

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.017

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.017

王璞,任宗萍,马晓妮,等.黄土坡面溶解性碳流失特征及其对水土保持措施的响应[J].水土保持学报,2025,39(2):48-56,64.

WANG Pu, REN Zongping, MA Xiaoni, et al. Characteristics of dissolved carbon loss on loess slopes and its response to soil and water conservation measures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 48-56, 64.

黄土坡面溶解性碳流失特征及其对水土保持措施的响应

王璞¹, 任宗萍¹, 马晓妮¹, 王凯博², 董彭蓓¹, 贺国凯¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710054; 2. 中国科学院
地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘要: [目的] 为系统认识不同水土保持措施下土壤碳的流失过程、通量特征及其影响因素。[方法] 采用野外模拟降雨试验, 对比分析梯田、草地、上梯下草、上梯下裸等水土保持措施下黄土坡面溶解性有机碳与无机碳随降雨过程的流失特征及影响因素, 量化不同水土保持措施对坡面溶解性碳流失的拦蓄效益。[结果] 各水土保持措施下坡面溶解性碳浓度随降雨过程无明显变化规律, 但溶解性碳流失通量均较裸地显著降低($p < 0.05$), 且以溶解性无机碳流失为主, 其贡献碳流失量的 79.5%~83.1%; 草地、上梯下草、梯田和上梯下裸措施对坡面溶解性碳的拦蓄效益分别为 76.9%、56.3%、47.6% 和 18.0%; 坡面产流量是影响溶解性碳流失通量的决定因素, 碳流失量与产流量呈显著正相关。[结论] 研究结果深化对不同水土保持措施减少土壤碳流失过程的认识, 为黄土高原坡面水土保持碳汇效益评估提供科学依据。

关键词: 模拟降雨; 溶解性碳; 流失过程; 拦蓄效益; 水土保持措施; 黄土高原

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0048-09

Characteristics of Dissolved Carbon Loss on Loess Slopes and Its Response to Soil and Water Conservation Measures

WANG Pu¹, REN Zongping¹, MA Xiaoni¹, WANG Kaibo², DONG Pengbei¹, HE Guokai¹

(1. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: [Objective] The implementation of soil and water conservation measures has led to a notable reduction in the loss of soil carbon pools, while simultaneously facilitating effective control of soil erosion. However, there is a paucity of systematic understanding of the processes of carbon loss, flux characteristics and the factors that influence them under different soil and water conservation measures. [Methods] In this study, a comparative analysis of the characteristics and influencing factors associated with the loss of dissolved organic carbon (DOC) and inorganic carbon (DIC) from loess slopes under different soil and water conservation measures was conducted. These measures included terraces, grasslands, upper terraces and lower grasslands, and the upper terraces and lower bare soil. To this end, a simulated rainfall test in the field was employed to quantify the benefits of the above-mentioned soil and water conservation measures in reducing the loss of dissolved carbon from the slopes. [Results] The dissolved carbon concentration on the slope surface under each soil and water conservation measure remained relatively constant throughout the rainfall process. However, the flux of dissolved carbon loss was significantly lower than that observed on bare ground ($p < 0.05$). Furthermore, the loss of dissolved inorganic carbon contributed to 79.5%—83.1% of the total carbon loss. The retention benefits of grassland, the upper terraces and lower grasslands, the upper terraces and lower bare soil measures for dissolved carbon on slopes were

收稿日期: 2024-10-15

修回日期: 2024-10-30

录用日期: 2024-11-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-20

资助项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U2243225)

第一作者: 王璞(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持与土壤碳循环研究。E-mail: wangpussr@163.com

通信作者: 王凯博(1982—), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事植被恢复与土壤碳循环研究。E-mail: wangkb@ieecas.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

76.9%, 56.3%, 47.6% and 18.0%, respectively. The volume of flow production on the slope surface was identified as the determining factor affecting the flux of dissolved carbon loss. Furthermore, the flux of carbon loss was found to be significantly positively correlated with the flow volume. [Conclusion] This study enhances our understanding of the mechanisms through which soil carbon loss is mitigated by diverse soil and water conservation measures. It offers a scientific foundation for evaluating the carbon sink benefits of soil and water conservation on the slopes of the Loess Plateau.

Keywords: simulated rainfall; dissolved carbon; loss process; retention benefit; soil and water conservation measures; the Loess Plateau

Received: 2024-10-15

Revised: 2024-10-30

Accepted: 2024-11-07

Online(www.cnki.net): 2025-01-20

溶解性碳包括溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和溶解性无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)。其中,DOC是指能够溶解于水或盐溶液的一系列结构大小不同的有机化合物^[1],不仅是河流水体微生物的直接碳源,也是河流水体温室气体排放源之一,在全球碳循环中具有重要作用^[2]。DIC通常是水体中最丰富的碳形式,其在溶解性碳中所占比重可高达90%以上^[3-4],是主导水-气界面碳交换与碳汇形成的重要因素^[5]。溶解性碳是连接陆地、河流和海洋碳循环的纽带,每年从陆地经过河流输入海洋的溶解性碳高达0.65 Pg,相当于全球陆地年碳汇量的21%^[6-7]。因此,科学认识溶解性碳从陆地向水域系统的迁移过程及其通量,对于准确理解全球生态系统碳循环具有重要意义。

水土流失是河流泥沙的重要来源,也是土壤碳从陆地进入河流的主要驱动力。植被、梯田等水土保持措施是黄土高原减少坡面水土流失的重要手段,在减少水土流失的同时,也有效减少土壤碳流失,降低陆地碳在搬运过程中的CO₂释放,从而提高土壤碳汇功能^[8]。早期学者^[9-11]对水土流失的研究主要围绕土壤侵蚀过程机理、水土保持的减水减沙效益等展开。近年来,越来越多的学者开始关注水土保持的碳汇效益^[12]。例如,曹文洪等^[13]测算出我国2021年现存水土保持措施垂向碳增汇总量为1.54亿t,对陆域碳汇的贡献约43.5%~56.5%;DENG等^[14]研究发现,退耕还林还草工程导致黄土高原每年的径流碳和泥沙碳减少量分别高达 7.3×10^3 、 1.8×10^6 Mg;RAN等^[8]研究表明,水土保持改变碳在景观尺度的再分配,降低陆地向水体的碳输送,在控制侵蚀和增加碳汇方面发挥着显著的协同效益。现有研究证实水土保持对陆地碳汇的重要作用,增强对区域尺度水土保持碳汇效益的认识,但对降雨过程中不同水土保持措施下坡面溶解性碳流失规律、通量及影响因素等仍然缺乏系统了解,亟待加强相关研究。

