

辽西半干旱区几种人工林生态系统 涵养水源功能研究*

罗跃初¹ 韩单恒¹ 王宏昌¹ 刘建民² 魏晶¹ 吴钢^{1**}

(¹中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室,北京 100085;²辽宁省朝阳市林业局,朝阳 122000)

【摘要】 从森林生态系统树冠截留降雨、枯落物持水及土壤蓄水 3 个层次对辽西半干旱区 5 种人工林生态系统的涵养水源功能进行了定量研究. 结果表明, 各人工林生态系统树冠对降雨的平均截留率为 14.58%~37.19%, 依次为沙棘林>油松沙棘混交林>杨树沙棘混交林>油松纯林>杨树纯林; 枯落物层厚度为 1.6~4.1 cm, 枯落物贮量为 1 890.4~6 425.2 kg·hm⁻², 枯落物层厚度和贮量均为沙棘林>油松沙棘混交林>杨树沙棘混交林>油松纯林>杨树纯林, 枯落物最大持水量取决于枯落物贮量及其最大持水率, 枯落物最大持水量为 5 957.7~19 332.9 kg·hm⁻², 依次为沙棘林>油松沙棘混交林>杨树沙棘混交林>油松纯林>杨树纯林; 各人工林生态系统 0~40 cm 土壤层非毛管蓄水量为 23.70~37.85 mm, 依次为沙棘林>杨树沙棘混交林>油松沙棘混交林>杨树纯林>油松纯林. 在 5 种人工林生态系统中, 沙棘林的涵养水源功能最好, 混交林较油松和杨树纯林有更好的涵养水源功能.

关键词 辽西半干旱区 人工林 涵养水源 树冠截留 枯落物持水 土壤蓄水

文章编号 1001-9332(2004)06-0919-05 **中图分类号** S718.56 **文献标识码** A

Water conservation functions of several artificial forest ecosystems in semiarid region of western Liaoning Province. LUO Yuechu¹, HAN Shanheng¹, WANG Hongchang¹, LIU Jianmin², WEI Jing¹, WU Gang¹ (¹Key Laboratory of System Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ²Chaoyang Forestry Bureau, Chaoyang 122000, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(6):919~923.

Five artificial forest ecosystems in semiarid region of western Liaoning Province were selected to test their water conservation capacity. The average interception rate of different artificial forest ecosystems varied from 14.58% to 37.19%, and the order was *H. rhamnoides* forest ecosystem > *P. tabulaeformis*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. simonii*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. tabulaeformis* forest ecosystem > *P. simonii* forest ecosystem. The thickness of the litter layer in different forest ecosystems varied from 1.6 to 4.1 cm, and the biomass of the litter varied from 1 890.4 to 6 425.2 kg·hm⁻². The order of the thickness and the biomass of the litter in different forest ecosystems was *H. rhamnoides* forest ecosystem > *P. tabulaeformis*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. simonii*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. tabulaeformis* forest ecosystem > *P. simonii* forest ecosystem. The maximum water holding capacity of the litter in different forest ecosystems varied from 5 957.7 to 19 332.9 kg·hm⁻², and the order was *H. rhamnoides* forest ecosystem > *P. tabulaeformis*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. simonii*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. tabulaeformis* forest ecosystem > *P. simonii* forest ecosystem. The water holding capacity of non-capillary porosity of 0~40 cm soil layer in different forest ecosystems varied from 23.70 to 37.85 mm, and the order was *H. rhamnoides* forest ecosystem > *P. simonii*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. tabulaeformis*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem > *P. simonii* forest ecosystem > *P. tabulaeformis* forest ecosystem. Among the five artificial forest ecosystems, *H. rhamnoides* forest ecosystem had the best water conservation capacity, and the mixed forest ecosystems had a better water conservation capacity than *P. tabulaeformis* and *P. simonii* forest ecosystem.

Key words Semiarid region of western Liaoning Province, Artificial forest, Conservation of water resources, Canopy interception, Water holding of litter, Soil water conservation.

