

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.09.027

引用格式:刘梦洁,王睿发,史晶晶,等.全生态系统增温对高寒泥炭地生态系统碳通量的影响[J].草地学报,2026,34(9):3434—3445

LIU Meng-jie, WANG Rui-fa, SHI Jing-jing, et al. Influence of Whole-ecosystem Warming on Carbon Fluxes of Alpine Peatland Ecosystem[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(9):3434—3445

全生态系统增温对高寒泥炭地生态系统 碳通量的影响

刘梦洁^{1,2,3}, 王睿发⁴, 史晶晶¹, 张惠晨⁵, 汪金松^{1,2*}

(1. 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室/中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学资源与环境
学院, 北京 100101; 4. 西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 5. 中国科学院教育部水土保持与
生态环境研究中心, 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以往原位增温研究多采用地上开顶式增温和红外辐射增温,难以模拟对深层土壤(>30 cm)的增温效应。全生态系统增温对地上植被和土壤剖面同步升温,更贴近实际变暖情景。泥炭地是全球单位面积有机碳密度最高的陆地生态系统,但在气候变暖情景下其固碳功能如何变化仍没有明确结论。本研究以四川省红原县若尔盖高寒泥炭地为研究对象,设置对照(CK)、地上增温(AW)、土壤剖面增温(BW)和全生态系统增温(EW)四种处理,探讨不同增温方式对泥炭地生态系统碳通量的影响及其机制。结果表明,土壤温度升高与土壤剖面含水量下降均为调控生态系统碳通量的关键因子。BW和EW均显著促进生态系统呼吸,而AW无显著影响。EW显著降低土壤剖面含水量并促进土壤蒸发,显著降低净生态系统生产力。尽管EW促进植被生长并增加碳输入,但呼吸增强效应超过增温对光合作用的促进效应,导致生态系统固碳能力显著减弱。本研究为准确评估气候变暖背景下高寒泥炭地固碳功能提供了科学依据。

关键词:生态系统碳通量;高寒泥炭地;气候变暖;全生态系统增温

中图分类号:X171.7

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)09-3434-12

Influence of Whole-ecosystem Warming on Carbon Fluxes of Alpine Peatland Ecosystem

LIU Meng-jie^{1,2,3}, WANG Rui-fa⁴, SHI Jing-jing¹, ZHANG Hui-chen⁵, WANG Jin-song^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. National Field Observation and Research Station(Sichuan Zoige) for Alpine Wetland Ecosystem, Chengdu, Sichuan Province 610041, China; 3. College of Resources and Environment, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. School of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan Province 621010, China; 5. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: Previous in situ warming experiments have predominantly employed open-top chamber and infrared radiation for aboveground warming, which fail to adequately simulate the warming process in deeper soil (>30 cm). In contrast, the whole-ecosystem warming, warming both aboveground vegetation and soil profile, represents the most realistic field-scale warming method. Peatland ecosystems are the terrestrial ecosystems with the highest organic carbon density per unit area globally. However, how their carbon sequestration function respond under climate warming remains inconclusive. This study focused on the Zoige alpine peatlands in Hongyuan

收稿日期:2025-09-28;修回日期:2026-02-05

基金项目:国家自然科学基金项目(32241035)资助

作者简介:刘梦洁(2000-),女,汉族,河南信阳人,硕士研究生,主要从事全球变化生态学研究, E-mail: liumengjie23@mails.ucas.ac.cn;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: wangjinsong@igsrr.ac.cn

County, Sichuan Province, China. A field experiment was established with four warming treatments, including control (CK), above-ground warming (AW), whole-soil profile warming (BW) and whole-ecosystem warming (EW). This research analyzed the effects of different warming treatments on ecosystem carbon fluxes in the peatland ecosystem and the regulatory mechanisms. The results showed that elevating soil temperature and decreasing soil profile moisture content were key regulators of ecosystem carbon fluxes. BW and EW all promoted ecosystem respiration (ER), while AW had no significant effect on ER. EW significantly reduced both soil profile water content and promoted soil evaporation, leading to a notable decrease in net ecosystem productivity (NEP). Although EW stimulated plant growth and increased carbon inputs, the enhanced respiration effect outweighed the warming-induced stimulation of photosynthesis, resulting in a significant weakened carbon sink. This study provides a scientific basis for accurately assessing the carbon sequestration function of alpine peatlands under climate warming.

Key words: Ecosystem carbon fluxes; Alpine peatlands; Climate warming; Whole-ecosystem warming

IPCC 报告预测,地表和深层土壤温度将以相近速率持续上升,预计到21世纪末升温约4℃,该趋势与RCP 8.5情景下的气温变化趋势一致^[1-2]。气候变暖加速土壤碳分解^[3],温度每升高1℃,陆地碳库净减少约45~65 Pg C^[4-5],进而通过改变全球碳收支可能对全球气候产生正反馈^[6-7]。为应对全球气候变化和减少温室气体排放,中国于2020年提出“碳达峰”与“碳中和”的“双碳”目标^[8]。如何有效应对气候变化,实现“双碳”目标,已成为全人类面临的重大挑战^[9]。碳循环作为陆地生态系统的关键过程,与全球气候变暖密切相关。总生态系统生产力(Gross ecosystem productivity, GEP)、生态系统呼吸(Ecosystem respiration, ER)和净生态系统生产力(Net ecosystem productivity, NEP)是碳循环的重要组成部分,直接反映了植物通过光合作用和呼吸作用固定碳和释放碳的能力,是生态系统碳循环的关键过程^[10]。陆地生态系统碳储量取决于植物光合作用固定碳和ER(包括植物和微生物呼吸等)释放碳之间的平衡。泥炭地是陆地生态系统的重要组成部分,虽然仅占全球陆地面积的2.84%^[11],但其碳储量占陆地生态系统总碳储量的12%~20%^[12],在全球碳循环中发挥重要作用。因此,研究泥炭地生态系统碳通量对气候变暖的响应具有重要意义。

大量研究表明,温度是影响生态系统碳通量的主要因子。温度升高可直接改变植物光合作用及植物-土壤呼吸作用,从而影响碳通量^[13-15];也可以通过间接效应(如物候和水分变化等)调控生态系统碳通量^[16-17]。在气候变暖条件下,这些非生物和生物因素通过不同途径调节生态系统碳吸收和碳排放之间的平衡,对大气CO₂浓度产生正反馈或负反馈^[18-19]。具体而言,升温通常促进植物光合作用,增强CO₂吸收与碳固定能力;同时刺激植物和微生

