

前期含水量对喀斯特山地石灰土坡面产流产沙的影响

蔡雄飞, 雷 丽, 王 济, 段志斌, 胡国锋

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘 要:为了探讨前期含水量对喀斯特山区坡耕地坡面产流产沙过程及机制的影响,以该区域广泛分布的石灰土为研究对象,通过人工模拟降雨的试验方法,系统研究了干态、稍湿态和湿态石灰土坡面产流产沙过程。结果表明:(1)坡面初始产流时间随土壤前期含水量的增加而减少,初始产流时间与土壤前期含水量呈线性负相关关系。(2)在 0~25 min 期间,径流量呈逐渐增大的趋势,变化率呈现稍湿态>干态>湿态。25 min 之后,径流量逐渐趋于稳定,随土壤前期含水量与坡度的增大,径流量增大。(3)稍湿态土壤坡面径流含沙量变化较小,基本趋于稳定;干态土壤坡面径流含沙量变化较大,呈开始增大,在第 20 分钟之后减小并趋于稳定;湿态土壤坡面径流含沙量变化最大,总体呈陡降、缓增,最后逐渐减小并趋于稳定的趋势。(4)径流平均含沙量与土壤前期含水量的关系呈近似抛物线变化,径流平均含沙量湿态>干态>稍湿态。

关键词:前期含水量;喀斯特;石灰土;产流产沙

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)01-0029-05

Effect of Antecedent Soil Water Content on Runoff and Sediment in Limestone Soil of Slopes in Karst Mountain Area

CAI Xiongfei, LEI Li, WANG Ji, DUAN Zhibin, HU Guofeng

(School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: To study the effect of antecedent soil water content on the processes and mechanism of runoff and sediment on sloping farmland in karst mountain area, the wet, slightly wet and dry limestone soils which wide distributed in Karst mountain area were selected, the processes and characteristics of runoff and sediment yields in limestone soil slopes under different antecedent soil moisture levers were systematically tested by rainfall simulation experiment. The results showed that: (1) the initial-yielding times of runoff on slopes decreased with increase of antecedent soil water contents under different slopes, and there was the negative linear relation between the initial-yielding time of runoff and the antecedent soil water content; (2) the runoff tended to increase within 0~25 min, the rates of change decreased in the order: slightly wet soil>dry soil>wet soil, and then gradually stabilized and the rates of runoff increased with increase of antecedent soil water contents and slopes; (3) the sediment concentration in slope with the slightly wet soil changed little, it had great variation in slope with the dried soil, it increased until 20 min and then decreased slowly and tended to be stable; the sediment concentration in slope with the wet soil had most variation, and which sharply declined, slowly increased and finally gradually decreased and tended to be stable as the whole; (4) there was approximate parabola-shape variation between average sediment concentration and the antecedent soil water content, average sediment concentrations decreased in the sequence: wetted soil>dried soil>slightly wetted soil.

Keywords: antecedent soil water content; karst; limestone soil; runoff and sediment yields

土壤前期含水量是影响土壤侵蚀的重要因素之一,已逐渐成为土壤侵蚀研究的重要内容。研究认为土壤前期含水量通过影响降雨的入渗量和径流量而对土壤侵蚀产生影响^[1-2],是影响入渗、径流和土壤流失的主要因素之一^[3-4],尤其对土壤深层入渗率有很大贡献,夏季可高达80%以上^[4]。不同土壤类型的研究表明随着土壤前期含水量的增大,径流含沙量减小,侵蚀量减小^[5-6],然而也有研究表明土壤前期含水量越大,片蚀发展为细沟侵蚀的时间越早,而且细沟侵蚀也越严重^[7]。随着土壤前期含水量的增大,径流量增大^[8],但也有研究表明稍湿态土壤径流总量最大,湿态土壤径流总量次之,而干态土壤径流总量最小^[5]。在同一雨强和坡度条件下,随着土壤含水量的增加,坡面达到稳定入渗率的时间缩短,开始均匀产流时间也减小,在5%~17%前期含水量的范围内,径流量、泥沙量随前期含水量增加而增加,17%~20%时径流量和产沙量为递减的变化趋势^[9]。所以,不同土壤前期含水量条件下土壤侵蚀的径流泥沙响应机制仍不清楚。

