

模拟降雨条件下两种城市灌木的水土保持效应

胡静¹, 马建刚^{1,2}, 赵彤晖¹, 王心禹¹, 陈娟娟¹

(1.西南林业大学 水土保持学院, 云南 昆明 650224;

2.国家林业和草原局云南沾益岩溶生态系统定位观测研究站, 云南 曲靖 655500)

摘要: [目的] 探究城市灌木植被的水土保持效应, 为城市绿地规划中的植被科学选配和水土流失防控提供科学依据。[方法] 通过野外径流小区模拟降雨试验, 研究红花檵木和浅齿黄金菊下垫面径流小区在 6 种降雨强度和 2 种坡度条件下的水土流失特征, 试验均在两种灌木下方种植黑麦草的条件下进行。[结果] ① 坡地水土流失量远高于平地。红花檵木坡地产流量可达到平地的 9.6~19.24 倍, 产沙量达到 3.99~9.22 倍; 浅齿黄金菊坡地产流量可达到平地的 0.91~4.7 倍, 产沙量达到 0.9~4.61 倍; 裸地坡地产流量可达到平地的 1.41~7.69 倍, 产沙量达到 1.67~5.84 倍。② 产流产沙量随降雨强度增大而增加, 但增幅因植被和坡度不同而异。③ 植被效应存在环境条件依赖性: 平地条件下红花檵木减流减沙效果显著优于浅齿黄金菊 ($p < 0.001$), 但在坡地或极端降雨(雨强重现期 100 a) 时差异不显著。④ 植被类型与降雨强度的交互作用显著, 坡度与植被类型的交互作用较弱。但两种交互作用均加重了水土流失。[结论] 城市灌木能有效保持水土, 但极端降雨(雨强重现期 100 a 时) 会削弱其水土保持效果。为此, 在城市绿地植被配置中, 建议优先选择具有紧密冠层结构和革质叶片的植物种类(如红花檵木), 以增强城市绿地在极端降雨条件下的水土保持能力, 降低水土流失风险。

关键词: 模拟降雨; 红花檵木; 浅齿黄金菊; 产流产沙; 降雨强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0057-10

中图分类号: S157.1

文献参数: 胡静, 马建刚, 赵彤晖, 等. 模拟降雨条件下两种城市灌木的水土保持效应[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 57-66. Hu Jing, Ma Jiangan, Zhao Tonghui, et al. Soil and water conservation effects of two urban shrubs under simulated rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 57-66.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.005

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.005

Soil and water conservation effects of two urban shrubs under simulated rainfall conditions

Hu Jing¹, Ma Jiangan^{1,2}, Zhao Tonghui¹, Wang Xinyu¹, Chen Juanjuan¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University,

Kunming, Yunnan 650224, China; 2.Zhanyi Karst Ecosystem Positioning Observation

Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Qujing, Yunnan 655500, China)

Abstract: [Objective] The soil and water conservation effects of urban shrub vegetation were investigated, in order to provide a scientific basis for the scientific selection of plants in urban green space planning and for the prevention and control of soil erosion. [Methods] Field runoff plot experiment with simulated rainfall were conducted to study soil and water loss characteristics of *Loropetalum chinense* var. *rubrum* and *Euryops chrysanthemoides* under six rainfall intensities and two slope gradients. All experiments were performed with ryegrass (*Lolium perenne*) planted beneath both shrubs. [Results] ① Soil and water loss on slopes much higher than that on flat ground. For *L. chinense* var. *rubrum*, runoff yield on slopes was 9.60—19.24 times, and sediment yield was 3.99—9.22 times than that on flat ground. For *E. chrysanthemoides*, runoff yield on slopes was 0.91—4.70 times, and sediment yield was 0.90—4.61 times than that on flat ground. For bare soil, runoff yield on slopes

收稿日期: 2025-06-07

修回日期: 2025-09-14

采用日期: 2025-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“暴雨条件下城市绿地积水入渗机制研究”(42261007); 云南省水土保持与荒漠化防治学一流学科开放课题(SBK20240025)

第一作者: 胡静(2001—), 女(汉族), 云南省会泽县人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水土保持。Email: 1459947104@qq.com。

通信作者: 马建刚(1978—), 男(汉族), 山西省古县人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事城市与山地水土保持研究。Email: 1257834@qq.com。

was 1.41—7.69 times, and sediment yield was 1.67—5.84 times than that on flat ground. ② Runoff and sediment yields increased with rainfall intensity, but the increase varied with vegetation type and slope gradient. ③ Vegetation effects were dependent on environmental conditions; on flat ground *L. chinense* var. *rubrum* was significantly better than *E. chrysanthemoides* in reducing runoff and sediment ($p < 0.001$), but this difference diminished on slopes or under extreme rainfall (100-year return period). ④ The interaction between vegetation type and rainfall intensity was significant, while that between slope gradient and vegetation type was weak. However, both interactions increased soil and water loss. [Conclusion] Urban shrubs effectively conserve soil and water, but extreme rainfall (100-year return period) diminishes their efficacy. Thus, in urban green space vegetation configuration, priority should be given to plant species with dense canopy structures and leathery leaves (e. g., *L. chinense* var. *rubrum*) to enhance soil and water conservation under extreme rainfall and reduce the risk of soil and water loss.

Keywords: simulated rainfall; *Loropetalum chinense* var. *rubrum*; *Euryops chrysanthemoides*; runoff and sediment yield; rainfall intensity

随着全球城市化进程的加速,土地利用方式的剧烈变化显著改变了地表径流特征和土壤稳定性,导致城市水土流失加剧、洪涝风险增加以及地表生态功能退化等问题^[1-2]。此外,受全球气候变化影响,城市极端强降雨事件频发,并呈现出历时短、强度大、局地性强的特征^[3],也进一步加剧了城市水土流失问题。

