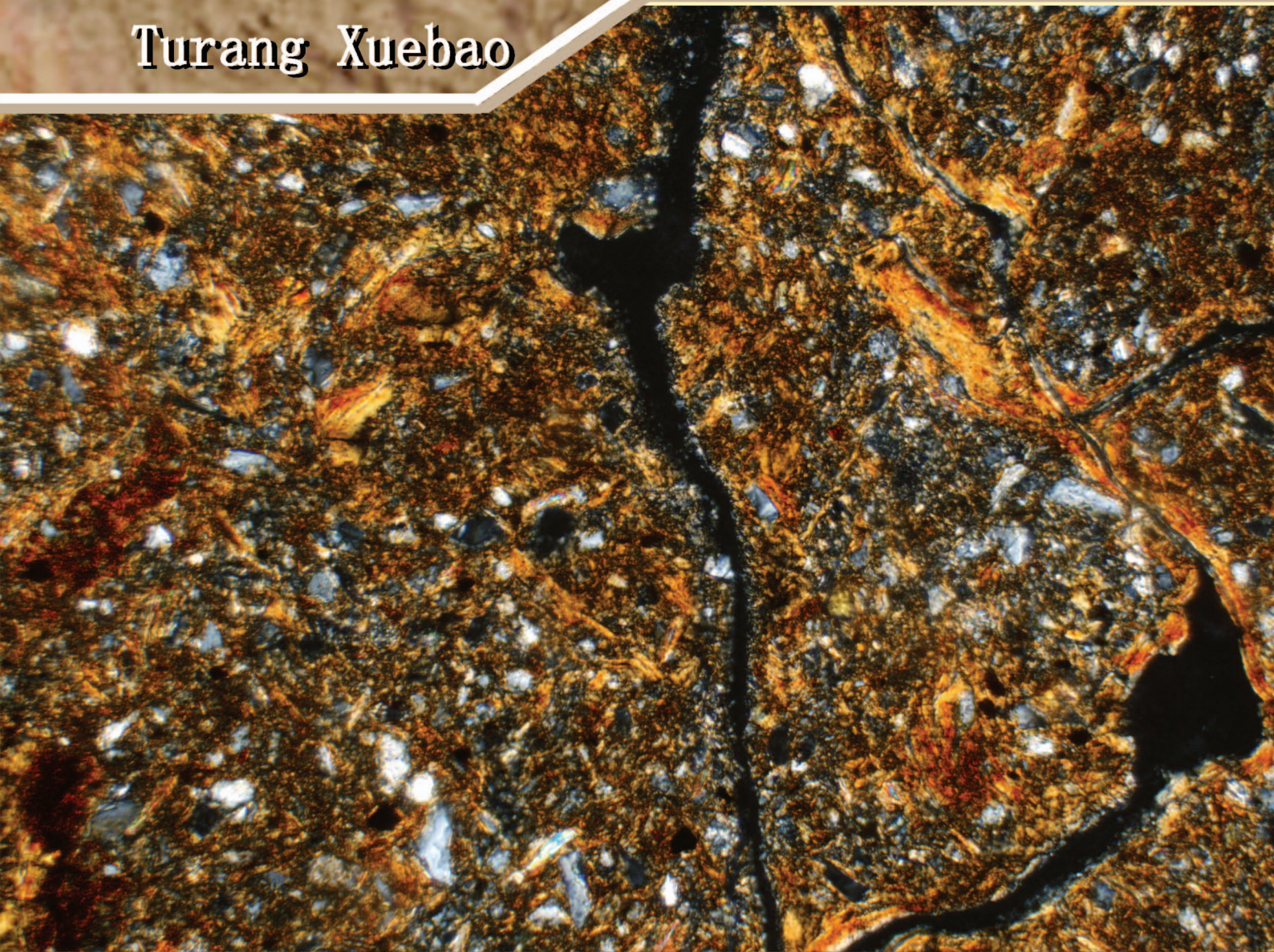


ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第 52 卷 第 2 期

Vol.52 No.2

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枏生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第52卷 第2期 2015年3月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 2 Mar., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路71号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史学正
主 管 中国科学院
主 办 中国土壤学会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街16号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址: 北京399信箱 邮政编码: 100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

DOI: 10. 11766/trxb201410250536

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

巨晓棠

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要 确定合理施氮量是获得较高目标产量、维持土壤氮肥力和降低施氮引起环境污染的关键。自一个世纪前氮肥发明和施用以来, 尽管已经开展了上百年的研究, 但尚未找到令人满意能够在田块尺度上方便的确定合理施氮量方法。本文在前期提出的作物理论施氮量概念和方法基础上, 进一步推导出在考虑其他来源氮素输入情况下, 根据百千克收获物需氮量确定理论施氮量的计算式。结果表明, 在确定了百千克收获物需氮量(N_{100} , kg)后, 推荐施氮量(N_{fert} , $N\ kg\ hm^{-2}$)是目标产量(Y , $kg\ hm^{-2}$)的唯一函数, 即理论施氮量 $N_{fert} \approx Y/100 \times N_{100}$ 。综合各种文献报道结果, 在当前生产条件和产量水平下, 小麦、玉米、水稻的百千克收获物需氮量分别取值为 2.8、2.3 和 2.4 kg。应用大量文献报道的田间试验结果, 对理论施氮量和经济最佳施氮量进行了比较。在绝大多数情况下, 两者非常接近。但东北的小麦、玉米和水稻的理论施氮量远高于区域氮肥推荐量。主要原因是氮素矿化作用大于固持作用, 作物利用了部分土壤矿化氮, 土壤有机氮处于消耗状态。结合理论施氮量, 本文详细解析了近年来我国建立的推荐施氮量方法的科学基础、推荐结果及适用性。认为将我国大面积生产中过量和不足施氮调节到合理施氮量范围, 是当前和今后一段时期的紧迫任务。理论施氮量从长期维持高产稳产、土壤氮素平衡和低环境风险考虑, 即可满足这种实际需求。推广技术人员和农户能够根据自己地块的目标产量用口算确定出施氮量, 简便易行。

关键词 理论施氮量; 目标产量; 百千克收获物需氮量; 土壤氮; 肥料氮; 作物吸收氮

中图分类号 S143 **文献标识码** A

确定合理施氮量是获得较高目标产量、维持土壤氮肥力和降低施氮引起环境污染的关键。自一个世纪前氮肥发明和施用以来, 尽管已经开展了上百年的研究, 但尚未找到令人满意的确定合理施氮量方法^[1-2]。总体而言, 国内外推荐施氮方法可以归为三类^[3]: 第一类是基于田间试验作物产量对施氮量的效应函数, 采用生物统计方法求得最佳经济施氮量(Economic Optimum N Rate, EONR)或最高产量施氮量(Maximum Yield N Rate, MYNR); 第二类是根据土壤-作物体系氮素的输入与输出平衡关系, 计算氮肥施用量; 第三类是基于土壤或植株测试为基础的测试类方法。这三类方法在实际应用中均有较大缺陷。前两者基于“投入-产出”关系, 视土壤为“黑箱”, 推荐量来源于前些年的试验结

果, 且不可能每块地上去做田间试验, 没有解决“时间和空间变异”问题。后者很难找到可靠的土壤有效氮测试指标, 如在水田尚未找到满意的指标; 尽管旱地根层贮存硝态氮可以反映土壤的供氮能力, 但也存在诸多局限性, 如硝态氮易移动、空间和时间变异大, 从采样到分析结果可引起 $N\ 30\ kg\ hm^{-2}$ 以上的误差, 该误差足以掩盖田块之间施氮量的差异; 将测试值转换为推荐量需要大量参数, 有时计算的结果不符合实际。两类方法的共同局限性还在于, 需要花费大量资金和时间进行田间试验和土壤与植物样品测试。由于我国田块小数量大, 测试工作量大; 复种指数高, 茬口紧, 测试工作难以做到不误农时; 测试设备不足, 技术人员少; 因此即使土壤供氮能力的测试指标得以解决, 也不可能广泛采

* 公益性行业(农业)科研专项(201103039)、国家重大科学研究计划(2014CB953803)和国家重点基础研究发展计划(2012CB417105)资助

作者简介: 巨晓棠(1965—), 男, 陕西白水人, 博士, 教授, 主要从事农田氮素管理、碳氮循环与温室气体减排研究。Tel: 010-62732006, E-mail: juxt@cau.edu.cn

收稿日期: 2014-10-25; 收到修改稿日期: 2014-11-24

用测试路线^[1]。

基于我国小农户土地分散经营的特点,朱兆良提出了区域平均适宜施氮量(Regional Mean Optimal N, RMON)的概念和做法^[1]。认为在一定区域内,土壤-气候条件、生产条件、农艺管理和产量水平相对一致,可以采用平均施氮量来代替每个田块的经济最佳施氮量。对于一个区域而言,通过平均施氮量获得的总产量与总施氮量,与通过对各个田块的经济最佳施氮量获得的总产量与总施氮量,两者差异很小。区域平均适宜施氮量是通过大量田间试验,获得的经济最佳施氮量的平均值,便于推广技术人员和农户在实际生产中应用。这种方法能将绝大多数地块施氮量控制在合理范围,但也需要在不同生产条件和阶段进行大量的田间试验,属于第一类方法。

