

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.018

引用格式:张浩,马扶林,刘小伟,等.冬季增温及刈割对青藏高原高寒草地土壤有机碳组分及碳库稳定性的影响[J].草地学报,2026,34(3):940-948

ZHANG Hao, MA Fu-lin, LIU Xiao-wei, et al. Effects of Winter Warming and Clipping on Soil Organic Carbon Fractions and Carbon Pool Stability in Alpine Grasslands of the Tibet Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):940-948

冬季增温及刈割对青藏高原高寒草地土壤有机碳组分及碳库稳定性的影响

张浩^{1,2}, 马扶林³, 刘小伟², 杨聪颖⁴, 木塔力甫·吾布力⁴, 王晓丽⁵,
张强⁶, 郭梁^{1,2,7*}

(1. 三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海 西宁 810016; 2. 西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 青海省海北牧业气象试验站, 青海 海北 810200; 4. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 三江源区高寒草地生态教育部重点实验室, 青海大学, 青海 西宁 810016; 6. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 7. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:青藏高原高寒草原碳库变化在促进地区生态平衡及区域可持续发展中具有不可替代的重要意义。本研究以青藏高原高寒草原为研究对象,分析冬季增温、刈割及其交互作用对土壤有机碳组分及其碳库稳定性的影响。结果表明:冬季增温显著提升土壤易氧化有机碳含量。刈割显著提升土壤颗粒态有机碳含量,降低矿物结合态有机碳含量($P<0.05$)。冬季增温、刈割交互作用显著降低土壤矿物结合态有机碳含量($P<0.05$)。冬季增温显著提升了土壤碳库活度、碳库活度指数及碳库管理指数($P<0.05$)。土壤含水量与矿物结合态有机碳含量呈极显著正相关($P<0.01$),而与碳库活度、碳库活度指数呈显著负相关($P<0.05$)。冗余分析与层次分割表明,土壤含水量与硝态氮含量显著影响土壤有机碳组分及碳库稳定性。本研究可为气候变化及人为活动影响下的青藏高原高寒草原土壤有机碳库变化提供基础数据。

关键词:冬季增温;刈割;高寒草原;有机碳组分;碳库稳定性

中图分类号:S154.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0940-09

Effects of Winter Warming and Clipping on Soil Organic Carbon Fractions and Carbon Pool Stability in Alpine Grasslands of the Tibet Plateau

ZHANG Hao^{1,2}, MA Fu-lin³, LIU Xiao-wei², YANG Cong-ying⁴, MUTALIFU Wu-bu-li⁴,
WANG Xiao-li⁵, ZHANG Qiang⁶, GUO Liang^{1,2,7*}

(1. Key Laboratory of Alpine Grassland Ecology in the Three Rivers Region (Qinghai University), Ministry of Education, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 3. Qinghai Haibei Livestock Experiment Weather Station, Haibei, Qinghai Province 810200, China; 4. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University Yangling, Shaanxi Province 712100, China; 5. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Key Laboratory of the Alpine Grassland Ecology in the Three Rivers Region Ministry of Education, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 6. Academy of Animal Sciences and Veterinary Medicine, Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 7. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

收稿日期:2025-07-09;修回日期:2025-08-26

基金项目:三江源区高寒草地生态教育部重点实验室开放课题(2023-SJKF-04);国家自然科学基金项目(42377471)资助

作者简介:张浩(1997-),男,汉族,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事气候变化下草地生态系统研究, E-mail:2377876212@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: guoliang2014@nwfau.edu.cn

Abstract: The changes in the carbon pool of alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau play an irreplaceably significant role in promoting regional ecological balance and sustainable development. This study focused on the alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau and analyzed the effects of winter warming, clipping, and their interactions on soil organic carbon components and the stability of carbon pool. The results indicated that winter warming significantly increased the content of easily oxidisable organic carbon in the soil. Clipping significantly increased the content of soil particulate organic carbon and decreased the content of mineral-bound organic carbon ($P < 0.05$). The interaction between winter warming and clipping significantly reduced the content of mineral-bound organic carbon ($P < 0.05$). Winter warming significantly enhanced soil carbon pool activity, the carbon pool activity index, and the carbon pool management index ($P < 0.05$). Soil moisture content showed a highly significant positive correlation with the content of mineral-bound organic carbon ($P < 0.01$), while it exhibited a significant negative correlation with the carbon pool activity and the carbon pool activity index ($P < 0.05$). Redundancy analysis and hierarchical partitioning revealed that soil moisture content and nitrate nitrogen concentration significantly influenced the components of soil organic carbon and the stability of the carbon pool. This study provides fundamental data for understanding the changes in soil organic carbon pools under the effects of climate change and human activities in the alpine grasslands of the Qinghai-Tibet Plateau.

