

广西不同林龄和区域马尾松人工林持水性综合分析

蒙 博¹ 李 鹏² 杨章旗², 通信作者

(1. 广西师范大学生命科学学院, 广西 桂林 541006;

2. 广西林业科学研究院, 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西 南宁 530002)

摘要: 为了解广西不同区域和林龄马尾松人工林水源涵养能力, 以天洪岭林场、派阳山林场、镇龙林场及华山林场四个区域的 5 种林龄 (幼林龄、中林龄、近熟林、成熟林、过熟林) 为例, 深入探讨不同林龄和区域下马尾松枯落物层及土壤层水源涵养能力。结果表明: 马尾松不同林龄和区域枯落物层水源涵养能力均具有显著性差异 ($P < 0.05$), 其中最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量和有效拦蓄率均在近熟林或成熟林高于其他林龄, 幼林龄或过熟林则低于其他林龄, 半分解层大于未分解层; 土壤层水源涵养能力变化也不尽相同, 其中镇龙林场土壤容重变化范围最大, 为 $1.101 \sim 1.504 \text{ g/cm}^3$; 天洪岭林场土壤孔隙度、毛管持水量、饱和持水量、土壤含水量及田间持水量均高于其他林场, 分别为土壤孔隙度 $51.638 \sim 56.919\%$ 、毛管持水量 $36.803 \sim 47.917 \text{ t/hm}^2$ 、饱和持水量 $40.890 \sim 56.257 \text{ t/hm}^2$ 、土壤含水量 $28.940 \sim 37.940\%$ 及田间持水量 $36.473 \sim 47.123 \text{ g/kg}$ 。综上, 成熟林阶段马尾松水源涵养能力优于其他林龄, 因此在后续马尾松经营管理中应围绕提高土壤层水源涵养能力开展。

关键词: 马尾松; 林龄; 枯落物; 土壤; 水源涵养

马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb) 作为中国南方亚热带地区广泛栽培的本土林木, 因其快速生长以及耐旱耐瘠薄的显著特性, 已成为国内重要的工业原材料之一。马尾松不仅是有效的水土保持树种, 还在水源涵养等方面发挥着至关重要的作用。森林生态系统在土壤保持、碳固存以及气候调节等多方面扮演着关键角色。枯落物层作为森林生态系统的重要组成部分, 在拦蓄降水、防止土壤溅蚀和减少水分蒸发等方面具有重要作用。而土壤层覆盖地表, 可以降低水流对土壤的侵蚀作用, 特别是在调节地表径流、维持水土平衡方面尤为关键。森林水源涵养能力的高低主要体现在林下枯落物层和土壤层持水性上, 它们是水源涵养功能的核心。

近年来, 许多研究者开始关注不同林分结构、混交模式、抚育措施以及立地条件下森林的水源涵养功能及其评价。在广西地区, 研究主要集中在小流域或其他树种的来源涵养功能, 而对不同林龄的马尾松纯林的水源涵养功能研究则相对匮乏。鉴于此, 本研究选取广西境内五种不同林龄的马尾松人工纯林作为研究对象, 从枯落物层和土壤层两个维度出发, 对该地区马尾松的水源涵养能力进行深入探讨。

一、研究地概况

研究区位于广西东部苍梧县天洪岭林场 ($111^\circ 14' - 116^\circ 16' \text{ E}$, $23^\circ 41' - 23^\circ 45' \text{ N}$)、南部宁明县派阳山林场 ($107^\circ 08' - 107^\circ 12' \text{ E}$, $22^\circ 01' - 22^\circ 02' \text{ N}$)、北部环江县华山林场 ($106^\circ 30' - 111^\circ 06' \text{ E}$, $21^\circ 15' - 25^\circ 31' \text{ N}$) 及中部横州市镇龙林场 ($109^\circ 08' - 109^\circ 19' \text{ E}$, $23^\circ 02' - 23^\circ 08' \text{ N}$)。属亚热带季风气候, 热量丰富, 降水丰沛, 雨热同期, 年均温度 21.5°C , 年均降雨量 1465.45 mm 。实验林多为红壤或赤红壤, 这种土壤通常具有良好的排水性能, 适合某些耐旱和耐酸性植物的生长。研究区属低矮丘陵地貌, 海拔 $250 \sim 550 \text{ m}$, 坡度 22° 左右, 坡向以阳坡或半阳坡为主, 林下乔木灌木层植物多为粗叶榕 (*Ficus hirta* Vahl)、苦楝 (*Melia azedarach* L)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 等; 林下草本层植物多为半边旗 (*Pteris semipinnata* L)、铁线蕨 (*Adiantum capillus-veneris* L)、越南悬钩子 (*Rubus cochinchinensis* Tratt.)、五节芒 (*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.)、鬼针草 (*Bidens pilosa* L.) 等。

二、研究方法

(一) 样地设置

经实地考察, 在气候、海拔、坡度等立地因子基本一致的情

况下, 依据林龄划分标准选取 5a (幼林龄)、15 a (中龄林)、23 a (近熟林)、30 a (成熟林)、40 a (过熟林) 的马尾松人工纯林为研究对象, 每种林分依次在上、中、下三个坡位各设置一块 $20 \times 20 \text{ m}$ 标准样方, 由于华山林场缺乏合适的近熟林, 因此共 57 块样地。

