

黄土高原坝地深层土壤有机碳稳定性研究

周仕轩¹, 夏彬², 郝旺林², 张佐源³, 许明祥^{1,2,3}, 梁银丽^{1,2}

(1.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: 淤地坝作为黄土高原重要的碳储库,其深层土壤有机碳稳定性在很大程度上影响坝地土壤储碳能力和碳排放。以黄土丘陵区不同利用年限的坝地为对象,从坝地剖面土壤有机碳含量及其组分入手,研究不同利用年限、不同沉积深度下,土壤有机碳含量及其稳定性的变化特征和影响因素。结果表明:(1)坝地深层土壤有机碳(SOC)含量低于该区坡耕地表层土壤有机碳含量,并未呈现明显的有机碳富集现象。随利用年限增加,坝地 SOC 含量呈增加趋势。(2)不同利用年限坝地的 SOC、易氧化碳(EOC)、微生物量碳(MBC)、水溶性碳(DOC)含量呈现出明显的表聚现象。MBC、DOC 和 EOC 含量在土壤 0—60 cm 内较高。(3)相较于坝地浅层土壤而言,坝地深层土壤有机碳具有较高的稳定性,长期耕作会降低坝地深层土壤有机碳稳定性。(4)坝地浅层和深层土壤有机碳稳定性变化的主导因素不同。浅层土壤有机碳稳定性主要受土层深度、有机碳含量和黏粒含量的影响,分别能解释其变异的 50.4%,19.6%和 11.8%;深层土壤有机碳稳定性主要受有机碳含量、土壤含水量和利用年限的影响,分别能解释其变异的 38.9%,33.9%和 11.8%。

关键词: 黄土高原; 淤地坝; 土壤有机碳; 活性有机碳; 有机碳稳定性

中图分类号: S152.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)04-0284-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.035

Stability of Deep Soil Organic Carbon of Dam Land on the Loess Plateau

ZHOU Shixuan¹, XIA Bin², HAO Wanglin²,

ZHANG Zuoyuan³, XU Mingxiang^{1,2,3}, LIANG Yinli^{1,2}

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling,

Shaanxi 712100; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: As an important carbon reservoir in the Loess Plateau, the stability of soil organic carbon in the deep layer of silt dam greatly affects soil carbon storage capacity and carbon emission. In this study, the soil organic carbon content and its components of the silt dam profile in loess hilly-gully region were investigated to study the variation characteristics and influencing factors of soil organic carbon content and its stability under different utilization years and different deposition depths. Results demonstrated that: (1) Soil organic carbon (SOC) content in the deep layer of the dam was lower than that in the surface layer of the sloping farmland, and there was no obvious organic carbon enrichment phenomenon. The SOC content of dam land increased with the increasing of utilization years. (2) The contents of SOC, EOC, MBC and DOC in the dam land with different utilization years showed obvious surface aggregation phenomenon. The content of MBC, DOC and EOC was higher in 0—60 cm soil layer. (3) Compared with the shallow soil, the SOC in the deep layer of the dam had higher stability, long-term tillage in dam would reduce the stability of SOC in deep soil. (4) The dominant factors affected SOC stability in shallow and deep soils were different. The stability of shallow SOC was mainly affected by soil depth, organic carbon content and clay content, which could explain 50.4%, 19.6% and 11.8% of the variation, respectively. The stability of deep SOC was mainly affected by

收稿日期:2022-01-07
资助项目:国家自然科学基金项目(41771318,42177345)
第一作者:周仕轩(1996—),男,硕士研究生,主要从事土壤有机碳稳定性研究。E-mail: zsx2019@nwfufu.edu.cn
通信作者:许明祥(1972—),男,研究员,主要从事侵蚀环境土壤质量演变及调控研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn
梁银丽(1957—),女,研究员,主要从事植物生理生态研究。E-mail: liangyl@ms.iswc.ac.cn

organic carbon content, soil water content and utilization years, which could explain 38.9%, 33.9% and 11.8% of the variation, respectively.

Keywords: the Loess Plateau; dam land; soil organic carbon; activated organic carbon; organic carbon stability

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳储库,其微小的变化就可能造成巨大的碳排放,土壤有机碳稳定性在很大程度上影响土壤固碳能力,改变土壤碳排放过程,进而引起全球气候变化^[1-2]。因此,理解土壤有机碳稳定性时空变化特征对于预测碳排放、优化土壤碳库管理、提升土壤碳汇功能有重要意义^[3]。

土壤有机碳抵抗干扰和分解的能力被称为有机碳的稳定性,通常用易氧化有机碳分配比例表征有机碳的非稳定性,易氧化有机碳占比越高,表示有机碳稳定性越差^[4]。土壤有机碳稳定性是水分、温度、通气性、微生物量、有机碳组分等多因素综合作用的结果,即有机碳的稳定性随土壤环境改变^[1]。商素云等^[5]研究表明,植被类型、管理模式、耕作方式对有机碳稳定性也有显著影响,其中管理模式和耕作方式对有机碳稳定性的影响不仅有直接作用,也有通过环境条件改变引起的间接作用。然而,当前对处在沉积环境的坝地土壤,尤其是坝地深层土壤,由于其独特的形成环境和水热特征,该地土壤有机碳稳定性如何变化,沉积的有机碳能否长期稳定存在,其稳定性受哪些因素控制,对于这些问题的认识还非常有限。

