

DOI:10.11686/cyxb2025230

http://cyxb.magtech.com.cn

连佳丽, 陈婧, 杨雪琴, 等. 降水变化对荒漠草原土壤有机碳分布与有机碳库稳定性的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 85—98.

LIAN Jia-li, CHEN Jing, YANG Xue-qing, *et al.* Effects of precipitation changes on the soil organic carbon distribution and stability of organic carbon pool in desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 85—98.

降水变化对荒漠草原土壤有机碳分布 与有机碳库稳定性的影响

连佳丽¹, 陈婧¹, 杨雪琴¹, 赵莹¹, 罗叙¹, 韩翠¹, 李建平^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 盐池北部荒漠草原宁夏野外观测研究站, 宁夏 吴忠 751500)

摘要: 研究降水对荒漠草原生态系统土壤有机碳(SOC)动态的调控机制, 对于深入理解脆弱干旱环境下的碳循环过程和稳定机制具有重要意义。以宁夏盐池县荒漠草原为研究对象, 采用遮雨棚技术模拟 5 个降水梯度, 分别为正常降水的 33%、66%、100%、133% 和 166% (记为 P₃₃、P₆₆、P_{CK}、P₁₃₃、P₁₆₆), 探讨荒漠草原土壤有机碳(SOC)分布格局及碳(C)库稳定性在不同降水变化模式下的演变动态, 揭示降水变化对土壤 C 库稳定性的影响机制。结果表明: 1) 各降水处理下, SOC、土壤可溶性有机碳(DOC)及土壤微生物生物量碳(MBC)含量均随土层深度增加而递减, 表层(0~10 cm)含量最高; 同一土层中, 增水处理显著提高了 SOC、土壤易氧化有机碳(EOC)及 MBC 含量, 而 DOC 含量在减水处理下显著升高; 2) 土壤有机 C 库稳定性指标显示, 增水处理显著提升了碳库活性(CA)、碳库管理指数(CPMI), 其中 P₁₃₃ 处理的 CPMI 达 192.49%, 表明适度增水可增强 C 库稳定性; 3) Pearson 相关性分析和结构方程表明, 降水通过影响土壤水分与土壤酶活性对活性 SOC 组分产生影响, 进而影响 CPMI, 其中 DOC 对 CPMI 的影响为主要通路。因此, 增水处理可有效提高荒漠草原活性 SOC 组分及 CPMI, 活性 SOC 对于降水变化极为敏感, 可作为表征降水变化对荒漠草原土壤 C 库稳定性影响的重要参数。

关键词: 荒漠草原; 降水变化; 土壤有机碳组分; 碳库稳定性

Effects of precipitation changes on the soil organic carbon distribution and stability of organic carbon pool in desert steppe

LIAN Jia-li¹, CHEN Jing¹, YANG Xue-qing¹, ZHAO Ying¹, LUO Xu¹, HAN Cui¹, LI Jian-ping^{1,2*}

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Northern Yanchi Desert Steppe Observation and Research Station of Ningxia, Wuzhong 751500, China

Abstract: The aims of this work were to investigate the regulatory mechanisms of soil organic carbon (SOC) dynamics in a desert steppe ecosystem, and to determine how they are affected by changes in precipitation. This is critical for advancing our understanding of carbon (C) cycling processes and stabilization mechanisms in vulnerable arid environments. A field experiment was conducted in the desert steppe in Yanchi County, Ningxia. A gradient of five precipitation levels was simulated by rain shelter technology; namely 33%, 66%, 100%, 133%, and 166% of normal rainfall (designated as P₃₃, P₆₆, P_{CK}, P₁₃₃, and P₁₆₆, respectively). The distribution pattern of SOC and the stability of the C pool under different precipitation changes in the desert steppe were analyzed, and the mechanisms by which changes in precipitation affected the stability of the soil C pool were explored. The results showed that: 1)

收稿日期: 2025-06-09; 改回日期: 2025-08-08

基金项目: 宁夏自然科学基金(2023AAC03092)和银川市重点研发项目(2023NYZC01)资助。

作者简介: 连佳丽(2001—), 女, 甘肃庆阳人, 在读硕士。E-mail: 14719665880@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lijianpingsas@163.com

Under all precipitation treatments, the contents of SOC, soil dissolved organic C (DOC), and soil microbial biomass C (MBC) decreased with increasing soil depth, and all these parameters had the highest values in the surface layer (0–10 cm). In the same soil layer, water addition significantly increased SOC, the easily oxidized soil organic C (EOC) content, and MBC content, while the DOC content increased significantly under reduced precipitation treatments. 2) The stability index of the soil C pool showed that increased precipitation treatments significantly increased the carbon pool activity (CA) and carbon pool management index (CPMI). The CPMI of the P₁₃₃ treatment reached 192.49%, indicating that a moderate increase in precipitation could enhance the stability of the C pool. 3) Pearson's correlation analysis and structural equation modeling (SEM) showed that precipitation affected the active SOC components through soil moisture and soil enzyme activity, which in turn affected CPMI; the effect of DOC on CPMI was the main pathway. Therefore, increased precipitation can effectively enhance the active SOC components and CPMI of soil in the desert steppe. Notably, active SOC was highly sensitive to variations in precipitation, so it can serve as an indicator of the effect of changes in precipitation on the stability of the soil C pool in the desert steppe.

Key words: desert steppe; precipitation change; soil organic carbon components; carbon pool stability

全球变暖将加剧地球上的水文过程,导致全球降水模式发生变化,并大大增加全球极端降水事件的发生频率^[1]。降水变化,特别是年降水量的变化,被认为对植物生长、生物量积累、土壤碳(carbon, C)循环和储存等生态系统过程和功能具有重要影响^[2–3]。草地具有极其重要的生态和生产功能,储存了全球陆地生态系统有机C总量的34%,其中约90%的C储存在植物根系和土壤中^[4],并且草地土壤在全球C循环和减缓气候变化中起着至关重要的作用。在此背景下,评估降水变化对草地土壤C库的影响尤为迫切。已有研究评估了降水变化如何影响陆地生态系统的土壤C变化动态(土壤呼吸或土壤C库)^[5–8],然而,关于降水变化对草地土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)稳定性的影响研究较少。因此,为了厘清降水变化对草地SOC的影响及土壤有机C库稳定性的调控机制,提出基于自然的气候变化解决方案,对于提升生态系统的保C增汇能力,保障全球生态安全和食物安全,实现“双碳”目标具有重要意义。

土壤C库是陆地生物圈中最大的C库^[9],其稳定性特征对于维持全球碳平衡与减缓气候变化意义重大^[10]。降水格局的改变对土壤有机C库的影响会显著影响全球C收支,并对全球气候变化产生重大反馈^[11–12]。降水增加往往会改变地表水文格局,调节植物生长并减缓凋落物的分解速率,从而影响土壤有机C库储量及C库稳定性^[13–15],相反,降水减少会限制微生物活性,降低分解速率,同时也减少了植物C输入,形成复杂的反馈机制^[16–17]。SOC是土壤碳储量的重要指标,对土壤肥力形成、粮食生产及土壤健康具有重要意义,土壤中适量的SOC对于植物生长、养分循环以及水分的有效渗透和保持至关重要^[18]。尽管活性SOC在总SOC中所占比例较小,且展现出较差的稳定性和高度的生物活性,但它对气候变化的响应却非常灵敏^[19–20]。这种响应通常依据多种指标进行评估,其中包括易氧化有机碳(easily oxidized soil organic carbon, EOC)、可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)以及微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)等。研究发现,人工增雨使SOC含量升高^[21],而降水减少则普遍降低植物碳输入,但可能因水分限制抑制分解,使得SOC变化呈现非线性响应。在垂直分布上,降水增加通常促进C向深层(>30 cm)土壤迁移,主要由于DOC的淋溶下渗及根系向深层的延伸^[8];相反,降水减少会减少深层C输入,导致表层C占比升高,但整体SOC储量可能下降^[22]。土壤C动态变化速率在陆地生态系统中的表现,常通过碳库管理指数(carbon pool management index, CPMI)来衡量,该指数用于评估环境因素对土壤SOC数量及其质量的效应^[23–24]。降水通过改变土壤理化特性^[6]、微生物群落组成^[13]及土壤酶活性^[25]等影响活性SOC组分,进而影响土壤有机C库稳定性。准确掌握SOC及其活性组分的特征,以及CPMI等核心指标,并结合土壤有机C库稳定性影响因子进行研究,对于预估SOC稳定性而言至关重要,同时能够协助评估土壤有机C库面对环境变化时的适应与响应潜能。

