

DOI: 10.5846/stxb201811212530

杨建伟, 杨建英, 何会宾, 唐静, 赵廷宁. 冀北山区滦平县 4 种新造林地水源涵养能力研究. 生态学报, 2019, 39(18): - .

Yang J W, Yang J Y, He H B, Tang J, Zhao T N. Study of water conservation capacity of four new woodlands in the northern Hebei Mountainous Area of Luanping County. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): - .

冀北山区滦平县 4 种新造林地水源涵养能力研究

杨建伟¹, 杨建英^{1,*}, 何会宾², 唐静³, 赵廷宁¹

1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

2 河北省承德市林业局生态工程项目管理中心, 承德 067000

3 河北省承德市滦平县林业局, 滦平 068250

摘要: 为研究密云水库上游冀北山区生态水源保护林的生长现状和涵养水源能力, 以油松×落叶松 (林地 I)、油松×山杏 (林地 II)、油松×蒙古栎 (林地 III)、侧柏×山杏 (林地 IV) 4 种混交林为研究对象, 通过测定林下枯落物层和土壤层特征, 分析比较不同林地枯落物和土壤的持水能力及林地水源涵养能力。研究结果表明: 枯落物现存量林地 II > 林地 IV > 林地 I > 林地 III, 林地 II 的枯落物层有效持水量最大, 为 81.30 t/hm², 林地 I 最小。土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度最大的均为林地 IV, 分别为 56.02%、50.26% 和 5.76%, 林地 IV 的土壤层有效持水量最大, 为 1507.90 t/hm², 林地 III 最小。综合 4 种林地的枯落物层和土壤层持水能力, 可知林地 IV (侧柏×山杏) 的水源涵养能力最强, 为 157.43 mm, 林地 III (油松×蒙古栎) 最弱。

关键词: 生态; 水源保护林; 滦平县; 枯落物层; 土壤层; 水源涵养能力

Study of water conservation capacity of four new woodlands in the northern Hebei Mountainous Area of Luanping County

YANG Jianwei¹, YANG Jianying¹, HE Huibin², TANG Jing³, ZHAO Tingning¹

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083

2 Eco-engineering Project Management Center of Chengde Forestry Bureau, Hebei Province, Chengde 067000

3 Luanping Forestry Bureau, Chengde City, Hebei Province, Luanping 068250

Abstract: To study the growth status and water conservation capacity of water conservation forests in the mountainous areas of northern Hebei in the upper reaches of the Miyun Reservoir, four mixed forests, *Pinus tabulaeformis* × *Larix* (woodland I), *Pinus tabulaeformis* × *Apricot* (woodland II), *Pinus tabulaeformis* × *Quercus mongolica* (woodland III), and *Platycladus orientalis* × *Apricot* (woodland IV), were studied. Through the analysis of the characteristics of the litter layer and soil layer under the forests, the water-holding capacity of the litter and soil and the water conservation capacity of the forest land were analysed and compared. The results showed that the existing litter amount was in the order of woodland II > woodland IV > woodland I > woodland III. The litter layer of woodland II had the largest effective water-holding capacity, which was 81.30 t/hm², and that of woodland I had the lowest water-holding capacity. Soil total porosity, capillary porosity, and non-capillary porosity were the highest in woodland IV (56.02%, 50.26%, and 5.76%, respectively). The soil layer of woodland IV had the most effective water-holding capacity, which was 1507.90 t/hm², and that of woodland III had the lowest water-holding capacity. Upon determining the water-holding capacities of the litter and soil layers of the four woodlands, the water conservation capacity was determined to be the strongest in woodland IV (*P. orientalis* × *Apricot*), 157.43 mm, and weakest in woodland III (*P. tabulaeformis* × *Q. mongolica*).

基金项目: 京冀合作造林项目生态效益监测评价 (2016HXFWBSBX014)

收稿日期: 2018-11-21; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyyang@bjfu.edu.cn

Key Words: ecology; water conservation forest; Chengde; litter layer; soil layer; water conservation capacity

