

研究论文



West Bengal的施钾项目。照片提供: 印度生命钾素 ([Potash for Life, India](#))

施肥“最佳法则”及其在印度实现目标产量的应用小结

Velayutham, M.⁽¹⁾, R. Santhi^{(2)*}, A. Subba Rao⁽³⁾, Y. Muralidharudu⁽⁴⁾, and P. Dey⁽⁵⁾

摘要

施肥“最佳法则”作为一个统一概念在植物营养学上被提出,目的是通过基于测试的土壤养分管理实现作物的目标产量。这个概念已经通过使用一个新因子田间试验方法在印度全国协调土壤测试作物效应项目 (STCR) 进行校准, 设计和使用。这一行动已在印度各土壤和作物上进行了40多年, 在农民的田地上进行了几百次的田间试验进行验证。

早期的试验结果证实小麦籽粒产量和植物吸收的总养分呈线性关系, 这表明想要获取一个假定的产量, 植物

必须要吸收定量的营养。基于获取理想的产量 (目标收益率) 作物则需要吸收养分, “最佳法则”计算氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 施用量, 从三个可衡量的方面来考虑养分的

⁽¹⁾ 前项目协调员, 印度全国协调土壤测试作物效应项目 (AICRP-STCR), Hyderabad, India

⁽²⁾ 教授, AICRP-STCR项目负责人, 土壤与农业化学系, Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore-3, India

⁽³⁾ AICRP-STCR前项目协调员, 印度土壤研究所 (IISS) 前所长, Bhopal, India

⁽⁴⁾ AICRP-STCR前项目协调员, 印度土壤研究所 (IISS), Bhopal, India

⁽⁵⁾ AICRP-STCR项目协调员, 印度土壤研究所 (IISS), Bhopal, India

*通讯作者: santhitnau@yahoo.co.in

贡献: 1) 土壤肥力(有效养分, 基于土壤化学测试); 2) 施加的肥料; 3) 施用的有机肥。迄今为止, 在农户的田地里已进行2000多个试验示范以验证这一概念, 实现目标产量的偏差为10%。操作上, “最佳法则”协调了关于“给土壤施肥”和“给作物施肥”的大量争论, 在有效养分之间确保一个实际的平衡。“最小养分律”、“报酬递减律”和“最大养分律”的调节植物养分的原理也都深刻的体现在“最佳法则”里面。此外, 该法则还为“精确农业”保持土壤肥力实现较高的产量及有效养分管理提供了依据, 实现可持续农业。

引言

未来一段时间内, 农业系统中施用营养物质的量预计将会继续增加, 以便在逐渐减少的耕地上生产出更多的食物、饲料和纤维。营养物质的有效施用是农业系统可持续发展的关键。有效的施肥方式意味着获得最佳作物产量的同时, 损失到环境中去的营养物质也最少, 这在经济及环境方面极其重要。有效养分施用需要平衡肥料施用和良好的管理决策及实践之间的关系。

土壤的养分供应能力, 即土壤肥力, 在实验室可以很容易地确定。然而, 全国范围内特定位置的土壤肥力评价需要进行系统的土壤样品采集、交付和反馈报告。作物对施加的营养物质的反应可以通过田间试验来验证, 然而, 结果因地点而异, 因土壤及气候的不同, 一个地方的试验结果往往不适用于另一个地方。认识到过去土壤测试和在多处化肥用量试验中作物对肥料的需求之间相关性的缺乏, 经常需要因地制宜的肥料配方的改良, 设计新颖独特的田间试验方法进行土壤测试作物效应(STCR)相关性研究(Ramamoorthy, 1968)。在印度, 这种新方法已经发展成为一个领先的概念, 一个有用的策略来提高肥料利用效率, 提高粮食生产。本文强调了由Ramamoorthy和Velayutham (2011)明确表达的“最佳法则”及其该法则在过去40年的应用和验证。

研究历史

植物生长因素定量关系研究和它们对植物生长及产量的影响可以追溯到Sprengel (1832) 和李比希 (1843)。众所周知的李比希的“最小养分学说”提出最终产量由限制养分的数量决定。这就是调节产量的因子, 增加任何其他营养物质的量都对产量不起作用, 产量保持不变。当这种最大限制因素纠正后, 产量就会受下一个不同的营养物质限制。在农业生产中, 随着产量的分步式提高, 土壤养分状况也发生变化, 直到没有剩余的生长限制因子。Paris (1992年) 在两种作物上验证了这种方法的适用性。Mitscherlich (1909) 在他的“报酬递减规律”中表示, 作物产量同时受到所有限制因素的影响, 每个限制

因素的影响情况与它限制的严重程度成正比。他的方程通过施肥量试验为最佳施肥量提供了基础。米切里希的概念和方程被后来的Balmukand (1928)、Bray (1945)、Willcox (1955) 和 Boyd (1956) 质疑并修正。

根据他的养分流动的概念, Bray (1945) 修改了米切里希方程如下:

$$\log(A-Y) = \log A - C1b - CX$$

A = 所有营养物质不亏缺时的最高产量;
Y = 土壤养分“b”亏缺时; 获得的产量;
C1 = 土壤养分的效率因子;
X = 肥料施加量;
C = 施肥方法的效率因子。

Mitscherlich-Bray收益率曲线的指数函数为曲线, 且从未达到最高值, 不管土壤养分现状如何, 结果表明产量从未达到100%。计算最高产量的计算基础因子是一个重要的百分比参数, 一直受到质疑。指数曲线从不会因为养分超量或者中毒而出现产量不景气的情况。这种方法也没有考虑营养物质之间的相互作用, 它们对产量的影响以及作为“平衡施肥”的养分的需求。

