

DOI: 10.11766/trxb202006220322

巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 1-13.

JU Xiaotang, ZHANG Chong. The Principles and Indicators of Rational N Fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (1): 1-13.

论合理施氮的原则和指标*

巨晓棠^{1,2}, 张 翀¹

(1. 海南大学热带作物学院, 海口 570228; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘 要: 施用氮肥的主要目的是获得较高目标产量、相应品质 and 经济效益以及维持或提高土壤肥力。针对我国近年来过度强调施肥的环境影响, 而放松施肥的生产目标和土壤培肥, 导致无原则的“减氮”可能影响作物生产的趋势, 本文定义了合理施氮的原则, 即在特定的气候-土壤-作物体系, 在一定的经营管理措施下(轮作与耕作、品种、灌溉等), 能够实现可获得的目标产量、相应品质 and 经济效益并维持或提高土壤肥力, 将环境效应降低至可接受的范围内的合理施氮量区间; 论述了确定合理施氮量的方法和评判指标; 论证了在当前农户常规氮素管理基础上“减氮”的实质, 是要通过施肥技术的改进减少氮素损失, 而不是简单地降低氮肥施用量; 强调了合理施氮需要综合考虑“4R”施肥理念或技术、与有机肥和秸秆还田的结合、与磷钾肥和中微量元素的平衡施肥以及与其他农艺措施的配合与协调等。最后, 建议将全国划分为不同的气候-土壤区或亚区, 在这些区域的代表作物上, 同时开展产量、品质、效益以及氮挥发、硝酸盐淋洗、氧化亚氮排放和土壤肥力的长期试验; 研究肥料氮-土壤氮-作物吸氮之间的关系, 应用氮素输入、输出、盈余、氮素利用率、损失和土壤有机碳变化等指标, 综合评判生产目标、环境效应和土壤肥力状况, 切忌顾此失彼; 需要根据各区域的气候-土壤和生产条件, 研究切实可行的施肥技术, 降低氮素损失, 使施用的氮肥能够被作物充分吸收利用, 形成同类地区能够机械操作的规范化种植模式与合理施肥措施。

关键词: 合理施氮; 目标产量; 环境效应; 土壤肥力; 氮素损失; 施肥技术

中图分类号: S143 文献标志码: A

The Principles and Indicators of Rational N Fertilization

JU Xiaotang^{1,2}, ZHANG Chong¹

(1. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The main objectives of nitrogen (N) fertilization to cropland are to obtain high target yield, accepted product quality and economic benefits, and maintain or improve soil fertility. In recent years, overemphasizing the environmental effects of N fertilization by unreasonable “reducing N” are becoming fashion while paying less attention to the production target and soil fertility, which might lead to reduce crop yield or product quality, or soil fertility. Here, we define the principles of rational N fertilization, i.e. in a given climate-soil-crop system with given relatively stable agronomic managements (such as crop rotation,

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0200105, 2016YFD0800102)和国家自然科学基金项目(41830751, 31861133018)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFD0200105 and 2016YFD0800102) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41830751 and 31861133018)

作者简介: 巨晓棠(1965—), 男, 陕西白水人, 教授, 博士生导师, 主要从事农田生态系统氮素循环与温室气体研究。E-mail: juxt@cau.edu.cn

收稿日期: 2020-06-22; 收到修改稿日期: 2020-08-04; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-08-25

tillage, cultivar and irrigation etc.), N rate should be in an rational range which could achieve high target yield, accepted product quality and economic benefits, maintain or improve soil fertility, and control N losses (thus environmental effects) in an acceptable level. We discussed the methods for determining the rational N rate and the indicators for evaluating N management. We emphasize that the essential of reducing current farmers' conventional unreasonable high N rates is to minimize N losses via improving N fertilization techniques rather than simply cutting the N application rate. We also emphasize that the rational N fertilization should implement the "4R" nutrient stewardship or techniques together with the recycling of manure and straw to cropland, and balancing other nutrients include phosphorus, potassium, middle and micronutrients, and integrating to other agronomic managements. We suggest to do long-term field experiments in different climate-soil zones to study crop yield, product quality, economic benefits, ammonia volatilization, nitrate leaching, nitrous oxide emission and soil fertility simultaneously, and to explore the relationship among fertilizer N, soil N and crop N in these climate-soil-crop systems, and further to evaluate the production target, environmental effects and soil fertility comprehensively. By using the indicators of N input, N output, N surplus, N use efficiency, N losses and change of soil organic carbon (SOC). We need form rational specific fertilization techniques by machinery to minimize N losses, thus to maximize crop N uptake according to the regional climate-soil crop systems and production conditions.

Key words: Rational N fertilization; Target yield; Environmental effects; Soil fertility; N losses; Fertilization techniques

我国农业每年大约使用 3 000 万 t (纯氮) 氮肥, 约占全球农业氮肥使用量的 30%^[1]。但我国也用大约 9% 的世界耕地, 生产了 25% 的世界粮食总产, 并为 20% 的全球人口提供了食物, 基本满足了 14 亿人口的农产品需求^[1]。当前, 我国是谷物、棉花、水果、蔬菜、肉、家禽、蛋和渔业产品的最大生产国^[2], 其中, 氮肥对粮食生产的贡献占 45% 左右^[3]。近二十年来, 普遍认为我国化肥使用量过高、增产效果下降、环境污染加重^[4-7]。近几年来, “减肥” 特别是“减氮” 的行动在我国广泛开展, 如政府制定了 2020 年化肥“零增长” 计划等^[8]。但需要清楚, 过量施氮在什么区域存在? 在什么作物上存在? 发生的根本原因是什么? 同时也要认识到, 这些“减氮” 行动, 是在什么基础上减? 减多少? “减氮” 的原则和指标是什么? 如果不弄清楚上述问题, 矫枉过正, 影响了作物生产和土壤肥力, 对满足农产品供应是十分不利的。

1 施用氮肥的目的

施用氮肥的主要目的是获得较高的目标产量、相应品质和经济效益并维持或提高土壤肥力, 所引起的环境污染是附带的。减施肥料(减肥)不能顾此失彼, 需要综合考虑生产目标(产量、品质和效益)、环境影响及土壤肥力(可用土壤有机碳指示)

的协调(图 1)。如果实现合理施肥, 环境效应是能够控制在可接受的范围的^[9-12]。虽然我国氮肥总使用量较高, 但集约化生产水平也高, 产量也处于相对偏高的水平^[9, 13]。在农户实际田块, 施氮量千差万别。依据农户调查数据, 与田间试验合理施氮量范围比较, 过量施氮田块占总调查田块大约 33%^[10]。依据单位播种面积平均施氮量, 与作物合理施氮量对比, 全国过量施氮面积大约占播种面积 20%、合理面积占 70%、不足面积占 10%^[10]。总体而言, 过量施氮主要发生在蔬菜和果树等经济作物上^[10, 14], 而且还表现在氮、磷、钾与中微量元素不平衡施肥上。如果不根据各个地区和作物的实际情况, 片面或一刀切“减肥”, 必然会降低农作物产量、品质及效益, 影响可持续集约化作物生产目标。