黄土高原是全球土壤侵蚀最为严重的地区之一,也是我国水土流失治理的重点区域^[15-17]。新中国成立以来,我国政府实施一系列水土流失治理工程,其中梯田和植被建设是控制黄土高原坡面水土流失的主要措施。本研究采用野外模拟降雨试验,探讨不同水土保持措施下黄土坡面径流DOC和DIC随降雨过程的流失特征,量化DIC和DOC对溶解性碳流失通量的相对贡献,评估水土保持措施对溶解性碳的拦蓄效益,揭示溶解性碳流失通量的主要影响因素,以期深化对黄土高原水土保持碳汇形成过程的科学认知,为水土保持措施优化配置提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市以西约14 km的六道沟流域(38°46'~38°51'N, 110°21'~110°23'E),地处黄土高原水蚀风蚀交错区,是黄河一级支流窟野河的二级支沟,属于黄河多沙粗沙区。流域海拔1 081~1 274 m,面积6.89 km²,主沟长4.21 km,沟道平均比降为2.6%。流域处于干旱半干旱季风气候带,多年平均气温8.4℃,潜在蒸发量1 000 mm,平均降水量437.9 mm,无霜期169 d。流域内土壤类型主要为黄绵土,结构疏松,易遭侵蚀;植被类型以草地、灌丛为主,占流域面积的70%以上^[18]。

1.2 野外径流小区布设

试验于2023年7月进行。在流域内选择坡度、坡向和植被类型等下垫面条件一致的坡面布设不同水土保持措施径流小区,开展人工模拟降雨试验。小区布设前土地利用类型为天然草地,坡度14°~16°,坡向东北,土壤pH 8.5,有机碳4.4 g/kg,无机碳12.4 g/kg,全氮0.39 g/kg,全磷0.48 g/kg。受限于地形因素,小区大小设置为1.5 m×5 m。试验设置5个处理:1)裸地小区为对照,用于模拟无植被覆盖时的坡耕地;2)草地,整个坡面均由草地组成,草地盖度约90%;3)梯田,整个坡面进行坡改梯处理,梯

田改造标准参照当地梯田等比例缩小修建,规格为田面宽度 1.2 m,每一阶高度为 0.3 m,埂外坡度为 65°,整个小区坡面共修建 4 阶梯田;4)上梯下草组合:小区坡面 2.5 m 断面以上与梯田措施按相同处理标准建设两阶梯田,断面以下为草地覆被;5)上梯下裸组合:小区坡面 2.5 m 断面以上为两阶梯田,断面以下按裸地坡面处理。草地和梯田是黄土高原北部地区常见的水土保持措施类型,上梯下草和上梯下裸小区用来模拟坡面不同水土保持组合措施情景。每个小区边缘钉入铁皮,深度为 0.3 m,以确保模拟降雨在小区内产生径流的完整性和独立性。小区下端设置集流槽,可在产流的同时接取水样。小区间距为 2 m 以上,确保各小区之间无影响。

1.3 人工模拟降雨试验

模拟降雨系统采用组合喷头式降雨器。降雨器喷头高度为 4 m,有效降雨面积为 2 m×5 m。喷头采取大、中、小组合,通过调节开度调整降雨强度,确保雨滴动能均匀。本试验设计雨强为 120 mm/h,降雨历时为小区产流开始后 60 min。每场降雨前对小区进行遮盖处理,然后进行雨强率定,确保降雨强度的一致性,并且保证降雨均匀度为 85% 以上。

在晴朗无风的清晨时段开展模拟降雨试验,并搭配挡风布以确保降雨均匀性。在正式降雨前 1 d 下午对小区进行预降雨处理,确保每个小区前期影响雨量的一致性。为确保降雨过程中各小区无影响,在对某个小区进行降雨试验时,其余小区均用塑料膜进行遮挡。小区产流后每 2 min 用容量为 1 000 mL 的聚乙烯瓶进行径流样品采集,接满为止,记录接满用时。若产流未达到 1 000 mL,则接取 2 min 时段内全部径流泥沙,并记录产流量。接样历时为开始产流至产流结束。降雨试验结束后立即将收集的径流样品送回实验站进行容积测量,用于后续计算产流率。测量容积后的径流样品静置 2 h 后取上清液 100 mL,置于冰箱内 4℃ 冷藏保存,用于径流中 DOC 与 DIC 质量分数的测定。

1.4 样品指标测定

径流样品中的 DOC 和总溶解性碳(dissolved total carbon, DTC)含量使用岛津总有机碳分析仪(TOC-VCPH, 日本)进行测定。将收集到的径流上清液用 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤,然后使用移液管量取 12 mL 待测液,同时预备同等容量的纯水 4 份作为空白对照标样,再将标样与待测液同时进行上机测定。径流样品的 DIC 质量分数通过差量法使用 DTC 减去 DOC 质量分数获得。

1.5 数据处理

坡面产流率计算:

$$Q = \frac{V}{t} \times \frac{120}{1000} \times \frac{1}{2} \quad (1)$$

式中:Q 为 2 min 内平均产流率, L/min; V 为模拟降雨试验中各时段径流瓶接取径流的实际体积, L; t 为径流瓶接满用时, s。

坡面 DOC 和 DIC 流失量计算:

$$E_{\text{DOC}} = VN_{\text{DOC}} \times \frac{1}{4S} \quad (2)$$

$$E_{\text{DIC}} = VN_{\text{DIC}} \times \frac{1}{4S} \quad (3)$$

式中: E_{DOC} 、 E_{DIC} 分别为 DOC、DIC 流失量, mg/(m²·min); V 为模拟降雨试验中径流瓶 4 min 接取径流的实际体积, L; N_{DOC} 、 N_{DIC} 分别为 DOC、DIC 浓度, mg/L; S 为小区面积, m²。

不同水土保持措施减流、保碳效益计算:

$$U_Q = \frac{Q_B - Q_m}{Q_B} \times 100\% \quad (4)$$

$$U_C = \frac{\overline{E}_B 60 - \overline{E}_C 60}{\overline{E}_B 60} \times 100\% \quad (5)$$

式中: U_Q 、 U_C 分别为不同水土保持措施下的减流、保碳效益, %; Q_B 为对照组裸地的总产流量, L; Q_m 为不同水土保持措施下的总产流量, L; $\overline{E}_B$ 为对照组裸地的碳流失量, mg/(m²·min); $\overline{E}_C$ 为不同水土保持措施下的碳流失量, mg/(m²·min)。

