

# 研究报告



印度Narendra Deva农业技术大学 (NDUAT) 水稻试验田, Kumarganj, Faizabad, UP, India.  
摄影: E. Sokolowski.

苗期单施钾肥或磷钾肥配合施用可提高淹水条件下水稻品种Swarna-Sub1的成活率和产量

Singh, A.K.<sup>(1)(1a)</sup>, P. Singh<sup>(1)</sup>, V.N. Singh<sup>(1)</sup>, A.H. Khan<sup>(1)</sup>, S. Singh<sup>(2)</sup>, A.K. Srivastava<sup>(2)</sup>, U.S. Singh<sup>(2)</sup>, A.M. Ismail<sup>(3)</sup>, and S.M. Haefele<sup>(4)</sup>

## 摘要

耐涝品种SUB1的引进极大地提高了低洼地水稻的产量,平均每公顷增产超过2t。考虑到这些品种的优势,北方邦政府在易受水淹的东部旱作低地地区大量培育SUB1耐涝品种。然而,很少有人注意到苗期营养,尤其是N、P、K肥的施用能极大地促进SUB1品种的生长,发挥其优势。鉴于此,笔者于2010、2011年雨季在印度NDUAT农业技术大学进行了相关的肥料研究。试验设7个处理,播种后10天施肥,氮肥选择尿素,磷肥选择过磷酸钙,钾肥选择

氯化钾,25天以后秧苗移栽到室外的下沉池塘。移栽15天后植株淹水13天,在排水5天和15天后分别记录植株存活率和恢复情况。在移栽前、浸水前、排水后、恢复后分别

<sup>(1)</sup>NDUAT农业技术大学, Kumarganj, Faizabad (UP), India

<sup>(2)</sup>国际水稻所 (IRRI), 印度新德里

<sup>(3)</sup>国际水稻所 (IRRI), 菲律宾Los Baños

<sup>(4)</sup>Adekaude大学Waite校区, 澳大利亚植物功能基因组学研究中心, 澳大利亚Adelaide

<sup>(1a)</sup>通讯作者 [assinghkumar3@gmail.com](mailto:assinghkumar3@gmail.com)

记录植株生长状况,进行养分分析。试验结果显示,处理5 (0-0-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 单施钾肥和处理6 (0-60-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 钾肥配施高剂量的磷肥在植株淹水13天后排水,植株成活率明显高于其他处理。处理1 (40-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 氮磷钾肥配合施用下水下幼苗的延长度最大,为25.4%,然而处理6 (0-60-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 和处理5 (0-0-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 的株高最大。排水后植株叶片中的氮磷钾的富集和吸收随施用量的减少而减少。此外,处理5 (0-0-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 的产量最高,处理6 (0-60-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>) 次之,这两个处理明显高于其他处理。钾肥的施用与苗期植株营养吸收、淹水条件下的存活、产量呈正相关。本试验研究显示在水稻苗期单施钾肥或者磷钾肥配合施用能使淹水后的植株快速复活,增加抵抗力,显著促进排水后的水稻的存活和再生。

## 引言

每年亚洲大约有2千万公顷的土地受到洪涝灾害,水稻生产因灾损失约6.5亿到10亿美元 (Herdt, 1991; Dey and Upadhyaya, 1996)。印度每年种植约1610万公顷的雨养旱作水稻,其中有440万公顷会受到涝害(intermediate rainfed lowlands; Haefele and Hijmans, 2007),此外,浅滩上的旱地和灌溉旱地都可能受到涝害。最近的研究显示,水稻SUB1基因是一个非常重要的抗涝基因,现在通过分子标记转移这种耐涝基因的克隆技术非常广泛,使之成为“伟大的品种”(Neeraja *et al.*, 2007; Septiningsih *et al.*, 2009)。在淹水条件下, SUB1对水稻存活力的影响是显著的,即使没有受到涝害,它也不会造成减产。国际水稻研究所研究显示,水稻完全淹水12~17天, SUB1品种的产量比无SUB1基因的品种产量平均高1~3.8 t ha<sup>-1</sup>,这在西孟加拉邦、奥利萨那、比卡尔、北方邦的农田得到了验证。在涝害发生时,非耐涝品种可能会发生不可挽回的损失,但是SUB1品种水稻基本不会造成减产(Mackill *et al.*, 2012)。2012年SUB1品种在印度的北方邦和奥利萨邦推广,比普通低地水稻品种增产1~2 t ha<sup>-1</sup>。

考虑到Swarna-Sub1品种的优点,北方邦已经大规模的繁育种子,广泛种植,但为充分利用SUB1基因渗入品种的抗涝性而与之配套的养管理却进展不大。最近有研究报道,涝害叶片氮含量高不利于植株的存活,如果缺磷土壤中增施氮肥能促进植株的耐涝性(Ella and Ismail, 2006)。此外,还没有公开发表的研究结果显示,叶片中氮含量无论是多少都会降低植株的存活性。如果在缺锌的土壤中施用锌肥能增加植株的存活性。有趣的是Wade *et al.* (1999)研究发现,在可能遭受涝害的旱作水稻田中施用氮的缓控释肥料是最理想的。此外,秧田施用农家肥、降低播种密度、移栽壮秧苗也能显著提高涝害后植株的存活率(Bhowmick *et al.*, 2014)。

