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

模拟氮沉降下纳帕海高寒草甸土壤碳矿化的调控机制

王明柳 陆梅 黄敏超 孙煜佳 郭础鸟 刘国庆 屈婧 曹舒涵 纪柏帆

Regulating mechanisms of soil carbon mineralization in Napahai Alpine Meadow, Yunnan Province of southwestern China under simulated nitrogen deposition

Wang Mingliu, Lu Mei, Huang Minchao, Sun Yujia, Guo Chuniao, Liu Guoqing, Qu Jing, Cao Shuhan, Ji Bofan

引用本文:
王明柳, 陆梅, 黄敏超, 孙煜佳, 郭础鸟, 刘国庆, 屈婧, 曹舒涵, 纪柏帆. 模拟氮沉降下纳帕海高寒草甸土壤碳矿化的调控机制[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):58–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250321
Wang Mingliu, Lu Mei, Huang Minchao, Sun Yujia, Guo Chuniao, Liu Guoqing, Qu Jing, Cao Shuhan, Ji Bofan. Regulating mechanisms of soil carbon mineralization in Napahai Alpine Meadow, Yunnan Province of southwestern China under simulated nitrogen deposition[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):58–67. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250321

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250321

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

氮添加对高寒草甸土壤团聚体分布及其碳氮含量的影响
Effects of nitrogen addition on soil aggregate distribution and carbon and nitrogen contents in alpine meadow
北京林业大学学报, 2022, 44(12): 102–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210439

蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响
Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China
北京林业大学学报, 2024, 46(5): 114–125. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220507

氮磷添加和干旱对高寒草甸优势植物叶片化学计量的影响
Effects of nitrogen, phosphorus addition and drought on leaf stoichiometry in dominant species of alpine meadow
北京林业大学学报, 2020, 42(5): 115–123. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190469

高寒草甸植物叶片氮和磷重吸收率对养分添加的响应及机理
Response and mechanism of plant leaf nitrogen and phosphorus resorption efficiency to nutrient addition in an alpine meadow
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 93–103. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230091

增温对高寒草甸土壤微生物多样性及功能潜力的影响
Effects of warming on soil microbial diversity and functional potential in alpine meadows
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 29–38. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240064

坡位对寒温带天然樟子松林土壤微生物生物量碳氮的影响
Effects of slope position on soil microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus sylvestris* var. *mongolia* forest in the cold temperature zone
北京林业大学学报, 2020, 42(2): 31–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190309

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250321

模拟氮沉降下纳帕海高寒草甸土壤碳矿化的调控机制

王明柳[1] 陆 梅[2] 黄敏超[1] 孙煜佳[1] 郭础鸟[1] 刘国庆[1]
屈 婧[2] 曹舒涵[2] 纪柏帆[2]
（1. 西南林业大学生态与环境学院（湿地学院），云南 昆明 650024；2. 西南林业大学水土保持学院，云南 昆明 650024）

摘要:【目的】氮沉降对湿地土壤碳矿化的影响过程及机制存在较大的不确定性，本研究旨在探明氮添加驱动高寒草甸土壤碳矿化的路径与机制。**【方法】**以纳帕海湿地疏花早熟禾草甸群落为研究对象，设置对照（0 g/(m^2·a)）、低氮（5 g/(m^2·a)）、中氮（10 g/(m^2·a)）和高氮（15 g/(m^2·a)）4 种氮添加处理，分析氮沉降介导土壤微生物生物量碳氮、酶活性及理化环境变化对碳矿化的直接与间接影响。**【结果】**（1）相较于对照，低、中氮添加显著提高土壤碳矿化速率，增幅分别为 22.84% 和 53.15%，而高氮添加对碳矿化速率无显著影响。（2）土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性随氮添加量的增加呈先升后降的趋势，均在中氮处理达最大值，比对照分别增加了 34.78%、22.46% 和 70.47%，但氮添加对酸性磷酸酶活性无显著影响；氮沉降下土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的变化显著影响碳矿化速率，其解释率分别为 75.2%、82.4% 和 82.8%。（3）氮添加显著降低土壤 pH 值，但提高了含水率、总有机碳、全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮及微生物生物量碳氮含量；氮沉降下土壤碳矿化速率与 pH 值显著负相关，与全氮、水解氮及微生物生物量碳显著正相关。（4）结构方程模型表明，氮添加下土壤酶活性对碳矿化具有显著的直接作用，而 pH 值兼具直接和间接效应，土壤 pH 值、微生物生物量碳和氮素养分（全氮和水解氮）通过影响酶活性间接地调控碳矿化。**【结论】**氮沉降通过增加土壤氮素养分及微生物生物量碳进而提高酶活性，最终促进高寒草甸土壤碳矿化，但氮沉降引起的土壤酸化对碳矿化速率产生一定的抑制作用。

关键词：氮沉降；氮添加；湿地土壤碳矿化；酶活性；微生物生物量碳氮；氮组分；高寒草甸；纳帕海湿地
中图分类号：S154.1；S812 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0058−10
引文格式：王明柳，陆梅，黄敏超，等. 模拟氮沉降下纳帕海高寒草甸土壤碳矿化的调控机制［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：58−67. Wang Mingliu, Lu Mei, Huang Minchao, et al. Regulating mechanisms of soil carbon mineralization in Napahai Alpine Meadow, Yunnan Province of southwestern China under simulated nitrogen deposition［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 58−67.

Regulating mechanisms of soil carbon mineralization in Napahai Alpine Meadow, Yunnan Province of southwestern China under simulated nitrogen deposition

Wang Mingliu[1] Lu Mei[2] Huang Minchao[1] Sun Yujia[1] Guo Chuniao[1] Liu Guoqing[1]
Qu Jing[2] Cao Shuhan[2] Ji Bofan[2]
(1. College of Ecology and Environment (College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming 650024, Yunnan, China;
2. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650024,Yunnan, China)

Abstract: ［**Objective**］The process and mechanism of nitrogen deposition influencing wetland soil carbon mineralization have considerable uncertainty. This study aimed to clarify the pathways and mechanisms of nitrogen additions driving carbon mineralization in alpine meadow soils. ［**Method**］This study established

