

陆地生态系统凋落物分解研究进展

曲 浩^{1,2}, 赵学勇¹, 赵哈林¹, 王少昆^{1,2}

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:凋落物分解是生态系统物质循环和能量流动的主要环节,对土壤有机质的形成和养分释放速率有着重要意义。对国内外在凋落物分解方面的研究进行综述,并结合森林、草地、荒漠3种不同陆地生态系统类型中凋落物的研究动态,阐述了凋落物分解的过程、影响效应及从凋落物本身的理化性质和CO₂浓度升高、气候因子、土壤特性等方面综合分析了影响凋落物分解的主要因子。在此基础上对凋落物分解的未来研究方向进行展望,得出长期定位研究、建立凋落物分解模型等方面将会成为今后研究的热点。

关键词:陆地生态系统;凋落物;分解;研究进展

中图分类号:S181

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2010)08-0044-08

1 概述^{*1}

凋落物是指在生态系统内,由地上植物组分产生并归还到地面,作为分解者的物质和能量来源,借以维持生态系统功能的所有有机质的总称^[1]。凋落物的分解是生态系统养分循环的关键过程之一,对其分解过程的研究有助于完整理解生态系统的生物地球化学循环和土壤有机质的形成^[2-3]。凋落物作为养分的基本载体,在养分循环中是连接植物与土壤的“纽带”。凋落物的分解对于土壤的理化性质、土壤肥力和植物生产力等均起着决定性的作用,对于维持生态系统碳、氮平衡也有着重要的意义,是陆地生态系统物质循环的重要环节^[4]。对凋落物分解进行研究可以定量描述地—气间碳交换过程及这一过程对气候变化的影响^[5-6]。因此,开展凋落物分解研究是充分认识生态系统结构和功能及促进陆地生态系统正常物质循环和养分平衡的基础。

1.1 主要研究方法 目前凋落物的野外测定方法主要有:尼龙网袋法、金属网罩法、自然分解法和束缚凋落物法等,其中尤以尼龙网袋法最为常用。王凤友^[1]将研究和估测凋落量的方法概括为:直接收集法、估测枯死体的现存量法和分层收割估测法等几种。另外,为建立凋落物分解速率与其质量指数和立地质量指数间的关系,并以此替代繁杂的分解试验和预测分解过程中养分释放

速率,科学家们还开展了凋落物分解预测指标的研究。并将凋落物分解的预测指标分为:环境指标(如实际蒸散量)、凋落物物理质量(如叶抗张强度)和化学质量指标(如C/N、木质素/N和C/P)3类^[7]。

1.2 凋落物质量和分解速率 多年以来,科学家对于凋落物的研究主要集中于凋落物质量和分解速率上^[8]。对凋落物质量的研究通常包括种群、群落、植被不同层次的季节动态和年动态变化及其与环境因子和气候变化的关系等;而对于凋落物分解速率的研究则主要针对各种内在和外在因素对其产生的影响方面,其中C/N和木质素被认为是重要的凋落物质量指标,也最能反映凋落物分解的速率。

凋落物质量通常以凋落物养分含量的高低来衡量,并以各种含碳化合物量(如木质素、纤维素、单宁等)与养分元素含量(N、P、K等)的比来表示,也可以直接以养分含量表示^[9-11]。凋落物质量与其分解速率密切相关,其基本原理是,凋落物分解主要是真菌与微生物过程,它们自身的C/N

* 收稿日期:2009-09-09
基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB421303);中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-431-3);国家自然科学基金(30870426)
作者简介:曲浩(1982-),男,甘肃兰州人,博士,主要从事干旱区生态恢复研究。
E-mail:quhao66@163.com

或 C/P 通常低于它们分解的凋落物。因而,它们在分解过程中对 N、P 等养分有很高需求,当凋落物含这些养分较高时,微生物群落生长加快,分解也就加快^[12]。

Chapin 等^[13]研究指出,大多数生态系统中植物所吸收的养分,90% 以上的 N 和 P、60% 以上的矿质元素都来自于植被归还给土壤的养分再循环。由此可见,凋落物分解速度决定着生态系统中养分循环的快慢,在一定程度上决定着土壤养分有效性的高低^[3]。从能量的角度来说,凋落物是能量流动的重要环节,植物通过光合作用固定有机质,最终以枯枝落叶的形式存在于地表,经分解后将能量释放到环境中。

