

DOI: 10.5846/stxb202107011754

秦立厚, 刘琪璟, 孙震, 徐振招, 斯庆毕力格. 长白山阔叶红松林主要树种凋落叶分解速率及其与叶性状的关系. 生态学报, 2022, 42(14): 5894-5905.

Qin L H, Liu Q J, Sun Z, Xu Z Z, Siqing Bilige. Leaf litter decomposition rate of main tree species in broad-leaved Korean pine forest and its relationship with leaf traits. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5894-5905.

长白山阔叶红松林主要树种凋落叶分解速率及其与叶性状的关系

秦立厚^{1,2}, 刘琪璟^{1,*}, 孙震¹, 徐振招¹, 斯庆毕力格^{1,3}

1 北京林业大学 林学院, 北京 100083

2 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

3 鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心, 鄂尔多斯 017010

摘要:阔叶红松林是我国东北地区地带性顶级森林群落,对维持区域生态系统稳定性具有重要作用。对阔叶红松林内主要树种凋落叶分解过程及影响因素进行研究,有助于增加长白山阔叶红松林生态系统的基础数据,为明确阔叶红松林的养分循环和物质流动提供依据。选取了长白山阔叶红松林内 30 个常见乔灌木种和 16 个凋落叶性状,采用野外分解袋法和室内样品分析等方法研究了长白山阔叶红松林内主要树种凋落叶分解速率及其与凋落叶性状的关系。1 年的野外分解实验表明,30 个树种的凋落叶重量损失率表现出较大差异。不同树种凋落叶的重量损失率在 20.56%—92.11% 之间,以红松 (*Pinus koraiensis*) 质量损失率最低,东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii*) 质量损失率最高。不同生活型树种的凋落叶在质量损失率上存在显著差异,以灌木树种凋落叶的质量损失率最高,小乔木次之,乔木树种质量损失率最低。Olson 模型拟合结果表明,不同树种凋落叶的分解速率 k 以红松最低,瘤枝卫矛 (*Euonymus verrucosus*) 最高,分别为 0.24 和 1.64。不同树种分解 50% 和 95% 所需的时间分别在 0.43—2.86 年,1.83—12.37 年之间。相关分析表明,凋落叶初始物理性状、化学性状均能反映凋落叶的分解速率。其中以凋落叶厚度、氮含量(N)、磷含量(P)、木质素含量、木质素与氮含量的比值(L:N)、木质素与磷含量的比值(L:P)与凋落叶分解速率 k 的相关性较高,说明利用凋落叶的某些物理、化学性状在一定程度上可以预测凋落叶的分解速率。

关键词:凋落叶分解;阔叶红松林;物理性状;化学性状

Leaf litter decomposition rate of main tree species in broad-leaved Korean pine forest and its relationship with leaf traits

QIN Linhou^{1,2}, LIU Qijing^{1,*}, SUN Zhen¹, XU Zhenzhao¹, SIQING Bilige^{1,3}

1 College of Forestry, Beijing forestry university, Beijing 100083, China

2 Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

3 Ordos forestry and Grassland Development Center, Ordos 017010, China

Abstract: The mixed-broadleaved Korean pine forest is a typical forest in Northeastern China, which plays an important role in maintaining the stability of regional ecosystem. The researches on litter decomposition of broad-leaved Korean pine forest can enrich the basic data and provide reference for nutrient cycling in this area. In this study, we selected 30 tree species and 16 leaf litter functional traits. Using litter bag method in the field and laboratory analysis we study the leaf litter decomposition rate of main tree species in the mixed-broadleaved Korean pine forest and the relationships between leaf litter decomposition rates and the leaf litter functional traits. The main results are as follows. After 365 days of decomposition, the

基金项目:国家自然科学基金(31670436)

收稿日期:2021-07-01; 采用日期:2021-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wdmgt666@sina.com

mass loss of 30 tree species ranged from 20.56% to 92.11%. The mass loss rate of *Pinus koraiensis* is the lowest while the mass loss rate of *Philadelphus schrenkii* is the highest. For the different life form tree species, there were significant differences in the mass loss rate among different life forms, with shrub species having the highest mass loss rate and arbor species having the lowest mass loss rate. The fitting results of Olson model showed the decomposition coefficients (k) of 30 tree species ranged from 0.24 to 1.64, with *Euonymus verrucosus* having the highest k and *Pinus koraiensis* having the lowest k . The time required for 50% decomposition takes 0.43—2.86 years for different species and the time required for 95% decomposition takes 1.83—12.37 years. Correlation analysis showed that 12 of the 16 traits were significantly correlated with leaf litter decomposition. Among them, leaf thickness, leaf N content, leaf P content, lignin content, lignin:N, lignin:P had a strong correlation with litter decomposition rate. Therefore, the decomposition rate of litter can be predicted by some physical and chemical properties of litter leaves.

Key Words: leaf litter decomposition; the mixed-broadleaved Korean pine forest; physical traits; chemical traits

凋落物分解在森林生态系统物质循环过程中起着重要的桥梁作用,是地上、地下物质循环和能量流动的枢纽。森林生态系统每年净初级生产力约有一半以上通过凋落物分解的方式转移到土壤中^[1],可为植物生长提供 70% 的营养物质^[2]。凋落物分解的速率直接影响了森林生态系统养分输入的快慢,进而会对森林生态系统生产力水平产生影响。开展森林生态系统凋落物分解的研究可进一步了解森林生态系统养分循环、能量流动与凋落物分解之间的联系,对评价凋落物分解速率对森林生产力的影响具有重要的参考价值。

凋落叶自身性质与凋落叶分解速率密切相关。凋落叶自身性质主要指凋落叶的物理、化学特性。物理性质主要包括凋落物的面积、比叶面积、叶片干物质含量、叶片抗张强度、叶片厚度、是否被有绒毛、蜡质等^[3-4]。分解较慢的树种一般具有较厚的表皮、角质层和蜡质层,这些性质决定了该物种叶片具有较差的透水性、适口性及不易破碎性等特性,降低凋落物的分解速率^[5-6]。另外,凋落叶的比叶面积及叶片干物质含量对凋落物的分解速率也有一定的影响,比叶面积越大分解速率越快^[3],干物质含量越高分解速率越低^[4]。此外,同一树种在不同海拔甚至不同部位由于其物理性质的不同,其分解速率也存在一定差异。例如由于树冠下部的叶片比顶部叶片柔软,其分解速率要比树冠顶部叶片分解的快^[7];Vitousek 等认为同一物种高海拔地区的叶片厚度大、结构粗糙,其分解速率要低于低海拔地区的叶片^[8]。凋落叶化学性状对分解同样起着重要作用。凋落物中含有不同的有机化合物,如难分解的有机成分如木质素、纤维素、半纤维素等,易分解的成分如多糖、氨基酸等。目前,研究凋落物质量的常用指标主要有凋落物初始氮、磷、木质素、纤维素含量及各成分的比值^[9-11]。氮含量作为一个重要的影响因子,主要是由于分解者的生长发育需要氮元素,初始氮含量较低的凋落叶不能为分解者提供足够的营养供应,因此会抑制凋落叶的分解^[12]。不同分解时期影响凋落物分解速率的因素会有所改变。在分解初期主要受凋分解者所需的必要元素(N、P 等)含量的影响,而在分解后期主要受木质素、纤维素、酚类等含量的影响^[13]。由于木质素、纤维素较难分解,在分解后期随着木质素、纤维素含量的不断增加分解速率也随之减慢^[14]。同时,磷含量也可能是影响凋落物分解的重要因子,特别是在磷储量较低的生态系统中^[15]。