近几年来, 我国过度强调了施肥的环境效应, 而放松了施肥的生产目标和土壤培肥的本源需求, 使这种无原则的“减氮” 现象相当普遍。笔者看到, 在各种会议和文献上, 许多资料利用短期田间试验(1~3 季或 1~3 年)的结果得出: 在农户常规(习惯)施氮的基础上, “减氮” 30% 不减产; 有的“减氮” 50% 不减产; 有的甚至“减氮” 80% 不减产; 最不可思议的是, 不施氮也不减产^[15-16]。值得注意的是, 这些试验存在下列问题: (1) 是在什么样的土壤肥力基础上做试验? (2) 将农户常规施氮降低到什么程度? “减氮” 的原则和标准是什么? (3) 是否在

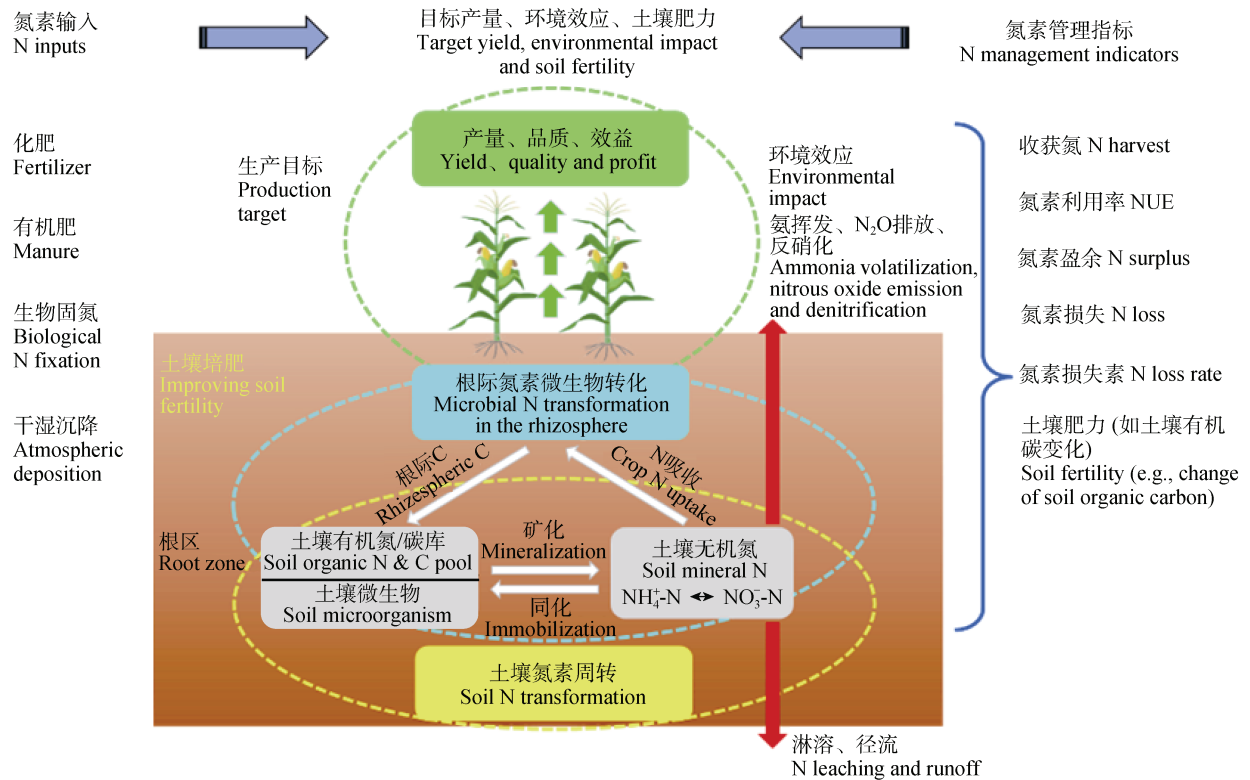


图 1 氮素投入与生产目标、环境效应及土壤培肥的关系

Fig. 1 Relationship among N inputs, production target, environmental impact and soil fertility

消耗以前过量施氮土壤累积的残留肥料氮？能持续多久？（4）“减氮”是否降低了谷类作物的籽粒粗蛋白含量（由籽粒含氮量乘 5.7 折算而得）？笔者发现，上述试验大部分是在原来过量施氮的田块进行，由于残留肥料氮较高，当季少施肥或不施肥未减产，有时还可能维持 1~3 季甚至 1~3 年（英文称“carry over”效应^[17-18]），但一直在消耗土壤氮；而且大部分试验均降低了籽粒粗蛋白含量^[19-21]，有的甚至达不到品质要求。这种“减氮”方式，短期内对作物生产的影响可能显现不出来；但长期下去，必然消耗地力，影响农作物产量和品质，是难以持续的；对指导生产意义不大，甚至误导。例如，小麦籽粒粗蛋白含量相比其他谷物（如玉米和水稻）要高，在过度“减氮”的条件下追求高产（“以少产多 Producing more with less”），会降低小麦的籽粒粗蛋白含量，从而影响其食用和加工品质^[13, 22-23]。为此，农业农村部种植业司印发了关于《全国水稻产区氮肥定额用量（试行）》的函^[24]，为不同稻区氮肥施用量设置了最低和最高限额（表 1，前 3 列），相应小麦和玉米的限额也于最近发表^[25]。

2 合理施氮的原则

那么，合理施氮的原则是什么？笔者认为，针对特定的气候-土壤-作物体系，在一定的经营管理措施下（轮作与耕作、品种、灌溉等），能够实现可获得的目标产量、相应品质和经济效益并维持或提高土壤肥力，同时将环境效应降低至可接受的范围内的合理施氮量区间，即将施氮量控制在一个目标产量、作物品质和效益、环境效应与土壤肥力均可接受的范围内（图 2），实现多目标共赢。这种合理施氮量范围在文献中已有清楚描述^[10, 26-27, 29]，但在实际生产上人们通常忘记或忽略了这些原则和标准，以至于从一个片面走向另一个片面。

在一个给定的作物生产条件下，随着施氮量的增加，产量和经济效益会相应增加（图 2）。用肥料效应函数会求得两个拐点：一是经济最佳施氮量（Economic Optimum N Rate, EONR），二是最高产量施氮量（Maximum Yield N Rate, MYNR）。谷类作物的籽粒粗蛋白含量也随施氮量的增加而提高，一般会在最高产量施氮量后达到峰值（图 2）。随着

表 1 全国水稻产区氮肥定额用量

Table 1 Maximum N application rate for rice in China

区域 Region	目标产量 Target yield/ (t·hm ⁻²)	氮肥定额用量 Quota of N fertilizer/ (kg·hm ⁻²)	理论施氮量 Theoretical N rate/ (kg·hm ⁻²)
黑龙江寒地单季稻区	8.25~11.00	105~150	116~154
吉辽蒙单季稻区	8.25~11.00	120~150	116~154
长江上游单季稻区	8.25~11.00	150~180	165~220
长江中游单双季稻区	8.25~11.00	150~180	165~220
长江下游单双季稻区	7.13~9.50	120~165	143~190
	8.25~11.00	150~180	165~220
江南丘陵山地单双季稻区	7.50~10.00	135~165	150~200
	7.88~10.50	135~180	158~210
	7.13~9.95	120~165	143~199
华南平原丘陵单双季稻区	7.88~10.50	135~180	158~210
	7.13~9.95	120~165	143~199
西南高原山地单季稻区	7.88~10.50	135~180	158~210

