

东北地区主要树种未分解凋落叶水源涵养能力与叶性状的耦合关系

施宇^{1,2,3,4}, 唐慧敏^{1,2,3,4}, 宋晓倩^{1,2,3,4}, 金鹭^{1,2,3,4}, 张衷华^{1,2,3,4}, 唐中华^{1,2,3,4}

(1.东北林业大学 化学化工与资源利用学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2.东北林业大学 森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040; 3.林业生物制剂教育部工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150040; 4.黑龙江省林源活性物质生态利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: [目的] 探究东北地区 11 种主要树种未分解凋落叶性状与水源涵养能力之间的耦合关系, 剖析其持水及失水过程, 为明确该区主要树种水源涵养能力提供理论依据。[方法] 以 11 种东北地区常见树种为研究对象, 通过室内浸泡与失水试验测定未分解凋落叶持水和失水特性, 再通过游标卡尺, 扫描仪、元素分析仪等仪器及 Klason 法, 浓酸水解定糖法测定 12 种叶物理化学性状, 对叶性状与叶水源涵养能力之间的关系进行回归分析。[结果] 11 种树种未分解凋落叶的最大持水率、有效拦蓄量、失水率和失水速率存在显著差异 ($p < 0.05$), 最大持水率由大到小依次为辽椴 (*Tilia mandshurica*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、兴安落叶松 (*Larix gmelinii*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸 (*Juglans mandshurica*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、加杨 (*Populus × canadensis*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、红皮云杉 (*Picea koraiensis*), 最大持水率与比叶面积呈显著正相关, 与叶厚、叶形指数存在显著负相关关系 ($p < 0.05$); 24h 失水率由小到大依次为红皮云杉、白桦、紫椴、辽椴、红松、蒙古栎、水曲柳、加杨、樟子松、落叶松、胡桃楸, 失水速率与叶长、比叶面积、粗糙程度呈显著正相关 ($p < 0.05$)。[结论] 比叶面积是影响未分解凋落叶水源涵养能力的最主要叶性状, 其次是叶长、叶厚、叶形指数、粗糙度。辽椴、白桦和紫椴是未分解凋落叶水源涵养能力相对优异的树种。

关键词: 未分解凋落叶; 叶性状; 持水性; 失水性; 水源涵养

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)06-0046-11

中图分类号: S715.7, S715.3

文献参数: 施宇, 唐慧敏, 宋晓倩, 等. 东北地区主要树种未分解凋落叶水源涵养能力与叶性状的耦合关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(6): 46-56. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20241105.001; Shi Yu, Tang Huimin, Song Xiaoqian, et al. Coupling relationship between water conservation capacity and leaf traits of undecomposed leaf litter of major tree species in Northeast China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(6): 46-56.

Coupling Relationship Between Water Conservation Capacity and Leaf Traits of Undecomposed Leaf Litter of Major Tree Species in Northeast China

Shi Yu^{1,2,3,4}, Tang Huimin^{1,2,3,4}, Song Xiaoqian^{1,2,3,4},
Jin Lu^{1,2,3,4}, Zhang Zhonghua^{1,2,3,4}, Tang Zhonghua^{1,2,3,4}

(1.College of Chemistry, Chemical Engineering and Resource Utilization, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 2.Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 3.Engineering Research Center of Forest Bio-preparation, Ministry of Education,

收稿日期: 2024-06-11

修回日期: 2024-08-15

资助项目: 国家重点研发计划“东北森林生态功能提升技术研发及示范”(2022YFF1300502); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2021C003)

第一作者: 施宇(2000—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。Email: sy596672428@163.com。

通信作者: 张衷华(1978—), 男(汉族), 吉林省通化市人, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事植物逆境营养及代谢方面的研究。Email: en_cn@126.com。

唐中华(1977—), 男(汉族), 江苏省丹阳市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事植物资源保护与利用方面的研究。Email: tangzh@nefu.edu.cn。

Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China; 4. Heilongjiang Provincial Key

Laboratory of Ecological Utilization of Forestry-based Active Substances, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: [Objective] The coupling relationship between undecomposed leaf litter traits and water conservation ability of 11 major tree species in Northeast China was explored, and their water retention and water loss processes were analyzed, in order to provide theoretical basis for clarifying the water conservation ability of main tree species in this area. [Methods] A total of 11 common tree species in Northeast China were used as the research object. The water holding and loss characteristics of undecomposed leaves were determined by indoor immersion and water loss experiments, and the physical and chemical properties of 12 kinds of leaves were then determined by vernier calipers, scanners, elemental analyzers, Klason method, and concentrated acid hydrolysis sugar determination method. The relationship between leaf traits and leaf water conservation ability was analyzed using regression analysis. [Results] The maximum water holding capacity, effective retention capacity, water loss ratio, and water loss rate of undecomposed litter of 11 species showed significant differences ($p < 0.05$). The maximum water retention rate in descending order was *Tilia mandshurica*, *Betula platyphylla*, *Tilia amurensis*, *Larix gmelinii*, *Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica*, *Quercus mongolica*, *Populus × canadensis*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *Pinus koraiensis*, *Picea koraiensis*, and it was significantly positively correlated with the specific leaf area. In addition, there was a significant negative correlation between leaf thickness and leaf shape index ($p < 0.05$). At 24 h, the water loss rates were (from low to high) *Picea koraiensis*, *B. platyphylla*, *T. amurensis*, *T. mandshurica*, *Pinus koraiensis*, *Q. mongolica*, *F. mandshurica*, *Populus × canadensis*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, *L. gmelinii*, and *J. mandshurica*. The water loss rate was significantly positively correlated with leaf length, specific leaf area, and rough degree ($p < 0.05$). [Conclusion] Specific leaf area was the most important leaf character affecting water conservation ability of undecomposed leaf litter, followed by leaf length, leaf thickness, leaf shape index, and roughness. *T. mandshurica*, *B. platyphylla*, and *T. amurensis* are tree species showing an excellent water conservation capacity of undecomposed litter.

Keywords: undecomposed litter leaves; leaf traits; water retention; water loss; water conservation

森林是陆地上最大的蓄水库。其林冠层、凋落物层及土壤层有着拦蓄降水、净化水质和调节地表径流的作用。因此,它在水源涵养和水土保持方面提供的生态系统服务是至关重要的^[1-3]。其中,凋落物^[4]作为中间层连接着土壤和植被,它不仅能够经过分解提供植物生长所需的养分,还发挥着重要的水文调节作用^[3,5]。一方面,附于地表的凋落物既可以有效防止土壤侵蚀、抑制水分蒸发和促进水分渗入土壤,又能够在一定程度上减缓地表径流;另一方面,凋落物因其疏松的结构可对降水进行吸滞和分散,从而达到涵养水源的效果^[6-8]。凋落物由植物凋落于地面的茎、枝、叶、花、果实和种子等多个部分组成^[8]。其中,凋落叶的占比高达 49.6%~100%^[9],是凋落物中至关重要的一部分^[10]。将凋落物去除会导致地面枯枝落叶层的降水截留量下降,从而造成洪峰流量增多^[11]。而许多已有研究表明,凋落叶的物理化学特征是影响凋落叶持水能力的重要因素。目前已有的研究包括在许多不同角度上对凋落叶持水性能进行探索。例

如,研究不同树种间凋落叶的持水特性是否存在差异^[12],分析凋落叶持水性能与不同生境的关系^[13]以及探究凋落叶不同多样性混合下的持水特性等^[14-15]。

