

DOI: 10.11689/sc.2023080101

马若男, 李强, 周道玮. 农田氮肥残留效应及其影响因素[J]. 土壤与作物, 2024, 13 (2): 201–214.

MA R N, LI Q, ZHOU D W. Residual effect of nitrogen fertilizer and its influencing factors in farmland[J]. Soils and Crops, 2024, 13 (2): 201–214.

农田氮肥残留效应及其影响因素

马若男^{1,2}, 李强¹, 周道玮¹

(1. 吉林省草地畜牧重点实验室/中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 氮肥利用效率的科学评估对指导农业生产至关重要。传统氮肥评估方案仅能反映当季肥料的利用效率, 而忽视了氮肥的残留效应。本文综述了肥料氮的转运、氮肥残留数量、分布、利用及其影响因素, 基于当前研究进展提出未来研究方向及相关研究对农业管理实践的启示。农田输入的肥料氮, 除了可以被当季作物吸收利用外, 残留在土壤中的氮也可以继续被后续作物吸收利用, 即评估肥效时, 应该考虑氮肥的后效, 而残留氮肥的回收利用受自身迁移和转化、作物种类、地力条件、气候环境、耕作管理等多个因素耦合影响。生产实践中, 对决定残留氮肥回收效率的外部因素进行优化调控, 诸如在长期浅根系/氮吸收低效作物种植后, 轮作深根系/氮高效吸收型作物, 合理密植, 在干旱区适时灌溉保墒。针对作物氮肥喜好合理定制肥料类型, 结合水肥一体化技术实施分次施肥, 施氮同时配施微生物氮转化联合抑制剂均可有效提高氮肥总体利用率。利用¹⁵N 同位素示踪技术, 整合残留肥效和土壤氮素矿化等动态监测数据, 配合作物类型、预期管理、目标产量等多要素数据, 建立一套氮肥残留肥效的预测评估及氮肥减施的决策支持模型, 对于指导未来的氮肥精准减施和提升农业生产效益具有重要科学意义。

关键词: 农田; 氮肥利用效率; 氮肥残留; 残留氮肥回收; 施肥管理

中图分类号: S143.1

文献标识码: A

Residual effect of nitrogen fertilizer and its influencing factors in farmland

MA Ruonan^{1,2}, LI Qiang¹, ZHOU Daowei¹

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Grassland Farming/Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The scientific evaluation of nitrogen fertilizer use efficiency is very important to guide agricultural production. The traditional nitrogen fertilizer evaluation scheme can only reflect the fertilizer use efficiency in the season applied, but ignore the residual effect of nitrogen fertilizer. The fate of fertilizer nitrogen, the amount, distribution, utilization and influencing factors of nitrogen fertilizer residues were reviewed in this paper. Based on the current research progress, the future research highlight and the implications of related research on agricultural management practice were proposed. In addition to being absorbed and utilized by crops in the season applied, the residual nitrogen in the soil can also continue to be absorbed and utilized by subsequent crops; the after-effect of nitrogen fertilizer should be taken into account when evaluating fertilizer efficiency. The recovery and utilization of residual nitrogen fertilizer are influenced by multiple factors such as its own migration and transformation, crop types, soil fertility conditions, climate environment and tillage management. In the production practice, the external factors that determine the recovery efficiency of residual nitrogen should be optimized. The potential practices include rotating deep root/high nitrogen absorption type crops and reasonable dense planting after long-term planting of shallow root/low nitrogen absorption crops, timely irrigation to conserve soil moisture in arid areas, customized fertilizer type according to the preference of crop nitrogen fertilizer, water and

收稿日期: 2023-08-10; 修回日期: 2023-10-26.

基金项目: 中国科学院战略先导专项 (XDA28110303); 吉林省自然科学基金 (YDZJ202201ZYTS522); 吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目 (2023SYHZ0053); 中国科学院东北地理与农业生态研究所创新团队项目 (2023CXTD02).

第一作者简介: 马若男 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为作物生产与肥料利用. E-mail: mnr159@163.com.

通信作者: 李强 (1984-), 男, 副研究员, 主要研究方向为作物生产和土壤培肥. E-mail: liqiang@iga.ac.cn.

fertilizer integration technology to implement fractional fertilization, nitrogen application combined with microbial nitrogen conversion inhibitor in effectively improving the overall nitrogen utilization rate. Using ^{15}N isotope tracer technology, integrating dynamic monitoring data such as residual fertilizer efficiency and soil nitrogen mineralization, combining multi-factor data such as crop type, expected management and target yield, as well as establishing a set of prediction and evaluation of residual fertilizer efficiency of nitrogen fertilizer and decision support model of nitrogen fertilizer reduction are of great scientific significance for guiding precise nitrogen fertilizer reduction and improving agricultural production efficiency in the future.

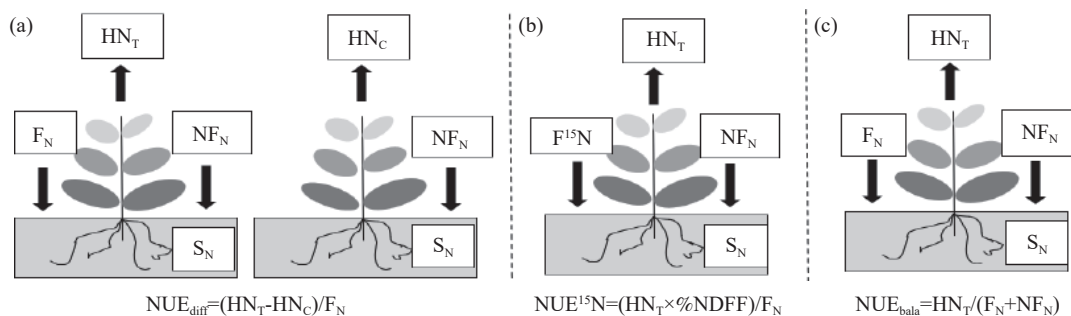
Keywords: farmland; nitrogen use efficiency; nitrogen fertilizer residue; residual nitrogen fertilizer recovery; fertilization management

0 引言

农业生产实践中,作物产量一直是农田经营和管理者关注的焦点^[1]。世界范围内,氮肥对作物产量的形成发挥着至关重要的作用^[2],平均贡献率约为50%^[3]。农田经营者往往为追求高产而盲目地使用大量氮肥^[4],然而,作物的生物学性状限制了其利用氮肥的潜力。对于特定作物和地力条件,当氮肥施用超过一定数量时再进一步增施氮肥,作物不仅不能显著增产,甚至可能造成减产^[5]。氮肥过量施用除了降低种植效益、造成肥料浪费外,还可能增加氮源温室气体的排放和水体的富营养化,对环境安全形成潜在威胁^[6]。

即使按产量效益评估当季肥料施用并不过量,现行的经验施肥标准下,去除作物吸收和肥料损失,当季施用的肥料氮平均有20%以上残留在土壤中^[7]。这部分氮后续或被微生物固定、或纳入土壤有机质、或保留为土壤矿质氮成为后续作物可直接吸收利用的氮源^[8]。生产中,人们普遍按照固定的作物生产模式在每季重复施用氮肥,而忽略了残留氮的肥效,这导致肥料氮在土壤中持续积累,形成了时间尺度上的肥料过施^[9]。

氮肥利用效率是指导农业施肥管理的通用指标。当前,作物氮肥利用效率的评估方法有3种,分别是氮素差减法(NUE_{diff})、 ^{15}N 同位素示踪法(NUE^{15}N)和氮平衡法(NUE_{bala})^[10]。氮素差减法用来指征氮肥表观利用率,通过施肥和未施肥地块作物收获时总氮吸收量之差与施氮量的比值表示(图1a)。 ^{15}N 同位素示踪法能精准区分作物对肥料源氮和土壤库存氮的吸收数量,被广泛用于作物氮吸收、利用和分配的



注: a、b、c 分别代表氮素差减法、 ^{15}N 示踪法和氮平衡法。 F_N 表示肥料氮输入, NF_N 表示非肥料氮输入, S_N 表示土壤氮, HN_T 表示施肥地块收获时作物吸收的氮, HN_C 表示未施肥地块收获时作物吸收的氮, $F^{15}\text{N}$ 表示施入 ^{15}N 标记氮肥,%NDF表示作物吸收的氮中来自当季施用氮肥的比例^[13]。

Note: a, b and c represent nitrogen difference method, ^{15}N tracer method and nitrogen balance method respectively. F_N represents fertilizer nitrogen input, NF_N represents non-fertilizer nitrogen input, S_N represents soil nitrogen, HN_T represents the nitrogen absorbed by the crop when the fertilized plot is harvested, HN_C represents the nitrogen absorbed by the crop when the unfertilized plot is harvested, $F^{15}\text{N}$ represents the application of ^{15}N labeled nitrogen fertilizer, %NDF represents the proportion of nitrogen absorbed by the crop from the application of nitrogen fertilizer in growing season^[13].

