

岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律

张彩云, 蒋勇军, 马丽娜, 汪啟容

(西南大学 地理科学学院, 岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715)

摘要: [目的] 研究岩溶槽谷区坡地产流产沙规律, 为槽谷区坡面水土流失防治提供理论基础。[方法] 基于重庆市北碚区中梁山岩溶槽谷区径流小区, 探讨了土地利用类型(耕地、林地、果园和竹林地)、降雨等级、降雨特征对坡地产流产沙的影响。[结果] ①不同土地利用方式的径流小区坡地总产流量为: 耕地(3 534.64 L) > 果园地(3 150.60 L) > 竹林地(2 347.75 L) > 林地(1 957.41 L); 径流系数(3.12%~5.70%) 远低于非岩溶区(约 20%); 地表产沙量耕地(3.37 kg) > 果园地(2.60 kg) > 林地(1.60 kg) > 竹林地(1.43 kg); ②虽然暴雨占总降雨场次的 1.53%, 但产流量占年产量的 42.28%, 产沙量占年总产沙量的 33.42%。中雨占年产流总量的 16.61%, 产沙量占年总产沙量的 20.47%, 但是由于中雨的降雨次数多, 其造成的泥沙流失也不可忽视。③降雨量对不同土地利用方式下的坡面产流的影响最大, 是坡面产流的主要影响因素。 I_{30} 对耕地和果园产沙量的影响最大, 降雨量对林地和果园产沙量的影响最大。[结论] 在相同的降雨条件下, 耕地的产流产沙量最大, 果园次之。在坡度一定的条件下, 不同等级的降雨是影响产流产沙的主要因素, 因此, 在安排农事活动时, 应尽量避免高强度降雨, 减少严重侵蚀事件的发生。

关键词: 岩溶槽谷区; 径流小区; 次降雨; 产流产沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)01-0049-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 张彩云, 蒋勇军, 马丽娜, 等. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下的坡地产流产沙规律[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 49-55. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.008; Zhang Caiyun, Jiang Yongjun, Ma Lina, et al. Characteristics of runoff and sediment on slope land with different land use in karst trough valley area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(1): 49-55.

Characteristics of Runoff and Sediment on Slope Land with Different Land Use in Karst Trough Valley Area

Zhang Caiyun, Jiang Yongjun, Ma Lina, Wang Qirong

(Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: [Objective] The law of sediment yield in a karst trough valley was studied to provide a theoretical basis for the prevention and control of soil and water loss on the slope of the trough area. [Methods] Based on the runoff plots of Zhongliang Mountain at Beibei District of Chongqing City, the effects of land use types (cultivated land, woodland, orchard, and bamboo forest land), rainfall grade, and rainfall characteristics on runoff and sediment yield on slopes were investigated. [Results] ① The total runoff of the four runoff plots was as follows: cultivated land (35.35 mm), followed by orchard land (31.51 mm), bamboo forest land (23.47 mm), and forest (19.57 mm). The runoff coefficient of them (3.12%~0.5.70%) was much lower than that of the nonkarst area (approximately 20%). The slope sediment yield of the four land uses decreased orderly, and that of the cultivated land was the largest (3.37 kg), followed by orchards (2.60 kg), forest (1.60 kg), and bamboo forest (1.43 kg). ② Although rainstorm accounted for 1.53% of the total rainfall, the runoff and sediment yield accounted for 42.28% and 33.42%, respectively. Moderate rain accounted for 16.61% of the total annual runoff, and sediment yield accounted for 20.47% of the total annual sediment yield. However, because of the frequent rainfall of moderate rain, the sediment loss caused by it

收稿日期: 2020-08-27

修回日期: 2020-11-16

资助项目: 国家重点研发计划项目“喀斯特槽谷区石漠化综合治理模式评价与优化”(2016YFC0502306)

第一作者: 张彩云(1996—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 主要从事岩溶学与环境变化研究。Email: 2301494294@qq.com。

通讯作者: 蒋勇军(1968—), 男(汉族), 湖南省安化县人, 教授, 博士生导师, 主要从事岩溶学与全球变化研究。Email: Jiangyj@swu.edu.cn。

can not be ignored. ③ Rainfall had the greatest impact on the runoff on slopes under different land uses. Moreover, I_{30} had the greatest impact on the sediment yield of cultivated land and orchards, and rainfall had the greatest impact on the sediment yield of forest land and orchards. [Conclusion] Under the same rainfall conditions, the runoff and sediment yield of cultivated land are the largest, followed by those of orchards. Under certain slope conditions, different levels of rainfall are the main factors affecting runoff and sediment yield. Therefore, when arranging agricultural activities, it is necessary to avoid high-intensity rainfall to reduce the occurrence of serious erosion events.

