

全球环境变化对森林凋落物分解的影响

宋新章¹, 江 洪^{1,2,*}, 张慧玲¹, 余树全¹, 周国模¹, 马元丹², Scott X. Chang³

(1. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 临安 311300; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;

3. 加拿大阿尔伯塔大学 可更新资源系, 埃德蒙顿市 阿尔伯塔省 T6G 2E3)

摘要: 全球环境变化将对森林生态系统凋落物的分解和养分循环产生直接和间接的多重影响。就全球环境变化如全球变暖、大气 CO₂ 浓度升高、UV-B 辐射增强、氮沉降等对凋落物分解影响的研究进展进行了综合述评。影响凋落物分解的内部因素为凋落物基质质量, 外部因素包括生物因素(微生物和动物)和非生物因素(温度、水分和土壤性质等)。全球变暖对凋落物分解的非生物作用有正效应, 也有负效应。全球变暖对凋落物化学组成虽然只有轻微的影响, 但可以通过影响植被的物种组成来间接改变凋落物的产量、化学性质和分解。全球变暖对凋落物分解生物作用的主要影响是增强土壤微生物活性, 从而加速凋落物的分解。CO₂ 浓度上升将增加凋落物产量, 并通过影响凋落物质量(提高 C/N 比、木质素/N 比等)和生物环境(微生物的数量和活性)而影响分解过程。UV-B 辐射和大气 N 沉降的增加亦对凋落物分解产生直接和间接的影响, 但影响效果尚不很清楚, 有待进一步的研究。总起来看, 全球环境变化将通过影响凋落物的分解速率而对全球碳循环产生重要影响, 但由于气候变化和凋落物分解响应的复杂性以及各因子之间的相互作用, 气候变化对凋落物分解的总效应尚需更深入的研究来量化。

关键词: 凋落物分解; 全球变暖; 大气 CO₂ 浓度升高; UV-B 辐射; C 循环

文章编号: 1000-0933(2008)09-4414-10 中图分类号: Q142, Q945, Q948, S718.5 文献标识码: A

A review on the effects of global environment change on litter decomposition

SONG Xin-Zhang¹, JIANG Hong^{1,2,*}, ZHANG Hui-Ling¹, YU Shu-Quan¹, ZHOU Guo-Mo¹, MA Yuan-Dan², Scott X. Chang³

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

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

3 Department of Renewable Resources, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada T6G 2E3

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4414 ~ 4423.

Abstract: The global environment change would affect litter decomposition and nutrient cycling directly and indirectly in forest ecosystem. The effects of global warming, elevated CO₂, increased UV-B radiation and N deposition on litter decomposition was reviewed in this paper based on literatures. In general, the litter substrate quality, biotic factors such as microbe and animal, and abiotic factors including temperature, moisture and soil condition were the main factors affecting

基金项目: 国家科技部 973 资助项目(2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208); 国家自然科学基金资助项目(40671132); 国家科技部数据共享平台建设资助项目(2006DKA32300-08); 浙江林学院科学发展基金资助项目; 浙江省森林培育重中之重学科开放基金资助项目(200608)

收稿日期: 2007-12-04; **修订日期:** 2007-05-27

作者简介: 宋新章(1976 ~), 男, 山东菏泽人, 博士, 主要从事森林生态学和全球生态学研究. E-mail: xzsong@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hongjiang.china@gmail.com

Foundation item: The project was financially supported by Funding support partially from The State Key Fundamental Science Funds of China (No. 2002CB111504, 2002CB410811, 2005CB422208), NSF-China Project (No. 40671132), The State Data Synthesis and Analysis Funds of China (No. 2006DKA32300-08), and Science Foundation of Zhejiang Forestry University, Open fund for a Zhejiang Provincial Top-key Discipline of silviculture, Zhejiang Forestry University (No. 200608)

Received date: 2007-12-04; **Accepted date:** 2007-05-27

Biography: SONG Xin-Zhang, Ph. D., mainly engaged in forest ecology and global ecology. E-mail: xzsong@126.com

decomposition rate. Global warming made both positive and negative effects on abiotic factors. Although global warming slightly influenced the litter chemistry, however, it indirectly changed litter production, chemistry composing and decay through alter vegetation component. A temperature variable (annual mean temperature, effective temperature sum or its logarithm) combined with a summer drought indicator explained the first-year mass loss of the Scots pine needle litter across Europe and North America with a higher R^2 value than actual evapotranspiration. Global warming also enhanced soil microbe activity and thereby accelerated decomposition. Elevated CO_2 would increase litter production and affect decomposition by altering litter quality (e.g. improving C:N and Lignin:N ratio) and biotic environment such as microbe quantity and activity. Increased UV-B radiation and N deposition also affected decomposition, but the results were uncertainty as the absent of data. In addition, global environment change would obviously affect the C cycling through changing litter decomposition. Therefore, it is necessary to enhance the further research of global environment change and response of litter decomposition and the reciprocity of various factors due to the complex relationship.

Key Words: litter decomposition; global warming; elevated CO_2 ; UV-B radiation; C cycling

全球环境变化,包括全球变暖、大气 CO_2 浓度升高、UV-B 辐射增强和酸沉降等,将对陆地生态系统的生产力及其分配格局产生重要而深远的影响,已引起生态学家们的广泛关注,并相继开展了大量研究,以预测全球环境变化对地球生态系统的影响。但已有的研究多集中在气候变化对农作物生长机理和外部形态的影响研究方面,而关于气候变化对森林凋落物分解影响的研究还相对较少。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]。全球环境变化直接和间接改变各种影响凋落物分解的因素,并最终影响到凋落物的分解速率^[2,5~7]。20 世纪 90 年代以来,研究凋落物分解对全球变化的响应相继开展,取得了一系列的重要成果,加深了人们对全球变化作用的认识。国内已有多位学者对凋落物的研究进展作了评述^[8~10],但主要限于凋落物的产量动态及分布、分解过程及影响因素、凋落物分解的研究方法等方面。彭少麟等^[11]对全球变暖可能对凋落物分解带来的影响进行了探讨,方华等^[12]综述了 N 沉降对森林凋落物分解的影响,但全面反映全球环境变化对凋落物分解影响的综述尚未见报道。本文对国内外在全球环境变化如全球变暖、大气 CO_2 浓度升高、UV-B 辐射增强、氮沉降等方面对凋落物分解的影响研究进展进行了综述,以供进一步开展相关研究参考。

