

不同雨强和坡度下新安江流域典型土壤坡面的产流产沙特征

宋 珍^{1,2}, 孙泽龙^{1,2}, 任继军^{1,2}, 岳忠帅^{1,2}, 袁 威^{1,2}

(1.中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心,
湖南长沙 410600; 2.黄山水土资源野外科学观测研究站, 安徽黄山 245000)

摘 要: [目的] 评估新安江流域坡面水土流失规律, 为区域水土流失治理和区域生态可持续发展提供科学支撑。[方法] 采用人工模拟降雨试验, 系统分析了该流域内黄壤和红壤在不同降雨强度和坡度组合下的产流产沙过程及两者间的差异性侵蚀特征, 并构建水动力学参数与产沙强度的定量关系模型。[结果] ① 黄壤和红壤坡面的径流速率和产沙速率均表现为降雨初期呈现陡坡式增加, 之后逐渐趋于稳定的变化规律, 且二者随着降雨强度和坡度的增大而增加。其中, 红壤坡面产流产沙能力高于黄壤, 尤其是在 60 mm/h 雨强下差异更加显著。② 降雨强度与坡度协同加剧水沙侵蚀, 其中降雨强度主导红壤坡面径流及泥沙输移过程; 当坡度达 15° 且降雨强度升至 60 mm/h 时, 坡度对黄壤坡面泥沙流失的贡献增加至 59.06%。③ 2 种土壤坡面产流与产沙呈高度相关性, 黄壤坡面水沙关系普遍符合 $Y=a/[1+\exp^{-b(X-c)}]$, 具有非线性函数特征, 而红壤因结构性差导致快速饱和, 产沙与产流在 60 mm/h 雨强下呈现同步指数增长特征, 函数关系为 $Y=a+bX$ 。④ 坡面水力学参数中, 平均流速 (V) 可有效预测黄壤产沙趋势 ($R^2=0.52$), 而弗劳德数 (F_r) 更适用于红壤产沙动态 ($R^2=0.44$)。[结论] 黄壤区需注重坡度管理, 遏制土壤侵蚀加剧。

关键词: 水土流失; 产流产沙; 雨强; 坡度; 水力学参数; 新安江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0065-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 宋珍, 孙泽龙, 任继军, 等. 不同雨强和坡度下新安江流域典型土壤坡面的产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 65-75. Song Zhen, Sun Zelong, Ren Jijun, et al. Runoff and sediment yield characteristics of typical soil slopes in Xin'an River basin under different rainfall intensities and slope gradients [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 65-75.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.007

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.007

Runoff and sediment yield characteristics of typical soil slopes in Xin'an River basin under different rainfall intensities and slope gradients

Song Zhen^{1,2}, Sun Zelong^{1,2}, Ren Jijun^{1,2}, Yue Zhongshuai^{1,2}, Yuan Wei^{1,2}

(1.Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha, Hunan 410600, China; 2.Huangshan Observation and Research Station for Land-Water Resources, Huangshan, Anhui 245000, China)

Abstract: [Objective] The patterns of soil erosion on slopes in the Xin'an River basin were evaluated in order to provide scientific support for regional soil erosion control and sustainable ecological development. [Methods] Through artificial rainfall simulation experiments, the runoff and sediment yield processes, and their differential erosion characteristics were systematically analyzed under different combinations of rainfall intensity and slope gradient for yellow soil and red soil in the river basin, and a quantitative relationship model between hydrodynamic parameters and sediment yield intensity was established. [Results] ① The runoff rate and sediment yield rate on the slopes of both yellow soil and red soil exhibited a steep initial increase during rainfall onset, followed by gradual stabilization, with both increasing with higher rainfall intensity and slope gradient. Red soil slopes demonstrated higher runoff and sediment yield capacity than yellow soil slopes, particularly under a rainfall

收稿日期: 2025-08-17

修回日期: 2025-11-05

采用日期: 2025-11-06

资助项目: 中国地质调查局项目“江南丘陵区自然资源与地表基质观测监测评价”(DD20230515)

第一作者: 宋珍(1997—), 女(汉族), 江西省吉安市人, 助理工程师, 硕士, 主要从事水生态方面的研究。Email: songzhen79@163.com。

通信作者: 袁威(1989—), 男(汉族), 湖南省岳阳市人, 工程师, 硕士, 主要从事地质矿产勘查和自然资源观测方面的研究。Email: 353793402@qq.com。

intensity of 60 mm/h. ② Rainfall intensity and slope gradient synergistically exacerbated runoff and sediment erosion, with rainfall intensity dominating the runoff and sediment transport processes on red soil slopes. When the slope gradient reached 15° and rainfall intensity increased to 60 mm/h, the contribution of slope to sediment loss on yellow soil slopes increased to 59.06%. ③ A high correlation was observed between runoff and sediment yield on both soil types. Yellow soil slopes generally exhibited a nonlinear relationship characterized by $Y=a/[1+\exp(-b^{-(X-c)})]$. In contrast, due to rapid saturation caused by poor structure, red soil slopes showed synchronous linear growth between sediment yield and runoff yield under a rainfall intensity of 60 mm/h, described by the function $Y=a+bX$. ④ Among the slope hydraulic parameters, average velocity (V) could effectively predict the sediment yield trend of yellow soil ($R^2=0.52$), while the Froude number (F_r) was more suitable for predicting the sediment yield dynamics of red soil ($R^2=0.44$). [Conclusion] This study clarifies the coupling mechanisms of rainfall intensity and slope gradient in soil slope erosion within the Xin'an River basin. It is recommended that rainfall intensity regulation should be strengthened in red soil areas, while slope management should be emphasized in yellow soil areas to curb the exacerbation of soil erosion.

Keywords: soil erosion; runoff and sediment yield; rainfall intensity; slope gradient; hydraulic parameters; Xin'an River basin

水土流失作为全球性生态环境问题,正在加速全球土地退化并降低与土壤相关的生态服务^[1-2]。新安江流域作为长江三角地区的核心生态屏障和国家级水源涵养重点生态功能区,其水土保持和流域管理直接关系到区域生态平衡和水资源的可持续利用效能^[3]。根据水利部太湖流域管理局2023年《太湖流域片水土保持公报》数据显示,新安江流域的水土流失面积2 287.12 km²,占总流域总面积的12.89%,这一比例虽较历史峰值显著下降。但不可否认的是,水土流失依然是制约该流域生态环境质量提升的关键因素^[4]。以红壤和黄壤为主的土壤类型广泛分布于该流域内山地丘陵区,在强降雨击溅作用和复杂地形条件的驱动影响下,不同土壤类型表现出差异性的侵蚀特征,导致流域长期面临高强度水土流失威胁,引发土地退化、水库淤积及水质恶化等连锁生态风险^[5]。鉴于此,深入解析土壤坡面水土流失的演变规律,无疑是破解该流域水土流失治理难题的重要科学基础与关键技术支撑。

现有研究表明,坡面水土流失与降雨过程和下垫面特征密切相关^[6-7]。国内外学者通过大量野外观测和室内模拟试验揭示了坡度、降雨、植被覆盖以及土壤类型等自然因素对坡面水土侵蚀过程的影响规律。其中,降雨作为驱动坡面水土流失的关键动力因子,其强度直接决定着土壤颗粒的剥离速率及泥沙输移效率,对华南地区红壤侵蚀特征研究表明,当降雨强度增加时,不仅坡面汇流量和土壤侵蚀量表现出同步增长特征,且两者间存在显著线性相关关系^[8]。坡度增加可通过增强径流动能提升输沙能力^[9],在相同降雨强度下,坡面径流量和侵蚀量均随

