

DOI: 10.20103/j.stxb.202305070949

田茜, 杨芳, 王召欢, 张庆印. 陆地生态系统土壤 CO₂ 排放对模拟增温的响应特征及影响因素. 生态学报, 2024, 44(5): 1928-1939.

Tian Q, Yang F, Wang Z H, Zhang Q Y. Response of soil CO₂ emission in terrestrial ecosystems to the simulated warming and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 1928-1939.

陆地生态系统土壤 CO₂ 排放对模拟增温的响应特征及影响因素

田 茜¹, 杨 芳¹, 王召欢¹, 张庆印^{2, *}

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨陵 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

摘要: 全球变暖已经成为不争的事实, 陆地生态系统碳循环的研究受到了各界广泛关注, 是当前全球变化研究中的重点。土壤 CO₂ 排放是陆地生态系统与大气间二氧化碳交换的最大通量之一, 当前陆地生态系统中土壤 CO₂ 排放如何响应全球气候变暖及其影响因素仍不清楚, 限制了对土壤碳循环过程及影响机制的深入认识。旨在明确全球变暖背景下陆地生态系统中土壤 CO₂ 排放格局及影响因素。基于 Web of Science、PubMed 和中国知网等中英文期刊数据库, 充分收集全球范围内的相关野外试验文献 81 篇, 提取出 65 个研究位置和 213 组相关研究数据, 采用 Meta 分析方法探讨陆地生态系统土壤 CO₂ 排放对增温的响应特征, 分析其与海拔、气候、土壤含水量、容重 (BD)、pH、全氮 (TN) 和土壤有机碳 (SOC) 的相关关系。结果表明: 陆地生态系统中土壤 CO₂ 排放对增温整体有显著的正向响应, 在农、林、草生态系统中, 增温使土壤 CO₂ 排放分别显著增加 13.1%、18.0%、5.9% ($P < 0.05$), 森林生态系统对增温响应的正效应最强烈; 增温能在短时期内促进土壤呼吸, 但随着增温持续时间增加, 土壤呼吸对温度的敏感性会降低, 对温度变化产生适应性, 从而使其对增温的响应能力减弱; 响应特征受到环境因子、土壤特性以及其他试验条件等的影响, 绝大多数条件下对增温表现出显著的正响应特征, 不同影响因子之间共同作用、相互影响。增温通常能够改变植物生物量、土壤养分含量及微生物数量和活性, 从而影响到植被根际呼吸和土壤呼吸速率。相关分析表明, 海拔对土壤 CO₂ 排放有显著负向影响, 而年均气温、年均降水量、土壤含水量和仪器嵌入土壤深度则对土壤 CO₂ 排放产生显著正向影响。这些结果对于理解全球土壤 CO₂ 排放的时空变化格局有重要意义, 也为准确评价全球变暖背景下土壤碳汇功能及其持续性提供理论依据。

关键词: 土壤 CO₂ 排放; 土壤呼吸; 陆地生态系统; 增温; Meta 分析

Response of soil CO₂ emission in terrestrial ecosystems to the simulated warming and its influencing factors

TIAN Qian¹, YANG Fang¹, WANG Zhaohuan¹, ZHANG Qingyin^{2, *}

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Global warming has become an indisputable fact. The research on the carbon cycle of terrestrial ecosystems has received extensive attention from all walks of life and is a key topic in current global change research. Soil CO₂ emission is one of the largest fluxes of CO₂ exchange between terrestrial ecosystems and the atmosphere, and how soil CO₂ emission in terrestrial ecosystems respond to global warming and its influencing factors remains unclear, which limits the in-depth

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (42207402)

收稿日期: 2023-05-07; 网络出版日期: 2023-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qyzhang@nwfau.edu.cn

understanding of soil carbon cycle processes and influencing mechanisms. This study aims to clarify the patterns and influencing factors of soil CO₂ emission in terrestrial ecosystems under global warming. Based on the Chinese and English journal databases such as Web of Science, PubMed and CNKI, 81 peer-reviewed papers was collected worldwide, 65 research sites and 213 sets of relevant research data were extracted. We used Meta-analysis to explore the response of soil CO₂ emission in terrestrial ecosystems to simulated warming, and analyzed its correlation with altitude, climate, soil water content, bulk density (BD), pH, soil total nitrogen (TN), and soil organic carbon (SOC). The results showed an overall significantly positive response of soil CO₂ emission to simulated warming in terrestrial ecosystems, with +13.1%, +18.0%, and +5.9% ($P < 0.05$) in agricultural, forest, and grass ecosystems, respectively. Forest ecosystems showed the strongest positive response to the simulated warming. Warming can promote soil respiration for a short period of time, but with the increase of warming duration, the sensitivity of soil respiration to temperature will be reduced, and the adaptability to temperature changes will be weakened, thereby the response of soil respiration to warming will be weakened. The response are affected by environmental factors, soil characteristics and other experimental conditions, and the most conditions show significant positive response to warming, and different influencing factors interact and influence each other. Warming generally alters plant biomass, soil nutrient content, microbial quantity and activity, thus affecting vegetation rhizosphere respiration and soil respiration rates. Correlation analysis showed that elevation had significantly negative effect on soil CO₂ emission, while mean annual temperature, mean annual precipitation, soil water content, and depth of instrument embedded in soil had significantly positive effects on soil CO₂ emission. These results have important implications for understanding the spatial and temporal patterns of global soil carbon emissions, and provide a theoretical basis for accurately evaluating the function of soil carbon sinks and their persistence in the context of global warming.

Key Words: Soil CO₂ emissions; soil respiration; terrestrial ecosystems; warming; Meta-analysis

全球变暖已成为不争的事实,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)预计全球气温在2030年至2052年间将比工业化之前升高1.5℃^[1],大气中的CO₂是气候变化的主要驱动因素^[2]。土壤CO₂排放是陆地生态系统与大气间CO₂交换的最大通量之一,并已引起了科学界的高度重视。人为活动排放了大量CO₂、CH₄,升高了其大气浓度,使全球温度升高,进而导致土壤有机碳分解加剧,土壤碳储量减少、碳排放增加,大气CO₂浓度升高又将进一步加剧全球变暖。在全球气候变化的背景下,研究陆地生态系统土壤CO₂排放的时空变异对于预测未来大气中CO₂浓度变化具有重要指示作用。

近几十年来,已有诸多研究利用人工模拟增温的方法探索陆地生态系统土壤CO₂排放对于增温的响应。众多研究表明增温将提高有机碳的分解速率,导致土壤碳的流失^[3-6]。此外,一些研究通过Meta分析表明,土壤增温通常会增加土壤呼吸、微生物丰度、微生物生物量碳、植物净初级生产和光合作用^[7-10]。同时,有部分研究显示与以上矛盾的结果。Su等^[11]研究结果没有检测到变暖、降水改变和氮添加对生态系统碳通量参数的交互影响,变暖使净生态系统CO₂交换和生态系统总生产力略有下降。这一结果与许红梅等^[12]研究所得的结论一致。此外,在中国温带草原生态系统,淡沐春等^[13]在为期一年的增温试验研究中发现增温显著降低了土壤有机碳的分解速率。还有一些研究则表明增温对土壤呼吸没有显著影响^[11, 14-16]。

