

伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测

彭舜磊¹, 梁亚红², 陈昌东¹, 刘沛松¹, 文祯中¹

(1. 平顶山学院 低山丘陵区生态修复重点实验室, 河南 平顶山 467000;
2. 平顶山学院 资源与环境科学学院, 河南 平顶山 467000)

摘 要:为了研究不同植被恢复类型对土壤入渗与产流的影响,采用双环入渗法测定了伏牛山东麓六种植被恢复类型土壤水分入渗过程,通过对比稳渗率与不同重现期的暴雨强度,判断不同植被类型地表径流产生的可能性。结果表明:(1) 不同植被类型土壤初渗率、稳渗率和前 60 min 入渗量均表现出栓皮栎次生林>栓皮栎人工林>刺槐人工林>侧柏人工林>灌丛>裸地的规律;(2) 土壤入渗特征参数与土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量、细根生物量和团聚体含量显著相关($p<0.05$),其中土壤容重、总孔隙度是影响土壤入渗的主导因子;(3) 栓皮栎次生林能抵御 10 a 一遇的暴雨,栓皮栎人工林能抵御 1 a 一遇的暴雨,而其它植被类型均不能抵御 1 a 一遇的暴雨,易产生暴雨径流。说明封育天然次生林和运用乡土树种造林进行植被恢复,有利于提高土壤的入渗性能。

关键词:土壤入渗;径流;土壤容重;土壤孔隙度;植被恢复类型

中图分类号:S152.7⁺2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2013)04-0029-05

Prediction of Soil Infiltration Capacity and Runoff under Different Restored Vegetation Types on the Eastern Side of Funiu Mountains

PENG Shun-lei¹, LIANG Ya-hong², CHEN Chang-dong¹, LIU Pei-song¹, WEN Zhen-zhong¹
(1. Key Laboratory of Ecological Restoration in the Hilly Area, Pingdingshan University, Pingdingshan, He'nan 467000, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Pingdingshan University, Pingdingshan, He'nan 467000, China)

Abstract: Aimed to test the effect of different restored vegetation types on soil infiltration capacity and runoff generation. Infiltration processes were measured with double-ring infiltration method in the six restored vegetation types on the eastern side of Funiu Mountains. The likelihood of runoff was inferred by comparing stable infiltration (K_s) at the top soil with prevailing storm intensities in the six restored vegetation types. The results indicated that: (1) the values of soil infiltration variables, including the initial infiltration, stable infiltration, and total amounts of infiltration before 60 minutes were in the sequences of *Quercus variabilis* secondary forest>*Quercus variabilis* plantation>*Black Locust* plantation>*Platycladus orientalis* plantation>Shrub>abandoned land; (2) soil bulk density, total porosity, non-capillary porosity, soil organic matter, fine root biomass, and water stable aggregate were significantly correlated with the variables of soil infiltration ($p<0.05$), soil bulk density and total porosity were the main factors affecting soil infiltration; (3) *Quercus variabilis* secondary forest could resist storm with 10 year recurrence, and *Quercus variabilis* plantation could overcome storm with 1 year recurrence. On the contrary, runoff was most likely to occur in the shrub land and abandoned land. It is suggested forest conversion and forest plantation with native tree species benefit for increasing soil infiltration capacity.

Key words: soil infiltration; runoff; soil bulk density; soil porosity; restored vegetation types

土壤入渗率是指单位时间、单位面积土壤表面入渗的水量,是描述土壤水分入渗快慢极为重要的物理参数之一。土壤渗透性能愈好,地表径流愈小,土壤的侵蚀量也就愈少^[1-4]。探讨不同植被恢复类型下土

