

亚喀斯特林地野外模拟降雨条件下地表径流特征

罗雅雪, 张思琪, 颜红, 岳彩雯, 韦小茶, 周秋文
(贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州贵阳550001)

摘要:以贵州省亚喀斯特地区为研究对象,通过人工模拟降雨实验的方法,分析不同降雨强度的地表径流效应特征,实验结果表明:降雨过程中任意时间段,雨强越大,地表径流量越大;降雨过程中,雨强为30 mm/h时的径流系数范围为0.0143~0.0407。雨强为75 mm/h时的径流系数范围为0.0093~0.0420。雨强为120 mm/h时的径流系数范围为0.0111~0.0435;侵蚀产沙随降雨历时变化的幅度较地表径流大,产沙量变化曲线呈现明显的不规则波动;雨强为30 mm/h时的产流时间是2.37 min,雨强为75 mm/h时是1.29 min,雨强为120 mm/h时是1.51 min;降雨结束时,累积地表径流量表现为雨强越大,累积地表径流量越大,即雨强为120 mm/h时的累积地表径流量最大。以累积地表径流量算出的径流系数,表现为随着雨强的增加而逐渐减小。研究结果表明:在亚喀斯特地区,雨强不同导致地表径流特征不同。该实验结论可为亚喀斯特地区水土保持和生态保护建设等提供一定的理论参考。

关键词:地表径流;人工模拟降雨;降雨强度;亚喀斯特林地

中图分类号:TV121⁺.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)01-0117-05

The characteristics of surface runoff under simulated rainfall in semi-karst wood land

LUO Yaxue, ZHANG Siqi, YAN Hong, YUE Caiwen, WEI Xiaocha, ZHOU Qiuwen
(School of Geography and Environment Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Taking the semi-karst region of Guizhou Province as the research object, the characteristics of surface runoff with different rainfall intensity were analyzed through artificial rainfall experiment, and the experimental results showed that: at any time during the rainfall, the greater the rainfall intensity is, the greater the surface runoff is. During the rainfall, when the rainfall intensity is 30 mm/h, the runoff coefficient ranges from 0.0143 to 0.0407. When the rainfall intensity becomes 75 mm/h, the runoff coefficient range is 0.0093~0.0420. While the rainfall intensity is 120 mm/h, the range of runoff coefficient is 0.0111~0.0435. The change of erosion and sediment with rainfall over time is larger than the surface runoff. The variation curve of sediment concentration shows obvious irregular fluctuation. When the rainfall intensity is 30 mm/h, the runoff time is 2.37 min, when the rainfall intensity is 75 mm/h, the runoff time is 1.29 min, when the rainfall intensity becomes 120 mm/h, the runoff time is 1.51 min. At the end of the rainfall, the cumulative surface runoff expressed as the greater the rainfall intensity is, the greater the cumulative surface runoff is, and when the rainfall intensity is 120 mm/h, the cumulative surface runoff is the largest. The runoff coefficient calculated from the cumulative surface runoff is gradually reduced with the increase of the rainfall intensity. The research indicates that, in the semi-karst area, different rainfall intensity makes different characteristics of surface runoff. This experimental results can provide some theoretical reference for Soil and Water Conservation and Ecological protection construction in the semi-karst area.

Key words: surface runoff; artificial simulated rainfall; rainfall intensity; semi-karst wood land

收稿日期:2017-06-10; 修回日期:2017-10-04

基金项目:贵州省本科教学工程建设项目;地理与环境生态大学生创新训练中心(2016DC3);贵州省科学技术基金(黔科合J字[2015]2118号);贵州师范大学博士科研启动金

作者简介:罗雅雪(1996-),女,贵州毕节人,本科生,专业为地理科学。

通讯作者:周秋文(1986-),男,广西桂林人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事喀斯特生态水文过程研究。

1 研究背景

地表径流是地表土壤侵蚀、面源污染以及养分流失的动力之一^[1-4],具有可以侵蚀地表土壤的能量,从而改变径流区、流域的地貌特征^[5-6]。亚喀斯特地貌是针对贵州等特殊的喀斯特生态环境,提出的一种介于典型喀斯特地貌以及非喀斯特地貌之间的地貌形态^[7]。该地貌类型以丘陵谷地、浅中丘、浅切割低中山为主,地形起伏较缓。“亚喀斯特”地区喀斯特发育程度不高,土层较厚,由于其地质环境的特殊性,生态系统较为脆弱,稳定性差,同等条件下土壤侵蚀量较高,对外界干扰很敏感^[8]。因此研究亚喀斯特地区地表径流特征具有重要意义。

