

水蚀风蚀交错区退耕坡面植被利用 对产流产沙的影响

王子豪¹ 张风宝^{1,2*} 杨明义^{1,2} 任瑞雪¹ 邓鑫欣¹ 曹晓娟^{2,3} 李占斌^{1,2,4}

(¹西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要 为有效利用水蚀风蚀交错区退耕封育坡面植被, 确定合理的植被利用强度非常必要。本试验选取黄土高原水蚀风蚀交错区典型小流域——六道沟小流域为试验区, 在多年退耕封育坡面布设径流小区, 通过人工模拟降雨试验, 研究植被地上部分在不同利用强度下各坡度(10°、20°和30°)坡面产流、产沙变化特征, 以确定合理的利用强度。结果表明: 次降雨过程中径流速率大体可分为两个阶段: 初期迅速增长阶段和中后期增长变缓或趋于准稳定阶段。侵蚀速率的变化趋势因坡度的不同而略有差异。利用强度对产流量有显著影响, 产流量随利用强度的加强而增加。坡度对侵蚀量影响显著, 侵蚀量表现为20°坡面>30°坡面>10°坡面。以植被地上部分未利用小区为对照, 相对增水量和相对增沙量均随利用强度加强而增加。结合降雨资料推测, 退耕15年左右坡面植被地上部分盖度达到25%时, 坡面年土壤侵蚀量基本低于容许土壤流失量。应重视该区20°坡面植被的恢复治理工作。

关键词 退耕封育; 水蚀风蚀交错区; 植被利用强度; 坡度; 产流; 产沙

Effect of vegetation utilization on runoff and sediment production on grain-for-green slopes in the wind-water erosion crisscross region. WANG Zi-hao¹, ZHANG Feng-bao^{1,2*}, YANG Ming-yi^{1,2}, REN Rui-xue¹, DENG Xin-xin¹, CAO Xiao-juan^{2,3}, LI Zhan-bin^{1,2,4} (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China).

Abstract: To effectively utilize the vegetation on grain-for-green slopes in the wind-water erosion crisscross region, it is necessary to determine the reasonable vegetation utilization intensity. We set up runoff plots on slopes which were not cultivated and were closed for many years in the Liudaogou catchment, a typical catchment in wind-water erosion crisscross region of the Loess Plateau. With artificial simulated rainfall experiments, the characteristics of runoff and sediment yield on slopes (10°, 20° and 30°) under different utilization intensity of vegetation were studied to select the reasonable utilization intensity. The results showed that the runoff rate in the process of rainfall simulation could be divided into two periods: rapidly increasing in the initial period and slow increasing or quasi-steady state in the middle and late periods. The variation of erosion rate during the rainfall was dependent on the slope. The utilization intensity had a significant effect on the runoff yield, which increased with the increasing utilization intensities. The slope gradient had a significant effect on the sediment yield, with the variation of sediment yield with slope gradient being: 20°>30°>10°. Compared with the unused (natural) plots, the relative runoff and sediment increased with increasing

本文由国家重点研发计划项目(2016YFC0402406)和国家自然科学基金项目(41571130082)资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0402406) and the National Natural Science Foundation of China (41571130082).

2018-06-04 Received, 2018-09-30 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fbzhang@nwsuaf.edu.cn

utilization intensities. Predicted based on the rainfall data, annual soil erosion amount on the slope would be basically lower than the tolerance level of soil loss when the vegetation cover on the slope surface reached 25% in 15 years after abandoning reclamation. More attention should be paid to the restoration and management of vegetation on the slope of 20° in this area.

Key words: grain for green; wind-water erosion crisscross region; utilization intensity of vegetation; slope gradient; runoff yield; sediment yield.

自 1999 年实施大面积退耕还林还草生态工程以来,黄土高原生态环境改善已取得显著成效,扭转了生态恶化的局面,植被覆盖度和各项生态系统服务功能显著提高,入黄泥沙急剧减少,土壤侵蚀得到有效控制^[1].时至今日,退耕还林还草生态工程已实施近 20 年.该项工程的实施不仅使生态环境得到改善,同时还肩负着农民脱贫致富的重要任务^[2].山仑^[3]认为,退耕最终成效的评价既要看到生态修复的作用,同时要看是否推动了黄土高原农业主导产业,主要指草地畜牧业的发展.有研究发现,黄土高原地区植被盖度的增加导致流域产流和土壤含水量显著下降,出现土壤干层现象^[4].Feng 等^[5]研究显示,目前黄土高原植被恢复已接近黄土高原水资源植被承载力的阈值.所以,若能对退耕封育后恢复的草地资源进行合理利用,不仅有利于发挥草地自然生产的优势及其经济效益,同时还能保持退耕封育坡面草地生态系统的良性发展^[6-7].在陕北安塞县的研究表明,封育 7 年后可以考虑开始利用草地资源,封育 13 年是利用的最佳时期,但应以中度干扰为限^[3].程积民等^[8]对宁夏雨雾山研究发现,封育 10~15 年后逐步加以利用是可行的.

黄土高原退耕还林还草的主要目标是防止水土流失,不同的植被利用强度都会影响植被的水土保持的功效.研究退耕坡面植被利用对坡面产流产沙的影响规律是植被合理利用的前提.对坡面植被进行利用直接影响到其降雨截流、削减减蚀、控制地表径流等水文功能^[9].王晗生等^[10]认为,流域林草植被整体覆盖率一般达 50% 以上时,植被控制水土流失的效果趋于最佳且稳定.但坡面产沙量的多少不仅与植被盖度有关,坡度条件也是重要因素^[11].众多研究表明,坡面侵蚀量并非随坡度增长而增加,当坡度达到临界坡度后,侵蚀量开始趋于稳定或缓慢下降^[12-14].不同坡度坡面对植被施加利用时,坡面产流、产沙过程都会受到影响,从而直接关系到坡面植被水土保持功效的发挥.

