

DOI: 10.11766/trxb201405130230

氮肥有效率的概念及意义*

——兼论对传统氮肥利用率的理解误区

巨晓棠[†]

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要 自氮肥发明和施用以来,人们一直想通过氮肥利用率来度量氮肥施用效果。传统氮肥利用率是指当季作物吸收肥料氮占施用肥料氮的百分率,而没有反映氮肥对土壤氮消耗的补偿效应。由于概念和算法本身缺陷,加之对结果解析和理解不够,在文献和日常交流中产生了许多误区。为此,国内外研究者尝试了许多改进算法,虽涉及到氮肥在后茬作物上的残效,但并未触及到残留肥料氮对土壤氮消耗补偿效应这一核心问题。本文根据土壤-作物体系氮素主要流动通量,及肥料氮-土壤氮-作物吸氮“三氮”之间关系,提出了氮肥有效率的观念和算法,其核心是将残留肥料氮作为补偿土壤氮消耗的有效部分。文章分析了国内¹⁵N 示踪试验资料,认为我国现有农田管理水平的氮肥有效率在 50%~60%,损失率在 40%~50% 之间,损失率很高。采取改进氮肥和农艺管理措施,我国未来将氮肥有效率提高至 70%~90%,是完全有可能的。氮肥有效率拓展了氮肥效应理念,在解析氮肥对作物增产、维持土壤氮肥力的真实效果,对环境的实质影响方面具有重要意义。

关键词 氮肥有效率;传统氮肥利用率;补偿效应;肥料氮;土壤氮;作物吸氮

中图分类号 S143 **文献标识码** A

氮素在作物产量和品质形成中起关键作用。在排除了其他显著影响产量的限制因素后(如土壤障碍因子、水分、磷钾等),合理施用氮肥是当今世界作物生产中获得较高目标产量的关键措施。不合理施用氮肥会导致两个后果:一是氮肥施用量低于经济最佳施氮量或最高产量施氮量,产量较低,没有发挥品种、灌溉等其他农艺措施的增产效果,如在生长季水热条件较好的非洲广大地区和世界上其他氮肥投入不足的地区,而且会出现大量耗竭土壤氮肥力的情况^[1];二是氮肥施用量超过了经济最佳施氮量或最高产量施氮量,导致产量不再增加或有所下降,但氮肥在土壤中的残留量或损失到环境(指水体和大气)中的量会显著增加^[2],这是当今世界许多集约化作物生产中因氮肥施用过量导致环境污染的根源。

在文献和日常科技交流中,一般会用氮肥利用

率(本文称之为“传统氮肥利用率”)来评价氮肥施用效果和对环境影响,认为氮肥利用率低,氮肥被作物利用情况和施用效果就差,环境污染就严重;氮肥利用率高,氮肥被作物利用情况和施用效果就好,环境污染就不严重。这个传统氮肥利用率有时甚至对科技工作者,也产生了诸多误导。如众多文献说我国氮肥利用率仅 30% 左右,西方发达国家达到了 50%~60% 左右,我们较别人少了 20~30 个百分点。还有人认为,我国氮肥利用率仅有 30% 左右,其余的 70% 左右氮肥均散失到水体和大气中去了。许多科技工作者利用传统氮肥利用率确定氮肥施用量,如果不能深入理解传统氮肥利用率的含义,往往得到不符合实际的结果。这些提法和做法的误区,一是对传统氮肥利用率的观念和含义理解不够;二是没有将施氮量、作物产量和土壤氮素变化情况紧密联系起来;三是传统氮肥利用率观念和

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

[†] 通讯作者, E-mail: juxt@cau.edu.cn

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。E-mail: juxt@cau.edu.cn

收稿日期:2014-05-13;收到修改稿日期:2014-06-21

算法本身的缺陷。为了剖析传统氮肥利用率真正含义,它能说明的问题和不能说明的问题,公众对其产生误区的原因,笔者综述了国内外氮肥利用率的概念、算法和最新发展。为了赋予传统氮肥利用率更丰富内涵,真实反映氮肥施用效果、对土壤氮肥力和环境影响,笔者提出了氮肥有效率的概念,并论述了它的含义和意义。最后,用 ^{15}N 示踪田间试验结果,计算了氮肥的有效率,分析了结果的意义。

1 对传统氮肥利用率的理解误区

我们平常所说的氮肥利用率是指当季作物吸收肥料氮占施入肥料氮的百分率,反映的是当季作物对肥料氮的回收情况,并未考虑氮肥后效和对土壤氮消耗的补偿作用。从概念上看,它只能通过 ^{15}N 示踪氮肥来测定(称之为 ^{15}N 利用率),因为其他方法不能区分作物吸收的氮素是来自肥料氮还是土壤氮。由于 ^{15}N 方法对技术和资金要求高,目前大多数研究采用差减法来估算(称之为差减法利用率)。关于 ^{15}N 示踪和差减法如何测定和计算传统氮肥利用率,所得结果的意义和存在问题,读者可以参考刘巽浩和陈阜^[3]、朱兆良^[4]、沈善敏^[5]、王火焰和周健民^[6]、宇万太等^[7]、巨晓棠和张福锁^[8]、侯彦林^[9]、田昌玉等^[10]的有关文章,这里不再赘述。除了传统氮肥利用率(有些文献称之为“当季作物回收率”、“氮肥回收率”、“氮肥表观利用率”等),根据要说明的问题,文献上还还包括氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产率。Cassman等^[11]、Johnston和Poulton^[12]和Ladha等^[13]对以上四种利用率的概念、测定、算法和含义进行了较详

细论述,这里也不再赘述。

在作物对肥料氮吸收项中,文献中考虑的并不一致。按照传统氮肥利用率定义,作物对肥料氮吸收应包括作物成熟收获期地上部(籽粒和秸秆)对肥料氮吸收量,也应该包括地下部根系对氮肥吸收量。由于根系对氮肥吸收量较小(相对于秸秆和籽粒),加之很难取到完整根系,许多文献中只用地上部对肥料氮吸收来计算传统氮肥利用率。实际上,包括根系和不包括根系计算结果差别不大。由于欧洲和北美普遍实行一年一季和秸秆还田的农业措施,许多文献上也用作物移出肥料氮量(即籽粒带走肥料氮量)作为分子,计算传统氮肥利用率。读者在阅读文献时,需注意传统氮肥利用率是用哪些参数计算出来的,以免在不同基础上进行相互比较,产生误判。

Brentrup和Palliere^[14]曾用英国洛桑长期小麦试验资料(“Broadbalk Experiment”, Rothamsted, UK),对传统氮肥利用率进行了计算,并对结果意义进行了进一步解析(表1)。在施氮量为 $\text{N } 48 \text{ kg hm}^{-2}$ 时,作物移出氮量(只包括籽粒)超过了施氮量,尽管传统氮肥利用率可超过63%,但土壤氮肥力和产量会很低,是不可持续的;当施氮量为 $\text{N } 96 \text{ kg hm}^{-2}$ 时,作物移出氮量基本等于施氮量,尽管传统氮肥利用率达到了69%,但这时仍存在着土壤氮肥力和产量降低风险,因为施氮量还需补充因作物秸秆和不可避免的氮素损失对投入氮的需求;当施氮量为 $\text{N } 144 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $\text{N } 192 \text{ kg hm}^{-2}$ 时,作物生长季的氮素输入和输出量能够维持平衡,传统氮肥利用率在65%~69%之间,土壤氮肥力和产量得以维持;当施氮量高于 $\text{N } 244 \text{ kg hm}^{-2}$ 时,作物生长季氮素输入量远高于输出量,传统氮肥利用率低至57%,具有大量氮素损失到

表1 英国洛桑长期不同氮肥用量小麦试验传统氮肥利用率及其解析^[14]

Table 1 Nitrogen use efficiency of different mineral fertilizer application rates in a long-term field trial with winter wheat

