

短历时强降雨对典型喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响

任青青¹, 严友进¹, 甘艺贤⁵, 伏文兵⁶, 戴全厚^{1,2,3,4}, 高儒学¹, 兰雪^{1,7}

(1.贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2.农业生物工程研究院, 贵阳 550025; 3.山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵阳 550025; 4.山地生态与农业生物工程协同创新中心, 贵阳 550025; 5.水城县森林公安局现场勘验中心, 贵州 六盘水 553000; 6.贵州华保环境技术咨询有限公司, 贵阳 550025; 7.贵州师范大学地球与环境科学学院, 贵阳 550025)

摘要: 探索短历时强降雨对典型喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响, 为喀斯特区坡耕地应对极端天气的水土流失防治提供理论依据。研究采用人工室内模拟降雨试验的方法, 对喀斯特坡耕地侵蚀产沙特征在短历时强降雨作用下的影响因素开展研究。结果表明: (1) 短历时强降雨导致喀斯特坡耕地地表输沙模数和产沙量随降雨强度的增大而增大, 而地下输沙模数和产沙量与降雨强度无明显变化规律, 坡耕地土壤侵蚀以地表为主。地表产沙临界雨强为 30~50 mm/h。(2) 坡度增大时地表产沙比重大于地下产沙比重, 地表土壤侵蚀以地表为主。产沙比重发生转折的坡度值为 15°~20°。70 mm/h 降雨强度和 5°坡度下, 降雨强度对地下土壤侵蚀可能存在“负效应”。(3) 喀斯特坡耕地侵蚀产沙特征与降雨强度和坡度密切相关, 但降雨强度因子起主导作用。强降雨主要影响地表土壤侵蚀, 因此, 对喀斯特坡耕地土壤侵蚀治理应以地表为主。研究结果有助于深入了解短历时强降雨对喀斯特坡耕地土壤侵蚀的影响, 为对喀斯特坡耕地应对极端天气和水土流失防治以及维持生态环境健康持续发展提供理论依据。

关键词: 短历时强降雨; 喀斯特; 坡耕地; 降雨强度; 侵蚀产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0105-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.015

Effects of Short-Duration High-Intensity Rainfall on Erosion and Sediment Yield of Typical Karst Slope Farmland

REN Qingqing¹, YAN Youjin¹, GAN Yixian⁵, FU Wenbing⁶,

DAI Quanhou^{1,2,3,4}, GAO Ruxue¹, LAN Xue^{1,7}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Agricultural Bioengineering Research Institute, Guiyang 550025; 3. Key Laboratory of Mountain Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation, Ministry of Education, Guiyang 550025; 4. Collaborative Innovation Center of Mountain Ecology and Agricultural Bioengineering, Guiyang 550025; 5. Site Survey Center, Forest Public Security Bureau of Shuicheng County, Liupanshui, Guizhou 553000; 6. Guizhou Huabao Environmental Technology Consultation, Guiyang 550025; 7. College of Earth and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

Abstract: This study explored the impact of the short-duration high-intensity rainfall on the erosion and sediment yield of typical karst slope farmland. The results would provide theoretical basis for the monitoring and preventing of extreme weather and soil erosion in slope farmland of karst area. The artificial indoor simulated rainfall experiment was conducted to study the erosion and sediment yield characteristics of karst slope farmland under the short-duration high-intensity rainfall. Results showed that: (1) Under the short-duration high-intensity rainfall, the surface sediment transport modulus and sediment yield of karst slope farmland increased with the increase of rainfall intensities, but there was no obvious change in the underground sediment transport modulus and sediment yield. The soil erosion of slope farmland was dominated by the surface, and the critical rainfall intensities of surface sediment yield were between 30~50 mm/h. (2) The proportion of surface sediment yield was greater than the underground when slope increased, and soil erosion was dominated by the surface. The transition slope of sediment yield was between 15°~20°. At

收稿日期: 2019-05-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41671275); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502604); 贵州省高层次创新型人才项目(黔科合平台人才[2018]5641); 贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022号); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788); 贵州省一流学科建设项目(GNYL[2017]007); 贵州省联合基金项目(黔科合重大专项字[2014]7060号)

第一作者: 任青青(1994—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复与重建研究。E-mail: 1002737763@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

70 mm/h rainfall intensity and 5° slope, rainfall intensity might have a “negative effect” on underground soil erosion. (3) The characteristics of erosion and sediment yield on karst slope farmland were closely related to rainfall intensities and slope, but the rainfall intensity factor played the leading role. High-intensity rainfall mainly affected surface soil erosion. Therefore, the soil erosion control of karst slopes farmland should be dominated by the surface. This study is helpful to understand the impact of short-duration high-intensity rainfall on soil erosion of karst slope farmland, and to provide theoretical basis for coping with the extreme weather, controlling soil erosion, maintaining the healthy and sustainable development of the ecological environment in karst slope farmland.