壤水分的入渗性能,对于研究坡面径流的产流机理、大气—土壤—植被连续体 (SPAC) 中水分传输转化过程具有重要意义^[5-6]。土壤入渗性能与植被类型和土壤质地、结构、地面坡度、土壤剖面含水量有关,并随入渗时间的推移逐渐降低,最终趋于一个常数,即稳定入渗率^[7-9]。植被通过改善土壤结构,提高入渗率,促进降雨入渗,减少地表径流^[10-11]。目前,土壤入渗的研究主要关注土壤入渗过程与模拟以及土壤入渗的空间异质性^[3-4,6-7]。植被恢复对土壤入参与产流的影响很大^[3-4],不同区域与不同植被恢复类型对土壤的入参与产流的影响存在差异^[6-7]。闫东锋和杨喜田^[8]对豫南典型林地土壤入渗特征及影响因素进行了分析;肖登攀等^[1]对太行山不同地表类型降雨入渗产流规律进行了研究,然而,不同植被恢复类型土壤入渗过程及其入渗产流机理研究尚待深入。

由于长期受到人类活动的干扰,伏牛山东麓原生自然植被几乎破坏殆尽,水土流失严重,生态环境脆弱^[12]。自 1999 年以来,该区先后实施了大规模的天然林保护工程和退耕还林工程,植被恢复效果显著,森林覆盖率显著提高。在这一系列变化中,土壤的理化性质包括入渗性能是否发生变化,是否能够减少地表径流? 目前,针对这些问题,亟需进行探索和研究。本文以伏牛山东麓六种植被恢复类型为研究对象,通过对其土壤水分入渗过程的测定以及稳渗率与不同重现期暴雨强度的比较,揭示不同植被恢复类型土壤入渗规律和地表径流产生的可能性,以期为伏牛山区水土保持、植被恢复及生态环境建设提供科技支撑与理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择伏牛山东麓的鲁山县昭平台库区为研究区,该区气候属于暖温带向北亚热带过渡区,年均气温 14.7℃,年均降雨量 1 000 mm,年蒸发量 1 100 mm,为全国暴雨中心之一。地貌属低山丘陵区,岩性组成较为复杂,主要为花岗片麻岩、闪长片麻岩、大理石岩和片岩等,成土母质为基岩风化残积和坡积物,土壤类型为黄棕壤,质地黏重,透水透气性差,水土流失严重,土壤侵蚀模数 4 979 t/km²,年均土壤流失总量 267.3 t^[12]。自然植被类型是含有常绿成分的落叶阔叶林,常见树种有栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、茅栗 (*Castanea seguinii*)、槲栎 (*Quercus aline*)、黄连木 (*Pistacia chinensis*)、山合欢 (*Albizia kalkora*)、化香 (*Platycarya strobilacea*) 等。由于长期的人类干扰,自然植被破坏严重,现存植被大都为次生林、次生灌丛和人工林。常见的人工林树种为栓皮栎、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 于 2012 年 7 月,在鲁山县昭平台库区,选取坡度、坡向和海拔基本相同的栓皮栎次生林、栓皮栎人工林、侧柏人工林、刺槐人工林、灌丛和裸地 6 个植被类型作为研究对象,在同一植被类型内,分别设置 3 个 20 m × 20 m 的样地,对每个样地进行森林植物群落调查,林龄通过生长锥测定,灌丛与裸地的年龄通过查阅营林档案和走访群众确定,各样地基本情况见表 1。

表 1 不同植被恢复类型样地基本情况

植被类型	代码	坡度/ (°)	坡向	林龄/ a	林冠层 郁闭度/%	灌草层 盖度/%	优势种 (乔+灌+草)
栓皮栎次生林	SF	20	西南	60	85	75	栓皮栎+连翘+披针叶苔草
栓皮栎人工林	SP	18	西南	45	80	60	栓皮栎+胡枝子+披针叶苔草
侧柏人工林	CB	19	西南	45	75	20	侧柏+荆条+茜草
刺槐人工林	CH	21	西南	45	80	45	刺槐+杜梨+艾蒿
灌 丛	GC	22	西南	20	—	70	荆条+稗草
裸地 (对照)	CK	18	西南	5	—	60	白茅

