

重庆市四面山人工林土壤持水与入渗特性

王伟¹, 张洪江¹, 杜士才², 李根平², 古德洪², 韩西远²

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 重庆市林业局, 重庆 401147)

摘要: 通过土壤持水量和水分入渗速率的测定,对重庆市四面山 4 种人工林(杉木 × 马尾松针叶林、石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香阔叶林、石栎 × 木荷阔叶林、杉木 × 马尾松 × 木荷针阔林)土壤层的水文特征进行分析评价。结果表明,针阔混交林土壤饱和持水量最高,为 314.98 mm;阔叶林其次,为 301.26 mm 与 290.26 mm;针叶林最小,为 237.94 mm。分别较荒地高 44.93%,38.61%,33.72%和 9.48%。石栎 × 木荷阔叶林土壤水分入渗速率最快,初渗速率为 25.35 mm/min,稳渗速率为 3.97 mm/min,平均入渗速率为 5.48 m/min。灰关联评价结果显示,该区两种阔叶混交林均具调蓄涵养最大日降雨的能力,石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香阔叶林改良土壤持水性能效果显著,石栎 × 木荷阔叶林土壤水分入渗能力有明显提高。

关键词: 人工林;土壤持水量;土壤水分入渗;灰关联评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)03-0113-05

中图分类号: S715.3

Soil Water Holding Capacities and Infiltration Characteristics of Typical Plantations in Simian Mountain of Chongqing Municipality

WANG Wei¹, ZHANG Hong-jiang¹, DU Shi-cai², LI Gen-ping², GU De-hong², HAN Xi-yuan²

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

and Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of

the MOE, Beijing 100083, China; 2. Chongqing Forestry Agency, Chengqing 401147, China)

Abstract: Soil water-holding and infiltration parameters were measured in the research on soil hydrological processes for four different plantations, which were *Cunninghamia lanceolata* × *Pinus massoniana*, *Lithocarpus glaber* × *Schima superba* × *Cinnamomum camphora* × *Liquidambar formosana*, *Lithocarpus glaber* × *Schima superba*, and *Cunninghamia lanceolata* × *Pinus massoniana* × *Schima superba*, in Simian mountain of Chongqing City. Results indicated that the saturated soil water holding capacity in mixed broadleaf-conifer forest was the maximum of 314.98 mm; broadleaf forests, 301.26 mm and 290.26 mm; and coniferous forest, the minimum of 237.94 mm. The values were 44.93%, 38.61%, 33.72%, and 9.48% higher than those in barren land, respectively. Soil infiltration rate in *Lithocarpus glaber* × *Schima superba* broadleaf forest was maximum, with the initial rate of 25.35 mm/min, the stable rate of 3.97 mm/min, and the averaged rate of 5.48 mm/min. The grey relational grade analysis indicates that the two different mixed broadleaf forests are able to adjust and conserve maximal daily rainfall. Broadleaf forest mixed by *Lithocarpus glaber* × *Schima superba* × *Cinnamomum camphora* × *Liquidambar formsana* has excellent soil water-holding capability, while broadleaf forest mixed by *Lithocarpus glaber* × *Schima superba* has strong soil infiltration efficiency.

Key words: plantation; soil water-holding capacity; soil infiltration; grey relational grade analysis

森林是陆地生态系统的重要组成部分,它具有较强的水源涵养和水土保持功能。土壤是林木的载体,是发挥其主要功能的主要活动层,降水经林冠和地被物截

持后在土壤中进行第 3 次分配。土壤持水与水分入渗作为林地土壤的主要水文过程,反映了林地涵养水源和水土保持功能,土壤通过渗透和储存降雨影响着

收稿日期:2008-07-15

修回日期:2008-10-17

基金项目:国家自然科学基金项目“长江三峡花岗岩地区优先流运动机理研究”(40771042); 国家林业科技支撑计划课题“三峡库区低山丘陵地区水土保持型植被建设技术试验示范”(2006BAD03A1304); 国家林业局“948 项目”森林系统水文生态效益监测与模拟技术”(2006-4-26)资助

