

土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对 气候变化响应的 Meta 分析

陈晓慧, 黎艳, 李玥洋, 于新鹏, 屈久祁, 杨光, 王明筱, 刘琳

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250000)

摘要: [目的] 探究气候变化与土壤固碳能力的关系, 揭示气温、二氧化碳(CO₂)浓度和降水增减对土壤有机碳及其组分碳库的影响, 为全球气候变化背景下土壤碳汇能力的提高提供理论依据。[方法] 采用 Meta 分析方法, 共筛选 44 篇相关文献, 收集 281 个样本数据, 利用颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和矿质结合态有机碳(mineral associated organic carbon, MAOC)表征土壤活性与惰性有机碳组分, 分析气候变化对土壤碳储量及其稳定性的影响。[结果] ①大气 CO₂ 浓度与土壤 POC 和 MAOC 含量呈显著负相关($p < 0.05$); 气温升高使土壤 POC 含量降低, 而土壤 MAOC 含量略有升高, POC 对气温变化更为敏感; 土壤 POC 与降水量增加呈正相关, 与降水量减少呈负相关, 而土壤 MAOC 含量则与之相反。②气温、CO₂ 浓度增加和降水量减少会伴随土壤总有机碳含量降低, 而降水量增加则会导致总土壤有机碳含量增加。③土层深度和地类对土壤有机碳及组分对气候变化因子的响应有重要影响。[结论] 不同气候因子对土壤有机碳及其组分含量的影响存在明显差异, 其变化会降低土壤有机碳库储量或其稳定性, 削弱土壤固碳能力。

关键词: 土壤有机碳; 颗粒有机碳; 矿物结合态有机碳; CO₂ 浓度升高; 全球变暖; 降水量变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0272-11

中图分类号: S153.6

文献参数: 陈晓慧, 黎艳, 李玥洋, 等. 土壤颗粒有机碳和矿质结合有机碳对气候变化响应的 Meta 分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 272-282. Chen Xiaohui, Li Yan, Li Yueyang, et al. Meta-analysis on responses of soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon to climate change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 272-282. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.028; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.028.

Meta-analysis on responses of soil particulate organic carbon and mineral-associated organic carbon to climate change

Chen Xiaohui, Li Yan, Li Yueyang, Yu Xinpeng, Qu Jiuqi, Yang Guang, Wang Mingxiao, Liu Lin

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: [Objective] The relationship between climate change and soil carbon sequestration capacity to reveal the effects of temperature, carbon dioxide (CO₂) concentration, and precipitation on soil organic carbon and its component pool were explored, in order to provide a theoretical basis for improving soil carbon sequestration capacity in the context of global climate change. [Methods] Using a Meta-analysis, 44 relevant studies were screened, and 281 research sample data were collected. Active and inert soil organic carbon components were characterized by particulate organic carbon (POC) and mineral-associated organic carbon (MAOC), respectively. The effects of climate change on soil carbon stocks and soil stability were analyzed. [Results] ① Atmospheric CO₂ concentration and soil POC and MAOC content showed a significantly negative correlation ($p < 0.05$). POC content decreased with rising air temperature, whereas MAOC content increased slightly. POC was more sensitive to changes in air temperature than MAOC. Soil POC was

收稿日期: 2024-10-07

修回日期: 2024-12-29

采用日期: 2024-12-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“棕壤坡面颗粒有机碳流失对团聚体破碎的响应”(41907055); 山东省自然科学基金资助项目“侵蚀—输移—沉积作用下土壤有机碳变化机制与模拟”(ZR2023MD015); 水利部长江中下游河湖治理与防洪重点实验室开放研究基金资助项目“侵蚀—输移—沉积作用下土壤有机碳动态变化机制与模拟”(CKWV20231162/KY)。

第一作者: 陈晓慧(2002—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与土壤碳循环。Email: cxh112802@163.com。

通信作者: 刘琳(1990—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持与土壤碳循环的研究。Email: kira_lau123@163.com。

positively correlated with an increase in precipitation and negatively correlated with a decline in precipitation, whereas soil MAOC content showed the opposite trend. ② The increase in air temperature and CO₂ concentration as well as the decrease in precipitation reduced the concentration of the soil total organic carbon, whereas the rise in precipitation increased the concentration of the soil total organic carbon. ③ The response of soil organic carbon and its components to changes in climatic factors was affected by soil depth and soil type. [Conclusion] The influence of climatic factors on the soil's organic carbon and its component content is clearly different. Moreover, changes in climatic factors reduce the storage or stability of the soil organic carbon pool and weaken the soil carbon sequestration capacity.

Keywords: soil organic carbon; particulate organic carbon; mineral-associated organic carbon; elevated CO₂ concentration; global warming; changes in precipitation

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库^[1-3],在全球碳循环与碳—气候互馈系统中发挥关键作用^[4]。全球气候变暖背景下土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量发生变化^[5],这是由于大气二氧化碳(CO₂)浓度、气温和降水作为影响土壤有机碳储量的重要气候因子,会影响陆地土壤碳循环。土壤碳储量约是大气碳储量的 2 倍,其释放会改变大气 CO₂ 浓度,加剧全球气候变化。因而,土壤有机碳库对气候变化的响应及其相关机制的研究成为国内外学者关注的重点。

通常依据土壤有机碳分解的难易程度和周转速率差异,土壤有机碳库可以被划分为两类:活性碳库和惰性有机碳库,其中,活性有机碳库的周转时间为 0.1~0.5 a,而惰性有机碳库的周转时间为 50~3 000 a^[6]。土壤颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)是由动植物和根系残体半分解或未分解产物组成,易被微生物降解,处于新鲜残茬向腐殖质转化的中间过渡碳库^[7]。矿质结合有机碳(mineral associated organic carbon, MAOC)是指吸附于黏粉粒(<53 μm)表面的有机碳组分,难以被微生物分解的土壤惰性有机碳组分,周转周期较 POC 长^[8],能够表征土壤惰性有机碳^[9-10]。因此,土壤 POC 和 MAOC 含量可以被用于指示土壤活性与惰性有机碳含量^[11]。POC 和 MAOC 作为 SOC 的重要组分,是诊断陆地生态系统碳循环与固碳能力变化的重要指标^[12],两者及其相对比例变化对 SOC 稳定性和 SOC 的周转速率有重要影响,但目前关于全球尺度下土壤 POC 和 MAOC 对各类环境变化的响应的整合分析较少。

以往的研究发现土壤 POC 和 MAOC 对不同气候因子的响应存在明显的差异^[13]。A. Feyissa 等^[14]的研究表明,活性有机碳库随降水量的增加而增加,而惰性有机碳库无变化;He Nianpeng 等^[15]的研究发现,全球范围内土壤 POC 和 MAOC 对降水量增加的反应不显著。J. D. Jastrow 等^[16]认为大气 CO₂ 浓度升高会增加 SOC 储量,而 K. M. Carney 等^[17]的

