

氮沉降对草原凋落物分解的影响

于雯超^{1,2,3}, 宋晓龙^{2,3}, 王 慧^{2,3}, 赵建宁^{2,3}, 赖 欣^{2,3}, 杨殿林^{1,2,3*}

(1. 沈阳农业大学园艺学院, 辽宁 沈阳 110866; 2. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 农业部产地环境质量重点实验室, 天津 300191)

摘要: 大气氮沉降增加是全球变化的重要现象之一, 草原生态系统对氮沉降增加的响应成为草地生态学的研究热点之一。凋落物分解是草原生态系统养分循环和能量流动的主要途径, 氮沉降增加引起草原植物群落结构变化, 导致凋落物质量、土壤肥力、土壤微生物和土壤动物的变化, 最终影响凋落物的分解。本文综述了氮沉降对草原凋落物结构、化学组成和分解环境的影响等方面的国内外最新研究进展, 讨论了需进一步加强研究的内容, 以期为进一步拓展该领域研究的广度和深度、为全面分析和评估全球变化对草原生态系统的影响提供参考。

关键词: 氮沉降; 凋落物分解; 草地生态系统; 全球变化

中图分类号: S812.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2013)06-0014-06

Advances in the Effect of Nitrogen Deposition on Grassland Litter Decomposition

YU Wen-chao^{1,2,3}, SONG Xiao-long^{2,3}, WANG Hui^{2,3}, ZHAO Jian-ning^{2,3}, LAI Xin^{2,3}, YANG Dian-lin^{1,2,3*}

(1. Department of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3. Key Laboratory of Original Agro-environment Quality of Ministry of Agriculture and Tianjin Key Laboratory of Agro-environment and Safe-product, Tianjin 300191, China)

Abstract: As one of the important phenomena of global change, nitrogen deposition impact on ecosystem is now being taken seriously into consideration, especially its effect on grassland ecosystems. Therefore, it has become one of key research areas in grassland ecology to reveal the effects of nitrogen deposition on grassland litter decomposition which has already shown the influence. Litter decomposition is a key process of nutrients cycling and energy flowing in grassland ecosystem. Advanced N deposition can cause the change of phytocoenosium structure, litter quantity, soil fertility, soil microorganism and animals, and finally affect litter decomposition. Based on the domestic and international progress of latest study, this paper reviewed main progresses on litter quality, chemical composition and environment of litter decomposition in the areas. Some topics should be focused on future in order to expand the research scope, analyze the problems comprehensively and evaluate the effect of global change on grassland ecosystem.

Keywords: nitrogen deposition; litter decomposition; grassland ecosystem; global change

近几十年来, 由于矿物燃料燃烧、含氮化肥的生产和施用、人口增长和畜牧业发展等原因, 人类向大气中排放的含氮化合物越来越多, 大气氮(包括 NH_x 和 NO_x) 沉降增加已成为一个日趋严重的全球变化现象^[1]。据估计, 全球氮沉降量在 1990 年为 $103 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$

($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$), 是 1860 年的 $31.6 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ 的 3 倍, 预计到 2050 年将达到 $195 \text{ Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[2]。有研究表明, 欧洲中部土壤中氮沉降量高达 $15 \sim 30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 已远远超过自然界天然固氮量^[3]。氮沉降同土地利用变化和气候变化一同成为影响植物物种多样性的第三大驱动因子^[4], 也被认为是持续影响生态系统生产力、物种多样性和群落结构的主要因子^[5-6]。大气氮沉降导致生态系统中氮输入量增加, 影响土壤微生物分解、养分的矿化与固定和土壤呼吸等一系列生态过程, 引起土壤微环境和土壤养分有效性的改变^[7]。短期之内大气氮沉降会促进植物生产力, 改变草原植物群落组成和结构, 改变凋落物的化学组成, 进而影响凋落物的分解^[8]。尤其

收稿日期: 2013-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(31170435); “十二五”国家科技计划项目(2012BAD13B07); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金; 农业部产地环境质量重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放基金