黄土高原水蚀风蚀交错区是我国北方农牧交错带的主要组成部分^[15],是传统的畜牧业区域,具有

发展畜牧业的优势,而且该区域退耕封育较早,植被恢复明显.合理科学地利用退耕坡面植被资源不仅有利于该地区退耕植被的可持续性恢复,还有利于缓解当地牧草短缺问题和畜牧业良性发展.在进行大范围利用之前,必先明确退耕封育坡面植被利用对水沙调控的影响.基于此,本试验选择在黄土高原水蚀风蚀交错带强烈侵蚀中心的典型代表小流域,即陕西省神木市六道沟小流域进行,采用人工模拟降雨的方法,研究退耕坡面植被地上部分在不同利用强度下各坡度坡面的产流产沙特征和坡面植被的水沙调控作用,以期对退耕还林还草工程实施以来,黄土高原坡面水土流失治理和畜牧业可持续发展提供科学依据.该研究对探究合理的植被利用强度,兼顾植被资源的生态效益和经济效益具有重要意义.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本试验选择在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行.该试验站地处陕西省神木市西南方向约 13 km 处的六道沟小流域(38°46′—38°51′ N, 110°21′—110°23′ E).该小流域位于毛乌素沙地边缘地带,为晋陕蒙水蚀风蚀交错带强烈侵蚀中心^[16],是水蚀风蚀交错带的典型区域和代表区域.六道沟小流域面积为 6.89 km²,海拔 1081.0~1273.9 m,地形破碎,沟壑面积占小流域总面积的 40%~50%.该区属于温带半干旱大陆性季风气候,四季分明,寒暑剧烈,气候干燥.年均降水量 422.7 mm,降水年际变化较大,主要分布在 200~600 mm,具有明显的季节性特征,降水主要集中在 7—8 月,且多为暴雨.日照资源丰富,年平均日照时数为 2782.5 h,能够满足作物生长需求^[17].

该小流域地面组成物质以第四纪黄土沉积物为主,主要为沙黄土与夹杂钙质结核层的老黄土.沙黄土主要分布在黄土台塬壕底、壕边梯田和坡地.在某些地段呈交错分布,地形和产沙地层复杂.该流域植被多为沙生植物和黄土区植物,天然植被多已遭到严重破坏,次生的地带性植被以旱生禾草群落和旱

中生蒿类群落为主,主要包括长芒草(*Stipa bungeana*)群落、大针茅(*Stipa grandis*)群落、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)群落、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)群落等,表现出典型草原区的植被特征^[18]。

1.2 试验小区设计

考虑到国家退耕还林政策的实施年份和当地的落实情况,选择在该小流域一退耕 15 年左右的坡面上建立 12 个径流小区。小区由厚度 1 mm、高度 30 cm 的铁皮围成。铁皮下埋深度为 15 cm,高出地面高度为 15 cm,起到与小区外部隔离的作用。该坡面土壤为沙黄土,按美国制土壤质地分类为砂质壤土,2~0.05 mm 粒级颗粒平均含量为 67.9%,0.05~0.002 mm 粒级颗粒平均含量为 27.9%,小于 0.002 mm 粒级颗粒平均含量为 4.2%。小区内植被主要为次生地地带性植被长芒草、大针茅等。每个小区上方设置排水沟,防止上部来水对小区的干扰。小区下方设有用来收集降雨所产生径流的径流桶。考虑到人为扰动等因素,小区在建设完毕后没有立即投入试验当中,而是放置 1 个月用来消减人为扰动的影响。

在径流小区的处理上,12 个小区根据所选取自然坡面坡度的不同分成 3 组,坡度分别约为 10°、20°和 30°。每组坡度有 4 个小区,设有不同植被利用强度。植被地上部分的利用是通过剪除小区内草地植被的地上部分而保留根系来模拟,剪除过程中不能扰动地面土壤,尽量贴近地面且保证剩余植被在坡面大致均匀分布。不同的植被利用强度是根据剪除植被地上部分后径流小区剩余植被的盖度来控制,分别为完全利用(complete utilization, CU)、重度利用(heavy utilization, HU)、轻度利用(light utilization, LU)和不利用(no utilization, NU)共 4 种利用强度。不同利用强度的植被盖度如表 1 所示。植被盖度的测量采用网格法,将试验小区划分为若干网格,通过计算每个网格中植被的盖度,最终得出试验小区的植被盖度。

1.3 模拟降雨和数据采集

本试验所用的降雨器为南京燕而信智能化系统工程制作的人工模拟降雨系统,为下喷式降雨器,由控制台、水压传感器、水箱、水泵、支架、喷头和软管组成。喷头为美国 SPAYING SYSTEMS CO 公司生产的 FULLJET 旋转下喷式降雨喷头,本降雨器所用喷头规格为 2#、3#和 4#。该人工模拟降雨系统由控制台中的微处理器控制水泵,对水箱中的水恒压输出压力,再经几何中心供水法等分压力后通

表 1 试验径流小区概况

Table 1 Condition of experimental runoff plots

坡度 Slope gradient (°)	坡位 Slope position	坡长 Length (m)	宽度 Width (m)	土壤类型 Soil type	植被利用 强度 Vegetation utilization intensity	盖度 Coverage (%)
10	下坡	5.98	2.02	沙黄土	CU	0
10	下坡	6.17	2.05	沙黄土	HU	20~25
10	下坡	6.17	2.00	沙黄土	LU	45~50
10	下坡	6.18	2.00	沙黄土	NU	70~75
20	中坡	6.09	2.01	沙黄土	CU	0
20	中坡	6.06	1.96	沙黄土	HU	20~25
20	中坡	5.97	2.09	沙黄土	LU	45~50
20	中坡	5.74	2.00	沙黄土	NU	70~75
30	上坡	5.97	2.05	沙黄土	CU	0
30	上坡	5.93	1.98	沙黄土	HU	20~25
30	上坡	6.17	2.17	沙黄土	LU	45~50
30	上坡	5.32	2.11	沙黄土	NU	70~75

CU: 完全利用 Complete utilization; HU: 重度利用 Heavy utilization; LU: 轻度利用 Light utilization; NU: 不利用 No utilization. 下同 The same below.