2 不同生态系统中凋落物研究现状

2.1 森林生态系统凋落物研究 森林凋落物是指森林生态系统内由生物组分产生,然后归还到林地表面,作为分解者的物质和能量来源,借以维持生态系统功能的所有有机物质的总称^[14]。目前国内有关凋落物的研究大多汇集在森林凋落物上^[1,7,14],且多集中于凋落物在增加土壤肥力和改善物质循环方面的作用^[15-16]。国外对森林凋落物的研究极为活跃^[17-18],可追溯到 19 世纪,德国的 Ebermayer 于 1876 年对森林凋落物的生产和化学组成做了经典研究,这大概是对森林凋落物研究的最早报道。但直到 20 世纪 50 年代,森林凋落物才得到全面和系统的研究。

我国自 20 世纪 60 年代初开展了对森林凋落物的研究,80 年代有较大发展。王凤友和许晓静等^[1,7]曾对森林凋落物分解研究进展进行了综述评,重点回顾了有关凋落物分解预测指标、养分释放机制、混合分解效应和 CO₂ 浓度升高对凋落物分解的影响等,对于深入认识凋落物分解的调控机制,开展陆地生态系统碳循环和养分生物地球化学循环的研究具有重要的意义,对国内森林凋落物的研究具有一定的指导作用。而林成芳等^[19]曾对各个历史时期出现的重要模型进行了简单的分类和评述,认为国内森林凋落物分解模型研究正在经历一个应用、改进和开发的过程,目

前急需建立适合我国各类森林生态系统凋落物分解模型。凋落物分解模型的最大优点就是可以将凋落物分解的预期过程采用取代普通的实验手段揭示出来。国内对凋落物分解建模的研究较少,大部分停留在对国外模型的简单应用和改进上。未来应加强凋落物分解的研究,填补不同气候带,不同生态系统分解研究的空白,并在此基础上建立机理模型。

逯军峰等^[20]的研究表明:油松(*Pinus tabulaeformis*)栽培林年凋落量与现存量随林龄增加均表现出递增趋势,30 年生油松林的年凋落量和 23 年生油松林现存量分别达到 4.236 和 18.788 t/hm²;枯枝落叶层主要营养元素储存量随着林龄的增加而增加,N、P、K 的积累量分别为 114.72~201.32、5.63~11.12、12.48~23.11 kg/hm²;凋落物分解率呈波动式递增趋势,且与阔叶树混交比例密切相关。年凋落量、现存量、分解率与土壤有机质、N、P、K 的含量、pH 值、田间持水量呈正相关,与土壤容重呈负相关。林波等^[21]研究显示:30 年栽培云杉(*Picea asperata*)林、40 年栽培云杉林及次生林和原始林年凋落量分别为 2.67、43.8、4.27 和 4.77 t/hm²,枯枝落叶层贮量分别为 31.9、36.4、142.0 和 145.0 t/hm²,通过凋落物归还土壤的营养元素(N、P、K、Ca 和 Mg)的年归还总量依次为 82.01、129.04、130.57、170.55 kg/hm²,凋落物年失重率分别为 24.35%、22.87%、36.96%和 32.23%,栽培林凋落物分解一半所需时间约为 2.5 年,天然林约为 1.6 年。森林年凋落量、枯枝落叶层贮量、养分归还量和年失重率与土壤自然含水率、有机质、N、P、K 的含量呈正相关,与土壤容重呈负相关。栽培云杉林生态功能的恢复滞后于次生林,凋落物分解缓慢是影响该地区土壤水分和养分状况的重要因素。栽培云杉林进入旺盛生长期后,凋落量增加,养分归还量增大,此时期森林对土壤肥力有较高的补给潜力;但凋落物分解过缓,大量养分元素累积于枯枝落叶层,不能及时进入土壤,造成土壤理化性质状况较差。