物呼吸作用,增加生态系统碳释放量^[20]。增温影响土壤含水量,而水分是植被生长和微生物代谢的必要条件,土壤湿度变化进一步影响光合作用和呼吸作用,对生态系统碳通量产生显著影响^[20-21]。由于碳吸收和碳排放过程对温度和土壤湿度的响应不同,不同增温方式下生态系统对全球气候变暖的响应特征可能存在显著差异^[21-23],而目前关于生态系统碳通量如何响应全球变暖仍存在争议^[24]。常用的实验增温方法主要包括开顶式(Open Top Chamber, OTC)增温、红外辐射增温和加热电缆增温,前两者主要作用于空气和地表植被,后者则主要引起土壤剖面温度变化。由于加热机制差异,不同增温方式可能引起植被和生态系统的特异性响应^[25],进而对生态系统碳通量产生不同影响。深层土壤碳储量约占土壤总碳储量的50%以上^[26-27],已有研究发现,土壤剖面增温会刺激土壤呼吸,增加生态系统CO₂排放,且其土壤碳释放对温度的敏感性大于表层土壤单独增温^[1,28]。这表明生态系统碳交换对不同增温方式的响应存在差异,但关于全生态系统增温如何影响碳通量的研究相对缺乏,其响应机制尚不明确。全生态系统增温(Whole-ecosystem warming, EW)包含地上增温(Above-ground warming, AW)和土壤剖面增温(Whole-soil profile warming, BW),是最接近真实气候变暖情景的先进野外增温方法。因此,研究全生态系统增温对生态系统碳通量的影响十分必要。已有一些研究采用全生态系统增温分析了生态系统CO₂排放量和土壤碳储量对温度变化的响应,但未深入探讨增温对生态系统碳输入和输出过程的影响,且目前关于泥炭地生态系统碳通量对全生态系统增温的响应研究仍十分匮乏^[29-31]。寒冷生态系统对温度变化更为敏感,增温可能导致更多碳损失^[32]。因此,研究高寒泥炭地生态系统碳通量对不同增温方式(尤其是全生态系统

增温)的响应,对理解气候变暖背景下泥炭地碳循环具有重要的科学意义。

青藏高原由于低温和缺氧环境形成了大面积的泥炭地,同时也是全球气候变化最显著的区域之一,其变暖速率约为全球平均水平的两倍^[33-34]。青藏高原约储存了中国泥炭地总碳储量(2.17 Pg)的69%^[35],若尔盖高原作为其中面积最大的高寒泥炭地,具有十分重要的碳储存功能。同时,由于该地区常常受低温限制,生态系统土壤有机质周转速率慢,土壤中积累了丰富的碳,增温会对该地区生态系统碳收支和碳平衡产生深远影响。因而,研究该高寒泥炭地生态系统碳通量对不同增温方式的响应具有重要的生态学意义。基于此,本文以若尔盖高原高寒泥炭地生态系统为研究对象,设置四种增温处理:对照(Control, CK)、地上增温(AW)、土壤剖面增温(BW)和全生态系统增温(EW),探讨不同增温方式对生态系统碳通量(NEP, ER和GEP)的影响及其机制,旨在深化对气候变暖影响泥炭地碳循环的认识,为更准确地预测和模拟泥炭地生态系统碳动态提供理论依据和实验证据,同时为泥炭地生态系统科学管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州红原县日干乔(102°38′33″E, 33°06′25″N),地处青藏高原东南缘。若尔盖高原是全球面积最大的高寒泥炭地分布区,本研究区位于其东部,平均海拔为3480 m,地貌表现为山地向高原的过渡,属丘状高原区^[36]。该区属高原寒温带湿润气候,无绝对无霜期,年均降水量约为700 mm,主要集中于5—9月^[37]。研究区为典型高寒泥炭地生态系统,植被以莎草科和禾本科为主,优势物种为莎草科的木里苔草(*Carex mulien-sis*)和四川嵩草(*Kobresia setchwanensis*)。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设4个区组。每个区组设置4种处理:对照(CK)、地上增温(AW)、0~100 cm土壤剖面增温(BW)和全生态系统增温(EW),共16个样地(图1)。每个样方为直径3 m的圆形,相邻样方间隔3 m以降低样方间的相互干扰。地上增温采用2根红外辐射器加热(每根红外辐射器

的最大功率为2000 W);土壤剖面增温在0~100 cm剖面内垂直、等距布设20根加热电缆,并在表层5 cm深度设置两圈加热电缆(分别距圆心0.5 m和1 m)以补充表层土壤热量损失;全生态系统增温同时包括地上红外辐射增温和土壤剖面增温。试验平台于2022年8月建成并开始增温,自2023年7月起正式观测。

1.3 生态系统碳通量测定

生态系统碳通量(GEP, ER, NEE)采用便捷式CO₂分析仪测定。自2023年7月起至生长季结束,对各样方进行观测。为测定生态系统与大气间的CO₂交换通量,在每个样方内固定1个0.5 m×0.5 m的地框。测定时将0.5 m×0.5 m×0.5 m的透明箱置于地框上,与CO₂分析仪连接并保证密闭。箱内对角安装小风扇以保证混匀箱内气体。箱内气体稳定后,连续测定60 s箱内的CO₂浓度变化(间隔1 s)。在光照条件下,依据箱内CO₂浓度随时间变化的斜率计算生态系统净CO₂交换量(Net ecosystem carbon exchange, NEE)。NEE为正值表示碳损失,负值表示碳吸收。将箱体覆盖内黑外白的不透明遮光布以阻断光照,于黑暗条件下测定ER。测量过程中,箱内两个小风扇连续运转以混匀箱内空气。箱式法测定ER具有较好的可靠性,已得到广泛应用^[38-40]。除地衣苔原等极端环境外,陆地生态系统非植物的光合作用可忽略不计,因此总初级生产力(GPP)和GEP基本等同,可用GEP衡量^[41]。此外,为测定土壤蒸发(Soil evaporation, E),本研究在每个样方内固定一个底面积为276.27 cm²的PVC环,测定前将环内的绿色植物去除,测定时将便捷式CO₂分析仪置于环上并确保密闭。在整个观测期间,确保生长季(7—9月)每月至少完成一次NEE, ER, GEP和E的测定。

NEP, ER和GEP及E的通量(Flux, F)计算如下:

$$F = \frac{10VP_0 \times (1 - W/1000)}{RS(T_0 + 273.15)} \times \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$NEP = -NEE$$

$$GEP = ER - NEE$$

式中, V为箱体体积(cm³), P₀为箱内初始大气压(KPa), W为水汽含量(mmol·mol⁻¹), R为常数8.314(Pa·m³·K⁻¹·mol⁻¹), S为箱底面积(cm²), T₀为箱内温度(°C), ∂C/∂t为箱体内水汽的排放速率(μmol·mol⁻¹·s⁻¹)。



图1 研究区增温试验设置

Fig. 1 Experimental design of warming treatments at the study site

在土壤 10 cm 深度处用温度探针和便携式温度计测定土壤温度;土壤体积含水量使用手持式土壤湿度仪(TDR 100, Spectrum Technologies Inc., Chicago, USA)测定,每次在通量观测地框附近随机选取 5 个点重复测量。考虑到泥炭地长期处于淹水环境,土壤含水量较高,故以土壤水位作为土壤水分状况的补充指标:在每个样方中埋设 100 cm 深的水位管,使用卷尺测量水位。土壤剖面湿度监测深度为 100 cm,分别在 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm, 75 cm 和 90 cm 处设置监测点,每 30 分钟自动记录土壤温度和土壤含水量。

