

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.007.

李映雪, 臧真凤, 张瑜, 等. 退耕还草对土壤碳库活度及团聚体活性有机碳组分分布的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 241-249.

LI Yingxue, ZANG Zhenfeng, ZHANG Yu, et al. Changes in Soil Carbon Pool Activity and Distribution of Labile Organic Carbon Composition in Soil Aggregates Following Conversion of Farmland to Grassland on the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 241-249.

退耕还草对土壤碳库活度及团聚体 活性有机碳组分分布的影响

李映雪^{1,2}, 臧真凤^{1,2}, 张瑜^{1,2}, 王怡楠^{1,2}, 赵巍^{1,2,3}

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]揭示黄土高原地区退耕还草对土壤团聚体活性有机碳的影响, 阐明植被恢复过程中土壤碳库质量和稳定性的调控因素, 为评估土壤碳固存潜力和有机碳积累机制提供理论参考。 [方法]以安塞纸坊沟流域不同退耕年限(7 a, 18 a, 35 a 和 45 a)土壤为研究对象, 选取耕地作对照, 分析了 0—10 cm 土层团聚体分布及其稳定性、不同粒级团聚体(5~2 mm, 2~0.25 mm, 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm)有机碳含量、活性有机碳组分含量及其土壤环境影响因子。 [结果]退耕还草显著提升土壤团聚体稳定性, 碳库活度虽然变化不显著, 但促进中活性有机碳转变为低活性有机碳, 增加非活性有机碳占比, 维持并提升土壤碳库质量。草地恢复影响土壤有机碳和活性有机碳在各粒级团聚体的重新分配, 土壤有机碳和高、中活性有机碳主要存在于>0.25 mm 粒级大团聚体中, 低活性有机碳主要存在于<0.25 mm 粒级微团聚体中。团聚体不同活性有机碳组分的积累主要受土壤总有机碳、可溶性有机碳、全氮和全磷等营养元素含量调控。 [结论]在黄土高原植被恢复过程中, 土壤结构和营养元素的综合效应共同决定活性有机碳在团聚体中的分布。

关键词: 土壤团聚体; 活性有机碳; 退耕还草; 黄土高原

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0241-09

Changes in Soil Carbon Pool Activity and Distribution of Labile Organic Carbon Composition in Soil Aggregates Following Conversion of Farmland to Grassland on the Loess Plateau

LI Yingxue^{1,2}, ZANG Zhenfeng^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, WANG Yinan^{1,2}, ZHAO Wei^{1,2,3}

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on

the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the impact of conversion of farmland to grassland in the region of the Loess Plateau on labile organic carbon (high, moderate, and low level) in soil aggregates, clarify the regulatory factors for soil carbon pool quality and stability during vegetation restoration, and provide theoretical reference for evaluating soil carbon sequestration potential and organic carbon accumulation mechanism. [Methods] Soil samples in four grassland restoration years (7 years, 18 years, 35 years and 45 years) and one sample from farmland in the 0—10 cm soil layer in Zhifanggou watershed in the hilly

收稿日期: 2022-07-24

修回日期: 2022-08-21

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土高原退耕还草土壤有机—无机碳耦合过程对团聚体稳定性的影响机制”(41877037)

第一作者: 李映雪(1995—), 女, 内蒙古包头人, 在读硕士研究生, 主要从事草地土壤生态学研究。E-mail: liyingxue@nwfau.edu.cn

通信作者: 赵巍(1979—), 男, 湖北赤壁人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事土壤化学与生态研究。E-mail: aoei@nwfau.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

and gully region of the Loess Plateau were collected. The distribution and stability of aggregates, the organic carbon (SOC) and labile organic carbon (LOC) contents in soil aggregates (5~2 mm, 2~0.25 mm, 0.25~0.053 mm and <0.053 mm), and the correlations between labile organic carbon (high, moderate, and low level) and soil properties were analyzed. [Results] The stability of soil aggregates increased significantly with returning farmland to grassland. The quality of soil carbon pool in grasslands was higher than that in farmland. The soil carbon pool activity changed little, but the moderate-labile organic carbon (LOC-M) transformed into low-labile organic carbon (LOC-L) and the proportion of non-labile organic carbon increased. It was found that grassland restoration led to the redistribution of soil aggregates and labile organic carbon fractions. SOC, high-labile organic carbon (LOC-H), and LOC-M distributed mainly in macroaggregates (>0.25 mm), LOC-L in microaggregates (<0.25 mm). The soil total organic carbon, dissolved organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus drove mainly the LOC accumulations in soil aggregates. [Conclusion] In the process of vegetation restoration on the Loess Plateau, the distribution of soil labile organic carbon in aggregates is jointly determined by the comprehensive effects of soil structure and nutrient elements.

Keywords: soil aggregate; labile organic carbon; returning farmland to grassland; Loess Plateau

