

DOI: 10.11766/trxb202405280211

CSTR: 32215.14.trxb202405280211

李婷玉, 姚澜, 钟于秀, 王怡, 李伟芳, 徐洋, 李冬佳, 刘蕊, 李贝, 张卫峰. 绿色发展背景下的中国氮肥需求[J]. 土壤学报, 2025, 62 (2): 308–321.

LI Tingyu, YAO Lan, ZHONG Yuxiu, WANG Yi, LI Weifang, XU Yang, LI Dongjia, LIU Rui, LI Bei, ZHANG Weifeng. Nitrogen Fertilizer Demand in China in the Context of Green Development[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (2): 308–321.

## 绿色发展背景下的中国氮肥需求\*

李婷玉<sup>1</sup>, 姚澜<sup>2</sup>, 钟于秀<sup>1</sup>, 王怡<sup>1</sup>, 李伟芳<sup>1</sup>, 徐洋<sup>2, 3</sup>, 李冬佳<sup>2</sup>,  
刘蕊<sup>2</sup>, 李贝<sup>2</sup>, 张卫峰<sup>2†</sup>

(1. 海南大学热带农林学院, 海口 570228; 2. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 3. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100125)

**摘 要:** 氮肥是粮食安全的重要保障, 但过量施用会导致活性氮排放, 造成严重的生态环境问题。在全面推动绿色发展的新时期, 明确我国氮肥合理需求与化学氮肥减量路径对农业转型升级具有重要意义。本文综合分析了我 31 种主要作物的产量潜力和氮素需求, 并结合不同作物在优化管理下的氮素合理盈余水平, 确定了我国在满足粮食安全和生态可持续发展要求下的氮肥合理需求。绿色发展背景下我国氮素养分合理需求总量为 3 100 万 t, 在不改变氮素投入结构的情况下, 化学氮肥合理需求量为 1 904 万 t, 占总需求的 61%。未来我国氮肥合理化应用调整路径应考虑氮肥定额、提高有机养分投入及替代比例、增加豆科作物种植比例提高生物固氮潜力, 以及优化氮肥产品结构等方面。在此路径下, 化学氮肥减量潜力为 26%~53%。如在合理的氮素投入情况下 (氮肥定额), 通过提高有机养分替代比例到适宜水平 40%, 可将化学氮肥需求量下调至 1 428 万 t, 减量潜力为 44%。在此基础上, 进一步提高豆科作物种植面积 (增加大豆-玉米轮作比例), 化学氮肥合理需求量可下调至 1 360 万 t, 减量潜力为 47%。最后, 进一步通过优化氮肥产品结构, 我国化学氮肥合理需求可进一步降低至 1 213 万 t, 减量潜力达 53%。本文对氮肥合理需求的评估和氮肥绿色发展路径的探索将有助于实施更科学的管理体系, 并为我国氮肥产业升级提供科学支持。

**关键词:** 氮肥定额; 氮肥合理需求; 绿色发展; 发展路径; 减量潜力

**中图分类号:** S143.1; S-01 **文献标志码:** A

## Nitrogen Fertilizer Demand in China in the Context of Green Development

LI Tingyu<sup>1</sup>, YAO Lan<sup>2</sup>, ZHONG Yuxiu<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, LI Weifang<sup>1</sup>, XU Yang<sup>2, 3</sup>, LI Dongjia<sup>2</sup>, LIU Rui<sup>2</sup>, LI Bei<sup>2</sup>, ZHANG Weifeng<sup>2†</sup>

(1. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Resources and Environmental

\* 国家重点研发计划项目 (2023YFD2300404)、国家自然科学基金项目 (42277234)、湖北省重点研发计划项目 (2023BBB147) 和海南特色作物科学施肥技术体系创建及应用项目 (RH2300006505) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program (No.2023YFD2300404), the National Natural Science Foundation of China (No. 42277234), the Hubei Province Key Research and Development Program (No. 2023BBB147), and the Scientific Fertilization Technology System for Characteristic Crops in Hainan (No. RH2300006505)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wfzhang@cau.edu.cn

作者简介: 李婷玉 (1990—), 女, 黑龙江鹤岗人, 副研究员, 主要从事田块和区域尺度养分综合管理技术、指标和政策研究。E-mail: lty@hainanu.edu.cn

收稿日期: 2024-05-28; 收到修改稿日期: 2024-07-22; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-11

Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3. National Agro-Tech Extension and Service Center, Beijing 100125, China)

**Abstract:** Nitrogen fertilizer is essential for food security, but its excessive application leads to reactive nitrogen emissions, causing severe environmental issues. In the new era of promoting green development, clarifying China's reasonable nitrogen fertilizer demand and pathways for reducing chemical nitrogen fertilizer is crucial for agricultural transformation and upgrading. This study comprehensively analyzes the yield potential and nitrogen demand of 31 major crops in China and determines the reasonable nitrogen fertilizer demand under the conditions of food security and ecological sustainability by combining the nitrogen surplus levels under optimized management for different crops. Under the green development framework, the total reasonable nitrogen nutrient demand in China is 31 million tons, with a reasonable chemical nitrogen fertilizer demand of 19.04 million tons, accounting for 61% of the total demand. Future pathways for rational nitrogen fertilizer application in China should consider nitrogen fertilizer quota, increasing organic nutrient input and substitution ratio, increasing the planting proportion of leguminous crops to enhance biological nitrogen fixation potential, and optimizing nitrogen fertilizer product structure. Under these pathways, the potential for reducing chemical nitrogen fertilizer ranges from 26% to 53%. Specifically, under reasonable nitrogen input conditions (nitrogen quota), increasing the organic nutrient substitution ratio to 40% could lower the chemical nitrogen fertilizer demand to 14.28 million tons, with a reduction potential of 44%. Further increasing the planting area of leguminous crops (enhancing soybean-maize rotation ratio) could reduce the chemical nitrogen fertilizer demand to 13.6 million tons, with a reduction potential of 47%. Finally, optimizing the nitrogen fertilizer product structure could further reduce the reasonable chemical nitrogen fertilizer demand to 12.13 million tons, with a reduction potential of 53%. This study's evaluation of reasonable nitrogen fertilizer demand and exploration of green development pathways for nitrogen fertilizer will aid in implementing more scientific management systems and provide scientific support for the upgrading of China's nitrogen fertilizer industry.

**Key words:** Nitrogen quota; Reasonable demand of nitrogen fertilizer; Green development; Development path; Decrement potential

氮肥合理供给和施用对粮食安全和环境可持续发展目标的协同发展至关重要。自 20 世纪七八十年代起,由于氮肥工业及集约化农业的快速发展,我国氮肥消费总量急剧增加,成为全球氮肥消费总量最高的地区<sup>[1]</sup>。虽然氮肥投入保障了农产品的有效供给,但过量氮肥投入也带来了土壤和生态环境退化等问题。从 20 世纪 80 年代后 30 年间,我国农田土壤 pH 下降 0.5,大气沉降增加 60%,水体富营养化面积增加 70%,68%~92%的重要水域及流域地下水硝酸盐含量超标<sup>[2-6]</sup>。这些问题曾一度受到国内外的高度关注。目前我国农田活性氮损失占总投入比例高达 30%~70%,而氮素利用效率仅为 40%<sup>[7]</sup>,低于全球平均水平(48%)<sup>[8-9]</sup>。养分资源的浪费和对环境的负面影响也产生巨大的经济损失,据统计我国由氮肥过量施用产生的环境保护和管理成本占国内生产总值(GDP)的 7%~10%<sup>[10]</sup>。氮肥的不合理施用已经成为制约我国农业绿色发

展的重要因素。

近年来国家出台了一系列指导方针来推动化肥的合理施用。如 2005 年启动的全国测土配方行动,2015 年出台的《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《关于推进化肥行业转型发展的指导意见》,以及 2017 年发布的《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》等<sup>[11-14]</sup>。这些政策有效推动了氮肥消费的下降,2016 年我国氮肥首次出现负增长,而后氮肥总量也持续稳定下降,至 2020 年我国氮肥消费总量较高峰期降低 17%。但目前我国氮肥施用强度仍高于合理需求水平,化肥减量进入瓶颈期,需要探索新的路径。