作者简介: 于雯超(1988—), 女, 辽宁大连人, 硕士在读, 主要从事草地生态恢复建设与保护研究。E-mail: leisituzi@163.com

* 通信作者: 杨殿林 E-mail: yangdianlin@caas.cn

是对干旱半干旱地区以及温带草原等地区^[9-10],由于其普遍受到氮素限制,氮素增加将给这些地区自然生态系统带来深刻的影响。

凋落物是植物生长发育过程中的产物,是草地生态系统的重要组成部分,推动着土壤有机质的矿化分解和土壤养分的循环与转化,对维持草原生态系统过程和功能具有重要作用^[11]。凋落物分解包括淋洗作用、机械破碎、有机物质的转化、土壤动物的消化作用及土壤微生物的酶解作用^[12]。凋落物分解不是单一的分解过程,而是由这些因素综合作用的结果。同时凋落物分解受到内部因素和外部因素综合作用影响,其中内部因素包括物理因素(体积、形状、表面粗糙程度等)和化学因素(N、P、木质素浓度、C/N比等)两方面。凋落物的失重率因植被的种类、质地、叶形、叶面积、环境因子的不同,使得分解速率间存在明显差异^[13]。凋落物分解也受到非生物因素和生物因素共同控制^[14]。早在1876年,德国的Ebermayer^[15]就开始研究凋落物在养分循环中的作用,此后国外许多学者对世界范围内凋落物的分解及影响因素进行了大量报道,但更多是关注森林生态系统。直至20世纪80年代,草地凋落物的研究才逐渐开展^[16]。

氮沉降研究已成为国际上生态研究的热点内容之一^[17]。在全球变化的背景下,作为生物地球化学循环的重要组成部分,草地凋落物分解的研究也逐渐被重视^[9]。欧洲和北美一些发达国家和地区对于草地生态系统对全球性氮输入增加的响应进行了研究^[18],国内有关氮素添加对草地生态系统影响的研究还相对较少^[19]。持续的氮沉降作用对草原生态系统的影响与机制的研究还有待揭示。本文综述了草原凋落物分解的影响因素,讨论了需进一步加强研究的内容,为深入理解氮沉降对草原生态系统的影响,制定草原合理的养管理策略提供科学依据,也为更一般意义上的凋落物分解对全球变化的响应研究提供参考。

1 氮沉降对凋落物组成结构的影响

在陆地生态系统中,90%以上的地上部分净生产量通过凋落物的方式返回地表,是分解者物质和能量的主要来源^[20]。草原凋落物的分解影响着草原植物萌发、群落结构和植被演替^[21]。大量模拟氮沉降的实验表明,通过不同浓度添加氮素会降低植被物种的丰富度。Bai等^[11]通过模拟试验研究氮沉降对内蒙古典型草原群落植物多样性的影响,结果表明,氮沉降明显减少了草原植物物种丰富度。Foster等^[22]研究结果显

示两个生长季的氮素添加均降低了美国密西根州草地物种的丰富度。Stevens等^[23]在英国68个酸性草地上的研究也有类似发现,物种丰富度随无机氮的沉降呈线性关系减小,每增加 $0.25\text{ gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的氮沉降, 4 m^2 的样方内将减少一个植物种。Ren等^[24]对高寒草甸草原的研究发现,添加氮素改变了植物群落物种多样性。张杰琦等^[25]研究表明,氮素添加显著降低了青藏高原高寒草甸草原植物群落中物种丰富度($p<0.01$)。氮沉降会改变草原植物群落组成,其中包括物种的演替、优势物种的定居及稀有种的丧失^[6]。

长远来看,草原植物群落的物种组成,特别是优势功能型物种的转变将可能导致凋落物质量和可分解性的完全转变^[26]。Fisher等^[27]对美国赤华胡安沙漠长期的增氮试验表明,施氮区草本植物的盖度比对照区高30%,豆科植物的盖度比对照降低52%,说明植物群落组成不同对施氮的响应也不同。祁瑜等^[28]对几种草地植物施氮的研究显示,豆科植物和禾本科植物对N素添加表现出不同的响应,豆科植物对N素添加响应不明显,施氮没有改变其生物量分配格局,而禾本科植物对施氮的响应明显,土壤养分的增加可促进羊草的营养繁殖能力。不同植物对氮沉降响应具有物种特异性,多年生非禾本科植物比禾本科植物对氮沉降更为敏感,且更易丧失^[29]。