冀北山区作为密云水库上游流域十分重要的源头,一直受到党中央和国务院的高度重视。从 2009 年开始,北京市政府与河北省达成合作意向,在密云水库上游冀北山区开展生态水源保护林建设,旨在改善密云水库上游流域的生态环境、保护密云水库饮用水源的清洁。研究区作为冀北山区重要的一部分,研究其境内生态水源保护林的水源涵养能力尤为重要。虽然目前很多学者对森林水源涵养的计量方法、功能评价、截留分配、枯落物和土壤水文特征等方面进行了大量的研究和论述^[1-3]。但对研究区滦平县境内不同类型混交林的水源涵养能力研究甚少。本研究将以滦平县生态水源保护林作为研究对象,从枯落物层和土壤层两方面对生态水源保护林 4 种不同类型混交林的水源涵养能力进行研究。

森林的水源涵养能力表现主要为林下枯落物层有效持水量和土壤层有效持水量之和^[4-5],其中土壤层是水源保护林涵养水源的主体^[6-7]。

1 研究区概况

研究区位于河北省承德市滦平县,地理位置介于北纬 40°39'21"—41°12'53",东经 116°40'15"—117°46'03"。气候属于半湿润半干旱大陆性季风型气候,年平均气温 7.7℃左右,年均无霜期 151d,适合林木生长。年均雨量为 351.1mm,年平均风速为 2.2m/s。主要土壤类型为褐土和棕壤土。研究区主要乔木有杨树、油松、落叶松、蒙古栎、山杏和刺槐等;主要灌木有鼠李、绣线菊、胡枝子和荆条等;草本植物则以禾本科、菊科和豆科等为主。

林地 I 位于滦平县小坝子乡,坡向为东北,海拔高度为 1100m;林地 II 位于滦平县小坝子乡,坡向为西南,海拔高度为 1135m;林地 III 位于滦平县云雾山林场,坡向为东南,海拔高度为 870m;林地 IV 位于滦平县雾灵山乡,坡向为东南,海拔高度为 720m。

2 研究方法

选择研究区具有代表性的 4 中混交林(油松×落叶松、油松×山杏、油松×蒙古栎、侧柏×山杏)作为研究对象,在每个林地的典型地段设置标准地,标准地大小 20m×20m,对标准地内每一棵林木的胸径、冠幅和树高等因子进行实地测量。各林地标准地基本情况详见表 1。

采用 S 型采样方法,在标准地内布设 5 个 1m×1m 的小样方,调查林下枯落物单位面积现存量^[8]。在实地测量过程中发现,林下枯落物有很少一部分为草本植物残骸,但主要为造林树种的枯枝落叶。采用室内浸泡法分别测定枯落物在浸泡 0.5h、1h、4h、8h、12h 和 24h 后的枯落物持水量和吸水速率,研究其吸水过程^[9]。枯落物层的持水能力用枯落物有效持水量来估算,即

$$W = (0.85R_m - R_0)M$$

式中: W 为有效持水量 (t/hm^2); R_m 为最大持水率 (%); R_0 为平均自然含水率 (%); M 为枯落物现存量 (t/hm^2)。

采用剖面法测定林地的土壤物理性质,在标准地内选取典型样点,采用环刀法分别取 1—10cm、10—20cm 和 20—30cm 三个剖面层土样,测定土壤容重和土壤孔隙度等物理性质^[10]。采用烘干法测定土壤含水量等指标。土壤层的持水能力用土壤有效持水量来计算^[11],即

$$S = 10000Ph^{[12]}$$

式中: S 为土壤有效持水量 (t/hm^2); P 为土壤毛管孔隙度 (%); h 为土壤厚度 (m), 为 0.3m。

田间持水量长期以来被认为是土壤所能稳定保持的最高土壤含水量,也是土壤中所能保持毛管水的最大量,计算公式为:

$$S_n = 10000P_n h$$

式中: S_n 为土壤田间持水量(t/hm^2); P_n 为土壤毛管孔隙度(%); h 为土壤厚度(m),为 0.3m。

最大持水量是指土壤孔隙全部充满水分时的最大含水量,它的计算公式为:

$$S_{max} = 10000P_i h$$

式中: S_{max} 为土壤最大持水量(t/hm^2); P_i 为土壤总孔隙度(%); h 为土壤厚度(m),为 0.3m。

表 1 标准地基本情况

Table 1 Basic situation of 4 woodlands

林地编号 Woodland number	林地 Woodland	来源 Source	海拔 Altitude/m	坡向 Slope direction	密度 Density/ (株/ hm^2)	平均树高 Average tree height/ cm	平均胸径 Average DBH/cm	平均冠幅 Average crown width	林龄 Forest age/a
I	油松×落叶松	人工林	1100	东北	1253	75	1.43	27	3
II	油松×山杏	人工林	1135	西南	1682	72	1.91	69	3
III	油松×蒙古栎	人工林	870	东南	1246	70	1.16	25	3
IV	侧柏×山杏	人工林	720	东南	2024	72	1.72	45	3