过软管输送于按一定距离布置的喷头喷出。不仅能稳定给予水滴一定的初始动能,有效模拟自然降雨打击力度,而且通过 3 种喷头的不同组合及供水压力变化达到动态调整降雨强度的目的。模拟雨强在 10~200 mm·h⁻¹ 模拟精度±5 mm·h⁻¹且均匀度大于 80%。根据试验所在研究区典型侵蚀性降雨特征^[19],本试验将模拟降雨器的雨强设置为 90 mm·h⁻¹,后经多次率定实测雨强为 83~87 mm·h⁻¹,基本满足试验要求。所有试验都在无风天气下进行,为尽可能降低风的干扰,试验时在小区两侧搭有防风篷布(图 1)。

在每场试验前,先用测钎长度 12 cm 的时域反射仪(time domain reflectometer, TDR)对径流小区的表层土壤含水量进行测定,通过预降雨或晾晒等方式保证每场降雨试验前期含水量大致相同。根据以往室内降雨试验资料和野外实测土壤含水量值,将本试验的前期土壤含水量控制在 10%~15%。每场降雨从产流开始到结束持续时间为 60 min,降雨过程中记录产流时间,自产流开始每隔 2 min 收集一个径流泥沙样品,用于试验结束后对产流产沙量的测算。采用烘干法测定坡面侵蚀产沙量。试验所用秒表精度为 0.01 秒,电子天平实际分度值为 0.01 g。

以未利用小区为基础,通过计算不同利用强度下相对增水量、绝对增水量、相对增沙量和绝对增沙量来评价利用强度对水沙变化的影响,计算方法为:

$$R_{ab} = R_x - R_{CK} \quad (1)$$

$$R_{re} = \frac{R_x - R_{CK}}{R_{CK}} \times 100\% \quad (2)$$

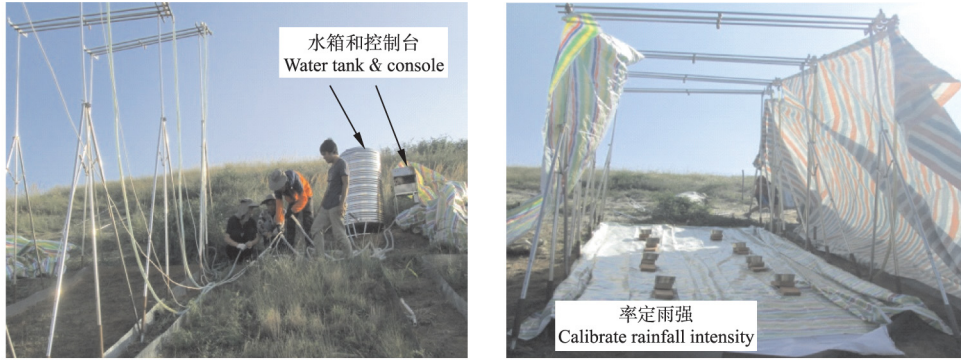


图 1 模拟降雨试验照片

Fig.1 Photos showing simulated rainfall test.

式中: R_{ab} 为绝对增水量; R_{re} 为相对增水量; R_{CK} 为相应坡度未利用小区产流量; R_x 为不同利用强度下的产流量.

$$S_{ab} = S_x - S_{CK} \quad (3)$$

$$S_{re} = \frac{S_x - S_{CK}}{S_{CK}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: S_{ab} 为绝对增沙量; S_{re} 为相对增沙量; S_{CK} 为相应坡度未利用小区产沙量; S_x 为不同利用强度下的产沙量.

2 结果与分析

2.1 坡面产流变化特征

由图 2 可以看出,所有处理坡面径流速率都处

于 $0.01 \sim 1.00 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 变异性较大, 变异系数为 0.80. 随降雨历时延长, 坡面径流速率的变化趋势基本相似, 降雨初期迅速增长, 中后期增长变缓或趋于准稳定状态, 次降雨产流速率最大值一般都出现在降雨的后期. 除 10° 坡面径流速率在降雨后期趋于平稳外, 其余均呈现缓慢增加趋势. 相同坡度下, 随利用强度的加强, 坡面径流速率呈增大趋势. 如不考虑坡度变化, NU、LU、HU 和 CU 处理的平均径流速率分别为 (0.13 ± 0.12) 、 (0.20 ± 0.15) 、 (0.33 ± 0.16) 和 $(0.75 \pm 0.17) \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 且变异系数随利用强度增加而明显减小, 说明退耕坡面植被的利用强度对其调控径流的能力影响显著. 随坡度的增加, 各利用强度下坡面产流速率的差值呈减小趋势. 除完全利用

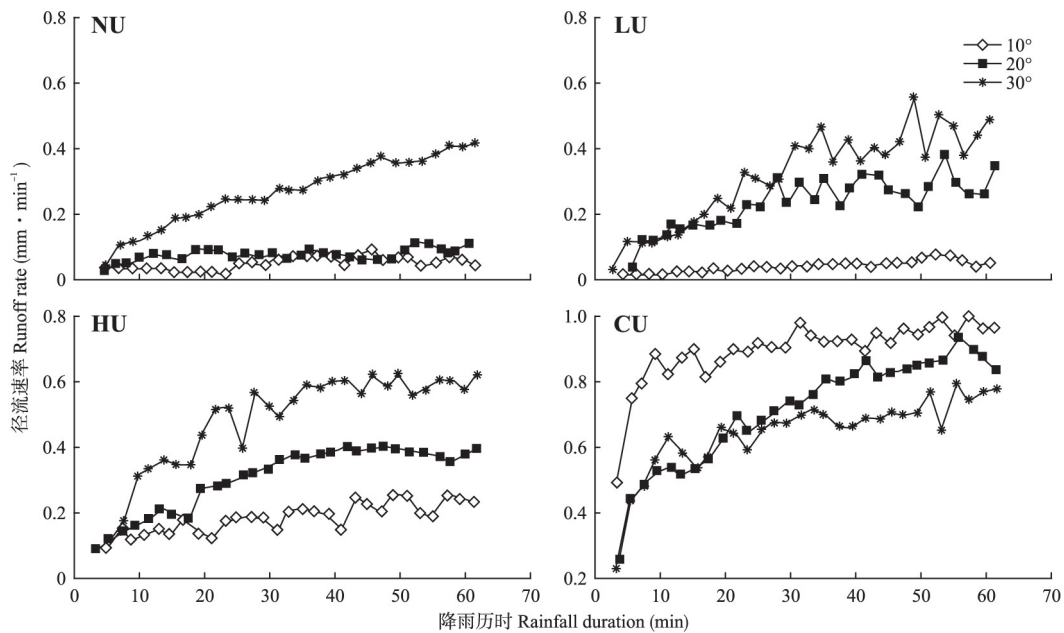


图 2 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下坡面径流速率随降雨历时的变化

Fig.2 Variation of runoff rate during the rainfall with $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ rainfall intensity.

NU: 不利用 No utilization; LU: 轻度利用 Light utilization; HU: 重度利用 Heavy utilization; CU: 完全利用 Complete utilization. 下同 The same below.

