

# 长白山不同林型土壤水源涵养功能特征

时钟瑜<sup>1</sup>, 李 婕<sup>1,2</sup>

(1.商丘学院 风景园林学院, 河南 商丘 476000;

2.北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:**为了研究长白山森林水源涵养功能,连续 3 年在长白山研究了 3 种主要森林类型(针叶林、针阔混交林、阔叶林)土壤特性和水源涵养功能。结果表明:(1) 不同林型土壤密度随土层深度的增加呈逐渐增加趋势,相同土层土壤密度大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。不同林型土壤总孔隙度和毛管孔隙度均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,相同土层土壤总孔隙度和毛管孔隙度基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林;然而相同土层毛管孔隙度大小基本表现为针阔混交林<针叶林<阔叶林。(2) 土壤总孔隙度和土层深度以指数函数方程拟合最好,而土壤总孔隙度土层深度以对数函数方程拟合最好,其中针阔混交林相关系数最高。(3) 土壤剖面各层次的自然含水量、土壤通气性、饱和蓄水量、最大持水量、有效持水量、毛管蓄水量和非毛管蓄水量均随着土层深度的递增而逐渐降低,相同土层自然含水量、土壤通气性、饱和蓄水量、最大持水量、有效持水量、毛管蓄水量和非毛管蓄水量基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。(4) 不同林型土壤稳渗速度、渗透系数( $K_1$ ,  $K_{10}$ )随土层深度的增加呈逐渐增加趋势,相同土层基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。(5) 相关性分析表明土壤渗透性能与总孔隙度和非毛管孔隙度均为极显著正相关关系( $p<0.01$ ),与毛管孔隙度呈极显著负相关关系( $p<0.01$ ),其中,非毛管孔隙状况对土壤渗透性的影响更为显著。层次分析法显示,不同林型综合能力范围为 0.714~0.956,大小排序为针阔混交林>针叶林>阔叶林。

**关键词:**长白山; 针叶林; 针阔混交林; 阔叶林; 土壤特征; 水源涵养

**中图分类号:**S714.7; S715.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)06-0158-07

## Characteristics of Water Conservation Functions of Soils in Different Forest Types in Changbai Mountains

SHI Zhongyu<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>

(1.School of Landscape Architecture, Shangqiu University, Shangqiu, Henan 476000, China; 2.Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Soil characteristics, soil water storage capacity and soil infiltration capacity of three main forest types (coniferous forest, coniferous and broad-leaved forest, broad-leaved forest) were studied for three consecutive years in Changbaishan Mountain. The results showed that: (1) soil density of different forest types increased gradually with the increase of soil depth, and the soil density of the same soil layer basically decreased in the order: mixed coniferous and broad-leaved forest > and coniferous forest > broad-leaved forest; the total porosity and capillary porosity of soil in different forest types decreased gradually with the increase of soil depth; however, the capillary porosity of the same soil layer increased in the order: coniferous and broad-leaved mixed forest < coniferous forest < broad-leaved forest; (2) soil total porosity and soil depth were best fitted by exponential function equation, the relation between soil depth and total porosity was best fitted by logarithmic function equation, among which had the highest correlation coefficient in coniferous and broad-leaved mixed forest; (3) natural water content, soil, air permeability, saturation storage capacity, maximum water holding capacity, effective water holding capacity, capillary water and capillary water of all layers in soil profile decreased with the increase of soil depth, soil natural water content, soil, air permeability, saturation storage capacity, maximum water holding capacity, effective water holding capacity,

收稿日期:2019-01-23

修回日期:2019-02-21

资助项目:河南省重点科技攻关项目“美国红枫在我国北方 30°—40°纬度地区适应性栽培研究”(132102110139)

第一作者:时钟瑜(1984—),男,河南西华人,硕士,讲师,主要从事生态环境及生态水文研究。E-mail:Yuu\_shizh@163.com

capillary water and capillary water the same layer decreased in the order: mixed forest>coniferous forest>needle broad-leaved forest; (4) the steady infiltration rate and permeability coefficient ( $K_1$  and  $K_{10}$ ) of soil in different forest types gradually increased with the increase of soil depth, and the permeability coefficient of the same soil layer decreased in the order: mixed forest>coniferous forest>needle broad-leaved forest; (5) the correlation analysis showed that soil permeability had a significantly positive correlation with total porosity and non-capillary porosity ( $p<0.01$ ), and a significantly negative correlation with capillary porosity ( $p<0.01$ ), among which non-capillary porosity had a more significant impact on soil permeability. The water conservation functions of different forest types in Changbaishan Mountain was quantitatively evaluated by analytic hierarchy process. The results showed that the comprehensive capacities of different forest types ranged from 0.714 to 0.956, and decreased in the order: mixed forest>coniferous forest>needle broad-leaved forest.