坡度的增加而增加^[10]。土壤类型通过调节入渗与抗侵蚀能力深刻影响水土流失过程^[11],如郭新付等^[12]研究了红壤、棕壤和褐土3种土壤坡面的泥沙流失特征,结果表明流失泥沙与被侵蚀土壤的质地组成密切相关,红壤坡面的产流排水率及径流泥沙浓度显著高于棕壤与褐土坡面。坡面水力学等参数作为表征坡面流体力学特性的重要指标,与坡面土壤侵蚀过程紧密相关,是解析坡面侵蚀演化规律的关键。目前针对新安江流域特有的土壤-地形-气候组合条件的径流和泥沙输移规律,以及径流泥沙响应机制,尚缺乏明确的认识和深入的研究。

本研究通过人工降雨模拟与径流小区试验,探究新安江上游流域黄壤和红壤2种典型土壤类型在不同降雨强度和坡度组合下水土流失规律,定量分析和预测该流域坡面产流产沙之间的关系,从而为新安江上游区域水土保持规划和土壤侵蚀提供理论依据和参考,助力改善当地农业生产条件,推动区域生态环境的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区设在黄山市内的黄山水土资源野外科学观测研究站(118°17'E, 29°41'N)(图1),地处皖浙交界的新安江发源地,属于新安江上游核心水源涵养区。试验区属亚热带湿润季风气候,四季分明,年均气温15.5~16.4℃,年降水量1 395~1 702 mm,多集中于5—8月。区域内地形起伏显著,坡度10°~35°,以山地和丘陵地貌为主。成土母质发育形成的黄壤与红壤构成主要土壤类型,前者主要分布于低山区,

土层较厚,肥力和透水性较好;后者多分布于丘陵地带,土壤肥力较差,质地黏重。土壤侵蚀过程呈现风力侵蚀与水力侵蚀并存的特征。

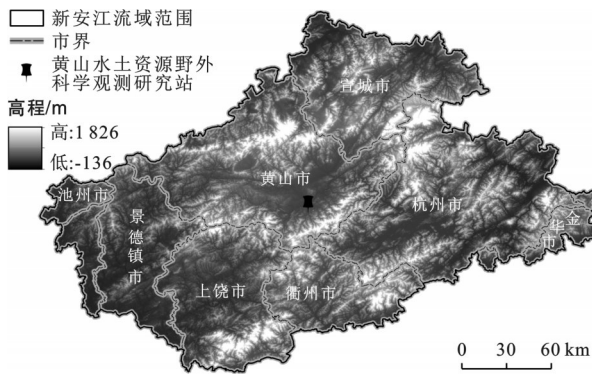


图1 新安江流域地形及研究区地理位置
Fig.1 Topography of Xinanjiang basin and geographic location of study area

1.2 试验设计与方法

1.2.1 径流小区布设

试验在黄山水土资源野外科学观测研究站的4个标准化径流小区中进行。各径流小区采用四面围合式截水墙设计,可精准阻断侧向径流交互,保障观测数据的独立性与可靠性。每个径流小区规格为10 m(长)×5 m(宽)×1.5 m(深),水平投影面积为50 m²。每个径流小区底端配备集水槽与径流泥沙自动监测装置,实现产流产沙过程的连续记录。考虑到新安江流域广泛分布的低山丘陵地形及农业坡耕地普遍小于20°的实际,本研究针对性设置了10°与15°2组坡度,每组坡度下分别填装流域典型土壤(黄壤与红壤)。试验采用旋转下喷式人工降雨装置模拟自然降雨,降雨装置由控制器、仪表、泵、水管、支架和降雨喷头以及其他部件组成,降雨高度为土壤表层2 m,降雨均匀性大于80%。

1.2.2 试验小区土壤和植被

供试土壤于2022年取自黄山市郊区具有代表性的休闲坡耕地(坡中下部)。为了保证填土过程土壤密度与野外采样时的测量值一致,填土时根据野外土壤实际情况采取上下层顺序进行分层填装,边填边压实,每层填土填完表面都进行浇水和刮毛打平处理,以确保不同土层间更好地胶结,最大限度还原原生土壤剖面的层次结构。土壤填装完成后,土壤坡面经2 a自然沉降后状态趋于稳定,基本复原野外真实条件。经测定,现场黄壤与红壤的容重分别为1.49 g/cm³和1.54 g/cm³。黄壤中黏粒、粉粒、砂粒占比分别为36.2%,37.9%和25.9%,红壤相应比例为42.7%,41.9%和15.4%。有机质含量方面,黄壤和

红壤分别为20.34 g/kg和15.13 g/kg。为了真实模拟新安江流域常见的经济林地覆盖的自然情景,各小区统一栽植山茶树并进行标准化修剪,控制冠层投影盖度为10%~15%,使得坡面大部分面积能够直接暴露于降雨下,承接完整的雨滴击溅动能。

1.2.3 试验设计

基于黄山市气象资料与实地降雨特征,本研究设置20,40,60 mm/h 3个等级的降雨强度。从2024年7月开始进行人工降雨模拟试验,每种雨强设置3组平行试验,试验设计降雨36场,所有试验均在稳定晴朗天气下进行。每次降雨前在土壤表面覆盖塑料薄膜后再进行降雨强度率定,单场降雨时间设置为90 min。降雨结束后,让径流小区静置48 h左右使土壤自然沉降,通过自然干燥或者预降雨的方式调控土壤初始含水量,保证各场次正式降雨前土壤坡面初始含水量相对一致(测定的土壤含水量为10%~15%),然后再进行下一场降雨。静置期间每日观察地表结皮与裂隙发育情况,必要时采用齿耙轻柔破除板结层并抹平侵蚀痕迹,最大限度减少对土壤结构的扰动。降雨过程中全程连续采集径流样品,每2 min采用高锰酸钾法测定流速。待坡面径流趋于稳定状态后,使用钢尺沿坡面垂直流向,在径流小区的上、中、下典型位置分别重复测量3次过水断面宽度。径流泥沙自动监测系统记录产流、产沙过程及瞬时流量和泥沙量。每次试验前清理收集装置以保证数据准确性。

1.2.4 数据处理

针对模拟降雨试验测得的所有样本数据,先以3倍标准差剔除异常值,删除所有异常数据后再按照平均值修正法对所有样本数据进行数据预处理。基于测定数据计算径流速率(R)、产沙速率(E)、平均径流深度(h)、弗劳德数(F_r)和阻力系数(f),计算公式分别为

径流速率和产沙速率^[13]:

$$R = \frac{V}{St} \quad (1)$$

$$E = \frac{W}{St} \quad (2)$$

式中: R 为径流速率(mm/min); V 为每个样品的产流量(L); t 为取样持续时间(min); S 为斜坡面积(m²); E 为产沙速率(g·m⁻²·min⁻¹); W 为产沙量(g)。

坡面平均径流深度:

$$h = \frac{Q}{VBt} \quad (3)$$

式中: h 为径流深度(m); Q 为 t 期间内小区坡面地表总径流量(m³); t 为径流取样时间(s); V 为平均流速

(m/s); B 为坡上流量段宽度(m), 取重复测定的过水断面平均值作为小区坡面降雨期间的平均过水断面宽度。

弗劳德数(F_r)是判断水流的流型流态, $F_r > 1$ 时为急流, $F_r = 1$ 时为临界流, $F_r < 1$ 时为缓流。阻力系数(f)则综合反映了坡面径流所受的下垫面摩擦与内部紊动共同产生的阻碍效应^[14], F_r 和 f 分别根据下式计算:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gR}} \quad (4)$$

