

热带尖峰岭和亚热带千岛湖六种凋落叶的分解特征

窦荣鹏¹, 江洪^{1,2,*}, 余树全^{1,*}, 马元丹¹, 郭培培¹, 宋新章¹

(1. 浙江林学院国际生态研究中心, 浙江临安 311300; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:选取亚热带 6 个树种马尾松 (*Pinus massoniana*)、毛竹 (*Phyllostachys heterocycla*)、水杉 (*Metasequoia glyptostroboides*)、木荷 (*Schima superba*)、青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*) 和苏铁 (*Cycas revoluta*) 的凋落物, 在亚热带的千岛湖和热带的尖峰岭进行凋落物分解实验, 研究不同气候带下调落物的分解特征。两样地的年均气温和降水为主要差异, 年均温差达 3.0℃。结果表明: 两个样地凋落物的分解速率顺序为: 毛竹 > 木荷 > 青冈 > 马尾松 > 水杉 > 苏铁, 尖峰岭样地 6 个树种 95% 分解所需的时间集中在 3.22—8.81a, 千岛湖样地 95% 分解所需的时间为 4.61—14.27a。6 种凋落物叶的分解速率尖峰岭显著大于千岛湖 ($P < 0.05$)。用尖峰岭的气候条件来模拟千岛湖气候变暖后的状况, 凋落物分解的分解速率将提高 43.08%—95.65%, 凋落物的 95% 分解时间将缩短 30.15%—48.85%。凋落物分解的表观 Q_{10} 在 3.30—9.35 之间。在千岛湖样地凋落物的分解速率 (k 值) 与初始氮含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与木质素含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); 在尖峰岭样地, 凋落物的分解速率与凋落物基质质量的各因子相关性均不显著。氮含量和木质素含量在中亚热带地区是预测凋落物分解和失重的良好指标, 在热带地区气候因子对凋落物分解的控制作用较强烈于凋落物初始基质质量的控制作用。

关键词:凋落物; 分解; 中亚热带; 热带; 全球变化

Leaf litter decomposition of six trees in Mid-subtropical and tropical China

DOU Rongpeng¹, JIANG Hong^{1,2,*}, YU Shuquan^{1,*}, MA Yuandan¹, GUO Peipei¹, SONG Xinzhang¹

1 International Research Center of Spatial Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Lin'an 311300, Zhejiang China

2 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Global change is becoming one of central issue in broadly disciplines. Litter decomposition is a critical pathway of nutrient cycling in forests, and it plays an important role in linking aboveground and belowground processes of forest ecosystems. Global warming could have complicated effects on litter decomposition in terrestrial ecosystems. Although litterfall composition and dynamics had been widely studied. However the influence of global warming on the litterfall decomposition is poorly understood, so our objective was to explore the effects of global warming on the litterfall decomposition in Mid-subtropical and tropical China. The leaf litter of six main tree species in subtropical and tropical China, including *Pinus massoniana*, *Phyllostachys heterocycla*, *Metasequoia glyptostroboides*, *Schima superba*, *Cyclobalanopsis glauca*, *Cycas revoluta*, were selected and their decomposition rates were measured by litterbag in two sites (Qiandaohu in Zhejiang Province and Jianfengling in Hainan Province). The two sites have similar soil types and slope aspect. The annual mean temperature with the difference of 3.0℃ and mean annual precipitation between two sites. The decomposition experiment was conducted with nylon bag and the leaf litter were collected in Lin'an County of Zhejiang Province, in March of 2006. These material of leaf litter had been drought at 80℃ and analyzed their N, P, K, C and lignin initial contents variation. We packed them with 216 nylon bags, then placed to the ground surface of evergreen broad-leaf forest of Zhejiang Province and tropical rain forest of Hainan Province. Eighteen bags were take out once a month. The experiment period was about two years. When the litter bags were take out, they were clean and dry, The weight loss rate

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2005CB422207, 2005CB422208, 2010CB428503); 国家自然科学基金项目(40671132, 30970485); 科技部数据共享平台建设项目(2006DKA32300-08); 科技部重大国际合作项目(200073819); 科技部重大基础性项目(2007FY110300-08); 浙江省重大科技专项(2008C13C2100010); 浙江省科技厅重大项目(2006C12060); 浙江省森林培育重中之重学科开放基金(200608)

