#### DOI: 10.20103/j.stxb.202209132602

陈玺洋,潘玉梅,齐志远,王裕,王常慧,张乃莉.北方农牧交错带温性盐碱化草地土壤碳组分对模拟增温的响应机制.生态学报,2023,43(18): 7448-7461.

Chen X Y, Pan Y M, Qi Z Y, Wang G, Wang C H, Zhang N L. The responses of soil organic carbon fractions to manipulative climate warming in a salinealkali grassland of the northern agro-pastoral ecotone. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18):7448-7461.

# 北方农牧交错带温性盐碱化草地土壤碳组分对模拟增 温的响应机制

陈玺洋<sup>1</sup>,潘玉梅<sup>1</sup>,齐志远<sup>2</sup>,王 裕<sup>2</sup>,王常慧<sup>2</sup>,张乃莉<sup>1,3,\*</sup>

1 北京林业大学林学院森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083

2 山西农业大学草业学院,太谷 030801

3 国家林业和草原局黑龙江三江平原沼泽草甸生态系统定位观测研究站, 双鸭山 518000

摘要:中国北方农牧交错带温性盐碱化草地土壤有机碳库对全球气候变暖的响应趋势存在较大不确定性。作为温性盐碱性草地的典型分布区,山西右玉农牧交错带是探索相关研究的理想生境。基于山西农业大学野外观测研究站开顶式气室模拟增温实验平台,通过采集生长旺季土壤样品,探索温性盐碱化草地不同土层有机碳、氮组分对模拟增温的响应与适应机制。结果表明:(1)不同增温处理对土壤有机碳(C)、总氮(N)、颗粒性有机碳(POM-C)和氮(POM-N)、矿物结合态有机碳(MAOM-C)和氮(MAOM-N)、可溶性有机碳(DOC)和氮(DON),以及微生物量碳(MBC)和氮(MBN)等组分无显著影响,但显著降低了MAOM-C/MBC 的比值;(2)除土壤可溶性有机碳和微生物量碳外,土壤碳、氮各组分均随土层深度加深而呈现递减趋势,土壤碳、氮各组分之间的比值,除 MAOM-N/N和 MBC/C外,均随土层深度的增加而呈现显著上升趋势;(3)增温对 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 的影响与土层深度存在明显的交互效应;(4)不同土层氮组分比值对增温的响应与禾草丰度、杂类草丰度、调落物量、土壤 pH 值及土壤含水量等因素有关。其中,调落物量和土壤 pH 值主要影响 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN,禾草丰度与杂类草丰度则调控 POM-N/N 的变化,土壤 pH 值和土壤含水量与 MAOM-N/N 密切相关。综上所述,温性盐碱化草地土壤有机碳、氮组分对短期内气候变暖存在较强的适应性;同时,相较于土壤碳组分,不同土层氮组分比值对增温处理表现出更强的差异性响应。这些结果有助于理解温性盐碱化草地土壤碳库对未来气候变暖的响应与适应格局,为全球气候变暖背景下我国北方脆弱草地生态系统的保育和恢复提供重要的基础性数据。

关键词:全球变暖;土壤碳组分;颗粒性碳组分;矿质结合态碳组分;草地生态系统

## The responses of soil organic carbon fractions to manipulative climate warming in a saline-alkali grassland of the northern agro-pastoral ecotone

CHEN Xiyang<sup>1</sup>, PAN Yumei<sup>1</sup>, QI Zhiyuan<sup>2</sup>, WANG Ge<sup>2</sup>, WANG Changhui<sup>2</sup>, ZHANG Naili<sup>1,3,\*</sup>

1 The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

3 Ecological Observation and Research Station of Heilongjiang Sanjiang Plain Wetlands, National Forestry and Grassland Administration, Shuangyashan 518000, China

**Abstract**: There is great uncertainty in the responses of soil organic carbon (C) to climate warming in the saline-alkali grassland in northern China. In this study, we explored the responses of soil organic C and nitrogen (N) fractions in

基金项目:北京林业大学大学生创新创业训练计划(X202110022025);山西农业大学高层次人才专项资助(2021XG008);山西省重点实验室项目(202104010910017)

收稿日期:2022-09-13; 网络出版日期:2023-05-08

\* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangnaili@ bjfu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

different soil layers to the manipulative warming using a 5-year continuous warming experiment in a saline-alkali grassland of Youyu, Shanxi Province. The experiment with a randomized block design had been conducted since 2017 at the Youyu Loess Plateau Grassland Ecosystem Research Station of Shanxi Agricultural University, where open-top air chambers (OTCs) were established to simulate climate warming. Our results showed that warming treatments did not significantly affect soil organic C, total N, particulate organic C (POM-C) and N (POM-N), Mineral-associated organic C (MAOM-C) and N (MAOM-N), dissolved organic C (DOC) and N (DON) and microbial biomass C (MBC) and N (MBN) fractions. Moreover, the ratio between soil C and N fractions, with the exception of MAOM-C/MBC which decreased owing to warming treatments, did not significantly change with warming treatments. However, we found that soil depth had a significant effect on soil organic C and N fractions, except for DOC and MBC, where soil C and N fractions showed a decreasing trend with soil depth. In contrast, the ratio between soil C and N fractions, except for MAOM-N/N and MBC/C, increased with soil depth. Warming and soil depth interactively affected POM-N/MBN and MAOM-N/MBN, suggesting a discrepancy between MBN and POM-N or MAOM-N from different soil layers in response to warming. Shifts in the ratio of N fractions of different soil layers under warming treatment may be attributable to shifts in the grass abundance, forb abundance, litter mass, soil pH and soil moisture. Among them, litter mass and soil pH pronouncedly associated with POM-N/MBN and MAOM-N/ MBN, grass abundance and forb abundance significantly related to POM-N/N, and soil physicochemical properties such as soil pH and soil moisture correlated with MAOM-N/N. Overall, the results as mentioned above highlight the adaptation of soil organic C and N fractions to short-term climate warming in the saline-alkali grassland. In addition, the ratio of N fractions in different soil layers showed a stronger response to warming treatment compared to soil C fractions. These findings could improve our understanding for the patterns of soil organic C pool in response to climate warming in the saline-alkali grassland, and provide support for the conservation and restoration of fragile grassland ecosystems in northern China.

