

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.011

引用格式:岳磊,唐庄生,孟天乐,等.氮添加对高寒草甸表层土壤有机碳及其组分的初期影响[J].草地学报,2026,34(6):2077–2089

YUE Lei, TANG Zhuang-sheng, MENG Tian-le, et al. Initial Effects of Nitrogen Addition on Surface Soil Organic Carbon and its Components in an Alpine Meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2077–2089

氮添加对高寒草甸表层土壤有机碳及其组分的初期影响

岳磊^{1,2}, 唐庄生^{1,2}, 孟天乐^{1,2}, 杨健^{1,2}, 马晶^{1,2}, 张文柳^{1,2}, 杨洁^{1,2*}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070; 2. 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃兰州 730070)

摘要:为揭示氮沉降对高寒草甸土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)及其稳定性的初期影响,本研究在祁连山东段开展野外氮添加试验,系统测定植被生物量、土壤理化性质、酶活性及SOC组分,并结合方差分解分析其主导因子。结果表明,氮添加显著提高地上生物量,但显著降低纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶活性($P<0.05$)。颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)含量和比例显著下降,而易氧化有机碳(Easily oxidizable organic carbon, EOC)和矿物结合态有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC)显著升高($P<0.05$)。POC主要受全磷和碳获取酶调控,MAOC与地上生物量、pH及 β -葡萄糖苷酶密切相关,EOC则受速效磷和纤维素酶驱动。总体而言,SOC短期变化的解释率主要来自微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC, 17%)和溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC, 14.1%)。综上,氮添加通过促进植被碳输入、调节酶活性并重塑碳组分分配,增强了土壤的稳定碳库。本研究揭示了氮沉降下高寒草甸SOC稳定化的途径,对理解脆弱生态区碳循环机制及评估氮沉降条件下的碳汇潜力具有重要意义。

关键词:高寒草甸;氮添加;活性碳组分;碳库稳定性;方差分解

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2077-13

Initial Effects of Nitrogen Addition on Surface Soil Organic Carbon and its Components in an Alpine Meadow

YUE Lei^{1,2}, TANG Zhuang-sheng^{1,2}, MENG Tian-le^{1,2}, YANG Jian^{1,2}, MA Jing^{1,2},
ZHANG Wen-liu^{1,2}, YANG Jie^{1,2*}

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;

2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: To elucidate the initial effects of nitrogen deposition on soil organic carbon (SOC) and its stability in alpine meadows, we conducted a field nitrogen addition experiment in the eastern Qilian Mountains. Aboveground biomass, soil physicochemical properties, enzyme activities, and SOC fractions were measured, and their key drivers were identified using variance partitioning. Nitrogen addition significantly increased aboveground biomass but reduced cellulase and β -glucosidase activities ($P<0.05$). Particulate organic carbon (POC) content and proportion decreased markedly, whereas easily oxidizable organic carbon (EOC) and mineral-associated organic carbon (MAOC) increased significantly ($P<0.05$). POC dynamics were mainly regulated by total phosphorus and carbon-acquiring enzymes, MAOC was closely associated with aboveground biomass, pH, and β -glucosidase, while EOC was primarily driven by available phosphorus and cellulase. Overall,

收稿日期:2025-09-08;修回日期:2025-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(32360345);中国农业大学对口支援项目(GSAU-DKZY-2024-004);甘肃农业大学伏羲青年英才(GAUFx-04Y06);甘肃省杰出青年基金(24JRRA632)资助

作者简介:岳磊(2000-),男,汉族,甘肃榆中人,硕士研究生,主要从事草地土壤碳循环研究,E-mail: yuelei5.22@foxmail.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: yang_jie@gsau.edu.cn

microbial biomass carbon (17%) and dissolved organic carbon (14.1%) primarily explained short-term SOC variations. In summary, nitrogen addition enhanced soil carbon pool stability by promoting plant carbon inputs, modulating enzyme activities, and reshaping the distribution of SOC fractions. These findings reveal the pathways through which nitrogen deposition stabilizes SOC in alpine meadows, providing critical insights into carbon cycling processes and the carbon sequestration potential of fragile ecosystems under nitrogen enrichment.

Key words: Alpine meadow; Nitrogen addition; Activated carbon components; Carbon pool stability; Variance decomposition

草原是全球分布最广的生态系统之一,约占地球陆地面积的30%,其土壤碳储量高达423 Pg,占全球陆地生态系统碳库的15%~17%^[1-2]。我国天然草原面积约 4×10^8 hm²,占国土总面积的41%以上,是全球草原资源最丰富的国家之一^[3]。高寒草甸作为青藏高原及其周缘地区的典型植被类型,具有独特的高寒环境和脆弱的生态属性,是维系区域乃至全球碳循环与气候调节的重要生态系统^[4]。近年来,受全球变化与氮沉降加剧的影响,高寒草甸的生态系统功能和土壤碳动态发生了显著改变。由于其对外界干扰的敏感性,它已成为研究氮输入对土壤有机碳过程影响的关键对象^[5-6]。

土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)是陆地生态系统碳库的重要组成部分,由动植物残体、微生物体及其代谢产物分解和转化形成^[2],对全球碳平衡具有重要调节作用。SOC并非一个化学均质体,而是由多个稳定性和周转速率差异显著的组分构成^[7-8],主要包括易氧化有机碳(Easily oxidized carbon, EOC)、溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)、颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)及矿物结合态有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC)等^[9]。这些组分在碳的储存、释放与转化中扮演不同角色,是评价碳库活跃度的重要依据。土壤碳获取酶(纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶等)是驱动土壤有机碳及其各组分形成、转化与稳定的关键生物催化剂,同时也是土壤理化性质和微生物状态的敏感指示因子^[10-11]。

氮是草地生态系统的限制性养分,外源氮输入会显著改变原有氮素格局,深刻影响植物群落构建、养分循环及初级生产力等关键生态过程^[12]。由于不同SOC组分在稳定性和周转速率上的差异,它们对外源氮输入等环境变化的响应尤为敏感^[13-16]。已有研究表明,氮添加可能通过增加植物碳输入和抑制微生物分解作用促进活性碳组分的积累^[17]。但也有研究指出,氮输入提高氮有效性后可刺激微生物活性,加速有机质分解与碳释放^[18]。此外,

Chen等人^[19]的研究表明氮添加对活性碳组分和稳定性碳组分均有促进作用。但Janssens等人^[20]认为氮添加可能会通过抑制氧化酶活性而降低微生物对稳定性有机碳的分解,从而提高稳定性碳组分。亦有研究认为氮添加可能会通过抑制微生物生长与残体积累,进而减少对稳定性碳的贡献^[21]。这些差异性结论暗示氮沉降对SOC组分的影响机制尚不明确,可能依赖于生态系统类型、氮输入水平及实验年限等多重因素。目前,许多研究已证实长期氮沉降对SOC及其组分影响显著,而短期试验作为长期效应的重要前提,能够为揭示SOC在氮沉降初始阶段的动态响应提供关键证据。基于此,本研究通过野外氮添加试验,系统测定祁连山东段高寒草甸不同处理下的土壤有机碳及其组分,并结合土壤养分、酶活性及植被特征,探讨氮沉降背景下SOC组分分配格局与碳库稳定性的动态变化及其主导因子,旨在揭示高寒草甸SOC短期响应机制与调控路径,为评估氮沉降条件下高寒草甸的碳汇潜力提供科学依据,并为高寒草甸生态系统的管理与保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东段天祝县抓喜秀龙乡(37°11'N, 102°29'E, 海拔2700~3100 m)^[22],年均降水量410 mm,夏季(6—8月)降水最多,占全年降水量的60%以上。年均温-0.1℃,1月份均温-18.3℃,7月份均温12.7℃。无四季之分,仅分冷暖两季^[23]。该地区大气氮的年湿沉降总量为10.05 kg·hm⁻²,其中铵态氮和硝态氮的沉降通量分别为2.63和7.42 kg·hm⁻²^[24]。草地类型为高寒草甸,土壤类型为亚高山草甸土。土壤全氮含量为4.37~5.27 g·kg⁻¹,速效氮含量为452.01~558.02 mg·kg⁻¹。植物生长期120~140 d,优势物种为矮生嵩草(*Kobresia humilis*),其他物种包括垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)和异针茅(*Stipa aliena*)等。

