

长江中游平原湖区人工林枯落物和 表层土壤持水特性

胡文杰¹ 庞宏东¹ 王晓荣¹ 付甜¹ 胡兴宜¹ 来生艳² 穆俊明³¹

(1. 湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430075;

2. 湖北省石首市林业局, 湖北 荆州 434400;

3. 湖北省林业勘察设计院, 湖北 武汉 430079)

【摘要】: 研究长江流域平原湖区人工林的水源涵养功能, 对长江两岸造林绿化和生态修复具有重要指导意义。通过野外调查, 采用室内浸泡法, 分析比较了7种不同林分类型枯落物层和土壤表层的水源涵养能力。结果表明: (1) 枯落物半分解层蓄积量大于未分解层, 未分解层蓄积量以池杉林最大, 半分解层蓄积量以苏柳林最大。池杉林的总蓄积量最大, 为 $3.90\text{t}/\text{hm}^2$; (2) 未分解层最大持水率大于半分解层, 其值分别为 $263.63\%\sim 530.86\%$ 和 $209.17\%\sim 277.91\%$ 。未分解层和半分解层的最大持水量为 $0.95\sim 4.48$ 和 $4.15\sim 6.02\text{t}/\text{hm}^2$, 分别以池杉林和苏柳林最大; (3) 未分解层有效拦蓄量为 $0.44\sim 3.11\text{t}/\text{hm}^2$, 半分解层为 $0.75\sim 3.82\text{t}/\text{hm}^2$, 分别以池杉林和二球悬铃木林最高。总最大持水量和总有效拦蓄量均以池杉林最大, 分别为 9.61 和 $5.64\text{t}/\text{hm}^2$; (4) 枯落物持水量随浸水时间的延长表现为先显著增加后减缓, 最后达到饱和, 两者之间呈对数函数关系。枯落物吸水速率随浸水时间的延长表现为前期吸水速率较大, 后急剧变小, 最后趋近于0, 两者之间呈幂函数关系; (5) 表层土壤最大持水量和有效持水量最大的均为苏柳林, 分别为 1116.27 和 $213.27\text{t}/\text{hm}^2$ 。枯落物层以池杉林水源涵养能力较好, 土壤表层以苏柳林水源涵养能力较好。总体来看, 以苏柳林的综合水源涵养能力较好。

【关键词】: 平原湖区人工林 枯落物层 土壤表层 持水特性

【中图分类号】: S719 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0644-10

森林生态系统在调节气候, 维持陆地生态系统生态平衡方面具有重要作用, 水源涵养功能是评价森林生态系统功能的重要指标。枯落物和土壤是森林水源涵养的主体部分, 枯落物在截持降水过程中, 可减小降水对地表的冲刷, 阻滞径流, 其持水能力是评价林分水源涵养的重要指标^[1,2], 而土壤是主要的储存库, 直接影响森林生态系统整体水文调节功能^[3], 因此, 研究枯落物和土壤的水文功能对了解森林水源涵养能力具有重要意义^[4]。枯落物持水性能与其蓄积量、分解程度、空间分布及其本身特性有关^[5,6], 大量研究表明^[7~9], 由于环境条件及树种组成等差异, 不同地区不同林分类型的森林枯落物的持水性能存在明显差异。关于未分解层、半分解层蓄积量、最大持水率和有效拦蓄率的大小关系等在不同研究中的结果也不完全一致, 而这些指标在评价森

作者简介: 胡文杰(1989~), 男, 助理研究员, 主要研究方向为森林生态. E-mail: wenjiehu1725@163.com

胡兴宜, E-mail: huxingyi027@126.com

基金项目: 湖北省林业科研项目([2020]LYKJ18); 国家科技支撑计划项目(2015BAD07B070203)

林枯落物水源涵养能力方面具有重要作用，因此，有必要进一步开展特定区域的森林群落枯落物持水性能研究。长江中游原始森林植被较少，尽管人工林建设已取得较好的效果，但区域性生态环境仍然较为脆弱，对环境变化的反应敏感，其生态系统稳定性对区域生态安全来说至关重要。当前该区域关于森林水源涵养的研究较少，本研究以长江中游平原湖区人工林为研究对象，选择主要的林分类型，综合分析评价枯落物层和表层土壤的水源涵养能力，以期在当前大力开展长江大保护和长江两岸绿化工程的背景下，为后期绿化造林和生态修复提供科学依据。

