DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.029 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.029
赵胜朝, 张秀梅, 衣强, 等. 径流小区尺度下土地利用类型对坡面减流减沙的调控机制[J]. 水土保持研究,2026,33(6):40-48,56.
Zhao Shengzhao, Zhang Xiumei, Yi Qiang, et al. Regulation mechanisms of land use types on runoff and sediment reduction on slopes at runoff plot scale[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):40-48,56.

径流小区尺度下土地利用类型对坡面减流减沙的调控机制

赵胜朝[1], 张秀梅[2], 衣 强[1], 章 瑞[2], 罗 荣[2],
安韶山[2], 马 波[2], 张 静[1], 陈国兵[1]
(1.河南省水土保持监测总站, 郑州 450008; 2.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**]系统评估不同土地利用类型对坡面产流产沙过程的调控作用,并揭示其减流减沙机制,为不同土地利用条件下坡面水土保持措施优化提供科学依据。[**方法**]基于2016—2024年河南嵩县胡沟小流域径流小区长期定位观测数据,选取10°,15°和25°共3种典型坡度,开展了裸地、农地、林地和草地4种土地利用类型在天然降雨条件下的产流产沙特征及减流减沙效益的规律探究。[**结果**](1)坡面径流深、含沙量及土壤流失量在年际尺度上波动显著,但总体受坡度与土地利用类型的共同控制。(2)裸地、农地平均径流深分别为48.45,26.10 mm,平均含沙量为458.75,313.81 g/L;草地减流减沙率长期维持在99%以上,林地减流减沙率整体介于23%~100%,农地减流减沙效应相对较弱。(3)平均I_{30}对农地、林地减流减沙率有显著负向作用($p<0.05$);林草覆盖度对林地减流减沙率有显著正向作用($p<0.01$);减流在降雨侵蚀性与泥沙输出之间起关键中介作用;草地减流过程对降雨和坡度变化响应不显著。[**结论**]在豫西黄土丘陵区,林地、草地等近自然植被配置可显著降低坡面水土流失。该研究可为该区域水土流失综合治理、生态修复及可持续土地利用提供数据支撑和实践指导。

关键词:土地利用类型; 径流小区; 减流减沙; 黄土丘陵区
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0040-09

Regulation mechanisms of land use types on runoff and sediment reduction on slopes at runoff plot scale

Zhao Shengzhao[1], Zhang Xiumei[2], Yi Qiang[1], Zhang Rui[2], Luo Rong[2],
An Shaoshan[2], Ma Bo[2], Zhang Jing[1], Chen Guobing[1]
(1.*Soil and Water Conservation Monitoring General Station of Henan Province*, *Zhengzhou* 450008, *China*; 2.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [**Objective**] To systematically evaluate the regulatory effects of different land use types on slope runoff and sediment yield processes and to elucidate their runoff and sediment reduction mechanisms, thereby providing a scientific basis for optimizing soil and water conservation measures under different land-use conditions. [**Methods**] Based on long-term fixed-position observation data from runoff plots in the Hugou small watershed of Song County, Henan Province, China, from 2016—2024, three representative slope gradients (10°, 15°, and 25°) were selected to investigate the runoff and sediment yield characteristics and the runoff and sediment reduction efficiencies under natural rainfall conditions for four land use types: bare land, cropland, forestland, and grassland. [**Results**] (1) Slope runoff depth, sediment concentration, and soil loss exhibited

收稿日期:2026-01-20 **修回日期:**2026-02-23 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:河南省2024年水利科技攻关项目"豫西黄土高原小流域泥沙来源示踪及治理对策"(GG202415)
第一作者:赵胜朝(1980—),男,河南延津人,学士,高级工程师,主要从事水土保持科研、水土保持规划及技术管理工作。E-mail:408481961@qq.com
通信作者:马波(1982—),男,陕西西乡人,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail:soilcrop@163.com

pronounced interannual variability but were jointly controlled by slope gradient and land-use type. (2) The average runoff depths of bare land and cropland were 48.45 mm and 26.10 mm, respectively, and their average sediment concentrations were 458.75 g/L and 313.81 g/L, respectively. The runoff and sediment reduction rates of grassland remained above 99% over the long term, those of forestland generally ranged from 23% to 100%, and the runoff and sediment reduction effect of cropland was relatively weak. (3) Average I_{30} had a significant negative effect on the runoff and sediment reduction rates of cropland and forestland ($p<0.05$); forest and grass coverage had a significant positive effect on the runoff and sediment reduction rate of forestland ($p<0.01$); runoff reduction played a key mediating role between rainfall erosivity and sediment output; and the runoff reduction process of grassland showed no significant response to rainfall and slope gradient changes. [**Conclusion**] In the loess hilly region of western Henan Province, near-natural vegetation configurations such as forestland and grassland can effectively reduce slope soil erosion. This study provides data support and practical guidance for comprehensive control of soil erosion, ecological restoration, and sustainable land use in the region.

Keywords: land-use type; runoff plot; runoff and sediment reduction; loess hilly region

降雨及其引发的坡面径流侵蚀产沙是全球普遍关注的生态环境问题之一,在我国黄土丘陵区表现尤为突出[1]。豫西黄土丘陵区位于黄土高原向华北平原过渡的关键地带,具有土层深厚疏松、地形起伏破碎、沟壑发育、植被覆盖度低等典型特征,区域土壤结构松散、抗蚀能力弱。同时,该区降水年际与季节分配不均,降雨过程多集中于汛期,并以短历时、高强度暴雨为主,极易诱发坡面快速产流产沙,形成暴涨暴落的山洪径流过程[2]。由此导致的强烈水土流失不仅加剧了区域土地退化、耕地质量下降和生态系统功能衰退,还通过持续向黄河干流输送大量泥沙,进一步加重下游河道淤积与洪涝风险,对区域生态安全和社会经济发展构成长期威胁[3]。因此,从坡面尺度系统揭示降雨作用下水沙产生及其调控机制,是豫西黄土丘陵区水土流失防治亟需解决的基础科学问题。