东北地区是中国乃至东北亚地区重要的生态屏障,其森林生态功能对中国生态服务功能的贡献不容小觑,这其中就包含森林的水源涵养功能。然而,其保持水土的作用往往被低估,对凋落叶初始性状与其涵养水源能力耦合关系的认识也有所欠缺。凋落物做为生态系统的重要组成部分,其蓄积量及持水能力是评价森林生态功能的重要依据和理论基础^[1,4]。目前,对森林生态系统中凋落物持水特性的研究日益增加,大多数将关注点放在不同森林类型及不同区域对其蓄积量和持水能力的影响^[15-18]。熊咏梅等^[19]将广州园林植物的凋落枝叶作为研究对象,对其持水特性进行分析,但并未涉及凋落叶物理化学特性与其持水特性的关系,且凋落叶的失水特性是径流调节的重要指标。已有研究表明凋落叶的物理化学性质与凋落叶持水性能密切相关,如比叶面积、叶片干物质含

量、叶片厚度等物理特性,凋落叶的 C、N、P 含量及其比值、木质素纤维素含量等化学特性^[20]。李素丽等^[21]在赣江中游水源涵养林乔木和蕨类植物凋落叶持水及失水特征研究中将凋落叶初始特性与持水及失水过程结合进行了分析,但在先前的相关研究中仍少有将凋落叶性状与其失水过程相结合进行分析。

为探究东北地区常见树种未分解凋落叶与其性状相结合下的持水和失水特性,本文定量分析比叶面积、叶形指数、C、N、木质素、纤维素含量等叶性状与东北地区 11 种常见树种未分解凋落叶持水、失水特性的耦合关系,剖析其持水及失水过程,为东北地区营造高效的水源涵养林时科学选择树种提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料收集

选取 11 种东北常见典型树种为研究材料^[15-17],分别为樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、加杨(*Populus × canadensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)和辽椴(*Tilia mandshurica*)。于 2023 年 10 月在黑龙江省哈尔滨市东北林业大学实验林场收集凋落叶。收集新鲜未分解、形态完整且无明显病虫害的凋落叶并将其装入自封袋中,带回实验室后立即对其上的尘土、枯枝和碎屑等进行清理。

1.2 叶特性测定

本研究选择叶长(LL)、叶宽(LW)、叶厚度(LT)、比叶面积(SLA)、叶形指数(LI)、叶片粗糙度(CC)、自然含水率(R_0)7 个物理特性、凋落叶初始 C、N、C:N、木质素、纤维素含量 5 个化学特性。

(1) 物理特性测定。每个树种分别随机选取 60 片凋落叶片,用电子游标卡尺测量 LL、LW,避开主叶脉测定 LT,每片测 3 次取平均值,并计算 LI,LI 即 LL 与 LW 的比值,它能够表示叶片的宽窄程度;CC 则通过观察叶片有无毛、毛多寡和叶片表面是否有白粉、霜、蜡质等^[22]反映。根据这一标准,本研究将叶片粗糙度分为低、中和高 3 个等级,并分别将粗糙度等级记为 0,1,2。其中低粗糙叶的特征为叶片双面无毛有白粉、霜、蜡,中粗糙叶的特征为叶片单面有毛或少许蜡质或双面稀疏柔毛,高粗糙叶的特征为叶片双面有密毛无蜡质。SLA 即叶面积(LA)与干重(LDW)的比值,LA 通过扫描仪(Epson Perfection

V19, China)将叶片扫描为图片,使用 ImageJ 软件导入图片进行计算;接着将叶片装入信封使其在鼓风干燥箱(设置为 80 °C)烘干至恒重,称量其 LDW 并记录,计算其 SLA。 R_0 为鲜重与干重之差占鲜重的比例。

(2) 化学特性测定。本研究凋落叶初始 C、N 含量使用元素分析仪(elementar vario MACRO cube, Germany)进行测定,并计算得出 C:N 比;凋落叶木质素采用 Klason 法测定;凋落叶纤维素含量采用浓酸水解定糖法测定。

1.3 凋落叶持水性指标测定

采用室内浸提法测定凋落叶持水性的指标^[17]。让凋落叶在烘箱中 80 °C 烘干至恒重,后称取 40 g 装入 0.15 mm 孔径 20 cm×30 cm 尼龙网袋中完全浸水,分别于 0.5,1,2,4,8,12,16,24 h 后取出悬挂,待其不滴水时立刻对其称重(大约 5 min)。凋落叶浸水达 24 h 后,将其取出悬挂并自然失水(室温 25 °C),分别于 0.5,1,2,4,8,12,16,24 h 后对其称重。每组试验设置 5 个重复。

$$\text{凋落叶持水率 } R_{th} = \frac{M_{th} - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{凋落叶吸水速率 } V_{th} = \frac{M_{th} - M_0}{M_0 \times th} \quad (2)$$

式中:th 为凋落叶浸泡时间(h); M_0 为烘干后凋落叶的净重(g); M_{th} 为浸泡 th 时间后凋落叶的质量(g); R_{th} 为浸泡 th 时间后凋落叶持水率(%)。

$$\text{凋落叶失水率 } R_{tl} = \frac{M_{th24} - M_{tl}}{M_{th24}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{凋落叶失水速率 } V_{tl} = \frac{M_{th24} - M_{tl}}{M_{th24} \times tl} \quad (4)$$

式中:tl 为凋落叶失水时间(h); M_{th24} 为浸泡 24 h 的凋落叶质量(g); M_{tl} 为失水 tl 时间后凋落叶的质量(g); R_{tl} 为失水 tl 时间后凋落叶失水率(%)。

最大持水量通常用浸泡 24 h 后达到饱和和持水状态的凋落物吸水量表示,贾剑波等^[23]提出在降雨量达到 20~30 mm 时,各林分内凋落物的有效截留率大约是其最大持水率的 85%,依据这一理论对凋落叶最大持水量(W_m)、最大持水率(R_{th24})、有效拦蓄量(W_{av})进行估算,计算公式为:

$$\text{最大持水量 } W_m = M_{th24} - M_0 \quad (5)$$

$$\text{最大持水率 } R_{th24} = \frac{M_{th24} - M_0}{M_0} \times 100\% \quad (6)$$

有效拦蓄量 $W_{av} = (0.85 \times R_{th24} - R_0) \times M_0$ (7)
式中: W_m 为最大持水量(g); M_{th24} 为浸泡 24 h 的凋

落叶质量(g); M_0 为凋落叶烘干后的净重(g); R_{th24} 为大持水率(%); R_0 为凋落叶自然含水率(%); W_{av} 为有效拦蓄量(g)。

1.4 数据处理

通过 Origin 2021 和 SPSS 24.0 软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著法(LSD)对其组间差异显著性进行检验,各指标的相关性采用皮尔逊相关性(Pearson)系数检验,通过 T 检验对相关系数显著性进行检验,统计学检验的显著性水平均为 $p=0.05$ 。通过对各凋落叶的持水性、失水性与时间的多元回归拟合进行统计学检验,得到其拟合度参数 R ,并在 $p<0.05$, $p<0.01$, $p<0.001$ 水平对其相关系数显著性进行检验。最大

持水率、失水速率与叶片理化性质之间的关系采用一元线性回归分析进行拟合。通过 Origin 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 凋落叶物理特征差异

表 1 为 11 个树种实测 7 个物理特征值。由表 1 可知,胡桃楸的叶长最大,是落叶松的 9.25 倍;加杨的叶宽最大,是红松的 94.99 倍;红松的叶厚最大,是白桦的 6.17 倍;红松的叶形指数最大,是加杨的 98.09 倍;胡桃楸的比叶面积最大,是红皮云杉的 6.62 倍;胡桃楸的自然含水率最大,是蒙古栎的 1.53 倍。