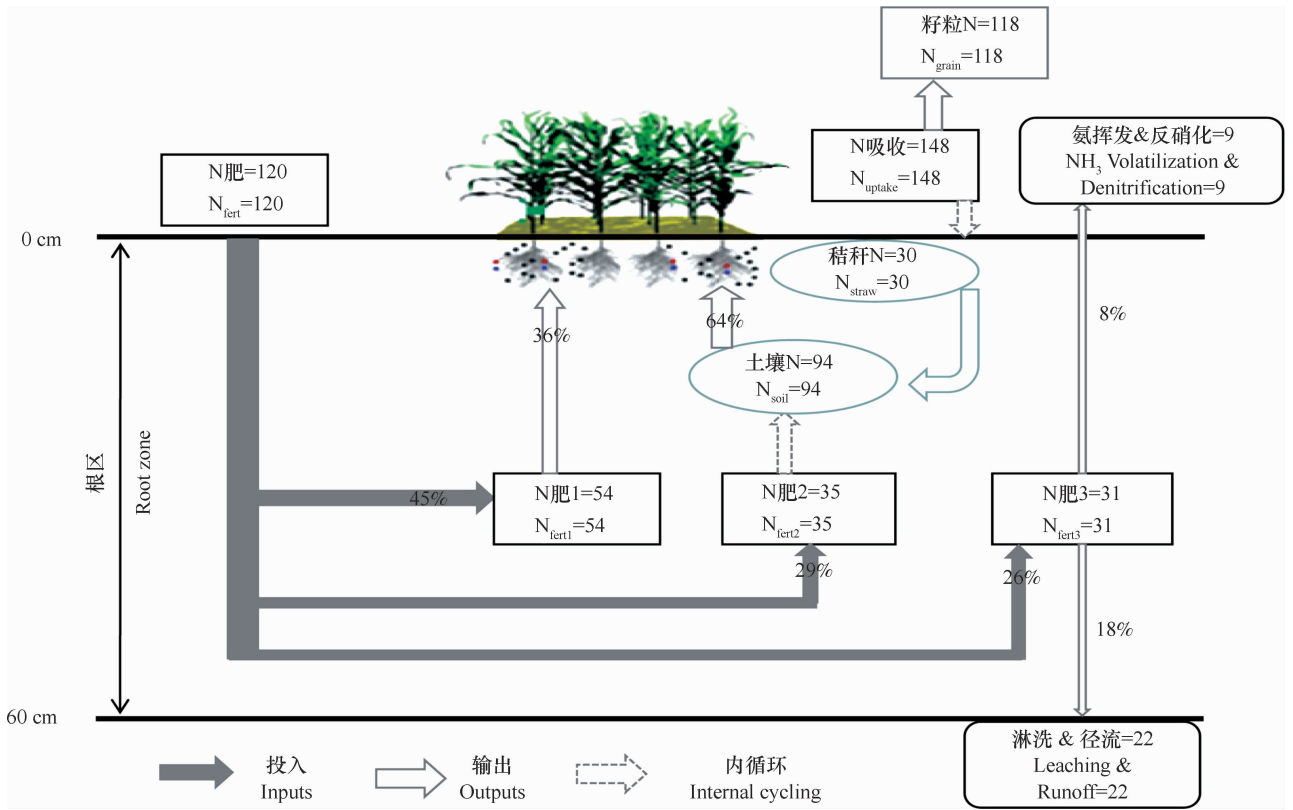
施氮量 N application rate (N kg hm^{-2})	作物移出量 N removal (N kg hm^{-2})	传统氮肥利用率 Traditional N use efficiency (%)	对结果的解析 Interpretation
0	26	—	耗竭土壤氮素 Soil mining
48	56	63	
96	92	69	有消耗土壤氮危险 Risk of soil mining
144	126	69	
192	151	65	输入与输出平衡 Balanced in-and outputs
244	166	57	有大量氮损失危险 Risk of high N losses

注:表中数据为1996—2000年平均值 Notes: Data in the table is the mean values of 1996 to 2000

环境的风险。从这个例子可以看出,并不是氮肥利用率越高越好,而是在维持较高目标产量、维持土壤氮肥力、实现体系氮素输入与输出基本平衡的条件下,维持较高传统氮肥利用率才有实际意义。

为了进一步说明传统氮肥利用率含义,以笔者曾经做过的一个¹⁵N 示踪试验结果为例(图 1)。在施氮量为 N 120 kg hm⁻²、冬小麦产量为 5.1 t hm⁻² 情况下,得到了冬小麦对氮肥吸收量、在土壤中残

留(考虑主要根系活动层 0~60 cm 土壤)及损失到环境的肥料氮量。也获得了冬小麦地上部总吸氮量中,分别来自肥料氮和土壤氮的量。由此结果,我们很容易计算出传统氮肥利用率是 45%。但这能说明该冬小麦体系对氮肥利用效果差吗?再能进一步提高到什么程度?通过下文分析,我们可以看出,传统氮肥利用率的含义和意义具有很大局限性,而且容易产生误导。



注:线条粗细代表通量大小。N_{fert}:氮肥施用量;N_{fert1}:作物吸收肥料氮;N_{fert2}:土壤残留肥料氮;N_{fert3}:肥料氮损失;N_{soil}:作物吸收土壤氮;N_{grain}:籽粒氮;N_{straw}:秸秆氮。图中百分数表示占施氮量的比率,其中作物吸收肥料氮和土壤氮的百分数指占作物总吸氮量的比率。Note: The width of the line represents the magnitude of each N flux. N_{fert}: N fertilizer rate, N_{fert1}: fertilizer N uptake by crop, N_{fert2}: residual fertilizer N in the soil, N_{fert3}: fertilizer N losses to the environment, N_{soil}: crop N uptake from soil, N_{grain}: grain N, N_{straw}: straw N. The percentages represent the ratio to N fertilizer rate except the percentages of fertilizer N uptake by crop and crop N uptake from soil which represent the ratio to total N uptake by crop

图 1 土壤-作物体系主要氮素流动通量(根据 Ju 和 Christie^[15]修改)
Fig. 1 The main fluxes of N in the soil-crop system (revised from Ju and Christie^[15])

传统氮肥利用率只表示施用肥料氮被当季作物吸收的部分,而且是个相对概念,并未将施氮量、作物产量和土壤氮素变化情况紧密联系起来。因此,单纯比较传统氮肥利用率高低是没有实际意义的。在解析传统氮肥利用率时,必须将相对比率与实际通量结合起来考虑。笔者曾在一篇文章中写到^[8],通过降低氮肥施用量,我们可以很容易提高传统氮肥利用率,但不能达到较高的目标产量,这

样的高氮肥利用率又有什么意义呢?以测试或平衡计算的推荐施氮方法,也总是从作物氮素需求中减去土壤供氮量来计算施氮量,很少考虑土壤氮的消耗是怎么补偿的^[15]。

除了上述文献^[3-13]论述的关于对传统氮肥利用率的理解误区以外,笔者认为该氮肥利用率存在如下缺陷:(1)不能解析土壤残留肥料氮是对土壤氮库消耗的补偿效应,实际上,对土壤消耗氮的补

