

# 太行山花岗片麻岩区坡面产流的影响因素分析

肖登攀<sup>1,2</sup>, 杨永辉<sup>1</sup>, 韩淑敏<sup>1</sup>, 樊彤<sup>3</sup>, 马林<sup>1,2</sup>, 王明磊<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 农业水資源重点实验室 中国科学院 遗传与发育生物学研究所 农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 国家环境保护总局 环境应急与事故调查中心, 北京 100035)

**摘要:** 通过自制的截流铲截取坡面径流, 对太行山花岗片麻岩区产流过程的影响因素进行了研究。结果表明: (1) 雨强是启动产流的关键因素, 当降雨强度大于特定值时才能产生地表径流, 且随着坡度降低, 地表产流所需雨强增大。当雨强达到产流后, 径流量和降雨量成显著正相关, 与雨强的相关性不显著。(2) 地表径流量不随着集水面积的增加而增加, 坡面强烈的入渗能力, 使得上方来水在产流过程中渗入土壤。坡度是影响地表径流的又一关键因素, 随着坡度的增加, 地表径流量明显的增加。由于不同坡向土壤质地不同, 使得阳坡地表径流量要明显多于阴坡, 平均径流系数也比阴坡高。总体上, 研究坡面径流系数均较小, 以 2 m 坡长为对象, 最大径流系数仅为 7.3%, 说明坡面入渗能力很强, 产流过程以入渗为主。

**关键词:** 地表径流; 截流铲; 坡面因子; 径流系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0114-05

中图分类号: S157

## Factors Influencing Surface Runoff in the Granitic Gneiss of Taihang Mountains

XIAO Deng-pan<sup>1,2</sup>, YANG Yong-hui<sup>1</sup>, HAN Shu-min<sup>1</sup>, FAN Tong<sup>3</sup>, MA Lin<sup>1,2</sup>, WANG Ming-lei<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Center for Agriculture Resource Research, Institute of Genetic and Development Biology, CAS, Shijiazhuang, Hebei 050021, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100045, China;

3. State Environmental Administration Environmental Emergency and Accident Investigation Center, Beijing 100035, China)

**Abstract:** By using a self-designed lysimeter to measure surface runoff on a slope in Taihang Mountains, we analyze the impacts of the factors influencing runoff in the Granitic Gneiss Region (GGR) of the mountainous area. The analysis shows that (1) rainfall intensity is a key factor for initiating runoff. Surface runoff occurs when rainfall intensity is above a critical value. The gentler the slope, the higher is the critical value of rainfall intensity needed to initiate runoff. When rainfall intensity reaches a critical value, runoff becomes positively correlated with rainfall significantly. However, the correlation between runoff and rainfall intensity is insignificant. (2) Runoff does not increase with the increase in the catchment area. A strong slope infiltration capacity enhances convergent runoff infiltration into soil. Surface slope is also a key factor influencing the process of runoff in the GGR area. With increased slope, surface runoff increases significantly. Since different slope aspects have different soil textures, runoff on sun-ward slope is higher than that on shade-ward slope. The averaged runoff coefficient for sun-ward slope is higher than that for shade-ward slope as well. Generally, however, runoff coefficient is low in the study area. For instance, it has the maximum of 7.3% for a 2 meter-length slope. An important finding from the study is that there exists a very strong infiltration capacity on the GGR slope in the study area. This has a significant implication for understanding the mechanisms of surface runoff, infiltration, and groundwater recharge in the region.

**Keywords:** surface runoff; self-designed lysimeter; slope factor; runoff coefficient

收稿日期: 2009-08-02

修回日期: 2009-11-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“ 滹沱河流域人工影响下的土地利用变化对径流减少的影响”(40871022); 国际科技合作项目(2009DFA21690)

作者简介: 肖登攀(1982—), 男(汉族), 河北省张北县人, 硕士研究生, 主要从事坡地水文学, 地表水循环等研究。E-mail: xiaodp@sjziam.ac.cn  
通信作者: 杨永辉(1965—), 男(汉族), 河北省晋州市人, 博士, 研究员, 研究方向为生态水文。E-mail: yonghui.yang@sjziam.ac.cn