土壤CO₂排放变化受多种因素的影响,气候因素(如气温、降水等)对土壤中植物根系呼吸和土壤微生物呼吸有直接或间接的影响,已成为人们研究的热点。温度是驱动土壤呼吸发生变化的关键因子^[17]。但在气候变暖背景下全球陆地生态系统土壤CO₂排放对增温的响应研究中存在检索文献不全面等因素,从而限制了对土壤碳循环过程及影响机制的深入认识。当前在全球变暖的背景下,土壤CO₂排放对于增温响应试验中,由于各研究区域、土壤理化性质、研究时间长短等方面的不同,所得到的研究结果存在明显差异,除温度外,其他环境因子、土壤特性和试验条件等也会影响土壤呼吸,在多种因素的交互作用下,土壤呼吸随温度的变化会表现得很复杂^[18]。由此当前对于陆地生态系统中土壤CO₂排放将如何响应全球气候变暖的一致结论仍难以

得到。

本研究采用 Meta 分析(又称荟萃分析)的方法,旨在探讨全球陆地生态系统土壤 CO₂排放对气候变暖的响应格局,分析气候变暖条件下土壤 CO₂排放的影响因素,有助于理解全球土壤 CO₂排放的时空变化格局,能够为准确评价全球变暖背景下土壤碳汇功能及其持续性提供理论依据。

1 研究材料与研究方法

1.1 数据来源与筛选

本研究所用文献主要来源于 Web of Science、PubMed 和中国知网等中英文期刊数据库,检索年限为 2000—2022 年,检索关键词为:增温、陆地生态系统、林地、草地、农田、土壤呼吸、CO₂、CH₄、碳排放。

结合本研究的目标,为避免在数据搜集与取舍过程中出现遗漏和偏差,将检索到的文献按照以下标准进行筛选:(1)只搜集进行野外试验的试验数据;(2)研究必须有实验组(增温组)和对照组数据;(3)同一野外试验中,实验组和对照组必须在试验场所、植被覆盖类型、土壤质地以及气候特征等方面保持一致;(4)为避免因短期试验带来的不确定性,试验时间至少在一个月以上;(5)对于多因素处理试验,只选取对照与增温处理数据;(6)实验组和对照组中相关参数均值、标准差以及实验重复次数能够直接从图、表或者文字中提取,或者以上数据可以从文献中通过计算而获得。

根据研究需要,将初始文献中不符合研究需求的文献剔除,保证数据的有效性,最终筛选出有效文献共 81 篇。本文数据库指标包括:土壤含水量、pH 值、容重、有机碳、全氮、土壤呼吸、CO₂和 CH₄浓度等。同时,详细记录试验点的位置、海拔、生态系统类型、采样深度、试验周期、增温方法、年均温度、年均降雨量等基本信息。数据来自所筛选文献中的表格或图表,对于以图的形式呈现出来的数据使用 GetData Graph Digitizer 软件从图中提取数据。所收集增温试验点的分布情况如图 1 所示。

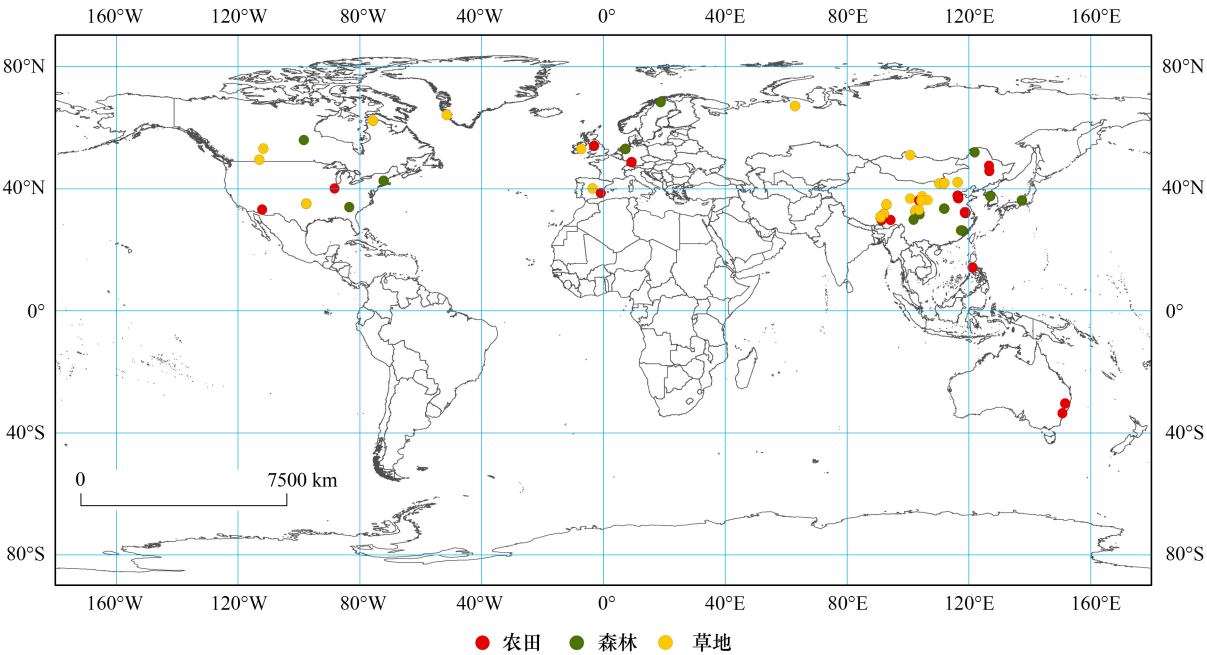


图 1 数据来源的试验点分布
Fig.1 Test site distribution of data sources

1.2 数据分类

由于不同试验区的试验条件、环境因子状况、土壤性质等存在较大差异,为了便于后期数据分析,首先将

各类数据根据其数据范围,并结合实际情况,以多种方式进行整理分类,以检验某一特定因素对土壤 CO₂排放的影响,如增温幅度、海拔、气候、土壤性质等。分类分组情况见表 1。

表 1 数据分类分组
Table 1 Data classification and grouping

数据类型 Data types	第 1 组 Group 1	第 2 组 Group 2	第 3 组 Group 3	第 4 组 Group 4
试验周期 Duration/d	<180	180—366	366—1825	>1825
增温幅度 Magnitude/℃	<1	1—2	2—3	>3
海拔 Altitude/m	<100	100—1500	1500—3500	>3500
年均温度 Mean annual temperature/℃	<0	0—5	5—15	>15
年均降水量 Mean annual precipitation/mm	<200	200—400	400—800	>800
土壤含水量 Soil moisture/(%VWC)	<10	10—20	20—30	>30
仪器嵌入土壤深度 Insert depth/cm	<3	3	>3	
pH	<6.5	≥6.5		
容重 Bulk density/(g/cm ³)	≤1.3	>1.3		
有机碳 Organic carbon/(g/kg)	<10	10—30	>30	
全 N Total N/(g/kg)	<1	1—2	>2	