关于在涝害发生时施用钾肥能提高水稻产量的研究较少。然而,涝害之后水稻的养管理显示,施肥特别是氮肥的施用能促进植株恢复生长和分蘖,进而提高产量,这表明在抗涝品种SUB1上施肥的管理与作物的生长密切相关。抗涝品种Swarna-Sub1已经在印度和孟加拉国推广种植,现在还有另外几个国家正在推广,因此迫切需要获得更多的营养管理对该品种耐涝性影响的信息。本文的目的是研究养管理,尤其是钾肥施用对涝害条件下具有较高耐涝性的Swarna-Sub1品种的耐涝能力的影响。

## 材料与方

### 试验地点

试验于2010-2011年秋季在印度北方邦Kumarganj的NDUAT农业技术大学作物生理系的教学农场进行。地块位于北方邦东部的恒河冲击平原,北纬26°47',东经82°12',海拔113m,属于半干旱地区,年平均降水量1100mm,其中80%的降雨集中在7~9月的雨季,剩余的20%降雨在冬季。2010-2011年试验地土壤理化性质如下:土壤由35.2%的砂质,48.6%的粉砂和16.2%的粘土构成,田间持水量为39.60%,容积密度1.3g cm<sup>-2</sup>, pH7.6,电导率0.2ds m<sup>-1</sup>,有机质3g kg<sup>-1</sup>,碱解氮57mg kg<sup>-1</sup>,有效磷7mg kg<sup>-1</sup>,速效钾218mg kg<sup>-1</sup>,氮磷钾元素的测定和计算分别采用Subbiah and Asiza (1956), Jackson (1969), and Olsen *et al.* (1954)的方法。

### 试验设计和作物管理

#### 苗期培育

试验选用抗涝水稻品种SUB1,三元素随机区组设计,2011、2012年都是6月7日播种于那伦德拉天神农业技术大学的教学农场,播种量50g m<sup>-2</sup>,小区面积2m×2m,设7个苗期施肥方案,播种10天后施肥。具体见表1。

氮肥选用尿素,磷肥选用过磷酸钙,钾肥选用氯化钾。磷钾肥作为基肥一次性施入,氮肥分两次等量施加,第一次是播种后10天,第二次是播种后20天。

表1. 不同试验处理N-P-K施肥量

处理	N-P-K	N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O
		-----kg ha <sup>-1</sup> -----
T <sub>1</sub>	N-P-K	40-40-40
T <sub>2</sub>	N	40-0-0
T <sub>3</sub>	P-K	0-40-40
T <sub>4</sub>	P	0-40-0
T <sub>5</sub>	K	0-0-40
T <sub>6</sub>	P-K	0-60-40
T <sub>7</sub>	P	0-60-0

### 主要的田间试验 (边池塘)

把25天的秧苗移栽到一个新建的下沉池塘,池塘位于那伦德拉天神农业技术大学的作物生理研究田,并保留到实验结束。池塘覆盖塑料膜,其规格为20m×17m×1.5m。移栽前7天撒牛粪,施用量为6t ha<sup>-1</sup>。氮磷钾肥的施用量(N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O)分别为80-40-40kg ha<sup>-1</sup>。磷钾肥作为基肥一次性施入,氮肥分3次施用,第一次是放水后5天,施用量为40kg ha<sup>-1</sup>,随后分别在移栽后的60天和90天各施氮肥20kg ha<sup>-1</sup>。

两年试验都是7月2日移栽,移栽密度为20cm×15cm,小区面积为2.5m×2m,移栽15天后,用浑浊的河流水浸田13天,浸田时直到中午才放水到池塘,这样植株在早上有足够的时间积累碳水化合物。定期加水使水位保持在70~75cm,在排水5和15天后分别记录植株存活量和复活率。试验过程中其他农事操作和保护措施采用传统的方法。

### 观察和统计分析

观察记录不同时期的植株的生长参数如株高、干物质质量、植株数和产量。每一小区随机取10行植株测量,在复活前后记录各小区植株数量,在移栽前、放水前后、复活后都要记录株高。记录在插秧前、浸水前后的干物质量,产量在成熟后测算。样品要在70度的烘箱至恒重。在插秧前,淹水前和放水后干物质中的氮磷钾的测量依据Lindner (1944) 和 Jackson (1973)。计算养分的吸收依据生物量和元素含量,数据整理分析方法依据Gomez and Gomez (1984)。