收稿日期: 2010-03-17; 修订日期: 2010-05-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianghong_china@hotmail.com; yushq@zjfc.edu.cn

were measured, and calculated the decomposition rate. The results indicate that the order of litter decomposition rate was *Phyllostachys heterocycla* > *Schima superba* > *Cyclobalanopsis glauca* > *Pinus massoniana* > *Metasequoia glyptostroboides* > *Cycas revolute* both in Jianfengling and Qiandaohu. The 95% decomposition time ranges from 3.22 to 8.81 in Jianfengling, and from 4.61 to 14.27 in Qiandaohu. The decomposition rate in Jianfengling is faster than it is in Qiandaohu. The leaf litter decomposition of *Schima superba* and *Cyclobalanopsis glauca* are especially faster in Jianfengling than in Qiandaohu. The litter decomposition rate of *Phyllostachys heterocycla* is the fastest, and its decomposition rate is higher than other species. The difference between Jianfengling and Qiandaohu also was significant ($P < 0.05$). As climate warming in the future, assuming the condition of Qiandaohu will be change to like Jianfengling, the litter decomposition rate will increase 43.08%—95.65%, the 95% decomposition time will shorten 30.15%—48.85%. The ranges of Q_{10} will be from 3.30 to 9.35, based on the basis of temperature difference between two sites, ranges We also found that annual decomposition rates of leaf litter in Qiandaohu was significantly correlated with the initial N and lignin concentration ($P < 0.05$), The relationship between decomposition rate and litter substrate quality was not significant in Jianfengling site. Therefore, the initial N and lignin concentration of leaf litter could be the good indicators of litter decomposition rate in mid-subtropical area.

Key Words: litter; decomposition; mid-subtropical area; tropical area; global change

凋落物分解时陆地生态系统物质循环和能量转换的主要途径^[1-3],森林凋落物在维持土壤肥力、保证植物再生长养分的可利用性中起着重要作用,同时对森林生态系统的碳预算具有重要的科学意义^[4-5]。

迄今,凋落物的跨气候带分解实验在国外已较为系统深入,如比较著名的美国长期埋藏分解实验(Long-term intersite decomposition experiment in the United States, LIDET)、加拿大的埋藏分解实验(The Canadian intersite decomposition experiment, CIDET)等^[6],这些研究在一定程度上揭示了温度升高对凋落物分解的影响。Jenney 等^[7]、Mikola^[8]、Heaney^[9]、Vitousek 等^[10]的研究观察到随气温的升高凋落物的分解速率增加。Jenney 等^[7]、Mikola^[8]是沿以纬度形成的气温梯度研究温度对森林凋落物分解速率的影响,Heaney^[9]、Vitousek 等^[10]是沿海拔高度形成的气温梯度进行研究的。Vitousek 等^[10]在太平洋热带岛屿 Mauna Loa 对优势种 *Metrosideros polymorpha* 的研究表明:海拔越高,气温越低,则凋落物的分解速率呈指数降低。目前,国内也已有不少关于凋落物分解对气候变化响应的综述性研究论文^[11-13],主要涉及分解过程影响因素、温度敏感性指数(Q_{10})、凋落物分解对土壤有机碳贡献及凋落物对气候变化响应的理论分析等,但在不同气候带之间研究具体树种凋落物分解对全球变暖的响应方面的实验不多。

在不同气候带的森林生态系统进行凋落物的分解实验,能为解释凋落物分解对全球变暖的响应提供许多有价值的信息,对了解气候变化对森林凋落物的分解和森林生态系统物质循环具有重要的参考价值。本文选取6个树种的凋落物分别放在中亚热带和热带林下进行分解对比研究,试图探究在跨气候带的大尺度下调落物在分解过程中:①凋落物在中亚热带和热带的分解速率,以预测未来气候变化变暖条件下凋落物的分解特征;②凋落物初始基质质量与不同气候带下调落物分解速率的相关性。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

千岛湖姥山林场位于杭州市西南部(29°31'N, 118°58'E),属中亚热带季风气候区,气候温暖湿润,雨量充沛,年均气温 17.0℃,7 月份平均温度为 28.9℃,极端最高气温为 41.8℃;1 月份平均温度为 5.0℃,极端最低气温为 -7.6℃。年均降水量 1430mm,年平均无霜期 263d,年均相对湿度 76%,海拔 172m,土壤类型为黄红壤,土体中常含半风化的页岩碎片,下部风化层较深。

该地区植物资源较丰富,现有森林植被以天然次生马尾松(*Pinus massoniana*)为主,人工林主要有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松、麻栎(*Quercus acutissima*)、木荷(*Schima superba*)和毛竹(*Phyllostachys*

heterocycla)。林下灌木层主要有白檀(*Symplocos paniculata*)、白栎(*Quercus fabri*)、白背叶(*Mallotus apelta*)、山胡椒(*Lindera benzoin*)等。草本层主要有蕨类和禾本科植物。

