

薛利红, 李刚华, 侯朋福, 等. 太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 729-736.

XUE Li-hong, LI Gang-hua, HOU Peng-fu, et al. Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 729-736.

太湖地区稻田持续高产的减量施氮技术体系研究

薛利红¹, 李刚华², 侯朋福¹, 范立慧^{1,2}, 杨林章¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.南京农业大学, 南京 210095)

摘要:在系统总结前人研究的基础上,结合课题组多年来¹⁵N同位素示踪研究以及水稻前后期用肥比例、适宜基肥比例盆栽试验和大田小区试验结果,提出了稻田持续高产低污的减量施氮技术体系方案。该技术体系包括稻季施氮量的合理计算、基于土壤肥力的前后期适宜施肥比例以及基肥的合理运筹、基于作物长势的穗肥实时调控等,明确了氮肥减量首先应依据目标产量计算合理施氮量,然后根据土壤肥力水平高低对前后期用肥比例以及基肥的分配进行优化,根据作物长势对穗肥用量进行实时微调,从而确保水稻高产可持续。氮肥减量重点在于减少前期用肥即基肥的用量。在同等施氮量下,水稻适宜基肥比例随肥力水平的增加而下降,低肥力下60%最佳,中肥力下50%为宜,高肥力下可降低至40%;此外,低肥力下需保证一定的基肥用量,并调整适宜的基肥比例以确保高产。

关键词:化肥减量;合理施氮量;氮肥运筹;作物长势实时诊断;产量;土壤肥力

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)04-0729-08 **doi:**10.11654/jaes.2016.04.017

Nitrogen reduction technique system for sustaining high yield of paddy fields

XUE Li-hong¹, LI Gang-hua², HOU Peng-fu¹, FAN Li-hui^{1,2}, YANG Lin-zhang¹

(1.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A nitrogen reduction technique system was put forward based on the previous research results including the ¹⁵N isotope trace, different split ratios of basal, tiller and panicle N fertilizer experiments. The N reduction technique system included the determination of theoretical N rate, the suitable split ratio of basal, tiller N fertilizer, and the real-time adjustment of panicle topdressing N rate based on the rice growth status. The theoretical N rate should be calculated based on the target yield and N requirement per unit grain. Then, the split ratios of N fertilizer at different growth stages should be optimized according to the soil fertility. Nitrogen rate reduction should be emphasized on basal and tiller N. At the same N rate, the suitable basal and tiller N ratio decrease with increasing soil fertility level, and should be 60%, 50% and 40% for low, medium and high soil fertility, respectively. Under low soil fertility, a certain amount of basal N rate should be applied and the ratio of basal to tillering should be kept at 3:7 to ensure the high yield and N use efficiency. However, no obvious influences was observed for different split ratios of basal to tiller N under high soil fertility. Finally, in order to ensure a high yield, the panicle topdressing N should be adjusted based on the crop growth and target yield using the leaf color or canopy reflectance spectra as the non-destructive diagnostic tool.

Keywords: chemical N fertilizer reduction; theoretical N rate; N split ratio; real-time diagnosis of growth status; yield; soil fertility

太湖流域是传统的鱼米之乡,稻田密布于水网之间。为了确保水稻高产,农户往往施入大量的化肥。据

调查研究,太湖流域稻季施氮量平均为 352 kg·hm⁻²,其中 270~360 kg·hm⁻² 的占 43.3%, 360~450 kg·hm⁻² (过量施肥)和超过 450 kg·hm⁻² (极端过量施肥)的分别占 26.6%和 13.3%^[1]。过量的化肥施入导致化肥利用率低下,氮肥的回收利用效率仅有 28.1%^[2],而稻田稻季氨挥发损失通量可占总施肥量的 20%~40%^[3],径流损失占 3.3%~5%^[4],渗漏损失占 2.1%~3.2%^[5],整个稻季施入的氮肥中有 30%~50%以上流失到周边水体

收稿日期:2015-11-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41171235);国家水专项课题(2012ZX07101-004);农业部行业专项课题(201503106);江苏省农业科技自主创新项目(CX(15)1004)