黄土高原是我国乃至全球土壤侵蚀最严重的地区之一,截至2015年,已建成淤地坝超过10万座,陕西地区约有4万余座^[6]。以碾庄沟流域为例,据调查^[7-8],该地过去54年间共建成192座淤地坝,累计拦蓄泥沙3 230万m³,贮存有机碳约173 133 t,是黄土高原重要的碳储库。本研究以黄土丘陵区典型流域坝地土壤为对象,从坝地剖面土壤水热通气性、有机碳含量及其组分入手,研究不同利用年限、不同沉积深度下土壤有机碳稳定性时空变化特征和影响因素。该研究对于厘清侵蚀沉积作用下的碳源碳汇效应、评价和预测侵蚀沉积作用下坝地土壤固碳潜力及制定坝地土壤固碳减排调控有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在陕西省延安市安塞区的方塌沟流域(109°15′32″E,36°47′49″N)、羊圈沟流域(109°04′31″E,36°50′20″N)、赵桥流域(109°05′82″E,36°51′46″N)和董家沟流域(109°04′26″E,36°50′08″N)等多个小流域内进行。研究区地处黄土高原中部,地形地貌复杂,平均海拔1 371.9 m。气候类型属于中温带半干旱季

风气候,全年平均气温8.8℃,极端最高气温36.8℃,极端最低气温-23.6℃,昼夜温差大,多年平均降水量505 mm,其中7—9月的降水量约占全年降水量的61%^[9]。研究地区土壤以黄绵土为主,抗侵蚀性差,加上人为活动的长期干扰,使得植被退化,水土流失严重。近二十年,随着生态恢复与重建,植被盖度已达到60%以上,水土流失显著减少^[10]。该区常见的植被类型有以刺槐为主的人工林,以柠条和沙棘等为主的人工林灌丛及封禁后形成的黄刺玫、丁香、虎棒子和狼牙刺等天然灌丛。

1.2 样地选择与样品采集

通过走访调查和查阅资料,了解安塞区淤地坝建设年限和利用情况。选择建设年限分别为20年、30年、40年、50年和60年的淤地坝(作为农耕地利用年限分别为0年、10年、30年、40年和50年),以反映不同沉积年限下坝地剖面土壤有机碳稳定性演变特征。各年限选取种植作物相同(玉米)、管理模式相似、田块面积相近、两侧坡地作物相同(刺槐、沙棘、柠条)的具有代表性的重复样地4块。

已有的土壤固碳研究主要针对100 cm内的土壤展开,但地表100 cm的土壤常受耕作扰动和作物根系的影响,因此本研究将0—100 cm作为浅层,100 cm以下作为深层。根据坝地的走向分前、中、后,每个样地居中选取前后2个采样点,用直径5 cm的土钻分层采集0—600 cm土样,其中0—100 cm每20 cm为1层,100—600 cm每50 cm为1层。同层2次重复的混合样为1个分析样,20块样地共得300份土壤样品。取样后除去土壤杂质,用四分法取部分土壤,分成2份:一份直接过2 mm筛后置于4℃保温箱中,用于土壤微生物量碳和水溶性碳的测定;另一份风干后测定土壤理化性质和有机碳组分。在采样同时,利用温湿度计测量每层土壤温度(℃)和含水量(v/v)。

1.3 测定指标与方法

土壤有机碳(SOC)含量采用重铬酸钾外加热法^[11]测定,土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸浸提法^[12]测定,易氧化有机碳(EOC)采用KMnO₄氧化法^[4]测定,水溶性有机碳(DOC)采用K₂SO₄浸提法测定^[13]。土壤质地采用英国马尔文公司的激光粒度仪(Mastersizer-2000)测定。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2016进行数据预处理和图表

绘制。使用 SPSS 26.0 统计软件(IBM Corp.)对不同利用年限下各土层 SOC、MBC、EOC 含量以及 MBC/SOC 和 EOC/SOC 比例进行 ANOVA 分析,采用一般线性模型(GLM)中的方差成分估计模块来计算坝地土壤有机碳含量、土壤温湿度、土层、颗粒组成和利用年限在易氧化碳分配比例变异(方差)中所占的百分比。

