

# 长白山地区不同林型土壤特性及水源涵养功能

方伟东<sup>1</sup> 亢新刚<sup>1</sup> 赵浩彦<sup>1</sup> 黄新峰<sup>1,2</sup> 龚直文<sup>1</sup> 高 延<sup>3</sup> 冯启祥<sup>3</sup>

(1 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 2 河南省林业调查规划院 3 吉林省汪清林业局)

**摘要:**以长白山金沟岭林场的原始林、云冷杉针阔混交林、杨桦次生林,以及53和39年生的人工落叶松林为研究对象,同时以草地为对照试验区,分析了不同林型枯落物的现存量及持水特性、土壤水分物理性质以及土壤蓄水量。结果表明:1)不同林型枯落物的现存量在28.96~56.42 t/hm<sup>2</sup>之间,原始林枯落物现存量最大,为56.42 t/hm<sup>2</sup>,杨桦次生林最小,为28.96 t/hm<sup>2</sup>。2)枯落物最大持水量依次为:原始林>杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>53年生人工落叶松林>39年生人工落叶松林。3)土壤密度随着土层深度的增加而增加,以幂函数方程拟合最好,各林型的土壤A<sub>1</sub>层的土壤密度都小于1.00 g/cm<sup>3</sup>,且明显小于草地土壤密度。4)土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层深度的递增而逐渐变小。5)土壤自然含水量随着土层深度的递增而逐渐降低,且用幂函数方程拟合效果最好。6)土壤饱和蓄水量和毛管蓄水量变化为:原始林>云冷杉针阔混交林>杨桦次生林>39年生人工落叶松林>53年生人工落叶松林>草地;非毛管蓄水量变化为:杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>39年生人工落叶松林>原始林>53年生人工落叶松林>草地。综上可知林地水源涵养功能为:杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>原始林>39年生人工落叶松林>53年生人工落叶松林>草地。

**关键词:**森林类型;林地土壤;土壤密度;孔隙度;蓄水量

中图分类号:S715.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2011)01-0040-08

FANG Wei-dong<sup>1</sup>; KANG Xin-gang<sup>1</sup>; ZHAO Hao-yan<sup>1</sup>; HUANG Xin-feng<sup>1,2</sup>; GONG Zhi-wen<sup>1</sup>; GAO Yan<sup>3</sup>; FENG Qi-xiang<sup>3</sup>. **Soil characteristics and water conservation of different forest types in Changbai Mountain.** *Journal of Beijing Forestry University*(2011) 33(4):40-47 [Ch 26 ref.]

1 Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

2 Henan Provincial Academy of Forest Inventory and Planning, Zhengzhou, 450045, P. R. China;

3 Wangqing Forestry Bureau, Yanji City, Jilin Province, 133200, P. R. China.

We took a virgin forest, a spruce-fir forest, a polar-birch secondary forest, 53- and 39-year-old artificial larch in the Jingouling Forest Farm in Changbai Mountain, northeastern China, as study objects, and took grassland as the control. Litter extant quantity, water-storage capacity of litter, soil physical property and water-storage capacity of soil of different forest types were analyzed. Results showed that 1) the litter extant quantity of various forest types ranged from 28.96 to 56.42 t/hm<sup>2</sup> (maximum in the virgin forest, minimum in the polar-birch secondary forest); 2) the sequence of maximum water-storage of litter is virgin forest > polar-birch secondary forest > spruce-fir forest > 53-year-old artificial larch > 39-year-old artificial larch > grassland; 3) soil bulk density increases with the soil depth increasing gradually, and the effect of the power function fitting is best. The bulk density of A<sub>1</sub> layer in different forest soil are less than 1.00 g/cm<sup>3</sup>, obviously less than that of grassland; 4) the total porosity and capillary porosity gradually decrease with soil depth increasing; 5) natural moisture content gradually decreases with the soil depth increasing and the effect of the power function fitting is best; 6) the sequence of maximal soil water-storage and capillary water-storage are virgin forest > spruce-fir forest > polar-birch secondary forest > 39-year-old artificial larch > 53-year-old artificial larch > grassland, and non-capillary water-storage change is polar-birch secondary forest > spruce-fir forest > 39-year-old artificial larch > virgin forest > 53-year-old artificial

收稿日期:2010-12-10

基金项目:林业公益性行业科研专项(200804027)。

第一作者:方伟东。主要研究方向:森林可持续经营。电话:15101156826 Email: dongweif@163.com 地址:100083 北京市清华东路35号 北京林业大学林学院。

责任编辑:亢新刚,教授,博士生导师。主要研究方向:森林可持续经营。电话:010-62336362 Email: xingangk@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

larch > grassland. In short ,the water conservation of different forest types is polar-birch secondary forest > spruce-fir forest > virgin forest > 39-year-old artificial larch > 53-year-old artificial larch > grassland.