土壤团聚体是表征土壤质量的关键指标^[1-2]。团聚体的大小、形状和稳定性直接影响土壤通气和水分效率,不同粒级团聚体在土壤养分保持、供应及转化能力等方面发挥着不同作用^[3]。团聚体的形成是土壤固碳的重要机制^[2,4],具有增加有机质含量、稳定土壤结构、创造孔隙通道、增加保水能力、庇护土壤微生物、支撑植物生长等功能^[3,5-6]。土壤有机碳含量约为大气碳库的两倍^[7],土壤轻微的碳损失可能改变大气CO₂浓度,因此增加陆地生态系统碳储量能去除大气中的碳,减缓气候变化^[8]。植被恢复作为积累土壤碳的有效途径,能改善土壤物理性状、加速土壤颗粒胶结、改变团聚体粒级分布,最终提高养分输入^[8-10]。表土近90%的有机碳储存在团聚体中^[4],农业生产活动也主要发生在表层土壤^[2],研究表层土壤团聚体有机碳有助于解释土地利用方式转变对碳固存的影响。土壤碳库基数巨大,总有机碳指标不能完全表征土壤质量提高或降低的程度^[11],同时由于其含量变化缓慢,难以灵敏反映短期内整个碳库的微小变化^[12]。土壤有机碳由分解程度、顽固性和周转率不同的各种碳组分构成^[13]。活性有机碳是土壤有机碳组分中一种易分解的不稳定碳,其活性和动态性较高,易被微生物分解利用^[14]。Logninow等^[15]根据不同浓度高锰酸钾(33.3 mmol/L, 167 mmol/L, 333 mmol/L)氧化土壤有机碳的数量,将活性有机碳分成高活性、中活性和低活性3种组分。活性有机碳周转时间短、易氧化,很容易受土地利用和管理方式的影响^[13-14]。因此,活性有机碳被认为是评价土壤性质和质量的良好指标^[16],其不同组分在质、量上的变化,能够表征土壤碳库对人为措施和环境条件变化的响应,进而相对全面地反映土壤碳库积累程度及其稳定性^[13-14]。

黄土高原是世界上生态最脆弱的地区之一,水土流失和荒漠化严重^[9-10]。20世纪70年代以来,该地区开始实施造林种草综合治理,1999年正式施行退耕还林(草)工程建设^[9]。迄今为止,黄土高原植被覆盖率增加28%,土壤养分储量显著增加,草地生态恢复取得良好成效^[8]。研究表明,植被恢复显著提高了该地区土壤有机碳含量和团聚体稳定性^[8,10]。此外,植被恢复过程中,有机碳大多集中在大团聚体(>0.25 mm),而微团聚体(<0.25 mm)的有机碳矿化率较低^[17]。然而,黄土高原退耕还草过程中指示土壤碳库稳定性的活性有机碳组分含量如何变化,活性有机碳组分在团聚体中的分布特征及其驱动因子尚不清楚。因此,本研究以黄土高原不同退耕还草年限土壤为研究对象,探究退耕还草过程中土壤团聚体特征及恢复年限和团聚体大小对活性有机碳组分含量及分布的影响,阐明植被恢复过程对土壤碳库质量和稳定性的影响,为评估植被恢复过程中土壤碳库质量和理解有机碳积累机制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区纸坊沟流域内(36°74'—36°80'N, 109°23'—109°25'E),海拔1 113~1 241 m,多年平均气温8.8℃,年降水量541.2 mm,集中于7—9月。流域内土壤类型以由黄土母质发育而来的黄绵土为主,结构疏松,抗侵蚀能力差。由于过度开垦植被遭到严重破坏,流域生态系统严重退化。1973年开展生态修复综合治理后,该地一些废弃陡坡耕地逐渐演替为天然草地,主要优势物种为铁杆蒿(*Artemisia*

gmelinii)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、兴安胡枝子(*Lespedeza daurica*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和赖草(*Leymus secalinus*)等。

1.2 样品采集

2021 年 10 月,在全面踏查的基础上,根据文献查阅与居民走访的结果采集土壤样品。选取流域内不同退耕年限的自然恢复草地(分别退耕还草 7 a、18 a、

35 a 和 45 a)开展试验,各样地退耕前管理措施相似,主要种植作物是玉米(*Zea mays*)和谷子(*Setaria italica*),自退耕后未受人为干扰,植被自然定植和生长。同时选取立地条件相似的坡耕地作为对照样地,耕地实行一年两熟玉米—谷子轮作种植制度,采样当年种植玉米。所有选定的样地都具有相似的坡向、坡度、海拔和土质,样地具体信息见表 1。

表 1 样地基本概况和土壤特征

指标	处理				
	耕地	退耕 7a	退耕 18a	退耕 35a	退耕 45a
地理坐标	36°74′39″N	36°74′40″N	36°74′40″N	36°75′74″N	36°80′06″N
	109°24′17″E	109°24′28″E	109°24′22″E	109°25′15″E	109°23′87″E
坡度/(°)	—	18	10	27	25
坡向	—	NbyE10°	NbyE9°	NbyE26°	NbyE27°
海拔/m	1235	1232	1241	1210	1113
pH	8.27±0.02a	8.35±0.04a	8.27±0.05a	8.31±0.02a	8.11±0.07b
总有机碳/(g·kg ⁻¹)	5.38±0.20b	4.23±0.05b	5.94±0.40b	6.76±0.68b	13.05±1.21a
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.33±0.02b	0.21±0.01b	0.28±0.03b	0.35±0.02b	0.57±0.08a
全磷/(g·kg ⁻¹)	0.45±0.02a	0.34±0.01b	0.27±0.01b	0.24±0.01b	0.32±0.01b
可溶性有机碳/(g·kg ⁻¹)	0.27±0.02b	0.21±0.01b	0.25±0.02b	0.23±0.02b	0.45±0.02a

注:同行不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

在这些研究地点随机建立 3 个重复样地(1 m×1 m),由于纸坊沟流域退耕还草样地大多以山坡为主,因此采样时选的所有退耕还草样地包含了上坡、中坡和下坡。去除地表凋落物后,在每个样地内按“S”型取样法用土钻(直径 5 cm)随机钻取 9 个表层(0—10 cm)土壤样品,过 2 mm 筛后混合成一份样品,在 4℃ 储存下立刻运到实验室,一部分自然风干,一部分保存在 4℃,用于土壤理化性质分析。在每个样地按照“五点取样法”采集原状土样装入铝制饭盒运回实验室,剔除小石块和植物残体,沿自然裂缝将土壤掰成直径<8 mm 后过 5 mm 土壤筛,将同一样地内的 5 个原状土混匀成一个土壤样品,最后风干土样。