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

式中: F_r 为弗劳德数; V 为平均流速(m/s); R 为水力半径(m), 近似等于径流深度。 g 为重力加速度, 取值 9.8 m/s^2 ; f 为阻力系数; J 为水力坡度, 一般为 $\sin \alpha$, α 是坡度($^\circ$)。

1.2.5 数据统计分析

采用 SPSS 21.0 软件中的单因素方差分析法(ANOVA)分析不同降雨强度和坡度组合下土壤坡面平均径流速率和平均产沙速率的差异, 置信区间在 95% 水平。采用线性拟合方法拟合 2 种土壤类型平均产沙强度与坡面平均水力学参数间的函数关系及相关趋势, 以定量分析和预测 2 种主要土壤坡面产流产沙间的关系。采用 Excel 和 Origin 软件进行计算与绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土壤坡面地表径流速率随时间的变化规律

研究结果(图 2)表明, 随降雨历时的增加, 2 种土壤坡面径流速率均呈阶段性变化, 降雨初期, 径流速率呈现陡坡式增加, 随着降雨持续, 产流率波动变化并趋于稳定。

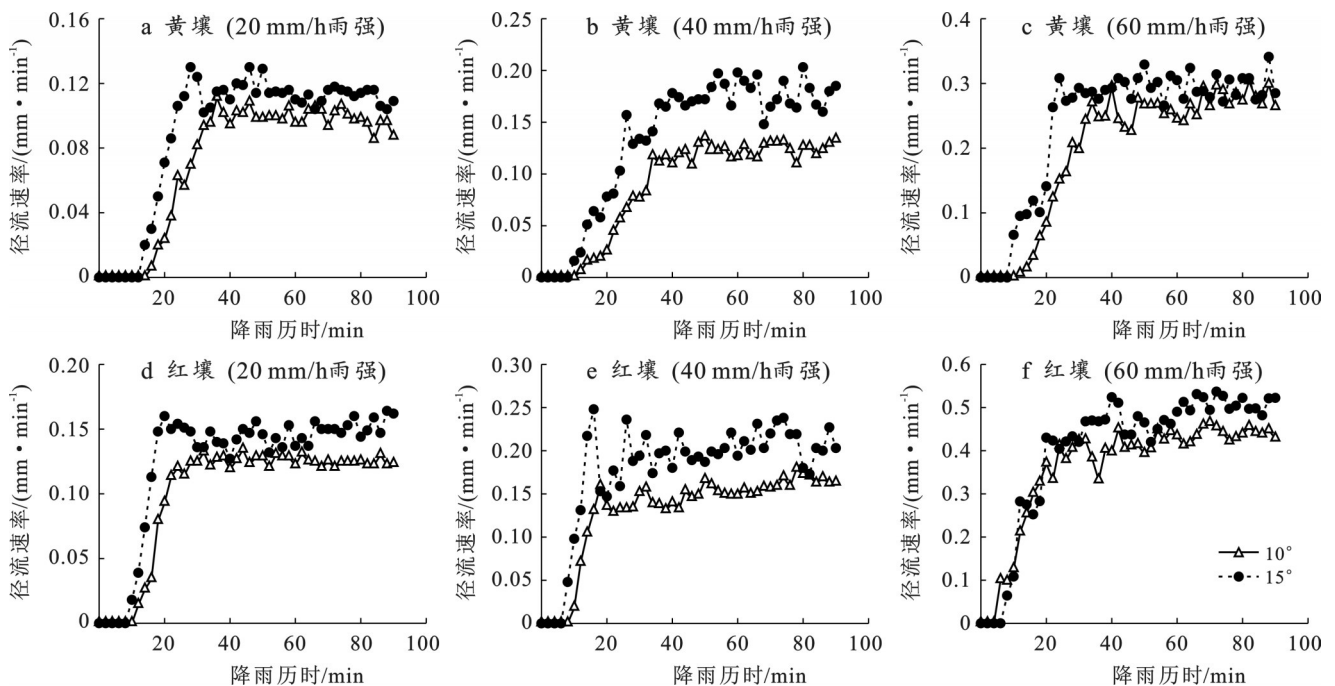


图 2 黄壤和红壤坡面径流速率随时间的变化

Fig.2 Variation patterns of runoff rate over time on slopes of yellow soil and red soil

红壤坡面(图 2d—2f)相较于黄壤(图 2a—2c)表现出更早的产流起始时间和更快的径流速率峰值到达时间。坡度相同时, 随着降雨强度的增大, 2 种土壤坡面的稳定径流速率逐渐增大; 雨强相同时, 2 种土壤坡面在 15° 坡度下的径流速率始终高于 10° 坡度, 且坡度增加缩短了坡面初始产流和稳定波动径流速率的时间(图 3)。单因素方差分析结果表明, 相同坡度条件下, 20 mm/h 和 40 mm/h 雨强的红壤坡面径流速率略高于黄壤, 但差异不显著; 在 60 mm/h 雨

强下, 10° 和 15° 坡度的黄壤坡面的稳定径流速率分别为 0.26 mm/min 和 0.29 mm/min, 红壤坡面的稳定径流速率分别为 0.42 mm/min 和 0.48 mm/min, 10° 和 15° 坡度的前者径流速率分别为后者的 1.73 倍和 1.63 倍, 均差异显著($p < 0.05$)。

2.2 不同土壤坡面产沙速率随时间的变化规律

2 种土壤坡面产沙过程与产流过程具有相似规律, 均表现为先陡坡式增加后稳定波动(图 4)。同一坡度条件下, 随着雨强的增加, 2 种土壤坡面的稳

定产沙速率均呈增大趋势;同一降雨强度条件下,15°坡度2种土壤坡面的产沙速率均高于10°坡面,且达到稳定波动的时间明显要早于10°坡度。

此外,红壤坡面的产沙起始时间与峰值出现时间均早于黄壤。单因素方差分析结果(图5)表明,黄壤坡面的产沙速率在不同雨强下变幅较小,呈现较稳定的产沙特征;而红壤坡面的产沙速率在不同条件下变幅较大,尤其是随着雨强增大异质性更加显著。在相同雨强和坡度组合下,红壤坡面的产沙速

率稳定值始终高于黄壤坡面。在40 mm/h雨强下,10°和15°坡度的红壤坡面稳定产沙速率分别为黄壤坡面的1.72倍和1.59倍;当雨强升至60 mm/h时,黄壤坡面在10°和15°坡度下的稳定产沙速率分别为0.58 g/(m²·min)和0.72 g/(m²·min),红壤坡面的稳定产沙速率分别为0.93 g/(m²·min)和1.18 g/(m²·min),10°和15°坡度的前者产沙速率分别为后者的1.60倍和1.63倍,该结果表明黄壤较红壤具有更强的抗侵蚀能力。