Keywords: karst trough valley; runoff plot; individual rainfall; runoff and sediment yield

岩溶槽谷区岩溶面积 $1.32 \times 10^5 \text{ km}^2$, 是中国南方岩溶面积最大的地区^[1], 同时也是石漠化治理效果相对较差的地区^[2], 相比较其他岩溶地貌类型区, 岩溶槽谷区生态环境恶劣, 加上槽谷区的经济条件差, 有限的土地资源养活了岩溶槽谷区约 8.00×10^7 的人口^[1], 坡耕地 ($>8^\circ$) 面积为 $20\,064.2 \text{ km}^2$, 占岩溶总面积的 15.2%, 农业生产结构不合理, 高位水资源泄露, 缺水现象严重, 干旱频发, 强烈的岩溶作用和不合理的人为活动, 加重了槽谷区的水土流失, 石漠化治理难度大。水土流失被认为是一个严重的生态环境问题^[3-4], 导致土地退化和自然生态系统遭到破坏^[5-6], 严重影响了生态环境和人类的发展^[7-8]。增加植被覆盖度已被广泛认为是治理石漠化地区水土流失的有效途径之一^[9]。不同的植被类型对地表径流和水土流失的影响存在显著差异^[4], 合理的植被类型不仅对减少对地表产流产沙具有积极作用, 还能增加当地农户的经济收益, 提高农户参与石漠化治理的积极性。因此, 定量评价岩溶槽谷区坡地产流产沙规律有利于制定合理的水土保持措施。

产流产沙过程是多种因素综合作用的结果(地质地貌、地形、气候、植被覆盖和人类活动)^[6,10-12], 其中, 降雨是导致地表产流产沙的直接动力因子^[13], 降雨落到地面产生溅蚀^[14], 使土壤颗粒产生位移^[12], 并随着径流, 冲刷和搬运泥沙导致水土流失。一般认为降雨量、雨强、雨型、历时显著影响着坡面产流产沙^[12]。在降雨强度较低的情况下, 土壤流失量与降雨强度成线性关系, 而在较高强度下成非线性关系, 另外降雨强度越大, 坡面径流量越大, 泥沙流失量越多^[15]。O. González-Pelayo 等^[16] 基于西班牙 9 个岩溶坡地的径流小区研究了降雨强度与坡面径流和土壤侵蚀的关系后得出, 当降雨强度增加到 20 mm/h 时, 径流量和土壤流失量成倍数增加。戴厚全等^[17] 研究表明, 随着岩石裸露度的增加, 产流产沙量先增加再减小。Peng 等^[18] 基于径流小区研究表明, 不同土地利用方式下的产流产沙量由大到小为: 放牧地、火烧地、耕地、混合植被地和幼林地。另外, 研究表明

不同的土地利用类型对水土流失的影响不同^[19-20], 合理的土地利用, 不仅能够提高土地生产力, 增加经济收益, 还能有效控制和减缓水土流失。此外, 还有许多学者进行了室内模拟试验, 如 Fu 等^[21] 根据在室内模拟了降雨对亚热带白云岩岩溶坡地产流的影响, 对比低强度降雨, 坡面产流和地下产流对高强度降雨的响应更为敏感。整体来看, 学者们从降雨、岩石裸露率和土地利用类型等方面对产流产沙进行了深入研究, 但是关于岩溶槽谷区坡地产流产沙特征及其影响因素的研究相对较少。因此, 本文选取重庆市北碚区中梁山岩溶槽谷区为研究基地, 根据不同土地利用方式修建了 4 个标准径流小区, 监测径流小区降雨量和产流产沙数据, 分析自然降雨条件下坡面的产流产沙特征, 降雨等级、降雨特征对坡面产流产沙的影响, 并探讨分析不同土地利用方式下的产流产沙特征。以为槽谷区坡面水土流失防治提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区中梁山, 地理坐标位置为 $106^\circ 54' - 107^\circ 27' \text{ E}$ 和 $28^\circ 46' - 39^\circ 31' \text{ N}$ 。岩性为三叠系系嘉陵江组 (T_1j) 石灰岩, 地貌上表现为典型的“一山三岭两槽”的“笔架”式地形, 海拔高程 $480 \sim 640 \text{ m}$ 。土壤以三叠系系嘉陵江组发育的石灰土为主, 土层厚度 $15 \sim 100 \text{ cm}$, 厚度不均。气候为典型的亚热带季风气候, 夏季高温多雨, 年均降雨量为 $1\,090 \text{ mm}$, 每年 4 月至 10 月是该地区的雨季, 约占全年降雨量的 80%, 降雨季节分配不均。地下水向东北方向汇入嘉陵江。中梁山槽谷土地面积为 37.2 km^2 , 主要的土地利用类型是林地, 耕地, 建设用地, 面积分别为 $21.6, 13.3, 2.3 \text{ km}^2$ 。由于研究区耕地面积小, 大量的土地已被开垦, 加上槽谷区坡度较大, 极易发生水土流失, 造成石漠化。

