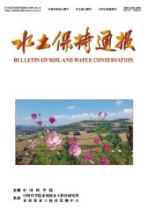


水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：淤地坝坝地有机碳空间分布及其对流域土地利用的响应
作者：孙睿哲，韩剑桥，李宗遥，刘子涵
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240522.001
收稿日期：2024-02-29
网络首发日期：2024-05-23
引用格式：孙睿哲，韩剑桥，李宗遥，刘子涵．淤地坝坝地有机碳空间分布及其对流域土地利用的响应[J/OL]．水土保持通报．https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240522.001

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240522.001　网络首发时间：2024-05-23 17:33:35
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.x.20240522.1044.002

淤地坝坝地有机碳空间分布及其对流域土地利用的响应

孙睿哲[1,2,3]，韩剑桥[1,2,3,4]，李宗遥[4]，刘子涵[4]

（1.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心，陕西 杨凌 712100；2.中国科学院 水利部 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；3.中国科学院大学，北京 100049；4.西北农林科技大学，水土保持科学与工程学院，陕西 杨凌 712100）

摘　要：［目的］淤地坝以直接拦截泥沙的方式治理水土流失，显著改变了土壤有机碳（SOC）的横向迁移过程。分析淤地坝坝地内 SOC 的空间分布特征及流域土地利用对坝地浅土层（0—200 cm）内 SOC 分布的影响，为淤地坝建设与流域生态环境协同发展提供科学依据。［方法］以岔巴沟流域内 3 个土地利用类型差异较大（草地、坡耕地、梯田面积占比不同）的小流域为对象，采用遥感解译、野外采样与室内测试相结合的方法，研究坝地 SOC 空间分布特征及坝地表土层 SOC 对土地利用的响应关系。［结果］①在垂直方向上，SOC 在表层土（0—20 cm）含量最高，并随土层深度增加快速降低，深层 SOC 含量变化较小，在 3.5 g/kg 上下浮动；②在顺水流方向上，因土壤侵蚀沉积特征等影响，SOC 在坝地中、后段含量较高；在平行坝体方向上，两侧含量较高。③流域内梯田占比较高的 B 淤地坝，坝地 SOC 均值（4.4 g/kg）显著高于 A 淤地坝坝地（3.9 g/kg）和 C 淤地坝坝地（3.5 g/kg）。④流域内梯田的 SOC 最高，同时梯田建设影响了侵蚀泥沙的土壤粒径，从而使得流域内梯田占比与坝地表土层 SOC 呈显著正相关关系。草地表层 SOC 碳含量较低，使得坝地地表 SOC 含量与草地呈负相关关系。坡耕地 SOC 密度与坝地地表的 SOC 含量呈正相关关系，但由于坡耕地面积较小，其占比与坝地地表 SOC 无明显相关性。［结论］受土壤侵蚀、SOC 来源和矿化特征影响，坝地表层土 SOC 最高，随土层深度增加快速降低并趋于稳定。梯田地类内的高 SOC 含量水平及较细颗粒的侵蚀土粒特征，导致了梯田占比最高的 B 淤地坝坝地内 SOC 含量最高。本研究揭示了黄土丘陵沟壑区坝控流域内的梯田建设对淤地坝坝地 SOC 的正向响应，梯田及淤地坝不仅能够减少流域内的水土流失，同时还能够显著提高流域内土壤有机碳水平，改善流域微环境。

关键词：淤地坝；SOC；土地利用；空间分布；相关性分析

文献标识码：A　**文章编号：**1000-288X(2024)03-0000-00　**中图分类号：**S157.3^{+}1

文献参数：孙睿哲，韩剑桥，李宗遥，等.淤地坝坝地有机碳空间分布及其对流域土地利用的响应[J].水土保持通报，2024，44(3)．Sun Ruizhe，Han Jianqiao，Li Zongyao，et al. Spatial distribution of organic carbon in check-dams and its response to land use in watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3)．

Spatial Distribution of Organic Carbon in Check-Dams and Its Response to Land Use in Watersheds

Sun Ruizhe[1,2,3]，Han Jianqiao[1,2,3,4]，Li Zongyao[4]，Liu Zihan[4]

（1.*The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment*，*Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*；2.*Institute of Soil and Water Conservation*，*Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*；3.*University of Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100049，*China*；4.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*，*Northwest A&F University*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*）

Abstract：［Objective］Check-dams are used to directly intercept sediment and control soil erosion，significantly changing the lateral migration process of soil organic carbon (SOC). The spatial distribution of SOC at a dam site and the impact of watershed land use on the distribution of SOC in the shallow soil layer

收稿日期：2024-02-29　**修回日期：**2024-04-19

资助项目：国家自然科学基金黄河水科学联合研究基金课题“黄土高原沟道水土保持措施阈值与布局”（U2243212）；；水利部重大科技项目（SKS-2022093）；榆林市 2023 年科技计划项目（2023-SF-14）

第一作者：孙睿哲（1999—），男（汉族），山东省邹平市人，硕士，研究方向为水土保持工程。Email：sunrz99@163.com。

通信作者：韩剑桥（1987—），男（汉族），河南省禹州市人，博士，副研究员，主要从事流域洪水泥沙、土壤侵蚀研究。Email：hjq13@163.com。

(0—200 cm) of the dam site was analyzed in order to provide a scientific basis for the coordinated development of check-dam construction and watershed ecological environment. [Methods] Three small watersheds with significant differences in the proportion of grassland, sloping farmland, and terraced land in the Chabagou catchment were investigated. A combination of remote sensing interpretation, field sampling, and indoor testing was used to study the spatial distribution characteristics of SOC in dams and their response to land use. [Results] ① In the vertical soil profile, SOC content was highest in the surface soil (0—20 cm), and rapidly decreased with increasing soil depth. The variation of SOC content in the deep layer was relatively small, fluctuating around 3.5 g/kg. ② In the downstream direction of water flow, due to the influence of soil erosion and sedimentation characteristics, the SOC content was relatively higher in the middle and later sections of the dams. In the direction parallel to the dams, the SOC content on both sides was relatively higher. ③ The B check-dam with a high proportion of terraced fields in the watershed had a significantly higher mean SOC (4.4 g/kg) than both the A check-dam (3.9 g/kg) and C check-dam (3.5 g/kg). ④ The SOC content of terraced fields in the watershed was the highest, and the construction of terraced fields affected the soil particle size of eroded sediment, resulting in a significant positive correlation between the proportion of terraced fields in the watershed and the SOC content of the soil layer on the dam surface. The surface SOC content of grassland was relatively lower, resulting in a negative correlation between the surface SOC content of the dams and the grassland. The SOC density of sloping farmland was positively correlated with the SOC content on the surface of the dams. However, due to the small area of sloping farmland, its proportion was not significantly correlated with the SOC content on the surface of the dams. [Conclusion] Due to soil erosion, SOC sources, and mineralization characteristics, the SOC content in the surface layer of check-dams was the highest, and SOC content rapidly decreased and tended to stabilize with increasing soil depth. The high level of SOC and the erosion characteristics of finer particles in terraced land led to the highest SOC content at the B check-dam site, which had the highest proportion of terraces. These results demonstrate the positive response of terrace construction in watersheds to SOC content of check-dam sites in the loess hilly and gully area. Terraces and check-dams not only reduce soil erosion in watersheds, but can also significantly increase SOC content and improve the microenvironment.

