

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.033; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.033.

赵泽坤, 史明昌, 杨润泽, 等. 暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 43-51.

Zhao Zekun, Shi Mingchang, Yang Runze, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and soil loss in sloping area under heavy rainfall conditions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 43-51.

# 暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响

赵泽坤<sup>1</sup>, 史明昌<sup>1</sup>, 杨润泽<sup>1</sup>, 王奋忠<sup>2</sup>, 王世雷<sup>2</sup>

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京市密云区水土保持工作站, 北京 101500)

**摘要:** [目的]探究暴雨条件下水土保持措施对坡面产流产沙的影响, 可对科学制定高效的水土流失防治措施提供依据。[方法]依托北京密云区石匣小流域水土保持科技示范园的 7 个径流小区, 选取了 2010—2021 年 20 场自然暴雨观测数据, 运用统计和相关分析等方法探讨了不同水土保持措施对产流产沙和面源污染的影响, 并分析了降雨、土壤、植被因子与产流产沙之间的相关性。[结果] (1) 在 2010—2021 年研究区年降雨总量相对平缓, 但年降雨频率有所增加, 暴雨发生次数呈现出上升趋势。 (2) 在 20 次暴雨条件样本中, 荆条的减流率和减沙率分别为 94.13% 和 99.76%, 减流减沙效益优于刺槐+侧柏+鱼鳞坑、玉米+梯田等其他组合。荆条、刺槐+侧柏+鱼鳞坑对面源污染的防治效果较好, 污染指标显著低于平均水平。 (3) 降雨因子、植被因子与径流泥沙的相关性分析显示, 平均雨强、 $I_{30}$ 、 $I_{60}$  与径流量呈显著正相关, 相关系数分别为 0.54, 0.73, 0.7; 平均雨强、 $I_{60}$  与泥沙量呈显著正相关, 相关系数分别为 0.58, 0.5; 植物盖度与径流量、泥沙量明显负相关, 相关系数分别为 -0.51, -0.58。[结论]综合考虑暴雨条件下的径流泥沙数据, 我们认为在保障经济效益的前提下, 推荐该地区采用荆条作为优先水土保持措施。

**关键词:** 土壤侵蚀; 暴雨; 产流产沙; 水土保持效益; 北方土石山区

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0043-09

## Effects of soil and water conservation measures on runoff and soil loss in sloping area under heavy rainfall conditions

Zhao Zekun<sup>1</sup>, Shi Mingchang<sup>1</sup>, Yang Runze<sup>1</sup>, Wang Fenzhong<sup>2</sup>, Wang Shilei<sup>2</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Soil and Water Conservation Station, Miyun District, Beijing 101500, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the effect of soil and water conservation measures runoff and sand production on slope under heavy rainfall conditions, and to provide a basis for the scientific development of efficient soil erosion control measures. [Methods] Seven runoff plots in the Soil and Water Conservation Science and Technology Demonstration Park of Shixia Sub-basin in Miyun District, Beijing, were used as the study sites. The observation data of 20 events of natural rainstorms from 2010 to 2021 were selected. The impacts of different soil and water conservation measures on the production of runoff and sand, and surface pollution were explored by using the methods of statistics and correlation analysis. The correlations between the rainfall, soil, and vegetation factors and the production of runoff and sediment were analyzed. [Results] (1) The total annual rainfall in the study area was relatively flat between 2010 and 2021, but the annual rainfall frequency increased and the number of storms showed a rising trend. (2) Among the 20 samples of heavy rainfall conditions, the runoff and sediment reduction rates of wattle were 94.13% and 99.76%, respectively, and the runoff and sediment reduction benefits were better than those of other

收稿日期: 2024-01-04

修回日期: 2024-09-12

接受日期: 2024-09-18

资助项目: 北京市水生生态保护与水土保持中心-北京市水土流失监测专项经费项目(2024SJCZJCZX21)

第一作者: 赵泽坤(1994—), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 616068607@qq.com

通信作者: 史明昌(1969—), 男, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士生导师, 研究方向为 GIS 技术及其应用。E-mail: shimc@bjfu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

combinations, such as *Robinia pseudoacacia* Linn + *Platycladus orientalis* Franco + fish scale pits and *Zea mays* L + terraces. *Vitex negundo* Linn, *Robinia pseudoacacia* Linn + *Platycladus orientalis* Franco + fish scale pit had better prevention and control of opposite source pollution, and the pollution indexes were significantly lower than the average level. (3) The correlation analysis of rainfall factor, vegetation factor and runoff sediment showed that the average rainfall intensity,  $I_{30}$ ,  $I_{60}$  and runoff were significantly positively correlated, with correlation coefficients of 0.54, 0.73, 0.7, respectively. The average rainfall intensity,  $I_{60}$  and sediment amount were significantly positively correlated, with correlation coefficients of 0.58, 0.5, respectively. The plant cover was significantly negatively correlated with runoff and sediment amount, with correlation coefficients of  $-0.51$ ,  $-0.58$ . [Conclusion] Considering the runoff sediment data under heavy rainfall conditions, it is believed that under the premise of guaranteeing economic benefits, the use of wattle is recommend as a priority soil and water conservation measure in this area.

