

DOI: 10.5846/stxb202010112591

王轶浩, 王彦辉, 李振华, 王耀建. 重庆铁山坪马尾松天然次生林降雨截持与贮水特征. 生态学报, 2021, 41(16): 6542-6551.

Wang Y H, Wang Y H, Li Z H, Wang Y J. The characteristics of rainfall interception and water storage of the natural secondary forests of Masson pine at Tieshanping of Chongqing. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6542-6551.

重庆铁山坪马尾松天然次生林降雨截持与贮水特征

王轶浩¹, 王彦辉^{2,*}, 李振华³, 王耀建⁴

1 重庆师范大学地理与旅游学院 重庆市三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 401331

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 新乡学院土木工程与建筑学院, 新乡 453000

4 深圳市北林苑景观及建筑规划设计院有限公司, 深圳 518052

摘要: 马尾松林是三峡库区防护林体系中最重要森林类型, 然而以往对结构更为复杂的马尾松天然次生林的生态水文效应研究还很不充分, 限制着全面了解和准确评价库区森林发挥的涵养水源服务功能。以重庆铁山坪的马尾松天然次生林为对象, 采用定位监测结合室内测定的实验方法, 系统研究了林冠层、林下草本层、枯落物层、土壤层的水文特征。结果表明: (1) 2010—2011 年马尾松林穿透雨量、干流量、林冠截留量分别占总降雨量 (1972.39 mm) 的 84.66%、0.26% 和 15.07%, 且均与次降雨量呈显著正相关 ($P < 0.01$), 其中干流在次降雨量达到 5 mm 时产生; 林冠截留量随次降雨量增大而逐渐达到饱和 (6 mm 左右)。(2) 林下草本植物的地上生物量达 1.32 t/hm^2 , 其持水率随浸水时间呈对数函数增加 ($P < 0.01$), 最大持水量为 0.61 mm。(3) 枯落物贮存量达 10.74 t/hm^2 , 未分解、半分解、未分解与半分解混合枯落物的最大持水率为 183.76%、206.31% 和 197.62%, 未分解与半分解层枯落物的最大持水能力达 1.44 mm。(4) 0—80 cm 土层的饱和贮水量达 334.75 mm, 其中滞留贮水量达 49.08 mm, 占饱和贮水量 14.66%。马尾松天然次生林各作用层的降雨截持及贮水作用明显, 其中尤以土壤层贮水能力最强。研究结果可为三峡库区森林涵养水源服务功能模拟与评价提供重要参考依据。

关键词: 降雨再分配; 截持/吸持能力; 林冠; 林下植被; 枯落物层; 森林土壤; 马尾松林

The characteristics of rainfall interception and water storage of the natural secondary forests of Masson pine at Tieshanping of Chongqing

WANG Yihao¹, WANG Yanhui^{2,*}, LI Zhenhua³, WANG Yaojian⁴

1 College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University; Field Science Observation and Research Station for Surface Ecological Process of Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China

2 Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

3 School of Civil Engineering and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang 453000, China

4 Shenzhen BLY Landscape and Architecture Planning and Design Institute Company Limited, Shenzhen 518052, China

Abstract: The Three Gorges Reservoir area is the largest strategic reserve of fresh water resources in China, and its ecological location is extremely important in the Yangtze River region. Therefore, it is very necessary and crucial to build the protection forest system with water conservation as the main function in the Three Gorges Reservoir area. Masson pine forest is the most important forest type in the protection forest system of the Three Gorges Reservoir area. However, the eco-hydrological effects of natural secondary forest of Masson pine with more complex structure was not studied enough in the

基金项目: 重庆师范大学基金项目 (20XLB005); 重庆市教育委员会科学技术研究项目 (KJQN202000502); 中挪国际合作项目 (193725/S30); 重庆市前沿与应用基础研究计划项目 (cstc2014jcyjA00038)

收稿日期: 2020-10-11; 网络出版日期: 2021-05-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

past, which led to a limitation to the complete understanding and the accurate evaluation of the water conservation service of the forests of the Three Gorges Reservoir area. Therefore, the hydrological effects of all functional layers (forest canopy layer, undergrowth herbaceous layer, humus layer and soil layer) of the natural secondary forests of Masson pine were systematically studied at Tieshanping of Chongqing, based on the field positioning observation and laboratory measurement. The results showed that: (1) the throughfall, stemflow and interception of Masson pine forests accounted for 84.66%, 0.26% and 15.07% of total precipitation (1972.39 mm) in 2010 and 2011, respectively, and all presented a significantly positive relation ($P < 0.01$) with the rainfall depth of individual rainfall events. The stemflow began to appear only when rainfall was more than 5 mm. The rainfall interception increased gradually with rising rainfall depth to its maximum value of about 6 mm. (2) The aboveground biomass of the undergrowth herbaceous was 1.32 t/hm². The water amount absorbed by the herbaceous increased logarithmically with soaking time ($P < 0.01$) until to its maximum value of 0.61 mm. (3) The humus layer amounted to 10.74 t/hm². The ratios of the maximum water-holding capacity of the un-decomposed humus, half-decomposed humus, and mixture of un-decomposed and half-decomposed humus were 183.76%, 206.31% and 197.62%, respectively. The maximum water-holding capacity of both the un-decomposed and half-decomposed humus layer was 1.44 mm. (4) The saturated water-holding capacity of the soil layer (0—80 cm) was 334.75 mm, in which the non-capillary water-holding capacity was 49.08 mm (14.66%). In summary, all functional layers of the natural secondary forests of Masson pine in the studied site present an obvious service of rainfall interception and water storage, and especially the service of the soil layer is the highest. The result of this study can provide an important basis for the simulation and evaluation of the water conservation service of the forests in the Three Gorges Reservoir area.

