

# 黄河班多水电站工程区荒草地坡面产流过程试验研究

朱文杰<sup>1</sup>, 王占礼<sup>2,3</sup>, 袁殷<sup>2</sup>, 马春艳<sup>2</sup>, 刘俊娥<sup>2</sup>, 陈浩<sup>2</sup>

(1. 黄河上游水电开发有限公司, 青海 西宁 810008; 2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 荒草地是黄河班多水电站工程区最主要的原生地面类型, 阐明其产流过程, 可为揭示与评价该工程区水土流失过程与强度奠定重要基础。采用野外人工放水产流试验方法, 对黄河班多水电站工程区内荒草地坡面产流过程进行了研究。(1) 同坡度不同供水流量下, 荒草地坡面产流率随供水过程的动态变化皆可用对数方程描述;(2) 同供水流量不同坡度下, 荒草地坡面产流率随供水过程的变化与不同供水流量下产流率变化过程总体上具有相似性, 都是随供水历时的增长呈先增大后趋于稳定的趋势;(3) 荒草地坡面产流深随供水流量的增大而显著增加, 可用对数方程来描述;(4) 荒草地坡面产流深随坡度的增大而增加, 可用指数方程来描述;(5) 荒草地坡面产流深随坡度、供水流量的动态变化可用二元线性方程描述, 供水流量对产流深的影响大于坡度的影响。

**关键词:** 黄河班多水电站; 工程区; 荒草地; 坡面; 产流过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0007-05

中图分类号: S157

## Experimental Study of Runoff Processes on Waste Grassland in Project Area of Banduo Hydropower Station of Yellow River

ZHU Wen-jie<sup>1</sup>, WANG Zhan-li<sup>2,3</sup>, YUAN Yin<sup>2</sup>, MA Chun-yan<sup>2</sup>, LIU Jun-e<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>

(1. *Huanghe Hydropower Development Limited Company, Xining, Qinghai 810008, China;*

2. *State Key Lab of Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;*

3. *State Key Lab of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)*

**Abstract:** Waste grassland is the main native ground type in the project of Banduo hydropower station of the Yellow River. Description of runoff processes in the area can reveal and estimate soil erosion processes and its degree. Based on field scouring experiments, runoff processes on waste grassland were studied and following results were obtained: (1) For different water supply discharges and the same slope, runoff yield varied with runoff process could be described by a logarithmic equation. (2) Runoff processes on waste grassland varied with flow rate on different slopes and at the same water supply discharge were similar to those at different flow rates. They both increased with souring time and then reached a stable state. (3) A logarithmic equation can be used to describe runoff depth varied with runoff process under different flow rates. Runoff depth increased with increased flow rate. (4) On different slopes, runoff depth on waste grassland increased when slope increased and the relationship can be described by a power equation. (5) Runoff depth on waste grassland changed with slope and flow rate and it can be described by a dual linear equation. Flow rate had a great effect on runoff depth than slope.

**Keywords:** Banduo hydropower station of the Yellow River; project area; waste grassland; slope; runoff process

随着我国经济建设的快速发展,各地的工程项目日益增多,产生了严重的新的水土流失,造成了泥沙灾害及污染等诸多重大环境问题,引起了全社会的广泛关注。为此,《中华人民共和国水土保持法》及《中华人

民共和国水土保持法实施条例》中规定:“在山区、丘陵区、风沙区修建铁路、公路、水工程,开办矿山企业、电力企业和其它大中型工业企业,必须有水行政主管部门同意的水土保持方案”。在编制水土保持方案中,水

收稿日期: 2009-06-30

修回日期: 2009-08-08

资助项目: 国家 973 计划课题(2007CB407201); 中国科学院知识创新工程重要方向项目课题(KZCX2-YW-442-04); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主研究课题(10502-Z5-3); 西北农林科技大学创新团队建设计划(01140202)

作者简介: 朱文杰(1978-),男(汉族),青海省西宁市人,助工,主要从事水电工程、水保及环保等工作。E-mail: zhuwenjie1978@163.com。

通信作者: 王占礼(1960-),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程及预报研究。E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn。