在此背景下,城市绿地作为重要的生态基础设施,其生态功能愈发凸显。研究^[4-6]表明,城市绿地作为城市中最重要可透水层,通过调蓄雨水、削减洪峰和雨污净化等功能,不仅有效推动了海绵城市建设,在减缓城市洪涝灾害等方面也具有不可或缺的作用。特别是灌木植被作为城市绿地系统的重要组成部分,如何通过植被调控优化城市生态基础设施,提升土壤抗侵蚀能力与雨水蓄滞功能,成为城市生态学和水土保持领域的研究热点。灌木植被作为城市绿地系统的重要组成部分,在水土保持工作中具有不可替代的作用。其密集根系网络能有效固持土壤颗粒,降低径流流速,而植物冠层则通过截留降雨、延缓滴流过程减少地表径流冲刷^[7-8]。充分认识灌木植被的水土保持效应对于优化利用灌木植被具有积极意义。然而,当前针对城市灌木植被水土保持效能的研究依旧存在不足:①现有研究多集中于自然生态系统^[9],城市环境下灌木产流产沙相关研究仍较薄弱。②综合考虑多种降雨梯度和地形因子的系统性试验更少^[10]。

鉴于此,本研究选取昆明地区典型城市灌木浅齿黄金菊和红花檵木为研究对象,创新性地设置6种暴雨强度梯度(重现期5~100 a)和2种坡度类型(0°和5°)的试验组合,通过野外模拟降雨控制试验,系统分析了不同暴雨—地形组合条件下的水土流失特

征,旨在为城市绿地规划中的植被科学选配和水土流失防控提供精细化、定量化的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验小区布设

在西南林业大学呼马山试验基地内,设置了6块径流小区,包括3块0°和3块5°。每块径流小区的大小规格为2.5 m×2 m,并在每个的中心位置设定一个大小为长2 m×宽1 m的测流小区。并在每个测流小区中心位置安装温湿度变送器,以观察土壤温湿度确保每次降雨前的湿度保持一致。其次测流小区的边界采用不锈钢挡板进行围挡。挡板埋入地下深度为30 cm,地上露出部分高度为15 cm,以确保有效隔离内外水流,防止径流渗出,同时减少边界干扰。此外本试验于2023年3月,在各径流小区分别移栽两种灌木植物:红花檵木(*Loropetalum chinense* var. *rubrum*)和浅齿黄金菊(*Euryops chrysanthemoides*),同时在灌木植物下方统一种植黑麦草(*Lolium perenne*),种植方式为将种子与少量表土混合后均匀撒播,撒播量为15 g/m²。并设计1组裸地对照组,用于对比植被覆盖对水土流失过程的影响。具体径流小区概况详见表1。

1.2 降雨设计

模拟降雨采用自制模拟降雨设备,该设备由钢管、喷头、输水软管、钢筋脚架、蓄水桶、压力表以及潜水式抽水泵(QDX3-21-0-55)组装而成。经测定,该设备降雨高度4.0 m时,可实现的雨强范围为25.8~78.7 mm/h,降雨均匀度>85%。根据昆明市1 h点暴雨量计算方法,按照雨强重现期5 a, 10 a, 20 a, 30 a, 50 a, 100 a设置6个暴雨强度,试验过程中,在测流小区边界多点布置雨量桶用于记录实际

雨强。每次降雨 30 min,降雨开始计时并记录初始产流时间,每场降雨结束后间隔至少 12 h,待样地 30 cm 内土壤湿度恢复到 30% 左右后进行下一次降雨,每个试验样地按设计降雨强度重复 3 次(表 2)。

表 1 径流小区基本情况

Table 1 Basic information of runoff plots

植被类型	坡度/ (°)	0—30 cm 土层土壤机械组成/%			容重/ (g·cm ⁻³)	株高/ cm	密度/ (m ² ·株 ⁻¹)	盖度/ %
		砂粒	粉粒	黏粒				
裸地	0	17.90±6.11	26.99±4.27	55.12±1.83	1.22±0.08	0	0	0
	5	15.61±6.33	36.51±4.13	47.89±3.71	1.09±0.02	0	0	0
红花檵木	0	26.45±12.73	26.84±0.46	46.70±10.86	1.10±0.09	48.91	3	92.53
	5	16.25±6.24	28.56±5.02	53.49±1.13	1.14±0.04	49.57	3	91.74
浅齿黄金菊	0	12.68±1.12	30.53±5.78	56.79±5.91	1.14±0.10	50.17	4.5	90.71
	5	21.26±13.62	25.26±4.92	53.48±10.91	1.15±0.06	50.38	4.5	90.56

注:数据为平均值±标准误。

表 2 模拟降雨设计

Table 2 Design of simulated rainfall for experiment

项目	不同重现期雨强/(mm·h ⁻¹)					
	5 a	10 a	20 a	30 a	50 a	100 a
设计雨强	41.02	49.12	56.80	61.18	66.58	73.92
实际雨强	42.09±0.36	49.78±0.48	57.30±0.40	61.94±0.32	66.35±0.43	72.75±0.44

1.3 产流、产沙测定与计算

1.3.1 产流处理

测流小区开始产流后用瓶子全量收集每 3 min 的径流 1 次,然后用量筒测出样品体积 V (ml),累积之和为总径流量 V_a 。

(1) 产流率^[11]。产流率[L/(min·m²)]用来表征产流状况,计算公式为

$$R_y = \frac{V_a}{t \cdot S} \quad (1)$$

式中: R_y 为产流率[L/(min·m²)]; V_a 为总径流量(ml); t 为产流时间(min); S 为测流小区面积(m²)。

1.3.2 产沙处理

将测定径流体积的样品用滤纸过滤并用洗瓶清洗到空铝盒中,随后放入烘箱 105 °C 烘干后称重,两者之间相减得到泥沙量。再根据得出的产沙量按照公式计算得出产沙率。

$$M = M_2 - M_1 \quad (2)$$

式中: M 为烘干后的样品泥沙质量(g); M_1 为空铝盒质量(g); M_2 为烘干后铝盒+泥沙质量(g)。

(2) 产沙率^[11]。产沙率[g/(min·m²)]用来表征产沙情况。

$$R_x = \frac{M_a}{t \cdot S} \quad (3)$$

式中: R_x 为产沙率[g/(min·m²)]; M_a 为总泥沙量

(g); t 为产流时间(min); S 为测流小区面积(m²)。

1.4 数据处理

本研究试验数据通过 Excel 2021 进行初步整理与汇总,SPSS 27.0 进行多因素方差分析、主效应检验和交互作用分析,使用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 产流特征

