

试验研究

植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理

孙佳美¹, 侯沛轩², 逢育波³, 张祯尧⁴, 李瀚之⁵

(1.中国科学院 植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

2.河北省林业和草原工程项目中心, 河北 石家庄 050081; 3.呼伦贝尔市海拉尔区农牧局综合保障中心, 内蒙古 呼伦贝尔 021008; 4.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 5.中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 研究植被覆盖坡面土壤侵蚀发生的动力学机制, 为揭示华北土石山区植被覆盖坡面侵蚀机理提供理论支撑。[方法] 从坡面径流水动力学特性出发, 基于人工模拟降雨的方法, 定量研究油松、侧柏、栓皮栎和酸枣覆盖坡面径流水动力学过程和侵蚀过程的相互关系。[结果] 侧柏覆盖坡面的产流量最大, 平均总产流量为 56.85 L。而产沙量最高的则是栓皮栎覆盖坡面, 平均总产沙量高达 1 189.15 g。各植被覆盖坡面径流流速范围为 $0.803 \pm 0.213 \sim 4.276 \pm 0.430$ m/min。栓皮栎覆盖坡面径流流速最快, 平均流速为 2.930 m/min。4 种植物覆盖坡面径流雷诺数和弗劳德数范围分别为 7.271~62.630 和 0.177~0.900, 径流雷诺数与弗劳德数均随着降雨强度的增大而增大。[结论] 坡面植被覆被具有良好的减流减沙效果。植被覆盖坡面径流水动力学要素与产沙率密切相关, 是预测土壤侵蚀过程的重要因子。

关键词: 植被; 坡面; 土壤; 侵蚀水动力学机理

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0001-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 孙佳美, 侯沛轩, 逢育波, 等. 植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 1-7. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.001; Sun Jiamei, Hou Peixuan, Pang Yubo, et al. Hydrodynamic mechanism of soil erosion on vegetation covered slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 1-7.

Hydrodynamic Mechanism of Soil Erosion on Vegetation Covered Slopes

Sun Jiamei¹, Hou Peixuan², Pang Yubo³, Zhang Zhenyao⁴, Li Hanzhi⁵

(1. State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Forestry and Grassland Engineering Project Center of

Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050081, China; 3. Comprehensive Security Center of Agriculture and Animal Husbandry

Bureau of Hailar District, Hulunbuir, Inner Mongolia 021008, China; 4. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry

University, Beijing 100083, China; 5. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The dynamic mechanism of soil erosion on vegetation covered slope was studied in order to provide theoretical support for revealing the mechanism of vegetation covered slope erosion in earth rock mountainous areas of North China. [Methods] Based on the runoff dynamic characteristics of slope and the method of artificial rainfall simulation, the relationships between runoff hydrodynamic characteristics and erosion processes on vegetation covered slopes (*Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, *Quercus variabilis* and *Ziziphus jujuba*) were explored quantitatively. [Results] The *Platycladus orientalis* covered slopes had the greatest runoff yield amount with mean value of 56.85 L. The *Quercus variabilis* covered slopes had the greatest sediment yield amount with mean value of 1 189.15 g. Runoff velocities under all 4 kinds vegetation ranged from 0.803 ± 0.213 to 4.276 ± 0.430 m/min. Reynolds number and Froude number increased with the increase of rainfall intensity, and the values varied 7.127~63.630 and 0.177~0.900, respectively. [Conclusion] Vegetation cover on the slope has a good effect of reducing runoff and sediment. The dynamic factors of runoff on slope are closely related to the sediment yield, which is an important factor to predict the process of soil erosion.

Keywords: vegetation; slope; soil erosion; hydrodynamic mechanism

收稿日期: 2021-09-16

修回日期: 2021-11-03

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“天然草地坡面融雪侵蚀—植被退化阈值量化及作用机制研究”(42007051)

第一作者: 孙佳美(1990—), 女(汉族), 河北省张家口市人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态学方面的研究。Email: sunjiamei@ibcas.ac.cn。