收稿日期: 2025−08−23 **修回日期:** 2025−10−22
基金项目: 云南省农业联合重点项目（202501BD070001-024），云南省中青年学术技术带头人后备人才项目（202205AC160047），国家自然科学基金地区科学基金项目（42067011），云南省应用基础研究面上项目（202001AT070113），西南林业大学水土保持一流学科开放基金项目（SBK20240026）。
第一作者: 王明柳。主要研究方向：土壤生态与全球变化。 Email：wangmingliu2023@163.com 地址：650224 云南省昆明市盘龙区白龙路 300 号西南林业大学生态楼。
责任作者: 陆梅，教授，博士生导师。主要研究方向：湿地生态与土壤学。 Email：lumeizx@126.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

four treatments such as control (0 g/(m^2·year)), low (5 g/(m^2·year)), medium (10 g/(m^2·year)) and high (15 g/(m^2·year)) nitrogen additions in the *Poa attenuata* communities in Napahai Alpine Meadow. We identified the direct and indirect effects of nitrogen-deposition-induced changes in soil microbial biomass carbon and nitrogen, enzyme activities and physicochemical properties on carbon mineralization. [**Result**] (1) In contrast to control, low and medium level of nitrogen additions significantly increased the soil carbon mineralization rates by 22.84% and 53.15%, respectively. In contrast, high nitrogen addition had no significant effect on carbon mineralization rate. (2) The activities of soil urease, sucrase and catalase increased first and then decreased with increased nitrogen addition level; their maximum values were 34.78%, 22.46% and 70.47%, respectively in the medium nitrogen treatment. However, the nitrogen additions had no significant effects on the activity of acid phosphatase. The changes in soil urease, sucrase and catalase activities under nitrogen deposition significantly affected the carbon mineralization rates. The explanatory rates of urease, sucrase and catalase activities for carbon mineralization variations were 75.2%, 82.4%, and 82.8%, respectively. (3) The medium and high level of nitrogen additions significantly reduced soil pH, while nitrogen additions significantly increased the values of soil water, total organic carbon, microbial biomass carbon, total nitrogen, hydrolyzable nitrogen and ammonium nitrogen. The soil carbon mineralization rates under nitrogen depositions were significantly negatively correlated with pH, but significantly positively correlated with microbial biomass carbon, total nitrogen and hydrolyzable nitrogen. (4) The structural equation model indicated that the changes of soil enzyme activity under nitrogen additions have a significant direct effect on carbon mineralization. The changes of soil pH, microbial biomass carbon, and nitrogen components (total and hydrolyzable nitrogen) may indirectly regulate carbon mineralization by mediating soil enzyme activity. [**Conclusion**] Nitrogen deposition enhances carbon mineralization in alpine meadow soils by increasing soil nitrogen nutrients and microbial biomass carbon, thereby enhancing enzyme activity. However, the soil acidification induced by nitrogen deposition inhibits the carbon mineralization rate.

Key words: nitrogen deposition; nitrogen addition; wetland soil carbon mineralization; enzyme activities; microbial biomass carbon and nitrogen; nitrogen components; alpine meadow; Napahai Wetland

近几十年来，由大气氮沉降和二氧化碳(CO_2)浓度剧增驱动的全球变化，已成为科学界、各国政府和社会公众广泛关注的生态环境问题。化石燃料燃烧和氮肥施用等人类活动导致全球大气氮沉降量急剧增加，中国已成为继欧美之外的全球第 3 大氮沉降区[1]。研究表明，大气氮沉降可能引起生物因素(植物、微生物和酶活性等)和非生物因素(土壤质地、结构、酸碱度和碳氮磷钾养分等)的改变，进而显著影响土壤碳循环过程[2−3]。土壤碳矿化作为碳循环变化的重要组成部分，是一个由土壤微生物将复杂有机物质分解为简单无机物质同时释放 CO_2 的复杂生物学过程[4]，对土壤养分释放、土壤质量维持以及生态系统物质循环和能量流动产生直接或间接的调控作用。因此，探索氮沉降增加背景下土壤碳矿化过程及其影响机制，是碳循环和全球变化研究的一个重要科学问题。

目前，氮沉降对湿地土壤碳矿化的影响仍存在很大的不确定性，可表现为促进、抑制或无显著影响。已有研究表明，氮添加处理显著增加沼泽湿地土壤碳矿化速率[5]；也有研究发现，氮输入增加显著抑制泥炭沼泽湿地土壤碳矿化，而硝态氮输入对土壤碳矿化无显著影响[6]。氮沉降对土壤碳矿化影响的不确定性，不仅与施氮类型、浓度、时间及生态系统类型等多种因素密切相关[7]，还受氮沉降引起的微生物、酶活性、土壤酸化及养分环境变化的影响[2]。然而，关于氮沉降下微生物、土壤酶和理化性质变化对湿地碳矿化的相对贡献，以及它们通过哪些直接或间接途径调控湿地土壤碳矿化过程的研究，目前仍缺乏相关报道。因此，揭示氮沉降增加背景下土壤生物及非生物环境因素对碳矿化的直接和间接影响，有助于深化对湿地土壤碳矿化关键调控机制的科学认识。

湿地是位于水陆交错区的一种复杂生态系统，在调节气候、涵养水源、降解污染、维持生物多样性和缓解全球变化等方面具有不可替代的作用[8]。云南纳帕海湿地作为青藏高原东南缘石灰岩上发育而成的国际重要湿地，是我国独有的低纬度、高海拔、季节性高寒沼泽湿地[9]。高寒湿地相较于其他生态

系统更加脆弱，对氮沉降等全球变化更为敏感[10]。大气氮沉降剧增能够引起高寒湿地土壤酶活性、微生物生物量碳氮及其理化性质等一系列因素的改变，进而影响土壤碳的矿化过程及其 CO_2 排放。然而，目前纳帕海的研究主要集中在湿地退化引起的植被、微生物和土壤理化环境变化[11−12]、碳积累与分配[13]以及土壤呼吸[9]等方面，未能揭示氮沉降这一全球性威胁如何调控土壤碳矿化过程。这不仅制约我们对湿地碳汇功能稳定性的准确判断，也难以全面评估氮沉降对区域乃至全球生态环境安全构成的潜在风险。因此，本研究采用野外原位模拟氮沉降的方法，分析氮添加下土壤酶活性、微生物生物量碳氮及理化环境的变化，并揭示其对纳帕海湿地土壤碳矿化的直接和间接影响路径，旨在深化理解高寒湿地土壤碳循环过程对氮沉降的响应机制，为评估湿地碳循环对全球变化的贡献提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 样地概况

研究区位于云南香格里拉纳帕海国际重要湿地（27°49′ ~ 27°55′N，99°37′ ~ 99°43′E），湿地面积 3 434 hm^2，平均海拔 3 260 m，为石灰岩上发育形成的低纬度、高海拔、季节性、半封闭型高原湿地[13]。该地区属于高原寒温带季风气候，年平均气温 5.4 ℃，最冷月均温 −3.8 ℃，最热月均温 13.2 ℃[11]。干湿季分明，水量补给主要来源于降水，年均降水量约 620 mm，干季（11 月至次年 4 月）约为 124 mm，湿季（5 月至 10 月）约为 496 mm[13]。自然因素与人为干扰的共同作用，加剧了纳帕海湿地的退化，形成了以沼泽草甸和草甸为主的退化湿地类型。其中，沼泽草甸以疏花早熟禾（*Poa pratensis*）群落为主，群落内非优势植物有牡蒿（*Artemisia japonica*）、平车前（*Plantago depressa*）及弹裂碎米荠（*Cardamine impatiens*）等[9]。