Key Words: global warming; soil organic carbon fractions; particulate organic matter; mineral-associated organic matter; grassland ecosystem

全球气候变暖现已成为广泛认同的事实。政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次气候评估报告指出,1880—2012 年全球平均地表温度上升 0.85℃,且上升速率 逐年增加,1951—2012 年六十年间地表温度上升速率几乎是 1880 年的两倍<sup>[1]</sup>。气温的升高给全球陆地生态 系统功能带来巨大的影响,深刻影响土壤碳库格局与动态,作为陆地生态系统最大的碳库,土壤碳库的反馈同 样会给气候变暖趋势造成深远的影响<sup>[2]</sup>。

温度升高会引发地表植物生理生长、土壤碳周转和养分矿化等一系列变化,直接或间接地影响土壤碳库储量<sup>[3]</sup>。一方面,温度升高会促进植物生产力,进而增加土壤有机碳的输入<sup>[4-5]</sup>;另一方面,增温会增强土壤有机碳的矿化,进而加速土壤有机碳的释放<sup>[6-7]</sup>。因而,土壤有机碳组分对气候变暖的响应结果取决于二者之间的权衡。然而,近年来的研究表明土壤有机碳不同组分对气候变暖的响应存在较大的差异:土壤总有机碳储量相对稳定<sup>[6,8]</sup>,而土壤活性有机碳组分则对气候变暖的响应较为敏感<sup>[9]</sup>。同时,大量研究表明,土壤有机碳组分随土层深度呈现明显的分布特征。土壤有机碳、氮更多地分布于表层土壤,随土层深度增加,其含量将逐渐降低<sup>[10]</sup>。因此,可以预知的是不同土层深度、不同类型的土壤有机碳组分对气候变暖响应可能存在明显差异,表层土壤有机碳活性组分的响应可能更为敏感<sup>[11]</sup>。此外,不同地区气候条件的差异也会影响增温对土壤有机碳含量的作用结果<sup>[12]</sup>。

中国北方农牧交错带草地面积约为 50 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,占全国草地面积近五分之一,是我国重要的草地生态 系统类型之一<sup>[13-14]</sup>。近年来,随着农牧业发展,我国北方农牧交错带草地生态系统大面积出现盐碱化问 题<sup>[15]</sup>。在自然生态系统中,受盐碱化影响,土壤碳的释放可能受到明显抑制,进而影响土壤有机碳含量<sup>[16]</sup>。 尽管早期研究报道指出气候变暖会通过促进地上植被生长或地下微生物群落活动等方式对土壤有机碳组成 及含量产生显著影响<sup>[17-18]</sup>。然而,盐碱化生态系统植物和土壤微生物响应机制可能更为复杂,受到盐碱化抑制的土壤微生物类群对增温可能存在较强的适应性,因此盐碱化生态系统对增温的响应可能更大程度上源于地上植被生长。研究基于连续 5a 的模拟增温实验,旨在厘清气候变暖背景下北方农牧交错带温性盐碱化草地土壤有机碳组分的响应与适应。拟验证的科学假设包括:1)北方农牧交错带盐碱化草地土壤有机碳活性组分(如颗粒有机碳、微生物量碳和可溶性有机碳)对增温处理的响应更为敏感;2)增温处理对表层土壤有机碳组分含量的影响强于深层土壤有机碳组分;3)考虑到盐碱化土壤对 CO<sub>2</sub>释放的限制,增温处理对土壤有机碳活性组分的促进可能主要通过增加地上植被生长的间接途径。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究样地设置在山西省右玉县山西农业大学农牧交错带草地生态系统野外观测研究站(39.28°N, 112.29°E)。研究样地所在区域海拔1348 m,属于大陆性季风气候,年均气温为4.7℃,最高气温22.4℃,最低 气温-17℃,年均降水量为435 mm。该研究区域土壤类型为钙栗土,pH 约为8.7,属于中度盐碱化草地;优势 植物物种包括羊草(Leymus chinensis (Trin.) Tzvel.)、赖草(Leymus secalinus (Georgi) Tzvel.)和克氏针茅(Stipa capillata L.)。