的坡面外 相同利用强度条件下 随坡度增大 径流速率也增大 如不考虑利用强度变化 10°、20°和 30°坡面的平均产流速率分别为(0.29±0.36) 、(0.33±0.26) 和(0.43±0.19) mm · min⁻¹ ,且变异系数随坡度增加呈减少趋势.在完全利用坡面 3 种坡度下径流速率都在 10 min 左右就达到并稳定在峰值水平 ,明显快于其他利用强度下径流速率达到稳定所需时间.其中 10°坡面产流速率最大 30°坡面产流速率最小.说明在相同地形条件下 无植被覆盖的坡面产流速率增长迅速 水分流失剧烈 而坡面产流速率对坡度的响应可能存在差异.

不同处理下次降雨的产流量在 2.54 ~ 48.15 mm 变化剧烈 变异系数为 0.79.整体而言 植被地上部分的利用对产流量影响显著(图 3) ,随利用强度增加 产流量明显增加.特别是在重度利用增强至完全利用时 增幅明显增大 单位面积径流量迅速上升.这一强度转折点恰恰也是坡面有无植被覆盖的转折点 说明坡面草地植被地上部分对调控径流发挥了重要作用.原因在于植被的地上部分常呈多层重叠且具有一定弹性和开张角 能有效分散和消减雨滴动能 截流的部分雨滴沿茎干流落地表或由枝叶滴落地面 改变了降雨的落地方式 直接降低植被覆盖下的降雨强度和降水量.另一方面 由于地表植物的存在 增加了地表糙度 改变了径流的水动力学特性 进而影响径流侵蚀能力.上述原因又直接与植被覆盖度有关 最终导致径流量随利用强度的加强而增加^[20-23].相同利用强度下 坡度对产流量的响应也存在差异 在有植被地上部分的坡面 随坡度增加 产流量增大.此规律与车明轩等^[24]、郑子成等^[25]有关紫色土坡面坡度对产流的研究成果相同 ,Wang 等^[26]在模拟降雨条件下耕作措施和坡度对产流产沙的影响研究中也得到类似结论.这是由于坡度由

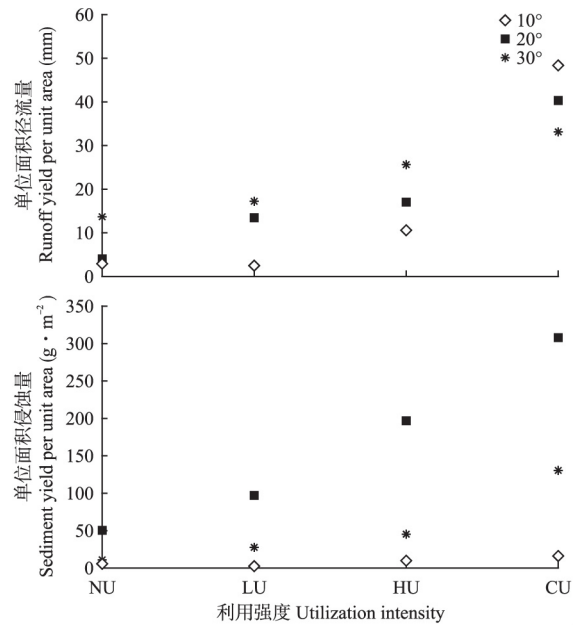


图 3 坡面单位面积径流量和单位面积侵蚀量的变化
Fig.3 Variation of runoff yield per unit area and sediment yield per unit area.

缓到陡重力作用逐渐增强 径流所受顺坡方向分力增加 导致入渗时间缩短 直接影响径流入渗量.而在无植被地上部分坡面 随坡度增加 产流量反而减少.原因可能是在无植被地上部分覆盖的坡面产流量主要由所承接的雨水量控制 随着坡度的增加 坡面垂直投影面减小 导致其承接雨水量依次减小.说明在斜坡坡长不变的无植被地上部分覆盖坡面 可能会出现径流量随坡度增大而减小的现象.这也说明坡度和植被地上部分变化的交互作用对坡面产流存在影响.次降雨产流量的方差分析结果显示 坡度对次降雨产流量的影响不显著 且对产流变化几乎没有贡献.植被地上部分利用强度对次降雨产流量变化的贡献率达 77% 影响极显著.误差项对产流量变化的贡献超过 23%(表 2) ,间接说明野外试验结

表 2 基于方差分析的各因子对退耕坡面产流量和侵蚀量的显著性及贡献率
Table 2 ANOVA of significance and contribution rate of various factors affecting runoff and sediment yield on the grain-for-green slope

变量 Variable	来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Sum of mean square	F 值 F value	显著性 Significance	因子贡献率 Contribution rate of each source (%)
产流量 Runoff yield	坡度 Slope	74.99	2	37.50	0.71	0.527	0
	利用强度 Utilization intensity	2037.79	3	679.26	12.93	0.005	77.4
	误差 Error	315.17	6	52.53			23.8
	总计 Total	2427.95	11				
侵蚀量 Sediment yield	坡度 Slope	50045.27	2	25022.64	8.40	0.018	45.7
	利用强度 Utilization intensity	28545.94	3	9515.31	3.19	0.105	20.3
	误差 Error	17881.58	6	2980.26			34.0
	总计 Total	96472.79	11				

果变化的复杂性.

2.2 坡面产沙变化特征

由图 4 可以看出,所有处理下坡面侵蚀速率在 $0.01 \sim 12.63 \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,平均值为 $(1.35 \pm 1.79) \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$,变异性较大,变异系数达 1.33.随降雨历时延长,除 30° 坡面侵蚀速率呈波动增加,峰值出现在降雨后期外,其余试验的侵蚀峰值出现在降雨中前期,部分试验侵蚀峰值为产流后的前两个值,之后迅速降低,中后期趋于波动稳定.这种现象可能是由于降雨开始前地表表层疏松或结皮影响的结果^[27-28],然后在雨滴的持续打击下,土层表面被压实紧密以及薄层水流的出现,使得侵蚀速率逐渐减小或趋于稳定.整体而言,随降雨历时延长,不同处理下坡面侵蚀速率变化比较复杂,规律性差.相同利用强度下, 20° 坡面侵蚀产沙速率最大, 30° 坡面次之, 10° 坡面最小,如不考虑利用强度的变化, 10° 、 20° 和 30° 坡面降雨过程中的平均侵蚀速率分别为 (0.16 ± 0.21) 、 (2.89 ± 2.21) 和 $(1.00 \pm 0.92) \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.相同坡度下,随利用强度的加强,坡面侵蚀速率增大,如不考虑坡度变化,NU、LU、HU 和 CU 处理下的平均坡面侵蚀速率分别为 (0.41 ± 0.40) 、 (0.77 ± 1.06) 、 (1.50 ± 1.75) 和 $(2.72 \pm 2.34) \text{ g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$.

