

# 农田氮肥利用率计算方法研究进展\*

杨宪龙<sup>1,2</sup> 同延安<sup>1,2\*\*</sup> 路永莉<sup>1,2</sup> 马海洋<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>中国热带农业科学院南亚热带作物研究所, 广东湛江 524091)

**摘要** 氮肥利用率是农学和环境科学等领域普遍关注的焦点,合理计算氮肥利用率是实现农田氮素优化管理的重要前提和基础.近年来,鉴于我国农田氮肥利用率测定值偏低,且存在很大变幅的事实,国内学者针对传统氮肥利用率的概念和计算方法进行了深入的思考和探讨,并提出了一些改进的尝试.本文首先综述了传统氮肥利用率在概念和计算方法上存在的种种缺陷,然后较为系统地介绍了目前学者提出的计算农田氮肥利用率的几种常见的替代方法,并对今后的研究方向进行了展望.建议在正确理解氮肥用量、作物产量、氮肥利用和损失之间辩证关系的基础上,逐步建立起符合现阶段我国农业生产现状的农田氮肥利用状况评价体系.

**关键词** 氮肥利用率; 差减法; <sup>15</sup>N 标记法; 改进算法; 综合评价体系

**文章编号** 1001-9332(2015)07-2203-10 **中图分类号** S14-3 **文献标识码** A

**Research advances in the calculating method of nitrogen use efficiency (NUE) in cultivated lands.** YANG Xian-long<sup>1,2</sup>, TONG Yan-an<sup>1,2</sup>, LU Yong-li<sup>1,2</sup>, MA Hai-yang<sup>3</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Science, Zhanjiang 524091, Guangdong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2015, 26(7): 2203-2212.

**Abstract:** Nitrogen use efficiency (NUE) has received worldwide concern in the sphere of agronomic science and environmental science, and it is fundamentally important for evaluating N utilization status and optimizing N fertilization management in cultivated lands. In recent years, in consideration of low values and great variations of NUE in China's cultivated lands, some scholars have discussed on the traditional concept and calculating method of NUE, and also have proposed some substituted NUE calculating methods. In this paper, we summarized some disadvantages of both conventional concept and calculating method of NUE, i.e. the subtraction method and the <sup>15</sup>N labeling method. Furthermore, we particularly introduced several substituted NUE calculation methods and discussed research directions in the future. In summary, we strongly suggested the establishment of a comprehensive evaluation index system of N utilization in good accordance with the current agricultural production status in China, based on a correct understanding of the dialectical relationships among N application rate, crop yield, N utilization and N loss.

**Key words:** nitrogen use efficiency (NUE); subtraction method; <sup>15</sup>N labeling method; substituted calculating method; comprehensive evaluation index system.

氮肥利用率(nitrogen use efficiency, NUE)作为评价农田氮肥施用经济效益和环境效应的重要指标,一直以来是广大土壤肥料和环境科技工作者普

遍关注的焦点<sup>[1-9]</sup>.我国农田氮肥利用率的研究约始于20世纪60年代,此后一直保持逐年增加的趋势,期间积累了大量宝贵的田间试验资料<sup>[10]</sup>,为我国农田生态系统氮素优化管理奠定了坚实的基础.差减法和<sup>15</sup>N标记法作为氮肥利用率常见的两种计算方法,被广泛地应用于科研和实践中<sup>[11-16]</sup>.然而,

\* 公益性行业(农业)科研专项(201003014)和高等学校学科创新引智计划项目(B12007)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

2014-07-22 收稿,2015-05-12 接受.

大量研究表明,基于传统方法计算的我国农田氮肥利用率数值存在较大的变幅. 例如,朱兆良<sup>[1]</sup>总结了国内 782 个田间试验数据,结果表明,氮肥利用率在不同作物和不同地区的变异很大,变幅达 9%~72%. 主要粮食作物氮肥利用率的变幅为 28%~41%,平均 35%. 闫湘等<sup>[3]</sup>基于全国 20 个省 165 个田间试验资料的统计表明,我国小麦、水稻和玉米的当季氮肥利用率在 8.9%~78.0%,平均为 28.7%. 张福锁等<sup>[4]</sup>通过分析国内粮食主产区 1333 个田间试验的结果表明,目前我国主要粮食作物的氮肥利用率在不同地区间的变异也很大,变幅在 10.8%~40.5%,平均为 27.5%.

鉴于我国农田氮肥利用率数值偏低,且存在很大变幅的事实,近年来国内学者针对传统氮肥利用率的概念、内涵与计算方法进行了深入的思考与探讨,并提出了一些质疑<sup>[17-32]</sup>,认为传统的氮肥利用率概念和计算方法已不能很好地评价农田氮肥利用状况和指导现代农业生产,必须进行改进和完善,并尝试提出了一些改进的计算方法<sup>[21,24,26-29,31-32]</sup>. 现本文就此方面的研究进展做一综述.

1 传统概念的表述及缺陷

不同学者对氮肥利用率 (NUE) 的概念做了不同形式的表述,但并无内涵或本质上的差异. 如单玉华等<sup>[19]</sup>认为,氮肥利用率是指植物吸收的肥料氮量占所施肥料总氮量的百分率,反映了肥料氮被植物利用的程度. 张福锁等<sup>[4]</sup>认为,“其反映了作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率”;中国农业科学院土壤肥料研究所主编的《中国肥料》中定义为:“作物对施用氮素的回收率常称作氮肥利用率或利用系数,是指施入农田的氮肥中,其氮素被当季作物吸收到体内的比例,不包括氮肥的损失和残留在土壤中的部分,通常以氮素量作为计算标准<sup>[26]</sup>.”

不难发现,上述概念仅说明了氮肥利用率实际上是氮肥中氮素的利用率,是一个表示施入土壤中的肥料氮素 (输入) 与作物吸收并收获肥料氮素 (输出) 关系的一个参数<sup>[26-28]</sup>,且一般上是指作物的当季氮肥利用率. 然而,在实践中发现,氮肥利用率的概念体系尚存在以下不足亟待完善.