2 研究方法

2.1 水土流失监测径流小区的设置

根据研究区的人类活动的差异性和地质特点, 在 2017 年, 选择 4 个典型的土地利用方式(耕地、林地、

果园、竹林地),在坡度一致(20°)的坡面修建了 4 个 5 m×20 m 的水土流失监测径流小区(见表 1)。小区四周下挖到基岩,用砖块和混泥土堆砌至地表以上 20 cm,以防止与外部的径流和泥沙发生交换。径流小区下方设有 50 cm×40 cm×30 cm 的集水池,集水池排出口装不锈钢三角堰,用于计算流量。4 个径流

小区的物理性质较为一致(表 2)。根据当地耕作习惯,本研究中的耕地春季种植西红柿、夏季种植包菜和花椰菜、秋季种植白菜、冬至种植萝卜。上述几种作物都需要占据较大的面积,在种植时采用与当地种植习惯保持一致,采用成行种植。果园地在橘子树开花前进行除草,后期不定期进行除草。

表 1 径流小区基本信息

编号	土地利用型	海拔/m	倾向/(°)	土层厚度/cm	植被覆盖率/%	植被类型
1#	耕地	580	155	40	15	白菜,西红柿等
2#	林地	580	155	45	80	棕榈,白蜡树等
3#	果园	580	155	40	20	柑橘树
4#	竹林地	530	330	50	75	竹、芭茅等

表 2 径流小区土壤物理性质

编号	土地利用型	pH 值	有机质/ (g·kg ⁻¹)	机械组成		
				<0.01mm	0.01—0.01mm	>0.05mm
1#	耕地	7.43	36.60	75.9	19.6	4.5
2#	林地	7.41	42.41	78.5	15.5	6
3#	果园	7.54	36.07	74	19	7
4#	竹林地	7.86	34.13	74.2	18.8	7

2.2 数据采集

(1) 降雨监测。监测时段为 2018 年,降雨量数据用天津气象仪器厂有限公司生产的 DAVIS Vantage Pro2 型自动气象监测站进行实时监测,精度为 0.1 mm,测量间隔为 15 min。

(2) 产流监测。每个收集池内安装有自动水位记录仪(美国 HOBO 公司,U20-001-04),采用压力测量原理,每 15 min 记录一次数据。

(3) 产沙监测。每场降雨后采集泥沙,带回室内用烧杯进行静置沉淀 3~5 d 左右,随后倒掉上层清液,静置风干后称重,得到坡面产沙量。

2.3 数据分析方法

利用 spss22.0 软件研究次降雨特征(次降雨量、降雨历时、30 min 最大雨强、平均雨强、降雨侵蚀力)对产流量和产沙量的影响。其中降雨侵蚀力^[22]由公式(1)~(3) 计算得出。

$$R = EI_{30} \quad (1)$$

$$E_k = 0.119 + 0.873 \lg I_k \quad (2)$$

$$E = \sum_{k=1}^n E_k \cdot P_k \quad (3)$$

式中: R 为降雨侵蚀力[MJ·mm/(hm²·h)]; I_{30} 为 30 min 最大雨强(mm/h); E_k 为 k 时段的降雨动能[MJ/(hm²·mm)]; I_k 为 k 时段的降雨强度(mm/h),在计算中去自然对数; P_k 为 k 时段的降雨量(mm)。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

在试验(2018 年 1 月 1 日至 12 月 31 日)的监测时段内,总降雨量为 1 009.8 mm(图 1),雨量丰富。降雨主要集中于 4—10 月,占全年降雨量的 83.58%,9 月降雨量最高为 157.9 mm,最低值为 1 月的 16.9 mm。