Key words: Winter warming; Clipping; Alpine grasslands; Organic carbon fractions; Carbon pool stability

青藏高原是地球上最独特的地理单元之一,但其脆弱的生态系统对气候变化十分敏感^[1]。在全球温度升高与人为活动加剧的背景下,青藏高原草地生态系统正面临着植被退化、冻土融化等诸多挑战^[2-3],这些变化不仅影响着青藏高原草地生态系统功能,也会对草地土壤有机碳库组成及稳定性产生连锁效应^[4]。因此,深入研究青藏高原草地生态系统土壤碳库对温度变化及人为活动的响应,对于维护全球生态安全和可持续发展意义重大。

IPCC第六次评估指出,冬季气温升高幅度显著大于其他季节,在未来气候情境下这种非对称性增温将会加剧,而青藏高原地区冬季升温幅度高于全球和中国平均水平^[5]。作为我国重要的陆地有机碳库,该地区生态系统碳库对温度变化的响应一直是全球气候变化生态学的研究热点^[6-8]。目前已有大量试验或模型研究了土壤有机碳库对增温变化的响应,但主要关注于全年增温或植物生长期增温所带来的影响,忽略了季节性不对称增温这一事实^[9-11]。而冬季温度变化主要通过直接改变积雪覆盖、冻融交替等影响土壤碳循环,许多影响植物生长的生态过程如土壤养分淋溶、温室气体排放、微生物活动均与积雪覆盖、冻融过程有关^[12-13]。可见冬季是生态系统过程的重要时期,而全年及生长季增温的试验设计制约了我们准确理解这种季节性不对称增温对高寒草地生态系统碳库变化的影响。

刈割是青藏高原地区草地管理与利用的主要方式之一。其主要通过改变植物生长、凋落物输入及土壤微生物活性影响土壤碳输入与输出平衡^[14]。已有大量试验研究了刈割对土壤有机碳的影响。

大多研究表明适度刈割虽减少植物凋落物向土壤中输入有机碳,但可以通过促进植物根系的补偿性生长、提高土壤微生物活性等,保持表层土壤有机碳的相对稳定^[15-16]。亦有研究表明,刈割会增强土壤呼吸速率,促进土壤有机碳矿化,从而导致有机碳含量降低。

青藏高原高寒草原土壤碳库受人为管理和气候变暖等多种因素调控。刈割作为当地草地管理的重要方式,在冬季显著增温背景下,该地区草地生态系统有机碳库组分及稳定性如何响应这种变化,目前研究报道尚少。因此,本研究以冬季增温与刈割为试验处理,探究有机碳组分、碳库稳定性变化趋势,分析土壤环境因子对有机碳库的影响,以提升青藏高原高寒草地土壤碳生物地球循环认知。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于青海省海北藏族自治州海晏县西海镇海北牧业气象实验站草地观测场,北纬 $36^{\circ}57'$,东经 $100^{\circ}51'$,海拔 3140 m ^[17]。该地区属于典型高原半干旱性气候,年平均气温 2°C ,气温季节性差异显著;年平均降水量 391.9 mm ,主要集中在5—7月植物生长季。年日照时数 2912.7 h ,平均无霜期 48 d ^[18]。土壤类型为砂壤土,植被类型为高寒草原。主要优势种包括西北针茅(*Stipa sareptana*)、冷地早熟禾(*Poa araratica*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等^[19]。

1.2 试验方法

于2021年9月在研究区内选取地势平坦,植被生长均一的地块作为研究样地。采用双因素裂区试验设计,以刈割(C)和未刈割(NC)为主处理,增温(W)和未增温(NW)为副处理。以未刈割未增温(NC×NW)为对照处理,共4个处理组合。每个处理设置3个重复,共计12个处理样方。刈割于2021年9月下旬植物生长季结束后进行,留茬高度为5 cm。在刈割同时使用开顶式生长室(Open-Top Chamber, OTC)进行冬季增温(10月至翌年4月)处理,前期研究发现研究区冬季增温处理0~5 cm土壤温度相较于未增温处理高3.02℃^[20]。

1.3 样品采集

2022年4月底增温结束时进行土壤样品采集。在每个处理样方中随机选取3个点,去除地表植被与凋落物后,使用直径5 cm的土钻采集0~10 cm的土壤混匀后装入自封袋,以减小土壤异质性引起的误差。将采集得到的样品一部分放入铝盒中带回实验室测定土壤含水量,另一部分装入自封袋中放入低温保温箱带回实验室,自然风干后测定土壤理化性质与土壤有机碳组分。

1.4 指标测定

1.4.1 土壤理化性质测定 土壤含水量(Soil water content, SWC)采用烘干法测定;土水比1:5浸提后使用pH计测定土壤pH值;使用激光粒度分析仪测定土壤粒径,分别测定黏粒(Clay)、粉粒(Silt)、砂粒(Sand)含量;全氮(Total nitrogen, TN)采用凯氏定氮仪测定;铵态氮(Ammonium nitrogen, $\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮(Nitrate nitrogen, $\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用1 mol·L⁻¹ KCl浸提,AA3型连续流动分析仪氯化钾溶液提取-分光光度法测定;全磷(Total phosphorus, TP)采用H₂SO₄-HClO₄消解后测定;速效磷(Available phosphorus, AP)测定采用钼锑抗比色法^[21]。

1.4.2 土壤有机碳组分测定 土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量采用重铬酸钾外加热法测定。颗粒态有机碳(Particulate organic carbon, POC)与矿物结合态有机碳(Mineral-associated organic carbon, MAOC)采用六偏磷酸钠分散法分离后测定。易氧化有机碳(Easily oxidizable organic carbon, EOC)采用高锰酸钾氧化法测定^[22]。