**Keywords:** Changbaishan Mountain; mixed forest; coniferous forest; broad-leaved forest; soil characteristics; water conservation functions

对于整个生态系统而言,陆地生态系统直接关乎人类社会生活,成为人类生存的载体<sup>[1-3]</sup>,环境变化对生存环境产生至关重要的影响,起着决定作用。作为陆地生态的关键组成部分,森林不仅是重要的林木资源,更决定着局地气候调节,作为一种可再生资源而发挥着关键作用,影响着人类的生存环境<sup>[4]</sup>。森林生态系统具有较为独特的复杂性<sup>[2-3]</sup>,能够产生较为频繁的能量交换及物质循环,并产生一系列的自然资源,为生物多样性分布奠定重要基础<sup>[4]</sup>,是重要的生物库及贮碳库,此外,还在涵养水源方面起着关键作用,成为重要的蓄水库,对于空气湿度等调节效果显著,因此在生态系统中扮演着不可或缺的角色<sup>[5-6]</sup>。对于森林系统而言,不仅能够有效拦蓄降雨,同时能够有效降低土壤侵蚀现象,对理化特征加以改善,并通过林冠及枯枝落叶共同作用于土壤,形成了 3 个层次的作用机理<sup>[7-8]</sup>。但是近些年来,随着大规模的林木砍伐等过度开发,林木保护意识不够强,森林面临着较为严重的粗放开发利用,大大降低了森林资源,其面积锐减,质量严重下降,对于其生态效应的发挥着着不利影响<sup>[9-11]</sup>。在生态环境治理不断加大力度的情况下,森林资源重要性更加深入人心,国家层面已经大力注重森林资源保护,环保意识也在不断加强,生态系统稳定性对于人类社会生活的重要性日益突出,森林资源的重要性被逐渐认可,并成为可持续发展的关键部分之一<sup>[12]</sup>,过去的几十年,人们过于注重对森林资源的索取,而未注重对森林生态系统的保护,致使生态功能退化,面积及质量也面临双重威胁,涵养水源方面的能力被破坏<sup>[13-14]</sup>。

对于降雨而言,在土壤蓄水作用下由地表径流进入地下,在这一过程中,森林起着关键作用,在地表裸露的情况下,土壤的蓄水能力大大降低;对于森林而

言,最终的涵养水源很大程度上要依赖于土壤蓄水,并形成了大部分的蓄水量<sup>[15]</sup>。土壤结构等特征决定着水分的转移方式,尤其是其持水性能、渗透能力等方面,加之养分状况的影响,这些都对土壤的水文特点起着决定性作用<sup>[16]</sup>。对于森林而言,涵养水源的能力不仅取决于母岩,更与土壤结构息息相关,森林能够依靠发达的根系及树干形成较强的蓄水能力,枯枝落叶层也能够进行有效的蓄水,并降低蒸发造成的水分散失,与土壤共同涵养水源,并形成较强的降雨吸纳能力,这也正是森林成为天然蓄水库的原因所在<sup>[17-18]</sup>。对于土壤而言,入渗特性也制约着地表径流的转化能力,从而决定着土壤对水分的蓄水能力,关乎涵养水源,该特性不仅与土壤特性密切相关,还与人为活动干预关系密切,尤其是土地耕种方式等<sup>[19-20]</sup>。因此,开展相应的土壤特性研究及森林蓄水具有重要现实意义和必要性<sup>[17-18]</sup>,对于土壤而言,其孔隙度及容重在其通气性方面起着决定性作用,进而制约着蓄水能力,成为其重要的特点参数。为进一步深入探讨林木涵养水源方面的作用机理,本研究将长白山林木作为研究对象,并进行连续 3 年的观测研究,从而通过对比分析探究其涵养水源特性,为涵养水源提供有益借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于长白山东麓,地理坐标北纬  $51^{\circ}14'$ ,东经  $122^{\circ}39'$ ,该区域森林面积多达  $7.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,受所处地理位置的影响,该区域的大陆季风气候特点较为明显,由于在北半球高纬度,因而夏季相对较短,但是冬季时间比较长,一年之中其一半时间属于冰冻期,其最低气温达到零下  $47.5^{\circ}\text{C}$ ,通过近年来的气象