作者简介:薛利红(1977—),女,博士,研究员。研究方向为农田养分管理,与面源污染控制技术。E-mail: njxuelihong@gmail.com

以及大气中^[4],造成了严重的面源污染。2013年的监测数据表明,宜兴市周铁镇43条大小河道TN浓度变化在2.25~11.6 mg·L⁻¹之间,平均为3.96 mg·L⁻¹,远高于国家地表水Ⅴ类水标准。根据《太湖流域水环境综合治理总体方案(2013年修编)》,2010年太湖流域综合治理区总污染负荷中面源污染TN的比重仍然达44.92%,高于工业点源(30.59%)和城镇生活源(24.49%),其中种植业对面源污染的贡献为24.24%^[9]。农田面源污染主要受降雨和施肥事件影响,污染排放存在着很大的不确定性和随机性,时空变异性较大,且责任主体涉及千家万户,污染的监控和监管比较困难。因此,从源头上控制农田面源污染发生量是减少面源污染最有效的措施^[7]。笔者已经系统总结梳理了国内外的源头减量技术,并按照技术原理进行了分类阐述^[8]。但是,针对集约化稻田系统,如何根据土壤地力的不同进行减量施肥,在保证高产可持续的同时减少化肥损失、提高利用率、降低面源污染风险,仍然缺乏一套可操作、实用的减量施肥技术体系,减多少、减施哪一次的肥料这些具体问题仍未得到解答。为此,本文在系统总结前人研究结果的基础上,结合自己多年的研究结果,总结提出了稻田高产可持续的减量施肥技术体系,以期当前太湖地区稻田化肥面源污染控制提供理论指导和技术支撑,确保稻田的高产可持续发展。

1 稻田高产低污可持续的减量施肥技术保证体系

1.1 稻季总施氮量的计算——化肥减量依据

合理施氮量的确定是获得高产、维持土壤肥力和减少施氮引起的环境污染的关键。众所周知,作物产量随氮肥用量的增加呈先上升后下降的二次曲线函数关系,而氮素损失随氮肥施用量的增加则呈现线性上升关系,表明过多的氮肥投入不仅造成产量下降,且增加环境污染^[9-10]。因此,合理减少施氮量,不仅能提高产量,还能减少面源污染。根据肥料-产量效应函数法,太湖流域稻田的最佳施氮量在210~270 kg·hm⁻²^[11-13],目前太湖流域稻田平均施氮量为352 kg·hm⁻²^[1],表明目前农户的化肥用量水平普遍超量30%左右。最近几年的化肥减量试验结果也证实,在当前农户施肥水平下(270~300 kg·hm⁻²),稻季化肥用量减量20%~30%是可行的,对产量没有显著影响^[14-15]。但这均是短期(2~3年)少数试验田块的结果,而我国土地实行农户分散经营制,田块小且田块间土壤肥力的

时空变异性巨大。在确保水稻高产可持续性,即不以牺牲土壤肥力为代价的前提下,面对千家万户,化肥减量应该减多少、能减多久关系到合理施氮量的计算问题。

目前我国水稻生产上普遍采用凌启鸿等^[16]提出的精确定量施氮法:施氮量=(目标产量-基础产量)×百千克籽粒吸氮量/氮肥利用率。该方法基于斯坦福方程,通过确定基础产量、百千克籽粒吸氮量及氮肥利用率三个参数来计算合理施氮量。虽然百千克籽粒吸氮量经过多年、多点、多品种的实验研究,已基本明确,参数相对比较稳定,但基础产量(即无氮区的产量)的精确确定仍然是一个难题,该指标可通过田间试验得出,或者通过土壤速效养分指标来估算,但无法解决这一参数的时空变异性问题。朱兆良^[17]提出了区域平均适宜施氮量的概念和做法,推荐在土壤、气候、生产条件、农艺管理和产量水平相对一致的区域,采用平均施氮量来代替每个田块的经济最佳施氮量。这无疑为区域化肥总量的控制提供了一个可行的办法,但区域平均适宜施氮量的计算仍然需要通过大量田间试验来获得,其采用的仍是肥料产量效应函数法,同样无法解决地块之间的空间变异性问题。巨晓棠^[18]在以往理论施氮量概念和方法基础上,考虑了其他来源氮素输入情况,包括秸秆还田、干湿沉降、灌溉水带入及非共生固氮等,进一步推导出根据百千克籽粒需氮量的理论施氮量计算方法。该方法综合考虑作物的持续高产稳产以及土壤氮素的平衡,认为高产不能以牺牲土壤地力为代价,简化了斯坦福方程中土壤基础供氮量的计算过程,只需百千克籽粒需氮量这一参数便可根据相应地块的目标产量口算出合理施氮量。为了确保高产的可持续性,同时避免农户施入过量的化肥,巨晓棠提出的理论施氮量无疑是一种最为简便且易于推广应用的方法,其具体计算公式如下:

$$N = \frac{Y}{100} \times N_{100} \quad (1)$$

式中: N 为理论推荐施氮量,kg·hm⁻²; Y 为目标产量,kg·hm⁻²; N_{100} 为百千克籽粒吸氮量(或者称为施氮系数),在当前高产条件下,太湖流域主推的籼稻品种建议取值1.8,粳稻品种建议取值2.1,杂交稻建议取值1.7^[19-20]。

