

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.048.

李子君, 刘家圆, 王海军. 北方土石山区坡面水土流失特征研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 1-9.

Li Zijun, Liu Jiayuan, Wang Haijun. Study on the Characteristics of Soil and Water Loss on the Slopes in Northern Rocky Mountain Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 1-9.

# 北方土石山区坡面水土流失特征研究

李子君<sup>1</sup>, 刘家圆<sup>1</sup>, 王海军<sup>2</sup>

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 济南 250358; 2. 山东省水文中心水情部, 济南 250014)

**摘要:** [目的] 揭示北方土石山区坡面水土流失规律, 为山区土壤侵蚀防治和生态建设提供科学依据。 [方法] 利用1988—1991年坡面径流小区观测数据, 运用统计和相关分析等方法, 对不同下垫面条件下坡面水土流失特征进行了分析, 并探讨了坡面径流深度、土壤侵蚀模数、土壤入渗率与有效降雨量、平均降雨强度、降雨历时、降雨等级的关系。 [结果] (1) 在 $5^{\circ}08' \sim 24^{\circ}08'$ 坡度范围内, 坡面径流深度随坡度增加逐渐减小, 土壤侵蚀模数和土壤入渗率随坡度增加逐渐增大; (2) 在2.18~33.19 m坡长范围内, 坡面径流深度随坡长增加逐渐减小, 土壤侵蚀模数和土壤入渗率随坡长增加呈现先增后减的变化趋势, 存在临界坡长; (3) 随着植被覆盖度增加, 坡面径流深度、土壤侵蚀模数迅速减小, 土壤入渗率逐渐增加; 裸地的坡面径流深度和土壤侵蚀模数显著高于30%植被覆盖度坡面, 但植被覆盖度由30%增加到60%, 90%时, 坡面水土流失过程的影响差异并不明显, 说明在水土流失治理中存在临界植被覆盖度; (4) 坡面径流深度、土壤侵蚀模数主要受到有效降雨量和平均降雨强度影响, 且均呈显著正相关; 而土壤入渗率主要受到平均降雨强度和降雨历时影响, 与平均降雨强度呈显著正相关, 与降雨历时呈显著负相关; 随降雨等级的增加, 坡面径流深度和土壤侵蚀模数呈增加趋势而土壤入渗率呈先增加后减少的趋势。 [结论] 下垫面条件和降雨因素对北方土石山区坡面水土流失过程产生了重要影响。未来应结合室内试验和模型模拟, 进一步加强该区域不同自然因素和人类活动对坡面水土流失过程和影响机制的研究。

**关键词:** 下垫面条件; 降雨; 径流深度; 土壤侵蚀模数; 土壤入渗率; 北方土石山区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0001-09

## Study on the Characteristics of Soil and Water Loss on the Slopes in Northern Rocky Mountain Area

Li Zijun<sup>1</sup>, Liu Jiayuan<sup>1</sup>, Wang Haijun<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. Department of Hydrological Information, Shandong Provincial Center of Hydrology, Jinan 250014, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the pattern of soil and water loss on the slopes of Northern Rocky Mountain Area, and provide scientific basis for soil erosion control and ecological construction in mountainous areas. [Methods] Based on the observation data of slope runoff plots from 1988 to 1991, the characteristics of soil and water loss on slope under different underlying subsurface conditions were analyzed using statistical and correlation analysis methods, and the relationships among slope runoff depth, soil erosion modulus, soil infiltration rate and effective rainfall, average rainfall intensity, rainfall duration and rainfall grade were discussed. [Results] (1) Within the slope range of  $5^{\circ}08' \sim 24^{\circ}08'$ , the slope runoff depth gradually decreased with increase of slope gradient, and the soil erosion modulus and soil infiltration rate gradually increased with increase of slope gradient. (2) In the slope length range of 2.18~33.19 m, the

收稿日期: 2023-01-20

修回日期: 2023-02-22

资助项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MD008); 山东水土保持学会重点领域创新资助项目(2019003); 国家自然科学基金项目(41101079)

第一作者: 李子君(1974—), 女, 山东日照人, 博士, 教授, 主要从事水土资源利用方面的研究。E-mail: lizijun@sdnu.edu.cn

通信作者: 王海军(1983—), 男, 山东济宁人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水土资源利用。E-mail: navy83@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

slope runoff depth gradually decreased with the increase of slope length, while the soil erosion modulus and soil infiltration rate showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of slope length, and there was a critical slope length. (3) With the increase of vegetation coverage, the slope runoff depth and soil erosion modulus decreased rapidly, and the soil infiltration rate increased gradually. The slope runoff depth and soil erosion modulus of bare land were significantly higher than those of 30% vegetation coverage slope, but the difference in the effect of vegetation coverage increasing from 30% to 60% and 90% on the slope soil erosion process was not obvious, indicating that there was a critical vegetation coverage in soil erosion control. (4) Slope runoff depth and soil erosion modulus were mainly affected by effective rainfall and average rainfall intensity, and both were significantly positively correlated. However, soil infiltration rate was mainly influenced by average rainfall intensity and rainfall duration, and was significantly positively correlated with average rainfall intensity and negatively correlated with rainfall duration. With the increase of rainfall grade, the slope runoff depth and soil erosion modulus showed an increasing trend while the soil infiltration rate increased first and then decreased. [Conclusion] The underlying surface conditions and rainfall factors had important impacts on the soil and water loss process on the slopes in the Northern Rocky Mountain Area. In the future, the research on the process and influence mechanism of different natural factors and human activities on soil and water loss on the slope in this region should be further strengthened in combination with indoor experiments and model simulations.

