

范德政,梅雪梅,张晓明,等. 宁夏黄土丘陵沟壑区产流产沙特征及其影响因素量化[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 833-843.  
FAN De-zheng, MEI Xue-mei, ZHANG Xiao-ming, et al. Characteristics of Runoff and Sediment Yield in the Loess Hilly and Gully Region of Ningxia, China and Quantification of Their Influencing Factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 833-843.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.09013

· 环境与可持续发展专刊 ·

## 宁夏黄土丘陵沟壑区产流产沙特征 及其影响因素量化

范德政<sup>1,2</sup>, 梅雪梅<sup>1,3,4\*</sup>, 张晓明<sup>5</sup>, 李鹏<sup>6</sup>, 张国军<sup>7</sup>, 赵阳<sup>5</sup>, 任正龔<sup>7</sup>

(1. 郑州大学 地热与生态地质研究中心, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 河南省减污降碳协同工程技术研究中心, 河南 郑州 450001; 4. 郑州大学 生态与环境学院, 河南 郑州 450001; 5. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 6. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 7. 宁夏回族自治区水土保持监测总站, 宁夏 银川 750002)

**摘要:** 土壤侵蚀是造成土地退化最严重的生态环境问题之一, 而水土保持措施是防治土壤侵蚀的重要举措。目前, 量化水土保持措施、降雨特征和坡度对黄土丘陵沟壑区径流量和泥沙量的直接和间接影响仍具有挑战性。在调查 2015~2019 年宁夏黄土丘陵沟壑区犁尖沟小流域 19 个径流小区 25 次典型侵蚀性降雨事件中的径流量和泥沙量基础上, 利用结构方程模型分析降雨特征、水土保持措施和坡度对径流和土壤流失的直接和间接作用, 同时采用冗余分析方法量化各影响因素对减流效益和减沙效益的贡献率。结果表明: ① 20° 坡度减流效益最好, 陡坡则具有更好的减沙效益; 不同水土保持措施中, 人工灌木林地的减流效益和减沙效益较高。② 降雨特征、水土保持措施和坡度对径流和泥沙没有间接影响, 最大 30 min 雨强对径流和泥沙的直接影响最大, 直接路径系数分别为 0.77 和 0.46。③ 降雨特征是影响径流、泥沙和减流效益的主导因素; 与降雨特征相比, 水土保持措施和坡度是控制减沙效益的主要因素。④ 全球变暖引起的极端侵蚀性降雨事件导致径流和土壤流失加剧; 水土保持措施对于防止径流和土壤流失是非常必要的; 在陡坡上, 实施以灌木为主的植被组合有望实现更大的减流效益和减沙效益。

**关键词:** 产流产沙; 减流效益; 减沙效益; 水土保持; 结构方程模型; 宁夏; 黄土高原

**中图分类号:** S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2023)04-0833-11

### Characteristics of Runoff and Sediment Yield in the Loess Hilly and Gully Region of Ningxia, China and Quantification of Their Influencing Factors

FAN De-zheng<sup>1,2</sup>, MEI Xue-mei<sup>1,3,4\*</sup>, ZHANG Xiao-ming<sup>5</sup>, LI Peng<sup>6</sup>,  
ZHANG Guo-jun<sup>7</sup>, ZHAO Yang<sup>5</sup>, REN Zheng-yan<sup>7</sup>

(1. Geothermal and Ecological Geology Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan,

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2023-02-23 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(32201627); 宁夏回族自治区水利科技项目(SBZZ-J-2021-13, SBZZ-J-2021-12); 郑州大学院士团队科研启动基金项目(134-32340370); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项资金项目(SE0145B022022)

作者简介: 范德政(1997-), 男, 山东德州人, 工学硕士研究生, E-mail: 1719522202@qq.com.

\* 通讯作者: 梅雪梅(1992-), 女, 河南商丘人, 直聘副教授, 农学博士, E-mail: mxm0115@126.com.

China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 3. Research Centre of Engineering and Technology for Synergetic Control of Environmental Pollution and Carbon Emissions of Henan Province, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 4. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 5. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 6. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 7. Ningxia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yichuan 750002, Ningxia, China)

**Abstract:** Soil erosion is the most serious ecological and environmental problem causing land degradation and water resources pollution, which is controlled by soil and water conservation measure (SWCM). At present, it is still challenging to quantify the direct and indirect impacts of SWCM, rainfall characteristics and slope on runoff and sediment yield in loess hilly and gully region. The runoff and sediment yield of 19 runoff plots and 25 typical erosive rainfall events in Lijiangou small watershed in the loess hilly and gully region of Ningxia were investigated from 2015 to 2019. The structural equation model (SEM) was used to analyze the direct and indirect effects of rainfall characteristics, SWCM and slope on runoff and soil loss. The redundancy analysis (RDA) method was used to quantify the contribution rate of each influencing factors to the runoff reduction benefit (RRB) and sediment reduction benefit (SRB). The results show that ① the 20° slope has the best RRB, and the steep slope has better SRB; in different SWCMs, RRB and SRB of artificial shrubland are higher. ② Rainfall characteristics, SWCM and slope have no indirect impact on runoff and sediment, while 30 min maximum rainfall intensity has the largest direct impact on runoff and sediment, with direct path coefficients of 0.77 and 0.46, respectively. ③ Rainfall characteristics are the dominant factor affecting runoff, sediment and RRB; compared with rainfall characteristics, SWCM and slope are the main factors controlling SRB. ④ Runoff and soil loss will increase due to extreme erosive precipitation events caused by global warming; SWCM is very necessary to prevent runoff and soil loss; on steep slopes, the vegetation combination mainly with shrub is expected to achieve greater benefits of runoff and sediment reduction.

