

沿坝地区 3 种典型林分类型枯落物层与土壤层水源涵养能力综合评价

杨良辰¹, 张春茹²

(1. 河北省涉县职业技术教育中心 河北 涉县 056400; 2. 河北木兰围场国有林场管理局, 河北 围场 068450)

摘要:为了研究沿坝地区 3 种典型林分的枯落物层与土壤层的水源涵养能力,利用熵权法对林分的枯落物层和土壤层的相关因子进行了综合评价。结果表明:(1) 枯落物层最大持水量:针阔混交林>油松林>落叶松纯林;有效拦蓄量:针阔混交林>油松林>落叶松纯林。(2) 持水量与浸水时间的回归方程为 $Q=alnt+b$ ($R^2>0.97$), 持水速率与浸水时间的回归方程为 $V=Kt^n$ ($R^2>0.94$)。 (3) 3 种林分类型土壤总孔隙度的排序为:针阔混交林>油松纯林>落叶松纯林;土壤持水能力大小排序为:针阔混交林>落叶松纯林>油松纯林;3 种林分土壤层的初渗速率差距比较大,大小排序为:针阔混交林>落叶松纯林>油松纯林;林分的稳渗速率大小排序为:针阔混交林>落叶松纯林>油松纯林;入渗速率与入渗时间回归方程为: $f=at^{-b}$ ($R>0.96$)。 (4) 利用熵权法计算得出的权重大小排序为:枯落物最大持水量>枯落物有效拦蓄量=土壤持水力>初渗速率>土壤毛管孔隙度>土壤容重>枯落物蓄积量=土壤非毛管孔隙度,3 种林分类型综合评分排序为:针阔混交林>油松纯林>落叶松纯林。针阔混交林为最优的水源涵养林,其在保持水土、涵养水源方面功能最强。

关键词:沿坝地区; 枯落物层; 土壤层; 水源涵养

中图分类号: S714.7; S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)06-0177-06

Comprehensive Evaluation of Water Conservation Capacity in Litter and Soil Layer of Three Typical Forest Types Along the Highland Area

YANG Liangchen¹, ZHANG Chunru²

(1. Shexian Vocational and Technical Education Center in Hebei Province, Shexian, Hebei 056400, China;

2. Mulan-Weichang Forestry Administration of Hebei Province, Weichang, Hebei 068450, China)

Abstract: In order to study the water conservation ability of the litter layer and soil layer of 3 typical stands along the highland area, the entropy weight method was used to evaluate the relative factors of the litter and soil layers. The results showed that: (1) the maximum water holding capacity of the litter layer decreased in the order: Coniferous and broad-leaved forest > *Pinus tabulaeformis* forest > *Larix gmelinii* pure forest; the effective retention amount decreased in the order: Coniferous and broad-leaved forest > *Pinus tabulaeformis* forest > *Larix gmelinii* pure forest; (2) the regression equation of water holding capacity and soaking time was presented as $Q=alnt+b$ ($R^2>0.97$), and the regression equation of water holding rate and soaking time was presented as $V=Kt^n$ ($R^2>0.94$); (3) the total soil porosity of 3 types of forest types decreased in the order: Coniferous and broad-leaved mixed forest > *Pinus tabulaeformis* forest > *Larix gmelinii* pure forest; the soil water holding capacity decreased in the order: Coniferous and broad-leaved mixed forest > *Larix gmelinii* pure forest > *Pinus tabulaeformis* forest; the initial infiltration rate of soil layer of 3 kinds of stand was larger, the size decreased in the order: Coniferous broad-leaved mixed forest > *Larix gmelinii* pure forest > *Pinus tabulaeformis* forest; the stable infiltration rate of the stand decreased in the order: Coniferous

收稿日期: 2018-02-07

修回日期: 2018-02-24

资助项目: 国家自然科学基金“基于森林空间结构的华北落叶松人工林种子萌发及幼苗成活机制研究”(31500523); 河北省林业厅科学技术研究计划(1705488)

