

DOI: 10.20103/j.stxb.202401210182

章梦, 王晨颖, 罗松, 夏允, 许秋月, 杨柳明, 岳楷, 范跃新. 施用氮肥对农田土壤有机氮组分的影响整合分析. 生态学报, 2025, 45(3): 1328-1338.

Zhang M, Wang C Y, Luo S, Xia Y, Xu Q Y, Yang L M, Yue K, Fan Y X. Influences of nitrogen fertilization on soil organic nitrogen components in agroecosystems: a meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(3): 1328-1338.

施用氮肥对农田土壤有机氮组分的影响整合分析

章梦¹, 王晨颖¹, 罗松¹, 夏允¹, 许秋月¹, 杨柳明^{1,2,3}, 岳楷^{1,2,3}, 范跃新^{1,2,3,*}

1 福建师范大学地理科学学院、碳中和未来技术学院, 福州 350007

2 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福建省植物生理生态重点实验室, 福州 350007

3 福建师范大学地理研究所, 福州 350007

摘要: 土壤有机氮组分和含量变化直接影响土壤供氮潜力, 而氮肥施加如何影响土壤有机氮组分目前尚不清楚。以农田土壤为研究对象, 以施氮肥处理与土壤有机氮为主题, 搜集了 1981—2023 年国内外已发表的 1792 条田间试验数据, 进行了整合分析 (meta-analysis)。结果表明: 1) 施氮肥显著增加了农田土壤总氮和有机氮含量, 其中酸解氨基糖氮和酸解氨态氮增幅最大, 而非酸解氮增幅最小。2) 施氮量是影响土壤有机氮累积的重要因素, 除非酸解氮以外, 其余各有机氮组分累积量均随施氮量增加而增加。3) 与短期 (1—3 a) 和长期 (>9 a) 施氮相比, 中长期 (3—9 a) 施氮更有利于土壤有机氮的累积。4) 施氮肥后 0—20 cm 和 20—40 cm 土层有机氮各组分显著增加, 40—60 cm 土层无显著变化。5) 土壤有机碳和矿质氮是施氮后土壤有机氮含量变化的关键非生物因素; 微生物生物量氮和蛋白酶活性是影响有机氮组分的重要生物因素。可见施氮肥显著提高了农田土壤有机氮含量和氮供应潜力, 特别是在有机碳含量和微生物活性较高的土壤中, 施肥对有机氮的累积效应更明显。

关键词: 有机氮组分; 田间试验; 氮肥; 整合分析

Influences of nitrogen fertilization on soil organic nitrogen components in agroecosystems: a meta-analysis

ZHANG Meng¹, WANG Chenying¹, LUO Song¹, XIA Yun¹, XU Qiuyue¹, YANG Liuming^{1,2,3}, YUE Kai^{1,2,3}, FAN Yuexin^{1,2,3,*}

1 School of Geographical Sciences, School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 Key Laboratory of Humid Subtropical Ecological Geographical Processes of Ministry of Education, Fujian Provincial Key Laboratory of Plant Physiology and Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: The changes of soil organic nitrogen components and content directly affect the potential of soil nitrogen supply, but how nitrogen fertilizer addition affects soil organic nitrogen components is still unclear. To address this, this study focused on farmland soil, with nitrogen fertilizer treatment and soil organic nitrogen as the main themes. We collected 1792 field test data published at home and abroad from 1981 to 2023, and carried out meta-analysis. The results showed that: 1) Nitrogen addition significantly increased the content of total nitrogen and organic nitrogen in farmland soil, and the increase of amino sugar nitrogen and ammonia nitrogen was the largest, while the increase of non-hydrolysable nitrogen was the smallest. 2) The nitrogen addition rate is an important factor affecting the accumulation of soil organic nitrogen. Except for non-hydrolysable nitrogen, the accumulation of other organic nitrogen components increases with the increase of nitrogen addition rate. 3) Compared with short-term (1—3 a) and long-term (>9 a) nitrogen addition, medium and long-term (3—

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32371674, 32192433, 41977090, 32171587)

收稿日期: 2024-01-21; **网络出版日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxfan@fjnu.edu.cn

9 a) nitrogen addition is more conducive to the accumulation of soil organic nitrogen. 4) The content of soil organic nitrogen components accumulated significantly in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, while there was no significant change in 40—60 cm soil layers. 5) Soil organic carbon and mineral nitrogen are the key abiotic factors for the change of soil organic nitrogen content after nitrogen addition; Microbial biomass nitrogen and protease activity are important biotic factors affecting organic nitrogen components. It can be seen that application of nitrogen fertilizer significantly increased the organic nitrogen content and nitrogen supply potential of farmland soil, especially in the soil with higher organic carbon content and microbial activity, the cumulative effect of fertilization on organic nitrogen was more obvious.

Key Words: organic nitrogen components; field experiment; nitrogen fertilizer; meta-analysis

有机氮(Soil organic nitrogen, SON)占土壤总氮(Total nitrogen, TN)的90%以上,既是土壤氮库的重要组成部分,亦是土壤有效氮的主要来源,其含量变化可能会改变土壤供氮潜力,进而影响地上植被生长和生态系统功能^[1]。在氮需求量大的农田生态系统中,施氮肥是提高土壤供氮能力和维持作物生长的主要措施^[2]。已有研究表明,农田的施肥量是作物氮需求的两倍^[3],意味着大量的氮肥并未被作物吸收,而是在土壤中积累下来,可能影响土壤有机氮库和供氮能力。然而,施肥对农田土壤有机氮的含量和组分有何影响,目前仍不清楚。

氮肥对土壤有机氮库的影响与有机氮的组分有关。根据 Bremner 等^[4]提出的有机氮分组方法,土壤有机氮主要包括酸解总氮(Total hydrolysable nitrogen, THN)和非酸解氮(Non-hydrolysable nitrogen, NHN)两大组分。其中酸解总氮又可分为酸解氨基糖氮(Amino sugar nitrogen, ASN)、酸解氨基酸氮(Amino acid nitrogen, AAN)、酸解氨态氮(Ammonia nitrogen, AN)和酸解未知氮(Hydrolysable unidentified nitrogen, HUN)。不同有机氮组分的来源和可利用性存在差异,如酸解氨基糖氮的主要成分为氨基葡萄糖、氨基半乳糖和胞壁酸^[5-6],是土壤微生物残体中包含的氮,与微生物活性、数量和群落结构紧密相关^[7]。酸解氨基酸氮主要来源于土壤微生物、动植物残体及其分解产物中的蛋白质、多肽等^[8]。酸解氨态氮是当季作物可以直接吸收利用的有效氮,主要来自土壤的无机氮(土壤固定态铵和吸附性铵)、土壤酸解产物(脱氨基或水解产生的氨基酸和氨基糖)和酰胺类化合物^[4, 9],绝大多数酸解氨态氮来源于固定态铵^[10]。酸解未知氮是腐殖质腐殖化过程的产物和部分酸解未释放的固定态铵^[11-12],主要包括杂环态氮(N-苯氧基氨基酸氮、非 α -氨基酸氮和嘧啶、嘌呤等)。非酸解氮是土壤酸解过程中氨基酸与还原糖的缩合产物^[4],不易被酸解成单体,在土壤中相对稳定。因此,有机氮组分来源与稳定性的差异,可能导致施肥后土壤有机氮组分具有不同的累积和调节机制。

