

# 老秃顶子自然保护区不同森林类型 土壤贮水与入渗特征研究

吕刚<sup>1</sup>, 张由松<sup>2</sup>, 祝业平<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 北京林业大学  
水土保持学院, 北京 100083; 3. 辽宁老秃顶子国家级自然保护区管理局, 辽宁 桓仁 117219)

**摘要:** 为了评价老秃顶子自然保护区不同森林类型土壤水源涵养功能, 对区内 5 种植被类型的土壤贮水能力与入渗特征进行了研究。结果表明, 不同林型 0—40 cm 土壤容重均值为 0.76~1.71 g/cm<sup>3</sup>, 非毛管孔隙度均值为 8.15%~22.07%, 毛管孔隙度均值为 27.60%~53.28%, 灌木林、岳桦林、杂木林等天然次生林的土壤孔隙状况要好于落叶松人工林和红松人工林; 不同林型 0—40 cm 土壤的蓄水容量为 1 429.8~2 834.3 t/hm<sup>2</sup>, 有效蓄容为 325.9~882.7 t/hm<sup>2</sup>, 毛管持水量为 1 103.8~2 131.0 t/hm<sup>2</sup>, 天然次生林土壤贮水能力相对较强; 不同林型 0—20 cm 土壤初渗率介于 0.28~21.1 mm/min 之间, 20—40 cm 土壤初渗率介于 0.07~6.7 mm/min 之间, 不同林型 0—20 cm 土层稳渗率介于 0.14~8.3 mm/min 之间, 20—40 cm 土层稳渗率介于 0.05~2.0 mm/min 之间, 初渗率和稳渗率均表现为天然次生林高于人工林; 土壤入渗速率与入渗时间存在良好的幂函数关系。

**关键词:** 土壤持水能力; 入渗; 水文效应; 老秃顶子自然保护区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)01-0109-05

中图分类号: S152.7

## Soil Water Storage and Infiltration Characteristics of Different Forest Soils in Laotudingzi Natural Reserve

LÜ Gang, ZHANG You-song<sup>2</sup>, ZHU Ye-ping<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Administration of Laotudingzi National Nature Reserve, Benxi, Liaoning 117219, China)

**Abstract:** In order to assess water conservational function of different forests types in Laotudingzi natural reserve, six forest soils were selected to test soil storage capacity and infiltration characteristics. The results indicate that soil bulk density(0—40 cm) under these forests ranged from 0.76 to 1.71 g/cm<sup>3</sup>, non-capillary porosity ranged from 8.15% to 22.07%, capillary porosity ranged from 27.060% to 53.28%, soil porosity conditions of natural secondary forests, such as shrub, *Betula ermanii*, Spinney, were better than *Larix pricepis-ruprechtii* and *Pinus koraiensis*, soil water storage(0—40 cm) ranged from 1 429.8 to 2 834.3 t/hm<sup>2</sup>, effective capacity ranged from 325.9 to 882.7 t/hm<sup>2</sup>, capillary water holding capacity ranged from 1 103.8 to 2 131.0 t/hm<sup>2</sup>, soil water-holding capability of natural secondary forest was relatively stronger than plantation, initial infiltration rates(0—20 cm) ranged from 0.28 to 21.1 mm/min, and initial infiltration rates(20—40 cm) ranged from 0.07 to 6.7 mm/min, steady infiltration rates(0—20 cm) ranged from 0.14 to 8.3 mm/min, steady infiltration rates(20—40 cm) ranged from 0.05 to 2.0 mm/min, initial infiltration rates and steady infiltration rates of natural secondary forests were relatively stronger than plantation. A power function can be used to describe the relationship between soil infiltration rate and time.