由于各个农户的生产条件、农艺管理水平和土壤肥力等的差异,在同一区域内获得的实际产量有较大差异。如果某一田块没有达到区域平均产量,采用上述区域平均适宜施氮量进行施肥,则导致过量施氮;反之,会导致施氮不足或耗竭土壤氮素。笔者认为,合理施氮量决定于目标产量和目标籽粒蛋白质含量。目标产量综合反映了各个田块的上述差异。在生产条件相对稳定的某段时期,农户对自己田块的目标产量最为熟悉,成为氮肥推荐容易获得和相对可靠的参数。因此,需要寻找根据单个田块目标产量确定田块施氮量的方法。

在前期研究中,笔者发现在施氮方法和时期均趋于合理的条件下,氮肥损失率并不高,可以控制到20%以下。施入的氮肥能够被作物吸收利用,或者补充土壤氮素消耗^[4-5]。Ju和Christie^[6]在分析土壤-作物体系中主要氮素通量及其相互关系的基础上,提出了确定作物理论施氮量(Theoretical N Rate, TNR)的概念和方法,并被授权中国发明专利(ZL 201010548476.0)^[7]。认为集约化长期耕种农田的氮肥投入量应该在获得较高目标产量的同时,维持土壤氮素平衡和最低的环境风险。该方法基于作物根区氮肥、土壤氮和作物吸收氮三者的数量关系来确定施氮量,根据农田秸秆还田的生产实际,推导出推荐施氮量约等于作物地上部吸氮量^[6]。可以将作物获得目标产量时的地上部吸氮量近似于理论施氮量。通过华北平原冬小麦-夏玉米轮作中大量田间试验和¹⁵N示踪肥料试验,证实了推导过程各种关系的正确性、计算的理论施氮量的可用性。本文的主要研究目的:(1)进一步推导出在考虑其他来源氮素输入情况下,根据百千克收

获物需氮量确定理论施氮量的计算式;(2)用文献报道的小麦、玉米和水稻田间试验资料验证;(3)根据目标产量给出田块尺度氮肥推荐量。

1 理论施氮量的改进

1.1 理论施氮量的进一步推导和解释

Ju和Christie^[6]在考虑秸秆还田条件下,根据土壤-作物体系中主要氮素通量推导出理论施氮量的计算式。本文在考虑其他来源氮的情况下,对理论施氮量做进一步推导和解释。这些其他来源的氮包括:干湿沉降、灌溉水、种子、非共生固氮,推导过程如下。

施入农田的氮肥(N_{fert})主要有三种去向:作物吸收(N_{fert1})、土壤残留(N_{fert2})和损失(N_{fert3}),理论而言,施氮量应该符合下式:

$$N_{fert} = N_{fert1} + N_{fert2} + N_{fert3} \quad (1)$$

作物地上部吸氮量(N_{uptake})主要来自吸收肥料氮(N_{fert1})、吸收土壤氮(N_{soil})和吸收其他来源的氮($N_{others} \times x\%$,其中 $x\%$ 为其他来源氮素被作物吸收的百分数),并且分为籽粒氮(N_{grain})和秸秆氮(N_{straw})两部分,可以用下列算式表示:

$$N_{uptake} = N_{fert1} + N_{soil} + N_{others} \times x\% = N_{grain} + N_{straw} \quad (2)$$

无论怎么施肥,作物整个生长季均在吸收土壤氮和其他来源的氮。理论而言,对于长期耕作、土壤碳氮库大致稳定的农田,作物对土壤氮的消耗应该通过氮肥残留、秸秆还田氮和其他来源氮残留进行补充,以维持土壤氮素平衡,可以用下列算式表示:

$$N_{soil} = N_{fert2} + N_{straw} + N_{others} \times (1 - x\%) \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),即可得到理论施氮量的基本表达式:

$$\begin{aligned} N_{fert} &= N_{uptake} - N_{soil} - N_{others} \times x\% + N_{soil} - N_{straw} - N_{others} \\ &\quad \times (1 - x\%) + N_{fert3} \\ &= N_{uptake} - N_{straw} - N_{others} + N_{fert3} \\ &= N_{grain} - N_{others} + N_{fert3} \end{aligned} \quad (4)$$

从上式可以看出,理论施氮量实质相当于籽粒移出氮量减去其他来源的氮量,再加上肥料氮的损失。本研究的理论施氮量计算不主张将其他来源的氮量考虑在内,主要原因:(1)在集约化生产条件下,与氮肥、有机肥和秸秆还田输入的氮素相比,这几种氮素投入具有数量级的差异,不是氮素输入的主流,对作物的供氮是次要的;(2)这几种氮素输入主要取决于区域土壤和环境条件,在区域之间的时空变异较大,不具有普遍意义,对土壤-作物生产体

系而言,属于不稳定和不可靠的氮素供应;(3)随农田和畜牧生产中氮素管理的优化,除过水田的生物固氮量较高外,通过干湿沉降、灌溉水、种子和非共生固氮带入的氮量相对较少,其作用可以看作是对土壤氮库的补充;(4)在集约化高产条件下,如果过多地将这几种氮素输入作为对作物有效供氮考虑,则难以获得较高的目标产量,因为这些氮素供应在时期上是不确定的,难以按照作物需求供氮。

在西欧和北美等氮肥施用技术较先进的国家或地区,氮肥的损失量较低,氮肥损失(N_{fert3})基本相当于其他来源(N_{others})的氮量。由式(4)可知,氮肥施用量大约相当于籽粒移出氮量。以英国小麦籽粒产量 10 t hm^{-2} 为例,要求籽粒蛋白质含量达到 $N 2\%$ 的水平,籽粒移出氮量为 $N 200 \text{ kg hm}^{-2}$ 左右,在生产上的施氮量也相当于这个水平^[3]。由于我国的施肥技术还较粗放,施肥过程和施肥后的氮素损失还比较高,在目前的施肥方法和农艺管理的情况下,肥料氮损失量(N_{fert3})大致相当于秸秆归还氮量(N_{straw})和其他来源的氮量(N_{others})之和,即 $N_{\text{fert3}} \cong N_{\text{straw}} + N_{\text{others}}$,将其代入式(4),即可推导出:

$$N_{\text{fert}} \cong N_{\text{uptake}} \quad (5)$$

即我国目前施肥技术条件下,施氮量相当于作物地上部氮素携出量。在未来实行大面积机械化深施氮肥的先进施肥技术以后,会降低氮肥损失量,氮肥施用量也可以降低为籽粒移出氮量^[5]。

本文进一步引进百千克收获物需氮量(N_{100})参数,推导出根据目标产量确定推荐施氮量的算式:

$$N_{\text{fert}} \approx Y/100 \times N_{100} \quad (6)$$

式中, N_{fert} 为理论推荐施氮量($N \text{ kg hm}^{-2}$), Y 为目标产量(kg hm^{-2})。可以看出,在确定了百千克收获物需氮量后,推荐施氮量是目标产量的唯一函数。

值得注意的是,此处考虑的是在长期秸秆还田的情况下,秸秆氮对土壤氮素消耗的补充作用。氮肥与秸秆配合施用使残留肥料氮的持留能力增强,损失减少,增加了土壤有机氮库,长期能够维持或提高土壤肥力^[8]。但是,秸秆氮对作物有效性是很低的。在短期秸秆还田条件下,由于小麦、玉米、水稻秸秆碳氮比高,由微生物固持作用主导的氮素转化过程,会竞争土壤体系中的有效氮(土壤原有的或者施入肥料的确态氮和铵态氮),产生与作物争氮的现象。当某一田块由秸秆不还田改成秸秆还田措施后,前3~5年需要适当增加氮肥投入,以避免高碳氮比秸秆引起的微生物对有效氮的固持作用而降低对作物的有效氮供给量。当连续进行秸

秆还田措施,土壤系统在3~5年达到稳定后,由于新系统的土壤供氮(即净矿化量)能力增强,就可以适当减少氮肥投入量。因此,秸秆氮主要对维持和培育土壤有机碳氮库有利,但对推荐施氮量的影响不大。生产上应根据当地的土壤-气候条件、轮作体系和农艺管理措施确定出合理的秸秆还田模式,从长远考虑,达到培肥土壤和实现目标产量的目的。

如果某一田块偶尔有有机肥的氮素投入,则应该从推荐施氮量中减去当季能够提供给作物的有效氮量,用这部分有效氮来替代部分化肥氮。如果某些田块长期有有机肥的氮素投入,则应该从推荐施氮量中减去有机肥的总氮素投入量。主要是因为有机肥的当季氮素有效性和前几季投入有机肥的残效基本相当于当季投入的总氮量^[8]。在生产上,我们提倡有机无机配合施用,这种措施可以保证高产与稳产,可以提高土壤肥力^[5]。