近年来,相关学者以农田生态系统为对象,研究了施肥后土壤有机氮组分含量和比例的变化,但研究结果并不一致^[13-15]。贾倩等^[16]通过3年田间定位试验研究表明,施氮显著提高了农田土壤酸解总氮的含量,对非酸解氮影响不显著;也有研究发现施氮提高了农田酸解氨态氮的含量,但降低了酸解氨基糖氮的含量^[17];但 Tian 等^[13]研究发现,施氮显著增加了农田酸解氨基糖氮的含量;通过5年的田间试验,施氮显著增加了酸解未知氮和非酸解氮的含量^[18]。此外,还有研究表明,长期施氮未显著改变土壤有机氮组分^[19]。可见,在样地尺度的研究中,施氮后土壤有机氮含量呈现出不同变化趋势。而大尺度上,施氮肥后农田土壤有机氮组分如何变化尚不清楚,开展整合分析研究可望发现施氮后土壤有机氮变化的一般规律。

外源氮输入通过改变土壤生物和非生物因素影响土壤有机氮的含量和组成^[20-24]。其中,土壤理化性质如pH、土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和氮磷养分等指标的变化是影响有机氮动态的主要非生物因素。如长期施氮会降低土壤pH,导致土壤酸化,改变土壤氮的转化速率,进而影响土壤有机氮的积累^[25]。此外, SOC也是影响有机氮含量的重要指标,一般有机质含量较高的土壤,其络合大分子氮聚合物的能力也更强,有利于有机氮的存储。因此,多数研究发现有机氮与SOC存在正相关关系^[26-27]。施氮后土壤属性等非生物因素的变化,主要通过改变土壤微生物群落和功能,加强或者削弱微生物转化土壤氮的能力,进而影响土壤有机氮的含量和组成^[28]。如施氮会提高土壤氮有效性,改善土壤养分状况,促进微生物快速生长和繁殖,微生物

生物量的增加会提高土壤氮的吸收和同化,将无机氮转化为有机氮,提高了土壤氨基糖氮等有机氮组分的积累^[13]。但是,土壤微生物活性的增强也可能会促进有机氮的分解,从而降低土壤有机氮的含量。如有研究发现,施氮后土壤蛋白酶和脲酶活性增加,表明施氮可能会提高微生物分解有机氮的能力^[29]。因此,关注土壤理化性质和微生物属性等环境因子的变化,可能有助于探索施氮后土壤有机氮含量和组分变化的调控机制。

基于以上问题,本研究以农田生态系统为研究对象,通过 Meta 分析来探讨施氮下土壤有机氮组分的变化和影响因素。重点关注以下科学问题:(1)施氮对土壤不同有机氮组分有何影响?(2)施氮背景下土壤有机氮组分变化的关键影响因素。

1 材料与方法

1.1 数据的收集及纳入标准

为探讨施氮对土壤有机氮组分的影响,本研究利用中国知网、Web of Science、谷歌学术等中英文数据库对已发表的文章进行搜索。本研究所用中文检索词包括有机氮组分、氮肥、氮添加等,所用英文检索词包括(“organic nitrogen components”)AND(“nitrogen input”OR“nitrogen fertilizer”OR“nitrogen addition”OR“nitrogen application”)。结合研究目的,避免在数据搜集与取舍过程中出现遗漏和偏差,将检索到的文献按照以下标准进行筛选:(1)试验对象为农田生态系统;(2)田间开展试验,且包含对照和施氮处理;(3)多因素试验,只选取对照与施氮处理;(4)同一田间试验中,试验组和对照组必须在施氮量、施氮时间、土壤深度等方面保持一致;共检索到文献 30 篇,提取数据 1792 条。数据直接从正文、表格和附录中提取,或者使用数字化软件(https://apps.automeris.io/wpd/index.zh_CN.html)从图中提取。每组数据包括对照平均值、处理平均值、标准差(SD)和样本量(N)。数据集主要包括试验地点(纬度和经度)、气候情况(年均温和年降水量)、氮肥施用参数(年施肥量和施肥时间)、土层深度、土壤属性和有机氮组分。本研究搜集的 30 篇文章中,大多分布在温带地区,少数分布在热带和亚热带地区。

为了比较不同因素对土壤有机氮组分的影响,根据组内最大均质化程度和数据分布进行评价分析^[30]。氮肥施用量分为 0—120 kg hm⁻² a⁻¹、120—240 kg hm⁻² a⁻¹、>240 kg hm⁻² a⁻¹ 3 个水平;试验持续时间分为 1—3 a、3—9 a、>9 a;土层深度按 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 划分土层。

1.2 统计分析

为了评估施氮对土壤有机氮组分的影响,本研究采用自然对数响应比(lnRR)作为效应值进行量化,公式如下:

$$\ln RR = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) \quad (1)$$

式中, X_t 和 X_c 分别为处理组和对照组的平均值。

计算响应比(lnRR)的变异系数(V),公式如下:

$$V = \frac{S_t^2}{X_t^2 N_t} + \frac{S_c^2}{X_c^2 N_c} \quad (2)$$

式中: S_t 和 S_c 分别为处理组和对照组的标准差; N_t 和 N_c 为处理组和对照组的样本数。

为了计算施氮对土壤有机氮组分的总体平均效应值(lnRR₊₊),本研究使用 R 中的“lme4”软件包运行了一个仅有截距的线性混合模型^[31]。其中,lnRR 被拟合为一个响应变量,文章编号作为随机变量,以解释单篇文章中研究数据之间的潜在自相关。为了进一步评估环境因子对 lnRR 的影响,先将所有环境因子拟合为连续变量或分组变量,再采用线性混合模型进行分析。由于不同环境因子的数据值存在较大差异,所以不能评估它们之间的相互作用,因此本研究只运行单变量模型来评估每个变量的影响。为了方便解释,将 lnRR₊₊ 及其 95% 置信区间(CI)换算成百分比,即效应值 = $(e^{\ln RR_{++}} - 1) \times 100\%$ ^[32]。95% (CI) 的均值为正值或负值,表示数据具有显著差异,相反则差异不显著。由于个别研究实验结果与其他研究结果差异较大,且权重较大,可能

导致研究结果产生较大偏倚,因此本研究采用无权分析(即权重 W 均赋值为 1)。

本研究所有数据使用 Excel 2021 进行记录和整理,再使用 R 语言“lme4”数据包进行分析,最后采用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果

2.1 施氮对土壤有机氮的影响

施氮导致土壤总氮和各有机氮组分显著增加(图 1)。其中,酸解氨基糖氮增幅最大为 30.17%,酸解氨态氮次之为 29.63%,之后是酸解总氮(21.55%)、酸解未知氮(21.46%)、土壤总氮(16.64%)、酸解氨基酸氮(13.41%)和非酸解氮(7.46%)。此外,施氮后酸解氨基糖氮和酸解氨态氮占总氮的比例显著增加,分别为 11.75%和 11.50%,而其他有机氮组分比例变化不显著(图 1)。