**Key words** forest type; forest soil; bulk density; porosity; water-storage

长白山地区森林资源丰富,是我国的主要木材及林产品生产基地,同时也是松辽平原的绿色屏障,承担着保土蓄水、维护地区生态环境的重要职责。对该地区森林的研究已经取得了很多成果,如长白落叶松(*Larix olgensis*)直径分布收获模型研究<sup>[1]</sup>、椴树阔叶红松林群落特征<sup>[2]</sup>、根系生物量研究<sup>[3]</sup>、针阔混交林林分结构动态研究<sup>[4]</sup>、混交林TWINSPAN分类及演替序列分析<sup>[5]</sup>、杨桦次生林直径结构研究<sup>[6]</sup>、天然林木年龄与胸径的变动关系<sup>[7]</sup>、长白原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应<sup>[8]</sup>、阔叶红松林林分空间结构<sup>[9]</sup>、云冷杉混交林生长模型<sup>[10]</sup>和阔叶红松林土壤水分特征曲线<sup>[11]</sup>等。多数研究集中在结构及模型等特性方面,但对不同林型土壤特性及水源涵养功能研究较少。本文对吉林省汪清林业局境内东北部不同森林类型的枯落物的现存量及持水特性、土壤水分物理性质以及土壤蓄水量特征进行研究,为评价该地区森林的涵养水源及其水土保持功能提供科学依据。

## 1 试验地概况

试验地位于吉林省汪清林业局境内东北部金沟岭林场,地理位置为130°10' E, 43°22' N。全区四面环山,属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,林场地貌为低山丘陵,海拔300~1 200 m,坡度10°~25°,个别陡坡在35°以上,经营面积为16 286 hm<sup>2</sup>。该地区属季风型气候,全年平均气温3.9 ℃,≥10 ℃的积温为2 144 ℃。1月份气温最低,平均为-32.0 ℃;7月份气温最高,平均为22.0 ℃。年降水量600~700 mm,且集中在7月份。早霜从9月中旬开始,晚霜延至翌年5月末,生长期为120 d;积雪平均厚度达50 cm。海拔800~1 000 m,为针叶林灰棕壤土,沟谷是草甸土、泥炭土、沼泽土或冲积土。结构一般为黏壤土类、粒状结构,且湿松、根系多,平均厚

度为40 cm左右。主要乔木树种有鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、红皮云杉(*P. koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepi*)、长白落叶松、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、红松(*Pinus koraiensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、枫桦(*B. costata*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer mono*)、椴树(*Tilia spp.*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)等;主要下木有忍冬(*Lonicera japonica*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、柳叶绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、暴马丁香(*Syringa reticulata*)等;主要地被物为香附子(*Cyperus rotundus*)及禾本科草类。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选择与调查

本地区森林资源以中龄林和幼龄林为主,其蓄积量占森林总蓄积量的89.5%。近成熟林和过熟林较少(见表1)。本文以中龄林为主研究不同林分林地的水源涵养功能。

经过实地踏查并结合原有固定标准地资料,选择有代表性的样地,进行每木检尺,找出平均木,并在平均木下挖取采样的土壤剖面。本研究共选定6块标准地,同时调查坡向、坡度、海拔、树高、胸径、郁闭度等特征因子。各标准地的大小为40 m×50 m,基本情况见表2。

表1 金沟岭林场林木资源龄组统计表

Tab. 1 Statistics of tree age group in the Jingouling Forest Farm

龄组	面积/hm <sup>2</sup>	面积比例/%	蓄积/m <sup>3</sup>	蓄积比例/%
幼龄林	3 166	24.7	321 861	15.6
中龄林	8 505	66.4	1 524 239	73.9
近成熟林	866	6.8	156 261	7.6
成熟林	271	2.1	60 302	2.9
合计	12 808	100.0	2 062 663	100.0

表2 标准地的基本情况

Tab. 2 Basic situation of the sample plot

	坡向	坡度/(°)	海拔/m	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径/cm	林分蓄积/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	草本盖度/%	郁闭度/%
原始林	南坡	10	700			375.0	90	0.9
云冷杉针阔混交林	西南坡	11	670	1 635	13.5	150.0	80	0.9
杨桦次生林	西南坡	16	770	1 693	13.6	171.8	85	0.9
人落39	西南坡	14	750	600	23.4		50	0.8
人落53	北坡	12	770	405	30.1		80	0.9
草地	西南坡	10	650				100	

注:原始林为云冷杉暗针叶林及阔叶红松林。下同。

### 2.2 枯落物持水量测定

在选择好的样地内(草地没有枯落物,不做研

究),沿着对角线设定5个20 cm×20 cm小样方,按未分解、半分解2个层次,测量其厚度,并称取样

方中全部枯落物鲜质量,用烘箱烘干(85℃恒温烘8~12 h)再称干物质的质量,用以计算林地枯落物现存量。取干物质100 g左右,用16目尼龙网眼布包起,做浸泡实验,测量枯落物的最大持水量。