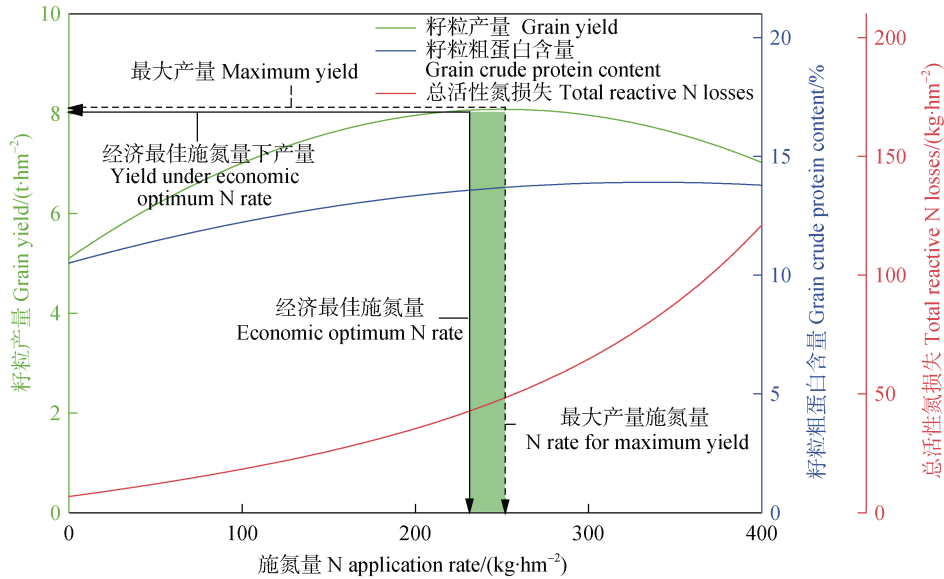
注：表中右栏为计算的理论施氮量^[26-27]，其中黑龙江寒地和吉辽蒙单季稻区百千克收获物需氮量采用 1.4 kg^[28]，其他稻区采用 2.0 kg。Note: To calculate theoretical N rate, N requirement per hundred kilograms of rice is 1.4 kg for cold region of Heilongjiang, Jilin, Liaoning and Inner Mongolia; for the other regions are 2.0 kg.

施氮量的增加，相应的氮素损失（氨挥发、反硝化、氧化亚氮（N₂O）排放、淋洗或径流）也随之增加，但在施氮方法和时期、肥料品种均趋于合理的条件下，氮素各种损失在最高产量施氮量前保持较低水平^[30-31]，因为作物对氮素的高效吸收会降低相应损失；但当施氮量超过最高产量施氮量后，氮素各种损失一般会呈指数增长^[32-33]。在施氮量-产量和品质-净经济效益的合理范围内，施氮引起的环境代价较小；环境代价仅是在效益达到最大值以后，才开始显著增加。因此，从产量、品质和氮素损失对施氮量的效应曲线看，合理施氮量范围就是经济最佳施氮量和最高产量施氮量的区间。不合理施氮会造成三种情况：（1）氮素供应不足，产量、品质和经济效益均低；（2）过分“减氮”后产量下降不明显，但达不到品质要求，经济效益不高，土壤肥力下降；（3）过量施氮，产量不提高甚至下降，籽粒和秸秆含氮量提高，氮素损失增加，环境代价增大，氮素浪费，经济效益下降。在合理施氮范围，产量、品质和效益均高，环境代价最低，土壤肥力得以维持或提高。

有些研究试图将环境成本考虑在内，计算扣除

环境成本后的施氮量^[15, 34-37]，其计算值应该是低于最佳经济施氮量，必然导致作物产量、品质和经济效益损失；也会导致整个土壤-作物体系氮素输入小于氮素输出^[26]，长期下去，会造成土壤肥力下降。由于环境成本是人为赋值，不同研究者的赋值差异，也会导致计算的施氮量具有较大变异。从氮肥施用的两个主要目标考虑（生产目标和补充土壤氮素消耗以维持地力），合理施氮量不应该把环境成本考虑进去。另一方面，如果考虑环境成本确定施氮量，达不到集约化作物生产目标，需要扩张更多耕地进行作物生产，由此造成的温室气体排放和生物多样性丧失，对地球生态和环境将会造成更大的损失^[38]。

值得注意的是，在给定的生产条件下，产量效应曲线需要通过在同类地区的长期试验（大于或等于 5 年）和多点试验获得。短期试验的肥料效应曲线，受前期地块肥力状况和施氮水平的影响，对确定合理施氮量意义不大，甚至引起误导^[15, 35, 39-40]。因为，即使在同一田块上做试验，同一施氮量水平下重复之间的产量变异就较大，何况不同田块或不同年际之间的变异了。由于产量、品质和氮素损失对施氮量效应，在田块和年际间的变异，导致最佳



注：图中数据以华北小麦为例；籽粒产量和粗蛋白含量数据来自于 Ma 等^[34]的 6 年田间定位试验结果；总活性氮损失包括氨挥发、硝态氮淋溶和氧化亚氮排放，根据 Cui 等^[16]建立的华北农田活性氮损失与施氮量的经验模型计算；图中绿色区域代表合理施氮量范围。Note: Data in the figure is derived from the winter wheat in the North China Plain; grain yield and crude protein content is cited from Ma et al.^[34]; total reactive N losses include N loss via ammonia volatilization, nitrate leaching and nitrous oxide emission, which were calculated from the empirical model of relationship between reactive N losses and N rate in the North China Plain developed by Cui et al.^[16]; green area denotes the range of rational N rate.

图 2 施氮量与籽粒产量、籽粒粗蛋白含量和总活性氮损失的关系

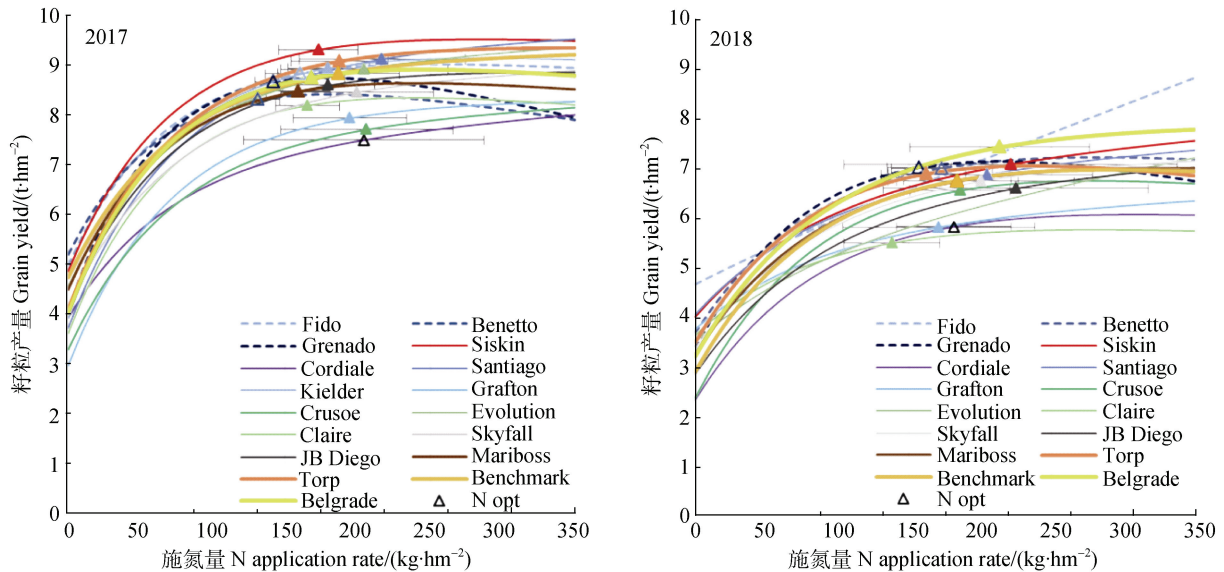
Fig. 2 Relationship among N application rate, grain yield, grain crude protein content and total reactive N losses, data derived from wheat in China