数据可以看出其年均气温接近于 4.7℃,全年的平均降雨量仅不足 500 mm,全年霜期较长,霜期接近于 280 d。在严寒及湿润条件影响下,兴安落叶松苔藓发育较好,同时枯枝落叶不易腐化导致在土壤表面堆积,因此在土壤表层形成较强的滞水性,使得土壤长期保持相对湿润,该区域土层一般低于 0.4 m;草甸土、沼泽土为主,该区域具有较多的枯枝落叶等残积物,处于冻土带的南部边缘,较低的山地地貌,其坡度基本低于 15°,拥有近 812 m 的海拔;该区域多寒温性针叶林,主要优势物种是兴安落叶松,还有白桦、山杨等阔叶乔木。

### 1.2 样地设置

本试验开始于 2015 年,并进行连续 3 年的观测实

验,所选择的区域为长白山区,选取的林木资源为 3 种:针叶林、针阔混交林和阔叶林,同时为了分析海拔的影响,特在不同海拔选择不同的林型,要求样地长、宽均为 50 m,为了提升实验对比的准确性,充分进行数据采集的精确性,特对各样地进行 3 次重复取样;然后在样地设置长、宽均为 1 m 的小样方,首先对其枯枝落叶厚度进行测量记录,并区分分解层及半分解层,同时测算蓄积量及土壤厚度,海拔不同,其腐殖质状况也存在较大差异。对枯枝落叶进行取样的过程中利用尼龙网兜,并区分分解层及半分解层,将之带回实验室进行风干处理,蓄积量的计算以干物质为基准;对地表及地下 20 cm 深度进行土壤取样,同时记录相应的生境数据,尤其是坡位和海拔等,具体见表 1。

表 1 长白山不同林型样地基本特征

样地 类型	坡度/ (°)	海拔/ m	林龄/ a	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	坡向	树高/ m	郁闭度	胸径/ m
针叶林	16	1923	25	769	SW	8.36	87	0.26
针阔混交林	32	1174	30	623	EN	7.19	92	0.28
阔叶林	25	956	28	714	NE	7.56	85	0.24

### 1.3 样品测定

对于土壤的含水量及容重借助于烘干法进行,对于其孔隙度计算采取浸水法进行,利用环刀法测定入渗特性<sup>[17]</sup>。在进行相关指标测定前首先将杂物去除,以免影响实验数据准确性,然后将双环打入土中,要求深度达到 5 cm,两侧同时加水,要求水层达到 3 cm,此时进行计时,以对其内环耗水量进行测定,同时对水温进行及时记录;对于其渗透速率的计算借助于常用公式<sup>[14]</sup>,并在此基础上计算初渗率及稳渗率等。

对于土样的采集利用环刀法,并将其带回实验室,在称重后浸水处理 24 h,并将之与空环刀粘接,置于漏斗并加水,进行渗水计时,记录不同时段的渗水量,进而计算渗透速率,为了提升实验准确性,进行 3 次重复。对于其持水性能的计算采取如下公式<sup>[18]</sup>:

MWC=10000m<sup>2</sup>×TSP×SD

EWC=10000m<sup>2</sup>×NSP×SD

式中:MWC 为最大持水量(m<sup>3</sup>);EWC 为有效持水量(m<sup>3</sup>);TSP 为土壤总孔隙度(%);NSP 为土壤非毛管孔隙度(%);SD 为土层厚度(m)

### 1.4 数据处理

Microsoft Excel 2007 进行数据的统计和整理,SPSS 18.0 进行方差分析和统计学检验,LSD 多重比较(显著水平设置  $p<0.05$ ),单因素方差分析(One-way ANOVA)比较其差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 长白山不同林型土壤物理性质