地表径流是土壤侵蚀、面源污染以及养分流失的动力<sup>[1-3]</sup>,也是集雨灌溉的主要水源<sup>[4]</sup>。坡面径流是流域径流的基本单元,同时也是流域洪水的重要组成部分。近年来,水文学者对不同降雨条件、土壤类型及植被类型的坡面产流进行了大量研究<sup>[5-7]</sup>,同时也探讨了径流的形成机制及影响因素,研究表明不同的降雨条件、地表特征及植被覆盖,径流产生机制和响应不同<sup>[8-10]</sup>。但影响地表径流的因子很多,并且相互关系复杂,只有针对具体情况进行研究,才能提出具有指导意义的理论。本实验通过自制的截流铲截取坡面地表径流,对太行山花岗片麻岩区坡面产流的几个主要影响因素进行了分析。研究结果对太行山低山丘陵区防治水土流失,提高集雨灌溉集水量等方面具有现实意义。

## 1 研究区概况

试验区位于河北省元氏县中国科学院太行山山地生态试验站(114°15'50"E, 37°52'44"N)西南 1.5 km 的石门小流域,面积约 0.6 km<sup>2</sup>,海拔 401~823.7 m,沟向东南,平均坡度 30°,部分坡度达 60°~70°,在该区具有典型性和代表性。

该区属于干旱半干旱大陆性季风气候,雨热同季,春冬季干旱少雨雪,夏季炎热多雨。年均降水量 513.2 mm,雨季(6—9月)平均降雨量 392.4 mm,占全年降雨量的 71.5%,年均蒸发量 1 598.5 mm,日照时数 2 038 h,太阳总辐射 116~136 kJ/cm<sup>2</sup>。

研究区内土壤种类主要为花岗片麻岩(部分地带为石灰岩和页岩)母质上发育的山地褐土,土壤结构不良,石砾含量大,且多属粗骨土,易侵蚀。土层浅薄,土层厚度在 20—50 cm 之间,阴坡少量砂土深度可达 70 cm 左右,阳坡土层厚度 20 cm 左右,平均土层厚度 34.1 cm,土壤常年较干旱,春季和初夏土壤含水量多在 10% 以下。阴阳坡植被差别较大,阳坡主要以盖度较低的荆条(*V. negundo* var. *heterophylla* Rehd.)、酸枣(*Z. jujube* var. *spinosa* Hu)为主,阴坡植被以黄背草[*T. japonica* (Willd.) Tanaka]、白羊草[*B. ischaemum* (L.) Keng]为主,盖度较高。

## 2 试验布设与方法

在小流域内植被比较均匀一致的坡面上,选取 6 个径流小区,各小区特征见表 1。在小区上方挖截流沟,沟内靠小区一侧用水泥砌墙挡水,切断样地外地表径流对样地的干扰。根据不同的坡长在坡面上安装自制的截流铲,截流铲用铝合金板焊接而成,铲底板长、宽均为 10 cm,横向截流板高 10 cm,并留有出

水孔。降雨过程中径流沿坡面流入截流铲中,用导水管把收集的径流导入储水桶中,降雨结束后次日用量筒量取储水桶中的水量,若降雨间隔小于 24 h,则视为一次降雨。为保证截流铲所测数据的准确性,每个样地重复布置 3 个截流铲。通过安装自记雨量计测得每次降雨量,同时还可以得到相应降雨历时,从而可以计算出平均降雨强度。试验于 2006 年 5 月布置完毕,7 月开始,共监测到 42 次降雨。

表 1 径流小区基本特征

项目	阳坡			阴坡		
坡长/m	2	2	2	2	4	6
坡度/(°)	29	29	16	30	30	30

由于截流铲截取的水量中包括部分降雨量,通过公式(1)计算地表径流量。

$$R = R_r - [P \cdot (1 - \delta \cdot S \cdot \cos\beta)] / 10 \quad (1)$$

式中:  $R$ ——地表径流量(ml);  $R_r$ ——截流铲截流量(ml);  $P$ ——降雨量(mm);  $\delta$ ——植被截流系数(取 0.15);  $S$ ——截流铲底面积(10 cm × 10 cm);  $\beta$ ——坡面坡度(°)。