Colwell (1978) 提出了一种正交多项式模型, 通过多点施肥量试验计算需肥量。然而, STCR项目下生成的类似的实验和数据未能优化肥料需求, 这是因为正交多项式模型低估了土壤测试值。

Wallace (1993) 提出的“最高养分律”有两个主要特点。首先, 修正其他限制因素, 给定的养分的投入对产量的影响逐步放大。最终结果大于各投入因素影响的总和, 因为它们相互影响, 相互影响的结果使各自的影响加剧。第二, 如果没有其他限制因素, 产量可以最高或最大, 限制因素越少, 产量越高。可以接近和达到的密切程度当然取决于相对经济。在处理Mitscherlich-type限制因素时, 可以首先选择那些最经济的使用。多养分施用量的试验使用例子中, 华莱士的模型演示了缺陷的负协同效应。举例来说, 单因素缺乏会限制产量, 90%的农业潜力, 两个因素缺乏会限制81%的潜在产量。5个这样的限因素缺乏会限制59%的潜在产量, 10个这样的因素缺乏会限制35%的潜在产量。农民将会尽90%的完美, 但只有实现最大可能的产量的35%。这突显出最佳管理实践和精准养分管理的必要性。

土壤测试作物效应(STCR)相关性研究

土壤测试是开展肥料施用项目的关键部分, 其有用性已被广泛认可, 1955~1956年来自美国国际开发署(USAID)援助的24个土壤测试实验室首先建立。联系印度农业研究所(IARI)最初在水稻和小麦上的大量研究

工作, 基于农业试验发现不同作物的肥料施用量应该等同于美国被视为适用于中等的土壤肥力状况的施用量, 但是实际施用量以经验为主, 相对于土壤测试结果或减少或增加了30%~50% (Muhr *et al.*, 1965)。Ramamoorthy and Velayutham (1971) 的研究报告提到如果不进行土壤测试而仅根据推荐用量进行施肥产量仅会增加11%。20世纪60年代中期, 即绿色革命时代, 农作物高产和杂交品种引入, 化肥施用需求显著增加。施肥变得非常费钱, 因此迫切需要更精确的需肥量校准。

认识到过去多地点的农业试验的报道中, 缺乏土壤测试和作物对肥料的反应的相关性, 以及为了获得经济作物生产而改进不同土壤测试值对应的肥料配方的需要。Ramamoorthy (1968) 设计了一种新颖的田间试验方法进行STCR相关研究方法, 由印度农业研究理事会 (ICAR) 于1967~1968发起了全印度协调研究项目。STCR田间试验的归纳方法, 获得所需的土壤肥力水平的变化, 在早期的农业试验不是通过选择不同的位置土壤, 而是采用管理实践和气候条件通过创建它在同一领域, 以减少土壤异质性 (类型和单位) 研究。Ramamoorthy、Velayutham (1971; 1971) 和 Velayutham *et al.* (1985) 阐述了这种归纳的方法, STCR田间设计在国外也被认可和接受 (Black, 1993)。

针对同时含有包括有机肥和化肥的异质性土壤肥力的田间试验方法已经建立起来了。肥料变化 (有机来源) 由3个平行组成, 约在测试作物播种前一个月, 每个施用不同水平的有机肥 (OM₀、OM₁、OM₂), 有机肥可选用FYM (农家肥料)、泥浆或堆肥。在有机肥施用的基础上选择4个氮 (N) 肥水平与之垂直正交。根据预先确定的土壤肥力状况和N水平, 选择12个磷 (P) 和钾 (K) 的组合水平。每个有机肥处理下各有完整的24个施肥处理 (图1)。

ICAR支持全印度协调研究项目 (AICRP) 的STCR始于1967~1968年, 建立了8个中心, 现在全国不同的农业生态区域已经增加到17个中心。STCR项目利用多元回归的方法来开发作物产量和土壤测试评价及肥料投入之间的关系。

表1展示了平衡营养对小麦使用化肥的农业及经济效率的影响。N施用量低时 (50kgNha⁻¹),

| | OM ₀ | OM ₁ | OM ₂ |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| N ₀ | P ₀ K ₁ | P ₂ K ₂ | P ₁ K ₂ |
| | P ₁ K ₂ | P ₀ K ₀ | P ₂ K ₂ |
| | P ₀ K ₀ | P ₀ K ₁ | P ₀ K ₀ |
| | P ₂ K ₂ | P ₁ K ₂ | P ₀ K ₁ |
| N ₁ | P ₁ K ₁ | P ₂ K ₁ | P ₁ K ₂ |
| | P ₂ K ₁ | P ₂ K ₂ | P ₂ K ₂ |
| | P ₁ K ₂ | P ₁ K ₁ | P ₂ K ₁ |
| | P ₂ K ₂ | P ₁ K ₂ | P ₁ K ₁ |
| N ₂ | P ₁ K ₁ | P ₁ K ₂ | P ₂ K ₁ |
| | P ₀ K ₂ | P ₂ K ₁ | P ₂ K ₀ |
| | P ₁ K ₂ | P ₁ K ₁ | P ₂ K ₃ |
| | P ₂ K ₂ | P ₂ K ₃ | P ₀ K ₂ |
| | P ₂ K ₁ | P ₃ K ₂ | P ₃ K ₃ |
| | P ₂ K ₀ | P ₂ K ₂ | P ₃ K ₂ |
| | P ₂ K ₃ | P ₃ K ₃ | P ₁ K ₁ |
| | P ₃ K ₂ | P ₂ K ₀ | P ₂ K ₂ |
| | P ₃ K ₃ | P ₀ K ₂ | P ₁ K ₂ |
| N ₃ | P ₁ K ₁ | P ₂ K ₂ | P ₂ K ₁ |
| | P ₂ K ₁ | P ₃ K ₂ | P ₃ K ₁ |
| | P ₂ K ₂ | P ₁ K ₁ | P ₂ K ₃ |
| | P ₃ K ₁ | P ₃ K ₃ | P ₃ K ₂ |
| | P ₃ K ₂ | P ₂ K ₃ | P ₃ K ₃ |
| | P ₂ K ₃ | P ₃ K ₁ | P ₁ K ₁ |
| | P ₃ K ₃ | P ₂ K ₁ | P ₂ K ₂ |

