

# 重庆铁山坪马尾松林凋落物输入及分解动态与持水特性

王轶浩<sup>1</sup>, 周建岗<sup>2</sup>, 王彦辉<sup>3</sup>

(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.沁县漳源林场, 山西 沁县 046400;

3.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)

**摘 要:**为揭示三峡库区马尾松林凋落物现存量及其生态水文效应,采用定位监测与室内测定相结合的方法,对马尾松林凋落物输入、分解及其持水能力进行了研究。结果表明:(1) 马尾松林月总凋落物量变化为 11.54~90.31 g/m<sup>2</sup>, 与其组分(除阔叶外)的年内变化均呈“双峰”模式;年凋落物组分排序为枯死针叶>有机碎屑>树枝>阔叶>树皮及球果>青黄针叶。(2) 凋落物现存量为 1 204 g/m<sup>2</sup>,其中未分解层、半分解层和已分解层分别占 29.98%,31.56%,38.46%。(3) 凋落物年失质量率为 35.62%,月失质量率变化为 1.04%~6.75%,干质量残留率与分解时间呈显著负相关关系( $p<0.01$ )。(4) 未分解层、半分解层和未分解+半分解层凋落物的有效拦蓄水深分别为 0.50,0.59,1.12 mm,其持水率均随浸水时间呈倒“J”型变化( $p<0.01$ ),吸水速率则均随浸水时间呈“J”型变化( $p<0.01$ )。可见,马尾松林凋落物各组分输入量、各层次储量及其持水能力均有较大差异,研究结果可为三峡库区马尾松林水源涵养功能准确评价提供科学依据。

**关键词:**凋落物;组分;分解;持水能力;马尾松林

**中图分类号:**S715.3; S718.5

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2021)06-0098-07

## Production and Decomposition and Water-holding Capacity of Litter in *Pinus massoniana* Forests in the Tieshanping of Chongqing

WANG Yihao<sup>1</sup>, ZHOU Jiangang<sup>2</sup>, WANG Yanhui<sup>3</sup>

(1.Chongqing Field Science Observation and Research Station for Surface Ecological

Process of Three Gorges Reservoir Area, College of Geography and Tourism, Chongqing Normal

University, Chongqing 401331, China; 2.Zhangyuan Forest Farm of Qinxian County, Qinxian, Shanxi 046400,

China; 3.Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration,

Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:**To reveal litter accumulation amount of *Pinus massoniana* forests and its eco-hydrological effects in the Three Gorges Reservoir area, production, decomposition and water-holding capacity of litter in *Pinus massoniana* forests were studied by using the method of fixed observation and measurement of laboratory. The results showed that: (1) the monthly litter amount of *Pinus massoniana* forests ranged from 11.54 g/m<sup>2</sup> to 90.31 g/m<sup>2</sup>; except broad leaves, the monthly variation of total litter and its components presented a two-peak pattern; the yearly amount of litter components decreased in the order: dead needles>debris>twigs>broad leaves>bark and cones>green needles; (2) the litter accumulation amount of *Pinus massoniana* forests was 1 204 g/m<sup>2</sup>, and the undecomposed litter layer, the half-decomposed litter layer and the undecomposed litter mixed with half decomposed litter layer accounted for 29.98%, 31.56% and 38.46% of litter accumulation amount, respectively; (3) the annual mass loss ratio of litter of *Pinus massoniana* forests was 35.62%, and the monthly mass loss ratio ranged from 1.04% to 6.75%; the mass remaining percentage for the decomposing litter of *Pinus massoniana* forests was significantly negative correlated with decomposition time ( $p<0.01$ ); (4) the effective interception water depths of the undecomposed litter layer, the half-

收稿日期:2020-12-28

修回日期:2021-01-03

资助项目:重庆师范大学校级基金项目(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)

第一作者:王轶浩(1982—),男,山西省沁县人,博士,副研究员,主要从事水土保持、生态修复和生态水文研究。E-mail:wyih515@163.com

通信作者:王彦辉(1957—),男,河北省安平县人,博士,研究员,主要从事生态水文与水土保持研究。E-mail:wangyh@caf.ac.cn

decomposed litter layer and the undecomposed litter mixed with half decomposed litter layer were 0.50 mm, 0.59 mm and 1.12 mm, respectively; variations of water holding rates of different types of litter all presented an inverted J-shaped feature over the immersed time, and variations of water absorption rates of different types of litter all presented a J-shaped feature over the immersed time. In summary, productions of litter components, accumulation amounts of litter layers and their water-holding capacities of *Pinus massoniana* forests were all different. These results can provide the scientific basis for accurately evaluating water conservation service function of *Pinus massoniana* forest in the Three Gorges Reservoir area.

