

DOI: 10.11766/trxb202108060408

邹洪琴, 李德近, 任科宇, 王伯仁, 蔡泽江, 徐明岗, 段英华. 肥力梯度红壤上不同形态氮库对玉米吸氮量的贡献[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 857–867.

ZOU Hongqin, LI Dejin, REN Keyu, WANG Boren, CAI Zejiang, XU Minggang, DUAN Yinghua. Contributions of Various Forms of Nitrogen to Nitrogen Uptake by Maize in Red Soil with Different Fertilities[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(3): 857–867.

肥力梯度红壤上不同形态氮库对玉米吸氮量的贡献*

邹洪琴¹, 李德近¹, 任科宇¹, 王伯仁², 蔡泽江², 徐明岗^{1, 3}, 段英华^{1†}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南祁阳 426100; 3. 山西农业大学生态环境产业技术研究院, 太原 030031)

摘要: 不同形态的土壤氮素是作物吸收氮素的主要来源, 而土壤肥力不仅影响氮素的含量, 也影响氮素的有效性, 进而影响作物对氮素的吸收利用。明确不同肥力红壤中各形态氮素的变化及其对作物吸氮量的贡献, 可为阐明氮素循环机制和沃土培肥提供理论依据。2019 年 5 月在湖南祁阳红壤实验站选取低肥力、中肥力和高肥力红壤进行田间微区试验, 设置不施氮(N0)和常规施氮(N1)两个处理。分析了 2020 年玉米(该试验的第三季作物)种植前和收获后土壤矿质氮(MN)、固定态铵(FN)、微生物生物量氮(MBN)和可溶性有机氮(SON)含量的变化及其与玉米地上部吸氮量的关系, 并通过结构方程模型(SEM)建立了各形态氮库与吸氮量的关系模型。结果发现, N0 条件下高肥力土壤的籽粒产量约为中肥力土壤的 4.6 倍, 但在 N1 条件下, 高肥力土壤的玉米产量和生物量与中肥力土壤无显著差异, 但其吸氮量显著高于中肥力土壤。与种植前相比, N0 条件下, 收获后中肥力土壤 FN 含量显著提高了 63%, 低肥力和高肥力土壤分别增加了 47%和 11%。与其相反, 土壤 MN、MBN 和 SON 含量均有所降低。土壤 MN 含量降低了 0.4~4 mg·kg⁻¹; MBN 降低了 18%~44%且土壤肥力间无显著差异; SON 减少了 55%~84%。N1 条件下, 土壤 MN 含量降低了约 22~38 mg·kg⁻¹; MBN 降低了 32%~72%; 而 SON 的减少量在高肥力土壤中可达 99 mg·kg⁻¹, 分别为中肥力土壤和低肥力土壤的 2.0 倍和 9.3 倍。相关分析结果表明, 地上部吸氮量与 MBN、SON 和 NH₄⁺-N 减少量存在显著正相关关系。结构方程模型结果进一步表明, SON 和 NH₄⁺-N 直接影响吸氮量, MBN 通过影响 SON 和 MN 间接影响玉米地上部吸氮量。总体而言, SON 和 MBN 可直接或间接影响玉米对氮素的吸收利用, 是土壤中重要的氮素存在形态, 应进一步加强对其实态转化的机制研究, 可促进红壤培肥和氮素高效利用。

关键词: 红壤; 土壤肥力; 可溶性有机氮; 微生物生物量氮; 吸氮量

中图分类号: S158.3 文献标志码: A

Contributions of Various Forms of Nitrogen to Nitrogen Uptake by Maize in Red Soil with Different Fertilities

ZOU Hongqin¹, LI Dejin¹, REN Keyu¹, WANG Boren², CAI Zejiang², XU Minggang^{1, 3}, DUAN Yinghua^{1†}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences National Engineering Laboratory

* 国家自然科学基金项目(42077098)和中央级公益性科研院所基本科研业务费(1610132021023)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42077098) and the Basic Scientific Research Service Funds of Central Level Public Welfare Research Institutes of China (No. 1610132021023)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: duanyinghua@caas.cn

作者简介: 邹洪琴(1995—), 女, 贵州威宁人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤培肥与改良。E-mail: 171885228@qq.com

收稿日期: 2021-08-06; 收到修改稿日期: 2021-11-15; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-02-27

for Improving of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. Red Soil Experiment Station of Chinese Academy of Agricultural Science in Hengyang/National Observation and Research of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang, Hunan 426100, China; 3. Engineer and Technology Academy of Ecology and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: 【Objective】 Soil nitrogen (N) is an important resource for N uptake by crops. The availability of soil N is dependent on soil fertility to a high extent, which in turn affects the absorption and utilization of N by crops. Understanding the various N forms in red soils with different fertility and their contribution to crop N uptake can provide a theoretical basis for clarifying the N cycle mechanism and cultivating high-yield and high-N efficiency soils. 【Method】 In May 2019, low-fertility, medium-fertility and high-fertility red soils were selected for the field micro-area experiments, and two treatments, no nitrogen fertilizer (N0) and conventional fertilization (N1) were set up. We determined the contents of soil mineral nitrogen (MN), fixed ammonium (FN), microbial biomass nitrogen (MBN) and soluble organic nitrogen (SON) before planting and after harvest of 2020 maize (the third crop of the experiment). The relationship model between each form of N and the quantity of N uptake was established through structural equation modeling (SEM). 【Result】 The grain yield of high fertility soil under N0 treatment was about 4.6 times that of medium fertility soil. Under N1 treatment, the maize yield and biomass of high fertility soil had no significant difference with that of medium fertility soil. Meanwhile the N uptake of high fertility soil was significantly higher than that of medium fertility soil. Compared with before planting, the FN content in the medium-fertility soil after harvest was significantly increased by 63% under N0 treatment. The FN of low and high fertility soil increased by 47% and 11%, respectively, while the contents of MN, MBN and SON in the soil were reduced. The MN content of the soils was decreased by between 0.4–4.0 mg·kg⁻¹. MBN was decreased by 18%–44% and there was no significant difference in soil fertility. Also, the SON was decreased by 55%–84%. Under N1 treatment, the content of MN was decreased by 22–38 mg·kg⁻¹ and the content of MBN was reduced by 32%–72%. The SON was reduced by 99 mg·kg⁻¹ in high-fertility soil, which was 2.0 times higher than medium-fertility soil and 9.3 times higher than low-fertility soil. The correlation analysis results revealed a significant positive correlation between the amount of N uptake by the aboveground biomass and the decrement of MBN, SON and NH₄⁺-N. The structural equation model results further showed that the content of SON and NH₄⁺-N directly affected the amount of N uptake, while MBN indirectly affected the N uptake by maize by changing SON and MN. 【Conclusion】 SON and NH₄⁺-N can directly regulate the maize N uptake. The MBN and FN indirectly affect maize N uptake through the MN and SON. In the future, it is crucial to strengthen the research on the mechanism of soil N form transformation to promote red soil fertility and high-efficiency utilization of N.