由表 2 可知,0—20 cm 土层土壤密度变化范围在为 1.05~1.16 g/cm<sup>3</sup>,大小顺序依次表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林,20—40 cm 土层土壤密度变化范围为 1.08~1.18 g/cm<sup>3</sup>,大小顺序依次表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林,40—60 cm 土层土壤密度变化范围为 1.13~1.26 g/cm<sup>3</sup>,大小顺序依次表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林,60—80 cm 土层土壤密度变化范围为 1.19~1.37 g/cm<sup>3</sup>,大小顺序依次表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林;不同林型土壤密度随土层深度的增加呈逐渐增加趋势,相同土层土壤密度大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。不同林型土壤总孔隙度均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,相同土层土壤总孔隙度大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。针叶林、针阔混交林、阔叶林毛管孔隙度变化范围分别为 28.79%~34.02%,22.78%~30.15%,30.74%~35.29%,其中,不同林型毛管孔隙度随土层深度的增加逐渐降低,相同土层毛管孔隙度大小基本表现为针阔混交林<针叶林<阔叶林。针叶林、针阔混交林、阔叶林非毛管孔隙度变化范围分别为 1.86%~2.35%,2.97%~3.26%,1.98%~2.21%,其中,不同林型土壤非毛管孔隙度均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,相同土

层土壤非毛管孔隙度大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。

2.2 长白山不同林型土壤密度和孔隙度与土层的关系

回归分析结果表明土壤总孔隙度和土层深度以指数函数方程拟合最好,如表 3 所示,针叶林土壤密度与土层深度呈显著的指数关系,其  $R^2=0.9236$ ,  $F=136.23$ ,针阔混交林土壤密度与土层深度呈显著

的指数关系,其  $R^2=0.9516$ ,  $F=198.58$ ,阔叶林土壤密度与土层深度呈显著的指数关系,其  $R^2=0.9147$ ,  $F=121.58$ 。针叶林土壤总孔隙度土层深度以对数函数方程拟合最好,其中针叶林土壤总孔隙度与土层深度的相关系数  $R^2=0.9157$ ,针阔混交林土壤总孔隙度与土层深度的相关系数  $R^2=0.9602$ ,阔叶林土壤总孔隙度与土层深度的相关系数  $R^2=0.8941$ 。

表 2 长白山不同林型土壤物理性质

样地类型	土层深度/m	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
针叶林	0—20	1.09±0.13	60.58±3.56	34.02±3.26	2.35±0.26
	20—40	1.13±0.26	57.02±5.24	32.58±2.45	2.24±0.24
	40—60	1.15±0.21	55.12±4.16	30.17±3.69	2.01±0.15
	60—80	1.24±0.25	53.79±3.29	28.79±2.01	1.86±0.32
针阔混交林	0—20	1.16±0.19	56.13±3.54	30.15±2.58	3.26±0.25
	20—40	1.18±0.06	54.89±5.01	26.57±3.14	3.15±0.19
	40—60	1.26±0.15	52.01±4.16	25.34±3.26	3.02±0.34
	60—80	1.37±0.26	49.78±3.58	22.78±1.58	2.97±0.16
阔叶林	0—20	1.05±0.24	62.01±2.47	35.29±2.04	2.21±0.25
	20—40	1.08±0.19	61.25±3.06	33.02±2.29	2.13±0.24
	40—60	1.13±0.32	60.25±2.78	32.78±2.78	2.05±0.18
	60—80	1.19±0.20	57.08±3.15	30.74±2.34	1.98±0.17

表 3 长白山不同林型土壤密度和孔隙度与土层的关系

土层深度	土壤密度			总孔隙度		
	回归方程	$R^2$	$F$	回归方程	$R^2$	$F$
针叶林	$y=0.2569x^{0.1598}$	0.9236	136.23	$y=-9.5236\ln x+92.103$	0.9157	159.21
针阔混交林	$y=0.2987x^{0.0239}$	0.9516	198.58	$y=-13.2619\ln x+103.587$	0.9602	203.14
阔叶林	$y=0.3514x^{0.2013}$	0.9147	121.58	$y=-8.8962\ln x+98.015$	0.8941	128.71

2.3 长白山不同林型涵养水源能力

土壤自然含水量与土壤蓄水性能关系密切,当土壤湿度很大时,即使降水量很少,也可能产生地表径流。由表 4 可知,土壤剖面各层次的自然含水量均随着土层深度的递增而逐渐降低,相同土层自然含水量基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。针叶林、针阔混交林、阔叶林土壤通气性变化范围分别为 23.02%~32.19%,30.74%~36.98%,18.24%~28.36%,其中,不同林型土壤通气性均随土层深度的增加逐渐降低,相同土层土壤通气性大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。土壤饱和蓄水量反映了土壤贮存和调节水分的潜在能力。饱和蓄水量是由总孔隙度和土层厚度决定的。不同林型土壤饱和蓄水量均随着土层深度的递增而逐渐降低,相同土层土壤通气性大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。不同林型土壤最大持水量和有效持水量均随着土层深度的递增而逐渐降低,相同土层土壤最大持水量和有效持水量基本