(二) 实验方法

枯落物采集与测定: 在样地内随机布置五个面积 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样方, 收集样方内全部枯落物 (包含未分解层和半分解层), 卷尺测量枯落物厚度, 将收集好的枯落物装进密封袋带回实验室称鲜重, 温度 80° 在烘箱内烘干至恒重, 将枯落物装进网袋, 采用室内浸泡法分别测量枯落物浸泡 0.25 h 、 0.5 h 、 1 h 、 2 h 、 4 h 、 6 h 、 8 h 、 10 h 、 12 h 、 24 h 的枯落物持水量, 用于计算枯落物最大拦蓄率、最大拦蓄量、有效拦蓄率及有效拦蓄量。

土壤样品采集与测定: 按照五点取样法采集样地内土壤样品, 用环刀法分别收集各样地内 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 及 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 土壤层土样, 参照《森林土壤水分-物理性质的测定》计算土壤层土壤容重、毛管孔隙度、土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量、饱和持水量、土壤含水量及田间持水量等指标。

(三) 数据处理

本文用 EXCEL2021 整理并初步分析数据, 用 SPSS27.0 进行相关单双因素方差分析。

三、结果与分析

(一) 不同林龄和区域马尾松纯林枯落物层持水性

如表 1 所示, 本研究采用了双因素方差分析 (Two-Way ANOVA) 方法, 通过对不同区域和林龄下马尾松枯落物层的最大持水率、最大持水量、有效拦蓄率及有效拦蓄量进行系统的比较与分析, 发现本研究中, 区域对枯落物层的水源涵养能力产生了极显著影响 ($P < 0.001$), 林龄对枯落物最大持水量、有效拦蓄量、产生了极显著影响 ($P < 0.001$), 对最大持水率和有效拦蓄率产生显著影响 ($P < 0.05$), 而区域与林龄之间存在显著的交互作用, 这种交互作用对于枯落物最大持水率以外的其他枯落物层水源涵养能力指标均产生了显著影响 ($P < 0.05$)。

表 1 枯落物水源涵养能力双因素方差分析

自变量	因变量	自由度	均方	统计量	显著性
Variable	Dependent variable	df	Mean square	F-test	P-value
区域 Region	最大持水率	3	31203.815	123.5	0.000***

	最大持水量	3	1294.994	43.917	0.000***
	有效拦蓄率	3	17328.018	61.822	0.000***
	有效拦蓄量	3	862.871	45.312	0.000***
Stand age	最大持水率	4	1099.53	4.352	0.005**
	最大持水量	4	298.849	10.135	0.000***
	有效拦蓄率	4	752.157	2.684	0.046*
	有效拦蓄量	4	238.395	12.519	0.000***
Region*Stand age	最大持水率	11	352.064	1.393	0.216
	最大持水量	11	175.172	5.941	0.000***
	有效拦蓄率	11	746.744	2.664	0.012*
	有效拦蓄量	11	94.17	4.945	0.000***

注：* 表示 P<0.05，** 表示 P<0.01，*** 表示 p <0.001

如表 2，随着林龄的增长，华山地区、镇龙地区马尾松林下未分解层枯落物最大持水量呈现先减小后增加再减小的变化趋势，而派阳山地区及天洪岭地区刚好相反。此外，天洪岭地区及华山

地区半分解层枯落物最大持水量均表现为持续减小的趋势，镇龙地区则呈现先减小后增加再减小的趋势，而派阳山地区与之相反，与此同时天洪岭地区呈现先增加后减小的趋势。华山地区和天洪岭地区枯落物未分解层最大持水率均呈先减小后增加的趋势，镇龙地区呈现波动趋势，派阳山地区呈持续减小趋势；而华山地区半分解层最大持水率呈先减小后增加的趋势，天洪岭地区与之相反，同时镇龙地区和派阳山地区均呈现先增加后减小再增加的趋势。

林龄的变化对于森林生态系统中有效拦蓄量及有效拦蓄率影响显著。如表 3，华山地区未分解层的有效拦蓄量呈波动性变化趋势，有效拦蓄率则显示出先减小后增加的变化趋势，而在镇龙、派阳山和天洪岭地区，未分解层的有效拦蓄量均展现出先增加后减小再增加的变化趋势，其中镇龙和天洪岭地区的有效拦蓄率变化趋势与最大持水量相同，派阳山地区有效拦蓄率却呈现出持续减小的趋势。