作者简介:王伟(1983—),男(汉族),河南省郑州市人,在读博士生,主要研究方向为水土保持与森林水文。E-mail:vane_bjfu@126.com。

通信作者:张洪江(1955—),男(汉族),河北省易县人,教授,博士生导师,主要研究土壤侵蚀与流域管理。E-mail:zhanghj@bjfu.edu.cn。

森林生态系统水量平衡以及地表径流的形成和特征^[1-3]。因此,林地土壤层持水和入渗特性成为森林生态系统研究中的重要内容。

国内外关于林地土壤持水和入渗特性的研究已有大量报道^[4-8]。在长江三峡低山丘陵地区的研究,多集中于天然林地土壤水分参数的定量分析与过程模拟方面,对人工林地的研究相对较少。本文通过对重庆四面山地区现有的 4 种主要类型人工林土壤持水与水分入渗能力定量分析,依据灰关联法对不同人工林土层的水文特征进行评价,为探索适合该区水土保持型与水源涵养型植被建设提供理论与实践指导。

1 研究区概况

研究区位于重庆市四面山张家山林区,其气候属北半球亚热带季风性湿润区,温暖湿润,雨量充沛,无霜期为 285 d。多年平均气温 13.7℃,月平均最高气温为 8 月份,达 31.5℃,月平均最低气温为 1 月份,为 -5.5℃。多年平均降雨量 1 522.3 mm,日最大降雨量 160.5 mm,雨季集中在 5—9 月,占年平均降雨量的 62.17%。年平均日照时数为 1 082.7 h,生长季 5—9 月份的日照时数约为全年日照时数的 64%。区内林地土壤主要由白垩纪夹组砖红色长石、石英砂岩夹砖红色、紫红色粉砂岩等风化残积物、冲积物发育而成,主要土壤类型有:黄棕壤、黄壤等。该区地势较陡,土层厚度一般在 10~70 cm 之间,多呈微酸性至酸性且抗侵蚀能力较差。1999 年开始在伐林地内实施人工造林和封山育林相结合的植被恢复与重建,主要栽植乔木为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、石栎(*Lithocarpus glaber*)、木荷(*Schima superba*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、枫香(*Liquidambar formosana*)等。

2 研究内容与方法

2.1 样地设置与外业调查

在研究区内选择杉木×马尾松针叶混交林、石栎×木荷×香樟×枫香阔叶混交林、石栎×木荷阔叶混交林、杉木×马尾松×木荷针阔混交林 4 种人工林分别设置试验样地,依次编号为 C₁—C₄,同时在林地周边选择伐林后未进行人工植被恢复的荒地(编号为 CK)作为对照,各样地面积均为 25 m×40 m。在样地内调查乔木的种类、株数、胸径、冠幅、高度和郁闭度等指标,每个样地中按对角线等距离设置 5 个 2 m×2 m 灌木样方和 10 个 1 m×1 m 草本样方,记录灌木和草本植物的种类、高度、株(丛)数和盖度。另设

置 10 个 0.20 m×0.25 m 的枯落物样方,分层采集不同分解程度的枯落物样品,记录各层厚度以计算枯落物储量。

在各样地内开挖深度为 60 cm 的土壤剖面,将土壤剖面分为 3 层进行土壤样本采集,每层厚度为 20 cm。采用环刀法分层取样,以备室内测定土壤容重、孔隙度等土壤物理参数。同时采集各层土壤样本,以备测定土壤有机质、pH 值等土壤化学指标。采用双环法进行土壤水分入渗速率测定。双环测渗筒外环直径为 22 cm,内环直径为 10.5 cm,内、外环高度均为 25 cm。实验中,将双环测渗筒打入土壤内约 10 cm 深度处,保持内外环 0.05 m 的入渗水头均匀供水,记录相应时间内环的水分入渗量,直至达到稳渗时为止。

2.2 土壤持水量计算

土壤持水量可分为毛管孔隙的吸持持水量和非毛管孔隙的滞留持水量,二者所持水量之和为土壤饱和持水量。根据各层土壤厚度与孔隙状况,推算土壤各类孔隙的持水量 W ^[9]:

$$W = 1\,000eh \quad (1)$$

式中: e ——孔隙度; h ——计算土层厚度(m); W ——单位面积土壤的持水量(mm)。

2.3 土壤水分入渗模拟

自 20 世纪初以来,许多描述土壤水分入渗过程的模型被提出,常用的有 Kostiakov 模型(1932)、Horton 模型(1940)和 Philip 模型(1957)等。本研究采用以上 3 种模型分别对土壤水分入渗过程进行模拟,确定土壤的初渗速率、稳渗速率和平均入渗速率大小。各模型具体形式为^[10]