不同处理下次降雨的侵蚀量在 $2.32 \sim 304.42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,变异系数为 1.26.坡度与利用强度对侵蚀量的变化都有明显影响.相同坡度下,侵蚀量随利用强度的加强呈现增加趋势.这与径流量随利用强度的

变化规律相同.这是由于水流所具有的能量与水流质量和流速有关,且植被覆盖状况好,可有效降低地表流速,导致径流能量损失,坡面侵蚀量降低.说明随着利用强度的增长,植被覆盖度减少,坡面水土流失问题加剧^[29].在相同利用强度下,侵蚀量表现为 20° 坡最大, 30° 坡次之, 10° 坡最小,且 20° 坡面侵蚀量是 10° 坡面的 8~20 倍,是 30° 坡面的 2~5 倍.说明此试验坡面侵蚀的临界坡度可能在 $20^\circ \sim 30^\circ$.这与胡世雄等^[30]运用能量法、泥沙运动力学法结合室内外试验观测资料对临界坡度的分析结果($22^\circ \sim 26^\circ$)接近,但其分析对象(裸露黄土和红土坡面)与本试验还存在差异.此外,因研究手段、环境条件等各不相同,前人对临界坡度值的预测结果多在 $25^\circ \sim 57^\circ$ 之间^[12-14].由次降雨方差分析结果表明,坡度对次降雨侵蚀量的贡献率为 45.7%,对侵蚀量影响显著.有研究表明,坡面侵蚀量的大小主要与坡面流切应力、坡面流速和土壤抗冲蚀能力有关.而这三方面因素又与所处坡面的坡度相关^[31],这就解释了坡度对侵蚀量贡献率较大的原因.数据分析还显示,误差项对坡面产沙量变化的贡献率为 34.0%(表 2),大于利用强度对产沙量变化的贡献,说明野外坡面产沙受诸多因素的影响,侵蚀产沙过程比较复杂,可变性大.

2.3 植被地上部分利用的水、沙响应特征

用相对增水(沙)量和绝对增水(沙)量来反映各利用强度下植被地上部分与水沙变化的响应关

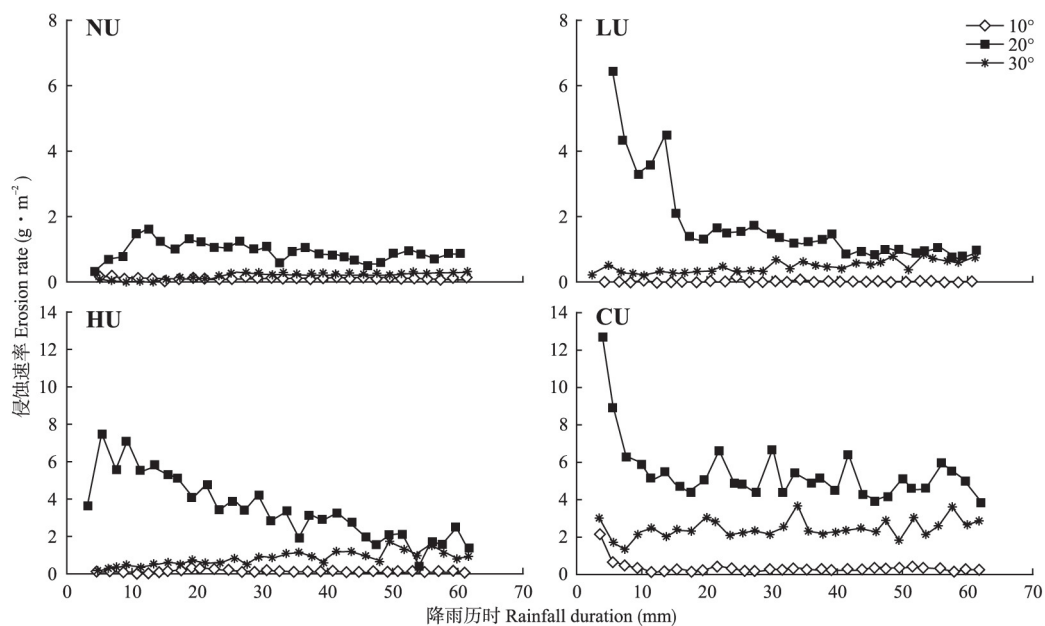


图 4 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下坡面侵蚀速率随降雨历时的变化

Fig.4 Variation of erosion rate during the rainfall with $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ rainfall intensity.

系.结果表明,相同坡度下,相对增水量随利用强度加强而增加.轻度、中度和完全利用强度下的平均相对增水量分别为 79.1%、226.2%和 874.5%(图 5).说明当利用强度逐级增加时,尽管植被覆盖度基本呈等差减少,但径流量的增幅变化却愈加剧烈.尤其在重度利用转至完全利用强度时,坡面产流量显著上升.相同利用强度下,各坡度相对增水量变化存在差异.在轻度利用小区,相对增水量为 $20^{\circ} > 30^{\circ} > 10^{\circ}$;在重度利用小区,相对增水量为 $10^{\circ} > 20^{\circ} > 30^{\circ}$,说明坡度对不同利用强度下产流量的影响存在差异.如不考虑利用强度的变化,平均相对增水量随坡度的增加而减小.相同坡度下,随利用强度加强,绝对增水量呈显著增大趋势.在轻度和重度利用下, 20° 坡面绝对增水量最大;在完全利用下, 10° 坡面绝对增水量最大.平均绝对增水量的最大坡度为 20° ,最小为 30° ,且 10° 和 20° 比较接近.需要说明的是, 10° 轻度利用小区的相对增水量和绝对增水量都为负值,其原因可能与该处理小区收集口处发现的面积约 40 cm^2 的蚂蚁巢穴有关.其在一定程度上加速了径流的下渗,影响径流的收集.

