

小五台山地区主要林分枯落物分布特征及水源涵养能力

侍柳彤¹，史常青¹，杜晨曦²，杨建英¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.淮河水利委员会淮河流域水土保持监测中心站,安徽 蚌埠 233000)

摘要：为评估小五台山地区主要林分的水源涵养能力，同时为筛选水源涵养树种提供新思路，通过浸泡法和模拟降雨法，对小五台山地区 7 种典型林分枯落物分布特征及水源涵养能力进行研究。结果表明：(1)林分枯落物覆盖面积和厚度均表现为阔叶林大于针阔叶混交林、针叶林，其最大分别为青杨纯林和蒙古栎纯林，且厚度表现出坡下大于坡上的特征；(2)枯落物蓄积量为油松纯林>青杨纯林>油松×蒙古栎混交林>白桦纯林>粉桦×云杉混交林>蒙古栎纯林>椴树纯林，其中半分解层大于未分解层；(3)枯落物吸持能力表现为半分解层[(0.82±0.23) mm]大于未分解层[(0.39±0.13) mm]，且针阔叶混交林和大部分阔叶林大于针叶林，其中青杨纯林的最大，最大持水量、有效拦蓄量和最终吸持量分别为 1.69, 1.37, 0.41 mm；(4)所有林分枯落物持水率均表现为浸泡法大于模拟降雨法，只采用传统的浸泡法会导致研究结果偏大。各林分枯落物水源涵养能力表现为阔叶林和针阔混交林优于针叶林，其中青杨纯林和白桦纯林水源涵养能力最强，在今后水源涵养林的树种筛选中可考虑多选择青杨和白桦等阔叶树。

关键词：小五台山；枯落物；分布特征；蓄积量；吸持能力

中图分类号：S727.21 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)05-0195-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.025

Distribution Characteristics and Water Conservation Capacity of Litter in Main Forests of Xiaowutai Mountain

SHI Liutong¹, SHI Changqing¹, DU Chenxi², YANG Jianying¹

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Huaihe River Basin Soil and Water Conservation Monitoring Center of Huaihe River Water Conservancy Commission, Bengbu, Anhui 233000)

Abstract: In order to evaluate the water conservation capacity of main forests in Xiaowutai Mountains and provide a new idea for the selection of water conservation tree species, the distribution characteristics and water conservation capacity of litter of seven typical forests in Xiaowutai Mountains were studied by immersion method and simulated rainfall method. The results showed that: (1) The litter thickness and distribution range of broad-leaved forests were greater than those of coniferous and broad-leaved mixed forests and coniferous forests, which were the greatest in pure forest of *Populus cathayana* Rehd. and pure forest of *Quercus mongolica* Fischer ex Ledebour, respectively, and the thickness on lower slope were greater than that on upper slope. (2) Litter accumulation followed the order of pure forest of *Pinus tabulaeformis* Carrière > pure forest of *P. cathayana* Rehd. > mixed forest of *P. tabulaeformis* Carrière and *Q. mongolica* Fischer ex Ledebour > pure forest of *B. platyphylla* Suk. > mixed forest of *B. platyphylla* Suk. and *Picea asperata* Masters > pure forest of *Q. mongolica* Fischer ex Ledebour > pure forest of *Tiliatuan* Szyszyłowicz, and the litter accumulation of the semi-decomposed layer was larger than that of the undecomposed layer. (3) The litter holding capacity of the semi-decomposed layer [(0.82±0.23) mm] was larger than that of the undecomposed layer [(0.39±0.13) mm], and the litter holding capacity of coniferous and broad-leaved mixed forests and mostly broad-leaved forests was greater than that of coniferous forests. Among them, the maximum water holding capacity, effective storage capacity and the final holding capacity of litter of pure forest *P. cathayana* Rehd. of were the greatest, which was 1.69, 1.37 and 0.41 mm, respectively. (4) The water holding capacity of litter in all forests was higher in immersion method than that in rainfall simulation method, so

收稿日期:2022-02-17
资助项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07110001)
第一作者:侍柳彤(1997—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:shiliutong@163.com
通信作者:史常青(1969—),男,博士,副教授,主要从事水土保持及林业生态工程研究。E-mail:scqbj@126.com

if only using the traditional soaking method, the results would be too large. The water conservation capacity of litter in broad-leaved forest, coniferous and broad-leaved mixed forest was better than that in coniferous forest, among which the water conservation capacity of pure forest of *P. cathayana* Rehd. and pure forest of *B. platyphylla* Suk. both were the strongest. More broad-leaved trees such as *P. cathayana* Rehd. and *B. platyphylla* Suk. should be selected in the selection of tree species for water conservation forest in the future.

Keywords: Xiaowutai Mountain; litter; distribution characteristics; storage volume; holding capacity

水源涵养指森林各结构层次在水文过程中与水的相互作用,即拦蓄降水、调节径流、补充地下水、改善水质等功能^[1-3],是森林生态系统的重要生态功能之一,包括林冠层截留、枯落物层持水以及土壤层蓄水 3 个部分^[4-6]。其中枯落物层作为森林水源涵养的主体^[3,7],降水截留率最高可达到 25.0%,对降水和径流的吸持量可达到自身干质量的 2~4 倍^[8],在森林水源涵养过程中吸持降水、分散滞缓地表径流、增加水分入渗、减少土壤侵蚀、抑制土壤水分蒸发等方面都发挥了重要的作用^[9-11]。目前有关枯落物的研究^[7,12]中主要是对枯落物蓄积量、分解情况和降水吸持能力等方面的研究,同时主要从最大持水量、有效拦蓄量、持水率、持水速率等方面对其吸持能力进行评价。以往研究^[8,13]发现,枯落物分布主要受林分类型、林龄及林分密度影响,枯落物吸持能力主要受蓄积量、厚度、树种类型、叶片形态、分解程度、降雨强度等因素影响。研究林地枯落物的分布特征及吸持能力,对合理利用森林资源进行保持水土、涵养水源、改善水质等方面都有着重要的意义。

