

## 缙云山典型林分森林土壤持水与入渗特性

王云琦 王玉杰

(北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室)

**摘要:**该文根据 2004 年 8 月的实测数据,对三峡库区重庆缙云山 4 种典型林分(马尾松阔叶混交林、常绿阔叶林、楠竹林和常绿阔叶灌丛)森林土壤的持水和入渗特性进行研究.结果表明,4 种典型林分森林土壤的非毛管持水量是农地的 1.5~2 倍;除楠竹林外,各林分土壤的有效蓄水容量为农地的 1.1~1.9 倍;各林分土壤持水量为:常绿阔叶灌丛(454.1 mm) > 马尾松阔叶混交林(327.6 mm) > 常绿阔叶林(292.5 mm) > 楠竹林(218.9 mm); 4 种典型林分森林土壤稳渗率的顺序为:常绿阔叶灌丛(10.169 mm/min) > 楠竹林(0.927 mm/min) > 马尾松阔叶混交林(0.743 mm/min) > 常绿阔叶林(0.551 mm/min) > 农地(0.253 mm/min); 从土壤持水性能和入渗性能来看,常绿阔叶灌丛的水源涵养和理水调洪功能远好于其他林分土壤,而马尾松阔叶混交林优于常绿阔叶林,楠竹林较差.

**关键词:**三峡库区, 土壤持水量, 入渗特性, 理水调洪

**中图分类号:** S715.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1522(2006)03-0102-07

WANG Yun-qi; WANG Yu-jie. **Soil water retaining capacity and infiltration property of typical forests in the Jinyun Mountain.** *Journal of Beijing Forestry University* (2006)28(3) 102-108 [Ch, 11 ref.] Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

In order to evaluate hydrological functions of different vegetation communities in the Three Gorges Region, the results of a study in August 2004 on the water retaining capacity and infiltration property of soil of four typical forest stands (mixed *Pinus massoniana*-deciduous forests, evergreen broadleaved forests, *Phyllostachys pubescens* forests and evergreen broadleaved shrub forests) in the Jinyun Mountain of the Three Gorges Region, Chongqing were presented. Study showed that the non-capillary water retaining capacity was 1.5-2 times as high as that of arable farmland soil and the effective water storage of the soil was 1.1-1.9 times as high, the exception was the soil of *P. pubescens* forests. For the four forest stands, the water retaining capacities of the soil were ranked as follows: evergreen broadleaf shrub forests (454.1 mm) > mixed *P. massoniana*-deciduous forests (327.6 mm) > evergreen broadleaf forests (292.5 mm) > *P. pubescens* forests (218.9 mm). The stable infiltration rates of the soil of four typical forest stands were ranked in the following order: evergreen broadleaf forests (10.169 mm/min) > *P. pubescens* forests (0.927 mm/min) > mixed *P. massoniana*-deciduous forests (0.743 mm/min) > evergreen broadleaved forests (0.551 mm/min) > arable farmland (0.253 mm/min). In general, the soil of the evergreen broadleaved shrub forests has the best hydrological function in soil water retention capacity and infiltration property. These characteristics are better in the mixed *P. massoniana*-deciduous forests than in the evergreen broadleaf forests, while the performance of the *P. pubescens* forests is worse in both capacities.

**Key words** the Three Gorges Region, soil water retaining capacity, soil water infiltration property, hydrological effects

收稿日期: 2005-05-25

http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(30571486)、国家林业局生态站资助项目(长江三峡库区森林生态站)。

第一作者: 王云琦, 博士生. 主要研究方向: 林业生态工程. 电话: 010-62349284 Email: wyunqi01@sohu.com 地址: 100083 北京林业大学水土保持学院.

责任编辑: 王玉杰, 博士, 教授. 主要研究方向: 土壤侵蚀、林业生态工程. 电话: 010-62337750 Email: wyujie@bjfu.edu.cn 地址: 同上.

重庆缙云山位于三峡工程库区尾端,拥有完整的亚热带常绿阔叶林群落类型,在一定程度上反映了中亚热带森林生态系统的天然本底,是研究森林涵养水源和理水功能的天然实验室. 本文依据2004年8月的实测数据对库区内典型植被类型下各森林土壤持水和入渗性能研究,以期对三峡库区的生态环境建设和植被恢复与保护提供一定的依据.

## 1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区,嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区(E106°22'、N29°45'). 最高处海拔951.5 m,山顶到山脚相对高差600 m. 缙云山的土壤以酸性(pH4.0~4.5)黄壤及水稻土为主,水平地带为典型的中亚热带生物气候,年均气温

13.6°C,年均降水量1 611.8 mm,年均蒸发量777.1 mm. 缙云山保护区内植物资源异常丰富,植被类型较多,有6个主要植被类型,分别为常绿阔叶林、暖性针叶林、竹林、常绿阔叶灌丛、亚热带灌草丛和水生植被. 主要优势树种为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、栲(*Castanopsis fargesii*)、华山松(*Pinus armandii*)、四川大头茶(*Gordonia acuminata*)和四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)等.