**Keywords:** soil erosion; heavy rainfall; runoff-producing and sediment-producing; soil and water conservation benefits; northern soil and rocky mountainous areas

水土流失是指在水力、风力等外营力作用下,土壤、土壤母质和其他地面组成物质被破坏、剥蚀、转运和沉积的全过程。水土流失常引发土壤肥力下降,土地生产力减弱,生态环境恶化等一系列问题<sup>[1-2]</sup>。降雨和水土保持措施是影响水土流失的关键因素<sup>[3]</sup>,短时间强降雨(即暴雨)会对地表产生较大的打击力,并快速产生大量超渗的地表径流进而引起强烈的水土流失<sup>[4]</sup>。水土保持措施通过改变下垫面、显著影响坡面产流产沙过程,是防治水土流失的重要手段<sup>[5]</sup>。因此,研究暴雨条件下水土保持措施的减流减沙效益,对于合理配置坡面水土保持措施有重要实践意义<sup>[6]</sup>。

近年来,诸多学者探讨了各类地区不同水土保持措施的减流减沙效益。张萌等<sup>[7]</sup>采用野外试验方法分析了密云区不同水土保持措施下板栗林地的水土流失防治效果,结果表明植物+工程组合措施的减流减沙效果略强于工程措施,但差异并不显著。普隽泽等<sup>[8]</sup>采用定位观测方法在罗玉沟流域研究了不同次降雨下典型草被覆盖径流小区的产流产沙响应机制,发现小冠花覆盖小区的抗侵蚀能力较差而沙打旺、鹰咀和紫云英覆盖小区的抗侵蚀能力较好。Huo 等<sup>[9]</sup>采用北京地区 1 900 余次降雨事件评估不同水土保持管理措施对减流减沙的效益,认为鱼鳞坑措施的减流减沙效益较好。另外,降水对坡面水沙过程影响研究显示,降雨和下垫面等因素的差异会导致不同的减流减沙差异。杜映妮等<sup>[10]</sup>发现,降雨量和最大 30 分钟雨强是影响土壤侵蚀的关键因素,且紫花苜蓿等植被措施均具有显著的水土保持效应。刘冉等<sup>[11]</sup>研究发现,降雨强度是对黄土丘陵沟壑区产流产沙贡献最大的因子。综上所述,水土保持措施是防治水土流失的有效手段,但以往研究多针对试验期全部降雨事件进行,聚焦于暴雨条件下水土保持

措施对产流产沙的影响研究还较少,同时有关暴雨条件下的降雨、植被与产流产沙量之间的关系探讨也较薄弱,加强这方面的研究工作尤为迫切,也将为水土保持措施的高效配置提供指导依据。此外,密云水库是首都重要的饮用水源地,做好水库上游的水土保持工作至关重要<sup>[12]</sup>。

鉴于此,本文选取北京市密云石匣小流域为研究区,采用野外试验方法对区域内径流小区进行长期监测,选取 2010—2021 年 20 余场暴雨事件,重点分析暴雨特征的变化趋势与暴雨条件下不同水土保持措施对产流产沙的影响,并对暴雨条件下影响产流产沙的降雨植被土壤等因子进行相关分析,旨在揭示暴雨条件下不同水土保持措施的产流产沙规律,以期为研究区水土流失防治措施的高效配置提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于北京市密云区密云水库上游的石匣小流域,地理坐标为东经  $117^{\circ}01' - 117^{\circ}07'$ ,北纬  $43^{\circ}32' - 43^{\circ}38'N$ (见图 1)。地处水库的东北方向,毗邻水库。该流域属于潮白河水系,属于燕山山脉的北方丘陵山地,地势北高南低,海拔高度 150~390 m,总面积约为 33 km<sup>2</sup>。该地区夏季湿热多雨,冬季干燥少雨,降雨主要集中在 7—8 月,年平均降雨量约为 650 mm。据当地气象站统计,1976 年的年降雨量达到了 965.4 mm,为历史最高值。流域内岩石类型以片麻岩为主,伴有少量花岗岩。土壤类型主要为褐土,由冲积母质和洪积母质发育而来,质地为轻壤土,土层较厚,但耕作层较浅。植被类型以杂草和灌丛为主。坡度较陡的丘陵地区主要种植板栗(*Castanea mollissima* Bl.)、刺槐(*Robina pseudoacacia* Linn.)、油松

(*Pinus tabulae-formis* Carr.)等适应当地环境的经济林。土地利用方式主要包括林地、坡耕地和草地。

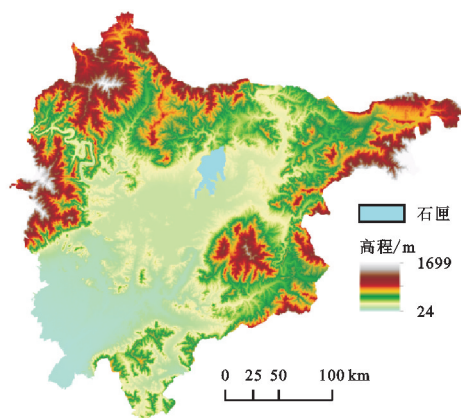


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Location map of the study area

## 1.2 数据的采集与测定

1.2.1 径流小区的设置 在石匣水土保持科技示范园内,陆续设置 22 个规格为 5 m×10 m 的径流小区,本研究选取其中较为典型的 7 个(见表 1)。不同径流小区布设不同的植被措施和工程措施。植被措施选用当地常见、成本较低且具有一定生态效益的物种;工程措施主要采用鱼鳞坑、水平条和梯田等。每个径流小区设置 9 个高度为 0.8 m 的分流孔,单个小区分流横断面积为 1.13 m<sup>2</sup>。各小区的处理方法按照标准小区处理方法进行,以确保植被的生存和植被覆盖度、生物量的稳定。此外,对所有径流小区进行植被属性和土壤属性的调查。

表 1 径流小区概况

Table 1 Overview of runoff plot

小区 编号	坡度/ (°)	坡长/ m	面积/ m <sup>2</sup>	植被 类型	工程 措施
1	16.5	10	50	玉米	无
2	16.5	10	50	板栗	水平条
3	16.5	10	50	无	无
12	17.1	10	50	刺槐+侧柏	鱼鳞坑
13	18.6	10	50	荆条	无
16	19	10	50	苜蓿	无
17	3.5	10	50	玉米	梯田

1.2.2 径流泥沙指标的测定 在 2004—2020 年每次降雨后,测量径流桶中的径流深度。由于径流桶底面积和小区面积固定,可以由此计算出径流小区的单位面积径流量。测量径流深度后,通过搅拌使径流桶内水样均匀,然后取一定体积的水样装入量筒并带回实验室。向水样中加入明矾以促进沉淀,倒出上清液后,将底部浊液放入 105 °C 烘箱中烘干并称重,以计算出径流小区的单位面积泥沙量。