Key Words: rainfall redistribution; rainfall interception and water-holding capacity; forest canopy; herbaceous layer; humus layer; forest soil layer; Masson pine forest

森林生态系统以其复杂的功能层次结构对大气降水再分配,包括林冠层截留、草本层和枯落物层截持、土壤层贮存等水文过程,从而改变降水输入数量及时空格局,进而实现涵养水源这个重要生态服务功能^[1]。森林涵养水源功能的大小与气象因子、立地条件、森林类型及其结构特征等密切相关^[2-3]。目前国内外学者对森林的冠层截留、穿透雨和干流特征、枯落物持水、土壤水文物理性质等均做了大量研究^[4-6],取得了较多成果。如袁秀锦等^[7]研究认为马尾松林冠截留量与叶面积指数、胸高断面积、冠幅面积呈显著正相关;Honda等^[8]研究认为具有多年生叶、单轴生长的大树能产生较多的干流;刘效东等^[9]研究认为随着森林演替进程,半分解层及已分解层枯落物的持水能力明显降低,以演替早期的森林枯落物层的降水截留能力较高;王轶浩等^[10]研究认为土壤水文物理性质存在较强空间变异性。

三峡库区作为我国最大的淡水资源战略储备库,是长江上游生态屏障的最后一道关口,生态区位十分重要,因此,构建以涵养水源为主导功能的三峡库区防护林体系非常必要和至关重要。马尾松(*Pinus massoniana*)作为我国南方山地丘陵主要造林树种和先锋树种,是三峡库区防护林体系中面积最大和最重要的森林类型,在保护库区生态环境方面发挥着重要作用^[11]。以往关于马尾松林的冠层截留、枯落物持水、土壤贮水等单一水文过程已有不少研究^[12-14],但主要针对马尾松人工林,而对马尾松天然次生林的生态水文效应研究还较少,尤其马尾松天然次生林包括林冠层、林下草本层、枯落物层、土壤层等完整作用层的系统研究还未见报道。

本文在三峡库区的重庆铁山坪林场,以 50—70 年林龄的马尾松天然次生林为研究对象,通过长期定位监测和室内测定,系统研究了马尾松林冠层、林下草本层、枯落物层、土壤层等完整作用层的水文特征,以期对三峡库区森林水源涵养功能的准确评价及可持续经营提供科学依据和理论指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市江北区铁山坪林场(29°38'N,106°41'E),属亚热带湿润气候,多年平均降水量 1100 mm,年均气温 18 ℃。该地属四川盆东平行岭谷地貌,海拔变异范围在 242—584 m,坡度变异范围在 5°—30°。铁山坪林场现有森林面积 1200 hm²,森林覆盖率达 90% 以上,主要是 20 世纪 50、60 年代天然林被破坏后经自然更新形成的马尾松次生林。林分的分层明显,上层以马尾松为主,伴有少量香樟(*Cinnamomum camphora*)、楠木(*Phoebe zhennan*);下木层主要有木荷(*Schima superba*)、杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)、杉木(*Cuninhama lanceolata*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)、白栎(*Quercus fabric*)等;草本层以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主。具体研究地点位于面积 0.27 km²的林中园小流域,其土壤以砂岩上发育的山地黄壤为主,土壤质地为粉砂壤土和粉砂粘壤土,厚度 50—80 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

在铁山坪林场林中园小流域,选择代表性区域布设 3 个马尾松林典型样地,马尾松林龄均在 62 年左右,下木有杜英(*Elaeocarpus sylvestris*)、杉木(*Cuninhama lanceolata*)、毛桐、(*Mallotus barbatus*)、檵木(*Loropetalum chinense*)等,草本植物以铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主,规格为 30 m×30 m,并调查各典型样地基本情况和每木检尺(表 1)。

表 1 马尾松林典型样地基本概况
Table 1 Basic information of sample plots for Masson pine forests

森林类型 Forest types	密度 Density/ (株/hm ²)	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	土层类型 Soil types	海拔 Altitude/m	坡度 Slope gradient/(°)	坡位 Slope position	坡向 Slope aspect
马尾松林 Masson pine forest	900	0.85	15.37	16.61	山地黄壤	532	10	中坡	西南坡
马尾松林 Masson pine forest	675	0.65	13.61	16.44	山地黄壤	540	15	中坡	西北坡
马尾松林 Masson pine forest	400	0.60	18.07	24.39	山地黄壤	553	6	中坡	北坡

DBH:胸径 Diameter at breast high

1.2.2 林冠层水文特征测定

2010 年 1 月—2011 年 12 月,在马尾松林各典型样地内共计随机布设 16 个雨量桶(内径 20 cm),每次降雨后测定穿透雨量,取其均值作为马尾松林的穿透雨量。同时,在各典型样地内根据马尾松径级大小分布,一共选择有代表性的 14 棵马尾松,通过缠绕树干的塑料水管及其接水容器,测定马尾松单株干流量,马尾松林分的干流量通过公式(1)计算得到。

$$S = \sum_i^N \frac{S_i \cdot M_i}{A \cdot 10^3}$$
 (1)

