

# 酸雨对土壤呼吸的影响机制研究进展与展望<sup>①</sup>

刘自强<sup>1</sup>, 危 晖<sup>1,2,3,4</sup>, 章家恩<sup>1,2,3,4\*</sup>, 郭 靖<sup>1</sup>, 李登峰<sup>1</sup>

(1 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2 农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 3 广东省现代农业生态学与循环农业工程技术研究中心, 广州 510642; 4 广东省生态循环农业重点实验室, 广州 510642)

**摘 要:** 土壤呼吸是陆地生态系统与大气之间进行碳交换的主要途径, 其动态变化直接影响着全球碳平衡。由于人类活动的影响, 酸雨成为人类当前面临的最严重的生态环境问题之一, 但其对土壤呼吸的影响及其机理尚无定论。本文综述了不同生态系统土壤呼吸对酸雨的响应特征, 多数文献表明, 高强度的酸雨抑制土壤呼吸, 而在低强度的酸雨作用下土壤呼吸的响应存在差异。从影响土壤呼吸的 4 个关键生物因子, 即光合作用、微生物、凋落物和根系生物量, 重点讨论了酸雨对土壤呼吸的影响机制。在此基础上, 提出了以下研究展望: 开展土壤呼吸对不同组成类型酸雨的响应研究; 开展与土壤碳排放相关的功能微生物对酸雨的响应研究; 开展不同物候期土壤呼吸对酸雨的响应研究; 开展土壤呼吸各过程对酸雨的响应研究; 建立全球酸雨地区土壤碳排放监测研究网络。

**关键词:** 酸雨; 土壤呼吸; 影响机制

中图分类号: S154.1 文献标识码: A

酸雨是指 pH<5.6 的雨水, 也包括雪、雾、霰等其他形式的酸性降水, 也称作酸沉降, 其包括湿沉降(酸雨、酸雪、酸雾、酸霰、酸雹)和干沉降(含硫氧化物、氮氧化物、氯氧化物)等气体酸性物<sup>[1]</sup>。酸雨是当今世界最严重的生态环境问题之一, 我国是继欧洲、北美之后世界第三大酸雨区, 酸雨区面积已达到国土面积的 40%, 华中、华南、西南及华东地区的酸雨最为严重, 长江以南地区为全球强酸雨中心, 长江中下游以南地区 50% 以上的面积降水年均 pH<4.5, 为酸雨重度污染区<sup>[2]</sup>, 其中广州 2012—2016 年 5 a 的降水年均 pH 为 5.25, 酸雨年均频率最高达 40.6%。酸雨对植物生长、土壤性质、生态系统的结构和功能以及人类健康等会产生直接或间接的影响。随着我国经济建设、工业化和城市化的快速发展, 酸雨面积还在进一步扩大, 其危害也在进一步加深<sup>[3]</sup>。

土壤呼吸是 CO<sub>2</sub> 从陆地生态系统重返大气的主要途径, 全球每年由土壤释放的 CO<sub>2</sub> 量高达 68 ~ 98 Pg C, 仅次于植物总光合作用的 100 ~ 120 Pg C<sup>[4]</sup>, 占陆地生态系统呼吸总量的 60% ~ 90%, 为陆地生态系统最大的碳排放通量<sup>[5]</sup>。因此, 土壤呼吸速率相对

微小的改变极有可能会显著改变大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度, 从而影响全球气候系统的稳定。近年来, 酸雨对土壤呼吸的影响已经受到广泛关注, 其潜在的作用机制得到了大量的研究, 已取得了一定的成果<sup>[6-8]</sup>, 酸雨通过影响土壤 pH、土壤养分等非生物因子以及光合作用、微生物、凋落物、根系生物量等生物因子对土壤呼吸产生影响。但土壤呼吸过程比较复杂, 其潜在的响应机理仍然存在极大的不确定性。因此, 研究酸雨污染背景下土壤呼吸的变化特征, 明确其潜在的响应机制, 能为预测当前全球变化背景下生态系统碳循环的动态变化提供理论基础, 也能为制定合理的酸雨防控措施提供科学依据。为了深入探讨酸雨对土壤呼吸的影响机制, 本文查阅了近 30 a 来相关研究文献, 从影响土壤呼吸的 4 个关键生物因子, 即光合作用、微生物、凋落物和根系生物量, 综合分析酸雨对土壤呼吸的作用机制, 并对该方面未来的研究领域进行了展望, 以期后续相关研究提供借鉴与参考。

