

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.020

卢朝阳, 马维伟, 杜佳团, 等. 尕海湿地地区沼泽草甸生长季土壤碳氮组分对增温施氮的响应[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 316-325.

LU Zhaoyang, MA Weiwei, DU Jianan, et al. Response of growing season soil carbon and nitrogen components to warming and nitrogen addition in marshy meadows of the gahai wetland area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 316-325.

尕海湿地地区沼泽草甸生长季土壤碳氮组分对增温施氮的响应

卢朝阳, 马维伟, 杜佳团, 常文华, 贺万鹏, 李淑卓

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: [目的] 为探究高寒湿地土壤碳氮组分对气候变暖和氮沉降的响应特征。[方法] 以尕海湿地沼泽草甸为研究对象, 采用开顶箱增温(OTC)和外源氮素(NH_4NO_3)添加模拟未来气候变暖及氮沉降试验, 分别设置对照(CK)、增温(W)、施氮(N)和增温施氮(WN)4种处理。在试验进行1.5年后对土壤碳氮组分含量进行测定。[结果] (1) 开顶箱增温装置提高0—20 cm土层平均温度1.126 °C, 显著降低0—10 cm土层土壤含水量(SMC)、pH、全氮(TN)、微生物量氮(MBN)、铵态氮(NH_4^+-N)、有机碳(SOC)和可溶性有机碳(DOC)含量, 提高硝态氮(NO_3^--N)含量。(2) 施氮显著降低 NH_4^+-N 、SOC和10—20 cm土层微生物生物量碳(MBC)及DOC含量, 增加土壤TN、MBN和 NO_3^--N 含量。(3) 增温施氮显著增加土壤SMC、TN、 NO_3^--N 和MBC含量, 降低MBN、 NH_4^+-N 和DOC含量。(4) 相关分析显示, 土壤水分与各理化因子均存在正相关性, 土壤碳氮组分间均呈正相关性。[结论] 模拟增温施氮缓解尕海湿地植物生长的温度和氮的限制, 促进TN的积累, 对土壤微生物量碳氮影响较大, 导致土壤微生物量碳氮及分布特征发生转换。

关键词: 尕海湿地; 增温施氮; 土壤碳氮组分

中图分类号: S812.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0316-10

Response of Growing Season Soil Carbon and Nitrogen Components to Warming and Nitrogen Addition in Marshy Meadows of the Gahai Wetland Area

LU Zhaoyang, MA Weiwei, DU Jianan, CHANG Wenhua, HE Wanpeng, LI Shuzhuo

(College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] To examine the response characteristics of soil carbon and nitrogen fractions in alpine wetland soil to climate warming and nitrogen deposition. [Methods] Using open-top box warming (OTC) and adding exogenous nitrogen (NH_4NO_3) to simulate future climate warming and nitrogen deposition tests, four treatments were established, namely control (CK), warming (W), nitrogen application (N), and warming nitrogen (WN). The soil carbon and nitrogen levels were quantified after 1.5 years. [Results] (1) The utilization of the open top box warming device resulted in a notable elevation of the mean temperature at 0—20 cm soil layer by 1.126 °C. Additionally, this intervention led to a significant decrease in the water content (SMC) and pH levels, as well as the concentrations of soil total nitrogen (TN), microbial nitrogen (MBN), ammonium nitrogen (NH_4^+-N), organic carbon (SOC), and dissolved organic carbon (DOC) at the 0—10 cm soil layer. Conversely, there was an observed increase in the concentration of nitrate nitrogen (NO_3^--N). (2) Nitrogen application considerably lowered the contents of NH_4^+-N and SOC in all the soil layers, as well as those of the contents of microbial biomass carbon (MBC) and DOC in soil layers 10—20 cm deep, but increased the contents of TN, MBN, and NO_3^--N . (3) The application of nitrogen through warming conditions resulted in a large rise in SMC, TN, NO_3^--N , and MBC content. Conversely,

收稿日期: 2023-08-29

修回日期: 2023-10-12

录用日期: 2023-10-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-01-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(31860143); 甘肃农业大学青年导师基金项目(GAU-QDFC-2021-11); 甘肃省教育厅青年博士基金项目(2021QB-024); 甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-15); 甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909)

第一作者: 卢朝阳(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1920375453@qq.com

通信作者: 马维伟(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事植被生态恢复研究。E-mail: mww-007@163.com

it led to a significant reduction in MBN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and DOC. (4) Correlation analysis showed that there was a positive correlation between soil moisture and all physicochemical factors, and soil carbon and nitrogen components were positively correlated. [**Conclusion**] The results indicated that the simulated warming application of nitrogen alleviated the temperature and nitrogen limitation of plant growth in the Gahai wetland, promoted the accumulation of TN, and had a greater impact on the soil microbiota biomass carbon and nitrogen, which led to the conversion of soil microbial biomass carbon and nitrogen activities and distribution characteristics.

Keywords: Gahai wetland; nitrogen application; soil carbon and nitrogen fractions

Received: 2023-08-29

Revised: 2023-10-12

Accepted: 2023-10-26

Online(www.cnki.net): 2024-01-08

自 19 世纪工业革命以来,随着化学氮肥和能源消耗量的激增,全球气候变暖和大气氮沉降显著增加,由此引起的湿地生态环境问题成为当前关注的焦点,如气温增高、氮沉降改变植物的优势种群^[1]、微生物群落结构^[2]和土壤碳排放^[3],同时也引起土壤养分供应失衡等生态问题^[1]。因此,气温增高及氮沉降对土壤碳氮组分的影响受到广泛重视。

湿地是陆地生态系统碳氮循环的重要组成部分,对全球碳氮平衡和气候变化起着重要作用。由于碳氮循环之间紧密的耦合关系,增温和氮沉降对湿地地下碳氮库产生重要影响,主要通过改变系统凋落物量、凋落物分解、土壤呼吸、有机碳氮库的稳定和氮素排放来影响土壤碳氮组分,但不同类型湿地土壤碳氮组分对增温和氮沉降的响应存在一定差异。有研究^[4]表明,增温显著降低河源湿地表土层的全氮和全碳含量,而施氮能够增加相应土层氮、碳含量;也有研究^[5-6]认为,增温减少土壤有机碳和氮含量,促进碳排放;而在高寒草地^[7]中发现,增温显著增加土壤水溶性碳和易氧化碳组分含量。随着未来气候变化加强,滨海湿地固碳功能将增强^[8]。此外,不同氮沉降量对湿地氮组分影响不同。在青藏高原湿草甸,土壤氮组分含量随不同施氮量的升高而显著增加^[9],但在黄河口新生湿地^[10]发现,适量施氮量有利于提高土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量,过量氮则不利于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的积累。气候变暖的加剧与大气氮沉降的增加往往同时发生,而目前关于全球气候变化对湿地土壤碳氮组分影响的研究还具有一定的局限性,主要以单一增温或施氮为主,且多基于短期的室内培养试验,而对于湿地区土壤多种碳氮组分含量对野外增温施氮 2 个因素响应的研究相对较少。