研究却恰恰相反,Y. Carrillo 等^[18]则认为 SOC 储量无响应。T. W. Crowther 等^[19]的研究发现气温升高使得 SOC 含量降低,且对于 SOC 含量高的区域,其土壤碳含量较 SOC 含量低的区域下降更显著。另有研究表明,气温升高能够促进土壤碳固存^[20]或对土壤碳储量的影响较小^[21],如 V. Allard 等^[22]发现在大气 CO₂ 浓度升高和气温升高条件下均可增加 POC 和 MAOC 的量,而 J. Lichter 等^[23]发现,气温升高对 POC 和 MAOC 都没有显著影响。这是由于土壤 POC 与 MAOC 对气候变化的响应亦受其他环境因素调控,包括植被类型和土壤微生物等生物因素,土体结构和土壤理化性质等非生物因素^[24-25]。综上所述,SOC 及其组分对气候变化响应的不确定性与其影响因素密切相关^[26],而该响应不确定性限制了气候变化背景下土壤固碳影响的准确评估与预测^[27],因此,气温、降水和大气 CO₂ 浓度变化对土壤有机碳及其组分的影响机制需要被进一步探究。鉴于此,本研究采用 Meta 分析法,定量分析 SOC,POC 和 MAOC 对不同气候变化因子的响应,并探讨不同试验年限、土层深度和地类对 SOC,POC 和 MAOC 对气候变化响应的影响,系统分析气候变化下土壤有机碳储量及其固碳能力的响应机理,以期为气候变化下提升土壤固碳潜力提供理论依据。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究所涉及的文献数据均来源于 CNKI 和 Web of Science 数据库 2000—2024 年发表的与“土壤 POC 和 MAOC 对气候变化响应”主题相关的文献,初步检索文献 412 篇。CNKI 和 Web of Science 检索式分别为:

KY=(“土壤有机碳库”+“颗粒有机碳”+“矿质结合有机碳”+“土壤有机碳组分”)AND(“CO₂ 浓度增加”+“气候变化”+“全球变暖”+“降水变化”)

TS=(soil organic carbon OR mineral-associated organic carbon OR particulate organic carbon) AND (precipitation change OR global warming OR elevated CO₂)

为精确筛选文献,并保证数据质量的可靠性,按以下原则筛选文献:①文章为试验类文章,不包括综述、Meta 分析类文章和图书。②试验设置对照组,测定指标与气候变化下 SOC、土壤 MAOC 或 POC 含量变化有关。③试验信息完整,包含研究区、经纬度、SOC 含量、土壤采样深度等。④图表明确清晰,包含均值、标准差或标准误及样本容量。⑤各土壤有机碳指标和气候变化因子均采用标准方法测定,以确保数据准确有效。本研究所使用的数据通过 WebPlot-Digitizer 4.6 对图片提取或读表获取,并通过图、表或文字进一步目视验证。最后,共筛选文献 44 篇,获取研究样本数据 281 个。其中,关于大气 CO₂ 浓度升高对 SOC、POC 和 MAOC 含量影响的文献篇数分别为 7, 3 和 6 篇;关于气温升高对 SOC、POC 和 MAOC 含量影响的文献篇数为 20, 11 和 14 篇;关于降水量变化对 SOC、POC 和 MAOC 含量影响的文献篇数为 15, 9, 11 篇。

1.2 数据整理与补齐

依据所筛选文献的研究热点因子,设置控制因子及亚组。因而,分别针对耕地、草地和林地 3 种地类收集数据,将土层深度划分为表层(0—15 cm)、深层(15—60 cm)和剖面平均(0—60 cm),对比 3 种地类、土层深度对 SOC 组分库对气候变化响应的影响。

所提取数据若无标准差,则通过标准误(E_s)计算标准差^[28],计算公式为:

$$D_s = \sqrt{n} \times E_s \quad (1)$$

式中: D_s 为标准差; E_s 为标准误; n 为重复数。

缺失数据通过两种方式补齐:①另查阅与缺失数据采样点的经纬度、地类及 SOC 含量等信息相同的试验点的文献,利用文献中 POC 和 MAOC 数据补充缺失数据。②若亚组碳组分含量与单一气候因子呈显著回归函数相关,则利用回归函数补齐个别缺失值。若缺失年均温和年降水量数据,则利用 R 软件提取年均温和年降水量,所使用气候数据下载自全球气候数据网站 WorldClim^[29]。最后,分别对大气 CO₂ 浓度、气温和降水量划分变化梯度,建立数据库。不同气候因子下所收集试验数据的基本信息见表 1—3;数据试验点分布情况如图 1 所示。

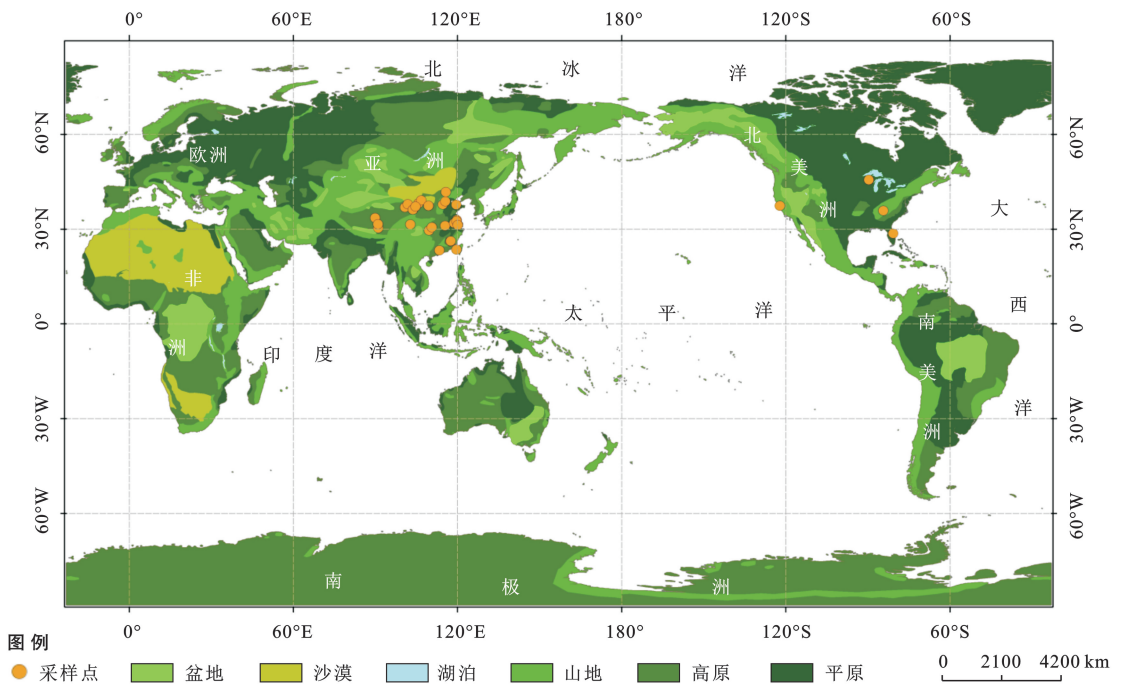


图 1 全球地形及数据试验点分布
注:地貌数据来源于 ArcGIS 10.7 的“Landforms of the World 4”数据集,地图数据来源于中华人民共和国自然资源部数据集,审图号:GS(2016)1667 号。