在该自然保护区内选取4个主要的林分类型:马尾松阔叶混交林、常绿阔叶林、楠竹林和常绿阔叶灌丛,对其森林土壤的持水和入渗特性进行研究,并以农耕地作为对照. 林分基本情况见表1.

表1 典型林分代表性标准地的基本情况

TABLE 1 Basic information of representative standard sites of typical forest stands

林分	立地因子			林型					枯落物	
	海拔/m	坡向	坡度/(°)	起源	龄级	郁闭度	下木盖度/%	地被物盖度/%	厚度/cm	贮量/(t·hm <sup>-2</sup> )
马尾松阔叶混交林	760	西北	16~25	天然	VI	0.90	40	30	3.5	31.57
常绿阔叶林	825	西北	26	天然	VI	0.90	40	20	3.4	58.90
楠竹林	800	西北	11	天然	V	0.85	10	80	1.4	29.11
常绿阔叶灌丛	860	西北	10	天然	V	0.95	60	50	4.5	86.85

## 2 研究内容与方法

### 2.1 土壤持水性能

采用铝盒烘干法按土壤自然剖面层次分层取样,测定土壤自然含水量,雨前含水量和土壤吸湿系数<sup>[1-2]</sup>;采用环刀法分层取样测定土壤容重,毛管孔隙度和总孔隙度<sup>[1-2]</sup>;采用压力薄膜仪实测土壤水分特征曲线<sup>[1-2]</sup>.

根据分层实测的各层孔隙度和土壤各层厚度逐层计算得不同林分土壤各类孔隙的持水量.

森林土壤各类孔隙持水量  $s$ :

$$s = eh \quad (1)$$

式中,  $e$  为孔隙度,  $h$  为计算土层厚度(mm).

由于土壤凋萎系数  $\theta_w$  一般很难直接测定,这里采用吸湿系数进行估计<sup>[1-2]</sup>:

$$\theta_w = 1.5 \theta_h \quad (2)$$

式中,  $\theta_h$  为吸湿系数.

土壤田间持水量采用土壤水分特征曲线中水吸力为0.1大气压所对应含水量<sup>[1-2]</sup>.

累积森林土壤蓄水容量  $I_M$ :

$$I_M = \sum h(\theta_c - \theta_w) \quad (3)$$

式中,  $\theta_c$ 、 $\theta_w$  分别为各层土壤田间持水量、各层土壤凋萎系数<sup>[3-4]</sup>.

森林土壤有效蓄水容量  $I_e$ :

$$I_e = \sum h(\theta_c - \theta_0) \quad (4)$$

式中,  $\theta_0$  为各层土壤自然含水量<sup>[3-4]</sup>.

### 2.2 土壤入渗性能

采用双环入渗,在内环使土壤表层保持4~5 cm 水层,不断补充渗入的水量并记时,试验至稳渗为止. 并用环刀分层取原状土样进行不同林分土壤各层入渗的测定. 由于各层土壤环刀入渗试验是在同一时间进行,所以未进行水温校正<sup>[5]</sup>. 采用以下入渗模型进行模拟.

1)考斯加柯夫公式

$$f = a't^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中,  $f$ 、 $a'$ 、 $t$  分别为入渗率、入渗系数、时间.

2)菲利普公式(Philip)

$$f = \frac{1}{2}st^{-\frac{1}{2}} + A \quad (6)$$

式中,  $s$ 、 $A$  分别为吸水率、稳渗率.

3)霍顿公式(Horton)

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (7)$$

式中,  $f_c$ 、 $f_0$ 、 $k$  分别为稳定入渗率、初始入渗率、常数.

4)幂函数回归

$$f = at^{-b} \quad (8)$$

式中,  $a$ 、 $b$  为常数.

同时,为分析土壤有机质对土壤持水和入渗性能的影响,采用重铬酸钾法测定有机质含量<sup>[2,6]</sup>.

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同林分土壤持水性能

##### 3.1.1 不同林分土壤持水量

土壤的理水调洪和水源涵养能力与土层厚度、有机质含量、非毛管孔隙率、最大持水量等有关<sup>[7-8]</sup>。

不同林分森林土壤各物理性状见表2。由表2看出,有机质含量主要集中在土壤A层,从土壤表层到底层,有机质含量迅速减少,土壤有机质对于改良土壤结构,提高土壤水源涵养性能起积极作用。实地调查表明,常绿阔叶灌丛土壤腐殖层最厚(25 cm),这是由于常绿阔叶灌丛的枯落物层最厚,贮量最多,树种也最丰富。楠竹林由于其枯落物厚