1.4 物种调查及地上净初级生产力的测定

于 2023 年 8 月初开展物种调查。每个样方内随机放置 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的样方框,目测估算群落总盖度。将样方框等分为 9 个小格,记录各小格内所有物种的株数、高度和盖度。净初级生产力(Above-ground net primary productivity, ANPP)的测定与物种调查同时进行。在每个样方里随机放置 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 样方框,将样方框内植物的地上部分齐地面剪取,区分绿色活体植物与凋落物。随后将样品带回实验室按物种分类,在 65°C 下烘 72 h 至恒重后称重,并计算各物种及群落总地上生物量。由于 8 月植物生物量接近年内峰值,可作为当年的 ANPP。

1.5 数据处理和统计分析

数据分析前剔除异常值,确保各观测期各处理至少有 3 个重复,以保证统计分析的稳健性。采用线性混合效应模型(LMM)分析增温处理对土壤温度、WTD、土壤含水量及生态系统碳通量的影响。LMM 可有效去除非独立观测数据的随机效应^[42],模型构建采用 R 软件包“lme4”完成。由于碳通量数据存在时间变化,模型设定增温处理为固定效应,测定日期和区组为随机效应。土壤剖面温度和含水量分析采用与碳通量同期观测的土壤剖面连续数据,模型中增温处理为固定效应,区组和测定日期为随机效应。基于 R 软件包“emmeans”进行 Tukey 事后多重比较(显著性水平为 0.05),检验不同增温处理间的显著性差异。采用回归分析探讨碳通量与环境因子(土壤温度, WTD, 土壤含水量等)的关系。数据整理在 Excel 中完成,统计分析在 R 4.3.1 中进行。对不满足正态性和方差齐性假设的变量进行适当变换,以满足模型假设。

2 结果与分析

2.1 不同增温处理下主要环境因子变化特征

各增温处理均显著提高了土壤温度。相比对照(CK),地上增温(AW)、土壤剖面增温(BW)和全

生态系统增温(EW)使10 cm土壤温度分别提高约1.5℃, 2℃和2.5℃($P<0.05$), 且EW较AW高1.3℃(图2b, $P<0.05$)。水位(WTD)呈显著季节变化, 8月初降至最低(-25 cm以下), 生长季末(9月末)最高。土壤含水量同样表现出明显的季节变化特征, 7月末降至最低(<60%), 随后持续上升, 9月达到峰值(图2)。土壤剖面分析表明, 各增温处理均显著提高了各土层温度; 在20 cm及以下深度, EW和BW的土壤温度均显著高于AW(图3a, $P<0.05$)。土壤温度随着深度增加呈递减趋势(图3a)。增温处理显著影响土壤含水量, EW在多数土

层显著降低土壤含水量, 该效应在深层土壤中更为明显(图3b, $P<0.05$)。在10 cm深处, AW显著降低土壤含水量, BW显著提高土壤含水量; BW和EW的土壤含水量均显著高于AW。在40 cm及以下深度, EW的土壤含水量显著低于AW(图3b, $P<0.05$)。

植被群落特征方面, EW显著提高了植被总盖度($P<0.05$), 但各增温处理对物种丰富度、ANPP和立枯生物量整体无显著影响(图4)。值得注意的是, EW的ANPP和立枯生物量均显著低于AW, BW的地上净初级生产力亦低于AW(图4b, d)。

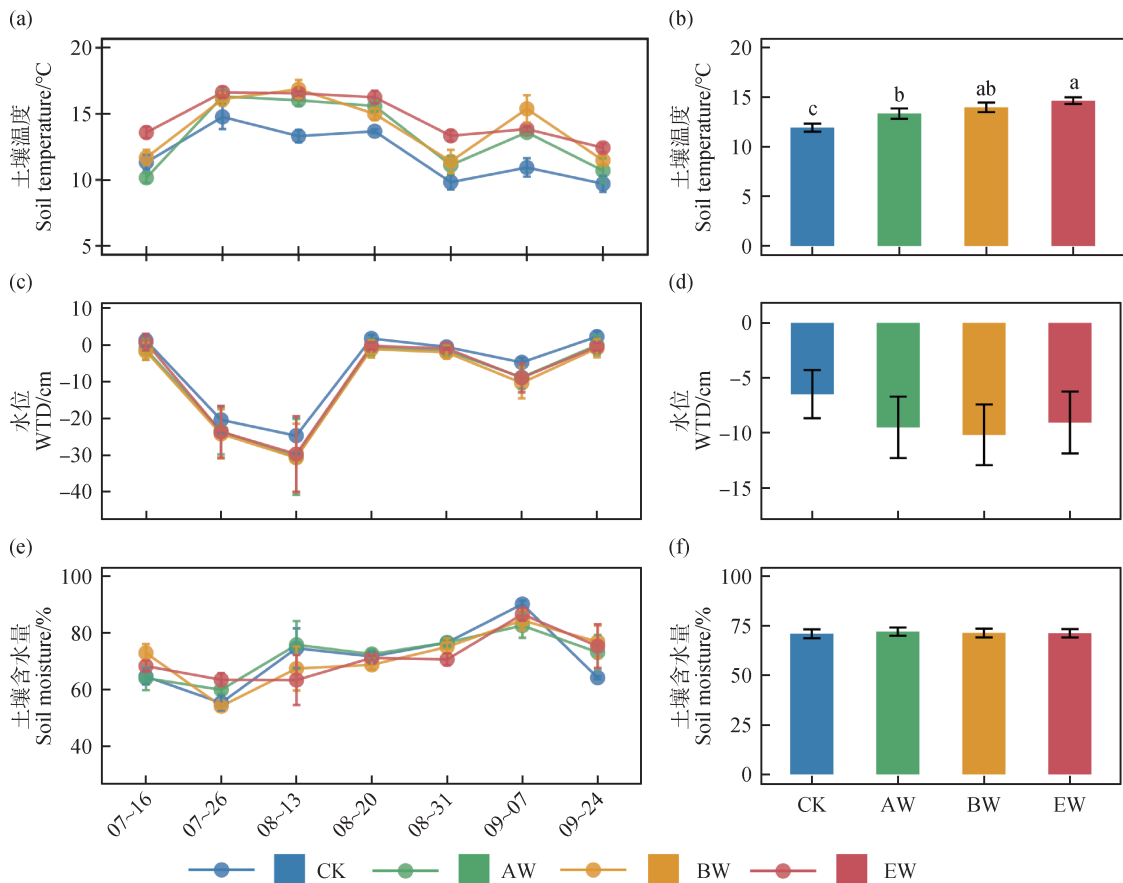


图2 不同增温处理土壤温度、水位和土壤含水量的变化

Fig. 2 Changes in soil temperature, water table depth and soil moisture under different treatments