表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。不同林型土壤毛管蓄水量和非毛管蓄水量呈相反的变化趋势,土壤毛管蓄水量均随着土层深度的递增而逐渐降低,相同土层土壤毛管蓄水量基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。不同林型非毛管蓄水量均随着土层深度的递增而逐渐增加,相同土层土壤非毛管蓄水量基本表现为针阔混交林<针叶林<阔叶林。

2.4 长白山不同林型土壤的渗透性能

由表 5 可知,不同林型常温土壤稳渗速度和 10℃ 情况下渗透各不相同,针叶林土壤稳渗速度变化范围为 7.03~9.56 mm/min,针阔混交林土壤稳渗速度变化范围为 7.06~11.98 mm/min,阔叶林土壤稳渗速度变化范围为 3.57~5.23 mm/min,其中,不同林型土壤稳渗速度均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,相同土层土壤稳渗速度基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。针叶林、针阔混交林、阔叶林土壤渗透系数( $K_1$ )变化范围为 3.02~4.26,5.13~



6.25,1.17~2.01,其中,不同林型土壤渗透系数均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,相同土层土壤渗透系数基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。针叶林、针阔混交林、阔叶林土壤渗透系数( $K_{10}$ )变

化范围分别为 0.43~0.63,0.65~0.85,0.31~0.47,其中不同林型土壤渗透系数均随土层深度的增加逐渐降低,相同土层土壤渗透系数基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。

表 4 长白山不同林型涵养水源能力

样地 类型	土层 深度/m	土壤 含水量/%	土壤 通气性/%	饱和蓄水量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	最大持水量/ $\text{m}^3$	有效持水量/ $\text{m}^3$	毛管蓄水量/ $\text{m}^3$	非毛管 蓄水量/ $\text{m}^3$
针叶林	0—20	18.26±2.16	32.19±2.16	2016±236	1127±63	23.04±1.59	689.21±23.65	132.59±26.32
	20—40	16.42±2.59	28.74±3.02	1985±156	1023±89	22.16±2.06	672.13±24.19	135.69±15.78
	40—60	15.03±1.87	25.16±2.57	1902±106	987±54	21.78±2.15	665.24±36.85	142.03±16.96
	60—80	14.78±1.54	23.02±1.59	1751±98	863±62	20.15±1.78	623.79±24.79	149.78±18.45
针阔混交林	0—20	21.03±2.01	36.98±3.45	2342±83	1356±71	26.39±2.36	756.32±39.85	112.25±13.02
	20—40	20.56±2.59	34.26±3.06	2105±125	1298±102	24.79±2.47	743.02±42.01	120.35±9.77
	40—60	19.78±3.01	33.18±2.47	1916±165	1104±86	23.01±2.01	712.45±46.52	128.97±6.35
	60—80	17.86±1.47	30.74±2.78	1754±138	993±79	21.78±2.49	698.03±49.77	132.41±16.59
阔叶林	0—20	17.23±1.40	28.36±1.98	1857±102	956±90	21.07±1.54	621.04±61.52	158.23±23.01
	20—40	16.58±1.98	22.24±2.65	1726±117	902±56	20.45±1.98	602.14±63.78	162.36±25.14
	40—60	15.74±2.56	21.48±2.39	1653±95	813±48	18.79±2.01	586.47±62.01	168.79±18.79
	60—80	14.79±2.47	18.24±1.55	1398±87	701±63	16.25±2.00	553.29±53.12	175.02±15.02

表 5 长白山不同林型土壤的渗透性能

样地 类型	土层 深度/m	稳渗速度/ ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$K_1$	$K_{10}$
针叶林	0—20	9.56	4.26	0.63
	20—40	9.12	4.03	0.62
	40—60	8.56	3.54	0.57
	60—80	7.03	3.02	0.43
针阔混交林	0—20	11.98	6.25	0.85
	20—40	10.54	6.12	0.82
	40—60	9.12	5.46	0.76
	60—80	7.06	5.13	0.65
阔叶林	0—20	5.23	2.01	0.47
	20—40	4.19	1.98	0.42
	40—60	4.01	1.65	0.36
	60—80	3.57	1.17	0.31