近年来,在气候变暖和氮沉降强度增加背景下青藏高原生态系统碳氮循环过程正发生着变化^[11]。有研究^[12]发现,青藏高原升温速率约为全球同期的 2 倍,气候变暖使青藏高原地区永久冻土层融化,加剧冻土湿地土壤有机碳不稳定性,碳排放速率增加^[13];

同时,变暖促进多年冻土土壤氮矿化,释放冻土中氮组分^[14]。但也有学者^[15]认为,气候变暖使得青藏高原草甸土壤固碳能力增强。因此,目前模拟增温试验中对有机碳库的影响还没有统一定论。高寒地区氮沉降在提高土壤速效氮的同时,也会导致土壤碳氮组分失衡^[16]。尽管有学者^[17-18]使用模型对青藏高原土壤碳氮组分含量进行了预测评估,但实测数据缺乏和不均匀分布常常导致模型结果准确性有限^[19]。

青藏高原拥有我国最大的高寒湿地,其中沼泽草甸占 70% 以上^[20],是全球气候变化和人为活动的最为敏感区之一。随全球气候变暖和氮沉降的持续增加^[21-23],势必对该区沼泽草甸土壤碳氮组分含量产生显著影响。但当前大多数全球气候变化对土壤碳氮组分的影响研究集中在高寒草地^[5]、滨海湿地^[4]、河源湿地^[4],对高寒湿地的研究较少。因此,本文以青藏高原东缘尕海湿地沼泽草甸为研究对象,采用野外模拟增温和氮添加的 1.5 年试验平台,研究增温和氮添加 1.5 年后生长季土壤碳氮组分的变化特征。拟解决 2 个问题:(1)增温、施氮及其交互作用对青藏高原高寒沼泽草甸生长季碳氮组分如何影响?(2)增温施氮后土壤温度、水分、pH 与土壤碳氮养分之间的关系如何?通过上述研究,以期对未来气候变化背景下的青藏高原高寒湿地土壤碳氮组分变化预测提供基础数据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

增温施氮野外控制试验位于甘肃省甘南藏族自治州碌曲县尕海—则岔自然保护区的尕海湿地 ($33^{\circ}58' - 34^{\circ}32' \text{N}$, $102^{\circ}09' - 102^{\circ}46' \text{E}$),平均海拔 3 800 m,其中沼泽化草甸面积 51 160 hm^2 ^[24],土壤类型主要包括沼泽草甸土、沼泽土和泥炭土等。研究区属于青藏高原大陆性季风气候,年平均气温 1.2°C ,年平均降水量 781.8 mm,(7—9 月降水占全年降水量的 79.7%);植物种类主要包括西藏嵩草

(*Carex tibetikobresia* S. R. Zhang)、乌拉草(*Carex meyeriana* Kunth)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum* L.)、线叶蒿(*Artemisia subulata* Nakai)和冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)等。草本植物丰富,有季节性积水^[25]。研究样地土壤基本情况见表 1,试验期间日平均气温及日降雨量见图 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 General information of sampling sites

处理	容重/(g·cm ⁻³)	全氮/(g·kg ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)
对照	0.93±0.11A	1.85±0.13A	42.02±1.44A
增温	0.92±0.02A	1.86±0.05A	41.16±1.03A
施氮	1.19±0.02A	1.83±0.23A	42.76±0.18A
增温+施氮	1.19±0.10A	1.80±0.61A	40.95±0.85A

注:表中数据为平均值±标准差。

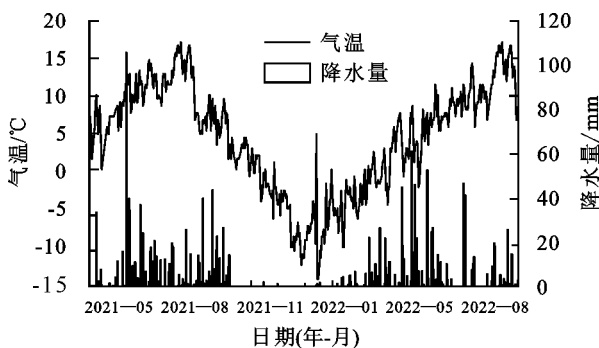


图 1 研究区日平均气温及日平均降水量

Fig. 1 Daily mean air temperature and precipitation at study area during this study period

1.2 试验设计

样地选择沼泽草甸区植被相对一致,总盖度为 85%~90%,地势平坦,地下水位相对一致。增温施氮试验于 2021 年 5 月开始,试验设置 4 种处理,即对照(CK)、增温(W)、施氮(N)和增温施氮(WN),每个处理重复 3 次,共 12 个试验小区,所有试验小区外围设置铁丝围栏。施氮处理参考青藏高原区氮沉降量为 10 kg/(hm²·a)^[22],设置为氮沉降的 1.5 倍[约为 15 kg/(hm²·a)]^[26]。增温处理采用被动开顶箱(open-top chamber, OTC)法,开顶箱规格为:底部面积约 2.20 m²,顶部面积约 1.03 m²,高 0.61 m;小区间隔带 5 m 以上,材料为透明有机玻璃,围成向内倾斜的正六边形,可见光和紫外线透射率约为 95%。未增温样地面积与增温样地面积大小一致。施氮处理选择植物易吸收的硝酸铵(NH₄NO₃)作为添加材料,5—9 月是该区雨季,氮沉降相对较大^[27-28],故在 5, 7, 9 月中旬分别称取 4.14 g NH₄NO₃溶于 2 L 水中,采用喷雾器将溶液均匀地喷洒到小区中,对照和无添加的样方采用同样体积水(2 L)进行喷洒处理。样地内安装 HOBO 气象站(Onset Inc., Bourne, MA, USA)用于测定降雨和

气温,同时在增温处理与未增温处理中埋设 3 组温度和土壤湿度探头,分别测定 0—10, 10—20 cm 土壤温度和湿度,记录频率为 10 min,土壤温湿度数据采用 3 组数据的平均值。