注: CK为对照; AW为地上增温; BW为土壤剖面增温; EW为全生态系统增温。不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Note: CK, control; AW, above-ground warming; BW, whole-soil profile warming; EW, whole-ecosystem warming. Different lowercase letters indicate significant ($P<0.05$) differences among treatments. The same as below

2.2 不同增温处理对生态系统碳通量的影响

生态系统碳通量具有明显的季节动态(图5)。GEP于7月初最高, 随后逐渐下降, 至9月降到 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(图5a); ER在8月达到峰值(接近 $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)(图5c)。研究区生长季整体表现为净碳吸收, NEP的季节变化趋势与GEP类似,

9月降至最低(约为 $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 图5e)。增温处理显著改变了碳通量组分。相比CK, EW使ER显著增加了 $1.03 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P<0.05$), NEP显著降低 $1.89 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P<0.05$); BW使ER显著增加 $0.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P<0.05$), 但对GEP无显著影响(图5d, f)。相比BW, EW使GEP和NEP分

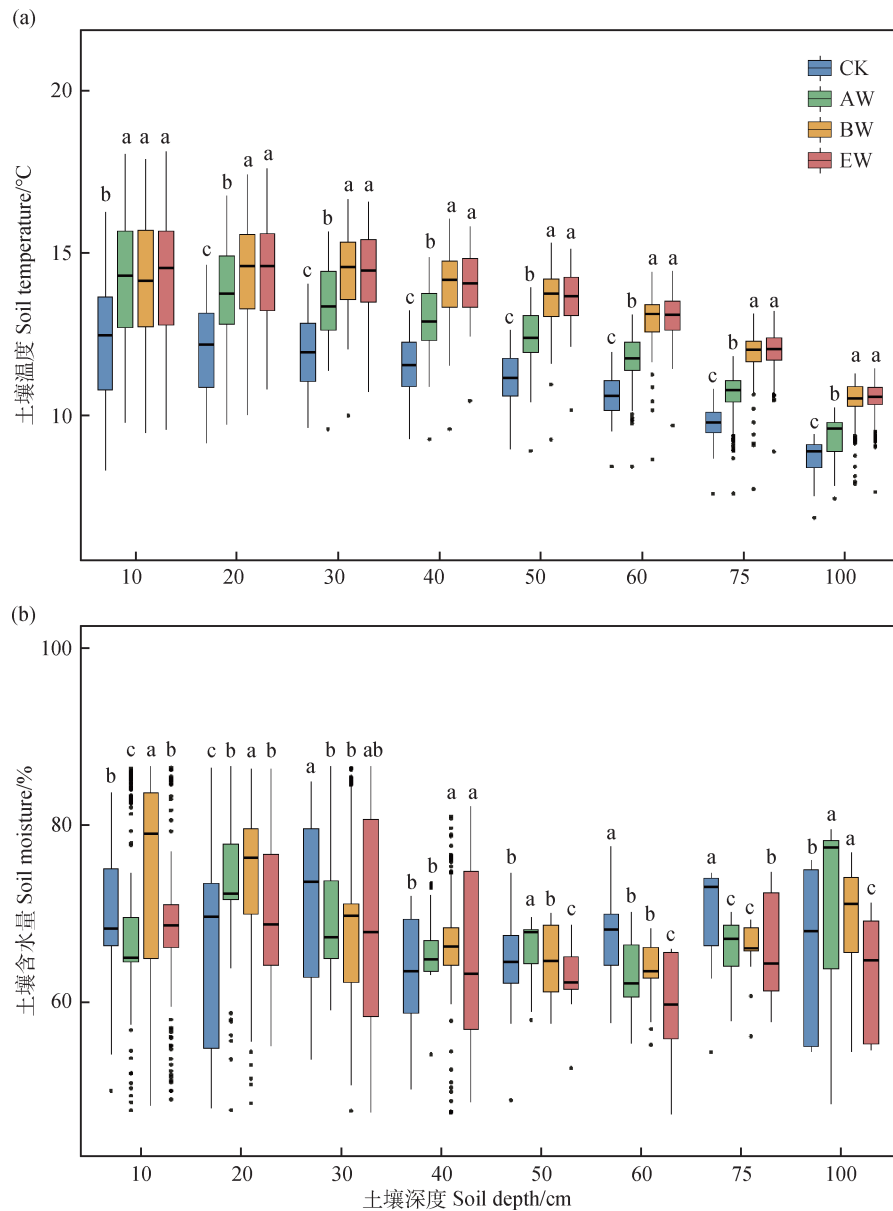


图3 不同增温处理的土壤剖面温度和含水量的变化

Fig. 3 Changes of soil temperature and moisture under different warming treatments

别显著降低 $1.95 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $2.03 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P<0.05$)。相比 AW, EW 使 ER 显著增加 $0.67 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($P<0.05$) , NEP 显著降低 $1.80 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 5, $P<0.05$)。

2.3 环境因素对生态系统碳通量的影响

生长季内 ER 与土壤温度呈显著正相关 (图 6d, $P<0.05$)。各增温处理下, 土壤温度对 GEP 无

显著影响 (图 6a)。CK 处理下 GEP 随着土壤温度升高显著增加 (图 6a, $P<0.01$) , 但土壤温度对 NEP 无显著影响 (图 6g)。WTD 和土壤含水量均可表征土壤水分状况。随着水位降低 (WTD 值更负), ER 和 GEP 均显著增加 (图 6b, e)。在 EW 处理下, ER 随着土壤含水量的降低而显著增加 (图 6f, $P<0.05$)。上述结果表明, 土壤水分与 ER 和 GEP 呈负相关。

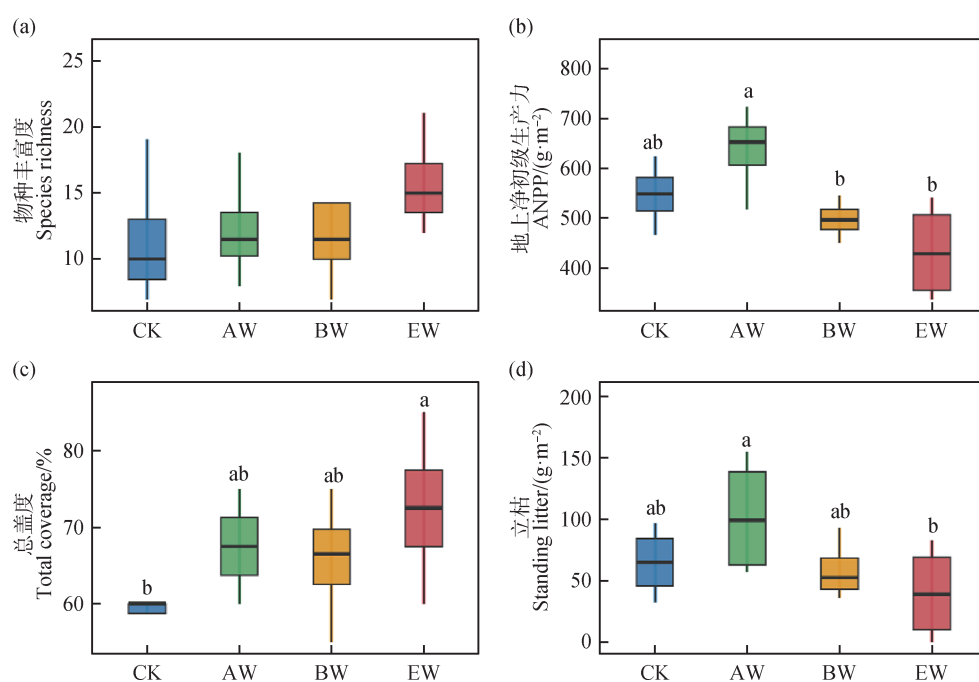


图 4 不同增温处理下植被群落特征及生物量的变化

Fig. 4 Changes of plant community properties and biomass under different warming treatments