1.2 关于百千克收获物需氮量(N_{100})

从上面理论施氮量的算式可以看出,百千克收获物需氮量是一个关键参数。尽管该参数可能随生产条件、产量水平和品种特性等而发生变化,但在高产栽培的产量范围内,它是相对稳定和容易获得的参数^[9]。

教科书上对小麦、玉米和水稻百千克收获物需氮量的取值一般为3、2.57和2.4 $\text{kg}^{[10]}$ 。于振文主编的《作物栽培学各论:北方版》^[11]总结的小麦和玉米百千克收获需氮量分别为2.39~3.69 kg (产量水平在3.3~9.8 t hm^{-2})和1.97~3.84 kg (产量水平在6~12 t hm^{-2}),平均分别为2.78和2.37 kg 。凌启鸿等^[9]通过大量田间试验得出,在粳稻产量水平6~11 t hm^{-2} 的情况下,百千克稻谷需氮量为1.63~2.54 kg ;当产量在10 t hm^{-2} 左右,绝大多数试验在2.0~2.2 kg 之间,回归值为2.14 kg 。因此,将2.1 kg 作为10 t hm^{-2} 左右的百千克稻谷需氮量的参数值。在同等产量水平下,籼稻百千克稻谷需氮量较粳稻低0.2 $\text{kg}^{[9-10]}$ 。

Yue等^[12]通过收集大量的文献资料,汇总出小麦籽粒产量在<4.5、4.5~6.0、6.0~7.5、7.5~9.0、9.0~10.5和>10.5 t hm^{-2} 的水平下,百千克收获物需氮量分别为2.71、2.50、2.45、2.38、2.27和2.25 kg 。Hou等^[13]汇总的春玉米籽粒产量在<7.5、7.5~9.0、9.0~10.5、10.5~12.0、12.0~13.5和>13.5 t hm^{-2} 的水平下,百千克收获物需氮量分别为1.98、1.81、1.74、1.71、1.70和1.69 kg 。孟庆峰^[14]汇总的夏玉米百千克收获物需氮量为

2.0 kg。张毅^[15]汇总的水稻产量在 <7.0、7.0~9.0、9.0~10.5 和 >10.5 t hm⁻² 的水平下,百千克稻谷需氮量分别为 1.86、1.88、1.79、1.74 kg。与其他文献报道的数据相比,上述文献荟萃分析的结果普遍偏低。

与 20 世纪 80 年代前的品种相比,现代品种的百千克收获物需氮量在降低。就现代品种而言,随籽粒产量水平的提高,百千克收获物需氮量也有所下降,说明作物氮素生理利用效率在提高,但籽粒蛋白质含量在下降。为了在高产条件下,维持作物较高的供氮强度和吸氮量,保证较高的籽粒蛋白质含量,同时简化实际应用中计算过程,在应用理论施氮量进行氮肥推荐时,可以不考虑百千克收获物需氮量随产量水平的变化。综合各种文献报道结

果,在当前生产条件下,小麦、玉米、水稻的百千克收获物需氮量分别取值为 2.8、2.3 和 2.4 kg,或者称其为施氮系数。

2 理论施氮量的验证

2.1 应用南方水稻田间试验结果验证

凌启鸿等^[9]通过确定斯坦福(Stanford)理论方程中 3 个参数的稳定值,进行高产条件下“水稻精确定量施氮”。本文应用该组数据同时计算了理论施氮量(表 1),并与精确定量施氮进行了对比分析。可以看出,绝大多数情况下,精确定量施氮较理论施氮量高。

表 1 水稻精确定量施氮和理论施氮量的比较(数据来源:凌启鸿等^[9])

Table 1 The comparisons of N rate between precision quantify and theoretical N rate (TNR) in rice (Source: Ling et al. ^[9])

试验地点和年份 Site and year	精确定量施氮的产量 Yield of precision quantify N rate (kg hm ⁻²)	精确定量施氮量 N rate of precision quantify (N kg hm ⁻²)	理论施氮量 TNR (N kg hm ⁻²)	差值 Difference (N kg hm ⁻²)
锡山 Xishan, 2000	10 674	255	256	-1
沛县 Peixian, 2000	10 508	334	252	82
孝陵卫 Xiaolingwei, 2000	10 679	275	256	19
孝陵卫 Xiaolingwei, 2001	10 594	270	254	16
连云港 Lianyungang, 2000	11 303	313	271	42
江苏省 8 个点 8 sites in Jiangsu, 2002	10 464	279	251	28
江苏省 3 个示范点 3 sites in Jiangsu	9 731	262	234	28
江苏省 1 个示范点 1 site in Jiangsu	9 105	252	219	33

值得注意的是,该精确定量施氮是以取得最高产量为目标,所以其施氮量较经济最佳施氮量高,因为该文提出了理论施氮量是以经济最佳施氮量为基础。可以看出,用斯坦福方程在减去土壤氮素供应量,再除以施用肥料的当季利用率后,得到的精确施氮量,与用目标产量和百千克收获物需氮量求得的理论施氮量相差不大。但理论施氮量只需要目标产量,而精确定量施氮则需要 3 个基本参数,况且土壤氮素供应量和当季肥料利用率均是很难获取的参数,需要大量的田间试验才能获得相对稳定的数值。如果这些参数的取值不合理,会得到无意义的推荐量。

朱兆良^[1]报道了 2003—2004 年在太湖地区进行的水稻氮肥施用量试验结果,并求出了各个田块的经济最佳施氮量和相应的水稻产量。本文应用

该组数据同时计算了理论施氮量(表 2),并进行了对比分析。

由表 2 可以看出,大多数情况下,经济最佳施氮量和理论施氮量相近。差距较大的几个试验点,主要是由于经济最佳施氮量尽管很高,但产量没有相应提高,说明这些点的氮肥损失较严重,或者其他农艺措施不到位而影响了产量。因此,理论施氮量更加合理,其推荐量主要决定于目标产量。由于目标产量综合反映了该地区的土壤-气候条件、生产条件、土壤肥力状况和农艺管理水平,依据目标产量确定施氮量,既不会因为施氮过多而浪费肥料,也不会因为施氮不足而损失应有的产量。笔者认为,目标产量主要决定于上述条件,而不决定于施肥水平,肥料只是实现目标产量的一个物质基础。

表 2 水稻经济最佳施氮量和理论施氮量的比较(数据来源:朱兆良^[1])Table 2 The comparisons of N rate between economic optimum N rate (EONR) and TNR in rice (Source: Zhu^[1])

试验地点和年份 Site and year	经济最佳施氮量时的产量 Yield of EONR (kg hm ⁻²)	经济最佳施氮量 EONR (N kg hm ⁻²)	理论施氮量 TNR (N kg hm ⁻²)	差值 Difference (N kg hm ⁻²)
大义 Dayi, 2003	4 868	185	117	68
白茆 Baimao, 2003	8 335	209	200	9
王庄 Wangzhuang, 2003	8 303	212	199	13
梅里 Meili, 2003	8 495	188	204	-16
辛庄 Xinzhuang, 2003	9 719	242	233	9
白茆 Baimao, 2004	8 844	252	212	40
唐市 Tangshi, 2004	7 328	218	176	42
王庄 Wangzhuang, 2004	8 610	222	207	15
辛庄 Xinzhuang, 2004	7 790	195	187	8
常南 Changnan, 2004	8 045	182	193	-11
大义 Dayi, 2004	8 102	239	194	45
北新桥 Beixinqiao, 2004	8 065	273	194	79

2.2 应用全国小麦、玉米和水稻田肥料试验结果验证

武良^[16]总结了2005—2010年农业部测土配方施肥项目在全国组织实施的“3414”小麦、玉米和水稻田试验。小麦涉及13个省(市)的195个县,共收集到了2 000多个试验,通过数据可用性分析,筛选出1 575个小麦氮肥效应试验。玉米涉及到22个省(市)的181个县,共收集到了2 000多个试验,筛选出1726个玉米氮肥效应试验。水稻涉及到了21个省(市)的173个县,共收集到了1 500多个试验,筛选出1 177个水稻氮肥效应试验。该研究以

县为最小分区单元,依据气候和生产布局,将我国小麦主产区划分为5个大区7个亚区,玉米划分为4个大区12个亚区,水稻划分为4个大区8个亚区。通过对同一区域所有试验点不同氮肥用量下的净收益进行平均并建立区域氮肥用量与净收益的函数关系,求出最大净收益下的氮肥用量作为区域氮肥推荐量^[17-19](Regional N Recommendation Rate, RNRR)(表3,表4,表5)。该方法的推荐量相当于朱兆良^[1]的区域平均适宜施氮量法,本文比较了不同区域氮肥推荐量与理论施氮量的差异。

表 3 小麦区域氮肥推荐量与理论施氮量的比较(数据来源:武良^[16])Table 3 The comparisons of N rate between regional N recommended rate (RNRR) and TNR in wheat (Source: Wu^[16])