2.2 草地生态系统凋落物研究 除了森林外,对其他生态系统凋落物的研究近年来也逐渐成为热点。草地凋落物分解是草地生态系统中有有机质残体分解转化的基本过程,是系统养分循环的关键环节,对维持草地生态系统生产力有着重要作用^[22-26]。近年来,国内外专家对草地生态系统凋落物的研究越来越多。张建利^[27-28]以云南马龙县退化山地草地为研究对象,在围栏封育条件下,对分解过程中不同分解状态的凋落物分解速率、最大持水率、有效截流率及自然持水率进行了分析。结果表明,随封育时间(分解时间)推移,草地凋落物分解速率有所降低。在封育条件下,草地凋落物的分解速率显著高于自然放牧草地。随凋落物分解时间的推移,其最大持水率呈抛物线状。程积民等^[29]针对我国西部典型草原地带,退化草地封禁后凋落物的积累、分解与水分变化过程进行了为期 20 年(1982—2002 年)的定位试验研究。结果表明:本氏针茅(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、铁杆蒿(*Atremisia sacrorum*)和大针茅(*S. grantea*)草地群落的凋落物积累与厚度的变化趋势,拟合曲线符合指数方程,无论在植物年生长的初期还是末期,其相关性极为显著。王妮等^[23]对羊草(*Leymus chinensis*)群落凋落物分解季节动态与微生物呼吸速率、土壤有机质、土壤 C/N、土壤温度、土壤水分等 11 种环境因素的季节动态进行了系统的研究,结果表明:凋落物分解季节动态呈单峰曲线,8 月中旬达最大值。微生物呼吸速率季节动态呈单峰曲线,8 月中旬达最大值,同凋落物分解速率显著正相关。凋落物分解速率同土壤有机质含量、土壤 C/N 显著负相关。凋落物分解速率同土壤水分显著正相关。

近红外光谱分析技术(NIRS)是利用化学物质在近红外光谱区的光学吸收特性快速测定某种样品中的一种或多种化学成分含量和特性的技术^[30]。近年来,该技术在测定草地凋落物方面得到了一定的应用。Couteaux 等^[31]利用尼龙网袋法将凋落物在草地中放置 22 个月,然后采用

NIRS 技术分析化学成分的变化,Hoff 等^[32]将凋落物在实验室可控条件下培养,通过 NIRS 技术测定凋落物分解速率,结果显示:NIRS 能很好地预测凋落物的分解速率。之后,他们又通过试验进一步探讨了 NIRS 技术在测定凋落物分解速率中的潜在应用价值,表明 NIRS 技术能很好地预测不同时间或不同条件下凋落物的分解状况,可为了解草地生态系统物质循环,特别是有机物质的时空变化及凋落物分解过程中的特性变化提供更为便捷、有效的方法。Bouchard 等^[33]采用与 Gillon 类似的方法测定了盐生沼泽凋落物的分解速率,得出同样的结果。总体看来,NIRS 技术是一种快速测定凋落物成分的理想方法。

2.3 荒漠植被生态系统凋落物研究 在荒漠生态系统中,凋落物是很重要也是不可多得的组成部分,它可以通过调节水、热状况,改善土壤理化性质,增强水土保持能力和提高植被生产力等来增加生态系统多样性和稳定性,同时对实现沙漠化过程的逆转也有着特殊的作用。总之,作为沙地生态系统的重要组成部分,凋落物的分解是生态系统养分循环中的重要一环,其分解过程中所释放的 CO₂ 是全球碳素收支的重要来源,凋落物分解的变化将对区域陆地生态系统碳平衡造成重要影响。

