北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

中国陆地生态系统土壤有机碳及其组分对模拟氮沉降的响应

杨行 刘梦洁 张睿博 王昭生

Response of soil organic carbon and its components to simulated nitrogen deposition in terrestrial ecosystems of China

Yang Hang, Liu Mengjie, Zhang Ruibo, Wang Zhaosheng

引用本文:
杨行, 刘梦洁, 张睿博, 王昭生. 中国陆地生态系统土壤有机碳及其组分对模拟氮沉降的响应[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):68–76. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250107
Yang Hang, Liu Mengjie, Zhang Ruibo, Wang Zhaosheng. Response of soil organic carbon and its components to simulated nitrogen deposition in terrestrial ecosystems of China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):68–76. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250107

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250107

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

林火干扰对广东省杉木林土壤有机碳及其组分的影响

Effects of forest fire disturbance on soil organic carbon and its components of *Cunninghamia lanceolata* forest in Guangdong Province, southern China

北京林业大学学报, 2019, 41(12): 108–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190179

岩溶区不同恢复方式下土壤有机碳组分及酶活性研究

Soil organic carbon fraction and enzyme activities under different restoration methods in karst area

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 1–11. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180184

陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素

Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in different vegetation types in loess region of northern Shaanxi Province, northwestern China

北京林业大学学报, 2020, 42(11): 56–63. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200013

色季拉山西坡表层土壤有机碳的小尺度空间分布特征

Spatial distribution characteristics at small scale of soil organic carbon in topsoil of the west slope in Sejila Mountain, western China

北京林业大学学报, 2020, 42(9): 70–79. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190481

园林绿化废弃物堆肥对土壤有机碳组分影响

Effects of green waste compost on soil organic carbon fractions

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 120–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210035

江西九连山不同海拔梯度土壤有机碳的变异规律

Variations in soil organic carbon along an altitudinal gradient of Jiulian Mountain in Jiangxi Province of eastern China

北京林业大学学报, 2019, 41(2): 19–28. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180383

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250107

中国陆地生态系统土壤有机碳及其组分对模拟氮沉降的响应

杨 行[1,2] 刘梦洁[3] 张睿博[3] 王昭生[3]
（1. 北京建筑大学，北京应对气候变化研究和人才培养基地，北京 100044；2. 北京建筑大学环境与能源工程学院，北京 100044；3. 中国科学院地理科学与资源研究所，北京 100101）

摘要:【目的】中国陆地生态系统作为全球碳循环的关键组成部分，其碳汇功能对维持区域碳平衡具有重要意义。然而，在氮沉降持续加剧的背景下，土壤有机碳（SOC）及其组分对氮沉降的响应机制尚未达成明确共识。**【方法】**本研究基于 Meta 分析方法，整合中国陆地生态系统 38 项模拟氮沉降（氮添加）试验，包括 141 组颗粒态有机碳（POC）和 99 组矿物结合态有机碳（MAOC）观测数据，系统分析氮沉降对 SOC 及其组分的影响。**【结果】**与对照处理相比，模拟氮沉降显著提高了 SOC 含量（5.18%）和 POC 含量（12.91%），但对 MAOC 含量无显著影响。这种分异特征主要源于 POC 和 MAOC 在形成机制和稳定性上的差异。进一步分析表明：模拟氮沉降对 SOC 的促进作用在森林生态系统、高氮添加量（> 100 kg/(hm^2·a)）、无机氮肥施用以及短期施肥（< 5 年）条件下更为显著，而对 POC 的促进作用则在农田生态系统、高氮添加量（> 100 kg/(hm^2·a)）、有机氮肥施用和短期施肥（< 5 年）条件下更为显著。值得注意的是，MAOC 含量在所有处理条件下均未呈现显著变化。**【结论】**本研究揭示了氮沉降促进中国陆地生态系统 SOC 积累，同时改变了 SOC 的组分。研究表明，评估氮沉降对 SOC 库的影响需综合考虑生态系统类型、土壤基质属性及氮添加强度和持续时间等多个因子的协同作用。研究结果为氮沉降对中国陆地生态系统有机碳库及其功能的影响提供了新的见解，这有助于准确预测土壤有机碳动态对未来大气氮沉降的反馈作用，为制定差异化固碳减排方案提供了数据支持。

关键词：氮沉降；氮添加；全球碳循环；土壤有机碳动态；颗粒态有机碳；矿物结合态有机碳；Meta 分析
中图分类号：S714；S151.9 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0068−09
引文格式：杨行，刘梦洁，张睿博，等. 中国陆地生态系统土壤有机碳及其组分对模拟氮沉降的响应［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：68−76. Yang Hang, Liu Mengjie, Zhang Ruibo, et al. Response of soil organic carbon and its components to simulated nitrogen deposition in terrestrial ecosystems of China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 68−76.