### 结果与讨论

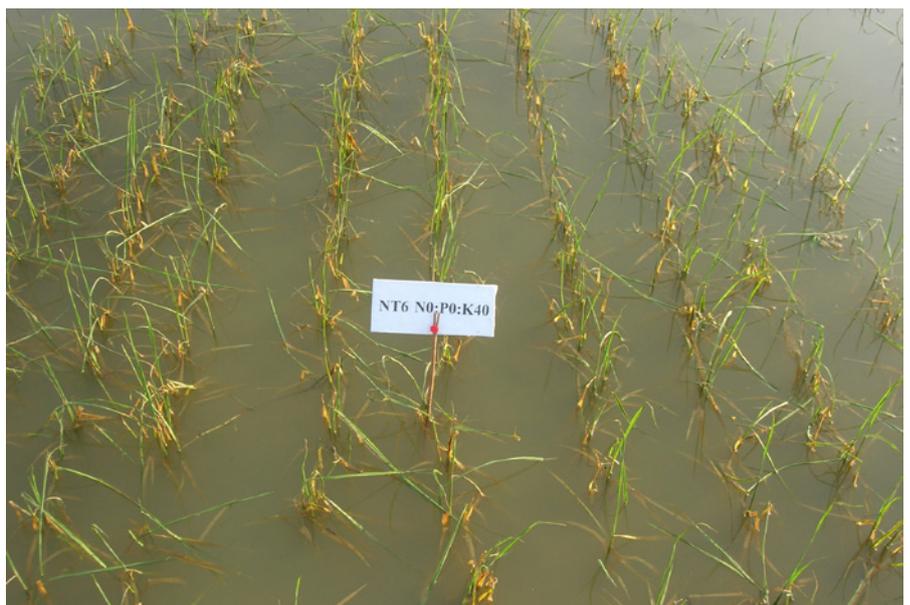
#### 存活率和生长参数

试验结果显示处理5 (0-0-40) 单施钾肥和处理6 (0-60-40) 钾肥配合施用较高剂量的磷肥有相对高的存活率,而处理2 (40-0-0) 单施氮肥和处理4 (0-40-0) 单施磷肥的存活率相对较低(表2)。可以看出,水稻淹



新建的下沉式试验稻田,为了满足试验设计的要求采用塑料薄膜覆盖。  
摄影: E. Sokolowski。

水一段时间后再排水单施氮肥或磷肥不能维持植株在淹水条件下的正常生长和生化过程,即不能支持氧自由基的快速解毒,从而引起作物中毒。因此,我们认为在营养供应方面,钾或者钾配合较高剂量的磷施用能提高植株存活率有2个原因: 1) 淹水后能促进植株有更大的容量维持内部气体扩散或更多的能量维持正常生长和发育过程。2) 加强促使这些SUB1基因能在淹水后快速做出抗氧化防



淹水的秧苗。摄影: E. Sokolowski。

卫机制。根据Shabala和Pottosin (2014) 研究报道显示, 在淹水过程中植株大量钾元素损失, 相应的水稻幼苗中产生大量活性氧 (ROS), 这是因为ROS侵害膜脂质双分子层的不饱和甘油三酯, 破坏膜的完整性, 植株的钾元素流出损失。植物根系中较高的钾含量, 可能是那些植物生长早期容易淹水的低地上作物成活率提高的一个重要因素。此外, 植株钾或者钾磷元素供应充足, 比不施磷钾的更能避免作物缺钾状况发生。钾元素在光合作用中扮演一个重要的角色, 当钾元素缺乏时, ROS生成, 产生有害影响 (Cakmak, 2005)。在实际生产中应施钾以避免钾元素的缺乏。

氮元素在决定植株生物量方面扮演一个重要的角色, 尤其是在排水后增加氮元素的供应更是如此 (表2)。排水15天后在所有处理中植物生物量最大的出现在处理1 (40-40-40), 其次是处理2 (40-0-0), 这两个处理都是氮元素供应充分, 而处理4 (0-40-0) 的植株生物量最少, 因为缺少氮元素和钾元素的供应。氮元素的有利影响也在Bhowmick *et al.* (2014) 的研究中得到验证, 研究中称同为耐涝水稻品种Swarna-Sub1在淹水7天后增加氮肥施用量能提高存活率, 排水后恢复较好, 产量提高。试验中所有处理生出新叶都在放水后3天 (表2)。

因为苗期不同的营养搭配, 在连根拔起移栽前, 幼苗的株高明显不同, 各处理的株高在13.9~17.1cm之间变化, 其中处理1 (40-40-40) 的株高最大为17.7cm, 紧随其后的是处理6 (0-60-40) 为16.8cm, 而处理4 (0-40-0) 的株高最低为13.9cm。根据Yoshida (1981) 称: “株高是一个重要的植物特征, 不仅由基因控制着, 而且也受到生存条件、幼苗活力和养分状况的影响。” 试验中最大的株高出现在处理1 (40-40-40), 可能是该处理的营养供应比较平衡, 处理4 (0-40-0) 株高最低, 这可能是单施磷肥结果, 而处理6 (0-60-40) 磷肥配合钾肥施用后株高明显增高至16.8cm (表3)。移栽15天后, 淹水之前处理7 (0-60-0) 的株高最大, 处理4 (0-40-0) 次之, 明显高于其他株高, 处理1 (40-40-40)

的株高最低。然而排水后立即再次测量株高和计算幼苗延伸率 (即为淹水期的株高和延伸率), 株高延伸率最小的是处理7 (0-60-0) 为14.2%, 最大的是处理1 (40-40-40) 为25.4%。不同于深水植物和水生植物, 旱作水稻在淹水后生长缓慢的重要性被认为是有利的, 因为这能阻止伤害, 囤积力量, 待洪水退后快速生长 (Singh, 2001; Jackson and Ram, 2003; Srivastava, 2007)。每天延伸率处理1 (40-40-40) 的最高为0.54cm, 其次为处理5 (0-0-40) 的为0.52, 处理7 (0-60-0) 的最低, 为0.34 (图1)。植株恢复后可以看出最大的株高出现在处理5 (0-0-40) 为48.83cm, 其次为处理6 (0-60-40), 47.03cm, 处理4 (0-40-0) 的株高最低, 为42.47cm。从放水后15天后的恢复情况看, 株高增加最大的为处理6 (0-60-40), 为49.8%, 其次为处理5 (0-0-40), 为43.7%, 最低的是处理4 (0-40-0), 为25.5% (表3)。