1 引 言

森林生态系统服务功能是指森林生态系统与生态过程所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用^[2, 18, 22]. 森林的涵养水源功能是森林生态系统服务功能的重要组成部分, 主要表现在森林树冠层、枯落物层及土壤层对降水的拦截和滞留作

用^[3, 9, 10, 19, 20, 25, 30, 31]. 对于干旱半干旱区, 森林生态系统的涵养水源功能显得尤为重要. 因为水在该区域生态系统中起着决定性作用. 它的变化将对区域

* 国家自然科学基金项目(70173035)和科技部农业科技成果转化资金资助项目(03EFNZ16600355).

** 通讯联系人.

2003-11-07 收稿, 2004-01-17 接受.

生态过程带来异常的冲击. 森林生态系统的涵养水源功能是目前干旱半干旱区生态系统服务功能研究的热点之一[14, 21, 23, 26~28].

我国辽宁西部半干旱区由于受地理环境和气候的影响, 植被稀疏, 水土流失严重, 灾害频繁, 再加上长期以来形成的掠夺式经营方式, 使原生森林植被破坏殆尽, 天然次生林也只有零星的分布, 生态系统严重失调, 给农牧业生产和人民生活带来了极大的损害. 为了改善该地区生态环境, 自 20 世纪 70 年代末, 各级政府开始重视该地区的生态恢复和重建工作, 实施了一系列的生态恢复工程, 如采用乡土树种和外源速生树种大规模营造人工林, 提高森林覆盖率, 明显地促进了该地区的生态恢复[16], 而有关植被恢复过程中不同人工林生态系统涵养水源功能的定量研究较少. 本研究于 2002~2003 年, 从森林生态系统树冠截留降雨、枯落物持水及土壤蓄水 3 个层次对该地区几种人工林生态系统的涵养水源功能进行了定量研究, 为水源涵养林的建设 and 合理经营提供科学依据.

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

研究区位于辽宁省朝阳市建平县太平沟小流域. 该小流域位于西辽河上游老哈河的支流崩河流域(119°35'47"~119°38'18"E, 41°57'38"~41°59'18"N), 总土地面积 10.64 km², 为中低山丘陵区, 海拔 650~820 m, 坡度大部分在 6°以下, 属温带半干旱大陆性季风气候, 年均降水量 457 mm, 多集中在 6~9 月, 年蒸发量 2 000 mm 以上, 平均气温 5.5 ℃, 无霜期 135 d 左右, 平均风速 3.2 m·s⁻¹, 10 ℃积温 2 821 ℃. 该区土壤除少许褐土性土外, 均为碳酸盐褐土, 土壤肥力较低, 水土流失严重. 植被区划属华北植物系向内蒙古植物系过渡地带, 以内蒙古区系干旱草原植物为主, 呈旱象景观, 森林植物种类有油松(*Pinus tabulaeformis*)、杨树(*Populus simonii*)、刺槐(*Robinia pseudo-acacia*)、山杏(*Prunus sibirica*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等树种, 均为人工种植.

研究对象为油松纯林、油松沙棘混交林、沙棘林、杨树纯林及杨树沙棘混交林, 均为人工林. 每一生态系统类型设置林分特征有代表性的标准地 3 块, 面积均为 400 m², 以荒山为对照, 所有标准地均具有基本一致的立地条件: 土壤为碳酸盐褐土; 海拔 720~730 m; 坡度为 3~5°; 坡向均为南坡. 对各标准地进行常规调查, 基本概况见表 1.

2.2 研究方法

2.2.1 树冠截留量的观测 在每一标准地中, 对 2003 年 6 月的 5 次降雨进行大气降雨量、林内穿透雨和树干径流量的观测, 所有测定方法参见《森林生态系统定位研究技术规范》和其它相关文献[1, 12, 29]. 其中, 在林外开阔地段布置 3 个简