**Key words:** runoff and sediment yield; runoff reduction benefit; sediment reduction benefit; soil and water conservation; structural equation model; Ningxia; Loess Plateau

## 0 引言

土壤侵蚀是全球性的环境问题, 不仅会降低土壤质量, 造成土壤水分流失, 还会对生态环境构成极大威胁, 特别是在我国黄土高原<sup>[1-3]</sup>。此外, 土壤侵蚀还会造成水污染。在土壤侵蚀过程中, 径流会导致 P 和 N 以溶解状态迁移, 同时泥沙也会以颗粒状态携带 P 和 N。因此, 深入了解土壤侵蚀机制, 进一步寻找控制径流和泥沙的最佳措施, 对于干旱、半干旱地区的植被恢复和水资源保护是非常有必要的。

水土流失是气候变化与人类活动相互作用的结果<sup>[4-5]</sup>。在气候变化过程中, 降雨对流域产流产沙都有显著影响。在人类活动加速全球气候变暖的背景

下, 极端降雨事件的强度和频率呈现上升趋势, 这可能会加速土壤侵蚀, 增加土壤流失的潜在风险<sup>[6-7]</sup>。目前, 已有不少学者研究降雨对产流产沙的影响。例如, 普隽泽等运用黄土丘陵沟壑区罗玉沟水土保持监测站的 6 种不同草被覆盖坡面野外观测数据, 探究了不同降雨条件下各草被覆盖径流小区的产流产沙规律<sup>[8]</sup>。黄国平等通过伊犁河谷退化草地自然降雨坡面径流监测试验, 发现坡面产流产沙受降雨特征的综合影响<sup>[9]</sup>。因此, 量化降雨特征对径流和泥沙的影响, 有助于了解气候变化背景下土壤侵蚀的趋势, 对保护生态环境具有重要意义。

黄土高原地形地貌复杂多样, 土壤多孔疏松, 是我国土壤侵蚀程度最严重的地区之一<sup>[10-11]</sup>, 水土流失已经影响到当地的生态安全。水土保持措施

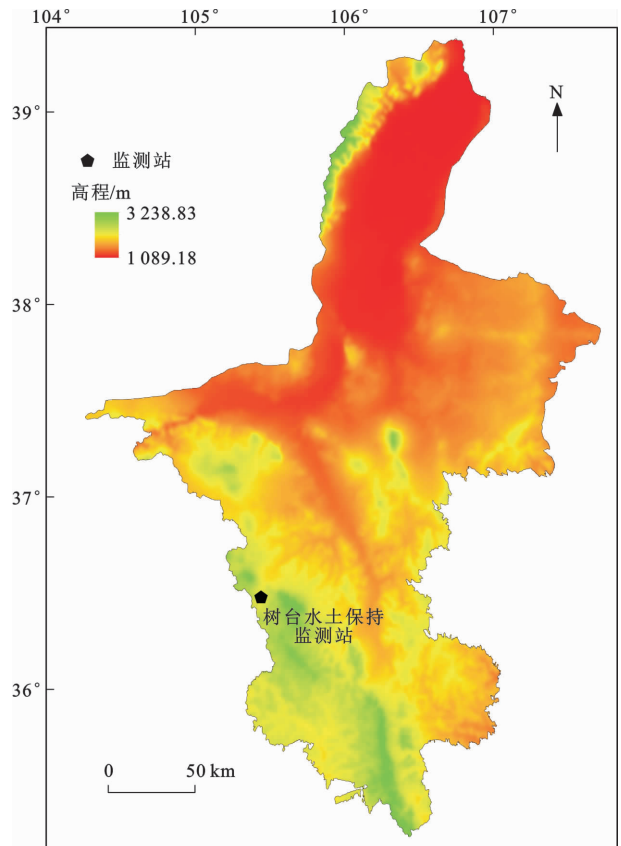
(Soil and Water Conservation Measures, SWCM) 是防止该地区土壤侵蚀最关键的手段。自1998年实施退耕还林还草工程以来,大量位于山丘和沟壑区的农田被改为林地或草地,以减少土壤侵蚀。在黄土高原,水是限制植被恢复的主要因素。为提高水分利用效率和加快植物生长,前人已经应用了各种整地技术,如等高耕作、鱼鳞坑等<sup>[12-14]</sup>,在减少径流泥沙方面取得了有效的成果。Huo等通过监测1 910次自然降雨事件,发现中国北方的鱼鳞坑减少了70.18%和91.07%的径流和土壤流失<sup>[15]</sup>。Zhao等研究发现,在工程措施比植被措施和农业措施更有效的情况下,水土保持措施可以显著减少土壤流失,但不能使之降低到背景水平<sup>[16]</sup>。一般来说,采取水土保持措施的土壤侵蚀率仍然高于永久植被覆盖的土壤侵蚀率。坡度也是控制径流和土壤流失的重要因素,在一定坡度范围内,随着坡度的增加,径流及输沙能力均增大<sup>[17-18]</sup>。杨瑞杰等在探究干旱河谷区横垄坡面水土流失特征时,发现在坡度分别为10°、15°、20°和25°条件下,产流产沙随着坡度的增大而增加<sup>[19]</sup>。

目前有不少学者通过坡度与降雨来对产流产沙的影响进行分析<sup>[20-22]</sup>,然而很少有研究涉及水土保持措施(土地利用和整地技术)与坡度共同作用,并且降雨、水土保持措施和坡度对径流和泥沙的耦合作用的影响大小也很少被量化,但对其进行量化研究可以更好地为水土流失治理以及水沙调控提供科学依据。基于此,本文选取黄土高原半干旱丘陵陵区梨尖沟小流域5°、10°、15°、20°和25°等5个坡度的19个径流小区内典型土地利用类型(天然牧草地、农田、人工乔木林地、人工灌木林地以及裸地)和整地技术(封禁、等高耕作、鱼鳞坑和穴播),用于研究降雨特征、水土保持措施和坡度对地表径流和土壤流失的直接和间接作用;并在长期整地技术与土地利用类型相结合条件下,确定该研究区内控制径流和土壤流失的最优水土保持措施,以期为我国水土保持综合治理工程的建设提供指导,并为预测径流和土壤流失趋势提供理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

本试验拟在宁夏黄土丘陵沟壑区树台水土保持监测站梨尖沟小流域进行,地理坐标为(36°29′54″N,105°25′55″E)(图1)。流域面积为1.02 km<sup>2</sup>,平均海拔为1 868 m,属大陆性气候,年平均降雨量为



(a) 梨尖沟小流域位置



1~19为径流小区编号

(b) 径流小区布局

图1 宁夏梨尖沟小流域位置及径流小区布局  
Fig. 1 Location of Lijiagou Small Watershed and Layout of Runoff Plots in Ningxia

