

黄浦江中游 5 种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究

李 阳, 万福绪

(南京林业大学林学院, 南京 210037)

摘要: 为了解黄浦江流域中游典型人工纯林枯落物和土壤的水源涵养能力, 提高流域内水源涵养林建设保护与经营管理水平, 选择黄浦江中游东岸的浦江郊野公园内的 5 种典型人工纯林(香樟林、桂花林、栎树林、无患子林和池杉林)作为研究对象, 采用环刀法、烘干法与室内浸泡法对林分地表枯落物和土壤的水源涵养能力进行研究, 并结合枯落物有效拦蓄量和土壤有效蓄水量来定量比较 5 种林分枯落物层和土壤层的水源涵养能力。结果表明: (1) 5 种林分枯落物有效拦蓄量为 $7.74 \sim 27.90 \text{ t/hm}^2$, 表现为池杉林 > 无患子林 > 桂花林 > 栎树林 > 香樟林。 (2) 土壤有效蓄水量为 $104.87 \sim 174.01 \text{ t/hm}^2$, 表现为栎树林 > 无患子林 > 香樟林 > 池杉林 > 桂花林。 (3) 林分枯落物有效拦蓄量和土壤有效蓄水量的总和为 $116.79 \sim 184.17 \text{ t/hm}^2$, 表现为栎树林、无患子林的枯落物和土壤水源涵养能力较强, 池杉林次之, 香樟林与桂花林较弱。因此, 在今后水源涵养林的建设管理过程中可优先选择落叶阔叶树种, 适当种植针叶树种与常绿阔叶树种, 加强对地表枯枝落叶层的保护, 使林分更好地发挥其涵养水源的能力。

关键词: 黄浦江中游; 枯落物; 土壤层; 水源涵养功能

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0264-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.041

Water Conservation Capacities of Litters and Soils in Five Typical Stands in the Middle Reaches of Huangpu River

LI Yang, WAN Fuxu

(College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: In order to understand the water conservation capacity of litters and soils in different forest types in the Huangpu River, and improve the protection and management level of water conservation forests, this paper took five typical artificial pure forests (the *Cinnamomum camphora* forest, *Osmanthus fragrans* forest, *Koelreuteria paniculata* foerst, *Sapindus mukorossi* forest and *Taxodium ascendens* forest) in the Pujiang Country Park on the east side of the middle reaches of the Huangpu River as the research object. Water conservation capacities of the litter layer and soil layer in different forest stands were studied by cutting-ring method, drying method and indoor immersion method. The water conservation capacities were also quantitatively compared by combining the modified interception amounts of the litters and the effective water storage capacities of the soils. The results showed that the modified interception amounts of the litters in the five forest stands were $7.74 \sim 27.90 \text{ t/hm}^2$, *Taxodium ascendens* forest > *Sapindus mukorossi* forest > *Osmanthus fragrans* forest > *Koelreuteria paniculata* foerst > *Cinnamomum camphora* forest. The effective water storage capacities of the soils in the five forest stands were $104.87 \sim 174.01 \text{ t/hm}^2$, *Koelreuteria paniculata* foerst > *Sapindus mukorossi* forest > *Cinnamomum camphora* forest > *Taxodium ascendens* forest > *Osmanthus fragrans* forest. The sum of the modified interception amounts of the litters and the effective water storage capacities of the soils were $116.79 \sim 184.17 \text{ t/hm}^2$. It showed that the litters and soils in *Koelreuteria paniculata* and *Sapindus mukorossi* forests had the stronger water conservation capacities, followed by *Taxodium ascendens*, *Cinnamomum camphora* and *Osmanthus fragrans* forests. Therefore, during the construction and management of water conservation forest in the future, it is suggested that

收稿日期: 2018-09-16

资助项目: 江苏省林业三新工程项目(LYSX[2015]20); 江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)

第一作者: 李阳(1993—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事城市林业与水土保持研究。E-mail: 958083752@qq.com

通信作者: 万福绪(1952—), 男, 教授, 主要从事林业生态工程与城市林业研究。E-mail: fxwan@njfu.edu.cn

deciduous broad-leaved tree species should be selected as a priority, and coniferous tree species and evergreen broad-leaved tree species be properly planted, and the protection of the surface litter layer could be strengthened, so that the forest could play better role in water conservation.