亚区 Sub-zone	区域氮肥推荐量时的产量 Yield of RNRR (kg hm ⁻²)	区域氮肥推荐量 RNRR (N kg hm ⁻²)	理论施氮量 TNR (N kg hm ⁻²)	差值 Difference (N kg hm ⁻²)
东北春麦区 NE	4 880	108	137	-29
西北干旱雨养区 NW1	5 520	171	155	16
西北灌溉麦区 NW2	6 720	172	188	-16
华北灌溉冬麦区 NCP1	6 950	199	195	4
华北雨养冬麦区 NCP2	6 750	196	189	7
长江中下游冬麦区 YR	6 000	182	168	14
西南冬麦区 SW	4 630	144	130	14

表 4 玉米区域氮肥推荐量与理论施氮量的比较(数据来源:武良^[16])
 Table 4 The comparisons of N rate between RNRR and TNR in maize (Source: Wu^[16])

亚区 Sub-zone	区域氮肥推荐量时的产量 Yield of RNRR (kg hm ⁻²)	区域氮肥推荐量 RNRR (N kg hm ⁻²)	理论施氮量 TNR (N kg hm ⁻²)	差值 Difference (N kg hm ⁻²)
东北冷凉春玉米区 NE1	8 980	153	207	-54
东北半湿润春玉米区 NE2	9 050	147	208	-61
东北半干旱春玉米区 NE3	9 480	162	218	-56
东北温暖湿润春玉米区 NE4	8 930	204	205	-1
华北早中熟夏玉米区 NCP1	8 230	194	189	5
华北晚熟夏玉米区 NCP2	8 670	213	199	14
西北雨养旱作春玉米区 NW1	8 350	190	192	-2
北方灌溉春玉米区 NW2	10 530	190	242	-52
西北绿洲灌溉春玉米区 NW3	10 330	221	238	-17
四川盆地玉米区 SW1	7 630	217	175	42
西南山地丘陵玉米区 SW2	7 720	195	178	17
西南高原玉米区 SW3	8 290	207	191	16

表 5 水稻区域氮肥推荐量与理论施氮量的比较(数据来源:武良^[16])
 Table 5 The comparisons of N rate between RNRR and TNR in rice (Source: Wu^[16])

亚区 Sub-zone	稻作类型 ¹⁾ Types	区域氮肥推荐量时的产量 Yield of RNRR (kg hm ⁻²)	区域氮肥推荐量 RNRR (N kg hm ⁻²)	理论施氮量 TNR (N kg hm ⁻²)	差值 Difference (N kg hm ⁻²)
黑龙江寒地单季稻区 NE1	SR	7 820	102	188	-86
吉辽内单季稻区 NE2	SR	9 170	153	220	-67
川陕盆地单季稻区 URY	SR	8 530	162	205	-43
长江中游平原单双季稻区 MYR	ER	6 840	165	164	1
	LR	7 220	174	173	1
	SR	7 990	182	192	-10
长江下游单季稻区 LYR	SR	9 100	226	218	8
江南丘陵单双季稻区 SC1	ER	7 110	159	171	-12
	LR	7 030	160	169	-9
	SR	8 270	178	198	-20
闽粤桂琼平原丘陵双季稻区 SC2	ER	6 780	171	163	8
	LR	6 750	165	162	3
云贵川湘山地高原单季稻区 SW	SR	7 230	165	174	-9

注:1)SR:单季稻,ER:早稻,LR:晚稻 Note: 1) SR: Single-cropping rice, ER: Early rice, LR: Late rice

从表中可以看出,在绝大多数情况下,区域氮肥推荐量和理论施氮量相近。但东北的小麦、玉米和水稻的理论施氮量远高于区域氮肥推荐量。主要原因是东北土壤耕作历史较短,土壤有机碳氮库还处于分解状态,氮素矿化与固持尚未达到稳定点。区域氮肥推荐量应用了部分土壤矿化氮量。如黑龙江的寒地水稻,土壤有机质在 35 g kg⁻¹左

右,产量可以达到 9~11 t hm⁻²,地上部吸氮量在 N 140~170 kg hm⁻²之间,但施氮量只需要 N 100 kg hm⁻²左右^[20],土壤氮素处于消耗状态。关于这些土壤在农业利用以后,土壤碳氮库消耗到什么程度,不至于引起土壤退化和生产力的降低,是值得研究的科学问题。

3 理论施氮量的应用

根据改进的理论施氮量算式和系数,以小麦、玉米、水稻的百千克收获物施氮系数分别为 2.8、2.3 和 2.4 kg,很容易求出三大粮食作物不同目标产量的推荐施氮量(表 6)。以此施氮系数求得的推荐施氮量略高于田间实际测定的地上部吸氮量。主要是为了维持作物较高的供氮强度和吸氮量,以达到该目标产量时的地上部吸氮量。如果基层推广人员能将这个简单的算式和系数告诉农户,农户通过口算就能得知自己田块的氮肥施用量,因为农户对自己田块的目标产量是相当清楚的。表 6 中的氮肥推荐量,与华北平原和长江中下游平原小麦、玉米和水稻大面积产量水平下的平均适宜施氮量分别为 $N\ 150 \sim 180\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 、 $170 \sim 190\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 和 $190 \sim 200\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ ^[21] 非常接近。

表 6 小麦、玉米和水稻三大粮食作物理论施氮量推荐表

Table 6 TNR of wheat, maize and rice

目标产量 Target yield ($\text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)	小麦施氮量 Wheat ($\text{N}\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)	玉米施氮量 Maize ($\text{N}\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)	水稻施氮量 Rice ($\text{N}\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$)
4 000	112	92	96
5 000	140	115	120
6 000	168	138	144
7 000	196	161	168
8 000	224	184	192
9 000	252	207	216
10 000	280	230	240
11 000		253	
12 000		276	
13 000		299	
14 000		322	
15 000		345	

4 讨 论

4.1 土壤-作物体系的氮素平衡

国际上普遍采用氮素平衡计算法来确定氮肥推荐量,或评价氮肥的施用效果^[3]。根据不同目的,考虑的输入和输出项的明细程度各不相同。为了更深入理解理论施氮量的计算依据,笔者在这里对详细的氮素平衡计算做进一步分析。

在氮素输入项中,应该包括化肥氮、有机肥氮和秸秆还田氮,这三部分决定于人为管理,也是农

田最大的氮素输入项,称之为外源投入氮。干湿沉降氮、灌溉水带入氮、种子带入氮和非共生固氮不是我们主动投入的氮,归为其他来源氮(N_{others})。还有最重要的土壤供氮,即播种前作物根区的土壤无机氮和生育期有机氮矿化成无机氮的部分。

在氮素输出项中,应包括作物地上部吸收氮,损失的氮素(包括氨挥发、硝化-反硝化、淋洗和径流损失)。还应包括收获后土壤的残留氮,其中有肥料氮通过固持作用进入有机氮的部分,也包括以无机氮残留的部分。

在理论施氮量推荐中,考虑到集约化长期耕作的田块,既不能过度消耗土壤无机与有机氮库,也不能使这两个氮库过度累积,希望土壤无机氮和有机氮库大致维持平衡,即作物播前根区的土壤无机氮和生育期有机氮矿化成无机氮之和约等于肥料氮通过固持作用进入有机氮的部分和收获后无机氮残留的部分。许多研究中,只考虑了生育期有机氮的矿化量,而未考虑无机氮的固持量,对土壤氮素平衡的解释是不完全的^[22-23]。

可以看出,在维持土壤氮素大致平衡的条件下,按照物质守恒定律,氮素输入应约等于氮素输出,则需要施入的化肥氮(N_{fertl})和有机肥氮(N_{org})量应该为:

$$N_{\text{fertl}} + N_{\text{org}} = N_{\text{uptake}} + N_{\text{losses}} - N_{\text{straw}} - N_{\text{others}}$$

在考虑了秸秆还田氮与其他氮素输入大致相当于氮素损失的情况下,化肥氮和有机肥氮的投入量应约等于地上部氮素携出量。可以看出,理论施氮量是符合氮素平衡的基本原理的。

理论施氮量计算中,并未包括土壤有效氮或本底氮供应(available N or indigenous N),主要是考虑在长期耕作田块,不应该消耗土壤本底氮,而应该维持土壤氮平衡。对于集约化高产农田而言,维持土壤氮平衡对于持续稳定高产是相当重要的。如果前季土壤氮库被过度消耗,后季很难获得高产,而且后季需要增加肥料氮的投入来弥补消耗的土壤氮库。由于我们只能在作物关键生育期施肥,施入的肥料氮与土壤氮的转化对作物供氮相当重要,因为作物生长过程中接触土壤氮的机会远高于肥料氮。在¹⁵N 标记肥料田间试验中,无论怎么施肥,作物吸收的土壤氮一般会占到地上部总吸氮量的 50% 以上^[4]。实际上,这些土壤氮部分来自于前季肥料氮的残留,残留肥料氮是对土壤氮消耗的重要补充。事实上,对于长期合理施氮的土壤,花很大的代价去估计土壤本底氮,对推荐施氮的意义不