图 1 全球地形及数据试验点分布
Fig.1 Worldwide landforms and tested point distribution of data

1.3 数据处理与分析

利用 Meta Win 2.1 软件进行 Meta 分析,以试验组和对照组均值比作为响应比(R)。选择响应比(R)的自然对数($\ln R$)作为效应值^[30],用以量化 CO₂ 增温

和降水对 SOC 及组分的影响大小^[31],计算公式为:

$$\ln R_i = \ln(\bar{X}_i / \bar{X}_c) = \ln(\bar{X}_i) - \ln(\bar{X}_c) \quad (2)$$

式中: $\ln R_i$ 为第 i 组的效应值; \bar{X}_i 和 \bar{X}_c 分别表示控制组和对照组中变量的平均值。

表 1 温度变化条件下试验数据基本信息
Table 1 Basic information of test data under condition of temperature change

编号	土地覆盖类型	纬度	经度	年均温/ °C	年降水量/ mm	土层深度/ cm	气温增加 幅度/°C	样本量
1	耕地	32.90°N	119.8°E	15.4	1 106.5	0—20	1.37	1
2		31.95°N	118.85°E	15.4	1 106.5	0—20	2.27	1
3		37.83°N	114.68°E	12.2	530.0	0—10 10—20	5.00	8
4		33.56°N	89.95°E	15.7	90.04	0—20	5.00	2
5	草地	36.95°N	100.85°E	1.2	489.0	0—15 15—20	2.00	2
6		30.41°N	91.08°E	1.3	476.8	0—15	3.00	1
7		37.41°N	109.51°E	9.5	525.0	0—5	1.34	4
8	林地	31.16°N	115.51°E	13.0~15.0	1 510.0	0—20	4.00	4
9		26.18°N	117.46°E	19.4	1 700.0	0—10	4.00	2
10		31.58°N	102.83°E	6.0~12.0	600.0—1 100.0	0—10	0.25	2
11		45.66°N	89.61°W	2.4	383.9	0—5	10.00	2

表 2 降水量变化条件下试验数据基本信息
Table 2 Basic information of test data under condition of precipitation change

编号	土地覆盖类型	纬度	经度	年均温/°C	年降水量/mm	土壤深度/cm	降水变率/%	样本量
1	耕地	37.75°N	119.58°E	12.9	530~630	0—20	+40%	1
							+60%	1
							-40%	1
							-60%	1
2	36.21°N	103.78°E	8.4	263	0—20	+20%	1	
						+40%	1	
						-20%	1	
3	41.76°N	115.83°E	2.4	384	0—20 20—50	-40%	3	
						+30%	8	
4	草地	36.21°N	103.78°E	6.3~7.1	263	0—5	-20%	3
						5—10	+20%	3
						10—20	+40%	3
						0—5	+50%	4
5	37.41°N	109.51°E	9.5	525	0—5	+50%	4	
6	35.90°N	84.33°W	11.2	136	0—20	+10%	1	
7	林地	29.65°N	109.68°E	11.5	2 100	0—10	-30%	3
							-60%	3
8	林地	26.31°N	117.60°E	19.1	1 630	0—10	-30%	2
						40—60	-60%	2

注:降水变率为“-”表示降水量减少,为“+”代表降水量增加。

表 3 CO₂ 增加条件下试验数据基本信息
Table 3 Basic information of test data under condition of CO₂ increase

编号	土地覆盖类型	纬度	经度	年均温/ °C	年降水 量/mm	土壤深 度/cm	CO ₂ 浓度增加幅度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	样本量
1	耕地	32.58°N	119.70°E	15.7	90.0	0—20	200	1
2		23.58°N	119.70°E	15.0	1 000.0	0—15	200	1
3	草地	31.41°N	120.23°E	11.5	2 100.0	14—15	200	1
4		31.63°N	91.01°E	-1.3	430.0	0—30	100	1
5		37.42°N	122.16°W	6.3~7.1	263.0	15—20	750	4
6	林地	23.35°N	113.50°E	21.5	1 600.0~1 900.0	0—20	700	1
7		28.63°N	80.70°W	11.5	131.0	0—10	350	1
8		45.66°N	89.61°W	2.4	383.9	0—5	200	1
9		31.41°N	103.53°E	9.3	825.2	15—30	700	4

在计算加权平均效应值前采用卡方检验进行异质性检验,检验结果 $p < 0.05$, $I^2 > 50\%$, 因而本研究采用随机效应模型。

每个效应值 $\ln R_i$ 的方差 $V_i^{[32]}$ 与各项独立研究内各处理权重 $W_i^{[33]}$ 计算公式为:

$$V_i = \frac{S_i^2}{N_i \bar{X}_i^2} + \frac{S_c^2}{N_c \bar{X}_c^2} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{1}{V_i} \quad (4)$$

式中: V_i 为方差; W_i 为权重; S_i 和 S_c 分别表示控制组和对照组中的标准差 (D_s); N_i 和 N_c 分别表示控制组和对照组中的重复数 (n); \bar{X}_i 和 \bar{X}_c 分别表示控制组和对照组中变量的平均值。

不同影响因素下各指标的加权平均效应值 $\ln R_R^{[33]}$ 和标准误 E_s 及 95% 置信区间^[34] 计算公式为:

$$\ln R_R = \sum(\ln R_i \times W_i) / \sum W_i \quad (5)$$

$$E_s = \sqrt{1 / \sum W_i} \quad (6)$$

$$95\% I_C = \ln R_R \pm 1.96 E_s \quad (7)$$

式中: $\ln R_R$ 为加权平均效应值; E_s 为标准误; 95% I_C 为 95% 置信区间。

若气候变化因子与指标之间表现为正效应, 则加权平均效应值 $\ln R_R > 0$; 若气候变化因子与指标之间表现为负效应, 则 $\ln R_R < 0$; 若 95% I_C 不与零重合则为显著, 如果重合, 则为不显著。

使用 R 软件中“metafor”程序包中的 rma 函数计算加权效应大小和 95% 置信区间 (I_C), 并绘制森林图^[35]。使用 ArcMap10.7 软件绘制数据试验点分布图。