Keywords: check-dam; soil organic carbon (SOC); land use; spatial distribution; correlation analysis

水土流失是中国主要的生态环境问题之一[1],其不仅造成土地退化、植被退化、粮食危机等生态和社会问题,同时也伴随着土壤碳氮等养分的流失和重分配[2-3]。黄土高原是中国土壤侵蚀强度最大的地区,为防治水土流失,中国自建国初以来开展了一系列的水土保持工作,显著地减轻了区域土壤侵蚀[4-6],同时也改变了流域内的土壤有机碳(SOC)等营养元素的迁移、沉积和矿化过程[7]。作为最有效的水土保持工程措施之一,淤地坝在拦沙滞沙、减少泥沙入黄、流域滞洪防洪等方面发挥了显著作用。同时,淤地坝建设也显著改变了流域内 SOC 的迁移过程[8-10],一方面,淤地坝将侵蚀泥沙淤积在坝前,从而使 SOC 未随径流发生迁移[11];另一方面,泥沙淤积过程能快速封存 SOC,使其迅速隔绝氧气,降低矿化速率,使沉积坝地土壤保持一定有机碳丰度[12-13]。

淤地坝坝控小流域内,侵蚀泥沙直接来源于流域内各土地利用区的表层和上层侵蚀土壤或母质,受水力、重力等侵蚀作用后沉积于坝后沟道内形成平坦坝地[14-16]。已有研究通过不同次侵蚀沉积过程下不同沉积土层的沉积泥沙特征分析,认为相较于降雨因素,流域水土保持措施会对沉积泥沙特征造成更大影响,不同土地利用下的土壤侵蚀模数存在显著差异[17]。同时,其他学者通过对流域内沉积层土样的放射性碳同位素进行测定[18-20],揭示了淤地坝坝地地表 SOC 主要来源于沟壁,其次为农田。此外,还有学者研究指出流域内坡面等侵蚀区的土地利用,会对同一流域内沉积区表层土壤的有机质、氮磷等营养元素产生影响[21-22]。然而,目前淤地坝坝地内 SOC 的空间分布特征,坝控流域土地利用对坝地表 SOC 的影响等问题还有待进一步探究。这些问题的存在,限制了小流域内淤地坝与其他沟道和坡面水土保持措施的协同[23],因此,开展坝地 SOC 空间分布特征的研究,以及坝控流域内不同土地利用对地表 SOC 的影响,具有重要意义。

因此,本文以黄土高原中部的岔巴沟流域为研究区,在岔巴沟内分别选择坡耕地占比较高,梯田建设规模较大,以及保留有较完整草地的 3 个土地利用方式存在明显差异的坝控小流域,研究中实地考察并对

流域进行土样采集和影像获取,测定采集土样的 SOC 的含量,以及坝地 SOC 的粒径特征。根据测定结果,分析 SOC 在坝地内的空间分布特征以及不同土地利用对坝地内地表 SOC 的影响,以期为淤地坝建设与流域生态环境协同发展提供科学依据。

1　研究区域及方法

1.1　岔巴沟概况及坝控小流域选择

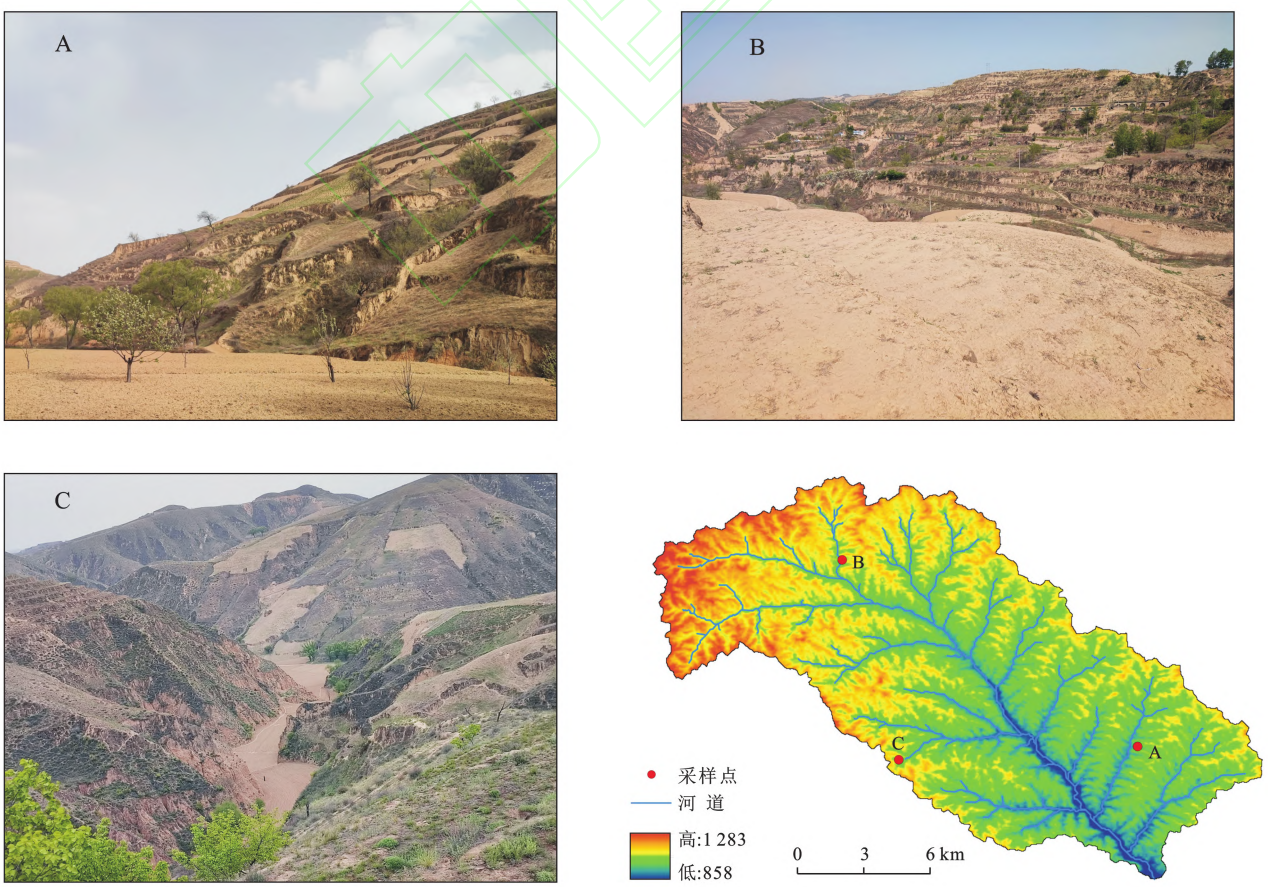
(1) 岔巴沟流域概况。岔巴沟流域位于陕西省榆林市子洲县北部(109.5°—110.1°E,37.5°—37.8°N),是大理河的一级支流,岔巴沟全长 26.6 km,流域面积 205 km^2。岔巴沟属黄土丘陵沟壑区,沟壑密度 1.05 km/km^2,主沟比降 7.57‰,土壤为黄土发育而成,土质疏松,易遭侵蚀。流域年平均降水量约为 474 mm,降雨多集中于夏季,因短骤型降雨频发,流域内侵蚀严重,洪水泥石流等灾害较多。流域内的主要自然景观为草地,乔木、灌木林地较少,主要农业用地类型为旱作坝地、梯田、缓坡耕地。