图1. 一个STCR试验设计的例子。3组不同有机肥料施用量和4水平N肥施用垂直正交。根据预先确定的土壤肥力状况和分散的N水平选择12个磷 (P) 和钾 (K) 的组合水平。每个有机肥处理下各有完整的24个施肥处理。

表1. 印度德里地区小麦Sonora 64上平衡施肥对肥料利用率及其经济效益的影响 (1865-1966) (Ramamoorthy *et al.*, 1967)

| Nitrogen dose | Associated treatment | Yield | Yield response to added N | Yield response to absorbed N |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| kg ha ⁻¹ | | -----kg ha ⁻¹ ----- | -----kg grain kg ⁻¹ N----- | |
| 90 | P ₇₅ K ₅₀ | 5,047 | 14.5 | 38.7 |
| | P ₅₀ K ₅₀ | 4,779 | 11.8 | 38.9 |
| | P ₅₀ K ₂₅ | 4,760 | 11.7 | 40.3 |
| | P ₅₀ K ₇₅ | 4,588 | 9.9 | 42.0 |
| | P ₂₅ K ₅₀ | 4,665 | 10.7 | 40.2 |
| 50 | P ₂₅ K ₂₅ | 4,330 | 14.8 | 43.1 |
| | P ₅₀ K ₅₀ | 4,302 | 14.2 | 43.5 |
| Control | P ₀ K ₀ | 3,590 | - | - |

产量效应值是最高的,为14.8 kg谷物 kg⁻¹N,同时磷和钾的施用量也最低,均为25 kg ha⁻¹。在同一施氮水平下提高磷钾的施用量反而会导致较低的粮食产量。

当氮的施用量提高到90 kg ha⁻¹时,产量效应下降,不同的磷钾施用情况下,产量效应平均为10~12 kg kg⁻¹。在新的施氮水平下想要回到14.5 kg kg⁻¹的高效值,磷和钾的施用量分别需要精确到75、50 kg ha⁻¹。这些结果证明随氮施用量增加产生的贡献却减少,只有纠正磷钾的施用量到最佳,氮素的产量效应值才会达到最高值。

为实现最大产量或经济效益,最近关于最佳营养平衡的研究探索 (Boldea *et al.*, 2015) 也显示了这一原则。此外,只要特定试验点N-P-K最佳组合得到满足,产量可以增加。表1还显示,吸收氮素的对产量产生的反应相对于增加氮素对产量产生的反应变化范围较窄。因此,施用肥料带来的变化的产量效应主要受到营养吸收限制的影响,但是一旦开始,施用养分的效率几乎是相同的。

目标产量的概念

基于STCR各中心不同土壤上种植主要作物的大量复杂的田间试验,为了获取各作物的目标产量,根据土壤测试结果进行肥料推荐技术已经开始。Truog (1960) 阐明了为获取玉米较高产量使用土壤和肥料养分有效性的经验值配方方法的可能性。普遍认为作物要求磷和钾遵循Mitscherlich-Baule (Baule, 1917) 和Mitscherlich and Bray (Bray, 1945) 提出的充分施肥量的

概念。然而, Ramamoorthy *et al.* (1967) 建立的理论基础和田间试验,证明且验证了李比希的“最小养分律”同样适用于各种高产小麦、水稻和珍珠小米对氮磷钾的需求。他们证明了磷和钾在决定作物应对氮的反应及在实现高效化肥施用中扮演均衡营养角色的重要性 (Ramamoorthy *et al.*, 1967; Ramamoorthy and Pathak, 1969)。他们的工作为推荐施肥建立了目标产量的概念。

产量水平和N-P-K吸收之间的线性关系表明,想要获取一个给定的产量,植物必须需要吸收一定数量的营养物质(从土壤和肥料中获取)。对于一个给定的产量一旦这个需求决定下来,可以计算出所需肥料的数量,当然还要考虑到土壤有效养分及施用的化肥和有机肥各自的贡献率。

关于目标产量概念的实现,可以用下面的例子来描述。印度希萨尔灰钙土土壤上种植的小麦WH-157土壤测试校准试验产生了下面的肥料调整方程,其最简单的形式为:

$$N_f = 4.96TY - 0.63N_s;$$

$$P_2O_5f = 3.83TY - 4.63P_s;$$

$$K_2Of = 2.66TY - 0.22K_s.$$

在这里 N_f 、 P_2O_5f 和 K_2Of 表示肥料施用量,用kg ha⁻¹表示, TY为目标产量,用q ha⁻¹ (100 kg) 表示; N_s 、 P_s 和 K_s 为土壤测试值,土壤中有效N, P, K含量,用kg ha⁻¹表示。