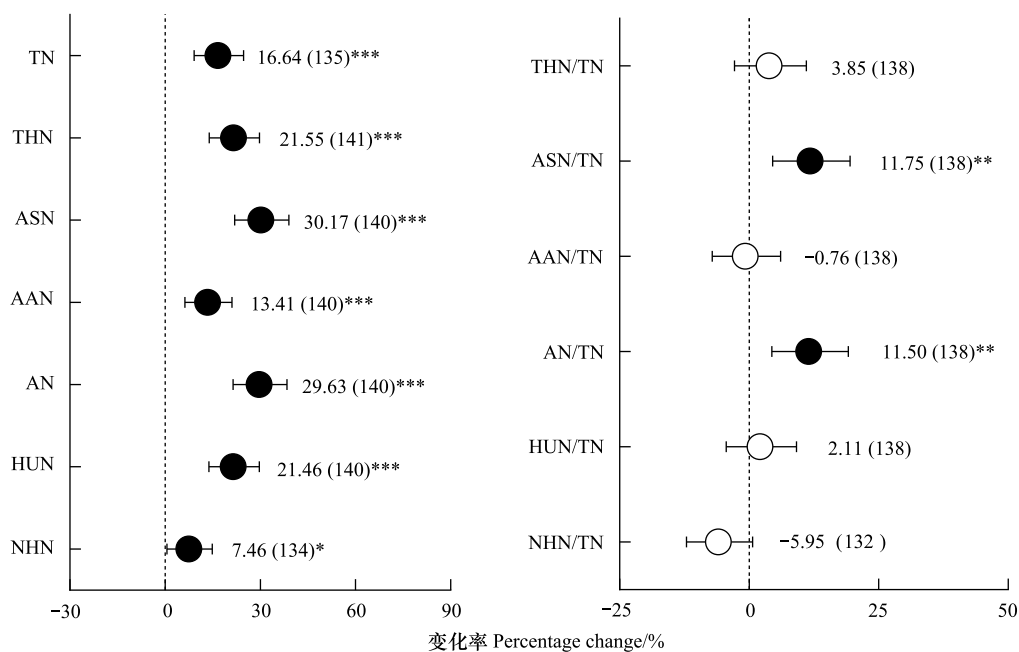


图 1 施氮对土壤有机氮组分及其占总氮比例的影响

Fig.1 Effects of nitrogen application on soil organic nitrogen components and their proportion to total nitrogen

TN: 土壤总氮; THN: 酸解总氮; ASN: 酸解氨基糖氮; AAN: 酸解氨基酸氮; AN: 酸解氨态氮; HUN: 酸解未知氮; NHN: 非酸解氮; THN/TN: 酸解总氮占土壤总氮比; ASN/TN: 酸解氨基糖氮占土壤总氮比; AAN/TN: 酸解氨基酸氮占土壤总氮比; AN/TN: 酸解氨态氮占土壤总氮比; HUN/TN: 酸解未知氮占土壤总氮比; NHN/TN: 非酸解氮占土壤总氮比; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

2.2 施氮量、施氮时间和土层深度对土壤有机氮组分的影响

氮肥对土壤有机氮的影响与施肥量有关,土壤总氮和各有机氮组分均表现出随施氮量增加而增加的趋势(图 2)。当施氮量为 0—120 ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 时,土壤总氮、酸解总氮、酸解氨态氮显著增加,但酸解氨基糖氮、酸解氨基酸氮和酸解未知氮变化不显著;当施氮量为 120—240 ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和 >240 ($\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 时,除了非酸解氮无显著变化之外,其余各有机氮组分均显著增加(图 2)。此外,土壤有机氮组分占总氮的比例也因施氮量而异。高施氮量(>240 $\text{kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 导致酸解总氮占总氮比例、酸解氨态氮占总氮比例、酸解未知氮占总氮比例分别增加了 7.28%、12.56% 和 14.69%,但非酸解氮占总氮比例却降低了 10.02%(图 2)。其他施氮处理下各氮组分占总氮的比例无显著变化。表明施氮量越高,土壤有机氮组分累积越多。

短期施氮(1—3 a) 未显著改变土壤总氮、酸解氨基酸氮、酸解未知氮和非酸解氮,但显著增加了酸解总氮、酸解氨基糖氮和酸解氨态氮的含量。施氮持续时间为 3—9 a 时,除了非酸解氮无显著变化,其余各有机氮

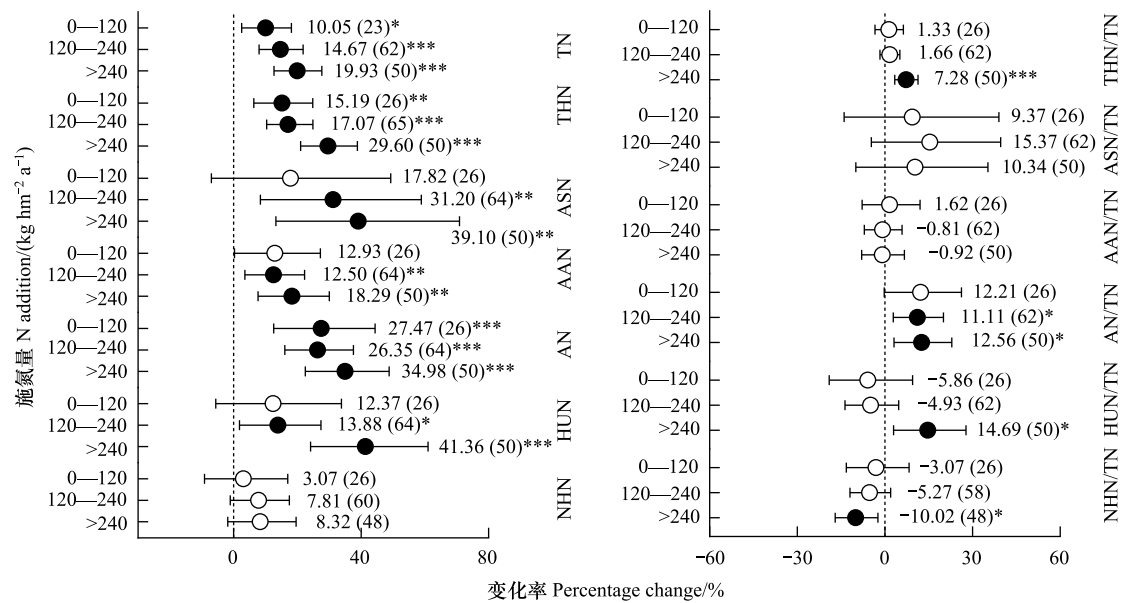


图2 施氮量对土壤有机氮组分及其组分占总氮比例的影响

Fig.2 Effects of nitrogen application on soil organic nitrogen components and their proportion to total nitrogen

TN: 土壤总氮; THN: 酸解总氮; ASN: 酸解氨基糖氮; AAN: 酸解氨基酸氮; AN: 酸解氨态氮; HUN: 酸解未知氮; NHN: 非酸解氮; THN/TN: 酸解总氮占土壤总氮比; ASN/TN: 酸解氨基糖氮占土壤总氮比; AAN/TN: 酸解氨基酸氮占土壤总氮比; AN/TN: 酸解氨态氮占土壤总氮比; HUN/TN: 酸解未知氮占土壤总氮比; NHN/TN: 非酸解氮占土壤总氮比; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