荒漠草原作为干旱和半干旱地区的主要草原生态系统,不仅拥有独特的生物多样性,而且在维持生态平衡和促进生物地球化学循环中扮演着关键角色,它对全球气候变化的响应表现出高度的敏感性和脆弱性^[26]。降水是荒漠草原生态系统中最为关键的环境因子之一,降水变化对荒漠草原的植被生长、土壤水分状况和微生物活动产生显著影响,这些影响进一步作用于土壤有机C库的稳定性和动态变化。已有大量研究探讨了水分对陆地生态系统的影响^[5],但目前关于降水变化对荒漠草原土壤有机C库稳定性的调控机理仍不清楚。基于此,本研究选定宁夏盐池县荒漠草原作为研究对象,采用人工模拟降水梯度,测定土壤理化性质、SOC活性组分及土壤酶活性,并据此计算CPMI,旨在深入探究不同降水处理条件下土壤有机C库稳定性的变化规律及其潜在影响因素,以期提升荒漠草原地区的土壤C储量和促进生态恢复提供科学的理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以宁夏盐池县荒漠草原为对象(37°04′—38°10′ N, 107°16′—107°28′ E),海拔1380~1600 m,地势相对平缓^[27](图1a)。该区为典型的农牧交错带,属于典型的温带大陆性气候,年平均气温8.6℃,大于0℃的年积温3430.0℃,年平均降水量为294.8 mm(图1b),并且主要集中在7—9月,约占全年降水量的80%,年平均蒸发量为2131.8 mm,无霜期大约为162 d^[28]。研究区地带性土壤主要为浅灰钙土,质地为砂壤和粉砂壤,pH值在8.8左右,土壤含水量均值为4.4%。该地区植被主要为中生与旱生的多年生草本植物,同时混生了大量旱生小灌木,牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等为优势种。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计 本试验于2018年在盐池县四墩子基地进行,根据1981—2018年气象监测数据,通过人工集雨大棚和滴灌技术进行降水控制试验。采用单因素完全随机试验设计,依据研究区近40 a的平均降水量及降水波动极值分别设置了5个降水梯度(图1c):P₃₃(正常降水量的33%)、P₆₆(正常降水量的66%)、P_{CK}(正常降水量)、P₁₃₃(正常降水量的133%)、P₁₆₆(正常降水量的166%)。各降水梯度设置3个面积为36 m²(6 m×6 m)的重复单元,共计15个小区。每个小区周围用1.2 m宽的塑料板隔离水分,以防止水分的扩散。减水试验采用钢架结构和U形透明有机玻璃(由聚碳酸酯材料制成,允许90%的光合有效辐射通过)覆盖小区2/3和1/3区域,减水收集的降水,按照小区增水量,采用人工喷灌的方式均匀补充到增水区。样地布局见图1a。

1.2.2 样品采集 经过6 a的降水处理,本研究于2023年8月进行土壤样本采集。在每一个样地中使用直径为6 cm的土钻在0~30 cm的土层中取样,以10 cm为取样间隔(0~10 cm,10~20 cm,20~30 cm)。每个样地每层取3钻,随后将同一土层的3份土样混合,形成一个土壤样本。将土样中的枯落物等杂物剔除后,通过2 mm筛进行细筛处理,并分成两份装入无菌密封袋,随后迅速转移至实验室4℃冰箱内,一份用于检测土壤的理化特性,一份用于检测土壤有机碳组分和酶活性。

1.3 样品分析

2023年5—10月利用Li-8100(Li-Cor,美国)携带的热电偶温度探针和湿度探测器测量5 cm处的土壤水分(moisture, M)与10 cm处的土壤温度(temperature, T)(图2)。土壤有机碳(SOC)、土壤全氮(total nitrogen, TN)和土壤全磷(total phosphorus, TP)含量分别采用重铬酸钾-浓硫酸外加热容量法^[29]、微量凯氏定氮法^[30]及钼锑抗比色法^[29]测定。研究区降水处理6 a(2018—2023年)后的土壤理化性质见表1。土壤易氧化有机碳(EOC)、可溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)含量分别采用高锰酸钾(K₂MnO₄)氧化比色法^[31]、硫酸钾(K₂SO₄)浸提法^[32]及氯仿熏蒸提取法^[29]测定。本研究测定了4种土壤水解酶的活性,分别为碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AKP)、β-1,4-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase, BG)、纤维二糖水解酶(cellobiose hydrolase, CBH)、β-1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(β-1,4-N-acetylglucosaminidase, NAG),均采用96孔微孔板荧光光度法^[33]测定。

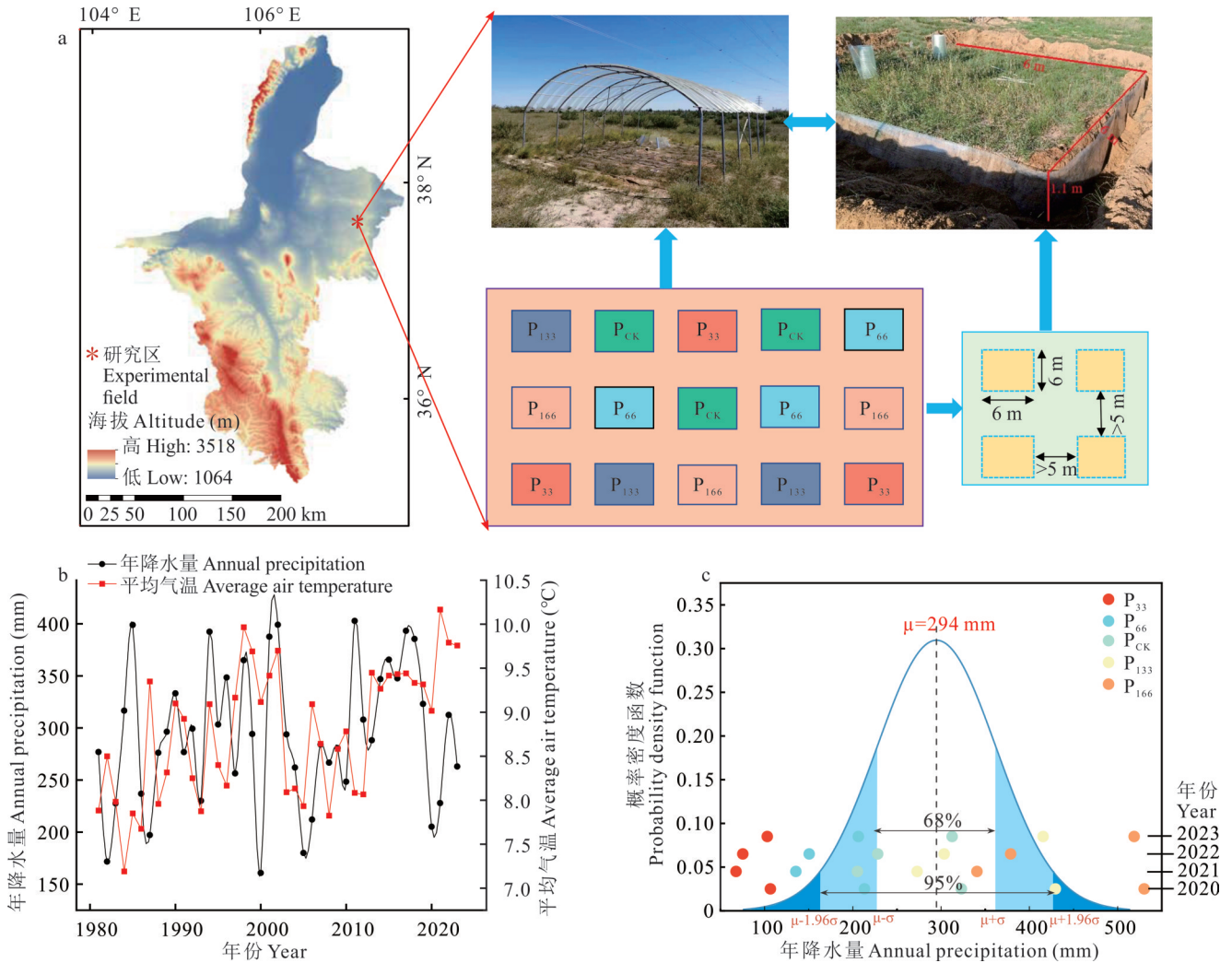


图1 研究区概况

Fig. 1 Profile of the study area

a: 荒漠草原野外试验区位置、设计和降水调控装置 Location, design and precipitation control device of desert grassland field test area; 该地图基于宁夏回族自治区标准地图服务网站宁S(2022)第001号标准地图制作,底图边界无修改。This map was made based on the standard map of Ningxia Hui Autonomous Region's Standard Map Service Website [宁S(2022)第001号], and the boundaries didn't modified. b: 1981—2023年宁夏盐池县降水量和气温变化 Precipitation and air temperature changes in Yanchi County of Ningxia from 1981 to 2023; c: 荒漠草原40 a间(1981—2023年)降水概率密度函数和2020—2023年模拟降水处理的统计变化 The probability density function of precipitation in desert steppe for 40 years (1981—2023) and the statistical changes of simulated precipitation treatment from 2020 to 2023.