Keywords: the Middle Reach of Huangpu River; litter; soil layer; water conservation function

水源涵养功能作为森林生态系统重要的生态服务功能和森林生态功能价值评估的重要指标,一直是生态学与水文学等相关学科研究的重点内容^[1-2]。当前已有研究^[3-4]表明,森林水源涵养功能包含了供给淡水、调节水文等多种供给服务与调节服务,其主要体现在拦蓄降水、调节径流、净化水质以及拦蓄洪水和削减洪峰等方面。森林生态系统的水源涵养功能实质上是通过各水文层次之间的水分分配和运动过程实现的,包括林冠及林下植被截留、枯落物拦蓄和土壤吸持贮存水分以及森林蒸散发和地表地下径流等水文过程^[5]。林分地表枯落物层与土壤层作为重要的水文层次,是森林涵养水源的主体,其持水量可占总体涵养水量的85%,为森林涵养水源做出了巨大贡献^[6-7]。由于森林水源涵养功能具有时空尺度特征以及环境异质性的普遍存在,森林涵养水源的能力受到多种因素的综合影响,包括气候、土壤、地形、降水特征以及植被类型等因素^[5,8]。因而对于不同树种组成的林分,由于其空间结构特征和树种生物学特性的差异,其涵养水源的能力也大不相同^[9-11]。

黄浦江发源于湖州安吉龙王山,流经上海市区,全长113.4 km,流域面积约为2.4万km²,是上海市的重要水源,被称作上海的“母亲河”。上海市自2003年启动黄浦江水源涵养林建设工程以来,全市以黄浦江水源涵养林为代表的各类水源涵养林规模迅速扩大,主要分布在黄浦江两岸、沿海岸一侧以及市级重点工程建设的生态片林区域^[12]。近些年来,有关黄浦江上游水源涵养林涵养水源的能力受到诸多学者的关注^[13-15]。然而,黄浦江中游水源涵养林及周边森林资源虽然对保护流域水资源、改善水质、保障下游区域生产生活用水安全等起着重大作用,但其涵养水源的能力并未受到国内研究者的重视。因此,本文以黄浦江中游东岸的浦江郊野公园作为试验地,在园内选择5种典型人工纯林(香樟林、桂花林、栎树林、无患子林和池杉林)作为研究对象,分别对林分地表枯落物层和土壤层的水源涵养能力进行研究分析,并结合枯落物有效拦蓄量和土壤有效蓄水量来定量比较5种林分枯落物和土壤涵养水源的能力,以期为黄浦江流域水资源的科学管理与保护、水源涵养林的建设保护与合理经营提供科学依据。

1 试验地概况

试验地设在上海市浦江郊野公园(31°01′—31°

04′N, 121°29′—121°30′E),位于闵行区东南部,毗邻浦江镇地区多个大型居住社区,地处黄浦江中游东侧,大治河以北,是上海7个先行试点建设的郊野公园之一,总规划面积15.29 km²,拥有5.3 km的黄浦江岸线资源,定位为“以森林游憩、滨水休闲为主要功能的近郊都市森林型郊野公园”,首期规划建设5.82 km²,并于2017年7月29日正式开园。属北亚热带海洋性季风气候,四季分明,光照充足,雨热同季,年平均气温约为15~16℃,气温年较差大致为24℃,无霜期较长,为223~235天。全年雨量适中,年平均降水量为1 048~1 138 mm,年降水日129~136天,全年70%以上的雨量集中在4—9月的汛期。土壤类型为黄棕壤兼有黄壤,主要是各种潴育型水稻土和渗育型水稻土,园区位于平原地区,地形平坦,地势较低,海拔高度为4 m。

园内拥有多处独特的自然景观,尤以林地景观最为突出,约占到公园规划面积的30%^[16]。植被类型主要为常绿阔叶林,现有植被资源主要为2003—2004年营建的黄浦江水源涵养林以及生态片林,其余为近年来人工移植的高大乔木、彩色树种、水生植物和经济果树以及原有的苗圃林、四旁林、农田等^[17]。森林植被长势良好,但林分结构较差,以乔木单层林为主,大多是纯林或少数树种块状混交的林分,且以幼、中龄林为主。主要造林树种有池杉(*Taxodium ascendens* Brongn.)、水杉(*Metasequoia glyptostroboides* Hu & W. C. Cheng.)、夹竹桃(*Nerium indicum* Mill.)、香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.)、桂花(*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour.)、银杏(*Ginkgo biloba* Linn.)、无患子(*Sapindus mukorossi* Gaertn.)、栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)和杜英(*Elaeocarpus decipiens* Hemsl.)等。

2 研究方法

2.1 样地选择与设置

经过实地踏查后,选择5种典型人工纯林作为研究对象,分别为香樟林、桂花林、栎树林、无患子林以及池杉林,均是人工栽植幼年苗木形成的纯林(池杉林为1982年由上海市农业局下属林业站出资栽植,其余4种林分均是上海市政府于2003—2004年营建的人工生态林)。于2017年9月,分别对5种典型林分设置3个20 m×20 m的标准样地,并进行每木检尺,实测树高、胸径等林分因子以及林下植被种类和

覆盖度等。同期进行野外调查采样工作。5 种林分标准样地基本概况见表 1。

表 1 5 种林分样地基本概况

林分 编号	林分 类型	植被 类型	林龄/ a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	郁闭度	平均 冠幅/m	密度/ (株·hm ⁻²)	林下植被 覆盖度/%	林下植被 概况
I	香樟纯林	常绿阔叶	15	10.9	20.4	0.76	3.2	900	5	无灌木,有少量草本,主要为一年蓬、 翅果菊
II	桂花纯林	常绿阔叶	15	5.1	—	0.95	2.5	4000	—	无灌木,无草本
III	栎树纯林	落叶阔叶	15	12.1	14.5	0.82	2.7	1500	80	无灌木,有少量栎树更新苗,主要草本 为飞蓬、一年蓬、竹节蓼等
IV	无患子纯林	落叶阔叶	15	13.2	17.0	0.83	2.6	1600	80	无灌木,有少量无患子更新苗,草本主 要为一年蓬、地肤、沿阶草等
V	池杉纯林	落叶针叶	36	14.8	19.1	0.70	3.2	1600	85	无灌木,有少量构树、桑树更新苗,草 本主要为地锦、求米草、马交儿等