图1 3种氮肥利用效率评估计算方法

Fig. 1 Three evaluation methods of nitrogen use efficiency

定量化研究^[11] (图 1b)。氮平衡法通过植物总氮收获量与土壤中全部氮输入量 (包括肥料氮和其他形式氮输入) 的比值来表征氮肥利用效率^[12] (图 1c)。这 3 种氮肥利用效率评估方法各有优劣, 根据研究和实践需要, 各有其可取之处, 计算数值的比较关系一般为 $NUE^{15}N \approx NUE_{diff} < NUE_{bala}$ ^[13]。然而, 3 种氮肥利用效率评估方法都存在相同的局限性, 即 3 种方法的评估数据指征的是肥料在当季作物中的吸收利用效率, 都没有考虑或区分土壤残留肥料氮的后效, 从而低估了长时间尺度内肥料真实的利用效率, 同时可能潜在高估了当季施用肥料的利用效率 (如氮平衡法)。

残留氮肥的积累增加了土壤氮库的养分供应, 将限制新施氮肥的利用效率^[14]。因而, 残留氮肥的后续肥效不仅在科学上影响肥料氮真实利用效率的评估, 也影响生产中的施肥决策。据此, 开展残留氮肥命运 (Nitrogen fertilizer fate) 及其肥料效应的研究, 对科学评估氮肥利用, 精准指导农业生产具有重要意义。本文对这方面的最新研究成果进行了综述, 以为相关领域的科学研究和生产实践提供理论依据。

1 肥料氮残留数量、分布及其回收利用

当季施用的氮肥面临 3 种命运: 作物吸收利用、肥料损失和土壤残留^[15]。肥料吸收利用率决定作物生产效益, 国内相关研究报道玉米、小麦、水稻等主要谷类作物当季氮肥平均利用效率为 27% ~ 37%^[16]。Lassaletta 等^[3] 整合 124 个国家粮农组织的历史统计数据, 指出作物当季氮肥利用效率普遍不足 50%; Cassman 等^[17] 综合全球实验性研究数据, 发现全球主要作物当季施用氮肥的平均利用效率在 30% ~ 50%。

氮肥损失指肥料转移出农田土壤环境或作物可吸收范围的过程, 其主要途径包括氨挥发和硝态氮淋溶^[18]。研究表明经由挥发损失的氮肥相对较少, 而氮肥的反硝化作用和淋溶损失则受环境条件强烈影响, 在温暖、湿润条件下损失较多, 在冷凉、干旱条件下损失很少^[18]。土壤残留是肥料归宿中占比最高的, Sanchez 和 Blackmer^[19] 基于美国常规种植玉米田的研究指出: 当季施氮量约有高达 50% ~ 64% 残留在土壤中。华北平原小麦种植区, 当施氮量达到 375 kg(N)·hm⁻² 时, 土壤残留氮肥可占当季总施氮量的 60.4%^[20]。这些结果充分表明当季施用的肥料有较大部分残留在土壤中。通过分析全球代表性作物的种植试验结果发现氮肥的土壤残留比例为 25% ~ 65%, 尽管受研究区域、作物类型、氮肥利用评估方法等影响, 氮肥命运的评估存在差异, 但全球范围内土壤残留量总体高于当季作物吸收量 (表 1)。即使当季施用肥料存在较高的土壤残留, 相比于氮肥利用率、氮肥损失及其环境效应等研究, 研究者很少关注氮肥残留及其后续肥料命运问题。

残留氮肥的垂直分布影响其被后续植物根系的吸收利用。对于水稻、小麦、玉米等主要作物, 其主根 (初生根) 长度一般不超过 40 cm, 主根的分布一定程度上限制了作物对更深层残留土壤氮的吸收, 因此, 0 ~ 40 cm 残留氮肥的数量会极大程度影响残留氮肥的回收利用效率。有研究指出: 0 ~ 25 cm 土层土壤可截存 25% ~ 40% 的当季残留氮肥, 且这部分肥料有近 50% 可在该土层存留 5 年以上^[21]。对黄土高原区冬小麦的田间观测实验发现, 当季施用氮肥主要残留于 0 ~ 40 cm 土层内, 该土层的氮肥残留量为 31.8 ~ 43.8 kg(N)·hm⁻², 约占当季施肥总量的 29.2% ~ 31.8%^[22]。Pilbeam^[23] 分析了英国、美国、法国等 6 个国家的农田土壤数据, 发现高达 74% 的当季残留氮肥分布在 0 ~ 30 cm 土层, 30 cm 以下土壤残留氮占比平均不足 20%。然而, 残留肥料氮的分布可能受降雨量的显著影响, 如在西班牙南部的典型雨养农业区, 较强的淋溶作用导致残留肥料氮被进一步下渗并大部分积累在 30 ~ 60 cm 土层中^[24]。在我国的冬小麦种植区, 夏季休耕期强降雨的发生甚至可使冬小麦种植季残留的氮肥被淋溶到 100 cm 以下的土层深度^[25]。

残留在土壤中的氮肥仍有机会被下季作物吸收利用。有研究指出, 在连作系统中大麦田的平均残留氮肥回收率 (残留氮肥吸收量占第一季氮肥施用量的比例) 约为 2.8%^[26], 小麦田约为 2.4%^[27], 玉米田为 4.2% ~ 9.4%^[28], 番茄等果蔬作物对土壤残留氮肥的回收利用效率为 2.2% ~ 4.7%^[29]。Smith 和 Chalk^[30] 利用¹⁵N 示踪技术进行的长期监测试验表明, 残余肥料在施肥后的第 60 年仍能在作物中检测到, 该研究发现在施肥后的第二季, 残留肥料的平均回收率为 5.4%, 自第三季开始, 残余肥料回收率 < 3%, 且逐渐递减。相比之下, 轮作系统的氮肥回收效率略高。在稻麦轮作系统中, 后季小麦对残留氮的回收率为 3.5% ~

5.2%^[31], 后季水稻为 9.2% ~ 11.8%^[32]。在大豆-玉米轮作系统中, 后季玉米对残留氮的回收率为 6.86% ~ 13.55%^[33]。在冬小麦-夏玉米轮作系统中, 第二季夏玉米对残留氮肥的回收率在华北平原为 5% ~ 10%^[34], 在黄土高原则可达 8% ~ 17%^[35], 而第三季冬小麦和第四季夏玉米仍可回收少量第一季的残余氮肥, 回收率分别为 0.9% ~ 2.9% 和 1.2% ~ 1.6%^[36]。

表 1 不同研究区、不同作物当季施用氮肥命运

Table 1 Nitrogen (N) fertilizer fates within growing season across different study regions and crop types

研究地区 Study regions	作物类型 Crop types	当季氮肥利用效率 N use efficiency within the current season/%	氮肥残留 N fertilizer residue/%	氮肥损失 N fertilizer loss/%	氮肥利用效率评估方法 Evaluation method of N use efficiency	参考文献 Reference
东北和华北地区 Northeast and North China	玉米 Maize	34	35	31	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[37]
华北平原 North China Plain	冬小麦/夏玉米 Winter wheat/Summer maize	25	25 ~ 45	30 ~ 50	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[38]
河南 Henan	小麦 Wheat	29.6 ~ 45.1	24.5 ~ 38.6	23.6 ~ 32.7	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[39]
长江流域 Yangtze River Basin	水稻/小麦 Rice / Wheat	40.8 ~ 41.8	43.2 ~ 56.7	28.2 ~ 37.3	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[40]
尼泊尔 Nepal	玉米/谷子 Corn / Millet	25	58	17	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[41]
摩洛哥 Morocco	小麦 Wheat	33.1	64.8	2.1	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[27]
澳大利亚东部 Eastern Australia	豆科作物/小麦 Legume crops / Wheat	49	30	21	氮平衡法 (NUE _{bal}) N balance method	[42]
德克萨斯州墨西哥湾沿岸地区 Texas Gulf Coast	玉米 Maize	14	45.8	40.2	氮素差异法 (NUE _{diff}) N difference method	[43]
巴西 Brazil	玉米+栅栏草/黑麦 Corn + Fence grass / Rye	33.6	48.9	17.5	¹⁵ N示踪法 (NUE ¹⁵ N) ¹⁵ N tracer method	[44]