3 结果与分析

3.1 枯落物层持水特征

枯落物层不仅在土壤抗蚀性和抗冲性方面发挥巨大作用,还对土壤微生物,土壤结构和土壤改良等方面有不可替代的重要作用^[13-14]。枯落物层的水源涵养功能主要表现在枯落物现存量 and 枯落物持水量两个方面^[15]。

3.1.1 不同林地枯落物现存量

由图 1 可见,林地 III 与其他三种林地枯落物现存量差异较大,这是因为林地 III 造林密度相对最小,导致枯落物现存量较少。4 种林地枯落物现存量范围在 11.08—19.48 t/hm^2 之间,其中林地 II 的枯落物现存量最高为 19.48 t/hm^2 ,分别比林地 I、林地 III 和林地 IV 的枯落物现存量高 21.49%、43.11% 和 2.81%。林地 III 的枯落物现存量最少为 11.08 t/hm^2 。枯落物现存量排序为林地 II (19.48)>林地 IV (18.93)>林地 I (15.29)>林地 III (11.08),差异具有显著性($p<0.05$)。

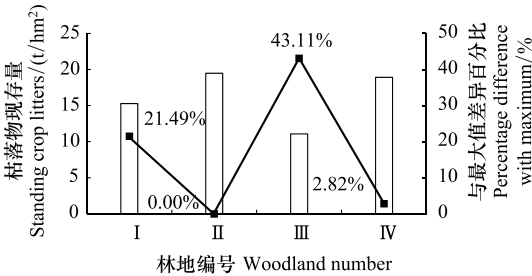


图 1 不同林地枯落物现存量及差异百分比

Fig.1 Litter size and percentage difference among different woodlands

3.1.2 不同林地枯落物吸水过程

枯落物在最初浸泡的半个小时内吸水速度最快,吸水速率均高于 $1 t\ hm^{-2}\ h^{-1}$,枯落物持水量迅速增加,此阶段枯落物拦蓄径流能力最强,在浸泡 1 小时内,枯落物的吸水速度开始变缓,截流能力开始减弱。从浸泡 1 小时后开始,枯落物随着浸泡时间的延长枯落物持水量呈现缓慢增加的趋势,随着枯落物吸水速率的不断减小,吸水能力越来越低,直至枯落物达到完全饱和状态不再吸水。

3.1.3 不同林地枯落物吸水速率

由图 2 可以看出,枯落物的吸水速率随时间的延长而不断减小,在浸泡 24h 后吸水速率趋近于 0,表明枯落物已经接近达到饱和状态。在刚开始浸泡时,枯落物的吸水速率都很大,这是因为林下枯落物在阳光和风的作用下大多处于风干状态,此时枯落物的细胞和表面水势差较大,当浸入水中后,迅速吸水,导致吸水速率较大。4 种林地的枯落物的平均吸水速率范围在 $0.41 t\ hm^{-2}\ h^{-1}$ — $0.93 t\ hm^{-2}\ h^{-1}$ 之间,平均吸水速率排序为林地 IV (0.93)>林地 III (0.54)>林地 II (0.42)>林地 I (0.41),可见 4 种混交林的枯落物最大持水量与吸水速率呈现出不同的变化规律,这是因为枯落物最大持水量主要由枯落物现存量决定,而吸水速率主要由枯落物

的种类所影响。4 种林地中林地Ⅳ的平均吸水速率与其他三种林地差异较大,其差异百分比均在 40%以上。

3.1.4 不同林地枯落物最大持水量

由图 2 可见,4 种混交林的枯落物持水量和吸水速率随浸泡时间增加的变化情况。4 种混交林枯落物层的最大持水量范围在 32.72—87.84 t/hm²之间,林地Ⅱ的枯落物最大持水量最大为 87.84 t/hm²,比林地Ⅳ的最大持水量高 12.61%,与林地Ⅲ和林地Ⅰ的最大持水量差异较大,分别高达 59.47%和 62.75%。这是因为最大持水量与枯落物的现存量、分解状况和厚度等因素有关,其中枯落物现存量的大小对枯落物最大持水量起决定性作用。林地Ⅰ的枯落物最大持水量最小为 32.72 t/hm²。最大持水量排序为林地Ⅱ(87.84)>林地Ⅳ(76.76)>林地Ⅲ(35.60)>林地Ⅰ(32.72)。

