

森林凋落物分解过程对土壤微生物影响研究综述

骆娟 (三亚学院翟明国院士工作站, 海南三亚 572000)

摘要 总结前人研究成果,选取了目前针对凋落物分解研究相对较多的几个方向进行总结,围绕凋落物组成、外源氮添加、季节和温度变化等常见因素在凋落物分解过程中对微生物群落的影响进行了比较分析,为未来进一步深入研究凋落物分解过程与土壤微生物互作关系提供理论依据。

关键词 森林凋落物;土壤微生物;环境因子

中图分类号 S714 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)05-0025-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.05.007



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Review on the Influence of the Forest Litter Decomposition on Soil Microorganism

LUO Juan (Academician Workstation of Zhai Mingguo, University of Sanya, Sanya, Hainan 572000)

Abstract Based on summing up the previous studies, this paper selected four common directions which are the litter composition, external nitrogen additions, seasonal and temperature variation to summarize and compare the effects on soil microbial community in litter decomposition, which provided theoretical basis for the further research of the interactions between litter decomposition and soil microorganisms.

Key words Forest litter; Soil microorganism; Influence factors

森林土壤为森林植物提供生长所需的营养物质和生长基质,同时森林植物在生长过程中又不断以凋落物形式把养分返还土壤,补充并改善土壤肥力及土质结构,促进森林生态系统的良性循环。森林凋落物是生态系统的重要组成部分,是森林地上、地下生态系统物质和能量流动的关键环节^[1-4]。据统计,每年凋落物总量约占地球生物量的90%以上^[5],森林植被通过凋落物形式分解并释放有机质和其他养分,促进养分返还土壤并提升林区土壤肥力水平,为维持森林生态系统的养分平衡和正常的物质循环发挥着重要功能^[6-7]。因此,凋落物分解被认为是森林生态系统中碳、氮及其他养分循环的关键步骤。而土壤微生物在森林生态循环系统中承担着森林凋落物分解、促进养分转化与循环等功能^[8]。森林凋落物分解过程的主要参与者是土壤微生物,有研究证明,土壤中微生物量的90%以上为细菌和真菌,它们在凋落物分解转化过程中发挥着主要作用,在凋落物分解过程中微生物把有机化合物等大分子物质分解为能够被植物吸收利用的小分子物质,对植物的生长以及土壤的形成与改良,甚至温室气体排放等方面发挥着积极作用^[9-11],并影响和控制植被群落的演替和养分循环过程^[12]。反过来,森林凋落物也为微生物提供了丰富的能量和营养物质来源,促进微生物群落生长繁殖^[13]。因此,微生物在森林凋落物分解过程中的具体功能以及微生物群落特征与凋落物分解过程的关系等内容成为当前森林生态学领域研究的重点内容^[14]。

1 凋落物多样性对微生物的影响

森林凋落物分解产物是土壤养分的主要来源,是森林土壤环境营养物质及碳循环的关键环节。作为主要的外源有机物,森林凋落物主要由糖类、淀粉、脂肪等易分解的成分和

木质素、多酚、腐殖酸等难分解的成分组成^[15],不同植物品种凋落物的组成成分及生物量也会存在差异。作为森林凋落物最主要的分解者,微生物群落多样性和数量与凋落物品质关系密切^[16-18]。

