



e-ifc

国际肥料通讯电子杂志 (*e-ifc*)
季刊, 国际钾肥研究所 (IPI) 主办

总第32期 | 2012年11月号
IPI成立60周年纪念特刊

INTERNATIONAL
POTASH INSTITUTE



60 ANNIVERSARY 1952-2012

Optimizing Crop Nutrition

编者按

亲爱的读者,

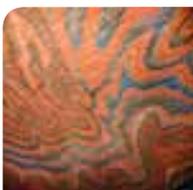
国际钾肥研究所 (IPI) 走过了值得庆祝的60周年的历程 (1952-2012)。数十年来, 我们的农艺师和土壤科学家传播了“平衡施肥”的理念, 示范和宣传了钾肥在提高作物产量和农产品品质、增加抗逆性能和提高农民收入方面的巨大作用。在这期国际肥料通讯电子杂志 (*e-ifc*) 中, 为了纪念IPI的发展和变革的历程, 我们邀请IPI成员企业和广大读者分享他们关于IPI的宗旨和目标的一些观点。

这期IPI成立60周年纪念专刊包含来自全球粮食安全角度来讲非常重要的3个地区的专题报告, 以及一篇与钾素运移有关的分子生物学进展的文章。中国的钾肥使用毫无疑问地为提高该国的农业生产水平和食物安全水平做出了巨大贡献。与中国土壤有关的使用钾肥的科学研究普遍建立起来了。在地球的另一面, 巴西的Cerrado地区已经改变了全球的农业生产形势, 使巴西成为重要的农产品出口国。巴西的科学技术使Cerrado的大部分地区从萨瓦纳荒原变成了农产品生产基地。最后但不是最不重要的部分是, 提高跨越广大非洲大陆的农产品生产能力, 在未来几年中将引起广大的农艺师和政府官员们极大关注。非洲在具有提高现有产能巨大潜力的同时, 与其他大洲相比, 非洲在土壤与作物的科学知识方面还有巨大的差距。所有的这些议题在这期杂志中都有所涉及。

在2012年末, 我们将结束IPI成立60周年庆典。当我们回首过去时, 心中充满骄傲, 尽管如此, 我们高度关注未来的挑战, 我们将坚定地继续开展实用技术研究, 针对农民需求开展示范, 推广和分享我们获得的知识, 以期更进一步地助推全球农业生产深入发展。

我们深信, 您将在这期杂志中发现一些非常有价值的观点!

Hillel Magen
国际钾肥研究所所长



国际钾肥研究所 (IPI) 的过去与现在-钾素平衡施肥科学研究与推广的辉煌60年 **3**
Magen, H.



IPI成员企业领导访谈录 **12**

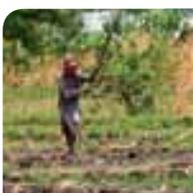
研究报告



中国钾肥使用历史回顾与展望 **17**
谢健昌 周建民



巴西热带草原农业发展的传奇故事 **26**
Scheid Lopes, A., L.R. Guimarães
Guilherme, and S.J. Ramos



非洲的钾肥施用: 背景、评价和前景展望 **35**
Wendt, J.



K⁺转运通过植物细胞膜的分子生物学研究: **43**
我们从模式植物拟南芥和水稻中学到了什么?
Sassi, A., I. Khan, A.A. Véry, and H. Sentenac



俄罗斯钾矿深层含钾矿物

IPI成立60周年纪念专文

国际钾肥研究所 (IPI) 的过去与现在-钾素平衡施肥科学研究与推广的辉煌60年

Magen, H.⁽¹⁾

历史

国际钾肥研究所 (IPI) 正在举办成立60周年庆祝活动 (1952-2012)。数十年来, 我们的农艺师和土壤科学家传播了“平衡施肥”的理念, 示范和宣传了钾肥在提高作物产量和农产品品质、增加抗逆性能和为农民带来价值方面的巨大作用。

IPI是在德国Staßfurt发现含钾盐矿后差不多100年以后由德国和法国的钾盐生产企业发起成立的。IPI成立的目的在于“促进土壤改良和肥料特别是钾肥使用有关的基础研究和实用技术的推广应用”。成立时其总部设在瑞士的首都波尼尔 (Bern)。机构成立几个月后, 来自16个欧洲国家的科学家成立了IPI科学顾问委员

会, 为IPI的发展提供必要的科学指导。

由于总部设在瑞士, 直到上世纪90年代, Paul Chaudet和Nello Celio两位政治家 (均出任过瑞士联邦主席) 一直领导IPI。1970-1991年IPI所长 Alexander von Peter说, “IPI那个时代的重要价值在于建立会员企业农艺师之间的开放和富有成果的交流机制, 这样就促进了IPI在非洲、亚洲、拉丁美洲和其他地区的活动。”

IPI运作5年后的1957年, 以色列的钾肥生产企业Dead Sea Works加入了这个由德国和法国企业成立的机构。不久, 西班牙、英国、前东德、前苏联

和约旦的钾肥生产企业也加入了IPI。随着这些企业的加入, IPI成为了欧洲和中东地区钾素研究应用的中心。

IPI的领导团队

IPI的60周年庆祝活动, 使我们有幸聆听该机构过去的领导人和成员企业介绍IPI过去的活动。在2012年上半年的几个月里, 我在德国和以色列的出差期间, 有幸和他们中的部分人见过面。

来自白俄罗斯的Prof. Iossif Bogdevitch教授自从1974年和Dr. Alexander von Peter博士见面后就介入了IPI的活动。在1990年, 在他的指导下, 在前苏联组织了第一次“钾肥推

⁽¹⁾ 国际钾肥研究所所长, 瑞士

从1970到现在IPI历任总裁 (1966-1970年出任IPI总裁的R.Gallay没有在列)



Paul Chaudet
1970-1977



Nello Celio
1977-1991



Erich Wyss
1991-2009



Prof. Dr. Christian Brückner
2009-today

荐施肥的发展”的学术研讨会。会议是在距离IPI的成员企业JSC Belaruskali的钾矿最近的城市Soligorsk召开的。在1990年, Prof. Bogdevitch教授加入IPI的科学顾问委员会。在那里,他和其他优秀的科学家一起,为IPI的活动提供了有价值和有影响力的指导。1998年,他成为了IPI在白俄罗斯、波罗的海国家和乌克兰的项目协调员。他说,“这份工作是我职业生涯中最满意的”。

Abraham Cohen 和Meir Bazelet 曾经任IPI的项目协调员,作为项目协调员和IPI技术秘书成员,为IPI工作超过30年。A. Cohen 1971年加入IPI。几年后开始直到他回到在Bern

的IPI总部工作前,他被推荐任命为IPI在南非和拉丁美洲的项目协调员。M.Bazelet 1966年作为土耳其的项目协调员加入IPI。后来他先后任IPI在中国、南非、阿根廷和其他地区项目协调员。这两位项目协调员都认为和发展中国家的科学家一起致力于钾素营养研究与推广使他们有非常高的成就感,这么多年过去了,他们和有些曾经一起工作过的科学家还保持着各种联系。

Dr. Alexander von Peter博士是IPI的1970至1992年的所长。我是在他的家乡Heidelberg见到他的,我们对他关于IPI丰富历史的了解非常感兴趣。作为一个训练有素的经济学家,

Dr. A. von Peter博士对钾肥使用的经济性一直非常关注。他召集IPI成员企业的众多的农艺师召开技术研讨会,就像一场富有成效的头脑风暴。在他任IPI所长期间, IPI改变了活动的关注重点,从只组织研讨会一类的活动转向与该地区的实质性的合作,从而在操作层面可以施加一定的影响。1992年,在瑞士的伯尼尔 (Bern)生活了20多年后, Dr. A. von Peter博士退休并回到了他的家乡德国的海德堡 (Heidelberg)。

Adolf Krauss 1994年至2004年任IPI所长。在2002年IPI举行50周年大庆时,他写道,“从很早的时候起, IPI就开始走出欧洲,在全世界开展活



Marshal Tito (third from left) visits and examines potash bags at an agri exhibition in Novi Sad, 1974 (photo courtesy of A. von Peter).



Dr. Alexander von Peter.



Prof. Dr. Iossif Bogdevitch.



Abraham Cohen (left) and Meir Bazelet (right).



Dr. Adolf Krauss (center); Martha Vacano, IPI's Office Manager (left), and Hillel Magen, IPI Director (right).

动。有些活动是IPI独立进行的,有些是和现在的国际磷肥钾肥研究所,即总部设在美国的PPI/PPIC共同开展的。最有影响的就是1957年至1962年在印度开展的POTASCHHEME计划,有很多印度侨民和当地雇员参与该计划。后来,在阿根廷、巴西、秘鲁、乌拉圭、东非、南非、前罗得西亚、香港、伊朗、日本、韩国、新加坡、台湾和地中海地区的法国的蒙彼利埃(Montpellier),开展了一系列的活动。”在他的任期内,IPI高度聚焦“平衡施肥”理念。图1的数据显示,与磷肥和钾肥相比,全球氮肥施用量增加非常高,导致很多地区的营养严重不平衡、产量和品质下降、土壤肥力降低和环境退化。

Mr. Erich Wyss先生从1991年至2009年任IPI总裁差不多20年。作为前苏联解体后的20世纪80年代末的世纪大调整的结果,IPI在Mr. Erich Wyss先生任总裁的20年是形成新

的联盟的时期。在那个变化的时代,Mr. Erich Wyss先生显示了他的卓越的领导价值,IPI在全世界的科学研究和推广活动不断保持并持续增加。他参加了在全世界举办的众多的学术研讨会,还在瑞士巴塞尔(Basel)举办了IPI成立50周年庆典活动,同时还举办了以“培育土壤,养育人民-钾素在可持续农业中的作用”为主题的学术研讨会,IPI的很多研究合作伙伴都参加了这个研讨会。另外,在他的任期内还制定了IPI的第一个五年计划(2009-2013)。

Prof. Dr. Christian Brückner教授/博士在2009年就任IPI总裁。在成员企业的大力支持下,Prof. Dr. Christian Brückner提出了面临新的机遇和挑战情况下的IPI的关键性导向。在IPI的6个区域项目协调员的带领下(见所附照片),现在IPI的科学研究和技术推广活动扩展到全球9个地区,设在苏黎世附近的Horgen

的IPI总部对这些活动进行总体协调。IPI的这些项目协调员都是来自其成员公司的农艺师,他们具有丰富的实际经验。经IPI成员企业的会员大会提名成为IPI的项目协调员,作为IPI的五年计划战略的一部分,这些项目协调员在全球不同地区从事长期的项目活动。

刊物出版和技术推广

在1960年代和1970年代,IPI针对钾素在农业中的作用投巨资出版相关科学文献。1954年出版第一份论文集以来,一直到现在,IPI每年都出版论文集。所有这些论文集现在都被扫描成电子文档,可以在IPI的网站阅读下载。

从1956年至1995年近40年里,IPI出版了1000多个特定主题的科学论文-**钾素综述**(Potash Review),其中很多论文都涉及到钾素在国际农业上的应用。这些珍贵的文献遗产,现在也发布在IPI的网站上了,可以通过题目、作者、出版年和论文主题等关键词进行检索。现在已经退休的IPI的科学顾问委员会成员,Prof. (Emeritus) Uzi Kafkafi说,“(扫描和在网站发布这些文献)使基于近一个世纪的科学研究的成果,过去40年发表在**钾素综述**上的实用技术的论文重新焕发出新的生命。农艺师和农民可以通过搜索适当的文献获得他们需要的实用技术。有了电子化这种新的形态,**钾素综述**代替了现在不太容易获得的那些老的植物营养书籍。在现在这个摩登时代,绝大多数的研究机构都将研究重点集中在基因研究上,农业实用技术被忽视,现在的学生也没法接触到过去发表的优秀文献。IPI应该受到大家的尊敬,因为它使这些与肥料和植物营养有关的实用技术的文献得到复活,否则,这些文献可能就永远丢失了。”



IPI Coordinators 2012.

Editorial	
Dear readers,	2
Economics of fertilizer use has always been of high concern. The issue that the present, when farming conditions and produce markets become difficult, some advice farmers that the best way to weather the storm is to cut costs: savings can be made on the matter of fertilizers. They say that yield increases over the years have not matched the increase in fertilizer use; that yield targets have been set too high, that when product prices fall, lower yields are acceptable especially as higher yields will lower prices, that it is not necessary to hold on to soil fertility and that advice to do so leads to over-use of fertilizers... as far as maize growing in South Africa is concerned, these ideas are false! Although this sentiment is familiar to us today, this sentiment from South Africa is taken from IPI's Potash Review report dating back to 1968 and much is still relevant today.	
"There is no doubt of the great importance of the price in shaping the use of fertilizers. However, of even greater importance is the dissemination of technical knowledge. The better the knowledge, the higher the level to which they lift the farming yield curve". This is the message put in a paper from IPI's Potash Review published in 1949 - now over 60 years ago.	
Clearly the question of the benefit-to-cost ratio of fertilizers has always been an issue, and more so during times of high fertilizer price and economic constraint. Elements of the benefit-to-cost calculation may always exist (and even just because climate is so unpredictable), so knowing more about efficient fertilizer use is crucial.	
As always, reducing fertilizer rates will impact on yield. But these days, farmers can employ better tools to make fertilizer use more efficient, including using more efficient delivery systems, measuring nutrients in soil and plant, and using remote sensing images - and discuss support systems. Using these will increase the benefit-to-cost ratio of fertilizer application. And so we reach the same conclusion as in 1949 stated above, the more knowledge, the higher the farming yield curve can be lifted.	
I wish you all an enjoyable read.	
Hilal Mergen Director	
Research Findings	2
Nutrient Balance in Long-Term Field Experiments in the Czech Republic Cizikova, F. and H. Stepanek	3
Response of Cissampelos Cinnam to Foliar Potassium Fertilizers: Effects on Fresh Production and Quality Munira, A. R., Karamah, M. S. El-Ghaili, and H. Shoukri	8
Effect of Potassium Application on Yield and Quality Characteristics of Pigeonpea (Cajanus cajan) and Mungbean (Vigna radiata) Crops in Central Plain Zone of Uttar Pradesh Tripathi, S. D., S. R. Pandey, and M. K. Dubey	16
Events	21
Publications	22
K in the Literature	23
Clipboard	28

Potash Review

Monthly communications by the International Potash Institute, Berne (Switzerland)

Subject 2

Farm Management, Advice and Information **December 1956**
4th suite

The dependence of the use of fertilizers on the costs of the means of production and on the prices of the agricultural products

A theoretical investigation

By H. Ruthenberg
Agrarwirtschaft 5, No. 8, 225 (1956)

2006开始, IPI启动了新的电子刊物 (*e-ifc*), 每年4期, 发送给2000个email订户。每期都有3-4篇研究论文和近期的重大活动, 最新出版物的信息和最新出版的论文, 这些论文和活动都与钾素施肥营养有关。该电子杂志由Dr. Ernest A. Kirkby博士主编, 它提供了来自IPI在拉丁美洲、欧洲、非洲和亚洲超过20个国家的研究项目的最新研究结果。现在已经发表了超过80篇研究论文, 而且每年还在增加。

通过邀请著名的科学家收集植物营养管理特定作物有关的数据, IPI提供不同作物的相关数据信息。1974年出版的第一期“作物专报 (Crop Bulletin)”是德国Büntehof农业研究中心实验站Dr. G.Kemmler博士关于小麦植物营养的小册子。现在, 已经出版了超过30种作物的小册子, 涵盖大田作物、水果和蔬菜、纤维类作物和其他作物, 最新的一本是即将出版的关于甘蔗的小册子。

另外一种出版物就是围绕一些引人关注的像灌溉施肥或作物的钾素需求等主题, 邀请杰出的科学家就这些主题进行编写, 每两年出版一次称为“研究主题 (Research Topics)”的小册子。

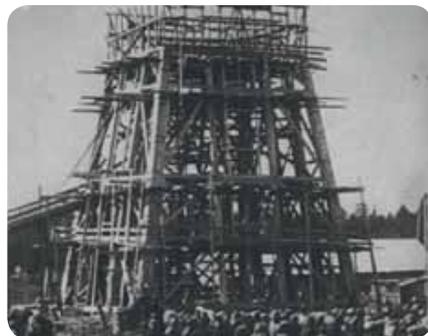


Early days for potash production at Dead Sea Works, Israel.

<http://www.iclfertilizers.com/Fertilizers/Pages/OurHistory.aspx>



Early days in Soligorsk, Belarus.
<http://www.kali.by/english/history.html>



1930: "Soyuzkali" decided to construct the Second Potash Mining Complex in Berezniki, later to become Uralkali's Berezniki 1.
<http://www.uralkali.com/about/history/>



Photograph showing the removal of ore using a horse to pull a train of wagons loaded with salt and potash. Alsace, France.
http://www.geowiki.fr/index.php?title=Les_Mines_de_Potasse_d'Alsace_au_fil_du_temps

IPI不仅介入科学家的科学发现的研究工作,更关注这些科研成果的推广应用。信息技术的最新发展为农业技术的推广应用提供了无限可能的富有创新意义的传播手段。IPI正在开发几种基于Apple和Android系统的应用,使广大用户能够浏览钾素对不同作物的影响的照片和植物缺素的典型特征(K gallery, K素图片馆),能够检索和浏览IPI的电子新闻杂志(*e-ifc*),能够计算不同作物带走的营养元素的量。高品质的解决方案、搜索和共享工具使得这些应用不论是Apple还是Android系统的智能手机和其他终端都能为小型农户、推广专家和研究人员提供有用的信息。



Screen shot from IPI's K gallery App. [View in App Store.](#)

项目和活动

我们在全球正在开展的活动包括田间试验和示范项目、以及讲座、论坛和农民田间日活动,每年都有50多项。我们在一些国家定期组织的国际学术研讨会,目的在于向各界展示钾素在许多作物的最优植物营养中的作用。IPI在面向农户、农资供应商和农业技术服务咨询的服务方面花费了巨大投入,IPI非常看重田间地头的针对农户的技术推广与服务、基础研究和应用研究。我们也和从事技术推广的机构、大学,以及其他所有愿意参与农民日、现场会、开放性讲座、培训课程和其他学习相关的活动的机构紧密合作。

过去50年(1961-2010)全球钾素施用量

关于钾肥施用量的记录可以追溯到1880年(表1),我们了解到,1880-1910年间,从大西洋、欧洲到美国的东海岸,都有使用钾肥的记录,而且增长非常快。1953年,超过60%的全球的钾肥销售起源于德国,以及后来的法国、俄罗斯、西班牙、波兰、美国和以色列(图2)。

钾肥市场以及其他农资投入品的销售量在第二次世界大战后有了回升。1954年,全球钾肥销量超过500mt

K_2O 。从1954年到1961年(FAOSTAT数据库没有包括这段时期的数据)保持了较高的增长率,到1961年,总的销售量超过了900 mt K_2O (FAOSTAT)。

FAOSTAT数据库也包括了1961年至今的作物和养分的数据,辅助国际肥料协会(IFA)提供的数据,可以做出下面的一些推断:

- 在过去的50年中,全球作物产量增长巨大(表2),谷物产量增长177%,其他的有些作物甚至增产超过300%(比如油料作物、蔬菜和瓜类)。
- 肥料施用量稳定增长(图1),N素增长超过P素和K素的增长(图1和表2),其中从1961年到2010年钾素增长203%,增长最少。
- 前苏联的解体导致全球所有的肥料用量都极大地下降(1988-1992;图1)。1992年以来,还没有这样重大的事件发生。
- 钾肥施用量快速增加导致 K_2O/N 比直线下降(图1)。1940-1950年代,氮素和钾素施用量差不多,但在2010年的

Table 1. Global potash deliveries in the early years 1880-1938.

Year	Potash deliveries -----mt K_2O -----
1880	69,000
1890	122,000
1900	304,000
1910	858,000
1920	914,000
1930	2,000,000
1938	2,460,000

Source: Cowie, 1951 and Turrentine, 1943.

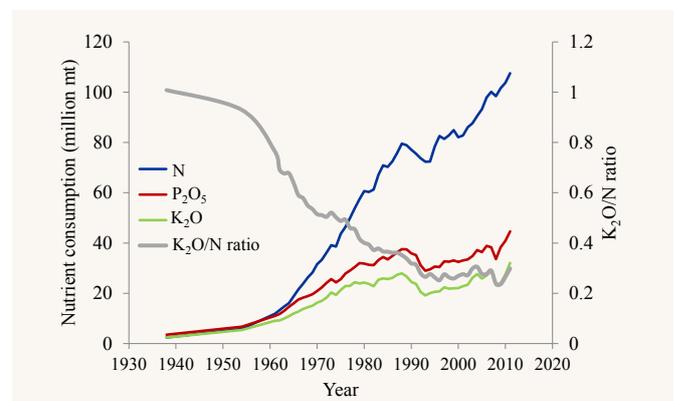


Fig. 1. N, P_2O_5 and K_2O consumption 1938-2010; K_2O/N ratio. Source: Cowie, 1951; FAOSTAT; and IFA for data from 1960.

时候,氮肥的施用量是钾肥的3倍。有前苏联垮台导致的 K_2O/N 比的直线下降的原因,但从20世纪90年代以来, K_2O/N 比保持稳定状态(约0.28),甚至稍有改善。这种情况的出现是因为种植制度改变了,或者改变了众多作物的生长速率:与1960年代相比,现在种植了更多的油料作物、甘蔗、蔬菜和水果作物。这些作物比谷类作物需要更多的K素。

对钾肥施用量的研究可以看出:

- 从1961年到1989年和从1993年到现在,全球钾肥施用量稳定增加(图3),达到32mt K_2O 以上。
- 只有在前苏联解体期间的1989年到1993年这样一个时期,出现全球钾肥施用量超过1年连续下降的情况(除了1980年和1981年的单个的例外)。
- 在过去50年中,只有12年出现了负增长,所有的负增长都是在单个年份出现(除了1980-1981年和1989-1993年)。
- 1961年至2010年间钾肥的施用量年均增长3%,但是可分为3个阶段,我们可以看到,1961年至1988年年均增长4.4%,1989年至1992年年均增长-7.2%,1993年至今年均增长3.22%。
- 这一结果反映了全球农业对钾肥的需求是持续反弹的。

结论和未来发展

1952年IPI的创立者们确立的宗旨今天依然富有生命力。我们在全球许多地区和在很多重大的危机时刻,一直坚持合作的理念,许多农民和那些帮助他们的人都非常看重这种不间断的科学知识的传授和促进共同发展的伙伴关系。Römheld and Kirkby (2010)阐述了钾素研究的需求和未来发展趋势,高度重视先进的高效的技术传播。信息通讯技术(ICT)的快速发展,使农民有可能利用智能手机和网络终端就可以快速和高效传播实用技术。我们国际钾肥研究所相信先进的技术推广是提高农产品生产能力的最重要的手段。

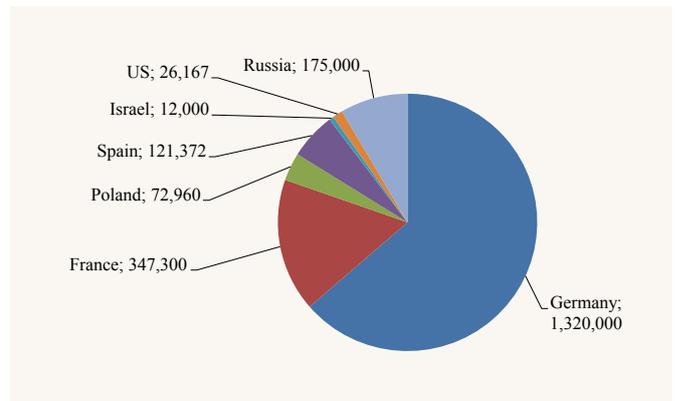


Fig. 2. Global potash sales (mt K_2O) in 1935. Source: Turrentine, 1943.

