

DOI: 10. 11766/trxb201405150234

# 基于土壤氮素平衡的氮肥推荐方法

## ——以水稻为例\*

宁运旺 张永春<sup>†</sup>

(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部江苏耕地保育科学观测实验站, 南京 210014)

**摘 要** 基于土壤氮素平衡提出了一种新的氮肥推荐方法——氮素归还指数法,并以水稻为例介绍了其实施过程。经江苏省太湖地区和里下河地区 45 个水稻田块的举例推荐,用肥料效应函数法推荐的最佳经济施氮量(OENR)、氮素归还指数法推荐的氮素归还施氮量(RNR)和理论施氮量法推荐的理论施氮量(TNR)分别平均为  $N\ 246.8 \pm 42.5$ 、 $216.9 \pm 27.3$  和  $176.9 \pm 22.3\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 。氮素归还指数法可不经田间试验实现以目标产量为唯一变量的氮肥推荐,但在区域氮素净损失率能否保持相对稳定、长期实施氮素归还施氮量能否使土壤不致产生氮素盈余等方面仍需进一步研究。

**关键词** 氮肥推荐;氮素平衡;氮素归还;水稻

**中图分类号** S143 **文献标识码** A

氮肥是农业生产最重要的增产因子之一,增施氮肥是提高作物产量和效益的重要举措,但氮肥用量增加并不意味着产量和效益同步增加<sup>[1]</sup>,相反当氮肥施用量超过一定限度后还会使产量和效益下降,同时对生态环境造成多方面影响<sup>[2-3]</sup>,因此,一个合理的氮肥施用量必须兼顾作物产量、效益和生态环境。20 世纪 80 年代以来,我国的推荐施肥技术在理论和实践上均得到了迅速发展,各种推荐方法不断涌现,有些方法至今仍在沿用,如以土壤测试为基础的测土推荐施肥方法(如目标产量法、地力分级法等)和以作物反应为基础的推荐施肥方法(如肥料效应函数法、植株冠层光谱法等)<sup>[4]</sup>,其中肥料效应函数法正是目前中国推荐施肥体系所普遍采用的方法,但这些方法在原理上主要基于土壤供肥性能或作物反应,未将施肥对环境的影响考虑在内,在实践中应用也会使土壤产生较多氮素盈余<sup>[4]</sup>,增加向环境流失的风险。土壤养分平衡在原理上可通过精确计算来定量推荐施肥,并使土壤不致产生养分盈余,一直是研究者们寻求兼顾作物产量、效益和生态环境推荐施肥方法的着力点,然而

迄今只有场域平衡(Farm-gate budget)在农场或区域尺度上得到了应用<sup>[5]</sup>,表观平衡(Soil surface budget)更多地作为评价区域土壤养分流失和施肥状况的手段而受到关注<sup>[6]</sup>,系统平衡(Soil system budget)由于涉及的养分损失途径多、变异大(受区域气候和不同田块土壤肥力差异影响而产生的),精确计算往往很难实现,作为推荐施肥的依据则鲜有合适的方法。Ju 基于土壤氮素平衡和氮肥去向发明了一种确定作物施氮量的方法——理论施氮量(TNR)法<sup>[7-8]</sup>,但该方法尚未在华北平原小麦—玉米轮作以外区域和轮作体系中得到验证。本文尝试以土壤氮素平衡作为氮肥推荐的依据,探讨一种新的氮肥推荐方法——氮素归还指数法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 氮素归还指数法

**1.1.1 不同田块土壤肥力差异的表征** 氮肥推荐的主要难点之一是如何量化田块的供肥性能,基于土壤测试的地力分级法和养分平衡法以及基

\* 江苏省农业科技自主创新基金(ex(12)3037)、公益性行业(农业)科研专项(20100314-1-2)和 IPNI 国际合作项目(Jiangsu-11)共同资助

<sup>†</sup> 通讯作者, E-mail: yczhang1966@sina.com

作者简介:宁运旺(1966—),男,安徽望江人,副研究员,主要从事甘薯营养与施肥研究。E-mail:ningyunwang460@sina.com

收稿日期:2014-05-15;收到修改稿日期:2014-11-16

于作物反应的肥料效应函数法均需对此做出评估,主要手段包括实验室测试和田间试验,由于成本原因只能在区域尺度上应用,具体田块的推荐施氮量还需要田块种植者根据具体情况加以调整<sup>[9]</sup>,这使得相当一部分田块种植者还是按照以往的施肥习惯投入高于推荐用量的肥料,或者在不同田块施相同用量的肥料<sup>[10]</sup>。实际上在推荐施肥中,定量化田块供肥性能的主要目的在很大程度上是为了区别不同田块的土壤肥力差异,而反映田块土壤肥力差异的指标可选择范围却较广。因此,从成本、准确性和田块种植者接受程度考虑,可选择田块种植者最为熟悉的田块产量潜力(或可以达到的目标产量 $Y_i$ )作为表征不同田块土壤肥力差异的变量。

**1.1.2 氮素归还指数(NRI)** 根据养分归还学说,施肥从本质上可以看成是一种向土壤归还养分的行为,在不同作物种植制度中,到底应该向土壤归还多少比较合适正是推荐施肥所要解决的问题,氮素归还指数就是基于这种考虑提出的,其定义为:“以保持土壤氮素平衡为前提,作物收获后移出土壤单位氮素所应投入土壤的肥料氮的用量”。

根据定义:假设作物收获后移出土壤的氮为 $C_N$ ,投入土壤的肥料氮为 $F_N$ ,则:

$$\text{氮素归还指数(NRI)} = F_N / C_N$$

从施肥到作物收获这一过程,土壤系统运行中的氮素输入途径包括肥料氮( $F_N$ )、土壤初始氮( $S_{N1}$ )和环境向土壤输入的氮( $E_{-N}$ ,包括大气沉降、灌溉、种子带入等,不包括秸秆还田和生物固氮),输出途径包括作物收获携出氮( $C_N$ )、土壤期末氮( $S_{N2}$ )和土壤向环境输出的氮( $E_{+N}$ ,包括侵蚀、径流、渗漏或淋洗、挥发、硝化-反硝化损失等)。

从土壤利用角度分析,可以将土壤分成3类:(1)“自然”土壤:既不施肥,也不种植作物,保持“自然状态”;(2)半农业土壤:只种作物不施肥,相当于肥料试验中的无氮区土壤;(3)农业土壤:既种作物又施肥。不施氮的“自然”土壤和半农业土壤中,土壤与环境间同样存在氮素“自然”交换,其输入与输出土壤的交换量分别称之为自然输入氮( $E_{-N0}$ )和自然输出氮( $E_{+N0}$ );施氮的农业土壤中,施氮必然会造成土壤与环境间氮素交换发生变化,其变化量称之为输入或输出氮增量( $\Delta E_N$ )。

现假设:在不施氮的土壤中,土壤与环境间的氮素交换为平衡。即: $E_{-N0} = E_{+N0}$ 。在“自然”土壤中,既没有肥料氮投入( $F_N = 0$ ),又没有作物收获氮支出( $C_N = 0$ ),根据假设和物质守恒定律( $F_N + S_{N1}$