1 全球变暖对凋落物分解的影响

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, CO_2 浓度倍增后,地球表面的温度将上升 $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$ ^[13]。IPCC^[14]评估报告则认为,未来全球温度每 10 年将升高 0.2°C 。全球变暖可能会带来气候带的移动。气候带将北移,降水也随之发生变化,进而导致植被带的迁移。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,而寒温带会向北方针叶林带入侵。寒温带和热带森林的面积将趋于增加,温带森林面积将减少^[15]。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^[11]。

温度作为影响生命活动的主导因子,对微生物的数量和酶的活性有着重要影响,进而对凋落物的分解起着主导作用。一些学者通过纬度或海拔形成的气温梯度来研究温度对森林凋落物分解速率的影响。Berg 等^[16]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,凋落物质量的影响只在局部区域尺度上起作用。Vitousek 等^[17]发现,随海拔降低,气温升高,凋落物的分解速率呈指数增加。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^[10]。

1.1 对凋落物质量的影响

凋落物的“基质质量(substrate quality)”是影响凋落物分解的内在因素,包括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等,其中N、P和木质素浓度、C/N、C/P、木质素与养分比值是常见的凋落物质量指标,尤其C/N比和木质素/N比最能反映凋落物分解速率^[18]。气候变暖通过2种途径来影响凋落物的化学性质。一种是直接引起群落内物种凋落物质量的短期变化。由变暖引起的凋落物分解速率的改变将影响土壤的有效养分和植物对养分的吸收,从而改变了凋落物的养分含量。有限的证据显示气候变暖对凋落物质量有轻微但很大程度上是不可预知的影响^[5]。另一种是通过改变群落内的物种组成而导致凋落物性质的长期变化。气候变暖可以影响植被的物种组成,并通过各物种的不同响应来间接改变凋落物的产量、化学性质和分解^[19,20]。不同种类的凋落物混合后常常能加快其分解^[21],因此植物群落物种组成的变化也将改变凋落物的分解速率。碳化合物含量低的凋落物比碳化合物含量高的凋落物对气候变化的反应更敏感^[22]。Aerts^[5]认为,在高纬度的寒冷生物群系中,凋落物质量和分解能力的种间差异远大于对气候变暖的表观响应,因而物种组成和群落结构的变化将对生态系统凋落物的分解产生更大的影响。

1.2 对非生物因素的影响

非生物因素指气候、土壤、大气成分等环境条件。全球变暖对凋落物分解的非生物作用有正效应,也有负效应。全球变暖将改变森林生态系统的水热条件。气温上升一方面会使土壤N的矿化作用增强,土壤营养的有效性增加^[23],有利于凋落物分解。另一方面也会导致地面蒸散作用增加,土壤含水量减少,不利于凋落物的淋溶和分解。温度上升本身可加速各种物理、化学过程的进行,对凋落物分解是有利的。在凋落物分解调节的等级模型中,气候是最基本的影响因素。Meentemeyer^[24]在大陆尺度和全球尺度上的研究发现,单一的气象学变量——实际蒸散(AET actual evapo-transpiration)可较好地预测植被覆盖的系统中凋落物的分解速率。Berg等^[16]对松类凋落物在横跨寒温带至亚热带及地中海区域共34个地点的分解状况进行了研究,发现气候在大尺度上对凋落物分解的影响十分明显,年均温仅能解释凋落物年失重率的18%,年降水解释30%,AET解释了50%。Aerts^[6]对凋落物分解与AET间的相关性进行了回归分析,发现凋落物分解与AET一般呈指数关系,热带地区AET对凋落物分解的影响最为显著。Liski等^[2]在做了同Berg等^[16]类似的试验后认为,AET由于糅合了温度和干旱的影响而不宜作为估测分解速率的气候指标($R^2=0.51$),他们发展了一个线性模型,用年均温、有效积温或有效积温的对数来描述温度变量,用5月至9月间降水同潜在蒸散的差值来描述夏季干旱指数,并用欧洲和北美凋落物试验的数据进行了验证,结果发现该模型能更好地解释凋落物在第1年中失重率的变化($R^2=0.68\sim0.74$)。从上述结果来看,如何更准确地预测凋落物的分解速率仍需进一步的研究。

1.3 对生物因素的影响

一般认为生物因素是凋落物分解的主导因子,生物分解过程是凋落物分解的主导过程,它依赖于生物分解者的种类、数量及活性。生物因素通常又划分为动物与微生物两部分。温度上升影响森林的地面微生物环境因子,如增加土壤微生物的活性,加快有机质及凋落物的分解和其它物质循环,增强N的矿化作用等。McHale等^[25]增加土壤温度的实验显示,凋落物的保持量随温度的上升而下降,但微生物对提升温度的反应是非线性的。

温度上升加上林下湿度的改变(主要为变干燥)可能还会使土壤动物和微生物的种群发生变化,干燥条件有利于细菌类的活动,湿润条件有利于真菌类的活动。Mondini等^[26]发现,枯枝落叶层干湿交替减少了微生物的数量,在一定程度上降低了分解率。同时,干湿交替促进了细菌对活性底物(如半纤维素)的分解,而不利于真菌对难分解复合物(如木质素)的分解。因此在干旱区域气温上升会使细菌类对凋落物分解的作用加强。