为了测量面源污染指标,取径流桶中的上清液样品。全氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定;全磷(TP)采用钼酸铵分光光度法测定;化学需氧量(COD)采用重铬酸盐法测定。土壤含水率使用 TDR 法测量;土壤有机质含量采用重铬酸钾—容量法测量;土壤全磷使用硫酸、高氯酸消解—钼锑抗比色法测定;土壤有效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测定;全氮采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定;化学需氧量采用分光光度法测定。测定过程中需采集三次径流泥沙样品。

降雨量、平均降雨强度等数据从当地气象站获取。

1.2.3 径流系数和土壤侵蚀模数的计算 利用观测的降雨量、径流量和泥沙含量数据计算径流系数和土壤侵蚀模数,计算公式为:

$$\alpha = R/P \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为径流系数; $R$  为径流深度(mm); $P$  为降雨深度(mm)。

$$S = M/A \quad (2)$$

式中: $S$  为土壤侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>); $M$  为产沙量(kg); $A$  为径流小区的面积(km<sup>2</sup>)。

1.2.4 减流率和减沙率的计算 利用试验得到的径流量和产沙量数据计算减流率和减沙率,计算公式为:

$$P_{ri} = (Q_{bi} - Q_{mi})/Q_{bi} \quad (3)$$

式中: $P_{ri}$  为减流率(%); $Q_{bi}$  和  $Q_{mi}$  分别为裸地和各水土保持措施的产流量(ml)。

$$P_{si} = (S_{bi} - S_{mi})/S_{bi} \quad (4)$$

式中: $P_{si}$  为减沙率(%); $S_{bi}$  和  $S_{mi}$  分别为裸地和不同水土保持措施的产沙量(t)。

1.2.5 雨强的计算 最大 30 分钟雨强:一次降雨的最大 30 分钟时段雨强,以记录时间间隔为滑动步长,依次计算每个连续 30 分钟的总雨量,然后乘以 2 即为每个 30 分钟的时段雨强,其中最大的一个值为该次降雨的  $I_{30}$ 。最大 60 分钟雨强同理。

## 1.3 数据处理方法

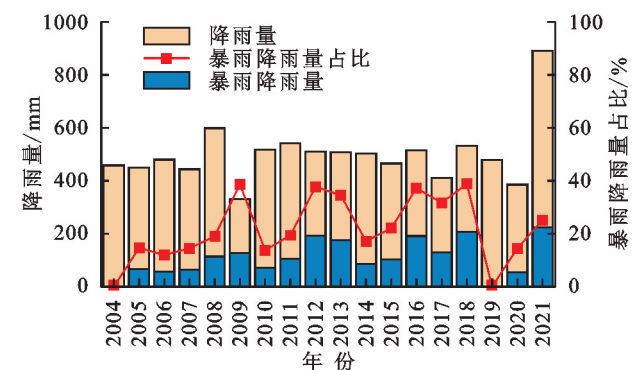
采用 Excel 2016 对不同小区的土壤侵蚀、面源污染数据进行描述性分析,采用 Origin 2021 进行图表的绘制。由于不同小区的坡度不同,需采用刘宝元等<sup>[13]</sup>提出的坡度标准化方法对坡度进行校正。

## 2 结果与分析

### 2.1 2004—2021 年际降雨相关因子变化趋势

由图 2 可以看出,2004—2021 年年降雨次数最多 3 个年份为 2016 年、2015 年、2021 年,其降雨次数分别达到 58 次、57 次、56 次,3 个年份均位于研究时段的后半段,因此,可以看出,近来降雨频率有所增加。2004—

2020 年的年降雨总量变化相对平缓,范围 331.4~598.9 mm。然而,年降雨总量于 2021 年突然较大幅度增加,达到 890.5 mm,较过去 17 a 的最大值增幅达到 48.69%。



除此之外,年暴雨总量最大的年份同样为 2021 年,达到 224.2 mm。2004—2021 年暴雨发生次数占降雨总次数的比例均呈现出一定的上升趋势。

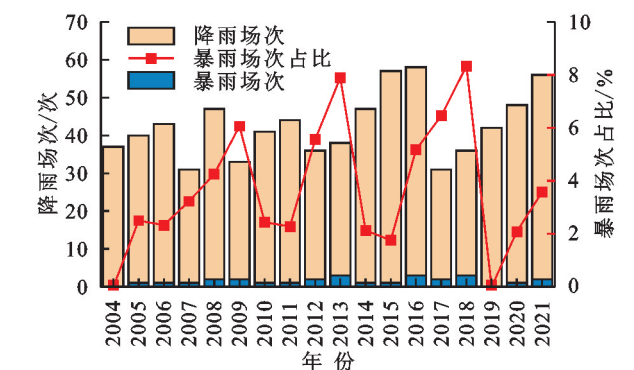


图 2 2004—2021 年以暴雨为主的降雨因子变化趋势

Fig. 2 Variation trend of rainfall factors dominated by heavy rain from 2004 to 2021

2.2 暴雨样本降雨事件下土壤侵蚀与面源污染特征分析

依据 2012 年国家标准《降水量等级》(GB/T28592—2012),本研究选取 2010—2021 年发生的所有暴雨事件(单次降雨量在 50 mm 以上的降雨事件,共计 20 次)作为样本降雨事件,在这些降雨事件中降雨量的变化范围为 51.3~124.0 mm,平均值为 79.98 mm,其中单次降雨量高于 100 mm 的降雨事件共发生 6 次,这 6 次降雨事件如表 2 所示。在所有样本降雨事件中,降雨历时的变化范围为 120~1 940 min,平均降雨历时为 901.65 min;单次降雨平均降雨强度的变化范围为 2.92~17.70 mm/h,20 次暴雨的平均雨强为 8.21 mm/h; $I_{30}$ 的变化范围为 15.2~87.6 mm/h,平均值为 41.24 mm/h; $I_{60}$ 的变化范围为 14.0~61.7