1.2 试验设计

本实验平台建于2023年7月,依托国际生态实验网络 Nutrient Network(NutNet)(<https://nutnet.org>)与 Drought-Net (DroughtNET)(<https://droughtnet.weebly.com>)。试验采用随机区组设计,共设16个处理,共计96个小区,每个小区面积为 $6\text{ m}\times 6\text{ m}$,过道为 1 m (图1)。实验包含三类处理:①降水变化(对照、减少50%、增加50%),通过遮雨棚减少自然降水并将排水引入增雨区实现;②养分添加(不施肥、单施N/P/K、两两组合NP/NK/PK、三元组合NPK),N/P/K添加量均为 $10\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;③围栏设置(仅用于CK与NPK)。氮源为树脂包膜尿素(N含量44%,用量 $818\text{ g}\cdot\text{小区}^{-1}$),磷源为重过磷酸钙(纯P含量17%,用量 $2118\text{ g}\cdot\text{小区}^{-1}$),钾源为硫酸钾(纯K含量40%,用量 $900\text{ g}\cdot\text{小区}^{-1}$),三种

养分均于每年5月一次性施入。为评估短期氮添加对高寒草甸土壤有机碳及其组分的效应,本研究选取CK与N处理的12个小区,开展生物量、土壤理化性质、酶活性及碳组分观测与分析。

1.3 野外调查与样品采集

在历经两次施肥(2024年5月与2025年5月)后于2025年8月在12个小区 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 永久固定样方(图1右A)进行植物物种组成特征调查,包括植物种类记录、物种高度(每种随机测量10株)及盖度。地上生物量(Aboveground biomass, AGB)采样在样方内选取两个 0.1 m^2 ($10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$)子样方进行破坏性采样(图1右B),在每个处理小区随机取8钻 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤,过 2 mm 筛后混合均匀分两部分保存,一部分放 -4°C 冰箱保鲜,一部分风干保存(图1)。

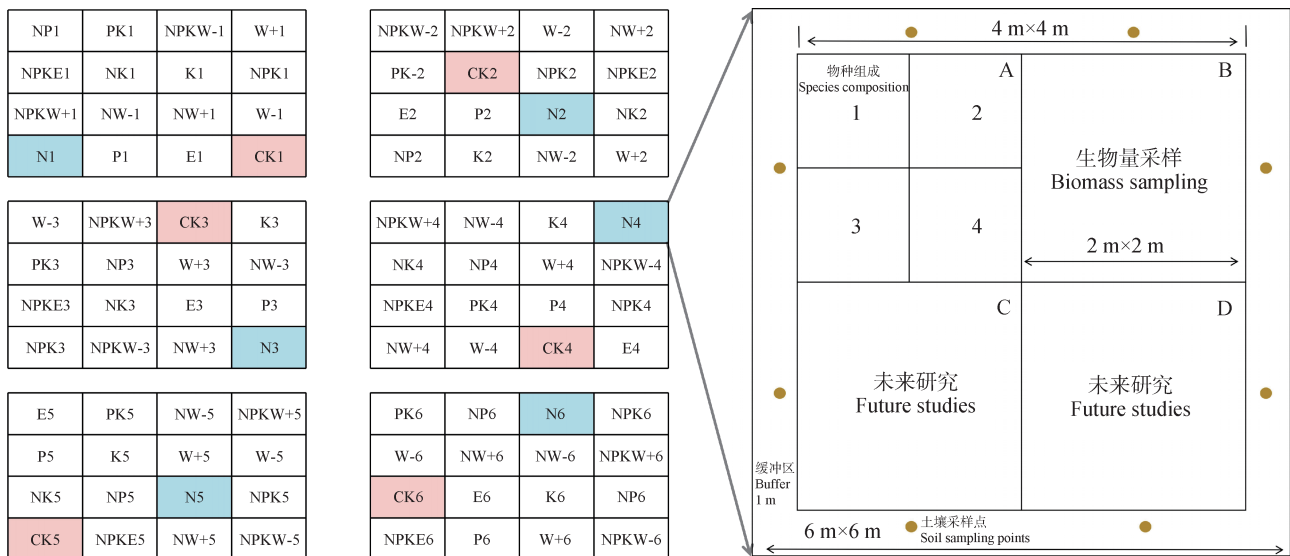


图1 采样点分布图(左)及样点设置图(右)

Fig. 1 Sampling point distribution map (left) and sampling point setting map (right)

1.3.1 植物多样性指数计算 重要值=(相对盖度+相对高度)/2^[25]

Patrick指数(R): $R=S$

Shannon-Wiener指数(H'): $H'=-\sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$

Pielou指数(J): $J=H'/\ln S$

Simpson多样性指数(D): $D=1-\sum_{i=1}^S P_i^2$

式中, S 为物种数目, P_i 为第 i 个物种的重要值。

1.3.2 土壤理化性质及碳获取酶活性的测定 土壤理化性质指标详细测定方法参见鲍士旦主编的《土壤农化分析》(第三版)^[26]。其中物理性质土壤含水量(Soil water content, SWC)、容重(Bulk

density, BD)分别采用 105°C 烘干法与环刀法测定,土壤化学性质全氮(Total N, TN)、全磷(Total P, TP)、全钾(Total K, TK)分别采用半微量凯氏定氮法、硫酸-高氯酸消煮法、NaOH熔融-火焰光度法测定;土壤速效氮(Available N, AN)、速效磷(Available P, AP)、速效钾(Available K, AK)分别采用碱解扩散法、钼锑抗比色法和 NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定;土壤pH值采用电位法测定。

土壤纤维素酶(Cellulase, CEL)采用3,5-二硝基水杨酸法; α -葡萄糖苷酶(α -glucosidase, AG)和 β -葡萄糖苷酶(β -glucosidase, BG)采用微量比色法测定。

1.3.3 土壤有机碳及其组分测定 土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾-浓硫酸外加热容量法测定^[26]。易氧化有机碳(EOC)含量采用高锰酸钾氧化比色法测定^[6]。溶解性有机碳(DOC)和微生物量碳(MBC)分别采用硫酸钾浸提法和氯仿熏蒸提取法测定。

颗粒有机碳(POC)和矿物结合有机碳(MAOC)参考 Cambardella 等人^[27]的方法,用 5 g·L⁻¹六偏磷酸钠振荡分散(18 h, 180 r·min⁻¹),悬液过 53 μm 筛,蒸馏水反复冲洗,筛上部分为颗粒有机质,通过 53 μm 筛的样品即为土壤矿物结合态有机质,65℃烘干至恒重,计算这些部分占整个土壤样品质量的比例。通过分析烘干样品中有机碳含量,计算颗粒有机质与矿物结合态有机质中的有机碳含量,再换算为单位质量土壤样品的对应组分有机碳含量^[28]。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 土壤有机碳碳库稳定性及分配比例相关指标的计算 本研究使用土壤碳库活度(Carbon activity, CA)、碳库活度指数(Carbon activity index, CAI)、碳库指数(Carbon pool index, CPI)以及碳库管理指数(Carbon pool management index, CPMI)来反映模拟氮添加(N)下土壤碳库稳定性的变化^[2]。以对照(CK)样地土壤为参考,计算上述 4 个指标。具体计算公式如下:

$$A_c = \frac{C_{EOC}}{C_{SOC} - C_{EOC}} \quad (1)$$

$$I_{CA} = \frac{A_{c,N}}{A_{c,CK}} \quad (2)$$

$$I_{CP} = \frac{C_{SOC,N}}{C_{SOC,CK}} \quad (3)$$

$$I_{CPM} = I_{CA} \times I_{CP} \times 100 \quad (4)$$

土壤碳组分分配比例(P)的计算公式如下:

$$P_{EOC} = \frac{C_{EOC}}{C_{SOC}} \times 100\% \quad (5)$$

$$P_{MBC} = \frac{C_{MBC}}{C_{SOC}} \times 100\% \quad (6)$$

$$P_{DOC} = \frac{C_{DOC}}{C_{SOC}} \times 100\% \quad (7)$$

$$P_{POC} = \frac{C_{POC}}{C_{SOC}} \times 100\% \quad (8)$$

$$P_{MAOC} = \frac{C_{MAOC}}{C_{SOC}} \times 100\% \quad (9)$$

式中, A_c 为碳库活度, I_{CA} 为碳库活度指数, I_{CP} 为碳库指数, I_{CPM} 为碳库管理指数, C 表示碳含量(单

位均换算为 g·kg⁻¹), C_{SOC} 为土壤有机碳含量, C_{EOC} 为易氧化有机碳含量, C_{MBC} 为微生物量碳含量, C_{DOC} 为溶解性有机碳, C_{POC} 为颗粒有机碳, C_{MAOC} 为矿物结合态有机碳。