土流失预测是一项很重要的基础内容,是方案编制的依据。而在编制工程区水土保持方案时进行的水土流失预测中,阐明工程区原生地面及扰动地面的水土流失过程,进而实现对工程新增水土流失量及新增水土流失过程的评价与认识,将能有效地实现对水土流失的科学预测。地表径流是造成地面土壤物质流失的直接动力,一般情况下,地面土壤流失的强烈程度与地面径流过程特征密切相关。荒草地是黄河班多水电站工程区最主要的原生地面类型。开展黄河班多水电站工程区荒草地坡面产流过程研究,其结果无疑将为认识该工程区荒草地坡面及其它类型原生地面水土流失过程奠定重要基础及提供借鉴,为进一步进行工程区水土流失预测、设计水土保持措施,监测与重建生态,编制科学合理的水土保持方案等提供重要科学依据,并将促进坡面产流理论的进一步发展。

1935年, Horton 提出自然界有两种产流方式<sup>[1]</sup>。Horton 对均质包气带产流机制做出了正确的阐述,但无法解释非均质或表层透水性极强的包气带的产流机制<sup>[2-3]</sup>。19世纪70年代初, Kirkby 等人提出了“山坡水文学产流理论”<sup>[3]</sup>。20世纪60年代以来,我国学者通过大量野外与室内模拟试验,建立了可用于界面产流和不同自然条件的统一产流模型<sup>[4-5]</sup>。由于这些模型大多比较简单,而产流机制受多因素影响,因此,当今学者多把研究侧重点放在中间尺度系统——坡地<sup>[6]</sup>,通过在坡地上进行降水来模拟研究地面流、壤中水和地下水的水文特征,分析其水流方式与坡度、土壤结构、水力特征、植被等因素之间的关系。对于产流机制,国内外学者也进行了大量研究<sup>[7-10]</sup>。张光义等<sup>[11]</sup>提出了具有空间分布的超渗产流模型。穆天亮等<sup>[12]</sup>建立了基于短历时 Philip 积水入渗公式的降雨产流模型。李建柱<sup>[13]</sup>也建立了超渗产流模型。王腊春<sup>[14]</sup>用遥感资料建立了分块产流模型。近期,袁建平等<sup>[15]</sup>研究了不同林草植被覆盖度下小流域径流泥沙变化规律。李树利等<sup>[16]</sup>研究了土壤含水量对地表产流过程的影响。孔刚等<sup>[17]</sup>指出初始含水量越高产流越快。彭文英等<sup>[18]</sup>对比分析了黄土高原坡耕地退耕还草前后的水沙变化特征。本文采用野外放水产流试验的方法,研究黄河班多水电站工程区荒草地条件下的坡面产流过程,为进一步揭示与评价工程区水土流失过程与强度奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄河班多水电站位于青海省海南州兴海县与同德县交界处的班多峡谷出口处,为黄河干流龙羊峡以

上茨哈至羊曲河段规划的第2个梯级电站。坝址区两岸地形平缓,阶地发育,左岸发育有II—V级阶地,II级阶地阶面高程2760~2770m,右岸局部残留有II级阶地基座。工程区地处内陆高原,属于青藏高原气候系统,为典型的大陆性气候,表现为冷热两季交替,干湿两季分明,冷季较长,降雨少,暖季水汽丰富,降雨量相对较多,多年平均降水量为425.2mm。坝址处黄河多年平均流量为567m<sup>3</sup>/s。坝址区及库区植被大多为荒漠草原和山地草甸等植被类型,地面组成物质主要为第四纪沉积物,土石混杂,砾石含量高。

黄河班多水电站工程区占地面积171.89hm<sup>2</sup>,其中,荒草地分布面积最大,占工程区总面积的52.53%,坡度变化介于5°~35°之间。

本研究选取班多水电站工程区原生地面中面积最大的荒草地进行实地放水产流试验研究。选取的荒草地坡面的植被覆盖度均小于30%,地面组成物质为第四纪沉积物,土石混杂,砾石含量高,试验前期土壤含水量为12.5%,土壤容重为1.090g/cm<sup>3</sup>。