经济施氮量或最高产量施氮量不可能是一个确定的值，而是在这个值的左右变动（图 3）。因此，对这两个拐点，必须接受一定程度的不确定性。在集约化高产田块，氮肥正负 $15 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （以 N 计，下同）的不确定性是可以接受的^[26-27]。国际上许多推荐施氮法的目标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^[41-43]。另一方面，合理施氮量的不确定性还来自于对产量、品质和氮素损失效应曲线，选择什么样的模型进行求解^[44-45]，必然得到不同的模拟结果，因为同一效应曲线可用性质不同的函数来模拟。由于净收益—施氮量曲线在两个拐点附近已相当平缓，效应曲线在拐点附近的变化一般不是突变的，少量增加或者减少施氮量对净收益影响很小。因此，用不同效应函数求解的最佳经济施氮量或最高产量施氮量也存在较大的差异^[44-45]。

图 3 为不同小麦品种在英国同一个试验点籽粒产量对施氮量的效应曲线（引自 Roger.Sylvester-Bradley 和 Susie Roques，个人通讯，经过允许）。可以看出，即使在同一试验地点同一年份，由于重复之间的变异，求得的经济最佳施氮量最低也有

$50 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右的误差，更不用说不同年际之间的差异了。2018 年（图 3 右图）由于早期夏季干旱，导致产量较 2017 年（图 3 左图）显著降低。但不可思议的是，2018 年大多数品种求得的经济最佳施氮反而较 2017 年高（图 3 中的红线和黑线）。在产量高而推荐施氮量低时，会导致土壤氮的消耗；而在产量低推荐施氮量高，会加大土壤氮素残留或损失。因此，这种产量效应曲线，在理论上能够清楚地展示产量对施氮量的响应；但要在实际生产中用于确定合理施氮量，尚存在着诸多难以解决的问题。

欧美大型农场采用精准农业的变量施肥技术，一般是在地形有起伏、土壤性质的变异足以引起施氮量变异的情况下进行^[10, 46]，与我国许多会议和文献上所提的“精准施肥”是不同的概念。由于气候和农田管理措施的不可预见性和随机性，即使在一个较均匀的田块上，施肥也无法“精准”，也不需要所谓的“精准”，仅需要将施氮量控制在合理范围就可以了。如从田间土壤采集到室内测定，再到计算出施肥量可带来 $30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上的误差，该误差足以掩盖田块之间施氮量的差异。另一方面，因为土



注:左图和右图分别为 2017 年和 2018 年的试验结果;2018 年产量降低的原因是早期夏季出现干旱;引自 Roger.Sylvester-Bradley 和 Susie Roques, 个人通讯, 经过允许;三角符号图例代表每个品种的经济最佳施氮量和标准差。Note: The left figure is derived from the result in 2017 and the right figure is derived from the result in 2018; lower yield in 2018 than 2017 due to early summer drought; Roger.Sylvester-Bradley & Susie Roques, personal communication with permission; triangle denotes the economic optimum N rate for each variety and corresponding standard deviation.

图 3 英国不同小麦品种籽粒产量随施氮量的响应曲线

Fig. 3 Grain yield response to N application rate for different wheat variety in the UK

壤对氮肥的缓冲和持留能力^[47-49], 在长期合理施氮量范围内, 本季施氮量的较小偏差, 也不会显著影响产量、品质和经济效益、氮素损失和土壤肥力。研究者更应该注重培育土壤自身的保氮-供氮能力 (Mineralization-immobilization Turnover, MIT), 发挥土壤对肥料氮和作物吸氮的调控作用, 将施肥的损失降下来, 使肥料氮保持在土壤氮库中, 在作物需要时能充分供应^[50-51]。

3 确定合理施氮量的方法

确定合理施氮量范围的方法是氮肥发明和施用以来的难题, 特别是氮肥在作物生产中大量使用以来。其主要方法可归纳为: (1) 基于田间试验作物产量对施氮量响应的肥料效应函数法; (2) 基于土壤或植株测试的测试类方法。但是, 这两类方法在实际应用中均有较大缺陷^[26], 实用性较差。基于我国小农户土地分散经营的特点, 朱兆良院士^[52]提出了区域平均适宜施氮量 (Regional Mean Optimal N, RMON) 的概念和方法, 认为在一定区域内, 气候-土壤和生产条件、农艺管理和产量水平相对一致,

可采用平均施氮量来代替每个田块的经济最佳施氮量。对于同类区域, 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相比, 两者差异较小。区域平均适宜施氮量, 能够将绝大多数地块施氮量控制在合理范围, 便于推广技术员和农户在实际生产中应用。但也需要在同类地区的不同田块, 开展多年多点的田间试验, 获得经济最佳施氮量的平均值; 而且田间试验需要在不同生产条件和历史阶段进行更新^[53], 应归于第一类方法。

为了应用已经获得的大量田间试验资料, 通过少量容易获取且相对可靠和稳定参数, 在实际生产中简单快捷地确定出合理施氮量, 增强方法的实用性和合理性。基于对肥料氮、土壤氮、作物吸氮等物理量之间数量关系的详细解析, Ju 和 Christie^[27]提出了理论施氮量 (Theoretical Nitrogen Rate, TNR) 的概念和方法。在考虑了包括生物固氮、干湿沉降等其他来源氮之后, 发现了“合理施氮量约等于作物地上部吸氮量”的普遍规律^[26-27]。在引入百千克收获物需氮量 (N_{100} , kg) 参数后, 合理施氮量是目标产量 (Y) 的唯一函数, 即理论施氮量 $N_{\text{fert}} \approx Y/100 \times N_{100}$ 。

可以看出，目标产量和百千克收获物需氮量是该方法的两个关键参数。

笔者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；仅东北的玉米和水稻的理论施氮量远高于经济最佳施氮量。笔者后来发现，这是由于东北地区作物的百千克收获物需氮量远低于其他温带地区所造成的。例如：计算黑龙江寒地水稻理论施氮量时，如果采用百千克收获物需氮量 2.4 kg 的全国平均参数，目标产量 7 500 kg·hm⁻² 的理论施氮量为 180 kg·hm⁻²。但是，彭显龙等^[28]近 20 年的试验结果表明，寒地水稻籽粒的含氮量仅有 1% 左右，而茎秆的含氮量约为 0.55%，均显著低于全国平均水平；百千克收获物需氮量仅 1.4 kg 左右，用这一参数计算的同样目标产量的理论施氮量为 105 kg·hm⁻²，完全符合东北寒地水稻的田间试验结果。东北寒地水稻在地上部吸氮量较低条件下，形成了较高的籽粒产量，氮素的生理利用率显著高于其他地区。由此可见，百千克收获物需氮量在不同区域的同一作物上差异较大，其值应取决于该地区的气候-土壤和生产条件，需要根据全国不同种植区的产量和籽粒氮含量等参数重新率定。表 1 右栏是计算的理论施氮量，黑龙江寒地和吉林、辽宁、内蒙古单季稻区百千克收获物需氮量采用 1.4 kg，其他稻区采用 2.0 kg。可以看出，理论施氮量普遍稍高于氮肥定额用量，但已经十分接近。如果用不同种植区的百千克收获物需氮量计算，结果会更符合实际。