Response of soil organic carbon and its components to simulated nitrogen deposition in terrestrial ecosystems of China

Yang Hang[1,2] Liu Mengjie[3] Zhang Ruibo[3] Wang Zhaosheng[3]
(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Research and Talent Training Base for Addressing Climate Change, Beijing 100044, China;
2. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Architecture, Beijing 100044, China;
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: ［**Objective**］As a key component of the global carbon cycle, China's terrestrial ecosystems play a crucial role in maintaining regional carbon balance through their carbon sink function. However, the responses and mechanisms of soil organic carbon (SOC) and its components to nitrogen (N) deposition

收稿日期: 2025−03−22 **修回日期:** 2025−04−07
基金项目: 云南省科技计划项目（202303AC100009），自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心开放基金（CS2023D06）。
第一作者: 杨行。主要研究方向：温室气体排放与评估。 Email: 1542859816@qq.com 地址：100044 北京市西城区展览路 1 号北京建筑大学环境与能源工程学院。
责任作者: 王昭生，副研究员。主要研究方向：陆地生态系统碳循环模拟研究。 Email: wangzs@igsnrr.ac.cn 地址：100101 北京市朝阳区大屯路甲 11 号中国科学院地理科学与资源研究所。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

remain poorly understood. [**Method**] This study integrated 38 simulated nitrogen deposition (nitrogen addition) experiments from China's terrestrial ecosystems, comprising 141 paired observations of particulate organic carbon (POC) and 99 paired observations of mineral-associated organic carbon (MAOC), to systematically analyze the effects of N deposition on SOC and its components. [**Result**] Nitrogen addition significantly increased SOC by 5.18% and POC by 12.91%, but had no significant effect on MAOC. This differential response was primarily resulted from the distinct formation mechanisms and stability between POC and MAOC. Further analysis indicated that the positive effect of N addition on SOC was more pronounced under conditions of forest ecosystems, high N addition rates (> 100 kg/(ha·year)), inorganic N fertilization, and short-term fertilization (< 5 years). While the effect on POM was more pronounced in agroecosystems, high N addition rates (> 100 kg/(ha·year)), organic N fertilization, and short-term fertilization (< 5 years). Notably, MAOC showed no significant change under all treatment conditions. [**Conclusion**] This study reveals that N addition promotes SOC accumulation in China's terrestrial ecosystems and alters the components of SOC. The findings suggest that assessing the impact of N deposition on SOC requires a comprehensive consideration of ecosystem types, soil quality, and intensity and duration of N deposition. Our results provide new insights into the impact of N deposition on SOC pool and its functions in China's terrestrial ecosystems, contributing to a more accurate prediction of SOC dynamics and feedbacks to future atmospheric nitrogen deposition, as well as offering data support for the development of differentiated carbon sequestration and emission reduction strategies.

Key words: nitrogen deposition; nitrogen addition; global carbon cycle; soil organic carbon dynamics; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; Meta analysis

中国陆地生态系统仅占全球 6% 的陆地面积，却储存了约 30% 的全球土壤有机碳，是全球最重要的碳库之一，在全球碳循环中占据着举足轻重的作用[1−2]。自 2009 年至今，中国已成为全球第二大碳排放国，对全球气候变化产生深远的影响[3]。“双碳”战略目标的提出不仅体现了中国的大国担当，更是走可持续发展道路的战略抉择。陆地生态系统固碳，是实现“双碳”美好愿景最为经济可行和环境友好的途径。因此，在全球气候变化的背景下，深入理解土壤有机碳的动态变化及其对环境变化的响应机制，对于预测未来气候变化情景下的碳循环以及制定应对策略具有至关重要的意义。

过去一个世纪，人类活动（如化石燃料燃烧和无机肥料施用）导致全球氮沉降速率倍增，我国已成为继欧美之后的第三大氮沉降区域[4]。氮沉降通过调控植物生产力和微生物过程，深刻影响土壤有机碳库的储量与稳定性[5−6]。考虑到土壤有机碳库的复杂性，近年来，学者将土壤有机碳划分为颗粒态有机碳（particulate organic carbon，POC）和矿物结合态有机碳（mineral-associated organic carbon，MAOC）两个功能组分，对于理解和预测土壤有机碳动态具有重要意义[7−8]。POC 主要来源于植物残体，分解程度较低，其稳定性受团聚体保护和土壤破碎化程度影响；而 MAOC 则主要由微生物衍生，并通过与土壤矿物的化学作用结合形成，因而更难被分解[9−11]。重要的是，考虑到 POC 和 MAOC 在形成机制、功能及周转时间等方面存在显著差异，通常被视为“未受保护”和“受保护”的土壤有机碳组分。然而，氮沉降如何影响土壤有机碳组分进而影响土壤有机碳库的储量和稳定性，目前还缺乏系统结论。

以往研究通常采用野外氮添加实验模拟大气氮沉降对生态系统的影响。尽管已有相关研究探讨了氮添加对 POC 和 MAOC 的影响，但由于生态系统类型的差异，以及受氮添加量、试验时间和本底条件的影响，目前 POC 和 MAOC 对氮添加的响应并没有明确结论[11−15]。对于 POC 而言，氮添加不仅可以通过增加植物生产力，从而增加植物残体输入形成颗粒态有机碳[8]，还可以通过提高微生物生物量[16−17]，加快微生物对 POC 的分解作用。然而，这种机制在不同生态系统中可能存在差异，具体取决于植物残体的化学性质和微生物群落的适应性。MAOC 对氮添加的响应则更为复杂。MAOC 主要通过微生物衍生的有机物质与土壤矿物的结合而形成[9−10]，受到多种因素的综合调控，包括土壤酸碱度、微生物群落结构和土壤矿物组成等。一方面，氮添加诱导的土壤酸化可以增加碱性阳离子（如 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}）的淋失，从而削弱 MAOC 的稳定性[18]。另一方面，酸化也可能增加铁和铝的溶解度，这些金属离子可以通过共沉淀反应促进 MAOC 的形成[19−20]。此外，酸化还可能抑制微生物的生长和代谢，减少微生物残体碳的