Key words: Red soil; Soil fertility; Soluble organic nitrogen; Microbial biomass nitrogen; Nitrogen uptake

土壤氮(N)素是作物生长的三大营养元素之一, 供应了作物吸氮量的50%以上^[1], 是影响作物生长和产量形成的主要限制因子。土壤中的铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)可直接被作物吸收利用, 是作物吸收氮素的主要来源; 还有一部分土壤氮以微生物生物量氮(MBN)和固定态铵(FN)的形式存在, 可以缓慢矿化或释放氮素供作物吸收利用, 对氮素循环与转化过程起主要调节作用^[2]; 此外, 土壤中大部分氮素以有机氮形态存在, 过去的研究通常认为这部分氮素很难被作物吸收利用, 但是越来越多的研究发现可溶性有机氮(SON)与氮素矿化和土壤微生物氮素显著相关, 且一些小分子可溶性有机氮可通过菌根或直接被作物吸收利用, 是作物吸氮的重要来源之一^[3]。我国土壤肥力

水平变异较大, 不同肥力水平土壤中氮素存在形态有明显差异。高肥力土壤上以生物固定为主, 在低肥力土壤中以晶格固定为主^[4]。有研究发现, 提升土壤肥力可显著提高 MBN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 SON^[5-6]含量, 且 MBN 与 SON 之间具有显著正相关关系^[7]。这可能是因为随着肥力的提高, 土壤能提供充足的碳源和氮源, 土壤微生物活性增强, 提高了 MBN 含量^[8], 并且也增加了土壤的硝化势^[6], 从而产生了更多的 NO₃⁻-N。但是, 不同肥力土壤上氮素形态的分配比例是否相同, 不同氮素形态是否影响对作物吸氮量的贡献, 尚缺乏深入研究。

土壤中各形态氮在不断进行转化, 如铵态氮肥或酰胺态氮肥施入土壤后, 土壤溶液中的 NH₄⁺-N 增加, 黏土矿物会将部分 NH₄⁺-N 固定在晶格里, 形成

FN；而当作物吸收、微生物同化、硝化消耗交换性铵时，黏土矿物又会释放晶格里的 NH_4^+ -N，为作物提供氮源^[9]。此外，土壤中的微生物会吸收利用 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 来合成自身所需要的氮，同时也会随着死亡、分泌等将固持的氮矿化供给作物吸收利用，其在协调土壤供氮上发挥着重要作用^[10]。巨晓棠等^[11]发现施入土壤中的氮肥显著增加 FN 含量，但 MBN 却随小麦生长而下降。沈其荣等^[12]发现施肥后 FN 和 MBN 变化相似，均先增加后降低后又有所增加。然而，氮素不同形态之间存在互相转换，那么不同形态氮对作物吸氮起到何种程度的贡献，很难用一种形态氮素来衡量。因此，探明不同有效性氮库之间的关系，将其结合起来评估其对作物吸氮量的贡献，对于理解和丰富农田系统氮循环理论和沃土培肥均具有十分重要的理论及实践意义。

本文选取三个肥力梯度红壤，通过田间微区试验，探究不同形态氮素在种植前后的变化及其对玉米吸氮量的贡献，以期阐明不同形态氮素的分配特征及其对玉米吸氮量的贡献，为红壤的肥力培育和氮素的高效利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验点概况

试验设在湖南祁阳的中国农业科学院红壤实验站 (26°02'N~26°51'N, 110°35'E~112°14'E)。该地属亚热带季风气候，年均气温 18.0℃，年均降水量为 1 250 mm，年均蒸发量为 1 470 mm，大于等于 10℃积温为 5 600℃，无霜期为 300 d (数据来源于中国气象共享服务系统，<http://cdc.cma.gov.cn/>)。

1.2 试验设计

供试土壤为红壤，成土母质为第四纪红色黏土。根据土壤有机碳含量^[7]设置 3 个肥力水平，包括低肥力、中肥力和高肥力。低肥力和中肥力土壤质地为黏土，高肥力土壤为粉黏土，其初始基础理化性状见表 1。肥力梯度试验于 2019 年开始，种植作物为玉米-小麦轮作，共设 2 个施氮水平：不施氮肥 (N0) 和施氮肥 (N1)。同一作物每年施肥量均相同，所有处理磷钾肥用量均相同，按照 N : P₂O₅ : K₂O=1 : 0.5 : 0.5 的比例施用。玉米的氮肥 (N) 施用量为 150 kg·hm⁻² (以 N 计，下同)，磷肥 (P₂O₅) 和钾肥 (K₂O) 施用量均为 75 kg·hm⁻²，小麦的氮肥 (N) 施用量为 75 kg·hm⁻²，磷肥 (P₂O₅) 和钾肥 (K₂O) 施用量均为 38 kg·hm⁻²。氮肥为尿素 (46%)，磷肥为过磷酸钙 (P₂O₅ 12.0%)，钾肥为氯化钾 (K₂O 60%)，均作基肥在播种前进行一次撒施。

1.3 样品采集与测定

本文试验结果为 2020 年 8 月第三季作物 (玉米) 种植前后土壤氮含量及玉米生物量等。在种植前及收获后根据五点取样法，采用直径为 2 cm 的土钻采集 0~20 cm 土壤样品，挑除动植物残体，混匀，带回实验室，过 2 mm 筛并挑根，一部分样品冷藏 (4℃)，用于测定铵态氮 (NH_4^+ -N)、硝态氮 (NO_3^- -N) 和微生物生物量氮 (MBN)，剩余样品风干备用。植株晒干脱粒后，测定籽粒产量、地上部生物量及其全氮含量。

植株和土壤全氮分别采用 H₂SO₄-H₂O₂ 和 H₂SO₄ 消煮，凯氏定氮法测定。 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量采用 2 mol·L⁻¹ KCl 浸提，流动分析仪 (SA1100, Skalar, 荷兰) 测定^[13]。MBN 采用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定^[14]。

表 1 不同肥力水平土壤基础性状 (2019 年试验前)

Table 1 Basic properties of soil with different fertility levels

土壤肥力 Soil fertility	有机碳 Organic carbon (g·kg ⁻¹)	pH	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline N (mg·kg ⁻¹)	全磷 Total P / (g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P (mg·kg ⁻¹)	全钾 Total K / (g·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
低 Low	7.67±0.40c	5.35±0.02c	0.64±0.06c	37.53±2.32c	0.31±0.01c	0.20±0.03c	10.12±0.11c	18.89±1.90c
中 Middle	11.69±0.22b	6.04±0.12b	0.87±0.02b	62.25±2.84b	0.54±0.02b	11.76±0.41b	12.48±0.21a	173.9±11.78a
高 High	28.30±0.21a	6.74±0.03a	1.72±0.21a	144.4±3.11a	0.84±0.01a	23.55±0.33a	10.8±0.10b	156.3±2.05b

注：表中数值为均值±标准误差 (n=3)；同列小写字母为不同土壤肥力间的差异显著 (P<0.05)。Notes: The values are mean ± standard deviation error (n=3); Different letters in the same column mean significant difference (P<0.05) in different soil fertility.