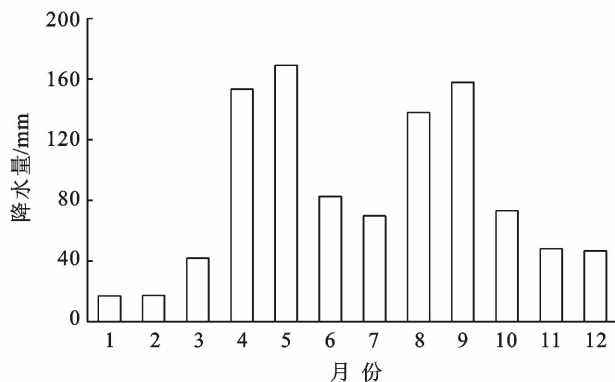


图 1 研究区 2018 年各月降雨量

由表 3 可知,观测期间共有 131 场降雨(根据实测产流特点,将降水过程中时间间隔超过 6 h 定义为两次降水过程,其中,有效降水(即每个径流小区均有产流产沙发生)18 场,虽然仅占总降雨场次的 13.53%,但占降雨总量的 51.58%。按照气象部门对降雨的划分,全年暴雨(≥ 50 mm)2 次,大雨(25~

49.9 mm)7 次,中雨(10~24.9 mm)9 次,其余场次为小雨(0.1~9.9 mm)。根据径流的小区的降雨量和产流产沙的监测数据,当降雨量达 14.3 mm,各径流小区都有地表径流产生,降雨虽然是导致产流产沙的主要因素,但是并非每场降雨都会导致水土流失。

表 3 研究区观测期间降雨事件

时间	降雨 历时/h	降雨量/ mm	$I_{15}/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	降雨 等级
20180405	10	22	5.6	中雨
20180424	8	30.5	44	大雨
20180517	3	20	54.4	中雨
20180520	8.75	54.6	60	暴雨
20180522	11.25	44.8	41.6	大雨
20180611	10	37.8	12.8	大雨
20180621	24.5	17.8	8.8	中雨
20180709	12	29.8	27.2	大雨
20180730	7	18.1	24	中雨
20180802	10.5	34.4	28	大雨
20180804	27.5	14.3	39.6	中雨
20180806	3.75	35.8	48	大雨
20180814	29	23.2	37.6	中雨
20180906	28.5	29.6	35.4	大雨
20180924	19	56.8	30.4	暴雨
20180927	30.5	18.2	13.6	中雨
20181003	28.25	18.4	19.6	中雨
20181019	18.75	15.6	5.4	中雨

3.2 不同土地利用方式下产流产沙特征

在相同的降水条件下,不同土地利用方式下坡面产流量差异显著(表 4)。各径流小区的地表总产流量均呈现为:耕地(35.35 mm) > 果园地(31.51 mm) > 竹林地(2 348 mm) > 林地(19.57 mm)。4 个径流小区的物理性质较为一致(表 2),但土地利用方式不同。这说明在相同的降雨条件下,不同的土地利用方式,由于受人类活动的差异,导致植被和土壤状况的不同,其蓄水保土的能力也存在差异。耕地由于扰动频繁且植被覆盖度低,对雨水的调控能力弱,径流量对降雨量的响应最敏感;果园地中虽种植柑橘树,但由于株距过大,相比较林地和竹林地减少雨滴动能的能力较弱,所以对降雨量的响应较为敏感。肖金强等人研究表明林地植被可对地表径流的消减率高达 89.3%^[23],研究区林地的植被覆盖高达 80%,树木枝叶繁茂,必然导致林冠截留增大从而减少到达地表的降水量,短时强降雨的影响被削弱,但降水总量到达一定程度,才能形成地表径流。

4 个径流小区中,径流系数在 3.12%~5.70%之间,与彭韬等人基于典型岩溶区陈旗河流域 6 类不同

土地利用方式的径流小区观测的地表径流系数(0.01%~12.81%)相近^[24]。然而,与非岩溶区相比,径流系数远低于非岩溶区(20%)^[25-26]。岩溶区由于特殊的地上地下二元结构,到达地面的降水并非全部转变为地表径流,绝大部分降水进入土壤层后,经裂隙,管道等进入地下河网^[27],而非岩溶区,到达地面的降水几部转变为地表径流,因此,岩溶区的径流系数明显小于非岩溶区。