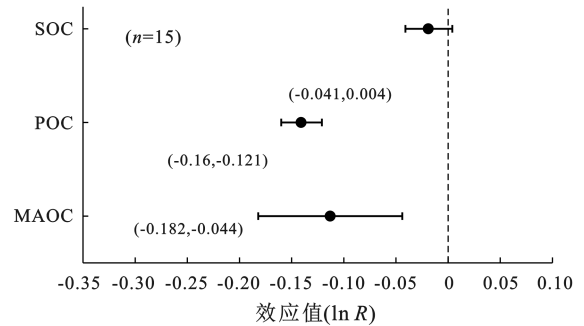
2 结果与分析

2.1 大气 CO₂ 浓度增加对土壤有机碳及各组分含量的影响

大气 CO₂ 浓度升高对土壤 POC 和 MAOC 含量的影响较大(图 2)。具体表现为, 大气 CO₂ 浓度升高会显著降低土壤 POC (-0.141) 和 MAOC 含量 (-0.113) ($p < 0.05$), 但对 SOC 含量无显著影响 ($p < 0.05$)。

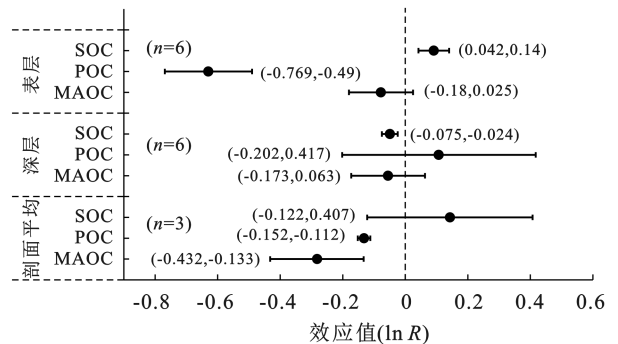
探究土层深度对 SOC 及各组分对 CO₂ 浓度升高响应的影响(图 3)发现, 在 0—15 cm 的表层土壤中, 大气 CO₂ 浓度升高使 SOC 含量显著增加, 但土壤 POC 含量显著降低 (0.091, -0.63) ($p < 0.05$); 而对于 15—60 cm 的深层土壤, SOC 含量显著降低 (-0.049) ($p < 0.05$), 土壤 POC 和 MAOC 含量则无明显变化; 对于 0—60 cm 土壤剖面平均, 大气 CO₂ 浓度升高对其 POC 和 MAOC 含量均呈显著负影响

(-0.132, -0.283) ($p < 0.05$), SOC 含量有增加趋势但并不显著。总之, SOC 及各组分对大气 CO₂ 浓度升高的响应受土层深度的影响大。



注: ①SOC 代表土壤有机碳, POC 代表颗粒有机碳, MAOC 代表矿质结合有机碳, n 代表样本数量; ② R 为响应比; ③ 括号内数据代表 95% 置信区间。下同。

图 2 土壤有机碳及其组分对 CO₂ 浓度升高的响应
Fig.2 Response of soil organic carbon and its components to increasing CO₂ concentration



注: 土层深度划定范围为表层 0—15 cm, 深层 15—60 cm 和剖面平均 0—60 cm。剖面平均数据由单独试验获取, 而非表层和深层的平均值。下同。

图 3 不同土层深度土壤有机碳组分对 CO₂ 浓度增加的影响
Fig.3 Response of soil organic carbon components to increasing CO₂ concentration of different depths

试验年限对 SOC 及各组分对 CO₂ 浓度升高响应的均不显著(图 4)。相较于 POC, 试验年限对土壤 MAOC 含量响应的影响更大, 当试验年限 < 5 a, 土壤 MAOC 含量与 CO₂ 浓度升高呈正相关 (0.065), 而试验年限 > 5 a 则呈负相关 (-0.074)。

地类对 SOC, POC 和 MAOC 含量对 CO₂ 浓度升高响应的影响较大(图 5)。其中, 林地 SOC 含量随 CO₂ 浓度升高显著增加 (0.066) ($p < 0.05$), 而土壤 POC 含量随 CO₂ 浓度升高显著减少 (-0.465) ($p < 0.05$), 土壤 MAOC 含量变化不明显; 草地土壤中, 大气 CO₂ 浓度升高显著减少 SOC 和 MAOC 含量 (-0.053, -0.283) ($p < 0.05$), 而显著增加 POC 含量 (0.243) ($p < 0.05$); 耕地土壤中 SOC 含量在 CO₂ 浓

度升高下显著增加(0.149) ($p < 0.05$), 而 POC 含量显著减少(-0.142) ($p < 0.05$)。

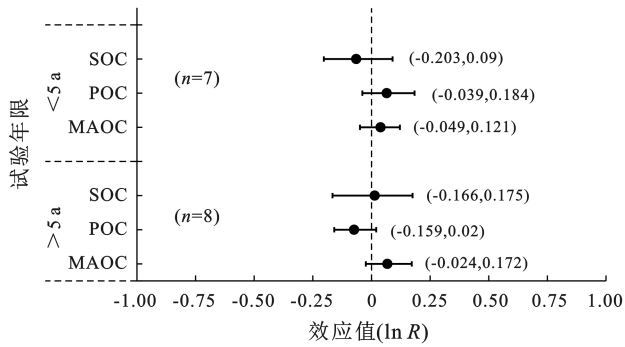


图 4 不同试验年限土壤有机碳组分对 CO_2 浓度增加的影响
Fig.4 Response of soil organic carbon components to increasing CO_2 concentration in different tested years

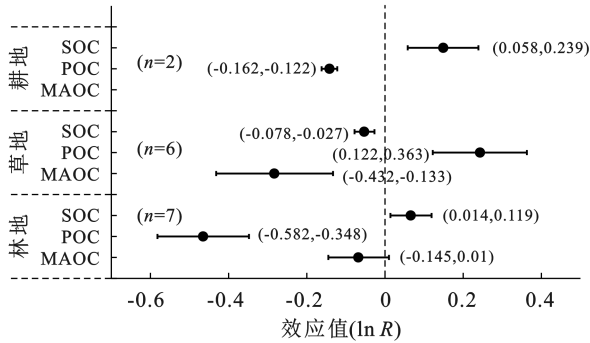


图 5 不同地类土壤有机碳组分对 CO_2 浓度增加的影响
Fig.5 Response of soil organic carbon components to increasing CO_2 concentration of different land use types

2.2 气温增加对土壤有机碳及各组分含量的影响

SOC, POC 和 MAOC 对气温升高的响应均很敏感(图 6)。气温升高会显著减少土壤 SOC 和 POC 含量(-0.074, -0.08) ($p < 0.05$), 却使土壤 MAOC 含量显著增加(0.007) ($p < 0.05$)。

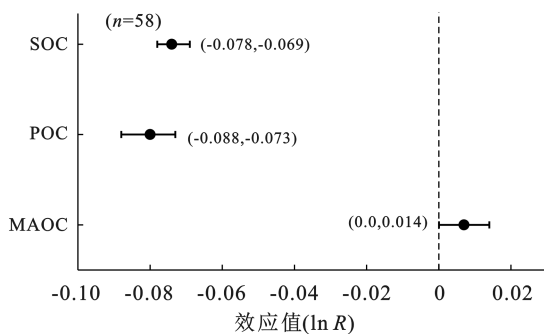


图 6 土壤有机碳及其组分对气温升高的响应
Fig.6 Response of soil organic carbon and its components to temperature rise