**Keywords:**litter; component; decomposition; water holding capacity; *Pinus massoniana* forest

凋落物层作为森林的重要水文功能层,在截持降水、减缓地表径流和防止土壤侵蚀等方面都发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。凋落物输入及分解直接影响着凋落物现存量多少,成为决定凋落物水文功能的重要因素。因此,研究森林凋落物输入、分解对于理解和掌握凋落物水文功能的作用机理显得非常必要,并受到林学、生态学、土壤学等领域的专家学者广泛关注<sup>[2-3]</sup>。目前国内外学者对森林凋落物输入、分解、持水特征等都做了大量研究<sup>[4-6]</sup>,如张建利等<sup>[7]</sup>研究认为杜鹃林的凋落物储量及持水功能受到干扰强度明显影响;侯玲玲等<sup>[8]</sup>研究认为不同群落类型的年凋落物量差异显著,并且凋落高峰出现时间以及各组分所占比例与群落类型有关;韩雪等<sup>[9]</sup>研究认为氮沉降能使凋落物分解速率减缓,且与氮沉降类型有关;武启骞等<sup>[10]</sup>研究认为红松人工林凋落物的持水性能优于蒙古栎天然林凋落物。但是,由于影响森林凋落物的因素较多,许多研究结果缺乏可比性<sup>[11]</sup>,并且以往研究大都是针对凋落物现存量及持水特性或者凋落物输入、分解、持水等单个过程及特性研究,而对森林凋落物输入、分解、持水等多过程与特性研究还不足,尤其是系统开展马尾松林凋落物输入、分解及持水特性的研究鲜有报道。

马尾松(*Pinus massoniana*)作为我国南方山地丘陵区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<sup>[12]</sup>。本文在三峡库区的重庆江北区铁山坪林场,较为系统地开展马尾松林凋

落物输入、分解与持水特性研究,以期揭示三峡库区马尾松林凋落物储量及其生态水文效应,为理解和评价三峡库区马尾松林水源涵养功能提供科学依据。

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)的林中园小流域,流域面积 0.274 km<sup>2</sup>,属亚热带湿润气候,多年平均降水量 1 100 mm,年均气温 18℃。该地属四川盆东平行岭谷地貌,海拔变化为 242~584 m,坡度变化为 5°~30°。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黏壤土,厚度 50~80 cm。铁山坪林场现有森林面积 1 200 hm<sup>2</sup>,主要是 20 世纪 60 年代森林被破坏后天然更新形成的马尾松次生林,森林覆盖率高达 90%以上。林分分层较明显,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。

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布设 4 个马尾松林典型样地,林龄均为 62 a 左右,规格为 30 m×30 m,然后调查马尾松林典型样地的基本情况和每木检尺(表 1)。

表 1 马尾松林样地基本概况

样地	密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	郁闭度	平均 树高/m	平均 胸径/cm	土层 类型	海拔/m	坡度/ (°)	坡位	坡向
1	900	0.85	5.37	16.61	山地黄壤	532	10	上坡	西南坡
2	675	0.65	13.61	16.44	山地黄壤	540	15	上坡	西北坡
3	400	0.60	18.07	24.39	山地黄壤	553	6	上坡	北坡
4	700	0.76	17.63	19.76	山地黄壤	556	10	坡顶	南坡

1.2.2 凋落物输入监测及其现存量调查 凋落物量输入监测采用收集网法。首先在各典型样地内随机

布设 10 个 1 m×1 m 凋落物收集网。收集网用孔径为 1 mm 的尼龙网做成,置于距离地面 50 cm 高处。

每月按时收集凋落物 2~3 次,将凋落物带回实验室后,区分枯死针叶、青黄针叶、阔叶、树皮及球果、树枝、有机碎屑(包括花朵、虫尸、粪等有机体)6 类凋落物组分,然后在 85℃ 烘箱中烘干至恒重、称重,最后计算出单位面积的总凋落物量及其组分重量。

凋落物现存量测定采用烘干法。首先在各典型样地内随机布设 3 个 1 m×1 m 凋落物样方,用钢尺测量凋落物未分解层(由新鲜凋落物组成,颜色变化不明显,结构完整,无分解痕迹)、半分解层(多数凋落物已粉碎,开始分解,颜色变黑,结构已破坏,但尚可分辨)和已分解层(凋落物彻底粉碎,无法识别原有结构)厚度<sup>[7]</sup>,然后分层收集,烘干称重,计算单位面积的凋落物现存量。