360 mm,66.7%的降雨集中在6月至9月,年平均气温为7.0℃,年平均蒸发量为1 902.4 mm。主要土壤类型为由黄土母质发育而成的暗黄土质,主要群落是短束草,最常见的本土草种为长芒草、冰草、铁杆蒿、黄花蒿、骆驼蓬等。

### 1.2 现场试验设计和数据收集

#### 1.2.1 径流小区设计

为研究降雨过程中形成的径流和泥沙特征,量化降雨过程中控制径流和泥沙的主要因素,试验在宁夏梨尖沟小流域改建了坡度分别为5°、10°、15°、



### 2.2 地表径流和泥沙变化

根据不同坡度、不同水土保持措施的径流小区在侵蚀性降雨事件作用下形成的径流量和泥沙量(图 3),可以发现在 25 次侵蚀性降雨过程中,不同水土保持措施和坡度形成的径流和泥沙存在较大差异。不同坡度下,与水土保持措施相比,裸地和农田产生的径流量和泥沙量最大;在 10°、15°、20°和 25°坡度下,天然牧草地径流量大于人工灌木林地和人工乔木林地;天然牧草地、人工灌木林地、人工乔木林地产生的泥沙量差异不明显;裸地中泥沙量随着坡度的增加而增加,而径流量的增加与坡度关系不

明显。同时,在每个水土保持措施样地中,径流量随着坡度的增加而增加,而泥沙量并未呈现相同的趋势。

从图 4 可以看出,除坡度为 10°的农田外,同一水土保持措施样地中减沙效益大于减流效益,表明水土保持措施的减流效益优于减沙效益。与农田相比,3 种水土保持措施样地(天然牧草地、人工乔木林地和人工灌木林地)具有较高的减流效益和减沙效益;而在这 3 种水土保持措施样地中,人工乔木林地和人工灌木林地比天然牧草地具有更好的减流效益和减沙效益。

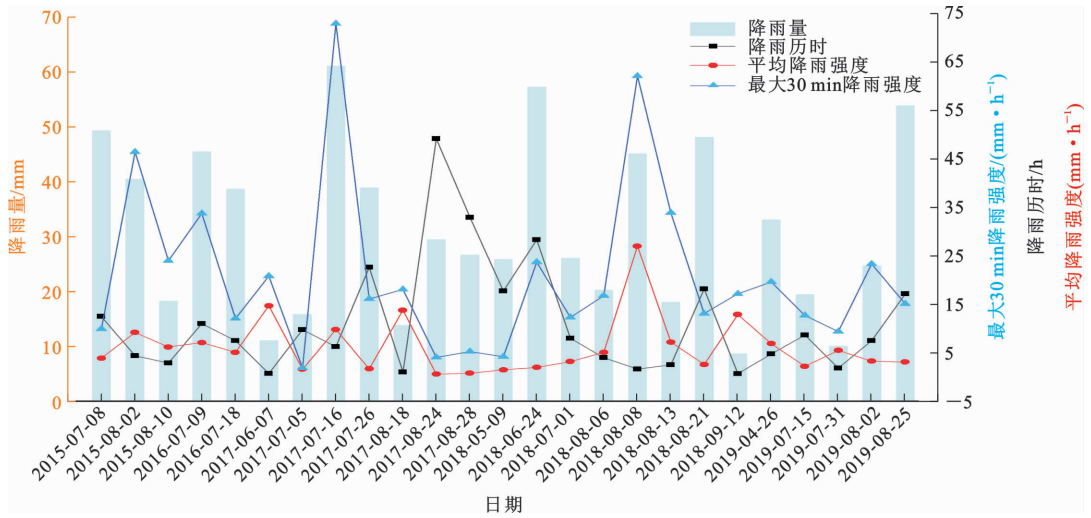


图 2 2015~2019 年梨尖沟小流域侵蚀性降雨事件特征

Fig. 2 Characteristics of Erosive Rainfall Events in Lijiangou Small Watershed from 2015 to 2019

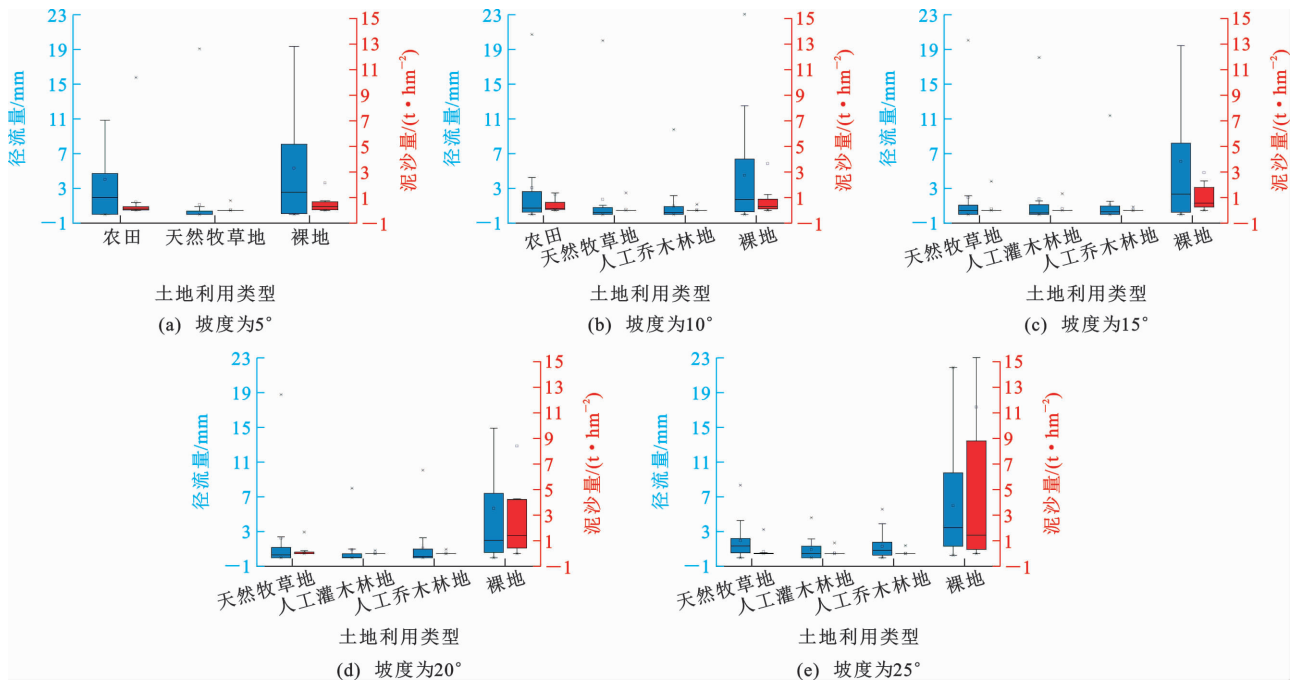


图 3 不同坡度下不同水土保持措施产生的径流量和泥沙量特征

Fig. 3 Characteristics of Runoff and Sediment Yield of Different SWCMs Under Different Slopes