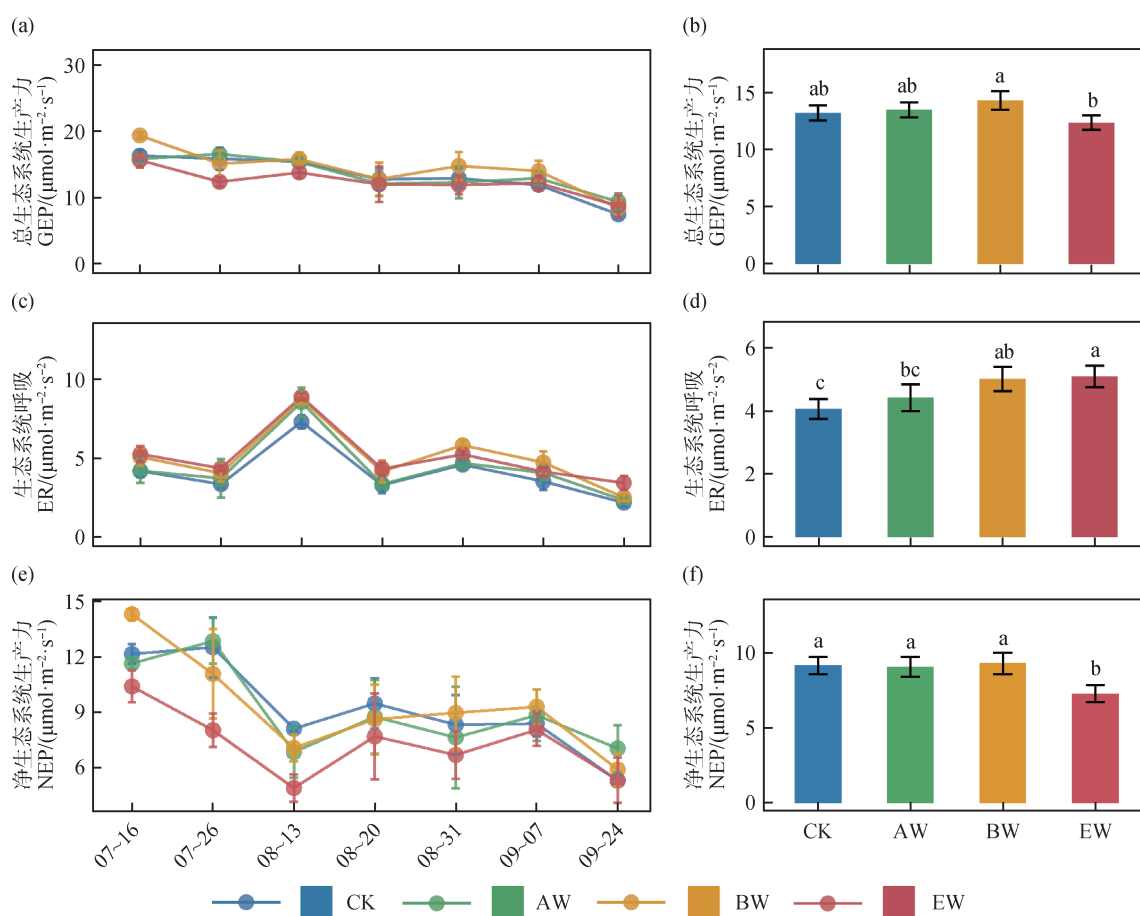


图 5 不同增温处理对生态系统碳通量的影响

Fig. 5 Impacts of different warming treatments on ecosystem carbon fluxes

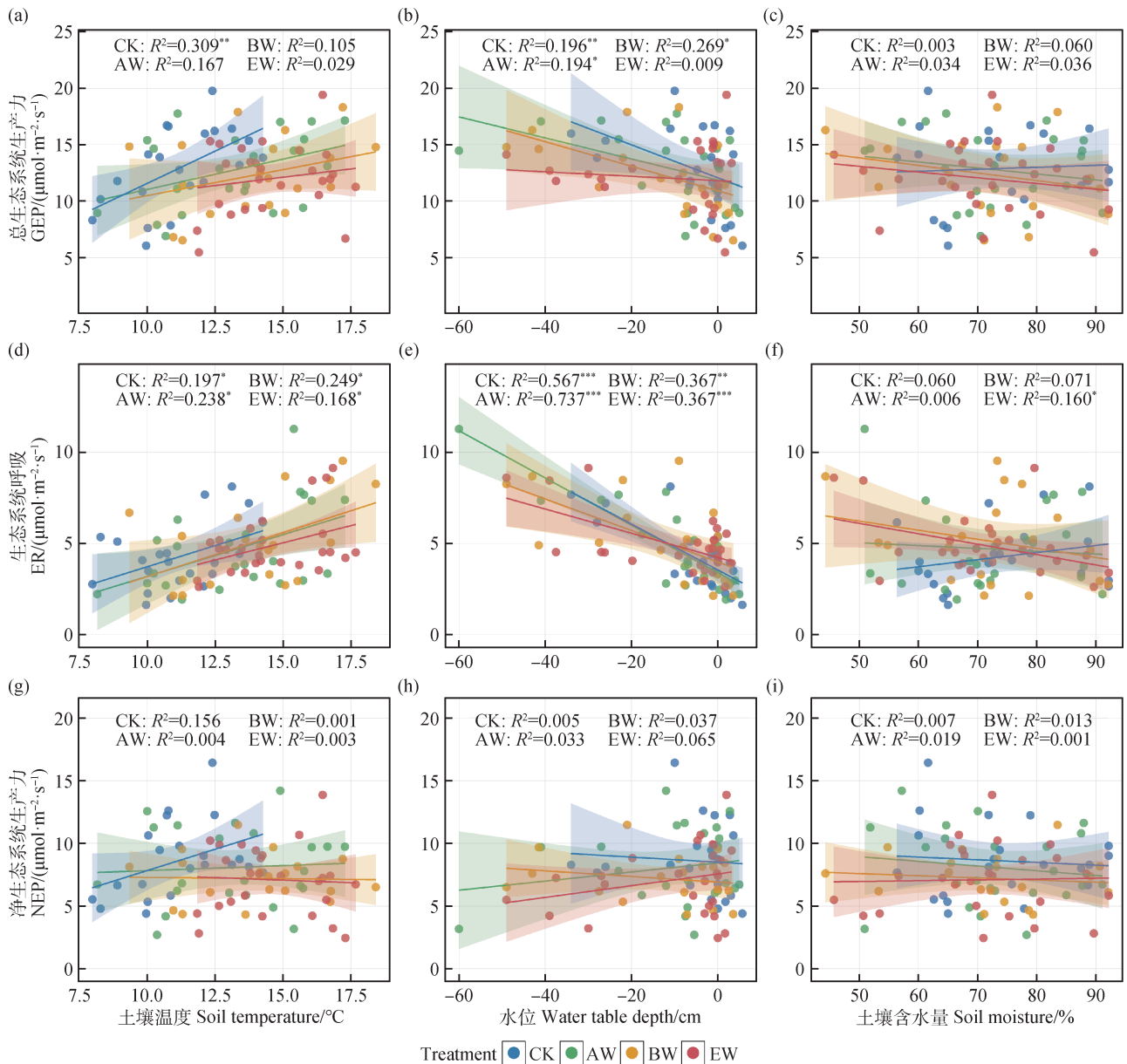


图6 GEP、ER和NEP与土壤温度、水位和土壤含水量之间的关系

Fig. 6 Relationships between GEP, ER, NEP and soil temperature, WTD and soil moisture

注:*, **, ***分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$

Note: *, **, *** indicate $P < 0.05$, $P < 0.01$, and $P < 0.001$, respectively

3 讨论

本研究发现EW显著增加ER,主要可能归因于以下机制:(1)升温增强土壤微生物活性和有机质分解^[15],加速土壤有机碳矿化,促进土壤呼吸^[13];(2)增温促进植物光合产物向地下分配,提高植物根系生物量和活性,增强植物根系呼吸^[6,28];(3)EW显著提高土壤蒸发(图7),改善土壤通气性和氧气供应,进而促进微生物分解和ER^[43]。EW对GEP无显著影响,可能因增温加剧植株体内水分散失,