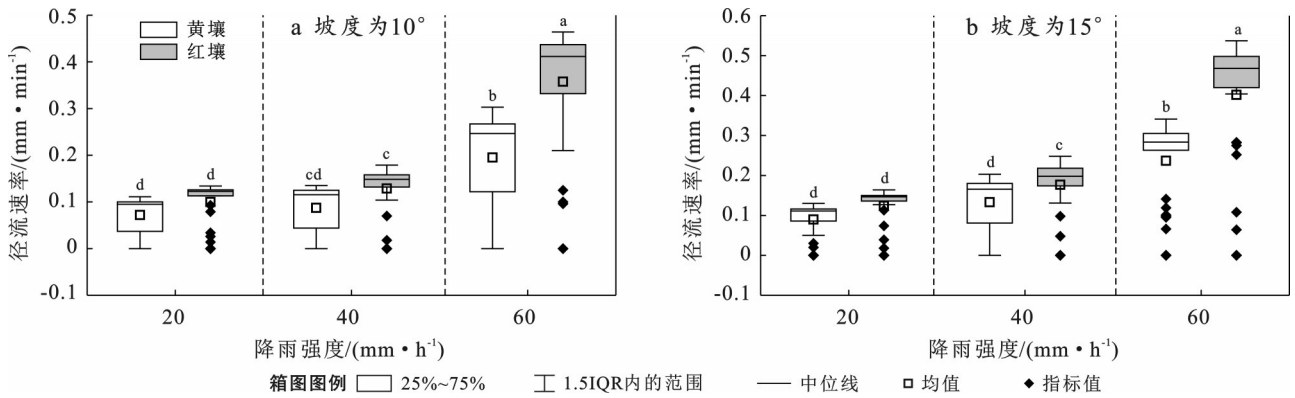


图3 土壤坡面所有试验处理的径流速率的差异分析

Fig.3 Difference analysis of runoff rates of all experimental treatments on soil slopes

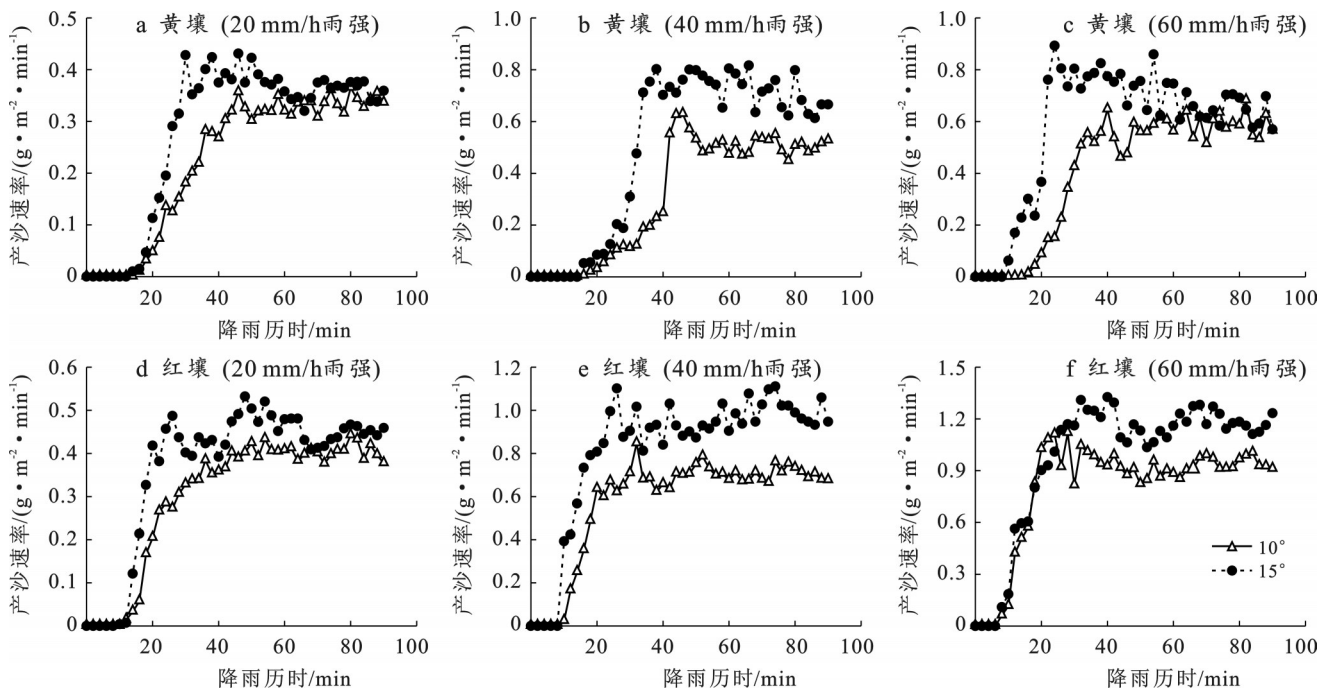


图4 黄壤和红壤坡面产沙速率随时间变化规律

Fig.4 Variation patterns of sediment yield rate over time on slopes with yellow soil and red soil

2.3 不同土壤坡面的产流总量和产沙总量特征

不同雨强和坡度下,黄壤和红壤坡面的产流总量和产沙总量均随雨强、坡度的增加呈现明显的增加趋势(表1)。其中,红壤坡面无论是产流还是产沙,其增幅均明显大于黄壤。当雨强由20 mm/h提

升至60 mm/h时,黄壤坡面在10°和15°坡度下的产流总量分别增长1.63倍和1.62倍,而红壤坡面对应增幅为2.55倍和2.26倍;产沙总量方面,黄壤坡面增长了1.76倍和1.98倍,而红壤坡面增长了2.64倍和3.35倍。因此,相较于红壤坡面,黄壤坡面的产流总

量和产沙总量随雨强和坡度增加的变化幅度相对较低,展现出一定的水土保持优势。

雨强和坡度的变化对坡面产流产沙的影响存在对比消长关系。对于黄壤坡面,雨强从 20 mm/h 增加到 40 mm/h 和从 40 mm/h 增加到 60 mm/h,在 10° 和 15° 坡度下雨强对径流的贡献率远超坡度的贡献率(图 6),贡献率分别为 71.38% 和 72.12%,表明雨强对黄壤坡面径流流失始终占据主导地位。然而,在 15° 坡度且雨强增至 60 mm/h,坡度对黄壤坡面泥沙流失的贡献增加至 59.06%,超越雨强占据主导地位,表明黄壤坡面在较高坡度下,随着雨强的增大坡度逐渐对泥沙流失起到主导作用。相比之下,红壤坡面在不同坡度下,雨强对径流的贡献率始终高于坡度,分别为 68.2% 和 82.4%。特别是在 15° 坡度且雨强增至 60 mm/h 时,雨强对径流流失的贡献进一步上升,凸显了雨强在高坡度下对红壤径流流失的显著影响。

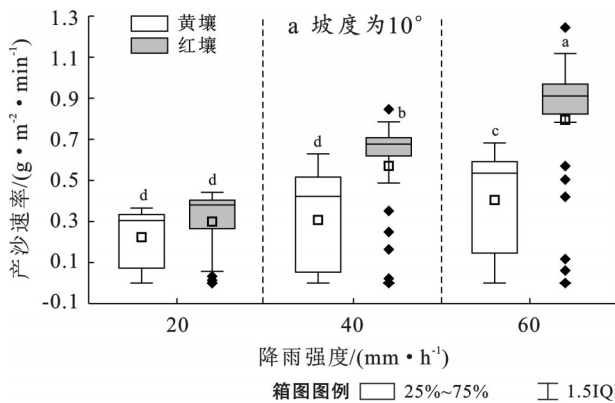


表 1 黄壤和红壤坡面平均产流总量与产沙总量
Table 1 Average total runoff and sediment yield on slopes with yellow soil and red soil

土壤类型	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	平均产流 总量/L	平均产沙 总量/kg
黄壤	20	10	138.16	0.42
		15	165.52	0.53
	40	10	155.88	0.56
		15	233.76	0.85
	60	10	363.42	0.74
		15	435.24	1.05
红壤	20	10	183.84	0.55
		15	227.76	0.74
	40	10	235.16	1.04
		15	325.20	1.47
	60	10	651.91	1.45
		15	742.88	2.48