**Keywords:** soil water-holding capacity; infiltration; hydrological effect; Laotudingzi nature reserve

土壤是森林生态系统发挥其涵养水源功能的主要部分,其自身的性质将直接影响到降水入渗、转化、蓄存及林地蒸散和流域产流等生态水文过程,其能力对调节洪水和干旱,减弱并防止土壤侵蚀具有重要作用。不同植被类型因其植物生物学特性及其林分结构的差异,其涵养水源的效应有所差异<sup>[1]</sup>,而植被水文生态功能可通过土壤贮水量和入渗性能来表征,多年来一直是研究的热点<sup>[2-4]</sup>。因此,研究不同植被类型土壤贮水能力与入渗特征对于深入探讨森林对流域水文过程的调节机制具有十分重要的意义<sup>[5]</sup>。

老秃顶子自然保护区地处辽宁东部山区,是辽河的发源地和鸭绿江的重要源头之一,是重要的水源涵养林区,因此,涵养水源发挥其生态效益成为今后相当一个时期老秃顶子自然保护区森林经营的主要目的。

鉴于老秃顶子自然保护区作为水源涵养林区的重要性,于 2008 年 8 月对老秃顶子自然保护区内主要森林植被类型土壤水文效应进行了研究,以其为老秃顶子自然保护区水源涵养林的保护及合理经营提供理论依据。

## 1 研究区概况

老秃顶子自然保护区位于辽宁省东部桓仁、新宾 2 县交界处(124°41′13″—125°5′15″E, 41°11′11″—41°21′34″N),总面积 152.173 km<sup>2</sup>,属北温带大陆性季风气候中的辽东冷凉湿润气候区,雨量充沛,年降

水量 900~1 200 mm,集中在 6—8 月,年平均相对湿度 67%,是省内最湿润的地区之一,最高气温 37.2 °C,最低气温 -37.5 °C,年平均气温 6.2 °C,≥10 °C 年积温 3 005 °C,年无霜期 139 d。土壤类型主要以分布在海拔 900 m 以下低山的棕色森林土和海拔 900 m 以上中山地带的暗棕色森林土为典型代表,全区大部分地段土层较厚,结构疏松,有机质含量高,pH 值 5.5~6.2,很适宜森林植物的生长发育。

老秃顶子自然保护区属长白山脉龙岗支脉向西南的延续部分,主峰老秃顶子海拔 1 325.3 m,是辽宁省最高峰,其东、南、西、北 4 个坡面自山麓(海拔 500 m)至峰顶均分布有比较明显的植被垂直带谱<sup>[6-7]</sup>。植物区系属长白植物区系的西南边缘,以长白区系为主,并具有华北植物区系的过渡性,水平地带性植被类型主要有红松、沙松—阔叶混交林、蒙古栎林、杂木林、椴木林、色木林、山杨林、黄桦林、低山灌草丛、人工植被群落。垂直地带性植被主要有鱼鳞云杉—臭冷杉林、岳桦林、云冷杉—阔叶混交林、中山灌丛、中山草丛、核桃球林<sup>[8]</sup>。森林覆盖率达 97%,属典型的辽东山地生态系统。该区现已规划为水源涵养用材林区,水源涵养林体系建设已经成为这一地区森林生态环境建设的主要任务<sup>[9]</sup>。

选择位于老秃顶子自然保护区北坡的落叶松人工林、红松人工林、杂木林、岳桦林、灌木林布设标准地(20 m×20 m),记录坡度、坡向、海拔,确定主要乔木树种、郁闭度。标准地基本概况见表 1。

表 1 标准地基本概况

植被类型	坡度/(°)	坡向	海拔/m	平均胸径/cm	平均高/m	郁闭度/%	土壤	土层厚度/cm
杂木林	13	东北	717	36.4	17.0	85	棕壤	59
岳桦林	7	东南	1 252	26.1	11.9	65	暗棕壤	71
灌木林	5	东北	1 284	2.1	2.4	95	暗棕壤	45
红松人工林	10	东南	576	27.2	14.8	75	棕壤	50
落叶松人工林	15	南	546	17.6	15.8	70	棕壤	45

注:杂木林主要有 5 株紫椴,3 株水曲柳,3 株鱼鳞云杉,2 株核桃秋,1 株色木槭。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤物理性质测定