Keywords: short-duration high-intensity rainfall; karst; slope farmland; rainfall intensity; erosion and sediment yield

近年来,全球气候不稳定导致了极端天气气候事件频繁发生^[1-2]。短历时强降水在极端天气气候事件中一直是各级防汛部门的重点和难点^[3-4]。短历时强降水是指降水量在短时间内达到或超过某一量值的强降水事件,中国气象局规定其为 ≥ 20 mm/h 降水量的降水^[5]。短历时强降水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^[6-7]。

贵州省位于我国低纬度云贵高原东部,气候多变且环境复杂,喀斯特区坡耕地大面积出露^[8]。近半世纪以来,贵州暴雨日在 5—9 月持续增长^[9-10],导致了该地区坡耕地土壤和水分流失,土层变薄、土壤肥力降低,造成坡地水土流失等灾害频繁出现,严重影响了当地的生态环境与经济发展^[11-12]。目前国内学者已开展大量关于影响坡地土壤侵蚀因素的相关报道,较多集中于岩石裸露率^[13]、地下孔(裂)隙度^[14]、坡长^[15]、坡度^[16]、降雨强度^[17]等影响因子的研究。而早期的研究中尚未关注到日益频发的极端强降雨事件对坡地土壤侵蚀的影响。极端降雨事件使得脆弱喀斯特地区面临着更为严重的生态威胁,特别是关于短历时强降雨对喀斯特坡耕地侵蚀产沙影响的研究相对薄弱,其关系着该地区已有水土保持成果的巩固和应对新气候挑战的能力。本文通过人工降雨试验模拟典型喀斯特坡耕地地表和地下的地貌,控制岩石裸露率和地下孔(裂)隙度水平,研究短历时强降雨对喀斯特坡耕地地表、地下侵蚀产沙特征的影响,揭示喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征机理,对喀斯特坡耕地应对极端天气和水土流失防治以及维持生态环境健康持续发展有着重要的理论和现实意义。

1 材料与方法

1.1 试验土样与试验设备

供试土壤(石灰性黏壤土)于 2017 年 6 月 3 日采自贵州省贵阳市花溪区喀斯特坡耕地(26°19′17″N, 106°39′18″E),该土壤由碳酸盐岩发育而成。石灰土的典型性表现为其是西南喀斯特区重要的土壤类型

之一。室内将采集土壤的根系及石块等杂质剔除,并用木条将土壤团块碎化,不对土壤过筛。供试土样的基本性质为砂粒(0.02~2 mm)含量 37.34%,粉粒(0.002~0.02 mm)含量 47.53%,黏粒(<0.002 mm)含量 15.03%,全氮含量(1.72±0.11)g/kg,全磷含量(1.69±0.10)g/kg,全钾含量(8.47±0.06)g/kg。

试验设备主要由变坡钢槽和降雨设备组成^[18]。变坡钢槽是自主设计带有地表和地下孔(裂)隙流集流槽的变坡钢槽(长 4 m,宽 1.5 m,深 0.35 m),坡度和孔裂隙度可调范围分别在 0°~45°和 0%~8%,钢槽底部为 2 块可活动且带有均匀打孔的钢板(孔直径 5 cm,数量 192 个)。降雨设备的降雨器主要由直立管和带有喷头的横管组成,长 6.5 m,降雨高度 6 m,降雨有效面积为 6.5 m×6.5 m,均匀度>85%,降雨设备的精度可调节为 7 mm/h,调节变化时间<30 s,降雨历时可任意调节,手动可调控降雨强度范围为 10~200 mm/h。

1.2 试验设计

室内人工模拟降雨试验于 2017 年 6 月 5 日至 9 月 15 日在贵州大学人工模拟降雨大厅内进行。依据课题组前期对贵州省贵阳市南明区、花溪区和安顺市普定县的 30 个坡地样地和 32 个岩石剖面的调查结果可知,贵州省喀斯特坡耕地的基岩裸露率和坡度大部分处于 10%~30%和 10°~25°内,地下孔(裂)隙度最大为 5.98%^[14]。为了更直观地探究短历时强降雨对喀斯特坡耕地侵蚀产沙的影响,试验选取了岩石裸露率和地下孔(裂)隙度作为控制因子,将变坡钢槽的坡面岩石裸露率设置为 30%,地下孔(裂)隙度设置为 5%,坡度设置 5 个水平(5°,10°,15°,20°,25°)。根据近年来贵州省的降雨特征和防汛部门颁布的降雨等级划分标准,设置 4 个短历时降雨梯度(30, 50, 70, 90 mm/h),降雨历时为 30 min。采用不同坡度与降雨强度组合进行交叉试验,每个处理重复 3 次,共计 60 场降雨。在每场降雨过程中以 3 min 为 1 个采样期,分别收集每个采样期内的地表径流和地下孔(裂)隙流水样。用烘干法测定每个采样期内的地表和地下孔(裂)隙的侵蚀产沙量。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤装填、坡面岩石裸露率及地下孔(裂)隙度设置 按照课题组前期研究方法^[19],随机将碳酸岩石排放于已调设坡度的变坡钢槽中,并对岩石露头高度大于30 cm的岩石面积进行测量;将岩石露头面积调至占变坡钢槽表面积的30%后,再将土壤分3层(10 cm/层)装填到钢槽中;利用土壤紧实仪测定并不断调整其紧实度自下而上的平均水平为1 070,760,410 kPa。表土用特制木板拔平,压实填土边缘以减少边界效应影响,土壤和岩石达到设计水平后,采集坡面垂直影片并利用ArcGis校核坡面岩石裸露率。通过调节变坡钢槽底部上下2个底板间孔洞的重合面积进行调节地下孔(裂)隙度,将孔(裂)隙度调节为5%。