1.2 稻季氮肥的合理运筹——肥料合理分配依据

为提高肥料利用率,目前水稻生产中多采用分次施肥的策略,即基肥、蘖肥和穗肥合理分配。目前水稻的氮肥运筹主要根据一定的比例对基、蘖和穗肥进行

分配,如当前生产实际中常用的 30:30:40、40:30:30 等。因此,要减量施肥,必须明确减施哪个时期的肥料。

1.2.1 前后期适宜的施肥比例

目前我国稻田基肥用量比例过高,占总施氮量的 60%~80%。丁艳峰等^[21]研究指出,增施基、蘖氮肥增加了拔节前植株吸氮量,但抑制了拔节后植株吸氮量,不利于整个生育期的氮素积累和总氮肥利用率的提高。利用 ¹⁵N 示踪技术,以目前太湖流域常用的常规粳稻武运梗 23 以及杂交稻 Y 两优 2 号为供试材料,对水稻基肥、蘖肥和穗肥的氮素去向进行了系统研究,结果发现,基肥氮和蘖肥氮的吸收利用率分别仅有 20%~21.4%和 20%~26.8%,远远低于穗肥(66.1%~71.6%),基肥中有 55%~70%损失到环境中,土壤残留只有 10%~22%,而穗肥的损失率不足 20%(图 1)^[22]。因此,从提高肥料利用率方面考虑,减少基肥用量,增加穗肥比例是比较科学的方法。

最近几年的研究结果也发现,重后期、轻前期的施肥策略,可增加产量并提高氮肥利用率^[23-25],如同等氮肥用量下(225 kg·hm⁻²),重穗肥不施基肥(基肥、蘖肥和穗肥的分配比例为 0:50:50 和 0:30:70)比传统施

肥(36:24:40)高产且肥料利用率提高^[25]。研究表明倒四叶、倒三叶是最利于早熟晚粳高产的追肥叶龄期,即前氮后移的最佳施肥期,此期追肥能确保穗数,又能攻取大穗,提高抽穗后的干物质积累和转运,从而增产^[26-27]。笔者在江西早稻上的研究表明,氮肥用量从 210 kg N·hm⁻² 降低到 180 kg N·hm⁻²,穗肥不减,无论是减基肥还是蘖肥,产量均表现为增加,基肥均减施的处理产量最高,增产 7%,单减基肥处理增产 6.6%,单减蘖肥处理仅有轻微增产效果^[28]。因此,目前过量施肥情况下,减量施肥应减少基肥的用量。太湖流域两年大田的试验结果进一步发现,氮肥用量从 300 kg N·hm⁻² 降低到 150 kg N·hm⁻²,同时将基肥用肥比例从 80%降低到 50%时,常规粳稻武运梗 23 的穗数虽有所下降,但穗粒数、结实率和千粒重提高,产量并没有出现下降,肥料利用效率显著提高,氮损失率显著下降了 10 个百分点以上;但如果减氮的同时不调整基肥比例,则产量下降 3%~8%(表 1)。这表明在减量施肥情况下要确保高产,更要注意前后期运筹比例,氮肥要重点用在肥料利用率高的后期^[29]。

为明确适宜的前后期用肥比例,开展了不同土壤

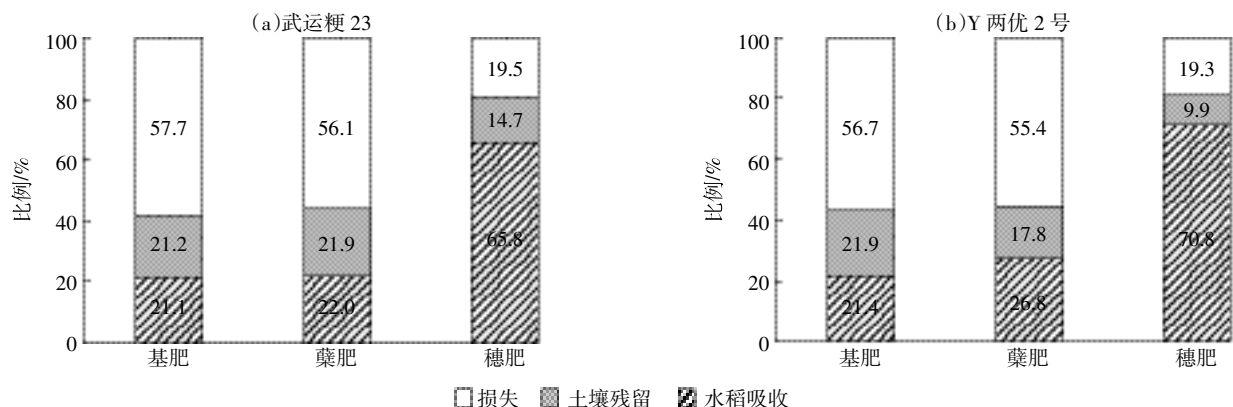


图 1 基于 ¹⁵N 示踪的基肥、蘖肥和穗肥的去向

Figure 1 Fates of basal, tiller, and panicle N in rice based on ¹⁵N tracer

表 1 氮肥减量下前后期用肥比例对产量及其构成、氮肥利用率及氮肥损失率的影响

Table 1 Yield and its components, N recovery efficiency and N loss ratio of different N split ratio treatments under N reduction

