

# 短历时强降雨对喀斯特玉米坡地产流产沙的影响

杨应冲<sup>1,2</sup>, 戴全厚<sup>1,2</sup>, 王勇<sup>1,2</sup>, 张友<sup>1,2</sup>, 姚一文<sup>1,2</sup>

(1.贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 2.贵州大学 土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 研究短历时强降雨对喀斯特坡耕地产流产沙的影响, 揭示喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征机理, 为解决喀斯特坡耕地土壤侵蚀和保障粮食生产提供科学依据。[方法] 通过人工模拟降雨试验, 以喀斯特裸坡地和玉米坡地为研究对象, 研究短历时强降雨对喀斯特坡耕地产流产沙的影响。[结果] ①裸坡地和玉米地地表产流产沙模数随坡度的增大而增大, 当坡度相同时, 玉米地地表产流产沙模数显著小于裸坡地 ( $p < 0.05$ ); 随着降雨历时的增加, 裸坡地和玉米地地表产流模数呈现出先增大后保持稳定的趋势, 而地表产沙模数则是先增大后减小。②裸坡地和玉米地各壤中流产流模数随坡度的增大而增大; 当坡度相同时, 玉米地各壤中流产流量显著小于裸坡地 ( $p < 0.05$ ), 其中坡度为  $20^\circ$  时, 玉米地壤中流 (15—25 cm) 总产流量相对裸坡地减少了 62.59%。③当坡度不变时, 玉米地地下产沙量和产沙模数显著小于裸坡地 ( $p < 0.05$ ); 随着降雨历时的增加, 裸坡地与玉米地地下产流模数呈现出不断增大的趋势, 其变化趋势基本保持一致, 而地下产沙模数呈现先增大后减小的趋势, 在 20~30 min 之间达到最大产沙模数。④比较不同坡度裸坡地与玉米地各产流产沙之间的相关性, 发现玉米地相比裸坡地地下产沙与地表产流、地下产流、地表产流之间相关性增强, 而地表产沙与地表产流、地下产流之间的相关性减弱。[结论] 强降雨下玉米坡地能够增加入渗, 具有阻控和缓蚀的作用, 其中地表产流产沙模数和壤中流产流模数随坡度的增大而增大, 而地下产流模数随降雨历时增加呈不断增大的趋势, 地下产沙模数呈先增大后减小的趋势。

**关键词:** 喀斯特坡耕地; 短历时强降雨; 产流模数; 产沙模数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0126-09

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 杨应冲, 戴全厚, 王勇, 等. 短历时强降雨对喀斯特玉米坡地产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 126-134. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.013; Yang Yingchong, Dai Quanhou, Wang Yong, et al. Effects of short-duration high-intensity rainfall on runoff and sediment yield on karst corn slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 126-134.

## Effects of Short-Duration High-Intensity Rainfall on Runoff and Sediment Yield on Karst Corn Slope

Yang Yingchong<sup>1,2</sup>, Dai Quanhou<sup>1,2</sup>, Wang Yong<sup>1,2</sup>, Zhang You<sup>1,2</sup>, Yao Yiwen<sup>1,2</sup>

(1.College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025;

2.Soil Erosion and Ecological Restoration Research Center, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025)

**Abstract:** [Objective] The effects of short-duration high-intensity rainfall on runoff and sediment yield in a karst slope farmland were analysed to reveal the mechanism of soil erosion, in order provide a scientific basis for reducing it, and ensuring food production in karst slope farmlands. [Methods] Through simulated rainfall experiments, the effects of short-duration high-intensity rainfall on the runoff and sediment yields over a karst slope farmland were studied by taking a karst bare slope and a corn slope as research objects. [Results] ① Surface runoff and sediment yield moduli of both bare and corn slopes increased with the rise of the slope. At similar slopes, the surface runoff and sediment yield moduli of the corn slope were much less than those of the bare slope ( $p < 0.05$ ). With the increase of rainfall duration, the surface runoff yield moduli of both bare and corn slopes increased first and then remained stable, while the surface sediment yield moduli

收稿日期: 2024-03-05

修回日期: 2024-05-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特碳酸盐岩与碎屑岩交互区坡面土壤侵蚀过程与机理”(42167044)

第一作者: 杨应冲(1999—), 男(汉族), 贵州省晴隆县人, 硕士研究生, 研究方向为水土流失与水土保持。Email: 2922289617@qq.com。

通信作者: 戴全厚(1969—), 男(汉族), 陕西省长武县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。Email: qh-dairiver@163.com。

increased first and then decreased. ② The runoff yield moduli of the respective subsurface runoffs of bare and corn slopes increased with the rise of the slope. At a similar slope, the runoff yield of respective subsurface runoffs in the corn slope was much less than that in the bare slope ( $p < 0.05$ ), whereas when slope was  $20^\circ$ , the total runoff yield of the corn slope's subsurface runoffs (15—25 cm) decreased by 62.59% compared with that of the bare slope. ③ When the slope was fixed, underground runoff and sediment yield moduli of the corn slope were much less than those of the bare slope ( $p < 0.05$ ). With the increase of rainfall duration, the underground runoff yield moduli of both bare and corn slopes showed a trend of continuous increase, where their changes were basically consistent, while the underground sediment yield moduli showed a trend of first increasing and then decreasing and reached a maximum between 20 min and 30 min. ④ By comparing the correlations between the runoff and sediment yields of the bare and the corn slopes under different slopes, it was found that the correlations between the underground sediment yield and the surface runoff yield, underground runoff yield, and surface sediment yield were enhanced in the corn slope compared with the bare slope, whereas the correlations between the surface sediment yield and the surface and underground runoff yields were weakened. [Conclusion] Under high-intensity rainfall, corn slope can increase infiltration, which has the effect of blocking and inhibiting erosion, in which the surface and subsurface runoff moduli increase with the increase of the slope, the underground runoff moduli increase with the increase of the rainfall duration, and the sediment yield moduli increases first and then decreases.