尖峰岭位于海南岛的西南部(18°40'N, 108°49'E), 属热带季风气候, 年均气温 20.0℃, 1 月份平均气温 15.1℃, 7 月份平均气温 22.9℃, 年均降水量 2651.6mm, 5—10 月份为雨季, 11 月份—翌年 4 月份为旱季, 年均相对湿度 88%, 海拔 810m, 土壤为砖黄壤, 微生物丰富, 总数达 28230.2 万个/g 干土^[14]。

本研究区位于尖峰岭国家级自然保护区的天池附近, 主要植被类型为热带山地雨林, 该植被类型分布区气候条件优越, 种类组成复杂, 以樟科(*Lauraceae*)、茜草科(*Rubiaceae*)、壳斗科(*Fagaceae*)和桃金娘科(*Myrtaceae*)等为优势科^[15]。

两样地的主要差异为年均气温和年均降雨量, 年均气温相差达 3.0℃, 年均降雨量相差 1221mm。

1.2 研究方法

1.2.1 实验树种及凋落物采集

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方分布面积最大的树种之一, 是典型的演替先锋树种。水杉(*Metasequoia glyptostroboides*)素有“活化石”之称, 稀有种, 世界上珍惜的孑遗植物, 树形优美, 生长快, 是亚热带地区平原绿化的优良树种, 也是速生用材树种。苏铁(*Cycas revoluta*)是世界上最古老的种子植物, 为优美的观赏树种, 在我国南方热带及亚热带分布极为普遍。毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)为常绿乔木状竹类植物, 经济价值较高, 在我国亚热带地区广泛分布。木荷(*Schima superba*)是亚热带常绿阔叶林的常见伴生种, 也是重要的防火树种。青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)为常绿乔木, 是常绿阔叶林的主要组成树种, 在我国长江流域以南各省普遍分布。

2006 年 3—4 月分别在浙江林学院校园及周边地区采集马尾松、水杉、苏铁、毛竹、木荷、青冈 6 个树种凋落的叶片, 凋落物采集后自然风干 1 个月。

1.2.2 凋落物化学组成测定

风干样留取一部分于 80℃ 烘至恒重, 测定含水率, 同时进行化学分析测定凋落物的木质素、碳、氮、磷、钾元素的含量。其中全碳采用重铬酸钾-浓硫酸($K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$)氧化法, 全氮采用碱解扩散法, 全磷采用钼锑抗比色法, 全钾采用火焰分光光度法, 木质素采用酸性洗涤纤维(ADF)法测定^[6]。

1.2.3 凋落物分解实验

凋落物分解采用分解袋法。凋落物袋孔径为 1.0mm × 1.5mm, 网袋大小为 15cm × 15cm, 分解袋由尼龙网制成。每个凋落物袋装约 10g 的风干样品, 然后于 2006 年 5 月将凋落物分解网袋放入海南岛尖峰岭的热带雨林和千岛湖姥山林场常绿阔叶林内, 每个试验地设 3 个区组, 每种凋落物在每个区组放置 12 袋, 分解袋置于地表, 与下面的凋落物层接触, 如果有草或者厚的苔藓层, 凋落物被放置在紧贴植物层或者苔藓层表面。自放置日期起, 每隔 1 个月在每一区组取回每种植物凋落物分解袋 1 个。实验时间为 2a。凋落物分解袋取回后, 将分解袋上的杂物剔除, 于 70℃ 烘箱中烘干至恒重并称重。

1.2.4 计算方法

用常用的 Olson 指数模型^[16]计算凋落物的分解速率: $X_t/X_0 = 100e^{-kt}$, 式中, X_t 表示时间 t (a) 时的干重(g), X_0 表示凋落物的初始干重(g), k 表示凋落物的年分解速率($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。

凋落物分解的半衰期(分解 50% 所需的时间) $t_{0.5}$ 的计算方法为: $t_{0.5} = (\ln 100 - \ln 50)/k$

分解 95% 所需的时间 $t_{0.95}$ 的计算方法为: $t_{0.95} = (\ln 100 - \ln 5)/k$, 式中, k 表示凋落物的年分解速率($g \cdot g^{-1} \cdot a^{-1}$)。

温度系数 Q_{10} 的计算方法为: $Q_{10} = k_j/k_q^{10/t}$, 式中, k_j 表示尖峰岭样地每个树种凋落物的分解速率, k_q 表示千岛湖样地每个树种凋落物的分解速率, t 表示尖峰岭和千岛湖样地的温度差(℃)。

