

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201601018

引文格式: 冯继广, 宋彦君. 模拟酸雨对土壤呼吸影响的研究进展 [J]. 广西植物, 2017, 37(4):533-540

FENG JG, SONG YJ. A review of the effects of simulated acid rain on soil respiration [J]. *Guihaia*, 2017, 37(4):533-540

模拟酸雨对土壤呼吸影响的研究进展

冯继广^{1*}, 宋彦君^{2,3}

(1. 中国人民大学 环境学院, 北京 100872; 2. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海 200241;
3. 浙江天童森林生态系统国家野外科学观测研究站, 浙江 宁波 315114)

摘要: 土壤呼吸是陆地生态系统与大气环境之间进行碳交换的主要途径, 在全球碳循环和碳平衡中占有极其重要的地位。全球变化背景下, 由于人类活动而导致日益严重的酸雨问题, 其对土壤呼吸的影响越来越受到国内外学者的广泛关注。酸雨导致土壤酸化, 对土壤微生物代谢活动、植物地上地下生长以及凋落物分解等产生影响, 进而影响土壤呼吸。该文综述了模拟酸雨对森林生态系统和农田生态系统土壤呼吸影响的三种结果, 即抑制、促进和无影响; 酸雨影响土壤呼吸的差异受到酸雨酸性、酸雨处理持续时间以及植被类型、植物生长季节、植被演替阶段以及土壤理化性质等生物和非生物因素的综合影响。低强度和高强度酸雨都倾向于降低土壤呼吸的温度敏感性(Q_{10})。从影响土壤呼吸的四个关键的生物因子, 即光合作用、凋落物、微生物、根系生物量, 分析了模拟酸雨影响土壤呼吸的潜在机制; 但是酸雨影响土壤呼吸的过程复杂, 使得土壤呼吸对酸雨的部分响应机理仍存在不确定性。在此基础上总结了现有研究存在的不足, 提出了今后需要给予重点关注的四个方面的研究: (1) 不同类型生态系统对酸雨响应的研究; (2) 土壤各组分呼吸对酸雨响应的研究; (3) 模拟酸雨与其他外界因素的共同作用研究; (4) 与土壤呼吸相关的生物因子对酸雨响应的研究。

关键词: 土壤呼吸, 温度敏感性, 森林生态系统, 农田生态系统, 光合作用, 凋落物, 微生物, 根系生物量
中图分类号: Q948.11, S154.1, X17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2017)04-0533-09

A review of the effects of simulated acid rain on soil respiration

FENG Ji-Guang^{1*}, Song Yan-Jun^{2,3}

(1. *School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China*; 2. *School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China*; 3. *Tiantong National Forest Ecosystem Observation and Research Station, Ningbo 315114, Zhejiang, China*)

Abstract: Soil respiration is a major exchange channel of carbon between terrestrial ecosystem and atmospheric environment; it plays a vitally important role in global carbon cycle and carbon balance. Under the background of global change, the issue of acid rain caused by anthropogenic activities has been serious increasingly; and the effects of increased acid rain on soil respiration have attracted increasing attention all over the world in recent years. Acid rain leads to soil acidification, and it then affects the metabolic activity of soil microbes, root growth, and litter decomposition, etc.; which finally affects soil respiration. This paper reviews the progresses of studies on the effects of simulated acid rain on soil respiration in forest and cropland ecosystem, and there are three kinds of results for the effects: depression, promotion, and no effect. The different results are affected by experimental, biological and non-biological factors, including the experimental acidity and du-

收稿日期: 2016-03-21 修回日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41101182) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41101182)].

作者简介: 冯继广(1990-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事森林生态学和全球变化研究, (E-mail) fjj@ruc.edu.cn.

* 通信作者

ration of simulated acid rain, vegetation type, plant growth season, vegetation succession phases, and physical and chemical properties of soil, etc. Both the low and high intensity of acid rain tends to reduce the temperature sensitivity (Q_{10}) of soil respiration. This paper also analyzes the potential mechanisms of how acid rain affects the soil respiration in ecosystem from four key biological factors affecting soil respiration, including photosynthesis, litter, microbes and root biomass. However, the process of the effects of acid rain on soil respiration is complex, leading to some uncertainties of the response mechanism of soil respiration to acid rain. Accordingly, some deficiencies for the current studies are summarized, and then four directions are proposed to be considered in the future study: (1) The studies on the responses of soil respiration to acid rain in different ecosystems; (2) The studies on the responses of different components of soil respiration to acid rain; (3) The studies on the combined effects of acid rain and other external factors; (4) The studies on the responses of biological factors that are relevant to soil respiration to acid rain.

Key words: soil respiration, temperature sensitivity, forest ecosystem, cropland ecosystem, photosynthesis, litter, microbes, root biomass

自 20 世纪 50 年代以来,酸雨已成为当今世界影响人类生存和发展的全球性环境问题 (Menz & Seip, 2004; Wang et al, 2004), 酸雨主要来源于工业生产和汽车尾气等人类活动所排放的大气污染物二氧化硫 (SO_2) 和氮氧化物 (NO_x) (Larssen & Carmichael, 2000; Zhang et al, 2007)。虽然, 20 世纪 90 年代以来一些发达国家的 SO_2 和 NO_x 等酸性气体的排放量得到了控制并有所下降 (Angéli et al, 2009; Reis et al, 2012), 但是在许多发展中国家酸雨依然是十分严重的问题, 中国南方地区已成为继欧美之后的全球第三大酸雨区 (王文兴等, 2009)。酸雨对土壤条件、植物生长、生物多样性等产生了直接或间接的作用, 并对生态系统的结构和功能产生了深刻影响 (Laverman et al, 2001; Ramlall et al, 2015)。作为全球陆地碳循环的重要环节之一, 土壤呼吸对酸雨的响应也引起了国内外学者的广泛关注 (Vanhala et al, 1996; 刘源月等, 2010; Liang et al, 2013)。