$+ E_{-N0} = C_N + S_{N2} + E_{+N0}$ ), $S_{N1} = S_{N2}$ ,土壤氮素可保持平衡。半农业土壤中,虽然没有肥料氮投入( $F_N = 0$ ),但作物仍有一定收获( $C_N = C_{N0}$ ),根据假设和物质守恒定律, $S_{N1} = C_{N0} + S_{N2}$ ,土壤氮素无法保持平衡。农业土壤中,氮肥的投入势必会增加土壤氮向环境的输出,此时土壤向环境输出的氮为 $E_{+N}$ ,而环境向土壤输入的氮仍为 $E_{-N0}$ (忽略单个田块的具体施肥对区域环境的影响),土壤向环境输出的氮增量为 $\Delta E_N = E_{+N} - E_{-N0}$ ,根据物质守恒定律: $F_N + S_{N1} + E_{-N0} = C_N + S_{N2} + E_{+N}$ ,则有: $F_N + S_{N1} = C_N + S_{N2} + E_{+N} - E_{-N0}$ ,即: $F_N + S_{N1} = C_N + S_{N2} + \Delta E_N$ 。因此,为保持农业土壤初始氮与期末氮平衡(即 $S_{N1} = S_{N2}$ ),必须使下式成立:

$$F_N = C_N + \Delta E_N \quad (1)$$

由式(1):

$$C_N / F_N = 1 - \Delta E_N / F_N \quad (2)$$

根据氮素归还指数(NRI)的定义,则有:

$$\text{NRI} = 1 / (1 - \Delta E_N / F_N) \quad (3)$$

**1.1.3 区域氮素归还指数(RNRI)** 由式(3),NRI的大小取决于 $\Delta E_N / F_N$ ,其中 $\Delta E_N$ 实际为氮素净损失量,其本质含义为施氮引起的土壤氮向环境输出的增加部分(即氮素净损失:施氮区土壤氮损失量-不施氮区土壤氮损失量), $\Delta E_N / F_N$ 即氮素净损失占施氮量的百分比(氮素净损失率)。 $\Delta E_N$ 的大小主要取决于施肥技术,施肥技术越高, $\Delta E_N$ 就越小,NRI也越小;理论上如果通过改进施肥技术使施肥后的 $\Delta E_N$ 为零,在保持土壤养分平衡的条件下,则施入的肥料养分与收获时作物摄取的养分相等,即 $\text{NRI} = 1$ 。因此,影响施肥技术与施肥效果的因素均可对NRI的值产生影响。土壤、气候、作物和氮肥施用技术对氮的绝对损失量影响较大,因此在不同区域氮素净损失率差异较大<sup>[11-14]</sup>,即使在同一区域的不同年份其氮素净损失率也差异较大<sup>[11,14-15]</sup>,但在同一农业区域的同一年份,这些因素的变异均较小,氮素净损失率也相对稳定<sup>[14,16]</sup>,称之为区域氮素净损失率,由此计算出的氮素归还指数称为区域氮素归还指数(RNRI),其值也相对稳定。

增量 $\Delta E_N$ 可以通过公式 $\Delta E_N = E_{+N} - E_{-N0}$ 计算,但必需具备区域条件下某种作物(包含两种处理:施氮与不施氮)的土壤养分输出的完全数据(径流、挥发、淋溶和硝化-反硝化等)。通常可以该区域内氮素损失监测数据,或以多年田间试验为基础、在常规栽培技术条件下以施氮处理与不施氮处理的氮素损失之差为增量 $\Delta E_N$ 。

**1.1.4 百千克籽粒吸氮量( $N_{100}$ )** 百千克籽粒吸氮量是指作物获得百千克经济产量时所移出的氮素养分量,与作物类型和品种有关。百千克籽粒吸氮量与产量水平呈极显著相关,对于同一区域的同一作物品种而言,不同产量水平下的百千克籽粒吸氮量可以相差很大且与产量极显著相关,如在江苏省域范围内,对现行的粳稻品种而言,其百千克籽粒吸氮量  $N_{100}$  在 1.17~2.90 kg 之间,且  $N_{100}$  与籽粒产量  $Y_1$  ( $\text{kg hm}^{-2}$ ) 符合下列线性关系:  $N_{100} = 8.67 \times 10^{-5} Y_1 + 1.161, r = 0.828 0^{**}$  [17]。

**1.1.5 田块推荐施氮量的计算** 某一具体田块种植某作物的氮素归还施氮量(RNR),可根据该种植区域该作物的区域氮素归还指数(RNRI)、该田块种植这种作物的目标产量( $Y_1$ )和该作物的百千克籽粒吸氮量( $N_{100}$ ),直接由下式计算:

$$\text{RNR} = Y_1 \times N_{100} \times \text{RNRI} / 100 \quad (4)$$

从式(4)可以看出,具体田块的氮素归还施氮量(RNR)与目标产量( $Y_1$ )、百千克籽粒吸氮量( $N_{100}$ )和区域氮素归还指数(RNRI)三个因数有关,它们分别反映了具体田块的肥力差异、品种特性和区域特点。由于  $N_{100}$  可以转化为  $Y_1$  的函数, RNRI 在特定的农业区域也可视为一个稳定的常数,因此,利用式(4)可以  $Y_1$  作为唯一变量对具体田块进行施氮量推荐。为便于叙述和比较,本文在后面的表达中将上述方法称之为“氮素归还指数法”,用氮素归还指数法推荐的施氮量称为“氮素归还施氮量”。

**1.1.6 对氮素归还施氮量(RNR)的修正** 农业生产中,秸秆还田已经成为普遍的发生项,生物固氮对于耕地土壤也是必然存在的,但以上氮素平衡的计算中未将通过秸秆还田和生物固氮带入土壤的氮计算在内,因此需要对氮素归还施氮量(RNR)进行修正。对土壤氮库而言,秸秆氮和生物固氮均属于外源有机氮,必须经过腐解和矿化后才能成为其一部分,而这一过程也存在氮素损失[18-19]。因此,如果将外源有机氮最终进入土壤氮库的量记为  $W_N$ ,修正后的氮素归还施氮量为:

$$\text{RNR} = Y_1 \times N_{100} \times \text{RNRI} / 100 - W_N \quad (5)$$

## 1.2 氮素归还指数法的应用

选择江苏省太湖地区水稻种植区域(119°08'~120°37'E, 31°09'~32°02'N)和里下河地区的部分水稻种植区域(119°08'~120°56'E, 32°12'~32°50'N)作为研究区域,包括江苏省苏州、无锡、常州以及南通、镇江、扬州、泰州和盐城的部分地区,同属于长江中下游平原的碟形两翼,其土壤形成机制、地

貌特点和气候特征接近[20],种植水稻的施肥习惯和产量水平也基本一致,且均属于北亚热带季风气候,四季分明,常年平均气温分别为 16℃ 和 14.5℃,年平均降水量分别为 1 181 mm 和 992 mm,本文将它们视为同一水稻种植区域。于 2003—2010 年在研究区域内选择 45 个水稻田块(其中 18 个来自太湖平原的苏州市和镇江市,27 个来自里下河平原的泰州市),分别以肥料效应函数法、氮素归还指数法和理论施氮量法进行氮肥推荐,并比较其差异。