1.3 Meta 分析方法

本研究使用 MetaWin 2.1 软件进行 Meta 分析。同一指标在不同研究中的表述方法可能存在一定的差异,因此进行数据综合分析之前,应先将不同研究中的指标进行统一,即在进行 Meta 分析时首先需要通过计算效应值来对所提取的数据进行量化,通过计算每个单独研究中的响应比(ln*R*),以估算增温对土壤各变量产生的影响。计算公式如下:

$$\ln R = \ln \frac{X_t}{X_c} = \ln X_t - \ln X_c$$

式中,*X_t*和*X_c*分别为实验组和对照组的平均值。

如果 ln*R*<0,说明增温处理下相关参数产生了负效应,如果 ln*R*>0,则说明增温处理下相关参数产生了正效应。通过 MetaWin 2.1 软件中的随机效应模型计算出 95%置信区间。若置信区间包括 0,则说明增温没有产生显著影响(*P*<0.05);若置信区间整体均不与 0 相交且全部大于 0,则说明增温产生了显著正效应(*P*<0.05);若置信区间全部小于 0,则说明增温产生了显著的负效应(*P*<0.05)。

1.4 数据分析

本研究利用 Excel 2021 软件对文献数据进行录入、统计和整理;利用 ArcMap 10.5 软件(www.esri.com)绘制出各个研究地点的地理位置分布图;采用 MetaWin 2.1 软件对各类型数据进行 Meta 分析^[19];通过 IBM SPSS Statistics 25 进行数据之间的相关性分析。根据以上结果数据,利用 Excel 2021 以及 Origin Pro 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 异质性和发表偏倚检验

采用卡方检验对增温条件下陆地生态系统土壤 CO₂排放进行异质性检验,结果表明,异质性检验统计量 *Q*=4360.4310,陆地生态系统土壤 CO₂排放对增温的异质性检验结果达到极显著(*P_Q*< 0.001),因此采用随机效应模型。为验证陆地生态系统土壤 CO₂排放对增温的响应是否遵循正态分布,使用高斯正态分布进行拟合(图 2)。结果表明,其响应特征效应值服从正态分布。

2.2 陆地生态系统土壤 CO₂排放对增温的总体响应

数据分析过程中发现,本研究所收集的 213 组数据中,CH₄通量数据仅有 9 组,而 CO₂通量有 213 组。因

所收集数据中 CH_4 通量观测值过少, 在分析时, 本研究重点关注 CO_2 通量的研究。

由图 3 可以看出, 全球尺度下, 增温后土壤 CO_2 排放显著增加 11.3% ($P < 0.05$)。不同生态系统增温均能显著促进土壤 CO_2 排放但促进效果不同。与总土壤 CO_2 排放量相比, 森林生态系统土壤 CO_2 排放量显著增加 18.0% ($P < 0.05$), 对增温的响应最明显; 农田生态系统的土壤 CO_2 排放量显著增加 13.1% ($P < 0.05$), 而草原生态系统的土壤 CO_2 排放量显著增加 5.9% ($P < 0.05$), 低于平均水平。

2.3 土壤 CO_2 排放对增温响应的亚组分析

本研究所选取的野外试验增温时间至少在一个月以上, 最短为 31d, 最长为 9490d (26 年)。其中, 增温时间在半年内的研究居多, 而大于五年的观测值数量仅为 6 (图 4)。增温时间小于 5 年 (1825d) 时, 土壤 CO_2 排放表现出显著增加响应。增温时间在半年到一年内对土壤 CO_2 排放的促进作用最强, 与总土壤 CO_2 排放量相比显著增加了 15.78% ($P < 0.05$), 增温时间大于 5 年后响应特征不显著。3 种增温方式都显著增加了土壤 CO_2 排放, 其中, 使用加热电缆进行增温时土壤 CO_2 排放量增加效应最强, 达到 25.32% ($P < 0.05$)。土壤 CO_2 排放量对增温幅度同样呈现显著增加响应, 但各组之间差异不显著。

2.4 土壤 CO_2 排放响应增温的驱动因素分析

2.4.1 环境因子

从海拔来看 (图 5), 除海拔高度大于 3500m 的地区增温对土壤 CO_2 排放的影响不显著外, 其他海拔下增温均显著增加了土壤 CO_2 排放, 尤以 100—1500m 地区最显著, 与总土壤 CO_2 排放量相比增加了 16.84% ($P < 0.05$)。

由图 5 可知, 温带气候和亚热带气候能显著促进土壤 CO_2 排放对增温的正响应, 二者差异较小; 寒带气候下增温对土壤 CO_2 排放的促进作用最显著, 达到 36.54% ($P < 0.05$); 热带季风气候、地中海气候和高山高原气候下增温对土壤 CO_2 排放无显著性作用。从年均温度来看, 在 $>5^\circ\text{C}$ 和 $<0^\circ\text{C}$ 时, 增温显著增加了土壤 CO_2 排放; 而在 $0-5^\circ\text{C}$ 时, 增温对土壤 CO_2 排放的影响不显著。从年均降水来看, 不同分组的年平均降水量使陆地生态系统土壤 CO_2 排放对增温的响应特征存在明显的差异。在 200mm 以下时土壤 CO_2 排放对增温的响应不显著, 其他降水条件下增温均能显著促进土壤 CO_2 排放, 其中土壤 CO_2 排放量在年均降水量为 200—400mm 或 $>800\text{mm}$ 时增加更显著。

对响应比 $\ln R$ 与海拔、年均温度、年均降水量数据利用随机效应模型进行 Meta 回归和一般线性回归分析, 发现其两者之间均存在显著的线性相关关系 (图 6, 表 2)。

2.4.2 土壤特性

本研究发现增温对土壤 CO_2 排放的影响与土壤含水量有显著的相关关系 ($P < 0.001$)。然而, 不同区间的

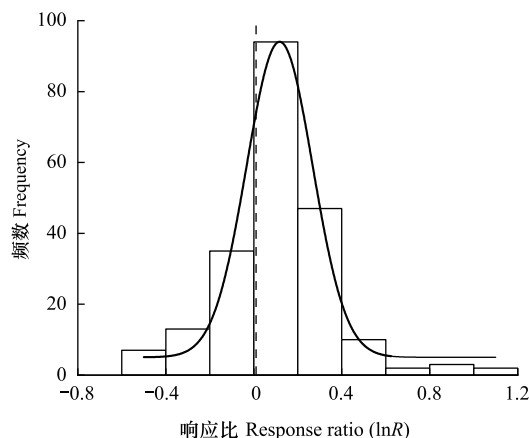


图 2 陆地生态系统土壤 CO_2 排放对增温响应比的频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of soil carbon emission response ratio to warming in terrestrial ecosystems

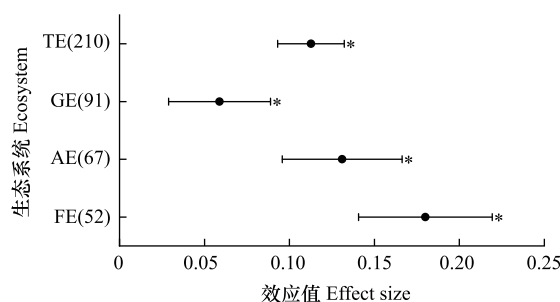


图 3 不同生态系统中土壤 CO_2 排放量对增温的总体响应

Fig. 3 Overall response of soil CO_2 emissions to warming in different ecosystems

