

粤北石漠化地区水文过程试验研究

陆冠尧^{1,2}, 李 森², 魏兴琥¹, 梁钊雄¹, 熊 彦¹, 黄金国¹

(1. 佛山科学技术学院国土资源环境与旅游研究中心, 广东 佛山, 528000; 2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州, 730070)

摘要: 通过在粤北石漠化地区选取不同石漠化阶段样地, 进行人工降雨模拟试验, 研究粤北石漠化地区水文过程。结果表明: 随石漠化程度的加深, 地表植物对雨水最大截留量不断下降, 其中以重度→极重度阶段降幅最大, 达6倍多。土壤持水量在重度→极重度石漠化阶段发生转折。地表径流在中度和重度石漠化土地上具有相同特征, 但在与轻度和极重度石漠化土地中差异明显。当雨强为30~50 mm/h时, 产流35 min内总径流量以中度石漠化样地最高; 当雨强为51~60 mm/h时, 以极重度石漠化样地最高; 而当雨强为61~70 mm/h时, 则以重度石漠化样地最高。在各石漠化阶段样地上以雨强35 mm/h进行人工模拟降雨60 min, 有0.6%~2.71%雨水被植被及枯落物截留; 2%~53.31%雨水被土壤吸收; 2.18%~7.37%雨水转化为地表径流; 41.8%~93.41%雨水渗漏形成地下水。

关键词: 石漠化; 降雨模拟; 水文过程; 粤北

中图分类号: P333.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)04-0481-08

中国的石漠化土地主要分布在长江上游的乌江流域、珠江上游的北盘江流域和粤北的岩溶山区。其特征之一是具有地上、地下双层结构^[1], 从而导致山地和丘陵因地表水渗漏损失严重而缺水, 地表径流仅出现在溶蚀谷地与洼地中, 形成了水土资源很不协调的“土地在山上, 水源在山下”的分布格局, 严重影响着当地人民生活及社会经济发展。一直以来, 贵州和广西是石漠化研究的重点区域, 而对岩溶环境水转化及其模型的研究在20世纪80年代初就已经开始, 但对象主要为“三水”: 大气降水、地表水和地下水^[2-8]。

粤北岩溶山区是中国南方岩溶区的东延部分, 涉及14个县(市), 总面积20 576 km², 区内广泛发育了泥盆系东岗岭组(D_{2d})与天子岭组(D_{3t})、石炭系壶天群(CH)、梓门桥组(C_{1z})与石蹬子组(C_{1s})、二迭系长兴组(P_{2c})和三叠系大冶组(T_{1d})等多套碳酸盐岩地层, 分布面积达9 475.63 km²^[9]。粤北是中国南方中亚热带脆弱的岩溶生态环境区域, 是石漠化演变过程十分典型、石漠化问题依然严重的区域。关于粤北岩溶山区资源环境的研究,

在1976年开展过植被调查^[10], 20世纪90年代初开展过地貌调查^[11], 2002年开展过水资源调查^[12], 2006年后李森等通过在粤北地区布设试验地对石漠化的景观、成因、治理等方面做了较多的研究^[13-17], 魏兴琥等通过人工模拟降雨试验研究过该区域的地表土壤侵蚀及钙离子流失^[18,19], 但对粤北石漠化土地“五水”(降水、植被截留雨水、土壤水、地表径流和地下水)转化过程的研究目前还是空白。因此, 在本区设置石漠化土地试验场地进行定位观测和人工降雨模拟试验研究, 探讨植被截留雨水、土壤水、地表径流及地下水特征, 并对“五水”转化进行定量化, 可以为认识和解决粤北岩溶石漠化地区水资源问题提供参考。

1 研究样地与研究方法

1.1 研究样地

研究区位于广东省英德市九龙镇石角村(24°08.113'N, 112°51.855'E, 海拔高度: 121 m)的一岩溶孤丘, 山体高70~80 m, 呈东西走向, 东西长约80 m, 南北宽约60 m, 峰尖坡陡, 呈峰林形态。九

收稿日期: 2012-06-18; 修订日期: 2013-01-12

基金项目: 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目(LYM11126)、广东省自然科学基金(S2012010009272)、国家自然科学基金项目(31170486)、广东省哲学社会科学十二五规划项目(GD12CGL01)资助。

