

1 养分管理

C. Witt¹, R.J. Buresh², S. Peng², V. Balasubramanian² and A. Dobermann²

1.1 产量差额形成的原因及分析

大多数稻农在某一特定地区所种植水稻的产量往往发挥不到其最大气候和水稻遗传潜力的60%，下面这个简单的模型可以用来说明影响“产量差额”形成的因素（图1）。

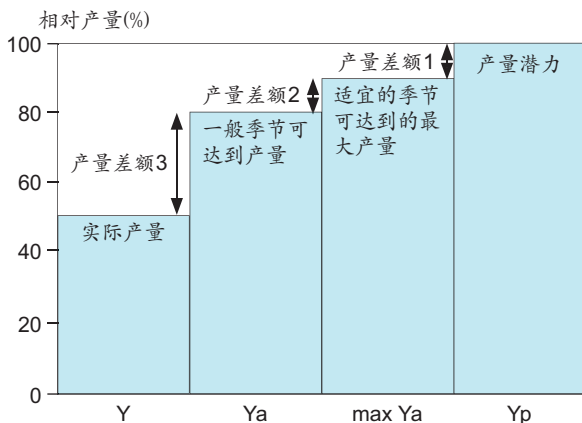


图 1. 养分和作物管理对水稻实际产量 (Y)、可达到产量 (Ya)、最大可达到产量 (max Ya) 与产量潜力 (Yp) 的影响举例。

1. 国际植物营养研究所 - 国际钾肥研究所东南亚项目部, 新加坡; 2. 国际水稻研究所, 菲律宾 Los Baños

水稻产量潜力 (Y_p) 是指仅受气候和品种的影响, 而其他因素处于最佳水平时的产量(图1)。由于受气候影响, 最大产量在不同年份之间会出现波动 ($\pm 10\%$)。对于位于南亚和东南亚热带地区的大部分水稻生长环境而言, 目前广泛种植的高产水稻品种在高产季 (HYS) 其产量潜力大约为10吨/公顷, 而低产季 (LYS) 其产量潜力为7–8吨/公顷。

最大可达到产量 ($\max Y_a$) 是指在适宜的气候条件以及优良的作物与水管理之下, 同时其他因素造成的减产效应(如病虫害的压力等等)很小的情况下所能达到的产量。这种情况下形成的产量差额较小 (产量差额1) (图1)。

可达到产量 (Y_a) 是指在典型年份当作物、养分和水管理较好实施的情况下在农民田块可达到的有着较高收益的产量。在没有明显限产因素的情况下, 可达到产量往往是产量潜力的75–80% (例如: 在高产季可达到7–8吨/公顷, 在低产季可达到5–6.5吨/公顷)。在大多情况下, 若要缩小产量差额2 (图1) 是很不经济的, 这主要是因为需要大量的投入并且由于作物倒伏和病虫害加剧所导致的作物歉收的风险很高。

农民田块中的实际产量 (Y) 通常低于可达到产量, 这主要归因于气候以外的其他因子的限制, 如养分、种子质量、杂草、虫害和病害以

及水分供应等限产因素（产量差额3）。提高养分管理水平，并结合优良的作物和水分管理，可以帮助农民降低产量差额3。通过优化养分管理可以获得最大的收益，这种情况主要发生在具有良好的作物管理和最少的虫害问题的农民田块上。

理解产量差额的成因是十分重要的，因为它们可导致：

- ▶ 农户收益的降低；
- ▶ 在水稻研究和发展上投资（例如：灌溉设备）利润的回报减少；
- ▶ 水稻生产能力降低，引起食物危机，增加了对水稻进口的需求。

农民需要理解一些特殊措施对生产力、收益率以及同时克服某些限制因子后所引起的综合效应的影响，例如病虫害问题可通过更适宜的养分管理得到减轻。推荐施肥策略可以基于可达到的产量目标（=产量目标）来建立，在作物歉收的风险最低的情况下实现高产和高收益。肥料的推荐策略对于氮而言应当足够灵活（N）同时提高磷钾活力（PK），以便在特别适宜的生产季能够实现最大可达到产量（maxYa）。

作物管理

大多数作物管理的措施都会影响作物对优化养分管理的响应。

考虑以下几点:

- ▶ 使用具有适合高产潜力的优质种子;
- ▶ 移栽适龄的幼苗 (例如: 苗龄10-20天);
- ▶ 适当平整土地并保持整个农田适宜均匀的水层, 使作物长势一致。这可减少用水总量;
- ▶ 选择合适的种植密度, 建立高效的冠层 (例如: 移栽稻的密度保持20-40穴/平方米、1-3株/穴; 浅水直播水稻每公顷撒播80-120公斤种子);
- ▶ 避免杂草与水稻竞争空间、水分、阳光和养分。

只有在良好的作物管理条件下才能使优化养分管理技术的潜力得到充分发挥。

病虫害

病虫害通过破坏叶片冠层、茎秆和籽粒从而影响优化养分管理对作物生长所发挥的效应。

灌溉稻最常见的病虫害有纹枯病、白叶枯病、茎腐病、螟虫、东格鲁病、褐飞虱、鼠害和鸟害。

考虑以下几点:

- ▶ 使用能抵抗常见病虫害的品种;
- ▶ 避免过量施氮, 防止叶片徒长诱发病虫害的发生;
- ▶ 在施用氮肥之前, 评价作物生长情况、叶片颜色 (使用叶色卡) 和病虫害发生频率;

- ▶ 缺钾水稻在氮肥用量过多和钾肥施用不足的情况下会引起多种病害（例如：褐斑病、纹枯病、稻白叶枯病、茎腐病和稻瘟病），导致更大的损失；
- ▶ 与其他农民合作实施综合虫害管理。

高效施用氮肥和平衡营养可把倒伏和病虫害发生的风险降到最低水平。

养分管理

只有保证在作物生长的适宜时期供给适宜的养分用量，在整个生育期满足作物对养分的需求，才能达到所确定的目标产量。

有效且经济的养分管理策略应达到以下目标：

- ▶ 通过良好的作物管理，使作物从肥料和土壤固有养分中吸收到尽可能多的养分；
- ▶ 要充分利用来自于秸秆、其它作物残茬和厩肥中的养分；
- ▶ 利用矿质肥料来克服具体的养分限制；
- ▶ 通过制订符合实际且经济可行的产量目标、提高肥料利用率并保持营养平衡，将作物歉收的风险降到最低；
- ▶ 充分考虑各种投入成本，包括劳动力、有机肥和无机肥，以实现最大收益。

1.2 氮、磷、钾养分平衡管理的基本原理

养分的输入和输出

稻田养分平衡（B）的估算方程如下所示（单位为 公斤/公顷）：

$$B = M + A + W + N_2 - C - PS - G$$

输入项：M是加入的养分源（有机和无机养分）；A是大气沉降（干湿沉降）；W是灌溉水、洪水和沉积物（溶解和悬浮养分）； N_2 是生物固氮。

输出项：C是谷粒和秸秆的净带走养分量（作物吸收的养分只有很少一部分以残茬形式归还）；PS是径流和渗漏损失的养分；G是因反硝化和氨挥发的气体总损失。

土壤养分供应与营养平衡

固有养分供应是指某一特定养分在作物生长季节除了无机肥料外所有对植物有效的其他来源所提供的养分量（如：土壤、作物残留、灌溉水）。

表征土壤养分供应能力的可靠且实用的指标是养分限制的产量，可通过缺素小区的稻谷产量来测得（例如：无氮小区产量，只施磷钾肥而不施氮肥；见1.8节第二步）。

有些养分仅靠土壤是不能充分供应的，需要平衡施肥来补充（图2）。

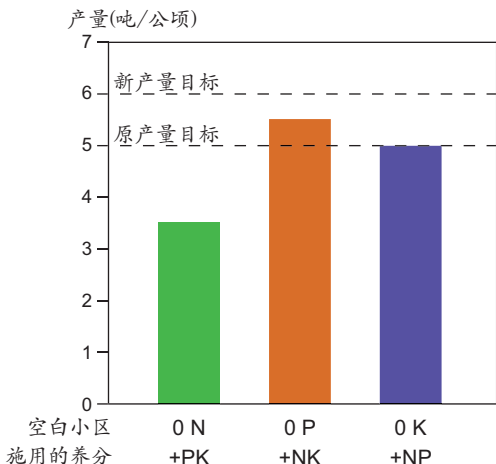


图2. 利用缺素小区的水稻产量对土壤氮、磷、钾养分供应进行估计。土壤氮素供应水平限制了原目标产量的实现，而不是磷和钾，而对于新目标产量的实现，土壤供给的氮、磷和钾均是不充分的，三种营养元素的限产次序为：氮>钾>磷。