在相同的降雨条件下,坡面产沙量表现为:耕地 > 果园地 > 林地 > 竹林地。耕地的侵蚀模数是果园地、林地和竹林地的 2.10, 1.30, 2.35 倍。表明耕地是研究区水土流失的主要土地利用类型。耕地的植被覆盖率最低为 15%,且经过一系列的田间管理措施(整地、翻耕和除草等),土壤扰动频繁,产流产沙量最高。相对比与受人类活动干扰强烈的耕地,林地的植被覆盖率高达 70%,一方面由于植被的冠层对雨滴溅蚀具有截留和缓冲作用^[28],降低了侵蚀动能,另一方面植物的根系深扎土壤,可以降低坡面径流的侵蚀能力^[29],其丰富的有机质还有利于雨水渗漏,植物根系和低等草本植物在降雨过程中阻碍了坡面径流携带的泥沙^[30],最终造成坡面产流产沙量远低于耕地和果园。岩溶槽谷区的土壤侵蚀模数明显低于黄土高原地区(400~10 000 t·km²/a)。岩溶区的土壤侵蚀模数小,但波动变化范围较大,这与彭韬等人的研究结果一致^[24]。土壤的形成过程是极其缓慢的,尤其是岩溶地区,形成 1 cm 的土壤需要上千年的时间,加之,岩溶区土壤土层薄,分布不连续,裸露的岩石与土壤交错分布,尽管岩溶区的土壤侵蚀模数低,土壤允许流失量小,且岩溶地区还存在泥沙随着壤中流和裂隙流的地下漏失,同等的土壤侵蚀造成的影响更为严重。岩溶槽谷区由于其特殊的地形(陡坡和谷地),贫瘠的、较薄的土壤分布在四周的坡面上,当地居民为了满足生活需要,不得不陡坡开垦。因此,在水土流失治理工作中,应结合区域特点,因地制宜综合治理。

表 4 研究区不同土地利用方式下的坡面产流产沙

土地利用 类型	径流量/ mm	径流 系数/%	产沙量/ kg	侵蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
耕地	35.35	5.70	3.37	33.70
林地	19.57	3.12	1.60	16.01
果园	31.51	5.00	2.60	25.86
竹林地	23.48	3.77	1.43	14.32

3.3 不同土地利用类型对次降雨产流产沙的响应

在不同时期和不同地表覆盖度下,坡面产流产沙对次降雨的响应存在明显不同,受地表覆盖物、植被

生长状况等因素综合影响^[31]。为了进一步了解土地利用类型对坡面产流产沙的响应,分析了 18 场有效降雨下的坡面产流产沙(图 2)。通过对比相同降雨场次下,不同土地利用的产流产沙量的变化可知,二者具有明显的相似性,即在同一降雨场次中,4 中土地利用类型的产流量增加,产沙量也随之响应的增加,且耕地的产流量和产沙量在不同有效降雨场次中最大;果园地的产流量和产沙量次之;竹林地和林地的产流产沙在不同降雨场次中差异较小。以 9 月 24 日的暴雨为例,在相同的降雨条件下,竹林地的土壤侵蚀模数比林地的产沙量少 0.24 t km²/a,竹作为一种特殊的森林资源,具有较好的水土保持功能。