式中, S 为马尾松林分的干流量(mm), N 为树干径级数, S_i 为第 i 径级的单株样树干流量(ml), M_i 为第 i 径级的树木株数, A 为样地面积(m²)。

利用林外空旷处设置的自动气象站(WeatherHawk232)记录次降雨量,马尾松林的林冠截留量通过公式(2)计算得到。

$$I = P - T - S$$
 (2)

式中, I 为马尾松林的林冠截留量(mm), P 为林外次降雨量(mm), T 为林内穿透雨量(mm), S 为马尾松林的干流量(mm)。

1.2.3 草本植物储量及水文特征测定

在每个马尾松林典型样地内随机布设 3 个 2 m×2 m 草本植物样方,采用收获法测定草本植物地上生物量^[15]。采用浸水法测定草本植物的水文特征,即随机称取一定重量的草本植物样品(6 个重复)后放入清水中浸泡,分别在浸水第 0.5、1、2、4、6、8、12 h 和 24 h 时称重,每次称重时要求静置到不滴水为止,然后将其在 85℃烘箱中烘干至恒重并称重。草本样品不同时间的浸水重量与其自然重量的差值即为草本植物持水量,其与烘干重量的比值即草本植物持水率,并根据样地草本植物储量计算草本植物层的持水能力。

1.2.4 枯落物贮存量及水文特征测定

在每个马尾松林典型样地内,随机布设 3 个 1 m×1 m 枯落物样方,首先用钢尺测量枯落物未分解层、半分解层和已分解层厚度,然后分层收集带回实验室内,在 85℃烘箱中烘干后测定枯落物的干贮存量。采用浸水法测定枯落物的水文特征,即将烘干的枯落物分未分解、半分解、未分解与半分解混合(混合比例依据样地枯落物组成的调查结果获得)3 种处理,分别称取一定重量的枯落物装入孔径为 1 mm 的 25 cm×30 cm(或 20 cm×30 cm)尼龙袋内,每种处理 6 个重复样本(即,共计 18 个尼龙袋),然后浸水 48 h 后取出静置直到枯落物不滴水为止,称重,所得重量与烘干重量差值即枯落物最大持水量,最大持水量与烘干重量比值即最大持水率,并根据样地的枯落物贮存量计算样地枯落物层的最大持水能力。

1.2.5 土壤水文特征测定

采用环刀法测定土壤水文特征,分别于 2010 年 10 月、2011 年 10 月在各个马尾松林典型样地选择代表性地段,开挖深为 80 cm 的土壤剖面(1 m×1 m),若土层厚度未达 80 cm 则挖至基岩,然后用容积为 200 cm³的环刀按 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60 cm 等深度分层取原状土样,每层 3 个重复,测定土壤容重、孔隙度和持水量,一定土层深度内的土壤贮水量通过公式(3)、(4)和(5)计算得到。

$$W_c = 1000P_c h \quad (3)$$

$$W_{nc} = 1000P_{nc} h \quad (4)$$

$$W_t = 1000P_t h \quad (5)$$

式中, W_c 、 W_{nc} 和 W_t 分别为土壤吸持贮水量(mm)、土壤滞留贮存量(mm)和土壤饱和贮水量(mm); P_c 、 P_{nc} 和 P_t 分别为毛管孔隙度(%)、非毛管孔隙度(%)和总孔隙度(%) ; h 为土层深度(m)。

1.2.6 数据处理

采用 Excel2019 软件对数据进行处理与绘图,利用 SPSS 23.0 软件进行马尾松林冠层水文特征与次降雨量、草本植物持水特征与浸水时间及草本重量的回归方程拟合,不同枯落物组分水文特征的单因素方差分析(one-way ANOVA)及 LSD 检验法的多重均值比较分析。

2 结果

2.1 马尾松林冠层水文特征

研究期间共观测到有效大气降雨 84 场,累计降雨量达 1972.39 mm,次降雨量最小仅 2 mm,最大达 122 mm,平均次降雨量为 23.48 mm。从雨量等级来看(表 2),<30 mm 的降雨有 59 场,占总降雨场次的 66.67%,而 80—90 mm 和 >90 mm 的降雨分别仅有 1 场;<30 mm 的降雨量为 683.39 mm,仅占累计降雨量 34.58%。说明研究区的降雨次数以<30 mm 的为主,但降雨量以>30 mm 的为主。

研究期间,马尾松林的穿透雨总量 1669.81 mm,干流量 5.19 mm,林冠截留量 297.31 mm,分别占总降雨量的 84.66%、0.26%和 15.07%。

由图 1 可知,马尾松林穿透雨量随次降雨量增大而增大,两者呈显著线性关系($R^2 = 0.9887$, $P < 0.01$, $n = 84$)。马尾松林穿透雨率则随次降雨量增大呈非线性增大,可用对数函数拟合($y = 11.332\ln(x) + 45.513$, $R^2 = 0.4302$, $P < 0.01$, y 为穿透雨率, x 为次降雨量, $n = 84$)。当次降雨量小于 15 mm 时,穿透雨率随次降雨量增大而快速增大;当次降雨量超过 15 mm 时,穿透雨率随次降雨量增大而缓慢增大,并在 92%左右趋于稳定。

表 2 不同雨量等级的马尾松林冠层水文特征

Table 2 Hydrological characteristics of canopy of Masson pine forests in different rainfall classes