除了凋落叶自身特性会影响分解速率外,微生物和土壤动物也会对凋落叶分解速率产生影响。与土壤动物相比,微生物的作用相对较小。例如 Vossbrinck 等研究发现添加微生物后分解速率由原来的 7.2% 增加到了 15.2%^[16]。而土壤动物对凋落物分解的影响在不同气候区表现不同。具体表现为由温带到热带地区土壤动物对凋落物的分解影响逐渐增大^[17]。包剑利等研究了土壤动物对长白山牛皮杜鹃凋落物分解的影响^[18]。结果表明中小型土壤动物对牛皮杜鹃分解的贡献率为 16.88%、大型土壤动物对牛皮杜鹃分解的贡献率为 8.69%。可见,在长白山地区影响凋落叶分解的主要因素可能是凋落叶自身性质。

阔叶红松林是我国东北地区非常典型的地带性森林群落,群落内结构复杂、物种多样性丰富、森林蓄积量大,对维持区域生态系统稳定性具有重要作用^[19-20]。明确阔叶红松林影响凋落叶分解的自身因素对预测不

同树种凋落叶分解速率,评估凋落叶分解动态有重要意义。基于此,本研究以阔叶红松林内 30 个常见树种凋落叶为研究对象,比较不同树种及不同生活型在分解速率上的差异,明确凋落叶性状与分解速率的关系,以期丰富长白山阔叶红松林生态系统的基础数据,为理解阔叶红松林生态系统功能和养分循环提供依据。

1 研究区概况

本研究位于长白山国家级自然保护区内。该保护区地处 $127^{\circ}42'—128^{\circ}16'E$ 与 $41^{\circ}41'—42^{\circ}25'N$ 之间,是我国保存较为完整的森林生态系统保护区之一。长白山自然保护区属于温带大陆性气候,四季分明,凉爽宜人,年平均气温为 $3.66^{\circ}C$,年均降水量为 $735.73\text{ mm}^{[21]}$ 。低温多雨的特点使得该地区常年湿润,空气湿度在 70% 左右。由于保护区内海拔差异接近 2000 m,气候垂直变化差异明显,植被组成上呈垂直分布规律,由低到高依次成了阔叶红松林带、云冷杉林带、岳桦林带、高山苔原带等植被带。阔叶红松林带处于海拔 1100 m 以下的地域,是长白山地区典型的地带性植被类型。阔叶红松林垂直结构明显,主林层主要树种主要有红松(*Pinus koraiensis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer mono*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、春榆(*Ulmus japonica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)等树种,此外还分布有大青杨(*Populus ussuriensis*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)等少量先锋树种。亚林层主要有假色槭(*Acer pseudosieboldianum*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)、水榆花楸(*Sorbus alnifolia*)、黑樱桃(*Cerasus maximowiczii*)等树种。

2 研究方法

2.1 样地和物种选择

于 2010 年 5 月在长白山自然保护区原始阔叶红松林内($42^{\circ}24'01''N$, $128^{\circ}05'51''E$)设置了边长为 100 m 的方形样地。2020 年 5 月对样地进行了复测,复测时将样地划分为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的小样方,对样方内所有胸径大于 5 cm 的样木进行每木检尺,记录树种名称、胸径、树高、冠幅、样木位置、立木类型等相关信息。对于灌木或幼树的调查,只调查对角线所在的样方,记录基径 $>1\text{ cm}$ 的灌木或幼树基径、高度、冠幅。调查完成后,选择 21 个乔木树种和 9 个灌木树种来研究分解速率与凋落叶分解的关系。具体乔、灌木树种见表 1。

2.2 凋落叶采集与叶性状测定

于 2019 年 9 月至 10 月采用收集器收集法采集 30 个物种新鲜凋落叶。收集器边长为 0.7 m,底部为孔径为 1 mm 的尼龙网,距离地面高度设置为 30 cm。由于部分灌木树种较少,在采集叶片时选择已枯死但还未凋落的凋落叶。对于这些树种每个树种至少从 3 株目标树种上选取。

为了研究长白山阔叶红松林内主要树种凋落叶分解速率与凋落叶初始叶性状的关系,本研究选择比叶面积(SLA)、叶片厚度(LT)、叶片韧性(TH)、抗拉强度(TS)、标准持水力(WHCstd)、饱和持水力(WHCmax)等 6 个物理性状,凋落叶初始 C、N、P、木质素、纤维素(Cellulose)含量 5 个化学性状, C:N、N:P、C:P、L:N、L:P 5 个化学计量比。其中,SLA 通过凋落叶单面叶面积与干重的比值计算得出。LT 通过游标卡尺进行测定。

TH 和 TS 通过拉力计测定。以将单位宽度叶片撕裂的力作为叶片 TS 的测量值^[22]。将同一树种的叶片浸湿后避开叶脉用刀片切成 0.5 cm 宽的长条,一端用夹子夹紧并固定,另一端固定在韦度电子手持式推拉力计(数显)上,拉动拉力计直至叶片断裂,记录叶片断裂时的瞬时拉力,每组测量 10 片,重复 3 次。以单位面积固体物穿过叶片所用的力作为叶片 TH 的测量值^[22]。同一树种的叶片浸湿后将叶片覆盖在大小合适的圆环上,在叶片上部再加一个孔径大小相同的圆环以固定叶片四周,圆环中应尽量避免叶脉的存在。将直径恰当且横截面平整的铁丝固定于韦度电子手持式推拉力计(数显)上,记录铁丝刺穿叶片时的瞬时推力即为叶片的韧性。每组测量 10 片,重复 3 次。

标准持水率为叶片在水中浸泡 1 h 后叶片增重与叶片干重的比值。饱和持水率则为叶片在水中浸泡 24 h 后叶片增重与叶片干重的比值^[22]。

化学性状的测定:烘干后的凋落叶经研磨仪(MM400)粉碎后过 60 目筛测定各项指标。使用总元素分析仪(FLASH 2000 CHNS/O)测定凋落叶中全 C、全 N。样品经消煮后使用紫外分光光度计(760 CTR)采用钼锑抗比色法测定凋落叶全 P 含量。凋落叶初始木质素和纤维素含量通过酸性洗涤法测定^[23—24]。

2.3 凋落叶分解实验

于 2019 年 9—10 月在长白山阔叶红松林内采用收集器法收集 30 个树种新鲜凋落叶。采集回的凋落叶在 60℃ 的温度下烘干至恒重^[25]。烘干完成后,每个树种分别称取 6g 凋落叶放入尼龙网袋中,网袋大小为 20cm×25 cm,网眼直径为 1mm。为了防止烘干后的凋落叶还存在一定的水分,将烘干后的凋落叶又分别取 3 份(每份重 6g)放在烘箱中置于 75℃ 下继续烘干至恒重,以对尼龙网袋中的重量进行校正。烘干后的样品经粉碎、过筛后用于测定各树种不同分解时间养分含量。养分含量的测定方法见 2.2 中“化学性状的测定”。

所有实验准备完成后,于 2019 年 10 月 26 日将 360 个(30 个树种×3 次重复×4 次回收)尼龙网袋放入 3 个地势平坦且没积水的样地中。分解袋布设完成后,分别于 180d、240d、300d 和 365d 后分 4 次回收分解袋。回收后的分解袋带回实验室内并取出袋内的凋落叶,仔细清除掺杂的泥土、植物根系和土壤动物等。随后将清理干净的剩余凋落叶置于烘箱中于 75℃ 温度下烘干至恒重并称重。