土壤呼吸是 CO_2 从陆地生态系统重返大气系统的主要途径 (Schlesinger et al, 2000), 占到陆地生态系统呼吸总量的 60%~90%, 为第二大陆地碳通量 (Raich & Schlesinger, 1992); 其在调节大气 CO_2 浓度和气候等中发挥着至关重要的作用 (Davidson et al, 2002), 在全球碳循环过程中占有非常重要的地位。土壤呼吸即使发生微小的变化, 其对全球碳循环, 尤其是对大气 CO_2 浓度和土壤碳库的变化将产生巨大的影响 (涂利华等, 2009; 梁国华等, 2016a)。因此, 在全球变化背景下, 研究酸沉降条件下各类型生态系统土壤呼吸及其温度敏感性的动态变化, 对于理解全球碳循环过程以及全球碳收支动态具有深远的影响。

目前, 针对酸雨对土壤呼吸的影响, 国内外学者已开展了一系列野外实验研究 (Vanhala et al, 1996; 刘源月等, 2010; 张勇等, 2011; Chen et al, 2012); 但模拟酸雨对土壤呼吸的影响并不相同, 存在抑制、促进和无影响三种情况。酸雨影响土壤呼吸受到多种因素的共同作用, 其内在机制较复杂。为深入探讨酸雨对土壤呼吸的影响过程, 本研究首先对土壤呼吸的组成、温度敏感性的概念及其影响因素做了简要介绍; 然后从土壤呼吸及其温度敏感性两个角度, 综述并分析国内外关于模拟酸雨对生态系统土壤呼吸的影响及其潜在机理方面的相关研究成果, 提出了未来该领域研究需要给予重点关注的几个方面, 以期对相关研究的发展提供借鉴与参考。

1 土壤呼吸及其温度敏感性

1.1 土壤呼吸的组成

土壤呼吸指未经扰动的土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用, 其主要生物源包括根的呼吸、微生物分解有机质的基础呼吸、根际微生物呼吸、植物残体分解以及根分泌物或植物残体对土壤微生物的激发效应 (Kuzakov, 2006)。在实际研究中, 通常可将土壤呼吸较简化地划分为微生物的异养呼吸和根系的自养呼吸 (Kuzakov, 2006; Ruehr & Buchmann, 2010)。这两部分呼吸分别与凋落物及有机质的分解和活根生物量相关 (Kuzakov, 2006)。

1.2 土壤呼吸的影响因素

土壤呼吸是一个复杂的生物学过程, 因时间、空间以及生态系统类型的不同, 其影响因素也各不相同。总体而言, 土壤呼吸受到非生物因子、生物因子

和人类活动 3 个方面因素的综合影响;其中,非生物因子包括土壤温度、湿度、降水以及土壤有机质、氮含量等;生物因子包括植被类型、光合作用、叶面积指数、根系生物量、凋落物以及土壤微生物等;人类活动包括施肥、耕作方式及土地利用变化等(张东秋等,2005;魏书精等,2013)。

1.3 土壤呼吸温度敏感性

土壤呼吸速率对温度变化的响应通常采用温度敏感性指数 Q_{10} 表示,即温度每升高 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸速率所增加的倍数(方精云,2000)。温度敏感性指数是评估土壤碳释放通量与气候变暖间反馈强度的一个关键参数,其影响因素主要包括土壤生物、底物(底物质量和底物供应)和环境因子(温度和水分等)三个方面(Davidson et al,2006;杨庆朋等,2011)。

2 模拟酸雨对土壤呼吸的影响

模拟酸雨对土壤呼吸速率及其温度敏感性的影响各地研究结果存在很大的差异,主要有抑制、促进和无影响三种结果。为便于理解不同类型生态系统土壤呼吸对模拟酸雨响应的差异,根据文献基础,从森林和农田两类生态系统分别讨论酸雨对土壤呼吸速率及其温度敏感性(Q_{10})的影响。

2.1 森林生态系统

作为陆地生态系统的主体,森林生态系统土壤呼吸是全球陆地土壤呼吸的重要组分;此外,森林土壤碳库也是全球碳库的重要组成部分,分别占全球植物碳库和土壤碳库的 86% 和 73%(Post et al,1982;Jenkinson et al,1991),在全球陆地生态系统碳循环中发挥着极其重要的作用。

2.1.1 土壤呼吸 Kelly et al (1984) 研究发现,不同 pH 值酸雨处理间的年均土壤呼吸 CO_2 通量不存在显著差异,其中 pH3.5 酸雨处理的通量($2\ 053\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)稍高于 pH5.7 酸雨处理的通量($1\ 965\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。Sitaula et al (1995) 研究发现,pH 为 2.5~3.0 的酸雨才降低土壤 CO_2 释放量,pH 值较高的酸雨对其没有影响。Vanhala et al (1996) 对芬兰亚寒带森林进行了为期 8 a 的模拟研究,发现酸雨并没有改变土壤微生物多样性,但使得土壤呼吸速率降低了 20%。张勇等(2011)对北亚热带天然次生林的研究表明,低强度(pH=3.5 和 4.5)酸雨对年均土壤呼吸速率没有显著影响,仅高强度(pH=2.5)酸雨显著抑制了土壤呼吸;研究还发现,酸雨影响土壤呼吸存在显