1.3.2 产沙量测定 试验准备时将塑料容器搁置在地表径流与地下孔(裂)隙流的收集口处,用以收集地表和地下的水样,以每3 min为1个测定时段,历时30 min,分别接收各时段内的地表与地下累积水样及整个降雨历时内的各部位的水样体积。量取500 mL地表径流与地下孔(裂)隙流的水样各3份后,用定量滤纸($d=12.5$ cm)过滤出水样中的泥沙,并将泥沙转移至烧杯中,放入105 °C烘箱烘干,最后用电子天平(精度0.000 1)称重并记录数据。

1.3.3 输沙模数、产沙比重计算

$$\text{输沙模数}(\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})) = \frac{\text{产沙量}}{\text{钢槽投影面积} \times \text{降雨历时}}$$

$$\text{地下产沙比重}(\%) = \frac{\text{地下产沙量}}{\text{地下产沙量} + \text{地表产沙量}}$$

$$\text{地表产沙比重}(\%) = \frac{\text{地表产沙量}}{\text{地下产沙量} + \text{地表产沙量}}$$

1.3.4 贡献率计算^[20-21]

$$\text{综合增量} = e_i - e_1$$

$$\text{综合增量 } A = E_i - e_1$$

$$\text{综合增量 } B = E_i - e_i$$

$$\text{坡度贡献率 } S_c = (e_i - e_1) / (E_i - e_1)$$

$$\text{降雨强度贡献率 } R_c = (E_i - e_i) / (E_i - e_1)$$

式中: E_i 为非基准降雨强度下各坡度坡面侵蚀量(g); e_1 为基准降雨强度下各坡度坡面侵蚀量(g);综合总量A为由于降雨强度和坡度增大或减少而引起的坡面侵蚀量的增加量或减少量(g);综合总量B为相同坡度坡面上由于降雨强度的增大或减少而引起的侵蚀量的增加量或减少量(g); $e_i - e_1$ 为基准降雨强度下,由于坡度增大或减少而引起的侵蚀量的增加量或减少量(g); i 为坡度(5°,10°,15°,20°,25°)。

1.3.5 试验数据处理 采用Excel 2013和SPSS 18.0软件进行统计和相关性分析,用Excel 2013和Origin Pro 8.0软件作图。

2 结果与分析

2.1 侵蚀产沙对降雨过程的响应

2.1.1 不同降雨强度下地表输沙模数随降雨时间的变化过程 分析短历时不同降雨强度下喀斯特坡耕地地表输沙模数的变化过程(图1),可知地表输沙模数随降雨强度的增大而增大,在短历时(30 min)降雨过程中,随着降雨强度的增大加快了产生和堆积泥沙的速率,地表土壤颗粒达到一定量后便随雨水大量快速流失,使输沙模数不断增大。30 mm/h降雨强度时地表输沙模数无变化。当降雨强度增大至50 mm/h时已出现产沙且地表输沙模数随降雨时间的延长呈上下波动变化。当坡度为5°,10°和25°时,各坡度在50~90 mm/h降雨强度下的输沙模数极差分别为 33.03×10^{-3} , 31.93×10^{-3} , 86.24×10^{-3} g/(m²·min)(5°), 113.41×10^{-3} , 49.64×10^{-3} , 209.42×10^{-3} g/(m²·min)(10°)与 30.05×10^{-3} , 23.28×10^{-3} , 137.01×10^{-3} g/(m²·min)(25°)。其中,降雨强度为90 mm/h时输沙模数变化最大,其次为50 mm/h,70 mm/h最小。当坡度为15°和20°时,50~90 mm/h降雨强度下的输沙模数极差分别为 47.57×10^{-3} , 101.03×10^{-3} , 113.49×10^{-3} g/(m²·min)与 44.65×10^{-3} , 67.65×10^{-3} , 76.42×10^{-3} g/(m²·min)。其中,降雨强度为90 mm/h时输沙模数变化最大,其次为70 mm/h,50 mm/h最小。

2.1.2 不同降雨强度下地下输沙模数随降雨时间的变化过程 不同降雨强度及坡度条件下的地下输沙模数总体上随降雨时间的延长呈上下波动的变化(图2)。历时30 min的降雨过程中,30~90 mm/h降雨强度下的平均输沙模数分别为173.27,600.14,213.32,438.03 g/(m²·min),50,90 mm/h降雨强度条件下的地下输沙模数总体大于30,70 mm/h,降雨强度与输沙模数无明显规律。当坡度为5°和10°时,50,90 mm/h降雨强度条件下的输沙模数极差分别为118.99,49.82 g/(m²·min)与55.58,59.68 g/(m²·min),较30,70 mm/h降雨强度下输沙模数波动幅度大。坡度为15°~25°时,50~90 mm/h降雨强度下的输沙模数波动幅度较大,30 mm/h降雨强度下的输沙模数基本上呈现较为平缓的变化趋势。短历时降雨过程中,当降雨强度较小时,地下侵蚀较弱而使输沙模数在短时间内变化大体平缓,故降雨强度较小时(30 mm/h)对地下输沙模数变化影响不明显。地下输沙模数在50~90 mm/h降雨强度下总体随时间的延长上下剧烈波动。可能是因50~90 mm/h降雨强度下雨滴击溅能力强易将地下土壤的物质组成结构破坏打散,较弱抗蚀性的土壤随雨水的流失致使输沙模数变化较大,地