2 影响氮肥利用及残留的因素

2.1 作物种类及品种

作物种类决定其生物量生产、根系结构和养分利用特征, 也通过改变地表覆盖调控土壤小气候, 是影响肥料残留的首要因素。然而, 现有的栽培学研究多关注于同一作物不同管理方式下的肥料利用比较。鲜有的同一区域、不同作物的种植试验发现, 华北地区玉米肥料氮残留率为 36.52% ~ 50.42%^[45], 小麦为 29.2% ~ 33.6%^[46]。事实上, 生产实践中由于不同作物肥料投入量的固有差异, 很难精准量化作物种类对肥料残余率的绝对贡献, 未来研究需要在标准化各类作物肥料投入基础上, 构建不同作物肥料残留的比较数据库, 以指导区域精准农业生产和环境管理。即使同种作物, 不同的品种, 甚至不同基因型也会因为肥料吸收能力的差异导致氮肥残留数量发生变化。如研究发现, 同一地区相同管理方式下, 不同品种小麦田的土壤残留硝态氮为 62.9 ~ 111.8 mg·kg⁻¹ 不等^[47]。另有研究发现, 高效氮吸收基因型较低效氮吸收基因型小麦具有更低的氮肥残留率^[48]。相似的研究结果表明, *GSI* 基因过量表达的玉米基因型具有更高的氮肥利用效率和更低的氮肥残留量^[49]。

2.2 环境因素

环境因子主要通过影响氮肥的迁移和转化, 调控作物生长性能进而改变氮肥残留。作物产量由土壤基础肥力和施肥量协同与权衡决定, 因而作物生长所处的土壤肥力条件在一定程度上影响氮素分配。在固定施肥量下, 过高或过低的土壤肥力都可能对肥料利用效率产生潜在的抑制作用^[50]。当土壤基础肥力较高时, 有利于作物获得高产, 但当土壤自身有效氮含量高、氮素矿化能力强时, 作物生长对土壤氮的依存度增加, 此时如果仍沿用传统施肥量或增加施肥量, 即可能导致氮肥利用效率下降, 增加氮肥残留和损失的风险^[51]。

而考虑到大田生产中氮肥施用的季节性及氮肥供给的非连续性, 如果土壤基础肥力过低, 极有可能造成作物生长阶段中生理性缺肥, 影响作物发育及最终产量, 也会影响肥料利用效率^[50]。土壤有机碳含量与作物对氮素的吸收具有正相关关系, 有机碳含量高的土壤, 作物对土壤和尿素中的氮吸收、土壤残留肥料中的氮均有所增加, 减少了氮损失^[52]。

不同土壤质地, 氮肥利用情况也存在差异。相较于砂土, 黏土因其较好的养分固持能力, 可促进氮的吸收、残留氮的保留及回收^[53]。水分是影响肥料残留和利用的关键环境要素。例如干旱通常导致作物生产力下降, 并抑制氮肥的淋溶损失, 潜在降低氮肥利用效率的同时, 还会增加氮肥在土壤中的残留^[54]。增加降水或灌溉能够刺激作物生产, 但同时也会提高氮肥被淋溶的风险。如果遭遇强降雨或不合理的灌溉, 耕层中大量的硝态氮可能渗入到深层土壤中, 降低了肥料利用率, 甚至可能造成作物根区脱肥, 严重降低作物产量^[55]。最近的研究表明: 伴随当前的气候变化和农业集约化管理, 极端性强降雨或集约灌溉导致的氮肥淋溶损失已经成为全球农业管理面临的重要问题^[55]。因此, 根据作物的需水特征, 供给适宜的水分条件对于保障作物产量和提高肥料利用率至关重要。

温度是影响氮肥残留的另一关键环境因子。温度决定作物长势和肥料吸收, 极端高温和低温都会抑制作物生长, 降低氮肥利用率并增加氮肥残留。适宜温度范围有利于作物生长和肥料利用, 同时能够提高尿素氮向铵态氮、硝态氮的转化, 促进肥料的吸收利用^[56-57]。尽管温度对氮肥利用有重要影响, 但其主要受区域气候控制, 大田农业生产中很难直接对温度进行适时调控以达到提高肥料利用、减少肥料残留的目的。在北方冷凉地区, 地膜覆盖是为数不多的一项能改善地温的耕作措施。也有研究表明, 地膜覆盖能够有效提升作物生长和肥料利用效率^[58], 但由于地膜覆盖同时具有土壤保墒的作用, 其导致的地温提升对肥料利用率的改善究竟发挥了多大作用仍需进一步试验研究。

土壤中微生物的组成、数量和活动也是影响肥料氮残留的重要环境要素, 其影响途径之一是调控土壤氮素循环过程^[59]。如研究发现, 土壤中氨氧化细菌和氨氧化古菌的相对丰度通过改变硝化作用强度调控土壤无机态氮含量, 进而决定着不同施氮管理下的作物氮素吸收和氮肥残留^[60]。另有研究发现, 在稻田中, 由于反硝化细菌占据主导地位, 增强了土壤反硝化作用强度, 增加了气态氮损失, 是导致水田系统氮吸收和土壤氮残留相对较低的主要原因^[61]。作物吸收的氮营养部分来源于肥料氮, 部分来自微生物矿化有机质生成的速效氮, 且一些情况下微生物的存在还会加剧其与作物间的氮素竞争^[59]。仅从该点考虑, 微生物存在及其对土壤有机氮的矿化作用在一定程度上将限制了氮肥利用效率, 增加了氮素残留。然而, 微生物活动能够维持和改善土壤结构^[62], 增加益生型土壤微生物与植物的积极互作^[63], 具有促进作物生长, 提高土壤水肥固持能力的作用, 这也潜在的促进肥料氮的利用。尤其一些功能微生物, 如固氮细菌等在提高土壤全氮含量的同时, 可减缓 NH_3 的挥发、 N_2O 的释放, 进而降低氮肥损失, 增加氮肥在土壤中的固持时间, 提高氮肥的利用效率^[64]。近 20 年, 尽管农田土壤微生物及其功能研究得到了高度关注, 但土壤微生物对作物肥料利用及氮肥残留的作用途径及影响结果仍旧存在极大不确定性。一个主要原因在于以往研究或聚焦于微生物群落结构变化及其影响的氮素循环过程^[59], 或关注于功能微生物的植保促生作用^[65], 少有研究整合微生物-土壤-作物生长之间关系来系统分析微生物对作物肥料利用的调控机制和结果, 这需要在后续研究中予以重视。

2.3 栽培管理方式

2.3.1 氮肥施用管理

氮肥施用, 尤其氮肥施用量是决定氮肥残留的核心耕作管理^[66]。在能够维持作物正常生长的供氮量前提下, 低土壤肥力或低施氮水平, 施用的氮肥可被作物更高效的吸收利用, 肥料残留量较低^[67]。如在华北平原地区进行的玉米种植试验表明, 在低施氮量 [$88 \text{ mg(N)} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土] 下, 施氮当年 67% 的肥料氮可被作物吸收利用, 土壤氮肥残留率仅为 21%, 残留率较高的氮处理 [$222 \text{ mg(N)} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干土] 减少了 18%^[68]。随着土壤肥力提升或施氮量增加, 植物氮吸收、土壤氮肥残留及氮肥损失量均显著增加^[69], 当土壤基础肥力、施氮量及其耦合决定的氮素有效性达到一定阈值, 氮肥残留量远高于氮肥吸收量, 进一步施氮将导致氮肥

残留率急剧增加^[70]。Malhi 等^[71] 针对黄土高原地区标准冬小麦田, 量化了传统施肥基础上氮肥增施对肥料残留的影响, 发现氮肥施用量每增加 100 kg(N)·hm⁻², 土壤氮残留量和氮残留率分别增加 47 kg(N)·hm⁻² 和 11%。另一项对不同施氮量下玉米季化肥氮去向的研究发现, 氮肥增施 35%, 土壤氮残留率可增加 10%^[72]。

施氮的时间也极大地影响肥料氮的命运, 但其影响可能根据作物的生长习性和氮素吸收的物候规律存在差异。例如研究发现对于黄熟型和早衰型玉米, 孕穗期追肥, 氮肥吸收利用率较高, 而氮肥损失率和残留率较低, 但对于生育期更长的绿熟型玉米, 开花期追肥, 肥料利用效率将显著提升^[73]。传统农田管理, 尤其雨养农业区的农田管理, 为方便农艺操作, 通常在播种期和作物拔节期施用氮肥。然而, 这种施肥管理往往导致土壤速效氮的供给与根系发育及其氮素吸收能力缺乏时间协同性^[74], 潜在增加了氮肥被淋溶或挥发损失的风险, 降低了肥料氮在当季的利用率。根据作物吸氮的物候规律, 配合水肥一体化设施, 将作物全季施氮量按比例优化在不同物候期分次施入, 可显著提升氮肥利用的时效性, 有效降低氮肥损失和残留, 这已经在广泛的研究中得以证实^[75-76]。