2.4 数据处理

分解袋回收到实验室并烘干称重后,凋落叶质量损失率(R)通过公式(1)计算:

$$R = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中 M_t 为经过时间 t 的分解后凋落叶剩余干重(g), M_0 为分解袋内凋落叶分解样初始干重(g)。

不同树种凋落叶的分解速率 k 通过 Olson 指数衰减模型来拟合计算^[26],修正后的 Olson 模型可表示为:

$$\frac{M_t}{M_0} = \alpha e^{-kt} \quad (2)$$

式中 M_t 为经过时间 t 的分解后凋落叶剩余干重(g), M_0 为分解袋内分解样初始干重(g), α 为修正系数, k 为凋落叶分解系数。

根据公式(3)和(4)用于计算各树种凋落叶分解 50% 和 95% 所需要的时间:

$$t_{0.5} = \ln(0.5)/(-k) \quad (3)$$

$$t_{0.95} = \ln(0.05)/(-k) \quad (4)$$

式中 $t_{0.5}$ 表示凋落叶分解 50% 所用的时间(半衰期), $t_{0.95}$ 表示凋落叶分解 95% 所用的时间。

采用单因素方差分析比较不同生活型凋落叶的分解速率;利用 Pearson 相关分析方法,分析凋落叶性状与分解速率的相关关系。所有的统计分析都在 SPSS 19.0 种完成。

3 结果与分析

3.1 不同物种叶性状比较

表 1 为 30 个树种实测 6 个物理性状值。可见,30 个树种的物理性状在种间差异较大。其中,WHCstd 最大的树种为怀槐 348.32%,最小的为红松仅为 40.43%,最大值是最小值的 8.62 倍。不同树种 SLA 的均值为 345.45 cm²/g,以水榆花楸 SLA 最大为 594.49 cm²/g,红松 SLA 最小仅为 76.58 cm²/g。对于不同树种凋落叶 LT,以红松的 LT 度值最大为 0.62mm,最小值为 0.032 mm 为白牛槭,所有树种凋落叶 LT 均值为 0.1mm。不同树种 TH 在 0.5—2.41 N/mm 之间,均值为 1.17 N/mm,以蒙古栎凋落叶 TH 最大,黄檗最小。不同树种凋落叶 TS 在 0.68—3.17 N/mm²之间,以蒙古栎凋落叶 TS 最大,水曲柳叶片 TS 最小,所有树种凋落叶 TS 均值为 1.38 N/mm²。

表 1 不同树种凋落叶物理性状

Table 1 Physical traits of 30 selected tree species

树种 Tree species	生活型 Life form	标准持水率 WHCstd/%	饱和持水率 WHCmax/%	比叶面积 SLA/ (cm ² /g)	叶厚度 LT/mm	抗拉强度 TH/(N/mm)	韧性 TS/ (N/mm ²)
白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	乔木	91.2	270.1	211.18	0.13	1.39	1.42
白牛槭(<i>Acer mandshuricum</i>)	乔木	82.6	236.0	285.72	0.03	1.27	1.39
春榆(<i>Ulmus japonica</i>)	乔木	52.5	227.7	162.77	0.18	2.28	1.12
大青杨(<i>Populus ussuriensis</i>)	乔木	257.4	362.9	205.06	0.11	1.25	1.32
胡桃楸(<i>Juglans mandshurica</i>)	乔木	137.2	261.4	287.83	0.17	1.06	1.23
红松(<i>Pinus koraiensis</i>)	乔木	40.4	52.9	76.58	0.62	/	/
怀槐(<i>Maackia amurensis</i>)	乔木	348.3	413.4	257.58	0.10	1.03	1.00
黄檗(<i>Phellodendron amurense</i>)	乔木	97.4	356.3	261.94	0.03	0.50	1.29
糠椴(<i>Tilia mandshurica</i>)	乔木	191.5	406.1	339.02	0.11	0.94	1.28
裂叶榆(<i>Ulmus laciniata</i>)	乔木	180.0	344.3	190.06	0.19	1.06	1.24
蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)	乔木	70.9	187.01	221.22	0.23	2.41	3.17
拧筋槭(<i>Acer triflorum</i>)	乔木	162.8	276.08	368.15	0.09	1.50	2.05
色木槭(<i>Acer mono</i>)	乔木	80.9	280.75	334.11	0.13	1.12	1.63
山杨(<i>Populus davidiana</i>)	乔木	128.8	230.72	177.83	0.12	1.83	1.98
水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)	乔木	70.0	236.43	174.84	0.14	0.98	0.68
水榆花楸(<i>Sorbus alnifolia</i>)	乔木	166.1	509.07	594.49	0.04	1.15	1.14
紫椴(<i>Tilia amurensis</i>)	乔木	53.9	277.99	299.38	0.16	0.85	1.15
暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i>)	小乔木	187.3	438.84	354.11	0.07	0.72	0.85
簇毛槭(<i>Acer barbinerve</i>)	小乔木	168.7	328.32	438.57	0.06	0.69	0.78
假色槭(<i>Acer pseudosieboldianum</i>)	小乔木	172.8	320.87	435.89	0.06	1.05	1.22
青楷槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	乔木	149.9	283.63	294.88	0.05	1.54	1.18
金刚鼠李(<i>Rhamnus diamantiaca</i>)	灌木	113.0	383.86	321.72	0.07	0.79	1.44
东北溲疏(<i>Deutzia parviflora</i>)	灌木	206.9	360.75	403.50	0.06	1.20	1.53
黄花忍冬(<i>Lonicera chrysantha</i>)	灌木	251.3	484.08	525.73	0.07	0.96	1.36
尖叶茶藨(<i>Ribes maximowiczianum</i>)	灌木	128.1	478.26	434.34	0.03	0.80	1.66
瘤枝卫矛(<i>Euonymus verrucosus</i>)	灌木	151.8	526.91	256.39	0.05	1.01	1.65
毛榛(<i>Corylus mandshurica</i>)	灌木	224.7	477.78	588.26	0.09	0.78	0.86
东北山梅花(<i>Philadelphus schrenkii</i>)	灌木	178.7	508.36	573.08	0.05	0.89	1.20
卫矛(<i>Euonymus alatus</i>)	灌木	130.4	467.25	454.02	0.05	1.95	2.20
早花忍冬(<i>Lonicera praeflorens</i>)	灌木	265.8	331.04	558.70	0.05	0.81	1.07

WHCstd; 标准持水力 Standard water holding capacity; WHCmax; 最大持水力 Maximum water holding capacity; SLA; 比叶面积 Specific leaf area;

TS; 韧性 Toughness; LT; 叶厚度 Leaf thickness; TH; 抗拉强度 leaf tensile strength

长白山阔叶红松林内常见树种的叶化学性状及化学计量学特征种间差异较大(表 2)。叶片 N 含量最大的树种为东北山梅花, N 含量为 1.7%, 最小的为红松为 0.75%, 均值为 1.09%, 变异系数为 20%。叶片 C 含量最大的树种为红松, C 含量为 50.94%, 最小的为东北溲疏为 37.85%, C 含量整体均值为 43.90%, 变异系数较小仅为 9%, 可见碳含量在不同种间变异较小。叶片 P 含量在 0.06%–0.18% 之间, 以东北山梅花含量最高, 红松最低。30 个树种的 P 含量整体均值为 0.12%, 变异系数为 27%。木质素(L)含量整体均值为 20.20%, 变异系数为 19%, 以红松最高为 30.06%, 东北山梅花最低为 14.5%。纤维素含量最大值为 29.5% (早花忍冬), 最小值为 12.8% (春榆)。30 个树种的纤维素含量整体均值为 20.48%, 变异系数为 19%。

