

滇中高原不同土地利用类型产流产沙特征及影响因素

——以尖山河小流域为例

顾小华¹, 杨智², 张兰兰¹, 普一然¹, 蒋苗³, 冷鹏⁴

(1.云南省水利水电勘测设计院有限公司, 云南 昆明

650021; 2.云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;

3.玉溪市水土保持工作站, 云南 玉溪 653100; 4.云南省水土保持生态环境监测总站, 云南 昆明 650100)

摘要: [目的] 研究滇中高原山区小流域不同土地利用类型植被措施的水土保持效益, 为合理种植及改善土地利用现状提供科学依据及理论指导。[方法] 以玉溪市尖山河小流域为研究区, 采集研究区 2012—2022 年的降雨数据结合径流小区径流量和产沙量数据, 研究分析次生林地、人工林地、灌草丛地、农耕地、经果林地径流量和产沙量特征及影响因素。[结果] ①径流量排序为: 农耕地 > 经果林地 > 灌草丛地 > 次生林地 > 人工林地, 产沙量排序为农耕地 > 人工林地 > 经果林地 > 次生林地 > 灌草丛地。相同降雨条件下农耕地较其他土地利用类型的抗侵蚀性差。②产沙量与径流量二者之间呈明显的正相关性 ($p < 0.01$), 产沙相较于产流具有滞后性, 当次生林地径流量 ≥ 0.02 mm, 灌草丛地 ≥ 0.46 mm, 人工林地 ≥ 0.4 mm, 经果林地 ≥ 0.62 mm, 农耕地 ≥ 0.09 mm 时才会携带泥沙。③径流量和产沙量与植被盖度、降雨特征因子之间的相关性显著 ($p < 0.05$), 与土壤理化指标中的毛管持水量、毛管孔隙度、总孔隙度之间存在显著相关性 ($p < 0.05$), 与其余的理化指标相关性不显著 ($p \geq 0.05$)。[结论] 研究区内应科学设置植被类型布局, 合理分配土地种植模式, 科学布局农田整地。

关键词: 径流量; 产沙量; 不同土地利用类型; 尖山河小流域; 相关性分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0075-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 顾小华, 杨智, 张兰兰, 等. 滇中高原不同土地利用类型产流产沙特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 75-82. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.009; Gu Xiaohua, Yang Zhi, Zhang Lanlan, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different land uses and its influencing factors in Central Yunnan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 75-82.

Characteristics of Runoff and Sediment Yield Under Different Land Uses and Its Influencing Factors in Central Yunnan Plateau

—A Case Study at Jianshan River Small Catchment

Gu Xiaohua¹, Yang Zhi², Zhang Lanlan¹, Pu Yiran¹, Jiang Miao³, Leng Peng⁴

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation

Design Co. Ltd., Kunming, Yunnan 650021, China; 2. Yunnan Institute of

Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming, Yunnan

650021, China; 3. Soil and Water Conservation Station of Yuxi City, Yuxi, Yunnan 653100, China;

4. Yunnan Soil and Water Conservation Ecological Environment Monitoring Station, Kunming, Yunnan 650100, China)

Abstract: [Objective] The soil and water conservation benefits of vegetation measures were analyzed under different land use types for the small catchment from the mountainous areas in the Central Yunnan Plateau to provide scientific basis and theoretical guidance for rational planting and improvement of land use status in the area. [Methods] The Jianshan River small catchment from Yuxi City of Yunnan Province was selected as

收稿日期: 2024-04-18

修回日期: 2024-07-02

资助项目: 云南省省本级财政项目“云南省年度水土保持监测站点运行管理”

第一作者: 顾小华(1981—), 女(汉族), 宁夏回族自治区固原市人, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事水土保持技术方面的研究。Email: 50999673@qq.com。

通信作者: 冷鹏(1986—), 男(汉族), 云南省宣威市人, 本科, 高级工程师, 主要从事水土保持监测等方面的研究。Email: 331500325@qq.com。

the study area, and the rainfall data were collected from 2012 to 2022. The runoff and sediment yield characteristics and their influencing factors under different land use types (secondary forest, artificial forest, shrub land, cultivated land, economic fruit forest) were analyzed based on the runoff and sediment data from the runoff plots. [Results] ① The order of runoff from different land uses was in the order of cultivated land > economic fruit forest > shrub land > secondary forest > artificial forest, and the order for sediment yield was cultivated land > artificial forest > economic fruit forest > secondary forest > shrub land. The erosion resistance of cultivated land was worse than that of other land use types under the same rainfall conditions. ② A significant positive correlation was determined between sediment yield and runoff ($p < 0.01$). The sediment delivery lagged behind the runoff generation. Only when the runoff was ≥ 0.02 mm for the secondary forest, ≥ 0.46 mm for shrubland, ≥ 0.4 mm for artificial forest, ≥ 0.62 mm for economic fruit forest, and ≥ 0.09 mm for cultivated land could they carry sediment. ③ Runoff and sediment yield were significantly correlated with vegetation coverage, rainfall, soil capillary water-holding capacity, soil capillary porosity, and total soil porosity ($p < 0.05$). [Conclusion] This study has an important practical significance for scientifically setting up the layout of vegetation types, reasonably allocating the land planting pattern, and laying out the farmland consolidation.