降水落到森林地表时,一部分被枯落物层吸持、拦蓄,一部分渗入土壤,一部分水分蒸发,因此枯落物长期浸在水中充分浸泡的情况基本不会存在,下层的枯落物也无法达到水分充分饱和^[4,8]。以往对枯落物吸持作用的研究中大多采用的浸泡法,得到的数据更多作为吸持能力理论值即最大吸持潜力,通常较实际吸持量偏大,只能在一定程度上反映枯落物对降雨的吸持能力,并不能客观描述枯落物层在实际降雨情况下的吸持过程及次降雨的实际吸持量^[7,14-15]。模拟降雨法更加接近自然条件,更能真实地反映枯落物的吸持能力^[6,16]。为更好地反映小五台山地区典型林分枯落物的水源涵养能力,本研究采用浸泡和模拟降雨 2 种方法对不同林分枯落物水源涵养能力进行研究。

小五台山自然保护区位于永定河中上游,林分面积为 10 534 hm²,森林覆被率为 75.4%,多年来一直是永定河的重要水源地,为京津及其周围提供了丰富的优质水源。该区域的水源涵养林可以调节永定河流域的径流变化^[17],影响着周边水资源和水环境,在保护永定河水系和水源方面具体重要意义。本研究以小五台山 7 种典型林分为研究对象,对各林分枯落

物分布特征及水源涵养能力进行研究,以期为评估永定河上游区域水源涵养能力及其对水生态的影响提供基础支撑,同时为该区域今后水源涵养林的配置及经营改造提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的试验地设在河北省张家口市蔚县的小五台山国家级自然保护区(39°50'41"—40°06'30"N, 114°47'80"—115°28'56"E)。研究区属于永定河流域,主要为中、亚高山地貌类型,海拔在 2 600 m 以上。该区域属于典型的华北土石山区,以山地棕壤、栗钙土、褐土亚高山草甸土等土壤类型为主,处于暖温带半湿润地区,气候类型为北温带季风气候,温差大、多大风、降水多集中夏季。年降水量 381~420 mm,年平均气温 6.4℃,无霜期 135~140 天,平均日照时间 2 875 h。其植物种类繁多,主要有青杨林(*Populus cathayana* Rehd.)、白桦林(*Betula platyphylla* Suk.)、蒙古栎林(*Quercus mongolica* Fischer ex Ledebour)、油松林(*Pinus tabulaeformis* Carrière)、落叶松林(*Larix gmelinii* (Ruprecht) Kuzeneva)、椴树林(*Tilia tuan* Szyszyłowicz)、云杉林(*Picea asperata* Masters)、粉桦林(*Betula platyphylla* Suk.)、油松×蒙古栎混交林、粉桦×云杉混交林等林分^[18],以及绣线菊(*Spiraea salicifolia* L.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decaisne.)、毛榛(*Corylus mandshurica* Maxim.)等灌草植被。

1.2 试验设计

本研究于 2019 年 8—9 月进行,在小五台山自然保护区的无人干扰地段,保证立地条件一致的情况下,选取油松纯林、青杨纯林、白桦纯林、椴树纯林、蒙古栎纯林、油松×蒙古栎混交林、粉桦×云杉混交林 7 个林分样地(表 1),每个样地设置 1 个 20 m×20 m 的样方。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 枯落物分布调查 综合考虑胸径、树高及冠幅得到每个样地的标准木,并选取 3 株标准木。在标准木冠幅投影下,以树干为起点分别在东、南、西、北、东北、东南、西北、西南 8 个方位上每隔 0.3 m 设置 1 个点,一直延伸到树冠投影边缘,测定各点未分解层、

半分解层枯落物的厚度。同时记录清楚哪些方位属于坡上,相对应的方位即为坡下。

表 1 样地基本信息

林分类型 (龄组)	编号	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	郁闭度/ %	林龄/ a	平均 树高/m	平均 胸径/cm	混交比
油松纯林(成熟林)	PtC	1250	阴坡	28	96	43	10.1	19.69	
青杨纯林(过熟林)	PL	1290	阳坡	30	90	34	13.1	20.34	
白桦纯林(过熟林)	BI	1280	/	0	84	31	11.9	18.20	
椴树纯林(成熟林)	TtS	810	半阳坡	27	86	29	14.1	12.2	
蒙古栎纯林(中龄林)	OmF	820	阳坡	33	93	27	14.93	10.8	
油松×蒙古栎混交林	PtC×OmF	690	半阴坡	31	92	25	蒙古栎 19.6,油松 10.8	蒙古栎 38.59,油松 21.61	1:1
粉桦×云杉混交林	BpS×PaM	1960	阴坡	35	81	29	粉桦 8.3,云杉 6.8	粉桦 13.88,云杉 10.41	5:1

1.3.2 枯落物蓄积量计算 每个样地选取 1 株标准木,在下方设置 3 个 1 m×1 m 的枯落物样方,并按未分解层和半分解层对枯落物进行分层收集,称量湿重后,在 65 ℃下烘干并称其干重,通过单位面积干重换算得到蓄积量。

1.3.3 枯落物吸持能力测定 本研究分别运用浸泡法和模拟降雨法,对枯落物吸持能力进行测定。

(1)浸泡法:称取一定数量的枯落物浸泡于水中,分别于浸泡后的 0.25,0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 对枯落物进行称重,每次取出时静置至枯落物不滴水时称重,重复 3 次。所有林分枯落物浸泡 24 h 后持水量达到饱和为最大持水量。枯落物的自然含水率、最大持水量、最大持水率、有效拦蓄量、有效拦蓄率的计算公式^[4]为:

$$R_m = \frac{W_{24} - W_0}{W_0} \times 100\%$$
 (1)

$$R_{av} = 0.85 R_m - R_0$$
 (2)

$$W_m = 0.1 R_m M$$
 (3)

$$W_{av} = 0.1 R_{av} M$$
 (4)