坡面作为流域水沙形成的基本单元,其产流产沙过程受坡面及土地利用的显著调控[4]。基于径流小区观测与人工模拟降雨试验,现有研究在减流减沙效应方面形成了较为一致的认识。肖培青等[5]在黄土丘陵区径流小区试验中指出,相较于裸地,草地和灌木覆盖能够显著降低坡面径流量与产沙强度。而冠层结构复杂、植被覆盖度高的林地在高强度降雨条件下仍能维持较为稳定的减沙效果[6]。陈鹏飞等[7]通过对坡耕地、人工草地、乔木林地、自然草地和灌木林地的系统对比,明确灌木林地和自然草地在削减坡面径流与泥沙产出方面具有综合优势。针对豫西黄土丘陵区,衣强等[8]的径流小区试验表明,草地的减沙效益显著优于一年生作物农地,其减沙率在部分降雨条件下可接近完全抑制水平。

在不同地形与降雨条件下,农地、草地和林地等的减流减沙效应表现出一定差异性。马波等[9]通过人工模拟降雨试验指出,作物覆盖可在一定程度上削弱坡度增加对坡面产流产沙的放大效应,降低坡面水土流失强度。从作用机制看,朱冰冰等[10]从水动力学角度阐明,草本植被覆盖通过增加地表糙度、降低径流流速和侵蚀功率,从而有效抑制土壤剥蚀与泥沙输移。以上研究表明,土地利用类型不仅影响坡面水沙产出量,还可通过改变下垫面结构调控径流动力过程及侵蚀强度。

在时间尺度上,长期径流小区监测进一步揭示了坡面减流减沙效应的演变特征。申震洲[11]和刘栋[12]等基于延安燕沟流域的长期观测结果指出,退耕还林还草和自然恢复植被的水土保持效益随植被演替和地表结构改善持续增强,表现出明显的累积效应和稳定性优势。这一认识凸显了长期生态修复措施在坡面水沙调控中的重要作用,也表明短期试验难以全面反映其减蚀效益的真实水平。

尽管上述研究为认识土地利用调控坡面减流减沙效应提供了重要基础,但针对豫西黄土丘陵区这一黄土高原与华北平原过渡带的系统性研究仍显不足。该区域降雨时空变异显著、地貌破碎程度高,土地利用格局复杂,不同土地利用类型下坡面水动力响应机制仍缺乏系统认识。尤其是在统一观测条件下,对多种典型土地利用类型开展多年连续平行对比研究相对匮乏,制约了不同土地利用减流减沙效应差异形成机制的深入理解。因此,亟需在统一观测背景下开展多土地利用类型的长期连续对比研究,以厘清土地利用-下垫面结构-水沙响应之间的作用关系。

基于此,本研究依托胡沟小流域 2016—2024 年径流小区连续监测数据,在统一降雨与地形背景条件下,系统研究裸地、农地、林地和草地 4 种土地利用类型对坡面产流产沙及减流减沙过程的影响特征,

并从下垫面结构与径流动力响应角度解析其调控机制，旨在揭示不同土地利用减流减沙效应差异的形成机理，以期为黄土丘陵区过渡带水土流失精准防控与土地利用优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

胡沟小流域（111°58′—112°03′E，34°05′—34°10′N）位于河南省洛阳市嵩县，地处豫西黄土丘陵区核心地带，是黄土高原东南缘与伏牛山余脉交汇的典型侵蚀地貌过渡区。属暖温带大陆性季风气候，降水集中且年际变率大。多年平均气温为13.2 ℃，年均降水量为635.8 mm，多以短历时、高强度暴雨形式出现；无霜期约210 d。冬季寒冷干燥，极端最低气温可达－15.3 ℃。

该流域地形破碎、沟壑发育，坡面坡度多为10°～25°，局部可超过30°。主风向为西北和东北，年均风速1.8 m/s，累年极大风速18.6 m/s，年均大风日数约8.2 d，沙尘天气较少，风蚀作用相对较弱，水力侵蚀为主导侵蚀类型。土壤以黄土母质发育的褐土为主，质地疏松、结构稳定性差。土壤颗粒组成中，黏粒（＜0.002 mm）、粉粒（0.002～0.05 mm）和砂粒（0.05～1 mm）含量分别为12.34%，58.71%和28.95%；有机质含量为8.63 g/kg，土壤容重为1.28 g/cm^3，孔隙度较高但抗冲性弱，暴雨条件下易发生溅蚀与片蚀。

历史上的胡沟小流域以顺坡耕作为主，天然植被破坏较为严重，现土地利用类型以人工林、灌草复合群落和坡耕地为主，生态系统较为脆弱。

1.2 数据的采集与测定

1.2.1 径流小区设置 本研究依托河南省嵩县胡沟小流域长期定位观测平台，采用标准径流小区观测方法，共设置3组径流小区，每组4个，共计12个标准径流小区，并配套36个集流池（图1）。径流小区坡度设置为10°，15°和25°，每种坡度各布设4个小区。单个标准小区水平投影面积为100 m^2（长20 m、宽5 m），每个小区下方设置3个集流池，单池容积为0.81 m^3，用于分级收集径流与泥沙。该试验系统于2011年建成，2016年完成升级改造，整体设计严格遵循《水土保持技术监测规范》，具备对坡面产流产沙过程进行连续、全量程、高精度监测的能力。



注：A改造后的径流小区俯视图；B 10°裸地小区监测设备；C小区径流取样；D径流小区集流桶清理。

图1 胡沟小流域径流小区示意

Fig. 1 Runoff plots in Hugou small watershed

为比较不同土地利用条件下坡面产流产沙特征，各坡度小区统一设置4种土地利用类型：裸露地表（裸地）、农作物地（农地）、林地和自然植被地（草地），分别对应10°-1，15°-1，25°-1（裸地），10°-2，15°-2，25°-2（农地），10°-3，15°-3，25°-3（林地）以及10°-4，15°-4，25°-4（草地），实现不同坡度与土地利用组合条件下坡面水沙过程的对比观测。各小区具体设置详见表1。

表1 不同土地利用类型径流小区的田间处理措施（2016—2024年）

Table 1 Field control measures for runoff plots under different land use types (2016—2024)