表 1 研究区不同树种凋落叶的叶片特征

Table 1 Leaf litter characteristics of different tree species at study area

树种	叶长 (LL)/cm	叶宽 (LW)/cm	叶厚 (LT)/mm	叶形指数 (LI)	比叶面积(SLA)/ ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	自然含水率 (R_0)/%	粗糙度 (CC)
白桦(<i>Betula platyphlla</i>)	71.57±1.76 ^d	53.71±1.55 ^d	0.12±0.00 ^e	1.34±0.13 ^d	206.82±25.16 ^b	55.58±10.70 ^d	0
蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)	148.33±6.23 ^b	79.98±4.87 ^b	0.17±0.00 ^d	1.89±0.19 ^d	152.29±20.66 ^d	44.61±11.11 ^f	0
辽椴(<i>Tilia mandshurica</i>)	87.93±4.97 ^d	83.47±4.33 ^{ab}	0.15±0.00 ^{de}	1.05±0.10 ^d	181.80±22.88 ^c	55.61±10.73 ^d	2
水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)	118.24±4.47 ^c	44.98±1.93 ^c	0.13±0.01 ^{de}	2.66±0.35 ^d	197.44±21.36 ^{bc}	65.52±11.32 ^b	1
胡桃楸(<i>Juglans mandshurica</i>)	199.98±13.79 ^a	80.21±4.74 ^b	0.13±0.00 ^{de}	2.47±0.37 ^d	364.42±88.10 ^a	68.28±11.67 ^a	2
紫椴(<i>Juglans mandshurica</i>)	77.00±1.94 ^d	63.72±1.38 ^c	0.15±0.00 ^{de}	1.21±0.05 ^d	195.20±21.26 ^{bc}	54.08±11.37 ^d	1
红皮云杉(<i>Picea koraiensis</i>)	22.20±1.30 ^e	1.17±0.04 ^f	0.60±0.04 ^b	19.10±4.68 ^c	55.06±3.63 ^f	61.01±12.28 ^c	0
樟子松(<i>Pinus sylvestris</i>)	84.68±4.46 ^d	1.19±0.05 ^f	0.53±0.02 ^c	71.55±12.90 ^b	59.50±2.74 ^f	53.39±11.89 ^d	0
红松(<i>Pinus koraiensis</i>)	88.43±4.86 ^d	0.95±0.03 ^f	0.74±0.02 ^a	93.19±19.08 ^a	81.53±6.49 ^e	54.30±13.70 ^d	0
落叶松(<i>Larix gmelinii</i>)	21.61±1.22 ^e	0.95±0.03 ^f	0.13±0.01 ^{de}	22.95±5.76 ^c	181.60±9.68 ^c	47.90±14.26 ^e	0
加杨(<i>Populus × canadensis</i>)	84.92±3.44 ^d	90.24±3.85 ^a	0.16±0.00 ^{de}	0.95±0.11 ^d	201.10±27.30 ^{bc}	68.28±15.67 ^a	1

注:数据为平均值±标准误;同列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.2 凋落叶的持水特性

由图 1 可知,除蒙古栎和胡桃楸外,不同树种之间最大持水率和有效拦蓄量大小顺序基本一致。4 种针叶树种的全过程持水率、全过程吸水速率、最大持水率和有效拦蓄量除落叶松外均低于其他 7 种阔叶树种。

如图 2 所示,随着浸水时间的增加,各树种凋落叶持水率总体表现出先增加后平稳趋势。在浸水前 2 h 内持水率的增长迅速,之后逐渐变缓,16 h 后趋于平稳,直到 24 h 达到饱和持水状态。计算得到 24 h 持水率已达到 36 h 持水率的 94% 及以上。然而,随着浸水时间的增加,各树种凋落叶的吸水速率逐渐减小,在 24 h 时吸水速率几乎趋近于 0,凋落叶处于饱和持水状态。

2.3 凋落叶的失水特性

由图 3 可知,在 24 h 的失水过程中,树种凋落叶的失水率随着失水时间的推移在持续上升,整体而言可将其分成 3 个阶段,首先在 0.5~2 h 迅速上升,随后在 2~16 h 内增长逐渐变缓,最后在 16~24 h 阶段失水率基本趋于平稳,直至 24 h 达到最大。计算得到 24 h 失水率已达到 36 h 失水率的 90% 及以上。胡桃楸 24 h 的失水率最大,为 36.95%;红皮云杉最小,为 14.90%。相反地,凋落叶在前 2 h 的失水速率迅速降低,此后随着失水时间的延长,其速率下降逐渐平缓,最终保持稳定并逐渐趋向于 0。阔叶树种与针叶树种 24 h 的失水速率无明显差异,其由大到小依次为胡桃楸、落叶松、樟子松、加杨、水曲柳、蒙古栎、红松、辽椴、紫椴、白桦、红皮云杉。

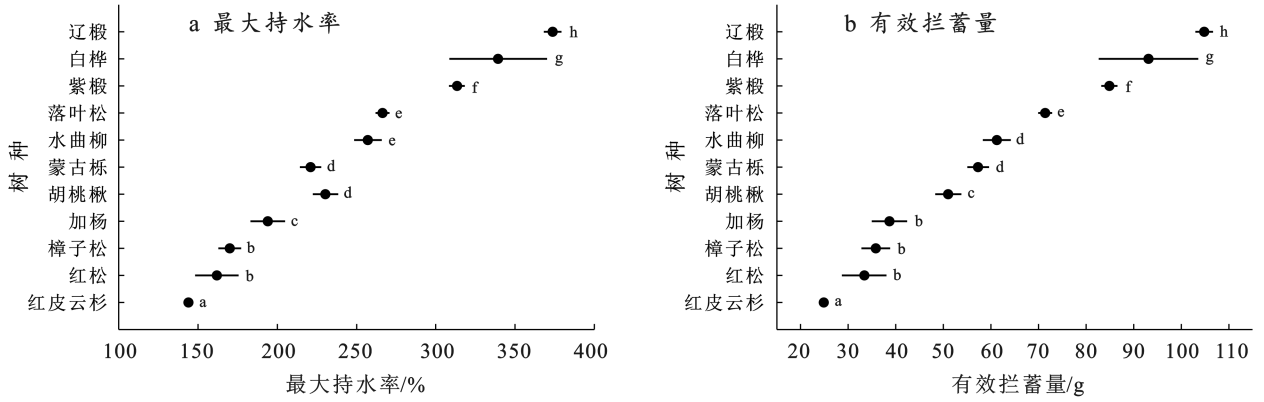


图 1 不同树种最大持水率与有效拦蓄量的变化

Fig.1 Change of Maximum water retention and effective storage capacity of different tree species