组分均显著增加。施氮持续时间 > 9 a 时, 土壤总氮、酸解总氮、酸解氨态氮和酸解未知氮的含量显著增加, 但酸解氨基糖氮、酸解氨基酸氮和非酸解氮变化不显著 (图 3)。除了酸解氨基酸氮占总氮比例和酸解氨态氮占总氮比例在 3—9 a 的施氮后显著增加, 其他各有机氮组分占总氮的比例在不同施氮时间下均无显著变化 (图 3)。表明中长期 (3—9 a) 施氮比短期 (1—3 a) 和长期施氮 (> 9 a) 更有利于土壤有机氮积累。

施氮肥显著增加了 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤总氮、酸解总氮、酸解氨基糖氮、酸解氨基酸氮、酸解氨态氮和酸解未知氮含量, 但对 40—60 cm 土层的各有机氮组分无显著影响; 与其他有机氮组分不同, 非酸解氮含量在不同土层的变化均不显著 (图 4)。从有机氮占总氮的比例来看, 除了酸解总氮占总氮比例在 20—40 cm 土层增加了 7.05% 和酸解氨态氮占总氮比例在 0—20 cm 土层增加了 11.69% 之外, 其余有机氮组分占总氮的比例均无显著变化 (图 4)。表明施氮主要促进了表层土壤的有机氮累积, 而对深层土壤无显著影响。

2.3 施氮后土壤有机氮组分变化的关键影响因素

模型选择分析显示, SOC、矿质氮和 pH 是土壤总氮和各有机氮组分变化的重要影响因素 (表 1)。其中, SOC 与土壤总氮、酸解总氮、酸解氨基酸氮和非酸解氮显著正相关; 铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 与酸解总氮、酸解氨基糖氮和酸解氨态氮显著正相关; pH 与酸解氨基糖氮显著正相关, 但与酸解氨态氮显著负相关。此外, 总氮与年均降水量 (Mean annual precipitation, MAP) 显著正相关 (表 1)。表明施氮通过改变 SOC、pH 和矿质氮等土壤理化性质影响有机氮的组分和含量。

线性回归分析发现, 土壤总氮、酸解总氮、酸解氨基酸氮、酸解氨态氮与微生物生物量氮和蛋白酶活性具有显著的正相关关系, 酸解氨基糖氮与蛋白酶活性显著正相关 (图 5)。表明施氮后微生物生物量和酶活性也是影响土壤有机氮累积的关键因素。

3 讨论

3.1 氮肥添加对土壤有机氮组分的影响

本研究发现, 施氮导致农田土壤总氮和各有机氮组分显著增加, 但不同有机氮组分增加的程度存在差异,

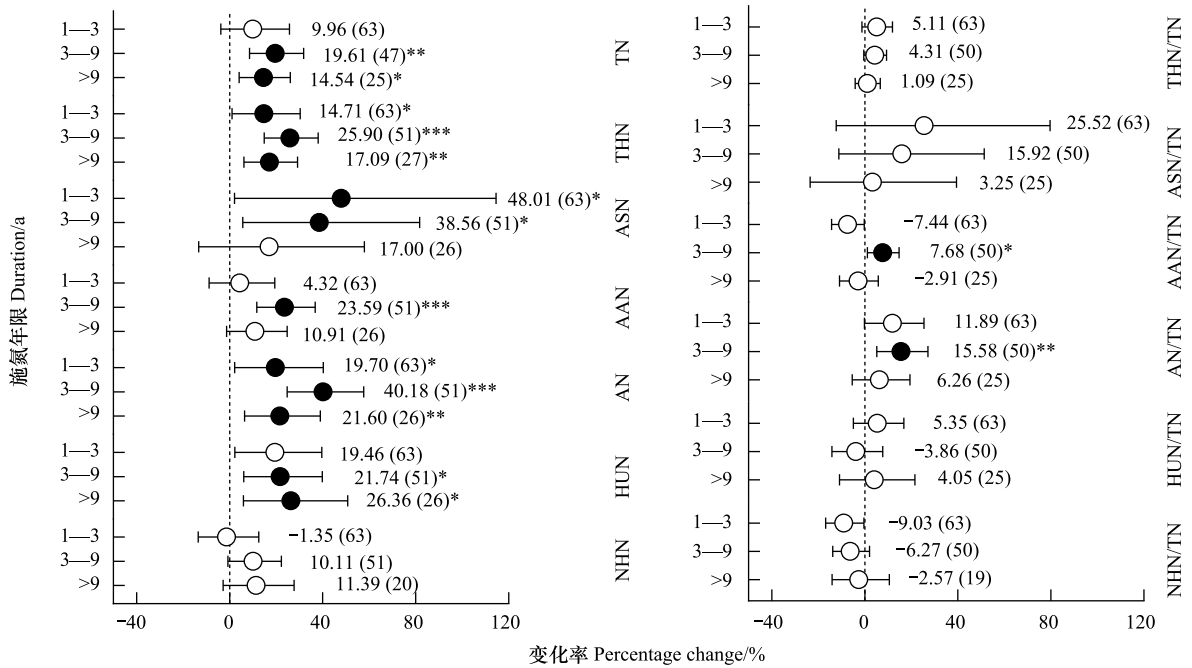


图3 施氮年限对土壤有机氮组分及其组分占总氮比例的影响

Fig.3 Effects of nitrogen application years on soil organic nitrogen components and their proportion to total nitrogen
TN: 土壤总氮; THN: 酸解总氮; ASN: 酸解氨基糖氮; AAN: 酸解氨基酸氮; AN: 酸解氨态氮; HUN: 酸解未知氮; NHN: 非酸解氮; THN/TN: 酸解总氮占土壤总氮比; ASN/TN: 酸解氨基糖氮占土壤总氮比; AAN/TN: 酸解氨基酸氮占土壤总氮比; AN/TN: 酸解氨态氮占土壤总氮比; HUN/TN: 酸解未知氮占土壤总氮比; NHN/TN: 非酸解氮占土壤总氮比; * 表示 $P<0.05$ 、** 表示 $P<0.01$ 、*** 表示 $P<0.001$

表1 土壤有机氮组分效应比 (lnRR) 影响因子的单变量线性混合效应模型分析

Table 1		Effects of environmental factors on soil organic nitrogen components effect ratio (lnRR) based on univariate linear mixed effects model							
		Latitude	MAT	MAP	pH	SOC	SOM	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
TN	E	-0.0097	-0.0031	0.0003 *	-2.2488	0.6572 **	0.0337	0.0791	0.0872
	N	135	100	117	24	56	22	29	34
THN	E	-0.0069	0.0024	0.0003	-0.5546	0.6383 *	0.0832	0.1193 *	0.0901
	N	141	104	118	27	56	25	32	38
ASN	E	0.0132	-0.0277	0.0004	3.8945 *	0.7537	0.1583	0.5609 **	-0.1009
	N	140	104	118	27	56	25	32	37
AAN	E	-0.0016	-0.0087	-0.0001	-0.3603	1.2166 *	-0.0026	0.0866	0.0573
	N	140	104	118	27	56	25	32	37
AN	E	-0.0062	0.0131	-0.0001	-2.7634 ***	-0.3214	0.0618	0.1423 *	0.1332 *
	N	140	104	118	27	56	25	32	37
HUN	E	-0.0054	-0.0036	0.0003	-0.3011	1.1442	0.2551 ***	-0.0343	0.1180
	N	140	104	118	27	56	25	32	37
NHN	E	-0.0042	-0.0037	0.0000	-0.2631	0.7561 **	-0.0377	-0.0911	-0.0998
	N	134	103	117	21	56	19	32	32