2.2 枯落物层水源涵养功能相关指标的测定

2.2.1 枯落物自然含水率与蓄积量的测定 在标准样地内沿对角线设置 3 个 50 cm×50 cm 的样方,用直尺测量各样方枯落物层厚度,并按未分解层、半分解层将枯落物装入档案袋带回实验室,称量其鲜重后放入烘箱中,在 85 ℃恒温条件下烘干至恒重,称量其烘干重,计算枯落物自然含水率,并以干物质质量推算单位面积枯落物蓄积量^[6]。

2.2.2 枯落物持水过程的测定 采用室内浸泡法^[18],称取一定质量已烘干的枯落物样品装入纱网袋,将其全部浸入水中,观测其持水过程。并分别称量枯落物样品浸水 0.5,1,2,4,8,12,24 h 后的质量,根据其浸水前后质量差值推算各时段单位质量枯落物的持水量和持水率。

2.2.3 枯落物最大持水量与有效拦蓄量的计算 通常认为枯落物在浸水 24 h 后达到饱和状态,此时枯落物吸持的水量达到最大,即为最大持水量,通过与其烘干质量之比计算枯落物最大持水率^[19]。在评价枯落物持水能力时,通常采用有效拦蓄量来估算枯落物对降水的实际拦蓄能力^[20]。枯落物最大持水量与有效拦蓄量计算公式为:

$$W_m = R_m \times M \tag{1}$$

$$W = (0.85R_m - R_0) \times M \tag{2}$$

式中:W_m 为枯落物最大持水量(t/hm²);W 为枯落物有效拦蓄量(t/hm²);R_m 为枯落物最大持水率(%);R₀ 为枯落物自然含水率(%);M 为枯落物蓄积量(t/hm²)。

2.3 土壤层水源涵养功能相关指标的测定

2.3.1 土壤水分—物理性质的测定 在标准样地内随机挖掘 3 个土壤剖面,按照 0—20,20—40,40—60 cm 土层深度用 100 cm³ 环刀取原状土(注意避开石块和粗根,尽量避免破坏土壤结构),放入密封袋带回实验室。在室内采用环刀法,按照《森林土壤水分—物理性质的测定(LY/T 1215—1999)》^[21]的操作步

骤测定土壤容重、孔隙度等物理性质以及土壤自然含水率、最大持水量等持水性能。

2.3.2 土壤饱和蓄水量与有效蓄水量的计算 通过测定的土壤最大持水量与非毛管持水量可换算得到土壤饱和蓄水量与有效蓄水量,计算公式为:

$$W_t = H_m \times 10 \tag{3}$$

$$W_o = H_o \times 10 \tag{4}$$

式中:W_t 为土壤饱和蓄水量(t/hm²);H_m 为土壤最大持水量(mm);W_o 为土壤有效蓄水量(t/hm²);H_o 为土壤非毛管持水量(mm)。

2.4 数据处理

使用 Excel 2017 软件对原始数据进行整理,计算平均值及标准偏差(STDEV);运用 SPSS 19.0 软件对 5 种林分同项指标进行单因素方差分析(ANOVA)。

3 结果与分析

3.1 枯落物层水源涵养功能分析

3.1.1 枯落物蓄积量 地表枯落物层是森林涵养水源的重要水文层次,除可以拦蓄降水,还可以减缓地表径流、抑制土壤蒸发以及改良土壤结构和增强土壤入渗、蓄水性能^[22-23]。枯落物蓄积量是反映森林枯落物层水源涵养能力的重要指标,受其自身特性、积累时间和微生物对其分解速度的影响,同时与林分结构、气候因子以及人类活动等因素密切相关^[6]。

由表 2 可知,5 种林分地表枯落物层总厚度为 1.93~5.77 cm,依次为 V>IV>II>III>I;枯落物总蓄积量变化范围为 5.32~16.42 t/hm²,依次为 V>II>IV>III>I,总体表现为落叶阔叶林、落叶针叶林大于常绿阔叶林,而桂花纯林由于为常绿灌木,枝叶丰富,林分郁闭度大,且受人为活动影响小,故其地表枯落物层厚度与蓄积量较大,仅次于池杉纯林。不同分解层次枯落物蓄积量表现为未分解层>半分解层,且未分解层所占比例远大于半分解层,可能因为 5 种林分均为人工纯林且栽植时间较短,枯落物多年