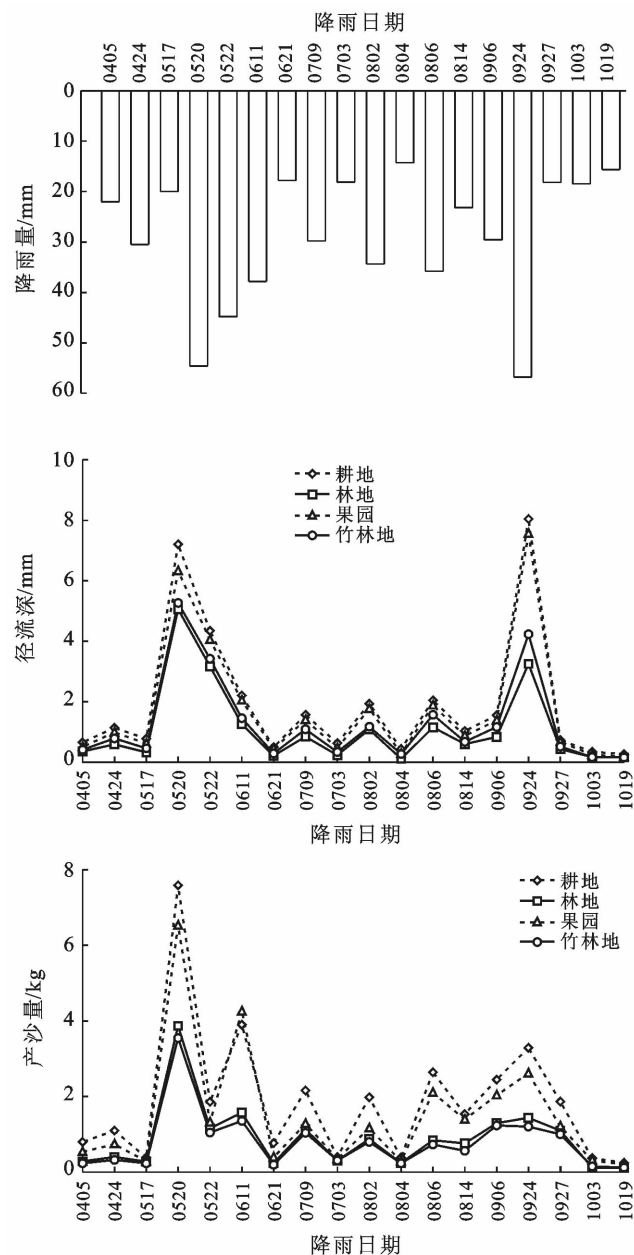


图 2 2018 年研究区有效降雨条件下坡面产流产沙特征

由图 2 可知,在有效降雨条件下,耕地和果园地的产流产沙量远大于其他两种土地利用类型。耕地经过一系列的田间管理措施(整地、翻耕和除草等),土壤扰动频繁,在相同的降雨场次中,耕地的产流产沙量最高。果园在橘子树的栽培过程中,按照株行距 2 m×3 m 挖定植坑,株距较大,且还要保证树盘底部无杂草,土壤扰动较为频繁,产流产沙量次之。

人为扰动较多的坡面土壤侵蚀模数较高,故产流输沙量较大,水土保持效果不佳^[32]。因此,在安排农事活动时,尽量避开高强度降雨,减少严重侵蚀事件的发生。与农作物的经济效益相比,果园收益相对较好,但水土保持效果相对较差,因此,在岩溶区种植柑橘是建议辅助修建鱼鳞坑、套种等整地方式以蓄水保土。

3.4 降雨等级对坡面产流产沙的影响

不同降雨等级下坡面径流量占比不同,在中雨条件下,产流量最大的是耕地,其次是竹林地、果园和林地;在大雨条件下,径流量最大的是竹林地,其次是林地、果园和耕地;在暴雨条件下,径流量最大的是果园,其次是耕地、林地和竹林地(图 3a)。不同土地利用方式下,不同降雨等级产生的土壤流失存在较大差异(图 3b)。耕地由大雨和暴雨产生的侵蚀量占年总侵蚀量的 79.99%,其中仅 5 月 2 日和 9 月 24 日 2 场降雨产生的侵蚀量占耕地全年侵蚀量的 32.26%,表明坡耕地坡面侵蚀主要大雨和暴雨引起的。径流量和产沙量与高强度降雨紧密相关,虽然暴雨占总降雨场次的 1.53%,降雨量占年降雨总量的 11.03%,但产流量占年产量量的 42.28%,产沙量占年总产沙量的 33.42%。在中雨类型下,虽然中雨造成的坡面径流量、产沙量占年总径流量、产沙量的比重较小(占年径流总量的 16.61%,产沙量占年总产沙量的 20.47%),但是由于中雨的降雨次数多,其造成的泥沙流失也不可忽视。

3.5 次降雨特征与产流产沙相关性分析

降水是坡面水力侵蚀的动力来源,也是诱发喀斯特坡地土壤侵蚀的主要驱动力,各降雨特征对产流产沙产生一定的影响^[33]。因此,本文将不同土地利用下的坡面产流产沙与次降雨特征进行相关性分析(表 5)。对于耕地而言,坡面径流量、产沙量与降雨量均表现为极显著相关(0.940, 0.809, $p < 0.01$),产沙量与 I_{30} 表现为极显著相关(0.886, $p < 0.01$);林地和竹林地的径流量和产沙量与降雨量表现为极显著相关,与 I_{30} 表现为显著相关;果园的径流量与降雨量和 I_{30} 表现为极显著相关,产沙量与降雨量表现为极显著相关,与降雨强度和 I_{30} 表现为相关。将降雨侵蚀力与不同土地利用方

式下的产流、产沙量分别进行了相关性分析。降雨侵蚀力与耕地、果园、林地和竹林地的相关系数分别为 0.767, 0.649, 0.566, 0.451, 表明坡面径流量随着降雨侵蚀力的增大而增加, 除与耕地的径流量呈现显著正相关外, 与其他 3 种土地利用方式的坡面径流的相