下土壤侵蚀随着降雨强度的增加不断加剧,使得输沙模数呈上下剧烈波动。

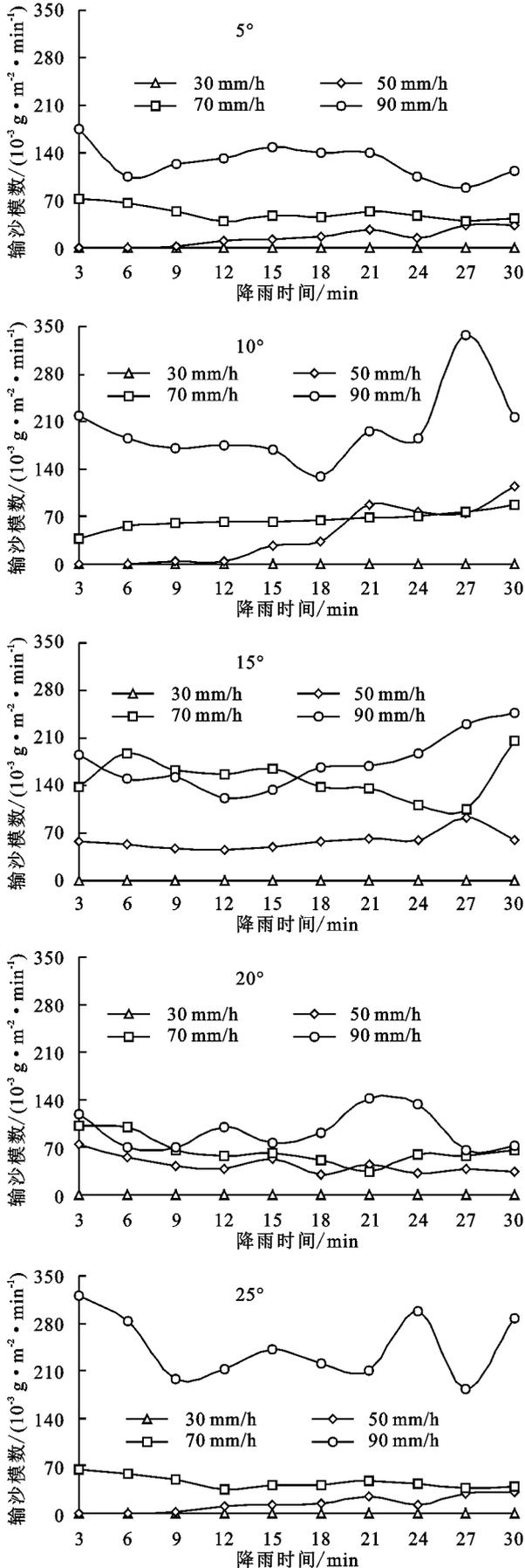


图 1 不同坡度下地表产沙随降雨时间的变化特征

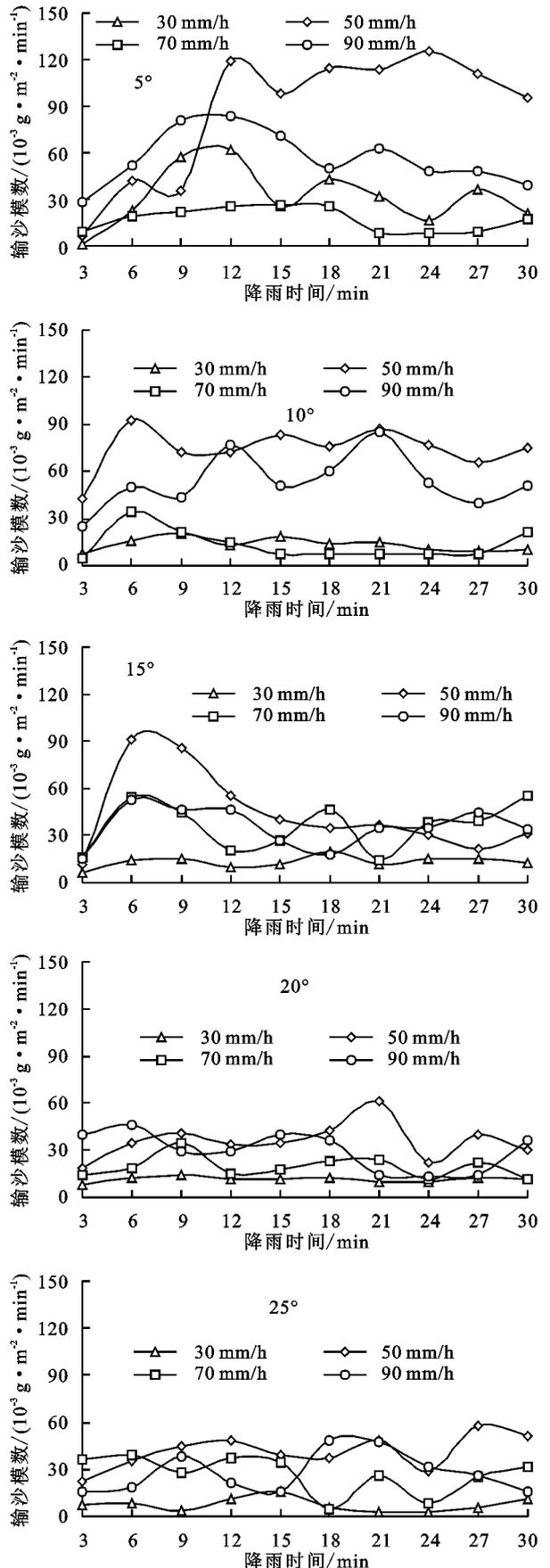


图 2 不同坡度下地下产沙随降雨时间的变化特征

2.2 产沙量对降雨强度的响应

2.2.1 不同降雨强度的地下和地表侵蚀产沙量 短历时降雨过程中,30 mm/h 降雨强度下坡耕地水土流失以

地下漏失(全部为地下产沙)为主(表 1)。当降雨强度增至 50 mm/h 时地表和地下都有泥沙流出,地表和地下输沙率分别为 0.15~1.27,0.38~0.86 g/min,可见地下和地表产沙量差异较小,地下漏失和地表土壤侵蚀并重^[21]。70,90 mm/h 降雨强度下主要为地表土壤侵蚀,地表输沙率比地下输沙率高达 3.00~6.16,3.23~4.75 倍,可知喀斯特坡耕地的土壤侵蚀方式从地下漏失转变为地表侵蚀,地表产沙量占坡面总产沙量比例大。地下

产沙量与降雨强度无规律变化,但地表则随降雨强度的增大而极剧增大。由此,地表产沙量大小依次为 90 mm/h>70 mm/h>50 mm/h,地下产沙量大小依次为 50 mm/h>90 mm/h>70 mm/h>30 mm/h。当降雨强度等于或低于 50 mm/h 时主要为地下漏失的水土流失,而超过 50 mm/h 降雨强度时地下漏失逐渐转向地表侵蚀。因此,短历时降雨过程中坡耕地地表产沙的临界降雨强度范围为 30~50 mm/h。

表 1 不同降雨强度的地表和地下产沙量

单位:g/min

类型	坡度/(°)	30 mm/h	50 mm/h	70 mm/h	90 mm/h
地表	5	0.00±0.00Ad	4.57±0.22De	15.24±0.68Db	38.29±1.67Ca
	10	0.00±0.00Ad	12.93±0.77Cc	19.74±0.79CDb	60.26±2.92Ba
	15	0.00±0.00Ad	18.21±1.22Bc	46.68±2.15Bb	54.23±2.63Ba
	20	0.00±0.00Ad	14.12±0.85Cc	20.85±1.85Cb	30.01±0.88Da
	25	0.00±0.00Ad	38.23±0.22Ac	68.35±0.68Ab	81.33±1.67Aa
地下	5	9.49±0.47Cb	25.93±1.39Ca	5.12±0.20Eb	16.96±1.18Cd