2.1.1 总产流量

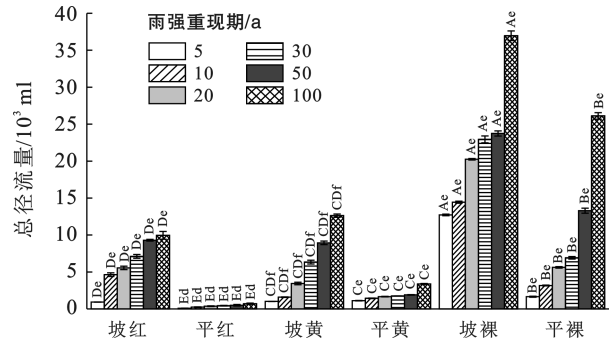
各径流小区不同雨强下的总径流量如图 1 所示。由图 1 可知,坡地的总径流量显著高于平地,且裸地的径流量显著最高,并与其他样地均存在极显著差异。在相同雨强条件下红花檵木、浅齿黄金菊、裸地的坡地产流量分别比平地高出 9.6~19.24, 0.91~4.7, 1.41~7.69 倍。降雨强度越大,产流量越大且增加幅度不同。例如坡地裸地在 5 a 到 100 a 重现期,径流量从 12 717 ml 增长到 36 961 ml,增长了约 2.9 倍;平地红花檵木从 93 ml 增长到 705 ml,增长了约 7.6 倍。不同灌木在不同条件下减流效果不同。平地红花檵木径流量最低,而坡地浅齿黄金菊在 50 a 重现期下径流量比红花檵木减少 4%。

2.1.2 产流过程

所有测流小区在不同降雨强度下产流过程均呈

现相似的动态变化规律,即产流率随时间先快速上升至最大值,后逐渐下降(图 2)。所有试验小区在产流过程中,产流率均随降雨强度增加,但增加幅度不同。

除裸地外,浅齿黄金菊和红花檵木的产流率增幅均在 20 a 重现期后趋于平缓。且在低重现期(5 a、10 a)条件下,产流峰值出现在 12~15 min;高重现期(50 a、100 a)时,峰值提前到 6~9 min。不同坡度条件下产流率变化也不同。坡地产流率在 3 min 内迅速增加,而平地上升平缓。在相同降雨强度条件下,坡地的产流率峰值都要比平地高。以 100 a 重现期为例,坡地浅齿黄金菊的产流率峰值为 0.30 L/(min·m²),而平地浅齿黄金菊仅为 0.07 L/(min·m²),前者达到后者的约 4 倍。



注:不同大写字母表示同一重现期下不同小区的径流量差异显著($p < 0.05$);不同小写字母表示同一个小区的不同重现期的径流量差异($p < 0.05$);采用降雨强度重现期表征降雨强度,并以“坡+植被”和“平+植被”的形式标注各径流小区,如“坡红”代表 5°坡地红花檵木小区等。

图 1 各径流小区不同雨强下的总径流量

Fig.1 Total runoff volumes under different rainfall intensities in each runoff plots

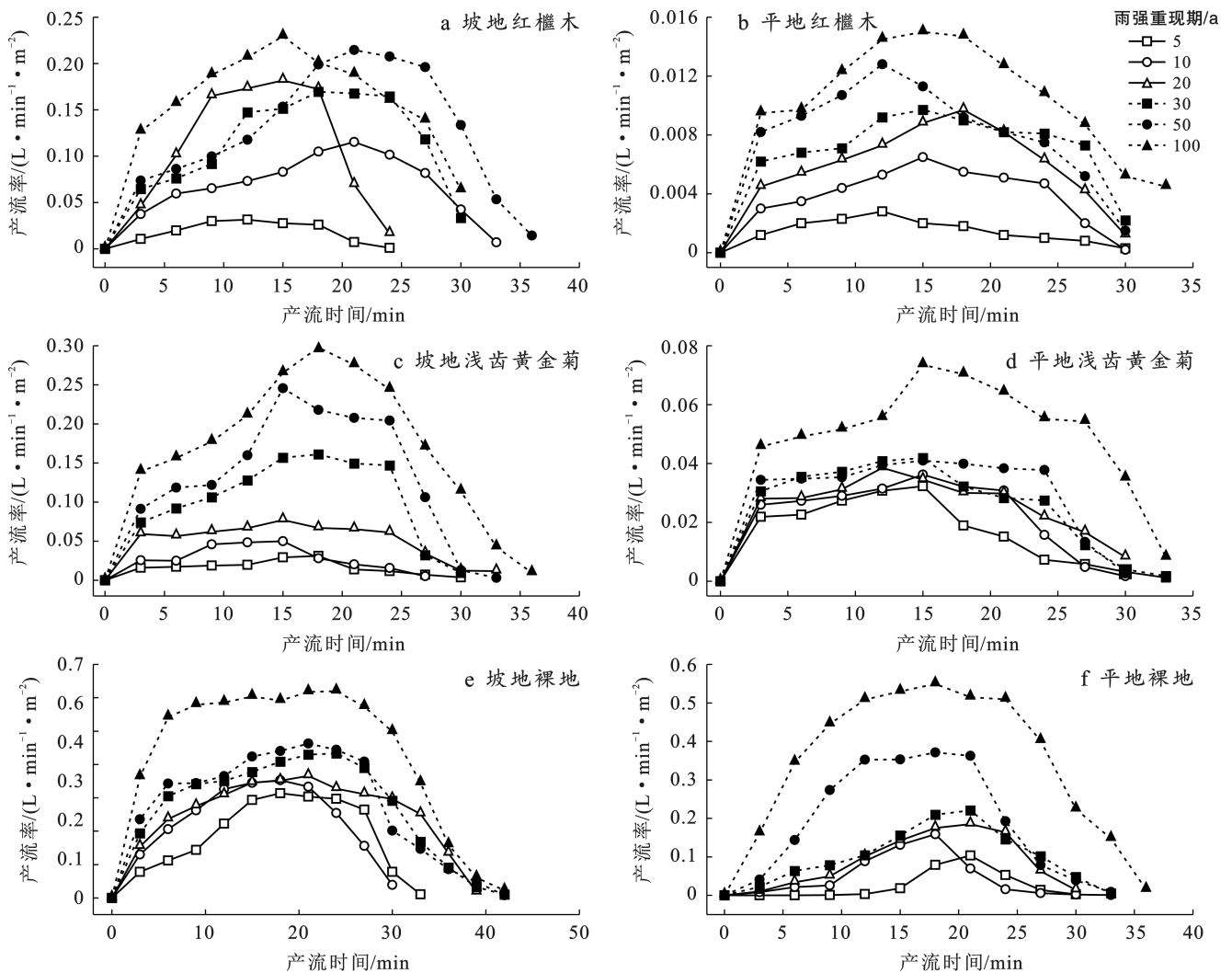


图 2 各径流小区不同雨强下的产流率

Fig.2 Runoff generation rates under different rainfall intensities in each runoff plots