表 2. 不同区域、林龄对马尾松林下枯落物最大持水量（率）的影响

区域 (Regin)	林分类型 (Stand type)	最大持水量 (t · hm ⁻²)	最大持水率 (%)	最大持水量 (t · hm ⁻²)	最大持水率 (%)
		Maximum water holding capacity	Maximum water holding rate	Maximum water holding capacity	Maximum water holding rate
		未分解层		半分解层	
		Undecomposed layer		Semi-decomposed layer	
华山	幼林龄	19.581 ± 1.100BCa	208.520 ± 28.369Ba	36.099 ± 15.203ABa	240.767 ± 21.467BCa
	Young forest				
	中林龄	15.463 ± 1.884Ba	178.020 ± 10.811Bab	33.041 ± 5.160Aa	231.007 ± 11.888Ca
	Middle-aged forest				
	成熟林	20.569 ± 3.606Ba	163.480 ± 6.944Bb	31.642 ± 5.412Aa	151.027 ± 38.416Bb
	Mature forest				
	过熟林	19.773 ± 7.163Ba	169.027 ± 12.466Bb	20.231 ± 3.137Ba	180.273 ± 25.02Cb
	Overmature forest				
镇龙	幼林龄	37.619 ± 1.838Ab	285.813 ± 0.162Aa	42.931 ± 4.598Ab	254.893 ± 10.775Bc
	Young forest				
	中林龄	34.514 ± 11.284Ab	256.980 ± 5.083Aab	35.603 ± 5.216Abc	286.173 ± 18.962Bab
	Middle-aged forest				
	近熟林	60.438 ± 6.422Aa	259.960 ± 11.948Aab	58.168 ± 4.897Aa	267.547 ± 3.112Bbc
	Near mature forest				
	成熟林	31.937 ± 0.933Ab	238.207 ± 17.738Ab	28.132 ± 9.054Acd	276.947 ± 13.316Aabc
	Mature forest				
派阳山	幼林龄	21.440 ± 2.802Bc	169.447 ± 10.339Ca	24.554 ± 5.336Bb	349.414 ± 69.491Aab
	Young forest				
	中林龄	29.311 ± 4.712ABb	163.873 ± 27.931Ba	37.450 ± 1.914Aab	397.805 ± 22.173Aa
	Middle-aged forest				
	近熟林	40.776 ± 3.823Bb	163.667 ± 6.132Ba	38.059 ± 5.317Bab	305.414 ± 8.665Ab
	Near mature forest				
	成熟林	30.088 ± 4.836Aa	157.160 ± 11.058Ba	28.646 ± 4.916Ab	306.094 ± 23.477Ab
	Mature forest				
天洪岭	过熟林	42.429 ± 4.038Aa	155.500 ± 6.580Ba	46.156 ± 9.807Aa	340.776 ± 13.476Aab
	Overmature forest				
	幼林龄	14.126 ± 4.920Ca	175.067 ± 13.396Ca	6.718 ± 1.984Cc	181.340 ± 7.990Cb
	Young forest				
	中林龄	18.993 ± 8.441Ba	168.480 ± 18.384Ba	19.569 ± 4.736Bab	189.627 ± 9.720Ab
	Middle-aged forest				
	近熟林	17.223 ± 8.732Ca	170.467 ± 21.628Ba	21.395 ± 2.342Ca	218.860 ± 11.644Ca
	Near mature forest				

天洪岭	成熟林	18.647 ± 2.897Bba	174.273 ± 4.311Ba	11.680 ± 3.735Bbc	193.280 ± 15.596Bb
	Mature forest				
	过熟林	21.087 ± 5.365Ba	185.280 ± 10.260Ba	9.182 ± 7.227Bc	182.450 ± 7.031Cb
	Overmature forest				

注：同一表格不同大写字母表示该林龄阶段枯落物水源涵养能力在不同区域间差异显著（P<0.05），同一表格不同小写字母表示该区域枯落物水源涵养能力在不同林龄间差异显著（P<0.05）