输入，从而降低 MAOC 形成[21]。因此，充分了解氮沉降对 POC 和 MAOC 影响的调控机制，对于准确预测土壤碳动态及其与气候之间的反馈关系至关重要。

尽管已有研究探讨了氮添加对全球土壤有机碳及其组分的影响，但关于氮添加如何影响中国陆地生态系统土壤有机碳的组分及其机制仍缺乏深入了解[15,18]。中国氮沉降的趋势主要呈现为从东南向西北递减，而华北向东北地区则呈现上升趋势[20,22]。这种空间异质性进一步增加了预测土壤有机碳动态变化的难度。基于此，本研究通过整合中国陆地生态系统氮添加控制试验数据，系统分析氮添加对 POC 和 MAOC 的影响及其调控机制，旨在回答 2 个科学问题：(1)氮添加如何通过改变颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳影响土壤有机碳及其稳定性；(2)不同生态系统类型、土壤性质、氮添加量、氮素类型和试验时长如何影响土壤有机碳及其组分。研究结果将为全球变化背景下中国陆地生态系统土壤固碳减排以及“双碳”战略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据收集与筛选

于 2024 年 12 月系统检索了 Web of Science 和中国知网(CNKI)数据库。检索关键词包括“氮添加”“颗粒态有机碳”“矿物结合态有机碳”等。按照以下标准筛选文献：(1)试验必须在分离 POC 和 MAOC 之前，采用六偏磷酸钠、超声或玻璃珠振荡等方法充分破坏土壤团聚体；(2)需以图表形式报告 POC 和 MAOC 含量数据(单位限定为 mg/kg 或 g/kg)，排除使用面积或体积单位(如 g/m^2、g/L)的数据；(3)需在中国陆地生态系统开展，且包含氮添加和对照处理；(4)仅选择单一氮添加处理的数据，排除多因子交互试验；(5)限定表层土壤(0 ~ 20 cm)数据；(6)需报告碳组分的均值、样本量和标准差(SD)数据。最终筛选出 38 个研究样点(表 1、附录)，包括 141 组 POC 和 99 组 MAOC 的配对观测数据。同时，收集了地理位置、气候因子、生态系统类型、氮添加量、试验时长、土壤属性等数据。图表数据通过 GetData Graph Digitizer 软件提取，表格和文本中的数据直接提取。

1.2 Meta 分析方法

本研究通过自然对数响应比(response ratio，R)来量化氮添加对各变量的影响，这是一种广泛应用于生态学和环境科学中的统计方法[12,16]，能够有效评估处理效应与对照之间的相对变化。R 的具体计算公式如下所示。

$$R = \ln X_t - \ln X_c$$

式中：X_t 和 X_c 分别代表氮添加处理和对照处理下各变量的平均值。通过取自然对数，可以将比率转换为对数尺度，从而更便于统计分析。

为评估 R 的不确定性，计算其方差(V)，具体公式如下。

$$V = \frac{S_{Dt}^2}{n_t X_t^2} + \frac{S_{Dc}^2}{n_c X_c^2}$$

式中：S_{Dt} 和 S_{Dc} 分别表示氮添加处理和对照处理的标准差，而 n_t 和 n_c 则分别对应于氮添加处理和对照处理的样本量。方差的计算考虑了样本量和标准差对估计精度的影响，从而为后续的统计分析提供了重要的参考信息。

为了在分析中合理分配每个观测值的权重，采用方差的倒数作为权重(w)。这种权重分配方式能够确保样本量大且变异小的研究在综合分析中占据更大的权重，从而提高分析结果的可靠性和代表性。然而，在实际研究中，部分研究可能包含多个观测值，这可能导致数据的非独立性。为了避免这种潜在的偏差，进一步根据每项研究的总观测数(n)对权重进行了调整。调整后的权重(w')计算公式如下所示。

$$w' = \frac{w}{n}$$

通过这种方式，确保每个研究的贡献与其观测数量相匹配。基于调整后的权重，进一步计算了加权响应比(R')。

$$R' = w'R$$

此外，通过加权平均的方法计算了所有观测值的总体加权响应比 $\ln R'$，其计算公式如下所示。

$$\ln R' = \frac{\sum R_i'}{\sum w_i}$$

式中：R_i' 和 w_i 分别是第 i 个观测值的加权响应比和调整后的权重。总体加权响应比 $\ln R'$ 通过加权平均计算得出。如果 95% 置信区间(CI)不与零重叠，则认为氮添加对变量有显著影响。