土地利用类型	主要植被或作物	播种/种植方式	收割/扰动时间	耕作与管理措施	全年覆盖特征
裸地	无植被，全年裸露	无	无	化学除草，保持清耕状态	雨季长期裸露，盖度＜5%
农地	花生：2016—2017年、2019年 红薯：2018年 大豆：2020—2023年 玉米：2024年	顺坡穴播	花生：9月 红薯：10月 大豆：9月 玉米：8月	等高种植，常规中耕除草	4—9月覆盖良好，冬季裸露
林地	杏树，林下竹叶草	植苗造林	无收割，仅自然落叶	无翻耕、无采伐	全年覆盖，郁闭度0.9，林下盖度20%
草地	自然植被（白草、白茅、羊胡子草）	初期人工播种，后自然恢复	无	免耕、免扰动、无施肥或刈割	全年高覆盖，盖度约90%，平均高度50 cm

注：各径流小区的土地类型均为黄褐土，土层厚度50 cm；“无”表示全年无扰动。花生（*Arachis hypogaea* L.），红薯〔*Ipomoea batatas*（L.）Lam.〕，大豆〔*Glycine max*（L.）Merr.〕，玉米（*Zea mays* L.）；杏树（*Prunus armeniaca* L.），竹叶草〔*Oplismenus compositus*（L.）P. Beauv.〕；白草（*Pennisetum flaccidum* Griseb.），白茅〔*Imperata cylindrica*（L.）P. Beauv.〕，羊胡子草（*Eriophorum scheuchzeri* Hoppe）。

1.2.2　*指标观测方法*　本研究数据来源于胡沟小流域径流小区 2016—2024 年年度监测成果整编报告。9 a 内共监测到有效降雨过程 195 场,每次降雨事件均同步记录并计算降雨历时、雨量、径流深、含沙量及土壤流失量等。基于单场降雨观测结果,在年尺度上对同一年内各次降雨产生的径流深和含沙量进行累积得到年径流深与年含沙量数据,用于不同土地利用类型坡面减流减沙效应的综合分析。

降雨量测定:研究区布设一体化遥测雨量站 1 套,连续记录降雨过程数据;选取降雨量及次降雨最大 30 min 雨强(I_{30})作为坡面产流产沙分析的基础气象因子。计算每年所有有效降雨事件的累积降水量和最大 30 min 雨强的算术平均值以表征年度降雨水平。

径流与泥沙测定:径流小区坡度设置为 10°,15° 和 25°,每个标准径流小区下设 3 个集流池。径流发生后,按监测方案对分流池和集流池进行取样。10°,15°和 25°裸地小区及 25°林地小区采用自动监测与人工取样相结合的方式,其余小区采用人工取样方式。取样过程中对径流充分搅拌后采集泥沙样品,每次径流事件每个小区取样 2 个。取样结束后清洗分流池和集流池,样品带回实验室进行分析测定。

泥沙含量测定:泥沙样品采用烘干法计算径流含沙量。

植被覆盖度测定:农作物覆盖度、林草覆盖度、草地覆盖度采用无人机及植被盖度测量软件和目估法测量,未产流时每月的 1 日左右和 15 日左右各测量植被盖度一次,发生产流时产流后加测一次;林下植被覆盖度采用无人机和目估法测量,平均树冠直径、草地平均高度使用卷尺测量,每月的 1 日左右和 15 日左右各测量一次。

农作物种植设计:花生、大豆种植密度为 3.33 株/m^2,株×行距为 15 cm×20 cm;红薯种植密度为 5 株/m^2,株×行距为 40 cm×50 cm;玉米种植密度为 1 株/m^2,株×行距为 100 cm×100 cm。

造林设计:杏树种植株×行距为 150 cm×200 cm,2016 年时林龄为 2 a。每年 4—7 月中耕除草,必要时进行化学除草。

1.2.3　*产流产沙和减流减沙指标计算*　为定量表征不同处理条件下坡面产流与侵蚀产沙特征,并消除径流小区面积差异对结果的影响,本文选取径流深、含沙量、土壤流失量(输沙模数)以及减流率和减沙率作为评价指标,对各处理小区在单次降雨事件或观测时段内的产流产沙过程进行分析。

径流深(R, mm)用于表征单位面积上的产流量,可将实测径流体积折算为等效水层深度,便于不同处理间的横向比较,其计算公式为:

$$R=\frac{V}{A}\times 1000 \tag{1}$$

式中:V 为单次降雨事件或观测时段内收集的径流体积(m^3);A 为径流小区的水平投影面积(m^2)。

径流小区含沙量(S, g/L)用于表征单位体积径流中所含固体泥沙的质量浓度,可反映真实条件下的泥沙输出,其计算公式为:

$$S=\frac{W_S}{V_W}\times 1000 \tag{2}$$

式中:W_S 为单次降雨事件或观测时段内收集的固体泥沙质量(g);V_W 为采集水样的容积(cm^3)。

土壤流失量(E, t/hm^2),亦称输沙模数,用于表征单位面积上的土壤侵蚀强度,以消除尺度效应并增强不同处理间的可比性,其计算公式为:

$$E=\frac{M_S}{A}\times 10^4 \tag{3}$$

式中:M_S 为单次降雨事件或观测时段内收集并烘干的泥沙干质量(t);A 为径流小区的水平投影面积(m^2)。

在此基础上,以同坡度条件下的裸地小区作为侵蚀基准,通过比较处理小区与裸地小区的径流深和土壤流失量,计算减流率(P_{ri},%)和减沙率(P_{si},%),以定量评价不同土地利用方式对坡面产流产沙的削减效应,其计算公式为:

$$P_{ri}=\frac{Q_{bi}-Q_{mi}}{Q_{bi}}\times 100\% \tag{4}$$

$$P_{si}=\frac{S_{bi}-S_{mi}}{S_{bi}}\times 100\% \tag{5}$$

式中:Q_{bi} 为裸地的径流深(mm);Q_{mi} 为不同土地利用的径流深(mm);S_{bi} 为裸地的含沙量(g/L);S_{mi} 为不同土地利用的含沙量(g/L)。