作者简介: 陆冠尧(1979-), 男, 广东佛山人, 讲师, 博士, 主要从事石漠化治理研究。E-mail: guanyaolu2005@126.com

龙镇地貌分区属于粤北山地丘陵区连江岩溶高原及盆地亚区,受连江干流及支流影响,形成九龙——明迳盆地。区内石灰岩与砂页岩相间分布,石山呈不连续孤立状或部分连续状分布。气候为南亚热带季风气候区,年均气温 20.7 °C,年降水量 1 879 mm,主要集中在 4~9 月,占全年降水量的 70% 多。表层土壤和裂隙土为黑色石灰土,但下层土壤为红色石灰土。植被为石灰岩灌丛,低洼处或土层较厚处有少量乔木,如黄连木(*Pistacia chinensis*)、八角枫(*Alangium chinense*)、野桐(*Mallotus tenuifolius*)等,其余多为灌木,尤其以攀援灌木和藤本居多,优势种为欏木(*Loopetalum chinense*)、雀梅藤(*Sageretia thea*)、小果蔷薇(*Rose cymosa*)、龙须藤(*Bauhinia championii*);地势平坦,光线充足处以黄荆(*Vitex negundo*)、红背山麻杆(*Alchornea trewiodes*)、苕麻(*Boehmeria longispicata*)较多,红背山麻杆和苕麻还多在陡峭的石壁上出现,在灌丛中还有部分草本出现,如五节芒(*Miscanthus floridulus*)、白茅(*Imperata cylindrica*)、芒萁(*Dicranopteris dichotma*)、臭根子草(*Bothriochloa intermedia*)在山坡下部多见,而淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、苔草(*Carex spp.*)等在较密的灌丛下出现。

野外径流试验场位于山坡北部下沿,坡度 8°~30°,径流小区面积 3 m×4 m,参照李森等^[15]粤北石漠化分级指标,将试验场分为极重度石漠化(岩石裸露率大于 90%),重度石漠化(岩石裸露率 70%~90%),中度石漠化(岩石裸露率 50%~70%)和轻度石漠化(岩石裸露率 30%~50%)4 个程度样地。试验前先对样地周边植被进行清理设置隔离带,四周挖深 10 cm、宽 20 cm 左右,再砌砖高 20 cm 以上,在下沿设置出水口,样地外设置接水桶。

1.2 研究方法

1.2.1 人工模拟降雨

在 4 个石漠化样地上进行人工降雨模拟试验。模拟降雨前先调查植被种类、盖度、生物量和土壤深度、容重和剖面组成,并采集土壤及水源样品分析水分与理化性质。试验所用仪器为中国科学院水利部水土保持研究所研制的 BX-1 型便携侧喷式模拟降雨机。模拟雨强为 30~40 mm/h、41~50 mm/h、51~60 mm/h 和 60~70 mm/h;每个模拟雨强下至少进行 3 次试验。为了能更加精确地控制模拟雨强,采用试验中实测雨强的方法,在径流小

区均匀放置雨量筒和相同口径的塑料桶,测定整个降雨过程的实际雨强。人工降雨在地表产流后 35 min 结束。地表径流量每隔 5 min 采集一次,适时测量。

1.2.2 土壤持水量的测定

土壤饱和持水量采用环刀法测定,在不同石漠化样地不同土壤深度用环刀采样,每小区 3 次,在环刀底部放滤纸,置于玻璃条上,再横置于瓷盘上,瓷盘中装水,将滤纸下折使充分吸水,置 6~8 h 充分吸水至饱和后称重即为饱和持水量,撤去瓷盘中的水,再置 8 h 使重力水充分流失后称重即为田间持水量。

1.2.3 石漠化土地“五水”转化量的测定

降雨落入石漠化土地后,雨水落至岩石表面后部分流入岩石裂隙、溶孔进入岩石下部,部分沿溶痕、溶沟进入与土壤相邻的石-土缝隙继续下渗,并与土壤水合体。落入土壤中的雨水首先经过地表植被的拦截,然后是地表枯落物,最后进入土壤表层,地表土壤水分饱和后下渗并形成地表径流。进入岩石中或岩石表面(包括地下岩石与土壤接触的表面)的流水渗漏进入地下河。因此,在石漠化土地上,降雨后的雨水有 4 个去向:植被截流,土壤吸收,地表径流,地下水。根据水平衡原理,将水转化用公式表示为: $T=V+S+R+F$,其中 T 为降水总量; V 为植被截流雨水量; S 为土壤含雨水量; R 为地表径流量; F 为地下水量。

本次试验“五水”转化量的计算是在不同石漠化样地以雨强 35 mm/h 人工模拟降雨 60 min 的“五水”转化量。

1) 降水量的测定:根据样地面积 12 m²、雨强 35 mm/h 和降雨时间 60 min 计算出降水量为 420 L。

2) 植被截流雨水量的测定:采取刈割法测定地上生物量。在每个样地内采用方格网随机设置 3 个采样点,以采样点为中心,样方 0.5 m×0.5 m 大小,选择晴天天气,垂直剪采地上植物,同时收集地表枯落物,即刻称取鲜质量,然后置于原样地内进行模拟降雨(35 mm/h 雨强),等地上生物茎秆和地表枯落物产流后称质量,计算降雨前后地上生物茎秆和地表枯落物质量差,再根据样地面积换算植被截流雨水量。