大。通过估计本底氮(或测定土壤有效氮)来计算氮肥用量只是短暂的,只对那些过去过高或过低施氮土壤有用^[24-25]。

现在许多肥料产品在设计理念和施肥指导上,追求一种所谓的“作物需要什么就补什么,需要多少就补多少,什么时间需要就在什么时间补充”。完全将土壤作为被动接受肥料的基质,忽略了土壤氮库与肥料氮的相互作用,忽略了土壤对肥料氮的缓冲(Buffer)和持留(Retention)性能^[26]。实质上,作物一生在持续地吸收土壤氮,施肥只是对土壤氮库的补充,肥料施用量和时期只要能满足作物关键生育期对氮素需求强度的要求,充分发挥土壤的保氮和供氮能力,就能达到高产稳产的需求。要将土壤看作为“鲜活”的生命体。

一般的土壤测试类推荐施氮方法,总是从作物氮素需求中减去土壤有效氮供应,来计算氮肥施用量。但这些方法从来不考虑土壤氮素消耗是怎么补充的。事实上,土壤氮素消耗是残留肥料氮、秸秆回田氮和其他来源氮补充的。残留肥料氮是不可避免的,同时也是非常必要的,是土壤氮素转化中补充土壤氮的重要机制。本文清楚地论述了残留肥料氮的重要意义。改善氮素管理的重要方面,是如何通过施肥方法和作物管理的改进,实质性地降低施肥过程和施肥后的氮素损失,而不在于精细的测定和利用土壤有效氮。

现在许多文献用氮肥偏生产力(PFN_N)来衡量氮肥施用的效率,其实掩盖了土壤氮、肥料氮、作物吸氮的关系以及实际的氮肥损失,不能正确评价土壤氮素的变化情况。例如,小麦产量为 6 t hm^{-2} 的情况下,理论施氮量为 $N 168 \text{ kg hm}^{-2}$,许多推荐方法的施氮量为 $N 120 \text{ kg hm}^{-2}$,两者的 PFN_N 分别为 $36 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$ 和 $50 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$ 。尽管其他推荐施氮量方法显著提高了 PFN_N ,但实际上消耗了土壤氮。提高 PFN_N 还有另一条途径,就是提高产量。如上面的例子,小麦产量在 6 t hm^{-2} 的条件下,理论施氮量为 $N 168 \text{ kg hm}^{-2}$,如果在此施氮量下将产量提高至 8 t hm^{-2} ,则 PFN_N 可以达到 $48 \text{ kg kg}^{-1} \text{ N}$,但也在消耗土壤氮。因此, PFN_N 在反映氮肥实际施用效果方面意义不大,而且造成许多假象。

严格维持土壤氮素平衡是非常困难和没有必要的,这主要取决于土壤氮肥力的高低。如果由于过去的高量施氮,土壤氮肥力较高,土壤根区中累积了大量的无机氮^[27-31],可以将计算的理论施氮量下调 $N 20 \sim 30 \text{ kg hm}^{-2}$,暂时消耗这部分累积氮来

降低环境风险。如果因为过去施氮不足,土壤有效氮库被大量消耗或者土壤本身氮肥力很低,像非洲大部分地区那样^[32-33],则可以将计算的理论施氮量上调 $N 20 \sim 30 \text{ kg hm}^{-2}$,用于提高土壤氮肥力和提高产量。不过,这些施肥措施需要与秸秆还田、土壤耕作、农艺管理等措施综合考虑,不然会增加氮素损失。

由于作物生长受诸如土壤-气候条件和农艺管理措施的影响,推荐施氮量不可能非常精确,我们必须接受一定程度的不确定性。在集约化高产田块, $N 15 \text{ kg hm}^{-2}$ 的不确定性应该是可以接受的。事实上,国际上许多推荐施氮法的目的就是将施氮量控制在一个较窄的范围,而不在于给一个多么准确的推荐数值^[3,34-35]。如果确定了氮肥的施用量,则氮肥施用时期和方法就成为这些氮素能否被作物吸收利用的关键,关于这个问题,请参考文献[5]。

4.2 其他施氮量推荐法

笔者在评审和阅读的许多中文文章中,经常会看到这样的论述,“在农户常规(或传统或习惯)施氮量的基础上,减量施氮 30% 或 50% 并不会降低产量,而会增加氮肥利用率,降低氮肥损失”。这些试验并未说明播前和收获后土壤氮库的变化情况。如果按照农户的产量水平,在过量的常规施氮基础上减量,则是利用了过去高量施氮土壤累积的无机氮和易矿化有机氮(高本底氮土壤),这些结果是必然的。如果农户施氮量在该产量水平的合理范围或低于合理范围,减量施氮必然引起土壤氮库的消耗,是不能持续的。该田块需要维持或增加施氮量,而不是减量施氮。

Peng 等^[35]针对我国水稻生产中过量施氮、降低产量和引起环境污染的问题,自 1997 年以来,在浙江、广东、湖南、江苏、湖北和黑龙江省,试验和示范实地养分管理技术(Site-Specific N Management, SSNM)。从 5 个省在 2001—2007 年开展的农户田块 25 个田间试验(on-farm field experiments)结果来看,在不施氮小区平均产量为 5.87 t hm^{-2} 的基础上,SSNM 和其他施氮量处理分别为 $N 120$ 和 161 kg hm^{-2} ,相应产量为 7.69 和 7.45 t hm^{-2} 。应用本研究的理论施氮量,该产量下的相应理论施氮量应该为 $N 185$ 和 179 kg hm^{-2} ,均高于 SSNM 和其他处理,说明这种推荐施氮方法在消耗土壤本底氮。同样,在 6 个省 2003—2007 年进行的 107 个农户田块示范(on-farm demonstrations)结果看,在不施氮小区平均产量为 5.69 t hm^{-2} 的基础上,SSNM 和农户习惯施氮量分别为 $N 133$ 和 195 kg hm^{-2} ,相应产量为

7.47 和 7.08 t hm⁻²。应用本研究的理论施氮量,该产量下的相应理论施氮量应该为 N179 和 170 kg hm⁻²。可以看出,理论施氮量高于 SSNM,但低于农户施氮量,也说明 SSNM 推荐施氮方法在消耗土壤的本底氮。在短期内,消耗土壤过高累积氮,有利用降低氮肥用量,减少氮素损失。但这种推荐量低于作物地上部吸氮量的情况能够持续多久,是一个值得深入研究的问题。整体而言,该技术可以在农户传统施氮量的基础上,降低施氮量 32%,而增加产量 5%。SSNM 技术产量增加主要是降低了病虫害、增加了抗倒伏能力。该研究还发现,我国水稻氮肥利用率低的主要原因是农户在生育前期施用大量的氮肥。我国稻田的本底氮(indigenous N supply)较其他水稻主产国高约 50%,导致施氮的产量效应平均大约仅 1.5 t hm⁻² [35]。

曹寒冰等 [23] 根据土壤-作物体系氮素平衡原理,结合旱地土壤容易累积硝态氮的特点,推导出旱地冬小麦施氮量的算式:施氮量 = 目标产量需氮量 + 收获土壤安全阈值 - 播前土壤有效氮。其中的安全阈值和土壤有效氮均是以 0~100 cm 土体的硝态氮累积量来设定的。可以看出,如果播前土壤有效氮接近于收获后的安全阈值,则施氮量近似等于作物地上部氮素携出量。由于过去农户的过量施氮,一般会导致播前土壤的硝态氮高于收获后的安全阈值,使推荐施氮量能够减下来。该方法在氮素输入项中将每季土壤氮素矿化量设定为 N 50 kg hm⁻²,但在推导时将该项设为 0,主要是未将肥料氮残留对土壤有机氮库消耗的补充作用考虑在内。肥料氮残留到有机氮库中的量大致相当于矿化氮量。如果说明了这点,将矿化和固持作用(Mineralization-immobilization Turnover, MIT)的净效应设为 0 是合理的。应用该方法在陕西渭北旱塬冬小麦上大量的田间试验表明,在平均产量为 5 658 kg hm⁻² 的情况下,推荐施氮量为 N 128 kg hm⁻²;而农户习惯施氮产量为 5 489 kg hm⁻²,施氮量为 N 172 kg hm⁻²,可以在农户习惯施氮量基础上节氮 N 44 kg hm⁻²。应用本研究的理论施氮量,两种产量水平下的施氮量应该为 N 158 kg hm⁻² 和 N 154 kg hm⁻²。理论施氮量较该方法施氮量高 N 30 kg hm⁻²,但较农户的习惯施氮低 N 18 kg hm⁻²。该施氮量应该是消耗了 N 30 kg hm⁻² 左右的土壤氮。

Chen 等 [36] 基于土壤无机氮测试法 [37-38] (Soil N_{min} method),建立了旱作土壤实时根区氮素管理法 [22,24,31,39] (In Season Root Zone N Management,