于 2008 年 8 月在不同植被类型典型样地上,选择具有代表性的地段,挖掘土壤剖面,记录土壤剖面的发生层次,并将腐殖质层清除掉,用容积为 100 cm<sup>3</sup>的环刀分别在 0—20 cm 和 20—40 cm 深度取原状土,每层 3 个重复,测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度等物理性质。由参考文献[10]可知:

$$\text{蓄水容量}(\text{t}/\text{hm}^2) = 10000 (\text{m}^2) \times \text{土壤总孔隙度}(\%) \times \text{土层厚度}(\text{m}) \times \text{水比重}(\text{t}/\text{m}^3)$$

$$\text{有效蓄容}(\text{t}/\text{hm}^2) = 10000 (\text{m}^2) \times \text{土壤非毛管孔隙度}(\%) \times \text{土层厚度}(\text{m}) \times \text{水比重}(\text{t}/\text{m}^3)$$

$$\text{毛管持水量}(\text{t}/\text{hm}^2) = 10000 (\text{m}^2) \times \text{土壤毛管孔隙度}(\%) \times \text{土层厚度}(\text{m}) \times \text{水比重}(\text{t}/\text{m}^3)$$

### 2.2 土壤入渗性能测定

本试验对测定土壤渗透速度的室内环刀法<sup>[11]</sup>进行了一点改进。把野外利用环刀取回的原状土立即进行室内土壤入渗特性的试验,而不是浸入水中若干

小时再进行测定,这样就可以得到土壤入渗率随时间变化的曲线,从而使得模型的拟合成为可能,虽然其测定值与野外双环法测定值存在一定偏差,但却可以解决野外大面积测定土壤渗透性的实际困难,不受天气和水源的影响。

(1) 初渗率 = 最初入渗时段内渗透量 / 入渗时间,本研究取最初入渗时间为 1 min。

(2) 稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定时的渗透速率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土壤孔隙状况

土壤容重与孔隙度是反映林地土壤物理性质的两项重要指标,由于不同林地表层的枯落物组成及地下根系的生长发育状况、枯落物的分解状况等存在差异,因此造成林地土壤物理化学性质的差异<sup>[12]</sup>。不同植被类型土壤容重存在一定差异(表 2),其中 0—40 cm 容重均值位于 0.76~1.71 g/cm<sup>3</sup> 之间,其中以灌木林容重最小,落叶松人工林容重最大,其顺序为:灌

木林 < 岳桦林 < 杂木林 < 红松人工林 < 落叶松人工林,表现为天然次生林下土壤容重低于人工林。产生这种差异主要是因为该区的天然次生林绝大部分均为近百年内萌生而成,林内空气湿度大,郁闭度高,加之风和热量因子的综合作用,枯枝落叶层较厚,腐殖质含量高,土壤结构疏松所致。而人工林大多为建国后营建,多分布在海拔 800 m 以下,成林时间短,可以形成良好的植被的成土时间短,土壤腐殖质含量相对较低,并且存在一定的砾石,土壤结构紧密。不同森林类型土壤容重随着海拔的增加有递减的趋势(表 1—2),这可能与老秃顶子海拔高差大而出现不同的气温梯度带有关。林地不同层次土壤容重间存在一定差异,其中落叶松人工林土壤容重表现为上层高于下层。这是因为落叶松人工林多分布在海拔 600 m 以下的山腹中部,是近 30 a 人工更新形成的,调查地段枯枝落叶层覆盖度也仅为 60%,部分土壤裸露在外,存在一定程度由降雨侵蚀而引起的土壤板结,容重偏大。红松人工林、杂木林、岳桦林、灌木林的土壤容重均表现为上层低于下层。

表 2 不同森林类型土壤物理性质

植被类型	土层深度/ cm	容重/(g · cm <sup>-3</sup> )		总孔隙度/%		非毛管孔隙度/%		毛管孔隙度/%	
		数值	均值	数值	均值	数值	均值	数值	均值
杂木林	0—20	0.91	1.12	65.57	57.83	16.54	12.68	49.03	45.15
	20—40	1.32		50.08		8.81		41.27	
岳桦林	0—20	0.74	0.83	71.90	68.63	17.16	15.35	54.74	53.28
	20—40	0.92		65.35		13.54		51.81	
灌木林	0—20	0.64	0.78	75.96	70.86	25.33	22.07	50.63	48.79
	20—40	0.91		65.75		18.81		46.95	
红松人工林	0—20	1.38	1.48	48.01	44.45	13.09	10.79	34.92	33.66
	20—40	1.57		40.88		8.48		32.40	
落叶松人工林	0—20	1.72	1.71	35.12	35.75	4.07	8.15	31.05	27.60
	20—40	1.69		36.37		12.22		24.14	