积累量较少,加之枯落物类型单一,微生物分解速度缓慢,造成未分解层蓄积量明显高于半分解层。

表 2 5 种林分枯落物层总厚度与蓄积量

林分类型	枯落物层 总厚度/cm	枯落物总蓄积量/ (t·hm ⁻²)	未分解层		半分解层	
			蓄积量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	比例/%
I	1.93±0.06a	5.32±1.42a	3.86±1.45a	72.69	1.45±0.26a	27.31
II	2.79±0.96a	8.77±3.74a	5.56±2.16a	63.28	3.22±1.67ab	36.72
III	2.57±0.25a	5.36±1.20a	4.05±1.10a	75.56	1.31±0.13a	24.44
IV	4.04±0.47b	7.78±1.24a	7.07±1.12a	90.76	0.72±0.40a	9.24
V	5.77±0.15c	16.42±6.18b	10.80±2.92b	65.77	5.62±3.28b	34.23

注:表内数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各林分类型间差异显著(P<0.05)。下同。

3.1.2 枯落物持水过程 由图 1 可知,5 种林分不同分解层次的枯落物其单位质量的持水量均随浸水时间的增加而逐渐增大,但持水速率逐渐减小。各林分未分解层、半分解层枯落物均在开始浸水 2 h 内持水量急速增加,2~12 h 内枯落物持水量增加趋势平缓,当浸水 24 h 时,枯落物持水量达到最大,持水速率最小。未分解层枯落物持水能力依次为Ⅲ>Ⅳ>Ⅴ>Ⅰ>Ⅱ,半分解层枯落物持水能力依次为Ⅳ>Ⅴ>Ⅲ>Ⅰ>Ⅱ,均表现出落叶阔叶林、落叶针叶林

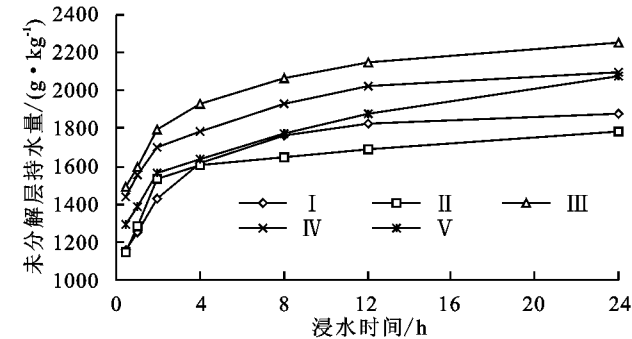


图 1 5 种林分枯落物未分解层、半分解层持水量与浸水时间的关系曲线

对 5 种林分未分解层、半分解层枯落物持水量与浸水时间进行回归分析后,可以得到表 3 所列方程。由表 3 可知,各林分不同分解层次枯落物持水量与浸水时间均满足对数关系,且拟合效果好,相关系数 R^2 较高,回归方程关系式可表示为:

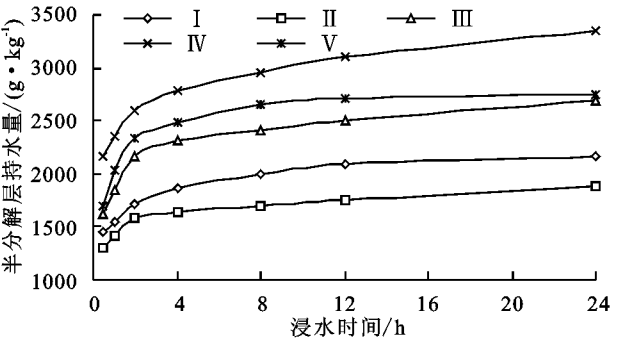
$$Q=a\ln(t)+b \tag{5}$$

式中:Q 为枯落物持水量(g/kg);t 为浸水时间(h);a 为系数;b 为常数项。

3.1.3 枯落物持水能力 枯落物的持水能力与其组成成分、分解状况、蓄积量以及林分类型、林龄等有关,可用最大持水量与最大持水率表示,且通常用有效拦蓄量来估算枯落物对雨水的实际拦蓄能力^[6]。由表 4 可知,5 种林分枯落物自然含水率均值为 13.49%~27.78%,依次为Ⅳ>Ⅴ>Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ。最大持水率均值为 183.18%~272.18%,依次为Ⅳ>Ⅲ>Ⅴ>Ⅰ>Ⅱ,最大值约为最小值的 1.4 倍,表现为落叶阔叶林>落叶针叶林>常绿阔叶林。各林分不同分解层次枯落物自然含水率与最大持水率

枯落物的持水能力强于常绿阔叶林。这可能由于与落叶树种相比,香樟和桂花的叶片质地较硬,叶片表面光滑无毛,地表枯落物不易形成良好的覆盖结构,导致其持水能力较弱。

总体来说,5 种林分不同分解层枯落物持水能力均表现为半分解层>未分解层,这是因为半分解层枯落物已有部分被分解,枯落物变得疏松、松软,易形成具有大量小孔隙的覆盖结构,吸水面大且表面张力较大,故其持水能力更好。