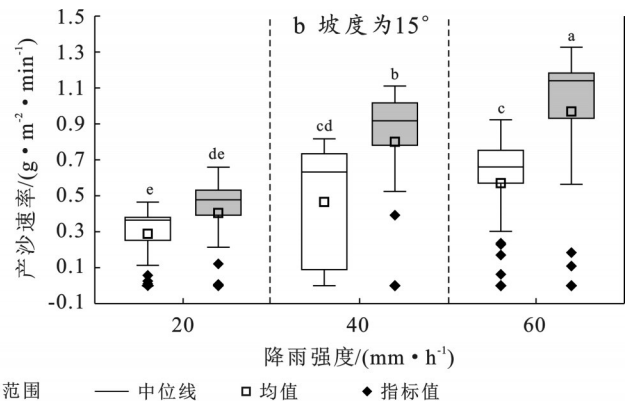


图 5 土壤坡面所有试验处理的产沙速率的差异分析

Fig.5 Difference analysis of sediment yield rate of all experimental treatments on soil slopes

2.4 不同土壤坡面的水沙响应关系

2.4.1 土壤坡面产流率与产沙率关系

不同雨强和坡度条件下,2种土壤坡面产流率与产沙率间存在高度相关性,产沙率随产流率的增加呈上升趋势(图 7,表 2)。对于黄壤坡面,不同雨强和坡度条件下,产流率与产沙率均呈显著非线性关系,拟合函数以对数函数为主, $Y=a/(1+\exp^{-b(X-c)})$ 。式中: a, b, c 均为常数。其决定系数(R^2)随雨强增加而增大,10°坡度的 R^2 分别为 0.668 7, 0.805 6 和 0.868 2, 15°坡度的 R^2 分别为 0.718 9, 0.830 9 和 0.842 1,该结果表明产沙对径流的响应程度随降雨强度增大而增强。红壤坡面则呈现阶段性特征,在 20 mm/h 雨强条件下,产沙率与产流率的关系符合“S”型曲线,当雨强增至 60 mm/h 时,两者呈现简单的线性关系($Y=a+bX$),表明红壤在高强度降雨时产流产沙的耦合效应更为直接。产流率与产沙率之间的拟合关

系随着雨强的增加变得更加显著,坡度 10°的 R^2 分别为 0.750 7, 0.809 1 和 0.874 9,坡度 15°的 R^2 分别为 0.837 7, 0.865 2 和 0.896 3。

2.4.2 土壤坡面产沙的水动力机制

坡面产沙与坡面水流的水动力特征密切相关。由图 8 可知,黄壤坡面平均产沙强度随平均流速的增大呈自然对数函数递增($R^2=0.52$),随弗劳德数的增大呈多项式函数递增($R^2=0.43$),随阻力系数的增大呈幂函数递减($R^2=0.37$),相关性相对较弱。从拟合效果(R^2)来看,相关关系的密切程度表现为平均流速>弗劳德数>阻力系数,表明坡面平均流速可以很好地预测该地区黄壤坡面在不同雨强及坡度组合下平均产沙强度变化趋势。与黄壤相似,红壤坡面平均产沙强度与平均流速、弗劳德数分别呈现对自然对数函数递增和多项式函数递增关系, R^2 分别为 0.44 和 0.49。坡面平均产沙强度随阻力系数

的增大呈幂函数递减($R^2=0.40$)。拟合效果(R^2)方面,弗劳德数 $>$ 平均流速 $>$ 阻力系数,说明坡面弗劳德数可以作为预测红壤坡面平均产沙强度和流体力学

变化趋势的有效指标。此外,根据弗劳德数的大小,2种土壤坡面在所有外界条件下的坡面径流均属于缓流。

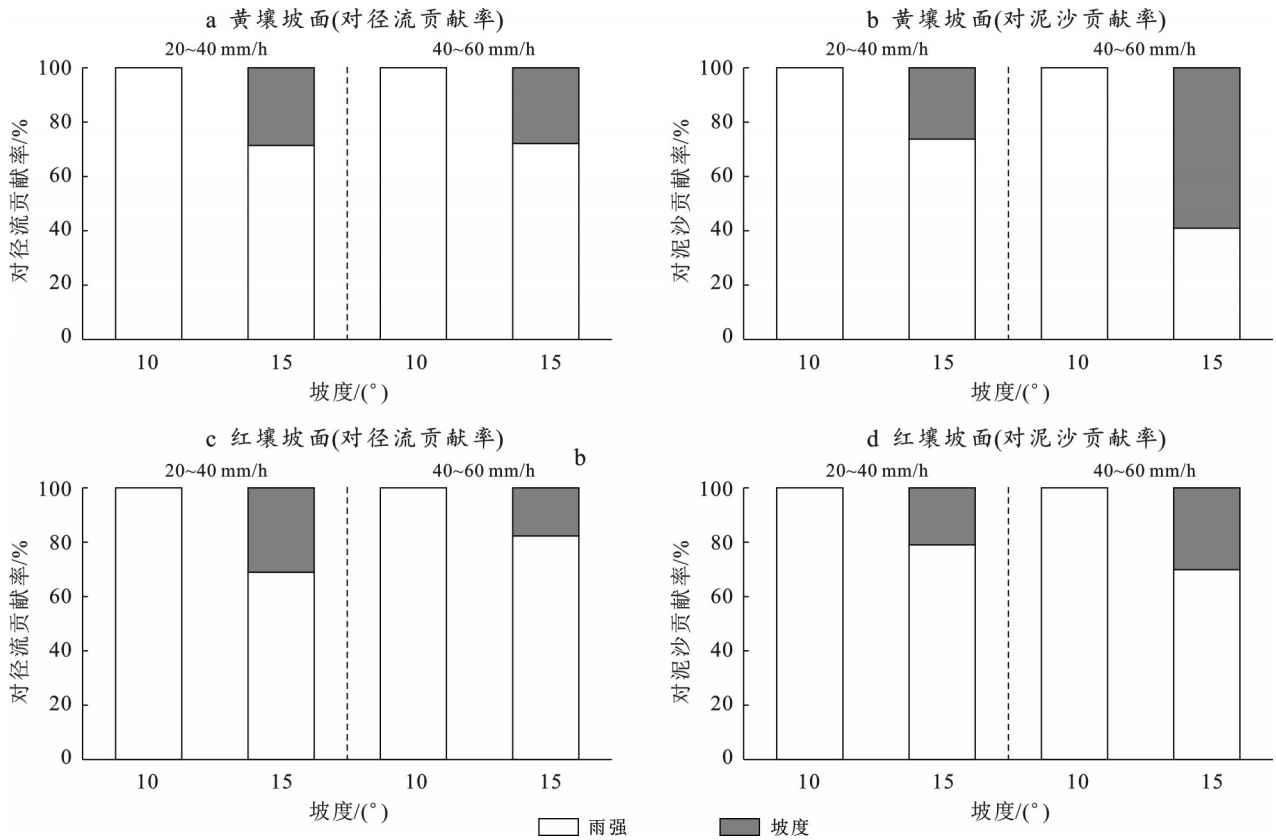


图 6 雨强和坡度对黄壤(a,b)和红壤(c,d)坡面径流和泥沙损失的贡献率
 Fig.6 Contribution rates of rainfall intensity and slope gradient to runoff and sediment loss on slopes with yellow soil (a, b) and red soil (c, d)