IRNM)。该法按照作物生育时期,将生长季分为 2—3 个阶段,每个阶段的施氮量由各阶段的氮素供应目标值减去根区土壤硝态氮测定值求得。氮素供应目标值决定于目标产量和该目标产量下不同阶段地上部和根系氮素吸收量。过去十多年中,他们应用该方法在农户田块进行了大量田间试验,以确定该方法的相关参数。并与农户常规施氮量进行比较,评价该方法在降低氮肥用量及对产量的影响 [40-42]。这些试验数据为探讨氮肥推荐方法积累了丰富资料。整体而言,该方法能将氮肥用量在农户常规施氮水平上大幅度降低,而不降低甚至增加产量。

值得注意的是,这些试验绝大多数是在农户过去多年过量施氮的田块,这些田块累积了大量的易矿化氮和无机氮 [27-31],短期内(几季作物)利用这些高量土壤累积氮,有利用降低氮肥用量,减少氮素损失。在文献中,我们称这种效应为肥料氮的“carry over effect”(残效) [43-46]。由于该推荐施氮量大部分低于作物地上部移出氮量,大多数情况下是在消耗土壤累积氮。对于长期施氮不足或施氮合理的田块,该方法不会将施氮量降下来。关于这种减氮推荐量能够持续多久,然后需要再增加施氮量,以维持土壤氮素平衡和持续稳定高产,也是一个值得研究的科学问题。根据笔者做过的田间试验,这种效应可以持续 1~4 季作物,随后的合理施氮量就恢复到与地上部吸氮量大致相当的水平。

这种就某一田块在某一作物生长季对根区硝态氮进行 2—3 次测定,然后用肥料调节到氮素供应目标值的方法,也无法考虑下阶段的土壤氮素矿化量,以及施入的氮肥被土壤的固持量。从整个生育期来看,也只考虑了作物不同阶段氮素需求和肥料氮与根区土壤硝态氮对这种需求的满足程度,而未考虑土壤氮库的变化情况。这种“精细调节”,只能在有限的田块和作物上做到。在我国大面积生产中,就目前普遍粗放施氮的状况,许多田块氮肥施用量远远超出了合理施氮量范围(过高或过低)。因此,将大面积生产中氮肥施用量调节到合理施氮量范围,是当前和今后一段时期的紧迫任务。理论施氮量即可满足这种实际需求。

由于我国过去的高产栽培中不注意肥料投入效率,往往过量投入肥料以保证实现高产,使肥料利用率降低,肥料损失严重,环境代价加大。近年来,科技界提出了既高产又高效的目标 [47-48]。事实上,如果实现了较高目标产量的合理氮肥投入,氮肥的效率自然会提高。这种合理氮肥投入应该在

保证目标产量的同时,维持土壤氮素平衡和低氮素损失。理论而言,即使施氮的效率再高,氮肥回收利用效率(Recovery Efficiency)也仅能达到70%左右,因为还应该有10%左右的氮肥损失和20%左右的氮肥在土壤中残留^[4, 49]。

Chen等^[47-48]进一步建立了在高产条件下土壤-作物系统综合管理技术(Integrated Soil-crop System Management, ISSM)。并在农户田块进行了大量的田间试验,来比较农户习惯(FP)、IRNM、追求高产(HY)、ISSM这些管理措施的产量、施氮量和氮素平衡状况,本文利用这些数据同时计算了理论施氮量(表7)。当实际施氮量高于地上部吸氮量和理论施氮量时,视为高氮累积或损失;当实际施氮量低于地上部吸氮量和理论施氮量时,视为消耗土壤氮;

当实际施氮量在在地上部吸氮量和理论施氮量之间时,视为消耗土壤氮的风险;当实际施氮量接近于理论施氮量时,视为合理范围。以此为评判标准,对其他氮肥推荐措施的评价结果见表7。可以看出,农户习惯和高产管理措施下,大多数情况实际施氮量远高于理论施氮量和地上部吸氮量,会造成土壤高氮累积或高损失状况。大多数情况下,IRNM和ISSM管理体系的氮肥推荐量低于理论施氮量,有时甚至低于地上部吸氮量,短期内处于消耗土壤氮的状态^[22,24,27-31,45]。从表中还可以看出,理论施氮量较地上部吸氮量稍高,这是由于计算时不考虑百千克收获物需氮量随产量水平的变化导致,也是为了在高产条件下,维持作物较高的供氮强度和根系吸氮量,保证较高的籽粒蛋白质含量的需要。

表7 高产条件下其他氮肥推荐与理论施氮量的比较(数据来源:Chen等^[47-48])

Table 7 The comparisons of N rate between other recommendations and TNR under high yield (Source: Chen et al. ^[47-48])

试验区域 Site	作物 Crop	管理措施 ¹⁾ Management	产量 Yield (kg hm ⁻²)	实际 施氮量 N rate	地上部 吸氮量 N uptake	实际施 氮量-地 上部吸氮量	理论 施氮量 TNR	对实际 施氮量 的评价 Evaluations	
						N rate - N uptake			
(N kg hm ⁻²)									
中国东北、 华北平原、 西北 ^①	玉米 Maize	FP(4 548)	6.8 ± 1.6	257 ± 121	132 ± 31	127 ± 42	156	高氮累积或损失 ^③	
		HY(43)	15.2 ± 2.6	747 ± 179	292 ± 50	457 ± 155	350	高氮累积或损失 ^③	
		ISSM(66)	13.0 ± 1.6	237 ± 70	250 ± 31	-12 ± 56	299	消耗土壤氮 ^④	
中国主要 农作区 ^②	水稻 Rice	FP	7.0 ± 1.5	209	127	82	168	高氮累积或损失 ^③	
		IRNM	8.1 ± 1.1	146	139	7	194	消耗土壤氮风险 ^⑤	
		HY	8.8 ± 1.2	192	154	38	211	合理范围 ^⑥	
		ISSM	8.5 ± 1.2	162	147	16	204	消耗土壤氮风险 ^⑤	
	小麦 Wheat	FP	5.7 ± 1.3	210	136	74	160	高氮累积或损失 ^③	
		IRNM	8.3 ± 1.7	192	201	-9	232	消耗土壤氮 ^④	
		HY	9.2 ± 1.9	283	233	50	258	高氮累积或损失 ^③	
		ISSM	8.9 ± 1.7	220	218	2	249	消耗土壤氮风险 ^⑤	
		玉米 Maize	FP	7.6 ± 1.5	220	148	72	175	高氮累积或损失 ^③
			IRNM	12.6 ± 2.2	214	222	-8	290	消耗土壤氮 ^④
HY	14.4 ± 2.4		402	262	140	331	高氮累积或损失 ^③		
		ISSM	14.2 ± 2.6	256	175	8	327	消耗土壤氮风险 ^⑤	

注:1)FP:农户习惯, HY:追求高产, ISSM:土壤-作物系统综合管理, IRNM:实时根区管理 Note: 1) FP: Farmers' practice, HY: High yield, ISSM: Integrated soil-crop system management, IRNM: In season root zone N management. ①NE, NCP, NW, 2006-2009, ②The main agro-ecological areas in China, 2009-2012, ③High accumulation or losses, ④Depleting soil N, ⑤Risk of depleting soil N, ⑥Rational range

已发表的许多试验资料均论述到:“在减氮条件下实现了高产,同时提高了产量和氮肥利用率”。应该注意到,这种减氮是在农户常规过量施氮的基础上减少的。如果与农户管理条件下产量效应曲

线上经济最佳施氮量(EONR)比较,许多高产体系的EONR还是要提高的。此外,这些试验大多是在农户高本底氮的土壤上取得的,短期内可以利用这些土壤高量累积氮来降低氮肥的施用量,但当这些

高累积氮被消耗掉后,该施氮量是否能够实现长期持续稳定的高产,也是一个值得研究的科学问题。

在我国目前的生产技术水平和农村实际情况下,究竟应该采用什么样的方法来确定施氮量?其实,对于大田作物,依据现在相对较高的目标产量,从长远看,每季作物的施氮量如果低于 $N\ 150\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,就会达不到目标产量或者消耗土壤氮素;如果高于 $N\ 250\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$,增产的幅度也很小,氮素损失会增加,环境代价增大。合理的施氮量范围大多数在 $N\ 150\sim 250\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 之间。无论是进行田间试验,或者是土壤植株测试,推荐施氮量的调节范围大多在 $N\ 100\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 左右。即我们付出的所有努力,落实到合理施氮量上,调节的余地绝大多数情况下在 $N\ 100\ \text{kg}\ \text{hm}^{-2}$ 范围内。在一个长期耕种的成熟农田生态系统中,只需要每季作物供给合理的施氮量,维持土壤-作物体系中氮素的大致平衡就可以了。除非生产条件(如灌溉措施、作物品种和农艺管理等)发生变化而导致目标产量发生显著的变化,施氮量才应做相应的调整。笔者认为,将我国农田过量和不足施氮调节到较为合适的水平至关重要,而对每个田块进行测试,进行精细调节,则是次要的事情,况且在生产实际中很难贯彻执行。本研究提出的方法是从长期维持产量和土壤氮素平衡考虑,在当前生产状况和技术水平下,对于将高本底氮下调后的土壤、长期施氮不足和合理施氮的土壤,均能适用,且简便易行。