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、冻融或重力等外营力作用下,被破坏、剥蚀、搬运和沉积的过程^[1-2],水力侵蚀是最常见的一种侵蚀方式,径流是水力侵蚀发生的主要动力,研究径流的水动力学特性对于揭示侵蚀机制有重要意义^[3]。国内外学者从 20 世纪 60 年代逐渐开始坡面径流水动力学特性的研究^[4],但是由于坡面径流特性受地形地貌、土壤特性、植被覆盖条件、降雨强度等多种因素影响,侵蚀形式极为复杂,加重了径流水动力学特性的研究难度,因此研究不同试验条件下坡面侵蚀过程非常必要。已发表的研究通过室内模拟降雨^[5]、天然降雨^[6]和放水冲刷^[7]试验对坡面径流水动力学特性进行了大量的研究,逐步由经验性分析走向动力学特征为主的机理研究^[8]。关于坡面径流水动力学特征方面的研究首先是集中于径流流态的判定,流态判定是评估径流侵蚀力的主要因子,这是由于相对于层流,紊态径流会对土壤表面产生更大的扰动,因此引起更强的土壤侵蚀^[9],而关于径流流态的研究说明径流不是简单的可以归类为层流或紊流,Horton^[10]研究说明坡面径流处于一种混合状态,紊流与层流共存,Emmett 等^[1]研究表明坡面径流为扰动流,具有紊流性质,也具有大部分层流性质,有别于明渠的层流、紊流和过渡流。国内专家姚文艺^[11]、张光辉等^[12]则将其视作“伪层流”。除了径流流态,径流的动力特征也是影响径流侵蚀力的重要因子,主要是针对径流剪切力、径流功率等径流动能的研究,最早的研究来自于 Horton^[10],分析了径流剪切力和坡面土壤侵蚀强度,Govers 和 Rauws^[13]研究了径流剪切力和水流功率对坡面径流输沙的影响,结果表明用水流剪切力和水流功率可以预测径流挟沙能力。除了对径流的动力研究,其阻力特性也是研究重点之一,主要是借助明渠水流阻力概念和对应的表达方法,包括 Darcy-Weisbach 阻力系数、Manning 糙率系数和 Chezy 系数等,其中 Darcy-Weisbach 阻力系数应用最为广泛,其值能够反映坡面径流在流动过程中受到的阻力大小,阻力系数越大,说明水流克服坡面阻力所消耗的能量就越大,则用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量就越小^[14]。坡度、坡面粗糙度均对径流阻力系数有影响^[11]。植被覆盖是一种重要的水土保持措施,具有显著的增加径流阻力、减缓并延滞径流流速的作用^[14],从而起到减弱坡面径流剪切力和功率的作用,降低土壤侵蚀程度。同时不同类型植被覆盖对径流的影响程度也不相同,会具有不同程度的水土保持作用。现有的关于植被覆盖坡面径流水动力学特性研究多研究均集中于黄土高原^[2,15],而褐土作为华北土

石山区主要土壤类型,研究褐土坡面侵蚀机理,尤其是不同植被类型覆盖条件下土壤侵蚀水动力学机理对于华北土石山区水土流失防治与植被恢复具有重要意义^[16]。因此,本文在已有研究基础上,采用人工模拟降雨的方法,对油松、侧柏、栓皮栎和酸枣覆盖坡面的产流和产沙过程进行了侵蚀过程水动力学特征研究,探究植被覆盖坡面土壤侵蚀的水动力学机理,以为揭示华北土石山区植被坡面侵蚀机理提供数据支撑。

1 试验地概况与试验装置

本文中的试验于 2018 年 6—10 月在北京林业大学鹫峰林场(40°04' N, 116°06' E)降雨大厅进行。区域多年平均温度为 9 °C,生长季节为每年的 5—10 月,多年平均降水量 600 mm,且 70%~80%的年降水均发生在 6—9 月。该区域的土壤条件特殊,土层瘠薄,厚度在 0.3~1 m 之间,平均土层厚度 0.5 m。土壤中含有较高的砾石含量,大于 2 mm 的砾石含量平均 13.9%,最高的砾石含量达到 30%^[17]。

试验采用了西安清远测控技术有限公司自主设计研发的 QYJY-503T 降雨控制设备,共包含 3 个部分,分别为坡面部分、降雨部分和控制部分。坡面部分长 2 m,宽 0.5 m,深 0.4 m,坡面底部有均匀分布的透水孔,用于坡面土壤水分入渗,坡面设计了坡度调节装置可以自由的设置坡度。该降雨装置采用全自动电脑控制系统,可以调节降雨位置和降雨强度。设备的降雨部分由水窖、水泵和导水管组成。水窖用来储存试验用水,保证在最大降雨强度仍有充足的水供给。水泵将水窖中的水输送到顶部经由降雨喷头进行模拟降雨。降雨喷头高度为 12 m,能够保证雨滴达到雨滴终速,更好地模拟实际降雨。经过实际的降雨均匀度校准,该降雨设备的降雨均匀度大于 85%。在试验操作过程中,在坡面周边布设一定数量的雨量筒,对降雨进行实际监测与校正,确保实际降雨强度满足试验要求。

2 试验方法与数据分析

2.1 试验设置与方法

研究土壤选取华北土石山区常见土壤褐土,该土壤通常呈褐色,其颜色也会随着土层深度而逐渐变浅。土壤来自试验区域的自然土壤,试验前过筛去除土壤中的杂物,然后自然风干到大约 10%的含水量进行填土。自然状态下该区域的容重约为 1.3~1.4 g/cm³,填土时按照 1.34 g/cm³ 的土壤容重进行计算分层填装,每层 10 cm。在填装下 1 层前,将前