本次试验所得数据均采用 Excel 2016 软件进行处理,并使用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(One-ANOVA)对不同水土保持措施下坡面产流率、DOC、DIC、DTC 的浓度及流失量等进行差异显著性分析($p < 0.05$),采用 Pearson 相关分析检验不同处理下坡面 DOC、DIC、DTC 的流失量与产流量和坡面溶解 C 浓度的关系,采用 Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 坡面产流特征

不同坡面处理平均产流率差异显著($p < 0.05$),大小为裸地(9.98 L/min) > 上梯下裸(9.94 L/min) > 梯田(8.28 L/min) > 上梯下草(5.90 L/min) > 草地(3.02 L/min)(表 1)。总体上,各处理小区产流率在产流开始后快速上升,其中裸地、上梯下裸和草地小区产流率大约 10 min 后趋于稳定,但梯田小区产流率大约在降雨 40 min 后略有下降,而上梯下草小区产流率随降雨过程持续上升,直到 46 min 后趋于稳定(图 1)。不同处理小区产流特征差异可能反映其产流机制的变化。

表 1 不同水土保持措施下坡面产流情况

Table 1 Runoff of slope surface under different soil and water conservation measures

水土保持措施	平均产流率/ (L·min ⁻¹)	产流量/L	减流效益/%
裸地	9.98±1.96a	599.0	—
草地	3.02±0.51b	181.5	69.7
梯田	8.28±1.63c	496.7	17.1
上梯下草	5.90±1.53d	354.0	40.9
上梯下裸	9.94±2.06a	596.5	0.4

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著水平($p<0.05$);—表示无数据。

裸地与上梯下裸 2 种处理的累积产流量相差较小,分别为 599.0、596.5 L,明显高于其余 3 种坡面处理。与裸地相比,不同水土保持措施产流量均有不同程度减

少。其中,草地对坡面产流量的降低效果最为显著,减流效益达 69.7%;其次为上梯下草处理,其减流效益为 40.9%;梯田的减流效益明显低于草地,仅为 17.1%;上梯下裸处理的减流效益最低,只有不足 1%(表 1)。

2.2 坡面径流溶解性碳浓度特征

裸地坡面产流中 DOC 和 DIC 浓度均为最高,平均值分别为 15.9、64.0 mg/L,显著高于其他处理($p<0.05$)。其余各处理的 DOC 和 DIC 浓度差异不显著,平均值分别为 10.7~11.4、48.8~56.0 mg/L。各处理 DTC 浓度平均值大小为裸地(79.9 mg/L)>上梯下裸(66.7 mg/L)>草地(61.2 mg/L)>梯田(60.8 mg/L)>上梯下草(59.5 mg/L)。除裸地 DOC 浓度随降雨历时总体呈下降趋势外,其余处理的 DOC、DIC 及 DTC 浓度随降雨时间波动变化(图 2)。

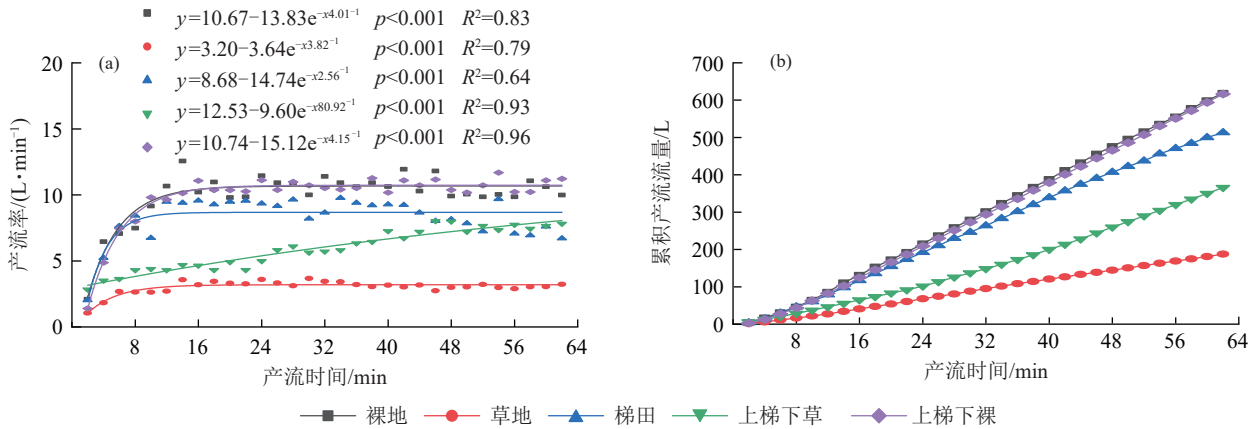


图 1 不同水土保持措施下的产流过程

Fig.1 Runoff process under different soil and water conservation measures

2.3 坡面径流溶解性碳流失通量

不同处理 DOC、DIC 和 DTC 流失量差异显著($p<0.05$)。裸地 DOC 和 DIC 流失量最大,平均值分别为 15.8、63.8 mg/(m²·min),其次为上梯下裸,分别为 10.3、55.0 mg/(m²·min),而草地流失量最小,分别为 3.4、15.0 mg/(m²·min),上梯下草处理的流失量比草地略高,分别为 6.2、28.6 mg/(m²·min),梯田处理的流失量高于上梯下草,分别为 9.0、50.7 mg/(m²·min)(图 3)。不同坡面处理 DOC、DIC 及 DTC 的流失通量随降雨时间的变化与产流率的变化基本一致,总体呈先快速上升,后保持稳定的阶段式变化。

2.4 溶解性有机碳与无机碳对径流碳流失通量的相对贡献

裸地及不同水土保持措施之间土壤流失 DOC 与 DIC 的比例无明显差异,所有处理的径流碳流失均以 DIC 为主,其在不同坡面处理贡献的径流碳流失平均比例分别为裸地(79.5%)、草地(81.4%)、梯田(83.1%)、上梯下草(82.0%)及上梯下裸(83.1%),而