5 结语与展望

理论施氮量给出了长期获得较高目标产量和维持土壤氮素平衡的推荐施氮量,不需要估计土壤有效氮供应量,避免因为测试土壤有效氮的高低,在某些季给出低的推荐量,其他季给出高的推荐量。由于目标产量已反映了目标田块的综合生产条件和肥力水平,理论施氮量可以给出不同目标产量水平下的氮肥推荐量。既不会因为施氮过多而浪费肥料,增加环境风险,也不会因为施氮不足而损失应有的产量。我国需要从这种每季作物均要根据土壤测试值调节施氮量的局面中走出来,给出某种土壤-作物体系长期高产稳产的合理施氮量,达到既能持续高产,又能维持土壤氮素平衡,最大限度降低环境风险的目标。事实上,这种测定土壤供氮量用以确定施氮量的方法,只在忽高忽低不合理氮肥施用量条件下,可以调节当季的施氮量。从长

远看,用理论施氮量确定一个合理施氮量范围,根据具体情况再做适当微调。测定土壤无机氮和易矿化氮等土壤有效氮指标,主要用于评估土壤肥力的演变、评价土壤培肥措施、诊断土壤障碍因子等目的。笔者非常欢迎读者在不同土壤-气候条件和不同生产条件下,用田间试验来进一步验证和评价理论施氮量在稳产高产、维持土壤氮素平衡和减少氮素损失方面的效果。

参考文献

- [1] 朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议. 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
- [2] Robertson G P, Vitousek P M. Nitrogen in agriculture: Balancing the cost of an essential resource. Annual Review of Environment and Resources, 2009, 34: 97—125
- [3] Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA). Fertilizer manual (RB209). 8th ed. The Stationery Office (TSO), 2010
- [4] 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理解误区. 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
- [5] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783—795. Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(4): 783—795
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 黄涛. 长期碳氮投入对土壤碳氮库及环境影响的机制. 北京: 中国农业大学, 2014. Huang T. The mechanisms of a long time carbon and nitrogen input on soil carbon and nitrogen pools and environmental impact (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2014
- [9] 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. Ling 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
- [10] 陆欣, 谢英荷. 土壤肥料学. 第2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2011. Lu X, Xie Y H. Soil and fertilizer (In Chinese).

- 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011
- [11] 于振文. 作物栽培学各论: 北方本. 第2版. 北京: 中国农业出版社, 2013. Yu Z W. Crop cultivation: North version (In Chinese). 2nd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [12] Yue S C, Meng Q F, Cui Z L et al. Change in nitrogen requirement with increasing grain yield for winter wheat. *Agronomy Journal*, 2012, 104: 1687—1693
- [13] Hou P, Gao Q, Zhang F S, et al. Grain yields in relation to N requirement: Optimizing nitrogen management for spring maize grown in China. *Field Crops Research*, 2012, 129: 1—6
- [14] 孟庆峰. 玉米和小麦高产和养分高效协同实现的技术途径. 北京: 中国农业大学, 2012. Meng Q F. The technical ways for simultaneously realizing high yield and high nutrient use efficiency in maize and wheat (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2012
- [15] 张毅. 长江流域水稻资源型功能肥料的设计与验证. 北京: 中国农业大学, 2013. Zhang Y. Design and validation of functional fertilizer for rice in Yangtze River Delta (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2013
- [16] 武良. 基于总量控制的中国农业氮肥需求及温室气体减排潜力研究. 北京: 中国农业大学, 2014. Wu L. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production (In Chinese). Beijing: China Agricultural University, 2014
- [17] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Development of regional nitrogen rate guidelines for intensive cropping systems in China. *Agronomy Journal*, 2013, 105: 1411—1416
- [18] Wang G L, Ye Y L, Chen X P, et al. Determining the optimal nitrogen rate for summer maize in China by integrating agronomic, economic, and environmental aspects. *Biogeosciences*, 2014, 11: 3031—3041
- [19] Wu L, Chen X P, Cui Z L, et al. Establishing a regional nitrogen management approach to mitigate greenhouse gas emission intensity from intensive smallholder maize production. *PLoS One*, 2014, 9: e98481
- [20] Zhao G M, Miao Y X, Wang H Y, et al. A preliminary precision rice management system for increasing both grain yield and nitrogen use efficiency. *Field Crops Research*, 2013, 154: 23—30
- [21] 朱兆良, 张福锁. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用的基础研究. 北京: 科学出版社, 2010: 1—27. Zhu Z L, Zhang F S. Basic Research on nitrogen behaviors and high nitrogen fertilizer use efficiency in Chinese main intensive agricultural ecosystems (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010: 1—27
- [22] Cui Z L, Chen X P, Miao X Y, et al. On-farm evaluation of the improved soil N_{min} -based nitrogen management for summer maize in North China Plain. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 517—525
- [23] 曹寒冰, 王朝晖, 师渊超, 等. 渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3826—3838. Cao H B, Wang Z H, Shi Y C, et al. Optimization of nitrogen fertilizer recommendation technology based on soil test for winter wheat on Weibei dryland (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3826—3838
- [24] Zhao R F, Chen X P, Zhang F S, et al. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China. *Agronomy Journal*, 2006, 98: 938—945
- [25] Lobell D B, Ortiz-Monasterio I, Asner G P. Relative importance of soil and climate variability for nitrogen management in irrigated wheat. *Field Crops Research*, 2004, 87: 155—165
- [26] Ju X T. Direct pathway of nitrate produced from surplus nitrogen inputs to the hydrosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(4): 416
- [27] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm estimation of indigenous nitrogen supply for site-specific nitrogen management in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 81: 37—47
- [28] Cui Z L, Chen X P, Miao Y X. On-farm evaluation of winter wheat yield response to residual soil nitrate-N in North China Plain. *Agronomy Journal*, 2008, 100: 1527—1534
- [29] Cui Z L, Zhang F S, Miao Y X, et al. Soil nitrate-N levels required for high yield maize production in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 82: 187—196
- [30] Chen X P, Cui Z L, Zhang F S, et al. Optimizing soil nitrogen supply in the root zone to improve maize management. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74: 1367—1373
- [31] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. In-season nitrogen management strategy for winter wheat: Maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context. *Field Crops Research*, 2010, 116: 140—146
- [32] Sanchez P A. Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 2002, 295: 2019—2020
- [33] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 2009, 324: 1519—1520
- [34] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85—156
- [35] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30: 649—656
- [36] Chen X P, Zhang F S, Horlacher D, et al. Synchronizing N supply from soil and fertilizer and N demand of winter wheat by an improved N_{min} method. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74: 91—98
- [37] Wehrmann J, Scharpf H C, Kuhlmann H. The N_{min} -method-An aid to improve nitrogen efficiency in plant production//Jenkinson D S, Smith K A. Nitrogen efficiency in agricultural soils. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science, 1988: 38—45
- [38] Wehrmann J V, Scharpf H C. Mineral nitrogen in soil as an indicator for nitrogen fertilizer requirements (N_{min} -method). *Plant Soil*, 1979, 52(1): 109—126
- [39] Cui Z L, Zhang F S, Chen X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil N_{min} test. *Field Crops Research*, 2008, 105: 48—55
- [40] Cui Z L, Dou Z X, Chen X P, et al. Managing agricultural nutrients for food security in China: Past, present, and future. *Agronomy Journal*, 2014, 106: 191—198
- [41] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S, et al. Current nitrogen manage-

- ment status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China. *Ambio*, 2012, 39: 376—384
- [42] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China. *Advances in Agronomy*, 2012, 116: 1—40
- [43] Stevens W B, Hoefl R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: I. Interactions with soil nitrogen. *Agronomy Journal*, 2005, 97: 1037—1045
- [44] Stevens W, Hoefl R, Mulvaney R. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: II. Nitrogen uptake efficiency. *Agronomy Journal*, 2005, 97: 1046—1053
- [45] Hartmann T E, Yue S C, Schulz R, et al. Nitrogen dynamics, apparent mineralization and balance calculations in a maize-wheat double cropping system of the North China Plain. *Field Crop Research*, 2014, 160: 22—30
- [46] Yan X Y, Ti C P, Vitousek P M, et al. Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 095002
- [47] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil-crop system management for food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(16): 6399—6404
- [48] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs. *Nature*, 2014, doi: 10.1038/nature13609
- [49] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(45): 18185—18189