mm/h,平均值为 30.46 mm/h。

在这 20 次样本降雨事件下,所有试验小区的产流产沙总量、养分流失总量均呈现出较高的数值。在所有样本降雨事件下径流小区的总平均径流量为 46 613.26 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,最大平均径流量为 160 434 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,最小平均径流量为 5 202 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>;总平均泥沙量为 1 249.61 t/km<sup>2</sup>,最大平均泥沙量为 6 397.38 t/km<sup>2</sup>,最小平均泥沙量为 15.37 t/km<sup>2</sup>;平均全氮总流失量为 118.67 kg/km<sup>2</sup>,最大全氮总流失量为 592.32 kg/km<sup>2</sup>,最小全氮总流失量为 1.33 kg/km<sup>2</sup>;平均全磷总流失量 10.42 kg/km<sup>2</sup>,最大全磷总流失量为 60.17 kg/km<sup>2</sup>,最小全磷总流失量为 0.42 kg/km<sup>2</sup>;平均总化学需氧量为 572.24 kg/km<sup>2</sup>,最大总化学需氧量为 6 734.81 kg/km<sup>2</sup>,最小总化学需氧量为 4.52 kg/km<sup>2</sup>。

表 2 2010—2021 年 6 次极端暴雨事件特征及所有径流小区的土壤侵蚀与面源污染特征

Table 2 Characteristics of 20 rainstorm events from 2010 to 2021 and characteristics of soil erosion and non-point source pollution in all runoff plots

降雨日期	降雨历时/min	降雨量/mm	平均雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	30 分钟最大雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	60 分钟最大雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	径流总量/(m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	泥沙总量/(t·km <sup>-2</sup> )	全氮流失量/(kg·km <sup>-2</sup> )	全磷流失量/(kg·km <sup>-2</sup> )	化学需氧量/(kg·km <sup>-2</sup> )
2011-7-24	470	105.2	13.43	59.6	46.4	160434	2273.14	1.33	22.86	60.82
2012-7-21	990	123.6	7.49	38.4	26.8	30034	651.21	20.91	2.05	95.38
2015-7-19	543	102.8	11.36	29.6	27.4	85634	2282.74	227.01	15.88	523.62
2018-7-16	1940	108.1	3.34	56.0	42.0	65538.63	1440.09	82.45	4.30	158.88
2021-7-12	1917	124.0	3.88	61.2	46.1	20724.99	96.98	244.35	5.75	65.90
2021-7-26	732	100.2	8.21	42.6	33.8	22837.95	27.75	87.62	1.97	65.99

2.3 暴雨样本降雨事件下不同水土保持措施水土保持效益对比

本试验中,不同径流小区布设不同水土保持措施,包括植被措施与工程措施。通过对比不同试验小区在样本暴雨事件下的单位面积径流量、泥沙量、全氮流失量、全磷流失量与化学需氧量,对不同水土保

持措施防治土壤侵蚀与面源污染的效益进行对比与评价。结果表明(图 3),编号为 12,13 径流小区的减流减沙效果较好。其中种植了荆条的 13 号径流小区在样本暴雨条件下的平均径流量为 1 170.94 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,减流率(相对于裸地径流小区)为 94.13%,可以看出,种植荆条对于减轻地表径流量有着显著的效果。在减轻

泥沙运移方面,13号径流小区在样本暴雨条件下的平均泥沙产量为 $1.48\text{ t/km}^2$ ,减沙率达到 $99.76\%$ 。除此之外,编号为12,17径流小区的产流产沙量也相对较少,其减流率依次为 $91.61\%$ , $91.98\%$ ,减沙率依次为 $99.04\%$ , $98.52\%$ ,可以看出,刺槐+侧柏等植被措施与鱼鳞坑、梯田等工程措施在减轻土壤侵蚀方面也具有较好的作用。

在减轻面源污染方面编号为12,13,17的径流小区表现出的作用较好,样本暴雨条件下的平均全氮流失量依次为 $4.37\text{ kg/km}^2$ , $4.98\text{ kg/km}^2$ , $8.29\text{ kg/km}^2$ ,减

少率依次为 $88.61\%$ , $87.04\%$ , $78.39\%$ ,可以看出,植被措施中荆条、刺槐+侧柏与工程措施中的鱼鳞坑措施对减轻氮元素的流失量有较显著作用。在减轻磷元素流失方面,表现较好的同样为以上3个径流小区,其在样本暴雨条件下的平均全磷流失量依次为 $0.28\text{ kg/km}^2$ , $0.40\text{ kg/km}^2$ , $0.26\text{ kg/km}^2$ ,其减少率依次为 $93.24\%$ , $90.41\%$ , $93.76\%$ 。除此之外,以上3个径流小区的平均化学需氧量依次为 $12.05\text{ kg/km}^2$ , $14.88\text{ kg/km}^2$ , $12.39\text{ kg/km}^2$ ,减少率依次为 $94.48\%$ , $93.18\%$ , $94.32\%$ 。