在我国西南喀斯特山区,石漠化是制约该区域社会经济发展的关键因素。土壤侵蚀是石漠化最直接的影响因素,石漠化是土壤侵蚀的顶级表现形式,已到了无土可流的发展阶段^[10]。土壤侵蚀及其引起的石漠化问题已受到政府和科研部门的高度关注,研究工作逐渐从宏观、定性研究转向宏观与微观结合、定性与定量相结合的系统研究。近年来,喀斯特山地土壤侵蚀的特征及关键问题^[11-12],基于土地利用、降雨、地形坡度等因素的土壤侵蚀过程与机制^[13-15]依然是该区域土壤侵蚀的研究重点与热点,取得大量研究成果。土壤地下流失问题已受到关注^[16-17],然而土壤前期含水量对喀斯特山地坡面土壤侵蚀影响的研究未见报道。所以,选取贵州喀斯特山区广泛分布的石灰土作为研究对象,通过人工模拟降雨的试验方法,系统研究不同坡度下干态、稍湿态、湿态3种不同土壤前期含水量的坡面产流产沙过程及变化规律,旨在为科学防治喀斯特山地坡耕地土壤侵蚀提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设备与材料

试验设备采用自制的针管式人工模拟降雨系统^[18]。系统主要由供水箱、降雨器和土槽3个部分组成。降雨器由有机玻璃制成,有效降雨面积为5 800 mm×9 600 mm,模拟降雨强度范围为40~120 mm/h。当雨强120 mm/h时,供水箱最大容积可持续降雨3 h

以上。试验土槽为不锈钢钢板土槽,规格为长1 400 mm、宽600 mm、深500 mm,前端设计四棱锥形集流槽。坡度在0°~45°可任意调节,土槽底端设置溢流孔(直径50 mm)。

试验土样为贵阳市相宝山麓坡耕地0—20 cm的表层土壤,将土样取回室内风干,去除碎石、植物根茎等杂物,过3.5 mm筛备用。

1.2 试验方法与过程

1.2.1 土壤制备和填装 试验设置3种不同前期含水量的试验土壤,即干态、稍湿态和湿态土壤,具体处理方式如下:

(1)干态试验土壤:即为野外取回风干,过筛后的土壤。(2)稍湿态试验土壤:根据容重和填装体积计算所需土壤数量,称取相等数量的备用土壤,通过初始含水量与目标含水量(干态15.34%、稍湿态30%)的差值计算,算出所需补充水量,用喷壶洒水并搅拌均匀,为防止水分蒸发,将土壤装入密封容器中,静置12 h后填土试验。(3)湿态试验土壤:先将备用土壤填装至土槽内,在槽中土体之上铺盖浓密塑料草皮,用于消减雨滴打击作用,然后将土槽调整到试验所需坡度,实施人工模拟降雨,直到土壤表层开始出现积水现象后停止降雨,认为此时表层土壤已经达到饱和状态,即为湿态土壤。通过上述不同处理方法,可获得不同前期含水量土壤。在每次人工模拟降雨试验前,对试验小区土壤从上、中、下分别采集适量土样进行实测含水量,测试表明同种状态的试验土壤前期含水量相对稳定,差值在0.8%以内。经计算干态、稍湿态、湿态3种试验土壤前期平均含水量分别为15.34%、26.28%和33.94%。填装土壤时容重控制在1.22 g/cm³左右。在土槽底铺5 cm厚度的粗砂层,粗砂层上铺1~2层纱布,然后开始填装试验土壤。按每层5 cm厚分层填装土壤,层间接触面用塑料刷子打毛,防止出现分层现象,土壤填装总厚度为25 cm。

1.2.2 降雨试验设计与样品采集 试验主要模拟引起严重土壤侵蚀的强降雨。统计分析贵州省1961—2008年暴雨次数和雨强分布表明:48 a间发生暴雨5 671次,其中暴雨(50 mm≤ R_{12} <100 mm)5 577次,占总暴雨次数的98.34%,大暴雨(100 mm≤ R_{12} <200 mm)77次,特大暴雨(R_{12} ≥200 mm)17次^[19]。本次模拟以暴雨为主,参考暴雨的雨强范围值,模拟降雨的雨强值设置为80 mm/h,试验过程中实测修正为77 mm/h。试验小区坡度值的设定,参考了我国林业部门对坡度的分级标准^[20]和部分野外样地调查的坡度值,设定试验坡度值为6°,16°,26°和36°。每次模拟降雨试验历时1 h,从雨滴打击土层表面开

始计时,在降雨过程中,适时观察小区表面土壤侵蚀状况,记录产流时间,并及时采集径流样品。为准确反映试验过程中的径流泥沙变化过程,产流之后每隔3 min左右采集径流泥沙样品1次,记录样品体积和质量。样品在常温条件下静置48 h,倾倒上层清水,并将水沙转移至铝盒,105℃条件下烘至恒重,称量计算得出径流和泥沙量。