1 研究区及方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江中游平原湖区(图 1),多数地区海拔 35m 左右,地势总体表现为由西北向东南逐渐倾降。土壤主要由河流冲积物和淤积物组成,多为砂壤土或黏土。气候属亚热带季风气候,无霜期约 240~260d,年均温 15.6℃~16.8℃,年均降水量 1100~1300mm,降水主要集中在 4~9 月。

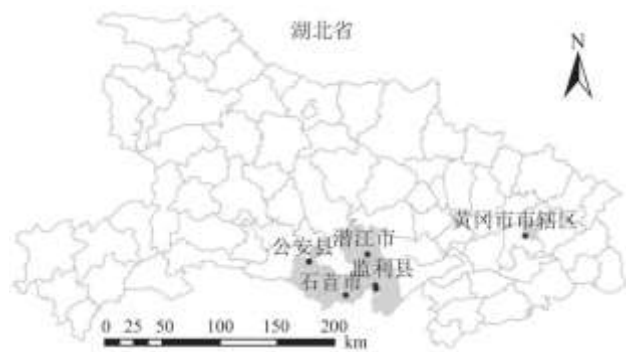


图 1 研究区域图

1.2 样地设置与调查

2019 年 3~4 月,在长江中游沿岸平原湖区选择林龄为 10a 左右的栎树林、二球悬铃木、水杉林、中山杉林、池杉林、杨树林和苏柳林等 7 个林分类型设置样地进行调查,每个类型的林分分别设置 3 块 20m×20m 的样地(具体情况见表 1)。除样地基本调查外,在每块样地沿对角线分别设置 3 个 0.5m×0.5m 的枯落物收集小样方,按照未分解层和半分解层分别收集全部枯落物^[10],并编号带回实验室。在每块样地中间位置分 0~10cm 和 10~20cm 用环刀取土壤样品,用于计算土壤水文参数,取其平均值作为 0~20cm 层土壤表层水文参数。

表 1 林分基本信息表

林分类型	地点	平均胸径(cm)	平均树高(m)	郁闭度	林龄(a)
栎树	监利县	13.58±2.23	7.75±1.02	0.9	8
		14.03±2.52	7.75±0.87	0.8	8
		13.81±2.20	8.09±0.82	0.8	8
二球悬铃木		12.83±1.09	13.22±0.86	0.9	8

		12.51±0.98	13.31±0.40	0.9	8
		13.04±1.53	12.77±0.38	0.8	8
水杉	潜江市	9.11±1.42	6.67±0.84	0.8	9
		9.24±1.72	6.91±1.09	0.8	9
		8.90±1.57	6.34±0.66	0.8	9
中山杉	公安县	13.96±3.51	8.69±1.78	0.7	10
		14.83±4.08	9.71±2.02	0.8	10
		16.25±3.87	10.46±1.88	0.8	10
		14.70±4.05	10.63±2.20	0.6	10
		14.38±4.09	9.29±2.11	0.7	10
		16.05±4.46	10.46±1.92	0.6	10
杨树	石首市	25.59±2.91	16.26±0.65	0.8	9
		23.98±4.45	17.05±1.26	0.8	9
		21.57±1.39	17.82±0.53	0.8	9
苏柳	黄州区	17.60±3.77	18.51±0.97	0.8	10
		18.17±4.06	19.08±1.01	0.8	10
		17.86±4.40	18.86±0.91	0.8	10

1.3 枯落物水文功能测定

枯落物自然状态下称重,然后将枯落物装入尼龙袋浸水 24h,取出至无水滴时称重,再将枯落物放入烘箱烘干至恒重,以此计算枯落物的自然含水率(%)、最大持水率(%)、蓄积量(t/hm^2)和最大持水量(t/hm^2)^[11]。枯落物有效拦蓄率和有效拦蓄量计算如下^[12]:有效拦蓄率(%)=0.85×最大持水率(%)–自然含水率(%);有效拦蓄量(t/hm^2)=枯落物蓄积量(t/hm^2)×有效拦蓄率(%)。将干枯落物装入尼龙袋后浸水,用来测定枯落物持水量和吸水速率。分别浸泡 0.25、0.5、1、2、4、8、10、12、24h 后取出至无水滴时称重,每次取出后称得的重量与其干质量的差值即为不同浸水时间的持水量,该持水量与对应时间的比值即为不同浸水时间的吸水速率。

