

柳杉凋落物在中国亚热带和热带的分解

窦荣鹏¹, 江洪^{1,2,*}, 余树全^{1,*}, 马元丹¹, 郭培培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: 柳杉 (*Cryptomeria fortunei*) 为我国特有种, 具有很高的经济价值, 而且在吸收二氧化碳和净化空气方面具有重要作用。为探究全球气候变暖对森林凋落物分解速率的影响, 分别在中亚热带的千岛湖、南亚热带鼎湖山和热带的尖峰岭, 用分解袋法对柳杉凋落物进行分解实验, 3 个实验样地的主要差异为温度。结果表明: 凋落物在 3 个样地的分解速率顺序为尖峰岭、鼎湖山、千岛湖, 且不同样地之间的分解速率具有显著差异 ($P < 0.01$)。在千岛湖样地分解速率常数 k 值与初始 C/N 呈显著相关 ($P < 0.05$); 在鼎湖山样地分解速率常数 k 值与初始碳含量呈极显著相关 ($P < 0.01$); 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, 推测可能是气候起主要作用。

关键词: 柳杉; 凋落物; 分解; 亚热带; 热带

Decomposition of *Cryptomeria fortunei* leaf litter in subtropical and tropical China

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

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: *Cryptomeria fortunei* is a special coniferous species with very high economic value and plays an important role in carbon sequestration and atmospheric purification in China. In order to explore the effects of climate warming on the litter decomposition, the decomposition experiment of *Cryptomeria fortunei* leaf litter in three sites (Qiandaohu in Zhejiang Province, Dinghushan in Guangdong Province, and in Jianfengling in Hainan Province) were conducted along with climate gradient, using litterbags method. The sites represented the mid-subtropical area, southern-subtropical area, and tropic area, respectively, they are with different temperature. The results indicated that significant difference ($P < 0.01$) was found for litter decomposition rates in three sites, and litter decomposition rate was ranked in the order of Jianfengling > Dinghushan > Qiandaohu along with the gradient. We also found that annual decomposition rates of leaf litter in Qiandaohu was significantly correlated with the initial C/N ($P < 0.05$), it was significantly correlated the initial nitrogen content in Dinghushan ($P < 0.01$). Insignificant relationship between decomposition rate and litter substrate was found in Jianfengling site. The result approved that the influence of climatic gradient on litter decomposition is important.

Key Words: *Cryptomeria fortunei*; litter; decomposition; subtropical area; tropical area

凋落物分解是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 C 预算具有重要的科学意义^[4-5]。

随着全球气候变暖日益受到人们的重视, 由于凋落物的性质在碳素和营养循环中起重要作用^[6-7], 凋落物分解和土壤微生物活动释放出 CO₂ 对温室效应的贡献, 全球变暖对凋落物动态的影响亦日渐为人们所

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2005CB422207, 2005CB422208, 2010CB428503); 国家自然科学基金资助项目 (40671132); 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 (2008C13G2100010)

收稿日期: 2009-09-22; 修订日期: 2009-12-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongjiang.china@gmail.com; yushq@zjfc.edu.cn.

关注。

到目前为止,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。Jenney 等^[8]、Mikola^[9]沿纬度梯度、Heaney^[10]和 Vitousek 等^[11]沿海拔梯度进行的凋落物分解研究也均观察到随气温的升高凋落物的分解速率增加。但国内在凋落物跨带分解研究方面尚鲜有报道。

柳杉(*Cryptomeria fortunei*)系杉科柳杉属植物,为我国特有种,常绿针叶乔木,高可达 54m。其材质好,重量轻,纹理通直,结构粗松,收缩性小,不翘不裂,经济价值高,是南方良好的用材树种。同时,柳杉枝叶茂盛,冠幅大,每公顷柳杉林每日能吸收 60kg 二氧化碳^[12],能吸收二氧化硫及滞留空气中的悬浮粒,起到固定二氧化碳和净化空气的重要作用。柳杉产自长江流域以南至广东、广西、贵州等地,在浙江省天目山自然保护区拥有世界上罕见的巨大柳杉林,总面积约达 267hm²。天目山的生境条件非常适合柳杉的生长,形成此地个体最大的建群树种,为天目山最具特色的森林植被之一。

因此,本文选择柳杉作为研究对象,利用不同气候带的气候差异来模拟未来气候变暖的情况,研究柳杉凋落物在当今及未来气候变暖之后分解速率的变化规律,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,对全球变化背景下大尺度生态系统的生物地球化学循环响应的研究具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