雨量等级 Rainfall range/mm	场次 Times	降雨量 Rainfall/mm	穿透雨量 Throughfall/mm	穿透雨率 Throughfall ratio/%	干流量 Stemflow/mm	干流率 Stem flow ratio/%	截留量 Interception/mm	截留率 Interception ratio/%
<10	29	143.39	92.22	64.31	0.05	0.04	51.12	35.65
10—20	20	289	225.82	78.14	0.37	0.13	62.82	21.74
20—30	10	251	213.17	84.93	0.47	0.19	37.36	14.88
30—40	7	252	229.95	91.25	0.77	0.31	21.27	8.44
40—50	8	349	303.03	86.83	0.90	0.26	45.07	12.91
50—60	4	208	183.19	88.07	0.60	0.29	24.21	11.64
60—70	2	127	111.90	88.11	0.43	0.34	14.59	11.49
70—80	2	145	121.23	83.61	0.57	0.39	23.20	16.00
80—90	1	86	80.10	93.14	0.45	0.52	5.45	6.34
>90	1	122	109.21	89.52	0.57	0.47	12.22	10.01
合计 Total	84	1972.39	1669.81	84.66	5.19	0.26	297.31	15.07

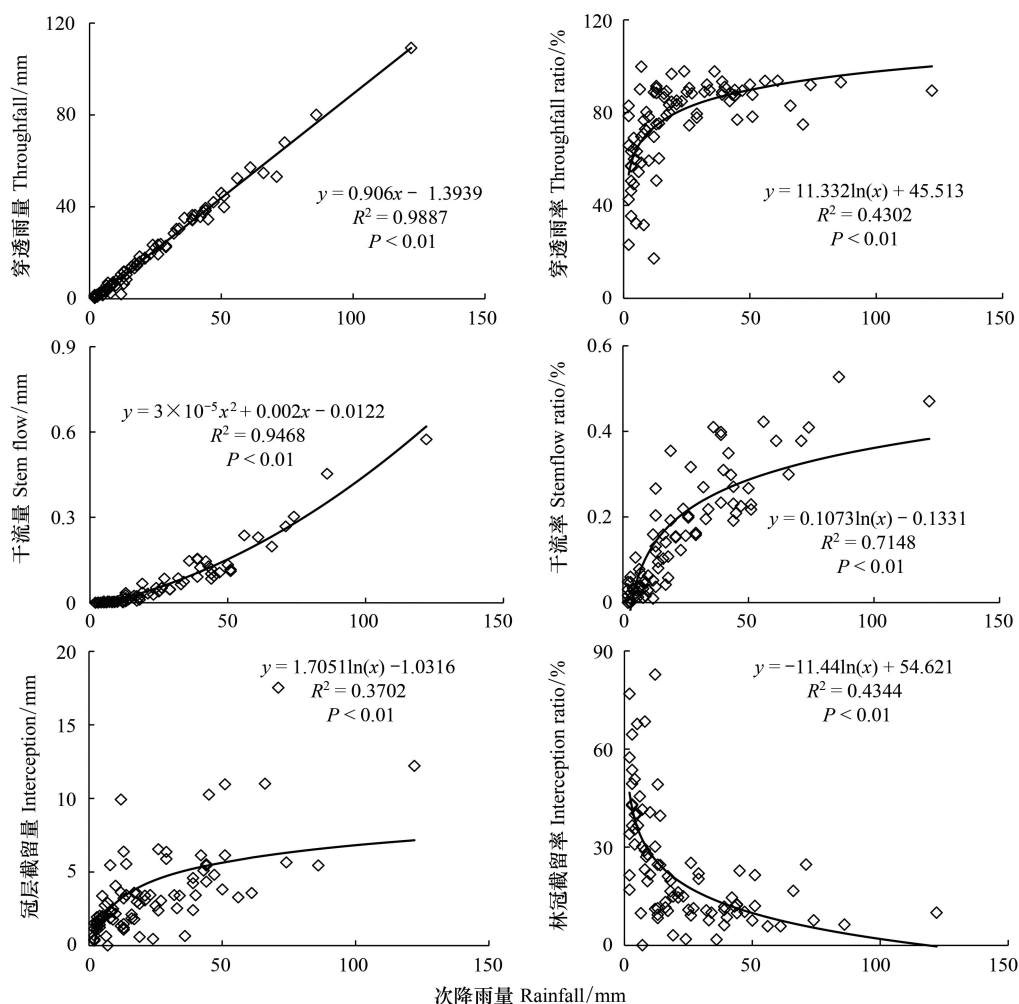


图 1 马尾松林冠水文特征与次降雨量的关系

Fig.1 Relations between hydrological characteristics of canopy of Masson pine forests and rainfall depth of individual rainfall events

由图 1 可知,马尾松林的干流量和干流率均与次降雨量呈显著的非线性关系($P<0.01$)。当次降雨量达到 5 mm 时,马尾松林才产生干流;当次降雨量大于 12 mm 时,干流量随次降雨量增大而近线性地快速增大。当次降雨量小于 50 mm 时,马尾松林的干流率随次降雨量增大而快速增大;当次降雨量大于 50 mm 时,干流率随次降雨量增加而缓慢增加,并在 0.4% 左右渐趋稳定。