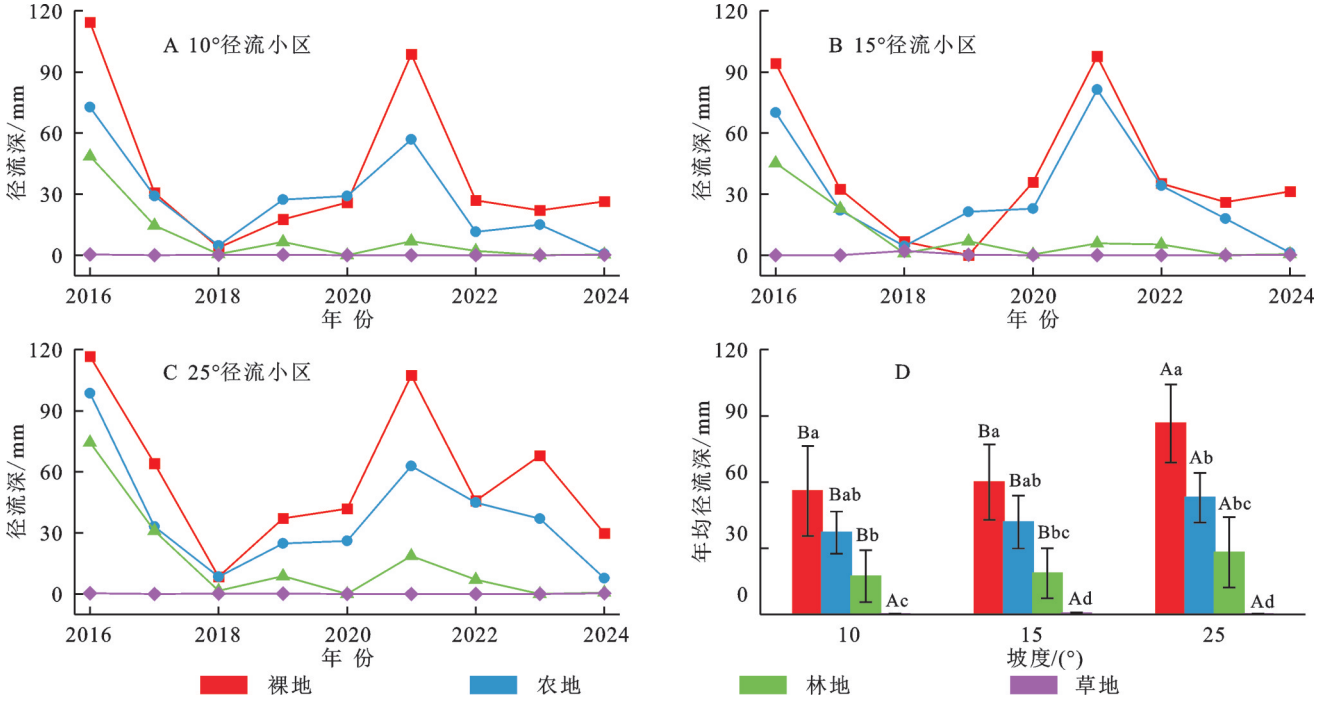
1.3　数据处理

采用 IBM SPSS 27 对不同坡度及土地利用条件下径流小区的产流产沙、土壤流失量及减流减沙特征进行描述性分析,基于双因素方差分析($\alpha=0.05$)分析不同坡度及土地利用条件下的产流产沙及减流减沙的显著差异。使用结构方程模型(Structural Equation Modeling, SEM)评估各影响因子对减流率、减沙率的直接和间接影响,引入卡方自由度比(χ^2/df)、比较拟合系数(CFI)、拟合优度指数(GFI)和近似误差均方根(RMSEA)指标判断模型拟合优度。考虑到长期定位观测数据样本量有限,本文中的 SEM 分析主要用于探索不同因子之间的潜在作用路径及直接与间接影响关系。结构方程模型使用 R4.5.1 中的 piecewiseSEM 程序包进行。图形绘制使用 Origin Pro 2024 和 Microsoft PowerPoint 完成。

2 结果与分析

2.1 不同坡度及土地利用条件下的径流小区产流产沙特征

2016—2024年观测结果表明，不同坡度径流小区径流深在年际尺度上波动显著，但总体受坡度和土地利用类型的共同控制（图2）。在3种坡度条件下，裸地径流深始终最大，农地次之，林地和草地显著偏小。就多年平均值而言，10°，15°和25°坡面中，裸地径流深分别显著高于对应坡度下的林地和草地，其中林地径流深多低于20 mm，草地径流深在多数年份接近于0，仅在个别强降雨年份出现微弱径流响应。坡度增大显著增强了坡面产流能力。相同土地利用条件下，25°坡面径流深整体高于10°和15°坡面，尤其在裸地和农地条件下表现最为明显。如2016年、2021年等降雨较强年份，25°裸地径流深分别达到128.3 mm和107.3 mm，明显高于10°和15°坡面的同期水平。而林地和草地对坡度变化的响应较弱，即植被覆盖在一定程度上削弱了坡度增加对产流过程的放大效应。



注：图2D中误差线表示均值的标准误差（SE）。

图2 不同土地利用类型条件下径流深的分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of runoff depth under different land use types