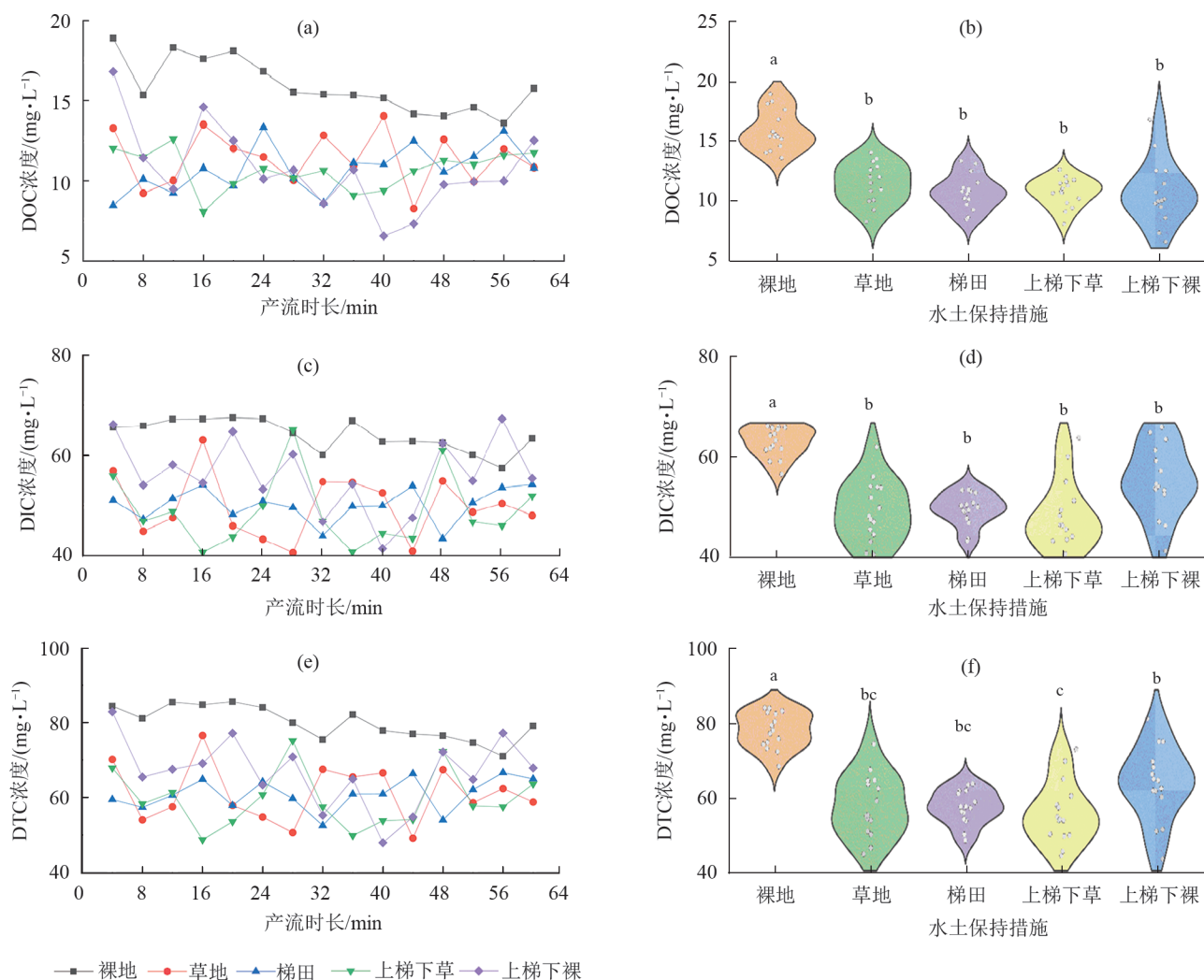
DOC 仅贡献径流碳流失量的 16.9%~20.5%。在流失过程中,裸地及不同水土保持措施流失 DOC 与 DIC 的比例总体处在一个稳定的水平(图 4)。

2.5 不同水土保持措施对溶解性碳流失的拦蓄效益

以裸地为对照,不同处理均显著减少径流 DOC 和 DIC 的流失,对径流中 DTC 流失量的拦蓄效益为 18.0%~76.9%(表 2)。其中,草地对 DOC 和 DIC 的拦蓄效益最高,分别为 78.3% 和 76.5%;其次为上梯下草,分别为 60.6% 和 55.3%;再次为梯田,分别为 42.8% 和 20.5%;上梯下裸拦蓄效益最低,分别为 34.8% 和 13.9%。

2.6 溶解性碳流失通量的影响因素分析

不同水土保持措施处理 DOC、DIC 及 DTC 的流失量与产流量均呈极显著相关($p<0.01$),而与溶解性碳浓度相关性较低(表 3)。产流量对 DOC 流失量的解释率上梯下草最高,为 87%,上梯下裸最低,仅 32%;对 DIC 和 DTC 流失量变化的解释率裸地最高,分别为 93% 和 91%,草地最低,分别为 61% 和 63%(图 5)。



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同水土保持措施 DOC、DIC 和 DTC 浓度变化

Fig. 2 Changes of DOC, DIC and DTC concentrations under different soil and water conservation measures

3 讨论

3.1 不同水土保持措施溶解性碳流失特征

本研究中,裸地处理的溶解性碳显著高于其他处理($p < 0.05$),且 DOC 随产流时间呈降低趋势(图 2),与坡面侵蚀中碳流失过程有关。裸地条件下,降雨击溅和径流冲刷破坏表层土壤团聚体结构,使原来受团聚体保护的 DOC 和 DIC 在降雨条件下充分溶解释放,呈最高值。随着时间推移,土壤中 DOC 和 DIC 随大团聚体数量的减少而不断减少,导致裸地溶解性碳随降雨过程逐渐降低。由于聚集在土壤团聚体内的碳以有机碳为主,故 DOC 的降低趋势更加明显。相比之下,不同水土保持措施处理之间的 DOC 和 DIC 差异不显著,且均随产流时间在 1 个稳定值上下波动,与前人^[19-20]研究结果基本一致。模拟降雨^[19]和野外观测^[20]试验均表明,不同下垫面条件下地表径流中的 DOC 浓度随降雨时间呈

波动变化,反映径流溶解性碳在土壤中不断溶解与流失的过程。

本研究还发现,尽管溶解性碳流失受径流与碳浓度变化的共同驱动,但水文过程在溶解性碳流失中起着主导作用(图 5)。LI 等^[21]研究发现,水文通量是影响黄土高原 DOC 和 DIC 通量的主要因素,且水文通量中的碳浓度对碳流失通量的贡献小于水文通量本身。由于黄土高原地下水埋藏较深,地表径流可能在任何时候都主导着该区河流的 DOC 通量^[22]。ZHONG 等^[23]研究发现,长江上游雅砻江和金沙江的径流量与碳通量之间具有良好的正相关性,径流量变化能够解释 95% 以上的 DOC 和 DIC 通量;对我国重庆市忠县石盘丘小流域径流 DOC 通量变化研究^[20]也发现,径流量决定流域溶解性碳通量,暴雨条件下河流 DOC 通量高达普通降雨条件的 3.95~60.67 倍,表明径流量对区域 DOC 流失量具有重要影响。