氮素添加对植物地上地下生物量组成结构也存在影响。氮素添加可以影响凋落物产量,最终直接影响凋落物的分解^[30]。一些学者认为,氮沉降会造成植物根系的生物量降低。Fenn等^[31]研究表明,生态系统中氮增加可以增加叶的生长,但随着氮沉降增加地下细根生物量分配都降低。一项对模拟氮沉降研究显示,增加氮可以增加种子、茎和根的产量,但根茎比却降低。在许多研究中都有发现,提高氮素水平可以显著降低细根总生物量^[32]。但也有一些研究表明,在贫瘠环境中,增加养分特别是氮的有效性,可促进细根生长和生物量的积累^[33]。氮素的添加可以促进植株生长,提高植物地上和地下部分的凋落物产量,加快了凋落物分解^[34]。也有研究表明氮增加对赤华胡安沙漠中小灌木细根的生长无影响^[35]。Kuperman^[36]研究认为,氮沉降对生态系统中凋落物分解的速度影响往往取决于试验所用的植物种类。综上所述,植物物种丰富度的改变会对凋落物分解产生影响。氮沉降造成草原植物物种多样性降低,改变植物群落的组成和结构,引起凋落物的组成结构的变化,最终对凋落物分解产生影响。

2 氮沉降对凋落物化学组成的影响

许多研究表明不同植物的凋落物化学组成不同,凋落物的分解速率也不同。氮沉降改变凋落物化学组成成分,进而影响凋落物分解速率^[37]。氮沉降对凋落物化学元素含量的影响已在模拟氮增加试验中得到证实^[1]。凋落物化学成分组成,尤其是凋落物中的氮素含量是影响凋落物分解速率和凋落物分解过程中养分释放的重要因素^[5]。凋落物的氮含量能较好地预测凋落物分解初期的分解速率^[38]。含氮素高的凋落物分解速度高于含氮素低的凋落物^[39]。Vestgarden^[40]的研究表明凋落物本身含N量高或是外加N处理都能促进凋落物的分解。凋落物自身木质素及化学成分组成,特别是凋落物的氮素含量是作为分解者的营养需求与分解速率联系在一起,凋落物中不同营养元素(如N、P、S等)的水平往往是相关的^[41]。一般来说,凋落物中C/N比值越小,初始N浓度越高,木质素含量越低,凋落物分解速率越快^[42]。总氮的残留量与凋落物分解残留率呈正相关^[43]。随着氮沉降的增加,凋落物分解加快,凋落物N含量也随之增加。一般认为,氮沉降的增加会导致凋落物化学组成的变化,影响草原生态系统凋落物的分解速率^[44]。外加氮在一定程度上增加了凋落物可利用的氮素,从而加速了凋落物的分解^[45]。Hobbie^[35]在夏威夷的试验表明N的有效性对凋落物碳(C)质量相互作用影响凋落物的分解,在低木质素含量情况下,氮增加提高氮含量,促进凋落物分解。氮素的添加也会促进凋落物中纤维素和可溶物质的初期分解^[46]。

长期施氮,沉降的N跟分解时的一些物质聚合形成更难降解的物质,N沉降则会抑制凋落物的分解^[47]。植物生长过程中,其组织内养分元素含量以及纤维化程度不一样^[48],从而导致不同生长季节植物的化学性质不同^[49]。分解早期阶段,凋落物中含有较多的易分解物质,在此期间凋落物中糖和淀粉含量大量减少,木质素的比例明显增加^[50]。分解的后期阶段,凋落物中积累大量难分解化合物,例如纤维素、单宁、角质以及分解过程中产生的次生代谢物质^[51]。而大气氮沉降会促进凋落物分解过程中的木质素和酚类物质发生聚合反应^[52],形成不易降解的物质,降低了凋落物的分解速率。还有研究发现,大部分生态系统中几乎都存在由于氮素添加而导致的磷限制,而这种磷限制会影响凋落物分解过程^[53]。综上所述,氮沉降会改变凋落物化学组成,分解前期养分含量及水溶性碳化合物