1.3 数据处理

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同树种凋落物初始化学元素含量的差异及两样地分解速

率的差异显著性,凋落物分解速率与基质质量各因子的相关性采用 Pearson 相关系数检验法,数据处理分析利用 SPSS 13.0 软件进行。

2 结果分析

2.1 凋落物分解过程中失重率的变化

由图 1 可知,在尖峰岭样地,分解初期凋落物的干重剩余率下降迅速,1a 后干重损失率即达到 50% (苏铁除外),之后分解变缓。6 个树种中毛竹、木荷和青冈凋落物的分解明显快于马尾松、水杉和苏铁,分解最快的是毛竹,经过 2a 的分解后仅剩 16.69%,分解最慢的是苏铁,2a 后还剩 51.15%;而千岛湖样地凋落物的分解速率呈现前期分解较慢,后期分解较快的特点,分解 1a 后干重剩余率集中在 47%—82% 之间,分解最快的毛竹经过 2a 的分解后还剩 30.80%,分解最慢的苏铁 2a 后还剩 67.86%。

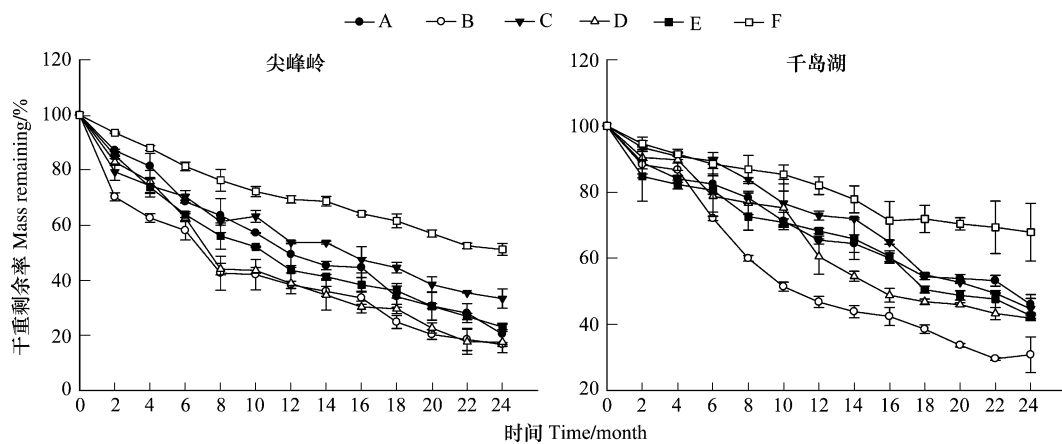


图 1 6 种叶凋落物在两年分解过程中干重剩余率的变化

Fig. 1 Dynamics of dry mass remaining rate in process of litter decomposition of six species during first two years

A: 马尾松 *Pinus massoniana*, B: 毛竹 *Phyllostachys heterocycla*, C: 水杉 *Metasequoia glyptostroboides*, D: 木荷 *Schima superba*, E: 青冈 *Cyclobalanopsis glauca*, F: 苏铁 *Cycas revoluta*

统计分析表明,6 种凋落物在 2 个样地的分解速率有显著差异 ($P < 0.05$),在尖峰岭样地分解明显快于在千岛湖样地的分解,尤其是木荷和青冈表现明显。2 个样地都是毛竹分解最快,苏铁分解最慢,这可能与毛竹叶比较容易分解有关。2 个样地的分解速率顺序为:毛竹 > 木荷 > 青冈 > 马尾松 > 水杉 > 苏铁,尖峰岭样地 6 个树种 95% 分解所需的时间集中在 3.22—8.81a,千岛湖样地 95% 分解所需的时间为 4.61—14.27a (表 1)。

表 1 6 个树种的分解系数、相关系数、半分解和 95% 分解时间

Table 1 Litter decomposition rate, correlation coefficient, time of half and 95% decomposition