均表现为半分解层>未分解层。

表 3 5 种林分不同分解层次枯落物持水量与浸水时间的回归方程

林分类型	枯落物 分解层次	回归方程	R^2
I	未分解	$Q=204.88\ln(t)+1292.4$	0.9792
	半分解	$Q=195.89\ln(t)+1576.8$	0.9922
II	未分解	$Q=158.85\ln(t)+1316.8$	0.9280
	半分解	$Q=140.47\ln(t)+1427.3$	0.9791
III	未分解	$Q=203.88\ln(t)+1631.6$	0.9956
	半分解	$Q=264.86\ln(t)+1878.1$	0.9725
V	未分解	$Q=175.05\ln(t)+1564.5$	0.9949
	半分解	$Q=300.19\ln(t)+2364.9$	0.9980
IV	未分解	$Q=196.96\ln(t)+1400.5$	0.9870
	半分解	$Q=271.50\ln(t)+2024.6$	0.9327

枯落物最大持水量不仅与其自身持水能力有关,还受枯落物蓄积量和覆盖结构影响。由表 5 可知,5 种林分枯落物最大持水量为 10.39~37.83t/hm²,依次为Ⅴ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅲ>Ⅰ。池杉纯林由于枯落物蓄

积量最大,并且最大持水率比较高,故其枯落物最大持水量最大;桂花纯林虽然枯落物最大持水率最小,但由于其蓄积量较大,因而最大持水量上升至第 3。枯落物有效拦蓄量为 7.74~27.90t/hm²,最大值约为最小值的 3.6 倍,依次为 V>IV>II>III>I,这

与枯落物最大持水量排序一致。大致看来,落叶针叶林枯落物最大持水量与有效拦蓄量明显高于落叶阔叶林、常绿阔叶林。各林分不同分解层次枯落物最大持水量与有效拦蓄量均表现为未分解层>半分解层,这是因为未分解层枯落物蓄积量明显高于半分解层。

表 4 5 种林分枯落物自然含水率与最大持水率

单位:%

林分 类型	自然含水率			最大持水率		
	未分解层	半分解层	平均值	未分解层	半分解层	平均值
I	15.67±4.10ab	33.71±5.40a	24.69	188.21±32.58a	216.04±9.71a	202.12
II	16.64±3.91ab	22.20±4.87a	19.42	178.03±28.64a	188.32±41.76a	183.18
III	9.49±1.15a	17.49±11.55a	13.49	225.84±14.27a	269.66±16.21b	247.75
IV	17.96±5.89ab	37.60±23.46a	27.78	210.18±36.69a	334.18±34.53c	272.18
V	23.54±11.04b	30.31±6.45a	26.93	207.11±11.91a	275.00±4.19b	241.06

表 5 5 种林分枯落物最大持水量与有效拦蓄量

单位:t/hm²

林分 类型	最大持水量			有效拦蓄量		
	未分解	半分解	总和	未分解	半分解	总和
I	7.26	3.13	10.39	5.57	2.17	7.74
II	9.88	6.06	16.48	7.48	4.44	11.92
III	9.15	3.53	12.68	7.39	2.77	10.16
IV	14.86	2.41	17.27	11.36	1.77	13.13
V	22.37	15.46	37.83	16.47	11.43	27.90

3.2 土壤层水源涵养功能分析

3.2.1 土壤物理性质 土壤容重与孔隙度是反映土壤物理特性的重要指标,容重大小是土壤质地、结构、孔隙等物理性状的综合反映,而孔隙度则反映土壤通透性,其中毛管孔隙使土壤具有贮水性能,非毛管孔隙使土壤具有透水性能^[24]。从表 6 可以看出,5 种林分土壤

容重均值为 1.42~1.46g/cm³,依次为II>I>III>IV=V,容重值整体偏大,土壤较为紧实,各林分之间差异较小。除池杉纯林土壤容重随土壤深度的增加而增大,其余 4 种林分土壤容重变化规律一致,均随土壤深度的增加先增大后减小。总体来看,各林分表层土壤容重最小,明显低于中层与下层土壤,这与地表枯落物对土壤结构的改良作用有直接关系。

由表 6 可知,5 种林分土壤总孔隙度均值为 42.23%~43.25%,依次为V>II>III>IV>I;毛管孔隙度均值为 39.81%~41.26%,依次为II>V>IV>III>I;非毛管孔隙度均值为 1.75%~2.90%,依次为III>IV>I>V>II。总体来看,5 种林分土壤孔隙度状况各不相同,非毛管孔隙度占比均很小,明显小于毛管孔隙度,说明土壤毛管持水能力较好,而渗水透气性较差。