Table 2. Crop production and nutrient consumption (metric tonnes) during the last 50 years.

	1961	2010	Increase
	-----mt-----		%
<i>Crop production</i>			
Oil crops	25,752,797	168,444,789	554
Vegetables and melons	222,591,949	965,650,533	333
Sugarcane	447,977,518	1,685,444,531	276
Fruit (excl. melons)	175,029,853	609,213,509	248
Cereals	876,874,902	2,432,236,739	177
Pulses	40,783,485	67,652,942	66
Roots and tubers	455,331,211	727,303,077	59
<i>Nutrient consumption</i>			
Nitrogen (N)	11,851,000	103,700,000	775
Phosphorous (P_2O_5)	11,037,000	40,900,000	270
Potassium (K_2O)	9,068,000	27,500,000	203

Source: FAOSTAT.

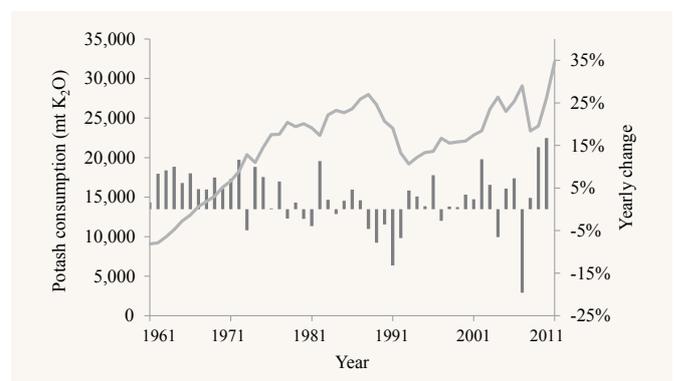


Fig. 3. Potash consumption (line, mt K_2O) and yearly change (bars, %) from 1961 to 2011. Source: FAOSTAT and IFA.

IPI董事会成员



From left to right: P. Losson, Vice President, Tessenderlo Kerley International, Belgium; I. Goldstein, Senior Vice President Marketing, ICL Fertilizers, Israel; C. Brückner, IPI President, Switzerland; O. Petrov, Director Sales and Marketing, JSC Uralkali, Russia; V. Ivanov, Director General, JSC Belarusian Potash Company, Belarus.

Römheld and Kirkby (2010)总结和强调了将来钾素研究的需求:

- 钾素与农产品营养品质之间的关系。
- 钾素在减轻植物生理和非生理灾害方面的作用 (也与全球气候变化有关)。
- 钾素吸收和人类与动物健康之间的关系。

钾素研究的其他未来的需求:

- 开发在线工具, 识别田间实时钾素需求。
- 开发有助于更好的基于土壤、植物营养和营养因素的钾素推荐施肥的管理模型。

提高钾素施肥的作物利用效率(Rengel and Damon, 2008; White, 2013, 待刊)。

以满足不断增长的全球人口食物需要, 提高作物产量为目标的高度集约施肥的历史不长。在过去的50年间, 全球食物产量有很大的增长。但是, N、P、K的施用量严重偏向N肥的使用, 导致很多地区土壤钾素亏缺和作物产量下降。所以, 为了弥补很多地区粮食产量的差距, 提高生产能力, 对增施钾肥的需求越来越强烈 (Mueller et al., 2012)。

满足未来粮食需求是一个巨大的挑战。到2050年, 食品需求将翻倍, 但要满足这一需求, 其方式和过去有了很大的不同, 因为油料作物、糖料作物、水果和蔬菜、块茎和根茎类作物等对钾素的需求比谷类作物要高些。考虑到集约化程度要提高, 环境要求更高, 土壤肥力管理和可持续生产的需要, “平衡施肥”这一短语将再度流行, 必将成为农民未来需要的应用起来最简单但最正确和适当的技术之一。

参考文献

- Bazelet, M. 2012. Personal communication.
- Cohen, A. 2012. Personal communication.
- Cowie, G.A. 1951. Potash, its Production and Place in Crop Nutrition. Edward Arnold & Co, London.
- Krauss, A. 2012. Personal communication.
- Mueller, N.D., J.S. Gerber, M. Johnston, D.K. Ray, N. Ramankutty, and J.A. Foley. 2012. Closing Yield Gaps through Nutrient and Water Management. *Nature* 490:254-257.
- Rengel, Z., and P.M. Damon. 2008. Crops and Genotypes Differ in Efficiency of Potassium Uptake and Use. *Physiologia Plantarum* 133:624-636.
- Römheld, V., and E.A. Kirkby. 2010. Research on Potassium in Agriculture: Needs and Prospects. *Plant and Soil* 335:155-180.
- Turrentine, J.W. 1943. Potash in North America. Reinhold Publishing Corp., New York.
- von Peter, A. 2012. Personal communication.
- White, P. 2012. Improving Potassium Acquisition and Utilization by Crop Plants. Accepted for publishing by *J. Plant Nutr. Soil Sci.*

要想获得更多的关于钾素营养和国际钾肥研究所的情况, 请访问[IPI网站](http://www.ipi.org)。

IPI成员企业领导访谈录

Vladislav Baumgertner, 俄罗斯Uralkali股份公司总裁、总经理



“国际钾肥研究所 (IPI) 具有的正统、权威性, 以及良好的机制, 使其有可能将其科学研究和专业服务传遍全世界。”

新兴国家肥料使用严重失衡, 最大的挑战是钾肥使用量过低。举例来说, 在中国、印度和巴西, 钾肥施用量在过去的10年中增长了一倍, 但仍低于科学家推荐量的一半。在俄罗斯, 钾肥施用量远远低于前苏联时期的施用量。这样的结果是, 这些地区的作物产量远远没有达到其产量潜力。

Uralkali是IPI的老会员。作为一个国际机构, IPI具有的正统、权威性, 以及良好的机制, 使其有可能将其科学研究和专业服务传遍全世界。IPI引领全球创新, 在不同地区实施研究项目, 积累研究成果, 为农业领域提供推荐施肥服务。

在Uralkali公司, 我们的目标是为客户提供可用的钾素知识。在这方面, 我们为类似IPI的机构提供教育培训支持, 贡献科学技术成果。

通过与IPI的合作, 我们可以高效地共同应对全球食物安全的挑战。

现在的世界变化很快, 公司和相关组织也应该适应变化的现实。作为一个国际机构, IPI解决了全社会的最重要的一个问题。IPI这么长的历史表明, 它是国际事务的高效的协调者。我充分相信, IPI将不断深入发展, 继续在全球食物安全方面做出巨大贡献。

IPI成员企业领导访谈录

Isaac Goldstein, 以色列ICL肥料公司市场部高级副总裁



“IPI的研究结果是可信的, 适合当地的条件, 在当地得到了验证, 也有国际支持。”

在IPI的60年的发展历程中, IPI已经非常成功地实现了它的目标, 充分显示了钾素在植物营养中的作用, 增进了人们对钾素在土壤和植物中的机制和行为的了解, 这些都在改进肥料推荐施用发挥了巨大作用。

然而, 现在又到了一个需要在科学研究和推广应用方面建立强大而稳定的桥梁的严峻时刻。钾素在提高应对不断增长的人口带来的食物安全的能力方面, 起到了基础的作用。发展中国家施钾量小于作物从土壤中带走的量, 长此以往, 土壤就处于缺钾状态。平衡施用钾素非常急迫。

ICL肥料公司认为, 构建研究-推广私营公司的合作伙伴关系, 对推广应用那些能够提高农民养分管理水平的实用技术非常重要。为农民提供更优的农艺操作指导和培训农民, 是我们公司追求的目标。现在, 通过和IPI的项目活动, 很好地实现了这一目标。通过IPI项目协调员的网络体系, IPI和农民、经销商、推广人员、农民合作组织和基金会等建立了广泛的联系。正是因为有了这样的联系, 使得IPI的研究结果是可信的, 适合当地的条件, 在当地得到了验证, 也有国际支持。”

ICL对IPI的活动提供了大量的支持, 不仅有财政上的资助, 更多的是通过农艺师作为IPI在许多国家的项目协调员, 参与实际的活动。ICL的农艺师Meir Bazelet和

Abraham Cohen在20世纪70年代IPI的活动中非常活跃。后来由Hillel Magen和Patricia Imas接替了他们的工作, 先后在阿根廷、印度和中国出任IPI的项目协调员。今天, 我们的农艺师Eldad Sokolowski是中国和印度的项目协调员, 在撒哈拉沙漠以南的非洲地区的活动中, Eldad Sokolowski也扮演了重要角色。

我们看到, 撒哈拉沙漠以南的非洲地区是IPI的下一个挑战。由于施肥量低而且施肥不平衡, 该地区产量低下而停滞, 农民收入增长和农业发展乏力。这种状况阻止了农村发展, 很多农村劳动力为了生计和获得较高收入, 移民进入城市。这种恶性循环, 可以通过正确使用肥料、合适的作物耕作管理、使用改良品种和杂交品种而改变。

在过去的60年里, IPI使农民、农艺咨询服务人员和决策者对合理使用肥料, 特别是钾肥的需求, 有了清醒的认识, 也在三者之间建立了信任和自信。未来的日子里, IPI将继续它的崇高使命, 在保护资源和环境的同时, 提高农民的收入, 维持土壤肥力。

IPI成员企业领导访谈录

Valery Ivanov,白俄罗斯钾肥公司联合股份公司总经理



“IPI通过建立项目协调员制度,在有兴趣的成员国家建立了良好的信用。”

在很多发展中国家,农民对施用钾肥提高作物产量,改善作物品质,从而给农民带来利润和经济效益,还没有清醒的认识。在这些国家,农技推广常常是最大的限制因素。在一些地区,缺乏基于科学研究的对当地主要作物的施肥推荐建议。

对世界上的很多国家来说,食物安全是可以实现的。实现途径是推广基于科学的耕作栽培技术,还有像IPI力推的平衡施肥也是其中的重要内容。围绕实现可持续农业需求的平衡营养,所有的钾肥生产企业都提供技术培训,常常是和该国的农业部合作,联合实施合作项目。通过这些活动,获得了宝贵的科学数据和基于IPI研究所制定的施肥推荐指导。IPI现在活跃在50多个国家,提供信息服务的语言就达到22个。

IPI组织这样的活动历史较长,和国际或者区域的相关机构或组织有广泛的联系,在科学界和学术界享有较高声誉。通过建立项目协调员制度,IPI在有兴趣的成员国家建立了很好的信用。作为IPI的一员,我们很高兴在其中扮演了重要角色。我们积极参与制定IPI的发展战略,确定了发展目标和制定了发展计划,提高了组织的整体效率。除了应用公司员工作为IPI在东欧和东南亚的项目协调员的成果外,我们还引用IPI在其他方面的成果,更好地完成大量的农业项目。

IPI成员企业领导访谈录

Valery Kirienko, 白俄罗斯Belaruskali联合股份公司总经理



“和IPI合作, 我们的共同目标就是为更好地养育全世界提供解决方案。”

今年是IPI成立60周年庆典之年。IPI成立于1952年, 最早由德国和法国钾肥生产企业发起, 满足了提供基于田间实验的科学信息的长期需要。从那以后, 围绕植物营养问题, 世界农业领域确定了大量的成果, IPI在其中为了农业化学的发展做出了突出贡献。

举例来说, 白俄罗斯共和国的Professor Iosif Mikhailovich Bogdevitch教授, 是农业化学领域和农业放射生态学领域杰出的科学家。就钾肥的作用和钾肥实用施肥技术等, 他在白俄罗斯研究人员与IPI之间建立了广泛联系。Bogdevitch教授在草皮灰化土高效施肥和土壤肥力管理方面做了大量的科学研究。同时, 他还开发了评价土壤肥力和为农民提供施肥指导的计算机集成模型。Bogdevitch教授的科研成果在包括IPI在内的国际科学和研究机构的培训项目中得到了广泛的应用。

俄罗斯伟大的植物学家和植物生理学家K. A. Timiryazev曾经说过, “农民真正的支持者不是土地而是植物, 农艺的全部精髓就是将植物和农民自身从土地上解放出来”。人类不能依赖地球提供另外的新的资源。主要方向, 或者说是发展现代农业的唯一方向, 是全面的集约化和工业化。和IPI合作, 我们的共同目标就是为更好地养育全世界提供解决方案。我对IPI 60周年庆典表示热烈的祝贺, 祝愿在实现这一神圣目标上, IPI将来取得更大的成功。

IPI成员企业领导访谈录

Patrick Losson, 比利时Tessengerlo Kerley 国际公司副总裁



“IPI在研究和发展方面扮演了触媒的作用,推动其成员公司在本领域做到最好。”

正确使用钾肥是可持续集约化经营的典型例子,可以提高作物产量,增强作物抵抗恶劣环境的能力,减少氮肥的施用从而减轻对环境的影响。

发展中国家增加钾肥用量非常重要,当然也要考虑几个关键因素。农民必须非常清楚地知道平衡施用肥料有多重要,也是做好施肥指导服务的需要,这样,农民就可以获得价格合理的、高品质的、满足作物需要的肥料。地方政府和相关部门需要了解如何将最优的肥料使用植入农民的商业计划之中,如何提供小额贷款支持农民购买肥料。

应对这些挑战的时候,单个公司都没法做到。这正是IPI能够发挥重要作用的地方,联合不同生产商提供农化服务,提高农业的整体效益。举例来说,IPI在中国做了大量的工作,使社会各界都认识到了施用含钾的平衡养分的肥料的重要性,为确保中国的粮食安全提供了支撑。

通过与企业、政府部门和非政府机构形成合力,IPI在研究和发展方面扮演了触媒的作用,推动其成员公司在本领域做到最好。这是一个最好的例证,说明企业形成合力,总的效果要远远超过单个企业自身能达到的水平。



研究报告

中国钾肥使用历史回顾与展望

谢健昌^① 周建民^①

引言

中国的国情是人多地少。目前，中国人口已超过13.4亿，人均耕地0.10/hm²，只有世界平均的1/3。所以中国的粮食安全压力非常大。然而中国已经付出了艰苦的努力，确保粮食自给率保持在95%的较高水平。2011年，中国粮食总产量达到5710亿kg，超过了全国人均400kg的要求。中国用占全世界9%的耕地，养活占世界20%人口。这是令世人瞩目的成就，这不仅保障了中国粮食安全，为中国可持续发展奠定了坚实的基础，同时也对世界粮食的稳定做出了贡献。肥料无疑在确保中国的粮食安全中发挥了重要的无可替代的作用。

中国农业发展与肥料使用

1949年以前，依靠施用有机肥来维持较低的农田养分循环，农作物产量很低。1949年以后，中国生产和使用了越来越多的化肥，保障粮食生产持续增长。现在，中国政府非常重视农业、农村和农民问题。

从1950年代早期，中国的肥料使用量就持续增加。从1950年的3.9万吨，一直增加到1970年的351万吨。同一时期，粮食产量也快速增加，由132万吨增加到240万吨。这种增加趋势一直延续，1980年粮食产量为320万吨，1990年为452万吨，1999年为508万

吨，2010年为546万吨。2011年粮食总产量达到571万吨，单产达到5166kg/hm²，比2010年提高3.9%。超过8年（2003-2011年）的优化平衡施肥技术的应用，使中国粮食综合生产能力踏上新的台阶。就像表1显示的那样，1949年到现在的粮食产量的增长与同时期肥料用量大幅增加高度相关。

虽然大量的肥料施用增加了粮食作物和经济作物的产量，但很多科学家还是质疑肥料用量是不是过量了。自20世纪80年代开始，种植结构逐年调整，近年来蔬菜和果树等的种植面积迅速增加。这些经济作物由于

经济价值高，其施肥量一般为粮食作物和其他主要作物的2-3倍以上。种植方式的变化已经成为带动化肥用量不断增长的主要驱动力。

2008年与1980年比较，粮食作为和其他大田作物种植面积减少1513×10⁴hm²，而瓜蔬和果树面积合计增加2367×10⁴hm²。同时，经济作物的总产大幅度提高，蔬菜增长6.2倍，瓜果增加5.2倍，油料增长2.8倍，糖料增长3.6倍。随着经济作物种植面积的不断扩大，产量的增长，估计在这期间新增的化肥中有50%以上是用在经济作物上（未发表资料）。据估计，2010年大田作物肥料的用量占

Table 1. Consumption of nutrients in China ('000 mt).

Year	Total*	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ratio N:P ₂ O ₅ :K ₂ O
-----'000 mt nutrient-----					
1949	13				
1950	39				
1952	78				
1962	630				
1970	3,512	2,497	991	24	1:0.40:0.010
1980	12,694	9,425	2,882	387	1:0.31:0.041
1990	25,903	17,480	6,452	1,971	1:0.37:0.113
1995	35,936	22,347	9,950	3,640	1:0.45:0.163
1999	41,245	24,811	11,004	5,430	1:0.44:0.219
2010	55,617	32,000	14,000	9,500	1:0.44:0.297

*1949-1962年化肥总量中主要是氮肥；
复合肥N、P₂O₅、K₂O数量按历年进口和国产复合肥中的实际养分量计入总量。
数据来源: Li et al. 2001; 中国国家统计局, 2011。

^①中国科学院南京土壤研究所

总用量的60%；果树、蔬菜等作物占40% (未发表资料)。

化肥的投入加强了农田生态系统的养分循环,对确保中国粮食作物持续增产发挥了重要作用。优良品种、灌溉和田间管理等其他的增产因素也发挥了应有作用,但大量的研究表明,施肥对作物增产的贡献率约为40%-50%。

从全球来看,自1993年以来,中国成为世界肥料消耗第一大国,近年来中国化肥养分消费量约占世界消费量的三分之一。回顾中国氮、磷、钾肥应用历史,也许可以说氮素施用始于1950年代,磷素施用始于1960年代,钾素施用始于1970年代。中国的化肥应用在起步阶段的施用量很低,1952年只有 7.8×10^4 t,1962年为 63×10^4 t,主要是氮肥(表1)。1960年代,中国对磷肥的肥效开展了广泛的研究,推动了磷肥的应用。

表1可见,在1970年代前,基本上没有矿质钾肥供应。从1972年开始进口了少量钾肥。1970年代中期以来,氮、磷肥用量大幅度增长,而钾肥用量仍然很少。自1980年代初开始,钾肥用量逐步增加。氮磷钾比例由1980年的1:0.31:0.041调整至1990年的1:0.37:0.113(含复合肥)。1999年的钾肥(K_2O)总消耗量已达到543万t,1999年的氮磷钾消耗比例为1:0.44:0.219。2010年钾肥用量猛增至950万t,氮磷钾比例为1:0.44:0.297。非常明显,自1980年至2010年的30年期间,随着粮食产量的增长,钾肥的年增长量平均达到11.7%。

中国的科研人员为钾肥的推广应用作出了历史性的贡献。早在1950年代初,中国科学院南京土壤研究所就开始了土壤钾素的研究。自此以后,由南而北逐步扩展到全国有关科研、教学和生产单位。不少单位先后成立了

钾肥组。自20世纪60年代以来,土壤钾素和钾肥研究一直是土壤植物营养与施肥领域内最有活力的分支之一。先后开展了以下的研究:土壤含钾矿物的特征与分布规律;土壤钾素的固定与释放;土壤钾含量、状态和有效性;土壤钾素肥力的评价方法;钾肥的有效条件;农田土壤钾素的循环、平衡与管理;钾素与作物品质和抗逆性的关系等等。有关单位还开展了大量推广示范工作。

钾方面的科研和推广工作之所以较为活跃,除了因适应农业生产发展的需求外,还与有关国际组织的密切协作分不开。南京土壤研究所与IPI的合作始于1970年代末,自1983到2012年合作召开了12次国际钾素讨论会,组织了有10个省市自治区参加的优化钾肥施用的试验。近年来,启动了与国际磷钾肥协会(PPI)和其他相关国际机构的合作。通过国际学术讨论会,出版各种刊物和大田的试验、示范等活动,促进了国际学术交流,培养了科研人才,为中国的土壤钾素研究和钾肥的推广施用发挥了极其重要的作用。

钾素对农业可持续发展的贡献

中国土壤钾素肥力概况

矿质土壤的最重要钾源是原生的铝硅酸盐矿物,包括钾长石、黑云母和白云母,以及次生的铝硅酸盐矿物,包括水化云母(伊利石)及其连续风化的产物(如蛭石)。中国南亚热带和热带地区具有高温多雨、干湿季节明显的特点。经过长期的风化,基性矿物强烈分解。整个土体中原生矿物含量极少,除高岭石外,还含有较多的三水铝矿和赤铁矿,因而是中国缺钾最突出的土带。中亚热带红壤的粘粒以高岭类矿物为主,但也有少量水云母和蛭石。而在中国北方地区,风化作用较弱,无论在什么母岩上形成的土壤,其粘粒部分都有大量

水云母和保持交换性钾的能力较强的蒙脱类矿物存在。如褐土区的土壤除有大量水云母外还有不少蛭石;黑钙土及栗钙土区的土壤除有大量水云母外,还伴有不少蒙脱类矿物;荒漠和半荒漠地区的土壤粘粒矿物以水云母为主。

中国土壤的全钾含量差别很大。土壤全钾含量最低的为广西的砖红壤,为3.6g/kg,最高的为吉林的风沙土,达26.1g/kg,两者相差7.3倍,多数土壤的全钾含量在15-20g/kg。一般来说,华南地区各类土壤除紫色土等外,全钾含量较低,而东北和西北地区的含量较高。

根据20世纪80年代全国第二次土壤普查结果,按7个地区的统计结果表明(表2),土壤速效钾含量(交换性钾加水溶性钾)大于150mg/kg的,以东北、西北地区所占百分比比较大,达37%以上,其次是华北,为30%,而以华中、华南地区较小,在14%以下。土壤速效钾含量<50mg/kg的,以东北、西北地区所占百分比小,低于3.5%,而以华南地区较大,高于50%。至于缓效钾,某一土类的缓效钾含量大体处于一定范围内。根据缓效钾含量,将中国主要土壤的供钾潜力分为从极高至极低7个等级(图1和表3)。对不同土壤的供钾潜力的了解,有助于从宏观上明确土壤钾素肥力状况,可为钾肥分配和施用提供依据。表4显示,土壤缓效钾含量在四川、贵州、山西和甘肃4省土壤差别很大。

土壤的钾素肥力是土壤母质、风化程度和施肥以及因作物移走、土壤侵蚀及淋溶而损失的钾量的综合反映。总体上说,中国土壤的钾素养分潜力有自南而北和自西向东增高的规律性,这与土壤中高岭石减少和水云母增多的分布规律是大体一致的。

钾肥肥效的演变1960-1990

Lin(1989)对钾肥肥效进行研究。中国肥效试验开展了三次,第一次是在1936~1940年,第二次是在1958~1962年,第三次是在1981~1983年。前两次多数试验未见增产作用。而第三次试验则表明,钾肥的效果在南方已趋于明显,而在北方大部分地区的粮食作物上仍未显效。就像以前讨论过的一样,这些科学发现很好地解释了目前中国南方土壤比北方土壤的含钾量低的现象。

砖红壤及赤红壤地区是中国最缺钾的土带,中国钾肥的大量试验和施用,首先是从这个地带开始的,粤西赤红壤丘陵地区栽培的大量橡胶树,1950年代末期一度出现相当普遍的黄叶现象,南京土壤研究所1960~1961年的研究结果表明,缺钾是橡胶树发生黄叶病的主要原因。1960年代中国基本上没有钾肥供应,所以在广东、湖南、江西和江苏用水泥窖灰进行了大量试验示范。广东土壤肥料研究所1973年的总结表明,在粤西的109块水稻田进行的窖灰钾肥试验,90%以上的田块增产稻谷10%~35%,其中以砂质田、黑泥田的效果最好。

1970年代末期,南方一些省份水稻已发生缺钾现象。比如广西柳州地区发现,由石灰岩等风化物发育的水稻土上,缺钾引起水稻胡麻叶斑病。从1970年代的大量试验证明,中国南方钾肥效果显著。如广西农科院土肥所1974年的6个玉米试验点上施钾增产21.0%,每公斤 K_2O 增产玉米7.9kg(钾肥农学效率,AEK)。与此类似,1981~1984年,农业部下达的由南方数省协作共同完成的“青海盐湖钾肥的合理使用和农业评价”课题中,每公顷施75kg K_2O ,施钾农学效率为



Color	K potential supply	Slowly available potassium (mg kg ⁻¹)	Predominant clay minerals in soil
Yellow	Very low	<66	Kaolinite
Light blue	Low	66-166	Kaolinite-hydrous micas
Pink	Medium-low	166-330	Vermiculite-kaolinite
Green	Medium	330-500	Hydrous micas - Vermiculite-kaolinite
Orange	Medium-high	500-750	Hydrous micas - Vermiculite (chlorite)
Brown	High	750-1,160	Hydrous micas - Montmorillonite
Dark brown	Very high	>1,160	Hydrous micas

Map 1. Predominant K bearing minerals and K potential supply in soils of China. Source: Xie and Li, 1990.