前人对不同地区的不同下垫面条件的地表径流等方面做了大量的研究,并取得颇多的研究成果。李文华等^[9]研究总结,地表径流的调节受多种因素的影响,包括气候条件、植被特征、土壤条件、地质、地形特征以及人类活动影响等。李耀明等^[10]在缙云山地区研究降雨因子对地表径流的影响,研究表明,对地表径流起着制约性的影响因素有降雨强度、降雨历时和降雨量等综合因子。张洪江等^[11]在相同地区做不同植被类型对地表径流系数的影响分析研究,得出植被类型对地表径流系数有影响,从而影响地表径流。唐小燕^[12]在钱江源进行典型森林类型地表径流研究。肖登攀等^[13]对不同地表类型降雨入渗产流规律进行研究,结果显示地表类型不同,地表产流特征也不同。

夏子翔等^[14]在喀斯特地区进行流域岩性对地表径流形态的影响研究,研究得出岩性对地表径流形态有影响。涂成龙等^[15]在典型喀斯特流域进行地表产流输出特征研究。张喜等^[16]选取黔中喀斯特地区的不同山地,对不同类型的森林做地表径流相关研究,研究证明森林类型对地表径流有影响。胡奕等^[17]以我国西南喀斯特地区为研究区进行地表径流相关研究,研究得出岩石裸露率、降雨强度、坡度和地下孔隙度均对地表径流造成影响的结论。伏文兵等^[18]对喀斯特耕地进行研究,结果表明地表径流与降雨强度、坡度的变化呈极显著正相关,与地下孔隙度的变化呈显著负相关。综上所述,已有的研究主要集中在典型的喀斯特地区或非喀斯特地区,针对亚喀斯特地区的研究很少。

鉴于亚喀斯特地貌是一种重要的地貌类型单元,在中国西南地区占有重要的地位^[19]。因此,本研究采用人工模拟降雨实验的方法,对亚喀斯特地

貌地区的地表径流特征进行分析研究,籍此揭示亚喀斯特地区在不同降雨条件下的地表径流变化规律,为亚喀斯特地区的生态环境建设和可持续发展提供理论基础和科学依据。

2 研究区概况

研究样地位于贵州省贵阳市花溪区桐木岭,地理位置为 $106^{\circ}40'47''E, 26^{\circ}22'15.85''N$ 。花溪区地处乌江与珠江分水岭,地表景观破碎,以山地和丘陵为主。属于亚热带季风湿润气候,全年平均气温为 $14.9^{\circ}C$,年极端最高气温为 $35.1^{\circ}C$,年极端最低温度为 $-7.3^{\circ}C$ 。年降雨量 $1\ 178.3\ mm$,蒸发量 $738\ mm$,雨量充沛。研究样地的岩性为中三叠统花溪组白云岩(含杂质),主要土壤类型为黄壤,植被优势种为马尾松。该地区成土母质相对丰富,土层较厚,地貌和景观均符合亚喀斯特地貌类型特征。

3 研究方法

3.1 径流小区设置

在选取的亚喀斯特样地内,共设置9个面积为 $60\ cm \times 100\ cm$ 的临时径流小区。样地内的9个径流小区尽量连续分布,目的在于使径流小区下垫面条件均一,以减少误差的产生。径流小区的组成材料包括两块带有把手的长度为 $1\ m$ 的钢板、一块长为 $60\ cm$ 的钢板,所有钢板宽度均为 $20\ cm$ 。另有一块 $60\ cm$ 长的V型不锈钢制集流槽,集流槽一端深度为 $5\ cm$,另一端深度为 $10\ cm$,将 $10\ cm$ 深的一端作为出水口。设置径流小区时,先将两块长为 $1\ m$ 的钢板平行楔入土壤中(图1(a)),两块钢板的间隔为 $60\ cm$ 。再将 $60\ cm$ 长的钢板垂直插入两块钢板上顶端处,使其紧密接触形成封闭的长方形。将钢板插入土层内 $10\ cm$ 左右的深度,然后在两块钢板的下接口处挖一条沟槽,将集流槽放入该沟槽内。为保证产生的地表径流量都能被采集,集流槽上边略低于地面,集流槽靠近径流小区一侧楔入土壤中。在集流槽的出水口处,挖一个较深的坑,用于放置容器,收集集流槽流出的水,完整的径流小区如图1(b)所示。为避免雨水淋,V型钢板和水样收集容器的上方用防水布盖好,且不能覆盖径流小区的承雨范围。此外,用防水布将试验样地两侧的其他样地盖好,避免其他样地在未开展实验前被雨水淋湿,影响地表径流数据的收集。