1.2 实验设计与样品采集

2017年,通过设置不同规格的开顶式气室模拟增温,探索全球变暖对右玉农牧交错区盐碱化草地的影响。控制实验采用随机区组设计,通过改变开顶式气室(open top chamber, OTC)高度实现增温梯度设置, OTC高度分别为0、0.4、0.6、0.8、1 m,倾角为60°,分别对应的增温处理编号为CK、W1、W2、W3、W4。每个处理设置5个重复,分别位于5个不同的区组。2021年8月,利用三点取样法进行土壤样品的采集,使用土钻(d = 3 cm)分别在OTC内0—10、10—20、20—30、30—40 cm的土壤分层取土,每层取3钻土壤,充分混合后过2 mm 筛以去除可见根及石块。所有采集、过筛土壤样品分为两份,其中一份在室温下风干,并再次去除风干土壤中的 细根等植物组分,用于土壤碳组分的测定;另一部分鲜土存储于4℃用于土壤微生物量等指标的测定。

1.3 土壤有机碳组分测定

采用湿筛法对土壤样品碳组分进行分离测定。取 20 g 风干过筛的土壤,用六偏磷酸钠溶液浸提后,使用 53 µm 筛子对土壤溶液进行筛分,将土壤分离为土壤颗粒有机物(particulate organic matter, POM)和矿物结合 态有机物(Mineral-associated organic matter, MAOM),分离后的溶液置于烘箱内于 60℃烘干,去酸处理后研 磨。采用元素分析仪(Elementar vario MACRO cube,德国)测定土壤总碳(soil organic carbon, C)、总氮(total organic nitrogen, N)、颗粒有机碳(POM-C)、氮(POM-N)和矿物结合态有机碳(MAOM-C)、氮(MAOM-N)含量。土壤可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和氮(dissolved organic nitrogen, DON)含量采用硫酸 钾浸提法测定。

采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤微生物量,称取 10 g 鲜土 2 份,一份进行氯仿熏蒸处理,另一份作为对照, 两份土壤均放置于 25℃培养箱中黑暗培养 24 h。之后加入 25 mL 0.5 mol/L K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>浸提液往返振荡 30 min, 吸取 1 mL 浸提液用于总有机碳分析仪的测定(Elementar vario,德国)。土壤微生物量碳、氮含量采用如下公 式计算: $B_{c(n)} = F_{c(n)} / k_{c(n)}$ 。其中, $F_{c(n)}$ 为熏蒸土壤与对照土壤浸提液碳(氮)含量的差值; $k_c$ 为 0.38,为微生 物量碳校正系数<sup>[19]</sup>;而 $k_n$ 为 0.54,为微生物量氮校正系数<sup>[19]</sup>。

1.4 土壤理化指标测定

实验样地空气温度、湿度和降水量采用 EM50 数据记录仪测定。土壤含水量用烘干法测定,称取 10 g 鲜 土置于 105℃烘干至恒重,称量干土重量用以计算土壤含水量。土壤 pH 的测定采用 1:2.5 的土水体积比制备 待测液,之后利用 pH 电位计测定。

1.5 植物生物量测定

植物生物量测定采用收获法。2021年8月中旬,在生长旺季,在每个小区随机选择1个(1m×0.2m)样

方,用剪刀将植物分种齐地面剪下地上部分,分类后装入信封带回实验室后,放入恒温烘箱,在105℃杀青 30 min之后,在65℃烘干至恒重(约48 h),之后称量、并计算每个 OTC 内总的地上生物量。地上植物多样性 调查采用实地踏查法,记录采集样方内高等植物种类组成及数量。

## 1.6 数据处理

数据的统计分析和绘图在 R 4.0.3 软件(R Core Team, 2020)中进行,采用 lme4 包的 glmer 函数拟合了广 义混合效应模型来研究不同增温处理、土层深度及二者的交互作用对不同碳组分的影响,其中不同增温处理 和土层深度为固定效应,实验小区为随机效应,并用 Car 包的 Anova 函数计算其差异显著性。不同碳组分之 间的差异性用 Kruskal-Wallis 非参数检验方法来实现;进一步利用 Wilcoxon 检验查看不同处理之间各碳组分 的差异,使用 R 软件的 wilcox.test 函数来实现结果,显著性水平设定为 α = 0.05。植物群落和土壤理化因子 与各碳组分的相关性用 Hmisc 包的 rcorr 函数完成;用 scale 函数进行数据标准化,去除共线性因子后,构建线 性回归模型,用前向逐步选择的方法进行模型筛选,使用 stepAIC 函数来实现结果,最后计算植物群落和土壤 理化性质对不同碳组分比值的解释量。所有图利用 ggplot2 包绘制。

#### 2 结果与分析

2.1 温性盐碱化草地模拟增温对其土壤理化因子及土壤碳、氮各组分的影响

温度监测数据结果显示,各处理具有一定增温效果,在生长旺季(即取样时期),W1、W2 和 W3 的增温幅 度在 0.1—0.2℃,其中 W4 的增温效果最强,和对照相比增温幅度达到 1℃。基于连续 5a 的增温模拟实验,发 现土壤 pH 随着增温处理强度的增加呈现一定程度的升高趋势,但并未达到统计学的显著水平;同时,增温处 理并未显著改变土壤含水量(图 1)。基于植被调查数据,发现连续增温处理降低了地上植被总丰度(F = 1.606; P<0.05)和禾草丰度(F=1.990; P<0.05),尤其是 W1 和 W4 增温处理显著低于对照;而增温处理增加 了杂类草丰度(F=0.869; P<0.05),尤其是 W3 增温处理显著高于对照。增温处理一定程度地降低了地上植 被物种数(F=0.697; P > 0.05)、总生物量(F=0.832; P > 0.05)和凋落物输入量(F=0.219; P > 0.05),但均 未达到统计学上的显著水平。