$$S_{\ln R'} = \sqrt{\frac{1}{w_i}}$$

$$\mathrm{CI} = \ln R' \pm 1.96 \times S_{\ln R'}$$

将总加权响应比 $\ln R'$ 转化为百分比的变化量，即效应值(E)，更好地反映氮沉降对 SOC 及其组分的影响程度。

$$E = (e^{\ln R'} - 1) \times 100\%$$

1.3 统计分析

所有数据分析均借助 R 语言(版本 4.0.1)完成。为确保数据满足正态分布假设，运用 Kolmogorov-

表 1　研究样点的基本情况

Tab. 1　Basic information of research sample sites

样点编号	经纬度	年均温/℃	年降雨量/mm	生态系统类型
1	34°16′48″N，108°00′00″E	11.00	600.00	农田
2	23°10′12″N，112°10′12″E	21.50	1 956.00	森林
3	23°19′48″N，113°30′00″E	21.50	1 750.00	森林
4	29°42′00″N，103°13′48″E	16.20	1 490.00	森林
5	27°42′00″N，117°45′00″E	17.50	1 900.00	森林
6	39°58′12″N，115°25′48″E	5.40	500.00	森林
7	50°49′48″N，121°30′00″E	−5.40	580.00	森林
8	41°42′00″N，127°37′48″E	3.60	700.00	森林
9	37°37′12″N，101°19′12″E	−1.70	648.00	草地
10	26°42′00″N，115°04′12″E	17.90	1 600.00	森林
11	26°45′00″N，115°04′12″E	17.90	1 475.00	森林
12	26°44′24″N，115°03′36″E	17.90	1 475.00	森林
13	50°49′12″N，121°31′12″E	−5.40	580.00	森林
14	34°25′48″N，105°13′12″E	6.40	390.90	农田
15	36°22′12″N，111°34′48″E	12.60	500.00	农田
16	36°49′48″N，116°34′12″E	13.40	569.60	农田
17	35°01′12″N，114°34′12″E	14.50	597.00	农田
18	41°31′12″N，123°24′00″E	7.90	700.00	农田
19	35°16′12″N，107°30′00″E	9.80	540.00	农田
20	23°10′12″N，112°10′12″E	21.90	1 748.00	森林
21	42°27′00″N，115°29′24″E	1.50	295.00	草地
22	31°10′48″N，102°34′48″E	9.00	800.00	森林
23	23°46′12″N，101°16′48″E	19.60	1 050.00	森林
24	42°01′48″N，116°16′48″E	2.10	382.30	草地
25	35°30′00″N，107°28′48″E	8.30	500.00	农田
26	30°25′12″N，104°36′00″E	17.70	883.00	农田
27	26°30′36″N，117°43′12″E	19.60	1 628.00	森林
28	49°06′00″N，119°31′48″E	−2.40	320.00	草地
29	45°21′00″N，127°30′00″E	2.80	700.00	森林
30	43°37′48″N，116°42′00″E	0.30	346.10	草地
31	27°15′00″N，110°13′12″E	16.50	1 300.00	森林
32	23°10′12″N，112°10′12″E	21.40	1 700.00	森林
33	37°36′00″N，101°19′12″E	−1.70	580.00	草地
34	26°42′00″N，115°04′12″E	17.90	1 600.00	森林
35	37°18′36″N，106°55′48″E	7.60	300.00	草地
36	34°18′00″N，108°04′12″E	13.00	632.00	农田
37	42°24′00″N，128°24′00″E	3.60	695.00	森林
38	32°58′48″N，103°40′12″E	4.80	693.20	森林

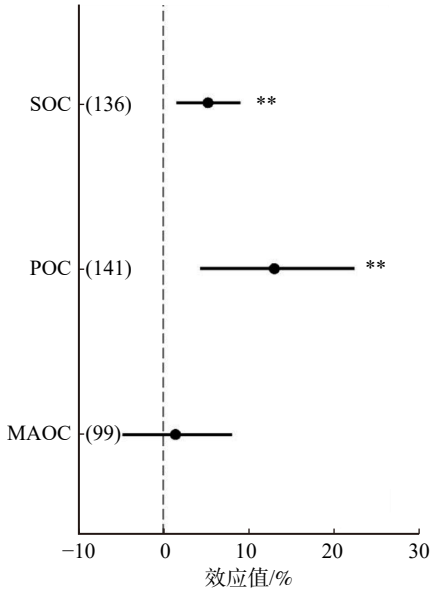
注：研究样点数据整理自附录参考文献。

Smirnov 检验对数据进行正态性评估，结果显示数据均符合正态分布要求。在计算效应值时，采用 metafor 包，并选用随机效应模型，以有效排除数据共线性问题，从而确保分析结果的稳健性。此外，文中所有图均通过 ggmap 和 ggplot2 包绘制。

2 结果与分析

2.1 氮添加对土壤有机碳及其组分的影响

通过对中国陆地生态系统氮添加实验数据的整合分析，系统评估了氮添加对 SOC、POC 和 MAOC 的影响。结果表明，氮添加对 SOC 和 POC 产生了显著的正向影响，但对 MAOC 的影响不显著(图 1)。具体而言，氮添加使 SOC 含量显著提高了 5.18%($P < 0.01$)，这一结果表明氮添加在一定程度上促进了 SOC 含量的积累。进一步分析发现，这种促进作用主要体现在 POC 含量的增加，氮添加使 POC 含量显著提高了 12.91%($P < 0.01$)。总体上，氮添加对 MAOC 含量没有显著影响。



SOC.土壤有机碳；POC. 颗粒态有机碳；MAOC. 矿物结合态有机碳。括号内数据为样本量。**表示在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。下同。

图 1 氮添加对土壤有机碳及其组分含量的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen addition on the contents of soil organic carbon (SOC) and its components