表 1 各生态系统基本概况

Table 1 General situation of different forest ecosystems

类型 Type	林龄 Age of forest (yr)	密度 Density (trees·hm ⁻²)	平均胸径 ^a Average DBH (cm)	平均树高 Average height (m)	郁闭度 Canopy density
I	28	2825	6.9	4.7	0.75
II	28 ^b	1790	9.8	6.6	0.85
	11 ^c	3650	2.6	1.6	
III	11	8950	4.3	1.9	0.90
IV	22	2645	7.3	4.9	0.70
V	22 ^d	1425	10.1	7.1	0.80
	11 ^c	3460	2.7	1.6	

a: 沙棘为平均地径 Average diameter of the butt for *H. rhamnoides*; b: 油松 *P. tabulaeformis*; c: 沙棘 *H. rhamnoides*; d: 杨树 *P. simonii*; I: 油松纯林 *P. tabulaeformis* forest ecosystem; II: 油松沙棘混交林 *P. tabulaeformis*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem; III: 沙棘林 *H. rhamnoides* forest ecosystem; IV: 杨树纯林 *P. simonii* forest ecosystem; V: 杨树沙棘混交林 *P. simonii*-*H. rhamnoides* mixed forest ecosystem; VI: 荒山(对照) Barren slope. 下同 The same below.

易雨量筒收集大气降雨, 并参照当地气象观测站资料; 在每一标准地内均匀布置 10 个简易穿透雨收集器测定林内穿透雨; 根据标准地乔木胸径调查结果, 选取 3 棵标准木, 在离地面 1.2 m 处用聚氯乙烯胶管蛇形环绕树干, 接引到树干径流收集器中(本研究未测定沙棘的树干径流量). 树冠截留量按公式: $P_i = P - P_j - P_k$ 计算. 式中, P_i 为树冠截留量; P 为大气降雨量; P_j 为乔木树干径流量; P_k 为穿透雨量.

2.2.2 枯落物贮量和持水量的测定 枯落物贮量的测定按生态系统类型设置小样方, 即在每块标准地中沿对角线设 20 cm×20 cm 的小样方 5 个, 然后测量枯落物层的厚度, 收取样方中所有的枯落物, 清除土壤颗粒, 并从每个样方内用铝盒采样 3 个, 室内烘干称重, 测得枯落物的自然含水率与干重, 以此推算单位面积的枯落物贮量; 枯落物最大持水率的测定用浸水法, 浸入水中 24 h 后称重与其干重之比[15].

2.2.3 土壤渗透性和贮水量的测定 在各标准地挖掘土壤剖面 3 个, 分 0~20 m 和 20~40 cm 取样测定土壤物理性质. 土壤容重和孔隙度采用环刀法测定, 土壤渗透性的测定采用渗透筒法[17], 测定结果求平均值为最终计算用值. 根据土壤孔隙度和土层厚度计算土壤贮水量.

3 结果与分析

3.1 不同人工林生态系统树冠截留

降水落地之前, 树冠层的截留使降水产生第一次分配, 树冠层的这种截留作用不仅减少了林下径流量, 而且推迟了产流时间[8]. 树冠截留功能受树种组成、林分郁闭度、覆盖层、降雨量及降雨强度等多种因素影响[31], 不同森林生态系统, 由于群落结构存在差异, 树种组成和数量不一, 树冠大小、形状、枝叶密度及吸着水的能力不相同, 从而导致树冠对降雨截留能力的差异[5, 11, 13]. 从树冠截留量和截留率来看, 各人工林生态系统树冠对降雨均有较大的截留作用(表 2), 平均截留率为 14.58%~37.19%.

其中, 沙棘林为最高, 然后依次为油松沙棘混交林、杨树沙棘混交林、油松纯林和杨树纯林, 平均截留率分别为 37.19、27.55、22.49、20.44 和 14.58%。这显然是由于沙棘林比较低矮, 郁闭度最大, 降雨过程中受风的吹动较小, 雨水能较好地附着于叶面, 截留率大于其它生态系统; 混交林由于沙棘的存在促进了油松和杨树的生长, 枝叶繁茂, 形成立体复层林冠结构, 郁闭度高于纯林, 截留作用比纯林更明显; 油松纯林比杨树纯林枝叶密、层次多, 枝叶总面积大, 因此, 油松纯林的截留率比杨树纯林大。

表 2 各生态系统降雨量的分配

Table 2 Distribution of precipitation in different forest ecosystems (2003)