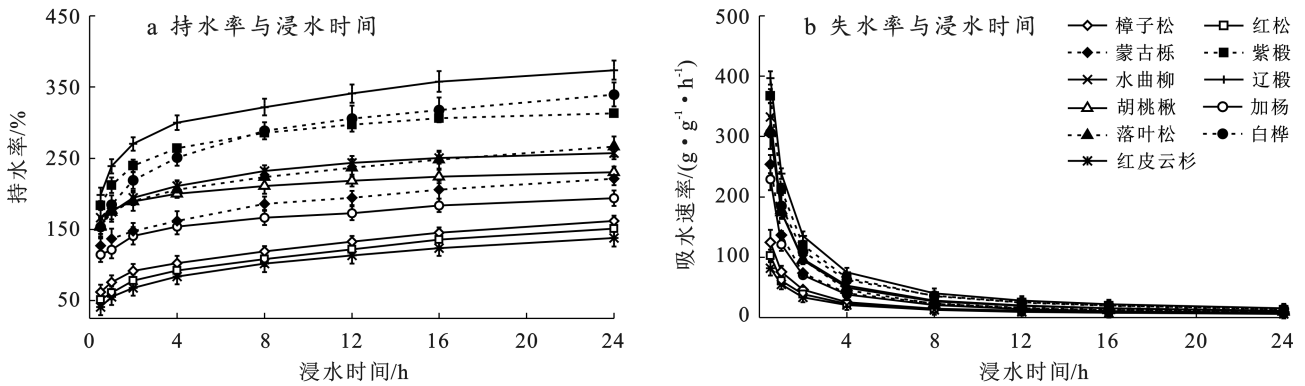


图 2 不同树种凋落叶持水率、吸水速率与浸水时间的关系

Fig.2 Relationship between water retention and water absorption rate of leaf litter of different tree species and soaking time

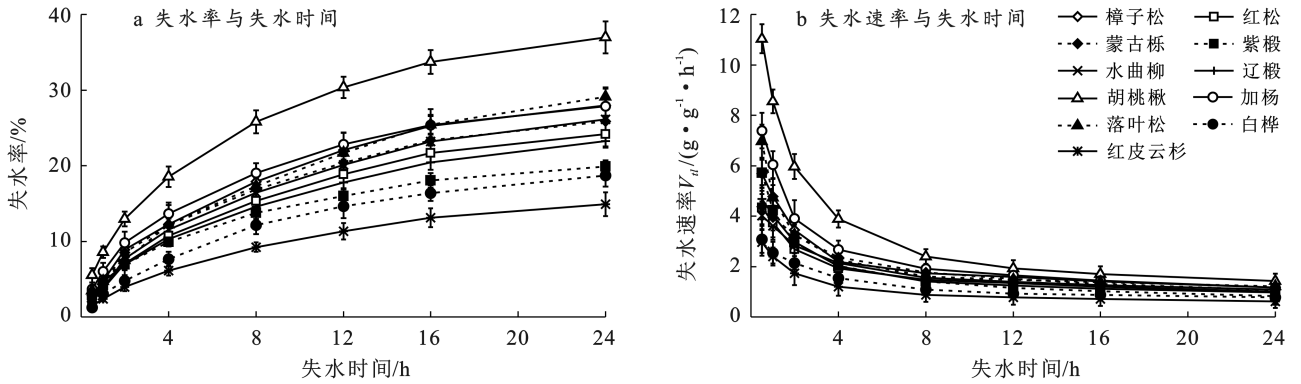


图 3 不同树种凋落叶失水率和失水速率与失水时间的关系

Fig.3 Relationship between leaf litter water loss rate, water loss rate and water loss time of different tree species

2.4 持水性能函数拟合

将凋落叶浸水时间 (th) 设为自变量, 持水率 (Q₁)、吸水速率 (V₁) 设为因变量, 对 Q₁ 和 th 进行对数 $Q_1 = a \cdot \ln(th) + b$ (a, b 为系数) 拟合, 对 V₁ 与 th 进行幂函数 $V_1 = K \cdot th^n$ (k, n 为系数) 拟合; 设凋落叶失水时间 (tl) 为自变量, 失水率 (Q₂) 和失水速率 (V₂) 为因变量, 对 Q₂ 和 tl 进行对数 $Q_2 = a \cdot \ln(tl) + b$ (a, b 为系数) 拟合, 对 V₂ 与 tl 进行幂函数 $V_2 = K \cdot tl^n$ (k, n 为系数) 拟合。从表 2 的结果来看: 不同

树种未分解凋落叶的各个相关性方程均为极显著关系 ($p < 0.01$), R^2 均大于 0.83, 方程拟合效果较为理想。

2.5 叶片特性与持水、失水性能的相关性

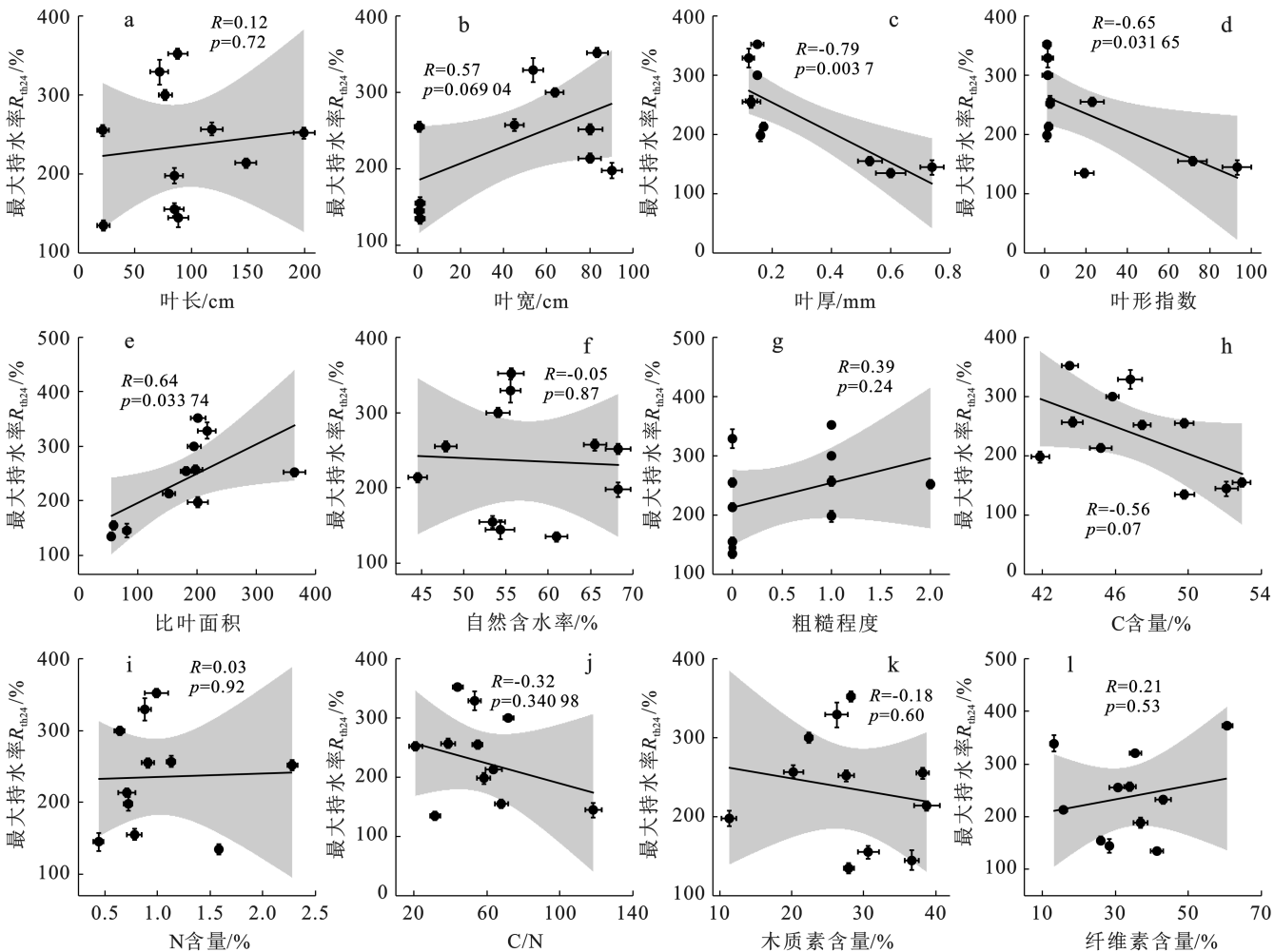
如图 4 所示, 11 个树种未分解凋落叶的最大持水率与比叶面积 (图 4e) 呈显著的正相关关系 (Pearson's R 为 0.64); 与叶厚 (图 4c)、叶形指数 (图 4d) 呈显著的负相关关系 (Pearson's R 分别为 -0.79, -0.65); 但与叶长、叶宽、自然含水率、粗糙程度、C 含量、N 含量、C/N、木质素含量、纤维素含量均无显著关系。