(1) Kostiakov 模型:

$$i = Bt^{-n} \quad (2)$$

式中: i ——渗透速率; t ——入渗时间; B 与 n ——拟合参数。

(2) Horton 模型:

$$i = i_c + (i_0 - i_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: i ——渗透速率; t ——入渗时间; i_0 ——初渗速率; i_c ——稳渗速率; k ——经验参数。

(3) Philip 模型:

$$i = \frac{1}{2}st^{-\frac{1}{2}} + A \quad (4)$$

式中: i ——渗透速率; t ——入渗时间; s 和 A ——与入渗特性有关的拟合参数。

2.4 人工林水文特征评价

以灰关联分析法对 4 种人工林土壤持水能力、入渗特性及土壤层的整体水文特征分别进行评价。将

描述土壤物理性质的5项参数:土壤毛管持水量(x_1)、非毛管持水量(x_2)、土壤初渗速率(x_3)、稳渗速率(x_4)和平均入渗速率(x_5)作为评价指标,选取 $[x_1, x_2]$ 对土壤持水性能进行评价,选取 $[x_3, x_4, x_5]$ 对土壤渗透性能进行评价,选取 $[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]$ 对土壤层的整体水文特征进行评价。

3 结果与分析

3.1 土壤持水能力

土壤持水能力与土壤厚度、容重及孔隙状况等有关。该区人工林立地条件、枯落物组成分解状况和地

下根系生长发育不同,使土壤物理性质具有一定差异。各人工林基本状况见表1。土壤容重由表层到底层均呈增加趋势,表层土壤较松,这与林地表面枯枝落叶储量及其分解速度有关。

土壤孔隙度基本上随土壤深度的加深而减小,这主要与林木根系的分布状况、土壤有机质和团聚体数量有关。土壤持水量是评价林地调节水分能力的重要指标。土壤非毛管孔隙能够较快地使滞留在地表的水分下渗,毛管孔隙能够将下渗的部分水分在土壤中储存起来,起到滞缓地表径流峰值,调节降雨产流过程的作用^[11](图1)。

表1 四面山人工林基本状况

林地类型	立地条件			土壤理化参数					枯落物储量/(t·hm ⁻²)	
	海拔/m	坡向	坡度/(°)	土层深度/cm	容重/(g·cm ⁻³)	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	有机质/%	总储量	分解层
杉木×马尾松 针叶混交林(C ₁)	1 160	东北	36.0	0—20	1.002	39.56	5.16	2.99	64.47	52.76
				20—40	1.059	34.63	8.89	1.39		
				40—60	1.229	23.41	7.32	0.66		
石栎×木荷×香樟× 枫香阔叶混交林(C ₂)	1 165	西南	38.5	0—20	0.951	37.60	16.72	5.05	191.82	186.80
				20—40	1.042	30.47	16.16	1.01		
				40—60	1.106	35.61	14.07	0.20		
石栎×木荷 阔叶混交林(C ₃)	1 166	东北	36.0	0—20	0.942	36.21	13.62	4.76	246.94	227.76
				20—40	1.167	32.56	13.03	1.77		
				40—60	1.307	42.16	7.73	0.82		
杉木×马尾松×木荷 针阔混交林(C ₄)	1 170	西北	28.8	0—20	1.005	43.43	12.64	5.43	102.79	87.99
				20—40	1.152	47.39	7.68	2.21		
				40—60	1.452	35.09	11.26	0.20		
荒地(CK)	1 183	西北	31.2	0—20	1.218	32.63	9.18	2.22	—	—
				20—40	1.449	30.82	4.56	0.98		
				40—60	1.661	27.13	4.35	0.10		