**Keywords:** karst slope farmland; short-duration high-intensity rainfall; runoff yield modulus; sediment yield modulus

在全球正经历以变暖为主要气候变化特征的背景下,极端天气气候事件频繁发生<sup>[1-3]</sup>。短历时强降雨是指短时间内降水强度较大,降水量达到或超过某一量值的强降水事件,是极端天气气候事件之一<sup>[4]</sup>。短时强降雨具有持续时间短、雨强大、突发性强等特点,在地质条件脆弱地区易引发水土流失和山体滑坡等灾害的发生,给自然生态系统和社会经济带来了严重影响<sup>[5]</sup>。极端天气下如何保障粮食生产安全也逐渐成为人类面临最艰巨的挑战之一<sup>[6-7]</sup>。喀斯特玉米坡地是贵州省玉米产量的主要来源之一,同时也是主要的坡耕地利用类型。短时强降雨对于喀斯特这样典型的生态脆弱区的危害更是不可估量的。喀斯特地区由于其特殊的“二元结构”,导致其土壤侵蚀过程的特殊性和复杂性<sup>[8]</sup>。土壤侵蚀和水土流失严重阻碍了喀斯特地区的生态恢复与重建,因此,如何解决土壤侵蚀成为当地人民发展的首要环境问题<sup>[9-10]</sup>。目前对于坡耕地土壤侵蚀的影响因素,国内外学者已开展大量关于坡度<sup>[11]</sup>、坡长<sup>[12]</sup>、降雨强度<sup>[13]</sup>、岩石裸露率<sup>[14]</sup>、地下孔(裂)隙度等<sup>[15]</sup>相关因子的研究。同时,在喀斯特地区径流和土壤流失还受到土地利用管理和植被覆盖的影响,植被对径流形成、泥沙产出以及水土保持方面具有显著的作用和重要的地位<sup>[16-17]</sup>。而对于短历时强降雨条件下不同坡面的土壤侵蚀特征相关方面的研究还比较匮乏,特别是针对喀斯特地区的玉米坡地。为此,本文通过人工模拟降雨试验,以喀斯特裸坡地和玉米坡地为研究对象,研究短历时

强降雨对喀斯特坡耕地产流产沙的影响,揭示喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征机理,为解决喀斯特坡耕地土壤侵蚀和保障粮食生产提供重要的科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验土壤与试验设备

1.1.1 试验土壤 所用土壤是 2021 年 8 月 6 日在贵州省贵阳市花溪区石坝镇(北纬  $26^\circ 26' 31.52''$ , 东经  $106^\circ 34' 9.84''$ )典型喀斯特区域坡耕地挖取的由碳酸盐岩和钙质土组成的石灰性黏壤土。室内将采集土壤的根系及石块等杂质剔除,并将土壤团块碎化,试验前对土壤进行过筛处理。然后根据野外调查土壤容重平均参数进行填土控制,按每层 10 cm 厚度分 3 层回填土,由上至下各土层容重依次为 0.99, 1.03 和  $1.12 \text{ g/cm}^3$ , 回填土的总土层厚度平均为 30 cm,且土表面与碳酸盐岩石上标记的露头线水平,填土表面用特制木板拨平,填土边界用手压实减小边缘效应影响。

1.1.2 试验设备 试验所需的设备主要由钢槽和降雨设备两部分组成(图 1)。试验所用钢槽为自主设计的长 2 m,宽 1 m,深 0.35 m 的钢槽,槽底部设有 25 个矩形孔,模拟地下孔(裂)隙,矩形孔的长度和宽度分别为 10 和 20 cm,钢槽的孔(裂)隙度 1%~5% 可调,坡度为  $0^\circ \sim 25^\circ$  可调。在钢槽的上下两层各设置了一个地表和地下产流的集水槽,在钢槽的中部每隔 10 cm 设置一个壤中流的集水槽,共设置 5 个。降雨设备为 QYJY-501 型全自动、不锈钢自动降雨装

置,包括降雨器、雨量计、水泵和控制器等。降雨器降雨高度 6 m,降雨设备的有效面积为  $6.5\text{ m} \times 6.5\text{ m}$ ,均匀度  $>85\%$ ,降雨设备的调节精度为  $7\text{ mm/h}$ ,调节变化时间  $<30\text{ s}$ ,雨量可由控制器或人工控制,雨量持续时间可随意调节。

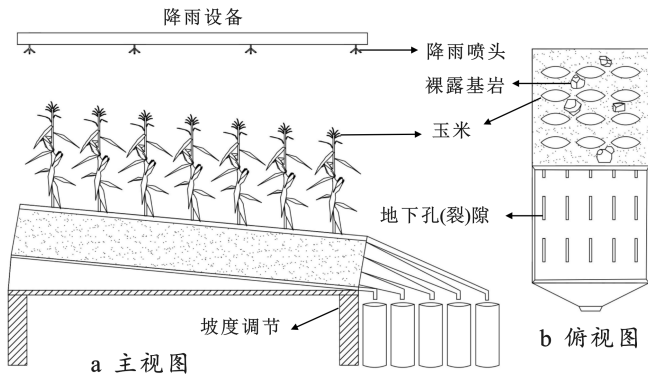


图 1 降雨设备及钢槽示意图

Fig.1 Schematic diagram of rainfall equipment and steel troughs

## 1.2 试验设计

根据研究,降雨强度、坡度、不同覆盖及降雨次数对地表径流、壤中流、岩土界面流和地下裂隙流等具有重要影响,土壤溶质随径流迁移量变化主要受水流与土壤接触时间和作用程度的影响。因此试验模拟喀斯特区域裸坡地和玉米坡地的坡面,采用地下孔(裂)隙度为  $5\%$  不变,坡度设计为  $10^\circ$  和  $20^\circ$  两个坡度,石块按照野外实地的一般规律进行埋入处理,基岩裸露率设置为  $10\%$ ,玉米坡地用夏季成熟玉米秸秆根据实地长势埋入,玉米埋入密度为  $4\ 333\text{ 株}/\text{hm}^2$ 。然后在  $90\text{ mm/h}$  的雨强下进行降雨试验,每场降雨历时  $60\text{ min}$ ,试验开始前先进行小雨 ( $10\text{ mm/h}$ ) 沉降,使土壤紧实度接近野外实测水平,再调节坡度、雨强至设计水平,待土壤水饱和产流后,开始计时收集水样。每一场降雨重复 3 次试验,共降雨 12 场,降雨过程中分别记录和收集降雨历时为  $5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50$  和  $60\text{ min}$  时的产流产沙量。

