

喀斯特裸露坡耕地径流养分流失试验研究

靳 丽，戴全厚，李昌兰，彭旭东，严友进

(贵州大学林学院,贵阳 550025)

摘要：为揭示雨强对喀斯特坡耕地养分流失的影响，运用可调坡度、地下孔（裂）隙度试验钢槽装填土石模拟喀斯特裸露坡耕地，采用人工模拟降雨的方法研究不同雨强下喀斯特裸坡径流养分流失特征。结果表明：（1）雨强为 15,30 mm/h 时地表不产流，雨强为 50 mm/h 时地表有产流；试验雨强下地下孔（裂）隙均有径流产生。（2）地表径流中全氮和全钾流失量均随雨强增大而增大，全磷流失量则先增大后减小；地下径流中全氮流失量随雨强增大呈先增大后减小趋势，全钾流失量与雨强正相关，全磷流失量与雨强关系不明显。（3）雨强为 30,50 mm/h 时养分以地下孔（裂）隙流失为主，其贡献率为 100%；地下径流中全氮流失量对其总流失量的贡献率表现为：15 mm/h>30 mm/h>50 mm/h>70 mm/h>90 mm/h，全磷与全钾为：15 mm/h>30 mm/h>50 mm/h>90 mm/h>70 mm/h。（4）地表径流量、全氮、全钾流失量和地下全钾流失量与雨强均呈显著正相关，相关系数分别为 0.926,0.919,0.982 和 0.955。15,30 mm/h 雨强下，径流养分仅通过地下孔（裂）隙流失，50 mm/h 及以上雨强时养分伴以地表径流流失，且地下流失量大于地表流失量。

关键词：养分流失；径流；地下孔（裂）隙；喀斯特裸坡

中图分类号：S157.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2016)05-0046-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.05.008

Experimental Study about Runoff Nutrient Loss on Karst Bare Slope

JIN Li, DAI Quanhou, LI Changlan, PENG Xudong, YAN Youjin

(Forestry College of Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to reveal the influence of rain intensity on nutrient losses from Karst bare slope, characteristics of runoff nutrient loss on Karst bare slope under different rainfall intensities were studied through artificial rainfall experiments based on simulating Karst bare slope in a steel tank with the adjustable slope and degree of underground holes (cracks). In each experiment, the tank was filled with soils and rocks. Results indicated: (1)Surface runoff didn't generated on karst bare slope under 15 mm/h and 30 mm/h rainfall intensities, however, the surface runoff was yielded when rainfall intensity increased to 50 mm/h, and the underground holes (cracks) produced runoff under any rainfall intensity. (2)In the case of surface runoff, the amount of total nitrogen (TN) and total potassium (TK) loss increased with the rainfall intensity, however, the amount of total phosphorus (TP) loss first increased and then decreased, in the case of underground holes (cracks) runoff, the amount of TN loss first increased and then decreased with the rainfall intensity increasing, the amount of TK loss was positive correlation with rainfall intensities while the amount of TP loss was insignificant correlation with the rainfall intensity. (3)When rainfall intensities were 30 mm/h and 50 mm/h, the nutrient loss was dominated by underground hole (crack) loss, and its contribution was 100%, the contribution of TN loss in underground hole (crack) runoff presented the order as 15 mm/h>30 mm/h>50 mm/h>70 mm/h>90 mm/h, and the order of TP and TK was 15 mm/h>30 mm/h>50 mm/h>90 mm/h>70 mm/h. (4)Both the runoff volume, TN loss, TK loss in surface runoff and the TK loss in underground holes (cracks) runoff had significant positive correlation with rainfall intensity and its correlation coefficient were 0.926, 0.919, 0.982 and 0.955 respectively. Runoff nutrients loss only through the underground holes (cracks) when the rainfall intensity was 15, 30 mm/h, as the rainfall intensity≥50 mm/h, accompanied with surface runoff loss, and the amount of underground nutrient loss was greater than that of surface nutrient loss.