当前我国农业正在走向绿色发展的新阶段。氮肥产业也处于转型升级的关键时期,亟需通过供给侧结构性改革来推动行业发展,化解过剩产能的问题,实现氮肥产业的绿色发展。在此背景下,对我

国当前氮肥合理需求的预测及发展路径的探索,既是农业产业技术决策的重要参考,更是氮肥工业发展的重要依据,同时对我国实现“双碳”目标,以及缓解全球气候变化至关重要。本研究利用 2009—2019 年农业农村部全国测土配方施肥调研中的 9 656 个农户样本信息,以及国际粮农组织 (FAO) 2020 年公开发布和发表文献数据,来确定作物当前产量潜力、目标产量和作物氮素收获量等参数,并基于养分平衡原理定量分析了全国主要作物的氮肥合理需求和理论需求总量,结合目前氮肥管理切实可行的发展策略,探讨了绿色发展背景下的氮肥减量潜力。

## 1 中国农用氮肥消费总量历史变化

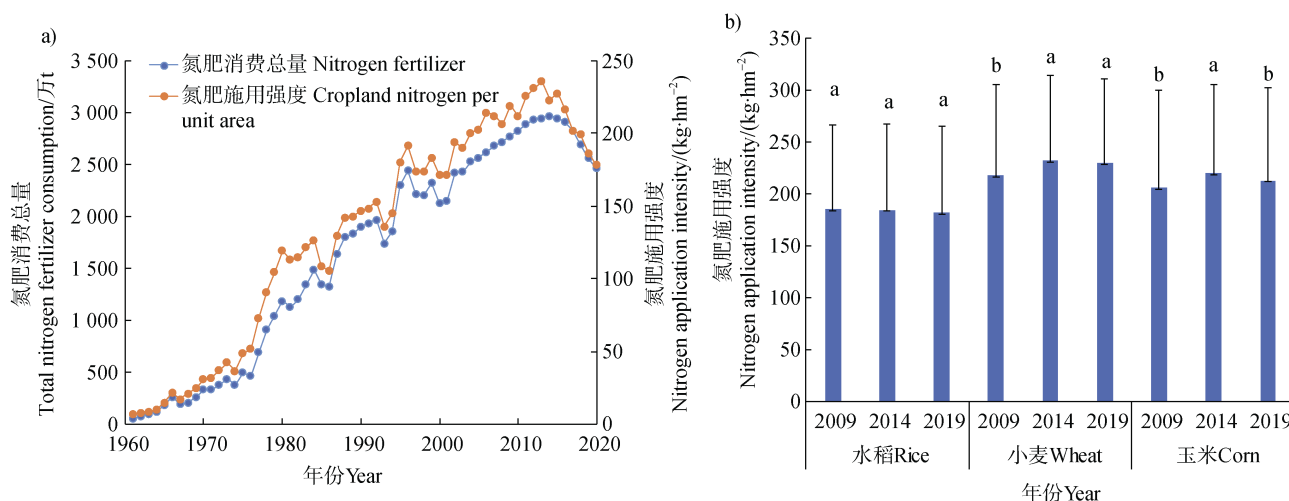
自 20 世纪 80 年代以来,我国氮肥产业快速发展,氮肥消费总量不断攀升。2015 年我国氮肥消费总量达到历史最高 2 968 万 t (除特殊标注外,本文中的氮肥用量均为纯 N 养分量),而后逐年下降,2016 年首次实现负增长,降至 2 949 万 t,2020 年我国氮肥消费总量为 2 467 万 t,氮肥利用效率也有所提高。说明我国农业生产对氮肥的需求已从“保产”转向“氮肥增效”,农田氮管理进入新的发展阶段。

我国农田氮肥施用强度的变化与消费总量的

变化趋势一致。2020 年我国农田氮肥平均施用强度为  $187 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (不包括其他氮源),相比 2014 年施用高峰(氮肥施用强度高达  $228 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )降低 20% (图 1a),但仍位居全球前列。尽管不断创新的氮肥管理技术已经取得一定成效,但由于种植者对认知水平的差异和种植结构的变化,我国氮肥利用率 (NUE)、作物产量和经济效益在空间上存在较大变异<sup>[15]</sup>。我国农田氮肥消费中有 63% 用于粮食作物,但近年来我国粮食作物氮肥施用强度降幅较小(图 1b),尤其是小麦、玉米当前的氮肥用量仍大于  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,近一半农田的氮养管理处于低产出高盈余水平<sup>[16]</sup>。在施肥空间上,我国西北和西南是氮肥用量的热点地区,分别为  $334$ 、 $306 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,而东北地区则保持较低的施氮水平 ( $208 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。种植模式的结构转变是造成地区施氮量差异的主要原因之一,蔬菜和经济作物种植面积的增加,且这些作物的施氮量约是主粮作物的 2 倍,水果氮素投入最高可达  $616 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,蔬菜平均氮素投入高达  $500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[16]</sup>。

## 2 满足粮食安全目标下的中国氮肥需求

自 2017 年起,我国积极探索农业投入品减量施用的新机制,并于次年提出了建立化肥定额的限量使用制度。目前的化肥定额制度主要集中在氮肥上。



注: 不同字母表示同一作物、不同年份的样本间差异达 5% 显著水平。Note: Different letters indicate a significant difference of 5% between samples of the same crop and different years.

图 1 中国氮肥总量消费历史变化 (a) 和粮食作物氮肥施用强度 (b)

Fig. 1 Historical changes in total nitrogen fertilizer consumption in China (a) and nitrogen fertilizer application intensity in food crops (b)

氮肥定额是指针对特定的气候-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），能够实现目标产量、相应品质 and 经济效益并维持或提高土壤肥力，同时将环境排放降低至可承受的范围内的最大氮肥用量。2020 年我国农业农村部种植业管理司在全国尺度上首次发布了水稻主要产区的氮肥施用定额，后又相继发布了小麦、玉米、油菜、苹果、茶叶等六个作物的氮肥定额。在区域尺度上，浙江省农业农村厅、浙江省财政厅在 2019 年发布了《关于试行农业投入化肥定额制的意见》<sup>[17]</sup>，明确在全省实施化肥定额制度。2022 年，江苏省市场监督管理局发布省级地方标准《重点流域农田化肥用量定额》<sup>[18]</sup>，主要面向太湖、淮河流域及其他沿江沿海流域。氮肥定额制度在我国快速发展，并在不同作物体系和不同区域上不断完善。

目前氮肥定额的核算方法较多，总体可归纳为五类，包括肥效函数法、环境容量法、理论施氮量、目标效率法、养分平衡法。但一些方法在应用中可行性较差，难以适用于我国农业生产现状（表 1）。

如肥效函数法起初在土壤氮素较为缺乏时应用效果较好，但随着农田氮肥投入强度的增加，土壤中氮素不断累积，残留氮素对肥料函数曲线的确定造成了很大的干扰，已无法形成较好的肥料函数，且随着作物品种和管理方式的更迭，以往形成的函数曲线已无法适应当下的种植体系<sup>[19]</sup>。基于活性氮排放阈值的安全容量法需要明确氮肥在不同体系和生态区域上的硝酸盐淋洗及氨挥发等损失通量及比例<sup>[20-21]</sup>，而获取这些数据需要多年多点的长期监测，所用时间和经济成本较高，且不同生态区间由于土壤气候条件不同，损失系数变异较大，很难在区域尺度上及不同作物体系上推广应用。理论施氮量的概念和方法是基于对肥料氮、土壤氮、作物吸氮等物理量之间数量关系的详细解析，根据长期定位实验推导出。即在考虑了包括生物固氮、干湿沉降等其他氮来源之后，在土壤肥力和氮库稳定条件下，合理氮肥投入约等于地上部吸氮量<sup>[23]</sup>。此方法所需参数较少（目标产量、百公斤籽粒吸氮量），由于目前仅在粮食作物得到验证，具有一定的局限性。养