**1.2.1 肥料效应函数法** 布置田间试验。45 个氮肥单因素试验的具体安排情况为:12 个为 2005—2007 年在泰州进行的 8 个施氮水平的水稻试验,施氮量分别为 N 0、112.5、150、187.5、225、262.5、300、337.5  $\text{kg hm}^{-2}$ ;15 个为 2006—2009 年在泰州进行的 7 个施氮水平的水稻试验,施氮量分别为 N 0、71.3、142.6、213.9、285.2、356.5、427.8  $\text{kg hm}^{-2}$ ;6 个为 2009 年在镇江进行的 6 个施氮水平的水稻试验,施氮量分别为 N 0、129.4、194.1、258.8、323.5、388.1  $\text{kg hm}^{-2}$ ;1 个为 2010 年在苏州进行的 7 个施氮水平的水稻试验,施氮量分别为 N 0、75、150、225、300、375、450  $\text{kg hm}^{-2}$ ;11 个引自公开发表的资料[9],试验地点位于常熟市。除引用的试验外,其他田间试验均重复 3 次,小区面积为 12~20  $\text{m}^2$ ,随机排列。小区之间作埂,并且用塑料薄膜覆盖埂体,保证各小区单排单灌。各处理磷、钾肥均为一次性基施,其中泰州的试验中磷钾肥用量分别为  $\text{P}_2\text{O}_5$  120  $\text{kg hm}^{-2}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  187.5  $\text{kg hm}^{-2}$ ,苏州和镇江的试验中磷钾肥用量分别为  $\text{P}_2\text{O}_5$  60~90  $\text{kg hm}^{-2}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  90~180  $\text{kg hm}^{-2}$ 。氮磷钾肥料品种分别为尿素(含 N 46%)、普通过磷酸钙(含  $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)、氯化钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  60%)。氮肥运筹均按 4 次施用,其中泰州试验按照基肥:蘖肥:促花肥:保花肥比例 5:2:2:1,镇江的比例为 3.5:2.5:3:1,苏州的比例为 4:2:3:1。水稻品种为当地的主栽粳稻品种。

建立肥料效应函数,计算最佳经济施氮量。根据试验结果建立施氮量与水稻产量的一元二次和线性加平台模型,并选择相关系数较大且极显著或显著的肥料效应函数作为推荐施氮模型,由边际效益( $dy/dx = px/py$ )或拐点坐标计算不同田块最佳经济施氮量和最佳经济产量。

**1.2.2 氮素归还指数法** 根据区域内种植水稻的氮素净损失率,计算区域氮素归还指数(RNRI)。(1)氮素净淋失率:根据朱兆良等[21]和薛利红等[22]

的研究结果分别为 1.04% ~ 1.93% 和 0.43% ~ 1.15%, 平均为 1.14%; (2) 氨挥发净损失率: 根据邓美华等<sup>[14]</sup>和薛利红等<sup>[22]</sup>的研究结果分别为 7.30% ~ 9.35% 和 20.0% ~ 21.1%, 平均为 14.44%; (3) 径流净损失率: 根据薛利红等<sup>[22]</sup>和田玉华等<sup>[23]</sup>的研究结果分别为 0.78% ~ 1.66% 和 1.14 ~ 1.52%, 平均为 1.28%; (4) 硝化-反硝化净损失率: 根据 Zhao 等<sup>[15]</sup>、Ju 等<sup>[24]</sup>和宁彤等<sup>[25]</sup>的研究结果, 太湖流域稻季氮的硝化-反硝化绝对损失率分别为 22.0%、36.4% 和 18.0%, 平均为 25.47%, 而薛利红等的研究则表明在绝对损失中有 31.68% 来自土壤本底<sup>[22]</sup>, 因此, 可估算出太湖流域稻季氮的硝化-反硝化净损失率平均为 25.47% × (1 - 31.68%) = 17.40%。累计以上 4 项稻田氮素损失, 该区域内常规施肥条件下水稻的区域氮素净损失率为 34.26%, 根据式(3)可计算出试验区域内基于土壤氮素平衡的水稻区域氮素归还指数 RNRI 为 1.52, 即在研究区域内, 种植粳稻收获后每携出 1 kg N, 为保持土壤氮素平衡必须施入 N 1.52 kg。

根据粳稻品种的百千克籽粒吸氮量 ( $N_{100}$ ) 和外源有机氮进入稻田土壤氮库的量, 计算并修正氮素归还施氮量 (RNR)。太湖流域以稻麦轮作为主, 稻田还田秸秆主要为小麦, 而统计研究表明小麦秸秆的平均含氮量为 0.65%<sup>[26]</sup>, 如果按照 6 000 kg hm<sup>-2</sup> 秸秆全量还田计算, 通过秸秆还田进入稻田的氮平均为 N 39 kg hm<sup>-2</sup>; 此外, 稻田的生物固氮主要来自于自生蓝绿藻, 据估算大约在 N 30 kg hm<sup>-2</sup><sup>[27-28]</sup>, 即验证区域内水稻生长季通过秸秆还田和生物固氮进入稻田的外源有机氮约为 N 69 kg hm<sup>-2</sup>; 另据研究, 还田秸秆中的氮在腐解转化、进入土壤氮库过程中有 10.3% ~ 38.0%<sup>[19]</sup>、17.87%<sup>[29]</sup>、38.0%<sup>[18]</sup> 和 27.1%<sup>[30]</sup> 的损失, 平均大约只有 75.8% 最终进入土壤氮库。据此, 可估算出太湖流域水稻种植季节通过秸秆还田和生物固氮进入土壤氮库的量约为 N 69 × 75.8% = 52.3 kg hm<sup>-2</sup>。由于研究区域内种植常规粳稻品种的  $N_{100} = 8.67 \times 10^{-5} Y_t + 1.161$ , RNRI = 1.52, 分别代入式(5), 则可得到太湖流域水稻氮素归还施氮量的计算公式:

$$RNR = 1.32 \times 10^{-6} Y_t^2 + 1.76 \times 10^{-2} Y_t - 52.3 \quad (6)$$

**1.2.3 理论施氮量法** 该方法包括两个推荐公式, 其中式 I “ $N_{fert} = (N_{uptake} - N_{straw}) / (1 - Coeff)$ ” 为理论推荐公式 ( $N_{fert}$  为推荐施氮量,  $N_{uptake}$  为地上部分氮素摄取量,  $N_{straw}$  为秸秆氮素摄取量, Coeff 为氮

素损失占施氮量的百分比), 式 II “ $N_{fert} \approx N_{uptake}$ ” 为经验推荐公式。

根据式 I, 以验证区域内水稻草谷比为 1<sup>[31]</sup>, 稻草含氮量为 0.91%<sup>[32]</sup>, 氮素(绝对)损失率 Coeff 为 46.7%<sup>[14-15, 21-25]</sup> 计算, 则有:

$$N_{fert} = 1.63 \times 10^{-6} Y_t^2 + 0.0047 Y_t \quad (7)$$

根据式 II, 则有:

$$N_{fert} \approx 8.67 \times 10^{-7} Y_t^2 + 0.01161 Y_t \quad (8)$$

## 2 结 果

### 2.1 最佳经济施氮量

表 1 所示, 45 个田块中, 施氮量与水稻籽粒产量均可拟合成显著或极显著的一元二次或线性加平台模型, 最佳经济施氮量在 N 182 ~ 337 kg hm<sup>-2</sup> 之间, 区域平均最佳经济施氮量为 N 246.8 ± 42.5 kg hm<sup>-2</sup>, 其中苏州、镇江和泰州等地区的区域平均最佳经济施氮量分别为 N 226.0 ± 31.8、250.1 ± 29.9 和 255.3 ± 61.6 kg hm<sup>-2</sup>。