时间	氮肥用量及前后期用肥比例/kg·hm ⁻²	穗数/(×10 ⁴ ·hm ⁻²)	穗粒数	结实率/%	千粒重/g	产量/t·hm ⁻²	氮肥恢复效率/%	氮损失比例/%
2012 年	300(8:2)	347.8a	123.4a	88.8b	30.7b	11.7a	37.1b	51.4a
	150(8:2)	314.6a	113.6a	95.7a	31.4b	10.7a	49.0a	38.6b
	150(5:5)	311.1a	119.2a	96.2a	32.4a	11.6a	58.8a	25.2c
2013 年	300(8:2)	370.1a	109.6a	90.4a	30.5b	11.1a	32.3b	47.2a
	150(8:2)	324.6ab	110.4a	94.5a	32.0a	10.8a	44.6a	49.0a
	150(5:5)	312.4b	119.3a	94.0a	31.4ab	11.0a	48.6a	37.7b

肥力下适宜前后期用肥比例的桶栽试验研究,结果发现,土壤肥力水平决定了产量潜力的高低,在同等氮肥用量下高肥力土壤的产量明显高于低肥力土壤;且适宜的前后期比例也因土壤肥力的不同而不同,水稻前后期用肥比例随肥力水平的增加而下降,低肥力下 6:4 最佳,中肥力和高肥力下 5:5 最佳,此时的产量和氮肥利用率均最高(图 2)。这也与张洪程等^[26]提出的中上等地力水平下的适宜前后期用肥比例一致。

1.2.2 基肥的施用运筹

以往的研究多针对水稻的氮肥施用总量、前(基肥)后期(穗肥)施肥比例及如何调控穗肥用量,对于基肥和穗肥两者之间的运筹研究较少。¹⁵N 的示踪研究发现,水稻整个生长期吸收的氮素中,基肥和穗肥的贡献率几乎相当,分别为 6.92% 和 7.58%,在土壤中的残留则表现为基肥>穗肥^[22]。水稻移栽后,秧苗需要 7~8 d 的移栽损伤恢复期,移栽后 2 周水稻对氮的吸收量十分少。本土氮供应能力在 50~60 kg N·hm⁻² 以上时,不施基肥,利用叶色卡或冠层光谱来实时指导追肥能在保证产量的基础上明显提高氮肥利用率^[30-32]。研究我国 199 个水稻品种对有无基肥的产量响应发现,三分之二的品种在不施基肥条件下肥料利用效率得到提高,有无基肥之间产量无显著差异^[33]。2014 年试验结果表明,基肥的用量取决于土壤肥力的高低。要实现水稻的高产高效低污栽培,必须针对土壤地力对各个时期的用肥进行精确定量^[34-36]。

为明确基肥和穗肥的运筹比例是否受土壤肥力的影响,选用武运粳 23 号为供试品种,采用大田小区试验,考察不同基穗肥运筹比例在高、低肥力水平下,

对水稻产量及产量构成因素、氮素利用率和群体质量的影响。2014 年试验结果表明,基穗肥运筹比例对产量及氮素利用率的影响因地力水平的差异而不同。低肥力土壤下,随着穗肥比例的增加,分蘖速度增加,高峰苗数降低,干物质积累和产量均呈现先增加后减少的趋势,在基穗肥比例为 3:7 时(总氮用量为 300 kg N·hm⁻²),产量和氮肥利用率也最高,分别为 13.12 t·hm⁻² 和 41.50%(图 3)。在高肥力土壤中,随着穗肥比例的增加,高峰苗数和分蘖速度均有所下降,最终穗数也呈现下降的趋势,产量及氮素利用率也发生相应的变化,但差异未达显著水平。低肥力下要保证高产必须注重基穗肥的合理运筹,高肥力下基穗肥的运筹对产量影响不显著。

1.2.3 根据作物长势的穗肥实时微调技术

为确保高产,弥补前期水肥管理不当或者土壤-气候条件变化对水稻生长和群体构建造成的影响,需要根据作物的实时长势对穗肥用量进行微调。根据高产栽培经验,长江中下游区域早熟晚粳群体高峰苗应为适宜穗数的 1.3~1.4 倍,叶色于无效分蘖期正常落黄,穗肥于倒 4 叶、倒 3 叶期正常施用;若群体茎蘖数不足,叶色落黄早,需要早施、重施穗肥;若中期群体大,茎蘖数过多,叶色不落黄,穗肥则要推迟、减量施用;若剑叶抽出期仍未明显褪黄,则不必施穗肥。为了精确调整穗肥用量,可利用叶绿素仪(SPAD 仪)、便携式光谱仪或光谱传感器等测定的叶色或冠层反射光谱对水稻生长进行无损快速诊断^[37-39],并对穗肥氮用量进行决策,从而有效解决作物长势和土壤养分存在的时空变异性问题。