注: $K_1$ 为渗透试验时水温的渗透系数, $K_{10}$ 为 10℃ 的渗透系数。

土壤渗透性是表征土壤对降水和地表径流的就地入渗和吸收能力,是土壤水文调节功能和林分涵养水源的重要指标。土壤渗透性的好坏,直接关系到地表产生径流的多少,渗透性能越好,地表径流越少,土壤侵蚀量也会相应减少。表 6 中显示了不同林型初渗速率与稳渗速率存在较好的幂函数关系,针叶林幂函数相关系数  $R^2=0.9236$ ,针阔混交林幂函数相关系数  $R^2=0.9549$ ,阔叶林幂函数相关系数  $R^2=0.9017$ 。相关性分析表明(表 7)土壤渗透性能与总孔隙度和非毛管孔隙度均为极显著正相关关系( $p<0.01$ ),与毛管孔隙度呈极显著负相关关系( $p<0.01$ ),其中,非毛管孔隙状

况对土壤渗透性的影响更为显著。

表 6 长白山不同林型土壤渗透性能

样地 类型	初渗速率( $y$ )与 稳渗速率( $x$ )回归方程	相关 系数	$p$
针叶林	$y=18.632x^{-0.402}$	0.9236	0.0013**
针阔混交林	$y=10.19x^{-0.356}$	0.9549	0.0009**
阔叶林	$y=23.014x^{-0.692}$	0.9017	0.0011**

注:\*\*表示在 0.01 水平上显著(双尾),\*表示在 0.05 水平上显著(双尾),下表同。

表 7 长白山不同林型土壤入渗速率与孔隙状况的相关性

项目	初渗 速率	稳渗 速率	总孔 隙度	毛管 孔隙度	毛管 孔隙度
初渗速率	1.000				
稳渗速率	—	1.000			
总孔隙度	0.914**	0.902**	1.000		
非毛管孔隙度	0.975**	0.921**	—	1.000	
毛管孔隙度	0.903**	0.916**	0.963**	-0.956**	1.000

注:“—”表示未发现显著相关性。

2.5 综合评定长白山不同林型土壤涵养水源功能

由表 8 可知,根据坐标综合评定法( $P$  值表示综合评定值), $P$  值越大,性能越好,土壤物理性质大小排序为针阔混交林>针叶林>阔叶林;不同林型土壤蓄水能力变化范围为 0.357~0.458,大小排序为针阔混交林>针叶林>阔叶林;不同林型土壤渗透能力变化范围为 0.561~0.659,大小排序为针阔混交林>针叶林>阔叶林;综合能力范围为 0.714~0.956,大小排序为针阔混交林>针叶林>阔叶林。

表 8 长白山不同林型水源涵养的综合能力

样地类型	土壤物理性质		土壤蓄水能力		渗透能力		综合能力	
	$P_1$	排序	$P_1$	排序	$P_1$	排序	$P_1$	排序
针叶林	0.298	2	0.403	2	0.578	2	0.823	2
针阔混交林	0.303	1	0.458	1	0.659	1	0.956	1
阔叶林	0.216	3	0.357	3	0.561	3	0.714	3

3 讨论

通过本研究分析得知,虽然林型存在较明显的差异,但是对于土壤密度而言,其在深度不断增加的情况下呈现较明显的上升;对于相同土层而言,不同的林型具有较大差异的土壤密度,其中针阔混交林的密度最大,其次是针叶林,而阔叶林最低,也就是说土层对于其熟化程度产生较明显的制约,从土壤密度也能够加以反映。对于表层土壤而言,土壤密度并不高,主要原因在于土层 20 cm 深度为主要的根系分布区,此外,腐殖质分解等导致土壤较为疏松;从土壤密度及深度回归分析得知,其幂函数方程具有较好拟合性,其相关性而言,混交林系数最高,其次是针叶林。