### 1.2 试验设计与观测

采用野外人工放水产流试验方法,研究黄河班多水电站工程区荒草地坡面产流过程。试验在该工程区荒草地坡面上进行。试验供水系统主要设备包括水泵和溢流箱等。供水流量大小通过安装在扬程水管出口的控制阀调节。溢流箱置于小区顶端,并嵌入地面一定深度,使溢流面与小区坡面刚好接触。通过溢流箱对水管出流的消能缓冲等作用,保证流入小区的水流为均匀薄层状水流。

试验小区由1mm厚的钢板插入地面以下0.15m围成,钢板高出地面0.10m,试验小区投影面积4m×0.5m。试验供水流量分别为4,6,8,10,12L/min 5个等级。依据对工程区的实地调查情况,选取荒草地的试验坡度分别为4°,13°,22°,29°,37°这5个等级。

试验的供水历时为30min。试验前用数码相机对试验的荒草地坡面进行不同位置的垂直拍照,将照片带回室内分析处理,以确定其植被覆盖度。分析处理方法是在 erdas imagine 9.1 环境下,选择照片中植被部分作为 AOI(感兴趣区域, area of interest),利用最小距离法对这一部分进行非监督分类(unsupervised classification),分类的结果进行目视判读,归并成两个大类(植被覆盖/无植被覆盖),统计出各自的像元数,最终得到植被的实际覆盖度,取得所有位置的植被覆盖度均小于30%。

试验开始前首先进行供水流量的率定,以确保供水流量达到试验设计要求。整个试验过程中,开始产流到试验结束期间,在小区出口处定时收集浑水样进

行观测。开始产流时取样一次, 产流后的前 6 min, 分别每隔 1, 2, 3 min 取一次样, 以后皆每隔 3 min 取一次样, 试验结束时再取一次。用量筒测定浑水样体积, 采用烧干法测定浑水样中的泥沙重量, 计算获得清水体积。

## 2 结果与分析

试验坡面小区顶端供入的水流在重力作用下沿坡面倾斜方向向小区底端流动, 由于开始流动即开始入渗, 流动过程始终与入渗过程同时相伴进行, 所以流到各坡位的水流实际就是各坡位入渗后的产流, 流出小区底端的水流既是该坡位的产流, 也是小区顶端供水流经小区坡面全程入渗后形成的小区坡面产流。与降雨条件下的坡面径流过程(产流汇流过程)不同, 供水试验条件下的坡面径流过程实际上只有与供水水流沿程入渗损失过程相伴的坡面产流过程, 不同空间坡位产流连续地连接在一起, 形成了供水试验条件下的坡面径流过程。

### 2.1 产流率随供水过程的变化

2.1.1 不同供水流量条件下产流率随供水过程的变化 将不同供水流量条件下产流率随供水过程的动态变化试验数据绘制成图 1, 相关分析结果见表 1。

从表 1 可以看出, 不同供水流量条件下, 荒草地坡面产流率随供水过程的动态变化皆可用对数相关方程描述。通过对图 1 进行分析, 在相同投影坡长、坡度, 不同供水流量条件下, 荒草地坡面产流率随供水过程的变化整体上表现为先逐步增大, 随后转为稳定的趋势。整个供水过程中, 在开始产流后的 5 min 内, 产流率随供水过程的变化幅度较大, 以后变化较为平缓且趋于稳定。不同供水流量条件下, 荒草地坡面产流率在整个供水过程中变化趋势基本一致, 但产流率的大小具有明显差异。

荒草地坡面产流率随供水过程发生这种变化的原因是在供水开始后的前期, 坡面表层土壤含水量小, 土壤的入渗率大, 上坡位产流小, 加之小区有一定坡长, 到小区出口产流需要一定时间, 所以开始供水后的短时间内没有获得小区坡面产流。随着供水过程的进行, 土壤表层含水量增大, 并逐渐接近饱和, 入渗率迅速减小, 产流率随着径流历时自然快速增加。当供水过程进行到一定时间, 入渗速度已基本接近饱和和入渗率, 产流趋于稳定, 相应的产流过程中产流率变化也就相对比较稳定。