(2) 采样淤地坝选择。为探究淤地坝坝地内的 SOC 分布特征,以及流域内土地利用差异对坝地内 SOC 含量的影响,本文在岔巴沟流域内选择了 3 个坝控小流域,为保证所选坝控流域的科学性和代表性,采样小流域的选择满足以下条件:①需选择无其他淤地坝建设的源头闷葫芦坝淤地坝,理论上坝控流域内水土流失造成的侵蚀泥沙全部沉积在淤地坝坝地内;②所选淤地坝具有相近的建坝时间、相似的淤积期和淤积状态,坝地沉积后耕作方式一致(本文所选 3 个淤地坝坝地均为旱作玉米农地);③所选淤地坝所在的坝控流域内,草地、梯田、坡耕地等地类面积占比不同,土地利用方式存在明显差异。根据上述条件,本研究于 2023 年 4 月 25 日—4 月 28 日实地考察了岔巴沟流域内多个建成淤地坝后,选择了 3 个坝控小流域,进行了土地利用区和坝地内的土样采集、无人机航拍,构建了 3 个小流域真彩色高分图,统计了不同坝控小流域的土地利用特征以及地形特征。

表 1　采样淤地坝基本情况

Table 1　Basic situation of sampling check-dams

淤地坝编号	经纬位置	建坝时间	坝控流域面积/hm^2
A	37°40′58″N,109°59′13″E	1970s	30.4
B	37°45′36″N,109°51′55″E	1970s	17.8
C	37°40′39″N,109°53′19″E	1970s	19.8



注:A,B,C 为淤地坝编号。下同。

图 1　岔巴沟内采样小流域的选择及流域的景观特征

Fig.1　Selection of Sampling Watersheds and their Landscape Characteristics

(3) 不同坝控小流域的土地利用区特征。本研究中,通过无人机航拍获取了流域的遥感影像并进行了拼接处理,采用 ArcGIS 10.2 对研究区小流域的影像进行了目视解译,以划分小流域内不同的土地利用区。3 个坝控流域土地利用占比情况如图 2 所示,不同小流域内土地利用类型面积占比差异最大的为梯田,A,B,C 坝控流域梯田占比分别为 9%,38%,23%。其次是坡耕地,其面积占比分别为 16%,6%,4%。此外,不同流域最主要的土地利用类型均为草地,在 A,B,C 坝控流域内的占比分别为 74%,51%,72%。研究区内林地(乔木林和灌木林)面积较小,呈零星分布,在 B 淤地坝控流域内占比略高,为 3%。

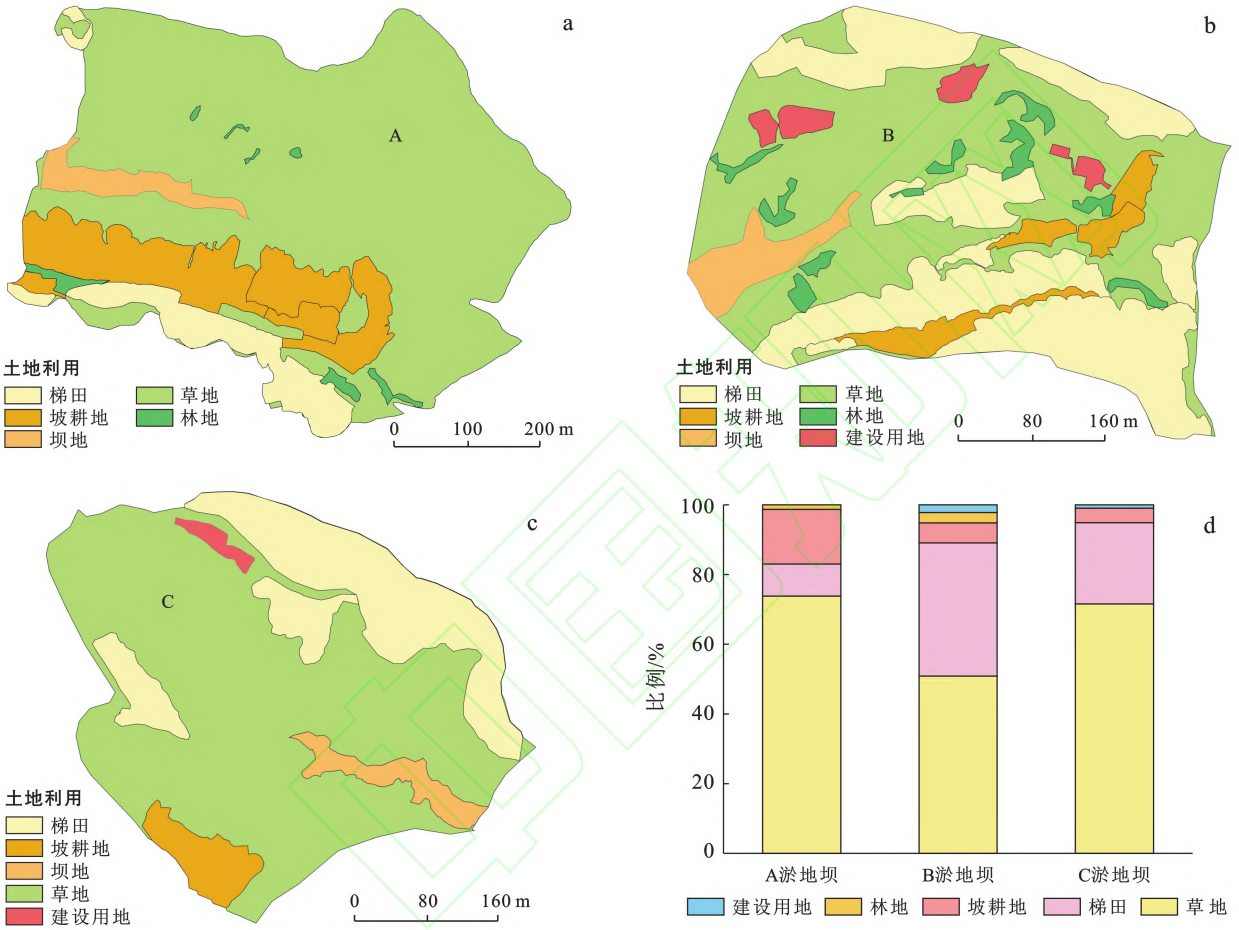


图 2 各坝控流域的地类特征

Fig.2 Land use of different dams controlled watersheds

1.2 土样采集及试验处理

(1) 淤地坝土壤采集。淤地坝坝控流域内土壤采样,分为坝地内采样和流域不同土地利用类型的采样。本研究在选定采样淤地坝后,于 2023 年 4 月 29 日至 5 月 5 日,对岔巴沟流域所选择的 3 个坝控小流域进行了坝地和不同土地利用区的土样采集工作,小流域的无人机飞行与土样采集工作为同期开展。

坝地内采样时,设定坝体为前方,将坝地沿沟道自然方向从坝体到沟头分为前、中、后 3 段采样区间。每段采样区间内,沿平行于淤地坝长轴的方向选择采样截面,从左向右分为左、中、右 3 个采样点,每个淤地坝坝地内共设 9 个采样点。每个采样点内,0—100 cm 土层采样间隔为 20 cm;100 cm 以下的土层采样间隔为 50 cm,同一土层内土样经均匀混合后按四分法取样[19]。当采集土样由均一质或较均一质淤土变为存在白色钙质结核的非均质黄土时,即确定已采样至沉积层之下的黄土母质,并结束该样点采样同时记录采样深度。3 个坝控流域内,共采集 290 个淤地坝坝地土样。