式中: R_m 为最大持水率(%); W_{24} 为浸泡 24 h 时的枯落物湿重(g); W_0 为枯落物干重(g); R_{av} 为有效拦蓄率(%); R_0 为自然含水率(%); W_m 为最大持水量(mm); M 为枯落物蓄积量(g/m²); W_{av} 为有效拦蓄量(mm)。

(2)模拟降雨法:根据野外真实状况将风干后的半分解、未分解枯落物依次均匀铺在 1.0 m×1.0 m×0.2 m 网筛上,铺后稍微压实以接近自然状态下的紧实度。网筛放置于坡度为 30°的铁架上,顶部设置模拟降雨器进行模拟降雨(通过控制喷头阀门来控制雨强),底部采用集雨布和集流桶收集出流量。根据对张家口市东南部降水量日变化特征的分析^[19],设置 15, 20,25 mm/h 3 个雨强,模拟降雨历时均为 1 h。每隔 5 min 测定 1 次枯落物停止滴水时集流桶收集的出流量,重复 3 次,降雨量减去出流量可得枯落物的吸持量。所有林分 1 h 后吸持量达到饱和记为最终吸持量,枯落物

的最终吸持量和吸持速率的公式为:

$$R = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100\%$$
 (5)

$$W_m = 0.1RM$$
 (6)

式中: R 为吸持率(%); W_1 为降雨 1 h 时的枯落物湿重(g); W_0 为枯落物干重(g); W_m 为最终吸持量(mm); M 为枯落物蓄积量(g/m²)。

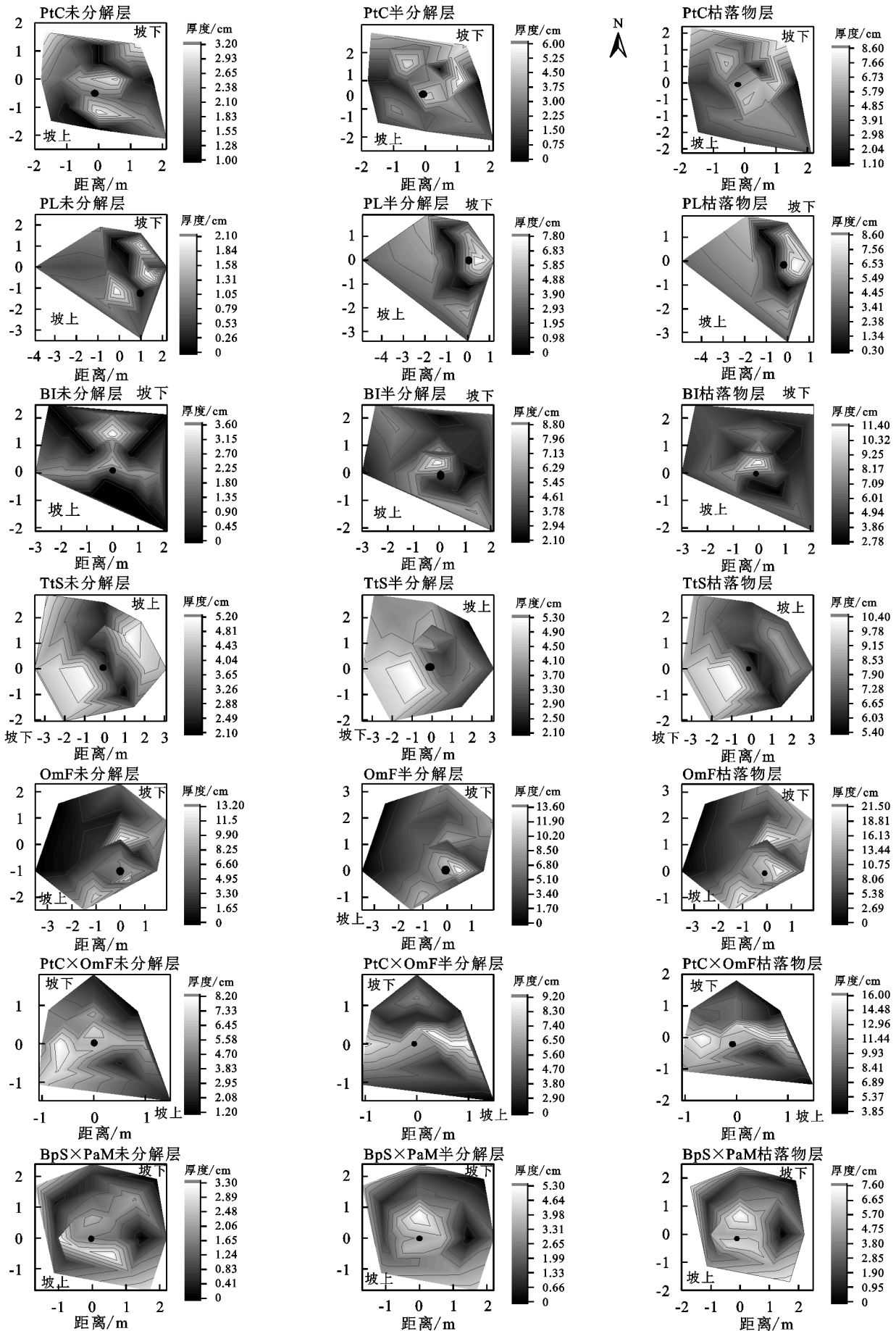
1.4 数据处理

运用 SPSS 26.0 软件对实地调查与试验所得数据进行分析并结合 Origin 7.0 软件作图。在 SPSS 26.0 软件中对各林分各分解层的厚度和蓄积量 Duncan 多重分析,并用 Origin 7.0 软件绘制枯落物厚度分布图和持水动态曲线。