2 CO₂浓度升高对凋落物分解的影响

根据测算,到21世纪中叶,CO₂浓度可能会从目前的350 $\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高到700 $\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[17]。大气CO₂浓度升高将对森林生态系统产生施肥效应。模拟CO₂浓度升高200 $\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$ (即565 $\mu\text{l}\cdot\text{L}^{-1}$)的FACE(free-Air CO₂

enrichment) 试验表明,森林的净初级生产量增加了 25%^[27],地表的凋落物量增加了 4%~22%^[28,29]。

CO₂ 浓度上升对凋落物分解的影响主要是间接的,它通过影响凋落物质量而影响分解过程。大多数研究认为 CO₂ 浓度上升会显著增加植物产量^[27,30]并形成含 N 量较低的有机物质,导致 C/N 比、木质素/N 比等上升,因而凋落物分解会减慢^[31,32]。Angelis 等^[33]发现,CO₂ 浓度倍增后,叶凋落物的木质素含量升高 18%,C/N 比上升了 20%,木质素/N 比上升 35%,在分解的初始阶段速度明显减慢,但随分解时间的延长,分解速率渐趋一致。Norby 等^[34]发现,高浓度 CO₂ 环境下产生的凋落物中 N 含量降低了 7.1%,木质素含量增加了 6.5%,但这些细微的变化并未影响到其分解速度。还有研究发现,在衰老的叶片中并没有表现出更高的 C:N 比和更低的 N 含量^[35,36],Finzi 等^[28,37]在美国松林的研究表明高 CO₂ 浓度下生产的凋落叶的化学性质并未发生实质性变化,分解速率同正常环境下的落叶并无差异。与此相比,分解过程中物种之间在初始凋落物化学性质、失重和 N 动态方面的差异更大。Hall 等^[38]在美国佛罗里达橡树林进行了 3a 的 CO₂ 浓度倍增模拟试验后也发现,虽然生长在 CO₂ 浓度倍增环境下的植物的凋落物中 C、半纤维素和木质素含量更高,但其分解速率同生长在正常环境下的植物的凋落物并无差异。但同时发现,凋落物在 CO₂ 浓度倍增环境下的分解速度显著高于在正常环境下的分解速度,且表现出更高的矿化 N 的富集。这表明在对凋落物分解和 N 循环的影响方面,分解时的空气状况比植物生长时的空气状况作用更大。这可能是由于在高 CO₂ 浓度的环境下土壤中的真菌和微生物数量更多、活性更强造成的^[39~41]。

CO₂ 浓度升高对分解过程中营养动态的影响也受到人们的关注,其中对 N 有效性的影响主要有两种假设。一种认为 CO₂ 浓度升高将刺激微生物的数量增加从而导致更多的 N 被固定^[42],而大多数学者认为 CO₂ 浓度升高将增加微生物的活性从而提高了 N 的有效性^[38,43~45]。

值得指出的是,虽然 CO₂ 上升通过影响凋落物质量而在一定程度上减慢了凋落物分解速率,但同时,CO₂ 上升形成的温室效应将导致温度上升从而加速了分解过程。Moore 等^[46]对加拿大 11 种凋落物在 18 个地点历时 3a 的分解实验研究表明,尽管在高浓度 CO₂ 下生长的植物的凋落物更高的木质素/N 比将减慢分解速率,但相比于气候改变引起的分解率加快,这种变化是很小的,CO₂ 倍增导致的升温最终可使凋落物分解率增加约 4%~7%。因而,CO₂ 浓度上升对凋落物分解的总效应尚需更多的研究来检验。

3 UV-B 辐射增强对凋落物分解的影响

UV-B 辐射增强是全球气候变化中十分引人注目的问题之一。大量研究已经证实,不仅在地球的两极,整个地球平流层的臭氧都在减少。世界气象组织^[47]估计,由于氟利昂(CFCs)的大量排放,北半球中纬度地区的臭氧层损耗每十年增加了 2%~3%。臭氧层的削减导致太阳紫外辐射(尤其是 UV-B)显著增强。按照目前的发展速度,未来 30a 内地球上的 UV-B 的辐射强度将比现在增加 30% 左右。UV-B 辐射变化对陆地生态系统的影响引起科学家们的广泛关注,有关 UV-B 辐射增强生物效应方面的研究成为继全球大气 CO₂ 浓度升高对植物影响的研究之后的又一热点领域^[48~51]。目前,植物对 UV-B 辐射增强的响应研究多从植株形态结构、细胞结构、光合与呼吸系统、细胞保护酶与抗氧化系统、内源激素与多胺代谢系统、紫外线接收蛋白、信号传导及其调控等方面展开,但很少有研究来评估 UV-B 对植物凋落物分解的影响^[52,53]。凋落物分解过程受到分解时照射的 UV-B 的直接影响和植物生长时照射的 UV-B 的间接影响。凋落物分解过程中 UV-B 的直接作用主要有 2 种机制,一种是非生物机制,即 UV-B 通过增加对凋落物木质素的光降解作用而促进分解^[54]。Austin 等^[55]对半干旱生态系统凋落物分解的研究表明,光降解对凋落物的分解起着主要的控制作用,UV-B 辐射的减弱导致凋落物分解降低了 33%。一种是生物机制,即通过改变生物分解者的数量和群落组成而直接降低了凋落物的分解速率^[56~58]。分解过程中这两种机制的作用可能是相反的,因为 UV-B 的增强加大了光降解作用但却削弱了分解者的生物活性。同时,这两种机制作用的大小又受到凋落物质量的调节,低品质的凋落物限制了微生物的活性,使得分解过程主要由非生物因子来驱动^[53]。

在植物的生长过程中,UV-B 能够引起植物各部分化学组成和形态特征的差异进而间接地影响到凋落物的分解,包括增加叶片的 α 纤维素^[54]和吸收 UV-B 的化合物如类黄酮和多酚^[56]、减少可溶性碳水化合物而增

加 N 含量^[59]。尽管都观测到生长在强 UV-B 辐射下的植物的凋落物含有更高的木质素/N 比,但 Cybulski 等^[60]发现这类凋落物分解得更快,而 Pancotto 等^[53]则发现这类凋落物分解得更慢。也有一些研究认为植物生长期间的 UV-B 辐射对凋落物的化学组成和分解没有影响^[61,62]。这些研究结果之间的差异可能与试验时的环境状况、UV-B 辐射强度及试验树种不同有关。为什么 UV-B 辐射对凋落物的化学组成产生不同的影响尚有待于进一步研究,以阐明其机理。