Keywords: nutrient loss; runoff; underground holes (cracks); Karst bare slope

喀斯特环境以地表和地下二元景观结构为基本特征^[1-2]。“二元结构”使喀斯特地区存在地表与地下水及养分流失^[3],结果导致土壤总量减少,结构破坏,肥力降低,质量退化,生产力急剧下降,严重制约农业发展。近年来,有学者针对常态地貌坡耕地养分流失规律开展了相关研究,郑子成等^[4]通过野外人工降雨研究了玉米季坡耕地地表径流中磷素的流失特征,认为坡面产流量与磷素流失总量和坡度显著正相关。王丽等^[5]通过人工模拟降雨实验研究了坡耕地不同坡度的土壤侵蚀程度,认为产沙量、产流量和养分流失与坡度显著相关。喀斯特坡耕地养分流失研究也有部分报道,倪九派等^[6]采用室内模拟降雨装置研究了三峡库区坡耕地土壤养分流失,认为黄色石灰土坡耕地土壤养分流失由流失泥沙和径流共同携带,表土各养分含量衰减程度与雨强正相关。吴士章等^[7]对黔中喀斯特地区20°坡耕地的养分流失进行了观测,得出全钾在水中溶解度高,极易随径流流失,而全磷极易被土壤固定。雨强对非喀斯特区坡耕地土壤侵蚀及土壤养分流失的影响研究较多^[8-9],但由于喀斯特地区水土流失的复杂性与隐蔽性,当前关于喀斯特坡耕地养分流失的研究只关注坡面流失,缺乏地表、地下径流养分流失的系统研究,特别是雨强对这一过程的影响,还有待进一步的探索。本研究通过室内模拟喀斯特坡耕地坡面,采用人工模拟降雨试验,监测地表、地下径流及其养分含量,研究不同雨强下喀斯特坡耕地径流养分流失特征,为喀斯特地区养分流失预测及面源污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土采自贵州省贵阳市花溪区青岩镇喀斯特典型坡耕地(106°39′18″E,26°19′17″N)石灰土0—20 cm耕层土壤,其砂砾含量为38.33%,粉粒含量为43.33%,黏粒含量为18.33%,全氮、全磷、全钾含量分别为9.72,2.04,8.72 g/kg。供试土壤不过筛,只对大的土壤团块进行分散处理,风干后均匀混合待用。

1.2 试验设备

试验设备由便携式全自动人工模拟降雨器和可调坡度、可调孔(裂)隙的试验钢槽组成。便携式全自动人工模拟降雨器是西安清远测控技术有限公司生产的QYJY—501型,降雨高度6 m,雨滴终点速度满足天然降雨特性,雨强连续变化范围10~200 mm/h,有效范围为6.5 m×6.5 m,均匀度>85%;可调孔(裂)隙度的变坡钢槽采用戴全厚等^[10]发明的室内模拟试验装置,钢槽长4 m、宽1.5 m、深0.35 m,可调坡度0°~45°,底板均匀打孔,孔径5.0 cm,孔裂隙度

0~8%任意可调。钢槽的径流出口处分上下两层收集径流。

1.3 试验设计

试验选取的控制因子为岩石裸露率、坡度及地下孔(裂)隙度,设置岩石裸露率10%,坡度25°,地下孔(裂)隙度3%,降雨强度15,30,50,70,90 mm/h,试验重复3次。岩石裸露率、地下孔(裂)隙度是根据对贵州省贵阳市南明区、花溪区和安顺市普定县的30个坡地样地以及32个岩石剖面的调查结果设置。25°是我国法定的退耕还林坡度,但喀斯特地区坡度在25°及以上的坡耕地所占比例依旧很大,贵州省第二次土地调查结果显示,贵州省坡度≥25°的坡耕地比例占17.9%。降雨强度是根据张文源等^[11]提出喀斯特坡耕地侵蚀性降雨指标(15 mm/h左右)的基础上设置。每场降雨历时90 min,每10 min收集1次地表、地下孔(裂)隙流水样,共计9个降雨时段。室内人工模拟降雨试验于2015年8—9月中旬在贵州大学人工模拟降雨大厅内进行。

1.4 研究方法

1.4.1 裸露坡耕地模拟 采用直径≥30 cm的石灰岩块石随机排列在钢槽中以模拟坡面基岩裸露率,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,待基岩排列达到设计水平后在钢槽内分3层进行填土,每层10 cm,每层土壤紧实度按野外实测数据自上而下为410,760,1070 kPa。试验开始前先降小雨(<15 mm/h)沉降,再将降雨强度、坡度、地下孔(裂)隙度调整至设计水平,待土壤水饱和产流后开始计时按测定时段收集水样。