**Keywords:** underlying surface condition; rainfall; runoff depth; soil erosion modulus; soil infiltration rate; Northern Rocky Mountain Area

坡面尺度是水土流失过程发生发展的基础地理单元。坡面在降水、地形、植被、土壤、土地利用等因素影响下产流、入渗等水文过程发生了一定变化,进而导致坡面侵蚀过程的发生发展<sup>[1]</sup>。深入研究坡面尺度的水文过程、土壤侵蚀规律及其影响因素对区域水土保持具有重要的理论和实践意义。

降水是坡面水土流失过程最根本的动力来源,是坡面径流产生和土壤水蚀的先决条件<sup>[2]</sup>,其强度、历时、雨量、等级等直接影响着坡面产流过程的时空差异性。坡度、坡长、植被覆盖、土地利用等下垫面因素主要通过影响产流能量、入渗强度以及降水在坡面的再分配,进而对坡面水土流失过程产生重要影响<sup>[3]</sup>。由于坡面水土流失过程的复杂性以及区域降水特征和下垫面条件的差异性,不同学者得到的坡面径流特征、土壤侵蚀规律和土壤入渗特征也各不相同<sup>[4-5]</sup>。

在降水对坡面水沙过程影响的研究中,有研究发现降雨量是影响产流产沙的主要因素<sup>[6]</sup>;有的研究则认为降雨强度是产流产沙的主控因子<sup>[7]</sup>。在坡度对坡面水土流失过程影响的研究中,有研究发现产流、产沙随坡度增加呈“增加—稳定”趋势<sup>[8]</sup>;有研究表明在小雨、中雨强度下坡面产流产沙量随坡度增大而增大,但当坡度超过 20°后,产流产沙量随坡度增加而减少,存在临界坡度<sup>[9]</sup>;还有研究发现产流、产沙随坡度增加而减少<sup>[10]</sup>。在坡长对坡面产流产沙过程影响

的研究中,有研究者认为坡面产流产沙均随坡长的增大而增大<sup>[11]</sup>;也有研究表明坡面土壤侵蚀模数随坡长增加呈现先增加后减少的趋势,存在临界坡长<sup>[12]</sup>。在植被覆盖对坡面水沙过程影响的研究中,已有研究表明植被覆盖度的高低不同程度地影响坡面减水减沙效果。有研究者发现当植被覆盖度大于 60%时,其减水减沙效应明显大于 20%和 40%植被覆盖度坡面<sup>[13]</sup>;也有研究表明当植被覆盖度大于 50%时,坡面产流产沙的变化趋于平缓<sup>[14]</sup>。对于坡面土壤入渗规律及其影响因素的研究相对较少。有研究认为降雨强度是影响坡面土壤入渗的主要因素,并且随着降雨强度增大,坡面土壤入渗率先增后减<sup>[15]</sup>;还有研究表明坡面土壤入渗率随坡度变化先升后降,随坡长变化线性增加<sup>[16]</sup>。由于受研究方法、区域差异性等因素的影响,坡面水土流失过程随降水和下垫面条件变化而形成的规律存在较大差异。只有借助多年野外径流小区观测数据,针对不同区域的不同情况进行具体分析,才能准确识别区域的坡面水土流失过程和规律,为区域水土流失的有效防治提供科学依据。

北方土石山区是我国主要的水土流失类型区之一,水蚀是该区域的主要侵蚀类型。该区域地形破碎,沟壑纵横,坡度大,水土流失严重,是全国水土保持规划国家级水土流失重点预防区。目前关于北方土石山区降雨和下垫面条件交互作用下坡面水土流

失过程和规律的研究相对较少,基于此选取河北省承德市南山径流场坡面径流小区 1988—1991 年的观测数据,运用统计方法,分析降雨因子(有效降雨量、平均降雨强度、降雨历时)、降雨等级和下垫面因子(坡度、坡长、植被覆盖)对坡面水沙过程(径流深度、土壤侵蚀模数、土壤入渗率)的影响,揭示北方土石山区坡面水土流失发生发展的规律,以期为山区坡面土壤侵蚀动态监测、水土流失防治措施布设和生态建设提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

河北省承德市南山径流场(117°56'E,41°23'N)海拔高度 390~450 m,平均坡度 15.2°,属于低山丘陵区。气候类型为温带大陆性季风气候,多年平均日照时数 2 600 h,年均温 9℃,年均无霜期 160 d,年均降水量 400~450 mm,降水主要集中于夏季。土壤类型为褐土,土地利用类型主要包括裸岩、林地(松

林、灌木林、经济林)和草地。

1.2 数据来源

为了探讨和揭示北方土石山区坡面水土流失过程发生发展的规律,河北省承德市水土保持科学研究所自 20 世纪 80 年代在承德市陆续布设了一系列不同条件的径流观测站和径流试验场,并于 1981—1995 年进行了定位观测研究,径流小区监测数据包括降雨量、降雨历时、降雨强度、径流量、侵蚀产沙量等,并被整理汇编成《燕山山区水土流失规律研究径流泥沙测验资料(1981—1995)》。由于北方土石山区土层较薄,所布设的径流小区在 20 世纪 90 年代末就因雨水冲刷而毁坏殆尽。基于上述整编资料,在对径流小区布设条件、观测内容和观测时间进行比较分析的基础上,选取南山径流场 3 组 15 个野外人工径流小区(表 1),利用各径流小区 1988—1991 年相关观测数据,探究不同降水、坡度、坡长和植被覆盖条件下坡面水土流失规律。