2 结果与分析

2.1 坝地剖面土壤有机碳分布特征

研究区坝地 0—600 cm 剖面土壤有机碳含量为 1.22~8.20 g/kg。SOC 含量在坝地剖面上呈现明显

的表聚现象,0—20 cm SOC 含量最高(4.64 g/kg),在 20—60 cm SOC 含量降幅较大,60—600 cm 变化较小且含量较低(图 1)。对于浅层土壤(0—100 cm),不同利用年限的坝地之间 SOC 含量无显著差异($p>0.05$);深层土壤(100—600 cm)SOC 含量随利用年限的增加呈逐渐增大趋势,利用 50 年的坝地 SOC 含量显著大于其他年限($p<0.05$)(图 2)。在利用年限不超过 10 年的坝地中,浅层 SOC 含量显著大于深层($p<0.05$),利用年限超过 10 年的坝地浅层与深层 SOC 含量差异不显著($p>0.05$)。

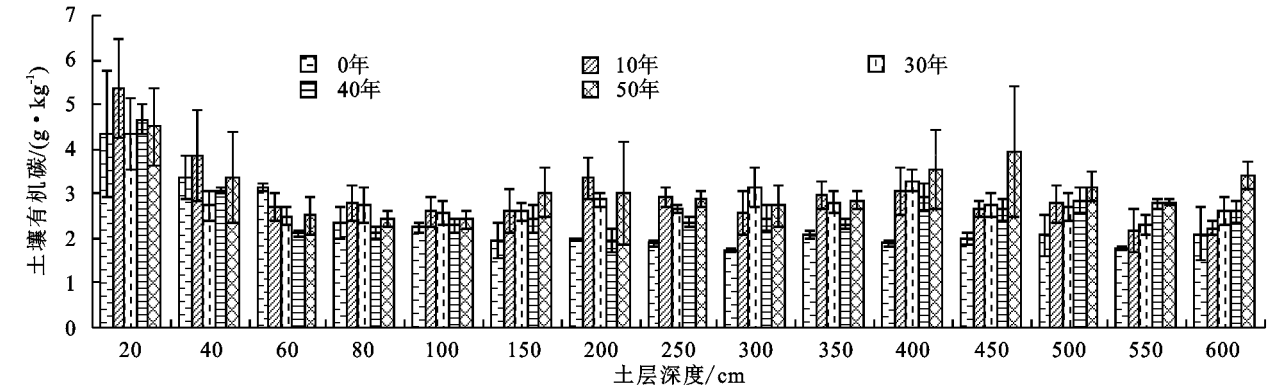
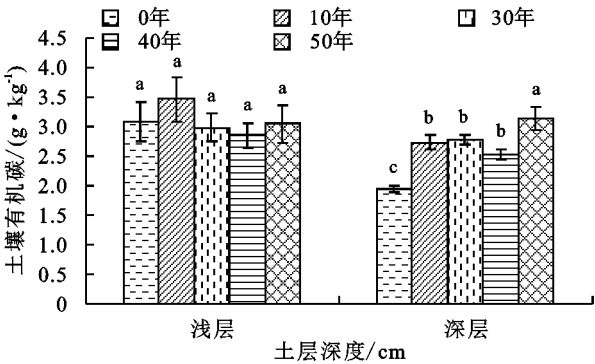


图 1 不同利用年限坝地土壤有机碳含量在土壤剖面上的分布



186.23 mg/kg,在 0—20 cm 处最高,随土层深度增加而减小,60—600 cm 土壤 MBC 含量趋于稳定(图 3)。土壤 MBC 主要集中在表层 0—60 cm。无论是在浅层(0—100 cm)还是深层(100—600 cm)土壤,MBC 含量随坝地利用年限的增加并没有明显的变化规律(图 4)。

坝地 0—600 cm 剖面土壤 DOC 含量为 5.80~55.08 mg/kg,0—20 cm 土层的 DOC 含量显著高于其他土层($p<0.05$),60—600 cm 的 DOC 含量相对稳定,DOC 主要集中在表层 0—60 cm(图 5)。在浅层(0—100 cm)土壤中 DOC 含量随坝地利用年限增加呈升高趋势($p>0.05$);深层(100—600 cm)土壤中,未耕作利用的坝地(0 年)DOC 含量显著小于其他坝地($p<0.05$)(图 6)。

注:图中不同字母表示相同土层不同利用年限间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同土层土壤有机碳含量