1 层土壤打毛,确保土壤接触良好,不会发生土壤滑动现象。土壤填装完成后,将土壤坡面放置 3~6 个月,促进土壤自然沉降,更好地模拟自然状态。

试验中的植物苗木来自区域中的油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)和酸枣(*Ziziphus jujube*)自然幼苗,选取长势良好并相近的苗木移栽到室内土壤坡面上。在移栽苗木的同时,收集苗木生长环境的原状枯落物,均匀的铺设到土壤坡面表面。各个植被类型的平均生长状况详见表 1。表中的叶面积指数(LAI)采用 LAI-2200 植被盖度分析仪(LI-COR 生物科学,林肯郡,内华达州,美国)。试验中设置 3 个降雨强度,分别为 30,60 和 90 mm/h。设置空白坡面进行对照。在每次试验结束后,将土壤坡面放置 1 个月,使其土壤表面恢复后进行下一次试验。

每场降雨历时从径流开始计时 60 min。降雨全程收集坡面产生的径流和泥沙样品,在降雨初期的 10 min,由于径流变化较大,因此每 2 min 收集一次径流样品,收集 2 min 内坡面产生的所有径流样品。随后的 50 min,径流相对稳定,每 5 min 收集 1 次径流样品,收集 5 min 内的所有径流样品。降雨结束后,使用量筒测量各径流样品的体积,随后,将径流样品放置到烘箱,105 °C 恒温烘干 24 h 后得到产沙量干重。径流流速采用染色剂示踪法进行测量,使用高锰酸钾作为染色剂,记录染色剂流经 1 m 距离所需时间,从而得出径流流速。径流流速每 5 min 测量 1 次,每次在 5 个平行的位置分别测量,以其平均值作为径流表层流速。

表 1 试验坡面植被生长状况

| 坡面覆被类型 | 基径/cm | 树高/m | 冠幅/m | 叶面积指数(LAI) |
|--------|-----------|-----------|---------|------------|
| 油松 | 1.65±0.05 | 1.99±0.05 | 0.9×1.2 | 0.67±0.03 |
| 侧柏 | 1.48±0.03 | 1.93±0.05 | 1.1×1.3 | 0.65±0.03 |
| 栓皮栎 | 1.42±0.02 | 1.88±0.03 | 1.5×1.4 | 1.23±0.05 |
| 酸枣 | 1.35±0.02 | 2.05±0.04 | 1.4×1.3 | 0.70±0.03 |

2.2 数据分析

径流平均流速计算公式^[18]为:

$$V = kV_m \quad (1)$$

式中: V_m 为平均径流速度(cm/s); V 为径流表层速度(cm/s); k 为修正系数,当流态为层流时, $k=0.67$,当流态为过渡流时, $k=0.7$,当流态为紊流时, $k=0.8$ ^[18]。

径流深计算公式^[19]为:

$$h = \frac{Q}{uBt} \quad (2)$$

式中: h 为平均水深(mm); Q 是 t 时间的径流量(m^3); u 是径流平均流速(m/s); B 是过水断面宽度(m); t 是采样时间(s)。

径流雷诺数和弗劳德数计算公式^[14,20]为:

$$Re = \frac{VR}{\nu} \quad (3)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4)$$

式中: ν 为水运动黏滞力系数(m^2/s), $\nu=0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2)$, t 为水温(°C); R 为水力半径(m); h 为径流深度(m)。

Darcy-Weisbach 阻力系数计算公式^[20]为:

$$f = \frac{8gRJ}{V^2} \quad (5)$$

式中: J 为水力坡度(m/m); V 为径流速度(m/s); R 为水力半径(m)。

径流剪切力计算公式^[20]为:

$$\tau = \gamma RJ \quad (6)$$

式中: τ 为径流剪切力(Pa); γ 为水流重度(N/m)。

径流功率计算公式^[20]为:

$$\omega = \tau V \quad (7)$$

式中: ω 为径流功率[N/(m·s)]。

单位径流功率计算公式^[20]为:

$$P = \frac{dy}{dx} = \frac{dx}{dt} \times \frac{dy}{dx} = JV \quad (8)$$

式中: J 为水力坡度(m/m); P 为径流功率(m/s)。

2.3 数据统计分析

本研究中所有统计均在 SPSS 17.0 软件(芝加哥,伊利诺伊州,美国)环境中进行分析。研究结果列出的数据为平均值以及其标准差。降雨强度、植被类型等试验条件对试验结果的显著性分析采用 ANOVA 方差分析,置信区间在 95% 水平。