降雨日期 Date	降雨量* Precipitation (mm, %)	类型 Type	树干径流 Stemflow (mm, %)	穿透雨 Throughfall (mm, %)	树冠截留** Interception (mm, %)
6.09	72.6(100)	I	2.27(3.13)	56.49(77.81)	13.84(19.06)
		II	1.32(1.82)	51.85(71.42)	19.43(26.76)
		III	-	47.76(65.79)	24.84(34.21)
		IV	2.33(3.21)	60.55(83.40)	9.72(13.39)
		V	1.41(1.94)	55.98(77.11)	15.21(20.95)
6.14	8.5(100)	I	0.00	6.14(72.22)	2.36(27.78)
		II	0.00	5.43(63.88)	3.07(36.12)
		III	-	4.43(52.12)	4.07(47.88)
		IV	0.00	6.74(79.29)	1.76(20.71)
		V	0.00	5.65(66.47)	2.85(33.53)
6.23	69.4(100)	I	2.19(3.16)	53.95(77.74)	13.26(19.12)
		II	1.29(1.86)	49.79(71.74)	18.32(26.40)
		III	-	44.12(63.57)	25.28(36.43)
		IV	2.28(3.29)	57.74(83.19)	9.38(13.52)
		V	1.35(1.95)	54.11(77.97)	13.94(20.08)
6.27	46.5(100)	I	1.54(3.32)	34.84(74.92)	10.12(21.76)
		II	1.03(2.22)	32.95(70.86)	12.52(26.92)
		III	-	28.66(61.63)	17.84(38.37)
		IV	1.58(3.41)	37.71(81.09)	7.21(15.50)
		V	1.07(2.30)	34.36(73.89)	11.07(23.81)
6.28	17.7(100)	I	0.65(3.67)	12.73(71.92)	4.32(24.41)
		II	0.42(2.37)	11.47(64.81)	5.81(32.82)
		III	-	9.89(55.88)	7.81(44.12)
		IV	0.66(3.73)	13.80(77.96)	3.24(18.31)
		V	0.46(2.59)	12.02(67.91)	5.22(29.50)
合计 Total	214.7(100)	I	6.65(3.10)	164.15(76.46)	43.90(20.44)
		II	4.06(1.89)	151.49(70.56)	59.15(27.55)
		III	-	134.86(62.81)	79.84(37.19)
		IV	6.85(3.19)	176.54(82.23)	31.31(14.58)
		V	4.29(2.00)	162.12(75.51)	48.29(22.49)

* 降雨强度 Rainfall intensity $0.037 \sim 0.379 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$; ** 括号前的数据为次降雨的树冠截留量, 括号内为树冠截留率 The data in front of the brackets are the amount of interception, and those within the brackets are the rates of interception.

3.2 不同人工林生态系统枯落物持水量

枯落物的持水性取决于其在林地上的积累量及其本身的持水能力, 而这又与生态系统的树种组成、林分发育、林分水平及垂直结构、枯落物的分解状况等因素有关^[4, 14, 32]。不同人工林生态系统, 林地枯落物的质和量不同, 其吸水性也不尽相同(表 3)。

从各生态系统枯落物层厚度及贮量来看, 沙棘林明显高于其它生态系统, 混交林高于油松和杨树

表 3 各生态系统枯落物贮量及持水特性

Table 3 Biomass of and water-holding capacity of the litter in different forest ecosystems

类型 Type	枯落物层厚度 Thickness of litter layer (cm)	枯落物贮量 Biomass of litter ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	最大持水率 Percentage of maximum water storage(%)	最大持水量 Maximum water storage ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}, \text{mm}$)
I	1.9	2285.9	269.8	6167.4(0.62)
II	2.8	3950.0	295.7	11680.3(1.17)
III	4.1	6425.2	300.8	19332.9(1.93)
IV	1.6	1890.4	315.2	5957.7(0.60)
V	2.5	3301.5	310.1	10238.4(1.02)

纯林(表 3)。这是由于沙棘林枝叶繁茂, 落叶量大, 郁闭度高, 林冠层透光性差, 林地温度较低, 不利于枯落物的分解, 所以林地枯落物贮量较大; 混交林中沙棘的存在促进了油松和杨树生长, 使其枯落物量增加, 而且由于郁闭度增加, 分解减慢。混交林中, 油松沙棘混交林高于杨树沙棘混交林, 纯林中, 油松纯林高于杨树纯林, 这主要是由于枯落物中阔叶分解速率要高于针叶的缘故。