2 结果与分析

2.1 不同前期含水量下坡面径流特性

定雨强条件下,坡面初始产流时间随土壤前期含

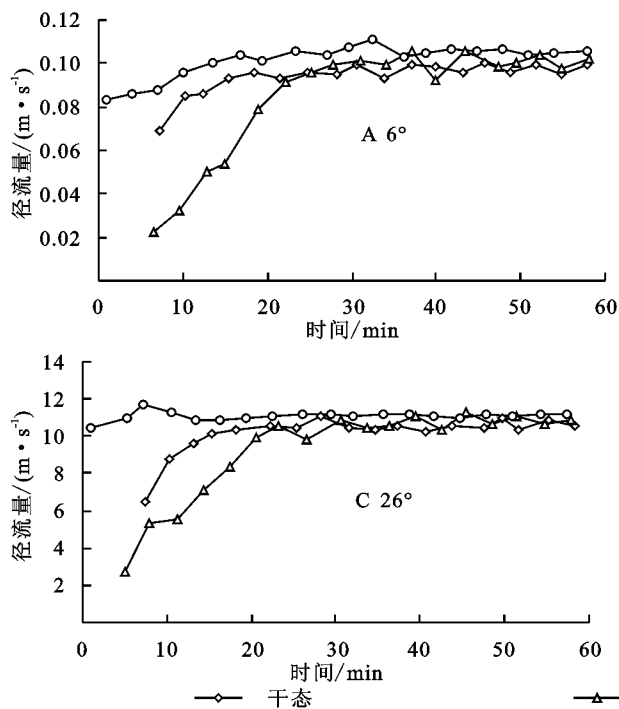
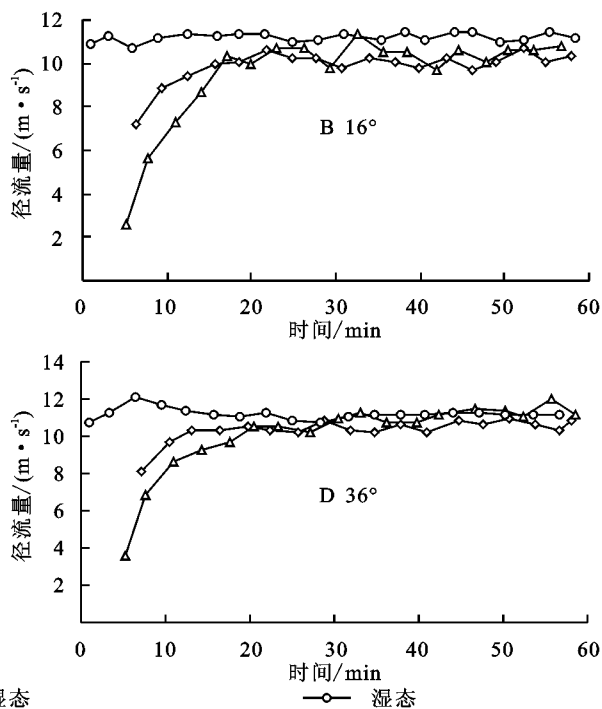


图1 不同坡度及土壤前期含水量下的坡面径流量变化过程

图1表明,径流量在0—25 min期间总体表现为增加过程,之后逐渐趋于平稳。0—25 min期间,湿态土壤坡面径流量最大,达到稳定入渗的时间最短,波动最小;稍湿态土壤坡面径流量最小,达到稳定入渗的时间最长,波动也最大;干态处于中间状态。同一时刻下流量大小呈现湿态>干态>稍湿态。湿态土壤由于水分已经饱和或趋于饱和,所以降雨形成的地表径流从开始产流时就比较稳定;稍湿态土壤,由于土壤水分相对较高,降雨初期不容易出现表层结皮现象,有利于降雨的入渗,加之部分降雨转化为土壤水,所以稍湿态土壤在0—25 min期间坡面径流量变化最大。而干态土壤由于比较干燥,在降雨初期往往出现表层结皮现象,影响降雨的入渗,在0—25 min期间坡面径流量大于稍湿态,小于湿态。当坡面径流趋于稳定