1.4.2 数据分析 本研究用 Excel 整理数据,用 SPSS 27 进行独立样本 T 检验比较 CK 与 N 处理差异,数据以 Mean±SE 呈现;用 R 4.5.1 进行 Pearson 相关性分析,筛选关键变量(剔除方差膨胀因子 VIF 大于 10 的环境因子)建立以区组为随机因子的线性混合效应模型,用 glmm. hp 与 lme4 包对有机碳及组分在模型中的边际 R^2 值进行了独立评估^[29]。作图使用 Origin 2024 与 R 4.5.1。

2 结果与分析

2.1 氮添加下植被群落特征与地上生物量

N 处理在一定程度上改变了高寒草甸群落的地上生物量和群落特征(表 1)。物种丰富度在 N 处理下呈下降趋势,由 10 降至 9,但差异不显著。群落多样性指数方面, N 处理下 Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数和 Simpson 指数均表现出下降趋势,但差异均未达显著水平。与对照(CK)相比, N 处理下 AGB 显著增加,由 445.49 g·m⁻² 提高至 627.86 g·m⁻² ($P < 0.05$)。其中,禾本科 AGB 显著增加,由 426.23 g·m⁻² 提高至 556.75 g·m⁻² ($P < 0.05$)。

2.2 氮添加下土壤理化性质与碳获取酶活性

如表 2 所示,土壤物理性质方面, N 处理下土壤水分与容重均有所增加,但差异不显著。土壤化学性质方面, N 处理显著降低土壤全磷含量 ($P < 0.05$),显著增加速效磷含量 ($P < 0.05$)。土壤全氮、全钾及速效氮、速效钾含量在 N 处理下均较 CK 略有增加,土壤 pH 值略有降低,但差异不显著。N 处理显著降低了土壤纤维素酶与 β-葡萄糖苷酶活性(图 2A, C; $P < 0.05$),对 α-葡萄糖苷酶影响不显著(图 2B)。

2.3 氮添加对土壤有机碳组分及碳库稳定性的影响

N 处理对高寒草甸 SOC 含量无显著影响(图 3A)。POC 在 N 处理下显著降低,由 44.48 g·kg⁻¹ 降至 21.71 g·kg⁻¹ (图 3E; $P < 0.05$),而 EOC 与

表 1 氮添加高寒草甸植被特征与地上生物量的变化

Table 1 Changes in vegetation characteristics and aboveground biomass of alpine meadow under nitrogen addition

处理 Treatment	物种丰富度 Species richness	香农-维纳指数 Shannon-Winener index	Pielou 指数 Pielou index	辛普森指数 Simpson index	地上生物量 Aboveground biomass/(g·m ⁻²)			
					豆科 Leguminosae	禾本科 Gramineae	杂类草 Forbs	总生物量 Total
对照 CK	10.25±0.95 ^a	2.12±0.11 ^a	0.93±0.01 ^a	0.86±0.02 ^a	0.25±0.07 ^a	426.23±34.96 ^b	12.85±8.29 ^a	445.49±51.92 ^b
施氮 N	8.50±0.65 ^a	1.93±0.06 ^a	0.89±0.01 ^a	0.83±0.01 ^a	8.26±6.12 ^a	556.75±25.81 ^a	9.93±3.54 ^a	627.86±30.34 ^a

注:表中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Note: Different lowercase letters in the table indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same as below

表 2 氮处理高寒草甸土壤理化性质的变化

Table 2 Changes in soil physical and chemical properties of alpine meadow under nitrogen treatment

处理 Treatment	对照 CK	施氮 N
含水量 Moisture content/%	24.00±0.59 ^a	26.00±1.70 ^a
容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	0.68±0.04 ^a	0.77±0.02 ^a
全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	2.63±0.22 ^a	3.09±0.34 ^a
全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	0.29±0.01 ^a	0.21±0.01 ^b
全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	9.14±0.23 ^a	9.46±0.42 ^a
速效氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	450.79±17.38 ^a	457.88±9.52 ^a
速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	13.72±0.09 ^b	14.50±0.23 ^a
速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	243.83±18.31 ^a	255.20±13.15 ^a
pH 值 pH value	7.56±0.02 ^a	7.54±0.02 ^a

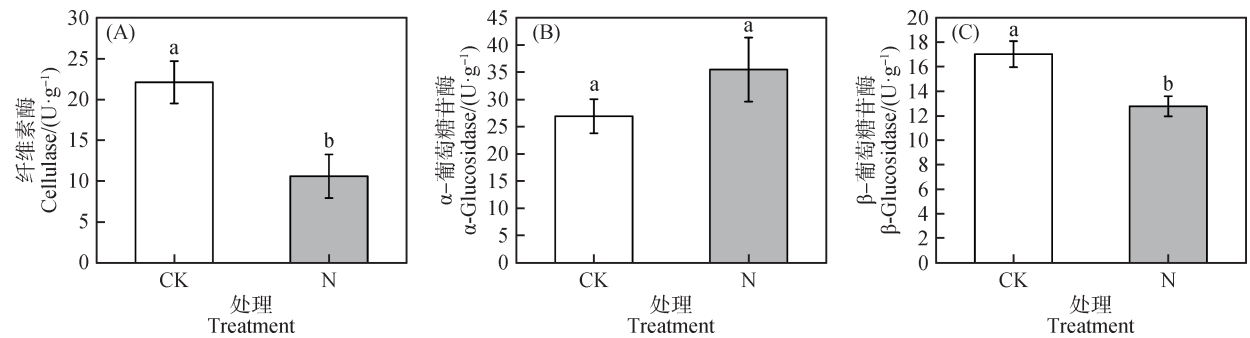


图 2 氮添加对高寒草甸土壤纤维素酶(A)、α-葡萄糖苷酶(B)及β-葡萄糖苷酶(C)活性的影响

Fig. 2 Impact of nitrogen addition on the activities of soil cellulase (A), α-glucosidase (B), and β-glucosidase (C) in alpine meadows

注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),其中CK表示对照,N表示氮处理。下同
Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$), where CK represents the control and N represents the nitrogen treatment. The same as below

MAOC(CK分别为3.36 g·kg⁻¹,26.98 g·kg⁻¹)则显著增加(N分别为6.38 g·kg⁻¹,44.86 g·kg⁻¹;图3B,F; $P<0.05$)。MBC和DOC在两处理间差异不显著(图3C,D)。N处理显著改变了土壤有机碳各组分的分配格局(表3)。与CK相比,N处理显著提高了EOC(CK:1.05%,N:7.75%; $P<0.05$)和MAOC(CK:33.00%,N:54.05%; $P<0.05$)在SOC中的

比例,而POC比例显著下降(CK:54.00%,N:26.27%; $P<0.05$)。MBC和DOC在两处理间差异不显著。N处理显著改变了土壤碳库活性及其相关指数(表4)。与CK相比,N处理下土壤CA由0.04提高至0.08($P<0.05$)。同时,N处理显著提高CAI与CPMI($P<0.05$),对CPI的影响不显著。

