

几个环境因子对凋落物分解的影响

卜 涛^{1,2}, 张水奎^{1,2}, 宋新章^{1,2}, 江 洪^{1,2}

(1. 浙江农林大学 亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 凋落物分解是陆地生态系统物质循环的一个重要环节。在介绍凋落物分解一般过程及其影响因素的基础上, 论述了全球环境变化背景下, 酸沉降增加、林火增多、土地利用变化等环境因子对凋落物分解的影响。酸沉降通常是影响凋落物分解的重要因素之一, 其中氮沉降对凋落物分解有促进、抑制或无明显影响等3种作用。林火发生后短期内对凋落物分解有抑制作用, 长期则逐渐转变为积极的促进作用。土地利用变化则因转变方式不同而对凋落物分解产生积极或消极的影响。今后亟待加强多个环境因子对凋落物分解复合作用影响的研究和长期观测。参 52

关键词: 森林生态学; 凋落物分解; 酸沉降; 林火; 土地利用变化; 复合作用; 综述

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)05-0740-08

Effects of several environmental factors on litter decomposition

BU Tao^{1,2}, ZHANG Shuikui^{1,2}, SONG Xinzhang^{1,2}, JIANG Hong^{1,2}

(1. The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Litter decomposition is an important part of biogeochemical cycle in terrestrial ecosystems. This paper firstly described the general process of litter decomposition and the factors influencing decomposition. Then the effects of several environment factors, including acid deposition, forest fire, land use change, on litter decomposition were discussed. Acid deposition played an important role in the litter decomposition. As a main type of acid deposition, nitrogen deposition could promote, inhibit or have no significant effect on litter decomposition. Forest fire would inhibit litter decomposition in a short period of time, but would accelerate decomposition in the long time. The land use change could have a positive or negative effect on litter decomposition depending on the different ways of the change. The future research should focus on the combined interaction of multiple environmental factors on the litter decomposition. [Ch, 52 ref.]

Key words: forest ecology; litter decomposition; acid deposition; forest fire; land use change; combined interaction; review

凋落物分解是陆地生态系统生物地球化学循环的一个重要环节, 在维持土壤肥力、保证植物的再生中起着重要作用, 对陆地生态系统的碳估算也具有重要的科学意义, 一直受到生态学家的关注。在生境条件相同的情况下, 凋落物的基质品质如木质素、碳、氮、磷含量和木质素/氮比、碳/氮比等对分解速度起着关键作用。但在全球尺度上, 气候因素如年均温(mean annual temperature, MAT), 年均降水(mean

收稿日期: 2012-08-17; 修回日期: 2012-10-27

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目 (31070440); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 资助项目 (2011CB302705); 浙江农林大学人才启动基金资助项目 (2012FR023)

作者简介: 卜涛, 从事森林生态学研究。E-mail: 105772112@qq.com。通信作者: 宋新章, 副教授, 博士, 从事森林生态学和全球变化生态学研究。E-mail: xzsong@126.com

annual precipitation, MAP), 实际蒸散(actual evapo-transpiration, AET)等对凋落物的分解起着主要控制作用^[1-2]。全球变化是人类面临的巨大挑战,正在从多个方面影响着凋落物的分解。凋落物分解主要受到基质品质和气候因素的影响。部分学者已就全球变暖^[3]、氮沉降^[4]、UV-B 辐射^[5]等环境因子变化对凋落物分解的影响进行了综合评述,但有关酸沉降、林火、土地利用变化等因子以及多因子的复合作用对凋落物分解影响的研究还没有进行系统的分析评述。基于此,本文在介绍了凋落物分解的一般过程及其影响因素的基础上,对酸沉降、林火、土地利用变化等因子对凋落物分解影响的研究进行了综合分析和述评,以期为相关研究提供参考。

1 凋落物分解的一般过程及其影响因素

凋落物分解主要包含物理、化学、生物等3个方面的作用过程,由降水、淋溶、动物咀嚼和啃食、土壤干湿交替和冻融、生物代谢等相互作用共同进行^[6]。凋落物的分解主要分为2个时间段:前期主要受非生物过程的影响,后期主要是受到生物作用。其中,分解早期凋落物质量损失将占整个凋落物分解过程失质量的80%,分解后期木质素则将成为分解快慢的主导因素^[7]。凋落物分解的最终结果将转化成二氧化碳、水和部分腐殖质,成为植物生长的养分来源,这是森林生态系统实现养分循环利用的重要途径之一。