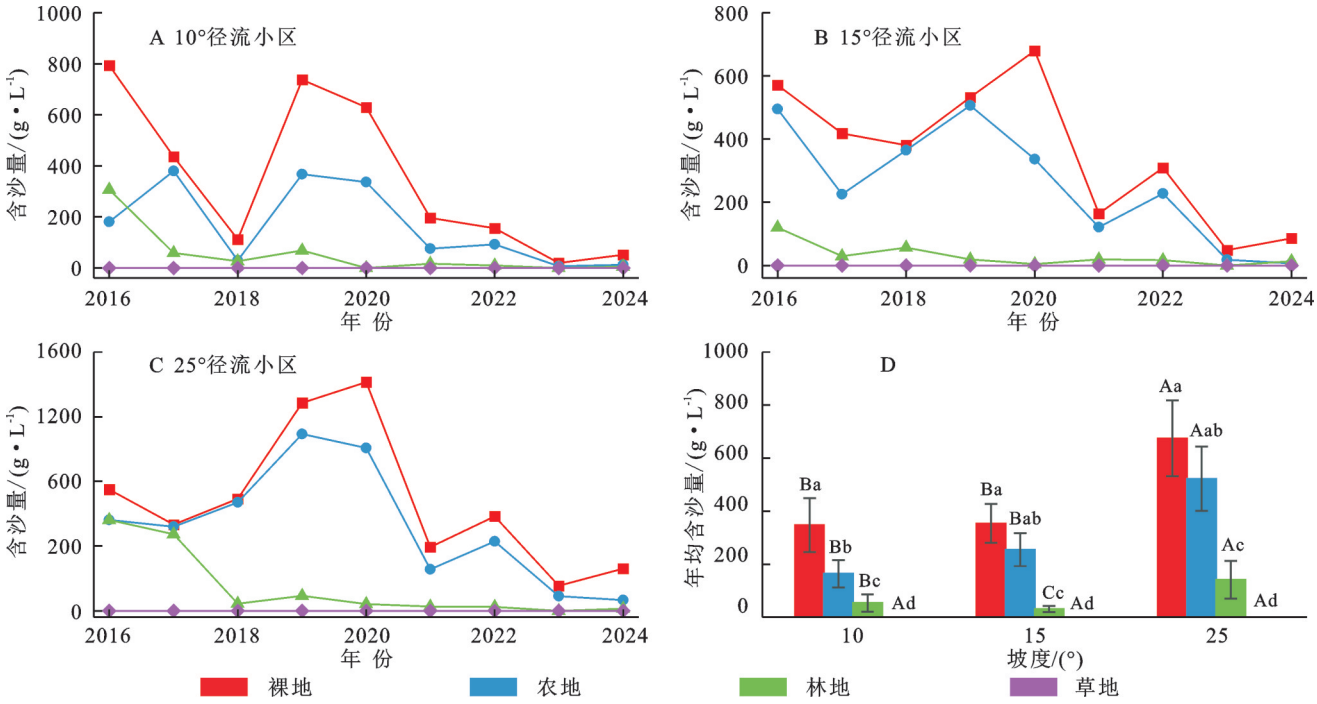
不同坡度和土地利用条件下的含沙量差异显著（图3），且变化幅度明显大于径流深。裸地条件下，各坡度含沙量均处于最高水平，且年际波动剧烈。25°裸地在多数年份表现出极高的输沙能力，2019年和2020年含沙量分别达到1 285.7 g/L和1 413.8 g/L，远高于同期林地和草地水平。10°和15°裸地虽整体低于25°坡面，但在强降雨年份仍表现出显著的产沙响应。农地含沙量整体低于裸地，但显著高于林地和草地，且对坡度变化较为敏感。15°和25°农地在2016—2019年期间多次出现较高含沙量值，即耕作扰动削弱了土壤结构稳定性，使坡面更易发生侵蚀。林地含沙量整体维持在较低水平，多数年份低于50 g/L；草地在所有坡度条件下含沙量几乎为零，未表现出明显产沙过程。这表明连续植被覆盖和发育良好的根系结构能够显著增强土体抗蚀性，并有效阻断泥沙输出。

2.2 不同坡度及土地利用条件下的径流小区土壤流失量特征

坡面土壤流失量变化受土地利用类型与坡度的共同控制。总体上，裸地和农地为主要土壤流失来源，林地土壤流失量显著偏低，草地在各坡度和各年份均未发生明显土壤流失，表现出最优的水土保持效应。相同土地利用条件下，土壤流失量整体随坡度增大而增加，其中25°坡面侵蚀最为强烈（图4）。以农地为例，10°，15°和25°坡面土壤流失量均值分别为23.17，23.23，52.29 t/hm^2；裸地在多数年份同样呈现25°＞15°＞10°的变化趋势，且在强降雨年份土壤流失情况尤为突出。

不同土地利用方式间差异更为显著，裸地和农地土壤流失量普遍高于林地，反映出地表扰动和覆盖不足对土壤结构稳定性的削弱作用；林地土壤流失量整体处于较低水平，多数年份低于5 t/hm^2，仅在

个别强降雨且坡度较大的条件下出现一定程度增加。草地始终未观测到土壤流失,表明连续植被覆盖和发达根系能够显著降低径流侵蚀能量,抑制坡度效应的放大。



注:图 3D 中误差线表示均值的标准误差(SE)。不同小写字母表示同一坡度条件下不同土地利用径流小区的年均含沙量在 0.05 水平有显著差异;不同大写字母表示同一土地利用条件下不同坡度径流小区的年均含沙量在 0.05 水平有显著差异。

图 3　不同土地利用类型条件下含沙量的分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of sediment concentration under different land use types

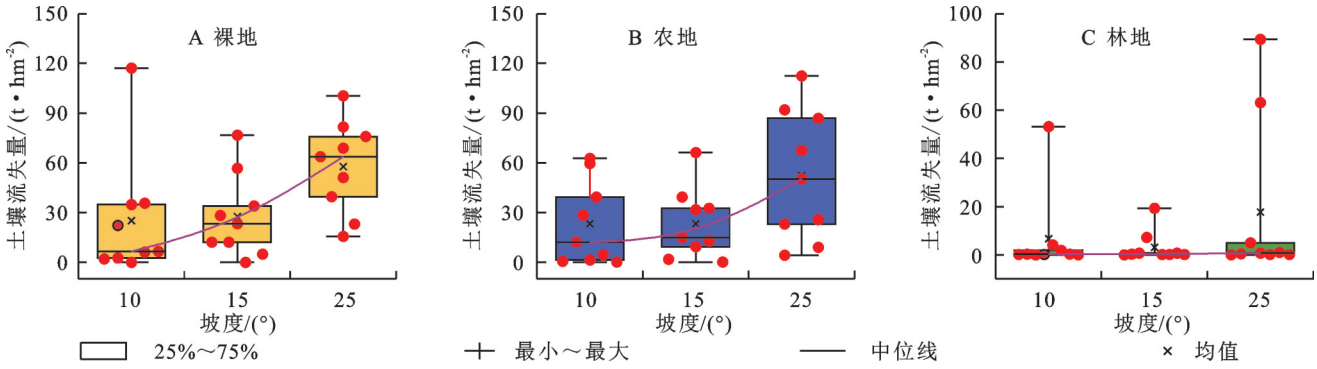


图 4　不同坡度与土地利用类型条件下土壤流失量的分布特征

Fig. 4　Distribution characteristics of soil loss under different slope gradients and land use types

