

DOI: 10.11766/trxb202106120307

王兴, 钟泽坤, 王佳懿, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 韩新辉. 黄土高原撂荒草地土壤碳库对两年增温增雨的响应[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 523–534.

WANG Xing, ZHONG Zekun, WANG Jiayi, JIAN Junnan, YANG Gaihe, REN Chengjie, HAN Xinhui. Responses of Soil Carbon Pool of Abandoned Grassland on the Loess Plateau to Two-years Warming and Increased Precipitation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(2): 523–534.

黄土高原撂荒草地土壤碳库对两年增温增雨的响应*

王兴¹, 钟泽坤¹, 王佳懿¹, 简俊楠¹, 杨改河¹, 任成杰^{1, 2}, 韩新辉^{1, 2†}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西杨凌, 712100; 2. 黄龙山森林生态系统国家定位观测研究站, 陕西延安, 716000)

摘要: 阐明暖湿的气候趋势下黄土高原土壤有机碳库不同活性组分和碳库稳定性的变化特征, 对脆弱生态区碳库的可持续发展以及评估区域生态效益具有重要意义。以黄土丘陵区自然撂荒草地为研究对象, 人工模拟增温和增雨, 分析了在增温(W)、增雨(P50%)及其交互作用(WP50%)下植被群落变化特征、土壤有机碳库组分含量、碳库组分的分配比例以及碳库稳定性的变化特征。结果发现:(1) 增雨显著增加了植被丰富度指数, 而增温和增温增雨显著降低了植被丰富度指数。(2) 增雨处理下土壤有机碳、酸解有机碳、易氧化有机碳、溶解性有机碳含量及分配比例在两个取样年均显著高于对照; 增温增雨处理则进一步增加了土壤易氧化有机碳和微生物生物量碳含量以及分配比例。相关性分析表明, 土壤有机碳与各个活性碳组分之间存在显著相关性。(3) 增温增雨处理下土壤碳库活度、碳库活度指数以及碳库管理指数均高于其他处理。酸解有机碳和微生物生物量碳的敏感指数在气候变化处理下相对较高。综上所述, 暖湿化的气候背景下黄土丘陵区撂荒草地土壤有机碳、有机碳活性组分含量和分配比例以及碳库稳定性显著提高, 有助于碳库良性发展, 酸解有机碳和微生物生物量碳可作为未来土壤有机碳变化的重要指示。

关键词: 黄土高原; 气候变化; 撂荒草地; 有机碳组分; 碳库稳定性; 敏感指数

中图分类号: Q143; S154.1 **文献标志码:** A

Responses of Soil Carbon Pool of Abandoned Grassland on the Loess Plateau to Two-years Warming and Increased Precipitation

WANG Xing¹, ZHONG Zekun¹, WANG Jiayi¹, JIAN Junnan¹, YANG Gaihe¹, REN Chengjie^{1, 2}, HAN Xinhui^{1, 2†}

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Shaanxi Engineering Research Center of Circular Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Forest Ecosystem Positioning Research Station of Huanglong Mountain, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: [Objective] Global climate change has had a huge impact on the carbon pool of terrestrial ecosystems, and the

* 国家林业和草原局林草科技创新发展与研究项目(2020132111)和国家自然科学基金项目(41877543)资助 Supported by the Forest and Grass Technology Innovation Development and Research Project of the State Forestry and Grassland Administration of China (No. 2020132111), and the National Natural Science Foundation of China (No. 41877543)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hanxinhui@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 王兴(1997—), 男, 陕西蒲城人, 硕士, 主要从事气候变化与土壤生态研究。E-mail: wangxing1996@nwfufu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-12; 收到修改稿日期: 2021-10-07; 网络首发日期(www.cnki.net): 2021-12-08

changes in average temperature and precipitation patterns pose severe challenges to the management of terrestrial carbon pools. This is especially serious in the Loess Plateau where the ecological environment is fragile. Therefore, understanding the changes of different fractions of soil organic carbon pool and the stability of this carbon pool under the background of the warming and humid climate of the Loess Plateau is of great significance. This will be of importance in the sustainable development of the carbon pool in fragile ecological areas and the evaluation of regional ecological benefits. 【 Method 】 In this study, natural abandoned grassland in the loess hilly region was taken as the research object. Soil warming and increased precipitation were artificially simulated and the changes in vegetation community, soil carbon fractions content and distribution, carbon pool stability index under warming (W), precipitation (P50%) and their interactions (WP50%) were analyzed. 【 Result 】 The results showed that: (1) P50% significantly increased the vegetation Gleason richness index, W and WP50% significantly reduced the Gleason richness index ($P < 0.05$) and the leaf organic carbon content under the WP50% was significantly higher than the control treatment. Both P50% and WP50% treatments reduced the Shannon-wiener diversity index and piouliou evenness index. (2) Soil organic carbon (SOC), acid hydrolyzable organic carbon (AHC), easily oxidizable carbon (EOC), dissolved organic carbon (DOC) content and their distribution ratio of the two sampling years under P50% were significantly higher than the control treatment. Also, warming based on P50% can further increase soil EOC, microbial biomass carbon (MBC) content and distribution ratio. However, only the soil MBC showed a significant difference compared with the control under W treatment. Recalcitrant organic carbon (ROC) presents an opposite trend to AHC. The correlation analysis showed that there was a significant correlation between soil total organic carbon and each active carbon fractions ($P < 0.05$). (3) The soil carbon pool activity (CA), carbon pool activity index (CAI), and carbon pool management index (CPMI) under WP50% treatment were higher than other treatments. The sensitivity index of AHC and MBC was relatively high under the treatment of climate change. 【 Conclusion 】 In summary, the total organic carbon, the content and distribution ratio of active fractions of organic carbon, and the stability of the carbon pool in abandoned grassland of the loess-hilly area will be significantly improved under background warming and humid climate. This will contribute to the healthy development of the carbon pool. From a sensitivity point of view, AHC and MBC can be used as early important indicators of changes in soil organic carbon under warm and humid climates in the future. This study provides a theoretical and scientific basis for research on climate change and carbon pool management in fragile ecological areas.