3) 土壤水量的测定:在不同石漠化阶段样地人工降雨前后通过环刀采集不同土层深度的土壤样品,通过称质量→室内烘干→再称质量,计算人

工降雨前后环刀土壤水量差。在不同石漠化样地上划定网格,每网格0.3 m×0.2 m大小,通过插钎法在每个网格交点测量土层深度,计算不同石漠化阶段样地土壤体积。再根据土壤体积和降雨前后环刀土壤水量差计算样地土壤水量。

4) 地表径流量的测定:按雨强35 mm/h分别在不同石漠化样地上进行人工模拟降雨,60 min后水桶收集的水量。

5) 地下水量的测定:地下水量通过水量平衡原理得出: $F=T-V-S-R$ 。

2 结果与分析

2.1 植被截留水特征

从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地,地表植物最大截留量不断下降,从1 198.14 g/m²下降到128.00 g/m²,其中以重度→极重度阶段降幅最大,达6倍多;地表枯落物最大截留量从轻度石漠化阶段的699.71 g/m²上升到中度石漠化阶段的791.90 g/m²,以此作为拐点降低到极重度的293.34 g/m²,降幅也是以重度→极重度阶段最大,达2倍多(表1)。

将植被盖度和地上生物量与降雨截留量进行相关分析(表2),发现地上生物量和植被盖度都与地表植物最大截留量和单位质量地表植物最大截留量有显著相关性,但与地表枯落物最大截留量和单位质量枯落物最大截留量相关性不显著。说明地表植物的最大截留量与地上植物种类有一定的关系,从轻度→中度→重度→极重度石漠化土地,植物群落及优势种都发生变化,与之相联系的植物种特征(茎秆粗糙度、叶片大小、光滑度、茎叶有芒无芒等)的不同使得在降雨过程中的截留量也呈现显著变化,轻度石漠化土地植物种较多,并具有黄连木、欏木、黄荆等乔灌木和层片既有高度又有厚度的灌丛,使得降雨截留量最大,其次为中度和重度石漠化灌草丛,而以苔藓地衣等低等植物和低结构灌草丛为主的极重度石漠化的降雨截留量显著降低。不同石漠化阶段地表枯落物对降雨的最大截留量与植被特征指标相关性不明显,可能是受到地表水冲刷、风吹等外部因素的影响,使得地表枯落物在同一地点不同时间上会产生不同变化。总的来说,植被退化可直接影响到降雨雨水的强度及其地表空间分布,而雨水强度及其

表1 不同石漠化阶段植物与地表枯落物的降雨截留

Table 1 The rainfall interception of vegetation and surface litter in different stages of rocky desertification

石漠化阶段	地上植物平均质量(g/m ²)		地表植物最大截留量(g/m ²)	单位质量地表植物最大截留量(g/g)	地表枯落物平均质量(g/m ²)		地表枯落物最大截留量(g/m ²)	单位质量枯落物最大截留量(g/g)
	降雨前	降雨饱和后			降雨前	降雨饱和后		
轻度	2455.18	3653.32	1198.14	0.56	1430.82	2130.53	699.71	0.71
中度	2189.56	3125.00	935.44	0.43	1775.58	2567.48	791.90	0.69
重度	1829.14	2657.65	828.51	0.34	715.52	1326.37	610.85	0.53
极重度	668.88	796.88	128.00	0.12	33.22	326.56	293.34	0.66

表2 不同石漠化阶段植被特征-降雨截留量相关性分析

Table 2 The correlation analysis of vegetation characteristics and rainfall interception in different stages of rocky desertification

	地表植物最大截留量(g/m ²)	单位质量地表植物最大截留量(g/g)	地表枯落物最大截留量(g/m ²)	单位质量枯落物最大截留量(g/g)
地上生物量	0.970*	0.994**	0.902	0.404
植被盖度	0.935	0.981*	0.849	0.507

注:*,**分别表示通过信度0.05和0.01假设检验。

地表空间分布的变化也必然引起土壤侵蚀以及基岩溶蚀程度的变化,最终产生一系列石漠化生态环境效应。

2.2 土壤水特征

从轻度→中度→重度石漠化样地,土壤饱和持水量呈上升趋势,在重度石漠化样地上达到最高,以此最为拐点,到极重度阶段,土壤饱和持水量显著降低(图1)。不同阶段石漠化样地的田间持水量也具有相同特征。