表 1 南山径流场径流小区基本特征

Table 1 Basic characteristics of runoff plots in Nanshan runoff field

小区编号	坡度	坡长/m	坡宽/m	受雨面积/m <sup>2</sup>	观测类别	地表情况	产流次数/次	产沙次数/次
1	5°08′	10.03	4.95	49.55	坡度	裸地	59	59
2	11°00′	10.16	5.00	49.85	坡度	裸地	59	59
3	16°20′	10.34	4.97	49.30	坡度	裸地	61	60
4	20°25′	10.66	5.00	49.95	坡度	裸地	62	62
5	24°08′	10.98	5.00	50.10	坡度	裸地	56	56
6	22°58′	2.18	4.98	10.01	坡长	裸地	47	44
7	22°58′	4.97	5.03	23.04	坡长	裸地	44	44
8	23°30′	11.95	5.00	54.80	坡长	裸地	52	52
9	24°40′	16.64	4.97	75.15	坡长	裸地	57	57
10	24°28′	22.26	4.94	99.64	坡长	裸地	57	57
11	24°17′	33.19	4.96	150.00	坡长	裸地	62	61
12	28°25′	11.36	5.00	49.95	覆被	裸地	56	56
13	28°55′	11.18	5.02	49.15	覆被	野草,覆盖度 30%	49	46
14	27°36′	11.20	4.92	48.86	覆被	野草,覆盖度 60%	49	41
15	26°08′	11.22	4.95	49.85	覆被	野草,覆盖度 90%	41	35

1.3 研究指标与方法

研究指标主要为有效降雨量(mm)、平均降雨强度(mm/h)、降雨历时(min)、降雨等级、径流深度(mm)、土壤侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>)和土壤入渗率(mm/min)。利用自记雨量计和普通雨量桶收集降雨数据,包括次降雨量、降雨历时和降雨强度等。降雨历时是由降雨过程计算出的净雨历时,平均降雨强度利用降雨量和降雨历时计算得出,利用烘干法测定次降雨侵蚀总量,土壤侵蚀模数利用侵蚀总量除以小区面积计算得到。由于原始资料多为浑水,在整编时折算

为清水深度,泥沙真比重按 2.65 t/m<sup>3</sup> 计算,径流深度=(径流泥沙总量—土壤侵蚀总量/2 650)/小区面积。由于降雨过程中截留量、蒸发量和填洼水量相对较小,可忽略不计,根据水量平衡方程并参考已有研究成果<sup>[17]</sup>,坡面土壤入渗率可以表示为:

$$I = (P \cos\theta - R) / T \tag{1}$$

式中: $I$  表示坡面土壤入渗率(mm/min); $P$  表示降雨量(mm); $\theta$  表示坡面的坡度(°); $R$  表示次降雨坡面径流深度(mm); $T$  表示降雨历时(min)。

利用 Excel 2019 进行数据整理,利用 SPSS 20.0

对数据进行统计分析,采用独立 T 检验对不同下垫面条件下产流、产沙和入渗差异进行显著性检验,利用 Pearson 相关分析法对有效降雨量、平均降雨强度和降雨历时与坡面径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率进行相关性检验。

2 结果与分析

2.1 径流场降雨和产流产沙特征

1988—1991 年南山径流场降雨和产流产沙特征如表 2 所示。南山径流场总共降雨 188 场次,其中有 78 场降雨产生了地表径流。总降雨量为 1 833.50 mm,其中有效降雨量达到 1 355.36 mm,占总降雨量的 73.40%。降雨次数和有效降雨次数的最高值均出

现在 7 月,其次是 6 月和 8 月。降雨量和有效降雨量的最高值均出现在 6 月份,其次是 7 月和 8 月。1990 年降雨最多,达到了 636.80 mm;1989 年降雨最少,仅有 324.90 mm。15 个径流小区总共产流 811 次,产流量为 265.61 m<sup>3</sup>;产沙 789 次,产沙量达到 29 803.13 kg。6 月份产流量和产沙量均最高,分别占总产流量的 32.45%和总产沙量的 41.12%,其次是 7 月、8 月和 9 月,5 月份产流量和产沙量均最少,分别占总产流量的 0.12%和总产沙量的 0.73%。1990 年产流量和产沙量均最高,分别占总产流量和产沙量的 39.24%和 51.69%,其次是 1991 年和 1988 年、1989 年产流量和产沙量均最低,分别占总产流量和产沙量 12.18%和 19.13%(图 1)。

表 2 1988—1991 年南山径流场降雨和产流产沙特征

Table 2 Characteristics of rainfall and runoff and sediment generation in the Nanshan runoff field from 1988 to 1991

月份	降雨特征				产流产沙特征			
	降雨 次数/次	降雨量/ mm	有效降雨 次数/次	有效 降雨量/mm	产流 次数/次	产流量/ m <sup>3</sup>	产沙 次数/次	产沙量/ kg
5 月	5	48.9	1	12.2	9	0.32	9	218.31
6 月	47	573.4	21	448.2	215	86.19	215	12278.61
7 月	54	513.1	29	440.4	250	75.79	249	9320.10
8 月	46	436.2	18	321.3	214	64.09	204	5069.60
9 月	36	261.9	11	133.3	123	34.21	112	2916.51
合计	188	1833.5	78	1355.4	811	265.61	789	29803.13

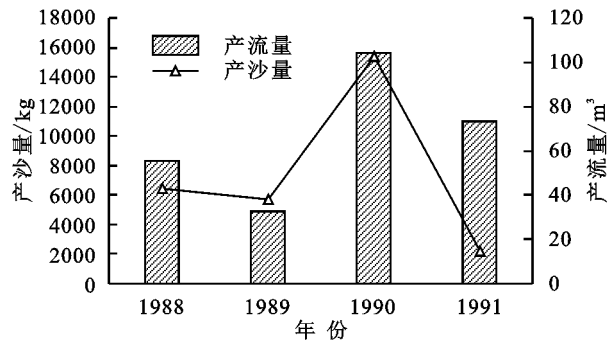


图 1 1988—1991 年南山径流场产流产沙变化

Fig. 1 Changes of runoff and sediment generation in Nanshan runoff field from 1988 to 1991