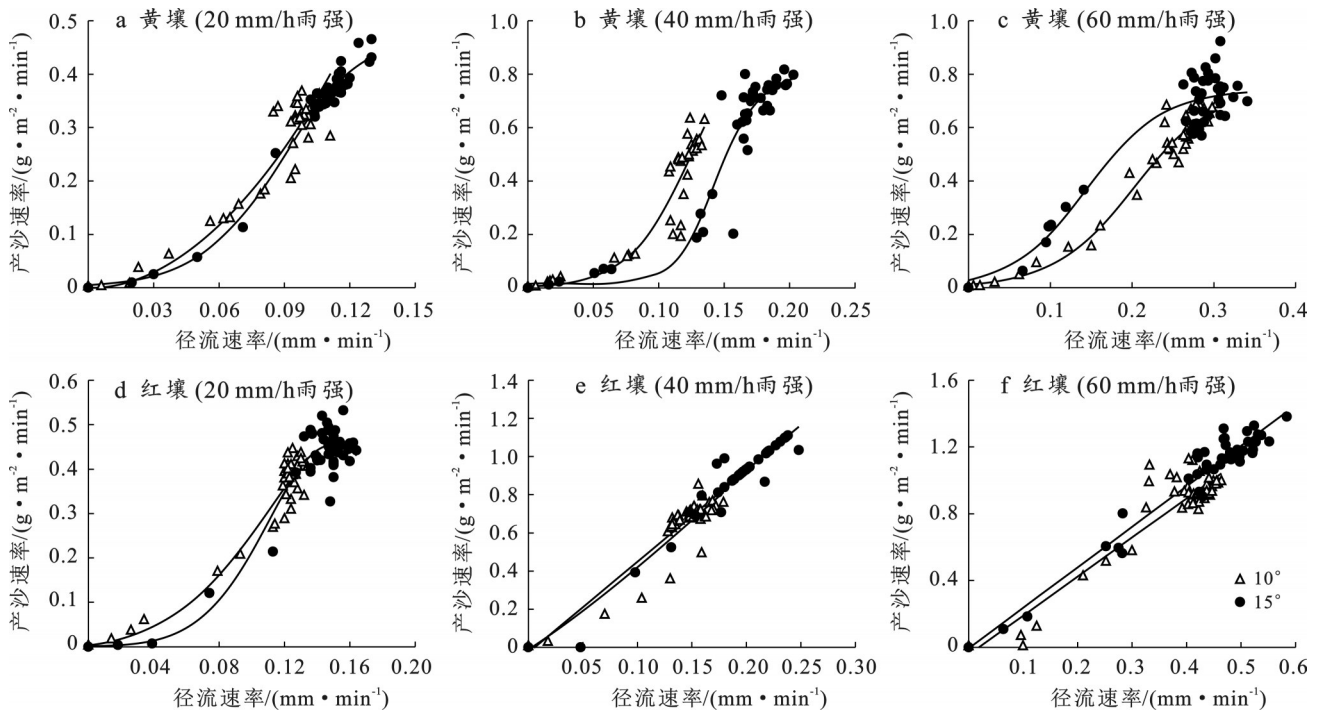


图 7 黄壤和红壤坡面产流率与产沙率关系
 Fig.7 Relationship between runoff yield rate and sediment yield rate on slopes with yellow soil and red soil

表 2 不同雨强和坡度下土壤坡面产流率(X)和产沙率(Y)之间的回归方程Table 2 Regression equation between runoff yield rate (X) and sediment yield rate (Y) of soil slopes under different rainfall intensities and slope gradients

土壤类型	雨强/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	坡度/($^{\circ}$)	拟合函数	决定系数 R^2
黄壤	20	10	$Y=34.3617 X^{2.0246}$	0.6687
		15	$Y=0.4826/[1+\exp^{-52.0251(X-0.0888)}]$	0.7189
	40	10	$Y=1.0594/[1+\exp^{-40.3312(X-0.1281)}]$	0.8056
		15	$Y=0.8122/[1+\exp^{-62.2811(X-0.1441)}]$	0.8318
	60	10	$Y=0.7423/[1+\exp^{-20.4779(X-0.2007)}]$	0.8682
		15	$Y=0.74/[1+\exp^{-21.8784(X-0.1446)}]$	0.8421
红壤	20	10	$Y=0.5553/[1+\exp^{-39.3349(X-0.1046)}]$	0.7517
		15	$Y=0.4689/[1+\exp^{-68.9835(X-0.1031)}]$	0.8377
	40	10	$Y=5.6295 X^{1.1147}-0.0118$	0.8091
		15	$Y=-0.0284+4.7805 X$	0.8652
	60	10	$Y=-0.4470+2.3414 X$	0.8749
		15	$Y=-0.0066+2.4281 X$	0.8963

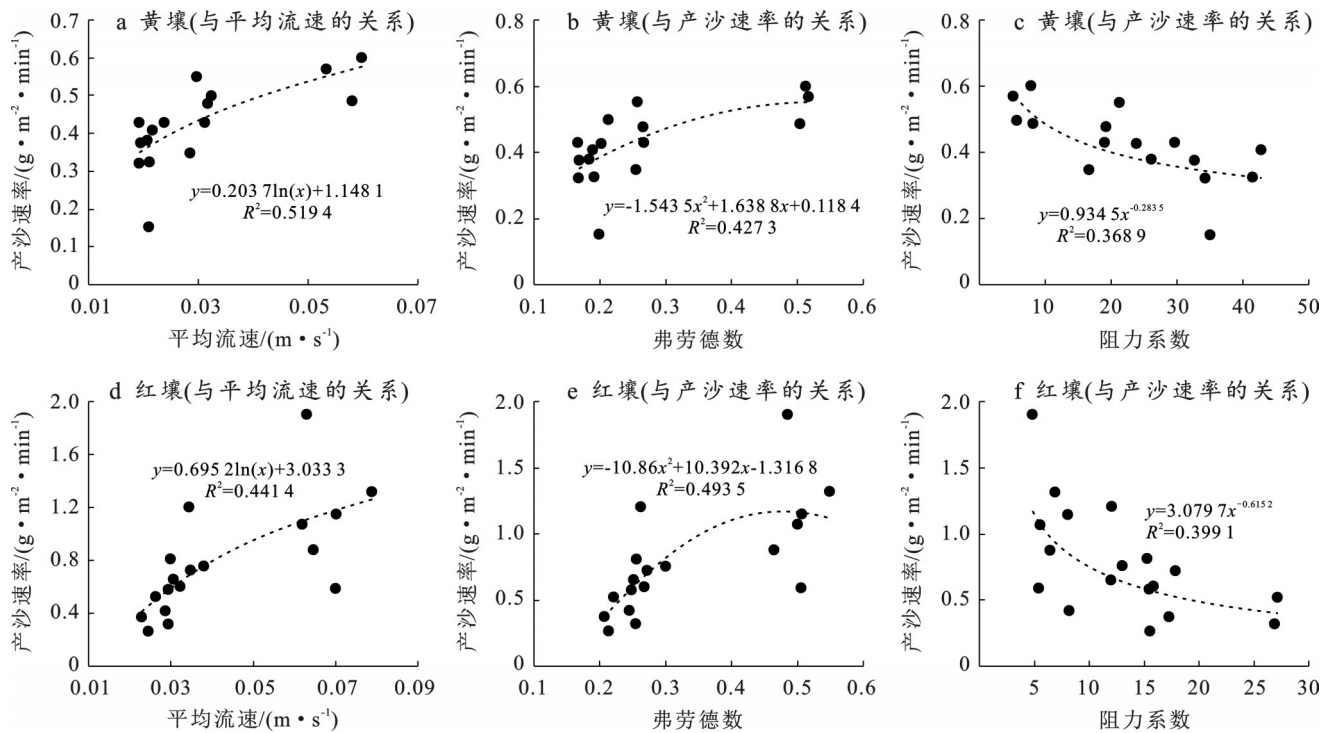


图 8 黄壤和红壤坡面平均产沙强度与坡面平均流速、弗劳德数和阻力系数的拟合关系

Fig.8 Fitting relationship between average sediment yield intensity and average flow velocity, Froude number, and resistance coefficient on slopes of yellow soil and red soil