各生态系统枯落物最大持水率在 269.8% ~ 315.2% 之间, 即为自身干重的 2.7~3.2 倍。就不同生态系统而言, 以杨树纯林枯落物的持水率最大, 油松纯林最低。各生态系统枯落物最大持水量的大小顺序为沙棘林 > 油松沙棘混交林 > 杨树沙棘混交林 > 油松纯林 > 杨树纯林, 最大持水量分别为 19 332.9、11 680.3、10 238.4、6 167.4 和 5 957.7 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 3)。枯落物吸持的水量除一部分蒸发外, 剩余部分则缓缓下渗到土壤中。

3.3 不同人工林生态系统土壤蓄水

林地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^[6]。林地土壤的发育直接受森林植被的影响, 林分类型不同, 林地表层的枯落物构成及地下根系的生长发育也各异, 所造成的林地土壤物理性质的差异, 引起各生态系统土壤蓄水能力上的不同^[7, 24](表 4)。

林地土壤的渗透能力直接影响到土壤的蓄水性, 土壤渗透能力强意味着降水可很快入渗并贮存于林地土壤, 反之, 则以地表径流流失。由表 4 可见, 各人工林生态系统土壤稳渗速度均明显高于荒山, 0~20 cm 土层的稳渗速度高于 20~40 cm; 在各生态系统中, 杨树沙棘混交林的稳渗速度最大, 沙棘林次之, 油松纯林最低。

水分在土壤的非毛管孔隙和毛管孔隙中的运动和贮存方式不同, 在非毛管孔隙中的水分主要受重力的作用, 贮蓄和运动速度快, 在林地调节水分运动中起重要作用, 非毛管孔隙贮蓄水量是评价林地涵

养水源的重要指标之一^[6]. 土壤总蓄水量是毛管孔隙和非毛管孔隙蓄水量之和, 反映了土壤贮蓄和调节水分的潜在能力. 由表4可见, 0~20 cm 土层的总孔隙度和非毛管孔隙度都高于 20~40 cm 土层, 这是森林表层土壤长期积累枯落物并腐烂从而形成较厚腐殖质层的结果. 从土壤饱和含水率和非毛管贮水量来看, 沙棘林最高, 混交林次之, 油松纯林最低. 各生态系统 0~40 cm 土壤层非毛管蓄水量的排序依次为沙棘林、杨树沙棘混交林、油松沙棘混交林、杨树纯林和油松纯林, 蓄水量分别为 37.85、32.76、29.96、29.00 和 23.70 mm.

表4 各生态系统土壤的物理性质及蓄水能力

Table 4 Physical properties and water storage capacity of soil in different forest ecosystems

类型 Type	土层 Soil layer (cm)	容重 Volume weight ($g \cdot cm^{-2}$)	总孔隙度 Total porosity (%)	非毛管 孔隙度 Non- capillary porosity (%)	稳渗速度 Stable infiltration ($mm \cdot$ min^{-1})	饱和含水率 Percentage of saturated containing water (%)	非毛管 蓄水量 Water storage of non-capil- lary porosity (mm)
I	0~20	1.23	53.36	7.12	2.08	45.78	14.24
	20~40	1.26	52.37	4.73	1.74	41.53	9.46
							(23.70)
II	0~20	1.11	57.32	9.30	3.16	53.03	18.60
	20~40	1.12	56.99	5.68	2.42	48.79	11.36
							(29.96)
III	0~20	1.05	59.30	10.71	3.24	57.40	21.42
	20~40	1.09	57.88	8.22	2.63	50.95	16.44
							(37.86)
IV	0~20	1.21	54.02	8.52	2.35	47.78	17.04
	20~40	1.24	53.03	5.98	1.86	43.00	11.96
							(29.00)
V	0~20	1.09	57.88	9.97	3.47	54.47	19.94
	20~40	1.10	57.65	6.41	2.87	49.96	12.82
							(32.76)
VI	0~20	1.31	50.72	3.91	1.29	37.95	7.82
	20~40	1.33	50.06	3.56	1.08	36.02	7.12
							(14.94)