在绿色革命的早期，产量的增加主要依赖于N肥的施用，通常政府给予氮肥补贴，同时也与现代杂交品种的应用密切相关。由于受到N肥增产效应的激励，农民为了获得高产通常施用过量的氮肥，而磷钾肥的用量较低，这导致了不平衡的养分供应。而且，随着目标产量的增加，以往不限制作物生长的养分现在变成了增产的限制因素(图2)。

集约化的高产和每年2-3熟的水稻体系导致土

壤P和K库的严重耗竭，因为：

- ▶ 作物残茬、有机肥和矿质肥料的施用可能无法弥补水稻收获带走的养分量；
- ▶ 农民从田间移走大量的秸秆（含有大量的钾）用作饲料和燃料，或者用作工业用途；
- ▶ 籽粒移走的P和K的量增加。

值得注意的是施肥中养分的最佳N:P:K比例因不同田块而异，取决于欲达到的产量目标和每一种土壤养分的供应量。

如果作物生长仅受养分供应所限制，最佳的营养平衡应该是每形成1吨稻谷产量作物需要吸收15公斤N、2.6公斤P和15公斤K（表1）。

表1. 现代水稻品种收获时氮、磷和钾的最佳吸收量。

植株组成	N	P	K
	(公斤 养分吸收量/吨 谷物产量)		
谷粒	9	1.8	2
秸秆	6	0.8	13
谷粒+秸秆	15	2.6	15

1.3 肥料利用效率

肥料的高效利用主要表现为：

- ▶ 施用的肥料大部分应被作物所吸收（称为养分回收效率，RE）；
- ▶ 每公斤肥料的施用会有较大幅度的增产（称为农学利用率，AE）。

$$RE(\%) = [\text{施氮肥区作物吸氮量} - \text{不施氮肥区作物吸氮量 (公斤/公顷)}] \times 100 / \text{氮肥用量 (公斤/公顷)}$$

$$AE \text{ (公斤/公斤)} = [\text{施氮肥区稻谷产量} - \text{不施氮肥区稻谷产量 (公斤/公顷)}] \times 100 / \text{氮肥用量 (公斤/公顷)}$$

要使养分回收率和农学利用率达到最大，需注意以下几点：

- ▶ 确定养分投入量时，要考虑到土壤养分供应量；
- ▶ 平衡供应作物所需各种养分；
- ▶ 把肥料施入作物吸收利用效率最高的土层中（例如：尿素的深施）；
- ▶ 氮肥的施用根据作物生长期间的氮素营养状况而定，可通过叶色卡确定植物的氮素营养状况；
- ▶ 选择适宜品种的高质量种子；
- ▶ 进行全面且高标准的作物管理（例如：控制杂草、种植密度、秧田管理、水分管理）；
- ▶ 应用综合的虫害管理技术来控制病虫害。

1.4 实地养分管理 (SSNM)

实地养分管理策略旨在通过适宜的养分和作物管理达到可持续的、经济的高产，具体管理策略包括：

- ▶ 根据养分的有效性和成本充分利用所有可利用

的营养资源，包括有机肥（厩肥）、作物残茬和无机肥；

- ▶ 采用叶色卡(LCC)按作物需求进行氮素管理；
- ▶ 通过缺素小区来测定土壤养分的供应能力（特别是磷和钾）；
- ▶ 平衡供应作物所需养分（氮、磷、钾和微量元素）；
- ▶ 补充由谷粒和秸秆带走的养分（特别是磷和钾），避免土壤养分库的耗竭；
- ▶ 选择成本最低的肥料资源组合；
- ▶ 使用高质量的种子，最佳种植密度，综合的虫害管理和良好的作物管理来充分发挥SSNM技术的优势；
- ▶ 调整SSNM技术使之与当地具体情况相结合（例如：在农户参与下估计农田产量和收益）。

1.5 施肥方案的制定

在以下情况下制定基于SSNM的施肥方案：

- ▶ 针对单个农户的田块；
- ▶ 针对大面积技术推广者，技术推广区应是相对均匀的大面积区域，且具有相似的土壤养分供应特性（见1.7节）。

研究人员、推广人员和当地农民应采用参与式方法一同制定适宜的施肥方案，并且在新的推荐施肥方案大面积推广之前，要在示范小区至少进行1-2季的评价，表2给出了制定施肥方案的时间建议表。

表2. 参与式建立和测试养分优化管理技术的建议时间框架。

生长季度	实施内容
第一季作物 种植前	选择一个目标区域，召开区域内相关人员的讨论会议，做需求和机会评估 (Needs and Opportunity Assessment, NOA); 选择区域推荐策略; 基于NOA和SSNM原理制定初步的优化氮肥管理方案。
第一季作物 ^a	在已选定为推荐区域的农户田块上通过农民的积极参与来测试新的优化氮肥施用方案; 评估土壤氮磷钾的供应能力; 检验所选定区域推荐施肥策略的正确性。
第二季作物 种植前	与农民和推广专家合作制定推荐施肥建议。
第二、三季作物	在农田示范小区测试和精细调整新的推荐施肥方案; 在第二或三季进一步验证土壤氮、磷、钾的供应能力。
第四、五季作物	在已选定的推荐区域大面积推广这种推荐施肥方案; 进一步监测和评价。

^a是指在较适宜气候和较少虫害条件下的理想高产季节。

注意:

- 要区分产量限制因素的优先次序：哪一项技术对于提高生产力有最大潜力？
- 不要一次引入太多新的推荐方法，主要针对二至三项技术（例如：改善种子品质和氮磷钾肥的优化施用）。
- 采用参与式方法在一定数量农田上对新的推荐

方法进行一到二季的测试，然后根据农民的反饋信息来调整这种推荐方法。

水稻氮、磷、钾养分的缺乏最普遍，同时其他养分的缺乏也不容忽视，如：锌和硫，特别是在高强度的水稻集约化种植体系中这种情况更为突出。

1.6 需求与机会评估

以目前的生产水平和肥料价格，亚洲水稻种植业收益的增加主要是通过提高产量来实现，部分取决于成本的降低。充分利用当地的养分资源，选择低成本、易得到的肥料组合，结合高效合理的施用可以大大降低成本（例如：在养分最缺乏的地方投入更多的肥料，而在较少出现养分限制的地方则适当节省肥料投入）。

弄清农民在物质与社会经济方面水稻生产的限制因子对于建立有效的推广策略是相当重要的，这可以通过需求和机会评估(NOA)来实现：

- ▶ 评估当前农民的作物、养分和虫害管理措施以弄清与这些管理有关的限制因素；
- ▶ 通过调查，评价农民对生产力限制因素的认知程度；
- ▶ 评价提高生产力是否存在较大机会，这要考虑农民的兴趣（以及农民的机会成本）和所有参与者（农民、非政府组织、推广人员和地方政府等等）对计划的执行能力。

选择合适的目标区域

基于NOA的结果、最初的土地调查以及与有关人员的讨论结果和行政区域界线来选定目标区域，计划引入优化养分管理策略的目标区域应有如下特点：

- ▶ 尽管具有高产潜力，但低效或不平衡的肥料施用导致较低的可达到产量（见1.1节），弄清当地农民、肥料供应商和推广人员的肥料使用情况；
- ▶ 出现养分缺乏症（见第二章）；
- ▶ 出现由于养分不平衡供给或氮肥过量施用而引起的虫害（例如：纹枯病）；
- ▶ 由于氮肥总用量过高或肥料分配和施肥时期不合理而导致氮肥利用率低，例如：如果存在以下情况就会导致这样的效应：
 - ▶▶ 氮肥用量 > 175 公斤N/公顷；
 - ▶▶ 在作物生长早期施用大量氮肥（在移栽/播种后前十天氮肥施用量 > 50 公斤N/公顷或前二十天施用量 > 75 公斤N/公顷）；
 - ▶▶ 每次撒施的肥料用量 > 50 公斤N/公顷；
 - ▶▶ 与不施肥稻田产量相比，每公顷增加一吨的产量需要施氮肥 > 55 公斤N（相当于施尿素120公斤/公顷）；
 - ▶▶ 出现倒伏等问题。
- ▶ 土壤磷、钾库的显著耗竭，例如：在中高产水平下，如果农民每年种两季或多季作物，并且