1.3 样品采集

2022 年 8 月底,在每个样方中随机选取 3 个土壤取样点,采用土钻分别 0—10, 10—20, 20—40 cm 土层取样,1 个处理共取 9 个样点,将同一样点处理土壤样品混匀后作为 1 个土壤样品,每个处理 3 次重复。采集好的新鲜土壤样品过 2 mm 筛,去除碎屑、动植物残体和砾石等,将过筛后新鲜的土壤样品分成 2 部分:一部分样品在 4 °C 下冷藏储存用于测定硝铵态氮、微生物量碳氮、可溶性有机碳和含水量;一部分在实验室通风避光处自然风干,进一步研磨处理后进行全氮、有机碳和 pH 测定。

1.4 样品室内分析

土壤 pH 采用电位法测定,以水为浸提剂,水土比为 2.5 : 1;土壤含水量采用烘干法测定;土壤容重采用环刀法测定;土壤全氮采用半微量凯氏法测定;土壤微生物量碳氮采用氯仿熏蒸浸提法测定;硝铵态氮采用 2 mol/L KCl 溶液浸提土壤中的硝铵态氮后使用 Smart Chem 450 全自动间断化学分析仪测定^[29];土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化外加热法^[24]测定;土壤可溶性有机碳采用 K₂SO₄ 溶液(0.5 mol/L)振荡 1 h 浸提后,进行消煮测定^[30]。

1.5 数据处理分析

采用 Excel 2021 对原始数据进行整理和计算,使用 SPSS 26.0 软件对土壤各项指标进行不同处理和不同土层间的单因素(One-way ANOVA)方差分析,采用三因素方差分析(Three-way ANOVA)增温、施氮和土层及其交互作用对土壤碳氮组分的影响,采用 Origin 2021 软件进行绘图,文中数据为平均值±标准差。

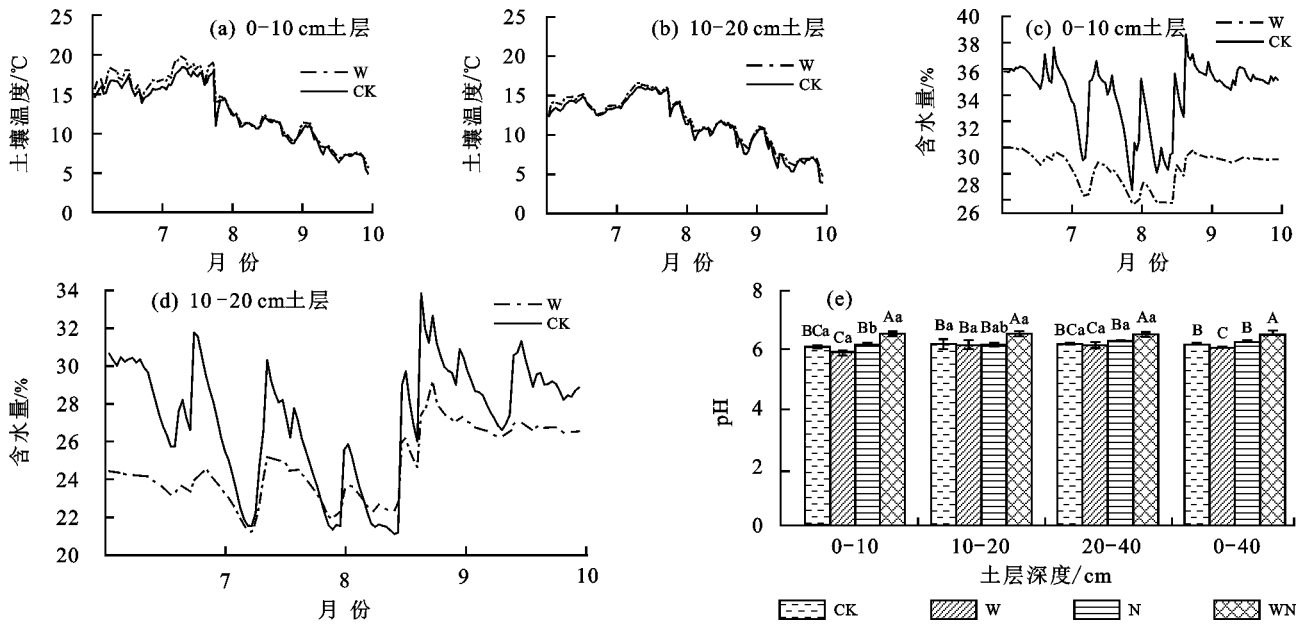
2 结果与分析

2.1 增温施氮对土壤温湿度及 pH 的影响

与 CK 相比,增温显著提高土壤温度,但不同土层增温效果存在一定差异(图 2a、图 2b)。

在 0—10, 10—20 cm 土层平均温度分别增加 1.544, 0.708 °C,表土层增温效果更为显著。不同时间增温也不尽相同,7—8 月温度相对较高。增温对土壤湿度也有显著影响(图 2c、图 2d),增温显著降低土壤水分含量,在 0—10, 10—20 cm 土层含水量分别降低 0.97%~9.30%和 -1.20%~7.80%,表土层含水量降低更为显著。地下 20 cm 处土壤温湿度存在明显的季节性波动,增温使土壤含水量随季节变动幅

度降低。整体上,与 CK 相比,增温显著降低土壤 pH 增温施氮显著增加各土层的土壤 pH。



注:CK 为对照,W 为增温处理,N 为施氮处理,WN 为增温施氮处理;不同大写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$);不同小写字母表示土层间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 2 增温施氮对生长季土壤温湿度及 pH 的影响

Fig. 2 Effects of warming and nitrogen application on soil temperature, humidity and pH in the growing season