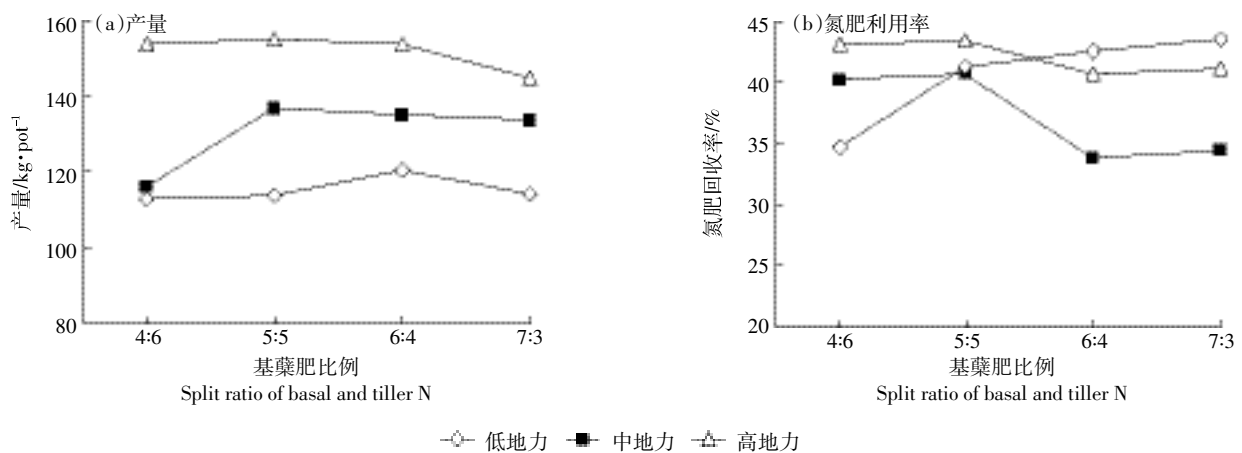


图 2 不同土壤肥力下前后期用肥比例对产量、氮肥利用率的影响(桶栽试验)

Figure 2 Effects of different split ratios of basal-tiller N to panicle N on yields and N recovery efficiency under different soil fertilities based on pot experiments

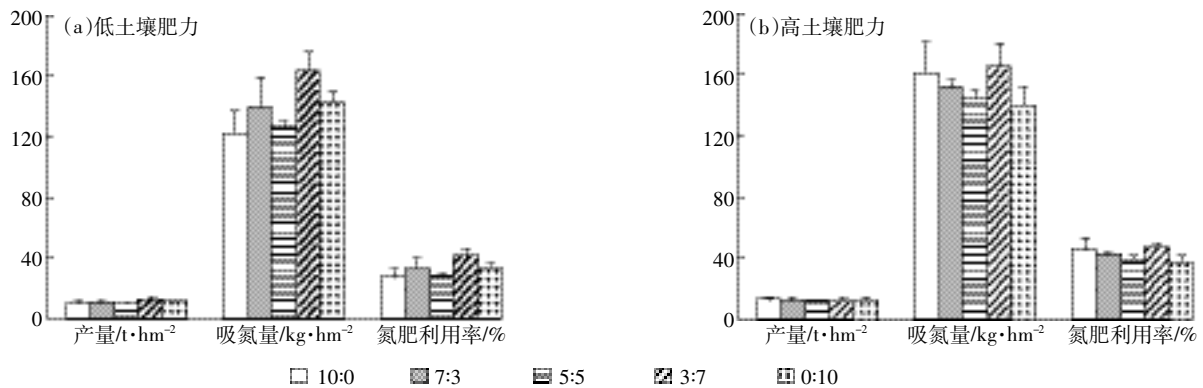


图3 不同土壤肥力下基肥、蘖肥比例对产量、吸氮量及氮肥利用率的影响(2014)

Figure 3 Effects of different split ratios of basal N to tiller N on yield, rice N uptake and N recovery efficiency under different soil fertilities(field experiment in 2014)