1.2 试验设计

于 2020 年 8 月，选择疏花早熟禾草甸群落为研究对象，采用随机区组设计布设野外原位模拟试验，共设置 3 个区组（相距 200 m 以上），分别在每个区组中设置 4 个 5 m × 10 m 的施氮处理样方，分别为对照（0 g/(m^2·a)）、低氮（5 g/(m^2·a)）、中氮（10 g/(m^2·a)）和高氮（15 g/(m^2·a)）。为防止不同处理间相互影响，样方之间设置一个 3 m × 10 m 的隔离带。与香格里拉临近的青藏高原区、昆明滇池及玉溪新平等地的实际年氮沉降量为 1.16 ~ 3.84 g/(m^2·a)[14−16]，故以高于该平均值约 2 倍的氮沉降量设置低氮处理。以尿素（含氮质量分数 46%）作为外源氮，为防止水分蒸发，于每月中旬选择阴天或阳光相对较弱的早晨进行氮添加，每月按上述年氮添加量的 1/12 进行溶液配置，使用喷雾器分别在各样方内均匀喷施，对照样地喷施等量的水。

于 2021 年 8 月以对角线取样法采集各处理样方 0 ~ 20 cm 土层土壤，同时使用便携式土壤水分温度测量仪测定土层温度，挑除根系石块和碎屑，将土样混合均匀后取约 2 kg 装入密封袋，置于冰盒中带回实验室。新鲜土样过筛后，用于土壤碳矿化速率、含水率、水解氮、铵态氮、硝态氮、微生物生物量碳氮、酶活性的测定，剩余土样平铺于牛皮纸上自然风干后研磨，分别过 0.25 mm 与 1 mm 土壤筛后用四分法装入自封袋并贴好标签，用于其他土壤理化性质测定。

1.3 碳矿化速率测定

取上述氮添加处理土样各 100 g，为使 4 个处理具有相同的水分条件，土样均用去离子水调节到样地田间最大持水量的 60%，分别装在 1 L 广口瓶中，每个处理 3 个重复，同时设置 3 个不加土样空白对照。将浓度为 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液分别置入广口瓶用于吸收释放的 CO_2（NaOH 溶液装在 50 mL 塑料瓶中），密封后在恒温恒湿培养箱内培养 7 d，取出碱液并加入 2 mL 浓度为 1 mol/L 的 $BaCl_2$ 溶液，再加入 2 ~ 3 滴酚酞指示剂，用 0.05 mol/L 的 HCl 滴定至红色消失，计算 7 d 土壤碳矿化总量，最后换算成日均土壤碳矿化速率[17]。

$$C_m = c \times (V_0 - V) \times 22 \times 10 \times (12/44)/t \quad (1)$$

式中：C_m 为培养期间的碳矿化速率；c 为盐酸浓度；V_0 为无土壤空白消耗盐酸的体积；V 为土壤样品消耗盐酸的体积；t 为培养时间；10 为每 100 g 土壤质量转换为每 kg 的换算系数；22 为 1 mL 盐酸与所生成 CO_2 的转换系数；12/44 为 CO_2 与 C 的转换系数。

1.4 酶活性、理化性质和微生物生物量碳氮测定

土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾容量法，蔗糖酶活性采用 3，5−硝基水杨酸比色法，脲酶活性采用苯酚−次氯酸钠比色法，酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法[18]。土壤基本理化指标的测定参照《土壤农化分析》[19]：土壤 pH 值采用电位法；含水率采用烘干称量法，总有机碳采用重铬酸钾−外加热法，土壤铵态氮采用氯化钾浸提−靛酚蓝比色法，土壤硝态氮采用双波长紫外分光光度法，水解氮采用碱解扩散吸收法，全氮采用硫酸−高氯酸消化全自动凯氏定氮法。

微生物生物量碳氮采用氯仿熏蒸−硫酸钾浸提

法[11]。每个土样称取相当于 5 g 烘干土的鲜土 6 份，用去离子水调节到田间持水量的 50%，其中 3 份放入真空干燥器中，使用真空泵进行熏蒸处理。先在干燥器底部加入少量去离子水保持湿度，再放入 2 个盛有无乙醇氯仿和沸石的烧杯以及 1 个盛有 1 mol/L NaOH 溶液的烧杯，干燥器瓷板上方放入熏蒸样品，抽真空（−0.07 MPa 以下），保持氯仿沸腾 5 min，关闭干燥器阀门，在 25 ℃ 黑暗环境下培养 24 h。熏蒸结束后打开干燥器阀门，取出底部烧杯并清洁干燥器底部，反复抽真空（5 次，每次 3 min），直至土壤无氯仿残留。另外 3 份土壤不加氯仿，置于另一干燥器中作为未熏蒸对照。将熏蒸土壤和对照土壤转移到聚乙烯塑料瓶中，加入 20 mL 的 0.5 mol/L 硫酸钾溶液振荡 30 min 后过滤，同时设置 3 份无土壤空白对照[20–21]。浸提液中有机碳的含量采用重铬酸钾氧化−外加热法，总氮含量采用硫酸钾氧化−紫外分光光度法[11]。熏蒸与未熏蒸土壤提取液中碳氮含量的差值，再除以转换系数，即可计算出微生物生物量碳氮。

$$C_{MBC} = (F_C - F_{UC})/K_C \quad (2)$$

式中：C_{MBC} 为微生物生物量碳含量；F_C 为熏蒸土壤提取液中可溶性有机碳含量；F_{UC} 为未熏蒸对照土壤提取液中可溶性有机碳含量；K_C 为转换系数，取值 0.38。

$$C_{MBN} = (F_N - F_{UN})/K_N \quad (3)$$

式中：C_{MBN} 为微生物生物量氮含量；F_N 为熏蒸土壤提取液的总氮含量；F_{UN} 为未熏蒸对照土壤提取液的总氮含量；K_N 为转换系数，取值 0.54。

1.5　数据处理

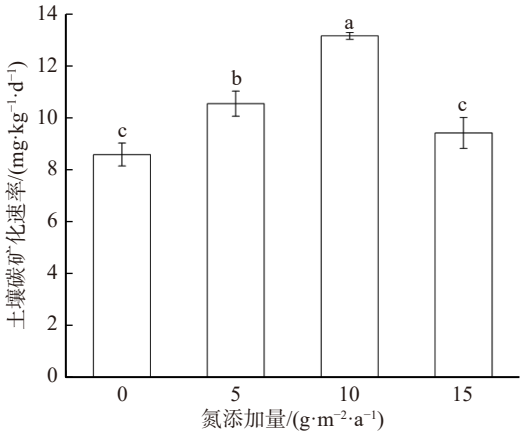
采用单因素方差分析和最小显著性差异法比较各组数据的差异性（$\alpha = 0.05$）。选择拟合效果最优的一元线性回归模型分析酶活性和碳矿化速率的关系，理化性质和碳矿化速率的关系则采用 Pearson 相关分析。运用结构方程模型解析氮添加引起土壤理化性质、微生物生物量碳及酶活性变化对碳矿化的直接和间接影响。使用主成分分析的第一主成分（first principal component，PCA1）参与结构方程模型构建，事先通过 Kaiser-Meyer-Olkin 和 Bartlett 检验。采用 Amos 28.0 构建结构方程模型，模型中所有变量均作为显变量处理，采用最大似然法进行参数估计。模型拟合优度通过以下指标进行评估：卡方自由度比（chi-square/degrees of freedom ratio，χ^2/df）< 3、近似误差均方根（root mean square error of approximation，RMSEA）< 0.08、比较拟合指数（comparative fit index，CFI）、增量拟合指数（incremental fit index，IFI）及塔克−刘易斯指数（Tucker-Lewis index，TLI）> 0.90。采用方差膨胀因子检验预测变量间的多重共线性[22]。