## 1 酸雨对土壤呼吸的影响效应

土壤呼吸是指未扰动的土壤中产生 CO<sub>2</sub> 的所有

基金项目: NSFC-广东联合基金项目(U1701236)、国家自然科学基金项目(31500401)、广东省科技计划项目(2015B090903077、2015A020215021)和珠江科技新星项目(201506010042)资助。

\* 通讯作者(jeanzh@scau.edu.cn)

作者简介: 刘自强(1993—), 男, 湖北通城人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学等方面研究。E-mail: liuziqiang0201@163.com

代谢过程,通常包括 3 个生物学过程(根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸)和 1 个非生物学过程(含碳物质的化学氧化作用)。由于土壤动物呼吸和化学氧化过程占土壤总呼吸的比例较小,可忽略不计<sup>[9]</sup>。根据不同的呼吸来源,土壤呼吸可分为自养呼吸和异养呼吸,其大小及变化主要取决于呼吸底物的供应和环境条件(例如温度和水分)。酸雨对土壤呼吸

的影响主要受植被、气候和酸雨特征的影响,包括生态系统类型、植被类型、生长季节、演替阶段、酸雨酸性等,因此,其结果也各不相同,即可能产生抑制、促进或无影响 3 种结果。表 1 综合了已有研究中有关酸雨对土壤呼吸的影响结果,从表中可以看出,酸雨对土壤呼吸影响的研究主要集中在森林和农田生态系统。

表 1 酸雨对土壤呼吸的影响  
Table 1 Effects of acid rain on soil respiration

生态系统	气候类型	植被类型	演替时间	酸雨 pH	影响结果	参考文献
森林	亚热带季风气候	马尾松针叶林	约 60 a	4.0/3.5/3.0	-	[10-11]
		马尾松针阔混交林	约 100 a	4.0/3.5/3.0	-	[10]
		季风常绿阔叶林	约 400 a	4.0/3.5	-	[10-13]
				3.0	↓	
	亚热带季风气候	马尾松针阔混交林	约 100 a	4.0/3.5	-	[11, 14]
				3.3/3.0/2.5	↓	
	亚热带湿润季风气候	针阔混交林	20~50 a	4.0/3.0/2.0	-	[7, 15-17]
	亚热带湿润季风气候	天然落叶阔叶次生林		4.5/3.5	-	[18-19]
				2.5	↓	
	亚热带季风气候	乐东拟单性木兰/秃瓣杜英		4.0/2.5	-	[20]
		青冈		4.0	-	
				2.5	↑	
		杉木幼苗		4.0	-	[21-22]
				2.5	↓	
			马尾松幼苗		4.0	↓
			2.5	↑		
亚热带湿润季风气候	马尾松针叶林	约 60 a	4.4/4.0/3.5	↑	[23]	
			3.1	↓		
		季风常绿阔叶林	约 400 a	4.4/4.0/3.5	↑	
			3.1	↓		
极地气候	松桦混交林		4.0/3.0	-	[24]	
农田	亚热带湿润季风气候	冬小麦、大豆		4.0/3.0/2.0/1.0	-	[25-27]
		冬小麦、大豆		2.0	↓	[28]
		冬小麦		1.0	↑	[29]
		大豆			↓	
	亚热带海洋季风气候	水稻		4.5/3.5	↓	[30]
草原	半干旱大陆性气候	根茎禾草和丛生禾草		3.3	↓	[31]

注: ↑: 显著升高; ↓: 显著降低; -: 无显著影响。

在对森林生态系统的研究中,以亚热带地区为主,而对热带、温带、寒带森林的研究极少。张勇等<sup>[18]</sup>对北亚热带天然次生林的研究发现,在非生长季,酸雨不仅不影响土壤呼吸速率,其中 pH 3.5 和 4.5 的酸雨处理反而会促进土壤呼吸;而在生长季,高强度(pH 2.5)酸雨显著抑制了土壤呼吸作用,但 pH 3.5 和 4.5 的酸雨不影响土壤呼吸速率。pH 3.0、3.5 和 4.0 的酸雨对南亚热带马尾松(*Pinus massoniana*)针叶林的土