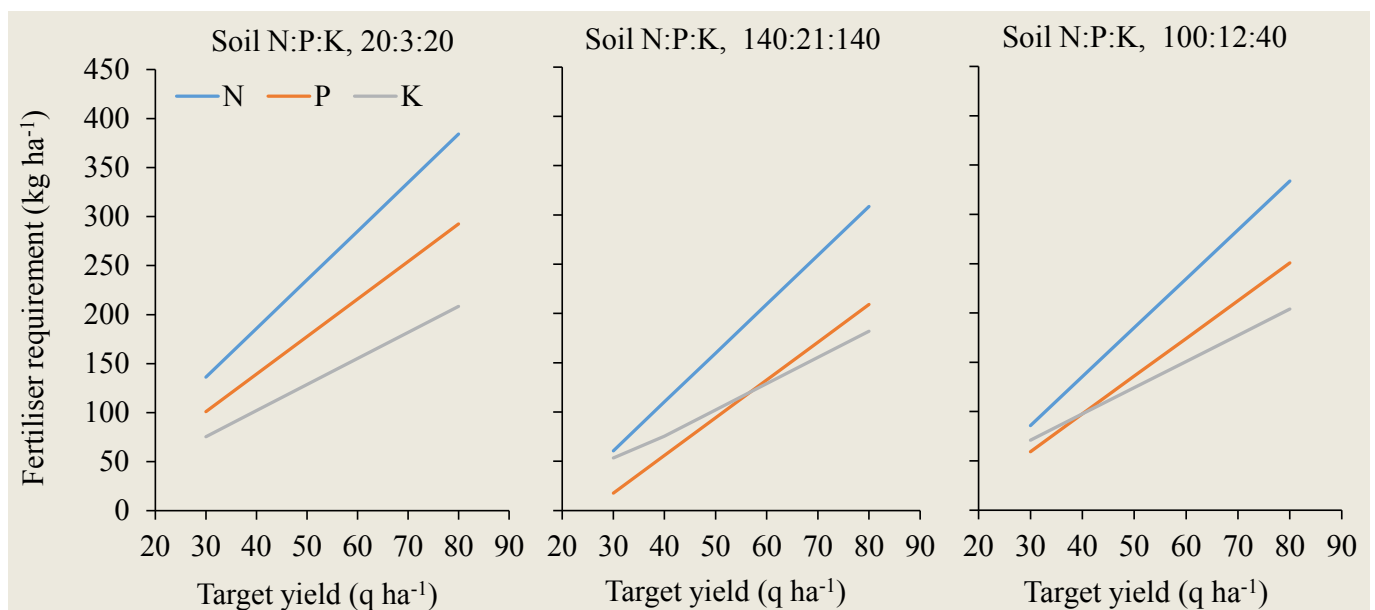


图2. 肥料需求量是小麦籽粒预期产量和3个不同试验地土壤肥力的变化N-P-K需要量的函数。小麦品种: WH-157; 土壤类型: Sierozem; 试验地点: Hissar, India.

这些简化的线性方程，表明了小麦籽粒预期产量和不同试验地土壤肥力的变化N-P-K需要量之间的关系（图2）。显然，化肥需求量根据不同土壤中N-P-K可用性而变化的。肥沃的土壤相对于贫瘠的土壤所需的施肥量显著较低。在雨养条件下，较低的产量水平差异更是显著，在化肥施用上相对较小的变化可以引起显著差异，经济由失败变成成功。农民在被告知他的田块的特定情况后，可能会根据化肥成本和可用的预算选择预期产量。根据图2，拥有贫瘠土壤的农民如果希望最高产量达60 q ha⁻¹，则应该施用N、P₂O₅和K₂O分别为285、216、155 kg ha⁻¹。然而，如果肥料成本太贵，这个农民情愿目标产量为40 q ha⁻¹，肥料支出减少了35%。显然，化肥需求随着初始土壤肥力

增加而下降。肥沃的土壤获得相同的60 q籽粒ha⁻¹需要N、P₂O₅和K₂O分别为209、133、129 kg ha⁻¹，减少目标产量到40 q ha⁻¹，将分别降低肥料花费为47%，58%和41%（图2）。

有机肥料的施用给目标产量方程添加了一个重要因素。Santhi *et al.* (2013) 记录53个印度南部泰米尔纳德邦的土壤作物情况。以一个生长Noyyal soil series尔土系（典型薄层干淋溶土）上的水稻为例，用一组方程表示：

$$\begin{aligned} N_f &= 4.39TY - 0.52Ns - 0.80No; \\ P_2O_5f &= 2.22TY - 3.63Ps - 0.98Po; \\ K_2Of &= 2.44TY - 0.39Ks - 0.72Ko \end{aligned}$$

