

普定岩溶区水土流失与土壤漏失模式研究

周念清¹, 李彩霞¹, 江思珉¹, 唐益群²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 普定县是贵州省水土流失比较严重的地区之一, 水土流失面积占全县总面积的 60.8%, 土壤年侵蚀模数高达 4 422.3 t/(km²·a)。通过现场调查, 对该地区地形特征、岩性特点和水文条件进行综合分析。结果表明, 岩溶裂隙、落水洞及地下暗河发育是造成水土流失的主要因素。对岩溶区水土流失与土壤漏失模式进行了概化, 探讨了水土流失过程中雨滴溅蚀、坡面侵蚀、落水洞漏失及地下暗河运移之间的关系, 从理论上分析了岩溶区水土流失的作用机理, 对该地区水土流失防治具有一定的指导意义。

关键词: 普定; 岩溶; 水土流失; 土壤漏失; 漏失模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)01-0007-05

中图分类号: S157.2

Models of Soil and Water Loss and Soil Leakage in Puding Karst Area

ZHOU Nian-qing¹, LI Cai-xia¹, JIANG Si-min¹, TANG Yi-qun²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Puding County is one of the most serious regions suffering from soil and water loss in Guizhou Province. The area of soil and water loss in the county is 60.8% of the total land area and the soil erosion modulus is 4 422.3 t/(km²·a). The development of karst fissure, sinkhole, and underground river is found to be the main factor of soil and water loss through analyzing the field data, topographic characteristics, lithologic features, and hydrological condition. The models of soil and water loss and karst leakage are generalized and the relationships among raindrop splash, slope erosion, sinkhole leakage, and underground river transport in the processes of soil and water loss are studied. The mechanisms of soil and water loss in karst area are analyzed as well. The study has a certain signification to prevent soil and water loss in this area.

Keywords: Puding County; karst; soil and water loss; soil leakage; leakage model

普定县位于贵州高原中部, 是乌江上游三岔河与珠江支流北盘江的分水岭, 海拔在 1 042 ~ 1 846 m 之间, 地形起伏大, 区内岩溶分布广。近几十年, 由于土地不合理利用, 植被不断减少, 原本脆弱的生态环境逐步恶化, 水土流失严重, 加剧了土地石漠化进程。有关普定岩溶区水土流失问题, 不少学者曾对此进行了深入的研究, 取得了许多研究成果。20 世纪 80 年代, 俞锦标等^[1-2]对普定岩溶展开了广泛调查, 对不同地质时期形成的岩溶洞穴形态及地下河发育情况作了详细介绍; 章程、袁道先、王腊春等^[3-4]先后对普定县后寨流域地下河岩溶作了系统分析; 林昌虎、安裕伦、王世杰等^[5-10]众多学者对该地区水土流失的成因进行了深入探讨, 认为地质条件、地形坡度、降雨、土地利用及人类活动是导致水土流失的主要影响因素。这些研究成果对于水土流失的防治起到了积极的作

用。综合已有的研究成果可知, 对发生在普定地区峰丛峡谷、峰林盆地等岩溶区水土流失问题, 可以认为碳酸盐岩地层出露是水土流失发生的物质基础, 岩溶系统提供水土的转移、储存空间, 决定水土流失程度, 而岩溶漏失是水土流失不可忽视的重要因素。

本研究通过分析普定的岩溶条件, 建立了岩溶区水土流失与土壤漏失的概念模型, 将岩溶区水土流失发生过程分为降雨溅蚀、坡面侵蚀、落水洞漏失以及地下暗河运移等几个阶段, 并对岩溶区水土流失与土壤漏失进行了探讨。

1 研究区概况

普定地区地势西高东低, 南北高中间低, 西部峰林盆地, 东部峰丛峡谷, 中部地势相对平缓, 多为丘陵。土地总面积 1 091 km², 耕地面积只有 424.3

收稿日期: 2008-07-31

修回日期: 2008-09-25

资助项目: 国家 973 计划项目“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”子课题“西南喀斯特山地土壤侵蚀过程与水土流失危险度评价”(2006CB403203)