1.4.2 样品采集与分析 坡面或地下孔(裂)隙产流后,开始计时并用塑料容器接取地表径流与地下孔(裂)隙流,以每10 min为一个测定时段,分别统计各时段内的地表与地下累积产流量^[12]。水样采集后现场加封并保存于4℃冰箱中,24 h内进行室内分析测定。全磷采用过硫酸钾氧化钼锑抗分光光度法测定,全钾采用原子吸收光谱仪测定,全氮采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法测定^[13],以人工降雨水为空白。

2 结果与分析

2.1 降雨强度对产流的影响

2.1.1 雨强对产流过程的影响 由于喀斯特的“二元结构”,裸坡存在沿坡面的地表径流和沿地下孔(裂)隙的地下径流。由图1可知,地表产流量和地下产流量变化趋势为:降雨初期(前20 min)径流量急剧上升到峰值后不再增加,最后趋于平稳。小雨强(15,30 mm/h)下,降雨强度小于坡面土壤入渗率,地表不产流,降水渗入土壤并以地下孔(裂)隙径流为主。随着雨强的增大,降雨量大于土壤入渗量,中雨强

(50 mm/h)下地表有产流,产流的临界雨强在 30~50 mm/h 之间。不同雨强地表产流量表现为:90 mm/h >70 mm/h>50 mm/h,地下产流量表现为:50 mm/h >70 mm/h>90 mm/h>30 mm/h>15 mm/h。

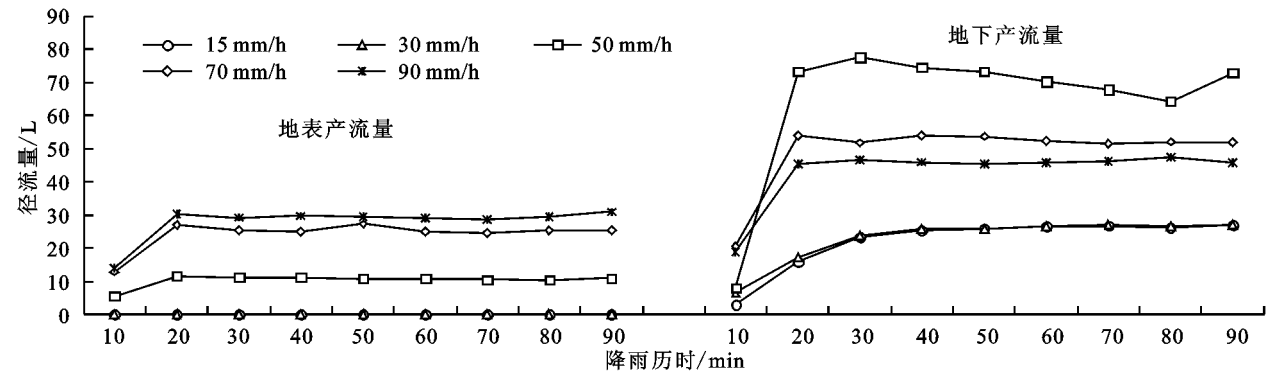


图 1 不同雨强的产流过程

2.1.2 雨强对径流深的影响 从不同雨强下地表及地下径流深(表 1)可以看出,雨强越大,地表径流深及径流总深越大,地表径流深的变化范围为 15.55~41.85 mm,地下径流深随雨强的增大先增大后减小,具体表现为:中雨强>大雨强>小雨强。地下径流深的变化范围为 33.30~70.65 mm,地下产流量明显大于地表产流量,除 30,50 mm/h 雨强外,不同雨强对径流深的影响差异显著($P<0.05$)。小雨强下以地下产流为主,随着雨强增大,表层土壤含水率逐渐

增大,入渗能力逐渐下降,入渗率等于或小于雨强时,地表开始产流,试验结果表明雨强为 50 mm/h 时地表有产流,50 mm/h 雨强下地下径流深达最大值 93.13 mm。随着雨强增大,降雨对地表的冲刷加重,坡面形成细沟,雨强大于土壤入渗能力,部分雨水来不及入渗以地表径流的方式流失,因此地表径流深逐渐增大,地下径流深逐渐减少。15,30 mm/h 雨强下地下流失量对流失总量的贡献率为 100%,50,70,90 mm/h 雨强的贡献率分别为 85.7%,66.9%,62.8%。

表 1 雨强对径流的影响

雨强/(mm·h ⁻¹)	15	30	50	70	90
地表径流深/mm	0.00d	0.00d	15.55±2.3c	36.45±2.99b	41.85±1.04a
地下径流深/mm	33.30±2.58d	34.35±2.15d	93.13±2.48a	73.78±2.41b	70.65±2.15c
总径流深/mm	33.30±2.58d	34.35±2.15 d	108.68±4.78c	110.23±0.58b	112.50±3.19a