基于叶色的水稻实地氮肥推荐法(SSNM),能在保证产量的基础上,减少农户氮肥用量 20%~40%,减少 TN 渗漏损失 38%和径流损失 26%^[9-11,22]。该施肥技术的关键点是在水稻关键施肥期根据水稻叶片叶色(SPAD 读数)对追肥用量进行实时调整:若实测叶片 SPAD 值低于临界值,说明水稻呈缺氮状态,需要在原追肥用量的基础上多施氮肥;若高于临界值,则说明水稻呈氮过盛状态,需要在原追肥用量的基础上减少用量。大量研究表明,江苏地区常规籼稻品种的叶片 SPAD 阈值为 35,常规粳稻品种为 37^[40],而对于超级稻“甬优 12 号”,其穗分化期的 SPAD 临界值为 49^[41]。实际应用中,一般取临界值加减一个单位为适宜的 SPAD 范围,增减的氮肥用量多以 10 kg·hm⁻² 为标准。如籼稻临界值为 36,若叶片 SPAD 在 35~37 之间,按原计划施氮;若低于 35 时,则需要原计划施氮量的基础上增加 10 kg·hm⁻²,若高于 37,则要少施 10 kg·hm⁻²^[40]。巨晓棠^[18]发现利用 SSNM 法推荐出的总施氮量一般均要略低于计算出的理论施氮量,主要是因为 SSNM 法是根据作物长势丰缺来判断施多少氮,在当前农户过量施肥、土壤肥力普遍较高的情况,作物长势比较旺盛,植株体内氮素含量较高,因此推荐氮肥用量明显减少。但若长期维持这一低施氮量,则会造成土壤本底氮的消耗,引起产量下降现象,如 Xue 等^[42]在周铁镇的研究表明,水稻连续 3 年施氮 150 kg·hm⁻²,第二年起水稻产量会出现轻微下降,尽管与农户对照统计上差异不显著。若在保证高产,必需考虑土壤地力的变化,根据作物长势每年都对追肥用量进行调整。如 Peng 等^[23]在江苏江都的研究结果表明,SSNM 法推荐的施氮量第二年比第一年高 20 kg·hm⁻²,此时水稻保持持续高产并比对照农户增产

8%左右。

作物冠层光谱指数以其反映冠层群体信息、可从遥感影像获取等优点在近年来备受关注,其中传统的归一化植被指数(NDVI)因其容易获取而常被用来诊断作物的氮素营养状况并进行推荐施肥研究。薛利红等^[38]利用冠层 NDVI 来诊断水稻氮素营养状况,初步提出了江西早稻穗分化期的 NDVI 临界指标为 0.70,组建了基于目标产量的光谱追肥算法(SDNT),与传统氮肥报酬曲线计算出的最佳施肥量和最高产量相差无几^[43-44]。在江西双季稻区的示范应用结果发现,推荐施氮量因土壤田块地力的不同而不同,早、晚稻的推荐施氮量分别为 157.5~181.5、165~187 kg·hm⁻²,比农户施氮量减少了 1%~18%,平均减少 8%~9%,但早、晚稻产量比农户平均增产 7.1%和 7.6%,氮肥农学效率分别提高了 30%和 47%(表 2)。这表明,基于作物长势的穗肥调控技术能够根据作物的实时长势以及作物高产氮素需求对氮肥用量进行及时矫正,可有效避免过量施肥或者施肥不足带来的不利影响,从而确保高产并减少氮素的损失。

2 结论

为保证稻田的高产稳产可持续发展,必须在保证土壤肥力不下降的基础上对氮肥用量进行合理减量,低土壤肥力下化肥减量空间较小,高土壤肥力下化肥减量空间较大。适宜施氮量的计算宜采用基于目标产量的理论施氮量计算方法,即目标产量与百千克籽粒吸氮量的乘积。应减施的化肥量等于农户施氮量与理论施氮量的差值。化肥减量应重点减施前期用肥即基肥。氮肥运筹应根据土壤肥力的高低进行优化调整,低土壤肥力下要重视前期用肥,促进水稻早发、快

表2 基于光谱的水稻氮肥推荐方法在江西早晚稻的应用

Table 2 Application of spectrum-determined N topdressing method(SDNT) in early and late rice in Jiangxi Province

田块	氮肥推荐方法	早稻			晚稻		
		施氮量/kg·hm ⁻²	产量/t·hm ⁻²	氮肥农学效率/kg·kg ⁻¹	施氮量/kg·hm ⁻²	产量/t·hm ⁻²	氮肥农学效率/kg·kg ⁻¹
田 1	SDNT	166.5	7.77	17.0	165	5.98	10.59
	SN	183	7.35	13.2	195	5.50	6.51
田 2	SDNT	181.5	7.94	17.6	187	5.71	7.93
	SN	183	7.36	14.3	195	5.41	6.05
田 3	SDNT	157.5	7.65	18.0	184	5.82	8.66
	SN	183	7.10	13.6	195	5.37	5.86

注:SDNT 为光谱推荐施肥法;SN 为常规多次施肥对照。

发,基肥施用比例以 60%为宜,其中基肥与蘖肥的比例以 3:7 为宜,中高土壤肥力下基肥的比例降低到 50%左右为宜。在此基础上,可利用叶色或冠层光谱无损监测技术对水稻长势进行实时无损诊断,并根据作物高产氮素需求对穗肥用量进行实时动态调整,从而确保高产。