水量的增大而减少,初始产流时间呈现湿态土壤<稍湿态土壤<干态土壤,不同坡度条件下变化规律相同(图1),坡面初始产流时间与土壤前期含水量呈现线性负相关关系(图2)。已有的多数研究结果与该结论一致^[21-23]。这主要是由于在降雨初期,对于比较干燥的土壤而言,土壤缺水严重,降雨初期雨水转化为土壤水的比率较大,达到稳定入渗的时间较长,导致坡面产流时间较长;而对于稍湿态和湿态土壤,土壤前期含水量明显高于干态土壤,降雨初期雨水转化为土壤水的比例相应减少,达到稳定入渗的时间也相应减少,导致坡面产流时间依次缩短。



后(25 min之后),6°条件下的干态、稍湿态、湿态土壤平均径流量分别为9.73 ml/s,10.00 ml/s,10.56 ml/s;16°条件下的干态、稍湿态、湿态土壤平均径流量分别为10.11 ml/s,10.46 ml/s,11.23 ml/s;26°条件下的干态、稍湿态、湿态土壤平均径流量分别为10.56 ml/s,10.69 ml/s,11.13 ml/s;36°条件下的干态、稍湿态、湿态土壤平均径流量分别为10.56 ml/s,11.10 ml/s,11.11 ml/s。这表明当坡面径流量稳定后,径流量随着土壤前期含水量与坡度的增大而增大。试验中的观察表明,随着小区坡度的增大,降雨转化为地表填洼的比例逐渐减小。此外,已有研究表明坡度的增加也使坡面水流速度增大,入渗能力降低,加速雨水转化为地表径流^[24-25];当径流量趋于稳定之后,土壤颗粒在水分渗润作用下膨胀,致使土壤孔隙度缩减,径流增强,纹沟或者细沟侵蚀增强。

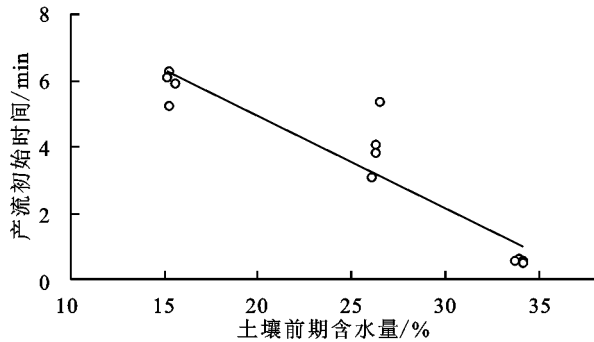


图2 土壤前期含水量与坡面初始产流时间关系

2.2 不同前期含水量下坡面产沙变化特征

如图3所示,在坡面侵蚀过程中,稍湿态土壤坡面径流含沙量变化不大,基本趋于稳定。坡度为 6° 时,稍湿态土壤坡面径流含沙量在 $0.000\ 62\sim 0.000\ 77\text{ g/ml}$ 变化;坡度为 16° 时,坡面径流含沙量在 $0.000\ 69\sim 0.001\ 17\text{ g/ml}$ 变化;坡度为 26° 时,坡面径流含沙量在 $0.000\ 86\sim 0.001\ 14\text{ g/ml}$ 变化;坡度为 36° 时,坡面径流含沙量在 $0.001\ 13\sim 0.001\ 54\text{ g/ml}$ 变化。在不同坡度条件下稍湿态土壤坡面在整个降雨过程中径流含沙量比较稳定,坡面几乎不发育线沟和纹沟,侵蚀搬运的泥沙主要为地表分散的细小土壤颗粒或雨滴打击分散的颗粒。

干态土壤坡面径流含沙量在降雨过程中变化较大,从开始至第20 min左右呈逐渐增大趋势,之后逐渐减小,第50 min后趋于稳定。湿态土壤坡面径流含

沙量在降雨过程中变化最大,坡面侵蚀强度也最大,但变化特征随时间和坡度变化复杂。在各坡度条件下,随降雨的持续,湿态土壤坡面径流含沙量总体呈现陡降、缓增、最后逐渐减小并趋于稳定趋势。这是由于湿态土壤的湿度相对较大,土壤胶结力较强,在产流前期不易被径流冲蚀分散。观察表明,随着降雨的持续,在10—25 min左右, 6° 坡面和 16° 坡面开始发育纹沟, 26° 坡面和 36° 坡面纹沟发育充分,在土槽的下端甚至形成线沟,随着纹沟和线沟的不断发育,坡面径流相对集中,动力增强,对土壤的冲蚀和搬运能力增强,加之降雨后期随着入渗量的减小并稳定,坡面径流含沙量出现最大峰值,之后纹沟或线沟发育趋于稳定,径流含沙量逐渐减少并趋于稳定。干态土壤坡面侵蚀产沙量总体呈现在开始缓慢增加,20 min左右出现产沙最大峰值,最后逐渐减小并趋于稳定。试验中观测发现,干态土壤由于前期含水量较低,湿度较小,土壤颗粒间的结合力小,在产流初期坡面未胶结而呈分散状态的细小土壤颗粒物极易被坡面径流搬运,形成薄层水沙流径流,使得侵蚀产沙量缓慢增大,到达峰值;随着降雨持续,小区表层土壤开始形成临界结皮层,同时在径流冲刷下,土壤表层的分散土壤颗粒逐渐被搬运,雨点和径流冲蚀分散的土壤变少,导致侵蚀产沙量开始减少并趋于稳定。