由于目标产量综合反映了该地区的气候-土壤和生产条件、土壤肥力状况及农艺管理水平；农户对自己田块的目标产量最为熟悉，成为氮肥推荐最容易获得和相对可靠的参数。因此，通过目标产量确定田块施氮量的方法最简便易行。目标产量不是凭空想象的，取决于某段时期给定地区的生产条件，可根据过去三年平均产量或当地能够获得的比较高的产量来确定。当然，如果要追求进一步将产量提高至更高台阶，就需要改进生产条件和栽培管理措施，相应的施氮量也应根据新设定的目标产量增加。

在我国目前的生产技术水平和农村实际情况下，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 150 kg·hm⁻²，就会达不到目标产量或者消耗土壤氮素；如果高于

250 kg·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 150~250 kg·hm⁻² 之间，施氮量的调节范围大多在 100 kg·hm⁻² 左右，可调节的余地不大。在一个长期耕作的达到稳态的农田生态系统中，仅需将每季作物施氮量控制在合理范围，就可维持土壤-作物体系的氮素平衡。除非生产条件（如灌溉措施、作物品种和农艺管理等）发生大的改变而导致目标产量发生显著变化，施氮量才应做相应的调整。理论施氮量从长期维持高产稳产、土壤氮素平衡和低环境代价考虑，推广技术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，提供了一种简便实用的方法^[26-27]。

4 合理施氮的评判指标

用什么标准判断农田氮素管理的合理性，即管理水平或优劣，是改善氮素管理的关键，其中一个重要的方面是建立氮素管理指标（indicator）。评判氮素管理的指标有氮素利用率（NUE）、氮素盈余（surplus）等（图 1）。NUE 一直被广泛使用，但该指标并不能反映产量水平和氮素损失量，片面追求较高的氮素利用率还可能造成土壤氮素消耗^[6, 54]。欧洲国家一直强调 NUE 必须和其他指标，如氮素盈余和作物收获氮等结合，来判断氮素管理水平^[55]。氮素盈余指“向土壤-作物体系输入的氮素与作物收获输出氮素的差值”^[56]。大量研究表明，氮素盈余是衡量氮素输入的生产力、环境影响和土壤肥力变化的最有效指标^[57]。随着氮素投入量增加，氮素盈余量从负值、为零到正值的变化过程中，能够反映出消耗土壤氮、合理施氮和过量施氮的状况。当氮素盈余处于负值时，尽管氮素损失很低，但作物供氮不足，作物产量低，还会消耗土壤氮素；当氮素大量盈余时，作物产量和品质不会增加或增加幅度较小，甚至还会降低，但氮素损失会大量增加，引起较大的环境代价。因此，优良氮素管理应该将土壤-作物体系的氮素盈余和氮素利用率控制在指标范围内，最大限度降低氮素在环境中的损失。

基于在我国不同区域多年多点的田间试验，笔者建立了 13 种作物体系的氮素盈余指标，同时建立了与 NUE 和作物收获氮之间的关系。一年一熟作物体系的氮素盈余标准为 40~100 kg·hm⁻²·a⁻¹（平均为

73 kg·hm⁻²·a⁻¹), 而一年两熟作物体系的氮素盈余标准为 110~190 kg·hm⁻²·a⁻¹(平均为 160 kg·hm⁻²·a⁻¹), 约为一年一熟作物体系的两倍^[56]。最近的研究结果(玉米、小麦和水稻的氮素盈余标准分别为 75、40 和 70 kg·hm⁻²), 也印证了该标准的合理性^[25]。在严格实施“4R”(合理的施肥量(Right amount)、正确的肥料品种(Right type)、正确的施肥时期(Right time)和正确的施肥方法(Right place))施肥理念或技术^[58-59]并改进其他农艺管理措施条件下, 氮素沉降和活性氮的损失可进一步降低, 氮素盈余标准也可进一步降低。上述指标可对现有管理水平和措施进行评判, 同时作为基准, 对未来改进措施设置目标。基于上述指标, 政策制定者、科研人员及农户能够客观地评估和提高不同田块的氮素管理水平, 实现目标产量、高品质和低氮素损失^[56]。

5 “减氮”的关键是减少损失

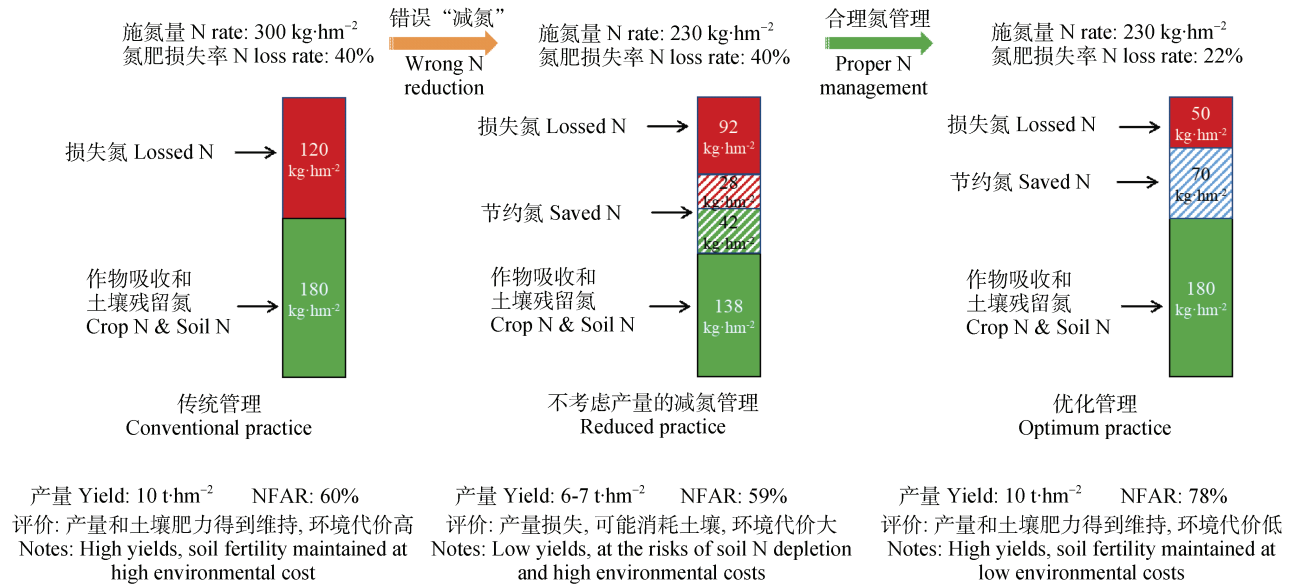
施入农田的氮肥主要有三种去向: 作物吸收、土壤残留和损失^[17, 26-27, 47]。如何使施用的氮肥最大限度地被作物吸收利用, 残留肥料氮能够补偿作物对土壤氮吸收的消耗, 而最大限度地降低氮素通过各种途径的损失, 是合理施氮的根本问题。笔者将作物吸收肥料氮、肥料氮在主要根区内的残留(被微生物、土壤有机质或黏土矿物固定)全部作为有效肥料氮考虑, 将通过气体损失(氨挥发、反硝化、N₂O 排放)或淋洗与径流等脱离出作物主要根区的肥料氮, 才视为无效^[11]。在合理施氮条件下, 肥料氮在主要根区的迁移转化属于内循环过程, 环境散失量并不会很高。仅在过量施氮或施氮方法不合理(如在石灰性土壤上撒施铵态或尿素态氮肥等)情况下, 氮肥的环境损失量才会很高^[12, 60-61]。