在过去五年里:

- ▶ 每季作物施磷肥 < 20公斤/公顷 (P_2O_5), 或者
- ▶ 每季作物施钾肥 < 10公斤/公顷 (K_2O), 并且大部分秸秆被移走。

养分资源的价格、可利用程度及品质

优化施肥措施如果被农民采纳, 需符合以下条件:

- ▶ 对农民产生较大的经济回报;
 - ▶ 有充足高品质的无机肥料可被当地农民利用。
- 对肥料价格和肥料品质的总体核查应该作为NOA的一部分。

总利润分析

在田块尺度上测试新的推荐方法之前, 需要进行总利润分析来决定:

- ▶ 以谷物产量所表示的所有投入成本的数值 (例如: “无亏损产量”);
- ▶ 新的推荐方法所需要投入的额外成本;
- ▶ 执行新技术所需要的额外成本 (例如: 劳力);
- ▶ 与传统管理方法相比利润的净增加量。

自发的转变

在优化推荐施肥方法的建立过程中, 农民是最重要的合作伙伴, 从一开始就应该通过需求和

机会评估体系(NOAs)以及共同参与的方式与农民商讨新施肥技术的可行性。

研究者要确定有足量可用的土地、劳力和资金来采纳这种新的技术，在农民需要贷款购买所有投入物资的地方，需调查借贷的渠道和利率。

新的施肥技术只有达到下述效果，农民才可能接受这个技术：

- ▶ 至少实现增产0.5吨/公顷（“眼见为实”）；
- ▶ 显著提高农田收益；
- ▶ 能够与当前农民所采用的管理措施相结合（包括劳动力需求）。

1.7 区域推荐

在特定的目标区域内建立推荐施肥方案需要基于一个经过鉴定的推荐区域，推荐区域的确定可通过了解当地的农民施肥习惯与社会经济特点，因为这些特点在选定的区域内决定着作物产量潜力、土壤养分供应以及预期肥料效应之间的关系。推荐区域应具备以下特点：

- ▶ 具有一个流域边界；
- ▶ 具有共同的种植体系和农时规律；
- ▶ 相似的灌溉水源；
- ▶ 相似的土壤肥力状况（基于现有土壤肥力的知识，包括土壤质地图以及其它土壤性质、地貌、当地农民和推广人员的知识背景）；

- ▶ 可能包括了若干个行政单位的边界。

推荐区域的土壤肥力状况可通过缺素小区（见1.8节）估计出的土壤养分供应能力来评价，推荐区域面积的大小取决于上述参数的空间变异。

推荐方法

要在农民的共同参与下确定推荐方法，具体的施肥建议要根据以下条件作出调整：

- ▶ 目标产量（或养分输入水平）
- ▶ 作物种植方式
- ▶ 品种
- ▶ 作物残茬的管理方法

推荐方法也要考虑推荐区域中农民当前的管理措施、需求和兴趣。

1.8 氮、磷、钾推荐施肥方法的建立

这部分介绍为了实现产量目标如何计算氮、磷、钾肥的适宜施用量，并且给出了氮肥和钾肥分期施用的建议（表3）。据此技术推广人员可在较大区域内建立推荐施肥方法（见1.7节），农民也可应用这种方法在自己的田块上形成一套推荐施肥技术。

在推荐区域内制定一套完整的施肥计划，施肥量的计算应包括以下步骤：

第一步，选定一个经济的目标产量；

第二步，估计土壤养分的供应量；

第三步，计算氮肥施用量并采用基于作物需求的氮管理策略；

第四步，计算磷肥 (P_2O_5) 施用量；

第五步，计算钾肥 (K_2O) 施用量。

本节施肥量的计算方法基于如下假设：

- ▶ 高产水稻品种的收获指数约为0.5；
- ▶ 经济目标产量的选定没有超过最大产量潜力的75–80%；
- ▶ 氮、磷、钾肥的平衡施用；
- ▶ 通过叶色卡 (LCC) 的诊断，适时适量的施用氮肥；
- ▶ 良好的作物管理；
- ▶ 其他限制因素如水分供应、杂草和病虫害没有严重影响作物的生长。

第一步、选定经济的目标产量

- ▶ 目标产量的确定是在良好作物管理和消除所有养分限制因子的前提下，基于过去3–5季作物可达到产量的平均值（同一季节）来计算（见图3，氮磷钾小区）；
- ▶ 目标产量反映了被作物所吸收的养分总量，随地区和季节而变，取决于气候、品种和作物管理；
- ▶ 目标产量应不高于通过作物模型估计的最大产量潜力 (Y_{max}) 的75–80%。目标产量越接近

表3. 氮、磷、钾推荐施肥建议制定的步骤

第一步、选定经济目标产量

最大产量潜力			
农民实际产量（平均值）			
目标产量			

第二步、用空白小区产量估计土壤养分供应能力

氮限制型产量（无氮肥小区产量）			
磷限制型产量（无磷肥小区产量）			
钾限制型产量（无钾肥小区产量）			

第三步、计算氮肥用量并应用于基于作物需求的氮肥管理策略

增产量（目标产量减去无氮肥小区产量）			
估计氮肥总需求量			
早期氮肥施用量（移栽14天后或播种21后）			
方法1: 实时调控法			
某一时期的氮肥总用量（__到__天）			
叶色卡阈值			
测定时间间隔			

单位	干季	湿季
吨/公顷	—	—
吨/公顷	—	—
吨/公顷	—	—
吨/公顷	—	—
吨/公顷	—	—
吨/公顷	—	—
公斤/公顷	—	—
公斤/公顷	—	—
公斤/公顷	—	—
公斤/公顷	—	—
叶色卡色阶号	—	—
天	—	—

方法2: 固定时期调控法

第一次追施氮肥: 分蘖期

第二次追施氮肥: 幼穗分化期

最适额外追施氮肥: 抽穗初期

叶色卡阈值

单位	干季	湿季
公斤/公顷	—	—
公斤/公顷	—	—
公斤/公顷	—	—
叶色卡色阶号	—	—

第四步、计算磷肥用量 (P_2O_5)

维持型磷肥用量

公斤/公顷	—
-------	---

第五步、计算钾肥用量 (K_2O)

在作物种植前秸秆还田的数量

维持型钾肥用量

L/M/H ^a	—
--------------------	---

公斤/公顷

第一次施用时期在__天 (__%)

第二次施用时期在__天 (__%)

公斤/公顷

公斤/公顷

公斤/公顷

^aL=低量, M=中量, H=高量

最大产量潜力，需肥量就越大，同时也加大了作物歉收和利润损失的风险；

- ▶ 在高产季（适宜的气候条件）选定一个较高的目标产量，在低产季（不利的气候条件，以及存在因倒伏或者病虫害而引起的较高作物歉收风险）选定一个适中的目标产量。

第二步、估计土壤养分的供应量

采用空白小区的稻谷产量（在适宜气候条件和良好的生长环境下）作为在一个作物生长季内土壤氮、磷、钾养分潜在供应能力的衡量指标（图3），使用高品质种子并进行良好的作物管理，包括水分管理和虫害控制。

- ▶ 选定10–20个有代表性的农户田块作为推荐区域，在每个田块里划出一个 $20\text{m} \times 5\text{m}$ 的小区，然后把这个小区再划分成4个 $5\text{m} \times 5\text{m}$ 的空白小区（注意：畦埂的宽和高均为 25cm 以防止小区之间的养分流动）：