抑制光合作用和植被生长^[44],该负效应抵消了地下养分有效性提升对GEP的促进作用^[45]。BW显著增加ER,但对GEP和NEP均无显著影响,可能原因是BW显著提高土壤蒸发量和剖面含水量、改变微生物群落结构^[46-47],但对植物生长的直接影响有限。AW对土壤水分条件及植被群落的影响较小,未实质改变碳输入和输出(ANPP、植被盖度和凋落物量均无显著响应),因此对泥炭地生态系统碳通量各组分均无显著影响。

研究区生态系统长期的淹水、低温和厌氧环境

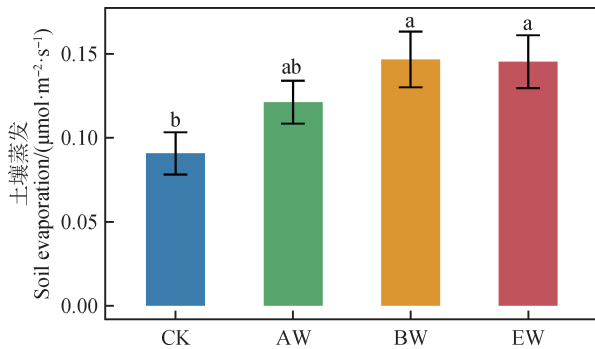


图7 不同增温处理下土壤蒸发的变化

Fig. 7 Changes of soil evaporation under different warming treatments

共同抑制有机质分解,促进有机碳不断积累(图5)。EW使NEP降低21%(图5),反映了碳收支平衡的改变。温度是影响泥炭地生态系统碳通量的关键环境因子^[48-49]。相比植物光合作用,ER对温度变化

更敏感,全球变暖可能削弱泥炭地碳汇功能^[22,50]。一方面,增温提高底物和养分有效性,增强植被生产力(图8),植被总盖度显著增加,植物利用光合作用进行碳吸收的能力增加,从而增加土壤有机碳输入^[7,51];另一方面,增温也会促进微生物活性和有机质分解,增强CO₂释放^[52-53]。本研究表明,增温对ER的刺激作用强于对GEP的促进作用(图6),导致NEP受到抑制。总体而言,NEP受到GEP和ER的综合影响,NEP降低反映光合固碳被呼吸作用所抵消,可能抑制植被持续生长,降低地上生产力。值得注意的是,虽然EW显著增加了ER并降低了NEP,但单独的地上增温对生态系统碳通量无显著影响。泥炭地碳库的长期稳定性依赖于淹水缺氧条件下缓慢的有机质分解,温度与土壤湿度均是影响碳通量的关键因素^[14,17,54]。全球变暖背景下,升