Pancotto 等^[53]发现,在增强 UV-B 辐射下生长的植物的凋落物 N 的释放减少,但 P 的释放更快。Austin 等^[55]对于旱草原凋落物分解的研究表明,由于 UV-B 辐射作用的增强,N 的释放显著加快了。截至目前,关于 UV-B 增强对凋落物分解过程中养分释放和循环的影响研究的较少,在今后的研究中可重点加强这方面的研究,以更好地认识 UV-B 辐射变化对陆地生态系统养分循环的影响。

4 N 沉降对凋落物分解的影响

20 世纪以来,由于人类活动的强烈干扰,大气 N 沉降正迅速增加,全球每年沉降到各类生态系统的活性 N 高达 43.47 Tg N/a^[63]。据预测,到 2050 年全球氮沉降水平将达到 195 Tg/a,大约是 20 世纪 90 年代 103 Tg/a 的两倍^[64]。N 沉降的快速增加已造成一系列严重的生态环境问题,引起了人们的广泛关注。N 沉降几乎影响到生态系统结构和功能的各个方面,并潜在地影响到大尺度上的元素循环^[65]。N 沉降大大增加了陆地生态系统的 N 输入,一方面通过影响植物的 N 吸收量来影响凋落物的初始 N 含量和其他营养元素含量,另一方面直接进入地表环境,通过影响植被组成而在总体上改变地表凋落物的化学成份比例^[66]。有研究表明,N 沉降的增加导致了凋落物的 N 含量升高,同时,植物将会吸收较多的其他营养元素以保持体内的元素平衡^[67]。Berg 等^[1]也发现,受 N 沉降的影响,苏格兰松(*Pinus sylvestris*)和挪威云杉(*Picea abies*)的凋落物在 N 含量增加的同时,木质素含量也相应增加。在长期 N 沉降的影响下,欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)林和苏格兰松林的地表植被组成也发生了明显变化,如 N 指示植物的丰度增加等^[66,68]。此外,N 对起降解作用的微生物的群落活性及其组成也有着重要影响^[6]。最近的研究发现^[69,70],在 N 沉降增加的条件下,同碳水化合物水解有关的酶的活性增加了,而分解多酚化合物的氧化酶的活性降低了。因此,酶的活性对 N 沉降的响应同凋落物的基质性质和微生物群落的组成都有关系。

凋落物及周围环境的 N 含量将对凋落物分解的快慢产生重要作用。大量研究发现,凋落物分解前期主要受到 N 的制约,后期则主要受到木质素/N 比的制约^[18,65]。贫瘠土壤上的低品质凋落物在分解前期(可达 2~3 a)会从环境中固定养分,特别是氮磷养分;而肥沃土壤上的高品质凋落物则可在较短时间内释放出养分^[8]。一个在全球 7 个生物群系 21 地点进行的长达 10a 的凋落物分解试验表明,N 的净释放主要由凋落物中 N 的初始含量和凋落物分解的剩余量来驱动,其机理在于凋落物中 N 的初始含量能否满足微生物分解者对 N 的需求。高 N 含量的凋落物能满足分解者对 N 的需求从而较快释放出 N;低 N 含量的凋落物不能满足分解者对 N 的需求,分解者必须从环境中固定外源 N,因而环境中 N 的有效性将影响凋落物 N 的释放^[71]。

目前,关于 N 沉降影响凋落物分解速率的研究结果大致可以分为 3 类。其一是促进凋落物的分解,不论是模拟 N 沉降的室内试验还是野外试验均观测到 N 沉降的增加加快了凋落物分解和养分的释放^[12,72],这主要是因为凋落物中 N 含量的增加促进了分解和外加 N 源促进了木质素、单宁含量少的凋落物的分解。其二是减缓凋落物的分解^[18,73],这可能同 N 沉降改变了参与分解的微生物和土壤酶的组成及其活性有关^[12,65]。其三是对凋落物分解无显著影响,这可能主要是因为:(1)凋落物及其周边环境的 N 含量已饱和,(2)N 增加对木质素降解的抑制作用抵消了其对分解的促进作用,(3)凋落物 C 源质量较差导致分解者对 N 增加无反应^[74]。另外,N 沉降对森林凋落物分解的影响效果可能还与森林类型密切相关。如莫江明等^[72]研究了鼎湖山森林不同演替阶段主要凋落物对模拟 N 沉降的响应,结果表明 N 沉降的增加促进了演替初期群落凋落物的分解,但对演替后期群落凋落物的分解则起到抑制作用,造成这种现象的主要原因可能是演替初期群落受到人类活动的长期干扰而导致土壤肥力下降,凋落物的初始 N 含量不能满足参与分解的微生物生长和维持的需要,外加 N 在一定程度上增加了凋落物可利用的 N,从而促进了凋落物的分解;而演替后期群落的土壤 N

含量大大增加,改变了系统中营养元素的平衡,抑制了参与凋落物分解的微生物的活动。因此,土壤 N 素的可获得性可能是决定 N 沉降作用效果的关键因素。

总起来看,N 沉降对凋落物分解的影响还存在很大的不确定性,作用结果往往同试验所用的树种、试验的强度和时长短等密切相关,尚需开展进一步的研究来进行全面评估。作为仅次于欧洲和美国的世界第三大 N 沉降区,我国应尽快开展凋落物分解对 N 沉降响应方面的研究,以更全面、深入地了解 N 沉降对我国陆地生态系统的影响。