Keywords: runoff; sediment yield; land use; Jianshan River catchment; correlation analysis

水土流失已成为制约中国可持续发展的重要生态环境问题^[1],不仅会造成耕地退化,而且威胁生态环境安全^[2]。云南省地处中国西南边陲,山地和高原面积约占该省总面积的 94%,受地理条件制约,云南省坡耕地占全省耕地面积比例较高。长期以来,随着人口急剧增长和人类活动的加剧,加上坡耕地生产方式粗放,土地开发无序,造成了严重的土地退化和水土流失^[3]。坡耕地严重的水土流失,淤积下游江河湖库,加剧了洪涝灾害^[4]。在新时代水土保持形势下,如何通过生态保护与修复减少水土流失,科学合理配置水土保持措施,遏制云南高原地区坡耕地水土流失,是实现区域水土保持可持续发展的关键问题之一。国内外已有大量研究表明,地形地貌、降水、下垫面条件等是诱发水土流失的重要自然影响因素^[5],因此可通过人为因素来改变下垫面的土地条件进而减轻水土流失,例如通过改变土地利用类型,种植不同植被类型来提高土地植被覆盖度能有效降低雨滴能量来减少冲刷作用^[6],且不同植被根系的物理固结作用也能增强土壤抗侵蚀能力^[7]。并且不同土地利用类型的水土保持效益有所不同。朱锐鹏等^[8]研究表明,在黄土丘陵沟壑区水保效益顺序为:天然林>人工林>草地>农耕地;Vasquez-Mendez 等^[9]研究发现灌木在减少径流和泥沙量方面效果最显著,其次是草本植物和乔木;肖培青等^[10]研究结果表明,灌木枝叶能显著增加对雨滴的截留作用并增加坡面粗糙度,相同土壤和降雨条件下,裸地平均土壤流失率为灌木地的 2~8 倍;Mongil-Manso 等^[11]研究结果表明,乔木能通过提高植被覆盖率、增加土壤有机质等方式,增大土壤孔隙度和入渗率、降低土壤容重,减少坡面

产流产沙。不同利用类型下的土壤理化性质的差异,会对土壤的渗透性能产生不同程度的影响,不同的质地结构也必定导致土壤的产流产沙不同^[12]。因此,探讨不同土地利用类型的产流产沙特征,寻找研究区最适宜的土地种植模式和植被类型^[13],对保护生态环境、提高经济效益等具有重要理论与现实意义。

综上所述,目前已有许多研究从不同影响因子的角度来分析水土流失的原因,比如从降雨特性^[14](降雨量大小、降雨强度、雨滴动能等)研究其与产流产沙的关系,也有从不同土地利用类型^[15-16](草地、人工林地、天然林地、农耕地等)分析水土流失特征,或者从土壤特性^[12,17](理化性质、团聚体、微团聚体特征等)探究土地抗蚀性强弱。说明这些因素都会对不同土地利用类型下的土壤产流产沙起到关键影响作用^[18],但目前鲜有学者将这些因素结合起来综合分析区域的产流产沙特征,而 Mantel 检验的优势即对两个矩阵相关关系的检验^[19],该检验方法从 1967 年 Nathan Mantel 提出以来,在群落生态学、物种与环境相关性等方面得到广泛应用^[20]。Mantel-tests 是确定两组距离测度矩阵之间相关性的相关性测试方法,用于判断一个矩阵中的样本距离与另一矩阵中的样本距离是否相关^[21]。因此本研究选取滇中高原玉溪尖山河小流域为研究区,采用 Mantel 检验法^[19]来分析降雨特征、不同土地利用类型下的土壤特征这两大类影响因子对不同土地利用类型下产流产沙的影响机制,探究云南山区不同土地利用类型水土流失特征,为合理种植及改善土地利用现状提供科学依据及理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市澄江县尖山河小流域内(24°32′00″—24°37′38″N, 102°47′21″—102°52′02″E), 北接龙街镇广龙村委会, 南接禄充管委会, 东临抚仙湖, 西接晋宁县。最高海拔在流域北部, 为 2 347.4 m, 最低海拔在尖山河入抚仙湖的入口处, 为 1 722 m, 相对高差 625.4 m。

水保和水文观测点布设在流域的下游, 流域地处低纬度高原, 土壤主要是红紫泥土和红壤, 红紫泥土主要分布在尖山大河上游河道顺流左岸方向。研究区多年平均降雨量 1 050 mm, 雨季为 5 月下旬至 10 月下旬, 降雨量占全年总降雨量的 75%, 旱季为 11 月上旬至次年 5 月中旬, 降雨量占全年降雨量的 25%。研究区内有坡耕地、林地、灌草地、经果林地等多种土地利用类型。主要乔木树种有云南松(*Pinus*

yunnanensis)、华山松(*Pinus armandi*)、水冬瓜(*Alnus cremastogyne*)等, 灌木有马桑(*Coriaria napalensis*)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)、竹(*Bambusoideae*)等, 草有紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)等, 果树有板栗(*Castanea mollissima*)、桃树(*Amygdalus persica*)、柿子(*Diospyros kaki*)、杨梅(*Morella rubra*)等。