2 结果与分析

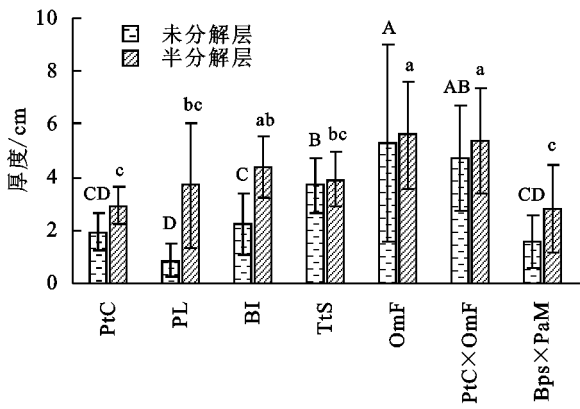
2.1 枯落物分布特征

由图 1 可知,树冠投影下的枯落物覆盖面积和厚度表现为阔叶林大于针阔叶混交林和针叶林,其厚度均值分别为(7.41±4.43),(7.23±4.19),(4.75±2.01)cm,面积均值分别为(21.95±2.78),(10.54±4.13),(13.75±1.62)m²。由于地形的影响,其厚度表现为坡下>坡上,且半分解层枯落物不同坡位的厚度差异更大,其中阔叶林坡上厚度为(6.65±4.22) cm,坡下厚度为(8.70±4.65) cm;针阔叶混交林坡上厚度为(6.86±4.22) cm,坡下厚度为(7.23±4.27) cm;针叶林坡上厚度为(4.42±1.36) cm,坡下厚度为(5.16±2.18) cm。7 种林分树冠投影下的枯落物覆盖面积为 6.40~26.65 m²,相对顺序是青杨纯林>白桦纯林>椴树纯林>蒙古栎纯林>粉桦×云杉混交林>油松纯林>油松×蒙古栎混交林。各林分枯落物厚度为 4.75~11.09 cm,表现为蒙古栎纯林>油松×蒙古栎混交林>椴树纯林>白桦纯林>油松纯林>青杨纯林>粉桦×云杉混交林(图 2)。其中蒙古栎纯林和油松×蒙古栎混交林未分解层和半分解层的厚度都显著大于油松纯林、粉桦×云杉混交林。



注:图中圆圈处为样地标准木所在地,轴线为到标准木中心的距离(cm)。

图 1 各林分枯落物分布



注:图柱上方不同大小写字母表示不同林分未分解层和半分解层间差异显著($p<0.05$), $n=168$ 。下同。

图 2 各林分枯落物厚度

2.2 枯落物蓄积量

由图 3 可知,枯落物蓄积量表现为针叶林 $[(545 \pm 163.01) \text{ g/m}^2]$ 大于针阔叶混交林 $[(295 \pm 34.73) \text{ g/m}^2]$ 和阔叶林 $[(241.25 \pm 90.88) \text{ g/m}^2]$,且半分解层大于未分解层,其占比分别为 59.78%~71.93%和 28.07%~40.22%。各林分枯落物蓄积量为 142~545 g/m^2 ,相对顺序为油松纯林>青杨纯林>油松×蒙古栎混交林>白桦纯林>粉桦×云杉混交林>蒙古栎纯林>椴树纯林。枯落物蓄积量受树木种类及数量的影响,如油松纯林枯落物蓄积量最大(545 g/m^2)约为其他林分的 1.44~3.83 倍,因为针叶树的叶片脂质含量较高,且叶纤维发达木质素含量高,不易分解,故针叶林枯落物蓄积量高于阔叶林和针阔叶混交林^[20-21]。青杨纯林由于叶片大且每年落叶多枯落物分布范围大,所以蓄积量也相对较高。椴树纯林叶片小且薄,故蓄积量最小。

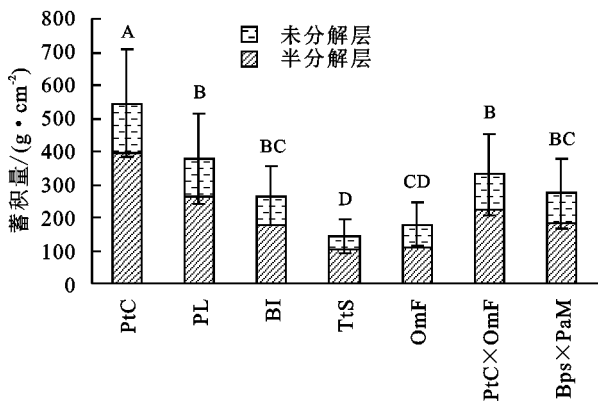


图 3 各林分各层枯落物蓄积量

2.3 枯落物吸持能力

2.3.1 基于浸泡法的枯落物吸持能力 所测定的 7 种林分枯落物最大持水量和有效拦蓄量变化分别为 0.69~1.69,0.56~1.37 mm,其均值为 (1.21 ± 0.32) , (0.96 ± 0.25) mm。不同树种枯落物持水率呈现出阔叶林 $(489.6\% \pm 13.4\%)$ 和针阔混交林 $(396.0\% \pm 26.2\%)$ 大于针叶林 $(269.8\% \pm 4.9\%)$,且持水量表现为半分解层 $[(0.82 \pm 0.23) \text{ mm}]$ 大于未分解层 $[(0.39 \pm$

0.13) mm]。枯落物最大持水率和有效拦蓄率表现为椴树纯林>白桦纯林>蒙古栎林>青杨纯林>粉桦×云杉混交林>油松×蒙古栎混交林>油松纯林(表 2)。其中最大持水率和有效拦水率最大的树种为椴树纯林,分别为 501.6%和 409.7%,最小的为油松纯林,分别为 269.8%和 208.5%。7 个树种持水能力的相对顺序为青杨纯林>白桦纯林>油松×蒙古栎混交林>粉桦×云杉混交林>油松纯林>蒙古栎林>椴树纯林,其枯落物持水能力最强的树种为青杨纯林,最大持水量为 1.69 mm,有效拦蓄量为 1.37 mm。