探究土层深度对 SOC 及其组分对气温升高响应的影 响(图 7)发现, 表层、深层或剖面平均土壤中,

气温升高对 SOC 含量均产生显著负影响(-0.089, -0.019, -0.124) ($p < 0.05$); 表层土壤和深层土壤中 POC 含量也随气温升高而下降(-0.172, -0.103), 而土壤 MAOC 含量随气温升高而增加(0.053, 0.015)。整体而言, 随土层深度的增加, SOC 和 POC 含量减少趋势有所缓解。

地类对 SOC 及各组分对气温升高响应的影响均很明显(图 8)。林地土壤 POC 含量与气温升高呈显著负相关(-0.072) ($p < 0.05$), SOC 和 MAOC 含量却无明显变化; 草地土壤中气温升高显著减少 SOC 和 POC 含量(-0.046, -0.172) ($p < 0.05$), 而使 MAOC 含量显著增加(0.053) ($p < 0.05$); 耕地土壤中 POC 和 MAOC 含量与气温升高均呈正相关(0.061, 0.079), 而 SOC 含量与气温升高呈负相关(-0.128)。

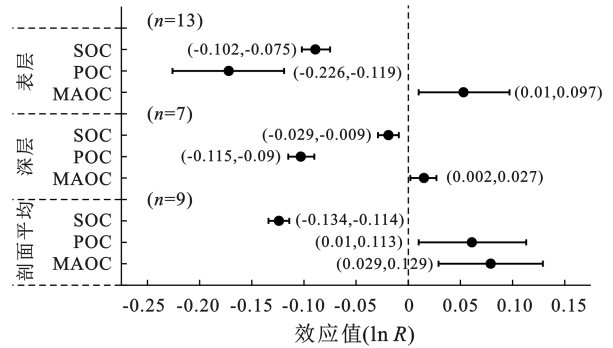


图 7 不同土层深度土壤有机碳组分对气温升高的响应
Fig.7 Response of soil organic carbon components to temperature rise at different soil depths

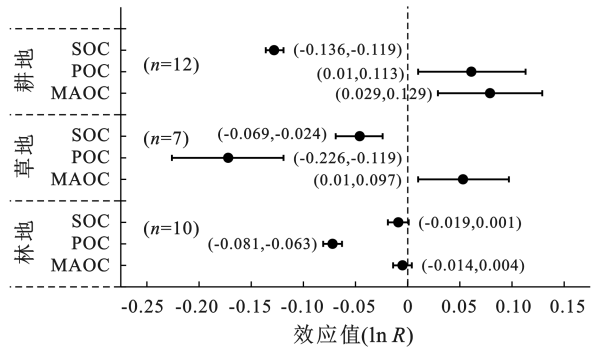


图 8 不同地类土壤有机碳组分对气温升高的响应
Fig.8 Response of soil organic carbon components to temperature rise of different land use types

2.3 降水量变化对土壤有机碳及各组分含量的影响

SOC, POC 和 MAOC 对降水量变化的响应均很敏感(图 9)。降水量减少显著降低 SOC 和土壤 POC 含量(-0.069, -0.289) ($p < 0.05$), 显著增加土壤 MAOC 含量(0.312) ($p < 0.05$); 当降水量增加时,

SOC 和土壤 POC 含量与之呈正相关(0.049,0.082), 土壤 MAOC 含量略有减少但不显著。

探究土层深度对 SOC 及其组分对降水量减少响应的影响(图 10)发现,不论表层、深层或土壤剖面平均,降水量减少均对 SOC 含量产生显著负面影响($-0.039, -0.09, -0.095$)($p < 0.05$);在深层土壤中 MAOC 含量与降水量减少呈显著正相关(0.584)($p < 0.05$),与土壤 POC 含量呈显著负相关(-0.355)($p < 0.05$);但从剖面平均来看,降水量减少对土壤 POC 和 MAOC 含量的影响均不显著。

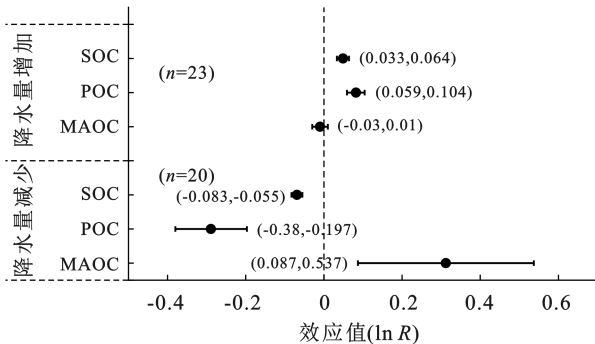


图 9 土壤有机碳及其组分对降水量变化的响应

Fig.9 Response of soil organic carbon and its components to precipitation changes

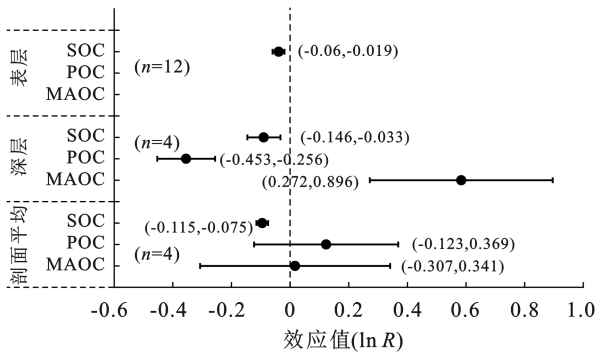


图 10 不同土层深度土壤有机碳组分对降水量减少的响应

Fig.10 Response of soil organic carbon components to precipitation reduction at different soil depths

各地类对 SOC 及各组分对降水量减少响应的影响具有明显差异(图 11),表现为,降水量减少对草地和林地 SOC 含量为显著负影响($-0.073, -0.059$)($p < 0.05$),而耕地土壤 SOC 含量无显著变化;对林地土壤 POC 含量为显著负影响(-0.289)($p < 0.05$),对土壤 MAOC 含量为显著正影响(0.312)($p < 0.05$)。

探究土层深度对 SOC 及各组分对降水量增加响应的影响(图 12)发现,表层土壤 SOC 含量与降水量增加呈显著正相关(0.133)($p < 0.05$),而对于深层和土壤剖面平均,降水量增加对 SOC 含量的影响不显著;土壤 MAOC 在表层土壤和深层土壤中与降水量

增加的关系相反,表层土壤中 MAOC 与降水量增加呈显著负相关(-0.084)($p < 0.05$),而深层土壤中 MAOC 与降水量增加呈显著正相关(0.11)($p < 0.05$);表层和深层土壤中,降水量增加均会显著增加土壤 POC 含量(0.402,0.055)($p < 0.05$)。