凋落物采集在浙江省天目山国家级自然保护区进行,天目山位于浙江省西北部临安市境内,地理位置为北纬 30°18'30"—30°24'55",东经 119°23'47"—119°28'27",地处中亚热带北缘向北亚热带的过渡地带,气候温暖湿润,雨量充沛,地质古老,自然条件优越。年均温 14.8—8.8℃,年均降水量 1390—1870mm,土壤以红壤、黄壤、棕黄壤为主。

分解实验分别选在浙江省千岛湖的常绿阔叶林、广东省鼎湖山的季风常绿阔叶林和海南省尖峰岭的热带雨林,其地理位置和具体气候条件见表 1。

表 1 3 个样地的地理位置和具体气候条件
Table 1 The location and environment of three sites

样地 Site	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	区域 Region	年均温/℃ Mean annual temperature	年均降雨量/mm Mean annual precipitation	土壤类型 Soil type
千岛湖 Qiandao Lake	29°31'	118°58'	中亚热带	17	1430	红黄壤
鼎湖山 Dinghushan	23°09'	112°30'	南亚热带	20.9	1929	红黄壤
尖峰岭 Jianfengling	18°40'	108°49'	热带	22.9	2635	砖黄壤

1.2 实验设计

2006 年 3 月中旬在浙江省天目山国家级自然保护区内采集柳杉凋落的叶片,凋落物采集后自然风干。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、磷元素的初始含量。

采用时空互代法来代替气温增高的过程,即用尖峰岭样地、鼎湖山样地与千岛湖样地的年均温度差来代替千岛湖未来气温增高之后的情形,看未来气温升高之后柳杉凋落物的分解如何变化。凋落物分解采用分解袋法。将凋落物称重后放入孔径为 1.0mm×1.5mm,网袋大小为 15cm×15cm 的分解袋中,分解袋由尼龙网制成,每袋重约 10g,然后于 2006 年 5 月将凋落物分解网袋分别放入 3 个地点的林内,放置时贴近地表模拟凋落物分解的自然状况,并设 3 个重复,之后每月取回 1 次凋落袋。共 72 个分解袋,分解时间为 2a。

1.3 样品处理

凋落物分解袋取回后,剔除长入分解袋内的根系,用清水快速清洗凋落袋表面附着的泥沙,于 80℃烘箱

中烘干至恒重并称重,粉碎后进行化学组分的分析。其中全碳采用重铬酸钾-浓硫酸($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$)氧化法,全氮采用碱解扩散法,全磷采用钼锑抗比色法,木质素采用酸性洗涤纤维(ADF)法测定^[13]。

1.4 数据处理

用常用的 Olson^[14] 指数模型计算凋落物的分解速率: $X_t/X_0 = e^{-kt}$,式中, X_t 表示时间 t 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($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较柳杉凋落物在 3 个样地分解速率的差异显著性,凋落物分解速率常数 k 值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。

2 结果分析

2.1 凋落物分解的失重率

由图 1 可知,柳杉在 3 个样地的分解速率从大到小的顺序为尖峰岭、鼎湖山、千岛湖,3 个地点的分解速率存在显著差异($P < 0.01$)。在尖峰岭样地,分解 50% 所需的时间为 1.61a,分解 95% 所需的时间为 6.97a。实际测定的结果表明,在 1.67a 时柳杉凋落物的干重剩余率为 49.34%,模型模拟与实验所测数据基本吻合,说明模型拟合效果良好。在千岛湖样地,分解 50% 所需的时间为 2.48a,而分解 95% 所需的时间则为 10.70a(表 2)。经 2a 分解后,柳杉凋落物在尖峰岭的干重剩余率为 43.67%,鼎湖山的干重剩余率为 48.64%,千岛湖的干重剩余率为 57.53%。

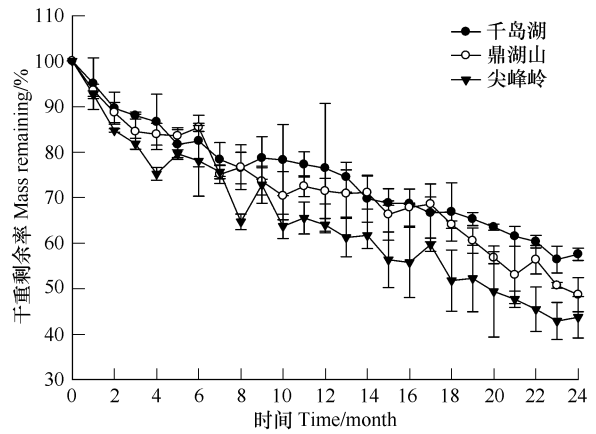


图 1 凋落物在两年分解过程中干重剩余率的变化
Fig.1 Dynamics of dry mass remaining rate in process of litter decomposition during first two years