## 1.3 试验方法及数据处理分析

1.3.1 产流量、产沙量测定 本试验设置  $10\%$  的基

岩裸露率,  $90\text{ mm/h}$  的降雨雨强,  $5\%$  的地下孔(裂)隙度,综合研究坡度对地表、地下以及各土层壤中溶质运移的影响。试验准备时将塑料容器放置在地表径流、各壤中流以及地下径流收集口处,用以收集水样,前  $30\text{ min}$  以  $5\text{ min}$  为一个测定时段,后  $30\text{ min}$  以  $10\text{ min}$  为一个测定时段,分别接收各时段内的地表径流、壤中流 a ( $0\text{—}15\text{ cm}$ )、壤中流 b ( $15\text{—}25\text{ cm}$ )、壤中流 c ( $25\text{—}35\text{ cm}$ ) 以及地下径流,然后通过对塑料容器中的产流利用量筒进行称量得到产流量。产沙量则是通过收集的含有地表径流和地下径流的沉积物通过滤纸过滤,转移到烧杯中,然后通过浑浊液静置  $24\text{ h}$  后放入  $105\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至恒重 ( $8\text{ h}$ ) 后再用电子天平称重得到。

### 1.3.2 产流模数、产沙模数计算

式中:产流模数是指在某一个时段内的产流量与对应集水面积之比,而产沙模数是指在某一个时段内的产沙量与对应集水面积之比。

$$\text{产流模数} = \frac{\text{产流量}}{\text{钢槽投影面积} \times \text{降雨历时}} \quad (1)$$

$$\text{产沙模数} = \frac{\text{产沙量}}{\text{钢槽投影面积} \times \text{降雨历时}} \quad (2)$$

1.3.3 数据处理分析 使用 Excel 2019 软件对原始数据进行处理,SPSS 22 软件对比较数据使用单因素 ANOVA 检验和双变量相关分析,用 Microsoft Excel 2019 和 Origin 2022 软件进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 强降雨下裸坡地和玉米地地表产流产沙特征

由表 1 强降雨下地表的产流产沙特征中可以看出,当坡度由  $10^\circ$  增大到  $20^\circ$  时,裸坡地和玉米地的产流产沙量以及产流产沙模数都随之增大。当坡度相同时,玉米地的产流产沙量以及产流产沙模数显著小于裸坡地 ( $p < 0.05$ ),而且产沙量之间的差别也较大。 $10^\circ$  玉米地相比  $10^\circ$  裸坡地产流模数减小了  $7.69\%$ ,产沙模数减小了  $28.57\%$ ;而  $20^\circ$  玉米地相比  $20^\circ$  裸坡地产流模数减小了  $7.69\%$ ,产沙模数减小了  $20.41\%$ 。

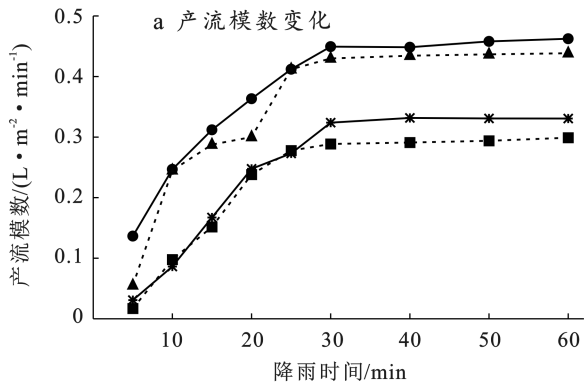
表 1 强降雨下试验小区地表产流产沙特征

Table 1 Characteristics of surface runoff and sediment yield in experimental plots under short-duration high-intensity rainfall

类型	坡度/ $(^\circ)$	产流量/L	产沙量/g	产流模数/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$	产沙模数/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1})$
裸坡地	10	$31.15 \pm 0.25^c$	$49.72 \pm 2.47^b$	$0.26 \pm 0.00^c$	$0.42 \pm 0.02^b$
	20	$46.57 \pm 1.17^a$	$59.33 \pm 2.10^a$	$0.39 \pm 0.01^a$	$0.49 \pm 0.02^a$
玉米地	10	$28.39 \pm 0.49^d$	$36.09 \pm 4.39^c$	$0.24 \pm 0.01^d$	$0.30 \pm 0.04^c$
	20	$43.49 \pm 0.04^b$	$47.15 \pm 0.86^b$	$0.36 \pm 0.00^b$	$0.39 \pm 0.01^b$

注:表中数据为平均值±标准差;同列中不同字母表示相同指标下不同类型和坡度差异显著 ( $p < 0.05$ );同行不同字母表示相同类型和坡度下不同指标差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

从图 2 可以看出,随着降雨历时的增加,裸坡地和玉米地的产流模数都随之增大,30 min 时达到最大产流模数,30 min 之后各产流模数基本保持不变。其中,20°的裸坡地和玉米地相对 10°的裸坡地和玉米地产流模数都比较大,而在同一坡度下,玉米地的产流模数要小于裸坡地。



玉米地的产沙模数随降雨历时前 15 min 增长较大,坡度为 20°时在 15 min 达到最大,10°时在 20 min 达到最大,而后随降雨历时逐渐减小。

裸坡地总体变化相对玉米地来说比较小,但也随时间呈现出先增大后减小的趋势,其最大产沙模数大于玉米地。

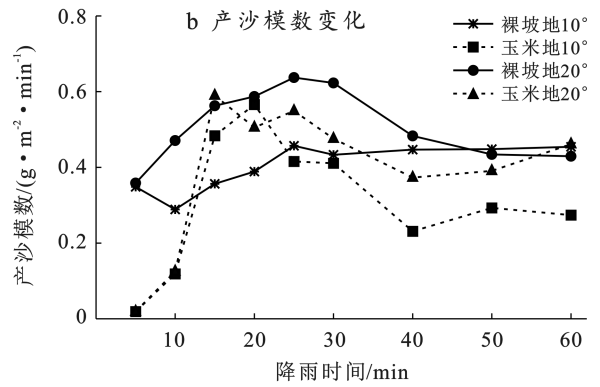


图 2 试验小区地表产流产沙模数变化特征

Fig.2 Characteristics of runoff and sediment yield modulus change of surface in experimental plots