度与贮量最少,腐殖层最薄(6 cm)。因此,A层有机质含量表现为常绿阔叶灌丛最高(77.9 g/kg),马尾松阔叶混交林和常绿阔叶林次之,分别为46.2和31.8 g/kg,楠竹林最低(20.8 g/kg),而农地由于人类积极耕作活动,A层有机质含量亦高达69.70 g/kg。

土壤的容重与孔隙度是反映森林土壤物理性质的两项重要指标<sup>[9]</sup>。由于不同林分的枯落物组成、分解状况和地下根系的生长发育存在差异,造成森林土壤物理性质的差异。由表2可知,各林分土壤容重由表层(A层)到底层(C层)呈增加趋势,各类孔隙度呈降低趋势。这在一定程度上说明,森林土壤水源涵养和理水调洪能力主要体现在上层土壤。

表2 缙云山不同林分土壤物理性状

TABLE 2 Physical soil properties of different forest stands in the Jinyun Mountain

林分	土层	土层厚度/cm	孔隙度/%			土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	自然含水量/%	吸湿系数/%	凋萎系数/%	田间持水量/%
			总孔隙	非毛管	毛管						
马尾松阔叶混交林	A	0~8	62.96	15.93	47.03	1.15	46.20	19.30	3.70	5.55	44.00
	AB	8~57	50.42	12.32	38.10	1.39	6.90	18.04	3.40	5.10	37.70
	B	57~99	49.43	12.27	37.16	1.51	3.90	16.32	3.60	5.40	28.19
	C	99~123	38.14	8.73	29.41	1.72	1.20	14.65	2.37	3.55	23.54
常绿阔叶林	A	0~11	55.92	12.40	43.52	1.18	31.80	17.46	3.12	4.68	41.55
	AB	11~33	44.60	10.26	34.34	1.49	3.00	14.94	2.04	3.07	32.54
	B	33~121	38.23	8.90	29.33	1.69	0.80	14.25	1.57	2.36	24.04
	C	121~135	42.44	9.80	32.64	1.53	1.00	13.96	1.52	2.28	23.19
楠竹林	A	0~6	58.50	14.48	44.02	1.14	20.80	18.82	1.98	2.97	29.75
	AB	6~56	47.11	12.70	34.41	1.46	11.00	17.45	1.79	2.69	24.47
	B	56~90	45.40	9.91	35.49	1.54	3.20	14.50	1.85	2.77	23.65
	C	90~110	43.91	9.99	33.92	1.64	2.00	13.78	3.58	5.38	23.91
常绿阔叶灌丛	A	0~25	73.33	16.94	56.39	0.73	77.90	13.92	3.96	5.94	44.12
	AB	25~57	57.85	14.21	43.64	1.17	14.10	16.23	4.52	6.79	40.10
	B	57~130	45.29	11.43	33.86	1.46	2.90	13.14	2.71	4.07	31.08
农地(对照)	A	0~28	72.01	10.80	61.21	0.78	69.70	19.45	4.07	6.11	36.47
	AB	28~71	40.70	5.77	34.93	1.45	9.10	18.18	5.14	7.71	31.91
	B	71~103	29.20	4.92	24.28	1.87	3.00	16.93	6.34	9.52	22.66
	C	103~130	30.60	5.06	25.54	1.63	1.40	11.75	3.99	5.99	21.47

土壤持水性能是评价不同林分土壤涵养水源及调节水分的一个重要指标<sup>[10]</sup>,林地蓄洪作用主要反映在非毛管孔隙水的贮存能力上。虽然非毛管孔隙持水量比毛管孔隙持水量要小,但是对于小流域而言,非毛管水滞留坡面的时间比地表径流在水网汇流的时间要长得多,其快速贮水能力是小流域蓄洪的主要指标,而且非毛管孔隙又可以迅速排水,从而可以滞缓径流峰值和削减快速径流量(但是不会减少暴雨总径流量)。因此水源涵养林对径流量的调节功能主要体现在林地土壤非毛管孔隙的持水量,它为暴雨提供了径流调节场所。

根据分层实测的各层孔隙度和土壤各层厚度逐层计算得各林分土壤各类孔隙的持水量见表3。由

表3可知,除常绿阔叶灌丛外,各林分土壤的毛管持水量不及农地,但是其快速度持水量(即非毛管暂时滞留水)是农地的1.5~2倍,这表明森林土壤水源涵养和理水调洪性能要优于农地土壤。各林分土壤饱和持水量和非毛管持水量的大小顺序依次为常绿阔叶灌丛(699.1、171.3 mm) > 马尾松阔叶混交林(585.1、143.0 mm) > 常绿阔叶林(555.5、128.2 mm) > 楠竹林(512.8、125.9 mm)。这与常绿阔叶灌丛植物种类多,枯落物层厚、贮量多以及腐殖层较厚、有机质含量高直接有关。排除不同林分土壤土层厚度不对土壤持水性能的影响,计算1 m深土壤各类孔隙持水量(见表3)可以看出,非毛管持水量为常绿阔叶灌丛(137.0 mm) > 常绿阔叶林(126.8 mm) >

马尾松阔叶混交林(116.7 mm) > 楠竹林(100.9 mm), 即常绿阔叶灌丛理水调洪功能最强, 楠竹林最差, 但它们之间差异减小, 变异系数由 0.15 降低到 0.13.