表 2 柳杉凋落物分解的回归方程、分解系数、相关系数、半分解和 95% 分解时间

Table 2 The regression equation, litter decomposition rate, correlation efficiency, time of half and 95% decomposition					
样地 Site	回归方程 Equation	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/a Time of 95% decomposition
千岛湖 Qiandao Lake	$y = 100e^{-0.28x}$	0.28	0.92	2.48	10.70
鼎湖山 Dinghushan	$y = 100e^{-0.33x}$	0.33	0.91	2.10	9.08
尖峰岭 Jianfengling	$y = 100e^{-0.43x}$	0.43	0.92	1.61	6.97

2.2 初始化学成分对柳杉凋落物分解的影响

柳杉凋落物的初始化学组成含量见表 3。

表 3 柳杉凋落物的初始化学组成和 3 次重复的标准差

Table 3 Initial chemical composition of litter and the standard error of the mean of three replicates						
	氮 N/%	磷 P/%	碳 C/%	碳氮比 C/N	木质素 Lignin/%	木质素 Lignin(N)/%
初始含量 Initial concentration	0.80	0.03	48.52	60.79	36.29	54.80
标准差 Standard deviatio	0.04	0.004	5.09	6.37	5.17	6.48

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 4),分析结果表明,在千岛湖样地柳杉凋落物的分解速率常数 k 值与初始 C/N 呈显著相关($P < 0.05$);在鼎湖山样地分解速率常数 k 值与初始 C 含量呈极显著相关($P < 0.01$);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都很低,均未达显著水平。

表 4 柳杉凋落物的分解速率(k)与初始化学成分的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between the parameters of Initial chemical composition and decomposition rate constants

		氮 N	磷 P	碳 C	碳氮比 C/N	木质素 Lignin	木质素 Lignin(N)
千岛湖 Qiandao Lake	皮尔逊相关系数	0.875	0.690	-0.984	-0.999 *	0.060	-0.248
	Sig.	0.322	0.515	0.115	0.032	0.962	0.840
鼎湖山 Dinghushan	皮尔逊相关系数	0.768	0.540	-1.000 **	-0.971	-0.129	-0.427
	Sig.	0.443	0.636	0.006	0.153	0.917	0.719
尖峰岭 Jianfengling	皮尔逊相关系数	-0.857	-0.972	0.337	0.543	-0.895	-0.715
	Sig.	0.345	0.151	0.781	0.634	0.295	0.493

注: ** 在 0.01 水平显著相关; * 在 0.05 水平显著相关

3 结论与讨论

3.1 柳杉凋落物对气候变暖的响应

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℃^[15]。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^[16]。

在中国东部南北样带中,随纬度增加,森林凋落物的分解速率下降^[17]。就目前已发表的文献的 k 值比较,如:千岛湖 0.39—1.12^[13,18],鼎湖山 0.29—1.40^[19],尖峰岭 0.42—1.58^[20],本研究的 k 值鼎湖山和尖峰岭与同地前人研究结果相似,但千岛湖处于低水平,这可能是研究所用树种不同所致。

本研究是利用时空互代法来模拟未来气候变暖对凋落物分解的影响。结果表明,柳杉凋落物的分解速率在热带尖峰岭、亚热带鼎湖山和中亚热带千岛湖有显著差异,在 3 个样地的分解速率顺序依次为尖峰岭、鼎湖山、千岛湖。千岛湖的凋落物若按鼎湖山的条件(升温 3.9℃)来分解,分解速率将增加 17.97%,按尖峰岭的条件(升温 5.9℃)来分解,分解速率将增加 53.78%,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。

3.2 基质质量对柳杉凋落物的影响

Swift 等^[21]将凋落物的化学属性称之为“基质质量”,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(氮、磷等)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/氮值、碳/磷值等。其中 C/N 值和木质素/氮值最能反映凋落物分解速率^[20,22-24]。氮含量、磷含量和碳/磷值亦可用作分解预测指标^[25]。