马尾松林冠截留量、截留率与次降雨量的关系均用对数函数拟合较好($P<0.01$,图 1)。马尾松林冠截留量随次降雨量增大而增加,当次降雨量小于 20 mm 时,林冠截留量随次降雨量增大而较快增加;之后增加渐趋缓慢,最后相对稳定在 6 mm 左右。马尾松林冠截留率则随次降雨量增大而一直非线性减小,当次降雨量小于 12 mm 时,林冠截留率随次降雨量增大而快速减小;之后缓慢减小,并在次降雨量达到 60 mm 时趋于稳定(7%左右)。

2.2 草本植物层水文特征

由图 2 可知,马尾松林下草本植物持水率随浸水时间延长而增大,用对数函数拟合效果较好($R^2 = 0.9801, P<0.01, n=9$)。在浸水前 4 h 内,持水率随浸水时间延长而增加较快,之后增加缓慢,并在 450% 左右趋于稳定。研究表明,马尾松林下草本植物地上生物量平均为 1.32 t/hm^2 。结合图 2 中拟合的草本植物持水量(浸水 24 h 时)随自身干重变化的线性函数($y=4.5978x, R^2=0.9764, P<0.01, y$ 为持水量, x 为草本干重, $n=6$),可知浸水 24 h 时马尾松林下草本植物层的持水量为 0.61 mm。

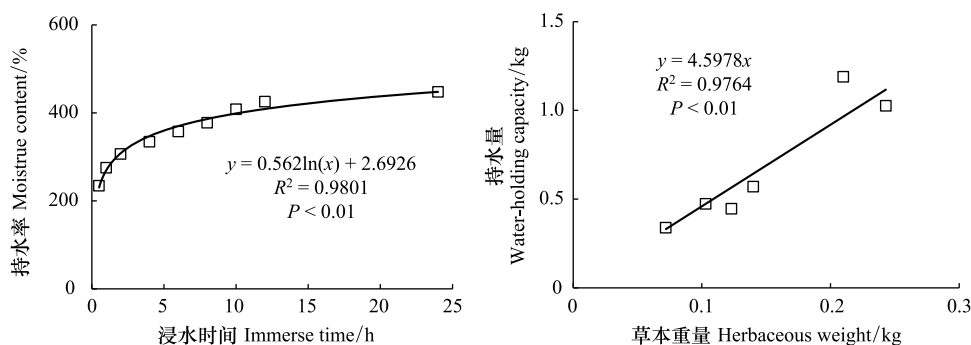


图 2 林下草本层植物持水特征与浸水时间、草本重量的关系

Fig.2 Relations between water-holding characteristics of undergrowth herbaceous and the soaking time and the dry weight of herbaceous for Masson pine forests

2.3 枯落物层水文特征

由表 3 可知,2010—2011 年马尾松林的枯落物贮存量平均为 10.74 t/hm^2 ,其中,未分解层、半分解层和已分解层的平均厚度为 2.02、1.37、1.84 cm,平均储量为 3.10、4.18、3.46 t/hm^2 ,分别占枯落物总贮存量的 28.86%、38.92%和 32.22%。

表 3 马尾松林枯落物贮存量

Table 3 Humus amount in Masson pine forests

未分解层 Undecomposed layer			半分解层 Half-decomposed layer			已分解层 Decomposed layer			合计 Total/ (t/hm^2)
厚度 Thickness/cm	储量 Amount/ (t/hm^2)	%	厚度 Thickness/cm	储量 Amount/ (t/hm^2)	%	厚度 Thickness/cm	储量 Amount/ (t/hm^2)	%	
2.02	3.10	28.86	1.37	4.18	38.92	1.84	3.46	32.22	10.74

由表 4 可知,马尾松林未分解、半分解、未分解与半分解混合枯落物的最大持水率分别为 183.76%、206.31%、197.62%。结合枯落物贮存量(表 3),可知马尾松林未分解层、半分解层、未分解与半分解层枯落物

的最大持水量分别为 5.70、8.62、14.39 t/hm²,最大持水能力分别 0.57、0.86、1.44 mm(表 4)。经方差分析及 LSD 多重均值比较检验表明,不同处理对枯落物持水特征影响不明显($P>0.05$),但未分解枯落物和半分解枯落物的持水特征差异显著($P<0.05$)。

表 4 马尾松林枯落物持水特征
Table 4 Water-holding characteristics of humus for Masson pine forests

枯落物 Humus	持水率 Moisture content/%	持水量 Water-holding capacity/ (t/hm ²)	持水能力 Water-holding capacity/mm
未分解 Undecomposed	183.76	5.70	0.57
半分解 Half decomposed	206.31	8.62	0.86
未分解+半分解 Undecomposed mixed with half decomposed	197.62	14.39	1.44

2.4 土壤层水文特征

研究表明,马尾松林土壤容重随土层加深而增大,由 0—10 cm 的 1.24 g/cm³增到 70—80 cm 的 1.65 g/cm³,0—80 cm 的土壤容重平均为 1.56 g/cm³(表 5)。土壤持水率和贮水量则随土层加深而减小,0—80 cm 的土壤饱和持水率、毛管持水率和田间持水率分别为 27.42%、23.20%和 22.23%。土壤饱和贮水量和滞留贮水量反映了土壤层的总贮水能力和调节水量能力,由表 5 可知,0—80 cm 的土壤饱和贮水量达 334.75 mm,滞留贮水量达到 49.08 mm,占饱和贮水量 14.66%。

表 5 马尾松林土壤层水文特征
Table 5 Soil hydrological characteristics for Masson pine forests