广义混合效应模型分析结果表明(表1),不同增温处理对土壤有机碳(C)、总氮(N)、颗粒性有机碳 (POM-C)和氮(POM-N)、矿物结合态有机碳(MAOM-C)和氮(MAOM-N)、可溶性有机碳(DOC)和氮(DON)

		Table 1 E	ffects of war	rming and s	oil depths o	n soil C and	N fractions	i		
影响田子		С		Ν	PC	OM-C	PC	M-N	MA	OM-C
Impact factors	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р
增温处理 Warming	0.007	0.934	0.196	0.658	0.915	0.339	1.690	0.194	0.921	0.337
土层深度 Soil depth	216.459	< 0.001	170.980	< 0.001	244.334	< 0.001	136.265	< 0.001	244.433	< 0.001
增温处理×土层深度 Warming×soil depth	1.522	0.677	7.431	0.059	0.509	0.917	1.133	0.769	0.042	0.998
影响因子	MA	OM-N	Ε	OOC	DON		MBC		MBN	
Impact factors	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р	Chisq- value	Р
增温处理 Warming	0.438	0.508	0.270	0.603	1.457	0.227	0.096	0.757	2.184	0.139
土层深度 Soil depth	303.121	< 0.001	7.693	0.053	63.181	< 0.001	9.371	0.025	154.315	< 0.001
增温处理×土层深度 Warming×Soil depth	1.306	0.728	2.467	0.481	1.140	0.767	1.752	0.625	6.614	0.085

表 1 不同增温处理和土层深度对土壤碳、氮组分的影响

Chisq-value:卡方值 Chi-square value;C:土壤总碳含量 Total soil organic carbon(C);N:土壤总氮含量 Total organic nitrogen(N);POM-C:土壤 颗粒有机碳 Particulate organic C;POM-N:土壤颗粒有机氮 Particulate organic N;MAOM-C:土壤矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic C; MAOM-N:土壤矿物结合态有机氮 Mineral-associated organic N;DOC:土壤可溶性有机碳 Dissolved organic C;DON:土壤可溶性有机氮 Dissolved organic N;MBC:土壤微生物量碳 Microbial biomass C;MBN:土壤微生物量氮 Microbial biomass N



图1 不同增温处理和土层深度对土壤理化性质的影响

Fig.1 Effects of warming and soil depths on soil physicochemical properties

CK: 对照 Control; W1: 增温处理 1(0.4 m) Warming treatment 1; W2: 增温处理 2(0.6 m) Warming treatment 2; W3: 增温处理 3(0.8 m) Warming treatment 3; W4: 增温处理 4(1 m) Warming treatment 4

和微生物量碳(MBC)和氮(MBN)等碳、氮组分无显著影响(图 2)。然而,模拟增温显著降低了 MAOM-C/MBC 的比值,并且增温对 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 的影响与土层深度存在明显的交互效应(表 2)。进一步分析发现,如图 3 所示,增温处理后 10—20 cm 的土层的 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 比值均低于 对照,而其他土层深度则并未发现类似响应趋势;在 20—30 cm 的土层,增温处理 W3 和 W4 土壤 MAOM-N/MBN 比值显著高于对照。

2.2 温性盐碱化草地不同土层深度土壤理化因子及其碳、氮组分的分布格局

如图 1 所示,不同土层深度的土壤 pH 值的变化趋势明显,其随土层深度的增加呈现显著递增的趋势,即 盐碱化程度随土层深度加深而升高;而土壤含水量随土层深度增加表现出一定程度的上升趋势,但并未达到

7452







C:土壤总碳含量 Total soil organic carbon(C);N:土壤总氮含量 Total organic nitrogen(N);POM-C:土壤颗粒有机碳 Particulate organic C;POM-N:土壤颗粒有机氮 Particulate organic N;MAOM-C:土壤矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic C;MAOM-N:土壤矿物结合态有机氮 Mineral-associated organic N;DOC:土壤可溶性有机碳 Dissolved organic C;DON:土壤可溶性有机氮 Dissolved organic N;MBC:土壤微生物量碳 Microbial biomass C;MBN:土壤微生物量氮 Microbial biomass N

统计学上的显著水平(图1)。

广义混合效应模型的结果表明(表1),除土壤可溶性有机碳和微生物量碳外,土壤碳、氮各组分均随土层 深度加深而呈现递减趋势(图4),其差异均达到统计学上的显著水平;如图4所示,土壤可溶性有机碳和微生 物量碳随土层加深则并未表现出明显差异。如表2广义混合效应模型分析所示,土壤碳、氮各组分之间的比





值,除 MAOM-N/N 和 MBC/C 外,均随土层深度的增加而呈现显著上升趋势。

2.3 影响温性盐碱化草地土壤碳组分变化的驱动因素

基于相关分析结果发现,除土壤总有机碳和可溶性有机氮外,土壤碳、氮各组分与地上植被生物量、物种数、总丰度、禾草丰度、杂类草丰度、优势物种(赖草)的相对比例和凋落物输入量均无显著的相关关系