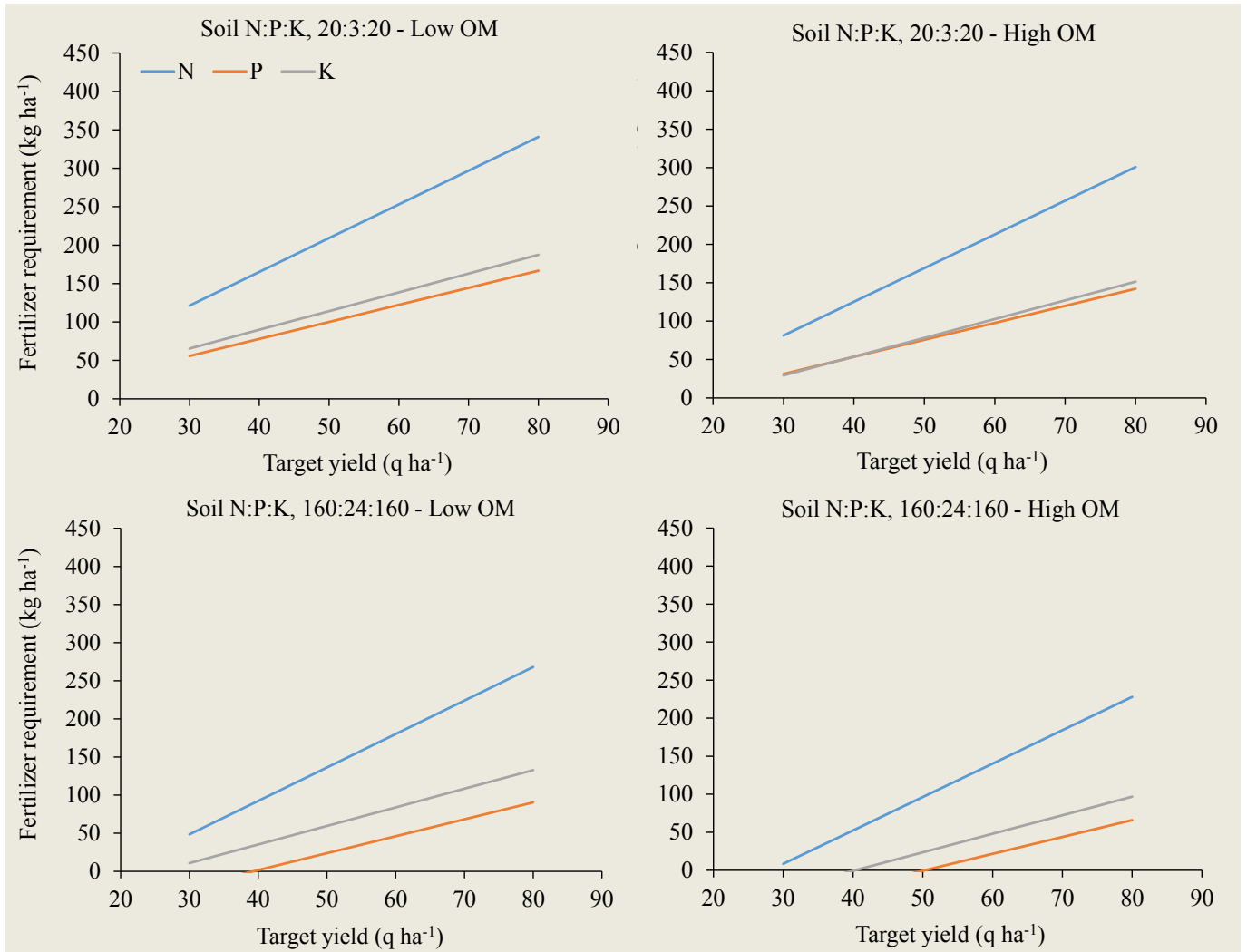


图3. 肥料需求量是水稻目标产量的函数，还随土壤和有机肥中有效N-P-K含量而变化。土壤类型: Typic Haplustalfs; 试验地点: Tamil Nadu, India

在这里 N_f , P_2O_5f , K_2Of 为肥料施用量, 用 $kg\ ha^{-1}$ 表示; TY 为目标产量, 用 $q\ ha^{-1}$ (100 kg) 表示; N_s , P_s 和 K_s 为土壤测试值, 土壤中有有效 N, P, K 含量, 用 $kg\ ha^{-1}$ 表示。

N_o , P_o , 和 K_o 为通过农家肥施入的 N、P、K 的数量, 以 $kg\ ha^{-1}$ 表示。

施用农家肥可显著减少肥料的需求, 但这种影响在肥沃的土壤上表现相当大 (图3)。选择目标产量相对较低的水平, 农民施用足够的农家肥可能显著降低他们在化肥上的费用。然而, 目标产量的概念也为农民提供了一个机会来认识合理的有计划的增加施肥量带来的可能的经济效益。

肥料配方方程的可预测性已通过一系列农民田地里相似土壤的田间验证试验 (追踪试验) 进行严格测试和评估。对追踪试验进行评价之后, 这些方程用于全印度所有主要作物的肥料推荐量计算。

目标产量的实际应用有约束农民或资源供给者 (肥料生产商/信贷者) 所投资化肥的固定成本的作用, 还有在作物轮作中保持土壤肥力的作用, 这在 Velayutham (1979), Randhawa 和 Velayutham (1982), Velayutham *et al.* (1985b), Reddy *et al.* (1989), Dey and Santhi (2014) 等的研究中可见相关报道。STCR 田间试验已经在所有的合作中心进行了分析, 各种作物肥料配方方程已研制出供咨询使用, 并已进行了相关记录 (Anonymous, 1968-2013; Subba Rao and Srivastava, 2001; Muralidharudu *et al.*, 2012; Dey and Das, 2014)。建立可靠的田间数据流 (不同地点的土壤测试数据), 从经济方面上考虑化肥和有机肥的施用, 目标产量的概念可以促使农作物产量平缓一致的增加。

土壤肥力的产量目标和维护

在制定推荐肥料施用量的各种方法中, 其中基于产量目标比较独特, 除了定义所需产量的肥料用量水平外, 还确保土壤肥力的维持, 考虑到了假定产量水平下作物的养分去除 (Velayutham, 1979; Velayutham and Tandon, 2014)。