1.4 土壤水文功能测定

以土壤最大持水量和有效持水量表征土壤持水能力。采用环刀法计算土壤总孔隙度和非毛管孔隙度^[13],土壤最大持水量和有效持水量计算如下^[14]:土壤最大持水量(t/hm^2)=10000(m^2)×总孔隙度(%)×土层厚度(m);土壤有效持水量(t/hm^2)=10000(m^2)×非毛管孔隙度(%)×土层厚度(m)。

2 结果与分析

2.1 枯落物储量

各林分类型不同层次枯落物蓄积量见图 2。除池杉林外，其他所有林分类型的半分解层枯落物蓄积量都显著大于未分解层 ($P<0.05$)，半分解层枯落物蓄积量是未分解层的 1.31~7.69 倍，其中以杨树林的差异最大，池杉林的最小，这说明在该区域主要林分类型中，半分解层是枯落物的主要层次。在未分解层，池杉林枯落物的蓄积量最大，且显著大于其他林分类型，二球悬铃木林和水杉林之间没有显著差异，但都显著大于栎树林、杨树林和苏柳林。未分解层蓄积量为池杉林 ($1.69\text{t}/\text{hm}^2$) > 水杉林 ($1.02\text{t}/\text{hm}^2$) > 二球悬铃木林 ($0.83\text{t}/\text{hm}^2$) > 中山杉林 ($0.68\text{t}/\text{hm}^2$) > 苏柳林 ($0.47\text{t}/\text{hm}^2$) > 杨树林 ($0.35\text{t}/\text{hm}^2$) > 栎树林 ($0.32\text{t}/\text{hm}^2$)。不同林分类型间半分解层枯落物蓄积量差异较小，蓄积量由大到小依次为苏柳林 ($2.84\text{t}/\text{hm}^2$) > 杨树林 ($2.73\text{t}/\text{hm}^2$) > 中山杉林 ($2.53\text{t}/\text{hm}^2$) > 池杉林 ($2.22\text{t}/\text{hm}^2$) > 栎树 ($2.19\text{t}/\text{hm}^2$) > 二球悬铃木林 ($2.15\text{t}/\text{hm}^2$) > 水杉林 ($1.94\text{t}/\text{hm}^2$)，其中，苏柳林半分解层蓄积量显著大于水杉林，而其他林分间差异不显著。在各林分类型中，池杉林总蓄积量最大 ($3.90\text{t}/\text{hm}^2$)，栎树林 ($2.51\text{t}/\text{hm}^2$) 最小 (图 3)。

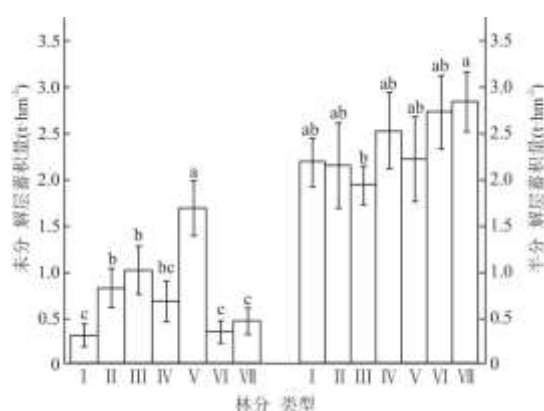


图 2 各林分类型不同层次枯落物蓄积量

注：不同数字代表林分类型，其中，I：栎树林；II：二球悬铃木林；III：水杉林；IV：中山杉林；V：池杉林；VI：杨树林；VII：苏柳林。不同字母表示不同林分类型间存在显著性差异 ($P<0.05$)。下同。

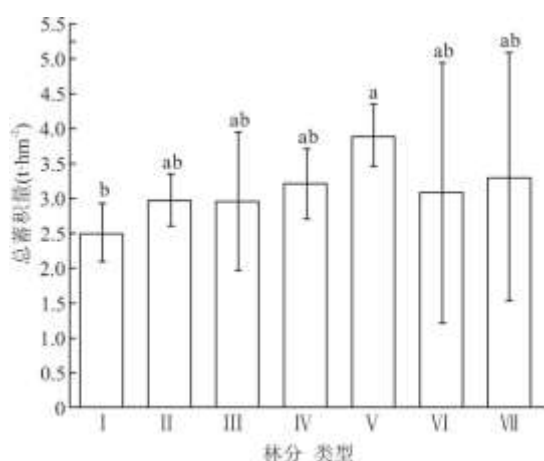


图 3 各林分类型枯落物总蓄积量

2.2 枯落物持水能力

最大持水量、最大持水率是反映枯落物持水能力的重要指标。可以看出,未分解层最大持水率为 263.63%~530.86%,以杨树林最大;半分解层最大持水率为 209.17%~277.91%,以二球悬铃木林最大。各林分类型枯落物未分解层的最大持水率都高于半分解层,这可能是因为未分解层枯落物的纤维管组织较为完整,从而具有更大的持水率。但除池杉林外($P>0.05$),各林分枯落物半分解层最大持水量都显著高于未分解层($P<0.05$),说明枯落物最大持水量与枯落物蓄积量的大小有直接关系。未分解层和半分解层最大持水量分别为 0.95~4.48 和 4.15~6.02t/hm²,分别以池杉林和苏柳林最大。