1.2.3 凋落物分解测定 凋落物分解采用分解袋法。首先将自然风干的马尾松未分解凋落物放在 70℃ 烘箱中烘干后,称取 50 g 凋落物装入用孔径为 0.5 mm 的尼龙网制成的分解袋(规格为 15 cm×20 cm),共 36 袋。2011 年 2 月份将分解袋放在已清除地面凋落物的 2 号马尾松林样地内,并确保分解袋与表层土壤紧密接触,然后每月固定时间收集 3 袋分解袋,直到 2012 年 2 月全部回收完毕。每次将分解袋回收后,将其表面杂物清除,同样在 70℃ 烘箱中烘干称重,其与凋落物初始干质量的差值即凋落物累积失质量,采用公式(1)~(2)计算凋落物累积失质量率和月失质量率。

$$D = \frac{W_i}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_i = \frac{W_i - W_{i-1}}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $D$  为凋落物累积失质量率(%); $D_i$  为第  $i$  个月的凋落物失质量率(%); $W_i$  为第  $i$  月凋落物失质量(g); $W_{i-1}$  为第  $i-1$  个月凋落物失质量(g); $W_0$  为凋落物初始干质量(g)。

凋落物累积分解残留率与分解时间关系采用 Olson 负指数衰减模型(3)拟合,并采用公式(4)和(5)计算凋落物分解半衰期和全衰期。

$$y = \frac{G_t}{W_0} = A e^{-kt} \quad (3)$$

$$t_{0.5} = \frac{\ln 0.5}{-k} \quad (4)$$

$$t_{0.95} = \frac{\ln 0.05}{-k} \quad (5)$$

式中: $y$  为凋落物分解  $t$  时间的干质量残留率(%); $G_t$  为凋落物分解  $t$  时间的干质量(g); $A$  为拟合参数; $k$  为凋落物年分解系数; $t$  为分解时间(a); $t_{0.5}$  和  $t_{0.95}$  为凋落物分解 50% 和 95% 时所需时间(a)。

1.2.4 凋落物持水特性测定 采用浸水法测定凋落物持水特性。首先将烘干的凋落物按未分解、半分解、未分解+半分解混合 3 种处理,分别称取一定重量的凋落物装入孔径为 1 mm 的 25 cm×30 cm 尼龙袋,每种处理 6 个重复,共 18 个尼龙袋。然后放入水中浸泡,分别在浸水 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 48 h 时,取出静置直到凋落物不滴水为止,称重,所得重量与烘干重量差值即凋落物在不同时间的持水量,持水量与烘干重量比值即凋落物持水率,持水率与浸水时间比值即凋落物吸水速率。将浸水 48 h 的凋落物持水率视为最大持水率,并根据凋落物现存量计算凋落物最大持水量和最大持水深。凋落物有效拦蓄量采用公式(6)计算得到。

$$W_s = (0.85R_{\max} - R_0) \times M \quad (6)$$

式中: $W_s$  为凋落物有效拦蓄量(t/hm<sup>2</sup>); $R_{\max}$  为凋落物最大持水率(%); $R_0$  为凋落物自然含水率(%); $M$  为凋落物现存量(t/hm<sup>2</sup>)。

## 2 结果与分析

### 2.1 凋落物输入及现存量

森林凋落物输入不仅与树种组成、林龄、密度及其生物节律等特征有关,还受到自然环境条件明显影响<sup>[13]</sup>,如干旱、大风等。由表 2 可知,2011 年马尾松林总凋落物量为 493.44 g/m<sup>2</sup>,其中,以枯死针叶最多,为 231.35 g/m<sup>2</sup>,占总凋落物量 46.89%;其次是有机碎屑,为 103.57 g/m<sup>2</sup>,占总凋落物量 20.99%;以青黄针叶最少,为 11.55 g/m<sup>2</sup>,占总凋落物量 2.34%。马尾松林凋落物不同组分排序为枯死针叶>有机碎屑>树枝>阔叶>树皮及球果>青黄针叶。