表 3 缙云山不同林分土壤各类孔隙持水量

TABLE 3 Water retaining capacity of varied soil porosity of different forest stands in the Jinyun Mountain

林分	土壤持水量			1 m 土层厚土壤持水量		
	饱和	非毛管	毛管	饱和	非毛管	毛管
马尾松阔叶混交林	585.1	143.0	442.1	445.3	116.7	328.6
常绿阔叶林	555.5	128.2	427.3	511.3	126.8	384.5
楠竹林	512.8	125.9	387.0	439.1	100.9	338.1
常绿阔叶灌丛	699.1	171.3	527.8	563.2	137.0	426.2
农地(对照)	552.7	84.5	468.2	461.3	69.3	392.0

### 3.1.2 不同林分土壤蓄水容量

森林土壤蓄水容量及有效蓄水容量在一定程度上反映了森林水源涵养和缓解洪水的作用. 这部分水用于植物吸收和土壤蒸发, 不能再进入河道或水库.

各林分土壤的蓄水容量  $I_M$  和有效蓄水容量  $I_e$ . 计算结果见表 4. 由表 4 可知, 常绿阔叶灌丛的蓄洪容量  $I_M$  最大, 可蓄水 399.2 mm, 其次为马尾松阔叶混交林(328.2 mm)和常绿阔叶林(325.5 mm), 楠竹林蓄水容量最小(233.0 mm). 除楠竹林外, 各林分土壤的蓄水容量为农地的 1.2~1.5 倍. 这是由于农地凋萎系数(5.99%~9.52%)很高, 而楠竹林田间持水量尤其是 A 层(29.75%)很低, 减弱了土壤蓄水性能.

由表 4 可知, 除楠竹林外, 各林分土壤的有效蓄水容量  $I_e$  为农地的 1.1~1.9 倍. 常绿阔叶灌丛的有效蓄水容量(282.8 mm)远高于其他林分土壤, 楠竹林最低(93.0 mm), 相比其他林分土壤小一个数量级.

为消除土层厚度对评价森林土壤蓄水容量的影响, 计算 1 m 深各林分土壤蓄水容量和有效蓄水容量见表 4. 由表 4 可知, 1 m 深土层有效蓄水容量仍为常绿阔叶灌丛高于其他林分土壤, 达 229.0 mm, 楠竹林有效蓄水容量相比其他林分土壤小一个数量级.

可见, 从森林土壤蓄水容量和有效蓄水容量来讲, 常绿阔叶灌丛的水源涵养作用远高于其他林分土壤, 其中, 楠竹林水源涵养作用最差.

表 4 缙云山不同林分土壤蓄水容量和有效蓄容量

TABLE 4 Soil water storage and effective storage of different forest stands in the Jinyun Mountain

林分	土壤蓄水				1 m 深土壤蓄水			
	有效蓄水容量	蓄水容量	$I_e$ 林地 $I_e$ 农地	$I_M$ 林地 $I_M$ 农地	有效蓄水容量	蓄水容量	$I_e$ 林地 $I_e$ 农地	$I_M$ 林地 $I_M$ 农地
马尾松阔叶混交林	184.6	328.2	1.2	1.2	166.8	288.2	1.1	1.1
常绿阔叶林	164.3	325.5	1.1	1.2	130.8	250.7	0.9	0.9
楠竹林	93.0	233.0	0.6	0.9	82.9	214.5	0.5	0.8
常绿阔叶灌丛	282.8	399.2	1.9	1.5	229.0	318.2	1.5	1.2
农地(对照)	151.3	272.9	1.0	1.0	123.3	227.2	1.0	1.0

### 3.2 不同林分土壤入渗特性

#### 3.2.1 不同林分土壤入渗速率

土壤渗透性是土壤理水调洪功能极为重要的特征参数之一, 其渗透性能的好坏, 直接关系到地表径流量的大小, 和将地表径流转化为壤中流、地下径流的能力, 对土壤侵蚀影响亦很大<sup>[5]</sup>.

迄今为止, 双环入渗实验仍是森林水文和水土

保持研究中确定土壤入渗性能最普遍采用和最简便的测定方法. 双环入渗实验因其方法简单, 而且更重要的是其入渗过程几乎只与土壤物理性状(孔隙率、含水量和孔隙形状等)直接有关, 而不与坡度发生作用, 故其指标能单一地反映不同林分的土壤入渗性能的相对值<sup>[3]</sup>.