树种 Species	样地 Site	分解系数 k Decomposition rate	相关系数 R^2 Correlation efficiency	半分解时间/a Time of half decomposition	95% 分解时间 Time of 95% decomposition
马尾松	尖峰岭	0.71	0.98	0.98	4.22
<i>P. massoniana</i>	千岛湖	0.38	0.97	1.82	7.88
毛竹	尖峰岭	0.93	0.93	0.75	3.22
<i>P. heterocycla</i>	千岛湖	0.65	0.96	1.07	4.61
水杉	尖峰岭	0.56	0.94	1.24	5.35
<i>M. glyptostroboides</i>	千岛湖	0.36	0.95	1.93	8.32
木荷	尖峰岭	0.90	0.97	0.77	3.33
<i>S. superba</i>	千岛湖	0.46	0.96	1.51	6.51
青冈	尖峰岭	0.73	0.98	0.95	4.10
<i>C. glauca</i>	千岛湖	0.41	0.95	1.69	7.31
苏铁	尖峰岭	0.34	0.98	2.04	8.81
<i>C. revoluta</i>	千岛湖	0.21	0.96	3.30	14.27

本研究采用时空互代法,即用尖峰岭样地的气候条件来模拟未来气候变暖后千岛湖样地的气候变化,若未来千岛湖样地气候条件达到目前尖峰岭的状况,则凋落物的分解速率将增加 43.08%—95.65%,凋落物的 95% 分解时间将缩短 30.15%—48.85%。

本研究所测的凋落物分解速率对温度的表观 Q_{10} 在 3.30—9.35 范围内,表观 Q_{10} 为温度系数,即温度每升高 10℃,化学反应或生物学反应速度增加的倍数。

2.2 凋落物的基质质量

不同树种凋落物的初始化学元素含量如表 2。马尾松凋落叶的 C 含量、C/N、木质素/N 比值最高,但其 N、P、K 含量最低,青冈的 K 含量最高。水杉的木质素、N、P 含量最高。

对凋落物初始化学元素含量与分解速率常数 k 值进行相关分析(表 3),结果表明,在千岛湖样地凋落物的分解速率常数 k 值与初始 N 含量呈显著正相关($P < 0.05$),与木质素含量呈显著负相关($P < 0.05$),与 P、K、C 含量及 C/N、木质素/N 比相关性均不显著;在尖峰岭样地,凋落物的分解速率常数 k 值与凋落物各初始化学元素含量相关性均不显著。

表 2 六个树种凋落物的初始化学组成,括号内为 3 次重复的标准差

Table 2 Initial chemical composition of six types litter. Values are means of three replicates, figure in parentheses is the standard error of the mean

树种	N/%	P/%	K/%	C/%	C/N	Lignin/%	Lignin/N
马尾松 <i>P. massoniana</i>	0.81(0.03) a	0.02(0.00) a	0.09(0.01) a	51.18(2.99) a	63.01(3.68) a	41.44(1.59) a	51.16(3.17) a
毛竹 <i>P. heterocycla</i>	2.06(0.05) bc	0.08(0.00) d	0.32(0.02) c	43.07(0.87) b	29.91(0.89) b	13.84(0.11) b	6.63(0.01) d
水杉 <i>M. glyptostroboide</i>	2.12(0.12) a	0.17(0.00) b	0.14(0.01) b	43.78(1.68) ab	20.76(1.97) b	44.72(1.03) a	21.16(0.85) b
木荷 <i>S. superba</i>	1.27(0.47) bc	0.04(0.00) e	0.26(0.00) d	47.68(0.75) b	48.16(0.21) e	42.06(4.18) c	42.97(4.92) d
青冈 <i>C. glauca</i>	1.10(0.03) c	0.05(0.00) f	0.62(0.01) e	46.70(3.81) b	42.57(3.47) c	33.47(6.86) d	30.43(6.98) e
苏铁 <i>C. revoluta</i>	1.09(0.08) b	0.03(0.00) c	0.27(0.00) c	43.12(7.25) ab	39.69(5.92) b	25.01(1.64) a	23.02(0.66) c

同列相同字母表示没有显著差异($P < 0.05$)

表 3 凋落物初始基质质量与在两样地的分解速率常数(k)的相关性

Table 3 Correlation coefficients between the parameters of initial litter quality and decomposition rate constants

样地	N	P	K	C	C/N	Lignin	Lignin/N
千岛湖	Pearson correlation	0.452 *	0.099	0.153	-0.007	-0.329	-0.421 *
	Sig.	0.030	0.348	0.272	0.488	0.091	0.041
尖峰岭	Pearson correlation	0.188	-0.78	0.182	0.219	-0.090	-0.110
	Sig.	0.228	0.380	0.235	0.191	0.361	0.332