马尾松林月总凋落物变化在 11.54~90.31 g/m<sup>2</sup>,基本呈双峰模式,其中,第 1 高峰发生在 4—5 月份,总凋落物为 129.13 g/m<sup>2</sup>;第 2 高峰发生在 7—9 月份,总凋落物为 146.7 g/m<sup>2</sup>,两个高峰的总凋落物为 275.83 g/m<sup>2</sup>,占年总凋落物的 69.89%。马尾松林总凋落物第 1 高峰的出现,可能是因为 4 月、5 月份正值马尾松开花期和阔叶树种换叶期。由表 2 可知,4 月、5 月份有机碎屑的月凋落物分别为 22.26, 22.28 g/m<sup>2</sup>,处于其年内变化的第三、二位,共占其年凋落物的 43% 和总凋落物第 1 高峰的 34.49%。4 月、5 月份阔叶凋落物达到其月凋落物年内变化的最高峰,分别为 9.55, 6.77 g/m<sup>2</sup>,共占其年凋落物 41.63%。马尾松林总凋落物的第 2 高峰出现,可能是因为马尾松林受到干旱环境胁迫影响<sup>[13]</sup>,其中 7 月、8 月份正值重庆地区的伏旱季节。7—9 月份枯死针叶凋落物达到其年内变化的峰值(99.82 g/m<sup>2</sup>),占其年凋落物

的 42.96%和总凋落物第 2 高峰的 36.19%。同样地, 月、8 月份树枝分别为 18.05,12.28 g/m<sup>2</sup>,共占其年树枝凋落物在该时段达到其年内变化的峰值,其中 7 凋落物的 40.80%。

表 2 马尾松林凋落物月输入 g/m<sup>2</sup>

月份	枯死针叶	阔叶	树皮及球果	青黄针叶	有机碎屑	树枝	总凋落物
1	8.25	1.55	0.99	0.15	0.56	0.04	11.54
2	8.85	3.41	1.39	0.45	0.79	0.40	15.27
3	13.35	4.30	2.17	0.73	1.85	3.62	26.01
4	15.19	9.55	2.50	1.31	22.26	11.23	62.03
5	22.14	6.77	5.87	1.52	22.28	8.52	67.10
6	14.56	2.10	3.46	0.83	7.82	7.57	36.33
7	34.23	2.16	6.89	3.71	25.27	18.05	90.31
8	26.36	1.97	4.11	1.89	15.11	12.28	61.72
9	39.23	1.98	2.39	0.37	3.33	7.38	54.67
10	13.08	1.06	1.56	0.32	2.26	2.32	20.61
11	23.40	2.11	1.17	0.20	1.51	2.12	30.51
12	12.70	2.25	0.85	0.07	0.54	0.81	17.22
全年	231.35	39.20	33.35	11.55	103.57	74.33	493.34

青黄针叶为非正常凋落的针叶,更能反映针叶对自然环境胁迫的响应,本研究青黄针叶月凋落物变化在 0.15~3.71 g/m<sup>2</sup>,也在 7 月、8 月份的伏旱季节达到其年内变化的峰值,分别为 3.71,1.89 g/m<sup>2</sup>,共占其年凋落物的 48.48%,同样可说明马尾松林凋落物受干旱环境明显影响。

总体上,除阔叶凋落物的年内变化呈单峰模式外,其他组分的年内变化趋势与总凋落物一致,均呈双峰模式,这可能是因为马尾松林中阔叶凋落物的年

内变化只受其生物节律支配,而马尾松凋落物的年内变化除受其生物节律支配外,还受到干旱等外界环境明显影响<sup>[13]</sup>

由表 3 可知,马尾松林凋落物现存量为 1 204 g/m<sup>2</sup>,其中以已分解层凋落物最多,为 463 g/m<sup>2</sup>,占凋落物现存量 38.46%;其次是半分解层,为 380 g/m<sup>2</sup>,占凋落物现存量 31.56%;以未分解层凋落物最少,为 361 g/m<sup>2</sup>,占凋落物现存量 29.98%。同时,结合表 2 可知,马尾松林凋落物的年输入量占现存量的 40.98%。

表 3 马尾松林凋落物现存量

未分解层			半分解层			已分解层			合计/ (g·m <sup>-2</sup> )
厚度/ cm	储量/ (g·m <sup>-2</sup> )	比例/ %	厚度/ cm	储量/ (g·m <sup>-2</sup> )	比例/ %	厚度/ cm	储量/ (g·m <sup>-2</sup> )	比例/ %	
1.93±0.50	361±54	29.98	2.03±0.41	380±75	31.56	1.20±0.42	463±116	38.46	