除施肥数量和时间, 肥料的种类也会影响肥料氮的残留。与施用速释氮肥相比, 缓释或有机氮肥的施用能够延长氮肥释放的时效, 降低氮肥损失, 但同时可能增加氮肥残留^[77]。不同的作物, 诸如水稻和小麦, 对肥料氮的形式存在不同偏好, 如水稻偏好吸收 NH₄⁺-N, 小麦偏好吸收 NO₃⁻-N^[78]。因此, 如果在水稻生产中大量施用硝态氮肥, 或在小麦生产中大量施用氨态氮肥, 极有可能造成肥料氮被低效利用并产生大量残留。

硝态氮淋溶是降低肥料利用率的重要原因, 研究表明在施肥的同时, 应用硝化细菌抑制剂, 可有效减少 NO₃-N 的淋失和 N₂O、NO 和 N₂ 的释放^[79], 提高肥料在当季的利用效率。同时, 由于淋溶损失的减少, 肥料残留增加并可被后季作物及时吸收利用, 能有效降低后季肥料的施用量^[80]。然而, 硝化抑制剂的施用可能刺激 NH₃ 的挥发^[81], 导致酸沉降及地表水污染等环境问题^[82]。在雨水充沛或持续灌溉的农田, 氮肥淋溶问题突出, 施用硝化抑制剂是提高肥料利用效率的有效办法, 但在温热地区的干旱农田, 硝化抑制剂应谨慎使用。最近的研究发现, 施用联合抑制剂(脲酶抑制剂+硝化抑制剂)可以抵消硝化抑制剂单独施用对 NH₃ 挥发的刺激作用, 更高效地减轻农业系统中的氮素损失, 并增加氮肥残留及其回收利用, 这为后续农田施肥的优化提供了新策略^[83]。

2.3.2 其他栽培管理方式

种植密度是作物生产的关键环节, 在植株密度和个体产量决定的作物总产量维持稳定的情况下, 相比低密度种植, 合理密植可以显著降低农田肥料氮残留^[14]。在肥料施用超量的地块, 提高作物种植密度在改善肥料利用和残留之外, 还可以有效地提高作物产量^[84]。农田间作、套作具有悠久的发展历史, 但在农业现代化、集约化的今天逐渐被忽视。然而, 大量研究表明, 采取间作套作的栽培方式, 由于作物间氮肥利用的互补性, 可较单一作物种植显著降低肥料残留, 提高肥料利用率^[51]。出于保护性耕作的目的, 秸秆还田已经成为一种普遍的农田管理措施^[85]。一些研究报道, 秸秆还田潜在促进氮肥在土壤中的持滞, 有利于提高肥料利用率^[86]。然而, 其他研究发现秸秆还田后, 碳基物料的增加可能促使氮肥被土壤微生物大量固定, 有效性降低并导致微生物-作物之间养分争夺加剧, 不利于作物生长^[87]。秸秆分解过程中, 微生物碳氮利用的耦合关系及其对土壤肥料命运的影响可能受作物类型、土壤基质和气候环境等多个因素影响^[88], 存在显著区域差异性, 未来需要通过多情景下的系统研究进行更深入细致的剖析。作物栽培管理涉及复杂的技术流程, 上述主要栽培管理以外, 任何致力于改善作物生长、培肥地力的农艺管理都可能不同程度地影响肥料利用和残留。如何区分和量化个体管理措施及其耦合作用对肥料氮命运的影响对于农田精准管理有重要意义, 需要在未来研究中予以更多关注。

3 影响残留氮肥回收利用的因素

残留于土壤中的氮肥在经历休耕期和后季种植期的转化损失后, 剩余的部分可被下一季作物再次吸收利用, 其回收率决定于氮肥施用量和后季作物回收量。残留氮肥的回收率一般随前季作物施氮量的增加而

递减。研究表明冬小麦季施氮量从 $75 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加到 $375 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$, 夏玉米对冬小麦季土壤剖面残留无机氮的回收率从 20.9% 下降至 5.9%^[89]。在稻麦轮作系统中, 水稻季氮肥增施 84%, 后茬小麦对残留肥料氮的回收率下降 20%^[31]。一个主要原因在于增加的施肥量扩大了肥料氮在土壤中扩散和吸附的不均匀性, 导致种植期和休耕期肥料氮损失几率的急剧增加^[66], 进而降低了可回收氮肥的占比。如前文所述, 过去研究人员针对种植期/生长季的氮肥损失量开展了大量监测工作, 却鲜有研究关注休耕期的氮肥损失。而研究发现即使不追加施肥, 一些农田在休耕期产生的氮肥损失量远远大于期间连续耕作^[90]。在我国北方, 尤其东北地区, 限于气候和主要作物的物候条件, 春秋两季农田有较长时间被闲置休耕, 受风蚀挥发影响, 一定程度上增加了残留氮肥的损失。因此, 如果能选取适宜性作物搭配种植, 如适当早播晚收种植两季短季作物, 或秋收后种植可越冬的覆盖作物, 以此延长田间作物的全年覆盖时长, 对于提高残留氮肥和肥料的总体利用率将有重要的作用。目前, 松嫩平原西部广泛开展的小麦+燕麦草、燕麦+燕麦草、小麦+白菜/油菜等一年两季种植模式针对这一方面已经有了很好的探索^[91]。

根据前文综述的数据, 按氮肥的残留量折算, 残留氮肥的平均利用率也远低于新施氮肥的利用率, 除去土壤氮素向环境的转移输出外, 限制残留氮肥回收利用率的固有原因还有如下几方面: 首先, 部分残留氮肥可能在施肥当年或后季被微生物固定^[8], 无法成为植物可直接利用的有效氮, 这潜在降低了残留氮肥利用率; 其次, 即使氮肥在施肥当季的残留深度主要限定在 $0 \sim 40 \text{ cm}$ 以内^[22], 在后茬作物中, 随着残留时间的延长和降雨渗透的增多, 残留肥料可能被淋溶到更深层土壤^[25], 并超出作物根系的吸收范围, 进而降低残留氮肥利用率; 再者, 如果残留氮肥不发生迁移和转化, 按作物施肥的传统管理, 后季重复新施的氮肥一定程度上稀释了残留氮被作物再吸收利用的机会, 也会限制残留氮的回收利用率。

对于留存至下一季作物种植期的残留氮肥, 其与新施氮肥的利用和转化过程相近, 受到相似的环境和管理因素的影响。环境因素对残留氮肥的影响方式和结果与前文所述新施氮肥类似, 且为提高残留氮肥利用而进行针对性调整的空间有限, 本文不再赘述。影响残留氮肥回收利用的耕作和管理因素主要包括以下两个方面。

3.1 作物种类及种植方式

作物种类不仅影响肥料氮残留, 同时决定其对残留肥料氮的回收能力。黄土高原地区的连作种植模式下, 各类作物均采用经验施氮量时, 小麦和玉米对氮素的回收利用率相差极大, 后一季小麦仅可回收 2.1%~2.8% 前季氮肥^[46], 而后一季玉米的残留氮肥回收率可达到 12.1%^[92]。此外, 轮作种植模式下, 当前季作物为小麦或玉米时, 大豆对残留氮肥的回收率均显著低于甘薯^[93], 而在稻麦轮作系统中, 水稻对残留氮的回收率高于小麦, 为 9.2%~11.8%, 小麦为 3.3%~4.0%^[32]。上述研究结果表明, 残留氮回收效率作物间差异的形成可能与作物根系深度、氮素利用特征和生长环境有关, 如玉米相对小麦有更深的根系分布^[94], 潜在增加了残留氮肥的吸收空间, 大豆是豆科作物, 其自身的固氮功能可能限制了其对土壤肥料的吸收利用^[95], 而在稻麦水旱轮作模式中, 旱地对肥料氮的固定远高于水田^[32], 从而降低了小麦对残留氮肥的回收效率。除了自身氮素吸收特征外, 不同作物生长对土壤水分、有机质等的理化特征的影响能够改变残留氮肥的迁移转化过程^[96]。作物-土壤微生物之间的特异性互作(如作物-菌根共生的物种差异性)可影响作物对残留氮肥的吸收效率^[97], 后季不同作物施肥量的差别可能改变残留氮肥在有效氮库中的比例, 这些机制均可影响残留氮肥的吸收利用, 下一步研究需要区分不同机制对残留氮肥回收能力的贡献。