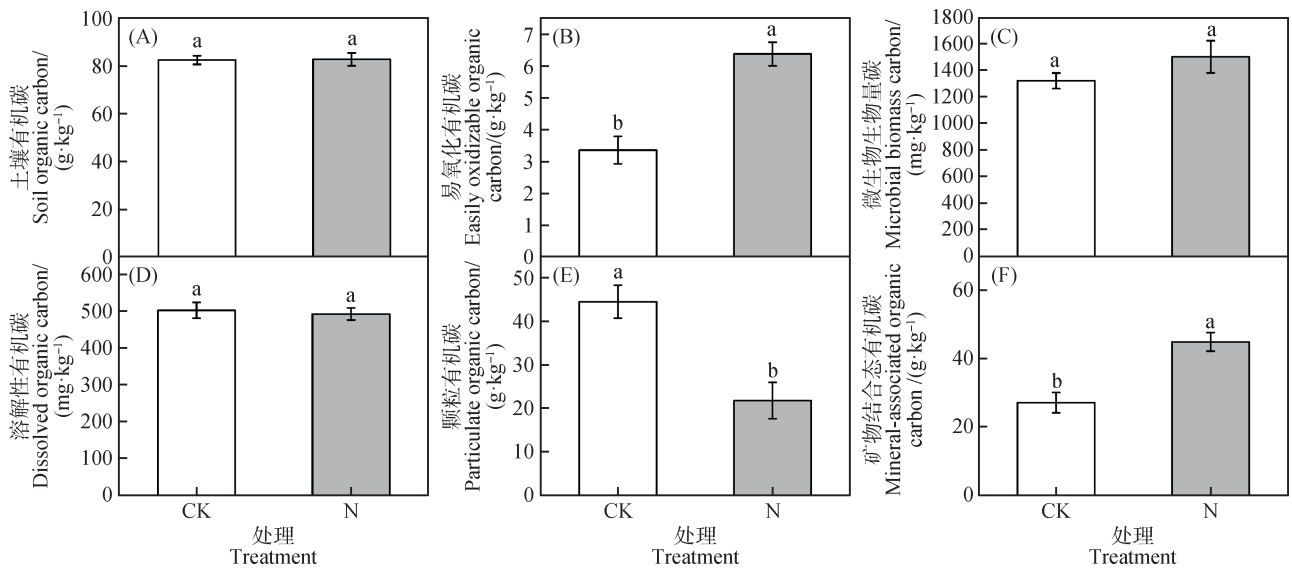


图3 氮添加对高寒草甸土壤有机碳(A)及其组分易氧化有机碳(B)、微生物生物量碳(C)、溶解性有机碳(D)、颗粒有机碳(E)及矿物结合态有机碳(F)的影响

Fig. 3 Impact of nitrogen addition on soil organic carbon (A) and its components: easily oxidizable organic carbon (B), microbial biomass carbon (C), dissolved organic carbon (D), particulate organic carbon (E), and mineral-bound organic carbon (F) in alpine meadows

表3 氮添加高寒草甸土壤有机碳组分的分配比例

Table 3 Distribution proportion of soil organic carbon components in alpine meadow with nitrogen addition

处理 Treatment	占土壤有机碳含量的比例 Proportion of soil organic carbon content/%				
	易氧化有机碳 EOC	微生物生物量碳 MBC	溶解性有机碳 DOC	颗粒有机碳 POC	矿物结合态有机碳 MAOC
对照 CK	1.05±0.45 ^b	1.60±0.06 ^a	0.61±0.03 ^a	54.00±4.76 ^a	33.00±4.53 ^b
施氮 N	7.75±0.63 ^a	1.80±0.10 ^a	0.68±0.03 ^a	26.27±5.14 ^b	54.05±2.16 ^a

表4 氮添加高寒草甸土壤碳库稳定性的影响

Table 4 Impact of nitrogen addition on soil carbon pool stability in alpine meadows

处理 Treatment	土壤碳库活度 Carbon activity	碳库活度指数 Carbon activity index	碳库指数 Carbon pool index	碳库管理指数 Carbon pool management index
对照 CK	0.04±0.00 ^b	1.00±0.00 ^b	1.00±0.00 ^a	100.00±0.00 ^b
施氮 N	0.08±0.01 ^a	1.44±0.17 ^a	1.00±0.02 ^a	136.76±10.89 ^a

2.4 土壤有机碳及其组分与碳库稳定性影响因素分析

土壤有机碳及其组分的相关性分析结果表明(图4),土壤POC与全磷和纤维素酶呈显著正相关($P<0.05$),但与 β -葡萄糖苷酶及地上生物量呈显著负相关($P<0.05$)。MAOC与土壤容重、pH值、 β -葡萄糖苷酶及地上生物量呈显著正相关($P<0.05$),与纤维素酶呈显著负相关($P<0.05$)。EOC与土壤全磷、速效磷、速效氮和纤维素酶呈显著负相关($P<0.01$),同时与均匀度指数呈显著负相关($P<0.05$),与 β -葡萄糖苷酶和地上生物量呈显著正相关($P<0.05$)。MBC仅与 β -葡萄糖苷酶呈显著正相关($P<0.05$)。

土壤碳库稳定性指数的相关性分析结果显示(图5),土壤CA与土壤全磷、速效磷、速效氮及纤维

素酶呈显著负相关($P<0.001$),与Pielou均匀度指数呈显著负相关($P<0.01$),与 β -葡萄糖苷酶及地上生物量呈显著正相关($P<0.05$)。土壤CAI与全氮、pH及 β -葡萄糖苷酶呈显著正相关($P<0.05$),与土壤水分呈显著负相关($P<0.01$)。土壤CPMI与土壤速效磷、速效氮及纤维素酶呈显著负相关($P<0.05$),与地上生物量呈显著正相关($P<0.05$)。

层次方差分解结果表明,不同环境因子对SOC各组分的解释力存在差异(图6)。EOC总量的主要驱动因子为速效磷(23.08%),其次为纤维素酶(15.59%)、全磷(14.66%)和全氮(13.64%), β -葡萄糖苷酶(9.85%)与地上生物量(8.64%)的贡献相对较低,上述因子合计解释率为85.5%(图6A)。对于POC,土壤全磷、纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶和地

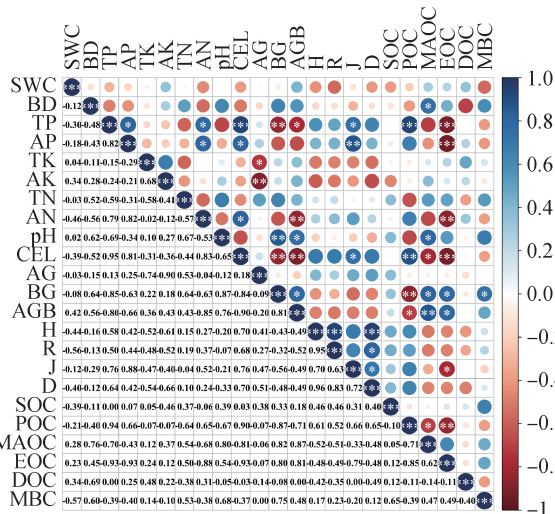


图4 高寒草甸土壤有机碳及其组分与环境因子的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil organic carbon and its components and environmental factors in alpine meadow
注: *, **和***分别代表在0.05、0.01和0.001水平上显著相关; SWC表示含水率; BD表示容重; TP表示全磷; AP表示速效磷; TK表示全钾; AK表示速效钾; TN表示全氮; AN表示速效氮; CEL表示纤维素酶; AG表示 α -葡萄糖苷酶; BG表示 β -葡萄糖苷酶; AGB表示地上生物量; H表示香农-威纳指数; R表示物种丰富度; J表示均匀度指数; D表示辛普森指数; SOC表示土壤有机碳; POC表示颗粒有机碳; MAOC表示矿物结合有机碳; EOC表示易氧化有机碳; DOC表示溶解性有机碳; MBC表示微生物生物量碳