土壤固定态铵 (FN) 的测定采用 Silver-Bremner 法^[15]。称取 1.000 0 g 过 100 目筛的风干土置于 200 mL 烧杯中, 加 20 mL KBrO₃, 盖上盖玻片静置 2 h, 加 60 mL 蒸馏水, 置于电热板或电炉上, 加热煮沸 5 min。静置过夜。第二天弃去上清液, 用 0.5 mol·L⁻¹ KCl 溶液将土壤转移至离心管中, 摇匀, 离心, 去上清液, 重复三次, 然后加入 20 mL HF (5 mol·L⁻¹) 和 HCl (1 mol·L⁻¹) 混合溶液, 振荡 24 h, 用凯氏法蒸馏定氮, 标准酸 (0.005 49 mol·L⁻¹ H₂SO₄) 滴定, 测定的氮含量即为 FN 含量。

土壤可溶性有机氮 (SON) 采用差减法^[16]测定, 即土壤可溶性总氮减去土壤矿质氮 (NH₄⁺-N、NO₃⁻-N) 来计算。称取 10 g 鲜土于 150 mL 小白瓶中, 用 50 mL 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液浸提, 振荡, 过滤, 取 5 mL 滤液于 50 mL 具塞比色管中, 加入 1 mL 30 g·L⁻¹ 碱性过硫酸钾溶液, 立即加塞, 充分摇匀后用蒸汽高压灭菌锅, 在 122℃ 下氧化 30 min 后取出, 冷却, 加入 1 mL 1:9 HCl 溶液, 用超纯水定容至 25 mL, 摇匀, 用流动分析仪测定硝态氮含量, 即为可溶性总氮, 其余滤液直接用流动分析仪测定 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N, 根据两者的差即可得到 SON 含量。

1.4 数据计算与统计分析

地上部吸氮量/(kg·hm⁻²) = 籽粒产量(t·hm⁻²) × 籽粒氮含量(g·kg⁻¹) + 秸秆产量(t·hm⁻²) × 秸秆氮含量(g·kg⁻¹);

氮素收获指数 (NHI) = 籽粒吸氮量/植株吸氮量^[17]

氮库含量变化量/(mg·kg⁻¹) = 收获后土壤氮含量(mg·kg⁻¹) - 种植前相应土壤氮含量(mg·kg⁻¹)

固定态铵含量/(mg·kg⁻¹) = $\frac{(V - V_0) \times c \times 14.0}{m} \times 1000$ (1)

式中, V 和 V_0 分别为滴定样品和空白时所用标准酸溶液的体积, mL; c 为 0.005 49 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 浓度; 14.0 为氮原子的摩尔质量, g·mol⁻¹; m 为烘干土样的质量, g; 1 000 为单位换算系数。

采用 Excel 2019 和 SPSS 22.0 进行试验数据处理和统计分析, 采用单因素方差分析 (One-way

ANOVA), 邓肯 (Duncan) 法进行多重比较, 分析不同肥力土壤间的差异; 采用 Origin 2018 绘制柱状图; 结构方程模型 (SEM) 可划分一个变量可能对另一个变量产生的直接和间接影响, 适合描述各因素间的复杂网络关系。由于作物吸氮量受到土壤各形态氮的影响, 本研究将地上部吸氮量与土壤各形态氮素进行了相关和回归分析。在相关和回归分析的基础上, 将有显著相关性或回归分析符合要求的因子纳入结构方程模型中, 采用 Amos Graphics 24.0 软件建立了各形态氮素间及其与地上部吸氮量的 SEM, 阐明各形态氮素变化量对玉米地上部吸氮量的直接或间接效应。

2 结果

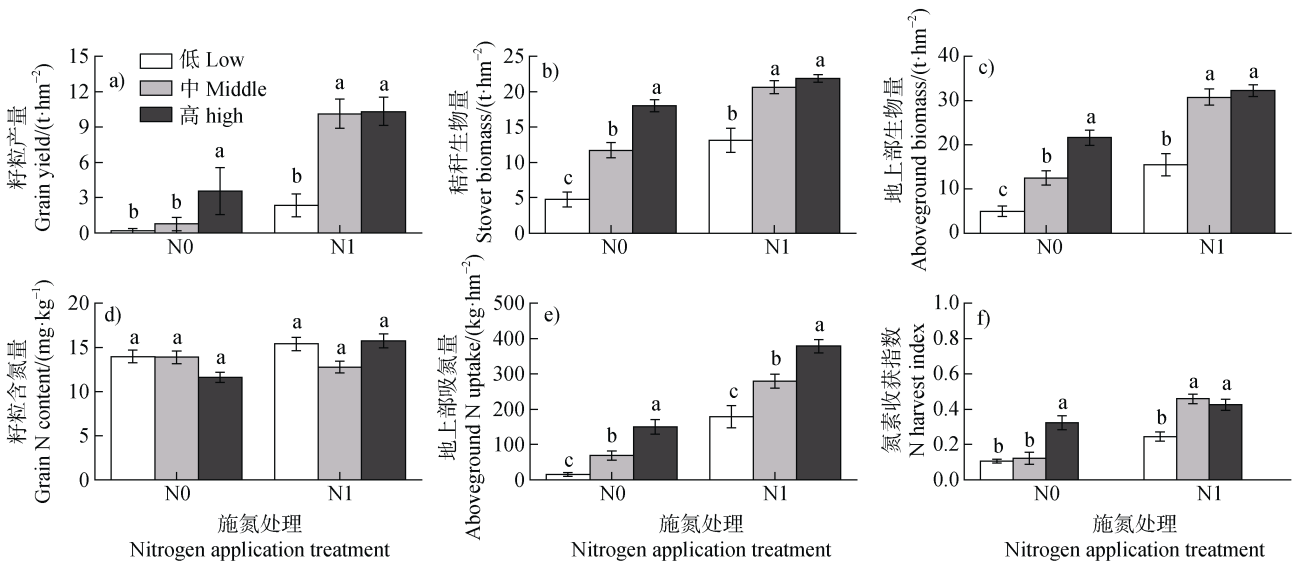
2.1 不同肥力红壤上玉米生物量和氮吸收

由图 1 可知, 在不施氮肥下, 玉米籽粒产量 (图 1a)、秸秆生物量 (图 1b)、地上部生物量 (图 1c) 和吸氮量 (图 1e) 均随土壤肥力提高而增加。在不施氮肥下, 高肥力土壤的籽粒产量约为中肥力土壤的 4.6 倍, 而低肥力土壤上玉米产量与中肥力土壤上无显著差异。施氮肥下, 中肥力土壤上产量是低肥力土壤的 4.3 倍, 但与高肥力土壤无显著差异。与籽粒产量不同, 不施氮肥下, 中肥力土壤上秸秆生物量明显高于低肥力土壤, 因此其地上部总生物量高于低肥力土壤。施氮肥下, 中肥力土壤上产量和秸秆生物量及总生物量均与高肥力土壤无显著差异。