著的季节性差异,在非生长季,低强度的酸雨处理反而促进了土壤呼吸,原因可能是短期内酸雨中硝态氮的施肥作用增加了根系细胞的氮含量,使得根系呼吸加强。Chen et al (2014) 研究发现,酸雨对土壤不同组分呼吸的比例具有影响,高强度(pH=2)的酸雨显著地提高了异养呼吸在总呼吸中的比例;但是不同酸雨处理(pH=4,3 和 2)均未显著改变亚热带天然次生林生长季及年均土壤呼吸速率,这可能与土壤呼吸的竞争和补偿机制有关,即高强度酸雨处理下相对较高的异养呼吸被较低的自养呼吸所抵消。Liang et al (2013) 对南亚热带森林的研究结果表明,酸雨对马尾松林的土壤呼吸没有影响,但显著降低了阔叶林和混交林的土壤呼吸速率;此外,3 种林型土壤呼吸对酸雨的响应敏感性表现出随森林的顺行演替而逐渐增强的趋势,这可能与土壤和凋落物层对酸雨的缓冲能力不同有关。梁国华等(2016a) 研究发现,模拟酸雨抑制了季风林的土壤呼吸,抑制作用随酸雨处理持续时间的延长而愈发显著,但显著性差异仅在湿季表现。

2.1.2 温度敏感性 张勇等(2011) 发现,低强度(pH=4.5 和 3.5)和高强度(pH=3.0)的酸雨都不同程度地降低了土壤呼吸的温度敏感性。梁国华等(2016a) 也得到类似的结果,并且表现出 Q_{10} 值随酸雨酸性的增强而呈现逐渐下降的趋势,即酸性越强对温度敏感性的抑制作用越强。然而,也有研究表明酸雨对土壤呼吸的温度敏感性没有影响。Chen et al (2014) 研究发现,对照组和不同 pH 酸雨处理组土壤总呼吸和异养呼吸的 Q_{10} 均不存在显著的差异。梁国华等(2016b) 也发现,不同酸雨处理均未对南亚热带不同演替阶段下的 3 个林型(针叶林、混交林、阔叶林)产生显著影响;但是,从土壤呼吸速率与 5 cm 深度土壤温度的回归方程系数来看,低强度的酸雨使得阔叶林和混交林的 Q_{10} 值均略有提高,而中强度和高强度的酸雨使其 Q_{10} 值稍有下降。此外,谢小赞等(2009) 研究发现,随着酸雨处理酸性的增强,马尾松和杉木幼苗的 Q_{10} 值均呈现出先增大后减小的抛物线趋势;并推测其原因可能是存在酸度阈值,在达到阈值前土壤呼吸的温度敏感性随着酸雨酸性的增加而增大,超过阈值后则减小。

2.2 农田生态系统

作为全球碳库中最活跃的部分之一,农业生态系统中的土壤碳库变化受到世界各地的广泛关注(陈骥等,2013)。相比于森林和草地等自然生态系

统,农田生态系统除受到自然因素的影响外,还受到较多的人为因素的干扰,使得酸雨对土壤呼吸的影响更为复杂。目前,关于模拟酸雨对农田生态系统土壤呼吸影响的研究并不多见。

2.2.1 土壤呼吸 史艳姝等(2011)研究发现,不同酸雨处理(pH=4、3和2)对冬小麦田以及冬小麦—大豆轮作期的土壤呼吸速率均无显著影响,只有高强度的酸雨(pH=2)明显抑制了大豆田的土壤呼吸速率;反映出酸雨影响土壤呼吸因植物生长季节、酸雨酸性的不同而存在差异。翟晓燕等(2014)对冬小麦—大豆轮作农田的研究表明,模拟酸雨(H^+ 浓度为 $0.016 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$)对作物不同生长时期的土壤呼吸没有显著影响,原因可能与土壤对短期性的外源酸性物质的添加具有缓冲作用有关(Karagatzides et al, 1999),酸雨对土壤呼吸的影响可能体现为长期效应。周迎平(2013)研究发现,模拟酸雨(pH=1)不同程度地提高了冬小麦各生长时期的土壤呼吸速率,使其在全生育期内提高了38.03%,但与对照组间的差异均不显著。Fangueiro et al (2013)得到与此类似的结果,酸雨处理使得土壤 CO_2 排放量稍有增加(11%)。

2.2.2 温度敏感性 在农田生态系统的研究上,酸雨影响土壤呼吸的研究十分有限,对温度敏感性的研究也鲜有报道。翟晓燕等(2014)对冬小麦—大豆轮作农田研究结果表明,对照组和实验组的 Q_{10} 值分别为1.85和1.81,即酸雨处理微弱降低了土壤呼吸的温度敏感性。

综上所述,酸雨对土壤呼吸的影响,一方面受到酸雨酸性及酸雨持续时间等实验处理的影响;另一方面受到植被类型、植物生长季节、植被演替阶段以及土壤理化性质等生物和非生物因素的影响。整合不同研究结果,可以发现短期的、低强度的酸雨并不足以对土壤呼吸产生抑制作用,甚至还可能会促进土壤呼吸,或无显著影响,这可能与土壤对酸雨具有缓冲作用有关;而长期的、高强度的酸雨对土壤呼吸的影响基本都表现为抑制作用,而且酸雨酸性的增强及处理的持续进行抑制作用逐渐增强。与农田生态系统相比,森林生态系统的土壤呼吸更容易受到酸雨处理的影响。对于土壤呼吸的温度敏感性而言,低强度和高强度的酸雨处理都倾向于使得不同类型生态系统的 Q_{10} 值降低。此外,根据大量研究的结果(张勇等,2011;Chen et al, 2012, 2014;翟晓燕等,2014;梁国华等,2015, 2016b),可以发现不同

pH酸雨处理下的土壤呼吸均具有明显的季节差异,即模拟酸雨不影响土壤呼吸的季节动态变化规律,其动态变化依然主要受土壤温度和湿度的支配。

3 酸雨对土壤呼吸影响的潜在机理

在影响土壤呼吸的各种因素中,酸雨主要通过作用于与土壤呼吸相关的生物因子而间接影响土壤呼吸。本研究主要从光合作用、凋落物、微生物、根系生物量四个生物因子,阐述了酸雨影响土壤呼吸的潜在机理。