2.2 坝地剖面活性有机碳的分布特征

坝地 0—600 cm 剖面土壤 MBC 含量为 4.68~

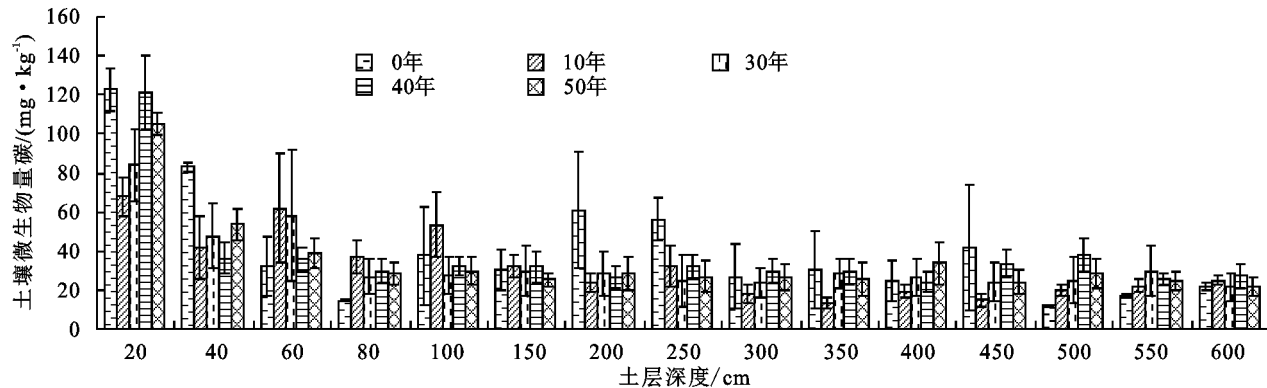


图 3 不同利用年限坝地土壤微生物量碳含量在土壤剖面上的分布

坝地 0—600 cm 剖面上 EOC 含量为 0.02~0.90 g/kg,0—20 cm 土层 EOC 含量显著高于其他土层,

60—600 cm 土壤 EOC 含量相对稳定,EOC 主要集中在 0—60 cm(图 7)。随着坝地利用年限的增加,浅层土壤(0—100 cm)EOC 含量无显著变化($p>0.05$),而深层土壤(100—600 cm)EOC 含量呈增加趋势,其中利用 50 年的坝地 EOC 含量显著高于其他年限($p<0.05$)(图 8)。

2.3 土壤活性碳与总有机碳的比例关系

浅层土壤 EOC/SOC 为 5.33%~6.41%,高于深层 EOC/SOC(4.61%~6.03%)(表 1)。随着利用年限的增加,浅层土壤 EOC/SOC 相对稳定,而深层土壤 EOC/SOC 呈现出增加的趋势,其中利用 40 年的坝地显著高于利用年限小于 40 年的坝地($p<0.05$)。浅层土壤微生物熵(微生物量碳与有机碳的比值)为 1.65%~1.81%,深层土壤微生物熵为 0.88%~1.68%,