所有数据使用 Excel 2021 和 SPSS 26.0 软件进行分析处理，使用 Origin 2022 绘图。文中数据均为平均值 ± 标准差。

2　结果与分析

2.1　不同氮添加对土壤碳矿化速率的影响

氮添加对纳帕海疏花早熟禾群落土壤碳矿化速率具有显著影响（$p < 0.05$，图 1）。随着氮添加量的增加，土壤碳矿化速率呈现抛物线型变化趋势。具体来说，不同处理下土壤碳矿化速率大小顺序为中氮（13.14 mg/(kg·d)）> 低氮（10.54 mg/(kg·d)）> 高氮（9.41 mg/(kg·d)）> 对照（8.58 mg/(kg·d)），在中氮处理时达到最大值。与对照相比，低氮和中氮处理显著提高土壤碳矿化速率，分别提高了 22.84% 和 53.15%（$p < 0.05$），而高氮处理对土壤碳矿化速率的影响不显著（$p > 0.05$）。



不同小写字母表示各处理间差异显著（$p < 0.05$）。下同。

图 1　氮添加对土壤碳矿化速率的影响

Fig. 1　Effects of nitrogen additions on soil carbon mineralization rates

2.2　氮添加下土壤酶活性变化对碳矿化的影响

氮添加对土壤脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性具有显著影响（$p < 0.05$），但对酸性磷酸酶活性无显著影响（$p > 0.05$，图 2）。氮添加均显著提高了脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性，增幅分别为 14.13% ~ 34.78%、7.14% ~ 22.46% 和 26.33% ~ 70.47%。3 种酶活性的大小均随氮添加量的增加均呈现抛物线型变化趋势，与土壤碳矿化速率变化趋势一致。均在中氮处理时达到最大值，较对照分别提高了 34.78%、22.46% 和 70.47%。

土壤酶活性与碳矿化速率的回归分析结果（表 1）表明，土壤脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性与碳矿化速率的回归关系极其显著（$p < 0.001$），而酸性磷酸酶活性与碳矿化速率的回归关系并不显著（$p > 0.05$）。

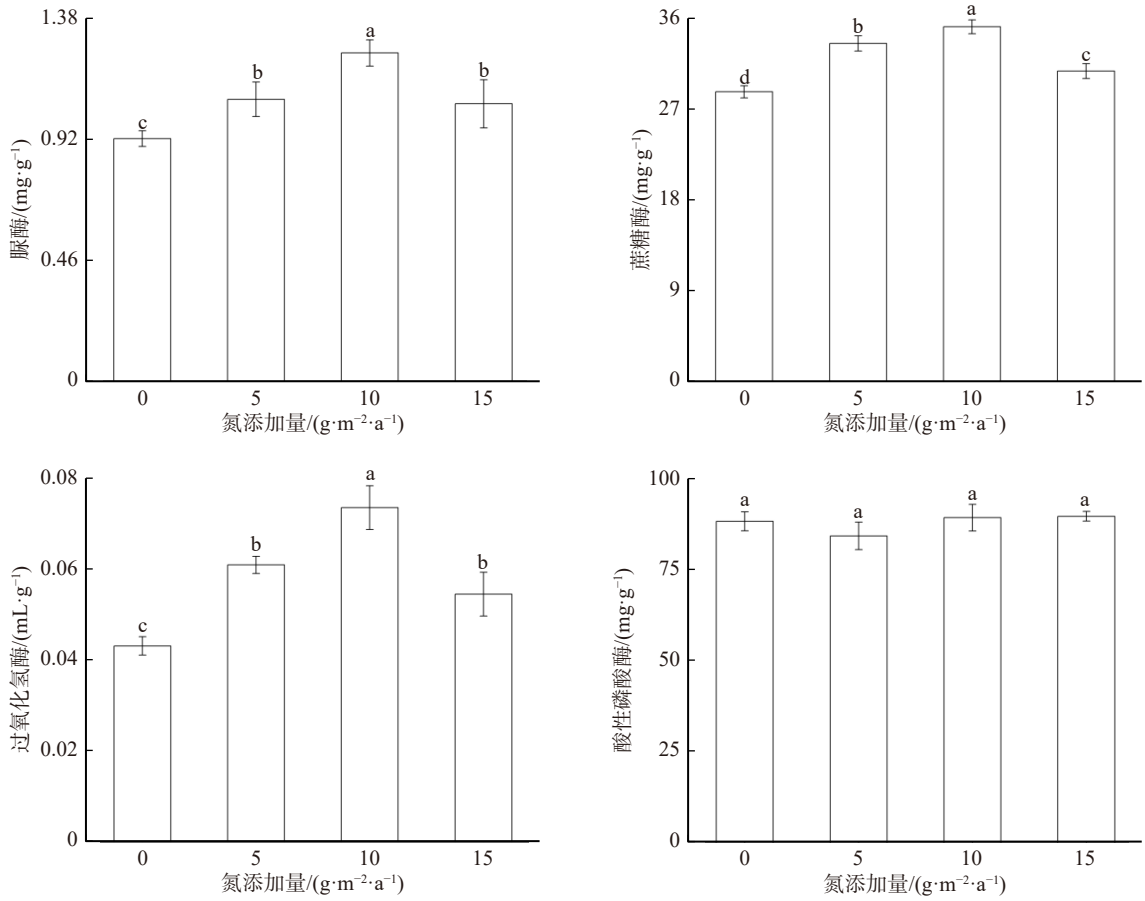


图 2 氮添加对土壤酶活性的影响

Fig. 2 Effects of nitrogen additions on soil enzyme activities

表 1 土壤酶活性与碳矿化速率的关系

Tab. 1 Relationship between soil enzyme activities and carbon mineralization rates

土壤酶活性	碳矿化速率回归方程	R^2	p
脲酶	$y = 12.085x - 2.484$	0.752	< 0.001
蔗糖酶	$y = 0.629x - 9.643$	0.824	< 0.001
过氧化氢酶	$y = 140.655x + 2.280$	0.828	< 0.001
酸性磷酸酶	$y = -0.036x + 13.613$	0.005	> 0.05