植物群落结构和物种组成发生变化会导致凋落物基质数量和质量随之改变,进而影响微生物群落的变化,并进一步改变物质养分生态循环进程。大量相关研究已经证实凋落物数量和组成多样性的变化会对微生物群落产生显著影响,总结前人研究主要集中在凋落物类型对土壤微生物的数量、群落组成以及碳代谢等方面^[19-25]。如宿晓琳等^[26]分别对比了单个物种、两个物种、四个物种和八个物种等4种不同凋落物多样性组合分解过程中微生物群落的变化特征,结果显示凋落物多样性对土壤微生物群落的影响显著,特别是在生态系统演替初期凋落物理化指标能揭示微生物群落结构变异的12.3%。陈法霖等^[25]也研究发现与单一针叶林相比,针叶、阔叶混合凋落物分解提高了土壤微生物群落碳代谢强度,通过改变凋落物组成能显著影响微生物群落的代谢多样性。而Waring等^[27]对比了5种热带地区的植物凋落物分解试验,结果发现分解速率与叶片养分含量显著相关,凋落物组成直接影响到真菌群落组成。Bending等^[28]研究认为树种特性和多样性能够对土壤微生物的群落结构产生关键影响,混合凋落物比单一凋落物含有类型更丰富多样的碳源和其他养分物质,更利于微生物繁殖及其多样性的增加,也有研究认为由于针叶林凋落物含有大量不易被分解的木质素和腐殖酸类物质,因此,土壤中以能够分解结构复杂的有机碳为主的微生物为主导,微生物类群较为单一^[29]。而阔叶林中细菌丰度显著高于针叶林,如钟哲科等^[30]对比杨树和水杉叶子的分解过程发现杨树叶子的分解速率及微生物数量显著高于水杉叶片。相关分析认为阔叶林凋落物在分解过程中引入土壤的碳含量和碳种类高于针叶林,直接导致了微生物类群的变化,因此,可以通过向针叶林凋落物中混入阔叶林凋落物来增加土壤微生物量并增加土壤微生物

基金项目 海南省自然科学基金资助项目(318QN253)。

作者简介 骆娟(1984—),女,河北保定人,讲师,在读博士,从事植物栽培及土壤营养研究。

收稿日期 2019-10-17

碳代谢强度。陈法霖等^[25]认为凋落物混合后改变了有机物的组成结构,如碳氮比、木质素与氮磷比等,进而影响微生物碳代谢的多样性。

凋落物的多样性与土壤微生物多样性呈正相关关系,不同凋落物混合后会产生交互作用,导致其分解速率增加或减慢,应通过合理控制凋落物碳氮比来调控其分解速率^[30-31]。林开敏等^[32]通过对杉木及其伴生植物混合后分解情况进行研究,发现凋落物混合后分解会发生交互影响,营养含量较高的凋落物分解过程中会促进养分含量较低的凋落物的分解,凋落物混合并利于促进碳氮循环的速率与分解速度^[33]。然而也有研究者有不同意见,王春阳等^[34]对比了黄土区6种植物凋落物分解过程认为多种枯落物混合后土壤微生物碳、氮含量及比值并为发生显著变化,其原因可能与不同凋落物化学组成的差异性相关^[35]。因为混合凋落物的植物种类、数量和比例不同,分解物之间会发生或协同、或拮抗等作用,导致分解速率发生变化。不同类型凋落物混合后也会引起微生境的改变,进而引起微生物活性和多样性的变化^[22,36-40]。

此外也有研究认为凋落物混合后对土壤环境 pH 的影响也可能是导致土壤微生物群落结构变化的原因之一。不同凋落物种类所含碱性物质类型及数量差异较大,对酸性土壤改良效果会有差异,不同种类凋落物释放的碱性物质还会是发生一定的交互作用,因此,土壤酸性环境的改善也是影响微生物群落功能的因子之一^[41-42]。相关研究进一步证明,不同类型凋落物分解过程的关键菌会有差异,如,凋落物质量较高的大多阔叶林分解过程中以细菌为主,针叶类质量较低的凋落物分解过程以真菌为主^[4],研究发现,针叶林添加阔叶类凋落物后碳源种类和数量发生改变,导致有机碳结构的复杂程度发生改变,是影响真菌、细菌类群多样性发生改变的主要因素^[43]。