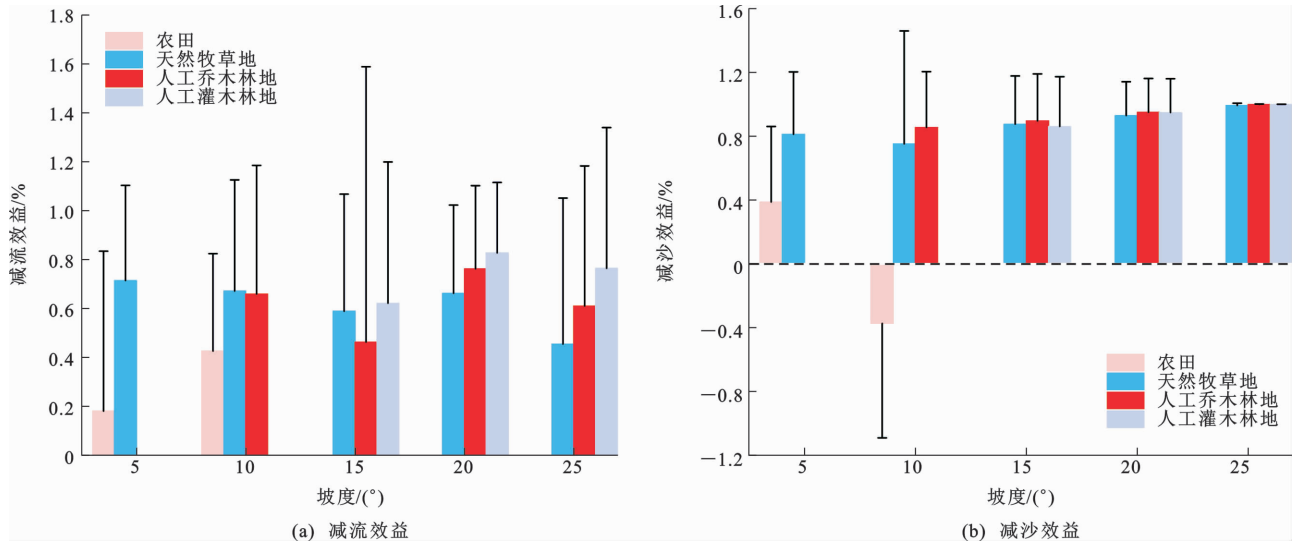


图4 不同坡度下不同水土保持措施的减流效益和减沙效益

Fig. 4 RRB and SRB of Different SWCMs Under Different Slopes

总体来看,水土保持措施对减流效益的作用受坡度的影响较大,每一种水土保持措施的减流效益随坡度的变化呈现明显波动。在5个坡度中,天然牧草地、人工乔木林地和人工灌木林地在20°坡度下观测到相对较大的减流效益。同时,在3个水土保持措施样地中,人工灌木林地减流效益保持较高水平,坡度15°、20°、25°所对应的减流效益分别为0.62、0.83、0.76。对于天然牧草地和人工乔木林地,在10°和15°坡度下,天然牧草地的减流效益比人工乔木林地大;而在20°和25°坡度下,天然牧草地的减流效益较低。对农田而言,其减流效益低于天然牧草地、人工乔木林地和人工灌木林地,在坡度为5°、10°时,减流效益分别为0.18、0.43。天然牧草地、人工乔木林地和人工灌木林地的减沙效益随坡度的增大而增大,说明水土保持措施在陡坡上呈现更好的减沙效益。其中,人工乔木林地和人工灌木林地的减沙效益保持较高水平,人工乔木林地减沙效益在坡度为10°、25°时分别为0.86、0.99,人工灌木林地减沙效益在坡度为15°、25°时分别为0.86、0.99。对于天然牧草地,其减沙效益低于人工乔木林地和人工灌木林地,在坡度为5°、10°、15°、20°、25°时分别为0.81、0.75、0.88、0.93和0.99。整体上,减沙效益随着坡度的增大而增大,天然牧草地中减沙效益与人工乔木林地和人工灌木林地具有相似的增速减缓趋势,并趋近于1;农田的减沙效益最低,在坡度为5°、10°时分别为0.39和-0.37。

### 2.3 降雨特征、水土保持措施和坡度对径流和泥沙的影响

利用结构方程模型确定降雨特征、水土保持措

施和坡度对径流量、泥沙量、减流效益和减沙效益的影响。结果如图5所示。

在与径流和土壤流失相关的模型中,模型的卡方(Chi-square)检验、自由度(df)和P值分别为104.37、1.00和0.00。规范拟合指数(Normed Fit Index, NFI)为0.915(>0.9),增值拟合指数(Incremental Fit Index, IFI)为0.915(>0.9),非规范拟合指数(Tucker-Lewis Coefficient, TLI)为-1.425,比较拟合指数为0.913(>0.9);由结构方程模型得到的近似均方根误差、赤池信息量准则(Akaike Information Criterion, AIC)、Browne-Cudeck准则(Browne-Cudeck Criterion, BCC)和期望复核指数(Expected Cross-validation Index, ECVI)分别为0.526、174.377、76.103和0.466。这些模型参数大多数符合结构方程模型标准,表明假设模型是合理的。此外,坡度与水土保持措施成正相关关系,相关系数为0.46,这是由于农田主要处于缓坡地段,而坡度稍大地区主要种植灌木和乔木。模型还进一步表明,坡度与径流量、泥沙量成正相关关系,而水土保持措施与径流量、泥沙量成负相关关系。这表明人工灌木林地和人工乔木林地相较于天然牧草地、裸地而言,有较小的径流和泥沙量。在降雨参数中,最大30 min降雨强度与径流量、泥沙量的直接路径系数最大,分别为0.77和0.46。此外,研究结果还表明,坡度、水土保持措施和降雨参数对径流量和泥沙量存在直接影响,不存在间接影响。