5 全球变化背景下凋落物分解对全球 C 循环的贡献

森林生态系统对 C 的吸存能力取决于地上和地下凋落物形成和分解的净平衡^[45]。凋落物的分解是 C 循环的一个关键过程,新鲜的凋落物分解过程中只有 20% 的 C 留存在土壤有机质中,而 80% 的 C 将损失掉^[75]。Raich 等^[76]估计,全球每年因凋落物分解(包括枯死根)释放的 C 为 68 Pg (Pg = 10^{15} g),约占全球年 C 通量的 70%。因此,在全球变化背景下,任何影响凋落物分解速率的因子的变化都将对全球碳预算产生重要影响。凋落物分解速率和气候变化之间有很强关系^[2,16],人们预计气候变暖将增加凋落物分解速率从而导致更高的 CO₂ 通量进入大气。这种效应在位于高纬度和高海拔的寒冷生物群系中可能更加明显,因为这类地区的增温最强烈,凋落物分解受到的温度限制也很强^[77,78]。在 CO₂ 浓度升高的背景下,由于土壤中根瘤菌和生物活性的增加,地中海森林生态系统的土壤有机碳贮量在初期可能因更快的流通量而降低^[40,45],但由于 CO₂ 浓度升高造成凋落叶 N 含量下降而降低了分解速率,导致更多的凋落物积累在林地表层,因此长期来看,土壤中的 C 贮量将增加^[45]。一些研究结果表明^[79,80],氮沉降增加抑制了木质素分解酶的活性,使木质素含量高的凋落物分解速率减慢,有利于土壤中有有机碳的累积,从而增加了森林土壤的固碳能力,这是北半球温带森林生态系统成为全球碳汇的主要原因之一。到目前为止,人们对全球环境变化如何影响凋落物分解进而影响 C 循环的了解还远远不够,已有的估计也多是定性的,还未能准确计算出因凋落物分解而释放出的 CO₂ 数量,因此,这方面的研究也应尽快加强。

6 问题与展望

综上所述,全球环境变化对凋落物分解的影响是一个复杂的综合作用过程,但其作用于凋落物分解的内在机理是一致的。一是通过改变凋落物的基质质量影响其分解速率,主要是木质素、N、C、P 含量和木质素/N 比、C/N 比等。二是通过改变凋落物分解的外部环境来影响分解,包括生物环境如土壤动物、微生物、土壤酶等和非生物环境如光质、降水等。从已发表的文献来看,研究主要集中在全球环境变化对凋落物基质质量和非生物环境的影响方面,对生物环境的影响研究的相对较少。土壤动物、微生物和土壤酶等分解者对凋落物的分解快慢有着重要作用^[81],加强这方面的研究将有助于人们更深入全面地了解全球环境变化对凋落物分解影响的内在机制。

当前,人们对凋落物的研究主要集中在凋落叶上,对于较难分解的枝条和不便观测的根系的分解的研究还比较少,这对于全面认识森林生态系统的养分循环和 C 平衡是远远不够的。在今后的研究中,应着重加强全球环境变化对植物其他部分如枝条和根系分解影响的研究,唯有如此,我们才能获得气候变化对植物凋落物分解影响的完整理解^[5]。

另外,酸沉降也是全球变化的一个重要特征,我国已成为继欧洲和北美之后的世界第三大酸雨区。酸沉降可造成土壤酸化,从而影响了细菌数量及凋落物的分解速率。同时,酸沉降也会改变植物叶片表面蜡被层和角质层的物理、化学特性,加速叶片的老化,使叶片失去活力,进而可能影响到凋落叶的分解。遗憾的是,关于酸沉降对凋落物分解的影响的研究工作还很少见,对于酸沉降影响凋落物分解的程度及其作用机理人们还了解不多,这方面的研究工作亟需加强。

由于研究方法不尽一致,试验地点和凋落物性质也各不相同,导致已有研究结果之间的可比性较差,甚至常常相互矛盾。而且,目前的这类研究都是短时间尺度的(一般在 3a 之内),而对于全球环境变化将如何影响凋落物的长期分解人们还一无所知,因此,其结论的可靠性还需要更长时间的试验来检验。再加上全球环

境变化的长期性、多变性以及生态系统响应的复杂性,现有的工作还远远不够,尚需要用更先进和统一的方法来开展更长期、更深入的研究。而且,在自然状态下,全球环境变化的各类因子同时作用于凋落物分解,因此多个环境变化因素对凋落物分解共同作用的影响也有待研究。

同国外相比,我国对凋落物分解的研究虽然起步较晚,但已对不同森林类型凋落物的产量动态及其化学组成、凋落物的分解过程及养分释放等进行了较为全面的研究,已基本摸清了我国主要森林类型及主要树种的凋落物产量及分解过程^[82~89]。而在气候变化对森林凋落物分解影响方面的工作基础还很薄弱,目前只有中国科学院华南植物研究所开展了一些 N 沉降、南亚热带和热带交互分解的试验工作^[90~94],樊后保等^[95,96]对模拟氮沉降对杉木人工林凋落物的影响进行了初步研究,邓小文等^[97]对模拟 N 沉降对长白山红松凋落物早期分解的影响进行了探讨。总体来看,对于全球气候变化将如何影响我国森林凋落物的分解还知之甚少。因此,在今后的工作中,应加强全球变化尤其是全球变暖、CO₂ 浓度升高、UV-B 增强对我国各主要森林类型凋落物的产量动态、化学性质及其分解、养分循环等多方面的影响和作用机理的研究,并进而探讨全球气候变化背景下凋落物分解模式的改变对森林生态系统的发育、恢复和演替以及 C 平衡和养分循环的深远影响,为全面、深刻理解并准确预估我国森林生态系统对全球变化的响应提供基础支撑。

References:

- [1] Berg B, McClaugherty C. Plant Litter: Decomposition, Humus formation, Carbon sequestration. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [2] Liski J, Nissinen A, Erhard M, *et al.* 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] 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] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 1997, 79: 439—449.
- [7] Paul G S, Douglas R T, Peter M V. Decomposition of *Metrosideros polymorpha* leaf litter along elevational gradients in Hawaii. *Global Change Biology*, 2000, 6: 73—85.
- [8] Li Z A, Zou B, Ding Y Z, *et al.* Key factors of forest litter decomposition and research progress. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(6): 77—83.
- [9] Lin B, Liu Q, Wu Y, *et al.* Advances in the studies of forest litter. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 60—64.
- [10] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, *et al.* A review on litter decomposition in forest ecosystem. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(4): 93—100.
- [11] Peng S L, Liu Q. The dynamics of forest litter and its responses to global Warming. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1534—1544.
- [12] Fang H, Mo J M. Effects of nitrogen deposition on forest litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3127—3136.
- [13] Easterling D R, Horton B, Jones P D, *et al.* Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 1997, 277: 364—367.
- [14] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Paris, February 2007: 18.
- [15] Li X, Zhang X S, Yang D A. Application of Holdridge vegetation-climate classification system in research of the responses of Chinese vegetation to the global changes. In: Life Science Department, the Committee of National Science Foundation of China and Shanghai Literature Information Center, Chinese Academy of Sciences Ed. *Global Changes and Ecosystems*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994, 1—16.
- [16] 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.
- [17] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, 75: 1861—1876.
- [18] Berg B, Johansson M B, Meentemeyer V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30: 1136—1147.
- [19] Dorrepaal E, Cornelissen J H C, Aerts R, *et al.* Are growth forms consistent predictors of leaf litter quality and decomposability across peatlands along a latitudinal gradient? *Journal of Ecology*, 2005, 93: 817—828.
- [20] Cornelissen J H C. An experimental comparison of leaf decomposition rates in a wide range of temperate plant species and types. *Journal of Ecology*, 1996, 84: 573—582.
- [21] Gartner T B, Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. *Oikos*, 2004, 104: 230—246.
- [22] Fierer N, Craine J M, McLauchlan K, *et al.* Litter quality and the temperature sensitivity of decomposition. *Ecology*, 2005, 86: 320—326.
- [23] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, *et al.* Responses of trace gas fluxes and N availability to experimental elevated soil temperatures.

- Ecological Applications, 1994, 4: 617—625.
- [24] Meentemeyer V. Microclimate and lignin control of litter decomposition rates. Ecology, 1978, 59: 465—472.
- [25] McHale P J, Mitchell M J, Bowles F P. Soil warming in northern hardwood forest: trace gas fluxes and leaf litter decomposition. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28: 1365—1372.
- [26] Mondini C, Contin M, Leita L, *et al.* Response of microbial biomass to air-drying and rewetting in soils and compost. Geoderma, 2002, 105: 111—124.
- [27] DeLucia E H, Hamilton J G, Naidu S L, *et al.* Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment. Science, 1999, 284: 1177—1179.
- [28] Finzi A C, Schlesinger W H. Species control variation in litter decomposition in a pine forest exposed to elevated CO₂. Global Change Biology, 2002, 8: 1217—1229.
- [29] Norby R J, Hanson P J, O'Neill E G, *et al.* Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage. Ecological Applications, 2002, 12: 1261—1266.
- [30] Dijkstra P, Hymus G, Colavito D, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ stimulates aboveground biomass in a fire-regenerated scrub-oak ecosystem. Global Change Biology, 2002, 8: 90—103.
- [31] Cotrufo M F, Ineson P. Elevated CO₂ reduces field decomposition rates of *Betula pendula* Roth. Leaf litter. Oecologia, 1996, 106: 525—530.
- [32] O'Neill E G, Norby R J. Litter quality and decomposition rates of foliar litter produced under CO₂ enrichment. In: Koch G W, Mooney H A eds. Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems. San Diego: Academic Press, 1996, 87—103.
- [33] Angelis P D, Kesari S C, Giuseppe E S M. Litter quality and decomposition in a CO₂-enriched Mediterranean forest ecosystem. Plant Soil, 2000, 224: 31—41.
- [34] Norby R J, Cotrufo M F, Ineson P, *et al.* Elevated CO₂, litter chemistry and decomposition: a synthesis. Oecologia, 2001, 127: 153—165.
- [35] Curtis P S, Drake B G, Whigham D F. Nitrogen and carbon dynamics in C₃ and C₄ estuarine marsh plants grown under elevated CO₂ *in situ*. Oecologia, 1989, 78: 297—301.
- [36] Hall M C, Stiling P, Hungate B A, *et al.* Effects of elevated CO₂ and herbivore damage on litter quality in a scrub oak ecosystem. Journal of Chemical Ecology, 2005, 31: 2343—2356.
- [37] Finzi A C, Allen A S, DeLucia E H, *et al.* Forest litter production, chemistry, and decomposition following two years of free-air CO₂ enrichment. Ecology, 2001, 82: 470—484.
- [38] Hall M C, Stiling P, Moon D C, *et al.* Elevated CO₂ increases the long-term decomposition rate of *Quercus myrtifolia* leaf litter. Global Change Biology, 2006, 12: 568—577.
- [39] Klamer M, Roberts M S, Levine L H, *et al.* Influence of elevated CO₂ on the fungal community in a coastal scrub oak forest soil investigated with terminal-restriction fragment length polymorphism analysis. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68: 4370—4376.
- [40] Hoosbeek M, Lukac M, van Dam D, *et al.* More new carbon in the mineral soil of a poplar plantation under free air carbon enrichment: cause of increased priming effect? Global Biogeochemical Cycle, 2004, 18: GB1040.
- [41] Moscatelli M C, Lagomarsino A, De Angelis P, *et al.* Seasonality of soil biological properties in a poplar plantation growing under elevated atmospheric CO₂. Applied Soil Ecology, 2005, 30: 162—173.
- [42] Diaz S, Grime J P, Harris J, *et al.* Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide. Nature, 1993, 364: 616—617.
- [43] Zak D R, Pregitzer K S, Curtis P S, *et al.* Elevated atmospheric CO₂ and feedback between carbon and nitrogen cycles. Plant and Soil, 1993, 151: 105—117.
- [44] Cotrufo M F, Raschi A, Lanini M, *et al.* Decomposition and nutrient dynamics of *Quercus pubescens* leaf litter in a naturally enriched CO₂ Mediterranean ecosystem. Functional Ecology, 1999, 13: 343—351.
- [45] Cotrufo M F, De Angelis P, Polle A. Leaf litter production and decomposition in a poplar short-rotation coppice exposed to free air CO₂ enrichment (POPFACE). Global Change Biology, 2005, 11: 971—982.
- [46] Moore T R, Trofymow J A, Taylor B, *et al.* Litter decomposition rates in Canadian forests. Global Change Biology, 1999, 5: 75—82.
- [47] World Meteorological Organization. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998. Report no. 44. WMO, Geneva, 1999.
- [48] Caldwell M M, Teramura A H, Tevini M, *et al.* Effects of increased solar UV radiation on terrestrial plants. Ambio, 1995, 24: 166.
- [49] Caldwell M M, Bjorn L O, Bornman J F, *et al.* Effects of increased solar UV radiation on terrestrial ecosystem. Journal of Photochemistry and Photobiology B, 1998, 46: 40—52.
- [50] Jiang G M. Review on some hot topics towards the researches in the field of plant physiocology. Acta Phytocologica Sinica, 25(5): 514—519.
- [51] Liu A Q, Ma X Q. The effect of enhanced Ultraviolet-B radiation on xylophyte. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(4): 36—39.
- [52] Newsham K K, Anderson J M, Sparks T H, *et al.* UV-B effect on *Quercus robur* leaf litter decomposition persists over four years. Global Change Biology, 2001, 7: 479—483.
- [53] Pancotto V A, Sala O E, Robson T M, *et al.* Direct and indirect effects of solar ultraviolet-B radiation on long-term decomposition. Global Change Biology, 2005, 11: 1982—1989.
- [54] Rozema J, Tosserams M, Nelissen H J M, *et al.* Stratospheric ozone reduction and ecosystem processes: enhanced UV-B radiation affects chemical