### 2.3 土壤水分物理性质测定

在设置的样地内按S型布点,分别选取3个试验样点,共计选择18个样点。通过野外对各土壤剖面的实际观测,并结合相关文献和资料,本实验区内土壤剖面可分为:A<sub>1</sub>层(腐殖质层)、A<sub>2</sub>层(灰化层)、B层(淀积层)和C层(母质层)<sup>[12]</sup>;挖取土壤剖面,并记录各层的颜色和厚度。用环刀(体积为100 cm<sup>3</sup>)和小铝盒在固定标准地内取原状土,带回实验室,采用常规方法(如烘干称量法和浸水烘干法称量法)测定土壤密度、自然含水量、饱和含水量、土壤总孔隙度和毛管持水量等水分物理性质指标。每个土壤发生层3个重复取样。

### 2.4 土壤持水量计算

土壤饱和蓄水量和土壤非毛管蓄水量是评价土壤蓄水性能的重要指标,采用下式<sup>[13]</sup>进行计算。

$$W_t = 10000P_t h$$

$$W_0 = 10000P_0 h$$

$$W_c = 10000P_c h$$

式中:W<sub>t</sub>为土壤饱和蓄水量(t/hm<sup>2</sup>),W<sub>0</sub>为土壤非毛管蓄水量(t/hm<sup>2</sup>),W<sub>c</sub>为土壤毛管蓄水量(t/hm<sup>2</sup>),P<sub>t</sub>为土壤总孔隙度(%),P<sub>0</sub>为土壤非毛管孔隙度(%),P<sub>c</sub>为土壤毛管孔隙度(%),h为土层厚度(取0.68 m)。

## 3 结果与分析

### 3.1 枯落物现存量和最大持水量的变化

枯落物层主要由凋落物的枝、叶、皮、花、果实和种子等组成,对降雨的二次分配有着重要的作用。森林枯落物层水源涵养功能的发挥,主要取决于枯落物的类型、组成、分解状况、现存量等因素<sup>[14]</sup>,因

而不同林型枯落物的现存量对评价森林水源涵养功能有十分重要的影响。

由表3可知,不同林型枯落物的现存量在28.96~56.42 t/hm<sup>2</sup>之间,针叶林大于阔叶林,依次为:原始林>53年生人工落叶松林>39年生人工落叶松林>云冷杉针阔混交林>杨桦次生林;方差分析结果显示,除云冷杉针阔混交林和杨桦次生林差异性不显著外,其他林型枯落物含量均达到显著差异水平( $F >> F_{0.05}$ )。人工林和针叶林林冠透光性差,郁闭度高,不利于枯落物的分解,进而积累较多。未分解层厚度、分解层厚度、总厚度的变化趋势都相同,依次为:原始林>杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>53年生人工落叶松林>39年生人工落叶松林。原始林未经过人为干扰,完全处于自然状态下更新,林内伴生着少量的阔叶树种,其枯枝落叶层的微生物活动更为频繁,所以其分解层、未分解层都较厚,枯落物现存量也是最大的。由于阔叶树种的叶片较大,堆积疏松,且利于微生物分解,所以杨桦次生林的未分解层和分解层的厚度仅次于原始林,而枯落物总现存量是最小的。在人工落叶松林中,随着林龄的增加,其枯枝落叶层的未分解层厚度、分解层厚度、总厚度和现存量都是增加的。

不同林型枯落物层的最大蓄水量在33.06~62.14 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>之间,依次为:原始林>杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>53年生人工落叶松林>39年生人工落叶松林。杨桦次生林枯落物的现存量较小,但其枯落物层的持水系数最大,为1.50。人工落叶松林随林龄的增加,枯落物现存量也有所增加,但是其单位面积的持水能力有所降低,这与枯落物本身的特性有关,针叶林枝叶表层蜡质成分高,吸水性差。方差分析结果显示,原始林与其他林分差异显著,云冷杉针阔混交林与杨桦次生林差异性不显著,两种人工落叶松林差异性也不显著。

表3 不同林分类型枯落物现存量及其蓄水量

Tab. 3 Litter extant quantity and water-storage capacity of different types of forest stand

林分类型	枯枝落叶层厚度/cm			现存量/(t·hm <sup>-2</sup> )	最大蓄水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	持水系数
	未分解层	分解层	总厚度			
原始林	7.2	5.4	12.6	56.42a	62.14a	1.10
云冷杉针阔混交林	6.1	3.5	9.6	29.63d	41.88b	1.41
杨桦次生林	6.5	4.1	10.6	28.96d	43.56b	1.50
39年生人工落叶松林	3.2	2.1	5.3	34.56c	33.06c	0.96
53年生人工落叶松林	5.0	3.1	8.1	40.35b	36.53c	0.91

注:同列不同字母表示测定指标差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

### 3.2 林地土壤密度和孔隙度的变化

土壤密度和孔隙度是土壤的基本物理性质,对土壤蓄水和通气性有着直接的作用,同时,间接影响土壤肥力和作物生长状况<sup>[15]</sup>。即使在相同的

气候和土壤条件影响下,不同植被类型的林地,其土壤物理性质也有所差异<sup>[13]</sup>。表4列出了不同植被类型土壤在不同深度时土壤密度和孔隙度的变化特征。