0 N: 在不施氮小区内测得氮限制型产量

（N-limited yield），此区施用磷和钾肥，不施任何氮肥。作物生长季节农民施用到其它田块的氮肥会引起小区的交叉污染，所以要设置田埂加以防止。

0 P: 在不施磷肥小区内测得磷限制型产量

（P-limited yield），此区不施磷肥，仅施氮和钾肥，要施用足量的氮、钾肥以实现推荐区域内的目标产量。

0 K: 在不施钾肥小区内测得钾限制型产量 (K-limited yield)，此区不施钾肥，仅施氮和磷肥，要施用足量的氮、磷肥以实现推荐区域内的目标产量。

NPK: 在施氮、磷、钾肥的小区内测得可达到的产量 (attainable yield)，要施用足量的氮、磷、钾肥以实现推荐区域内的目标产量。

在0 P、0 K和NPK小区，必须采用一个适宜的氮肥分配比例，以防止倒伏。如果普遍存在Zn等微量元素缺乏的症状，应在所有的小区施用Zn肥和其他微量元素肥料。

- ▶ 作物成熟时，在每个空白小区中心 $2\text{m} \times 2.5\text{m}$ 的面积内测定稻谷产量。收获所有的穗并把它们放置在塑料布上以避免产量损失。小心地剥开

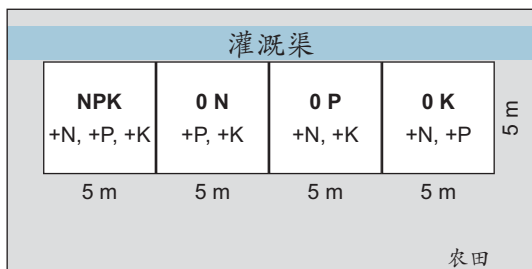


图3. 农田NPK施肥与缺素小区设计图。试验布置尽可能避免靠近田块的边缘，以防农民耕种时机具转弯对试验小区带来的影响。

所有的小穗，除去瘪穗，把谷粒铺平在塑料布上。将谷粒在充足的阳光下自然晾干一天，使谷粒含水量为12%–16%。如果在雨季，将谷粒充分晾干可能需要2–3天。谷物产量的单位用吨/公顷表示。

- ▶ 从10–20个田块获取各缺素小区的平均产量以确定相关参数进行区域推荐：

- ▶▶ 氮限制型平均产量（0 N小区产量）
- ▶▶ 磷限制型平均产量（0 P小区产量）
- ▶▶ 钾限制型平均产量（0 K小区产量）
- ▶▶ 可达到的产量（NPK小区产量）

- ▶ 如果缺素小区产量表明推荐区域土壤养分供应能力存在较大差异，那么就要把这个推荐区域再划分为两个或更多的区域。经验性原则是，不同的两块推荐区域内缺素小区产量应至少能保持1吨/公顷 的差异。

注意：

 氮素是首要的产量限制因素，水稻磷、钾的吸收很大程度上受到氮管理的影响，所以，对于0 P、0 K和NPK小区，必须采取适宜的氮肥管理策略。为达到最大产量潜力的75–80%应该施用充足的氮肥，氮肥的管理要适时、适量（见第三步）。在0 P、0 K和NPK小区内不能采用现行的农民习惯氮肥管理措施；

 根据产量和生长季，0 K小区至少要施用30–45公斤/公顷的磷肥（ P_2O_5 ），而0 P小区至少要

施用50–100公斤/公顷的钾肥 (K_2O) ;

在适宜的气候条件和良好的作物管理下, 稻谷产量 (GY) 可作为潜在养分供应能力的指标。为了能正确反应供应养分的能力, 谷物的产量不应该受到其他因素的限制, 诸如其他养分的供应、水分供应和病虫害。如果由于倒伏、鼠害、虫害等等而导致产量大大降低, 那么这个产量指标就不能使用;

以植物吸收为基础的养分供应能力的测定方法会受到作物品种和种植方式带来的影响, 因此, 以稻谷产量为指标测定的养分供应能力, 浅水直播水稻一般低于移栽水稻。因而采用农民的水稻种植方式来衡量农田的土壤养分供应是十分重要的;

如果农民当前的管理措施中除了施用无机肥外还施用了诸如农家肥之类的有机肥, 那么各缺素小区也应该补充相同数量的有机肥。

第三步、氮肥施用量的计算和基于植物需求的氮肥管理

有两种互补的方法已经成功地应用在农田中用来指导氮肥的有效施用 (实时管理和固定时间管理)。表3给出了这两种方法的主要部分。建议在大面积推广之前, 要采用农民参与式的方式在农田中对比测试这两种方法, 从而评估其实施效果。在制定氮肥管理策略时, 要考虑到社会经济因素 (可用的劳动力和成本, 肥料和

水稻的价格，可用的肥料资源和当前的施用措施）。

氮肥优化管理方法一(Option N1): 实时管理方法

农民在作物生长季中常常用叶色作为一种可视指标来判断水稻氮素营养状况，并由此确定氮肥的施用。叶色卡（LCC）是一种在作物生长季节直接使用的、简单且价格低廉的检测植物氮营养状况的诊断工具，可以用来确定如何追施氮肥。当水稻叶片的颜色低于叶色卡阈值时，表明植株缺乏氮素，应施用一定数量的氮肥。这会帮助农民在影响作物生长的某一具体的气候条件下调控氮肥的施用（称之为实时氮肥管理）。良好的实时氮肥管理能够减少氮肥用量，提高氮肥的利用率，并能够降低水稻感染病虫害的几率。

实时氮素管理方法的基本原理

国际水稻所自2003年建立和供应标准的叶色卡（见封面图片），叶色卡随着颜色由浅黄绿色（2号）到暗绿色（5号）包括四个色阶板。由

表4. 不同品种和种植方式下的叶色卡阈值。

品种	种植方式	叶色卡LCC阈值
香米	—	2
半矮秆籼稻	直播	3
半矮秆籼稻	移栽	3.5
杂交水稻	移栽	3.5

于水稻品种和种植方式的不同，叶色卡的阈值从2到4不等，低于阈值就应追施氮肥。表4中所给出的叶色卡阈值在应用时要在当地进行校验。

叶色卡的使用原则

- ▶ 从移栽稻移栽14天后或浅水直播稻播种21天后，每隔7到10天测一次叶色卡值，最后一次测定要在刚开花时完成。农民更希望能减少测定的工作量，可以推荐固定时期调控法即仅在水稻生长的关键时期测定叶色值（如：分蘖盛期，穗分化初期[见A-9]）。
- ▶ 因为水稻顶端完全展开叶可以很好地指示水稻植株的氮营养状况，所以通常用LCC测定它们的叶色，把叶片中部的颜色与叶色卡色阶相比较得出叶色卡LCC值。如果叶片颜色居于叶色卡两个色阶之间，那么这两个色阶数值的平均数就是这个叶片的叶色卡读数。例如：如果叶片颜色在3和4色阶之间，那么此叶片的叶色卡读数为3.5。
- ▶ 因为叶片颜色会受到太阳角度和阳光强度所影响，所以在测量过程中要始终用身体挡住阳光。如果可能的话，尽量在每次测量时，由同一个人在每次测定当天的同一时间读取叶色卡值。
- ▶ 在每一个田块从选定的穴中随机选取10片叶子进行读数。如果有6个或6个以上叶片叶色卡读

表5. 叶色卡读数低于阈值时对半矮秆籼稻的氮肥建议施用量。

预计相对于无氮区产量的增加量 (吨/公顷)	移栽14天或播种21天后到穗分化氮肥的施用量 (公斤 N/公顷) ^a
1-2	25
2-3	35
3-4	45

^a从穗分化到开花初期施用约25公斤N/公顷。

数低于规定的叶色卡阈值，那么就应立即补施氮肥。

- ▶ 表5给出了半矮秆籼稻品种的氮肥推荐施用量。

叶色卡的校验原则

叶色卡的校验试验可以在试验田或农田实施。选取3-4个当地最常用的水稻品种，选取不同阈值比较作物生长的情况（例如：取阈值3，3.5和4）。按表5所示使用叶色卡调控氮肥施用。除了记录肥料的使用情况外，也要记录水稻产量和产量组成（可选择的）、病虫害发生几率以及倒伏程度。