不同层次的枯落物最大持水量与蓄积量在各林分类型中未表现出完全一致的变化规律,这主要是由不同林分类型间最大持水率的差异造成。如池杉林未分解层的最大持水率最小,但对应的最大持水量最大,这是因为其蓄积量较大。水杉、中山杉和池杉等针叶林未分解层的最大持水率均小于阔叶林,这可能是因为未分解状态,针叶树种含有一定含量的油脂等排水物质,导致其最大持水率相对较小,在半分解层,各林分类型的最大持水率则无明显差异。综合来看,各林分类型总最大持水量由大到小依次为池杉林(9.61t/hm²)>二球悬铃木林(8.24t/hm²)>水杉林(7.28t/hm²)>中山杉林(7.22t/hm²)>苏柳林(6.97t/hm²)>杨树林(6.31t/hm²)>栎树林(6.01t/hm²)。

2.3 枯落物拦蓄能力

由于采用浸泡法得到的最大持水量和最大持水率反映的是枯落物在理想状态下的持水能力,难以客观反映枯落物在自然降水过程中的截持能力,因此,一般采用有效拦蓄量和有效拦蓄率来表征枯落物的拦蓄能力^[9,15]。枯落物未分解层的有效拦蓄率均高于半分解层,与最大持水率表现一致,未分解层有效拦蓄率为 67.89%~386.90%,半分解层为 52.06%~178.02%,说明未分解层在降水截留过程中的能力更强。未分解层和半分解层有效拦蓄率最高的分别为栎树林、二球悬铃木林,最低的均为水杉林。由于蓄积量对有效拦蓄量有较大影响,所以除池杉林外,各林分类型的半分解层有效拦蓄量均高于未分解层,其中,栎树林、二球悬铃木林、中山杉林、杨树林和苏柳林存在显著差异($P<0.05$)。因为池杉林未分解层的有效拦蓄率高于半分解层,且其蓄积量较为接近,所以池杉林未分解层有效拦蓄量高于半分解层。未分解层有效拦蓄量为 0.44~3.11t/hm²,半分解层为 0.75~3.82t/hm²,分别以池杉林和二球悬铃木林最高。综合来看,各林分类型总有效拦蓄量由大到小依次为池杉林(5.64t/hm²)>二球悬铃木(5.42t/hm²)>中山杉林(4.65t/hm²)>栎树林(4.38t/hm²)>苏柳林(4.00t/hm²)>杨树林(2.86t/hm²)>水杉林(1.45t/hm²)。

2.4 枯落物持水过程

枯落物持水量大小与枯落物种类、组成结构和分解程度等因素有关。从图 4 可以看出,各林分类型枯落物未分解层的持水量在 0~2h 内急剧增加,12h 后持水量趋于稳定,而半分解层的持水量在 0~1h 内增加得更为急剧,之后渐缓,12h 后持水量趋于稳定,半分解层的持水量在较短时间内增幅剧烈可能是由于其吸水速率更快导致。以上持水变化过程表明,枯落物层的持水过程主要集中在降水前期,而半分解层的响应更敏感。随着降水的持续,枯落物的持水量逐渐达到饱和。不同林分类型枯落物未分解层持水量随时间变化的差异比半分解层更大,在未分解层,水杉林和栎树林的持水量较大,在半分解层,二球悬铃木林的持水量较大。在相同浸水处理下,各林分类型未分解层持水量高于半分解层。