2.2 增温施氮对土壤碳氮组分含量的影响

2.2.1 土壤氮组分含量 单独增温或施氮仅对表土

层 TN 产生显著影响,而增温施氮对 20—40 cm 土层 TN 含量有显著促进作用(图 3)。

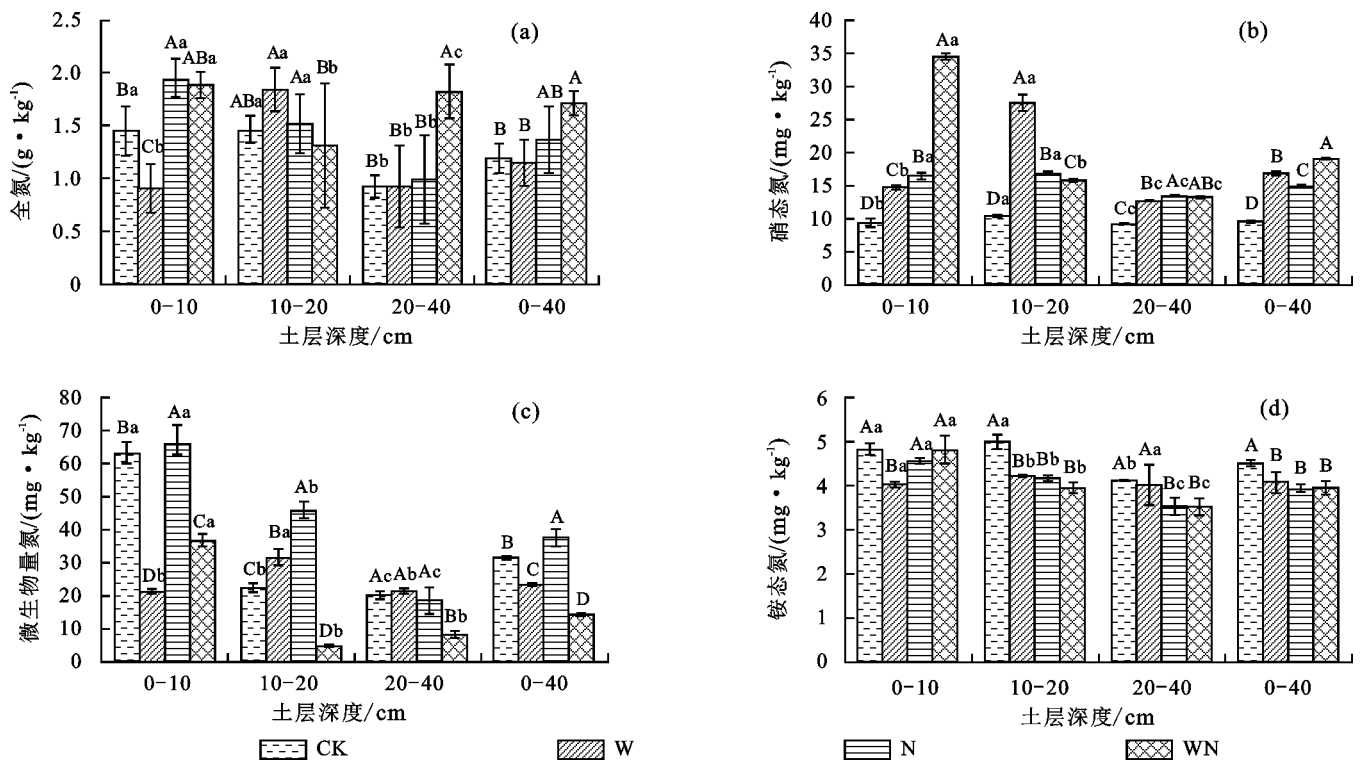


图 3 增温施氮处理对土壤氮组分含量的影响

Fig. 3 Effect of warming and nitrogen application treatments on the content of soil nitrogen fractions

在 0—10 cm 土层,与 CK 相比,增温处理显著降低土壤 TN 和 MBN 含量,分别降低 37.38%, 66.17%,而施氮显著增加土壤 TN 和 MBN 含量,分别增加 35.13%和 6.18%;在 10—20 cm 土层,增温和

施氮显著增加土壤 MBN 含量,对土壤 TN 含量无显著影响;在 20—40 cm 土层,与 CK 相比,增温或施氮对土壤 TN 和 MBN 含量均无显著影响,但增温施氮却显著增加土壤 TN 含量,增加 97.25%。与 CK 相

比,增温施氮显著降低各土层 MBN 含量。增温、施氮和增温施氮处理均在不同程度上减少土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量,而显著增加土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量的增加幅度分别是 CK 的 1.36 ~ 2.63, 1.44 ~ 1.73, 1.42 ~ 3.67 倍。

2.2.2 土壤碳组分含量 在 0—40 cm 土层,单独增温或施氮显著降低土壤 SOC 和 MBC 含量。增温施氮在不同土层对 SOC 和 MBC 的影响不同(图 4)。与 CK 相比,在 0—10 cm 土层,增温显著降低土壤 SOC 和 DOC 含量,分别降低 13.35%, 34.64%, 而显著增加土壤 MBC 含量,增加 18.34%,施氮和增温施

氮显著降低土壤 DOC 含量,分别降低 18.58%, 9.56%, 而增温施氮显著增加 MBC 含量,增加 58.53%。

在 10—20 cm 土层,增温处理均显著降低土壤 SOC、MBC 和 DOC 含量,分别降低 30.69%, 57.13%, 21.27%, 施氮显著降低土壤 SOC、MBC 含量,分别降低 41.14%, 23.96%, 增温施氮处理显著降低土壤 SOC 和 DOC 含量,分别降低 15.55%, 11.76%; 在 20—40 cm, 增温显著降低土壤 MBC 含量,降低 60.56%, 施氮显著降低土壤 SOC 含量,增温施氮显著增加土壤 SOC 含量,增加 13.97%。

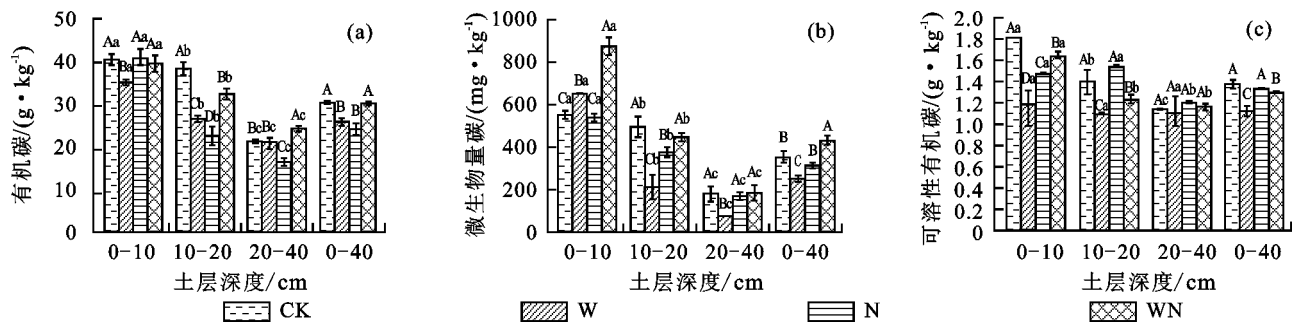


图 4 增温施氮处理对土壤碳组分含量的影响

Fig. 4 Effect of warming and nitrogen application treatments on the content of soil carbon fractions