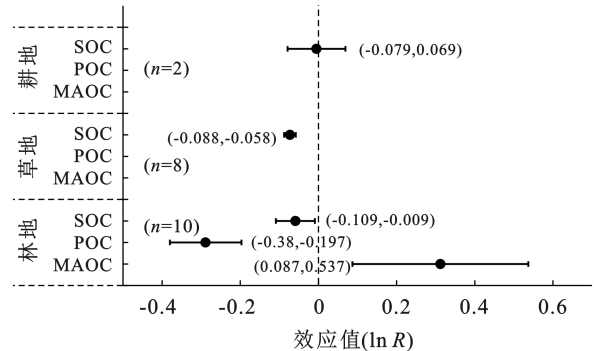


图 11 不同地类土壤有机碳组分对降水量减少的响应

Fig.11 Response of soil organic carbon components to precipitation reduction under different land use types

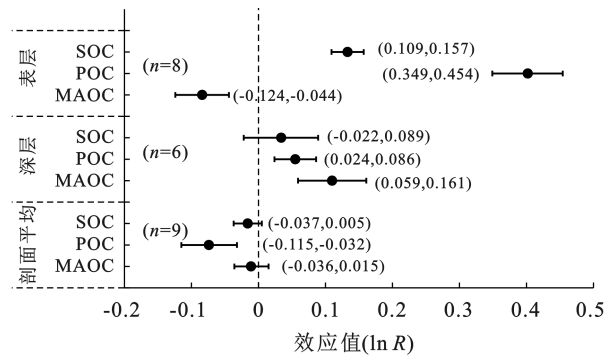


图 12 不同土层深度土壤有机碳组分对降水量增加的响应

Fig.12 Response of soil organic carbon components to precipitation increase at different soil depths

各地类对 SOC 及各组分对降水量增加响应的均很明显(图 13)。降水量增加显著增加草地 SOC 和 POC 含量(0.104,0.164)($p < 0.05$),而土壤 MAOC 含量无显著变化;降水量增加减少了林地 SOC 和 POC 含量($-0.04, -0.19$),土壤 MAOC 含量无显著变化;耕地土壤中 SOC 含量无显著变化。

3 讨论

3.1 POC 和 MAOC 对气候变化响应的差异性分析

土壤 POC 和 MAOC 含量对气候变化的响应存在明显差异。其中,由于土壤 POC 较 MAOC 更易分解^[36],因而,相较 MAOC,POC 对气候变化的响应更显著。这与土壤 MAOC 被物理化学双重保护^[37],且周转周期长有关。本研究发现,虽然 MAOC 含量随气候因子的变化较 POC 小,但依然明显,而以往诸多科研工作多单一选用土壤 POC 作为评估土壤碳库对

气候变化响应的标志性参数,本研究认为,在理解气候变化对土壤碳库的影响时,气候变化对 MAOC 的影响也不可忽视。

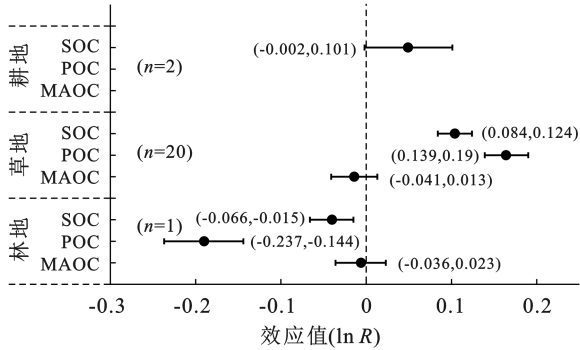


图 13 不同地类土壤有机碳组分对降水量增加的响应
Fig.13 Response of soil organic carbon components to precipitation increase of different land use types

土壤 POC 和 MAOC 对增温与大气 CO₂ 浓度升高的响应为负反馈,这是由于全球气候变暖会促进土壤微生物对 POC 的分解^[38],CO₂ 浓度升高也会通过氧化还原和溶解反应破坏土壤 MAOC 的稳定,从而促进 MAOC 矿化^[39]。这也与增温和大气 CO₂ 浓度升高促使 SOC 的积累过程仅在短期内具备优势有关。T. Peplau 等^[40]研究发现,气温升高会加剧植物凋落物输入,同时,也会增加微生物生物量,提高微生物的代谢活动,加速土壤 POC 分解。POC 作为植物源有机碳,其标志物木质素的周转对温度变化的敏感性高^[41],同时,气温升高会促使不同覆被类型土壤 POC 含量的下降幅度存在差异,如耕地最低,林地次之,草地最大。而土壤 MAOC 主要来源为微生物源有机碳,多为微生物残体^[13],因而,土壤 POC 分解过程中的微生物繁殖、代谢可能会促进土壤 MAOC 形成,因此,特定气候环境条件下土壤 MAOC 含量或占比可能会随气温升高而升高。例如,气温升高可能会导致耕地和草地 MAOC 增加,而林地 MAOC 略有降低,这也与不同地类土壤 MAOC 中的有机碳来源存在差异有关,如耕地和草地多来源于微生物,而林地多来源于植物^[42]而易于被分解。

在降水量增加条件下,土壤 POC 含量随之增加,土壤 MAOC 含量变化虽不显著,但与之呈负相关。这是由于降水量增加,使土壤含水量提高、植被生物量增多,破碎凋落物或根系大量进入土壤^[2],碳输入速率超过微生物分解速率,土壤 POC 含量升高,而土壤中不稳定碳转化为 MAOC 含量的比例却减少^[43]。降水量减少条件下情况则相反,已有研究表明,降水量减少不利于土壤有机碳与各组分间的周转^[44],降

水量减少一定程度上限制植物生长及微生物活性,从而降低土壤有机质的分解强度和储量。这是土壤 POC 和 MAOC 对降水变率差异响应的根本原因。

3.2 气候变化背景下土壤固碳能力变化及其影响因素

POC 和 MAOC 在一定程度上可以用来表征活性与惰性有机碳^[45]。气温、大气 CO₂ 浓度升高和降水量变化主要通过影响植被凋落物输入量、微生物活性、土壤性质和有机碳分解影响土壤惰性和活性有机碳含量,从而影响土壤固碳能力及有机碳库稳定性^[46]。当气温和 CO₂ 浓度升高时,微生物会分解更多植物残体^[47],微生物分解速率超过碳输入速率,导致表层土壤 SOC 和 POC 含量减少,土壤固碳能力降低;虽然深层土壤性质、有机碳组成、各组分含量及其储量受影响较表层小^[48],但也存在明显变化。因而,未来的相关研究需要兼顾表层与深层土壤固碳能力的变化,且不可忽视深层土壤碳库固碳潜力,以更准确地评估气候变化对土壤碳库及其稳定性的影响。当降水量增加时,大部分区域植被覆盖度增加,输入土壤凋落物增加,微生物活性升高,此时,虽然土壤有机碳库储量不变或增加,但土壤“惰性”有机碳库储量会降低,因而,土壤碳库稳定性降低。