在减流效益和减沙效益的相关模型中,模型的卡方检验、自由度和P值分别为0.811、1.000和0.368。模型评价指标均大于0.9,其中规范拟合指

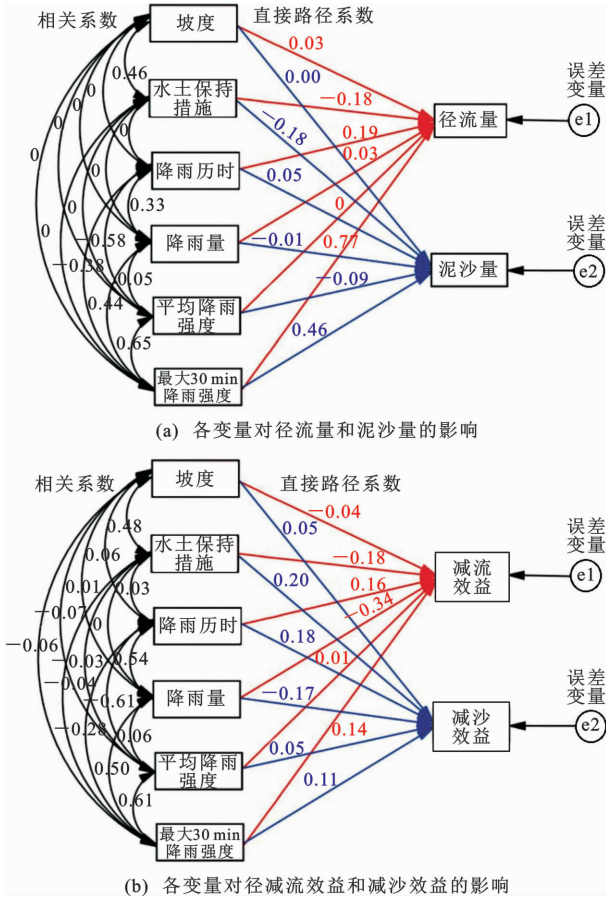


图 5 各变量对径流量、泥沙量、减流效益和减沙效益的影响

Fig. 5 Effects of Various Variables on Runoff, Sediment Yield, RRB and SRB

数为 0.99,增值拟合指数为 1.00,非规范拟合指数为 1.007,比较拟合指数为 1.00;近似均方根误差为 0.000,赤池信息量准则为 70.811,Browne-Cudeck 准则为 73.085,期望复核指数为 0.248。适应度统计量基本符合结构方程模型标准,表明假设模型是合理的。该模型还表明,降雨特征与坡度、水土保持措施的相关性不大,但坡度与水土保持措施之间存在明显的相关关系。模型进一步表明,水土保持措施与减流效益、减沙效益成正相关关系,相关系数分别为 0.18 和 0.20。这意味着人工乔木林地和人工灌木林地比农田和天然牧草地具有更大的减流效益和减沙效益。坡度、水土保持措施和降雨参数对减流效益和减沙效益存在直接影响。

使用冗余分析方法计算得到降雨特征、水土保持措施和坡度对减流效益和减沙效益的相对贡献(图 6)。从图 6 可以看出:降雨特征对径流和泥沙的贡献大于水土保持措施和坡度,相对贡献率分别为 95.0%和 77.7%;水土保持措施对径流和泥沙的

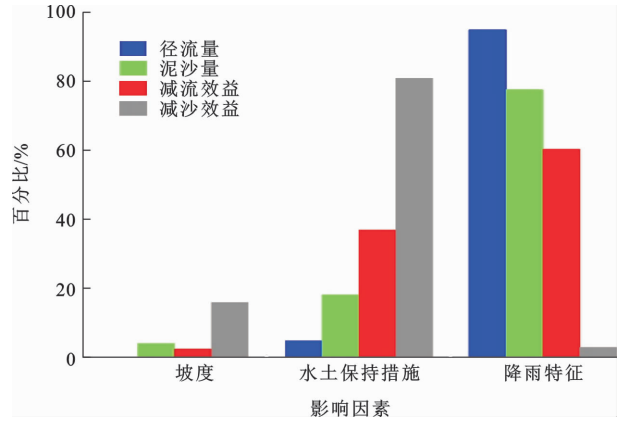


图 6 冗余分析中各影响因素对径流量、泥沙量、减流效益和减沙效益的相对贡献率

Fig. 6 Relative Contribution Rates of Each Influence Factor to Runoff, Sediment Yield, RRB and SRB Calculated by RDA

贡献大于坡度。在影响减流效益的因素中,降雨特征和水土保持措施是主导因素,相对贡献率分别为 60.4%和 37.0%;而在减沙效益方面,水土保持措施和坡度是主要因素。

### 3 讨论

#### 3.1 降雨特征和坡度对径流和泥沙的影响

降雨特征是侵蚀性降雨事件中驱动径流和土壤流失的主导因子<sup>[27]</sup>。在本文中,降雨特征(降雨历时、降雨量、平均降雨强度、最大 30 min 降雨强度)与径流、泥沙、减流效益和减沙效益相关。冗余分析结果进一步表明,与水土保持措施和坡度相比,降雨特征是影响径流、泥沙和减流效益的主导因素,相对贡献率分别为 95.0%、77.7%和 60.4%,这主要是因为降雨是径流和泥沙产生的直接驱动力。

在本文中,相较于其他降雨特征指标,降雨历时、最大 30 min 降雨强度与径流量具有明显的相关性,相关系数分别为 0.19 和 0.77。径流量随着降雨历时的增加而增加,最大 30 min 降雨强度随着降雨历时的增加而增加(图 5)。降雨历时和最大 30 min 降雨强度对泥沙量也有影响<sup>[24]</sup>。降雨历时表示雨滴作用于土壤颗粒的时间,降雨历时越长,土壤颗粒运移和土壤流失越容易产生。此外,与平均降雨强度和降雨量相比,最大 30 min 降雨强度能在很大程度上反映降雨强度与土壤流失的关系。短时间的高强度降雨更容易产生黄土高原的径流和土壤流失,这是由于高强度降雨过程中降雨与土壤表面的相互作用易形成地表结皮和封闭性,使得入渗率降低,地表径流量增加<sup>[28-29]</sup>。而在高强度降雨事件中,