1.2 试验区布设及数据采集

综合考虑研究区实际地形条件、土壤类型、植被类型及土地利用类型, 共顺坡设置 5 个垂直投影宽 5 m 和长 20 m 的标准径流小区(表 1), 小区下方修筑集流槽, 下接集流池(1 m×1 m×1 m)用于收集径流和泥沙。利用 5 m 的塔式水尺进行测定读数为径流量; 泥沙含量采用 Model 711 悬移质泥沙测定仪测量, 在降雨后小区产流时及时进行测定。径流深为径流量与径流小区面积之比, 径流系数为径流深与同时段内降雨量之比。

表 1 不同土地利用类型径流小区布设情况

Table 1 Layout of runoff plots in different land use types

土地利用类型	主要植物	植被覆盖度/%	坡向	小区面积/m ²	土层厚度/m	有机质含量/%	水保措施
次生林地	桉树(<i>Eucalyptus</i> spp.)	80	南北	100	0.8	1.08	截排水沟、水平阶
人工林地	云南松	70	南北	100	0.6	1.80	截排水沟
灌草丛地	马桑	95	南北	100	0.6	0.93	截排水沟
农耕地	烤烟(<i>Nicotiana tabacum</i>)	60	南北	100	0.8	0.98	截排水沟
经果林地	杨梅	80	南北	100	0.8	2.08	截排水沟

降雨数据采用自记雨量计和人工观测结合观测降雨量, 在径流小区附近安置自记雨量计(型号: JDZ-1)一个, 观测降雨量。同时同地安装标准雨量筒一个, 用于校对自记雨量计。将雨量计中获取的资料, 以 6 h 为间隔划分次降雨; 利用 RainRecordSetup 1.06.exe 软件分析出次降雨量、降雨历时、降雨强度、

I_{30} 等降雨特征因子, 降雨特征如图 1 所示。由图 1 可以看出, 共记录到 2012—2022 年 11 a 间的降雨数据, 2016 年降雨量最多为 1 065.6 mm, 2019 年最少为 651.2 mm, 2013 年降雨场次最少为 11 场, 最多为 2016 年 40 场, 2017 年降雨历时最长为 34.64 h, 2013 年最短为 11 h。

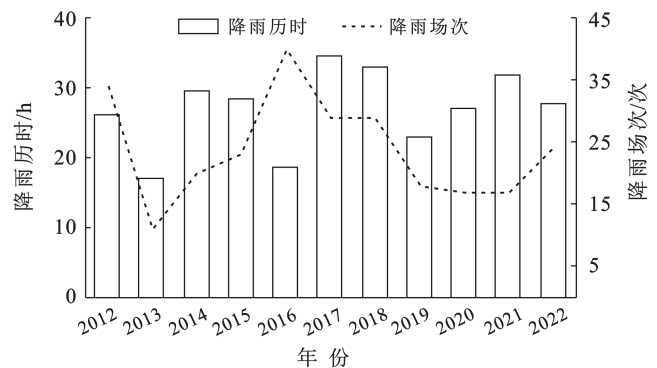
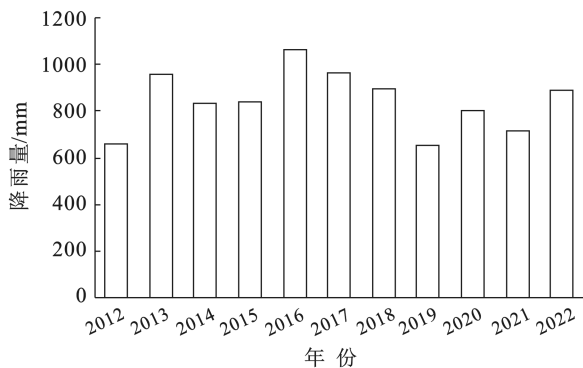


图 1 研究区 2012—2022 年降雨特征

Fig.1 Rainfall characteristics of study area during 2012—2022

1.3 土壤样品采集与测定

在径流小区周边根据土地利用类型分别布设面积为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的标准样地, 每种土地利用方式分别设置 3 个重复样地, 每个样地相距 $50 \sim 100\text{ m}$, 在样地中随机设置 5 个采样点。去除表层枯枝落叶, 采用 5 点法挖掘 1 m 土壤剖面, 用土壤袋分层采集土壤样品带回实验室待测。土壤容重、最大持水量、毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度采用环刀法^[22]测定; 土壤自然含水率采用烘干法^[23]测定; 总磷采用碱溶—钼锑抗比色法, 速效磷质量分数采用碳酸氢钠法, 水解氮量采用碱解扩散法, 土壤有机质采用浓硫酸—重铬酸钾外热源法^[24]。

1.4 数据处理

采用 Excel 软件对数据进行预处理和做柱状图; 运用 SPSS 20.0 统计分析软件对数据进行相关性分析; 采用 R 4.0.5 软件进行数据统计分析, 包括径流量和产沙量采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 方法中的 LSD 多重比较 ($p < 0.05$); 径流量和产沙量相关性回归分析采用“ggpubr”包和“ggpmisc”包分析并作图; 径流量和产沙量与其他影响因子的响应分析采用 Mantel 检验法并用“corrplot”包、“vegan”包、“ggcor”包、“ggplot2”包绘制 Mantel.tests 图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型径流量与产沙量特征