由公式(2)计算径流深。

$$R_d = 10 \cdot R / S' \quad (2)$$

式中:  $R_d$ ——径流深(mm);  $S'$ ——径流的集水面积(cm<sup>2</sup>)。

径流系数  $\theta$  由公式(3)计算。

$$\theta = R_d / P \quad (3)$$

## 3 结果分析

### 3.1 雨强和雨量对地表径流量的影响

地表径流与降雨量和降雨强度密切相关,但不同地区其影响程度是不同的。在降雨量与地表径流相关关系的研究中,因试验条件不同而出现相关或者不相关的结论,而在降雨强度及降雨历时与地表径流关系研究中,同样出现类似分歧<sup>[9]</sup>。相关研究<sup>[11]</sup>认为北方特别是黄土高原区,地表径流主要取决于降雨强度,南方地区则主要取决于降雨量。尹忠东<sup>[9]</sup>的研究认为采取 4 类坡面治理措施在降低地表径流量的同时,提高了降雨量、降雨历时与地表径流的相关性,降低了降雨强度与地表径流的相关性。还有些研究者<sup>[12]</sup>通过研究得到地表径流量与降雨量的拟合关系式,并认为降雨强度对径流量的影响要比降雨量、土壤表层初始含水量小的多。在本研究区域以超渗产流为主,降雨强度是地表径流产生的关键因子,坡度为 30°的坡面,只有当降雨强度大于一定值(0.05 mm/min),才有地表径流产生,坡度为 16°的坡面,产

生地表径流需要的雨强更大(图 1)。也就是说随着坡度的降低,产生地表径流需要更大的降雨强度。

通过相关分析表明,当降雨强度达到产流条件后,径流量与降雨量及雨强都成正相关,相关系数见表 2,但与降雨量的相关系数要大于与雨强的相关系数且达到极显著水平,与雨强的相关系数不显著。表明当坡面开始产流后,径流量的大小主要取决于降雨量,并且降雨量越大,径流量越大。

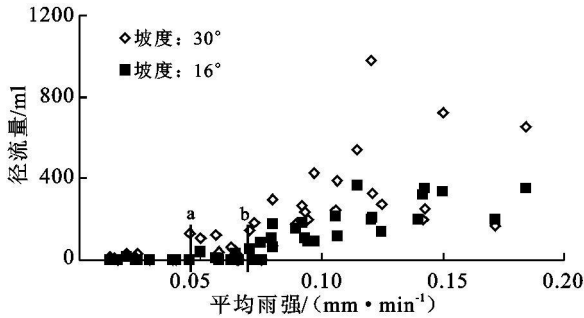


图 1 地表径流量与平均雨强的相关性

表 2 不同坡长地表径流与降雨量和降雨强度相关分析

坡长/m	降雨量		降雨强度	
	Pearson 相关系数	Sig (双尾)	Pearson 相关系数	Sig (双尾)
6	0.514**	0.002	0.283	0.065
4	0.602**	0.000	0.123	0.263
2	0.541**	0.001	0.141	0.237

注: \*\*表示  $P=0.01$  水平显著相关。

### 3.2 坡面因子对地表径流的影响

坡面径流是降雨与下垫面因素相互作用的结果,降雨是产生径流的先决条件,雨量与雨强对径流的影响较大,但是下垫面因素特别是坡面因子(坡长、坡度及坡向)对径流的形成具有重要影响。

坡长和径流的关系十分复杂,有研究者<sup>[13]</sup>认为径流量随着坡长的增加逐渐减少,而有些研究<sup>[14]</sup>结论正好相反,认为径流量随着坡长的增加而增大,同时另一种观点认为,陡坡条件下,随着坡长的增加径流没有明显变化<sup>[15]</sup>。本研究通过设置 2, 4 和 6 m 的 3 个不同坡长处理来研究坡长对地表径流的影响,发现坡长对地表径流的影响程度很弱,不同的坡长地表径流量相差很小(图 2a),理论上坡长越大地表径流的集水面积越大,但结果表明不同坡长的径流量差别很小,地表径流不随着集水面积的增加而增加。分析认为主要是由于径流入渗,也就是径流在汇流过程中,由于局部土壤未饱和而导致上游径流被土壤吸收,该过程主要出现在以超渗产流的干旱半干旱地区,而本研究区域正是这种区域的典型代表。