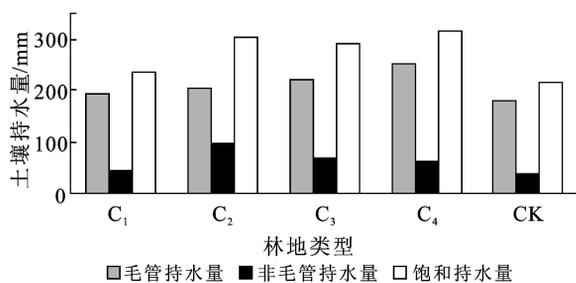


图1 不同人工林60 cm土壤持水量

C₁ 杉木×马尾松针叶混交林; C₂ 石栎×木荷×香樟×枫香阔叶混交林; C₃ 石栎×木荷阔叶混交林; C₄ 杉木×马尾松×木荷针阔混交林; CK 荒地。下同。

从图1可见,由于孔隙发育状况不同,不同人工林土壤持水量存在一定差异。各人工林土壤饱和持水量由高到低分别为C₄(314.98 mm), C₂(301.26 mm), C₃(290.26 mm)和C₁(237.94

mm)。林地土壤饱和持水量均高于荒地,分别较荒地高44.93%,38.61%,33.72%和9.48%。在95%置信度下,经单因素方差检验,C₂,C₃,C₄林地与荒地饱和持水量差异显著,表明针阔混交林和阔叶混交林能有效提高土壤的持水能力。而针叶混交林因枯落物储量小且叶片富含难以分解的单宁等物质,土壤有机质含量低,对土壤持水性能改善效果不明显。

4种人工林土壤毛管持水量与非毛管持水量均分别高于荒地。C₄林地土壤毛管持水量最高,为251.82 mm; C₁林地最低为195.2 mm,分别较荒地高39.00%和7.75%。C₄林地对土壤吸持水分能力改善作用较强。

C₂林地土壤非毛管持水量最大为93.9 mm,较荒地高159.54%,C₃与C₄林地土壤非毛管滞水能力

也较荒地高 90.05 % 与 74.57 % , C₁ 林地土壤非毛管持水量较差, 仅为 42.74 mm。C₂ 为石栎、木荷、香樟及枫香 4 种阔叶树种的混交林, 其浅层土壤质地松散, 有机质含量高, 根系发育速度快且分布范围广, 有利于土壤非毛管孔隙的形成, 土壤滞留持水的能力较强。

3.2 土壤水分入渗特性

3.2.1 水分入渗过程模拟 土壤水分入渗是体现土壤水文特征的重要方面, 也是土壤物理性状的重要参

数。土壤水分入渗特性影响地表产流量, 直接影响到林地土壤的侵蚀状况。水分入渗性能越好, 地表径流产量就会越少, 土壤的流失量也会相应减少^[12]。

通过分析水分入渗数据, 得到土壤渗透模型参数与相关系数(见表 2), 模型计算结果显示, 这 3 种土壤渗透模型中 Horton 模型的相关系数最大, 相关系数平均值为 0.950, 可以判断 Horton 模型对实测渗透数据拟合程度最高, 能够更接近地模拟各标准地土壤水分渗透实际过程, 在本研究中具有良好的适用性。

表 2 不同人工林土壤入渗模型参数与相关系数

林地类型	Kostiakov 模型			Horton 模型				Philip 模型		
	B	n	R	i ₀	i _c	k	R	s	A	R
杉木 × 马尾松	0.035	0.398	0.930	12.500	2.460	0.031	0.943	34.177	2.031	0.871
石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香	0.045	0.281	0.917	17.417	5.350	0.021	0.921	45.210	5.578	0.875
石栎 × 木荷	0.218	0.776	0.928	37.917	1.967	0.043	0.934	113.840	1.465	0.901
杉木 × 马尾松 × 木荷	0.043	0.552	0.962	10.083	1.486	0.030	0.986	35.566	0.670	0.850
荒地	0.130	0.606	0.929	21.700	2.325	0.019	0.968	80.672	2.275	0.706