第一作者: 杨良辰(1964—), 男, 河北涉县人, 本科, 主要从事果林生产技术与水土保持研究。E-mail: 937962206@qq.com

通信作者: 张春茹(1975—), 女, 河北围场人, 副高, 主要从事林业经济管理和水土保持研究。E-mail: 927293733@qq.com

and broad-leaved mixed forest>*Larix gmelinii* pure forest>*Pinus tabulaeformis* forest; the regression equation of infiltration rate and infiltration time was presented as $f=at^{-b}$ ($R>0.96$); (4) the weights calculated by the entropy weight method followed the sequence: the maximum water holding capacity of the litter>the effective blocking amount of the litter=soil water holding capacity>initial infiltration rate>soil capillary porosity>soil bulk weight>litter volume=soil non capillary porosity, and comprehensive scoring of 3 types of forest type decreased in the order: Coniferous and broad-leaved mixed forest>*Pinus tabulaeformis* forest>*Larix gmelinii* pure forest. Coniferous and broad-leaved mixed forest is the best water conservation forest, which has the strongest function of soil and water conservation.

Keywords: highland area; litter layer; soil layer; water conservation

枯落物层和土壤层对森林截留降水、减缓降雨速度和涵养水分具有很重要的作用^[1]。木兰围场位于沿坝地区,森林多以针叶为主,其中华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)为主要组成部分,阔叶则以山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)为主^[2-3]。森林是生态系统的重要组成部分,其很重要的一个功能是水源涵养,减少水土流失,不同森林组成在水源涵养方面的能力也是不一样的,具有一定的差异^[4-6]。该地区的研究主要集中林分的结构、生长特性、物种多样性、森林各层次的水源涵养能力,但是对林分水源涵养综合能力进行评价的研究则相对较少。本文利用熵权法将沿坝地区 3 种典型森林类型的枯落物层与土壤层水源涵养能力进行量化,能够更加直观地进行评价和比较,以便于为该地区的森林生态效益评价提供一定的理论依据^[7-8]。

1 研究区概况

围场县位于承德境内,地理坐标为东经 116°32′—118°14′,北纬 41°35′—42°40′。与内蒙古接壤,处于华北山石区的沿坝地区,是山区与坝上的过渡地带,海拔

750~1 829 m,年平均温度较低,为-1.5~4.8℃,年无霜期 90~125 d,年均降水时间分布很不均匀,集中性比较强,降雨量为 380~560 mm,土壤的种类也较多,总共有 143 个土种,植物种类资源也是非常丰富,野生的种子植物达到了 793 种,蕨类植物 22 种。此次的试验地点在围场县木兰林管局的北沟林场。

2 研究方法

2.1 枯落物层数据测定

2.1.1 枯落物生物量 2016 年 8 月在沿坝地区的北沟林场,选择华北落叶松纯林、油松纯林、针阔混交林 3 种林分类型设置标准的样地,样地的大小为 30 m×30 m,并对标准地的基本情况进行了调查(表 1),其中郁闭度的测定是通过在样地内机械地设置 100 个样点,在各样点位置上进行抬头垂直昂视,判断该样点是否被树冠覆盖,统计被覆盖的样点数,该点数与样点数的比值则是林分的郁闭度。而枯落物生物量的测定则是在选取的标准地里选取样地的 4 个角和中心位置设置 5 块枯落物小样方,大小为 50 cm×50 cm,枯落物测定分未分解层和半分解层,以下枯落物的数据都是均值。

表 1 3 种林分类型标准地概况

林分类型	海拔/m	坡向	坡度/(°)	林龄/a	郁闭度	主要树种	平均胸径/cm	平均树高/m
I	1170~1310	阴坡	21~22	25~29	0.70	华北落叶松	13.5	11.9
II	1110~1250	半阳坡	14~18	25~29	0.75	油松	14.8	12.3
III	1150~1300	半阴坡	20~23	25~29	0.85	华北落叶松 白桦 黑桦	15.0	12.5

注: I 代表华北落叶松纯林,简称落叶松林; II 代表油松纯林; III 代表针阔混交林,下同。

2.1.2 枯落物持水量和吸水速率 利用室内浸泡法对 3 种林分的枯落物持水量和持水速率进行测定,先测量枯落物的厚度,根据枯落物分解的程度来进行区分,划分为未分解层与半分解层,然后要快速对其鲜重进行称量,此后带回实验室进行烘干,对其重量进行再次称