表 1 氮肥定额核算方法比较

Table 1 Comparison of calculation methods of nitrogen fertilizer quota

核算方法	优缺点	数据基础	应用现状
Accounting method	Merits and demerits	Data basis	Application status
肥效函数法 <sup>[19]</sup>	最大产量或最佳经济施氮量，理论容易接受，但该方法中的肥效函数受土壤氮残留情况干扰较强，目前很难得到一致的肥效函数	所需数据量较大	丹麦采用最佳经济施氮量减 15%作为氮肥定额
环境容量法 <sup>[20-21]</sup>	需要基于多年多点实验数据构建氮用量与活性氮排放的数学模型，而区域间规律差异较大，数据可获得性较差，适用性较差	所需数据量大，且活性氮排放成本较高	处于研究阶段
目标效率法 <sup>[22]</sup>	方法简单易操作，但目标氮利用效率在不同土壤和作物体系上缺乏较为一致的结论	所需参数较少（目标产量、氮浓度系数及目标氮效率）	初步在果树定额上应用
理论施氮量 <sup>[23]</sup>	根据长期定位实验推导出，在土壤肥力和氮库稳定条件下，合理氮肥投入与地上部吸氮量相同，此方法目前仅在粮食作物得到应用	所需参数较少（目标产量、百公斤籽粒吸氮量）	初步在粮食作物上应用
养分平衡法 <sup>[24]</sup>	方法简单易操作，可施用于不同地区和作物系统，适宜在区域尺度应用	所需参数较少（目标产量、氮浓度系数及合理氮素盈余）	初步在粮食作物上应用

分平衡法是基于养分平衡理论,通过目标产量和合理盈余来确定总的氮素投入<sup>[24]</sup>。该方法简单易操作,可适用于不同地区和作物系统,所需参数较少(目标产量、氮浓度系数及合理氮素盈余)。农田总氮素投入中作物收获氮素的确定基于粮食安全需要,而氮素盈余的确定满足环境安全需要。同一生态区,在相似的自然条件(气候、土壤)和栽培技术条件下,作物产量潜力、氮浓度参数及合理氮素盈余水平相近,适宜用养分平衡法来确定区域理论氮肥定额,该方法符合当前我国农村田块小而多、缺乏测试条件、季节紧的实际情况,在大面积生产中易于操作。

近些年来,由于农田管理技术和作物新品种研发的不断进步,作物产量水平也不断增加,而产量水平直接决定了作物氮素需求。本研究基于 2009—2019 年农业农村部测土配方农户调研、FAO 2020 年公开发布和发表文献数据,包含了 9 656 个农户调研数据,建立了我国 31 种主要作物产量潜力、作物产品氮浓度参数数据库,并结合已发表文献构建了优化管理下的氮素合理盈余数据库,以此评估我国主要作物的氮肥定额。其中作物产量潜力以农户调研得到的作物产量前 10%为评估依据,并以产量潜力的 75%~80%作为目标产量,此产量水平是农户可以实现的高产水平,同时也是满足中国未来粮食安全要求的产量水平。合理氮素总投入为目标产量下的氮素收获量与合理盈余之和,而氮肥定额则指合理氮素投入扣除环境养分投入后剩下的化肥及

有机肥氮总量。其中环境氮素主要包括大气沉降和生物固氮。合理氮素盈余以采用农田氮肥综合管理技术 4R 优化原则下得到的作物氮素盈余水平为依据,目前我国农田在 4R 管理策略下,粮食作物、蔬菜及水果作物可实现的合理氮素盈余分别为 81 kg·hm<sup>-2</sup>、108 kg·hm<sup>-2</sup> 和 283 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[25-26]</sup>。

基于以上方法评估,实现作物产量潜力 80%的目标下,我国农田氮养分需求总量为 3 100.8 万 t(表 2),粮食、蔬菜和瓜果氮养分需求总量占比分别为 62.7%、13.2%、8.7%。其中,粮食作物氮养分需求总量为 1 943.7 万 t,蔬菜氮养分需求总量为 407.9 万 t,瓜果氮养分需求总量为 269.6 万 t,其他经济作物氮养分需求总量为 479.6 万 t。三大粮食作物中,水稻、小麦、玉米氮肥需求总量分别占粮食作物的 27.4%、25.9%和 46.7%。经济作物中的大豆、马铃薯、花生、油菜籽按农业生态区进行划分,作物总氮养分需求总量为 448.4 万 t,占经济作物总氮养分需求的 38.8%,东北地区总氮养分需求量最大(以种植大豆为主,为 102.7 万 t),然后是西南地区(以种植马铃薯为主,为 75.4 万 t)和长江中下游地区(以种植油菜籽为主,为 56.7 万 t)。

3 绿色发展背景下的氮肥减量潜力

基于农田多样化的氮养分投入结构和当前已有的技术途径及管理措施,氮肥减量措施包括以下几个方面:一是全面实施氮肥用量限制制度,通过政

表 2 中国主要作物目标产量下的作物氮素需求

Table 2 Fertilizer nitrogen consumption under target yield of main crops in China

作物类型	作物名称	区域	产量潜力	目标产量	氮素推荐量	总氮需求
Crop type	Crop name	Area	Y <sub>potential</sub> / (t·hm <sup>-2</sup> )	Y <sub>target</sub> / (t·hm <sup>-2</sup> )	N <sub>recommend</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	N <sub>demand</sub> / 万 t
粮食 Grain	水稻 Rice	东北	11.0	8.8	204.2	107.0
		西南	10.2	8.2	195.5	78.5
		长江中下游	10.1	8.1	175.3	266.8
		东南	9.5	7.6	177.8	79.9
	小麦 Wheat	华北	9.5	7.6	230.0	284.3
		西北	7.6	6.1	206.9	69.9
		长江中下游	9.9	8.0	235.3	149.5
	玉米 Cron	东北	13.6	10.9	270.3	338.1