## 2.2 强降雨下裸坡地和玉米地壤中流产流产沙特征

壤中流是指在土体表面或层状土层之间的交界面上横向流动的一种水流,是径流过程的重要组成部分。从表 2 强降雨下各壤中流产流特征可以得到,壤中流 c 25—35 cm 的总产流量显著高于壤中流 a 5—15 cm 和壤中流 b 15—25 cm,当坡度为 10°时,裸坡地壤中流 c 产流总量是壤中流 a 的 31.80 倍,是壤中流 b 的 18.90 倍,玉米地壤中流 c 产流总量是壤中流 a 的 34.76 倍,是壤中流 b 的 30.31 倍;当坡度为 20°时,裸坡地壤中流 c 产流总量是壤中流 a 的 19.81 倍,是壤中流 b 的 11.86 倍,玉米地壤中流 c 产流总量是壤中流 a 的 21.65 倍,是壤中流 b 的 27.95 倍。裸坡地和玉米地产流模数都随坡度的增大而逐渐增大,在坡度相同的情况下,玉米地各壤中流产流量以及产流模数显著小于裸坡地( $p < 0.05$ ),其中坡度为 20°时,玉米地壤中流 b 总产流量相对裸坡地减少了 62.59%。

从图 3 各壤中流产流模数变化曲线可以看出,壤中流 a 和壤中流 b 的产流模数随降雨历时的增大呈现出先增大后减小然后继续增大的趋势,在 30 min 的时候达到最大产流模数,且其数值都比较小;随着坡度的增大,壤中流 a 和壤中流 b 的产流模数也随之增大。在壤中流 c 的产流模数变化曲线中,裸坡地与玉米坡地产流模数都随降雨历时增大呈现不断增大的趋势,在 30 min 之前增加速度要比 30 min 之后要大得多,从总体来看,玉米地的产流模数相比裸坡地

稍小一些。无论是壤中流 a、壤中流 b 还是壤中流 c,在同一坡度下,玉米地的产流模数相对于裸坡地都要小。在坡度相同的条件下,经过玉米覆盖的玉米地不仅各壤中流产流量要明显小于裸坡地,而且还在一定程度上减缓了产流模数随降雨历时的变化。

表 2 强降雨下试验小区各壤中流产流特征

Table 2 Characteristics of subsurface runoff yield in experimental plots under short-duration high-intensity rainfall

壤中位置	土地类型	坡度/ (°)	总产流量/L	总产流模数/ ( $L \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$ )
壤中流 a (5—15 cm)	裸坡地	10	$0.41 \pm 0.11^{bc}$	$0.00 \pm 0.00^{bc}$
		20	$0.88 \pm 0.27^a$	$0.01 \pm 0.00^a$
	玉米地	10	$0.34 \pm 0.05^c$	$0.00 \pm 0.00^c$
		20	$0.71 \pm 0.15^{ab}$	$0.01 \pm 0.00^{ab}$
壤中流 b (15—25 cm)	裸坡地	10	$0.69 \pm 0.07^b$	$0.01 \pm 0.00^b$
		20	$1.47 \pm 0.07^a$	$0.01 \pm 0.00^a$
	玉米地	10	$0.39 \pm 0.10^c$	$0.00 \pm 0.00^c$
		20	$0.55 \pm 0.14^{bc}$	$0.01 \pm 0.00^b$
壤中流 c (25—35 cm)	裸坡地	10	$13.04 \pm 0.06^c$	$0.11 \pm 0.00^c$
		20	$17.43 \pm 0.16^a$	$0.15 \pm 0.00^a$
	玉米地	10	$11.82 \pm 1.26^d$	$0.10 \pm 0.01^d$
		20	$15.37 \pm 0.12^b$	$0.13 \pm 0.00^b$

## 2.3 强降雨下裸坡地和玉米地地下产流产沙特征

从表 3 强降雨下地下产流产沙特征可以得到,在同一坡度下,玉米地产流量和产流模数大于裸坡地,

而产沙量和产沙模数显著小于裸坡地 ( $p < 0.05$ ); 当坡度由  $10^\circ$  增大到  $20^\circ$  时, 除玉米地的产流模数随时间

没有发生变化外, 裸坡地和玉米地的产流产沙量和产流产沙模数都变小。

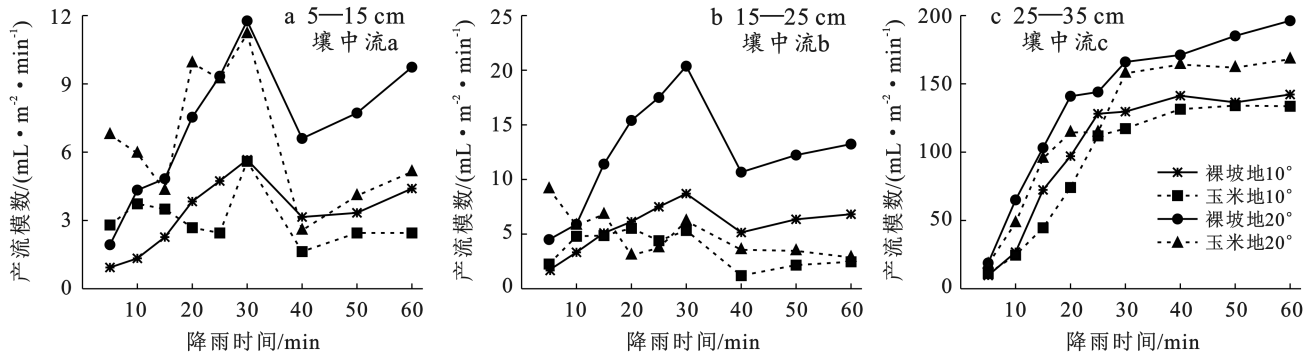


图 3 强降雨下试验小区各壤中流产流模数变化特征

Fig.3 Characteristics of runoff yield modulus change of subsurface in experimental plots under short-duration high-intensity rainfall