雨滴的势能和溅蚀作用较强,加剧了土壤侵蚀<sup>[30-31]</sup>。试验结果还表明,降雨历时、平均降雨强度和最大30 min降雨强度与减流效益和减沙效益成正相关关系。减流效益和减沙效益随降雨历时、平均降雨强度和最大30 min降雨强度的增加而增加。因此,在降雨历时长、平均降雨强度和最大30 min降雨强度较大的降雨事件中,水土保持措施可以更好地发挥作用。

与降雨特征和水土保持措施相比,坡度对径流、泥沙、减流效益和减沙效益的影响较弱。尽管之前的研究已经证明,径流和土壤流失并不总是随着坡度的增加而增加,会存在一个临界坡度,使产生的径流和泥沙达到最大<sup>[32]</sup>。但一般来说,当坡度从 $5^\circ$ 变为 $25^\circ$ 时,径流量和泥沙量随着坡度的增加而增加。本文中,径流量、泥沙量与坡度成正相关关系。这主要是因为大坡度下雨滴在表层土壤停留的时间短,土壤渗透速率小,导致地表流速和流量大。此外,随着径流量的增加,土壤颗粒更有可能被携带<sup>[33]</sup>。

### 3.2 水土保持措施对径流和泥沙的影响

水土保持措施可有效减少侵蚀性降雨事件下产生的地表径流量和泥沙量<sup>[34]</sup>。在各坡度下,水土保持措施较裸地能更有效地减少径流和泥沙(图3)。水土保持措施由整地技术和土地利用类型组成。坡地整地技术可以改变径流路径,降低水流速度。鱼鳞坑内的径流和土壤流失最低,这是因为其能够有效地收集坡地上的水,将径流转化为入渗<sup>[35]</sup>。相反,农田的径流和土壤流失最高。这是因为植被可以通过茎叶减小雨滴的动能以及根系固持土壤来影响地表径流和侵蚀<sup>[36]</sup>。本文中,在同一坡度下,径流和土壤流失在不同土地利用类型中表现出较大的差异。天然牧草地径流和土壤流失最高,减流效益和减沙效益最低。减流效益和减沙效益的最高值一般出现在人工灌木林地,而不是人工乔木林地,这是由于人工灌木林地的地表土壤粗糙度较大。

水土保持措施在影响产流产沙方面与坡度的相关系数为0.46(图5),与实际植被情况相一致。1999年中国实施退耕还林还草工程中,农田(坡度大于 $25^\circ$ )转化为林地或草地,农田一般以缓坡存在。此外,不同坡度下水土保持措施对径流和泥沙的影响程度不同。天然牧草地、人工灌木林地和人工乔木林地的减沙效益整体上随坡度的增大而增大(图4),表明在陡坡条件下,水土保持措施具有更明显的减沙效益。冗余分析结果表明,与降雨特征和

坡度相比,水土保持措施是影响减沙效益的主导因子,这可能是因为植被可以保护土壤表面免受侵蚀,并且整地技术所造成的微地形可以沉积来自上坡的土壤流失<sup>[37]</sup>。

### 3.3 启示

降雨特征是影响径流和泥沙的主导因素。在降雨特征中,最大30 min降雨强度是最关键的控制因子。结果表明,短期极端侵蚀性降雨事件会产生大量径流并造成土壤流失。全球变暖会使极端侵蚀性降雨事件的发生频率增加,导致径流和土壤流失加剧<sup>[38]</sup>。水土保持措施的优化对于长期维持水土保持效果至关重要。缓坡天然牧草地具有较好的减流效益和减沙效益,而陡坡天然牧草地减沙效益不明显。在人工灌木林地中,减流效益和减沙效益较大。从这个角度来看,人工灌木林地可能是一种很好的土地管理策略,通过它可以有效保护水土资源。此外,随着坡度的增大,减沙效益的增加趋势逐渐变低,减流效益甚至出现了下降的现象。这意味着在陡坡上,单一的植被类型不能很好地发挥水土保持作用。目前不少研究发现,不同的植被组合能够减少产流产沙<sup>[39-41]</sup>。为了保持较大的水土保持效益,建议在陡坡上进行以灌木为基础的植被组合。

## 4 结语

本文基于径流小区尺度,对宁夏黄土丘陵沟壑区犁尖沟小流域2015~2019年25次典型侵蚀性降雨事件产生的径流量和泥沙量进行分析,得到以下结论。

(1)在研究区内所设计的坡度中, $20^\circ$ 坡度减流效益最好,陡坡则具有更好的减沙效益。综合来看,与其他水土保持措施相比,人工灌木林地的减流效益和减沙效益较高。

(2)结构方程模型分析结果表明,降雨特征、水土保持措施和坡度对径流和泥沙没有间接影响,最大30 min降雨强度对径流和泥沙的直接影响最大,直接路径系数分别为0.77和0.46。

(3)冗余分析结果表明,降雨特征是影响径流、泥沙和减流效益的主导因素。与降雨特征相比,水土保持措施和坡度是控制减沙效益的主导因素。

(4)全球变暖引起的极端侵蚀性降雨事件导致径流和土壤流失加剧。水土保持措施对于防止径流和土壤流失(特别是对于人工灌木林地来说)是非常必要的。在陡坡上,实施以灌木为主的植被组合有