土壤颗粒、容重和持水量是表征土壤组成、结构和水源涵养功能的物理指标,土壤持水量受土壤基本性质的影响^[20]。本文选取有机质、容重、土壤颗粒组成(<0.005 mm、0.01~0.005 mm、0.05~0.01 mm、0.10~0.05 mm、0.25~0.10 mm、0.50~0.25 mm、>0.5 mm)与土壤持水量进行分析,结果见表3。

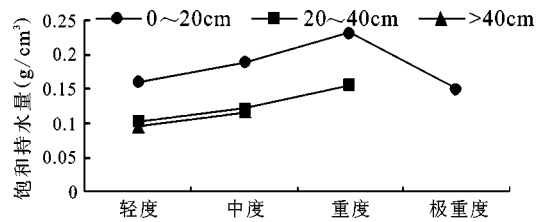


图1 不同石漠化阶段土壤饱和持水量的变化
Fig.1 Variations of soil saturated capacity in different stages of rocky desertification

有机质为土壤中的亲水物质,一方面可以吸持水分,增加土壤的水分含量;另一方面参与土壤结构的形成与改良,有机质高的土壤,往往由良好的团粒结构,适宜的土壤孔隙构成,土壤蓄持水的能力增加。从轻度→中度→重度石漠化样地,有机质呈上升趋势,主要是由于随着石漠化程度的加深,岩石裸露率增加,经过常年雨水侵蚀,岩石上的裂隙、洼地等微地形越来越多,虽然

表3 不同石漠化阶段土壤持水量和土壤基本性质

Table 3 Soil moisture capacity and characteristics in different stages of rocky desertification

石漠化阶段	土层深度 (cm)	饱和持水量 (g/cm ³)	田间持水量 (g/cm ³)	有机质 (g/kg)	容重 (g/cm ³)	土壤颗粒组成(g/kg)						
						>0.5 mm	0.50~0.25 mm	0.25~0.10 mm	0.10~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	<0.005 mm
						mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
轻度	0~20	0.161	0.089	26.49	1.13	2.25	4.37	15.53	21.47	30.19	7.02	18.84
	20~40	0.103	0.052	15.66	1.45	2.21	4.12	15.48	22.34	31.64	7.86	19.22
	>40	0.095	0.048	15.46	1.87	2.08	3.87	14.72	21.83	32.52	7.89	18.93
中度	0~20	0.190	0.105	29.82	1.15	3.19	6.07	16.28	20.08	28.77	6.77	18.70
	20~40	0.120	0.069	18.27	1.44	3.01	6.02	15.23	19.85	29.66	7.12	18.63
	>40	0.115	0.067	14.39	1.45	2.96	5.39	15.02	21.37	30.97	7.31	18.16
重度	0~20	0.231	0.115	35.00	0.96	4.22	6.24	17.59	21.55	23.94	6.04	15.55
	20~40	0.154	0.076	21.41	1.08	4.17	5.88	16.45	20.21	26.21	6.31	16.73
极重度	0~20	0.150	0.100	12.76	1.52	23.43	17.26	19.94	11.81	10.98	1.31	1.04

土壤盖度小,厚度薄,但地表枯枝落叶、岩石表面少量风化产物常被雨水冲蚀积累在残存土壤中,致使土壤有机质含量高,结构疏松,容重也降低。在极重度石漠化样地,岩石裸露率达93%,土壤盖度极低,土层很薄,虽然结构比较疏松,但其地表岩石常受雨水侵蚀和风化作用,使得土壤中沙砾含量较高,土壤容重也较大。从轻度→中度→重度石漠化样地,土壤持水量与有机质、容重呈显著相关性(图2、图3)。

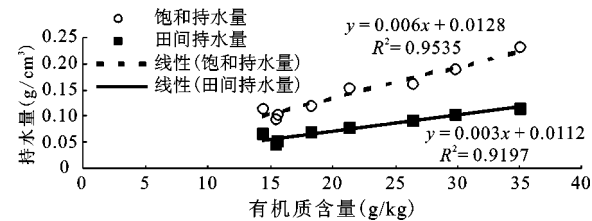


图2 土壤持水量与有机质含量关系
Fig. 2 Relationship between soil moisture capacity and organic matter

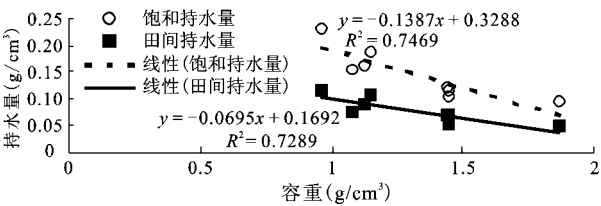


图3 土壤持水量与容重关系
Fig.3 Relationship between soil moisture capacity and bulk density

土壤颗粒组成影响到土壤的质地,从而影响到土壤持水量^[20]。从轻度→中度→重度石漠化样地,土壤中0.25~0.10 mm、0.05~0.01 mm和0.01~0.005 mm颗粒与土壤持水量呈显著相关(表3),其中土壤持水量与0.25~0.10 mm颗粒呈正相关,而与0.05~0.01 mm和0.01~0.005 mm颗粒呈负相关。极重度石漠化样地由于土壤盖度极低,土层很薄,而且土壤中砾石含量高,土壤失去保水作用,其土壤持水量与土壤颗粒关系不明显。