2.2 下垫面条件对坡面土流失过程的影响

2.2.1 坡度对坡面水土流失过程的影响 坡度是影响坡面水土流失过程的重要因素之一,对坡面发育和侵蚀演变过程起着重要作用。在相同的降雨条件下,坡度的大小在一定程度上决定了径流冲刷和搬运的能力,不同坡度坡面水土流失过程的差异较大<sup>[18]</sup>。选取 5 个坡度小区 1988—1991 年观测数据,计算径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率的平均值、标准误差和差异显著性(图 2)。

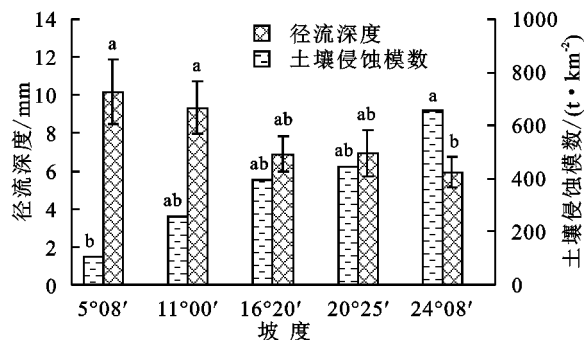
由图 2 可知,当坡度从 5°08'分别增大到 11°00', 16°20', 20°25', 24°08'时,小区的平均径流深度分别

为 5°08'坡面径流深度的 91.71%, 67.88%, 78.07%, 58.25%,说明坡面径流深度整体随着坡度的增加而减少。在相同的坡长和降雨条件下,随着坡度的增加,坡面受雨面积减少,降雨在单位时间内产生的净雨量降低,同时坡面流速增加,径流在坡面的停留时间缩短,导致径流深度随着坡度的增加而减少。5°08', 11°00'小区的坡面径流深度显著大于 24°08'小区,而 5°08'和 11°00'小区以及 16°20'和 20°25'小区均没有显著性差异。

11°00', 16°20', 20°25', 24°08'坡度径流小区的土壤侵蚀模数分别为 5°08'坡度小区的 2.41, 3.71, 4.16, 6.14 倍,说明坡面土壤侵蚀模数随着坡度的增加而增加,坡度越大对土壤侵蚀的影响越大。这是因为随着坡度的增加,土壤颗粒的稳定性下降,径流在斜坡方向的重力切向分力增大,使坡面流速加快,动能增加,挟带泥沙的能力增大,从而导致土壤侵蚀模数增加。24°08'小区的土壤侵蚀模数显著高于 5°08'小区, 11°00', 16°20', 20°25', 24°08'小区间的差异均不显著。当坡度从 5°08'分别增大到 11°00', 16°20', 20°25', 24°08'时,土壤入渗率分别为 5°08'坡面的 1.16, 1.30, 1.30, 1.37 倍,这是由于坡度增加使降雨对地表的垂直作用力降低,雨滴对地表的溅蚀作用减



弱,不利于地表结皮的产生,土壤入渗能力也随之增



注:同一指标相同字母表示没有显著性差异( $p>0.05$ ),不同字母表示显著性差异( $p<0.05$ ),下同。

图 2 不同坡度径流小区的径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率

Fig. 2 Runoff depth, soil erosion modulus and soil infiltration rate in different slope runoff plots

2.2.2 坡长对坡面水土流失过程的影响 坡长是影响坡面径流、侵蚀产沙过程的重要因子,决定着坡面水流能量的沿程变化,主要通过影响水流挟沙力影响土壤侵蚀、搬运和沉积过程<sup>[19]</sup>。选取 6 个坡长小区 1988—1991 年观测数据,计算不同坡长小区的径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率的平均值、标准误差和差异显著性(图 3)。

由图 3 可见,当坡长由 2.18 m 增加到 4.97, 11.00, 16.64, 22.26, 33.19 m 时,坡面径流深度分别为 2.18 m 坡面径流深度的 64.04%, 50.38%, 43.67%, 43.93%, 35.09%,说明坡面径流深度随坡长增加而逐渐降低。这是由于随着坡长增加,坡面受雨面积也相应增加,影响汇水过程,坡面径流量也随之增加,导致坡面径流动能增加,流速加快,水流在坡面的停留时间减短,径流深度也随之减少。2.18 m 坡长小区的坡面径流深度显著大于 11.00, 16.64, 22.26, 33.19 m 坡长小区,而 11.00, 16.64, 22.26, 33.19 m 坡长小区的差异均不显著。

当坡长由 2.18 m 增加到 4.97, 11, 16.64, 22.26, 33.19 m 时,坡面土壤侵蚀模数分别增加了 4.39, 8.19, 12.92, 18.26, 15.80 倍,说明在 2.18~33.19 m 坡长范