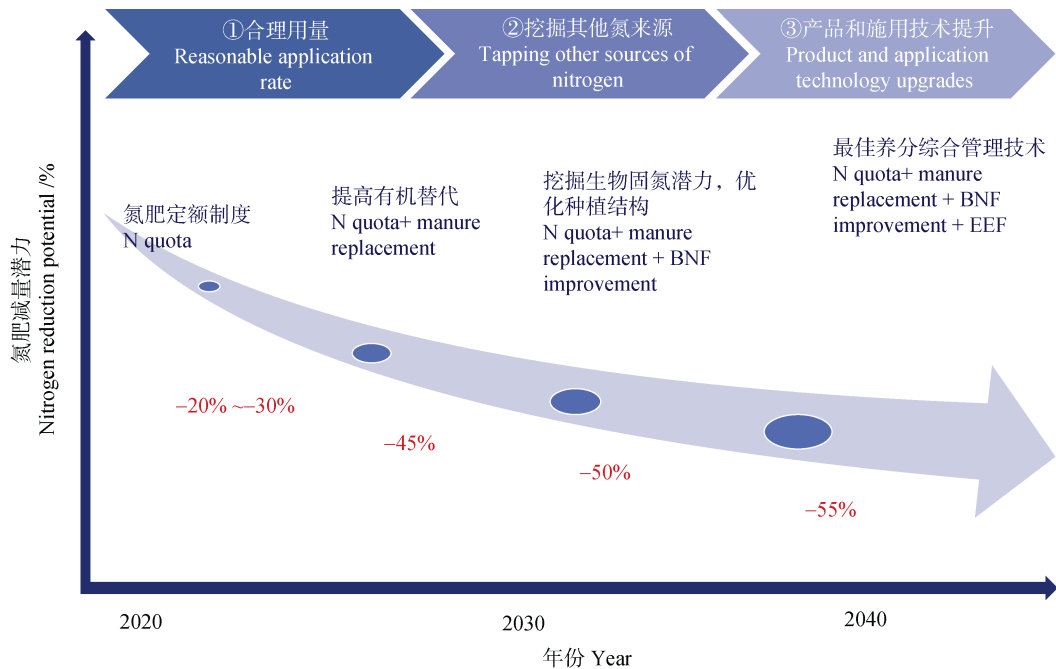
续表

作物类型	作物名称	区域	产量潜力	目标产量	氮素推荐量	总氮需求	
Crop type	Crop name	Area	Y <sub>potential</sub> / ( t·hm <sup>-2</sup> )	Y <sub>target</sub> / ( t·hm <sup>-2</sup> )	N <sub>recommend</sub> / ( kg·hm <sup>-2</sup> )	N <sub>demand</sub> / 万 t	
蔬菜类 Vegetable	大豆 Soyabean	华北	10.7	8.6	208.7	274.3	
		西北	12.6	10.1	259.9	194.2	
		西南	10.5	8.4	221.0	101.3	
		东北	3.0	2.4	189.6	102.7	
		西北	2.7	2.2	176.1	24.7	
	马铃薯 Potatoes	长江中下游	2.7	2.2	157.3	20.9	
		西北	41.4	33.2	339.8	47.0	
		西南	24.8	19.8	217.4	75.4	
	花生 Peanut	长江中下游	25.0	20.0	200.9	16.0	
		华北	3.8	3.1	128.3	28.1	
		长江中下游	3.0	2.4	90.0	7.1	
	油菜籽 Rapeseed	东南	4.7	3.7	174.1	11.7	
		西北	3.9	3.1	207.0	15.6	
		西南	3.4	2.7	184.7	42.4	
		长江中下游	3.3	2.7	163.0	56.7	
	蔬菜类 Vegetable	白菜 Cabbage	—	63.1	50.5	164.8	—
		葱 Onion		97.5	78.0	218.6	
		胡萝卜 Carrot		84.4	67.5	150.9	
		花椒 Pricklyash		2.7	2.2	94.9	
		花椰菜 Cauliflower		58.1	46.5	192.4	
		黄瓜 Cucumber		78.0	62.4	307.6	
		豇豆 Cowpea		23.4	18.8	77.2	
		辣椒 Pepper		37.8	30.2	198.3	
		蒜 Garlic		23.0	18.4	217.8	
		西红柿 Tomato		82.5	66.0	253.9	
		平均值 Average		55.1	44.1	187.6	407.9
瓜果类 Melons and fruits	柑橘类 Citrus	60.2	48.2	206.8	—		
	苹果 Apple	52.4	41.9	207.3			
	葡萄 Grapes	37.5	30.0	162.5			
	桃 Peach	47.5	38.0	252.5			
	西瓜 Watermelon	43.3	34.6	229.3			
	甘蔗 Sugar Cane	102.5	82.0	189.1			
	平均值 Average	48.2	45.8	207.9	269.6		
	其他类 Other	棉花 Cotton	3.7	2.9	99.7	31.2	
总计						3 100.8	

注：以 2021 年全国不同地区作物种植面积为基准，蔬菜类和瓜果类计算氮肥需求总量时以平均值表示，此处展示了常见的 24 种主要作物。“—”表示数据未获取。Note: Based on the planting area of crops in different regions of the country in 2021, the total nitrogen fertilizer demand for vegetables and melons is expressed as an average value. The 24 main crops commonly found are shown here. - indicates that data is not obtained.

策手段来实现氮肥投入强度的合理化；二是优化氮素投入结构，在总氮养分投入不变的情况下，增加有机肥和生物固氮比例，从而减少化学氮肥的用量；

三是通过提高养分利用效率来减少总养分投入，如优化氮肥产品结构，增加养分利用高效、环境友好型氮肥产品等（图 2）。



注：N quota 为氮肥定额，N quota+manure replacement 为氮肥定额+有机肥替代 2 种技术组合，N quota+manure replacement+BNF improvement 为氮肥定额+有机肥替代+生物固氮潜力提高 3 种技术组合，N quota+manure replacement+BNF improvement+EEF 为氮肥定额+有机肥替代+生物固氮潜力提高+增效肥料 4 种技术组合。Note: N quota is the nitrogen quota, N quota+manure replacement is the nitrogen quota+manure replacement 2 technology combinations, N quota+manure replacement+BNF improvement is the nitrogen quota+manure replacement+biological nitrogen fixation potential improvement 3 technology combinations, and N quota+ manure replacement+BNF improvement+EEF are 4 technology combinations of nitrogen quota+manure replacement+biological nitrogen fixation potential improvement+efficiency-enhancing fertilizer.

图 2 化学氮肥减量路径及潜力  
Fig. 2 Pathways and potential for reducing chemical nitrogen fertilizer

3.1 氮肥定额制度

实施氮肥定额制度是当前最有效调控氮肥（包括有机肥）施用强度的方法。欧盟硝酸盐法案中也通过限制有机肥施用量不超过 170 kg·hm<sup>-2</sup>来降低农田养分负荷，同时成员国也相继出台了不同作物总氮投入的限量标准。基于养分平衡原理计算作物在目标产量下的氮素推荐用量（表 2），可以作为计算作物氮肥定额的依据。在此总氮养分 3 100 万 t 的定额下，不改变当前的种植结构和氮投入结构（我国当前化肥占总氮投入比例为 66.7%），化肥氮的需求总量为 1 904 万 t，相比于现在的 2 574 万 t，减量潜力达 26%（图 3）。

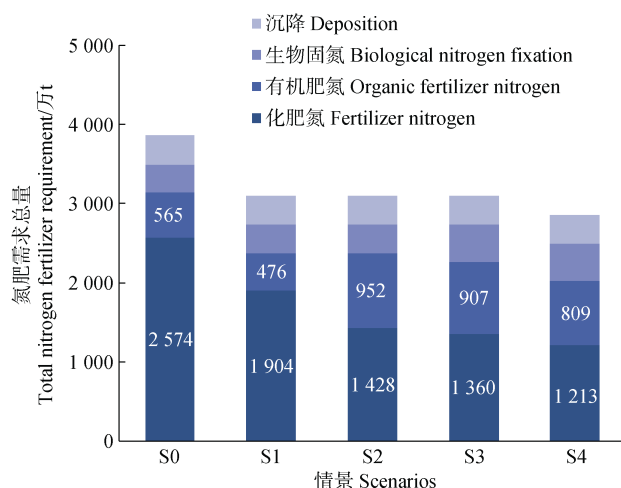
3.2 挖掘有机替代与生物固氮潜力

在合理用量的基础上进一步减少化学氮肥投入

则需要其他氮素来源的有效补充。我国有丰富的畜禽粪便和秸秆等有机资源，替代化肥潜力巨大。同时这些有机物料的还田还可提高土壤肥力、改善土壤条件和微生物群落，以及有效促进作物生长<sup>[27]</sup>。根据已有的田间实验研究，有机肥替代比例并非越高越好，适宜比例为 30%~60%，替代比例过低无法发挥其改善土壤质量、丰富养分元素和形态等作用，而过高的替代比例则会导致产量和效率的下降<sup>[28]</sup>。目前我国有机肥氮投入占比仅为 18%，生产中超过 70%的农业有机废弃物散失在环境中，仅 20%左右的农业有机废弃物作为有机肥料进行了循环再利用<sup>[29-31]</sup>，这将导致资源浪费和环境污染。以 40%有机替代比例作为合理水平，评估化学氮肥和有机肥需求的变化。在合理的总氮养分投入下，当有机替



代比例增至 40% (有机肥氮占化肥及有机肥投入总氮之比), 有机肥需求量增加至 952 万 t, 化学氮肥需求量将减少至 1 428 万 t, 减量潜力为 45% (图 3)。



注: S0 为当前我国氮肥用量; S1 为满足粮食安全背景下的合理氮肥用量, 即氮肥定额, 此时的有机替代为 20%; S2 为氮肥定额+40%有机替代下的优化氮肥用量; S3 为氮肥定额+40%有机替代+生物固氮潜力提高 30%下的优化氮肥用量; S4 为氮肥定额+40%有机替代+生物固氮潜力提高 30%+增效肥料 (EEF) 下的优化氮肥用量。Note: S0 is the current amount of nitrogen fertilizer in China, and S1 is the reasonable amount of nitrogen fertilizer under the background of food security, that is, the quota of nitrogen fertilizer, and the organic substitution is 20%. S2 is the optimal nitrogen fertilizer dosage under nitrogen fertilizer quota +40% organic substitution. S3 is the optimal nitrogen dosage under nitrogen fertilizer quota +40% organic substitution + 30% increase of biological nitrogen fixation potential; S4 is the optimal nitrogen dosage under nitrogen fertilizer quota +40% organic substitution + 30% increase in biological nitrogen fixation potential + efficiency-enhancing fertilizer (EEF) .