1.1 没有明确限定田间测定条件

实践中,土壤本底肥力水平和养分平衡状况等因素都会影响氮肥利用率的实际测定值. 例如,相同氮肥用量下,在较低肥力水平的土壤上往往会测得较高的氮肥利用率;反之,在较高肥力水平的土壤

上会测得较低的氮肥利用率<sup>[33-34]</sup>. 再者,氮肥利用率的测定条件应具有一定的区域代表性<sup>[26,28]</sup>,如土壤类型及肥力水平、耕作制度、作物品种、栽培方式、施肥方法和时期、灌溉方式和降雨年型 (水分状况) 等. 在某些不具普遍意义的极端条件下测定,其结果作为区域指标必然缺乏现实指导意义.

1.2 较难评价长期定位试验的氮肥利用状况

长期定位试验中,不施氮区作物产量会逐年下降,然后保持在一个较低的水平,与施氮区作物的产量表现出较大的差别,从而导致两者地上部氮素吸收量的较大差异. 在传统差减法中,若以不施氮区 (对照区) 作物的氮素吸收量作为土壤的供氮量按种植季或年度计算,则氮肥利用率的测定值往往会随着作物种植季或年限的推移表现为逐年增加的趋势. 另外,前一季或多季的不同施氮操作必然造成对照区和施氮区土壤肥力水平存在差异,以此为基础计算的氮肥利用率指导意义较差<sup>[5,35-36]</sup>.

1.3 无法高效指导现代农业生产

现代农业生产以高产、优质、高效、生态可持续和环境保护为目标,强调农田生态系统物质输入-输出的平衡性和功能的稳定性. 然而,在传统概念中,仅将氮肥利用率狭隘地表述为作物对施入土壤中肥料氮的利用系数. 但实际情况是,氮肥一旦施入土壤便和土壤中原有的氮素发生一系列复杂的反应,而作物吸收氮素时原则上对两者并不作严格区分. 另外,研究发现,部分地区农田环境养分的输入已不容忽视<sup>[37-39]</sup>. 如果只关注肥料氮素被作物吸收利用的比例,既与实际情况不符,也没有考虑到肥料氮补充土壤氮素营养、维持土壤微生物等作用<sup>[27]</sup>以及农田生产力的稳定性与可持续性. 因此,有学者指出<sup>[26,28]</sup>,只有在保证土壤氮素库容量不变的条件下,计算氮肥利用率才有意义. 在生产中土壤氮素增加了,虽然计算的氮肥利用率低,但也许是必需的 (培肥地力中);如果在生产中土壤氮素容量降低了,虽然计算的氮肥利用率高,也许是不可取的生产方式.

2 对传统计算方法的质疑

2.1 差减法

差减法计算氮肥利用率是通过在试验中设置不施氮对照,将对照作物的氮素吸收量作为土壤的供氮量,通过施氮作物和对照作物氮素吸收量的差值与施氮量的比值来计算. 其公式一般表述为:

氮肥利用率 (NUE) = [ 施氮作物吸氮量 (U) - 不

施氮作物吸氮量( $U_0$ )]/施氮量( $F$ ) $\times 100\%$  (1)

我们知道,一般情况下,施氮处理中作物吸收的氮素( $U$ )一部分源于施入的肥料( $U_f$ ),一部分源于土壤本身( $U_s$ ),其中包括大气沉降和灌溉等方式携入的氮,即式(1)分子中:

$$\text{施氮作物吸氮量}(U) = \text{作物吸收肥料氮量}(U_f) + \text{作物吸收土壤氮量}(U_s) \quad (2)$$

则上述氮肥利用率的计算公式又可表述为:

$$\text{氮肥利用率}(NUE) = (U_f + U_s - U_0) / F \times 100\% \quad (3)$$

所以,由式(3)不难看出,仅仅当  $U_s = U_0$  时,即施氮处理作物吸收的土壤氮量与不施氮处理作物吸收的氮量(全部来自于土壤)相等时,该公式才能正确反映作物对施入土壤中肥料氮的利用效率(传统概念内涵). 由此可见,  $U_s = U_0$  也是差减法计算氮肥利用率的基本假设和前提<sup>[19,24]</sup>. 然而,现在的疑惑是,这个基本假设是否成立? 也就是说,施氮处理作物吸收的土壤氮量与不施氮处理作物吸收的土壤氮量会不会总是相等呢? 如果不是,那又是怎样一种情形呢?

事实上,绝大多数试验证实<sup>[18-20,24-25,40-43]</sup>,氮肥施入土壤后,由于“正激发效应(ANI)”的存在,施氮处理的作物会较对照处理的作物吸收更多的土壤氮,即表现为  $U_s > U_0$ . 可见,在一般情况下,差减法计算氮肥利用率时给定的基本假设  $U_s = U_0$  不成立. 因此,差减法计算的氮肥利用率并不总能正确反映作物对施入土壤中肥料氮的利用率,即在大多数情况下,差值法计算值与氮肥利用率的传统概念内涵并不一致,测定值较传统概念意义的理论值偏高.

## 2.2 $^{15}\text{N}$ 标记法

$^{15}\text{N}$  标记法,又被称为  $^{15}\text{N}$  示踪法,它是用收获物中标记氮的百分超与收获物的乘积来直接计算作物吸收同位素标记肥料的量. 计算公式为:

$$\begin{aligned} \text{标记肥料氮利用率} = & \{ \text{植株地上部干质量} \times \text{植株} \\ & \text{全氮含量}(\%) \times (\text{标记区植株}^{15}\text{N} \text{ 原子百分超} - \text{植株自然丰度}^{15}\text{N} \text{ 原子百分超}) \} / [ \text{标记} \\ & \text{肥料施用量} \times \text{肥料氮含量}(\%) \times \text{肥料}^{15}\text{N} \text{ 原} \\ & \text{子百分超} ] \times 100\% \end{aligned} \quad (4)$$

长期以来,由于  $^{15}\text{N}$  同位素标记技术可以动态监测被标记氮肥施入土壤后的各种去向,因此被广泛地应用于作物对氮素的吸收、利用、分配以及氮素在土壤中的转化和损失等方面的研究中<sup>[44-48]</sup>. 利用  $^{15}\text{N}$  标记技术可以将作物吸收来自土壤的氮和来自肥料的氮严格区分开来,从而精确定量被标记肥