表 3 强降雨下试验小区地下产流产沙特征

Table 3 Characteristics of underground runoff and sediment yield in experimental plots under short-duration high-intensity rainfall

小区类型	坡度/ $(^\circ)$	产流量/L	产沙量/g	产流模数/ $(L \cdot m^{-2} \cdot min^{-1})$	产沙模数/ $(g \cdot m^{-2} \cdot min^{-1})$
裸坡地	10	$32.07 \pm 2.04^a$	$12.34 \pm 0.16^a$	$0.27 \pm 0.02^a$	$0.10 \pm 0.00^a$
	20	$29.42 \pm 1.99^a$	$10.09 \pm 1.02^b$	$0.24 \pm 0.02^a$	$0.08 \pm 0.01^b$
玉米地	10	$33.05 \pm 0.79^a$	$9.56 \pm 0.31^{bc}$	$0.27 \pm 0.01^a$	$0.08 \pm 0.00^{bc}$
	20	$32.95 \pm 2.33^a$	$8.96 \pm 0.30^c$	$0.27 \pm 0.02^a$	$0.07 \pm 0.01^c$

从图 4 试验小区地下产流产沙模数变化特征可以看出,  $10^\circ$  的裸坡地与玉米地产流模数随着降雨历时增大呈现出不断增大的趋势, 到 40 min 后变化不大, 而  $20^\circ$  的裸坡地与玉米地产流模数随降雨历时不断增大到 30 min 达到最大值后在 40 min 之前随时间增加而减小。

裸坡地与玉米地产流模数随降雨历时变化基本保持一致, 其中玉米地的产流模数大于裸坡地。裸坡地与玉米地的产沙模数随降雨历时呈现出先增大后减小的趋势, 在 20~30 min 之间达到最大产沙模数,  $10^\circ$  裸坡地产沙模数随时间变化较大, 在 30 min 时达到最大产沙模数  $0.256 g/(m^{-2} \cdot min)$ 。

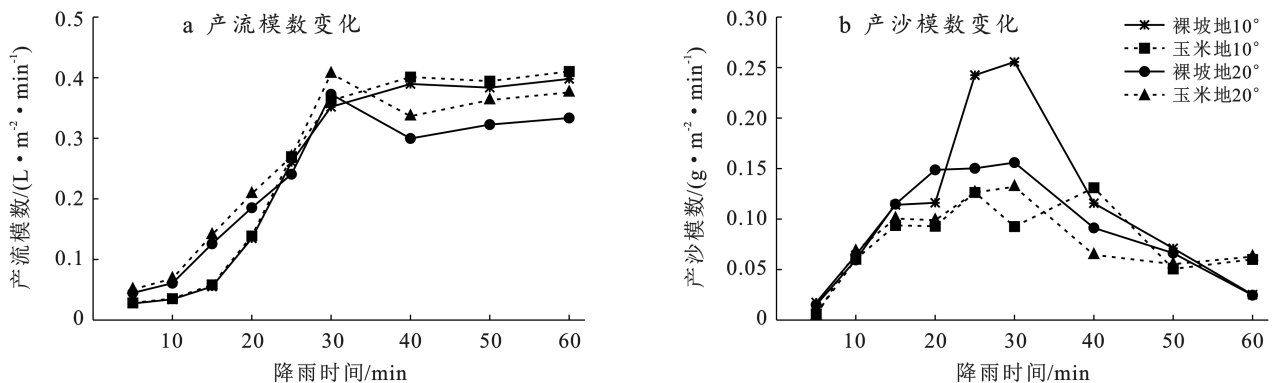


图 4 试验小区地下产流产沙模数变化特征

Fig.4 Characteristics of runoff and sediment yield modulus change of underground in experimental plots

## 2.4 强降雨下裸坡地和玉米地产流产沙综合分析

2.4.1 总产流产沙特征 喀斯特地区坡度和坡面是土壤溶质运移的两个关键因素。从表 4 裸坡地与玉米地总产流产沙特征可以得到, 裸坡地和玉米地坡度为  $20^\circ$  时的产流总量显著大于坡度为  $10^\circ$  时的产流总量 ( $p < 0.05$ ), 产流模数在同一坡度相差不大, 当坡度

增加的时候产流模数同样增大。在坡度相同的情况下, 玉米坡地的产沙总量显著小于裸坡地 ( $p < 0.05$ ), 坡度为  $10^\circ$  时减少了  $16.41 g$ , 坡度为  $20^\circ$  时减少了  $13.30 g$ ; 坡度为  $10^\circ$  时, 裸坡地的产沙模数是玉米地的 1.37 倍, 当坡度增大到  $20^\circ$  时, 裸坡地产沙模数是玉米地的 1.23 倍。

表4 裸坡地与玉米地总产流产沙特征

Table 4 Characteristics of total runoff and sediment yield on bare slope and corn slope land

土地类型	坡度/(°)	总产流量/L	产流模数/(L·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )	产沙总量/g	产沙模数/(g·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )
裸坡地	10	63.22±1.82 <sup>b</sup>	0.53±0.02 <sup>b</sup>	62.06±2.42 <sup>b</sup>	0.52±0.02 <sup>b</sup>
	20	75.99±3.15 <sup>a</sup>	0.63±0.02 <sup>a</sup>	69.41±2.97 <sup>a</sup>	0.58±0.03 <sup>a</sup>
玉米地	10	61.43±0.59 <sup>b</sup>	0.51±0.01 <sup>b</sup>	45.65±4.35 <sup>d</sup>	0.38±0.04 <sup>d</sup>
	20	76.44±2.36 <sup>a</sup>	0.64±0.02 <sup>a</sup>	56.11±0.79 <sup>c</sup>	0.47±0.01 <sup>c</sup>