3 结果与讨论

3.1 植被对坡面产流与产沙量的影响

各试验植被坡面在不同降雨条件下坡面总产流量和总产沙量结果见下详见表 2。由表 2 的结果对比可以看出,降雨强度对坡面总产流量和产沙量有显著影响,随着降雨强度的增大,坡面的总产流量和总产沙量均有显著的增加(单向方差分析,显著性水平为 0.05)。植被类型对坡面总产流量和总产沙量也有显著的影响(单项方差分析,显著性水平为 0.05),同时双向方差分析显示两个因素对总产流和产沙量具有交互作用,在两个因素的共同作用下,总产沙量在降雨强度为 90 mm/h 条件下,栓皮栎坡面最高达到

2 591.87±14.19 g。本研究中的 6 个植被类型中,侧柏坡面的产流量最大,随着降雨强度从 30 增大到 90 mm/h,其坡面总产流量从 17.12 L 增大到 97.10 L,平均总产流量为 56.85 L。而产沙量最高的则是栓皮栎坡面,平均产沙量高达 1 189.15 g,随着降雨强度从 30 增大到 90 mm/h,其总产沙量从 208.48 g 增大到 2 591.87 g。

3.2 植被坡面土壤侵蚀的水动力学机制

各植被覆盖坡面的水动力学特性因子详见表 3。由表 3 可知,植被类型和降雨强度均是影响坡面径流流速的重要因子(双向方差分析,显著性水平为 0.05)。各植被覆盖坡面径流流速范围在 0.803±0.213 至 4.276±0.430,同时随着降雨强度的增大,覆盖坡面的径流流速显著增大,降雨强度对各植被覆盖坡面的径流流速影响显著(单向方差分析,显著性水平为 0.05)。4 种覆盖类型中,栓皮栎覆盖坡面径流流速最快,平均流速为 2.930 m/min,流速最慢的为酸枣覆盖坡面,平均流速为 1.516 m/min。植被覆盖坡面径流雷诺数和弗劳德数范围分别为 7.271~62.630,0.177~0.900,径流雷诺数与弗劳德数均随着降雨强度的增大而增大。植被覆盖坡面径流阻力系数随降雨强度的增大而减小,范围为 2.858 至 73.418,随降雨强度的增大而减小,这是因为降雨强度增大了坡面径流流速,增大了水深,使阻力系数显著减小^[12]。坡

面径流剪切力在各植被影响下范围为 0.829~3.394,径流功率范围为 0.017~0.131,单位径流功率范围为 0.005~0.019,均随着降雨强度的增大而增大。

表 2 植被覆盖坡面总产流量和总产沙量

| 植被类型 | 降雨强度/(mm·h ⁻¹) | 总产流量/L | 总产沙量/g |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 油松 | 30 | 11.78±1.81 ^{aA} | 110.43±11.40 ^{aB} |
| | 60 | 45.02±3.35 ^{bA} | 637.27±9.59 ^{bC} |
| | 90 | 92.38±5.28 ^{cB} | 2 069.10±13.94 ^{cC} |
| 侧柏 | 30 | 17.12±1.52 ^{aC} | 86.18±9.60 ^{aA} |
| | 60 | 56.32±2.58 ^{bB} | 406.33±10.15 ^{bB} |
| | 90 | 97.10±4.37 ^{cB} | 1 277.41±25.74 ^{cA} |
| 栓皮栎 | 30 | 14.72±2.71 ^{aB} | 208.49±7.93 ^{aC} |
| | 60 | 43.85±3.84 ^{bA} | 767.10±15.64 ^{bD} |
| | 90 | 81.81±4.05 ^{cA} | 2 591.87±14.19 ^{cF} |
| 酸枣 | 30 | 14.39±3.36 ^{aB} | 83.88±5.78 ^{aA} |
| | 60 | 46.55±1.65 ^{bA} | 336.91±4.60 ^{bA} |
| | 90 | 94.02±3.11 ^{cB} | 1 606.34±12.14 ^{cB} |
| 双向方差分析 ρ 值 | 降雨强度 | 899.22 ^{***} | 6.10 ^{***} |
| | 植被类型 | 6.75 ^{***} | 22.67 ^{***} |
| | 降雨强度×植被类型 | 9.10 ^{***} | 2.40 ^{**} |

注:不同降雨强度条件下坡面的产流量和产沙量显著性分析使用小写字母(a,b,c)表示,相同降雨条件下不同植被类型产流量和产沙量显著性分析使用大写字母(A,B,C,D)表示(显著性水平为 $p < 0.05$);最后 3 行为降雨强度和植被类型两个因素交互对总产流量和总产沙量的双向方差分析结果(*表示 $p \leq 0.05$,**表示 $p \leq 0.01$,***表示 $p \leq 0.001$)。下同