表 2 凋落叶的持水和失水特性与时间的相关性

Table 2 Correlation between water retention and water loss characteristics of leaf litter and time

树种	持水率(Q_1)与 浸水时间(th)的关系		吸水速率(V_1)与 浸水时间(th)的关系		失水率(Q_2)与 失水时间(tl)的关系		失水速率(V_2)与 失水时间(tl)的关系	
	相关性方程	R^2	相关性方程	R^2	相关性方程	R^2	相关性方程	R^2
白桦	$Q_1 = 37.22\ln(\text{th}) + 220.67$	0.99 **	$V_1 = 181.89\text{tl}^{-0.76}$	0.99 **	$Q_2 = 3.05\ln(\text{tl}) + 5.38$	0.88 **	$V_2 = 2.40\text{tl}^{-0.32}$	0.82 **
蒙古栎	$Q_1 = 24.32\ln(\text{th}) + 136.47$	0.97 **	$V_1 = 137.72\text{tl}^{-0.88}$	0.99 **	$Q_2 = 5.04\ln(\text{tl}) + 6.22$	0.93 **	$V_2 = 3.64\text{tl}^{-0.32}$	0.89 **
辽椴	$Q_1 = 34.22\ln(\text{th}) + 264.90$	0.99 **	$V_1 = 230.83\text{tl}^{-0.80}$	0.99 **	$Q_2 = 4.93\ln(\text{tl}) + 3.72$	0.88 **	$V_2 = 3.85\text{tl}^{-0.42}$	0.93 **
水曲柳	$Q_1 = 24.72\ln(\text{th}) + 178.42$	0.99 **	$V_1 = 178.24\text{tl}^{-0.89}$	0.99 **	$Q_2 = 6.25\ln(\text{tl}) + 6.23$	0.89 **	$V_2 = 3.37\text{tl}^{-0.33}$	0.95 **
胡桃楸	$Q_1 = 18.42\ln(\text{th}) + 173.34$	0.99 **	$V_1 = 170.29\text{tl}^{-0.88}$	0.99 **	$Q_2 = 7.76\ln(\text{tl}) + 7.98$	0.93 **	$V_2 = 8.04\text{tl}^{-0.50}$	0.99 **
紫椴	$Q_1 = 33.87\ln(\text{th}) + 212.38$	0.99 **	$V_1 = 208.67\text{tl}^{-0.82}$	0.99 **	$Q_2 = 4.22\ln(\text{tl}) + 4.01$	0.92 **	$V_2 = 4.11\text{tl}^{-0.50}$	0.99 **
红皮云杉	$Q_1 = 22.55\ln(\text{th}) + 70.50$	0.97 **	$V_1 = 52.77\text{tl}^{-0.66}$	0.99 **	$Q_2 = 3.21\ln(\text{tl}) + 2.07$	0.87 **	$V_2 = 2.27\text{tl}^{-0.50}$	0.99 **
樟子松	$Q_1 = 25.38\ln(\text{th}) + 74.41$	0.95 **	$V_1 = 74.72\text{tl}^{-0.74}$	0.99 **	$Q_2 = 6.22\ln(\text{tl}) + 4.09$	0.89 **	$V_2 = 4.41\text{tl}^{-0.42}$	0.98 **
红松	$Q_1 = 25.31\ln(\text{th}) + 73.15$	0.94 **	$V_1 = 61.94\text{tl}^{-0.72}$	0.99 **	$Q_2 = 6.04\ln(\text{tl}) + 5.19$	0.89 **	$V_2 = 3.45\text{tl}^{-0.38}$	0.99 **
落叶松	$Q_1 = 26.79\ln(\text{th}) + 169.77$	0.95 **	$V_1 = 170.63\text{tl}^{-0.85}$	0.99 **	$Q_2 = 6.08\ln(\text{tl}) + 4.12$	0.84 **	$V_2 = 4.82\text{tl}^{-0.50}$	0.99 **
加杨	$Q_1 = 19.60\ln(\text{th}) + 125.65$	0.98 **	$V_1 = 124.92\text{tl}^{-0.87}$	0.99 **	$Q_2 = 6.03\ln(\text{tl}) + 5.31$	0.92 **	$V_2 = 5.49\text{tl}^{-0.48}$	0.99 **

注: Q_1 、 Q_2 分别为持水与失水率(%); V_1 、 V_2 分别为吸水和失水速率($\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); th、tl 分别为浸水和失水时间(h); ** 表示相关性达到极显著水平($p < 0.01$)。



注: R 为皮尔逊相关系数。下同。

图 4 凋落叶特性与最大持水率的一元线性回归关系

Fig. 4 Linear regression relationship between leaf litter characteristics and maximum water retention

如图 5 所示, 11 个树种未分解凋落叶的失水速率与叶长(图 5a)、比叶面积(图 5e)、粗糙程度(图 5g)呈显著的正相关关系(其 Pearson's R 分别为 0.66,