1.4.3 土壤碳库稳定性相关指标计算 本研究使用碳库活度(Carbon activity, CA)、碳库活度指数(Carbon activity index, CAI)、碳库指数(Carbon pool index, CPI)及碳库管理指数(Carbon pool management index, CPMI)来表征土壤碳库稳定性。其中,CA表示易被微生物分解、周转快的“活性碳库”所占比例,常被用来快速诊断土壤退化或恢复进程;CAI常被用来比较不同处理对土壤碳活性提升或抑制的相对效果;CPI是土壤总有机碳库相对参照土壤的倍数,用于衡量碳库“量”的变化;CPMI既考虑总碳库大小,又兼顾活性碳库比例,可灵敏地反映土地管理措施对土壤碳库质量的综合影响^[23]。研究以未刈割、未增温(NC×NW)样地土壤碳组分指标为对照,具体计算公式如下:

$$CA = \frac{EOC}{(SOC - EOC)}$$

$$CAI = \frac{CA_T}{CA_{CK}}$$

$$CPI = \frac{SOC_T}{SOC_{CK}}$$

$$CPMI = CAI \times CPI \times 100$$

式中,EOC为土壤易氧化有机碳含量,SOC为土壤总有机碳含量,CA_T和SOC_T分别为不同刈割与增温处理下土壤的碳库活度与土壤总有机碳的含量,CA_{CK}与SOC_{CK}分别为对照处理下土壤的碳库活度与土壤总有机碳的含量。

1.5 数据处理

使用双因素方差分析探究冬季增温及刈割处理对土壤有机碳组分、碳库稳定性的影响,用LSD法进行多重比较。使用简单相关分析有机碳组分、碳库稳定性的关系。冗余分析影响有机碳组分与碳库稳定性的关键环境因子,层次分割法计算各个因子的相对贡献。所有数据分析及可视化均在R 4.3.1中进行,冗余分析采用vegan包进行,层次分割采用radcca-hp包^[24],使用ggplot2包进行制图。

2 结果与分析

2.1 冬季增温和刈割下土壤有机碳组分特征

对冬季增温、刈割处理下土壤总有机碳、易氧化有机碳、矿物结合态有机碳与颗粒态有机碳含量分析发现:冬季增温显著提升土壤易氧化有机碳含

量($P=0.05$),而对总有机碳、矿物结合态有机碳与颗粒态有机碳含量无显著影响。刈割显著提升土壤颗粒态有机碳含量,降低矿物结合态有机碳含量($P<0.05$),对总有机碳与易氧化有机碳无显著

影响。冬季增温、刈割交互作用显著降低土壤矿物结合态有机碳含量($P<0.05$),对总有机碳、易氧化有机碳与颗粒态有机碳含量无显著影响(图1)。

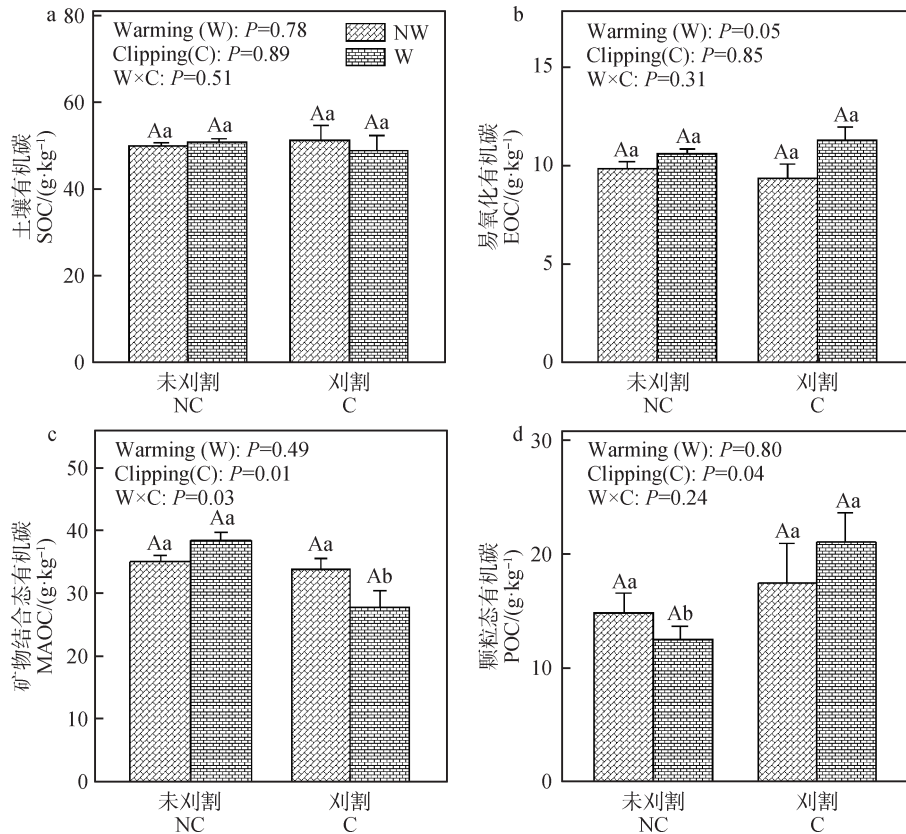


图1 冬季增温和刈割对土壤有机碳组分的影响

Fig. 1 Effects of winter warming and clipping on soil organic carbon components

注:图中数据均表示为平均值±标准误($n=3$)。不同大写字母表示刈割或不刈割处理下增温与未增温处理间具有显著差异。不同小写字母表示增温或未增温处理下刈割与不刈割处理间具有显著差异($P<0.05$),下同

Note: Data in the figure are presented as mean ± standard error ($n=3$). Different uppercase letters indicate significant differences between warming and non-warming treatments under either clipping or non-clipping conditions ($P<0.05$). Different lowercase letters denote significant differences between clipping and non-clipping treatments under either warming or non-warming conditions ($P<0.05$), the same as below