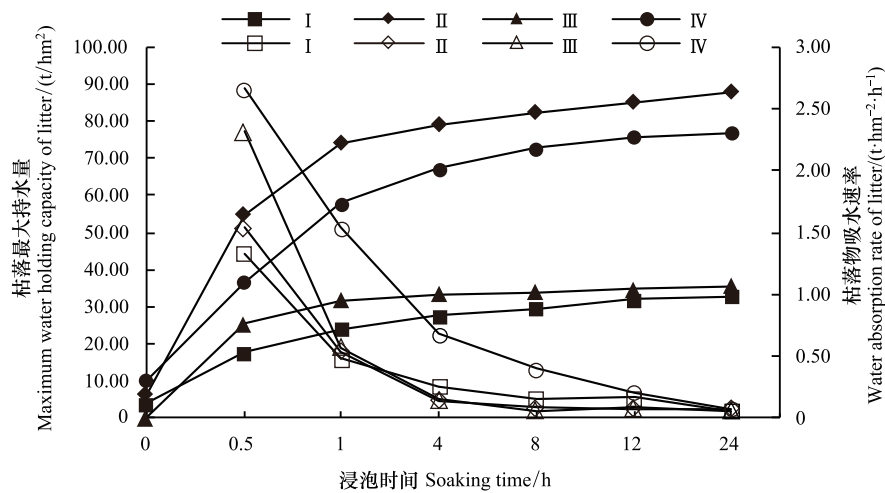


图 2 不同林地枯落物最大持水量、枯落物吸水速率与浸泡时间的关系

Fig.2 The relationship between maximum water holding capacity of litter, water absorption rate of litter and soaking time in different woodlands

图中实线为枯落物持水量,虚线为枯落物吸水速率

3.2 土壤层持水特征

土壤层是森林持水的主要场所,其水源涵养功能在森林生态系统服务功能中是最重要的^[16]。土壤层的水源涵养能力主要表现在土壤孔隙度、土壤最大持水量和土壤有效持水量等几个方面。

3.2.1 不同林地土壤容重

土壤容重又称为干容重,是指一定容积的土壤烘干后的重量与同容积水重的比值,它是土壤紧实度的指标。虽然土壤容重不是水源涵养能力的直接评价指标,但其可以间接影响土壤的滞水持水性能。土壤容重越小,表明土壤越疏松,从而增强了土壤的持水能力。由表 2 可知,4 种林地土壤容重的范围在 1.00—1.48g/cm³之间,其中林地Ⅲ的土壤容重最大。土壤容重排序为林地Ⅲ(1.48)>林地Ⅱ(1.32)>林地Ⅰ(1.12)>林地Ⅳ(1.00),差异不具有显著性($p<0.05$)。

表 2 不同林地土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of different woodlands

林地编号 woodland number	土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity/%		
		总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non capillary porosity
I	1.12	48.05	45.93	2.11
II	1.32	44.19	41.13	3.06
III	1.48	35.11	31.03	4.08
IV	1.00	56.02	50.26	5.76

3.2.2 不同林地土壤孔隙度

土壤空隙是水分运动和储存的场所,是影响土壤渗透性能、决定地表径流量和径流时间的关键要素。土壤孔隙度由毛管孔隙度和非毛管孔隙度组成。

非毛管孔隙因土壤颗粒大、排列疏松而形成,其数量取决于土壤的结构性。非毛管孔隙所占土壤体积的百分比,称为非毛管孔隙度。非毛管孔隙经常充满空气,仅在重力水大量存在时,比如洪涝时,才会被水填充,它不具有持水能力,但能使土壤通气、透水。

毛管孔隙占土壤体积的百分比,称为毛管孔隙度。毛管孔隙是土壤水分贮存和水分运动相当强烈的地方,其大小决定了土壤滞留雨水、调节径流和发挥涵养水源的能力。由图 3 可见,4 种林地土壤总空隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的差异以及他们分别与最大值的差异百分比。可以看出不同林地土壤孔隙度差异较大,其中林地Ⅳ的土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均为最大,其最大值分别为 56.02%、50.26% 和 5.76%。土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度排序均为林地Ⅳ>林地Ⅰ>林地Ⅱ>林地Ⅲ,且差异均具有显著性($p<0.05$)。由此可见,土壤孔隙度与土壤容重呈负相关关系,由此说明土壤容重影响孔隙度,从而影响土壤持水性能。