表4 不同植被的土壤密度和孔隙度特征

Tab. 4 Soil bulk density and porosity characteristics of different vegetation types

	土层名称	土层深度/cm	土壤密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
原始林	A1	0~13	0.76	68.36	53.90	14.46
	A2	13~29	1.00	62.09	42.92	19.17
	B	29~49	1.22	54.03	33.38	20.65
	C	49~68	1.27	52.13	30.15	21.98
			(1.06)	(59.15)	(40.09)	(19.07)
云冷杉针阔混交林	A1	0~10	0.82	63.71	47.15	16.56
	A2	10~26	1.00	61.11	35.28	25.83
	B	26~47	1.22	53.05	31.53	21.52
	C	47~68	1.31	50.57	30.10	20.47
			(1.09)	(57.11)	(36.12)	(21.1)
杨桦次生林	A1	0~11	0.84	63.79	35.18	28.61
	A2	11~26	1.16	56.18	32.70	23.48
	B	26~48	1.31	50.42	26.18	24.24
	C	48~68	1.43	45.95	24.88	21.07
			(1.19)	(54.09)	(29.74)	(24.35)
39年生人工落叶松林	A1	0~11	0.86	63.42	36.10	27.32
	A2	11~27	1.33	51.49	31.48	20.01
	B	27~50	1.36	45.86	26.18	19.68
	C	50~68	1.43	43.16	23.53	19.63
			(1.25)	(50.98)	(29.32)	(21.66)
53年生人工落叶松林	A1	0~10	0.88	58.53	36.42	22.11
	A2	10~25	1.36	47.59	30.23	17.36
	B	25~46	1.43	46.08	28.35	17.73
	C	46~68	1.44	41.25	22.02	19.23
			(1.28)	(48.36)	(29.26)	(19.11)
草地	A1	0~8	1.15	56.75	46.23	10.52
	A2	8~21	1.38	45.76	27.32	18.44
	B	21~45	1.51	40.01	22.29	17.72
	C	45~68	1.62	35.84	18.40	17.44
			(1.42)	(44.59)	(28.56)	(16.03)

注:表中括号内数值为平均值。下同。

由表4可以看出,不同植被类型的土壤密度均值变动范围在1.06~1.42 g/cm<sup>3</sup>之间,各林地A<sub>1</sub>层的密度都小于1.00 g/cm<sup>3</sup>,方差分析结果显示,土壤密度随土层深度的变化达到极显著水平( $F >> F_{0.01}$ ),说明土壤各层之间的熟化程度差异性很大,土壤密度也反映了土壤的熟化程度间的差异。表层土壤密度最小,可能是因为灌木和草本植物存在的缘故,这些植物的根系50%以上生长在土壤表层0~20 cm内<sup>[3]</sup>,另外表层腐殖质的大量积累使土壤更加疏松,密度变小。回归分析结果表明,土壤密度和土层深度以幂函数方程拟合效果最好,且相关系数较大(见表5)。林地土壤密度都明显小于草地土壤密度,且改变土壤密度的作用依次为:原始林(平均值为1.06 g/cm<sup>3</sup>)>云冷杉针阔混交林(平均值为1.09 g/cm<sup>3</sup>)>杨桦次生林(平均值为1.19 g/cm<sup>3</sup>)>39年生人工落叶松林(平均值为1.25 g/cm<sup>3</sup>)>53年生人工落叶松林(平均值为1.28 g/cm<sup>3</sup>)>草地(平均值为1.42 g/cm<sup>3</sup>)(见表4)。人工落叶松林随着林龄的增加,改变土壤密度的作用有所降低,但差异性不显著。

表5 土壤密度与土层深度的关系式

Tab. 5 Relationship between soil bulk density and soil depth

	回归方程	R <sup>2</sup>
原始林	$y = 0.335 \cdot 2x^{0.323} 0$	0.986 1
云冷杉针阔混交林	$y = 0.455 \cdot 0x^{0.251} 0$	0.989 2
杨桦次生林	$y = 0.428 \cdot 4x^{0.291} 3$	0.979 0
39年生人工落叶松林	$y = 0.519 \cdot 0x^{0.259} 8$	0.838 7
53年生人工落叶松林	$y = 0.476 \cdot 7x^{0.272} 2$	0.860 1
草地	$y = 0.838 \cdot 4x^{0.156} 8$	0.990 6

由表4可知,土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层深度的递增而逐渐变小,在土壤深度0~30 cm左右变化明显,在30 cm以上变化不大;而毛管孔隙度中,杨桦次生林、39年生人工落叶松、53年生人工落叶松和草地在土层深度20~45 cm之间变化很小。回归分析结果表明:土壤总孔隙度和土层深度以对数函数方程拟合最好,相关系数大(见表6)。不同林型土壤总孔隙度平均值和毛管孔隙度平均值变动范围为44.59%~59.15%和28.56%~40.09%,其中表层的总孔隙度、毛管孔隙度均最大。地表枯落物的分解腐