不同肥力土壤上玉米籽粒含氮量 (图 1d) 无显著差异, 秸秆中亦如此 (数据略)。尽管差异不显著, 但是可以看出施氮肥下, 高肥力土壤上籽粒含氮量较中肥力土壤上高了 23%。因此, 地上部吸氮量均在高肥力土壤上最高, 中肥力土壤其次, 低肥力土壤最低, 且施氮高于不施氮肥。氮素收获指数在不施氮肥条件下为 0.1~0.3, 其中在高肥力土壤上最高; 在施氮肥下为 0.2~0.5, 在高肥力与中肥力土壤中无显著差异, 但显著高于低肥力土壤。

2.2 不同肥力红壤铵态氮和硝态氮含量

由表 2 可知, 经过 3 季作物种植, 本季玉米种植前连续施氮肥 (N1) 土壤中的 NH₄⁺-N 明显较高, 为 NO₃⁻-N 的 4~10 倍, 而不施氮肥 (N0) 土壤



注：低、中和高分别代表低肥力、中肥力和高肥力土壤；小写字母为不同土壤肥力间的差异显著 ($P < 0.05$)；N0 为不施氮肥，N1 为施氮肥 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，下同。Note: Low, medium and high represent low fertility, medium fertility and high fertility soils, respectively. The lowercase letters on top of the bar indicate a significant difference ($P < 0.05$) between soil fertility levels. N0 and N1 represent no nitrogen application and applying $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, and the same below.

图 1 不同肥力红壤玉米籽粒产量 (a)、秸秆生物量 (b)、地上部生物量 (c)、籽粒氮含量 (d)、地上部吸氮量 (e) 及氮素收获指数 (f)

Fig. 1 Grain yield (a), stover biomass (b), aboveground biomass (c), grain nitrogen content (d), aboveground nitrogen uptake (e) and N harvest index (f) of maize in red soil with different fertility levels

表 2 不同肥力红壤上铵态氮、硝态氮和矿质氮含量

Table 2 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and Mineral N content in red soil with different fertility levels

肥力 Fertility	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N} / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$			硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N} / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$			矿质氮 Mineral N / ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
	种植前	收获后	变化量	种植前	收获后	变化量	种植前	收获后	变化量
	Before planting	After harvest	Variation	Before planting	After harvest	Variation	Before planting	After harvest	Variation
N0 低 Low	4.2±0.2a	2.5±0.3a	-1.8±0.3b	4.4±0.4a	1.8±0.3c	-2.6±0.4b	8.6±0.6b	4.2±0.2b	-4.4±0.7b
N0 中 Middle	2.8±0.2b	1.9±0.4a	-0.8±0.1a	1.8±0.1b	2.4±0.2b	0.7±0.2a	4.8±0.3c	4.3±0.4b	-0.4±0.1a
N0 高 High	3.8±0.2a	2.0±0.1a	-1.8±0.3b	6.9±0.3a	4.3±0.3a	-2.6±0.7b	10.6±0.7a	6.2±0.3a	-4.4±0.9b
N1 低 Low	25.6±0.6a	2.9±0.5a	-22.7±1.1a	3.3±0.4b	2.5±0.5c	-0.8±0.2b	29.0±1.2b	5.4±0.6a	-23.5±1.3a
N1 中 Middle	25.1±0.1a	1.5±0.3b	-23.6±0.5a	2.5±0.1b	3.6±0.4b	1.1±0.4a	27.7±0.2b	5.2±0.3a	-22.5±0.5a
N1 高 High	36.2±0.94a	1.7±0.7b	-34.4±0.8b	8.7±0.1a	5.5±0.7a	-3.2±0.6c	43.0±0.2a	5.3±1.5a	-37.6±0.8b

注：表中数值为均值±标准误差 ($n = 3$)；同列不同小写字母为不同土壤肥力间的差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: The values are mean ± standard deviation error ($n = 3$)；Different letters in the same column mean significant difference ($P < 0.05$) in different soil fertility levels.

中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 相近。收获后，除中肥力土壤外，其他土壤中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 均较种植前有

所降低。其中，N0 条件下 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降低了 $0.8 \sim 1.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，N1 条件下降低了 $23 \sim 34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总体而

言, N0 条件下中肥力土壤上的矿质氮 (MN) 含量无显著变化, 而低肥力和高肥力土壤中降低了约 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; N1 条件下低肥力和中肥力土壤上 MN 降低了约 $23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高肥力土壤上降低了 $38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3 不同肥力红壤固定态铵含量

玉米种植前, 土壤固定态铵含量以中肥力土壤最高 ($206\sim 208 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其次为高肥力土壤 ($185\sim 194 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 低肥力土壤中最低 ($172\sim 177 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) (图 2a)。玉米收获后, 不同肥力红壤中固

定态铵含量均呈累积状态, 但累积量在肥力间差异较大 (图 2b)。N0 条件下, 中肥力土壤的固定态铵累积量最高 ($129 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 较种植前增加了 63%, 低肥力和高肥力土壤中分别增加了 47% 和 11%。N1 条件下, 中肥力土壤的固定态铵累积量 ($96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 为低肥力和高肥力土壤的 2~3 倍, 而低肥力和高肥力土壤间无显著差异。此外, 除了高肥力土壤在两种施肥下无显著差异, 固定态铵累积量均为 N0 条件下高于 N1 条件下。