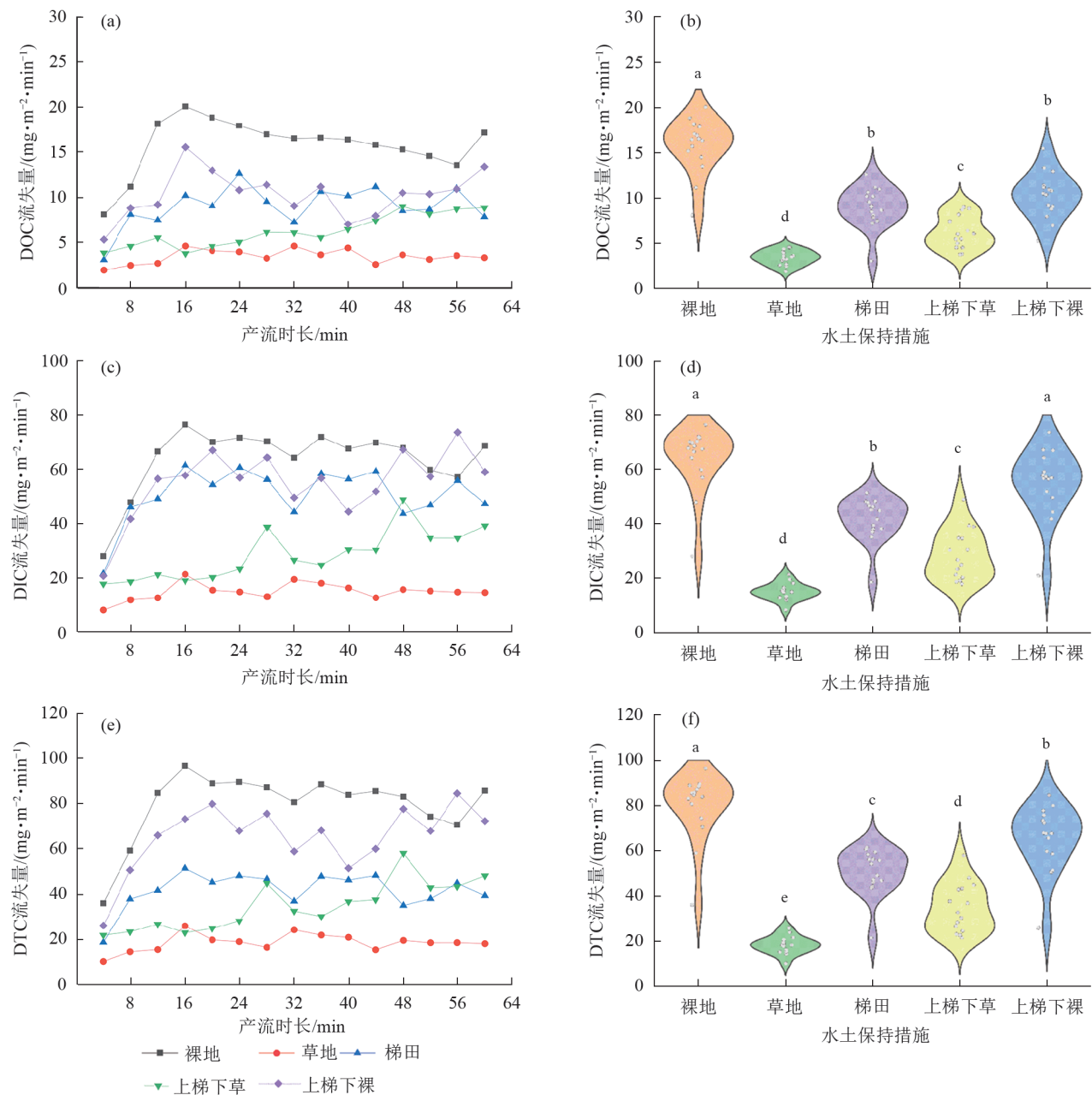


图 3 Changes in DOC , DIC and DTC loss volume under different soil and water conservation measures

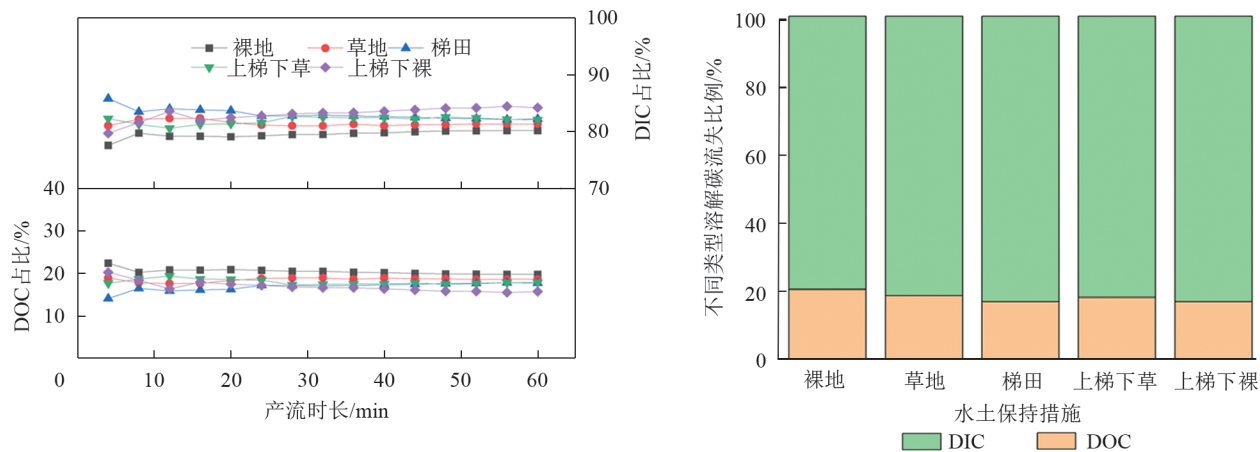


Fig.4 Characteristics of dissolved carbon loss ratio under different soil and water conservation measures