为消除枯落物蓄积量的影响,本研究对单位质量枯落物的吸持能力进行分析。所有林分枯落物的吸持量和吸持速率随浸泡时间的变化趋势都基本一致(图 4),浸泡初期吸持速率最高,吸持量增加迅速,前 1 h 内枯落物已基本达到最大吸持量的 90.0%,之后增幅逐渐平缓,8 h 后基本趋于稳定,24 h 已达到饱和。各林分枯落物吸持速率和吸持量在前期表现为:半分解层>未分解层,阔叶林、针阔混交林>针叶林,后期相差不大。7 种林分枯落物吸持能力表现为油松纯林吸持能力最小(0.53 mm),其余树种吸持能力相差不大,均为油松纯林的 1.5~1.6 倍。

2.3.2 基于模拟降雨法枯落物吸持能力 所有林分枯落物对于降雨的吸持过程基本一致,可分为快速湿润和稳定增长 2 个阶段(图 5)。快速湿润阶段,枯落物吸持量可达到最终吸持量的 80%左右,且历时随着雨强的增加而缩短。由于雨强、降雨历时、枯落物量等因素的差异,各阶段持续时长也存在差异。如椴树纯林质量较小,其快速湿润持续了 20 min,而白桦纯林、青杨纯林持续了 25 min。7 种林分的最终吸持量总体表现为阔叶林 $[(0.37 \pm 0.08) \text{ mm}]$ >针阔叶混交林 $[(0.35 \pm 0.07) \text{ mm}]$ >针叶林 $[(0.32 \pm 0.06) \text{ mm}]$,具体表现为青杨纯林>粉桦×云杉混交林>白桦纯林>椴树纯林>蒙古栎纯林>油松纯林>油松×蒙古栎混交林,其中最大的为青杨纯林 $[(0.41 \pm 0.08) \text{ mm}]$ 。

2.3.3 浸泡法和模拟降雨法的比较 分析发现,2 种方法枯落物吸持水分的过程是基本一致,均为由快速增长到缓慢增长,直到逐渐趋于饱和。为了将 2 种方法得到结果进行对比,选择 2 种方法枯落物在 1 h 时的吸持率进行对比研究。浸泡法枯落物吸持率显著大于模拟降雨法(表 3),且雨强越大差距越小,模拟降雨 3 种雨强下得到吸持率分别为 48.8%~230.4%,79.7%~225.2%,82.3%~325.7%,而浸泡试验的持水率则达到 236.1%~443.0%。这是因为在模拟降雨以及自然界真实降雨的情况下,降雨因受到风力、水汽等因素,并非均匀地落在枯落物上;且枯落物是经过长期积累风化的,下层的枯落物无法达到浸泡试验中枯落物水分充分饱和的条件。

表 2 各林分枯落物持蓄能力

林分 类型	最大持水量/mm		最大持水率/%		有效拦蓄量/mm		有效拦蓄率/%	
	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层	未分解层	半分解层
油松纯林	0.40±0.01c	1.09±0.09a	261.3±3.8c	278.3±22.9c	0.31±0.01c	0.83±0.08a	205.5±3.3c	211.5±19.5c
青杨纯林	0.61±0.01a	1.08±0.03a	524.3±12.2b	413.5±10.1b	0.50±0.01a	0.86±0.02a	431.5±10.4a	330.7±8.6b
白桦纯林	0.47±0.01b	0.84±0.03b	527.1±13.8ab	475.0±18.0a	0.39±0.01b	0.67±0.03b	430.0±11.8a	379.9±15.3a
椴树纯林	0.22±0.02e	0.47±0.01d	541.5±36.2a	461.7±3.9a	0.18±0.01e	0.38±0.01d	446.9±30.7a	372.5±3.3a
蒙古栎纯林	0.36±0.01d	0.51±0.02d	390.5±12.8ab	494.4±18.8a	0.28±0.01d	0.40±0.02d	393.9±10.9b	373.3±16.0a
油松×蒙古栎混交林	0.22±0.01e	1.02±0.07a	206.6±7.9d	456.0±31.1a	0.17±0.01e	0.83±0.06a	166.6±6.7d	370.0±26.4a
粉桦×云杉混交林	0.46±0.01b	0.73±0.01c	525.6±13.2ab	395.6±6.0b	0.32±0.01c	0.57±0.01c	425.4±11.2a	305.9±5.1b