图 3 有机肥替代潜力与资源总量

Fig. 3 Substitution potential and total resources of manure

生物固氮是生态系统中氮循环的关键环节, 也是有效减少农业生产中人为氮肥投入的重要途径<sup>[32]</sup>。可以自行生物固氮的作物包括大豆和花生的共生固氮和水稻、小麦、玉米等作物的非共生固氮。全球农田每年固氮约为  $4.3 \times 10^7$  t ( $3.2 \times 10^7 \sim 5.3 \times 10^7$  t)<sup>[33]</sup>, 占农田氮输入的 35.8% (全球农田每年施用化学氮肥量高达  $1.2 \times 10^8$  t)<sup>[34]</sup>。而我国农田生物固氮总量为  $3.57 \times 10^6$  t (2020 年), 仅占农田氮投入的 9.8%。在所有固氮作物中, 可以与根瘤菌形成根瘤固氮的豆科作物其固氮潜力最大, 其固氮总量占农田总固

氮量的 1/2 以上<sup>[35-36]</sup>。豆科作物平均固氮量为  $80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[37-38]</sup>, 其中大豆可达  $91.7 \sim 150.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (与作物产量及施氮量有关), 在豆科作物中固氮能力最强<sup>[39]</sup>。2014 年, 我国大豆作物总面积 709.8 万  $\text{hm}^2$ , 平均单产为  $1 787.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 固氮总量约为  $5.7 \times 10^5$  t。2019 年起我国实施大豆振兴计划, 截至 2022 年大豆种植面积增至 1 024 万  $\text{hm}^2$ , 大豆平均单产增加了 11.7%, 单产水平提高  $207.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 这一目标的实现使我国豆科作物固氮总量达到  $1.1 \times 10^6$  t (豆科作物平均固氮量为  $0.052 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )<sup>[40-41]</sup>, 较之前提高了 54.9%。按当前的大豆总产增幅速率, 2030 年我国大豆产量将达到 4 000 万 t, 自给率达到 40%, 农田生物固氮总量将增加 34%。实现这一目标一方面需要增加作物单产, 另一方面要进一步扩大大豆作物种植面积。目前我国大豆的单产仅为  $2.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 实现了产量潜力的 48%, 未来产量可增至产量潜力的 60%, 即单产增加至  $2.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 面积将增加至 1 600 万  $\text{hm}^2$  (较 2022 年增加 576 万  $\text{hm}^2$ ), 生物固氮总量增加至  $4.77 \times 10^9$  kg, 增幅 34%。实现大豆面积增加较为可行的方法是通过玉米-大豆轮作替代玉米连作的模式, 此措施将玉米的种植面积补偿给大豆, 同时玉米的施肥量高于大豆, 也能进一步减少化肥用量。目前我国玉米种植面积为 4 152 万  $\text{hm}^2$ , 适合玉米-大豆轮作的地区主要包括东北、黄淮海等地区, 增加的 576 万  $\text{hm}^2$  可以分布在黑龙江、吉林、内蒙古东部、江苏等地。此时, 在以上两个优化背景下, 通过此种植结构的调整, 可以将氮肥投入降低至 1 360 万 t, 减量潜力 47% (图 3)。

### 3.3 优化氮肥产品结构

我国氮肥工业往往仅从肥料产品的含氮量考虑选用氮肥产品, 缺乏对氮肥产品“养分协同”“高效利用”和“绿色低碳”的认识, 导致当前中国的氮肥产品结构极不平衡, 酰胺态氮与铵态氮产品占据 90% 以上的市场份额, 具有较高环境成本的普通尿素成为氮肥产品的主流。而在欧美发达国家, 例如德国, 以合理的铵硝配比为理念开发的铵硝结合类氮肥产品占比约 27.7%, 所有产品中硝酸铵钙占比最大, 约 45.4%。欧美发达国家学者同时还认为, 氮肥产品物理性状多样化是提高氮肥利用率的可行方法。因此, 美国大力发展液体氮肥, 例如液氨、尿素硝铵, 其液体氮肥产品占比超过 45%。鉴于此, 结合不同肥料的环境效应与养分协同增效



理论,我国今后氮肥产品结构应转向多形态氮肥产品供应,通过铵硝协同供应提高肥料利用率,实现全新的低碳氮肥产品结构。

过去半个世纪全球氮肥产业不断发展出多种增效氮肥品种,丰富了氮肥产品结构的同时也提升了农田养分高效利用。其中已经大面积实现产业化的增效氮肥产品类型主要有生物增效尿素、控释尿素、稳定性尿素等。全球肥料工业协会(IFA)预测2026年全球新型增效肥料市场规模将达到3 570万t,占化肥总量的8%。遗憾的是,新型增效肥料在我国却发展缓慢,据统计2021年其产量仅占化肥总量的1.7%,虽然经过了50年的发展,目前发展方向仍然不明。但新时期下,要寻求氮肥行业的根本出路还离不开产品创新,企业应当加大研发力度,从提升氮素利用水平、延长肥效、延伸功能上寻求突破,以创新开拓生存空间。

针对当前不合理的氮肥产品结构,有学者提出对当前3 000万t尿素为主的氮肥产品改造至“520”的氮肥结构,这5个20%指的是20%的缓控释氮肥、20%的添加脲酶抑制剂型尿素、20%的添加硝化抑制剂型铵态氮肥、20%的硫酸铵等低排放氮肥、20%的铵硝结合态氮肥(如尿素硝铵溶液和硝酸铵钙)<sup>[42]</sup>。这些氮肥通过延长肥效、减少特定形态的活性氮损失及铵硝养分形态协同等原理,可以有效提高氮肥利用效率,减少损失<sup>[43]</sup>。这些氮肥产品生产工艺非常成熟,没有大面积生产的技术障碍。据评估,这些氮肥产品增效潜力平均为10%~20%<sup>[34, 44]</sup>,此时化学氮肥总量可以进一步减少10%左右,需求为1 213万t,减量潜力达到53%。

## 4 未来优化氮肥管理中的几个关键问题

### 4.1 氮肥定额制度的应用

氮肥定额的核算依赖于科学有效的方法。针对目前化肥定额核算方法繁多、一些方法适用性较差的问题,建议继续优化和完善方法体系,提高核算方法的科学性和可行性。在核算养分需求时,目标产量要尽可能考虑未来作物增产潜力,提高农民增产的积极性,所用的作物产品养分参数也须充分考虑作物品种和地区差异。此外,氮肥定额的核算及实施应适宜不同的尺度,一是全国尺度,按照作物不同生态区来制定氮

肥施用定额,同一生态区土壤气候条件及管理条件较为一致,目标产量相近;二是省级或市级尺度,地方标准应参考国家标准并以此为基础进一步制定适宜不同区域、不同品种、不同产量水平下的氮肥定额,作为对全国氮肥定额的补充,这两级标准不能有冲突。随着气候、品种和栽培技术等生产条件的变化,区域氮肥总量控制应重新确定。