凋落物分解过程中,不同凋落物养分元素的富集与释放模式并不完全相同。一般来说,元素释放主要有3种模式^[8]:①淋溶—富集—释放;②富集—释放;③直接释放。但并不是所有凋落物分解都存在这3个阶段,如马尾松 *Pinus massoniana*, 非洲圆柏 *Juniperus procera* 等凋落叶的分解过程中,并不出现明显的甚至不存在淋溶阶段。氮表现为先富集后释放的特征^[9]。钾、钠、镁、磷属于植物体内易移动元素,一般分布在植物的生长点和嫩叶;而钙、铁、锰在植物体内属于难溶解化合物的组成成分(如木质素、纤维素和多酚类物质),在凋落物中的含量较高,将会抑制凋落物分解的速率。在大多数的生态系统中,林木生长所需要的氮和磷有69%~87%是由凋落物分解所提供的^[10]。在全球7个生物系21个地点历经10 a的凋落物分解元素释放试验表明,凋落物的初始氮含量与凋落物分解的剩余量是氮的净释放的主要驱动力^[11]。凋落物自身的物理性质和化学性质是影响凋落物分解的主要内因,氮、磷和木质素的含量、碳/氮、碳/磷、木质素与养分比是常见反映凋落物品质的指标,碳/氮比和木质素/氮是反映凋落物分解速率的较好指标^[12-14]。其次,陆地生态系统的物种构成和群落结构不同,也会导致凋落物分解速率产生差异,例如针叶林的碳/氮、木质素/氮以及萜类物质和酚类物质含量较高,不利于土壤生物群落生长和繁衍,因而其分解速率较阔叶林慢^[15]。凋落物的自身物理性质对凋落物的分解速率也具有影响。有研究^[16]发现,高海拔山地的树木凋落叶片更加厚实宽大,结构粗糙,分解速率相对低海拔的凋落叶片就更慢。

气候、土壤、大气成分等环境条件构成凋落物分解时的非生物环境。大量研究结果显示,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总体上表现为:热带>亚热带>温带>寒温带^[10]。Meentemeyer^[17]通过对大陆和全球2种尺度上的研究发现,实际蒸散因反应了温度和湿度的综合效应而可以对植被覆盖的系统中凋落物的分解速率进行较准确的预测,实际蒸腾与年均分解率呈正相关($r=0.98$)。

微生物和土壤动物承担着对不易分解的凋落物成分进行生物降解作用。微生物能够产生蛋白质酶、纤维素酶和木质素降解酶等,提高凋落物的分解速率。Pausas等^[18]通过研究发现,土壤动物的粉碎作用及土壤微生物对凋落物中难分解成分的生物降解对凋落物的分解速率有显著影响。

2 酸沉降

中国是世界三大酸雨区之一,由酸雨导致的森林土壤酸化有日益严重的趋势,酸沉降对凋落物分解的影响同生态系统养分循环和碳平衡等方面具有密切联系。酸沉降改变植物表面蜡被层和角质层的物理化学性质,使植物叶片快速老化,增加了凋落物累积量。研究^[19]发现,通过在酸性烟田土壤中施用适量石灰,中和酸性,可以增加土壤细菌、放线菌、好气性纤维素分解菌数量,提高脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和纤维素酶活性,进而影响凋落物的分解。Wang等^[20]发现,酸雨抑制了麻栎 *Quercus acutissi-*

ma 和马尾松凋落叶的分解速率,同时还发现酸雨抑制了纤维素酶、蔗糖酶、硝酸还原酶、酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、多酚氧化酶和尿酶的活性,但增强了过氧化氢酶的活性,因此认为酸雨对凋落物分解的消极作用可能与其对酶活性的抑制密切相关。马元丹等^[21]也发现,与对照组相比,毛竹 *Phyllostachys edulis* 叶凋落物在中度(pH 4.0)和重度(pH 2.5)酸雨胁迫下分解速率分别降低了0.12%和0.36%,95%分解时间分别延长了0.92 a和4.74 a,即酸雨胁迫导致了毛竹叶凋落物分解速率的减慢,并且随着胁迫的增强,分解速率愈加减慢。洪江华等^[22]研究发现,马尾松、青冈 *Cyclobalanopsis glauca* 和木荷 *Schima superba* 的叶凋落物的分解受到中度酸雨处理(pH 4.0)和重度酸雨处理(pH 2.5)的抑制,其中受到重度酸雨处理的抑制程度最大,凋落物的分解速率最慢。