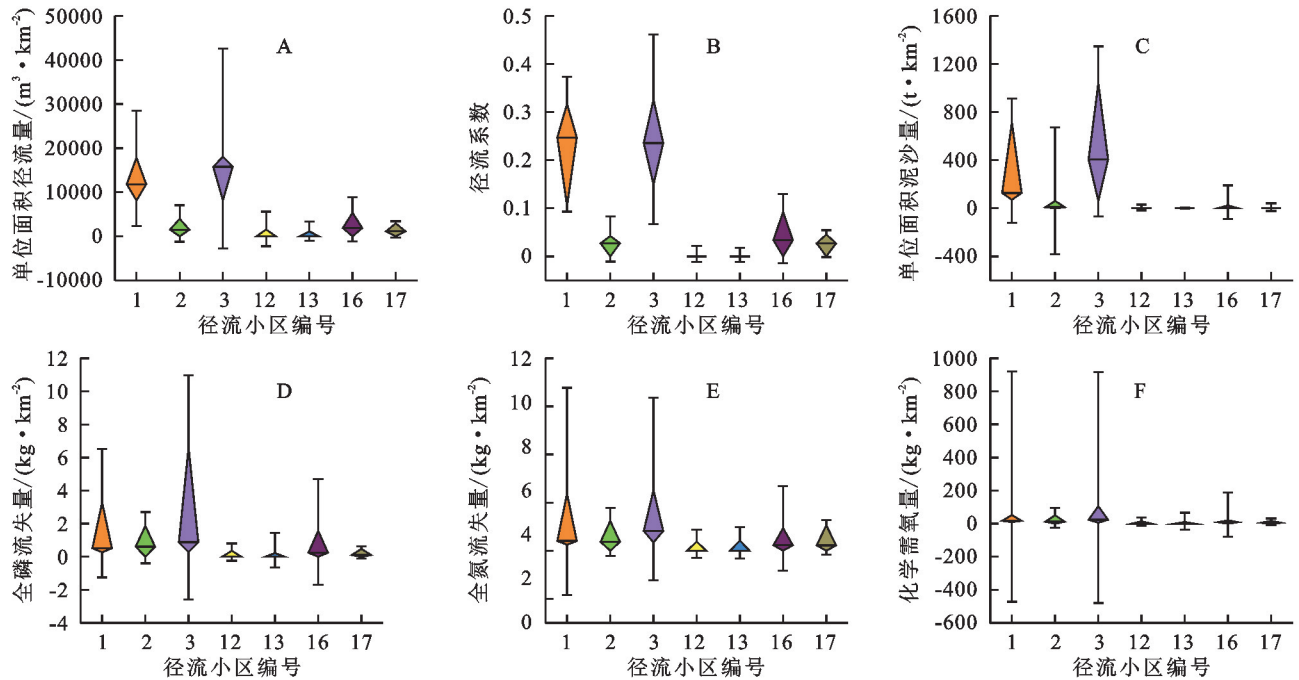


图3 不同径流小区防治土壤侵蚀、面源污染的效益对比

Fig. 3 Comparison of benefits of soil erosion and non-point source pollution control in different runoff plots

## 2.4 暴雨样本降雨事件下影响产流产流的因子分析

2.4.1 降雨因子对土壤侵蚀与面源污染的影响 如图4所示,总体来看,通过分析所有试验小区在样本暴雨事件下的土壤侵蚀情况,可以看出,在降雨因子中对径流量影响较大的有平均雨强、 $I_{30}$ 、 $I_{60}$ ,其与径流量相关关系显著,相关系数分别为 $0.54, 0.73, 0.7$ ;对泥沙量影响较大的降雨因子主要包括平均雨强、 $I_{60}$ ,其与泥沙量呈显著相关关系,相关系数分别为 $0.58, 0.50$ 。除此之外,在面源污染方面,COD, TN, TP与几种降雨因子的相关关系不显著。

如表3所示,单独来看,降雨因子对布设不同水土保持措施径流小区的土壤侵蚀与面源污染的影响有所不同。布设板栗+水平条的小区中较为明显的相关关系主要包括 $I_{30}$ 与径流量、泥沙量、化学需氧量,其相关系数分别为 $0.65, 0.67, 0.64$ ;  $I_{60}$ 与径流量、泥沙量、化学需氧量的相关系数分别为 $0.60, 0.65, 0.60$ ,均为显著相关;种植玉米的径流小区中 $I_{30}$ 与泥沙量、化学需氧量的相关

系数分别为 $0.59, 0.5$ ;  $I_{60}$ 与泥沙量、化学需氧量的相关系数分别为 $0.54, 0.51$ ,均呈显著相关关系;布设玉米+梯田的径流小区中降雨历时与降雨量、TN呈显著相关关系,相关系数分别为 $0.49, 0.55$ ,泥沙量与 $I_{30}$ 、 $I_{60}$ 的相关系数为 $0.71, 0.65$ ;种植苜蓿的径流小区中, $I_{30}$ 与径流量、泥沙量的相关关系显著,相关系数分别为 $0.75, 0.79$ ;  $I_{60}$ 与径流量、泥沙量的相关系数分别为 $0.66, 0.73$ 。

2.4.2 植被因子、土壤因子对土壤侵蚀的影响 结合试验小区植被、土壤理化性质相关因子与暴雨条件下的产流产沙量(表4),分析试验地所有径流小区在暴雨条件下发生的土壤侵蚀对植被因子与土壤因子的响应。结果表明(图5),植物盖度与径流量、泥沙量均呈显著的负相关关系,相关系数均为 $-0.51, -0.58$ 。植物冠幅与径流量、泥沙量均呈显著的负相关关系,相关系数均为 $-0.58, -0.52$ 。由此可知,在极端暴雨条件下当地植物盖度和植被冠幅对径流小区的产流产沙量有较大的影响。除此之外,植物株数

与土壤有效 P 的相关系数分别为 0.82;植物株高与土壤有机质的相关系数为 0.92;由此可知,在极端暴雨条件下产流产沙量对不同植被因子与土壤因子的响应有一定差异。