- quality and decomposition of leaves of the dune grassland species *Calamagrostis epigeios*. *Plant Ecology*, 1997, 128: 284—294.
- [55] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*, 2006, 442: 555—558
- [56] Gehrke C, Johanson U, Callaghan T V, *et al.* The impact of enhanced ultraviolet-B radiation on litter quality and decomposition processes in *Vaccinium* leaves from the Subarctic. *Oikos*, 1995, 72: 213—222.
- [57] Moody S A, Paul N D, Björn L O, *et al.* The direct effects of UV-B radiation on *Betula pubescens* litter decomposing at four European field sites. *Plant Ecology*, 2001, 154: 29—36.
- [58] Pancotto V A, Sala O E, Cabello M, *et al.* Solar UV-B decreases decomposition in herbaceous plant litter in Tierra del Fuego, Argentina: potential role of an altered decomposer community. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1465—1474.
- [59] Yue M, Li Y, Wang X. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on plant nutrients and decomposition of spring wheat under field conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, 40: 187—196.
- [60] Cybulski III W J, Peterjohn W T, Sullivan J H. The influence of elevated ultraviolet-B radiation (UV-B) on tissue quality and decomposition of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) needles. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, 44: 231—241.
- [61] Newsham K K, Splatt P, Coward P A, *et al.* Negligible influence of elevated UV-B radiation on leaf litter quality of *Quercus robur*. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 659—665.
- [62] Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. Elevated UV-B radiation has no effect on litter quality and decomposition of two dune grassland species: evidence from a long-term field experiment. *Global Change Biology*, 2004, 10: 200—207.
- [63] Kaiser J. The other global pollutant; nitrogen proves tough to curb. *Science*, 2001, 294: 1268—1269.
- [64] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, *et al.* Nitrogen cycles: Past, present and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 153—226.
- [65] Moorhead D L, Sinsabaugh R L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction. *Ecological Monographs*, 2006, 76(2): 151—174.
- [66] Tamm C O. Nitrogen in terrestrial ecosystems: Questions of productivity, vegetational changes, and ecosystem stability. *Ecological Studies* 81, Berlin: Springer Verlag, 1991.
- [67] Makrov M T, Krasilnikova T L. Nitrogen and phosphorus contents in plants under conditions of industrial pollution of the atmosphere and the soil. *Moscow Univ. Soil Sci. Bull*, 1987, 42: 2—11.
- [68] Falkengren G U, Eriksson H. Changes in soil, vegetation and forest yield between 1947 and 1988 in beech and oak sites southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 1990, 38: 37—53.
- [69] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition. *Ecology*, 2000, 81: 2359—2365.
- [70] Gallo M, Amonette R, Lauber C, *et al.* Microbial community structure and oxidative enzyme activity in nitrogen-amended north temperate forest soils. *Microbial Ecology*, 2004, 48: 218—229.
- [71] Parton W, Silver W L, Burke I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315: 361—364.
- [72] Edmonds R L, Thomas T B. Decomposition and nutrient release from green needles of western hemlock and Pacific silver fir in an old-growth temperate rain forests, Olympic National Park Washington. *Canadian Journal of Botany*, 1995, 25: 1049—1057.
- [73] Kuperman R G. Litter decomposition and nutrient dynamics in oak-hickory forests along a historic gradient of nitrogen and sulfur deposition. *Soil Biology and Biochemistry*. 1999, 31: 237—244.
- [74] Hobbie S E. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest. *Ecosystems*, 2000, 3: 484—494.
- [75] Ngao J, Epron D, Brechet C, *et al.* Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1768—1776.
- [76] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81—99.
- [77] Robinson C H. Controls on decomposition and soil nitrogen availability at high latitudes. *Plant and Soil*, 2002, 242: 65—81.
- [78] Hobbie S E, Nadelhoffer K J, Höglberg P. A synthesis: the role of nutrients as constraints on carbon balances in boreal and arctic regions. *Plant and Soil*, 2002, 242: 163—170.
- [79] Magill A H, Aber J D. Long term effects of experimental nitrogen addition on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems. *Plant Soil*, 1998, 203: 301—311.
- [80] Deforest J L, Zak D R, Pregitzer K S, *et al.* Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 965—971.
- [81] Tian G, Kang B T, Brussaard L. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions—decomposition and nutrient release. *Soil Biology & Biochemistry*, 24: 1051—1060.
- [82] Li H T, Yu G R, Li J Y, *et al.* Decomposition dynamics and nutrient release of litters for four artificial forests in the red soil and hilly region of subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 898—908.
- [83] Guo Z L, Zheng J P, Ma Y D, *et al.* Researches on litterfall decomposition rates and model simulating of main species in various forest vegetations of Changbai Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1037—1046.