表6 总孔隙度与土层深度的关系式

Tab. 6 Relationship between total porosity and depth of soil

	回归方程	R <sup>2</sup>
原始林	$y = -10.280 \ln x + 95.233$	0.976 8
云冷杉针阔混交林	$y = -7.1470 \ln x + 81.464$	0.902 2
杨桦次生林	$y = -9.729 \ln x + 87.416$	0.997 0
39年生人工落叶松林	$y = -11.130 \ln x + 89.453$	0.989 6
53年生人工落叶松林	$y = -8.520 \ln x + 77.265$	0.950 5
草地	$y = -9.601 \ln x + 76.155$	0.992 4

烂后增加了腐殖质的含量,有利于表层土壤团聚结构的形成,且土壤表层细根分布较多,而细根生长及分解可以改善土壤的孔隙状况<sup>[16]</sup>。方差分析结果显示,土壤毛管孔隙度随土层深度的变化极为显著( $F > F_{0.01}$ )。这说明土壤深度是影响土壤毛管孔隙度的主要因素之一,其可能原因一方面是土壤在不同深度的熟化程度不同,另一方面是树木的根系作用引起的<sup>[17]</sup>。而非毛管孔

隙度的变化随土层深度的变化无确定的规律,在0~30 cm之间变化很明显,最终非毛管孔隙度均值在16%~25%之间。

### 3.3 土壤的水分特性分析

土壤水分是土壤三大肥力因素之一,它不仅是土壤中物理、化学和生物过程的主要条件和参与者,同时土壤水分也是自然界水循环的一个重要环节,处于不断的变化和运动中,直接影响作物的生长和土壤中各种物质的转化过程<sup>[12]</sup>。森林是复杂的生态系统,从而导致其林地土壤也具有复杂性<sup>[18]</sup>。因此,研究林地土壤水分的特性,有助于更好地了解森林生长情况,也有助于了解哪种森林类型能更好地改良土壤,为将来林地的进一步改造提供科学依据。表7列出了不同植被类型的土壤持水特性。

表7 不同植被类型的土壤蓄水量

Tab. 7 Water-storage capacity of different vegetation types

	土层深度/cm	自然含水量/%	土壤通气性/%	饱和蓄水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	毛管蓄水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	非毛管蓄水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
原始林	0~13	41.55	36.78	888.68	700.70	187.98
	13~29	31.83	30.26	993.44	686.72	306.72
	29~49	28.90	18.77	1 080.60	667.60	413.00
	49~68	26.48	18.50	990.47	472.85	517.62
		(32.19)	(26.08)	(3 953.19)	(2 527.87)	(1 425.32)
云冷杉针阔混交林	0~10	35.10	34.93	637.10	471.50	165.60
	10~26	27.11	34.00	977.76	564.48	413.28
	26~47	24.04	23.72	1 114.05	662.13	451.92
	47~68	22.24	21.44	1 061.97	632.10	429.87
		(27.12)	(28.52)	(3 790.88)	(2 330.21)	(1 460.61)
杨桦次生林	0~11	38.10	31.79	701.69	386.98	314.71
	11~26	24.90	27.30	842.70	490.50	352.20
	26~48	22.30	21.21	1 109.24	575.96	533.28
	48~68	19.70	17.78	919.00	497.60	421.40
		(26.25)	(24.52)	(3 572.63)	(1 951.04)	(1 621.59)
39年生人工落叶松林	0~11	33.86	34.30	697.62	397.10	300.52
	11~27	23.46	20.29	823.84	503.68	320.16
	27~50	24.56	12.46	1 054.78	602.14	452.64
	50~68	20.55	13.77	776.88	423.54	353.34
		(25.61)	(20.21)	(3 353.12)	(1 926.46)	(1 426.66)
53年生人工落叶松林	0~10	31.71	30.63	585.30	346.20	221.10
	10~25	22.57	16.89	713.85	453.45	260.40
	25~46	21.14	15.85	967.68	595.35	372.33
	46~68	18.21	15.03	907.50	484.44	423.06
		(23.41)	(19.60)	(3 174.33)	(1 897.44)	(1 276.89)
草地	0~8	29.76	22.53	454.00	369.84	84.16
	8~21	22.18	15.15	594.88	355.16	239.72
	21~45	19.23	10.97	960.24	534.96	425.28
	45~68	16.75	8.71	824.32	423.20	401.12
		(21.98)	(14.34)	(2 833.44)	(1 683.16)	(1 150.28)

注:表中括号内数值,除自然含水量和土壤通气性为其平均值之外,其余均为合计值。

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<sup>[19]</sup>。从表7可以得出,土壤剖面各层次的自然含水量都是随着土层深度的递增而逐渐降低。各林