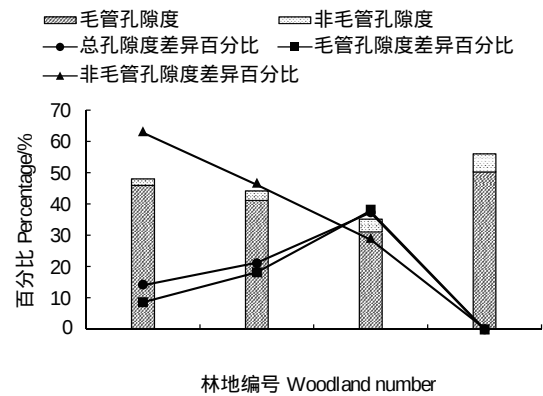


图 3 不同林地孔隙度与最大值差异百分比

Fig. 3 Percentage difference of bulk density, porosity and maximum value of different woodlands

3.2.3 不同林地土壤最大持水量和土壤有效持水量

由表 3 可见,在持水量方面,4 种林地的土壤最大持水量和土壤有效持水量之间差异较大。其中林地Ⅳ的土壤最大持水量和土壤有效持水量均最大,分别为 1680.70 t/hm²和 1507.90 t/hm²,这是因为林地Ⅳ的土壤容重最小,土壤相对较疏松,土壤孔隙度最大,土壤持水能力最强。土壤最大持水量和土壤有效持水量的排序均为林地Ⅳ>林地Ⅰ>林地Ⅱ>林地Ⅲ。在差异方面,林地Ⅳ的最大持水量分别比林地Ⅰ、林地Ⅱ和林地Ⅲ的高 14.24%、21.12%和 37.34%,而土壤有效持水量分别比林地Ⅰ、林地Ⅱ和林地Ⅲ高 8.61%、18.17%和 38.27%。

表 3 不同林地枯落物、土壤持水量

Table 3 Litter and soil water holding capacity in different woodlands

林地编号 woodland number	自然含水率 Natural moisture content/%	枯落物最大持水量 Maximum water holding capacity of litter/(t/hm ²)	枯落物有效持水量 Effective water holding capacity of litter/(t/hm ²)	土壤最大持水量 Maximum water holding capacity of soil/(t/hm ²)	土壤有效持水量 Effective Water Holding Capacity of Soil/(t/hm ²)	林地有效持水量 Effective water holding capacity of woodlands/(t/hm ²)
I	10.43	32.72	28.80	1441.40	1378.00	1406.80
II	17.42	87.84	81.30	1325.70	1233.90	1315.20
III	22.23	35.60	35.40	1053.20	930.90	966.30
IV	11.51	76.76	66.42	1680.70	1507.90	1574.32

3.3 不同林地水源涵养能力

3.3.1 不同林地枯落物层的持水能力

枯落物的最大持水量只能反映枯落物持水能力的大小,不能反映枯落物对雨水的拦蓄能力,而枯落物有效持水量才是森林枯落物对降雨拦截作用的真实反映^[17]。研究枯落物层的水源涵养能力我们采用有效持水量来计算。4 种林地的枯落物有效持水量范围在 28.80—81.30 t/hm²之间,其中林地Ⅱ的有效持水量最大为 81.30 t/hm²,其较林地Ⅳ、林地Ⅲ和林地Ⅰ的有效持水量分别高 18.30%、56.46%和 64.58%。枯落物有效持水

量的排序为林地Ⅱ(81.30)>林地Ⅳ(66.42)>林地Ⅲ(25.40)>林地Ⅰ(28.80),说明在4种林地枯落物层中林地Ⅱ的拦蓄降水、减少地表径流和延长径流时间的能力最强,即油松×山杏混交林枯落物层的持水能力最强,林地Ⅳ次之,林地Ⅰ最弱。

3.3.2 不同林地土壤层持水能力

土壤有效持水量决定土壤水源涵养能力的大小,所以在此重点比较4种林地的土壤有效持水量。受土壤容重、土壤孔隙度和土壤质地等因素影响,不同林地土壤有效持水量的差异较大。4种林地土壤有效持水量范围在930.90—1507.90 t/hm²之间,其中林地Ⅳ的土壤有效持水量最大为1507.90 t/hm²,其较林地Ⅲ、林地Ⅱ和林地Ⅰ的土壤有效持水量分别高38.62%、16.46%和10.64%。土壤有效持水量排序为林地Ⅳ(1507.90)>林地Ⅰ(1378.00)>林地Ⅱ(1233.90)>林地Ⅲ(930.90),说明在4种林地土壤层中林地Ⅳ的滞留雨水和调节径流的能力最强,即侧柏×山杏混交林土壤层的持水能力最强,林地Ⅰ次之,林地Ⅲ最弱。