料氮被作物吸收利用的比例,曾一度被认为是测定氮肥利用率最准确可靠的方法. 然而,事实上,该方法作为肥料意义上的氮肥利用率的测定,其结果的可靠性同样值得商榷. 因为通常  $^{15}\text{N}$  和  $^{14}\text{N}$  作为肥料概念上的氮素,其物理、化学和生物性质没有区别,作物吸收时对两者并不作区分. 由于 ANI 作用,  $^{15}\text{N}$  交换出的土壤养分  $^{14}\text{N}$  有一部分被作物吸收利用了,归根结底它是  $^{15}\text{N}$  的作用效果,但是  $^{15}\text{N}$  示踪法测定的结果没有包括这部分肥料的效果<sup>[26-28]</sup>. 因此,  $^{15}\text{N}$  标记法的测定值仅是  $^{15}\text{N}$  的利用率,作为肥料意义上的氮肥利用率测定,其计算值较传统概念意义的理论值偏小. 宇万太等<sup>[25]</sup> 也指出,在多数  $^{15}\text{N}$  标记肥料试验中,由于生物固持过程消耗了部分  $^{15}\text{N}$  标记氮,使作物氮肥利用率的测定结果偏低. 土壤中氮的生物固持作用越强,用  $^{15}\text{N}$  法测定的氮肥利用率也将越低. 然而需要指出的是,如果作为传统狭隘概念意义上的氮肥利用率的测定,则  $^{15}\text{N}$  标记法是非常准确的<sup>[19]</sup>.

## 2.3 差减法法和 $^{15}\text{N}$ 标记法测定值比较

综上所述,既然差减法测定的氮肥利用率在大多数情况下并不能正确反映作物对施入土壤中肥料氮的利用效率,而  $^{15}\text{N}$  示踪法测定的结果也仅是  $^{15}\text{N}$  的利用效率,并不能反映肥料意义上真实的氮肥利用率,那么两者测定的结果大小关系如何呢?

现已明确,在绝大多数情况下<sup>[18-20,24-25,40-43]</sup>,氮肥施入土壤后会使得作物吸收较对照处理作物更多的土壤氮( $U_s > U_0$ ),即表现为正的 ANI 效应,此时差减法测定值大于  $^{15}\text{N}$  标记法测定值;例如,巨晓棠等<sup>[23]</sup> 指出,示踪法计算的氮肥利用率比差减法低. 显然这是由于差减法还包括了作物因施氮肥而多吸收的土壤氮. 朱兆良<sup>[5]</sup> 也认为,示踪法测得的氮肥利用率一般低于差减法,并解释为:  $^{15}\text{N}$  示踪法计算的氮肥利用率仅包括作物吸收的示踪氮肥,没有包含因施肥交换出土壤原有氮素的部分.

然而在极少数情况下<sup>[25]</sup>,氮肥施入土壤后会减少作物对土壤氮的吸收,表现为施氮处理作物较不施氮处理作物吸收较少的土壤氮( $U_s < U_0$ ),即负的 ANI 效应,此时差减法测定值小于  $^{15}\text{N}$  标记法测定值. 关于氮肥施入土壤后抑制作物吸收土壤氮的推测和试验验证,请分别参考沈善敏<sup>[24]</sup>“关于氮肥利用率的猜想”一文和宇万太等<sup>[25]</sup>“氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响—兼论作物氮肥利用率”一文.

需要指出的是,尽管差减法和  $^{15}\text{N}$  标记法均不能获得真实可靠的氮肥利用率,但在评价和比较上

述两种方法测定结果和确定其各自的适用场合时需注意:在研究肥料氮施入土壤后的一系列行为或各种去向时,应采用<sup>15</sup>N示踪法计算测定;若将氮肥利用率作为衡量施肥后植株体内营养水平提高程度的指标时,应采用差减法测定. 因为尽管差减法利用率中包含了激发效应,但激发效应本身也是由施肥引起的,所以基于差减法计算的氮肥利用率能反映施入氮肥后植株氮营养水平的实际提高程度<sup>[19,23]</sup>.

3 对传统计算方法改进的尝试

鉴于传统氮肥利用率概念和计算方法存在的诸多弊端,近年来国内学者相继做出了一些探索和尝试,提出了计算氮肥利用率的一些替代方法,现详述如下.

3.1 非线性回归法

通常又被称作导数法,即通过对植株体内累积氮量( $y$ )和施氮量( $x$ )间的数量关系  $y=f(x)$  求一阶导数,用该一阶导数值表示氮肥利用率<sup>[49-50]</sup>. 一般情况下,通常假设作物体内累积氮量( $y$ )与施氮量( $x$ )之间的关系符合一元二次曲线,即  $y=ax^2+bx+c$ , 其中, $c$  相当于对照区土壤的供氮量, $b>0, a<0$ . 则:

氮肥利用率( $NUE, \%$ ) =  $\frac{dy}{dx} = b+2ax$  (5)

作者认为,导数法是从作物吸氮量与施氮量的函数关系求导获得,求出的  $NUE$  能更好地反映报酬递减率. 然而,从数学意义上讲, $dy/dx$  表示在施氮量  $x$  的基础上增施单位氮量  $dx$  时作物体内累积氮的增加量  $dy$ ,仅表示在施氮量为  $x$  的一点上施入肥料氮使作物累积氮增加的程度,并不实际反映施入的氮肥被作物利用的比例,与传统概念上的氮肥利用率相去甚远<sup>[19]</sup>.

另外,也可求得施氮量为  $x$  时的差减法利用率:

氮肥利用率( $NUE, \%$ ) =  $\frac{y-c}{x} = \frac{c+bx+ax^2-c}{x} = \frac{b+2ax}{1}$  (6)

由于  $a<0$ ,故  $b+2ax<b+ax$ ,即式(6)计算值大于式(5).

单玉华等<sup>[19]</sup>通过试验验证发现,随着施氮量的增加,两种方法计算的利用率均下降,但差值法(式6)计算的利用率均大于零,而非线性回归法(式5)测定的氮肥利用率在施氮量过大时变成负值. 由此可见,该方法测定值并不是通常意义上的氮肥利用率,但对分析氮肥提高植株体内氮营养水平效应的变化可能具有特殊的意义.