	10	4.04±0.26Ca	22.63±1.12Ca	4.09±0.20Da	16.31±1.12Cb
	15	4.08±0.21Aa	13.58±0.66Ab	11.09±0.43Ac	10.98±0.51Ab
	20	3.64±0.19Cd	11.47±0.53Ba	6.14±0.48Cb	9.57±0.78Bb
	25	2.44±0.15Ba	13.75±0.70Bb	8.97±0.64Bb	9.29±0.55Bb

注:表中数据为平均值±标准差;同列中不同大写字母表示相同降雨强度下不同坡度的产沙量差异显著($P<0.05$);同行不同小写字母表示相同坡度下不同降雨强度的产沙量差异显著($P<0.05$)。

2.2.2 不同降雨强度的地表和地下产沙比重 各降雨强度的地下产沙比重随着坡度的增大总体呈减小的趋势(图 3)。当降雨强度为 30 mm/h 主要以地下产沙为主。当降雨强度增至 50 mm/h 条件时地表出现侵蚀产沙,5°~25°坡度条件下对应地下产沙比重分别为 85.02%,63.6%,42.73%,44.81%,26.46%。当降雨强度增至 70 mm/h 时,随着坡度的增大,相应产沙比重大小为 25.14%,17.15%,19.19%,22.74%,11.60%,地下产沙比重较 50 mm/h 降雨强度条件下的产沙比重减少 53.85%~70.59%。当降雨强度为 90 mm/h 时,地下产沙比重分别为 30.70%,21.30%,16.84%,24.17%,10.25%,相对于 50 mm/h 降雨强度下分别减少 61.54%~63.53%。各降雨强度的产沙比重在 15°~20°时发生转折,可能是因受到降雨特征等因素的综合作用的影响。可见,因坡度的增大和降雨历时的延长使地下孔(裂)隙被土壤颗粒充满,而导致下产沙量不断减少,故随坡度的增大地下产沙比重整体呈减少的趋势^[21]。

2.3 降雨强度与坡度对侵蚀产沙的影响

2.3.1 降雨强度与侵蚀产沙的相关性 本研究对比分析了喀斯特坡耕地地表和地下侵蚀输沙模数、产沙量、产沙比重与坡度及降雨强度之间的关系(表 2)。当降雨强度一定时,坡度与地表和地下输沙模数、产沙量和产沙比重不相关。但坡度一定时,降雨强度与地表输沙模数存在极显著正相关($P<0.01$),与产沙

量和产沙比重存在显著正相关($P<0.05$),偏相关系数分别为 0.801,0.743,0.740;与地下产沙比重存在极显著负相关,偏相关系数为-0.925。综上,地表输沙模数、产沙量和产沙比重与地下产沙比重主要受降雨强度的影响,喀斯特坡耕地因受短历时强降雨的影响而面临着更为严峻的水土流失。