Key words: Loess Plateau; Climate change; Abandoned grassland; Soil organic carbon fractions; Carbon pool stability; Sensitivity index

全球平均气温升高和高纬度地区降水增加的气候预测可能会深刻影响陆地生态系统碳收支。土壤碳库作为陆地生态系统中最大的碳库,其源/汇转换和稳定性特征对调控大气 CO_2 浓度和减缓全球气候变化起着重要作用^[1-2]。尽管目前已经取得了大量关于土壤碳库对气候变化响应的研究结果,但由于气候变化明显的区域差异性以及生态系统本身的空间异质性,未来气候变化对土壤碳库的影响方向和强度仍然具有较大的未知性^[3-4]。土壤碳库约有三分之二以有机碳的形式存在,其包括植物残体、枯落物、微生物残体以及植被根系分泌物等,全球表层土壤有机碳储量约为 2 011 Pg,为植被或者大气碳库的 2 倍左右^[5-6],因此,土壤有机碳含量直接影响土壤质量并驱动土壤碳库变化。而土壤有机碳库属于复杂的连续混合物,可根据周转速率分为易分解的活性

碳库和难分解的惰性碳库^[7-9]。土壤有机碳库组分对气候因子的差异响应是现阶段的重要研究方向。例如,在青藏高原高寒草地开展的一项研究发现增温降低了溶解性有机碳含量,却显著增加了微生物生物量碳含量^[10],同样,Zhou 等^[11]在内蒙古半干旱草原上的研究表明,增雨仅增加了微生物生物量碳含量,而有机碳和惰性有机碳均不受增温、增雨及交互作用的影响。土壤碳库组分含量的变化势必会引起碳库稳定性的改变。通常认为,活性碳库虽然含量和占比均不高,但其生物活性较好,可指示土壤碳库活力水平并反映碳库稳定性的短期变化;而惰性有机碳较难分解,稳定性高,在维持土壤质量和稳定性方面发挥着重要作用^[12],然而,仅使用土壤有机碳组分含量评估碳库稳定性具有一定的局限性。Blair 等^[13]采用土壤易氧化有机碳与非易氧化有

机碳的比值描述土壤碳库的不稳定性，即土壤碳库活度，进而采用处理与对照的活度之比，即碳库活度指数表征碳库损失及其对稳定性的影响，再进一步使用碳库活度与活度指数计算碳库管理指数，评价土壤碳库的质量和稳定性；Liang 等^[14]采用敏感指数确定处理后变化最快的敏感碳组分。但是，前人的研究主要集中在农业耕作措施或者施肥管理对上述指标的影响，使用上述指标评估气候变化条件下土壤有机碳库稳定性的研究仍然较少。

黄土高原地区水土流失严重，生态环境极其脆弱，是我国典型的生态脆弱区和生态恢复重点区域，自封山育林、退耕还林还草等工程实施以来，该地区的植被覆盖率有了显著提升。最近的研究^[15]趋向于一个共识，即农田撂荒相较于人工林恢复能在相当长一段时间内获得更大的生态效益。多项研究^[16]通过气象数据拟合发现，未来黄土高原中部丘陵沟壑区预计呈现暖湿的气候趋势。基于此，本文以黄土丘陵沟壑区自然撂荒草地作为研究对象，通过人工模拟增温和降水增加的方法，研究土壤有机碳库组分以及碳库稳定性的变化趋势，以期揭示气候变

化对土壤碳库特征的影响，并为气候变化背景下开展脆弱生境土壤碳库研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于陕西省延安市安塞区五里湾流域（36°51'N~36°52'N，109°19'E~109°21'E），属于典型的黄土丘陵沟壑植被恢复区，平均海拔 1 061~1 371 m（图 1）。该区属中温带半干旱大陆性季风气候区，气候温和。年平均降水量 525 mm 且集中于 7—9 月，年平均温度为 9.5 °C，月平均最高温度在 7 月，最低温度在 1 月，无霜期 160 d 左右，年日照时数 2 352~2 573 h，日照百分率达 50%~70%，光能丰富，干燥度 1.4~2.0。试验区土壤类型主要为由黄土母质发育而成的黄绵土，土壤贫瘠，土质疏松，抗侵蚀能力差。为加强生态治理，该区域在 1999 年开始大范围实行退耕还林还草工程，植被覆盖度显著提升，目前主要植被类型为退耕后人工种植的林地和退耕后自然撂荒的次生演替草地。

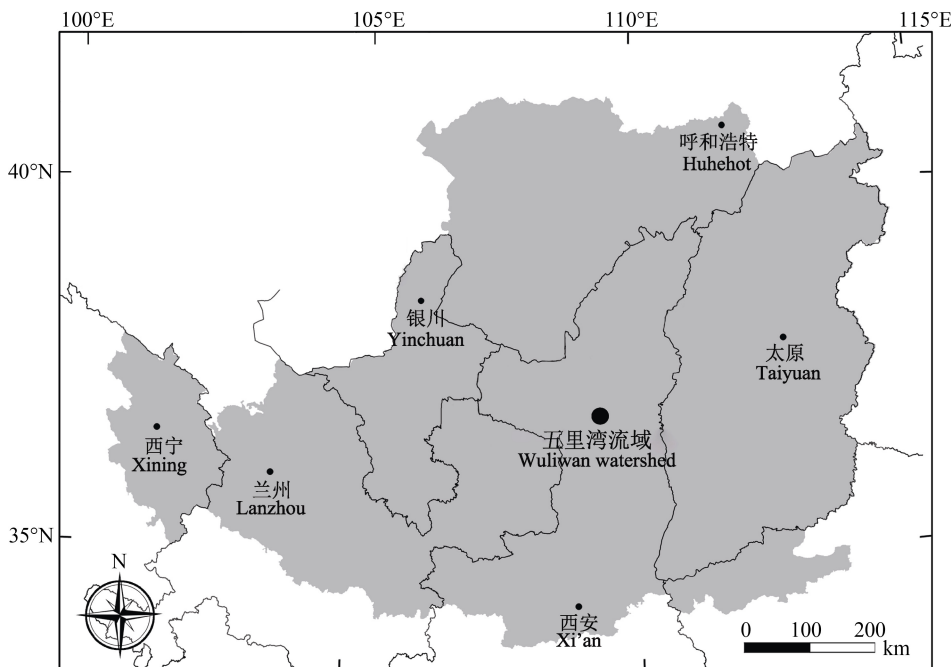


图 1 研究区位图

Fig. 1 Location of study area

1.2 试验设计与样品采集

为研究气候变化对该地区生态系统碳库的影响过程，2016 年 7 月选取了撂荒 10 年的平坡耕地为

试验样地。样地基本特征见表 1，土壤基本理化性状为：全氮 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，全磷 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，硝态氮 $1.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，铵态氮 $2.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，有效磷 $3.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，