表3 土壤持水量与土壤颗粒相关性分析

Table 3 The correlation analysis of soil moisture capacity and soil particle

	土壤颗粒组成(g/kg)						
	>0.5 mm	0.50~0.25 mm	0.25~0.10 mm	0.10~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	<0.005 mm
饱和持水量(g/cm ³)	0.694	0.645	0.915**	-0.247	-0.859**	-0.878**	-0.701
田间持水量(g/cm ³)	0.628	0.677	0.826*	-0.332	-0.780*	-0.843**	-0.591

注:*,**分别表示通过信度0.05和0.01假设检验。

2.3 地表径流特征

2.3.1 地表径流变化特征

在轻度石漠化样地上,以3个不同雨强进行人工模拟降雨,地表都能产生径流,产流时间随雨强增大而变短,但径流强度差异不大,都介于2~5 mm/h之间,而且随降雨时间的延长,径流强度也处在稳定的状态。这是由于轻度石漠化样地除了具有植被覆盖度较高,土层较深条件外,其岩石裸露率为30.4%,裸露的岩石上有6条大小不一的裂隙,其中有一条面积达104 cm²,且位于样地低洼处。降落到岩石表面的雨水大部分沿裂隙渗漏,降落到土壤上超渗产生的径流也大部分流向低洼裂隙处继而渗漏,因此产流后汇集到集水处的径流量少,而且不同雨强产生的径流量的差异也不明显(图4a)。

在中度和重度石漠化样地上进行的人工模拟降雨,其地表径流特征有相似的特征,表现在2个方面:一是该类土地在不同雨强条件下的地表径流强度变化呈现出具有一定波动性的较为曲折的峰谷相间的特点。二是该类土地在产流初期,曲线的波动性大,并表现为地表径流强度较大且变幅也较大,随着时间的推移,地表径流强度明显降低且变幅也随之减小,曲线的波动性减弱,逐渐趋向于稳定。主要原因在于该类土地岩石裸露率高,土层较薄,降雨后地表土壤水能较快饱和继而产生地表径流,且径流量在短时间内不断增大。但该类土地土层下也分布有落水洞和漏斗,当土壤水饱和后沿土壤-落水洞和土壤-漏斗界面渗漏,其渗漏强度大于土壤的入渗强度时,地面径流量快速变小,当落水洞和漏斗的渗漏水量达到饱和的时候,地面径流量变幅也随之减小,逐渐趋向于稳定(图4b,c)。

在极重度石漠化样地上进行的人工模拟降雨试验,其地表径流也有2个明显特征:一是在该类土地上实施人工降雨后很快产流,且在不同的雨强条件下其产流时间相差不大;另一方面是产流

后每隔5 min时间段地表径流强度的变化幅度很小,在不同的雨强条件下其地表径流强度的变化幅度相差也不大。主要原因在于该类土地基岩裸露,裂隙、节理极为发育,洼地内多漏斗、落水洞,特别是包气带上部发育有表层带,该表层带相当于碳酸盐层上部的风化裂隙带,厚达数米,垂向的裂隙及节理上宽下狭,致使降落到地面的雨水大部分以分散的形式向下渗漏,成为分散式的补给裂隙;渗漏雨水满足裂隙持水量后(雨水的损失量),形成裂隙流。裂隙流因裂隙大小不同其流动速度不一,形成不同的快、慢速裂隙流,它们以不同的汇流速度向洞穴汇集补给。当雨强超过裂隙下渗强度时,超渗部分的雨水形成地面径流,沿着倾斜坡面流动,继续向洼地内漏斗、落水洞汇集,以“灌入”的方式集中补给地下水源。因此,降落在试验样地内大部分区域的雨水都通过裂隙、漏斗以及落水洞流失掉,试验样地下方的小部分区域作为径流的主要来源,降雨后便很快产生径流,由于集流面积小,雨强增大后产生的径流变化幅度不大(图4d)。