3.2 累计(叠加)算法

氮肥利用率的计算应建立在小区土壤肥力水平均一的基础上进行. 然而,长期定位试验中,若按年度或按种植季测算作物当年或当季氮肥利用率时,前一季或多季作物的连续种植必然使得施氮区和空白区土壤肥力水平差异悬殊<sup>[5,35-36]</sup>. 因此,若以空白区作物的氮素吸收量作为土壤供氮量计算,则氮肥利用率测定值必然无法反映氮肥的实际利用情况. 另外,当季氮肥利用率也难以反映肥料氮的后效. 鉴于此,李世清等<sup>[21]</sup>、宇万太等<sup>[35]</sup>和杨宪龙等<sup>[36]</sup>采用“累计氮肥利用率”的算法,它是指一段时期内作物累计从土壤中吸收的来自肥料的氮量与累计施入土壤中的肥料氮量的比值,其表达式为:

氮肥利用率( $NUE$ ) =  $\frac{CU-CU_0}{CF} \times 100\%$  (7)

式中: $CU$  为一段时期内施氮作物的累计氮素吸收量; $CU_0$  为该段时期内不施氮作物的累计氮素吸收量; $CF$  为该时期内累计肥料氮素投入量.

刘巽浩等<sup>[17]</sup>认为,在同一田块上进行多年的累计氮肥利用率分析可以避免单纯分析当季或当年氮肥利用率所带来的片面性,有助于减少和相互弥补因气候和其他因素对肥效的影响,可以消除年际间的差异. 另外,多年的累计氮肥利用率包括了氮肥的后效在内,时间越长,肥料利用率越稳定,更能准确说明肥料利用的真实情况,在长期定位试验中应用较广泛<sup>[21,35-36,51]</sup>.

3.3 比值法

沈善敏<sup>[24]</sup>2005年在“关于氮肥利用率的猜想”一文中指出,<sup>15</sup>N同位素标记法测定氮肥利用率会受到土壤-肥料间交互作用的影响,而差值法则既受土壤-肥料间交互作用的影响,又可能受施肥直接抑制作物吸收土壤养分的影响. 因此,作者猜想这两种测算方法都不可能获得可靠的结果. 为了规避上述过程的干扰,在基于等效养分假设的基础上(土壤氮和肥料氮对作物而言是同等有效的,作物吸收土壤氮和肥料氮的比率等同于土壤氮和肥料氮这两种氮源供给力的比率),作者首次提出适用于通常肥料试验肥料利用率估算的比值法,公式如下:

氮肥利用率( $NUE$ ) =  $\frac{U}{U_0+F} \times 100\%$  (8)

式中: $U$  为施氮作物的氮素吸收量; $U_0$  为不施氮作物的氮素吸收量; $F$  为肥料氮素投入量.

实践证明,基于比值法计算的氮肥利用率数值较常规差值法计算值偏大,在一定程度上校正了计

算结果偏低的现象<sup>[24-25]</sup>,然而在施氮量较低的情况下,计算结果会很高,有待于进一步验证.同时,该方法的提出尚缺乏理论依据支撑.

3.4 系数矫正法

该方法由田昌玉等<sup>[27]</sup>在“解释与改进差减法氮肥利用率的计算方法”一文中提出.作者认为土壤中养分的有效性与其存在的形态、空间位置和作物生育进程(时间)有关,人为施氮肥量不能与土壤中存在的无机氮量、作物生育期矿化氮量及大气沉降氮量等简单等同.从严格意义上讲,各种途径来源的氮素对作物并非是同等有效的,但是可以通过假定等效氮肥量(AN)的概念来表述土壤氮素的总体有效性.即假定作物在不施氮肥条件下吸收的氮素完全依靠施入的氮肥来提供,那么所需要施入土壤的氮肥数量就是 AN.

当施氮量较小时,对于施氮区和无氮区而言,作物地上部吸收的氮素与土壤中有效氮营养含量的比值近似相等,公式为:

$$\frac{U}{F+AN} = \frac{U_0}{AN} \tag{9}$$

将式(9)通过比例式变换、化简可得:

$$\frac{U-U_0}{F} = \frac{U_0}{AN} = NUE \tag{10}$$

可见,上述计算氮肥利用率的公式(式 10)只有在施氮量比较小的情况下才成立.当施氮肥量较大时,式(9)不成立,则用式(10)计算氮肥利用率就不合适,需在方程式中引入一个与施氮量有关的系数  $k$ ,则公式为:

$$\text{氮肥利用率}(NUE) = \frac{U-kU_0}{F} \times 100\% \tag{11}$$

式(9)、(10)和(11)中, $U$ 为施氮作物的氮素吸收量; $U_0$ 为不施氮作物的氮素吸收量; $k$ 为小于 1 的系数; $F$ 为肥料氮素投入量; $AN$ 为等效氮肥量.

通过验证,基于该方法计算的氮肥利用率比通常方法的计算值略高,计算的氮肥利用率数值也较稳定<sup>[27]</sup>,有利于正确评价我国氮肥利用率及氮肥污染问题.然而公式中系数  $k$  需通过氮肥用量试验来确定,操作较为繁琐,实践中应用较少.

3.5 土壤氮素平衡法

田昌玉等<sup>[28]</sup>在“氮肥利用率计算方法评述”一文中提出,只有保持土壤生态系统总氮素库在作物生长前后相对稳定的条件下,氮肥氮素的输入与其在作物收获物中的输出关系(氮肥利用率),才能正确表示土壤生态系统对肥料氮素输入在作物收获物

中的效果,才能维持一个相对稳定的土壤生产力.

在长期定位试验中,当施氮区和对照区作物收获的氮量趋于一个相对稳定值,同时土壤全氮也维持一个相对平衡量时,可以认为土壤氮素库在作物生产前后没有变化,则氮肥利用率的计算可以表述为:

$$\text{氮肥利用率}(NUE) = \frac{U'-U'_0}{F} \times 100\% \tag{12}$$

( $U'_0 \approx U_0$ )

式中: $U'$ 为施氮区作物收获氮的平衡量; $U'_0$ 为施氮区作物收获氮平衡量中除施氮肥作用之外的收获氮量; $U_0$ 为对照区作物氮素吸收的平衡量.需注意,尽管式(12)与常规的氮肥利用率计算公式在形式上完全一样,但是其含义却不相同.