依据坝控流域内土地利用目视解释结果,本文选择梯田、坡耕地、草地作为不同土地利用采样区。每个地类内的采样深度统一为 200 cm,土层采样间隔与坝地采样相同。采取随机抽样方式选择 3 个采样点,将 3 个采样点土样混合均匀后,采用四分法取土,标记为一个土样。

(2) SOC 及粒径测定。岔巴沟采集土样于 2023 年 5 月 6 日运回中国科学院水土保持研究所人工模拟干旱大厅,于干旱大厅进行自然避光风干至恒重。

5 月 13 日至 15 日,对 3 个小流域坝地内采样土样和不同土地利用区土样进行了人工研磨并过筛,以便进行 SOC、土壤粒径分析。

2023 年 5 月 15 日至 6 月 5 日,于黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,对坝地和不同土地利用区的土样采用重铬酸钾—硫酸消解法测定了土壤有机碳的含量。2023 年 10 月至 11 月,于西北农林科技大学资源环境学院水工实验室,对土壤粒径测试的土样进行了样品标记和预处理工作。土壤粒径测试试验前,首先分别加入稀盐酸和双氧水并加热,以去除土样水样混合测定样品中的有机质和碳酸盐,土样粒径的激光粒径仪上机测定于西北农林科技大学资源环境学院完成。

1.3　数据处理及统计分析

表层土壤有机碳密度(SOCD)反映了土壤肥力指标,本文计算了坝控小流域内坝地以及不同土地利用区 0—100 cm 土层的土壤有机碳密度,其公式为:

$$SOCD = SOC \cdot BD \cdot h \tag{1}$$

式中:SOCD 代表土壤有机碳密度(kg/m^2);SOC 为土壤有机碳含量(g/kg);BD 为土壤容重(g/cm^3),本文土壤容重数据,参考了前人在靠近研究区的黄土高原相同气候地形区测定的土壤容重[22]数据;h 为测定土层深度(m)。

本文应用 Excel 对测定数据进行了整理,参考前人不同地特征等因素对地表土壤营养元素的研究思路[21-22],应用 SPSS 25.0,分析了土壤粒径、流域地类特征等相关因素对坝地内地表 0—200 cm 深度土层 SOC 的含量影响。

2　结果与分析

2.1　不同土地利用区 SOC 含量差异

由表 2 可知,3 个研究小流域内,梯田 SOCD 始终在较高的水平,为 6.48～7.79 kg/m^2。不同小流域内坡耕地 SOCD 变率较大,A 淤地坝坝控流域内的 SOCD 最低,为 4.85 kg/m^2;B 淤地坝坝控流域的 SOCD 最高,为 7.21 kg/m^2。此外,3 个流域内草地的 SOCD 分别为 5.24,5.80,6.30 kg/m^2。

图 3 反映了不同土地利用的 SOC 的垂直分布,A 淤地坝坝控流域中,不同土地利用类型的表层 0—40 cm 采样土壤的 SOC 含量随采样深度增加快速降低,在 40—200 cm 的采样土层内 SOC 含量变化较小,梯田的 SOC 含量在全采样深度内高于坡耕地和草地。在 B 淤地坝坝控流域不同地类中,坡耕地、草地的 SOC 垂直变化与 A 淤地坝 3 种地类基本相同,梯田内 SOC 随深度增加的下降趋势缓于 A 淤地坝内的梯田,并在 0—60 cm 采样土层内减少最快,从 7.0 g/kg 下降到 4.3 g/kg。C 淤地坝坝控内,不同地类的 SOC 均在 0—60 cm 采样土层内随深度较快减少,且均在 40—60 cm 采样深度内降为 3.9 g/kg 左右,在 60—200 cm 的采样土层内,不同土层深度、不同地类的 SOC 差异较小,均值为 3.7 g/kg。

表 2　小流域不同土地利用的 SOC 特征

Table 2　SOC of different land uses in watersheds

淤地坝编号	土地利用类型	SOCD(0—100 cm)(kg/m^2)	土壤容重/(g·cm^{-3})	面积占比/%
A	坡耕地	4.85	1.34	15.87
	梯 田	6.48	1.25	9.33
	草 地	5.24	1.35	74.80
B	坡耕地	7.21	1.34	6.28
	梯 田	6.62	1.35	41.97
	草 地	5.80	1.35	51.75
C	坡耕地	5.67	1.34	4.21
	梯 田	7.79	1.35	23.54
	草 地	6.30	1.35	72.26