坡度是影响地表径流的又一关键因素。在相同的条件下,地面坡度大、漫流速度快,历时短,下渗量就小,相反地表径流量就大;然而在受雨面积相等的情况下,随着坡度的增大,实际坡度面积增加,从而入渗面积增大,使得入渗量增大,所以坡度增大,地表径流量增加还是减小,还要考虑上述哪种趋势占优势。已有研究表明<sup>[14]</sup>径流开始随着坡度的增加而增加,坡度达到一定值后,径流又有减少的趋势<sup>[16]</sup>,也有研究认为随着坡度的增大径流增大。本研究通过 2 个不同的坡度处理发现,随着坡度的增大,地表径流量明显增大(图 2b),坡度为 30° 的地表径流量约为坡度为 16° 的 2 倍,由此可知在该试验区,至少在 30° 的坡度范围内,坡度与地表径流成正相关。

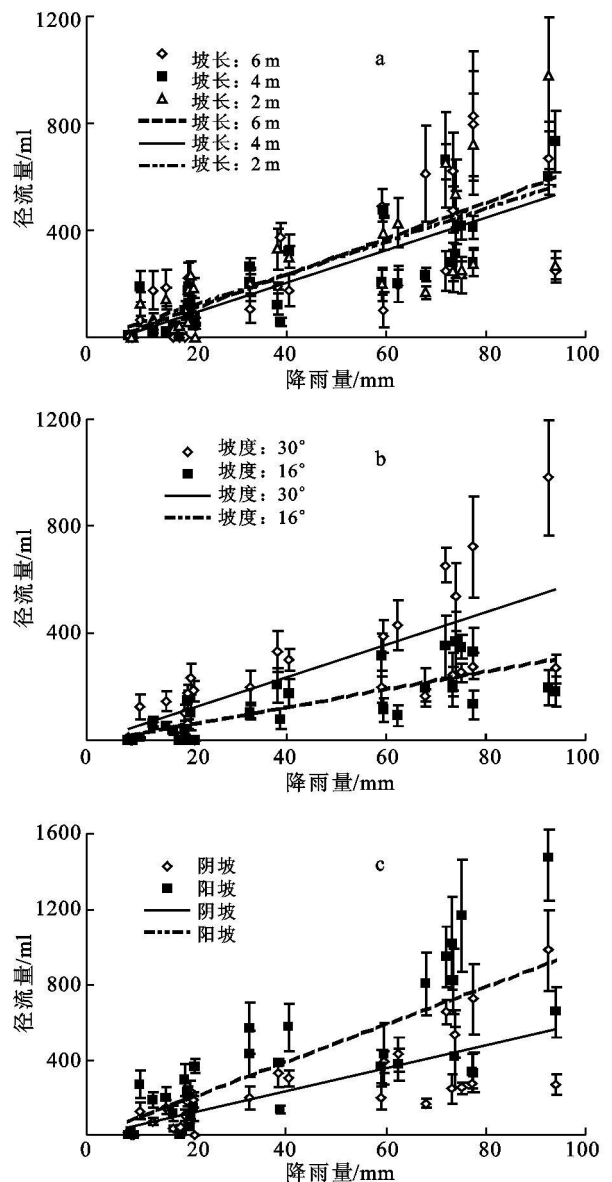


图 2 不同坡面因子地表径流量与降雨量(雨强  $> 0.05 \text{ mm/min}$ ) 关系

坡向做为因子,分析其对坡面产流影响的相关研究还鲜见报道,由于不同坡向接收的太阳辐射不同,导致不同的坡向地面植被,土壤质地等因素差异显著,坡向只是通过这些因素间接的影响坡面产流过程。本研究在试验设计上考虑了坡向因素,目的在于发现坡向上的哪些具体因素使得不同坡向的径流量出现差异。

分析发现,不同坡向地表径流量差异显著,阳坡的地表径流量明显的多于阴坡(图 2c)。在样地选择上,阴阳坡的植被种类及地面覆盖基本相似,分析认为不会对径流产生较大影响。