### 2.2 氮素归还施氮量和理论施氮量

以 45 个田块的最佳经济产量为目标产量, 根据式(6)计算的氮素归还施氮量以及根据式(7)和式(8)计算的理论施氮量见表 2。表 2 所示, 45 个田块的氮素归还施氮量在 N 148 ~ 264 kg hm<sup>-2</sup> 之间, 区域平均氮素归还施氮量为 N 216.9 ± 27.3 kg hm<sup>-2</sup>, 较区域平均最佳经济施氮量极显著降低 12.1% ( $p < 0.01$ ), 其中苏州地区、镇江地区和泰州地区的区域平均氮素归还施氮量分别为 N 187.4 ± 23.8、214.4 ± 24.6 和 230.5 ± 17.6 kg hm<sup>-2</sup>, 较相应的区域最佳经济施氮量分别显著降低 17.1% ( $p < 0.01$ )、14.3% ( $p < 0.05$ ) 和 9.7% ( $p < 0.05$ )。根据式(7)和式(8)计算的理论施氮量非常接近, 在 N 121 ~ 211 kg hm<sup>-2</sup> 之间, 区域平均理论施氮量为 N 176.9 ± 22.3 ~ 177.2 ± 18.0 kg hm<sup>-2</sup>, 分别较区域平均最佳经济施氮量和区域平均氮素归还施氮量极显著降低 28.2% ~ 28.3% 和 18.3% ~ 18.4% ( $p < 0.01$ ), 其中苏州、镇江和泰州等地区的区域平均理论施氮量分别为 N 152.9 ± 19.2 ~ 157.8 ± 15.7、174.8 ± 20.3 ~ 175.6 ± 16.2 和 186.2 ± 11.6 ~ 188.0 ± 14.5 kg hm<sup>-2</sup>, 较相应的区域最佳经济施氮量分别极显著降低 30.2% ~ 32.3%、29.8% ~ 30.1% 和 26.4% ~ 27.1% ( $p < 0.01$ ), 较相应的区域平均氮素归还施氮量分别极显著降低 15.8% ~ 18.4%、18.1% ~ 18.5% 和 18.4% ~ 19.2% ( $p < 0.01$ )。

表 1 45 个验证田块的最佳经济施氮量

Table 1 Optimal economic N rate (OENR) for 45 tested plots

试验地点与时间 Test location and year	肥料效应函数 Fertilizer efficiency function	相关系数 Correlation coefficient	最佳经济施氮量 Optimal economic N rate(N kg hm <sup>-2</sup> )
苏州 Suzhou			
望城 Wangcheng (2010)	$y = -0.0387x^2 + 23.18x + 5374$	0.966 **	280
苏州常熟 Changshu, Suzhou			
白茆 Baimao (2003)	$y = -0.0202x^2 + 9.556x + 7228$		209
王庄 Wangzhuang (2003)	$y = -0.0157x^2 + 7.778x + 7366$		212
梅李 Meili (2003)	$y = -0.0195x^2 + 8.448x + 7615$		188
辛庄 Xinzhuang (2003)	$y = -0.0115x^2 + 6.705x + 8727$		242
白茆 Baimao (2004)	$y = -0.0297x^2 + 16.10x + 6586$		252
塘市 Tangshi (2004)	$y = -0.0134x^2 + 6.989x + 6443$		218
王庄 Wangzhuang (2004)	$y = -0.0123x^2 + 6.578x + 7747$		222
辛庄 Xinzhuang (2004)	$y = -0.0171x^2 + 7.800x + 6939$		195
常南 Changnan (2004)	$y = -0.0073x^2 + 3.798x + 7635$		182
大义 Dayi (2004)	$y = -0.0105x^2 + 6.126x + 7198$		239
北新桥 Beixinqiao (2004)	$y = -0.0071x^2 + 4.982x + 7126$		273
苏州地区平均最佳经济施氮量 Average of optimal economic N rate in Suzhou			226.0 ± 31.8
镇江丹阳 Danyang, Zhenjiang			
延陵 Yanling (2009)	$y = -0.036x^2 + 20.41x + 5964$	0.776 *	263
皇塘 Huangtang (2009)	$y = -0.047x^2 + 24.81x + 6801$	0.973 **	248
导墅 Daoshu (2009)	$y = 8937 + 12.59(N - 191) (N < 191); y = 8937 (N \geq 191)$	0.980 **	191
珥陵 Erling (2009)	$y = 8317 + 11.15(N - 270) (N < 270); y = 8317 (N \geq 270)$	0.785 *	270
珥陵 Erling (2009)	$y = 9200 + 10.46(N - 267) (N < 267); y = 9200 (N \geq 267)$	0.961 **	267
吕城 Lvcheng (2009)	$y = -0.042x^2 + 23.46x + 5519$	0.961 **	261
镇江地区平均最佳经济施氮量 Average of optimal economic N rate in Zhenjiang			250.1 ± 29.9
泰州姜堰 Jiangyan, Taizhou			
张甸 Zhangdian (2006)	$y = -0.034x^2 + 20.76x + 6136$	0.951 **	283
张甸 Zhangdian (2006)	$y = -0.050x^2 + 27.19x + 5388$	0.965 **	257
张甸 Zhangdian (2006)	$y = 8258 + 18.47(N - 224) (N < 224); y = 8317 (N \geq 224)$	0.928 **	224
娄庄 Louzhuang (2006)	$y = -0.026x^2 + 18.92x + 6176$	0.990 **	335
娄庄 Louzhuang (2006)	$y = -0.027x^2 + 19.70x + 5940$	0.974 **	337
张甸 Zhangdian (2007)	$y = -0.047x^2 + 28.69x + 4988$	0.894 **	289
梁徐 Liangxu (2007)	$y = -0.047x^2 + 28.56x + 4870$	0.946 **	288
梁徐 Liangxu (2007)	$y = -0.047x^2 + 28.61x + 4607$	0.924 **	284
桥头 Qiaotou (2007)	$y = -0.046x^2 + 24.02x + 6274$	0.868 **	245
娄庄 Louzhuang (2007)	$y = -0.071x^2 + 37.54x + 4644$	0.958 **	254
娄庄 Louzhuang (2007)	$y = -0.057x^2 + 29.22x + 6457$	0.916 **	243
沈高 Shengao (2007)	$y = -0.047x^2 + 23.16x + 6796$	0.874 **	230
张甸 Zhangdian (2008)	$y = -0.042x^2 + 27.22x + 4707$	0.941 **	306
梁徐 Liangxu (2008)	$y = -0.058x^2 + 33.35x + 4982$	0.982 **	275

续表

试验地点与时间 Test location and year	肥料效应函数 Fertilizer efficiency function	相关系数 Correlation coefficient	最佳经济施氮量 Optimal economic N rate(N kg hm <sup>-2</sup> )
大伦 Dalun (2009)	$y = -0.040x^2 + 26.19x + 5279$	0.974 **	309
张甸 Zhangdian (2005)	$y = 9778 + 16.90(N - 188) (N < 188); y = 9778 (N \geq 188)$	0.892 **	188
沈高 Shengao (2005)	$y = 9809 + 16.20(N - 188) (N < 188); y = 9809 (N \geq 188)$	0.845 **	188
沈高 Shengao (2005)	$y = 9602 + 15.89(N - 195) (N < 195); y = 9602 (N \geq 195)$	0.838 **	195
张甸 Zhangdian (2005)	$y = 9725 + 15.84(N - 188) (N < 188); y = 9725 (N \geq 188)$	0.833 **	188
张甸 Zhangdian (2006)	$y = 9718 + 23.16(N - 225) (N < 225); y = 9718 (N \geq 225)$	0.965 **	225
沈高 Shengao (2006)	$y = 9679 + 17.32(N - 225) (N < 225); y = 9679 (N \geq 225)$	0.937 **	225
张甸 Zhangdian (2006)	$y = 9291 + 17.09(N - 229) (N < 229); y = 9291 (N \geq 229)$	0.963 **	229
沈高 Shengao (2006)	$y = 9494 + 16.24(N - 226) (N < 226); y = 9494 (N \geq 226)$	0.906 **	226
沈高 Shengao (2007)	$y = 9515 + 15.71(N - 283) (N < 283); y = 9515 (N \geq 283)$	0.974 **	283
张甸 Zhangdian (2007)	$y = 9667 + 15.06(N - 286) (N < 286); y = 9667 (N \geq 286)$	0.963 **	286
沈高 Shengao (2007)	$y = 8995 + 17.78(N - 246) (N < 246); y = 8995 (N \geq 246)$	0.982 **	246
张甸 Zhangdian (2007)	$y = 8399 + 16.79(N - 256) (N < 256); y = 8399 (N \geq 256)$	0.958 **	256
泰州地区平均最佳经济施氮量 Average of optimal economic N rate in Taizhou			255.3 ± 61.6
试验区区域平均最佳经济施氮量 Average of optimal economic N rate in tested area			246.8 ± 42.5