2 外源氮添加对凋落物微生物的影响

氮元素是地球生态系统主要的限制因子,特别是近年来人类活动加大了氮元素的输入,相关研究证明过去近一百年全球氮沉降较以前增加了将近3倍^[44]。环境中氮元素输入的持续增加能显著改变森林植被群落的物种组成,造成喜氮植物增多,原有优势树种逐渐衰退^[45]。此外,氮输入量的增加也会对土壤呼吸、养分循环产生影响,并进一步改变凋落物分解过程中的养分循环和土壤微生物的多样性^[46]。土壤微生物对外界环境变化能快速做出反应,在凋落物氮添加试验中微生物群落既可以反应凋落物分解进程的变化,也可以作为环境改变的表征指标^[47]。但是,不同氮添加试验对微生物群落的影响结果存在差异,Cusack 等^[48]对热带地区森林进行氮添加试验,结果显示添加氮素后土壤微生物量显著增加。袁颖红等^[49]在杉木林人工添加氮素,结果显示施低量氮素利于微生物量增加,而氮素施用量过高则会对土壤微生物产生一定抑制作用,导致土壤微生物的丰富度降低。刘蔚秋等^[50]认为适量的氮添加有益于微生物繁殖,过量氮添加会对微生物群落产生胁迫,导致微生物群落结构和丰富度降低。也有研究发现在人工杨树林添加氮没有改变微生

物总量,但是却导致微生物群落结构发生变化,其中细菌和革兰氏阳性菌含量分别升高、下降^[51]。而 Frey 等^[52]认为氮添加对土壤细菌和真菌均产生一定抑制作用,并且对真菌的抑制作用更明显。研究结果的差异可能是因为受到森林类型、氮增加水平不同以及施氮方式的差异等因素影响所导致的。

3 季节因素对凋落物微生物影响

凋落物降解过程中土壤微生物群落结构和组成常随着季节改变而变化^[53-56],进而改变和调节微生物活性和繁殖速度^[53-54],有研究认为时间和季节因素比凋落物类型对微生物群落的影响更明显。微生物群落特征随着季节变化有显著差异,但是不同研究结果显示季节变化对微生物群落变化的影响因具体环境条件不同而存在差异^[16,57]。凋落物分解过程中,微生物群落活性和多样性也受到温度、水分、土壤养分等气候环境因素的影响,因此,气候变化也是导致微生物群落变化的重要因子。当前,气候变暖对森林凋落物分解过程中微生物群落结构的影响逐渐受到人们的重视,人们普遍认为气候变暖直接导致全球气温升高,生态系统水热条件发生改变,环境因子直接作用改变了微生物的生存环境进而影响了凋落物的分解速度。Criquet 等^[16]研究认为凋落物分解过程中在水热条件相对缓和的春秋季节真菌生物量较高,但也有研究与此相反,认为微生物活性随着气温升高逐渐增强,真菌生物量在水热充沛的夏季达到峰值。研究结果的区别可能是由于不同区域气候类型及水热条件存在差异导致了微生物群落的不同变化,虽然高温高湿环境更利于微生物生长繁殖,然而随着温度进一步升高则可能会对其活性产生一定的抑制作用。此外,凋落物分解阶段不同微生物群落优势种群也会存在差异,如,在中亚地区凋落物分解初期真菌菌丝通过定殖作用及分泌胞外酶改变凋落物组成结构,为后期细菌定殖创造条件,因而形成分解前期真菌占优势,而分解后期细菌占比逐步增高直至二者比例接近^[25]。

相关研究认为微生物群落结构与温度变化间的关系密切相关,细菌数量随着温度升高呈显著下降趋势,而真菌则相反,随着温度升高呈增长趋势^[58]。如,Rinnan 等^[59]研究发现增温幅度在不同年限使亚北极石楠灌丛细菌增长了28%~73%,此外,气候环境的改变影响了植物群落的物种组成结构以及凋落物数量和质量,进而改变了土壤养分循环过程。

在模拟增温环境改变了凋落物叶际微生物群落结构,凋落物分解速率显著加快,主要是由于温度提高促进了大部分微生物的活性,并显著增加微生物种群数量,促进其对凋落物的分解速率^[60-61]。郑海峰等^[62]研究认为不同土层土壤微生物对模拟增温的响应敏感性不同,其中,凋落物充沛的有机质层比矿质土壤层反应更灵敏,此外,细菌对模拟增温的敏感性高于真菌,研究证实增温处理会显著提高细菌群落活性^[63],内生真菌生物量降低^[64]。也有研究认为微生物群落与全球气候变暖间也存在着驯化与适应的变化规律。如,短期的增温会引起微生物量显著增加^[65-66],而随着增温时间的持续延长微生物量则会保持稳定甚至略有下降^[67-68],这可