2.4.2 不同坡度裸坡地与玉米地各产流产沙的相关性 由表5—6对比分析可知,10°裸坡地地表产沙与地表产沙和地下产流呈极显著正相关关系,而10°玉米地地表产沙则与地表产流呈显著正相关,相关系数分别为0.721(10°坡度)和0.676(20°坡度),与地下产流无显著相关关系。裸坡地地下产沙与地表产流无显著相关关系,而玉米地地下产流与地表产流相关性增强,达到显著正相关关系。裸坡地地下产沙与地表

产沙之间无相关关系,而10°玉米地地下产沙与20°玉米地地表产沙之间呈显著正相关关系(相关系数为0.670),20°玉米地地下产沙与地表产沙呈极显著正相关关系,相关系数分别为0.819(10°坡度)和0.824(20°坡度)。通过比较不同坡度裸坡地与玉米地各产流产沙的相关性,得到玉米地相比裸坡地地下产沙与地表产流、地下产流、地表产沙之间相关性增强,而地表产沙与地表产流、地下产流之间的相关性减弱。

表5 不同坡度裸坡地产生沙相关性分析

Table 5 Correlation analysis of runoff and sediment yield in bare slope land with different slope

项 目	地表产流		地下产流		地表产沙		地下产沙	
	10°	20°	10°	20°	10°	20°	10°	20°
地表产流	10°	1						
	20°	0.996**	1					
地下产流	10°	0.988**	0.987**	1				
	20°	0.989**	0.984**	0.992**	1			
地表产沙	10°	0.973**	0.981**	0.983**	0.964**	1		
	20°	0.978**	0.973**	0.950**	0.946**	0.934**	1	
地下产沙	10°	0.317	0.258	0.286	0.308	0.162	0.421	1
	20°	0.391	0.332	0.304	0.333	0.221	0.514	0.891**

注: \*\*表示各产流产沙在1%水平上的差异性( $p < 0.01$ ), \*表示各产流产沙在5%水平上的差异性( $p < 0.05$ )。下同。

表6 不同坡度玉米地产生沙相关性分析

Table 6 Correlation analysis of runoff and sediment yield in corn slope land with different slope

项 目	地表产流		地下产流		地表产沙		地下产沙	
	10°	20°	10°	20°	10°	20°	10°	20°
地表产流	10°	1						
	20°	0.992**	1					
地下产流	10°	0.982**	0.981**	1				
	20°	0.986**	0.980**	0.993**	1			
地表产沙	10°	0.721*	0.676*	0.597	0.661	1		
	20°	0.895**	0.878**	0.823**	0.858**	0.907**	1	
地下产沙	10°	0.710*	0.712*	0.666	0.635	0.537	0.670*	1
	20°	0.706*	0.691*	0.610	0.655	0.819**	0.824**	0.709*

### 3 讨论

#### 3.1 强降雨下坡度对坡耕地产生沙的影响

降雨强度和坡度是喀斯特坡面水土流失的主要影响因子<sup>[18-19]</sup>。坡度影响坡面土壤溶质运移的同时

还造成水土流失,随着坡度的变化,雨滴对表土的瞬时打击角度随之发生改变,方向的改变一方面直接影响着地表径流所受重力势能转化为沿坡面向下动能的转化率,另一方面间接影响降雨入渗的时间,对坡面土壤入渗能力具有明显的效应,这一系列的变化最

终会使坡面溶质的运移途径发生改变<sup>[20-21]</sup>。本研究发现当坡度由 10°增大到 20°时,裸坡地和玉米地的地表产流产沙量以及产流产沙模数都随之增大,这与胡奕等<sup>[22]</sup>研究结果相似,探究其原因可能是随着坡度增加,水层沿坡面方向的冲力增大,垂直坡面压力减小,入渗率随坡度增大而减少,所以地表径流随之增大。本研究发现当坡度增大,产沙量随之增大,这与奚宏等<sup>[23]</sup>发现坡耕地产沙量随坡度增大呈先增大后减小趋势略有不同,分析原因可能是本研究在强降雨(90 mm/h)下进行试验,坡度增大导致雨滴击溅侵蚀力减弱对本试验的影响较小,因此其产沙量没有随坡度的增大呈先增大后减小的趋势。彭旭东等<sup>[24]</sup>也表明,极端降雨下,地表产流率随着坡度的增加而增大。同时,降雨强度和坡度对坡面产流产沙影响显著,在试验范围内,随雨强增大,不同坡度下的产流量和产流模数均随降雨历时的增加呈上升趋势,在产流 30 min 之后趋于稳定,裸坡地与玉米地的产沙模数随降雨历时呈现出先增大后减小的趋势,赵士杰<sup>[25]</sup>也有相同的结果。随着坡度的增大,当降雨雨强大于土壤入渗能力,雨滴打击坡面产生地表结皮的时间就越长,因此,坡度越大,地表产流稳定性越差,达到稳定产流的时间就越长。玉米地地表产沙模数和地下产流模数明显减小,说明强降雨下玉米地也可以有效阻拦地表产沙,在一定程度上还可以缓解地下径流的漏失。本研究在强降雨的条件下对比分析了玉米坡地与裸坡地各自的产流产沙特征,为应对喀斯特地区极端天气可以更好地做出措施。

### 3.2 强降雨下覆盖对坡耕地产流产沙的影响

短时强降雨是造成水土流失发生的常见天气状况,通过在坡面种植植被可以降低短时强降雨对土壤坡面的侵蚀程度,地表植被覆盖能够起到削弱降雨溅蚀、抑制地表径流以及降雨截留的作用<sup>[26-27]</sup>。表土剥离后表层土壤的容重和土壤颗粒分形维数呈显著性增大,导致土壤透水性、孔隙大小等发生改变<sup>[28]</sup>。本研究试验结果表明,10°玉米地相比 10°裸坡地产流模数减小了 7.69%,产沙模数减小了 28.57%,20°玉米地相比 20°裸坡地产流模数减小了 7.69%,产沙模数减小了 20.41%,阻控效果没有那么显著,这与李智勇等<sup>[29]</sup>发现苜蓿覆盖可以显著降低坡面径流速率略有不同,分析原因是因为本研究是在强降雨(90 mm/h)下进行试验,以此应对极端天气带来的危害,因此对于径流的阻控效果没有那么显著。喀斯特坡耕地侵蚀产沙特征与降雨强度和坡度等密切相关,但降雨强度因子起主导作用<sup>[30]</sup>。在本研究中,坡度为 10°时裸坡地的产沙模数是玉米地的 1.37 倍,当坡