表 1 试验样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of the experimental plot

| 位置 Location | 海拔 Elevation/m | 坡向 Aspect/° | 容重 Bulk density / (g·cm ⁻³) | 黏粒 Clay | 粉粒 Silt | 砂粒 Sand | pH | 优势科 Dominant families | 优势物种 Dominant species |
|---------------------|-------------------|----------------|---|------------|------------|------------|-----|--------------------------|--------------------------|
| 109°21'E 36°52'N | 1 263 | NbyW18 | 1.16 | 15% | 43% | 42% | 8.2 | 菊科 禾本科 | 铁杆蒿、猪毛蒿 狗尾草、糙隐子草 |

注: NbyW 为北偏西, 土壤颗粒组成为体积百分比 (%)。Note: NbyW represent west by north, soil particle composition is the proportion of volume percentage content (%)。

微生物生物量氮 36.69 mg·kg⁻¹, 微生物生物量磷 10.48 mg·kg⁻¹。在所选样地内随机布置三个区组, 每个区组内设置 4 个 3 m × 3 m 的样方, 彼此间距 1 m 以上, 分别对应增雨 50% (P50%: +50% precipitation)、增温 (W: warming)、对照 (CK) 以及用于给增雨样方截留雨水的样方, 在增雨处理样方内嵌套安装一个 OTC (顶部敞开的腔室, open top chamber) 增温装置, 实现增温和增雨的交互处理, 即增温+增雨 50% 处理 (WP50%: warming+50% precipitation), 每个处理 3 个重复样方。用于加温处理的 OTC 具有由透明有机玻璃纤维板制成的六边形设计, 底面积为 1.10 m², 高 0.51 m, 顶部开口面积为 0.79 m²。将自然降水使用挡雨架截留并通过管道流入相邻样方内实现增雨, 具体为: 在相邻样方顶端安装的挡雨板遮挡面积为减雨样方面积的 50%, 挡雨架上端离地 1.40~1.80 m 处, 用 25 cm 宽的瓦面状透明凹槽板搭建相应面积的挡雨板, 挡雨板截留的雨水经过由聚氯乙烯板制作的导水槽流入集雨装置中, 随即通过导流槽流至增雨样方, 从而实现了在不改变降水频率的情况下增加了 50% 的自然降水。试验场于 2017 年 7 月搭建完毕, 并进行自然恢复一年。

于 2018 年和 2019 年 7 月对各处理下的植被特征开展调查, 分别记录样方内每一棵植物物种名称、数量、高度和盖度以及样方内所有物种的个体数和总数, 汇总后用于后续计算。植被调查结束后采集植物叶片, 在随机布置的采集样方中收集所有植物叶片, 实验室 105 °C 杀青后再 80 °C 烘干至恒重, 最后用粉碎机粉碎后过 0.25 mm 筛用于后续测定。叶片收集完毕后采集土壤样品, 采样前先将土壤表面植被和枯草等小心移除, 露出裸土, 随后采用土钻法 (直径为 9 cm) 在每个样方随机钻取 3 个 0~10 cm 土芯并混合, 分离其中的植物残体, 过 2 mm

土样筛并分为两部分, 一部分低温运输至实验室后于 -20 °C 长期保存, 另一部分经自然风干后保存。每个处理 3 个重复样品, 两个取样年共计采集 4×3×2=24 份土样。

1.3 测定方法与计算公式

采用丰富度指数 (Gleason richness index, G)、多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index, H) 和均匀度指数 (Pielou evenness index, E) 反映不同处理下的植被群落特征^[17]。计算公式如下:

$$G = \frac{S-1}{\ln N} \quad (1)$$

$$H = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (2)$$

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (3)$$

式中, S 为样方中物种总数, N 为样方物种个体数, P_i 为第 i 个物种占有所有物种个体数的百分比。

土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪 (Mastersizer-2000, 马尔文仪器有限公司, 英国) 测定, 土壤 pH 采用土壤-蒸馏水悬浮液摇匀后使用 pH 计测得, 土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 采用重铬酸钾-浓硫酸 (K₂Cr₂O₇-H₂SO₄) 油浴加热法测定^[18]。

易氧化有机碳 (easily oxidizable carbon, EOC) 采用高锰酸钾 (KMnO₄) 氧化法^[13]测定。溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 采用 0.5 mol·L⁻¹ 硫酸钾溶液 (K₂SO₄) 浸提法^[19]测定。惰性有机碳 (recalcitrant organic carbon, ROC) 采用 HCl 水解, 之后采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定, 酸解有机碳 (acid hydrolyzable organic carbon, AHC) 含量为

有机碳含量与惰性有机碳含量之差^[9]。微生物生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC) 采用氯仿熏蒸法^[18]测定。

有机碳分配比例作为碳库质量的指示因子可以推断碳素有效性, 对评价土壤有机质和土壤肥力状况有重要意义^[20]。

有机碳组分分配比例 /% = 有机碳组分含量 (mg·kg⁻¹) / 土壤有机碳含量 (g·kg⁻¹) × 100

本文使用碳库活度 (carbon activity, CA)、碳库活度指数 (carbon activity index, CAI)、碳库指数 (carbon pool index, CPI)、碳库管理指数 (carbon pool management index, CPMI)、敏感指数 (sensitivity index, SI) 来探究气候变化对土壤碳库稳定性特征的影响^[21]。

以对照 (CK) 为参考进行上述指标的计算:

CA = 土壤易氧化有机碳含量 / (土壤有机碳含量 - 土壤易氧化有机碳含量)

CAI = 处理土壤碳库活度 (CA) / 参考土壤碳库活度

CPI = 处理土壤有机碳含量 / 参考土壤有机碳含量

CPMI/% = 碳库指数 (CPI) × 碳库活度指数 (CAI) × 100

SI = (处理土壤有机碳组分含量均值 - 参考土壤有机碳组分含量均值) × 100 / 参考土壤有机碳组分含量均值^[21]

1.4 数据处理

本研究数据结果用平均数 ± 标准误 (M ± SE) 表示, 所有数据均符合正态分布, 使用 SPSS 22.0 进行数据统计分析, 采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异 (least significant difference, LSD) 法进行多重比较检验不同气候变化处理土壤碳库组分含量以及有机碳效率的差异显著性 ($P = 0.05$ 或 0.01), 采用双因素方差分析法探究增温和增雨处理的交互作用对土壤碳库相关指标的影响, 相关性分析采用斯皮尔曼 (Spearman) 检验法, 图像处理采用 OriginPro.2016 和 R (V.4.0.3) 实现。