能与微生物的生态适应性相关,长期的气候变化改变了微生物群落结构及其生态适应能力^[67,69-70]。

4 结论与展望

土壤微生物在森林凋落物分解过程中发挥着关键作用,凋落物组成、外源氮素添加以及季节、气候等因素都会对微生物的多样性和活性等特征产生影响。目前,国内外学者针对凋落物分解过程中微生物丰富度、多样性等特征展开研究,分析对比了一系列影响因子,如,凋落物构成、氮素添加、气候变化等对微生物群落的影响特征,结果显示各种影响因子主要通过改变凋落物质量以及微环境进而对微生物产生影响。未来应进一步扩展研究的广度与深度,特别是针对微生物种群结构特征以及具体种属与凋落物环境变化间的关系应进一步深入研究。

参考文献

- [1] 凌华,陈光水,陈志勤. 中国森林凋落量的影响因素[J]. 亚热带资源与环境学报,2009,4(4):66-71.
- [2] MAGUIRE D A. Branch mortality and potential litterfall from Douglas-fir trees in stands of varying density[J]. Forest ecology & management, 1994, 70(1/2/3):41-53.
- [3] WITKAMP M. Microbial populations of leaf litter in relation to environmental conditions and decomposition[J]. Ecology, 1963,44(2):370-377.
- [4] WARDLE A D. Ecological linkages between aboveground and belowground biota[J]. Science, 2004,304(5677):1629-1633.
- [5] CEBRIAN J. Patterns in the fate of production in plant communities[J]. American naturalist, 1999, 154(4):449-468.
- [6] 刘颖,韩士杰,林鹿. 长白山四种森林类型凋落物动态特征[J]. 生态学杂志,2009,28(1):7-11.
- [7] 薛立,何跃君,屈明,等. 华南典型人工林凋落物的持水特性[J]. 植物生态学报,2005,29(3):415-421.
- [8] 周建斌,陈竹君,李生秀. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用[J]. 生态学报,2001,21(10):1718-1725.
- [9] POTTHOFF M, DYCKMANS J, FLESSA H, et al. Decomposition of maize residues after manipulation of colonization and its contribution to the soil microbial biomass[J]. Biology & fertility of soils, 2008,44(6):891-895.
- [10] 许湘琴,林植华,陈慧丽. 凋落物分解对土壤生物的影响[J]. 生态学杂志,2011,30(6):1258-1264.
- [11] CROWTHER T W, STANTON D W G, THOMAS S M, et al. Top-down control of soil fungal community composition by a globally distributed keystone consumer[J]. Ecology, 2013,94(11):2518-2528.
- [12] BERG B, LASKOWSKI R. Decomposers: Soil microorganisms and animals[J]. Advances in ecological research, 2005,38:73-100.
- [13] NEVINS C J, NAKATSU C, ARMSTRONG S. Characterization of microbial community response to cover crop residue decomposition[J]. Soil biology and biochemistry, 2018, 127:39-49.
- [14] SCHEIBE A, STEFFENS C, SEVEN J, et al. Effects of tree identity dominate over tree diversity on the soil microbial community structure[J]. Soil biology & biochemistry, 2015, 81:219-227.
- [15] 强学彩,袁红莉,高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO₂ 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(3):469-472.
- [16] CRIQUET S, FERRE E, FARNET A M, et al. Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter: Influence of biotic and abiotic factors[J]. Soil biology & biochemistry, 2004,36(7):1111-1118.
- [17] 季晓燕,江洪,洪江华,等. 模拟酸雨对亚热带三个树种凋落物分解速率及分解酶活性的影响[J]. 环境科学学报,2013,33(7):2027-2035.
- [18] KUBARTOVÁ A, MOUKOUMI J, BÉGUIRISTAIN T, et al. Microbial diversity during cellulose decomposition in different forest stands: I. Microbial communities and environmental conditions[J]. Microbial ecology, 2007,54(3):393-405.
- [19] 李茜. 黄土高原不同树种枯落叶混合分解对土壤性质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [20] 钟哲科,高智慧. 杨树、水杉林带凋落物对土壤微生物 C、N 的影响[J]. 林业科学,2003,39(2):153-157.
- [21] 王春阳,周建斌,夏志敏,等. 黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 生态学报,2011,31(8):2139-2147.
- [22] 胡亚林,汪思龙,黄宇,等. 凋落物化学组成对土壤微生物学性状及土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2005,25(10):2662-2668.
- [23] 彭琳. 改变凋落物的输入方式对慈竹林土壤有机碳和酶活性的影响[D]. 雅安:四川大学,2012.