本研究发现,气温增加虽然使 SOC 储量降低,但一定程度上能够增加耕地和草地土壤惰性有机碳含量,从而使得该地类土壤的固碳潜力增大;而对于林地土壤,气温增加却会削弱各有机碳组分含量,降低土壤固碳能力。因此,面对未来全球气候变暖的趋势,通过改良土壤结构,可以进一步充分发挥耕地与草地土壤的固碳潜力。在大气 CO₂ 浓度增加条件下,耕地土壤活性与惰性有机碳含量降低,土壤固碳能力明显降低,成为明显的碳源;虽然草地土壤碳储量变化较小,但由于土壤活性有机碳库储量占比的增加,惰性有机碳含量降低,有机碳库稳定性明显降低,这可能与 CO₂ 浓度升高促使草地植物光合作用增强,增加了 SOC 输入量有关^[49]。总之,大气 CO₂ 浓度升高,不仅会降低土壤碳储量,增加碳排放,也会使原有土壤有机碳更易于被矿化,增加土壤碳汇难度。因此,相较增温,CO₂ 浓度增加会对土壤固碳造成更恶劣的影响,采用积极碳减排措施,增强土壤固碳能力,降低大气 CO₂ 浓度迫在眉睫。此外,受已有研究限制,本研究所收集数据未能覆盖全球区域,且个别地类样本量有限,未来在相关领域需进一步研究。

土壤活性和惰性有机碳库对气候变化的响应受土层深度和地类的重要影响。以往研究发现,该响应也受其他多种环境因子的影响,如土壤活性有机碳碳库对变暖的响应规律与纬度呈现负相关关系^[50];不

同 SOC 组分碳库对气候因子变化的响应也取决于土壤中氮的有效性^[7],如在草地和丛枝菌根林环境中如果土壤中氮含量不低于土壤惰性有机碳形成所依赖的阈值,则气候变化对 SOC 的稳定性不会造成大的影响^[51]。而本研究由于数据的限制,尚未考虑纬度和土壤氮含量的影响,这些方面未来仍需要进一步探究。

4 结论

(1) 大气 CO₂ 浓度增加,气温升高和降水量减少均会导致 SOC 储量降低,降水量增加虽然会导致 SOC 储量升高,但土壤 MAOC 含量有降低趋势。总体上,气候变化会降低土壤碳储量或削弱碳库稳定性,但不同气候因子变化对 SOC 库及其稳定性的影响存在差别。

(2) 不同气候变化因子对土壤 POC 和 MAOC 的影响存在差异。气温升高导致土壤 POC 含量降低,而 MAOC 含量的变化趋势随地类改变而变化,如耕地和草地土壤 MAOC 含量增加,而林地土壤 MAOC 含量降低;大气 CO₂ 浓度升高使得 POC 与 MAOC 含量降低幅度更大;降水量增加使土壤 POC 含量增加,MAOC 含量减少,而降水量减少则相反。

(3) 土层深度和地类对气温升高,CO₂ 浓度升高和降水量增减对 SOC 碳库及其稳定性的影响有重要影响。林地 SOC 库对气候因子变化的响应最大,土壤固碳能力明显削弱,草地次之,耕地最小;虽然表层至深层土壤 SOC 库受气候变化的影响明显变小,但深层土壤也存在明显变化,其固碳潜力不可忽视。

参考文献 (References)

- [1] Sanderman J, Hengl T, Fiske G J. Soil carbon debt of 12 000 years of human land use [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017,114(36):9575-9580.
- [2] Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss [J]. *Nature Geoscience*, 2015,8(10):776-779.
- [3] 金鑫鑫,汪景宽,孙良杰,等.稳定¹³C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J].*土壤*,2017,49(2):217-224.
Jin Xinxin, Wang Jingkuan, Sun Liangjie, et al. Progress of carbon cycle in farmland and sequestration in soil aggregates revealed by stable ¹³C isotope [J]. *Soils*, 2017,49(2):217-224.
- [4] Rocci K S, Lavallee J M, Stewart C E, et al. Soil organic carbon response to global environmental change depends on its distribution between mineral-associated and particulate organic matter: A Meta-analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,793:148569.
- [5] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions [J]. *Nature Sustainability*, 2020,3(5):391-398.
- [6] Lu Xiaofei, Hou Enqing, Guo Jieyun, et al. Nitrogen addition stimulates soil aggregation and enhances carbon storage in terrestrial ecosystems of China: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2021,27(12):2780-2792.
- [7] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2019,12(12):989-994.
- [8] Feng Wenting, Plante A F, Aufdenkampe A K, et al. Soil organic matter stability in organo-mineral complexes as a function of increasing C loading [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014,69:398-405.
- [9] 蓝家程,王俊贤,王莎莎,等.喀斯特石漠化治理措施对土壤颗粒有机碳与团聚体有机碳的影响[J].*中国岩溶*, 2022,41(5):773-783.
Lan Jiacheng, Wang Junxian, Wang Shasha, et al. Impact of controlling karst rocky desertification on soil particulate organic carbon and aggregate-associated organic carbon [J]. *Carsologica Sinica*, 2022,41(5):773-783.
- [10] 章晓芳,郑生猛,夏银行,等.红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征[J].*环境科学*,2020,41(3):1466-1473.
Zhang Xiaofang, Zheng Shengmeng, Xia Yinhang, et al. Responses of soil organic carbon fractions to land use types in hilly red soil regions, China [J]. *Environmental Science*, 2020,41(3):1466-1473.
- [11] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002,66(6):1981-1987.
- [12] 张睿博,汪金松,王全成,等.土壤颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳对气候变暖响应的研究进展[J].*地理科学进展*,2023,42(12):2471-2484.
Zhang Ruibo, Wang Jinsong, Wang Quancheng, et al. Responses of soil particulate and mineral-associated organic carbon to climate warming: A review [J]. *Progress in Geography*, 2023,42(12):2471-2484.
- [13] Jia Juan, Liu Zongguang, Haghypour N, et al. Molecular ¹⁴C evidence for contrasting turnover and temperature sensitivity of soil organic matter components [J]. *Ecology Letters*, 2023,26(5):778-788.
- [14] Feyissa A, Yang Fan, Feng Jiao, et al. Soil labile and recalcitrant carbon and nitrogen dynamics in relation to