2.2 冬季增温和刈割下土壤有机碳库稳定性特征

对土壤碳库稳定性指标进行多因素方差分析发现,冬季增温显著提升了土壤碳库活度、碳库活度指数及碳库管理指数,而LSD法比较发现上述指标在未刈割未增温处理与未刈割增温处理间差异不显著;刈割条件下,增温处理土壤碳库活度、碳库活度指数及土壤碳库指数显著提高。刈割及增温刈割交互处理对土壤碳库活度、碳库活度指数、碳库指数及碳库管理指数无显著影响(表1)。

2.3 土壤环境因子对有机碳组分及碳库稳定性的影响

对土壤理化性质指标分析发现(表2),刈割显

著降低土壤含水量、pH、速效氮及铵态氮($P<0.05$)。冬季增温处理导致土壤含水量及硝态氮含量显著降低,土壤pH显著提高($P<0.05$)。冬季增温、刈割交互处理显著降低土壤含水量及速效氮含量,显著提高土壤pH($P<0.05$)。

对土壤理化性质与有机碳组分、碳库稳定性相关性分析发现(图2a),土壤含水量与MAOC呈极显著正相关($P<0.01$),而与CA、CAI呈显著负相关($P<0.05$)。土壤TN与EOC、CPI呈显著正相关($P<0.05$),与SOC呈极显著正相关($P<0.01$)。土壤 NO_3^- -N与CAI呈显著负相关($P<0.05$),与CA呈极显著负相关($P<0.01$)。土壤 NH_4^+ -N与POC呈显著负相关($P<0.05$)。土壤AN与MAOC呈显著正

表 1 冬季增温和刈割对土壤有机碳库稳定性的影响

Table 1 Effects of winter warming and clipping on the stability of soil organic carbon pools

指标 Index	未刈割×未增温 NC×NW	未刈割×增温 NC×W	刈割×未增温 C×NW	刈割×增温 C×W	刈割 F	刈割 P	增温 F	增温 P	刈割×增温 F	刈割×增温 P
碳库活度 CA	0.24±0.01 ^{Aa}	0.26±0.01 ^{Aa}	0.22±0.03 ^{Ba}	0.30±0.03 ^{Aa}	0.41	0.54	10.5	0.02	4.25	0.07
碳库活度指数 CAI	1.00±0.00 ^{Aa}	1.07±0.07 ^{Aa}	0.91±0.09 ^{Ba}	1.23±0.14 ^{Aa}	0.49	0.50	14.47	0.01	5.72	0.44
碳库指数 CPI	1.00±0.00 ^{Ba}	1.01±0.00 ^{Aa}	1.02±0.05 ^{Aa}	0.98±0.05 ^{Aa}	0.05	0.82	0.14	0.71	0.81	0.39
碳库管理指数 CPMI	100.00±0.00 ^{Aa}	109.33±7.11 ^{Aa}	93.62±12.11 ^{Aa}	120±16.82 ^{Aa}	0.13	0.73	8.01	0.02	1.87	0.21

注:粗体表示冬季增温、刈割及其交互作用对土壤理化性质的影响显著。下同

Note: Values in bold denote significant effects of winter warming, clipping, and their interaction on soil physicochemical properties. The same as below

相关而与土壤 CA 呈显著负相关($P<0.05$)。土壤 Clay 与 MAOC 呈显著负相关,Silt 与 CA、CAI 呈显著正相关,Sand 与 MAOC 呈显著正相关($P<0.05$)。

对土壤理化性质与有机碳组分、碳库稳定性进行冗余分析发现(图 2b,c),土壤理化性质的两轴分别解释了不同处理下土壤有机碳组分、碳库稳定性

变异的 62.14% 和 10.77%。层次分割结果显示,SWC 与 NO_3^- -N 显著影响了土壤碳组分与碳库稳定性指标,其分别解释了 32.78% 与 19.05% 的土壤碳组分与碳库稳定性变异。 NH_4^+ -N、土壤 Silt 分别解释了 21.52% 与 15.17% 也是影响碳组分与碳库稳定性变异的重要因素。

表 2 增温及刈割对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of warming and clipping on physical and chemical properties of soil

指标 Index	未增温×未刈割 NW×NC	未增温×刈割 NW×C	增温×未刈割 W×NC	增温×刈割 W×C	刈割 F	刈割 P	增温 F	增温 P	刈割×增温 F	刈割×增温 P
土壤含水量 SWC	34.39±0.99 ^{Aa}	32.71±1.32 ^{Aa}	36.76±0.43 ^{Aa}	20.48±2.12 ^{Bb}	43.70	<0.01	13.17	0.01	28.86	<0.01
pH	7.08±0.01 ^{Bb}	8.18±0.04 ^{Aa}	8.18±0.03 ^{Aa}	8.12±0.03 ^{Aa}	7.76	0.02	7.44	0.02	14.58	0.01
总氮 TN	3.55±0.10 ^{Aa}	3.37±0.15 ^{Aa}	3.61±0.06 ^{Aa}	3.44±0.21 ^{Aa}	1.64	0.23	0.20	0.665	0.01	0.984
总磷 TP	0.64±0.02 ^{Aa}	0.61±0.01 ^{Aa}	0.65±0.01 ^{Aa}	0.63±0.01 ^{Aa}	3.50	0.098	1.22	0.300	0.04	0.842
速效氮 AN	41.46±6.60 ^{Aa}	33.13±3.79 ^{Aa}	37.80±3.05 ^{Aa}	18.13±1.45 ^{Bb}	1.19	0.33	0.25	0.64	13.67	0.02
速效磷 AP	11.90±0.46 ^{Aa}	10.73±1.34 ^{Aa}	12.07±0.96 ^{Aa}	9.73±0.62 ^{Aa}	3.70	0.09	0.21	0.66	0.41	0.53
硝态氮 NO_3^- -N	19.48±2.78 ^{Aa}	25.84±4.15 ^{Aa}	15.82±2.39 ^{Aa}	12.31±2.66 ^{Ba}	0.21	0.65	7.81	0.02	2.58	0.15
铵态氮 NH_4^+ -N	21.98±3.92 ^{Aa}	10.28±4.72 ^{Aa}	21.98±3.61 ^{Aa}	5.82±1.21 ^{Ba}	14.87	<0.01	0.38	0.55	0.38	0.55