从表 2 可知,不同森林类型土壤 0—40 cm 非毛管孔隙度均值为 8.15%~22.07%,其中以灌木林最大,为落叶松人工林的 2.7 倍,其顺序为:灌木林 > 岳桦林 > 杂木林 > 红松人工林 > 落叶松人工林,表现为天然次生林大于人工林。不同植被类型土壤 0—40 cm 毛管孔隙度均值为 27.60%~53.28%,以岳桦林最大,落叶松人工林最小,其顺序为:岳桦林 > 灌木林 > 杂木林 > 红松人工林 > 落叶松人工林,同样表现为天然次生林大于人工林。但不论是天然次生林还是人工林,辽东老秃顶子自然保护区土壤的孔隙状况均好于辽西<sup>[10]</sup>,这说明该区在天然次生林得到保护的同时,人工林也充分发挥了其改良土壤的作用。

#### 3.2 土壤贮水能力

森林土壤是水分贮蓄的主要场所,土壤水分贮蓄量和贮蓄方式受其物理性质影响很大<sup>[13]</sup>。根据土壤持水和调节水分能力的不同,可分为蓄水容量和有效蓄容。蓄水容量与土壤的总孔隙度有关,它是指土壤中的全部孔隙都充满水分时的贮水量;而有效蓄容与非毛管孔隙度有关,是土壤中的非毛管孔隙中所能填充的水分贮量,它反映了土壤的调蓄能力,是评价土壤层水文功能的重要指标之一<sup>[10]</sup>。有效蓄容越大,则土壤的水源涵养作用越强。从图 1 可知,不同植被类型土壤 0—40 cm 的蓄水容量以灌木林最大(2 834.3 t/hm<sup>2</sup>),落叶松人工林最小(1 429.8 t/

hm<sup>2</sup>),其大小顺序与容重排序正相反。这主要是因为总孔隙度与容重之间存在正相关关系。有效蓄容为 325.9~882.7 t/hm<sup>2</sup>,以灌木林最大,落叶松人工林最小,其顺序与非毛管孔隙度的排序一致。可见,老秃顶子作为辽宁重要的水源涵养林区,其森林土壤调蓄能力较强。毛管持水量的大小反映了森林植被吸持水分用于维持自身生长发育和保持水土的能力。不同植被类型土壤毛管持水量为 1 103.8~2 131.0 t/hm<sup>2</sup>,以岳桦林最大,落叶松人工林最小,大小顺序与毛管孔隙度的排序一致。

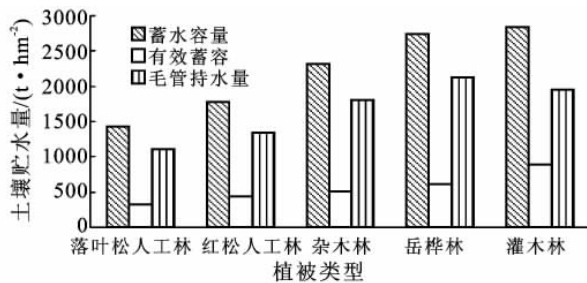


图 1 不同森林类型 0—40 cm 土壤的贮水量

老秃顶子自然保护区属于温带大陆性季风湿润气候,由于受海洋暖气团的影响,形成夏季降水集中,且雨量明显大于辽东北部山地,为植被生长提供了良好的生态条件,是研究森林生物多样性和理水调洪功能的天然实验室。

本文通过对老秃顶子不同森林类型土壤的贮水能力研究后认为,位于高海拔的天然次生林土壤贮水能力较强,发挥了较好的水源涵养功能。因此,从保护水源涵养林的角度出发,应继续加强天然次生林特别是水源地森林植被的保护力度,以最大程度地发挥其土壤的水源涵养功能,以保证下游城乡工农业生产用水和生活用水。红松和落叶松均为该区的乡土树种,生长状况良好,虽然其林下土壤也表现出一定的蓄水能力,但与天然次生林相比仍然较弱,因此,应从用材林的角度加以保护利用。

### 3.3 土壤入渗特征

土壤渗透性是土壤极为重要的物理特征参数之一,渗透性能的好坏直接关系到地表产生径流量的多少,土壤渗透性能越好,地表径流就会越少,土壤的流失量也会相应减少<sup>[14]</sup>。初渗率和稳渗率是反映土壤入渗能力最直接的指标。