IMPROVEMENT AND VALIDATION OF THEORETICAL N RATE (TNR) —DISCUSSING THE METHODS FOR N FERTILIZER RECOMMENDATION

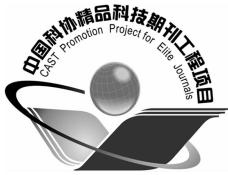
Ju Xiaotang

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract Determining reasonable nitrogen (N) fertilizer rate is the key point for getting higher target yield, maintaining soil N fertility and reducing environmental pollution. Since N fertilizer invention and application a century ago, although it had been carried out more than hundred of years' researches, people didn't find the satisfied methods that could determine the reasonable N application rate on the field scale. Based on the previous concept and method of theoretical N rate (TNR) and on the conditions of considering other sources of nitrogen inputs, this paper further deduce the calculation of TNR according to the N requirement per hundred kilograms (kg) of grain. The results showed that, after determining the N requirement per hundred kg of grain (N_{100}), the TNR (N_{fert} , $N \text{ kg hm}^{-2}$) is the only function of target yield (Y , kg hm^{-2}) as: $N_{fert} \approx Y/100 \times N_{100}$. After integrating the results from all kinds of literatures, the N requirement per hundred kilograms of wheat, maize and rice was 2.8, 2.3 and 2.4 kg, respectively, under current production conditions and yield levels. Comparing the TNR with economic optimum N rate (EONR) from a large number of field experiments' results on the literatures, in most case, the two rates are very close in other regions of China except for the northeast China. The TNR of wheat, maize and rice in the northeast region is much higher than the regional N recommended rate (RN-RR). The main reason is that the soil N mineralization is greater than immobilization during growth period, which means the crops utilizing part of soil mineralized N and soil organic N is depleted. Combining with the TNR, this paper also analyzed the scientific basis, recommendation results and applicability of other N recommendation methods established in recent years in China in details. The paper recognized that to adjust the excessive and deficient N application rates to the reasonable scope is the urgent task nowadays and in the future, and the TNR could meet this actual demand by maintaining high and stable target yield, soil N balance and low environmental risk. It is very convenient for extension technicians and farmers to determine the reasonable N application rate according to the target yield of their own field.

Key words Theoretical N rate (TNR); Target yield; N requirement per hundreds of kg grain; Soil nitrogen; Fertilizer nitrogen; Crop nitrogen uptake

(责任编辑:陈德明)



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 2 期 2015 年 3 月

目 次

综述与评论

- 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 巨晓棠(249)
- 森林土壤氧化亚氮排放对大气氮沉降增加的响应研究进展 方华军 程淑兰 于贵瑞等(262)

研究论文

- 商丹盆地黄土母质发育土壤的微形态特征及其诊断意义 庞奖励 黄春长 查小春等(272)
- 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(281)
- 三峡库区紫色土的碎石分布特征 王小燕 王天魏 蔡崇法等(293)
- 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响 吴秋菊 吴 佳 王林华等(303)
- 基于局部加权回归的土壤全氮含量可见-近红外光谱反演 陈颂超 冯来磊 李 硕等(312)
- 五价砷在中国南方两类典型土壤中的迁移特征 李璐璐 张 华 周世伟等(321)
- 柠檬酸盐对黑云母表面溶解及微结构变化的影响 李继福 张文君 鲁剑巍等(329)
- 活化过硫酸钠氧化土壤对挥发性有机污染物吸附特性的影响 丁浩然 王 磊 龙 涛等(336)
- 退化喀斯特森林植被自然恢复中土壤有机碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征 黄宗胜 喻理飞 符裕红等(345)
- 缓释复合肥对茄子产量和不同采果期品质的影响 王 菲 李银科 王正银等(355)
- 氮肥和秸秆施用对稻麦轮作体系下土壤剖面 N_2O 时空分布的影响 潘晓健 刘平丽 李 露等(364)
- 应用 ^{15}N 示踪法研究咸水滴灌棉田氮肥去向 张 文 周广威 闵 伟等(372)
- 中国南方基础工程建设中土壤生态修复技术体系与实践 徐国钢 程 睿 赖庆旺等(381)
- 黑土农田施加 AM 菌剂对大豆根际菌群结构的影响 宋福强 程 蛟 常 伟等(390)
- 自生固氮菌对土壤钾的活化作用 张 亮 袁 玲 黄建国(399)
- 长期保护性耕作对纤维素降解基因 *cbh 1* 多样性的影响 陈 坤 李传海 朱安宁等(406)
- 模拟条件下土壤硝化作用及硝化微生物对不同水分梯度的响应 刘若萱 张丽梅 白 刃等(415)
- 水力侵蚀影响下土壤有机碳和微生物数量动态变化特征 喻 为 李忠武 黄金权等(423)

研究简报

- 土壤制图中土壤类型配色模型构建与应用 徐爱国 张维理 张怀志等(431)
- 土壤专题图中采样点点位标识模型的构建 张怀志 张维理 徐爱国等(440)
- 非对称混合电解质体系中恒电荷颗粒表面与 Stern 电位的测定 樊会敏 赵 艳 刘新敏等(446)
- 植被重建下露天煤矿排土场边坡土壤碳储量变化 李俊超 党廷辉 薛 江等(453)
- 滨海盐渍化土壤理化性质与小麦生产间的关系 谢文军 张衍鹏 张 森等(461)

信息

- 第 20 届国际土壤与耕作研究组织大会 (414)
- 《土壤学报》2014 年度审稿专家名录 (467)

封面图片: 陕西丹凤盆地土壤黏化层典型微形态(由庞奖励提供)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Improvement and validation of theoretical N rate (TNR)—Discussing the methods for N fertilizer recommendation Ju Xiaotang(261)
- Study on the responses of nitrous oxide emission to increased nitrogen deposition in forest soils; A review Fang Huajun, Cheng Shulan, Yu Guirui, et al. (270)

Research Articles

- Micromorphological features of soils derived from loess in Shangdan Basin and their significance in soil diagnosis Pang Jiangli, Huang Chunchang, Zha Xiaochun, et al. (279)
- Soil nitrogen balance based recommendation of nitrogen fertilization; A case study of rice ... Ning Yunwang, Zhang Yongchun(292)
- Spatial distribution of rock fragments in purple soil in Three Gorges Reservoir Area Wang Xiaoyan, Wang Tianwei, Cai Chongfa, et al. (301)
- Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the Loess Area Wu Qiuju, Wu Jia, Wang Linhua, et al. (311)
- Vis-NIR spectral inversion for prediction of soil total nitrogen content in laboratory based on locally weighted regression Chen Songchao, Feng Lailei, Li Shuo, et al. (319)
- Migration of pentavalent antimony in two types of soils typical to South China Li Lulu, Zhang Hua, Zhou Shiwei, et al. (327)
- Effects of citrate dissolving surface and altering microstructure of biotite Li Jifu, Zhang Wenjun, Lu Jianwei, et al. (335)
- Effect of soil oxidation with reactivated sodium persulfate on sorption of volatile organic contaminants Ding Haoran, Wang Lei, Long Tao, et al. (343)
- Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ value of soil organic carbon under naturally restoring degenerative karst forest Huang Zongsheng, Yu Lifei, Fu Yuhong, et al. (353)
- Effects of slow-release compound fertilizer on yield and quality of eggplant relative to timing of harvest Wang Fei, Li Yinke, Wang Zhengyin, et al. (362)
- Spatial and temporal distributions of soil profile N_2O as affected by N fertilization and straw incorporation in the rice-wheat rotation system Pan Xiaojian, Liu Pingli, Li Lu, et al. (371)
- Fate of fertilizer N in saline water drip-irrigated cotton field using ^{15}N tracing method Zhang Wen, Zhou Guangwei, Min Wei, et al. (379)
- Soil ecology remediation technical system and its practice in infrastructure construction in South China Xu Guogang, Cheng Rui, Lai Qingwang, et al. (389)
- Impact of inoculation with AM fungi on microbial community structure in soybean rhizosphere in farmland of black soil Song Fuqiang, Cheng Jiao, Chang Wei, et al. (397)
- Mobilization of potassium in soils by *Azotobacter* Zhang Liang, Yuan Ling, Huang Jianguo(404)
- Effects of long-term conservation tillage on diversity of cellulose degradating gene *cbh I* in Fluvo-aquic soil Chen Kun, Li Chuanhai, Zhu Anning, et al. (413)
- Response of nitrification and nitrifier to change in soil moisture content under simulated conditions Liu Ruoxuan, Zhang Limei, Bai Ren, et al. (421)
- Dynamics of soil microbial population and organic carbon under water erosion Yu Wei, Li Zhongwu, Huang Jinquan, et al. (430)

Research Notes

- Construction of a color matching model for soil types and its application to soil mapping Xu Aiguo, Zhang Weili, Zhang Huaizhi, et al. (439)
- Development of soil sampling point labeing model for the matic soil maps Zhang Huaizhi, Zhang Weili, Xu Aiguo, et al. (445)
- Principle for determination of surface potential and Stern plane potential of constant charged particles in asymmetric mixed electrolyte solutions Fan Huimin, Zhao Yan, Liu Xinmin, et al. (452)
- Variability of soil organic carbon storage in dump slope of opencast coal mine under revegetation Li Junchao, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. (460)
- Relationships between soil physicochemical properties and wheat production in coastal saline soil Xie Wenjun, Zhang Yanpeng, Zhang Miao, et al. (466)

Cover Picture: Typical micromorphological photos in Horizon Bt of the soil profile in Danfeng Basin, Shaanxi Province, China (by Pang Jiangli)