注:由于2006年后中国实行粮食最低收购价,苏州常熟的试验水稻籽粒价格为1.86元 kg<sup>-1</sup>,氮肥为2.10元 kg<sup>-1</sup>N,其余试验水稻籽粒价格为2.86元 kg<sup>-1</sup>,氮肥价格为4.33元 kg<sup>-1</sup>N Note: As China has implemented the policy of minimum grain purchase prices since 2006, the price of rice seed and N fertilizer was 1.86 yuan kg<sup>-1</sup> and 2.10 yuan kg<sup>-1</sup>N, respectively, in Changshu, Suzhou and 2.86 yuan kg<sup>-1</sup> and 4.33 yuan kg<sup>-1</sup>N, respectively, in other regions

表 2 45 个验证田块的氮素归还施氮量和理论施氮量

Table 2 Recycled N rates (RNR) and theoretical N rates (TNR) for the 45 tested plots

试验地点与时间 Test location and year	目标产量 Target yield (kg hm <sup>-2</sup> )	氮素归还施氮量 Recycled N rate (N kg hm <sup>-2</sup> )	理论施氮量 Theoretical N rate (N kg hm <sup>-2</sup> )	
			I	II
苏州 Suzhou				
望城 Wangcheng (2010)	8 830	206	168	170
苏州常熟 Changshu, Suzhou				
白茆 Baimao (2003)	8 309	185	152	157
王庄 Wangzhuang (2003)	8 514	193	151	156
梅李 Meili (2003)	9 676	242	157	162
辛庄 Xinzhuang (2003)	8 757	203	197	194
白茆 Baimao (2004)	7 330	148	165	168
塘市 Tangshi (2004)	8 601	197	121	132
王庄 Wangzhuang (2004)	7 810	166	160	164
辛庄 Xinzhuang (2004)	8 084	176	136	144
常南 Changnan (2004)	8 062	175	144	151
大义 Dayi (2004)	7 957	171	143	150
北新桥 Beixinqiao (2004)	8 065	178	140	147
苏州地区平均值 Average in Suzhou	8 356 ± 594	187.4 ± 23.8	152.9 ± 19.2	157.8 ± 15.7

续表

试验地点与时间 Test location and year	目标产量 Target yield (kg hm <sup>-2</sup> )	氮素归还施氮量 Recycled N rate (N kg hm <sup>-2</sup> )	理论施氮量 Theoretical N rate (N kg hm <sup>-2</sup> )	
			I	II
镇江丹阳 Danyang, Zhenjiang				
延陵 Yanling (2009)	8 842	207	168	170
皇塘 Huangtang (2009)	10 063	258	211	205
导墅 Daoshu (2009)	8 937	210	171	173
珥陵 Erling (2009)	8 317	185	151	157
珥陵 Erling (2009)	9 200	221	180	180
吕城 Lvcheng (2009)	8 781	204	166	169
镇江地区平均值 Average in Zhenjiang	9 023 ± 585	214.4 ± 24.6	174.8 ± 20.3	175.6 ± 16.2
泰州姜堰 Jiangyan, Taizhou				
张甸 Zhangdian (2006)	9 288	225	183	183
张甸 Zhangdian (2006)	9 073	216	176	177
张甸 Zhangdian (2006)	8 258	183	149	155
娄庄 Louzhuang (2006)	9 596	238	194	191
娄庄 Louzhuang (2006)	9 513	235	191	189
张甸 Zhangdian (2007)	9 354	228	186	184
梁徐 Liangxu (2007)	9 197	221	180	180
梁徐 Liangxu (2007)	8 941	211	172	173
桥头 Qiaotou (2007)	9 398	230	187	186
娄庄 Louzhuang (2007)	9 599	238	194	191
娄庄 Louzhuang (2007)	10 192	264	216	208
沈高 Shengao (2007)	9 637	240	196	192
张甸 Zhangdian (2008)	9 104	217	177	178
梁徐 Liangxu (2008)	9 767	246	200	196
大伦 Dalun (2009)	9 552	236	193	190
张甸 Zhangdian (2005)	9 778	246	201	196
沈高 Shengao (2005)	9 809	247	202	197
沈高 Shengao (2005)	9 602	238	194	191
张甸 Zhangdian (2005)	9 725	244	199	195
张甸 Zhangdian (2006)	9 718	243	199	195
沈高 Shengao (2006)	9 679	242	197	194
张甸 Zhangdian (2006)	9 291	225	184	183
沈高 Shengao (2006)	9 494	234	191	188
沈高 Shengao (2007)	9 515	235	191	189
张甸 Zhangdian (2007)	9 667	241	197	193
沈高 Shengao (2007)	8 995	213	173	175
张甸 Zhangdian (2007)	8 399	189	154	159
泰州地区平均值 Average in Taizhou	9 413 ± 421	230.5 ± 17.6	188.0 ± 14.5	186.2 ± 11.6
区域平均值 Average in tested area	9 079 ± 666	216.9 ± 27.3	176.9 ± 22.3	177.2 ± 18.0

### 2.3 三种推荐施氮量的效益分析

表 3 为三种推荐施氮量下 45 个田块的产量、施氮量、氮损失量、土壤氮盈余量和净收入变化的平均值,其中产量是根据表 1 的肥料效应函数求得。表中所示,当应用最佳经济施氮量时,获得的水稻产量最高、经济效益最大,但同时向环境排放的氮和产生土壤盈余的氮也最多。当应用氮素归还施氮量时,与最佳经济施氮量相比,水稻减产 2.4%、

经济效益减少 500 元  $\text{hm}^{-2}$ ,但同时亦可使氮肥投入和氮素损失分别减少 N 29.9 和 10.3  $\text{kg hm}^{-2}$ ,并可减少土壤氮素盈余 71.6% (N 13.9  $\text{kg hm}^{-2}$ )。当应用理论施氮量时,与最佳经济施氮量相比,虽然氮肥投入和氮素损失分别大幅减少 N 69.9 和 24.0  $\text{kg hm}^{-2}$ ,但水稻减产和经济效益减少的幅度也分别达到 5.6% 和 1 150 元  $\text{hm}^{-2}$ ,同时使土壤产生氮素耗竭 N 13.1  $\text{kg hm}^{-2}$ 。