注:荆条 (*Vitex negundo* Var. *heterophylla*), 白茅 (*Imperata cylindrica*), 连翘 (*Forsythia suspensa*), 胡枝子 (*Lespedeza bicolor*), 杜梨 (*Pyrus betuli folia*), 披针叶苔草 (*Carex lanceolata*), 茜草 (*Rubia cordi folia*), 艾蒿 (*Artemisia argyi*), 稗草 (*Echinochloa crusgalli*)。

1.2.2 样品采集 在每个样地内选择具有代表性的样点,去掉枯枝落叶层,随机挖掘 3 个土壤剖面,每个土壤剖面,用环刀 (5 cm) 取 0—10 cm 的原状土两个,1 个备测土壤容重,1 个备测土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度等指标。同时,在样点附近,去掉枯枝落叶层,用大土钻 (7.5 cm) 取 0—10 cm 土层的土壤,放入自封袋中,备测土壤有机质含量、细根生物量和水稳

性团聚体含量,每个样地重复取样 3 次。

1.2.3 指标测试方法 土壤入渗率测试采用双环入渗法^[13],在内环使土壤表层保持 5 cm 水层,直到渗出水基本稳定为止,记录数据包括:初始入渗速率 (前 5 min 平均入渗率)、各时段入渗率、稳定入渗率、前 60 min 累计入渗量。

土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度和毛管孔隙

度的测定采用环刀法^[14];土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾外加热法;水稳性土壤团聚体用改进的 Yoder 湿筛法测定^[14]。将野外取样的根系冲洗阴干后,70℃恒温下 48 h 烘干,称其干质量,细根生物量等于根系干质量与取样环刀横截面面积的比值^[15]。各植被类型土壤理化指标见表 2。

表 2 不同植被恢复类型土壤入渗特征参数

植被类型	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/ %	非毛管孔 隙度/%	毛管孔隙 度/%	有机质质量分数/ (g·kg ⁻¹)	细根生物量/ (g·m ⁻²)	土壤团聚体 含量/%
SF	1.22	53.96	22.24	31.72	20.68	112.16	52.04
SP	1.24	53.21	18.06	35.15	19.32	99.77	48.25
CB	1.35	49.06	18.55	30.51	18.25	81.21	46.72
CH	1.31	50.57	16.52	34.05	18.95	90.28	45.56
GC	1.38	47.92	12.02	35.90	16.34	51.04	43.48
CK	1.40	47.17	11.21	35.96	15.42	45.59	36.35

1.2.4 不同重现期暴雨历时计算及产流可能性预测

根据鲁山县气象局 1953—2009 年的降雨资料,按年最大值法选样,用指数分布函数进行频率拟合,得出重现期与降雨强度的关系,应用我国通用的设计暴雨公式通过最小二乘法得出暴雨历时曲线。通过比较土壤稳渗率与暴雨历时曲线对应的 10 min 雨强,预测地表径流发生的可能性^[3]。

1.3 数据分析

土壤入渗和土壤各理化指标采用平均值,各土壤理化因子对土壤入渗参数的影响以及暴雨历时曲线拟合所涉及的统计分析均通过 SPSS 16.0 统计软件完成,运用 SigmaPlot 11.0 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型表层土壤入渗率比较

不同植被恢复类型的土壤入渗过程可分为 3 个阶段。(1) 瞬变阶段(0—20 min):各种植被类型渗透初期,土壤渗透率变化幅度较大;(2) 渐变阶段(20—40 min):各植被类型的土壤渗透率逐渐变小;(3) 稳渗阶段(40 min):主要发生在 40 min 以后,入渗率趋于稳定(图 1)。初始入渗率、稳渗率和前 60 min 入渗总量在不同植被恢复类型中均呈现同样的趋势:栓皮栎次生林>栓皮栎人工林>刺槐人工林>侧柏人工林>灌丛>裸地。栓皮栎次生林的初始入渗率、稳渗率和前 60 min 入渗总量最高,分别为 8.1 mm/min,4.8 mm/min 和 319.1 mm,分别是裸地对照的 4.3 倍,12 倍和 7.2 倍(图 2)。