注:同列不同小写字母表示不同林分枯落物持蓄能力差异显著($p<0.05$), $n=21$ 。

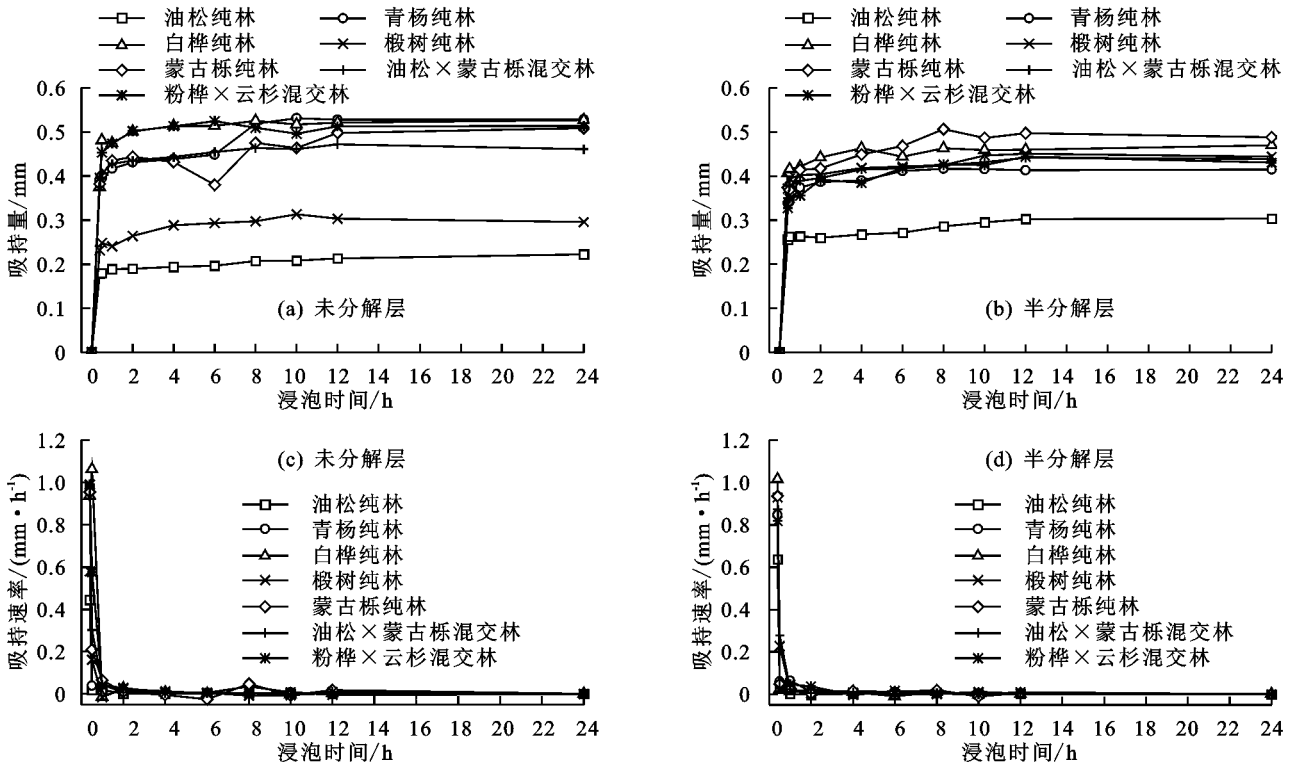


图 4 各林分单位质量枯落物吸持量及吸持速率随浸泡时长的动态变化

3 讨论

枯落物层作为森林生态系统的第 2 个功能层,在森林水源涵养过程中发挥着最重要的作用^[8,15]。其覆盖于森林地表,避免了降水和地上径流与土壤的直接接触,起到了拦蓄降水的作用,很大程度上减少了雨滴动能,分散延缓了地表径流,减少了土壤侵蚀,平均能够削减 9.1% 的大气降水总动能^[5,22-24]。同时枯落物结构疏松多孔,吸持能力强,且分解后能够改良土壤理化性质,增加水分入渗,抑制土壤水分蒸发^[4,9-10]。已有研究^[3]发现,枯落物与土壤相互作用下的对降水的吸持量可达到占整个森林生态系统水源涵养总量的 80.0% 以上。

枯落物分布范围及厚度不仅受林分类型、林龄、密度等因素的影响,同时还受地形、坡面位置以及自身堆积情况的影响^[4,14,22]。本研究中枯落物覆盖面积和厚度阔叶林大于针阔叶混交林和针叶林的特征,主要是由于阔叶树叶片大、落叶多,针叶树叶片小落叶量少。本研究发现,所有林分枯落物分布范围及厚

度均沿坡面表现出较强的差异性,具体为坡下大于坡上。因为研究地坡度较陡,在长期的主要风向、降雨过程中地表径流的冲刷、泥沙运移以及自身自重的作用下,枯落物发生位移堆积在坡下^[25]。且由于地形因素的影响地表含水量存在差异,坡下土壤水分及有机质含量相对较多,更有利于促进枯落物的分解,导致半分解层枯落物坡上坡下的厚度差异更大^[26]。同时如果枯落物蓄积量较大,风吹、径流泥沙冲刷运移过程中的阻力更大,所以上下坡的差异性较小;枯落物蓄积量较小则阻力小,在风力、径流及泥沙的长期搬离、运移、堆积后枯落物厚度区别会较大。以往关于不同坡位下枯落物分布特征的相关研究较少,但也有研究^[11,27-28]发现,枯落物厚度、蓄积量、盖度及混入量沿坡面分布有显著差异性,同样表现为坡下大于坡上。当坡度较陡时,坡位的不同会造成枯落物分布不均,从而影响其对减缓坡面径流的缓冲作用,坡上枯落物分布的减少会造成其水源涵养功能下降,而坡下林分的水源涵养功能会相对更好。