- ▶ 在试验站安排田间试验，选择一个析因试验方案，例如，三个品种、三个LCC临界值作为处理，四次重复，完全随机区组设计；
- ▶ 如果要在农民的田块中进行校验试验，那么就选择农户作为重复。每个品种至少选取四个农户田块作为重复，每个田块测试2-3个叶色卡阈值；
- ▶ 不同处理都要设置无肥小区来计算肥料的农学利用率（AE，施用单位数量的氮肥增加的产

量，见1.3节）；

- ▶ 尽管每次追氮量因季节而变，并且主要受气候决定的预期增产量的影响（表5），而叶色卡的阈值则主要由品种和种植方式所决定（表4）。

注意：

- 因为叶色卡法是一种基于植株的氮素管理方法，对于移栽水稻而言，通过对无氮区产量进行近似估计，可以决定水稻生长的前14天是否需要早期施肥。在土壤供氮能力较低的土壤上减少基肥的使用可能会降低水稻分蘖。因此，是否需要施用基肥将在方法2中论述（见下文），而本节主要介绍应用叶色卡精细调控后期氮肥的追施。
- 把以叶色卡为基础的氮肥管理技术融入到综合的实地养分管理策略中会更为有效。为了得到植物对氮肥的最佳效应，其它养分（磷、钾、硫、锌）不能成为限制因素。磷、钾肥的施用以下第四步和第五步有所论述，微量元素（硫、锌）要基于土壤测定和当地的推荐技术。
- 磷的缺乏（见2.2节）可使叶片颜色变暗而导致叶色卡读数不准。
- 实时氮管理方法要求各地的叶色卡值都应进行校验，对于叶色卡使用方法的说明书应该力求简练并且要采用当地通俗语言，使农民明白如何在特定的生长季里决定正确的氮肥施用时间和施用量。

氮肥优化管理方法二(Option N2): 固定分期调控方法

固定分期调控方法给出了氮肥推荐总量，制定了与作物生育时期、作物生长季、水稻品种和种植方式相一致的氮肥施用时期和分配计划，用叶色卡来调节每次的追肥量。

固定分期调控方法的基本原则：

估计氮肥的总施用量并制定氮肥分配模式，在水稻主要生长临界期使用叶色卡调整预定的氮肥施用量。

通过表6来获得氮肥的总施用量要基于：

- ▶ 根据目标产量和无氮区（0 N）产量之间的差值计算作物对氮肥的产量效应（第一和第二步）；
- ▶ 可达到的氮农学效率（AEN，见第7-8页）。

经验原则：对氮肥而言，形成1吨的产量效应（即每增产1吨）需要施用40-60公斤氮。

在多雨季节里对作物施用较少的氮肥（低光照、低产量效应），在干旱季节里施用较多的氮肥（高光照、高产量效应）。

只有在良好的气候条件和高产季节，才可选择高于0 N小区产量4吨/公斤及其以上的预期的产量效应。

亚洲热带地区的经验表明，在良好的作物管理和高产季节，农学效率AEN可以达到25公斤/

公斤N，在良好的作物管理和低产季节，农学效率AEN也可以达到16.7或20公斤/公斤N。

应注意到低氮用量条件下农学效率AEN通常比高氮肥用量时要高。在热带地区，高效环境友好型氮管理的目标是实现较高的经济产量，农学效率达到16.7–25公斤/公斤N；在亚热带气候条件下，优化的农学效率可超过25公斤/公斤N，增产效应可达5吨/公顷，在这种情况下，表6中的数据需要作出调整。

- ▶ 氮肥推荐总量要分2–4次施用，对于生育期较长的品种和高产季节，应增加氮肥的分施次数，在作物生长需肥最大时期要施用较多的氮肥（例如：分蘖中期到开花期），只有在气候条件适宜且作物的产量效应较大时，氮肥的一次施用量才可大于45公斤/公顷。

表6. 根据可达到的增产量（目标产量 – 无氮区产量）和预期的氮农学效率（AEN, 施用每公斤氮的增产量，单位：公斤/公斤N）确定氮肥总用量。

氮农学效率 (谷物增产量/公斤N) →	16.7	20	25
氮的产量效应 (吨/公顷) ↓	氮肥用量 (公斤/公顷)		
1	60	50	40
2	120	100	80
3	180	150	120
4	↙	200	160
5	↙	↙	200

↙ 指不可能实现的目标产量。

- ▶ 采用表7-9确定氮肥分期施用的大致的数量，尽管作物生长阶段可以清楚地确定，但实际的氮肥施用日期取决于具体的品种（作物生育期），对于热带水稻，幼穗分化大约出现在收获前的60天，活跃分蘖期（分蘖中期）大约发生在水稻移栽14天或直播21天到幼穗分化期之间。
- ▶ 确定水稻移栽14天或直播21天之前的基肥用量，需参照以下原则：
 - ▶▶ 当产量效应小于1吨/公顷时，一般前期不施基肥；当产量效应在1-3吨/公顷时，前期施用20-30公斤 N/公顷；当产量效应大于3吨/公顷时，前期氮肥的施用占施氮总量的25%-30%；
 - ▶▶ 当施用高质量的有机物质或厩肥时，前期可减少或不施氮肥；
 - ▶▶ 对于移栽稻，避免早期施用大量氮肥（如：施用量大于50公斤/公顷），因为早期水稻生长缓慢，移栽后的前3周氮素的吸收较慢；
 - ▶▶ 对于低分蘖大穗型品种进行大苗移栽（>24天）或采用生育期较短的品种时，应当增加早期氮的施用，植株的株、行距（<20穴/m²）较宽，提高了分蘖能力。或者播种与移栽时气温与水温较低的稻田（如高纬度地区），为了增加分蘖，需要适当增加早期氮肥的施用；

- ▶ 基肥应在播种之前施用，或者在移栽的14天内或直播21天内施用，基肥氮的形态以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为佳，而不用 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，也不需要应用LCC进行早期施氮的推荐。
- ▶ 水稻移栽14天或直播21天之后，使用LCC评价叶片的氮营养状况与作物的氮需求，当叶色较黄时，适当上调氮肥的用量；当叶色较绿时，适当下调氮肥的用量。
- ▶ 为了延迟叶片的衰老，提高灌浆能力，适当推迟氮肥的施用（如：在抽穗初期），但这种施肥策略仅适用于有高产潜力生长良好的作物。杂交稻和大穗型品种在高产季节通常需要在抽穗初期施用氮肥。为了减少倒伏和病虫害的风险，避免在孕穗初期到开花期施用过量氮肥，在低产季节尤为如此。
- ▶ 对于适用于大多数水稻品种的标准的LCC（IRRI），叶色与叶色卡读数（表7-9）的对应关系如下：
 - ▶ 黄绿色 = LCC的值为3
 - ▶ 中间绿色 = LCC的值为3.5(代表3-4之间的取值)
 - ▶ 绿色 = LCC的值为4
- ▶ 表7-9中的施肥量适用于氮肥利用率较高的情况（农学利用率，AEN），例如：在预期施肥的产量效应为1-2 吨/公顷的生产季，施用每公斤氮肥可增加籽粒产量16.7-20公斤；当预期施

表7. 氮肥利用效率较高的移栽和直播常规稻的氮肥分配时期及用量。

与无氮区相比的产量效应→		1	2	3	4
		吨/公顷			
生长阶段	叶色 ^a	施氮量 (公斤N/公顷)			
移栽后14天内或直播后21天内		—	20	30	45
分蘖盛期	黄绿	35	45	45	60
	黄 - 绿中间色	25	35	35	45
	绿色	—	—	25	25
幼穗分化期	黄绿	35	45	60	60
	黄 - 绿中间色	25	35	45	45
	绿色	—	25	25	35

^a 见A-6页附录中LCC对应值的说明。

表8. 氮肥利用效率较高的移栽杂交稻的氮肥分配时期及用量。

与无氮区相比的产量效应→		1	2	3	4
		吨/公顷			
生长阶段	叶色 ^a	施氮量 (公斤N/公顷)			
移栽后14天内		—	20	30	45
分蘖盛期	黄绿	35	45	45	60
	黄 - 绿中间色	25	35	35	45
	绿色	—	—	25	25
幼穗分化期	黄绿	35	45	60	60
	黄 - 绿中间色	25	35	45	45
	绿色	—	25	25	35
抽穗初期	黄绿	—	—	20	20