然而,一般不容易达到土壤氮素的周年稳定,通常采用土壤氮素平衡法计算氮肥利用率,计算氮肥利用率时假设所有的氮素输入都等效,土壤氮素库的增减可以用肥料氮素等量调节.计算公式如下:

$$\text{氮肥利用率}(NUE) = \frac{U}{F+AN+RN+SN} \times 100\% \tag{13}$$

式中: $U$ 为施氮作物的氮素吸收量; $F$ 为肥料氮素投入量; $AN$ 为大气干湿沉降氮量; $RN$ 为灌水携入氮量; $SN$ 为 1 m 土体土壤氮素库容的降低量.

笔者认为,作者首次在氮肥利用率的计算公式中将灌溉水和干、湿沉降等环境携入氮以及作物对土壤中原有氮素的消耗考虑进来,拓展了传统氮肥利用率狭隘的概念体系,为农田氮肥利用状况的正确评估奠定了基础.

3.6 养分真实利用率算法

该方法由王火焰等<sup>[31]</sup>在“肥料养分真实利用率计算和施肥策略”一文中提出.该文基于肥料养分和土壤养分转化的复杂性和不完全区分的实际情况,首先提出了养分真实利用率的算法,然后论证了该算法也是肥料养分真实利用率的算法.根据作者的定义,氮肥养分真实利用率是指作物吸收的肥料氮量占消耗的肥料氮量的比例,残留在耕层土壤中的肥料氮不计入消耗内,因此,氮肥真实利用率公式表述为:

$$\text{氮肥利用率}(NUE) = \frac{U_f}{F-S_f} \times 100\% \tag{14}$$

式中: $U_f$ 为作物吸收的肥料氮量; $F$ 为肥料氮投入量; $S_f$ 为耕层土壤中残留的肥料氮量.从理论上讲,该方法可准确地测算肥料氮的当季真实利用率,但

定量  $U_i$  和  $S_i$  需要同位素示踪技术, 计算结果的准确性取决于残留肥料氮量测定的准确性。

若不用同位素示踪技术, 假设肥料氮与土壤氮和其他各种外源氮(沉降氮、灌溉氮和生物固氮)的真实利用率相等(各种途径输入的氮素对作物是同等有效的), 则各种来源氮真实利用率的平均值与氮肥真实利用率数值相等, 其算法与土壤氮素平衡法(式 13)基本相同, 公式如下:

氮肥利用率(NUE) =  $\frac{U}{F + ON + SN} \times 100\%$  (15)

式中:  $U$  为施氮作物的氮素吸收量;  $F$  为肥料氮素投入量;  $ON$  为其他途径来源氮量;  $SN$  为耕层土壤氮素库容的降低量。在其他来源氮量忽略不计时, 式(15)可简化为:

氮肥利用率(NUE) =  $\frac{U}{F + SN} \times 100\%$  (16)

在长期稳定平衡的土壤-作物体系中, 土壤氮素库容如果变化不大,  $SN$  也可以忽略不计, 则式(16)可进一步简化为:

氮肥利用率(NUE) =  $\frac{U}{F} \times 100\%$  (17)

式中:  $U$  为作物的氮素吸收量;  $F$  为肥料氮素投入量;  $SN$  为土壤氮素养分减少量。

作者认为, 利用新的计算公式后, 我国肥料养分的真实利用率无论是当季还是长期利用率都远高于当前文献报道的数据, 获得的肥料养分利用率直接与肥料养分的损失率相对应, 将有利于揭示肥料对粮食生产的实际贡献力和损失率, 并推动土壤肥力的培育目标及施肥策略与养分损失率相对应, 促进施肥技术向减少肥料损失的方向发展<sup>[31]</sup>。

3.7 氮肥有效率计算法

该方法由巨晓棠<sup>[32]</sup>在“氮肥有效率的概念和意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区”一文中提出。作者认为, 传统概念意义上的氮肥利用率只关注施用肥料氮被当季作物吸收的部分, 而且是一个相对概念, 并未将施氮量、作物产量和土壤氮素变化情况联系起来, 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。另外, 国内外研究者尝试的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。鉴于此, 作者根据土壤-作物体系氮素主要流动通量, 及肥料氮-土壤氮-作物吸收氮“三氮”之间的关系, 提出氮肥有效率的观念和算法。

氮肥有效率是指氮肥施入土壤后被作物吸收的量和在主要根区土壤中残留量之和占施入总量的百分数, 也就是从 100% 中扣除氮肥使用过程和施肥后的损失率。其中, 土壤中的残留量应该是指残留的肥料氮。另外, 考虑的根区深度应该根据主要根系分布层决定。根据上述概念表述, 氮肥有效率只能用<sup>15</sup>N 示踪法测定, 计算公式可以表示为:

氮肥有效率( $AR_N$ ) =  $\frac{U_i + R_i}{F} \times 100\%$  (18)

式中:  $U_i$  为作物吸收的肥料氮量;  $F$  为肥料氮投入量;  $R_i$  为主要根区土壤中残留的肥料氮量。作者建议, 小麦或玉米体系考虑 0~60 cm 土层, 水田稻作体系考虑 0~20 cm 土层, 旱作浅根作物如蔬菜等考虑 0~30 cm 土层。

另外, 氮肥有效率的计算也可通过如下公式表述:

氮肥有效率( $AR_N, \%$ ) =  $100\% - \frac{L}{F}$  (19)

式中:  $L$  为肥料氮损失量;  $F$  为肥料氮投入量。其中, 肥料氮的损失量( $L$ )可通过下式计算获得:

肥料氮损失量( $L$ ) =  $F - U_i - R_i$  (20)

式中:  $F$  为肥料氮投入量;  $U_i$  为作物吸收的肥料氮量;  $R_i$  为主要根区土壤中残留的肥料氮量。

作者通过分析国内<sup>15</sup>N 失踪试验资料指出, 采用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<sup>[32]</sup>。同时认为, 氮肥有效率拓展了氮肥效应的理念, 对全面客观反映氮肥施用效果、确定田块氮肥用量和预测区域或国家尺度氮肥需求方面将会发挥重要作用。