对于土壤水分而言,不仅仅是植被生长发育过程中的必需,同时更扮演着其理化特征的角色,在促进水循环方面起着重要作用<sup>[21-22]</sup>,作为一种独特的生态系统,森林系统有其较为独特的复杂性,同时也是相对完整的局地生态系统<sup>[23]</sup>,开展其土壤水分的相关研究能够探究森林生长情况,利于林地管理。通过实验对比分析可知,在土层深度不断增加的情况下,不仅水分明显下降,其通气性也出现明显降低,对于相同土层而言,针阔混交林的密度最大,其次是针叶林,而阔叶林最低;含水量与通气性之间息息相关,二者呈现明显的负向影响,当含水量高的情况下,土壤孔隙被堵塞,造成土壤氧气消耗增加,抑制了根系呼吸<sup>[24-25]</sup>。对于土壤通气性而言,不仅孔隙度、密度起着决定作用,自然含水量也起着关键影响作用<sup>[21-22]</sup>;虽然林型存在较大差异,但是从其总孔隙度与毛管孔隙度的角度来讲,二者具有明显的负向变化关系,尤其是表层土壤最高;对于枯枝落叶层而言,在腐殖质分解及降解作用下,腐殖质含量明显上升,这明显增强了土壤团聚,加之根系分布的作用,土壤孔隙呈现较高水平。通过方差分析可知,土层深度对毛管孔隙的影响极为显著<sup>[26-28]</sup>,主要原因在于土壤深度不同的情况下,其熟化程度也出现较大差异,加之根系主要分布在土壤的表层,使得土层深度对孔隙度产生了较为重要的影响。

在土壤蓄水的作用下,地表径流形成了大量的地下径流,在这一过程中,森林起着关键作用,对于森林

而言,其最终的涵养水源很大程度上要依赖于土壤蓄水,并形成了大部分的蓄水量,因此常将其作为涵养水源的重要衡量指标,尤其是非毛管需水量,具有较高的准确性。当其蓄水能力较强的情况下,降雨的转化量大幅增加,一方面为植被生长提供必要的水分支撑,另一方起着调节水循环的作用,在局地生态中扮演着重要角色<sup>[15-16]</sup>。通过实验对比,针阔混交林具有较强的涵养水源能力,在人工育林方面要加以充分利用。综合来看,虽然长白山地区林型出现较大的差异,但是其在涵养水源方面均发挥着一定作用,只是作用大小不同,其效果最为明显的是针阔混交林,其次是针叶林,而阔叶林效果最差;对于森林而言,其涵养水源的能力不仅取决于母岩,更与土壤结构息息相关,森林能够依靠发达的根系及树干形成较强的蓄水能力,其枯枝落叶层也能够进行有效的蓄水,并降低蒸发造成的水分散失,与土壤共同涵养水源,并形成较强的降雨吸纳能力,此外,林木胸径、密度等特点也会产生直接的影响,这也是下一步研究的方向之一<sup>[12-13]</sup>。对于森林而言,其枯枝落叶层在降低蒸发造成的水分散失方面作用明显,在林地管理过程中不仅要选择适宜的林型,同时要注意枯枝落叶层的保护,在对天然阔叶林进行有效保护的同时加强针阔混交林种植,通过林型错配来达到涵养水源、保持水土、调节局地气候的效果。

4 结论

(1) 不同林型土壤密度随土层深度的增加呈逐渐增加趋势,相同土层土壤密度大小基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。不同林型土壤总孔隙度和毛管孔隙度均随土层深度的增加呈逐渐降低趋势,相同土层土壤总孔隙度和毛管孔隙度基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林;然而相同土层毛管孔隙度大小基本表现为针阔混交林<针叶林<阔叶林。

(2) 土壤总孔隙度和土层深度以指数函数方程拟合最好,而土壤总孔隙度土层深度以对数函数方程拟合最好,其中针阔混交林相关系数最高。

(3) 土壤剖面各层次的自然含水量、土壤通气性、饱和蓄水量、最大持水量、有效持水量、毛管蓄水

量和非毛管蓄水量均随着土层深度的递增而逐渐降低,相同土层自然含水量、土壤通气性、饱和蓄水量、最大持水量、有效持水量、毛管蓄水量和非毛管蓄水量基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。

(4) 不同林型土壤稳渗速度、渗透系数( $K_1$ 和 $K_{10}$ )随土层深度的增加呈逐渐增加趋势,相同土层基本表现为针阔混交林>针叶林>阔叶林。相关性分析表明土壤渗透性能与总孔隙度和非毛管孔隙度均为极显著正相关关系( $p<0.01$ ),与毛管孔隙度呈极显著负相关关系( $p<0.01$ ),其中,非毛管孔隙状况对土壤渗透性的影响更为显著。层次分析法显示:不同林型综合能力范围为0.714~0.956,大小排序为针阔混交林>针叶林>阔叶林。