表 3 植被覆盖坡面径流水动力学特征

| 植被类型 | 降雨强度/(mm·h ⁻¹) | 流速/(m·min ⁻¹) | 雷诺数 | 弗劳德数 | 阻力系数 | 径流剪切力/(N·m ⁻²) | 径流功率/[N/(m·s)] | 单位径流功率/(m·s ⁻¹) |
|-----------------|----------------------------|---------------------------|--------|-------|--------|----------------------------|----------------|-----------------------------|
| 油松 | 30 | 1.209±0.415 ^a | 7.271 | 0.363 | 20.975 | 0.829 | 0.017 | 0.006 |
| | 60 | 2.674±0.714 ^b | 27.789 | 0.605 | 7.635 | 1.429 | 0.066 | 0.013 |
| | 90 | 3.638±0.362 ^{bc} | 57.227 | 0.665 | 5.221 | 2.135 | 0.127 | 0.016 |
| 侧柏 | 30 | 1.033±0.204 ^a | 10.568 | 0.240 | 40.780 | 1.454 | 0.026 | 0.005 |
| | 60 | 2.363±0.424 ^b | 34.766 | 0.450 | 11.097 | 1.974 | 0.079 | 0.011 |
| | 90 | 3.231±0.545 ^{bc} | 62.630 | 0.536 | 8.070 | 2.493 | 0.131 | 0.014 |
| 栓皮栎 | 30 | 1.463±0.514 ^a | 9.084 | 0.435 | 17.114 | 0.862 | 0.022 | 0.007 |
| | 60 | 3.050±0.513 ^b | 27.070 | 0.743 | 4.083 | 1.224 | 0.064 | 0.014 |
| | 90 | 4.276±0.430 ^c | 50.692 | 0.900 | 2.858 | 1.606 | 0.112 | 0.019 |
| 酸枣 | 30 | 0.803±0.213 ^a | 8.885 | 0.177 | 73.418 | 1.496 | 0.021 | 0.004 |
| | 60 | 1.513±0.371 ^b | 28.736 | 0.256 | 41.675 | 2.582 | 0.065 | 0.007 |
| | 90 | 2.231±0.256 ^c | 58.572 | 0.336 | 20.404 | 3.394 | 0.129 | 0.010 |
| 双向方差分析 ρ 值 | 降雨强度 | 13.00 ^{***} | | | | | | |
| | 植被类型 | 98.44 ^{***} | | | | | | |
| | 降雨强度×植被类型 | 2.12 [*] | | | | | | |

3.2.1 坡面径流剪切力对土壤侵蚀的影响 坡面土壤侵蚀是土壤颗粒在径流剪切力以及土壤颗粒本身的重力共同作用下发生位移,沿着坡面运移的过程,

径流剪切力能够打破土壤颗粒之间的黏结力,分离土壤颗粒从而为土壤侵蚀提供物质来源^[17]。因此径流剪切力越大时,能剥离更多的土壤颗粒,从而增大侵

蚀程度。径流剪切力与土壤侵蚀产沙有显著的相关关系,因此本研究对径流剪切力与坡面产沙率进行了相关分析,结果显示坡面径流剪切力与产沙率呈现良好的线性相关关系,结果如图 1 所示。在相关方程