表 3. 不同区域、林龄对马尾松林下枯落物有效拦蓄量（率）的影响

区域 (Regin)	林分类型 (Stand type)	有效拦蓄量 (t · hm ⁻²)	有效拦蓄率 (%)	有效拦蓄量 (t · hm ⁻²)	有效拦蓄率 (%)
		Effective holding capacity	Effective holding rate	Effective holding capacity	Effective holding rate
		未分解层		半分解层	
		Undecomposed layer		Semi-decomposed layer	
华山	幼林龄	12.299 ± 2.243BCa	131.217 ± 28.815Ba	15.736 ± 7.333Ba	103.812 ± 7.685BCa
	Young forest				
	中林龄	9.483 ± 2.395Ca	107.481 ± 8.888Ba	14.070 ± 4.873Ba	103.405 ± 52.855Ca
	Middle-aged forest				
	成熟林	14.712 ± 4.526BCa	115.309 ± 21.855Ba	15.187 ± 3.499Aa	72.901 ± 22.895Ca
	Mature forest				
	过熟林	13.174 ± 2.997Ca	118.063 ± 25.838Ba	11.900 ± 1.820Ba	112.832 ± 52.659BCa
	Overmature forest				
镇龙	幼林龄	23.691 ± 2.870Ab	179.679 ± 14.517Abc	26.360 ± 6.161Ab	154.806 ± 16.313Ba
	Young forest				
	中林龄	27.660 ± 8.902Ab	206.415 ± 8.025Aab	23.714 ± 3.969Abc	190.420 ± 16.530Ba
	Middle-aged forest				
	近熟林	45.974 ± 4.972Aa	197.822 ± 11.752Aab	36.498 ± 5.017Aa	167.370 ± 7.966Ba
	Near mature forest				
	成熟林	20.518 ± 1.240ABb	152.703 ± 6.148Ac	14.920 ± 6.949Acd	143.636 ± 25.338Ba
	Mature forest				
派阳山	过熟林	21.354 ± 4.365Bb	221.310 ± 24.084Aa	11.409 ± 3.061Bd	184.588 ± 48.169Ba
	Overmature forest				
	幼林龄	17.186 ± 2.141Bc	135.916 ± 8.602Ba	20.236 ± 4.275ABb	288.525 ± 59.741Aab
	Young forest				
	中林龄	23.395 ± 3.863ABb	130.799 ± 22.867Ba	31.045 ± 1.494Aab	329.819 ± 19.375Aa
	Middle-aged forest				
	近熟林	32.583 ± 3.592Ba	130.698 ± 6.769Ba	30.906 ± 4.621Aab	247.791 ± 9.431Ab
	Near mature forest				
天洪岭	成熟林	23.909 ± 4.159Ab	124.778 ± 10.684Ba	23.080 ± 3.782Ab	246.970 ± 21.167Ab
	Mature forest				
	过熟林	33.005 ± 2.497Aa	121.202 ± 7.786Ba	37.741 ± 8.094Aa	278.637 ± 13.012Aab
	Overmature forest				
	幼林龄	8.444 ± 3.539Ca	102.693 ± 19.165Ba	2.902 ± 1.223Cb	76.083 ± 14.319Ca
	Young forest				
	中林龄	14.453 ± 6.730BCa	127.502 ± 13.356Ba	11.488 ± 3.617Ba	109.908 ± 12.071Ca
	Middle-aged forest				
	近熟林	13.059 ± 7.456Ba	127.434 ± 25.163Ba	12.391 ± 1.573Ba	126.536 ± 6.043Ca
	Near mature forest				
	成熟林	12.566 ± 2.510Ca	117.014 ± 9.758Ba	4.975 ± 3.960Bab	74.021 ± 32.428Ca
	Mature forest				
	过熟林	14.789 ± 3.627Ca	130.252 ± 12.179Ba	4.677 ± 6.685Bab	65.050 ± 53.479Ca
	Overmature forest				

注：同一表格不同大写字母表示该林龄阶段枯落物水源涵养能力在不同区域间差异显著（P<0.05），同一表格不同小写字母表示该区域枯落物水源涵养能力在不同林龄间差异显著（P<0.05）

（二）不同林龄和区域马尾松纯林土壤物理性质

对不同区域、林龄马尾松土壤层持水性双因素方差分析，发现马尾松土壤 0-20 层持水性易受到不同区域或不同发育阶段以及二者交互作用的显著影响（p<0.05，表 4），此外，由表 5 可知，区域、区域及林龄交互作用对马尾松土壤 20-40 层土壤持水能力有显著影响，而林龄对毛管孔隙度、非毛管孔隙度、毛管持水量及田间持水量均有显著影响，对土壤容重等其他因子无显著影响。

表 4 土壤 0-20 层水源涵养能力双因素方差分析

自变量	因变量	自由度	均方	统计量	显著性
Variable	Dependent variable	df	Mean square	F-test	P-value
区域 Region	土壤容重 g/cm ³	3	0.443	66.513	0.000***
	毛管孔隙度 (%)	3	0.031	39.793	0.000***
	土壤总孔隙度 (%)	3	0.078	123.239	0.000***

区域 Region	非毛管孔隙度 (%)	3	0.078	123.239	0.000***
	毛管持水量 (t·hm ⁻²)	3	0.097	74.905	0.000***
	饱和持水量 (t·hm ⁻²)	3	0.190	107.994	0.000***
	土壤含水量 (t·hm ⁻²)	3	0.190	107.994	0.000***
	田间持水量 (t·hm ⁻²)	3	0.017	2.573	0.040*
林龄 Stand age	土壤容重 g/cm ³	3	0.004	4.870	0.001***
	毛管孔隙度 (%)	5	0.008	11.914	0.000***
	土壤总孔隙度 (%)	5	0.008	11.914	0.000***
	非毛管孔隙度 (%)	5	0.005	3.484	0.010**
	毛管持水量 (g/cm ³)	5	0.006	3.660	0.007**
	饱和持水量 (t·hm ⁻²)	5	0.006	3.660	0.007**
	土壤含水量 (t·hm ⁻²)	5	0.005	4.896	0.001***
	田间持水量 (t·hm ⁻²)	5	0.092	87.034	0.000***
区域 × 林龄 Region × Stand age	土壤容重 g/cm ³	13	0.031	4.603	0.000***
	毛管孔隙度 (%)	13	0.005	6.597	0.000***
	土壤总孔隙度 (%)	13	0.006	8.980	0.000***
	非毛管孔隙度 (%)	13	0.006	8.980	0.000***
	毛管持水量 (t·hm ⁻²)	13	0.008	6.226	0.000***
	饱和持水量 (t·hm ⁻²)	13	0.011	6.498	0.000***
	土壤含水量 (t·hm ⁻²)	13	0.011	6.498	0.000***
	田间持水量 (t·hm ⁻²)	13	0.008	7.203	0.000***