2.2 不同植被类型表层土壤入渗的影响因素

选取土壤容重(X_1)、总孔隙度(X_2)、非毛管孔隙度(X_3)、毛管孔隙度(X_4)、有机质质量含量(X_5)、细根生物量(X_6)、水稳性团聚体含量(X_7)作为影响土壤入渗的因子,选取初始入渗率(Y_1)、稳渗率(Y_2)、前 60 min 入渗量(Y_3)作为表征土壤入渗特征的因子,

进行相关性分析(表 3),结果表明:土壤各入渗参数除与毛管孔隙度不相关外,与土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量、细根生物量、水稳性团聚体含量均显著相关($p<0.05$),其中稳渗率和前 60 min 入渗量与土壤容重和总孔隙度极显著相关($p<0.01$)。为消除各影响因子之间的交互作用和多重共线现象,以 3 个土壤入渗指标分别作为因变量,7 个影响土壤入渗的因子作为自变量,进行逐步回归分析,得到土壤水分初渗率、稳渗率和前 60 min 入渗量的主导因子方程(表 4),结果均达到了极显著水平,说明总孔隙度和土壤容重是影响土壤入渗特征的主导因子。

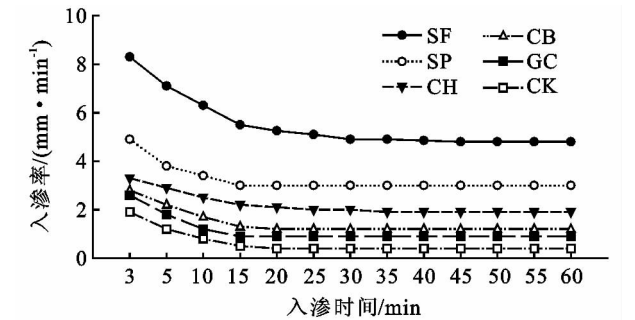


图 1 不同植被恢复类型土壤入渗过程比较

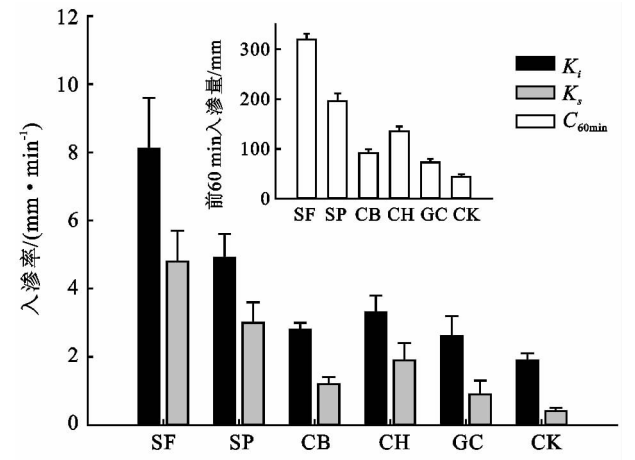


图 2 不同植被恢复类型初渗率(K_i)、稳渗率(K_s)和前 60 min 入渗量(C_{60min})比较

表 3 土壤入渗性能与影响因素相关系数

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Y_1	-0.909**	0.909**	0.836*	-0.422	0.854*	0.837*	0.828*
Y_2	-0.958**	0.958**	0.863*	-0.411	0.907**	0.897*	0.859*
Y_3	-0.947**	0.947**	0.901**	-0.442	0.889*	0.853*	0.861*

注：* $P<0.01$, * $P<0.05$ 。

表 4 土壤渗透性主导因子方程

主导因子方程	F	R	P
$Y_1=0.741X_2-33.351$	18.915	0.012	0.909
$Y_2=29.796-21.086X_1$	44.144	0.003	0.958
$Y_3=34.31X_2-1583.126$	34.476	0.004	0.947