2 结 果

2.1 增温增雨处理下植被多样性和叶片养分的变化

不同处理下撂荒草地的植被和叶片养分的变化见表 2。两个取样年均发现增雨显著增加了丰富度

表 2 不同处理下撂荒草地的植被特征

Table 2 Vegetation characteristics of abandoned grassland under different treatments

| 年份 Year | 处理 Treatment | 丰富度指数 ^① | 多样性指数 ^② | 均匀度指数 ^③ | 叶片有机碳 ^④ / (g·kg ⁻¹) | 叶片总氮 ^⑤ / (g·kg ⁻¹) | 叶片总磷 ^⑥ / (g·kg ⁻¹) |
|------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|---|---|
| 2018 | P50% | 3.96 ± 0.06a | 1.97 ± 0.08b | 0.64 ± 0.01b | 438.90 ± 3.37ab | 21.08 ± 0.61a | 1.88 ± 0.08a |
| | WP50% | 2.11 ± 0.07c | 1.52 ± 0.03c | 0.58 ± 0.01b | 488.56 ± 1.75a | 20.57 ± 0.74a | 1.94 ± 0.01a |
| | W | 1.78 ± 0.02d | 1.92 ± 0.08b | 0.80 ± 0.01a | 475.25 ± 4.91ab | 17.75 ± 0.43b | 1.41 ± 0.02b |
| | CK | 3.01 ± 0.02b | 2.21 ± 0.06a | 0.76 ± 0.02a | 428.58 ± 32.52b | 18.23 ± 0.76b | 1.60 ± 0.11b |
| 2019 | P50% | 3.39 ± 0.06a | 2.02 ± 0.13ab | 0.68 ± 0.05b | 491.42 ± 3.20ab | 21.77 ± 0.72a | 1.68 ± 0.11a |
| | WP50% | 2.06 ± 0.06c | 1.68 ± 0.13b | 0.72 ± 0.04ab | 498.32 ± 3.61a | 22.00 ± 1.67a | 2.00 ± 0.30a |
| | W | 1.78 ± 0.15c | 1.99 ± 0.06ab | 0.84 ± 0.02a | 485.37 ± 3.89ab | 19.47 ± 0.12a | 1.41 ± 0.10b |
| | CK | 2.89 ± 0.15b | 2.14 ± 0.14a | 0.75 ± 0.06ab | 478.39 ± 7.42b | 18.58 ± 0.89a | 1.59 ± 0.18b |

注: P50%: 增雨 50%; WP50%: 增温增雨 50%; W: 增温; CK: 对照, 同一列不同字母表示不同处理之间在 $P < 0.05$ 水平有显著差异, 下同。 Note: P50%: increased precipitation; WP50%: interaction of warming and increased precipitation; W: warming; CK: control, different letters in the same column indicate significant differences at the $P < 0.05$ level between different treatments, the same below. ① Gleason richness index; ② Shannon-Wiener diversity index; ③ Pielou evenness index; ④ Leaf organic carbon; ⑤ Leaf total nitrogen; ⑥ Leaf total phosphorus.

指数, 增温和增温增雨显著降低了丰富度指数 ($P<0.05$), 增雨和增温增雨处理均降低了多样性指数和均匀度指数, 而值得注意的是, 增温在 2019 年对多样性指数和均匀度指数的影响并不显著, 这意味着植被多样性和均匀度与土壤水分之间可能存在一定的负相关。此外, 2018 年和 2019 年均发现增温增雨下叶片有机碳含量显著高于对照处理。

2.2 增温增雨处理下土壤碳库组分含量的变化

增雨以及增温增雨的交互对土壤有机碳以及酸解有机碳含量有极显著影响 ($P<0.01$); 单独增温或者单独增雨对土壤易氧化有机碳含量有显著影响 ($P<0.05$); 单独增温对土壤微生物生物量碳含量有

极显著影响 ($P<0.01$) (表 3)。

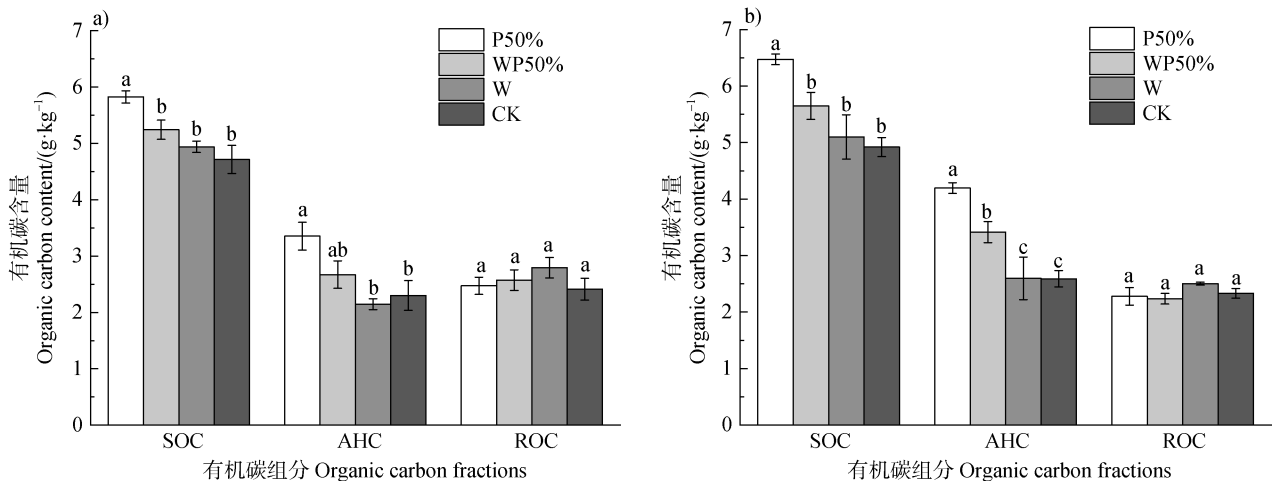
对于不同的模拟气候变化处理, 增雨处理有机碳含量和酸解有机碳含量显著高于增温以及对照处理, 增温增加了惰性有机碳含量, 但差异不显著 (图 2)。增温增雨交互处理的土壤易氧化有机碳含量在两个取样年均显著高于对照处理, 但与单独增雨处理差异不显著; 土壤微生物生物量碳在增温增雨交互和单独增温两个处理下的含量较高, 且均与对照处理形成了显著差异; 2018 年增雨处理的溶解性有机碳含量显著高于对照处理, 2019 年增雨和增温增雨处理均显著高于对照处理 (图 3)。