2.1.2 不同坡度条件下产流率随供水过程的变化 将不同坡度条件下产流率随供水过程的动态变化试验数据绘制成图 2, 相关分析结果见表 2。

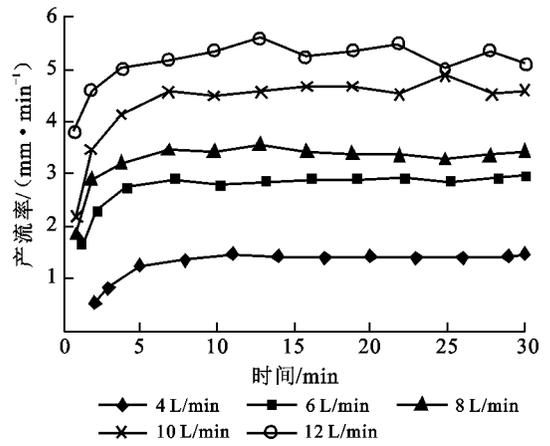


图 1 不同供水流量下坡面产流率随供水过程的变化

表 1 不同供水流量下坡面产流率随供水过程变化的经验方程

供水流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	经验方程	相关系数
4	$H = 0.278 2\ln t + 0.595 9$	0.867 5
6	$H = 0.318 2\ln t + 1.976 4$	0.878 1
8	$H = 0.318 2\ln t + 2.498 0$	0.801 3
10	$H = 0.585 2\ln t + 2.953 7$	0.893 0
12	$H = 0.334 9\ln t + 4.350 3$	0.816 9

注:  $H$  为产流率 ( $\text{mm}/\text{min}$ );  $t$  为时间 ( $\text{min}$ ); 投影坡长为 400 cm, 坡度为  $22^\circ$ 。

从表 2 可以看出, 不同坡度条件下, 荒草地坡面产流率随供水过程的动态变化皆可用对数相关方程描述。

通过对图 2 进行分析, 在相同投影坡长、供水流量, 不同坡度条件下, 荒草地坡面产流率随供水过程的变化呈增长趋势。

整个供水过程中, 在开始产流后的 5 min 内, 产流率随供水过程的变化迅速增大, 以后变化较为平缓趋于稳定, 各坡度下的变化趋势一致, 差异很小, 几乎重叠在一起。

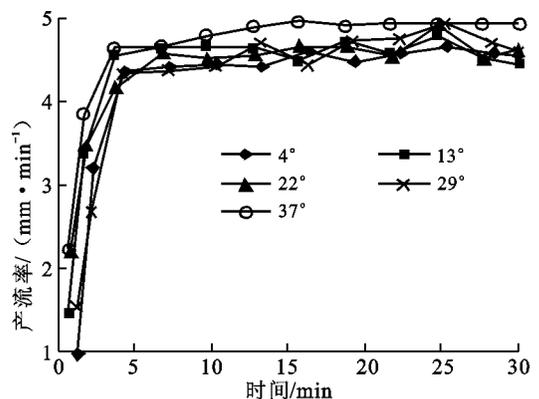


图 2 不同坡度下坡面产流率随供水过程的变化

不同坡度条件下荒草地坡面产流率随供水过程的变化与不同供水流量下产流率变化过程总体上具有相似性,都是随供水历时先增大后趋于稳定的趋势。差异性在于供水开始的前期(即前 5 min),不同坡度条件下的产流率变化的增长速率大于不同供水流量条件下产流率随供水历时的增加速率,且各坡度条件下产流率的变化趋势极其相似,差异很小,趋势线几乎重叠在一起,而不同供水流量对产流率的影响比较明显,使得各供水流量下产流率的差异较大。

表 2 不同坡度下坡面产流率随供水过程变化的经验方程

坡度/(°)	经验方程	相关系数
4	$H = 0.859 01nt + 2.066 0$	0.822 1
13	$H = 0.658 41nt + 2.762 0$	0.818 5
22	$H = 0.585 21nt + 2.953 7$	0.893 0
29	$H = 0.869 31nt + 2.141 2$	0.891 1
37	$H = 0.593 61nt + 3.225 3$	0.884 4