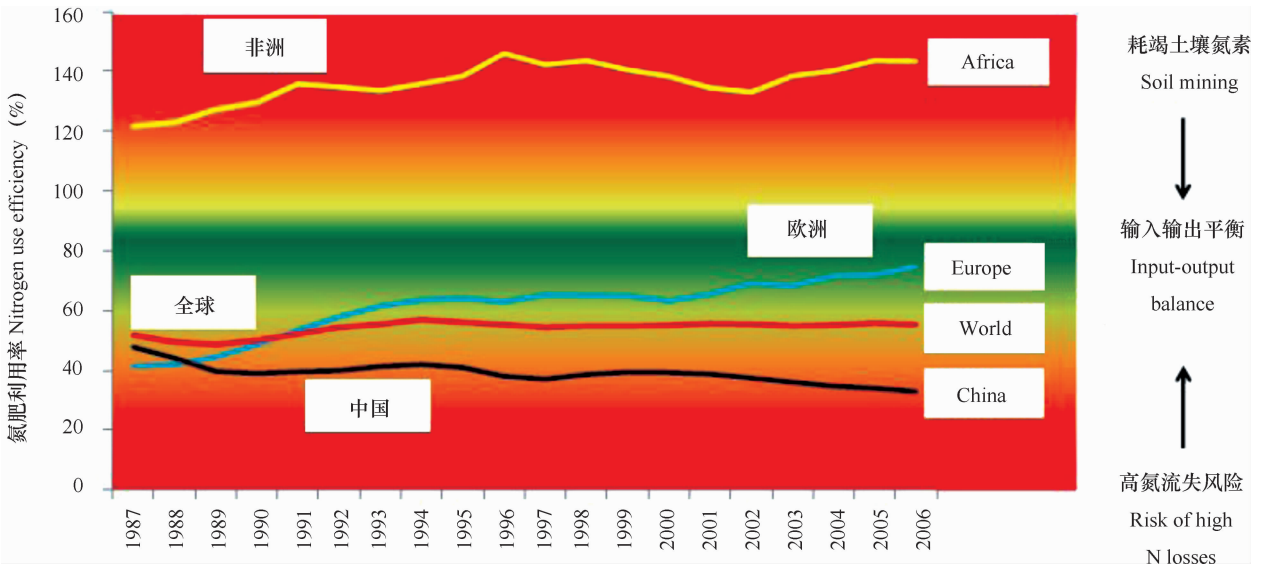
偿是施用氮肥用以维持或提高土壤氮肥力的另一个重要目的;(2)没有将施氮量、作物产量和土壤氮变化情况紧密联系起来;(3)不能真实反映氮肥施用过程和施用后的损失情况,对通过技术改进来降低氮肥损失参考意义不大;(4)仅是一个相对概念,其大小决定于分子和分母相对比例,如果作物吸收了同样数量的肥料氮,因施氮量不同传统氮肥利用率会相差很远;(5)差减法获得的利用率受土壤基础肥力、作物生长情况等因素的严重影响,如土壤氮肥力较高,氮肥利用率会很低,但作物也吸收了大量肥料氮。

2 对传统氮肥利用率改进的尝试

针对传统氮肥利用率缺陷和容易产生的误区,为了使氮肥利用率更能用于评价氮肥施用效果、对土壤氮肥力和环境的影响,国内外研究者做了许多尝试。

为了比较区域或国家之间在氮肥利用、土壤肥

力和产量水平等方面的差异,Brentrup 和 Palliere^[14]曾提出了用氮素输出与输入率来表示区域或国家尺度上的氮肥利用率,称之为平衡法氮肥利用率(Balance approach)。这里输出即作物移走氮(籽粒),输入即氮肥投入。图 2 表示了用输出输入比计算的地区或国家平衡法氮肥利用率从 1987 年至 2006 年的变化情况。在非洲,平衡法氮肥利用率从 1987 年约 120% 上升至 2006 年约 140%,作物移走氮始终超过了肥料投入氮,而且呈不断增加趋势,说明随时间推移,与肥料氮输入相比,作物移出更多的氮,不仅产量较低,而且会不断耗竭土壤氮肥力。中国情况正好相反,平衡法氮肥利用率从 1987 年约 50% 下降至 2006 年约 40%,说明作物移走氮增加(因产量增加)低于氮肥投入量增加,氮肥损失不断加重。欧洲平衡法氮肥利用率从 1987 年约 40% 上升至 2006 年约 60%,主要是由于农田管理措施改善,在未大量增加氮肥投入情况下,实现了产量和相应吸氮量的增加。就世界平均而言,平衡法氮肥利用率稳定在 50%~55% 之间。



注:图中数据为 3 年滑动平均。输出指作物移出氮,输入指肥料氮;Brentrup 和 Palliere^[14]基于 FAO^[16]和 IFA^[17]计算结果 Note: Date in the figure is the moving average over 3 years. N removal with arable & permanent crops and N input with mineral N. Calculations by Brentrup & Palliere^[14] based on FAO^[16] and IFA^[17]

图 2 输出与输入比计算的不同地区或国家平衡法氮肥利用率^[14]

Fig. 2 Nitrogen use efficiency calculated by balance approach for different regions or countries^[14]

在《欧洲氮评估》报告中,Brentrup 还注意到应用差减法通过短期试验和长期试验得到的传统氮肥利用率差异,认为差减法只适用于计算长期试验传统氮肥利用率。由于土壤本底氮的差异,导致一季试验差减法利用率显著低于长期试验。为了避

免不施氮小区本底氮对平衡法氮肥利用率的影响,他们进一步提出将大气氮沉降量包括到计算中,用来代替长期不施氮小区供氮量的方法,称之为扩展平衡法(Extended balance approach)。图 3 是 Yara 154 个一年田间试验和英国洛桑长期小麦试验的平

均产量效应曲线,图中显示了不施氮区作物移走氮,经济最佳施氮量的作物移走氮量。为了说明这些氮肥利用率的差别和含义,他们用图3的一年短期试验与洛桑长期试验结果分别计算,进行对比解析如表2。在这个例子中,氮沉降量按 $N 20 \text{ kg hm}^{-2}$ 计算。可以看出,一年试验用传统差减法计算的氮肥

利用率远低于长期试验,但用平衡法计算的氮肥利用率前者远高于后者,用扩展平衡法计算的氮肥利用率两者趋于接近。作者强调,必须根据不同计算方法的意义,对结果进行正确解析,而不是单纯比较计算数字的高低^[14]。

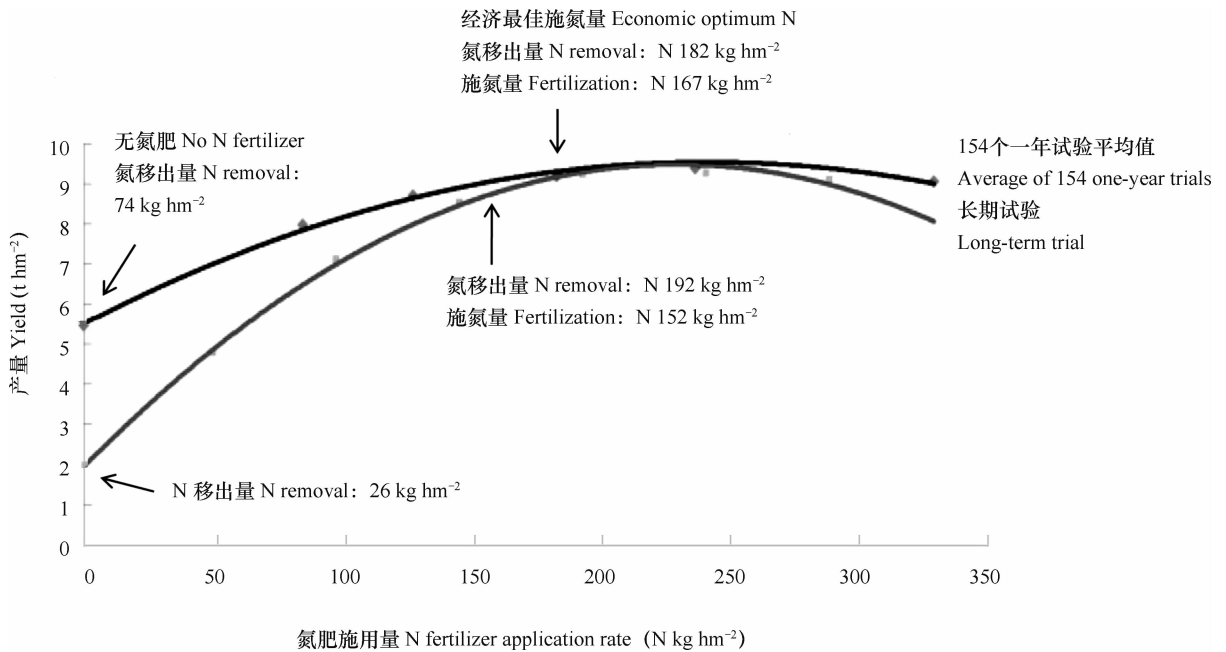


图3 Yara 一年试验和英国洛桑 Broadbalk 长期试验的氮肥效应曲线^[18] (引自《欧洲氮评估》报告第3章)