3.1 地上部分

3.1.1 光合作用 在植物生长期土壤呼吸作用主要受植物生长的控制(Högberg et al, 2002)。作为土壤呼吸的物质来源基础,光合作用在调控植物自养呼吸方面具有重要作用(井艳丽和袁凤辉, 2013)。供应到根系的碳水化合物与光合作用、光合速率与植被根系活性之间具有紧密联系(Szaniawski & Kielkiewicz, 1982;黄湘等, 2011)。光合作用对土壤呼吸有驱动作用,能促进根系和根际微生物活动(Tang et al, 2005;周萍等, 2009);Moyano et al (2007)也发现,光合作用强烈时,植物地下的呼吸作用也旺盛;此外,根系呼吸作用主要依赖于植物地上部分的光合产物对地下部分的分配,而且其呼吸速率与植被净初级生产力(NPP)呈显著正相关关系。酸雨处理会降低植物光合色素含量与组成以及破坏同化组织,对植物的形态结构和生理生化过程造成影响,从而影响植物的光合作用;而且,酸雨对植物光合作用的影响随酸雨酸性、植物种类及其发育阶段等的不同而存在差异(高吉喜等, 1997;付晓萍和田大伦, 2006)。金清等(2009)和周明昆等(2012)研究证实,植物净光合速率随着酸雨处理浓度的增加而下降。因此,在酸雨的作用下,植物光合作用的减弱,可能会间接抑制土壤呼吸。

3.1.2 凋落物 约有70%的土壤呼吸 CO_2 通量来自于凋落物和土壤有机质的分解,凋落物数量及其分解速率在很大程度上影响着土壤呼吸通量(Raich & Schlesinger, 1992; Prescott, 2005; Wan et al, 2007)。凋落物分解是土壤呼吸的重要途径之一,微生物异养呼吸与凋落物分解总量以及土壤可利用有机碳密切相关(Kuzyakov, 2006);土壤微生物活性的降低会导致其分解速率的降低,进而导致凋落物分解产生的 CO_2 减少(Wolters et al, 1991)。洪江华等(2009)

研究发现,酸雨处理减缓了亚热带木荷、马尾松以及青冈叶凋落物的分解速率,而且减缓程度随酸雨酸性增强而增加。马元丹等(2010)、季晓燕等(2013)和 Wu et al (2016)也得到与此类似的研究结果。梁国华等(2016a)研究表明,模拟酸雨减缓了季风林优势树种锥栗叶凋落物的分解速率,从而抑制凋落物 CO₂ 的释放。

3.2 地下部分

3.2.1 微生物 土壤呼吸与土壤有机物的转化和循环密切相关,需要借助于专性微生物的活化才能完成;酸化的土壤由于 H⁺ 的毒害作用,从而改变土壤微生物的种类、结构以及生物活性 (Falappi et al, 1994)。蔡晓明(2000)指出各种微生物都有其最适宜的 pH 范围, pH 过低会对微生物的活性产生抑制作用;而酸雨对土壤呼吸的抑制也主要是通过抑制微生物来实现的(刘可慧等,2005)。研究表明,由于土壤酸化所导致的土壤 pH 值及土壤无机阳离子的变化是影响微生物的两个主要途径(Chen et al, 2015),酸雨对土壤微生物的数量和群落组成具有明显的影响,使土壤中微生物的总量减少,并改变其组成、结构与功能(Lim et al, 2011; Cha et al, 2013; Liang et al, 2013; Xu et al, 2015)。此外,酸雨还会对土壤中相关酶的活性产生影响,进而影响微生物的代谢活动;刘源月等(2010)研究发现,酸雨不同程度地降低了与土壤微生物活性以及碳循环相关的土壤纤维素酶的活性;Chen et al (2015)研究发现土壤微生物呼吸的减弱与关键的细胞外参与分解的微生物酶的活性或表达的降低有关;张萍华等(2005)研究发现,酸雨对脲酶有明显的抑制作用,并且随着酸雨酸性的增强而愈加明显。微生物活动的减弱一方面会降低土壤有机质的矿化和分解速率,从而抑制土壤 CO₂ 的释放;另一方面也会抑制凋落物的分解速率,导致微生物分解凋落物所产生的 CO₂ 量减少(Liang et al, 2013)。吴建平等(2015)和梁国华等(2016a)研究证实,模拟酸雨加剧了酸性森林土壤的酸化;同时也降低了土壤微生物量碳氮的含量,抑制了土壤微生物活性及其异养呼吸。Xu et al (2016)研究发现,酸雨处理使得微生物量碳含量和土壤呼吸都显著降低,而这种降低作用与微生物群落结构和功能尤其是真菌生物量的下降密切相关。

3.2.2 根系生物量 植物根系代谢活动产生的 CO₂ 是土壤呼吸的重要组成部分,占土壤总呼吸的 10%~90% (Hanson et al, 2000; Lee et al, 2003);而