Note: ***, **, and * represent significant correlations at the 0.001, 0.01, and 0.05 levels, respectively; SWC denotes soil moisture content; BD stands for bulk density; TP represents total phosphorus; AP indicates available phosphorus; TK signifies total potassium; AK stands for available potassium; TN represents total nitrogen; AN stands for available nitrogen; CEL represents cellulase; AG denotes α -glucosidase; BG represents β -glucosidase; AGB stands for aboveground biomass; H represents Shannon-Wiener index; R denotes species richness; J represents evenness index; D denotes Simpson index; SOC stands for soil organic carbon; POC represents particulate organic carbon; MAOC denotes mineral-associated organic carbon; EOC indicates easily oxidizable organic carbon; DOC stands for dissolved organic carbon; MBC represents microbial biomass carbon

上生物量的独立解释率分别为29.05%、23.69%、21.63%、12.67%，共同解释率达87% (图6B)。对于MAOC, pH的贡献最高(21.94%)，其次为地上生物量(18.74%)、纤维素酶(17.96%)、 β -葡萄糖苷酶(13.90%)和全磷(13.70%)，合计解释率为86.2% (图6C)。总体而言，SOC主要由MBC(17%)和DOC(14.1%)解释，MAOC和POC的解释率较低(分别为4.69%、0.34%)，总解释率为36.1% (图6D)。在土壤碳库稳定性方面(图7)，

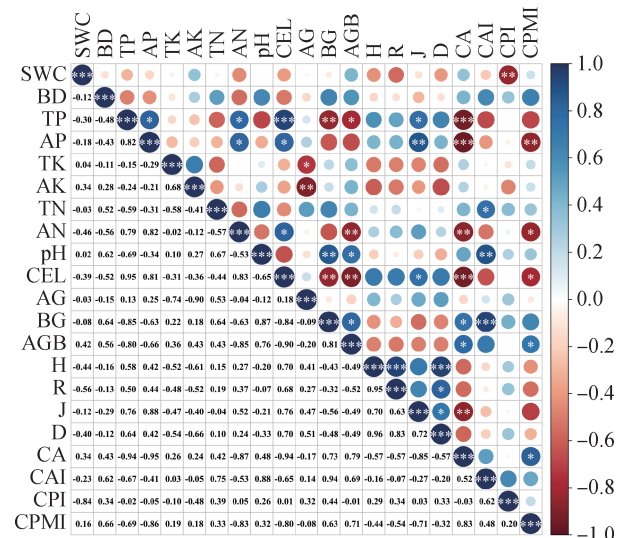


图5 高寒草甸土壤碳库稳定性指数与环境因子的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between soil carbon pool stability index and environmental factors in alpine meadows

注: *, **和***分别代表在0.05、0.01和0.001水平上显著相关; SWC表示含水率; BD表示容重; TP表示全磷; AP表示速效磷; TK表示全钾; AK表示速效钾; TN表示全氮; AN表示速效氮; CEL表示纤维素酶; AG表示 α -葡萄糖苷酶; BG表示 β -葡萄糖苷酶; AGB表示地上生物量; H表示香农-威纳指数; R表示物种丰富度; J表示均匀度指数; D表示辛普森指数; CAI表示碳库活性; CPI表示碳库指数; CPMI表示碳库管理指数

Note: *, ** and *** represent significant correlations at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively; SWC denotes soil moisture content; BD stands for bulk density; TP represents total phosphorus; AP indicates available phosphorus; TK signifies total potassium; AK represents available potassium; TN stands for total nitrogen; AN represents available nitrogen; CEL stands for cellulase; AG represents α -glucosidase; BG denotes β -glucosidase; AGB stands for aboveground biomass; H represents Shannon-Wiener index; R represents species richness; J represents evenness index; D represents Simpson index; CAI represents carbon pool activity; CPI represents carbon pool index; CPMI represents carbon pool management index

CA的主要驱动因子是土壤速效磷(26.79%)，其次为纤维素酶(19.89%)和全磷(19.38%)，而速效氮(14.07%)、地上生物量(9.64%)及 β -葡萄糖苷酶(7.96%)的解释率相对较低，上述因子合理解释率为97.7% (图7A)。对于CAI, β -葡萄糖苷酶的解释率最高(40.51%)，其次为pH(28.92%)和全氮(19.08%)，合计为88.5% (图7B)。对于CPMI, 纤维素酶(26.07%)和速效氮(25.54%)的解释率较高，而全磷(15.76%)和地上生物量(15.12%)的解释率较低，合理解释率为82.5% (图7C)。

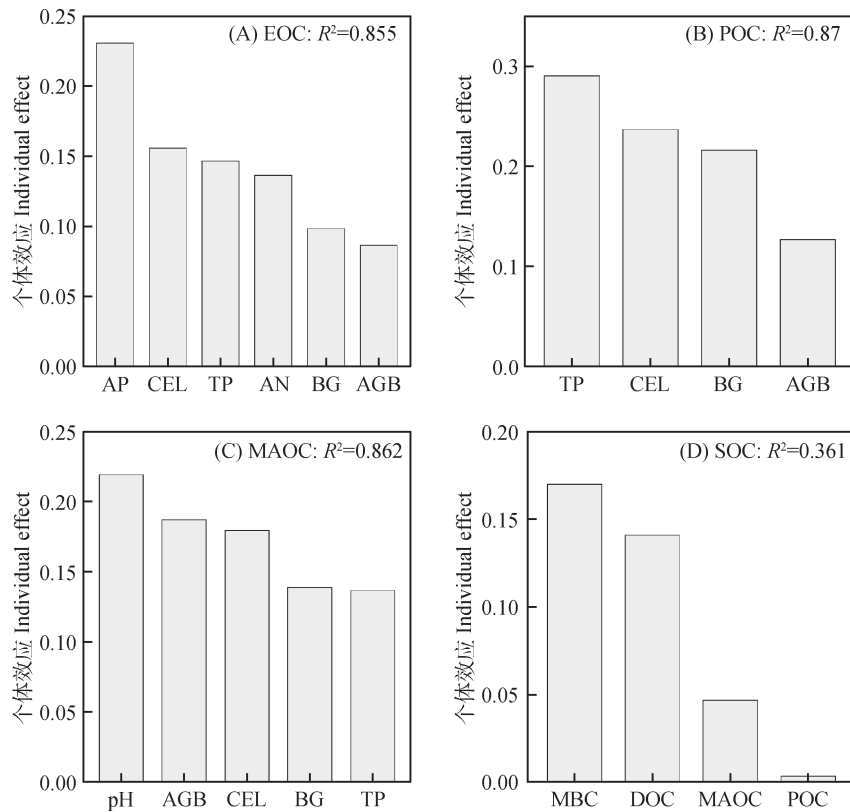


图 6 土壤因素和植被特征对 EOC(A), POC(B), MAOC(C) 以及各组分对 SOC(D) 影响的相对重要性

Fig. 6 Exploring the relative importance of soil factors and vegetation characteristics on EOC (A), POC (B), MAOC (C), and the impact of each component on SOC (D)