3 讨论

3.1 土壤坡面产流产沙对降雨强度和坡度的响应及其差异性

新安江流域坡面水土流失是多因素协同作用的结果,其中降雨、坡度和土壤性质起着决定性的作用^[15]。作为水土流失的核心驱动力,降雨通过动力冲击和径流冲刷双重机制主导侵蚀过程,其雨滴击溅效应随雨强增大而显著增强,当降水速度超过渗透速度时,这些高强度冲刷能显著提高水沙输移效

率^[16]。本研究表明,冲刷效应在降雨初期尤为突出,随着降雨持续,土壤孔隙逐渐填充密实,抗冲性增强,产流量与径流挟沙能力趋于稳定,2种土壤坡面的产沙率亦随之平稳,该变化趋势与霍云梅等^[17]研究结果具有一致性。相较之下,坡度对土壤坡面水沙侵蚀的影响较弱,但相同雨强下坡度的增大提高了坡面水流的流速,减少入渗并加剧土壤颗粒冲刷,从而提升产流与产沙总量^[18],本试验中15°坡面出现最大产流量和产沙量,这与勒长兴等^[19]和林庆明等^[20]提出的15°为临界坡度的理论相符,当坡度小于

临界坡度时,径流率和产沙率均随着坡度的增大而增大,但本研究设定的坡度梯度尚未达到临界阈值,因而所得数据序列中未观测到水土流失量随坡度变化的转折特征。同时,随着雨强增大,坡度增大对土壤颗粒剥蚀作用更为突显,尤其在黄壤坡面侵蚀中,坡度对土壤侵蚀的贡献随着雨强增大逐渐占主导地位。

土壤有机质含量与孔隙结构是影响坡面水文过程与侵蚀响应的内在因素^[21]。本研究表明,红壤坡面的产流产沙对于雨强变化的响应程度较黄壤更为显著。当雨强从20 mm/h提升至60 mm/h时,红壤坡面稳定径流速率增幅达40%,而黄壤仅增加12%;同期红壤稳定产沙速率增长37%,黄壤则为22%,且红壤的稳定产流、产沙速率始终高于黄壤。究其成因,尽管红壤黏粒含量较高,但其有机质含量偏低,导致其团聚体的水稳性较差,加之其孔隙结构以微小孔隙为主,排水性能较差,易在降雨作用下形成致密表层结皮,削弱入渗能力,加速径流汇集^[22]。先前研究证实了中国南方红壤地区水土侵蚀程度仅次于黄土高原^[23-24],而新安江流域广泛分布的红壤因坡地开垦(如茶园、果园等经济林地)叠加自然降雨冲刷,加剧了土壤有机质消耗,致使其在暴雨条件下更易形成表面结皮,加速径流汇聚并引发剧烈侵蚀,这与本研究中红壤产沙量达黄壤2.36倍的实证结果高度吻合,揭示了该流域红壤分布区存在的潜在侵蚀风险。相比之下,该地区黄壤凭借更高的有机质含量促进团聚体形成,提升水分入渗能力,且砂粒含量较高、结构更为疏松,大孔隙比例更高,提升了水分的人渗性能,也提高了团聚体抵抗径流剪切破坏的能力。建议在红壤分布区实施结构性改良工程(如通过施加生物质炭等土壤改良剂来促进团聚体形成),而在黄壤区需重点控制有机质流失,维持其固有的抗侵蚀韧性。

3.2 土壤坡面水沙响应特征与水动力学机理

地表径流作为土壤侵蚀的动力源和唯一介质,其流体力学特性不仅直接决定土壤颗粒的剥离速率,更通过悬浮载荷形式主导着坡面的泥沙输移过程^[25]。2种土壤坡面径流和泥沙之间的拟合关系均表明坡面水沙高度相关,呈现出水丰沙多的现象,该结果与姚冲等^[26]和王丽等^[27]的研究结果一致。随着雨强和坡度的增大,径流动能显著增强,促使土壤颗粒剥离与输移过程趋于同步化,从而强化了产沙量与径流量间的统计关联性。此外,不同条件下,黄壤与红壤表现出截然不同的侵蚀、输沙模式。黄壤坡面的水沙关系表现为非线性饱和曲线,符合推移质

输沙的规律,其相对优良的结构性使得土壤颗粒的启动需要更高的临界水流剪切力。初期产沙率随水流能量增加而快速上升,后期受制于团聚体破碎速率,增长放缓并趋于饱和。而红壤坡面在较高降雨强度(如60 mm/h)条件下,产沙率与产流率呈现高度同步的线性关系($R^2 > 0.87$),表明其侵蚀过程对径流动能变化的响应更为直接。其内在机制在于,雨强的增大显著加剧红壤地表结皮发育,结皮层一方面限制了径流对下层土壤的垂直剥离,另一方面促使径流集中能量,持续冲刷并携带地表已分散的细颗粒物,最终导致产沙量与径流量近乎同步线性增长。

在坡面水蚀过程中,侵蚀产沙机制的研究核心聚焦于泥沙颗粒的运动规律,而这一过程深受坡面水流水动力学特性的直接影响^[28],探究水动力学参数与坡面侵蚀量的关联关系,对于深入认知坡面侵蚀机理具有重要意义。本研究表明,平均流速和弗劳德数可分别作为黄壤与红壤坡面侵蚀监测的特征性指标。黄壤坡面产沙强度与平均流速呈自然对数关系,印证了层流状态下流速对推移质输沙的经典力学响应规律^[29],说明在结构相对稳定的黄壤中,径流冲刷是泥沙启动与输移的主控机制。红壤坡面的产沙强度虽与弗劳德数呈强多项式相关,但其本质仍属层流范畴,这表明红壤侵蚀过程对水流能量变化的响应更显著,即使未达到紊流条件,弗劳德数的微小变化即可通过增强径流动能加速土壤剥离^[30],这与其易形成细沟、跌坎等微地貌,从而增强水流紊动与剥离能力的特性相符。这些定量模型为构建新安江流域水土流失预测系统提供了参数化基础,尤其可为基于水动力参数的侵蚀风险评估提供理论支持。

4 结论

(1) 黄壤和红壤坡面的径流和产沙速率均随降雨强度和坡度的增加而增大,且初始产流和产沙时间相应缩短。红壤因土壤有机质含量相对较低、抗侵蚀能力弱,在相同条件下,其径流速率、产沙速率、平均产流总量和平均产沙总量均高于黄壤,且随着降雨强度增大差距更显著,揭示该地区红壤水土流失风险更高。

(2) 降雨是驱动土壤坡面产流产沙的主导因素,其对径流速率的促进作用大于坡度。坡度通过增强径流动能调控产沙过程,尤其在黄壤坡面侵蚀中,坡度对土壤侵蚀的贡献随着雨强增大逐渐占主导地位,在15°坡度与60 mm/h雨强耦合条件下,坡度对黄壤产沙的贡献率高达59.06%,突显地形因子对泥沙输移的关键作用。

(3) 黄壤与红壤坡面产流率与产沙率高度相关,但拟合关系存在差异。黄壤坡面在不同条件下产流率与产沙率的关系多符合“S”型曲线: $Y=a/[1+\exp^{-b(X-c)}]$;而红壤坡面在小雨情况下产流率与产沙率均呈现出较为平缓的变化趋势,随着雨强增大,其变化呈简单线性关系: $Y=a+bX$ 。