作者简介: 周念清(1964—), 男(土家族), 湖南省石门县人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学水资源及环境水文地质方面的研究工作。
E-mail: nq.zhou@tongji.edu.cn。

km², 人均耕地不到 0.1 hm², 陡坡垦殖普遍, 土地利用不合理。在强降雨冲刷作用下, 原本浅薄的土层极易被剥离, 随水流走。

据统计, 目前该地区土壤侵蚀模数高达 4 422.3

t/(km²·a), 年泥沙流失量达到 9.08 × 10⁵ t。根据有关研究成果, 将水土流失分为 5 级, 如表 1 所示, 普定县以中度水土流失所占比例最大, 强度和极强度水土流失也有分布。

表 1 普定县水土流失分布情况

项目	无水土流失	轻度流失	中度流失	强度流失	极强度流失
侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	500	500~2 500	2 500~5 000	5 000~8 000	8 000~15 000
面积/km ²	427.67	208.51	338.35	86.95	29.52
占全县总面积的百分比/%	39.20	19.11	31.01	7.97	2.71

中、强度水土流失主要发生在峡谷两岸、斜坡地带和峰丛洼地等碳酸盐岩地区, 如在夜郎湖及周边地区, 主要是峰丛峡谷、峰丛洼地等岩溶地貌形态, 地形崎岖, 山高谷深, 人多地少, 水土流失严重; 在马场河—白桥河流域及周边, 有峰丛漏斗、峰林盆地、峰丛峡谷等地貌组合, 地下河发育且埋藏深, 岩溶干旱和洼地洪涝灾害并存, 陡坡垦殖严重, 60%的耕地为 25°以上坡地, 水土流失严重。

2 岩溶发育特征与水文条件

2.1 岩溶发育特征

普定在大地构造上属华南台块一部分, 位于上扬

子地台褶皱带的中部。地层除志留系、侏罗系、白垩系缺失外, 其余地层均有出露。

地层以中生界和上古生界为主, 占全区总面积的 93.37%。其中三叠系地层出露面积最大, 占全县总面积的 60%, 其次是二叠系地层, 为 26.92%。地质构造主要有普定向斜、大窑背斜、一棵树地堑, 地质褶皱、断裂纵横交错, 为岩溶发育提供了良好条件。

普定地区碳酸盐岩出露面积 863.7 km², 占该区总面积的 79.2%, 主要代表岩类为石灰岩、白云岩、白云质灰岩、灰质白云岩和泥灰岩, 占该区碳酸盐岩总面积的 97.2%。普定地区的溶蚀的特点及岩溶发育特征如表 2 所示。

表 2 各类碳酸盐岩特点^[11]

岩性名称	白云石含量	岩石结构	比溶解度	溶蚀特点	岩溶发育情况
石灰岩	< 25%	多属泥晶粒屑结构	0.9~1.20	原生孔隙大, 不均匀溶孔与溶隙沟通, 多沿裂隙扩大溶蚀。	岩溶发育强烈, 在普定西部和北部发育了大型的峰丛、洼地、漏斗、天窗、溶洞、暗河等。
白云岩	> 85%	细—粗晶结构	0.4~0.5	颗粒结构紧密, 溶孔较少。	岩溶发育较差, 岩溶地貌形态不显著。
白云质石灰岩	25%~50%	多属泥晶结构	0.96~1.20	泥晶灰岩颗粒全部溶蚀后, 残余的白云石颗粒呈砂糖状白云石粉砂。	岩溶发育特征接近石灰岩, 溶蚀程度有时高于石灰岩。
灰质白云岩	50%~85%	多属泥晶结构	变化范围宽	晶间有孔洞发育, 溶孔多且分布均匀。	常发育裂隙—溶孔等含水层, 在一些节理构造部位地下水丰富, 发育了多而密集的岩溶洞穴。
泥灰岩	极少量	多属泥晶结构	0.9~1.20	泥晶颗粒溶蚀后, 不均匀溶孔与溶隙沟通, 但沉淀的残余黏土会阻碍溶蚀继续发展。	岩溶发育弱, 没有形成溶道和暗河, 岩体常为裂隙水含水层。

2.2 岩溶水文条件

受亚热带暖湿气流影响, 普定降水期长, 集中在 5—9 月, 雨量充沛, 年均降水量为 1 396.9 mm, 暴雨量占 30%~40%。碳酸盐岩受降水溶蚀作用, 形成典型的岩溶地貌, 从分水岭到河谷地貌依次呈现为: 峰林—盆地—峰林—洼地—峰丛—洼地—峰丛—峡谷。在盆地、洼地等处常见地下河天窗、落水洞、漏斗等单