3.4 不同人工林生态系统枯落物和土壤蓄水能力比较

研究表明, 生态系统土壤的渗透性能取决于其非毛管孔隙, 在饱和持水量中, 非毛管孔隙中滞留的重力水在调蓄水方面具有更为重要的作用^[15]. 因此, 近年来不少研究提出, 将土壤非毛管孔隙度大小作为判断生态系统土壤蓄水能力大小的主要指标, 并用它和土层厚度来计算土壤蓄水量^[6]. 为了比较不同生态系统枯落物和土壤的水源涵养能力, 以枯落物最大持水量和 0~40 cm 土壤层的非毛管蓄水量之和作为生态系统枯落物和土壤的蓄水能力(图1), 从中可以看出, 各生态系统枯落物和土壤蓄水能力的大小顺序为沙棘林>杨树沙棘混交林>油松沙棘混交林>杨树纯林>油松纯林.

由图1可见, 与土壤蓄水量相比, 生态系统的枯

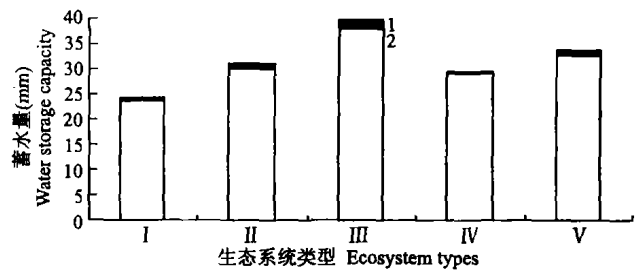


图1 不同生态系统枯落物和土壤(0~40 cm)蓄水能力

Fig.1 Water storage capacity of litter and soil(0~40 cm) in different forest ecosystems.

1) 枯落物 Litter; 2) 土壤 Soil.

落物蓄水量很小, 但枯落物的涵养水源功能不可忽视, 因为枯落物的涵养水源作用是多方面的^[10]. 枯落物可以缓冲雨水动能, 避免雨水溅击而导致土壤结果破坏, 并有调节和阻滞地表径流的作用. 同时, 枯落物的分解可增加土壤有机质, 提高土壤非毛管孔隙度, 使森林土壤的浸透性增强, 贮存更多的水量, 并能增加下渗率, 减少地表径流.

4 结 论

4.1 各人工林生态系统树冠对降雨均有较大的截留作用, 树冠截留率随着生态系统郁闭度的增大而增大, 沙棘林、油松沙棘混交林、杨树沙棘混交林、油松纯林和杨树纯林的平均截留率分别为 37.19、27.55、22.49、20.44 和 14.58%. 树冠截留使降雨强度减弱, 林内雨量减少, 为到达林内的降雨逐渐下渗创造了条件, 从而减少了地表径流.

4.2 沙棘林、油松沙棘混交林、杨树沙棘混交林、油松纯林和杨树纯林的枯落物贮量分别为 6 425.2、3 950.0、3 301.5、2 285.9 和 1 890.4 $kg \cdot hm^{-2}$; 枯落物最大持水率以杨树纯林最高, 依次为杨树沙棘混交林、沙棘林、油松沙棘混交林和油松纯林, 分别占 315.2、310.1、300.8、295.7 和 269.8%; 沙棘林、油松沙棘混交林、杨树沙棘混交林、油松纯林和杨树纯林枯落物最大持水量分别为 19 332.9、11 680.3、10 238.4、6 167.4 和 5 957.7 $kg \cdot hm^{-2}$. 本研究中, 尽管杨树纯林的枯落物持水率最高, 但由于其枯落物贮量最低, 所以其枯落物持水量也低.