从1998年开始在一个固定田块 (印度南部哥印拜陀市泰米尔纳德邦农业大学) 的水稻上通过施肥配方方程进

表2. Afisol 土壤上水稻的目标产量和肥料利用效率 (每季15个收获点的平均值) (Maragatham *et al.*, 2015). AE-农学效率, IPNS-作物养分综合管理系统

| Treatments | Kharif season (1998-2013) | | | Rabi season (1998-2013) | | |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------|---------------------|--------------------------------|-------------|---------------------|
| | Target yield | Grain yield | AE | Target yield | Grain yield | AE |
| | -----Mg ha ⁻¹ ----- | | kg kg ⁻¹ | -----Mg ha ⁻¹ ----- | | kg kg ⁻¹ |
| General agronomic recommendation | | 5.37 | 12.0 | | 4.95 | 11.4 |
| STCR - NPK alone | 6 | 5.72 | 13.7 | 5 | 5.10 | 15.2 |
| STCR - NPK alone | 7 | 6.52 | 14.4 | 6 | 5.90 | 15.7 |
| STCR - IPNS | 7 | 6.74 | 16.0 | 6 | 6.05 | 17.5 |
| Absolute control | | 2.80 | - | | 2.78 | - |

表3. Alfisol 土壤上水稻收获30季后的土壤肥力状态和目标产量 (Maragatham *et al.*, 2015).

| Treatments | Targeted yield | Soil organic carbon | Available nutrients | | |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|------|-----|
| | | | N | P | K |
| | Mg ha ⁻¹ | g kg ⁻¹ | -----kg ha ⁻¹ ----- | | |
| General agronomic recommendation | | 6.0 | 210 | 19.8 | 472 |
| STCR-NPK alone | 6 | 7.0 | 218 | 21.5 | 492 |
| STCR- NPK alone | 7 | 7.4 | 260 | 27.0 | 498 |
| STCR - IPNS | 7 | 8.6 | 268 | 28.5 | 550 |
| Absolute control | | 5.2 | 165 | 15.1 | 412 |
| Initial status (1998 Kharif) | | 4.6 | 280 | 20.2 | 670 |

行施肥, 目标产量示范块已经充分显示出基于土壤测试调整植物营养系统 (IPNS) (Velayutham and Santhi, 2013) 来获取高产量 (稻谷产量为6~7 t ha⁻¹) 的价值。15年的连作结果 (Maragatham *et al.*, 2015) 符合肥料施用有益的且维持了长期的土壤肥力的观点 (表2和3)。Velayutham (1979) 表明, 轮作时通过选择适当的作物产量目标, 可保持土壤肥力, 甚至会提升土壤肥力。

钾和“最佳法则”

在植物必需的营养元素中, 钾素被认为是相对重要的, 因为植物对钾素的需求量较大, 此外, 钾素还能增加作物产量、改善产品质量, 提高氮和磷的利用效率 (Rao *et al.*, 2014)。钾在植物生理中扮演很多角色: 它能激活酶参与光合作用和碳水化合物及蛋白质的代谢; 有助于碳水化合物的合成和运移、蛋白质合成、膜透性及气孔调节; 钾素还能调节水分利用; 促进氮的吸收并提高利用率; 能增强植物抗非生物胁迫的能力及抗病性 (Mengel and Kirkby, 1987)。

不同作物从土壤中吸收钾的效率也不同, 会受到很多因素的影响, 如作物类型、作物生长阶段, 植物根密度及

分布、土壤类型、土壤水分状况等。土壤中不同的钾素储存动态平衡对作物吸收效率也有重要影响。土壤钾的状态及其不同储存状态的分布是由其矿物学决定的。土壤钾有三个主要的储存状态：可交换性钾，非交换性钾，有机钾。可交换性钾包含了 K^+ 离子，粘附在带负电荷的最好的土壤颗粒部分的表层。这种钾素在土壤溶液中保持稳定，但会受到土壤pH的影响，并与溶解的其他离子相互作用。可交换性钾被认为是土壤中最有用的钾资源。然而，由于其溶解度高，土壤中可交换性钾极易移动，强烈受土壤中的水分状况及水分运动的影响。

非交换性钾存在于土壤颗粒内部，作为他们化学成分的一个固有元素。这种钾素数量取决于土壤矿物组成。植物对非交换性钾的可用性取决于土壤风化过程的类型及速度。虽然非交换性钾不能立即可用，但是作物需求的大部分钾素来源于此 (Rao *et al.*, 2014)。然而，这种可用性很难估计，因此非交换性钾在肥料需求的定期评估中不作考虑。同样，有机土壤物质中钾的有效性也难以评估。

因此土壤有效钾的含量是与水流量相矛盾的结果；作物吸钾及钾素淋失均能减少土壤中钾的含量，而土壤风化和有机物质的矿化可以补充丰富土壤中的钾素。在集约农业上，由于作物连续种植的过度开发，土壤有效钾可能会被连续快速耗尽，在这里土壤风化转变成了水土流失，水和风破坏掉了原先较好结构的土壤颗粒。因此，土壤钾素平衡可能严重枯竭，导致产量减少，农民收入不足，减少粮食安全。不幸的是，目前印度大多数省份化肥使用的趋势属于严重不足，主要施用氮磷肥，这导致了全印度大多数土壤上的负的钾素平衡 (Rao *et al.*, 2014)。