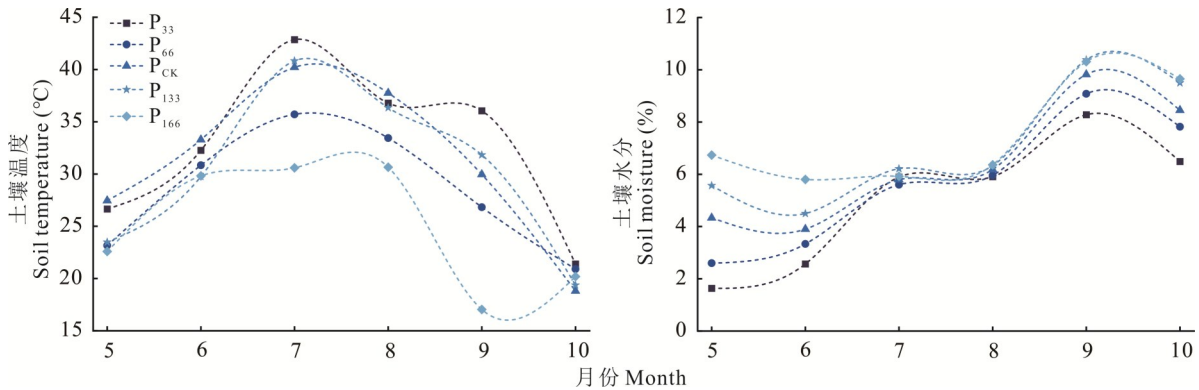


图2 降水变化下土壤温度与土壤水分的时间变化

Fig. 2 Temporal variations of soil temperature and soil moisture under the change of precipitation

1.4 数据分析

本研究中不同降水条件下土壤碳库稳定性的变化采用土壤碳库活度(carbon pool activity, CA)、碳库活度指数(carbon pool activity index, CAI)、碳库指数(carbon pool index, CPI)和碳库管理指数(CPMI)4个指标来反映。以对照(P_{CK})样地的土壤为参考,计算上述4个指标,具体计算公式如下^[23,34]:

$$CA = EOC / (SOC - EOC)$$

$$CAI = CA_p / CA_{CK}$$

$$CPI = SOC_p / SOC_{CK}$$

$$CPMI(\%) = CAI \times CPI \times 100$$

式中: CA_p 和 CA_{CK} 分别为不同降水和对照处理下土壤的碳库活度; SOC_p 和 SOC_{CK} 分别为不同降水和对照处理下土壤总有机碳的含量($g \cdot kg^{-1}$)。

采用Excel 2010软件进行原始数据的整理和土壤碳库管理指数的计算,采用SPSS 26.0对不同降水处理和不同土层的数据在0.05水平下进行单因素方差分析(One way ANOVA),使用Origin 2024进行图表绘制及Pearson相关性分析。采用偏最小二乘路径模型(partial least squares path modeling, PLS-PM)评估降水变化对土壤有机C库稳定性的直接和间接影响。路径系数表示通过模型计算出的潜在变量与被解释变量之间的线性关系(R^2)的方向和强度,模型拟合度(goodness-of-fit, GOF)用于评估模型的整体预测能力。结构方程模型使用R软件中plspm程序包完成。

2 结果与分析

2.1 降水变化对土壤有机碳库垂直分布的影响

在垂直分布上(图3a), P_{33} 、 P_{66} 与 P_{133} 处理下SOC含量呈现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势,且最大值均出现在0~10 cm土层,比20~30 cm土层分别显著高出76.94%、81.52%、75.24%($P < 0.05$)。而在 P_{166} 处理下,3种土层间无显著差异($P > 0.05$)。0~10 cm土层中, P_{166} 处理的SOC含量显著高于 P_{33} 处理;10~20 cm土层中,各处理下的SOC含量较对照组均变化不显著($P > 0.05$);20~30 cm土层中,各处理间差异不显著。

各降水处理下,DOC含量均呈现出随土层深度增加而逐渐降低的趋势(图3b),其中, P_{33} 处理下,各土层间有显著性差异; P_{66} 处理下,0~10 cm土层的DOC含量显著高于20~30 cm土层($P < 0.05$);而在 P_{133} 及 P_{166} 处理下,3种土层间均无显著差异($P > 0.05$)。在0~10 cm土层中, P_{66} 处理下的DOC含量较对照处理增加了13.01%,差异显著($P < 0.05$)。

在 P_{66} 、 P_{CK} 、 P_{133} 及 P_{166} 处理下,EOC含量在3种土层间均无显著差异(图3c);而在 P_{33} 处理下,3种土层间的EOC含量差异显著($P < 0.05$),且在0~10 cm土层中达到最高,为 $0.53 g \cdot kg^{-1}$ 。同一土层中,EOC含量随降水量增加呈现上升趋势,并且 P_{133} 及 P_{166} 处理下EOC含量显著高于 P_{33} 及 P_{66} 处理($P < 0.05$)。

不同降水处理下,MBC含量均在0~10 cm土层中达到最大,依次为32.15、41.01、29.24、36.09和37.29 $mg \cdot kg^{-1}$ (图3d)。其中, P_{33} 处理下,0~10 cm土层的MBC含量显著高于10~20 cm及20~30 cm土层; P_{66} 、 P_{133} 及 P_{166} 处理下,0~10 cm土层的MBC含量显著高于20~30 cm土层($P < 0.05$)。在0~10 cm土层中, P_{66} 处理下的MBC含量显著高于对照处理;10~20 cm土层中, P_{133} 及 P_{166} 处理下的MBC含量显著高于 P_{33} ,分别增加了51.93%、67.02%;20~30 cm土层中, P_{166} 及 P_{66} 处理下的MBC含量显著高于 P_{33} ($P < 0.05$)。

2.2 降水变化对土壤有机碳库稳定性的影响

碳库活度的下降表征着土壤C库稳定性的上升。由表2可知,5种降水处理下的土壤碳库活度(CA)为 $P_{133} >$

表1 研究区降水处理6 a(2018–2023)后的土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties after 6 years of precipitation treatment (2018–2023) in the study area ($g \cdot kg^{-1}$)

处理 Treatment	土壤有机碳 Soil organic carbon	土壤全氮 Soil total nitrogen	土壤全磷 Soil total phosphorus
P_{33}	1.64±0.47b	0.16±0.05b	0.21±0.04a
P_{66}	1.87±0.61b	0.20±0.06b	0.22±0.03a
P_{CK}	2.51±1.02ab	0.26±0.13ab	0.24±0.04a
P_{133}	2.14±0.63b	0.20±0.07b	0.23±0.02a
P_{166}	3.08±1.36a	0.33±0.18a	0.25±0.05a

数据表示0~30 cm土层的平均值±标准误。 P_{33} :正常降水量的33%; P_{66} :正常降水量的66%; P_{CK} :正常降水量; P_{133} :正常降水量的133%; P_{166} :正常降水量的166%;同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。The data are expressed as mean±standard error of 0~30 cm soil layer. P_{33} : 33% of natural rainfall; P_{66} : 66% of natural rainfall; P_{CK} : Natural rainfall; P_{133} : 133% of natural rainfall; P_{166} : 166% of natural rainfall. Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level. The same below.