土壤酶活性对碳矿化速率的解释率不同，表现为过氧化氢酶(82.8%) > 蔗糖酶(82.4%) > 脲酶(75.2%)。

2.3 氮添加下土壤理化性质变化对碳矿化速率的影响

氮添加对纳帕海高寒草甸土壤理化性质的影响存在一定差异(表 2)。随着氮添加量的增加，土壤 pH 值的降幅逐渐增大。与对照相比，氮添加显著降低了土壤 pH 值($p < 0.05$)，降幅为 10.13% ~ 30.89%；但显著提高了土壤含水率、总有机碳、全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮和微生物生物量碳氮含量($p < 0.05$)。其中，含水率和总有机碳呈增加趋势，增幅分别为 14.48% ~ 39.14% 和 9.83% ~ 21.06%。全氮、水解氮、铵态氮、硝态氮及微生物生物量碳氮随氮添加量增加呈先增后减的变化趋势，硝态氮和微生物生物量碳氮在低氮处理时达到最大值，较对照分别增加了 115.06%、71.24% 及 54.50%，而全氮、水解氮及铵态氮在中氮处理时达最大值，较对照分别增加了 60.44%、46.04% 及 298.68%。此外，氮添加对土壤温度无显著影响。

土壤碳矿化速率与理化性质的相关性分析结果(表 3)表明：碳矿化速率与 pH 值显著负相关，与微生物生物量碳显著正相关($p < 0.05$)，与全氮及水解氮极显著正相关($p < 0.01$)，但与温度、含水率、总有机碳、铵态氮、硝态氮及微生物生物量氮的相关性未达到显著水平($p > 0.05$)。

2.4 氮添加下土壤碳矿化速率的直接和间接调控因素分析

通过主成分分析结果构建结构方程模型，使用全氮和水解氮表征土壤氮素养分，其中 PCA1 解释

表 2　氮添加对土壤理化性质的影响

Tab. 2　Effects of nitrogen additions on soil physicochemical properties

土壤理化性质	氮添加量/（$g·m^{-2}·a^{-1}$）			
	0	5	10	15
pH值	7.90 ± 0.15a	7.10 ± 0.17b	6.57 ± 0.06c	5.46 ± 0.14d
温度/℃	22.74 ± 0.25a	24.50 ± 0.96a	23.76 ± 1.44a	23.57 ± 0.53a
含水率/%	21.82 ± 0.62d	24.98 ± 0.87c	28.13 ± 0.59b	30.36 ± 0.85a
总有机碳/（$g·kg^{-1}$）	26.26 ± 1.13c	28.84 ± 0.94b	29.98 ± 0.60b	31.79 ± 0.99a
全氮/（$g·kg^{-1}$）	0.91 ± 0.03c	1.37 ± 0.05ab	1.46 ± 0.09a	1.27 ± 0.06b
水解氮/（$mg·kg^{-1}$）	275.66 ± 13.55c	359.64 ± 13.32b	402.58 ± 16.29a	344..43 ± 10.53b
铵态氮/（$mg·kg^{-1}$）	2.28 ± 0.37d	5.07 ± 0.14c	9.09 ± 0.51a	6.80 ± 0.30b
硝态氮/（$mg·kg^{-1}$）	3.85 ± 0.33c	8.28 ± 1.10a	6.33 ± 0.20b	4.04 ± 0.39c
微生物生物量碳/（$mg·kg^{-1}$）	255.00 ± 12.65d	436.66 ± 7.52a	385.58 ± 11.01b	307.24 ± 18.47c
微生物生物量氮/（$mg·kg^{-1}$）	57.25 ± 5.92c	88.45 ± 1.97a	73.06 ± 3.99b	61.78 ± 2.94c

表 3　土壤理化性质与碳矿化速率的相关关系

Tab. 3　Correlations between soil physicochemical properties and carbon mineralization rates

项目	碳矿化速率	pH值	温度	含水率	总有机碳	全氮	水解氮	铵态氮	硝态氮	微生物生物量碳
碳矿化速率	1									
pH值	−0.580*									
温度	0.363	−0.423								
含水率	0.379	−0.916**	0.146							
总有机碳	0.276	−0.854**	0.207	0.953**						
全氮	0.811**	−0.795*	0.483	0.668*	0.625*					
水解氮	0.883**	−0.799*	0.447	0.606*	0.541	0.909**				
铵态氮	0.328	−0.945**	0.261	0.952**	0.903**	0.634*	0.636*			
硝态氮	0.534	−0.188	0.655*	−0.048	0.027	0.639*	0.579*	−0.006		
微生物生物量碳	0.667*	−0.418	0.652*	0.228	0.278	0.827**	0.728**	0.224	0.925**	
微生物生物量氮	0.471	−0.244	0.655*	0.024	0.144	0.636*	0.564	0.065	0.908**	0.921**

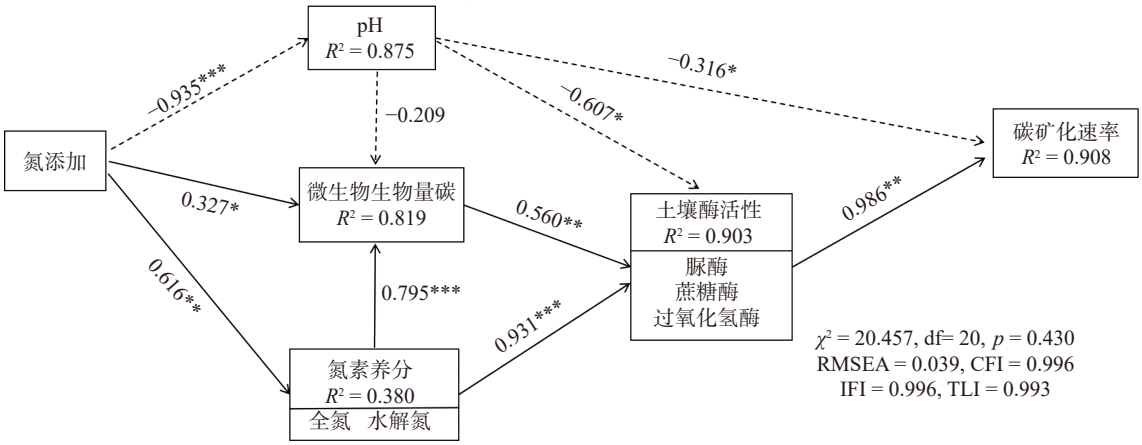
注：*表示$p < 0.05$；**表示$p < 0.01$。

了 95.47% 的变异；同时，以脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性表征土壤酶活性，PCA1 解释了 90.98% 的变异。结构方程模型结果表明，土壤酶活性、pH 值、微生物生物量碳和氮素养分共同解释了 90.8% 的土壤碳矿化速率的变化（图 3）。土壤酶活性（$R^2 = 0.903$）对碳矿化速率有直接的显著正向影响（路径系数为 0.986）；氮添加引起土壤 pH 值（$R^2 = 0.875$）显著变化（路径系数 −0.935），并对碳矿化速率产生直接且显著抑制作用（路径系数为 −0.316）。同时，氮添加下土壤 pH 值（$R^2 = 0.875$，路径系数为 −0.607）、微生物生物量碳（$R^2 = 0.819$，路径系数为 0.560）和氮素养分（$R^2 = 0.380$，路径系数为 0.931）通过影响土壤酶活性（$R^2 = 0.903$），间接促进土壤碳矿化（路径系数为 0.986）。其中，酶活性、pH 值及微生物生物量碳对碳矿化速率的解释率较高（$R^2 > 0.5$）。因此，氮添加主要通过调控土壤酶活性、pH 值及微生物生物量碳，从而影响土壤碳矿化速率的变化。