近年来,随着工业的发展和城市机动车数量激增,中国的酸沉降类型逐渐由硫酸型向硝酸型转变,即大气氮沉降。大气氮沉降含有大量生物生长发育所需的氮素,因而对生态系统的影响受到了格外关注。氮沉降对凋落物分解的影响研究的结果一般分为3种情况。第1种情况,氮沉降对凋落物分解呈促进作用。樊后保等^[23]研究表明,低氮($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)和中氮($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)促进杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林凋落物的分解,而高氮($240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)则表现出一定的抑制作用。第2种情况,氮沉降对凋落物分解有抑制作用,除了受到氮沉降量的影响,这可能与氮沉降改变了分解者的组成和活性有关。但是,有研究发现^[24],沉降的氮会与分解时的一些物质形成更难降解的物质,从而抑制了凋落物的分解。Hobbie等^[25]发现氮添加促进了美国针栎 *Quercus ellipsoidalis* 凋落物的早期分解,但在分解后期,外源氮因降低了木质素降解酶的活性和革兰氏阴性菌及革兰氏阳性菌的丰富度而对分解产生了抑制作用。Zhang等^[26]也发现氮输入激发了杉木和桤木 *Alnus cremastogyne* 凋落物的早期分解,但却抑制了后期分解。第3种情况,凋落物分解速率没有明显变化。导致这些模拟试验结果间存在较大差异的一个重要原因可能与模拟氮沉降输入量的多少有关,也同试验地点间的氮饱和点存在差异有关。过量的氮沉降会直接或间接抑制木质素酶与纤维素酶的活性,不利于凋落物的分解。通常情况下,温带地区土壤氮素含量较缺乏,其氮饱和点也较高,而热带地区土壤氮素含量较丰富,其氮饱和点也较低。再加上试验地点间的氮沉降背景值也存在差异,从而导致同一试验地点不同氮输入量的模拟结果存在较大差异,相同氮输入量在不同试验地点间的模拟结果也明显不同。

氮沉降可通过影响凋落物的氮含量直接影响凋落物的分解速率,也可以通过影响森林地被物组成和凋落物化学成分间接影响凋落物的分解速率,氮沉降已经对凋落物分解产生长期的影响。方华^[4]等对鼎湖山主要森林植物凋落物分解的研究显示,氮沉降对鼎湖山森林植物凋落物分解的影响随着森林演替进展,其影响从正作用向负作用效应转移。到目前为止,有关酸沉降对凋落物分解影响的研究报道相对比较有限的,这方面的研究应进一步加强,这对于深入认识研究凋落物分解和酸沉降之间的作用关系具有重要意义。

3 林火

林火是森林的主要干扰因子之一,在很大程度上决定着该生态系统的碳平衡。林火一般分为林冠火与地面火,其中,地面火通常有利于凋落物的分解,其作用比微生物与土壤动物对凋落物分解的影响更迅速。林火在燃烧过程中,常常导致大量的氮丢失。张敏等^[26]研究发现,大兴安岭地区,火烧后的前4 a,由于氮的挥发,迹地土壤含氮量呈减少趋势,4 a后逐渐恢复正常,因此演替初期的环境常常不能立刻满足微生物分解者对氮的需求,但伴随火烧迹地表面温度的升高,又会促进土壤有机氮的矿化作用,为微生物提供新的氮源,对凋落物分解产生积极的影响。研究证实,不同强度的林火都会促进细根系生物量增加,增加土壤有机质的含量,而火烧所导致的土壤养分的释放,要比降水和凋落物带来的养分高得多,对植被的快速生长具有刺激性作用^[27],进而影响到凋落物的产量与品质。林火能够侵蚀土地表面,改变土壤的结构和化学成分,降低土壤吸水 and 保水能力,对凋落物分解前期的淋溶有负效应,减缓凋落物分解速率。