表 3 增温增雨及交互作用对土壤碳组分含量和分配比例的双因素分析结果

Table 3 Results (P -values) of two-way ANOVA on the effects of warming (W), precipitation (P), and their interactions on soil carbon fractions and distribution

| 处理 Treatment | 碳组分 Carbon fractions | | | | | | 碳组分分配比例 Distribution ratio of carbon fractions | | | | |
|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|--------|-------|--|-------|-------|--------|-------|
| | SOC | AHC | ROC | EOC | MBC | DOC | AHC | ROC | EOC | MBC | DOC |
| W | 0.234 | 0.144 | 0.289 | 0.039 | <0.001 | 0.462 | 0.194 | 0.194 | 0.008 | <0.001 | 0.182 |
| P | <0.001 | 0.001 | 0.489 | 0.037 | 0.168 | 0.092 | 0.012 | 0.012 | 0.324 | 0.340 | 0.973 |
| W × P | 0.004 | 0.043 | 0.474 | 0.625 | 0.709 | 0.192 | 0.334 | 0.334 | 0.592 | 0.054 | 0.900 |

注: SOC: 土壤有机碳; AHC: 酸解有机碳; ROC: 惰性有机碳; EOC: 易氧化有机碳; MBC: 微生物生物量碳; DOC: 溶解性有机碳, $P<0.05$ 表示有显著影响, $P<0.01$ 表示有极显著影响, 下同。Note: SOC: soil organic carbon; AHC: acid hydrolyzable organic carbon; ROC: recalcitrant organic carbon; EOC: easily oxidizable organic carbon; MBC: microbial biomass carbon; DOC: dissolved organic carbon, $P<0.05$ indicates a significant impact, $P<0.01$ indicates a very significant impact, the same below.



注: 图 a 和图 b 分别表示 2018 年和 2019 年各处理有机碳组分含量, 同一碳组分中不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$), 下同。Note: Figure a and Figure b represent the organic carbon content of each treatment in 2018 and 2019 respectively. Different letters in the same carbon fraction indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below.

图 2 土壤有机碳 (SOC)、酸解有机碳 (AHC) 以及惰性有机碳 (ROC) 的含量变化特征

Fig. 2 Changes of soil organic carbon (SOC), acid hydrolyzable organic carbon (AHC) and recalcitrant organic carbon (ROC) contents

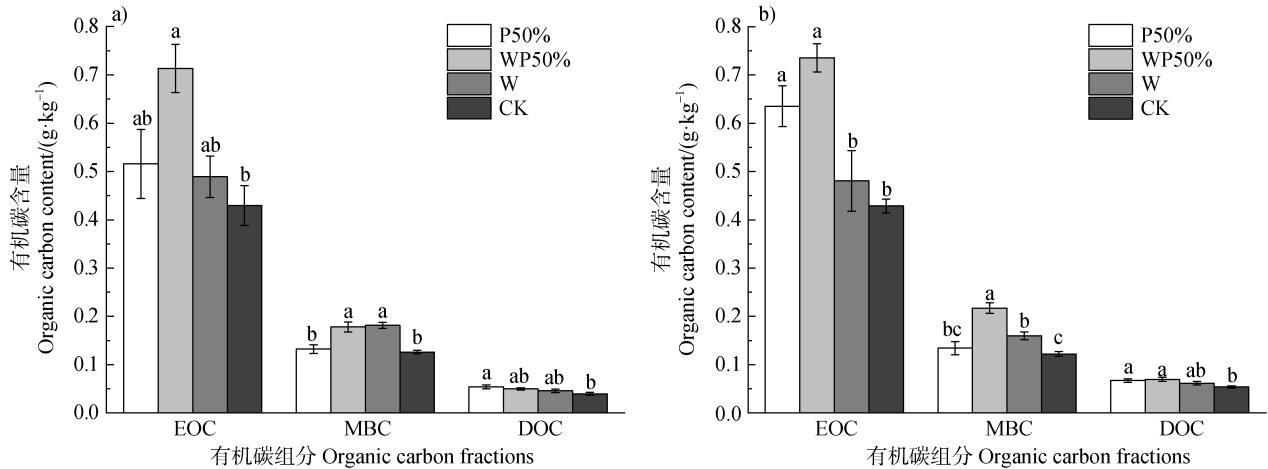


图 3 土壤易氧化有机碳 (EOC)、微生物生物量碳 (MBC) 以及溶解性有机碳 (DOC) 的含量变化特征

Fig. 3 Changes of soil easily oxidizable carbon (EOC), microbial biomass carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC) contents

2.3 增温增雨处理下碳组分比例的变化及各碳组分的相关性

增雨对酸解有机碳和惰性有机碳的分配比例有显著影响 ($P < 0.05$); 增温对易氧化有机碳、微生物生物量碳的分配比例有极显著影响 ($P < 0.01$) (表 3)。

增雨处理下土壤酸解有机碳分配比例 (AHC/SOC) 最高, 2018 年和 2019 年分别达到了 57.45% 和 64.84%, 显著高于增温和对照处理, 而增温增雨交互处理的 AHC/SOC 在 2019 年显著高于增温和对照处理, 达到了 60.38%, 土壤惰性有机碳与酸解有

机碳分配比例在处理间的特征趋势完全相反(图 4)。除了 2018 年的增温处理, 在其他所有处理下, 均发现酸解有机碳占比高于惰性有机碳(图 4)。2018 年和 2019 年均发现增温增雨交互作用下土壤易氧化有机碳分配比例 (EOC/SOC) 显著高于其他处理, 分别达到了 13.51% 和 13.08%, 单独增温和增雨处理与对照处理之间并未发现有显著差异(图 4)。而对于土壤微生物生物量碳的分配比例 (MBC/SOC), 发现增温和增温增雨的交互处理显著高于单独增雨以及对照处理; 溶解性有机碳分配比例 (DOC/SOC) 在各个处理下均未发现显著差异(图 4)。