3　讨　　论

3.1　不同氮添加量对高寒草甸土壤碳矿化的影响

本研究发现，不同氮添加量对碳矿化速率的影响不一，表现为低、中氮添加显著促进土壤碳矿化速率，这与 Jiang 等[23]在半干旱草原的研究结果相似。这可能是由于纳帕海高寒湿地土壤初始氮含量较低，氮添加提高了土壤氮素养分的有效性。一方面，氮添加通过促进植物生长及根系分泌物输入增加土壤有机质[9]；另一方面，氮添加缓解了微生物氮限制，刺激了土壤微生物、水解酶和氧化酶的活性，从而促进土壤有机碳的矿化过程[24]。而高氮添加对土壤碳矿化速率的影响并不显著，这与李赟等[25]在高寒湿



实线和虚线分别表示正、负关系，线上数字为路径系数，R^2 为模型中数据的解释率；χ^2.卡方；df.自由度；RMSEA.近似误差均方根；CFI.比较拟合指数；IFI.增量拟合指数；TLI.塔克−刘易斯指数。*表示 $p < 0.05$，**表示 $p < 0.01$，***表示 $p < 0.001$。

图 3 土壤碳矿化速率与各因素的结构方程模型

Fig. 3 Structural equation model of soil carbon mineralization rate and various factors

地的研究结果一致。这可能是因为高氮添加虽然通过降低土壤 pH 值抑制了微生物活性，但其增加的全氮和水解氮含量可缓解微生物氮限制，两种相反效益相互抵消[26]，从而未对土壤碳矿化速率产生显著影响。与本研究结果不同的是，李英臣等[27]对季节性冻土区湿地的研究和 Tian 等[28]对热带森林长期氮添加研究表明，氮添加对碳矿化速率具有显著抑制作用。这种差异可能与本研究模拟氮沉降时间较短、气候条件及土壤类型不同有关。因此，不同氮添加量对土壤碳矿化的影响可表现为促进、抑制或中性效应，这不仅受氮沉降量和时间长短的影响，还取决于样地土壤碳氮磷等养分供应状况、微生物需求以及微生物与植物竞争关系之间的平衡[29−30]。

3.2 土壤理化性质对碳矿化的调控作用

与吕晶花等[11]施氮 1 年的研究结果相似，本研究发现土壤 pH 值随氮添加浓度增加而显著降低。这可能因为尿素水解产生NH_4^+，后经硝化作用释放大量 H^+，并引发 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+ 等盐基离子置换淋失，最终导致土壤 pH 值降低[31]。姚易寒等[32] 80 d 培养试验的研究结果与之相反，氮添加反而提高 pH 值。这种差异可能与原始土壤的 pH 值不同有关：在强酸性土壤中，施氮后尿素水解或氨挥发过程会消耗土壤溶液中的 H^+，导致 pH 值上升；而在本研究区石灰岩发育而成的微碱性土壤环境中，氮添加提高了反应底物浓度并促进硝化作用，致使土壤 pH 值降低。氮沉降引起土壤 pH 值的变化，可通过影响土壤溶液酸碱性、矿物溶解度和反应动力学，直接调控土壤碳矿化过程。结构方程结果表明，氮添加通过显著降低土壤 pH 值进而抑制碳矿化速率。一般而言，在中性至弱酸性的湿地土壤环境中，微生物通常表现出较高的生长繁殖速率和代谢活性，可能促进土壤碳矿化[33]。本研究中，高氮添加导致土壤 pH 值下降至 5.46，引起土壤酸化，可能抑制微生物生长及降低酶活性，从而降低土壤碳矿化速率。这与沈芳芳等[34]持续施氮 6 年和 Zheng 等[35]9 ~ 13 年的研究结果相类似，长期的高氮沉降可引起土壤的严重酸化，并导致土壤微生物及酶活性改变，最终抑制土壤有机碳矿化。因此，氮沉降对土壤碳矿化速率的影响，可能受研究区本底土壤母岩类型、土壤初始酸碱性以及氮沉降持续时间的重要调控。

氮添加可能会引起土壤温湿度、有机底物有效性等理化性质的显著变化进而调控碳矿化速率[9,23,27]。本研究发现，氮添加显著增加了土壤含水率、总有机碳、铵态氮、硝态氮含量。这可能是氮添加直接解除了植物和微生物的氮限制[7,23]，不仅促进植物生长，还增加了凋落物归还量及根系生物量，从而向土壤输入大量有机物质[11]，最终提高了土壤碳氮含量；而且植物郁闭度增加能减少地表水分蒸发，增强土壤持水能力，导致土壤含水率上升，进而可能影响土壤碳的矿化[9]。特别是，充足的氮素供应与增加的有机碳输入为微生物生长提供了充足的底物和营养，能够促进微生物的矿化作用。然而，土壤含水率、总有机碳、铵态氮及硝态氮并未对碳矿化速率产生显著影响，这可能是由于含水率过高抑制了好氧微生物的活动及多样性的提高[33]，最终未对土壤碳矿化过程产生显著效益。

3.3 土壤全氮、水解氮与微生物生物量碳共同驱动酶活性对碳矿化的调控机制

氮素是土壤生态系统中常见的限制性养分。前人研究表明，氮添加能够改变土壤氮素有效性，并通过调节微生物数量、群落结构、代谢活性及其与土壤酶活性之间的复杂耦合关系，直接或间接地影响土