注：* 表示 P<0.05, ** 表示 P<0.01, *** 表示 p <0.001

表 5 土壤 20–40 层水源涵养能力双因素方差分析

自变量	因变量	自由度	均方	统计量	显著性
Variable	Dependent variable	df	Mean square	F-test	P-value
区域 Region	土壤容重 g/cm ³	3	0.216	32.860	0.000 ***
	毛管孔隙度 (%)	3	0.016	8.967	0.000 ***
	土壤总孔隙度 (%)	3	0.033	17.543	0.000 ***
	非毛管孔隙度 (%)	3	0.012	30.540	0.000 ***
	毛管持水量 (t·hm ⁻²)	3	0.045	19.559	0.000 ***
	饱和持水量 (t·hm ⁻²)	3	0.077	28.155	0.000***
	土壤含水量 (t·hm ⁻²)	3	0.026	9.210	0.000***
	田间持水量 (t·hm ⁻²)	3	0.045	19.548	0.000 ***

表 6. 不同林龄和区域马尾松土壤物理性质

区域	林分类型	土层 (cm)	土壤容重 (g/cm ³)	毛管孔隙度 (%)	非毛管孔隙度 (%)	总孔隙度 (%)
Reagin	Stand type	Soil layer (cm)	Soil bulk density (g/cm ³)	Capillary porosity (%)	Non-capillary porosity (%)	Total porosity (%)
华山	幼林龄	0–20	1.333 ± 0.168Abc	46.082 ± 2.969Aa	1.650 ± 1.007Ba	47.732 ± 2.026Cab
	Young forest	20–40	1.371 ± 0.066ABb	48.393 ± 2.481Aa	0.372 ± 0.030Aab	48.765 ± 2.507Bb
	中林龄	0–20	1.471 ± 0.091Ac	42.107 ± 1.192Ca	1.228 ± 1.158Cb	43.336 ± 0.593Bbc
	Middle-aged forest	20–40	1.359 ± 0.131ABb	43.908 ± 3.448Ba	1.965 ± 0.606Bab	45.873 ± 2.917Ba
	成熟林	0–20	1.485 ± 0.123Aa	42.922 ± 0.856ABa	0.300 ± 0.045bc	43.222 ± 0.859Cbc
	Mature forest	20–40	1.371 ± 0.084Ab	50.440 ± 15.190Aa	1.035 ± 0.882Aa	51.475 ± 14.547Cab
	过熟林	0–20	1.557 ± 0.121Cab	35.855 ± 2.246Ba	1.158 ± 1.338Bc	37.013 ± 2.859Dbc
	Overmature forest	20–40	1.562 ± 0.064Aa	34.648 ± 2.320Ba	0.490 ± 0.103Cb	35.138 ± 2.225Bb
镇龙	幼林龄	0–20	1.149 ± 0.034Bbc	42.240 ± 3.791Aa	7.844 ± 1.828Ba	50.084 ± 3.559Bab
	Young forest	20–40	1.360 ± 0.107ABa	41.707 ± 2.704Ba	6.106 ± 0.802Aab	47.812 ± 1.932Aa
	中林龄	0–20	1.101 ± 0.037Bc	39.779 ± 1.686Ca	4.070 ± 1.345Bcb	43.849 ± 0.610ABbc
	Middle-aged forest	20–40	1.504 ± 0.091Aa	39.196 ± 2.234Cab	4.403 ± 0.830Bab	43.599 ± 1.580Aa
	近熟林	0–20	1.101 ± 0.038ABabc	39.586 ± 1.350ABa	8.273 ± 2.644Bab	47.859 ± 3.022Aa
	Near mature forest	20–40	1.361 ± 0.051Ba	42.066 ± 4.936Ba	6.009 ± 1.458Bab	48.074 ± 5.252Ba
	成熟林	0–20	1.101 ± 0.039Ba	38.039 ± 4.463Bca	5.377 ± 3.593Bb	43.416 ± 0.876abc
	Mature forest	20–40	1.433 ± 0.102Aa	35.920 ± 1.300Ab	5.694 ± 2.185Ab	41.614 ± 3.394Ba
	过熟林	0–20	1.101 ± 0.040Aab	38.913 ± 2.289Ba	3.874 ± 0.764Bc	38.195 ± 3.953Bbc
	Overmature forest	20–40	1.374 ± 0.046B	40.834 ± 1.993Aab	9.209 ± 5.700ABa	50.043 ± 3.708Aa

林龄 Stand age	土壤容重 g/cm3	3	0.013	1.977	0.118
	毛管孔隙度 (%)	5	0.006	3.518	0.015 *
	土壤总孔隙度 (%)	5	0.003	1.427	0.244
	非毛管孔隙度 (%)	5	0.003	8.536	0.000 ***
	毛管持水量 (t·hm ⁻²)	5	0.006	2.637	0.049 *
	饱和持水量 (t·hm ⁻²)	5	0.006	2.035	0.109
	土壤含水量 (t·hm ⁻²)	5	0.004	1.301	0.287
	田间持水量 (t·hm ⁻²)	5	0.006	2.710	0.044*
区域 × 林龄 Region × Stand age	土壤容重 g/cm ³	13	0.020	2.994	0.006 **
	毛管孔隙度 (%)	13	0.005	3.004	0.006 **
	土壤总孔隙度 (%)	13	0.007	3.929	0.001 ***
	非毛管孔隙度 (%)	13	0.001	3.116	0.004 **
	毛管持水量 (g/cm ³)	13	0.006	2.566	0.015 *
	饱和持水量 (g/cm ³)	13	0.009	3.141	0.004 *
	土壤含水量 (g/cm ³)	13	0.007	2.601	0.014 *
	田间持水量 (g/cm ³)	13	0.006	2.532	0.017*