从表 5 可以看出, 不同林分的实测初渗率值的

表 5 缙云山不同林分土壤各层入渗速率

TABLE 5 Soil water infiltration rates in varied soil genetic horizons of different forest stands in the Jinyun Mountain

林分	A 层	AB 层	B 层	C 层	稳渗率	初渗率
马尾松阔叶混交林	1.570	0.073	0.028	0.055	0.743	2.190
常绿阔叶林	1.575	0.084	0.029	0.051	0.551	13.333
楠竹林	16.20	0.036	0.015	0.055	0.927	3.704
常绿阔叶灌丛	7.143	2.368	1.025		10.169	35.294
农地(对照)	16.220	0.023	0.002	0.007	0.253	20.000

排序是常绿阔叶灌丛 (35.294 mm/min) > 农地 (20.000 mm/min) > 常绿阔叶林 (13.333 mm/min) > 楠竹林 (3.704 mm/min) > 混交林 (2.190 mm/min), 而其稳渗率的顺序为: 常绿阔叶灌丛 (10.169 mm/min) > 楠竹林 (0.927 mm/min) > 马尾松阔叶混交林 (0.743 mm/min) > 常绿阔叶林 (0.551 mm/min) > 农地 (0.253 mm/min). 常绿阔叶灌丛的实测初渗率和稳渗率值都远大于其他森林土壤, 这与其断面非毛管孔隙分布直接有关; 而农地稳渗率最低则与其非毛管孔隙和有效蓄水容量低有关.

由表 5 还可见, 各林分土壤 A 层入渗速率远大于其下层土壤, 这有利于将地表径流迅速转化为壤中流, 特别是对于短历时高强度的暴雨作用明显. A 层的入渗速率以农地、楠竹林最大, 常绿阔叶灌丛次之, 常绿阔叶林和马尾松阔叶混交林最小, 这是由于楠竹林的根系集中分布在较浅土层和横向分布比较广泛之故, 而农地的 A 层耕作活动最为频繁, 受人为影响较大, 因此其入渗率较高. 而在 AB 和 B 层下, 各林分土壤入渗率均明显高于农地, 其中常绿阔叶灌丛入渗率远大于其他林分, 楠竹林的入渗率最

小. 在 C 层, 各林分入渗率相差不大, 但都大于 B 层, 这与各林分 (除马尾松阔叶混交林外) C 层非毛管孔隙度大于 B 层, 容重小于 B 层有关.

### 3.2.2 不同林分土壤入渗过程

由于林地坡面水分入渗一般属于非饱和水分运动, 故土壤水分运动基本方程, 即使是最简单的边界条件, 严格意义上的解析都十分困难. 因此, 自本世纪以来已有不少研究者提出了许多半理论、半经验甚至纯经验的入渗模型<sup>[3,5]</sup>.

考斯加柯夫公式是最简单的入渗模型; Philip 公式是在水分运动基本方程式的基础上, 经简化推导出来的, 因此它有一定的物理基础, 由于它比考斯加柯夫公式多了一个常数项, 可以认为是对它的改进式; Horton 公式属于纯经验性模型. 采用不同入渗模型对各林分土壤入渗过程拟合得相关系数  $R$  的大小 (表 6), 可以判断 Philip 公式比 Horton 公式拟合效果好. 而对于农地土壤, 采用 Horton 公式模拟效果更好. 运用入渗模型模拟要优于直接幂函数回归. 用最优化公式拟合得不同林分及农地土壤入渗模型见表 7.

表 6 不同林分土壤入渗模型的参数

TABLE 6 Parameters of different soil water infiltration models of different forest stands

林分	Philip 公式			幂函数			Horton 公式			
	$s$	$A$	$R$	$a$	$b$	$R$	$f_0$	$f_c$	$k$	$R$
马尾松阔叶混交林	6.711	0.347	0.947	2.547	0.273	0.895	1.425	0.740	0.036	0.945
常绿阔叶林	3.242	0.407	0.991	1.361	0.599	0.978	1.000	0.550	0.035	0.843
楠竹林	10.196	0.429	0.987	4.436	0.339	0.971	2.878	0.920	0.043	0.866
常绿阔叶灌丛	25.010	9.200	0.969	20.988	0.190	0.942	20.891	10.160	0.103	0.792
农地(对照)	26.870	2.655	0.901	29.850	0.660	0.788	18.406	0.253	0.061	0.978

表 7 不同林分土壤入渗模型

TABLE 7 Soil water infiltration models of different forest stands

林分	入渗模型	累积入渗量公式
马尾松阔叶混交林	$f = \frac{1}{2} \times 6.711 t^{-\frac{1}{2}} + 0.347$	$F = 6.711 t^{\frac{1}{2}} + 0.347 t$
常绿阔叶林	$f = \frac{1}{2} \times 3.242 t^{-\frac{1}{2}} + 0.407$	$F = 3.242 t^{\frac{1}{2}} + 0.407 t$
楠竹林	$f = \frac{1}{2} \times 10.196 t^{-\frac{1}{2}} + 0.429$	$F = 10.196 t^{\frac{1}{2}} + 0.429 t$
常绿阔叶灌丛	$f = \frac{1}{2} \times 25.010 t^{-\frac{1}{2}} + 9.200$	$F = 25.010 t^{\frac{1}{2}} + 9.200 t$
农地(对照)	$f = 0.253 + 18.156 e^{-0.0606t}$	$F = 0.253 t + (18.406 - 0.253) \times (1 - e^{-0.0606t}) / 0.0606$