关性不显著; 降雨侵蚀力与坡面产沙量的相关性与径流量一致, 但二者的相关性不显著。降雨量对不同土地利用方式下的坡面径流的影响最大, 是坡面产流的主要影响因素。 I_{30} 对耕地和果园产沙量的影响最大, 降雨量对林地和果园产沙量的影响最大。

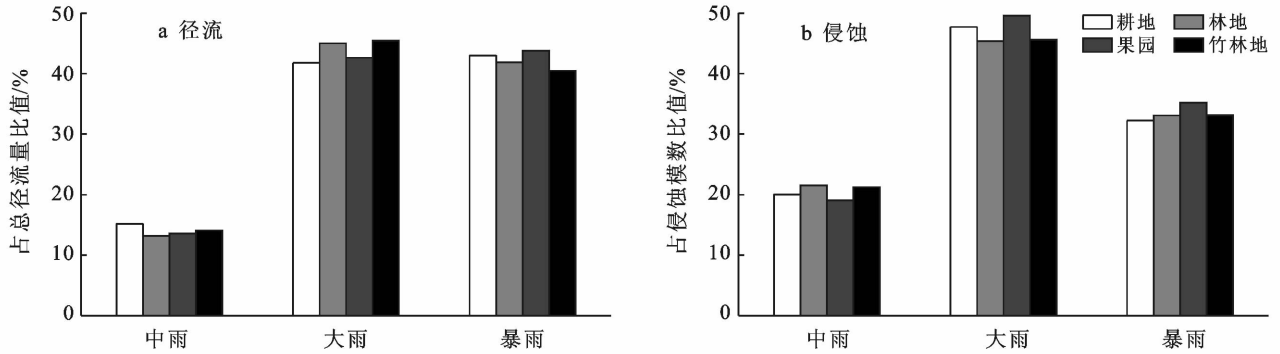


图 3 降雨等级与产流产沙的关系

表 5 不同土地利用方式下坡面产流产沙与降雨特征相关分析

项目	径流量				产沙量			
	耕地	林地	果园	竹林地	耕地	林地	果园	竹林地
降雨历时	0.216	0.268	0.209	0.259	0.209	-0.155	0.194	-0.151
降雨量	0.940**	0.914**	0.943**	0.942**	0.809**	0.772**	0.784**	0.783**
降雨强度	0.684*	0.637	0.677	0.644	0.753*	0.463	0.635*	0.454
I_{30} 值	0.721*	0.616*	0.701*	0.609**	0.886**	0.742*	0.862**	0.733*
R 值	0.767**	0.566	0.649	0.451	0.604	0.597	0.607	0.534

注: * 为显著水平 ($p < 0.05$); ** 为极显著水平 ($p < 0.01$)。

4 结论

(1) 不同土地利用方式的径流小区坡地径流量为: 耕地 (35.35 mm) > 果园地 (31.51 mm) > 竹林地 (23.48 mm) > 林地 (19.57 mm); 地表产沙量耕地 (3.37 kg) > 果园地 (2.60 kg) > 林地 (1.60 kg) > 竹林地 (1.43 kg)。耕地的坡面产流产沙量最大, 果园次之, 竹林地的水土保持效果较好。

(2) 径流量和产沙量与高强度降雨紧密相关, 虽然暴雨占总降雨场次的 1.53%, 降雨量占年降雨总量的 11.03%, 但产流量占年产量量的 42.28%, 产沙量占年总产沙量的 33.42%。中雨占年产流总量的 16.61%, 产沙量占年总产沙量的 20.47%, 但是由于中雨的降雨次数多, 其造成的泥沙流失也不可忽视。

(3) 降雨量对不同土地利用方式下的坡面径流的影响最大, 是坡面产流的主要影响因素。 I_{30} 对耕地和果园产沙量的影响最大, 降雨量对林地和果园产沙量的影响最大。此外, 不同土地利用下的产流产沙与降雨历时的相关性不显著。

[参 考 文 献]

- [1] 王正雄, 蒋勇军, 张远喆, 等. 基于 GIS 与地理探测器的岩溶槽谷石漠化空间分布及驱动因素分析[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 1025-1039.
- [2] 杜文鹏, 闫慧敏, 甄霖, 等. 西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 5798-5808.
- [3] Dlamini P, Orchard C, Jewitt G, et al. Controlling factors of sheet erosion under degraded grasslands in the sloping lands of KwaZulu-Natal, South Africa [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(11): 1711-1718.
- [4] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the loess plateau of China [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45(1): 223-243.
- [5] Raclot D, le Bissonnais Y, Annabi M, et al. Main issues for preserving Mediterranean soil resources from water erosion under global change [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(3): 789-799.
- [6] Liang Yue, Jiao Juying, Tang Bingzhe, et al. Response of runoff and soil erosion to erosive rainstorm events and vegetation restoration on abandoned slope farmland in the