0.68, 0.71); 但与叶宽、叶厚、叶形指数、自然含水率、C 含量、N 含量、C/N、木质素含量、纤维素含量均无显著关系。

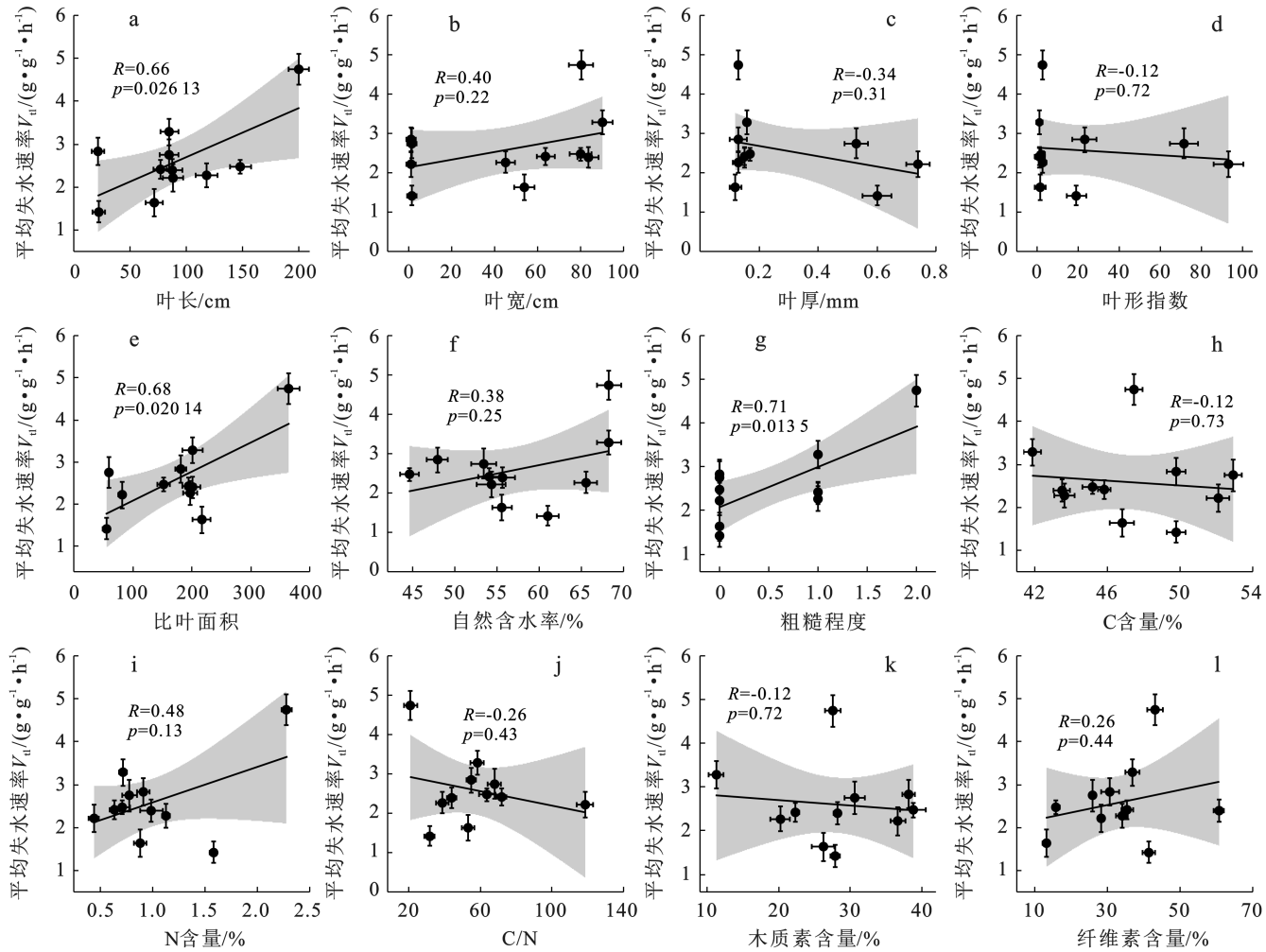


图 5 凋落叶特性与失水速率的一元线性回归关系

Fig.5 Linear regression relationship between leaf litter characteristics and water loss rate

3 讨论

3.1 凋落叶持水性及叶片性状分析

通过对凋落叶 24 h 持水过程的监测发现,凋落叶持水率和浸水时间存在对数函数关系,前 2 h 内持水率增长迅速,之后逐渐变缓,16 h 后趋于平稳,直到 24 h 达到饱和持水状态,该结论与先前的诸多研究^[12,15,24]结果相吻合。在森林生态系统中,凋落物的持水性能被当作是用来评判其减缓地表径流和保持水土能力的重要指标之一^[12,14]。因此合理保留森林中的凋落叶对短时截获降雨并吸聚水分、减少水分蒸发和涵养森林水土具有重要意义。最初凋落叶的吸水速率差异较明显,浸水 24 h 后吸水趋于饱和,吸水速率趋近一致,这与郑晶晶等^[14]研究结果一致。这是由于在浸泡初期,处于烘干状态的凋落叶表面与水之间的水势差较大,凋落叶吸水速率最高,但随着浸泡时间的推移,凋落叶的含水率在逐步升高,凋落叶与水体之间的水势差逐渐减少,吸水速率不断下

降^[25-26],在 24 h 时逐渐趋近于 0,即凋落叶吸水量达到饱和状态。

凋落物的最大持水率反映了其能够截留的最大降雨量^[25]。本研究最大持水率由大到小依次为辽椴、白桦、紫椴、落叶松、水曲柳、胡桃楸、蒙古栎、加杨、樟子松、红松、红皮云杉。除落叶松外,7 种阔叶树种凋落叶持水性均优于 3 种针叶树种,先前的许多研究^[12,26-27]也表明阔叶树种凋落叶饱和持水量均高于针叶树种。这是由于相较于阔叶树种,针叶树种凋落叶含有丰富的油脂等物质,使得凋落叶变得更加疏水,不利于水分的吸收和贮存^[28]。而落叶松作为针叶树种却有较好的持水性,可能由于它是落叶针叶树种,且其叶片密度小,叶片薄,比叶面积大,叶片基本平展无卷曲,相同质量或体积情况下可以堆叠更多数量的凋落叶,空间利用率更高,使水分子都留在叶片之间的小缝隙中不至流失^[29]。辽椴持水能力最佳,是因为其叶片下表面密被灰色星状茸毛,增加了与水分子的接触面积,对水的粘附力更强。红皮云杉表现

出最低持水率是有以下几个原因:红皮云杉均具有较厚角质层,对水的吸收也就相对较少,且其叶片短小而厚,比叶面积小,与水的接触面积小。

3.2 凋落叶失水性及叶片性状分析

本研究中,凋落叶的失水率与失水时间呈对数函数关系,在 0.5~2 h 迅速上升,随后在 2~16 h 内增长逐渐变缓,最后在 16~24 h 阶段失水率基本趋于平稳。这与先前的相关研究^[12,27]相符。凋落叶的失水率和失水速率作为衡量凋落叶持水性的关键指标^[12],失水率与失水速率的高低直接反映了保水能力的强弱。具体而言,当失水率较大时,意味着水分蒸发流失的速度较快,保水能力也就更弱;反之,失水率较小时,则表明保水能力更强。凋落叶的失水率越低,失水速率越慢,可为森林提供更多可消耗水,有效延迟森林枯水时间。同时,凋落叶对水分的保持有利于减缓洪峰,并通过蒸发实现对水流、水循环的调控。此外,其还在缩小森林温差,调节空气湿度方面做出贡献,从而实现了对森林气候的调节。对于蒸发量较高的地区,较慢的失水速率有利于林地水分的保持,涵养水源^[9]。凋落叶的失水与吸水是两个相对的过程,持水率越高,其与大气之间的水势差就越大,因此也越容易失水^[30]。

本研究 24 h 失水率由小到大依次为红皮云杉、白桦、紫椴、辽椴、红松、蒙古栎、水曲柳、加杨、樟子松、落叶松、胡桃楸。红皮云杉的失水率和失水速率最低,其作为针叶树种,叶片具有特殊的适应低温和干旱的冬季环境性状,如叶片小而厚,气孔数目多,表皮覆盖有蜡质或厚厚的角质层等^[31]。角质层作为保护层,赋予了表皮较高的不透水性,从而有效地抑制了体内的水分蒸腾作用^[32]。且红皮云杉相较于其他针叶树种比叶面积更小,叶片密度更大。白桦之所以保水性好,是由于其叶片薄且为纸质,LI 接近于 1(更接近圆形),使得叶片间贴合更紧密,水分蒸发更少。且叶片间有较大的接触面积,而与空气的接触面积小,因而水分散失缓慢,保水相对更加持久^[33]。

3.3 凋落叶性状与持水失水关系分析

在森林生态系统中,凋落叶特性一直被视为其持水特征的重要影响因素^[22,27,33],因此许多研究结论的不一致性可能源于不同树种间凋落叶特性的差异。但大多数研究多集中在凋落叶吸水过程及与其特性的关系。本研究中,凋落叶的最大持水率与叶厚、叶形指数呈显著负相关,而与比叶面积则呈显著正相关;失水过程中,凋落叶的失水速率与叶长、比叶面积和粗糙度均呈显著正相关。由此表明叶片形态特征及结构特征对持水特性具有显著影响。其中,比叶面