E: Estimate, 估算值; N: 样本量; Latitude: 经度; MAT: 年均气温; MAP: 年均降水量; SOC: 土壤有机碳; SOM: 土壤有机质; NH₄⁺-N: 铵态氮; NO₃⁻-N: 硝态氮; TN: 土壤总氮; THN: 酸解总氮; ASN: 酸解氨基糖氮; AAN: 酸解氨基酸氮; AN: 酸解氨态氮; HUN: 酸解未知氮; NHN: 非酸解氮; * 表示 $P<0.05$ 、** 表示 $P<0.01$ 、*** 表示 $P<0.001$

其中酸解氨基糖氮增幅最大(图1)。表明氮肥施加总体上促进了土壤总氮和有机氮的累积,特别是酸解氨基糖氮的累积最明显。这可能与有机氮组分的来源和属性有关。酸解氨基糖氮主要来源于微生物细胞壁^[7],施氮后土壤微生物生物量的增加可能是土壤有机氮累积的主要原因。有研究发现长期施肥提高了土壤微生

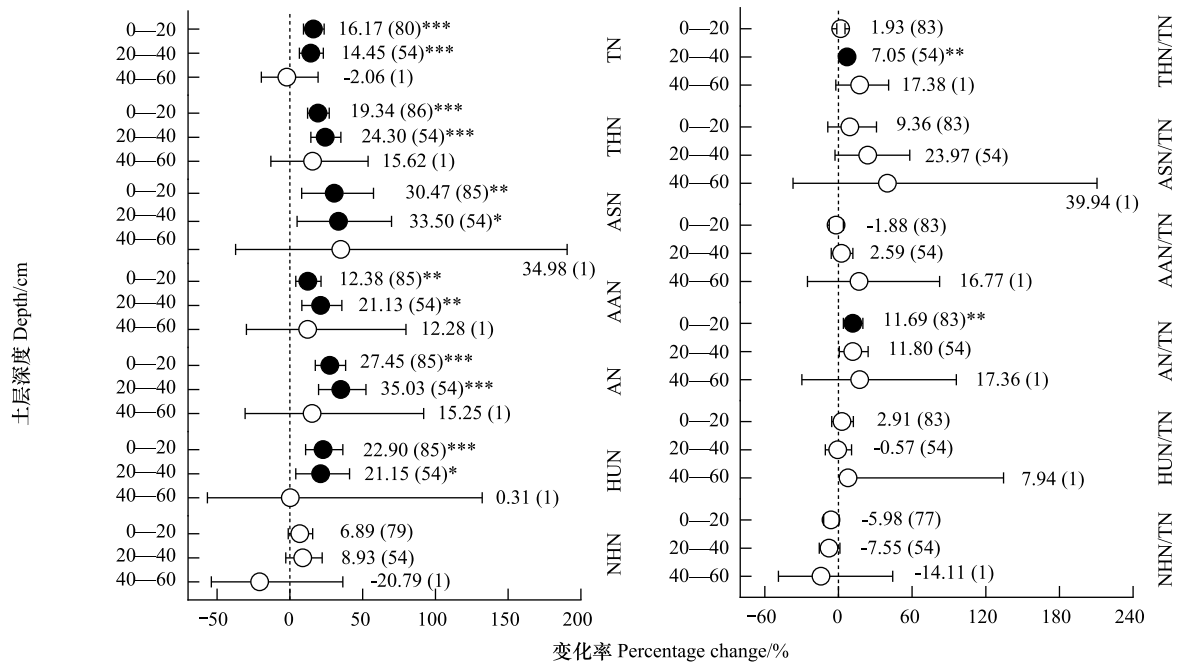


图4 土层深度对土壤有机氮组分及其组分占总氮比例的影响

Fig.4 Effects of soil depth on soil organic nitrogen components and their proportion to total nitrogen

TN: 土壤总氮; THN: 酸解总氮; ASN: 酸解氨基糖氮; AAN: 酸解氨基酸氮; AN: 酸解氨基态氮; HUN: 酸解未知氮; NHN: 非酸解氮; THN/TN: 酸解总氮占土壤总氮比; ASN/TN: 酸解氨基糖氮占土壤总氮比; AAN/TN: 酸解氨基酸氮占土壤总氮比; AN/TN: 酸解氨基态氮占土壤总氮比; HUN/TN: 酸解未知氮占土壤总氮比; NHN/TN: 非酸解氮占土壤总氮比; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

物的代谢活性和周转速率,增强了微生物固定土壤氮的能力,在微生物死亡后,被微生物同化的氮以酸解氨基糖氮和酸解氨基酸氮形式在土壤中积累下来,从而导致土壤中酸解氨基糖氮和酸解氨基酸氮含量的增加^[33]。相比于酸解有机氮,非酸解氮结构稳定,不易受外界干扰。但持续施氮也可能会增加非酸解氮的含量,如一项田间试验发现施氮肥显著提高了土壤非酸解氮含量^[34]。尽管非酸解氮含量增加,但增幅最低,表明施氮肥主要促进了酸解氮的积累,对非酸解氮的影响较小。

此外,控制试验也发现不同施氮处理显著提高土壤酸解总氮含量,特别是酸解氨基态氮^[35-36]。这可能是因为酸解氨基态氮一部分来自于土壤中的固定态铵,外源氮进入土壤后除了被作物吸收,剩余部分多被土壤胶体吸附或被粘土矿物固定^[37],进而提高酸解氨基态氮的含量。另外,尿素等外源氮进入土壤后,在水解酶的作用下产生铵态氮,也会间接增加土壤酸解氨基态氮的含量^[33]。由于酸解氨基态氮是土壤氮肥的“临时储藏库”,施肥后土壤中酸解氨基态氮含量的增加有利于土壤氮的保持,提高了土壤供氮潜力^[38]。施氮后酸解未知氮的含量也显著增加了 21.46%,这与农田长期定位试验研究结果相似^[2]。可能是外源氮输入促进了微生物对土壤中动植物残体的分解或聚合能力,导致土壤微生物的代谢产物增多,从而促进土壤酸解未知氮含量的累积。

3.2 施氮量、施氮时间、土层深度对土壤有机氮组分的影响

施氮量是影响土壤有机氮组分的关键因素,本研究发现除了非酸解氮,酸解总氮各组分的累积量均随施氮量的增加而增加(图2)。一方面可能是因为,施氮量低时,大部分氮被植物吸收利用,或者通过气态氮和淋溶等途径损失,不易在土壤中累积^[34]。随着施氮量的增加,除了植物吸收和损失之外,剩余的氮在微生物或植物的作用下转化为不同组分的有机氮,进而提高有机氮含量。有研究表明高氮输入会导致农田生态系统土壤新固定态铵、酸解氨基酸氮和酸解氨基糖氮的含量显著增加^[39-40]。另一方面,当大量氮素进入土壤,微生物会优先利用易利用氮素,减少对酸解总氮的矿化,也可能会促进土壤有机氮的累积^[7]。