TE: 陆地生态系统 Terrestrial ecosystem; AE: 农田生态系统 Agroecosystem; FE: 森林生态系统 Forest ecosystem; GE: 草地生态系统 Grassland ecosystem; 当 95% 置信区间与 0 不重叠, 则说明效应具有显著性; 括号中的数值为样本中数据个数, * 表示在 0.05 水平上显著影响

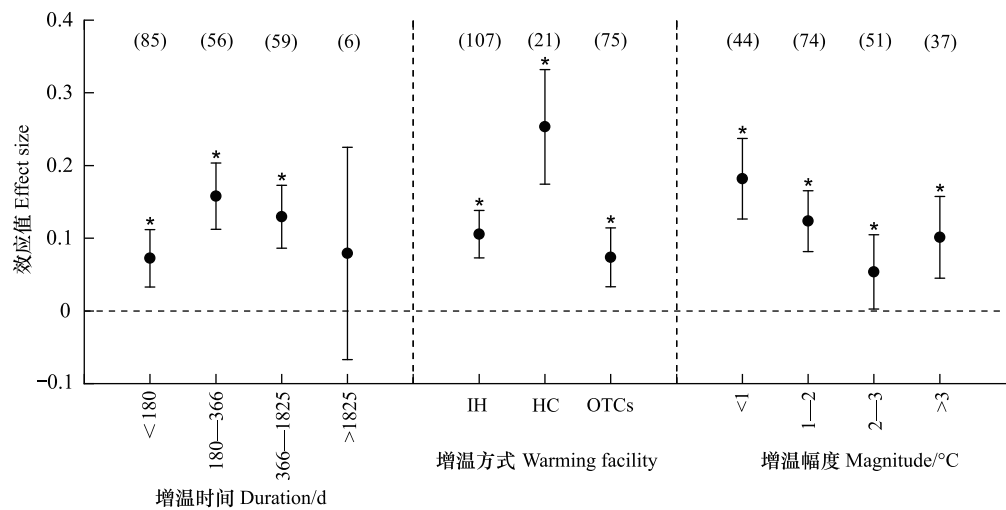


图 4 不同分组下土壤 CO₂排放对增温的响应特征

Fig.4 Characteristics of soil carbon emissions in response to warming under different groupings

OTCs:开顶箱式增温装置 Open-top chambers;HC:加热线缆 Heating cable;IH:红外加热器 Infrared heater;当 95%置信区间与 0 不重叠,则说明效应应具有显著性

土壤含水量之间存在显著差异(图 5)。土壤含水量>10%时,显著促进增温条件下土壤 CO₂的排放,且土壤含水量在 10%—30%之间时,土壤含水量越高,促进作用越强;而当土壤含水量在<10% 时,土壤 CO₂排放量无明显变化。

表 2 各因子变量对土壤 CO₂排放的影响
Table 2 Effect of each factor variable on soil CO₂ emission

变量 Variables	n	随机效应模型 Random effect model		线性相关性 Linear correlation		Pearson 相关性 Pearson correlation
		异质性 Q 统计量 Q _{total}	P	决定系数 R ²	P	
海拔 Altitude	203	429.20	0.0000	0.1239	0.0000	-0.358 **
年均温度 Mean annual temperature	200	341.01	0.0000	0.0070	0.1179	0.109 *
年均降水量 Mean annual precipitation	202	348.35	0.0000	0.0129	0.0551	0.133 *
气候类型 Climate	202	276.13	0.0000	—	—	—
土壤含水量 Soil moisture	112	240.48	0.0000	0.0821	0.0009	0.300 **
仪器嵌入土壤深度 Insert depth	159	266.15	0.0000	0.0409	0.0053	0.216 **
pH	136	201.53	0.0002	0.0026	0.2445	-0.099
容重 Bulk density	70	163.26	0.0000	-0.0136	0.9439	-0.008
全氮 Total N	86	100.37	0.1378	-0.0096	0.6849	0.044
有机碳 Organic carbon	70	114.43	0.0006	-0.0069	0.4843	0.082

n 是样本量, * 表示在 P<0.05 水平上显著, ** 表示在 P<0.01 水平上显著

图 5 也展示了土壤 pH、容重(BD)、全氮(TN)和有机碳(OC)不同分组下土壤 CO₂排放受增温影响的加权响应比。研究发现,全球陆地生态系统范围内,土壤性质对增温后土壤 CO₂排放的影响存在差异,但四种土壤性质均对土壤 CO₂排放有着显著的正效应。由图 5 可以看出,pH 对土壤 CO₂排放存在显著影响,碱性条件下更明显,比总土壤 CO₂排放量显著增加 15.07% (P<0.05)。BD<1.3g/cm³时土壤 CO₂排放量显著增加 23.85% (P<0.05),而 BD>1.3g/cm³时显著增加 15.68% (P<0.05)。TN 和 SOC 含量较低时,对土壤 CO₂排放的促进作用更显著,相较于总土壤 CO₂排放量,TN<1g/kg 时,土壤 CO₂排放显著增加 18.39% (P<0.05),SOC<