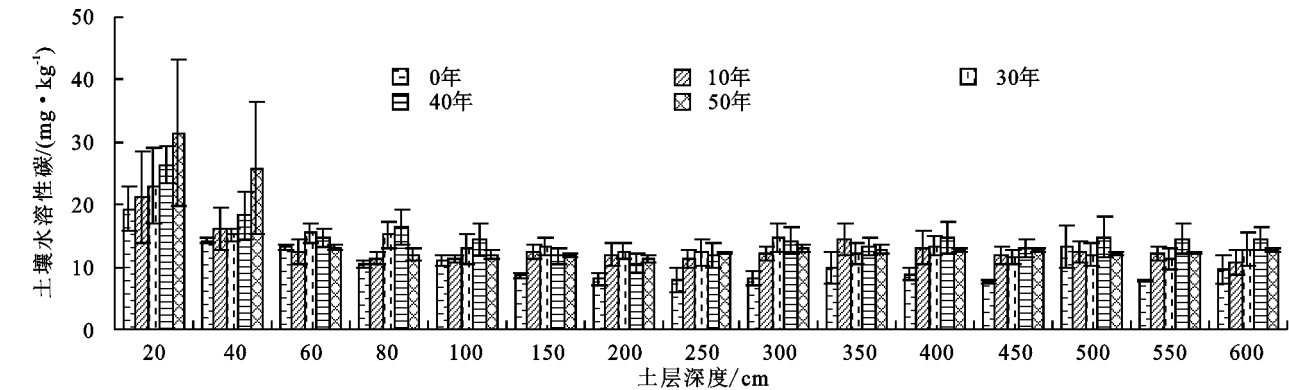


图 5 不同土地利用年限坝地土壤水溶性碳含量在土壤剖面上的分布

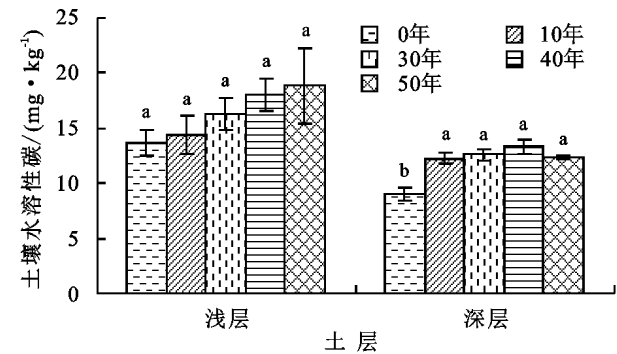


图 6 不同土层土壤水溶性碳含量

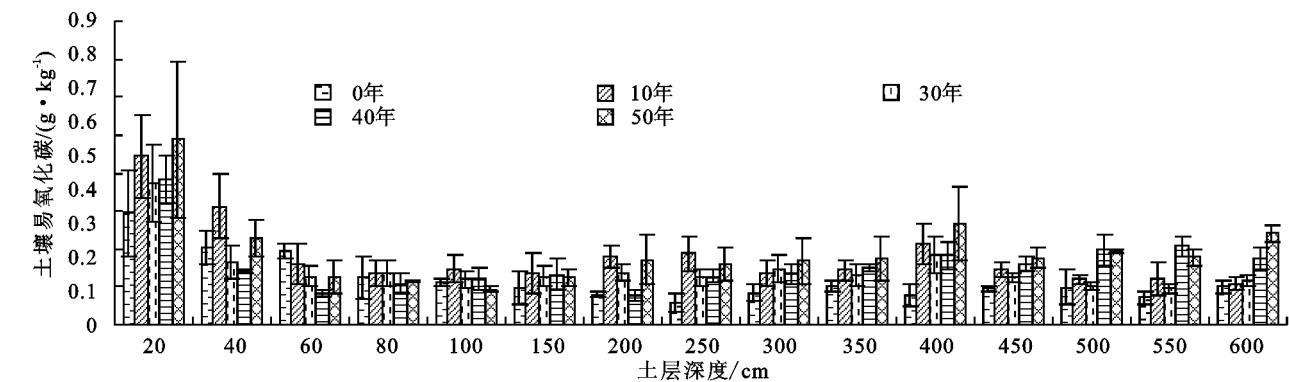


图 7 不同土地利用年限坝地土壤易氧化有机碳含量在土壤剖面上的分布

3 讨论

土壤侵蚀普遍存在,全球每年因土壤侵蚀而发生迁移的有机碳可达 4~6 Pg^[14]。黄土高原是全球水

浅层微生物熵显著高于深层($p<0.05$)。随着利用年限的增加,浅层土壤微生物熵没有显著变化,而深层土壤微生物熵呈减小趋势。

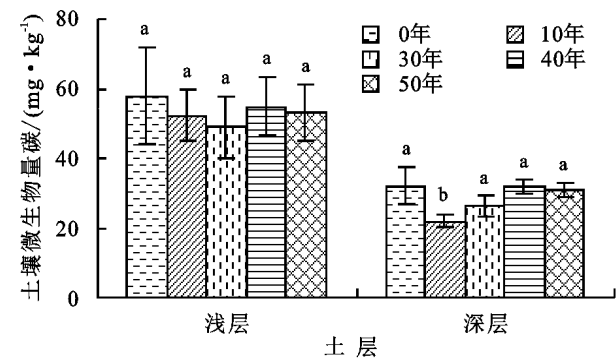


图 4 不同土层土壤微生物量碳含量

2.4 坝地土壤有机碳稳定性影响因素

各因子对坝地浅层和深层土壤 EOC/SOC 的影响不同(表 2)。在浅层土壤 EOC/SOC 主要受土层深度和有机碳含量的影响,可分别解释 50.4%和 19.6%的变异性,黏粒含量和土壤含水量影响也较大,可解释 11.8%和 10.6%的变异性,土壤温度和利用年限影响较小。在深层土壤 EOC/SOC 变异的主要影响因素是有机碳含量和土壤含水量,可分别解释 38.9%和 33.9%的变异性,利用年限和土壤温度可分别解释 11.8%和 8.5%的变异性,而土层和黏粒含量影响较小。

土流失最严重的地区之一,每年流失的土壤可高达 16 亿 t^[15]。我国自 20 世纪 50 年代开始进行淤地坝建设,截至 2002 年底,黄土高原淤地坝拦泥 210 亿

m³,增加碳储量约 0.123 Gt,约为美国每年沉积泥沙有机碳储量的 3 倍^[7]。可见,黄土高原淤地坝土壤有机碳是沉积环境土壤有机碳固存的重要形式,是区域碳循环中不可忽略的一部分。

淤地坝土壤的形成过程和机制与原始成土过程明显不同,主要表现为次降雨侵蚀泥沙沉积形成的层状结构土壤,淤地坝中埋藏的土壤主要从两侧的坡耕地迁移而来,其土壤有机碳含量主要与该区域气候条件、侵蚀特征及坡地土壤肥力相关^[14]。本研究中淤地坝 SOC 含量均值为 2.83 g/kg,有机质均值为 4.81 g/kg 低于研究区内坡耕地表层土壤有机质含量 6.15 g/kg^[16]。因为在土壤水蚀过程中,暴雨的冲击破坏部分土壤团聚体及有机碳表面的聚合物,从而影响团聚体对有机碳的物理保护作用,约有 10%~20% 的侵蚀碳被矿化分解;另一部分土壤有机质在侵蚀及其搬运过程中可能不会发生氧化作用^[17-18]。在淤地坝形成过程中,当侵蚀坡面形成细沟和浅沟时,极可能带走 5—30 cm 处 SOC 含量较低的土壤,而后在侵蚀位移和沉积过程中与表层富含 SOC 的土壤混合,这也会导致坝地 SOC 含量较该区坡耕地耕层偏低^[19]。