2.3 增温、施氮、土层及其交互作用对土壤碳氮组分的影响

三因素方差分析结果(表 2)表明,增温、施氮及土层均对土壤碳氮组分存在显著影响。

其中,施氮、增温对土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、MBN、DOC 均有显著影响($p < 0.005$);施氮与土层

对 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、MBN 和 SOC 有极显著交互影响($p < 0.001$);增温与土层、增温与施氮均对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、MBN、SOC、DOC 和 MBC 有极显著交互影响($p < 0.001$),增温、施氮和土层仅对土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、MBN、SOC、DOC 和 MBC 有极显著交互作用。

表 2 增温、施氮和土层对土壤理化性质影响的三因素方差分析结果

Table 2 Three-way ANOVA results of temperature increase, nitrogen application and soil layer on soil physicochemical properties

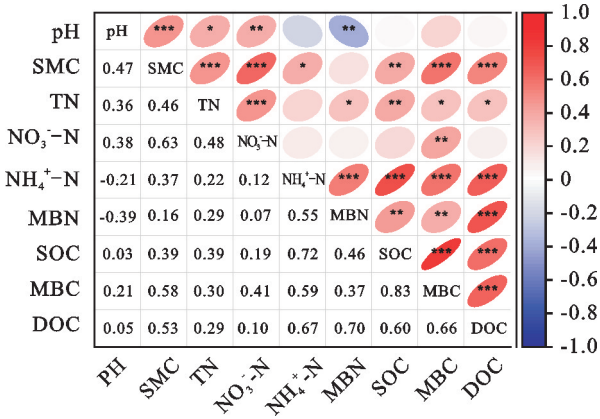
影响因素	显著性	全氮	氨态氮	硝态氮	微生物量氮	有机碳	可溶性有机碳	微生物量碳
土层	F 值	5.28	35.98	563.52	408.47	438.79	68.98	598.87
	p 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
施氮	F 值	17.94	29.90	1 163.07	0.10	8.91	19.50	67.37
	p 值	<0.001	<0.001	<0.001	0.75	0.005	<0.001	<0.001
增温	F 值	1.11	24.56	2 970.09	822.85	0.037	96.85	3.89
	p 值	0.29	<0.001	<0.001	<0.001	0.84	<0.001	0.057
施氮×土层	F 值	6.81	12.96	729.86	31.84	18.06	1.07	1.96
	p 值	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.37	0.14
增温×土层	F 值	3.51	2.90	294.76	108.69	16.96	9.56	69.28
	p 值	0.026	0.050	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
增温×施氮	F 值	3.10	26.61	141.05	160.78	239.13	45.73	185.69
	p 值	0.088	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
增温×施氮×土层	F 值	3.58	3.66	663.89	101.88	27.04	25.44	7.74
	p 值	0.024	0.023	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001

2.4 增温施氮下土壤理化性质间相互作用关系

相关分析(图 5)显示,除土壤 pH 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、MBN 呈负相关外,其余土壤理化因子间均存在不同

程度的正相关性。其中,土壤 pH 与土壤含水量(SMC)、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 呈极显著正相关($p < 0.01$),与 TN 呈显著正相关($p < 0.05$),与 MBN 呈极显著负相

关($p < 0.01$)。SMC 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 呈显著正相关($p < 0.05$), 与其他土壤理化因子均呈极显著正相关性($p < 0.01$)。除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 外, TN 与其他土壤理化因子均呈显著正相关性($p < 0.05$)。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、MBN、SOC、MBC 和 DOC 两两间呈极显著正相关($p < 0.01$)。



注: 图中倾斜向上的椭圆圈表示正相关, 倾斜向下的椭圆圈表示负相关关系, 颜色深浅表示相关性 R^2 的大小, 圆圈中 * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$ 。

图 5 土壤理化性相关性矩阵

Fig. 5 Correlation matrix of soil physical and chemical properties

3 讨论

3.1 土壤碳氮组分对增温的响应

温度条件影响土壤碳氮含量及转化速率, 可调节土壤微生物活性及植物根系对土壤碳氮组分的分解和释放, 影响土壤生态系统与外界生物圈之间的物质循环过程^[31]。本研究结果表明, 增温显著降低土壤表层含水量和 pH, 由于增温引起土壤水分损失, 表土含水量降低, 而土壤含水量减少引起土壤 pH 降低^[32]。有研究^[33]也发现, 增温降低表层土壤 TN、MBN 和 MBC 含量, 这可能是由于增温引起水分降低而抑制土壤氮周转速率, 进而减少土壤中氮组分含量。土壤水分与土壤氮素显著的正相关性进一步证实土壤水分积极参与调节土壤氮组分周转(图 5)。与此同时, 温度作为高寒湿地的限制性因子, 增温抑制微生物的代谢活动, 导致微生物生物量碳、氮降低^[34], 这与多数学者^[35-36]研究结果一致。本研究也发现, 增温提高 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量, 但降低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 这与刘美等^[37]研究结果有所差异。这是因为温度升高增加土壤透气性, 使土壤中盐类化合物溶解度增大, 土壤胶体吸附力减弱, 促使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 向 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 转化, 更有利于土壤有机氮的硝化反应, 从而增加土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量。水分既是氮素溶解的媒介, 又是氮素转移的载体, 是影响土壤氮素可利用性的重要环境因子^[38]。本研究结果表明, 增温

处理显著降低土壤碳组分含量, 对此不同专家学者的研究结果也存在差异, 有研究^[39]表明, 长期增温条件有利于促进有机质分解, 导致不同形式的碳组分损失; 也有研究^[40]发现, 增温对土壤有机碳的积累并无显著影响。而本研究结果的原因是增温引起的水分减少及促进土壤有机质的分解使得该地区的碳排放剧增^[41], 从而减少土壤中碳组分含量。