2.3　不同坡度及土地利用条件下的径流小区减流减沙效应

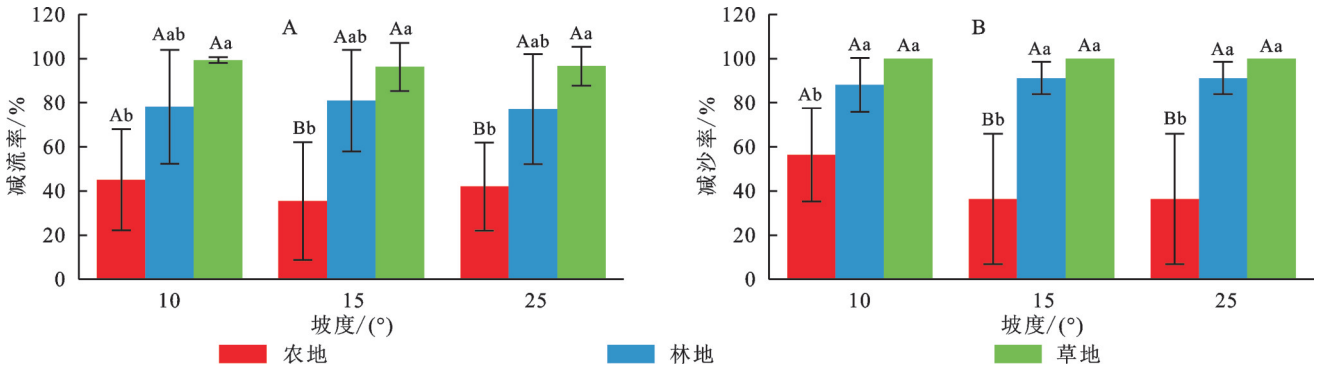
2016—2024 年各径流小区减流率与减沙率计算结果表明,各类土地利用类型对坡面径流与泥沙输出均具有显著削减作用,但其效应强度随土地利用类型和坡度条件存在明显差异(图 5)。总体上,草地在各坡度条件下均表现出最优的减流减沙效果,减流率和减沙率长期维持在 99% 以上,显示出稳定而高效的水土保持功能。林地次之,其减流率随观测年限呈逐步增强趋势,整体介于 23%~100%;减沙率多高于 80%,尤其在 15°和 25°坡面,后期年份减流率与减沙率普遍超过 90%,这是由于林地通过冠层截留、枯落物覆盖和根系固土有效削弱了径流侵蚀过程。农地减流减沙效应相对较弱,且年际波动显著,减流率多集中在 20%~60%,减沙率多数年份低于 70%,在部分年份和坡度条件下甚至不足 30%,反映出耕作扰动和地表裸露对径流形成和泥沙剥蚀的放大作用。

在不同坡度条件下,农地和林地的减流率与减沙率整体随坡度增大略有下降,即坡度增加增强了径流动力条件,削弱了下垫面的拦截与阻滞能力;而草地在不同坡度间差异不明显,表明高覆盖度和连续地表结构能够有效抵消坡度效应。

2.4　水沙削减效益的机制分析

针对农地、林地和草地分别构建结构方程模型

的结果表明，农地的结构方程模型整体拟合效果较林地好，所构建模型的χ^2/df分别为1.85，3.50。而草地的减沙率在观测期内始终为100%，变量缺乏变异性，仅对减流过程进行了影响路径分析。

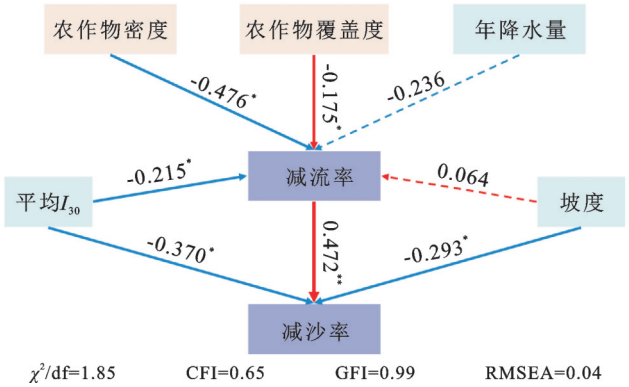


注：误差线表示均值的标准差(SD)。不同小写字母表示同一坡度条件下不同土地利用径流小区的减流率和减沙率在0.05水平有显著差异；不同大写字母表示同一土地利用条件下不同坡度径流小区的减流率和减沙率在0.05水平有显著差异。

图5 土地利用类型与坡度交互作用下减流减沙效果

Fig. 5 Runoff and sediment reduction effects under interaction between land use types and slope gradients

土地利用类型为农地时，降雨侵蚀性因子对减流和减沙过程均具有显著抑制作用，平均I_{30}对减流率和减沙率的路径系数(r)分别为−0.215($p<0.05$)和−0.370($p<0.05$)(图6)。农作物结构因子中，作物密度($r=-0.476$，$p<0.05$)和作物覆盖度($r=-0.175$，$p<0.05$)均对减流率产生显著负向影响，而其对减沙率的直接作用不显著。可能是由于本研究条件下的径流小区内部根系密集分布，从而导致表层土壤结构紧实，进而降低入渗率、减弱水土保持效应。而坡度对减沙率亦呈显著负向影响($r=-0.293$，$p<0.05$)，即地形条件主要通过增强径流侵蚀能量直接影响泥沙输出。此外，减流率对减沙率的正向作用显著($r=0.472$，$p<0.01$)，清晰揭示了农地坡面以减流控制减沙为主导的水土保持机制。

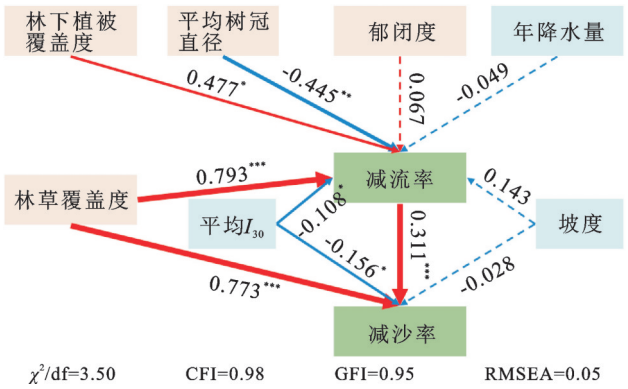


注：箭头上的数字为标准化的路径系数；红色箭头为正数，蓝色箭头为负数；实线箭头表示显著的标准化路径系数，虚线箭头表示不显著的标准化路径系数；*，**分别代表在0.05，0.01水平显著。