- [84] Wang J, Huang J H. Comparison of major nutrient release patterns in leaf litter decomposition in warm temperate zone of China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(3): 375—380.
- [85] Huang J H, Chen L Z, Han X G. Changes of some major and micro nutrients during the decomposition process of oak twigs. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 229—234.
- [86] Zhang Q F, Song Y C, Wu H Q, *et al.* Dynamics of litter amount and its decomposition in different successional stages of evergreen broad-leaved forest in Tiantong Zhejiang province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(3): 250—255.
- [87] Shen H L, Ding B Y, Shen G F, *et al.* Decomposition dynamics of several coniferous and broadleaved litters in Mongolian Scots pine plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 1996, 32(5): 393—402.
- [88] Yi W M, Ding M M, Zhang Z P. Litter Mass and Its Nitrogen Dynamics of *Cryptocarya Concinna* Community in the Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Phytocologica Sinica*, 1994, 18(3): 228—235.
- [89] Yu M J, Chen Q C, Li M H, *et al.* Litterfall in the evergreen broadleaved forests dominated by *Cyclobalanopsis Glauca* in Zhejiang, SE China. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(2): 144—150.
- [90] Mo J M, Xu J H, Fang Y T. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants of Dinghushan forests in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(7): 1413—1420.
- [91] Liu Q, Peng S L, Bi H, *et al.* The reciprocal decomposition of foliar litter in tropical and subtropical forests. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(4): 86—89.
- [92] Liu Q, Peng S L, Bi H, *et al.* Nutrient dynamics of foliar litter in reciprocal decomposition in tropical and subtropical forests. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(1): 24—32.
- [93] Xu G L, Mo J M, Zhou G Y, *et al.* Litter decomposition under N deposition in Dinghushan forests and its relationship with soil fauna. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6): 901—907.
- [94] Wang H, Mo J M, Xue J H, *et al.* Effects of Elevated Nitrogen Deposition on the Activities of Enzymes in Forest Litter Decomposition: a Review. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2006, 14(6): 539—546.
- [95] Fan H B, Liu W F, Qiu X Q, *et al.* Responses of litterfall production in Chinese fir plantation to increased nitrogen deposition. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(9): 1335—1338.
- [96] Fan H B, Huang Y Z, Qiu X Q, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on litterfall nitrogen concentrations and its annual flux in Chinese fir plantations. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2007, 29(1): 43—47.
- [97] Deng X W, Zhang Y, Han S J, *et al.* Effects of nitrogen addition on the early stage decomposition of Korean pine litter in the Changbaishan Mountains, northeastern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(6): 16—22.

参考文献:

- [8] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(6): 77—83.
- [9] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 60—64.
- [10] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4): 93—100.
- [11] 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.
- [12] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响. *生态学报*, 2006, 26(9): 3127—3136.
- [50] 蒋高明. 2001. 当前植物生理生态研究的几个热点问题. *植物生态学报*, 25(5): 514—519.
- [51] 刘爱琴, 马祥庆. UV-B 辐射增强对木本植物的影响研究进展. *中国生态农业学报*, 2004, 12(4): 36—39.
- [82] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 等. 亚热带红壤丘陵区四种人工林凋落物分解动态及养分释放. *生态学报*, 2007, 27(3): 898—908.
- [83] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究. *生态学报*, 2006, 26(4): 1037—1046.
- [84] 王瑾, 黄建辉. 暖温带地区主要树种叶片凋落物分解过程中主要元素释放的比较. *植物生态学报*, 2001, 25(3): 375—380.
- [85] 黄建辉, 陈灵芝, 韩兴国. 几种常量微量元素在辽东栎枝条分解过程中的变化特征. *生态学报*, 2000, 20(2): 229—234.
- [86] 张庆费, 宋永昌, 吴化前, 等. 浙江天童常绿阔叶林演替过程凋落物数量及分解动态. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 250—255.
- [87] 沈海龙, 丁宝永, 沈国防, 等. 樟子松人工林下针叶凋落物分解动态研究. *林业科学*, 1996, 32(5): 393—402.
- [88] 蚁伟民, 丁明懋, 张祝平. 鼎湖山黄果厚壳桂群落的凋落物及其氮素动态. *植物生态学报*, 1994, 18(3): 228—235.
- [89] 于明坚, 陈启瑞, 李铭红, 等. 1996. 浙江建德青冈常绿阔叶林凋落量研究. *植物生态学报*, 20(2): 144—150.
- [90] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413—1420.
- [91] 刘强, 彭少麟, 毕华, 等. 热带亚热带森林凋落物交互分解的研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(4): 86—89.
- [92] 刘强, 彭少麟, 毕华, 等. 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.
- [93] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 氮沉降下鼎湖山森林凋落物分解及与土壤动物的关系. *生态环境*, 2005, 14(6): 901—907.
- [94] 王晖, 莫江明, 薛璟花, 等. 氮沉降增加对森林凋落物分解酶活性的影响. *热带亚热带植物学报*, 2006, 14(6): 539—546.
- [95] 樊后保, 刘文飞, 裘秀群, 等. 杉木人工林凋落物量对氮沉降增加的初期响应. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1335—1338.
- [96] 樊后保, 黄玉梓, 裘秀群, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林凋落物氮素含量及归还量的影响. *江西农业大学学报*, 2007, 29(1): 43—47.
- [97] 邓小文, 张岩, 韩士杰, 等. 外源氮输入对长白山红松凋落物早期分解的影响. *北京林业大学学报*, 2007, 29(6): 16—22.