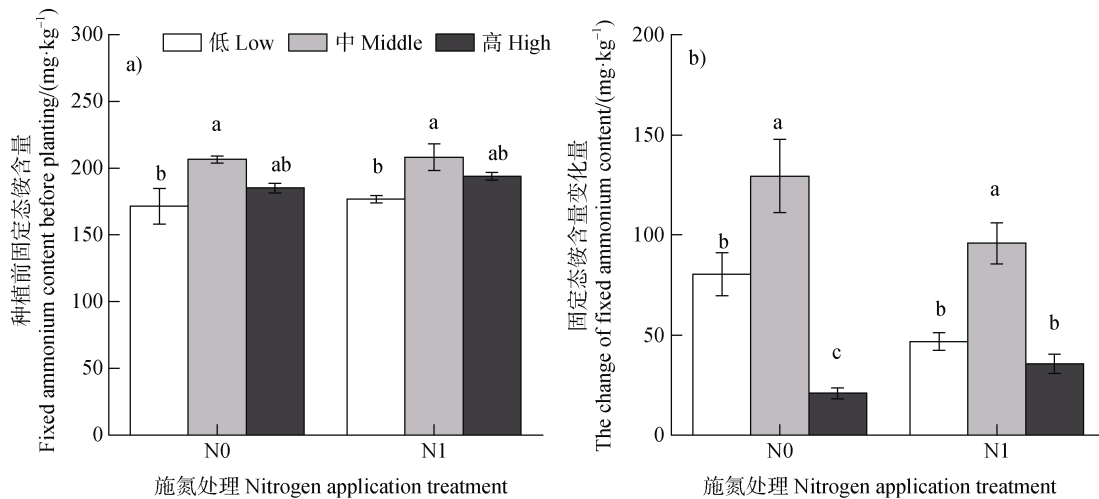


图 2 不同肥力红壤上玉米种植前的固定态铵含量 (a) 及其变化量 (b)

Fig. 2 Fixed ammonium (FN) content before planting (a) and its change rates (b) in red soil with different fertility levels

2.4 不同肥力红壤微生物生物量氮含量

由图 3a 可知, 与种植前相比, 收获后土壤 MBN 均有所降低, 且在 N1 条件下降低量高于 N0。N0 条件下, 三个肥力土壤的 MBN 减少量无显著差异,

为 $4.7\sim 5.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 减少了 18%~44%。N1 条件下, 中肥力土壤的 MBN 减少量最高 ($38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 减少了 72%。而低肥力和高肥力土壤的 MBN 减少量无显著差异, 为 $12\sim 18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。微生物生物量氮

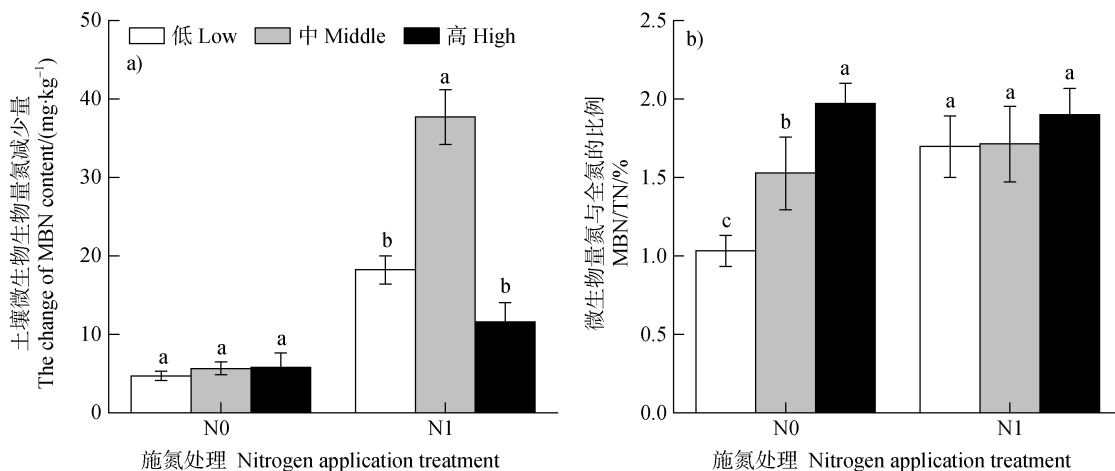


图 3 不同肥力红壤上微生物生物量氮减少量 (a) 和微生物生物量氮与全氮的比例 (b)

Fig. 3 Reduction of soil microbial biomass nitrogen (MBN) (a) and MBN/TN (b) in red soil with different fertility levels

与全氮的比例 (MBN/TN) 在一定程度上表明土壤中氮的生物有效性。MBN/TN 在 N0 条件下随肥力提升显著增加, 而在 N1 下无显著差异 (图 3b)。

2.5 不同肥力红壤可溶性有机氮含量

不同肥力红壤可溶性有机氮 (SON) 含量在收获后均低于种植前 (图 4)。N0 条件下, SON 的减少量为 6~18 mg·kg⁻¹, 减少了 55%~84%, 且其减少量所占比例随肥力提升而增加 ($P < 0.05$)。N1 条件下, SON 含量较种植前的 16~120 mg·kg⁻¹ 减少了

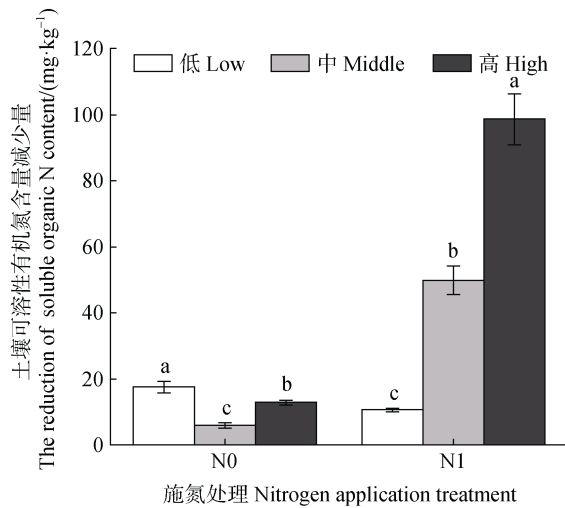


图 4 不同肥力红壤上可溶性有机氮减少量

Fig. 4 The reduction of soluble organic N content in red soil with different fertility levels

67%~85%, 其减少量随土壤肥力的提高显著增加。其中, 高肥力土壤的减少量约为中肥力土壤的 2.0 倍, 为低肥力土壤的 9.3 倍。但就降低比例而言, 中高肥力土壤间无显著差异 (82%~85%), 显著高于低肥力土壤 (67%)。