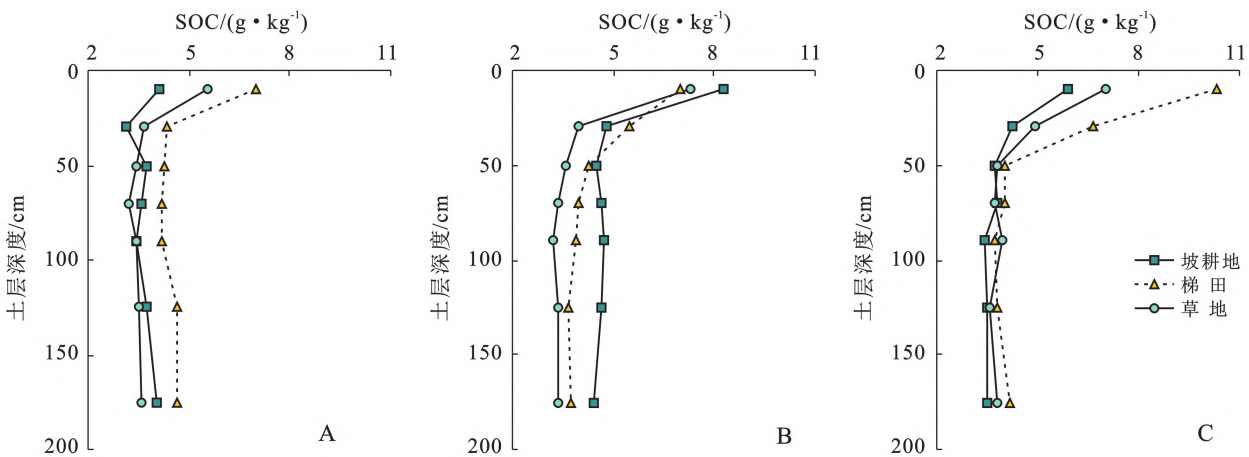


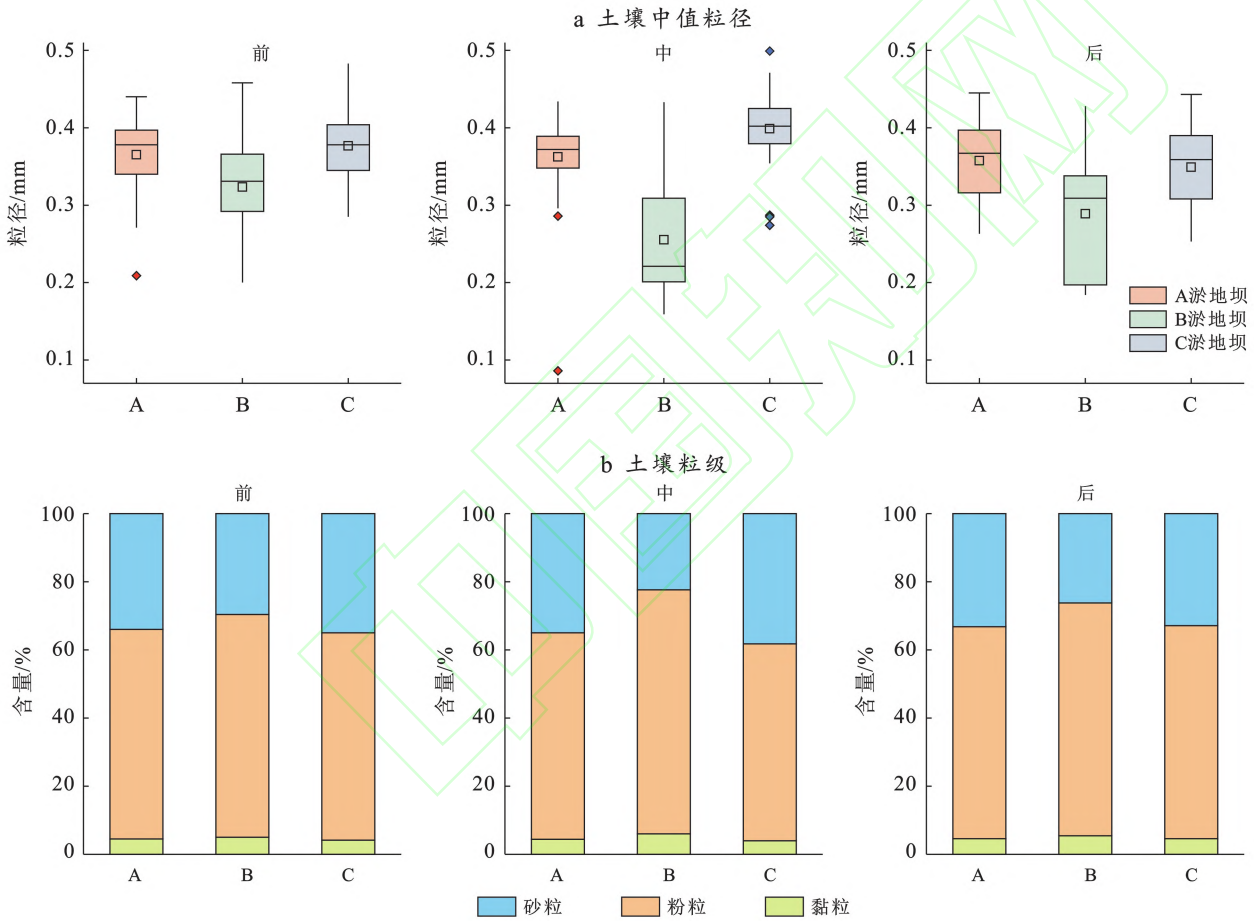
图 3　小流域不同土地利用区土壤有机碳(SOC)的垂直分布特征

Fig.3　The vertical distribution of soil organic carbon in different land use of watersheds

2.2 不同小流域坝地土壤粒径特征

由图 4 可知，A 淤地坝坝地土壤前、中、后采样区土壤中值粒径和粒级分布的变化较小，土壤中值粒径的均值分别为 0.032，0.032，0.031 mm，粒级砂粒、粉粒、黏粒组成变化小于 2%；B 淤地坝坝地土壤中值粒径和粒级分布差异明显，前、中、后采样区间内土壤中值粒径均值分别为 0.027，0.019，0.023 mm，中、后段采样区间粉粒相较前一段先增加 7%后减少 4%。砂粒则先减少 8%后增加 4%；C 淤地坝坝地前、中、后采样土壤的中值粒径均值分别为 0.033，0.036，0.030 mm，粒级分布明显变化，中、后段采样区粉粒占比先下降至 58%，后上升至 63%，砂粒占比则先增加至 38%，后降低至 33%。

不同研究小流域间，A，C 坝地内土壤中值粒径相似，土粒平均中值粒径均显著大于 B 淤地坝；同时 A，C 坝地内粒级分布砂粒、粉粒、黏粒组成接近，砂粒的含量显著大于 B 坝控流域内坝地土样。此外，不同小流域坝地内土壤黏粒变化均较小，含量均在 4%～6%左右。



注：图中前、中、后指坝地内采样时，设定坝体为前方，将坝地沿沟道自然方向从坝体到沟头分的前段、中段、后段采样区间。下同。

图 4 不同小流域坝地土壤粒径特征

Fig.4 Soil particle characteristics in the land of different water sheds

2.3 坝地 SOC 空间分布特征

（1）坝地 SOC 的垂直分布特征。A 淤地坝坝地，SOC 在 0—20 cm 土层含量最高，在 20—80 cm 土层内随深度增加，SOC 含量快速下降，SOC 平均值在前、中、后采样区内分别从 6.5，6.8，5.3 g/kg 下降到了 3.5，3.6，3.2 g/kg。在 100 cm 以下至淤积最深处，SOC 变化幅度较小，均值为 3.35 g/kg。B 淤地坝坝地 0—20 cm 土层的 SOC 含量最高，在 100 cm 土层深度内，SOC 含量随深度增加迅速下降。80—100 cm 的采样土层，各个采样点的 SOC 含量均在 4.0 g/kg 左右。在 100 cm 以下的土层深度内，SOC 随深度呈缓慢下降趋势。C 淤地坝坝地前段采样区内，SOC 变化趋势与 A，C 淤地坝坝地基本相同：0—20 cm 土层内最高，在 20—80 cm 土层内快速下降，在 80 cm 以下采样土层内缓慢下降。中段、后段采样区内，SOC 含量峰值出现在 80—100 cm，在 80—150 cm 的土层深度 SOC 含量迅速下降，150 cm 以下土层的 SOC 含量在 3.0～3.4 g/kg 内小幅度波动。