受到氮素的影响,促进分解,而后期木质素含量的升高及沉降的N与凋落物中其他物质的聚合形成难分解的物质降低了凋落物的分解速率。

3 氮沉降对凋落物分解环境的影响

3.1 氮沉降对土壤理化性质的影响

氮沉降通过影响草原土壤pH值、土壤养分、土壤微生物、土壤动物和土壤酶活性及其交互作用,最终影响草原凋落物分解。氮沉降的增加能加速土壤酸化。潘根兴等^[54]在对庐山土壤近35年的研究发现,由于氮沉降作用该地区土壤pH值有明显的下降趋势。魏金明等^[55]对内蒙古典型草原水肥研究也有类似发现,与对照相比随着氮肥使用量的增加,土壤pH值明显降低,至N15处理平均降低1.2个pH单位($p < 0.01$)。土壤pH值是土壤生物分布的敏感因素,土壤pH值影响土壤生物代谢的酶活性及细胞膜的稳定性,进而影响生物体对环境中的营养物质的吸收,且大多数土壤动物适宜在微酸和中性条件下生活,土壤pH值的变化也会影响土壤动物的丰度^[56],进而间接影响凋落物分解。氮沉降可增加土壤中可利用氮含量,使得植物碳同化作用增强,形成大量有机质进入土壤^[57],有研究证明氮素添加可提高土壤中 NO_3^- -N等可利用资源的增加^[25]。在N素限制的土壤中,植物根系与微生物竞争土壤中的有效氮,添加氮素后,土壤中 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N增加,促进了凋落物的分解,且增加了N的矿化速度,硝化和反硝化过程的反应底物增多,添加的N转化为 N_2O 排出^[58],但氮沉降导致的 N_2O 排放的增多是否会直接影响凋落物的分解,还有待进一步研究。

3.2 氮沉降对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤物质循环和能量流动的主要参与者,推动着土壤有机质的矿化分解和土壤养分的循环与转化,对维持草原生态系统过程具有重要作用^[59]。土壤微生物与生态系统中植物、土壤养分有着密切的关系^[60],因此氮沉降能间接或直接影响土壤微生物活性,进而对草原凋落物分解产生影响。在凋落物分解的过程中,土壤微生物之间是相互协同、共同作用的,且细菌和真菌在凋落物分解的最初阶段起着主要作用^[37]。研究表明,分解者的不同类群对凋落物的分解作用不同,分解主要由土壤微生物来完成,分解强度占年损失率的97%^[41]。土壤微生物在凋落物分解中占有重要的地位,直接影响着凋落物的分解。氮沉降持续增加的全球变化背景下,土壤微生物的生物量、组成

与酶活性的改变是调控凋落物分解的核心机制^[61]。何亚婷等^[57]研究证明,施氮改变了土壤微生物的群落结构组成及其对底物的利用方式,对土壤微生物多样性的影响呈负效应,且长期施氮降低土壤微生物量,但有利于细菌数量的增加。高强度的人为施氮可以在短时间内显著地改变土壤微生物群落的组成,并对植物和微生物之间的共生关系产生干扰。还有研究发现,对于N缺乏地区,N的沉降可以增加环境中的营养物质含量从而促进微生物活动,最终促进凋落物的分解^[62]。凋落物分解早期阶段,土壤微生物能吸收和同化可溶性的、低分子量的外加N用于生长呼吸,促进了微生物的生长,增强了其活性,有利于凋落物的分解^[63]。氮输入后土壤中可利用氮的数量增加,植物碳同化作用相应增强,为微生物的降解提供碳源^[57],加速了凋落物的分解。Lovell等^[64]研究发现,不同管理措施的草地凋落物在分解过程中,凋落物质量和分解速率的改变促进了细菌数量的提高,同时加速自身的分解。张建利等^[65]对云南马龙县山地封育草地凋落物的研究表明,凋落物分解过程中,若氮素含量缺乏,则微生物的活性受到限制,微生物须从外部获得N源以补充其需要,并与凋落物竞争N源,从而抑制了凋落物分解。综上,任何有利于微生物活动的行为与过程都将促进凋落物的分解^[66],当微生物活性受到限制时,凋落物的分解也会受到抑制。大多数研究表明,氮沉降可以为微生物生长活动提供N源,提高微生物活性,加速了凋落物的分解。

3.3 氮沉降对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤生物活性的一个重要指标,它们参与土壤有机物质的分解转化。土壤酶活性的高低可以反映土壤养分(尤其是氮、磷)转化能力强弱。草原凋落物分解酶的底物由碳、氮、磷3种元素构成。因此根据凋落物底物营养成分的不同,将凋落物分解酶分为纤维素分解酶类、木质素分解酶类、蛋白水解酶类磷酸酶类。由于凋落物的主要成分是纤维素和木质素,因此决定凋落物分解的酶主要为纤维素分解酶类和木质素分解酶类^[67]。而目前大部分研究认为,氮沉降增加能提高磷酸酶活性^[68],而其他3种酶未呈现有规律的变化^[69]。