2.2 不同环境条件下氮添加对土壤有机碳及其组分的影响

2.2.1 生态系统类型和土壤 pH

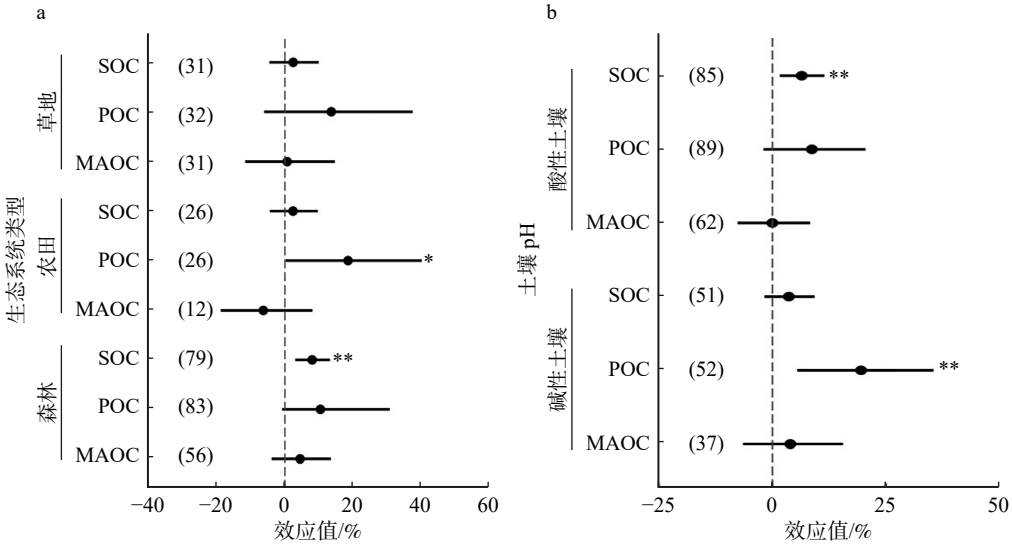
氮添加对 SOC 含量和组成的影响存在显著的生态系统依赖性(图 2a)。在森林生态系统中，氮添加显著促进了 SOC 含量的积累，使其含量显著提升了 8.03%($P < 0.01$)。而在农田生态系统中，氮添加显著增加 POC 含量，其增幅达 18.59%($P < 0.05$)。

在不同土壤酸碱性条件下，氮添加对 SOC 含量和组成的影响也存在显著差异(图 2b)。酸性土壤中，氮添加显著促进了 SOC 的积累，其含量显著提升了 6.45%($P < 0.01$)。碱性土壤中，氮添加虽未显著改变 SOC 和 MAOC 含量，但使 POC 含量显著提升了 19.53%($P < 0.01$)。

2.2.2 氮添加量和氮素类型

SOC 含量仅在氮添加量超过 100 kg/(hm^2·a)时才显著增加，其增幅为 6.09%($P < 0.01$)。同时，氮添加量超过 100 kg/(hm^2·a)时，POC 含量也显著提高了 17.05%($P < 0.001$)(图 3a)。

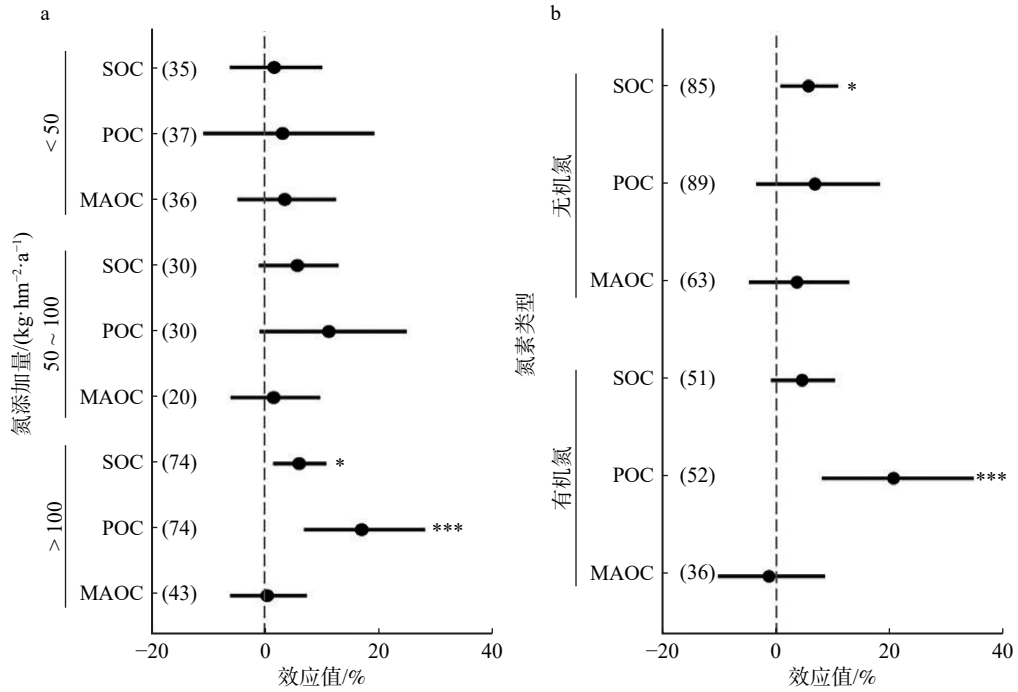
在氮素类型方面，无机氮肥使 SOC 含量显著提升了 5.63%($P < 0.05$)，而有机氮虽未影响 SOC 和 MAOC 含量，却显著提高了 POC 含量，其增幅为



*表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 2 氮添加在不同生态系统(a)和土壤 pH 条件(b)下对土壤有机碳及其组分的影响

Fig. 2 Nitrogen addition impacts on the contents of SOC and its components under different ecosystems (a) and soil pH (b)



***表示在 $P < 0.001$ 水平上差异显著。下同。

图 3　氮添加在不同氮添加量(a)和氮添加类型(b)条件下对土壤有机碳及其组分含量的影响

Fig. 3　Effects of nitrogen addition on SOC and its components under different nitrogen addition amounts (a) and types (b)

20.59%($P < 0.001$)(图 3b)。

2.2.3　试验时长

试验时长 < 5 年时，氮添加对 SOC 和 POC 的积累有显著的促进作用，使 SOC 和 POC 含量分别增加了 9.18% 和 17.50%($P < 0.01$)(图 4)。然而，当试验年限超过 5 年时，氮添加对 SOC 含量及其组分均没有显著影响。