注: * 在 0.05 水平显著相关; $n = 18$

3 结论与讨论

3.1 凋落物分解对气候变暖响应

全球气候变暖是正在发生的引人注目的全球变化现象之一。科学家们预计,CO₂ 浓度倍增后,地球表面的温度将上升 1.5—4.5℃^[17]。模型预测显示全球变暖会加快热带雨林的更新,热带雨林将向亚热带地区入侵,因全球变暖而扩大寒温带和热带林面积的趋势预期在总体上将会加大增温地区凋落物的分解速率^[18]。大量研究结果表明,由于受温度的影响,凋落物的分解速率呈现明显的气候地带性,各气候带中的凋落物分解速率从大到小依次为:热带 > 亚热带 > 温带 > 寒温带^[19]。

本研究结果表明,相同树种的凋落物在热带的尖峰岭和中亚热带的千岛湖样地的分解速率有显著差异($P < 0.05$),凋落物在尖峰岭的分解明显快于千岛湖。在未来气候变暖趋势下,若千岛湖的气候条件达到目前尖峰岭的气候条件,凋落物的分解速率将增加 43.08%—95.65%,凋落物的 95% 分解时间将缩短 30.15%—48.85%。这也再次说明了未来气候变暖后凋落物的分解速率将会明显加快,这一趋势将对区域生态系统的营养循环特别是碳循环产生深远影响。

温度对分解速率的作用,还可用凋落物的表观 Q_{10} (温度升高 10°C 时分解速率成比例增加的倍数) 来反映。计算的凋落物的表观 Q_{10} 为 3.30—9.35, 与刘强等^[20] 鼎湖山和尖峰岭测得的 Q_{10} 3.7—7.5 范围基本吻合, 但比 Heaney 等^[9] 的结果高, 他们在哥斯达黎加海拔 2500m 的垂直高度带上, 测得的 Q_{10} 为 1.78, 本研究结果同他们的差异可能是由中国特殊的气候条件引起的。

3.2 基质质量和气候对凋落物分解的影响

Swift 等^[21] 将凋落物的化学属性称之为“基质质量 (substrate quality)”, 定义为凋落物的相对可分解性, 依赖于构成组织的易分解成分 (N、P 等) 和难分解有机成分 (木质素、纤维素、半纤维素、多酚类物质等) 的组合情况、组织的养分含量和组织的结构。用作凋落物 (基质) 质量的常见指标有: 氮含量、磷含量、木质素与纤维素含量、C/N 值、木质素/N 值、C/P 值等。其中 C/N 值和木质素/N 值最能反映凋落物分解速率^[22-25]。氮含量、磷含量和 C/P 值亦可用作分解预测指标^[26]。也有研究表明, 凋落物的木质素含量是预测凋落物分解和失重的好指标^[3,27]。Heal 等^[28] 在其综述中称 C/N 值是凋落物质量的一般化指数。

已有的多数研究显示凋落物的初始 N 含量高会加快其分解^[22,29-30], 而木质素含量高将延缓其分解^[3,31], 一项在加拿大 18 个地点进行的长达 3—6a 的 11 种凋落物类型的分解试验研究表明, 初始的木质素/N 比是最重要的凋落物质量变量, 凋落物的初始木质素/N 比越高, 分解的就越慢^[32-33]。而本文研究结果显示, 6 个树种的分解速率与初始 P、K、C 含量及 C/N、木质素/N 等均无显著相关性, 推测可能与树种及研究地气候不同有关。马元丹等^[6] 对不同起源时间的植物叶凋落物在中亚热带的分解实验研究结果显示, 凋落物的分解速率 k 与 N 含量呈显著正相关, 与木质素含量及木质素/N 呈显著负相关。李雪峰等^[34] 在长白山对 9 种叶凋落物进行的 34 个月的分解速率测定的结果显示分解速率与凋落物基质 N 含量呈显著正相关, 与 C/N 比值呈显著负相关, 裸子植物红松的 N 含量高于其余 8 种被子植物, 而 C/N 比值低于被子植物。王希华等^[35] 在中亚热带对裸子植物马尾松和其余 29 种被子植物叶凋落物分解实验的结果表明, 凋落物分解速率与基质 N 含量有极显著相关性, 而与 P 含量无显著相关。黄耀等的研究也表明凋落物的分解速率与木质素含量呈显著负相关^[36]。本研究结果显示, 在千岛湖样地凋落物的分解速率与初始 N 含量呈显著正相关, 与木质素含量呈显著负相关, 再次证明了基质质量各元素中氮含量和木质素含量是预测亚热带凋落物分解和失重的好指标这一结论。