岩溶形态, 如分水岭—一棵树—余官地堑内, 不到 2 km² 的范围内有天窗 40 个, 马官附近的漏斗密度达 35 个/km²。

此外, 细小溶孔、裂隙、较大的溶洞在碳酸盐岩体中不均匀地分布, 交织形成网状结构, 储存地下水能力强, 互相联通形成地下河, 已探明普定地下河有 23 条, 总长度达 164 km, 流量为 3.25 m³/s。

普定地表地下岩溶化程度高,地表水文系统不完整,与地下水连成一体,互相排泄和补给,图 1 表示了该地区在降雨作用下,降水从地表向地下的转化转移过程。

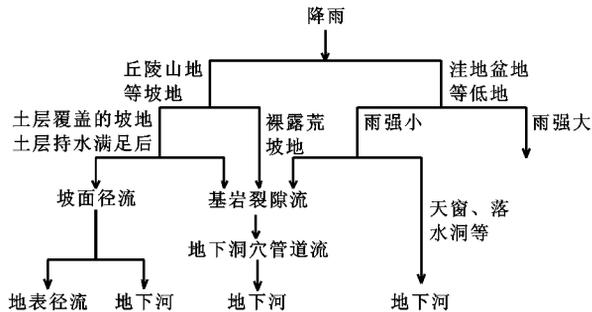


图 1 降水造成岩溶土壤漏失过程

鉴于普定地形特征,降水汇集区分为两类,即坡地与低地。降水落入坡地时,因地表土层和植被覆盖条件不同,出现两种个支:在土层覆盖地区,降水满足土层需水量后,超渗水沿坡面侧向运动,形成坡面径流,直接汇入地表河流,或注入洼地以集中方式补给地下河^[12];在裸露荒坡地区,降水一方面溶蚀岩体,另一方面沿裂隙、节理缓慢向地下洞穴渗漏。当降水落入低洼地,会转向漏斗、落水洞等更低处。遇高强度降雨时,落水洞和裂隙等通道消水不及,地表出现积水,发生洪涝灾害。普定地表水缺乏而地下水充裕的水文条件,严重限制植物生长发育,植被覆盖率仅为 24.35%,且分布不均匀。此外,普定土壤以石灰土为主,抗蚀能力弱,加之近几十年人类活动频繁,土地利用方式改变,坡地越耕越陡,土层越耕越松,涵养水能力不断降低。在降雨作用下,小颗粒被雨滴溅起、搬运,土层松散,之后是大颗粒随水流走,形成坡面侵蚀,导致水土流失严重。

3 岩溶区水土漏失概念模型

地表漏斗、落水洞和地下裂隙、溶洞不仅是超渗水的通道,也是土壤漏失通道。将普定多山、多峡谷、多洼地的岩溶地貌概化成一简单示意图,用于研究水土的岩溶漏失过程(图 2)。

在降雨作用下,不同地形其水土流失贡献各不相同。B 区域,由于山顶裸露,降水直接冲刷基岩,搬运岩缝中的残余土壤,土颗粒随水渗漏到基岩裂隙。C 区域,山丘坡度大,土层浅薄,雨水的水力侵蚀作用大,土体松散,土粒随径流沿坡面迁移,该区域是产流产沙的主要发生区。D 区域,山丘缓坡虽有较厚土层,植被覆盖率高,径流冲刷力小,但由于雨滴溅蚀,表土层松散,仍有土粒随超渗流漏失到基岩裂隙。E 区域,径流在洼地等低处汇集,由于地势低,被输送的

泥沙在该区域沉积。土层覆盖厚,植被发育较好,但该地区常出露落水洞、漏斗等岩溶形态,径流遇到它们时直接向下注入,土壤随之漏失,成为地下泥沙的主要补给源,该区域的岩溶漏失严重。在普定的一些岩溶洞穴中常见较厚黏土层,性状接近地表土壤,可判断出其来源是地表土,证明这些黏土是地表土经溶蚀裂隙漏失到洞内,不断沉积形成。