图6 农地径流小区影响减流减沙率的作用途径

Fig. 6 Pathways influencing runoff and sediment reduction rates in cropland runoff plots

由林下植被覆盖度、平均树冠直径、郁闭度及林草综合覆盖度构成的植被结构因子在林地减流减沙过程中的调控作用较强。林下植被覆盖度(0.477，$p<0.05$)和林草综合覆盖度(0.793，$p<0.001$)对减流率具有显著正向影响(图7)。而平均树冠直径对减流率呈显著负向作用(−0.445，$p<0.01$)，该结果可能与冠幅增大后林下光照受限、林下植被覆盖下降及穿透雨空间集中增强有关，从而削弱地表径流分散与泥沙拦截能力。减流率对减沙率的正向影响显著(0.311，$p<0.01$)，同时林草覆盖度对减沙率存在显著直接促进作用(0.773，$p<0.001$)。相比之下，年降水量和坡度在林地模型中对减流和减沙的直接影响未达到显著水平。减流率与减沙率呈显著正相关($r=0.301$，$p<0.001$)，即增强的径流截留会带来更高的泥沙截留。



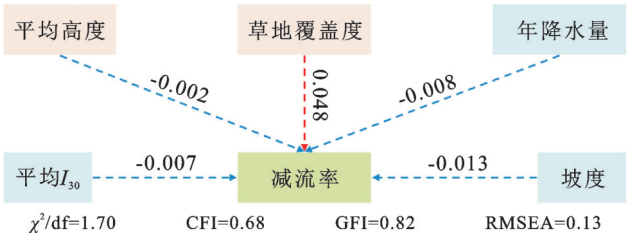
注：箭头上的数字为标准化的路径系数；红色箭头为正数，蓝色箭头为负数；实线箭头表示显著的标准化路径系数，虚线箭头表示不显著的标准化路径系数；*，**，***分别代表在0.05，0.01，0.001水平显著。

图7 林地径流小区影响减流减沙率的作用途径

Fig. 7 Pathways influencing runoff and sediment reduction rates in forestland runoff plots

草地组中坡度和年降水量对径流减量率影响不显著(图8)，覆盖度、降雨因子及坡度等对减流率的路径系数均未达到显著水平，模型整体拟合度相对较低(χ^2/df=1.70)，表明在本试验条件下草地对泥沙的截留已接近饱和状态，仅部分受到降雨强度影响。

需说明的是,草地恒定的减沙率提示草地植被几乎完全阻止了泥沙流失。



注:箭头上的数字为标准化的路径系数;红色箭头为正数,蓝色箭头为负数;虚线箭头表示不显著的标准化路径系数。

图 8　草地径流小区影响减流减沙率的作用途径

Fig. 8　Pathways influencing runoff and sediment reduction rates in grassland runoff plots

3　讨　论

下垫面类型作为坡面侵蚀的核心调控因子,通过改变地表覆盖状况与土壤结构,直接影响降雨入渗与径流形成过程,其调控效应呈现显著分异特征,这与豫西黄土丘陵区多区域研究结论一致[13-14]。裸地因缺乏植被拦截与枯落物覆盖,土壤入渗能力弱[15],降雨快速转化为地表径流,汇流速度快,成为产流产沙的极端敏感源。监测数据显示,裸地降雨平均径流深达 48.45 mm,平均含沙量约 458.75 g/L,分别是林地的 3.28 倍和 6.56 倍,这与申震洲等[11]研究中裸地侵蚀强度显著高于其他土地利用类型的结论一致。

结构方程模型结果清晰揭示了不同土地利用类型在坡面减流减沙机制上的显著差异。农地减沙过程对径流削减高度依赖,减流在降雨侵蚀性与泥沙输出之间起关键中介作用[16]。主要体现在耕作扰动通过破坏土壤结构与孔隙连续性,削弱了地表入渗能力,使较高的作物覆盖并未有效转化为稳定的径流控制能力,这一特征在高强度降雨条件下尤为明显[17]。

相比之下,林地减流减沙过程呈现出径流调控与植被固沙并存的双重机制。一方面,多层次植被结构通过冠层截留、枯落物覆盖和根系加固显著增强坡面入渗与径流削减能力[18-19];另一方面,林草覆盖对土壤颗粒剥离具有直接抑制作用,使林地减沙并非完全依赖径流减少[20]。结构方程结果中,植被结构因子中的林草覆盖度对减流与减沙均表现出显著影响($p<0.01$,图 7),这是由于高林龄和林分结构完善的林下植被能显著增强林地的水土保持效应,即林地水土保持效应并非单纯依赖乔木层,而是受多层次植被结构协同调控,这与已有研究结果一致[21]。而降雨与地形因子的作用相对弱化,表明在研究区尺度内,林地水土保持效益主要受植被结构特征制约。值得注意的是,平均树冠直径对减流率的影响系数为−0.445($p<0.01$,图 7),表明单一追求乔木生长规模并不一定有利于坡面水土保持,应重视林下植被与复合覆盖的协同配置。

本研究中草地的减沙率在观测期内长期维持在较高水平,反映出其已形成高度稳定的水土保持功能。减流过程对降雨和坡度变化响应不显著,说明草地系统具备较强的缓冲能力和结构稳定性。这一结果表明,在一定演替阶段后,草地水土保持效益会进入相对稳定的平台期,其管理重点应由效益提升转向稳定性维持与退化风险防控。

对比不同土地利用类型的减流减沙率可知,草地和林地的整体减流减沙效应显著优于农地,验证了植被类型在坡面侵蚀调控中的核心作用。强降雨和陡坡条件会放大径流侵蚀风险[22-23],而高覆盖度、多层次植被通过截留、固定和能量耗散作用有效削弱径流与泥沙输出[24-25]。土地利用类型作为坡面侵蚀的主导调控因子,其作用强度随植被覆盖度提高而逐渐增强,而坡度效应在林地和草地条件下被明显削弱,这与径流深和含沙量的变化特征保持一致。