度增大到 20°时,裸坡地产沙模数是玉米地的 1.23 倍,玉米坡地的秸秆覆盖能够减弱地表径流的挟沙能力,有效降低输沙模数,这与高泽超等<sup>[31]</sup>研究结果相似,植被的存在会改善土体的渗透性,同时也将大大降低雨水对坡面的侵蚀,究其原因,植被地上部分和凋落物层通过降雨截流、削减溅蚀及控制地表径流等方式增加土壤入渗,减少产流产沙,玉米坡地中的冠层覆盖率和单位面积密度也会对坡面产流产沙造成影响,合适的覆盖植物也会起到更好地水土保持作用。本研究试验结果表明,玉米地相比裸坡地地下产沙与地表径流、地下径流、地表产沙之间相关性增强,而地表产沙与地表产流、地下产流之间的相关性减弱,分析原因可能是种植玉米之后影响了降雨沿坡面的径流和入渗,玉米增加了降雨与坡面接触时间,减缓了降雨在坡面的流动,使更多的降雨入渗到地下,从而增强了地下与地表的联系,然而玉米的存在也阻碍或保留了一部分降雨沿坡面的流动。对喀斯特坡耕地适当的利用和管理可以增加其土壤颗粒之间的结合,增加土壤剪切强度,控制径流产生,并降低土壤可侵蚀性。玉米冠层对降雨的拦截可以显著减少地表的总水量输入,并将大部分雨水重新分配到其茎基(累积降雨量的 22.0% 成为茎流)<sup>[32]</sup>。玉米具有一定缓蚀作用,部分落在玉米枝条上的降雨会使其丧失侵蚀作用,因而增厚树冠是一种有效的减蚀措施,可以考虑在玉米地间种植其他一些豆类植物增加覆盖。

## 4 结论

(1) 裸坡地和玉米地地表产流产沙量以及产流产沙模数都随坡度的增大而增大,当坡度不变时,玉米地地表产流产沙量以及产流产沙模数显著小于裸坡地;随着降雨历时的增加,裸坡地与玉米地地表产流模数呈现先增大后保持稳定的趋势,而地表产沙模数则呈现先增大后减小的趋势。

(2) 裸坡地和玉米地各壤中流产流模数随坡度增大而增大,当坡度相同时,玉米地各壤中流产流量显著小于裸坡地。

(3) 当坡度不变时,玉米地地下产沙量和产沙模数显著小于裸坡地;随着降雨历时的增加,裸坡地与玉米地地下产流模数呈现出不断增大的趋势,而地下产沙模数则呈现先增大后减小的趋势。

(4) 玉米地相比裸坡地地下产沙与地表产流、地下产流、地表产沙之间相关性增强,而地表产沙与地表产流、地下产流之间的相关性减弱,说明玉米能够增加入渗,具有阻控和缓蚀的作用。

## 参考文献 (References)

- [1] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.  
Zhou Botao, Qian Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.
- [2] 袁宇锋,翟盘茂. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知[J]. 大气科学学报, 2022, 45(2): 161-166.  
Yuan Yufeng, Zhai Panmao. Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(2): 161-166.
- [3] 赵丽,韩雪云,杨青. 近 50 a 西北干旱区极端降水的时空变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 19-26.  
Zhao Li, Han Xueyun, Yang Qing. Spatial and temporal variability of the extreme precipitation in the arid region of Northwest China during recent 50 years [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(1): 19-26.
- [4] 赵淑芳,张立文,王倩,等. 山东极端强降雨分钟雨量、Z-R 关系和风暴结构演变特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 806-814.  
Zhao Shufang, Zhang Liwen, Wang Qian, et al. Analysis of minutely rainfall, Z-R relationship and structural evolution for extreme rainfall storms in Shandong Province [J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 806-814.
- [5] 郭渠,陈佳,李瑞,等. 重庆地区短历时强降雨气候特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 944-953.  
Guo Qu, Chen Jia, Li Rui, et al. Climatic characteristics of short duration heavy precipitation in Chongqing [J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 944-953.
- [6] 杨久栋,关仕新. 气候变化和极端天气增多, 如何保障粮食生产安全? [J]. 记者观察, 2023(28): 36-39.  
Yang Jiudong, Guan Shixin. Climate change and extreme weather increase, how to ensure the safety of food production? [J]. Reporters' Notes, 2023(28): 36-39.
- [7] 朴英姬. 气候变化下的全球粮食安全: 传导机制与系统转型[J]. 世界农业, 2023(10): 16-26.  
Piao Yingji. Global food security under climate change: Transmission mechanism and system transformation [J]. World Agriculture, 2023(10): 16-26.
- [8] Yan Youjin, Dai Quanhou, Yuan Yingfei, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China [J]. Geoderma, 2018, 330: 30-40.
- [9] 陈洪松,付智勇,张伟,等. 西南喀斯特地区水土过程与植被恢复重建[J]. 自然杂志, 2018, 40(1): 41-46.  
Chen Hongsong, Fu Zhiyong, Zhang Wei, et al. Soil water processes and vegetation restoration in karst regions of Southwest China [J]. Chinese Journal of Nature, 2018, 40(1): 41-46.
- [10] 张光辉,杨扬,刘瑛娜,等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 1-12.  
Zhang Guanghui, Yang Yang, Liu Yingna, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 1-12.
- [11] 文雅琴,熊康宁,李瑞. 黔东南喀斯特坡面产流产沙及土壤含水量特征[J]. 人民黄河, 2020, 42(3): 77-81, 86.  
Wen Yaqin, Xiong Kangning, Li Rui. Characteristics of runoff and sediment yield and soil water content on slope in karst area of Northeast Guizhou [J]. Yellow River, 2020, 42(3): 77-81, 86.
- [12] 姚璟. 坡长与雨强对晋西黄绵土坡面径流侵蚀产沙的影响[D]. 山西 太原: 太原理工大学, 2017.  
Yao Jing. The impact of slope length and rainfall intensity on runoff and sediment yield processes [D]. Taiyuan, Shanxi: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [13] 张洋,张辉,李占斌,等. 不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 136-142.  
Zhang Yang, Zhang Hui, Li Zhanbin, et al. Process of runoff and sediment yield and relationship between water and sand of frozen soil slope in loess area under different rainfall intensities [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(11): 136-142.
- [14] Dai Q, Liu Z, Shao H, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study [J]. Solid Earth, 2015, 6(3): 985-995.
- [15] 伏文兵,戴全厚,严友进. 喀斯特坡耕地及其浅层孔(裂隙)土壤侵蚀响应试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 11-16, 22.  
Fu Wenbing, Dai Quanhou, Yan Youjin. The response of soil erosion in Karst slope and its shallow underground crevasse ratios [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(2): 11-16, 22.
- [16] 甘艺贤. 人工模拟降雨下喀斯特裸露坡耕地溶质迁移特征试验研究[D]. 贵州 贵阳: 贵州大学, 2018.  
Gan Yixian. Experimental study on solute migration characteristics of unexplored karst slope under artificial simulated rainfall [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2018.
- [17] Karimzadeh H, Farhang H R, Rahimmalek M, et al. The role of some vegetation parameters of *Gundelia tournefortii* L. in controlling runoff generation and sediment yield based on rainfall simulation experiments in major habitats of Central Zagros, Iran [J]. Arabian