1.3 测定方法

土壤团聚体采用湿筛法^[18]进行分级,得到 5~2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm 和<0.053 mm4 个粒级的水稳性团聚体。土壤团聚体稳定性指标平均重量直径(Mean weight diameter, MWD)、几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD)和水稳性团聚体百分比(Water stable aggregates, WAS)分别按照以下公式计算^[19]:

$$MWD=\sum_{i=1}^n(x_i\times w_i)$$
 (1)

$$GMD=\exp(\sum_{i=1}^nw_i\ln x_i)$$
 (2)

$$WAS=(M_{r>0.25})/M_T$$
 (3)

式中: x_i 为各粒级平均直径(mm); w_i 为各粒级水稳

定性团聚体质量百分比(%); n 为水稳性团聚体总粒级数; $M_{r>0.25}$ 为大于 0.25 mm 土壤团聚体质量(g); M_T 为土壤团聚体总质量(g)。

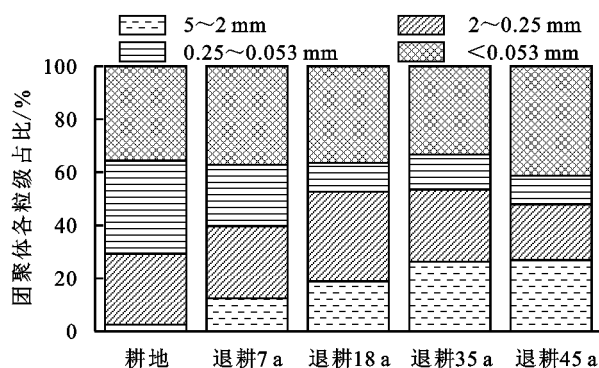
使用 pH 计测定土壤 pH(土水比 1:2.5);土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC)含量、团聚体有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量采用重铬酸钾氧化法测定^[20];土壤全氮(Total nitrogen, TN)采用凯式定氮法测定^[20];土壤全磷(Total phosphorus, TP)采用硫酸—高氯酸—钼锑抗比色法测定^[20];采用岛津 TOC-L 有机碳分析仪测定土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)浓度^[21]。不同活性有机碳组分采用 Logninow^[15]提出的高锰酸钾氧化法测定,并进行了一些修改,具体方法如下^[13]:称取含 15~30 mg 碳的土壤样品于 50 ml 离心管,加入不同浓度(33.3, 167, 333 mmol/L)的 KMnO₄ 溶液 25 ml,密封震荡 1 h 后,放入离心机以 4 000 r/min 的转速离心 5 min,取上清液用去离子水稀释 250 倍,然后将稀释液于分光光度计 565 nm 波长处比色,根据 KMnO₄ 消耗量得出 3 种活性有机碳的含量,分别记为 C_1 、 C_2 、 C_3 ,单位为 g/kg(氧化过程中 1 mmol/L KMnO₄ 消耗 9 mg 碳)。 C_1 为高活性有机碳(High-labile organic carbon, LOC-H)含量, C_2 和 C_1 的差值为中活性有机碳(Moderate-labile organic carbon, LOC-M)含量, C_3 和 C_2 的差值为低活性有机碳(Low-labile organic carbon, LOC-L)含量。土壤碳库活度(Carbon pool activity, A)依照以下公式计算:

$$A = \text{LOC} / (\text{TOC} - \text{LOC}) \quad (4)$$

式中:LOC 为土壤总活性有机碳含量(g/kg),等于 C_3 测定值;TOC 为土壤总有机碳含量(g/kg)。

1.4 统计分析

采用 SPSS 24.0 软件进行数据处理,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 检验比较不同处理下的参数差异($\alpha=0.05$)。采用 Pearson 相关系数评价不同因子间的相关关系,采用逐步回归分析不同活性有机碳的主要影响因素。使用 Origin 2021 绘制柱状图和折线图,R 4.1.0 绘制主成分分析(PCA)图。



注:图中不同字母表示同一处理间差异显著($p<0.05$);误差棒为标准差。

图1 不同退耕年限下团聚体粒级组成和稳定性的动态变化

2.2 恢复年限对团聚体有机碳和活性有机碳的影响

团聚体 SOC 含量显著受恢复年限影响($p<0.05$, 图 2),表现为 45 a(12.42 g/kg)>35 a(6.23 g/kg)>耕地(5.71 g/kg)>18 a(4.75 g/kg)>7 a(4.11 g/kg)。随退耕年限增加,除 LOC-L 外,其余两种活性有机碳组分含量均呈先降低后升高趋势,并在退耕 45 a 达到最大。退耕 45 a LOC-M 较耕地增幅近两倍(165.96%),其次是 LOC-H(68.30%)和 LOC-L(48.23%)。LOC-L 在耕地中含量最低,退耕还草 7 a,18 a,35 a 和 45 a 的 LOC-L 含量较耕地分别增长 42.81%,32.14%,82.01%和 48.23%。