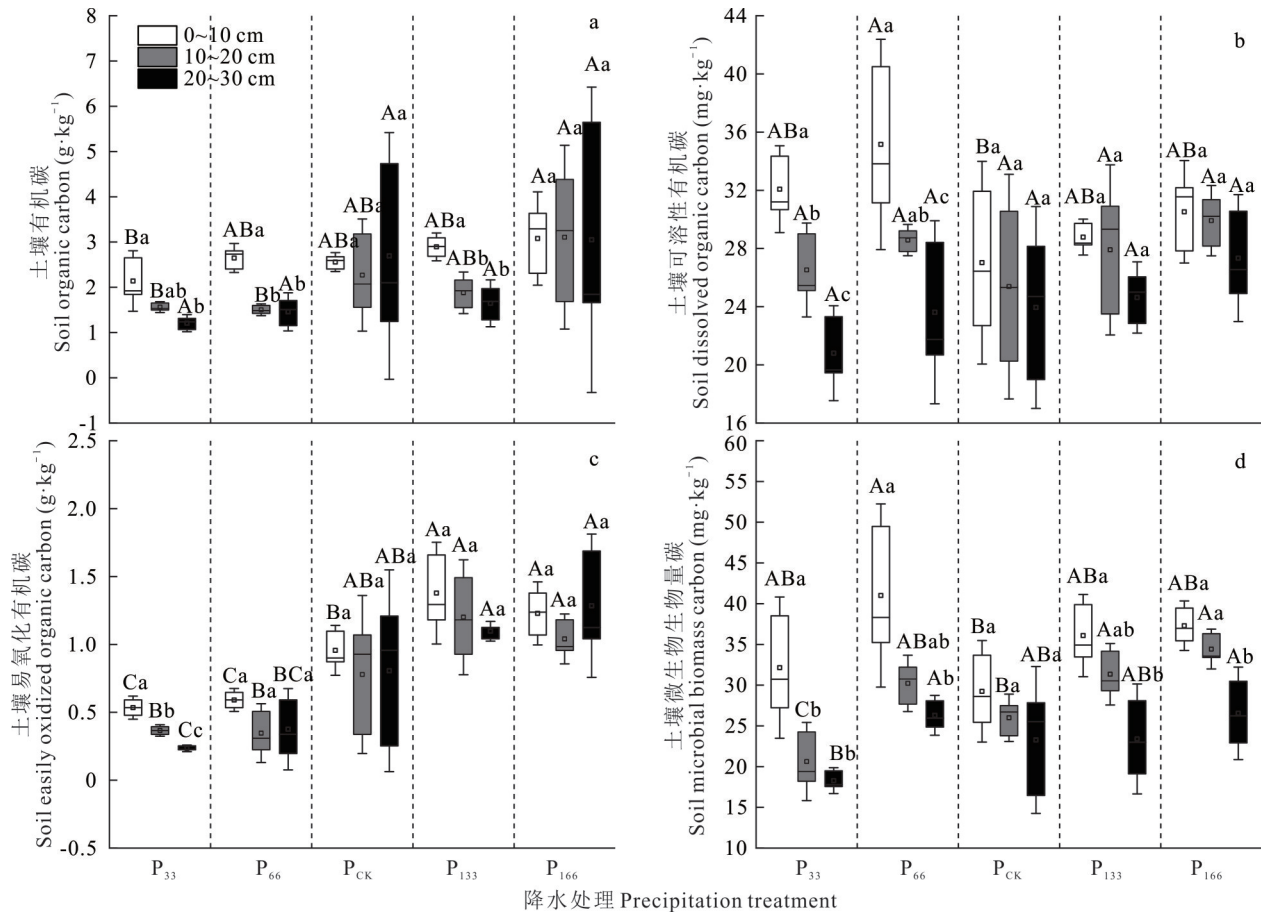


图3 降水变化下各土层有机碳及其组分含量

Fig. 3 The content of organic carbon and its components in each soil layer under the change of precipitation

不同大写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一处理不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Different capital letters indicate significant differences at the 0.05 level among different treatments of the same soil layer; different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level among different soil layers of the same treatment. The same below.

$P_{166} > P_{CK} > P_{66} > P_{33}$, 并且 P_{133} 处理下的 CA 显著大于其他处理 ($P < 0.05$)。 P_{133} 处理下的土壤碳库活度指数 (CAI) 较 P_{66} 和 P_{33} 处理分别显著提高 364.52%、336.36% ($P < 0.05$)。5 种降水处理下的土壤碳库指数 (CPI) 为 0.72~1.36, 其中最大值出现在 P_{166} 处理下, 分别较 P_{133} 、 P_{CK} 、 P_{66} 及 P_{33} 处理提高 54.55%、36.00%、63.86%、88.89%。碳库管理指数 (CPMI) 是基于对照处理的土壤 SOC 变化的稳定性指标, 对照处理的 CPMI 为 100%。不同降水处理下的 CPMI 变化趋势与 CA 相同, 其中 P_{33} 与 P_{66} 处理下的 CPMI 显著低于 P_{133} 与 P_{166} 处理 ($P < 0.05$), 且 P_{133} 与 P_{166} 处理下的 CPMI 分别为 192.49%、190.07%, 均大于 100%。

表2 降水变化下的土壤碳库管理指数

Table 2 Soil carbon pool management index under the change of precipitation

处理 Treatment	土壤碳库活度 Carbon pool activity (CA)	碳库活度指数 Carbon pool activity index (CAI)	碳库指数 Carbon pool index (CPI)	碳库管理指数 Carbon pool management index (CPMI, %)
P_{33}	0.30 ± 0.06b	0.66 ± 0.32c	0.72 ± 0.25b	49.90 ± 35.37b
P_{66}	0.32 ± 0.14b	0.62 ± 0.21c	0.83 ± 0.31ab	53.84 ± 34.55b
P_{CK}	0.54 ± 0.24b	1.00 ± 0.00bc	1.00 ± 0.00ab	100.00 ± 0.00b
P_{133}	2.19 ± 2.05a	2.88 ± 2.32a	0.88 ± 0.33ab	192.49 ± 96.53a
P_{166}	0.93 ± 0.58b	2.05 ± 1.99ab	1.36 ± 0.74a	190.07 ± 157.09a

2.3 降水变化对土壤酶活性的影响

本研究结果表明,不同处理和土壤深度对 4 种酶活性有显著影响。在所有处理下,土壤中 BG、CBH、NAG 及 AKP 4 种酶活性均随土层深度增加而降低,且 0~10 cm 土层中 4 种酶活性总体显著高于更深土层 ($P < 0.05$,图 4)。

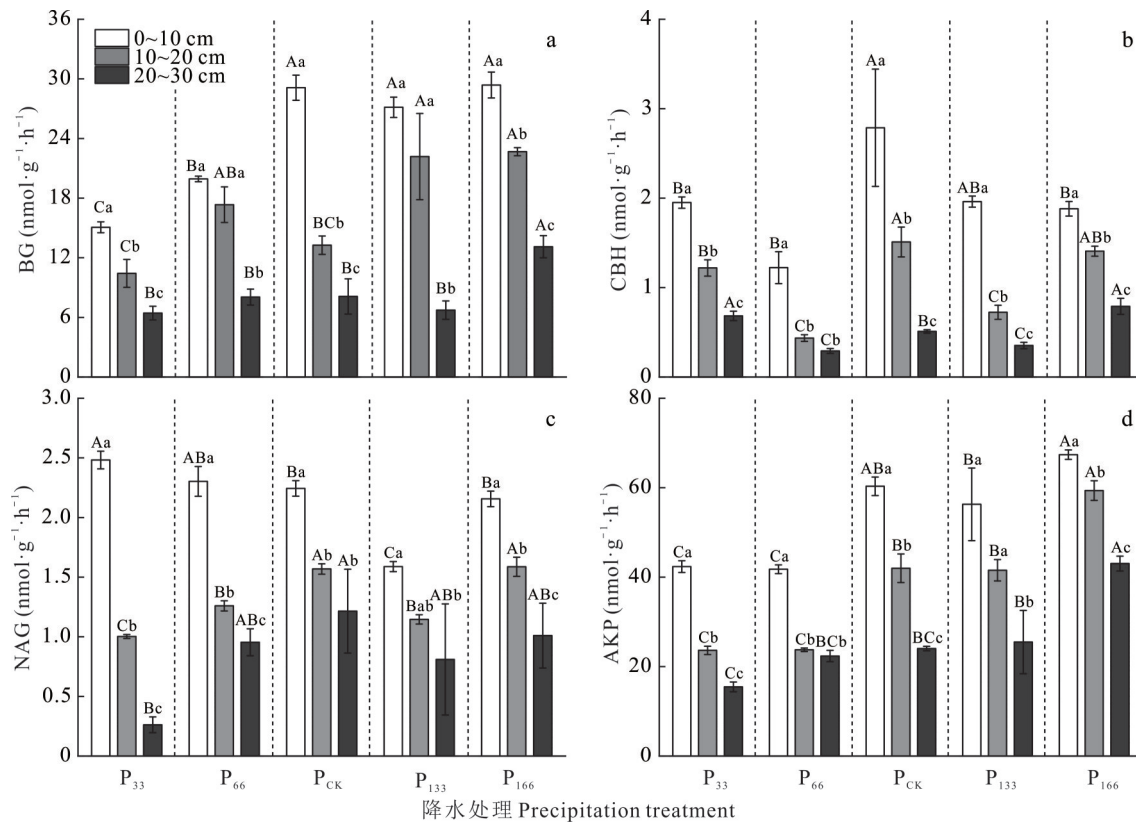


图 4 降水变化下各土层的土壤酶活性变化

Fig. 4 Changes in soil enzyme activity with each soil layer under the change of precipitation change

BG: β -1, 4-葡萄糖苷酶 β -1, 4-glucosidase; CBH: 纤维二糖水解酶 Cellobiose hydrolase; NAG: β -1, 4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶 β -1, 4-N-acetylglucosaminidase; AKP: 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase. 下同 The same below.