2.2 凋落物分解

凋落物分解直接决定着凋落物现存量及其层次组成与分配,从而影响着凋落物层的生态水文功能。由表 4 可知,马尾松林凋落物的累积失质量和累积失质量率均随分解时间延长而增大,其中,马尾松林凋落物分解 1 个月后,其累积失质量和累积失质量率分别为 1.85 g,3.71%;分解半年后,其累积失质量和累积失质量率分别为 11.36 g,22.72%,是年失质量(17.81 g)和年失质量率(35.62%)的 63.78%,这可能是 3—8 月份的温度、湿度等自然环境条件比较适宜马尾松林凋落物分解所致。从马尾松林凋落物月失质量率也可看出(表 4),3—8 月份月失质量率普遍较高,除 7 月份为 1.55%外,其余月份均在 2%以上,平均为 3.79%。而 9—次年 2 月份的月失质量率普遍较低,除 9 月份、12 月份外,其余月份基本在 1.5%以下,平均为 2.15%。马尾松林凋落物月失质量率年内

变化为 1.04%~6.75%,最大值发生在 8 月份,最小值发生在 2 月份,平均为 2.97%。

表 4 马尾松林凋落物分解特征

日期 (年-月)	累积 失质量/g	累积失 质量率/%	月失质 量率/%
2011-03	1.85	3.71	3.71
2011-04	4.14	8.28	4.57
2011-05	5.17	10.34	2.06
2011-06	7.21	14.42	4.08
2011-07	7.99	15.97	1.55
2011-08	11.36	22.72	6.75
2011-09	13.09	26.17	3.46
2011-10	13.84	27.69	1.51
2011-11	14.59	29.17	1.49
2011-12	16.56	33.11	3.94
2012-01	17.29	34.57	1.47
2012-02	17.81	35.62	1.04



由图 1 可知,马尾松林凋落物干质量残留率( $y$ )与分解时间( $x$ )呈显著指数函数关系,随分解时间增大而减小,拟合方程为  $y = 99.414e^{-0.46x}$  ( $R^2 = 0.9855, p < 0.01, n = 12$ )。分解 1 a 后,马尾松林凋落物干质量残留率为 64.38%,进一步研究表明马尾松林凋落物年分解系数为 0.46,分解 50%(半衰期)为 1.51 a;分解 95%(全衰期)为 6.51 a。

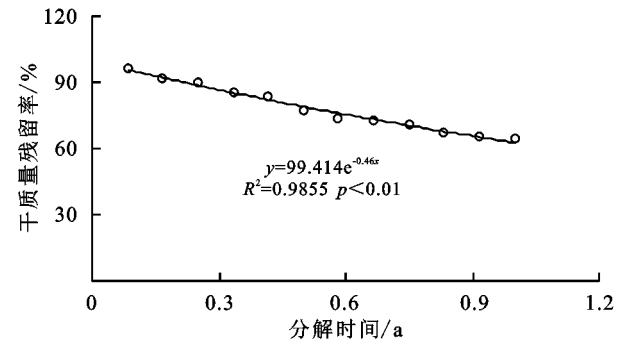
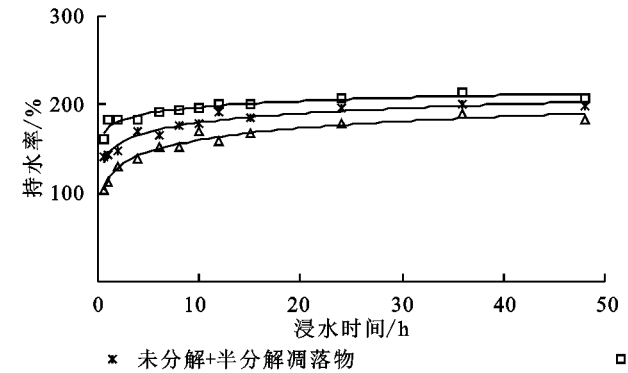