(4) 坡面侵蚀产沙与水动力特征显著相关。黄壤产沙强度随平均流速增大呈自然对数递增,随弗劳德数增加呈多项式递增,平均流速为最佳预测指标;红壤产沙与平均流速呈对数关系,与弗劳德数呈多项式关系,弗劳德数预测效果更优。两者产沙强度均随阻力系数增大呈幂函数递减,但相关性较弱。平均流速和弗劳德数可分别作为黄壤和红壤产沙强度判断的关键预测参数。

参考文献 (References)

- [1] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 2013.
- [2] Zhao Wenwu, Liu Yue, Daryanto S, et al. Metacoupling supply and demand for soil conservation service [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 136-141.
- [3] 石磊, 夏敏, 唐婷, 等. 基于遥感生态指数模型(RSEI)的新安江流域(宣城段)生态环境质量状况分析[J]. *安徽地质*, 2025, 35(2): 151-153.
Shi Lei, Xia Min, Tang Ting, et al. Analysis of the eco-environmental quality of the Xin'an River basin (the Xuancheng section) based on remote sensing ecological index model (RSEI) [J]. *Geology of Anhui*, 2025, 35(2): 151-153.
- [4] 太湖流域片水土保持公报[R]. 太湖流域管理局, 2023. *Bulletin on Soil and Water Conservation in Taihu basin* [R]. Taihu Basin Administration, 2023.
- [5] 张乃夫. 安徽新安江流域景观格局特征及土壤侵蚀评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
Zhang Naifu. Anhui Xin'an river watershed landscape pattern characteristics and soil erosion evaluation [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2014.
- [6] Zhao Longshan, Fang Qian, Hou Rui, et al. Effect of rainfall intensity and duration on soil erosion on slopes with different microrelief patterns [J]. *Geoderma*, 2021, 396: 115085.
- [7] Mondal A, Khare D, Kundu S, et al. Impact of climate change on future soil erosion in different slope, land use, and soil-type conditions in a part of the Narmada River basin, India [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 20(6): C5014003.
- [8] 梁志权, 张思毅, 卓慕宁, 等. 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 1-6.
Liang Zhiqian, Zhang Siyi, Zhuo Muning, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion process in red soil hillslopes [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 1-6.
- [9] 李海, 沈鹏, 吕凯, 等. 玉米间作大豆行比配置对坡耕地水土流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(4): 11-19.
Li Hai, Shen Peng, Lü Kai, et al. Effect of row ratio configuration of maize intercropping soybean on soil and water loss in slope farmland [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(4): 11-19.
- [10] 王婷婷, 沈海鸣, 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.
- [11] Ekwue E I, Harrilal A. Effect of soil type, peat, slope, compaction effort and their interactions on infiltration, runoff and raindrop erosion of some Trinidadian soils [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(1): 112-118.
- [12] 郭新送, 宋付朋, 高杨, 等. 模拟降雨下3种类型土壤坡面的泥沙流失特征及其养分富集效应[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 23-28.
Guo Xinsong, Song Fupeng, Gao Yang, et al. Characteristics of lost sediment and its nutrient enriched effect on three types soil slope under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 23-28.
- [13] 熊维彬, 陈志强, 陈志彪, 等. 南方典型红壤区不同枯死亡率芒萁的水土流失阻控效应[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 76-83.
Xiong Weibin, Chen Zhiqiang, Chen Zhibiao, et al. Effect of dicranopteris pedata with different mortality on soil and water loss control in typical red soil region of Southern China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(2): 76-83.
- [14] 陈诗婷, 查轩, 黄少燕, 等. 暴雨条件下典型红壤区生物结皮坡面水土流失过程研究[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 95-100.
Chen Shiting, Zha Xuan, Huang Shaoyan, et al. Soil erosion process on slope with biological soil crusts under rainstorm in typical red soil region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 95-100.
- [15] Defersha M B, Melesse A M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment

- concentration and sediment enrichment ratio [J]. *Catena*, 2012,90:47-52.
- [16] Chen Hao, Zhang Xiaoping, Abla M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2018,170:141-149.
- [17] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(4):23-26.
Huo Yunmei, Bi Huaxing, Zhu Yongjie, et al. Erosion process and its affecting factors of southern typical clay slope under simulated rainfall condition [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(4):23-26.
- [18] 王照润,高建恩,周凡凡,等.坡度对降雨径流挟沙能力影响的模拟试验[J].水土保持学报,2023,37(1):97-102.
Wang Zhaorun, Gao Jian'en, Zhou Fanfan, et al. Simulation experimental study on the impact of slope gradients on sediment carrying capacity of rainfall runoff [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023,37(1):97-102.
- [19] 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.
- [20] 靳长兴.坡度在坡面侵蚀中的作用[J].地理研究,1996,15(3):57-63.
Jin Changxing. The role of slope gradient on slope erosion [J]. *Geographical Research*, 1996,15(3):57-63.
- [21] 何周窈,苏正安,王勇,等.干热河谷冲沟发育区土壤细沟可蚀性及主要影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):8-13.
He Zhouyao, Su Zheng'an, Wang Yong, et al. Erodibility and main influencing factors of soil rill in gully development area of dry-hot valley [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(3):8-13.
- [22] 韩珍,王小燕,李馨欣.碎石含量影响下紫色土坡面径流流速变化过程及土壤侵蚀的阶段性[J].中国农业大学学报,2016,21(10):102-108.
Han Zhen, Wang Xiaoyan, Li Xinxin. Processes of runoff velocity and stages of soil erosion under the effect of rock fragment content [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016,21(10):102-108.
- [23] 王赫,陈文祥,李会光,等.南方红壤区典型水土流失治理小流域的洪水径流泥沙特征[J].农业工程学报,2023,39(15):86-93.
Wang He, Chen Wenxiang, Li Huiguang, et al. Runoff and sediment characteristics of flood events in a typical soil and water conservation watershed in the red soil region of Southern China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(15):86-93.
- [24] 金鑫,谢斯琴,宋颖,等.人工红壤坡面对超大雨强降雨的响应过程[J].水土保持学报,2017,31(5):19-24.
Jin Xin, Xie Siqin, Song Ying, et al. Experimental study on the response of artificial red soil slope to the large rainfall intensity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(5):19-24.
- [25] Zhao Longshan, Hou Rui. Effects of collection time intervals of surface runoff and sediment on soil erosion analysis during rainfall [J]. *Catena*, 2018,165:201-206.
- [26] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].水土保持学报,2018,32(3):10-15.
Yao Chong, Zha Ruibo, Huang Shaoyan, et al. Study on processes of erosion on hillslopes of quaternary red clay under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(3):10-15.
- [27] 王丽,王力,王全九.前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J].农业环境科学学报,2014,33(11):2171-2178.
Wang Li, Wang Li, Wang Quanjiu. Effect of antecedent soil moisture on runoff and sediment and nitrogen and phosphorus losses from slope cropland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014,33(11):2171-2178.
- [28] 郭太龙,卓慕宁,李定强,等.华南红壤坡面侵蚀水动力学机制试验研究[J].生态环境学报,2013,22(9):1556-1563.
Guo Tailong, Zhuo Muning, Li Dingqiang, et al. Experimental study on soil erosion and flow hydraulics on red soil slope [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013,22(9):1556-1563.
- [29] 苏涛,张兴昌,赵怀玉.砭砂岩地区坡面径流水动力学特性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(8):203-209.
Su Tao, Zhang Xingchang, Zhao Huaiyu. Study on hydraulic characteristics of slope runoff in Pisha sandstone region [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2011,39(8):203-209.
- [30] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.草被覆盖下坡面径流入渗过程及水力学参数特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):50-53.
Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Study on runoff and infiltration process and hydraulic parameters characteristics with grass coverage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009,23(4):50-53.