对于其他 5 个化学计量特征 L:N、C:N、N:P、L:P 和 C:P 变化范围分别介于 8.53–45.7, 23.8–76.0, 5.5–17.8, 85.2–510.5 和 237.4–849.0 之间, 均值分别为 19.47、41.28、10.00、196.42。在 5 个化学计量学特性中以 L:P 变异性最大, 变异系数达到 47%, C:N 变异性最小变异系数为 27%。

表 2 不同树种凋落叶化学性状
Table 2 Chemical traits of all selected tree species

树种 Tree species	氮 N/%	碳 C/%	磷 P/%	木质素 L/%	纤维素 Cellulose/%	木质素:氮 L:N	碳:氮 C:N	氮:磷 N:P	碳:磷 C:P	木质素:磷 L:P
白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	1.1	48.1	0.08	19.5	15.6	17.4	43.0	14.0	601.8	244.0
白牛槭(<i>Acer mandshuricum</i>)	1.1	43.9	0.16	17.2	23.8	15.1	38.5	7.1	274.6	107.3
春榆(<i>Ulmus japonica</i>)	1.0	42.3	0.13	21.4	12.8	21.8	43.1	7.5	325.0	164.3
大青杨(<i>Populus ussuriensis</i>)	1.1	42.5	0.09	22.9	18.6	21.6	40.1	11.8	471.8	254.3
胡桃楸(<i>Juglans mandshurica</i>)	1.0	47.7	0.10	26.4	13.6	26.1	47.2	11.2	530.1	293.3
红松(<i>Pinus koraiensis</i>)	0.7	50.9	0.06	30.6	22.2	45.7	76.0	11.2	849.0	510.5
怀槐(<i>Maackia amurensis</i>)	1.4	47.2	0.08	25.9	19.6	18.2	33.2	17.8	589.9	323.4
黄檗(<i>Phellodendron amurense</i>)	1.4	46.9	0.17	21.8	28.6	16.2	34.7	7.9	275.7	128.5
糠椴(<i>Tilia mandshurica</i>)	1.3	46.7	0.13	18.7	20.8	14.5	36.2	8.6	311.1	124.7
裂叶榆(<i>Ulmus laciniata</i>)	1.0	38.3	0.12	16.3	19.2	15.7	36.9	8.7	319.5	135.7
蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)	0.9	47.0	0.10	25.6	21.5	28.1	51.6	9.1	469.8	256.0
拧筋槭(<i>Acer triflorum</i>)	0.8	44.2	0.13	17.0	21.7	22.6	59.0	5.8	340.3	130.6
色木槭(<i>Acer mono</i>)	1.1	43.3	0.12	16.2	21.8	14.6	39.0	9.3	360.7	135.3
山杨(<i>Populus davidiana</i>)	0.8	46.4	0.14	17.2	21.7	22.4	60.3	5.5	331.6	122.9
水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)	1.0	42.6	0.10	23.5	22.7	22.6	40.9	10.4	425.6	235.0
水榆花楸(<i>Sorbus alnifolia</i>)	0.9	44.1	0.08	17.3	27.6	19.0	48.5	11.4	551.4	216.1
紫椴(<i>Tilia amurensis</i>)	1.2	46.4	0.11	23.9	19.6	20.1	39.0	10.8	421.6	217.5
暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i>)	1.3	43.8	0.14	22.5	25.6	17.2	33.4	9.4	312.5	160.6
簇毛槭(<i>Acer barbinerve</i>)	1.0	46.3	0.13	15.7	16.5	16.4	48.3	7.4	356.3	120.9
假色槭(<i>Acer pseudosieboldianum</i>)	0.9	47.0	0.07	19.4	17.7	21.1	51.0	13.1	670.9	277.4
青楷槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	1.3	41.4	0.11	16.8	18.2	13.3	32.9	11.5	376.5	152.6
金刚鼠李(<i>Rhamnus diamantiaca</i>)	1.1	38.9	0.13	17.1	19.0	16.2	37.0	8.1	298.8	131.2
东北溲疏(<i>Deutzia parviflora</i>)	1.2	37.9	0.11	18.1	19.6	15.7	32.9	10.5	344.1	164.1
黄花忍冬(<i>Lonicera chrysantha</i>)	1.4	42.7	0.18	17.3	23.1	12.4	30.5	7.8	237.4	96.1
尖叶茶藨(<i>Ribes maximowiczianum</i>)	0.8	45.5	0.11	23.3	17.9	28.8	56.1	7.4	413.2	212.1
瘤枝卫矛(<i>Euonymus verrucosus</i>)	1.3	47.3	0.18	15.3	16.6	11.5	35.5	7.4	262.7	85.2
毛榛(<i>Corylus mandshurica</i>)	1.0	44.4	0.09	21.3	21.0	22.4	46.7	10.6	492.8	236.1
东北山梅花(<i>Philadelphus schrenkii</i>)	1.7	40.5	0.15	14.5	22.0	8.5	23.8	11.3	269.7	96.9
卫矛(<i>Euonymus alatus</i>)	1.0	42.9	0.07	23.3	20.5	22.4	41.2	14.9	612.4	333.1
早花忍冬(<i>Lonicera praeflorens</i>)	1.1	43.3	0.08	22.8	29.5	21.3	40.4	13.4	540.8	285.3

C: 碳 Carbon; N: 氮 Nitrogen; P: 磷 Phosphorus; L: 木质素 Lignin

3.2 不同树种凋落叶分解速率

经过 365d 的分解,不同树种凋落叶的质量损失率表现出较大的差异(表 3)。30 个树种凋落叶质量损失率在 20.56%—92.11%之间,损失率均值为 56.04%,变异系数为 26.85%。以东北山梅花损失率最高为 92.11%,其次为黄花忍冬(85.19%)和瘤枝卫矛(84.61%)。质量损失率较低的树种主要有红松、蒙古栎、胡桃楸、春榆、白桦等,质量损失率不足 40%。质量损失率最低的为红松,仅为 20.56%。不同生活型总质量损失率比较发现(图 1),3 种生活型质量损失率存在显著差异($P=0.004$),以乔木树种质量损失率最低为 48.23%,灌木树种质量损失率最高为 69.63%。

不同树种凋落叶分解负指数衰减模型拟合结果如表 4 所示。由表可知,不同树种凋落叶 Olson 负指数衰减模型都表现出较好的拟合效果,决定系数 R^2 均在

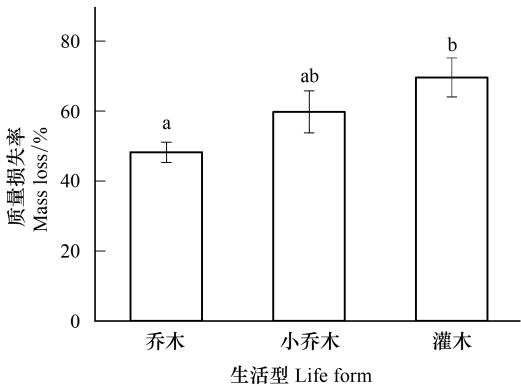


图 1 不同生活型树种凋落叶质量损失率比较
Fig.1 Comparison of mass loss of leaf litter for different life form tree species
不同小写字母表示不同生活型质量损失率差异显著

0.87—0.99 之间。不同树种的分解系数(k)以瘤枝卫矛最大为 1.64,红松最小仅为 0.24。30 个树种分解 50% 和 95%所需的时间有较大的差异。凋落叶分解 50%和 95%所需的时间均以红松所需的时间最长,瘤枝卫矛所需的时间最短。红松分解 50%所需的时间为 2.86 年,分解 95%所需的时间为 12.37 年。瘤枝卫矛分解 50%所需的时间最短为 0.43 年,分解 95%所需的时间为 1.83 年。