2.2 产沙特征

2.2.1 总产沙量

各测流小区总产沙量动态如图 3 所示。坡地的

总产沙量显著高于平地但不同植被表现不同。在相同降雨强度下红花檵木、浅齿黄金菊、裸地的坡地产沙量分别比平地高出 3.99~9.22, 0.9~4.61,

1.67~5.84 倍。降雨强度越大,产沙量越大但增加幅度具有显著差异。例如,平地红花檵木从 5 a 到 100 a 重现期,泥沙量从 0.330 8 g 增长到 1.158 6 g,增长约 3.5 倍;坡地浅齿黄金菊从 0.920 6 g 增长到 12.770 9 g,增长了约 13.9 倍。5~20 a 重现期下,两种灌木下的产沙量均较低,且差异不明显,红花檵木的产沙量比浅齿黄金菊低 10.5%。随着雨强的增大,二者之间差异缩小,在 100 a 重现期下浅齿黄金菊产沙量仅比红花檵木高 3.0%。

2.2.2 产沙过程

各测流小区的产沙过程动态特征与其产流过程具有一致性,均表现为产沙率时间先增加至最大值后逐渐下降趋势(图 4)。坡地的总产沙量显著高于平地但不同植被表现不同。在相同降雨强度下红花檵木、浅齿黄金菊、裸地的坡地产沙量分别比平地高出 3.99~9.22, 0.9~4.61, 1.67~5.84 倍。降雨强度越大,产沙量越大但增加幅度具有显著差异。

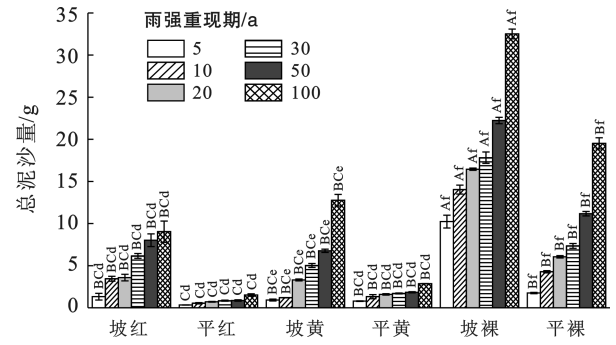


图 3 各径流小区不同雨强下的总产沙量

Fig.3 Total sediment yield under different rainfall intensities in each runoff plots

例如,平地红花檵木从 5 a 到 100 a 重现期,泥沙量从 0.330 8 g 增长到 1.158 6 g,增长约 3.5 倍;坡地浅齿黄金菊从 0.920 6 g 增长到 12.770 9 g,增长了约 13.9 倍。5~20 a 重现期下,两种灌木下的产沙量均较低,且差异不明显,红花檵木的产沙量比浅齿黄金菊低 10.5%。随着雨强的增大,二者之间差异缩小,在 100 a 重现期下浅齿黄金菊产沙量仅比红花檵木高 3.0%。

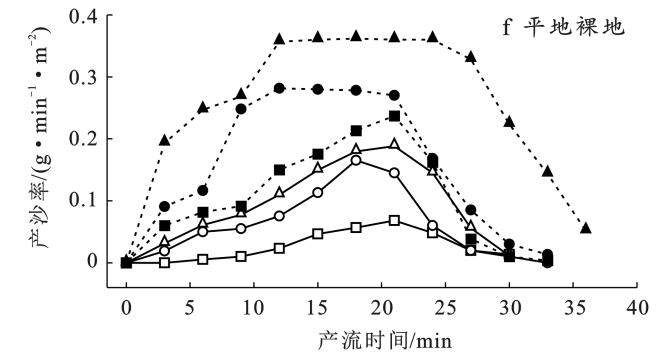
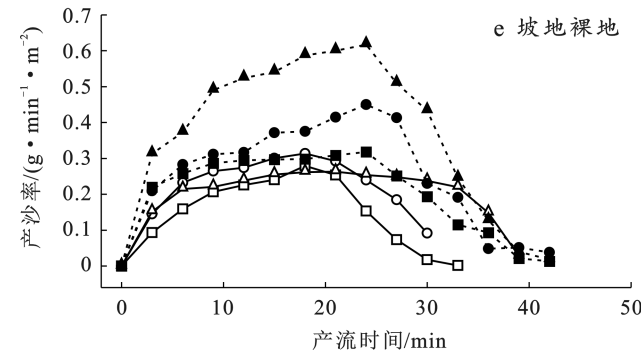
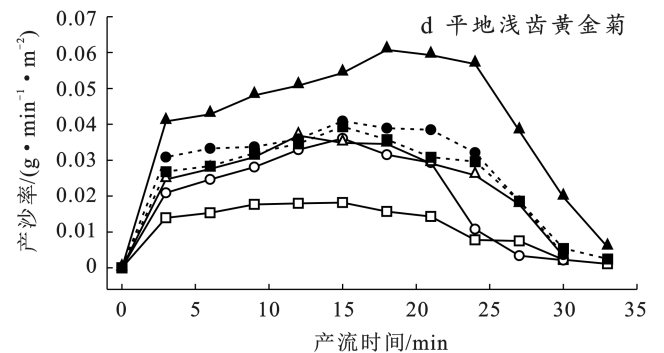
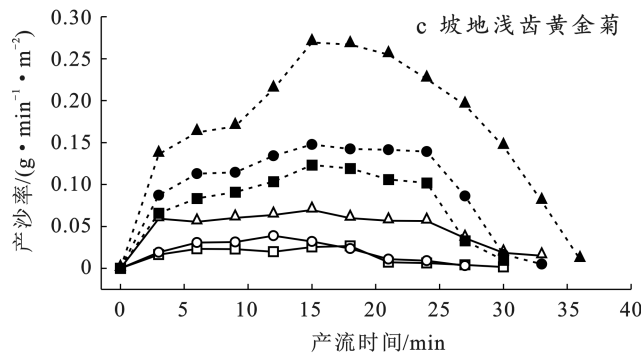
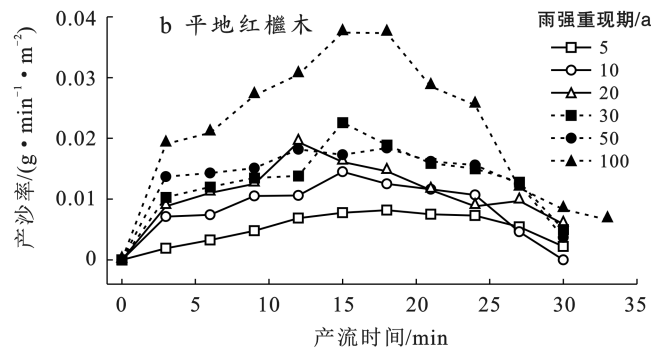
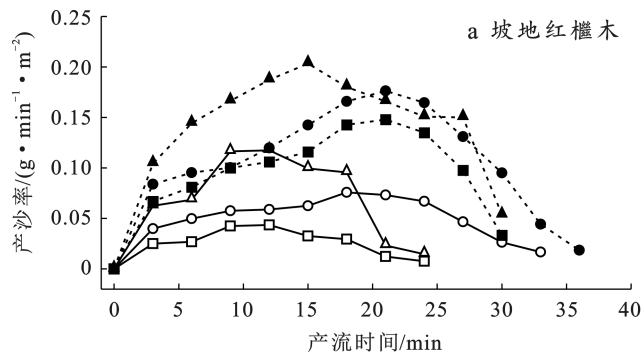