4 研究展望

4.1 正确理解施氮量、作物产量、氮肥利用和损失之间的辩证关系, 在保证作物高产的前提下尽量提高氮肥利用率

氮肥利用率作为评价农田氮肥施用效率的指标, 在农学领域应用十分广泛。氮肥利用率的合理计算对于客观评价氮肥施用效果、优化农田氮素管理、确定区域或国家尺度农田氮肥用量等方面意义重大<sup>[32]</sup>。然而, 需要引起注意的是, 在开展相关研究时切忌在思想上受到束缚或产生误导, 不要为了计算氮肥利用率而盲目地计算氮肥利用率。事实上, 我们开展研究的最终目标是通过客观合理地计算氮肥利用率来优化我国农田生态系统氮素管理措施, 从而更好地服务于现代农业生产。计算氮肥利用率

只是手段,不是目的. 另外,计算的氮肥利用率并不是越高越好,因为大量实践表明,对于某一给定的农业生产体系而言,较高的氮肥利用率并不一定意味着较高的产量,较低的氮肥利用率也并不一定意味着较高的氮肥损失. 作物产量与氮肥用量的关系一般符合抛物线、线性+平台或二次式+平台等模型<sup>[52]</sup>,最高产量施氮量往往高于最佳经济效益施氮量,和环境友好施氮量. 基于报酬递减律的数学推导证实,作物产量与氮肥利用率之间的关系一般遵从抛物线变化模式<sup>[30]</sup>,即作物产量在一定范围内随氮肥利用率的增加而增加,超过临界值后,作物产量随氮肥利用率的继续增加而降低. 另外,实践中需正确看待氮肥的损失问题,氮肥损失率的高低除了与利用率有关外,还需考虑氮肥在土壤中的残留问题<sup>[23]</sup>,不能简单认为未被作物利用的氮肥都损失掉了. 氮肥施入土壤、经过作物吸收后,必然有一部分在土壤剖面中发生累积,如果能对这部分氮素进行科学地管理和利用,其损失问题并不是十分严重. 从某种意义上讲,适量的矿质氮累积对于培肥地力、维持稳定的土壤生产力也是必需的. 在当今我国人口增加、耕地锐减,粮食安全问题面临威胁的严峻现实下,我们不能效仿西方一些人少地多的国家,通过降低氮肥用量牺牲一部分产量来换取较高的氮肥利用率和较好的环境效应. 在可预见的未来,如果在植物营养和肥料领域科学技术上没有突破性的进步,我国农业生产必须继续坚持依赖大量化肥投入的集约化生产模式<sup>[7]</sup>. 我们只能在保证较高产量水平的前提下通过各种技术手段尽量提高氮肥利用率,减轻氮肥损失对环境的压力,而不应一味盲目追求较高的氮肥利用率而忽视产量效应<sup>[18,23]</sup>.

#### 4.2 逐步建立符合现阶段我国农业生产现状的农田氮肥利用状况评价体系

在国际农学领域,评价农田氮肥利用状况的指标除了氮肥利用率( RE )外还有很多,如氮肥偏生产力( partial factor productivity of applied N, PFP )、氮肥农学效率( agronomic efficiency, AE )和氮肥生理利用率( physiological efficiency, PE )等. 以上 4 个参数是从不同角度描述作物对肥料养分的利用效率<sup>[4,53-54]</sup>. 一般可以概括为两类:吸收效率和生产效率. 前者如 RE,反映了作物对施入土壤中肥料氮的回收效率,后者则注意到了氮肥的物质生产效率(如 PFP 和 AE)以及氮肥吸收后向经济器官(如籽粒)的转移和分配情况(如 PE)<sup>[40]</sup>. 由于过去我国化肥资源紧缺,节约化肥非常重要,同时我国土壤肥

力水平普遍低下,土壤和环境来源的养分少,化肥的增产效应很显著,RE 既能很好地反映作物对化肥养分的吸收状况,且计算简单,容易获得,因此,我国农学界多用 RE 评价氮肥的利用状况. 然而,当前我国正处于社会、经济和技术的快速转型期,农田生产经营方式正在向以高投入、高产出和高资源消耗为特征的集约化模式快速发展,土壤和环境养分供应量逐渐增大、化肥增产效益不断下降,如果单纯应用 RE 进行评价就值得商榷<sup>[4]</sup>. 另外,一个简单的氮肥利用率很难反映不同农业生产水平下作物对氮肥的利用状况,因为氮肥利用率受土壤-气候条件、施氮量、施氮方法和时期、其他营养元素的供应状况、光热水等因素的深刻影响,对于某一生产体系的氮肥利用状况应用多种指标来衡量,其中包括产量水平、氮肥利用、氮肥残留和氮肥损失<sup>[23]</sup>. 现阶段,迫于未来人口增长对粮食的刚性需求,我国农业必须寻求一条以提高作物单产为核心同时兼顾环境效应的可持续发展之路. 为了更高效地指导农业生产,必须建立一个具有正确价值导向、符合现阶段我国农业生产现状的氮肥利用状况评价体系. 在未来研究中,以下两方面尚需加强:

1) 摸清我国典型农区农田氮素损失的主要途径、数量和比例,建立存在区域化差异的农田氮肥施用环境效应评价指标. 由于我国疆域辽阔,南北跨度大,加之复杂多样的地形地貌特征和气候类型,导致水、热、光、温等资源在南北地区分布极不平衡,从而使得我国农业生产存在不同的模式或体系. 研究表明,在不同农业生产体系中,农田氮肥的利用状况和主要损失途径也往往存在差异. 例如,在我国北方干旱、半干旱农业区,呈弱碱性的石灰性土壤分布较为广泛,使得该地区农田氮素损失主要以氨挥发为主;然而,在南方稻-麦轮作区或多季稻(两季或三季)种植区,由于土壤季节性滞水和嫌气的微环境,使得该地区农田氮素损失多以硝化-反硝化气态损失和淋溶损失为主. 因此,在我国南北不同农业体系中进行农田氮肥施用环境效应评价时,应因地制宜、选用该区域最具代表性的环境表征因子建立评价指标,不能一概而论.