中,当剪切力太小时,土壤颗粒的黏结程度较强,土壤结构不易受破坏,不发生土壤颗粒运移,当径流剪切力增大后,径流剪切力大于其本身结构黏结强度,能够发生土壤侵蚀。

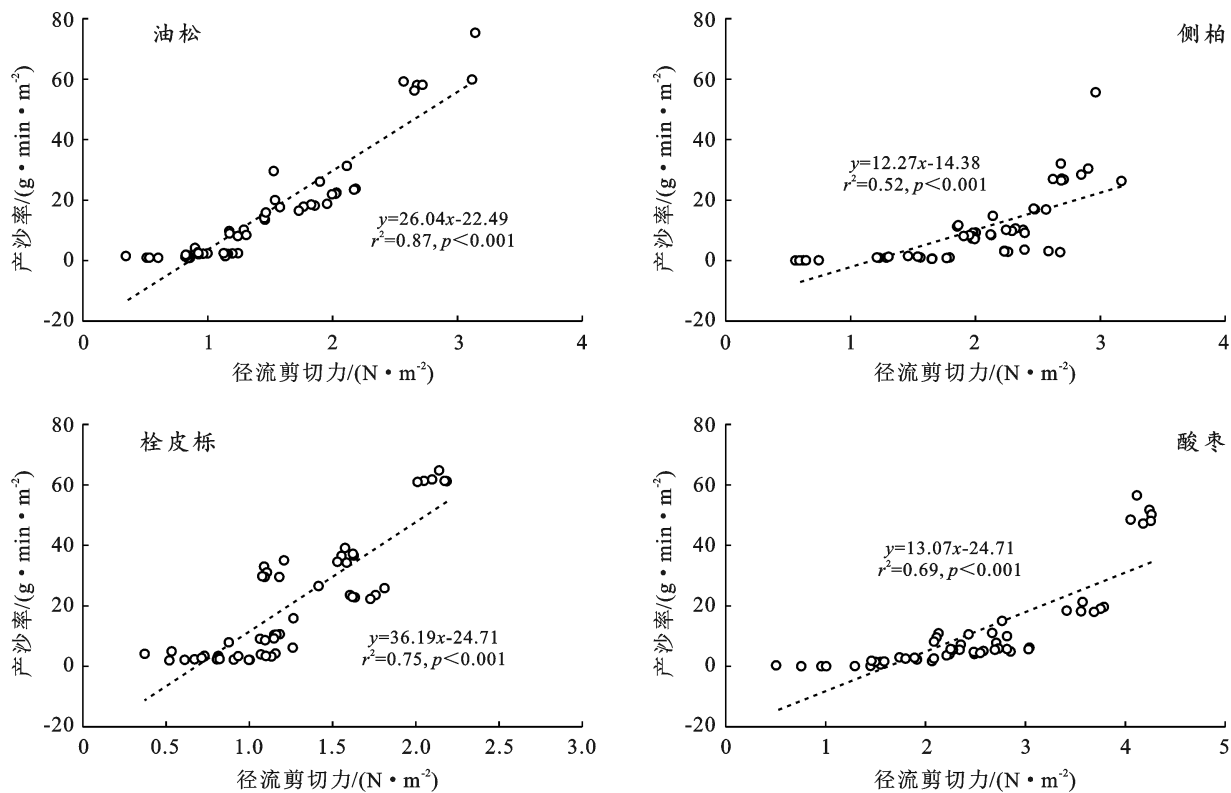


图 1 不同试验条件下植被覆盖坡面径流剪切力与产沙率的相关关系

3.2.2 径流功率对土壤侵蚀的影响 径流作用于土壤颗粒发生运移的过程也是径流耗能的过程,因此引入径流功率来评价径流对土壤颗粒的搬运能力^[2]。径流功率越大,则其所蕴含的势能越大,则其能够侵蚀更多的土壤。因此本研究对各植被坡面产沙率与径流功率的相关性进行了研究,相关结果如图 2 所示,由图 2 可以看出,坡面径流功率与产沙率呈现较好的线性相关关系。

3.3 讨论

土壤侵蚀的物理原理为径流搬运泥沙的耗能做功过程,因此径流所蕴含的能量对土壤团粒分散、泥沙颗粒输移有物理作用^[21],因此径流功率是评估侵蚀量的重要因素,径流功率可以作为描述径流做功快慢的物理量,因此其值与径流对土壤颗粒的作用密切相关^[22]。

在功率理论上, Yang^[21] 提出了单位水流功率计算公式,其定义为流速与坡降的乘积,即在长度为 x ,总落差为 y 的明渠上,单位重量的水体具备的

用于输送水和泥沙的能量率。该公式量纲简单,计算简便,能够描述径流的功率特性,但是单位径流功率理论在土壤侵蚀研究中的应用实践不足, Moor 和 Burch^[23] 在 1986 年首次采用单位径流功率来计算侵蚀率;崔文滨等^[24] 阐述了径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用;肖培青等^[8] 使用单位径流功率预测苜蓿草地的产沙率,其结果均证明单位径流功率与径流功率能够很好地预测产沙率。植被的存在能够减缓径流流速,降低径流功率,引起径流输移泥沙和径流剪切土壤的能力下降^[25]。在实际应用中,由于剪切力的计算过程反映的为剪切力在坡面的平均分布状况,但是实际侵蚀过程并非均匀分布在坡面,植被以及坡面粗糙程度均会造成径流的水深不一,因此径流深的点剪切力较大,使剪切力呈点状分布^[26]。而径流功率理论能够消除这一误差,其描述的为径流的初始与终结状态的坡面距离,通过计算坡面径流在坡面顶端和坡面底端的能量差值,从而得到由于侵蚀而消耗的能量^[22]。