图 4 各径流小区不同雨强下的产沙率

Fig.4 Sediment production rate under different rainfall intensities in each runoff plots

随着雨强的增大,二者之间差异缩小,在 100 a 重现期下浅齿黄金菊产沙量仅比红花檵木高 3.0%。所有试验小区在产流过程中,产沙率均随降雨强度增加,但增加幅度不同。在 20 a 重现期下,除裸地外,浅齿黄金菊和红花檵木的产沙率均开始加速增长,在 50 a 重现期后裸地产沙率增长逐渐缓慢(坡地裸地在 50~100 a 期间仅增长了 65%)。不同坡度,产沙率增长幅度也不同。坡地产流率在 3 min 内迅速增加,而平地上升平缓。且在相同降雨强度条件下,坡地的产流率峰值都要比平地高。如 100 a 重现期时坡地裸地的产沙率峰值在 0.65 g/(min·m²)达到平地裸地 0.35 g/(min·m²)的约 2 倍。

2.3 交互作用

2.3.1 产流率影响因素的主效应与交互效应分析

采用多因素方差分析方法,分析了降雨强度、坡度及植被类型对产流率的主效应,并揭示了各因子间显著的交互作用(表 3)。植被类型、降雨强度和坡度类型均对产流率有显著独立影响($p < 0.001$,且偏 $\eta^2 > 0.14$),其中植被类型的解释力最强(偏 $\eta^2 = 0.361$)。此外,降雨强度与植被类型的交互作用显著($p < 0.001$,偏 $\eta^2 = 0.114$),而植被类型与坡度类型的交互作用显著($p < 0.001$),但效应量(偏 $\eta^2 = 0.034$)较小,表明两者虽然存在交互作用,但实际影响较弱,需再通过简单效应结合具体数据判断其实际意义。其他交互作用均不显著。

表 3 产流率的主体间效应检验结果
Table 3 Results of inter-subject effect test for runoff rates

差异来源	p 值	偏 η^2
降雨强度	<0.001	0.212
坡度类型	<0.001	0.199
植被类型	<0.001	0.361
降雨强度×坡度类型	0.477	0.011
降雨强度×植被类型	<0.001	0.114
坡度类型×植被类型	<0.001	0.034
降雨强度×坡度类型×植被类型	0.143	0.036

注: $p < 0.05$ 表示显著; $p < 0.01$ 表示高度显著; $p < 0.001$ 表示极显著。偏 η^2 表示效应量:偏 $\eta^2 \geq 0.01$ 表示小效应,偏 $\eta^2 \geq 0.06$ 为中效应,偏 $\eta^2 \geq 0.14$ 为大效应。下同。

2.3.2 产沙率影响因素的主效应与交互效应分析

采用多因素方差分析方法,分析降雨强度、坡度及植被类型对产沙率的主效应,并揭示了各因子间显著的交互作用(表 4)。植被类型、降雨强度和坡度类型均对产沙率有极显著影响,其中植被类型的独立影响解释力最强。降雨强度与植被类型的交互作用显著,而坡度与植被类型的交互作用虽显著,但没

有前者交互作用强。因此,需进一步通过简单效应分析降雨强度与植被类型、坡度与植被类型的交互作用,以明确其具体影响机制。

表 4 产沙率的主体间效应检验结果
Table 4 Results of inter-subject effect test on sediment yield rates

差异来源	p 值	偏 η^2
降雨强度	<0.001	0.225
坡度类型	<0.001	0.197
植被类型	<0.001	0.383
降雨强度×坡度类型	0.093	0.023
降雨强度×植被类型	<0.001	0.085
坡度类型×植被类型	<0.001	0.036
降雨强度×坡度类型×植被类型	0.573	0.022

3.3.3 降雨强度与坡度对植被调控产流产沙的交互作用

通过多因素方差分析(表 3—4)已得出降雨强度×植被类型和坡度类型×植被类型的交互作用均达到显著水平,因此需要通过简单效应分析进一步探究,即得出不同坡度下植被类型对产流产沙的调控效果(表 5);不同降雨强度下植被类型对产流产沙的差异比较(表 6)。

在不同坡度条件下,裸地的产流产沙率与植被覆盖地的差异在 5°坡度时更为明显。此外,红花檵木与黄金菊在 0°坡度时产流产沙率存在显著差异,但在 5°坡度时差异不显著。在不同降雨强度条件下,裸地的产流率和产沙率和植被覆盖地的差异随着降雨强度的增加而增大,且在 100 a 重现期时达到最大差异;在 5~50 a 重现期条件下,红花檵木与黄金菊的产流率和产沙率均无显著差异;当降雨强度增至 100 a 重现期时,红花檵木在产沙率上呈现优于黄金菊的趋势(均值差 = -0.028),但未达显著水平($p = 0.473$)。