3.2 人工模拟降雨实验设置

本研究采用便携式人工模拟降雨装置开展实

验。该装置在实验前已经过检验,雨滴的雾化效果良好,能较好地模拟自然降雨。人工降雨装置安装在径流小区旁,地势平坦且无其他植物影响喷洒过程。为使雨滴速度接近天然降雨,喷头固定在距地面 2.3 m 处,模拟降雨过程如图 2 所示。

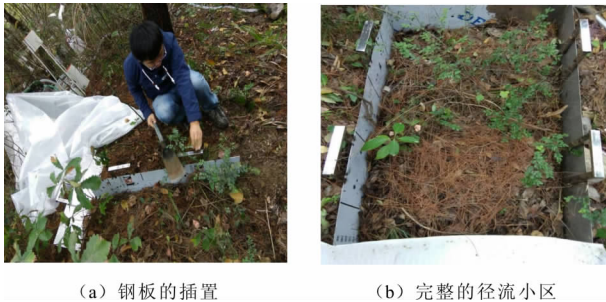


图 1 径流小区设置



图 2 人工模拟降雨实验过程

本次实验的唯一变量为雨强,共设置 3 个不同的雨强,分别为 30 mm/h、75 mm/h、120 mm/h。在同一雨强下设置 3 个重复实验,最终数据为 3 组实验数据平均值,故样地内共需进行 9 场人工降雨。降雨历时设置为 30 min,喷头开始喷洒雨雾时计时,待集流槽出口开始有连续水流时,记录产流时间,并以 3 min 为一时间段,每隔 3 min 采集一次径流样品。每次收集水样后即刻用量筒量取并记录读数,分别用瓶子装好,并在瓶子上注明采样时间及水样的体积。实验进行 30 min 时立即关闭喷洒系统,一块样地的实验便完成。立即在与该样地相邻的另一样地中做相同的实验。

3.3 相关计算公式

产沙量与径流系数的计算公式如下:

$$c_s = (m - \rho V) / V \quad (1)$$

$$c = w / (i \cdot t \cdot s) \quad (2)$$

式中: c_s 为产沙量, g/mL; m 为含沙的水的质量, g; ρ 为水的密度 g/cm^3 ; V 为含沙的水的体积, mL; c 为径流系数; w 为径流量, mL; i 为降雨强度; mm/h; t 为降雨时间, h; s 为降雨面积, cm^2 。

4 结果与分析

4.1 不同雨强和降雨历时的地表径流量变化

降雨强度的不同,导致相同时间段内产生的地表径流量有所不同。以 3 min 为一时间段进行分析,径流量的变化如图 3 所示。30 mm/h 雨强条件下,模拟降雨开始 3 min 时的地表径流量为最小值,只有 28 mL,一直到 15 min 时产生的地表径流量始终保持递增的趋势。15 min 时产生的地表径流量为 128 mL,而在 18 min 时,地表径流量减少至 112 mL,在 19 min 到 24 min 内,地表径流量继续呈现递增状态。地表径流量在 24 min 时达到最大值为 137 mL,24 min 后先减少后增加,地表径流量最大值与最小值之间的差值为 109 mL。