2.3 不同植被类型土壤稳渗率与不同重现期暴雨强度的关系

由图 3 可知,栓皮栎次生林土壤表层的稳渗率最高,大于 10 a 一遇的暴雨 10 min 雨强,栓皮栎人工林土壤表层的稳渗率次之,大于 1 a 一遇的暴雨 10 min 雨强。其它植被类型表层土壤的稳渗率较低,均低于 1 a 一遇的 10 min 暴雨雨强,很容易产生暴雨径流。

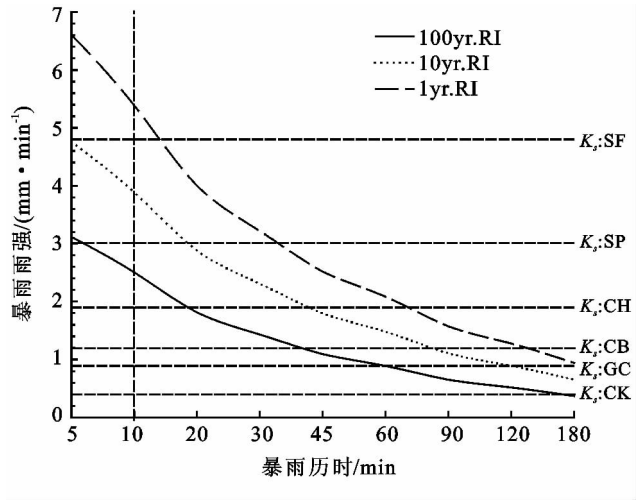


图 3 不同植被类型表层土壤稳渗率与不同重现期暴雨强度比较

注:1, 10, 100 yr. RI 指 1 a,10 a,100 a 一遇的暴雨曲线; K_s 代表土壤稳渗率,灰虚线代表 10 min 雨强参考线。

3 结论与讨论

3.1 不同植被恢复类型土壤入渗率差别较大

选择初始入渗率、稳渗率和前 60 min 入渗量作为表征土壤入渗特征的指标,不同植被恢复类型的入渗特征指标均呈现出同样的趋势:栓皮栎次生林>栓皮栎人工林>刺槐人工林>侧柏人工林>灌丛>裸地。土壤水分入渗是一个复杂的水文过程,与降雨地表径流、表土结构、容重密切相关^[16-17],本研究表明:土壤各入渗参数除与毛管孔隙度不相关外,与土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质含量、细根生物量、水稳性团聚体含量均显著相关($p<0.05$)。逐步

回归分析表明,土壤容重和总孔隙度是影响土壤入渗性能的主导因子。栓皮栎次生林表层土壤受干扰小,根系发达,土壤有机质、水稳性团聚体含量、非毛管孔隙度高,有利于提高土壤总孔隙度,降低土壤容重,进而提高土壤水分入渗性能^[6,9,18-20]。在人工林恢复模式中,乡土树种栓皮栎人工林下植被相对丰富,根系发达,土壤总孔隙度较高,土壤容重较低,因而入渗率相对较高,而侧柏和刺槐人工林和灌丛林下植被组成简单,根系不发达,总孔隙度小,土壤容重相对栓皮栎次生林和人工林较高,所以入渗性能相对较低^[18]。裸地土壤受人类干扰大,较为紧实、根系不发达、土壤团聚体和有机质含量少,孔隙性差,因此入渗能力最低^[7]。许多研究表明,土壤入渗率与土壤容重呈显著负相关^[13,16-17],与本研究的结果一致。土壤容重越大,土壤越紧实,孔隙度越小,透水、透气性越差,入渗率就越低。

从土壤入渗的时间过程曲线分析,6 种植被类型均呈现出相似的规律,即入渗率的变化过程分为瞬变阶段(0—20 min)、渐变阶段(20—40 min)和稳定阶段(40 min 后)。瞬变阶段土壤入渗速率主要受土壤表面分子力的作用,入渗率与土壤初始含水量关系密切,渐变阶段主要受土壤毛管力的作用;稳定阶段土壤水分已经完全充满土壤孔隙,水分主要在重力的作用下做渗透运动,最后达到稳定状态^[16]。以往研究中多采用稳渗率来比较不同土地利用类型的土壤渗透性能,而忽视了初渗率^[3-4]。如在一次降水,特别是短历时降水中,土壤初渗率越大,降水产生的地表径流越少,土壤拦蓄降水的作用就越强,此时的初渗率则更能反映土壤的渗透性能。