除了确定合理的施肥量(Right amount)外, 合理施肥还包括其他三个方面, 即正确的肥料品种(Right type)、正确的施肥时期(Right time)和正确的施肥方法(Right place), 国际上称为“4R”理念或技术^[58-59]。这四个不是孤立的, 而是紧密联系的。施肥量首先取决于目标产量, 但又决定于肥料品种、施肥时期和方法。如果三者均合理, 则施入农田的氮肥能够被作物充分吸收利用, 而不需要加大施氮量以弥补肥料氮损失^[10]。如果任一方面被忽视, 均会导致较高的氮素损失, 使确定的合理

施氮量无法满足高产作物需求, 这也是为什么农户现有施肥技术不得不加大施氮量的主要原因。我国许多农户普遍采用的撒施氮肥, 或撒施后灌水, 导致肥料氮不能深施, 是氮肥大量损失的主要原因^[10, 62]。如在我国目前大面积生产中, 小麦(产量水平在 5.5~7.5 t·hm⁻²)、玉米(6.5~9.5 t·hm⁻²)、水稻(6.5~8.5 t·hm⁻²)的合理施氮量范围在 150~250 kg·hm⁻²之间^[10, 63-64], 但许多田块氮肥施用量达到了 250~350 kg·hm⁻², 实际上, 在施肥过程已有 100 kg·hm⁻²左右的氮素发生了损失, 起作用的还是 150~200 kg·hm⁻²^[10]。可以看出, 由于施肥方法的粗放, 导致农户为了使损失后的氮素能够达到较高目标产量的需求, 不得不施入过量的氮肥, 打出点“余头”。笔者称这种粗放的施肥技术为“既给作物施肥, 又给环境施肥”。

在当前农户常规氮素管理基础上“减氮”, 实质上是要减少氮素损失。例如: 在华北平原的玉米生产中, 对于目标产量为 10 t·hm⁻²的田块, 按照理论施氮量, 需要施用 230 kg·hm⁻²的氮肥; 如果其他“3R”(氮肥品种、施氮方式和时期)均处于合理状况, 这时的氮肥损失率为 22%左右, 损失量为 50 kg·hm⁻²^[9]; 氮肥被作物吸收或补充土壤氮素消耗为 180 kg·hm⁻², 氮肥有效率为 78%左右^[11](图 4 右栏)。但在当前农户传统氮素管理下, 施氮量普遍在 300 kg·hm⁻²以上^[65]; 如果保持氮肥被作物吸收或补充土壤氮素消耗仍然为 180 kg·hm⁻², 以达到相同的目标产量和维持土壤氮素消耗, 其损失量达到了 120 kg·hm⁻², 氮肥损失率达 40%左右, 较上述合理氮素管理多损失 70 kg·hm⁻², 这就是农户传统施肥的环境代价(图 4 左栏)。但在未采取合理施肥技术减少氮素损失的情形下, 盲目减少施氮量(就像现在的许多“减氮”行动), 势必会降低作物产量和吸氮量。如上面的例子, 将施氮量减少至 230 kg·hm⁻², 如果氮肥损失率还是 40%, 则损失量为 92 kg·hm⁻²; 这时, 用于被作物吸收或补充土壤氮素消耗的氮仅有 138 kg·hm⁻²; 按照理论施氮量推算, 这样的供氮量仅能获得 6~7 t·hm⁻²的产量, 或者消耗地力; 这样“减氮”而不“减氮损失”的施肥措施是不可取的(图 4 中栏)。

“减氮”应该对大田作物、蔬菜和果树体系区别对待。目前, 我国大田作物单位播种面积施氮量已基本趋于合理范围, “减氮”的余地并不大^[10]; 科学

图 4 正确和错误的“减氮”模式 (根据 Ju 和 Zhang^[12])Fig. 4 Right and wrong model of reducing N (adapted from Ju and Zhang^[12])

施肥的主要目标是通过改进施肥技术进一步减少氮素损失。在诸多谷类作物“减氮”试验中, 如果未采取合理施肥技术减少损失而一味“减氮”(施氮量低于经济最佳施氮量), 籽粒粗蛋白含量会降低, 或者达不到品质要求^[22-23]。现阶段, 我国蔬菜和果树单位播种面积施氮量远高于作物需求量, 全国平均每季作物施氮量分别为 388 kg·hm⁻² 和 555 kg·hm⁻²^[66]; 在一些施氮量较高的农户田块, 每季作物可分别高达 847 kg·hm⁻² 和 782 kg·hm⁻²^[67-68], 因此, 减氮的空间很大。我国蔬菜和果树不合理施肥技术, 如过量灌水造成的氮素淋溶出根区以下, 为了满足浅根系蔬菜的氮素供应强度, 农户需要不停地施肥^[69]。因此, 对于蔬菜和果树这种效益较高的经济作物, 施肥需要与供水措施配合, 才能实现“减氮”。诸多试验结果表明, 与传统粗放水肥管理模式相比, 通过水肥一体化或滴灌施肥等技术, 可将施氮量控制在合理范围内, 还能够提高果蔬的品质(如可溶性糖、维生素 C 含量和糖酸比等)^[70-71], 实现真正意义上的高产优质和环境保护。根据我国已经发表的大量研究资料^[63], 蔬菜每季作物氮肥推荐量范围大致在 150~300 kg·hm⁻² 之间, 果树大致在 150~250 kg·hm⁻² 之间。

除了上述“4R”施肥技术外, 合理施氮还包括与有机肥和秸秆还田的结合、与磷钾肥和中微量元素

素的平衡施肥以及与其他农艺措施(轮作与耕作、品种、灌溉等)的配合与协调^[72-74]。有机无机配合是合理施肥的首要原则, 这种措施可提高作物对氮素的吸收和利用效率, 减少氮素损失^[75-76]; 可保证持续高产与稳产, 提高土壤肥力^[10]。过去人们仅注意了有机肥提供的养分, 而对有机肥或秸秆提供的碳源在调节土壤肥力因子方面的作用重视不够。有机无机配合, 为微生物提供了碳源, 既可维持土壤相对较大的有机碳、氮库, 增加土壤的缓冲性能, 又可维持土壤较好的无机氮供应^[73-74, 77-78], 提高土壤保水保肥性能。当土壤维持一个较大的有机氮库时, 在水热条件较好的作物快速生长期, 土壤有机氮可通过矿化作用持续不断地供应作物对氮素的需求, 仅需在关键生育期施用氮肥就可以了。当土壤有机氮库较小时, 土壤失去了这种保持和供应养分的缓冲性能, 即使多次施肥, 也很难保证对作物养分的持续供应, 因为根系接触土壤氮的几率较肥料氮大得多, 作物对土壤氮的依赖和吸收始终是主要的^[11, 17]。

6 结论与建议

如果全球停止施肥, 特别是氮肥, 估计仅能生产目前世界粮食总产量的 1/2, 也仅能养活目前全球 1/2 左右的人口^[79]。至 2050 年, 预计世界人口将超过 90