地土壤的自然含水量平均值依次为:原始林(32.19%)>云冷杉针阔混交林(27.12%)>杨桦次生林(26.25%)>39年生人工落叶松林(25.61%)>53年生人工落叶松林(23.41%)>草地(21.98%)。回归分析结果表明:自然含水量随土层深度以幂函数方程拟合最好,且相关系数大(见表8)。

表8 自然含水量随土层深度的关系式

Tab. 8 Relationship between natural moisture content and depth of soil

森林类型	回归方程	R <sup>2</sup>
原始林	$y = 81.36x^{-0.268}$	0.985 4
云冷杉针阔混交林	$y = 60.09x^{-0.238}$	0.994 7
杨桦次生林	$y = 85.94x^{-0.356}$	0.964 0
39年生人工落叶松林	$y = 58.36x^{-0.276}$	0.962 8
53年生人工落叶松林	$y = 61.08x^{-0.257}$	0.946 8
草地	$y = 50.49x^{-0.260}$	0.990 4

土壤的含水量又与土壤的通气性密切相关,土壤含水量越高,土壤的通气性就越差。由于土壤的含水量高,土壤中就有更多的孔隙被水充塞,阻碍了外界与土壤中的气体交换,然而土壤中的氧气在很短时间内就可能被耗竭,同时二氧化碳含量迅速升高,作物根系的呼吸就会受到严重抑制。而土壤的通气性是由土壤总孔隙度、自然含水量和土壤密度共同决定的,原始林、杨桦次生林和云冷杉针阔混交林地土壤有很高的总孔隙度,依然有很好的通气性。土壤的通气性依次为:云冷杉针阔混交林(28.52%)>原始林(26.08%)>杨桦次生林(24.52%)>39年生人工落叶松林(20.21%)>53年生人工落叶松林(19.60%)>草地(14.34%),前5种林型的通气性分别是草地通气性的2.0、1.8、1.7、1.4和1.3倍,而人工落叶松林随着林龄的增加土壤的通气性有所降低(见表7)。

土壤饱和蓄水量反应了土壤贮存和调节水分的潜在能力<sup>[20]</sup>。饱和蓄水量是由总孔隙度和土层厚度决定的。不同林型的林地土壤饱和蓄水量基本上是随着土层深度的递增而逐渐增加,在B层(沉淀层)达到最大值,之后又减少(见图1)。不同林型均增大了土壤的饱和蓄水能力,其顺序为:原始林(3 953.19 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>云冷杉针阔混交林(3 790.88 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>杨桦次生林(3 572.63 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>39年生人工落叶松林(3 353.12 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>53年生人工落叶松林(3 174.33 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>草地(2 833.44 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)(见表7),且前5种林型分别是草地的1.40、1.34、1.26、1.18和1.12倍。人工落叶松林随着林龄的增加林地的贮存和调节水分的潜在能力有所降低(见表7)。饱和蓄水量大,有利于调节地表径流,增加土壤蓄水。在人工造林时应加强针阔混交,应

减少人工落叶松纯林的栽植。

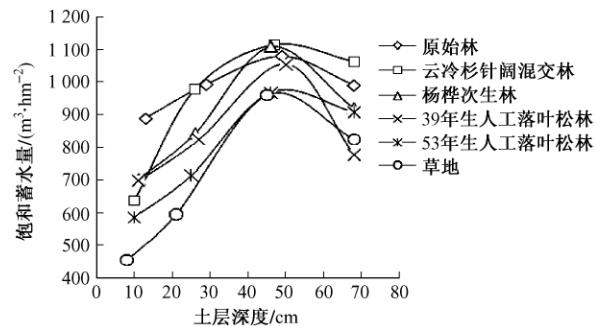


图1 饱和蓄水量随土层深度的变化

Fig. 1 Changes of maximum water-storage with soil depth

从土壤保水性能看,毛管孔隙中的水分能较长时间保持在土壤中,主要用于植物根吸收和土壤蒸发<sup>[12]</sup>。由表7可以看出,土壤毛管蓄水量依次为:原始林(2 527.87 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>云冷杉针阔混交林(2 330.21 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>杨桦次生林(1 951.04 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>39年生人工落叶松林(1 926.46 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>53年生人工落叶松林(1 897.44 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>草地(1 683.16 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>),且前5种林型分别是草地的1.56、1.38、1.16、1.14和1.13倍;原始林林地保水能力最强,而人工落叶松林随着林龄的增加林地的保水性能有所降低。

土壤的蓄水能力是评价水源涵养和调节水循环的重要指标之一,而通常以土壤非毛管蓄水量作为计量森林土壤蓄水量的标准<sup>[21]</sup>。土壤蓄水能力越高,所接纳的降雨就越多,从而为灌草的生长提供更为良好的土壤水分环境。不同植被类型的土壤非毛管蓄水量变化很大,由表7可以看出,土壤的非毛管蓄水量依次是:杨桦次生林(1 621.59 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>云冷杉针阔混交林(1 460.67 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>39年生人工落叶松林(1 426.66 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>原始林(1 425.32 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>53年生人工落叶松林(1 276.89 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>草地(1 150.28 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>);落叶松林由于本身枯落物的不易分解,从而影响林地植被的更新,且人工落叶松林随着林龄的增加林地接纳雨水的性能有所降低。