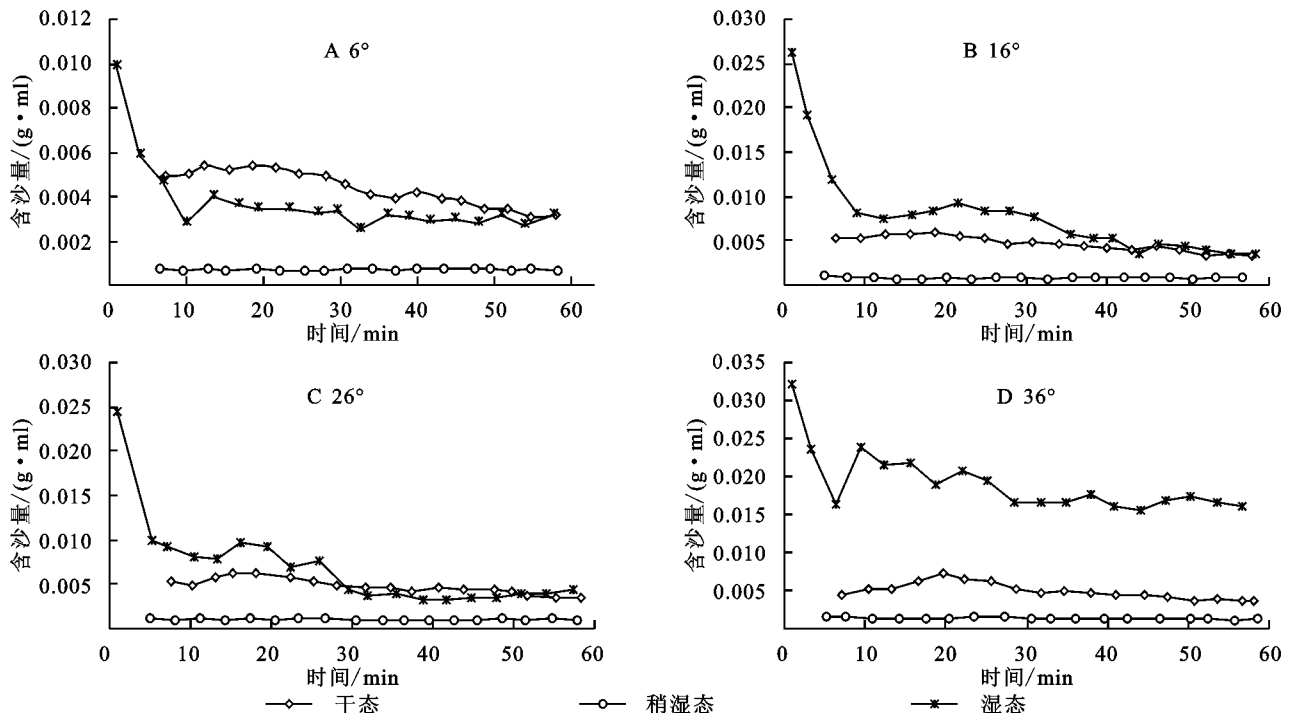


图3 不同坡度及土壤前期含水量下的坡面侵蚀产沙量的变化过程

通过比较各坡面径流量中平均含沙量发现,径流平均含沙量与土壤前期含水量的关系呈近似抛物线变化规律,干态土壤坡面平均含沙量高于稍湿态土

壤,最大的是湿态土壤(图4),这种变化规律与坡面产流产沙情况吻合,也给坡耕地水土流失的防治思路和方法提供了新的可能。

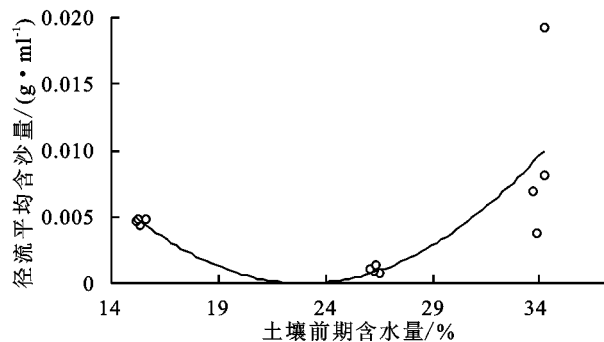


图4 土壤前期含水量与平均径流含沙量的关系

3 结论

(1) 不同坡度条件下坡面初始产流时间随土壤前期含水量的增加而减少,初始产流时间与土壤前期含水量呈线性负相关关系。

(2) 在0—25 min期间,径流量呈逐渐增大的变化趋势,相同时刻径流量湿态>干态>稍湿态,径流量变化率呈现稍湿态>干态>湿态。25 min之后,径流量逐渐趋于稳定,随土壤前期含水量与坡度的增大,径流量增大。

(3) 在坡面侵蚀过程中,稍湿态土壤坡面径流含沙量变化不大,基本趋于稳定;干态土壤坡面径流含沙量变化较大,呈现开始增大,在第20 min左右形成拐点,之后逐渐趋于稳定的趋势;湿态土壤面径流含沙量变化最大,坡面侵蚀强度也最大,总体呈现陡降、缓增、最后逐渐减小并趋于稳定的趋势。

(4) 径流平均含沙量与土壤前期含水量的关系呈近似抛物线变化,干态土壤坡面平均含沙量高于稍湿态土壤,最大的是湿态土壤。

参考文献:

- [1] McDowell R W, Sharpley A N. The effect of antecedent moisture conditions on sediment and phosphorus loss during overland flow; Mahantango Creek catchment, Pennsylvania, USA[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(15):3037-3050.
- [2] Wei L, Zhang B, Wang M. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1):54-62.
- [3] Li J, Zhang F, Wang S, et al. Combined influences of wheat-seedling cover and antecedent soil moisture on sheet erosion in small-flumes[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 151:1-8.
- [4] Lai X, Liao K, Feng H, et al. Responses of soil water percolation to dynamic interactions among rainfall, antecedent moisture and season in a forest site[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 540:565-573.
- [5] Vermang J, Demeyer V, Cornelis W M, et al. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil. [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3):718-726.
- [6] Defersha M B, Melesse A M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio [J]. *Catena*, 2012, 90(3):47-52.