2.3.2 地表总径流特征

从轻度→中度→重度石漠化样地,随着雨强的增大,产流后35 min内的总径流量呈增大趋势,但在极重度石漠化样地,雨强为61~70 mm/h的地表总径流量比雨强为51~60 mm/h的小。当雨强为30~40 mm/h时,总径流量以中度石漠化样地最高;当雨强为41~50 mm/h时,以极重度石漠化样地最高;而当雨强为61~70 mm/h时,则以重度石漠化样地最高(图5)。轻度石漠化样地乔灌木树种多、盖度高,能够截留部分雨水,同时,土层厚度也深,土质疏松,可以保持相当数量的雨水。而重度石漠化土地岩石裸露率大,土层薄,降雨产生后很快就产生径流。极重度石漠化样地不仅岩石裸露率最大,其裂隙、溶孔的数量也最多,降雨后雨水渗漏较快,产生的地表总径流量也较小;另外,在这种环境下,雨水对碳酸盐岩的冲刷以及对碎屑、颗粒的

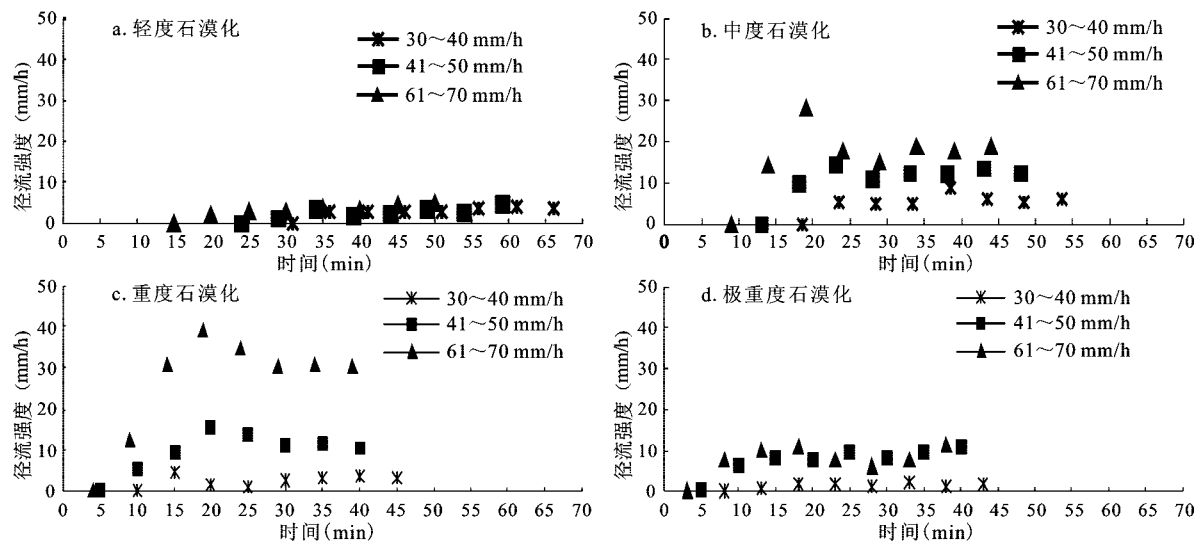


图4 不同石漠化阶段样地产流后35 min径流时间内的径流强度变化
Fig.4 Changes of runoff intensity for 35 min on plots in different stages of rocky desertification

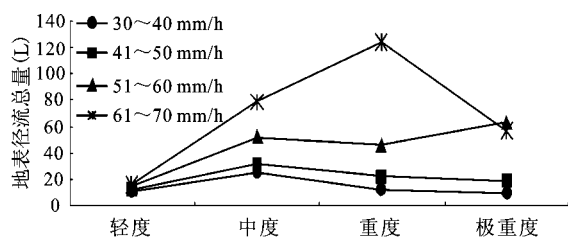


图5 不同石漠化阶段样地产流后35 min径流时间内径流量
Fig.5 Comparison of runoff for 35 minutes on plots in different stages of rocky desertification

搬运作用极其强烈,当雨强较大的时候,能把堵在裂隙、溶孔口的碎屑、颗粒冲开,这时雨水更多的通过裂隙、溶孔渗漏,产生的地表径流总量也更小。所以,只有当岩石裸露率和土壤盖度达到一定比例,且岩石裂隙较少时才有相对较大的径流量。

2.4 石漠化土地“五水”转化

在不同石漠化阶段样地进行人工模拟降雨,当地表径流产生后,地表植物及枯落物达到最大截留雨量。同时,土壤水也充分饱和。这时,随雨强的变化,降雨总量会变化,而植被截留雨水量和土壤水量保持在一个稳定的状态,因此地表径流及地下水量也会发生变化。以雨强35 mm/h人工模拟降雨60 min各石漠化阶段样地“五水”转化量见表4。

雨水主要转化为土壤水和地下水,两者总和达90%以上。从轻度→中度→重度→极重度石漠化样地,土壤含雨水量显著减少,而地下水量显著增大。在极重度石漠化样地,雨水转化为地下水

表4 不同阶段石漠化样地人工降雨
60 min后“五水”量(L)