运用入渗模型将不同林分土壤的入渗过程绘于图 1, 根据土壤入渗过程曲线将入渗过程划分为 3 个阶段: ①初渗阶段 (0~5 min); ②过渡阶段 (5~30 min) ③稳渗阶段 (30~180 min). 由图 1 可知, 在初渗阶段, 常绿阔叶灌丛和农地的入渗性能远好于其他林分; 在过渡阶段, 农地的入渗速率明显降低, 常绿阔叶灌丛的入渗速率仍明显大于其他林分土壤, 其他林分相差不大; 到稳渗阶段, 农地入渗速率低于林地. 可见, 常绿阔叶灌丛的入渗性能要明显优于其他林分和农地土壤, 在初渗阶段为其他林分土壤的 4~10 倍, 农地土壤的 1.5 倍, 在过渡阶段为其他

林分土壤的 7~15 倍, 为农地土壤的 5 倍, 到稳渗阶段为其他森林土壤的 15~20 倍, 为农地土壤的 40 倍.

对林地和农地 120 min 入渗过程测定结果 (表 8) 表明, 常绿阔叶灌丛的累计入渗量远大于其他各种林分, 楠竹林好于马尾松阔叶混交林, 常绿阔叶林的累计入渗量最少.

### 3.3 不同林分土壤理水调洪功能评价

实测重庆缙云山最大日暴雨量为 127 mm<sup>[11]</sup>, 各林分土壤非毛管持水量为 125.9~171.3 mm, 有效蓄水容量为 93.0~282.8 mm. 这表明, 各林分土壤具

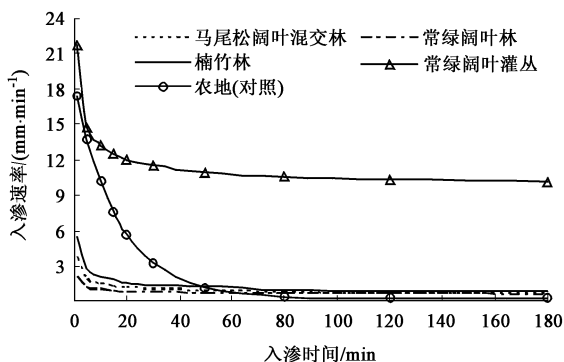


图1 不同林分土壤入渗过程

FIGURE 1 Soil water infiltration process of different stands

有调蓄该地区最大日降水量的能力. 各林分土壤非毛管持水量和有效蓄水容量之和为常绿阔叶灌丛(454.1 mm) > 马尾松阔叶混交林(327.6 mm) > 常绿阔叶林(292.5 mm) > 楠竹林(218.9 mm), 可见从土壤持水性能来讲, 常绿阔叶灌丛水源涵养和理水调洪性能最优, 马尾松阔叶混交林、常绿阔叶林次之, 楠竹林最差.

表8 120 min 累计入渗模拟值与实测值

TABLE 8 Accumulative values of observing and simulating during 120 min infiltration

林分	实测值/mm	模型计算值/mm	与实测值之差/%
马尾松阔叶混交林	114.43	115.16	0.6
常绿阔叶林	85.66	84.35	-1.5
楠竹林	159.23	163.17	2.5
常绿阔叶灌丛	1 372.64	1 377.97	0.4
农地(对照)	300.99	329.71	9.5

当  $\theta_0$  达到田间持水量时,  $I_e = 0$ , 即说明土壤已不能再贮存水量, 因此, 良好的入渗性能对于缓解洪水起非常重要的作用, 其中常绿阔叶灌丛的入渗速率远大于其他林分和农地土壤, 其 120 min 累积入渗量可超过土壤持水量(454.1 mm) 2 倍以上, 楠竹林地持水量低(218.9 mm), 水源涵养作用较差, 但是其入渗速率相对较高, 120 min 累积入渗量也可达 159.23 mm, 高于马尾松阔叶混交林和常绿阔叶林, 对于短历时高强度降雨也有比较明显的理水调洪作用.

## 4 结 论

1) 重庆缙云山 4 种典型林分土壤的非毛管持水量是农地的 1.5~2 倍, 以常绿阔叶灌丛最高(171.3 mm), 楠竹林最低(125.9 mm).

2) 4 种典型林分土壤的有效蓄水容量亦以常绿阔叶灌丛最高(282.8 mm), 楠竹林最低(93.0 mm). 除楠竹林外, 森林土壤的有效蓄水容量为农地的 1.1~1.9 倍.