2.1.1 不同土地利用类型径流量特征 2012—2022 年不同土地利用类型条件下径流量的产生有所不同 (图 2), 农耕地径流量较其他 4 种土地利用类型产生量最大发生在 2022 年的 4.8 mm , 均值也是最大为 4 mm , 可能与 2022 年发生的降雨事件有关 (图 1), 该年降雨量较其他年份大且降雨场次少降雨时长短, 多为大而急的降雨对该年份还处在生长期的烤烟地冲刷力度大; 其次为经果林地的径流量均值为 2.37 mm , 次生林地和灌草丛地的径流量均值相差不大, 为 2.07 左右, 人工林地的径流量均值最小, 为 1.98 mm , 是最大值农耕地的 $1/2$ 不到, 从均值来看具体排序为: 农耕地 > 经果林地 > 灌草丛地 > 次生林地 > 人工林地; 由多重分析结果可知, 5 种土地利用类型下径流量差异性极显著 ($p < 0.01$), 11 a 间记录到的人工林地径流量离散程度最低离散值为 0.25 , 次生林地、灌草丛地、经果林地 3 种离散程度接近离散值在 $0.31 \sim 0.38$ 之间。

2.1.2 不同土地利用类型产沙量特征 2012—2022 年不同土地利用类型条件下产沙量有所不同 (图 3), 农耕地产沙量较其他 4 种土地利用类型产沙量最大发生在

2022 年的 2.8 t/km^2 , 均值也是最大为 2.04 t/km^2 ; 其次为人工林地和经果林地的产沙量均值分别为 0.92 t/km^2 , 0.71 t/km^2 , 次生林地和灌草丛地的产沙量均值相差不大分别为 0.58 t/km^2 , 0.5 t/km^2 , 最大值为最小值的 5 倍多, 具体排序为农耕地 > 人工林地 > 经果林地 > 次生林地 > 灌草丛地; 由多重分析结果可知, 5 种土地利用类型下产沙量差异性极显著 ($p < 0.01$), 11 a 间记录到的次生林地产沙量离散程度最低离散值为 0.03 , 人工林地和灌草丛地次之为 0.04 t/km^2 , 经果林地离散程度为第二大离散值为 0.06 , 农耕地离散程度最大离散值为 0.1 。

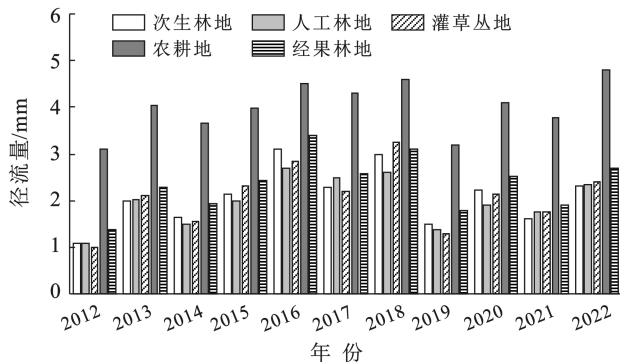


图 2 不同土地利用类型径流量特征

Fig.2 Characteristics of runoff under different land use types

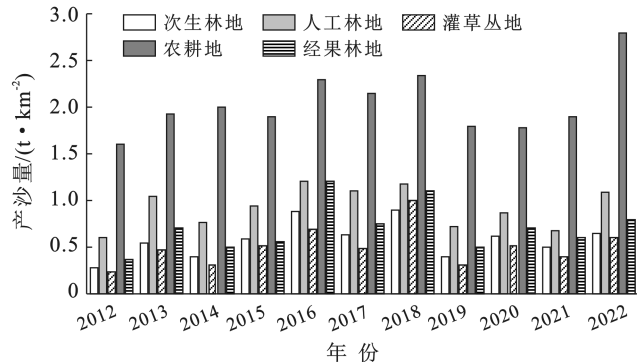


图 3 不同土地利用类型产沙量特征

Fig.3 Characteristics of sediment yield under different land use types

2.2 不同土地利用类型径流量和产沙量相关性

对不同土地类型的径流量和产沙量进行回归分析 (图 4), 可明显看出 5 种土地利用类型的产沙量与径流量二者之间呈明显的正相关性, 产沙量随径流量的增加而增加, 且相关性极为显著 ($p < 0.01$); R^2 值除农耕地为 0.72 外, 其余 4 种土地类型均大于等于 0.9 , 次生林高达 0.97 , 相关性较其他 4 种最强; 通过线性回归公式 [y 为产沙量 (t/km^2), x 为径流量 (mm)] 也可看出, 不同土地类型降雨形成径流量达到一定