望实现更大的减流效益和减沙效益。

## 参考文献:

## References:

- [1] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等. 1901~2016年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J]. 人民黄河, 2022,44(9):36-45.  
MU Xing-min, LI Peng-fei, LIU Bin-tao, et al. Spatial-temporal Development and Driving Mechanisms of Erosion on the Chinese Loess Plateau Between 1901 and 2016[J]. Yellow River, 2022, 44(9): 36-45.
- [2] 刘欢欢,刚成诚,温仲明,等. 基于结构化植被指数的延河流域土壤侵蚀时空动态分析[J]. 水土保持研究, 2022,29(5):1-7.  
LIU Huan-huan, GANG Cheng-cheng, WEN Zhong-ming, et al. Soil Erosion Dynamics Analysis in the Yanhe Basin During 2000—2018 Based on the Structural Vegetation Index[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 1-7.
- [3] 澹腾辉,焦雄,平原,等. 基于土壤侵蚀时空演变的县域生态承载力评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4):210-216.  
DAN Teng-hui, JIAO Xiong, PING Yuan, et al. Ecological Carrying Capacity Evaluation Based on Spatial and Temporal Evolution of Soil Erosion at County Scale[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 210-216.
- [4] FU B J, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic Ecosystem Responses to Natural and Anthropogenic Changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2016, 45(1): 223-243.
- [5] RACLOT D, LE B Y, ANNABI M, et al. Main Issues for Preserving Mediterranean Soil Resources from Water Erosion Under Global Change[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(3): 789-799.
- [6] ZHAO F, DENG H, ZHAO X Y. Rainfall Regime in Three Gorges Area in China and the Control Factors [J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(9):1396-1406.
- [7] 贾路,于坤霞,李占斌,等. 长江经济带降雨侵蚀力与NDVI耦合协调关系时空变异分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4):102-114.  
JIA Lu, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, et al. Spatial-temporal Variability Analysis of the Coupling Coordination Relationship Between Rainfall Erosivity and NDVI in the Yangtze River Economic Belt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-
- ing, 2023, 39(4): 102-114.
- [8] 普隽泽,吕锡芝,张秋芬,等. 黄土丘陵沟壑区典型草被产流产沙特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2):1-6.  
PU Jun-ze, LYU Xi-zhi, ZHANG Qiu-fen, et al. Characteristics and Influencing Factors of Runoff and Sediment Yield of Typical Grassland in Loess Hilly and Gully Region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 1-6.
- [9] 黄国平,张文太,陈景梅,等. 伊犁河谷次降雨特征对坡面产流产沙的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(3):109-116, 125.  
HUANG Guo-ping, ZHANG Wen-tai, CHEN Jing-mei, et al. Influence of Rainfall Characteristics on Runoff and Sediment Yield in Ili Valley[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(3): 109-116, 125.
- [10] 刘黎,赵永华,韩磊,等. 基于土地资源分区的黄土高原水土热资源时空变化和生态功能区划[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2021, 49(6):86-97.  
LIU Li, ZHAO Yong-hua, HAN Lei, et al. Spatio-temporal Variation and Ecological Function Regionalization of Soil, Water and Heat Resources on the Loess Plateau Based on Land Resource Zoning [J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2021, 49(6): 86-97.
- [11] 张龙齐,贾国栋,吕相融,等. 黄土高原典型地区不同植被覆盖下坡面土壤侵蚀阈值研究[J]. 水土保持学报, 2023, 37(2):187-198.  
ZHANG Long-qi, JIA Guo-dong, LYU Xiang-rong, et al. Research of Soil Erosion Thresholds on the Lower Slopes of Different Vegetation Cover in Typical Areas of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 187-198.
- [12] 魏云洁,甄霖,胡云锋,等. 黄土高原典型区水土保持技术评估与需求分析:以安塞为例[J]. 生态学报, 2019, 39(16):5809-5819.  
WEI Yun-jie, ZHEN Lin, HU Yun-feng, et al. Assessment and Needs Analysis on Soil and Water Conservation Technology in the Typical Region of the Loess Plateau: A Case Study of Ansai, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 5809-5819.
- [13] 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 Shu-ning, ZHANG Ze-yu, LI Rong-rong, et al. Effects of Contour Tillage on Soil Erosion Process in Different Slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 37-44.

- [14] 杨润泽,冯天骄,肖辉杰,等.京郊强降雨条件下不同水土保持治理措施配置模式效益评价[J].水土保持学报,2022,36(1):8-17.  
YANG Run-ze, FENG Tian-jiao, XIAO Hui-jie, et al. Evaluating the Benefits of Different Soil and Water Conservation Measures Under Heavy Rainfall Conditions in the Suburban Areas of Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 8-17.
- [15] HUO J Y, YU X X, LIU C J, et al. Effects of Soil and Water Conservation Management and Rainfall Types on Runoff and Soil Loss for a Sloping Area in North China[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(15): 2117-2130.
- [16] ZHAO J L, YANG Z Q, GOVERS G. Soil and Water Conservation Measures Reduce Soil and Water Losses in China But Not Down to Background Levels: Evidence from Erosion Plot Data[J]. Geoderma, 2019, 337: 729-741.
- [17] 牟廷森,沈海鸥,李洪丽,等.不同坡度下掺沙对黑土坡面径流侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):43-47,55.  
MOU Ting-sen, SHEN Hai-ou, LI Hong-li, et al. Effects of Soil Mixed with Sand on Slope Erosion at the Mollisol Hill Slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 43-47, 55.
- [18] 文博瑾,段高辉,温仲明.生物多样性与地形及土壤因素对坡面产流产沙的耦合影响[J].草地学报,2023,31(4):1186-1197.  
WEN Bo-jin, DUAN Gao-hui, WEN Zhong-ming. Coupling Effects of Biodiversity with Topographic and Soil Factors on Slope Runoff-sediment Yield[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(4): 1186-1197.
- [19] 杨瑞杰,何淑勤,逯传琦,等.大渡河干旱河谷区横垄坡面产流产沙特征及水保效益[J].水土保持学报,2022,36(6):16-22.  
YANG Rui-jie, HE Shu-qin, LU Chuan-qi, et al. Runoff and Sediment Yield Characteristics and Soil and Water Conservation Benefits of Cross Ridge Slope in Arid Valley of Dadu River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 16-22.
- [20] 徐相忠,刘前进,张含玉.降雨类型与坡度对棕壤垄沟系统产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):56-62,71.  
XU Xiang-zhong, LIU Qian-jin, ZHANG Han-yu. Effects of Rainfall Type and Slope on Runoff and Sediment Yield in Brown Soil Furrow System[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(4): 56-62, 71.
- [21] 向宇国,张丹,陈凡,等.降雨和坡度对植烟坡耕地产流产沙的影响[J].西南农业学报,2021,34(5):1121-1127.  
XIANG Yu-guo, ZHANG Dan, CHEN Fan, et al. Effect of Rainfall and Slope on Runoff and Sediment Production of Tobacco Slope Farmland[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(5): 1121-1127.
- [22] 陈泽勋,刘廷玺,王怡璇,等.模拟降雨条件下典型草原坡面初始产流时间及产流产沙量[J].生态学杂志,2022,41(7):1316-1323.  
CHEN Ze-xun, LIU Ting-xi, WANG Yi-xuan, et al. Quantitative Analysis of the Contribution of Different Rainfall Conditions to Runoff and Sediment Yield on Typical Grassland Slope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7): 1316-1323.
- [23] 徐宁,吴发启,杨一凡,等.大豆调节坡耕地径流和泥沙作用研究[J].水土保持学报,2020,34(3):42-48.  
XU Ning, WU Fa-qi, YANG Yi-fan, et al. Regulation Effect of Soybean on Runoff and Sediment on Sloping Farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 42-48.
- [24] 王玲莉,张富,胡彦婷,等.侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响[J].人民黄河,2021,43(10):109-113.  
WANG Ling-li, ZHANG Fu, HU Yan-ting, et al. Effects of Erosive Rainfall Classification and Vegetation Types on Runoff and Sediment Load Generation[J]. Yellow River, 2021, 43(10): 109-113.
- [25] 任正龔,张栋,杨志,等.不同降水强度等级和坡度下水土保持措施减流减沙效益研究[J].中国水土保持,2022(6):40-43.  
REN Zheng-gan, ZHANG Dong, YANG Zhi, et al. Runoff and Sediment Reduction Benefits of Soil and Water Conservation Measures Under Different Precipitation Intensity Grades and Slopes[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(6): 40-43.
- [26] 梁越,焦菊英.黄土高原小流域产沙性降雨标准分析[J].中国水土保持科学,2019,17(3):8-14.  
LIANG Yue, JIAO Ju-ying. Analysis on Rainfall Standards While Sediment Occurring in Small Watersheds on the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(3): 8-14.
- [27] 朱锐鹏,刘殿君,张世豪,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应[J].水土保持研究,2022,29(4):10-17.  
ZHU Rui-peng, LIU Dian-jun, ZHANG Shi-hao, et al.