			WITT I MONT		idan nac nin Si							
影响因子	C	N	POM	-C/N	POM	-C/C	-MOA	N/N	MAOM	-C/N	MAON	A-C∕C
Impact factors	Chisq-value	Р	Chisq-value	Ρ	Chisq-value	Р	Chisq-value	Ρ	Chisq-value	Р	Chisq-value	Р
增温处理 Warming	0.098	0.755	0.010	0.921	0.868	0.352	0.677	0.411	0.894	0.344	1.050	0.306
土层深度 Soil depth	82.299	< 0.001	147.566	< 0.001	153.229	< 0.001	18.957	< 0.001	21.721	< 0.001	136.174	< 0.001
增温处理 × 土层深度 Warming × Soil depth	7.334	0.062	0.545	606.0	0.610	0.894	7.443	0.059	2.938	0.401	0.495	0.920
影响因子	MAOM	N∕N-]	D0(	2/C	D01	N/N	MBC/	MBN	MBC	/C	MBI	N/N
Impact factors	Chisq-value	P	Chisq-value	Ρ	Chisq-value	Р	Chisq-value	Ρ	Chisq-value	$^{b}$	Chisq-value	Ρ
增温处理 Warming	0.027	0.870	0.197	0.657	2.222	0.136	1.037	0.309	0.171	0.680	2.537	0.111
土层深度 Soil depth	4.618	0.202	124.092	< 0.001	9.462	0.024	14.125	0.003	4.381	0.223	43.625	< 0.001
增温处理 × 土层深度 Warming × Soil depth	5.915	0.116	2.385	0.496	6.119	0.106	1.513	0.679	1.270	0.736	1.626	0.654
影响因子	POM-C	//MBC	N-MO4	I/MBN	MAOM	.C/MBC	MAOM-I	N/MBN	MBC/I	DOC	MBN	/DON
Impact factors	Chisq-value	Р	Chisq-value	Ρ	Chisq-value	Р	Chisq-value	Ρ	Chisq-value	Р	Chisq-value	Ρ
增温处理 Warming	5.799	0.016	0.025	0.875	4.427	0.035	0.000	0.991	0.045	0.833	2.766	0.096
土层深度 Soil depth	19.011	< 0.001	90.269	< 0.001	18.624	< 0.001	65.345	< 0.001	12.517	0.006	62.690	< 0.001
增温处理 × 土层深度 Warming × Soil depth	7.763	0.051	12.803	0.005	5.091	0.165	12.312	0.006	1.400	0.705	6.438	0.092

表 2 不同增温处理和土层深度对土壤碳、氮组分比值的影响

http://www.ecologica.cn

18 期

7455



Fig.4 Effects of soil depths on C and N fractions

(图 5)。土壤总有机碳与植被总丰度呈正相关关系,而与植被物种数和土壤 pH 值呈负相关关系;土壤可溶性有机氮与地上植被物种数和土壤 pH 值呈显著的负相关关系(图 5)。除土壤 C/N、DOC/C 和 POM-N/MBN 的比值外,土壤碳、氮各组分与土壤 pH 值均呈负相关关系;除 MAOM-C/C 和 MAOM-N/N 与土壤含水量呈显著的负相关关系,土壤碳、氮各组分与土壤含水量并未发现显著的相关性(图 5)。

基于回归分析结果发现,禾草丰度、杂类草丰度、土壤 pH 值、赖草的相对丰度和凋落物量对 POM-N/N 的 变化具有较高的解释量,物种数、土壤含水量和优势物种(赖草)相对生物量对 POM-N/N 的解释量则较低 (图 6)。对 MAOM-N/N 而言,土壤理化性质的解释量相对较高,而植物物种数、凋落物量、赖草相对丰度和相

7457



图 5 土壤碳、氮组分与植物和土壤理化因子的相关性分析

## Fig.5 Correlation of soil C and N fractions with plant and soil physicochemical properties

\*,P<0.05; \*\*,P<0.01; \*\*\*,P<0.001; gross abundance:总丰度; grass abundance:禾草丰度; forb abundance:杂类草丰度; proportion LS G: 赖草的相对丰度; litter mass:凋落物量; dry mass:植物生物量; proportion LS D:赖草的相对生物量; richness:植物物种数; pH:土壤 pH 值 Soil pH; SM:土壤含水量 Soil moisture; C:土壤总碳含量 Total soil organic carbon(C); N:土壤总氮含量 Total organic nitrogen(N); POM-C:土壤颗粒 有机碳 Particulate organic C; POM-N:土壤颗粒有机氮 Particulate organic N; MAOM-C:土壤矿物结合态有机碳 Mineral-associated organic C; MAOM-N:土壤矿物结合态有机氮 Mineral-associated organic N; DOC:土壤可溶性有机碳 Dissolved organic C; DON:土壤可溶性有机氮 Dissolved organic N; MBC:土壤微生物量碳 Microbial biomass C; MBN:土壤微生物量氮 Microbial biomass N;绿色,正相关;橙色,负相关

对生物量的解释量则较低(图6)。凋落物量和土壤 pH 值对 POM-N/MBN 变化的解释量较高,而土壤含水量 与禾草丰度的解释量则较低(图6)。此外,凋落物量也是 MAOM-N/MBN 的主要解释量,禾草丰度与杂类草 丰度对其的解释量最低(图6)。

## 3 讨论

## 3.1 温性盐碱化草地土壤有机碳、氮组分对增温处理的适应性响应

土壤微生物量碳、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳等组分与土壤微生物的活动及其碳转化效率密不可分<sup>[12,21]</sup>。温度的增加能够促进土壤微生物的活动,进而影响土壤有机碳活性组分的分布。因此,北方农牧交