值后才会携带泥沙,次生林地径流量 $x \geq 0.02$ mm,灌草丛地 $x \geq 0.46$ mm,人工林地 $x \geq 0.4$ mm,经果

林地 $x \geq 0.62$ mm,农耕地 $x \geq 0.09$ mm 时才会携带泥沙。

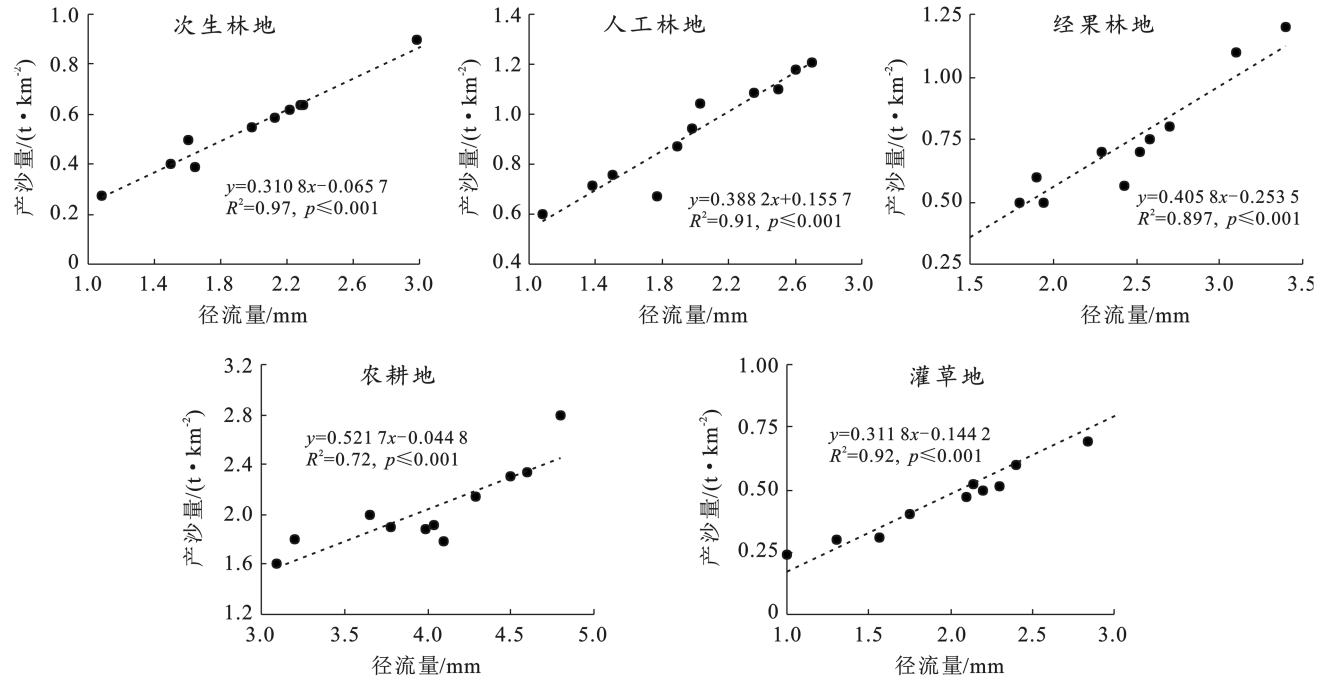


图 4 不同土地利用类型径流量和产沙量的关系特征

Fig.4 Characteristics of relationship between runoff and sediment yield under different land use types

2.3 不同土地利用类型径流量产沙量影响因子分析

为分析不同土地利用类型下径流量和产沙量二者与降雨特征因子、植被覆盖情况及土壤理化指标之间的相关性,避免各类数据单位不同带来的分析误差,对影响因子数据均进行数据标准化处理,再对 5 种土地利用类型下的径流量和产沙量进行 Mantel 检验分析(图 5)。对影响径流量和产沙量的环境因子做双侧相关性分析,结果表明影响因子的相关性存在较大差异,降雨特征因子之间有明显的相关性 ($p < 0.05$);植被盖度与土壤理化指标之间相关性显著 ($p < 0.05$)。图 5 左下部分,从相关性连线颜色来看降雨历时、平均雨强、径流系数、植被盖度、土壤毛管持水量与 5 种土地利用类型的径流量和产沙量都表现出极显著相关性 ($p < 0.01$);降雨特征因子(降雨量、雨强)与灌草丛地、农耕地、次生林地、人工林地相关性显著 ($p < 0.05$);土壤特征因子(毛管孔隙度、总孔隙度)与 5 种土地利用类型相关性显著 ($p < 0.05$),总磷与农耕地和人工林地相关性显著 ($p < 0.05$)。从相关性连线粗细来看,相关性系数 r 值与 p 值几乎一致,即存在显著相关性的影响因子相关系数 $r \geq 0.4$,相关性不显著的影响因子相关系数 $r < 0.2$ 。总体来说这 5 种土地利用类型的径流量和产沙量与植被盖度、降雨特征因子(降雨量、降雨历时、平均强度、 I_{30})等之间的相关性显著 ($p < 0.05$),与土壤理化指标中的毛管持水