平均每公斤 K_2O 增产7kg稻谷。

钾肥效果不但在大量试验上表现出来,而且也从IPI和PPI(IPNI)支持的大面积示范中得到证实。这些示范包括南京土壤研究所与这些机构合作,1978~1979年在江西刘家站垦殖场进行的1400hm²亩钾肥试验;1979年在浙江金华县进行的早晚稻钾肥示范;1981年在广西柳江县进行的钾肥示范,1983~1984年在江西

泰和进行的7万hm²钾肥示范等。加拿大钾肥公司(Canpotex)于1986年在广西开展了以配施钾肥为主要内容的平衡施肥示范,都充分证实了钾肥的增产效应。

在南方缺钾研究日渐成熟的同时,北方土壤缺钾的研究逐渐增加。北方缺钾土壤的施钾增产效应经历了无效—微显效—显效三个阶段,每个阶段约持续了10年左后的时间。

1986年中国农业科学院土壤肥料研究所与IPNI合作,在山东、河南和河北的一些低钾土壤上开展施钾试验,获得了不同程度的增产效果。随着时间的推移,随着农作物产量和氮、磷肥用量的不断提高,在我国北方一些地区施用钾肥增产效果日趋明显,钾肥用量逐年增多。在东北和华北地区,安排了1350个田间试验和示范,结果表明,在施用适量氮磷肥的基础上增施钾肥,对主要作物均有显著的增产效应。即使在土壤含钾量丰富的地区,在一些需钾较高的作物上,如棉花、甜菜等作物施钾,效果显著。1990年代在西北地区4省(区)(陕西、青海、宁夏、新疆)107个试验,其中施钾增产5%以上的占78.5%。新品种施钾的需求也得到了试验验证。Bt棉花在中国的种植面积快速增长,施钾不足容易导致棉花的早衰和降低产量。对新疆的长绒棉来说,施钾是其高品质的重要保障。所以,即使在含钾量较高的土壤上种植棉花来说,也需要施钾。

Niu *et al.*(2011)的研究表明,华北平原(NCP)的河北的淋溶土和山东的雏育土上种植的主要作物玉米施钾效果显著。多点的试验显示,玉米施钾增产10%-21%,高产栽培(HP)和传统栽培(CP)相比,增产最为突出(表5)。玉米施钾的农学效率(AEK),每公斤 K_2O 增产玉米在2-12kg之间,较高的AEK给农民带来更多的收益(Value-cost-ratio; VCR,数据没有列出)。较高的AEK出现在只有钾素为高产栽培(HP)措施之一的田块,其他的高产措施包括提高密度和优化磷肥施用水平等。同时,施钾还提高氮素的偏生产力(PFPN)大约20%左右。几乎在所有的试验点,在HP措施的田块的钾素偏生产力(PFPK)都较高。最后,施钾量高的处理和高产栽培措施(HP)处理的钾肥利用率(REK)明显要高(约30%)。

Table 2. Distribution of soils according to their readily available K content in the ploughed layer in different regions of China.

Region	Soil group	K content ($mg\ kg^{-1}$)				
		>200	150-200	100-150	50-100	<50
-----%						
Northeast China	Dark burozem, black soils, chernozems	19.8	17.6	39	21.0	1.7
North China	Burozem, cinnamon soils, fluvo-aquic soils	14.2	16.4	32.3	32.2	4.4
Northwest China	Catanozems, brown pedocals, gray desert soils, brown desert soils	27.7	25.1	25.5	18.3	3.5
Southwest China	Purplish soils, yellow earths	14.6	10.3	27.9	41.3	5.8
East China	Paddy soils, yellow brown earths, cinnamon soils	6.2	13.8	27.1	40.1	12.8
Central China	Red earths, yellow earths, paddy soils	1.2	12.8	21.4	56.0	9.2
South China	Latosols, lateritic red earths	2.6	3.8	9.9	33.6	52.2

Source: Xie *et al.*, 2000.

Table 3. K-supplying potential (slowly available K) in major soils of China. See also Map 1.

K-supplying potential	Level of slowly available K ($mg\ kg^{-1}$)	Soil type
Very low	<66	Latosol, latosolic red soil, calcareous soil and related paddy soil (Guangxi and Guangdong)
Low	60-166	Red soil, yellow soil and related paddy soil (Hunan and Jiangxi)
Medium-low	166-330	Paddy soil around Taihu lake and Zhujiang river, sandy soil around Yangtze river
Medium	330-500	Paddy soil in Dongting lake and Ganjiang river, yellow-brown soil, boggy soil, sandy fluvo-aquic soil (Hubei, Guizhou and Sichuan)
Medium-high	500-750	Purple soil (Sichuan and Hubei), chestnut soil, meadow soil (Heilongjiang and Inner Mongolia)
High	750-1,160	Dark-brown soil, black soil, brown soil, clay fluvo-aquic soil, mountain soil (Heilongjiang, Jilin, Shanxi, Shandong, Hebei and Henan)
Very high	>1,160	Grey desert soil, brown desert soil (Xingjiang and Inner Mongolia)

Source: Xie *et al.*, 2000.

Table 4. Statistical data of slowly available K in four southwestern and northwestern provinces

Province	Number of samples	Slowly available K ($mg\ kg^{-1}$)						
		<66	66-166	166-330	330-500	500-750	750-1,160	>1,160
-----%								
Sichuan	940	0.85	11.91	26.28	26.28	25.85	6.70	1.60
Guizhou	758	5.41	36.62	38.65	14.12	4.75	0.79	0.66
Shanxi	497	-	-	1.41	1.61	13.88	52.31	30.78
Gansu	210	-	-	-	0.95	18.10	44.76	36.19

Source: Xie *et al.*, 2000.

这些数据显示, 在NCP区域, 也就是前些年施钾没有效应的区域, 施用钾肥可以提高氮肥利用效率、生产能力给农民带来更高的收益。

通过长期定位试验, 研究氮磷钾施用对作物持续生产和土壤肥力的影响也受到重视。在华中、华北和西部地区布置的三个长期试验结果见表6。这3个试验的土壤供钾能力是不同的, 以湖南长沙试验地土壤供钾能力最低, 因而钾肥持续显效27年。河南封丘的试验地供钾能力应属中上等, 试验12年后, 钾肥才开始显效。陕西试验地土壤供钾能力很高, 试验已进行20年, 施钾仍无效果。

还有试验表明, 在严重缺钾的土壤上进行的长期试验, 施钾的增产作用很大, 而且随着时间的推移, 钾肥的效应越来越显著。例如在广西柳江的石灰性水稻土上, 其土壤全K、速效K、缓效K含量分别为1.9g/kg、44mg/kg、114mg/kg, 表示土壤供钾潜力极低。15年长期定位试验表明, NPK处理较NP处理平均增产高达60%以上 (Du et al.,2001)。另一个例子是在江西省上高县连续4年 (2005-2008)

Table 5. Average effect of K application on maize in seven locations in the North China Plains (NCP) and efficiency indicators (adapted from Niu et al., 2011). CP: conventional practice; HP: high yielding practice. The locations were in Shandong (Shuitun, Laiyang and Dajin) and Hebei (Qingyuan (3 locations) and Zhengding). K1 and K2 levels were different between locations (120 and 240; 75 and 150; and 90 and 180 kg K₂O ha⁻¹, respectively).

K treatment	Yield				PFPN		PFPK		AEK		REK			
	CP	Increase	HP	Increase	CP	HP	CP	HP	CP	HP	CP	HP		
	<i>mt ha⁻¹</i>	%	<i>mt ha⁻¹</i>	%	-----kg kg ⁻¹ -----								-----%-----	
K0	6.46	-	6.58	-	37.7	28.4	-	-	-	-	-	-		
K1	7.10	9.9	7.62	15.7	41.4	32.9	81.1	87.2	7.1	11.8	0.18	0.30		
K2	7.42	14.9	7.96	21.0	43.7	34.4	42.9	46.1	6.2	8.4	0.21	0.25		

的双季稻试验, 也表明了施钾有效 (Tang et al.,2011)。2005年NPK处理 (N、P₂O₅、K₂O用量, 早稻为150、75、180kg/hm²; 晚稻为180、45、180kg/hm²) 与NP处理比较, 早稻增产12.1%, 晚稻增产32.3%, 到了2008年早稻增产达18.3%, 晚稻增产高达37.2% (Tang et al., 2011)。根据中国东南6省666次试验统计, 水稻平均增产658 kg/hm²,平均增产率为11.7%, 每公斤K₂O增产稻谷7.5kg (Xie,2000)。IPNI中国项目的最近结果也显示, 主要粮食作物的钾肥农学效率与1980年代相比大大地提高了 (表7)。随着杂交稻和超级稻的推广应用, 较高的稻谷产量需要更高的钾肥施用量和适当的氮肥和磷肥。所以, 随着耕作的发

展, 施钾效果越来越显著, 意味着缺钾的程度越来越严重。

Zhang et al.(2011)分析了小麦和玉米在15年 (1990-2005) 或者18年 (1990-2008) 期间中国5个农业生态类型区的施钾肥效情况。试验土壤的交换性钾含量74-288mg/kg,非交换性钾含量487-1764mg/kg。钾素平衡 (表观平衡, 钾素总吸收-钾素总投入) 为负平衡, 除了湖南祁阳点外, 钾素平衡在每公顷-22和-226kg K之间。祁阳点的钾素施用量和移出量相当, 但多施的有机肥 (OM) 使钾素表现为正平衡。在所有的区域内, NP处理都比对照表现出更严重的钾素负平衡。从钾素平衡的角度看, 施用有机肥的好处

Table 6. Long-term effect of K fertilizer input in three different soil types.

Location	Period of experiment	Soil type	Soil K content			Rotation	Fertilizer rate			K effect (Comparison between NP and NPK treatment)	
			Total	Readily available	Slowly available		N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
			<i>g kg⁻¹</i>	-----mg kg ⁻¹ -----			-----kg ha ⁻¹ -----				
Changsha city, Hunan	1981-2007	Red paddy soil	14.1	62.3	173.9	Double rice	Early rice	150	90	120	Effective immediately; the average annual yields of early rice and late rice increased by 15.2% and 17.2%, respectively, during each of the 27 years
							Late rice	180	90	120	
Fengqiu county Henan	1990-2009	Fluvo-aquic soil	18.6	82.9	797.5	Wheat-corn	Wheat	150	75	150	Effective after 12 years; the average annual yields of wheat and corn increased by 12% and 17%, respectively, from 2002 onwards
							Corn	150	60	150	
Yangling county Shanxi	1991-2010	Loess soil	21.6	200	1,500	Wheat-corn	Wheat	165	57.6	68.5	No effect in 20 years
							Corn	187.5	24.6	77.8	

Source: Data from ISSAS field experiments and other sources.

Table 7. Agronomic efficiency of K in main cereal crops in China.

Crop	Agronomic efficiency of K			
	1980-1983		2002-2007	
	Whole country	North	South	Whole country
	-----kg kg ⁻¹ -----			
Rice	4.9	7.5	7.8	7.7
Wheat	2.1	7.0	8.3	7.3
Corn	1.6	9.4	7.5	9.2

Source: IPNI unpublished data.

非常明显。这项研究表明，钾素平衡主要受土壤的交换性钾含量和非交换性钾的量影响，常规施钾并没有补充作物带走的钾素，所以，钾素平衡表现出负平衡不变。

养分循环和替代性钾素施用

随着人口的增加和粮食产量的提高，作物收获籽粒、果实和叶片时从农田土壤中带走的钾素的总量越来越多。为了保持土壤肥力和生产能力，这些被带走的钾素必须得到补充。总体上说，施钾对作物生长的好处得到了普遍的认可，正是因为这个原因，近年来钾素的施用量稳定增长。然而，21世纪头10年末期，钾肥价格的上涨，引起了人们对秸秆还田的极大兴趣。尽管秸秆还田增加了农事耕作的难度，但秸秆还田后钾素水平提高显著，也一定程度上满足了土壤钾素的需求。

很早以前，人们对作物秸秆中富含的钾素就有了明确的认识。在所有的植物营养元素中，钾素像氮素一样，非常容易得到循环，而且这两种元素都是有机肥料的重要组成部分。事实上，中国历史上长期施用有机肥对中国农业的发展起到了巨大的作用。但将秸秆还田需要采取更多的农艺操作，还会增加劳动力的投入，但钾肥价格的提升，为政府和农民高效利用秸秆还田这种优质的钾素资源提供了充分的动力。所以，近年来，政府采取了许多措施推广秸秆还田技术，由此既减少了秸秆焚烧带来的环境污染，也降低了施用钾肥的费用。

中国很多农业生态类型区都表现出钾素亏缺，每年的亏缺幅度在-10kg到-158kg K₂O/hm² (Jianmin *et al.*, 2004)。作者建议有2种重要的钾素资源可以利用，即作物秸秆和灌溉水源。上海附近的一个持续15年采取秸秆还田的试验调查表明(数据来自Wang, 引述者Jianmin *et al.*, 2004)，只施用钾肥的钾素平衡为-528kg/hm²，而既施钾肥又秸秆还田的处理，钾素平衡为-166kg/hm²。这一结果说明，只采用秸秆还田是不足以满足作物对钾肥的需要的，也就是说，必须施用钾肥和采取秸秆还田措施。一个很好

的解释是，配合秸秆还田处理的，作物产量增加了，所以作物带走的养分也是增加的。

Jianmin *et al.* (2004;数据引自 Xu *et al.*, 1998)的研究还显示，每年灌溉水和雨水为钾素平衡分别贡献了大约20-35kg和5kg K₂O/hm²，当然，与此同时，钾素由于灌溉径流和淋洗带来的损失也非常明显。如果把所有这些所有的因素考虑在内，钾素平衡为正(净贡献)，每年大约为10-17kg K₂O/hm²。

非常明显，中国农业正在进入一个必须高效利用所有资源的时代。改革农艺措施和从总体上计算钾素平衡显得非常重要，也就是说，要把养分收获部分(比如秸秆)和养分损失部分(比如淋失)全部计算在内，以确保作物高产的同时不带来土壤养分亏缺和土壤肥力降低。

前景展望

中国的人口还将继续增加，为了保证国家的粮食，仍然必须继续依靠化肥的使用以进一步提高作物产量。为促进全国钾肥的施用提供支持，必须加强研究，提高对农田土壤钾素状况和钾素循环的了解和认识。田间试验的研究结果必须通过示范和农业技术推广机构推广到农民那里去，使他们对提高钾素利用率和提高作物产量有更清晰的认识。同时，需要加强对生产钾肥的钾矿资源的利用，以满足钾肥的需求。

提高对农田土壤钾素重要性和钾素循环的认识

了解农田土壤钾素状况和钾素循环状况是做好钾素合理推荐施肥的重要基础。这里可能会产生很多问题。比如，土壤中有效钾含量是多少?不同土壤类型和作物的钾素测试方法是什么?怎么样施用钾肥才能既满足作物高产需要又保持土壤肥力钾素平衡?所有的这些问题都必须得到进一步研究。中国科学院南京土壤研究所的钾素研究小组的结果表明，土壤中的非交换性钾的含量非常高，差不多达到土壤总钾含量的40%，其有效性受释放速率的影响(Zhou and Wang, 2008)。需要应用新的方法对非交换性钾进行分类和定量研究，以对土壤钾素状况有更好地了解。在中国，醋酸铵浸提法是土壤钾素有效性测定和钾肥推荐施肥的主要方法。然而，这个方法并不能测定非交换性钾含量，所以不适合用来评定土壤非交换性钾对植物营养的贡献。一种能评价植物营养钾素有效性的新的方法在几种不同的土壤上建立起来了，但与所有的土壤类型的相关性和作物的相关性还需要进一步的研究验证(Wang *et al.*, 2010)。钾素推荐施肥的目标不应该是仅仅关注保证作物获得高产，还应该考虑在高产的同时保持土壤肥力不下降。为了实现这一目标，将来更多的研究应该导向钾素循环、钾素平衡和农田作物效应。

推广测土配方施肥,促进钾肥高效利用

测土配方施肥技术指考虑土壤本身供钾能力、作物的养分需求和养分平衡的一种养分施用的技术。这种技术可以提高肥料利用率,减少施肥量,从而达到增产增收的效果。

2005-2010年,全国有1.6亿农户从全国测土配方施肥项目中收益。根据2009年3000多个试验结果统计,水稻、玉米和小麦等粮食作物,测土配方施肥比农民常规施肥增产450kg/hm²以上,少施氮肥15-30kg/hm²,氮、磷、钾肥的利用率分别提高10%、7%-10%和7%以上。据江苏省小麦测土配方施肥核心区调查,氮、磷、钾肥料使用比例为1:0.3:0.32,而农民习惯施肥比例为1:0.28:0.22,通过配方施肥,钾肥施用比例呈明显上升趋势。

采用多种方法保证钾素可持续供应

1972年开始,中国钾肥消费量(进口量加上国内生产量)逐渐增加,到2007年达到941万吨K₂O。中国是世界第一大的钾肥进口国,消费量占世界生产量的20%。近年来,钾肥价格猛涨,不仅抑制了钾肥的供应和钾肥的农业利用,也威胁到了国家粮食安全。所以,中国付出许多努力,以减少对进口钾肥的依赖。中国的钾矿资源主要是钾盐盐湖,但相对来说,数量很小。1980年,中国的钾肥产量只有2万吨,但后来增长很快,到2005年增长到254万吨,占当年全国钾肥用量的37%。但是,钾肥供应量非常有限,只占全世界钾肥产量的2%。从资源角度说,中国即使到达3百万吨的年产量,也只能维持50年,所以中国一直依赖进口钾肥。

中国可溶性钾资源贫乏,但却拥有极为丰富的难溶性钾资源,亦即富钾硅酸性岩石。富钾岩石是指K₂O含量大于10%的钾长石和云母两类。它的远景资源可能大于200×10⁸tK₂O,近年来,钾长石的开发利用方面有了长足的进展。另外,近年来,中国正探索与一些国家合作,对国外钾盐矿产进行勘探开发,以弥补中国钾资源不足。

参考文献

- Bai Youlu. 2009. Response Strategy to the High Price of Potassium Fertilizer in China. *Soil and Fertilizer Sciences in China* 3:1-4.
- Du Chenglin, Zhu Bin, Xing Haibin, Tao Sheng, Xu Zhifei. 2001. Rice Yield and its Nutrients Uptake on a Limy Paddy Soil. *Soils* 3:147-149.
- Du Shen. 2009. Achievement and Prospect of Formula Fertilization by Soil Testing. *Phosphate & Compound Fertilizer* 24(6):75-76.
- Jin Jiyun. 1994. K Deficient Soil in North China and the Trend of K Fertilizer Application. *Soil K and Yield Responses in North China*. Chinese Agricultural Science and Technology Press.
- Li Jiakang, Lin Que, Liang Guoqing, Shen Guiqin. 2001. Prospect of consumption of chemical fertilizer in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 7(1):1-10.
- Lin Bao. 1989. *Application of Chemical Fertilizers in China*. Beijing Science and Technology Press.
- Liu Xiaoyan, He Ping, Jin Jiyun. 2006. Advances in Effect of Potassium Nutrition on Plant Disease Resistance and its Mechanism. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 12(3):445-450.

National Agricultural Technology Extension and Service Center. *Review of Chemical Fertilizer in Last 100 Years in China*. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press. 2002.

National Bureau of Statistics of China, *Chinese Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press. 2011.

Niu, J., W. Zhang, X. Chen, C. Li, F. Zhang, L. Jiang, Z. Liu, K. Xiao, K. Assaraf, and P. Imas. 2011. Potassium Fertilization on Maize under Different Production Practices in the North China Plain. *Agron. J.* 103(3):822-829.

Potash Industry Branch of China Inorganic Salt Industry Association. *K Fertilizer in China*. China Financial and Economic Press. 2011.

Qin Shengwu, Gu Yichu, Zhu Zhaoliang. 1998. A Preliminary Report on Long-Term Stationary Experiment on Fertility Evolution of Fluvo-Aquic Soil and the Effect of Fertilization. *Acta Pedologica Sinica* 35(3):367-375.

Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. *Proceeding of National Balance Fertilization Symposium*. 1989.

Sun Haixia, Wang Huoyan, Zhou Jianmin, Du Changwen, Chen Xiaoqin, Qin Shenwu. 2009. Change of Soil Potassium Fertility in Long-Term Located Field Experiment and Comparison of Different Methods to Measure Potassium Change in Soil. *Soils* 41(2):212-217.

Tang Leilei, Wan Kaiyuan, Li Zuzhang, Chen Fang. 2011. Effect of Fertilizing Patterns on Grain Yield, Nutrient Uptake and Economical Efficiency of Double-Season Rice. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 17(2):259-268.