近年来,学者们陆续对于干旱、半干旱地区的草原、沙地农作物及植物凋落物进行了相关研究^[29,34-39]。得出如下结论:随着沙漠化程度的进展,凋落物分解率减小,植被状况与土壤性状是影响凋落物分解的重要因素,植物叶凋落物的初始氮含量对其 CO₂ 释放量及释放速率均有影响,土壤的干湿变化对凋落物的分解有明显的影响。赵学勇^[34-35]、李玉强等^[37]利用分解袋法对沙漠化过程中凋落物的分解及 C、N 释放进行测定和分析,研究结果表明,科尔沁沙地农田生态系统小麦(*Triticum aestivum*)凋落物有机质总产量随着施肥量的增加而增加;随着沙漠化程度的加深,凋落物的干物质失重率降低,分解速率减小,C、N 释放速率减缓。通过凋落物分解作用向土壤归还养

分与有机物质,是生态系统“自肥”作用的重要机制之一^[2]。凋落物质量、土壤质地、结构、通气状况以及土壤微生物和土壤动物活性等是影响凋落物分解的主要因素^[40]。李玉强认为在我国北方半干旱的科尔沁沙地,养分的周转及植被与土壤之间能量的转换主要依赖于一些占优势的灌木和一年生杂草凋落物的输入及其在土壤中的分解。沙漠化的发展,一方面导致沙地植物群落生物量的明显下降,以及地表凋落物的积累量和向土壤的输入量显著减少,既使得可供分解的有机物减少;另一方面,沙漠化过程是土壤质地变粗,C、N含量衰减,微生物活性降低的过程。正是植被退化和土壤退化两个过程的统一,严重破坏了通过凋落物分解向土壤归还养分的生态机制,使系统处于恶性循环状态,丧失其基本服务功能。沙漠化过程中凋落物C的释放速率要明显高于N的释放,并且随着沙漠化程度的增加,C、N释放速率均随之减缓。

3 凋落物分解过程及其影响因子分析

3.1 凋落物的分解过程 凋落物分解是一个物理和化学过程紧密结合的生态过程。在该过程中,生物和非生物因子均参与其中,而且它们之间存在明显的交互作用。凋落物分解过程中养分释放机制及复杂,养分的释放因凋落物种类、分解阶段的不同而异,同时也与养分本身的性质有关。许晓静等^[7]对现有研究成果进行总结认为,凋落物分解过程中养分动态释放模式主要有淋溶—释放、淋溶—富集—释放和富集—释放等几种。

凋落物混合分解研究最早可追溯至20世纪40年代,目前有关混合分解中植物种的组成和比例对于分解过程的影响机制仍不明确。凋落物的混合分解并非单一植物种分解的简单叠加,因植物种的组成和比例不同,基质的化学组成会发生变化,从而影响分解者的多样性、丰富度和生理活性,进而直接和间接地影响其分解速率;凋落物混合分解中可能存在无效应、促进效应和抑制效应3种情况^[41];现有的研究结果显示凋落物混合分解的适宜比例应与群落中不同植物种的种群比例

相一致^[7]。

3.2 凋落物分解的影响因子 凋落物分解作为养分循环中重要的环节以及全球碳平衡的重要组分,其过程对CO₂浓度上升的响应受到了极大关注^[42]。目前的研究,多数是探讨高浓度CO₂条件下生长的植物,其产生的凋落物分解会有什么变化,基本结论是:由于CO₂浓度上升显著增加植物产量,并形成含氮量较低的有机物质,从而随着C/N、木质素/N等上升,分解会减慢^[43-44]。CO₂浓度上升对凋落物分解的影响,主要是间接的,它是通过影响凋落物质量而影响分解过程。但这一结论仍有待更多的检验,已开展的研究对其他干扰因素估计不足,同时,分解速率下降的幅度也有限。目前,未观察到CO₂浓度上升对凋落物分解产生直接影响^[45-47]。Angelis等^[48]在意大利开展了CO₂浓度加倍对3种木本植物(*Quercus ilex*, *Phillyrea angustifolia* 和 *Pistacia lentiscus*)凋落叶分解的影响,他们测得CO₂浓度升高条件下,木质素含量升高可达18%,木质素/N上升35%,C/N上升20%。可以看出,CO₂上升对凋落物质量的影响是极为显著的。用这些凋落物进行分解试验,其分解速率有较明显的减慢,但主要表现在开始阶段,此时,各个叶子的质量差别较大,特别是木质素/N、C/N等参数,随着分解时间的推移,各种落叶质量更趋一致,分解速率也差别不大。因而,CO₂浓度上升,在一定程度上会加强土壤作为碳汇的功能。必须指出,CO₂上升在一定程度上减慢了凋落物分解速率,但CO₂上升形成的温室效应,将导致温度上升,升温却又加速了解过程,加拿大的研究显示,它可增加分解率4%~7%。因此,CO₂浓度上升形成的总效应仍有待研究^[46]。CO₂浓度升高不仅影响凋落物的化学性质,而且与分解环境中土壤的生物活性密切相关,但CO₂浓度升高并不改变凋落物质量与分解速率之间的关系;越来越多的研究显示,CO₂浓度升高的环境下,植物群落的物种组成会产生变化,这种变化对养分循环速率的影响远大于单纯大气CO₂浓度变化的影响^[7]。