壤呼吸没有显著影响,但显著降低了针阔叶混交林和季风常绿阔叶林的土壤呼吸速率,并且 3 个林型土壤呼吸对酸雨的响应敏感性随森林的顺行演替而增强,这可能与土壤层和凋落物层(凋落物量减少)对酸雨的缓冲能力不同有关<sup>[11]</sup>。另外, pH 3.0、3.5 和 4.0 的酸雨对季风常绿阔叶林土壤呼吸的抑制作用随处理时间的延长而逐渐显著,且抑制作用的显著性差异只出现在湿季<sup>[13]</sup>。而谢小赞等<sup>[22]</sup>研究发现,在 pH 2.5

的模拟酸雨处理下,马尾松幼苗的土壤呼吸速率升高了 14%,其原因可能是马尾松根系短期内对酸雨有一定的耐受性,并且酸雨中  $\text{NO}_3^-$  的施肥作用增加了马尾松根系细胞的氮含量,使得地下部的土壤呼吸速率加强。综上所述,高强度的酸雨多抑制森林土壤呼吸,而低强度的酸雨对土壤呼吸无显著影响。

在农田生态系统中,对作物类型的研究还仅仅局限于冬小麦和大豆,而对全球分布较为广泛的水稻、玉米等很少涉及。pH 2.0、3.0 和 4.0 的模拟酸雨均未显著影响冬小麦田以及冬小麦-大豆轮作生长季的农田土壤呼吸,但高强度酸雨(pH = 2.0)显著降低了大豆田土壤呼吸速率和  $\text{CO}_2$  产生速率<sup>[27]</sup>。翟晓燕等<sup>[25]</sup>对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的研究也得到了类似的结果,即酸雨(pH 1.0)仅在大豆生长季抑制其土壤呼吸速率,而对冬小麦田的土壤呼吸速率无显著影响;周迎平<sup>[32]</sup>的研究也发现,从全生育期来看,酸

雨(pH 1.0)并未显著改变冬小麦和大豆田土壤  $\text{CO}_2$  通量,其原因可能是不同作物-土壤系统对酸雨具有很强的缓冲能力。

综上所述,短期、低强度的酸雨并未显著抑制土壤呼吸,反而会促进土壤呼吸,其原因可能为:土壤层和凋落物层对酸雨具有一定的缓冲能力;地上部植物或作物系统对酸雨也具有一定的耐受性和缓冲性能。而长期、高强度的酸雨对土壤呼吸大多表现为抑制作用。

## 2 酸雨对土壤呼吸的影响机制

土壤呼吸是一系列极为复杂的生物化学过程共同作用的结果,这些过程会受到非生物因素、生物因素和人为活动等多方面的影响(表 2)。其中,非生物因素包括土壤温度、湿度、土壤质地以及土壤有机质、氮含量等环境和土壤特征;生物因素包括生

表 2 影响土壤呼吸的因素  
Table 2 Factors affecting soil respiration

影响因素	因子	土壤呼吸和因子的关系	参考文献
非生物因素	土壤温度	指数回归关系	[7, 11, 14]
	土壤湿度	直线回归关系	[11, 14, 33]
	土壤 pH	pH 降低会抑制土壤呼吸	[11, 14, 31]
	土壤电导率	负相关关系	[30]
	土壤质地	土壤质地会影响有机碳分解速率,进而影响土壤呼吸	[34-35]
	基质供应	正相关关系	[34, 36]
	土壤 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 等盐基离子	盐基离子的可利用性降低会导致植物生物量以及地上部生产力降低,进而降低土壤呼吸	[31]
生物因素	土壤理化性质	土壤理化性质不同,土壤呼吸强度就不一样	[23, 37]
	生态系统类型	生态系统不同,土壤呼吸对酸雨的响应敏感性不同	[14, 27, 38]
	植被类型	植被不一样,对应的土壤呼吸速率就不一样	[37, 39-41]
	植物多样性	植物种类增加会使土壤呼吸强度上升	[42]
	演替阶段	土壤呼吸对酸雨的响应敏感性随顺行演替而增强	[10-11]
	生长季	不同生长季土壤呼吸对酸雨胁迫会表现出不同的响应方式	[20, 25]
	光合作用	正相关关系	[38, 43]
	凋落物	土壤呼吸速率与凋落物量之间具有显著的线性关系	[44]
	根系生长状态	土壤呼吸与根系生物量之间呈正相关关系	[8, 11, 45]
	土壤微生物	土壤呼吸与土壤微生物呼吸之间呈正相关关系	[7, 31, 37, 46]
人类活动	施肥	施肥对土壤呼吸的影响尚无定论	[47-48]
	耕作方式	耕作后土壤 $\text{CO}_2$ 的排放增加	[47]
	林火	火干扰后森林土壤呼吸速率降低	[48]
	土地利用变化	草地开垦、放牧和森林砍伐一般加速土壤呼吸过程,复垦则降低土壤呼吸速率	[47, 49]