注:不同小写字母表示差异达 5%显著水平。下同。

2.2 雨强对全氮流失的影响

2.2.1 全氮流失量随降雨历时的变化过程 坡面养分流失主要包括泥沙携带和径流 2 种途径,径流养分流失包括地表径流和地下径流 2 种形式。根据本次模拟降雨试验结果(图 2),小雨强(15,30 mm/h)降雨径流中全氮仅通过地下孔(裂)隙流失。不同雨强降雨地表全氮流失量变化趋势为:降雨初期流失量急剧增加后有所减小并趋于稳定,原因是地表径流形成初期,土壤表层受长期施肥耕作的影响土壤松散并有大量的养分富集,在雨滴击打及径流的冲刷作用下,养分富集率较高的细颗粒和一部分易溶性养分首先随径流流失,即初期冲刷效应^[14]。随着降雨过程持续,表层土壤中养分含量逐渐降低,加上降雨径流稀释,径流中流失量逐渐减小,并趋于稳定。中雨强下全氮流失量在降雨 20 min 时到达峰值,大雨强下 40 min 到达峰值;50,70,90 mm/h 雨强降雨下全氮流失量变化范围分别在 35.85~80.04,43.16~126.80,46.15~141.00 mg 之间。大雨强下地表全氮流失量大于中雨强。地下全氮流失量变化趋势与

地表有所差异,降雨过程中流失量没有明显规律,波动较大。15,30,50,70,90 mm/h 雨强降雨下全氮流失量变化范围分别在 5.62~59.30,23.53~126.86,47.35~478.72,54.81~214.31,10.64~151.00 mg 之间。雨强为 50 mm/h 下的全氮流失量显著高于其他雨强下的流失量。地下径流中全氮流失量表现为:中雨强>大雨强>小雨强。

2.2.2 全氮流失量对降雨雨强的响应特征 从表 2 看出,地表径流中全氮流失量随雨强的增大而增大,50~90 mm/h 雨强降雨下全氮流失量为 572.83~1 037.37 mg;地下径流中全氮流失量、总流失量随雨强的增大呈先增大后减小的趋势,15 mm/h 雨强降雨的地下径流全氮流失量值最小为 296.16 mg,50 mm/h 雨强时值最大为 3 023.57 mg,除 15,30 mm/h 雨强外,不同雨强降雨对地表、地下全氮流失量和总流失量的影响差异显著($P<0.05$)。相对于地表径流,地下径流与土壤相互作用时间长,溶入的氮量较多,因此全氮流失量主要通过地下径流流失,这与罗春燕等^[15]的研究结果一致。

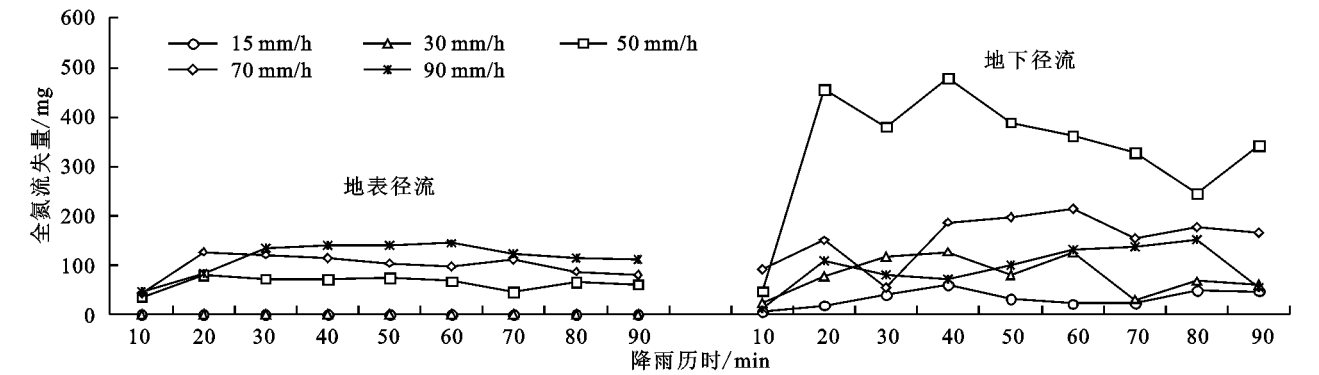


图 2 全氮流失量随降雨历时的变化特征

雨强/ (mm·h ⁻¹)	径流氮流失量/mg		总量/ mg
	地表	地下	
15	0d	296.16±0.61e	296.16±0.61e
30	0d	709.4±1.27d	709.4±1.27d
50	572.83±1.50c	3023.57±1.93a	3596.4±3.42a
70	885.53±0.69b	1387.99±1.44b	2273.52±0.75b
90	1037.37±1.30a	843.89±0.58c	1881.26±1.89c