Fig.6 The regression analysis of soil N fraction ratio with plant and soil physicochemical properties

错带温性盐碱化草地土壤有机碳活性组分可能对增温处理的响应更为敏感。然而,与本研究科学假设相悖, 连续 5a 的增温处理并未显著影响盐碱化草地土壤微生物量碳、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳等活性组分。 已有研究表明,土壤微环境(土壤 pH 值、土壤含水量、空气等)的改变会显著影响土壤有机碳的稳定性,导致 土壤有机碳含量发生明显变化<sup>[21]</sup>。而本研究发现增温处理并未显著改变土壤 pH 值等土壤环境因子,说明土 壤微环境在模拟增温处理下的相对稳定性可能是土壤有机碳、氮组分不敏感响应的原因之一。但是,由于本 项研究中仅对特定时段的含水量和 pH 值进行了测定,则需要后续拓展较长时间的观测数据对上述结论加以 验证。

增温对土壤有机碳含量的影响可能受到区域环境的制约,研究发现低温环境(如本研究区域年平均气温 为4.7℃)往往不会显著改变土壤有机碳含量,低温环境下,增温促进植物生长、有机质输入等固碳过程与加 强微生物活性而增加的土壤有机碳释放过程可能会更容易达到一种平衡,从而表现出生态系统对增温的适应 性响应<sup>[22]</sup>。增温对土壤有机碳变化的影响还与增温持续时间有关。已有研究证明,短期增温处理(≤3a)对 草地生态系统土壤碳组分含量具有促进作用,但该促进作用在长期增温处理(≥3a)下消失<sup>[23]</sup>。这可能是土 壤有机质和地上植被对增温处理适应性响应的结果。一方面,温度升高将导致土壤有机质的分解速率加快; 另一方面,增温导致大气 CO<sub>2</sub>浓度升高,提高了地上植被的净光合效率,从而补偿了流失的土壤有机碳<sup>[24]</sup>。 在长期增温处理背景下,两种作用的共同影响导致土壤有机碳、氮组分对增温处理产生适应性响应,使土壤微 生物量碳、颗粒有机碳和矿物结合态有机碳等组分对增温处理的响应不显著。

连续 5a 的长期增温结果显示,虽然增温处理对北方农牧交错带草地土壤有机碳、氮组分含量的影响不明显。但对土壤碳、氮组分比值已产生了一定影响,特别是对 MAOM-C/MBC 影响显著,表明微生物量碳与矿质结合态有机碳对增温的响应敏感性存在差异。本研究发现 MAOM-C/MBC 比值在增温处理情境下是显著增加的,说明 MAOM-C 的增加幅度相较于 MBC 更为显著。而矿物结合态有机碳以微生物源组分(包括土壤微生物产物及其残体物质)为主,可通过与土壤矿物质结合延缓分解<sup>[25]</sup>。增温处理可能一定程度地加速了土壤微生物量活性组分的周转,增加微生物残体碳的累积,由此促进矿物结合态有机碳的相对比例。这一结果表明短期内增温虽然没有对土壤碳、氮组分产生显著影响,但可能已引起土壤内部各碳、氮组分间的相互转化,这将会给土壤有机碳带来更为复杂的影响。

## 3.2 温性盐碱化草地不同土层有机碳、氮组分对增温处理的差异性响应

本研究发现土壤有机碳、氮组分随着土层加深呈现明显的递减趋势,这与以往研究结果一致<sup>[26-28]</sup>。然而,土壤可溶性有机碳和微生物量碳随土层深度变化不显著。在自然环境中,土壤可溶性有机碳主要来源于 植物凋落物、微生物生物量、土壤腐殖质以及根系分泌物等途径,其含量主要受生物因素(凋落物数量、质量、 类型和生物分解者等)和非生物因素(温度、降水、土壤微环境等)两方面的影响<sup>[29-30]</sup>。一般情况下,土壤可 溶性有机碳含量随土层深度增加而降低,但本研究结果发现土壤可溶性有机碳并未呈现明显的垂直分布特 征。这可能与研究区域较高的土壤 pH 值有关。已有研究表明,土壤可溶性有机碳含量与土壤 pH 值呈正相 关<sup>[31-32]</sup>。在本实验中,随土层深度增加,土壤 pH 呈现显著递增趋势,这可能促进土壤可溶性有机碳在深层 土壤中的积累,使其随土层深度的变化不显著。在高盐碱化土壤中,微生物的活性一般会受到抑制<sup>[33-34]</sup>。北 方农牧交错带温性盐碱化草地属于中度盐碱化土壤,随着土层深度增加,pH 值显著增加,说明深层土壤中微 生物量的累积可能会受到抑制。然而,本研究发现土壤微生物量并未随土层变化而变化,说明还有其他因素 影响土壤微生物量碳的垂直分布格局。本研究发现土壤含水量随土层深度增加表现出一定程度的上升趋势, 这可能缓解了高土壤盐度对微生物的抑制作用<sup>[35]</sup>。此外,盐碱化草地土壤环境复杂,一些本研究尚未检测的 生物和非生物因素也可能影响土壤微生物量的累积,最终导致土壤微生物量碳含量在不同土层呈现的差异 不大<sup>[36-38]</sup>。