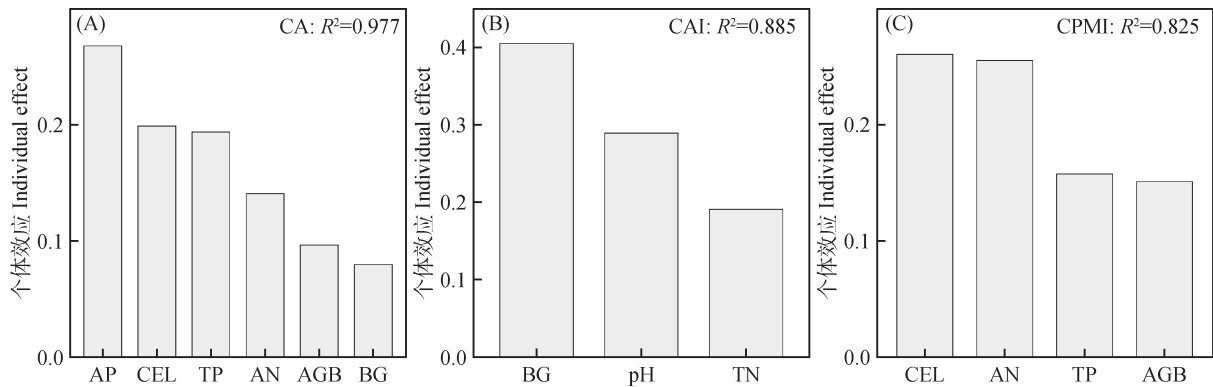


图 7 土壤因素和植被特征对 CA(A), CAI(B), CPMI(C) 影响的相对重要性

Fig. 7 Exploring the relative importance of soil factors and vegetation characteristics on CA (A), CAI (B), and CPMI (C)

3 讨论

3.1 氮添加对植被特征、土壤理化性质及酶活性的影响

本研究发现,施氮显著提高了高寒草甸群落的地上生物量,这一结果与氮沉降对草地地上生产力的研究结果一致^[30-31]。本研究发现,施氮处理下物种丰富度和多样性指数均呈下降趋势。这一趋势与亚高山草原和黄土高原长期原位氮添加试验中

观察到的多样性下降现象相一致^[32-33],说明氮添加可能通过促进优势功能群(如禾本科)的生长来增强群落生产力,并在一定程度上抑制其他功能群的生长。此外,该效应在本研究中尚未显著体现,可能与高寒草甸较强的生态“缓冲效应”及施氮年限较短有关^[34]。土壤养分方面,氮添加显著降低全磷含量而增加速效磷含量。这一结果与田沐雨等人^[35]的 Meta 分析结果一致,即氮输入促进植物生物量增加,为了满足植物生长发育对磷的需求,土壤

全磷养分进一步释放。氮添加还可通过降低土壤pH促进固定态无机磷的溶解,使其转化为植物可利用的有效磷^[36]。此外,表层土壤(0~10 cm)有机质含量高、微生物活跃,氮添加条件下微生物代谢和有机质分解过程可能促进难利用态或有机磷的矿化,从而进一步提高表层土壤速效磷含量^[37]。本研究还发现,氮输入显著抑制了与碳分解相关的水解酶活性,尤其是 β -葡萄糖苷酶和纤维素酶,且不同碳获取酶对氮输入的响应存在差异^[38]。这说明氮添加对土壤酶活性的调控不仅取决于氮素本身,还与底物类型及酶类的差异化响应密切相关。

3.2 氮添加对土壤有机碳组分与碳库稳定性的影响

本研究发现,尽管氮添加显著提高了高寒草甸地上生物量,但对SOC总量并未产生显著影响。这一结果与刘畅等人^[39]对高寒草甸的Meta分析结果一致。氮素输入降低了纤维素酶等碳获取酶的活性,表明植物凋落物及易分解有机碳组分的分解过程受到一定抑制,这可能延缓了新增SOC的固持过程。同时,高寒草甸SOC储量庞大且具有较强的缓冲能力,其变化往往需要更长的时间尺度才能显现^[40]。POC、EOC和DOC通常被描述为有机碳的活性组分,其含量越高,有机碳的活性便越高^[6]。POC通常来源于植物残体和真菌菌丝的高分子量有机碳,而MAOC依赖于有机质与矿物的结合,是土壤碳长期稳定的关键库^[9]。本研究发现,氮添加对SOC不同组分的响应存在显著差异,其中POC含量降低,而EOC和MAOC含量增加。祁瑜等人^[41]的研究亦表明在施氮量为 $10\text{ g}\cdot\text{N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 时,POC含量降低,可能的原因是地下生物量(0~10 cm土层)是POC的重要补充来源,而施氮导致地下根系生长受抑,直接减少了根系残体和根际分泌物的输入,切断了POC的核心碳源之一。同时,施氮条件下过高的无机氮浓度可能抑制真菌活性,或促使微生物优先分解POC等易获取碳源,从而加速POC的消耗。目前关于氮沉降对POC的效应仍存在分歧^[39,41-42],部分长期试验结果显示POC含量增加或无显著变化。而短期效应往往更为敏感,尤其在表层土壤中^[41]。相较之下,MAOC在施氮处理下显著增加,说明外源氮促进了有机微粒在矿物表面的吸附固定,加速了碳的物理—化学稳定化^[43-44],从而提高了MAOC在SOC中的比例。这种分配格局

说明氮输入并未直接增加SOC总量,而是通过调节碳流向增强了碳的稳定化潜力。EOC被认为是最敏感的SOC组分^[45]。本研究发现,氮添加显著提高了EOC含量,说明土壤活性碳周转被加速,这一现象在贝加尔针茅草原也有报道^[46]。值得注意的是,短期内活性碳的增强可能提高微生物对底物的利用效率,并促进代谢产物向MAOC的转化^[47],从而提升土壤碳库的整体稳定性。相比之下,DOC在本研究中未表现出显著响应。这一结果与齐玉春等人^[48]在温带草地的研究结果一致,表明DOC等快速周转组分对氮沉降的响应可能更依赖于生态系统类型、氮添加水平及实验年限。碳库稳定性指数进一步验证了上述结果。CA和CAI的增加与EOC含量显著提高密切相关。其次,CPMI的显著提升反映碳库结构在短期氮输入下发生了优化,SOC的内部分配格局发生改变,促进部分有机碳由易分解组分向更稳定的矿物结合态转化,从而在短期内提升了土壤碳库的稳定性,而非简单增加活性碳的累积。

3.3 驱动土壤有机碳组分与碳库稳定性的关键因子

土壤有机碳(SOC)及其活性组分(POC, MAOC, EOC, MBC)的分布与积累,是土壤理化性质、酶活性及植被特征共同作用的结果。不同SOC组分的形成和转化机制差异显著,因此其驱动因子也存在差异。相关性与方差分解结果显示,POC的主要驱动因子为全磷(29.05%)、纤维素酶(23.69%)和 β -葡萄糖苷酶(21.63%),说明其积累依赖于较充足的养分条件以维持植物输入,但其作为结构性碳源同时易受微生物快速分解消耗^[9]。POC与 β -葡萄糖苷酶呈负相关,同时方差分解结果表明该因子对POC变化的解释力较高,说明微生物分解对POC的消耗是影响其积累的重要机制。换言之, β -葡萄糖苷酶对POC的高解释力并非促进作用,而是反映其在分解消耗中的关键作用。与POC不同,MAOC的形成主要依赖于小分子有机碳与矿物的结合过程,其前体物质来源于植物和微生物残体的解聚产物^[9]。本研究中,MAOC与地上生物量、pH及 β -葡萄糖苷酶呈显著正相关,表明植被输入与微生物代谢的双重调控在其形成过程中发挥了关键作用。地上生物量的增加为土壤提供了更多植物残体输入,同时由于凋落物C:N降低,输入的

碳源质量提高。土壤pH作为控制土壤微生物量、活性及群落结构的重要因素^[49],适宜的土壤环境可增强酶活性,加速有机质的分解与可利用碳的释放。这些碳源在微生物代谢过程中一部分被消耗,另一部分则转化为代谢产物和残体,正如“微生物碳泵”理论所述^[50],微生物代谢残体较植物残体具有更高的矿物亲和力和相对化学惰性,更易与土壤矿物表面结合,从而促进MAOC的形成与累积。EOC的变动主要受土壤养分供给和酶活性共同调控。养分状况(如氮、磷含量)为微生物分解提供了必要条件,而水解酶的活性则直接决定了有机质的分解速率和小分子有机碳的释放速率^[51]。同时,植被生产力的提升也在一定程度上增加了新鲜有机质的输入^[41]。从而增加EOC含量。这种“消耗与补充并存”的动态机制使EOC成为SOC周转的敏感指标^[52]。从SOC整体调控来看,MBC和DOC对SOC的解释率分别达17%和14.1%,显示短期内SOC变化存在较大不确定性。其动态变化更多依赖于微生物活性和溶解性有机碳的快速周转。然而,EOC的绝对与相对变化幅度均小于POC和MAOC,其与SOC的相关性更多体现为敏感性指标,而非主要驱动因子。另一方面,本研究发现POC与MAOC呈现相反变化趋势,这在一定程度上抵消了SOC总量的波动,导致SOC的整体变化较为微弱。因此,SOC在短期内的调控机制可能同时受活性碳组分的敏感响应与稳定碳库的结构性变化的影响,需结合更长期的观测加以验证。