3) 4 种典型林分土壤持水量大小依次为常绿阔叶灌丛(454.1 mm) > 马尾松阔叶混交林(327.6 mm) > 常绿阔叶林(292.5 mm) > 楠竹林(218.9 mm).

4) 4 种典型林分土壤稳渗率的大小顺序依次为常绿阔叶灌丛(10.169 mm/min) > 楠竹林(0.927 mm/min) > 马尾松阔叶混交林(0.743 mm/min) > 常绿阔叶林(0.551 mm/min) > 农地(0.253 mm/min).

5) 4 种典型林分土壤的入渗速率, 以 Philip 公式拟合效果较好, 而对于农地土壤则采用 Horton 公式模拟效果好. 运用入渗模型模拟要优于直接幂函数回归.

6) 从土壤持水性能和入渗性能来看, 常绿阔叶灌丛的水源涵养和理水调洪作用好于其他林分土壤, 其次为马尾松阔叶混交林和常绿阔叶林, 楠竹林最差.

## 参 考 文 献

[1] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.  
ZHANG W R, XU B T. *Methods for forest soil research* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1986.

[2] 中国科学院南京土壤所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.  
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Analysis of soil physics and chemistry* [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.

[3] 于志明, 王礼先. 水源涵养林效益研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991.  
YU Z M, WANG L X. *Benefits research on water conservation forest* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1991.

[4] 吴长文, 王礼先. 林地土壤孔隙的贮水性能分析[J]. 水土保持研究, 1995, 2(1): 76-79.  
WU C W, WANG L X. The analysis on the water storage properties of soil pore in forest land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1995, 2(1): 76-79.

[5] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(6): 1-5.  
WU Q X, HAN B, LI Y Y. Characteristics of soil infiltration in watersheds in loess hilly region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2004, 2(2): 1-5.

[6] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 77-130.  
LEI Z D, YANG S X, XIE S C. *Soil water dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988: 77-130.

[7] 马良清, 张毓锐. 重庆地区森林水文作用的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(1): 14-19.  
MA L Q, ZHANG Y R. A preliminary study on the forest hydrology effect in Chongqing area, southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(1): 14-19.

[8] 吴长文, 王礼先. 林地土壤的入渗及其模拟分析[J]. 水土保持研究, 1995, 2(1): 71-75.  
WU C W, WANG L X. The analysis on the characteristics of infiltration and its simulating into forest land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1995, 2(1): 71-75.

[9] 李香兰,田积莹,张成娥.黄土高原不同林型对土壤物理性质的影响[J].林业科学,1992,28(2):98-105.  
LI X L, TIAN J Y, ZHANG C E. A study on effects of different types of forest on the Loess Plateau on physical properties of soil[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1992, 28(2):98-105.

[10] 余新晓,张建军,朱金兆.黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价[J].林业科学,1996,32(4):289-296.  
YU X X, ZHANG J J, ZHU J Z. Analysis and evaluation of soil and water conditions of protective forest ecosystem in loess area [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(4):289-296.

[11] 王云琦,王玉杰,朱金兆,等.重庆缙云山不同土地利用类型坡面产流对暴雨的响应[J].中国水土保持科学,2005,3(4):19-26.  
WANG Y Q, WANG Y J, ZHU J Z, et al. Different land-uses slope runoff generation responses to rainstorm in Jinyun Mountain in Chongqing City[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(4):19-26.

(责任编辑 冯秀兰)

### 致 谢

2005年,《北京林业大学学报》在各位专家、学者的支持下顺利地完成了了一年的工作任务,也正是各位专家和学者认真、负责的工作保证了稿件的质量.在此,本刊谨向各位老师表示衷心的感谢,并希望在新的一年里能够继续得到您的支持,以进一步提高本刊的学术水平.