值得注意的是,虽然除 MAOM-C/MBC 外,增温处理对土壤有机碳、氮各组分比值的影响均不显著,但增 温对 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 的影响与土层深度表现出明显的交互效应。不同土层对增温处理响应 的差异性可能由两种因素导致。一方面,增温会显著提高表层土壤温度,降低土壤含水量,直接影响土壤有机 碳、氮的积累,该效应随土层深度增加而降低<sup>[39-40]</sup>。表层土壤温度上升促进了微生物量氮的积累,但对颗粒 有机氮和矿物结合态有机氮无显著影响,随土层深度增加,该促进作用可能随之降低,土壤微生物量氮含量下 降,POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 的比值显著上升。另一方面,增温通过改变地上植物生长和凋落物输入 量,从而间接影响土壤理化性质、并作用于土壤有机碳、氮的累积<sup>[41-42]</sup>;在不同土层、不同组分的响应存在差 异的情况下,就会表现出上述不同土层 POM-N/MBN 比值对增温处理的差异性响应。本研究结果表明,凋落 物量是 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 的主要解释量,而土壤 pH 的解释量仅次于前者。说明增温处理一定 程度地降低了表层土壤凋落物输入量,影响了土壤 pH 值,使土壤微生物量氮含量降低。随土层深度增加,增 温作用递减,土壤 pH 值显著上升,微生物活性受到抑制,土壤微生物量氮显著降低,POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 的比值显著上升。基于上述结果,本研究发现增温与土层深度的交互效应主要影响土壤活性氮组分 的比值,但对活性碳组分的比值均无显著影响,表明温性盐碱化草地土壤活性氮组分对增温的响应相对碳组 分更为敏感。

## 4 结论

本研究通过连续 5a 的增温实验,探索了全球气候变暖对北方农牧交错带温性盐碱化草地不同土层土壤 有机碳、氮组分的作用机制。研究结果表明,不同增温处理对土壤有机碳(C)、总氮(N)、颗粒性有机碳 (POM-C)和氮(POM-N)、矿物结合态有机碳(MAOM-C)和氮(MAOM-N)、可溶性有机碳(DOC)和氮(DON) 和微生物量碳(MBC)和氮(MBN)等碳、氮组分无显著影响,说明温性盐碱化草地土壤有机碳、氮组分对增温 处理存在适应性响应。增温处理对温性盐碱化草地土壤 POM-N/MBN 和 MAOM-N/MBN 比值的影响与土层 深度存在明显的交互效应,说明相比于土壤碳各组分,土壤活性氮组分的差异性响应可能更为突出。北方农 牧交错带温性盐碱化草地面积广泛,是我国重要的草地生态系统,具有较强的恢复潜力和固碳能力,加强其对 气候变化响应与适应机制研究,能够更好地了解全球气候变化背景下我国北方脆弱草地生态系统土壤碳汇的 变化情况。

#### 参考文献(References):

- [1] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [2] 金碧洁, 张彬. 增温对土壤生态系统多重功能性影响的元分析. 土壤通报, 2020, 51(4): 832-840.
- [3] 张仲胜,李敏,宋晓林,薛振山,吕宪国,姜明,武海涛,王雪宏.气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展.土壤 学报,2018,55(2):273-282.
- [4] Manning P, de Vries F T, Tallowin J R B, Smith R, Mortimer S R, Pilgrim E S, Harrison K A, Wright D G, Quirk H, Benson J, Shipley B, Cornelissen J H C, Kattge J, Bönisch G, Wirth C, Bardgett R D. Simple measures of climate, soil properties and plant traits predict national-scale grassland soil carbon stocks. Journal of Applied Ecology, 2015, 52(5): 1188-1196.
- [5] Chang J F, Ciais P, Gasser T, Smith P, Herrero M, Havlík P, Obersteiner M, Guenet B, Goll D S, Li W, Naipal V, Peng S S, Qiu C J, Tian H Q, Viovy N, Yue C, Zhu D. Climate warming from managed grasslands cancels the cooling effect of carbon sinks in sparsely grazed and natural grasslands. Nature Communications, 2021, 12: 118.
- [6] Liu S S, Yang Y H, Shen H H, Hu H F, Zhao X, Li H, Liu T Y, Fang J Y. No significant changes in topsoil carbon in the grasslands of Northern China between the 1980s and 2000s. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1478-1487.
- [7] 常帅, 于红博, 曹聪明, 马梓策, 刘月璇, 李想. 锡林郭勒草原土壤有机碳分布特征及其影响因素. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1355-1366.
- [8] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Smith P, Mohammat A, Wang S P, Wang W. Soil carbon stock and its changes in Northern China's grasslands from 1980s to 2000s. Global Change Biology, 2010, 16(11): 3036-3047.
- [9] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.
- [10] 张雄伟,李刚,董宽虎,赵祥.山西主要草地类型土壤有机碳储量及其垂直分配特征.中国草地学报, 2020, 42(1): 141-146.
- [11] 陈新月,姚晓东,曾文静,王娓.北方农牧交错带草地土壤微生物量碳空间格局及驱动因素.北京大学学报:自然科学版,2021,57(2): 250-260.
- [12] 李晓菡, 邹俊亮, 武菊英, 阚海明, 庞卓, 张国芳, 胡恭任. 土壤呼吸和有机碳对增温的响应及其影响因素分析. 地球与环境, 2022, 50 (4): 471-480.
- [13] 方精云,郭兆迪,朴世龙,陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算.中国科学:D辑:地球科学, 2007, 37(6): 804-812.
- [14] 何立环,董贵华,王伟民,明珠.中国北方农牧交错带 2000—2010 年生态环境状况分析.中国环境监测, 2014, 30(5): 63-68.
- [15] 车文峰,李帅,穆光远.山西省盐碱地资源调查研究及其开发利用.科技情报开发与经济,2012,22(1):106-109.
- [16] Zhao Y G, Zhang F H, Yang L, Wang D, Wang W C. Response of soil bacterial community structure to different reclamation years of abandoned salinized farmland in arid China. Archives of Microbiology, 2019, 201(9): 1219-1232.
- [17] Chen Z, Liu J Y, Li L, Wu Y P, Feng G L, Qian Z H, Sun G Q. Effects of climate change on vegetation patterns in Hulun Buir Grassland. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2022, 597: 127275.
- [18] 王怀海,黄文达,何远政,牛亚毅,朱远忠. 短期增温和降水减少对沙质草地土壤微生物量碳氮和酶活性的影响. 中国沙漠, 2022, 42 (3): 274-281.
- [19] Anderson J P E, Domsch K H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. Soil Biology and