Fig. 3 Grain yield and N removal with grain in short-term (1-year) Yara field trails and in Broadbalk long-term trail in Rothamstad, UK^[18] (Cited from chapter 3 of The European Nitrogen Assessment)

表2 短期(1年试验)和长期试验氮肥利用率比较

Table 2 Comparison of the nitrogen use efficiency (NUE) of short-term (1-year) and long-term trial

试验类型 Experiment type	差减法利用率 ¹⁾ Difference method with reference to unfertilized plot		平衡法利用率 ²⁾ Balance approach with crop N uptake in fertilized plot		扩展平衡法利用率 ³⁾ Balance approach with N deposition instead of unfertilized plot	
	计算式 Calculation method	利用率 NUE	计算式 Calculation method	利用率 NUE	计算式 Calculation method	利用率 NUE
	一年试验 1-year trail	$100\% \times (167 - 74) / 182$	51%	$100\% \times 167 / 182$	92%	$100\% \times 167 / (182 + 20)$
长期试验 Long-term trail	$100\% \times (152 - 26) / 192$	66%	$100\% \times 152 / 192$	79%	$100\% \times 152 / (192 + 20)$	72%

注:1)差减法利用率 = $100\% \times (\text{施氮区作物移出量} - \text{不施氮区作物移出量}) / \text{施氮量}$; 2)平衡法利用率 = $100\% \times \text{施氮区作物移出量} / \text{施氮量}$; 3)扩展平衡法利用率 = $100\% \times \text{施氮区作物移出量} / (\text{施氮量} + \text{氮沉降量})$ Note: 1) NUE of different method = $100\% \times (\text{crop N uptake in fertilized plot} - \text{crop N uptake in unfertilized plot}) / \text{N fertilizer rate}$; 2) NUE of balance approach = $100\% \times \text{crop N uptake in fertilized plot} / \text{N fertilizer rate}$; 3) NUE of extended balance approach = $100\% \times \text{crop N uptake} / (\text{N fertilizer rate} + \text{N deposition})$

刘巽浩和陈阜^[3]曾提出叠加利用率的概念,他们根据大面积多年连续氮肥肥效分析,将产出氮占投入氮的百分数作为氮肥叠加利用率。产出氮包括籽粒和秸秆,投入氮包括化肥氮、有机肥氮和秸秆氮。这种方法得到的国内外投入氮肥利用率在50%~80%之间。这种叠加氮素利用率实际上是将肥料残效包括到利用率计算中,包括了肥料氮被后茬多季作物利用的情况。他们分析的是产出氮占投入氮的比例,对投入氮在土壤中的内循环过程还是作为“黑箱”处理。

沈善敏^[5]提出了估算氮肥利用率的比值法,即比值法氮肥利用率(%) = 100% × 施氮区作物吸氮量 / (作物吸收土壤氮 + 肥料氮),认为分子中的作物吸氮量也包括了对土壤氮的吸收量。根据图1的数据。用该方法计算的比值法氮肥利用率 = 100% × 148 / (94 + 120) = 69%,远高于传统氮肥利用率45%,认为这样计算的氮肥利用率反映了氮肥施用真实效果。该算法实际上将肥料补充的土壤氮消耗,考虑为肥料氮的有效部分。但是以作物吸收土壤氮来计算,而不是以肥料氮在土壤中的残留量来计算。

王火焰和周健民^[6]提出了肥料养分真实利用率的概念,定义为肥料施入土壤后,直至消耗完之前,被作物吸收利用的肥料养分量占被消耗的肥料养分量的比率。肥料养分真实利用率(%) = 作物吸收肥料养分量 / (施肥量 - 土壤贮存的肥料养分量) × 100%。根据图1数据,用该方法计算的氮肥真实利用率(%) = 54 / (120 - 35) × 100% = 64%。该方法反映施入肥料氮被当季消耗部分的真实利用率。此外,侯彦林^[9]、田昌玉等^[10]也对传统氮肥利用率提出了一些改进想法和算法,但笔者认为过于复杂,尚未从肥料氮 - 土壤氮 - 作物吸氮过程的主要氮流通量给以清楚解析。

以上改进虽均涉及到氮肥施用后在后茬作物上残效问题,但并未触及到肥料氮残留对土壤氮消耗补偿效应这一核心问题。未能从土壤 - 作物体系氮素主要流动和转化过程,以及肥料氮 - 土壤氮 - 作物吸氮“三氮”之间关系中提出新概念和算法。事实上,在¹⁵N示踪试验中,后茬作物对残留肥料¹⁵N利用率是很低的,主要是后茬连续施氮和巨大土壤氮库,使该部分残留肥料氮被作物根系吸收的几率变小。笔者进行的冬小麦或夏玉米¹⁵N示踪试验,连续两季后茬作物对施入肥料氮的回收率仅4.2%~9.4%(占开始施入肥料¹⁵N百分数)^[19]。Ladha

等^[13]总结的资料表明,连续六季后茬作物对施入肥料氮回收率小于7%。即使将当季作物对肥料¹⁵N回收率与多季后茬回收率叠加,氮肥利用率也仅在30%~60%之间^[13]。只有将残留肥料氮作为对土壤氮消耗的补偿作用考虑到计算式中,才能真正解析施入氮肥的效果和去向,也才能客观反映肥料氮向环境损失的比率。因此,笔者拟将氮肥施用后作物吸收肥料氮、肥料氮在主要根区内的残留(被微生物、土壤有机质或黏土矿物固定)全部作为有效肥料氮考虑,只有通过气体(氨挥发、硝化 - 反硝化)或淋洗与径流等脱离出主要作物根区的肥料氮,才视为无效。在合理施氮条件下,肥料氮在主要根区土壤 - 作物体系的流动和转化属于内循环过程,向环境散失量并不会很高。只有在过量施氮或施氮方法不合理(如在石灰性土壤上表面撒施铵态或尿素态氮肥等)情况下,氮肥向环境损失量才会很高。

3 氮肥有效率的 概念、算法及意义

基于以上分析,为了清楚地说明氮肥施用效果、对土壤氮肥力和环境的影响,表明氮肥施用被作物吸收、在土壤中残留以及向环境损失的实际情况,使氮肥施用效果能与作物产量水平、土壤氮肥力维持和环境影响程度紧密联系起来,避免对传统氮肥利用率的理解误区,笔者在此提出了氮肥有效率概念。氮肥有效率是指氮肥被作物吸收量和在主要根区土壤中残留量之和占施入氮肥的百分率,也就是从100%中减去氮肥施用过程和施肥后的损失率。作物吸氮量包括籽粒和秸秆。在土壤中残留量指在作物根区残留的肥料氮,用于补充当季被作物吸收消耗的土壤氮。考虑的根区深度应根据主要根系分布层决定,因为当季作物主要消耗了这些层次的土壤氮,肥料氮残留也主要是对这些层次消耗的土壤氮进行补充。更深层次的残留肥料氮被后茬作物利用几率很小,视为肥料氮损失。根据笔者多年来对土壤 - 作物体系肥料氮主要流动和去向研究,在旱作深根作物如小麦或玉米体系中,肥料残留氮应考虑0~60 cm土层;对水田的稻作体系,考虑0~20 cm土层;对旱作浅根作物如蔬菜,考虑0~30 cm土层。