有研究显示长期氮增加造成土壤酶活性的降低,特别是木质素溶解酶活性、纤维素降解酶活性的降低^[70]。氮沉降能抑制木质素细胞溶解酶的活性,降低土壤有机碳的分解速率,导致土壤碳的积累,从而引起凋落物分解速率的变化^[66]。Berg等^[71]在凋落物分解

研究中发现,氮增加明显降低凋落物尤其是后期的分解速率,这是由于木质素降解酶主要由白腐真菌产生^[72],而白腐真菌通常仅在氮受限的条件下才能生产大气氮沉降能直接或间接影响土壤酶活性,从而改变凋落物中营养元素的释放和有机质的形成^[66]。有研究表明,过量的氮沉降可以加快凋落物分解,但对木质素分解酶和胞外酶活性却有抑制作用^[73]。综上所述,在凋落物分解过程中,酶活性随着凋落物质量不同而发生改变,氮沉降的增加导致酶活性的降低,进而影响凋落物分解速率。

4 研究展望

近年来,关于凋落物的研究方法日趋成熟,但有关氮沉降对草地凋落物分解的影响研究还很不足,氮沉降的增加会影响陆地生态系统凋落物的分解速率,然而到目前为止,无论是野外还是室内试验,都没有一致表现出外加氮源会增加凋落物分解速度^[76],因此在以后的实验工作中需要更深入系统地研究。

(1)目前,国内外有关草原生态系统凋落物分解的研究,主要集中于叶片等较易观察的地上部凋落物,然而对于不便观测的地下部根系凋落物(细根)分解的研究还很少。细根的死亡和分解对全球碳收支和土壤中养分的有效性有着重要意义,所以,同地上部叶片凋落物相比,全球变化对地下部根系凋落物分解的影响如何,影响其分解的主要因素有哪些,这都需要开展相关的研究。

(2)已有研究大多集中于单一凋落物分解,混合凋落物分解的研究不多。现实环境中,不同种类凋落物通常是混合在一起分解的,很可能发生混合效应。单一凋落物分解特征的研究,很难说明其结果能在多大程度上反映混合凋落物作为一个整体进行分解的实际特征。全球变化背景下,混合凋落物分解的混合效应是否存在,混合效应方向到底与哪些因子有关,这些问题的存在限制了人们更好地了解草原生态系统碳和养分的循环。