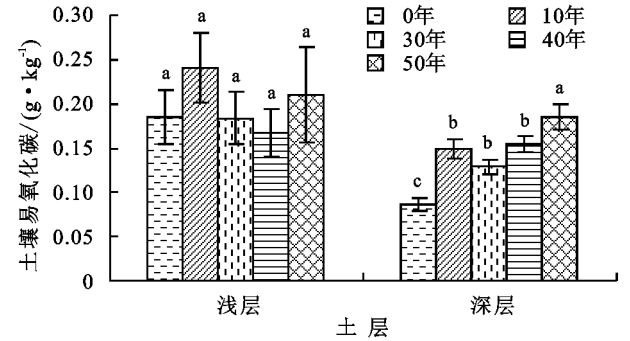


图 8 不同土层的土壤易氧化有机碳含量

表 1 不同土地利用年限下 EOC/SOC 和 MBC/SOC 比例
单位: %

利用 年限/a	EOC/SOC		MBC/SOC	
	0—100 cm	100—600 cm	0—100 cm	100—600 cm
0	6.35±1.08a	4.66±0.47c	1.81±0.42a	1.68±0.27a
10	6.41±0.47a	5.31±0.25bc	1.67±0.31a	0.88±0.07c
30	5.65±0.44a	4.61±0.20c	1.65±0.29a	1.01±0.13bc
40	5.33±0.43a	6.03±0.28a	1.66±0.16a	1.22±0.08b
50	6.12±0.75a	5.91±0.29ab	1.66±0.17a	0.93±0.09bc

注:表中数据为平均值±标准误;同列不同字母表示相同土层不同利用年限间差异显著($p<0.05$)。

坝地利用年限对 SOC 含量及活性有一定的影响。一方面耕作利用过程中,有机肥投入、农作物根系分泌物和根系分解物影响上层土壤有机碳含量及组分;另一方面,在降雨淋溶作用下,其影响会延伸至深层。本研究中,坝地 0—20 cm 的 SOC 含量显著高于其他土层。在浅层土壤中,不同年限 SOC 含量有

一定降低趋势,但并不显著,表明耕作管理引起的碳输入(有机肥投入、根系残差等)与碳输出(耕作引起的有机碳矿化、淋溶等)基本平衡^[20]。在深层土壤中,随利用年限的增加,SOC 含量呈增大趋势,可能因为坝地常发生季节性淹水,土壤含水量较大而通气性差,减缓了深层 SOC 的矿化;同时,上层 SOC 的淋溶作用一定程度上增加了深层 SOC 的积累^[21-22]。土壤活性有机碳是有机碳中最活跃的部分,其对环境因子变化最为敏感,可以指示有机碳的动态变化^[23]。受耕作活动的影响,坝地土壤 MBC、DOC 和 EOC 主要集中在 0—60 cm。由于淤地坝在耕作利用前长期处于淹水状态促进活性有机碳均质化分布,因此活性有机碳在 60—600 cm 土层分布比较均匀^[24]。

表 2 不同因子在坝地浅层和深层土壤 EOC/SOC 变异
(方差)中的贡献

方差来源	浅层		深层	
	方差	方差百分比/%	方差	方差百分比/%
土层深度	0.358	50.4	0.011	1.4
土壤含水量	-0.075	10.6	0.261	33.9
土壤温度	0.021	3.0	0.065	8.5
有机碳含量	0.139	19.6	-0.299	38.9
利用年限	-0.033	4.6	0.091	11.8
黏粒含量	-0.084	11.8	-0.042	5.5
粉粒含量	0	0	0	0

有机碳稳定性主要是由有机碳的组分构成及其与土壤环境的相互作用决定的^[3]。耕作利用改变坝地土壤剖面易氧化有机碳的分配比例,进而可能在一定程度上改变坝地土壤有机碳的稳定性。随着利用年限增加,浅层土壤 EOC/SOC 没有显著变化,深层土壤 EOC/SOC 整体呈增加趋势,且浅层 EOC/SOC 显著高于深层,表明坝地深层土壤有机碳比浅层土壤具有更高的稳定性。可能是因为坝地的耕作管理增加通气性和外来碳源输入,浅层土壤中活性碳组分增多,且增强 SOC 的淋溶作用使小分子易溶解的碳组分向深层土壤迁移并积累^[13]。随着利用年限的增加,利用超过 30 年的坝地深层土壤 EOC/SOC 显著升高(表 1),这可能与上层土壤活性有机碳淋溶作用的累积效应有关,这与张帅等^[4]和张宏等^[25]的研究相比,坝地浅层和深层土壤 EOC/SOC 比林地和草地低,表明坝地浅层和深层 SOC 相对研究区内的草地和林地具有更高的稳定性。党亚爱等^[26]研究表明,黄土高原同一土壤类型 MBC/SOC 均随土层深度增加呈下降趋势,且达一定深度后趋于稳定。与本研究结果相同,坝地土壤浅层微生物熵均比深层大,因为微生物主要集中在表层土壤,且沿剖面变化幅度比有机碳大。