根据定义,氮肥有效率可以通过下式计算:

氮肥有效率(%) = 100% × (作物吸收肥料氮 + 主要根区土壤残留肥料氮) / 氮肥施用量

氮肥损失量 = 氮肥施用量 - (作物吸收肥料氮 + 主要根区土壤残留肥料氮)

或者氮肥有效率 (%) = $100\% \times (1 - \text{氮肥损失量} / \text{氮肥施用量})$

氮肥损失率 (%) = $100\% \times \text{氮肥损失量} / \text{氮肥施用量}$

从以上概念和表达式可以看出,氮肥有效率只能通过¹⁵N 示踪肥料测定,因为作物吸收肥料氮、主要根区土壤残留肥料氮,或者氮肥损失量只能通过该方法获得。如图 1 中,氮肥有效率 (%) = $100\% \times (54 + 35) / 120 = 74\%$;或者氮肥有效率 = $100\% \times (1 - 31 / 120) = 74\%$ 。由此可见,氮肥有效率可以达到 74%,而不是传统氮肥利用率的 45%,差距就在于有 29% 的肥料残留在主要作物根区,用于补充当季作物消耗的土壤氮。可以看出,在该施氮量水平下,土壤氮素能够维持基本平衡,即土壤氮素消耗 (N 94 kg hm⁻²) 约等于肥料残留氮 (N 35 kg hm⁻²) 加上秸秆还田氮 (N 30 kg hm⁻²) 再加上干湿沉降氮 (约 N 20 ~ 50 kg hm⁻²)^[2]。在合理施氮量和施氮方法与时期,达到目标产量条件下,施氮既可以保证作物吸氮,又可以维持土壤氮素平衡,这种状况氮肥损失最低,应该是该种土壤 - 作物体系氮肥施用的最佳状态。这时所得到的各种通量可以用来评判在不合理氮肥施用量、不合理施用方法和时期的条件下所获得通量的差距及原因,在进一步生产实践中矫正这些不合理施肥,达到施用氮肥的最佳效果。

当施氮量低于目标产量需求时,作物产量会较低,作物吸氮量也会相应降低,为维持生长,作物会大量吸收土壤氮,这时传统氮肥利用率会较高(尽管分子小,但分母更小),这种情况是以耗竭土壤氮为代价的^[15],肥料氮在土壤中残留量不足以弥补作物对土壤氮素消耗量,是不可持续的。这时氮肥有效率尽管也会很高,但没有达到目标产量,而且消耗了土壤氮库,并未达到施肥目的。

当施氮量高于目标产量需求时(即通常所说的过量施氮),作物产量或持平或减少(倒伏或病虫害增加等原因),作物吸氮量会稍微增加(奢侈吸收增加了籽粒和秸秆含氮量),这时传统氮肥利用率会很低(尽管分子稍微增加,但分母增加更大)。肥料土壤残留量会超过作物对土壤氮素消耗量,造成土壤氮素累积;氮肥也会发生大量气态和淋洗损失^[15]。这时氮肥有效率也会降低(因为分母增大),施氮没有增加产量,而是增加了土壤残留量和

向环境损失量。高量土壤残留氮在以后若干年继续向环境损失,是向“环境”施肥。由此可见,只有在合理施氮量和施氮方法与时期,达到目标产量,维持土壤氮素平衡条件下,氮肥有效率越高,说明氮肥损失率越低。背离了这些条件,单纯谈氮肥有效率,就像单纯谈传统氮肥利用率一样,是没有实际意义的。读者可以从上文的例子中,看出氮肥有效率较传统氮肥利用率高,说明的问题更加清晰。

笔者曾在一篇《美国科学院院报》(PNAS) 的评论文章中,提出了氮素持留能力的概念,就以上三种情景作物对氮肥吸收,氮肥在土壤中内循环以及向环境散失的情况进行了分析,这里不再赘述^[20]。下面进一步用笔者做过的一个¹⁵N 示踪试验例子,来说明氮肥有效率在反映作物对肥料氮吸收、土壤氮素平衡和肥料氮向环境损失的情况。

在农户习惯施氮量 N 300 kg hm⁻² 和优化管理 N 139 kg hm⁻² 情况下(表 3),作物地上部(包括籽粒与秸秆)吸收的肥料氮分别为 N 54.6 kg hm⁻² 和 N 48.4 kg hm⁻²,并不因施氮量大量增加而增加很多,而是呈递减性增加,最后不增加或降低^[15]。农户习惯氮肥传统利用率仅 18.2%,优化管理为 34.8%,主要是因为施氮量(传统氮肥利用率的分子)差异引起的。值得注意的是,尽管农户习惯氮肥损失量显著增加,但氮肥损失率却差别不大。在这一种植体系中,高量农户习惯施氮主要增加了肥料氮在土壤主要根区残留量和向环境损失量。显然,如果我们单纯计算传统氮肥利用率,很难说明该体系对氮肥利用和氮肥损失的实际情况。在分析和报道结果时,必须将吸收量、残留量、损失量与相应的比率结合,才能避免误导。

更为重要的是,在种植一季冬小麦后,土壤氮素是盈余还是亏缺。该试验的优化管理由于采用了优化栽培、土壤耕作与秸秆还田、水肥优化等措施^[21],在施氮量低于农户习惯条件下,显著增加了产量,也显著增加了总吸氮量,总吸氮量增加的主要部分来自于对土壤氮的消耗(表 4)。由于高量施氮农户习惯显著增加了土壤残留,导致土壤氮素盈余 N 22.0 kg hm⁻²,而低施氮量优化处理大量消耗了土壤氮,使土壤氮素亏缺 N 105.8 kg hm⁻²。优化管理的施氮量是由土壤无机氮测试方法决定的^[22],之所以施氮量低,是因为播前测定的 0 ~ 60 cm 土层贮存了 N 190 kg hm⁻² 的硝态氮,按照该优化方法,需要对播前土壤高量硝态氮进行扣除。如果长期耕作土壤 - 作物体系实现了合理施氮量,

则不会造成播前土壤硝态氮过量累积,这时施氮量应该稳定在合理水平,而不需要根据播前土壤有效氮的高低来进行每季调整^[15]。在这个例子中,如果考虑秸秆还田和干湿沉降对土壤补充的氮量,农户习惯处理维持土壤氮平衡施氮量约等于施氮量(N 300 kg hm⁻²)减去土壤氮素盈余量(N 22 kg hm⁻²)再减去秸秆还田和干湿沉降带入氮量(N 50 ~ 80 kg hm⁻²),结果为 N 228 ~ 198 kg hm⁻²;优化管理维持土壤氮平衡施氮量约等于施氮量(N 139 kg hm⁻²)

加上土壤氮素亏缺量(N 106 kg hm⁻²)再减去秸秆还田和干湿沉降带入氮量(N 50 ~ 80 kg hm⁻²),结果为 N 195 ~ 165 kg hm⁻²。两者的施氮量趋于同一水平,这应该是该产量水平合理施氮量范围。在这个例子中,农户习惯和优化管理的氮肥有效率分别为 56% 和 60%,表明在氮肥施用过程和施用后的损失还很严重,特别是农户习惯氮肥损失的绝对量很高,对环境影响很大。

表 3 肥料氮在冬小麦季去向

Table 3 The fate of N fertilizer in winter wheat season

处理 Treatment	施氮量 N application rate (N kg hm ⁻²)	产量 ¹⁾ Yield (t hm ⁻²)	作物吸收 Crop uptake		0 ~ 60 cm 土壤残留 Soil N residual in 0 ~ 60 cm		损失 N loss	
			吸收量 N uptake rate (N kg hm ⁻²)	传统利用率 Traditional use efficiency (%)	残留量 N residual (N kg hm ⁻²)	残留率 Residual ratio (%)	损失量 N loss (N kg hm ⁻²)	损失率 N loss ratio (%)
			农户习惯 Conventional	300	4.1b	54.6a	18.2b	112.0a
优化管理 Optimum	139	5.8a	48.4b	34.8a	34.3b	24.7b	56.3b	40.5a