从表 3 还可看出, 凋落物分解速率与初始基质质量的相关性在千岛湖中亚热带气候条件下较强, 而尖峰岭热带气候条件下相关性较弱, 也就是说: 在气温高的样地, 凋落物初始基质质量对分解速率的控制作用减弱。刘强等^[20] 在尖峰岭和鼎湖山对木荷等 10 种植物凋落物交互分解的研究发现, 在鼎湖山凋落物分解速率与初始木质素含量、木质素/N 等有较高的负相关性, 而在尖峰岭, 分解速率与初始基质质量均无显著相关性。Berg 等^[37] 对寒温带至亚热带及地中海区域松类凋落物的分解状况的研究发现, 气候在大尺度上对凋落物分解的影响十分明显, 凋落物基质质量的影响只在局部区域尺度上起作用, Meentemeyer^[38] 的研究也认为跨气候带的样地间, 气候因素的差异对分解速率的影响更大。在气候因素稳定的条件下 (同一样地内), 凋落物基质质量和土壤动物、微生物对分解速率的影响可能更为突出^[39]。

降雨可制约凋落物化学成分淋溶的物理过程。降雨量越大, 表层凋落物的分解越快^[21]。水分还可通过影响分解者的活性来影响凋落物失重速率和营养释放速率^[9]。在热带生态系统中, 降雨量对凋落物的分解有直接的正效应^[40]。在一些温带生态系统中, 高降雨量的嫌气条件反而使凋落物分解减慢。如李雪峰等^[41] 的研究表明, 降水量变化会改变凋落物质量, 进而间接影响蒙古栎叶片分解速率, 随降雨量增加, 蒙古栎叶片分解速率降低。中国长期分解实验 (Long-term Intersite Decomposition Experiment Team, LIDET), 3a 的研究结果表明, 气候是控制凋落物分解的主要因子, 年平均气温和实际蒸散是主导因子, 而年平均降水量次之^[42]。因此, 未来全球气候变化 (温度升高和降水增加) 将改变凋落物分解速率由基质质量决定的基本格局, 在跨气候带的凋落叶分解过程中, 凋落物分解速率是受基质质量和分解环境双重调控的, 且气候因子的控制作用强于凋落物初始基质质量的控制作用。

References:

- [1] Berg B, McLaugherty C. Plant litter: Decomposition, Humus formation, carbon sequestration. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008: 12-13.
- [2] Liski J, Nissinen A, Erhard M, Taskinen O. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest. *Global Change Biology*, 2003, 9: 575-584.
- [3] Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, 63: 621-626.
- [4] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology*, 1995, 1: 77-91.
- [5] Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 713-724.
- [6] Ma Y D, Jiang H, Yu S Q, Dou R P, Guo P P, Wang B. Leaf litter decomposition of plants with different origin time in the mid-subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5237-5245.
- [7] Jenney H S, Gessel P, Bingham F T. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science*, 1949, 68: 419-432.
- [8] Mikola P. Comparative experiment on decomposition rates of forest litter in southern and northern Finland. *Oikos*, 1960, 11: 161-166.
- [9] Heaney A, Proctor J. Chemical elements in litter on Volcan Barva, Costa Rica. *Mineral nutrients in tropical forest and savanna ecosystems*. Oxford: Blackwell Scientific, 1989: 225-271.
- [10] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, Sanford R L. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii I: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 1994, 75: 418-429.
- [11] Chen H, Harmon M E, Tian H Q. Effects of global change on litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1549-1563.
- [12] Peng S L, Liu Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [13] Yang W Q, Deng R J, Zhang J. Forest litter decomposition and its responses to global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [14] Jiang Y X, Lu J P. Jianfengling tropical forest ecological system on Hainan Island of China. Beijing: Science Press, 1991: 165-170.
- [15] Li Y D. Research and conservation of tropical forest and biodiversity, Hainan Island, China. Beijing: Chinese Forestry Press, 2002: 178-179.
- [16] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological system. *Ecology*, 1963, 44: 322-331.
- [17] Easterling D R, Horton B, Jones P D, Peterson T C, Karl T R, Salinger M J, Razuvayev V, Plummer N, Jamason P, Folland C K. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277: 364-367.
- [18] Song X Z, Jiang H, Zhang H L, Yu S Q, Zhou G M, Ma Y D, Scott X. Chang. A review on the effects of global environment change on litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4414-4423.
- [19] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, Lin P, Xie J S. A review on litter decomposition in forest ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(4): 93-100.
- [20] Liu Q, Peng S L, Bi H, Zhang H Y, Li Z A, Ma W H, Li N Y. Nutrient dynamics of foliar litter in tropical and subtropical forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(1): 24-32.
- [21] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. Decomposition in terrestrial ecosystems. Berkly: University of California Press, 1979: 108-109.
- [22] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W J F. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 1989, 70: 97-104.
- [23] Hill H H. Decomposition of organic matter in soils. *Journal Agricultural Research*, 1926, 33: 77-79.
- [24] Hobbie S E. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological Monographs*, 1996, 66: 503-522.
- [25] Xu X N, Hirata E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: N and P dynamics. *Plant and Soil*, 2005, 273: 279-289.
- [26] Vitousek P M. Nutrient cycling and limitation: Hawaii as a model system. Princeton: Princeton University Press, 2004: 162-164.
- [27] Dyer M L, Meentemeyer V, Berg B. Apparent controls of mass loss rate of leaf litter on a regional scale. *Scand Journal forest research*, 1990, 5: 311-323.
- [28] Heal O W, Anderson J M, Swift M J. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. Walling UK: CAB International. 1997, 164-165.
- [29] Alhamd L, Arakaki S, Hagihara A. Decomposition of leaf litter of four tree species in a subtropical evergreen broad-leaved forest, Okinawa Island, Japan. *Forest Ecology and Management*, 2004, 202: 1-11.
- [30] Sundarapandian S M, Swamy P S. Litter production and leaf-litter decomposition of selected tree species in tropical forests at Kodayar in the