注: $H$  为产流率(mm/min); $t$ 为时间(min);投影坡长为 400 cm,供水流量 10(L/min)。

## 2.2 产流深随供水流量的变化

将同坡度(22°)不同供水流量条件下,荒草地坡面产流深随供水流量变化的试验数据绘制成图 3。从图 3 可以看出,产流深随供水流量的增大而显著增加。通过对试验结果进行分析,结果显示,产流深随供水流量的变化可用对数相关方程来描述,其经验方程为:

$$H = 102.31 \ln Q - 105.5 \quad (R = 0.9919) \quad (1)$$

式中: $H$ ——产流深(mm); $Q$ ——供水流量(L/min)。

供水流量在坡面产流中起重要的驱动作用。相同条件的下垫面在不同供水流量的产流过程中,虽然包括地面形态、土壤空隙率等下垫面状况不断发生着变化,但因此而导致的土壤的入渗率变化远不及供水流量的变化大,所以随着供水流量的增大,产流深必然相应增大。

## 2.3 产流深随坡度的变化

将同供水流量(10 L/min)不同坡度条件下,荒草地坡面产流深随坡度变化的试验数据绘制成图 4。从图 4 可以看出,产流深随坡度的增大而增大。通过对试验结果进行相关分析,产流深随坡度的变化可用指数相关方程来描述,其经验方程为:

$$H = 124.8e^{0.00235S} \quad (R = 0.726 4) \quad (2)$$

式中: $H$ ——产流深(mm); $S$ ——坡度(°)。

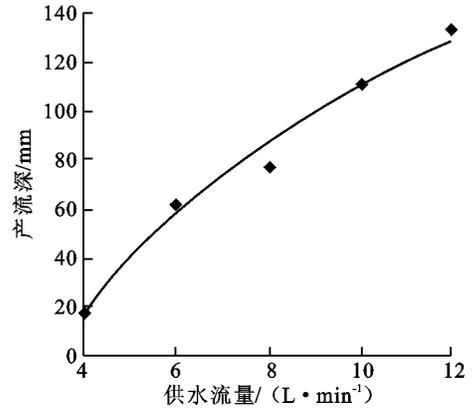


图 3 坡面产流深随供水流量的变化

坡度是影响坡面产流的重要地形因子。在同一供水流量条件下,产流深随坡度的增大而增大的根本原因在于随着坡度的增大,水流在顺坡方向的重力分力增大,使得水流在坡面停留的时间相对减少,流速加快,土壤入渗时间缩短,入渗量减小,从而增加了产流量,故此产流深会有所增加。另外,本试验研究中并未出现临界坡度,可能的原因是只在小区顶端供入水的放水产流过程不同于从空中在小区各部位皆输入雨水的降雨产汇流过程。

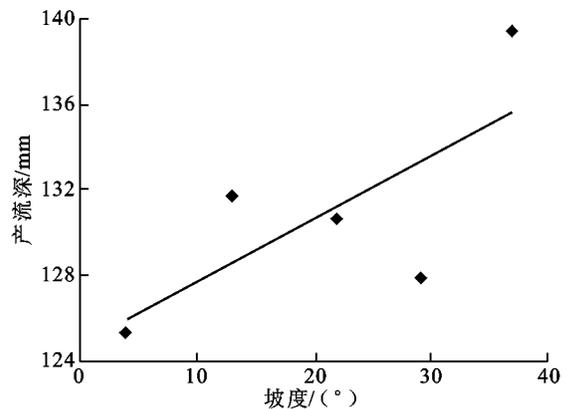


图 4 坡面产流深随坡度的变化

## 2.4 产流深随供水流量及坡度的变化

通过对不同供水流量、坡度条件下的全部试验观测数据进行统计,得到下列经验方程:

$$H = -119.581 + 3.824 2 \ln S + 103.824 3 \ln Q \quad (3)$$

$$[R = 0.9905; F = 181.6611 > F_{0.01}(2, 7) \approx 9.55]$$

式中: $H$ ——产流深(mm); $S$ ——坡度(°); $Q$ ——供水流量(L/min)。

模拟与检验结果表明,荒草地坡面产流深随坡度、供水流量的动态变化可用二元线性方程描述,相关关系高度显著。式(3)表明,供水流量对产流深的影响大于坡度的影响。

### 3 结论

采用野外放水产流试验的方法, 对同供水流量(10 L/min), 不同坡度( $4^\circ$ ,  $13^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $29^\circ$ ,  $37^\circ$ ) 和同坡度( $22^\circ$ ), 不同供水流量(4, 6, 8, 10, 12 L/min) 条件下黄河班多水电站工程区荒草地坡面产流过程进行了研究, 结果如下。