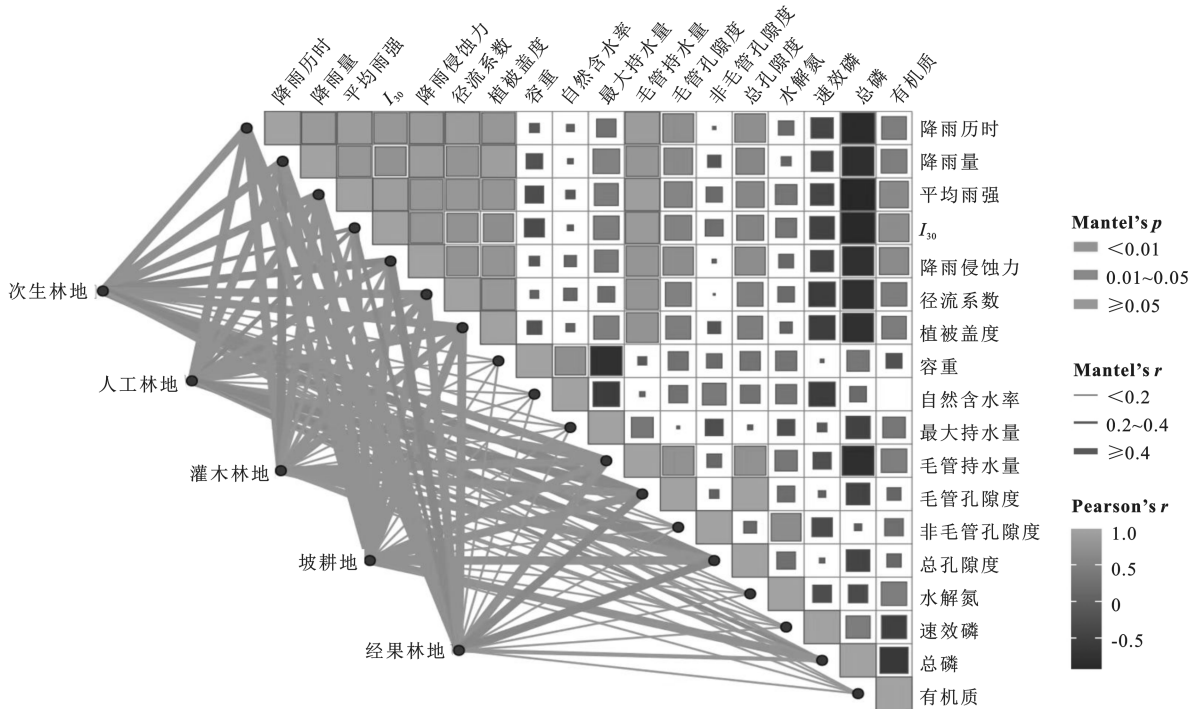
量、毛管孔隙度、总孔隙度之间也存在显著相关性 ($p < 0.05$),与其余的理化指标相关性不显著 ($p \geq 0.05$)。

3 讨论

研究表明不同土地类型降雨形成径流量达到一定值后才会携带泥沙,次生林地径流量 ≥ 0.02 mm、灌草丛地 ≥ 0.46 mm、人工林地 ≥ 0.4 mm、经果林地 ≥ 0.62 mm、农耕地 ≥ 0.09 mm 时才会携带泥沙,说明当地表径流较小时,径流对土地表层的土壤冲刷作用也较小。一方面主要是由于这 5 种土地利用类型都增加了试验小区的植被覆盖度,植被叶片对降雨起到了缓冲和截留作用,降低了雨水溅蚀能力,植被茎秆和根系对坡面径流起到了拦蓄作用,可以减轻土壤侵蚀强度和拦截泥沙^[25],另一方面产沙较产流具有滞后性即土壤的分离速率需要地表径流量达到一个较大值才会将土壤泥沙分离出来,并且随径流量的增大而增大^[26]。径流量的排序为:农耕地 > 经果林地 > 灌草丛地 > 次生林地 > 人工林地,此结果与不同年份间农作物的生长情况关系很大,比如叶片大小,根系丰富度等,对降雨产生的泥沙量削减量相关,这可能也与农作物根系对土壤的固定作用和种植密度对降雨的削减作用不及其他植被类型有关,同时表明乔木林地能明显减少平均径流量^[27],乔木能更好地重新分配降水,削弱雨滴动能,植物根系能固持土壤,增

强土壤抗冲性,改良土壤理化性质,大幅度减少坡面产流^[28]。灌草丛地能延长径流产生的时间和减慢径流流速的作用^[10]。产沙量的排序为:农耕地>人工林地>经果林地>次生林地>灌草丛地,灌草丛地表现出较好的减流减沙效益,主要通过地上部分和地下

部分共同作用减少坡面产流产沙,其中地上植被通过改变坡面水力系数、增加地表粗糙度等方式,减缓径流流速,促进水分入渗,消耗径流动能,地下根系部分的作用主要体现在改善土壤结构、增大土壤孔隙度,提高土壤抗冲性能和入渗能力等方面^[8]。



注:图最右侧 Mantel's p 值大小用来做相关性连线粗细选择; Mantel's r 值大小用来表示径流量和产沙量与各因子连线的粗细,值由小到大连线由细到粗相关性由弱到强; Pearson's r 值大小表示各影响因子之间的相关性,颜色深浅和正方形大小表示相关性系数大小即图右侧小正方形;中间连线部分的粗细分别代表 r 的统计量和显著性 p 值。

图 5 不同土地利用类型径流量和产沙量与相关影响因子 Mantel 检验分析

Fig.5 Mantel test analysis of runoff and sediment yield and related influencing factors for different land use types