在 0~10 cm 土层中, P₃₃ 及 P₆₆ 处理下的 BG 活性显著低于 P_{CK} ($P < 0.05$), 分别降低了 48.26%、31.53%。在 10~20 cm 土层中, BG 活性在 P₁₃₃ 及 P₁₆₆ 处理下较 P_{CK} 分别显著提高 67.21%、70.89%, 而在 P₃₃ 处理下, BG 活性变化不显著 ($P > 0.05$)。在 20~30 cm 土层中, BG 活性在 P₁₆₆ 处理下显著高于其他处理 ($P < 0.05$, 图 4a)。

在 0~10 cm 土层中, CBH 活性在 P₃₃、P₆₆ 及 P₁₆₆ 处理下显著低于 P_{CK} ($P < 0.05$), 分别降低了 30.01%、56.13%、32.49%。10~20 cm 土层中, P_{CK} 处理下的 CBH 活性显著高于 P₃₃、P₆₆ 及 P₁₃₃ 处理 ($P < 0.05$), 分别高出 23.80%、246.69%、108.50%。在 20~30 cm 土层中, P₃₃ 及 P₁₆₆ 处理下的 CBH 活性显著高于 P_{CK} 处理 ($P < 0.05$, 图 4b)。

0~10 cm 土层中, NAG 活性在 P₃₃ 处理下显著高于 P_{CK} 处理, 而在 10~20 cm 土层中, NAG 活性在 P₃₃ 处理下显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。在 20~30 cm 土层中, P₃₃ 处理下 NAG 活性较 P_{CK} 处理显著降低了 77.85% ($P < 0.05$)。在 10~20 cm 和 20~30 cm 土层中, P₁₆₆ 处理下的 AKP 活性显著高于其他处理 ($P < 0.05$), 而在 0~10 cm 土层中, AKP 活性较 P_{CK} 处理变化不显著 ($P > 0.05$, 图 4c, d)。

2.4 土壤有机碳稳定性的驱动因素

Pearson 相关性分析结果表明 (图 5), CA 与 EOC 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与 AKP、BG 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 而与土壤温度 (T) 呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$); CPMI 与 EOC、AKP、BG 呈极显著正相关关

系($P<0.01$),与土壤水分(M)、CBH、NAG呈显著正相关关系($P<0.05$),而与土壤温度(T)呈显著负相关关系($P<0.05$);SOC与TN、TP、EOC、MBC呈极显著正相关关系($P<0.01$),与DOC、土壤水分(M)呈显著正相关关系($P<0.05$)。

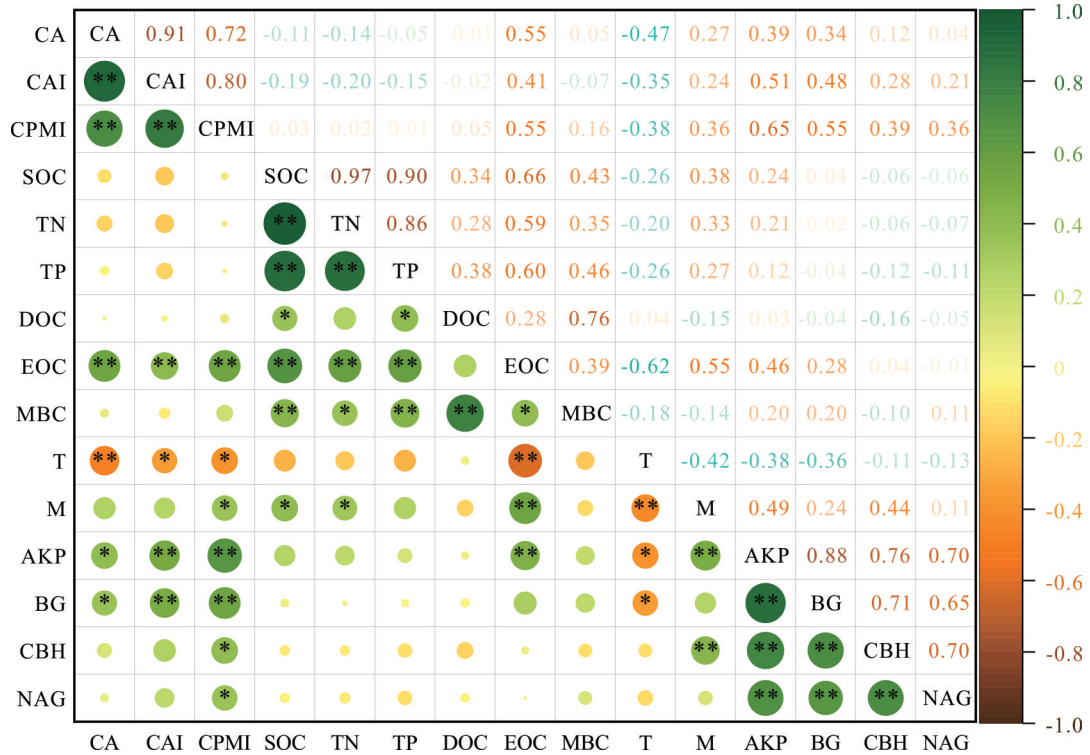


图5 土壤理化性质、酶及有机碳组分与土壤碳库稳定性的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between soil physical and chemical properties, soil enzymes, soil organic carbon components and soil carbon pool stability

CA: 碳库活度 Carbon pool activity; CAI: 碳库活度指数 Carbon pool activity index; CPMI: 碳库管理指数 Carbon pool management index; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; EOC: 易氧化有机碳 Easily oxidized organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; M: 土壤水分 Soil moisture; T: 土壤温度 Soil temperature; TP: 全磷 Total phosphorus; TN: 全氮 Total nitrogen. *: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。下同 The same below.

利用结构方程模型(structural equation modeling, SEM)分析降水变化对荒漠草原土壤有机C库稳定性的路径通路(GOF=0.56,图6a),方程模型解释了68%的CPMI变异。结果显示,降水变化对DOC(路径系数:0.61, $P<0.001$)与MBC(路径系数:0.40, $P<0.01$)存在极显著的正向影响。土壤水分与DOC和EOC呈显著正相关关系,同时,DOC与EOC间也存在显著正相关关系(路径系数:0.34, $P<0.05$)。MBC对土壤酶活性存在显著正向影响(路径系数:0.50, $P<0.01$)。3种活性SOC组分中,DOC含量的增加能够对CPMI产生显著的正向影响(路径系数:0.77, $P<0.001$)。由图6b可知, Precipitation、M、DOC、EOC和MBC均对CPMI产生正效应,其中DOC影响最大,而Enzyme对CPMI产生负效应。

3 讨论

3.1 降水变化对土壤有机碳库垂直分布的影响

SOC是衡量土壤肥力和生态环境质量的重要指标,对全球C收支具有重要影响。本研究显示,在P₃₃、P₆₆及P₁₃₃这3种降水处理下,土层深度对SOC有显著影响,随着土层深度的增加,土壤中SOC含量呈现下降趋势,其中0~10 cm土层中SOC含量最高。一方面是因为表层土壤SOC大部分来自凋落物,它们在地表迅速分解,释放出大量的SOC,并且土壤表层微生物活动较为活跃,可分解有机物质将其转化为SOC;而在深层土壤,微生物的活