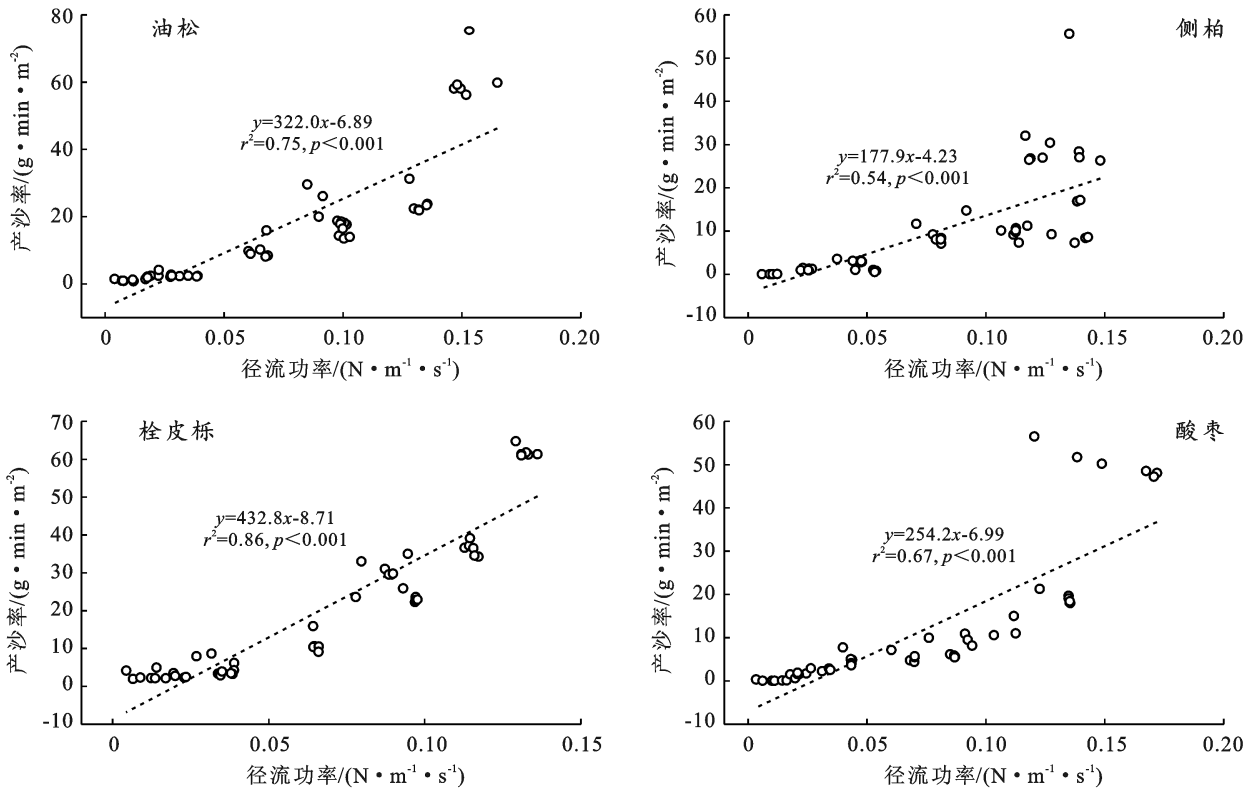


图 2 不同试验条件下植被覆盖坡面径流功率与产沙率相关关系

坡面侵蚀与径流形态密切相关,径流冲刷会引起坡面形态改变,反之形态变化会影响径流形态以及侵蚀程度,因此二者相互影响,密不可分。描述坡面径流水动力学特性的要素主要有:雷诺数、弗劳德数、阻力系数、径流功率、径流深等,这些要素是描述径流特性的重要因素,也是深入了解坡面侵蚀过程以及侵蚀规律的重要途径。本研究采用弗劳德数作为流态表征因子,来探究径流功率与径流流态的相互关系,径流功率的增大会引起径流流态逐渐由层流过渡到紊流,这是由于坡面径流在从坡上向坡下流动过程中,其做功主体势能逐渐转变为径流动能,因此流速会逐渐增大^[27],同时坡面的粗糙特性也会作用于径流,增大径流流体内部紊动程度,从而改变径流流态^[25]。侵蚀过程中,土壤表面颗粒的表土团聚体的崩解、分散等水土间相互作用,改变了土壤表面结构,也会加深坡面粗糙程度,从而加深径流流态的变化^[28]。

本研究中植被覆盖坡面随着径流雷诺数的增大,坡面径流的阻力系数逐渐减小。径流阻力系数与径流雷诺数的相关关系较为复杂,已发表研究中二者的关系多样,不同坡度等试验条件均会影响二者的相互关系。郑良勇等^[29]研究表明阻力系数与雷诺数呈现指数相关关系,其结果也说明坡度是影响相互关系的主要原因,当坡度在 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时,二者存在正相关关系,与郑良勇等研究结果相似,而坡度减小后,二者则

呈负相关关系,本研究的坡度为 10° ,二者为负相关对数关系,与张科利^[4]的研究结果相似。以上研究结果显示,径流阻力系数与雷诺数关系复杂,尚无定论,既有可能是正相关,也有可能是负相关关系。雷诺数与阻力系数的相关关系存在临界坡度,在缓坡下二者呈负相关,陡坡下呈正相关,临界值约在 $10^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 间。除了坡度影响外,二者关系也受土壤粒径组成和结构影响,这是由于随着雷诺数的增大,径流会在坡面底部土壤颗粒的作用形成较小的漩涡,从而减小土壤颗粒的阻滞力。