表 3 不同树种不同时间段质量损失率

Table 3 Mass loss of different species in different time periods

树种 Tree species	质量损失率 Mass loss rate/%				总质量损失率/% Total mass loss rate
	0—180d	180—240d	240—300d	300—365d	
白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	13.44	14.11	6.61	5.78	39.94
白牛槭(<i>Acer mandshuricum</i>)	18.28	13.11	14.11	14.94	60.44
春榆(<i>Ulmus japonica</i>)	18.33	10.39	5.56	5.33	39.61
大青杨(<i>Populus ussuriensis</i>)	22.44	9.83	10.33	2.83	45.44
胡桃楸(<i>Juglans mandshurica</i>)	20.67	9.39	3.78	2.06	35.89
红松(<i>Pinus koraiensis</i>)	7.78	5.72	5.61	1.44	20.56
怀槐(<i>Maackia amurensis</i>)	19.33	13.17	10.00	4.39	46.89
黄檗(<i>Phellodendron amurense</i>)	25.06	14.33	23.67	11.17	74.22
糠椴(<i>Tilia mandshurica</i>)	19.44	11.33	9.78	7.28	47.83
裂叶榆(<i>Ulmus laciniata</i>)	18.61	15.78	11.78	5.00	51.17
蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)	10.89	9.17	9.61	5.33	35.00
拧筋槭(<i>Acer triflorum</i>)	15.17	14.72	15.44	5.61	50.94
色木槭(<i>Acer mono</i>)	20.22	11.83	15.72	5.50	53.27
山杨(<i>Populus davidiana</i>)	19.17	11.33	7.89	5.83	44.22
水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)	28.06	17.28	12.39	10.33	68.06
水榆花楸(<i>Sorbus alnifolia</i>)	19.83	21.11	7.44	4.61	53.00
紫椴(<i>Tilia amurensis</i>)	11.06	14.56	13.83	2.56	42.00
暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i>)	25.58	19.58	16.50	10.58	72.25
簇毛槭(<i>Acer barbinerve</i>)	20.94	10.44	23.89	5.11	60.39
假色槭(<i>Acer pseudosieboldianum</i>)	14.11	12.44	16.06	4.17	46.78
青楷槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	23.61	9.94	21.78	4.33	59.67
金刚鼠李(<i>Rhamnus diamantiaca</i>)	29.50	19.25	20.89	6.36	76.00
东北溲疏(<i>Deutzia parviflora</i>)	44.83	3.17	12.47	14.81	75.28
黄花忍冬(<i>Lonicera chrysantha</i>)	39.92	17.17	3.64	24.47	85.19
尖叶茶藨(<i>Ribes maximowiczianum</i>)	21.06	11.44	5.39	13.28	51.17
瘤枝卫矛(<i>Euonymus verrucosus</i>)	46.89	16.17	16.17	5.39	84.61
毛榛(<i>Corylus mandshurica</i>)	17.11	7.94	4.94	15.72	45.72
东北山梅花(<i>Philadelphus schrenkii</i>)	31.39	28.61	17.72	14.39	92.11
卫矛(<i>Euonymus alatus</i>)	17.11	12.17	12.17	4.00	45.44
早花忍冬(<i>Lonicera praeflorens</i>)	34.4	14.11	19.27	2.94	71.22

表 4 不同树种凋落叶分解 Olson 负指数衰减模型

Table 4 Olson Negative exponential decomposition model for leaf litter of 30 selected tree species

树种 Tree species	模型 model	决定系数 R^2	分解系数 k	$t_{0.5}/a$	$t_{0.95}/a$
白桦(<i>Betula platyphylla</i>)	$102.20e^{-0.53t}$	0.94	0.53	1.31	5.65
白牛槭(<i>Acer mandshuricum</i>)	$104.20e^{-0.75t}$	0.90	0.75	0.92	3.99
春榆(<i>Ulmus japonica</i>)	$100.98 e^{-0.51t}$	0.99	0.51	1.36	5.89
大青杨(<i>Populus ussuriensis</i>)	$101.05 e^{-0.62t}$	0.98	0.62	1.11	4.80
胡桃楸(<i>Juglans mandshurica</i>)	$99.47 e^{-0.48t}$	0.98	0.48	1.44	6.22

续表

树种 Tree species	模型 model	决定系数 R^2	分解系数 k	$t_{0.5}/a$	$t_{0.95}/a$
红松(<i>Pinus koraiensis</i>)	$100.90 e^{-0.24t}$	0.96	0.24	2.86	12.37
怀槐(<i>Maackia amurensis</i>)	$101.90 e^{-0.63t}$	0.97	0.63	1.10	4.75
黄檗(<i>Phellodendron amurense</i>)	$104.63 e^{-1.05t}$	0.88	1.05	0.66	2.85
糠椴(<i>Tilia mandshurica</i>)	$102.07 e^{-0.70t}$	0.97	0.62	1.12	4.84
裂叶榆(<i>Ulmus laciniata</i>)	$102.74 e^{-0.75t}$	0.94	0.70	0.99	4.31
蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)	$102.5 e^{-0.42t}$	0.93	0.42	1.67	7.21
拧筋槭(<i>Acer triflorum</i>)	$102.89 e^{-0.62t}$	0.91	0.62	1.13	4.86
色木槭(<i>Acer mono</i>)	$103.11 e^{-0.84t}$	0.93	0.84	0.82	3.54
山杨(<i>Populus davidiana</i>)	$101.48 e^{-0.58t}$	0.98	0.58	1.21	5.20
水曲柳(<i>Fraxinus mandshurica</i>)	$102.85 e^{-1.00t}$	0.95	1.00	0.69	2.99
水榆花楸(<i>Sorbus alnifolia</i>)	$102.38 e^{-0.76t}$	0.94	0.76	0.92	3.96
紫椴(<i>Tilia amurensis</i>)	$103.55 e^{-0.89t}$	0.89	0.54	1.28	5.52
暴马丁香(<i>Syringa reticulata</i>)	$103.95 e^{-0.92t}$	0.92	0.92	0.76	3.27
簇毛槭(<i>Acer barbinerve</i>)	$104.08 e^{-0.82t}$	0.89	0.82	0.84	3.64
假色槭(<i>Acer pseudosieboldianum</i>)	$102.79 e^{-0.56t}$	0.91	0.56	1.23	5.33
青楷槭(<i>Acer tegmentosum</i>)	$101.92 e^{-0.75t}$	0.91	0.75	0.93	4.00
金刚鼠李(<i>Rhamnus diamantiaca</i>)	$103.74 e^{-1.20t}$	0.92	1.20	0.58	2.50
东北溲疏(<i>Deutzia parviflora</i>)	$100.70 e^{-1.18t}$	0.98	1.18	0.59	2.53
黄花忍冬(<i>Lonicera chrysantha</i>)	$102.18 e^{-1.33t}$	0.94	1.33	0.52	2.25
尖叶茶藨(<i>Ribes maximowiczianum</i>)	$101.95 e^{-0.64t}$	0.96	0.64	1.09	4.69
瘤枝卫矛(<i>Euonymus verrucosus</i>)	$101.70 e^{-1.63t}$	0.97	1.63	0.43	1.83
毛榛(<i>Corylus mandshurica</i>)	$102.29 e^{-0.52t}$	0.93	0.52	1.34	5.80
东北山梅花(<i>Philadelphus schrenkii</i>)	$104.48 e^{-1.53t}$	0.87	1.53	0.45	1.95
卫矛(<i>Euonymus alatus</i>)	$102.39 e^{-0.59t}$	0.95	0.59	1.16	5.02
早花忍冬(<i>Lonicera praeflorens</i>)	$103.26 e^{-1.25t}$	0.93	1.25	0.55	2.39