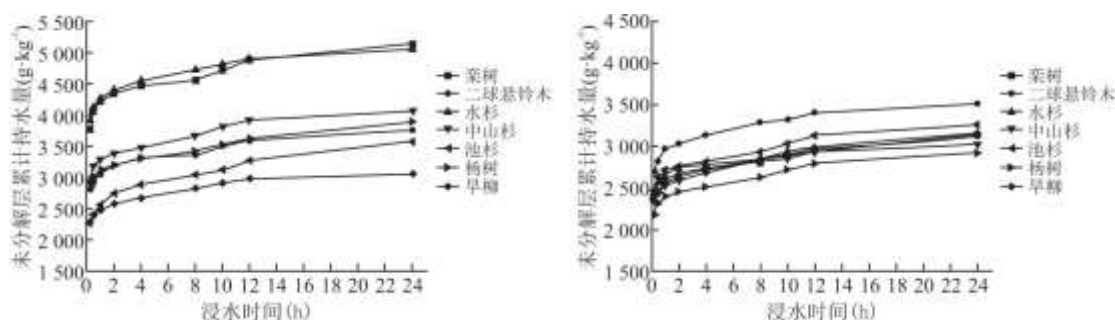


图 4 不同林分类型枯落物层持水过程

从图 5 可以看出,随着浸水时间的延长,不同林分类型各枯落物层次的吸水速率逐渐降低,总体表现为在 0~2h 内吸水速率急剧下降,之后逐渐降低,在 10h 后吸水速率逐渐趋近于 0,这主要是因为枯落物处于干燥状态时浸水,由于水势差较大,导致前期吸水速率较大,随着浸水时间的延长,枯落物持水量逐渐趋于饱和,从而使吸水速率变小。半分解层在 0~1h 内的吸水速率明显大于未分解层,这在一定程度上解释了半分解层在 0~1h 内的持水量急剧增大的原因。在相同浸水处理下,各林分类型半分解层的吸水速率大于未分解层。

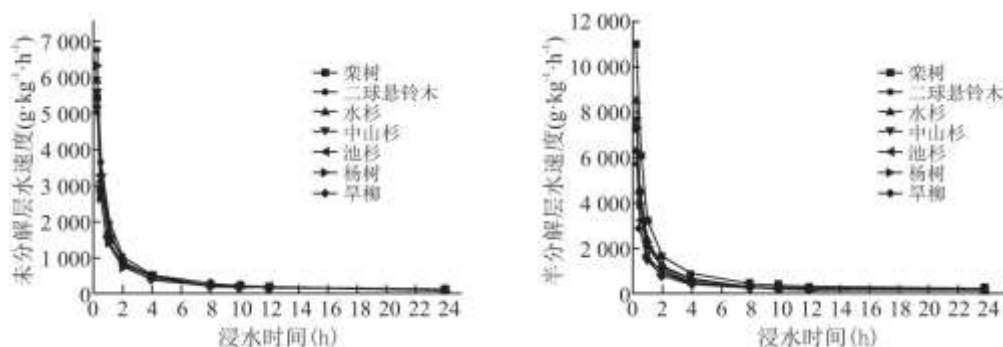


图 5 不同林分类型枯落物层吸水过程

分别对不同林分类型各层次枯落物的持水量、吸水速率与浸水时间进行回归分析,结果表明,枯落物各层次的持水量与浸水时间表现为对数函数关系,吸水速率与浸水时间表现为幂函数关系,拟合关系式都达到显著水平,且拟合效果较好。

2.5 表层土壤持水能力

土壤的持水能力对林分整体水源涵养功能有重要影响。从图 6 可见,不同林分类型土壤表层持水能力有所差异。苏柳林的最大持水量显著大于其他林分,栎树林、水杉林和中山杉林的最大持水量之间无显著差异,但都显著大于池杉林,不同林分类型土壤表层最大持水量表现为苏柳林($1116.27\text{t}/\text{hm}^2$)>水杉林($937.50\text{t}/\text{hm}^2$)>栎树林($916.07\text{t}/\text{hm}^2$)>中山杉林($896.70\text{t}/\text{hm}^2$)>杨树林($870.40\text{t}/\text{hm}^2$)>二球悬铃木林($860.57\text{t}/\text{hm}^2$)>池杉林($810.37\text{t}/\text{hm}^2$)。苏柳林有效持水量显著大于其他林分,且其他林分类型间无显著差异,具体表现为苏柳林($213.27\text{t}/\text{hm}^2$)>中山杉林($73.13\text{t}/\text{hm}^2$)>栎树林($69.70\text{t}/\text{hm}^2$)>杨树林($60.27\text{t}/\text{hm}^2$)>池杉林($47.33\text{t}/\text{hm}^2$)>水杉林($44.30\text{t}/\text{hm}^2$)>二球悬铃木林($41.37\text{t}/\text{hm}^2$)。综合以上内容可以看出,无论是表层土壤最大持水量还是有效持水量,均是苏柳林最大,因此,其持水能力最好。但最大持水量较大的林分其有效持水量不一定也较大,这说明不同林分类型土壤物理总孔隙度和非毛管孔隙度等物理性质间的变化规律有所不同,土壤物理性质一般会直接影响土壤的水源涵养能力。