且土壤呼吸与根系生物量呈现正相关关系(Bauhus et al, 1998; Jia et al, 2006; Davidson et al, 2006)。酸雨的累积效应导致养分淋溶,同时可以直接改变植物对氮的可利用性,长期营养损耗将抑制植物的生长,进而影响植物的根系生物量(Oene, 1992; Baba et al, 1995; Rousk et al, 2010)。根系生物量的减少极有可能会减弱根系 CO₂ 排放(Kuzyakov, 2006)。Cheplick(1993)研究证实,随酸雨酸性增加根系生物量下降。Chen et al (2012)研究发现,酸雨处理降低了表层土壤(0~7 cm)的根系生物量,土壤呼吸速率也表现出与此相同的下降趋势。Chen et al (2014)研究发现,酸雨处理降低了根系生物量,但是差异并不显著;但是可以看出其土壤呼吸速率与根系生物量基本具有一致性。Liang et al (2013)研究表明,酸雨对土壤呼吸的抑制作用与酸雨处理所导致的根系生物量和微生物活力下降有关。然而,酸雨处理改变了禾本类植物群落结构,引起其地下生物量和地下与地上部生物量比的增加,从而促进了根系呼吸(Chen et al, 2015)。

综上所述,酸雨影响土壤呼吸的过程与机制比较复杂,但其影响可以概括为两个方面:一是长期酸雨处理导致土壤发生酸化,对微生物的活性、结构与功能以及土壤中相关酶的活性产生抑制作用,使得微生物的代谢活动及其对凋落物的分解作用减弱,从而抑制土壤呼吸。二是酸雨处理对植物生长产生抑制作用,导致植物根系生物量的减少,使得根系呼吸减弱,进而降低土壤总呼吸。

4 问题与展望

目前,虽然国内外在模拟酸雨影响土壤呼吸研究上取得了一些成果,但是酸雨对土壤呼吸的影响比较复杂,使得酸雨对其生理与生态过程的部分影响机理仍存在不确定性。因此,深入探讨酸雨对土壤呼吸的影响过程与机理并以此预测其对全球碳循环的影响仍将是今后的研究重点。综合已有文献,指出了现有研究的不足,并提出了未来需要给予重点关注的研究内容。

4.1 不同类型生态系统对酸雨响应的研究

目前,模拟酸雨对土壤呼吸影响的研究主要集中在森林生态系统,部分涉及到农田生态系统;而对于草地(Chen et al, 2015)和湿地等生态系统的研究极少。对于森林生态系统的研究,森林类型以亚热

带森林最多,而关于热带、温带、寒带森林几乎没有涉及;农田生态系统中已对冬小麦田、大豆田等有所研究,而对全球分布比较广泛的水稻田、玉米田等却很少涉及。不同类型生态系统以及不同植被类型下的土壤呼吸都存在差异,其对酸雨的反应也会因生物和非生物因子的不同而存在差异。因此,开展长期的野外原位监测,研究酸雨对不同类型生态系统及植被下土壤呼吸及其温度敏感性的影响,将有助于理解陆地生态系统土壤碳释放的响应机制,从而为全球和区域生态模型的构建与发展提供基础的数据与理论支持。

4.2 土壤各组分呼吸对酸雨响应的研究

土壤呼吸包括自养呼吸和异养呼吸,不同组分呼吸的控制因子不同。自养呼吸和异养呼吸及其 Q_{10} 对氮素添加、模拟增温等具有不同的响应(Zhou et al, 2014; Wang et al, 2014)。因此,土壤不同组分呼吸对酸雨的反应可能也存在差异。目前仅有个别研究(Chen et al, 2012, 2014, 2015)将土壤呼吸的不同组分进行区分。此外,在温度敏感性方面,现有研究侧重于简单分析酸雨处理对 Q_{10} 值的影响,而对其影响机制未做详细阐述。然而,准确区分土壤各组分呼吸对于了解土壤呼吸机理及其估算土壤碳储量具有重要意义(井艳丽和袁凤辉, 2013)。只有更深入地研究土壤各组分呼吸及其温度敏感性对酸雨的反应机制,才能更好地理解土壤呼吸对酸雨的反应过程,在更大尺度上预测土壤呼吸对酸雨的反应趋势及其对全球碳收支机制的影响。

4.3 模拟酸雨与其他因素的共同作用研究

在酸沉降背景下,也同时伴随着气候变暖、 CO_2 浓度升高、氮沉降以及降水格局的改变等全球变化过程,它们都会对土壤呼吸产生影响。现有的研究更多是探讨单一因素即不同pH酸雨处理对土壤呼吸的影响,而很少和其它全球变化因素相结合。增温将会促进陆地生态系统的土壤呼吸(Wang et al, 2014),而酸雨处理又将抑制土壤呼吸;在增温与酸雨交互作用下,土壤呼吸将发生何种变化依旧不清楚。因此,今后可考虑开展模拟酸雨与其他因素(如增温、增雨、减雨、施氮、 CO_2 浓度升高)共同作用的研究,以探讨他们对土壤呼吸的交互影响机制,这将有利于揭示全球变化背景下的土壤碳排放的变化趋势与规律。