3.2 土壤碳氮组分对施氮的响应

氮是植物生长所需的最重要的土壤养分之一, 被认为是陆地生态系统净初级生产力的主要限制因子^[42]。前人研究^[43]发现, 施氮能够显著增加土壤氮组分含量。本研究也发现, 施氮增加土壤 TN、MBN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量(图 3), 表明施氮显著增加土壤氮组分含量。这可能是施氮直接或间接增加土壤无机氮组分含量; 氮添加一定程度上降低氮限制强度, 提高生物固氮能力和土壤氮转化速率, 进而导致氮组分含量增加。也有研究^[44]发现, 施氮明显降低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 一方面可能是由于在生长季植物生长吸收较多的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量降低; 另一方面, 该区 8 月份土壤含水量与同期降雨相比处于低水平; 有研究^[45]表明, 随着干旱等级和时间的持续, 土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量显著升高, 而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量显著降低, 这也反映水分积极参与调控该区土壤无机氮库的转化进程(图 5)。本研究发现, 施氮处理降低 10—40 cm 土层 SOC 和 MBC 含量, 这与汪金松等^[46]对油松林研究结果类似; 施氮处理下土壤有机碳含量显著降低, 这与刘永万等^[47]对长江源区高寒沼泽草甸研究结果相悖, 分析原因可能是施氮促进生长季植物对土壤氮的吸收同时也增加对碳的需求, 而植物所需养分主要来源于土壤, 在无外源碳添加的情况下, 10—20 cm 土层植物根系分布较多而吸收土壤中的碳素^[38], 以促进植物碳向地上部分转移, 降低地下根部碳的分配量, 致使土壤碳组分为供给植物生长而降低。

3.3 土壤碳氮组分对增温施氮的响应

增温施氮处理对土壤碳氮组分含量具有耦合效应, 不是单一增温或施氮处理的叠加, 存在不同程度的促进或抑制作用。增温施氮处理降低尕海湿地地区沼泽草甸的温度和氮限制。本研究表明, 土壤 TN、和 MBC 含量对增温施氮的响应随土层的加深呈先减小后增大的趋势, 对 MBN 的影响恰好相反, 导致土壤 TN 含量呈现此分布的原因可能是在增温施氮处理下植物生长旺盛, 10—20 cm 土层植物根系分布较多而吸收土壤中 TN 含量。同时增温施氮处理完全改变此前土壤 TN 和 MBN 相同的变化趋势, 使土

壤 TN 与 MBC 的变化趋势一致, BROWN 等^[48]研究发现, 改变土壤氮素的化学计量, 导致微生物群落代谢产生的重大变化, 资源流动和土壤功能发生变化。本研究结果表明, 增温施氮处理导致土壤微生物碳氮活性及分布特征发生转换。微生物群落作为土壤碳氮组分的驱动者和贡献者, 土壤 MBN 和 MBC 与其他养分分子的相关性均达到极显著水平(图 5)($p < 0.01$), 与杨建琴^[49]的研究结果一致, 进一步证实土壤微生物量碳、氮可以作为反映土壤养分状况的敏感因子。本研究结果也表明, 增温施氮处理减少表层土壤 SOC 含量, 但增加深层土壤 SOC 含量, 这与前人研究结果不尽一致。有研究^[50]认为, 增温施氮提高土壤 SOC 含量, 也有研究^[51]则表明, 增温施氮降低土壤 SOC 含量。本研究中表层土壤 SOC 减少的原因可能是由于增温施氮增强土壤微生物活性, 增加正处于生长季植物碳汇的利用率, 促进对表层土壤 SOC 的分解、吸收和转化, 从而导致土壤 SOC 减少。土壤 DOC 含量对增温施氮的响应整体呈下降趋势, 有学者^[52]研究发现, 土壤 DOC 主要来源于表层土壤中的凋落物, 本研究正处于生长季, 植物生长旺盛, 导致增加对土壤有效碳的需求, 但降低凋落物的分解速率, 进而导致土壤 DOC 含量降低^[53]。研究表明, 增温施氮显著增加深层土壤 TN 及 SOC 含量, 根据 WANG 等^[8]对滨海湿地蓝碳功能的模拟预测结果显示, 随着气候变化增加滨河湿地的固碳功能, 从而抵御气候变化, 对此本研究结果进一步证实增温施氮缓解生长季尕海湿地土壤的温度和氮的限制, 有助于提高生长季尕海湿地土壤的碳、氮汇功能, 使土壤 TN 和 SOC 在深层土壤中固定并积累。本研究仅基于 1.5 年时间的增温施氮处理对青藏高原高寒沼泽草甸生长季碳氮组分含量的研究, 关于尕海湿地响应气候变暖及氮沉降的程度, 还需进一步连续观测土壤碳氮组分含量来确定其响应效应。

4 结论

(1) 在尕海湿地沼泽草甸植物生长季, 增温显著提高土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量, 对土壤含水量、pH、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、MBN 及碳组分含量均有不同程度的降低。

(2) 增温不利于土壤碳氮的固定, 易造成尕海湿地土壤碳氮组分流失。

(3) 施氮增加土壤氮储量。本研究中施氮处理降低土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量, 而增加土壤 TN、MBN 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量, 显著降低 10—40 cm 土层土壤 SOC 和 MBC 含量, 施氮能促进土壤氮组分的积累。

(4) 增温施氮对尕海湿地植物生长季土壤微生物量碳氮影响较大, 导致土壤微生物量碳氮活性及分布

特征发生转换, 并促进 TN 的积累。

参考文献:

- [1] CHEN X P, WANG G X, ZHANG T, et al. Effects of warming and nitrogen fertilization on GHG flux in an alpine swamp meadow of a permafrost region[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 601/602: 1389-1399.
- [2] MARTI M, NILSSON M B, DANIELSSON A, et al. Strong long-term interactive effects of warming and enhanced nitrogen and sulphur deposition on the abundance of active methanogens in a boreal oligotrophic mire[J]. *Mires and Peat*, 2019, 24: 1-14.
- [3] 张艺. 氮添加对若尔盖高寒泥炭湿地土壤碳稳定性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
ZHANG Y. Effect of nitrogen addition on soil carbon stability in Zoige Alpine Peatland[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [4] 左弟召. 青海湖不同类型湿地生态系统碳交换对模拟增温和氮沉降的响应[D]. 西宁: 青海师范大学, 2021.
ZUO D Z. Responses of carbon exchange in different types of wetland ecosystems in Qinghai Lake to simulated warming and nitrogen deposition[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2021.
- [5] 秦瑞敏, 温静, 张世雄, 等. 模拟增温对青藏高原高寒草甸土壤 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(4): 908-916.
QIN R M, WEN J, ZHANG S X, et al. Impacts of simulated warming on C, N, and P stoichiometric characteristics of alpine meadow soil in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(4): 908-916.
- [6] 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J]. *生态学报*, 2017, 37(1): 12-24.
HUANG J X, XIONG D C, LIU X F, et al. Effects of warming on soil organic carbon mineralization: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1): 12-24.
- [7] 张云云. 模拟气候变暖对高寒泥炭湿地碳稳定性的影响及机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
ZHANG Y Y. Effects of simulate climate warming on carbon stability from alpine peat wetland and its mechanism[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [8] WANG F M, LU X L, SANDERS C J, et al. Tidal wetland resilience to sea level rise increases their carbon sequestration capacity in United States[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): e5434.
- [9] 魏星星, 吴江琪, 李广, 等. 青藏高原湿草甸土壤氮组分对氮添加浓度的响应[J]. *草地学报*, 2021, 29(4): 677-683.
WEI X X, WU J Q, LI G, et al. Response of soil nitrogen components to nitrogen addition in wet meadow in the Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(4): 677-683.