重,最后将需要测定的枯落物在水中浸泡,在 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 24 h 对枯落物的重量变化要进行测定,从而得出枯落物的持水量、持水速率和最大持水率测定枯落物的持水量^[9-11]。利用下式进行计算:

$$C = (m_1 - m_2) / m_2 \times 100\% \quad (1)$$

$$S = (m_3 - m_2) / m_2 \times 100\% \quad (2)$$

$$W_m = (R_m - R_0)M \quad (3)$$

式中: C 为枯落物自然含水量(%); m_1 为样品鲜质量(g); m_2 为样品烘干质量(g); S 为饱和持水率, m_3 为样品浸水 24 h 后的质量(g); W_m 为枯落物的最大拦蓄量(t/hm^2); R_m 为最大持水率(%); R_0 为平均自然含水量(%); M 为枯落物蓄积量(t/hm^2)。

2.1.3 枯落物有效拦蓄量 枯落物对降雨的实际拦蓄量的测定,可以通过有效拦蓄量(modified interception)来进行计算,即:

$$W = (0.85R_m - R_0)M \quad (4)$$

式中: W 为有效拦蓄量(t/hm^2); R_m 为最大持水率(%); R_0 为平均自然含水率(%); M 为枯落物蓄积量(t/hm^2)。

2.2 土壤层物理性质和土壤入渗过程测定

按照不同的土层深度取样,即土壤剖面法,采用土壤烘干法和环刀法测定需要的土壤特性。其中土壤持水力 $S=10000hp$,式中: S 为土持水力(t/hm^2); h 为土壤层厚度(m); p 为非毛管孔隙度(%)。

采用双环法测定水分入渗土壤的过程,初渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间;平均渗透速率=达到稳渗时的渗透总量/达到稳渗时的时间。利用 Kostiakov 模型来对水入渗土壤的过程来拟合,在 $f=at^{-b}$ 中: f 为 t 时间时的瞬时入渗速率; t 为入渗时间; a, b 则是指试验资料拟合的参数。

2.3 水源涵养综合评价

本研究为了能够将枯落物层和土壤层的水文效应更加直观地进行比较评价,利用熵权法对林分各因子进行量化,在一个标准系统下进行计算,对 3 种林分类型的水源涵养能力进行综合评价,主熵的概念源于热力学,是对系统状态不确定性的一种度量,通过熵值法得到各个指标的信息熵,信息熵越小,信息的无序度越

低,其信息的效用值越大,指标的权重越大^[12-13]。

(1) 依据以下公式计算出各个指标的熵值,记为 H_i ,各指标具体熵值,计算熵值公式为:

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

$$f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^n r_{ij}}, k = \frac{1}{\ln n} \quad (\text{假定 } f_{ij} = 0 \text{ 时, } f_{ij} \ln f_{ij} = 0)$$

式中: H_i 为熵值; k 为常数 $1/\ln n$; f_{ij} 为在第 j 个评价指标下第 i 个林分 H_i 的贡献度; i 表示林分类型数; j 表示评价指标数。

(2) 依据以下公式计算各个指标的权重,记为 w_i ,计算权重公式为:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (i=1, \dots, m) \quad (6)$$

式中: w_i 为权重; H_i 为熵值; i 为林分类型数。

3 结果与分析

3.1 枯落物生物量

枯落物的存量多少是由很多因素决定的,决定枯落物存量的是林分枯落物的进入量和分解量,而林分枯落物的进入量与林分树种组成、郁闭度和林下植被生长情况都是有关系的。由表 2 可以看出,针阔混交林的枯落物生物量最大,为 $17.19 t/hm^2$,其次是油松纯林,大小为 $16.9 t/hm^2$,最小的是落叶松纯林,为 $15.86 t/hm^2$ 。此外,3 种林分的未分解层和半分解层的组成比例也是有差异的,其中落叶松纯林和油松纯林的未分解层的比例都是大于半分解层,而针阔混交林的半分解层的比例是大于未分解层的,针阔混交林未分解层所占比例最小,占总储量的 46.42% ,落叶松纯林则最大,占总储量的 54.54% ,而油松居中为 52.6% 。