4.3 各人工林生态系统土壤稳渗速度均明显高于荒山, 0~20 cm 土层的稳渗速度高于 20~40 cm. 其中, 杨树沙棘混交林的稳渗速度最大, 依次为沙棘林、油松沙棘混交林、杨树纯林和油松纯林; 0~40 cm 土壤层非毛管蓄水量依次为沙棘林、杨树沙棘混交林、油松沙棘混交林、杨树纯林和油松纯林, 分别

为 37.85、32.76、29.96、29.00 和 23.70 mm。

4.4 沙棘林、杨树沙棘混交林、油松沙棘混交林、杨树纯林和油松纯林枯落物和土壤蓄水能力分别为 39.79、33.78、31.13、29.60 和 24.32 mm。本文是以 0~40 cm 土壤层非毛管蓄水量代表土壤蓄水量, 实际的土壤蓄水量则更大。

4.5 综合考虑各人工林生态系统树冠层截留降水、枯落物层持水和土壤层蓄水 3 个层次, 沙棘林是辽西半干旱区最好的水源涵养生态系统, 其次是混交林, 油松和杨树纯林最差。自 20 世纪 70 年代末, 辽西半干旱区开展了大规模的水土保持综合治理, 营造了大面积的人工林。目前这些人工林生态系统发挥了重要的水源涵养功能。现今尚存的大面积油松和杨树纯林树种单一, 虫害严重, 许多形成了“小老树”, 林分生产力低下。如何将这些纯林改造成混交林, 促进其垂直结构的发育, 是进一步发挥辽西半干旱区人工林生态系统涵养水源功能的关键。