$t_{0.5}$ 、 $t_{0.95}$ 分别表示凋落叶分解 50%、95% 所用的时间

3.3 分解速率与凋落叶性状的关系

不同物理性状对凋落叶分解的影响不同。图 2 为阔叶红松林内所选 30 个树种叶片物理性状和分解速率 k 的关系。30 个树种 WHCmax、SLA、LT 及 TH 与凋落叶分解速率存在显著的相关关系 ($P < 0.05$), 其中 WHCmax、SLA 与凋落叶分解速率为正相关关系, LT 及 TH 与凋落叶分解速率呈负相关关系。不同物理性状以 WHCmax 与凋落叶分解速率的相关性最高为 0.55。对于其他物理性状, WHCstd 和 TH 则与叶凋落物分解没有显著相关性 ($P > 0.05$)。

凋落叶化学元素的含量对分解速率有一定的影响, 不同化学元素对凋落叶分解速率的影响见图 3。可以看出, 30 个树种叶 N、C、P 及木质素均与叶凋落物分解存在显著的相关关系 ($P < 0.05$), 其中 N 和 P 与叶凋落物分解速率为正相关关系, C 和木质素与叶凋落物分解呈负相关关系。而凋落叶纤维素则与叶凋落物分解没有显著相关性 ($P > 0.05$)。不同化学性状以叶片 N 与叶凋落物分解速率的相关性最强为 0.63。对于不同的化学计量比, L:N、C:N、L:P、C:P 与叶凋落物分解呈显著负相关性。其中以 L:N 值对凋落叶分解速率的解释能力最强, 相关性为 -0.66。N:P 对凋落叶分解速率的解释性较差。

凋落叶物理性状、化学性状在不同时间段内对凋落叶质量损失量的影响程度不同(表 5)。具体表现为, 在实验前 180d 和 180—240d, 叶片 WHCmax、LT、叶片 N 含量、木质素、L:N、L:P 与各阶段质量损失率有显著相关性。在第三阶段(240—300d), 物理性状仅 LT 与此阶段质量损失率存在显著相关性, 化学性状木质素、L:N、C:N、L:P 与此阶段质量损失率存在显著相关性, 可见此阶段影响凋落叶分解的主要因素为凋落叶内化学物质含量的影响。分解到最后一个阶段时, 物理性状仅凋落叶 WHCmax 和 SLA 与此阶段质量损失率存在

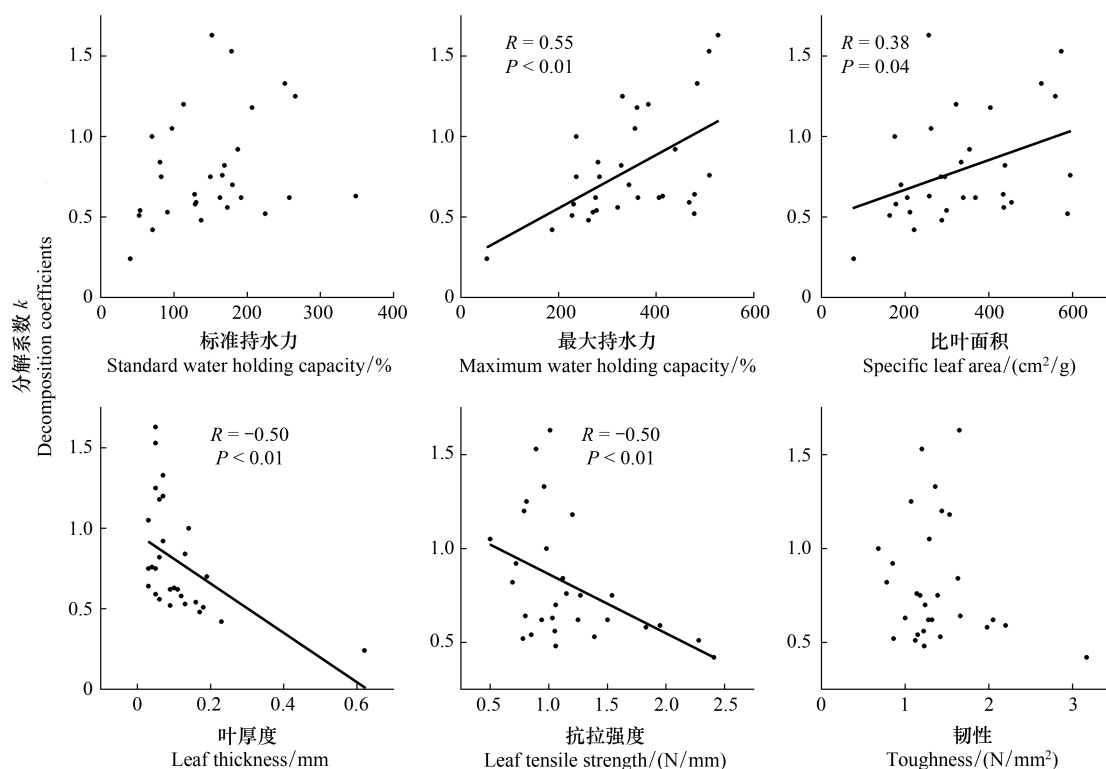


图2 凋落叶分解速率与物理性状间的相关性

Fig.2 Relationship between chemical traits of leaf litter and physical decomposition coefficients

显著相关性,化学性状 N、P、L:N、C:N、C:P、L:P 与此阶段质量损失率存在显著相关性。

4 结论与讨论

凋落物分解在森林生态系统物质循环中发挥着重要作用,是地上、地下物质循环和能量流动的枢纽。本研究通过测定 30 个树种的 1 年的分解速率,研究了长白山阔叶红松林内常见树种凋落叶分解速率与叶性状的关系,有助于增加长白山阔叶红松林生态系统的基础数据,丰富阔叶红松林的生态学理论,为研究阔叶红松林的养分循环和物质流动提供依据。

研究表明,凋落叶分解与凋落叶质量、叶片结构等功能性状有密切关系^[27]。对于物理性状,凋落叶分解速率与凋落叶饱和持水率、叶片厚度、比叶面积和抗拉强度之间存在显著相关性,此结论与 Makkonen 等、Vaieretti 等的研究结果相同^[22,28]。饱和持水率与凋落叶分解存在较强的相关性,原因可能为具有高饱和持水率的凋落叶具有较强的获取水分和保留水分的能力,能改善分解者周围的小气候,可以为分解者提供所必需的水分^[22]。另外,饱和持水率可能与叶片干物质含量具有相同的解释。叶片干物质含量反映了叶肉和结构化合物的比例关系^[29]。叶片干物质含量越高,叶肉和表皮(光组织)所占比例越低,维管组织和厚壁组织(木质素、纤维素)所占比例越高,其分解速率越慢^[30-31]。比叶面积与凋落物分解成正比,说明比叶面积越大,分解速率越快。其原因是比叶面积与叶的粗糙度呈反比,凋落叶越粗糙分解速率越慢^[15]。另外,比叶面积大代表着单位重量的叶片有更大的面积与分解者接触,进而提高了分解速率^[32]。叶片抗拉强度一般与叶片的物理防御相关。高抗拉强度具有较高的物理防御能力,这类凋落叶组织密度较高,会降低土壤动物的适口性,也会使分解者花费更多的能量和时间去分解这些难分解物质从而降低分解速率^[33]。但是本研究发现同样代表物理防御能力的叶片韧性与凋落物分解却没有显著相关性,这与 Gallardo 等^[5]的研究有一定差异。