积这一特征与凋落叶吸水与失水性能都有较强的相关性,这一特性与多数前人研究结果相一致^[21,33]。刘效东等^[34]在对鼎湖山 3 种不同演替阶段森林凋落物的持水特性的研究也表明,亚热带针叶林凋落叶之所以比常绿阔叶林凋落叶有更强的持水性,是因为其更大的比叶面积。比叶面积是指单位质量凋落叶能够平整展开的面积,凋落叶比叶面积越大,其表面能够与水分子接触的频率更高,相应地吸附水分的能力也越强^[29]。与之相对应地,凋落叶比叶面积越大,其表面与空气的接触机会也越多,水分蒸发较快,因此失水速率较快。已有研究^[22,29]也表明,树种叶片密度小,而比叶面积大,则水分散失多,失水速率大。本研究还发现,凋落叶表面越粗糙,失水速率越大,因其表面柔毛增大了叶片与空气接触表面积,更利于水分蒸发,因此失水速率也更快^[25]。此外,凋落叶持水特性也受叶片间贴合状态的影响^[29,34],以落叶松为例,其叶面积小、密度小、单位质量凋落叶数量更多,因此具有较强的吸水能力,且在空中悬挂时,叶片间能够较好地贴合,使得其与空气之间的接触更少,水分散失速度慢。

本研究表明,凋落叶的形态特征(叶长、叶厚、叶形指数、比叶面积、粗糙度)是影响凋落叶吸水失水过程的重要指标。此外,叶的质地,是否具角质层等也是影响叶片持水失水能力的重要因素。总的来说,凋落叶持水能力受其内外部因素共同影响,具体情况仍然需要更深入地研究。另外,本研究采用了室内浸提法来探究凋落叶的持水能力,然而其持水能力还受到多种主客观因素的影响,如凋落叶的储量、分解程度、多样性混合、叶片内部结构及大气降雨等^[16,35],这些都有待更为细致地探究。综上所述,应综合分析凋落叶的持水能力,以遴选出凋落叶持水性能表现优秀的树种,提升森林树种的涵养水源能力。

4 结论

(1) 东北地区 11 种常见树种未分解凋落叶的持水特性(最大持水率、有效拦蓄量)及失水特性(最大失水率、最大失水速率)存在显著差异。7 种阔叶树种持水能力优于 3 种针叶树种,但落叶松作为落叶针叶树种持水能力优于 3 种常绿针叶树种。

(2) 辽椴、白桦和紫椴持水能力较强。白桦同时具有较小的失水率与失水速率;辽椴,紫椴的失水率和失水速率稍大,但综合考虑二者出色的吸水能力,仍认为二者具有较强的持水能力。

(3) 未分解凋落叶的叶长、叶厚、粗糙度、叶形指数和比叶面积是影响凋落叶持水和失水能力的主要

因素。凋落叶的最大持水率与叶厚、叶形指数呈显著负相关关系(R 为 -0.79 和 -0.65), 与比叶面积呈显著正相关关系(R 为 0.64)。凋落叶的失水速率与叶长、比叶面积和粗糙度均呈显著正相关关系(R 为 $0.66, 0.68, 0.71$)。

参考文献 (References)

- [1] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
He Shuxia, Li Xuyong, Mo Fei, et al. The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of Eastern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [2] Acharya B S, Hao Y, Ochsner T E, et al. Woody plant encroachment alters soil hydrological properties and reduces downward flux of water in tallgrass prairie [J]. *Plant and Soil*, 2017, 414(1): 379-391.
- [3] Sato Y, Kumagai T, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers: The effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(16): 3007-3018.
- [4] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学报, 2004, 23(1): 60-64.
Lin Bo, Liu Qing, Wu Yan, et al. Advances in the studies of forest litter [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 60-64.
- [5] Neris J, Tejedor M, Rodríguez M, et al. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain) [J]. *Catena*, 2013, 108: 50-57.
- [6] 张志兰, 郑云泽, 于秀娟. 重庆市几种常见经济林凋落物持水性能研究[J]. 中国水土保持, 2019(2): 59-62.
Zhang Zhilan, Zheng Yunze, Yu Xiujuan. Study on water holding capacity of litter of some common economic forests in Chongqing [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(2): 59-62.
- [7] 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.
Yang Xia, Chen Lihua, Kang Yingli, et al. Water-holding characteristics of litter in five typical water conservation forests in low mountainous areas of Eastern Liaoning [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(9): 2662-2670.
- [8] 武鹏艳, 张玉珍. 3 种人工林枯落物持水性能及土壤水文效应的研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(12): 2930-2934.
Wu Pengyan, Zhang Yuzhen. Study on water-holding characteristics and soils hydrological effects of three kinds of planted forest litter [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(12): 2930-2934.
- [9] 李玉霖, 孟庆涛, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地植物成熟叶片性状与叶凋落物分解的关系[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2486-2494.
Li Yulin, Meng Qingtao, Zhao Xueyong, et al. Relationships of fresh leaf traits and leaf litter decomposition in Kerqin sandy land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2486-2494.
- [10] 吴承祯, 洪伟, 姜志林, 等. 我国森林凋落物研究进展[J]. 江西农业大学学报, 2000, 22(3): 405-410.
Wu Chengzhen, Hong Wei, Jiang Zhilin, et al. Advances in research of forest litter-fall in China [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2000, 22(3): 405-410.
- [11] Gomyo M, Kuraji K. Effect of the litter layer on runoff and evapotranspiration using the paired watershed method [J]. *Journal of Forest Research*, 2016, 21(6): 306-313.
- [12] 郑文辉, 林开敏, 徐昇, 等. 7 种不同树种凋落物持水性能的比较研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 88-91.
Zheng Wenhui, Lin Kaimin, Xu Bian, et al. Comparative study of water-holding capacity of litter in seven different trees' species [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 88-91.
- [13] 张腾达, 陶建平, 王玉平. 两种生境下不同生活型植物凋落物的持水特性[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 310-315.
Zhang Tengda, Tao Jianping, Wang Yuping. Water-holding characteristics of leaf litter from different life-form plants in two habitats [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(2): 310-315.
- [14] 郑晶晶, 蔡锰柯, 林宇, 等. 6 种不同沿海防护混交林凋落物持水性能比较[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 111-116.
Zheng Jingjing, Cai Mengke, Lin Yu, et al. Comparative study on water-holding capacity of litters in six different mixed forests for coastal protection [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 111-116.
- [15] Chen Shujun, Cao Tianjian, Tanaka N, et al. Hydrological properties of litter layers in mixed forests in Mt. Qinling, China [J]. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 2018, 11(2): 243-250.
- [16] 刘芝芹, 黄新会, 涂璟, 等. 云南高原不同林分类型枯落物储量及持水特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 919-924.
Liu Zhiqin, Huang Xinhui, Tu Jing, et al. Litter reserves and water holding characteristics of different species in Yunnan Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6): 919-924.
- [17] 张淑兰, 张海军, 张武, 等. 小兴安岭不同森林类型枯落物储量及其持水特性比较[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 85-90.