3 讨论

3.1 产流产沙特征

本研究中,所有测流小区的产流产沙过程均随着降雨的持续,产流产沙量呈现先逐渐增加到最大值,继而随降雨停止而逐渐减小的动态模式。从各小区在不同降雨强度下的变化趋势上来看,所有测流小区的产流量和产沙量均随降雨强度增大而显著增加,这与刘俊娥等^[12]的黄土坡面研究结论相同。然而,不同小区随降雨强度增大的变化幅度不同,红花檵木小区在 5 a 重现期时变化平缓,随后显著增大;

浅齿黄金菊小区则从 30 a 重现期起增幅明显变大。这表明降雨强度增大不仅会提高产流产沙量,还会加剧其波动程度。这一结果与励其其等^[13]的研究结果相互印证,不同的是他们的研究以自然土地为对象,自然条件下的土壤结构疏松,有机质含量较高。城市土壤由于人为压实等,容重普遍较大,孔隙度较低,导致水分入渗能力下降,进一步加剧了极端降雨

下的产流风险,对植被的截留能力也提出了更高的要求。此外,在 100 a 重现期条件下,黄金菊和红花檵木的产流产沙能力均较高,这也表明了植被虽能保持水土,但植被固土能力有限,在极端降雨条件下其本身也可能成为水土流失的源区,特别是在城市灌溉提高了土壤含水量以及下层土壤更加紧实的情况下,城市绿地也易发生水土流失^[14]。

表 5 不同坡度下不同植被类型间产流率与产沙率的多重比较结果
Table 5 Multiple comparison results of runoff and sediment yield rates among different vegetation types under various slope gradients

坡度/(°)	比较组	产流率			产沙率		
		均值差	ρ 值	偏 η^2	均值差	ρ 值	偏 η^2
0	裸地-红花檵木	0.125	<0.001	0.418	0.103 7	<0.001	0.382
	裸地-浅齿黄金菊	0.105	<0.001	0.356	0.091 8	<0.001	0.324
	红花檵木-浅齿黄金菊	-0.020	<0.001	0.287	-0.012	<0.001	0.205
5	裸地-红花檵木	0.167	<0.001	0.453	0.147	<0.001	0.412
	裸地-浅齿黄金菊	0.184	<0.001	0.487	0.157	<0.001	0.438
	红花檵木-浅齿黄金菊	0.017	0.400	0.005	0.011	0.589	0.003

表 6 不同降雨强度下不同植被类型间产流率与产沙率的多重比较结果
Table 6 Multiple comparison results of runoff and sediment yield rates among different vegetation types under varying rainfall intensities

重现期/a	比较组	产流率			产沙率		
		均值差	ρ 值	偏 η^2	均值差	ρ 值	偏 η^2
5	裸地-红花檵木	0.096	0.002	0.214	0.073	0.004	0.178
	裸地-浅齿黄金菊	0.089	0.004	0.187	0.074	0.003	0.191
	红花檵木-浅齿黄金菊	-0.007	0.109	0.032	0.001	0.925	0.001
10	裸地-红花檵木	0.089	0.009	0.183	0.100	<0.001	0.254
	裸地-浅齿黄金菊	0.099	0.003	0.221	0.108	<0.001	0.289
	红花檵木-浅齿黄金菊	0.011	0.435	0.012	0.008	0.336	0.009
20	裸地-红花檵木	0.123	0.001	0.271	0.114	<0.001	0.342
	裸地-浅齿黄金菊	0.136	<0.001	0.325	0.115	<0.001	0.348
	红花檵木-浅齿黄金菊	0.013	0.707	0.008	0.003	0.999	<0.001
30	裸地-红花檵木	0.127	<0.001	0.218	0.102	<0.001	0.193
	裸地-浅齿黄金菊	0.126	<0.001	0.214	0.107	<0.001	0.208
	红花檵木-浅齿黄金菊	-0.001	0.997	<0.001	0.004	0.950	<0.001
50	裸地-红花檵木	0.156	<0.001	0.287	0.140	<0.001	0.253
	裸地-浅齿黄金菊	0.148	<0.001	0.261	0.141	<0.001	0.258
	红花檵木-浅齿黄金菊	-0.007	0.937	<0.001	0.001	0.997	<0.001
100	裸地-红花檵木	0.298	<0.001	0.512	0.233	<0.001	0.432
	裸地-浅齿黄金菊	0.269	<0.001	0.438	0.205	<0.001	0.482
	红花檵木-浅齿黄金菊	-0.029	0.492	0.008	-0.028	0.473	0.006

从不同测流小区的产流产沙特征来看,与裸地相比,红花檵木和浅齿黄金菊在坡地和平地条件下均表现出更低的产流产沙量,展现出植被良好的水土保持效果,这一结果与朱方方等^[9]的研究结论相符。但其研究的森林系统具备乔-灌-草-枯落物多层

次防护结构,而城市灌木绿地多呈现单一结构,加之频繁的人工养护清理了地表枯落物,使其难以在地表形成有效的枯枝落叶蓄渗层,进而削弱了地表枯落物的蓄渗能力。因此,在城市绿地中,植被冠层结构的水土保持作用更加关键。例如,红花檵木和浅

齿黄金菊在强降雨条件下的截留减沙效果虽然差异不明显,但红花檵木凭借其紧密冠层结构,仍表现出相对更强的减流减沙能力。通过深入分析发现,这一现象主要受以下因素影响:首先,植被冠层具有减缓雨滴动能^[10],减小雨滴溅蚀的作用^[15],而红花檵木的紧密冠层结构(冠层孔隙度 14.72%)和叶片革质,能更有效分散和吸收雨滴动能,延缓击溅时间,从而减少溅蚀和径流形成。其次,植被种植密度也可能影响水土流失^[16-17]。浅齿黄金菊的种植密度较大,分枝密集可形成稠密枝网,也具有减流减沙效果,但其冠层结构较疏松(冠层孔隙度 25.13%)且叶片质地较软,导致冠层截留能力随降雨进程下降较快,水土保持作用较为有限。因此,红花檵木虽然种植密度不高,但凭借其本身优良的冠层结构,比浅齿黄金菊的截留减沙效果略胜一筹。