随着时间的推移,不同强度的林火引起的微生物数量变化会发生显著改变^[27],主要为真菌、细菌、放线菌。真菌释放的漆酶、木质素过氧化物酶等能够降解木质素和纤维素等难分解的化合物^[6],放线菌可以释放过氧化物酶、酯酶和氧化酶等降解腐殖质和木质素等^[28]。因此,凋落物分解速率将会受到火烧

迹地土壤不同微生物数量的影响。王可可等^[29]研究表明在林火发生的当年，与土壤养分释放相关的土壤酶活性会受到抑制，土壤营养物质得不到补充，趋于酸性，削弱了微生物降解凋落物的能力。

4 土地利用变化

土地利用是人类社会活动和生产活动的一种重要方式。随着人类社会的发展，土地利用的格局、深度和强度不断发生变化，由此对全球环境的各个方面产生了深刻影响。全球性的土地改造具有累聚性和系统性的影响。从局部到区域性的土地退化，如净初级生产力、作物产量、土壤肥力的下降，均与土地利用与土地覆盖变化密切相关。过去的300 a间，地表被开垦的面积相当于阿根廷甚至整个南美洲的面积^[30]。土地利用模式的改变对凋落物的分解有显著的意义。20世纪80年代，由于土地利用的变化造成陆地生态系统每年向大气输入的净碳通量为2 Pg，其中绝大部分来自热带地区，而由于森林砍伐后变为农田和草地引起的释放量大约占85%^[31]。

不同土地利用方式的变化以及不同的管理措施等必将导致凋落物化学组成和土壤温度、湿度的变化，进而影响到凋落物的分解。Castro等^[32]发现，葡萄牙南部的草地转换为灌木丛后，凋落物分解速率下降，主要原因在于凋落物的化学组成发生了改变。林地和草地的退化以及耕地的退化，都将向自然界释放大量的碳，空气中二氧化碳的含量增加，与非结构碳水化合物降解有关的一些还原酶活性增强，而与木质素降解有关的多酚氧化酶、过氧化物酶和胞外酶活性受到抑制^[33]，使凋落物分解的速率变慢。同时温室效应更加明显，温度升高将会促进凋落物的分解。另一方面，耕作使作物凋落物与土壤充分混合，团聚体结构被打破，并使有机质暴露，凋落物分解速率加快^[34]，反之，退耕还林，有利于土壤的碳储量，提高土壤有机物的稳定性，改善凋落物的品质，加快营养元素的循环速率，促进凋落物的分解。

不同土地利用类型形成的陆地小气候不一样，在不同土地利用类型环境下，凋落物的分解受到不同环境因子变化的影响，植被过度地被破坏，可能会导致当地气候的干旱和高温，对凋落物分解产生影响。另一方面，人为影响也会使土地利用产生新的变化，例如，耕种时施氮肥，追施磷肥，土壤酸性变强，会使土壤微生物数量减少，有机质分解速率减缓，抑制凋落物分解^[35]。同时，耕地增加、林地减少、土地裸石化，严重会导致山坡地土层贫瘠，水分、养分流失日益严重，这些将会对凋落物基质的质量与微生物分解的活性产生影响。

5 问题与展望

凋落物分解是一个复杂的综合作用过程，实验地的气候状况和土壤理化性质、实验时间及凋落物性质等客观因素，均可能会导致研究结果大相径庭，使得研究结果间的可比性较差。当前的实验结果主要是基于短时间尺度的，并不能完全反应凋落物长期分解的情况，其结果的真实性需要更长期和更多的研究结果来验证。