- functional vegetation groups along precipitation gradients in secondary grasslands of South China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, 27(10):10528-10540.
- [15] He Nianpeng, Chen Quansheng, Han Xingguo, et al. Warming and increased precipitation individually influence soil carbon sequestration of Inner Mongolian grasslands, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 158:184-191.
- [16] Jastrow J D, Miller R M, Matamala R, et al. Elevated atmospheric carbon dioxide increases soil carbon [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(12):2057-2064.
- [17] Carney K M, Hungate B A, Drake B G, et al. Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(12):4990-4995.
- [18] Carrillo Y, Dijkstra F, Lecain D, et al. Elevated CO₂ and warming cause interactive effects on soil carbon and shifts in carbon use by bacteria [J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(11):1639-1648.
- [19] Crowther T W, Todd-Brown K O, Rowe C W, et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming [J]. *Nature*, 2016, 540(7631):104-108.
- [20] Chen Ying, Feng Jiguang, Yuan Xia, et al. Effects of warming on carbon and nitrogen cycling in alpine grassland ecosystems on the Tibetan Plateau: A meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2020, 370:114363.
- [21] Chen Ying, Han Mengguang, Yuan Xia, 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.
- [22] Allard V, Newton P C D, Lieffering M, et al. Increased quantity and quality of coarse soil organic matter fraction at elevated CO₂ in a grazed grassland are a consequence of enhanced root growth rate and turnover [J]. *Plant and Soil*, 2005, 276(1):49-60.
- [23] Lichter J, Barron S H, Bevacqua C E, et al. Soil carbon sequestration and turnover in a pine forest after six years of atmospheric CO₂ enrichment [J]. *Ecology*, 2005, 86(7):1835-1847.
- [24] Walker T W N, Kaiser C, Strasser F, et al. Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(10):885-889.
- [25] Nottingham A T, Meir P, Velasquez E, et al. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest [J]. *Nature*, 2020, 584(7820):234-237.
- [26] Guan Song, An Na, Zong Ning, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116:224-236.
- [27] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478(7367):49-56.
- [28] 高静,徐明岗,李然,等.整合分析生物炭施用对土壤 pH 的影响[J].*中国农业科技导报*,2023,25(9):186-196.
Gao Jing, Xu Minggang, Li Ran, et al. Effects of biochar application on soil pH: A Meta-analysis [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(9):186-196.
- [29] Hijmans R J, Cameron S E, Parra J L, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15):1965-1978.
- [30] Zhou Zhenghu, Wang Chuankuan, Zheng Mianhai, et al. Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 115:433-441.
- [31] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 1999, 80(4):1150.
- [32] 张广立,岑柏霖,龙新宪,等.粪肥施用对土壤团聚体的影响:Meta 分析[J].*土壤*,2024,56(3):610-622.
Zhang Guangli, Cen B T, Long Xinxian, et al. Responses of soil aggregates to manure application: A meta-analysis [J]. *Soils*, 2024, 56(3):610-622.
- [33] 蒋发辉,钱泳其,郭自春,等.基于 Meta 分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性:以作物产量为例[J].*土壤学报*,2022,59(4):935-952.
Jiang Fahui, Qian Yongqi, Guo Zichun, et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of NorthEast China: A Meta-analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(4):935-952.
- [34] 安海涛,孙彩彩,董全民,等.青藏高原土壤微生物生物量对放牧强度响应的 Meta 分析[J].*草地学报*,2024,32(6):1913-1922.
An Haitao, Sun Caicai, Dong Quanmin, et al. Meta-analysis of soil microbial biomass response to grazing intensity in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(6):1913-1922.
- [35] 朵莹.冬季及生长季增温对草地生态系统碳氮过程及地上生物量的影响:基于 meta 分析与控制实验[D].*陕西杨凌:西北农林科技大学*,2022.
Duo Ying. Effects of warming in winter and growing season on carbon and nitrogen processes and aboveground

- biomass of grassland ecosystem: Based on Meta-analysis and control experiments [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2022.
- [36] Lugato E, Lavallee J M, Haddix M L, et al. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter [J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14 (5):295-300.
- [37] Rasmussen C, Torn M S, Southard R J. Mineral assemblage and aggregates control carbon dynamics in a *California conifer* forest [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6):1711-1721.
- [38] Jensen K H, Grandy A S, Sparks J P. Elevated atmospheric CO₂ drives decreases in stable soil organic carbon in arid ecosystems: Evidence from a physical fractionation and organic compound analysis [J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(2):e17175.
- [39] 司马鑫琪, 李彦生, 于镇华, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对玉米农田黑土碳库及细菌群落的影响[J]. *土壤与作物*, 2024, 13(4):428-438.
- Sima Xinqi, Li Yansheng, Yu Zhenhua, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and warming on soil carbon pool and microbial community composition in a maize-grown mollisol [J]. *Soils and Crops*, 2024, 13(4):428-438.
- [40] Peplau T, Schroeder J, Gregorich E, et al. Long-term geothermal warming reduced stocks of carbon but not nitrogen in a subarctic forest soil [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(20):5341-5355.
- [41] Amelung W, Flach K W, Zech W. Lignin in particle-size fractions of native grassland soils as influenced by climate [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5):1222-1228.
- [42] Sokol N W, Sanderman J, Bradford M A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1):12-24.
- [43] Bai Tongshuo, Wang Peng, Hall S J, et al. Interactive global change factors mitigate soil aggregation and carbon change in a semi-arid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9):5320-5332.
- [44] Jaman M S, Wu Honghui, Yu Qiang, et al. Contrasting responses of plant above and belowground biomass carbon pools to extreme drought in six grasslands spanning an aridity gradient [J]. *Plant and Soil*, 2022, 473 (1):167-180.
- [45] 胡坤, 张红雪, 郭力铭, 等. 烟秆炭基肥对薏苡土壤有机碳组分及微生物群落结构和丰度的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9):1592-1603.
- Hu Kun, Zhang Hongxue, Guo Liming, et al. Effects of tobacco stalk biochar-based fertilizer on the organic carbon fractions and microbial community structure of adlay soil [J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2021, 29(9):1592-1603.
- [46] 蒿廉伊. 控制降水对黄土高原西部荒漠草原土壤有机碳组分及其稳定性的影响[D]. 甘肃 兰州: 西北师范大学, 2022.
- Hao Lianyi. Effects of controlled precipitation on soil organic carbon composition and its stability in desert steppe of Western Loess Plateau [D]. Lanzhou, Gansu: Northwest Normal University, 2022.
- [47] Pisani O, Frey S D, Simpson A J, et al. Soil warming and nitrogen deposition alter soil organic matter composition at the molecular-level [J]. *Biogeochemistry*, 2015, 123 (3):391-409.
- [48] 陈栋, 郁红艳, 邹路易, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对不同层次水稻土有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2559-2565.
- Chen Dong, Yu Hongyan, Zou Luyi, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on the stability of soil organic carbon in different layers of a paddy soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2559-2565.
- [49] Cardon Z G, Hungate B A, Cambardella C A, et al. Contrasting effects of elevated CO₂ on old and new soil carbon pools [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(3):365-373.
- [50] Zhang Xianzhou, Shen Zhenxi, Fu Gang. A meta-analysis of the effects of experimental warming on soil carbon and nitrogen dynamics on the Tibetan Plateau [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 87:32-38.
- [51] Luo Yiqi, Su Bo, Currie W S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide [J]. *BioScience*, 2004, 54(8):731.