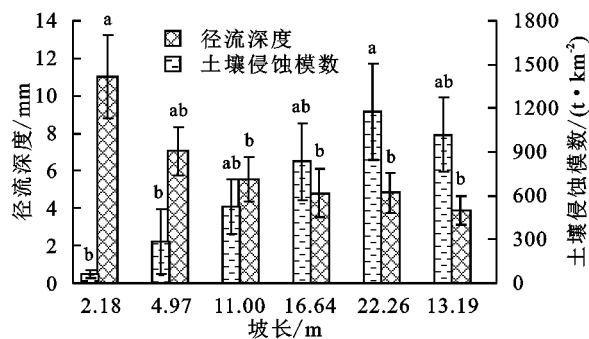
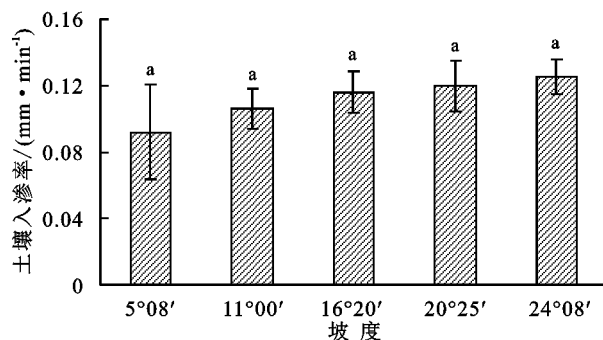


图 3 不同坡长径流小区的径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率

Fig. 3 Runoff depth, soil erosion modulus and soil infiltration rate in different slope length runoff plots

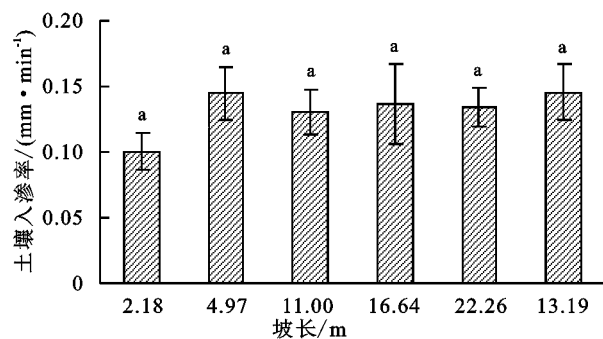
2.2.3 植被覆盖对坡面水土流失过程的影响 植被类型、数量、结构、分布的差异将形成不同的下垫面条件,进而影响坡面降水过程、下渗过程、产流产沙过程及

强。土壤入渗率在各坡度小区均没有显著性差异。



围内坡面土壤侵蚀模数随坡长增加出现先增加后减少的趋势,坡长为 22.26 m 时坡面土壤侵蚀模数达到最大值,存在临界坡长。这是因为随着坡长增加,坡面径流流程增加,径流的不断汇集会增强坡面土壤侵蚀能力和水流挟沙能力,导致坡面土壤侵蚀量随坡长的增加而增大;而当坡长增加到一定程度时,坡面水流的流路增加会使得水流流动的动力减弱,侵蚀阻力增加,挟带泥沙的能力下降,进而导致土壤侵蚀模数也随之下降。22.26 m 坡长小区的坡面土壤侵蚀模数显著高于 2.18, 4.97 m 坡长小区,而 2.18, 4.97 m 坡长小区以及 11.00, 16.64, 33.19 m 坡长小区间均无显著性差异。

坡长与土壤入渗的关系比较复杂,随坡长增加土壤入渗率呈现先增后减的变化,坡长为 4.97 m 时坡面的土壤入渗率达到最大值,存在临界坡长。分析认为,在 2.18~4.97 m 坡长范围内,随着坡长增加,受雨面积增加,土壤入渗量也随之增加;当坡长增加到一定长度时,径流深度减小,对地表的垂直作用力减弱<sup>[20]</sup>,土壤水分入渗受阻。土壤入渗率在各坡长小区均没有显著性差异。



其动力机制<sup>[21]</sup>。选取 4 个不同植被覆盖度小区 1988—1991 年观测数据,计算径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率的平均值、标准误差和差异显著性(图 4)。

由图 4 可见,植被覆盖度由 0 增加到 30%, 60%, 90% 时,坡面径流深度分别为裸地的 32.46%, 14.28%, 13.67%, 表明坡面径流深度随植被覆盖度的增加呈现减少的趋势,尤其是植被覆盖度达到 30% 以上时能够显著减少地表径流。当植被覆盖度较低时,坡面由于缺少植被覆盖难以对降雨进行拦蓄,大量坡面降雨直接转化为坡面漫流,径流量和径流深度也随之增加;随着坡面植被覆盖度的提高,地表的植被能够有效截留部分降水,从而降低水流流速,提高坡面径流渗透能力,显著减少坡面径流的形成机率,径流深度也随之减小。裸地小区的坡面径流深度显著大于植被覆盖度为 30% 的小区,植被覆盖度为 30% 小区的坡面径流深度显著大于植被覆盖度为 60% 和 90% 的小区,而植被覆盖度为 60% 和 90% 的小区无显著性差异。

当植被覆盖度由 0 增加到 30%, 60%, 90% 时,坡面土壤侵蚀模数分别为裸地的 10.65%, 0.72%, 0.39%, 可见坡面土壤侵蚀模数随植被覆盖度的增加显著降低,植被覆盖可以有效控制土壤侵蚀。当坡面处于裸露状态时,降雨直接打击和溅蚀会使得土壤松动,坡面径流会直接对坡面进行冲刷,加大了土壤侵蚀发生的机率;当坡面处于较高植被覆盖状态时,植被面积的增加能够减少雨滴对坡面的直接打击,枯落物层和茎干也能提高地表糙度,减小坡面径流的动力和势能,显著减少坡面土壤侵蚀发生的可能性。裸地小区的坡面土壤侵蚀模数显著高于植被覆盖度为 30%, 60% 和 90% 的小区,而植被覆盖度为 30%, 60%, 90% 的小区无显著性差异。