不同土地利用类型的径流量和产沙量都与降雨历时和降雨量有极显著相关性^[29] ($p < 0.05$),植被类型和土地利用方式等因素影响坡面径流和土壤流失量。从产沙量和径流量之间的相关性来看,产沙量与径流量存在正相关线性函数关系,根据实际情况分析,可能原因是研究区内遇上短历时、雨量大、强度高的降雨事件,降雨期间产生的地表径流多而急,降雨对地表土壤层的冲刷作用时间比较集中,从而产生的地表径流中携带大量的泥沙,利用逐步回归分析的方法得到径流量对产沙量起到决定性作用的研究结论相似^[12]。

Mantel-tests 是确定两组距离测度矩阵之间相关性的相关性测试方法,用于判断径流量和产沙量矩阵中的样本距离与相关影响因子矩阵中的样本距离是否相关^[20],通过 Mantel 检验分析 5 种土地利用类型的径流量和产沙量与植被盖度、土壤理化指标中的毛管持水量、毛管孔隙度、总孔隙度之间存在显著相关性 ($p < 0.05$),与其余的理化指标相关性不显著 ($p \geq$

0.05)。这与植被地下根系密,能更好地固持土壤,增大土壤孔隙度,改善土壤结构,增加径流入渗,减少径流量产生的研究结果一致^[30]。并且林地(人工林地、次生林地、经果林地)的径流量和产沙量要低于农耕地,说明林地的植物种类丰富,覆盖度高,凋落物量较多,分解速度较快,能有效促进土壤有机碳的增加,从而促进水稳性团聚体的形成,改善土壤结构,使土壤不易受到水力破坏^[14]。农耕地的径流量和产沙量与多种土壤理化指标及降雨特征因子都有显著相关性 ($p < 0.05$),可能与农耕地上种植的作物生长季节有关,研究区农耕地大部分时间种植的农作物为烤烟,当作物还未达到最大生物量,地上枝叶和地下根系如遇到强降雨事件都不能抵抗强降雨动能容易产生径流并携带大量泥沙,这与朱锐鹏等^[8]的研究结果一致。本研究得出:在相同降雨事件下,与农耕地相比,林地和草地的径流量和产沙量小,且能增加土壤抗侵蚀性,今后可以此为依据科学开展研究区内保水保土

布局,合理分配土地种植模式,宜林则林,宜草则草,科学布局农田整地。

4 结论

(1) 不同土地利用类型条件下径流量和产沙量有所不同,径流量具体排序为:农耕地>经果林地>灌草丛地>次生林地>人工林地;产沙量具体排序为农耕地>人工林地>经果林地>次生林地>灌草丛地;5种土地利用类型下径流量和产沙量差异性极显著($p < 0.01$);同类型降雨条件下,农耕地相较于其他种植模式下的土地产流产沙量大,对水土的保持效益弱。

(2) 5种土地利用类型的产沙量与径流量二者之间呈明显的正相关性,产沙量随径流量的增加而增加,且相关性极为显著($p < 0.01$);不同土地类型降雨形成径流量达到一定值后才会携带泥沙,次生林地径流量 ≥ 0.02 mm,灌草丛地 ≥ 0.46 mm,人工林地 ≥ 0.4 mm,经果林地 ≥ 0.62 mm,农耕地 ≥ 0.09 mm时才会携带泥沙,说明降雨事件后产沙具有滞后性,如果降雨产生的径流量少且植被的固沙作用强的话,降雨不一定引起土壤流失。

(3) 不同土地利用类型的产流量和产沙量与降雨特征及植被类型相关性明显,与之相比其与土壤理化性质相关性不显著。

参考文献(References)

- [1] 关冰,刘金萍.基于GIS和RS的重庆市南岸区土壤侵蚀定量研究[C]//天津:第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集,2009.
Guan Bing, Liu Jinping. Quantitative study on soil erosion in Nan'an District, Chongqing City based on GIS and RS [C]. Tianjing: Proceedings of the 3rd National Symposium on Agricultural Environmental Science, 2009.
- [2] 汪景宽,徐香菇,裴久渤,等.东北黑土地地区耕地质量现状与面临的机遇和挑战[J].土壤通报,2021,52(3):695-701.
Wang Jingkuan, Xu Xiangru, Pei Jiubo, et al. Current situations of black soil quality and facing opportunities and challenges in Northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(3): 695-701.
- [3] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.云南省坡耕地现状及水土流失综合治理探索[J].中国水土保持,2015(4):11-12.
Zhao Cheng, Gu Xiaohua, Jiang Honglei, et al. Present situation of sloping farmland in Yunnan Province and exploration of comprehensive control of soil erosion [J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(4): 11-12.
- [4] 吕清华.高原区坡耕地水土流失综合治理[J].区域治理,2019(38):32-34.
Lv Qinghua. Comprehensive control of soil erosion in

sloping farmland in plateau area [J]. Regional Governance, 2019(38):32-34.