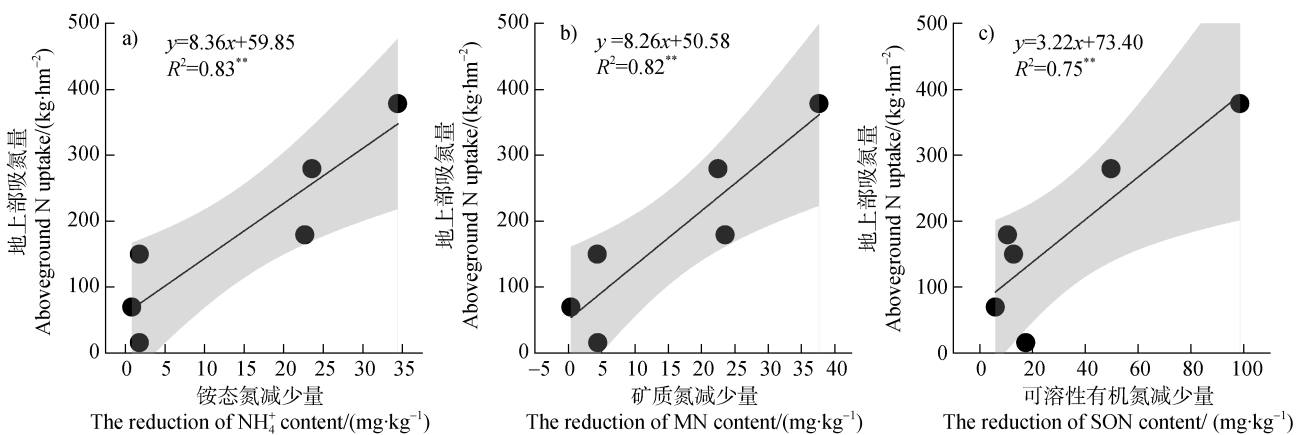
2.6 地上部吸氮量与土壤氮库变化量的关系

相关分析结果发现, 玉米地上部吸氮量与土壤 NH₄⁺-N、MN 和 SON 的减少量呈极显著 ($P < 0.01$) 相关。图 5 建立了玉米地上部吸氮量与土壤 NH₄⁺-N、MN 和 SON 变化量的关系。当土壤 NH₄⁺-N、MN 和 SON 分别减少 1 mg·kg⁻¹ 时, 玉米地上部吸氮量分别能增加 8.36 kg·hm⁻²、8.26 kg·hm⁻² 和 3.22 kg·hm⁻²。

3 讨论

3.1 不同肥力红壤上作物产量与含氮量的差异

本研究中 N0 条件下高肥力土壤上玉米产量显著高于中肥力土壤 (图 1a), 说明高肥力土壤有较强的供氮能力^[18], 可提供更多养分供给作物吸收利用。但在 N1 条件下, 两者产量无显著差异, 说明在外源氮肥量较为充足条件下, 中肥力土壤已可满足作物生长的需求。张军等^[19]研究表明, 低、中和高肥力土壤达到最高产的合理施肥量不同, 高肥力土壤仅需 260.8 kg·hm⁻², 而低肥力土壤则需



注: **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。Notes: **indicate extremely significant correlation ($P < 0.01$) .

图 5 地上部吸氮量与铵态氮 (a)、矿质氮 (b) 和可溶性有机氮 (c) 减少量的关系

Fig. 5 Relationship between aboveground N uptake and the decrease of NH₄⁺-N (a), mineral nitrogen (MN, b) and soluble organic nitrogen (SON, c)

345.5 kg·hm⁻²。在考虑高产和环境效益条件下,应对高肥力农田适当减少氮肥施用量,一方面避免施肥量过低引起的土壤氮耗竭,另一方面可降低过多氮肥造成的环境效应。值得注意的是, N0 条件下,高肥力土壤的籽粒产量和地上部吸氮量显著高于中低肥力土壤,籽粒含氮量却略低于中低肥力土壤,说明外源氮素供给不足条件下高肥力土壤上作物吸收的氮素可能更多被用于合成生物体。佟玉欣等^[20]发现,籽粒含氮量随玉米产量的增加而下降,且籽粒氮浓度的稀释较产量的增长速度还要快。李久生等^[21]研究表明,作物吸氮量会随施氮量增加而增加,但对产量无显著影响,主要是因为高肥力土壤中初始的氮素含量在一定程度上满足作物对养分的需求,减轻了施肥不均匀的影响。可见,含氮量和产量并非总是协同耦合关系,在土壤培肥和肥料管理中应增加对作物籽粒含氮量或其他农产品品质指标的关注,综合考虑作物品质、产量和环境效益,确定不同肥力土壤的最佳施氮量。

3.2 不同肥力红壤氮含量的差异

种植一季玉米后,除 FN 含量增加(图 2)外, MN(表 2)、MBN 和 SON 均降低(图 3 和图 4),且高肥力土壤的减少量较高(除 MBN),说明高肥力土壤不仅可供应大量的矿质氮,且 MBN 和 SON 也可直接或间接转化为 MN 供作物吸收(图 6)。其主要原因有,一方面,高肥力土壤的养分更充足且均衡,有良好的土壤结构,利于根系生长发育及吸收养分;此外,高肥力土壤的缓冲能力、阳离子交换能力更强,本研究的结果也表明由于土壤中 NH₄⁺-N 含量的降低使高肥力土壤的 FN 累积量最小(表 1 和图 2);其次,高肥力土壤有机碳含量较高,含有更多的微生物源组分^[22],可提高微生物的数量和活性,固持更多氮素,减少氮素损失。本研究也发现,高肥力土壤的 MBN 减少量最低(图 3),这主要是因为高肥力土壤有利于土壤 MBN 的保蓄,施氮肥后,土壤微生物初期固持的氮素在其死亡之后又重新被植物吸收利用^[23]。

NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 是作物可利用的主要氮素形态。收获后,高肥力土壤的矿质氮减少最多,中肥力的减少量最低(表 2)。这可能是因为高肥力土壤作物生物量较大且带走了更多的氮素,而中肥力土壤上生物量虽高,但籽粒氮含量较低,带走的氮素并不多。另一方面可能受到土壤质地的影响,如同

延安等^[24]的研究表明,土壤质地显著影响 MN 的残留量,黏土对 MN 的吸附能力较强,残留量较高,变化量较小,本研究的中肥力土壤的质地为黏土,高肥力的土壤质地则为粉黏土,结果与其一致。但是, N0 条件下,中肥力土壤种植前的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 显著低于低肥力土壤,除了作物吸收原因外,低肥力土壤 pH(5.35)和中肥力土壤 pH(6.04)的差异可能影响了硝化作用强度,进而造成了 MN 含量的差异,这将是下一步工作的重点。

可溶性氮(SON)是土壤有效养分中最活跃和易被降解的组分之一,可作为土壤微生物的氮源,小分子的氨基酸类物质也可直接被作物吸收利用^[25]。本研究中土壤 SON 减少量随土壤肥力提升显著增加(图 4),这可能是因为高肥力土壤的有机氮和 SON 含量显著高于低肥力土壤的含量,且高肥力土壤供给作物的较多,而在低肥力土壤上,作物吸收的氮素更多来源于外源氮,所以 SON 降低得较少。由于该试验中氮肥未采用 ¹⁵N 标记,难以准确定量氮库之间的转化过程,明确 SON 与矿质氮等氮形态之间的转化过程尚需要采用 ¹⁵N 标记技术深入研究。