注:1)烘干重。同一列带有不同字母代表处理之间差异显著(p < 0.05),下同 Note: 1) Oven dry weight. Different letter in the same column denote significant difference between treatments (p < 0.05). The same as follows

表 4 冬小麦收获后土壤氮素盈亏状况

Table 4 The budget of soil N after winter wheat harvest (N kg hm⁻²)

处理 Treatment	施氮量 N application rate (N kg hm ⁻²)	作物地上部 总吸氮量 Total N uptake by aboveground	作物带走 肥料氮 Fertilizer N uptake by crop	作物带走 土壤氮 Soil N uptake by crop	土壤残留 肥料氮 Fertilizer N residual	土壤氮素盈亏 Soil N budget
农户习惯 Conventional	300	144.6b	54.6a	90.0b	112.0a	+22.0
优化管理 Optimum	139	188.5a	48.4b	140.1a	34.3b	-105.8

夏玉米结果与冬小麦类似(表 5 和表 6),农户习惯处理维持土壤氮平衡施氮量约等于施氮量(N 250 kg hm⁻²)加上土壤氮素亏缺量(N 45 kg hm⁻²)再减去秸秆还田和干湿沉降带入氮量(N 50 ~ 80 kg hm⁻²),结果为 N 245 ~ 215 kg hm⁻²;优化管理维持土壤氮平衡施氮量约等于施氮量(N 185 kg hm⁻²)加上土壤氮素亏缺量(N 89 kg hm⁻²)再减去秸秆还田和干湿沉降带入氮量(N 50 ~ 80

kg hm⁻²),结果为 N 224 ~ 194 kg hm⁻²。两者的施氮量也趋于同一水平,这应该也是该产量水平合理施氮量范围。在这个例子中,农户习惯和优化管理的氮肥有效率分别为 56% 和 62%,氮肥有效率不高,反映了需要通过进一步优化施肥来降低氮肥损失。通过这样的分析才能真正理解肥料氮作物吸收、土壤氮平衡和损失情况,对施用氮肥产量效应、土壤肥力和环境效应给以真实和客观评判。

表 5 肥料氮在夏玉米季去向

Table 5 The fate of N fertilizer in summer maize season

处理 Treatment	施氮量 N application rate (N kg hm ⁻²)	产量 Yield (t hm ⁻²)	作物吸收 Crop uptake		0~60 cm 土壤残留 Soil N residual in 0~60 cm		损失 N loss	
			吸收量 N uptake rate (N kg hm ⁻²)	传统利用率 Traditional use efficiency (%)	残留量 N residual (N kg hm ⁻²)	残留率 Residual ratio (%)	损失量 N loss (N kg hm ⁻²)	损失率 N loss ratio (%)
			农户习惯 Conventional	250	6.7b	52.0b	20.8b	88.5a
优化管理 Optimum	185	7.5a	60.2a	32.5a	54.2b	29.3a	70.6b	38.2a

表 6 夏玉米收获后土壤氮素盈亏状况

Table 6 The budget of soil N after summer maize harvest (N kg hm⁻²)

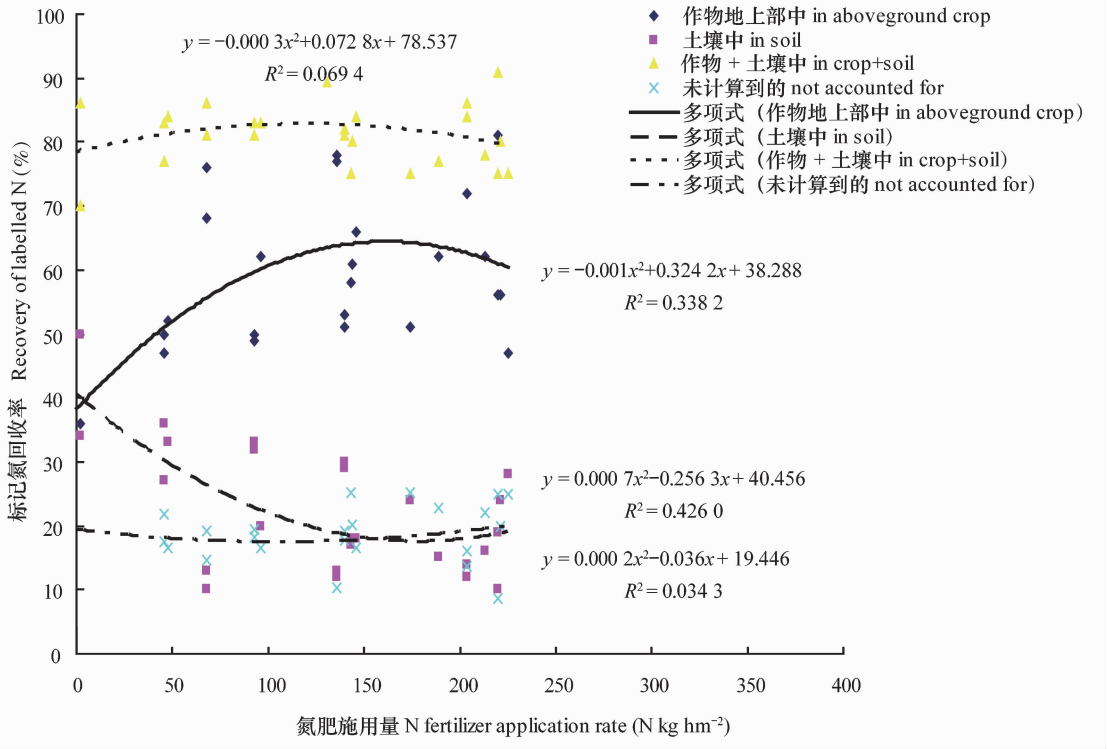
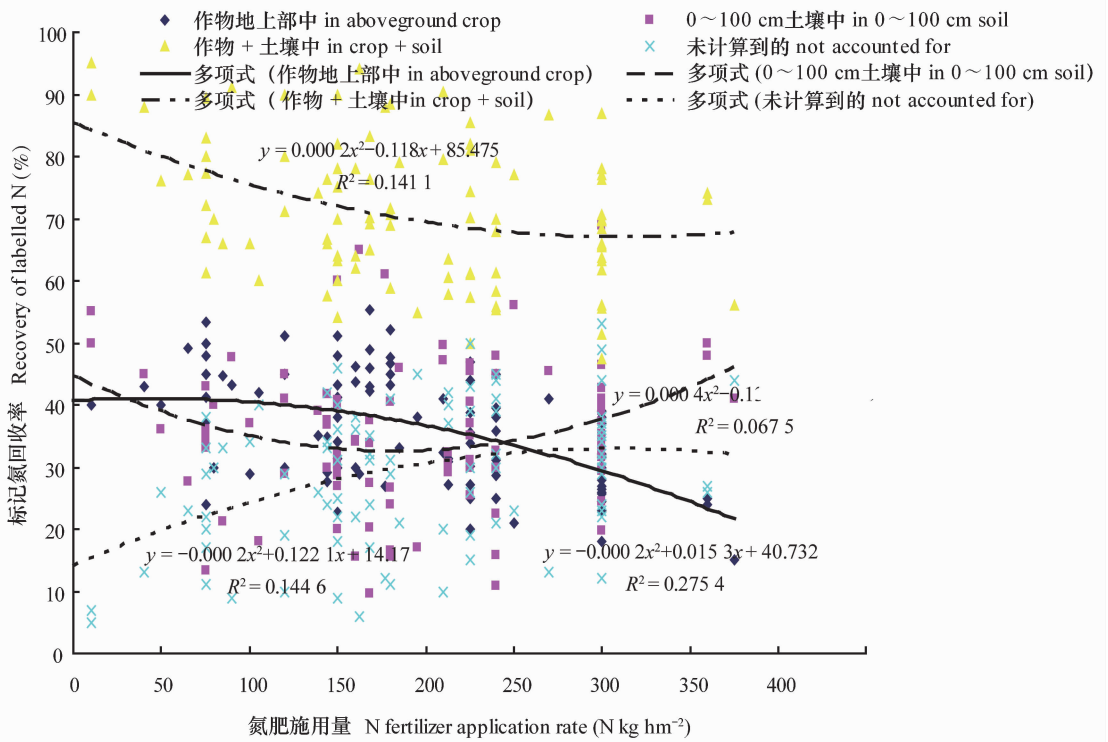
处理 Treatment	施氮量 N application rate (N kg hm ⁻²)	作物地上部 总吸氮量 Total N uptake by aboveground	作物带走 肥料氮 Fertilizer N uptake by crop	作物带走 土壤氮 Soil N uptake by crop	土壤残留 肥料氮 Fertilizer N residual	土壤氮素盈亏 Soil N budget
		农户习惯 Conventional	250	185.2b	52.0b	133.2b
优化管理 Optimum	185	203.8a	60.2a	143.6a	54.2b	-89.4