Table 4 The amount of “five water” for 60 minutes on plots in different stages of rocky desertification

“五水”转化量	轻度	中度	重度	极重度
降雨水量	420.00	420.00	420.00	420.00
植被截留雨水量	11.39	10.36	8.64	2.53
土壤含雨水量	223.92	144.96	65.18	8.40
地表径流量	9.14	30.97	19.26	16.76
地下水量	175.55	233.70	326.93	392.31

比例高达93.41%,而在轻度石漠化样地,土壤含雨水量和地下水量差距最小。在轻度→中度石漠化过程中,“五水”转化比重从以土壤含雨水量转变为以地下水量为主(图6)。轻度和中度石漠化样地土层较深,保持的水量自然较多,而随石漠化程度的加深,土层愈来愈薄,岩石裸露率愈来愈大,裂隙发育越强烈,到极重度石漠化阶段,土壤已经失去保水作用,绝大部分的雨水通过裂隙、溶洞等漏失。

在粤北石漠化样地“五水”转化过程中,有0.6%~2.71%雨水被植被及枯落物截留;2%~53.31%雨水被土壤吸收;2.18%~7.37%雨水转化为地表径流;41.8%~93.41%雨水渗漏形成地下水(图7)。由于连续降雨过程中,植被截留雨水量和土壤含水量基本处在稳定的状态,因此随时间的延长,降雨产生的地表径流量和地下水量比例会不断增大。

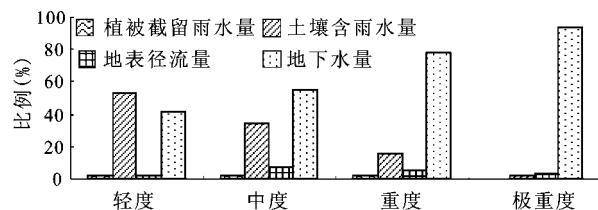


图6 不同石漠化阶段样地“五水”比例

Fig.6 Proportion of “five water” on plots in different stages of rocky desertification

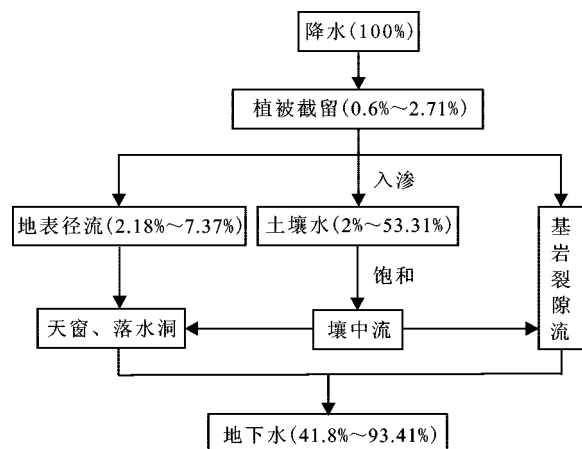


图7 石漠化土地“五水”转化过程示意图

Fig.7 Schematic diagram of the process of “five water” transformation in the rocky desertification land

3 结 论

在粤北石漠化地区,植被的退化会直接影响到降雨雨水的强度及其地表空间分布,随石漠化程度的加深,地表植物对雨水最大截留量不断下降,其中以重度→极重度阶段降幅最大,达6倍多。土壤的有机质和容重都会影响到土壤持水量,而重度→极重度石漠化是一个转折阶段,从轻度→重度石漠化阶段,土壤田间持水量和饱和持水量呈上升趋势,在重度石漠化样地上达到最高,以此最为拐点,到极重度阶段又显著降低。

人工降雨模拟试验得出中度和重度石漠化土地地表径流特征有相似之处,但其与轻度和极重度石漠化土地差异明显,主要归因为石漠化土地复杂的植被-土壤-基岩界面组成及其物质能量流动。

在粤北石漠化地区,降落到石漠化土地上的雨水大部分转化为地下水。该区域气候为亚热带季风气候,气候干湿季分明,每年4~9月的降水量

占全年总降水量的70%,而从10月至次年3月的降雨仅占全年的30%,这种干湿季极其分明的状况,加上前述岩溶地下水在岩溶通道中运动,地下水、地表水迅速转化的特点,使得岩溶地下水的季节变幅很大。雨季刚过不久的10月上旬,试验地附近的河流断流、泉眼干涸,表明地表水和地下水的流失都很快。

在野外通过人工降雨收集地下水准确的数量相当困难,特别是进入到裂隙、天窗、落水洞等水量,目前还没有一个学术界认为有效的方法。本次试验通过测算植被截留雨水量、土壤水量、地表径流量,再根据水量平衡来推算地下水量,试验结果在一定程度上反映粤北地区石漠化土地“五水”转化量的关系。后续研究可通过建设室内石漠化径流小区,设计不同岩石裂隙率,模拟人工降雨验证“五水”转化量。