壤有机碳的矿化过程[3,7,10]。

一方面，本研究发现氮添加显著增加土壤全氮、水解氮及微生物生物量碳含量，进而显著刺激土壤酶活性。这可能是因为氮添加直接提高土壤氮素养分有效性，缓解了土壤微生物的碳氮限制，刺激其繁殖及生物量的积累，二者共同促进酶的合成与分泌，并增强其活性[18]。与李晓东等[36]和胡洋等[10]的研究结果相似，氮添加显著增加土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性。这 3 种酶活性增幅最高出现在中氮处理，表明氮添加对 3 种酶活性的影响存在阈值效应，这可能与土壤初始氮水平及微生物养分利用策略有关。由于土壤初始氮含量较低，低剂量氮添加并未改变植物和土壤的氮限制状态，微生物将有限的能量与资源优先分配于自身生长而非酶合成，此时土壤酶活性增幅相对较低[37]。而中氮添加有效解除了氮限制，一方面促进微生物活性增强及根系分泌物增加，刺激微生物分泌大量脲酶及蔗糖酶以获取碳氮养分；另一方面，旺盛的代谢压力导致植物和微生物在养分吸收与呼吸分解过程中产生过量过氧化氢，为避免过氧化氢积累引发氧化损伤及毒害，生物体通过上调过氧化氢酶活性，维持细胞氧化还原稳态，以缓解氧化胁迫[38]，从而使 3 种酶活性均在中氮处理时达到峰值。然而，高氮添加导致土壤氮饱和现象，高浓度的 NH_4^+ 和土壤酸化等胁迫环境抑制微生物生长，最终导致酶活性增加较少。因此，氮沉降下土壤氮素养分有效性对微生物生物量及土壤酶活性影响的性质、大小和过程均存在较大的不确定性。

另一方面，氮添加下土壤酶活性的变化对土壤有机碳矿化具有重要的调控作用。土壤酶是驱动复杂有机化合物分解最直接、最灵敏的生物催化剂，其活性的强弱直接决定了有机碳的分解速率与转化路径，最终调控土壤碳库的储量与稳定性[39]。回归分析与结构方程一致表明，氮沉降诱导的土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性变化对土壤碳矿化速率具有显著促进作用。其中，土壤脲酶能加速尿素分解，将有机氮转化为无机氮，解除微生物的氮限制以促进其分解有机碳；蔗糖酶通过催化蔗糖分解，为微生物提供碳源和能源，从而驱动土壤有机碳矿化[36]；过氧化氢酶则通过清除活性氧物质来缓解氧化胁迫，有利于维持微生物细胞结构、生命活动及代谢功能[40]，这是促进有机碳分解与矿化的重要生物途径。因此，氮添加通过刺激水解酶与氧化酶的合成与分泌，最终加速了土壤有机碳向无机碳的转变过程。

4　结　　论

短期氮沉降对纳帕海高寒湿地土壤碳矿化产生显著影响。土壤碳矿化速率随氮添加浓度呈先增后降的变化趋势，低中氮添加显著促进土壤碳矿化速率而高氮添加无显著影响。结构方程模型表明，氮添加下土壤酶活性的增加直接促进了碳矿化，而土壤 pH 值的降低却对碳矿化具有直接抑制作用；氮添加促进土壤氮养分及微生物生物量碳增加，并通过刺激土壤酶活性而间接调控土壤碳矿化。

本研究结果揭示了氮沉降增加背景下土壤理化环境、微生物生物量及酶活性对碳矿化的直接和间接作用路径，阐明了氮沉降对纳帕海高寒湿地土壤碳矿化过程的影响机制。该研究不仅有助于深化对氮沉降驱动全球碳循环的碳氮耦合机制的理解，而且能为全球变化背景下陆地碳汇动态预测提供重要的科学依据。然而，本研究模拟氮沉降周期较短且氮源形态单一，存在一定的局限性。后续研究将延长模拟周期、纳入多种氮源，并结合碳同位素标记技术，追踪土壤碳流转路径，从而更精确地揭示其内在机制。

参　考　文　献

[1] Dentener F, Drevet J, Lamarque J F, et al. Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: a multimodel evaluation[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(4): 2005GB002672.

[2] Yuan X, Niu D, Guo D, et al. Responses of soil carbon and nitrogen mineralization to nitrogen addition in a semiarid grassland: The role of season[J]. Catena, 2023, 220: 106719.

[3] 王明柳, 陆梅, 黄敏超, 等. 氮沉降对森林土壤碳矿化影响的生物学机制 [J]. 世界林业研究, 2024, 37(3): 16−21.
Wang M L, Lu M, Huang M C, et al. Biotic mechanisms of nitrogen deposition influencing forest soil carbon mineralization[J]. World Forestry Research, 2024, 37(3): 16−21.

[4] Walker T W N, Kaiser C, Strasser F, et al. Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(10): 885−889.

[5] 潘哲妍. 模拟海平面上升及施氮对闽江河口半咸水沼泽湿地土壤有机碳组分及稳定性的影响 [D]. 福州: 福建师范大学, 2023.
Pan Z Y. Effects of simulated sea-level rise and nitrogen addition on soil organic carbon components and stability in the brackish marsh of Min River Estuary[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2023.

[6] 陶宝先, 宋长春. 氮素形态对泥炭沼泽土壤有机碳矿化的影响 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 372−377.
Tao B X, Song C C. Effects of nitrogen forms on carbon mineralization in peatland soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 372−377.

[7] 程淑兰, 方华军, 徐梦, 等. 氮沉降增加情景下植物−土壤−微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展 [J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8285−8295.

Cheng S L, Fang H J, Xu M, et al. Regulation of plant-soil-microbe interactions to soil organic carbon in natural ecosystems under elevated nitrogen deposition: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8285−8295.

[8] 陆梅. 纳帕海湿地退化对土壤微生物群落结构及多样性的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
Lu M. Effects of wetlands degradation on structure and biodiversity of soil microbial community in Napahai Plateau Wetlands[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.

[9] 孙官发, 陆梅, 闪昇阳, 等. 短期氮沉降对纳帕海高寒退化疏花早熟禾草甸土壤呼吸干湿季变化的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(2): 390−398.
Sun G F, Lu M, Shan S Y, et al. Effect of short-term nitrogen deposition on dry-wet seasonal variation of soil respiration in degraded *Poa pratensis* alpine meadow of the Napahai, Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(2): 390−398.

[10] 胡洋, 丛孟菲, 陈末, 等. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤微生物量和酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5328−5339.
Hu Y, Cong M F, Chen M, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzymatic activity in Bayinbuluk Alpine Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5328−5339.

[11] 吕晶花, 赵旭燕, 陆梅, 等. 氮沉降下纳帕海草甸植被与土壤变化对微生物生物量碳氮的影响 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(6): 1525−1532.
Lü J H, Zhao X Y, Lu M, et al. Effects of vegetation and soil changes on microbial biomass carbon and nitrogen in the Napahai Meadow under N deposition[J]. Journal of Applied Ecology, 2023, 34(6): 1525−1532.

[12] 孙煜佳, 陆梅, 赵旭燕, 等. 纳帕海高寒退化草甸土壤细菌群落结构对氮添加的响应 [J]. 生态环境学报, 2025, 34(2): 233−246.
Sun Y J, Lu M, Zhao X Y, et al. Response of soil bacterial community structure to nitrogen addition in degraded Napahai Alpine Meadow[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025, 34(2): 233−246.

[13] 刘攀, 陆梅, 吕晶花, 等. 蚂蚁筑巢对纳帕海面山土壤碳积累及分配的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5): 114−125.
Liu P, Lu M, Lü J H, et al. Effects of ant colonization on carbon accumulation and distribution in the forests of neighbouring mountains in the Napahai Wetlands, Yunnan Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 114−125.