- [5] 侯淑艳,刘绪军,刘建新,等.水土保持措施对黑土坡耕地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022,20(4):26-33.
Hou Shuyan, Liu Xujun, Liu Jianxin, et al. Effects of soil and water conservation measures on the runoff and sediment yield in black sloping farmland [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(4): 26-33.
- [6] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J].生态学报,2019,39(7):2416-2425.
Wang Zhongyu, Liu Guobin, Wang Bing, et al. Litter production and its water holding capability in typical plants communities in the hilly region of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [7] Vaezi A R, Ahmadi M, Cerdà A. Contribution of rain-drop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls [J]. Science of the Total Environment, 2017, 583: 382-392.
- [8] 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 Ruipeng, Liu Dianjun, Zhang Shihao, 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.
- [9] Vázquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico [J]. CATENA, 2010, 80(3):162-169.
- [10] Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Effects of shrub on runoff and soil loss at loess slopes under simulated rainfall [J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(4): 589-599.
- [11] Mongil-Manso J, Navarro-Hevia J, San Martín R. Does forest restoration influence soil infiltrability?: A case study in the restored woodland of Sierra de Ávila (Central Spain) [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(7): 1778-1793.
- [12] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.
Aru Sultan, Chang Shunli, Zhang Yutao. Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9111-9118.
- [13] 周梦玲,郭建斌,周金星,等.丹江口库区喀斯特坡地不

- 同植被覆盖类型的产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2020,18(2):77-83.
- Zhou Mengling, Guo Jianbin, Zhou Jinxing, et al. Characteristics of runoff and sediment yield from different vegetation types in the Karst region of Danjiangkou Reservoir area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(2):77-83.
- [14] 曹光秀,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带地区常绿阔叶林地表径流和产沙影响机制[J].水土保持学报,2018,32(4):30-36.
- Cao Guangxiu, Wang Keqin, Zhao Yangyi, et al. The mechanism of surface runoff and sediment yield of evergreen broad-leaved forest in the middle subtropical region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(4):30-36.
- [15] 赵一鹤,杨时宇,周祥,等.巨尾桉工业原料林地与不同土地利用类型坡面产流产沙特征对比分析[J].水土保持通报,2012,32(1):77-81.
- Zhao Yihe, Yang Shiyu, Zhou Xiang, et al. Comparative analysis of slope runoff and sediment yield from *Eucalyptus grandis* × *E. Urophylla* industrial plantations and other land use types [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012,32(1):77-81.
- [16] 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 Pengfei, Chen Lihua, Wang Yu, et al. Effect of land use pattern on runoff and sediment yield on slope lands in loess hilly region [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010,26(3):199-204.
- [17] 张华渝,王克勤,宋娅丽.滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J].水土保持学报,2019,33(5):50-57.
- Zhang Huayu, Wang Keqin, Song Yali. Soil erosion resistance under different land use types in Jianshan River watershed in middle Yunnan Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(5):50-57.
- [18] 淡彩虹,许欢欢,王兵,等.模拟降雨下前期含水量对黄绵土坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):31-36.
- Dan Caihong, Xu Huanhuan, Wang Bing, et al. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment yield on loess slope under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):31-36.
- [19] 覃光莲,谭劲英. Mantel 方法在生态学中的应用[J].生物数学学报,2014,29(3):507-512.
- Qin Guanglian, Tan Jinying. Mantel test and its applications in ecology [J]. Journal of Biomathematics, 2014,29(3):507-512.
- [20] Mantel N. The detection of disease clustering and a generalized regression approach [J]. Cancer Research, 1967,27(2):209-220.
- [21] 刘振滇.滇池湖滨带生态恢复过程中陆生植物群落构建机制研究[D].云南 昆明:云南大学,2021.
- Liu Zhendian. Terrestrial plant community assembly mechanisms during the ecological restoration process in Dianchi lakeside zone [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University, 2021.
- [22] 张万儒,杨光滢,屠星南.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,2000.
- Zhang Wanru, Yang Guangying. Forest Soil Analysis Methods [M]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [23] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
- Zhou Jianmin, Shen Renfang. Dictionary of Soil Science [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [24] 肖珊美.土壤检验技术[M].北京:化学工业出版社,2012.
- Xiao Shanmei. Soil Testing Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [25] 张晶玲,周丽丽,马仁明,等.天然降雨条件下横垄与顺垄坡面产流产沙过程[J].水土保持学报,2017,31(5):114-119.
- Zhang Jingling, Zhou Lili, Ma Renming, et al. Runoff and sediment yield process on longitudinal and cross ridge slopes under natural rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(5):114-119.
- [26] 张玉斌,郑粉莉.近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J].中国水土保持科学,2007,5(2):5-10.
- Zhang Yubin, Zheng Fenli. Effects of near-surface soil water conditions on soil erosion process [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(2):5-10.
- [27] Zhang Xiao ping, Zhang Lu, McVicar T R, et al. Modelling the impact of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2008,22(12):1996-2004.
- [28] 吴光艳,成婧,祝振华,等.黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析[J].水土保持研究,2011,18(4):32-35.
- Wu Guangyan, Cheng Jing, Zhu Zhenhua, et al. Rainfall characteristics under canopy of plantation forest in the southern Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(4):32-35.
- [29] Meng Xianmeng, Zhu Yan, Yin Maosheng, et al. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope [J]. Scientific Reports, 2021,11(1):16341.
- [30] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.