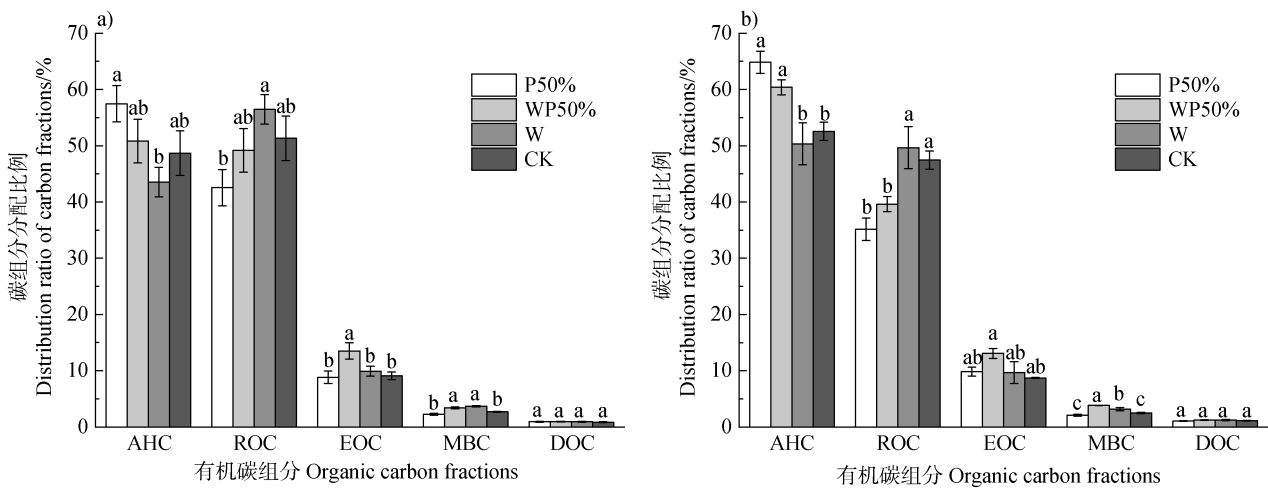
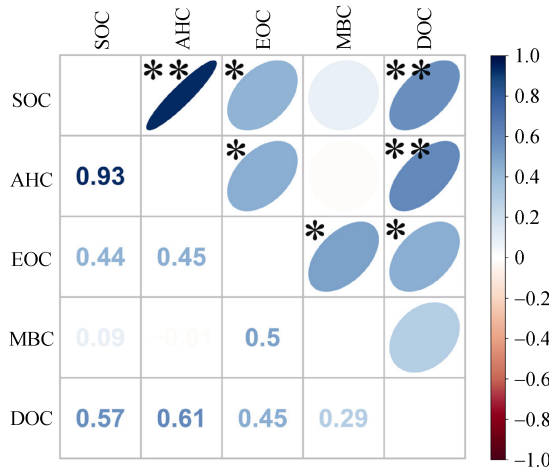


图 4 土壤各有机碳组分分配比例的变化特征

Fig. 4 Changes of distribution ratio of soil organic carbon fractions

土壤有机碳及其组分之间的相关性分析如图 5 所示, 土壤有机碳与酸解有机碳、溶解性有机碳

显著正相关 ($P < 0.01$); 与易氧化有机碳显著正相关 ($P < 0.05$), 与微生物生物量碳不相关; 酸解有机碳



注：蓝色和红色分别代表正相关和负相关，*和**分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的差异显著水平，左半边中的数字代表相关系数，与右上半边的图形对应。Note: Blue and red represent positive correlation and negative correlation, respectively, * and ** represent the significant level of difference in correlation analysis with $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The numbers in the lower-left half correspond to the graphs in the upper right half, representing the correlation coefficient.

图5 土壤有机碳及各组分之间的相关性

Fig. 5 Correlation analysis of soil organic carbon and its different components

与易氧化有机碳显著正相关 ($P<0.05$), 与溶解性有机碳极显著正相关 ($P<0.01$); 易氧化有机碳与微生物生物量碳和溶解性有机碳显著相关 ($P<0.05$)。

2.4 增温增雨处理下土壤有机碳库稳定性的变化

土壤有机碳库稳定性指标的变化特征见表4。四种处理中土壤碳库活度的最高值出现在增温增雨的交互作用下, 且在2018年和2019年增温增雨处

理相比对照分别高出了57%和59%; 土壤碳库活度指数也表现为增温增雨的交互作用高于单独增雨和单独增温处理, 在2018年有显著差异。碳库管理指数总体表现出增温增雨的交互作用高于单独增温和单独增雨处理, 与对照相比, 2018年和2019年增温增雨交互作用分别高出49.1%和57.9%, 均达到显著水平。

土壤有机碳库不同组分的敏感指数见表5, 单独增雨处理下土壤酸解有机碳的敏感指数明显高于其他碳组分, 2018年和2019年分别达到45.59和62.40; 增温增雨交互处理下2018年土壤易氧化有机碳的敏感指数(66.04)高于其他处理, 但2019年微生物生物量碳的敏感指数(77.89)却高于其他碳组分, 说明不同的降雨条件下增温和增雨交互处理的土壤各个碳组分的敏感程度不同; 单独增温处理下土壤微生物生物量碳的敏感指数高于其他碳组分。

增温增雨及交互作用对土壤碳库稳定性指标的双因素分析结果(表6)表明, 单独增温处理对土壤碳库活度、活度指数以及碳库管理指数有极显著影响 ($P<0.01$), 单独增雨处理对土壤碳库指数和碳库管理指数有极显著影响 ($P<0.01$), 增温增雨的交互作用对土壤碳库指数有显著影响 ($P<0.05$)。

3 讨论

全球气候变化背景下, 维持与稳定黄土丘陵生态脆弱区等气候敏感型生态系统的土壤有机碳库变得愈发重要^[22]。本研究发现, 与对照相比, 模拟增

表4 土壤有机碳库稳定性指标的变化特征

Table 4 Changes of soil organic carbon pool stability index

| 年份 Year | 处理 Treatment | 碳库活度 | 碳库活度指数 | 碳库指数 | 碳库管理指数 |
|------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---|
| | | Carbon pool activity (CA) | Carbon pool activity index (CAI) | Carbon pool index (CPI) | Carbon pool management index (CPMI) /% |
| 2018 | P50% | 0.097±0.013b | 0.962±0.074b | 1.244±0.076a | 118.8±5.87b |
| | WP50% | 0.157±0.019a | 1.559±0.114a | 1.117±0.056ab | 173.3±9.293a |
| | W | 0.11±0.011b | 1.096±0.040b | 1.056±0.08ab | 116.3±12.46b |
| | CK | 0.100±0.008b | 1.000 | 1.000 | 100.0 |
| 2019 | P50% | 0.109±0.010ab | 1.147±0.113ab | 1.318±0.044a | 150.5±12.48ab |
| | WP50% | 0.151±0.012a | 1.577±0.108a | 1.149±0.046b | 180.3±6.379a |
| | W | 0.108±0.024ab | 1.129±0.241ab | 1.034±0.048bc | 114.4±18.76bc |
| | CK | 0.095±0.001b | 1.000 | 1.000 | 100.0 |