影响土壤有机碳稳定性的因素主要分为自然因

素和人为因素^[3]。坝地土壤因其独特的成土过程和所处的环境条件,剖面浅层和深层 SOC 稳定性的影响因素表现出明显差异。不同利用方式的土壤有机碳稳定性的影响因素也有差异,如廖丹等^[27]研究发现,水稻土有机碳稳定性主要受颗粒组成、全氮、pH 影响;高雨等^[28]研究表明,对于森林土壤,有机碳稳定性主要受 pH、黏粒含量、有机碳含量的影响;吴旭东^[29]研究发现,荒漠土壤有机碳稳定性主要受黏粒和粉粒成分影响;霍莉莉^[30]研究发现,沼泽湿地有机碳稳定性主要受土壤含水量、土地利用方式和土壤温度影响。本研究中,坝地浅层 SOC 稳定性的主要影响因素是土层深度和有机碳含量。土壤表层经常受到耕作的影响,0—20 cm 处通气性好,有丰富的植物残体,活性有机碳较多,但是随着土层深度的增加,土壤通气性变差,水分增大,受耕作影响减小,活性有机碳较少,更有利于有机碳的稳定。深层 SOC 稳定性的主要影响因素与浅层有所不同,分别为土壤湿度、有机碳含量和利用年限。深层土壤受到的扰动较小,随着利用年限及土壤湿度的增加,土壤淋溶作用引起碳组分的向下迁移积蓄一定量的活性有机碳,土壤压实作用导致通气性差^[31],一定程度上能够影响微生物的活性,同时黏粒的颗粒结构能够吸附更多的有机碳聚集,一定程度上黏粒含量的增加增大 EOC 的含量。

4 结 论

(1)坝地深层土壤有机碳含量低于该区坡耕地表层土壤有机碳含量,并未呈现明显的有机碳富集现象。随着利用年限的增加,坝地 SOC 含量呈增加趋势。

(2)不同利用年限坝地的 SOC、EOC、MBC、DOC 含量均呈现出明显的表聚现象,MBC、DOC 和 EOC 含量在土壤 0—60 cm 内较高。

(3)相较于坝地浅层土壤而言,坝地深层土壤有机碳具有较高的稳定性,长期耕作会降低坝地深层土壤有机碳稳定性。

(4)坝地浅层和深层土壤有机碳稳定性变化的主导因素不同。浅层土壤有机碳稳定性主要受土层深度、有机碳含量和黏粒含量的影响,可分别解释其变异的 50.4%、19.6%和 11.8%;深层土壤有机碳稳定性主要受有机碳含量、土壤含水量和利用年限的影响,可分别解释其变异的 38.9%、33.9%和 11.8%。

参考文献:

[1] Lal R. Accelerated soil erosion as a source of atmospheric CO₂[J].Soil and Tillage Research,2019,188:35-40.
[2] Nadeu E, Gobin A, Fiener P, et al. Modelling the impact of agricultural management on soil carbon stocks at

the regional scale: The role of lateral fluxes[J].Global Change Biology,2015,21(8):3181-3192.
[3] 吴庆标,王效科,郭然.土壤有机碳稳定性及其影响因素[J].土壤通报,2005,36(5):743-747.
[4] 张帅,许明祥,张亚锋,等.黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响[J].环境科学,2015,36(2):661-668.
[5] 商素云,姜培坤,宋照亮,等.亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性[J].生态学报,2013,33(2):416-424.
[6] 曲婵,刘万青,刘春春,等.黄土高原淤地坝研究进展[J].水土保持通报,2003,36(6):339-342.
[7] 李勇,白玲玉.黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J].水土保持学报,2003,17(2):1-4,19.
[8] Liu C, Li Z W, Dong Y T, et al. Do land use change and check-dam construction affect a real estimate of soil carbon and nitrogen stocks on the Loess Plateau of China? [J].Ecological Engineering,2017,101:220-226.
[9] 马听听,许明祥,杨凯.黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探[J].环境科学,2012,33(11):3893-3900.
[10] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J/OL]. Nature Communications,2017,8(1). DOI: 10.1038/s41467-017-02142-7.
[11] 鲍士旦.土壤农化分析方法[M].3 版.北京:中国农业科技出版社,2000:30-34.
[12] 林启美,吴玉光,刘焕龙.熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J].生态学杂志,1999,18(2):63-66.
[13] 姜培坤.不同林分下土壤活性有机碳库研究[J].林业科学,2005,41(1):10-13.
[14] Lü Y H, Sun R H, Fu B J, et al. Carbon retention by check dams: Regional scale estimation[J].Ecological Engineering,2012,44(1):139-146.
[15] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
[16] 许明祥.黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2003.
[17] 魏守才,张晓平,陈学文.土壤水蚀对土壤有机碳动态及全球碳循环平衡的影响[J].土壤与作物,2015,4(4):156-162.
[18] Jacinthe P A, Lal R. A mass balance approach to assess carbon dioxide evolution during erosional events [J]. Land Degradation and Development,2001,12(4):329-339.
[19] 赵龙山,侯瑞,吴发启.黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持,2017(9):47-51,67.
[20] 韩可欣,禹朴家,韩东亮,等.开垦年限对松嫩碱化草地土壤碳库的影响[J].土壤通报,2017,48(1):127-133.
[21] 刘国群,章明奎.利用方式与成土母质对金衢盆地土壤有机碳积累及其稳定性影响的研究[J].江西农业学报,2020,32(10):29-34.