表2. 苗期营养管理对Swarna-Sub1水稻品种的幼苗存活率、涝后再生和新叶出现天数的影响

处理	N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O 施用量 kg ha <sup>-1</sup>	每株莖数			存活率 <sup>(1)</sup> %	新叶出现天数 (DAD)
		BS	AS	AR		
T <sub>1</sub>	40-40-40	134.3	108.7	129.6	80.9	3 <sup>rd</sup>
T <sub>2</sub>	40-0-0	135.0	96.3	129.0	71.3	3 <sup>rd</sup>
T <sub>3</sub>	0-40-40	132.0	115.0	121.0	87.1	3 <sup>rd</sup>
T <sub>4</sub>	0-40-0	122.6	92.0	119.0	75.0	3 <sup>rd</sup>
T <sub>5</sub>	0-0-40	128.6	116.7	125.3	90.8	3 <sup>rd</sup>
T <sub>6</sub>	0-60-40	127.6	114.7	126.0	89.9	3 <sup>rd</sup>
T <sub>7</sub>	0-60-0	125.0	106.3	125.0	85.0	3 <sup>rd</sup>
LSD at 5%		2.98	6.35	6.99	2.83	-

注: BS: 淹水之前; AS: 排水之后 (完全淹水13天后排水); AR: 恢复 (排水15天后); ADA: 排水后天数。

<sup>(1)</sup> 存活率在排水5天后统计。

移栽15天后, 秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

表3. 苗期营养管理对Swarna-Sub1水稻株高和伸长率 (%)的影响

处理	N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O 施用量 kg ha <sup>-1</sup>	株高			
		BT	BS	AS	AR
T <sub>1</sub>	40-40-40	17.67	25.73	32.27 (25.4) <sup>(1)</sup>	46.33 (43.6) <sup>(2)</sup>
T <sub>2</sub>	40-0-0	15.93	27.22	32.83 (20.6)	45.77 (39.4)
T <sub>3</sub>	0-40-40	14.67	26.97	33.00 (22.4)	43.80 (32.7)
T <sub>4</sub>	0-40-0	13.90	28.70	33.83 (17.9)	42.47 (25.5)
T <sub>5</sub>	0-0-40	14.07	27.73	33.97 (22.5)	48.83 (43.7)
T <sub>6</sub>	0-60-40	16.77	25.80	31.40 (21.7)	47.03 (49.8)
T <sub>7</sub>	0-60-0	14.13	28.73	32.80 (14.2)	46.23 (40.9)
LSD at 5%		0.86	0.87	1.14	1.23

<sup>(1)</sup> 括号里的数字为AS相对BS增长的百分数。

<sup>(2)</sup> 括号里的数字为AR相对AS增长的百分数。

注: BT: 移栽之前; BS: 淹水之前; AS: 排水之后 (完全淹水13天后排水); AR: 恢复 (排水15天后)。移栽15天后, 秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

由表4可以看出各处理幼苗干重在0.51~0.57mg之间变化,处理6(0-60-40)的最高,为0.57mg,其次为处理2(40-0-0),0.51mg。Singh *et al.* (2005) 报道幼苗生长的各种指标特征依赖于养分管理,这与我们的研究结果一致。淹水前最大幼苗干重是处理3(0-40-40)为0.61mg,其次为处理1(40-40-40),为0.60mg,最小的为处理7(0-60-0),为0.57mg。排水后则是处理5(0-0-40)和处理6(0-60-40)的幼苗干重增加最大,均为18.97%,最小的则为处理2(40-0-0)和处理4(0-40-0),均为3.39%。Winkel *et al.* (2013)和Winkel *et al.* (2014)报道水稻叶片有气膜来帮助氧气和二氧化碳进行交换,淹水条件下植株在水的深处通过强的辐射度而进行水下光合作用发生,放水后导致生物量产生,然而这更多的依赖于洪水的性质特征。在淹水条件下,维持正常新陈代谢活动而消耗储备物质(RFM)和水下光合作用之间产生一种新的平衡,补偿新合成的吸收损失。Winkel *et al.* (2014)研究对比了4种水稻基因型,发现在淹水13天后光合作用存在差异。发现 Swarna-Sub1水稻(携带SUB1基因)在淹水过程中光合作用下降,气膜保留与SUB1基因没有联系。

营养分析,吸收和产量

移栽和浸水前,幼苗中氮元素含量最高的是处理2(40-0-0),但是排水后,处理1(40-40-40)的最高,可能是因为在这两个处理中都施用了氮肥。移栽和浸水前,幼