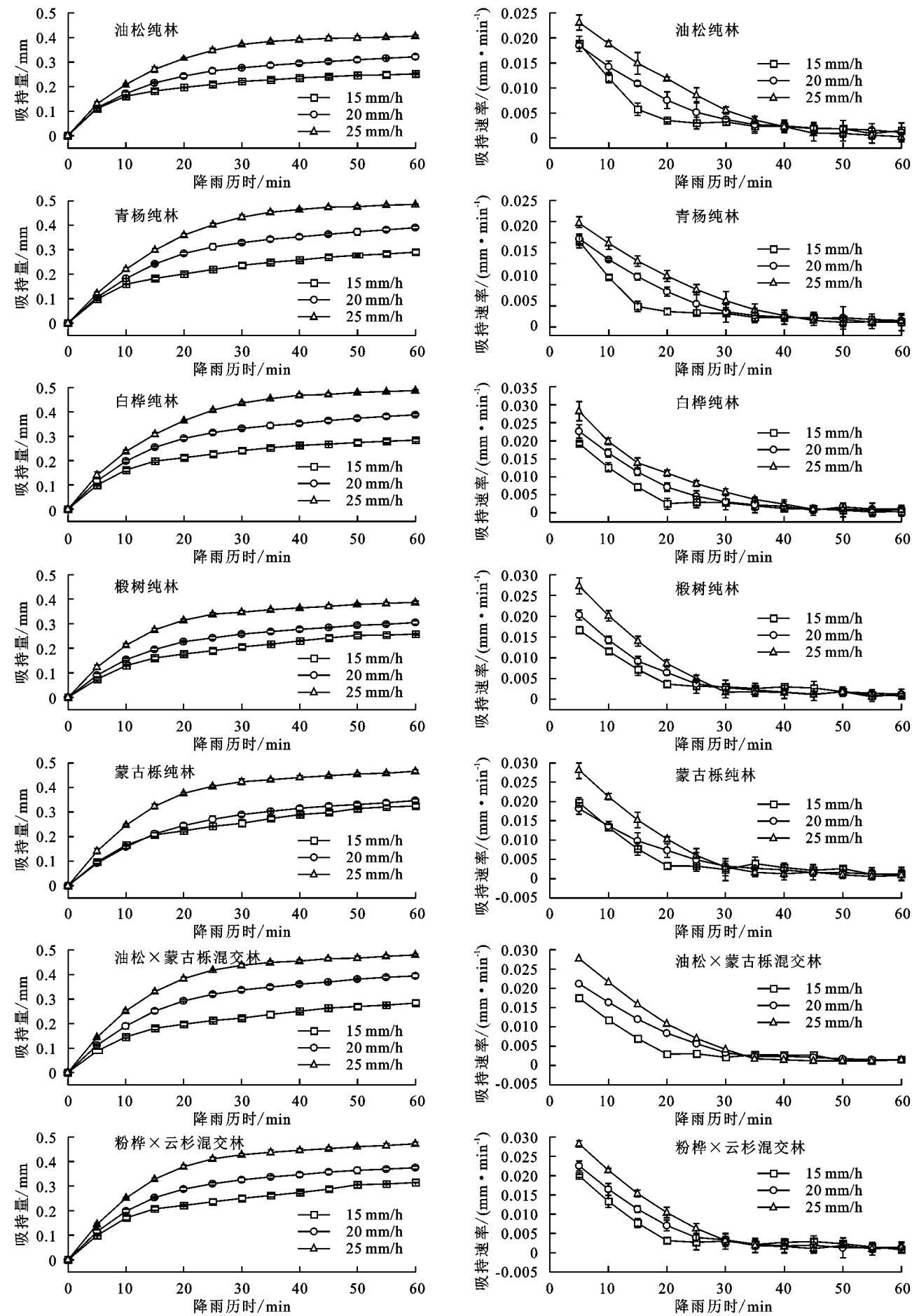


图5 不同雨强下各林分枯落物吸持量及吸持速率随降雨历时的动态变化

枯落物吸持率受到林分类型、叶片本身的形态及分解程度等因素的影响。本研究中吸持量表现为半分解层大于未分解层,这是由于半分解层的枯落物已进入分解状态,部分枯落物已经转化为腐殖质,同时存在少量的动物残体,故其吸持能力更强。且半分解层蓄积量较未分解层更大,故其吸持量也更大,与已有研究^[7-8]结果一致。本研究中,2 种方法枯落物对降水的吸持率均表现为阔叶林大于针叶林,与杨霞等^[8]的研究结果一致。

这是由于阔叶林枯落物叶片面积较大增加了与雨水的接触空间,且其叶片表面有毛状体吸附力较大,可以有效滞留水滴,还有一些阔叶林叶片卷曲形态也更加有利于雨水聚集。而针叶林的枯落物表面

油脂较多不易储存水分,且针叶状的残体形态,导致其枯落物堆积排布并没有阔叶林密实,孔隙度较大,故相对于其他林分吸持过程中下渗流失至地表的水分较多。对于雨强大、历时短的降雨,阔叶林对降水的吸持作用更好,因为其吸持率显著高于针叶林。与前人^[8]研究阔叶林持水量大于针叶林的结论有出入,可能是因为本研究中浸泡法下蒙古栎纯林、椴树纯林最大持水量小于油松纯林,模拟降雨法下油松×蒙古栎混交林最终吸持量小于油松纯林。枯落物蓄积量是引起上述现象的主要原因,枯落物吸持量主要取决于吸持能力及蓄积量,一般蓄积量越高,枯落物持水能力越强^[13],油松纯林的蓄积量远高于蒙古栎纯林和椴树纯林。

表 3 2 种试验方法枯落物吸持率的对比

林分类型	浸泡法 吸持率/%	15 mm/h 雨强 吸持率/%	20 mm/h 雨强 吸持率/%	25 mm/h 雨强 吸持率/%
油松纯林	236.1±11.2a	48.78±0.566c	79.72±1.744b	82.32±0.762b
青杨纯林	385.2±1.7a	79.23±2.670d	113.56±1.679c	128.88±0.703b
白桦纯林	443.0±7.4a	106.63±2.456d	142.01±1.904c	174.34±1.130b
椴树纯林	424.6±15.5a	230.42±1.843c	225.28±4.34c	325.681±3.804b
蒙古栎纯林	413.2±2.7a	161.92±4.777d	217.49±3.793c	257.11±3.695b
油松×蒙古栎混交林	332.5±8.9a	84.94±3.064d	117.49±2.444c	153.33±1.034b
粉桦×云杉混交林	395.0±6.63a	121.16±0.11d	158.90±2.226c	176.60±2.543b

注:表中同列不同小写字母表示不同林分枯落物吸持率差异显著($p<0.05$), $n=21$ 。

4 结 论

(1)各林分枯落物的覆盖面积和厚度均表现为阔叶林大于针阔叶混交林和针叶林,且厚度表现出坡下大于坡上的特征。

(2)浸泡法和模拟降雨法下小五台山地区林分枯落物水源涵养能力总体均表现为阔叶林和针阔混交林优于针叶林,其中青杨纯林和白桦纯林枯落物水源涵养能力最强。在今后水源涵养林的树种筛选中可考虑多选择青杨和白桦等阔叶树,以提高其水源涵养能力。

(3)所有林分枯落物吸持率均表现为浸泡法大于模拟降雨法,且雨强越大差距越小,只采用传统的浸泡法进行研究可能会导致研究结果较实际情况偏大,应结合模拟降雨法进行研究。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 赵娜,王俊博,李少宁,等.北京松山 4 种典型林分枯落物持水特征研究[J].生态环境学报,2021,30(6):1139-1147.