表 2 3 种林分类型枯落物生物量

林分类型	枯落物平均厚度/cm		总厚度/ cm	枯落物生物量				总生物量/ ($t \cdot hm^{-2}$)
	未分解	半分解		未分解/ ($t \cdot hm^{-2}$)	比例/ %	半分解/ ($t \cdot hm^{-2}$)	比例/ %	
I	2.30	1.80	4.10	8.65	54.54	7.21	45.46	15.86
II	3.50	1.40	4.90	8.89	52.60	8.01	47.40	16.90
III	1.80	1.60	3.40	7.98	46.42	9.21	53.58	17.19

3.2 枯落物水文效应

3.2.1 枯落物最大持水量 3 种林分类型中针阔混交林的最大持水量最大,为 $37.59 t/hm^2$,其次为油松纯林和落叶松纯林,分别为 $27.78 t/hm^2$ 和 $26.04 t/hm^2$;3 种林分类型的最大持水率的范围 $163.55\% \sim 216.55\%$,依次为针阔混交林分 > 油松纯林 > 落叶松纯林。

表 3 3 种林分类型枯落物最大持水量和最大持水率

林分 类型	最大持水量/($t \cdot hm^{-2}$)			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	总和
I	14.72	11.32	26.04	170.12	156.97	163.55
II	13.45	14.33	27.78	151.32	178.95	165.14
III	14.86	22.73	37.59	186.26	246.83	216.55

3.2.2 枯落物持水过程 枯落物在浸泡持水过程中

有一定的规律,在0.5 h内是吸水最快的阶段,随着时间的推移枯落物的持水量不断增加,最后趋于稳定,但是不同的林分枯落物的持水速率也是有差距的,枯落物的这一过程与降雨时枯落物的拦蓄过程有一定的相似性,在降雨的初期,枯落物的拦蓄能力比较强,但是随着枯落物的持水量增加,枯落物的吸持能力降低。枯落物的未分解和半分解层的持水量也

有一定的差距,达到饱和的时间也不相同(表4)。对0.25~24 h之间3种类型林分枯落物各层持水量与浸泡时间的关系进行回归分析,得出该时间段内持水量与浸泡时间之间存在如下关系(表5):

$$Q = a \ln t + b \quad (7)$$

式中:Q为枯落物持水量(g/kg);t为浸泡时间(h);a为方程系数;b为方程常数项。

表4 3种林分类型枯落物层持水过程

林分类型	层次	0.25 h	0.5 h	1 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	24 h
I	未分解	1701.3	1969.8	2089.7	2131.5	2198.5	2253.8	2298.7	2338.6	2412.5
	半分解	2108.6	2436.9	2570.5	2631.1	2710.9	2789.1	2864.8	2901.2	2962.3
II	未分解	1801.2	2010.0	2112.6	2168.3	2231.4	2287.9	2338.5	2387.4	2479.6
	半分解	2691.0	2821.3	3024.6	3129.5	3212.8	3289.1	3359.3	3415.6	3506.5
III	未分解	2203.1	2487.9	2634.2	2748.3	2834.6	2920.5	2989.3	3048.7	3146.3
	半分解	2764.3	2929.8	3136.8	3256.9	3345.2	3421.3	3490.1	3546.3	3634.2

3.2.3 枯落物吸水速率 通过试验表明,3种类型林分的枯落物的吸水速率具有一定的规律,在0.25~1 h内,枯落物的吸水速率是最大的时候,随后速率出现了较大的下降,在6 h左右时枯落物的下降速率趋于平缓,随着时间推移,枯落物的吸水速率趋于稳定,这种情况是因为随着浸泡的时间不断增长,枯落物的持水量达到了最大持水量,即枯落物的持水量趋于饱和,持水速率也会趋于稳定。

3.2.4 枯落物有效拦蓄量 林分类型下不同层次枯落物的拦蓄能力见表6,枯落物的累积量的大小排序为:III>II>I,针阔混交林的枯落物累积量最大为17.19 t/hm²,落叶松纯林的最小为15.86 t/hm²,油松居中为16.9 t/hm²;最大持水量的大小排序为:III>II>I,针阔混交林最大为37.59 t/hm²,落叶松纯林的最小为26.04 t/hm²,油松居中为27.78 t/hm²;有效拦蓄量

大小排序为:III>II>I,有效拦蓄量针阔混交林的枯落物累积量最大为27.65 t/hm²,落叶松纯林的最小为20.24 t/hm²,油松居中为21.71 t/hm²。最大持水率、最大拦蓄率和有效拦蓄量的大小排序都是一样的,其中针阔混交林的最大,油松其次,落叶松纯林最小。