土壤性质及其他的一些条件也会影响凋落物的分解,凋落物与土壤间的相互作用是整个生态系统稳定的基础。在一定的范围内,分解速率通常与上述因素呈正相关,只有在气候和土壤条件一定时,分解速率才主要受控于凋落物质量。李玉强等^[37-39]研究认为,植被状况与土壤性状是影响科尔沁地区凋落物分解的重要因素,土壤微生物特性也是影响凋落物分解的重要因素。凋落物在土壤中的分解,必须激发含腐殖质部分的有机物质来促进非腐殖质部分的残体的降解。因此凋落物在分解过程中,微生物数量以及土壤酶活性均表现为初期增加或旺盛,后期减少或衰弱。真菌首先定着和破坏凋落物表层使得大量内居性动物侵入凋落物内部,随着分解凋落物碎片的体积越来越小,而表面积却相对变大,微生物易定着并分解这些碎片,最后阶段对有机养分的无机化过程起主要作用的可能是细菌^[49]。

综上所述,凋落物的分解速率受内在因素和外在因素的共同影响,内在因素就是指凋落物自身的理化性质,包括凋落物的形状、体积、柔韧度、N浓度、P浓度、落物C/N、木质素/N等,其中的C/N、木质素是最重要的凋落物质量指标,最能反映凋落物分解的速率^[23]。而外因则是分解过程中的各种环境因子,包括生物因子和非生物因子。生物因子是指参与分解的土壤微生物和土壤动物,生物因子是主导因子,对凋落物分解起直接作用;非生物因子是指气候、降水、大气成分等环境条件,通过影响生物的活动而对凋落物分解起间接作用^[50]。Aerts^[40]对陆地生态系统气候、落叶化学性质与落叶分解作用之间的相关性进行了综述,认为凋落物分解主要受气候、凋落物性质、微生物和土壤动物的影响。凋落物分解速率的大小与土壤微生物数量的多少、酶活性的强弱、营养元素含量变化规律基本一致。

4 凋落物分解的影响效应

温明章等^[51]的结果表明:土壤水分总的趋势是随着凋落物量的增加,土壤含水量逐渐提高,当凋落物量达到一定时趋于平稳状态;地表温度和

地下温度(5 cm)变化趋势在各月份基本相似,均随凋落物层厚度增加而降低,至一定厚度达到稳定;土壤pH值和电导率与凋落物量均呈显著负相关;有凋落物层土壤中有机质、N、P、K的含量均高于无凋落物层的含量,其含量随凋落物量而逐渐升高。凋落物平均每增加100 g/m²,有机质提高17.9%,N提高7.6%,P提高26.4%,K提高3.8%。当凋落物量达600 g/m²时,有机质含量比无凋落物层提高了近1.8倍,N提高81.5%,P提高1.8倍,K提高24.6%。

20世纪70年代末以来,陆续有文献报道了凋落物对植被天然更新的影响效应,包括凋落物对植被更新的毒性效应^[52],对种子萌发的抑制效应^[53],对草本幼苗更新的影响^[54],对本本幼苗更新的影响^[55]和对幼苗群落结构及动态的影响^[56]。