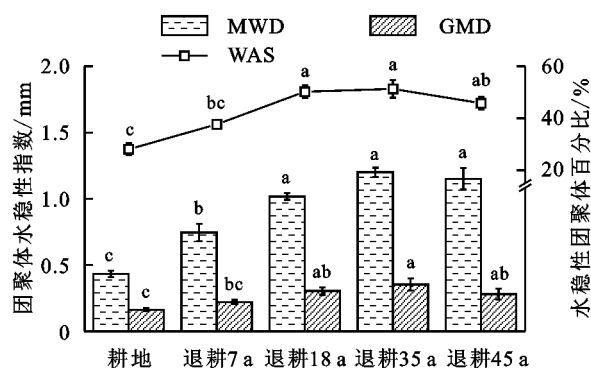
2.3 团聚体粒级对土壤有机碳和活性有机碳的影响

团聚体中土壤有机碳和活性有机碳含量显著受团聚体粒级分布的影响(图 2)。 <0.053 mm 团聚体 SOC 浓度显著低于 >0.25 mm 粒级($p<0.05$,退耕 18 a 除外)。各样地 LOC-H 均以储存在 5~2 mm 粒级为主(退耕 18 a 除外),5~2 mm 粒级 LOC-H 含量(0.91 g/kg)显著高于 0.25~0.053 mm(0.69 g/kg)和 <0.053 mm(0.61 g/kg),且随粒级减小含量逐渐降低($p<0.05$)。相同恢复年限下, <0.053 mm 团聚体 LOC-H 和 LOC-M 含量最低,约为 5~2 mm 团聚体浓度的 2/3。LOC-L 含量随粒级减小逐渐增大(退耕 18 a 除外), <0.053 mm 团聚体 LOC-L 含量显著高于其他粒级($p<0.05$),2~0.25 mm,0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 粒级团聚体 LOC-L 较 5~2 mm 粒级分

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体分布及稳定性的变化

随着草地恢复,土壤 5~2 mm 团聚体占比不断增加,在退耕 45 a 达到最高值(25.67%),而 0.25~0.053 mm 团聚体占比整体呈降低趋势(图 1)。退耕还草后,团聚体 MWD,GMD 和 WAS 值均高于耕地,并随退耕年限增加表现为先增加后略减小的分布特征,在退耕 35 a 达到最大值。退耕 35 a 的 MWD,GMD 和 WAS 较耕地分别增加 177.15%,115.80%和 82.58%。



别高 55.76%,75.45%和 140.03%。

2.4 退耕还草对土壤活性有机碳库质量的影响

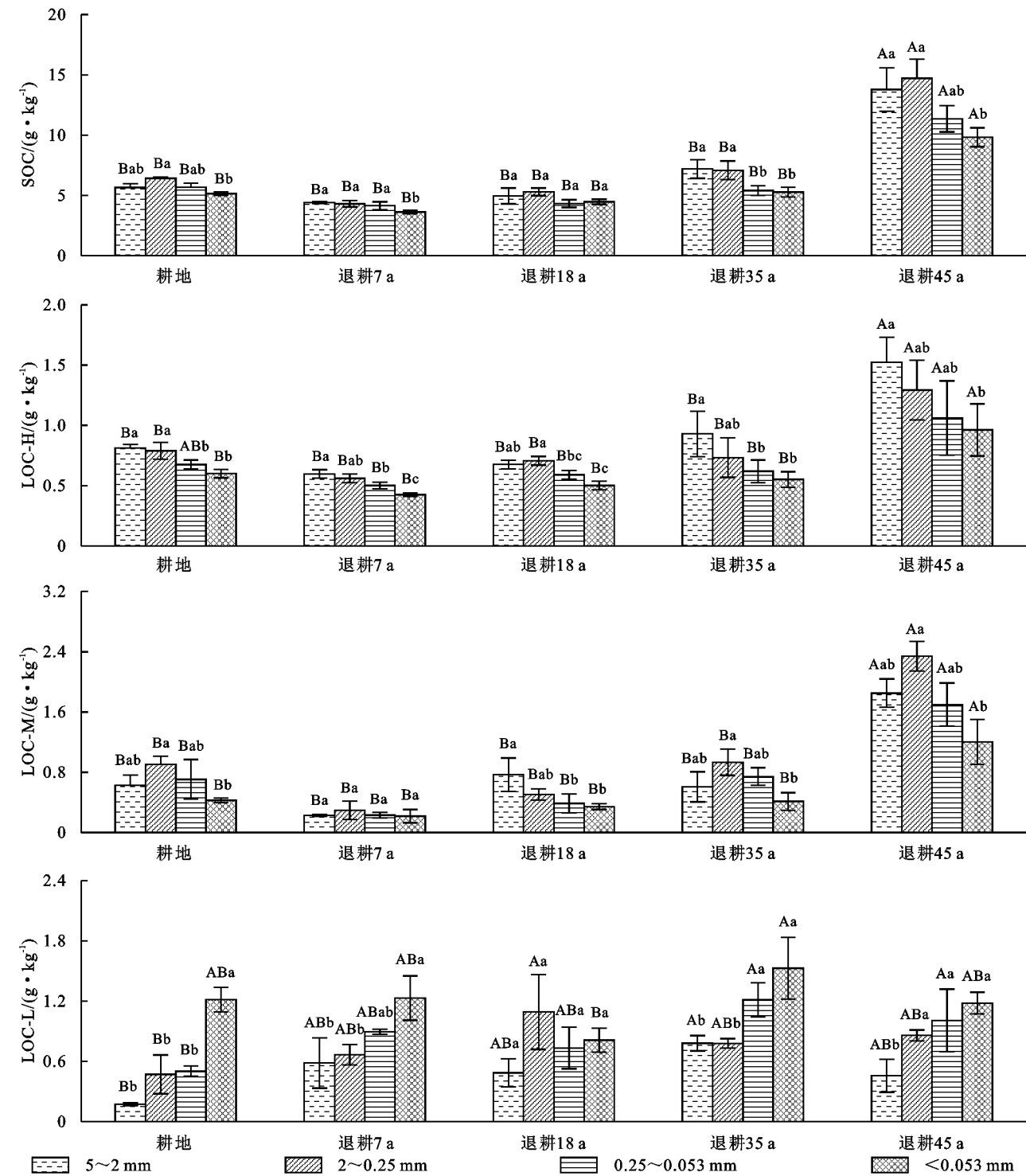
土壤碳库活度在退耕后并未发生显著改变($p>0.05$,图 3),呈整体波动变化的趋势,并在退耕 35 a 达到峰值(0.77)。草地恢复对 LOC-M 和 LOC-L 组分分布有显著影响($p<0.05$),同时降低 LOC-H 的相对质量分数(图 4)。退耕初期(7 a)和中期(18 a 和 35 a)土壤 LOC-M 比例下降,LOC-M 占比上升,退耕 7 a,18 a 和 35 a 的 LOC-L 质量分数较耕地分别增加了 7.21%,17.75%和 14.96%;退耕后期(45 a)土壤 LOC-L 显著向 LOC-M 转变($p<0.05$)。