- Wang H.Y., H.X. Sun, J.M. Zhou, W. Cheng, C.W. Du, and X.Q. Chen. 2010. Evaluating Plant-Available Potassium in Different Soils Using a Modified Sodium Tetrphenylboron Method. *Soil Science* 175(11):544-551.
- Wang Lihe, Sun Bin, Pei Ruijie, Chao Jianli, Wang Xizhi, Wang Liquiu, Cao Wenmei, Liu Songtao. 2009. Effect of Potassium in the Different Soil Types on Material Formation and Quality Relations of the Strong Gluten Flour Wheat. *Chinese Journal of Soil Science* 40(2):352-357.
- Wang Weini, Lu Jianwei, Lu Mingxing, Li Xiaokun, Li Yunchun, Li Hui. 2011. Effects of Potassium Fertilizer and Potassium Use Efficiency on Early-Mid- and Late-Season Rice in Hubei Province, China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* 17(5):1058-1065.
- Xie Jianchang, Zhou Jianmin. 1999. Advance in Soil K Research and K Fertilizer Application in China. *Soils* 31(5):244-254.
- Xie Jianchang. 2000. Potassium in China Agriculture. Nanjing: Hehai University Press.
- Xie Jianchang, and Li Chingkwei. 1990. Soil Potassium. *In: Li Chingkwei (ed.) Soils of China*. Science press, Beijing. 613 p.
- Yang Fan, Li Rong, Cui Yong, Duan Yinghua. 2010. Utilization and Develop Strategy of Organic Fertilizer Resources in China. *Soil and Fertilizer Sciences in China* 4:77-82.
- Zhang Guorong, Gu Siyu, Li Jumei, Xu Minggang. 2010. The Relationship between Fertilization and Yield of High-Yield Paddy Field in Middle and Lower Reaches of Yangtze River. *Soil and Fertilizer Sciences in China* 1:75-80.
- Zhang, H.M., X.Y. Yang, X.H. He, M.G. Xu, S.M. Huang, H. Liu, and B.R. Wang. 2011. Effect of Long-Term Potassium Fertilization on Crop Yield and Potassium Efficiency and Balance Under Wheat-Maize Rotation in China. *Pedosphere* 21(2):154-163.
- Zhou Jianmin, Chen Xiaoqin, Xie Jianchang, and Rolf Hårdter. 2004. Nutrient Balance and Nutrient Management in Agro-Ecosystems of China. *In: Nutrient Management in China: Part 1. Nutrient Balances and Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems. Proceedings of the IPI-ISSCAS Workshop on Nutrient Management in China*. 419 p.
- Zhou Jianmin. 2004. Evaluation of Soil K Fertility and Reasonable K Fertilizer Application. Changchun: Jilin Science and Technology Press.
- Zhou Jianmin, Wang Huoyan. 2008. K Forms and Transformation in Soils. *In: Zhou, J.M., and H. Magen (ed.) Soil Potassium Dynamics and K Fertilizer Management (in Chinese)*. Hehai University Press, Nanjing. p. 3-9.

中国钾肥使用历史回顾与展望一文在IPI网站区域活动/中国栏目可以获得。



研究报告

巴西热带草原农业发展的传奇故事

Scheid Lopes, A.⁽¹⁾, L.R. Guimaras Guilherme⁽²⁾, and S.J. Ramos⁽³⁾

引言

巴西农业商业非常成功, 2006年其产值为巴西国民生产总值 (GNP) 的23%, 是过去30年中巴西经济最大的亮点 (Lopes and Daher, 2008)。导致农业商业成功的一个非常重要的因素是, 运用适当的养分管理技术确保巴西的生产能力。这一点可以从1992年至2011年的统计中得到印证, 这期间巴西的粮食播种面积从3560万公顷上升到4860万公顷 (上升40%), 粮食产量从6830万吨提高到16010万吨 (上升230%), 肥料销售从930万吨上升到2830万吨 (上升300%)。这些数据表明, 年均耕地面积增加1.93%, 粮食总产提高4.77%, 而肥料销售量上升5.55%。

这种发展重要指标之一就是Cerrado地区农业的扩展和肉牛产量提高, 而这一地区直到1960年代还被认为不适合发展农业 (图1)。诺贝尔奖获得者, 被称为“绿色革命之父”的Norman Borlaug曾经说过, “没有人想到这些土壤还能有这么高的生产力”。Cerrado地区有2亿公顷耕地, 为农业的发展做出了重要的贡献, 该地区成为了全世界最大粮食生产基地之一。作为巴西第二大的生物群系, 该地区的生物多样性非常丰富, 非常有助于生产食品、饲料、燃料和木材、药材和园林植物。

在聚焦该地区采取的养分管理等多种必要技术措施克服土壤肥力限制和实现成功的农业生产的同时, 本文对巴西Cerrado地区的生产潜力和限制因素等方面都进行了阐述。

巴西Cerrado地区概括

位于巴西中部的具有热带草原植被的Cerrado地区面积达204万平方公里, 占巴西国土面积的23% (图1)。据估计, 该地区有超过50%的面积适合于农业生产, 66%的面积可以用于与农业/牧业/林业有关的产业。年降雨量900~2000mm, 通常在1000~1400mm的幅度变化。该地区



图1. 南美和巴西热带草原 (Cerrado) 地区分布 (图中绿色部分)。来源: Lopes and Guilherme, 1994. 巴西Cerrado地区幅员面积204万平方公里, 占巴西国土面积的23%。

南部年平均温度为22°C, 北部为27°C (Goedert, 1989)。该地区主要土壤类型为热带高度风化和淋溶的氧化土 (Oxisols), 占46%, 老成土 (Ultisols) 占15%, 新成土 (Entisols) 占15% (美国土壤分类, 见图2), 显示土壤自然养分状况很低, 限制了农业生产的发展。这些土壤酸化, 土壤有效N、P、K、Ca、Mg、S、B、Cu、Mo和Zn含量都很低。另外, 土壤的铝离子饱和度很高, 以至于对很多作物都有毒害作用。这些土壤的固磷能力很强 (表1)。

⁽¹⁾ 农艺师, 博士, 名誉教授, 联邦Lavras大学(UFLA), 巴西, 名誉研究员, 巴西全国科学技术发展委员会(CNPq), Email: ascheidl@dcs.ufla.br

⁽²⁾ 农艺师, 博士, 副教授, UFLA; 研究员, CNPq.
通讯作者: guilherm@dcs.ufla.br

⁽³⁾ 农艺师, 博士, 助理科学家, Vale技术研究院-矿业,
Email: silvio.ramos@vale.com

除了这些土壤化学性质限制因素外, 该地区对农业生产的限制还有以下几点 (Lopes and Guilherme, 1994) :

- 通常有5~6个月的干季(4~9月)。
- 即使在雨季也有3周的被当地人称为“范拉尼罗早期(veranicos)”, 而且常常伴随着非常高的蒸腾蒸发率。
- 土壤田间持水量很低, 即使在粘质土壤上也是如此。
- 因为土壤铝毒和/或深层土壤钙缺乏, 导致许多作物的根系都很浅。

这些因素更加凸显了在Cerrado地区土壤上通过适当的管理技术提高其生产能力的重要性。尽管存在这些问题, 最近几十年来该地区的农业取得了突破性的进展, 主要包括粮食作物、牧草和多年生作物。

直到1970年代, 该地区的经济活动主要是基于养牛业、水稻种植、木炭加工和原木。但是, 在过去的30年中, 农业生产获得了突飞猛进的发展。目前, 大约9850万公顷的土地是从事农业生产的, 其中5000万公顷为人工牧草, 3000万公顷为天然牧草, 1500万公顷为一年生作物, 350万公顷为多年生作物和森林。Cerrado地区生产占全国55%的大豆, 单产高于全国的平均产量。该地区还生产其他主要的农产品, 生产占全国总产76%的棉花、32%的玉米、18%的水稻、22%的其他豆类。近年来, 生产的高粱、向日葵、大麦、小麦、橡胶, 以及为加工用的水果和蔬菜等, 所占比例都有所提高。就畜牧业来说, Cerrado地区的数量也是非常惊人的, 生产占全国17600万头牛的42%, 肉类占巴西全国的55% (Embrapa, 2012)。

Cerrado地区的农业发展潜力非常大, 以至于Dr. Norman Borlaug博士将Cerrado地区称为世界农业的最前沿 (Borlaug and Dowsnell, 1993)。据估计, Cerrado地区可

以生产2.5亿吨粮食、1200万吨肉和9000万吨多年生作物产品(Macedo, 1995; Lopes and Guilherme, 1994)。

巴西全国和Cerrado地区农业对养分的使用量

多年来, NPK的施用量一直在稳定增加, 从1970年到2011年, 年均增长率分别为5.4%、3.82%和5.86% (分别以N、 P_2O_5 、 K_2O 计) (图1)。对钾的需求较高是由该地区种植的作物种类决定的。对于需钾量高的大豆来说, 其占了全巴西钾肥市场的35%, 接下来是玉米和甘蔗, 也占了不



Map 2. Soil map of Brazil and the Cerrado region (marked in red). Source: Embrapa solos.

小的份额(图2)。20年来,该地区采用了更集约的轮作制度,在全巴西首先倡导推广扩大免耕栽培,增加高吸钾作物(如大豆、玉米和甘蔗),这些都加剧了从土壤中移除更多的钾素。这是值得引起人们注意的,因为在巴西,钾素在提高农产品加工业的产品质量方面起到非常重要的作用,比如,钾素提高了甘蔗的品质和棉花纤维的质量。钾素还在增加大豆对氮素的吸收利用以及提高大豆品质方面发挥重要作用。

导致Cerrado地区农产品总产和单产水平提高的重要因素之一,是肥料特别是NPK肥料的养分利用率的提高。在1970/1971年度,正是Cerrado地区农业在巴西不断扩展的开始时期,N、P₂O₅、K₂O的养分施用量分别只有7.7、11.5、8.5kg/hm²。总的播种面积为3600万公顷,16种主要作物的总产(干基)为5200万吨,平均只有1.6吨/hm²。与此对照的是,在2010/2011年度,N、P₂O₅、K₂O的养分施用量分别为39.9、52.4、49.2kg/hm²,分别比1970/1971年度增长5.2、4.6、5.8倍。在2009/2010年度,总的播种面积为6400万公顷,16种主要作物的总产为2.58亿吨,平均产量达到4.0吨/hm²。这些数据表明,播种面积增加了1.8倍,单产增加了2.9倍(从1.4吨/hm²增加到4.0吨/hm²,但总产增加了5倍。这种增长与合理的肥料施用密切相关,增产的粮食相当于节约了7700万公顷的耕地,也就是相当于巴西Amazon省的全部耕地面积。

这些数据也揭示了,在巴西最近的2个作物季(2010/2011)里钾肥施用量在肥料中是增加最多的(图1)。确实,如果用2011年肥料施用总量和1970年的数据对比的话,这期间的钾肥施用量增加了14.4倍,而氮肥增加了12.2倍,磷肥增加了9.3倍。这么大的增加幅度,主要都是在最近20年内发生的,是从巴西大规模采用免耕技术开始的。2006年巴西全国应用免耕技术的面积为2550万公顷,而其中大部分都在Cerrado地区(2006年为1190万公顷)。

与N、P₂O₅相比,K₂O的施用量增加是最大的,这一点值得引起关注。除了对提高Cerrado地区的农业总产和单产水平外,也可以看出施用钾肥还有其他的好处。比如,减少水分和热胁迫,提高产品品质、促进蛋白质合成,水果坐果更好,豆科作物固氮能力更强等。

Table 1. Chemical properties of 518 composite samples (0-15 cm) of top-soil under Cerrado vegetation in Brazil.

Properties	Cerrado area	Properties	Cerrado area
	%		%
pH in water (<5.0)	50	Organic matter % <2.0	17
Ca cmol _c /dm ³ <1.5	96	Zn mg/dm ³ Mehlich 1 <1.0	95
Mg cmol _c /dm ³ <0.5	90	Cu mg/dm ³ Mehlich 1 <1.0	70
K cmol _c /dm ³ <0.15	85	Mn mg/dm ³ Mehlich 1 <5.0	37
Al cmol _c /dm ³ >1.0	15	N deficiency	32
Effective CEC cmol _c /dm ³ <4.0	97	S-SO ₄ ²⁻ deficiency	70
Al saturation of effective CEC >40%	79	B deficiency	60
P mg/dm ³ Mehlich 1 <2.0	92		

Source: Adapted from Lopes and Cox, 1977; and Malavolta and Kliemann, 1985.

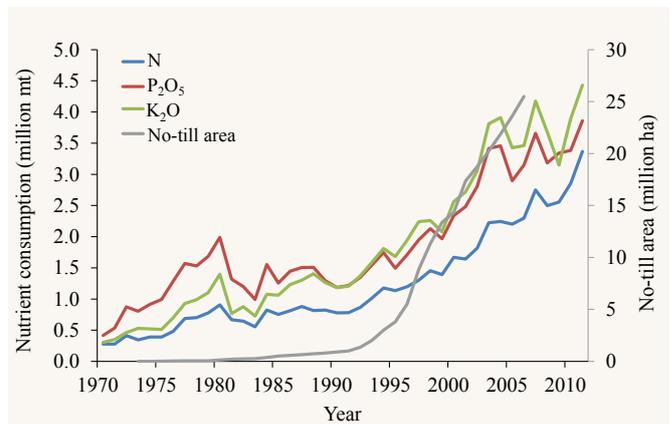


Fig. 1. Growth of N, P₂O₅ and K₂O consumption in Brazilian agriculture from 1970 to 2011, plotted together with the expansion of the no-till area in Brazil from 1973 to 2006.

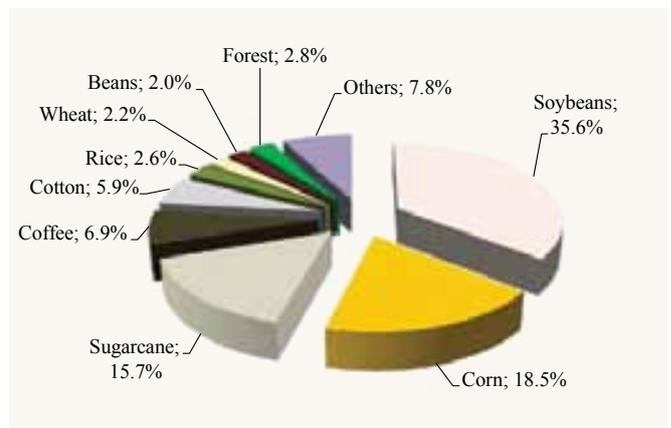


Fig. 2. Brazilian fertilizer market share by crop in 2011. Source: ANDA.

施肥和土壤管理技术

施石灰

施石灰对不耐酸性土壤的作物来说是非常重要的管理手段,可以矫正较低的pH和降低铝毒(表2)。施石灰的平均用量为3t/hm²(变化幅度为1-5),撒施或者尽量深施到土体,以有助于作物根系下扎。这样,就减少在耕作季节(雨季)中的干季对作物的危害。对多年生刚移栽的作物,改良草场和免耕少耕栽培的粮食作物,石灰用量为正常用量的25%。

因为绝大多数这样的土壤都缺乏Ca和Mg,推荐施用含白云石的石灰或高镁石灰。该地区的石灰用量有个评估公式,即用盐基饱和度的提高量来评估。公式为:

$$\text{石灰用量 (mt/hm}^2\text{)} = T(V2 - V1)/100$$

这里, T=pH等于7.0时的CEC值; V2=作物适合的盐基饱和度; V1=pH等于7.0时的盐基饱和度(Quaggio et al.,1983)。

对很多作物来说, V2的值50%, Ca:Mg的比值必须保持在1:1到10:1之间, Mg的最小值为0.5 cmol_c Mg/dm³(Sousa and Lobato, 2004)。施用石灰的后效可以持续3到5年。撒施或者耕作层浅施石灰必须在施肥或者播种至少60~90天之前。

底土酸性改良

绝大多数情况下,石灰反应只在耕作层土壤中发生。表土下土壤的钙和铝毒依然会限制作物根系的下扎(Lopes, 1983; Goedert, 1987)。有证据表明,在这种情况下,施用农用石膏这种磷酸的副产品,是一种有效的管理技术,可以有效促进作物根系向深处下扎(照片1)。

这是非常重要的方法去评价表土(0~20cm)、以及20~40cm和40~60cm土体中土壤酸度的指标(pH、Ca和铝的含量水平)。对多年生作物来说,评价时应该考虑60~80cm土体的情况。对表土下Ca离子含量在0.3 cmol_c Ca/dm³以下,和/或Al离子含量0.5 cmol_c Al/dm³以上,和/或Al离子饱和度占有有效CEC的30%的区域,推荐施用量更高,以促进Ca向下移动,和/或降低整个土体的铝毒(Lopes, 1983; Lopes, 1986)。评价在这些条件下施用石膏多少的最简单的参数是粘粒的百分含量。通常用的最多的有两种方法:

- 石膏施用量(kg/hm²)=300+(20×粘粒百分数%),由Lopes and Guilherme (1994)发明,用于改良20~40cm土体。

Table 2. Economic balance of the liming effect on three crops in Brazil.

Lime rate in the first year <i>mt ha⁻¹</i>	Production increase after liming	
	First year	Period under review
	-----kg ha ⁻¹ -----	
Five years of corn		
3.0	422	7,877
6.0	600	11,619
9.0	1,250	13,777
Three years of soybean		
1.5	473	1,746
3.0	513	2,357
4.5	645	2,610
Four years of cotton		
1.5	32	1,072
3.0	245	2,609
6.0	442	4,092

Source: Raij and Quaggio, 1984.

- 石膏施用量(kg/hm²)=50×粘粒百分数%,由Sousa and Lobato (2004)发明,用于改良20~60cm土体。对于多年生作物来说,上式计算结果乘以1.5。

在这些土壤上施用石膏可以提高产量,主要是因为作物根系下扎更深,底土的水分和养分的利用效率提高。有报道称,土壤施用石膏种植玉米、小麦、大豆、咖啡和紫花苜蓿,其农学效率分别提高72%、59%、14%、30%和80%。另外,种植芒果、柑橘和甘蔗也有很大的增产幅度(Sousa, Lobato and Rein, 1995)。石膏要在施用石灰60天到90天后施用,其后效可持续5年到15年。

磷肥施用的累积

这些土壤有效磷含量非常低,所以要想在较短的时间内获得合适的经济产量,补充土壤磷素就非常重要。土壤磷含量平均为0.4mg/dm³,土壤磷固定能力又非常高。因为绝大多数这些土壤具有较低的活性粘土矿物,所以土壤粘粒百分含量与要构建土壤磷库需要施入的磷肥数量之间有很好的相关性。总体上说,土壤粘粒含量高,土壤固定磷素的能力就强。因此,质地细的土壤类型,比如粘壤土,比砂质粗糙质地的土壤类型的固定磷素的能力更强。1:1型的粘粒类型(比如高岭土)的固定磷的能力要高于2:1型的粘粒类型(比如蒙脱石、伊利石和蛭石)。像Cerrado地区一样,高温高降雨量条件下形成的土壤类型,含有大量的高岭石,所以土壤的固磷能力就比那些含有2:1型粘土矿物的土壤要高。高温高降雨量同时还升高了土壤中Fe和Al的氧化物的含量,这些也促进了对施入Cerrado土壤中的磷素的固定作用。

根据Lopes(1983)的研究,每1%的粘粒含量需要3~5kg的有效态 P_2O_5 ,第一年撒施并在种植作物前镇压,然后施入很少量的肥料以在3年中达到目标产量。表3提供了在旱作或者灌溉条件下,基于土壤粘粒含量和土壤磷素含量,构建土壤磷库的施磷推荐的更多情况。土壤含磷量非常低的土壤和土壤粘粒含量非常高的土壤,都需要施入较多的磷肥。如果一种土壤类型含有足够的磷素,就不会推荐施用以建立土壤磷库为目的的施磷量。

另外一个常用的改善这些土壤磷素状况的方法,是在作物栽培时施用稍微多点的 P_2O_5 (比作物正常需要的施磷量多30~40kg/hm²)。这种施用量应该连续保持5~6年。在土壤磷素状况达到中高水平时,只施入作物需要的施磷量。对粮食作物、甘蔗和咖啡等作物来说,在施用石灰后,施入可溶性磷肥(比如过磷酸钙、重过磷酸钙和热法磷酸盐或者高反应的磷矿石)已经被证实最有效的磷源。因为巴西绝大多数磷矿石的反应性都很低,这些产品多被在新开垦的草场作为耕地种植抗酸性作物品种时直接施用(Smyth and Sanchez, 1982; Goedert and Lobato, 1984; Goedert and Lopes, 1988)。因为施用石灰会降低低反应磷矿石的农学效率,所以,在这种情况下,石灰用量为正常用量的25%(Lopes and Guidolin, 1989)。

钾肥施用的累积

在含钾量中低水平的土壤上也推荐基于建立土壤钾库的施钾量。施钾量也是根据pH等于7.0时的CEC进行估算的(表4)。土壤pH7.0时土壤CEC低于4.0cmol_c/dm³,表示土壤钾素更容易淋失(Mclean and Watson, 1985)。这种情况下,大于40kg/hm²施钾量的,都应该分次条施或者撒施。撒施施钾量达到土壤钾素累积的水平时,也可以计算成pH等于7.0时CEC的3%~5%的钾饱和度(Lopes and Guidolin, 1989)。



Photo 1. Cotton root development in depth without (left) and with (right) application of 3 mt gypsum ha⁻¹. Each square is 15 cm by 15 cm. Photo courtesy of D.M.G. Sousa. Source: Sousa and Rein, 2009.

Table 3. Recommended application rate for total build-up of P fertilization for the Cerrado region based upon clay percentage.

Clay	Extractable soil P level					
	Upland systems			Irrigated systems		
	Very Low	Low	Medium	Very Low	Low	Medium
%	-----kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹ *-----					
≤15	60	30	15	90	45	20
16-35	100	50	25	150	75	40
36-60	200	100	50	300	150	75
>60	280	140	70	420	210	105

*For acidulated phosphates: P₂O₅ soluble in neutral ammonium citrate plus water. For thermal phosphates and basic slags: P₂O₅ soluble in 2% citric acid (1:100 ratio). For reactive natural phosphates: total P₂O₅.

Source: Adapted from Sousa and Lobato, 2004.

钾素在大豆作物生长中的作用

虽然钾素不是植物体和细胞的构成成分,但钾素仍然被称为作物生长和产量发育的必需的大量元素之一。钾阳离子在植物体中含量非常丰富,参与支持植物生长发育的许多植物生理过程,或与之有关。钾素影响植物水分关系、光合作用、同化物质的转运和酶活性(Pettigrew, 2008)。另外, Mengel (1980)还证实了在较高水平的钾素条件下氨基酸的转运得到了提高,特别是将更多的氨基酸转移到植物的籽粒中。

在巴西农作物对K₂O的需求中,大豆种植需求量最大,因为巴西大豆种植面积非常高,2012年达到大约2500万公顷(IBGE, 2012)。

根据Sacramento和Rosolem (1998)的研究,钾素在大豆的矿质营养中起到特别重要的作用,因为钾是作物吸收的大量元素之一,在植物体中转运的量最大。非常明显的可见的植物缺钾症状是植物的生长变慢(Pettigrew and Meredith, 1997)。缺钾导致大豆生物量的下降,是因为在钾素缺乏的条件下,大豆叶片面积和大小下降(Lana *et al.*, 2002)。

为了保持或者获得最高产量,通常需要施用足够的K₂O,特别是在Cerrado地区的土壤上是这样。很多研究都表明,施用K₂O能提高大豆的产量。Lana *et al.* (2002)发现,施钾提高大豆产量的原因,是因为施钾能提高每株总荚数和主茎上的荚数,也可以提高单荚粒数。施钾的正效应还表现在施钾可以提高大豆的绝大多数的产量构成因素,比如株荚数(Lana *et al.*, 2002)、单粒重(Serafim *et al.*, 2012)、某些大豆品种的根瘤数(Novo *et al.*, 1999)。这样,钾素不仅能提高大豆叶片中碳水化合物的含量,还能提高这些物质转运到大豆根系中的能力,从而根系有更多的能源,促进根瘤的形成和刺激N₂的固定(Armstrong, 1998)。另外,在Cerrado土壤中,水是大豆获得高产的主要限制因素。钾素有控制细胞膨胀和新陈代谢的作用,从而可以缓解水分的胁迫。

钾素对很多作物来说都可以提高其品质(Usherwood, 1985)。Tanaka *et al.* (1995)发现,大豆施钾可以提高豆粒的含油量。大豆还含有异黄酮类物质,人们认为这类植物化合物对人类的健康非常有益。Yin和Vyn (2004)报道,大豆施钾可以提高豆粒中异黄酮的含量。

微量元素肥料使用的累积

提高Cerrado土壤肥力水平也包括微量元素营养。在微量元素(Zn, Cu, B, Mn, and Mo)自然含量比较低的土壤上,可以撒施微量元素肥料。在微量元素低的土壤上,可以分别撒施2, 2, 6, 0.4和6 kg/hm²的B, Cu, Mn, Mo和Zn。通常,这样的施肥量可以在一年中分3次条施。在微量元素含量中等的土壤上,推荐条施上述用量的25%。在微量元素含量较高的土壤上,不推荐施用微量元素肥料。

Table 4. Recommendation of build-up K fertilization for the Cerrado region.