4.4 与土壤呼吸相关的生物因子对酸雨响应的研究

现有研究更多地是集中探讨酸雨作用下土壤呼

吸的年际、季节和日变化,而对于与土壤呼吸密切相关的其他生物因子却鲜有涉及。光合作用、根系生物量、凋落物、微生物碳氮量等作为影响土壤呼吸的主要生物因子,其对模拟酸雨的反应与土壤呼吸的反应之间存在着什么样的关系,仍不清楚。因此,探讨与土壤呼吸相关的其他因子对模拟酸雨的反应,将有助于从机理上理解土壤呼吸对模拟酸雨的反应过程。在今后研究中,还需要对根系生物量、凋落物、微生物以及土壤酶活性等进行同步测定,以使研究结果能够更好揭示酸雨影响土壤呼吸的机制。

参考文献:

- ANGÉLI N, DAMBRINE E, BOUDOT JP, et al, 2009. Evaluation of streamwater composition changes in the Vosges Mountains (NE France): 1955–2005 [J]. *Sci Total Environ*, 407(14): 4378–4386.
- BABA M, OKAZAKI M, HASHITANI T, 1995. Effect of acidic deposition on forested andisols in the Tama hill region of Japan [J]. *Environ Poll*, 89(1): 97–106.
- BAUHUS J, PARE D, COTE L, 1998. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 30(8): 1077–1089.
- CAI XM, 2000. *Ecology of ecosystem* [M]. Beijing: Science Press. [蔡晓明, 2000. 生态系统生态学 [M]. 北京: 科学出版社.]
- CHA S, LIM SM, AMIRASHEBA B, et al, 2013. The effect of simulated acid rain on microbial community structure in decomposing leaf litter [J]. *J Ecol Environ*, 36(4): 223–233.
- CHEN DM, WANG Y, LAN ZC, et al, 2015. Biotic community shifts explain the contrasting responses of microbial and root respiration to experimental soil acidification [J]. *Soil Biol Biochem*, 90: 139–147.
- CHEN J, CAO JJ, LIU Y, et al, 2013. Research progress and prospect of nitrogen fertilization on soil respiration [J]. *Grassl Turf*, 33(6): 87–93. [陈骥, 曹军骥, 刘玉, 等, 2013. 氮素添加对土壤呼吸影响的研究进展 [J]. *草原与草坪*, 33(6): 87–93.]
- CHEN ST, SHEN XS, HU ZH, et al, 2012. Effects of simulated acid rain on soil CO_2 emission in a secondary forest in subtropical China [J]. *Geoderma*, 189–190(6): 65–71.
- CHEN ST, ZHANG X, LIU YF, et al, 2014. Simulated acid rain changed the proportion of heterotrophic respiration in soil respiration in a subtropical secondary forest [J]. *Appl Soil Ecol*, 86: 148–157.
- CHEPLICK GP, 1993. Effect of simulated acid rain on the mutualism between tall fescue (*Festuca arundinacea*) and an endophytic fungus (*Acremonium coenophialum*) [J]. *Int J Plant*, 154(1): 134–143.
- DAVIDSON EA, JANSSENS IA, LUO YQ, 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} [J]. *Glob Change Biol*, 12(2): 154–164.
- DAVIDSON EA, SAVAGE K, VERCHOT LV, et al, 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of