当植被覆盖度由 0 增加到 30%, 60%, 90% 时,坡面土壤入渗率分别为裸地的 1.68, 1.90, 2.13 倍,说明坡面

土壤入渗率随植被覆盖度的增加而逐渐增大。这是由于低植被覆盖的坡面对降雨的拦蓄作用较小,导致径流在坡面停留时间较短,土壤入渗速率较低;当植被覆盖度增加时,植被对降雨的截留作用以及对土壤入渗能力的改良作用(改善土壤孔隙度、容重和有机质含量等)显著增强,径流在坡面的停留时间延长,坡面土壤入渗速率也相应增大。植被覆盖度为 90% 和 60% 小区的土壤入渗率显著高于裸地小区,但植被覆盖度为 60% 和 90% 的小区不具有显著性差异。

值得注意的是,低植被覆盖度坡面与高植被覆盖度坡面径流深度、土侵蚀模数和土壤入渗率的差异十分显著,但随着植被覆盖度的增加,坡面径流深度和土壤侵蚀模数的变化速率越来越小并趋于稳定。植被覆盖度由 30% 增加到 90% 并没有引起土壤侵蚀模数和土壤入渗率的显著变化,尤其是 60% 和 90% 的植被覆盖度对坡面水土流失过程影响的差异不大,说明在水土流失治理中存在临界植被覆盖度。坡面水土流失过程受多种因素综合影响,除降雨影响之外,土壤紧实度、容重、水稳性团聚体、水分状况以及有机质含量等均对土壤的抗蚀性有重要影响,这些土壤理化性质受植被类型特别是植被根系分布特征的影响<sup>[22]</sup>。上述径流小区植被以野草为主,观测季节为夏、秋季节,草被植物根系量大且密集,茎枝叶枯落物和衰老退化的根系腐烂后可有效改善土壤的理化性状,因此在特定的坡长、坡度、植被种类等条件配合下,植被覆盖度达到 30% 后,植被的影响作用减小,植被的水沙调控作用趋于稳定,对坡面产流、入渗和抗侵蚀的能力只有一定辅助作用,蓄水拦沙效果表现不明显。因此,一味地增加地表植被覆盖度并不能特别有效地减少水土流失。

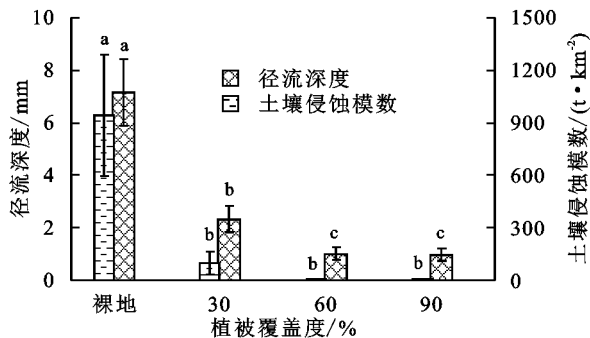


图 4 不同植被覆盖度径流小区的径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率

Fig. 4 Runoff depth, soil erosion modulus and soil infiltration rate in runoff plots with different vegetation coverage

## 2.3 降雨因子与坡面水土流失过程的关系

降雨是坡面产流产沙过程最根本的动力来源,除直接打击土壤形成溅蚀外,还形成地表径流冲刷土壤<sup>[23]</sup>,以一种综合效应影响坡面水土流失过程。降雨因子包括有效降雨量、平均降雨强度、降雨历时、降

雨等级等均对坡面水土流失过程起着重要影响。

2.3.1 有效降雨量、平均降雨强度、降雨历时与坡面水土流失的关系 为了综合分析有效降雨量、平均降雨强度、降雨历时对坡面径流深度、土壤侵蚀模数、土壤入渗率的影响,选取 15 个不同下垫面条件的坡面径流

小区 1988—1991 年数据,对有效降雨量、平均降雨强度、降雨历时与坡面径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率进行 Pearson 相关分析(表 3)。由表 3 可见,不同降雨因子对坡面水土流失过程的影响各不相同。

有效降雨量、平均降雨强度均与坡面径流深度呈显著正相关,但降雨历时与坡面径流深度的相关性较差,说明坡面径流深度主要受到有效降雨量和平均降雨强度的影响。降雨是坡面径流的直接来源,当降雨量超过土壤的入渗能力就会形成坡面径流,随着降雨量的增大坡面径流深度也增加。当降雨强度增大,降雨的速度会随之增加,单位时间内产生的径流深度也会增加。降雨强度对径流深度的影响也体现在雨滴的大小和雨滴所具有的动能,雨滴对坡面的打击使土壤表层趋于紧实,形成地表结皮,会有效降低坡面的粗糙度<sup>[24]</sup>,更易形成坡面径流。

有效降雨量、平均降雨强度与坡面土壤侵蚀模数呈显著正相关,但降雨历时与坡面土壤侵蚀模数呈负相关且相关性较差,说明坡面土壤侵蚀模数更多地受到有效降雨量和平均降雨强度的影响。除雨滴的溅蚀作用外,降雨量的增加导致坡面径流量的增加从而加大对坡面的侵蚀冲刷,增加产沙量。降雨强度增大,雨滴对坡面土壤的溅蚀能力增强,破坏土壤结构,使土粒分散、破坏和迁移,相应的坡面径流可以携带更多的土壤颗粒<sup>[25]</sup>,同时降雨强度增大会增加坡面径流的紊乱性,进而增加水流的侵蚀能力,使坡面产沙量增加。

降雨历时与土壤入渗率呈显著负相关,有效降雨量和平均降雨强度与土壤入渗率皆呈显著正相关,但有效降雨量与土壤入渗率的相关系数较小,说明土壤入渗率更多受到降雨历时和平均降雨强度的影响。在降雨初期,土壤含水量较少,坡面土壤入渗能力较强;随着降雨的持续,土壤含水量增加,坡面土壤入渗能力下降,同时受雨滴溅蚀的影响,土壤表层形成较为致密的结皮层,在一定程度上使得坡面入渗率降低<sup>[24]</sup>。降雨强度增大会增加雨滴对坡面的打击力,所产生的冲击力对土壤入渗有一定促进作用<sup>[26]</sup>,同时降雨强度增大会增加坡面径流深度,致使坡面受到的重力增加,坡面土壤入渗率也随之增加。