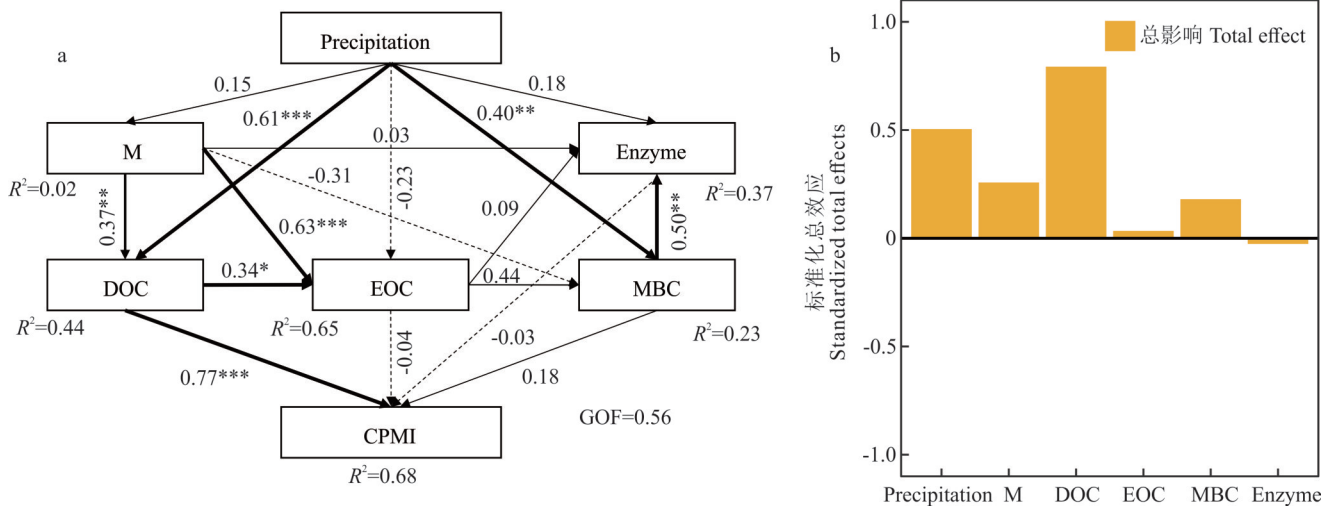


图 6 降水变化对土壤碳库管理指数影响的结构方程模型和标准化总效应

Fig. 6 The structural equation model analysis (SEM) and standardized total effect for the effects of precipitation change on the carbon pool management index

Precipitation: 降水量变化 Precipitation change; Enzyme: 4 种土壤酶活性 Activity of four kinds soil enzymes (BG, CBH, NAG, AKP); CPMI: 碳库管理指数 Carbon pool management index; GOF: 模型拟合度 Goodness-of-fit. 图中单箭头表示假设的因果关系方向, 实线和虚线分别代表正向和负向路径, 线的粗细反映效应程度。The single arrows in the figure represent the hypothesized direction of causality. The solid and dotted lines represent positive and negative pathways, respectively. The thickness of the line reflects the extent of the effect. ***: $P < 0.001$.

性降低, 则会使有机质分解速率降低^[34]; 另一方面, 植物根系和凋落物是土壤 SOC 的主要来源, 但随着土层深度增加, 植物根系分布减少, 凋落物难以到达深层土壤, 导致 SOC 输入减少^[35-36], 从而造成深层 SOC 含量降低。本研究发现, 在 10~20 cm 土层中, 增水较减水显著提高了 SOC 含量, 这与陈小梅等^[8]的研究结果相吻合, 降水增加直接促进了植物生产力, 特别是在水分限制的生态系统中。多项研究表明, 在干旱和半干旱地区, 降水增加可显著提高植被生物量, 从而通过凋落物输入和根系分泌物增加向土壤输入 SOC^[37-38]。

本研究中, 在不同降水条件下, 土壤中 DOC 与 EOC 含量变化趋势与 SOC 相似, 均随土层深度的增加而逐渐减少。DOC 是土壤生物和植物可以直接利用的有机碳源, 在土壤固 C 过程中扮演重要角色^[39], EOC 移动迅速、不稳定, 易于被微生物降解, 是土壤 C 循环及地力提升的关键因素^[40]。深层土壤 DOC 与 EOC 含量比表层低, 这可能与随土层加深而引起的物理吸附力增强有关; 另一个原因则是微生物会降解 SOC。然而, 通常认为物理吸附作用是导致这种差异的主要因素^[41]。表层土壤直接与植被接触, 便于接收植物残体和根系释放的分泌物; 这些接收到的物质构成了 DOC 与 EOC 的主要补给源, 并且随着土壤深度的增加, 来自植物的 SOC 输入量减少, 这导致深层土壤中 DOC 与 EOC 含量相对较低^[35]。DOC 作为 SOC 组分中易溶于水的部分, 更易受降水过程的影响^[42]。本研究中, 表层土壤减水处理下, DOC 含量显著高于对照处理, 可能是降水减少导致土壤湿度降低, 微生物的活性受到抑制, 而微生物在分解有机质时会将部分 SOC 转化为 DOC, 但当微生物活性降低时, DOC 的分解速率也会减慢, 从而导致 DOC 在土壤中积累^[43]。例如, 在杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 幼林土壤的研究中发现, 水分减少不利于 SOC 活化为 DOC, 也不利于植物生长, 降低了根系分泌物等的产生, 因而土壤 DOC 中碳水化合物的含量低, 微生物可利用的 C 少^[44]。有研究表明, 土壤中 EOC 含量与土壤湿度呈显著正相关关系^[45], 在增加降水条件下, 土壤含水量提高可能暂时减缓了微生物的活动速率, 同时增强了淋溶作用, 利于氧化型 SOC 的累积^[46-47], 这可能是同一层土壤 EOC 含量比减雨条件下明显增加的原因之一。

从垂直分布来看, 所有处理下的 MBC 在 0~10 cm 的土层中含量最高。这归因于随着土层深度的递增, 自地表向深层土壤传递的有机碳源逐渐减少, 进而导致深层土壤中的 SOC 浓度显著降低^[48], 与之相应, MBC 含量也呈现出递减趋势。本研究中, 表层土壤中 MBC 在减水处理下显著低于对照处理, 这与李娜等^[49]的研究结果类似, 降水减少会导致土壤微生物群落结构发生变化, 部分适应能力更强的微生物种群数量增加, 其 MBC 含量也会随

之增加,进而影响到整个MBC。总体而言,降水的变化不但会引起SOC变化,而且会对SOC组分造成直接的影响。土壤湿度太大或太小都会抑制微生物的生长,从而导致土壤SOC的变化。

3.2 降水变化对土壤有机碳稳定性的影响

随着全球气候变化的持续发展,维持和稳定荒漠草原这类对气候敏感的生态系统中的土壤有机C库变得越来越关键。CPMI已成为总结陆地生态系统土壤有机C库变化动态的敏感指标^[50-51],也是土壤质量评价^[52]的重要参数。本研究表明,降水增加对CA及CPMI有显著的积极影响。其他研究表明,CPMI的增加反映土壤质量得到改善^[53-54]。降水增加可以提高植被的生物量,增加植物凋落物的输入,这些凋落物是SOC的重要来源,因此可使CA增加^[55];此外,降水的增多还可能影响到土壤微生物的群落结构与活性,尤其是微生物的生物量,这些微生物在SOC的分解和合成过程中发挥关键作用,从而提高了CA及CPMI^[56],有利于改善土壤肥力和增强土壤养分循环。本研究地点位于宁夏荒漠草原地区,蒸散量大,水分有限。因此,逐渐增加的降水改善了土壤微环境^[57],促进了植物生长,增强了根系分泌物和植物凋落物对土壤C库的输入^[58],而这些植物C输入是半干旱草原表层土壤有机质的主要来源^[54,59]。改善的土壤微环境也可能通过促进土壤动物^[59]和微生物^[60]的丰度和活性来促进凋落物分解。此外,降水的物理作用也会加速叶片的萎蔫和凋落。这些因素的综合作用导致更多的活性SOC被转移到土壤中,从而增加了表征土壤有机C库总量和活性的CPMI。相反,降水减少进一步加剧了生态系统的水分限制,不仅抑制了植物生长和生理过程(例如增加细根死亡率),而且限制了微生物的生长和发育过程,导致养分有效性和活性SOC组分降低^[61-62]。此外,降水减少还可能通过增加团聚体内部土壤有机质的物理保护和促进矿物-有机质相互作用来抑制土壤有机质分解^[63]。