农业生产中, 在权衡作物种植效益基础上, 为提高残留氮肥利用率, 可选择在长期浅根系/氮吸收低效作物种植后适时轮作、间作深根系/氮高效吸收型作物, 或者在高肥料投入型作物种植后适时轮作或间作低肥料投入型作物^[46,92]。在肥料投入不做调整前提下, 调整作物种植方式, 如小麦田通过增大播幅、玉米田通过大垄密植适度增加作物植株密度也是提高残留肥料氮回收率、维持和提升作物产量的有效途径^[14,98-99]。

3.2 施肥管理

后季作物氮肥施用的数量、时间和形式等对残留氮肥的回收利用影响重大。不考虑氮沉降、生物固氮

等其他外源氮输入方式,后季作物的氮素来源主要包括残留氮肥、新施氮肥和土壤有机质矿化氮。随着新施肥料的增加,土壤有机质的矿化同时被加剧^[100],残留氮肥在土壤有效氮库中的比例被不断稀释,其回收利用效率也将不断下降。因此,在连年均一化种植施肥的农田中,适当减施氮肥有助于提高残留肥料利用率,达到农业节本增效的目的。施肥数量一定的情况下,选择不同时间施肥也将改变残留氮肥被作物利用的几率。随着时间延长,残留氮肥被不断迁移转化,其自身对于作物的有效性将不断下降。因此,如果在后季作物生育期过早集中投入肥料,可能浪费掉残留氮肥被及时利用的时段,降低残留氮肥利用率。一项为期3年的玉米田间试验发现如果将后季作物全季氮肥分3次(播前:八叶期:吐丝期=4:3:3)施用,其残留氮肥的回收利用率显著高于播种时一次性施入和播种期+拔节期两次施用^[101]。据此,与通过水肥一体化等手段提高当季肥料利用率相似,研究并利用残留肥料的周转规律,再进一步结合后茬作物生长过程中的需肥动态,合理设置氮肥施用时间和比例能够最大限度利用残留氮肥,避免肥料浪费。

4 氮肥残留肥效的科学评估及其对农业减肥的指导意义

农田经营管理效益决定于作物产量和肥料等生产资料投入的权衡。对于成熟耕地,在当前高强度农田施肥管理下,大宗作物的单产已经很难再有大的提升空间。因此,如何在维持现有产量基础上,优化施肥和管理,降低农业生产成本是提高农田经营效益的努力方向。根据已有氮肥残留及其回收利用的研究数据,残留氮肥对后季作物产量形成具有无法忽视的贡献。残留氮肥的存在降低了新施氮肥被作物吸收的效率,因此,如果能在传统连年一致的施肥管理下,充分考虑残留肥效,适当减施氮肥,有助于提高农田总体肥料利用率和经营效益。即使残留肥料回收率决定的单位面积化肥减施空间有限,但考虑到我国有超过1.2亿 hm^2 的耕地面积,依据残留肥效开展化肥减施仍有巨大的农业节本增收效益。

当前,化肥减施已经被提上重要的农业管理议题。然而,具体实践中化肥减施数量的科学依据仍需开展更深入的研究。依据残留肥效开展化肥减施,首先有必要对残留氮肥回收利用率进行科学评估和预测,而常规肥料施用无法有效区分作物吸收的残留肥料和当季新施肥料,残留氮肥回收率的精准评估需要借助 ^{15}N 同位素示踪技术。其方法为利用 ^{15}N 同位素示踪技术对第一季作物所施氮肥进行同位素标记,后续作物施用常规氮肥,依次检测从第一季到第 n 季作物吸收的 ^{15}N 标记肥料的比例(图2),利用公式(1)-(5)可计算包括残留氮回收效率在内的一次施用肥料的真实利用效率^[72]。

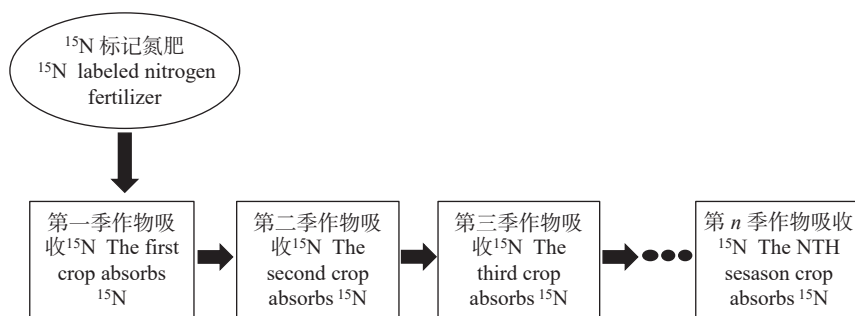


图2 氮肥利用长期效益评估方案

Fig. 2 Long-term benefit evaluation scheme of nitrogen fertilizer utilization

$$\text{样品中}^{15}\text{N}\text{原子百分超}(\%) = \text{样品中}^{15}\text{N}\text{原子}\% \text{含量} - 0.3663\% \quad (1)$$

$$\text{源自肥料的氮NDFFF}(\%) = \left(\frac{\text{样品中}^{15}\text{N}\text{原子百分超}}{\text{肥料中}^{15}\text{N}\text{原子百分超}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\text{NDFFF}(\text{g}) = \text{样品中全N}(\text{g}) \times \left(\frac{\text{样品中}^{15}\text{N}\text{原子百分超}}{\text{肥料中}^{15}\text{N}\text{原子百分超}} \right) \quad (3)$$

$$\text{残留氮的回收效率R}(\%) = \frac{\text{NDFFF}(\text{第二季及以后})}{\text{施入土壤的N肥量}(\text{第一季})} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{总肥料利用效率}(\%) = \frac{\text{NDFE (第一季)}}{\text{施入土壤的N肥量 (第一季)}} \times 100 + \text{残留氮的回收效率}R(\%) \quad (5)$$

农业生产中, 根据残留氮肥回收率(残余肥效)及其年际变化指导肥料减施尚需解决系列科技问题。首先, 氮肥施用是每个生长季连续进行的农田管理, 第 N 季残留氮肥回收量为前面 N-1 个生长季残留肥效的叠加效应, 精准肥料减施需要依据叠加后的残余肥效开展。根据已有的研究结果, 氮肥施用后, 至少可在未来 3 个生长季内产生较为明显的残余肥效^[36], 因此精准肥料减施有必要对过去至少 3 个生长季所施肥料的累计残余肥效进行估测。然而, 目前所开展的氮肥残留效应的研究通常仅针对一季施用肥料进行了连续跟踪监测^[30]。对于多年持续、稳定运行的农田, 假定每季残留肥料的后继命运一致, 第 N (≥3) 季的累积残余肥效可近似视为任意单季所施肥料后续 3 年回收率的累加。但是, 实际上前季残余肥料和后续新施肥料之间潜在相互影响, 可能导致后施肥料的残效动态发生变化, 尤其在新近开垦尚未熟化的农田。精准化肥减施需要通过¹⁵N 示踪技术阐明和区分相近生长季所施氮肥的残效动态, 这在以往的研究中通常被忽视了。其次, 残留肥料命运可能伴随气候、作物、肥料施用量等变化发生即时改变, 残留肥效的评估预测需要充分考量环境和管理等多要素的变化。依残留肥效所做的氮肥减施本身即对后续残余肥效产生了新的影响, 然而肥料施用量的调减对后续残留肥效的影响很少被报道, 需要予以更深入的研究。最后, 试验研究中, 残留肥效的监测数据需要在生长季结束时才能获得, 该数据并无法用于指导监测地块当季的农田减肥管理。目前亟需建立一套氮肥减施的决策支持模型, 通过整合过往残留肥效动态、土壤氮素矿化动态、作物类型和目标产量、预期农田管理等多要素数据, 对未来生长季发生的残留肥效和实际肥料需要量进行合理预测, 以科学指导氮肥减施^[102]。

5 结 论

全球农田土壤氮肥的残留比例约为 25%~65%, 且施肥当年土壤所固持的残留肥料氮大部分分布于作物可吸收的土层深度^[103]。残留氮肥的回收效率受自身迁移和转化、作物种类、地力条件、气候环境、耕作管理等多个因素耦合作用, 呈现明显的地域和地块差异, 但仍能发现一定的规律性, 如轮作农田的氮肥回收效率平均高于连作农田, 依作物生育期需肥特征多次施肥的农田高于一次集中施肥等。

生产实践中, 对决定残留氮肥回收效率的外部因素进行优化调控, 诸如通过作物的合理时间布局增加作物覆盖时长, 降低农田休耕期的肥料损失。在长期浅根系/氮吸收低效作物种植后, 轮作深根系/氮高效吸收型作物、合理密植。在干旱区适时灌溉保墒, 针对作物肥料喜好合理定制肥料类型, 结合水肥一体化技术实施分次施肥, 施肥同时配施微生物氮转化抑制剂均可有效提高肥料总体利用率。