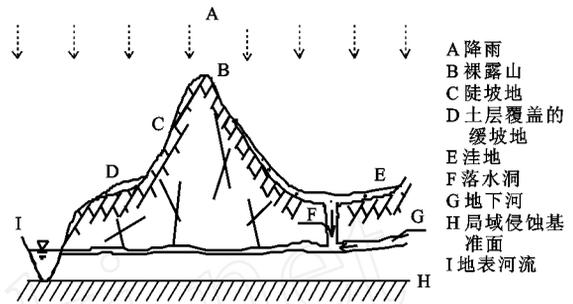


图 2 岩溶漏失概化示意

4 岩溶区水土漏失模型分析

4.1 水土流失过程

岩溶区由于基岩裂隙、洼地落水洞、地下暗河等岩溶的广泛发育,水土流失过程可分为雨滴溅蚀、坡面侵蚀、落水洞漏失、地下暗河运移 4 个主要过程,具体情况如图 3 所示。

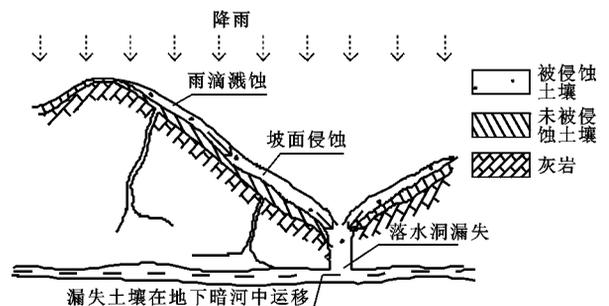


图 3 水土岩溶漏失过程概化图

4.1.1 降雨溅蚀过程 降雨是水土流失发生的诱导因素,其作用体现在:雨滴击溅土壤,使土粒与土体分离,变成松散颗粒^[13-14],当松散土粒遇基岩裂隙时,土粒向下漏失。

取石灰岩上有裂隙发育的一小段坡地作为研究对象,其土层覆盖浅薄。将土层简化,由两层土粒构成,土粒在黏聚力作用下紧密排列,如图 4(1),而当降雨落入坡面,击打土层时,出现图 4(2)的情况:降雨前,a,b,c 等颗粒规则排列,降雨时,雨滴从高空下落,其势能转化为动能,具有较大动量,当撞击到土体时,其动量转化为冲量,冲量使土粒反弹,向上跃起,在重力作用下作抛物线运动,落在前方坡面上,继续

接受雨滴的溅蚀。雨滴对土粒的作用力如图 4(3) 中 F 所示,垂直向下的冲击力 F 分解为沿坡面方向的推力 P 和垂直于坡面的压力 N , P, N 大小受坡度 p 影响。其中压力 N 挤压土粒,在裂隙附近的土粒沿裂隙向下运移,如图中 b, c 颗粒,推力 P 使松散颗粒沿坡迁移,如图中 a 。关于雨滴撞击土体的作用力,赵晓光等^[15-16] 做过深入研究,根据物理动量及能量理论,得出如下关系式:

$$f = \frac{1}{8} D^2 v_0^2 \quad (1)$$

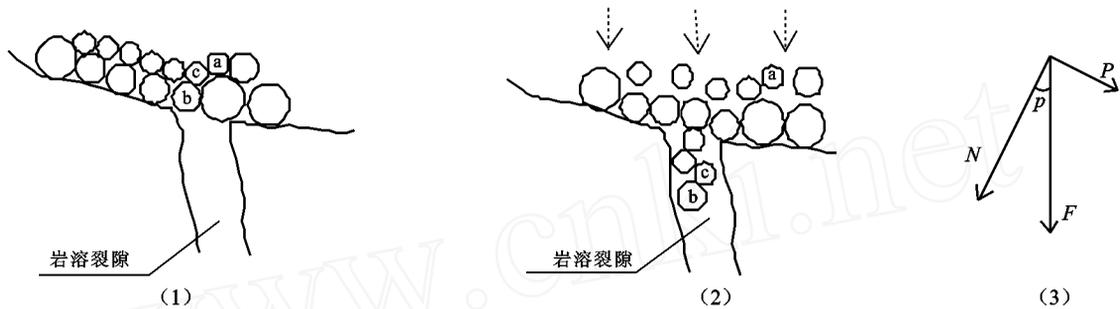


图 4 溅蚀土粒的裂隙漏失过程及雨滴冲刷力分解图

4.1.2 坡面侵蚀过程 降雨在击溅土体后,一部分降水通过土壤孔隙进入岩溶裂隙,转入地下水文结构,其余降水转化为坡面径流。遇高强度降雨时,径流流速大,孔隙水对土粒侧向压力和向上浮力都随之增大,径流极易冲散土层,并携带走大量土壤,形成坡面面蚀,片蚀甚至沟蚀、水土流失严重。径流底部的土粒受几种力作用:径流对土粒的推压力,重力沿坡向下分力,还有坡面对土粒的摩擦力,颗粒间摩擦力、粘结力以及颗粒扩散应力^[17],这些力互相叠加,彼此消长,当前进的力大于向后阻力时,土粒持续向前运移,反之,土粒在坡面沉积。可见水土的坡面流失过程除了与降雨特性有关外,很大程度上决定于坡面情况,如坡度,植被覆盖条件等,然而岩溶地区地表缺水,植被生长所需养分大多流失,造成植被稀疏、覆盖浅薄,在陡坡地常见土地石漠化现象。坡度对水土流失的影响表现在坡度越大,重力沿坡分力越大,即水土向下运移的牵引力越大,溅蚀土粒的位移也越大,水土流失加剧。在普定岩溶地区,土地大多为坡地,且坡度较陡,例如三岔河流域 25% 以上的坡耕地占总耕地面积的 65%,在这些坡地上,径流携带和输送土壤能力大,造成水土资源大量丢失。

4.1.3 落水洞漏失过程 携带土壤的径流运移到坡脚时转入低洼地,在洼地汇集,遇到落水洞等岩溶通道时,径流直接注入,排泄到地下河。由于石灰岩等碳酸盐岩受水溶蚀作用,发育的落水洞洞壁大多铅垂

式中: f ——单个雨滴的撞击力(N); ρ ——雨滴密度(g/cm^3); D ——雨滴直径(mm); v_0 ——雨滴落在坡面时的终极速度,其大小为 $\sqrt{2gh}$, h ——雨滴降落的高度(m)。所以撞击土粒时雨滴动能为:

$$e = \frac{1}{2} m v_0^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{4}{3} D^3 \rho\right) \cdot v_0^2 = \frac{2}{3} D^3 \rho v_0^2 \quad (2)$$

由式(1—2)可知,雨滴的冲击力和动能与雨滴直径及速度有关,对于整个降雨过程来说,土壤的溅蚀与降雨量、降雨强度及历时有关,还与土壤本身结构、粒径级配、土壤孔隙率以及地表植被、地形坡度等有关。

向下(图 5)。为说明漏失过程,将落水洞简化为一柱形管道,管口直径为 R ,顶部代表落水洞洞口,底部与地下暗河相通。

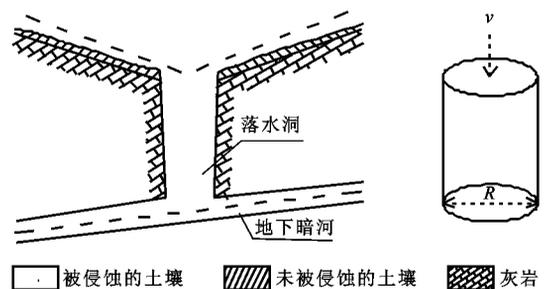


图 5 水土的落水洞漏失过程

在强降雨冲刷侵蚀作用下,坡脚处径流流速大,土颗粒互相碰撞,漏失到圆管中的水流为非稳定流,加之重力作用,水土的渗漏过程复杂,总的漏失量可近似表示为:

$$Q = \int_0^t v(t) \frac{\pi R^2}{4} dt \quad (3)$$

式中: $v(t)$ ——渗漏速度,是时间 t 的函数,随着降雨历时及坡面侵蚀过程的不同而变化,具体表达式要视实际情况通过实验来确定。

4.1.4 地下暗河运移过程 普定石灰岩、白云质石灰岩以及灰质白云岩 3 种基岩出露面积大,由表 2 可知其溶蚀性不同于白云岩,它们的溶蚀作用强,不仅发育裂隙含水层,还常发育溶洞、暗河等裂隙—溶孔

含水层,例如在后寨南部倒树龙潭至老黑潭地带,管道流和裂隙流并存。此外,在一些节理构造部位地下水丰富,这些地下岩溶空间有利于漏失的水土输送和沉积。由于裂隙溶洞等含水层空间大,从落水洞漏失到地下暗河中的水土流速不断减小,土粒不断沉积,反过来阻碍地下水的运动。当降雨强度大且历时较长时,基岩裂隙、溶孔、溶洞等含水层水量达到饱和,排泄的多余降水不能很快转移,造成落水洞消水不及,出现涌水甚至在地表低洼地发生洪涝灾害。所以地下含水层一方面储存运移水土,造成水土资源损失;另一方面通过排泄超渗水在一定程度上延缓了洪涝灾害的出现。