2.3.2 降雨等级与坡面水土流失过程的关系 为了分析不同等级降雨对坡面径流深度、土壤侵蚀模数、土壤入渗率的影响,根据国家气象局制定的降雨等级划分标准并结合实际情况,依据 24 h 内降雨总量大小划分为小雨(<10.0 mm)、中雨(10.0~25.0 mm)、大雨(25.0~50.0 mm)、暴雨(≥50.0 mm)4 个等级。由表 4 可知,15 个径流小区的中雨累计次数最多(共 371

次),暴雨累计次数最少(共 76 次)。当降雨等级由小雨增大为中雨、大雨、暴雨时,坡面径流深度、土壤侵蚀模数分别为小雨的 2.15,4.70,13.78 倍和 4.82,16.68,50.61 倍,说明坡面径流深度、土壤侵蚀模数随着降雨等级增大而增加。降雨等级变大,有效降雨量和降雨强度也增大,坡面径流量和侵蚀量也随之增加。

表 3 坡面径流深度、土壤侵蚀模数、土壤入渗率与降雨历时、有效降雨量、平均降雨强度间的关系

Table 3 Relationship between slope runoff depth, soil erosion modulus, soil infiltration rate and rainfall duration, effective rainfall and average rainfall intensity			
指标	有效降雨量	平均降雨强度	降雨历时
径流深度	0.553 **	0.361 **	0.096
土壤侵蚀模数	0.348 **	0.358 **	—0.077
土壤入渗率	0.195 **	0.717 **	—0.403 **

注:\*\* 在 0.01 水平上显著相关。

土壤入渗率随着降雨等级的增大整体上呈现先增后减的变化趋势(表 4)。当降雨等级为大雨时,坡面土壤入渗率最高为 0.34 mm/min;当降雨等级为暴雨时,坡面土壤入渗率下降,这说明坡面土壤入渗率存在临界降雨等级。这是因为一般情况下对于自然坡面次降雨事件而言,土壤含水量均未达到饱和状态,降雨量越大,入渗水量就越大,平均入渗率随之变大。当日降雨量增加,降雨等级也随之增加,达到临界降雨等级后,地表也因受到雨滴击打、溅蚀的影响,在降雨过程中形成致密的结皮<sup>[24]</sup>,阻碍水分的入渗,这时入渗水量变小,平均土壤入渗率变小。

表 4 不同降雨等级下的坡面径流深度、土壤侵蚀模数和土壤入渗率

Table 4 Slope runoff depth, soil erosion modulus and soil infiltration rate under different rainfall levels				
降雨等级	累计次数/次	径流深度/mm	土壤侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> )	土壤入渗率/(mm·min <sup>-1</sup> )
小雨	159	1.65	45.67	0.16
中雨	371	3.55	219.91	0.13
大雨	162	9.75	761.86	0.34
暴雨	76	22.74	2311.47	0.18

### 3 结论

本研究选取河北省承德市南山径流场 15 个径流小区 1988—1991 年观测数据,探讨了降雨和不同下垫面条件下坡面径流、土壤侵蚀和土壤入渗特征及规律,得到如下结论:

(1) 随着坡度增加,坡面径流深度逐渐减小,土壤侵蚀模数和土壤入渗率呈逐渐增加的趋势。随着坡长增加,坡面径流深度呈现逐渐减少的趋势,土壤



侵蚀模数和土壤入渗率呈现先增后减的变化趋势且存在临界坡长。

(2) 随着植被覆盖度增加,坡面径流深度、土壤侵蚀模数迅速减少,土壤入渗率逐渐增加。植被覆盖度由30%增加到90%并没有引起土壤侵蚀模数和土壤入渗率的显著变化,尤其是60%和90%的植被覆盖度对坡面水土流失过程的影响差异不明显,说明在水土流失治理中存在临界植被覆盖度。

(3) 北方土石山区坡面产流产沙主要受到有效降雨量和平均降雨强度的影响,土壤入渗率则主要受到平均降雨强度和降雨历时的影响。坡面径流深度和土壤侵蚀模数随降雨等级的增加而增加,而土壤入渗率随降雨等级的增加呈现先增后减的变化趋势,存在临界降雨等级。

由于北方土石山区不同降雨和下垫面条件下的坡面水土流失过程存在着一定差异,因此在进行水土流失综合治理时,要根据土石山区坡面条件的实际状况和水土流失特征,结合降雨特点,有针对性地进行生态建设和土壤侵蚀防治。需要注意的是,在坡度对坡面水土流失过程影响的探讨中发现并没有存在临界坡度,这与有的研究并不一致<sup>[2]</sup>,因此对于北方土石山区坡面产流产沙是否存在坡度临界值、临界值大小的问题仍需要进一步地研究。目前对不同土地利用、坡度和植被覆盖条件下坡面渗透性能的研究较多,但对于不同坡长坡面土壤入渗性能的研究相对较少,坡长对坡面土壤入渗的影响方式和影响机制仍需要进一步地探讨。