Extractable soil K mg/dm ³	Interpretation	Total build-up -----kg K ₂ O ha ⁻¹ -----	Gradual build-up
CEC at pH 7.0 less than 4.0 cmol _c /dm ³			
≤15	Low	50	70
16-30	Medium	25	60
31-40	Adequate ¹	0	0
>40	High ²	0	0
CEC at pH 7.0 more than or equal to 4.0 cmol _c /dm ³			
≤25	Low	100	80
26-50	Medium	50	60
51-80	Adequate ¹	0	0
>80	High ²	0	0

¹For soils with adequate level of extractable K, rates of K₂O are recommended according to expected yield.

²For soils with high level of extractable K, rates of K₂O of 50 percent of the maintenance fertilization or expected/estimated K extraction are recommended in the last production.

Source: Adapted from Sousa and Lobato, 2004.

土壤有机质管理

Cerrado的土壤含有较低活性粘粒含量、中等有机质含量和非常低的CEC含量,超过70%的CEC来自土壤有机颗粒。在单作、传统耕作和施用石灰和肥料的情况下,有机质剥蚀的非常快,耕作短短的数年后,土壤有机质将下降到不可持续的水平。在这种情况下,非常重要的就是推广应用可持续农业技术措施,避免土壤有机质含量的快速下降。

诸如包含改良草场在内的作物轮作、绿肥、少耕或者免耕、肥田作物、农家肥和适量的作物秸秆覆盖等,都是重要的管理技术措施。近年来,该地区免耕技术快速发展,这将是未来可持续农业发展的关键因素。

土壤肥力的保持

按照建立土壤养分库的施肥要求,适量的养分平衡的施肥方案,对开发作物产量潜力和保持土壤肥力都非常重要。保持土壤主要的微量元素肥力,其施肥方案要基于目标产量、土壤和作物测试。

结论

在过去50年中, Cerrado已经从曾经不太适合农业生产的地区,变成了农业生产能力高的地区,成为了农业革命的典型例子。这期间在几个农业区用于实验研究的投资,形成了大量的农业管理技术,从而使Cerrado地区成为了巴西粮食、肉牛、农业能源生产,以及植树造林等方面最富生产能力的地区之一。另外,为了将该地区建成“绿色农业”的示范基地,最近一些年,在该地区实施了以下更加

可持续的管理技术措施。

- 增加作物轮作和增加肥田作物 (比如照片2)。
- 免耕/少耕: 在1990年时, 巴西农民只在2.6%的粮食作物上应用免耕技术, 今天这一比例超过了50%。
- 作物-畜牧生产和/或作物-畜牧-林业生产集成 (比如照片3): 桉树是该地区商业用木材的主要树种, 但是, 有超过100种有用的树种, 被证明为该地区适合的农林复合系统(Schorr, 2001)。

我们相信在Cerrado地区农业商业和合理利用自然资源可以和谐共存, 其目标是建立一个更加可持续的生产系统, 这就要求不仅要增加对众多的农艺问题的研究的努力, 还要解决几个后勤保障的问题。在限制该地区农业快速发展的几个因素上, 有两点值得提及: 基础设施建设和运输能力。运输和后勤保障不仅影响农产品最后的市场价格, 对价格竞争激烈的农业生产资料投入品也有很大的影响。对Cerrado来说, 这一点至关重要, 因为该地区可持续的生产, 是高度依赖农业投入品中石灰和肥料的供应的。

References

- Armstrong, D.I. 1998. Better Crops with Plant Food 82(3).
- Borlaug, N.E., and C.R. Dowsell. 1998. Fertilizer: to Nourish Infertile Soil that Feeds a Fertile Population that Crowds a Fragile World. Keynote address at the 61st Annual Conference, International Fertilizer Industry Association (IFA), May 24-27, 1993, New Orleans, Louisiana, USA. 18 p.
- Embrapa. 2012. Embrapa Cerrados – Apresentação. From <http://www.cpac.embrapa.br/unidade/apresentacao/>
- Goedert, W.J. 1987. Management of Acid Tropical Soils in Savannas of South America. p. 109-127. In: IBSRAM (International Board for Soil Research and Management). Management of Acid Tropical Soils for Sustainable Agriculture: Proceedings of an IBSRAM inaugural workshop. Bangkok, Thailand.
- Goedert, W.J., and E. Lobato. 1984. Avaliação agrônômica de fosfatos em solos de cerrado. R. bras. Ci. Solo, Campinas, SP, 8:97-102.
- Goedert, W.J. 1989. Região dos cerrados: potencial agrícola e política para o seu desenvolvimento. Pesq. agropec. bras., Brasília, DF, Brasil, 24(1):1-17.
- Goedert, W.J., and A.S. Lopes. 1988. Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados para culturas anuais, perenes, pastagens e reflorestamento. p. 24-29. In: Seminário sobre recuperação de fósforo. São Paulo, SP, IBRAFOS.



Photo 2. Brachiaria as a cover crop in maize field.
Source: Courtesy of R. Trecenti.



Photo 3. Crop-livestock-forest production system.
Source: Courtesy of R. Trecenti.

- IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. Agosto 2012. Available at http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201208.pdf
- Lana, R.M.Q., O.T. Hamawaki, L.M.L. Lima, and L.A. Zañón jr. 2002. Resposta da soja a doses e modos de aplicação de potássio em solo de cerrado. *Bioscience Journal* 18:17-23.
- Lopes, A.S. 1983. Solos sob “cerrado”: características, propriedades e manejo. Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba, SP. 162 p.
- Lopes, A.S. 1986. Calagem e gesso agrícola. Encontro técnico sobre gesso agrícola. Fósferil/Petrofertil, Belo Horizonte, MG. 58 p. (mimeo).
- Lopes, A.S., and F.R. Cox. 1977. A survey of the soils under cerrado vegetation in Brazil. *Soil Science Society of America Journal* 41:742-747.
- Lopes, A.S., and E. Daher. 2008. Agronegócio e recursos naturais no cerrado: desafios para uma coexistência harmônica. In: Faleiro, F. G.; Farias Neto, A. L. de (ed.). *Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. cap. 5, p. 173-209.
- Lopes, A.S., and J.A. Guidolin. 1989. Interpretação de análise de solos: conceitos e aplicações. ANDA, São Paulo, SP, Boletim Técnico N° 2, 3a. edição. 64 p.
- Lopes, A.S., and L.R.G. Guilherme. 1994. Solos sob cerrado: manejo da fertilidade para produção agropecuária. ANDA, São Paulo, SP, Boletim Técnico N° 5, 2a edição. 62 p.
- Macedo, J. 1995. Prospectives for the rational use of the Brazilian Cerrados for food production. Planaltina, EMBRAPA- CPAC. 19 p.
- Malavolta, E., and H.J. Kliemann. 1985. Desordens nutricionais no cerrado. Piracicaba: Potafos, 1985. 136 p.
- McLean, E.D., and M.E. Watson. 1985. Soil Measurement of Plant Available Potassium. In: Munson, R.D., ed. *Potassium in Agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, p. 277-308.
- Mengel, K. 1980. Effect on Potassium on the Assimilate Conduction to Storage Tissue. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 93:353-362.
- Novo, M.C.S.S., R.T. Tanaka, H.A.A. Mascarenhas, N. Bortoletto, P.B. Gallo, J.C.N.N.A. Pereira, and A.A.T. Vargas. 1999. Nitrogênio e potássio na fixação simbiótica de n₂ por soja cultivada no inverno. *Scientia Agricola*, 56:143-156.
- Oliveira Neto, S.N., A.B. Vale, A.P. Nacif, M.B. Vilar, and J.B. Assis. *Sistema agrossilvipastoril - integração lavoura, pecuária e floresta*. 1ª. ed. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais - SIF, 2010. 189 p.
- Pettigrew, W.T. 2008. Potassium Influences on Yield and Quality Production for Maize, Wheat, Soybean and Cotton. *Physiologia Plantarum* 133:670-681.
- Pettigrew, W.T., and W.R. Meredith jr. 1997. Dry Matter Production, Nutrient Uptake, and Growth of Cotton as Affected by Potassium Fertilization. *Journal of Plant Nutrition* 20:531-548.
- Quaggio, J.A. 1983. Critérios para calagem em solos do estado de São Paulo. Unpublished manuscript M.S. thesis. ,Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz,” Piracicaba, SP, 76 p.
- Sacramento, L.V.S., and C.A. Rosolem. 1998. Eficiência de absorção e utilização de potássio por plantas de soja em solução nutritiva. *Bragantia* 57(2):355-365.
- Serafim, M.E., F.B. Ono, W.M. Zeviani, J.O. Novelino, and J.V. Silva. 2012. Umidade do solo e doses de potássio na cultura da soja. *Revista Ciência Agronômica* 43:222-227.
- Schorr, M. 2001. *Sistemas agroflorestais para o Brasil*. Instituto Anima. 64 p.
- Sousa, D.M.G. de, and E. Lobato. 2004. Cerrado. Correção do solo e adubação. Planaltina, DF, Embrapa Cerrados. 2nd edition, 416 p.
- Sousa, D.M.G. de, and T.A. Rein. 2009. Manejo da fertilidade do solo para culturas anuais: experiências no cerrado. *Informações Agronômicas*, N° 126, Junho 2009. IPNI, Piracicaba, SP, p. 1-7.
- Sousa, D.M.G. de, E. Lobato, and T.A. Rein. 1995. Uso de gesso agrícola nos solos dos cerrados. p. 20. Planaltina, DF, EMBRAPA-CPAC, Circular Técnica N° 32.
- Smyth, T.J., and P.A. Sanchez. 1982. Phosphate Rock Dissolution and Availability in Cerrado Soils as Affected by Phosphorus, Sorption Capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, Wisconsin, USA, 46:339-34.
- Tanaka, R.T., H.A.A. Mascarenhas, M.A.B. Reginato-D’Arce, and P.B. Gallo. 1995. Concentração e produtividade de óleo e proteína de soja em função da adubação potássica e calagem. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 30:463-469.
- Usherwood, N.R. 1985. The Role of Potassium in Crop Quality. In: Munson, R.D. (ed.) *Potassium in Agriculture*. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI, p. 489-513, 1985.
- Yin, X., and T.J. Vyn. 2004. Critical Leaf Potassium Concentrations for Yield and Seed Quality of Conservation-Till Soybean. *Soil Science Society of America Journal* 68:1626-1634.

“巴西热带草原农业发展的传奇故事” 在IPI网站
“区域活动/拉丁美洲” 栏目可以获得。



研究报告

非洲的钾肥施用: 背景、评价和前景展望

Wendt, J.⁽¹⁾

引言

21世纪, 非洲大陆面临着前所未有的食物生产和自然资源的压力升高的挑战。有预测表明, 非洲人口将持续上升, 将从2000年的大约8亿升高到2050年的22亿, 到2100年达到36亿(图1)。撒哈拉沙漠南部非洲(SSA)营养失衡是最严重的, 有30%的人口生活在严重的饥饿状态(FAO, 2010), 而且这一数据在过去的20多年中保持在很高的水平。现在和将来预期人口快速增长, 由此可以预期, 该地区营养不良的人口数量将还会增长。

该文考察了SSA地区农业生产能力比较低的一些根本原因, 结果表明, 市场导向的解决方案将会极大地提高食物安全。矿质肥料营养, 特别是大量元素钾素对提高和保持可持续生产能力的作用受到广泛关注。

文中SSA指撒哈拉南部非洲地区, 但不包括南非。和南非和撒哈拉北部非洲国家(阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥、苏丹、突尼斯和西撒哈拉)相比, SSA地区显著的特征就是农业生产能力低下(单位面积产量)。

农业发展历程

SSA地区的特征是土壤类型(图1)、农业生态类型区(图2)和耕作制度的丰富多样。这些和南非有相近的地方。

SSA地区基本上错过了1950-1970年代的“绿色革命”。“绿色革命”是指通过推广应用改良的种质资源、矿质肥料、灌溉和良好的管理技术措施, 导致全世界的农业生产能力的极大提高。矿质肥料的使用, 无论对提高作物产量, 还是补充作物收获时带走和因为气化(比如氮)、淋洗和土壤侵蚀带走的养分, 都非常重要。这一时期, 非洲的N、P、K肥料施用量停滞不前, 但其在亚洲和拉丁美洲的消费量增加却非常大(表2)。现在, SSA地区占世界耕地面积的13%, 但其肥料用量小于世界用量的1%(表3)。其结果是, 该地区和其他地区相比, 作物产量增加较小(表4)。

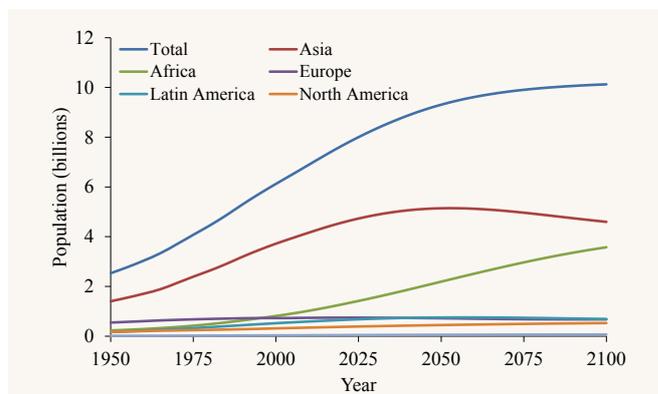


Fig. 1. Medium variant projections of population growth for various regions of the world. Source: Collated from UNDP, 2010.

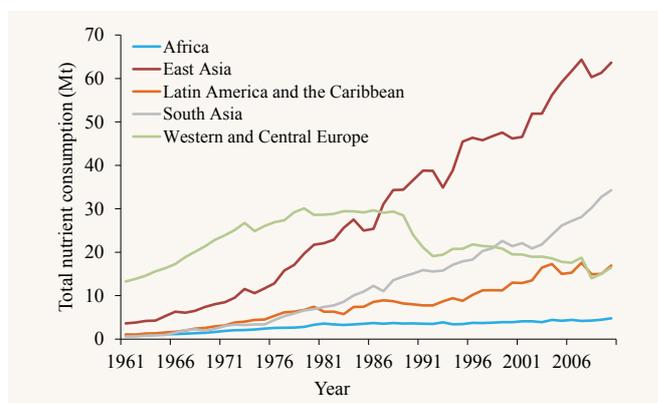


Fig. 2. Nutrient consumption (NPK) in regions, 1961-today. The term "Africa" includes North African countries, sub-Saharan Africa and South Africa. Source: IFA.

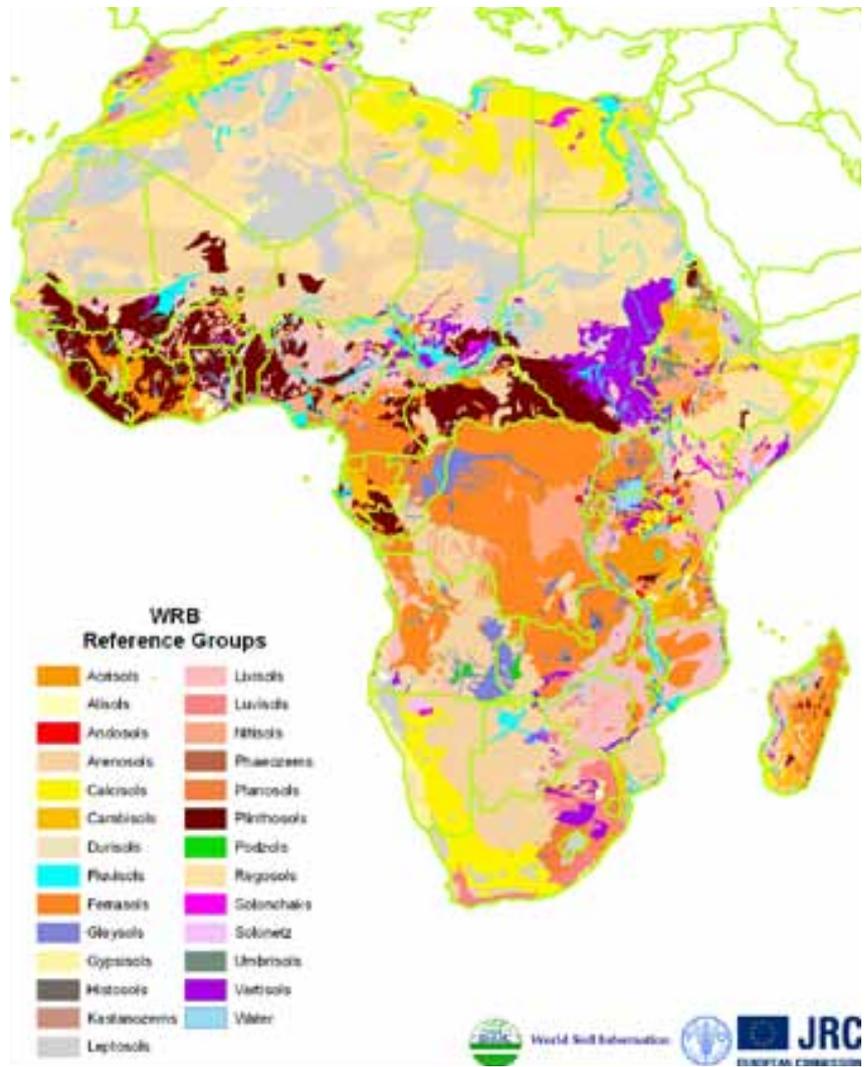
尽管SSA地区作物单产停滞不前, 但其粮食生产总量一直在试图超过其人口的快速增加。2010年SSA地区的人口比1961年增长370%, 食物的热值增长122% (从每人每天的1955kcal增加到2380kcal, FAOSTAT)。但是, 这并不能说营养不良人口在减少, 因为城市人口的增加, 消耗了增加

⁽¹⁾自然资源管理项目负责人, 东南非洲处, 国际肥料发展中心, 内罗毕, 肯尼亚。

的卡路里。SSA地区营养不良的人口比例增加了大约3倍，从1970年的8800万增加到2010年的2.39亿。

总产的增加主要是由于农业用地面积的增加。表1显示，食物商品的单产在1961年到2010年期间有所增长，但用于粮食种植的耕地面积增加227%（众所周知的扩展过程）。食物产品的产量增加（单产提高和面积扩大）幅度介于235%和758%之间。另外，1961年到2010年期间，SSA地区的每公顷的粮食生产能力远低于2010年世界的平均水平，绝大多数作物的单产介于世界平均水平的1/2到1/3（表1）。总之，当全世界其他地区由于使用改良的作物品种和矿质营养而大幅提高粮食安全保障水平时，SSA地区仍然停留在主要依靠农业用地面积的增加和最少的矿质养分的投入来提高总产。

主要依靠面积扩大提高粮食总产的情况，带来几个人们不愿看到的后果。在农场层次，人们认为单产低下是因为单位收获面积的产量投入大。因为这样的较低的竞争力，非洲的农产品贸易量占全世界的份额，从1965年的8%下降到2000年微不足道的3%。产量低下也对其他的生态系统带来威胁：据Henao and



Map 1. Major soil types of Africa.

Source: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/library/maps/africa_atlas/images/COVER.pdf

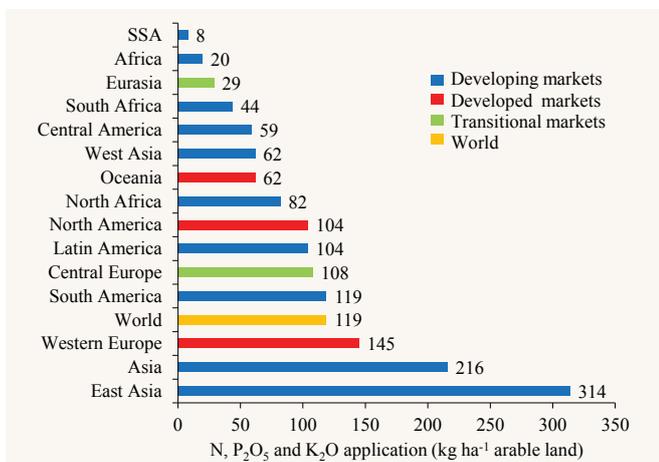


Fig. 3. Fertilizer use (kg ha⁻¹) for various regions and markets, 2010. Source: IFDC, derived from FAOSTAT.

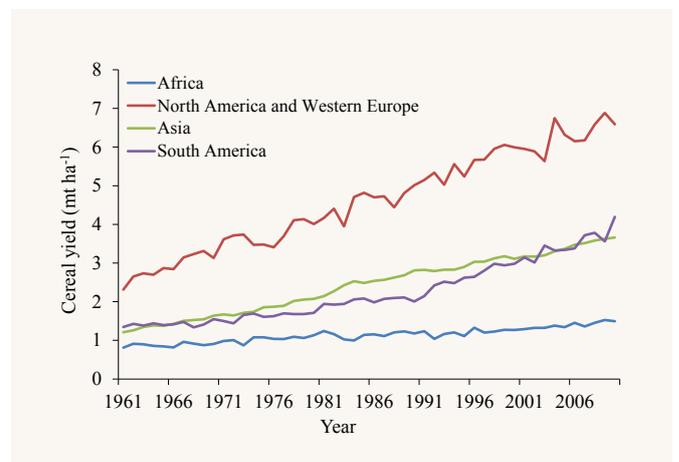
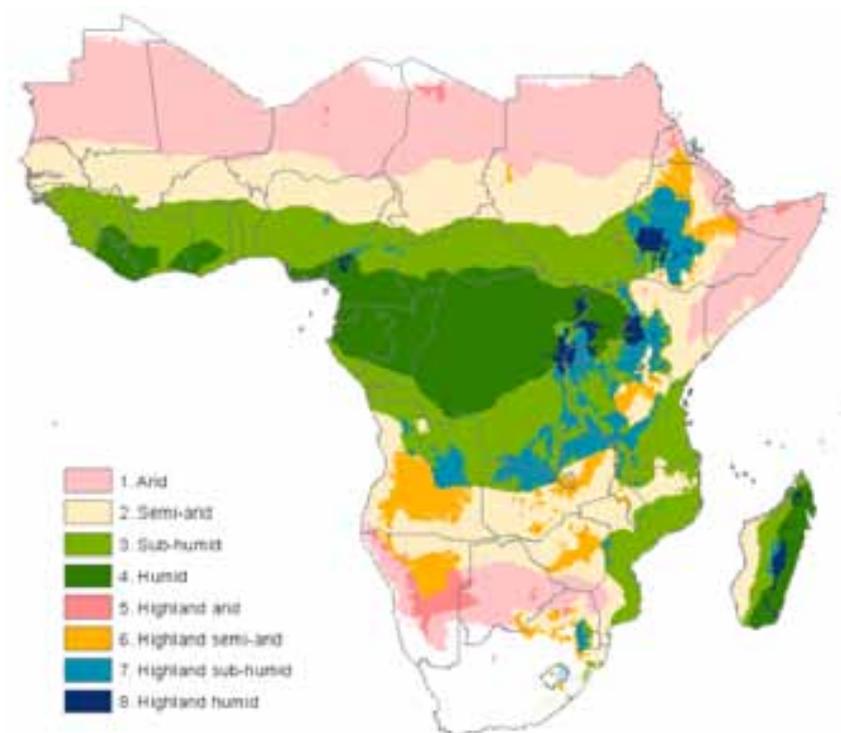


Fig. 4. Cereal yields in various parts of the world, 1961-2010. Source: Compiled from FAOSTAT.