- [10] 胡星云. 氮负荷增强对黄河口新生湿地氮生物循环过程与循环状况的影响[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
HU X Y. Effects of nitrogen loadings on nitrogen biological cycle process and circulation in the newly created marshes of the Yellow River Estuary [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.
- [11] CHEN H, JU P J, ZHU Q A, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, 3(10): 701-716.
- [12] SHEN M G, WANG S P, JIANG N, et al. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, 3(10): 633-651.
- [13] ZHAO W W, ZHANG Z S, ZHANG X H, et al. Combination of mineral protection and molecular characteristics rather than alone to govern soil organic carbon stability in Qinghai-Tibetan Plateau wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 344: e118757.
- [14] ZHANG D Y, WANG L, QIN S Q, et al. Microbial nitrogen and phosphorus co-limitation across permafrost region[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(14): 3910-3923.
- [15] WANG Y Y, XIAO J F, MA Y M, et al. Persistent and enhanced carbon sequestration capacity of alpine grasslands on Earth's Third Pole [J]. *Science Advances*, 2023, 9(20): e6875.
- [16] GUO W J, DING J X, WANG Q T, et al. Soil fertility controls ectomycorrhizal mycelial traits in alpine forests receiving nitrogen deposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 161: e108386.
- [17] PIAO S L, TAN K, NAN H J, et al. Impacts of climate and CO₂ changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai-Tibetan grasslands over the past five decades [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 98/99: 73-80.
- [18] LUO T X. Carbon dynamics of terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau during the 20th century: An analysis with a process-based biogeochemical model [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(5): 649-662.
- [19] TAN K C, CIAIS P, PIAO S L, et al. Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai-Tibetan grasslands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(1): e3530.
- [20] WEI D, XU R, TARCHEN T, et al. Revisiting the role of CH₄ emissions from alpine wetlands on the Tibetan Plateau: Evidence from two *in situ* measurements at 4758 and 4320 m above sea level [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(9): 1741-1750.
- [21] YANG G, CHEN H, WU N, et al. Effects of soil warming, rainfall reduction and water table level on CH₄ emissions from the Zoige peatland in China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 78: 83-89.
- [22] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.
- [23] ZHU X X, LUO C Y, WANG S P, et al. Effects of warming, grazing/cutting and nitrogen fertilization on greenhouse gas fluxes during growing seasons in an alpine meadow on the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214/215: 506-514.
- [24] 马维伟, 李广, 石万里, 等. 甘肃尕海湿地退化过程中植物生物量及物种多样性变化动态 [J]. *草地学报*, 2016, 24(5): 960-966.
MA W W, LI G, SHI W L, et al. Changes of plant biomass and species diversity in degradation process of Gahai wetland in Gansu Province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(5): 960-966.
- [25] 马维伟, 王辉, 黄蓉, 等. 尕海湿地生态系统土壤有机碳储量和碳密度分布 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 738-744.
MA W W, WANG H, HUANG R, et al. Distribution of soil organic carbon storage and carbon density in Gahai Wetland ecosystem [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 738-744.
- [26] JIA Y L, YU G R, HE N P, et al. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: e3763.
- [27] CHEN X P, WANG G X, ZHANG T, et al. Effects of warming and nitrogen fertilization on GHG flux in the permafrost region of an alpine meadow [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 157: 111-124.
- [28] DIELEMAN C M, BRANFIREUN B A, MCLAUGHLIN J W, et al. Climate change drives a shift in peatland ecosystem plant community: Implications for ecosystem function and stability [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(1): 388-395.
- [29] 盛晓琳, 孙佳峰, 兰亚琼, 等. 全自动间断化学分析法快速测定污水中的无机氮 [J]. *净水技术*, 2020, 39(2): 6-11, 15.
SHENG X L, SUN J F, LAN Y Q, et al. Rapid determination of inorganic nitrogen in wastewater with full-automatic batch chemical analysis [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(2): 6-11, 15.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. *Agrochemical analysis of soil* [M]. Third edition. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2000.
- [31] 马丽, 徐满厚, 翟大彤, 等. 高寒草甸植被-土壤系统对气候变暖响应的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1708-1717.