[14] Liu X, Zhang Y, Han W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. Nature, 2013, 494: 459−462.

[15] 任加国, 贾海斌, 焦立新, 等. 滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 [J]. 环境科学, 2019, 40(2): 582−589.
Ren J G, Jia H B, Jiao L X, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus formation in atmospheric deposition in Dianchi Lake and their contributions to lake loading[J]. Environmental Science, 2019, 40(2): 582−589.

[16] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤, 等. 滇中亚高山人工林凋落物分解对模拟氮沉降的响应 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2523−2532.
Zhang Y J, Song Y L, Wang K Q, et al. Responses of litter decomposition in two subalpine plantations to simulated nitrogen deposition in central Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2523−2532.

[17] 张丹丹. 模拟增温对土壤有机碳矿化及腐殖质组成的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
Zhang D D. Effects of experimental warming on organic carbon mineralization and humus composition of soils[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017.

[18] 刘红梅, 周广帆, 李洁, 等. 氮沉降对贝加尔针茅草原土壤酶活性的影响 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1387−1394.
Liu H M, Zhou G F, Li J, et al. Effects of nitrogen deposition on soil enzyme activities of *Stipa baicalensis* steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(8): 1387−1394.

[19] 鲍士旦, 江荣风, 杨超光, 等. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D, Jiang R F, Yang C G, et al. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[20] Jenkinson D S, Brookes P C, Powlson D S. Measuring soil microbial biomass[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(1): 5−7.

[21] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M]. 北京: 中国气象出版社, 2006.
Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Soil microbial biomass-methods and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

[22] 高佳文, 左亚凡, 鲁雅雯, 等. 基于结构方程模型的白桦次生林健康评价: 以大通县宝库河流域为例 [J]. 生态学报, 2025, 45(12): 5941−5954.
Gao J W, Zuo Y F, Lu Y W, et al. Health assessment of secondary forests of *Betula platyphylla* based on structural equation model: the example of Baoku River Basin in Datong County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5941−5954.

[23] Jiang L, Cheng H, Peng Y, et al. Relative role of soil nutrients vs. carbon availability on soil carbon mineralization in grassland receiving long-term N addition[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 235: 105864.

[24] 朱灵, 张梦瑶, 高永恒. 高寒草原土壤有机碳矿化对水氮添加的响应 [J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 30−37.
Zhu L, Zhang M Y, Gao Y H. Response of soil organic carbon mineralization to water and nitrogen addition in alpine steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 30−37.

[25] 李赟, 王春梅, 高士杰, 等. 模拟增温和氮沉降的耦合作用对高寒泥炭湿地土壤碳激发效应的影响 [J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2430−2438.
Li Y, Wang C M, Gao S J, et al. Effects of coupling effects of nitrogen addition and simulated warming on soil carbon priming effect in alpine peat wetland[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(8): 2430−2438.

[26] Qin W K, Feng J G, Zhang Q F, et al. Different responses of

priming effects in long-term nitrogen-and phosphorus-fertilized soils to exogenous carbon inputs[J]. Plant and Soil, 2024, 500(1): 647−663.

[27] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等, 氮可利用性对东北不同类型湿地土壤有机碳矿化的影响 [J]. 地理科学, 2011, 31(12): 1480−1486.
Li Y C, Song C C, Hou C C, et al. Effects of exogenous nitrogen availability on carbon mineralization of different wetland soil types in Northeast China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(12): 1480−1486.

[28] Tian J, Dungait J A J, Lu X, et al. Long-term nitrogen addition modifies microbial composition and functions for slow carbon cycling and increased sequestration in tropical forest soil[J]. Global Change Biology, 2019, 25(10): 3267−3281.

[29] Ning Q, Hättenschwiler S, Lü X, et al. Carbon limitation overrides acidification in mediating soil microbial activity to nitrogen enrichment in a temperate grassland[J]. Global Change Biology, 2021, 27(22): 5976−5988.

[30] Wang R, Yang J, Liu H, et al. Nitrogen enrichment buffers phosphorus limitation by mobilizing mineral-bound soil phosphorus in grasslands[J]. Ecology, 2022, 103(3): e3616.

[31] 张普河, 姚佳, 王雪韧, 等. 短期氮添加对荒漠草原土壤无机碳及土壤酸缓冲能力的影响 [J]. 草地学报, 2024, 32(7): 2081−2088.
Zhang P H, Yao J, Wang X R, et al. Effects of short-term nitrogen addition on soil inorganic carbon and soil acid buffering capacity in desert grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(7): 2081−2088.

[32] 姚易寒, 张少博, 周家树, 等. 氮磷添加对毛竹林土壤有机碳矿化及其激发效应的影响 [J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1088−1100.
Yao Y H, Zhang S B, Zhou J S, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on organic carbon mineralization and priming effect in a moso bamboo plantation soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 1088−1100.

[33] 陆梅, 田昆, 张仕艳, 等. 不同干扰程度下高原湿地纳帕海土壤酶活性与微生物特征研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2783−2788.
Lu M, Tian K, Zhang S Y, et al. Study on the soil enzyme activities and microorganism characteristics of different human disturbances of plateau wetlands Napahai[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(12): 2783−2788.

[34] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(2): 517−527.
Shen F F, Yuan Y H, Fan H B, et al. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 517−527.

[35] Zheng M H, Zhang T, Luo Y Q, et al. Temporal patterns of soil carbon emission in tropical forests under long-term nitrogen deposition[J]. Nature Geoscience, 2022, 15(12): 1002−1010.

[36] 李晓东, 苏连波, 王克勤, 等. 模拟氮沉降对云南中部亚高山华山松林土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 38−47.
Li X D, Su L B, Wang K Q, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in subalpine *Pinus armandii* forest in central Yunnan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 38−47.

[37] 张燕, 强薇, 罗如熠, 等. 氮磷添加对土壤微生物生长、周转及碳利用效率的影响研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 526−534.
Zhang Y, Qiang W, Luo R Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial growth, turnover, and carbon use efficiency: a review[J]. Chinese Journal Applied and Environmental Biology, 2022, 28(2): 526−534.

[38] Zhang N, Lv F J, Qiu F H, et al. Pathogenic fungi neutralize plant-derived ROS via SrpK1 deacetylation[J]. The EMBO Journal, 2023, 42(9): e112634.

[39] Chen X, Cao J, Sinsabaugh R L, et al. Soil extracellular enzymes as drivers of soil carbon storage under nitrogen addition[J]. Biological Reviews, 2025, 100(4): 1716−1733.

[40] 张学鹏, 宁堂原, 杨燕, 等. 不同浓度石灰氮对黄瓜连作土壤微生物生物量及酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(10): 3073−3082.
Zhang X P, Ning T Y, Yang Y, et al. Effects of different application rates of calcium cyanamide on soil microbial biomass and enzyme activity in cucumber continuous cropping[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3073−3082.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）