^a 见A-6页附录中LCC对应值的说明。

表9. 大穗型(穗重型)水稻品种氮肥分配时期及用量。

与无氮区相比的产量效应 →		1	2	3	4
		吨/公顷			
生长阶段	叶色 ^a	施氮量 (公斤N/公顷)			
移栽后14天内		25	30	40	50
分蘖盛期	黄绿	—	35	45	45
	黄-绿中间色	—	25	35	35
	绿色	—	—	25	25
幼穗分化期	黄绿	45	45	45	60
	黄-绿中间色	35	35	35	45
	绿色	25	25	25	35
抽穗初期		—	—	25 ^b	25 ^b

^a 见A-6页附录中LCC对应值的说明。^b 不考虑LCC读数，进行氮肥施用。

肥的产量效应为3—4吨/公顷的生产季时，施用每公斤氮肥可增加籽粒产量25公斤（见表6）。

- ▶ 按植物的氮需求与土壤供应特点采用LCC监测植物的氮营养状况优化氮肥分配的施用量。表7—9中基于LCC值的施肥量试图给予足够灵活的施肥量推荐值以适合特定的水稻生长季节及不同产量效应。
- ▶ 表7—9中的氮肥推荐量可以进行细调，以适应于不同的地点、不同的生长条件和不同的水稻品种。

1. 移栽水稻（普通自交品种）（见表7）

种植密度为20—40穴/米²，高产常规品种，持续或间歇淹水。移栽水稻在生长初期叶面积扩

展、干物质积累和氮素吸收速率较慢，但从分蘖中期到灌浆期，氮素吸收加快，生长迅速。

2. 浅水直播水稻（见表7）

播种量为80–150公斤/公顷，撒播，采用高产常规品种，出苗后持续淹水。在生长初期，浅水直播水稻叶面积迅速扩大，干物质积累很快，氮素吸收量大，但从穗分化初期后，特别是在灌浆期，氮素吸收和作物生长均较慢。直播稻叶片的早衰和倒伏比移栽稻要更严重。直播水稻在生长后期需要较少或不需要施用氮肥。

3. 移栽水稻（杂交品种）（见表8）

种植密度为20–30穴/米²，具有高产潜力的杂交水稻，持续淹水或间歇灌溉。移栽杂交稻在高产季节加强后期氮肥的供应通常具有明显的增产效果。

4. 移栽水稻(大穗型品种)(见表9)

高产大穗型水稻(穗重型)，分蘖较少且抗倒伏能力较强，包括很多新种植类型以及一些杂交水稻如中国的超级杂交稻。

注意：

 如果预报有大的降雨时，尽量不要追施氮肥。

第四步、磷肥(P₂O₅)施用量的计算

磷肥管理的主要目的是防止磷素缺乏，而不是

在出现磷素缺乏症状之后再去做处理。如果土壤供磷能力低导致不能达到目标产量，那么磷肥管理就要着重建立和维持充足的土壤有效磷水平，确保土壤磷素供应不会限制作物生长和降低氮肥利用率。

磷在土壤中是不易损失的，但诸如象灌溉水和秸秆等来源的磷素输入量通常是很小的。磷肥施用的残留效应可持续几年，保持土壤供磷能力需要长期管理措施，并且这种措施应该适合当地的条件，并考虑所有磷素输入的来源。

磷素的可持续性管理需要土壤磷库的补充，特别是在高产条件下的双季或三季水稻种植体系，即使作物对磷肥的施用没有直接的产量反应也要考虑磷肥的补充问题。

经验原则：在土壤供磷能力低的地方，目标产量每增加1吨需施用20 公斤 P_2O_5 /公顷（目标产量和无磷肥小区产量的差）。

表10给出了维持性的磷肥施用量，在低量至中度的秸秆还田的情况下，用来补充由谷粒和秸秆带走的磷。磷肥的施用量取决于：

- ▶ 目标产量（见第一步）；
- ▶ 通过无磷肥小区产量估计的土壤供磷能力（见第二步）。

理论上，在选定的目标产量下，如果产量效应不明显表明并不需要磷肥的施用（例如：如果

目标产量=养分限制区产量)，则无须施用磷肥。这种“无磷肥”措施可导致土壤磷库的消耗，从中长期来看也会影响作物产量，特别是在没有秸秆和绿肥等其它养分来源的情况下土壤磷库的消耗更为明显。

注意：

如果增产效应（与无磷肥小区相比）为3吨/公顷，在表10中要选定稍低一点的产量目标。这种情况下，首要的目标是要在几季作物种植中逐渐提高土壤肥力状况；

为了防止土壤磷库的消耗，可采用以下原则：

▶▶ 如果大部分秸秆都还田（例如：联合收割之后或只收割稻穗），同时有机肥养分输入很少的情况下，收获每吨谷粒至少应该施用4公斤 P_2O_5 /公顷（例如：产量为5吨/公顷，

表10. 根据目标产量和无磷肥小区产量确定的维持性磷肥施用量（ P_2O_5 ）。

目标产量（吨/公顷）→	4	5	6	7	8
无磷肥小区产量 （吨/公顷）↓	施肥总量（公斤 P_2O_5 /公顷）				
3	20	40	60	◀	◀
4	15	25	40	60	◀
5	0	20	30	40	60
6	0	0	25	35	45
7	0	0	0	30	40
8	0	0	0	0	35

◀ 指不切合实际的目标产量。

需施用20公斤 P_2O_5)来补充谷粒所带走的养分;

- ▶ 如果稻田中全部秸秆被移走同时其他养分(有机肥、水、沉降物)输入很少,那么收获每吨谷粒至少应施用6公斤 P_2O_5 /公顷(如:产量为5吨/公顷,需施用30公斤 P_2O_5)来补充谷粒和秸秆所带走的养分。

如下情况可以减少维持性磷肥的施用量(见表10):

- ▶ 土壤施入了农家肥等有机物质(见表13)。有机物质能充分建立和维持土壤磷库,取决于有机物质的养分浓度和施用量。在缺素小区施用有机物质可评价土壤和所施有机物质的综合养分供应能力;
- ▶ 土壤的周期性淹水而导致沉积物中大量养分的输入(例如:越南的湄公河三角洲)。

无论对水稻还是小麦施用磷肥都会对后茬作物有残余效应,但是对每季作物来说直接施用磷肥的效果会更好。磷肥应该在播种或移栽前混入土壤,或者在移栽稻移栽后的14天之前或浅水直播稻播种后21天之前在土壤中撒施磷肥;

如果无磷肥小区作物管理良好,所有其它营养元素供应充分并且条件适宜,其产量高于目标产量,那么就不建议施用磷肥;

在8-10个作物周期之后,有必要重新评价土壤供磷能力。

第五步、钾肥 (K_2O) 施用量的计算

一般来说，钾肥的管理与磷肥的管理遵循相同的原则（见第四步），但是水稻对钾的吸收量要远远高于磷（表1）。此外，水稻收获后超过80%的吸钾量保留在秸秆中，这使得秸秆在计算钾肥的需求量时成为一项重要的输入源（表11）。