- MA L, XU M H, ZHAI D T, et al. Response of alpine meadow vegetation-soil system to climate change: A review [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(6): 1708-1717.
- [32] 赵亮. 增温和降雨变化对高寒草甸植物群落和土壤理化因子的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- ZHAO L. Effects of warming and precipitation changes on plant communities and soil physical and chemical factors in alpine meadow[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [33] 宗宁, 石培礼. 模拟增温对西藏高原高寒草甸土壤供氮潜力的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(12): 4356-4365.
- ZONG N, SHI P L. Effects of simulated warming on soil nitrogen supply potential in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(12): 4356-4365.
- [34] 李娜, 王根绪, 高永恒, 等. 模拟增温对长江源区高寒草甸土壤养分状况和生物学特性的影响研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1214-1224.
- LI N, WANG G X, GAO Y H, et al. Effects of simulated warming on soil nutrients and biological characteristics of alpine meadow soil in the headwaters region of the Yangtze River[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1214-1224.
- [35] 唐偲頔, 郭剑芬, 张政, 等. 增温和隔离降雨对杉木幼林土壤养分和微生物生物量的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(1): 40-45.
- TANG C D, GUO J F, ZHANG Z, et al. Effects of soil warming and precipitation exclusion on soil nutrients and microbial biomass in young Chinese fir plantation[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2017, 12(1): 40-45.
- [36] 姚世庭, 芦光新, 周华坤, 等. 模拟增温对高寒草甸土壤性质的影响[J]. *草地学报*, 2021, 29(增刊 1): 218-224.
- YAO S T, LU G X, ZHOU H K, et al. Effect of simulated temperature increase on carbon and nitrogen changes in alpine meadow [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(S1): 218-224.
- [37] 刘美, 马志良. 模拟增温对青藏高原东部高寒灌丛土壤氮转化的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6): 2045-2052.
- LIU M, MA Z L. Effects of experimental warming on soil nitrogen transformation in alpine scrubland of eastern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6): 2045-2052.
- [38] 闫钟清, 齐玉春, 董云社, 等. 草地生态系统氮循环关键过程对全球变化及人类活动的响应与机制[J]. *草地学报*, 2014, 23(6): 279-292.
- YAN Z Q, QI Y C, DONG Y S, et al. Nitrogen cycling in grassland ecosystems in response to climate change and human activities[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(6): 279-292.
- [39] 曹聪, 阮超越, 任寅榜, 等. 模拟增温对武夷山不同海拔森林表层土壤碳氮及酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5347-5356.
- CAO C, RUAN C Y, REN Y B, et al. Effects of stimulating warming on surface soil carbon, nitrogen and its enzyme activities across a subtropical elevation gradient in Wuyi Mountain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5347-5356.
- [40] 王茹, 张永清, 宗宁, 等. 长期增温对西藏高寒草甸土壤团聚体周转和稳定性影响[J]. *土壤通报*, 2023, 54(3): 596-605.
- WANG R, ZHANG Y Q, ZONG N, et al. Effects of long-term warming on turnover and stability of soil aggregates in Tibetan alpine meadow[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(3): 596-605.
- [41] 陈龙飞, 何志斌, 杜军, 等. 土壤碳循环主要过程对气候变暖响应的研究进展[J]. *草业学报*, 2015, 24(11): 183-194.
- CHEN L F, HE Z B, DU J, et al. Response of soil carbon cycling to climate warming: Challenges and perspectives [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(11): 183-194.
- [42] CHENG X, LUO Y, XU X, et al. Soil organic matter dynamics in a North America tallgrass prairie after 9 yr of experimental warming [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(6): 1487-1498.
- [43] 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.
- LYU 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]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(6): 1525-1532.
- [44] 杨雪辰. 松嫩草地土壤微生物对降水变化的响应及其对氮循环的调节机制[D]. 长春: 东北师范大学, 2021.
- YANG X C. Soil microbial responses to precipitation and its regulation of the nitrogen cycle in Songnen meadow steppe [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2021.
- [45] 元晓春, 陈岳民, 袁硕, 等. 氮沉降对杉木人工幼林土壤溶液可溶性有机物质浓度及光谱学特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 1-11.
- YUAN X C, CHEN Y M, YUAN S, et al. Effects of nitrogen deposition on the concentration and spectral characteristics of dissolved organic matter in soil solution in a young *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(1): 1-11.
- [46] 汪金松, 赵秀海, 张春雨, 等. 模拟氮沉降对油松林土壤有机碳和全氮的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(10): 88-94.
- WANG J S, ZHAO X H, ZHANG C Y, et al. Effects

- of simulated nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen content in plantation and natural forests of *Pinus tabuliformis* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(10): 88-94.
- [47] 刘永万, 白炜, 尹鹏松, 等. 外源氮素添加对长江源区高寒沼泽草甸土壤养分及植物群落生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 483-491.
LIU Y W, BAI W, YIN P S, et al. Effects of exogenous nitrogen addition on soil nutrients and plant community biomass in alpine swamp meadow in the headwaters region of the Yangtze River [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 483-491.
- [48] BROWN R W, CHADWICK D R, BENDING G D, et al. Nutrient (C, N and P) enrichment induces significant changes in the soil metabolite profile and microbial carbon partitioning [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 172: e108779.
- [49] 杨建琴. 松嫩草地土壤微生物量碳、氮对模拟增温及氮沉降的响应[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
YANG J Q. Response of soil microbial biomass and nutrient to simulated warming and nitrogen application in Songnen grassland [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011.
- [50] 尹鹏松. 青藏高原高寒沼泽草甸土壤酶活性与有机碳分布特征对增温与施氮的响应[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
YIN P S. Responses of soil enzyme activity and organic carbon distribution characteristics to warming and nitrogen application in alpine swamp meadow on the Tibetan Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [51] 伍昱飞. 增温及外源氮添加对大兴安岭多年冻土区活动层土壤理化性质及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2021.
WU Y F. Effects of Warming and exogenous nitrogen addition on soil physical and chemical properties and enzyme activities in active layer of permafrost in Daxing' an Mountains [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2021.
- [52] 姚兰, 张焕朝, 胡立煌, 等. 黄山不同海拔植被带土壤活性有机碳、氮及其与酶活性的关系[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(6): 1069-1076.
YAO L, ZHANG H C, HU L H, et al. Soil labile organic carbon and nitrogen and their relationship with enzyme activities in different vegetation zones along an altitudinal gradient on Mount Huangshan [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019, 36(6): 1069-1076.
- [53] 奚晶阳, 白炜, 尹鹏松, 等. 模拟增温对长江源区高寒沼泽草甸土壤有机碳组分与植物生物量的影响研究[J]. 生态科学, 2019, 38(1): 92-101.
XI J Y, BAI W, YIN P S, et al. Effects of simulated warming on soil organic carbon composition and biomass in alpine swamp meadow in the headwaters region of the Yangtze River [J]. Ecological Science, 2019, 38(1): 92-101.
- (上接第 117 页)
- [34] ZHANG S L, WANG X R, XIAO Z L, et al. Quantitative studies of gully slope erosion and soil physiochemical properties during freeze-thaw cycling in a Mollisol region [J]. The Science of the Total Environment, 2020, 707: e136191.
- [35] WU Y Q, ZHENG Q H, ZHANG Y G, et al. Development of gullies and sediment production in the black soil region of northeastern China [J]. Geomorphology, 2008, 101(4): 683-691.
- [36] HU G, WU Y Q, LIU B Y, et al. The characteristics of gully erosion over rolling hilly black soil areas of Northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(3): 309-320.
- [37] TANG J, XIE Y, WU Y Q, et al. Influence of precipitation change and topography characteristics on the development of farmland gully in the black soil region of Northeast China [J]. Catena, 2023, 224: e106999.
- [38] XU J Z, LI H, LIU X B, et al. Gully erosion induced by snowmelt in Northeast China: A case study [J]. Sustainability, 2019, 11(7): e2088.
- [39] HUANG D H, SU L, ZHOU L L, et al. Gully is the dominant sediment source of snowmelt erosion in the black soil region: A case study [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: e105232.