图 1 马尾松林凋落物干质量残留率和分解时间的关系

2.3 凋落物持水特征

马尾松林未分解、半分解、未分解+半分解凋落物的持水率均随浸水时间增加而增大,呈倒“J”型,其持水过程可划分为快速增加阶段(0~4h)、缓慢增加阶



段(4~12 h)、趋于稳定阶段(12~48 h)3 个阶段(图 2)。在浸水 0.5 h 时,持水率即分别达到 104.72%,160.61%,141.14%;在浸水 4 h 时,持水率则分别为 139.18%,184.08%,169.63%,相比 0.5 h 时分别增加了 34.46%,23.47%,28.49%。总体上,不同浸水时间的马尾松林凋落物持水率均表现为半分解>半分解+未分解>未分解,说明半分解凋落物的持水能力优于其他层次凋落物。由图 2 可知,马尾松林未分解、半分解、未分解+半分解凋落物的吸水速率随浸水时间增加而减小,呈“J”型。同样地,马尾松林凋落物吸水过程也可划分为急剧减小阶段(0~4 h)、缓慢减小阶段(4~12 h)、趋于稳定阶段(12~48 h)3 个阶段。在快速减小阶段,未分解、半分解、未分解+半分解凋落物的吸水速率由 0.5 h 时 2.10,3.15,2.82 kg/(kg·h)分别下降到 4 h 时 0.36,0.46,0.42 kg/(kg·h),仅为 0.5 h 的 1/7 左右;在趋于稳定阶段,各层次凋落物的吸水速率最后接近于“0”。这说明马尾松林凋落物在 0.5 h 内发挥的水文功能最强,对短时降水的截持调蓄功能也最大,其后则急剧下降,4 h 之后其截持调蓄能力趋于饱和,12 h 之后则完全饱和。

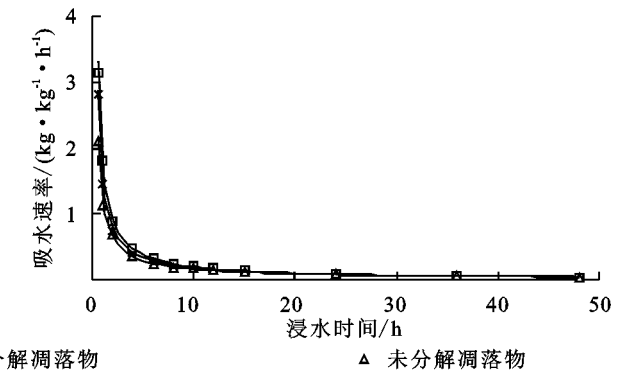


图 2 马尾松林凋落物持水和吸水过程

马尾松林未分解、半分解、未分解+半分解凋落物的持水率与浸水时间均呈极显著正相关关系( $p < 0.01$ , 表 5),可用对数函数拟合: $s = a \ln t + b$ ,式中: $s$  为持水率(%); $t$  为浸水时间(h); $a$  为方程系数; $b$  为方程常数项。

由表 5 可知,马尾松林各凋落物的吸水速率与浸水时间则均呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ ),可用幂函数拟合: $v = at^{-b}$ ,式中: $v$  为吸水速率[kg/(kg·h)]; $t$  为浸水时间(h); $a$  为方程系数; $b$  为方程常数项。

表 5 马尾松林凋落物持水率、吸水速率与浸水时间的拟合方程

凋落物	持水率/%		吸水速率/(kg·kg <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	
	关系式	$R^2$	关系式	$R^2$
未分解	$s = 0.1917 \ln t + 1.1606$	0.9752 **	$v = 1.1737 t^{-0.867}$	0.9995 **
半分解	$s = 0.0987 \ln t + 1.7444$	0.9031 **	$v = 1.723 t^{-0.945}$	0.9996 **
未分解+半分解	$s = 0.1482 \ln t + 1.4572$	0.9327 **	$v = 1.4611 t^{-0.912}$	0.9994 **

最大持水能力是评价凋落物水源涵养功能的最重要指标,由表 6 可以看出,马尾松林未分解层、半分解层、未分解+半分解层凋落物的最大持水量分别为 6.63,7.84,14.64 t/hm<sup>2</sup>,最大持水深分别为 0.66,0.78,1.46 mm。有效拦蓄能力则更能反映凋落

物实际截持调蓄降水的效果,它与凋落物初始湿度密切相关,研究表明,马尾松林未分解层、半分解层、未分解+半分解层凋落物的有效拦蓄率分别为 139.37%,154.14%,150.52%,有效拦蓄水深分别为 0.50,0.59,1.12 mm。

表 6 马尾松林凋落物持水特征

凋落物层	吸水速率/ (kg · kg <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )		最大 持水率/%	最大持水量/ (t · hm <sup>-2</sup> )	最大 持水深/mm	有效 拦蓄率/%	有效拦蓄量/ (t · hm <sup>-2</sup> )	有效拦蓄 水深/mm
	0.5 h	4 h						
未分解层	2.10	0.36	183.76	6.63	0.66	139.37	5.03	0.50
半分解层	3.15	0.46	206.31	7.84	0.78	154.14	5.86	0.59
未分解+半分解层	2.82	0.42	197.62	14.64	1.46	150.52	11.15	1.12