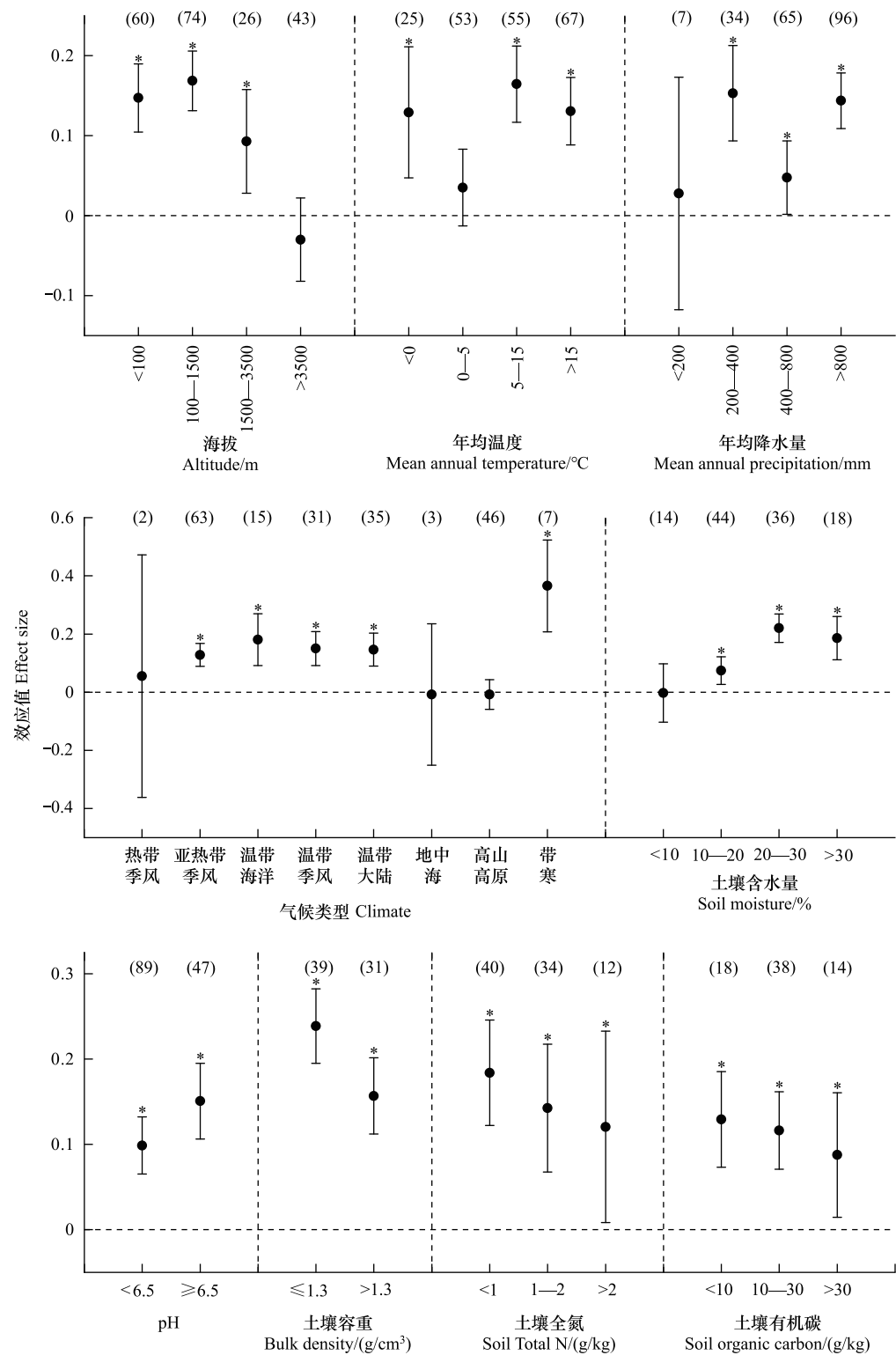


图5 土壤 CO₂排放对增温的加权响应比在不同影响因子下的变化特征

Fig.5 Characteristics of the weighted response ratio of soil carbon emission to warming under different influence factors

10g/kg 时,土壤 CO₂排放显著增加 12.92% ($P<0.05$)。

分别对土壤含水量、pH、BD、TN 和 SOC 进行 Meta 回归和相关性分析发现,土壤含水量与响应之间存在显著的线性相关关系,而 pH、BD、TN、SOC 与 lnR 之间不存在显著的线性相关关系(图 6,表 2)。

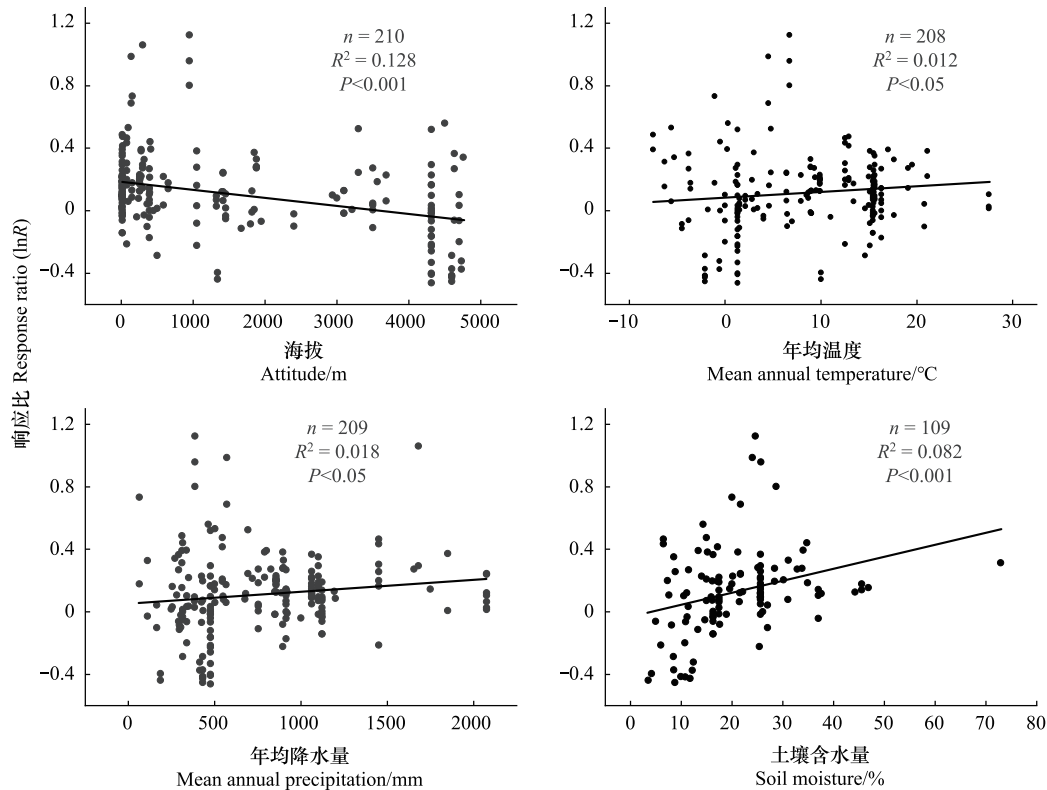


图 6 增温响应比与不同影响因子的相关关系

Fig.6 Correlation of temperature increase response ratio with different influencing factors

2.4.3 其他试验条件

由图 7 可知,野外试验中气体收集仪器嵌入土壤的深度会影响土壤 CO₂排放对增温响应的结果。嵌入土壤越深,所得试验结果显示增温对土壤 CO₂排放的促进作用越强。嵌入深度介于 0—3cm 之间时,增温能够促进土壤 CO₂排放但排放量变化没有达到显著水平;嵌入深度为 3cm 时,土壤 CO₂排放量显著增加了 12.42% ($P<0.05$);嵌入深度>3cm 时,土壤 CO₂排放量显著增加了 23.09% ($P<0.05$)。对响应比 lnR 和仪器嵌入深度进行 Meta 回归和一般线性回归分析,发现两者之间存在显著的线性相关关系(图 8,表 2)。

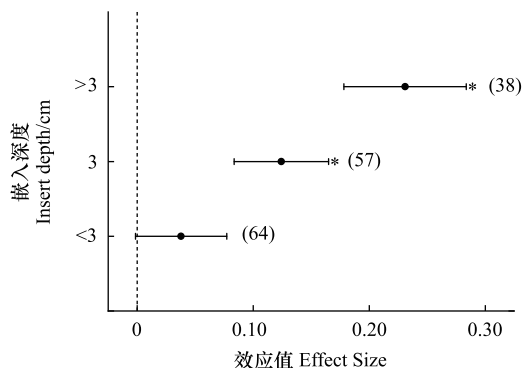


图 7 加权响应比在不同仪器嵌入深度下的变化特征

Fig.7 Variation characteristics of the weighted response ratio at different instrument embedding depths

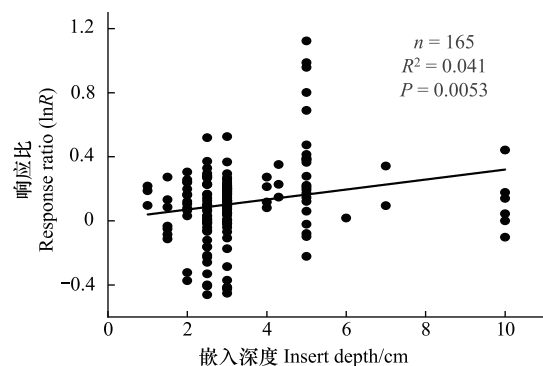


图 8 增温响应比与仪器嵌入深度的关系

Fig.8 Relationship between incremental temperature response ratio and instrument embedding depth