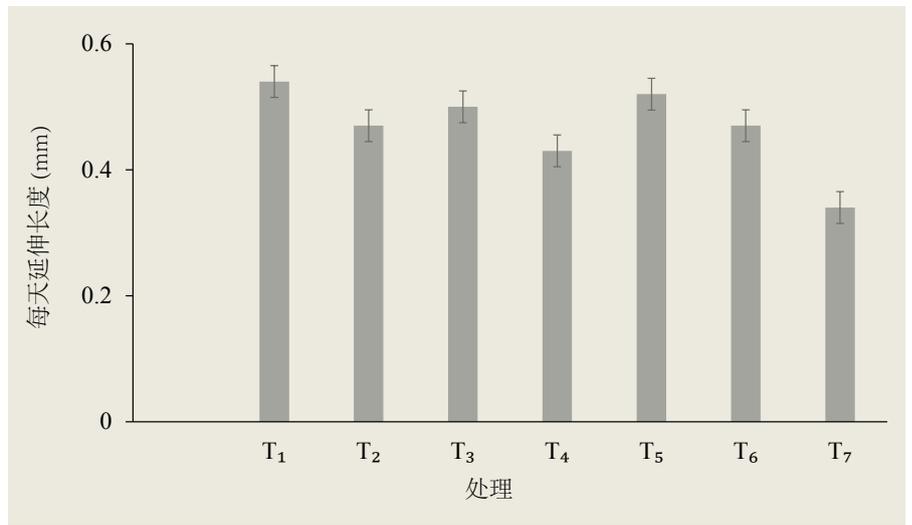


图1. 苗期不同养分处理对在完全淹水的13天里Swarna-Sub1水稻水下茎每天延伸长度 (cm) 的影响  
注: T<sub>1</sub>: 40-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>2</sub>: 40-0-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>3</sub>: 0-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>4</sub>: 0-40-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>5</sub>: 0-0-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>6</sub>: 0-60-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>7</sub>: 0-60-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>. 移栽15天后,秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

苗中磷元素的含量最高的是处理6(0-60-40),放水后,处理7(0-60-0)的含量最高,同样的道理推测,这两个处理都施用了磷肥。移栽前,幼苗中钾元素含量最高的是处理3(0-40-40),浸水前和放水后,处理5(0-0-40)和处理6(0-60-40)的含量最高。Ella和Ismail (2006)报道水稻叶片中氮元素含量高是有害的,在生长初期易受洪水的影响,单施氮肥不利于植株存活,幼苗储备的碳水化合物容易很快消耗尽,导致严重的过氧化损害发生。然而氮肥配合充足的磷钾肥能大大提高Swarna-Sub1(渗入SUB1基因)品种的存活率。就这一点而言, Singh (2011) 研究报道在排水后5天施用氮肥比氮磷钾肥在一开始施用,植株有更高的再生能力。

氮磷钾在移栽前,浸水前和放水后三个时间的吸收如图2所示。氮的吸收模式在所有阶段是相似的,处理1(40-40-40)和处理2(40-0-0)吸收的较多,放水后,处理4(0-40-0)的吸收显著下降,可能是由于浸水后氮磷吸收产生一个相互作用。在移栽前处理6(0-60-40)和处理7(0-60-0)的磷吸收最高,归因于磷肥的施用量高,然而,处理7(0-60-0)小于处理6(0-60-40)。浸水前处理2(40-0-0)和处理5(0-0-40)吸收的磷少可能是因为单施氮钾肥,没有施用磷肥。但放水后,所有处理的磷吸收变大,这

表4. Swarna-Sub1基因型水稻苗期养分管理对其干重的影响

处理	N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O 施用量 kg ha <sup>-1</sup>	植株干重		
		BT	BS	AS
T <sub>1</sub>	40-40-40	0.53	0.60	0.64 (6.67) <sup>(1)</sup>
T <sub>2</sub>	40-0-0	0.51	0.59	0.61 (3.39)
T <sub>3</sub>	0-40-40	0.53	0.61	0.63 (3.28)
T <sub>4</sub>	0-40-0	0.52	0.59	0.61 (3.39)
T <sub>5</sub>	0-0-40	0.53	0.58	0.69 (18.97)
T <sub>6</sub>	0-60-40	0.57	0.58	0.69 (18.97)
T <sub>7</sub>	0-60-0	0.55	0.56	0.66 (17.86)
LSD at 5%		0.001	0.005	0.003

<sup>(1)</sup> 括号里的数字为AS相对BS增长的百分数。

注: BT: 移栽之前; BS: 淹水之前; AS: 排水之后(完全淹水13天后排水)。移栽15天后,秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