3.3.3 不同林地水源涵养能力

林地的水源涵养能力表现为枯落物层有效持水量和土壤层有效持水量之和。4种林地的有效持水量范围在966.30—1574.32 t/hm²之间,其中林地Ⅳ的有效持水量最大为1574.32 t/hm²。由图4可直观看出,林地有效持水量排序为林地Ⅳ(1574.32)>林地Ⅰ(1406.80)>林地Ⅱ(1315.20)>林地Ⅲ(966.30),即4种林地水源涵养能力排序为林地Ⅳ(157.43mm)>林地Ⅰ(140.68mm)>林地Ⅱ(131.52mm)>林地Ⅲ(96.63mm),表明在4种林地中林地Ⅳ侧柏×山杏混交林的水源涵养能力最强。故在今后在营造京冀生态水源保护林时,侧柏×山杏混交林可作为最优先造林选择,油松×落叶松和油松×山杏混交林次之。

水源涵养能力贡献率根据枯落物层有效持水量和土壤层有效持水量占林地总有效持水量的比例计算而得。由图4可知,4种林地土壤层的贡献率均在93%以上,可见土壤层作为森林涵养水源的主体,其在拦蓄降水、减少地表径流方面发挥主要作用。土壤层贡献率最大的为林地Ⅰ,其值为97.95%,最小的为林地Ⅱ,为93.82%,这是因为林地Ⅱ枯落物层的持水能力最强,枯落物层贡献率最大,从而导致土壤层贡献率偏低。4种林地土壤层贡献率排序为林地Ⅰ(97.95%)>林地Ⅲ(96.34%)>林地Ⅳ(95.78%)>林地Ⅱ(93.82%),枯落物层贡献率排序则相反。

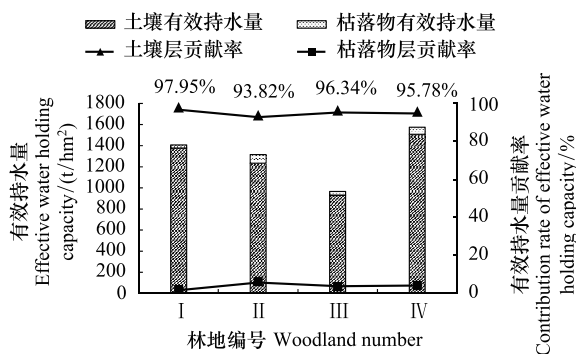


图4 不同林地有效持水量及有效持水量贡献率

Fig.4 Contribution Rate of Effective Water Holding Capacity and Effective Water Holding Capacity of Different woodlands

4 结论与讨论

本研究在对滦平县京冀生态水源保护林油松×落叶松、油松×山杏、油松×蒙古栎、侧柏×山杏4种典型混交林的的水源涵养能力进行研究,得到如下结果:

(1) 枯落物层持水能力: 4种林地中林地Ⅱ的枯落物现存量最高为19.48 t/hm²,这是因为林地Ⅱ的平均冠幅最大,枯枝落叶较多。林地Ⅱ比林地、林地Ⅲ和林地Ⅳ的枯落物现存量分别高21.49%、43.11%和2.81%。林地Ⅱ的枯落物有效持水量最大为81.30 t/hm²,林地Ⅰ最小为28.80 t/hm²,这是因为枯落物现存量是影响枯落物持水量的最主要因素,而林地Ⅱ的枯落物现存量最大。林地Ⅱ的枯落物有效持水量比林地Ⅳ、林地Ⅲ和林地Ⅰ分别高18.30%、56.46%和64.58%。枯落物层有效持水量排序为林地Ⅱ>林地Ⅳ>林地Ⅲ>林地Ⅰ,表明林地Ⅱ油松×山杏混交林枯落物层的持水能力最强,林地Ⅰ最弱。