氮肥定额制度的落实需要有效的政策保障机制,目前我国尚未形成有效的系统化的施用机制。建议在全国和地方成立化肥定额工作组,系统化构建满足不同作物和区域的化肥定额标准,并根据随着品种和栽培技术等生产条件的变化,及时更新定额标准。浙江省的一些经验和方法提供了一些好的思路,包括实名制购肥、建立化肥定额示范方、推广科学施肥产品和技术以及升级农资店经营资质等。其中,实名制购肥是通过建立数字化平台来实现化肥购买实名登记,该平台已基本覆盖浙江省大部分农资店,对经营规模较大的农户实施购肥信息实时登记。同时,浙江省对农资店经营资质进行了升级,只有使用该数字购肥平台的农资店才有经营权。政府还对农资店经营者进行培训,只有达到培训要求才能获得经营许可。浙江省的实名购肥制度和信息化平台取得了良好的成效,建议在全国其他有基础的地区进行推广。

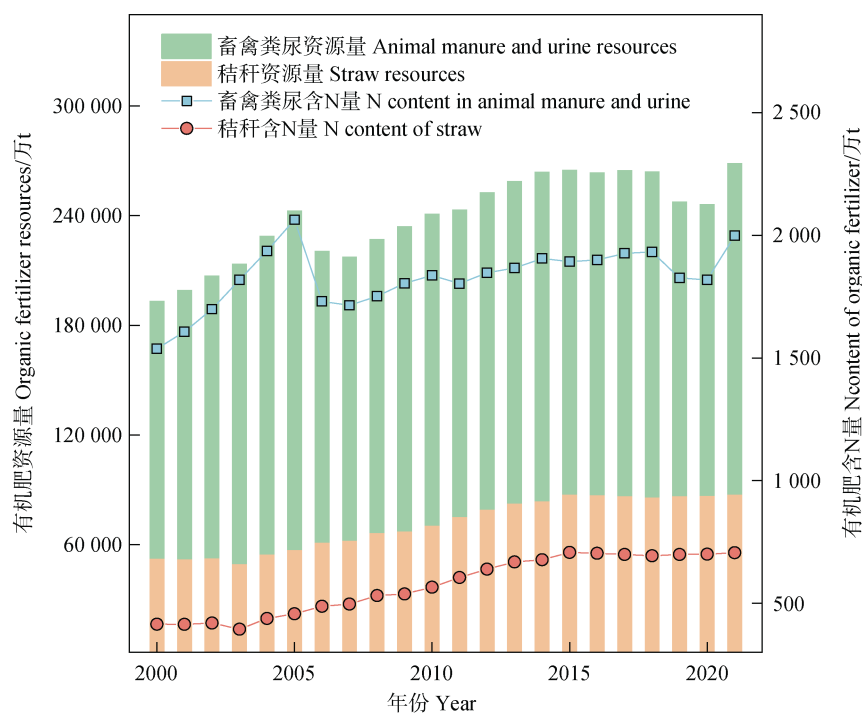
### 4.2 重视有机无机配合及生物固氮的作用

实施有机替代和增大豆科作物种植,不仅可以减少化肥投入,还能够提高农田系统的整体效率。根据研究发现,农田氮素投入结构(有机肥和生物固氮在总氮投入中的占比)对氮素盈余累积有较大影响,当有机肥和生物固氮投入之和占总氮投入接近1/2时,氮素盈余最低且氮素利用率最高<sup>[32]</sup>。多种氮素来源的配合也是多种氮素形态的配合,如有机氮和无机氮、铵态氮和硝态氮,一方面可有效改善作物的生理代谢过程,提高作物对养分的吸收从而提高产量,另一方面也可改善土壤物理化学及生物学属性,更好地固持和循环养分,提高作物利用率,减少氮素盈余<sup>[45-46]</sup>。随着我国有机肥行业的不断发展,近年来国家有关部门陆续出台了一系列相关政策,支持和规范行业的发展,为行业提供了良好的政策环境。如有机肥补贴政策,果菜茶有机肥替代化肥、畜禽粪污资源化利用行动方案等。2021

年浙江省农业农村厅发布的《关于试行农田投入有机肥最低用量指导制度的意见》<sup>[47]</sup>中,更是提出了农田投入有机肥最低用量不低于 30% 的标准,和氮肥定额一同实施称为“双定额”。尽管外部政策环境逐步改善,但当前有机肥施用仍面临诸多挑战,如有机(类)肥料肥效慢、施用量大、耗费劳力,以及生产上缺乏配套机械设备等,为应对这些挑战,仍需要政策和技术的不断创新。

值得注意的是,当前我国每年有机肥产生量以

1.58% 的速度增长,资源总量从 2000 年的 19 亿 t 增至 2021 年的 26 亿 t,能够有效供给的农田氮养分数从 1 953.2 万 t 增至 2021 年的 2 705.3 万 t (图 4)。其中,2021 年畜禽粪尿中总氮资源量为 1 998.8 万 t,秸秆中总氮资源量 706.6 万 t,即便提高有机替代比例至 40% 时,还田的有机氮养分为 952 万 t,仍有 60% 以上的有机氮养分无法被有效利用,并成为环境隐患,因此我国应通过控制养殖密度来减少有机资源带来的环境负荷。



注: 畜禽粪尿资源量核算中仅考虑猪、牛、羊。秸秆资源量核算中仅考虑小麦、玉米、水稻。Note: Only pigs, cattle and sheep are considered in the calculation of manure and urine resources. Only wheat, maize and rice are considered in the calculation of straw resources.

图 4 有机资源总量与养分含量  
Fig. 4 Total organic resources and nutrient content

作物轮作是平衡不同氮输入来源的方法之一,在丹麦、法国和美国等国家已被广泛采用,这些国家实现了较高的氮素利用率,以及较低的氮素盈余<sup>[48]</sup>。种植固氮作物有助于提高作物从多种来源吸收的氮,并能够带来许多共同效益,例如提高总体生产力和养分保持率,更好地控制病虫害,增强土壤健康和生产力<sup>[34]</sup>。多样化种植制度的有效执行可使化学氮肥用量减少 360 万 t,同时还可以减少年均碳排放( $\text{CO}_2\text{eq}$ ) 106.8 万 t,相当于我国粮食系统减少了 5.6% 的温室气体排放(2020 年碳排放为 19 亿 t)<sup>[49]</sup>。

在印度,轮作已被证明可以改善膳食养分供应、气候适应力和农民净收入,并减少自然资源使用和温室气体排放;美国、加拿大等国家也通过玉米-大豆轮作使玉米平均产量提高 5%~10%<sup>[50-51]</sup>。此外,非洲的作物由于土地退化和氮肥投入使可获得产量远低于可达到的产量,若引入豆科植物能提高主要作物产量 43%,产量提高程度是北美的 2 倍多(19%),是亚洲的 3 倍多(12%)<sup>[52]</sup>。

除了采用轮作方式,大豆玉米带状复合种植的间套作也是稳玉米、扩大豆的有效途径。该模式利

用豆科与禾本科作物间套作的根瘤固氮培肥地力,并通过优化田间配置,提升大豆玉米种间协同功能,使其资源利用率大大提高,系统生产能力显著提高。2022 年我国在多地大力推广大豆玉米带状复合种植技术,扩大大豆种植面积,提高大豆产能。2023 年共完成推广面积 134 万  $\text{hm}^2$ ,较上年增加 33 万  $\text{hm}^2$ 。未来,要进一步推动该技术的应用,在进行技术评估的同时启动经济效益评估,全面衡量实施效果,优化种植区域,同时注重加大收储政策、补贴政策等系统配套工作力度,确保整个推广工作的顺利进行。

### 4.3 氮肥产品的创新和产业化发展

大力推广高效肥料产品和施肥技术是支撑化肥定额制度有效落地的重要手段。定额制度能否全面落实,关键在于配套技术的完善与推广。缓控释肥与稳定性肥料(统称为增效肥料)自 20 世纪 50 年代兴起后,逐步成为提高肥料利用率和减少活性氮损失的重要抓手。部分发达国家已通过立法强制应用,如德国在 2017 年和 2020 年均对化肥法规进行了修订。自 2020 年 2 月以来,德国农民不得在未添加脲酶抑制剂或未在 4 h 内将尿素深施入土壤的情况下施用尿素。同时,越南、印度、孟加拉国等均已强制推行增效氮肥,如印度的印楝素等。2021 年全球(除中国外)增效肥料产品消费增长约 6%。受北美驱动,2021 年全球控释肥消费量增长 2%,稳定性肥料—脲酶抑制剂消费量增长 6%。受拉丁美洲驱动,2021 年全球水溶肥消费增长 6%。2021 年全球增效肥料消费量约为 1 680 万 t,较 2020 年增长 5%,主要推动力为养分利用效率提高的政策需求、产品技术创新和可控性提高。