不同退耕年限下土壤理化性质与活性有机碳组分及碳库活度的 PCA 分析如图 5 所示,2 个主坐标累计解释了 80.7%的总方差。LOC-L 相对质量分数及碳库活度与 pH 和团聚体稳定性(WAS,GMD,MWD)密切相关,LOC-H 和 LOC-M 的分布与土壤营养元素(TOC,DOC,TN,TP)具有较高的正相关性。

2.5 土壤团聚体不同活性有机碳与土壤理化性质的相关性分析

不同粒级团聚体中不同活性有机碳与土壤 pH,TOC,TN,TP,DOC 和团聚体稳定性显著相关($p<0.05$,表 2)。4 种粒级团聚体 LOC-H,LOC-M 与 TOC,TN 和 DOC 呈极显著正相关,相关系数范围分别为 0.846~0.965,0.900~0.960,0.821~0.945。各粒级 LOC-H,LOC-

M 与 TOC 的相关系数表现为 $r_{(5\sim 2\text{ mm})} > r_{(2\sim 0.25\text{ mm})} > r_{(<0.053\text{ mm})} > r_{(0.25\sim 0.053\text{ mm})}$ 。LOC-H, LOC-M 与 pH 呈极显著负相关($p < 0.01$), 且以 $2\sim 0.25\text{ mm}$ 团聚体的相关系数最大(-0.907)。 $5\sim 2\text{ mm}$ 团聚体和 $0.25\sim 0.053\text{ mm}$ 团聚体 LOC-L 与 TP 显著负相关, 而与 WAS, MWD 和 GMD 显著正相关。 $5\sim 2\text{ mm}$ 粒级 LOC-L 与 TP, WAS, MWD 和 GMD 的相关性最大。



注: SOC 为土壤有机碳, LOC-H 为高活性有机碳, LOC-M 为中活性有机碳, LOC-L 为低活性有机碳; 图中不同小写字母表示同一处理各粒级间差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一粒级各处理间差异显著($p < 0.05$); 误差棒为标准差。

图 2 不同年限土壤团聚体有机碳和活性有机碳组分变化

2.6 土壤性质与团聚体不同活性有机碳分布的逐步回归

对影响团聚体不同活性有机碳的土壤因子进行

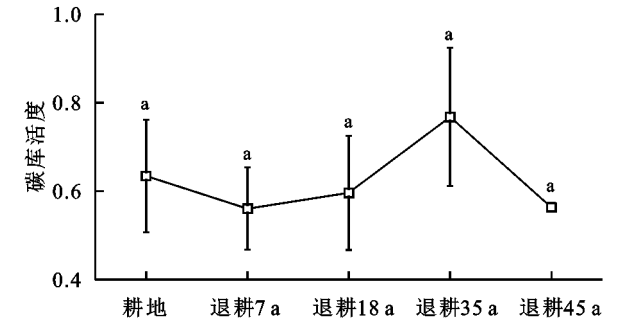
逐步回归, 得出最优的多元线性回归模型, 筛选出显著性影响因子(表 3)。回归方程通过 F 检验均达到了显著水平($p < 0.01$), 说明团聚体活性有机碳含量

和全土理化性质间存在一定的相关关系。逐步回归结果表明,影响 LOC-H 的主要因素是 DOC 和 TOC,DOC 贡献较大;影响 LOC-M 的主要因素是 TN;TP 对 LOC-L 影响较大。

表 2 团聚体不同活性有机碳含量与全土理化性质的相关关系

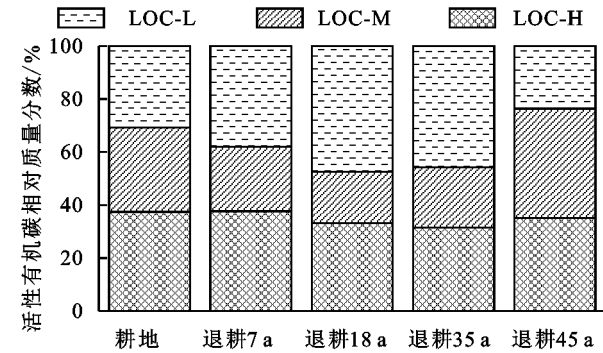
参数	粒径	pH	TOC	TN	TP	DOC	WAS	MWD	GMD
LOC-H	5~2 mm	-0.829**	0.941**	0.939**	-0.029	0.876**	0.202	0.452	0.178
	2~0.25 mm	-0.907**	0.910**	0.919**	0.068	0.878**	0.122	0.344	0.063
	0.25~0.053 mm	-0.878**	0.846**	0.900**	0.100	0.821**	0.113	0.302	0.066
	<0.053 mm	-0.842**	0.875**	0.926**	0.108	0.864**	0.133	0.344	0.130
LOC-M	5~2 mm	-0.819**	0.965**	0.906**	-0.061	0.925**	0.226	0.427	0.128
	2~0.25 mm	-0.847**	0.955**	0.960**	0.036	0.933**	0.150	0.394	0.122
	0.25~0.053 mm	-0.852**	0.928**	0.931**	0.035	0.867**	0.107	0.360	0.072
	<0.053 mm	-0.877**	0.953**	0.936**	0.011	0.945**	0.172	0.380	0.077
LOC-L	5~2 mm	0.221	-0.016	-0.041	-0.651**	-0.157	0.712**	0.673**	0.753**
	2~0.25 mm	-0.006	0.231	0.045	-0.601*	0.147	0.565*	0.488	0.428
	0.25~0.053 mm	0.157	0.245	0.091	-0.609*	0.117	0.533*	0.634*	0.532*
	<0.053 mm	0.160	0.082	0.097	-0.007	-0.018	-0.084	0.046	-0.062