表 6 5 种林分土壤物理性质

林分 类型	土层 深度/cm	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔隙度/%
I	0—20	1.35±0.02a	41.88±1.68cde	3.35±1.41bc	45.23±1.50de
	20—40	1.54±0.09f	38.02±1.21ab	1.57±0.18a	39.59±1.39a
	40—60	1.47±0.05cdef	39.52±0.78abcd	2.34±1.61abc	41.86±0.91abcde
	平均值	1.45	39.81	2.42	42.23
II	0—20	1.45±0.03bcde	42.36±2.66de	1.75±0.76ab	44.11±2.61bcde
	20—40	1.50±0.03def	39.65±2.31abcd	1.68±0.22a	41.34±2.33abcd
	40—60	1.44±0.08bcd	41.78±0.83bcde	1.81±0.73ab	43.59±1.46abcde
	平均值	1.46	41.26	1.75	43.01
III	0—20	1.36±0.02a	41.93±1.43cde	3.61±0.68c	45.54±1.93e
	20—40	1.52±0.08ef	38.37±2.23abc	2.60±0.74abc	40.97±1.54abc
	40—60	1.44±0.04bcd	39.27±0.68abcd	2.49±0.67abc	41.76±1.26abcde
	平均值	1.44	39.86	2.90	42.76
IV	0—20	1.39±0.03ab	41.92±2.10cde	2.65±0.74abc	44.57±2.84cde
	20—40	1.46±0.05bcdef	38.88±2.57abcd	2.19±0.65abc	41.06±3.15abcd
	40—60	1.42±0.10abc	39.88±3.64abcde	2.47±0.63abc	42.36±4.25abcde
	平均值	1.42	40.23	2.44	42.66
V	0—20	1.36±0.04a	43.49±0.66e	2.40±1.11abc	45.89±1.18e
	20—40	1.38±0.03ab	42.09±1.52cde	1.59±0.09a	43.68±1.57abcde
	40—60	1.51±0.08def	37.89±2.33a	2.30±0.76abc	40.19±1.60ab
	平均值	1.42	41.16	2.10	43.25

3.2.2 土壤持水能力 土壤层作为森林生态系统水分的主要贮存库,其持水能力由土壤理化性质决定,与土壤容重和孔隙度密切相关,受土壤前期含水量、降雨特征等因素影响^[25]。由表 7 可知,5 种林分 0—60 cm 土壤层自然持水量为 213.27~237.09 mm,依次为 V>Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ>Ⅳ。最大持水量为 253.36~

259.50 mm;毛管持水量为 238.84~247.58 mm;非毛管持水量为 10.49~17.39 mm。5 种林分土壤持水能力排序均与其相应孔隙度指标的排序一致,这表明土壤持水性能与土壤孔隙度密切相关。总体来看,各林分土壤毛管持水量显著高于非毛管持水量,这与土壤毛管孔隙度占总孔隙度比例较大有关。

表 7 5 种林分不同土层深度持水能力相关指标

林分类型	土层深度/cm	自然持水量/mm	毛管持水量/mm	非毛管持水量/mm	最大持水量/mm
Ⅰ	0—20	78.09±4.53abcde	83.75±3.36cde	6.70±2.81bc	90.45±2.98de
	20—40	70.94±1.05a	76.04±2.42ab	3.14±0.36a	79.18±2.78a
	40—60	75.98±2.40abcde	79.05±1.56abcd	4.68±3.22abc	83.73±1.81abcde
	总和	225.01	238.84	14.52	253.36
Ⅱ	0—20	79.20±6.29bcde	84.72±5.33e	3.50±1.51ab	88.22±5.23bcde
	20—40	75.12±5.21abcde	79.30±4.61abcd	3.37±0.43a	82.67±4.66abcd
	40—60	80.13±0.26cde	83.56±1.64bcde	3.62±1.47ab	87.18±2.90abcde
	总和	234.45	247.58	10.49	258.07
Ⅲ	0—20	77.14±2.68abcde	83.86±2.87cde	7.22±1.35c	91.08±3.87e
	20—40	72.45±4.93abc	76.74±4.46abc	5.19±1.48abc	81.93±3.09abc
	40—60	73.12±3.34abc	78.54±1.35abcd	4.98±1.34abc	83.52±2.52abcde
	总和	222.71	239.14	17.39	256.53
Ⅳ	0—20	72.07±3.56ab	83.84±4.20cde	5.31±1.48abc	89.15±5.67cde
	20—40	70.84±4.87a	77.75±5.13abcd	4.37±1.33abc	82.12±6.31abcd
	40—60	70.36±3.61a	79.77±7.28abcde	4.95±1.26abc	84.72±8.50abcde
	总和	213.27	241.36	14.63	255.99
Ⅴ	0—20	82.72±2.28e	86.97±1.33e	4.80±2.21abc	91.77±2.36e
	20—40	80.94±3.79de	84.17±3.04cde	3.18±0.18a	87.35±3.14abcde
	40—60	73.43±5.77abcd	75.77±4.64a	4.61±1.53abc	80.38±3.18ab
	总和	237.09	246.91	12.59	259.50

3.2.3 土壤饱和蓄水量与有效蓄水量 土壤饱和蓄水量反映土壤贮存和调节水分的潜在能力,其中土壤毛管孔隙所持水分主要用于植物根系吸收以及林地土壤蒸发,而非毛管孔隙所持水分受自身重力运动,直接影响土壤渗透和调节水分的能力,因此土壤非毛管蓄水量也称为有效蓄水量,是评价森林水源涵养功能的重要指标^[26]。由表 8 可知,5 种林分 0—60 cm 土层深度饱和蓄水量为 2 533.54~2 595.06 t/hm²,依次为 V>Ⅱ>Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ,香樟纯林明显