态系统类型、植被类型、植物特性(如光合作用、凋落物生产以及根系生长状态等)和土壤微生物等;人为活动主要包括施肥、耕作方式、林火以及土地利用变化等因素。

土壤作为酸雨的重要承载体,对酸雨具有一定的缓冲能力。同时,酸雨进入土壤后,会改变土壤的理化性质,最终导致土壤酸化、土壤板结<sup>[50]</sup>、土壤通气性降低,这些土壤理化性质的变化可能会影响土壤中 CO<sub>2</sub> 向空气中的扩散与排放。另外,土壤酸化会对土壤微生物代谢活动、植物地上地下部生长以及凋落物分解等产生影响,这些生物因素的变化强烈地影响着土壤呼吸作用的强度和动态变化<sup>[51-52]</sup>。下面主要从光合作用、微生物、凋落物和根系生物量 4 个方面重点讨论酸雨对土壤呼吸的影响过程及其潜在机制。

### 2.1 光合作用

酸雨对植物的形态结构及生理生化过程都会产生明显影响(图 1)。酸雨会破坏植物叶表面的蜡质和角质层,损害植物的表皮结构,酸性物质通过气孔或表皮扩散进入植物体内,叶肉细胞结构被破坏,叶绿体逐渐解体<sup>[53]</sup>,细胞质膜透性增大, Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、

K<sup>+</sup> 等阳离子被酸雨淋洗出来<sup>[54]</sup>,导致叶片叶绿素含量下降,叶片褪绿变淡,产生黄褐色伤斑<sup>[53,55]</sup>,使光合速率下降。光合作用作为植物-土壤系统的主要基质来源,其强弱在很大程度上影响着植物根系活性<sup>[56]</sup>:光合速率降低会引起根系活性下降,从而降低根系自养呼吸,导致土壤呼吸速率减小。酸雨也会影响植物的单叶长、单叶重以及叶面积指数等。相关研究报道,重庆铁山坪酸雨区受害马尾松的单叶长、单叶重以及叶面积指数均低于健康的马尾松林<sup>[57]</sup>,而土壤呼吸与叶面积指数存在显著的正相关关系<sup>[58]</sup>。因此,叶面积指数降低可能最终导致土壤呼吸强度减弱。也有研究表明,酸雨会降低叶片气孔导度以及蒸腾速率。例如,木芙蓉(*Hibiscus mutabilis*)的气孔导度以及蒸腾速率均随模拟酸雨 pH 的降低而降低<sup>[59]</sup>,使得光合作用暗反应受阻,导致光合作用产物合成受阻,而根系呼吸作用主要依赖于植物地上部分光合产物对地下部分的分配<sup>[38]</sup>,分配到根系中的光合产物约 75% 被呼吸消耗掉<sup>[52]</sup>,并且土壤呼吸主要来自于新近合成的光合产物<sup>[43]</sup>,因此光合产物合成受阻可导致土壤呼吸 CO<sub>2</sub> 的排放量减少。