亿,且人们的饮食结构逐渐向畜牧产品转变^[80-81],合理施肥仍然在未来可持续集约化作物生产中发挥关键作用^[3,6]。笔者在此提出进一步开展合理施氮的四点建议:(1)将全国划分为不同的气候-土壤区或亚区,在这些区域的代表作物上,同时开展产量、品质、效益以及氨挥发、硝酸盐淋洗、N₂O排放和土壤肥力的长期试验;(2)在设置田间小区试验或大面积推广示范试验时,优化施氮处理应该遵循上述原则和指标,而不是设计成在农户常规施氮基础上减少多少,如此缺乏优化的依据;(3)利用上述试验资料,研究给定气候-土壤-作物体系肥料氮-土壤氮-作物吸氮之间的关系,应用氮素输入、输出、盈余、氮素利用率、损失以及土壤有机碳变化等指标,综合评判生产目标、环境效应和土壤肥力状况;(4)根据各区域的气候-土壤和生产条件,研究切实可行的施肥技术,降低氮素损失,使施用的氮肥能够被作物充分吸收利用;形成同类地区能够机械操作的规范化种植模式与合理施肥措施。

由于“减氮”的含义并不明确,这样的用词并不科学,还可能引起误导;今后应避免再用这样的概念和词汇,而应该用“合理施氮”的概念。随着我国耕地规模化经营、标准化操作、机械化施肥的普及应用,通过实施“4R”理念或技术,施氮的损失会降低。如果将田块尺度施氮量控制在合理范围,全国总氮肥需求量应该在2100万t左右^[10]。由此,我国在保证农产品供应的同时,氮肥引起的环境问题将会降低,已经污染的大气和水体将会逐渐恢复生机。

参考文献 (References)

- [1] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAOSTAT Data [DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/en/>, May 2019.
- [2] Huang J K, Yang G L. Understanding recent challenges and new food policy in China[J]. *Global Food Security*, 2017, 12 (12): 119—126.
- [3] Yu C Q, Huang X, Chen H, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China[J]. *Nature*, 2019, 567 (7749): 516—520.
- [4] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327 (5968): 1008—1010.
- [5] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494 (7438): 459—462.
- [6] Zhang X, Davidson E A, Mauzerall D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. *Nature*, 2015, 528 (7580): 51—59.
- [7] Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (1): 1—6. [蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 1—6.]
- [8] Jin S Q, Zhou F. Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9 (sp1): 50—58.
- [9] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106 (9): 3041—3046.
- [10] Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (4): 783—795. [巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 (4): 783—795.]
- [11] Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—Discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 921—933. [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[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 921—933.]
- [12] Ju X T, Zhang C. Nitrogen cycling and environmental impacts in upland agricultural soils in North China: A review[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 (12): 2848—2862.
- [13] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514 (7523): 486—489.
- [14] Chen X H, Ma L, Ma W Q, et al. What has caused the use of fertilizers to skyrocket in China?[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 110 (2): 241—255.
- [15] Khoshnevisan B, Rafiee S, Pan J, et al. A multi-criteria evolutionary-based algorithm as a regional scale decision support system to optimize nitrogen consumption rate: A case study in North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120213.
- [16] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555 (7696): 363—366.
- [17] Stevens W B, Hoefl R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: II. Nitrogen uptake efficiency[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97 (4): 1046—1053.
- [18] 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[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 52—61.

- [19] Yue S C, Meng Q F, Zhao R F, et al. Change in nitrogen requirement with increasing grain yield for winter wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(6): 1687—1693.
- [20] Wu M L. Research on effect of reducing nitrogen on yield and nitrogen efficiency of different varieties of maize [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2014. [吴美玲. 减施氮对不同品种玉米产量和氮效率的影响研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.]
- [21] Zhang K, Qin M M, Liu Y X, et al. Effects of reducing nitrogen application rate on grain yield and processing quality of Zhengmai 101[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, 47 (5): 24—27. [张琨, 秦毛毛, 刘艳喜, 等. 减量施氮对郑麦 101 产量及加工品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(5): 24—27.]
- [22] Swarbreck S M, Wang M, Wang Y, et al. A roadmap for lowering crop nitrogen requirement[J]. *Trends in Plant Science*, 2019, 24 (10): 892—904.
- [23] Zörb C, Ludewig U, Hawkesford M J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply[J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23 (11): 1029—1037.
- [24] Department of Crop Production, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Maximum N application rate for rice in China [DB/OL]. <http://www.zzys.moa.gov.cn/>, Feb 2020. [中华人民共和国农业农村部种植业管理司. 全国水稻产区氮肥定额用量 (试行) [DB/OL]. <http://www.zzys.moa.gov.cn/>, 2020 年 2 月.]
- [25] Li T Y, Zhang W F, Cao H B, et al. Region-specific nitrogen management indexes for sustainable cereal production in China[J]. *Environmental Research Communications*, 2020, 2 (7): 075002.
- [26] Ju X T. Improvement and validation of theoretical N rate (TNR) —Discussing the methods for N fertilizer recommendation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (2): 249—261. [巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (2): 249—261.]
- [27] Ju X, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 450—458.
- [28] Peng X L, Wang W, Zhou N, et al. Analysis of fertilizer application and its reduction potential in paddy fields of Heilongjiang Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (12): 2092—2100. [彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (12): 2092—2100.]
- [29] Ju X T, Gu B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2): 281—296. [巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (2): 281—296.]
- [30] Goulding K W T, Poulton P R, Webster C P, et al. Nitrate leaching from the Broadbalk Wheat Experiment, Rothamsted, UK, as influenced by fertilizer and manure inputs and the weather[J]. *Soil Use and Management*, 2000, 16 (4): 244—250.
- [31] Powlson D, Nourse D, Lu Y L. Agricultural development in China—Environmental impacts, sustainability issues and policy implications assessed through China-UK projects under SAIN (UK China Sustainable Agriculture Innovation Network), 2008—2017 [DB/OL]. <http://www.sainonline.org/pages/zhuanlan/SAIN%20Working%20Paper%20No%201.pdf>, Feb 2018.
- [32] Cui Z L, Yue S C, Wang G L, et al. Closing the yield gap could reduce projected greenhouse gas emissions: A case study of maize production in China[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19 (8): 2467—2477.
- [33] Song X, Liu M, Ju X T, et al. Nitrous oxide emissions increase exponentially when optimum nitrogen fertilizer rates are exceeded in the North China Plain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52 (21): 12504—12513.
- [34] Ma G, Liu W X, Li S S, et al. Determining the optimal N input to improve grain yield and quality in winter wheat with reduced apparent N loss in the North China Plain[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 181. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00181>.
- [35] Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618 : 1173—1183.
- [36] Xia Y Q, Yan X Y. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental, and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (6): 1210—1218. [夏永秋, 颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量[J]. *土壤学报*, 2011, 48 (6): 1210—1218.]
- [37] Xia Y Q, Yan X Y. Ecologically optimal nitrogen application rates for rice cropping in the Taihu Lake region of China[J]. *Sustainability Science*, 2012, 7 (1): 33—44.
- [38] Song X T, Ju X T. Nutrient Management Handbook [DB/OL]. https://www.fertilizer.org/Public/Stewardship/Publication_Detail.aspx?SEQN=5473&PUBKEY=DFEF7286-E3B9-408C-B024-8E71CC2D8303, March 2018. [宋晓桐, 巨晓棠. 养分管理手册 [DB/OL]. https://www.fertilizer.org/Public/Stewardship/Publication_Detail.aspx?SEQN=5473&PUBKEY=DFEF7286-E3B9-408C-B024-8E71CC2D8303, 2018 年 3 月.]
- [39] 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[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11 (11): 3031—3041.