表 2 不同水土保持措施对 DOC、DIC 及 DTC 的拦蓄效益

Table 2 The retention benefits of different soil and water conservation measures on DOC, DIC and DTC %

水土保持措施	DOC	DIC	DTC
草地	78.3	76.5	76.9
梯田	42.8	20.5	47.6
上梯下草	60.6	55.3	56.3
上梯下裸	34.8	13.9	18.0

研究区不同水土保持措施下坡面溶解性碳流失均以 DIC 流失为主,约占径流溶解性碳的 81.8% (图 4),略高于研究区土壤无机碳占土壤全碳的比例 (73.8%),但较同处黄土高原的无定河流域 DIC 平均比例偏低 10%,其原因可能与各小区处理前为土壤有机质相对较高的草地类型有关。RAN 等^[24]研究发现,无定河流域碳组成中 DIC 通量约占溶解性碳的 91%;CHAPLOT 等^[6]对全球 249 条河流溶解性碳通量的 Meta 分析表明,全球河流溶解碳中有 92% 是 DIC,只有 8% 是 DOC。溶解性碳在从陆地向水域的输运过程中,大部分的 DOC 被分解或吸附到一些化合物上,并在水流输送系统中沉淀出来,造成 DOC 损失。相比之下,DIC 较少被微生物分解利用,导致河流系统 DIC:DOC 较陆地系统更高^[25]。

3.2 水土保持措施对径流溶解碳的拦蓄效益

本研究表明,不管是单一的坡面水土保持措施还是水土保持措施组合的实施,都能对坡面土壤溶

解性碳流失产生较好的拦蓄作用。草地主要通过增加地表覆盖减少雨滴动能,增加降雨入渗,从而减少径流侵蚀的发生,能有效减少碳迁移过程中有机质被氧化、矿化的速率和总量^[26-27]。草地植被的根系能显著改善土壤的质地和化学成分,增加土壤孔隙度和有机质质量分数,增强土壤团聚体的稳定性,从而对土壤碳流失产生阻控效果^[28-29]。

表 3 不同水土保持措施下产流量和溶解性碳浓度与 DOC、DIC 及 DTC 流失量的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of dissolved carbon concentration and runoff volume of different soil and water conservation measures with DOC, DIC and DTC loss volume

项目	水土保持措施	DOC	DIC	DTC
产流量	裸地	0.865**	0.965**	0.954**
	草地	0.773**	0.782**	0.794**
	梯田	0.858**	0.936**	0.938**
	上梯下裸	0.565*	0.820**	0.810**
	上梯下草	0.935**	0.879**	0.903**
溶解性碳浓度	裸地	0.105	0.143	0.067
	草地	0.580*	0.487	0.483
	梯田	0.438	0.300	0.447
	上梯下裸	0.248	0.251	0.139
	上梯下草	0.328	0.539*	0.487

注:*,**分别表示显著差异($p<0.05$)和极显著差异($p<0.01$)。

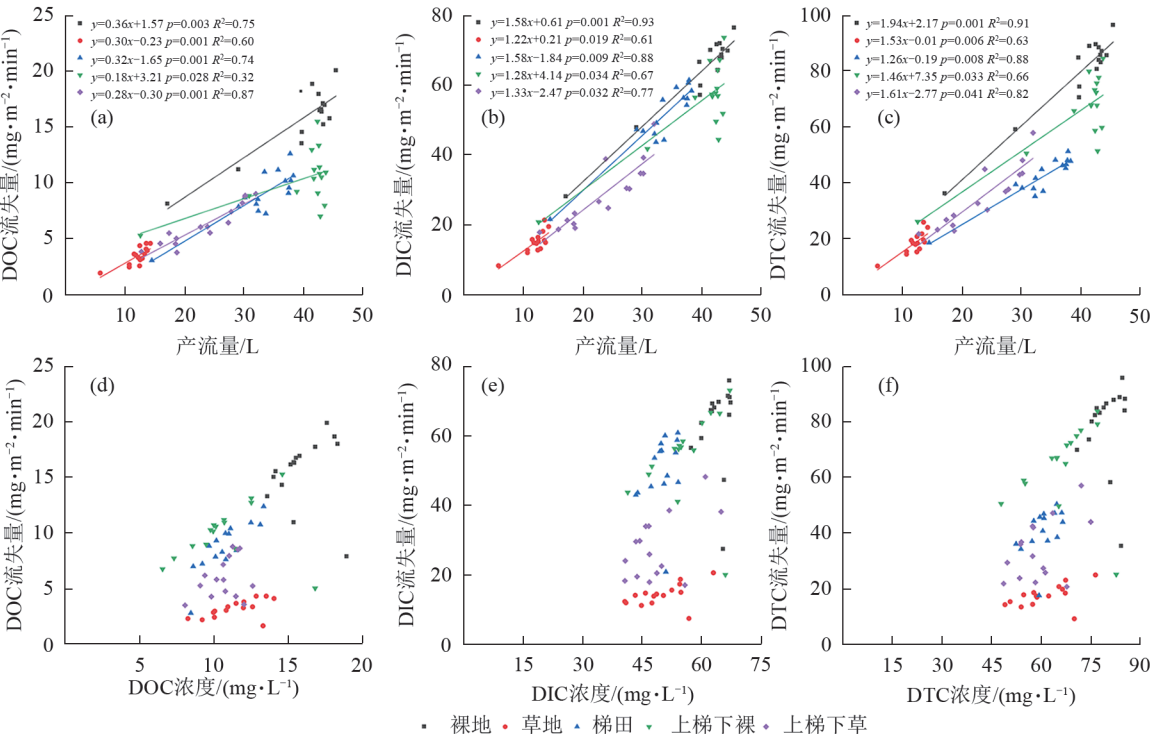


图 5 不同水土保持措施的产流量和溶解性碳浓度与 DOC、DIC 及 DTC 流失量的拟合关系

Fig.5 Fitting relationship of dissolved carbon Concentration and runoff of different soil and water conservation measures with DOC, DIC and DTC loss volume

由于植被恢复,黄土高原不同区域地表径流每年约减少2~37 mm,地表径流的下降有效减少溶解性碳的水平迁移,使得更多的溶解性碳入渗到深层土壤,增强碳汇效益^[22]。梯田通过减缓坡面坡度和截断坡长,以及拦蓄降水、减少径流来产生这一效果^[30]。梯田能显著降低流域内水文连通性,改变流域的汇水面积和洪峰流量,减少溶解性碳的流失;梯田的存在能有效阻止径流和泥沙进入沟渠,修建石坎梯田后径流系数从20%下降到4%^[31]。梯田质量对其减流效益具有重要影响,相同降雨条件下,不同类型梯田的平均减流效益相差可达60%^[32],影响其对溶解性碳的拦蓄效益。