依据残留肥效适当减施氮肥, 有助于提高农田总体肥料利用率和经营效益。精准化肥减施需要利用¹⁵N 同位素示踪技术对农田残留肥效进行科学评估和预测。为实现这一目的, 需要在现有研究基础上, 进一步阐明和区分过去相近生长季分别施用氮肥的残留肥效, 同时深入揭示环境和管理等多要素变化对氮肥残留效应的影响。为便于指导氮肥减施实践, 需要建立一套整合肥料、土壤、作物、气候、管理和产量目标的氮肥减施决策支持模型。

参考文献 (References):

- [1] SHAH F, WU W. Soil and crop management strategies to ensure higher crop productivity within sustainable environments[J]. *Sustainability*, 2019, 11 (5): 1485.
- [2] 宋毅, 李静, 谷贺贺, 等. 氮肥用量对冬油菜籽粒产量和品质的影响[J]. *作物学报*, 2023, 49 (7): 2002-2011.
SONG Y, LI J, GU H H, et al. Effects of application of nitrogen on seed yield and quality of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49 (7): 2002-2011.
- [3] LASSALETTA L, BILLEN G, GRIZZETTI B, et al. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9 (10): 105011.
- [4] WAN X J, WU W, SHAH F. Nitrogen fertilizer management for mitigating ammonia emission and increasing nitrogen use efficiencies by

- ¹⁵N stable isotopes in winter wheat[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 790: 147587.
- [5] 王伟妮. 基于区域尺度的水稻氮磷钾肥料效应及推荐施肥量研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
WANG W N. Evaluating fertilization effect and fertilizer recommendation of nitrogen, phosphorus and potassium for rice at a regional scale [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [6] MOSIER A, KROEZE C. Potential impact on the global atmospheric N₂O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands[J]. *Chemosphere - Global Change Science*, 2000, 2 (3/4) : 465–473.
- [7] WANG Z, WANG Z, LUO Y, et al. Biochar increases ¹⁵N fertilizer retention and indigenous soil N uptake in a cotton-barley rotation system[J]. *Geoderma*, 2020, 357: 113944.
- [8] DOURADO-NETO D, POWLSON D, ABU BAKAR R, et al. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (1) : 139–152.
- [9] LENKA S, SINGH A K, LENKA N K. Soil water and nitrogen interaction effect on residual soil nitrate and crop nitrogen recovery under maize-wheat cropping system in the semi-arid region of northern India[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013, 179: 108–115.
- [10] WANG Y, ZHAO X, WANG L, et al. Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 32–39.
- [11] WU M, LI G L, LI W T, et al. Nitrogen fertilizer deep placement for increased grain yield and nitrogen recovery efficiency in rice grown in subtropical China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1227.
- [12] ZHENG W K, WAN Y S, LI Y C, et al. Developing water and nitrogen budgets of a wheat-maize rotation system using auto-weighing lysimeters: effects of blended application of controlled-release and un-coated urea [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263(Pt A): 114383.
- [13] QUAN Z, ZHANG X, FANG Y T, et al. Different quantification approaches for nitrogen use efficiency lead to divergent estimates with varying advantages[J]. *Nature Food*, 2021, 2 (4) : 241–245.
- [14] CHEN J, ZHU X C, XIE J A, et al. Reducing nitrogen application with dense planting increases nitrogen use efficiency by maintaining root growth in a double-rice cropping system[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9 (4) : 805–815.
- [15] JALPA L, MYLAVARAPU R S, HOCHMUTH G, et al. Recovery efficiency of applied and residual nitrogen fertilizer in tomatoes grown on sandy soils using the ¹⁵N technique[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 278: 109861.
- [16] 宗宁, 石培礼, 耿守保, 等. 北方山区主要森林类型树木叶片氮、磷回收效率研究[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (4) : 520–529.
ZONG N, SHI P L, GENG S B, et al. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency of forests in North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25 (4) : 520–529.
- [17] GRANSTEDT A. Optimizing nitrogen management in food and energy production, and environment change[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, 31 (6) : 496–497.
- [18] PEOPLES M, BOYER E, GOULDING K, et al. Pathways of nitrogen loss and their impacts on human health and the environment [M]. Washington D. C. : Island Press, 2004: 51–67.
- [19] SANCHEZ C A, BLACKMER A M. Recovery of anhydrous ammonia-derived nitrogen-15 during three years of corn production in Iowa[J]. *Agronomy Journal*, 1988, 80 (1) : 102–108.
- [20] JU X T, CHRISTIE P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: a case study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124 (3) : 450–458.
- [21] ALLEN A L, STEVENSON F J, KURTZ L T. Chemical distribution of residual fertilizer nitrogen in soil as revealed by nitrogen-15 studies[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1973, 2 (1) : 120–124.
- [22] 党廷辉, 蔡贵信, 郭胜利, 等. 黄土旱塬黑垆土—冬小麦系统中尿素氮的去向及增产效果[J]. *土壤学报*, 2002, 39 (2) : 199–205.
DANG T H, CAI G X, GUO S L, et al. Fate of and crop response to nitrogen applied to winter wheat growing on heilu soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39 (2) : 199–205.
- [23] PILBEAM C J. Effect of climate on the recovery in crop and soil of ¹⁵N fertilizer applied to wheat[J]. *Fertilizer Research*, 1995, 45 (3) : 209–215.
- [24] LÓPEZ-BELLIDO L, MUÑOZ-ROMERO V, LÓPEZ-BELLIDO R J. Nitrate accumulation in the soil profile: long-term effects of tillage, rotation and N rate in a Mediterranean Vertisol[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130: 18–23.
- [25] 章孜亮, 刘金山, 王朝辉, 等. 基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18 (6) : 1387–1396.
ZHANG Z L, LIU J S, WANG Z H, et al. Nitrogen recommendation for dryland winter wheat by monitoring nitrate in 1 m soil and based on nitrogen balance[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18 (6) : 1387–1396.
- [26] SIELING K, BEIMS S. Effects of ¹⁵N split-application on soil and fertiliser N uptake of barley, oilseed rape and wheat in different cropping systems[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2007, 193 (1) : 10–20.
- [27] ICHIR L L, ISMAILI M, HOFMAN G. Recovery of ¹⁵N labeled wheat residue and residual effects of N fertilization in a wheat-wheat cropping system under Mediterranean conditions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66 (2) : 201–207.
- [28] 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.