注:** $p<0.01$, * $p<0.05$;样本数 $n=15$;自由度 $df=13$;LOC-H 为团聚体高活性有机碳,LOC-M 为团聚体中活性有机碳,LOC-L 为团聚体低活性有机碳。



注:图中不同字母表示同一处理间差异显著($p<0.05$);误差棒为标准差。

图 3 土壤碳库活度的变化



注:LOC-H 为全土高活性有机碳,LOC-M 为全土中活性有机碳,LOC-L 为全土低活性有机碳;图中不同字母表示同一处理间差异显著($p<0.05$)。

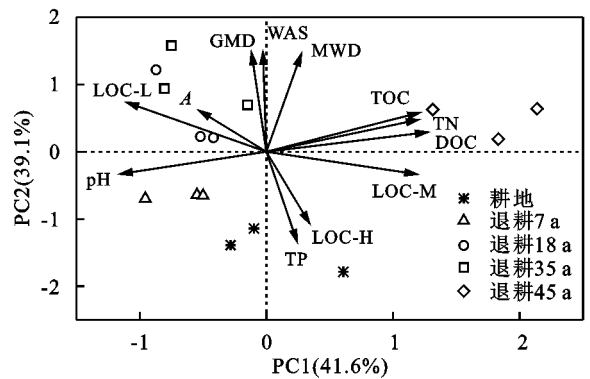
图 4 土壤活性有机碳相对质量分数的变化

3 讨论

3.1 退耕还草对土壤团聚体水稳定性的影响

植被结构和物种多样性对土壤微环境的改善有重要贡献^[22],较小的人为扰动、较大的植被覆盖和较多的有机结合剂输入使恢复草地土壤更易形成团聚体结构。本研究中,退耕还草促使土壤<0.25 mm 粒

级的团聚体向 5~2 mm 和 2~0.25 mm 粒级的团聚体转变,从而显著增加了土壤团聚体水稳性指数(WSA,图 1),提高土壤抗侵蚀能力^[17]。退耕 7 a,18 a 和 35 a 的 MWD 和 GMD 指数逐年上升,耕地的相应值处于较低水平(图 1),这与王兴等^[23]和李柏桥等^[24]的研究具有相同趋势,可见退耕还草改善土壤团粒结构及稳定性的作用在黄土丘陵区具有普遍性。水稳性团聚体分布及稳定性的变化主要归因于土地利用方式的转变及植被恢复对土壤的改良效应。长期翻耕导致大量植物根系和大团聚体被破坏,从而降低土壤大团聚体含量,并释放微团聚体^[25]。因此,当农田进行退耕还草时,植物残体和凋落物的积累覆盖有助于提升土壤水分和腐殖质含量^[9],促进微生物菌丝体及菌类分泌物与土壤颗粒胶结^[6],增加土壤团聚体水稳定性。



注:LOC-H 为全土高活性有机碳相对质量分数,LOC-M 为全土中活性有机碳相对质量分数,LOC-L 为全土低活性有机碳相对质量分数,A 为碳库活度。

图 5 土壤理化性质与活性有机碳组分及碳库活度的 PCA 分析

表 3 全土理化性质和团聚体不同活性有机碳含量的逐步回归分析

参数	回归方程	R^2	F	p	n
LOC-H	$y = 1.212\text{DOC} - 0.052\text{TOC} + 0.705$	0.623	9.917	0.003	60
LOC-M	$y = -1.552\text{TN} + 1.136$	0.548	15.765	0.002	60
LOC-L	$y = -3.75\text{TP} + 1.814$	0.545	15.542	0.002	60

注:LOC-H 为团聚体高活性有机碳,LOC-M 为团聚体中活性有机碳,LOC-L 为团聚体低活性有机碳。

3.2 退耕还草对土壤团聚体有机碳和活性有机碳组分分布的影响

团聚体的形成是土壤碳贮存的重要机制,尤其是对有机碳的物理保护^[2,4]。本研究中,土壤团聚体有机碳和活性有机碳含量随退耕还草年限增加呈先降低后升高趋势(图 2),即退耕 7 a<耕地<退耕 18 a<退耕 35 a<退耕 45 a,与 TOC 含量变化一致。退耕 7 a 的 SOC 含量低于耕地初始值,这是由于弃耕减少了土地管理和肥料投入,植物生长从土壤吸收消耗的有机碳含量大于输入土壤的含量。退耕 18 a 后,随着地表植被和物种丰富度增加,恢复草地自身植被和凋落物等残体的分解能满足其养分循环需求,因此输入土壤的碳含量大于植物消耗^[17],最终使土壤总有机碳含量、团聚体有机碳和活性有机碳含量逐步增加,丰富了土壤碳库。团聚体对碳的保护能力因其粒径大小而异^[1,5]。本研究中,SOC 主要存在于>0.25 mm 的大团聚体中(图 2),与前人研究结果类似^[24,26]。草地系统中枯枝落叶和微生物代谢所需的碳氮等养分首先在大团聚体(>0.25 mm)中积累,因此 SOC 浓度较高^[1,27];而微团聚体(<0.25 mm)的形成依赖于大团聚体的分解,对新鲜有机质保护弱,SOC 含量低于大团聚体^[5,28]。