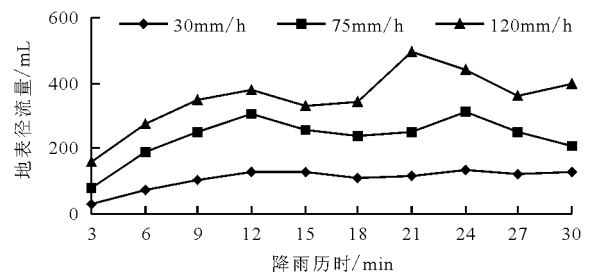


图 3 不同雨强和降雨历时条件下地表径流量变化

75 mm/h 雨强条件下,模拟降雨开始 3 min 时的地表径流量为 81 mL,地表径流量在 24 min 时达到最大值 312 mL,整个产流过程中地表径流量变化不稳定,降雨结束时产生的地表径流量为 210 mL,地表径流量最大值与最小值之间的差值为 231 mL。当雨强为 120 mm/h 时,模拟降雨开始 3 min 时的地表径流量为 157 mL,地表径流量在 21 min 时达到最大值为 497 mL,在降雨结束时地表径流量减至 400 mL,地表径流量最大值与最小值之间的差值为 340 mL。

从图 3 可看出,整个降雨过程的地表径流量都表现为随着雨强的增大而增加。在降雨开始 3 min 时,雨强为 120 mm/h 产生的地表径流量是雨强为 30 mm/h 时的 5.61 倍,是雨强为 75 mm/h 时的 1.94 倍。当降雨结束时,雨强为 120 mm/h 产生的地表径流量是雨强为 30 mm/h 时的 3.13 倍,是雨强为 75 mm/h 时的 1.90 倍。

4.2 不同雨强和降雨历时条件下径流系数变化

径流系数是一定汇水面积内总径流量与降雨量的比值,能综合反映流域内自然地理要素对径流的影响。由图 4 可看出,降雨强度不同,导致不同降雨历时条件下的径流系数也不同。其中,雨强为 30 和 75 mm/h 时的径流系数变化趋势基本相同,但是,当降雨历时为 3 和 6 min 时,雨强 75 mm/h 较雨强 30

mm/h 的径流系数大,而在其他降雨历时中均表现为雨强 75 mm/h 的径流系数比雨强 30 mm/h 的小。当雨强为 120 mm/h 时,径流系数在降雨历时为 3 和 21 min 时均大于其他两个雨强,除这两个降雨历时以外,雨强为 120 mm/h 的径流系数均小于雨强 75 mm/h 和雨强 30 mm/h 的径流系数。不同雨强和降雨历时下的径流系数总体表现为雨强越大,径流系数越小,但在降雨历时为 3 和 21 min 时出现不同的规律,产生此现象的原因是径流收集时操作不当引起的,最终导致径流系数偏大。

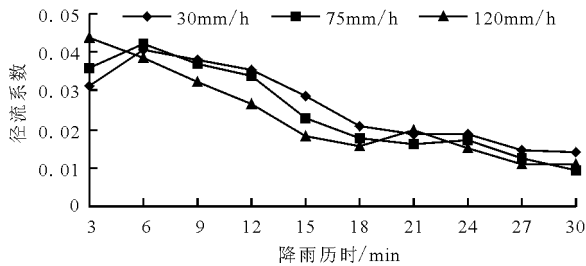


图4 不同雨强和降雨历时条件下的径流系数

降雨过程中,不同雨强的最大径流系数不同。雨强为 30 mm/h 时为 0.0407,雨强为 75 mm/h 时为 0.0420,当雨强增至 120 mm/h 时,最大径流系数为 0.0435。以最大径流系数来看,表现为雨强越大,径流系数越大。但从图 4 看出,径流系数整体变化为雨强越大,径流系数越小,分析原因为雨强越大,产生的地表径流量越大,但不同雨强下不同降雨历时条件的地表径流增加量有所不同。

4.3 不同雨强和降雨历时条件下产沙量变化

雨强大小的不同,对土壤的侵蚀能力可通过产沙量大小显示。如图 5 所示,雨强为 30 mm/h 时的不同时段产沙量变化较大,降雨开始 3 min 时产沙量为最大值 0.0088 g/mL,最小值在 24 min 出现,产沙量为 0.0004 g/mL,最大值与最小值间的差值为 0.0084 g/mL,降雨 30 min 时的产沙量为 0.0017 g/mL。雨强为 75 mm/h 时,产沙量变化幅度较雨强为 30 mm/h 时变化小,降雨开始 3 和 9 min 时的产沙量相等且为最大值,数值为 0.0056 g/mL。当降雨为 18 min 时产沙量为最小值,降至 0.0002 g/mL,差值为 0.0054,降雨 30 min 时的产沙量为 0.0007 g/mL。当雨强为 120 mm/h 时,降雨 6 min 时产沙量达最大值,产沙量为 0.0075 g/mL,27 min 时为最小值,产沙量为 0.0003 g/mL,差值为 0.0072,降雨 30 min 时的产沙量为 0.004 g/mL。雨强为 30 mm/h 时,产沙量的变化趋势、幅度均较大。雨强为 75 mm/h 时的产沙量较雨强为 30 mm/h 时变化幅度