3 讨论

3.1 陆地生态系统中土壤 CO₂ 排放对增温的响应特征

多数的野外试验表明增温能够促进土壤呼吸,从而增加土壤 CO₂ 排放量^[9, 20]。本研究表明,主要陆地生态系统中土壤 CO₂ 排放对增温均表现出显著的积极响应,但不同类型生态系统对增温的响应有较大差异,其中森林生态系统中土壤 CO₂ 排放对增温的正响应最强(图 3)。先前的研究发现,草原的土壤碳库和森林的土壤碳通量受到了气候变暖的影响^[21],森林生态系统土壤呼吸对变暖的响应最强烈^[9]。此外, Lu 等^[8]在研究生态系统碳循环对实验性变暖的响应时也发现,试验增温使土壤呼吸显著增加 9.0%,生态系统呼吸显著增加 6.0%,增温显著增加了森林、草地和湿地的土壤 CO₂ 排放,但相较而言,森林的土壤呼吸增加幅度最大,显著高于草原,与本研究结果相同。不同生态系统对增温的响应效果不同(图 3),可能是由于生态系统之间的水热条件不同^[21]。模拟增温时间不同使土壤 CO₂ 排放响应存在一定差异性。土壤 CO₂ 排放随增温时间的增加表现出先增加后降低的趋势,与 Romero-Olivares 等^[22]对全球 25 个田间增温实验进行 Meta 分析的检验结果一致,本研究发现,在增温时间小于 5 年时,土壤 CO₂ 排放量显著增加,即增温初期,随增温时间增加,土壤 CO₂ 排放量显著增加;但试验过程中存在一个拐点,本研究中发现当增温时间超过 5 年时,土壤 CO₂ 排放量无显著变化,说明此拐点存在于 5 年或者 5 年之前。原因在于植物根系呼吸是陆地生态系统中土壤 CO₂ 排放的主体之一,增温能在短时间内促进根系呼吸,从而导致土壤呼吸释放更多的 CO₂,但随着增温持续时间增加,土壤呼吸会逐渐对温度的敏感性降低,从而对温度变化产生一定的适应性,进一步降低对增温的正响应^[23-25]。同时,全球变暖对陆地生态系统土壤 CO₂ 排放的影响是一个复杂和长期的生态过程,增温时间的动态对土壤 CO₂ 排放的影响并不是单一的,期间会受到气候因子、土壤特性以及其他试验条件等的协同影响,因此,分析气候变暖与其他因子的联合效应成为今后研究重点^[23]。

虽然有关陆地生态系统对全球变暖的响应研究已有一定开展,但纵观本研究的数据库,从图 1 可以看出,增温试验主要分布在北半球亚热带和温带地区,其他地区尤其是亚马逊平原和非洲地区鲜有相关研究。杨玉盛^[26]在全球环境变化对典型生态系统的影响研究中指出,野外增温试验的开展主要针对中高纬度地区的草原、农田、冻原和森林生态系统,在 30°N 以南的热带和亚热带地区仍少有野外增温试验,热带森林碳交换量对增温响应的模型预测仍存在巨大不确定性。这一现状使得研究数据源分布区域不均匀,可能导致研究结果存在一定偏差或不足以代表全球尺度陆地生态系统的土壤 CO₂ 排放状况。因此,未来需要继续挖掘更全面的相关试验数据信息,以进一步进行全球尺度的研究,得到更全面的结论。

3.2 土壤 CO₂ 排放响应增温的影响因素分析

(1) 环境因子

不同海拔条件下,土壤含水量、土壤微生物、土壤类型是影响土壤有机碳库的主要因素^[27]。本研究发现,随着海拔升高,增温对土壤 CO₂ 排放的促进作用先增强后减弱,二者之间存在负相关关系(图 5, 6)。低海拔地区受到干旱胁迫而高海拔地区受到低温胁迫^[28]。气候类型对增温条件下土壤 CO₂ 排放的影响主要与该类气候下的气温和降水等水热条件有关。本研究分析气温、降水和土壤含水量对在增温条件下土壤 CO₂ 排放的影响,结果显示,随年平均温度的升高和年平均降水量的增加,土壤 CO₂ 排放量逐渐增多(图 5)。年均温的不同会导致土壤微生物含量和土壤 pH 值差异,调节土壤有机质的分解活动,从而间接影响土壤呼吸^[29-30]。降水能够使干旱和半干旱地区产生干湿交替过程,促进提高土壤微生物活性^[31-33],并且微生物呼吸占据土壤呼吸的重要地位^[34],因此降水通常能够激发土壤呼吸^[20, 35]。综合来看,在气温相对适宜、降水量比较适中的地区,土壤 CO₂ 排放对增温的响应最强烈。王庚辰等^[36]证实了丰水年的土壤呼吸与土壤温度两者之间有着更强的相关关系。葛晓改等^[37]研究发现土壤呼吸速率与土壤温度呈显著的指数函数关系。另外有研究表明,增加降水能通过改善土壤水分条件提高土壤呼吸^[33];通过对全球尺度降水控制实验进行 Meta 分析的研究结果显示,增加降水促进土壤呼吸,减少降水抑制土壤呼吸^[38];雨季土壤呼吸速率明显高于旱季土壤呼吸速

率^[39-40]。以上研究结果与本研究结果相似,原因可能是升温对土壤呼吸的影响效应依赖于土壤含水量,在气候适宜环境中,水热条件较好,增温能够有效刺激土壤根系呼吸,增加土壤微生物数量、提升活性,从而促进土壤 CO₂的排放。土壤呼吸在潮湿条件下受到刺激,而在干燥条件下受到抑制^[41]。另一原因是土壤呼吸的两个组分——异养呼吸和自养呼吸^[42]对增温的响应及影响因素不同。自养呼吸主要取决于植物生物量,异养呼吸则受环境因子(温度、水分和养分条件等)和生物因子(土壤动物及微生物等)的影响^[43]。增温通常能够改变植物生物量、土壤养分含量及微生物数量和活性,从而影响到植被根际呼吸和土壤呼吸速率^[44-45]。有研究表明,增温使土壤异养呼吸显著增加,自养呼吸也有提高但其对增温的响应并不敏感,土壤含水率对自养呼吸的影响更显著^[46]。温度升高,土壤酶活性提高^[47],促进增温条件下土壤微生物数量增加及其活性^[48],从而提高微生物代谢速率,加速土壤碳矿化,土壤异养呼吸速率得以快速提高。水分是植物光合作用的基础,土壤含水率越高,植物光合作用越强,土壤自养呼吸速率就随之提高^[46]。