3 讨论

3.1 冬季增温和刈割下土壤有机碳组分、碳库稳定性特征

增温可以通过改变生物与非生物因素共同作用于土壤有机碳^[25]。目前研究增温对土壤有机碳的影响结果各异,但多数研究发现增温降低了土壤有机碳含量^[26]。不同土壤碳组分因形成的物理、化学机制差异因而对增温的响应也不一致^[27]。而刈割可以通过影响凋落物输入、根系生长来改变土壤有机碳含量及组分分配^[28]。本研究发现,冬季增温与刈割对土壤总有机碳无显著影响,但显著影响了不同有机碳组分间的分配。具体而言,冬季增温条件下,刈割显著降低了土壤 MAOC,而 POC 含量显著增加。土壤 POC 主要来源于植物残体,刈割可能造成了部分植物根系的补偿性生长^[29],而在增温环境下,土壤中的植物残体更易分解,提升了土壤 POC 含量。增温改变了土壤理化性质,影响土壤矿物与有机碳结合的稳定性,使原本紧密结合的

MAOC 因矿物表面性质改变而解析^[30],重新进入土壤中,这进一步提升了土壤 POC 含量。

EOC 是土壤中易被化学或生物过程氧化分解的活性有机碳组分^[31]。土壤碳库活度与土壤碳库活度指数可以表示土壤活性有机碳组分含量及其相对变化,是评估管理措施对短期效应的关键指标^[32]。本研究发现,冬季增温条件下,刈割显著提升了土壤有机碳中 EOC 占比,土壤碳库活度与碳库活度指数显著增加。这可能是由于刈割后植物地下凋落物及分泌物生物量增加^[33],增温促进活性有机碳的输入,提高了土壤 EOC 占比,导致土壤碳库活度与碳库活度指数升高。碳库指数反应土壤总有机碳变化特征。张义凡等^[34]研究发现,增温可通过提高植物生产力间接提高土壤碳库指数。这与本研究的结果一致,本研究中未刈割条件下,增温显著提升了土壤碳库指数。这可能是冬季增温后土壤中微生物活性升高,植物残体更易分解^[35],土壤中的有机碳含量增加,提高了土壤碳库指数。

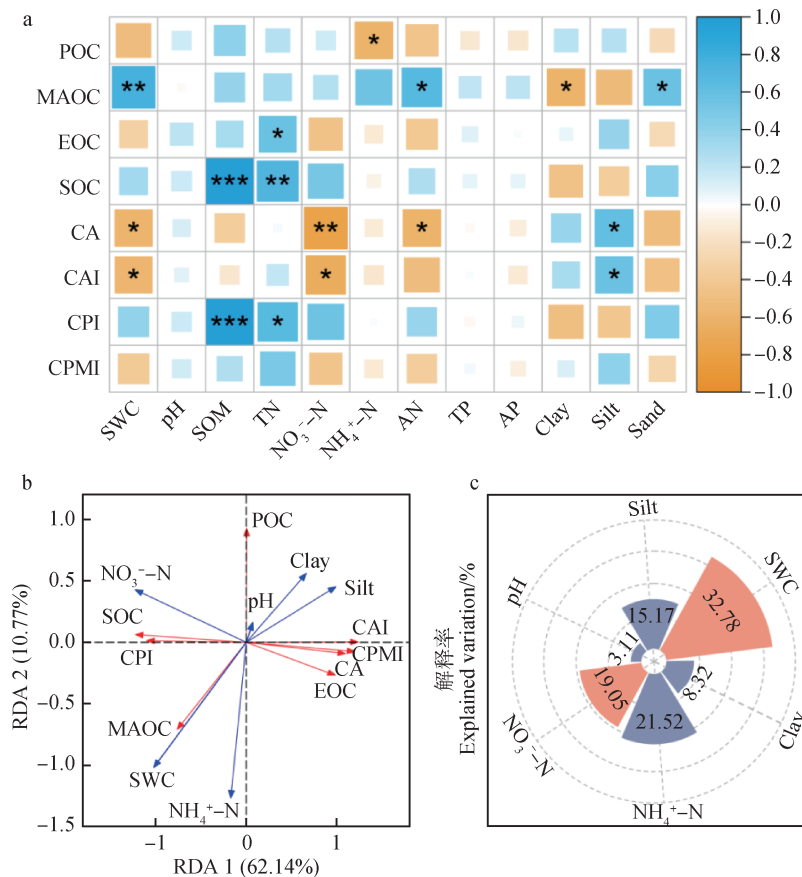


图2 土壤理化性质与土壤碳组分、碳库稳定性指数相关性分析(a),冗余分析(b),层次分割分析(c)