3 讨论

树木凋落物多少由其本身生物学特性和自然环境条件共同影响,不同树种的凋落物量及其凋落节律各不相同<sup>[10-11]</sup>,本研究马尾松针叶凋落主要发生在7—9月份,而阔叶凋落主要发生在3—5月份。森林凋落物多少则主要取决于森林类型及树种组成、起源、林龄、密度等林分特征和气候、土壤、地形等自然环境因素,不同立地条件、森林类型的凋落物量差异很大<sup>[14]</sup>,但其年内月变化规律一般呈“单峰”型、“双峰”型或不规则类型<sup>[13]</sup>。本研究马尾松林年凋落物量为4.93 t/hm<sup>2</sup>,高于郭婧等<sup>[11]</sup>对中亚热带杉木人工林研究结果(4.14 t/hm<sup>2</sup>),但低于中亚热带石砾+青冈常绿阔叶林(7.24 t/hm<sup>2</sup>)、南酸枣落叶阔叶林(7.95 t/hm<sup>2</sup>)和马尾松针阔混交林(8.18 t/hm<sup>2</sup>)。此外,本研究马尾松林总凋落物年内变化呈双峰模式,而除阔叶外,其他组分凋落物年内变化规律也呈双峰模式,这与中亚热带杉木人工林和南酸枣落叶阔叶林一致<sup>[11]</sup>。

凋落物现存量由凋落物输入和分解共同决定,处于动态平衡,并直接影响着凋落物层水文功能。本研究马尾松林现存量为12.04 t/hm<sup>2</sup>,与贾秀红等<sup>[15]</sup>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/hm<sup>2</sup>),但要低于鼎湖山马尾松林(21.96 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>、贵州龙里林场马尾松林(32.20 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[16]</sup>、重庆四面山马尾松+杉木+木荷混交林(64.47 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[17]</sup>和三峡库区马尾松林枯落物贮存量平均值(15.70 t/hm<sup>2</sup>)<sup>[18]</sup>。这可能与本研究马尾松林林分密度较小以及受酸沉降影响而针叶凋落物年输入较少<sup>[13]</sup>有关。

凋落物分解主要是由温度、湿度、酸碱度等外界环境条件以及凋落物组分通过影响土壤生物活动而起作用的,不同森林类型凋落物的分解特征不同,一般阔叶林>针阔混交林>针叶林<sup>[19]</sup>。我国针叶林凋落物年失质量率变化在20%~40%,阔叶林凋落物变化在43.5%~85%<sup>[20]</sup>。本研究马尾松林年失质量率为35.62%,半衰期为1.51 a,全衰期6.51 a,这与任来阳等<sup>[21]</sup>在该地区的研究结果相近,但高于三峡库区秭归马尾松

人工林(30.4%)<sup>[3]</sup>,明显低于福建洋口林场马尾松人工林(年失质量率为91.6%,半衰期为4.7个月,全衰期为19个月)<sup>[22]</sup>、江西千烟洲马尾松林(50%)<sup>[23]</sup>和广西禄峰山林场马尾松林(全衰期为2.13~2.46 a)<sup>[24]</sup>,这可能是由本研究马尾松林的土壤酸化严重、土壤动物和微生物种类和数量减少所致<sup>[21,25]</sup>。

凋落物以其疏松的内部结构和巨大的表面积,在截持降水、增加降雨入渗、减少地表径流、防止土壤侵蚀等方面都具有重要作用<sup>[10]</sup>。研究表明,不同浸水时间的马尾松林凋落物持水率均以半分解最大,未分解最小,未分解+半分解居中,这与魏强等<sup>[14]</sup>研究结果一致,主要是因为相比未分解凋落物,马尾松林的半分解针叶凋落物含油率更高、表面积更大。凋落物持水能力则由凋落物现存量和持水率共同决定,本研究马尾松林未分解、半分解、未分解+半分解层凋落物的最大持水深分别为0.66,0.78,1.46 mm,均明显低于其他研究地区的马尾松林凋落物<sup>[16-18]</sup>,这主要与本研究马尾松林的凋落物现存量较少及其最大持水率较小有关。

4 结论

(1) 马尾松林总凋落物量为493.44 g/m<sup>2</sup>,为现存量(1 204 g/m<sup>2</sup>)的40.98%;马尾松林月总凋落物变化在11.54~90.31 g/m<sup>2</sup>,与其他组分(除阔叶外)凋落物的年内变化趋势均呈双峰模式,年凋落物组分排序为枯死针叶>有机碎屑>树枝>阔叶>树皮及球果>青黄针叶。