- 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.
- [29] HOU M M, ZHONG F L, JIN Q, et al. Fate of nitrogen-15 in the subsequent growing season of greenhouse tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill) as influenced by alternate partial root-zone irrigation[J]. *RSC Advances*, 2017, 7 (55) : 34392–34400.
- [30] SMITH C J, CHALK P M. The residual value of fertiliser N in crop sequences: an appraisal of 60 years of research using 15N tracer[J]. *Field Crops Research*, 2018, 217: 66–74.
- [31] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区水稻季氮肥的作物回收和损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (1) : 55–61.
TIAN Y H, YIN B, HE F Y, et al. Recovery by crop and loss of nitrogen fertilizer applied in rice season in Taihu Lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (1) : 55–61.
- [32] 王盈盈, 夏龙龙, 蔡思源, 等. 长期不施氮肥下稻麦轮作农田残留化肥氮的后效及去向[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (6) : 1626–1639.
WANG Y Y, XIA L L, CAI S Y, et al. Long-term fate and availability of residual fertilizer nitrogen in rice-wheat cropping system in Taihu Lake region of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (6) : 1626–1639.
- [33] 刘沂阳. 长期轮作施肥棕壤肥料氮平衡及后效研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
LIU L Y. Study on balance and residual efficiency of fertilizer nitrogen in brown soil under long-term fertilization and rotation [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [34] JIA S L, WANG X B, YANG Y M, et al. Fate of labeled urea-¹⁵N as basal and topdressing applications in an irrigated wheat-maize rotation system in North China Plain: I winter wheat[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 90 (3) : 331–346.
- [35] 赵伟, 梁斌, 杨学云, 等. 长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (8) : 1628–1634.
ZHAO W, LIANG B, YANG X Y, et al. Effects of long-term different fertilizations on the fate of residual fertilizer N in a wheat-maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46 (8) : 1628–1634.
- [36] 董娴娴, 刘新宇, 任翠莲, 等. 潮褐土冬小麦-夏玉米轮作体系氮肥后效及去向研究[J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (11) : 2209–2216.
DONG X X, LIU X Y, REN C L, et al. Fate and residual effect of fertilizer nitrogen under winter wheat-summer maize rotation in North China plain in meadow cinnamon soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (11) : 2209–2216.
- [37] QUAN Z, LI S L, ZHANG X, et al. Fertilizer nitrogen use efficiency and fates in maize cropping systems across China: field 15N tracer studies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104498.
- [38] 潘家荣. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系中化肥氮的去向[D]. 北京: 中国农业大学, 2001.
PANG J R. The fate of chemical fertilizer nitrogen in winter wheat / summer maize rotation system in North China Plain[D]. Beijing: China Agricultural University, 2001.
- [39] YE T Y, LIU B, WANG X L, et al. Effects of water-nitrogen interactions on the fate of nitrogen fertilizer in a wheat-soil system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 136: 126507.
- [40] XU H, ZHONG G F, LIN J T, et al. Effect of nitrogen management during the panicle stage in rice on the nitrogen utilization of rice and succeeding wheat crops[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 41–47.
- [41] PILBEAM C, GREGORY P, TRIPATHI B, et al. Fate of nitrogen-15-labelled fertilizer applied to maize-millet cropping systems in the mid-hills of Nepal[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35 (1) : 27–34.
- [42] PEOPLES M B, SWAN A D, GOWARD L, et al. Soil mineral nitrogen benefits derived from legumes and comparisons of the apparent recovery of legume or fertiliser nitrogen by wheat[J]. *Soil Research*, 2017, 55 (6) : 600.
- [43] FROMME D D, COKER D L, MCFARLAND M L, et al. Residual soil nitrogen credits for corn production along the upper Texas Gulf Coast region[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2017, 40 (1) : 23–32.
- [44] COSTA N R, CRUSCIOL C A C, TRIVELIN P C O, et al. Recovery of 15N fertilizer in intercropped maize, grass and legume and residual effect in black oat under tropical conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 310: 107226.
- [45] 张妍, 李发东, 时鹏, 等. 华北平原玉米种植中施入氮肥的去向研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32 (4) : 210–215.
ZHANG Y, LI F D, SHI P, et al. Study on the fate of nitrogen fertilizer applied to maize cropping system in the North China plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (4) : 210–215.
- [46] 党廷辉, 蔡贵信, 郭胜利, 等. 用¹⁵N标记肥料研究旱地冬小麦氮肥利用率与去向[J]. *核农学报*, 2003, 17 (4) : 280–285.
DANG T H, CAI G X, GUO S L, et al. Study on nitrogen efficiencies of dry land wheat by ¹⁵n labeled fertilizer[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17 (4) : 280–285.
- [47] 童依平, 李继云, 刘全友, 等. 收获后不同小麦品种土壤硝态氮残留量的差异研究[J]. *环境科学学报*, 2000, 20 (2) : 251–253.
TONG Y P, LI J Y, LIU Q Y, et al. Variations of residual nitrate in the soil grown different wheat genotypes after harvest[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20 (2) : 251–253.
- [48] TIAN H, FU J E, DRIJBER R A, et al. Expression patterns of five genes involved in nitrogen metabolism in two winter wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes with high and low nitrogen utilization efficiencies[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 61: 48–54.

- [49] GARNETT T, PLETT D, HEUER S, et al. Genetic approaches to enhancing nitrogen-use efficiency (NUE) in cereals: challenges and future directions[J]. *Functional Plant Biology:FPB*, 2015, 42 (10): 921–941.
- [50] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (14): 2886–2894.
- ZENG X M, HAN B J, XU F S, et al. Effect of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (14): 2886–2894.
- [51] 陆晓松, 于东升, 徐志超, 等. 土壤肥力质量与施氮量对小麦氮肥利用效率的综合定量关系研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (2): 487–494.
- LU X S, YU D S, XU Z C, et al. Study on comprehensive quantitative relationship of soil fertility quality and nitrogen application rate with wheat nitrogen use efficiency[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (2): 487–494.
- [52] PENG W F, ZENG Y J, QINGHUA S, et al. Responses of rice yield and the fate of fertilizer nitrogen to soil organic carbon[J]. *Plant Soil and Environment*, 2017, 63: 416–421.
- [53] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. *作物学报*, 2005, 31 (11): 1422–1428.
- YE Q B, ZHANG H C, WEI H Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31 (11): 1422–1428.
- [54] 李晶, 何志斌, 王建兵, 等. 荒漠绿洲农田土壤水热动态及硝态氮淋溶特征[J]. *中国沙漠*, 2022, 42 (5): 245–257.
- LI J, HE Z B, WANG J B, et al. Soil hydrothermal dynamics and nitrate leaching characteristics in farmland in desert oasis[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42 (5): 245–257.
- [55] FERNÁNDEZ J A, DEBRUIN J, MESSINA C, et al. Late-season nitrogen fertilization on maize yield: a meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2020, 247: 107586.
- [56] GUNTIÑAS M, LEIRÓS M, TRASAR-CEPEDA C, et al. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: a laboratory study[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 48: 73–80.
- [57] DESSUREAULT-ROMPRÉ J, ZEBARTH B J, GEORGALLAS A, et al. A biophysical water function to predict the response of soil nitrogen mineralization to soil water content[J]. *Geoderma*, 2011, 167/168: 214–227.
- [58] 冯悦晨, 于志勇, 周怀平, 等. 氮肥调控与地膜覆盖对晋南旱地小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021 (3): 63–69.
- FENG Y C, YU Z Y, ZHOU H P, et al. Effects of nitrogen fertilizer regulation and mulching on wheat yield and nitrogen use efficiency in dry land of southern Shanxi Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021 (3): 63–69.
- [59] LAN T, XIE N, CHEN C, et al. Effects of biological nitrification inhibitor in regulating NH₃ volatilization and fertilizer nitrogen recovery efficiency in soils under rice cropping [J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 838(Pt 1): 155857.
- [60] 周丽, 付智丹, 杜青, 等. 减量施氮对玉米/大豆套作系统中作物氮素吸收及土壤氨氧化与反硝化细菌多样性的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (6): 1076–1087.
- ZHOU L, FU Z D, DU Q, et al. Effects of reduced N fertilization on crop N uptake, soil ammonia oxidation and denitrification bacteria diversity in maize/soybean relay strip intercropping system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (6): 1076–1087.
- [61] 张文学. 生化抑制剂对稻田氮素转化的影响及机理 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- ZHANG W X. The effect of biochemical inhibitor on nitrogen transformation in paddy field and its mechanism [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [62] 李慧, 李雪梦, 姚庆智, 等. 基于Biolog-ECO方法的两种不同草原中5种不同植物根际土壤微生物群落特征[J]. *微生物学通报*, 2020, 47 (9): 2947–2958.
- LI H, LI X M, YAO Q Z, et al. Biolog-ECO analysis of rhizosphere soil microbial community characteristics of five different plants in two different grasslands[J]. *Microbiology China*, 2020, 47 (9): 2947–2958.
- [63] GUL N, WANI I, MIR R, et al. Plant growth promoting microorganisms mediated abiotic stress tolerance in crop plants: a critical appraisal[J]. *Plant Growth Regulation*, 2023, 100: 7–24.
- [64] SONG X N, ZHANG J L, LI D H, et al. Nitrogen-fixing cyanobacteria have the potential to improve nitrogen use efficiency through the reduction of ammonia volatilization in red soil paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 217: 105274.
- [65] 索炎炎, 张翔, 司贤宗, 等. 丛枝菌根真菌和根瘤菌对连作花生养分吸收及土壤微生物特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023 (2): 106–112.
- SUO Y Y, ZHANG X, SI X Z, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobia on nutrient uptake and soil microbial characteristics of continuous cropping peanut[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023 (2): 106–112.
- [66] STEVENS W B, HOEFT 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.
- [67] CUI Z L, WANG G L, YUE S C, et al. Closing the N-use efficiency gap to achieve food and environmental security[J]. *Environmental*