- Western Ghats, India. *Forest Ecology and Management*, 1999, 12: 231-244.
- [31] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87: 2288-2297.
- [32] Moore T R, Taylor B, Prescott C, Camire C, Duschene F J, Kozak L, Kranabetter M, Morrison I, Siltanen M, Smith S, Titus B, Visser S, Wein R, Zoltai S, Trofymow J A. Litter decomposition rates in Canadian forests. *Global Change Biology*, 1999, 5: 75-82.
- [33] Trofymow J A, Moore T R, Titus B, Prescott C, Morrison I, Siltanen M. Rates of litter decomposition over 6 years in Canadian forests: influence of litter quality and climate. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 789-803.
- [34] Li X F, Han S J, Hu Y L, Zhao Y T. Decomposition of litter organic matter and its relation to C, N and P release in secondary conifer and broadleaf mixed forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 245-251.
- [35] Wang X H, Huang J J, Yan E R. Leaf litter decomposition of common trees in Tiantong. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(4): 457-467.
- [36] Huang Y, Shen Y, Zhou M, Ma R S. Decomposition of plant residue as influenced by its lignin and nitrogen. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(2): 183-188.
- [37] Berg B, Berg M P, Bottner P. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry*, 1993, 20: 127-153.
- [38] Meentemeyer V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology*, 1978, 59: 465-472.
- [39] Berg B, Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. *Ecology Bull*, 1981, 33: 163-178.
- [40] Smith J L, Norton J M, Paul E A. Decomposition of ^{14}C - and ^{15}N -labeled organisms in soil and anaerobic conditions. *Plant and Soil*, 1989, 116: 115-118.
- [41] Li X F, Han S J, Zhang Y. Indirect effects of precipitation on litter decomposition of *Quercus mongolica*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 261-266.
- [42] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, Tang X L, Liu S G, Liu J X, Zhang D Q, Yan J H. Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China. *Plant and Soil*, 2008, 311: 61-72.

参考文献:

- [6] 马元丹, 江洪, 余树全, 窦荣鹏, 郭培培, 王彬. 不同起源时间的植物叶凋落物在中亚热带的分解特性. *生态学报*, 2009, 29(10): 5237-5245.
- [11] 陈华, Harmon M E, 田汉勤. 全球变化对陆地生态系统枯落物分解的影响. *生态学报*, 2001, 21(9): 1549-1563.
- [12] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应. *生态学报*, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [13] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [14] 将有绪, 卢俊培. 中国海南岛尖峰岭热带林生态系统. 北京: 自然科学出版社, 1991: 165-170.
- [15] 李意德. 中国海南岛热带森林及其生物多样性保护研究. 北京, 中国林业出版社, 2002: 178-179.
- [18] 宋新章, 江洪, 张慧玲, 余树全, 周国模, 马元丹, Scott X. Chang. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2008, 28(9): 4414-4423.
- [19] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢晋升. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4): 93-100.
- [20] 刘强, 彭少麟, 毕华, 张洪溢, 李志安, 马文辉, 李妮亚. 热带亚热带森林凋落物交互分解的养分动态. *北京林业大学学报*, 2005, 27(1): 24-32.
- [34] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [35] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 457-467.
- [36] 黄耀, 沈雨, 周密, 马瑞升. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 183-188.
- [41] 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 261-266.