(3)有些研究发现土壤氮素增加能够促进凋落物的分解,而有些研究发现没有作用,甚至是抑制凋落物的分解。土壤氮增加对凋落物分解影响的研究结果尚无定论。在研究过程中既要考虑单因素影响,又要兼顾各因素之间的相互作用,参考对比国内外不同学者的研究结果,应形成统一的研究方法,开展不同地带草地凋落物分解长期定位联网研究,为全球变化条件下草地资源管理提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, et al. Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1):358–372.
- [2] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2):153–226.
- [3] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest system[J]. *Environ Rev*, 1997(5):1–25.
- [4] Sala O E, Stuart C F, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100[J]. *Science*, 2000, 287:1770–1774.
- [5] Harpole W S, Tilman D. Grassland species loss resulting from reduce niche dimension[J]. *Nature*, 2007, 446:791–793.
- [6] Cleland E E, Harpole W S. Nitrogen enrichment and plant communities [J]. *Ann NY Acad Sci*, 2010, 1196:46–61.
- [7] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(9):1309–1315.
- [8] 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.
- [9] Niu S L, Yang H J, Zhang Z, et al. Non-additive effects of water and nitrogen addition on ecosystem carbon exchange in a temperate steppe[J]. *Ecosystems*, 2009, 12(6):915–926.
- [10] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. *Science*, 2004, 303(5665):1876–1879.
- [11] Rovira P, Rovira R. Fitting litter decomposition datasets to mathematical curves: towards a generalized exponential approach[J]. *Geoderma*, 2010, 155(3–4):329–343.
- [12] Wood T G. Field investigations on the decomposition of leaves of *Eucalyptus delegatensis* in relation to environmental factors [J]. *Pedobiology*, 1991, 14:343–371.
- [13] 赵红梅, 黄刚, 马健, 等. 典型荒漠植物凋落物分解及养分动态研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4):628–634.
- [14] 王星丽, 殷秀琴, 宋博, 等. 羊草草原主要凋落物分解及土壤动物的作用[J]. 草业学报, 2011, 20(6):143–149.
- [15] Ebermayer E. Die gesamte Lehre der waldeteru mit Rucksicht auf die chemische static woldbaues[M]. Berlin: Julius Springer, 1876:116.
- [16] Bontti E E, Decant J P, Munson S M, et al. Litter decomposition in grasslands of Central North America (US Great Plains) [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(5):1356–1363.
- [17] Jenkinson D S, Goulding K, Powlson D S. Nitrogen deposition and carbon sequestration[J]. *Nature*, 1999, 400:629.
- [18] Wedin D A, Tilman D. Influence of nitrogen loading and species composition on the carbon balance of grass lands[J]. *Science*, 1996, 274:1720–1723.
- [19] Niu S L, Wu M Y, Han Y, et al. Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2009, doi: 10.1111/j.136522486.2009.01894.x.
- [20] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, et al. Leaf decomposition in two semi evergreen tropical ferests: influence of litter quality[J]. *Biology and Fertility Soils*, 2002, 35:247–252.
- [21] Facell J M, Pickett S TA. Plant litter: Its dynamics and effects on plant communit structure[J]. *Bot Recvi*, 1991, 57:1–32.
- [22] Foster B L, Gross K L. Species richness in successional grassland: Effects of nitrogen enrichment and plant litter[J]. *Ecology*, 1998, 79:2593–2602.
- [23] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grass lands[J]. *Science*, 2004, 303:1876–1879.
- [24] Ren Z W, Li Q, Chu C J, et al. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2010(3):25–31.
- [25] 张杰琦, 李奇, 任正炜, 等. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10):1125–1131.
- [26] 徐振锋, 尹华军, 赵春章, 等. 陆地生态系统凋落物分解对全球气候变暖的响应[J]. 植物生态学报, 2009, 3(6):1208–1219.
- [27] Fisher F M, Zak J C, Cunningham G L, et al. Water and nitrogen effects on growth and allocation patterns of creosotebush in the northern Chihuahuan Desert[J]. *Journal of Range Management*, 1988, 41:387–391.
- [28] 祁瑜, 黄永梅, 王艳, 等. 施氮对几种草地植物生物量及其分配的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18):5122–5128.
- [29] Xia J Y, Wan S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition[J]. *New Phytol*, 2008, 179:428–439.
- [30] 申艳, 杨慧玲, 何维明. 冬小麦生境中土壤养分对凋落物碳氮释放的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5):498–504.
- [31] Fenn M E, Baron J S, Allen E B, et al. Ecological effects of nitrogen deposition in the western United States[J]. *Bioscience*, 2003, 53(4):404–420.
- [32] He D, Li X L, He F, et al. Effect of nitrogen fertilizer on biomass and the important values of the main species in degraded grassland[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2009, 31(5):42–46.
- [33] Burton A J, Pregitzer K S, Hendrick R L. Relationships between fine root dynamics and nitrogen availability in Michigan northern hardwood forests[J]. *Ecologia*, 2000, 125:389–399.
- [34] 廖利平, 高洪, 汪思龙, 等. 外加氮源对杉木叶凋落物分解及土壤养分淋失的影响[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1):34–39.
- [35] Hobbie S E. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest[J]. *Ecosystems*, 2000(3):484–494.
- [36] Kuperman R G. Litter decomposition and nutrient dynamics in oak-hickory forest s along a historic gradient of nitrogen and sulfur deposition [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31:237–244.
- [37] 马川, 董少锋, 莫江明. 鼎湖山马尾松林凋落物分解对凋落物输入变化的响应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4):647–653.