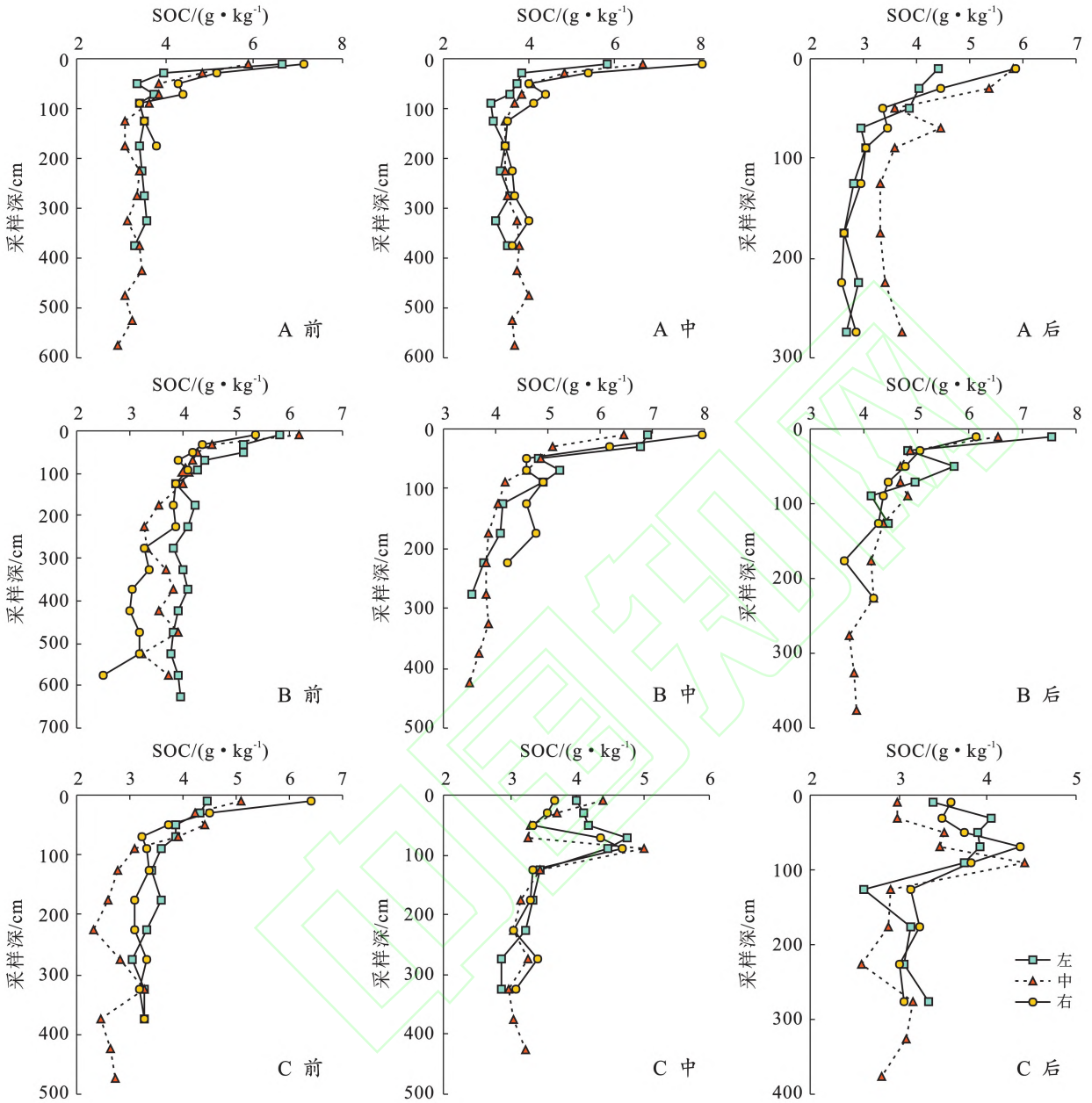


图 5　坝地 SOC 的垂直分布特征

Fig.5　Vertical distribution of SOC in the site of check-dam

(2) 坝地 SOC 的水平分布特征。图 6 显示了小流域坝地内,SOC 在每个采样土层内的水平分布特征。A 淤地坝坝地内,不同采样深度内 SOC 含量在坝地右端普遍较高;沿沟道水流方向,从小流域源头到坝体,SOC 含量总体上呈上升趋势。

B 淤地坝坝地内土样 SOC 均值最大。在不同深度土层,SOC 含量在坝地前段采样区最低,在中、后段采样区较高。在同一土壤采样面内,SOC 的极大值几乎均出现在左后两侧。

C 淤地坝坝地内 0—60 cm SOC 含量,沿坝体向沟道源头方向呈下降趋势。在 80—150 cm 的不同采样面内,坝地不同采样平面的 SOC 含量呈对称分布特征。

2.4　不同小流域的 SOC 差异

B 淤地坝坝地内,坝地整体的 SOC 均值和中位数均大于 4.0 g/kg,明显高于 A,C 淤地坝,A,C 坝地内 SOC 含量均低于 4.0 g/kg,同时 A 淤地坝 SOC 高于 C 淤地坝,SOC 均值分别为 3.9,3.5 g/kg。3 个采样坝地,前、中、后不同采样区内的 SOC 含量的高低顺序与整体顺序相同,B 淤地坝 SOC 含量均明显高于 A,C 淤地坝,A 淤地坝 SOC 含量均略高于 C 淤地坝。

A 淤地坝坝地内,前、中采样区不同深度、不同样点的 SOC 含量变异性较小,含量为3.8 g/kg,后段采样区 SOC 略低同时变率较大,中位数和均值分别为

3.4,3.6 g/kg;B 淤地坝内,中、后段采样 SOC 含量显著大于前段;C 淤地坝坝地内,前、中、后采样点内 SOC 含量变化较小,均为 3.5 g/kg 左右。

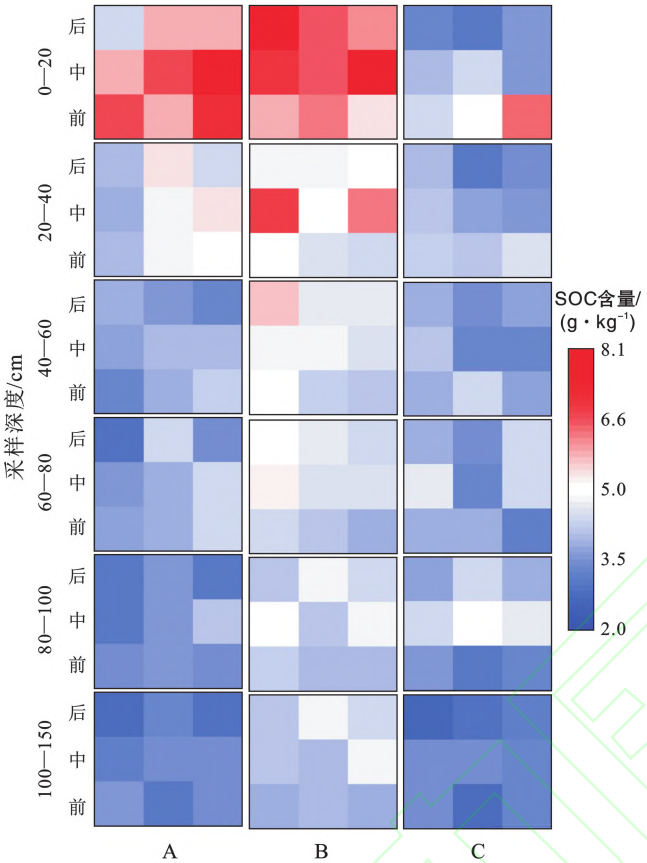


图 6 SOC 在不同淤地坝坝地内的水平分布特征

Fig.6 Horizontal distributionof soil organic carbon in land of check-dams

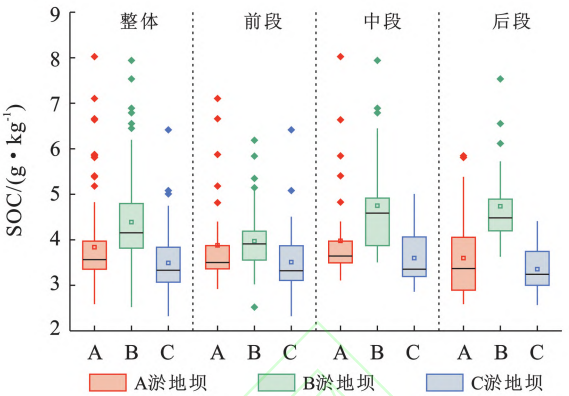


图 7 各坝控流域淤地 SOC 特征

Fig.7 Soil organic carbon in the land of dams controlled basin

2.5 坝地表层 SOC 对土地利用响应

3 个坝控小流域内,不同土地利用类型的面积大小占比、不同地类占比与该地类 SOCD 的二元乘积,均可能对坝地内 0—200 cm 表土层内 SOC 的含量造成潜在影响。本文进行了 SOC 含量与以上 3 种土地利用的相关变量以及土壤粒级、中值粒径的相关性分析。