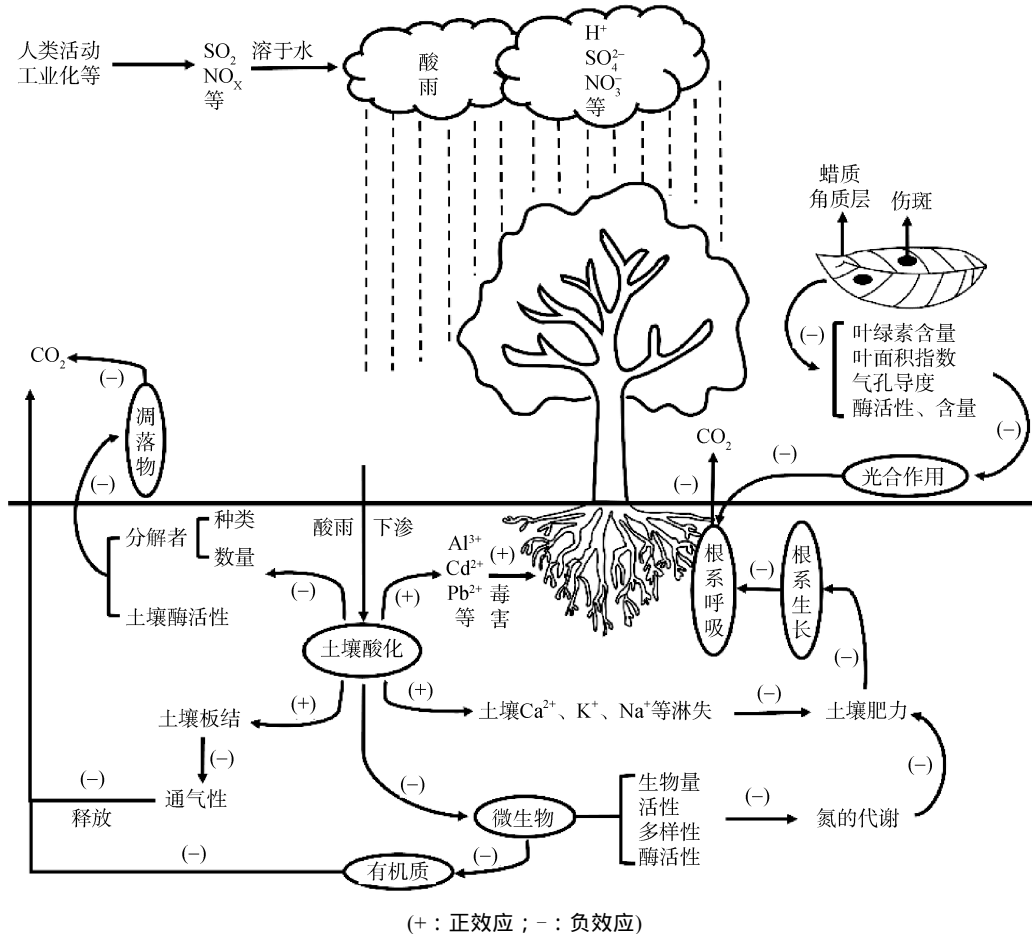


图 1 酸雨对土壤呼吸的影响  
Fig.1 Effects of acid rain on soil respiration

在酸雨胁迫下, Hill 反应速率和叶绿体膜上  $Mg^{2+}$ -ATPase 的活性均会显著降低, 从而抑制光化学反应, 使光合电子传递速率降低, 继而抑制整个光能转换过程, 致使光合作用受阻<sup>[60]</sup>。光合作用强度直接影响根系碳水化合物供应量<sup>[61]</sup>, 而碳水化合物供应量会显著影响自养呼吸速率<sup>[62]</sup>。此外, 光合作用强度决定根系分泌物产量<sup>[63]</sup>, 而根系分泌物是根际微生物的主要碳源<sup>[64]</sup>, 分泌物中的可溶性糖是根际菌根和微生物呼吸的底物<sup>[65]</sup>, 因此, 光合作用受阻会导致土壤呼吸受到抑制。酸雨还会打破植物体内活性氧(ROS)代谢系统的平衡, 破坏和降低活性氧清除酶系统(包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD))的活性以及含量, 导致活性氧含量增加<sup>[66]</sup>, 而高浓度的 ROS 会引起脂质、蛋白、核酸等生物大分子的氧化损伤甚至细胞死亡<sup>[67]</sup>, 使叶片结构遭受破坏, 光合作用减弱, 土壤呼吸底物供应量降低, 从而降低土壤呼吸速率。总体而言, 酸雨会破坏和改变叶片特征, 降低植物叶片光合作用强度, 从而减少自养呼吸活性和异养呼吸的基质供应, 最终降低土壤总呼吸速率。