参考文献:

- [1] 王海,席运官,陈瑞冰,等.太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J]. 农业环境与发展, 2009, 26(3): 10-15.
WANG Hai, XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, et al. Investigation on excessive application of fertilizer and pesticides in Taihu Lake region[J]. *Agro-Environment and Development*, 2009, 26(3): 10-15.
- [2] Zhang F S, Cui Z L, Fan M S, et al. Integrated soil-crop system management: reducing environmental risk while increasing crop productivity and improving nutrient use efficiency in China[J]. *J Environ Qual*, 2011, 40(4): 1051-1057.
- [3] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1682-1689.
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8): 1682-1689.
- [4] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J]. 环境科学, 2011, 32(4): 222-227.
XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 222-227.
- [5] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(5): 988-995.
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 48(5): 988-995.
- [6] 国家发展改革委, 环境保护部, 住房城乡建设部, 水利部, 农业部. 太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年修编)[R]. 北京, 2013.
National Development and Reform Commission, Ministry of Environmental Protection, Ministry of Housing and Urban-rural Development, Ministry of Water Resources, Ministry of Agriculture. General plans for comprehensive treatments of water environment in Taihu Lake basin (2013)[R]. Beijing, 2013.
- [7] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [8] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践——源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881-888.
XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce-Retain-Reuse-Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881-888.
- [9] 薛峰, 颜廷梅, 乔俊, 等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 26-31, 51.
XUE Feng, YAN Ting-Mei, QIAO Jun, et al. Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4): 26-31, 51.
- [10] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 743-749.
ZHAO Dong, YAN Ting-Mei, QIAO Jun, et al. Change of different nitrogen forms in surface water of rice field and reduction of nitrogen fertilizer application in rice season[J]. *Ecology and Environment*, 2011, 20(4): 743-749.
- [11] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. 生态学报, 2000, 20(4): 659-662.
CUI Yu-ting, CHENG Xu, HAN Chun-ru, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 659-662.
- [12] 黄进宝, 范晓晖, 张绍林, 等. 太湖地区黄泥土壤水稻氮素利用与经济效益生态适宜施氮量[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 588-595.

- HUANG Jin-bao, FAN Xiao-hui, ZHANG Shao-lin, et al. Investigation on the economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer applied in rice production in Fe-leaching-Stagnic Anthrosols of the Taihu Lake region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 588-595.
- [13] 闫德智, 王德建, 林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮, 水稻吸氮和地下水的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(3): 440-446.
YAN De-zhi, WANG De-jian, LIN Jing-hui. Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 42(3): 440-446.
- [14] 张 刚, 王德建, 陈效民. 稻田化肥减量施用的环境效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(2): 327-330.
ZHANG Gang, WANG De-jian, CHEN Xiao-min. Effects of reduced fertilizer application on environmental quality of paddy field[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 327-330.
- [15] Qiao Jun, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake region[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 146: 103-112.
- [16] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2457-2467.
LING Qi-hong, ZHANG Hong-cheng, DAI Qi-gen, et al. Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457-2467.
- [17] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施氮量的方法论刍议[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4.
ZHU Zhao-liang. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 1-4.
- [18] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证: 兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 249-261.
JU Xiao-tang. Improvement and validation of theoretical N rate: Discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(2): 249-261.
- [19] Li G H, Zhang J, Yang C D, et al. Yield and yield components of hybrid rice as influenced by nitrogen fertilization at different eco-sites[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2014, 37: 244-258.
- [20] 于林惠, 李刚华, 徐晶晶, 等. 机插粳稻氮磷钾吸收分配特征研究[J]. 作物学报, 2012, 38(4): 1-10.
YU Lin-hui, LI Gang-hua, XU Jing-jing, et al. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium uptake and partitioning in mechanical transplanting Japonica rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 1-10.
- [21] 丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 等. 氮素基、磷肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 762-767.
DING Yan-feng, LIU Sheng-huan, WANG Shao-hua, et al. Effects of the amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004, 30(8): 762-767.
- [22] 林晶晶, 李刚华, 薛利红, 等. ^{15}N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1418-1428.
LIN Jing-jing, LI Gang-hua, XUE Li-hong, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ^{15}N tracer[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1418-1428.
- [23] Peng S, Buresh R J, Huang J, et al. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Res*, 2006, 96(1): 37-47.
- [24] Ghaley B B. Uptake and utilization of 5-split nitrogen topdressing in an improved and a traditional rice cultivar in the Bhutan Highlands[J]. *Exp Agri*, 2012, 48(4): 536-550.
- [25] Zhang Z J, Chu G, Liu L J, et al. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size[J]. *Field Crops Res*, 2013, 150: 9-18.
- [26] 张洪程, 吴桂成, 戴其根, 等. 水稻氮肥精确后移及其机制[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1837-1851.
ZHANG Hong-cheng, WU Gui-cheng, DAI Qi-gen, et al. Precise postponing nitrogen application and its mechanism in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1837-1851.
- [27] 杨海生, 张洪程, 杨连群, 等. 依叶龄运筹氮肥对优质水稻产量与品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 19-26.
YANG Hai-sheng, ZHANG Hong-cheng, YANG Lian-qun, et al. Effects of nitrogen operations according to leaf age on yield and quality in good-quality rice[J]. *J China Agric Univ*, 2002, 7(3): 19-26.
- [28] 薛利红, 覃 夏, 李刚华, 等. 基肥氮不同比例对直播早稻群体动态、氮素吸收利用及产量形成的影响[J]. 土壤, 2010, 42(5): 681-685.
XUE Li-hong, QIN Xia, LI Gang-hua, et al. Effect of basal and tiller nitrogen rates on population dynamics, nitrogen uptake and utilization and yield formation of direct-seedling early rice[J]. *Soil*, 2010, 42(5): 681-685.
- [29] Li G H, Lin J J, Xue L H, et al. Uptake, residual, and loss of basal N under split N fertilization in transplanted rice with ^{15}N isotope tracer[J]. *Pedosphere*, 2015. (Accepted)
- [30] Singh B, Singh Y, Ladha J K, et al. Chlorophyll meter- and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in Northwestern India[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(4): 821-829.
- [31] Shukla A K, Ladha J K, Singh V K, et al. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a systems perspective[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(6): 1606-1621.
- [32] Xue L H, Yang L Z. Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100(4): 524-534.
- [33] Wang Z, Huang K K, Xue X. Genotype difference in grain yield response to basal N fertilizer supply among various rice cultivars[J]. *Afri J Soil Sci*, 2014(2): 52-57.
- [34] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14): 2886-2894.
ZENG Xiang-ming, HAN Bao-ji, XU Fang-sen, et al. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(14): 2886-2894.