Fig. 2 Correlation analysis of soil physicochemical properties with soil carbon components and carbon pool stability index (a), redundancy analysis (b), and hierarchical partitioning analysis (c)

注:颜色越深表示相关性系数越高,蓝色表示正相关,黄色表示负相关。*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。SWC, 土壤含水量; TN, 土壤全氮; NO_3^- -N, 土壤硝态氮; NH_4^+ -N, 土壤铵态氮; AN, 土壤速效氮; TP, 土壤全磷; AP, 土壤速效磷; Clay, 黏粒; Silt, 粉粒; Sand, 砂粒; POC, 颗粒态有机碳; MAOC, 矿物结合态有机碳; EOC, 易氧化有机碳; SOC, 土壤总有机碳; CA, 土壤碳库活性; CAI, 碳库活性指数; CPI, 碳库指数; CPMI, 碳库管理指数。下同

Note: Darker colors indicate higher correlation coefficients, with blue representing positive correlations and yellow denoting negative correlations. *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$. SWC, soil water content; TN, total nitrogen; NO_3^- -N, nitrate nitrogen; NH_4^+ -N, ammonium nitrogen; AN, available nitrogen; TP, total phosphorus; AP, available phosphorus; Clay, clay content; Silt, silt content; Sand, sand content; POC, particulate organic carbon; MAOC, mineral-associated organic carbon; EOC, readily oxidizable organic carbon; SOC, soil organic carbon; CA, carbon pool activity; CAI, carbon pool activity index; CPI, carbon pool index; CPMI, carbon pool management index. The same as below

3.2 土壤理化性质对有机碳组分、碳库稳定性变化的调控机制

土壤理化性质可以通过团聚体保护、矿物吸附、微生物调控等方面影响有机碳组分及其稳定性^[36-37]。本研究发现,土壤含水量与CA、CAI呈显著负相关,而与MAOC呈极显著正相关,这可能是由于土壤水分含量增加,土壤微生物活性升高,微生物代谢产物或死亡后形成的微生物残体与矿物结合形成了MAOC^[38],而EOC的丧失导致CA与CAI的降低。此外,土壤TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、Clay、Silt等土壤理化性质指标与土壤有机碳组分及碳库稳定性具有显著的正/负相关性,增温与刈割

处理导致的土壤理化性质改变,影响了土壤微生物群落组成、空间分布及酶活性,在一定范围内促进或抑制土壤有机质分解和土壤呼吸碳释放,从而导致土壤有机碳组分及其碳库稳定性发生变化^[39-40]。冗余分析及层次分割结果表明,SWC对土壤有机碳组分及其碳库稳定性影响最大,其次为 NO_3^- -N与 NH_4^+ -N。这可能是因为冬季增温与刈割后影响土壤含水量,进而影响冬季土壤冻结后土壤理化性质变化,氮素作为土壤生态系统中主要养分元素,可以影响地上植物与土壤微生物生长,进而改变土壤中不同有机碳组分间的转化。

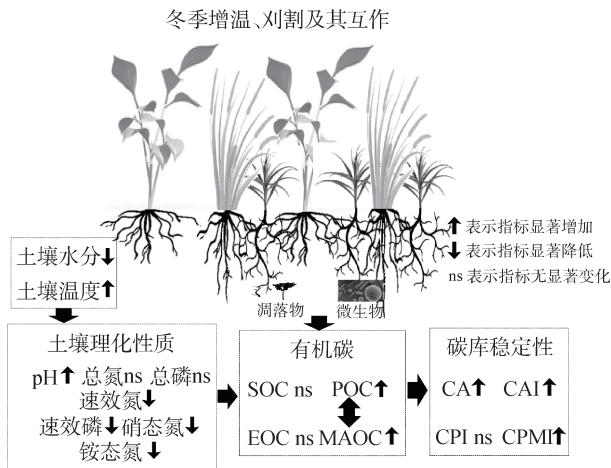


图3 冬季增温、刈割及其互作影响土壤有机碳组分及其碳库稳定性的潜在途径

Fig. 3 Potential pathways through which winter warming, clipping, and their interaction influence soil organic carbon components and the stability of carbon pools

4 结论

本研究分析了冬季增温及刈割后土壤有机碳组分及碳库稳定性变化特征及影响因素,研究发现,增温效应显著影响土壤易氧化有机碳含量与有机碳占比、土壤碳库活度、碳库活度指数及碳库管理指数,而刈割效应显著影响土壤矿物结合态有机碳与颗粒态有机碳含量,刈割与增温交互作用显著影响土壤矿物结合态有机碳含量。土壤含水量与 NO_3^- -N是显著影响有机碳组分与碳库稳定性的土壤理化因子。本研究可为气候变暖及人类活动影响下青藏高原草地冬季土壤有机碳库变化研究提供基础数据及理论依据。