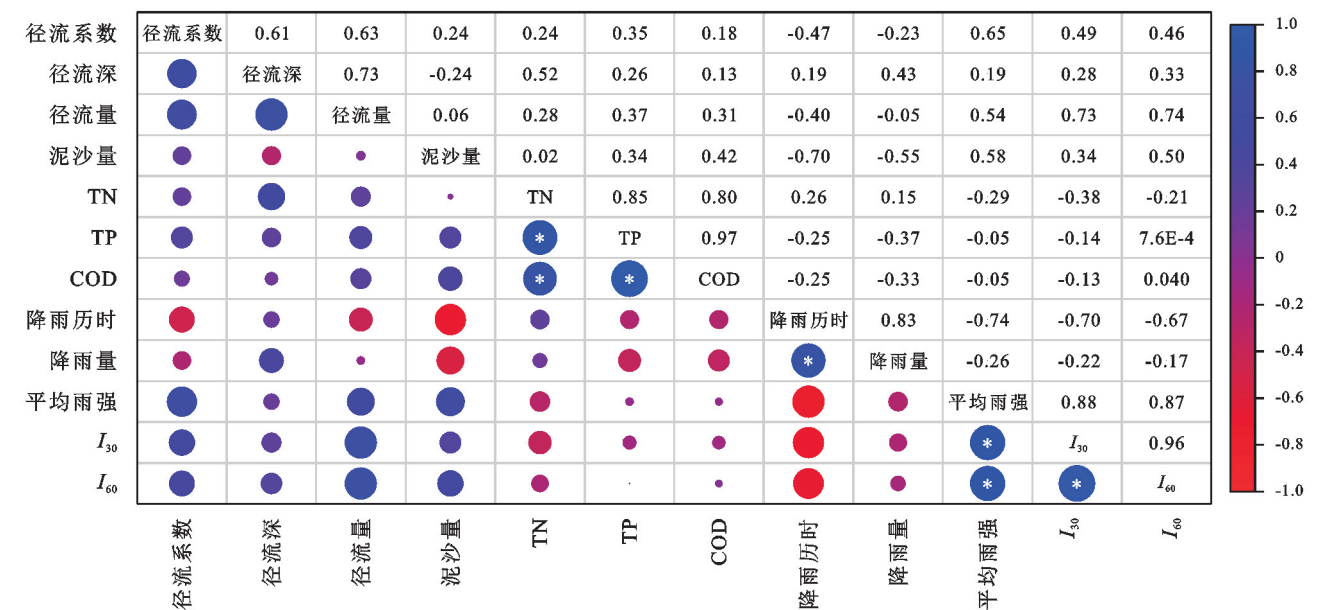


图 4 降雨因子与土壤侵蚀因子、面源污染因子的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of rainfall factors with soil erosion factors and non-point source pollution factors

表 3 不同水土保持措施下土壤侵蚀因子、面源污染因子与降雨因子的相关性对比

Table 3 Correlation between soil erosion factors, non-point source pollution factors and rainfall factors under different soil and water conservation measures

水土保持措施种类	土壤侵蚀指标	降雨量	降雨历时	雨强	$I_{30}$	$I_{60}$
板栗+水平条	径流量	0.26 *	0.6	-0.38	0.65 *	0.60 *
	泥沙量	0.17	0.42	-0.28	0.67 *	0.65 *
	全磷流失量	0.25	-0.21	0.25	0.21	0.29
	全氮流失量	-0.17	0.11	-0.29	-0.25	-0.31
	化学需氧量	-0.029	0.29	-0.17	0.64 *	0.60 *
玉米	径流量	0.1	-0.09	0.20	0.07	0.12
	泥沙量	0.26	0.24	0.15	0.59 *	0.5 *
	全磷流失量	-0.08	0.11	-0.09	0.19	0.2
	全氮流失量	-0.1	0.09	-0.17	0.25	0.24
	化学需氧量	0.04	0.29	-0.21	0.54 *	0.51 *
玉米+梯田	径流量	0.23	0.49 *	-0.27	0.37	0.32
	泥沙量	0.18	0.33	-0.20	0.71 *	0.65 *
	全磷流失量	0.19	0.42	-0.47	-0.19	-0.32
	全氮流失量	0.11	0.55 *	-0.60 *	0.11	0.21
	化学需氧量	-0.34	-0.17	0.09	0.1	0.07
苜蓿	径流量	-0.1	0.46	-0.56	0.75 *	0.66 *
	泥沙量	-0.09	0.35	-0.42	0.79 *	0.73 *
	全磷流失量	0.2	0.29	-0.18	-0.01	0.02
	全氮流失量	0.24	0.37	-0.28	0.01	0.14
	化学需氧量	0.07	-0.02	0.14	-0.21	-0.15

注: \* 表示在  $p < 0.05$  水平上显著相关。

### 3 讨论

#### 3.1 京郊降雨格局变化及土壤侵蚀影响因素分析

近年来,伴随着全球气候变化,极端降雨事件的

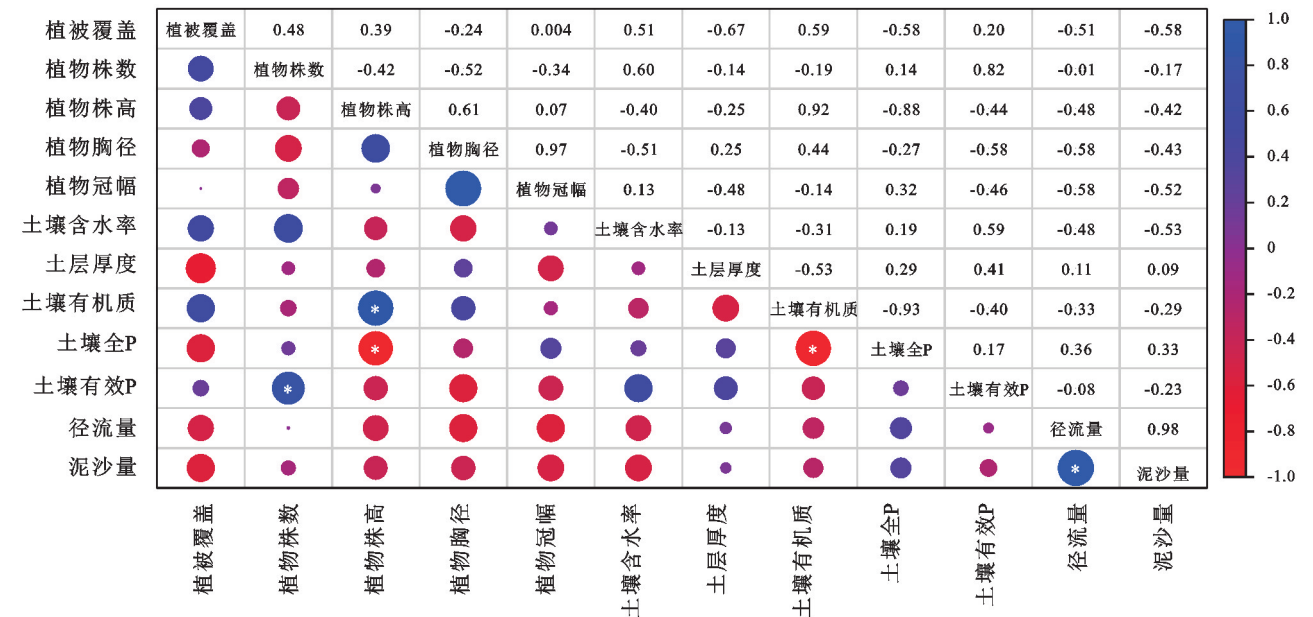
发生有所增加<sup>[14]</sup>。本研究通过分析近年来京郊地区暴雨发生频率,发现在该地区同样存在极端降雨发生频率增加的现象。结合图 2 可以看出,京郊地区的暴雨降雨量有较明显的增加趋势,且暴雨的发生次数与