注：* 表示 P<0.05, ** 表示 P<0.01, *** 表示 p <0.001

不同区域和林龄的土壤物理性质也不尽相同。土壤容重是反映土壤结构和松紧程度的重要指标，其数值大小不仅直接影响土壤通气能力和透水能力，还可以反映森林植被对土壤物理性质的改良效果，常用于评价森林土壤水源涵养功能的优劣。由表 6 可知，四个区域的土壤容重均随着土层深度的增加有不同程度变化趋势，华山地区土壤容重在 0–20cm 层呈随林龄增加持续增加趋势，20–40cm 层呈先减小后增加的趋势；镇龙地区 0–20cm 层呈持续减小趋势，20–40cm 层呈波动性变化；派阳山地区则与镇龙地区相反；而天洪岭地区 0–20cm 层呈现先增加后减小趋势，20–40cm 层呈先增加后减小再增加的趋势。土壤孔隙度（即毛管孔隙度与非毛管孔隙度总和）直接影响土壤的持水能力和渗透性，为土壤中的气体交换提供了空间，有利于氧气进入土壤并供给根系，较高的孔隙度意味着土壤具有较好的水分保持能力，从而在自然界的水循环中起到关键作用。华山地区土壤总孔隙度均呈现先减小后增加再减小的变化趋势，镇龙地区则呈波动性变化趋势；派阳山地区均呈随林龄增加先减小后增加再减小的趋势，天洪岭地区则与镇龙地区相反。

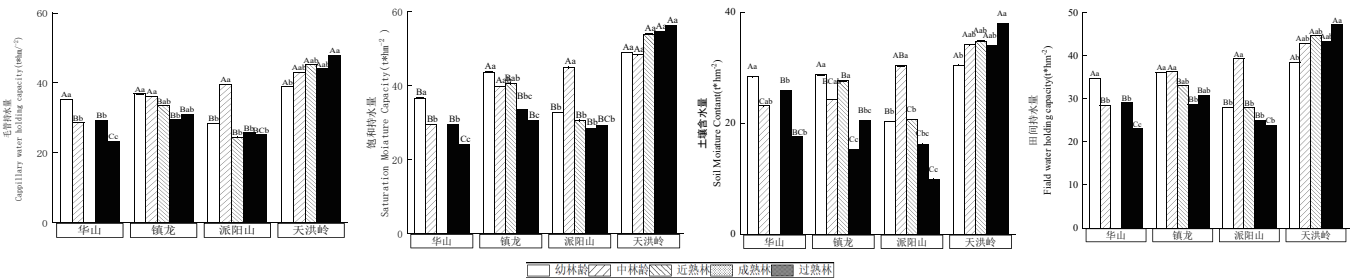
派阳山	幼林龄	0–20	1.308 ± 0.037Abc	37.129 ± 1.610Ba	5.593 ± 2.000Ca	42.722 ± 1.463Bab
	Young forest	20–40	1.491 ± 0.015Aa	36.391 ± 0.866Cb	2.454 ± 0.592Bc	38.846 ± 0.274Bb
	中林龄	0–20	1.100 ± 0.081Bc	43.217 ± 1.322Ba	5.726 ± 2.116Bb	48.942 ± 2.967Abc
	Middle-aged forest	20–40	1.479 ± 0.021Aa	41.836 ± 1.940BCd	1.383 ± 0.830bc	43.219 ± 1.124Bb
	近熟林	0–20	1.368 ± 0.109Aabc	33.001 ± 8.199Ba	8.352 ± 8.251Bab	41.353 ± 3.307Aa
	Near mature forest	20–40	1.496 ± 0.084Aa	37.030 ± 1.639Bb	2.050 ± 0.531Cc	39.080 ± 1.657Cb
	成熟林	0–20	1.302 ± 0.046Ba	33.456 ± 4.807Ca	3.699 ± 1.611Cb	37.154 ± 3.212BCabc
	Mature forest	20–40	1.350 ± 0.068Ab	47.510 ± 5.290Aa	2.712 ± 0.703Aa	50.222 ± 5.567Cb
	过熟林	0–20	1.430 ± 0.073Bab	35.959 ± 0.810Ba	5.863 ± 0.930Bc	41.822 ± 1.576Cbc
天洪岭	Overmature forest	20–40	1.386 ± 0.064Bab	36.368 ± 2.669Bb	9.292 ± 3.612Bab	45.660 ± 1.427Aa
	幼林龄	0–20	1.143 ± 0.057Ba	44.410 ± 1.424Ac	11.374 ± 0.833Aa	55.784 ± 1.556Ac
	Young forest	20–40	1.264 ± 0.126Ba	46.021 ± 2.287Ab	7.562 ± 2.774Aab	53.583 ± 5.011Aa
	中林龄	0–20	1.145 ± 0.094Ba	48.917 ± 1.896Aa	6.057 ± 3.023Aa	54.973 ± 4.574Aa
	Middle-aged forest	20–40	1.269 ± 0.096Ba	48.723 ± 0.791Aa	2.914 ± 1.168Ab	51.638 ± 1.959ABb
	近熟林	0–20	1.048 ± 0.069Ba	47.189 ± 1.167Aab	9.120 ± 2.299Aa	56.309 ± 3.439Aab
	Near mature forest	20–40	1.096 ± 0.049Ca	48.336 ± 1.070Aab	8.583 ± 0.926Aa	56.919 ± 0.408Aa
	成熟林	0–20	1.036 ± 0.080Ccab	45.482 ± 0.435Abc	10.813 ± 1.315Aa	56.296 ± 1.460Abc
	Mature forest	20–40	1.114 ± 0.036Ba	46.191 ± 0.357Ab	9.450 ± 0.652Aab	55.641 ± 0.296Aa
	过熟林	0–20	1.013 ± 0.051Aab	48.403 ± 1.476Aa	8.439 ± 0.547Aa	56.842 ± 1.031Aa
	Overmature forest	20–40	1.153 ± 0.110Ca	43.338 ± 0.668Ac	9.916 ± 2.431Aab	53.253 ± 2.314Aa