3　讨　　论

3.1　氮添加对土壤有机碳的影响

氮添加通过增加 POC 含量促进了 SOC 积累。本研究发现，氮添加使中国陆地生态系统 SOC 含量显著提高了 5.18%($P < 0.01$)，这一结果与 Tang 等[23]在全球尺度整合分析中报道结果基本一致。在他们的研究中，氮添加使全球 SOC 含量显著增加了 8.3%。这种促进作用可能与 SOC 组分的特异性响应有关[8]。POC 和 MAOC 在物理和化学性质上存在显著差异，导致它们对氮添加的敏感性不同[18,22]。本研究发现氮添加显著增加了未受保护的 POC 含量，但对受保护的 MAOC 含量无显著影响。这一结果表明，SOC 含量增加可能主要归因于 POC 的积累。因此，如何使 POC 能够稳定地储存在土壤中被认为是应对未来气候变化需要重点关注的方向。

氮添加显著促进了森林土壤有机碳(增幅 8.03%，图 2a)，而对草地和农田土壤有机碳无显著影响。这一发现与 Wu 等[24]的整合分析结果一致，表明氮添加对森林土壤有机碳的积累具有显著的促进作用。森林作为生态系统中碳储量最高的类型，通常具有较高的地上生物量[25]，从而通过增加土壤碳输入促进了土壤有机碳积累。

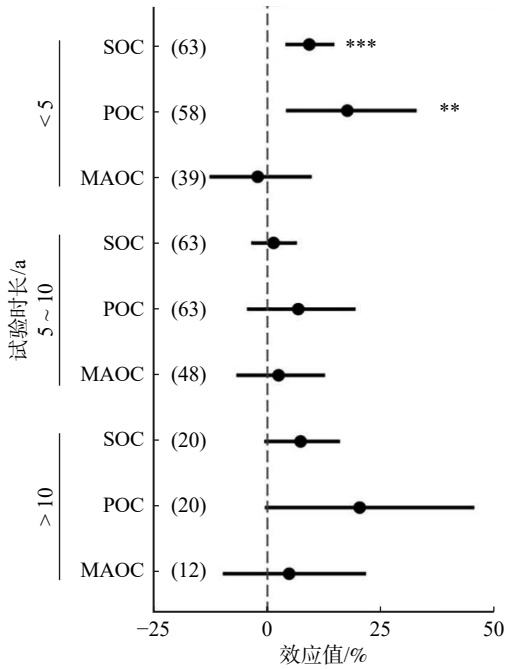


图 4　不同试验年限氮添加对土壤有机碳及其组分含量的影响

Fig. 4　Nitrogen addition impacts on the contents of SOC and its components under different experimental years

在无机氮和高氮添加量下，氮添加对土壤有机碳的促进作用尤为明显。这可能由于无机氮的化学

结构相对简单，能够直接被植物和微生物吸收利用。不仅有利于促进植物生长，增加凋落物的输入，还能降低微生物氮相关的酶活性，进而降低土壤有机碳的分解[16]。此外，较高的氮肥施用量可能导致土壤 pH 值降低，增加土壤中矿物离子的溶解度[20]，并且为真菌菌丝的生长提供了更多底物。矿物离子和菌丝这种胶结物质都是促进土壤团聚体形成的关键因子，高氮添加量可能通过促进团聚体形成间接减少了微生物与土壤有机碳的接触，进一步增强了土壤有机碳的稳定性[26]。

该研究还发现，短期氮添加可以显著促进 SOC 积累，这可能归因于氮添加提高了土壤养分的可利用性，增强了微生物的碳周转速率，从而促进了 SOC 积累[3]。然而，长期氮添加（＞5 年）可能会加剧土壤酸化和土壤板结，这些负面效应会抵消氮添加对 SOC 含量的促进作用，导致长期氮添加对 SOC 含量的影响并不显著[23]。

3.2 氮添加对颗粒态有机碳的影响

氮添加促进了中国陆地生态系统土壤颗粒态有机碳，其含量在氮添加下显著增加了 12.91%，这与此前的一项全球整合分析的结果（POC 含量增加 16.4%）基本一致[23]。POC 含量增加的原因主要有以下两个方面：首先，氮添加通常会提高植物残体和地上生物量。由于 POC 主要来源于未完全分解的植物残体，因此植物残体的输入增加将提高 POC 含量[24]。其次，POC 含量的增加也可能与氮添加对 POC 分解的抑制作用有关。研究表明，氮添加会因土壤酸化和毒害作用抑制土壤微生物对 POC 的分解[23]。

在不同生态系统中，氮添加对土壤 POC 的影响存在差异。与草地和森林生态系统相比，氮添加使得农田生态系统土壤 POC 显著提高了 18.59%，这与 Pareja-Sanchez 等[27]的结果基本一致。与自然生态系统相比，农田更容易受到人类农业管理的影响。农田的经营管理措施，尤其是翻耕、旋耕和深耕，会促进更多的植物残体进入土壤，从而增加土壤 POC 的积累。因此，适当的农业管理政策和农业活动有利于增加土壤有机碳储量。

在施用有机氮和氮添加量超过 100 kg/(hm^2·a) 的条件下，氮添加分别使 POC 的含量显著提高了 20.59% 和 17.05%。与无机氮相比，有机氮除了含有氮外，还包含大量的碳水化合物、蛋白质、木质素和脂类物质。这些有机物更容易被微生物分解，产生大量低分子量有机化合物，如多糖、氨基酸和有机酸等[28]。这些化合物不仅可以直接形成 POC，还可以促进植物生长，增加植物碳输入[14]。较高的氮肥施用量可以为植物提供生长所需的养分，增加植物残体的输入，有利于促进 POC 在土壤中的积累[23]。