7461

Biochemistry, 1978, 10: 215-221.

- [20] Brookes P C, Landman A, Pruden G and Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17: 837-842.
- [21] 陈心桐,徐天乐,李雪静,赵爱花,冯海艳,陈保冬.中国北方自然生态系统土壤有机碳含量及其影响因素.生态学杂志,2019,38(4): 1133-1140.
- [22] 张宝林,江世高,张春萍,李旭东,特木其勒图,庄光辉,赵建,牛得草.贺兰山西坡草地土壤碳特征及潜在退化损失分析.草业科学, 2017,34(11):2200-2210.
- [23] Wang N, Quesada B, Xia L L, Butterbach-Bahl K, Goodale C L, Kiese R. Effects of climate warming on carbon fluxes in grasslands- A global meta-analysis. Global Change Biology, 2019, 25(5): 1839-1851.
- [24] 黄文华, 王树彦, 韩冰, 焦志军, 韩国栋. 草地生态系统对模拟大气增温的响应. 草业科学, 2014, 31(11): 2069-2076.
- [25] 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. Global Change Biology, 2020, 26(1): 261-273.
- [26] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. Science, 2022, 377 (6606): 603-608.
- [27] 季波,何建龙,吴旭东,王占军,谢应忠,蒋齐.宁夏典型天然草地土壤有机碳及其活性组分变化特征.草业学报,2021,30(1):24-35.
- [28] 张华渝,王克勤,宋娅丽,赵洋毅,陈雪.滇中尖山河小流域不同土地利用类型土壤活性有机碳分布特征.水土保持研究,2019,26(3): 16-21.
- [29] 庞学勇,包维楷,吴宁.森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展.应用与环境生物学报,2009,15(3):390-398.
- [30] 李洋, 王毅, 韩国栋, 孙建, 汪亚峰. 青藏高原高寒草地土壤微生物量碳氮含量特征及其控制要素. 草业学报, 2022, 31(6): 50-60.
- [31] Kupka D, Gruba P. Effect of pH on the sorption of dissolved organic carbon derived from six tree species in forest soils. Ecological Indicators, 2022, 140: 108975.
- [32] Yang N, Zou D S, Yang M Y, Lin Z G. Variations in soil microbial biomass carbon and soil dissolved organic carbon in the re-vegetation of hilly slopes with purple soil. PLoS One, 2016, 11(12): e0166536.
- [33] Singh K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. Land Degradation & Development, 2016, 27(3): 706-718.
- [34] 李明,毕江涛,王静.宁夏不同地区盐碱化土壤细菌群落多样性分布特征及其影响因子.生态学报, 2020, 40(4): 1316-1330.
- [35] 郭文章, 并长青, 邓小进, 陈宸, 赵苇康, 侯志雄, 王公鑫. 天山北坡典型草地土壤呼吸特征及其对环境因子的响应. 中国农业科技导报, 2022, 24(10): 189-199.
- [36] 陈蔚,王维东,蒋嘉瑜,刘任涛.半干旱草地植物枯落物碳、氮和磷元素释放对放牧和封育管理的响应.生态学报,2022,42(11): 4401-4414.
- [37] 曲艳,宋倩,杨合龙,赵坤,赵敏,刘玉玲,王德平,戎郁萍.呼伦贝尔草原不同利用方式对土壤微生物群落结构的影响.草地学报, 2021,29(8):1621-1627.
- [38] 黄娟,邓羽松,韦慧,林立文,黄海梅,付智勇.喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤微生物量碳氮磷和养分特征.土壤通报,2022,53 (3):605-612.
- [39] 李博文,王奇,吕汪汪,周阳,姜丽丽,刘培培,孟凡栋,张立荣,张苏人,阿旺,李耀明,斯确多吉,汪诗平. 增温增水对草地生态系统 碳循环关键过程的影响. 生态学报, 2021, 41(4): 1668-1679.
- [40] 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉. 增温和增雨对黄土丘陵区撂荒草地土壤呼吸的影响. 环境科学, 2022, 43 (3): 1657-1667.
- [41] 杨红飞,穆少杰,李建龙. 气候变化对草地生态系统土壤有机碳储量的影响. 草业科学, 2012, 29(3): 392-400.
- [42] 王丽华,薛晶月,谢雨,吴彦.不同气候类型下四川草地土壤有机碳空间分布及影响因素.植物生态学报,2018,42(3):297-306.