参考文献

- [1] 羿明璇,孙政国,丛鹏飞,等. 草地生态系统功能对气候变化的响应研究进展[J]. 中国草地学报,2023,45(12):112-120
YI M X, SUN Z G, CONG P F, et al. Research progress on the response of grassland ecosystem function to climate change[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(12): 112-120
- [2] 曹晓云,周秉荣,周华坤,等. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展[J]. 干旱气象,2022,40(6):1068-1080
CAO X Y, ZHOU B R, ZHOU H K, et al. Research progress on the impact of climate change on vegetation ecosystem in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(6): 1068-1080
- [3] 王一博,吕明侠,赵海鹏,等. 青藏高原多年冻土区活动层土壤入渗特征及机理分析[J]. 冰川冻土,2021,43(5):1301-1311
WANG Y B, LÜ M X, ZHAO H P, et al. Analysis on soil water infiltration characteristics and mechanism in active layer in permafrost area of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1301-1311
- [4] 张智,孔维龙,汤凌,等. 青藏高原国家公园群区域性主导功能群组识别及管理优化策略[J]. 生态学报,2025,45(6):2545-2557
ZHANG Z, KONG W L, TANG L, et al. Identification of the dominant functional groups and management strategies for the Qinghai-Tibetan Plateau National Park cluster[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2545-2557
- [5] LEE H, ROOMERO J. IPCC, 2023: Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [EB/OL]. <https://ipcc-browser.org/browser/dataset/7567/0>, 2024-03-07/2025-7-6
- [6] 赵广,张扬建. 大气 CO_2 浓度升高对土壤碳库稳定性的影响[J]. 生态学报,2023,43(20):8493-8503
ZHAO G, ZHANG Y J. Effect of elevated CO_2 on the persistence of soil carbon pool[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8493-8503
- [7] 王子滢,李周园,董世魁,等. 近40年青藏高原生态格局演变及其驱动因素[J]. 生态学报,2022,42(22):8941-8952
WANG Z Y, LI Z Y, DONG S K, et al. Evolution of ecological patterns and its driving factors on Qinghai-Tibet Plateau over the past 40 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 8941-8952
- [8] 刘安榕,杨腾,徐炜,等. 青藏高原高寒草地地下生物多样性:进展、问题与展望[J]. 生物多样性,2018,26(9):972-987
LIU A R, YANG T, XU W, et al. Status, issues and prospects of belowground biodiversity on the Tibetan alpine grassland[J]. Biodiversity Science, 2018, 26(9): 972-987
- [9] 马志良. 青藏高原东缘高寒灌丛根系分泌物碳氮输入对增温的响应[J]. 生态环境学报,2020,29(4):643-649
MA Z L. Responses of root exudative carbon and nitrogen inputs to warming in an alpine scrub ecosystem on the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(4): 643-649
- [10] 杨新宇,林笠,李颖,等. 青藏高原高寒草甸土壤物理性质及碳组分对增温和降水改变的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版),2017,53(4):765-774
YANG X Y, LIN L, LI Y, et al. Effects of warming and altered precipitation on soil physical properties and carbon pools in a Tibetan alpine grassland[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(4): 765-774
- [11] 吕汪汪,孙建平,吕静雅,等. 气候变暖对寒区草地土壤有机碳库的影响及其机制研究进展[J]. 生态学报,2024,43(6):1604-1611
LYU W W, SUN J P, LYU J Y, et al. Research progress on effects of climate warming on soil organic carbon pools in frigid grasslands and its mechanisms[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(6): 1604-1611
- [12] MACKELPRANG R, WALDROP M P, DEANGELIS K M,

- et al. Metagenomic analysis of a permafrost microbial community reveals a rapid response to thaw [J]. *Nature*, 2011, 480 (7377):368-371
- [13] WANG Q, LV W W, LI B W, et al. Annual ecosystem respiration is resistant to changes in freeze-thaw periods in semi-arid permafrost [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26 (4): 2630-2641
- [14] EGAN G, CRAWLEY M J, FORNARA D A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613/614:810-819
- [15] KONCZ P, VADÁSZ-BESNYŐI V, CSATHÓ A I, et al. Carbon uptake changed but vegetation composition remained stable during transition from grazing to mowing grassland management [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 304:107161
- [16] 陈万杰. 刈割对大针茅草地群落特征及牧草产量和品质的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2017:1-3
CHEN W J. Effect of mowing on community characteristics and forage yield and quality in stipa grandis steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017:1-3
- [17] 种碧莹. 增温和围栏封育对高寒草原土壤有机碳组分的影响[D]. 兰州:兰州交通大学, 2023:9-10
CHONG B Y. Effects of warming and enclosure on soil organic carbon composition in alpine grassland [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2023:9-10
- [18] FANG H J, CHENG S L, YU G R, et al. Nitrogen deposition impacts on the amount and stability of soil organic matter in an alpine meadow ecosystem depend on the form and rate of applied nitrogen[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65 (4):510-519
- [19] LUO R Y, LUO J F, FAN J L, et al. Responses of soil microbial communities and functions associated with organic carbon mineralization to nitrogen addition in a Tibetan grassland [J]. *Pedosphere*, 2020, 30(2):214-225
- [20] 木塔力甫·吾布力, 马扶林, 刘小伟, 等. 冬季增温和刈割对青藏高原高寒草原土壤生态系统的影响[J]. *草业科学*, 2025, 42 (6):1378-1390
MUTALIFU·WUBULI, MA F L, LIU X W, et al. Effects of winter warming and clipping on the soil ecosystem of the alpine grassland on the Tibetan Plateau [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(6):1378-1390
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 1999: 1-247
LU R K. Soil agricultural chemical analysis methods[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 1-247
- [22] 王雅润, 赵娟, 杨振兴, 等. 不同施肥模式下褐土的有机碳组分及碳固存效应变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(3): 469-481
WANG Y R, ZHAO J, YANG Z X, et al. Organic carbon composition and carbon sequestration function of cinnamon soil as affected by fertilization modes [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(3):469-481
- [23] 钟泽坤. 增温和降雨改变对黄土丘陵区撂荒地土壤碳循环关键过程的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2021:25-26
ZHONG Z K. Effects of experimental warming and precipitation manipulation on the key processes of soil carbon cycle in abandoned farmland of the loess hilly region [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021:25-26
- [24] 刘尧, 于馨, 于洋, 等. R程序包“rdacca. hp”在生态学数据分析中的应用:案例与进展[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(1): 134-144
LIU Y, YU X, YU Y, et al. Application of “rdacca. hp” R package in ecological data analysis: case and progress [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(1):134-144
- [25] 秦文宽, 张秋芳, 敖古凯麟, 等. 土壤有机碳动态对增温的响应及机制研究进展[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(4):403-415
QIN W K, ZHANG Q F, AO G, et al. Responses and mechanisms of soil organic carbon dynamics to warming: a review [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(4):403-415
- [26] 李晓茜, 邹俊亮, 武菊英, 等. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析[J]. *地球与环境*, 2022, 50(1):73-82
LI X H, ZOU J L, WU J Y, et al. Responses of soil respiration and organic carbon to warming and their influencing factors [J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(1):73-82
- [27] 张睿博, 汪金松, 王全成, 等. 土壤颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳对气候变暖响应的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(12):2471-2484
ZHANG R B, WANG J S, WANG Q C, et al. Responses of soil particulate and mineral-associated organic carbon to climate warming: A review [J]. *Progress in Geography*, 2023, 42(12):2471-2484
- [28] 李祎, 李亚晓, 元雯雯, 等. 全球草地退化的成因、修复技术及恢复效果评估研究进展[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 110-129
LI Y, LI Y X, QI W W, et al. Review of causes, restoration techniques, and effectiveness evaluation of global grassland degradation [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46 (11): 110-129
- [29] 王志婷, 刘廷玺, 童新, 等. 不同处理方式对沙丘-草甸草地植被和土壤特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(7):43-52
WANG Z T, LIU T X, TONG X, et al. Effects of different treatments on vegetation and soil characteristics of dune-meadow grassland [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44 (7):43-52
- [30] 许秋月, 何敏, 夏允, 等. 磷添加对森林土壤有机碳影响的研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2024, 19(1):9-15
XU Q Y, HE M, XIA Y, et al. Research progress on effects of phosphorus addition on forest soil organic carbon [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2024, 19(1):9-15
- [31] 陈宗定, 许春雪, 安子怡, 等. 土壤碳赋存形态及分析方法研究进展[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(2):233-244
CHEN Z D, XU C X, AN Z Y, et al. Research progress on frac-