[4] 韩春,陈宁,孙杉,等.森林生态系统水文调节功能及机制研究进展[J].生态学杂志,2019,38(7):2191-2199.

[5] 孙向阳,王根绪,吴勇,等.川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应[J].生态学报,2013,33(2):501-508.

[6] Li X, Niu J Z, Xie B Y. Study on hydrological functions of litter layers in North China[J]. PLoS One, 2013, 8(7):1-11.

[7] 刘小娥,苏世平.兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能[J].应用生态学报,2020,31(8):2574-2582.

[8] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.

[9] Cai D, Yang X H, Wang S Z, et al. Effects of dissolved organic matter derived from forest leaf litter on biodegradation of phenanthrene in aqueous phase [J]. Journal of Hazardous Materials,2017,324(B):516-525.

[10] Adolfo C C, Lourdes C H, Sandra R O. Mass, nutrient pool, and mineralization of litter and fine roots in a tropical mountain cloud forest [J].Science of the Total Environment,2017,575(1):876-886.

[11] 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):2020-2031.

[12] Zheng X L, Chen L H, Gong W Y, et al. Evaluation

of the water conservation function of different forest types in northeastern China [J].Sustainability,2019,11(15):4075.

[13] 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.

[14] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301,308.

[15] 丁霞,程昌锦,漆良华,等.丹江口库区湖北水源区不同密度马尾松人工林水源涵养能力[J].生态学杂志,2019,38(8):2291-2301.

[16] 牛勇,刘洪禄,张志强.北京地区典型树种及非生物因子对枯落物水文效应的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):183-189.

[17] 尤海舟,毕君,蔡蕾,等.小五台山不同林分类型林地水文效应及涵养水源生态功能价值估算[J].中国农学通报,2013,29(13):60-65.

[18] 杜晨曦,史常青,杨建英,等.小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J].水土保持学报,2021,35(3):236-243.

[19] 韩函,吴昊旻,黄安宁.华北地区夏季降水日变化的时空分布特征[J].大气科学,2017,41(2):263-274.

[20] 许小明,邹亚东,孙景梅,等.黄土高原北洛河流域林地枯落物特征及水分吸持效应[J].生态学报,2021,41(13):5153-5165.

[21] 郝弯弯,赵鹏,李思维,等.御道口牧场不同类型防护林的枯落物水文效应[J].水土保持学报,2019,33(6):197-204.

[22] 韦小茶,周秋文,崔兴芬,等.喀斯特针叶林枯落物层水文效应[J].生态科学,2017,36(4):120-127.

[23] Burrows C R, Appold M S. Hydrology of the forest city basin, Mid-Continent, USA: Implications for CO₂ sequestration in the St. Peter Sandstone [J].Environmental Earth Sciences,2015,73(4):1409-1425.

[24] 公博,师忱,何会宾,等.冀北山区 6 种人工林的林地水源涵养能力[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):165-170.

[25] 栾莉莉,张光辉,孙龙,等.黄土高原区典型植被枯落物蓄积量空间变化特征[J].中国水土保持科学,2015,13(6):48-53.

[26] 邵臻,张富,陈瑾,等.陇中黄土丘陵沟壑区不同土地利用下土壤水分变化分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(12):129-135.

[27] 汪建芳,王兵,王忠禹,等.黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J].水土保持学报,2018,32(4):139-144.

[28] 张缓,穆兴民,高鹏.黄土高原不同立地条件下枯落物蓄积量及持水特征[J].水土保持研究,2021,28(3):45-52.

(上接第 194 页)

[30] Pei Y Y, Dong J W, Zhang Y, et al. Performance of four state-of-the-art GPP products (VPM, MOD17, BESS and PML) for grasslands in drought years [J].Ecological Informatics,2020,56:e101052.

[31] Bai P, Liu X M. Intercomparison and evaluation of three global high-resolution evapotranspiration products across China [J].Journal of Hydrology,2018,566:743-755.

[32] Zan M, Zhou Y L, Ju W M, et al. Performance of a two-leaf light use efficiency model for mapping gross primary productivity against remotely sensed sun-induced chlorophyll fluorescence data [J].Science of the Total Environment,2018,613:977-989.

[33] 张方敏,居为民,陈镜明,等.基于遥感和过程模型的亚洲东部陆地生态系统初级生产力分布特征[J].应用生态学报,2012,23(2):307-318.

[34] 仇宽彪.中国植被总初级生产力,蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D].北京:北京林业大学,2015.

[35] 周蕾,王绍强,陈镜明,等.1991 年至 2000 年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征[J].资源科学,2009,31(6):962-972.

[36] 郭瑞萍,莫兴国.森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异[J].应用生态学报,2007,18(8):1751-1757.

[37] 蒋冲,王飞,穆兴民,等.气候变化对渭河流域自然植被净初级生产力的影响研究(Ⅱ):渭河流域自然植被净初级生产力的研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):53-57.

[38] Law B, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation [J].Agricultural and Forest Meteorology,2002,113(1/4):97-120.

[39] 冯丽丽.北半球主要生态类型植被水分利用效率的变化特征及影响因子分析[D].兰州:兰州大学,2017.

[40] 刘宪锋,胡宝怡,任志远.黄土高原植被生态系统水分利用效率时空变化及驱动因素[J].中国农业科学,2018,51(2):302-314.