- soil respiration [J]. *Agr For Meteorol*, 113(1-4): 21-37.
- FALAPPI D, FARINI A, RANALLI G, et al, 1994. Effects of simulated acid rain on some microbiological parameters of subacid soil [J]. *Chemosphere*, 28(6): 1087-1095.
- FANG JY, TANG YH, LIN JD, et al, 2000. *Global ecology: climate change and ecological response* [M]. Beijing: China Higher Education Press. [方精云. 2000. 全球生态学. 气候变化与生态响应 [M]. 北京: 高等教育出版社.]
- FANGUEIRO D, SURGY S, COUTINHO J, et al, 2013. Impact of cattle slurry acidification on carbon and nitrogen dynamics during storage and after soil incorporation [J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 176(4): 540-550.
- FU XP, TIAN DL, 2006. Research progress of the effect of acid rain on plant [J]. *J NW For Univ*, 21(4): 23-27. [付晓萍, 田大伦, 2006. 酸雨对植物的影响研究进展 [J]. 西北林学院学报, 21(4): 23-27.]
- GAO JX, PAN FY, ZHOU XB, 1997. Effects of SO₂ on plant metabolism (II): Effects on photosynthesis, respiration and nutrient material metabolism [J]. *Res Environ Sci*, 10(6): 5-9. [高吉喜, 潘风云, 周兴宝, 1997. 二氧化硫对植物新陈代谢的影响(II)—对光合、呼吸与物质代谢的影响 [J]. 环境科学研究, 10(6): 5-9.]
- HANSON PJ, EDWARDS NT, GARTEN CT, et al, 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations [J]. *Biogeochemistry*, 48(1): 115-146.
- HÖGBERG P, NORDGREN A, ÅGREN GI, 2002. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest [J]. *Oecologia*, 132(4): 579-581.
- HONG JH, JIANG H, MA YD, et al, 2009. The influence of acid rain on the leaf litter decomposition of three dominant trees in the subtropical forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 29(10): 5246-5251. [洪江华, 江洪, 马元丹, 等, 2009. 模拟酸雨对亚热带典型树种凋落物分解的影响 [J]. 生态学报, 29(10): 5246-5251.]
- HUANG X, LI WH, MA JX, et al, 2011. Influence of photosynthesis on soil respiration rates for *Populus euphratica* in different light conditions in arid environments [J]. *J Des Res*, 31(5): 1167-1173. [黄湘, 李卫红, 马建新, 等, 2011. 通过改变光热条件分析胡杨群落光合作用对土壤呼吸速率的影响 [J]. 中国沙漠, 31(5): 1167-1173.]
- JENKINSON DS, ADAMS DE, WILD A, 1991. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming [J]. *Nature*, 351(6324): 304-306.
- JI XY, JIANG H, HONG JH, et al, 2013. The influence of acid rain on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests [J]. *Acta Sci Circum*, 33(7): 2027-2035. [季晓燕, 江洪, 洪江华, 等, 2013. 模拟酸雨对亚热带三个树种凋落叶分解速率及分解酶活性的影响 [J]. 环境科学学报, 33(7): 2027-2035.]
- JIA B, ZHOU G, WANG F, et al, 2006. Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biol Biochem*, 38(4): 653-660.
- JIN Q, JIANG H, YU SQ, et al, 2009. Research on the growth and photosynthesis of typical seedlings in subtropical regions under acid rains tress [J]. *Acta Ecol Sin*, 29(6): 3322-3327. [金清, 江洪, 余树全, 等, 2009. 酸雨胁迫对亚热带典型树种幼苗生长与光合作用的影响 [J]. 生态学报, 29(6): 3322-3327.]
- JING YL, YUAN FH, 2013. Research advance on responses of soil respiration to nitrogen deposition [J]. *World For Res*, 26(4): 25-32. [井艳丽, 袁凤辉, 2013. 氮沉降对土壤呼吸影响研究进展 [J]. 世界林业研究, 26(4): 25-32.]
- KARAGATZIDES JD, HUTCHINSON TC, SAGER EPS, et al, 1999. The impact of simulated acid rain and fertilizer application on a mature sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) forest in central Ontario Canada [J]. *Water Air Soil Poll*, 109(1-4): 17-39.
- KELLY JM, STRICKLAND RC, 1984. CO₂ efflux from deciduous forest litter and soil in response to simulated acid rain treatment [J]. *Water Air Soil Poll*, 23(4): 431-440.
- KUZZYAKOV Y, 2006. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biol Biochem*, 38(3): 425-448.
- LARSEN T, CARMICHAEL GR, 2000. Acid rain and acidification in China: The importance of base cation deposition [J]. *Environ Poll*, 110(1): 89-102.
- LAVERMAN AM, ZOOMER HR, VERHOEF HA, 2001. The effect of oxygen, pH and organic carbon on soil-layer specific denitrifying capacity in acid coniferous forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 33(4-5): 683-687.
- LEE MS, NAKANE K, NAKATSUBO T, et al, 2003. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperate deciduous forest [J]. *Plant Soil*, 255(1): 311-318.
- LIANG GH, LIU XZ, CHEN XM, et al, 2013. Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern China [J]. *PLoS ONE*, 8(4): e62207.
- LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al, 2015a. Responses of soil pH value and soil microbial biomass carbon and nitrogen to simulated acid rain in three successional subtropical forests at Dinghushan Nature Reserve [J]. *Ecol Environ Sci*, 24(6): 911-918. [梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等, 2015a. 鼎湖山不同演替阶段森林土壤 pH 值和土壤微生物量碳氮对模拟酸雨的响应 [J]. 生态环境学报, 24(6): 911-918.]
- LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al, 2016a. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan Nature Reserve [J]. *Guihai*, 36(2): 145-153. [梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等, 2016a. 模拟酸雨对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸的初期影响. 广西植物, 36(2): 145-153.]
- LIANG GH, WU JP, XIONG X, et al, 2016b. Response of soil respiration to simulated acid rain in three successional subtropical forests in southern China [J]. *Chin J Ecol*, 35(1): 125-134. [梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等, 2016b. 南亚热带不同演替阶段森林土壤呼吸对模拟酸雨的响应 [J]. 生态学杂志, 35(1): 125-134.]
- LIM SM, CHA SS, SHIM JK, 2011. Effects of simulated acid rain on microbial activities and litter decomposition [J]. *J Ecol Field Biol*, 34(4): 401-410.
- LIU KH, PENG SL, MO JM, et al, 2005. The process and mechanism of rain deposition upon forest plants [J]. *Ecol Environ Sci*, 14(6): 953-960. [刘可慧, 彭少麟, 莫江明, 等, 2005. 酸沉降对森林植物影响过程和机理 [J]. 生态环境学报, 14(6): 953-960.]
- LIU YY, JIANG H, LI YH, 2010. A short-term effect of simulated acid rain on the soil respiration of the compound system of Chinese fir seedling-soil [J]. *Acta Ecol Sin*, 30(8): 2010-