低于其余 4 种林分,这可能因为其林下植被覆盖度以及枯落物蓄积量较少,对土壤结构的改善作用有限,导致其土壤总孔隙度较小,土壤蓄水能力较差。有效蓄水量为 104.87~174.01 t/hm²,依次为Ⅲ>Ⅳ>Ⅰ>Ⅴ>Ⅱ,最大值约为最小值的 1.6 倍,各林分之间有所差异,桂花纯林明显低于其余 4 种林分。总体表现为落叶阔叶林大于落叶针叶林和常绿阔叶林,说明落叶阔叶林土壤层水源涵养能力相比其他林分类型更好。

表 8 5 种林分土壤饱和蓄水量与有效蓄水量 单位:t/hm²

林分类型	饱和蓄水量				有效蓄水量			
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	总和	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	总和
Ⅰ	904.46	791.78	837.30	2533.54	66.93	31.41	46.80	145.14
Ⅱ	882.22	826.71	871.84	2580.77	35.00	33.67	36.20	104.87
Ⅲ	910.83	819.32	835.21	2565.36	72.27	51.94	49.80	174.01
Ⅳ	891.54	821.18	847.23	2559.95	53.14	43.66	49.53	146.33
Ⅴ	917.73	873.54	803.79	2595.06	48.00	31.80	46.07	125.87

3.3 5 种林分枯落物和土壤水源涵养能力比较

通过计算各林分枯落物有效拦蓄量与 0—60 cm 土壤有效蓄水量的总和,定量比较 5 种林分枯落物和

土壤的水源涵养能力。由表 9 可知,5 种林分地表枯落物层和土壤层的水源涵养能力由大到小依次为Ⅲ>Ⅳ>Ⅴ>Ⅰ>Ⅱ,综合蓄水量为 116.79~184.17

t/hm², 栎树纯林最大, 桂花纯林最小, 最大值约为最小值的 1.6 倍, 大致表现为落叶阔叶林>落叶针叶林>常绿阔叶林, 主要因为落叶林地表枯落物较多以及林下植被丰富, 有利于土壤形成良好的团粒结构, 提高土壤蓄水透水能力, 进而使林分具有较好的水源涵养能力。对比 5 种林分枯落物层与土壤层的蓄水

量可以看出, 土壤层是林分涵养水源的主体, 其有效蓄水量可占林分综合蓄水量的 90%, 对整个林分涵养水源的能力起着重要作用, 而枯落物层虽然拦蓄水量占比较小, 但其在减小降雨动能、延缓地表径流速度、抑制土壤蒸发、改善土壤理化性质等方面具有重要的水文生态意义。

表 9 5 种林分综合蓄水量

林分 类型	枯落物层		0—60 cm 土层		综合蓄水量/ (t·hm ⁻²)	水源涵养 能力排序
	有效拦蓄量/ (t·hm ⁻²)	比例/%	有效蓄水量/ (t·hm ⁻²)	比例/%		
I	7.74	5.06	145.14	94.94	152.88	4
II	11.92	10.21	104.87	89.79	116.79	5
III	10.16	5.52	174.01	94.48	184.17	1
IV	13.13	8.23	146.33	91.77	159.46	2
V	27.90	18.14	125.87	81.86	153.77	3

4 结论与建议

(1) 5 种林分枯落物总蓄积量为 5.32~16.42 t/hm², 依次为 V>II>IV>III>I, 不同分解层次枯落物蓄积量表现为未分解层>半分解层, 且未分解层所占比例远大于半分解层。不同分解层次枯落物持水量与浸水时间均满足良好的对数关系: $Q=a\ln(t)+b$, 未分解层枯落物持水能力为 III>IV>V>I>II; 半分解层持水能力为 IV>V>III>I>II, 均表现出落叶阔叶林、落叶针叶林强于常绿阔叶林。

(2) 5 种林分枯落物最大持水率均值为 183.18%~272.18%, 依次为 IV>III>V>I>II; 最大持水量均值为 10.39~37.83 t/hm², 依次为 V>IV>II>III>I; 有效拦蓄量均值为 7.74~27.90 t/hm², 依次为 V>IV>II>III>I, 大致表现出落叶阔叶林、落叶针叶林大于常绿阔叶林, 而栎树纯林低于桂花纯林, 说明枯落物蓄积量会影响其持水量大小。

(3) 5 种林分土壤容重均值为 1.42~1.46 g/cm³, 依次为 II>I>III>IV=V, 均为表层土壤容重最小。土壤总孔隙度均值为 42.23%~43.25%, 依次为 V>II>III>IV>I; 毛管孔隙度均值为 39.81%~41.26%, 依次为 II>V>IV>III>I; 非毛管孔隙度均值为 1.75%~2.90%, 依次为 III>IV>I>V>II, 各林分之间土壤孔隙度状况各不相同。0—60 cm 土层深度饱和蓄水量为 2 533.54~2 595.06 t/hm², 依次为 V>II>III>IV>I; 有效蓄水量为 104.87~174.01 t/hm², 依次为 III>IV>I>V>II, 各林分之间差异明显, 大致表现为常绿阔叶林小于落叶针叶林、落叶阔叶林。