由表 3 可知,不同森林类型 0—20 cm 土壤初渗率介于 0.28~21.1 mm/min 之间,以灌木林最大,为落叶松人工林的 75 倍,其大小顺序为:灌木林>杂木林>岳桦林>红松人工林>落叶松人工林,而不同植被类型 20—40 cm 土壤初渗率为 0.07~6.70 mm/

min,下层土壤初渗率大小顺序与上层一致,而且不同森林类型均表现为上层高于下层,同一层次天然次生林初渗率均高于人工林。

不同植被类型 0—20 cm 土壤稳渗率为 0.14~8.30 mm/min,以灌木林最大,为落叶松人工林的 59 倍,大小顺序为:灌木林>岳桦林>杂木林>红松人工林>落叶松人工林,而不同森林类型 20—40 cm 土壤稳渗率介于 0.05~2.00 mm/min 之间,大小顺序为:灌木林>杂木林>岳桦林>红松人工林>落叶松人工林,而且不同森林类型均表现为上层高于下层,同一层次天然次生林稳渗率均高于人工林。总体分析可知,不同森林类型土壤初渗率之间的差异程度要比稳渗率的大,这主要是因为初渗率除了与土壤自身的性质有关外,还与土壤初始含水量有关系;不同森林类型土壤不同层次的初渗率和稳渗率均表现为天然次生林高于人工林,这主要是由于天然次生林土壤结构疏松,孔隙状况良好所引起的。相关分析表明,初渗率与非毛管孔隙度呈极显著正相关关系( $R^2 = 0.815^{**}$ ,  $n=10$ ),与容重呈极显著负相关关系( $R^2 = -0.765^{**}$ ,  $n=10$ ),与毛管孔隙度呈显著正相关关系( $R^2 = 0.639^*$ ,  $n=10$ );稳渗率与毛管孔隙度呈显著正相关关系( $R^2 = 0.661^*$ ,  $n=10$ ),与容重呈极显著负相关关系( $R^2 = -0.776^{**}$ ,  $n=10$ ),与非毛管孔隙度呈极显著正相关关系( $R^2 = 0.803^{**}$ ,  $n=10$ )。

表 3 不同森林类型土壤入渗能力 mm/min

植被类型	土层深度/cm	初渗率	稳渗率
杂木林	0—20	15.30	3.00
	20—40	4.50	1.40
岳桦林	0—20	9.80	5.80
	20—40	0.20	0.11
灌木林	0—20	21.10	8.30
	20—40	6.70	2.00
红松人工林	0—20	2.55	0.28
	20—40	0.51	0.19
落叶松人工林	0—20	0.28	0.14
	20—40	0.07	0.05

### 3.4 土壤入渗过程拟合

土壤入渗模型能够表达入渗速率随时间变化的规律,从而对土壤入渗过程作出定性或定量的评价。利用 Kostikov 模型:

$$f(t) = at^{-b}$$

式中: $f(t)$ ——入渗速率; $t$ ——入渗时间; $a, b$ ——由试验资料拟合的参数。

对老秃顶子自然保护区不同植被类型不同层次土壤入渗速率与时间的变化过程进行了拟合,得到了

相应的模型参数(表 4)。从表 4 可以看出,拟合模型的相关系数均在 0.8 以上,并达到了显著水平,表明不同森林类型土壤入渗速率与入渗时间存在良好的幂函数关系。其中  $a$  值在 0.09~75.47 之间,其大小与初始含水量和土壤密度有关,可以较好地反映初始入渗速率的大小,最小值出现在落叶松人工林的上层,最大值出现为蒙古栎林的下层,这与初始入渗速率大小顺序基本一致; $b$  值在 0.149~0.464 之间,其大小反映了入渗速率递减的状况, $b$  值越大,入渗速率随时间递减越快。