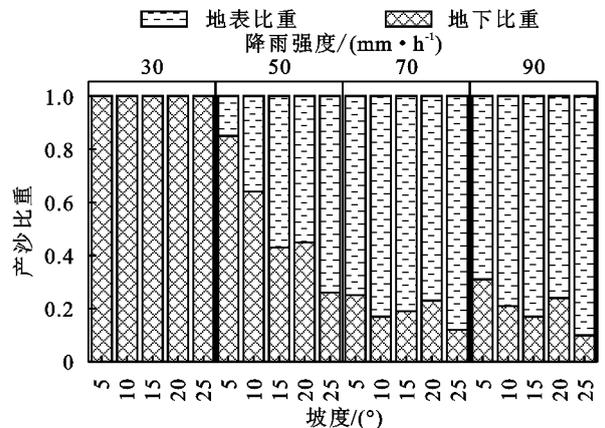


图 3 不同坡度下的产沙比重变化特征

表 2 地下和地表侵蚀输沙模数、产沙量、产沙比重与坡度及降雨强度之间的关系

类型	影响因素	输沙模数/ ($g \cdot m^{-2} \cdot min^{-1}$)	产沙量/g	产沙比重
地表	坡度/(°)	0.142	0.645	0.615
	降雨强度/($mm \cdot h^{-1}$)	0.801**	0.743*	0.740*
	坡度/(°)	-0.366	-0.327	-0.368
地下	降雨强度/($mm \cdot h^{-1}$)	0.500	0.507	-0.925**

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.3.2 降雨强度和坡度对累积侵蚀产沙量的贡献率

不同条件下的降雨强度和坡度对地表和地下侵蚀产沙量具有不同的影响。地表以 5°坡度和 50 mm/h 降雨强度为基准(表 3),可见 50~90 mm/h 降雨强度和 5°~25°坡度范围内,坡度对地表产沙量贡献率分别为 32.4%~58.7%和 15.0%~43.9%,降雨强度贡献率分别为 41.3%~67.6%和 56.1%~85.0%。在 70 mm/h 降雨强度条件下的坡度对侵蚀产沙的影响总体上较大于降雨强度。90 mm/h 降雨强度条件下的降雨强度对侵蚀产沙的影响明显大于坡度,贡献度均在 50%以上。总体上,降雨强度是影响地表累积侵蚀量的主要因素。

地下以 25°坡度和 30 mm/h 降雨强度为基准(表 4),可见 50 mm/h 降雨强度下,降雨强度的贡献率明显大于坡度的贡献率。70 mm/h 降雨强度下,坡度

为 5°时,土壤入渗降低且地表径流量增加^[22],土壤入渗率小于地表径流量,土壤随地表径流大量流失导致地下泥沙量减小,地下漏失量相对较低,降雨强度对其可能存在“负效应”,削弱了地下漏失的能力,故降雨强度贡献率出现了负值。当坡度为 10°时,降雨强度贡献率较小,而坡度则是影响地下累积侵蚀量的主要因素。降雨强度为 90 mm/h,10°~25°坡度时,降雨强度是影响地下累积侵蚀量的主要因素,贡献率保持在 80%以上,所以降雨强度是影响地下累积侵蚀量的主要因素。

综上,90 mm/h 降雨强度对地表累积侵蚀产沙量贡献率最多,而对地下累积侵蚀产沙量贡献率达到最大的降雨强度为 50 mm/h,贡献率分别为 85.0%和 92.1%。可见,短历时强降雨过程中降雨强度是影响累积侵蚀量的主要因素。

表 3 不同坡度和降雨强度对地表侵蚀产沙量的贡献率

坡度/ (°)	综合增量/g		综合 增量 A/g	综合增量 B/g		Sc/%		Rc/%	
	R ₇₀	R ₉₀		R ₇₀	R ₉₀	R ₇₀	R ₉₀	R ₇₀	R ₉₀
5	10.7	33.7	0	10.7	33.7	0	0	100.0	100.0
10	15.2	55.7	8.4	6.8	47.3	55.1	15.0	44.9	85.0
15	42.1	49.7	13.6	28.5	36.0	32.4	27.5	67.6	72.5
20	16.3	25.4	9.6	6.7	15.9	58.7	37.6	41.3	62.4
25	63.8	76.8	33.7	30.1	43.1	52.8	43.9	47.2	56.1

注:R₇₀为降雨强度 70 mm/h;R₉₀为降雨强度 90 mm/h;S_c为坡度贡献率;R_c降雨强度贡献率。下同。

表 4 不同坡度和降雨强度对地下侵蚀产沙量的贡献率

坡度/(°)	综合增量/g			综合 增量 A/g	综合增量 B/g			Sc/%			Rc/%		
	R ₅₀	R ₇₀	R ₉₀		R ₅₀	R ₇₀	R ₉₀	R ₅₀	R ₇₀	R ₉₀	R ₅₀	R ₇₀	R ₉₀
5	23.5	2.7	14.5	8.2	15.3	-5.5	6.3	34.8	305.2	56.3	65.2	-205.2	43.7
10	20.2	1.6	13.9	1.6	18.6	0	12.3	7.9	97.2	11.5	92.1	2.8	88.5
15	11.1	8.6	8.5	1.6	9.5	7.0	6.9	14.7	19.0	19.2	85.3	81.0	80.8
20	9.0	3.7	7.1	1.2	7.8	2.5	5.9	13.3	32.5	16.8	86.7	67.5	83.2
25	11.3	6.5	6.8	0	11.3	6.5	6.8	0	0	0	100.0	100.0	100.0