小雨强降雨下全氮仅通过地下孔(裂)隙流失。大于等于 50 mm/h 雨强降雨时伴以地表径流方式的流失,表明 30~50 mm/h 雨强间存在临界雨强使土壤渗透率小于或等于降雨强度。雨强大于 50 mm/h 时,地下径流全氮流失量随雨强的增大逐渐减小,地表全氮流失量逐渐增大。原因是随雨强的增大,降雨对坡面的溅滴作用和冲刷作用增强,产生的地表径流量越来越多,随地表径流的全氮流失量就越来越多,随地下径流的流失量则减少。地下径流中全氮流失量对其总流失量的贡献率表现为:15,30 mm/h>50 mm/h>70 mm/h>90 mm/h,分别为 100%,75%,61%,45%。不同雨强对地表全氮流失量的影响具体表现为:90 mm/h>70 mm/h>50 mm/h,对地下全氮流失量和总流失量的影响具体表现为:50 mm/h>

70 mm/h>90 mm/h>30 mm/h>15 mm/h。

2.3 雨强对全磷流失的影响

2.3.1 全磷流失量随降雨历时的变化过程 图 3 表明,小雨强下全磷仅通过地下孔(裂)隙流失。不同雨强地表中全磷流失量随降雨历时的变化趋势不明显,呈波浪式起伏,与陈玲等^[16]对不同雨强下坡耕地径流养分输出机制的试验结果基本一致。原因是磷主要以泥沙结合态随地表径流流失,降雨初期径流量虽小,但坡面松散土粒富集程度较高,易随降雨径流流失,全磷流失量在初期较高并呈降低趋势;之后雨滴对地表的击溅使土壤大颗粒被击碎分散成为细小的颗粒,使全磷的流失量呈波浪式起伏的变化趋势。50,70,90 mm/h 雨强降雨的流失量变化范围分别在 2.54~6.82,3.04~7.08,3.60~7.05 mg 之间。地下全磷流失量随降雨历时无明显变化趋势,波动起伏比地表明显;15,30,50,70,90 mm/h 雨强降雨的流失量变化范围分别在 0.71~10.06,1.34~11.54,4.93~31.00,2.13~8.41,1.59~14.83 mg 之间;雨强为 50 mm/h 时的流失量显著高于其他雨强且变幅较大,地下径流中全磷流失量表现为:中雨强>大雨强>小雨强。

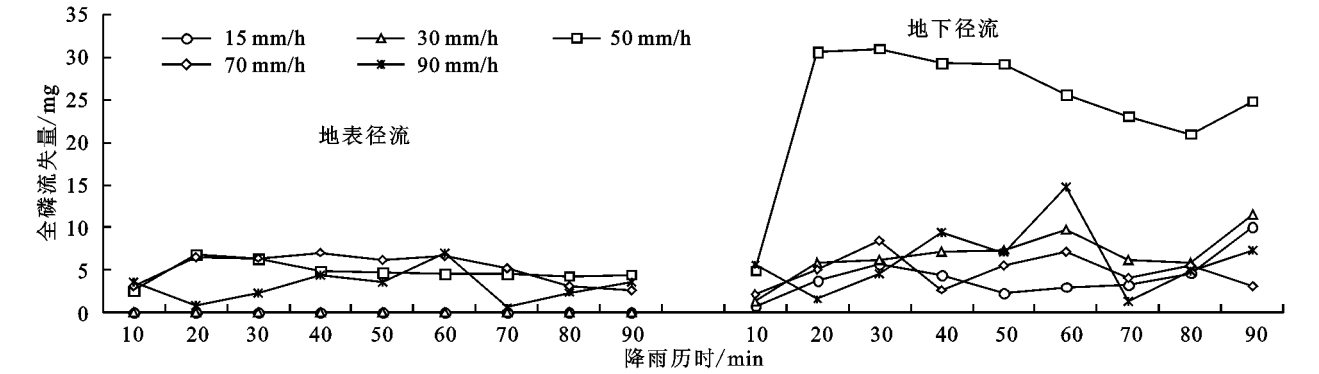


图 3 全磷流失量随降雨历时的变化特征

2.3.2 全磷流失量对雨强的响应特征 根据全磷流失量对雨强的响应特征(表 3)可看出,地表径流中全磷流失量随雨强的增大先增大后减小,50~90 mm/h 雨强降雨的全磷流失量为 43.17~28.27 mg,雨强对地下径流中全磷流失量的影响不明显,对总流失量的