土层深度 Soil depth/cm	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	饱和持水率 Saturated water content/%	毛管持水率 Capillary water content/%	田间持水率 Field capacity/%	饱和贮水量 Saturated water-holding capacity/mm	吸持贮水量 Capillary water-holding capacity/mm	滞留贮水量 Non-capillary water-holding capacity/mm
0—10	1.24±0.13	42.63±10.64	30.60±7.75	29.12±7.82	51.83±6.82	37.33±7.05	14.50±4.66
10—20	1.56±0.10	27.11±4.22	22.21±3.22	21.18±3.02	41.83±3.98	34.33±3.37	7.50±2.72
20—30	1.62±0.08	24.59±3.38	21.60±3.44	20.77±3.50	39.50±3.52	34.67±4.12	4.83±2.09
30—40	1.59±0.03	25.33±1.22	21.89±2.40	20.90±2.48	40.33±1.33	34.83±3.42	5.50±2.19
40—50	1.62±0.08	24.81±3.08	21.92±3.00	21.10±2.92	40.00±3.13	35.33±3.27	4.67±0.52
50—60	1.60±0.03	25.90±0.81	23.13±1.19	22.03±1.13	41.33±1.25	36.92±2.13	4.42±1.20
60—70	1.62±0.02	24.65±1.21	22.39±1.08	21.56±1.12	39.92±1.69	36.25±1.44	3.67±0.68
70—80	1.65±0.02	24.32±1.00	21.89±0.69	21.16±0.94	40.00±1.54	36.00±1.00	4.00±0.61
0—80	1.56	27.42	23.20	22.23	334.75	285.67	49.08

3 讨论

森林穿透雨包括直接穿过林冠间隙的自由穿透雨和被冠层枝叶遮挡溅落的冠滴雨,本研究期间的马尾松林穿透雨量 1669.81 mm,占总降雨量 84.66%,这与袁秀锦等^[12]、莫江明等^[16]研究结果(分别为 82.3%和 82.7%)相近。穿透雨量与次降雨量一般呈较好线性关系^[5,12],其线性函数斜率反映了穿透雨量随次降雨量的变化程度。本研究中马尾松林为 0.906,大于鼎湖山马尾松林(0.675)^[16]和湖南张家界马尾松林(0.747)^[14],但小于三峡库区秭归马尾松林(0.927)^[12]。这主要是因穿透雨与冠层特征(冠型、厚度、叶面积指数等)密切相关^[6,17],本研究马尾松林受酸沉降危害影响,冠层落叶率较高^[18]、叶面积指数小(2011 年变化在 0.92—1.83,月均 1.25)、冠层稀疏。

干流对森林生态系统养分循环和树木生长有着重要作用,但干流量普遍较低,其与冠幅面积、叶形、枝叶方向与角度、树皮糙度等相关^[19]。往往光滑的树皮具有较低的吸持雨水能力,能产生较多的干流^[20]。本研

究马尾松林干流量仅 5.19 mm,这与马尾松树皮粗糙有关。森林干流率一般变化在 0—5%之间^[21],本研究马尾松林干流率仅 0.26%,与 30—40 年生马尾松林(0.27%)接近^[22],低于 47 年生马尾松人工林(1.4%)^[12]和 25 年生马尾松林(2.4%)^[14],高于 30 年生马尾松林(0.15%)^[16],这可能与本研究马尾松林密度较小、冠层稀疏、叶面积指数小有关。正如袁秀锦等^[7]研究表明,干流率与树高、冠层厚度呈显著负相关,与叶面积指数、林分密度呈显著正相关。同时,干流的产生存在一个雨量阈值,即达到这个阈值后,才产生干流。本研究马尾松林产生干流的雨量阈值为 5 mm,与杜妍等^[23]研究结果相近,但低于杨茂瑞^[24]、莫江明等^[16]研究结果(分别为 7 mm、8 mm)。

研究表明,我国森林的林冠截留率一般变化在 11.4%—36.5%之间,平均为 21.6%,且针叶林的林冠截留率高于阔叶林^[25]。本研究马尾松林林冠截留率为 15.07%,与崔鸿侠等^[22](16.3%)、莫江明等^[16](17.2%)的研究结果相近,低于我国森林的林冠截留率平均水平,也低于 25 年生马尾松林(29%)^[14]和 30—40 年生马尾松林(23.03%)^[22],但高于 18 年生马尾松林(10.6%)^[24],这些差异主要是受林分密度、冠层结构特征及降雨条件等所致。

林下草本植物以其较大的叶面积对穿透雨进行吸持与截留,参与林地降雨输入的再分配,且能有效提高地表植被覆盖、防止土壤侵蚀和增加生物多样性,但在森林水源涵养功能研究中往往被忽略。本研究中,马尾松林下草本植物持水率随浸水时间延长而增大,但在浸水 24 h 时持水率已几乎不再增加(图 2)。因此,可将浸水 24 h 时的持水率视为草本植物最大持水率,故理论上马尾松林的林下草本层最大持水能力可达 0.61 mm。李德生^[26]通过模拟降雨研究了不同类型森林的林下植被降雨截持,表明当降雨量为 12.3 mm、持续时间为 2.3 h 时,阴坡油松林的林下植被降雨截持量为 0.72 mm;当降雨量为 46.5 mm、持续时间为 6.6 h 时,林下植被的降雨截持量为 0.93 mm。这说明林下植被的降雨截持能力不仅与植物种类、多少等植被特征有关,还受到降雨特征影响。