5 凋落物研究展望

凋落物的研究加深了对生态系统物质循环、能量流动、土壤成土和肥力形成过程、水土保持功能和更新演替等机制和规律的认识,但如何利用凋落物的生态功能提高森林生态系统管理的水平,发挥生态系统的自我维持机制,将是今后研究的重点。目前,凋落物分解研究绝大多数是短期的,尚缺乏长期定位研究数据,因此,需要加强和积累长期定位研究。另外,凋落物研究方法不统一,研究结果的可比性差。今后应在全球范围内的生态系统中统一凋落物分解试验的研究方法,进行不同气候带间的交互分解试验,以获取可比性强的数据,并最终形成一个全球凋落物生产、分解的总体数量格局。

凋落物模型化研究包括:凋落动态、分解动态模型及对土壤肥力影响的动态模型等,从而为凋落物的管理和生态应用提供定量依据。目前凋落量、分解率及其动态研究虽然较多,但如何从群落结构及其组成树种的生物学和生态学特性、气候条件(包括小气候异质性)、生境状况的协同等方面进行研究还有待深入。由于不同凋落物种类质量不同,且分解过程的影响因素及其复杂,加之养分释放机制的多样性,至今仍未能获得可预测不

同凋落物分解速率的指标。因此,探讨可预测不同凋落物分解速率的指标仍将是今后研究的重要方向^[7-8]。

此外,由于各种现实的原因,现有的研究结果尚无法准确预估凋落物分解向大气中释放 CO₂ 的量及其对全球变暖的贡献。因此,随着全球变暖趋势的日益加剧,科学家对于 CO₂ 浓度升高对凋落物分解过程影响机制的研究也将越来越广泛和深入^[57]。需进行实验室模拟试验与田间试验紧密结合,深化凋落物分解机制的研究,进一步优化单因素分解模型,探索多因素的分解模型,建立全球温暖变化与凋落物分解及土壤腐殖质蓄积之间的耦合关系,为实现凋落物的有效调控提供可靠方法^[7]。

参考文献

- [1] 王凤友. 森林凋落量研究综述[J]. 生态学进展, 1989 (6): 82-89.
- [2] Waring R H, Schlesinger W H. Forest ecosystem concepts and management [M]. Orlando: Academic Press, 1985: 181-210.
- [3] Berg B, McLaugherty C. Plant Litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration. [M]. New York: Springer-Verlag, 2003: 186-189.
- [4] 钟化平, 杜占池. 川东中高山地区红三叶、鸭茅凋落物分解速率与气候因子之间的定量关系[J]. 中国草地, 1997(6): 29-32.
- [5] 王妮, 郭继勋. 东北松嫩平原羊草群落的土壤呼吸与枯枝落叶分解 CO₂ 贡献量 [J]. 生态学报, 2002, 22(5): 655-660.
- [6] 张志山, 谭会娟, 王新平, 等. 沙漠栽培植被区土壤呼吸初探[J]. 中国沙漠, 2005, 25(7): 525-528.
- [7] 许晓静, 张凯, 刘波, 等. 森林凋落物分解研究进展 [J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(4): 108-114.
- [8] Bertrand I, Chabbert B, Kurek B, *et al.* Can the biochemical features and histology of wheat residue explain their decomposition in soil [J]. Plant Soil, 2006, 281: 291-307.
- [9] Schlesinger W H, Hasey M M. Decomposition of chaparral shrub foliage: losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreen leaves [J]. Ecology, 1981, 62: 762-774.
- [10] Melillo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics [J]. Ecology, 1982, 63: 621-626.
- [11] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change [J]. Ecology, 1994, 75: 1862-1876.
- [12] Enriquez S D, Sand-Jensen C M. Patterns in decomposition rates among photosynthetic organisms: the importance of detritus C : N : P content [J]. Oecologia, 1993, 94: 457-471.
- [13] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology [M]. New York: Springer-Verlag, 2002: 98-102.
- [14] 吴承祯, 姜志林. 我国森林凋落物研究进展 [J]. 江西农业大学学报, 2000(22): 405-410.
- [15] 李叙勇, 孙继坤, 常直海, 等. 天山森林凋落物和枯枝落叶层的研究 [J]. 土壤学报, 1997, 34(4): 406-417.
- [16] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 等. 森林凋落物层水文生态功能研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 30-34.
- [17] Koopmans C J, Tietema A, Verstraten J M. Effects of reduced N deposition on litter decomposition and N cycling in two N saturated forests in the Netherlands [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30: 141-151.
- [18] Guo L B, Sims R E H. Litter production and nutrient return in New Zealand eucalypt short-rotation forests: implications for land management [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1999, 73: 93-100.
- [19] 林成芳, 高人, 陈光水, 等. 凋落物分解模型研究进展 [J]. 福建林业科技, 2007, 34(3): 227-233.
- [20] 逯军峰, 王辉, 曹靖, 等. 油松栽培林凋落物对土壤理化性质的影响 [J]. 西北林学院学报, 2007, 33(22): 25-28.
- [21] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2003(9): 346-351.
- [22] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