表5 不同林分枯落物层持水量、持水率与浸泡时间关系

枯落物层	林分类型	持水量与浸泡时间关系式	R ²	持水率与浸泡时间关系式	R ²
未分解层	I	$Q=300.19 \ln t + 1727.9$	0.9885	$V=11187t^{-1.892}$	0.9447
	II	$Q=286.53 \ln t + 1794.3$	0.9851	$V=11629t^{-1.903}$	0.9485
	III	$Q=414.14 \ln t + 2190.1$	0.9951	$V=14230t^{-1.882}$	0.9468
半分解层	I	$Q=370.69 \ln t + 2136.7$	0.9920	$V=13837t^{-1.892}$	0.9446
	II	$Q=376.29 \ln t + 2625.8$	0.9791	$V=17009t^{-1.916}$	0.951
	III	$Q=401.07 \ln t + 2710.1$	0.9872	$V=17555t^{-1.912}$	0.9501

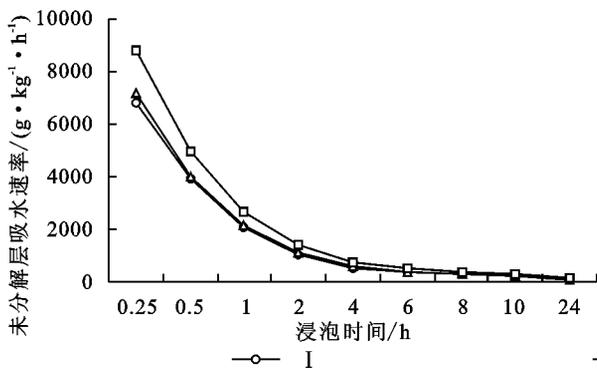


图1 3种林分类型枯落物持水量、持水速率与浸泡时间关系曲线

3.3 土壤层的水文效应

3.3.1 土壤层的物理性质 由表7可以看出,3种林分类型土壤容重的总体差距不大,其中落叶松纯林的最大,为1.31 g/cm³,油松纯林的次之,为1.21 g/cm³,针阔混交林的最小,为1.19 g/cm³;总孔隙度的排序为:针阔混交林(54.15%)>油松纯林

(49.31%)>落叶松纯林(41.87%);而非毛管孔隙度与土壤持水力密切相关,其大小排序为:针阔混交林(5.12%)>落叶松纯林(4.89%)>油松纯林(4.69%)。土壤持水能力大小排序为:针阔混交林(363.52 t/hm²)>落叶松纯林(388.51 t/hm²)>油松纯林(267.33 t/hm²)。

表 6 不同林分枯落物层有效拦蓄能力

层次	林分类型	枯落物累积量/ (t · hm ⁻²)	自然 含水率/%	最大 持水率/%	最大 拦蓄率/%	有效 拦蓄率/%	最大持水量/ (t · hm ⁻²)	有效拦蓄量/ (t · hm ⁻²)	有效 拦蓄深/mm
未分解层	I	8.65	6.93	170.12	163.19	137.67	14.72	11.91	1.19
	II	8.89	12.30	151.32	139.02	116.32	13.45	10.34	1.03
	III	7.98	12.89	186.26	173.37	145.43	14.86	11.61	1.16
半分解层	I	7.21	17.91	156.97	139.06	115.51	11.32	8.33	0.83
	II	8.01	10.21	178.95	168.74	141.90	14.33	11.37	1.14
	III	9.21	35.64	246.83	211.19	174.17	22.73	16.04	1.60

表 7 3 种林分类型土壤的物理性质

林分类型	土壤容重/ (g · cm ⁻³)	土壤 厚度/cm	自然 含水率/%	非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	总毛管 孔隙度/%	土壤持水力/ (t · hm ⁻²)
I	1.31	59	20.18	4.89	36.98	41.87	288.51
II	1.21	57	17.35	4.69	44.62	49.31	267.33
III	1.19	71	37.21	5.12	49.03	54.15	363.52