相比全球,我国增效肥料发展缓慢,国内外发展的巨大差异在于发达国家更注重环保效应,而我国长期对农业生产环保考虑不足。同时,国内现有的增效肥料产品的增产、增效、节肥效果不突出且变异大。根据前人研究,增效肥料的增产率仅为 3%~6%,氮素利用率无法全面突破 50%。主要原因包括三个方面:一是产品仍存较多不完善之处,如包膜肥的控释效果不稳定,稳定性肥料的持效期短(20 天以内)、抑制率不稳定;二是产品适用性差,与土壤气候和作物条件不匹配;三是配套施用技术不完善,难以实现节本、省工、增产的作用。未来,为了进一步满足农业绿色发展需求和肥料产

业升级需求,控释肥与稳定性肥料产品的生产应优化工艺装备、降低成本、提升产品质量,并创制适用复杂场景的产品。围绕当前产业瓶颈,需要通过技术创新提高控释肥膜材降解率,研发抑制率稳定、持效期长、低成本、适用主流化肥生产工艺的抑制剂产品及其配套工艺等。除了技术创新,增效氮肥的进一步应用还需要良好的机制保障。目前我国增效肥料行业在政策支持、市场准入、质量监管等方面仍存在不足。例如,针对增效肥料的核心增效物质的添加量没有强制标准、行业标准制定要求低、不合规产品缺乏监管和强制处罚措施等。提倡政府、行业联合会、高校与科研院所合作,制定科学合理的行业标准和监管政策。加强市场监管,确保增效肥料产品质量安全。同时,通过财政补贴、税收优惠等措施,鼓励企业研发创新,提升产品质量和技术水平。这些举措将有助于促进增效氮肥在我国的广泛应用。

### 参考文献 (References)

- [1] Zhang W F, Ma L, Huang G Q, et al. The development and contribution of nitrogenous fertilizer in China and challenges faced by the country[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (15): 3161—3171. [张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (15): 3161—3171.]
- [2] Shah S M, Liu G Y, Yang Q, et al. Emergy-based valuation of agriculture ecosystem services and dis-services[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118019.
- [3] Ghasemi-Mobtaker H, Kaab A, Rafiee S. Application of life cycle analysis to assess environmental sustainability of wheat cultivation in the west of Iran[J]. *Energy*, 2020, 193: 116768.
- [4] Wang C, Li X L, Gong T T, et al. Life cycle assessment of wheat-maize rotation system emphasizing high crop yield and high resource use efficiency in Quzhou County[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 68: 56—63.
- [5] Zhang X, Zhang Y, Shi P, et al. The deep challenge of nitrate pollution in river water of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 144674.
- [6] Gu W Y, Ma G S, Wang R, et al. Climate adaptation through crop migration requires a nexus perspective for environmental sustainability in the North China Plain[J]. *Nature Food*, 2024, 5: 569—580.
- [7] Bindaban P S, Dimkpa C O, White J C, et al. Safeguarding human and planetary health demands a fertilizer sector transformation[J]. *Plants, People, Planet*,

- 2020, 2 (4): 302—309.
- [ 8 ] Liu J G, You L Z, Amini M, et al. A high-resolution assessment on global nitrogen flows in cropland[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107 ( 17 ): 8035—8040.
- [ 9 ] You L C, Ros G H, Chen Y L, et al. Global mean nitrogen recovery efficiency in croplands can be enhanced by optimal nutrient, crop and soil management practices[J]. Nature Communications, 2023, 14: 5747.
- [ 10 ] Wang Y C, Lu Y L. Evaluating the potential health and economic effects of nitrogen fertilizer application in grain production systems of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 264: 121635.
- [ 11 ] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular of the Ministry of Agriculture on the issuance of the action plan for zero growth in fertilizer Use by 2020[EB/OL]. [2024-05-13]. [https://www.moa.gov.cn/nybg/2016/diwuqi/201711/t20171127\\_5920859.htm](https://www.moa.gov.cn/nybg/2016/diwuqi/201711/t20171127_5920859.htm). [中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》的通知 [EB/OL]. [2024-05-13]. [http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/201503/t20150318\\_6309945.htm](http://www.zzys.moa.gov.cn/gzdt/201503/t20150318_6309945.htm).]
- [ 12 ] Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Ministry of Industry and Information Technology on promoting the transformation and development of the fertilizer industry's guiding opinions[EB/OL]. [2024-05-13]. [https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2020/art\\_c686f3eb293841a5bfcc8bc1315b711.html](https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2020/art_c686f3eb293841a5bfcc8bc1315b711.html). [中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部关于推进化肥行业转型发展的指导意见 [EB/OL]. [2024-05-13]. [https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2020/art\\_c686f3eb293841a5bfcc8bc1315b711.html](https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/ldhd/art/2020/art_c686f3eb293841a5bfcc8bc1315b711.html).]
- [ 13 ] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Ministry of Agriculture on the issuance of "carry out fruit, vegetable and tea organic fertilizer action plan for substituting chemical fertilizers[EB/OL]. [2024-05-13]. [https://www.moa.gov.cn/nybg/2017/derq/201712/t20171227\\_6130977.htm](https://www.moa.gov.cn/nybg/2017/derq/201712/t20171227_6130977.htm). [中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《开展果菜茶有机肥替代化肥行动方案》的通知 [EB/OL]. [2024-05-13]. [https://www.moa.gov.cn/nybg/2017/derq/201712/t20171227\\_6130977.htm](https://www.moa.gov.cn/nybg/2017/derq/201712/t20171227_6130977.htm).]
- [ 14 ] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Circular of the Ministry of Agriculture on the issuance of the action program on resource utilization of livestock and poultry manure ( 2017-2020 ) [EB/OL]. [2024-05-13]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103\\_6134011.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm). [中华人民共和国农业农村部. 农业部关于印发《畜禽粪污资源化利用行动方案 ( 2017—2020 年 ) 》的通知 [EB/OL]. [2024-05-13]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103\\_6134011.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dbq/201801/t20180103_6134011.htm).]
- [ 15 ] Xu P, Li G, Zheng Y, et al. Fertilizer management for global ammonia emission reduction[J]. Nature, 2024, 626 ( 8000 ): 792—798.
- [ 16 ] Zhang Q S. Nitrogen, phosphorus and potassium nutrient balance and optimization approaches of major crops in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. [张青松. 中国主要作物氮磷钾养分平衡与优化途径 [D]. 北京: 中国农业大学, 2021.]
- [ 17 ] Zhejiang Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs. Opinions on trial agricultural input fertilizer quota system[EB/OL]. [2024-05-13]. [https://nynct.zj.gov.cn/art/2019/8/7/art\\_1229142036\\_685297.html](https://nynct.zj.gov.cn/art/2019/8/7/art_1229142036_685297.html). [浙江省农业农村厅. 关于试行农业投入化肥定额制的意见 [EB/OL]. [2024-05-13]. [https://nynct.zj.gov.cn/art/2019/8/7/art\\_1229142036\\_685297.html](https://nynct.zj.gov.cn/art/2019/8/7/art_1229142036_685297.html).]
- [ 18 ] Jiangsu Market Supervision and Administration Bureau. The quota of chemical fertilizer application in key watershed farmland[EB/OL]. [2024-05-13]. [https://nynct.jiangsu.gov.cn/art/2022/4/8/art\\_13245\\_10409428.html](https://nynct.jiangsu.gov.cn/art/2022/4/8/art_13245_10409428.html). [江苏省市场监督管理局. 重点流域农田化肥用量定额 [EB/OL]. [2024-05-13]. [https://nynct.jiangsu.gov.cn/art/2022/4/8/art\\_13245\\_10409428.html](https://nynct.jiangsu.gov.cn/art/2022/4/8/art_13245_10409428.html).]
- [ 19 ] Lü F L, Hou M M, Zhang H T, et al. Closing the nitrogen use efficiency gap and reducing the environmental impact of wheat-maize cropping on smallholder farms in the Guanzhong Plain, Northwest China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18 ( 1 ): 169—178.
- [ 20 ] Monteny G J. The EU Nitrates Directive: A European approach to combat water pollution from agriculture[J]. The Scientific World Journal, 2001, 1 ( Suppl 2 ): 927—935.
- [ 21 ] Gao C, Zhang T. Environmental management options practiced in Europe to mitigate agricultural nutrient pollution of ground and surface water[J]. Rural Eco-Environment, 1999, 15 ( 2 ): 50—53.
- [ 22 ] He P, Jin J Y, Pampolino M F, et al. Approach and decision support system based on crop yield response and agronomic efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18 ( 2 ): 499—505. [何萍, 金继运, Pampolino M F, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18 ( 2 ): 499—505.]
- [ 23 ] 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.]
- [ 24 ] Ramamoorthy B, Narasimham R L, Dinesh R S. Fertilizer application for specific yield target of sonara-64 wheat[J]. Indian Farming, 1967, 16 ( 4 ): 46—49.