短期氮添加显著促进了 POC 的积累，而长期氮添加对其没有显著影响，这可能与 POC 自身的性质有关[29–30]。作为土壤中的活性碳组分，POC 已被证实对氮添加的响应非常敏感[29]。短期氮添加可以促进活性碳组分的积累，但随着时间的推移，POC 可能会逐渐被微生物分解，或者转化为惰性碳组分[31–32]。因此，长期氮添加可能并不会增加 POC 在土壤中的积累。

3.3 氮添加对矿物结合态有机碳的影响

在所有处理条件下，氮添加均未显著改变 MAOC 含量。这一现象揭示了 MAOC 形成机制的复杂性：虽然植物、微生物群落和土壤矿物含量是影响 MAOC 形成的关键因素[32]，但这些因素之间的协同作用可能导致 MAOC 对外源氮输入的响应不敏感。

MAOC 的形成主要依赖于土壤矿物离子与低分子量有机碳之间的相互作用，包括吸附、螯合以及共价键的形成[24]。这些低分子量有机碳主要来源于植物残体的分解和微生物残体碳。理论上，氮添加通过提高植物生产力和微生物生物量，可以增加低分子量有机碳的生成，从而促进 MAOC 的形成[22–23]。同时，氮添加后植物生长加快也会引起有机酸分泌增加，进而会破坏土壤 MAOC 的积累[33–35]。然而，当氮添加量超过植物对氮的需求时，会导致氨态氮向硝态氮的转化，加快土壤酸化[9]。土壤酸化不仅对植物和微生物产生毒害作用，还会抑制 MAOC 的形成[9]。此外，在微生物本身并不缺乏氮的情况下，氮添加可能不会对其生物量或代谢活动产生显著影响，进而也不会对 MAOC 的形成产生显著的促进作用[20]。总而言之，氮添加对植物、微生物的促进作用可能被土壤酸化带来的毒害作用抵消，进而导致氮添加并未改变 MAOC 的含量。

从 MAOC 自身的抗分解能力方面出发，MAOC 本身具有较强的抗分解能力，这使得它在土壤中具有较高的稳定性[36]。MAOC 既可通过共价键的形成实现化学稳定性，也可通过促进土壤团聚体形成获得物理保护，从而构建其多层次的稳定性机制[37]。这种稳定性可能是 MAOC 对氮添加不敏感的主要原因之一。尽管氮添加可以改变植物和微生物的代谢活动，但 MAOC 的形成和稳定更多地依赖土壤矿物、植物和微生物之间的相互作用[20]。

4 结　　论

本研究基于模拟氮沉降的氮添加试验，系统揭示了氮沉降对土壤有机碳及其组分形成与稳定机制

的影响。研究表明，颗粒态与矿物结合态有机碳对氮沉降表现出显著不同的响应模式，并阐明了在氮沉降背景下土壤碳固持过程受多重因素协同调控的特征。

(1)氮添加通过促进土壤颗粒态有机碳而不是矿物结合态有机碳，进而增加土壤有机碳的积累。这主要由于颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳在形成和稳定机制方面的差异所致。颗粒态有机碳主要来源于植物残体，对氮添加响应敏感；而矿物结合态有机碳因与土壤矿物紧密结合，具有较高的稳定性，对氮添加不敏感。

(2)氮添加对土壤有机碳的促进作用在不同生态系统中表现不同，且在短期氮添加中更为显著。但是，长期氮添加则可能因土壤酸化等因素而减弱氮添加对土壤有机碳积累的促进作用。

(3)研究表明，尽管氮添加能够增加土壤有机碳，但其影响受到多种因素的调控，因此需要综合考虑生态系统类型、土壤条件和氮素类型等多要素的协同作用。这不仅有利于准确预测全球氮沉降背景下土壤碳动态与气候变化之间的反馈关系，还为我国“双碳”战略目标的实现提供科学依据。

本研究仍存在一定局限性。所用数据主要来源于文献整理，受原始试验条件及报告方式的差异影响，存在部分不可控因素。为降低单个研究差异对结果的干扰，我们采用 Meta 分析方法对文献数据进行汇总与标准化处理，剔除了个别研究的特异性效应，进而揭示氮沉降对土壤有机碳积累的普遍规律。该方法在提炼整体规律方面具有显著优势，但仍可能无法充分反映特定生态系统或极端条件下的特殊响应特征。

附录详见 http://j.bjfu.edu.cn/article/exportSupplementary?id=55b2ee0f-fee7-4a24-9971-89ec089fe370&pageType=cn

参　考　文　献

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304: 1623−1627.

[2] Lehmann J, Kleber M. The contentious nature of soil organic matter[J]. Nature, 2015, 528: 60−68.

[3] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478: 49−56.

[4] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320: 889−892.

[5] Reay D S, Dentener F, Smith P, et al. Global nitrogen deposition and carbon sinks[J]. Nature Geoscience, 2008, 1(7): 430−437.

[6] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change[J]. Ecology, 1994, 75(7): 1861−1876.

[7] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(12): 989−994.

[8] Lavallee J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. Global Change Biology, 2020, 26(1): 261−273.

[9] Kögel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, et al. Organo-mineral associations in temperate soils: integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(1): 61−82.

[10] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099−2103.

[11] Yang X, Ma S, Huang E, et al. Nitrogen addition promotes soil carbon accumulation globally[J]. Science China Life Sciences, 2025, 68: 284−293.