Baanante(2006)估计, 因为农业用地的扩展, 非洲每年有5万公顷的森林面积和6万公顷的草地消失。另外, 不断缩短的休耕期, 不利于土壤肥力的恢复再生。低下的生产能力也降低了土壤上植被的覆盖度和水分的蒸腾作用, 其结果是通过土壤侵蚀和淋洗导致土壤养分损失量增加, 这样, 就形成了一个螺旋式的向下的土壤肥力变化的趋势。Henao and Baanante(2006)曾经警告说, 9500万公顷农用地 (占整个非洲农用地的40%) 呈现土壤退化的趋势, 需要大量的投入恢复这些土壤的生产能力, 这样做被证明在经济上就非常不合算。

非洲的养分流失

要监测像非洲这样大尺度的每年养分的流失量是一项巨大的工程, 需要考虑土壤类型 (地图1)、农业生态类型区 (地图2)、地形和土地利用



Map 2. Agro-ecological zones for sub-Saharan Africa based on FAO/IIASA methodology. Source: HarvestChoice/IFPRI, 2009.

Table 1. Changes in yield, land area and production for various commodity groups in SSA from 1961-2010, and world average yields for commodity groups, 2010.

Commodity group	Year	Yield <i>mt ha⁻¹</i>	Area <i>ha</i>	Production <i>mt</i>	Change 2010 relative to 1961			As proportion of food crop area
					Yield	Land area	Production	
					-----%-----			
Cereals	SSA 1961	0.73	39,400,000	28,740,000				54
	SSA 2010	1.22	81,070,000	98,520,000	167	206	343	49
	World 2010	3.23						
Oil crops	SSA 1961	0.25	13,640,000	3,370,000				19
	SSA 2010	0.33	24,190,000	7,900,000	132	177	235	15
	World 2010	0.63						
Roots and tubers	SSA 1961	5.7	8,070,000	46,340,000				11
	SSA 2010	9.0	22,810,000	206,190,000	157	283	445	14
	World 2010	13.9						
Pulses	SSA 1961	0.48	6,090,000	2,940,000				8
	SSA 2010	0.61	20,370,000	12,470,000	127	334	425	12
	World 2010	0.88						
Fruits	SSA 1961	5.05	3,420,000	17,270,000				5
	SSA 2010	6.30	8,640,000	54,420,000	125	253	315	5
	World 2010	10.92						
Vegetables	SSA 1961	4.68	1,470,000	6,890,000				2
	SSA 2010	5.90	4,960,000	29,240,000	126	337	426	3
	World 2010	18.98						
Tree nuts	SSA 1961	0.61	330,000	200,000				0.5
	SSA 2010	0.72	2,130,000	1,540,000	117	645	758	1.3
	World 2010	1.33						
Total			72,420,000					
			164,170,000			227		

Source: Compiled from FAOSTAT.

方式。基于Stoorvogel and Smaling (1990, 1993, 1998)对土壤养分剥蚀的研究成果, Henao and Baanante (2006)对非洲的土壤养分平衡状况进行了评价。输入包括化学肥料、有机的作物秸秆和农家肥、氮素固定和大气沉降, 而输出包括土壤侵蚀、淋洗、挥发和作物收获带走的养分。

表2 (引自Henao and Baanante, 2006)显示了非洲多种农业生态类型区养分流和养分损失的主要途径。在非洲大部分地区作物产量低下的情况下, 作物收获和秸秆带走的养分占养分损失的大约34%的N素、87%的P素和73%的K素。这个计算没有包括地中海地区和北部非洲地区, 这些地区不属于SSA区域, 而且肥料的使用量高。土壤侵蚀占另外43%的氮素损失。随着合理施肥带来作物产量的提高, 可以预计, 由于侵蚀导致的养分损失的占比将会减少而作物收获和秸秆部分带走的养分将会增加。

肥料使用量的增加, 提高了作物的产出(籽粒和生物量), 从而带来了除单产增加以外的好处。因为在SSA地区作物生物产量是很重要的饲料和燃料来源, 增加的生物

量产量, 使更多的秸秆才可能在田间留下或返回到田间。作物秸秆覆盖对保护表土流失, 保持土壤有机质和作物养分循环特别是钾素的循环, 都非常重要。

非洲土壤有效钾含量

考虑到非洲环境条件的复杂性, 没有人能够对非洲土壤的钾素状况从总体上进行说明, 但我们又必须了解非洲土壤钾素的有效性的复杂变化。要了解土壤钾素状况, 没有简单的土壤测试方法, 但是醋酸铵浸提的交换性钾(这种方法测得的钾含量和Mehlich3和或者稀释的酸溶液浸提等其他方法的结果高度相关)是推荐的常用方法。Booker热带土壤手册(1984)提供了不同土壤有效钾含量值所表征意义的解读。土壤缺钾的限量标准马拉维是<0.20 meq/100g土。美国是<0.25 meq/100g土, 新西兰是<0.50 meq/100g土, 英国是<0.15 meq/100g土。对津巴布韦砂质、砂壤质和红棕粘质土壤来说, 缺钾标准分别为0.05、0.10、0.15 meq/100g土。Maria and Yost (2006)报道, 莫桑比克砂质、壤质和粘质土壤缺钾的标准分别为0.1、0.2、0.4 meq/100g土。

Table 2. Estimated nutrient losses and gains in various agro-ecological zones of Africa.

Region/nutrient	Annual nutrient losses (2002-2004 average)					Annual nutrient gains and inflows (2002-2004 average)						Total
	Harvest	Residues	Leaching	Gaseous	Erosion	Manure	Deposition	Fixation	Sediments	Fallow	Fertilizer	
----- kg ha ⁻¹ yr ⁻¹ -----												
Humid Central												
N	-11.3	-3.4	-4.7	-9.3	-18.8	0.2	2.8	4.2	0.1	1.9	1.1	-37.2
P ₂ O ₅	-4.2	-2.9			-1.4	0.1	0.9		0.1	1.9	0.8	-4.7
K ₂ O	-10.1	-3.7	-4.4		-2.9	0.3	2.4		0.1	1.9	1.1	-15.3
Humid and Sub-Humid West												
N	-16.3	-6.1	-3.2	-4.6	-18.8	1.4	3.6	4.7	0.8	0.7	2.9	-34.9
P ₂ O ₅	-6	-2.7			-1.4	0.7	1.3		0.3	0.7	1.5	-5.6
K ₂ O	-12.6	-6.2	-3.3		-2.9	2.8	2.8		0.8	0.4	1.1	-17.1
Mediterranean and Arid North												
N	-31.5	-7.6	-2.7	-4.3	-17.3	0.9	1.7	3	0.7	1.3	41	-14.8
P ₂ O ₅	-9.1	-3.1			-1.3	0.5	0.6		0.3	1.3	10.2	-0.6
K ₂ O	-13.3	-3.3	-3		-2.1	0.8	1.3		0.4	0.7	5	-13.5
Sub-Humid and Mountain East												
N	-17.4	-6.5	-3.6	-5.2	-13.5	1.2	2.7	3.6	0.6	0.6	7.3	-30.2
P ₂ O ₅	-6.9	-3.2			-1	0.6	1		0.3	0.6	3.1	-5.5
K ₂ O	-13.5	-6.2	-2.7		-2.1	1.4	2.2		0.5	0.3	0.9	-19.2
Sudano-Sahelian												
N	-13.5	-3.7	-4.2	-7.3	-18.4	1.7	2.4	4.2	0.7	1.4	3	-33.7
P ₂ O ₅	-5.3	-2.1			-1.4	0.8	0.8		0.2	1.4	0.7	-4.9
K ₂ O	-10	-3.8	-4.8		-2.5	3.1	1.8		0.4	0.7	0.5	-14.6
Sub-Humid and Semi-Arid Southern												
N	-24.4	-6.6	-5.3	-7.6	-19	1.6	3.1	4.9	0.7	1.7	23.8	-27.1
P ₂ O ₅	-10.5	-4.4			-1.5	0.6	0.1		0.1	1.7	8.8	-5.1
K ₂ O	-17.5	-6.6	-3.8		-3	3	2.5		0.6	0.8	7.2	-16.8

Source: Summarized from Henao and Baanante, 2006.

但是,钾的有效性不是土壤交换性钾的唯一功能。土壤交换性钾含量为0.2meq/100g土,表示交换性钾含量为78ppm,相当于在土壤容重为1.3g/cm³的20cm的表土中含K量为203kg。这个含量非常低,种植玉米产量为5t/hm²并移出秸秆的情况下,2~3年后土壤有效钾就会被消耗殆尽。土壤中钾素有交换性钾和不稳定性钾(缓效钾)。缓效钾为土壤储备性钾,主要存在蒙脱石和伊利石这样的2:1型粘土矿物中。缓效钾缓慢释放,在土壤钾素的供应中起到缓冲作用。这些粘土矿物通常存在浅风化土壤中。因为这种缓冲性,有些土壤类型可以种植数十年而不耗竭土壤钾素,特别是在将含有大量钾素的作物秸秆进行还田的情况下,更是如此。与此对应的是,土壤N和P库通常会很快被消耗殆尽,特别是当种植谷类作物时更是如此。有时作物在不施钾的情况下,施N和施P都有效,反之,却不尽然。在SSA普遍施肥不足的情况下,较低的产量表示移出的K素少。当然,也有一些值得关注的例外。这点我们会在下面进行详尽的讨论。

非洲土壤的有效钾含量范围非常宽。Kanyanjua *et al.* (2006)发现,肯尼亚的土壤交换性钾含量范围介于0.2meq/100g土至1.8meq/100g土之间。他们还发现,施用NP肥料玉米连作的情况下,在土壤含钾量较低的土壤上,施钾已经开始显效。在莫桑比克,Geurtz and Van den Berg (1998)通过大量的土壤样品测试表明,低活性强酸土(Acrisols)、红沙土(Arenosols)、铁铝土(Ferralsols)、低活性淋溶土(Lixisols)和淋溶土(Luvisols)土壤有效钾平均含量分别为0.98, 0.26, 0.36, 0.53、0.83 meq/100g土。Maria and Yost (2006)也有类似的发现,在莫桑比克10个生态类型区中的4个采集土壤样品分析,其K素水平介于0.20~1.7meq/100g土。在尼日利亚,Ataga (1973)发现,种植棕榈树的砂质酸性土壤的钾素含量非常低(0.03~0.11meq/100g土),但基底杂岩发育形成的土壤的钾含量较高(0.10~0.32meq/100g土)。Acquaye(1973)发现,加纳土壤有效钾含量从其砂岩发育土壤的0.12meq/100g土,到基性岩发育土壤的0.32meq/100g土(平均值)。他们还发现,相比其他几种度量钾素供应状况的指标来说,植物钾素吸收和交换性钾的相关性最好。在坦桑尼亚,Hartemink *et al.* (1996)发现,铁铝土的K素水平通常低于0.10meq/100g土,而低活性强酸土的K素水平稍高些,这些土壤上在森林休耕和连续种植剑麻的次生林覆盖的条件下,土壤的钾素水平低于0.5 meq/100 g土。

没有或者只有很低的投入而且作物连作的条件下,土壤肥力指标常常都表现为下降趋势。在绝大多数情况下,土壤有机质含量、土壤pH值和交换性盐基(Ca、Mg、K)通常一起下降。包括坦桑尼亚的Tanga地区在内的一些土

壤样品土壤肥力指标表现下降趋势(Hartemink, 1997),那里的铁铝土和低活性强酸土的土壤有机质含量、土壤pH值和交换性盐基,从1950年代和1960年代到1980年代和1990年代,都下降的非常显著。Hartemink发现,虽然土壤钾素一直表现下降,但一般来说,雏形土(Cambisols)和淋溶土(Luvisols)的土壤肥力下降非常少。Moultapa(1973)指出,土壤钾素缺乏最严重的是在潮湿的热带间辐合区热带草原地带的砂质土壤上。他进一步指出,土壤缺钾常常在湿润的森林地区,但只在经过多年的连续耕作后出现,同时,在半湿润地区的雏形土和淋溶土很少发现土壤严重缺钾的情况。Mukashema(2007)发现,在卢旺达高地的Gishwati流域不同的土地利用方式下,经过25年的时间,土壤肥力指标表现下降,其中农业用地比森林和草地下降更快,而砂质酸性土壤肥力退化比火山灰土下降更快。Haefele *et al.* (2004)研究了塞内加尔土壤肥力变化,发现潜育土(Gleysol)和变性土(Vertisol)上经过16季(一年2季)的灌溉水田,在只施用N素肥料时,其土壤P素急剧下降,但土壤交换性钾下降较慢。他们得出结论认为,这些土壤钾素的缓冲能力导致了这样的结果,即使不施用钾肥这些土壤还可以在几十年内持续保持这样的产量水平。

市场导向策略加速了肥料的应用

表面上非常明显但常常被忽视的事实是,农民只有在施用肥料可以获得收益的时候才能应用这种肥料。SSA地区的绝大多数农民手段更有限,他们更倾向于投资那些回报和风险达到平衡的那些机会。

推销养分投入时常常有个趋势,总是引导农民将肥料投向那些广泛种植的高粱或者玉米等谷类作物。但是,这些作物并不能总是代表肥料投入的最好的回报。特别是在那些粮食储藏能力较低的国家,几年的好收成,大量的肥料应用导致粮食丰收,就会抑制粮食价格。如果农民不能和特定的市场机遇对接(比如面粉厂或者加工企业),或者没有可能在大的仓库储藏他们的农产品,那么就会导致很低的收成,甚至赔本。

在很多情况下,只有很少的作物可以获得施肥投资的最好的收成。举例来说,花生和大豆等豆科作物对肥料投入要求较低(常常只需要P、K肥料),因为他们可以固定一定的氮素。但是,如果他们的价值高的话,收益也是不错的。整个非洲的农民将肥料都投向了蔬菜,因为蔬菜常常可以使农民获得施肥带来的良好的收益。

另外一个促进肥料使用的因素是将肥料混合起来。在非洲最能获得的肥料是尿素、磷酸氢二铵(DAP)和NPK混合肥料(NPK比例通常为15:15:15或17:17:17)。没有适合特定作物的配方肥料。但是,总部设在非洲的肥料企

业正在逐步增加生产适合特定的蔬菜、高粱、谷类作物和块茎类作物的肥料。现在,一些混合肥料中包括中量和微量元素,以克服在很多情况下因为缺乏中微量元素限制NPK肥料施肥效应的问题。直到最近,在很多非洲国家的零售商那里是买不到中微量元素肥料的。像微量元素Zn和B一样,S是一种普遍缺乏的营养元素。解决这种问题,是生产小到1kg一包的适合特定作物的这种肥料。小包装使农民有可能在较小的经济投入风险的情况下,看到不同配方的肥料的施肥效应。

将肥料和其他农业投入品一起综合考虑,也可以产生更大的协同利益。改良品种的应用是获得最高产量的一项关键因素。很少的杀虫剂的投入常常可以成倍地提高豆科作物的单产。除草剂和少耕结合,可以极大地减轻耕作成本和野草带来的压力,特别是在劳动力非常紧张的集约化程度高的农业生产系统下更是如此。处理病虫害和野草危害,可以减小农民的风险,提高肥料投入带来良好收益和产量的可能性。

市场导向提高生产能力的方法需要功能价值链,这是竞争性农业系统和企业(CASE)的方法(Mattman et al., 2011)。CASE的一个非常重要的元素是农业商业的集群。一个集群由所有构成价值链的所有参与者构成,他们围绕一种特定的商品,共同探求一种商业机会。商业集群的合作伙伴通常包括农民及其所属组织、投入品供应商、金融服务商、产后价值提升者(加工企业、仓储、包装者)、市场主体(贸易商、运输公司和买主),以及商业开发服务机构。这些服务机构通过技术性咨询服务提高整个体系的能力。CASE的策略在西非IFDC的“数以万计(From Thousands to Millions)”项目(2006-2010)中成功地得到应用。该项目成功地将大约70万农民的肥料使用量提高了100kg/hm²。其结果是,提高了折成50万t谷物的产量,农民收入提高了50%。

未来肥料需求量预测, 以及结论

Henao and Baanante (2006) 估计, SSA地区每年需要670万吨的N、P、K (N+P₂O₅+K₂O), 以使土壤养分矿化发生逆转和有力促进作物增产。这一数据是SSA地区2004年NPK消费量的4.8倍。参加非洲肥料论坛(2006年在尼日利亚的阿布亚举行)的代表们认为, 提高施肥量是非洲面临人口增长压力, 提高作物产量和阻止土壤肥力下降的重要手段。非洲绿色革命之肥料阿布亚宣言(Abuja Declaration on Fertilizer for an African Green Revolution, NEPAD, 2006), 设定了一个到2050年非洲肥料用量达到50kg/hm²的目标。这一目标意味着, SSA地区的施肥量要在现在的基础上增长5倍多。

非盟(African Union)同意阿布亚宣言的原则精神, NEPAD(非洲发展新伙伴计划, New Partnership for Africa's Development)对非洲大陆逐个国家这方面取得的进展进行监测。市场导向的方法显示, 虽然不可能在2050年实现, 但施肥量达到50kg/hm²的目标还是可以在很大范围内实现的。由此引起的一个问题是, 如果施肥量达到这一目标后, SSA的产量可以达到什么水平。

就像阿布亚宣言展望的那样, 对SSA地区来说, 要将该地区的粮食安全提高到一个较高的水平, SSA必须和中美洲、西亚、北非、中亚和南非等国家和地区一样, 生产上达到更高的产量水平。这些地区N、P、K的平均用量达到53 kg/hm²。总体上看, 这些地区谷物作物、豆类作物、油料作物、根茎类作物和块茎类作物的产量为SSA地区的2倍。这样, 如果阿布亚宣言设定的施肥量目标能够达到, 可以预期, SSA地区的作物产量将翻倍。产量翻倍的话, 将有助于减轻扩大耕种面积的冲动, 极大地提高粮食安全水平和降低生产成本, 提高SSA地区农产品在世界市场的竞争力。但是, 值得注意的是, 据预测, SSA地区的人口到2050年将是现在的3倍。到那个时候, 如果要保证本地区粮食自给的话, N、P、K肥料的使用量应该为100kg/hm²。扩大耕地面积对保障粮食安全也是一个方面, 但即使有新开垦的耕地, 这些耕地上的肥料用量也将不得不达到现在的平均水平。

结论是, SSA地区必须尽快提高肥料使用量, 以扭转环境退化和养活不断增长的人口。SSA可以从拉丁美洲和亚洲国家吸取成功的经验, 这些国家具有相似的土壤类型、农业生态类型和种植制度, 但他们在过去的40年里取得了提高产量的成就。土地扩展-粗放型扩大化模式, 不是通过提高农业利用强度增加产量的备选方案。因为这种方式导致农业生产的不可持续、较低的生产能力和导致其产品在国际市场上缺乏竞争力的较高的生产成本。

鼓励肥料施用, 需要通过市场导向的方法加以促进。农业商业集群已经被证明在开发利益价值链, 和鼓励千千万万的小规模种植农户通过施用对作物增产有重要作用的肥料来提高生产能力等方面非常成功。非洲的混合肥料供应商对这些商业集群非常重要, 他们生产特定作物和特定土壤条件的专用型混合肥料, 以获得施肥的利益最大化。改良品种和植物保护产品等另外一些投入品, 对提高生产能力也非常重要, 是肥料的重要补充, 可以提高施肥的效益和降低施肥风险。

参考文献

- Acquaye, D. K., 1973. Factors Determining the Potassium Supplying Power of Soils in Ghana. Potassium in Tropical Crops and Soils, Proceedings 10th Colloquium, International Potash Institute, Abidjan. p. 51-69.
- Ataga, D.O., 1973. Release and Fixation of Potassium in Some Soils Supporting the Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Nigeria. Potassium in Tropical Crops and Soils, Proceedings, 10th Colloquium, International Potash Institute, Abidjan. p. 131-141.
- Booker Tropical Soil Manual: a Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics. Edited by J.R. Landon. London and New York: Longman (1984), pp. 450.
- Ezui, K.S., A. Mando, L. Franke, J. Sogbedji, B.D.K. Ahiabor, F.M. Tetteh, B.H. Janssen, and K.E. Giller. 2012. Improving Fertilizer Use Efficiency in Cassava Production Systems of West Africa.
- FAO, 2010. The State of Food Insecurity in the World: Addressing Food Insecurity in Protracted Crises. FAO, Rome. 58 p.
- FAOSTAT. 2012. <http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD>.
- Geurtz, P.M.H., and M. Van den Berg. 1998. A Simple Agro-Ecological Zonation for Fertilizer Recommendations in Mozambique. Soil Land Use and Management 14:136-141.
- Haefele, S.M., M.C.S. Wopereis, A.M. Schloebom, and H. Wiechmann. 2004. Long-Term Fertility Experiments for Irrigated Rice in the West African Sahel: Effect on Soil Characteristics. Field Crops Research 85:61-77.
- Hartemink, A.E. 1997. Soil Fertility Decline in Some Major Soil Groupings Under Permanent Cropping in Tanga Region, Tanzania. Geoderma 75:215-229.
- Hartemink, A.E., J.F. Osborne, and Ph. A. Kips. 1996. Soil Fertility Decline and Fallow Effects in Ferralsols and Acrisols of Sisal Plantations in Tanzania. Experimental Agriculture 32:173-184.
- HarvestChoice/IFPRI. 2009. Agro-Ecological Zones for sub-Saharan Africa based on FAO/IIASA Methodology: All Tropics. <http://harvestchoice.org/data/aez-tropical-8-class>. HarvestChoice/International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- Henaio, J., and C. Baanante. 2006. Agricultural Production and Nutrient Mining in Africa: Implications for Resource Conservation and Policy Development. IFDC, Alabama, USA. 75 p.
- Kanyanjua, S.M., J.K. Keter, R.J. Okalebo, and L. Verchot. 2006. Identifying Potassium-Deficient Soils in Kenya by Mapping and Analysis of Selected Sites. Soil Science 171:610-626.
- Maria, R.M., and R. Yost. 2006. A Survey of Soil Fertility Status of Four Agro-Ecological Zones of Mozambique. Soil Science 171:902-914.
- Mattman, A., V.A. Clottey, A. Diallo, K. Djagni, I. Duniya, Y. Duplessis, K.O. Gyasi, M. Kabore, F. Keita, K. Konda, A. Konlambigue, E. Kpogan, A. Nobre, U. Rudiger, and A.S. Traore. 2011. Competitive Agricultural Systems and Enterprises – A Grassroots Approach to Agribusiness Development in sub-Saharan Africa. Volume I: Reference Framework and Early Experiences. IFDC and CTA, Veenman+, Rotterdam, The Netherlands.
- Moultapa, F. 1973. Soil Mapping in Relation to the Use of Fertilizers in the Humid Tropics. Potassium in Tropical Crops and Soils, Proceedings, 10th Colloquium, International Potash Institute, Abidjan. p. 71-81.
- Mukashema, A. 2007. Mapping and Modeling Landscape-Based Soil Fertility Change in Relation to Human Induction. Case Study: Gishwati Watershed of the Rwandan Highland. MSc thesis, NRM, Enschede, ITC. 55 p.
- New Partnership for African Development (NEPAD). 2006. Abuja Declaration on Fertilizer for an African Green Revolution. <http://www.nepad.org/system/files/Abuja%20Declaration%20on%20Fertilizers%20for%20an%20African%20Green%20Revolution.pdf>.
- Stoorvogel, J.J., and E.M.A. Smaling. 1990. Assessment of Soil Nutrient Depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000, 4 Volumes. Report 28. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, the Netherlands.
- Stoorvogel, J.J. and E.M.A. Smaling. 1998. Research on Soil Fertility Decline in Tropical Environments: Integration of Spatial Scales. Nutrient Cycling in Agroecosystems 50:151-158.
- Stoorvogel, J.J., E.M.A. Smaling, and B.H. Jansen. 1993. Calculating Soil Nutrient Balances at Different Scales: I. Supra-national scale. Fert. Res. 35:227-235.
- UNDP. 2010. Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat, World Population Prospects: The 2010 Revision, http://esa.un.org/unpd/wpp/unpp/panel_population.htm.