枯落物层是森林的重要功能层,在拦蓄降水、减缓地表径流和防止土壤侵蚀等方面具有重要作用。同时,森林演替阶段、林分结构以及树种组成均影响着枯落物贮存量及其组分构成^[9]。本研究马尾松林枯落物贮存量为 10.74 t/hm²,其中未分解层、半分解层和已分解层分别占 28.86%、38.92%和 32.22%,这与贾秀红等^[27]研究结果相近(马尾松林未分解层和半分解层凋落物储量为 6.32 t/hm²),但低于贵州龙里林场马尾松林(32.20 t/hm²)^[28]、重庆四面山马尾松—杉木—木荷混交林(64.47 t/hm²)^[29]和三峡库区马尾松林枯落物贮存量平均值(15.70 t/hm²)^[30]。这可能与本研究马尾松林密度较小及受长期酸沉降危害使得树木健康水平降低和每年新生针叶量少^[31]有关。枯落物最大持水能力常被作为森林水文功能重要指标,而最大持水率反映了单位重量枯落物的持水能力。本研究马尾松林的未分解、半分解、未分解与半分解混合枯落物的最大持水率分别为 183.76%、206.31%和 197.62%,与其它研究区域^[28-30]的马尾松林枯落物最大持水率相比均较低,其原因尚不清楚,有待进一步研究。不过可以确定的是,虽然室内浸水法作为一种操作简便的方法被广泛用于测定枯落物持水特征,但在实验过程中不可避免会改变枯落物的结构与组分,并且是在完全浸水情况下测定,其结果势必与野外枯落物持水能力存在一定偏差。

土壤层作为森林发挥水源涵养功能的主体,其贮水量可占到森林生态系统同期贮水量的 50%以上^[21],对降水分格局影响最明显^[5]。一般认为,土壤容重小则土质疏松,利于拦截降水、促进降水入渗和减缓地表径流^[32]。本研究马尾松林 0—80 cm 土层的土壤容重为 1.56 g/cm³,土壤饱和贮水量、吸持贮水量和滞留贮水量分别达 334.75、285.67、49.08 mm,其在 0—40 cm 土层的指标均与马尾松—冬青混交林接近,且高于马尾松纯林^[27],但其在 0—60 cm 土层的指标均低于福建莘口林场的马尾松中龄林^[33]、广西桂平金田的马尾松中龄林^[34]、福建武夷山的马尾松近熟林和成熟林^[35]。这主要与本研究区长期受酸沉降危害而导致土壤酸化和由此引发的马尾松根系较少与分布趋于土壤表层化^[36]、凋落物营养元素回归土壤不足^[31]有关。

在完全饱和状态下,重庆铁山坪马尾松天然次生林林冠层、林下草本层、枯落物层、土壤层(0—80 cm)的降雨截持量或贮水量可分别达 6.0、0.61、1.44、334.75 mm,可见,马尾松天然次生林各作用层的降雨截持与贮

水作用明显,且尤以土壤层贮水能力最强。但以上马尾松天然次生林林下草本层、枯落物层和土壤层的降雨截持与贮水作用与其野外实际降雨截持与贮水能力还存在一定差距,因为马尾松天然次生林各作用层的降雨截持与贮水能力不仅均与降雨特征(也不止降雨量,还包括降雨强度、降雨历时等)有关,还受各作用层的结构特征影响,如林下草本层的植物种类、覆盖面积、叶面积指数等。因此,今后还需加强马尾松天然次生林各作用层的降雨截持与贮水作用及其影响因素的野外监测,并进一步建立降雨截持与贮水作用及其影响因素的数量关系,以从机理上掌握马尾松天然次生林的降雨截持与贮水特征。

4 结论

2010—2011 年观测的 84 场有效大气降雨的累计降雨量为 1972.39 mm,其中降雨次数以<30 mm 的降雨为主;降雨量以>30 mm 的降雨为主。马尾松林的穿透雨量、干流量、林冠截留量分别占总降雨量 84.66%、0.26%、15.07%,且与次降雨量分别呈显著线性、一元二次函数和对数函数关系,其中干流在次降雨量达到 5 mm 时产生,林冠截留量随次降雨量增大而逐渐达到饱和(6 mm 左右)。穿透雨率和干流率均与次降雨量呈显著正相关,并随次降雨量增大而分别在 92%、0.4%左右趋于稳定。林下草本植物的地上生物量为 1.32 t/hm²,其持水率随浸水时间呈显著对数函数增加,最大持水量达 0.61 mm。枯落物贮存量为 10.74 t/hm²,其未分解、半分解、未分解与半分解混合枯落物的最大持水率分别为 183.76%、206.31%和 197.62%;未分解与半分解层枯落物的最大持水能力达 1.44 mm,且未分解和半分解枯落物的持水特征差异显著。0—80 cm 土层的土壤饱和贮水量达 334.75 mm,其中滞留贮水量达 49.08 mm,占饱和贮水量 14.66%。可见,马尾松天然次生林各作用层的降雨截持及贮水作用明显,其中尤以土壤层贮水能力最强。

参考文献(References):