从施氮持续时间来看,短期施氮(1—3 a)对土壤有机氮组分含量的影响较小,随着施氮时间的增加(3—

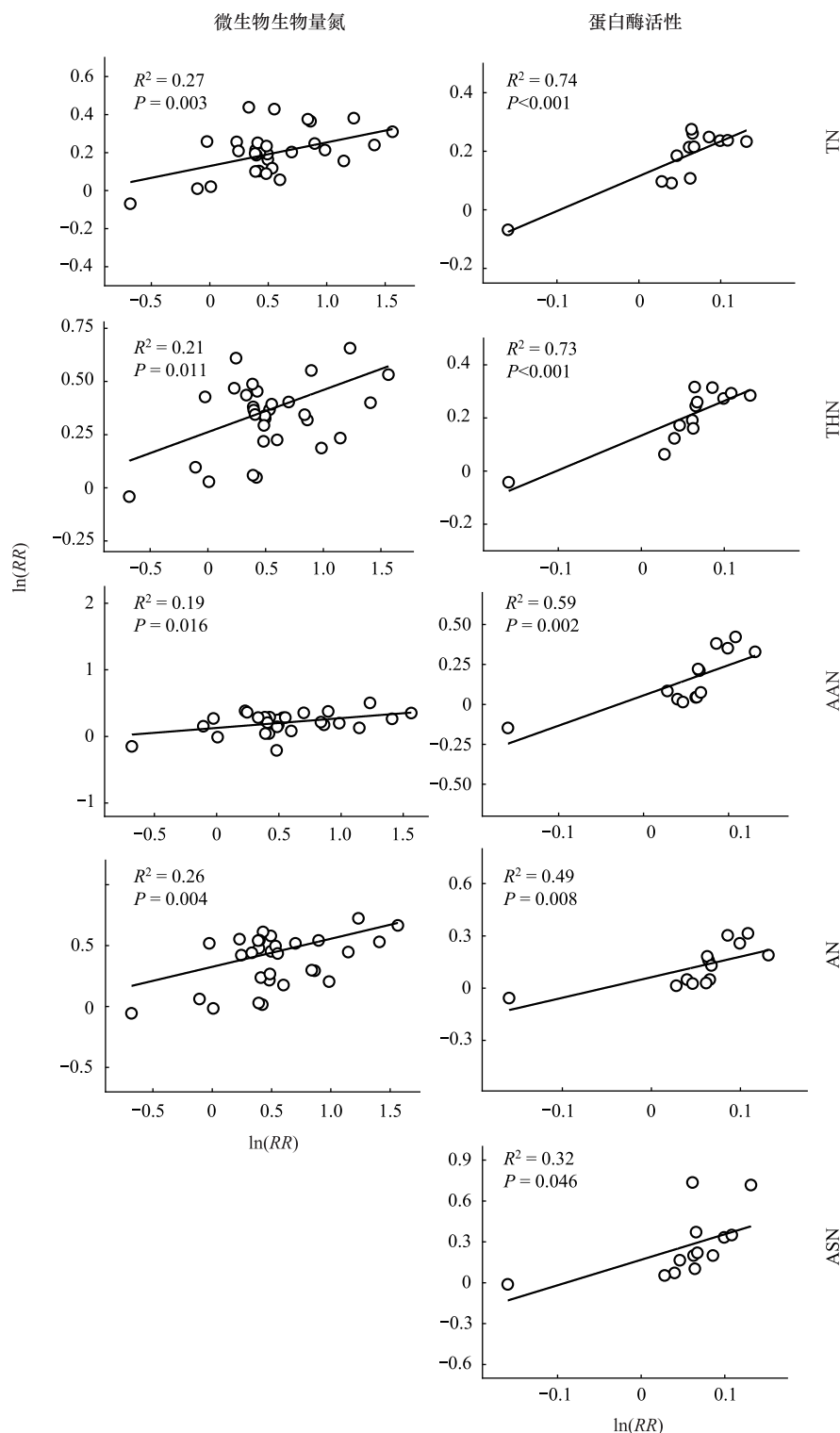


图5 土壤有机氮组分与微生物生物量氮、蛋白酶活性的相关性

Fig.5 Linear relationships between soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen and protease activities

MBN: 微生物生物量氮; Protease activities: 蛋白酶活性; TN: 土壤总氮; THN: 酸解总氮; ASN: 酸解氨基糖氮; AAN: 酸解氨基酸氮; AN: 酸解氨态氮; HUN: 酸解未知氮; NHN: 非酸解氮; $\ln RR$: 自然对数响应比; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

9 a), 土壤有机氮组分的积累效应逐渐增强(图3)。这可能是因为短期施肥(1—3 a)土壤氮素处于累积阶段, 随着施氮持续时间变长, 土壤氮有效性得到提高, 促进了土壤微生物生长, 微生物活性的增强, 加快了土壤

有机氮组分的累积。然而更长时间施氮(>9 a)后土壤各有机氮组分不再增加,可能是因为长期施氮导致土壤酸化^[41],降低农田生态系统中固氮微生物的多样性和丰度^[42],不利于有机氮的累积。Zhou 等人通过长期农田试验发现,施氮会使土壤酸化,降低真菌的生物多样性,改变微生物群落组成^[43]。此外,长期施氮(>9 a)在促进土壤有机氮累积的同时,也会引起氮素的大量流失,这可能会减少土壤氮的净累积^[44]。因此,中长期施氮(3—9 a)最有利于土壤有机氮的累积,而长期施氮(>9 a)导致土壤酸化,降低微生物活性,从而削弱施肥对各有机氮组分的累积效应。

就土层而言,施肥后各酸解总氮组分在 0—40 cm 土层均显著增加。0—20 cm 土壤有机氮组分的累积得益于农田的施肥,雨水淋溶或植物根系运输等方式向下运输表层养分,增强了 20—40 cm 土层的微生物活性,提高了氮的利用和转化,导致 20—40 cm 土层的有机氮含量增加。然而随着土层加深,下渗的氮素逐渐减少,对土壤氮转化和累积的影响降低,这可能是 40—60 cm 土层有机氮组分累积不显著的主要原因。如有研究发现随土层深度的增加,土壤各有机氮含量逐渐降低,但在土层超过 80 cm 后,有机氮含量不再降低^[45]。表明施氮后微生物和有机质含量多的表层土壤更有利于有机氮的累积。

3.3 施氮后土壤有机氮组分变化的影响因素

除施氮量、施氮时间和土层外,氮肥还可能通过以下几个方面来影响有机氮组分。首先,氮肥中的氮元素可以作为土壤氮的直接来源,促进有机氮的积累。这将会促进土壤中有机氮组分含量的累积^[46]。其二,施氮可能通过改变土壤中 SOC 含量来影响土壤有机氮。土壤总氮、酸解总氮、酸解氨基酸氮和非酸解氮都与 SOC 含量显著正相关(表 1),表明在有机碳含量更高的土壤中,施氮更容易导致有机氮累积,具有更高的供氮潜力^[47]。一方面可能是因为有机碳是土壤微生物活动的能量来源^[48],与微生物生物量呈正相关关系。而微生物生物量的增加更有利于土壤氮肥的利用和转化,从而导致有机氮组分的累积。施用氮肥促进了作物生长,增加了根系分泌物等有机质的输入,提高了土壤有机碳含量^[49];同时,植物根系和真菌菌丝通过分泌物形成土壤团聚体,从物理上保护大团聚体有机碳不被分解^[50]。因此,氮肥输入可能会提高有机碳含量,促进微生物生长,进而增加有机氮的累积。此外,有机质对外源氮的吸附和固定,可能会减少氮的淋溶损失,是施氮后高有机碳土壤中有机氮更容易积累的另一个原因^[51]。有研究表明,酸解总氮与有机质存在显著正相关关系^[52],本研究也发现类似结果(表 1)。pH 是影响有机氮含量的另一个因素,土壤 pH 与酸解氨态氮含量显著负相关,可能是因为长期氮输入导致土壤酸化,抑制了土壤微生物的活性,不利于氮素的转化和固定,降低了酸解氨态氮的含量^[25, 40]。除了 pH,年平均降水量与土壤总氮显著正相关,土壤含水率主要受降水调控^[53],适度的土壤含水率有利于提高土壤氮有效性,直接或间接影响微生物活性,进而影响土壤氮的转化和有机氮的含量^[54]。