#### 参考文献:

- [1] 侯旭蕾,吕殿青,王辉,等.坡度对红壤土坡面降雨侵蚀及水文过程的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(6):118-121.  
Hou X L, Lu D Q, Wang H, et al. Effect of slope gradient on rainfall erosion and hydrological process on red soil slope[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(6):118-121.
- [2] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):147-154.  
Li G F, Zheng F L, Lu J, et al. Effects of rainfall and topographic factors on soil erosion on black soil slope[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2015, 46(4):147-154.
- [3] 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 S Y, Liu Y X, Cheng J M, 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.
- [4] Suescún D, Villegas J C, León J D, et al. Vegetation cover and rainfall seasonality impact nutrient loss via runoff and erosion in the Colombian Andes[J]. Regional Environmental Change, 2017,17(3):827-839.
- [5] Sobol N V, Gabbasova I M, Komissarov M A. Effect of rainfall intensity and slope steepness on the development of soil erosion in the Southern Cis-Ural region(A model experiment)[J]. Eurasian Soil Science, 2017, 50(9):1098-1104.
- [6] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4):7-12.  
Yang S, Yin Z, Zheng Z C, et al. Analysis of Natural rainfall and erosion and sediment yield characteristics of maize seasonal slope farmland in yellow soil region of Sichuan Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):7-12.
- [7] 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(08):2886-2894.
- [8] 陈诚,郝治邦.模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J].水土保持研究,2017,24(2):70-76,83.  
Chen C, Hao Z B, Research on slope runoff, sediment and P and K loss characteristics on slopes with different gradients under artificial simulation of rainfall[J]. Study on Soil and Water Conservation, 2017,24(02):70-76,83.
- [9] 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 Y G, Zhang D, Chen F, 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.
- [10] Fox D M, Bryan R B, Price A G, et al. The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions[J]. Geoderma, 1997,80(1/2):181-194.
- [11] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):79-84.  
Pei G B, Gong D Q, Fu X T. Rill morphology and its effect on runoff and sediment yield on loessal soil slope in western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and



- Water Conservation, 2017, 31(6):79-84.
- [12] 蔡强国,王贵平,陈永宗,黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟[M].北京:科学出版社,1998.  
Cai G P, Wang P G, Chen Y Z. The English title was translated by the author himself[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [13] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J].水土保持研究, 2015, 22(3):16-20.  
Liu J G, Zhang X C, Li L, et al. Effects of vegetation coverage on soil and water loss on purple soil slope[J]. Study on Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 16-20.
- [14] 张晶晶,王力.坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析[J].水土保持通报, 2011, 31(2):159-162.  
Zhang J J, Wang L. Grey correlation analysis of influencing factors of runoff and sediment yield on slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(2):159-162.
- [15] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报, 2004, 9(4):48-53.  
Li Y Y, Shao M A. Experimental study on characteristics of water transformation on slope land Slope [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 9(4):48-53.
- [16] 黄俊,金平伟,李敏,等.径流小区尺度土壤入渗率影响因素与估算模型研究[J].农业机械学报, 2016, 47(8): 171-178.  
Huang J, Jin P W, Li M, et al. Study on influencing factors and estimating model of soil infiltration rate at runoff small scale[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(8):171-178.
- [17] 陈洪松,邵明安,王克林.土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J].农业工程学报, 2006, 22(1):44-47.  
Chen H S, Shao M A, Wang K L. Effect of initial soil water content on rainfall infiltration and soil water redistribution on slope[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2006, 22(1):44-47.
- [18] 李焱秋,戴全厚,甘艺贤,等.喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应[J].水土保持学报, 2019, 33(5):28-33.  
Li Y Q, Dai Q H, Gan Y X, et al. Response of runoff to rainfall intensity and slope on bare slope land in karst [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5):28-33.
- [19] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学, 2020, 18(6):140-146.  
Liu R, Yu X X, Cai Q G, et al. Research progression the effect of slope length on slope erosion, transportation and deposition processes [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6):140-146.
- [20] 王秀颖,刘和平,刘宝元.变雨强人工降雨条件下坡长对径流的影响研究[J].水土保持学报, 2010, 24(6):1-5.  
Wang X Y, Liu H P, Liu B Y. Effect of slope length on runoff under artificial rainfall with variable rainfall intensity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6):1-5.
- [21] 丁琳,许海超,秦伟,等.不同坡面草被格局下的侵蚀产沙量及其连通性指数表征[J].农业工程学报, 2022, 38(9):119-128.  
Ding L, Xu H C, Qin W, et al. Erosion and sediment yield under different grass cover patterns and its characterization of connectivity index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9):119-128.
- [22] 李鹏,李占斌,郑良勇.植被保持水土有效性研究进展[J].水土保持研究, 2002, 9(1):76-80.  
Li P, Li Z B, Zheng L Y. Advances in researches of the effectiveness for vegetation conserving soil and water slope in western Shanxi Province [J]. Study on Soil and Water Conservation, 2002, 9(1):76-80.
- [23] 何淑勤,郑子成,吴发启,等.降雨对黄土区主要管理措施坡耕地水沙动态过程的影响[J].水土保持学报, 2010, 24(2):19-24.  
He S Q, Zheng Z C, Wu Q F, et al. Effect of rainfall on the dynamic process of water and sediment in slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(2):19-24.
- [24] 吴发启,范文波.土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J].中国水土保持科学, 2005, 3(2):97-101.  
Wu F Q, Fan W B. Effects of soil crust on rainfall infiltration and runoff and sediment yield [J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2005, 3(2):97-101.
- [25] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报, 2018, 34(17):143-150.  
Deng L Z, Zhang L P, Fan, et al. Characteristics of runoff and sediment yield under different rainfall intensities and slope gradients in erosive weathered granite area [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(17):143-150.
- [26] 卫喜国,严昌荣,魏永霞,等.坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J].灌溉排水学报, 2009, 28(4):114-116.  
Wei X G, Yan C C, Wei Y X, et al. Influence of slope gradient and rainfall intensity on the infiltration of slope farmland [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(4):114-116.