- [24] 王锐萍,刘强,彭少麟,等. 尖峰岭不同树种凋落物分解过程中微生物动态[J]. 浙江林学院学报,2006,23(3):255-258.
- [25] 陈法霖,郑华,阳柏芳,等. 中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响[J]. 生态学报,2011,31(11):3027-3035.
- [26] 宿晓琳,李英滨,杨波,等. 植物多样性对亚热带森林土壤微生物群落的影响[J]. 生态学杂志,2018,37(8):2254-2261.
- [27] WARING G B. Exploring relationships between enzyme activities and leaf litter decomposition in a wet tropical forest[J]. Soil biology & biochemistry, 2013,64(9):89-95.
- [28] BENDING G D, TURNER M K, JONES J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities[J]. Soil biology & biochemistry, 2002, 34(8):1073-1082.
- [29] SWIFT M J, HEAL O W, ANDERSON J M. Decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Studies in ecology, 1979,5(14):2772-2774.
- [30] BLAIR J M, PARMELEE R W, BEARE M H. Decay rates, nitrogen fluxes, and decomposer communities of single and mixed-species foliar litter[J]. Ecology, 1990,71(5):1976-1985.
- [31] BRIONES M J I, INESON P. Decomposition of eucalyptus leaves in litter mixtures[J]. Soil biology & biochemistry, 1996,28(10/11):1381-1388.
- [32] 林开敏,洪伟,俞新妥,等. 杉木与伴生植物凋落物混合分解的相互作用研究[J]. 应用生态学报,2001,12(3):321-325.
- [33] HANDA I T, AERTS R, BERENDSE F, et al. Consequences of biodiversity loss for litter decomposition across biomes[J]. Nature, 2014, 509(7499):218-221.
- [34] 王春阳,周建斌,董燕婕,等. 黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响[J]. 生态学报,2010,30(24):7092-7100.
- [35] WRIGHT M S, COVICH A P. Relative importance of bacteria and fungi in a tropical headwater stream: Leaf decomposition and invertebrate feeding preference[J]. Microbial ecology, 2005,49(4):536-546.
- [36] GE X G, ZENG L X, XIAO W F, et al. Effect of litter substrate quality and soil nutrients on forest litter decomposition: A review[J]. Acta ecologica sinica, 2013,33(2):102-108.
- [37] 陈法霖,郑华,欧阳志云,等. 土壤微生物群落结构对凋落物组成变化的响应[J]. 土壤学报,2011,48(3):603-611.
- [38] HATTENSCHWILER S, TIUNOV A V, SCHEU S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Annual review of ecology evolution & systematics, 2005,36:191-218.
- [39] KUBARTOVÁ A, RANGER J, BERTHELIN J, et al. Diversity and decomposing ability of saprophytic fungi from temperate forest litter[J]. Microbial ecology, 2009,58(1):98-107.
- [40] WARDLE D A, NILSSON M C, ZACKRISSON O, et al. Determinants of litter mixing effects in a Swedish boreal forest[J]. Soil biology & biochemistry, 2003,35(6):827-835.
- [41] 宋蒙亚,李忠佩,刘明,等. 不同林地凋落物组合对土壤速效养分和微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学杂志,2014,33(9):2454-2461.
- [42] 毛佳,徐仁扣,黎星辉. 氮形态转化对豆科植物物料改良茶园土壤酸度的影响[J]. 生态与农村环境学报,2009,25(4):42-45,99.
- [43] 陈冬梅,柯文辉,陈兰兰,等. 连作对白肋烟根际土壤细菌群落多样性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1751-1758.
- [44] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008,320(5878):889-892.
- [45] STRENGBOM J, WALHEIM M, NÄSHOLM T, et al. Regional differences in the occurrence of understorey species reflect nitrogen deposition in Swedish forests[J]. Ambio, 2003,32(2):91-97.
- [46] 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.
- [47] COMPTON J E, WATRUD L S, PORTEOUS L A, et al. Response of soil microbial biomass and community composition to chronic nitrogen additions at Harvard forest[J]. Forest ecology & management, 2004,196(1):143-158.