较小,折线起伏较小。雨强为 120 mm/h 时,产沙量在降雨 3 ~ 6 min 间的变化最大,从 3 min 时的 0.0006 g/mL 增至 0.0075 g/mL,又在 9 min 时降至 0.0012 g/mL,9 min 以后的变化趋势减缓。表明雨强为 120 mm/h 时,不同时间段的产沙量差值较小,产沙量相差不大。

总体而言,侵蚀产沙随降雨历时变化的幅度较地表径流大,产沙量变化曲线呈现明显的不规则波动。其原因是,土粒崩解具有随机性和偶发性,加上泥沙的运移在短距离、短时间内具有非匀速特征,因此在集水区面积较小情况下,产沙量呈现出明显的不规则波动。

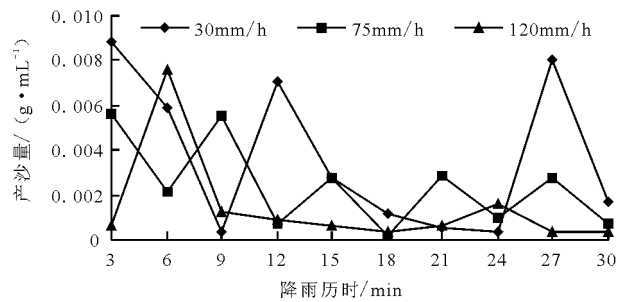


图5 不同雨强和降雨历时条件下的产沙量变化

4.4 不同雨强条件下产流时间变化

如表 1 所示,不同雨强条件下产流时间不同。雨强为 30 mm/h 时,产流时间为 2.37 min,当雨强为 75 mm/h 时,产流时间降至 1.29 min,当雨强增至 120 mm/h 时,产流时间又增为 1.51 min。雨强为 75 mm/h 时的产流时间较雨强为 30 mm/h 时的产流时间少 1.08 min,较雨强为 120 mm/h 时少 0.22 min,差距较雨强为 30 mm/h 时小的多。由表 1 可知,雨强为 75 mm/h 时产流所需时间最短,即产流最快,但是产流时间并未随着降雨强度的增加而保持递减的趋势,雨强 75 mm/h 与雨强 120 mm/h 的产流时间差距不大,推测可能是由于实验误差导致的。一方面,设置径流小区时集流槽与土壤切面接触不紧密,导致降雨初期产生的少量地表径流从集流槽与土壤切面间的缝隙漏掉;另一方面,可能由于径流小区下垫面状况导致,设置雨强 120 mm/h 的 3 个径流小区土壤表层均较疏松,或枯落物层较厚,有利于水分蓄滞和入渗,导致产流时间推迟。

4.5 不同雨强条件下累积径流量与径流系数变化

降雨强度的大小影响地表径流量,导致降雨结束时不同雨强的累积地表径流量不同。如表 1 所示,降雨结束时,雨强为 30 mm/h 的累积地表径流量为 1 075 mm,雨强为 70 mm/h 时,累积地表径流

量为 2 351 mm,降雨强度增至 120 mm/h 时,累积地表径流量增加到 3 526 mm。总体而言,历时 30 min 的降雨结束时,雨强为 120 mm/h 的累积地表径流量是雨强为 30 mm/h 时累积地表径流量的 3.28 倍,是雨强为 75 mm/h 时累积地表径流量的 1.50 倍,显示出雨强越大,产生的地表径流量越多的规律。

表 1 不同雨强的产流产沙情况

雨强/ (mm·h ⁻¹)	降雨面积/ cm ²	累积径流 量/mL	径流 系数	产流时 间/min
30	6000	1075	0.119	2.37
75	6000	2351	0.104	1.29
120	6000	3526	0.098	1.51

由表 1 可知,历时 30 min 的降雨结束时,雨强为 30 mm/h 的径流系数为 0.119,雨强为 75 mm/h 的径流系数为 0.104,雨强为 120 mm/h 的径流系数为 0.098。降雨结束时径流系数随着雨强的增加呈现递减趋势,即为雨强越大,径流系数越小。