表 3 三种施氮量下的效益分析

Table 3 Efficiency analysis of the three N rates

项目 Item	(1) 产量 Yield ( $\text{kg hm}^{-2}$ )	(2) 化肥施用量 Application rate of chemical N ( $\text{N kg hm}^{-2}$ )	(3) 秸秆氮施用量 Incorporation rate of straw N ( $\text{N kg hm}^{-2}$ )	(4) 水稻吸氮量 N uptake by rice ( $\text{N kg hm}^{-2}$ )	(5) 氮净损失量 N net loss ( $\text{N kg hm}^{-2}$ )	(6) 土壤氮盈余量 Soil N surplus ( $\text{N kg hm}^{-2}$ )	(7) 净收入变化量 Variation of net income (Yuan $\text{hm}^{-2}$ )
OENR	9 079	246.8	52.3	176.9	102.5	19.4	0
RNR	8 859	216.9	52.3	168.7	92.2	5.5	-500
TNR	8 571	176.9	52.3	163.2	78.5	-13.1	-1 150

注:OENR、RNR 和 TNR 分别表示最佳经济施氮量、氮素归还施氮量和理论施氮量;水稻吸氮量 = 产量  $\times$  百千克籽粒吸氮量/100;氮净损失量 = (化肥施用量 + 秸秆氮施用量)  $\times$  氮素净损失率;土壤氮盈余量 = [(2) + (3)] - [(4) + (5)];净收入变化量 = 稻谷产值增加量 - 氮肥成本增加量。水稻籽粒价格和氮肥价格分别按 2.86 元  $\text{kg}^{-1}$  和 4.33 元  $\text{kg}^{-1}$  N 计算 Note: OENR, RNR, and TNR stands for optimal economic N rate, recycled N rate, and theoretical N rate, respectively. N uptake by rice = (1)  $\times$   $N_{100}/100$ ; N net loss = [(2) + (3)]  $\times$  ratio of N net loss; Soil N surplus = [(2) + (3)] - [(4) + (5)]; Net income = increment of rice output - increment of N cost. Rice seed price and nitrogen price was 2.86 yuan  $\text{kg}^{-1}$  and 4.33 yuan  $\text{kg}^{-1}$  N, respectively

## 3 讨论

### 3.1 氮素归还指数与氮肥真实利用率和氮肥有效性的关系

我国土壤肥料科研工作中,肥料氮对土壤氮库的补充作用被长期忽视,因为肥料(表观)利用率是其中最常用的一个比较指标,而这个指标本身就将作物从土壤中吸收的氮排除在外。从氮肥利用率(NUE)的计算公式“ $\text{NUE} = F_N / (C_N - C_{N_0})$ ”可知,氮肥利用率的计算不包括作物从土壤中吸收的氮,而氮素归还指数的(NRI)计算公式“ $\text{NRI} = F_N / C_N$ ”将作物从肥料和土壤中吸收的氮均包括在内。实际上投入土壤的肥料氮除一部分被作物吸收外,还有很大一部分用于补充土壤氮因被作物吸收产生的亏缺。因此,如果将作物从土壤中吸收的氮计算在内,则氮肥的真实利用率将会大大提高。已有学者认识到目前氮肥利用率的计算不能反映其真实情况<sup>[33-35]</sup>,如王火焰和周健民曾对氮肥真实利用率进

行过探讨,认为氮肥真实利用率是作物吸收的养分占种植作物消耗的养分比例,并提出了氮肥真实利用率的计算公式:“作物养分吸收量/(施肥量 - 土壤养分盈亏量)<sup>[35]</sup>”,巨晓棠提出了“氮肥有效率”的概念,并认为“氮肥有效率 = 100%  $\times$  (1 - 氮肥损失量/氮肥施用量)<sup>[34]</sup>”。可以看出,当土壤养分保持平衡时土壤养分盈亏量为零,亦即当土壤氮素保持平衡时,本文所定义的氮素归还指数与王火焰和周健民提出的氮肥真实利用率互为倒数,如太湖平原种植水稻的氮素归还指数为 1.52,则该区域的氮肥真实利用率为 65.79%;而氮素有效率实际上就是“1 - 氮肥(净)损失率”,如太湖平原种植水稻的氮素净损失率为 34.26%,则氮素有效率为 65.74%,也与本文所定义的氮素归还指数互为倒数。

### 3.2 三种推荐施氮量的差异

无数田间试验已经证明,用肥料效应函数法推荐的最佳经济施氮量即可满足作物生长需求,在实际生产中应用最多的也是最佳经济施氮量。最大产量施氮量尽管可以收获最高产量,却远超过作物



本身的需求,从而造成土壤养分盈余,增加向环境流失的风险。但在实际应用中却发现,以牺牲少量产量为代价的最佳经济施氮量虽然能获得最佳经济效益,却仍能使土壤形成较多氮素盈余<sup>[4]</sup>。一个兼顾作物产量、效益和生态环境的推荐施氮量还应在最佳经济施氮量的基础上继续下调 5.8%~11.0%左右,这种“生态施氮量”虽然在作物产量和经济效益上有少量损失,但却可使综合效益最大化<sup>[4,36-37]</sup>。本文结果表明,45 个水稻田块的氮素归还施氮量平均为  $N 216.9 \pm 27.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ,较平均最佳经济施氮量  $N 246.8 \pm 42.5 \text{ kg hm}^{-2}$  低 12.1%。当施用氮素归还施氮量时,虽然水稻减产 2.4%、经济效益减少 500 元  $\text{hm}^{-2}$ ,但同时亦可氮肥投入和氮素损失分别减少  $N 29.9$  和  $10.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ,并可使土壤氮素处于基本平衡状态,与前人研究结果基本一致。

理论施氮量法和氮素归还指数法均是基于土壤氮素平衡而建立起来的氮肥推荐方法,但推荐结果却有较大差异,作者认为可能与两种方法的推荐目标不同有关。氮素归还指数法立足于当季作物的土壤氮素收支平衡和氮肥推荐,因而在秸秆还田氮的计算上应用的是当季作物种植前进入土壤的秸秆氮,而理论施氮量法立足于长期氮素收支平衡和周年氮肥推荐,应用的是当季作物收获后进入土壤的秸秆氮,两种秸秆氮量的不同造成了两种推荐方法最终结果上的差异。以本文种植水稻为例,进入当季稻田的小麦秸秆秸秆氮约为  $N 39 \text{ kg hm}^{-2}$ ,而水稻收获后的秸秆氮(以水稻产量  $9 000 \text{ kg hm}^{-2}$  计算)约为  $N 82 \text{ kg hm}^{-2}$ ,两者相差  $N 43 \text{ kg hm}^{-2}$ ,扣除秸秆氮进入土壤氮库过程中的损失,实际进入土壤氮库的秸秆氮(N)相差  $43 \times 75.8\% = 33 \text{ kg hm}^{-2}$ ,因此,对当季作物水稻而言,理论施氮量法将进入稻田的秸秆氮以水稻秸秆来计算多了  $N 33 \text{ kg hm}^{-2}$ ,因而在当季水稻的推荐施氮量上就会少了  $N 33 \text{ kg hm}^{-2}$ ,因此,如果按周年推荐,两者基本一致。

### 3.3 氮素归还指数法存在的问题

尽管氮素归还指数法在理论上是基于土壤氮素平衡,在计算上也以田块目标产量为唯一变量(不需要经过田间试验),但氮素归还指数法还有许多问题需要进一步探讨和证实。这些问题主要包括三个方面:其一是缺少直接证据可以证实本文所提到的假设,即“在不施氮的土壤中,土壤与环境间的氮素交换为平衡”。甚至有研究表明长期休闲或不施氮的土壤氮素呈增加趋势<sup>[38]</sup>,但这并不能成