- Characteristics of Runoff and Sediment Yield in Different Land Use Types in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2022,29(4):10-17.
- [28] DE ROO A P J, RIEZEBOS H T. Infiltration Experiments on Loess Soils and Their Implications for Modelling Surface Runoff and Soil Erosion[J]. *Catena*, 1992,19(2):221-239.
- [29] VANDERVAERE J P, PEUGEOT C, VAUCLIN M, et al. Estimating Hydraulic Conductivity of Crusted Soils Using Disc Infiltrometers and Minitensiometers [J]. *Journal of Hydrology*,1997,188/189:203-223.
- [30] DENG L Z, ZHANG L P, FAN X J, et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on Runoff and Sediment Yield from Hillslopes with Weathered Granite[J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2019,26(5):32559-32573.
- [31] 朱方方,秦建森,朱美菲,等. 模拟降雨下林下覆被结构对产流产沙过程的影响[J]. *水土保持学报*,2023,37(3):10-18.
- ZHU Fang-fang, QIN Jian-miao, ZHU Mei-fei, et al. Effect of Mulch Structure on Runoff and Sediment Yield Under Simulation Rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2023,37(3):10-18.
- [32] WANG L J, ZHANG G H, ZHU P Z, et al. Comparison of the Effects of Litter Covering and Incorporation on Infiltration and Soil Erosion Under Simulated Rainfall[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(13):2911-2922.
- [33] 温永福,高鹏,穆兴民,等. 野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J]. *水土保持研究*,2018,25(1):23-29.
- WEN Yong-fu, GAO Peng, MU Xing-min, et al. Experimental Study on Runoff and Sediment Yield in Runoff Plot Under Field Simulated Rainfall Condition [J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2018,25(1):23-29.
- [34] 张彩云,蒋勇军,马丽娜,等. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J]. *水土保持通报*,2021,41(1):49-55.
- ZHANG Cai-yun, JIANG Yong-jun, MA Li-na, et al. Characteristics of Runoff and Sediment on Slope Land with Different Land Use in Karst Trough Valley Area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*,2021,41(1):49-55.
- [35] WEI W, FENG X R, YANG L, et al. The Effects of Terracing and Vegetation on Soil Moisture Retention in a Dry Hilly Catchment in China[J]. *Science of the Total Environment*,2019,647:1323-1332.
- [36] 夏晓平,信忠保,赵云杰,等. 北京山区河岸植被的水土保持效益[J]. *水土保持学报*,2018,32(5):71-77,83.
- XIA Xiao-ping, XIN Zhong-bao, ZHAO Yun-jie, et al. Soil and Water Conservation Benefits of Riparian Vegetation in Beijing Mountainous Area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2018,32(5):71-77,83.
- [37] WANG L H, DALABAY N, LU P, et al. Effects of Tillage Practices and Slope on Runoff and Erosion of Soil from the Loess Plateau, China, Subjected to Simulated Rainfall[J]. *Soil and Tillage Research*,2017,166:147-156.
- [38] 许阳光,郭文召,王文龙,等. 极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响[J]. *生态学报*,2022,42(19):7898-7909.
- XU Yang-guang, GUO Wen-zhao, WANG Wen-long, et al. Characteristics of Shallow Landslides Under Extreme Rainfall and Their Effects on Runoff and Sediment on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2022,42(19):7898-7909.
- [39] 王恒星,张建军,孙若修,等. 晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J]. *北京林业大学学报*,2021,43(3):85-95.
- WANG Heng-xing, ZHANG Jian-jun, SUN Ruo-xiu, et al. Effects of Different Vegetation Slope Patterns on Infiltration and Characteristics of Runoff and Sediment Production in the Loess Area of Western Shanxi Province, Northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*,2021,43(3):85-95.
- [40] 朱永杰,王超,刘自强. 降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持通报*,2021,41(6):8-14.
- ZHU Yong-jie, WANG Chao, LIU Zi-qiang. Effects of Rainfall and Vegetation Cover on Soil Erosion of Railway Bed Slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*,2021,41(6):8-14.
- [41] 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 Tao, SU Zheng-an, LIU Gang-cai, 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*,2022,38(9):91-100.