3.2.2 水分入渗速率 经拟合计算后, 不同人工林地土壤水分入渗速率见图 2。结果表明, 4 种林地土壤水分初渗速率、平均入渗速率和稳渗速率均高于荒地。C₃ 林地土壤水分初渗速率最大为 25.35 mm/min, 其次为 C₄ (22.5 mm/min) 与 C₂ (21.56 mm/min), C₁ 林地最低为 13.89 mm/min。这主要与表层土壤的容重与非毛管孔隙度有关, 非毛管孔隙与松散的表层土壤能够引导水分迅速下渗。土壤稳渗速率由高到低依次为, C₃ (3.97 mm/min), C₂ (3.53 mm/min), C₄ (2.54 mm/min) 和 C₁ (2.48 mm/min)。林地土壤平均渗透速率变化与稳渗速率基本相一致, C₂ 林地最高为 6.18 mm/min, 依次为 C₃ (5.48 mm/min), C₄ (5.45 mm/min), C₁ (4.02 mm/min)。经单因素方差检验, C₂, C₃, C₄ 林地与荒地土壤水分平均入渗速率差异显著, C₁ 林地平均入渗速率与荒地无显著差异。

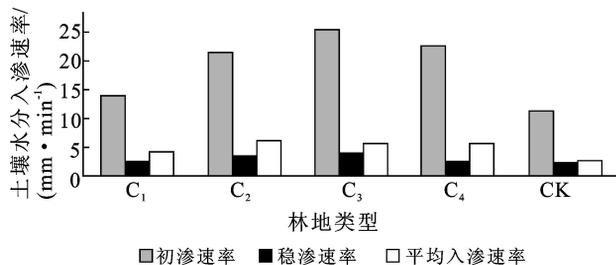


图 2 不同人工林土壤水分入渗速率

石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香和石栎 × 木荷两种阔叶混交林具有较好的水分入渗性能。阔叶混交林土

壤能持续快速地排导地表积水, 林地土壤容水量大, 能够提供较好的径流调节空间, 能有效地减少地表径流产量, 从而减轻径流对地表土壤的冲刷能力。

3.3 人工林水文特征评价

灰色关联分析法是揭示小样本间相关程度的一种有效的定量分析方法, 该方法基于行为因子序列微观或宏观几何接近, 分析和确定因子对主行为的贡献度, 以评价主行为功能大小。根据灰关联理论, 选择多个参数对土壤持水性能、水分入渗特性和土壤层整体水文特征分别进行综合评价, 评价结果见表 3。

表 3 不同人工林土壤水文特征灰关联度

林地类型	灰关联度		
	持水性能	入渗特性	水文特征
杉木 × 马尾松	0.469 1	0.416 7	0.450 8
石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香	0.817 6	0.772 1	0.798 7
石栎 × 木荷	0.627 7	0.896 0	0.792 5
杉木 × 马尾松 × 木荷	0.742 1	0.610 9	0.675 3
荒地	0.428 1	0.343 1	0.389 4

土壤持水性能灰关联分析结果表明, 4 种人工林土壤相比荒地吸持和滞留水分的能力均有所提高的, 土壤涵养水源能力有一定改善。其中石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香阔混交林土壤持水性能灰关联系数最大, 因此该阔叶林土壤的水源涵养能力提高最为显著。这与刘霞^[4]、王玉杰^[5]和王兵^[6]等人在不同地区林地土壤持水能力的研究结果基本吻合。其原因可能是木荷、香樟等阔叶植物枯落物储量且叶片中富含 Ca 和 N 元素, 腐殖化的过程中能够形成大量的 Ca²⁺

和含 N 离子,能够促进土壤中的胶体凝聚和提供大量的腐殖质作为胶结剂,同时叶片中含有大量灰分元素,形成的腐殖质大部分呈中性,土粒易胶结而形成有结构的土壤。根据单因素方差分析结果,阔叶林枯落物储量与土壤有机质含量均较针叶林有显著差异。阔叶植物根系生长迅速,腐化形成的根孔能够形成大量非毛管孔隙,可提高土壤的滞留持水能力。虽然针叶植物根系生长过程中,会产生大量缠绕的菌丝,能充分分割挤压土壤,为土壤结构的改善提供了外力作用,但菌丝会填充根孔,不利于非毛管孔隙的形成,在一定程度上影响了土壤滞留持水能力的提高。