影响呈先增大后减小的趋势。地下径流中全磷流失量在 15 mm/h 雨强降雨下值最小(37.71 mg),50 mm/h 雨强降雨下值最大(219.73 mg),不同雨强对地表、地下全磷流失量及总流失量的影响差异显著($P<0.05$)。地下径流中的全磷流失量大于地表径

流中的全磷流失量。小雨强下,磷素仅通过地下孔(裂)隙流的方式流失;流失量随雨强的变化规律不明显,地下径流中全磷流失量对其总流失量的贡献率表现为:15,30 mm/h>50 mm/h>90 mm/h>70 mm/h,分别为 100%,83.6%,48.3%,66.7%。不同雨强对地表全磷流失量的影响具体表现为:70 mm/h>50 mm/h>90 mm/h;对地下全磷流失量的影响具体表现为:50 mm/h>90 mm/h>30 mm/h>70 mm/h>15 mm/h;对全磷总流失量的影响具体表现为:50 mm/h>70 mm/h>90 mm/h>30 mm/h>15 mm/h。全磷流失量显著低于全氮流失量,原因是 70%~90%的氮素是以溶解态的硝氮形式流失^[17],而硝氮带负电荷,不易被带负电荷的土壤胶体吸附,其淋溶现象较显著。

表 3 雨强对径流磷流失量的影响

雨强/ (mm·h ⁻¹)	径流磷流失量/mg		总量/ mg
	地表	地下	
15	0d	37.71±0.67e	37.71±0.67e
30	0d	61.17±0.61c	61.17±0.61d
50	43.17±0.62c	219.73±1.17a	262.9±1.79a
70	46.74±0.70b	43.73±0.90d	90.47±0.25b
90	28.27±0.23a	56.64±0.58b	84.91±0.56c