活性有机碳组分能有效反映土壤中有机物质的转化速率和碳库稳定性^[15]。本研究中,土壤团聚体 LOC-H 和 LOC-M 与团聚体 SOC 变化规律相似(图 2),说明团聚体中这 3 种碳组分密切相关。华娟等^[29]人对宁夏云雾山草原区的相关研究也得出类似结论,即土壤团聚体中活性有机碳含量与有机碳含量呈极显著线性正相关关系。本研究发现,LOC-H 和 LOC-M 含量随团聚体粒级降低有减少趋势,LOC-L 则相反(图 2)。以上结果证明,团聚体尺寸是土壤活性有机碳库稳定和转化的主要限制因素。大团聚体可保护植物根系、微生物菌丝及其分泌物等高、中活性有机物质^[30],避免被氧化;而微团聚体中与矿物结合的多糖等低活性有机碳组分稳定^[30],其碳周转率比大团聚体中的高、中活性有机物质慢^[31-32]。

3.3 土壤理化性质与活性有机碳组分的关系

总体上看,退耕还草对土壤碳库活度影响不大(图 3),总碳库增加的碳以非活性有机碳为主,土壤碳库质量得以维持并提升。虽然退耕还草过程碳库活度变化不明显,但由于活性有机碳对外界环境有较

强的敏感性^[15-16],导致高、中和低活性有机碳分布发生显著变化(图 4)。退耕初期(7 a)和中期(18 a),草地恢复在一定程度上促进 LOC-M 向 LOC-L 转化,降低土壤活性有机碳迁移,进而增强草地土壤储碳能力。但退耕还草中后期(35,45 a),植被组成趋于稳定,大量凋落物的归还导致细根及其分泌物显著增加,由此显著促进土壤中等活性有机碳组分 LOC-M 的累积^[33]。土壤碳库活度及活性有机碳组分的变化与土壤营养元素、pH 和团聚体稳定性的相关性较强(图 5)。碳氮磷元素作为土壤的养分元素,对碳固存起重要作用;各粒级团聚体含量变化能改变土壤孔隙结构,进而影响碳的固持和周转;土壤 pH 值对微生物活性影响较大,在一定程度上控制碳的周转速率^[34]。

在团聚体尺度,TOC 和 DOC 是影响 LOC-H 的主要因素,TN 是影响 LOC-M 的主要因素(表 3)。以往研究表明^[13,14,27],土壤有机碳与高活性有机碳通常呈显著正相关,与本研究结果一致;同时姚旭等^[13]研究发现,团聚体的中活性有机碳对短期氮添加响应最为敏感。团聚体 LOC-H,LOC-M 含量与土壤 pH 显著负相关(表 2),这可能是由于黄土高原退耕还草后期(45 a)pH 的显著降低($p<0.05$,表 1)减缓了微生物生长速率,抑制土壤有机物分解^[35-36],导致 LOC-H,LOC-M 含量上升。土壤团聚体水稳定性指数(MWD,GMD,WSA)和 TP 含量是影响团聚体 LOC-L 分布的重要指标(表 3)。低活性有机碳包括颗粒有机碳、糖、脂类等有机化合物及部分复杂化合物,与团聚体的形成和稳定密切相关^[1,32]。因此,团聚体稳定性越强,土壤对碳的保持能力越高。本研究中,团聚体 LOC-L 与 TP 含量呈负相关(表 2),这可能与土壤微生物养分代谢限制存在关联。由于退耕还草后土壤 TOC,TN 含量显著增加,但 TP 含量增幅不大(表 1),导致土壤磷利用率低,微生物代谢易受到磷限制^[37]。研究表明,在黄土高原等土壤磷利用率低的生态系统中,微生物磷限制会促进土壤碳固存^[38],有助于团聚体对低活性有机碳的进一步积累。

4 结论

- (1) 退耕还草促进<0.25 mm 粒级团聚体向 5~2 mm 和 2~0.25 mm 粒级转变,显著提高团聚体 MWD,GMD 和 WAS 指数,土壤结构趋于稳定。
- (2) 草地恢复维持并提升土壤碳库质量,促进中

活性有机碳向低活性有机碳转化,降低土壤活性有机碳的迁移,提升生态系统保碳增汇能力。

(3) 随退耕年限增加,团聚体有机碳和活性有机碳呈先降低后升高趋势,其含量积累受团聚体尺寸的影响,土壤有机碳、高活性有机碳、中活性有机碳主要存在于 $>0.25\text{ mm}$ 粒级团聚体中,低活性有机碳主要存在于 $<0.25\text{ mm}$ 粒级。