经验原则：在土壤供钾能力低的土壤上，目标增产量每增加1吨需要施用钾肥30公斤 K_2O /公顷（目标产量-无钾肥小区产量）。

表12列出了一些具体维持性的钾肥施用量，在考虑前茬作物秸秆还田的基础上，施用这些钾肥以补充由谷粒和秸秆带走的钾量。

钾肥的施用量取决于：

- ▶ 目标产量（见第一步）；
- ▶ 通过无钾肥小区产量估计的土壤供钾能力（见第二步）；
- ▶ 秸秆的钾素循环量以及上一季作物的秸秆管理措施（表11）。

土壤钾库的消耗从中长期来看会影响产量，特别是在大部分秸秆被移走的情况下。作为钾肥用量的最低限，施入钾肥的数量应该能够补充由谷粒和秸秆所带走的钾量。

表11. 根据前季作物的产量和秸秆管理措施确定秸秆还田的钾素输入量。

秸秆管理	前季	
	低产季 4-5吨/公顷	高产季 4-5吨/公顷
地表收割，秸秆全部移走，小于10%的秸秆以残茬存留，如印度、尼泊尔、孟加拉国和越南	秸秆钾素输入量： 低 (0-1吨的秸秆还田量)	秸秆钾素输入量： 低 (0-1t的秸秆还田量)
低位收割，25-30cm的残茬留在土壤中，不焚烧，如菲律宾	秸秆钾素输入量： 中 (2-3吨的秸秆还田量)	秸秆钾素输入量： 中到高 (3-5吨的秸秆还田量)
高位收割，30cm以上的残茬留在土壤中，不焚烧，如菲律宾、印尼	秸秆钾素输入量： 中到高 (3-4吨的秸秆还田量)	秸秆钾素输入量： 高 (5-7吨的秸秆还田量)
联合高位收割，长残茬和收割后的秸秆一同留在土壤中并将其全部焚烧掉，如泰国、越南和印度北部	秸秆钾素输入量： 高 (4-5吨的秸秆还田量，由于焚烧（磷）和钾的淋洗导致20-25%的磷、钾素损失）	秸秆钾素输入量： 高 (6-8吨的秸秆还田量，由于焚烧（磷）和钾的淋洗导致20-25%的磷、钾素损失）

注意:

如下情况可适当降低表12中维持性钾肥的用量:

- ▶ 土壤施入了农家肥等有机物质（有机物质中钾的一般含量见表13）。有机物质能从根本上建立和维持土壤钾库，取决于钾素养分的浓度和所施用的量。在缺素小区施用有机物可评价土壤和施入有机物质的综合养分供应能力；
- ▶ 土壤周期性淹水可导致沉积物中大量养分的输入（例如：越南的湄公河三角洲）。

与无钾肥小区相比，当产量增加超过3吨/公顷时，在表12中要选定稍低的产量目标。如果想达到如此高的增产目标，需要经过长期的培肥土壤。

作为另一种选择，要考虑以下经验原则：

- ▶ 在大部分秸秆都还田（如：联合收割之后），同时有机肥养分输入很少的情况下，收获每吨谷粒至少应该施用3.5公斤 K_2O /公顷（如：产量为5吨/公顷时，需补充17.5公斤 K_2O ）来补偿谷粒所带走的养分；
- ▶ 如果全部秸秆从稻田中被移走同时其他养分（有机肥、水、沉降物）输入很少，那么收获每吨谷粒至少应施用12公斤 K_2O /公顷（如：产量为5吨/公顷时，需施用60公斤 K_2O ）来弥补谷粒和秸秆所带走的养分。

表12. 根据目标产量、秸秆还田量和无钾肥小区产量确定的维持性钾肥施用量 (K_2O)。

目标产量 (吨/公顷) →		4	5	6	7	8
秸秆还田量	无钾肥小区产量 (吨/公顷) ↓	K_2O 施用总量 (公斤 K_2O /公顷)				
低 <1 吨/公顷	3	45	75	105	◀	◀
	4	30	60	90	120	◀
	5		45	75	105	135
	6			60	90	120
	7				75	105
	8					90
中 2-3 吨/公顷	3	30	60	90	◀	◀
	4	0	35	65	95	◀
	5		20	50	80	110
	6			35	65	95
	7				50	80
	8					65
高 4-5 吨/公顷	3	30	60	90	◀	◀
	4	0	30	60	90	◀
	5		0	30	60	90
	6			10	35	70
	7				25	55
	8					40

◀ 指不可能实现的目标产量。

从短期来看，在选定的目标产量下，如果产量效应不明显（例如：如果目标产量=养分限制区产量），从理论上来说则无需施用钾肥。这种管理措施从中长期来看可导致土壤钾库的消

耗，也会影响产量，特别是在没有秸秆和绿肥等其它养分来源的情况下。

在播种21天内或移栽后14天内可以提前施用少量的钾肥，大量施用钾肥（40–120公斤 K_2O /公顷）应该分两次施用（在作物移栽之前或在移栽之后的两周之内施用50%的钾肥作为前期肥料，其余50%的钾肥在穗分化期施用）。更大的钾肥（>120公斤 K_2O /公顷）应该分三次施用（ $\frac{1}{3}$ 用做前期肥料， $\frac{1}{3}$ 用在穗分化期， $\frac{1}{3}$ 用在抽穗期到第一片颖花出现）。

1.9 有机肥、秸秆和绿肥的管理

无论在什么地区在条件允许的情况下，农家肥、秸秆和绿肥等养分资源应该和矿质肥料配合使用，这一方面为水稻生长提供部分养分，从长远来看也可以保持土壤肥力。对大部分水稻种植农户来说，秸秆是他们主要可以利用的有机物质。水稻成熟后其所吸收的养分大约有40%的氮、30–35%的磷、80–85%的钾和40–50%的硫保存在秸秆和残茬中。然而，在很多地区，有机肥料的投入量并不足以平衡养分的移出，同时使用有机肥料比投入相同数量的化学肥料所消耗的费用更高。

理解投入的有机物分解的基本规律以及有机物在不同稻作体系中的作用是十分重要的：

- ▶ 在水稻-其他作物轮作体系中（如：水稻-小麦轮作）或者雨养水田或旱作水稻体系：较长的

有氧时期会导致有机物质更快更彻底的周转，这可能会导致土壤有机质含量的降低，以及在旱地条件下对土壤物理结构产生负面效应

（如：减少持水能力、损坏结构、降低水分渗透性、生物活性及磷的有效性）。

- ▶ 在稻-稻（-稻）集约化种植体系中：残茬的分解是在厌氧淹水条件下进行的，导致更稳定和较好保存的有机质存留在土壤中。维持“物理性的”土壤质量并不重要，因为土壤结构会在土地种植准备时被破坏。有机质的作用仅体现在对养分供应的直接或间接的影响上。有时，有机质通过导致矿质元素的缺乏（如锌）或毒性（如铁、硫化物）对作物生长产生负面效应，还会影响根系健康。

秸秆管理和耕作

- ▶ 作物残茬和秸秆的还田可使被作物吸收的大多数养分重新回到土壤当中（见表14），经过长期还田有助于土壤养分库的保持。这种做法短期看来对谷物产量的影响是很小的（与秸秆移出或焚烧相比），但从长期来看增产效果明显。矿质肥料和秸秆同时使用时，土壤氮、磷、钾和硅库可以保持平衡甚至有所增加。在已耕翻过的潮湿土壤上施入作物残茬和秸秆可导致土壤氮素的暂时固定，所以应该在秸秆还田2-3周后再进行水稻的移栽；或者在秸秆还田的同时施用尿素。

- ▶ 秸秆的焚烧可导致几乎所有氮素的损失、大约25%磷的损失和5–60%硫的损失，秸秆焚烧后由淋洗间接损失的钾为20%。在施用的肥料不含硫时，秸秆可能是硫的重要来源，因此不应焚烧秸秆，否则会造成硫的损失。相对而言，焚烧是将秸秆转化为矿质钾素的一个重要来源，而在此过程中钾的损失量很小。为了防止在农田中形成“养分富集点”应该均匀撒散秸秆。
- ▶ 长期来看，秸秆移除对土壤钾肥力的影响要远大于磷（见表1）。尽管如此，秸秆还田（均撒秸秆并与土壤混合）的工作量是巨大的，权宜之下农民更愿意把秸秆焚烧掉。秸秆也是微量营养元素（锌）的重要来源，并且对水稻中累积的硅的平衡有重要的作用（见2.6节）。
- ▶ 早期，在土面较干的情况下进行浅耕（深度为5–10cm）将作物的残茬混入，并通过休闲加强土壤通气来增加氮的有效性以满足后续水稻生长的需要。干土的浅耕需要四轮拖拉机在作物收获后2–3周进行，如果是在两季作物之间干湿交替期，则需要30天之后进行。然而，也要从经济角度考虑附加的燃料和劳力的花费。
- ▶ 通过定期的排水和晾田可提高淹水土壤的供氮能力，例如：在分蘖末期（大约在移栽后的35天）进行5–7天的中期排水。