4 结论

本研究通过人工模拟降雨的试验方法,模拟了油松、侧柏、栓皮栎、酸枣 4 种植被覆盖坡面的侵蚀过程以及径流的水动力学特性。4 种植被覆盖坡面均能有效地减少径流的产生,减弱径流的输沙能力,从而减少坡面土壤侵蚀量,发挥良好的水土保持作用。侧柏坡面的产流量最大,平均总产流量为 56.85 L。而产沙量最高的则是栓皮栎坡面,平均产沙量高达 1 189.15 g。各植被覆盖坡面径流流速范围在 0.803 ± 0.213 至 4.276 ± 0.430 ,栓皮栎覆盖坡面径流流速最快,平均流速为 2.930 m/min,流速最慢的为酸枣覆盖坡面,平均流速为 1.516 m/min。植被覆盖坡面径流雷诺数和弗劳德数范围分别为 7.271~62.630,

0.177~0.900,径流雷诺数与弗劳德数均随着降雨强度的增大而增大。坡面径流剪切力在各植被影响下范围为0.829~3.394,径流功率范围为0.017~0.131,均随着降雨强度的增大而增大。研究结果对植被覆盖坡面径流水动力学的探究和土壤侵蚀过程模型的建立具有重要的理论和实践意义。

[参 考 文 献]

- [1] Emmett W W. The Hydraulics of Overland Flow on Hillslopes [M]. U S: Geological Professional Paper, 1970.
- [2] 张光辉.对坡面径流挟沙力研究的几点认识[J].水科学进展,2018,143(2):4-11.
- [3] 贾宝真,钟德钰,张科利.基于动理学理论的坡面水流土壤分离能力研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(3):591-605.
- [4] 张科利.黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J].泥沙研究,1991(4):39-46.
- [5] 肖培青,姚文艺,李莉,等.植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J].泥沙研究,2013(3):1-5.
- [6] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].农业工程学报,2017,33(13):159-167.
- [7] 杨兴,张家喜,彭培好,等.模拟降雨条件下不同砾石含量工程边坡土壤侵蚀及水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(6):9-15.
- [8] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2):232-237.
- [9] 张光辉.对土壤侵蚀研究的几点思考[J].水土保持学报,2020,34(4):21-30.
- [10] Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1945,56(3):275-370.
- [11] 姚文艺.坡面流流速计算的研究[J].中国水土保持,1993(3):21-25.
- [12] 张光辉.国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J].水土保持学报,2000,14(3):112-115.
- [13] Govers G, Rauwas G. Transporting capacity of overland flow on plane and irregular beds [J]. Earth Surface Pro-Cess and Landform, 1986,11(5):515-524.
- [14] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被减流减沙效应及其水力学机制分析[J].中国水土保持科学,2010,8(2):15-19.
- [15] 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.
- [16] 张光辉.植被恢复背景下土壤侵蚀研究需要加强的内容[J].中国水土保持,2020(9):76-79.
- [17] 符素华,路炳军,叶芝茜.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18,34.
- [18] An Juan, Zheng Fenli, Lu Jia, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions [J]. Soil Science, 2012,177(8):517-526.
- [19] 吴淑芳,吴普特,原立峰.坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J].农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [20] 戎玉博,王森,白玉洁,等.含砾石锥状工程堆积体侵蚀水动力学特性和细沟形态特征[J].水土保持学报,2018,32(2):134-141.
- [21] 杨志达.泥沙输送理论与实践[M].李文学,姜乃迁,张翠萍译.北京:中国水利水电出版社,2000.
- [22] 赵春红,高建恩,王飞,等.阻力形式对坡面流流速修正系数的影响[J].农业机械学报,2013,44(10):130-135,46.
- [23] Moor L P, Burch G L. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory [J]. Water Resources Research, 1986,22(8):1350-1360.
- [24] 崔文滨,李鹏,李占斌,等.径流功率理论在黄土坡面侵蚀产沙计算中的应用[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005,33(9):103-107.
- [25] 王军光,李朝霞,蔡崇法,等.坡面流水力学参数对团聚体剥蚀程度的定量影响[J].水科学进展,2012,23(4):502-508.
- [26] 李鹏,李占斌,郑良勇,等.坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J].水土保持学报,2005,19(3):66-69.
- [27] 田凯,李小青,申震洲,等.不同床沙下的坡面水力学特性试验研究[J].水土保持学报,2010,24(2):70-73.
- [28] 杨春霞,姚文艺,等.坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J].中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.
- [29] 郑良勇,李占斌,李鹏.黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究[J].水利学报,2004,35(5):46-51.