[12] 裴志福, 红梅, 尚星玲, 等. 氮添加对土壤可溶性有机碳和微生物生物量碳的影响: 基于 Meta 分析 [J]. 土壤, 2024, 56(5): 1129−1136.
Pei Z F, Hong M, Shang X L, et al. Effect of nitrogen addition on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon: a meta-analysis[J]. Soils, 2024, 56(5): 1129−1136.

[13] 王梁, 赵学超, 杨少博, 等. 杉木叶和细根诱导的土壤有机碳分解激发效应及其对氮添加的响应 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(11): 1434−1444.
Wang L, Zhao X C, Yang S B, et al. Priming effect of soil organic carbon decomposition induced by *Cunninghamia lanceolate* leaf litter and fine root and its response to nitrogen addition in subtropical forests[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(11): 1434−1444.

[14] 杨军刚, 周晓兵, 郭星, 等. 古尔班通古特沙漠藓结皮光合生理活性与土壤有机碳组分对长期氮添加的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(17): 7760−7769.
Yang J G, Zhou X B, Guo X, et al. Responses of moss crust photosynthetic physiological activity and soil organic carbon fractions to the long-term nitrogen addition in the Gurbantunggut Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7760−7769.

[15] Chen J, Xiao W, Zheng C, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 142: 107708.

[16] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies[J]. Ecology Letters, 2008, 11(10): 1111−1120.

[17] Zhang T, Chen H Y H, Ruan H. Global negative effects of nitrogen deposition on soil microbes[J]. The ISME Journal, 2018, 12(7): 1817−1825.

[18] Ye C, Chen D, Hall S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: plant, microbial and

geochemical controls[J]. Ecology Letters, 2018, 21(8): 1162−1173.

[19] Mueller K E, Eissenstat D M, Hobbie S E, et al. Tree species effects on coupled cycles of carbon, nitrogen, and acidity in mineral soils at a common garden experiment[J]. Biogeochemistry, 2012, 111(1): 601−614.

[20] Yu G, Xiao J, Hu S, et al. Mineral availability as a key regulator of soil carbon storage[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(9): 4960−4969.

[21] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. Nature Microbiology, 2017, 2(8): 17105.

[22] Villarino S H, Pinto P, Jackson R B, et al. Plant rhizodeposition: a key factor for soil organic matter formation in stable fractions[J]. Science Advances, 2021, 7(16): eabd3176.

[23] Tang B, Rocci K S, Lehmann A, et al. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality[J]. Global Change Biology, 2023, 29(7): 1971−1983.

[24] Wu J, Zhang H, Pan Y, et al. Particulate organic carbon is more sensitive to nitrogen addition than mineral-associated organic carbon: a meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 232: 105770.

[25] Rocci K S, Lavallee J M, Stewart C E, et al. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: a meta-analysis[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148569.

[26] Ma X, Zhu B, Nie Y, et al. Root and mycorrhizal strategies for nutrient acquisition in forests under nitrogen deposition: a meta-analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2021, 163: 108418.

[27] Pareja-Sánchez E, Cantero-Martínez C, Álvaro-Fuentes J, et al. Soil organic carbon sequestration when converting a rainfed cropping system to irrigated corn under different tillage systems and N fertilizer rates[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84(4): 1219−1232.

[28] 路丹, 卢昌友, 范晓苏, 等. 有机无机氮配施对植烟土壤养分含量及微生物数量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2025, 53(2): 29−38.
Lu D, Lu C Y, Fan X S, et al. Effects of organic and inorganic nitrogen combined application on nutrient content and microbial quantity of tobacco-planting soil[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2025, 53(2): 29−38.

[29] 戴辉. 短期氮添加对亚热带罗浮栲林土壤有机碳组分的影响及其调控因素 [D]. 福州: 福建师范大学, 2023.
Dai H. Effects of short-term nitrogen addition on soil organic carbon fractions in a subtropical *Castanopsis fabri* forest and their regulating factors[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023.

[30] 裴志福. 长期氮添加条件下草甸草原土壤有机碳变化特征及调控机制 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024.
Pei Z F. Changes and regulatory mechanisms of soil organic carbon in meadow grassland under long-term nitrogen addition[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024.

[31] 刘芳, 王萌萌, 张子璇, 等. 增温和氮添加对不同类型森林表层土壤有机碳分解的耦合影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(5): 1164−1170.
Liu F, Wang M M, Zhang Z X, et al. Interactive effects of warming and nitrogen addition on surface soil organic carbon decomposition in different forests[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, 29(5): 1164−1170.

[32] 杨家明. 高寒草甸土壤有机碳组分对氮添加梯度的响应机制 [D]. 成都: 西南民族大学, 2022.
Yang J M. Response mechanisms of soil organic carbon fractions to nitrogen addition gradient in an alpine meadow[D]. Chengdu: Southwest Minzu University, 2022.

[33] Keiluweit M, Bougoure J J, Nico P S, et al. Mineral protection of soil carbon counteracted by root exudates[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(6): 588−595.

[34] Adeleke R, Nwangburuka C, Oboirien B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: a review[J]. South African Journal of Botany, 2017, 108: 393−406.

[35] Feng X, Qin S, Zhang D, et al. Nitrogen input enhances microbial carbon use efficiency by altering plant-microbe-mineral interactions[J]. Global Change Biology, 2022, 28(16): 4845−4860.

[36] Shen D, Ye C, Hu Z, et al. Increased chemical stability but decreased physical protection of soil organic carbon in response to nutrient amendment in a Tibetan alpine meadow[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 126: 11−21.

[37] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155−176.

（责任编辑 范 娟
责任编委 臧润国）