土壤水分入渗特性灰关联分析结果表明,各人工林对土壤入渗特性的改良均具一定效果,其中石栎 × 木荷与石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香两种阔叶混交林对土壤入渗特性改良效果最为显著。针阔混交林虽具有一定的土壤结构,但是其中的针叶树木生长缓慢,凋落物富含单宁等物质,影响凋落物的分解速率,且其根部易形成外生菌根,菌根的遗体在土壤层中积累,形成具有斥水性的土壤菌丝网层,妨碍水分入渗,因此针叶植物对土壤入渗特性的改良作用不显著。另一方面阔叶混交林土壤根系含量高,土壤非毛管孔隙发育较好,能够为水分提供更多的快速运移通道,也从一定程度上提高了其水分入渗能力。

4 种人工林土壤层的整体水文特征分析结果表明,阔叶混交林具有较好的涵养水源和水土保持功能,其次为针阔混交林,而针叶林土壤水文功能略差。经人工恢复的林地土壤水文功能相对荒地均有所改善。该区有记录的日最大降雨量为 160.5 mm,而两种人工阔叶混交林的毛管持水量分别为 207.36 mm 与 221.86 mm,总蓄水容量为 172.96 mm 和 170.10 mm,土壤初渗速率也达到 21.56 mm/min 和 25.35 mm/min,这表明两种模式下的阔叶混交林均有调蓄涵养该地区最大日降雨的能力。

4 结论

重庆四面山 4 种人工林土壤持水与入渗能力较荒地均有一定提高。杉木 × 马尾松 × 木荷针阔混交林土壤饱和持水量最大,为 314.98 mm;两种阔叶混交林其次,为 301.26 mm 与 290.26 mm;针叶混交林最小,为 237.94 mm。分别比荒地高 44.93%,38.61%,33.72% 和 9.48%。Horton 水分入渗模型对各人工林地入渗过程拟和的相关系数最大,平均值为 0.950,在本研究中具有良好的适用性。

灰关联评价结果,显示阔叶混交林对土壤的改良效果最优,而针叶林改良效果不明显,主要为树木生

理特点、枯落物组成分解状况等因素差异所致。该区两种阔叶人工林均具调蓄涵养最大日降雨的能力,石栎 × 木荷 × 香樟 × 枫香阔叶混交林对土壤持水性能的改良效果显著,石栎 × 木荷阔叶混交林土壤入渗能力较强。

本文对四面山地区主要人工林地的土壤持水和入渗性能进行了量化分析,依靠灰关联法对不同人工林地土壤层水文功特征行了评价。在实际植被恢复过程中,应依据研究结果,为不同功能要求的植被恢复区选择合适的植物配置模式。研究中没有对造成林地土壤差异的因子进行系统研究,因此今后还需要对不同植被措施下影响土壤结构和入渗特性的因子及其作用机理进行更加深入的探讨。

[参 考 文 献]

- [1] Sharma S K, Sastry G. Impact of various land uses on the infiltration in Doon Valley[J]. Indian Journal of Soil Conservation, 1998, 26 (1): 17-18.
- [2] Zwieniecki M A, Newton M. Water holding characteristics of meta-sedimentary rock in selected forest ecosystems in Southwestern Oregon [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1578-1582.
- [3] Andr é Iroumé, Huber Anton, Schulz Kurt. Summer flows in experimental catchments with different forest covers [J]. Journal of Hydrology, 2005, 300 (1): 300-313.
- [4] 刘霞,张光灿,李雪蕾,等. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与持水特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(6): 1-5.
- [5] 王兵,魏文俊,冷冷. 宁夏六盘山不同森林类型土壤持水与入渗研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2006, 27(3): 1-5.
- [6] 王玉杰,王云琦. 重庆缙云山典型林分林地土地土壤入渗特性研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 193-194, 256.
- [7] 余新晓,赵玉涛,张志强,等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2004, 14(1): 15-19.
- [8] 雷孝章,曹叔尤,代永波. 松柏林分对土壤入渗的调蓄作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(6): 20-23.
- [9] Sampson D A, Allen H L. Regional influences of soil available water-holding capacity and climate and leaf area index on simulated loblolly pine productivity [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 124 (1): 1-12.
- [10] Hillel D. Environmental soil physics [M]. New York: Academic Press, 1998, 391-393.
- [11] 齐实,王云琦,孙阁,等. 三峡库区森林小流域森林理水调洪功能模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 42-51.
- [12] 何凡,张洪江,史玉虎,等. 长江三峡花岗岩坡面管流与渗流实验研究[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 10-13, 44.