- [40] Xiao R Y, Wang K B, Liu Q Y, et al. Effects of N application rate on the yield, nitrogen absorption and the balance of soil nitrogen[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53 (4): 495—502. [肖荣英, 王开斌, 刘秋员, 等. 施氮量对水稻产量、氮素吸收及土壤氮素平衡的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53 (4): 495—502.]
- [41] Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA). Fertilizer manual(RB209) [DB/OL]. <https://www.gov.uk/government/publications/fertiliser-manual-rb209--2>, March 2011.
- [42] Ladha J K, Pathak H, Krupnik T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87: 85—156.
- [43] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, et al. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30 (3): 649—656.
- [44] Morris T F, Murrell T S, Beegle D B, et al. Strengths and limitations of nitrogen rate recommendations for corn and opportunities for improvement[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110 (1): 1—37.
- [45] Xia Y Q, Yan X Y. Comparison of statistical models for predicting cost effective nitrogen rate at rice-wheat cropping systems[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57 (2): 320—330.
- [46] Rees R M, Maire J, Florence A, et al. Mitigating nitrous oxide emissions from agricultural soils by precision management[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2020, 7 (1): 75—80.
- [47] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (45): 18185—18189.
- [48] Ju X T. Direct pathway of nitrate produced from surplus nitrogen inputs to the hydrosphere[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (4): E416.
- [49] Stevens W B, Hoelt R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: I. interactions with soil nitrogen[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97 (4): 1037—1045.
- [50] Zhang J B, Cheng Y, Cai Z C. The mechanisms of soil regulating nitrogen dynamics[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2019, 34 (1): 11—19. [张金波, 程谊, 蔡祖聪. 土壤调配氮素迁移转化的机理[J]. *地球科学进展*, 2019, 34 (1): 11—19.]
- [51] Wang J, Zhu B, Zhang J B, et al. Mechanisms of soil N dynamics following long-term application of organic fertilizers to subtropical rain-fed purple soil in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 91: 222—231.
- [52] Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12 (1): 1—4. [朱兆良. 推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12 (1): 1—4.]
- [53] Zhu Z L, Zhang S L, Yin B, et al. Historical comparison on the response curves of rice yield/nitrogen application rate in Tai Lake Region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (1): 1—5. [朱兆良, 张绍林, 尹斌, 等. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (1): 1—5.]
- [54] Zhang X, Davidson E A, Zou T, et al. Quantifying nutrient budgets for sustainable nutrient management[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2020, 34 (3): e2018GB006060. <https://doi.org/10.1029/2018gb006060>.
- [55] EU Nitrogen Expert Panel. Nitrogen use efficiency (NUE) – an indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems [DB/OL]. <http://www.eunep.com/wp-content/uploads/2017/03/Report-NUE-Indicator-Nitrogen-Expert-Panel-18-12-2015.pdf>, December 2015.
- [56] Zhang C, Ju X T, Powlson D S, et al. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (12): 6678—6687.
- [57] Oenema O, Kros H, de Vries W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20 (1): 3—16.
- [58] International Fertilizer Association. The global “4R” nutrient stewardship framework: Developing fertilizer best management practices for delivering economic, social and environmental benefits [DB/OL]. https://www.fertilizer.org/images/Library_Downloads/2009_ifa_agcom_FBMPs.pdf, May, 2009.
- [59] International Plant Nutrition Institute (IPNI). 4R plant nutrition manual: A manual for improving the management of plant nutrition [DB/OL]. <http://www.ipni.net/article/IPNI-3255>, 2012.
- [60] Zhang C, Li X Q, Su F, et al. Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35 (6): 1194—1201. [张翀, 李雪倩, 苏芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35 (6): 1194—1201.]
- [61] Liu M, Zhang C, He Y F, et al. Impact of fertilization method on soil nitrous oxide emissions and ammonia volatilization during summer maize growth period[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2016, 22 (1): 19—29. [刘敏, 张翀, 何彦芳, 等. 追氮方式对夏玉米土壤 N₂O 和 NH₃ 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (1): 19—29.]
- [62] Gu B J, Song Y, Yu C Q, et al. Overcoming socioeconomic barriers to reduce agricultural ammonia emission in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27 (20): 25813—25817.

- [63] Zhang F S, Chen X P, Chen Q, et al. Fertilizer application guideline for main crops of China [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009. [张福锁, 陈新平, 陈清, 等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.]
- [64] Zhang F S, Cui Z L, Chen X P, et al. Integrated nutrient management for food security and environmental quality in China[J]. *Advance in Agronomy*, 2012, 116: 1—40.
- [65] Zheng X J, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Nitrogen supply modulates nitrogen remobilization and nitrogen use of wheat under supplemental irrigation in the North China Plain[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1): 3305.
- [66] Wu L. Nitrogen fertilizer demand and greenhouse gas mitigation potential under nitrogen limiting conditions for Chinese agriculture production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [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[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [67] Wang X Z, Zou C Q, Gao X P, et al. Nitrous oxide emissions in Chinese vegetable systems: A meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 239: 375—383.
- [68] Yan M, Cheng K, Yue Q, et al. Farm and product carbon footprints of China's fruit production—life cycle inventory of representative orchards of five major fruits[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (5): 4681—4691.
- [69] Liang B, Tang Y H, Wang Q Y, et al. Drip irrigation and application of straw reducing nitrogen leaching loss in tomato greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (7): 78—85. [梁斌, 唐玉海, 王群艳, 等. 滴灌和施用秸秆降低日光温室番茄地氮素淋溶损失[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (7): 78—85.]
- [70] Truffault V, Marlene R, Brajeul E, et al. To stop nitrogen overdose in soilless tomato crop: A way to promote fruit quality without affecting fruit yield[J]. *Agronomy*, 2019, 9 (2): 80.
- [71] Alborno F. Crop responses to nitrogen overfertilization: A review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 205: 79—83.
- [72] Drinkwater L E, Snapp S S. Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm[J]. *Advances in Agronomy*, 2007, 92: 163—186.
- [73] Qiu S, Ju X T, Ingwersen J, et al. Role of carbon substrates added in the transformation of surplus nitrate to organic nitrogen in a calcareous soil[J]. *Pedosphere*, 2013, 23 (2): 205—212.
- [74] Huang T. The mechanisms of a long-term carbon and nitrogen input on soil carbon and nitrogen pools and environmental impact [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [黄涛. 长期碳氮投入对土壤有机碳氮库及环境影响的机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [75] Duan Y H, Xu M G, Gao S D, et al. Long-term incorporation of manure with chemical fertilizers reduced total nitrogen loss in rain-fed cropping systems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33611.
- [76] Cai A D, Xu M G, Wang B R, et al. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 189: 168—175.
- [77] Ma Q, Li S L, Xu Z Q, et al. Changes in N supply pathways under different long-term fertilization regimes in Northeast China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 201: 104609.
- [78] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of manure and fertilizer on soil organic carbon pools in dryland farming in northwest China[J]. *PLoS One*, 2013, 8 (2): e56536. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056536>.
- [79] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (10): 636—639.
- [80] Lassaletta L, Billen G, Garnier J, et al. Nitrogen use in the global food system: Past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11 (9): 095007.
- [81] Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health[J]. *Nature*, 2014, 515 (7528): 518—522.

(责任编辑: 陈荣府)