相同坡度下,相对增沙量随利用强度的增加而增加.这与相对增水量变化相同,说明相较于未利用坡面,利用强度的增加会同时加剧坡面的产流量和产沙量.相同利用强度下,相对增沙量表现为 $30^{\circ} > 20^{\circ} > 10^{\circ}$,平均相对增沙量分别为 47.9%、295.0%和 577.9%.相对增沙量最大值(1218.9%)出现在完全利用的 30° 坡面.随利用强度增大,绝对增沙量与相对增沙量的变化趋势一致,但绝对增沙量对坡度的响应与相对增沙量不一致, 20° 坡面的绝对增沙量明显大于 10° 和 30° 坡面.

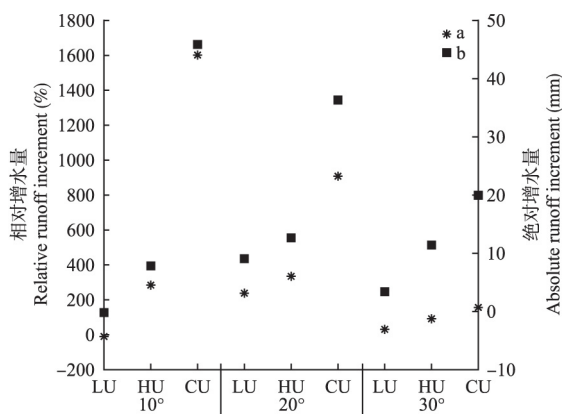


图 5 90 mm · h⁻¹雨强下绝对增水量 (a) 和相对增水量 (b) 的变化
Fig.5 Variation of absolute runoff increment (a) and relative runoff (b) increment under 90 mm · h⁻¹ rainfall intensity.

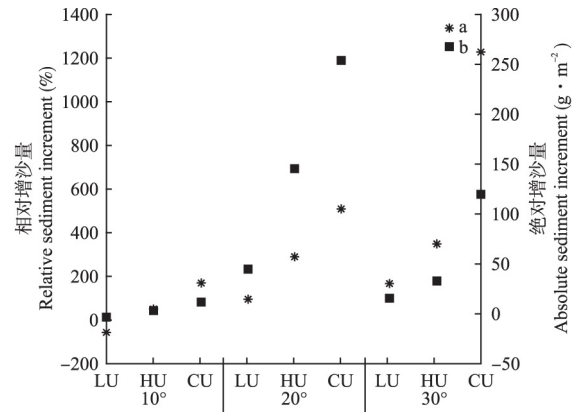


图 6 90 mm · h⁻¹雨强下绝对增沙量 (a) 和相对增沙量 (b) 的变化
Fig.6 Variation of absolute sediment increment (a) and relative sediment increment (b) under 90 mm · h⁻¹ rainfall intensity.

3 讨 论

合理利用黄土高原地区退耕坡面植被地上部分是该区域畜牧业快速发展和升级的潜在推力.植被地上部分利用对坡面产流、产沙的影响变化是评价利用是否合理的重要参考.本试验结果表明,坡面地上部分植被的利用增加了降雨过程中的产流、产沙速率,也增加了整场降雨的产流、产沙总量.随利用强度的加强,即坡面地上部分植被盖度的减少,产流、产沙量都呈明显增大趋势,尤其地上植被完全被利用后,产流、产沙量增加显著,最大相对增水、增沙量分别达 1587%和 1219%.说明植被地上部分的利用对坡面产流、产沙影响显著.该结论与大多研究植被对坡面产流、产沙影响的试验结果基本一致^[32-34].本研究结果也显示,相同利用强度下,坡面产流、产沙对坡度的响应还存在差异.坡面产流、产沙随坡度变化的部分结果与以往研究存在不一致现象^[35],可能与野外试验坡面状况和降雨条件存在一定的不确定性有关.整体上看, 20° 坡面在相同利用强度下绝对增水、增沙量高于 10° 和 30° 坡面,尤其在有植被覆盖的坡面.这与以往关于临界坡度为 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 的研究成果一致^[11, 30].但是, 20° 坡面的相对增沙量低于 30° 坡面,表现与绝对增量不一致,说明在不同利用强度下产流、产沙与坡度间响应关系的复杂性.

神木年降雨量主要分布在 200 ~ 600 mm,平均值为 423 mm^[17].假定每次降雨都是以 90 mm · h⁻¹的雨强进行,设定 270、450、630 和 810 mm 4 个年降雨量等级,认为 810 mm 降雨为极端降雨年份,基于单次降雨的侵蚀结果,推算年侵蚀量(表 3).根据

表 3 基于本研究估算不同年降雨量下的年土壤侵蚀量

Table 3 Estimation of annual soil erosion amount under different annual precipitations based on this study

坡度 Slope (°)	利用强度 Utilization intensity	次侵蚀量 Single soil erosion amount ($t \cdot km^{-2} \cdot h^{-1}$)	年侵蚀量 Annual soil erosion amount ($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)			
			270 mm	450 mm	630 mm	810 mm
10	CU	17.4	52.2	87.0	121.8	156.7
10	HU	9.4	28.1	46.9	65.6	84.4
10	LU	2.3	7.0	11.6	16.2	20.9
10	NU	6.6	19.7	32.8	45.9	59.0
20	CU	304.4	913.3	1522.1	2131.0	2739.8
20	HU	196.5	589.4	982.4	1375.4	1768.3
20	LU	97.0	291.0	485.0	679.1	873.1
20	NU	50.5	151.4	252.3	353.2	454.1
30	CU	126.9	380.6	634.3	888.0	1141.8
30	HU	43.0	129.0	215.0	301.0	386.9
30	LU	25.8	77.3	128.8	180.3	231.9
30	NU	9.6	28.9	48.1	67.3	86.6