坝地内采集土样的 SOC 含量与土壤中值粒径、土壤砂粒含量呈负相关关系,与黏粒、粉粒含量呈显著正相关关系。

在不同地类中,SOC 含量与坡耕地面积占比、坡耕地占比和 SOCD 的二元乘积均与坝地内 SOC 无明显相关性关系。坝地内 SOC 与梯田面积占比、梯田占比和 SOCD 的二元乘积均呈显著的正相关关系。淤地坝坝地内 SOC 含量与草地面积占比、草地占比和 SOCD 的二元乘积均呈显著负相关关系。

表 3 SOC 及其潜在影响因素的相关性

Table 3 Correlation between SOC and its potential influencing factors

项 目	坡耕地占比/%	梯田占比/%	草地占比/%	坡耕地(占比*SOCD)	梯田(占比*SOCD)	草地(占比*SOCD)	中值粒径/mm
皮尔逊相关性	−0.021	0.321**	−0.407**	0.087	0.272**	−0.443**	−0.350**
Sig.	0.774	<0.001	<0.001	0.239	<0.001	<0.001	<0.001
项 目	黏粒	粉粒	砂粒				
皮尔逊相关性	0.270**	0.293**	−0.294**				
Sig.	<0.001	<0.001	<0.001				

注:**为在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

3 讨 论

3.1 SOC 在坝地内的空间分布特征及影响因素

在 SOC 的垂直分布特征上,不同坝地内 SOC 含量的峰值均出现在 0—20 cm 土层中,出现峰值后土层内 SOC 随土层深度增加快速下降,与以往研究结果一致[24]。由于地表植被枯落物等外源性 SOC 直接向坝地地表输入,导致表层 SOC 含量较高。表层土之下的浅土层透气性较好,好氧微生物活跃,SOC 的矿化作用强,因此随土层深度增加,SOC 含量会快速降低。深层土透气性条件较差,好氧微生物活动减弱,矿化速率低,SOC 含量基本保持稳定。而 C 淤地坝坝控流域内,可能是由于坝地内进行了深耕等整地措施[25],在中、后段采样区间,SOC 含量峰值未出现

在 0—20 cm 土层中,而在近表层 60—100 cm 的土层中出现峰值。

SOC 的水平分布特征中,坝地内左右端 SOC 高于中部,或是由于发生侵蚀沉积过程的暴雨侵蚀事件中,不同粒径的侵蚀泥沙在淤地内的沉积位置不同[20],在坝地内,靠近坡面的两侧区域,相较于沟道中心部位地势较高,造成了粒径较大的土粒因重力而迁移沉积于淤地中段,而粒径较小土粒多分布于两端。在以往研究中,存在沿水流方向上,近坝端 SOC 含量较高的特征[26],本文中 A 淤地坝出现了类似的特征,B,C 淤地坝则无此类分布特征,这是由于坝控流域的大小、形状等存在差异造成的水流方向上 SOC 的分布不同。

3.2　不同坝控小流域的 SOC 差异

3 个不同小流域坝地内地表 0—200 cm 土层深度的 SOC 含量存在明显差异,B 淤地坝坝地内 SOC 的含量显著高于 A,C 淤地坝。一方面,B 淤地坝坝地内土壤中值粒径显著低于 A,C 淤地坝,在一定粒径范围内,SOC 含量与研究土样的土粒中值粒径呈显著负相关关系,这是由于土壤粒径越小,土壤比表面积越大,吸附力越强,SOC 等养分被吸附越多[27]。另一方面,坝地内表层 SOC 含量与小流域梯田面积占比呈显著正相关关系,同时 SOC 的测定,梯田表层土中的 SOCD 普遍高于坡耕地和草地,与前人研究一致[28],梯田建设保护了土地内团聚体的稳定性,更有效地利用了肥力,显著增加了流域固定 SOC 的能力,使得梯田表层 SOC 含量最高。B 淤地坝坝控流域内梯田面积占比较大,淤地坝坝地更易获得梯田这一表土层 SOC 含量较高的地类内迁移出的侵蚀泥沙。以往研究中,也揭示了梯田内因侵蚀而发生迁移并沉积在坝地内的土粒,相较于其他地类土粒颗粒更细[29],B 淤地坝坝地内土壤粒径较小,从而更易吸附 SOC。除梯田外,3 个坝控流域内坝地 SOC 含量与草地地类呈负相关关系,这或是由于 3 个小流域内草地 SOC 含量都较低,同时草地的植被盖度比农业用地的植被盖度高,减轻了的雨滴溅蚀,同时增加了降雨和径流的渗透,从而一定程度减少了径流,减轻了表土层的土壤侵蚀,从而降低了草地内 SOC 的损失[30],所以流域内草地对坝地内 SOC 贡献较小。此外,坝地内的 SOC 含量与坡耕地面积占比,坡耕地占比同坡耕地 SOCD 的二元乘积无显著相关关系,或因为 3 个流域内坡耕地占比普遍较低,这可能需要开展更多流域内的土地利用与坝地 SOC 采样和研究,进一步解释坡耕地与坝地内 SOC 的相关关系。

本研究中 A,B,C 流域的平均坡度分别为 35.09°,22.57°,30.49°,B 流域显著小于 A,C 流域。不同流域内地形坡度的差异,一方面会影响流域内接受太阳辐射的强度和时长,进而影响地表温度以及地面蒸散发水平,进而影响地表水分状况[31-32]。此外,流域内坡度与土壤侵蚀发生频率及强度均显著相关,因此,坡度较小的流域内,植被生长状况相对较好,更有利于固碳以及坝地内有机碳的汇聚。流域内梯田的建设,改变了梯田地类内的地形和坡度,从而对流域平均坡度也会产生影响,进而影响流域内的固碳水平。

以上因素,造成了 B 淤地坝坝内 SOC 含量水平显著高于 A,C 淤地坝。

4　结 论

由于土地利用特征不同,不同淤地坝坝地内 SOC 含量存在明显的差异,同时 SOC 的分布由于受土壤侵蚀发生机制、SOC 和矿化速率等因素影响,呈以下空间分布特征。

(1) 在垂直方向上,由于表土层外源性 SOC 的输入,表层土(0—20 cm)SOC 含量达到峰值,而后在 20—100 cm 土层中因土壤透气性较好、矿化作用强而快速降低,后随深度增加透气性降低,好氧性微生物活动减弱,矿化速率降低,SOC 含量基本保持稳定(3.0～4.0 g/kg)或小幅波动。

(2) 沿沟道水流方向上,由于受淤地坝大小,侵蚀沉积特征等因素的影响,SOC 在采样中、后段含量高于前段,靠近坡面的左右两侧高于沟道中心。

(3) 在不同坝控流域内,梯田面积占比较高的 B 淤地坝坝地 SOC 含量均值为 4.4 g/kg,显著高于 A 淤地坝坝地 SOC 均值 3.9 g/kg 和 C 淤地坝的 3.5 g/kg。

(4) 不同地类对坝地 0—200 cm 表土层 SOC 的影响不同,坡耕地在不同流域内面积普遍较小,坡耕地相关变量与坝地内表层 SOC 无明显相关关系。梯田地类的 SOC 含量最高,同时梯田侵蚀输出的泥沙粒径较小,影响了坝地内土壤粒径,进而增加了土粒对 SOC 的吸附,正向影响坝地内表土层 SOC 含量。研究区草地 SOC 含量较低,同时草地增加了地表覆被,降低雨滴溅蚀、增加入渗而减少径流,使表土层侵蚀和 SOC 输移降低,造成了与坝地表土层 SOC 含量与草地地类呈负相关关系。黄土丘陵沟壑区坝控流域内的梯田建设不仅能够减少流域的土壤侵蚀,也会对淤地坝坝地内的 SOC 含量产生正向效应,同时梯田及淤地坝作为重要的水土保持措施,在增加流域 SOC,改善流域微环境上发挥了更多潜在作用。

参考文献(References)

[1] 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.
Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7398-7409.