2017. [刘源月, 江洪, 李雅红, 等, 2010. 模拟酸雨对杉木幼苗-土壤复合体系土壤呼吸的短期效应 [J]. 生态学报, 30(8): 2010-2017.]
- MA YD, JIANG H, YU SQ, et al, 2010. Effects of simulated acid rain on the decomposition of *Phyllostachys pubescens* [J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 49(2): 95-99. [马元丹, 江洪, 余树全, 等, 2010. 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), 49(2): 95-99.]
- MENZ FC, SEIP HM, 2004. Acid rain in Europe and the United States: an update [J]. Environ Sci Pol, 7(4): 253-265.
- MOYANO FE, KUTSCH WL, SCHULZE ED, 2007. Response of mycorrhizal, rhizosphere and soil basal respiration to temperature and photosynthesis in a barley field [J]. Soil Biol Biochem, 39: 843-853.
- OENE VH, 1992. Acid deposition and forest nutrient imbalance: A modeling approach [J]. Water Air Soil Poll, 63(1): 33-50.
- PENNANEN TH, VANHALA P, KIIKKILA O, et al, 1998. Structure of a microbial community in soil after prolonged addition of low levels of simulated acid rain [J]. Appl Environ Microbiol, 64(6): 2173-2180.
- POST WM, EMANUEL WR, ZINKE PJ, et al, 1982. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 298(5870): 156-159.
- PRESCOTT CE, 2005. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know? [J]. For Ecol Manage, 220(1-3): 66-74.
- RAICH JW, SCHLESINGER WH, 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. Tellus, 44(2): 81-99.
- RAMLALL C, VARGHESE B, RAMDHANI S, et al, 2015. Effects of simulated acid rain on germination, seedling growth and oxidative metabolism of recalcitrant-seeded *Trichilia dregeana* grown in its natural seed bank [J]. Physiol Plant, 153(1): 149-160.
- REIS S, GRENNFELT P, KLIMONT Z, et al, 2012. From acid rain to climate change [J]. Science, 338(338): 1153-1154.
- ROUSK J, BROOKES PC, BÅÅTH E, 2009. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization [J]. Appl Environ Microbiol, 75(6): 1589-1596.
- RUEHR NK, BUCHMANN N. 2010. Soil respiration fluxes in a temperate mixed forest: seasonality and temperature sensitivities differ among microbial and root-rhizosphere respiration [J]. Tree Physiol, 30(2): 165-176.
- SHI YS, CHEN ST, HU ZH, et al, 2011. Effects of simulated acid rain on soil respiration, nitrification and denitrification in a winter wheat-soybean rotation cropland [J]. J Agro-Environ Sci, 30(12): 2503-2510. [史艳姝, 陈书涛, 胡正华, 等, 2012. 模拟酸雨对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸、硝化和反硝化作用的影响 [J]. 农业环境科学学报, 30(12): 2503-2510.]
- SITAULA BK, BAKKEN LR, ABRAHAMSEN G, 1995. N-fertilization and soil acidification effects on N₂O and CO₂ emission from temperate pine forest soil [J]. Soil Biol Biochem, 27(11): 1401-1408.
- SZANIAWSKI RK, KIELKIEWICZ M, 1982. Maintenance and growth respiration in shoots and roots of sunflower plants grown at different root temperatures [J]. Physiol Plant, 54(4): 500-504.
- TANG JW, BALDOCCHI DD, XU LK, 2005. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale [J]. Global Change Biol, 11(8): 1298-1304.
- TU LH, HU TX, HUANG LH, et al, 2009. Response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in *Pleioblastus Amarus* forest, rainy area of west China [J]. Chin J Plant Ecol, 33(4): 728-738. [涂利华, 胡庭兴, 黄立华, 等, 2009. 华西雨屏区苦竹林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应 [J]. 植物生态学报, 33(4): 728-738.]
- VANHALA P, FRITZE H, NEUVONEN S, 1996. Prolonged simulated acid rain treatment in the subarctic: Effect on the soil respiration rate and microbial biomass [J]. Biol Fert Soils, 23(1): 7-14.
- WAN SQ, NORBY RJ, LEDFORD J, et al, 2007. Responses of soil respiration to elevated CO₂, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland [J]. Glob Change Biol, 13(11): 2411-2424.
- WANG JQ, WU JB, LI RZ, et al, 2004. Research development and some problems discuss on acid rain in China [J]. Adv Water Sci, 15(4): 526-530.
- WANG WX, 2009. Research progress in precipitation chemistry in China [J]. Progr Chem, 21(Z1): 266-281. [王文兴, 许鹏举, 2009. 中国大气降水化学研究进展 [J]. 化学进展, 21(Z1): 266-281.]
- WANG X, LIU LL, PIAO SL, et al, 2014. Soil respiration under climate warming: differential response of heterotrophic and autotrophic respiration [J]. Glob Change Biol, 20(10): 3229-3237.
- WEI SJ, LUO BZ, SUN L, et al, 2013. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: A review [J]. Ecol Environ Sci, 22(4): 689-704. [魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等, 2013. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展 [J]. 生态环境学报, 22(4): 689-704.]
- WILL ME, GRAETZ DA, ROOF BS, 1986. Effect of simulated acid precipitation on soil microbial activity in a typic quartzipsamment [J]. J Environ Qual, 15(4): 399-403.
- WOLTERS V, 1991. Effects of acid rain on leaf-litter decomposition in a beech forest on calcareous soil [J]. Biol Fert Soils, 11(2): 151-156.
- WU JP, LIANG GH, HUI DF, et al, 2016. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in Southern China [J]. Sci Total Environ, 544: 94-102.
- WU JP, LIANG GH, XIONG X, et al, 2015. Effects of simulated acid rain on soil microbial biomass carbon and total organic carbon in a monsoon evergreen broadleaved forest at the Dinghushan Nature Reserve [J]. Acta Ecol Sin, 35(20): 6686-6693. [吴建平, 梁国华, 熊鑫, 等, 2015. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应 [J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6686-6693.]
- XIE XZ, JIANG H, YU SQ, et al, 2009. Effect of simulated acid rain on soil respiration of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Acta Ecol Sin, 29(10): 5713-5720. [谢小赞, 江洪, 余树全, 等, 2009. 模拟酸雨胁迫对马尾松和杉木幼苗土壤呼吸的影响 [J]. 生态学报, 29(10): 5713-5720.]
- XU HQ, ZHANG JE, OUYANG Y, et al, 2015. Effects of simulated acid rain on microbial characteristics in a lateritic red soil [J]. Environ Sci Poll Res, 22(22): 18 260-18 266.
- YANG QP, MING XU, LIU HS, et al, 2011. Impact factors and (下转第 496 页 Continue on page 496)