- [23] 王妮,郭继勋,张保田. 东北松嫩草地羊草群落环境因素与凋落物分解季节动态[J]. 草业学报, 2003,12(1):47-52.
- [24] 刘忠宽,汪诗平,韩建国,等. 内蒙古温带典型草原植物凋落物和根系的分解及养分动态的研究[J]. 草业学报,2005,14(1):24-30.
- [25] 杜占池,樊江文,钟华平. 营养元素在红三叶叶片分解过程中的释放动态[J]. 草业科学,2003,20(7):12-15.
- [26] 郭忠玲,郑金平,马元丹,等. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模拟的试验研究[J]. 生态学报,2006,26(4):1037-1046.
- [27] 张建利,张文,毕玉芬. 山地草地凋落物分解与凋落物水文功能[J]. 生态环境,2008,17(5):1986-1990.
- [28] 张建利,张文,毕玉芬. 山地草地凋落物分解与持水力的研究[J]. 草业科学,2008,25(3):108-110.
- [29] 程积民,万惠娥,胡相明,等. 半干旱区封禁草地凋落物的积累与分解[J]. 生态学报,2006,26(4):1207-1212.
- [30] 许冬梅,王堃. 近红外光谱技术在天然草地植被管理中的应用[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(10):2013-2016.
- [31] Couteaux M M,McTiernan K B,Berg B,*et al.* Decomposition of ^{14}C - and ^{15}N -labelled material, under controlled conditions, in coniferous forest soils from a north-south climatic sequence in western Europe[J]. *Soil Biology & Biochemistry*,1998,30(5):597-610.
- [32] Hoff C,Rambal S,Joffre R. Simulating carbon and water flows and growth in a Mediterranean evergreen *Quercus ilex* coppice using the FOREST-BGC model[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002,164(1):121-136.
- [33] Bouchard V,Gillon D,Joffre R,*et al.* Actual litter decomposition rates in salt marshes measured using near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003,290(2):149-163.
- [34] 赵学勇,崔建垣,张铜会. 沙化农田小麦凋落物产量测定及分解量预测[J]. 中国沙漠,1999,19(增刊1):103-106.
- [35] 赵学勇,张铜会,张志坚. 沙地小麦凋落物的分解残留物中营养元素的动态线性分析[J]. 中国沙漠,1999,19(增刊1):99-102.
- [36] 孟庆涛,李玉霖,赵学勇,等. 科尔沁沙地30种植物叶凋落物 CO_2 释放量及释放速率的研究[J]. 中国沙漠,2007,27(6):960-967.
- [37] 李玉强,赵哈林,移小勇,等. 沙漠化过程中科尔沁沙地植物——系统碳氮储量动态[J]. 环境科学,2006,27(4):34-39.
- [38] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地夏秋(6—9月)季不同类型沙丘土壤呼吸对气温变化的响应[J]. 中国沙漠,2008,28(2):249-254.
- [39] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等. 沙漠化过程对植物凋落物分解的影响[J]. 水土保持学报,2007,21(5):64-67.
- [40] Aerts R C. Leaf chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship [J]. *Oikos*,1997,79:439-449.
- [41] Gartner T B,Cardon Z G. Decomposition dynamics in mixed species leaf litter [J]. *Oikos*,2004,104:230-246.
- [42] Finzi A C,Schlesinger W H. Species control variation in litter decomposition in a pine forest exposed to elevated CO_2 [J]. *Global Change Biology*,2002,106:1217-1229.
- [43] Bazzaz F A. The response of natural ecosystems to the rising global CO_2 levels [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*,1990,21:167-196.
- [44] Cotrufo M F,Ineson P,Rowland A P. Decomposition of tree leaf litters grown under elevated CO_2 : effect of litter quality[J]. *Plant and Soil*,1994,163:121-130.
- [45] Cotrufo M F,Ineson P,Scott A Y. Elevated CO_2 reduces the nitrogen concentration of plant tissues [J]. *Global Change Biology*,1998(4):43-54.
- [46] Moore T R,Trofymow J A,Taylor B,*et al.* Litter decomposition rates in Canadian forests[J]. *Global Change Biology*,1999(5):75-82.
- [47] O'Neill E G,Norby R J. Litter quality and decomposition rates of foliar litter produced under CO_2 enrichment[J]. *Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems*,1996(6):87-103.