3.3.2 土壤层的渗透性 土壤渗透性是土壤物理性质的主要特征之一,它代表了入渗的速度,而且还是林分水源涵养的指标之一。土壤的渗透性越好,林分的水源涵养能力越强,土壤的流失也会比较小,地表的径流也会比较少,从而减少林分土壤被侵蚀的程度。从表 8 可以看出,3 种林分土壤层的初渗速率差距比较大,大小排序为:针阔混交林(24.7 mm/min) > 落叶松纯林(22.1 mm/min) > 油松纯林(18.9 mm/min);随着时间的不断推移,土壤的入渗速率会趋于稳定,各林分的稳渗速率大小排序为:针阔混交林(1 mm/min) > 落叶松纯林(0.9 mm/min) > 油松纯林(0.7 mm/min);呈现这种情况的主要原因为:针阔混交林的土壤层的非毛管孔隙数量多,对于土壤的水分渗入非常有利,渗透性也会比较强,而油松纯林土壤层的非毛管孔隙较少,不利于土壤层水分的渗入,渗透性也就比较差。3 个林分达到稳定入渗的时间是不同的,针阔混交林时间最长为 32 min,油松纯林最小为 25 min,落叶松纯林居中为 29 min。通过对入渗速率与入渗时间进行线性回归分析,发现二者之间存在较好的幂函数关系:

$$f = at^{-b} \quad (R > 0.96)$$

式中: f 为入渗速率(mm/min); a, b 为常数; t 为入渗时间(min)。

表 8 3 种林分类型土壤渗透的速率及渗透数学模型

林分类型	初渗速率/ (mm · min ⁻¹)	稳渗速率/ (mm · min ⁻¹)	稳渗 时间/min	回归 方程	R
I	22.1	0.9	29	$f = 34.23t^{-1.095}$	0.9838
II	18.9	0.7	25	$f = 39.795t^{-1.234}$	0.9736
III	25.6	1	32	$f = 39.273t^{-0.953}$	0.9671

3.4 水源涵养能力综合评价

3.4.1 不同森林类型评价指标数据表 本研究采用熵权法,选择枯落物层和土壤层的指标来进行综合评价,其中枯落物层水文效应指标选择 3 个,包括枯落物蓄积量、有效拦蓄量和最大持水量;土壤层水文效应选择 5 个评价指标,包括土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤持水力、初渗速率,总计 8 项指标,综合 8 项指标进行权重赋值来评价沿坝地区 3 种不同森林类型水源涵养能力(表 9)。

表 9 3 种不同林分类型评价指标数据

林分类型	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
I	15.86	20.24	26.04	1.31	36.98	4.89	288.51	22.10
II	16.90	21.71	27.78	1.21	44.62	4.69	267.33	18.90
III	17.19	27.65	37.59	1.19	49.03	5.12	363.52	25.60

注: A_1 为枯落物蓄积量, A_2 为枯落物有效拦蓄量, A_3 为枯落物最大持水量, A_4 为土壤容重, A_5 为土壤毛管孔隙度, A_6 为土壤非毛管孔隙度, A_7 为土壤持水力, A_8 初渗速率,下表同。

3.4.2 构造标准化指标矩阵并计算权重值 根据第 j 个属性下第 i 个方案 A_i 的贡献度,即先求出各列的和,然后用每行的数值比上列和,形成新的标准矩阵(表 10),再根据公式(5)计算出各指标的熵值,最后利用公式(6)计算出各林分类型的权重值(表 11),利用熵值法计算得出的权重为枯落物蓄积量占 1%,枯落物有效拦蓄量占 19%,枯落物最大持水量占 28%,土壤容重占 2%,土壤毛

管孔隙度占 14%,土壤非毛管孔隙度占 1%,土壤持水力占 19%,初渗速率占 16%,故我们在对林分水源涵养进行综合评价的时候更多要考虑林分枯落物的最大持水量、枯落物有效拦蓄量、土壤持水力和初渗速率,3 种林分指标的具体值与其权重的乘积之和为其综合评价值,这样得出 3 种林分类型综合评分排序为:针阔混交林(16.968 9) > 油松纯林(12.854 4) > 落叶松纯林(12.103 8)。

表 10 各指标标准化矩阵

林分类型	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
I	0.32	0.29	0.28	0.35	0.28	0.33	0.31	0.33
II	0.34	0.31	0.30	0.33	0.34	0.32	0.29	0.28
III	0.34	0.40	0.41	0.32	0.38	0.35	0.40	0.38