- [ 25 ] Zhang B F, Xiao Y L, Zhang C, et al. Establishment of nitrogen surplus indicators in the main vegetable and orchard systems in Hainan[J]. *Journal of Tropical Biology*, 2024, 15 ( 4 ): 391—399. [张博飞, 肖玉林, 张翀, 等. 海南典型蔬菜和果树氮素盈余指标的建立[J]. *热带生物学报*, 2024, 15 ( 4 ): 391—399.]
- [ 26 ] Li W F, Yi J J, Ju X T, et al. Study on nitrogen application quota for major crops and regional nitrogen capacity of farmland in Hainan Island[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, DOI: 10.11674/zwyf.2024202. [李伟芳, 易俊杰, 巨晓棠, 等. 海南岛主要作物氮肥定额及区域农田氮素承载力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, DOI: 10.11674/zwyf.2024202.]
- [ 27 ] Yi X Y, Yu L R, Chang S H E, et al. The effects of China's Organic-Substitute-Chemical-Fertilizer ( OSCF ) policy on greenhouse vegetable farmers[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297: 126677.
- [ 28 ] Shang Z Y, Abdalla M, Xia L L, et al. Can cropland management practices lower net greenhouse emissions without compromising yield?[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27 ( 19 ): 4657—4670.
- [ 29 ] Ren F L, Sun N, Misselbrook T, et al. Responses of crop productivity and reactive nitrogen losses to the application of animal manure to China's main crops: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 158064.
- [ 30 ] Chen B H, Ren C C, Wang C, et al. Driving forces of nitrogen use efficiency in Chinese croplands on county scale[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 316 ( 2 ): 120610.
- [ 31 ] Shen W Z, He J, Li S S, et al. Opportunity and shift of nitrogen use in China[J]. *Geography and Sustainability*, 2024, 5 ( 1 ): 33—40.
- [ 32 ] Hu W B, Wang X M, Xu Y F, et al. Biological nitrogen fixation and the role of soil diazotroph niche breadth in representative terrestrial ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 189: 109261.
- [ 33 ] Herridge D F, Peoples M B, Boddey R M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311 ( 1 ): 1—18.
- [ 34 ] Gu B J, Zhang X M, Lam S K, et al. Cost-effective mitigation of nitrogen pollution from global croplands[J]. *Nature*, 2023, 613 ( 7942 ): 77—84.
- [ 35 ] Yan Z J, Chu J C, Nie J W, et al. Legume-based crop diversification with optimal nitrogen fertilization benefits subsequent wheat yield and soil quality[J]. *Agricultural, Ecosystems and Environment*, 2024, 374: 109171.
- [ 36 ] Xie Z B, Zhang Y H, Wang H. Advances and perspectives in paddy biological nitrogen fixation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 ( 3 ): 540—546. [谢祖彬, 张燕辉, 王慧. 稻田生物固氮研究进展及方向[J]. *土壤学报*, 2020, 57 ( 3 ): 540—546.]
- [ 37 ] Ladha J K, Tirol-Padre A, Reddy C K, et al. Global nitrogen budgets in cereals: A 50-year assessment for maize, rice, and wheat production systems[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19355.
- [ 38 ] Shahzad A N, Qureshi M K, Wakeel A, et al. Crop production in Pakistan and low nitrogen use efficiencies[J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2: 1106—1114.
- [ 39 ] Guan D W, Li L, Yue X L, et al. Study on potential of biological nitrogen fixation of soybean in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20 ( 6 ): 1497—1504. [关大伟, 李力, 岳现录, 等. 我国大豆的生物固氮潜力研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20 ( 6 ): 1497—1504.]
- [ 40 ] Collino D J, Salvagiotti F, Peticari A, et al. Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: Relationships with crop, soil, and meteorological factors[J]. *Plant and Soil*, 2015, 392 ( 1 ): 239—252.
- [ 41 ] Di Ciocco C, Penón E, Coviella C, et al. Nitrogen fixation by soybean in the pampas: Relationship between yield and soil nitrogen balance[J]. *Agrochimica*, 2011, 55 ( 6 ): 305—313.
- [ 42 ] Li D J, Liu R, Chen L, et al. Proposed innovation reform model for the mineral nitrogen fertilizer industry in China to reduce greenhouse gas emissions[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, 10 ( 2 ): 234—247.
- [ 43 ] Zhang F S, Huang C D, Shen J B, et al. Green intelligent fertilizer: New insight into making full use of mineral nutrient resources and industrial approach[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 ( 5 ): 1203—1212. [张福锁, 黄成东, 申建波, 等. 绿色智能肥料: 矿产资源养分全量利用的创新思路与产业化途径[J]. *土壤学报*, 2023, 60 ( 5 ): 1203—1212.]
- [ 44 ] Li T Y, Zhang W F, Yin J, et al. Enhanced-efficiency fertilizers are not a panacea for resolving the nitrogen problem[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24 ( 2 ): e511—e521.
- [ 45 ] Chen Z D. Thinking about the work of fertilizer reduction and efficiency improvement in Zhejiang Province[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2024 ( 2 ): 36—38. [陈正道. 关于浙江省化肥减量增效工作的思考[J]. *上海农业科技*, 2024 ( 2 ): 36—38.]
- [ 46 ] Liu S B, Wang J Y, Pu S Y, et al. Impact of manure

- on soil biochemical properties: A global synthesis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 745: 141003.
- [ 47 ] Wang J, Shan Y J, Lu R H, et al. Practice and exploration of chemical fertilizer reduction and efficiency improvement in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63 ( 12 ): 2755—2758. [汪洁, 单英杰, 陆若辉, 等. 浙江省化肥减量增效的实践与探索[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63 ( 12 ): 2755—2758.]
- [ 48 ] Ding W C, Xu X P, He P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11—18.
- [ 49 ] Yang X L, Xiong J R, Du T S, et al. Diversifying crop rotation increases food production, reduces net greenhouse gas emissions and improves soil health[J]. *Nature Communications*, 2024, 15 ( 1 ): 198.
- [ 50 ] Xie W, Zhu A F, Ali T, et al. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China[J]. *Nature*, 2023, 616 ( 7956 ): 300—305.
- [ 51 ] Bowles T M, Mooshammer M, Socolar Y, et al. Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in North America[J]. *One Earth*, 2020, 2 ( 3 ): 284—293.
- [ 52 ] Zhao J, Chen J, Beillouin D, et al. Global systematic review with meta-analysis reveals yield advantage of legume-based rotations and its drivers[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4926.

( 责任编辑：卢 萍 )