5 结 论

本文以贵州省亚喀斯特地区为例,基于人工模拟降雨的方法,分析不同雨强下地表径流的产流时间、累积地表径流量、径流系数、产流速率和产沙量,得出以下结论:

(1)在降雨实验过程中,总体表现为地表径流量随雨强的增大而增加。

(2)历时 30 min 的降雨过程中,径流系数整体表现为雨强越大,径流系数越小。

(3)侵蚀产沙量随降雨历时变化的幅度较地表径流大,产沙量变化曲线呈现明显的不规则波动。

(4)产流时间表现为雨强 30 mm/h 时最长,120 mm/h 时次之,雨强 75 mm/h 时所需时间最短。

(5)累积地表径流量随着雨强的增加而增加,此时的径流系数随着雨强的增加而逐渐减小。

本项研究的对象为亚喀斯特林地,相对已有研究而言,对喀斯特、亚喀斯特地区地表径流和侵蚀产沙的研究是一项有益的补充。此外,研究中以雨强作为唯一变量,未分析其他变量对地表径流的影响,在今后的研究中可以增加坡度、土壤类型、森林类型等因素从多个角度分析亚喀斯特地貌的径流产沙效应,为喀斯特、亚喀斯特地区水土保持和生态保护建设等提供一定的理论参考。

参考文献:

[1] 魏强,张秋良. 地表径流与土壤侵蚀研究进展[J]. 中国

水土保持,2008(9):30-33.

- [2] 李恒鹏,黄文钰,杨桂山,等. 太湖上游典型城镇地表径流面源污染特征[J]. 农业环境科学学报,2006,25(6):1598-1602.
- [3] 黄河仙,谢小立,王凯荣,等. 不同覆被下红壤坡地地表径流及其养分流失特征[J]. 生态环境,2008,17(4):1645-1649.
- [4] 孙 阁. 林地地表径流的研究[J]. 水土保持学报,1989,3(2):52-56.
- [5] 张慧芳. 东山流域水土保持措施对地表径流和土壤侵蚀的影响[J]. 山西水利,2012,28(11):22-41.
- [6] 李秋芳,王克勤,王帅兵,等. 不同治理措施在红壤坡耕地的水土保持效益[J]. 水土保持通报,2012,32(6):196-200.
- [7] 胡 锋,安裕伦,许 璟. “亚喀斯特”概念与景观特征的初步探讨——以贵州为例[J]. 地理研究,2015,34(8):1569-1580.
- [8] 胡 锋,安裕伦,赵海兵. 基于土地利用转型视角的“亚喀斯特”区域生态环境效应研究——以黔中部分地区为例[J]. 地球与环境,2016,44(4):447-454.
- [9] 李文华,何永涛,杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报,2001,16(5):398-406.
- [10] 李耀明,王玉杰,储小院,等. 降雨因子对缙云山地区典型森林植被类型地表径流的影响[J]. 水土保持研究,2009,16(4):244-249.
- [11] 张洪江,孙艳红,程 云,等. 重庆缙云山不同植被类型对地表径流系数的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(6):11-13+45.
- [12] 唐小燕. 钱江源典型森林类型地表径流和土壤侵蚀特征研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2012.
- [13] 肖登攀,韩淑敏,杨艳敏,等. 太行山低山丘陵区不同地表类型降雨入渗产流规律研究[J]. 水土保持研究,2009,16(5):35-39.
- [14] 夏子翔,赵海兵,胡洪丽. 喀斯特流域岩性对地表径流形态的影响——以花溪河流域为例[J]. 安徽农业科学,2017,45(3):52-54.
- [15] 涂成龙,陆晓辉,刘裕录,等. 典型喀斯特流域地表产流输出特征[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(12):1879-1885.
- [16] 张 喜,薛建辉,许效天,等. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报,2007,15(6):527-537.
- [17] 胡 奕,戴全厚,王佩将. 喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J]. 水土保持学报,2012,26(6):46-51.
- [18] 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+22.
- [19] 许 璟,安裕伦,胡 锋,等. 基于植被覆盖与生产力视角的亚喀斯特区域生态环境特征研究——以黔中部分地区为例[J]. 地理研究,2015,34(4):644-654.