- [48] De Angelis P, Chigwerewe K S, Scarascia Mugnozza G E. Litter quality and decomposition in a CO₂-enriched Mediterranean forest ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2000, 224: 31-41.
- [49] 田兴军, 立石贵浩. 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用[J]. *植物生态学报*, 2002 (26): 257-263.
- [50] 周存宇. 凋落物在森林生态系统中的作用及其研究进展[J]. *湖北农学院学报*, 2003, 4(2): 140-145.
- [51] 温明章, 于丹, 郭继勋. 凋落物层对东北羊草草原微环境的影响[J]. *武汉植物学研究*, 2003 (21): 395-400.
- [52] Górski T, Górski K, Nowicki J. Germination of seeds of various herbaceous species under leaf canopy[J]. *Flora*, 1977, 166: 249-259.
- [53] Bliss D, Smith H. Penetration of light into soil and its role in the control of seed germination[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1985(8): 475-483.
- [54] Peterson C J, Facelli J M. Contrasting germination and seedling growth of *Betula alleghaniensis* and *Rhus typhina* subjected to various amounts and types of plant litter[J]. *American Journal of Botany*, 1992, 16: 1209-1216.
- [55] Tao D L, Xu Z B, Li X. Effect of litter layer on natural regeneration of companion tree species in the Korean pine forest[J]. *Environmental and experimental botany*, 1987, 27: 53-65.
- [56] Iacono C, Friend T, Keen H, *et al.* Effects of density and water availability on the behavior, physiology, and weight loss of slaughter horses during transport[J]. *Journal of Equine Veterinary Science*, 2007, 27: 355-361.
- [57] Laskowski R, Berg B, Caswell H. Litter Decomposition: A Guide to Carbon and Nutrient Turnover [M]. New Jersey: Academic Press, 2006: 448.

Research progress of litter decomposition in terrestrial ecosystems

QU Hao^{1,2}, ZHAO Xue-yong¹, ZHAO Ha-lin¹, WANG Shao-kun^{1,2}

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,

Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As a main linkage between material cycle and energy flow in ecosystem, the litter decomposition plays a very important role in soil organic matter formation and nutrient release rate. The research progress on litter decomposition in domestic and overseas were reviewed, and combining with its research trends in three different types of terrestrial ecosystems (forest, grassland and desert), the process of litter decomposition and its affecting effect were described, and the main factors which affect litter decomposition rate from different aspects including physical and chemical properties of litter, CO₂ concentration, climatic factors and soil properties were analyzed as well. It could be concluded that the long term and fixed on-site research and the establishment of decomposition model would be the research hot pots in the future.

Key words: terrestrial ecosystems; litter; decomposition; research progress