- Zhang Shulan, Zhang Haijun, Zhang Wu, et al. Comparison of water-holding characteristics and biomass of litter under different forest types in Xiaoxing' an Mountains [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4): 85-90.
- [18] 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.
- Wei Qiang, Ling Lei, Zhang Guangzhong, et al. Water-holding characteristics and accumulation amount of the litters under main forest types in Xinglong Mountain of Gansu, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2589-2598.
- [19] 熊咏梅, 赵冰, 代色平. 广州七种园林植物枯落物的水文效应[J]. *广东园林*, 2009, 31(6): 60-63.
- Xiong Yongmei, Zhao Bing, Dai Seping. Hydrological effects of seven landscape plants litter in Guangzhou [J]. *Guangdong Landscape Architecture*, 2009, 31(6): 60-63.
- [20] 赵梓贤, 代奉林, 刘杨赞, 等. 灌丛群落叶功能型及其与凋落物水分涵养性能的关系: 以广西三种典型灌丛群落为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(13): 5684-5694.
- Zhao Zixian, Dai Fenglin, Liu Yangyun, et al. Leaf functional types of shrub communities and their relationship with water conservation of litter: A case study of three typical shrub communities in Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(13): 5684-5694.
- [21] 李素丽, 徐佳文, 丁翊东, 等. 赣江中游水源涵养林乔木和蕨类植物凋落物持水和失水特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 170-176.
- Li Suli, Xu Jiawen, Ding Yidong, et al. Litter water-holding and water-loss characteristics of trees and ferns in the water conservation forests at the middle reaches of the Gan River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 170-176.
- [22] 肖洋, 郑树峰, 张大鹏, 等. 哈尔滨市典型森林对雪水量的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(25): 132-137.
- Xiao Yang, Zheng Shufeng, Zhang Dapeng, et al. Effect of representative forests on snow water equivalence in Harbin [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(25): 132-137.
- [23] 肖路, 王文杰, 张丹, 等. 哈尔滨市城市森林树种种类组成特征及配置合理性[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2074-2081.
- Xiao Lu, Wang Wenjie, Zhang Dan, et al. Urban forest tree species composition and arrangement reasonability in Harbin, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2074-2081.
- [24] 贾剑波, 刘文娜, 余新晓, 等. 半城子流域 3 种林地枯落物的持水能力[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 26-32.
- Jia Jianbo, Liu Wenna, Yu Xinxiao, et al. Water-holding characteristics of litters in three types of forest in the upper reaches of Banchengzi Basin [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(6): 26-32.
- [25] 肖卫平, 喻理飞. 贵州茅台水源功能区植物叶片形态与持水特征及其功能群划分[J]. *植物研究*, 2012, 32(5): 596-602.
- Xiao Weiping, Yu Lifei. Classification of plant functional groups based on leaf modality and water-holding features in Moutai water functional district of Guizhou [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 32(5): 596-602.
- [26] 刘尚华, 冯朝阳, 吕世海, 等. 京西百花山区 6 种植物群落凋落物持水性能研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 179-182.
- Liu Shanghua, Feng Chaoyang, Lü Shihai, et al. Study on water-holding capacity of litter in six vegetation communities in Baihua Mountainous areas of West Beijing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(6): 179-182.
- [27] 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.
- Zhang Jianli, Wang Jiaguo, Li Weijie, et al. Litter reserves and water holding characteristics of *Rhododendron* forest in Baili *Rhododendron* Nature Reserve of Guizhou [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 167-173.
- [28] 吴晓光, 刘龙, 张宏飞, 等. 砭砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 137-144.
- Wu Xiaoguang, Liu Long, Zhang Hongfei, et al. Litter water-holding capacity and soil physical properties of main afforestation tree species in sandstone area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 137-144.
- [29] 刘一霖, 温娅檬, 李巧玉, 等. 川西高山峡谷区 6 种森林枯落物的持水与失水特性[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 151-156.
- Liu Yilin, Wen Yameng, Li Qiaoyu, et al. Water-holding and water-loss characteristics of six types of forest litter in the alpine gorge region of Western Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 151-156.
- [30] 蒲嘉霖, 刘亮. 亚热带森林凋落物分解特征及水文效应

- [J].水土保持研究,2019,26(6):165-170.
- Pu Jialin, Liu Liang. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):165-170.
- [31] 周丽丽,蔡丽平,马祥庆,等.不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J].水土保持学报,2012,26(5):249-253.
- Zhou Lili, Cai Liping, Ma Xiangqing, et al. Ecohydrological function in different developing stages of Chinese fir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(5):249-253.
- [32] 张明明,高瑞馨.针叶植物叶片比较解剖及生态解剖研究综述[J].森林工程,2012,28(2):9-13.
- Zhang Mingming, Gao Ruixin. Research review on comparative anatomy and ecological anatomy of conifers blade [J]. Forest Engineering, 2012,28(2):9-13.
- [33] 于强,闫淑君,陈莹,等.9种园林树种凋落叶的持水性能[J].中国城市林业,2021,19(6):21-27.
- Yu Qiang, Yan Shujun, Chen Ying, et al. Water holding capacity of leaf litters in nine greening tree species [J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2021,19(6):21-27.
- [34] 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性[J].林业科学,2013,49(9):8-15.
- Liu Xiaodong, Qiao Yuna, Zhou Guoyi, et al. Waterholding characteristics of litters in three forests at different successional stages in Dinghushan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013,49(9):8-15.
- [35] 刘少冲,段文标,赵雨森.莲花湖库区几种主要林型枯落物层的持水性能[J].中国水土保持科学,2005,3(2):81-86.
- Liu Shaochong, Duan Wenbiao, Zhao Yusen. Waterholding capacity of litter layer for various major forest types in Lianhua Lake reservoir area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005,3(2):81-86.
-
- (上接第 30 页)
- [29] 闫晓宇,郭文君,秦都林,等.滨海盐碱地棉花秸秆还田和深松对棉花干物质积累、养分吸收及产量的影响[J].作物学报,2022,48(5):1235-1247.
- Yan Xiaoyu, Guo Wenjun, Qin Dulin, et al. Effects of cotton stubble return and subsoiling on dry matter accumulation, nutrient uptake, and yield of cotton in coastal saline-alkali soil [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022,48(5):1235-1247.
- [30] 慈华聪,田晓明,张楚涵,等.不同盐分处理对狼尾草和大油芒发芽与幼苗生长的影响[J].生态学杂志,2013,32(5):1168-1174.
- Ci Huacong, Tian Xiaoming, Zhang Chuhan, et al. Effects of salt stress on the seed germination and seedling growth of *Pennisetum alopecuroides* and *Spodiopogon sibiricus* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(5):1168-1174.
- [31] 咸敬甜,陈小兵,王上,等.盐渍土磷有效性研究进展与展望[J].土壤,2023,55(3):474-486.
- Xian Jingtian, Chen Xiaobing, Wang Shang, et al. Phosphorus availability in saline soil: A review [J]. Soils, 2023,55(3):474-486.
- [32] 孙军娜,徐刚,邵宏波.黄河三角洲新生湿地磷分布特征及吸附解吸规律[J].地球化学,2014,43(4):346-351.
- Sun Junna, Xu Gang, Shao Hongbo. Fractionation and adsorption-desorption characteristics of phosphorus in newly formed wetland soils of Yellow River delta, China [J]. Geochimica, 2014,43(4):346-351.
- [33] 刘盛林,丁效东,郑东峰,等.黄河三角洲盐渍化荒地种植植物对土壤改良、磷形态转化及有效性的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):278-284.
- Liu Shenglin, Ding Xiaodong, Zheng Dongfeng, et al. Effect of different plants plantation on amelioration of uncultivated saline wasteland, soils phosphorus fraction and availability in the Yellow River delta [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):278-284.
- [34] 夏静,南丽丽,陈洁,等.低磷胁迫下不同根型苜蓿形态及生理响应[J].中国草地学报,2023,45(10):58-67.
- Xia Jing, Nan Lili, Chen Jie, et al. Morphological and physiological responses of different root types of alfalfa under low phosphorus stress [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(10):58-67.