参考文献:

- [1] 中国矿物岩石地球化学学会.关于我国西南石漠化地区生态环境治理工作的建议[J].学会月刊,2001,9:10~11.
- [2] 王腊春,许有鹏,张立峰,等.贵州普定后寨地下河流域岩溶水特征研究[J].地理科学,2000,20(6):557~563.
- [3] 张彦林,李永生,付东林,等.陇东盆地西部岩溶地下水形成机制研究[J].中国地质,2006,33(6):1393~1399.
- [4] 林天建.岩溶地区的“三水”转化[J].工程勘察,1984,6:10~14.
- [5] 王腊春,史运良.西南喀斯特山区三水转化与水资源过程及合理利用[J].地理科学,2006,26(2):173~178.
- [6] 成建梅,陈崇希.广西北山岩溶管道-裂隙-孔隙地下水流数值模拟初探[J].水文地质工程地质,1998,4:50~54.
- [7] 蒙海花,王腊春,苏维词,等.基于落水洞的岩溶半分布式水文模型的构建及其应用[J].地理科学,2009,29(4):550~555.
- [8] 何仁伟,刘邵权,刘运伟.基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例[J].地理科学,2011,31(11):1376~1382.
- [9] 慈龙骏.中国的荒漠化及其防治[M].北京:高等教育出版社,2005:42~53.
- [10] 广东省植物研究所.广东植被[M].北京:科学出版社,1976.
- [11] 广东省科学院丘陵山区综合考察队.广东山区地貌[M].广州:广东科技出版社,1991.
- [12] 黄树鹏,陆魏峰,曾士荣,等.粤北岩溶石山地区地下水资源勘查与生态环境地质调查报告[R].广州:广东省地质调查院,2002.
- [13] 李 森,魏兴琥,黄金国,等.中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程[J].中国沙漠,2007,27(6):918~926.
- [14] 王兮之,李 森,王金华.粤北典型岩溶山区土地石漠化景观格局动态分析[J].中国沙漠,2007,27(5):758~764.
- [15] 李 森,董玉祥,王金华.土地石漠化概念与分级问题再探讨[J].中国岩溶,2007,26(4):279~284.

- [16] 黄金国. 粤北岩溶山区水土流失现状与治理对策[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(5): 73~75.
- [17] 李 森, 魏兴琥, 张素红, 等. 典型岩溶山区土地石漠化过程——以粤北岩溶山区为例[J]. 生态学报, 2010, **30**(3): 674~684.
- [18] 魏兴琥, 李 森, 罗红波, 等. 粤北石漠化过程土壤与植被变化及其相关性研究[J]. 地理科学, 2008, **28**(5): 662~666.
- [19] 王明刚, 李 森. 粤北石漠化地区坡地土壤侵蚀模拟试验研究[J]. 中国沙漠, 2011, **31**(6): 1488~1492.
- [20] 徐 燕, 龙 健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(1): 157~160.

Experimental Study of Hydrological Processes in Rock Desertification Area of Northern Guangdong

LU Guan-yao^{1,2}, LI Sen², WEI Xing-hu¹, LIANG Zhao-xiong¹, XIONG Yan¹, HUANG Jin-guo¹

(1. Resources and Environmental Science Research Institute, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China;

2. Department of Geographic and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Some plots with different stages of rock desertification were selected in rocky desertification area of northern Guangdong to study the hydrological process of there through artificial simulation rainfall test. The results show that: the maximum ground surface vegetation interception of rainfall is decreasing with the deepening of rock desertification, and the maximum decreasing range appears in severely stage to very severely stage which is more than six times. Soil moisture capacity is turning from severely stage to very severely stage. The surface runoff appears same characters in moderately and severely rocky desertified land, but has obviously difference in slightly and very severely rocky desertified land. When rainfall intensity is 30-50 mm/h, the highest total runoff of runoff yield for 35 min is in moderately rocky desertified land. When rainfall intensity is 51~60 mm/h, the highest total runoff of runoff yield for 35 min is in very severely rocky desertified land. When rainfall intensity is 51~60 mm/h, the highest total runoff of runoff yield for 35 min is in severely rocky desertified land. After artificial simulation rainfall with 35 mm/h rainfall intensity in plots with different stages of rock desertification for 60 minutes, 0.6% to 2.71% rainwater is intercepted by vegetation and litter, 2% to 53.31% rainwater is absorbed by soil, 2.18% to 7.37% rainwater has transformed to surface runoff, 41.8%~93.41% rainwater has leaked and formed groundwater.

Key words: rock desertification; simulated rainfall; hydrological process; northern Guangdong