表 5 土壤有机碳库不同组分的敏感指数

Table 5 Sensitivity index of different components in soil organic carbon pool

| 年份 Year | 处理 Treatment | 敏感指数 Sensitivity index | | | | |
|------------|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | SOC | AHC | EOC | MBC | DOC |
| 2018 | P50% | 23.57 | 45.59 | 19.99 | 4.92 | 35.49 |
| | WP50% | 11.25 | 16.04 | 66.04 | 41.27 | 25.19 |
| | W | 4.67 | -6.74 | 13.83 | 43.65 | 15.13 |
| 2019 | P50% | 31.50 | 62.40 | 48.16 | 9.91 | 24.91 |
| | WP50% | 14.63 | 32.17 | 71.49 | 77.89 | 29.37 |
| | W | 3.64 | 0.39 | 11.99 | 30.79 | 14.31 |

表 6 增温增雨及交互作用对土壤碳库稳定性指标的双因素方差分析结果

Table 6 Results (*P*-values) of two-way ANOVA on the effects of warming (W), precipitation (P), and their interactions on soil organic carbon pool stability index

| 处理 Treatments | 碳库稳定性特征 Characteristics of soil carbon pool stability | | | |
|------------------|--|-------|--------|-------|
| | CA | CAI | CPI | CPMI |
| W | 0.008 | 0.002 | 0.295 | 0.005 |
| P50% | 0.341 | 0.110 | <0.001 | 0.003 |
| W × P50% | 0.614 | 0.277 | 0.010 | 0.844 |

温、降雨增加及其交互作用均提高了土壤有机碳及其组分的含量(图 2 和图 3),这可能是由于温度升高和水分增加会刺激植物生长,同时改善了腐殖质的分解环境,从促进植被生产力进而增加输入土壤的枯枝落叶的量以及促进微生物快速分解腐殖质两个角度增加了土壤有机碳及其组分含量^[23],有机碳含量的增加进而提高了土壤碳库指数(CPI),植物叶片有机碳含量和丰富度指数的增加(表 2 和表 4)佐证了这一观点。温度和水分增加引起可溶性有机质的溶解速度加快(可溶性有机质的溶解是吸热过程),并促进微生物活性以及胞外酶分泌增加,这进一步促进了有机质的矿化和微生物的生长。同时,水分增加提高了土壤水分和阳离子的可利用性,从而使得土壤可交换金属阳离子含量(主要是 Mg^{2+})增加。金属阳离子的桥联作用促进了土壤团聚体的形成和稳定^[24],从而有利于土壤酸解有机碳、溶解性有机碳、微生物生物量碳等含量的提升。然而值得注意的是,与之前多数研究的结果^[25]不同,本研究发现土壤水分增加反而降低了该区植物多样性和

均匀度指数(表 2),这可能是由于水分亏缺降低了优势种的丰富度和生物量,缓解了群落内的种间竞争,从而在短期内增加了物种多样性和均匀度^[26]。

增温增雨的交互处理下土壤微生物生物量碳含量显著高于对照处理,且高于单独增温和单独增雨处理(图 3),这说明增温和增雨在调节土壤微生物生物量碳方面具有一定的协同交互作用。此外,敏感指数的结果发现,微生物生物量碳对单独增温以及增温增雨的交互作用的响应程度最高(表 5),因此,推测微生物生物量碳的相关指标变化可能是表征暖湿气候或者单独气候变暖情境下土壤有机碳库变化的更为敏感的指标。Zhou 等^[11]在半干旱草地长达 6 年的野外试验中发现,增温是土壤惰性有机碳(ROC)含量增加的主要原因,本研究中也发现增温增加了 ROC 含量以及其占有有机碳的比例,而减少了酸解有机碳(AHC)的含量(图 2 和图 4)。这主要与两种有机碳库的分解难易程度有关,ROC 库由于与土壤矿物质结合紧密,不易被微生物分解,而 AHC 是不稳定的碳组分,含有大量的外源新鲜碳,是反映植被输入和微生物分解的重要部分,因此会对外界环境条件产生快速的响应^[27-28],此外,活性碳库分解过程中也可能残留一部分难分解的有机碳从而形成惰性有机碳,因此,增温由于加速了 AHC 的分解从而降低了 AHC 含量,并间接增加了 ROC 含量。此外,Zhou 等^[11]还发现增雨会增加 AHC 含量,这同样与本研究结果(图 2)相一致,这主要是由增雨促进生态系统净生产力和植被生物量增加,植被向土壤输入新鲜碳的速率加快导致的^[29],并且酸解有机碳在单独增雨处理下的敏感指数最高,表明酸解有机碳含量及有效率的变化是表征土

壤水分增加的更为敏感的指标。本研究中, 相同的增雨条件下, 增温会降低 AHC 含量, 增加了 ROC 含量 (图 2), 这与增温的主效应相同, 说明增温和增雨在调控土壤活性和惰性有机碳组分的过程中具有一定的拮抗交互作用, 且交互作用中增雨占据主导地位。

易氧化有机碳在土壤碳库中占比较高, 同时也是计算土壤碳库活度和活度指数的参数, 对于表征土壤碳库活度具有重要作用。本研究发现, 增温增加了土壤易氧化 (EOC) 有机碳含量, 但结果不显著 (图 3)。这可能是由于增温促使了凋落物碳输入 (减少了新碳的输入) 与矿化碳输出 (增加了老碳的矿化) 之间形成平衡^[30]。而根据 Xu 等^[31]的研究结果, 长期增温会加速 EOC 的分解从而降低 EOC 含量, 这项研究结果有待于进一步验证。与单独增温处理不同, 增雨以及增温增雨引起的水分增加促使植物生长加速, 使得植物向土壤的碳输入以及微生物对于输入碳的分解速率加快, 进而打破了上述平衡, 因此促进了 EOC 的积累。易氧化有机碳含量的变化引起土壤碳库活度和活度指数的改变。本研究中, 碳库活度 (CA) 和活度指数 (CAI) 最高值出现在增温增雨的交互作用下 (表 4), 碳库活度和碳库指数共同决定了碳库管理指数 (CPMI) 的大小。CPMI 是反映土壤碳库动态变化的量化指标, 能够全面和动态地反映外界条件对土壤肥力和质量的影响^[32]。本研究中, CPMI 在增温增雨交互下出现最高值 (表 4), 说明了该区域暖湿的气候变化会提高土壤有机碳库质量, 使得土壤有机碳更容易被微生物分解和被植物吸收利用。相关性分析表明, 土壤各个活性较高的碳库与土壤有机碳之间有显著的正相关性 (图 5), 说明土壤有机碳中的活性成分直接参与了土壤生物化学转化过程, 一些活性碳组分与有机碳处于动态平衡中。同时也表明了土壤各个活性碳组分之间联系紧密, 虽然在测定方法和表达形式上有所区别, 但均在不同程度或不同角度表征了土壤中活性程度较高的部分。