- 春玉米产量影响研究[J].南昌工程学院学报,2017,36(1):37-41.
- [20] Wei C C, Li F H, Yang P L, et al. Effects of irrigation water salinity on soil properties, N_2O emission and yield of spring maize under mulched drip irrigation [J].Water,2019,11(8):e1548.
- [21] 王帅杰,杨培岭,苏艳平,等.微咸水与淡水轮灌对春玉米土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(10):41-48.
- [22] 杨培岭,王瑜,任树梅,等.咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J].农业机械学报,2020,51(6):273-281.
- [23] 陈丽娟,冯起,王昱,等.微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律[J].农业工程学报,2012,28(8):44-51.
- [24] 王艳娜,侯振安,龚江,等.咸水滴灌对土壤盐分分布、棉花生长和产量的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2007,25(2):158-162.
- [25] 王诗景,黄冠华,杨建国,等.微咸水灌溉对土壤水盐动态与春小麦产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(5):27-33.
- [26] 吴军虎,陶汪海,赵伟,等.微咸水膜下滴灌不同灌水量对水盐运移和棉花生长的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):272-276,329.
- [27] 商艳玲.不同滴头流量下再生水灌溉对土壤水分运移规律的影响[J].甘肃水利水电技术,2015,51(6):15-18.
- [28] 刘雪艳,丁邦新,白云岗,等.微咸水膜下滴灌对土壤盐分及棉花产量的影响[J].干旱区研究,2020,37(2):410-417.
- [29] 郭安安,王梦琴,王为木,等.微咸水滴灌对土壤水盐运移影响的研究[J].安徽农学通报,2019,25(12):118-121.
- [30] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等.咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J].农业机械学报,2017,48(10):220-228,201.
- [31] 侯振安,王艳娜,龚江,等.干旱区咸水滴灌土壤盐分的分布与积累特征[J].土壤通报,2008,39(1):16-24.
- [32] 贾春青,张瑞坤,陈环宇,等.滨海盐碱地地下水位对土壤盐分动态变化及作物生长的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2018,35(4):283-290.
- [33] 杨文杰,王振华,任作利,等.微咸水膜下滴灌对土壤水盐分布及加工番茄产量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(6):117-123,131.
- [34] 王海霞,徐征和,庞桂斌,等.微咸水灌溉对土壤水盐分布及冬小麦生长的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):291-297.
- [35] Li J G, Chen J, Jin J X, et al. Effects of irrigation water salinity on maize (*zea may* L.) emergence, growth, yield, quality, and soil salt[J].Water,2019,11(10):e2095.
- [36] 魏琛琛,任树梅,徐子昂,等.灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J].农业机械学报,2021,52(7):251-260.
- (上接第 289 页)
- [22] 周艳翔,吕茂奎,谢锦升,等.深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性[J].亚热带资源与环境学报,2013,8(1):48-55.
- [23] 万忠梅,郭岳,郭跃东.土地利用对湿地土壤活性有机碳的影响研究进展[J].生态环境,2011,20(3):567-570.
- [24] 肖烨,黄志刚,肖菡曦,等.不同水位时期东洞庭湖湿地土壤微生物生物量碳氮和酶活性变化[J].应用生态学报,2021,32(8):2958-2966.
- [25] 张宏,黄懿梅,安韶山,等.黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究[J].水土保持研究,2013,20(3):65-70.
- [26] 党亚爱,李世清,王国栋,等.黄土高原典型土壤有机碳和微生物碳分布特征的研究[J].自然资源学报,2007,22(6):936-945.
- [27] 廖丹,于东升,赵永存,等.成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究[J].土壤学报,2015,52(3):517-527.
- [28] 高雨,赵洪涛,郭银花,等.山西太岳山不同林龄油松林土壤有机碳稳定性的变化特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(10):46-55.
- [29] 吴旭东.沙漠化对草地植物群落演替及土壤有机碳稳定性的影响[D].银川:宁夏大学,2016.
- [30] 霍莉莉.沼泽湿地垦殖前后土壤有机碳垂直分布及其稳定性特征研究[D].吉林 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2013:67-99.
- [31] Zhang H C, Liu S G, Yuan W P, et al. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon[J].Journal of Geophysical Research: Biogeosciences,2016,121(6):1449-1455.