凋落物分解过程实质上是多因子如凋落物化学组成、气候和土壤等非生物因素的综合作用过程，这使得实验结果往往只是一个综合作用导致的数据，并不能完全反映实验所预计的某单个因子的作用效果。例如，凋落物分解实验常用的分解袋的隔离作用及其形成的小环境限制了土壤动物、微生物的活动，凋落物的分解速率因为土壤动物与土壤微生物活动缓慢而被低估。在温带和暖温带地区，土壤小动物对凋落物的分解过程影响较小，但在热带、亚热带地区，土壤动物对凋落物分解会起到重要的作用。卢俊培等^[36]同时采用分解袋和网罩法比较山地雨林凋落物的分解速率，实验显示：采用网罩法对土壤中动物翻动泥土所造成的干扰较少，从而凋落叶分解质量损失的速度在任何时段都是网罩法快于分解袋法。Williams等^[37]早期就开始使用杀菌剂、杀虫剂和其他微生物试剂来处理凋落物，用来排除生物干扰对凋落物的分解影响。

另一方面，当前关于凋落物分解对某一单个环境因子的响应研究仅仅能从某个侧面反映该因子对分解的作用，并不能全面、准确地反映其实际的综合影响。当前全球环境变化背景下，研究多因子的复合作用对生态系统的影响更具有现实的意义。Vitousek等^[38]通过在夏威夷岛对凋落物化学组成、温度、湿度、下垫面进行了系统性的研究，第1次较为准确地证明了生境作用相比凋落物化学组成更为显著。但受限于现有条件和技术，多因子的复合作用主要集中在对植物生理生态特征的影响方面，如干旱胁迫与

UV-B 辐射对栽培植物的复合作用^[39-41], 氮添加与 UV-B 辐射对黄瓜 *Cucumis sativus* 生长的复合作用^[42], 二氧化碳浓度增强与 UV-B 辐射对番茄 *Solanum lycopersicum* 的复合作用^[43]等, 但有关多因子复合作用对凋落物分解影响的研究尚鲜见报道。

森林凋落物研究历史已近百年。与国外相比, 中国凋落物分解研究虽然起步较晚, 但是在森林类型的凋落量及季节动态, 凋落物分解速率、分解过程中的化学性质与物理性质的变化及与土壤相互作用的影响, 森林凋落物基质质量及营养元素动态分析, 纯林及混交林凋落物养分回归的比较等方面做了较为全面的研究。但是关于土地利用变化、林火、酸沉降等全球变化因素对森林凋落物分解的研究工作开展的不多。如方华等^[44]、莫江明等^[45-46]研究了模拟氮沉降对鼎湖山主要树种凋落物分解的影响; 刘苹等^[47]开展了关于氮素添加对半干旱草原凋落物分解影响的研究; 张伟东等^[26]和樊后保等^[48]进行了杉木人工林凋落物分解对模拟氮沉降的响应研究; 李元等^[49]开展了 UV-B 辐射影响春小麦 *Triticum aestivum* 秸秆分解的试验; 宋新章等^[50-52]则在国内首次进行了 UV-B 辐射影响森林凋落物分解方面的研究。此外, 还存在研究方法不统一, 研究结果可比性差, 过分依赖早期数据与资料等问题, 需要采用更先进更精确的研究方法来开展此类试验。在未来中国酸沉降和 UV-B 辐射增强日趋严重、土地利用变化剧烈等情况下, 开展多种生态因子的复合作用的研究, 构建多种影响因子关系模型来测定全球环境变化和人类活动对凋落物分解的影响, 并通过长期定点观测, 提高模型对凋落物在大时空尺度下分解的机理拟合程度, 对全面评估中国生态系统的碳、氮动态和养分循环有着重要的科学意义和实际价值。

参考文献:

- [1] ZHANG Deqiang, HUI Dafeng, LUO Yiqi, *et al.* Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors[J]. *J Plant Ecol*, 2008, **1**(2): 85 - 93.
- [2] 宋新章, 江洪, 马元丹, 等. 中国东部气候带凋落物分解特征: 气候和基质质量的综合影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5219 - 5126.
SONG Xinzhang, JIANG hong, MA yuandan, *et al.* Litter decomposition across climate zone in Eastern China: the integrated influence of climate and litter quality[J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(10): 5219 - 5126.
- [3] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. *生态学报*, 2002, **22**(9): 1534 - 1544.
PENG Shaolin, LIU Qiang. The dynamics of forest litter and its responses to global warming [J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, **22**(9): 1534 - 1544.
- [4] 方华, 莫江明. 氮沉降对森林凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2006, **26**(9): 3127 - 3136.
FANG Hua, MO Jiangming. Effects of nitrogen deposition on forest litter decomposition[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(9): 3127 - 3136.
- [5] 张慧玲, 宋新章, 袁建国, 等. 增强紫外线-B 辐射对凋落物分解的影响研究综述[J]. *浙江林学院学报*, 2010, **27**(1): 134 - 142.
ZHANG Huiling, SONG Xinzhang, AI Jianguo, *et al.* A review of UV-B radiation and its influence on litter decomposition [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(1): 134 - 142.
- [6] SWIFT M J, HEAL O W, ANDERSON J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems* [M]. Berkeley and Los Angeles: University of California Press, 1979.
- [7] TAYLOR B R, PARKINSON D, PARSONS W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test [J]. *Ecology*, 1989, **70**(1): 97 - 104.
- [8] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. *林业科学*, 2006, **42**(4): 93 - 100.
GUO Jianfen, YANG Yusheng, CHEN Guangshui, *et al.* Review on litter decomposition in fire ecosystems [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(4): 93 - 100.
- [9] 莫江明, 布朗, 孔国辉, 等. 鼎湖山生物圈保护区马尾松林凋落物的分解及其营养动态研究[J]. *植物生态学报*, 1996, **20**(6): 534 - 542.
MO Jiangming, BROWN S, KONG Guohui, *et al.* Litter decomposition and its nutrient dynamics of a pine forest in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1996, **20**(6): 534 - 542.
- [10] WAMING R H, SCHLESINGER W H. *Forest Ecosystems: Concepts and Management* [M]. New York: Academic Press, 1985: 210.

- [11] PARTON W, SILVER W L, BURKE I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J]. *Science*, 2007, **315**(5810): 361.
- [12] BERG B, JOHANSSON M B, MEENTEMEYER V. Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control[J]. *Can J For Res*, 2000, **30**(7): 1136 – 1147.
- [13] MOORE T R, TROFYMOW J A, TAYLOR B, *et al.* Litter decomposition rates in Canadian forests[J]. *Global Change Biol*, 1999, **5**(1): 75 – 82.
- [14] 宋新章, 江洪, 张慧玲, 等. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4414 – 4423.
SONG Xinzhang, JIANG Hong, ZHANG Huiling, *et al.* A review on the effects of global environment change on litter decomposition [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(9): 4414 – 4423.
- [15] 代力民, 徐振邦, 张扬建, 等. 红松针叶的凋落及其分解速率研究[J]. *生态学报*, 2001, **21**(8): 1296 – 1300.
DAI Limin, XU Zhenbang, ZHANG Yangjian, *et al.* Study on decomposition rate and fall of *Pinus koraiensis* needle [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21**(8): 1296 – 1300.
- [16] VITOUSEK P M, TUMER D R, PARTON W J, *et al.* Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models [J]. *Ecology*, 1994, **75**(2): 418 – 429.
- [17] MEENTEMEYER V. Microclimate and lignin control of litter decomposition rates [J]. *Ecology*, 1978, **59**: 465 – 472.
- [18] GARCIA-PAUSAS J, CASALS P, ROMANGA J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer [J]. *Soil Biol Biochem*, 2004, **36**(6): 989 – 997.
- [19] 唐莉娜, 熊德中. 酸性土壤施石灰对土壤性质与烤烟品质的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003, **11**(3): 81 – 83.
TANG Lina, XIONG Dezhong. Effects of applying lime on the properties of acid soil and the leaves quality in flue-cured tobacco [J]. *China J Ecol*, 2003, **11**(3): 81 – 83.
- [20] WANG C Y, GUO P, HAN G M, *et al.* Effect of simulated acid rain on the litter decomposition of *Quercus acutissima* and *Pinus massoniana* in forest soil microcosms and the relationship with soil enzyme activities [J]. *Sci Total Environ*, 2010, **408**: 2706 – 2713.
- [21] 马元丹, 江洪, 余树全, 等. 模拟酸雨对毛竹凋落物分解的影响[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, **49** (2): 95 – 99.
MA Yuandan, JIANG Hong, YU Shuquan, *et al.* Effects of simulated acid rain on the *Phyllostachys pubescens* [J]. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2010, **49**(2): 95 – 99.
- [22] 洪江华, 江洪, 马元丹, 等. 模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(10): 5246 – 5251.
HONG Jianghua, JIANG Hong, MA Yuandan, *et al.* The influence of acid rain on leaf litter decomposition of three dominant trees in the subtropical typical forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(10): 5246 – 5251.
- [23] 樊后保, 刘文飞, 杨跃霖, 等. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降增加的响应[J]. *北京林业大学学报*, 2008, **30** (2): 8 – 13.
FAN Houbao, LIU Wenfei, YANG Yuelin, *et al.* Decomposition of leaf litter of Chinese fir in response to increased nitrogen deposition[J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30**(2): 8 – 13.
- [24] BLOOMFIELD J, VOGT K A, VOGT D J. Decay rate and substrate quality of fine roots and foliage of two tropical tree species in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico [J]. *Plant Soil*, 1993, **150**(2): 233 – 245.
- [25] HOBBI E S, EDDY W C, BUYARSKI C R, *et al.* Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment [J]. *Ecol Monogr*, 2012, **82**(3): 389 – 405.
- [26] ZHANG W D, WANG S L. Effects of NH_4^+ and NO_3^- on litter and soil organic carbon decomposition in a Chinese fir plantation forest in South China [J]. *Soil Biol & Biochem*, 2012, **47**: 116 – 122.
- [27] 张敏. 林火对土壤环境影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002.
ZHANG Min. *The Effect of Forest Fire on Soil Environment* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2002.
- [28] SIMOES D, MCNEILL D, KRISTIANSEN B, *et al.* Purification and partial characterisation of a 1.57 kDa ther-