(4) 逐步回归分析表明,退耕还草引起的土壤理化性质改变是团聚体活性有机碳组分变化的主要原因,影响团聚体高活性有机碳的主要因素为土壤有机碳和可溶性有机碳,土壤全氮影响中活性有机碳含量,而低活性有机碳受土壤全磷影响。综上所述,土壤结构和营养元素的综合效应共同决定活性有机碳在团聚体中的分布,研究结果对系统地了解黄土高原植被恢复过程土壤团聚体固碳机制具有重要参考意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Mustafa A, Xu M G, Shah S A A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China [J]. Journal of Environmental Management, 2020,270:110894.
- [3] Rabot E, Wiesmeier M, Schluter S, et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review [J]. Geoderma, 2018,314:122-137.
- [4] 刘中良,宇万太.土壤团聚体中有机碳研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(2):447-455.
- [5] 潘根兴,陆海飞,李恋卿,等.土壤碳固定与生物活性:面向可持续土壤管理的新前沿[J].地球科学进展,2015,30(8):940-951.
- [6] Wilpiszeski R L, Aufrecht J A, Retterer S T, et al. Soil aggregate microbial communities: towards understanding microbiome interactions at biologically relevant scales [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2019,85(14):e00324-19.
- [7] Kukul S S, Bawa S S. Soil organic carbon stock and fractions in relation to land use and soil depth in the degraded Shiwaliks hills of lower Himalayas [J]. Land Degradation & Development, 2014,25(5):407-416.
- [8] Zhong Z K, Wu S J, Lu X Q, 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.
- [9] 靳小莲,赵巍,李梦迪,等.黄土高原退耕还草土壤水分对植物地上部化学计量特征的影响[J].水土保持研究,2022,29(2):57-63.
- [10] 胡磊,余冬立,杨震.晋西北黄土丘陵区小流域土壤团聚体稳定性及其分异特征[J].水土保持研究,2022,29(1):72-77.
- [11] 曹培,徐莹,朱杰,等.不同种植模式对稻田土壤活性有机碳组分及产量的短期影响[J].生态学杂志,2019,38(9):2788-2798.
- [12] 王琳,李玲玲,高立峰,等.长期保护性耕作对黄绵土总有机碳和易氧化有机碳动态的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(9):1057-1063.
- [13] 姚旭,景航,梁楚涛,等.人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应[J].生态学报,2017,37(20):6724-6731.
- [14] 乔赵崇,王炯琪,赵海超,等.种植模式对冀西北坝上土壤活性有机质和碳库管理指数的影响[J].生态环境学报,2020,29(6):1139-1146.
- [15] Logninow W, Wisniewski W, Gonet S S, et al. Changes in soil carbon during the establishment of a hardwood plantation in subtropical Australia [J]. Polish Journal of Soil Science, 1987,20:47-52.
- [16] Ma Y, Cheng X Q, Kang F F, et al. Effects of thinning on soil aggregation, organic carbon and labile carbon component distribution in *Larix principis-rupprechtii* plantations in North China [J]. Ecological Indicators, 2022,139:108873.
- [17] 潘英杰,何志瑞,刘玉林,等.黄土高原天然次生林植被演替过程中土壤团聚体有机碳动态变化[J].生态学报,2021,41(13):5195-5203.
- [18] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986,50(3):627-633.
- [19] Kemper W D. Aggregate stability and size distributions [M]. Madison: American Society of Agronomy, 1986.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [21] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen(DON) and dissolved organic carbon(DOC) in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006,38(5):991-999.
- [22] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions [J]. Science, 2022,377(6606):603-608.
- [23] 王兴,钟泽坤,张欣怡,等.长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J].环境科学,2020,41(5):2416-2424.
- [24] 李柏桥,付玉,李光录,等.退耕年限与方式对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):238-244.
- [25] 何绍浪,黄尚书,钟义军,等.耕作深度对红壤坡耕地土壤水稳性团聚体特征的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):127-132.
- [26] Cheng X Q, Han H R, Zhu J, et al. Forest thinning and organic matter manipulation drives changes in soil respiration in a *Larix principis-rupprechtii* plantation in China [J]. Soil & Tillage Research, 2021,211:104996.

- [27] 梁彩群, 刘国彬, 王国梁, 等. 黄土高原人工刺槐林土壤团聚体中不同活性有机碳从南到北的变化特征[J]. 环境科学学报, 2020, 40(3): 1095-1102.
- [28] Soinne H, Hyvaluoma J, Ketoja E, et al. Relative importance of organic carbon, land use and moisture conditions for the aggregate stability of post-glacial clay soils [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 158: 1-9.
- [29] 华娟, 赵世伟, 张扬, 等. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4613-4619.
- [30] Haynes R J, Beare M H. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1997, 29(11/12): 1647-1653.
- [31] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1367-1377.
- [32] Segoli M, De Gryze S, Dou F, et al. AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies [J]. *Ecological Modelling*, 2013, 263: 1-9.
- [33] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413.
- [34] 张富荣. 植被恢复对土壤有机碳固存及其周转速度的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [35] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3591.
- [36] Zeng Q C, Liu D, An S S. Decoupled diversity patterns in microbial geographic distributions on the arid area (the Loess Plateau) [J]. *Catena*, 2021, 196: 104922.
- [37] Xu M P, Li W J, Wang J Y, et al. Soil ecoenzymatic stoichiometry reveals microbial phosphorus limitation after vegetation restoration on the Loess Plateau, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 815: 152918.
- [38] Cui Y X, Moorhead D L, Wang X X, et al. Decreasing microbial phosphorus limitation increases soil carbon release [J]. *Geoderma*, 2022, 419: 115868.

(上接第 233 页)

- [28] Bi S B, Qiu X K, Wang G J, et al. Spatial distribution characteristics of drought disasters in Hunan Province of China from 1644 to 1911 based on EOF and REOF methods [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(16): 533.
- [29] Xu X R, Tian H Y, Tian W S, et al. The spatiotemporal patterns of the upper-tropospheric water vapor over the Tibetan plateau in summer based on EOF analysis [J]. *Journal of Climate*, 2022, 35(15): 5033-5051.
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [31] 刘慧媛, 邹磊, 邢万里. 1961—2018 年海河流域极端降水时空演变特征 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(12): 1-6.
- [32] 任建成, 王峰, 卢晓宁. 基于 EOF 和小波分析的山东省年降水时空变化特征 [J]. *水土保持研究*, 2022, 29(2): 179-183.
- [33] 南庆红, 杨舵, 杨青. 应用 EOF 方法分析新疆降水变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2003(5): 78-83.

(上接第 240 页)

- [23] Du S, Wang Y L, Kume T, et al. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 1-10.
- [24] Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, et al. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(9): 951-960.
- [25] Meinzer F C, James S A, Goldstein G. Dynamics of transpiration, sap flow and use of stored water in tropical forest canopy trees [J]. *Tree Physiology*, 2004, 24(8): 901-909.
- [26] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics (Second Edition) [M]. New York: Springer, 1998.
- [27] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [28] 种培芳. 荒漠植物红砂、白刺和沙拐枣抗旱指标及抗旱性综合评价研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [29] Kozłowski T T. Water deficit and plant growth. Vol. 1. Development, control and measurement [M]. New York, London: Academic Press, 1968.