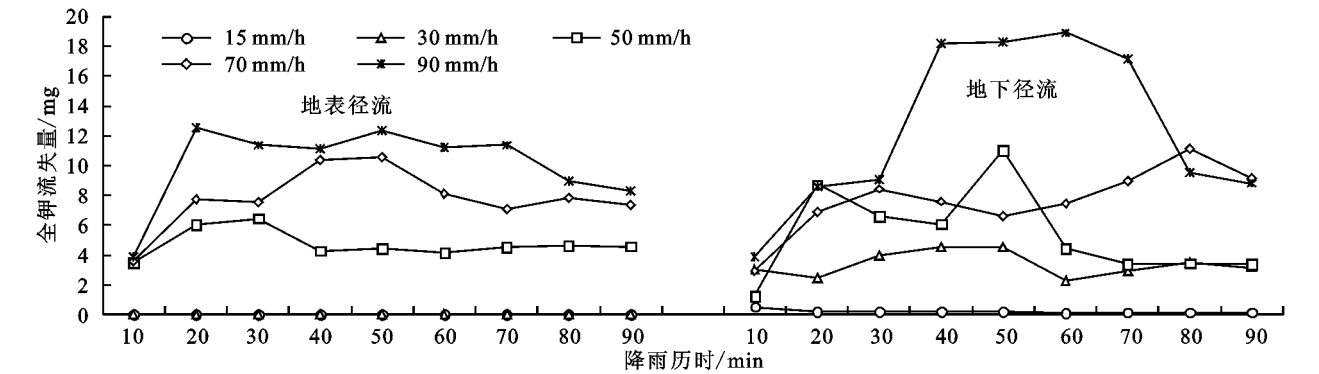


图 4 全钾流失量随降雨历时的变化特征

2.4.2 全钾流失量对雨强的响应特征 从表 4 看出,地表、地下径流中全钾流失量均随雨强的增大呈增大的趋势,50~90 mm/h 雨强降雨时地表全钾流失量为 42.41~91.05 mg,15~90 mm/h 雨强降雨时地下径流全钾流失量为 30.18~112.48 mg。小雨强下全钾仅通过地下孔(裂)隙流失,降雨强度大于或等于土壤入渗率时,伴以地表径流的方式流失。地下径流中全钾流失量对其总流失量的贡献率表现为:15,30 mm/h>50 mm/h>90 mm/h>70 mm/h,分别为 100%,58.9%,55.3%,49.6%。全钾流失量受雨强的影响较显著,地表、地下径流中全钾流失量都随雨强的增大而增大,与彭浩等^[18]的研究一致,除 15,30 mm/h 雨强外,不同雨强对地表、地下全钾流失量和总流失量的影响差异显著($P<0.05$)。

2.5 雨强、径流与流失养分相关分析

表 5 表明,地表径流量、全氮流失量、全钾流失量

2.4 雨强对全钾流失的影响

2.4.1 全钾流失量随降雨历时的变化过程 全钾的流失可分为土壤内部的可溶性物质随入渗水分沿垂直方向的地下径流迁移和土壤入渗能力小于雨强时产生的地表径流迁移。分析全钾流失量随降雨历时的变化过程(图 4)得出,15,30 mm/h 雨强降雨下全钾以地下孔(裂)隙流的流失方式为主。地表全钾流失量随降雨历时呈先增大后减小的趋势,50,70,90 mm/h 雨强降雨下流失量到达峰值的时间分别为 30,50,20 min;50,70,90 mm/h 雨强降雨下流失量变化范围分别在 3.46~6.45,3.58~10.55,3.85~12.50 mg 之间;地表降雨过程全钾流失量表现为:大雨强>中雨强。地下全钾流失量随降雨历时的变化波动较大,雨强为 90 mm/h 降雨下的流失量在降雨 30~80 min 期间显著高于其他雨强的流失量,15 mm/h 雨强降雨下的流失量显著较少,说明全钾流失易受大雨强的影响。15,30,50,70,90 mm/h 雨强降雨下地下径流中流失量变化范围分别在 0.09~0.47,2.27~4.50,1.18~11.01,2.88~11.15,3.90~18.91 mg 之间,具体表现为:大雨强>中雨强>小雨强。

与雨强均呈显著正相关,相关系数分别为 0.926,0.919,0.982;地表全氮流失量、全钾流失量与地表径流量均呈显著正相关,相关系数分别为 0.984,0.955。地表全氮流失量与全磷流失量和全钾流失量之间也显著相关,地表全磷流失量与地表径流量和雨强之间没有显著的相关性。对有相关关系的雨强、地表径流量与流失养分之间进行回归分析,结果如下:

表 4 雨强对径流钾流失量的影响

雨强/ (mm·h ⁻¹)	径流钾流失量/mg		总量/ mg
	地表	地下	
15	0d	30.18±0.41d	30.18±0.41d
30	0d	31.63±0.24d	31.63±0.24d
50	42.41±1.34c	60.72±1.21c	103.13±2.54c
70	70.06±0.75b	68.99±0.83b	139.05±0.37b
90	91.05±1.11a	112.48±1.17a	203.53±0.52a

$Q=3.648X-73.44,R^2=0.858$ (1)

$Y_1=14.827X-257.019,R^2=0.844$ (2)

$$Y_1=4.033Q+44.963,R^2=0.969 \tag{3}$$

$$Y_2=0.330X+3.529,R^2=0.912 \tag{4}$$

$$Y_2=1.337Q-27.479,R^2=0.964 \tag{5}$$

式中:Q 为地表径流量(L);Y₁ 为地表全氮流失量(mg);Y₂ 为地表全钾流失量(mg);X 为降雨雨强(mm/h)。

表 5 地表雨强、径流与流失养分相关分析

指标	雨强	径流量	全氮流失量	全磷流失量	全钾流失量
雨强	1	0.926*	0.919*	0.714	0.982**
径流量		1	0.984**	0.804	0.955*
全氮流失量			1	0.892*	0.956*
全磷流失量				1	0.773
全钾流失量					1