为否定本文假设的证据,因为假设中土壤与环境间的氮素交换不包括生物固氮,土壤氮素增加完全可能来自于生物固氮。其二是缺少直接证据证实区域氮素归还指数(RNRI)是一个相对稳定的常数,虽然有少量文献支持在同一区域的同一年份种植相同品种的水稻,在常规或推荐施肥下其氮素净损失率基本一致<sup>[14,16]</sup>,但在同一区域的不同年份,由于气候的变异则可能对某项氮素净损失造成较大影响<sup>[11,14-15]</sup>,对总的氮素净损失率的影响如何尚缺少数据支撑。其三是施用氮素归还施氮量(RNR)能否在产量和综合效益上保持较高水平、能否使土壤不致产生较多氮素盈余,也需要经过长期定位试验的验证。

## 4 结 论

基于土壤氮素平衡和养分归还学说提出的氮素归还指数法,可不经田间试验实现以目标产量为唯一变量的氮肥推荐。45 个水稻田块氮肥施用量推荐表明,氮素归还指数法推荐的氮素归还施氮量(RNR)平均为  $N 216.9 \pm 27.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ,较肥料效应函数法推荐的最佳经济施氮量(OENR)减少 12.1%。与最佳经济施氮量比较,施用氮素归还施氮量可使水稻减产 2.4%、经济效益减少 500 元  $\text{hm}^{-2}$ ,但同时亦可使氮肥投入和氮素损失分别减少  $N 29.9$  和  $10.3 \text{ kg hm}^{-2}$ ,并可使土壤氮素处于基本平衡状态。氮素归还指数法与理论施氮量法的差异在于其推荐目标不同,前者立足于当季作物的土壤氮素收支平衡和氮肥推荐,后者立足于长期氮素收支平衡和周年氮肥推荐。氮素归还指数法在区域氮素净损失率能否保持相对稳定、长期施用氮素归还施氮量能否使土壤不致产生氮素盈余等方面仍需进一步研究。

致 谢 泰州姜堰市农业局土肥站朱德进和镇江丹阳市农业局土肥站谢金学提供水稻氮肥单因素试验数据,中国农业大学巨晓棠教授、陈新平教授给予悉心指导,作者在此一并致谢!

## 参 考 文 献

- [1] Stewart W M, Roberts T L. Food security and the role of fertilizer insupporting it. *Procedia Engineering*, 2012, 46: 76—82
- [2] 朱兆良,孙波. 中国农田面源污染控制对策研究. 环境保护, 2008, 394(48): 4—6. Zhu Z L, Sun B. Reseach on control measures of agricultural non-point source pollution in China

- (In Chinese). *Environmental Protection*, 2008, 394 (48): 4—6
- [ 3 ] 赖力, 黄贤金, 王辉, 等. 中国化肥施用的环境成本估算. *土壤学报*, 2009, 46(1): 63—69. Lai L, Huang X J, Wang H, et al. Estimation of environmental costs of chemical fertilizer utilization in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1): 63—69
- [ 4 ] 何萍, 金继运, Mirasol F, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 499—505. He P, Jin J Y, Mirasol F, et al. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 499—505
- [ 5 ] Oenema O, Kros H, de Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20: 3—16
- [ 6 ] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域表观氮磷平衡清单及政策建议. *环境科学*, 2007, 28(6): 1305—1310. Chen M P, Chen J N. Inventory of regional surface nutrient balance and policy recommendations in China (In Chinese). *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1305—1310
- [ 7 ] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case study on the North China Plain. *Field Crops Research*, 2011, 124: 450—458
- [ 8 ] 巨晓棠. 确定作物施氮量的方法: 中国, ZL201010548476.0. 2012. Ju X T. A method of recommending crop nitrogen rate: China, ZL201010548476.0 (In Chinese). 2012
- [ 9 ] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论诤议. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 1—4. Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 1—4
- [ 10 ] Scharf P C, Kitchen N R, Sudduth K A, et al. Field-scale variability in optimal nitrogen fertilizer rate for corn. *Agronomy Journal*, 2005, 97(2): 452—461
- [ 11 ] 宋勇生, 范晓晖, 林德喜, 等. 太湖地区稻田氨挥发及影响因素的研究. *土壤学报*, 2004, 41(2): 265—269. Song Y S, Fan X H, Lin D X, et al. Ammonia volatilization from paddy field in the Taihu Lake region and its influencing factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 265—269
- [ 12 ] 杨林章, 孙波. 中国农田生态系统养分循环与平衡及其管理. 北京: 科学出版社, 2008: 154—196. Yang L Z, Sun B. Cycling, balance and management of nutrients in farmland ecosystem in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008: 154—196
- [ 13 ] 尹娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 189—191. Yin J, Fei L J, Tian J C, et al. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6): 189—191
- [ 14 ] 邓美华, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氨挥发损失的影响. *土壤*, 2006, 38(3): 263—269. Deng M H, Yin B, Zhang S L, et al. Effects of rate and method of N application on ammonia volatilization in paddy fields (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(3): 263—269
- [ 15 ] Zhao X, Zhou Y, Wang S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in Southern China. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76 (3): 1068—1078
- [ 16 ] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季氮的湿沉降. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1884—1888. Su C G, Yin B, Zhu Z L, et al. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1884—1888
- [ 17 ] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2457—2467. Lin Q H, Zhang H C, Dai Q G, et al. Study on precise and quantitative N application in rice (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457—2467
- [ 18 ] 王志明, 朱培立, 黄东迈, 等. 淹水土壤中秸秆氮素的转化. *江苏农业学报*, 2001, 17(4): 236—240. Wang Z M, Zhu P L, Huang D M, et al. Transformation of straw <sup>15</sup>N in the submerged soil (In Chinese). *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2001, 17(4): 236—240
- [ 19 ] 闫德智, 王德建, 张刚, 等. <sup>15</sup>N 标记秸秆在太湖地区水稻土上的氮素矿化特征研究. *土壤学报*, 2012, 49(1): 77—85. Yan D Z, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen mineralization of applied <sup>15</sup>N labeled straw in paddy soils in the Taihu Lake region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1): 77—85
- [ 20 ] 陈洪全. 论长江三角洲的北界. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 27(1): 76—79. Chen H Q. Decision thinking for the northern demarcation line of Yangtzi River Delta (In Chinese). *Journal of Zhejiang Normal University: Natural Sciences*, 2004, 27(1): 76—79
- [ 21 ] 朱兆良, 范晓晖, 孙永红, 等. 太湖地区水稻土上稻季氮素循环及其环境效应. *作物研究*, 2004, 18(4): 187—191. Zhu Z L, Fan X H, Sun Y H, et al. Nitrogen cycle and environmental effectiveness of rice in paddy soils in Taihu Lake region (In Chinese). *Crop Research*, 2004, 18(4): 187—191
- [ 22 ] 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. *环境科学*, 2011, 32(4): 1133—1138. Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake region (In Chinese). *Environmental Science*, 2011, 32(4): 1133—1138
- [ 23 ] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区稻季的氮素径流损失研究. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1071—1075. Tian Y H, Yin B, He F Y, et al. Nitrogen loss with runoff in rice season in the Taihu Lake region, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1071—1075
- [ 24 ] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the*