《北京林业大学学报》编辑部  
2006年3月

### 2005年《北京林业大学学报》审稿人名单 (按姓氏笔画为序)

- |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 于文吉 | 于志明 | 于静洁 | 于澎涛 | 马 岩 | 马天乐 | 马克平 | 马钦彦 | 马履一  |
| 亢新刚 | 戈 峰 | 方桂珍 | 方精云 | 牛树奎 | 王 兵 | 王 娟 | 王九龄 | 王仁中  |
| 王文全 | 王占礼 | 王本楠 | 王石发 | 王礼先 | 王华芳 | 王印政 | 王庆礼 | 王百田  |
| 王克勤 | 王沙生 | 王孟本 | 王厚立 | 王彦辉 | 王政权 | 王树立 | 王效科 | 王海燕  |
| 王献溥 | 车学俭 | 邓 广 | 冯文英 | 卢存福 | 卢孟柱 | 叶建仁 | 田大伦 | 田呈明  |
| 乔启宇 | 任青山 | 任海青 | 关毓秀 | 关德新 | 刘 庆 | 刘 勇 | 刘 强 | 刘 燕  |
| 刘 璨 | 刘一星 | 刘友良 | 刘文耀 | 刘世荣 | 刘 奉 | 刘果厚 | 刘金福 | 刘俊昌  |
| 刘政安 | 刘艳红 | 刘景云 | 刘登瀛 | 吕建雄 | 孙 军 | 孙向阳 | 孙保平 | 孙鹏森  |
| 安鑫南 | 成仿云 | 朱圣光 | 朱永官 | 朱政贤 | 朱清科 | 毕华兴 | 江泽平 | 许大全  |
| 齐力旺 | 何忠孝 | 朱余光 | 余新晓 | 冷 平 | 吴 燕 | 吴玉英 | 吴保国 | 吴钦孝  |
| 宋纯鹏 | 宋艳茹 | 宋铁英 | 应俊生 | 张 旭 | 张 真 | 张 一 | 张力平 | 张万儒  |
| 张大勇 | 张双保 | 张克斌 | 张志娥 | 张志强 | 张 毅 | 张求慧 | 张国盛 | 张学忠  |
| 张建国 | 张金屯 | 张彦东 | 张星耀 | 张洪江 | 张智光 | 张福锁 | 张璧光 | 李 云  |
| 李 悦 | 李 黎 | 李凤日 | 李凤兰 | 李文彬 | 李永慈 | 李合生 | 李吉跃 | 李庆梅  |
| 李应国 | 李志仁 | 李典漠 | 李建章 | 李忠正 | 李昌哲 | 李迪强 | 李俊清 | 李春俭  |
| 李贻铨 | 李振宇 | 李浚明 | 李景文 | 李渤生 | 李锡文 | 李韶华 | 李镇宇 | 李懋学  |
| 杜纪山 | 杨玉盛 | 杨宇明 | 杨承栋 | 汪 矛 | 汪有科 | 汪来发 | 沈 昕 | 沈 隽  |
| 沈海龙 | 沈瑞祥 | 沈熙环 | 肖文发 | 肖 宁 | 汪苏文 | 苏晓华 | 苏雪痕 | 陆元昌  |
| 陆守一 | 陈龙清 | 陈伟烈 | 陈百明 | 陈树椿 | 陈家宽 | 陈晓阳 | 陈祥伟 | 陈端生  |
| 周广胜 | 周永东 | 周志国 | 周国逸 | 周择福 | 周晓峰 | 国庆喜 | 奉国强 | 孟 平  |
| 孟宪宇 | 周孟佐 | 孟新法 | 岳德鹏 | 庞 勇 | 易浩若 | 林 辉 | 林立民 | 欧阳志云 |
| 罗万春 | 罗国光 | 郎奎建 | 郑小贤 | 郑书敏 | 郑粉莉 | 郑彩霞 | 金幼菊 | 金则新  |
| 俞元春 | 姚 兵 | 姚春丽 | 姚渭溪 | 段新芳 | 洪 伟 | 胡建忠 | 胡德夫 | 费本华  |
| 贺 伟 | 郝庆棠 | 郝康宁 | 赵 东 | 赵广杰 | 赵廷宁 | 赵 宪 | 赵梁军 | 赵惠勤  |
| 郝小琴 | 郝占庆 | 唐克丽 | 唐家骏 | 唐晓明 | 夏乃斌 | 徐 力 | 徐化成 | 徐永吉  |
| 徐程扬 | 朗奎健 | 朗惠卿 | 桑卫国 | 殷 宁 | 秦特夫 | 聂立水 | 郭 浩 | 郭良栋  |
| 钱世钧 | 顾万春 | 高甲荣 | 高志奎 | 高建民 | 高贤明 | 高荣乎 | 高瑞清 | 崔丽娟  |
| 崔克明 | 崔国发 | 崔保山 | 康向阳 | 曹 琳 | 曹宗巽 | 曹金珍 | 盛炜彤 | 章文华  |
| 续九如 | 阎秀峰 | 鹿振友 | 黄心渊 | 曹洛华 | 曹 荣 | 彭少麟 | 曾君社 | 曾德慧  |
| 温亚利 | 温俊宝 | 游先祥 | 程 放 | 程金水 | 董 源 | 董乃钧 | 董文渊 | 蒋志刚  |
| 蒋身学 | 蒋明康 | 蒋湘宁 | 覃先林 | 谢力生 | 谢宗强 | 谢宝元 | 谢响明 | 韩东海  |
| 韩建国 | 韩海荣 | 韩熙春 | 鲁小珍 | 谢明曙 | 鲍伟东 | 鲍甫成 | 廖蓉芬 | 熊 伟  |
| 熊耀国 | 翟明普 | 臧润国 | 蔡强国 | 裴 铁 | 谭炳  | 撒 潮 | 樊永明 | 薛 彪  |
| 戴 思 | 魏 伟 | 魏天兴 | 瞿礼嘉 |     |     |     |     |      |