已有的多数研究显示凋落物的初始氮含量高会加快其分解^[22,26-27],而木质素含量高将延缓其分解^[6,28],Joseph 等^[29]对北美长叶松林 7 种凋落物的分解研究表明,凋落物 C/N、酸性难溶物/氮和磷含量可以显著的预测凋落物的分解速率。宋新章等^[18]在中亚热带对马尾松等 7 种针阔叶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 C/N 有显著相关性。刘强等^[17]在热带亚热带森林凋落物交互分解实验中发现,在鼎湖山分解中,分解速率常数 k 值与初始碳含量有显著相关性。结果显示,在千岛湖样地,分解速率与初始 C/N 呈显著相关($P < 0.05$),在鼎湖山样地,分解速率与初始碳含量呈极显著相关($P < 0.01$),在尖峰岭样地,分解速率与凋落物各初始化学元素含量相关性都很低,均未达显著水平,这也证明了初始化学成分中 C/N 和碳含量是预测凋落物在亚热带分解和失重的良好指标这一结论。

从表 4 还可以看出,柳杉凋落物分解速率与初始化学成分的相关性在中亚热带气候条件和亚热带气候条件下较强,而热带气候条件下相关性较弱,也就是说:在纬度低的地方,凋落物初始化学成分对分解速率的控制减弱,气候起主要作用。Berg 等^[30]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^[31]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^[32]。可见,在跨气候带的凋落叶分解过程中,气候因子的控制作用较强于凋落叶初始基质质量的控制作用。

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^[10]。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^[33]。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^[34]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。本实验中年均降雨量存在差异,对凋落物分解速率的影响有待进一步研究。

References:

- [1] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus formation, Carbon sequestration. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008:1-3.
- [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 M. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, 63: 621-626.
- [4] 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.
- [5] Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 713-724.
- [6] Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, 63: 621-626.
- [7] Berg B, Tamm C O. Decomposition and nutrient dynamics of litter in long-term optimum nutrient experiments. *Journal of Forest Research*, 1991, 6: 305-321.
- [8] 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.
- [9] Mikola P. Comparative experiment on decomposition rates of forest litter in southern and northern Finland. *Oikos*, 1960, 11: 161-166.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Cheng A X, Yang S Z. Mount Tianmu *Cryptomeria fortunei*. *Man and Biosphere*, 1998, 3: 9.
- [13] 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.
- [14] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposition in ecological system. *Ecology*, 1963, 44: 322-331.
- [15] Easterling D R, Horton B, Jones P D, Peterson T C, Karl T R, Parker D E, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Song X Z, Jiang H, Yu S Q, Ma Y D, Zhou G M, Dou R P, Guo P P. Litter decomposition of dominant plant species in successional stages in mid-subtropical zone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 537-542.
- [19] Zhang D Q, Ye W H, Yu Q F, Kong G H, Zhang Y C. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 938-944.
- [20] Hill H H. Decomposition of organic matter in soils. *Journal Agricultural Research*, 1926, 33: 77-79.
- [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] Jensen H L. On the influence of the carbon nitrogen ratios of organic materials on the mineralization of nitrogen. *Journal Agricultural Science*, 1929, 19: 71-82.

- [24] Witkamp. Decomposition of leaf litter in relation to environment microflora and microbial respiration. *Ecology*, 1966, 47:194-201.
- [25] Schlesinger W H, Hasey M M. Decomposition of chaparral shrub foliage: losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreen leaves. *Ecology*, 1981, 62:762-774.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Hendricks J J, Wilson C A, Boring L R. Foliar litter position and decomposition in a fire-maintained longleaf pine-wiregrass ecosystem. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32:928-941.
- [30] Berg B, Berg M P, Bottnar 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.
- [31] Meentemeyer V. Macroclimate and lignin control of litter decomposition rates. *Ecology*, 1978, 59:465-472.
- [32] Berg B, Staaf H. Leaching, accumulation and release of nitrogen in decomposing forest litter. *Ecology Bull*, 1981, 33:163-178.
- [33] 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.
- [34] 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.

参考文献:

- [4] 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.
- [12] 程爱兴, 杨淑贞. 天目山——柳杉. *人与生物圈*, 1998, 3:9.
- [13] 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.
- [16] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4):93-100.
- [17] 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.
- [18] 宋新章, 江洪, 余树全, 马元丹, 周国模, 窦荣鹏, 郭培培. 中亚热带森林群落不同演替阶段优势种凋落物分解实验. *应用生态学报*, 2009, 20(3):537-542.
- [19] 张德强, 叶万辉, 余清发, 孔国辉, 张佑倡. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究. *生态学报*, 2000, 20(6):938-944.
- [34] 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.