与梯田小区相比,草地小区对土壤DOC、DIC及DTC的拦蓄效益都更为显著。MA等^[33]发现,黄土高原地区林草植被对土壤侵蚀动态具有主导影响,占总贡献的86.1%,梯田的贡献仅占13.9%。降雨强度、梯田修建年限及规格同样也影响梯田对土壤碳流失的拦蓄效果^[34-35]。虽然梯田处理对土壤碳流失的拦蓄效益较草地处理略低,但在本研究中其产生的拦蓄效益仍约40%,并且梯田在生产实践中对保障耕地面积方面具有重要的作用,因此,在布设水土保持措施时应当综合考虑梯田和草地组合效益,通过在坡上修建梯田,坡下建植草地能够在保障区域粮食安全的同时进一步增强水土保持措施的固碳效益。

4 结论

1)除裸地外,各水土保持措施下坡面径流DOC和DIC无显著差异,且随降雨历时增加波动变化;不同水土保持措施下坡面径流DOC、DIC流失量均较裸地显著降低,且降低程度为草地>上梯下草>梯田>上梯下裸。

2)坡面产流量是影响溶解性碳流失的决定因素,不同处理下坡面DOC、DIC及DTC的流失通量与产流量呈显著相关,且溶解性碳流失通量以DIC为主,其贡献溶解性碳流失量的79.5%~83.1%。

3)不同水土保持措施对坡面径流DOC、DIC及DTC产生显著的拦蓄效益,各水土保持措施对坡面溶解性碳的拦蓄效益分别为草地(76.9%)>上梯下草(56.3%)>梯田(47.6%)>上梯下裸(18.0%)。

参考文献:

- [1] BOLAN N S, ADRIANO D C, KUNHIKRISHNAN A, et al. Dissolved organic matter [M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2011:1-75.
- [2] COLE J J, HARARUK O, SOLOMON C T. The carbon cycle: With a brief introduction to global biogeochemistry [M]//Fundamentals of Ecosystem Science.

Amsterdam: Elsevier, 2021:131-160.

- [3] 赵宗权,索惠英,焦树林.万峰湖水库溶解性无机碳来源及时空变异特征[J].应用生态学报,2020,31(6):1783-1790.
ZHAO Z Q, SUO H Y, JIAO S L. Source and spatio-temporal variation characteristics of dissolved inorganic carbon in Wanfenghu Reservoir, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(6):1783-1790.
- [4] WANG Z G, LI X Y, LIU X, et al. Understanding the environmental drivers of summer dissolved carbon in lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau [J].Science of the Total Environment, 2024,951:e175720.
- [5] 李彦,王玉刚,唐立松.重新被“激活”的土壤无机碳研究[J].土壤学报,2016,53(4):845-849.
LI Y, WANG Y G, TANG L S. The effort to re-activate the inorganic carbon in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(4):845-849.
- [6] CHAPLOT V, MUTEA M. Sources and main controls of dissolved organic and inorganic carbon in river basins: A worldwide meta-analysis [J].Journal of Hydrology, 2021,603:e126941.
- [7] RUEHR S, GIROTTO M, VERFAILLIE J G, et al. Ecosystem groundwater use enhances carbon assimilation and tree growth in a semi-arid Oak Savanna [J].Agricultural and Forest Meteorology, 2023,342:e109725.
- [8] RAN L S, FANG N F, WANG X H, et al. Substantially enhanced landscape carbon sink due to reduced terrestrial-aquatic carbon transfer through soil conservation in the Chinese Loess Plateau [J].Earth's Future, 2023,11(7):e2023EF003602.
- [9] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
GAN Y X, DAI Q H, FU W B, et al. Characteristics of soil erosion on Karst slopes under artificial rainfall experiment conditions [J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(9):2754-2760.
- [10] 高佩玲,雷廷武.小流域土壤侵蚀动态过程模拟模型[J].农业工程学报,2010,26(10):45-50.
GAO P L, LEI T W. Dynamic process simulation model for soil erosion of small-scale watershed system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(10):45-50.
- [11] 周涛,苏正安,刘刚才,等.工程堆积体典型生态修复措施对土壤侵蚀水动力过程的影响[J].农业工程学报,2022,38(9):91-100.
ZHOU T, SU Z A, LIU G C, et al. Effects of typical ecological restoration measures for engineering accumulation on sediment yield and hydrodynamic process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,31(1):131-160.