- United States of America, 2009, 106(9): 3041—3046
- [25] 宁彤, 高超, 许有鹏. 快速城市化背景下县域尺度农田氮素平衡状况的演变——以江苏省宜兴市为例. 中国环境科学, 2011, 31(4): 668—673. Ning T, Gao C, Xu Y P. County-level changes in nitrogen budgets in agroecosystems against the background of rapid urbanization: A case study of Yixing Municipality in Eastern China's Jiangsu Province (In Chinese). China Environmental Science, 2011, 31(4): 668—673
- [26] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 黄淮海三省两市作物秸秆及其养分资源利用现状分析. 中国农学通报, 2009, 25(11): 186—193. Gao L W, Ma L, Zhang W F, et al. Analysis on the quantities and utilization of crop straw and its nutrient in Huang-Huai-Hai region (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(11): 186—193
- [27] 曹志洪, 林先贵, 杨林章, 等. 论“稻田圈”在保护城乡生态环境中的功能 II. 稻田土壤氮素养分的累积、迁移及其生态环境意义. 土壤学报, 2006, 43(2): 256—260. Cao Z H, Lin X G, Yang L Z, et al. Ecological function of “Paddy Field Ring” to urban and rural environment II. Characteristics of nitrogen accumulation, movement in paddy field ecosystem and its relation to environmental protection (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2): 256—260
- [28] Bei Q C, Liu G, Tang H Y, et al. Heterotrophic and phototrophic  $^{15}\text{N}_2$  fixation and distribution of fixed  $^{15}\text{N}$  in a flooded rice-soil system. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 59: 25—31
- [29] 王胜佳, 王家玉, 陈义. 肥料和稻草氮利用率的3年定位研究. 土壤通报, 2004, 35(6): 763—766. Wang S J, Wang J Y, Chen Y. A three-year research on nitrogen recovery of chemical fertilizer and rice straw by isotope N in rice field (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(6): 763—766
- [30] 彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等.  $^{15}\text{N}$  交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留. 生态学报, 2011, 31(3): 858—865. Peng P Q, Qiu S J, Hou H B, et al. Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic  $^{15}\text{N}$  cross labeled fertilizers (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 858—865
- [31] 顾克军, 张斯梅, 许博, 等. 江苏省水稻秸秆资源量及其可收集量估算. 生态与农村环境学报, 2012, 28(1): 32—36. Gu K J, Zhang S M, Xu B, et al. Estimation of total yield and collectable amount of rice straw in Jiangsu Province (In Chinese). Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(1): 32—36
- [32] 刘晓燕, 金继运, 任天志, 等. 中国有机肥料养分资源潜力和环境风险分析. 应用生态学报, 2010, 21(8): 2092—2098. Liu X Y, Jin J Y, Ren T Z, et al. Potential of organic manures nutrient resources and their environmental risk in China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2092—2098
- [33] 宇万太, 周桦, 马强, 等. 氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响——兼论作物氮肥利用率. 土壤学报, 2010, 47(1): 90—96. Yu W T, Zhou H, Ma Q, et al. Effect of N fertilizer on uptake of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(1): 90—96
- [34] 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的误解. 土壤学报, 2014, 51(5): 921—933. Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921—933
- [35] 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略. 土壤学报, 2014, 51(2): 216—225. Wang H Y, Zhou J M. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 216—225
- [36] Xiang P A, Zhou Y, Jiang J A, et al. External costs and optimum use of nitrogen fertilizer based on the balance of economic and ecological benefits in the paddy field system of the Dongting Lake area, China. Agricultural Science in China, 2007, 6(3): 347—354
- [37] 夏永秋, 颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量. 土壤学报, 2011, 48(6): 1210—1218. Xia Y Q, Yan X Y. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental, and economic benefits for wheat season in Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1210—1218
- [38] 梁斌, 赵伟, 杨学云, 等. 小麦-玉米轮作体系下氮肥对长期不同施肥处理土壤氮含量及作物吸收的影响. 土壤学报, 2012, 49(4): 748—757. Liang B, Zhao W, Yang X Y, et al. Effects of N application on N content and uptake by crops in soils under different long-term fertilization managements in wheat-maize rotation system (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(4): 748—757

## SOIL NITROGEN BALANCE BASED RECOMMENDATION OF NITROGEN FERTILIZATION: A CASE STUDY OF RICE

Ning Yunwang Zhang Yongchun<sup>†</sup>

(*Institute of Agricultural Resources and Environmental Research, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Jiangsu), Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China*)

**Abstract** Based on nitrogen (N) balance in soil system, a new N fertilization recommendation method, i. e. “N return index (NRI)” method, was introduced. The NRI concept was brought forth by the Nutrient Return Doctrines, and means how much N must be returned to soil in order to maintain soil N balance when one kilogram N is taken off by crop harvesting. On the assumption that other than N fertilization, the N inflow via atmosphere deposition, irrigation and seeding (N biofixation and N in straw incorporation exclusive) and the N outflow via erosion, runoff, leaching, volatilization, and nitrification-denitrification, are constant, an equation for calculation of NRI ( $NRI = 1 - \Delta E/F_N$ ) was deduced, where  $\Delta E$  stands for increase in N output from soil to environment induced by N application;  $F_N$  for N input with fertilizer applied, and  $\Delta E/F_N$  is net N loss. With the target yield ( $Y_t$ ) of the fields most farmers are familiar with set as the only variable to distinguish fields different in soil fertility, an equation for NRI-based recommendation of N fertilization was worked out, i. e.  $RNR = RNRI \times N_{100} \times Y_t/100$ , where RNR stands for recycled N rate, RNRI for the regional NRI, which is a relatively stable constant in a specific farming area,  $N_{100}$  for N uptake by one hundred kilogram grains, which is in a significant linear relationship with crop yield. By taking into account the actual production practices, the equation was finally amended as  $RNR = RNRI \times N_{100} \times Y_t/100 - W_N$ , where  $W_N$  stands for N input via biofixation and straw incorporation. To verify effectiveness of NRI, two regions in Lixiahe Plain and Taihu Lake Basin in Jiangsu Province were selected as for the study. Based on the soil N budgeting data of the study areas during the rice growing season, RNRI was worked out to be 1.52, based on traits of rice cultivars,  $N_{100}$  was  $8.67 \times 10^{-5} Y_t + 1.161$  ( $r = 0.8280^{**}$ ) and based on N biofixation and straw incorporation,  $W_N$  was  $N 52.3 \text{ kg hm}^{-2}$ , then the equation of  $RNR = 1.32 \times 10^{-6} Y_t^2 + 1.76 \times 10^{-2} Y_t - 52.3$  for recommendation of N fertilization for rice in the study areas was figured out. Based on the data of the fertilization experiment on 45 cultivars of japonica rice in recent years, comparison was performed between N fertilization recommendations using different methods, the fertilizer effective function (FEF), NRI and theoretical N rate (TNR) in effectiveness. Results show that the optimal economic N application rate (OENR) recommended by FEF, the N-recycling N application rate (RNR) by NRI and the theoretic N application rate (TNR) by TNR was  $N 246.8 \pm 42.5 \text{ kg hm}^{-2}$ ,  $216.9 \pm 27.3 \text{ kg hm}^{-2}$  and  $176.9 \pm 22.3 \text{ kg hm}^{-2}$  respectively. Compared with OENR, RNR was 2.4% less in rice grain yield and 500 yuan  $\text{hm}^{-2}$  in economic benefits, but saved  $N 29.9 \text{ kg hm}^{-2}$  and  $10.3 \text{ kg hm}^{-2}$ , respectively, from N application and soil-N net loss and moreover kept soil-N in a rough balance. The new method can be used to make recommendation for N fertilization with target yield being the only variable and without the need to go through field experiment, however, further study is still required to see whether RNRI will remain relatively stable for long, and whether long-term use of the method would lead to soil-N surplus or not.

**Key words** Nitrogen recommendation; Nitrogen balance; Nitrogen return; Rice

(责任编辑:陈德明)