- [38] 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[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 457-467.
- [39] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地枯落物分解及营养动态[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1207-1212.
- [40] Vestgarden L S. Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: effects of internal and external nitrogen[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33: 465-474.
- [41] 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原生态系统的分解者与枯枝落叶分解的研究[J]. 草业学报, 1991, 3(1): 13-17.
- [42] Koukoura Z, Mamolos A P, Kalburtji K L. Decomposition of dominant plant species litter in a semi-arid grassland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23(1): 13-23.
- [43] Mougin E, Seena D L, Rambal S, et al. A regional Sahel grassland model to be coupled with multispectral satellite data I: Model description and validation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(3): 181-193.
- [44] 莫江明, 薛花, 方云霆. 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): 1413-1420.
- [45] Mo J M, Brown S, Peng S L, et al. Nitrogen availability in disturbed, rehabilitated and mature forests of tropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175: 573-583.
- [46] Berg B, Matzner E. Effect of N deposition on decomposition of plant litter and soil organic matter in forest systems[J]. *Environmental Reviews*, 1997, 5(1): 1-25.
- [47] Berg B, Staaf H. Decomposition rate and chemical changes in decomposing needle litter of Scots pine II. Influence of chemical composition[J]. *Ecol Bull*, 1980, 32: 373-390.
- [48] 闫芊, 何文珊, 陆健健. 崇明东滩湿地植被演替过程中生物量与氮含量的时空变化[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1019-1023.
- [49] 张彩虹, 张雷明, 刘杏认, 等. 不同月份采集贝加尔针茅地上部的分解特征及影响因素[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1088-1096.
- [50] Aneja M K, Sharma S, Fleischmann F, et al. Microbial colonization of beech and spruce litter: Influence of decomposition site and plant litter species on the diversity of microbial community[J]. *Microbial Ecology*, 2006, 52: 127-135.
- [51] Wang W J, Baldock J A, Dalal R C, et al. Decomposition dynamics of plant materials in relation to nitrogen availability and biochemistry determined by NMR and wet-chemical analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36: 2045-2058.
- [52] Kondo R, Iimori T, Imamura H, et al. Polymerization of DHP and depolymerization of DHP-glucoside by lignin oxidizing enzymes[J]. *Biotechnology*, 1990, 13: 181-188.
- [53] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解影响及其微生物学机制[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [54] 潘根兴, P Fallavier, 卢玉文, 等. 近35年来庐山土壤酸化及其物理化学性质变化[J]. 土壤通报, 1993, 24(4): 145-147.
- [55] 魏金明, 姜勇, 符明明, 等. 水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳氮磷及pH的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1642-1646.
- [56] 殷秀琴, 李健东. 羊草草原土壤动物群落多样性的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 186-188.
- [57] 何亚婷, 齐玉春, 董云社, 等. 外源氮输入对草地土壤微生物特性影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(8): 877-885.
- [58] 张炜, 莫江明, 方霆运, 等. 氮沉降对森林土壤主要温室气体通量的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2309-2319.
- [59] Yang Xitian, Ning Guohua, Dong Huiying, et al. Soil microbial characters under different vegetation communities in Taihang mountain area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1761-1764.
- [60] Craig L M, Dobbs F C, Tiedje J M. Phylogenetic diversity of the bacterial community from a microbial mat at an active, Hydrothermal vent system, Loihi Seamount, Hawaii[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61: 1555-1562.
- [61] Zechmeister-Boltenstern S, Michel K, Pfeffer M. Soil microbial community structure in European forests in relation to forest type and atmospheric nitrogen deposition[J]. *Plant and Soil*, 2011, 343(1): 37-50.
- [62] Bloomfield J, Vogt K A, Vogt D J. Decay-rates and substrate quality of fine root and foliage of 2 tropical tree species in the liquidly experimental forest, Puerto Rico[J]. *Plant and Soil*, 1993, 150: 233-245.
- [63] Molina J A E, Clapp C E, Shaffer M J, et al. A model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration and behavior[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1983, 47: 85-91.
- [64] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: Effects of management changes[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(7): 969-975.
- [65] 张建利, 张文, 高玲苹. 云南马龙县山地风雨草地凋落物分解与氮释放的研究[J]. 草业科学, 2008, 25(7): 77-82.
- [66] 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.
- [67] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. Effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, 34: 1309-1315.
- [68] 葛晓敏, 吴麟, 唐罗忠. 森林凋落物分解与酶的相互关系的研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 43-47.
- [69] 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[J]. 热带亚热带植物学报, 2006, 14(6): 539-546.
- [70] Deforest J L, Zaka D R, Pregitzer K S, et al. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 965-971.
- [71] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133: 13-22.
- [72] 赵玉涛, 李雪峰, 韩士杰, 等. 不同氮沉降水平下两种林型的主要土壤酶活性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2769-2773.
- [73] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, et al. Microbial enzyme shift explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition[J]. *Ecology*, 2000, 81: 2359-2365.
- [74] 莫江明, 薛花, 方云霆. 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): 1413-1420.