该文“非洲的钾肥施用：背景、评价和前景展望”也可以在IPI网站“区域活动/撒哈拉南部非洲”栏目浏览和下载。



研究报告

K⁺转运通过植物细胞膜的分子生物学研究: 我们从模式植物拟南芥和水稻中学到了什么?

Ali Sassi, Imran Khan, Anne-Aliénor Véry and Hervé Sentenac⁽¹⁾

引言

植物中K⁺的含量可高达植物总干重的10%。K⁺即使在高浓度状态下仍具有的与蛋白结构的兼容性使其成为细胞液中含有最高的阳离子。在细胞水平, K⁺发挥着基础作用, 例如阴离子电子平衡、细胞膜极性控制、细胞膨压渗透调节和调控等 (Clarkson and Hanson, 1980; Maathuis and Sanders, 1996)。在植物整株水平, K⁺功能涉及高度复杂和整合性功能, 例如与其参与膨压调控相关的例子, K⁺在向性运动或保卫细胞运动方面发挥作用, 能够促使植物通过调控孔径大小调节叶面气孔的张合。K⁺的这些重要功能或许可以解释为什么对K⁺质膜运输的研究远远超过对其他营养元素离子的研究, 从而造就许多(研究)突破和创新模型, 如爱普斯坦双重机制, 其认为K⁺的质膜运输和许多其他营养元素离子一样, 都包含高亲和力 and 低亲和力运输机制转运活动。

目前我们对K⁺在植物体内转运的认识主要是从对模式植物拟南芥的研究中获得的。无论是在家族结构还是在基因数目上, 似乎涉及K⁺转运的基因家族在高等植物中是高度保守的。然而, HKT家族是个例外, 这个家族内可能含有只在单子叶植物中表达的K⁺通透性基因。这个差异暗示禾本科(单子叶)和双子叶作物对K⁺的摄取和长距离转运是不同的。但是对K⁺通透性HKT转运载体蛋白的认识仍然知之甚少。

根据目前的资料, 拟南芥基因组编码的大约27,000个蛋白中至少有35个与质膜的K⁺转运有关(Mäser *et al.*, 2001), 它们组成了2个K⁺通道蛋白家族: Shaker和TPK, 分别含有9个和6个成员; 2个K⁺转运载体蛋白家族: HAK(或KT、Kup)和KEA, 分别含有13个和6个成员。拟南芥中唯一一个HKT转运载体蛋白家族成员被证明具有Na⁺选择性(Uozumi *et al.*, 2000)。而相比之下, 水稻中多达4个HKT转运载体蛋白家族成员对K⁺具有通透性(Corratgé-Faillie *et al.*, 2010)。Shaker、HKT转运蛋白系统和至少部分HAK和KEA系统都位于细胞膜上, 其中TPK通道系统看起来在K⁺

转运通过泡膜的过程中起着至关重要的作用。本文综述的重点是在细胞膜上激活以及参与K⁺从土壤溶液中的摄取、植物体内转运的K⁺转运蛋白。

本文将介绍目前的植物膜激发和离子转运模型, 并着重阐述应用于植物生物学领域内的一些专业术语; 然后总结目前对于活跃在质膜上的K⁺转运系统分子家族的认识, 包括Shaker K⁺通道蛋白家族以及HAK、HKT和KEA转运载体蛋白家族; 接着对这些系统在植物体中功能作用做简单描述, 包括K⁺被根从土壤中的摄取; K⁺在木质部和韧皮部脉管系统中的长距离运输; K⁺的积累和膨压驱动程序, 如花粉管伸长或保卫细胞运动和蒸腾作用水分散失的调控。

植物体内溶质通过植物细胞膜的激活

早在20世纪60年代和70年代对根部溶质摄取的生理研究, 促使了被动和主动运输概念的产生(Maathuis and Sanders, 1996)。当一个未带电荷的溶质(如葡萄糖)被从外界介质摄取并穿过细胞膜进入细胞, 而这个过程又是逆浓度梯度, 如外界溶质的浓度低于胞液中溶质的浓度, 那么这个转运过程就被称作主动运输。相反, 当顺浓度梯度发生转运则被称为被动运输, 如外界溶质的浓度高于内部溶质的浓度。从能量学角度看, 当溶质是带电的(例如营养元素离子K⁺、SO₄²⁻或NO₃⁻), 那么它通过质膜的转运则不仅取决于它在质膜中的浓度梯度, 而且还有赖于它的电荷梯度, 例如土壤溶质和细胞质的电势差异。

当测量幼根表皮细胞电势时, 我们会发现其电势梯度一般在-50和-250mv之间, 其大小取决于外界离子环境(主要是pH值和K⁺浓度)。摄取为主动运输, 因此当逆离子电势 μ 发生转运时, 就必须直接依靠质膜机制提供的能量,

⁽¹⁾Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes, Institut de Biologie Intégrative des Plantes, UMR 5004 CNRS / UMR 0386 INRA / SupAgro Montpellier / Université Montpellier 2, F-34060 Montpellier Cedex 2, France

正如Nernst公式里描述的 $[\mu = \mu_0 + RT\ln(C) + zF\Psi]$, C代表离子浓度, z代表离子价, Ψ 代表细胞液内的电势, μ_0 , R, T和F代表它们通常的含义, 分别是标准电化学势、理想气体常数、温度和法拉第常数]。与此相反, 顺电化学势的摄取为被动运输。如上所述, 主动运输必需能量, 这由H⁺-泌出ATP酶在细胞膜上的活化提供。这些酶借助ATP水解作用提供的能量将H⁺泵出细胞, 从而导致贯通细胞膜的电势和pH梯度, 从而形成一种由内导向的H⁺电化学梯度。

这种导致H⁺自动重新进入细胞的电化学梯度通过H⁺驱动的共转运系统(参见Mitchell理论)为质膜和活跃的转运蛋白活动提供能量。对于H⁺摄取, 这意味着的H⁺-K⁺同向转运蛋白在细胞膜上活化, 这种同向转运蛋白对H⁺和K⁺都有通透性, 并能在逆电势梯度条件下将H⁺自动重进入系统和K⁺摄取结合在一起。换言之, H⁺-K⁺同向转运蛋白内的H⁺自动回到细胞液和同向转运蛋白内K⁺的运转是一起的, 并且是从外界媒质逆电化学梯度进入胞液的。图1解释了这个质膜能量化和K⁺摄取过程。在被植物摄取的4种主要阳离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺和Na⁺)中, 只有K⁺需要高水平的主动运输活动, 且其被动运输还依赖土壤中K⁺的可利用性; 其他3种离子则都是被动摄取的。

除了主动运输和被动运输这种分类以外, 对机制的分析将转运蛋白分为2类: 通道蛋白和转运载体蛋白(除了泵蛋白以外)(Stein, 1990)。在开放状态下, 通道蛋白可以看成是一个选择性的小孔, 基质离子在不需诱导改变蛋白常规构象的情况下就可以通过这个小孔; 而转运载体蛋白对每一个转运的基质都需要经历一个构象转换的循环过程。在这个经典模型中, 转运载体蛋白将其底物结合到朝向外界溶质的位置, 然后经历一个重整过程以允许结合位点和底物能够进入胞液, 并在胞液中底物溶解; 而后发生一个新的构象变化以允许结合位点回到胞膜的其他位置, 再次面对外界溶质。

因此, 转运载体蛋白的最高转运速度(高至10⁴转运事件/秒/蛋白)是远低于通道转运速度的(高至10⁶转运事件/秒/蛋白)。从能量标准方面考虑, 转运蛋白可被分为独立转运载体蛋白和同向载体转运蛋白。独立转运载体蛋白顺电化学梯度转运基质, 因此介导的是被动运输; 而同向转运载体蛋白(同向转运子或逆向转运蛋白)能够协同另一个离子逆电化学梯度转运基质(如H⁺-K⁺同向转运蛋白中的H⁺)。

在植物中, 对K⁺介导转运通过质膜研究最多的蛋白是来自Shaker家族的K⁺通道蛋白, 在大多不同类型的细胞中, 这些通道蛋白介导了占主导地位的K⁺膜电导的被动运

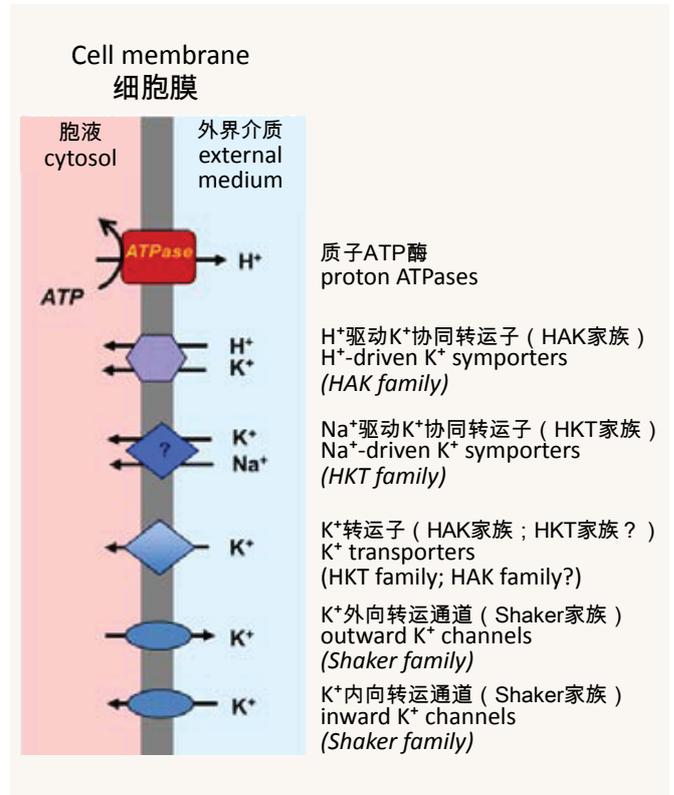


图1 膜激活和K⁺转运通过质膜机制

输(Lebaudy *et al.*, 2007)。相对了解较少的、由H⁺-K⁺同向转运蛋白组成的HAK家族在K⁺主动摄取中起着重要的作用(Gierth and Mäser, 2007)。此家族含有2类转运载体蛋白, 第一种存在于单子叶和双子叶植物中, 只对Na⁺具有通透性; 第二种只存在于单子叶植物中, 对Na⁺和K⁺都具有通透性(Corratgé-Faillie *et al.*, 2010)。对K⁺和阴离子Cl⁻同向转运载体蛋白组成的KEA家族仍然研究较少(Gierth and Mäser, 2007)。下文总结了目前对这4个家族的认识。

Shaker K⁺通道

植物中最先被鉴定的营养元素离子转运系统是拟南芥中的2个Shaker K⁺通道蛋白: AKT1和KAT1(分别是拟南芥K⁺转运和K⁺拟南芥的缩写), 它们是在1992年通过对一个酵母(酿酒酵母)突变体进行功能互补克隆的, 这个突变体有K⁺摄取缺陷, 并且不能在含K⁺的生理培养基上生长(Anderson *et al.*, 1992; Sentenac *et al.*, 1992)。首先将cDNA文库转入酵母突变细胞, 然后涂抹到低K⁺琼脂糖培养基上, 挑选生长速度较快的克隆并对其转化载体进行纯化和测序。从推导的多肽发现, 它们无论是在序列上还是在结构上都与动物K⁺通道蛋白相似, 这些蛋白组成了所谓的Shaker超家族(Jan and Jan, 1997)。

Shanker基因编码的多肽含有6个跨膜区,例如6个(20个氨基酸的)疏水区,每个区都横跨细胞膜。第四个跨膜区含有一个活跃的带电氨基酸,这个氨基酸充当着一个电位感应器,从而使通道开关对电压敏感,此跨膜区感受跨膜电势梯度的变化而在细胞膜内运动,导致蛋白构象变化以帮助通道孔的开与关。位于第5和第6跨膜区有一个高度保守的质膜环-P区组成了离子传导孔选择性滤膜的一部分。植物Shaker多肽疏水核的下游有一个大的胞质区,由多个结构域组成,包括一个推测的环核苷酸结合域。在多数Shaker通道蛋白中,这个胞质区还含有一个锚蛋白结构域,这个结构域含有一个调控蛋白结合位点。应当注意的是,单独一个Shaker多肽并不能形成一个功能通道。事实上,通道系统有一个同源四聚体结构,这个结构或者由四个同一个基因编码的Shaker多肽组成,或者由不同基因编码的Shaker多肽组成。此异聚化过程导致功能多样性(例如膜电势敏感性)的增加,换言之,植物可以把一定数目的Shaker基因组成许多不同类型的通道系统。

模式植物拟南芥中共发现9个Shaker基因,其中5个基因KAT1、KAT2、AKT1、SPIK和AKT6主要参与K⁺转运通过细胞膜,2个基因(SKOR和GORK)参与K⁺泌出细胞膜,1个基因(AKT2)编码一个通道蛋白能让K⁺摄取和泌出,1个基因(AtKC1)编码通道蛋白调控亚基,影响异源多肽通道对电势的敏感性(例如对跨膜电势梯度的敏感性)(Lebaudy *et al.*, 2007)。转运蛋白通过(摄取和泌出)Shaker通道的方向取决于通道对电势的敏感性,通道感受跨膜电势的超极化激活而调控的K⁺摄取,在电化学分析上这叫做内向性(或向内整流)通道。相反,通道感受跨膜电势的去极化激活而调控的K⁺泌出,叫做外向性(向外整流)通道。

种间比较结果显示,Shaker基因家族结构在高等植物中无论是基因数目(例如,拟南芥中9个,水稻中11个,葡萄中11个)还是通道类型(内向型和外向型)都比较保守。这种保守性有利于将从经典模式植物(拟南芥和目前低一层次的水稻)中获取的(对Shaker基因)基本认识转移至其他物种和作物。

HAK转运载体蛋白

植物中的HAK(其他作者也称作KT或KUP)家族基因是通过序列同源性方法获得的,包括细菌K⁺摄取转运载体蛋白基因(KUP)和真菌高亲和性K⁺转运载体蛋白基因(HAK)(Santa-María *et al.*, 1997; Rodríguez-Navarro, 2000; Gierth and Mäser, 2007)。

对这些转运蛋白的结构仍然知之甚少(图3),疏水性

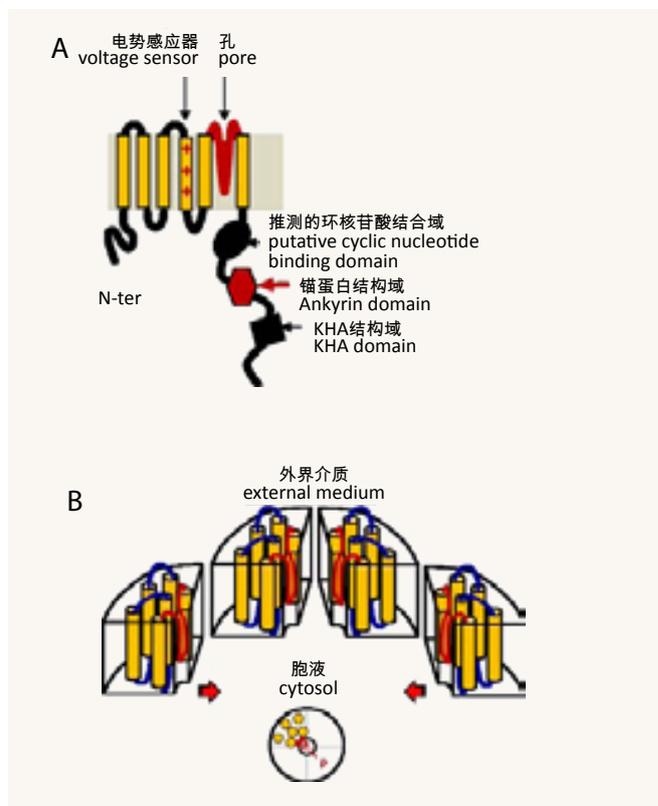


图2A Shaker基因编码的多肽含有6个疏水跨膜区(在图中以黄色标示)。第四个跨膜区上含有一个活跃的带电氨基酸,这个氨基酸充当着一个电位感应器。P结构域(红色)位于第5和第6跨膜区。胞质区由多个结构域构成。包括一个推测的环核苷酸结合域(黑色),在大多数Shaker通道中还含有一个锚蛋白结构域(红色),这个结构域含有一个调控蛋白结合位点。锚蛋白结构域的下游有一个KHA结构域,参与通道四聚化过程(Daram *et al.*, 1997)。

图2B 由4个Shaker多肽构成的时聚化结构。

分析提出转运载体蛋白含有10个跨膜区和1个位于第二、第三跨膜区的长胞质环(Gierth and Mäser, 2007)。到目前为止在转运载体蛋白上还没有发现任何与离子传导相关的结构。

植物中这些系统的作用并不十分完全清楚,特别是看起来当杂合转运蛋白转入爪蟾卵中表达时在细胞膜上并不起作用。而在K⁺摄取缺陷酵母或大肠杆菌突变体中的表达能更好的鉴定属于I类和II类的HAK/Kup/KT家族成员。也有人提出一些转运载体蛋白在μM浓度水平也能在高亲和力K⁺转运过程中发挥作用,而另一些在毫克K⁺浓度范围内也能发挥重要作用。在植物界,有证据显示高亲和力HAK/Kup/KT成员在低K⁺条件下,通过接到H⁺-K⁺同向转运载体蛋白活动,参与根部K⁺主动运输(Santa-María *et al.*, 1997 & 2000; Gierth and Mäser, 2007)。拟南芥HAK5基因很有可能是这种情况(Gierth *et al.*, 2005)。

HKT转运载体蛋白

植物HKY转运载体蛋白与真菌Trk和原核生物KtrB和TrkH转运载体蛋白相关(Durell and Guy, 1999 Rodríguez-Navarro, 2000)。原本认为真菌和原核生物中此类超家族可作为 $H^+ - K^+$ 或 $Na^+ - K^+$ 同向转运载体蛋白或 K^+ 独立转运载体蛋白起作用。在真菌中, Trk转运载体蛋白作为 K^+ 摄取的重要参与者, 在微摩尔至亚毫克水平, 或者至少在中性和pH基准水平, 都能发挥作用(Rodríguez-Navarro, 2000)。由测序分析形成的一个假说认为这些转运载体蛋白是由细菌 K^+ 通道蛋白进化而来的, 具有一个由4个随机重复结构域构成的跨膜疏水核, 每一个随机重复结构域都含有一个跨膜结构域, 后面是1个P结构域和另一个跨膜区。四个P结构域排成一列构成了中央孔(Durell and Guy, 1999) (图4)。

系统发生学和功能分析发现了2个植物HKT转运载体蛋白亚家族, 第一个存在与单子叶和双子叶植物中, 且只对 Na^+ 具有通透性; 第二个目前为止只发现存在于单子叶植物中, 对 Na^+ 和 K^+ 都有通透性。这里也应当注意HKT家族在双子叶植物中的数目看起来要比在单子叶植物中的少, 例如在拟南芥和杨树中都只有1个, 相对而言, 在水稻和每个小麦染色体组中有10个 (Corratgé-Faillie *et al.*, 2010)。

只对 Na^+ 有通透性的HKT转运载体蛋白已被证实有助于提高植物对盐的适应性。转运载体蛋白在植物脉管系统中表达降低了 Na^+ 从根到叶子的转运, 从而降低了叶片中 Na^+ 的含量。HKT转运载体蛋白促进植物耐盐的适应性已在单子叶和双子叶植物中被证实。

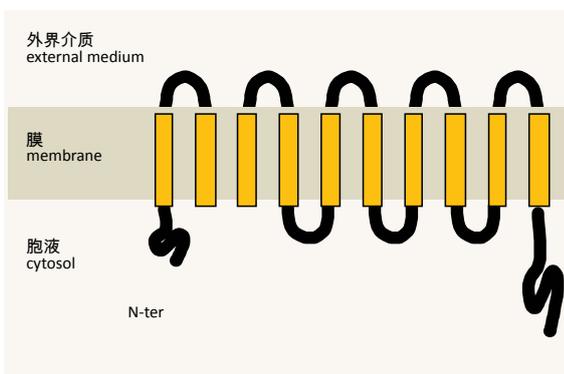


图3 通过序列同源性发现了细菌 K^+ 摄取转运子基因 (KUP) 和真菌高亲和性 K^+ 转运载体基因 (HAK) 在植物的同源基因KUP/HAK/KT转运载体蛋白。根据疏水性分析, 它们可能含有10个跨膜区 (黄色标记) 和1个位于第二、第三跨膜区的长胞质环。根据基因组序列分析, 在拟南芥中发现了13个HAK基因, 水稻 (*Oryza sativa*) 中发现了26个 (Mäser *et al.*, 2001; Amrutha *et al.*, 2007)。进化分析表明植物KUP/HAK/KT家族可分4类 (Bañuelos *et al.*, 2002)。

对 Na^+ 和 K^+ 都具有通透性的HKT转运载体蛋白目前了解仍然较少, 因此, 此类转运载体蛋白只在单子叶植物中表达这一事实的原因还不清楚。此类HKT转运载体蛋白已被证实当在异源系统中表达时能够充当 $Na^+ - K^+$ 同向转运载体蛋白的作用, 因此能够介导高亲和力的 K^+ 主动摄取 (Rubio *et al.*, 1995; Haro *et al.*, 2005)。事实上外界溶液中可利用 K^+ 的减少会导致此类HKT转运载体蛋白在根中表达的增加, 这进一步支持了HKT转运载体系统参与高亲和力 K^+ 主动摄取的假说。然而, 到目前为止看起来所有试图鉴定植物中 $Na^+ - K^+$ 同向转运载体蛋白活动的努力都以失败告终。因此, 所有与这些系统活动相关的研究, 以及单子叶和双子叶植物HKT家族基因数目和成员类型差异的研究等都是最令人向往的, 属于前沿科学研究。