- [35] 张 军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(11): 2020–2029.
ZHANG Jun, ZHANG Hong-cheng, DUAN Xiang-mao, et al. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(11): 2020–2029.
- [36] 彭建伟, 丁哲利, 刘 强, 等. 地力和养分管理模式对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(22): 190–195.
PENG Jian-wei, DING Zhe-li, LIU Qiang, et al. Effect of soil fertility level and nutrient management model on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2010, 26(22): 190–195.
- [37] 李刚华, 薛利红, 尤 娟, 等. 水稻氮素和叶绿素 SPAD 叶位分布特点及氮素诊断的叶位选择[J]. 中国农业科学, 2007, 40(6): 1127–1134.
LI Gang-hua, XUE Li-hong, YOU Juan, et al. Spatial distribution of leaf N content and SPAD value and determination of the suitable leaf for N diagnosis in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6): 1127–1134.
- [38] 薛利红, 覃 夏, 李刚华, 等. 江西鹰潭早稻关键生育期的 NDVI 诊断指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增 2): 223–227.
XUE Li-hong, QIN Xia, LI Gang-hua, et al. Diagnostic indexes of NDVI at key growth stages for early rice at Yingtan, Jiangxi Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(Suppl 2): 223–227.
- [39] Xue L H, Cao W X, Luo W H, et al. Monitoring leaf nitrogen status in rice with canopy spectral reflectance[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1): 135–142.
- [40] 刘立军, 徐 伟, 桑大志, 等. 实地氮肥管理提高水稻氮肥利用效率[J]. 作物学报, 2006, 32(7): 987–994.
LIU Li-jun, XU Wei, SANG Da-zhi, et al. Site-specific nitrogen management increases fertilizer-nitrogen use efficiency in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(7): 987–994.
- [41] 刘荣杰. 超级稻“甬优 12”实地氮肥管理技术[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2015, 33(1): 48–53.
LIU Rong-jie. Research on site-specific nitrogen management technology in super rice “Yongyou 12”[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2015, 33(1): 48–53.
- [42] Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. *Environmental Research Letter*, 2014, 9(11): 115010.
- [43] 覃 夏, 王绍华, 薛利红. 江西鹰潭地区早稻氮素营养光谱诊断模型的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 691–698.
QIN Xia, Wang Shao-hua, XUE Li-hong. Nitrogen nutrition diagnosis of early rice with NDVI and its application for nitrogen topdressing recommendation at Yingtan, Jiangxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(4): 691–698.
- [44] Xue L H, Li G H, Qin X, et al. Topdressing nitrogen recommendation for early rice with an active sensor in South China[J]. *Precision Agriculture*, 2014, 15(1): 95–110.