从不同的坡度测流小区产流产沙特征来看,红花檵木和浅齿黄金菊以及裸地的坡地产流量均显著高于平地的产流量,且在坡地上的变化幅度更大,这也表明了坡度对产流产沙的影响较大。结合本试验设置的 0°和 5°坡度来看,即使是 5°的缓坡,也能增加产流产沙,即也表明坡度增加较小也能加剧水土流失^[18-19]。此外,红花檵木和浅齿黄金菊平地产流量与产沙量受坡度的影响比裸地的大。这是因为植被在坡度越低的条件下,表现出的截留减沙效果越好^[20-21]。因此二者在平地条件下的产流产沙量较小与坡地的差异就越明显。

3.2 交互作用

降雨强度、植被类型和坡度类型对产流产沙的存在极显著的主效应($p < 0.001$),其中植被类型的独立解释力最强(偏 $\eta^2 > 0.36$),凸显了植被在调控城市水土流失中的核心地位。研究证实,植被能够通过减缓地表径流速度、增加水流阻力来有效降低径流侵蚀能力^[22-23]。作为关键驱动因子,降雨强度的变化对产流产沙过程具有决定性影响^[24],而作为重要地形因子,坡度对坡面径流和土壤侵蚀过程产生显著作用^[25]。结合本研究中降雨强度与坡度类型、坡度类型与植被类型之间存在显著交互作用($p < 0.05$)的结果来看,表明了植被的减流减沙效益并非一成不变,而是需要依赖于外部环境因子的驱动力强度的变化而调整。

坡度与植被类型的交互作用主要展现了地形对植被功能的调控。坡度增加会削弱植被的整体减流减沙效果^[26]。坡度通过改变水文动力的过程,显著削减了植被的水土保持效能。本研究中,在坡地(5°)条件下不同植被的减流减沙效果差异不明显,这与

平地条件下二者存在极显著差异形成了鲜明对比。其内在机制是坡度增大,径流汇集速度加快,径流动力和冲刷力增强^[27]。在此背景下,由植被冠层和根茎对地表径流产生的阻力与强大的坡面径流能力相比显得不足,从而在一定程度上掩盖了不同植被径流造成的阻力差异,使得两种植被减流减沙效果差异不显著。反之平地(0°)条件下,径流汇集速度较慢,整个过程就较多的由植被作用主导。此时,由于红花檵木与浅齿黄金菊的结构差异,就突出了二者的产流产沙差异。

降雨强度与植被类型的交互作用主要展现了植被对水文和侵蚀过程的动态调控能力。降雨强度会影响植被的截留减沙效果^[28],降雨强度与植被类型的交互作用是影响产流和产沙过程的关键。在重现期 5~50 a 的雨强条件下,两种灌木的减流减沙效益无显著差异;然而,当降雨强度增至 100 a 重现期的极端水平时,尽管二者差异仍未达显著水平,但裸地与有植被小区之间的产流产沙量差值达到最大。这表明了降雨强度的增大,会削弱植被冠层的截留集水能力^[7]。此外,在极端降雨条件下,裸地、浅齿黄金菊、红花檵木的产流产沙能力均大幅提升,两种植被的调控能力均接近其极限。其机理与植被冠层的截留饱和效应和雨滴动能的耗散极限密切相关。这一现象与植被冠层对雨滴动能的耗散机制密切相关。植被冠层通过物理拦截和能量耗散影响侵蚀过程^[29]。在强降雨条件下,雨滴动能明显增大,而植被冠层逐渐趋于饱和,其对降雨的再分配与缓冲能力随之下降,导致其对雨滴的缓冲和消散能力不足,难以有效抵抗高强度降雨的侵蚀作用。因此,降雨强度与植被类型的交互作用,实质上是外部侵蚀营力不断增强与植被内部调控能力逐渐饱和之间动态博弈的体现,当降雨强度超过某一临界阈值后,二者的交互响应会共同加剧水土流失风险。

4 结论

城市环境与自然条件相比存在显著差异,城市灌木绿地的水土保持机制主要体现在冠层对降水的截留、枝条及叶片对地表覆盖的保护,以及根系对土壤的固持等方面。也正因如此,在强降雨事件(重现期超过 50 a)发生时,城市绿地依旧面临较严重的水土流失问题。尽管,如红花檵木和浅齿黄金菊等灌木植被能显著减少中低雨强条件下的水土流失,但在极端降雨条件下(重现期 100 a)时,其防护效果会明显减弱,导致产流产沙量出现大幅增加。

为有效应对极端降雨带来的城市水土流失风

险,建议在城市绿地植被选择中优先选用红花檵木这类具有良好截留能力的灌木植被,其革质互生的叶片和较大的冠幅能有效分散雨滴动能,降低地表径流冲击,减少水土流失。而像浅齿黄金菊这类叶片密集、枝系发达的植被,也可适当选用,其利用其密集的分枝网缓释雨水冲击,辅助减缓地表径流和土壤侵蚀。通过绿地植被的科学选择和结构优化,可以形成更坚固的防护体系,从而有效提升城市绿地的水土保持能力与抗风险水平。

参考文献 (References)