3.3 土壤有机碳稳定性的驱动因素

水分是宁夏半干旱草原生态系统最重要的限制因子之一^[22],降水变化会影响植物发育进程及土壤理化性质等,从而对荒漠草原生态系统C循环产生深远的影响。本研究通过Pearson相关性分析和结构方程模型(SEM)揭示了降水变化对荒漠草原土壤CPMI及土壤有机C库稳定性的影响机制。结果表明,活性SOC组分(EOC、DOC、MBC)和土壤酶活性(AKP、BG、CBH、NAG)在调控土壤C库稳定性中扮演关键角色,而环境因子(如土壤水分和温度)则通过直接或间接途径影响这些生物化学过程。土壤水分通过促进DOC和EOC的积累,间接增强CPMI,这与干旱区研究中水分是微生物活动和土壤C转化的限制因子结论相符^[58]。土壤EOC和DOC与CPMI显著正相关,表明EOC和DOC是土壤有机C库稳定性的重要贡献者^[64-65]。DOC通过微生物代谢直接参与C循环,并且DOC是微生物的能量来源,其可利用性增强会促进微生物活性,进而加速C转化,提升土壤有机C库的稳定性^[66]。CPMI与 β -1,4-葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶及碱性磷酸酶活性显著正相关,这表明土壤中微生物代谢能力随土壤酶活性的增加而增强,进一步提高了微生物利用底物的能力^[67],使SOC稳定性提高。此外,MBC对土壤酶活性的正向影响进一步支持了土壤微生物在土壤有机C库动态中的桥梁作用^[68]。土壤酶由土壤微生物合成和分泌,参与土壤SOC的循环转化,MBC的增加不仅能够直接提升土壤有机C库的活性组分,还可以通过调节土壤酶活性,进一步影响SOC的分解和固定。相反,土壤温度与CA和CPMI的负相关关系可能归因于高温加速了SOC的矿化速率^[69],或通过降低土壤水分有效性间接抑制微生物过程^[10]。采取适当的水分管理措施以提升土壤水分,能够有效促进稳定态SOC向活性态SOC的转变,从而提升土壤中活性SOC的比例,最终增强土壤有机C库的稳定性。需要指出的是,本研究在野外自然条件下进行,环境因子相对复杂。除降水变化外,土壤SOC的动态周转还可能受到温度、植被群落、微生物活动等多重因素影响。未来研究需要通过长期观测,结合多因子交互作用分析,才能更全面地认识气候变化对土壤C、N循环的影响机制。

4 结论

本研究通过模拟不同降水梯度,研究了降水变化对宁夏盐池县荒漠草原土壤碳库的调控机制。各降水处理下,土壤有机碳组分均随土层深度增加而降低。增水处理显著提高了SOC和EOC含量,而DOC含量在减水处理下显著升高。增水处理显著提高了CA和CPMI,表明增水处理有助于增强土壤有机C库的稳定性,减水处理

则降低了碳库稳定性。DOC 是土壤有机 C 库稳定性的主要驱动因素,土壤酶活性和微生物活动也与土壤有机 C 库稳定性密切正相关。

参考文献 References:

- [1] Smith M D. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research. *Journal of Ecology*, 2011, 99(3): 656–663.
- [2] Wang P, Huang K L, Hu S J. Distinct fine-root responses to precipitation changes in herbaceous and woody plants: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2020, 225(4): 1491–1499.
- [3] Xu S, Geng W X, Sayer E J, *et al.* Soil microbial biomass and community responses to experimental precipitation change: a meta-analysis. *Soil Ecology Letters*, 2020, 2: 93–103.
- [4] Bai Y F, Cotrufo F M. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377(6606): 603–608.
- [5] Zhou X H, Zhou L Y, Nie Y Y, *et al.* Similar responses of soil carbon storage to drought and irrigation in terrestrial ecosystems but with contrasting mechanisms: a meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 228: 70–81.
- [6] Du Y, Wang Y P, Su F, *et al.* The response of soil respiration to precipitation change is asymmetric and differs between grasslands and forests. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): 6015–6024.
- [7] Deng L, Peng C, Kim D G, *et al.* Drought effects on soil carbon and nitrogen dynamics in global natural ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 2021, 214: 103501.
- [8] Chen X M, Liu J X, Deng Q, *et al.* Effects of precipitation intensity on soil organic carbon fractions and their distribution under subtropical forests of South China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1210–1216.
陈小梅, 刘菊秀, 邓琦, 等. 降水变率对森林土壤有机碳组分与分布格局的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1210–1216.
- [9] Tarnocai C, Canadell J G, Schuur E A G, *et al.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(2): GB2023.
- [10] Crowther T W, Todd-Brown K E O, Rowe C W, *et al.* Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature*, 2016, 540(7631): 104–108.
- [11] Iii F S, Mcfarland J, Mcguire A D, *et al.* The changing global carbon cycle: linking plant-soil carbon dynamics to global consequences. *Journal of Ecology*, 2009, 97(5): 840–850.
- [12] Thomey M L, Collins S L, Vargas R, *et al.* Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. *Global Change Biology*, 2011, 17(4): 1505–1515.
- [13] Canarini A, Carrillo Y, Mariotte P, *et al.* Soil microbial community resistance to drought and links to C stabilization in an Australian grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 103: 171–180.
- [14] Sherlynette P C, Elsa E C, Robert W, *et al.* Soil microbial responses to drought and exotic plants shift carbon metabolism. *The ISME Journal*, 2019, 13(7): 1776–1787.
- [15] Hoover D L, Rogers B M. Not all droughts are created equal: the impacts of interannual drought pattern and magnitude on grassland carbon cycling. *Global Change Biology*, 2016, 22(5): 1809–1820.
- [16] Cleveland C C, Wieder W R, Reed S C, *et al.* Experimental drought in a tropical rain forest increases soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *Ecology*, 2010, 91(8): 2313–2323.
- [17] Zhang L, Wylie B K, Ji L, *et al.* Upscaling carbon fluxes over the Great Plains grasslands: Sinks and sources. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2011, 116(G3): G00J03.
- [18] Schlesinger W H. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 1990, 348: 232–234.
- [19] 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. *Ecological Science*, 2019, 38(1): 92–101.
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. *生态科学*, 2019, 38(1): 92–101.
- [20] Sowerby A, Emmett B A, Williams D, *et al.* The response of dissolved organic carbon (DOC) and the ecosystem carbon balance to experimental drought in a temperate shrubland. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(5): 697–709.
- [21] Xiang Y B, Zhou S X, Xiao Y X, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition and precipitation changes on soil organic carbon

- in an evergreen broad-leaved forest that is part of the Rainy Area of Western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(14): 4686–4695.
- 向元彬, 周世兴, 肖永翔, 等. 模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤有机碳的影响. *生态学报*, 2017, 37(14): 4686–4695.
- [22] Ma X H, Huang J Y, Yu H L, *et al.* Soil organic carbon and its easily decomposed components under precipitation change and nitrogen addition in a desert steppe in northwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(8): 1065–1077.
- 马煦晗, 黄菊莹, 余海龙, 等. 降水量变化及氮添加下荒漠草原土壤有机碳及其易分解组分研究. *植物生态学报*, 2024, 48(8): 1065–1077.
- [23] Blair G, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural system. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 393–406.
- [24] Qian H Y, Zhou H X, Luo Y J, *et al.* Responses of soil labile organic carbon and carbon pool management index to alpine wetland degradation. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7): 2273–2282.
- 钱虹宇, 周宏鑫, 罗原骏, 等. 土壤活性有机碳及碳库管理指数对高寒湿地退化的响应. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2273–2282.
- [25] Yang Y J, Liu S R, Schindlbacher A, *et al.* Topsoil organic carbon increases but its stability declines after five years of reduced throughfall. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 156: 108221.
- [26] Hu A G, Guan Q Y. China tackles global climate change. Beijing: Tsinghua University Press, 2019.
- 胡鞍钢, 管清友. 中国应对全球气候变化. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [27] Luo X, Wang Y T, Zhang J, *et al.* Responses of dominant species and rhizosphere soil stoichiometry to rainfall in typical steppe of the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 1002–1014.
- 罗叙, 王誉陶, 张娟, 等. 黄土高原典型草原优势种植物及其根际土壤化学计量对降雨变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(3): 1002–1014.
- [28] Lian J L, Chen J, Yang X Q, *et al.* Responses of desert steppe plant diversity and microbial diversity to precipitation change. *Biodiversity Science*, 2024, 32(6): 131–144.
- 连佳丽, 陈婧, 杨雪琴, 等. 荒漠草原植物多样性和微生物多样性对降水变化的响应. *生物多样性*, 2024, 32(6): 131–144.
- [29] Bao S D. Soil agro-chemical analysis (The third edition). Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [30] Li J P, Xie Y Z. Effects of natural grassland enclosure on carbon and nitrogen storage in deep soil in the Loess Plateau of China. *Pratacultural Science*, 2016, 33(10): 1981–1988.
- 李建平, 谢应忠. 封育对黄土高原天然草地深层土壤碳、氮储量的影响. *草业科学*, 2016, 33(10): 1981–1988.
- [31] Barreto R C, Madari B E, Machado P L O A, *et al.* The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 132(3): 243–251.
- [32] Zhong Z K, Li W J, Lu X Q, *et al.* Adaptive pathways of soil microorganisms to stoichiometric imbalances regulate microbial respiration following afforestation in the Loess Plateau, China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: 108048.
- [33] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309–1315.
- [34] Zhong Z K. Effects of experimental warming and precipitation manipulation on the key processes of soil carbon cycle in abandoned farmland of the Loess Hilly Region. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- 钟泽坤. 增温和降雨改变对黄土丘陵区撂荒草地土壤碳循环关键过程的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [35] Zhang X, Zhao Y C, Xie E Z, *et al.* Spatio-temporal change of soil organic carbon, progress and prospects. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 673–679.
- 张秀, 赵永存, 谢恩泽, 等. 土壤有机碳时空变化研究进展与展望. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 673–679.
- [36] Zhou Y, Li Y Y, Li N, *et al.* Contribution of soil microbial necromass carbon to soil organic carbon in grassland under precipitation change and its influencing factors in loess hilly region, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(9): 2592–2598.
- 周玥, 李娅芸, 李娜, 等. 黄土丘陵区降水变化下草地土壤微生物残体碳对土壤有机碳组分的贡献及其影响因素. *应用生态学报*, 2024, 35(9): 2592–2598.