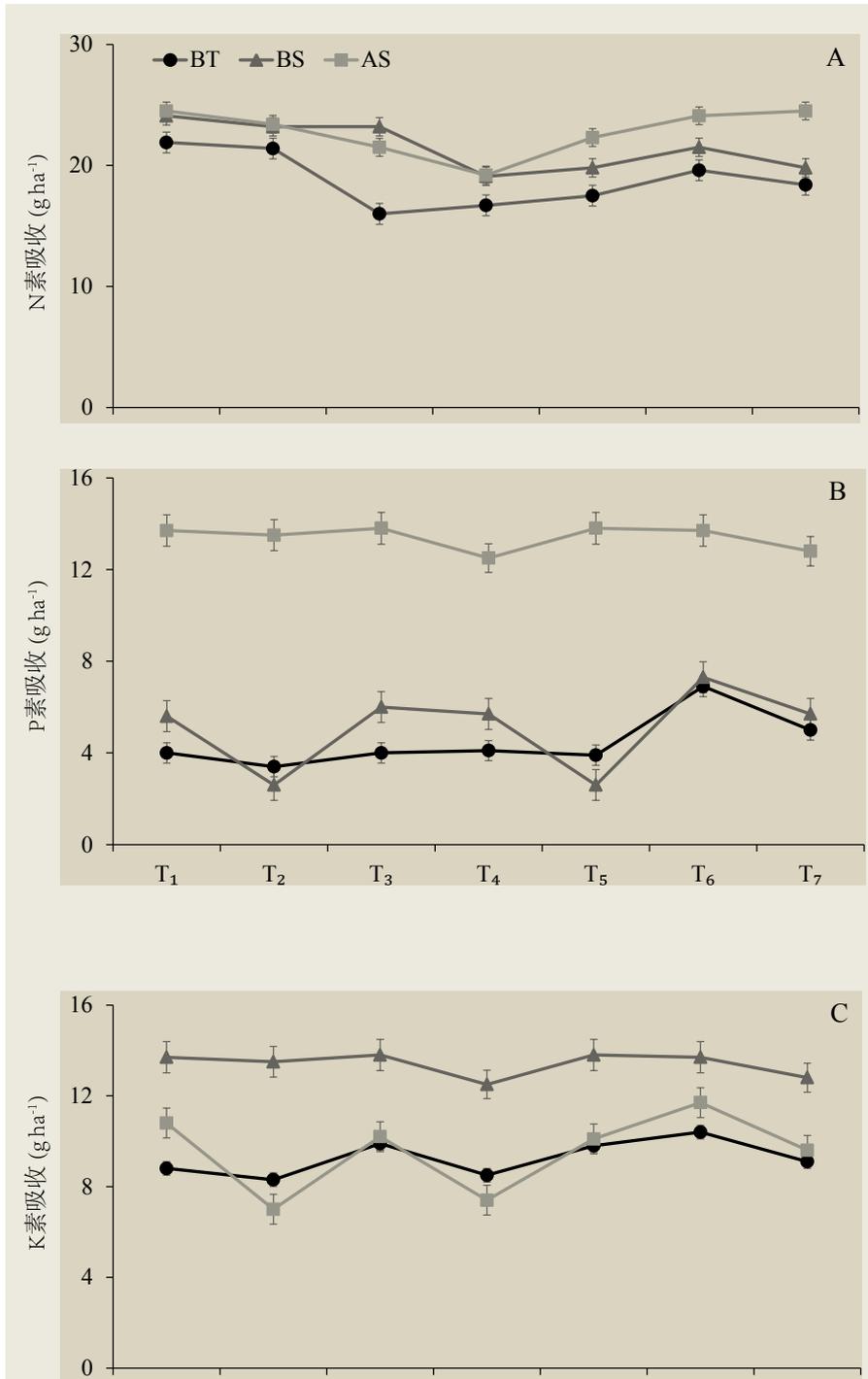


图2. 秧苗苗期营养处理对养分吸收的影响; A) N素吸收 (g ha<sup>-1</sup>), B) P素吸收 (g ha<sup>-1</sup>), C) K素吸收 (g ha<sup>-1</sup>)。竖条表示对应的SD值。  
注: BT: 移栽之前; BS: 淹水之前; AS: 排水之后 (完全淹水13天后排水)。  
T<sub>1</sub>: 40-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>2</sub>: 40-0-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>3</sub>: 0-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>4</sub>: 0-40-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>5</sub>: 0-0-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>6</sub>: 0-60-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>7</sub>: 0-60-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>。  
移栽15天后, 秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

可能是因为浸水后土壤中有有效磷增加Singh (2011)。移栽前施钾肥的钾的吸收就大。有意思的是同样是磷钾肥同施, 处理6 (0-60-40) 钾元素的吸收高于处理3 (0-40-40), 随磷的施用量增加钾吸收的量变大。浸水前所有处理钾元素的吸收高于移栽前, 放水后, 处理2 (40-0-0), 处理4 (0-40-0) 和处理7 (0-60-0) 钾元素的吸收显著下降。

水稻产量最大的是处理5 (0-0-40), 其次是处理6 (0-60-40), 这两个处理明显高于其他处理。随着磷肥施用的减少, 处理4 (0-40-0) 和处理3 (0-40-40) 产量低于处理7 (0-60-0) 和处理6 (0-60-40) 的产量。可以看出产量上的差异仅仅与磷肥的施用有关, 然而, 钾肥施用引起产量方面的差异不明显 (图3)。最低的产量是处理2 (40-0-0)。这些试验结果明显的表示, 单施氮肥会在淹水之后排水产生不利影响即存活率低或作物的难恢复。在移栽前苗期供应钾元素能对植株产生正面影响, 进而影响浸水后来的生长。幼苗中钾元素的含量和吸收与存活率呈正相关, 相关系数0.95和0.92, 与产量的相关系数为0.60和0.45。相反, 幼苗中氮元素的含量和吸收与存活率呈负相关, 相关系数为-0.58和-0.36。

### 结论

试验结果显示单施钾肥40kg ha<sup>-1</sup> 或者在施钾肥的基础上增施60kg ha<sup>-1</sup> 磷肥能明显提高存活率, 然后帮助迅速再生, 同样产量随之提高。适当的钾元素营养能增加耐涝性和产量, 对比正常的磷肥施用量适当高的磷元素结合正常钾元素的施用也能造成高的产量。不过这些结果需要更深入的大田试验验证是否可以施用少的氮结合磷钾肥。