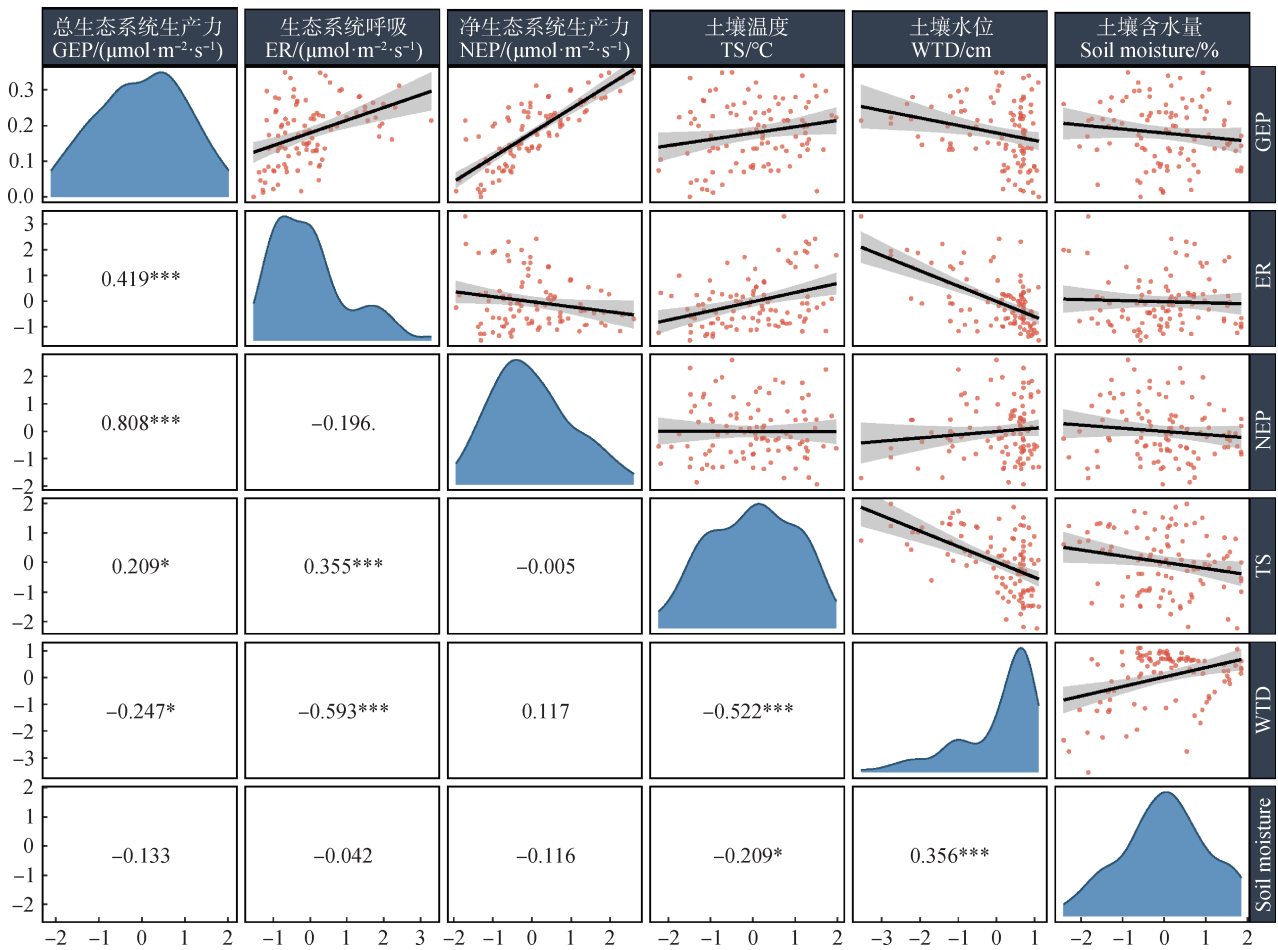


图8 各变量间的相关性

Fig. 8 Correlation matrix analysis of variables

注:土壤温度(Soil temperature, TS)。上三角图为线性回归拟合分析,下三角图表示Pearson相关系数和显著性,其中*,**,***分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$

Note: Soil temperature, TS. Upper triangle shows linear regression fits; lower triangle shows Pearson correlation coefficients with significance (*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$)

温增强土壤蒸发,导致土壤水分流失。本研究中,各增温处理均显著提高了土壤温度(图2)。但土壤温度变化与NEP的相关关系并不显著(图6),可能原因是温度对光合作用的促进被呼吸增强所抵消。EW同时加热空气、植被和土壤剖面,对土壤湿度及植物-微生物代谢活动影响更显著。与AW相比,EW进一步提高土壤温度并降低土壤剖面含水量,改善土壤通气性和氧气可利用性,促进根系呼吸和微生物活动^[17,55]。尽管EW促进植被生长并增加碳输入,但呼吸增强效应占主导,导致生态系统固碳能力减弱。

4 结论

本研究基于若尔盖泥炭地生态系统碳通量观测数据,探讨不同增温方式对碳通量的影响及其机制。结果表明,各增温处理均会引起土壤温度升高,显著降低土壤剖面含水量。全生态系统增温和土壤剖面增温对生态系统呼吸的促进作用更为显著。而随着增温处理下土壤温度的升高,研究区总生态系统生产力相对稳定。全生态系统增温对生态系统的影响最为显著,该增温处理通过降低土壤含水量、提高土壤蒸发,显著降低净生态系统生产力。综合分析表明,土壤温度、水位和含水量是驱动碳通量变化的重要环境因子,且升温 and 含水量下降对生态系统呼吸的刺激作用大于对总生态系统生产力的促进作用。相比于地上增温,全生态系统增温对土壤湿度和植被生长的影响更大,促进了植物根系呼吸和微生物分解作用,因而显著增加了生态系统呼吸。本研究聚焦若尔盖泥炭地生态系统碳通量对增温的响应,证实了全生态系统增温对泥炭地生态系统碳通量的显著影响,为全球变暖背景下准确评估泥炭地固碳潜力提供了关键的实验证据。本研究仅反映泥炭地生态系统碳通量对气候变暖的短期响应,而生态系统对全球变化的响应具有明显的时间依赖性。鉴于泥炭地碳循环过程的复杂性,未来亟需基于现有增温平台开展长期连续观测,以全面评估增温的累积效应及泥炭地碳汇功能的长期变化趋势。

参考文献

[1] HICKS PRIES C E, CASTANHA C, PORRAS R C, et al. The whole-soil carbon flux in response to warming[J]. *Science*, 2017, 355(6332): 1420-1423

[2] CIAIS P, SABINE C, BALA G, et al. Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 465-570

[3] DAVIDSON E A, JANSSENS I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173

[4] WENZEL S, COX P M, EYRING V, et al. Emergent constraints on climate-carbon cycle feedbacks in the CMIP5 Earth system models[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(5): 794-807

[5] ARORA V K, KATAVOUTA A, WILLIAMS R G, et al. Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models, and their comparison to CMIP5 models[J]. *Biogeosciences*, 2020, 17: 4173 - 4222

[6] LUO Y Q, WAN S Q, HUI D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625

[7] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176

[8] MALLAPATY S. How China could be carbon neutral by mid-century[J]. *Nature*, 2020, 586(7830): 482-483

[9] 张卉, 郭正堂, 赵艳. 泥炭地碳源汇功能与“双碳”目标[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 324-335

ZHANG HUI, GUO ZHENG TANG, ZHAO YAN. Peatland carbon cycling and its contribution to carbon peak and carbon neutrality[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 324-335

[10] 常顺利, 杨洪晓, 葛剑平. 净生态系统生产力研究进展与问题[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2005(5): 517-521

CHANG SHUNLI, YANG HONGXIAO, GE JIANPING. Advance and questions in net ecosystem production[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2005(5): 517-521

[11] DARGIE G C, LEWIS S L, LAWSON I T, et al. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex[J]. *Nature*, 2017, 542(7639): 86-90

[12] INUBUSHI K, FURUKAWA Y, HADI A, et al. Seasonal changes of CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan[J]. *Chemosphere*, 2003, 52(3): 603-608.