- [1] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, Pan Y X, Paradeloc M. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1084-1095.
- [2] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 2000, 14(16/17): 2903-2920.
- [3] 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): 6731-6737.
- [4] 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(S1): 46-48, 63-63.
- [5] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 邱志军, 徐大平, 高吉喜, 胡哲森. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应. *生态学报*, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [6] 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.
- [7] 袁秀锦, 肖文发, 雷静品, 王晓荣, 胡文杰, 崔鸿侠, 庞宏东, 潘磊. 马尾松林分结构对冠层水文效应的影响. *生态学杂志*, 2020, 39(2): 451-459.
- [8] Honda E A, Mendonca A H, Durigan G. Factors affecting the stemflow of trees in the Brazilian Cerrado. *Ecohydrology*, 2015, 8(7): 1351-1362.
- [9] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸, 肖崑, 张德强. 鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性. *林业科学*, 2013, 49(9): 8-15.
- [10] 王轶浩, 王彦辉, 谢双喜, 莫非, 于澎湃, 熊伟, 时忠杰. 六盘山分水岭沟土壤水文物理性质空间变异. *中国水土保持科学*, 2008, 6(4): 33-40.
- [11] Zeng L X, He W, Teng M J, Luo X, Yan Z G, Huang Z L, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F. Effects of mixed leaf litter from predominant afforestation tree species on decomposition rates in the Three Gorges Reservoir, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 679-686.
- [12] 袁秀锦, 肖文发, 雷静品, 潘磊, 王晓荣, 崔鸿侠, 胡文杰. 三峡库区马尾松林穿透雨和树干茎流空间变异特征. *林业科学*, 2020, 56(1): 10-19.
- [13] 秦佳双, 李明金, 宋尊荣, 零天旺, 马姜明, 杨章旗, 颜培栋, 营瑞, 陆绍浩. 不同年龄阶段马尾松人工林土壤水分-物理性质. *广西科学*, 2019, 26(2): 245-251.
- [14] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析. *林业科学*, 2006, 42(12): 13-20.

- [15] 刘燕萍, 马驰, 莫保儒, 蔡国军, 薛睿. 柠条人工林下草本植被特征与土壤特性相关性研究. 草地学报, 2020, 28(2): 468-473.
- [16] 莫江明, 方运霆, 冯肇年, 孔国辉, 孟泽. 鼎湖山人干扰下马尾松林水文生态功能. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(2): 99-104.
- [17] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, Gowing D J. Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 141(2/4): 244-256.
- [18] Wang Y H, Solberg S, Yu P T, Myking T, Vogt R D, Du S C. Assessments of tree crown condition of two Masson pine forests in the acid rain region in south China. Forest Ecology and Management, 2007, 242(2/3): 530-540.
- [19] André F, Jonard M, Ponette Q. Influence of species and rain event characteristics on stemflow volume in a temperate mixed oak-beech stand. Hydrological Processes, 2008, 22(22): 4455-4466.
- [20] Van Stan II J T, Levia Jr D F. Inter-and intraspecific variation of stemflow production from *Fagus grandifolia* Ehrh. (American beech) and *Liriodendron tulipifera* L. (yellow poplar) in relation to bark microrelief in the eastern United States. Ecohydrology, 2010, 3(1): 11-19.
- [21] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 丁德蓉. 岷江上游 23 年生油松纯林凋落物与土壤截留降水的效应. 水土保持学报, 2004, 18(5): 115-119.
- [22] 崔鸿侠, 张卓文, 陈玉生, 张志永, 温雪松. 三峡库区莲峡河小流域马尾松水文生态效应. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 46-49.
- [23] 杜妍, 孙永涛, 李宗春, 韩诚, 葛波, 张金池, 庄家尧. 苏南马尾松林分冠层水文过程对降雨的响应特征. 北京林业大学学报, 2019, 41(6): 120-128.
- [24] 杨茂瑞. 亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流. 林业科学研究, 1992, 5(2): 158-162.
- [25] 刘世荣, 温远光, 王兵, 周光益. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996: 157-243.
- [26] 李德生. 山东泰安黄前水库流域主要植被类型的水文特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [27] 贾秀红, 曾毅, 周志翔, 高大雄, 谢经荣, 郭国志. 鄂中低丘区不同演替阶段森林凋落物和土壤水文特征. 水土保持学报, 2013, 27(4): 125-129.
- [28] 彭云, 丁贵杰. 不同林龄马尾松林枯落物储量及其持水性能. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 43-46.
- [29] 王波, 张洪江, 徐丽君, 王伟, 卢炜丽, 李猛. 四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究. 水土保持学报, 2008, 22(4): 90-94, 99-99.
- [30] 王鹏程, 肖文发, 张守攻, 史玉虎, 潘磊, 曾立雄, 万睿. 三峡库区森林植被林地枯落物现存量及其持水能力. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 41-47, 99-99.
- [31] 王轶浩, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 李振华, 郝佳, 段健. 重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对于旱胁迫的响应. 生态学报, 2013, 33(6): 1842-1851.
- [32] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪. 托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能. 水土保持学报, 2018, 32(1): 210-216, 224-224.
- [33] 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 刘春华, 蒋宗垲, 沈宝贵. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 655-659.
- [34] 黄承标, 梁宏温. 广西不同地理区域森林土壤水文物理性质研究. 土壤与环境, 1999, 8(2): 96-100.
- [35] 游秀花. 马尾松天然林不同演替阶段土壤理化性质的变化. 福建林学院学报, 2005, 25(2): 121-124.
- [36] 张治军, 王彦辉, 于澎涛, 袁玉欣, 李志勇, 张国增, 刘英亘. 不同优势度马尾松的生物量及根系分布特征. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(4): 71-75.