## 感谢

非常感谢那伦德拉天神农业大学对试验进行提供的帮助, 包括对试验场地的提供, 土壤和植株养分化验。同时感谢北方邦政府和国际钾肥研究所对本研究提供的资金支持。

## 参考文献

- Bhowmick, M.K., M.C. Dhara, S. Singh, M.H. Dar, and U.S. Singh. 2014. Improved Management options for Submergence-Tolerant (SUB1) Rice Genotype in Flood-Prone Rainfed Lowlands of West Bengal. *Amer. J. Plant Sci.* 5:14-23.
- Cakmak, I. 2005. The Role of Potassium in Alleviating Detrimental Effects of Abiotic Stresses in Plants. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168:521-530.
- Dey, M.M., and H.K. Upadhyaya. 1996. Yield Loss Due to Drought, Cold and Submergence in Asia. *In: Evenson, R.E., R.W. Herdt, and M. Hossain (eds.), Rice Research in Asia: Progress and Priorities.* CAB International, Wallingford. p. 291-303.
- Ella, E.S., and A.M. Ismail. 2006. Seedling Nutrient Status Before Submergence Affects Survival After Submergence in Rice. *Crop Sci.* 46:1673-1681.
- Gomez, K.A., and A.A. Gomez. 1984. *Statistical Procedures for Agricultural Research.* Second Edition. A Wiley-Inter-Science Publication (John Wiley and Sons), New York.
- Haefele, S.M., and R.J. Hijmans. 2007. Soil Quality in Rice-Based Rainfed Lowlands of Asia: Characterization and Distribution. *In: Aggarwal, P.K., J.K. Ladha, R.K. Singh, C. Devakumar, and B. Hardy (eds.), Science, Technology, and Trade for Peace and Prosperity. Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Rice Research Conference, 9-12 October 2006, New Delhi, India.* Los Baños (Philippines) and New Delhi (India): International Rice Research Institute, Indian Council of Agricultural Research, and National Academy of Agricultural Sciences. p. 297-308.
- Herdt, R.W. 1991. Research Priorities for Rice Biotechnology. *In: Khush, G.S., and G.H. Toenniessen (eds.), Rice Biotechnology.* CAB International, UK, pp. 19-54.
- Jackson, M.B., and P.C. Ram. 2003. Physiological and Molecular Basis of Susceptibility and Tolerance of Rice Plants to Complete Submergence. *Ann. Bot.* 91:227-241.
- Jackson, M.L. 1973. *Soil Chemical Analysis.* Prentice Hall Inc. India. p. 281-285.
- Lindner, R.C. 1944. Rapid Analytical Method for Some of the More Common Inorganic Constituents of the Plant Tissues. *Plant Physiol.* 19:76-89.
- Mackill, D.J., A.M. Ismail, U.S. Singh, R.V. Labios, and T.R. Paris. 2012. Development and Rapid Adoption of Submergence-Tolerant (SUB1) Rice Varieties. *Adv. Agron.* 115:299-352.
- Neeraja, C., R. Maghirang-Rodriguez, A. Pamplona, S. Heuer, B. Collard, E. Septiningsih, G. Vergara, D. Sanchez, K. Xu,

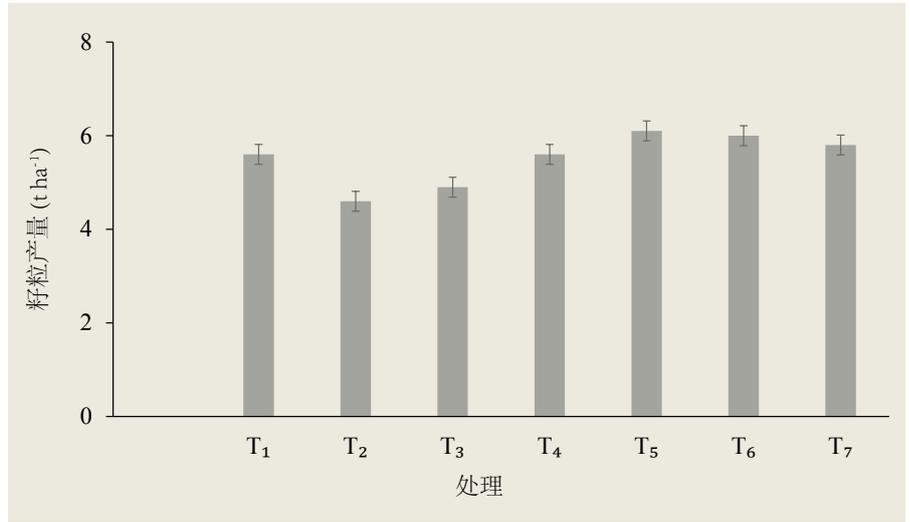


图3. 苗期营养管理对Swarna-Sub1水稻籽粒产量的影响 (籽粒在排水后93-97天时收获)

Note: T<sub>1</sub>: 40-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>2</sub>: 40-0-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>3</sub>: 0-40-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>4</sub>: 0-40-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>5</sub>: 0-0-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>6</sub>: 0-60-40 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>, T<sub>7</sub>: 0-60-0 kg N-P-K ha<sup>-1</sup>. 移栽15天后, 秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