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

表 6 表明,地下径流量与雨强有一定相关性,r=0.638;地下全氮流失量和地下径流量呈显著正相关,r=0.908,地下全钾流失量和雨强呈显著正相关,r=0.955,地下全氮流失量与雨强无显著关系,地下全氮流失量与地下全磷流失量之间呈显著相关,地下全磷流失量与雨强和地下流失量之间都没有显著关系。对有相关关系的雨强、地下径流量与流失养分之间进行回归分析,分析结果如下:

$$Q_1=14.827X-257.019,R^2=0.844 \tag{6}$$

$$Y_3=1825.421-11.169Q_1+0.23Q_1^2,R^2=0.978 \tag{7}$$

$$Y_4=21.636e^{0.18X},R^2=0.933 \tag{8}$$

式中:Q₁ 为地下径流量(L);X 为降雨雨强(mm/h);Y₃ 为地下全氮流失量(mg);Y₄ 为地下全钾流失量(mg)。

表 6 地下雨强、径流与流失养分相关分析

指标	雨强	径流量	全氮流失量	全磷流失量	全钾流失量
雨强	1	0.638	0.325	0.019	0.955*
径流量		1	0.908*	0.756	0.632
全氮流失量			1	0.950*	0.335
全磷流失量				1	0.029
全钾流失量					1

3 结论

(1)喀斯特裸坡在 15,30 mm/h 雨强降雨时地表不产流,50 mm/h 雨强降雨时地表有产流;不同雨强下地下孔(裂)隙均有径流产生。地表开始产流的临界雨强在 30~50 mm/h 之间。随雨强增大,地表径流深显著增加,地下径流深呈先增大后减小的趋势,除 15,30 mm/h 雨强外,不同雨强对径流深的影响差异显著(P<0.05)。

(2)15,30 mm/h 雨强下,径流养分仅通过地下孔(裂)隙流失,50 mm/h 及以上雨强降雨时伴以地表径流方式流失。地表养分流失量随降雨历时先增大后减小,存在初期冲刷效应;地下养分流失量随降雨历时变化规

律不明显,有明显的波动现象,地下径流全氮、全磷流失量在 50 mm/h 雨强降雨时最大且波动明显,而全钾流失量在 90 mm/h 雨强降雨最大且波动明显。

(3)地表径流全氮流失量和全钾流失量均随雨强增大而增大,全磷流失量则是先增大后减小;除 15,30 mm/h 雨强外,不同雨强对地表径流养分流失量的影响差异显著(P<0.05)。地下径流中全氮流失量随雨强增大先增大后减少,全钾流失量与雨强呈正相关,全磷流失量与雨强关系不明显。除 15,30mm/h 雨强外,不同雨强对地下养分流失量的影响差异显著(P<0.05)。

(4)小雨强下(30,50 mm/h),养分流失以地下孔(裂)隙流的方式为主,贡献率为 100%;地下径流中全氮流失量对总流失量的贡献率表现为:15 mm/h>30 mm/h>50 mm/h>70 mm/h>90 mm/h,全磷与全钾的贡献率表现为:15 mm/h>30 mm/h>50 mm/h>90 mm/h>70 mm/h。

(5)地表径流量、全氮流失量、全钾流失量和地下全钾流失量与雨强均呈显著正相关,相关系数分别为 0.926,0.919,0.982,0.955;地表全氮流失量、地表全钾流失量与地表径流量均呈显著正相关,相关系数分别为 0.984,0.955;地下全氮流失量和地下径流量呈显著正相关,相关系数为 0.908。

参考文献:

[1] 龙健,江新荣,邓启琼,等. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J]. 土壤学报,2005,42(3):419-427.

[2] Field M. A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology[EB/OL]. [2016-06-21]. <http://www.umsl.edu/~naumannj/Geography%201001%20articles/ch%203%20landforms%20&%20soil/glossary%20karst%20&%20caves.pdf>

[3] 凡非得,王克林,熊鹰,等. 西南喀斯特区域水土流失敏感性评价及其空间分异特征[J]. 生态学报,2011,31(21):6353-6362.

[4] 郑子成,何淑勤,尹忠,等. 不同坡度下玉米季坡耕地地表径流中磷素流失特征[J]. 水土保持学报,2013,27(5):109-114.

[5] 王丽,王力,王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报,2015,29(2):69-75.

[6] 倪九派,魏朝富,高明,等. 三峡库区坡耕地土壤养分流失的实验研究[J]. 水土保持学报,2008,22(5):38-42.

[7] 吴士章,朱文孝,苏维词,等. 喀斯特地区土壤侵蚀及养分流失定位试验研究:以贵阳市修文县久长镇为例[J]. 中国岩溶,2005,24(3):202-205.

[8] 李裕元,邵明安,郑纪勇,等. 降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(4):39-46.