(2) 土壤特性

研究发现,气候变暖与土壤含水量的相互作用对土壤 CO₂排放有显著影响(图 5, 6, 表 2)。这一结论与 Guo 等^[49]在研究玉米生态系统呼吸的主要驱动条件时得出的结论一致,他们发现,在年际尺度下,生态系统呼吸和土壤含水量呈显著的线性正相关。此外,刘硕等^[50]研究表明增加土壤含水量会导致森林土壤 CO₂排放量持续增加。本研究中所涉及的 pH、BD、TN、SOC 四种土壤性质对土壤 CO₂排放均有显著的影响(图 5)。pH 是土壤呼吸温度敏感性的主要驱动因子,王陈里等^[51]研究表明土壤 pH 值对土壤呼吸温度敏感性变化影响最显著,土壤 N 含量的影响相对较小。本研究中对四种土壤性质分别与效应值进行相关分析发现其均不存在显著的线性相关关系(表 2)。该结果不同于 Knorr 等^[5]的研究,他们发现温度升高,土壤有机碳分解增加,进而使土壤 CO₂排放量增加,SOC 含量与土壤 CO₂排放之间呈负相关关系。土壤有机碳和微生物量碳氮比是影响 CO₂排放的主要因素,增温导致表层土壤 pH 值、土壤有机碳、全氮的含量降低,增温条件下土壤微生物加快生长,SOC 分解强度上升,SOC 含量降低,微生物呼吸速率加快,导致微生物生物量碳增多^[43,52]。不同研究之间的差异表明,土壤性质对土壤 CO₂排放对增温响应特征的影响与相应地点复杂多样的环境条件也相关。

(3) 仪器嵌入深度

仪器嵌入土壤深度不同对增温条件下土壤 CO₂排放的影响有明显差异^[53],嵌入土壤越深,对土壤 CO₂排放的促进作用越强,表现出显著的线性正相关关系(图 7、图 8)。若气体收集仪器嵌入土壤较浅,会导致部分土壤呼吸产生的 CO₂等气体流失,从而使研究得到的土壤 CO₂排放量小于实际排放量,造成结果之间的差异;反之,则能更好的减少气体流失。此外,仪器嵌入土壤深度不同对增温条件下土壤 CO₂排放的影响可能与土壤有机层厚度有关。异养呼吸(Rh)为土壤微生物分解有机物时所释放的 CO₂;自养呼吸(Ra)主要包括活体根系呼吸所释放的 CO₂。土壤表层的有机层中植物根系发达,多为自养呼吸;深层土壤有机质含量降低,主要是异养呼吸。本研究中仪器嵌入土壤深度的范围分布在 1—10cm,以浅层土壤为主,原因可能是浅层土壤有机质含量高,土质较松软,植物根系呼吸较强,同时浅层土壤容重较小,土壤微生物活性高,土壤微生物生物量碳随容重增加而降低^[54-55]。土壤中的微生物属于好氧型微生物,深层紧实的土壤不易于好氧型微生物活动,进而导致微生物量碳含量降低^[56]。

4 结论

本研究针对全球陆地生态系统,搜集了 2000—2022 年间有关增温对土壤 CO₂排放影响的文献共 81 篇,提取出 65 个研究位置和 213 组相关研究数据,对收集到的文献数据进行整合,采用 Meta 分析的方法,研究陆地生态系统中土壤 CO₂排放对增温的响应特征,并初步探讨了其主要影响因素。主要结论如下:

(1) 陆地生态系统中,土壤 CO₂排放对增温整体有着显著的正向响应特征。与总土壤 CO₂排放量相比,增温条件下森林、农田、草地生态系统中土壤 CO₂排放量均显著增加,森林生态系统土壤 CO₂排放对增温的响应

最强烈。

(2) 土壤 CO₂ 排放对增温的响应特征受到海拔、气候(气温和降水)、土壤含水量等环境因子的影响,也受到土壤性质以及试验条件等的影响。土壤 CO₂ 排在绝大多数环境、土壤因素条件下对增温表现出显著的正响应特征。

(3) 在增温条件下,不同因子共同作用,对土壤 CO₂ 排放产生相应影响。海拔对土壤 CO₂ 排放产生显著负效应,而年均气温、年均降水量、土壤含水量和仪器嵌入土壤深度则对土壤 CO₂ 排放产生显著正效应;此外,土壤性质对土壤 CO₂ 排放的作用效果不显著。

参考文献(References):

- [1] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner H O, Roberts D, Skea J, Shukla P R, Pirani A, Moufouma-Okia W, Péan C, Pidcock R, Connors S, Matthews J B R, Chen Y, Zhou X, Gomis M I, Lonnoy E, Maycock T, Tignor M, Waterfield T. Summary for Policymakers. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge: IPCC, 2018: 3-24.
- [2] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors S L, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis M I, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews J B R, Maycock T K, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R, Zhou B. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: IPCC, 2021: 3-32.
- [3] 郭丁, 郭文斐, 赵建, 特木其勒图, 李旭东, 傅华, 骆亦其. 黄土高原草地和农田系统碳动态对降雨、温度和 CO₂ 浓度变化响应的模拟. 草业学报, 2018, 27(2): 1-14.
- [4] Sanderman J, Amundson R G, Baldocchi D D. Application of eddy covariance measurements to the temperature dependence of soil organic matter mean residence time. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(2): 1061.
- [5] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. Nature, 2005, 433(7023): 298-301.
- [6] Lavoie M, Mack M C, Schuur E A G. Effects of elevated nitrogen and temperature on carbon and nitrogen dynamics in Alaskan Arctic and boreal soils. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(G3): G03013.
- [7] García-Palacios P, Vandegehuchte M L, Shaw E A, Dam M, Post K H, Ramirez K S, Sylvain Z A, de Tomasel C M, Wall D H. Are there links between responses of soil microbes and ecosystem functioning to elevated CO₂, N deposition and warming? A global perspective. Global Change Biology, 2015, 21(4): 1590-1600.
- [8] Lu M, Zhou X H, Yang Q A, Li H, Luo Y Q, Fang C M, Chen J K, Yang X, Li B. Responses of ecosystem carbon cycle to experimental warming: a meta-analysis. Ecology, 2013, 94(3): 726-738.
- [9] Rustad L, Campbell J, Marion G, Norby R, Mitchell M, Hartley A, Cornelissen J, Gurevitch J, GCTE-NEWS. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. Oecologia, 2001, 126(4): 543-562.
- [10] Zhang X Z, Shen Z X, Fu G. A meta-analysis of the effects of experimental warming on soil carbon and nitrogen dynamics on the Tibetan Plateau. Applied Soil Ecology, 2015, 87: 32-38.
- [11] Su F L, Wang F W, Li Z, Wei Y N, Li S J, Bai T S, Wang Y, Guo H, Hu S J. Predominant role of soil moisture in regulating the response of ecosystem carbon fluxes to global change factors in a semi-arid grassland on the Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2020, 738: 139746.
- [12] 许红梅, 高清竹, 黄永梅, 贾海坤. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟. 生态学报, 2006, 26(9): 2939-2947.
- [13] 淡沐春, 杨劫, 侯虹, 张立欣, 宋炳煜. 模拟增温增水对克氏针茅草原主要物种及群落凋落物分解的影响. 中国农业气象, 2015, 36(6): 746-753.
- [14] Bai T S, Wang P, Hall S J, Wang F W, Ye C L, Li Z, Li S J, Zhou L Y, Qiu Y P, Guo J X, Guo H, Wang Y, Hu S J. Interactive global change factors mitigate soil aggregation and carbon change in a semi-arid grassland. Global Change Biology, 2020, 26(9): 5320-5332.
- [15] Fang C, Ye J S, Gong Y H, Pei J Y, Yuan Z Q, Xie C, Zhu Y S, Yu Y Y. Seasonal responses of soil respiration to warming and nitrogen addition in a semi-arid alfalfa-pasture of the Loess Plateau, China. Science of the Total Environment, 2017, 590/591: 729-738.
- [16] Su F L, Wei Y N, Wang F W, Guo J X, Zhang J J, Wang Y, Guo H, Hu S J. Sensitivity of plant species to warming and altered precipitation dominates the community productivity in a semiarid grassland on the Loess Plateau. Ecology and Evolution, 2019, 9(13): 7628-7638.
- [17] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. Functional Ecology, 1994, 8(3): 315-323.
- [18] Roderick M L, Farquhar G D. A simple framework for relating variations in runoff to variations in climatic conditions and catchment properties. Water Resources Research, 2011, 47(12): W00G07.
- [19] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. Metawin: Statistical software for meta-analysis with resampling tests. The Quarterly Review of Biology, 1998, 73(1): 126.
- [20] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G, Peñuelas J, Hungate B. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. Global Change Biology, 2011, 17(2): 927-942.
- [21] Yan C, Yuan Z Y, Shi X R, Lock T, Kallenbach R. A global synthesis reveals more response sensitivity of soil carbon flux than pool to warming.

- Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(3): 1208-1221.
- [22] Romero-Olivares A L, Allison S D, Treseder K K. Soil microbes and their response to experimental warming over time: a meta-analysis of field studies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 107: 32-40.
- [23] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 师尚礼. 气候变暖对草地生态系统碳循环的影响. *草业学报*, 2012, 21(3): 294-302.
- [24] Atkin O K, Tjoelker M G. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(7): 343-351.
- [25] Slot M, Kitajima K. General patterns of acclimation of leaf respiration to elevated temperatures across biomes and plant types. *Oecologia*, 2015, 177(3): 885-900.
- [26] 杨玉盛. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究: 现状、挑战与发展趋势. *生态学报*, 2017, 37(1): 1-11.
- [27] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述. *中国水土保持科学: 中英文*, 2022, 20(3): 142-150.
- [28] 王林, 李海波, 陈汉鑫, 代永欣, 解庆, 韩有志. 海拔高度对中国沙棘水碳代谢和生长的影响——以关帝山区为例. *生态学报*, 2023, 43(5): 1995-2004.
- [29] 王丹. 长白山垂直样带森林土壤碳矿化及其温度敏感性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [30] 王铭, 刘兴土, 张继涛, 李秀军, 王国栋, 鲁新蕊, 李晓宇. 松嫩平原西部草甸草原 5 种典型植物群落土壤呼吸的时空动态. *植物生态学报*, 2014, 38(4): 396-404.
- [31] Guo X B, Drury C F, Yang X M, Reynolds W D. Water-soluble carbon and the carbon dioxide pulse are regulated by the extent of soil drying and rewetting. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(4): 1267-1278.
- [32] 贺云龙, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 孙良杰, 贾军强, 郭树芳, 闫钟清. 干湿交替下草地生态系统土壤呼吸变化的微生物响应机制研究进展. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3373-3380.
- [33] Huang G, Li Y, Su Y G. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, Northwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 83: 52-56.
- [34] 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹. 外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响. *环境科学*, 2018, 39(4): 1934-1942.
- [35] Shen Z X, Li Y L, Fu G. Response of soil respiration to short-term experimental warming and precipitation pulses over the growing season in an alpine meadow on the Northern Tibet. *Applied Soil Ecology*, 2015, 90: 35-40.
- [36] 王庚辰, 杜睿, 孔琴心, 吕达仁. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究. *科学通报*, 2004, 49(7): 692-696.
- [37] 葛晓改, 童冉, 曹永慧, 周本智, 肖文发, 王小明, 陆人方. 模拟干旱下凋落物输入对毛竹林土壤呼吸及温度敏感性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2233-2242.
- [38] 杨青霄, 田大栓, 曾辉, 牛书丽. 降水格局改变背景下土壤呼吸变化的主要影响因素及其调控过程. *植物生态学报*, 2017, 41(12): 1239-1250.
- [39] 刘惠, 赵平, 林永标, 饶兴权. 华南丘陵区不同土地利用方式下土壤呼吸. *生态学杂志*, 2007, 173(12): 2021-2027.
- [40] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 高人, 李震, 金钊. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. *生态学报*, 2005, 25(7): 1684-1690.
- [41] Peng F, Xu M H, You Q G, Zhou X H, Wang T, Xue X A. Different responses of soil respiration and its components to experimental warming with contrasting soil water content. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2015, 47(2): 359-368.
- [42] 陈志芳. 模拟增温和氮素添加对荒漠草原生态系统气体交换的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.
- [43] 杨晶晶. 模拟火烧和增温对羊草草地土壤性质和温室气体通量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [44] Mielenick P C, Dugas W A. Soil CO₂ flux in a tallgrass prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 221-228.
- [45] 张明乾, 韩证仿, 陈金, 郭嘉, 田云录, 张彬, 杨冰, 张卫建. 夜间增温对冬小麦土壤微生物量碳氮及其活性的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1464-1470.
- [46] 李先锋. 中亚热带格氏栲天然林和杉木人工林土壤呼吸及其组分对土壤增温的响应[D]. 福州: 福建师范大学, 2018.
- [47] 陈书涛, 桑琳, 张旭, 胡正华. 增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响. *环境科学*, 2016, 37(2): 703-709.
- [48] 潘新丽, 林波, 刘庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1637-1643.
- [49] Guo H, Li S E, Kang S Z, Du T S, Tong L, Ding R S. Annual ecosystem respiration of maize was primarily driven by crop growth and soil water conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 272: 254-265.
- [50] 刘硕, 李玉娥, 孙晓涵, 万运帆, 高倩竹, 秦晓波, 马欣. 温度和土壤含水量对温带森林土壤温室气体排放的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1093-1098.
- [51] 王陈里, 张利杰, 张仲富, 崔婉哲, 王好才, 王行. 基于室内试验的土壤呼吸温度敏感性影响因素整合分析. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2022, 42(3): 128-137.
- [52] 唐偲岷, 郭剑芬, 张政, 蔡小真, 杨玉盛. 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. *亚热带资源与环境学报*, 2017, 12(1): 40-45.
- [53] 易志刚, 蚁伟民. 森林生态系统中土壤呼吸研究进展. *生态环境*, 2003, 12(3): 361-365.
- [54] 王群, 尹飞, 郝四平, 李潮海. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响. *生态学报*, 2009, 29(6): 3096-3104.
- [55] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1785-1792.
- [56] 李威闻, 黄金权, 齐瑜洁, 刘小岚, 刘纪根, 毛治超, 高绣纺. 土壤侵蚀条件下土壤微生物生物量碳含量变化及其影响因素的 Meta 分析. *生态环境学报*, 2023, 32(1): 47-55.