降雨量相对年总体降雨占比均呈现出上升的趋势。研究表明,极端降雨事件造成的危害远高于一般降雨事件<sup>[15]</sup>,例如造成特大人员伤亡与财产损失的北京“7·31”特大暴雨灾害。因此,应当对未来极端降雨可能造成的潜在危害加以重视,并通过试验探究进一步了解当地极端降雨条件下土壤侵蚀与面源污染特征,为应对极端降雨提出更合理的建议。

降雨是土壤侵蚀的直接动力,降雨雨滴击打地面与土壤饱和后产生的地表径流造成了土壤颗粒的剥离与搬运,降雨因子是影响土壤侵蚀与面源污染的主要因子之一<sup>[16]</sup>。降雨因子中与径流量和泥沙量关系较显著的有降雨量、 $I_{30}$ 、 $I_{60}$ <sup>[17]</sup>;在面源污染方面,COD 与  $I_{30}$ 、 $I_{60}$  的相关关系较为显著,TN,TP 与几种降雨因子的相关关系不显著<sup>[18]</sup>。

表 4 不同径流小区植被属性、土壤属性与产流产沙量的对比

Table 4 Comparison of vegetation attributes, soil attributes and sediment yield in different runoff plots												
编号	植被 覆盖度/%	植物 株数	株高/ m	胸径/ cm	冠幅/ m	土壤 含水率/%	土层 厚度/cm	有机质 含量/%	土壤全/ (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	径流量/ (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	泥沙量/ (t·km <sup>-2</sup> )
1	15	320	1.9	—	—	20.5	30	1.25	0.822	10.9	308470.7	7894.3
2	5	8	4.5	8.76	—	22.65	30	1.55	0.77	5.8	58569.6	2902.7
3	0	0	—0	—0	—	22.45	30	1.05	0.798	6.7	398127.6	12758.5
12	85	32	11.0	4.94	0.36	22.15	15	2.85	0.528	6.1	1902.3	0.0
13	45	42	2.0	—	1.4	26.05	15	1.11	0.847	5.4	1201.5	0.0
16	90	—	—	—	—	29.35	15	1.32	0.762	17.8	77522.4	989.0
17	10	182	2.0	—	—	25.45	60	0.77	0.787	16.8	31989.6	186.5



注：\* 表示  $p < 0.05$ 。

图 5 植被与土壤属性相关因子与土壤侵蚀因子、面源污染因子的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of vegetation and soil attributes with soil erosion factors and non-point source pollution factors

除降雨因子外,植被覆盖与土壤均为影响土壤侵蚀的重要因子。植被通过减缓外营力对土地的作用、减缓径流、拦蓄泥沙及改善土壤质量等方式来减轻土壤侵蚀与面源污染的危害<sup>[19]</sup>。另外,有研究表明土壤理化性质对土壤的抗蚀有一定影响<sup>[20]</sup>。由于研究地的气候特征及立地条件是具有独特性,甚至在同一试验地降雨因子对不同水土保持措施下土壤侵蚀与面源污染的影响同样存在差异。因此,深入探究京郊地区当地不同土壤侵蚀影响因子之间的关系有利于深入了解不同植被种类在防治土壤侵蚀与面源污染方面

的作用机制。

3.2 不同水土保持措施对土壤侵蚀的影响

应对极端降雨的主要手段是在坡面布设适合于当地的水土保持措施。坡面水土保持措施通常包括植被措施与工程措施,植被措施主要通过其地上部分减少雨滴对地表的击溅作用,且具有一定减缓径流与拦蓄泥沙的功效,除此之外,植物根系还具有固结土壤,改善土壤结构等作用<sup>[21]</sup>。如图 2 所示,通过对比分析不同水土保持措施在暴雨条件下土壤侵蚀与面源污染数据,可以看出,不同水土保持措施的水土保

持效益存在一定差异。荆条、侧柏等植被对于减缓土壤侵蚀与面源污染具有一定积极作用<sup>[22-24]</sup>,研究表明其在北京地区的水土保持作用也十分显著。除植被措施外,工程措施中的鱼鳞坑在当地极端降雨条件下防治土壤侵蚀与面源污染的效益最好。相较于该地区之前相关学者关于部分侵蚀性降雨事件下的土壤侵蚀与面源污染特征的研究结论<sup>[25]</sup>,极端降雨条件下的产流产沙特征与养分流失特征表现出了一定的差异。除此之外,部分水土保持措施在不同降雨条件的限定下表现出的水土保持效益同样存在一定差异,与之前的研究结果一致<sup>[26]</sup>。为更好地减轻极端降雨事件所造成的危害,有必要对当地不同水土保持措施或多种措施的配置模式在极端降雨事件下表现出的水土保持效益进行对比分析,以探究出最适合当地防治极端降雨造成的水土流失的措施。

## 4 结论

(1) 石匣小流域地区存在暴雨发生频率增加的现象,且近十年暴雨发生次数及比例均呈现出一定的上升趋势,建议加强暴雨条件下水土流失的防治措施。(2) 暴雨降雨条件下,荆条的减流率和减沙率分别为 94.13% 和 99.76%,减流减沙效益优于刺槐+侧柏+鱼鳞坑、苜蓿、玉米+梯田等其他组合。荆条、刺槐+侧柏+鱼鳞坑对面源污染的防治效果较好,污染指标显著低于平均水平。(3) 下垫面条件和降雨强度对北方山区水土流失过程产生了重要影响。平均雨强、 $I_{30}$ 、 $I_{60}$  与径流量显著正相关,相关系数分别为 0.54, 0.73, 0.7; 平均雨强、 $I_{60}$  与泥沙量显著正相关,相关系数分别为 0.58, 0.5; 植物盖度与径流量、泥沙量呈负相关,相关系数分别为 -0.51, -0.58。综合考虑暴雨条件下的水土流失情况,我们推荐在保障经济效益的前提下应采用荆条作为水土保持优先措施。