KEA逆向转运载体蛋白

鉴于与细菌KEA蛋白的同源性, 植物KEA蛋白 (钾离子交换逆向转运载体蛋白) 被认为是以 H^+ / K^+ 逆向转运载体蛋白作用方式运转 (Yao *et al.*, 1997)。在拟南芥中发现6个KEA基因, 但到目前为止其生理功能仍然不详 (Mäser *et al.*, 2001)。在大肠杆菌中, KefB和KefC介导的 K^+ 流出受谷胱甘肽的负调控。在植物KEA1-3转运载体蛋白中, 谷胱甘肽结合袋并不显著保守, 这暗示植物KEA1-3转运载体蛋白可能以不同的方式进行调控 (Gierth and Mäser, 2007)。也有人提出 H^+ / K^+ 逆向转运载体蛋白在质膜上可能通过参与木质部汁液 K^+ 主动泌出或通过将 K^+ 上载至液泡或者其他酸性隔间调控 K^+ 体内平衡中发挥重要作用。

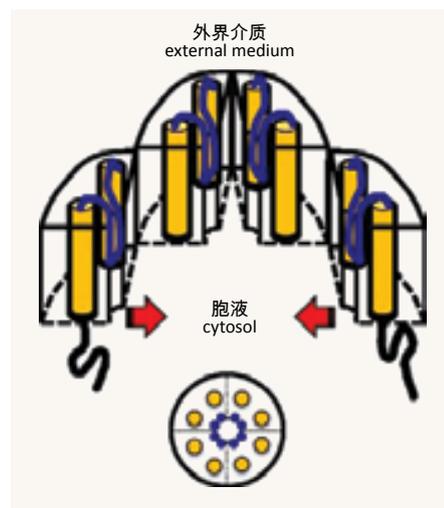


图4 推想的HKT转运子拓扑结构是为整个HKT/(真菌) Trk/(细菌) KtrB超家族中推想的, 由4个连续的MPM结构域组成, 每一个含有一个跨膜区 (黄色), 接着是P结构域 (绿色), 然后是另一个跨膜区 (黄色), 这4个P结构域排成一列形成中央孔。

根对土壤溶液中K⁺的摄取

根据拟南芥中获得的信息发现了2个与根部K⁺摄取有关的系统:可能由Shaker AtHAK1通道亚基控制的AKT1 Shaker通道系统和AtHAK5转运载体蛋白系统(图5)。在其他物种中如水稻也发现了AKT1和AtHAK5的近同源体(Bañuelos *et al.*, 2002; Fuchs *et al.*, 2005; Amrutha *et al.*, 2007)。

在拟南芥编码基因阻断突变体中找到了AKT1基因参与K⁺从土壤中摄取的直接证据(Hirsch *et al.*, 1998)。有意思的是, AKT1对根部K⁺摄取的作用看上去只有在外部环境含有NH₄⁺时对植物的发育才是必不可少的。在没有NH₄⁺存在的情况下, AKT1突变体没有任何表型变化;而在NH₄⁺存在的条件下, AKT1突变体对K⁺的摄取能力降低、种子萌发能力受损、生长速率降低。这样根据对AKT1的敏感性可以将根部K⁺的摄取活动分为2个不同的阶段。在NH₄⁺存在的条件下, AKT1对即使是低K⁺含量溶质的K⁺摄取仍有至关重要的作用。非AKT1阶段是NH₄⁺敏感型,能够在NH₄⁺存在的条件下使根摄取K⁺。

KUP/HAK家族的K⁺转运载体蛋白表达已被证明能够被外部的NH₄⁺抑制(Santa María *et al.*, 2000)。在拟南芥中, AtHAK5在根表皮上表达并参与K⁺缺失诱导的高亲和力和K⁺摄取(Gierth *et al.*, 2005)。这可能形成部分非AKT1 K⁺摄取,也应该提到(在单子叶植物中)对K⁺和Na⁺都具有通透性的HKT转运载体蛋白在根部外围细胞中表达,因此能够有助于根部K⁺的摄取。然而正如上面所指出的,这些系统的真正作用还不清楚。

K⁺在植物内的长距离运输

借助反义遗传学方法已在拟南芥中揭示了Shaker K⁺通道蛋白SKOR的运作机制, SKOR蛋白在中柱鞘和木质部薄壁细胞中表达,主导大约50%的K⁺向茎内的运输(Gaymard *et al.*, 1998)(图5)。而其他参与K⁺转运到木质部液汁中的系统还不清楚。

对韧皮组织中K⁺的转运机制研究主要集中在2个Saker家族通道蛋白: AKT1和KAT2。KAT2是内向性转运通道蛋白,而AKT2既能够调控K⁺的摄取和又能够调控K⁺的泌出。这种功能可塑性和AKT2在韧皮部脉管系统、叶片和根部表达的事实促使形成了一个假说,认为这个通道系统在K⁺装载入库源叶片并在存储器官中卸载的过程中发挥作用(Marten *et al.*, 1999; Lacombe *et al.*, 2000)(图5)。AKT2在转录水平依赖CO₂的光诱导特性暗示AKT2在韧皮组织中的表达受光合产物的调控(Deeken *et al.*, 2000)。AKT2功

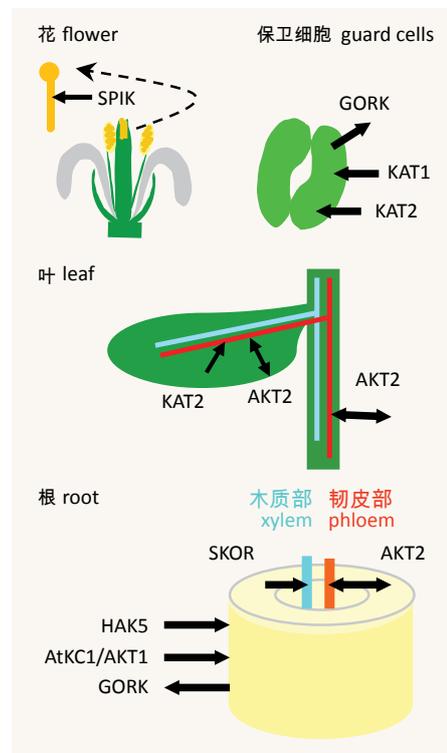


图5 拟南芥K⁺通道和转运蛋白的表达模式和功能。

能缺失突变体表型分析发现植物的发育延缓,并且有意思的是,韧皮液汁中糖的含量减少50%。

K⁺(和Na⁺)通透性HKT转运载体蛋白在韧皮组织表达,但是,正如上面所指出的,它们在植物细胞中原位K⁺转运的真实能力还没有被证实。只对Na⁺具有通透性的HKT转运载体蛋白在植物韧皮组织中表达,参与控制/减少Na⁺向茎中的运输以及在叶片中的积累。

花粉管的伸长

尽管K⁺对诱导细胞膨压有重要作用,但到目前为止很少有直接证据支持K⁺通道蛋白或转运载体蛋白参与控制细胞生长的假说。在拟南芥中,打断内向性Shaker通道蛋白SPIK基因的表达严重抑制花粉管的生长(Mouline *et al.*, 2002)(图5)。尽管SPIK突变体花粉的萌发正常,但花粉管的伸长通常迅速停止,即使能够发育生长也比野生型的要慢很多。既然SPIK基因是花粉中K⁺内向性传导的重要组成部分,那么敲除突变体花粉管生长的抑制可能是由K⁺的摄取不足造成的。这种缺陷表现导致花粉健康性和授精能力的严重降低。

保卫细胞K⁺流和气孔开度的控制

保卫细胞在叶片表面的运动对气孔开合和水分挥发流失的调控是通过渗透驱动的,保卫细胞膨压沿空隙方向的增加或降低就能分别打开或关闭气孔。K⁺和伴胞阴离子(NO₃⁻, Cl⁻和苹果酸)是参与这个渗透驱动过程的溶质的主要成分(Talbot and Zeiger, 1996; Schroeder et al., 2001)。总而言之, H⁺泌出ATP酶在保卫细胞细胞膜上的激活(被光或者其他信号)和活化导致膜超极化并激活K⁺内向性通道,从而促使K⁺流入、K⁺积累的增加和最终气孔的开放。相反, H⁺泌出ATP酶的抑制(例如,被应激激素ABA)导致膜去极化(进一步被阴离子通道蛋白激活证实),从而促使外向性K⁺通道蛋白的激活、K⁺流出和最终气孔的关闭。在拟南芥中,气孔的关闭和开放的时间常数分别在10分钟和20分钟左右。

拟南芥中,只有一个Shaker基因GOPK编码外向性通道蛋白,并活跃在细胞膜上;而其他5个基因(KAT1, KAT2, AKT1, AKT2和AtKCI)编码内向性通道蛋白(图5),这意味着在气孔开放时对K⁺流入的紧密控制比气孔关闭时对K⁺流出的控制更复杂和重要。保卫细胞外向性和内向性K⁺通道活动的打断(在拟南芥中利用反向遗传学方法)被证明能够分别增加气孔关闭和开放时间常数的50%和400%(Hosy et al., 2003)。正如预期所料,外向性通道蛋白活动的中断导致植物蒸腾(水分)损失增加,而内向性K⁺通道蛋白活动的中断导致对环境条件变动反应能力的显著降低,例如相对湿度或内部可利用CO₂量,还有在Na⁺(甚至在生理浓度水平)存在条件下受损的对气孔运动的控制(Lebaudy et al., 2008)。

结论和展望

从1992年从拟南芥中克隆Shaker K⁺通道蛋白基因(AKT1和KAT1)开始,对K⁺在植物中转运通过细胞膜的研究取得了相当多的进步,多个不同家族的K⁺通道蛋白和转运载体蛋白基因家族被克隆,表明情况比原来想的更复杂。目前对Shaker K⁺通道蛋白家族进行了大量的研究,突出了这个家族成员的功能,例如K⁺的摄取、K⁺从木质部汁液泌出流向茎部,或者保卫细胞的运动。然而,对K⁺转运系统其他家族的了解却知之甚少。要想获得一个对K⁺在植物中转运的整体认识尚需要更多的努力对植物HAK、HKT和KEA家族转运载体蛋白的特征和作用进行研究。同样还需要对液泡膜系统激活进行研究,例如TPK通道系统。

大多数的工作集中在对模式植物拟南芥的研究,当然从其他物种中也获取一定的信息,例如水稻和葡萄。根据现有数据,对Shaker家族在拟南芥中的认识或许对于帮助研究这个家族在其他物种的作用有所帮助。事实上也的确如此,因为看起来无论是在基因数目、通道系统功能特征,还是或许比其他家族更复杂的通道系统表达模式上,Shaker家族在植物中十分保守。例如,单子叶植物和双子叶植物的HKT转运载体蛋白家族在转运载体蛋白数目和功能亚类上都有较大差异。理解这种差异的生理意义是会令人非常兴奋的,并且是分析植物中K⁺的转运,特别是与植物耐盐相关性研究的基本目标。

未来研究的另一个主要目标是解释在植物中表达的不同K⁺转运系统活动的控制和整合过程,比如从基因水平和蛋白水平。例如, K⁺缺乏或盐渍已被证明能够有力调节Shaker、HAK和HKT家族成员的表达(转录水平)。在蛋白水平,一个强有力的例子是CIP激酶和它的2个CBL伴胞基因的鉴定, K⁺通道蛋白在细胞溶质Ca²⁺信号的控制下的参与根部K⁺的摄取(Xu et al., 2006)。

总之,尽管Shaker K⁺通道蛋白家族可被认为是植物细胞膜中研究最清楚的营养离子转运系统家族,仍然需要很多努力以确保在植物生物学的这一领域取得更进一步的成果,获得K⁺在植物体内转运活动机制和调控的整体认识。然而鉴于目前这一领域的情况以及现有的可行假说和令人振奋的展望,这种努力很明显是值得的。从K⁺营养在植物对生物和非生物逆境的适应性包括腌渍和生物产量的重要作用来看这种努力也是值得的。

参考文献

- Amrutha, R.N., P.N. Sekhar, R.K. Varshney, and P.B.K. Kishor. 2007. Genome-Wide Analysis and Identification of Genes Related to Potassium Transporter Families in Rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Sci.*, 172:708-21.
- Anderson, J.A., S.S. Huprikar, L.V. Kochian, W.J. Lucas, and R.F. Gaber. 1992. Functional Expression of a Probable *Arabidopsis thaliana* Potassium Channel in *Saccharomyces cerevisiae*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 89:3736-3740.
- Bañuelos, M.A., B. Garcíadeblás, B. Cubero, and A. Rodríguez-Navarro. 2002. Inventory and Functional Characterization of the HAK Potassium Transporters of Rice. *Plant Physiol.*, 130:784-194.

- Clarkson, D.T., and J.B. Hanson. 1980. The Mineral Nutrition of Higher Plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 31:239-398.
- Corratgé-Faillie, C., M. Jabnoute, S. Zimmermann, A.A. Véry, C. Fizames, and H. Sentenac. 2010. Potassium and Sodium Transport in Non-animal Cells: The Trk/Ktr/HKT Transporter Family. *Cell. Mol. Life Sci.*, 67:2511-2532.
- Daram, P., S. Urbach, F. Gaymard, H. Sentenac, and I. ChereL. 1997. Tetramerization of the AKT1 Plant Potassium Channel Involves its C-terminal Cytoplasmic Domain. *EMBO J.* 16:3455-3463
- Deeken, R., D. Geiger, J. Fromm, O. Koroleva, R. Langenfeld-Heyser, N. Sauer, S.T. May, and R. Hedrich. 2002. Loss of the AKT2/3 Potassium Channel Affects Sugar Loading into the Phloem of *Arabidopsis*. *Planta*, 216:334-344.
- Deeken, R., C. Sanders, P. Ache, and R. Hedrich. 2000. Developmental and Light-Dependent Regulation of a Phloem Localised K⁺ Channel of *Arabidopsis thaliana*. *Plant J.* 23:285-290.
- Durell, S.R., Y. Hao, T. Nakamura, E.P. Bakker, and H.R. Guy. 1999. Evolutionary Relationship Between K⁺ Channels and Symporters. *Biophys. J.* 77:77-788.
- Fuchs, I., S. Stölzle, N. Ivashikina, and R. Hedrich. 2005. Rice K⁺ Uptake Channel OsAKT1 is Sensitive to Salt Stress. *Planta* 221:212-21.
- Gaymard, F., G. Pilot, B. Lacombe, D. Bouchez, D. Bruneau, J. Boucherez, N. Michaux-Ferrière, J.B. Thibaud, and H. Sentenac. 1998. Identification and Disruption of a Plant Shaker-Like Outward Channel Involved in K⁺ Release into the Xylem Sap. *Cell* 94:647-655.
- Gierth, M., and P. Mäser. 2007. Potassium Transporters in Plants: Involvement in K⁺ Acquisition, Redistribution and Homeostasis. *FEBS Lett.* 581:2348-2356.
- Gierth, M., P. Mäser, and J.I. Schroeder. 2005. The Potassium Transporter AtHAK5 Functions in K⁺ Deprivation-Induced High Affinity K⁺ Uptake and AKT1 K⁺ Channel Contribution to K⁺ Uptake Kinetics in *Arabidopsis* Roots. *Plant Physiol.* 137:1105-1114.
- Haro, R., M.A. Bañuelos, M.E. Senn, J. Barrero-Gil, and A. Rodríguez-Navarro. 2005. HKT1 Mediates Sodium Uniport in Roots. Pitfalls in the Expression of HKT1 in Yeast. *Plant Physiol.* 139:1495-1506.
- Hirsch, R.E., B.D. Lewis, E.P. Spalding, and M.R. Sussman. 1998. A Role for the AKT1 Potassium Channel in Plant Nutrition. *Science* 280:918-921.
- Hosy, E., A. Vavasseur, K. Mouline, I. Dreyer, F. Gaymard, F. Porée, J. Boucherez, A. Lebaudy, D. Bouchez, A.A. Véry, T. Simonneau, J.B. Thibaud, and H. Sentenac. 2003. The *Arabidopsis* Outward K⁺ Channel GORK is Involved in Regulation of Stomatal Movements and Plant Transpiration. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 100:5549-5554.
- Jan, L.Y., and Y.N. Jan. 1997. Cloned Potassium Channels from Eukaryotes and Prokaryotes. *Annu. Rev. Neurosci.* 20:91-123.
- Kader, M.A., T. Seidel, D. Golldack, and S. Lindberg. 2006. Expressions of *OsHKT1*, *OsHKT2*, and *OsVHA* are Differentially Regulated under NaCl Stress in Salt-Sensitive and Salt-Tolerant Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars. *J. Exp. Bot.* 57:4257-4268.
- Lacombe, B., G. Pilot, E. Michard, F. Gaymard, H. Sentenac, and J.B. Thibaud. 2000. A Shaker-Like K⁺ Channel with Weak Rectification is Expressed in both Source and Sink Phloem Tissues of *Arabidopsis*. *Plant Cell* 12:837-851.
- Lebaudy, A., A. Vavasseur, E. Hosy, I. Dreyer, N. Leonhardt, J.B. Thibaud, A.A. Véry, T. Simonneau, and H. Sentenac. 2008. Plant Adaptation to Fluctuating Environment and Biomass Production are Strongly Dependent on Guard Cell Potassium Channels. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 105:5271-5276.
- Lebaudy, A., A.A. Véry, and H. Sentenac. 2007. K⁺ Channel Activity in Plants: Genes, Regulations and Functions. *FEBS Lett.* 581:2357-2366.
- Maathuis, F.J.M., and D. Sanders. 1996. Mechanisms of Potassium Absorption by Higher Plant Roots. *Physiol. Plant.* 96:158-168.
- Marten, I., S. Hoth, R. Deeken, K.A. Ketchum, and R. Hedrich. 1999. AKT3, A Phloem-Localized K⁺ Channel, is Blocked by Protons. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96:7581-7586.
- Mäser, P., S. Thomine, J.I. Schroeder, J.M. Ward, K. Hirschi, H. Sze, I.N. Talke, A. Amtmann, F.J. Maathuis, D. Sanders, J.F. Harper, J. Tchieu, M. Gribskov, M.W. Persans, D.E. Salt, S.A. Kim, and M.L. Guerinot. 2001. Phylogenetic Relationships within Cation-Transporter Families of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol.* 126:1646-1667.
- Mouline, K., A.A. Véry, F. Gaymard, J. Boucherez, G. Pilot, M. Devec, D. Bouchez, J.B. Thibaud, and H. Sentenac. 2002. Pollen Tube Development and Competitive Ability are Impaired by Disruption of a Shaker K⁺ Channel in *Arabidopsis*. *Genes Dev.* 16:339-350.
- Rodríguez-Navarro, A. 2000. Potassium Transport in Fungi and Plants. *Biochim. Biophys. Acta* 1469:1-30.

- Rubio, F., W. Gassmann, and J.I. Schroeder. 1995. Sodium-Driven Potassium Uptake by the Plant Potassium Transporter HKT1 and Mutations Conferring Salt Tolerance. *Science* 270:1660-1663.
- Santa-María, G.E., C.H. Danna, and C. Czibener. 2000. High-Affinity Potassium Transport in Barley Roots. Ammonium-Sensitive and -Insensitive Pathways. *Plant Physiol.* 123:297-306.
- Santa-María, G.E., F. Rubio, J. Dubcovsky, and A. Rodríguez-Navarro. 1997. The *HAK1* Gene of Barley is a Member of a Large Gene Family and Encodes a High-Affinity Potassium Transporter. *Plant Cell* 9:2281-2289.
- Sentenac, H., N. Bonneaud, M. Minet, F. Lacroute, J.M. Salmon, F. Gaymard, and C. Grignon. 1992. Cloning and Expression in Yeast of a Plant Potassium Ion Transport System. *Science* 256:663-665.
- Schroeder, J.I., G.J. Allen, V. Hugouvieux, J.M. Kwak, and D. Waner. 2001. Guard Cell Signal Transduction. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 52:627-658.
- Stein, W.D. 1990. Channels Carriers, and Pumps: An Introduction to Membrane Transport. Academic Press, Inc., San Diego, CA.
- Talbott, L.D., and E. Zeiger. 1996. Central Roles for Potassium and Sucrose in Guard-Cell Osmoregulation. *Plant Physiol.* 111:1051-1057.
- Uozumi, N., E.J. Kim, F. Rubio, T. Yamaguchi, S. Muto, A. Tsuboi, E.P. Bakker, T. Nakamura, and J.I. Schroeder. 2000. The *Arabidopsis* HKT1 Gene Homolog Mediates Inward Na⁺ Currents in *Xenopus laevis* Oocytes and Na⁺ Uptake in *Saccharomyces cerevisiae*. *Plant Physiol.* 122:1249-1259.
- Xu, J., H.D. Li, L.Q. Chen, Y. Wang, L.L. Liu, L. He, and W.H. Wu. 2006. A Protein Kinase, Interacting with Two Calcineurin B-like Proteins, Regulates K⁺ Transporter AKT1 in *Arabidopsis*. *Cell* 125:1347-1360.
- Yao, W., N. Hadjeb, and G.A. Berkowitz. 1997. Molecular Cloning and Characterization of the First Plant K(Na)/Proton Antiporter. *Plant Physiol.* 114S:200.

国际肥料通讯 e-*ifc* 中文版 版权信息

ISSN 1664-8765 (网络) ; ISSN 1664-8757 (印刷)

出版者: 国际钾肥研究所 (IPI)
英文版编辑: Ernest A.Kirkby, UK; Susanna Thorp, WRENmedia, UK; Patrick Harvey, Green Shoots, UK; Hillel Magen, IPI
中文版翻译主编: 田有国, 全国农技中心, 中国
版式设计: Martha Vacano, IPI
地址: 国际钾肥研究所 (IPI)
P.O.BOX 260
Baumgartlistrasse 17
CH-8810 Horgen, Switzerland
电话: +41 43 8104922
电传: +41 43 8104925
E-Mail: ipi@ipipotash.org
网址: www.ipipotash.org

每季度一刊的国际肥料通讯, 订阅的用户可以通过E-mail定期发送, 同时在IPI网站上定期发布。

这期国际肥料通讯上的相关链接只出现在其电子版本上。订阅国际肥料通讯电子杂志, 请发送电子邮件到网站的杂志订阅。退订的, 请点击给您发送的邮件底部的杂志退订链接。

国际钾肥研究所成员公司:

ICL Fertilizers; JSC Belaruskali; JSC Uralkali; Tessenderlo Chemie; and JSC Belarusian Potash Company (BPC).

Copyright©国际钾肥研究所 (IPI)

IPI保有其所有出版物和网站内容的版权但是鼓励非商业目的的复制传播。引用有关内容的要注明出处。不用提出特别申请, 也不用付费, IPI允许用于个人或教育目的而非盈利或商业目的的使用其有关电子或印刷资料, 但必须在材料的首页注明材料来源。对IPI不拥有所有权的材料, 如果要复制或使用, 必须要得到其版权所有者的许可。

这篇论文“K⁺转运通过植物细胞膜的分子生物学研究: 我们从模式植物拟南芥和水稻中学到了什么?”也可以在IPI网站“[IPI K Centre - Basic Facts about Potassium](#)”栏目找到。