- neering, 2022, 38(9):91-100.
- [12] 吴普侠, 汪晓珍, 吴建召, 等. 中国退耕还林工程固碳现状及固碳潜力估算[J]. 水土保持学报, 2022, 36(4): 342-349.
- WU P X, WANG X Z, WU J Z, et al. Estimation of carbon stock and carbon sequestration potential for China's grain for green project[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 342-349.
- [13] 曹文洪, 张晓明, 张永娥, 等. 水土保持碳汇内涵与测算方法[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2024, 22(1): 1-11.
- CAO W H, ZHANG X M, ZHANG Y E, et al. Connotation of carbon sink in soil and water conservation and its calculation method[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(1): 1-11.
- [14] DENG L, WANG K B, ZHU G Y, et al. Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018, 171: 185-192.
- [15] 罗佳茹, 李斌斌, 张风宝, 等. 黄丘区特色治理开发小流域土壤侵蚀变化对景观格局演变的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(12): 4165-4176.
- LUO J R, LI B B, ZHANG F B, et al. Responses of soil erosion to changes in landscape pattern and its evolution in watershed in the Loess Hilly Region under characteristic management and development[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(12): 4165-4176.
- [16] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG H X, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2021, 602: e126714.
- [17] TIAN P, XU X Y, PAN C Z, et al. Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548: 24-39.
- [18] 黄婷婷, 史扬子, 曹琦, 等. 黄土高原六道沟小流域近 30 年来土壤侵蚀变化评价[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 8-17.
- HUANG T T, SHI Y Z, CAO Q, et al. Soil erosion evaluation of Liudaogou catchment in the Loess Plateau during the past 30 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(1): 8-17.
- [19] WANG H, ZHANG Q W, LI X, et al. Surface microrelief induced by tillage management alters the pathway and composition of dissolved organic matter exports from soils to runoff during rainfall[J]. Water Research, 2023, 245: e120554.
- [20] LIANG K, LI T Y, HE B H, et al. Dynamics of dissolved organic carbon in runoff discharge under different rainfall patterns in a representative agricultural catchment[J]. Journal of Hydrology, 2023, 617: e129079.
- [21] LI J Y, LIU S G, FU B J, et al. Dissolved carbon fluxes in a vegetation restoration area of an eroding landscape[J]. Water Research, 2019, 152: 106-116.
- [22] LI Z W, PENG H, XIE B G, et al. Dissolved organic matter in surface runoff in the Loess Plateau of China: The role of rainfall events and land-use[J]. Hydrological Processes, 2020, 34(6): 1446-1459.
- [23] ZHONG J, LI S L, ZHU X T, et al. Dynamics and fluxes of dissolved carbon under short-term climate variabilities in headwaters of the Changjiang River, draining the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021, 596: e126128.
- [24] RAN L S, TIAN M Y, FANG N F, et al. Riverine carbon export in the arid to semiarid Wuding River catchment on the Chinese Loess Plateau[J]. Biogeosciences, 2018, 15(12): 3857-3871.
- [25] CHAPLOT V, RIBOLZI O. Hydrograph separation to improve understanding of dissolved organic carbon dynamics in headwater catchments[J]. Hydrological Processes, 2014, 28(21): 5354-5366.
- [26] YU Z C, ZHANG W, LIU Y S, et al. Dynamics of SOC density and driving factors during the restoration of artificial grassland and abandoned farmland in Mu Us Desert, China[J]. Catena, 2023, 224: e106991.
- [27] CHEN C, PARK T, WANG X H, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature Sustainability, 2019, 2: 122-129.
- [28] SU X P, XU C, LIN T C, et al. Response of erosion-induced carbon loss to rainfall characteristics is forest type dependent[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 345: e109835.
- [29] 张智勇, 艾宁, 刘广全, 等. 陕北黄土区退耕还林(草)地土壤质量特征及其对降水的响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 73-80.
- ZHANG Z Y, AI N, LIU G Q, et al. Soil quality characteristics of forests and grasslands returned from farmland and their responses to precipitation in the Loess Region of Northern Shaanxi, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 73-80.
- [30] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.
- LI Z B, ZHOU B, MA T T, et al. Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in Loess Hilly Region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 312-318.
- [31] WEI W, CHEN D, WANG L X, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 159: 388-403.

(下转第 64 页)

- [23] SILVA D F, ARAUJO A S F, LIMA A Y V, et al. Enzymatic stoichiometry in degraded soils after two decades of restoration in a Brazilian semiarid region [J]. Catena, 2024, 236: e107768.
- [24] 宋达成, 马全林, 刘世权, 等. 民勤黏土沙障-人工梭梭林物种多样性及土壤水分变化特征 [J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 618-628.
- SONG D C, MA Q L, LIU S Q, et al. Species diversity in Minqin clay sand barrier-artificial *Haloxylon ammodendron* plantations and the characteristics of soil moisture changes [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 618-628.
- [25] 徐春燕, 王涛, 贾晨波, 等. 贺兰山东麓荒漠植物对土壤化学性质和酶活性的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29(12): 2346-2354.
- XU C Y, WANG T, JIA C B, et al. Effects of different desert plants on the soil chemical properties and enzyme activities in Helanshan eastern region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2346-2354.
- [26] 安花, 蒙仲举, 李浩年, 等. 库布齐沙漠不同林龄沙柳树对土壤酶活性的影响 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 77-85.
- AN H, MENG Z J, LI H N, et al. Effects of different ages of *Salix psammophila* forest on soil enzyme activity in Hobq Desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 77-85.
- [27] 张延文, 周雅洁, 张不染, 等. 固沙林恢复土壤酶化学计量特征与养分限制效应 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 102-111.
- ZHANG Y W, ZHOU Y J, ZHANG B R, et al. Soil enzymatic stoichiometry and nutrient limitation during revegetation in sand-fixing forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 102-111.
- [28] RAZAVI B S, BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Temperature selects for static soil enzyme systems to maintain high catalytic efficiency [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 97: 15-22.
- [29] 杨智姣, 温晨, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8606-8617.
- YANG Z J, WEN C, YANG L, et al. Effects of different restoration methods on ecosystem multifunctionality in the semi-arid loess small watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8606-8617.
- [30] 梁钰镁, 高永, 王瑞东, 等. 沙柳沙障腐烂过程对土壤微生物生物量及酶活性的影响 [J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 305-311.
- LIANG Y M, GAO Y, WANG R D, et al. Effects of *Salix psammophila* sand barriers decay on soil microbial biomass and enzymes activities [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 305-311.
- [31] 潘颜霞, 赵洋, 张志山. 生态垫铺设对风沙固定及土壤温湿度的影响 [J]. 中国沙漠, 2023, 43(5): 186-193.
- PAN Y X, ZHAO Y, ZHANG Z S. The influence of ecotone laying on sand fixation and soil temperature and humidity [J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(5): 186-193.
- [32] 李镒, 汪季, 焦宏远, 等. 基于破损规律及植物保存率的沙障选择 [J]. 西北林学院学报, 2021, 36(2): 130-135.
- LI Z, WANG J, JIAO H Y, et al. Sand barrier selection based on the damage rule and plant preservation rate [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2): 130-135.
- [33] 马全林, 王继和, 刘虎俊, 等. 机械沙障在退化人工梭梭林恢复中的应用 [J]. 干旱区研究, 2005, 22(4): 526-531.
- MA Q L, WANG J H, LIU H J, et al. Application of sand barriers in regenerating the degenerated artificial forests of *Haloxylon ammodendron* bge [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4): 526-531.
- (上接第 56 页)
- [32] CHEN D, WEI W, CHEN L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. Earth-Science Reviews, 2017, 173: 109-121.
- [33] MA T L, LIU B Y, HE L, et al. Response of soil erosion to vegetation and terrace changes in a small watershed on the Loess Plateau over the past 85 years [J]. Geoderma, 2024, 443: e116837.
- [34] 张玥, 郭学锋, 韩剑桥, 等. 黄土高原近 40 年梯田建设的土壤固碳效益初步估算 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 190-197.
- ZHANG Y, GUO X F, HAN J Q, et al. Preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau in the past nearly 40 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 190-197.
- [35] CHEN D, WEI W, CHEN L D, et al. Response of soil nutrients to terracing and environmental factors in the Loess Plateau of China [J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(2): 230-240.