### 3.4 不同植被类型林地的水源涵养功能对比

森林林地蓄水量包括枯落物层蓄水量和土壤蓄水量<sup>[22]</sup>,由表9可知:杨桦次生林总蓄水量显著高于其他林地;原始林、云冷杉针阔混交林和39年生人工落叶松林总蓄水量有所差异,但差异性不显著;53年生人工落叶松林的总蓄水量最小。各植被类型总蓄水量依次为:杨桦次生林(1 663.47 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>云冷杉针阔混交林(1 504.23 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>原始林(1 487.46 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)>39年生人工落叶松林

( $1459.72 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 53年生人工落叶松林 ( $1304.42 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) > 草地 ( $1150.28 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ),且前5种林型分别是草地的1.45、1.31、1.29、1.26和1.13

倍。人工落叶松林随着林龄的增加,总蓄水量逐渐降低,平均每年减少水量约为 $10.35 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,说明随着林龄的增加人工落叶松林地水源涵养功能逐渐降低。

表9 不同植被类型林地蓄水量

Tab. 9 Water-storage of forest soil of different vegetation types

森林类型	非毛管蓄水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	枯落物蓄水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	总蓄水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	最大蓄水深度/mm
原始林	1 425.32	62.14	1 487.46b	148.75
云冷杉针阔混交林	1 460.67	43.56	1 504.23b	150.42
杨桦次生林	1 621.59	41.88	1 663.47a	166.35
39年生人工落叶松林	1 426.66	33.06	1 459.72b	145.97
53年生人工落叶松林	1 276.89	36.53	1 304.42c	130.44
草地	1 150.28		1 150.28c	115.03

## 4 结论与讨论

1) 不同林型枯落物现存量总体为针叶林大于阔叶林,依次为:原始林>53年生人工落叶松林>39年生人工落叶松林>云冷杉针阔混交林>杨桦次生林。枯落物层最大持水量在 $33.06\sim62.14 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间,依次为:原始林>杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>53年生人工落叶松林>39年生人工落叶松林。

2) 土壤密度随土层深度的变化以幂函数方程拟合最好。不同林型改变土壤密度的作用依次为:原始林>云冷杉针阔混交林>杨桦次生林>39年生人工落叶松林>53年生人工落叶松林>草地;各林地 $A_1$ 层的密度都小于 $1.00 \text{ g/cm}^3$ ,人工落叶松林两种林地改变土壤密度作用的大小差异性不显著。

3) 土壤总孔隙度和毛管孔隙度随土层深度的递增而逐渐变小,在土层深度 $0\sim30 \text{ cm}$ 左右变化明显,在 $30 \text{ cm}$ 以上变化不大;而毛管孔隙度中,杨桦次生林、39年生人工落叶松、53年生人工落叶松和草地在土层深度 $20\sim45 \text{ cm}$ 之间变化很小。回归分析结果显示,土壤总孔隙度和土层深度以对数函数方程拟合最好。不同植被土壤的总孔隙度和毛管孔隙度均值变动范围是 $44.59\%\sim59.15\%$ 和 $29.26\%\sim40.09\%$ ,其中腐殖质层的总孔隙度和毛管孔隙度均最大。

4) 不同林型土壤的自然含水量都是随着土层深度的递增而逐渐降低,且用幂函数方程拟合效果最好。土壤的通气性依次为:云冷杉针阔混交林>原始林>杨桦次生林>39年生人工落叶松林>53年生人工落叶松林>草地。

5) 不同林型土壤的饱和蓄水量和毛管蓄水量有相同的变化趋势,依次为:原始林>云冷杉针阔混交林>杨桦次生林>39年生人工落叶松林>53年生人工落叶松林>草地。

6) 土壤的非毛管蓄水量依次是:杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>39年生人工落叶松林>原始

林>53年生人工落叶松林>草地。

综上所述,依据枯落物层和土壤层的蓄水量来评价林地水源涵养功能,依次为:杨桦次生林>云冷杉针阔混交林>原始林>39年生人工落叶松林>53年生人工落叶松林>草地;人工落叶松林地随着林龄的增加水源涵养功能逐渐降低。