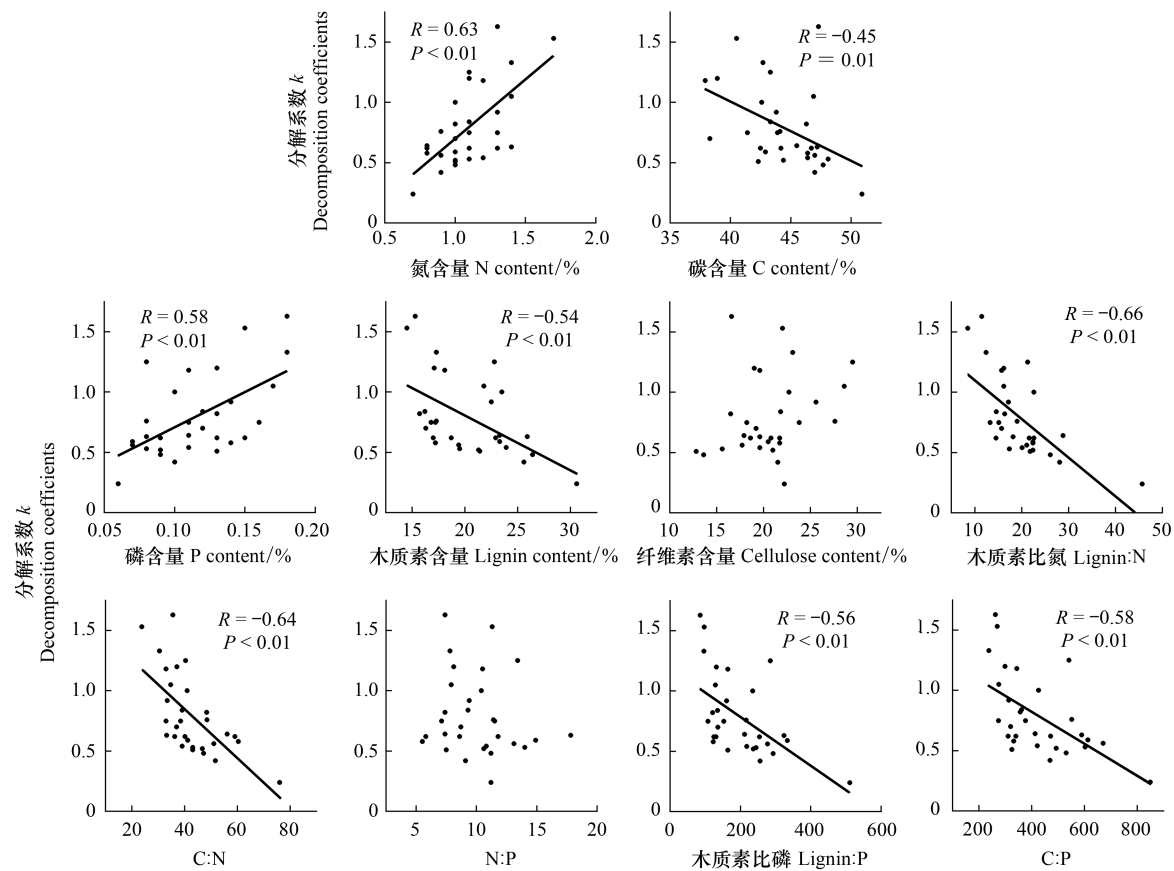


图 3 凋落叶分解速率与化学性状间的相关性

Fig.3 Relationship between chemical traits of leaf litter and decomposition coefficients

表 5 不同分解阶段质量损失率与凋落叶性状的关系

凋落叶性状 Leaf traits	R			
	0—180d	180—240d	240—300d	240—365d
标准持水力 WHCstd/%	0.39 *	0.08	0.00	0.19
饱和持水力 WHCmax/%	0.52 **	0.48 **	0.07	0.42 *
比叶面积 SLA/(cm ² /g)	0.30	0.33	0.12	0.41 *
叶厚度 LT/mm	-0.46 *	-0.36 *	-0.39 *	-0.36
韧性 TS/(N/mm)	-0.18	-0.22	-0.15	-0.11
抗拉强度 TH/(N/mm ²)	-0.34	-0.32	-0.33	-0.27
氮 N/%	0.53 **	0.46 **	0.36	0.39 *
碳 C/%	-0.46 **	-0.25	-0.25	-0.32
磷 P/%	0.42 *	0.36	0.15	0.52 **
木质素 Lignin/%	-0.41 *	-0.40 *	-0.40 *	-0.30
纤维素 Cellulose/%	0.13	0.33	0.26	0.25
木质素:氮 L:N	-0.55 **	-0.50 **	-0.46 *	-0.36 *
碳:氮 C:N	-0.58 **	-0.44 *	-0.36 *	-0.37 *
氮:磷 N:P	-0.14	-0.02	-0.08	-0.31
碳:磷 C:P	-0.52 **	-0.34	-0.33	-0.51 **
木质素:磷 L:P	-0.47 **	-0.39 *	-0.38 *	-0.46 *

* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著

凋落叶化学性状是最常用来解释凋落叶分解速率的指标。已有研究证明了多个化学成分会影响凋落叶的分解速率,如叶片 N、P、木质素、纤维素、L:N 等^[27]。许多研究发现凋落叶 N 含量对分解速率的解释能力较

强,因为 N 元素是分解者生长发育、生理代谢不可缺少的元素,分解者在分解初期更倾向于分解 N 含量高的凋落物。随着分解的进行,N 含量不断下降,分解者继而转向 P 含量较高的凋落叶^[34],因此 P 含量对凋落叶的分解也有一定的预测作用。本研究中凋落叶 N 和 P 含量均与叶片分解速率呈显著正相关关系,此结论与前人研究结果一致。凋落叶 C 含量与凋落物分解呈负相关关系,与一些研究的结论相同^[4]。C 含量对于高木质化组织的分解预测能力较强,而且与木质素、纤维素等难分解物质有很强的相关性。木质素、纤维素及木质素和氮的比值也在多项研究中被证明与凋落叶分解存在一定的关系,本研究的结果与以往研究结论相似。但是本研究中纤维素并没有显现出与凋落叶分解有一定的相关性,与部分研究结论相反。

在同一林型内,可以认为凋落叶分解所处的环境因素和分解者因素是相同的。因此,凋落叶分解实验除了受凋落叶自身特性的影响外还会受实验材料的影响。研究表明,实验过程中所用的分解袋网孔大小也会对凋落叶分解速率有较大影响,例如李艳红分别使用 6 目、30 目和 260 目的网袋研究了不同孔径下凋落叶的分解速度,结果表明不同孔径下的分解速率差异显著^[35]。对长白山地区来讲,不通孔径分解袋对凋落叶的影响可能较小甚至不会产生显著性差异,蒋云峰利用孔径为 0.1mm、2mm 和 4mm 的分解袋研究了阔叶红松林内红松、水曲柳、紫椴和色木槭的分解特征,结果表明水曲柳和紫椴经过 1 年的分解不同孔径分解袋中的损失率没有显著差异,红松和色木槭仅 0.01mm 孔径网袋内的凋落叶损失率与 2mm 和 4mm 的存在差异,2mm 和 4mm 孔径网袋内的凋落叶损失率没有显著性差异^[36]。本研究使用 1mm 孔径的网袋保证了实验材料的一致性,可以认为真实反映了不同树种在分解速率快慢上的差异。