在农户习惯和优化管理条件下,氮肥有效率差别不大,主要是高量施氮在根区残留了许多肥料氮引起。在旱旱轮作条件下,这些残留肥料氮分布于根区土壤剖面各个深度,如果不及时利用,或者后季又施用大量氮肥使这些残留肥料氮没有机会被后季作物利用,那么这部分残留氮在后季也会损失(这就是我国过量施氮地块常发生的情况)。在水旱轮作中,由于频繁干湿交替,不仅当季氮肥损失很高,残留氮损失也很高^[2]。因此,应避免过量投入氮肥而引起土壤氮素过量残留。通过测定土壤中贮存有效氮方法进行氮肥推荐,之所以能将氮肥用量减下来,就是因为该田块过去施氮量过高,而在下季要利用掉这部分氮素;如果地块长期保持合理施氮水平,从施氮量中减去测定土壤有效氮,就会使土壤氮肥力下降^[15]。

Sebilo 等^[23]用¹⁵N 标记硝酸钾肥料进行了长达三十年示踪试验,在一个平衡施氮量条件下^[19],开始季施用标记硝酸钾,随后各季均施用非标记氮肥,来追踪肥料氮长期去向。经过大约三十年后,作物地上部分对肥料氮累积利用率达到 61%~65%,还有 12%~15% 肥料氮残留在土壤中用于补

充对土壤氮消耗,仅有 8%~12% 氮肥发生了淋洗损失。从这个结果可以看出,用一季短期试验结果很难评判施用氮肥效果、残留和损失情况。一次氮肥施用后,残留在土壤中的肥料氮可以持续八十年之久,这些残留氮在维持土壤氮平衡、保持土壤氮肥力方面起到重要作用。只要施氮量和施氮方法合理,氮肥的损失量可以控制到很低水平。氮肥有效率的 概念和含义即是基于这种理论基础提出的。

笔者收集了我国华北平原自 2000 年以来在冬小麦和玉米上做的¹⁵N 示踪试验结果^[15],也同时收集了英国洛桑试验站 1980—1988 年期间,在冬小麦和大麦上的¹⁵N 试验结果^[12],用于比较不同施氮量作物吸收率、土壤残留率、肥料损失率和本文提出的氮肥有效率(图 4)。尽管英国的试验没有超过 N 225 kg hm⁻² 的施氮量,为了方便比较,将施氮量横坐标统一设定为 N 400 kg hm⁻²。我国华北试验土壤残留氮考虑深度为 0~100 cm,英国试验考虑的土壤深度有 0~23 cm、0~70 cm 或者 0~100 cm 不等,但对相互比较影响不大。由图 4 可以看出,将不同试验数据放到一起进行分析时,数据点相当分散,但可以看到大致趋势。在氮肥施用量 N 225 kg hm⁻²



注:我国华北数据来源于 Ju 和 Christie^[15] 附录,英国洛桑数据来源于 Johnston 和 Poulton^[12] Note: Data of North China Plain from Appendix A of Ju & Christie^[15], and data of Rothamstad, UK from Johnston & Poulton^[12]

图 4 我国华北(左)和英国洛桑(右)¹⁵N 示踪试验作物吸收率、土壤残留率、肥料损失率及氮肥有效率
Fig. 4 The ratios of fertilizer N by crop uptake, residual in soil, loss and the N fertilizer availability ratio on the North China Plain (left) and Rothamstad, UK (right)

以前,随着施氮量增加,我国华北传统氮肥利用率在下降,残留率也在下降,但损失率在上升;英国洛桑传统氮肥利用率在上升,残留率在下降,损失率一直保持在 20% 左右。在氮肥施用量 $N\ 225\ kg\ hm^{-2}$ 以后,我国华北传统氮肥利用率在迅速下降,残留率在迅速上升,损失率维持在较高水平。从氮肥有效率分析,我国华北在 47%~95%,平均值为 71%,变异系数为 15%;英国洛桑在 70%~91%,平均值为 81%,变异系数为 6%。由此可以看出,我国华北氮肥有效率平均较英国洛桑低 10 个百分点,相应的损失率平均较英国洛桑高 10 个百分点(分别为 29% 和 19%)。值得注意的是,这是田间试验结果比较,在农户实际生产中我国氮肥有效率应该还低于这个水平。我国华北氮肥有效率低的主要原因是:(1)前季过量施氮造成的土壤本底无机氮(主要是硝态氮)含量很高;(2)作物管理不到位造成整体产量水平不高,施氮的增产效果差;(3)普遍采用的撒施氮肥方式造成损失严重^[2]。

在国家尺度上,朱兆良和金继运综合我国部分地区主要作物上进行的田间原位观测结果,对我国农田中化肥氮去向进行了初步估计^[24]。传统氮肥利用率约为 35%,氨挥发损失 11%,硝化-反硝化损失 34%,淋洗损失 2%,径流损失 5%,尚有 13% 未能明确(其中包括在农田土壤中净残留部分)。如果将残留率也计入农业可利用部分,则氮肥传统利用率和土壤残留率之和为 48%,也就是本文所说的氮肥有效率是 48%,通过各种途径损失肥料氮约占 52%。笔者根据过去二十多年来在我国北方石灰性旱作土壤上进行的田间原位观测结果,对农户习惯化肥氮去向也进行了初步汇总估计,传统氮肥利用率约为 27%,化肥氮在根区残留约 30%,氨挥发损失 23%,淋洗损失 18%,硝化-反硝化损失 2%。如果将残留率也计入农业可利用部分,则氮肥传统利用率和土壤残留率之和为 57%,也就是本文所说的氮肥有效率是 57%,通过各种途径损失肥料氮约占 43%。而不是普遍认为的我国“氮肥利用率”在 30% 左右,其余氮肥均损失到环境中。

综合以上分析,我国现阶段农户管理水平氮肥有效率在 50%~60% 之间,损失率在 40%~50% 之间。田间试验氮肥有效率在 60%~70% 之间,损失率在 30%~40% 之间。整体而言,氮肥损失率仍然很高。降低氮肥向环境损失仍是当前的紧迫任务和今后需要长期坚持的研究和推广工作。笔者认为以下措施是提高氮肥有效率的关键:(1)根据目