本研究基于 2016—2024 年胡沟小流域径流小区的长期定位观测数据,从土地利用类型、坡度及耕作管理的综合视角系统揭示了坡面减流减沙调控机制,确定了提高坡面植被覆盖度、优化植被结构仍是区域水土保持措施配置的关键方向。然而,受研究重点与篇幅限制,本研究未对种植模式、翻耕频率、作物残茬管理等不同耕作管理措施的细化效应展开深入分析,未来可结合多情景田间管理试验,进一步量化坡耕地水土保持效能的差异,为区域农业可持续利用提供精细化支撑。

4　结　论

(1) 2016—2024 年观测结果表明,各径流小区的径流与泥沙输出在年际尺度上波动显著,但总体受坡度和土地利用类型的共同控制。裸地和农地径流深、含沙量及土壤流失量显著高于林地和草地,且坡度增大明显增强坡面产流产沙能力;林地和草地通过植被覆盖显著削弱了坡度对侵蚀过程的放大效应。

(2) 不同土地利用类型的减流减沙效应存在显著差异。草地在各坡度条件下均表现出稳定且高效的减流减沙能力,林地次之,农地减流减沙效应相对较弱且年际波动较大。

(3) 农地减沙过程高度依赖径流削减,减流在降雨侵蚀性与泥沙输出之间起关键中介作用;林地的减流减沙主要受植被结构因子调控,林下植被和林草综合覆盖度对水土保持效应具有显著促进作用,气候和地形因子的直接影响相对较弱;近自然草地植被水土保持功能已趋于稳定。

参考文献(References):

[1] 王占礼,靳雪艳,马春艳,等.黄土坡面降雨产流产沙过程及其响应关系研究[J].水土保持学报,2008,22(2):24-28.
Wang Z L, Jin X Y, Ma C Y, et al. Research on processes and responses of rainfall-runoff-sediment yield on loess hillslope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008,22(2):24-28.

[2] 衣强,张岩,张红峰,等.豫西黄土丘陵区侵蚀沟空间分布特征研究[J].人民黄河,2016,38(11):85-88.
Yi Q, Zhang Y, Zhang H F, et al. Study on the spatial distribution characteristics of the eroded gully in gullied rolling loess area of west Henan Province[J]. Yellow River, 2016,38(11):85-88.

[3] 王晓峰,肖飞艳,尹礼唱,等.黄河中游不同流域尺度土壤侵蚀评价[J].安徽农业大学学报,2017,44(6):1070-1077.
Wang X F, Xiao F Y, Yin L C, et al. Evaluation of soil erosion at different watershed scales in the middle reaches of the Yellow River[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017,44(6):1070-1077.

[4] 贾莲莲.模拟降雨条件下黄土坡面侵蚀过程与调控试验研究[D].西安:西安理工大学,2010.
Jia L L. Experiment study on soil erosion process and regulation on loess slope under simulating rainfall[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010.

[5] 肖培青,姚文艺,王国庆,等.植被作用下土壤抗剪强度和径流侵蚀力的耦合效应[J].水科学进展,2016,27(2):224-230.
Xiao P Q, Yao W Y, Wang G Q, et al. Effects of soil shear strength and runoff erosivity on slopes with different vegetation cover[J]. Advances in Water Science, 2016,27(2):224-230.

[6] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土丘陵沟壑区水土保持人工林减蚀效应研究[J].林业科学,2002,38(5):87-94.
Jiao J Y, Wang W Z, Li J, et al. The soil erosion reducing benefit of soil and water conservation of plantation on the loess hilly and gully region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2002,38(5):87-94.

[7] 陈鹏飞,陈丽华,王宇,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型对坡地产流、产沙的影响[J].生态与农村环境学报,2010,26(3):199-204.
Chen P F, Chen L H, Wang Y, et al. Effect of land use pattern on runoff and sediment yield on slopelands in loess hilly region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010,26(3):199-204.

[8] 衣强,李越梅,闫俊飞,等.不同土地利用类型对豫西黄土丘陵区坡面产流产沙的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):67-74,85.
Yi Q, Li Y M, Yan J F, et al. Effects of different land uses on runoff and sediment on sloping land in loess hilly area of western Henan[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):67-74,85.

[9] 马波,吴发启,李占斌,等.作物与坡度交互作用对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):33-38.
Ma B, Wu F Q, Li Z B, et al. Interaction of crop cover and slope gradient on runoff and sediment yield[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013,27(3):33-38.

[10] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.
Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(3):401-407.

[11] 申震洲,刘普灵,谢永生,等.不同下垫面径流小区土壤水蚀特征试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):6-9,22.
Shen Z Z, Liu P L, Xie Y S, et al. Study of plot soil erosion characteristic under different underlying horizon[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006,26(3):6-9,22.

[12] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
Liu D, Liu P L, Deng R F, et al. Erosion characteristics of plots with various underlying surfaces in single rainfall[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(2):99-102.

[13] 卫伟,贾福岩,陈利顶,等.黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应[J].环境科学,2012,33(8):2674-2679.
Wei W, Jia F Y, Chen L D, et al. Response of sloping water erosion to rainfall and micro-earth pattern in the loess hilly area[J]. Environmental Science, 2012, 33(8):2674-2679.

[14] 于国强,李占斌,李鹏,等.不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J].水科学进展,2010,21(5):593-599.
Yu G Q, Li Z B, Li P, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff-erosion and sediment yield [J]. Advances in Water Science, 2010,21(5):593-599.

[15] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土高塬沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响[J].水土保持学报,2024,38(6):89-96,104.
Ma X Y, Mu X M, Wang S Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltration and runoff in the gully regions on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(6):89-96,104.

[16] 陆淑宁,张泽瑜,李荣融,等.等高耕作对不同坡度坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2023,37(2):37-44.
Lu S N, Zhang Z Y, Li R R, et al. Effects of contour tillage on soil erosion process in different slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):37-44.

[17] 方乾,赵龙山,吴发启.降雨强度对农业耕作措施水土保持作用的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):215-219,228.
Fang Q, Zhao L S, Wu F Q. Effect of rainfall intensity on soil and water conservation of tillage practices[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019,37(2):215-219,228.

(下转第56页)