通过分析土壤特性发现,导致坡面产流差异显著

的主要原因是不同坡向土壤机械组成的不同(表 3),在土层 30 cm 以上,阴坡大于 10 mm 的碎石的含量在 20 % 以上,而阳坡仅 10 % 左右,阴坡大的碎石含量是阳坡的 2 倍,远远的多于阳坡;Munn 等<sup>[17]</sup>的研究指出,在半干旱地区有限降水条件下,含碎石土壤水分入渗深度更大,而且较低的土壤水分含量下有效水比重较高,其它相关研究也有大的碎石有利于入渗的结果<sup>[18]</sup>。

由此可见,本试验区阴坡的入渗能力要比阳坡强,同时野外入渗试验也有相同结果<sup>[19]</sup>,因此使得阳坡的地表径流量要显著的多于阴坡。

表 3 不同坡向土壤机械组成

土层深度 /cm	阳坡					阴坡					%
	> 10	10~1	1~0.25	0.25~0.075	< 0.075	> 10	10~1	1~0.25	0.25~0.075	< 0.075	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
0-10	11.08	39.35	33.22	10.50	5.85	20.68	33.09	27.55	11.87	6.81	
10-20	10.28	41.36	33.40	9.38	5.58	21.45	33.40	23.05	12.21	9.89	
20-30	7.94	42.82	33.74	9.31	6.19	28.73	38.31	17.95	8.54	6.47	
30-40	7.52	40.81	39.78	8.67	3.22	11.99	53.55	26.84	5.91	1.71	
40-50	5.58	35.59	38.47	12.86	7.49	10.22	56.87	24.60	5.93	2.38	

### 3.3 地表径流系数

径流系数是降雨量转化为径流量的比率,能综合反映流域内自然地理—环境要素对降水和径流的影响。试验表明,该地区土壤强的入渗能力使得地表径流系数很小,且不同的降雨等级径流系数不同(见表 4)。

对本试验区 2 m 坡长的坡面径流系数的进行分析,最大径流系数仅为 7.3 %,由于 4 和 6 m 坡长的地表径流量与 2 m 坡长相差不大,计算到相应集水面积上,径流系数比由 2 m 坡长计算出的数值更小。表明本试验区坡面产流过程以入渗为主,同时径流入渗普遍存在,从而使得坡面产流量较小。

对观测到的 42 场降雨根据不同雨量进行分级,通过分析不同雨量级别的径流系数(表 4)发现,并不是降雨量越大径流系数越大,在阴坡,大雨雨级的径流系数最大,为 3.8 %,而在阳坡最大径流系数是 7.3 %,由中雨雨级产生。

以上分析结果表明,径流系数与降雨量有着复杂的关系,虽然降雨量越大产生的径流量越大,但在转换比例上不同。在阴坡,大雨过程中,降雨转换为径流的比例最高,而在阳坡是中雨转换率最高。同时发现,除小雨阴阳坡的径流系数相同外,其它雨量级都是阳坡的径流系数高于阴坡,与前面分析的不同坡向不同的土壤机械组成对坡面产流影响结果较为一致。

表 4 不同雨量级地表径流系数

雨量级	平均降雨量/mm	阴坡		阳坡	
		平均径流深/mm	径流系数	平均径流深/mm	径流系数
小雨	9.0	0.17	1.9	0.18	1.9
中雨	18.2	0.53	2.9	1.34	7.3
大雨	36.6	1.38	3.8	2.09	5.7
暴雨	73.6	2.13	2.9	3.52	4.8
平均	34.4	1.05	2.9	1.78	4.9

注:小雨雨量为 0.1~9.9 mm,中雨为 10~24.9 mm,大雨为 25~49.9 mm,暴雨为 50~99.9 mm;坡长为 2 m。

## 4 结论

(1) 利用自行设计的截流铲测定了坡面地表径

流,与传统的径流小区相比,由于截流铲本身面积较小的原因,测量的径流量较小,但可以在人为不产生任何干扰的条件下多次测量天然降雨所产生的地表

径流,这是径流小区观测中难以实现的。同时在每个处理的坡面上都布置了 3 个截流铲,通过统计检验,3 个重复的截流铲所截取的径流量无显著差异,表明截流铲本身对试验的影响很小,所得的径流数据能够反映本研究区域的坡面产流特征。