标产量确定合理氮肥用量;(2)实现机械深施氮肥,避免表面撒施;(3)优化农艺措施提高产量和吸氮量,包括水分管理、栽培管理、土壤耕作、秸秆管理、有机肥和其他营养元素配合等。由此,我国在保证粮食单产和总产的同时,在农户田块和国家尺度上的氮肥用量将不再增加,甚至降低。氮肥引起的环境问题将会大幅度减小,已经污染的大气和水体将会逐渐恢复生机。

4 结 语

氮肥利用率有多种概念和相应算法,在实际应用中,不能简单比较数字的高低,而应该注意获得这些数字的条件和方法,以对结果含义和真实意义做出符合实际的解析和判断。传统氮肥利用率只反映作物吸收肥料氮对施入肥料氮的比率,而没有反映施入氮肥在维持土壤氮肥力上的补偿效应,不能全面评价氮肥施用对作物产量、土壤氮素盈亏和向环境损失的综合效应。本文进一步明确了残留肥料氮的归宿,认为残留肥料氮是不可避免的,同时也是必要的,是对土壤消耗氮的有效补偿。提高氮肥管理水平,在于通过作物管理和施肥方法的改善,实质性降低氮肥损失,而不取决于如何准确测定和利用土壤本底氮。

本文提出的氮肥有效率概念,是在维持较高目标产量前提下,反映作物对肥料氮吸收和维持土壤氮平衡的能力,及与之相关的氮肥向环境损失情况,能够对施用氮肥的作物生产力、土壤氮肥力维持和环境影响做出客观评判。氮肥有效率拓展了氮肥效应的理念,认为只要肥料氮不损失出土壤-作物体系,在体系内的循环均是有效的,对全面客观地反映氮肥效果、确定田块氮肥用量,预测区域和国家尺度氮肥需求将会发挥重要作用,其实际应用有待进一步探讨。

鉴于目前我国大众和有些科技工作者对传统氮肥利用率的诸多误区和误判,笔者建议在不同土壤-气候条件下,对重要作物体系进行¹⁵N 示踪试验研究,用于获得这些作物体系在不同施氮条件下肥料氮的确切去向,包括作物吸氮的真实来源、肥料氮对土壤氮库消耗的补偿效应及肥料氮的损失情况,研究肥料氮-土壤氮-作物吸氮“三氮”之间关系,真正理解土壤-作物体系氮素主要流动过程,获得氮肥有效率结果,用于进一步改进作物管理、确定施氮量和改进施氮方法,达到施氮的更好

效果,将环境影响降低到最低限度。而不是做大量常规性施氮试验,来比较传统氮肥利用率高,这样很难对氮肥效果和环境影响到实质上的改进。氮肥管理的实质在于增加产量、维持地力、减少环境影响,在于实质性降低氮肥损失量,而不是简单地追求很高的传统氮肥利用率。

参 考 文 献

- [1] Sanchez P A. Soil fertility and hunger in Africa. *Science*, 2002, 295: 2019—2020
- [2] 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 Sciences USA*, 2009, 106: 3041—3046
- [3] 刘巽浩,陈阜. 对氮肥利用效率若干传统观念的质疑. *农业现代化研究*, 1990, 11(4): 28—34. Liu X H, Chen F. Doubts on some traditional ideas of the nitrogen use efficiency (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 1990, 11(4): 28—34
- [4] 朱兆良. 农田生态系统中化肥氮的去向及氮素管理//朱兆良,文启孝. *中国土壤氮素*. 南京:江苏科学技术出版社, 1992: 228—245. Zhu Z L. Fertilizer fate and N management in agroecosystem//Zhu Z L, Wen Q X. *Nitrogen in soil of China* (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228—245
- [5] 沈善敏. 关于肥料利用率的猜想. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 781—782. Shen S M. A conjecture on the fertilizer recovery measurement by field experiment (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5): 781—782
- [6] 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
- [7] 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 by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 90—96
- [8] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考. *生态环境*, 2003, 12(2): 192—197. Ju X T, Zhang F S. Thinking about nitrogen recovery rate (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 192—197
- [9] 侯彦林. 肥效评价的生态平衡施肥理论体系、指标体系及其实证. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1257—1266. Hou Y L. Theory system, index system of ecological balanced fertilization and demonstration for fertilizer efficiency evaluation (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1257—1266
- [10] 田昌玉,林治安,左余宝,等. 氮肥利用率计算方法评述. *土壤通报*, 2011, 42(6): 1531—1536. Tian C Y, Lin Z A, Zuo Y B, et al. Review on several concepts on fertilizer nitrogen recovery rate and its calculation (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(6): 1531—1536
- [11] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio*, 2002, 31: 132—140
- [12] Johnston A E, Poulton P R. Nitrogen in agriculture: An overview and definitions of nitrogen use efficiency. *Proceedings International Fertiliser Society*, 2009, 651
- [13] 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
- [14] Brentrup F, Palliere C. Nitrogen use efficiency as an agro-environmental indicator. *OECD Workshop: Agri-Environmental Indicators: Lessons Learned and Future Directions*, 2010, 23—26
- [15] 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(3): 450—458
- [16] Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAO database*. Available at <http://www.fao.org>. 2012
- [17] International Fertilizer Association. *IFA database*. Available at <http://www.fertilizer.org/>. 2012
- [18] Jensen L S, Schjoerring J K, van der Hoek K, et al. Benefits of nitrogen for food, fiber and industrial production//The European nitrogen assessment. Chapter 3, 2011, 32—61
- [19] Ju X T, Liu X J, Pan J R, et al. Fate of ¹⁵N-labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 52—61
- [20] Ju X T. Direct pathway of nitrate produced from surplus nitrogen inputs to the hydrosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2014, 111(4): 416
- [21] Gao B, Ju X T, Su F, et al. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study. *Science of the Total Environment*, 2014, 472: 112—124
- [22] 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
- [23] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. *Proceedings of the National Academy Sciences USA*, 2013, 110(45): 18185—18189
- [24] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. *植物营养与肥科学报*, 2013, 19(2): 259—273. Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 259—273

THE CONCEPT AND MEANINGS OF NITROGEN FERTILIZER AVAILABILITY RATIO — DISCUSSING MISUNDERSTANDING OF TRADITIONAL NITROGEN USE EFFICIENCY

Ju Xiaotang[†]

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

Abstract Since the invention and application of nitrogen (N) fertilizer, people always wanted to measure the effects of N fertilizer application by nitrogen use efficiency (NUE). The traditional NUE is the percentage of fertilizer N uptake by crop to N fertilizer rate, which didn't consider the replenishing effect of fertilizer N to soil N consumption. Due to the defects of the concept and calculation, and the poor interpretations and understands of the results, there are a lot of misunderstands in the literature and daily communication. Therefore, many improved method for calculating NUE were proposed by researchers. However, although these methods had been involved the residual effects of N fertilizer on succeeding crops, they didn't touch the core issue of the replenishing effect of fertilizer N to soil N consumption. Based on the main N flows in the soil-crop system and the relationships between the fertilizer N, soil N and crop N uptake (called three N), I proposed the concept and calculation of nitrogen fertilizer availability ratio (NFAR) in this study. The core item for NFAR is that the residual fertilizer N is regard as the replenishing to soil N consumption. I recognize that the NFAR is 50% ~ 60% and the loss rate of N fertilizer is 40% ~ 50% under current N management practices in China based on the analysis the data from the ¹⁵N tracer field trial, which reflects the high loss of fertilizer N in practices. It is possible to increase NFAR to 70% ~ 90% by improved fertilizer N and agronomic managements. The NFAR expand the idea for the effects of N fertilizer application. It would be important for demonstrating the real effects of crop N uptake and soil N fertility maintain by N fertilizer, and would reflect real loss to environments of N fertilizer application.

Key words Nitrogen fertilizer availability ratio; Traditional nitrogen use efficiency; Replenishing effect; Fertilizer nitrogen; Soil nitrogen; Crop nitrogen uptake

(责任编辑:陈德明)