4 结论

增雨以及增温增雨处理显著增加了土壤有机碳以及其中活性程度较高的土壤碳组分含量和分配比

例, 并且提高了碳库稳定性, 表明在未来暖湿气候条件下, 土壤碳库活度和质量更高, 利于土壤良性发展。单独增雨处理下酸解有机碳最为敏感, 而在单独增温以及增温增雨交互处理下, 微生物生物量碳相对更为敏感, 因此, 酸解有机碳和微生物生物量碳可作为未来暖湿气候条件下土壤有机碳早期变化的重要指示。

参考文献 (References)

- [1] Wu Z, Dijkstra P, Koch G W, et al. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17 (2): 927—942.
- [2] Crowther T W, Todd-Brown K E O, Rowe C W, et al. Quantifying global soil carbon losses in response to warming[J]. *Nature*, 2016, 540 (7631): 104—108.
- [3] Wang Q K. Responses of forest soil carbon pool and carbon cycle to the changes of carbon input[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 (4): 1075—1081. [王清奎. 碳输入方式对森林土壤碳库和碳循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, 22 (4): 1075—1081.]
- [4] Shi Z, Crowell S, Luo Y Q, et al. Model structures amplify uncertainty in predicted soil carbon responses to climate change[J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 2171.
- [5] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, 5 (1): 81—91.
- [6] Chen P Q. Carbon cycle of earth system [M]. Beijing: Science Press, 2004. [陈洋勤. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [7] Yu J, Fang L, Bian Z F, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (17): 4829—4838. [余健, 房莉, 卞正富, 等. 土壤碳库构成研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34 (17): 4829—4838.]
- [8] Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (3): 513—519. [王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25 (3): 513—519.]
- [9] Xi D, Weng H D, Hu Y L, et al. Effects of canopy nitrogen addition and understory removal on soil organic carbon fractions in a Chinese fir plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (21): 8525—8534. [习丹, 翁浩东, 胡亚林, 等. 林冠氮添加和林下植被去除对杉木林土壤有机碳组分的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41

- (21): 8525—8534.]
- [10] Yang X Y, Lin L, Li Y, et al. Effects of warming and altered precipitation on soil physical properties and carbon pools in a Tibetan alpine grassland[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, 53 (4): 765—774. [杨新宇, 林笠, 李颖, 等. 青藏高原高寒草甸土壤物理性质及碳组分对增温和降水改变的响应[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 765—774.]
- [11] Zhou X, Chen C, Wang Y, et al. Warming rather than increased precipitation increases soil recalcitrant organic carbon in a semiarid grassland after 6 years of treatments[J]. *PLoS One*, 2013, 8 (1): e53761.
- [12] Chen Q Y, Niu B, Hu, Y L, et al. Warming and increased precipitation indirectly affect the composition and turnover of labile-fraction soil organic matter by directly affecting vegetation and microorganisms[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136787.
- [13] Blair G J, 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 systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46 (7): 1459—1466.
- [14] Liang Q, Chen H Q, Gong Y S, et al. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 92 (1): 21—33.
- [15] Tuo D F, Gao G Y, Chang R Y, et al. Effects of revegetation and precipitation gradient on soil carbon and nitrogen variations in deep profiles on the Loess Plateau of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 399—411.
- [16] Sun K H, Zeng X D, Li F. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980—2014[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2019, 24(4): 455—468. [孙康慧, 曾晓东, 李芳. 1980~2014 年中国生态脆弱区气候变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2019, 24(4): 455—468.]
- [17] Zhang Y Q, Li Z C, Hou LY, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese fir plantation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (1): 239—250. [张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 239—250.]
- [18] Bao S D. Analysis for soil and agrochemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [19] Yin D, Li H, Xu J B, et al. Composition characteristics of organic carbon pool in upland red soil under long-term application of straw and pig manure[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1259—1269. [殷丹, 李欢, 徐江兵, 等. 长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地有机碳库组成特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1259—1269.]
- [20] Wang C Y, He N P, Lü Y L. Latitudinal patterns and factors affecting different soil organic carbon fractions in the eastern forests of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (11): 3176—3188. [王春燕, 何念鹏, 吕瑜良. 中国东部森林土壤有机碳组分的纬度格局及其影响因子[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3176—3188.]
- [21] Yan L J, Li G, Wu J Q, et al. Effects of four typical vegetations on soil active organic carbon and soil carbon in Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (15): 5546—5554. [闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5546—5554.]
- [22] Belay-Tedla A, Zhou X, Su B, et al. Labile, recalcitrant, and microbial carbon and nitrogen pools of a tallgrass prairie soil in the US Great Plains subjected to experimental warming and clipping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41 (1): 110—116.
- [23] Fang X, Zhou G, Qu C, et al. Translocating subtropical forest soils to a warmer region alters microbial communities and increases the decomposition of mineral-associated organic carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 142: 107707.
- [24] Zhong Z, Wu S, Lu X, et al. Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 196: 104867.
- [25] Hoeppe S S, Dukes J S, et al. Interactive responses of old-field plant growth and composition to warming and precipitation[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18 (5): 1754—1768.
- [26] Alon M, Sternberg M. Effects of extreme drought on primary production, species composition and species diversity of a Mediterranean annual plant community[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2019, 30(6): 1045—1055.
- [27] Chen Q, Lei T, Wu Y, et al. Comparison of soil organic matter transformation processes in different alpine ecosystems in the Qinghai - Tibet Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124 (1): 33—45.
- [28] Althuizen I H J, Lee H, Sarneel J M, et al. Long-term climate regime modulates the impact of short-term climate variability on decomposition in alpine grassland soils[J]. *Ecosystems*, 2018, 21 (8): 1580—1592.
- [29] Yang H, Wu M, Liu W, et al. Community structure and composition in response to climate change in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17 (1):

- 452—465.
- [30] Liu F R, Zhang Y M, Luo J X. The effects of experimental warming and CO₂ concentration doubling on soil organic carbon fractions of a montane coniferous forest on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *European Journal of Forest Research*, 2018, 137 (2): 211—221.
- [31] Xu X, Sherry R A, Niu S L, et al. Long-term experimental warming decreased labile soil organic carbon in a tallgrass prairie[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361 (1/2): 307—315.
- [32] Teng Z, Cao X Q, Sun M Y, et al. Effect of different ecological restoration patterns on soil labile organic carbon and carbon pool management index of lakeside wetland of Chaohu Lake[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28 (4): 752—760. [滕臻, 曹小青, 孙孟瑶, 等. 不同生态恢复模式对巢湖湖滨湿地土壤活性碳库及其管理指数的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28 (4): 752—760.]

(责任编辑: 陈荣府)