2) 确定我国主要农区粮食生产的主要限制因子,根据不同农区粮食增产潜力的差异,建立存在产量效应和环境效应权重差异的农田氮肥利用评价方法. 例如,在我国部分集约化农区,农田氮肥用量和灌溉水量已居高不下,远远超过了作物的吸收和利用能力. 然而,实践中粮食产量却往往停滞不前,出

现“增氮而不增产”的尴尬局面,由此说明氮肥施用量已不再成为作物增产的限制因素,如果在施肥技术和作物营养调控没有实质性突破的前提下,大幅增产的可能性已不大.同时,在这种高量的氮肥投入下,农田氮素的损失问题也十分严重,不容忽视.因此,在该地区进行农田氮肥利用状况评价时,在保证作物产量的前提下,评价指标应多向环境因子倾斜,如氨挥发损失、硝化-反硝化气态损失和淋溶损失等.然而,由于经济和技术等方面的制约,我国农田氮肥投入在不同地区和不同作物上分配极不均衡,导致部分地区农田氮素投入整体上偏少,氮素供应不足依然是限制该地区粮食增产的主要因子,同时,较少的氮肥施用引发的环境污染问题亦不严重.因此,在评价该地区农田氮肥利用状况时,评价指标应多考虑产量效应.

## 参考文献

- [1] Zhu Z-L (朱兆良). Fertilizer fate and N management in agro-ecosystem// Zhu Z-L (朱兆良), Wen Q-X (文启孝), eds. Nitrogen in Soil of China. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 228–245 (in Chinese)
- [2] Zhu ZL, Chen DL. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**: 117–127
- [3] Yan X (闫湘), Jin J-Y (金继运), He P (何萍), et al. Recent advances in technology of increasing fertilizer use efficiency. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(2): 450–459 (in Chinese)
- [4] Zhang F-S (张福锁), Wang J-Q (王激清), Zhang W-F (张卫峰), et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 915–923 (in Chinese)
- [5] Zhu Z-L (朱兆良). Research on soil nitrogen in China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2008, **45**(5): 778–783 (in Chinese)
- [6] Li ST, He P, Jin JY. Nitrogen use efficiency in grain production and the estimated nitrogen input/output balance in China agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2013, **93**: 1191–1197
- [7] Zhu Z-L (朱兆良), Jin J-Y (金继运). Fertilizer use and food security in China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(2): 259–273 (in Chinese)
- [8] Andrews M, Lea PJ. Our nitrogen ‘footprint’: The need for increased crop nitrogen use efficiency. *Annals of Applied Biology*, 2013, **163**: 165–169
- [9] Cai Z-C (蔡祖聪), Yan X-Y (颜晓元), Zhu Z-L (朱兆良). A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2014, **20**(1): 1–6 (in Chinese)
- [10] Zhu Z-L (朱兆良). Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil and Environmental Sciences* (土壤与环境), 2000, **9**(1): 1–6 (in Chinese)
- [11] Wang YC, Wang EL, Wang DL, et al. Crop productivity and nutrient use efficiency as affected by long-term fertilization in North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, **86**: 105–119
- [12] Wang XB, Cai D, Hoogmoed WB, et al. Regional distribution of nitrogen fertilizer use and N-saving potential for improvement of food production and nitrogen use efficiency in China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, **91**: 2013–2023
- [13] 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**: 18185–18189
- [14] Duan YH, Xu MG, Gao SD, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications. *Field Crops Research*, 2014, **157**: 47–56
- [15] Asplund L, Bergkvist G, Weih M. Proof of concept: Nitrogen use efficiency of contrasting spring wheat varieties grown in greenhouse and field. *Plant and Soil*, 2014, **374**: 829–842
- [16] Feng Y (冯洋), Chen H-F (陈海飞), Hu X-M (胡孝明), et al. Optimal nitrogen application rates on rice grain yield and nitrogen use efficiency in high, middle and low-yield paddy fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2014, **20**(1): 7–16 (in Chinese)
- [17] Liu X-H (刘巽浩), Chen F (陈阜). Some questions on the traditional concept of nitrogen use efficiency. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 1990, **11**(4): 28–34 (in Chinese)
- [18] Chen L-S (陈伦寿). A correct view of fertilizer utilization rate. *Phosphate & Compound Fertilizer* (磷肥与复肥), 1996, **11**(4): 4–7 (in Chinese)
- [19] Shan Y-H (单玉华), Feng K (封克). Discussion on problems in fertilizer N recovery estimation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 1998, **4**(4): 425–428 (in Chinese)
- [20] Harmsen K, Moraghan JT. A comparison of the isotope recovery and difference methods for determining nitrogen fertilizer efficiency. *Plant and Soil*, 1988, **105**: 55–67
- [21] Li S-Q (李世清), Li S-X (李生秀). Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dryland agroecosystem. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2000, **33**(1): 76–81 (in Chinese)
- [22] Chen T-B (陈同斌), Zeng X-B (曾希柏), Hu Q-X (胡清秀). Utilization efficiency of chemical fertilizers among different counties of China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2002, **57**(5): 531–538 (in Chinese)
- [23] Ju X-T (巨晓棠), Zhang F-S (张福锁). Thinking