[2] Doetterl S, Berhe A A, Nadeu E, et al. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 154:102-122.

[3] 黄满湘,章申,唐以剑,等.模拟降雨条件下农田径流中氮的流失过程[J].土壤与环境,2001,10(1):6-10.
Huang Manxiang, Zhang Shen, Tang Yijian, et al. Nitrogen losses from farm runoff under simulated rainfall conditions [J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(1):6-10.

[4] Li Yurui, Zhang Xuanchang, Cao Zhi, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development [J]. Science of the Total Environment, 2021,756:143676.

[5] Wang Shuai, Fu Bojie, Piao Shilong, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. Nature Geoscience, 2016,9:38-41.

[6] 王尧,陈睿山,郭迟辉,等.近 40 年黄河流域资源环境格局变化分析与地质工作建议[J].中国地质,2021,48(1):1-20.
Wang Yao, Chen Ruishan, Guo Chihui, et al. Changes of resource and environmental pattern of the Yellow River Basin in the past 40 years and suggestions on geological work [J]. Geology in China, 2021,48(1):1-20.

[7] Han Yuguo, Feng G, Ouyang Ying. Effects of soil and water conservation practices on runoff, sediment and nutrient losses [J]. Water, 2018,10(10):1333.

[8] Yao Yufei, Song Jinxi, Wei Xiaorong. The fate of carbon in check dam sediments [J]. Earth-Science Reviews, 2022,224:103889.

[9] 李智广,成辉,方怒放,等.淤地坝保碳、减排、增汇作用与其能力评估[J].水土保持学报,2023,37(4):1-6.
Li Zhiguang, Cheng Hui, Fang Nufang, et al. The role of yudiba dams in protecting carbon, reducing carbon emission and enhancing carbon sequestration and its capability assessment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(4):1-6.

[10] 毛战坡,王雨春,彭文启,等.筑坝对河流生态系统影响研究进展[J].水科学进展,2005,16(1):134-140.
Mao Zhanpo, Wang Chunyu, Peng Wenqi, et al. Advances in effects of dams on river ecosystem [J]. Advances in Water Science, 2005,16(1):134-140.

[11] Qin Xin, Zhu Hansong, Ren Yongqing, et al. Erosion intensity and check dam size affect the horizontal and vertical distribution of soil particles, carbon and nitrogen: Evidence from China's Loess Plateau [J]. Catena, 2022,217:106451.

[12] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Cutillas P P, et al. Carbon redistribution by erosion processes in an intensively disturbed catchment [J]. Catena, 2017,149:799-809.

[13] Mongil-Manso J, Díaz-Gutiérrez V, Navarro-Hevia J, et al. The role of check dams in retaining organic carbon and nutrients: A study case in the Sierra de Ávila mountain range (Central Spain) [J]. Science of the Total Environment, 2019,657:1030-1040.

[14] Fu Bojie. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China [J]. Soil Use and Management, 1989,5(2):76-82.

[15] Zhang Jiaqiong, Yang Mingyi, Zhang Fengbao, et al. Revealing soil erosion characteristics using deposited sediment sources in a complex small catchment in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau [J]. Geoderma, 2020,379:114634.

[16] Zhu Bingbing, Zhou Zhengchao, Li Zhanbin. Soil erosion and controls in the slope-gully system of the Loess Plateau of China: A review [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021,9:657030.

[17] Cao Taohong, She Dongli, Zhang Xiang, et al. Understanding the influencing factors and mechanisms (land use changes and check dams) controlling changes in the soil organic carbon of typical loess watersheds in China [J]. Land Degradation & Development, 2022,33(16):3150-3162.

[18] Zhang Jiaqiong, Shang Yueting, Bai Ruru, et al. Sediment source determination for a series of connected check dams in an agricultural catchment in the Chinese Mollisol Region [J]. Journal of Hydrology, 2023,617:129045.

[19] Zhang Yi, Li Peng, Liu Xiaojun, et al. Tracer elements revealed the soil organic carbon sources in a dam-controlled watershed [J]. Soil and Tillage Research, 2022,216:105184.

[20] Wei Yanhong, He Zhong, Jiao Juying, et al. Variation in the sediment deposition behind check-dams under different soil erosion conditions on the Loess Plateau, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018,43:1899-1912.

[21] Puget P, Lal R. Soil organic carbon and nitrogen in a

Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use [J]. Soil and Tillage Research, 2005,80(1/2):201-213.

[22] Shi Peng, Zhang Yan, Li Peng, et al. Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2019,652:505-512.

[23] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
Hu Chunhong, Zhang Xiaoming. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(1):1-11.

[24] Li Zhongwu, Liu Chun, Dong Yuting, et al. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China [J]. Soil and Tillage Research, 2017,166:1-9.

[25] Alcántara V, Don A, Well R, et al. Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks [J]. Global Change Biology, 2016,22(8):2939-2956.

[26] 李勉,杨剑锋,侯建才,等.黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积过程研究[C]//中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会第七届学术讨论会论文集(下册).杭州,2007:114-117.
Li Mian, Yang Jianfeng, Hou Jiancai, et al. Research on sedimentation process of small watershed check-dams in Loess Hilly areas [C]// Proceedings of the 7th academic symposium of the Hydrological and Sediment Professional Committee of the China Society of Hydropower Engineering (Volume 2). Hangzhou, 2007:114-117.

[27] Soane B D. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects [J]. Soil and Tillage Research, 1990,16(1/2):179-201.

[28] Wei Wei, Chen Die, Wang Lixin, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing [J]. Earth-Science Reviews, 2016,159:388-403.

[29] Xu Lu, Zhang Dan, Proshad R, et al. Effects of soil conservation practices on soil erosion and the size selectivity of eroded sediment on cultivated slopes [J]. Journal of Mountain Science, 2021,18(5):1222-1234.

[30] Wu Gaolin, Liu Yifan, Cui Zeng, et al. Trade-off between vegetation type, soil erosion control and surface water in global semi-arid regions: A meta-analysis [J]. Journal of Applied Ecology, 2020,57(5):875-885.

[31] 潘占兵,余峰,王占军,等.宁南黄土丘陵区坡向、坡位对苜蓿地土壤含水量时空变异的影响[J].水土保持研究,2010,17(2):141-144.
Pan Zhanbing, Yu Feng, Wang Zhanjun, et al. Effects of slope aspect and position on temporal and spatial variation of soil water content on alfalfa land in Loess Hilly Region of South Ningxia Hui autonomous region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(2):141-144.

[32] Hoylman Z, Jencso K, Hu Jia, et al. Hillslope topography mediates spatial patterns of ecosystem sensitivity to climate [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018,123:353-371.