- [1] Ivanova M, Baste I, Lee B, et al. Global Environment Outlook5(GEO-5): Environment for the future we want [EB/OL] [2024-12-27]. Nairobi: United Nations Environment Programme (UNEP), 2012. <https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-5>.
- [2] 许文盛,张文杰,张志华,等.中国城市水土保持研究进展与发展趋势[J].中国水土保持科学,2025,23(2):1-8. Xu Wensheng, Zhang Wenjie, Zhang Zhihua, et al. Research progress and development trend of urban soil and water conservation in China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025,23(2):1-8.
- [3] 吴辉明,陈文龙,杨芳,等.高密度城市短时强降雨洪涝灾害预报预警对策[J].中国防汛抗旱,2024,34(1):29-35. Wu Huiming, Chen Wenlong, Yang Fang, et al. Prediction and early warning strategies for short-term heavy rainfall and flood disasters in high-density cities [J]. China Flood & Drought Management, 2024,34(1):29-35.
- [4] Farrugia S, Hudson M D, McCulloch L. An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure [J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2013,9(2):136-145.
- [5] Yao Lei, Chen Liding, Wei Wei, et al. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2015, 14(2):300-308.
- [6] 方政,杜建会,张思毅,等.人为侵入体对城市绿地土壤水分入渗特征的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):124-130. Fang Zheng, Du Jianhui, Zhang Siyi, et al. Influence of anthropogenic intrusions on the soil infiltration characteristics in urban green land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(4):124-130.
- [7] 李海防,俞洁蕾,邵西宁,等.半湿润地区城市绿地灌木的截留集水功能及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(5):1363-1369. Li Haifang, Yu Jielei, Shao Xining, et al. Canopy interception and water harvesting function of shrubs in urban green spaces of semi-humid region and their influencing factors [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(5):1363-1369.
- [8] 乔文英,安琪琪,常小峰,等.黄土高原草地灌丛化对潜在植被截留和土壤蓄水能力的影响[J].水土保持通报,2022,42(1):69-76. Qiao Wenying, An Qiqi, Chang Xiaofeng, et al. Effects of shrub encroachment on potential vegetation interception and soil water-holding capacity of grasslands on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):69-76.
- [9] 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 Fangfang, Qin Jianmiao, Zhu Meifei, 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.
- [10] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):58-63. Chang Songtao, Huang Shaoyan, Zha Xuan, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation coverage on runoff and sediment yield on red soil slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):58-63.
- [11] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等.黄土坡面片流过程模拟研究[J].土壤学报,2013,50(2):268-274. Liu June, Wang Zhanli, Gao Sujuan, et al. Simulated-rainfall experimental study on runoff of sheet flow on loess hillslope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2):268-274.
- [12] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21. Lin Qingming, Ding Wenfeng, Zhang Changwei, et al. Hydrodynamic characteristics of runoff in red slope erosion process under simulated rainfall experiments [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(2):16-21.
- [13] 励其其,刘鸿涛,孟岩,等.不同降雨强度和下垫面条件对黑土区坡面产流产沙的影响[J].水利水电技术,2020,51(5):91-98. Li Qiqi, Liu Hongtao, Meng Yan, et al. Effects of different rainfall intensity and underlying surface conditions on runoff-sediment yield of slope surface within black soil region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020,51(5):91-98.
- [14] 杨倩,刘目兴,王苗苗,等.武汉市典型绿地植被类型对表层土壤入渗和持水性能的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1324-1333. Yang Qian, Liu Muxing, Wang Miaomiao, et al. Char-

- acterization of surface soil water infiltration and retention capacity in urban green space of Wuhan City [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(6):1324-1333.
- [15] 晏长根,梁哲瑞,贾卓龙,等.黄土边坡坡面防护技术综述[J].*交通运输工程学报*,2023,23(4):1-22.
Yan Changgen, Liang Zherui, Jia Zhuolong, et al. Review on surface protection technologies of loess slope [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(4):1-22.
- [16] 董敬兵,时鹏,李占斌,等.植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J].*农业工程学报*,2022,38(20):96-104.
Dong Jingbing, Shi Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of the role of vegetation and terraced measures on the rill erosion in slope-gully system [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(20):96-104.
- [17] 彭琼,刘宝元,曹琦,等.作物覆盖度对土壤侵蚀的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(5):97-103.
Peng Qiong, Liu Baoyuan, Cao Qi, et al. Effect of crop coverage on soil erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5):97-103.
- [18] 海龙,樊国莉,赵亚波,等.植被覆盖和坡度对铁尾矿边坡产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2025,32(4):124-130.
Hai Long, Fan Guoli, Zhao Yabo, et al. Effects of vegetation coverage and slope on runoff and sediment yield on iron tailing slopes [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4):124-130.
- [19] 丛鑫,边振,薛春珂,等.不同坡度条件下的水土流失特征研究[J].*中国农村水利水电*,2017(5):124-128.
Cong Xin, Bian Zhen, Xue Chunke, et al. The characteristics of soil and water loss under different slope conditions [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(5):124-128.
- [20] Wei Wei, Jia Fuyan, Yang Lei, et al. Effects of surficial condition and rainfall intensity on runoff in a loess hilly area, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513:115-126.
- [21] Shi Peng, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 259:107231.
- [22] 张蒙,胡桂清,张文太,等.长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J].*水土保持研究*,2024,31(5):164-172.
Zhang Meng, Hu Guiqing, Zhang Wentai, et al. Effect of long-term vegetation coverage on runoff and sediment reducing ability of purple soil slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(5):164-172.
- [23] 王瑞红,李明鑫,张瀚,等.不同植被盖度对三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨研究[J].*水土保持学报*,2023,37(1):59-64.
Wang Ruihong, Li Mingxin, Zhang Han, et al. Study on indoor simulated rainfall with different vegetation coverage on slope erosion reduction in the Three Gorges reservoir area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):59-64.
- [24] 盛菲,刘士余,陈子惟,等.场次暴雨条件下濂水流域水沙关系探究[J].*农业工程学报*,2023,39(3):68-75.
Sheng Fei, Liu Shiyu, Chen Ziwei, et al. Exploration of the runoff-sediment relationship in Lianshui watershed in south Jiangxi of China under the condition of a single rainstorm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(3):68-75.
- [25] 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 Shuning, Zhang Zeyu, Li Rongrong, 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.
- [26] 崔晓芳,刘佳悦,尹钊,等.坡度及植被盖度对潮土坡面土壤侵蚀特征的影响[J].*东北林业大学学报*,2025,53(4):117-125.
Cui Xiaofang, Liu Jiayue, Yin Zhao, et al. The impact of slope and vegetation coverage on soil erosion characteristics of tidal soil slopes [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2025, 53(4):117-125.
- [27] 王婷婷,沈海鸥,梁羽石,等.不同坡度条件下连续降雨及汇流对黑土坡面侵蚀的影响[J].*水土保持学报*,2025,39(2):12-20.
Wang Tingting, Shen Haiou, Liang Yushi, et al. Effects of continuous rainfall and runoff under different slope conditions on hillslope soil erosion in the black soil region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):12-20.
- [28] 陶淑芸,刘沂轩,程建敏,等.连云港市低山丘陵区侵蚀性降雨特征及产流产沙规律[J].*水土保持通报*,2022,42(4):33-41.
Tao Shuyun, Liu Yixuan, Cheng Jianmin, et al. Characteristics of erosive rainfall and its effects on runoff and sediment yield in a low mountain and hilly area of Lianyungang City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4):33-41.
- [29] 田培,毛梦培,潘成忠.植被调控水土流失机制研究进展及展望[J].*中国水土保持科学*,2024,22(1):131-140.
Tian Pei, Mao Mengpei, Pan Chengzhong. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(1):131-140.