3.2 天然次生林与乡土树种人工林地表径流量较其它植被类型小

很多学者通过降雨历时曲线与稳渗率的比较,预测地表径流产生的可能性^[3-4,11]。栓皮栎次生林由于林下土壤受人为干扰较小,土壤容重较低,总孔隙度高,土壤团粒结构发育好,根系发达,有机质含量高,所以入渗率最高,能抵御 10 a 一遇的暴雨,不容易产生地表径流^[3-4,11];栓皮栎人工林由于是乡土树种,林下植被丰富,对土壤的改善作用大于刺槐和侧柏人工林,入渗率较高,所以能够抵御 1 a 一遇的暴雨而很少

产生地表径流。而侧柏、刺槐人工林和灌丛林下植被组成简单,根系不发达,土壤渗透性与栓皮栎次生林和人工林相比较差,低于1 a一遇的暴雨10 min雨强,易产生地表径流。裸地受人为干扰最大,土壤紧实,入渗率最低,最容易产生地表径流^[6,13,17]。

在伏牛山东麓植被恢复建设中,应保护现有的天然次生林,其林下土壤具有较强的入渗能力。另外,在人工林恢复中,应首先选择乡土树种,其林下可以吸引更多的乡土植被定居,逐渐形成与自然植被相近的群落结构,促进林下土壤恢复,增加土壤入渗能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等.野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究[J].水土保持学报,2005,19(2):5-8.
- [3] Price K, Jackson C R, Parker A J. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA[J]. Journal of Hydrology,2010,383(3/4):256-268.
- [4] Zimmermann B, Elsenbeer H. Spatial and temporal variability of soil saturated hydraulic conductivity in gradients of disturbance[J]. Journal of Hydrology,2008,361(1/2):78-95.
- [5] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自然资源学报,2001,16(5):427-432.
- [6] 杨永辉,赵世伟,雷廷武,等.宁南黄土丘陵区不同植被下土壤入渗性能[J].应用生态学报,2008,19(5):1040-1045.
- [7] 张治伟,朱章雄,王燕,等.岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素[J].农业工程学报,2010,26(6):71-76.
- [8] 闫东锋,杨喜田.豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):43-50.
- [9] 赵锦梅,张德罡,刘长仲.东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响[J].自然资源学报,2012,27(3):422-429.
- [10] 刘洁,李贤伟,纪中华,等.元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J].生态学报,2011,31(8):2331-2340.
- [11] Hassler S K, Zimmermann B, van Breugel M, et al. Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics[J]. Forest Ecology and Management,2011,261(5):1634-1642.
- [12] 杨三平,李志华.鲁山县荒山治理开发模式及成效[J].中国水土保持,2006(12):54-54.
- [13] Ren L, Lai J. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation[J]. Soil Science Society of America Journal,2007,71(6):1667-1675.
- [14] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Environments,2006,64(1):77-96.
- [15] Silver W L, Thompson A W, McGroddy M E, et al. Fine root dynamics and trace gas fluxes in two lowland tropical forest soils[J]. Global Change Biology,2005,11(2):290-306.
- [16] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:126-128.
- [17] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [18] 彭亿,李裕元,李忠武,等.红壤坡地生态系统土壤入渗特征比较研究[J].水土保持研究,2009,16(6):205-209.
- [19] 刘建立,王彦辉,程丽莉,等.六盘山北侧不同立地土壤的蓄水性能和渗透性研究[J].水土保持研究,2009,16(3):61-64.
- [20] 喻明美,谢正生.广州市白云山五种森林类型的土壤渗透性研究[J].水土保持研究,2011,18(1):153-156.