参考文献 (References):

- [1] Domke G M, Perry C H, Walters B F, Woodall C W, Russell M B, Smith J E. Estimating litter carbon stocks on forest land in the United States. *Science of the Total Environment*, 2016, 557-558: 469-478.
- [2] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Orlando: Academic Press, 1985.
- [3] Liu G F, Wang L, Jiang L, Pan X, Huang Z Y, Dong M, Cornelissen J H C. Specific leaf area predicts dryland litter decomposition via two mechanisms. *Journal of Ecology*, 2018, 106(1): 218-229.
- [4] 李玉霖, 孟庆涛, 赵学勇, 崔建垣. 科尔沁沙地植物成熟叶片性状与叶凋落物分解的关系. *生态学报*, 2008, 28(6): 2486-2494.
- [5] Gallardo A, Merino J. Leaf decomposition in two Mediterranean ecosystems of southwest Spain: influence of substrate quality. *Ecology*, 1993, 74(1): 152-161.
- [6] 张晓曦, 周雯星, 李佳佳, 王博雅, 刘增文, 石雪. 早期分解中油松与阔叶树种凋落叶混合分解效应及其相互影响. *植物科学学报*, 2019, 37(3): 303-311.
- [7] Giller K E, Cadisch G. Driven by nature: a sense of arrival or departure? // Cadisch G, Giller K E, eds. *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. Wallingford: CAB International, 1997: 393-399.
- [8] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, Sanford R L. Litter decomposition on the mauna loa environmental matrix, Hawai'i: patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 1994, 75(2): 418-429.
- [9] Aber J D, Melillo J M, McLaugherty C A. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems. *Canadian Journal of Botany*, 1990, 68(10): 2201-2208.
- [10] Agethen S, Knorr K H. *Juncus effusus* mono-stands in restored cutover peat bogs - Analysis of litter quality, controls of anaerobic decomposition, and the risk of secondary carbon loss. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 117: 139-152.
- [11] 魏强, 凌雷, 王多锋, 李国林, 戚建莉, 柴春山. 甘肃省兴隆山森林主要树种凋落叶分解速率与初始质量的关系. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 9-15, 36-36.
- [12] Taylor B R, Parsons W F J, Parkinson D. Decomposition of *Populustremuloides* leaf litter accelerated by addition of *Alnuscrispa* litter. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(5): 674-679.
- [13] 郭伟, 张健, 黄玉梅, 刘旭, 王伟, 薛林. 森林凋落物影响因子研究进展. *安徽农业科学*, 2009, 37(4): 1544-1546.
- [14] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(1/2): 13-22.
- [15] Moretto A S, Distel R A, Didoné N G. Decomposition and nutrient dynamic of leaf litter and roots from palatable and unpalatable grasses in a semi-arid grassland. *Applied Soil Ecology*, 2001, 18(1): 31-37.
- [16] Vossbrinck C R, Coleman D C, Woolley T A. Abiotic and biotic factors in litter decomposition in a semiarid grassland. *Ecology*, 1979, 60(2):

265-271.

- [17] 杨效东, 邹晓明. 西双版纳热带季节雨林凋落叶分解与土壤动物群落: 两种网孔分解袋的分解实验比较. 植物生态学报, 2006, 30(5): 791-801.
- [18] 包剑利, 殷秀琴, 李晓强. 长白山牛皮杜鹃凋落物分解及土壤动物的作用. 生态学报, 2015, 35(10): 3320-3328.
- [19] 李俊清, 李景文. 中国东北小兴安岭阔叶红松林更新及其恢复研究(英文). 生态学报, 2003, 23(7): 1268-1277.
- [20] 耿晓源. 长白山某些树种叶子的分解动态研究. 植物生态学报, 1993, 17(1): 90-96.
- [21] 刘雅各, 袁凤辉, 王安志, 吴家兵, 郑兴波, 尹航, 关德新. 长白山生态功能区气候变化特征. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1503-1512.
- [22] Makkonen M, Berg M P, Handa I T, Hättenschwiler S, van Ruijven J, van Bodegom P M, Aerts R. Highly consistent effects of plant litter identity and functional traits on decomposition across a latitudinal gradient. Ecology Letters, 2012, 15(9): 1033-1041.
- [23] Terashima N, Kitano K, Kojima M, Yoshida M, Yamamoto H, Westermarck U. Nanostructural assembly of cellulose, hemicellulose, and lignin in the middle layer of secondary wall of ginkgo tracheid. Journal of Wood Science, 2009, 55(6): 409-416.
- [24] Ververis C, Georgiou K, Christodoulakis N, Santas P, Santas R. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. Industrial Crops and Products, 2004, 19(3): 245-254.
- [25] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology, 1963, 44(2): 322-331.
- [26] Patoine G, Bruehlheide H, Haase J, Nock C, Ohlmann N, Schwarz B, Scherer-Lorenzen M, Eisenhauer N. Tree litter functional diversity and nitrogen concentration enhance litter decomposition via changes in earthworm communities. Ecology and Evolution, 2020, 10(13): 6752-6768.
- [27] Pei G T, Liu J, Peng B, Gao D C, Wang C, Dai W W, Jiang P, Bai E. Nitrogen, lignin, C/N as important regulators of gross nitrogen release and immobilization during litter decomposition in a temperate forest ecosystem. Forest Ecology and Management, 2019, 440: 61-69.
- [28] Vaieretti M V, Harguindeguy N P, Gurvich D E, Cingolani A M, Cabido M. Decomposition dynamics and physico-chemical leaf quality of abundant species in a montane woodland in central Argentina. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 223-234.
- [29] Arendonk J J C M, Poorter H. The chemical composition and anatomical structure of leaves of grass species differing in relative growth rate. Plant, Cell & Environment, 1994, 17(8): 963-970.
- [30] Niemann G J, Pureveen J B M, Eijkel G B, Poorter H, Boon J J. Differences in relative growth rate in 11 grasses correlate with differences in chemical composition as determined by pyrolysis mass spectrometry. Oecologia, 1992, 89(4): 567-573.
- [31] Garnier E, Laurent G. Leaf anatomy, specific mass and water content in congeneric annual and perennial grass species. New Phytologist, 1994, 128(4): 725-736.
- [32] Vestergaard P, Rønn R, Christensen S. Reduced particle size of plant material does not stimulate decomposition, but affects the microbivorous microfauna. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(12/13): 1805-1810.
- [33] Onoda Y, Westoby M, Adler P B, Choong A M F, Clissold F J, Cornelissen J H C, Díaz S, Dominy N J, Elgart A, Enrico L, Fine P V A, Howard J J, Jalili A, Kitajima K, Kurokawa H, McArthur C, Lucas P W, Markesteijn L, Pérez-Harguindeguy N, Poorter L, Richards L, Santiago L S, Sosinski E E Jr, Van Bael S A, Warton D I, Wright I J, Wright S J, Yamashita N. Global patterns of leaf mechanical properties. Ecology Letters, 2011, 14(3): 301-312.
- [34] Cleveland C C, Townsend A R, Schmidt S K. Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubations and field studies. Ecosystems, 2002, 5(7): 680-691.
- [35] 李艳红. 巨桉—台湾桉木混合凋落物分解特征及其土壤动物群落动态[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [36] 蒋云峰. 长白山针阔混交林主要凋落物分解及土壤动物的作用[D]. 长春: 东北师范大学, 2013.