#### 参考文献:

- [1] 崔嵬,郑小贤,顾丽.金沟岭林场森林水源涵养功能与价值研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(5):88-92.
- [2] 张宏锋,袁素芬.东江流域森林水源涵养功能空间格局评价[J].生态学报,2016,36(24):8120-8127.
- [3] 刘璐璐,曹巍,邵全琴.南北盘江森林生态系统水源涵养功能评价[J].地理科学,2016,36(4):603-611.
- [4] 唐玉芝,邵全琴.乌江上游地区森林生态系统水源涵养功能评估及其空间差异探究[J].地球信息科学学报,2016,18(7):987-999.
- [5] 陈书林.基于 TVDI 模型的森林生态系统水源涵养服务功能研究[J].生态经济,2016,32(12):182-186.
- [6] 周佳雯,高志球,杨伟超.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
- [7] 杨峰.修河上游流域 4 种森林类型的水源涵养功能评价[J].水土保持研究,2017,24(4):337-341.
- [8] 杨英,王立新,任卫华,等.基于 InVEST 模型的河南淅川县森林资源水源涵养功能评估[J].林业资源管理,2017(3):51-55.
- [9] 罗叶琴.基于 MATLAB 的森林水资源涵养功能评估系统的研建[D].北京:北京林业大学,2016.
- [10] 喻阳华,杨苏茂.水源涵养林结构配置研究进展[J].世界林业研究,2016,29(4):19-24.
- [11] 刘宇,郭建斌,邓秀秀.秦岭火地塘林区 3 种土地利用类型的土壤潜在水源涵养功能评价[J].北京林业大学学报,2016,38(3):73-80.
- [12] 殷格兰,邵景安,郭跃,等.林地资源变化对森林生态系统服务功能的影响:以南水北调核心水源地淅川县为例[J].生态学报,2017,37(20):6973-6985.
- [13] 白艳莹,闵庆文,李静.哈尼梯田生态系统森林土壤水源涵养功能分析[J].水土保持研究,2016,23(2):166-170.
- [14] 马国飞,满苏尔·沙比提.托木尔峰自然保护区台兰河上游森林植被水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):147-153.
- [15] 刘凯,贺康宁,田赞,等.青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):141-146.
- [16] 孟楚,郑小贤,王威.北京八达岭林场水源涵养林林分结构与土壤的相关性研究[J].西北林学院学报,2016,31(4):99-105.
- [17] 丁程锋,张绘芳,李霞,等.天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估:以乌鲁木齐河流域为例[J].生态学报,2017,37(11):3733-3743.
- [18] 夏祥友.森林经营对东北林区主要森林类型蓄水保土功能的影响[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.
- [19] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- [20] 孟庆旭,张胜利,李侃,等.秦岭华山松林间伐强度对其水源涵养功能的影响[J].西北林学院学报,2016,31(2):1-7.
- [21] 姚炳全,岳德鹏,陈金星,等.水源涵养林评价系统的构建[J].西北林学院学报,2016,31(3):191-196.
- [22] 蒋毓琪,陈珂.浑河流域上游森林生态服务空间流转价值及其对沈阳城市段供水量影响的通径分析[J].水土保持通报,2017,37(6):285-290.
- [23] 陈姗姗,刘康,包玉斌,等.商洛市水源涵养服务功能空间格局与影响因素[J].地理科学,2016,36(10):1546-1554.
- [24] 龚诗涵,肖洋,方瑜,等.中国森林生态系统地表径流调节特征[J].生态学报,2016,36(22):7472-7478.
- [25] 林灯,陈壮,黄荣俊,等.海南热带次生林恢复过程中凋落物及土壤水源涵养功能变化[J].西部林业科学,2016,45(2):7-14.
- [26] 马程,王晓玥,张雅昕,等.北京市生态涵养区生态系统服务供给与流动的能值分析[J].地理学报,2017,72(6):974-985.
- [27] 于立忠,王利,刘利芳,等.浑河上游典型水源涵养林降雨再分配过程[J].水土保持学报,2016,30(6):106-110.
- [28] 何琴飞,郑威,彭玉华,等.珠江流域中游主要森林类型凋落物持水特性[J].水土保持研究,2017,24(1):128-134.