(2) 土壤层持水能力: 4种林地中林地Ⅳ的土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均最大,其最大值分别为56.02%、50.26%和5.76%。林地Ⅳ的土壤有效持水量最大为1507.90 t/hm²,这是因为毛管孔隙度的大小决定了土壤滞留雨水、调节径流和发挥涵养水源的能力,而林地Ⅳ的毛管孔隙度最大。林地Ⅳ较林地Ⅲ、林

地Ⅱ和林地Ⅰ的土壤有效持水量分别高 38.62%、16.46% 和 10.64%。土壤层有效持水量排序为林地Ⅳ>林地Ⅰ>林地Ⅱ>林地Ⅲ,表明林地Ⅳ侧柏×山杏混交林土壤层的持水能力最强,林地Ⅲ最弱。

(3)水源涵养能力:4 种林地水源涵养能力范围为 96.63mm—157.43 mm,其中林地Ⅳ的水源涵养能力最强,为 157.43 mm。林地水源涵养能力排序为林地Ⅳ>林地Ⅰ>林地Ⅱ>林地Ⅲ,表明 4 种林地中林地Ⅳ侧柏×山杏混交林的水源涵养能力最强,林地Ⅰ次之,林地Ⅲ最弱。虽然林地Ⅳ枯落物层的持水能力并非最强,但是其土壤层持水能力在 4 种林地中最强,土壤层作为水源涵养能力的主体,最终导致林地Ⅳ的水源涵养能力最强。在水源涵养能力贡献率方面,4 种林地土壤层的贡献率均在 93%以上,最大的为林地Ⅰ,其值为 97.95%,最小的为林地Ⅱ,值为 93.82%,4 种林地土壤层贡献率排序为林地Ⅰ>林地Ⅲ>林地Ⅳ>林地Ⅱ。

参考文献(References):

- [1] Wu H, Zhang J L, Yu L F, Yan L B, Yuan C J, Liu T Y. Study on water conservation capacity of litter from different types of forest in Caohai basin. *Meteorological and Environmental Research*, 2013, 4(12): 17-22, 26-26.
- [2] 殷沙,赵芳,欧阳勋志. 马尾松木荷不同比例混交林枯落物和土壤持水性能比较分析. *江西农业大学学报*, 2015, 37(3): 454-460.
- [3] Gen X L, Sun D Q, Zhang L B, Jia Q T. Study on the effects of natural factors on water conservation capacity of Qilian mountain. *Meteorological and Environmental Research*, 2011, 2(11/12): 46-48, 63-63.
- [4] 潘明亮,丁访军,谭伟,戴全厚,朱军. 贵州西部四种典型林地土壤水文特性研究. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 139-143.
- [5] 李军,田超,杨新兵. 河北省木兰林管局典型森林类型枯落物水文效应研究. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 192-196.
- [6] 齐特,李玉婷,何会宾,张雪峰,赵廷宁. 冀北地区丰宁县水源林地水源涵养能力. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3): 60-67.
- [7] 赵建生,王永明,杨新兵. 冀北山地森林土壤水文效应研究. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 201-205.
- [8] 田超,杨新兵,李军,鲁绍伟,刘阳,毕可姣. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 221-226.
- [9] 张振明,余新晓,牛健植,鲁绍伟,宋维峰,刘秀萍,张颖. 不同林分枯落物层的水文生态功能. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 139-143.
- [10] 孙艳红,张洪江,杜士才,李根平. 四面山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 109-112, 117-117.
- [11] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,温亚飞,钟良子,马俊杰. 冀西北地区 4 种纯林枯落物及土壤水文效应. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 304-310.
- [12] 周志立,张丽玮,陈倩,徐学华,李玉灵. 木兰围场 3 种典型林分枯落物及土壤持水能力. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 207-213.
- [13] Li Y Q, Xu M, Sun O J, Cui W C. Effects of root and litter exclusion on soil CO₂ efflux and microbial biomass in wet tropical forests. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(12): 2111-2114.
- [14] Rinnan R, Michelsen A, Jonasson S. Effects of litter addition and warming on soil carbon, nutrient pools and microbial communities in a subarctic heath ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(3): 271-281.
- [15] 李红云,杨吉华,鲍玉海,郑兆亮,贝桂民. 山东省石灰岩山区灌木林枯落物持水性能的研究. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 44-48.
- [16] 张卫强,李召青,周平,曾令海,王明怀,陈光胜,黎艳明,周毅,郭乐东. 东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 130-134.
- [17] 赵阳,余新晓,吴海龙,宋思铭,黄枝英. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 148-152.