注：同一表格不同大写字母表示该林龄阶段土壤物理性质在不同区域间差异显著（ $P<0.05$ ），同一表格不同小写字母表示该区域土壤物理性质在不同林龄间差异显著（ $P<0.05$ ）

（三）不同林龄和区域马尾松纯林土壤持水性

马尾松土壤层持水特性与毛管持水量、饱和持水量等一众指标密切相关，如图1所示，华山、镇龙、派阳山及天洪岭林场0–20cm土壤层持水性变化趋势大致相同。其中华山林场随林龄增加呈先减小后增加再减小的趋势；镇龙林场毛管持水量、土壤含水量及田间持水量均呈先减小后增加的趋势，饱和含水量呈先减小后增

加的波动趋势；派阳山林场呈先增加后减小的趋势；天洪岭林场呈先增加后减小的趋势。图2可知，华山林场20–40cm土壤层持水性随林龄增加呈现与0–20cm层变化相同的趋势；镇龙林场则呈先减小后增加又减小再增加的变化趋势；派阳山林场变化趋势则与镇龙相反；天洪岭林场则呈先增加后减小的变化趋势。



注：同一图组不同大写字母表示该林龄阶段土壤持水性在不同区域间差异显著（ $P<0.05$ ），同一图组不同小写字母表示该区域土壤持水性在不同林龄间差异显著（ $P<0.05$ ）（下同）

图 1. 不同林龄和区域马尾松 0–20cm 土壤层持水能力

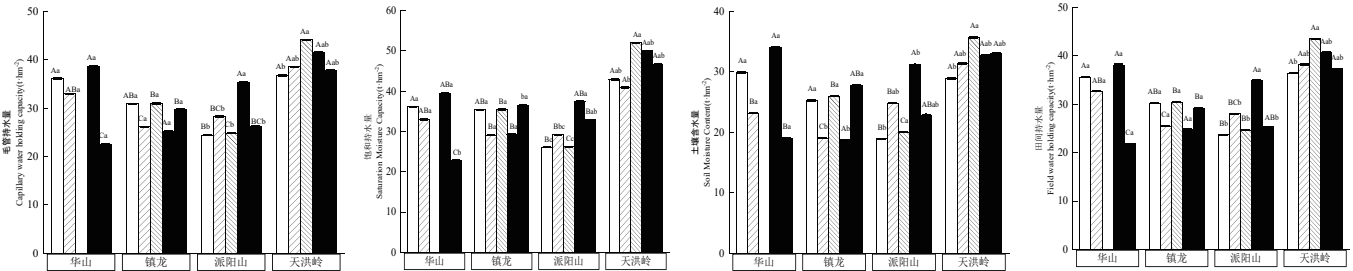


图 2. 不同林龄和区域马尾松 20–40cm 土壤层持水能力

（四）结论与讨论

枯落物层不仅是森林生态系统的重要组成部分，而且对于调节地表水分、维持土壤湿度和水文循环具有至关重要的作用。马尾松枯落物层最大持水量（率）、有效持水量（率）在近熟林或成熟林阶段高于其他林分，未分解层枯落物持水性变

化最大地区为镇龙地区 $26.12\sim60.438\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；半分解层变化最显著地区与之相同，分别是镇龙地区 $17.853\sim58.168\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。其中未分解层最大持水率变化范围最大地区是镇龙地区 $238.207\%\sim285.813\%$ ；半分解层变化范围最大地区是派阳山地区 $305.414\%\sim397.805\%$ 。未分解层与半分解层有效持水量变化最大地

区均为镇龙地区,分别是未分解层 $20.518\sim 45.974\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 及半分解层 $11.409\sim 36.498\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$;有效拦蓄率未分解层变化最大地区为镇龙地区 $152.703\%\sim 221.310\%$;半分解层变化最大地区为派阳山地区 $246.970\%\sim 329.819\%$ 。