- [7] 张玉斌,郑粉莉. 近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2):5-10.
- [8] Yi C, Fan J. Application of HYDRUS-1 D model to provide antecedent soil water contents for analysis of runoff and soil erosion from a slope on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2016, 139:1-8.
- [9] 王丽,王力,王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11):2171-2178.
- [10] 王世杰,李阳兵,李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(6):657-666.
- [11] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. *地理学报*, 2012, 67(7):878-888.
- [12] 郑伟,王中美. 贵州喀斯特地区降雨强度对土壤侵蚀特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(6):333-339.
- [13] 陈洪松,杨静,傅伟,等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16):121-126.
- [14] 戴海伦,苑爽,张科利,等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):37-41.
- [15] 黄启芬. 贵州喀斯特山区土地利用格局变化及土壤侵蚀效应:以大方县为例[J]. *贵州师范大学学报:自然版*, 2015, 33(2):18-23.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 王济,蔡雄飞,张一修,等. 一种人工模拟降雨试验装置[P]. 2011, 中国, ZL201020250922. 5.
- [19] 卢瑞荆,樊兰峰. 1961—2008年贵州暴雨时空分布特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2010, 04(3):17-21.
- [20] 中华人民共和国林业部颁发. 林业专业调查主要技术规范[M]. 北京:中国林业出版社, 1990.
- [21] 孔刚,王全九,樊军,等. 前期含水量对坡面降雨产流和土壤化学物质流失影响研究[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6):1395-1399.
- [22] 张向炎,史学正,于东升,等. 前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J]. *水科学进展*, 2010, 21(1):23-29.
- [23] 王丽,王力,王全九. 前期含水量对坡耕地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11):2171-2178.
- [24] 卫喜国,严昌荣,魏永霞,等. 坡度和降雨强度对坡耕地入渗的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(4):114-116.
- [25] 张小娜,冯杰,高永波,等. 不同雨强条件下坡度对坡地产汇流及溶质运移的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2):119-123.