碳库稳定性指标反映了SOC的不同维度,其驱动因子也表现出差异性。影响CA的主导因素是土壤速效磷和纤维素降解过程。在高寒草甸中,微生物对碳的利用还可能受磷限制或碳磷共同限制,磷的供给不足更易成为制约微生物代谢功能的关键瓶颈^[53-55]。而较高的速效磷不仅为微生物分解提供营养支持,还使纤维素等结构性有机物更容易被矿化,从而短期内提高碳库活性。 β -葡萄糖苷酶主要参与小分子有机碳(如纤维二糖)的降解^[56],其活性升高表明土壤中易分解碳的周转加快。CAI与 β -葡萄糖苷酶呈显著正相关,且该因子贡献率高达40.51%。说明微生物对小分子碳底物的分解活性在很大程度上决定了碳库活度指数的变化。CPMI则对纤维素酶和速效氮更为敏感,说明快速分解和氮富集可能削弱碳库质量,但其与地上生物量的正相关关系也表明植被输入在一定程度上缓解了这种

不利效应。总体来看,CPMI的提升说明氮输入不仅改变了碳的周转模式,也促进了SOC库质量结构的优化。

4 结论

短期氮添加显著改变了高寒草甸土壤有机碳的组分分配格局,并增强了碳库的稳定性。具体表现为颗粒有机碳下降,而矿物结合态有机碳和易氧化有机碳含量上升,反映了易分解碳源减少及有机质向矿物结合态稳定化的转化增强。氮添加通过增加高质量碳源输入、提升微生物活性及改善土壤化学条件协同作用于土壤有机碳组分动态。此外,碳库稳定性指标(碳库活度、碳库活度指数、碳库管理指数)也随之提高,显示氮沉降在短期内能够改变土壤碳库的稳态性。这一分配格局的变化提示,高寒草甸对氮沉降的响应受到碳源输入及养分-酶交互作用的共同调控。然而,短期实验仍可能存在滞后和阈值效应,未来应结合长期和多因子耦合实验进一步验证氮沉降对高寒草甸碳库长期稳定性的影响。

参考文献

- [1] WANG L H, YEN H, E X, et al. Dissolved organic carbon driven by rainfall events from a semi-arid catchment during concentrated rainfall season in the Loess Plateau, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(7): 3141-3153
- [2] 杨才艳. 三江源区不同人工草地对土壤有机碳及活性碳组分变化规律研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2024: 1-19
YANG C Y. Changes of soil organic carbon and active carbon fraction by different artificial grasslands in Sanjiangyuan area[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024: 1-19
- [3] 陈彦珠. 东祁连山醉马草型退化高寒草地植被和土壤对放牧制度和恢复措施的响应[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2024: 1-2
CHEN Y Z. Responses of vegetation and soil of *Achnatherum inebrians*-type degraded alpine grassland to grazing systems and restoration measures in the eastern Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2024: 1-2
- [4] 王晓芬, 马源, 张格非, 等. 高寒草甸退化阶段植物群落多样性与系统多功能性的联系[J]. *草地学报*, 2021, 29(5): 1053-1060
WANG X F, MA Y, ZHANG G F, et al. Relationship between plant community diversity and ecosystem multifunctionality during alpine meadow degradation[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(5): 1053-1060
- [5] ZHANG F W, LI H Q, ZHU J B, et al. Context dependencies in the responses of plant biomass and surface soil organic carbon content to nitrogen addition and precipitation change within

- alpine grasslands [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2025, 381:109475
- [6] 包志鹏,林栋,刘雪鹏等. 放牧强度对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250610.1423.008>, 2025-06-10/2025-11-23
- BAO Z P, LIN D, LIU X P, et al. Effects of intensities grazing on soil organic carbon and its fractions in alpine meadow [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250610.1423.008>, 2025-06-10/2025-11-23
- [7] HAN L F, SUN K, JIN J, et al. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94:107-121
- [8] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580):60-68
- [9] 周正虎,刘琳,侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成:机制和模型[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10):11-22
- ZHOU Z H, LIU L, HOU L. Soil organic carbon stabilization and formation: mechanism and model[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(10):11-22
- [10] UTOBO E B, TEWARI L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status[J]. *Applied Ecology And Environmental Research*, 2015, 13(1):147-168
- [11] 刘亚军,王文静,李敏,等. 甘薯不同轮作模式对土壤有机碳组分及碳转化酶活性的影响[J]. *河南农业科学*, 2024, 53(2):65-74
- LIU Y J, WANG W J, LI M, et al. Effects of different rotation modes of sweet potato on soil organic carbon components and carbon conversion enzyme activities[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2024, 53(2):65-74
- [12] 付伟,武慧,赵爱花,等. 陆地生态系统氮沉降的生态效应:研究进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(5):475-493
- FU W, WU H, ZHAO A H, et al. Ecological impacts of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems: research progresses and prospects[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(5):475-493
- [13] LI J, WEN Y C, LI X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175:281-290
- [14] 魏孔钦,赵俊威,张前兵. 施磷对紫花苜蓿土壤呼吸速率及活性有机碳组分的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(2):80-92
- WEI K Q, ZHAO J W, ZHANG Q B. Effects of phosphorus application on soil respiration rate and active organic carbon components of alfalfa[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(2):80-92
- [15] 陈思思,王森,张楚,等. 不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023, (11):16-24
- CHEN S S, WANG M, ZHANG C, et al. Effects of different grazing intensities on soil active organic carbon in *Leymus chinensis* meadow steppe in Hulunbuir[J]. *Chinese Journal of Soil and Fertilizer*, 2023(11):16-24
- [16] 杨桦,彭小瑜,杨淑琪,等. 滇南喀斯特断陷盆地土地利用方式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(17):7105-7117
- YANG H, PENG X Y, YANG S Q, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and soil labile organic carbon in karst faulted basin of southern Yunnan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):7105-7117
- [17] 冯继广,张秋芳,袁霞,等. 氮磷添加对土壤有机碳的影响:进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(8):855-870
- FENG J G, ZHANG Q F, YUAN X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon: Review and prospects[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(8):855-870
- [18] 李嵘,常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(10):1012-1020
- LI R, CHANG R Y. Effects of external nitrogen additions on soil organic carbon dynamics and the mechanism[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(10):1012-1020
- [19] CHEN J G, JI C J, FANG J Y, et al. Dynamics of microbial residues control the responses of mineral-associated soil organic carbon to N addition in two temperate forests[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 748:141318
- [20] JANSSENS I A, DIELEMAN W, LUYSSAERT S, et al. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. *Nature geoscience*, 2010, 3(5):315-322
- [21] CHEN J G, WEN X, ZHENG C Y, 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
- [22] 赵昕,周惠丽,马娜,等. 祁连山东段高原鼯鼠繁殖期体型特征与气候因子关系[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250313.1705.004>, 2025-03-14/2025-11-23
- ZHAO X, ZHOU H L, MA N, et al. Relationship between the body size of plateau zokor and climatic factors in breeding season in the eastern Qilian Mountain [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20250313.1705.004>, 2025-03-14/2025-11-23
- [23] 杨斐,张文韬,张飞民,等. 1961—2022年祁连山气候特征及其变化[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(10):1627-1638
- YANG F, ZHANG W T, ZHANG F M, et al. Climate characteristics and variation in the Qilian Mountains from 1961 to 2022[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(10):1627-1638
- [24] ZHANG B J, LI Z X, FENG Q, et al. Environmental significance of atmospheric nitrogen deposition in the transition zone between the Tibetan Plateau and arid region[J]. *Chemosphere*, 2022, 307:136096
- [25] 张阳灿,杨文权,魏兴勇,等. 祁连山国家公园不同类型草地植被及土壤特征研究[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(11):23-34
- ZHANG Y C, YANG W Q, WEI X Y, et al. Study on vegetation and soil characteristics of different types of grassland in Qilian Mountain National Park[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11):23-34
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2001:14-114

- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Agriculture Press, 2001: 14-114
- [27] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783
- [28] 高雪松, 何鹏, 邓良基, 等. 丘陵区坡面土壤有机碳及颗粒有机碳分布特征 [J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 337-342
- GAO X S, HE P, DENG L J, et al. Distribution characteristics of soil total organic carbon and particle organic carbon on the purple hilly region slopes [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(1): 337-342
- [29] LAI J S, ZOU Y, ZHANG S, et al. glmm: hp: an R package for computing individual effect of predictors in generalized linear mixed models [J]. Journal of Plant Ecology, 2022, 15(6): 1302-1307
- [30] 李禄军, 曾德慧, 于占源, 等. 氮素添加对科尔沁沙质草地物种多样性和生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1838-1844
- LI L J, ZENG D H, YU Z Y, et al. Effects of nitrogen addition on grassland species diversity and productivity in Keerqin sandy land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(8): 1838-1844
- [31] 李春丽, 李奇, 赵亮, 等. 环青海湖地区天然草地和退耕恢复草地植物群落生物量对氮、磷添加的响应 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(10): 1015-1027
- LI C L, LI Q, ZHAO L, et al. Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in natural and restored grasslands around Qinghai Lake basin [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(10): 1015-1027
- [32] 曹丰丰, 刘瑞雪, 黄国柱, 等. 短期氮添加对祁连山亚高山草地生产力及植物多样性的影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5034-5044
- CAO F F, LIU R X, HUANG G Z, et al. Effect of short-term nitrogen addition on productivity and plant diversity of subalpine grassland in Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 5034-5044
- [33] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 氮素添加对黄土高原荒漠草原草本植物物种多样性和生产力的影响 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 66-71
- HE Y H, LIU X P, XIE Z K. Effect of nitrogen addition on species diversity and plant productivity of herbaceous plants in desert grassland of the Loess Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 66-71
- [34] 宗宁, 石培礼. 不同类型高寒草地群落结构与生产对施氮的响应及其敏感性 [J]. 生态学报, 2020, 40(12): 4000-4010
- ZONG N, SHI P L. Differential responses of community structure and production, and the sensitivities of different alpine grasslands to nitrogen addition [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4000-4010
- [35] 田沐雨, 于春甲, 汪景宽, 等. 氮添加对草地生态系统土壤pH、磷含量和磷酸酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2985-2992
- TIAN M Y, YU C J, WANG J K, et al. Effect of nitrogen additions on soil pH, phosphorus contents and phosphatase activities in grassland [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 2985-2992
- [36] LONG M, WU H H, SMITH M D, et al. Nitrogen deposition promotes phosphorus uptake of plants in a semi-arid temperate grassland [J]. Plant and Soil, 2016, 408: 475-484
- [37] SPOHN M, KUZYAKOV Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 61: 69-75
- [38] 吴建波, 王小丹. 藏北高寒草原土壤酶活性对氮添加的响应及其影响因素 [J]. 草地学报, 2021, 29(3): 555-562
- WU J B, WANG X D. Responses of soil enzyme activities to nitrogen addition and its impact factors at the alpine steppe of northern Tibet [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(3): 555-562
- [39] 刘畅, 陈积山, 朱瑞芬, 等. 氮添加对中国草地生物量和土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 [J]. 草地学报, 2025, 33(7): 2078-2089
- LIU C, CHEN J S, ZHU R F, et al. Meta-analysis of the impacts of nitrogen addition on biomass and soil organic carbon content of china grasslands [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7): 2078-2089
- [40] ZHAO Y F, WANG X, JIANG S L, et al. Climate and geochemistry interactions at different altitudes influence soil organic carbon turnover times in alpine grasslands [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 320: 107591
- [41] 祁瑜, MULDER J, 段雷, 等. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土壤有机碳的短期影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1104-1113
- QI Y, MULDER J, DUAN L, et al. Short-term effects of simulating nitrogen deposition on soil organic carbon in a Stipa krylovii steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1104-1113
- [42] 郑娇娇, 方华军, 程淑兰, 等. 增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5363-5372
- ZHENG J J, FANG H J, CHENG S L, et al. Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5363-5372
- [43] LING J, DUNGAIT J A J, DELGADO-BAQUERIZO M, et al. Soil organic carbon thresholds control fertilizer effects on carbon accrual in croplands worldwide [J]. Nature communications, 2025, 16(1): 3009
- [44] LU X, HOU E, GUO J, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis [J]. Global Change Biology, 2021, 27(12): 2780-2792
- [45] 张祎, 李鹏, 马田田, 等. 黄土高原典型流域“自然-人工”植被对土壤表层碳分布的影响 [J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(4): 443-449
- ZHANG Y, LI P, MA T T, et al. Effects of "nature-artificial" vegetation on surface soil carbon distribution in typical watershed of the Loess Plateau [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(4): 443-449

- [46] 刘红梅,张海芳,赵建宁,等. 氮添加对贝加尔针茅草原土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 草业学报,2020,29(8):18-26
LIU H M, ZHANG H F, ZHAO J N, et al. Effects of nitrogen addition on labile soil organic carbon and carbon pool management index of *Stipa baicalensis* steppe in Inner Mongolia, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(8):18-26
- [47] BAI Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions[J]. Science, 2022, 377(6606):603-608
- [48] 齐玉春,彭琴,董云社,等. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应[J]. 环境科学,2014,35(8):3073-3082
QI Y C, PENG Q, DONG Y S, et al. Responses of soil total organic carbon and dissolved organic carbon to simulated nitrogen deposition in temperate typical steppe in Inner Mongolia, China[J]. Environmental Science, 2014, 35(8):3073-3082
- [49] ACIEGO PIETRI J C, BROOKES P C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7):1396-1405
- [50] 朱雪峰,孔维栋,黄懿梅,等. 土壤微生物碳泵概念体系2.0[J]. 应用生态学报,2024,35(1):102-110
ZHU X F, KONG W D, HUANG Y M, et al. Soil microbial carbon pump conceptual framework 2.0[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1):102-110
- [51] SONG Y, YAO Y F, Kong W B, et al. Effects of vegetation loss and soil erosion intensity on soil carbon dynamics across landscape position: Evidence from China's Loess Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2026, 396:109992
- [52] 董扬红,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):143-148
DONG Y H, ZENG Q C, AN S S, et al. Effects of different forest types on soil active organic carbon and soil humus composition in the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1):143-148
- [53] SUN Y, ZHANG X J, YANG Y S, et al. Alpine meadow degradation regulates soil microbial diversity via decreasing plant production on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Ecological Indicators, 2024, 163:112097
- [54] 秦嘉豪,张晓东,董世魁,等. 氮磷添加对高寒草地土壤有机碳组分的影响[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250826.1503.006>, 2025-08-26/2025-11-23
QIN J H, ZHANG X D, DONG S K, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon components of alpine grassland [J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250826.1503.006>, 2025-08-26/2025-11-23
- [55] PAUL E A. Soil microbiology, ecology, and biochemistry in perspective[M]. New York: Academic Press, 2007:3-24
- [56] TURNER B L, HOPKINS D W, HAYGARTH P M, et al. β -Glucosidase activity in pasture soils[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 20(2):157-162

(责任编辑 付宸)