表5. Swarna-Sub1水稻早期淹水 (5天) 水稻的N、P、K养分含量

处理	N, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O 施用量 kg ha <sup>-1</sup>	BT			BS			AS		
		N	P	K	N	P	K	N	P	K
T <sub>1</sub>	40-40-40	4.02	0.77	1.66	3.83	0.94	2.29	3.83	0.08	1.68
T <sub>2</sub>	40-0-0	4.20	0.66	1.63	3.93	0.44	2.08	3.84	0.09	1.14
T <sub>3</sub>	0-40-40	3.02	0.75	1.86	3.81	0.98	2.26	3.42	0.14	1.62
T <sub>4</sub>	0-40-0	3.21	0.78	1.64	3.24	0.96	2.12	3.14	0.13	1.22
T <sub>5</sub>	0-0-40	3.30	0.74	1.84	3.42	0.45	2.38	3.23	0.10	1.47
T <sub>6</sub>	0-60-40	3.43	1.05	1.83	3.71	1.25	2.36	3.49	0.16	1.70
T <sub>7</sub>	0-60-0	3.35	1.04	1.66	3.53	1.02	2.28	3.41	0.17	1.46
LSD at 5%		0.11	0.03	0.05	0.07	0.01	0.06	0.08	0.01	0.12

注: BT: 移栽之前; BS: 淹水之前; AS: 排水之后 (完全淹水13天后排水)。

移栽15天后, 秧苗在室外池塘自然条件下完全淹水13天。

- A. Ismail, and D. Mackill. 2007. A Marker-Assisted Backcross Approach for Developing Submergence-Tolerant Rice Cultivars. *Theor. Appl. Genet.* 115:767-776.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanube, and L.A. Dean. 1954. Estimation of Available Phosphorus in Soil by Extraction with  $\text{NaHCO}_3$ , USDA circ. 939:19-33.
- Ram, P.C., M.A. Mazid, A.M. Ismail, P.N. Singh, V.N. Singh, M.A. Haque, U.S. Singh, E.S. Ella, and B.B. Singh. 2009. Crop and Resource Management in Flood Prone Areas: Farmer's Strategies and Research Developments. *In: Haefele, S.M., and A.M. Ismail (eds.), Proceedings Natural Resource Management for Poverty Reduction and Environmental Sustainability in Fragile Rice-Based Systems, Los Baños (Philippines), International Rice Research Institute, 2009. p. 82-94.*
- Septiningsih, E.M., A.M. Pamplona, D.L. Sanchez, C.N. Neeraja, G.V. Vergara, S. Heuer, A.M. Ismail, and D.J. Mackill. 2009. Development of Submergence-Tolerant Rice Cultivars: The SUB1 Locus and Beyond. *Ann. Bot.* 103:151-160.
- Shabala, S., and I. Pottosin. 2014. Potassium Transport in Plants Under Hostile Conditions: Implications for Abiotic and Biotic Stress Tolerance. *Physiol. Plant.* 151(3):257-279.
- Singh, H.P., B.B. Singh, and P.C. Ram. 2001. Submergence Tolerance of Rainfed Lowland Rice: Search for the Physiological Markers Traits. *J. Plant Physiol.* 158:883-889.
- Singh, K.N., B. Hassan, B.A. Kandy, and A.K. Bhat. 2005. Effect of Nursery Fertilization on Seedling Growth and Yield of Rice. *Indian J. Agron.* 50(3):187-189.
- Singh, P. 2011. Nutrient Management in Nursery for Improving Submergence Tolerance in Swarna-Sub1 Rice (*Oryza sativa* L.). M.Sc. Dissertation, Narendra Deva University of Agriculture and Technology, Kumarganj, Faizabad (U.P.).
- Singh, S., D.J. Mackill, and A.M. Ismail. 2009. Responses of SUB1 Introgression Lines to Submergence in the Field: Yield and Grain Quality. *Field Crops Res.* 113:12-23.
- Srivastava, A.K., P.N. Singh, S. Kumar, P.C. Ram, and A. Ismail. 2007. Physiological Changes Associated with Submergence Tolerance in Genetically Diverse Lowland Genotypes. *Tropical Agric. Res.* 19:240-253.
- Subbiah, B.V., and G. L. Asija. 1956. A Rapid Procedure for Estimation of Available N in Soils. *Curr. Sci.* 25:259-260.
- Wade, L.J., S.T. Amarante, A. Olea, D. Harnpichitvitaya, K. Naklang, A. Wihardjaka, S.S. Sengar, M.A. Mazid, G. Singh, and C.G. McLaren. 1999. Nutrient Requirements in Rainfed Lowland Rice. *Field Crops Res.* 64:91-107.
- Winkel, A., T.D. Colmer, A.M. Ismail, and O. Pedersen. 2013. Internal Aeration of Paddy Field Rice (*Oryza sativa*) During Complete Submergence - Importance of Light and Floodwater  $\text{O}_2$ . *New Phytol.* 197:1193-203.
- Winkel, A., O. Pedersen, E. Evangelina, A.M. Ismail, and T.D. Colmer. 2014. Gas Film Retention and Underwater Photosynthesis During Field Submergence of Four Contrasting Rice Genotypes. *J Exp. Bot.* 65:3225-3233.
- Xu, K., X. Xia, T. Fukao, P. Canlas, R. Maghirang-Rodriguez, S. Heuer, A.M. Ismail, J. Bailey-Serres, P.C. Ronald, and D.J. Mackill. 2006. SUB1A is an Ethylene-Response-Factor-Like Gene that Confers Submergence Tolerance to Rice. *Nature* 442:705-708.
- Yoshida, S. 1981. Mineral Nutrient of Rice: *In: Yoshida, S. (ed.), Fundamentals of Rice Crop Science. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños. p. 111-146.*

“本文“苗期单施钾肥或磷钾肥配合施用可提高淹水条件下水稻品种Swarna-Sub1的成活率和产量”也可以在IPI官方网站上浏览下载：[区域活动/印度](#)”