- ide from the rice-winter wheat rotation systems in Southeast China[J]. *Ecological engineering*, 2016, 86: 239–246.
- [22] 赵峥, 岳玉波, 张翼, 等. 不同施肥条件对稻田温室气体排放特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2273–2278.
- [23] FAN X F, YU H Y, WU Q Y, et al. Effects of fertilization on microbial abundance and emissions of greenhouse gases (CH₄ and N₂O) in rice paddy fields[J]. *Ecology & evolution*, 2016, 6(4): 1054–1063.
- [24] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5): 913–918.
- [25] 李琳, 张海林, 陈阜, 等. 不同耕作措施下冬小麦生长季农田二氧化碳排放通量及其与土壤温度的关系[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2765–2770.
- [26] 王旭燕, 张仁陟, 蔡立群, 等. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH₄、N₂O 气体排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3655–3661.
- [27] 李平, 郎漫, 李森, 等. 不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2360–2367.
- [28] LIU H T, LI J, LI X, et al. Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland[J]. *Science bulletin*, 2015, 60(6): 598–606.
- [29] 傅志强, 龙攀, 刘依依, 等. 水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3365–3372.
- [30] 王孟雪. 东北寒地稻作水氮互作的温室气体排放特征研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [31] 杭玉浩, 王强盛, 许国春, 等. 水分管理和秸秆还田对稻麦轮作系统温室气体排放的综合效应[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(11): 1844–1855.
- [32] 彭世彰, 侯会静, 徐俊增, 等. 节水灌溉对稻田 N₂O 季节排放特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 14–18.
- [33] 袁伟玲, 曹贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(12): 4294–4300.
- [34] WANG J Y, CHEN Z Z, MA Y C, et al. Methane and nitrous oxide emissions as affected by organic-inorganic mixed fertilizer from a rice paddy in southeast China[J]. *Journal of soils and sediments*, 2013, 13(8): 1408–1417.
- [35] 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 337–345.
- [36] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11): 2443–2450.
- [37] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦—玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 704–715.
- [38] 江波, 杨书运, 马友华, 等. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(2): 241–247.
- [39] 陈晓龙, 杨威, 江波, 等. 不同耕作方式下冬小麦田 N₂O 排放特征的差异性研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 221–227.
- [40] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 216–224.
- [41] 赵力莹, 董文旭, 胡春胜, 等. 耕作方式转变对冬小麦季农田温室气体排放和产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11): 1613–1623.
- [42] BADAGLIACCA G, BENÍTEZ E, AMATO G, et al. Long-term effects of contrasting tillage on soil organic carbon, nitrous oxide and ammonia emissions in a Mediterranean Vertisol under different crop sequences[J]. *Science of the total environment*, 2018, 619/620: 18–27.
- [43] 张岳芳, 周炜, 陈留根, 等. 太湖地区不同水旱轮作方式下稻季甲烷和氧化亚氮排放研究[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 290–296.
- +++++
- (上接第 27 页)
- [48] CUSACK D F, SILVER W L, TORN M S, et al. Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests[J]. *Ecology*, 2011, 92(3): 621–632.
- [49] 袁颖虹, 樊后保, 王强, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤有效养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2007, 24(4): 437–444.
- [50] 刘蔚秋, 刘滨扬, 王江, 等. 不同环境条件下土壤微生物对模拟大气氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1691–1698.
- [51] 赵超, 张文文, 徐长柏, 等. 模拟氮沉降对杨树人工林土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(2): 360–366.