表 11 各指标权重值

A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
0.01	0.19	0.28	0.02	0.14	0.01	0.19	0.16

表 12 水源涵养能力评价

林分类型	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	水源涵养能力
I	0.1953	3.9190	7.3305	0.0243	0.0510	0.0007	0.5482	0.0350	12.1038
II	0.2081	4.2036	7.8203	0.0225	0.0616	0.0006	0.5079	0.0299	12.8544
III	0.2116	5.3538	10.5819	0.0221	0.0676	0.0007	0.6907	0.0405	16.9689

4 结论

(1) 枯落物层最大持水量: 针阔混交林 > 油松纯林 > 落叶松纯林, 3 种林分中针阔混交林的持水潜力是最大, 落叶松纯林相对是最小的; 有效拦蓄量: 针阔混交林 > 油松纯林 > 落叶松纯林, 说明 3 种林分中真实拦蓄量最大的为针阔混交林, 最次的落叶松纯林, 出现这种差异主要是因为林分枯落物层的生物量不同, 因此三种林分中最优的水源涵养林为针阔混交林; 持水量与浸水时间的回归方程为 $Q = a \ln t + b$ ($R^2 > 0.97$), 持水速率与浸水时间的回归方程为 $V = Kt^n$ ($R^2 > 0.94$)。枯落物持水测定采用了浸泡法, 虽然在一定程度上反映了林分的真实拦蓄量, 但是对于特定降雨情况的拦蓄能力还需要进一步的研究。

(2) 3 种林分类型总孔隙度、非毛管孔隙度和土壤的初渗速率最高的均为混交林, 高于其他两种纯林, 说明混交林的地理环境更有利于林木的生长和涵养水源。非毛管孔隙度与土壤持水力密切相关, 其大小排序与土壤持水能力相同, 大小依次排序为针阔混交林、落叶松纯林、油松纯林, 3 种林分土壤层的初渗速率差距比较大, 大小依次排序为针阔混交林、落叶松纯林、油松纯林; 3 个林分达到稳定入渗的时间是不同的, 针阔混交林时间最长为 32 min, 油松纯林最小为 25 min, 落叶松纯林居中为 29 min; 入渗速率与入渗时间回归方程为: $f = at^{-b}$ ($R > 0.96$)。

(3) 利用熵权法计算得出的权重大小排序为: 枯落物最大持水量(28%) > 枯落物有效拦蓄量(19%) = 土壤持水力(19%) > 初渗速率(16%) > 土壤毛管孔隙度(14%) > 土壤容重(2%) > 枯落物蓄积量(1%) = 土壤非毛管孔隙度(1%), 3 种林分类型综合评分排序为: 针阔混交林(16.968 9) > 油松纯林(12.854 4) > 落叶松纯林(12.103 8)。针阔混交林为最优的水源涵养林, 其在保持水土、涵养水源方面功能最强。

参考文献:

- [1] 徐娟, 余新晓, 席彩云. 北京十三陵不同林分枯落物层和土壤层水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 189-193.
- [2] 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报, 2006, 19(3): 139-143.
- [3] 姜海燕, 赵雨森, 陈祥伟, 等. 大兴安岭岭南几种主要森林类型土壤水文功能研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 149-153.
- [4] 张晓蓓. 宁夏六盘山南侧华北落叶松人工林生态水文影响的密度效应评价[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2012.
- [5] 张宁, 梁丽双, 常月梅, 等. 冀北山地落叶松 4 种典型林分的结构研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 22(6): 20-27.
- [6] 张宁, 郭宾良, 于士涛, 等. 冀北山地 4 种典型落叶松林分生态功能研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 320-327.
- [7] 孙艳红, 张洪江, 杜士才, 等. 四面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, 2009, 23(5): 109-113.
- [8] 赵阳, 余新晓, 吴海龙, 等. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 148-152.
- [9] 白晋华, 胡振华, 郭晋平. 华北山地次生林典型森林类型枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 84-89.
- [10] 梁晓娇, 王树力, 阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 140-145.
- [11] 杨振奇, 秦富仓, 李晓琴, 等. 砭砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 118-122.
- [12] 谈正鑫, 万福绪, 张涛. 盱眙人工林枯落物及土壤水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 184-188.
- [13] 张焜. 重庆四面山 4 种类型天然林水文功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.