3 讨论

3.1 短历时强降雨过程中降雨强度对侵蚀产沙的影响

短历时强降雨使土壤侵蚀愈加复杂,降雨是坡面土壤侵蚀的主要驱动力^[23]。降雨强度主要是通过降雨量和雨滴击溅影响地表和地下土壤侵蚀^[24]。短历时强降雨能使土壤结构发生改变,从而导致坡耕地地表和地下产沙特征发生变化^[25]。在历时 30 min 的强降雨过程中,喀斯特坡耕地地表输沙模数和产沙量均随降雨强度的增大而增大,相关研究^[26]也表明,6 h 降雨时段内的坡面侵蚀产沙量与降雨强度呈正相关。但对于地下输沙模数和产沙量而言,降雨强度与其无明显变化规律,彭旭东等^[23]和 Yan 等^[27]对历时 90 min 的侵蚀产沙研究得出,降雨强度对地下侵蚀产沙影响不明显。本研究中,30 mm/h 降雨强度时的地下输沙模数和产沙量变化总体较小,而地表无变

化。50~90 mm/h 降雨强度时的地表、地下输沙模数和产沙量变化波动较大,但地表较地下变化大。主要是因为地表产沙存在临界降雨强度,在 30 mm/h 的降雨条件下,喀斯特坡面主要为蓄满产流,降雨主要入渗进入土壤,然后沿地下岩溶裂隙、管道等进入地下水系统^[28]。因此,坡耕地产沙全部为地下产沙。当降雨强度增至 50 mm/h 时,降雨强度超过一定的临界值时,降雨强度大于土壤入渗率,坡面产生径流,地表便出现了侵蚀产沙,随着降雨强度的增大泥沙伴随径流流失,土壤侵蚀以地表流失为主。因此,表明短历时强降雨过程中,喀斯特坡耕地地表产沙临界降雨强度为 30~50 mm/h,应在预防极端天气和水土流失的过程中重视临界降雨强度范围内的土壤侵蚀^[29]。在 70 mm/h 降雨条件下,因地下产沙逐渐向地表过渡,导致地表输沙模数和产沙量极剧增大,地

下减小。降雨强度为 90 mm/h,雨水的入渗能力有限,坡耕地土壤吸水饱和,降低土体抗剪强度,大部分雨水形成了坡面径流,在雨水的冲刷下形成裂隙便流进土体,导致坡耕地地表和地下的输沙模数、产沙量总体较大,水土流失最严重。

3.2 短历时强降雨过程中坡度对侵蚀产沙的影响

坡度是影响坡面土壤侵蚀的重要因素之一^[30],同时也是水土流失方程中的重要因子^[21]。本研究中坡耕地地表产沙比重随降雨强度的增大总体呈增大的趋势,地下则相反,但在 15°~20°出现转折。范丽丽等^[31]研究中提出土壤侵蚀强度最强的坡度范围为 15°~20°。可见,短历时强降雨过程中坡面产沙并未出现临界坡度,但在 15°~20°之间却发生了转折,可能因受到短历时和强降雨等其他因素的综合影响造成转折的坡度不是唯一值^[32]。70 mm/h 降雨强度和 5°坡度时,雨滴击溅分散的土粒之间存在摩擦力使之向下移动,地下土壤空隙被土粒填充,土粒的运移受阻而变缓,雨滴动能增大促进土壤表面物理结皮的形成,导致土壤入渗降低且地表径流量增加^[22]。加之坡度较缓,土壤入渗率小于地表径流量,土壤随地表径流大量流失导致地下泥沙量减小,地下漏失量相对较低,降雨强度对其可能存在“负效应”,削弱了地下漏失的能力,故降雨强度贡献率出现了负值。在 50~90 mm/h 降雨强度下,地表产沙比重范围分别为 0.15~0.74,0.75~0.88 和 0.69~0.90。当坡度增大时,导致地下漏失量降低,地表径流量增大使土壤侵蚀愈发严重,故在喀斯特区坡耕地进行种植时,是否可以通过适当增大坡度,并实施拦蓄措施,以平衡地表和地下的土壤流失量,这在今后的研究中有待深入。

3.3 短历时强降雨过程中侵蚀产沙的主要影响因素

降雨强度是影响坡面径流产沙过程中最重要的降雨特性因子^[33],坡度是影响坡面土壤侵蚀的主要地形因子^[34]。降雨强度是影响地表和地下累积侵蚀量的主要因素。短历时强降雨过程中,地下输沙模数、产沙量和产沙比重主要受降雨强度的影响,地表产沙比重主要受降雨强度影响,输沙模数受坡度影响,产沙量同时受坡度和降雨强度的影响,但主要以降雨强度为主,佐证了降雨强度是该区土壤侵蚀加剧的重要驱动因子,这与耿晓东等^[20]研究结论一致。究其原因,降雨强度和坡度的大小能将进入坡耕地地表和地下的雨水进行不同比例的分配,从而影响土壤入渗能力,降雨强度影响坡耕地地表的剪切和剥蚀作用从而导致土壤破坏,坡度的增大仅是放大了土壤的