本文从宏观方面研究了在原始土壤母质形成相似的地带,林地演替不同阶段,中龄林林分的枯落物层和土壤层的持水特性,进一步揭示不同林型的林地水源涵养功能大小。枯落物现存量为针叶林大于阔叶林,这同郝占庆等<sup>[23]</sup>研究辽东山区不同林型枯落物现存量的结果变化一致。土壤自然含水量随土层深度的变化用幂函数拟合效果最好,张社奇<sup>[15]</sup>研究黄土高原油松和刺槐人工林所取得的结果相符合。土壤密度随土层深度变化依次增大,孔隙度表层相对于下层较大,这种变化特性可能与植物根系的空间分布有关,因为植物的根系主要分布在表层<sup>[16]</sup>,进而影响各种指标的持水特性。尽管落叶松林枯落物层较厚,但是会影响林下植被的更新,进而影响林地的发育状况,其土壤密度、孔隙度、水源涵养功能都小于针阔混交林,这与徐学华等<sup>[24]</sup>研究冀北山地取得的结果一致;另外本研究中落叶松林地随着林龄的增加林地有衰退的趋势,这与潘建平等<sup>[25]</sup>和耿玉清等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。影响林地水源涵养功能的因素有很多,也很复杂,比如林分密度、胸径、降水量、温湿度、林内伴生的树种等,这些因素具体的细微变化会对结果产生多大的影响,有待进一步研究和讨论。枯落物层涵养水源的功能也很大,建议在今后的森林经营中注重保护林地的枯落物,保护现有的天然阔叶林,加强营造针阔混交林的力度,注意树种的搭配,提高枯落物的分解程度,进一步改善土壤的物理性质,以便更好地发挥长白山地区森林水源涵养功能的生态效益。

## 参 考 文 献

- [1] 孟宪宇,邱水文.长白落叶松直径分布收获模型的研究[J].北京林业大学学报,1991,13(4):9~14.

- [2] 孙中伟,赵土洞.长白山北坡椴树阔叶红松林群落特征[J].生态学杂志,1995,14(5):26-30.
- [3] 杜晓军,刘常富,金罡,等.长白山主要森林生态系统根系生物量研究[J].沈阳农业大学学报,1998,29(3):229-232.
- [4] 穆新刚,胡文力,董景林,等.过伐林区检查法经营针阔混交林林分结构动态[J].北京林业大学学报,2003,25(6):1-5.
- [5] 张会儒,汤孟平.金沟岭林场混交林 TWINSPAN 分类及演替序列分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2009,33(1):37-42.
- [6] 龚直文,亢新刚,杨华,等.长白山杨桦次生林直径结构研究[J].西北林学院学报,2009,24(3):1-6.
- [7] 胡云云,亢新刚,赵俊卉.长白山地区天然林林木年龄与胸径的变动关系[J].东北林业大学学报,2009,37(11):38-42.
- [8] 胡艳玲,韩士杰,李雪峰,等.长白山原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应[J].东北林业大学学报,2009,37(5):37-42.
- [9] 夏富才,赵秀海,潘春芳,等.长白山阔叶红松林林分空间结构[J].应用与环境生物学报,2010,16(4):529-534.
- [10] 赵俊卉.长白山云冷杉林混交林生长模型的研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [11] 孙迪,夏静芳,关德新,等.长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J].应用生态学报,2010,21(6):1405-1409.
- [12] 林大仪.土壤学[M].北京:中国林业出版社,2002:244-245.
- [13] 孙艳红,张洪江,程金花,等.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2006,20(2):106-109.
- [14] 刘世荣,温光远,王兵,等.中国森林生态水文生态功能规律[M].北京:中国林业出版社,1996:156-159.
- [15] 张社奇.黄土高原油松、刺槐人工林土壤生态系统的功能特征研究[D].杨凌:西北林学院,2004.
- [16] 王树堂,韩士杰,张军辉,等.长白山阔叶红松林表层土壤木本植物细根生物量及其空间分布[J].应用生态学报,2010,21(3):583-589.
- [17] IROUME A, HUBER A, SCHULZ K. Summer flows in experimental catchments with different forest covers, Chgile [J]. Journal of Hydrology, 2005, 300:300-313.
- [18] WHAKEY W R, RISELEY B, LEEDS-HARRISM P B, et al. Structural differences between bulk and rhizosphere soil [J]. European Journal of Soil Science, 2004, 56(3):353-360.
- [19] 周泽福,张光灿,林富荣.太行山水源涵养林研究[M].北京:中国林业出版社,2006:39-41.
- [20] 王国胜,洪惜英,王礼先.密云水库上游油松等林分调节水分效应的研究[J].北京林业大学学报,1995,17(2):21-25.
- [21] 马雪华.森林水文学[M].北京:中国林业出版社,1993:124-126.
- [22] 余新晓,甘敬.水源涵养林研究与示范[M].北京:中国林业出版社,2007:20-23.
- [23] 郝占庆,王力华.辽东山区主要森林类型林地土壤蓄水性能的研究[J].应用生态学报,1998,9(3):237-241.
- [24] 徐学华,于树峰,崔立志,等.冀北山地华北落叶松人工林水源涵养功能分析[J].水土保持研究,2009,16(5):163-166.
- [25] 潘建平,王华章,杨秀琴.落叶松人工林地理衰退研究的现状与进展[J].东北林业大学学报,1997,25(2):59-63.
- [26] 耿玉清,孙向阳,亢新刚,等.长白山林区不同森林类型下土壤肥力状况的研究[J].北京林业大学学报,1999,21(6):97-101.

(责任编辑 冯秀兰)