- mostable esterase from *Bacillus stearothermophilus*[J]. *FEMS Microbiol Lett*, 1997, **147**(1): 151 – 156.
- [29] 王可可, 周运超, 李绍斌, 等. 林火发生对土壤集中酶活性变化的影响[J]. 江苏林业科技, 2011, **38**(1): 12 – 15.
WANG Keke, ZHOU Yunchao, LI Shaobin, *et al.* Change off soil enzyme activity after forest fire[J]. *Jiangsu For Sci Technol*, 2011, **38**(1): 12 – 15.
- [30] 于兴修. 土地利用与土地覆盖变化: 全球环境变化的重要原因[J]. 中学教学地理参考, 2002(1): 4 – 5.
YU Xingxiu. Land use and land cover change: the important cause of global environmental change [J]. *Trach Refer Mid School Geogr*, 2002(1): 4 – 5.
- [31] HOUGHTON R A, HACKLER J L. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia[J]. *Global Change Biol*, 1999, **5**(4): 481 – 492.
- [32] CASTRO H, FORTUNEL C, FREITAS H. Effects of land abandonment on plant litter decomposition in a Montado system: relation to litter chemistry and community functional parameters[J]. *Plant Soil*, 2010, **333**(1): 181 – 190.
- [33] FINZI A C, SCHLESINGAR W H. Species control variation in litter decomposition in a pine forest exposed to elevated CO₂[J]. *Global Change Biol*, 2002, **8**(12): 1217 – 1229.
- [34] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(2): 189 – 204.
CHEN Guangsheng, TIAN Hanqin. The land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystem[J]. *Chin J Plant Ecol*, 2007, **31**(2): 189 – 204.
- [35] CAMPBELL C A, ZENTNER R P, LIANG B C, *et al.* Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan-effect of crop rotations and fertilizers[J]. *Can J Soil Sci*, 2000, **80**(1): 179 – 192.
- [36] 卢俊培, 刘其汉. 海南岛尖峰岭热带林凋落叶分解过程的研究[J]. 林业科学研究, 1989, **2**(1): 25 – 32.
LU Junpei, LIU Qihan. Research on decomposition process of the fallen leaves in the tropical forests at Jianfengling, Hainan Island [J]. *For Res*, 1989, **2**(1): 25 – 32.
- [37] WILLIAMS J E, WIEGERT R G. Effects of naphthalene application on a coastal plain broomsedge (*Andropogon*) community[J]. *Pedobiologia*, 1971, **11**: 58 – 65.
- [38] VITOUSEK P M. Beyond global warming: ecology and global change[J]. *Ecology*, 1994, **75**(7): 1861 – 1876.
- [39] SULLIVAN J H, TERAMURA A H. Field study of the interaction between solar ultraviolet-B radiation and drought on photosynthesis and growth in soybean[J]. *Plant Physiol*, 1990, **92**(1): 141 – 146.
- [40] BALAKUMAR T, VINCENT V, PALIVAL K. On the interaction of UV-B radiation (280–315 nm)with water stress in crop plants [J]. *Physiol Plant*. 1993, **87**(2): 217 – 222.
- [41] CAMPBELL B D, HOFMANN R W, HUNT C L. UV-B effects on New Zealand pasture ecosystems [G]. ROZEMA J. *Stratospheric Ozone Depletion: Effects of Enhance UV-B Radiation on Terrestrial Ecosystem*. Backhuys; [s.n.], 1999: 227–249.
- [42] HUNT J E, MCNEIL D L. Nitrogen status affects UV-B sensitivity of cucumber [J]. *Funct Plant Biol*, 1998, **25**(1): 79 – 86.
- [43] 王军, 李方民, 邹志荣, 等. CO₂浓度倍增减轻UV-B辐射对大棚番茄的抑制作用研究[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(5): 817 – 821.
WANG Jun, LI Fangmin, ZOU Zhirong, *et al.* Study on doubled CO₂ concentration reduce the inhibition of enhanced UV-B radiation on tomato in plastic greenhouse[J]. *Act Bot Boreali-Occident Sin*, 2004, **24**(5): 817 – 821.
- [44] FANG Hua, MO Jiangming, PENG Shaoling, *et al.* Cumulative effects of nitrogen additions on litter decomposition in three tropical forests in southern China [J]. *Plant Soil*, 2007, **297**(1): 233 – 242.
- [45] MO Jiangming, BROWN S, XUE Jinhua, *et al.* Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China [J]. *Plant Soil*, 2006, **282**(1): 135 – 151.
- [46] 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[J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1414 – 1420.
MO Jiangming, XUE Jinhua, FANG Yunting. Litter decomposition and its responses to simulated N deposition for the major plants in Dinghu mountain in subtropical China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(7): 1414 – 1420.
- [47] LIU Ping, HUANG Jianhui, SUN Osbert Jianxin, *et al.* Litter decomposition and nutrient release as affected by soil