- Science and Technology*, 2014, 48 (10) : 5780-5787.
- [68] 山楠, 杜连凤, 毕晓庆, 等. 用¹⁵N肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (4) : 930-936.
SHAN N, DU L F, BI X Q, et al. Nitrogen use efficiency and behavior studied with ¹⁵N labeled fertilizer in maize in fluvo-aquic soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (4) : 930-936.
- [69] 侯云鹏, 杨建, 李前, 等. 施氮对水稻产量、氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47 (1) : 118-124.
HOU Y P, YANG J, LI Q, et al. Effects of nitrogen application on yield, nitrogen utilization and accumulation of soil inorganic nitrogen of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47 (1) : 118-124.
- [70] 韩燕来, 葛东杰, 汪强, 等. 施氮量对豫北潮土区不同肥力麦田氮肥去向及小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21 (5) : 151-154.
HAN Y L, GE D J, WANG Q, et al. Effect of N fertilizer rate on fate of labeled nitrogen and winter wheat yield on different soil fertility fields in Chao soil area in North Henan[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (5) : 151-154.
- [71] DAI J A, WANG Z H, LI F C, et al. Optimizing nitrogen input by balancing winter wheat yield and residual nitrate-N in soil in a long-term dryland field experiment in the Loess Plateau of China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 181: 32-41.
- [72] 汪新颖, 彭亚静, 王玮, 等. 华北平原夏玉米季化肥氮去向及土壤氮库盈亏定量化探索[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (10) : 1610-1615.
WANG X Y, PENG Y J, WANG W, et al. Exploration of N fertilizer fate and quantitative soil nitrogen pool budget in growing season of summer maize in North China plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23 (10) : 1610-1615.
- [73] 潘家荣, 邹国元, 魏丽, 等. 群体密度和追氮方法对不同熟相冬小麦产量效应的差异及对化肥氮去向的影响[J]. 核农学报, 2003, 17 (6) : 466-471.
PAN J R, ZOU G Y, WEI L, et al. Influence of density and top-dressing of nitrogen fertilizer on yield of wheat with different maturing phases and response of fate of fertilizer nitrogen[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17 (6) : 466-471.
- [74] DE PAULA B V, VITTO B B, SETE P B, et al. Annual and residual urea nitrogen contribution to the nutrition of peach trees (*Prunus persica* L.) grown under subtropical climate[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 284: 110099.
- [75] 徐明杰, 张琳, 汪新颖, 等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (1) : 36-45.
XU M J, ZHANG L, WANG X Y, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (1) : 36-45.
- [76] LU J S, HU T T, ZHANG B C, et al. Nitrogen fertilizer management effects on soil nitrate leaching, grain yield and economic benefit of summer maize in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247: 106739.
- [77] ADEDIRAN J A, TAIWO L B, AKANDE M O, et al. Application of organic and inorganic fertilizer for sustainable maize and cowpea yields in Nigeria[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 27 (7) : 1163-1181.
- [78] ZHANG J, CAI Z, MULLER C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant - specific N preferences: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69 (3) : 488-501.
- [79] HE T H, LIU D Y, YUAN J J, et al. Effects of application of inhibitors and biochar to fertilizer on gaseous nitrogen emissions from an intensively managed wheat field[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 628/629: 121-130.
- [80] ALONSO-AYUSO M, GABRIEL J L, QUEMADA M. Nitrogen use efficiency and residual effect of fertilizers with nitrification inhibitors[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 80: 1-8.
- [81] WU D, ZHANG Y X, DONG G, et al. The importance of ammonia volatilization in estimating the efficacy of nitrification inhibitors to reduce N₂O emissions: a global meta-analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 271: 116365.
- [82] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47 (6) : 1027-1033.
SUN H J, MIN J, SHI W M, et al. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field[J]. *Soils*, 2015, 47 (6) : 1027-1033.
- [83] LAM S K, SUTER H, BAI M, et al. Using urease and nitrification inhibitors to decrease ammonia and nitrous oxide emissions and improve productivity in a subtropical pasture[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 644: 1531-1535.
- [84] ANAS M, LIAO F, VERMA K K, et al. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency[J]. *Biological Research*, 2020, 53 (1) : 47.
- [85] 叶桂香, 史永晖, 王良, 等. 秸秆还田的小麦-玉米农田N₂O周年排放的量化分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (3) : 589-596.
YE G X, SHI Y H, WANG L, et al. Quantitative analysis of straw returning on annual soil N₂O emission in the wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (3) : 589-596.
- [86] ROOZBEH M, RAJAIE M. Effects of residue management and nitrogen fertilizer rates on accumulation of soil residual nitrate and wheat yield under no-tillage system in south-west of Iran[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 1: 116-126.

- [87] 张鑫. 秸秆还田下氮肥管理对土壤微生物学特性的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
ZHANG X. Effect of straw incorporation with nitrogen management on soil microbiological characteristics [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, .
- [88] 孙波, 王晓玥, 蒋璐霁, 等. 气候和土壤类型对秸秆长期腐解过程中秸秆组成与微生物群落结构协同演变的影响[C]. 成都: 电子科技大学出版社, 2012. .
SUN B, WANG X Y, JIANG Y J, et al. Effects of climate and soil types on the co-evolution of straw composition and microbial community structure during long-term straw decomposition[C]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2012.
- [89] 黄生斌, 陈新平, 张福锁. 冬小麦施氮对下茬夏玉米的后效[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7 (1) : 54-58.
HUANG S B, CHEN X P, ZHANG F S. Effect of residual nitrogen applied to winter wheat on the following summer maize[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7 (1) : 54-58.
- [90] JIAO P, XU D, WANG S, et al. Nitrogen loss by surface runoff from different cropping systems[J]. *Soil Research*, 2012, 50 (1) : 58.
- [91] 陶冬雪, 胡娟, 高英志, 等. 吉林西部一年两茬种植模式的作物产量及经济效益研究[J]. 土壤与作物, 2021, 10 (2) : 221-229.
TAO D X, HU J, GAO Y Z, et al. Yield and economic benefits of annual two-cropping in western Jilin Province[J]. *Soils and Crops*, 2021, 10 (2) : 221-229.
- [92] 王少杰. 黄土高原旱作覆膜玉米不同时期施氮效果及气态氮损失 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
WANG S J. Effects of nitrogen splits application to dry-land mulching maize on fate of nitrogen and gaseous nitrogen losses in the loess plateau [D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [93] YONG T W, XIANG D B, ZHANG Z, et al. Analysis of the nitrogen uptake and utilization efficiency and N fertilizer residual effect in the wheat-maize-soybean and wheat-maize-sweet potato relay strip intercropping[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20 (6) : 34-44.
- [94] 彭亚静, 汪新颖, 张丽娟, 等. 根层调控对小麦-玉米种植体系氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48 (11) : 2187-2198.
PENG Y J, WANG X Y, ZHANG L J, et al. Effects of root layer regulation on nitrogen utilization and soil NO₃-N residue of wheat-maize system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48 (11) : 2187-2198.
- [95] 董守坤, 龚振平, 祖伟. 氮素营养水平对大豆氮素积累及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16 (1) : 65-70.
DONG S K, GONG Z P, ZU W. Effects of nitrogen nutrition levels on N-accumulation and yields of soybean[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16 (1) : 65-70.
- [96] 朱培立, 黄东迈. 土壤水湿状况和肥料碳氮比对稻田肥料氮素转化的影响[J]. *土壤学报*, 1986, 23 (3) : 251-261.
ZHU P L, HUANG D M. Nitrogen transformation in paddy soil as affected by different soil water regimes and c/n ratio of manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1986, 23 (3) : 251-261.
- [97] 徐如玉, 左明雪, 袁银龙, 等. 氮肥用量优化对甜玉米氮肥吸收利用率及氮循环微生物功能基因的影响[J]. *南方农业学报*, 2020, 51 (12) : 2919-2926.
XU R Y, ZUO M X, YUAN Y L, et al. Effects of nitrogen fertilizer dosage optimization on nitrogen uptake content and utilization efficiency and microbial function genes of nitrogen cycle in sweet corn[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51 (12) : 2919-2926.
- [98] 李广浩, 刘娟, 董树亭, 等. 密植与氮肥用量对不同耐密型夏玉米品种产量及氮素利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (12) : 2247-2258.
LI G H, LIU J, DONG S T, et al. Effects of close planting and nitrogen application rates on grain yield and nitrogen utilization efficiency of different density-tolerance maize hybrids[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (12) : 2247-2258.
- [99] 尹艳忠, 李延峰. 玉米大垄密植高产栽培技术[J]. *种植与养殖*, 2012 (1) : 15.
YIN Y Z, LI Y F. High yield cultivation technology of corn in large ridge dense planting[J]. *Planting and breeding*, 2012 (1) : 15.
- [100] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 不同施肥处理红壤性水稻土团聚体有机碳矿化特征[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (17) : 3325-3334.
CHEN X F, LIU M, JIANG C Y, et al. Organic carbon mineralization in aggregate fractions of red paddy soil under different fertilization treatments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (17) : 3325-3334.
- [101] WANG S J, LUO S S, YUE S C, et al. Residual effects of fertilizer N response to split N applications in semiarid farmland[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2019, 114 (2) : 99-110.
- [102] XU X P, HE P, PAMPOLINO M F, et al. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 27-34.
- [103] LIU L, YAO S, ZHANG H, et al. Soil nitrate nitrogen buffer capacity and environmentally safe nitrogen rate for winter wheat-summer maize cropping in Northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 445-453.