其他有机物质的管理

- ▶ 有机肥料因其组成、对土壤肥力的作用以及养分供应的不同而千差万别（表13）。在条件允许的情况下，应在有机质含量较少的土壤施用2–10吨/公顷（或更多）的农家肥或者其他可利用的有机物质（作物秸秆、堆肥），特别是雨养洼地水稻种植体系以及水稻与其他旱地作物如小麦和玉米轮作的集约化种植体系，要避免在作物开始生长不久即投入大量有机物质。
- ▶ 许多豆科绿肥作物如生长快、周期短的茎生根瘤田菁属（长喙田菁）可以迅速的积累氮（在生长期45–60天可以积累80–100公斤氮）。大部分的氮（大约80%）来自生物固氮。当把绿肥作物翻入土壤，其分解速度很快并且可以代替氮肥，特别是在营养生长阶段。利用叶色卡来决定是否需要投入化学氮肥。绿肥可以改善土壤物理性质，但长期来看对提高土壤有机质含量的潜力却是很小的。绿肥的投入对加速盐碱土的改良是十分有效的。
- ▶ 如果土壤水分条件和农民经济状况允许，在水稻-其他作物轮作的休闲期种植捕获作物（豆类、其他绿肥作物、人工管理的草）来维持土壤氮素、积累额外的有机物质并提高经济收入（豆类粮食作物）。

1.10大面积推广的策略评价

评价一个新建立的养分管理技术，需要在农民的田块上布置不少于500–1000平方米的小区试验。

- ▶ 如果要评估多个因子对产量的效应，应考虑用两个示范小区来分别表明每个因子对产量的贡献（例如：在一个小区验证改良种子质量的效果，在第二个小区示范改良种子加上养分管理的效果）；
- ▶ 测量稻谷产量并监测肥料用量；
- ▶ 在农户参与评估后进一步优化推荐施肥技术，并在大面积推广前进行总利润分析。在推广时应分析偶然出现的那些与养分无关的限制因素；
- ▶ 给农民和推广人员提供一些宣传画、单页的分发材料，这些材料应含有不同生长季节作物与养分实时管理的“黄金法则”（如：品种、秧苗年龄、种植密度、平整土地、氮磷钾肥的推荐、叶色卡的使用等等）。

如果没有实现目标产量该如何？

- ▶ 如果没有实现目标产量（ $\text{实际产量} < \text{目标产量} \times 80\%$ ），应尽力排除其他限产因素。实地养分管理技术已经被证明可以提高产量，即使是在作物管理不善（水分、种子等等）导致养分利用率较低的农场上。在这种条件下，降低目标产量和减少肥料投入来增加养分效率的做法

表13. 有机物质主要养分的含量。

有机物质 ^a	含水量 (%)	C	N	P	K	Ca
		(占鲜重的%)				
人粪			1.0	0.2	0.3	
牛粪			0.3	0.1	0.1	
猪粪			0.5	0.2	0.4	
新鲜粪肥	60	8–10	0.4–0.6	0.1–0.2	0.4–0.6	0.2–0.4
腐熟粪肥	35	30–35	1.5	1.2	2.1	2.0
猪粪	80	5–10	0.7–1.0	0.2–0.3	0.5–0.7	1.2
家禽粪肥	55	15	1.4–1.6	0.5–0.8	0.7–0.8	2.3
垃圾堆肥	40	16	0.6	0.2	0.3	1.1
污水污泥	50	17	1.6	0.8	0.2	1.6
蔗滤饼	75–80	8	0.3	0.2	0.1	0.5
蓖麻饼	10	45	4.5	0.7	1.1	1.8

^a 每吨新鲜有机肥的养分量 (公斤) = 养分含量% × 10

可能会进一步导致实际产量和效益的降低。为了提高作物产量和效益，应及早发现并消除其他限产因素的副作用。

- ▶ 如果当前高水平的肥料养分投入（氮）加大了虫害和倒伏的风险，使作物歉收，那么就on应该降低目标产量（减少投入）。

1.11 有用的数据

这一节列出了用于计算作物籽粒和秸秆平均带走养分量的计算参数（表14），也包括了养分换算因子（表15）。

表14. 现代灌溉稻品种的平均养分移走量和谷粒、秸秆中的养分含量。

N	P	K	Zn	S	Si
每吨谷物产量谷粒和秸秆带走的养分量 (公斤/吨)					
17.5	3.0	17.0	0.05	1.8	80
每吨谷物产量谷粒带走的养分量 (公斤/吨)					
10.5	2.0	2.5	0.02	1.0	15
每吨谷物产量秸秆带走的养分量 (公斤/吨)					
7.0	1.0	14.5	0.03	0.8	65
谷粒中的矿质元素含量 (%)					
1.10	0.20	0.29	0.002	0.100	2.0
秸秆中的矿质元素含量 (%)					
0.65	0.10	1.40	0.003	0.075	5.5

Mg	Ca	Fe	Mn	Cu	B
每吨谷物产量谷粒和秸秆带走的养分量 (公斤/吨)					
3.5	4.0	0.50	0.50	0.012	0.015
每吨谷物产量谷粒带走的养分量 (公斤/吨)					
1.5	0.5	0.20	0.05	0.009	0.005
每吨谷物产量秸秆带走的养分量 (公斤/吨)					
2.0	3.5	0.30	0.45	0.003	0.010
谷粒中的矿质元素含量 (%)					
0.15	0.05	0.025	0.005	0.0010	0.005
秸秆中的矿质元素含量 (%)					
0.20	0.30	0.035	0.045	0.0003	0.001

表 15. 养分换算系数。

由	乘以	得到/由	乘以	得到
NO_3^-	0.226	N	4.426	NO_3^-
NH_3	0.823	N	1.216	NH_3
NH_4^+	0.777	N	1.288	NH_4^+
$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ -urea	0.467	N	2.143	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ -urea
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.212	N	4.716	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
NH_4NO_3	0.350	N	2.857	NH_4NO_3
P_2O_5	0.436	P	2.292	P_2O_5
$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0.458	P_2O_5	2.185	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
K_2O	0.830	K	1.205	K_2O
KCl	0.632	K_2O	1.583	KCl
KCl	0.524	K	1.907	KCl
$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.364	Zn	2.745	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.227	Zn	4.398	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
SO_2	0.500	S	1.998	SO_2
SO_4^{2-}	0.334	S	2.996	SO_4^{2-}
MgSO_4	0.266	S	3.754	MgSO_4
$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.232	S	4.316	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.130	S	7.688	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.243	S	4.121	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
SiO_2	0.468	Si	2.139	SiO_2
CaSiO_3	0.242	Si	4.135	CaSiO_3
MgSiO_3	0.280	Si	3.574	MgSiO_3
MgO	0.603	Mg	1.658	MgO
MgO	2.987	MgSO_4	0.355	MgO
MgO	3.434	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.291	MgO
MgO	6.116	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.164	MgO
MgO	2.092	MgCO_3	0.478	MgO

续表 15.

由	乘以	得到/由	乘以	得到
CaO	0.715	Ca	1.399	CaO
CaCO ₃	0.560	CaO	1.785	CaCO ₃
CaCl ₂	0.358	Ca	2.794	CaCl ₂
CaSO ₄	0.294	Ca	3.397	CaSO ₄
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0.388	Ca	2.580	Ca ₃ (PO ₄) ₂
FeSO ₄	0.368	Fe	2.720	FeSO ₄
MnSO ₄	0.364	Mn	2.748	MnSO ₄
MnCl ₂	0.437	Mn	2.090	MnCl ₂
MnCO ₃	0.478	Mn	2.092	MnCO ₃
MnO ₂	0.632	Mn	1.582	MnO ₂
CuSO ₄ ·H ₂ O	0.358	Cu	2.795	CuSO ₄ ·H ₂ O
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.255	Cu	3.939	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O	0.138	B	7.246	Na ₂ B ₄ O ₇ ·5H ₂ O
Na ₂ B ₄ O ₇ ·7H ₂ O	0.123	B	8.130	Na ₂ B ₄ O ₇ ·7H ₂ O
B	3.230	B ₂ O ₃	0.310	B