- [52] FREY S D, KNORR M, PARRENT J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. *Forest ecology & management*, 2004, 196(1): 159–171.
- [53] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局[J]. *生态学报*, 2010, 30(12): 3135–3143.
- [54] 刘纯, 刘延坤, 金光泽. 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 451–459.
- [55] EDWARDS K A, MCCULLOCH J, KERSHAW G P, et al. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet Arctic sedge meadow in late winter and early spring[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2010, 38(9): 2843–2851.
- [56] EDWARDS K A, JEFFERIES R L. Inter-annual and seasonal dynamics of soil microbial biomass and nutrients in wet and dry low-Arctic sedge meadows[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2013, 57(3): 83–90.
- [57] ALLISON S D, VITOUSEK P M. Extracellular enzyme activities and carbon chemistry as drivers of tropical plant litter decomposition[J]. *Biotropica*, 2010, 36(3): 285–296.
- [58] DESLIPPE J R, HARTMANN M, SIMARD S W, et al. Long-term warming alters the composition of arctic soil microbial communities[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 82(2): 303–315.
- [59] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E. Long-term warming of a subarctic heath decreases soil bacterial community growth but has no effects on its temperature adaptation[J]. *Applied soil ecology*, 2011, 47(3): 217–220.
- [60] BRADFORD M A, DAVIES C A, FREY S D, et al. Thermal adaptation of soil microbial respiration to elevated temperature[J]. *Ecology letters*, 2010, 11(12): 1316–1327.
- [61] PETTERSSON M, BÅÅTH E. Temperature-dependent changes in the soil bacterial community in limed and unlimed soil[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, 45(1): 13–21.
- [62] 郑海峰, 陈亚梅, 杨林, 等. 高山林线土壤微生物群落结构对模拟增温的响应[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2840–2848.
- [63] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E, et al. Mineralization and carbon turnover in subarctic heath soil as affected by warming and additional litter[J]. *Soil biology & biochemistry*, 2007, 39(12): 3014–3023.
- [64] RINNAN R, MICHELSEN A, BÅÅTH E, et al. Fifteen years of climate change manipulations alter soil microbial communities in a subarctic heath ecosystem[J]. *Global change biology*, 2010, 13(1): 28–39.
- [65] VAN MEETEREN M J M, TIETEMA A, VAN LOON E E, et al. Microbial dynamics and litter decomposition under a changed climate in a dutch heathland[J]. *Applied soil ecology*, 2008, 38(2): 119–127.
- [66] INUBUSHI K, CHENG W, MIZUNO T, et al. Microbial biomass carbon and methane oxidation influenced by rice cultivars and elevated CO₂ in a Japanese paddy soil[J]. *European journal of soil science*, 2011, 62(1): 69–73.
- [67] GUTKNECHT J L M. Exploring long-term microbial responses to simulated global change[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2007.
- [68] RINNAN R, STARK S, TOLVANEN A. Responses of vegetation and soil microbial communities to warming and simulated herbivory in a subarctic heath[J]. *Journal of ecology*, 2009, 97(4): 788–800.
- [69] SCHIMEL J, BALSER T C, WALLENSTEIN M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function[J]. *Ecology*, 2007, 88(6): 1386–1394.
- [70] HYVÖNEN R, ÅGREN G I, DALIAS P. Analysing temperature response of decomposition of organic matter[J]. *Global change biology*, 2010, 11(5): 770–778.