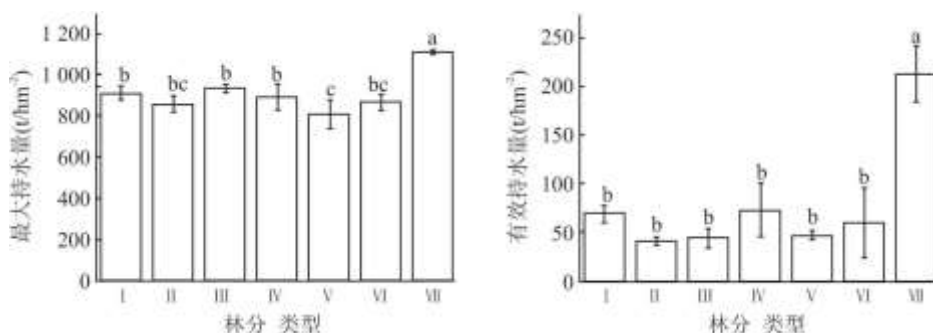


图6 不同林分类型表层土壤持水能力

3 讨论

枯落物现存蓄积量大小与林分组成、结构、演替阶段、分解速率及环境条件等因素有关^[16~18]。在本研究中,长江中游平原湖区不同树种人工林蓄积量为 $2.51\sim 3.09\text{t}/\text{hm}^2$,普遍小于其他地区林分枯落物蓄积量^[19,20],这主要与环境条件有关,本研究区靠近长江,环境湿度大,太阳照射时间长,而较高的湿度和较长的气温累积一方面可以促进淋溶加快枯落物分解,另一方面增强了微生物活性从而加快枯落物分解^[21],由此导致林分总蓄积量偏小。不同林分类型枯落物总蓄积量为池杉林($3.90\text{t}/\text{hm}^2$)>苏柳林($3.31\text{t}/\text{hm}^2$)>中山杉林($3.21\text{t}/\text{hm}^2$)>杨树林($3.08\text{t}/\text{hm}^2$)>二球悬铃木林($2.98\text{t}/\text{hm}^2$)>水杉林($2.96\text{t}/\text{hm}^2$)>栎树林($2.51\text{t}/\text{hm}^2$),有研究认为,由于针叶林分解较慢的原因,针叶林的枯落物蓄积量高于阔叶林^[12,22],本研究结果表明,池杉林的枯落物蓄积量高于阔叶林,但中山杉林和水杉林并未表现出相同的规律,这与针叶林的种类有密切关系。不同林分类型半分解层枯落物蓄积量都大于未分解层,这与多数研究的结果一致^[23~25],这说明在相同环境条件下,不同林分类型的枯落物分解循环具有一致性^[25]。但在砒砂岩区及城市近郊林分中的研究却得到相反的结果^[26,27],这与不同的环境条件、林分状况及人为活动干扰程度等因素有关,林分的生长周期影响了枯落物的输入量,枯落物的结构、内含物等影响着枯落物的分解速率,由此可能导致不同地区林分枯落物蓄积量的差异^[28]。

不同林分类型未分解层的最大持水率都大于半分解层,说明在单位质量相同情况下,枯落物未分解层的持水能力更强,该结果与胡晓聪等^[14]的研究结果一致。其中,阔叶林的最大持水率高于针叶林,说明阔叶林枯落物单位质量的持水能力比针叶林强。一般来说,以最大持水量反映林分枯落物整体的持水能力,由于蓄积量在一定程度上决定了最大持水量的大小,所以持水率最大的林分最大持水量不一定大^[26]。在本研究中,不同林分枯落物总最大持水量表现为池杉林($9.61\text{t}/\text{hm}^2$)>二球悬铃木林($8.24\text{t}/\text{hm}^2$)>水杉林($7.28\text{t}/\text{hm}^2$)>中山杉林($7.22\text{t}/\text{hm}^2$)>苏柳林($6.97\text{t}/\text{hm}^2$)>杨树林($6.31\text{t}/\text{hm}^2$)>栎树林($6.01\text{t}/\text{hm}^2$),说明池杉林枯落物的持水能力最强,二球悬铃木次之。为反映枯落物在实际降水过程中的拦蓄能力,一般采用有效拦蓄量和有效拦蓄率表示^[29]。未分解层的有效拦蓄率大于半分解层,但半分解层的有效拦蓄量大于未分解层,这是由不同层次枯落物蓄积量不同造成。综合总拦蓄量来看,池杉林的有效拦蓄量最高,表明该林分在降水过程中的截持作用更好。