参考文献

- Chen B-F(陈步峰), Zhou G-Y(周光益), Zeng Q-B(曾庆波), et al. 1994. Hydrological process and nutrient tendency on the regenerative forest ecosystem of tropical mountain rain forest in Jianfengling, China. *For Res* (林业科学研究), 7(5): 525~530(in Chinese)
- Daily G. 1997. What are ecosystem services? In: Daily G ed. *Natures Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press. 1~10
- Deng K-M(邓坤枚), Shi P-L(石培礼), Xie G-D(谢高地). 2002. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River and its benefits. *Resour Sci* (资源科学), 24(6): 68~73(in Chinese)
- Geng Y-Q(耿玉清), Wang B-P(王保平). 2000. Effect of forest litter on water source conservation. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 22(5): 49~52(in Chinese)
- Guo L-Q(郭立群), Wang Q-H(王庆华), Zhou H-C(周洪昌), et al. 1999. Rainfall interception of forest litter of main forest types in central Yunnan Plateau. *Yunnan For Sci Technol* (云南林业部科技), (1): 22~25(in Chinese)
- Hao Z-Q(郝占庆), Wang L-H(王力华). 1998. Water conservation capacities of soils with major forest types in mountainous regions of east Liaoning Province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 9(3): 237~241(in Chinese)
- Huang Q-F(黄庆丰), Gao J(高健), Wu Z-M(吴泽民). 2002. Study on the fertility of soil and the benefit of soil-water conservation for different forest types. *J Anhui Agric Univ* (安徽农业大学学报), 29(1): 82~86(in Chinese)
- Huang Z-L(黄忠良), Kong G-H(孔国辉), Yu Q-F(余清发), et al. 2000. Hydrological function and nutrient dynamics in lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 24(2): 157~161(in Chinese)
- Jiang W-W(蒋文伟), Yu S-Q(余树全), Zhou G-M(周国模), et al. 2002. A study on water-holding function of different forest vegetation in Anji region. *J Jiangxi Agric Univ* (江西农业大学学报), 24(5): 635~639(in Chinese)
- Jiang Z-L(姜志林). 1984. Function of water and soil conservation of forest ecosystems. *Chin J Ecol* (生态学杂志), 3(3): 61~64(in Chinese)
- Liang J-M(梁建民), Mao S-Y(毛士英), Liu C-T(刘采堂). 1980. Observation and study in annual rainfall on rainfall stay crown cover of the forest. *Geogr J Coll* (地理集刊), (12): 39~52(in Chinese)
- Liu S-R(刘世荣), Wen Y-G(温远光), Wang B(王兵), et al. 1996. Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China. Beijing: China Forestry Press. 72~117(in Chinese)
- Liu X-D(刘向东), Wu Q-X(吴钦孝), Zhao H-Y(赵鸿雁). 1991. A study on hydro-ecological functions of litters of artificial Chinese pine forest on the loess plateau. *J Soil Water Conser* (水土保持学报), 5(4): 87~92(in Chinese)
- Liu X-D(刘向东). 1982. A study on the precipitation intercepted by forest on Mountain Liupan. *J For Sci Technol* (林业科技通讯), (3): 18~21(in Chinese)
- Ma X-H(马雪花). 1993. *Forest Hydro-Ecology*. Beijing: China Forestry Press. 91~132(in Chinese)
- Mao S-S(马树森). 1991. Recovery and development approach of forest vegetation in western Liaoning Province. *Liaoning For Sci Tech* (辽宁林业科技), (2): 59~62(in Chinese)
- Nanjing Soil Science Institute, Chinese Academy of Sciences(中国科学院南京土壤研究所). 1978. *Analysis of Physical and Chemical Nature*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press. 90~410(in Chinese)
- Ouyang Z-Y(欧阳志云), Wang R-S(王如松), Zhao J-Z(赵景柱). 1999. Ecosystem services and their economic valuation. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 10(5): 635~640(in Chinese)
- Wan T(万涛), Zhang J-M(张建民), Pan K-W(潘开文). 2003. Ecological function and restoration strategies of forests in the regions of evergreen broad-leaved forest in the lower and middle mountain areas in the upper reaches of the Yangtze River. *J Sichuan For Sci Technol* (四川林业科技), 24(1): 56~60(in Chinese)
- Wang D(王棣), Lu J(吕皎). 2001. Function of water and soil conservation of mixed forest of *Pinus tabulaeformis*. *J Soil Water Conser* (水土保持学报), 15(4): 44~46(in Chinese)
- Wei T-X(魏天兴), Yu X-X(余新晓), Zhu J-Z(朱金兆), et al. 2001. Relationship between water supply and consumption of main planting tree species of protection forests in loess area of western Shanxi Province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 12(2): 185~189(in Chinese)
- Wu G, Xiao H, Zhao JZ, et al. 2002. Forest ecosystem services of Changbai Mountain in China. *Sci China* (Series C), 45(1): 21~32
- Wu Q-X(吴钦孝), Zhao H-Y(赵鸿雁). 2000. Hydro-ecological effects of forest and suitable index of vegetation coverage. *Chin Bull Soil Water Cons* (水土保持通报), 20(5): 32~34(in Chinese)
- Zhang J-C(张金池), Hu H-B(胡海波), Zhu K-C(朱克成), et al. 1995. A study on the function of soil and water conservation via different harnessing managements. *J Nanjing For Univ* (南京林业大学学报), 19(3): 6~10(in Chinese)
- Zhang Q-F(张庆费), Zhou X-F(周晓峰). 1994. Evaluation of the benefits of forest on the water storage and sediment reduction in Hulan River and Tangwang River Basins. *Ecol Econom* (生态经济), (6): 21~24(in Chinese)
- Zhang Z-Q(张志强), Wang L-X(王礼先), Yu X-X(余新晓), et al. 2001. Impacts of forest vegetation on runoff generation mechanisms: A review. *J Nat Resour* (自然资源学报), 16(1): 79~84(in Chinese)
- Zhao C-Y(赵传燕), Feng Z-D(冯兆东), Liu Y(刘勇). 2003. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation. *Chin J Mou Sci* (山地学报), 21(2): 157~161(in Chinese)
- Zhao H-Y(赵鸿雁), Wu Q-X(吴钦孝), Liu G-B(刘国彬). 2002. Studies on hydro-ecological effects of *Populus davidiane* stand. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 26(4): 497~500(in Chinese)
- Zhao S-D(赵士洞). 1995. *Technological Criterion on Orientation Study of Forest Ecosystem*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Zhou G-Y(周光益), Chen B-F(陈步峰), Zeng Q-B(曾庆波), et al. 1996. Water balance and geological cycling of main nutrients in the tropical mountain rainforest, Hainan Island. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 16(1): 28~32(in Chinese)
- Zhou X-F(周晓峰). 1999. *Ecological Services and Management Approach of Forest*. Beijing: China Forestry Press. (in Chinese)
- Zhu J-Z(朱金兆), Liu J-J(刘建军), Zhu Q-K(朱清科), et al. 2002. Hydro-ecological functions of forest litter layers. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), 24(5/6): 30~34(in Chinese)

作者简介 罗跃初, 男, 1975年生, 博士生, 主要从事生态系统服务功能和生态系统健康研究, 发表论文 8 篇。E-mail: yuechuluo@163.net