- about nitrogen recovery rate. *Ecology and Environment* (生态环境), 2003, **12**(2): 192-197 (in Chinese)
- [24] Shen S-M (沈善敏). A conjecture on the fertilizer recovery measurement by field experiment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(5): 781-782 (in Chinese)
- [25] Yu W-T (宇万太), Zhou H (周桦), Ma Q (马强), *et al.* Effect of N fertilizer on uptake of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen recovery rate. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(1): 90-96 (in Chinese)
- [26] Tian C-Y (田昌玉), Zuo Y-B (左余宝), Lin Z-A (林治安), *et al.* Review the concept of fertilizer nitrogen recovery rate and determination by  $^{15}\text{N}$  tracer. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(17): 210-213 (in Chinese)
- [27] Tian C-Y (田昌玉), Zuo Y-B (左余宝), Zhao B-Q (赵秉强), *et al.* Interpreting and upswing of the subtraction calculating method of apparent recovery efficiency of applied nitrogen ( $\text{RE}_\text{N}$ ). *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2010, **41**(5): 1257-1261 (in Chinese)
- [28] Tian C-Y (田昌玉), Lin Z-A (林治安), Zuo Y-B (左余宝), *et al.* Review on several concepts on fertilizer nitrogen recovery rate and its calculation. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2011, **42**(6): 1530-1536 (in Chinese)
- [29] Hou Y-L (侯彦林). Application of index system of ecological balanced fertilization for fertilizer efficiency evaluation. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2011, **30**(8): 1477-1481 (in Chinese)
- [30] Liu X-H (刘小虎), Xing Y (邢岩), Zhao B (赵斌), *et al.* Study on relation between fertilizer dosage and its recovery efficiency and their application. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2012, **43**(1): 131-135 (in Chinese)
- [31] Wang H-Y (王火焰), Zhou J-M (周健明). Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(2): 10-19 (in Chinese)
- [32] Ju X-T (巨晓棠). The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio: Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2014, **51**(5): 1-13 (in Chinese)
- [33] Liu X-J (刘学军), Zhao Z-J (赵紫娟), Ju X-T (巨晓棠), *et al.* Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(7): 1122-1128 (in Chinese)
- [34] Liu L-J (刘立军), Xu W (徐伟), Tang C (唐成), *et al.* Effect of indigenous nitrogen supply of soil on the grain yield and fertilizer N use efficiency in rice. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2005, **19**(4): 343-349 (in Chinese)
- [35] Yu W-T (宇万太), Jiang Z-S (姜子绍), Zhao X (赵鑫), *et al.* Effect of different fertilization system on fertilizer utilization efficiency. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2009, **40**(1): 122-126 (in Chinese)
- [36] Yang X-L (杨宪龙), Lu Y-L (路永莉), Tong Y-A (同延安), *et al.* Effects of long-term N application and straw returning on N budget under wheat-maize rotation system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2013, **19**(1): 65-73 (in Chinese)
- [37] Zhang Y, Liu X-J, Fangmeier A, *et al.* Nitrogen inputs and isotopes in precipitation in the North China Plain. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**: 1436-1448
- [38] Liu X-J (刘学军), Zhang F-S (张福锁). Nutrient from environment and its effect in nutrient resources management of ecosystems: A case study on atmospheric nitrogen deposition. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2009, **26**(3): 306-311 (in Chinese)
- [39] Liang T (梁婷), Tong Y-A (同延安), Lin W (林文), *et al.* Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(3): 1-8 (in Chinese)
- [40] Sun C-F (孙传范), Cao W-X (曹卫星), Dai T-B (戴廷波). Research advances on nitrogen fertilizer use efficiency in soil-plant systems. *Soils* (土壤), 2001, **33**(2): 64-69 (in Chinese)
- [41] Mohammad M.J. Utilization of applied fertilizer nitrogen and irrigation water by drip-fertigated squash as determined by nuclear and traditional techniques. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **68**: 1-11
- [42] Wang Q-L (王巧兰), Wu L-S (吴礼树), Zhao Z-Q (赵竹青). Advance and application of  $^{15}\text{N}$  tracer method on research of plant nitrogen nutrition. *Journal of Huazhong Agricultural University* (华中农业大学学报), 2007, **26**(1): 127-132 (in Chinese)
- [43] Tian Y-H (田玉华), Yin B (尹斌), He F-Y (贺发云), *et al.* Recovery by crop and loss of nitrogen fertilizer applied in rice season in Taihu Lake region. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2009, **15**(1): 55-61 (in Chinese)
- [44] Ju X-T (巨晓棠), Pan J-R (潘家荣), Liu X-J (刘学军), *et al.* Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat/summer maize rotation system in Beijing suburban. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2003, **9**(3): 264-270 (in Chinese)
- [45] Sawatsky N, Soper R.J. A quantitative measurement of the nitrogen loss from the root system of field peas (*Pisum avense* L.) grown in the soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23**: 255-259
- [46] Gu H-H (谷海红), Liu H-B (刘宏斌), Wang S-H (王树会), *et al.* Study on accumulation and distribution of different sources of nitrogen in flue-cured tobacco plant by  $^{15}\text{N}$  tracer. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2008, **41**(9): 2693-2702 (in Chinese)
- [47] Jia S.L., Wang X.B., Yang Y.M., *et al.* Fate of labeled urea- $^{15}\text{N}$  as basal and topdressing applications in an irrigated wheat-maize rotation system in North China Plain. I. Winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*,

2011, **90**: 331–346

[48] Yang YM, Wang XB, Dai K, *et al.* Fate of labeled urea-<sup>15</sup>N as basal and topdressing applications in an irrigated wheat-maize rotation system in North China Plain. II. Summer maize. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **90**: 379–389

[49] Dang P-L (党萍莉), Xiao J-Z (肖俊璋), Ma Y-H (马耀华). The effect of N and P in matching with organic manure on wheat nitrogen recovery. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science)* (西北农林科技大学学报:自然科学版), 1993, **21**(S1): 103–107 (in Chinese)

[50] Song H-X (宋海星), Li S-X (李生秀). Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2003, **36**(1): 71–76 (in Chinese)

[51] Huang S-M (黄绍敏), Bao D-J (宝德俊), Huangpu X-R (皇甫湘荣), *et al.* Long-term effect of fertilization on fertilizer use efficiency of wheat in soil. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2006, **26**(2): 121–

126 (in Chinese)

[52] Yang X-L (杨宪龙), Lu Y-L (路永莉), Tong Y-A (同延安), *et al.* Optimum-N application rate to maximize yield and protect the environment in a wheat-maize rotation system on the Guanzhong Plain, Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2014, **34**(21): 6115–6123 (in Chinese)

[53] Novoa R, Loomis RS. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil*, 1981, **58**: 177–204

[54] Zhao H-W (赵宏伟), Sha H-J (沙汉景). Recent research of fertilizer nitrogen use efficiency in paddy field of China. *Journal of Northeast Agricultural University* (东北农业大学学报), 2014, **45**(2): 116–122 (in Chinese)

---

**作者简介** 杨宪龙, 男, 1988 年生, 博士研究生. 主要从事农田氮素优化管理和科学施肥研究. E-mail: yangxian-long1988@126.com

**责任编辑** 张凤丽

---