表 4 不同森林类型土壤入渗过程拟合结果

植被类型	土层深度/cm	Kostiakov 方程	$R^2$	$F$	Sig $F$
落叶松人工林	0—20	$y=0.268t^{-0.179}$	0.858	55.435	0.000
	20—40	$y=0.094t^{-0.202}$	0.847	28.748	0.006
红松人工林	0—20	$y=3.268t^{-0.533}$	0.962	427.376	0.000
	20—40	$y=0.549t^{-0.261}$	0.935	174.906	0.000
杂木林	0—20	$y=24.155t^{-0.412}$	0.955	738.951	0.000
	20—40	$y=6.166t^{-0.308}$	0.881	157.023	0.000
岳桦林	0—20	$y=11.623t^{-0.149}$	0.902	230.816	0.000
	20—40	$y=0.241t^{-0.186}$	0.827	48.693	0.000
灌木林	0—20	$y=24.566t^{-0.223}$	0.968	934.532	0.000
	20—40	$y=8.484t^{-0.248}$	0.992	3718.002	0.000

## 4 结论

(1) 不同森林类型 0—40 cm 土层土壤容重均值介于 0.76~1.71 g/cm<sup>3</sup> 之间,非毛管孔隙度均值为 8.15%~22.07%,毛管孔隙度均值为 27.60%~53.28%,天然次生林土壤孔隙状况好于人工林。

(2) 不同森林类型土壤 0—40 cm 土层的蓄水容量为 1 429.8~2 834.3 t/hm<sup>2</sup>,有效蓄容为 325.9~882.7 t/hm<sup>2</sup>,毛管持水量为 1 103.8~2 131.0 t/hm<sup>2</sup>,天然次生林土壤贮水能力强于人工林。

(3) 不同森林类型土壤 0—20 cm 土层初渗率介于 0.28~21.10 mm/min 之间,稳渗率介于 0.14~8.30 mm/min 之间;不同植被类型土壤 20—40 cm 土层初渗率介于 0.07~6.70 mm/min 之间,稳渗率介于 0.05~2.00 mm/min 之间。不同森林类型土壤初渗率之间的差异程度比稳渗率的大,不同层次土壤的初渗率和稳渗率均表现为天然次生林高于人工林;初渗率、稳渗率与非毛管孔隙度呈极显著正相关关系,与容重呈极显著负相关关系,与毛管孔隙度呈显著正相关关系。

(4) 不同森林类型土壤入渗速率与入渗时间存在良好的幂函数关系,相关系数均在 0.8 以上。

(5) 老秃顶子自然保护区天然次生林土壤水源涵养功能很强,因此,应加强天然次生林的保护力度,相应提高保护等级,以保证下游城乡工农业生产用水和生活用水,维持其生态环境的稳定性。

(6) 本研究仅对老秃顶子自然保护区内的 5 种森林类型进行了研究,略显不足,应加强其它林型的研究,特别应加强关于保护区内土壤涵养水源功能的垂直变化特征研究,分析其是否与植被垂直分布有相关关系。

## [参 考 文 献]

- [1] 齐清,李传荣,许景伟. 沙质海岸不同植被类型土壤水源涵养功能的研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):102-105.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 漆良华,张旭东,周金星,等. 湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性[J]. 林业科学,2007,43(4):1-8.
- [5] 赵玉涛,张志强,余新晓. 森林流域界面水分传输规律研究述评[J]. 水土保持学报,2002,16(1):92-95.
- [6] 张宝财,张华,祝业平,等. 辽宁老秃顶子南坡植物生活型谱及其海拔变化[J]. 辽宁师范大学学报,2007,30(4):499-502.
- [7] 张华,马延新,武晶. 辽东山地老秃顶子北坡植被类型及垂直带谱[J]. 地理研究,2008,27(6):1261-1270.
- [8] 老秃顶子自然保护区管理处,辽宁省林业厅. 老秃顶子自然保护区科学考察报告集[R]. 本溪:老秃顶子自然保护区管理局,1996.
- [9] 高人,周广柱. 辽宁东部山区几种主要森林植被类型土壤渗透性能研究[J]. 农村生态环境,2002,18(4):1-4,14.
- [10] 吕刚,吴祥云,雷泽勇,等. 辽西半干旱低山丘陵区人工林地表层土壤水文效应[J]. 水土保持学报,2008,22(5):204-208.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社,1978.
- [12] 饶金懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. 北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [13] 郝占庆,王力华. 辽东山区主要森林类型林地土壤涵养水性能的研究[J]. 应用生态学报,1998,9(3):237-241.
- [14] 陈洪松,邵明安. 黄土坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4):513-520.