侵蚀破坏作用,而不是主要影响侵蚀过程的主要因素。因此降雨强度因子起主导作用。

4 结论

(1)短历时强降雨会导致喀斯特坡耕地地表和地下侵蚀产沙随降雨强度的变化而变化。地表输沙模数和产沙量随降雨强度的增大而增大,而地下输沙模数和产沙量与降雨强度无明显变化规律。当降雨强度逐渐增大并超过 50 mm/h 时,雨水的入渗能力有限,大部分雨水形成了坡面径流,坡耕地地表水土流失愈为严重,土壤侵蚀以地表侵蚀为主。喀斯特坡耕地的二元结构使地表产沙临界降雨强度为 30~50 mm/h。

(2)短历时降雨过程中,坡度与地表产沙比重呈正相关,而地下则相反。产沙比重因受到降雨特征等因素的综合作用的影响在 15°~20°时发生转折。70 mm/h 降雨强度和 5°坡度时,降雨强度对其可能存在“负效应”,削弱了地下漏失的能力。因此,适当增大坡度,实施拦蓄措施以平衡地表和地下的土壤流失量以减少水土流失。

(3)短历时降雨过程中,降雨强度和坡度是影响喀斯特坡耕地地表、地下侵蚀产沙特征的关键因素,但降雨强度起主导作用。强降雨对喀斯特坡耕地的土壤侵蚀主要以地表为主。在应对短历时强降雨和水土流失过程中应以注重防治地表土壤侵蚀为主,在坡耕地预警点,充分参考可能发生降雨的雨强,并结合预警点的坡度,对坡耕地的地表实施一定的防护措施和做好排水设计。

参考文献:

- [1] 龚强,汪宏宇,张运福,等.辽宁省气候变化及其对极端天气气候的影响[J].生态学杂志,2013,32(6):1525-1531.
- [2] 邵颢,廖要明,柳艳菊,等.2015 年全球重大天气气候事件及其成因[J].气象,2016,42(4):489-495.
- [3] 吕博,韩风军,李又君,等.一次持续性暴雨过程的湿位涡诊断分析[J].环境科学与技术,2013,36(增刊 1):129-134.
- [4] 马冰然,曾逸凡,曾维华,等.气候变化背景下城市应对极端降水的适应性方案研究:以西宁海绵城市试点区为例[J].环境科学学报,2019,39(4):1361-1370.
- [5] 孙晓巍.辽宁短时强降水分布特征及预报技术研究[D].兰州:兰州大学,2015.
- [6] 金炜昕,李维京,孙丞虎,等.夏季中国中东部不同历时降水时空分布特征[J].气候与环境研究,2015,20(4):465-476.
- [7] 郭渠,陈佳,李瑞,等.重庆地区短历时强降水气候特征[J].干旱气象,2018,36(6):944-953.
- [8] 李宗发.贵州喀斯特地貌分区[J].贵州地质,2011,28

- (3):177-181.
- [9] 伍红雨,王谦谦.近 49 年贵州降水异常的气候特征分析[J].高原气象,2003,22(1):65-70.
- [10] 王芬,张娇艳,谷晓平.西太平洋副热带高压不同特征指数与贵州夏季降水的关系[J].暴雨灾害,2017,36(4):348-356.
- [11] Ellison W D. Some effects of raindrops and surface-flow on soil erosion and infiltration[J].Eos Transactions American Geophysical Union,1945,26(3):415-429.
- [12] Liu D D, She D L, Yu S E, et al. Rainfall intensity and slope gradient effects on sediment losses and splash from a saline-sodic soil under coastal reclamation[J].Catena,2015,128:54-62.
- [13] Dai Q H, Liu Z, Shao H B, et al. Karst bare slope soil erosion and soil quality: A simulation case study[J].Solid Earth Discussions,2015,7(2):1639-1671.
- [14] 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.
- [15] 孔亚平,张科利,唐克丽.坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J].水土保持学报,2001,15(2):17-20.
- [16] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
- [17] 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.
- [18] 戴全厚,喻理飞,杨智.一种用于研究坡面径流和地下孔裂隙流的模拟试验装置:中国,CN101988886A[P].2011-03-23.
- [19] 甘艺贤,戴全厚,伏文兵,等.基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2754-2760.
- [20] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):48-53.
- [21] 王丽园,查轩,黄少燕,等.不同雨强条件下坡度对红壤坡面侵蚀的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):40-44.
- [22] 耿晓东,郑粉莉,张会茹.红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J].水土保持学报,2009,23(4):39-43.
- [23] 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.
- [24] Angulo-Martínez M, Barros A P. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains[J].Geomorphology,2015,228(1):28-40.
- [25] 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.
- [26] 蔡雄飞,王济,雷丽,等.不同雨强对我国西南喀斯特山区土壤侵蚀影响的模拟研究[J].水土保持学报,2009,23(6):5-8.
- [27] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, 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.
- [28] 彭旭东,戴全厚,杨智,等.喀斯特山地石漠化过程中地表地下侵蚀产沙特征[J].土壤学报,2016,53(5):1237-1248.
- [29] 李鹏春.短历时强降雨防御机制探讨[J].中国防汛抗旱,2011,21(5):56-58.
- [30] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope[J].Soil and Tillage Research,2016,155:429-436.
- [31] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民.基于 GIS 的大宁河流域土壤侵蚀评价及其空间特征研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(5):563-566.
- [32] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263-1268.
- [33] García R I, Gil S F. Prediction of parameters describing phosphorus-desorption kinetics in soils of Galicia (Northwest Spain)[J].Journal of Environmental Quality,2007,43(5):563-566.
- [34] 王志伟,陈志成,艾钊,等.不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):17-20.