(1) 不同供水流量条件下, 荒草地坡面产流率随供水过程的动态变化皆可用对数相关方程描述。整个供水过程中, 在开始产流后的 5 min 内, 产流率随供水过程的变化幅度较大, 以后变化较为平缓且趋于稳定, 不同供水流量条件下, 荒草地坡面产流率在整个供水过程中变化趋势基本一致, 但产流率的大小具有明显差异; 不同坡度条件下, 荒草地坡面产流率随供水过程的动态变化也皆可用对数相关方程描述。在开始产流后的 5 min 内, 产流率随供水过程的变化迅速增大, 以后变化较为平缓, 各坡度下的变化趋势一致, 差异很小, 几乎重叠在一起。

(2) 不同坡度条件下荒草地坡面产流率随供水过程的变化与不同供水流量下产流率变化过程总体上具有相似性, 都是随供水历时先增大后趋于稳定的趋势。差异性在于供水开始的前期, 不同坡度条件下的产流率变化的增长速率大于不同供水流量条件下产流率随供水历时的增加速率, 且各坡度条件下产流率的变化趋势极其相似, 差异很小, 而不同供水流量对产流率的影响比较明显, 使得各供水流量下产流率的差异较大。

(3) 不同供水流量条件下, 荒草地坡面产流深随供水流量的增大而显著增加, 可用对数相关方程来描述; 不同坡度条件下, 荒草地坡面产流深随坡度的增大而增加, 可用指数相关方程来描述; 荒草地坡面产流深随坡度、供水流量的动态变化可用二元线性方程描述, 相关关系高度显著, 供水流量对产流深的影响大于坡度的影响。

#### [ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Horton R E. Surface runoff phenomena. Horton Hy-

drology Laboratory Publication. 1935, 101(73): 1-73.

- [ 2 ] Hewlett J D, Hibbert Alden R. Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(4): 1081-1087.
- [ 3 ] Kirkby M J. Hillslope Hydrology [M]. John Wiley and Sons, Ltd., 1978.
- [ 4 ] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [ 5 ] 芮孝芳, 姜广斌. 基于径流形成原理的若干洪水预报理论评述[J]. 水文, 1997(4): 16-20.
- [ 6 ] 孙三祥, 杜宏民, 冉新民. 产流计算若干问题述评[J]. 甘肃水利水电技术, 1994(04): 48-52.
- [ 7 ] 襄作新. 流域水文模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [ 8 ] Sharma K D, Singh. Runoff estimation using landsat thematic mapper data and SCS model[J]. Hydrological Science Journal, 1992, 37(1): 39-52.
- [ 9 ] 范荣生, 李长兴, 李占斌. 考虑降雨空间变化的流域产流模型[J]. 水利学报, 1994(3): 33-39.
- [ 10 ] 惠士博. 田间入渗空间结构及雨洪利用数学模拟分析[J]. 水利学报, 1992(8): 1-14.
- [ 11 ] 张光义, 夏军, 张翔, 等. 具有空间分布的超渗产流模型[J]. 人民黄河, 2007, 29(12): 18-20.
- [ 12 ] 穆天亮, 王全九, 王辉. 基于短历时 Philip 入渗公式的产流模型[J]. 水土保持学报, 2008, 22(04): 62-64.
- [ 13 ] 李建柱, 冯平. 基于大孔隙下渗理论的产流模型及其应用[J]. 天津大学学报, 2008, 41(04): 467-470.
- [ 14 ] 王腊春, 熊江波. 用遥感资料建立分块产流模型[J]. 地理科学, 1997, 17(01): 76-80.
- [ 15 ] 袁建平, 蒋定生. 不同治理度下小流域正态整体模型试验: 林草措施对小流域径流泥沙的影响[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 91-96.
- [ 16 ] 李树利, 彭培好, 王玉宽, 等. 雨前土壤含水量对紫色土坡耕地地表产流过程的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(35): 15593-15595.
- [ 17 ] 孔刚, 王全九, 樊军, 等. 前期含水量对破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.
- [ 18 ] 彭文英, 张科利, 江忠善, 等. 黄土高原坡耕地退耕还草的水沙变化特征[J]. 地理科学, 2002, 22(4): 397-402.