- nitrogen availability and litter quality in a semiarid grassland ecosystem[J]. *Oecologia*, 2010, **162**(3): 771 – 780.
- [48] 樊后保, 刘文飞, 徐雷, 等. 氮沉降下杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林凋落叶分解过程中 C, N 元素动态变化[J]. 生态学报, 2008, **28**(6): 2546 – 2553.
- FAN Houbao, LIU Wenfei, XU Lei, *et al.* Carbon and nitrogen dynamics of decomposing foliar litter in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation exposed to simulated nitrogen deposition[J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(6): 2546 – 2553.
- [49] 李元, 祖艳群, 王勋陵. 增强的 UV-B 辐射对春小麦植株化学成分、真菌定殖和分解的影响[J]. 应用生态学报, 2001, **12**(2): 223 – 225.
- LI Yuan, ZU Yanqun, WANG Xunling. Effect of enhanced UV-B radiation on chemical composition, fungal colonization and decomposition of spring wheat plant [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12**(2): 223 – 225.
- [50] 宋新章, 张慧玲, 江洪, 等. UV-B 辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2106 – 2114.
- SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, JIANG Hong, *et al.* Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of *Pinus massoniana* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(8): 2106 – 2114.
- [51] SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, CHANG Scott X, *et al.* Elevated UV-B radiation increased the decomposition of *Cinnamomum camphora* and *Cyclobalanopsis glauca* leaf litter in subtropical China [J]. *J Soils Sediment*, 2012, **12**(3): 307 – 311.
- [52] SONG Xinzhang, JIANG Hong, ZHANG Huiling, *et al.* Elevated UV-B radiation did not affect decomposition rates of needles of two coniferous species in subtropical China[J]. *Eur J Soil Biol*, 2011, **47**(6): 343 – 348.