- tion and analysis methods of soil carbon[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2019, 38(2):233-244
- [32] 管光玉, 范燕敏, 武红旗, 等. 不同利用方式土壤颗粒分形特征及其与土壤有机碳库稳定性的关系[J]. *草地学报*, 2016, 24(2):258-262
- GUAN G Y, FAN Y M, WU H Q, et al. The relationship of soil particle fractal characteristics and organic carbon pool stability under different types of utilization[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2):258-262
- [33] 赵轻舟, 王艳芬, 崔骁勇, 等. 草地土壤微生物多样性影响因素研究进展[J]. *生态科学*, 2018, 37(3):204-212
- ZHAO Q Z, WANG Y F, CUI X Y, et al. Research progress of the influence factors of soil microbial diversity in grassland[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(3):204-212
- [34] 张义凡, 陈林, 张蚌蚌, 等. 荒漠草原表层土壤有机碳粒径组分及碳库管理指数特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5):283-290
- ZHANG Y F, CHEN L, ZHANG B B, et al. Characteristics of organic carbon particle size composition and carbon pool management index in surface soil of desert grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):283-290
- [35] 亓伟伟, 牛海山, 汪诗平, 等. 增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究[J]. *生态学报*, 2012, 32(6):1713-1722
- QI W W, NIU H S, WANG S P, et al. Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(6):1713-1722
- [36] 任秀娥, 童成立, 孙中林, 等. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10):2245-2250
- REN X E, TONG C L, SUN Z L, et al. Effects of temperature on organic carbon mineralization in paddy soils with different clay content[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10):2245-2250
- [37] 李娅丽, 何国兴, 柳小妮, 等. 陇中温性荒漠4种草地型土壤有机碳组分及碳库活度变化特征[J]. *草地学报*, 2024, 32(5):1489-1499
- LI Y L, HE G X, LIU X N, et al. Variation characteristics of soil organic carbon fraction and carbon pool activity in four grassland types in the temperate desert of longzhong[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5):1489-1499
- [38] 徐梦, 徐丽君, 程淑兰, 等. 人工草地土壤有机碳组分与微生物群落对施氮补水的响应[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13):2678-2690
- XU M, XU L J, CHENG S L, et al. Responses of soil organic carbon fractionation and microbial community to nitrogen and water addition in artificial grassland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13):2678-2690
- [39] 刘先, 索沛衡, 杜大俊, 等. 连栽杉木人工林参与土壤碳氮转化过程酶活性及其与土壤理化因子的相关性[J]. *生态学报*, 2020, 40(1):247-256
- LIU X, SUO P H, DU D J, et al. Soil carbon and nitrogen transformed enzyme activities in continuously cultivated Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations and their correlations with soil physicochemical factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(1):247-256
- [40] 马群, 白炜, 牟国旭, 等. 增温对高寒沼泽草甸土壤团聚体稳定性及碳氮含量的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(2):547-555
- MA Q, BAI W, MOU G X, et al. Effects of warming on soil aggregate stability and contents of carbon and nitrogen in alpine swamp meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2):547-555

(责任编辑 彭露茜)