枯落物未分解层和半分解层的持水量在浸水前期显著增加,后渐变缓直至饱和。这表明在降水初期,枯落物有较强的拦蓄能力,随着降雨过程的持续,其拦蓄能力逐渐减弱^[30]。不同林分类型枯落物未分解层的持水曲线差异较大,这说明不同林分类型枯落物未分解层的持水过程差异较大,而半分解层的差异则较小,这可能是因为枯落物持水量与其内部结构和组成物质有关^[31],当处于未分解状态时,不同种类的枯落物性质差异较大,而分解后这种差异变得较小,由此导致不同林分类型半分解层持水量差异较小。在相同浸水条件下,各林分类型未分解层持水量高于半分解层。半分解层的吸水速率大于未分解层,这可能是因为枯落物经过分解后,其内部结构发生改变,已含有腐殖质,且表面积增大,具有更强的亲水能力^[32,33]。

不同林分类型由于林内微环境、养分循环等存在差异的原因使得土壤物理性质有所不同^[34,35],土壤物理性质是影响土壤持水量的重要因素^[36]。由土壤持水量计算方法可知,土壤总空隙度越大,其最大持水量越大;土壤非毛管孔隙度越大,其有效持水量越大,在不同林分类型中,苏柳林表层土壤总孔隙度(55.81%)和非毛管孔隙度(10.66%)均最大,表明苏柳林表层土壤的通透性良好,水文涵养功能较好。有研究表明,枯落物的腐化分解会对土壤物理性质产生显著影响^[37],当枯落物进入土壤后会使得土壤容重降低^[38,39],而土壤容重与土壤持水量之间存在显著负相关关系^[40],在不同林分类型中,苏柳林表层土壤容重($1.16\text{g}/\text{cm}^3$)最小,且显著小于其他林分类型($P<0.05$)。有机质归土对改善土壤持水量有明显作用^[40],枯落物是有机质的主要来源,池杉林枯落物层蓄积量最大,但由于针、阔叶片特性差异,即使针叶类型枯落物蓄积量较大,在单位时间内分解产生的有机质也不一定比阔叶类型的枯落物多,因此,虽然池杉林枯落物层蓄积量最大,但并没有使其表层土壤持水量也变得最大,苏柳林枯落物层蓄积量在阔叶林中最大。综上所述,苏柳林表层土壤持水能力最好。

4 结论

(1)在池杉林、苏柳林、中山杉林、杨树林、二球悬铃木林、水杉林和栎树林等7中林分类型中,池杉林枯落物层总蓄积量最大(3.90t/tm²),栎树林最小(2.51t/hm²),表明长江中游平原湖区不同树种人工林枯落物层蓄积量存在较明显差异。

(2)枯落物未分解层的最大持水率、有效拦蓄率均大于半分解层,未分解层的最大持水量、有效拦蓄量均小于半分解层,在长江中游平原湖区,枯落物半分解层是涵养水源的主要层次。

(3)从枯落物层看,池杉林的最大持水量和有效拦蓄量最高;从土壤表层看,苏柳林的最大持水量和有效持水量最高;综合枯落物层和土壤表层看,苏柳林的综合水源涵养能力较好。

(4)对长江两岸进行造林绿化,或营建长江防护林时,应结合地域性生态安全需要,因地制宜地开展造林绿化工作,若要进行水源涵养林造林或生态修复时,可在保持林分生物多样性及群落稳定的基础上,适当提高苏柳林比例。

参考文献:

- [1]牛存洋,阿拉木萨,宗芹,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿地上一地下生物量分配格局[J].生态学杂志,2013,32(8):1980-1986.
- [2]董云中,张强,郇春花,等.定植年限对小叶锦鸡儿灌丛及根际土壤养分与酶活力的影响[J].农学学报,2014,4(1):29-32.
- [3]PULLEMAN M, CREAMER R, HAMER U, et al. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services—an overview of European approaches[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012, 4(5):529-538.
- [4]匡旭,邢丁亮,张昭臣,等.长白山北坡云冷杉林和落叶松林物种组成与群落结构[J].应用生态学报,2014,25(8):2149-2157.
- [5]刘玉国,刘长成,李国庆,等.贵州喀斯特山地5种森林群落的枯落物储量及水文作用[J].林业科学,2011,47(3):82-88.
- [6]林波,刘庆,吴彦,等.川西亚高山人工针叶林枯枝落叶及苔藓层的持水性能[J].应用与环境生物学报,2002,8(3):234-238.
- [7]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.
- [8]常雅军,陈琦,曹靖,等.甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性[J].生态学报,2011,31(9):2392-2400.
- [9]胡淑萍,余新晓,岳永杰.北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究[J].水土保持学报,2008,22(1):146-150.
- [10]武启骞,王传宽,赵娟,等.帽儿山2种森林类型凋落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2015,29(3):161-166.
- [11]张建利,王加国,李苇洁,等.贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能[J].水土保持学报,2018,32(3):170-176.
- [12]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):143-148.

-
- [13]LY/T 1215-1999. 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 森林土壤水分-物理性质的测定[S]. 国家林业局, 1999:22-24.
- [14]胡晓聪, 黄乾亮, 金亮. 西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J]. 应用生态学报, 2017(1):55-63.
- [15]田超, 杨新兵, 李军, 等. 冀北山地不同海拔蒙古栎林枯落物和土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):221-226.
- [16]SONG X, YAN C, XIE J, et al. Assessment of changes in the area of the water conservation forest in the qilian mountains of China' s Gansu province, and the effects on water conservation[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(8):2441-2448.
- [17]郑江坤, 王婷婷, 付万全, 等. 川中丘陵区典型林分枯落物层蓄积量及持水特性[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):87-92.
- [18]宋春林, 孙向阳, 王根绪. 森林生态系统碳水关系及其影响因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9):2891-2902.
- [19]王晓荣, 唐万鹏, 刘学全, 等. 丹江口湖北库区不同林分类型枯落物储量及持水性能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5):244-248.
- [20]袁秀锦, 王晓荣, 潘磊, 等. 三峡库区不同类型马尾松林枯落物层持水特性比较[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):163-169.
- [21]陈婷, 郗敏, 孔范龙, 等. 枯落物分解及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7):1927-1935.
- [22]韩同吉, 裴胜民, 张光灿, 等. 北方石质山区典型林分枯落物层涵蓄水分特征[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2005, 36(2):275-278.
- [23]杨荣, 杨宏伟, 刘丽英, 等. 不同林分山杏灌木林枯落物持水性能研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017(2):104-110.
- [24]孟庆权, 葛露露, 杨馨邈, 等. 滨海沙地不同人工林凋落物现存量及其持水特性[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):146-152.
- [25]常雅军, 曹靖, 马建伟, 等. 秦岭西部山地针叶林凋落物持水特性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(11):2346-2351.
- [26]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.
- [27]金雅琴, 李冬林, 孙丽娟, 等. 南京近郊人工林地表枯落物的累积量及持水性[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5):98-107.
- [28]李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(14):3807-3819.
- [29]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.
- [30]剪文灏, 李淑春, 陈波, 等. 冀北山区三种典型森林类型枯落物水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(05):144-147.

-
- [31] WIEDER R W, CIECELAND C C, TOWNSEND A R. Tropical tree composition affects the oxidation of dissolved organic matter from litter[J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(2):127-138.
- [32] 周巧稚, 毕华兴, 孔凌霄, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4):115-121.
- [33] 刘凯, 贺康宁, 王先棒. 青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1):89-97.
- [34] 胡健, 吕一河, 张琨, 等. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异[J]. *生态学报*, 2016, 36(11):3338-3349.
- [35] SHANG W, ZHAO L, WU X D, et al. Soil organic matter fractions under different vegetation types in permafrost regions along the Qinghai-Tibet highway, north of Kunlun mountains, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2015(4):1010-1024.
- [36] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃亚高山云杉人工林土壤特性及水源涵养功能对林分密度的响应特征[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(09):57-69.
- [37] 丁绍兰, 杨乔媚, 赵串串, 等. 黄土丘陵区不同林分类型枯落物层及其林下土壤持水能力研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5):104-108.
- [38] 王忠禹, 王兵, 刘国彬, 等. 黄土丘陵区典型植被枯落物坡面分布及混入土壤对土壤性状的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11):162-173.
- [39] 孙海, 王秋霞, 张春阁, 等. 不同树叶凋落物对人参土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(10):3603-3615.
- [40] 祁凯斌, 黄俊胜, 杨婷惠, 等. 亚高山森林自然与人工恢复对土壤涵水能力的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(22):244-254.