(2) 马尾松林凋落物年失质量率为35.62%,半衰期为1.51 a,全衰期为6.51 a;月失质量率变化在1.04%~6.75%,平均为2.97%,以3—8月份的月失质量率普遍较高;凋落物的干质量残留率与分解时间呈显著负相关( $p<0.01$ )。

(3) 马尾松林未分解层、半分解层和未分解+半分解层凋落物的最大持水量分别为6.63,7.84,14.64 t/hm<sup>2</sup>,有效拦蓄水深分别为0.50,0.59,1.12 mm;各凋落物的持水率均随浸水时间呈倒“J”型变化,不同浸水时间

的凋落物持水率均为半分解>半分解+未分解>未分解,吸水速率则均随浸水时间呈“J”型变化。

#### 参考文献:

- [1] 张俊,张华,常畅,等.基于文献计量的凋落物研究现状及热点分析[J].生态学报,2020,40(6):2166-2173.
- [2] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, et al. Litterfall production along successional and altitudinal gradients of subtropical monsoon evergreen broadleaved forests in Guangdong, China[J]. Plant Ecology, 2007,188(1):77-89.
- [3] 王晓荣,雷蕾,付甜,等.抚育择伐对马尾松林凋落叶分解速率和养分释放的短期影响[J].林业科学,2020,56(4):12-21.
- [4] Liu G, Sun J, Tian K, et al. Long-term responses of leaf litter decomposition to temperature, litter quality and litter mixing in plateau wetlands[J]. Freshwater Biology, 2017,62(1):178-190.
- [5] Acharya B S, Stebler E, Zou C B. Monitoring litter interception of rainfall using leaf wetness sensor under controlled and field conditions[J]. Hydrological Processes, 2017, 31(1):240-249.
- [6] 刘效东,乔玉娜,周国逸,等.鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特征[J].林业科学,2013,49(9):8-15.
- [7] 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):167-173.
- [8] 侯玲玲,毛子军,孙涛,等.小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化[J].生态学报,2013,33(6): 1994-2002.
- [9] 韩雪,王春梅,蔺照兰.模拟氮沉降对温带森林凋落物分解的影响[J].生态环境学报,2014,23(9):1503-1508.
- [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] 郭婧,喻林华,方晰,等.中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周转期[J].生态学报,2015,35(14): 4668-4677.
- [12] Zeng X, He W, Teng M J, et al. Effects of mixed leaf litter from predominant afforestation tree species on decomposition rates in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of Total Environment, 2018, 639: 679-686.
- [13] 王铁浩,王彦辉,于澎涛,等.重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应[J].生态学报,2013,33(6):1842-1851.
- [14] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J].应用生态学报,2011,22(10): 2589-2598.
- [15] 贾秀红,曾毅,周志翔,等.鄂中低丘区不同演替阶段森林凋落物和土壤水文特征[J].水土保持学报,2013,27(4):125-129.
- [16] 彭云,丁贵杰.不同林龄马尾松林枯落物储量及其持水性能[J].南京林业大学学报:自然科学版,2008,32(4): 43-46.
- [17] 王波,张洪江,徐丽君,等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报,2008,22(4): 90-94,99.
- [18] 王鹏程,肖文发,张守攻,等.三峡库区森林植被林地枯落物现存量及其持水能力[J].中国水土保持科学, 2008,6(4):41-47,99.
- [19] 陈永亮,李淑兰,胡桃楸、落叶松纯林及其混交林下叶凋落物分解与养分归还的比较研究[J].林业科技, 2004,29(5):9-12.
- [20] 林波,刘庆,吴彦,等.森林凋落物研究进展[J].生态学杂志,2004,23(1):60-64.
- [21] 任来阳,于澎涛,刘霞,等.重庆酸雨区马尾松与木荷的叶凋落物分解特征[J].生态环境学报,2013,22(2): 246-250.
- [22] 杨细明.马尾松人工林凋落物分解及养分释放规律[J].福建林学院学报,2002,22(1):86-89.
- [23] 李海涛,于贵瑞,李家永,等.亚热带红壤丘陵区 4 种人工林凋落物分解动态及养分释放[J].生态学报,2007, 27(3):898-908.
- [24] 田大伦,宁晓波.不同龄组马尾松林凋落物量及养分归还量研究[J].中南林学院学报,1995,15(2):163-169.
- [25] 孟磊,章家恩,徐华勤,等.模拟酸雨对广东赤红壤的中小型动物群落组成及多样性的影响[J].生态学杂志, 2010,29(1):2204-2209.