因此钾肥施用是必不可少的。然而，土壤钾素平衡恢复意味着不能一次性补给缺失的钾素，而是分多次进行。土壤储存钾的能力是有限的，因为它取决于土壤的阳离子交换量 (CEC)。同样，作物吸收钾的速率也是有限的，取决于作物类型、生长速率及作物的生长阶段。施用的多余钾素可能会通过淋溶作用损失掉，尤其是在持续时间较长的雨或暴雨 (例如在雨季) 时更明显。因此，明智的方法就是施用钾肥，这需要计算当前作物的需求，了解天气条件，明确现在和未来土壤中钾含量。在这里，“最佳法则”及其源于该法则的方法对土壤肥力恢复和维持可持续高产的农业系统，提供了一个极好的战略及切实可行的措施。每年的土壤测试将决定当前土壤钾的含量、CEC及通过非交换性钾转换成潜在钾的贡献。施用有机肥可以丰富土壤中的缓释营养物质，提高土壤CEC，增强保水性，使未来的土壤肥力得到保持。作物类型和目标产量决定了该

作物生长周期钾素的需求。然后，使用“最佳法则”方程可以确定施肥配方来满足作物所需的营养量。可是，作物生长季节钾肥施用的分配应该仔细计划，要考虑作物吸钾能力及土壤容量的极限。对农民来说仅仅基施钾肥虽然是简单的，但在大多数情况下却是最基本的首选项。已经确定好的钾肥施用量最好在作物种植季节分成多次施用，要考虑作物当前生长阶段 (对钾的需求) 及预期的降雨情况。如果有灌溉，可以考虑钾肥与灌溉用水一起应用到作物上。

结论

最近几十年印度经济虽然获得了显著的进展，但是仍有70%的人口生活在农村地区，仍然依靠农业生存。耕地有限，但对食物、饲料和纤维要求却日益增长，迫使我们必须要维护、管理、丰富自然资源，此外还要提高其使用效率。土壤是任何作物生产的基础，是最宝贵的自然资源。土壤肥力下降是直接影响农作物产量的重要因素之一。因此，土壤肥力管理是确保生产力及营养安全的关键，同时也是保持土壤健康和可持续性的关键。农业生产中肥料是一项不菲的投入，然而肥料施用却是确保土壤生产力的关键。不管怎样，事实证明，不平衡施肥不仅会导致土壤质量恶化还会影响养分的利用效率。为了实现最大利益，提高养分利用效率，减少养分损失，肥料施用数量必须正确、肥料来源可靠、在正确的时间利用正确的施肥方法施用不同的肥料组合 (Dey, 2015; Singh, 2016)。

根据在不同STCR实验中心不同土壤上种植的主要作物上的大量且复杂的田间试验，基于土壤测试获取作物目标产量的肥料推荐技术已逐步形成。在过去的15年里，不同的AICRP利用不同的种植制度的目标产量方程集中于STCR开发预测方程。预测的值可用作随后种植作物的肥料推荐量，从而减少昂贵且周期性的土壤测试的需要。投入收益状况随土壤、作物和地点的不同而变化。然而，许多示范已经证明，通过STCR技术控制农民的实践操作或施用一般推荐的肥料量，可使收益/成本的比率增加 (Majumdar *et al.*, 2014)。此外，目标产量概念使农民能够调整他们的肥料投入得到预期产量水平，从而得到更好的财务及经济控制。

因此，“最佳法则”提供给农民一个好的可行的方法，来精确地实现特定地点的作物营养需求，同时还能保持甚至改善土壤肥力，从而优化他们的农场管理。期待着增加了农民的收入，提高了国家农业生产率，同时保持了土壤肥力，完全可能给印度带来更多的可持续农业。

参考文献:

- Anonymous. 1968-2013. Annual Progress Report of the All India Coordinated Research Project on STCR, IISS, Bhopal.
- Balmukand, B.H. 1928. Studies in Crop Variation: V. The Relation Between Yield and Soil Nutrients. *The Journal of Agricultural Science* 18(4):602-627.
- Baule, B. 1917. Mitscherlich's Law of Physiological Relations (In German). *Landwirtschaftliche Jahrbuecher* 51 (1916-17). p. 363-385.
- Black, C.A. 1993. *Soil Fertility Evaluation and Control*. Lewis Publishers, Boca Raton. p. 406-409.
- Boldea, M., F. Sala, H. Rawashdeh, and D. Luchian. 2015. Evaluation of Agricultural Yield in Relation to Doses of Mineral Fertilizers. *J. Central European Agric.* 16:149-161.
- Boyd, D.A. 1956. *Brit. Sug. Beet. Rev.* 25:19-21.
- Bray, R. 1945. Soil-Plant Relations: II. Balanced Fertilizer Use through Soil Test for Potassium and Phosphorus. *Soil Sci.* 60(6):463-474.
- Colwell, J.D. 1978. *Computations for Studies of Soil Fertility and Fertilizer Experiments*. CAB, London.
- Dey, P. 2015. Targeted Yield Approach of Fertiliser Recommendation for Sustaining Crop Yield and Maintaining Soil Health. *JNKVV Res. J.* 49(3):338-346.
- Dey, P., H. Das. 2014. Progress Report of the STCR Project, IISS, Bhopal.
- Dey, P., and R. Santhi. 2014. Soil Test Based Fertiliser Recommendations for Different Investment Capabilities. In: Tandon, H.L.S. (ed.). *Soil Testing for Balanced Fertilisation - Technology-Application-Problems-Solutions*. p. 49-67.
- Liebig, von J. 1843. *Chemistry in its Application to Agriculture and Physiology*. Report to the British Association.
- Majumdar, K., P. Dey, and R.K. Tewatia. 2014. Current Nutrient Management Approaches: Issues and Strategies. *Indian J. Fert.* 10:14-27.
- Maragatham. S., R. Santhi, K.M. Sellamuthu, R. Natesan, and P. Dey. 2015. Long-Term Effect of STCR - IPNS Based Fertilizer Prescription on Productivity and Soil Fertility in Rice-Rice Cropping Sequence. In: *Proc. National Seminar on Soil Resilience, 2015, AC&RI, Madurai*. p. 304-305.
- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 1987. *Principles of Plant Nutrition* (4th ed.). International Potash Institute, Switzerland. 687 p.
- Mitscherlich, E.A. 1909. Das Gesetz des Minimum und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtschaftliche Jahrbücher*. 38:537-552.
- Muhr, G.R., N.P. Datta, H. Sankarasubramoney, V.K. Leley, and R.L. Donahue. 1965. *Soil Testing in India*. 2nd edition, USAID, New Delhi.
- Muralidharudu, Y., A. Subba Rao, and K. Sammi Reddy. 2012. District-Wise Soil Test Based Fertiliser and Manure Recommendations for Balanced Nutrition of Crops. IISS, Bhopal, India. 292 p.
- Paris, Q. 1992. The Return of von Liebig's 'Law of the Minimum'. *Agron. J.* 84:1040-1046.
- Ramamoorthy, B., R.L. Narasimham, and R.S. Dinesh. 1967. Fertilizer Application for Specific Yield Targets of Sonora 64 (wheat). *Indian Fmg* (5). 17:43-45.
- Ramamoorthy, B. 1968. Project Coordinator's Report, First Workshop of the STCR Project, JNKVV, Jabalpur.
- Ramamoorthy, B., and V.N. Pathak. 1969. Soil Fertility Evaluation - Key to Targeted Yields. *Indian Fmg.* 18(3):29-33.
- Ramamoorthy, B., and M. Velayutham. 1971. Soil Test-Crop Response Correlation Work in India. *World Soil Resources Report No. 41:96-102*. FAO, Rome.
- Ramamoorthy, B., and M. Velayutham. 1972. Soil Fertility and Fertiliser Use Research in India. *Indian Fmg.* 21:80-84.
- Ramamoorthy, B., and M. Velayutham. 2011. The 'Law of Optimum' and Soil Test Based Fertiliser Use for Targeted Yield of Crops and Soil Fertility Management for Sustainable Agriculture. *Madras Agric. J.* 98:295-307.
- Randhawa, N.S., and M. Velayutham. 1982. Research and Development Programmes for Soil Testing in India. *Fert. News* 27:35-64.
- Rao, C.S., S.B. Reddy, and S. Kundu. 2014. Potassium Nutrition and Management in Indian Agriculture: Issues and Strategies. *Indian J. Fert.* 10:58-80.
- Reddy, K.C.K., G.R.M. Sankar, M.S. Gangwar, T.S. Verma, B. Bhattacharya, P.K. Ray, and R. Singh. 1989. A Basis for Simultaneous Optimization of Chemical and Organic Nitrogen Doses Under Optimum C/N Conditions. *Indian J. Agric. Sci.* 59:102-106.
- Santhi, R., K.M. Sellamuthu, S. Maragatham, R. Natesan, P. Dey, and A. Subba Rao. 2013. Soil Test and Yield Target Based Balanced Fertilisation (Agricultural and Horticultural Crops (in Tamil), AICRP-STCR (TSP), Tamil Nadu Agricultural University, Coimbatore. 88 p.
- Singh, S.R. 2016. Soil Test Crop Response: Concepts and Components for Nutrient Use Efficiency Enhancement. In: *Biofortification of Food Crops*. p. 237-246. Springer India.
- Sprengel, C. 1832. *Chemie für Landwirte, Forstmänner und Kameralisten*, Göttingen.
- Subba Rao, A., and S. Srivastava. 2001. In: 16th Progress Report of the STCR Research Project, IISS, Bhopal. 200 p.
- Truog, E. 1960. Fifty Years of Soil Testing. *Trans 7th Intl. Congr. Soil Sci. Vol. III, Commission IV, Paper No. 7:46-53*.
- Velayutham, M. 1979. Fertilizer Recommendation Based on Targeted Yield Concept - Problems and Prospects. *Fert. News.* 24:12-20.
- Velayutham, M., K.C.K. Reddy, and G.R.M. Sankar. 1985a. Potassium Fertiliser Recommendations Based on Soil Tests in India. In: *Proc. Intl. Symposium on Potassium in Agricultural Soils, Dhaka*. p. 195-220.

- Velayutham, M., K.C.K. Reddy, and G.R.M. Sankar. 1985b. All India Coordinated Research Project on Soil Test - Crop Response Correlation and its Impact on Agricultural Production. *Fert. News*. 30(4):81-95.
- Velayutham, M., and H.L.S. Tandon. 2014. Various Methodologies for Formulating Soil Test Based Fertilizer Recommendations. In: Tandon, H.L.S. (ed.). *Soil Testing for Balanced Fertilisation - Technology-Application-Problems-Solutions*. p. 6-26.
- Wallace, A. 1993. The Law of the Maximum. *Better Crops* 77:20-22.
- Willcox, O.W. 1955. Meaning of the Great German Soil Fertility Survey. *Soil Sci.* 79:123-132.

“施肥‘最佳法则’及其在印度实现目标产量的应用小结”一文可以在国际钾肥研究所（IPI）官方网站上浏览下载：[区域活动/印度](#)。