除此之外,施氮也会改变土壤中微生物的群落结构和活性,从而影响有机氮的分解和转化^[28]。本研究中,MBN 与土壤总氮、酸解总氮、酸解氨基酸氮和酸解氨态氮均具有显著正相关关系,表明微生物生物量氮的增加可能是施氮后各有机氮组分积累的关键原因。MBN 作为重要的活性氮库,在土壤氮循环过程中发挥着至关重要的作用^[55]。已有研究发现施加氮肥通常会增加 MBN^[56],MBN 增加表明微生物同化土壤氮的能力增加,这部分氮在微生物死亡之后以微生物残体氮的形式(氨基糖态氮)存储在土壤中,这可能是 MBN 与有机氮组分显著正相关的主要原因。作为有机氮分解的重要胞外酶,蛋白酶活性越高,有机氮分解的越快^[57]。本研究中蛋白酶活性与酸解氨态氮和酸解氨基酸氮呈正相关关系。这可能与铵态氮和氨基酸氮是蛋白酶作用下大分子有机氮分解的中间产物有关,表明施氮在促进有机氮积累的同时也导致了有机氮的分解^[58],而两者之间的平衡决定了施氮对土壤有机氮的累积效应。总之,施氮促进了土壤有机氮的累积,特别是在 SOC 含量、微生物数量和活性更高的土壤中,有机氮的累积更明显。

4 结论

基于 1981—2023 年公开发表的施氮对农田土壤有机氮影响的文章数据,通过整合分析评估了氮肥施加

对土壤有机氮含量的影响及其影响因素。总体上,施肥显著增加了农田土壤有机氮的含量,尤其是提高了酸解总氮的含量,而非酸解氮的累积量最低。施氮量越高,土壤各有机氮组分累积越多。施氮持续时间也是有机氮积累的重要因素,短期和长期施氮均不利于有机氮积累,而中长期(3—9 a)施氮有利于土壤有机氮积累。施氮主要提高了 0—40 cm 土壤有机氮的含量,但未显著影响 40—60 cm 土壤有机氮的积累。SOC 和 MBN 以及酶活性是施氮后农田土壤有机氮组分和含量变化的重要影响因素。本研究主要基于 Bremner 酸水解法的有机氮组分数据,探索了施用氮肥对农田土壤有机氮组分和含量的影响。未来可基于不同有机氮组分测定方法,关注不同类型生态系统土壤氮组分的动态,深入揭示未来气候变化背景下,陆地生态系统土壤氮动态和氮有效性的变化模式及调控机制。

参考文献(References):

- [1] 张玉玲,陈温福,虞娜,张玉龙,邹洪涛,党秀丽. 长期不同土地利用方式对潮棕壤有机氮组分及剖面分布的影响. 土壤学报, 2012, 49(4): 740-747.
- [2] 高晓宁,韩晓日,刘宁,左仁辉,吴正超,杨劲峰. 长期定位施肥对棕壤有机氮组分及剖面分布的影响. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2820-2827.
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle; recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [4] Bremner J M. Organic nitrogen in soils. *Soil nitrogen*, 1965, 10: 93-149.
- [5] Amelung W, Zhang X. Determination of amino acid enantiomers in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(4-5): 553-562.
- [6] Zhang X D, Amelung W. Gas chromatographic determination of muramic acid, glucosamine, mannosamine, and galactosamine in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(9): 1201-1206.
- [7] 吴汉卿,张玉龙,张玉玲,邹洪涛,虞娜. 土壤有机氮组分研究进展. 土壤通报, 2018, 49(5): 1240-1246.
- [8] 徐阳春,沈其荣,茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响. 中国农业科学, 2002, 35(4): 403-409.
- [9] Stevenson F J. Organic forms of soil nitrogen. *Nitrogen in agricultural soils*, 1982, 22: 67-122.
- [10] 王圣瑞,焦立新,金相灿,刘景辉. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征. 环境科学学报, 2008, 28(1): 37-43.
- [11] Kelley K R, Stevenson F J. Forms and nature of organic N in soil[C]//*Nitrogen Economy in Tropical Soils: Proceedings of the International Symposium on Nitrogen Economy in Tropical Soils, held in Trinidad, WI, January 9-14, 1994*. Springer Netherlands, 1996: 1-11.
- [12] 郝小雨,马星竹,高中超,陈苗苗,周宝库. 长期施肥下黑土活性氮和有机氮组分变化特征. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4707-4716.
- [13] Tian J H, Wei K, Condon L M, Chen Z H, Xu Z W, Feng J, Chen L J. Effects of elevated nitrogen and precipitation on soil organic nitrogen fractions and nitrogen-mineralizing enzymes in semi-arid steppe and abandoned cropland. *Plant and Soil*, 2017, 417: 217-229.
- [14] Sekhon K S, Singh J P, Mehla D S. Long-term effect of manure and mineral fertilizer application on the distribution of organic nitrogen fractions in soil under a rice-wheat cropping system. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2011, 57(7): 705-714.
- [15] 焦亚鹏,齐鹏,王晓娇,武均,姚一铭,蔡立群,张仁陟. 施氮量对农田土壤有机氮组分及酶活性的影响. 中国农业科学, 2020, 53(12): 2423-2434.
- [16] 贾倩,廖世鹏,卜容燕,张萌,任涛,李小坤,丛日环,鲁剑巍. 不同轮作模式下氮肥用量对土壤有机氮组分的影响. 土壤学报, 2017, 54(6): 1547-1558.
- [17] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响. 中国农业科学, 2004, 37(1): 87-91.
- [18] Ren G C, Zhang X F, Xin X L, Yang W L, Zhu A N, Yang J, Li M R. Soil organic carbon and nitrogen fractions as affected by straw and nitrogen management on the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 342: 108248.
- [19] 陈安磊,谢小立,文苑玉,王卫,童成立. 长期施肥对红壤稻田氮储量的影响. 生态学报, 2010, 30(18): 5059-5065.
- [20] Lu X F, Hou E Q, Guo J Y, Gilliam F S, Li J L, Tang S B, Kuang Y W. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2021, 27(12): 2780-2792.
- [21] 张乃木,宋娅丽,王克勤,张雨鉴,潘禹,郑兴蕊. 模拟氮沉降下滇中亚高山森林凋落物养分元素释放特征. 生态环境学报, 2021, 30(5): 920-928.
- [22] 黄瑞灵,王西文,马国虎,朱锦福,周华坤. 模拟氮沉降对高寒湿地土壤理化性质和酶活性的影响. 草地学报, 2022, 30(6): 1343-1349.
- [23] 周世兴,邹秤,肖永翔,向元彬,韩博涵,唐剑东,罗超,黄从德. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的影响. 应用生态学报, 2017, 28(1): 12-18.
- [24] Gurnesa G A, Lu X K, Gundersen P, Mao Q G, Zhou K J, Fang Y T, Mo J M. High retention of ¹⁵N-labeled nitrogen deposition in a nitrogen saturated old-growth tropical forest. *Global Change Biology*, 2016, 22(11): 3608-3620.
- [25] Fang Y, Xun F, Bai W M, Zhang W H, Li L H. Long-Term Nitrogen Addition Leads to Loss of Species Richness Due to Litter Accumulation and Soil Acidification in a Temperate Steppe. *PLoS ONE*, 2012, 7(10): e47369.
- [26] 朱炳德. 黄海及胶州湾沉积物中氮的形态研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.