- Loess Plateau region, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020,584:124694.
- [7] Gao Jiangbo, Wang Huan. Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion: A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China [J]. *Catena*, 2019,172:369-377.
- [8] Chen Hongsong, Liu Jianwei, Wang Kelin, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China [J]. *Catena*, 2011,84(1/2):21-28.
- [9] 常勇,姜光辉,康彩霞,等.峰丛洼地坡面径流过程:以丫吉试验场为例[J].*水文*,2010,30(6):19-23.
- [10] Bookhagen B. Appearance of extreme monsoonal rainfall events and their impact on erosion in the Himalaya [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2010, 1(1):37-50.
- [11] Bryndal T, Franczak P, Krocak R, et al. The impact of extreme rainfall and flash floods on the flood risk management process and geomorphological changes in small Carpathian catchments: A case study of the Kasiniczanka river (Outer Carpathians, Poland) [J]. *Natural Hazards*, 2017,88(1):95-120.
- [12] 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.
- [13] Wang Zhijie, Jiao Juying, Rayburg S, et al. Soil erosion resistance of "Grain for Green" vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2016,141:109-116.
- [14] Cerdà A, Lucas Borja M E, Ubeda X, et al. *Pinus halepensis* M. versus *Quercus ilex* subsp. *Rotundifolia* L. runoff and soil erosion at pedon scale under natural rainfall in Eastern Spain three decades after a forest fire [J]. *Forest Ecology and Management*, 2017,400:447-456.
- [15] Mohamadi M A, Kavian A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015,3(4):273-281.
- [16] González-Pelayo O, Andreu V, Gimeno-García E, et al. Rainfall influence on plot-scale runoff and soil loss from repeated burning in a Mediterranean-shrub ecosystem, Valencia, Spain [J]. *Geomorphology*, 2010,118(3/4):444-452.
- [17] 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.
- [18] Peng Tao, Wang Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. *Catena*, 2012, 90:53-62.
- [19] 张晶晶,王力.坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析[J].*水土保持通报*,2011,31(2):159-162.
- [20] 路炳军,王志强.北京西部山区径流小区区产流产沙和土壤养分流失特征[J].*中国水土保持科学*,2015,13(6):33-39.
- [21] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: A field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250:1-14.
- [22] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1958,39(2):285-291.
- [23] 肖金强,张志强,武军.坡面尺度林地植被对地表径流与土壤水分的影响初步研究[J].*水土保持研究*,2006, 13(5):227-231.
- [24] 彭韬,王世杰,张信宝,等.喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J].*地球与环境*,2008,36(2):125-129.
- [25] 何周窈,苏正安,熊东红,等.金沙江干热河谷区坡面剑麻的水土保持效应[J].*山地学报*,2018,36(5):731-739.
- [26] 田太强,何丙辉,闫建梅.不同施肥与耕作模式下紫色土坡地产流特征[J].*水土保持通报*,2014,34(3):1-5.
- [27] 吴泽,蒋勇军,姜光辉,等.中梁山岩溶槽谷区不同土地利用方式坡地产流规律[J].*生态学报*,2019,39(16):6072-6082.
- [28] Zhou Ji, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2016,137:1-11.
- [29] Sun Long, Zhang Guanghui, Liu Fa, et al. Effects of incorporated plant litter on soil resistance to flowing water erosion in the Loess Plateau of China [J]. *Biosystems Engineering*, 2016,147:238-247.
- [30] Wang Lunjiang, Zhang Guanghui, Wang Xue, et al. Soil loss: Effect of plant litter incorporation rate under simulated rainfall conditions [J]. *Land Degradation & Development*, 2019,30(10):1193-1203.
- [31] Patin J, Mouche E, Ribolzi O, et al. Effect of land use on interrill erosion in a montane catchment of Northern Laos: An analysis based on a pluri-annual runoff and soil loss database [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563:480-494.
- [32] 陈利顶,贾福岩,汪亚峰.黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究[J].*地理科学*,2015,35(9):1176-1182.
- [33] 张远瞩,蒋勇军,李勇,等.隧道工程对喀斯特槽谷区坡面产流及土壤侵蚀的影响[J].*生态学报*,2019,39(16):6126-6135.