4.2 水土流失模型分析

将普定峰丛峡谷、峰林盆地、峰丛洼地等岩溶地貌简化成上述概念模型,水土流失过程分为4个子过程,这种简化依据实际情况,具有合理性。模型虽然基于基岩裂隙和落水洞漏失,而对于洼地漏斗、竖井以及地下河天窗等形态也适用,漏失机理相同。同时,在分析岩溶对水土流失的作用中忽略了碳酸盐岩成土速度慢,影响水土流失等次要因素,重点探讨了岩溶地下空间为水土漏失提供运移及储存条件,虽然岩溶区的水土流失是多因素综合作用的结果,但普定地区岩溶水土漏失是造成岩溶区水土流失的主要因素。

综上所述,控制水土流失首先要减少水土的岩溶漏失,而岩溶发育不受人为控制,只能通过改变地表土壤及植被条件,减缓降水溅蚀作用,减小径流冲刷,增强土壤抗蚀性。要控制水土流失需要采取生态措施,如在坡地尤其是陡坡地开展退耕还林、植树造林以及坡改梯等工作,提高土体的抗蚀性。此外,还要合理利用岩溶地下水,例如在地下河道内筑坝,形成地下水库;开凿隧道,将地下水引入低洼地,用于农田灌溉;此外还可在洼地、谷地等耕地集中处建造临时抽水站,以满足春耕及干旱时的用水需要。

5 结论

(1) 普定岩溶广泛发育是其特殊地质和气候条件综合作用的结果,岩溶地貌形态决定了该地区水文系统具有地上地下二元结构,水土流失过程不同于非岩溶地区。

(2) 岩溶地区漏失以水和悬移质为主,同时有大部分的推移质是进入了河流,也有部分通过溶洞或落水洞漏失到地下暗河,在地下运移或沉积,造成地表水土资源一旦漏失就不可再利用,这一水土流失特

点不同于非岩溶地区,必须采取措施控制岩溶地区的水土流失。

(3) 本研究分析了岩溶区水土流失的作用机理,建立了水携带土壤漏失与水土流失概念模型,从理论上探讨了水土从降雨到转移至地下空间的过程,是分析岩溶地区水土流失的一种新思路,具有一定参考价值;由于岩溶漏失过程复杂,对于水土的岩溶漏失量还没有给出定量关系式,有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 俞锦标. 贵州普定喀斯特发育特征[J]. 地理研究, 1985, 4(3): 32-39.
- [2] 俞锦标, 章海生. 贵州普定岩溶地貌[J]. 中国岩溶, 1988, 7(2): 163-172.
- [3] 章程, 袁道先. 典型岩溶地下河流域水质变化与土地利用的关系[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 134-138.
- [4] 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.
- [5] 张冬青, 林昌虎, 何腾兵. 贵州喀斯特环境特征与石漠化的形成[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 220-223.
- [6] 安裕伦, 蔡广鹏, 熊书益. 贵州高原水土流失及其影响因素研究[J]. 水土保持通报, 1999, 19(3): 47-52.
- [7] 汪文富. 贵州普定后寨河流域土壤侵蚀模型与应用研究[J]. 贵州地质, 2001, 18(2): 99-106.
- [8] 张宏群, 安裕伦. 贵州省喀斯特山区水土流失遥感信息模型的建立[J]. 水土保持通报, 2003, 23(5): 39-42.
- [9] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 贵州省岩溶地区坡度与土地石漠化空间相关分析[J]. 水土保持通报, 2006, 26(4): 82-86.
- [10] 杨胜天, 王冰, 王玉娟. 喀斯特地区水土流失遥感监测现状与发展趋势[J]. 水土保持通报, 2007, 27(1): 62-66.
- [11] 何宇彬, 金玉璋, 李康. 碳酸盐岩溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶, 1984(2): 12-16.
- [12] 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): 557-562.
- [13] Rudi H, Theo V A. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2003, 54: 131-146.
- [14] Kinnell P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review [J]. Hydrological Processes, 2005, 19: 2815-2844.
- [15] 赵晓光, 吴启发. 单雨滴击溅规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 43-49.
- [16] 高学田, 包忠谟. 降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 24-26.
- [17] 胡世雄, 靳长兴. 坡面突然侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. 地理学报, 1999, 54(4): 347-356.