(4) 通过计算枯落物有效拦蓄量和 0—60 cm 土壤有效蓄水量之和得到 5 种林分综合蓄水量为

116.79~184.17 t/hm², 依次为 III>IV>V>I>II, 总体表现为落叶阔叶林>落叶针叶林>常绿阔叶林。其中土壤层有效蓄水量可占林分综合蓄水量的 90%, 表明土壤层是林分涵养水源的主体, 而枯落物层虽然持水较少, 但其对土壤结构的改善、减少地表径流等有着重要意义。

综上所述, 栎树纯林、无患子纯林的枯落物和土壤水源涵养能力较强, 池杉纯林次之, 香樟纯林与桂花纯林较弱。因此, 在今后黄浦江流域营建人工生态林时, 可优先选择栎树、无患子等落叶树种, 而且在进行林分管护时应注意地表枯落物的保留以及林下植被的适当种植。对于水源涵养能力较差的林分, 建议在条件允许下补植落叶树种或灌木树种, 一方面增加林分地表枯落物来源和年产量, 另一方面通过枯落物的养分归还和植被根系改善土壤结构, 更好地发挥林分水源涵养功能。

参考文献:

[1] 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.
[2] 刘毅, 韦建财, 周海喜, 等. 柳江流域中游 3 种人工林的水源涵养功能[J]. 林业与环境科学, 2017, 33(2): 1-7.
[3] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 等. 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.
[4] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
[5] 姬少玲. 森林对水源的涵养研究进展[J]. 防护林科技, 2017(7): 82-83.
[6] 庞梦丽, 朱辰光, 翟博超, 等. 河北省太行山区 3 种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 51-56.
[7] Neris J, Tejedor M, Rodríguez M, et al. Effect of for-

- est floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain)[J]. *Catena*, 2013, 108: 50-57.
- [8] 马维玲, 石培礼, 宗宁, 等. 太行山区主要森林生态系统水源涵养能力[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(4): 478-489.
- [9] 刘凯, 贺康宁, 田赟, 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.
- [10] 王先棒, 贺康宁, 董喆, 等. 北川河流域典型林型水源涵养能力评价[J]. *中国水土保持科学*, 2017, 15(5): 94-102.
- [11] Dietz J, Hölscher D, Leuschner C, et al. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 237(1): 170-178.
- [12] 张现武, 李明华, 张金池, 等. 上海市水源涵养林建设现状及发展对策研究[J]. *华东森林经理*, 2015, 29(2): 23-26.
- [13] 刘道平. 黄浦江上游水源林水文生态功能研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [14] 李阿瑾. 黄浦江上游近自然林与纯林涵养水源能力比较[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [15] 臧贵敏. 黄浦江水源涵养林土壤生态特性研究及优化造林模式的选择[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
- [16] 郊野公园规划项目组. 落实生态文明建设, 探索郊野公园规划: 以上海试点郊野公园规划为例[J]. *上海城市规划*, 2013(5): 51-61.
- [17] 张思维. 浅谈浦江郊野公园首期启动区绿化专项设计[J]. *中外建筑*, 2017(4): 136-140.
- [18] 李婧. 三峡库区紫色砂岩地主要森林类型水文效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [19] 吴钦孝, 赵鸿雁, 刘向东, 等. 森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 24-29.
- [20] 张峰, 彭祚登, 安永兴, 等. 北京西山主要造林树种林下枯落物的持水特性[J]. *林业科学*, 2010, 46(10): 6-14.
- [21] 森林土壤水分—物理性质的测定. LY/T 1215—1999. 中华人民共和国林业行业标准[S]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [22] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 525: 737-746.
- [23] 赵艳云, 程积民, 万惠娥, 等. 林地枯落物层水文特征研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2007(2): 130-134.
- [24] 王利, 于立忠, 张金鑫, 等. 浑河上游水源林不同林型水源涵养功能分析[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 249-255.
- [25] 孙浩, 刘晓勇, 何齐发, 等. 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.
- [26] 莫菲, 李叙勇, 贺淑霞, 等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 5009-5016.

(上接第161页)

- [21] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, et al. Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2008, 108(1/2): 40-58.
- [22] Coble P G, Timperman A T. Fluorescence detection of proteins and amino acids in capillary electrophoresis using a post-column sheath flow reactor[J]. *Journal of Chromatography A*, 1998, 829(1/2): 309.
- [23] Yamashita Y, Jaffe R, Maie N, et al. Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(5): 1900-1908.
- [24] Kothawala D N, Stedmon C A, Muller R A, et al. Controls of dissolved organic matter quality: Evidence from a large-scale boreal lake survey[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1101-1114.
- [25] 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 等. 不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 333-342.