土壤层作为水资源的储存层和调节层,对地下水资源的保护和管理具有非常重要的意义。镇龙林场土壤容重变化范围最大,为 $1.101\sim 1.504\text{ g/cm}^3$ 。天洪岭林场土壤孔隙度、毛管持水量及饱和持水量均高于其他林场,其变化范围是 $51.638\sim 56.919\%$ 、 $36.803\sim 47.917\text{ t/hm}^2$ 及 $40.890\sim 56.257\text{ t/hm}^2$ 。同时天洪岭林场土壤含水量及饱和持水量均高于其他地区,分别为 $28.940\sim 37.940\%$ 及 $36.473\sim 47.123\text{ g/kg}$ 。随着马尾松生长发育,成熟林阶段马尾松土壤持水能力明显大于其他发育阶段,说明马尾松在成熟林阶段发育最完整成熟。

综上所述,长期单一树种的林业管理易造成土壤肥力衰减、水源涵养能力减弱、森林结构单一化、生态系统稳定性下降等。而水源涵养能力除枯落物层与土壤层外,还受到气候、土壤等多种因素的影响,因此后续研究中,除了围绕提高枯落物持水量及土壤持水性以外,还需要具体的研究和实地考察才能对马尾松人工林持水性进行全面的评估。枯落物持水能力的变化反映了森林生态系统在不同生长阶段的水文功能和土壤保持能力的变化,这些变化反映了不同地区林龄变化对水文功能影响的复杂性和地域性特点,而在森林生态系统的土壤学研究领域,土壤物理性质的差异性及其生态功能意义一直是研究的重点之一。土壤层可以通过蓄水和排水作用,调节水文循环,维持一定的水文平衡。未来的研究需要更深入地探讨枯落物及土壤层持水能力变化的生态机制,以及气候化对这些过程的潜在影响。本研究通过对华山地区及其周边地区的森林生态系统进行详细的水文功能分析,揭示了林龄变化对枯落物层及土壤层持水性能的显著影响,为进一步理解森林生态系统在全球水循环中的作用提供了重要的科学依据,并为森林管理和水资源保护提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 陆卫勇,叶家义,李学团等.马尾松、红锥纯林及其混交林凋落物与土壤的水源涵养能力[J].亚热带农业研究,2023,19(02):83-90.
- [2] 颜耀,张辉,黄智军等.补植阔叶树种对红壤侵蚀区马尾松林水源涵养功能的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2020,49(01):67-73.
- [3] 王亚萍,张淑兰,韩勇等.秦岭两种典型人工林不同密度时的枯落物持水功能差异[J].林业科学研究,2023,36(03):100-108.

[4] 陈歆宇,谭伟,杨深钧.不同类型马尾松混交林结构与水源涵养功能的耦合关系[J].水土保持研究,2023.

[5] 杨建伟,杨建英,何会宾等.冀北山区滦平县4种新造林地水源涵养能力研究[J].生态学报,2019,39(18):6731-6737.

[6] 温林生,邓文平,彭云等.江西退化红壤区3种森林恢复模式的枯落物和土壤表层水文功能研究[J].水土保持学报,2020,34(04):158-163.

[7] 彭玉华,郑威,谭长强等.广西壮族自治区的台湾桫木混交造林水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2019,39(05):98-105+112.

[8] 杨美琪.基于不同林地条件下的水源涵养功能分析[J].水土保持应用技术,2023(02):10-12.

[9] 李海星.桂西南四种人工林水源涵养功能的研究[D].广西大学,2017.

[10] 聂泽旭,齐实,马曦瑶等.华蓥市山区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持学报,2020,34(02):276-282.

[11] LY/T 2908-2017,主要树种龄级与龄组划分[S].

[12] 张淑兰,韩勇,杨盼等.汉江上游不同林龄麻栎林枯落物的水文功能评价[J].生态环境学报,2022,31(01):44-51.

[13] LY/T 1215-1999,森林土壤水分-物理性质的测定[S].

[14] 赵恩辉,吴磊,赵生华.黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究,2023,30(06):255-263.

[15] 吕德鹏.广东省典型区域不同土地利用方式下土壤大孔隙特征[D].河南农业大学,2023.

[16] 李雪惠.抚育间伐对杉木林植被和生物量及土壤理化性质的影响[D].中南林业科技大学,2023.

[17] 姚佳峰,郭钰,董媛,等.枯落物厚度对华北落叶松人工林天然更新的影响[J].应用生态学报,2024,35(04):1025-1032.

项目来源以及经费支持

“十四五”国家重点研发计划课题(2023YFD2200904)、广西科技基地和人才专项(桂科AD19254004)、广西八桂学者专项(2019A026)、广西科技重大专项(桂AA17204087-4)等资助。

第一作者:蒙博(1998—),男,硕士研究生。研究方向:森林培育。Email:2918756368@qq.com。

通信作者:杨章旗(1964—),男,博士,教授级高工。研究方向:林木遗传育种及森林培育。Email:Yangzhangqi@163.com。