- Journal of Geosciences, 2023,16(7):429.
- [18] 彭旭东,戴全厚,李昌兰,等.模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J].农业工程学报, 2017,33(2):131-140.  
Peng Xudong, Dai Quanhou, Li Changlan, et al. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in karst region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(2):131-140.
- [19] 王恒松,熊康宁,张芳美.地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J].水土保持通报,2015,35(4):1-7.  
Wang Hengsong, Xiong Kangning, Zhang Fangmei. Mechanism study on effects of terrain on soil erosion of karst slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(4):1-7.
- [20] 曾荣昌.集中流条件下喀斯特槽谷区坡面细沟侵蚀模拟研究[D].重庆:西南大学,2020.  
Zeng Rongchang. Indoor simulation experiments of rill erosion on slope in the karst tough valley area under concentrated flow condition [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [21] 丁鹏玮.人工降雨条件下喀斯特林地石灰土的溶质迁移规律和影响因子分析[D].贵州 贵阳:贵州大学,2022.  
Ding Pengwei. Analysis of solute transport patterns and influencing factors in limestone soil of karst forestland under artificial rainfall conditions [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2022.
- [22] 胡奕,戴全厚,王佩将.喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J].水土保持学报,2012,26(6):46-51.  
Hu Yi, Dai Quanhou, Wang Peijiang. Runoff features and the influencing factors on karst sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(6):46-51.
- [23] 奚宏,唐继斗,史东梅,等.坡度对紫色土坡耕地产流产沙特征的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2022, 20(4):19-25.  
Xi Hong, Tang Jidou, Shi Dongmei, et al. Effects of slope on the runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland of Chongqing [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(4):19-25.
- [24] 彭旭东,戴全厚,袁应飞,等.喀斯特坡耕地裸坡侵蚀性降雨产流试验研究[J].应用基础与工程科学学报, 2019,27(6):1211-1224.  
Peng Xudong, Dai Quanhou, Yuan Yingfei, et al. Experimental study on runoff yield in erosive rainfalls on bare slope farmland in karst regions [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019,27(6):1211-1224.
- [25] 赵士杰.喀斯特地区坡耕地土壤侵蚀对重金属元素迁移的影响机制[D].贵州 贵阳:贵州师范大学,2021.  
Zhao Shijie. The influence mechanism of soil erosion on the migration of heavy metal elements on slope farmland in karst area [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2021.
- [26] 黄国平,张文太,陈景梅,等.伊犁河谷次降雨特征对坡面产流产沙的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(3):109-116.  
Huang Guoping, Zhang Wentai, Chen Jingmei, et al. Influence of rainfall characteristics on runoff and sediment yield in Ili Valley [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021,56(3):109-116.
- [27] 王栋栋,王占礼,张庆玮,等.草地植被覆盖度坡度及雨强对坡面径流含沙量影响试验研究[J].农业工程学报, 2017,33(15):119-125.  
Wang Dongdong, Wang Zhanli, Zhang Qingwei, et al. Experiment on influence of cover degree, slope and rainfall intensity on sediment concentration of slope runoff in rangeland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(15):119-125.
- [28] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.下垫面变化对喀斯特坡地地下产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(1): 67-73,79.  
Yan Youjin, Dai Quanhou, Fu Wenbing, et al. Influences of underlying surface changes on underground runoff and sediment yield in karst slope land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018,32(1):67-73,79.
- [29] 李智勇,张梦杰,陈明玉,等.苜蓿对坡面产流产沙及土壤水分的影响[J].水土保持研究,2021,28(5):54-60.  
Li Zhiyong, Zhang Mengjie, Chen Mingyu, et al. Effects of alfalfa (*Medicago sativa* L.) on runoff and sediment yield and soil moisture on slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):54-60.
- [30] 任青青,严友进,甘艺贤,等.短历时强降雨对典型喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):105-112.  
Ren Qingqing, Yan Youjin, Gan Yixian, et al. Effects of short-duration high-intensity rainfall on erosion and sediment yield of typical karst slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6): 105-112.
- [31] 高泽超,潘焰菲,徐勤学,等.秸秆覆盖对西南喀斯特坡地幼龄橘园产流产沙的影响[J].水土保持研究,2022, 29(1):36-43.  
Gao Zechao, Pan Yanfei, Xu Qinxue, et al. Effect of straw mulch on runoff and sediment production in young citrus orchards in southwest karst [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(1):36-43.
- [32] Nazari M, Sadeghi S M M, Van Stan J T, et al. Rainfall interception and redistribution by maize farmland in Central Iran [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020,27:100656.