- [37] Diao H J, Chen X P, Zhao X, *et al.* Effects of nitrogen addition and precipitation alteration on soil respiration and its components in a saline-alkaline grassland. *Geoderma*, 2022, 406: 115541.
- [38] Ding J M, Wang W Z, Mi W B, *et al.* Spatial characteristics of soil organic carbon in grassland of Ningxia and its influencing factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 1913–1922.
丁金梅, 王维珍, 米文宝, 等. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(5): 1913–1922.
- [39] Hu C J, Yan C, Guo L, *et al.* Effects of flooding on soil organic carbon and dissolved organic carbon under extreme rainstorm. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(8): 1322–1330.
胡婵娟, 鄢创, 郭雷, 等. 极端降雨条件下淹水对农田土壤有机碳、可溶性有机碳的影响. *中国生态农业学报*, 2024, 32(8): 1322–1330.
- [40] Li J J, Zhao X, Pan T H, *et al.* Effects of different land-use types on soil labile organic matter. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(1): 147–151.
李君剑, 赵溪, 潘恬豪, 等. 不同土地利用方式对土壤活性有机质的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(1): 147–151.
- [41] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277–304.
- [42] Xu S, Wang J J, Sayer E J, *et al.* Precipitation change affects forest soil carbon inputs and pools: A global meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168171.
- [43] Li H, Yang Y S, Si Y T, *et al.* Effects of short-term global warming and precipitation reduction on the quantity and spectral characteristics of soil DOM in *Cunninghamia lanceolata* plantation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7): 949–957.
李欢, 杨玉盛, 司友涛, 等. 短期增温及减少降雨对杉木人工林土壤 DOM 的数量及其光谱学特征的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(7): 949–957.
- [44] Liu X F, Lin T W, Xiong D C, *et al.* Interactive responses of undergrowth vegetation biomass in Chinese fir to soil warming and precipitation separation. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2014, 9(3): 92–95.
刘小飞, 林廷武, 熊德成, 等. 土壤增温及降雨隔离对杉木幼林林下植被生物量的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2014, 9(3): 92–95.
- [45] Li L B, Tu C L, Zhao Z Q, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and its isotopic composition for soil profiles of Loess Plateau under different vegetation conditions. *Earth and Environment*, 2011, 39(4): 441–449.
李龙波, 涂成龙, 赵志琦, 等. 黄土高原不同植被覆盖下土壤有机碳的分布特征及其同位素组成研究. *地球与环境*, 2011, 39(4): 441–449.
- [46] Skopp J, Jawson M D, Doran J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6): 1619–1625.
- [47] Xu X, Wang F, Luan Y L, *et al.* Soil readily oxidizable carbon along an elevation gradient of Wuyi Mountains in southeastern China. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(7): 1115–1121.
徐侠, 王丰, 栾以玲, 等. 武夷山不同海拔植被土壤易氧化碳. *生态学杂志*, 2008, 27(7): 1115–1121.
- [48] Yin Y, Liu Y Y, Jing Y L, *et al.* Contents of soil organic carbon and components in three types of forests in the mountain area of Eastern Liaoning. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 2100–2106.
殷有, 刘源跃, 井艳丽, 等. 辽东山区三种典型林型土壤有机碳及其组分含量. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2100–2106.
- [49] Li N, Wang B R, An S S, *et al.* Response of soil bacterial community structure to precipitation change in grassland of loess plateau. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4284–4293.
李娜, 王宝荣, 安韶山, 等. 黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应. *环境科学*, 2020, 41(9): 4284–4293.
- [50] Blair N, Faulkner R D, Till A R, *et al.* Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility: Part II: Bad Lauchstadt static and extreme FYM experiments. *Soil & Tillage Research*, 2006, 91(1/2): 39–47.
- [51] Jiang X, Xu D P, Rong J J, *et al.* Landslide and aspect effects on artificial soil organic carbon fractions and the carbon pool management index on road-cut slopes in an alpine region. *Catena*, 2021, 199: 105094.
- [52] Diekow J, Mielniczuk J, Knicker H, *et al.* Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. *Plant and Soil*, 2005, 268(1): 319–328.
- [53] Gami S K, Lauren J G, Duxbury J M. Soil organic carbon and nitrogen stocks in Nepal long-term soil fertility experiments. *Soil & Tillage Research*, 2009, 106(1): 95–103.
- [54] Zhu L Q, Hu N J, Zhang Z W, *et al.* Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system. *Catena*, 2015, 135: 283–289.

- [55] Hao L Y, Zhang L H, Xie Z K, *et al.* Influence of precipitation change on soil respiration in desert grassland. *Environmental Science*, 2021, 42(9): 4527–4537.
蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 等. 降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响. *环境科学*, 2021, 42(9): 4527–4537.
- [56] Zhou J G, Zhang J F, Lambers H, *et al.* Intensified rainfall in the wet season alters the microbial contribution to soil carbon storage. *Plant and Soil*, 2022(1/2): 476.
- [57] Wu L W, Zhang Y, Guo X, *et al.* Reduction of microbial diversity in grassland soil is driven by long-term climate warming. *Nature Microbiology*, 2022, 7: 1054–1062.
- [58] Wang B, Chen Y L, Li Y, *et al.* Differential effects of altered precipitation regimes on soil carbon cycles in arid versus humid terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 2021, 27(24): 6348–6362.
- [59] Peng Y, Peñuelas J, Vesterdal L, *et al.* Responses of soil fauna communities to the individual and combined effects of multiple global change factors. *Ecology Letters*, 2022, 25(9): 1961–1973.
- [60] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1407–1421.
- [61] Wei X Y, Meerbeek K V, Yue K, *et al.* Responses of soil C pools to combined warming and altered precipitation regimes: A meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 2023, 32(9): 1660–1675.
- [62] Fuchslueger L, Bahn M, Fritz K, *et al.* Experimental drought reduces the transfer of recently fixed plant carbon to soil microbes and alters the bacterial community composition in a mountain meadow. *New Phytologist*, 2014, 201(3): 916–927.
- [63] German D P, Allison S D. Drying and substrate concentrations interact to inhibit decomposition of carbon substrates added to combusted inceptisols from a boreal forest. *Biology and fertility of Soils*, 2015, 51(5): 525–533.
- [64] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, *et al.* Climatic influences on active fractions of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1103–1111.
- [65] Hopkins F M, Filley T R, Gleixner G, *et al.* Increased belowground carbon inputs and warming promote loss of soil organic carbon through complementary microbial responses. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 76: 7–69.
- [66] Ren T J, Smreczak B, Ukalska-Jaruga A, *et al.* Differential impacts of nitrogen addition on soil dissolved organic carbon in humid and non-humid regions: A global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 2025, 377: 124744.
- [67] Wang J, Li G, Xiu W M, *et al.* Effects of nitrogen and water on soil enzyme activity and soil microbial biomass in *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia of North China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(3): 237–245.
王杰, 李刚, 修伟明, 等. 氮素和水分对贝加尔针茅草原土壤酶活性和微生物量碳氮的影响. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(3): 237–245.
- [68] Luo R, Kuzyakov Y K, Zhu B, *et al.* Phosphorus addition decreases plant lignin but increases microbial necromass contribution to soil organic carbon in a subalpine forest. *Global Change Biology*, 2022, 28(13): 4194–4210.
- [69] Li X J, Xie J S, Zhang Q F, *et al.* Substrate availability and soil microbes drive temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization to warming along an elevation gradient in subtropical Asia. *Geoderma*, 2020, 364: 114198.