2008 年颁发的中华人民共和国水利行业标准《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190-2007)^[36],西北黄土高原地区容许土壤流失量为 $1000 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,微度土壤侵蚀为 $<1000 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,轻度土壤侵蚀为 $1000 \sim 2500 t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$.与表 3 中的计算结果对比发现,年降雨量为 270 mm 时,坡面的侵蚀强度都在容许土壤流失量以下,为微度侵蚀;年降雨量为 450 mm 时,只有完全利用的 20°坡面侵蚀强度为轻度侵蚀,其余都为微度侵蚀;降雨为 630 mm 时,只有完全利用和重度利用的 20°坡面侵蚀强度为轻度侵蚀,其余都为微度侵蚀;降雨为极端的 810 mm 时,也只有完全利用和重度利用的 20°坡面及完全利用的 30°坡面侵蚀强度为轻度侵蚀,其余都为微度侵蚀.说明在降雨量正常年份,神木地区退耕坡面植被地上部分的利用对坡面土壤侵蚀不会造成实质性影响.另外,在计算过程中并没有考虑植被地上部分被利用后又重新长出植被后对产沙的影响.根据野外观测,被刈割地上部分的天然植被基本在 2 周左右又会重新长出,新长出的植被地上部分也能一定程度上减少土壤流失.综上,在研究区域 15 年左右的退耕封禁坡面上,植被地上部分覆盖在 25% 左右时,坡面年土壤侵蚀基本低于容许土壤流失量.但是在植被利用过程中还应注意坡度因素的影响,20°~30°的坡面应适当增加植被覆盖度.需要说明的是,上述分析是基于次降雨试验结果的推算,不能一概而论地评价所有退耕坡面植被对土壤侵蚀的影响,植被的水土保持效应受诸多因素的影响.朱冰冰等^[37]指出,植被的空间分布格局及其与地貌的不同组合都会影响植被的水土保持作用,进而影响植被

临界植被覆盖度.其次,植被水土保持效应存在明显的尺度性,影响水土流失的因素也随尺度的增大而愈加复杂^[38].故由于研究尺度的不同,得到的临界植被覆盖度也不同.本试验的植被类型为自然恢复的草本植被,而在流域尺度上实际包括多种植被类型,对土壤侵蚀的调控机理也存在差异.于国强等^[39]研究表明,林地具有蓄水减沙的水土保持功效,而草地具有直接拦沙的水土保持功效.试验坡面的退耕年限为 15 年左右,而不同退耕年限的坡面植被的多样性、坡面土壤养分及其理化性质均存在差异^[40].这将直接影响降雨过程中土体的抗蚀能力、水分入渗等过程,最终影响坡面的产流、产沙结果.此外,根系能提高土壤结构的抗蚀力,尤其体现在根系网的固土功能.本试验中没有进行植被根系的水土保持功效等相关研究,后续将在这方面加强.影响植被水土保持效应的相关研究众多且研究成果不尽相同,在保证植被水土保持功效的同时对植被进行合理利用更是相对复杂又十分必要.本试验通过对不同植被利用强度下坡面产流、产沙变化规律进行研究,旨在提供小区尺度下退耕封禁坡面合理利用强度的参考,使退耕封禁坡面植被在不会造成土壤侵蚀风险增加的前提下得到充分利用,同时可能缓解流域产水量和土壤含水量的减小,减少植被对水资源的需求量,使黄土高原植被恢复低于黄土高原水资源植被承载力的阈值,保持退耕封禁坡面植被的可持续性,带动区域经济发展.

4 结 论

本试验通过野外实地模拟降雨,对不同坡度和

利用强度条件下坡面产流、产沙过程及总量变化特征进行比较分析,用相对(绝对)增水量和相对(绝对)增沙量来反映施加不同强度利用后各坡度坡面的水沙响应关系.主要结论如下:

坡面径流速率的变化趋势表现为降雨初期迅速增长,中后期增长变缓或趋于准稳定状态.侵蚀速率的变化趋势因坡度的不同存在差异,大体表现为 20° 坡面侵蚀速率呈现初期迅速降低,中后期趋于稳定趋势,其余两个坡度基本呈稳定或缓慢增长趋势.

植被地上部分利用强度对产流量影响显著,对次降雨产流量变化的贡献率达 77%.相对增水量和相对增沙量均随利用强度加强而增加.坡度对侵蚀量影响显著,对次降雨侵蚀量变化贡献率为 46%.相同利用强度下,各坡度坡面侵蚀量大小表现为 $20^\circ > 30^\circ > 10^\circ$,但相对增沙量却随坡度的增加而增加.

在退耕 15 年左右的坡面,当植被地上部分覆盖度达到 25%时,年土壤侵蚀量基本小于容许土壤侵蚀量.研究区临界坡度可能在 20° 左右,应加强此坡度下坡面植被的恢复和保护工作.

参考文献

- [1] Jiang C, Wang F, Zhang H, et al. Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000–2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration. *Ecological Engineering*, 2016, **97**: 258–271
- [2] Wang B (汪滨), Zhang Z-Q (张志强). Land use change driven by Sloping Land Conversion Program in typical watershed on Loess Plateau and its rationality evaluation. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2017, **33**(7): 235–245 (in Chinese)
- [3] Shan L (山仑). Rotational herding or permanent prohibition of grazing: Discussion on strengthening the development of grassland animal husbandry on the Loess Plateau. *China Awards for Science and Technology* (中国科技奖励), 2011(6): 6–7 (in Chinese)
- [4] Shao M-A (邵明安), Jia X-X (贾小旭), Wang Y-Q (王云强), et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2016, **31**(1): 14–22 (in Chinese)
- [5] Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, **6**: 1019–1022
- [6] Sun J-X (孙吉雄). Grassland Culture (for Grassland Specialty). Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [7] Cheng J-M (程积民), Zou H-Y (邹厚远). Effects of protective growing cutting and grazing on the vegetation of grassland. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 1998, **5**(1): 36–54 (in Chinese)
- [8] Cheng J-M (程积民), Jing Z-B (井赵斌), Jin J-W (金晶炜), et al. Restoration and utilization mechanism of degraded grassland in the semi-arid region of Loess Plateau. *Scientia Sinica Vitae* (中国科学: 生命科学), 2014, **44**(3): 267–279 (in Chinese)
- [9] Li K-Q (李开权). Hydrological effect of vegetation on the ground. *Journal of Qinghai University* (Natural Science) (青海大学学报: 自然科学版), 2013, **31**(3): 12–16 (in Chinese)
- [10] Wang H-S (王晗生), Liu G-B (刘国彬), Wang Q-N (王青宁). Effect of vegetation as whole in watershed on protecting soil from erosion and dissection of its landscape structure. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2000, **14**(suppl.1): 73–77 (in Chinese)
- [11] Jin C-X (靳长兴). A theoretical study on critical erosion slope gradient. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1995, **50**(3): 234–239 (in Chinese)
- [12] Peng H (彭华). Research progress on critical slope of soil erosion. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation* (水土保持科技情报), 2004(2): 30–32 (in Chinese)
- [13] Lin J-L (林敬兰), Chen M-H (陈明华), Zhou F-J (周伏建), et al. Relationship between slope degree and soil erosion in the south Fujian. *Fujian Journal of Agricultural Sciences* (福建农业学报), 2002, **17**(2): 86–89 (in Chinese)
- [14] Wang X-K (王协康), Fang D (方铎). Study on critical gradient of slope surface erosion. *Sichuan Water Power* (四川水力发电), 2000, **19**(2): 11–13 (in Chinese)
- [15] Zhao H-L (赵哈林), Zhao X-Y (赵学勇), Zhang T-H (张铜会), et al. Boundary line on agro-pasture zigzag zone in North China and its problems on eco-environment. *Advance in Earth Sciences* (地球科学进展), 2002, **17**(5): 739–747 (in Chinese)
- [16] Zha X (查轩), Tang K-L (唐克丽). Study on comprehensive control model of small watershed ecoenvironment in water and wind crisscrossed erosion zone. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2000, **15**(1): 97–100 (in Chinese)
- [17] Wu S-Y (吴胜勇). Analysis of climate characteristics and change in Shenmu County in recent 55 years. *Journal of Shaanxi Meteorology* (陕西气象), 2013(2): 20–23 (in Chinese)
- [18] Li Y-Y (李裕元), Shao M-A (邵明安). Degradation process and plant diversity of alfalfa grassland in North Loess Plateau of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2321–2327 (in Chinese)
- [19] Tang K-L (唐克丽). Regional Characteristics of Soil Erosion and Its Control Approaches on Loess Plateau. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese)
- [20] Yair A, Raz-Yassif N. Hydrological processes in a small arid catchment: Scale effects of rainfall and slope length. *Geomorphology*, 2004, **61**: 155–169
- [21] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Calvo-Cases A, et al.

- Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Process & Landforms*, 2010, **32**: 85–101
- [22] Morenode IHM. Development of soil physical structure and biological functionality in mining spoils affected by soil erosion in a Mediterranean-Continental environment. *Geoderma*, 2009, **149**: 249–256
- [23] Zhao M-J (赵梦杰), Yao W-Y (姚文艺), Wang J-H (王金花), et al. Experimental study on influence of vegetation coverage to soil infiltration and runoff-producing of the Loess Plateau Region. *Soil and Water Conservation in China* (中国水土保持), 2015(6): 41–43 (in Chinese)
- [24] Che M-X (车明轩), Gong Y-B (宫渊波), Mu N (穆罕默德·纳伊姆·汉), et al. Impact of rainfall intensity, slope gradient on overland flow of purple soil under simulated rainfall. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2016, **36**(4): 164–168 (in Chinese)
- [25] Zheng Z-C (郑子成), He S-Q (何淑琴), Yin Z (尹忠), et al. Phosphorus loss of surface runoff in sloping cropland at different slopes during maize growing season. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2013, **28**(5): 109–114 (in Chinese)
- [26] Wang L, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall. *Soil and Tillage Research*, 2017, **166**: 147–156
- [27] Jin C-X (靳长兴). The role of slope gradient on slope erosion. *Geographical Research* (地理研究), 1996, **15**(3): 57–63 (in Chinese)
- [28] Zhang H-R (张会茹), Zheng F-L (郑粉莉). Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2011, **25**(3): 40–43 (in Chinese)
- [29] Zehe E, Sivapalan M. Threshold behaviour in hydrological system as (human) geo-ecosystems: Manifestations, controls, implications. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2009, **13**: 1273–1297
- [30] Hu S-X (胡世雄), Jin C-X (靳长兴). Theoretical analysis and experimental study on the critical slope of erosion. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 1999, **54**(4): 347–356 (in Chinese)
- [31] Liu Q-Q (刘青泉), Chen L (陈力), Li J-C (李家春). Influences of slope gradient on soil erosion. *Applied Mathematics and Mechanics* (应用数学和力学), 2001, **22**(5): 449–457 (in Chinese)
- [32] Zhang Y-F (张祎帆), Zhao Q-H (赵清贺), Ding S-Y (丁圣彦), et al. Effects of slope gradient and vegetation coverage on hydrodynamic characteristics of overland flow on silty riparian slope. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(8): 2488–2498 (in Chinese)
- [33] Dai J-M (戴金梅), Zha X (查轩), Huang S-Y (黄少燕), et al. Effects of slope gradients on erosion under different vegetation coverage on purple slopes. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2017, **31**(3): 33–38 (in Chinese)
- [34] Cao Z-H (曹梓豪), Zhao Q-H (赵清贺), Ding S-Y (丁圣彦), et al. Effect of slope gradient and vegetation cover on sediment yielding characteristics of the riparian slope. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2017, **32**(11): 1892–1904 (in Chinese)
- [35] Mu W-B (穆文彬), Li Y-H (李义豪), Li C-Z (李传哲), et al. Rainfall runoff test on bare soil with different slope gradient and soil moisture content. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology* (南水北调与水利科技), 2016, **14**(6): 6–11 (in Chinese)
- [36] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China (中华人民共和国水利部). Standard for Classification and Classification of Soil Erosion (SL 190–2007). Beijing: China Water Conservancy and Hydro-power Press, 2015 (in Chinese)
- [37] Zhu B-B (朱冰冰), Li Z-B (李占斌), Li P (李鹏), et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(3): 401–407 (in Chinese)
- [38] Chen D-L (陈端吕), Peng B-F (彭保发), Li J-P (李际平). A review on scale-dependency of soil and water conservation effect of vegetation. *Hubei Agricultural Sciences* (湖北农业科学), 2012, **51**(3): 433–437 (in Chinese)
- [39] Yu G-Q (于国强), Li Z-B (李占斌), Pei L (裴亮), et al. Difference of runoff-erosion-sediment yield under different vegetation type. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2012, **26**(1): 1–5 (in Chinese)
- [40] Guo M (郭曼), Zheng F-L (郑粉莉), He W-X (和文祥), et al. Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in lands of different abandoned years in the loess hilly-gully region. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(5): 979–986 (in Chinese)

作者简介 王子豪,男,1994年生,硕士研究生.主要从事坡面土壤侵蚀与植被互作研究. E-mail: 1076809928@qq.com

责任编辑 杨弘

王子豪,张风宝,杨明义,等. 水蚀风蚀交错区退耕坡面植被利用对产流产沙的影响. *应用生态学报*, 2018, **29**(12): 3907–3916

Wang Z-H, Zhang F-B, Yang M-Y, et al. Effect of vegetation utilization on runoff and sediment production on grain-for-green slopes in the wind-water erosion crisscross region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(12): 3907–3916 (in Chinese)