- [27] Wu H Q, Du S Y, Zhang Y L, An J, Zou H T, Zhang Y L, Yu N. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on greenhouse soil organic nitrogen fractions and soil-soluble nitrogen pools. *Agricultural Water Management*, 2019, 216: 415-424.
- [28] 张忠学, 宋健, 齐智娟, 张作合, 黄艳, 王柏. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮素利用率的影响. *东北农业大学学报*, 2022, 53(3): 42-49, 60.
- [29] 王小南, 熊德成, 张宇辉, 席颖青, 黄锦学, 陈仕东, 刘小飞, 杨智杰. 增温和氮添加对中亚热带杉木人工林土壤氮矿化和 N_2O 排放的影响. *林业科学研究*, 2023, 36(3): 22-31.
- [30] Bates D, Mächler M, Bolker B, Walker S. Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 2015, 67(1): 1-48.
- [31] Hou Q, Ni Y M, Huang S, Zuo T, Wang J, Ni W Z. Effects of substituting chemical fertilizers with manure on rice yield and soil labile nitrogen in paddy fields of China: A meta-analysis. *Pedosphere*, 2023, 33(1): 172-184.
- [32] Handbook of meta-analysis in ecology and evolution[M]. Princeton University Press, 2013.
- [33] 王克鹏. 长期施肥对河西灌漠土有机氮组分及其剖面分布的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [34] 吕东波, 吴景贵, 李建明, 曲晓晶, 胡娟. 不同缓控尿素对春玉米产量、品质及土壤有机氮的动态影响. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 165-170, 249.
- [35] Smith S J, Young L B. Distribution of nitrogen forms in virgin and cultivated soils. *Soil Science*, 1975, 120(5): 354-360.
- [36] 张电学, 韩志卿, 吴素霞, 范海荣, 谢新宇, 常连生, 王秋兵. 不同施肥制度对褐土有机氮及其组分的影响. *华北农学报*, 2017, 32(3): 201-206.
- [37] Tang Y, Wang X Z, Zhao H T, Feng K. Effect of potassium and C/N ratios on conversion of NH_4^+ in soils. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 539-544.
- [38] 段鹏鹏, 张玉玲, 丛耀辉, 徐文静, 虞娜, 张玉龙. 氮肥与有机肥配施协调土壤固定态铵与可溶性氮的研究. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1578-1585.
- [39] Lu C Y, Zhang X D, Chen X, Shi Y, Ma J, Zhao M Q, Chi G Y, Huang B. Fixation of labeled ($^{15}NH_4$) $_2SO_4$ and its subsequent release in black soil of Northeast China over consecutive crop cultivation. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106(2): 329-334.
- [40] 王媛, 周建斌, 梁斌, 刘东娜. 不同栽培模式和施氮量对小麦-玉米轮作体系土壤供氮特性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1351-1357.
- [41] Fu G, Shen Z X. Response of alpine soils to nitrogen addition on the Tibetan Plateau: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology*, 2017, 114: 99-104.
- [42] Fan K K, Delgado-Baquerizo M, Guo X S, Wang D Z, Wu Y Y, Zhu M, Yu W, Yao H Y, Zhu Y G, Chu H Y. Suppressed N fixation and diazotrophs after four decades of fertilization. *Microbiome*, 2019, 7: 1-10.
- [43] Zhou J, Jiang X, Zhou B K, Zhao B S, Ma M C, Guan D W, Li J, Chen S F, Cao F M, Shen D L, Qin J. Thirty four years of nitrogen fertilization decreases fungal diversity and alters fungal community composition in black soil in northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 95: 135-143.
- [44] de Vries W, Du E Z, Butterbach-Bahl K. Short and long-term impacts of nitrogen deposition on carbon sequestration by forest ecosystems. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 9-10: 90-104.
- [45] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征. *中国农业科学*, 2011, 44(24): 5021-5030.
- [46] 代新俊. 不同 pH 土壤的氮素淋溶损失和作物利用研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2023.
- [47] 朱天鸿, 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 郑娇娇, 李英年. 青藏高原高寒草甸土壤 CO_2 排放对模拟氮沉降的早期响应. *生态学报*, 2011, 31(10): 2687-2696.
- [48] 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利. 宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征. *环境科学*, 2015, 36(9): 3401-3410.
- [49] 何冰, 刘璐, 魏静, 孙志梅, 马文奇. 长期施用氮肥对麦玉轮作体系土壤水稳性团聚体和有机碳的影响. *河北农业大学学报*, 2023, 46(5): 1-7.
- [50] Tripathi R, Nayak A K, Bhattacharyya P, Shukla A K, Shahid M, Raja R, Panda B B, Mohanty S, Kumar A, Thilagam V K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions after 41 years long-term fertilizer experiment in tropical rice-rice system. *Geoderma*, 2014, 213: 280-286.
- [51] 油伦成, 李东坡, 武志杰, 崔磊, 闫增辉, 张金明, 崔永坤, 刘裕. 稳定性铵态氮肥在黑土和褐土中的氮素转化特征. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1079-1087.
- [52] 陈天, 程瑞梅, 沈雅飞, 肖文发, 王丽君, 孙鹏飞, 张萌, 李璟. 氮添加对三峡库区马尾松人工林土壤团聚体有机氮组分和氮矿化的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2601-2609.
- [53] Wang C Y, Yu M H, Ding G D, Gao G L, Zhang L L, He Y Y, Liu W. Size- and leaf age-dependent effects on the photosynthetic and physiological responses of *Artemisia ordosica* to drought stress. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(7): 744-758.
- [54] 陈好, 马维伟, 龙永春, 常文华, 杨永凯. 杂海湿地草甸土退化过程土壤氮矿化演变特征. *生态学报*, 2023, 43(10): 3906-3919.
- [55] Jones D L, Shannon D, Murphy D, Farrar J. Role of dissolved organic nitrogen (DON) in soil N cycling in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5): 749-756.
- [56] 唐锐, 韩宜秀, 易树生, 郑伟, 南小红, 罗鸿, 温晓荣, 翟丙年. 不同水氮组合对冬小麦产量及水氮利用效率的调控效应. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(10): 1944-1955.
- [57] 徐钰. 寒地纳米膜覆盖模式好氧堆肥效果分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [58] 李惠通. 覆膜及秸秆还田对旱地冬小麦化肥氮归趋及平衡的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021.