### 参考文献(References):

- [1] 效存德,史培军,李小雁,等.地表过程与可持续发展研究进展与展望[J].北京师范大学学报:自然科学版, 2022, 58(3): 476-490.  
Xiao C D, Shi P J, Li X Y, et al. Earth surface process and regional sustainable development [J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2022, 58(3): 476-490.
- [2] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等.东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J].水土保持学报, 2022, 36(2): 1-12.  
Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12.
- [3] 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 F, Liu S Y, Chen Z W, 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.
- [4] 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 D Z, Mei X M, Zhang X M, 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.
- [5] 白文强,周凤艳,李刚,等.辽西低山丘陵区坡面暴雨产流产沙过程及水土保持效益[J].泥沙研究, 2024, 49(3): 55-61, 68.  
Bai W Q, Zhou F Y, Li G, et al. Runoff and sediment yield process by rainstorm and soil and water conservation benefit on slope surface in low mountain and hilly area of western Liaoning [J]. Journal of Sediment Research, 2024, 49(3): 55-61, 68.
- [6] 白晓永,张思蕊,冉晨,等.我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策[J].中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1903-1914.  
Bai X Y, Zhang S R, Ran C, et al. Ten problems and solutions for restoration of Karst ecosystem in Southwest China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1903-1914.
- [7] 张萌,关红杰,王若水,等.水土保持措施对密云板栗林坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报, 2023, 37(5): 130-136.  
Zhang M, Guan H J, Wang R S, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield on slopes of Miyun chestnut forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 130-136.
- [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 J Z, Lü X Z, Zhang Q F, 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] 霍景玉,于晓,刘成,等.水土保持措施对坡面径流和土壤流失的影响[J].土地退化与开发, 2020, 31(15): 2117-2130.  
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.
- [10] 杜映妮,周怡雯,李朝霞,等.丹江口库区不同降雨类型下典型植被措施的水土保持效应[J].水土保持学报, 2023, 37(2): 51-57, 66.

- Du Y N, Zhou Y W, Li Z X, et al. Effects of typical vegetation measures on soil and water conservation under different rainfall regimes in Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):51-57,66.
- [11] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.黄土丘陵沟壑区黄土坡面侵蚀过程及其影响因素[J].应用生态学报,2021,32(8):2886-2894.
- Liu R, Yu X X, Cai Q G, et al. Erosion process of loess slope and influencing factors in the loess hilly-gully region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2886-2894.
- [12] 安晨,方海燕,王奋忠.密云水库上游坡面产流产沙特征及降雨响应:以石匣小流域为例[J].中国水土保持科学,2020,18(5):43-51.
- An C, Fang H Y, Wang F Z. Characteristics of runoff and sediment yield on slopes and their responses to rainfalls in the upstream of the Miyun Reservoir: a case study of the Shixia Watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020,18(5):43-51.
- [13] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.
- Liu B Y, Bi X G, Fu S H. Beijing soil loss equation [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] Fang H Y. Impacts of soil conservation measures on runoff and soil loss in a hilly region, Northern China[J]. Agricultural Water Management, 2021,247:106740.
- [15] Spekkers M, Rözer V, Thieken A, et al. A comparative survey of the impacts of extreme rainfall in two international case studies [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017,17(8):1337-1355.
- [16] Zhang N, Zhang Q, Li Y Q, et al. Effect of ground-covers on reducing soil erosion and non-point source pollution in *Citrus* orchards on red soil under frequent heavy rainfall[J]. Sustainability, 2020,12(3):1146.
- [17] 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 R Z, Feng T J, Xiao H J, 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.
- [18] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- Tan X J, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2):713-722.
- [19] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J].水土保持学报,2017,31(1):97-102.
- Xie X J, Li Y F. Degree of coupling relationship between anti-erodibility and soil factors of purple soil in different *Eucalyptus grandis* plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(1):97-102.
- [20] 杨洁,莫明浩,宋月君,等.红壤坡地水土保持植物措施下柑橘林地水文生态效应[J].长江流域资源与环境,2012,21(8):994-999.
- Yang J, Mo M H, Song Y J, et al. Hydro-ecological effects of citrus land under vegetation measures of soil and water conservation in red-soil slope[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012,21(8):994-999.
- [21] 吕皎,王维.太行山中山区六种植被配置模式的水土保持功能研究[J].土壤通报,2010,41(5):1146-1152.
- Lv J, Wang W. Study on function of soil and water conservation of six vegetation arrangement patterns in middle Taihang Mt [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010,41(5):1146-1152.
- [22] Wu S F, Wu P T, Feng H, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2011,5(1):76-83.
- [23] 贾忠奎,温志勇,贾芳,等.北京山区侧柏人工林水源涵养功能对抚育间伐的响应[J].水土保持学报,2012,26(1):62-66.
- Jia Z K, Wen Z Y, Jia F, et al. Effects of thinning on water conservation of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing mountain area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(1):62-66.
- [24] 王文涛.石匣小流域不同水土保持措施坡面小区产流产沙及污染物输出特征分析[D].北京:北京林业大学,2020.
- Wang W T. Analysis of runoff sediment and pollutant output characteristics of slope plots with different soil and water conservation measures in Shixia small watershed[D].Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [25] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].水土保持学报,2017,31(2):17-21.
- Ma X, Zheng J K, Wang W W, et al. Characteristics of the runoff and sediment yield of sloping farmland in the purple soil area under different rainfall patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(2):17-21.
- [26] Zhu P Z, Zhang G H, Wang H X, et al. Effectiveness of typical plant communities in controlling runoff and soil erosion on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2021,602:126714.