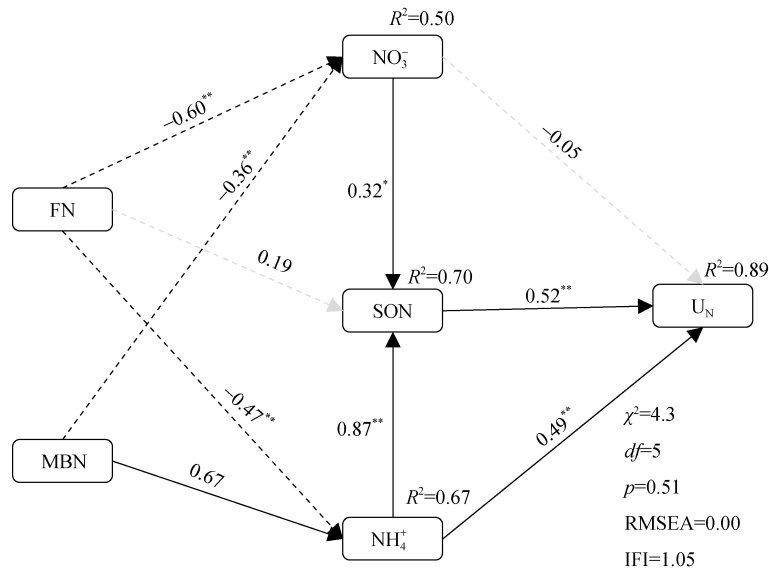
3.3 影响作物吸氮量的各形态氮库含量因素

为探明各形态氮素减少量对玉米地上部吸氮量的直接或间接效应,建立了结构方程模型(图 6)。结果发现, NH₄⁺-N 和 SON 减少量对玉米吸氮量有着正向调控(解释率达 89%),说明高的 NH₄⁺-N 和 SON 变化量有利于玉米对氮素的吸收利用。这主要是因为氮的累积过程中,主要以酰胺态氮和氨基酸态氮为主,且两者均为可溶性氮,可被作物迅速吸收利用。越来越多研究表明,作物不仅可吸收利用 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,还可直接吸收 SON,SON 在氮素循环和作物吸氮中具有不可忽视的重要作用。玉米根具备一种利用 SON 的高效机理,SON 通过被动运输方式释放,同时可通过活性转运机制重新捕获根外的游离氨基酸^[26]。此外,低分子量的 SON 在微生物营养方面也具有重要作用,不仅可直接被微生物利用,还能促进矿物风化,直接影响土壤养分的有效性和流动性^[27],进而影响作物吸收利用氮素。

土壤微生物生物量氮(MBN)和固定态铵(FN)是土壤中的固持氮库,能反映土壤持续供氮的能力。

图 6 结果表明, MBN 和 FN 可通过调控无机态氮或可溶性小分子有机态氮, 进一步调控作物吸收利用氮素。说明一定程度上, 高的 MBN 和 FN 有利于玉米对氮素的吸收利用。在作物生长过程中, 作为土壤易矿化氮的主要来源, 微生物体氮的分解可为作物提供大量有效氮^[28]。并且, MBN 含量高, 在

某种程度上可认为土壤微生物数量多, 种类丰富, 提高了 SON 含量^[29], 增加了作物可利用的氮源。可见, MBN 和 SON 在作物氮素吸收利用过程中起着关键作用, 因此, 进一步探究微生物对氮的固持释放机制及其对 SON 的调控机制, 对丰富氮循环理论及作物高效利用氮素、合理施用氮肥具有重要意义。



注: U_N代表玉米地上部吸氮量。*表示效应显著 ($P < 0.05$); **表示效应极显著 ($P < 0.01$)。黑色虚线和实线分别代表显著负效应和显著正效应, 灰色虚线代表效应不显著; 线上的数字表示标准路径系数, 数值的大小代表贡献的大小; 每个变量被解释的方差 (R^2) 位于其上方; 模型的配适度参数位于模型的右下方, RMSEA: 近似均方根误差。Note: U_N represents maize aboveground N uptake, respectively. * indicated significant effect ($P < 0.05$); ** indicated extremely significant effect ($P < 0.01$). The black dotted and solid arrows indicate negative and positive effects, respectively, and grey dotted arrows indicate non-significant effects. The numbers adjacent to the arrows are standardized path coefficients, which are indicative of the effect size of the relationship. The proportion of explained variance (R^2) appears above every response variable in the model. The goodness-of-fit statistics for the model is shown in the lower right corner, RMSEA: Root mean square error of approximation.

图 6 玉米地上部吸氮量与土壤氮库含量变化量的通径分析

Fig. 6 Path analysis of maize aboveground N uptake and the change of soil N pools

4 结 论

常规施用氮肥 150 kg·hm⁻²时, 高肥力和低肥力红壤上玉米产量无显著差异, 说明对肥力较高的红壤可适当减少氮肥施用量。种植一季玉米后, 土壤 NH₄⁺-N、微生物生物量氮 (MBN) 和可溶性有机氮 (SON) 均有所降低, 并且与作物吸氮量呈直线正相关关系, 说明这三种形态氮在氮素供应上起到重要作用。玉米吸氮量受 SON 的直接正向调控, 并且 MBN 可通过影响 MN 和 SON 含量间接调控玉米吸氮量, 可见, SON 和 MBN 在作物吸氮调控过程中

发挥着重要作用。因此, 在土壤培肥研究和技术上, 一方面可更多地关注 SON 和 MBN 调控作物氮吸收的机制上, 另一方面可采用有机肥替代化肥或使用生物肥来增加土壤中碳含量和微生物生物量, 从而提高土壤 MBN 和 SON 含量, 以促进作物高产和氮肥高效利用。

参考文献 (References)

- [1] Ju X T, Zhang F S. Correct understanding of nitrogen recovery rate[J]. Science & Technology Review, 2003, 21 (4): 51—54. [巨晓棠, 张福锁. 氮肥利用率的要义及其提高的技术措施[J]. 科技导报, 2003, 21 (4):