[13] CAREY J C, TANG J, TEMPLER P H, et al. Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(48): 13797-13802

[14] LI Q, LEROY F, ZOCATELLI R, et al. Abiotic and biotic drivers of microbial respiration in peat and its sensitivity to temperature change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153: 108077

[15] CHAPIN F S, SHAVER G R, GIBLIN A E, et al. Responses of arctic tundra to experimental and observed changes in climate[J]. *Ecology*, 1995, 76(3): 694-711

- [16] HELBIG M, CHASMER L E, DESAI A R, et al. Direct and indirect climate change effects on carbon dioxide fluxes in a thawing boreal forest – wetland landscape[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(8):3231-3248
- [17] MÄKIRANTA P, LAIHO R, MEHTÄTALO L, et al. Responses of phenology and biomass production of boreal fens to climate warming under different water-table level regimes[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(3):944-956
- [18] CLARK D B, MERCADO L M, SITCH S, et al. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description- Part 2: carbon fluxes and vegetation dynamics[J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, 4(3):701-722
- [19] FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ M, VICCA S, JANSSENS I A, et al. Nutrient availability as the key regulator of global forest carbon balance[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6):471-476
- [20] ZHANG B W, TAN X R, WANG S S, et al. Asymmetric sensitivity of ecosystem carbon and water processes in response to precipitation change in a semi-arid steppe[J]. *Functional Ecology*, 2017, 31(6):1301-1311
- [21] NIU S L, WU M Y, HAN Y, et al. Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe[J]. *New Phytologist*, 2008, 177(1):209-219
- [22] DORREPAAL E, TOET S, VAN LOGTESTIJN R S P, et al. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic[J]. *Nature*, 2009, 460(7255):616-619
- [23] GIARDINA C P, LITTON C M, CROW S E, et al. Warming-related increases in soil CO₂ efflux are explained by increased below-ground carbon flux[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(9):822-827
- [24] PEÑUELAS J, GORDON C, LLORENS L, et al. Noninvasive field experiments show different plant responses to warming and drought among sites, seasons, and species in a north-south European gradient[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(6):598-612
- [25] 牛书丽, 韩兴国, 马克平, 等. 全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J]. *植物生态学报*, 2007(2):262-271
- NIU SHULI, AN XINGGUO, MA KEPING, et al. Field facilities in global warming and terrestrial ecosystem research[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007(2):262-271
- [26] YANG Y H, FANG J Y, TANG Y H, et al. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7):1592-1599
- [27] JACKSON R B, LAJTHA K, CROW S E, et al. The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2017, 48(1):419-445
- [28] CHEN Y, QIN W K, ZHANG Q F, et al. Whole-soil warming leads to substantial soil carbon emission in an alpine grassland[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1):4489
- [29] HANSON P J, GRIFFITHS N A, IVERSEN C M, et al. Rapid net carbon loss from a whole-ecosystem warmed peatland[J]. *AGU Advances*, 2020, 1(3):e2020AV000163
- [30] BAI Y X, PENG Y F, ZHOU W, et al. SWAMP: A new experiment for simulating permafrost warming and active layer deepening on the Tibetan Plateau[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2023, 14(7):1732-1746
- [31] OFITI N O E, SCHMIDT M W I, ABIVEN S, et al. Climate warming and elevated CO₂ alter peatland soil carbon sources and stability[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1):7533
- [32] KIRSCHBAUM M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(6):753-760
- [33] EHLERS T A, CHEN D L, APPEL E, et al. Past, present, and future geo-biosphere interactions on the Tibetan Plateau and implications for permafrost[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 234:104197
- [34] CHEN Y, HAN M G, YUAN X, et al. Warming has a minor effect on surface soil organic carbon in alpine meadow ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(4):1618-1629
- [35] WANG M, CHEN H, WU N, et al. Carbon dynamics of peatlands in China during the Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 99:34-41
- [36] 陈建伟, 欧阳凯华, 屈思潮. 红原县白河瓦切镇塔林段水生态保护方案之浅见[J]. *四川水力发电*, 2024, 43(4):51-53, 65
- CHEN JIANWEI, OUYANG KAIHUA, QU SICHAO. A preliminary view on the water ecological protection plan for Talin Section of Waqie Town along the Baihe River in Hongyuan County[J]. *Sichuan Hydropower*, 2024, 43(4):51-53, 65
- [37] 道里刚, 张洪轩, 史长光, 等. 红原县瓦切镇景观格局定量分析[J]. *草学*, 2017(6):52-56
- DAO LIGANG, ZHANG HONGXUAN, SHI CHANGGAUNG, et al. Quantitative analysis of grassland landscape pattern of Waqie Town Hongyuan County[J]. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2017(6):52-56
- [38] GANJURJAV H, GAO Q Z, ZHANG W N, et al. Effects of warming on CO₂ fluxes in an alpine meadow ecosystem on the central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Public Library of Science One*, 2015, 10(7):e0132044
- [39] XIA J Y, WAN S Q. The effects of warming-shifted plant phenology on ecosystem carbon exchange are regulated by precipitation in a semi-arid grassland[J]. *Public Library of Science One*, 2012, 7(2):e32088
- [40] FU G, SHEN Z X, ZHANG X Z, et al. Response of ecosystem respiration to experimental warming and clipping at daily time scale in an alpine meadow of Tibet[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(3):455-463
- [41] JÄRVEOJA J, NILSSON M B, GAŽOVIĆ M, et al. Partitioning of the net CO₂ exchange using an automated chamber system reveals plant phenology as key control of production and respiration fluxes in a boreal peatland[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(8):3436-3451

- [42] DING J Z, CHEN L Y, JI C J, et al. Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions[J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10(6):420-424
- [43] SULMAN B N, DESAI A R, COOK B D, et al. Contrasting carbon dioxide fluxes between a drying shrub wetland in Northern Wisconsin, USA, and nearby forests[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(6):1115-1126
- [44] AURELA M, RIUTTA T, LAURILA T, et al. CO₂ exchange of a sedge fen in southern Finland—the impact of a drought period [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, 59(5):826
- [45] LAINE A M, MÄKIRANTA P, LAIHO R, et al. Warming impacts on boreal fen CO₂ exchange under wet and dry conditions[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6):1995-2008
- [46] BELAY-TEDLA A, ZHOU X H, SU B, et al. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1):110-116
- [47] SHEIK C S, BEASLEY W H, ELSHAHED M S, et al. Effect of warming and drought on grassland microbial communities[J]. *The ISME Journal*, 2011, 5(10):1692-1700
- [48] HELBIG M, HUMPHREYS E R, TODD A. Contrasting temperature sensitivity of CO₂ exchange in peatlands of the Hudson Bay Lowlands, Canada[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(7):2126-2143
- [49] WU J H, ROULET N T. Climate change reduces the capacity of northern peatlands to absorb the atmospheric carbon dioxide: The different responses of bogs and fens[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(10):1005-1024
- [50] ISE T, DUNN A L, WOFSEY S C, et al. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(11):763-766
- [51] XU X, SHI Z, LI D J, et al. Plant community structure regulates responses of prairie soil respiration to decadal experimental warming[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(10):3846-3853
- [52] GILL A L, GIASSON M A, YU R, et al. Deep peat warming increases surface methane and carbon dioxide emissions in a black spruce-dominated ombrotrophic bog[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(12):5398-5411
- [53] LUND M, LAFLEUR P M, ROULET N T, et al. Variability in exchange of CO₂ across 12 northern peatland and tundra sites[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(9):2436-2448
- [54] HELFTER C, CAMPBELL C, DINSMORE K J, et al. Drivers of long-term variability in CO₂ net ecosystem exchange in a temperate peatland [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(6):1799-1811
- [55] TRETTIN C C, LAIHO R, MINKKINEN K, et al. Influence of climate change factors on carbon dynamics in northern forested peatlands[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2006, 86(Special Issue):269-280

(责任编辑 付 宸)