(2) 降雨强度是决定地表径流产生与否的关键因子,只有当降雨强度大于特定值时,才产生地表径流,且随着坡度的降低,开始产生地表径流所需要的降雨强度增大。当降雨强度达到产流要求后,径流量与降雨量和降雨强度都成正相关关系,但是与降雨量的相关性达到极显著水平,与降雨强度的相关性不显著。

(3) 地表径流量不随坡长的增加而增加,坡面强烈的入渗能力,使得上方来水在产流过程中渗入土壤。随着坡度的增加,地表径流量显著增加,坡度是影响地表径流的又一关键因子。由于不同坡向的土壤机械组成不同,阴坡大的碎石含量远远大于阳坡,土壤入渗能力强于阳坡,使得阴坡地表径流量要明显的少于阳坡,平均径流系数也比阳坡低。

(4) 该试验区坡面径流系数均较小,以 2 m 坡长为对象,最大径流系数仅为 7.3%。由于 4 和 6 m 坡长的地表径流量与 2 m 坡长相差不大,计算到相应集流面积上,径流系数比 2 m 坡长所得到的更小。表明本试验区坡面产流过程以入渗为主,同时径流入渗普遍存在。

(5) 植被条件是影响地表产流的重要因素,本试验在试验设计上没有设置不同的植被条件,在以后的研究中要考虑该研究区域不同植被条件对径流的影响。

#### [ 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.不同植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 ] 杨国强,何俊仁.集雨灌溉工程技术研究与应用[ J ].人民黄河,1997(6):27-28.
- [ 5 ] 唐小娟,郭雪莲.几种坡面径流调控措施的筛选试验研究[ J ].水土保持研究,2008,15(5):125-128.
- [ 6 ] 尹忠东,丛晓红,李永慈.江西丘陵红壤区坡面径流及其与降雨关系的影响因素[ J ].水土保持通报,2008,28(4):7-10.
- [ 7 ] 魏强,张秋良,代海燕,等.大青山不同植被下的地表径流和土壤侵蚀[ J ].北京林业大学学报,2008,30(5):111-117.
- [ 8 ] 陈建锋,杨晓俊.降雨径流的机制分析[ J ].地下水,2007,29(1):3-4.
- [ 9 ] Arnaez J, Lasanta T, Ruiz F P, et al. Factors affecting runoff and erosion under simulated rainfall in Mediterranean vineyards[ J ]. Soil & Tillage Resrch, 2007, 93(2): 324-334.
- [ 10 ] 杨晓俊.降雨产流影响因素分析[ J ].地下水,2007,29(5):50-51.
- [ 11 ] 景可,王万忠,郑粉莉.中国土壤侵蚀与环境[ M ].北京:科学出版社,2005:55-58.
- [ 12 ] 郭庆荣,张秉刚,钟继洪,等.丘陵赤红壤降雨入渗产流模型及其变化特征[ J ].水土保持学报,2001,15(1):62-65.
- [ 13 ] Aaron Y, Naama R Y. Hydrological processes in a small catchment: Scale effects of rainfall and slope length[ J ]. Geomorphology, 2004, 61(1/2): 155-169.
- [ 14 ] 魏天兴,朱金兆.黄土残塬沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[ J ].北京林业大学学报,2002,24(1):59-62.
- [ 15 ] 孔亚平,张科利,曹龙熹.土壤侵蚀研究中的坡长因子评价问题[ J ].水土保持研究,2008,15(4):43-47.
- [ 16 ] 金雁海,柴建华,朱智红,等.内蒙古黄土丘陵区坡面径流及其影响因素研究[ J ].水土保持研究,2006,13(5):292-295.
- [ 17 ] Munn L, Harrington N, Mcgirr D R. Reclaiming mine soil and overburden in the western United States[ M ]// Williams R D, Schuman G E. Analytic Parameter and procedures soil conservation society of America. Ankeny Iowa, 1987: 259-282.
- [ 18 ] 王慧芳,邵明安.含碎石土壤水分入渗试验研究[ J ].水科学进展,2006,17(5):604-609.
- [ 19 ] 樊彤.太行山花岗岩片麻岩小流域水文过程试验研究[ D ].石家庄:中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心,2008.