- 51—54.]
- [2] Pan F F, Yu W T, Ma Q, et al. Influence of ^{15}N -labeled ammonium sulfate and straw on nitrogen retention and supply in different fertility soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53 (3): 303—313.
- [3] Jones D L, Shannon D, Murphy D V, et al. Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36 (5): 749—756.
- [4] Qiu S J, Peng P Q, Liu Q, et al. Soil microbial biomass nitrogen and its role in nitrogen cycling[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25 (4): 443—448.[仇少君, 彭佩钦, 刘强, 等. 土壤微生物生物量氮及其在氮素循环中作用[J]. *生态学杂志*, 2006, 25 (4): 443—448.]
- [5] Peng W F, Lü W S, Huang S, et al. Effects of soil fertility on rice yield and nitrogen use efficiency in a red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51 (18): 3614—3624. [彭卫福, 吕伟生, 黄山, 等. 土壤肥力对红壤性水稻土水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (18): 3614—3624.]
- [6] Wang P P, Duan Y H, Xu M G, et al. Nitrification potential in fluvo-aquic soils different in fertility and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (1): 124—134.[王萍萍, 段英华, 徐明岗, 等. 不同肥力潮土硝化潜势及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (1): 124—134.]
- [7] Yang X Y, Liu X H, Han X R. Effect of nitrogen application rates in different fertility soils on soil N transformations and N use efficiency under different fertilization managements[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (13): 2561—2571. [杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日. 施氮量对不同肥力土壤氮素转化及其利用率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (13): 2561—2571.]
- [8] Liu Y L, Zhang B, Li C L, et al. Long-term fertilization influences on clay mineral composition and ammonium adsorption in a rice paddy soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (6): 1580—1590.
- [9] Duan P P, Zhang Y L, Cong Y H, et al. Regulation of soil fixed ammonium and soluble N through combined application of N fertilizer and manure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (6): 1578—1585. [段鹏鹏, 张玉玲, 丛耀辉, 等. 氮肥与有机肥配施协调土壤固定态铵与可溶性氮的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (6): 1578—1585.]
- [10] Guo Z, Wang X L, Xu H, et al. A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase microbial biomass carbon and nitrogen in yellow paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (5): 1168—1174.[郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (5): 1168—1174.]
- [11] Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of soil fixed NH_4^+ and soil microbiomass nitrogen in the growing season of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12 (1): 90—91.[巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦生长期土壤固定态铵与微生物氮的动态研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12 (1): 90—91.]
- [12] Shen Q R, Wang Y, Shi R H. Changes of soil microbial biomass N and soil fixed ammonium during rice growth and use efficiency of residual N by rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37 (3): 330—338.[沈其荣, 王岩, 史瑞和. 土壤微生物量和土壤固定态铵的变化及水稻对残留 N 的利用[J]. *土壤学报*, 2000, 37 (3): 330—338.]
- [13] Bao S D. Analysis for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.[鲍士旦. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [14] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass by fumigation extraction—an automated procedure[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, 22 (8): 1167—1169.
- [15] Silva J A, Bremner J M. Determination and isotope ratio analysis of different forms of nitrogen in soil: fixed ammonium[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1966, 30 (5): 587—594.
- [16] Zhou X G. Soil soluble nitrogen of in organic vs conventional vegetable production systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.[周晓光. 有机和常规蔬菜生产系统土壤可溶性氮素的分析比较[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.]
- [17] Gou Z W, Hu F L, Zhao C, et al. Postponed topdressing of nitrogen fertilizers to meet nitrogen requirement of maize under full plastic film mulching in oasis irrigation region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24 (4): 888—895. [苟志文, 胡发龙, 赵财, 等. 氮肥后移满足绿洲灌区全膜覆盖玉米的氮素需求[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (4): 888—895.]
- [18] Yang B G, Cai S Y, Liu Y J, et al. Soil nitrogen supply and retention capacity determine the effect and utilization rate of nitrogen fertilizer in paddy field [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (1): 212—223. [杨秉庚, 蔡思源, 刘宇娟, 等. 土壤供保氮能力决定稻田氮肥增产效果和利用率[J]. *土壤*, 2023, 60 (1): 212—223.]
- [19] Zhang J, Zhang H C, Duan X M, et al. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield, quality, and nitrogen use efficiency[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37 (11): 2020—2029. [张军, 张洪程, 段祥茂, 等. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37 (11): 2020—2029.]
- [20] Tong Y X, Li Y Y, Liu S Q, et al. Variations of the grain yields and N absorption of spring maize in Heilongjiang Province [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20 (5): 1094—1102. [佟玉欣,

- 李玉影, 刘双全, 等. 黑龙江春玉米籽粒产量与氮素吸收变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (5): 1094—1102.]
- [21] Li J S, Li B, Su M S, et al. Responses of nitrogen uptake and yield of winter wheat to nonuniformity of sprinkler fertigation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(8): 1600—1607. [李久生, 李蓓, 宿梅双, 等. 冬小麦氮素吸收及产量对喷灌施肥均匀性的响应[J]. 中国农业科学, 2005, 38 (8): 1600—1607.]
- [22] Miao C H, L ü Y Z. Spectral characteristics and structural difference of DOM in black soil , fluvo-aquic soil and red soil[J]. Soils, 2021, 53 (1): 168—172.[缪闯和, 吕贻忠. 黑土、潮土和红壤可溶性有机质的光谱特征及结构差异[J]. 土壤, 2021, 53 (1): 168—172.]
- [23] Wang N, Wang S, Gao Q, et al. Effect of nitrogen application levels on microbiological characteristics of soils with different fertility basics[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (4): 148—152, 167.[王楠, 王帅, 高强, 等. 施氮水平对不同肥力土壤微生物学特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (4): 148—152, 167.]
- [24] Tong Y A, Shi W, L ü D Q, et al. Relationship between soil texture and nitrate distribution and accumulation in three types of soil profile in Shaanxi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11 (4): 435—441.[同延安, 石维, 吕殿青, 等. 陕西三种类型土壤剖面硝酸盐累积、分布与土壤质地的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11 (4): 435—441.]
- [25] Geisseler D, Horwath W R, Joergensen R G, et al. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms – A review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42 (12): 2058—2067.
- [26] Jones D L, Darrah P R. Amino-acid influx at the soil-root interface of *Zea mays* L. and its implications in the rhizosphere[J]. Plant and Soil, 1994, 163 (1): 1—12.
- [27] Hedin L O, Armesto J J, Johnson A H. Patterns of nutrient loss from unpolluted old growth temperate forests: Evaluation of biogeochemical theory[J]. Ecology, 1995, 76 (2): 493—509.
- [28] Ma Q, Wu Z J, Pan F F, et al. Effect of glucose addition on the fate of urea-¹⁵N in fixed ammonium and soil microbial biomass N pools[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 75: 168—173.
- [29] Dai K H, David M B, Vance G F. Characterization of solid and dissolved carbon in a spruce-fir Spodosol[J]. Biogeochemistry, 1996, 35 (2): 339—365.

(责任编辑：陈荣府)