## 2.2 微生物

土壤微生物是土壤有机质的主要分解者, 微生物呼吸占土壤总呼吸的 52.1%<sup>[68]</sup>, 因此, 微生物在土壤呼吸中起着至关重要的作用。酸雨对土壤微生物的影响主要体现在两个方面: 酸雨会加速土壤酸化, 降低土壤 pH, 增加土壤容重, 导致土壤环境恶化, 降低土壤微生物量<sup>[12, 31, 69]</sup>(图 1), 从而抑制土壤呼吸<sup>[31]</sup>;

酸雨会改变土壤微生物群落结构<sup>[31, 70-71]</sup>, 抑制微生物活性<sup>[13]</sup>(图 1), 使土壤有机物的分解速率降低<sup>[23]</sup>, 进而可导致土壤  $CO_2$  的排放量减少。

在部分生态系统中, 由土壤藻类等微生物生长引起的土壤生物结皮现象对土壤呼吸过程也具有一定的调节作用。生物结皮是由蓝细菌、藻类、地衣以及苔藓等微生物与表层土壤颗粒复合作用形成的共同体<sup>[72]</sup>, 它是土壤与大气之间的一个界面层, 可以通过光合固碳作用增加土壤碳累积量<sup>[73]</sup>, 土壤藻类作为生物结皮中最重要的形成生物, pH 下降导致土壤藻类种类和数量减少后, 可能使生物结皮生物量降低, 进而影响土壤呼吸过程中  $CO_2$  的排放。但由于生物结皮的结构复杂, 加上土壤呼吸的影响因素众多, 因此目前关于生物结皮对土壤呼吸的影响尚无定论, 不同气候区和不同类型生物结皮的研究结果不尽相同。例如, 在内蒙古科尔沁沙地和黄土高原的不同侵蚀区, 苔藓结皮和藻结皮对土壤呼吸有明显的抑制

作用, 进而降低土壤  $CO_2$  排放<sup>[74-75]</sup>, 但在毛乌素沙地东北部, 藻结皮会促进土壤呼吸<sup>[76]</sup>。因此, 进一步研究不同生态系统中土壤结皮的主要微生物类群对酸雨的响应, 有利于深入理解酸雨对这些生态系统中土壤呼吸产生影响的过程与相关机制。

酸雨影响土壤微生物量、改变土壤微生物群落结构和抑制微生物活性的原因可能包括以下几个方面:

每种微生物都有其最适宜的 pH 范围, pH 过低会对土壤微生物产生抑制作用。例如, 细菌适宜生长在中性和偏碱性的环境中, 放线菌在酸性环境中生长不良, 但真菌在酸性环境中数量会有所增加, 而种类会减少<sup>[1]</sup>。研究表明, 随着酸雨 pH 的下降, 细菌、放线菌数量呈下降趋势, 而真菌的数量随 pH 的降低先升高后下降, 由于细菌是土壤微生物中数量最多的一个类群, 因此土壤微生物量随模拟酸雨 pH 的降低而不断减少<sup>[77]</sup>。另外, pH 下降会导致土壤藻类的种类和数量明显减少<sup>[78]</sup>, 而土壤藻类能为其他土壤微生物的生长提供营养, 因此, 土壤藻类生物量的减少会导致土壤微生物生物量的降低<sup>[79]</sup>; 酸雨导致土壤酸化, 使土壤中重金属和 Al 等有害元素活化<sup>[69]</sup>, 对土壤微生物产生毒性<sup>[80]</sup>, 铝毒效应还会引起植物根系生物量减少, 根际微生物生长受到一定抑制, 微生物量相应减少<sup>[12]</sup>; 酸雨的酸化累积效应会加速  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  和  $Mg^{2+}$  等营养元素流失, 导致微生物可利用的营养源减少<sup>[69]</sup>; 酸雨会抑制脱氢酶和过氧化氢酶的活性, 脱氢酶存在于微生物细胞内, 其活性大小直接反映出土壤微生物的数量和活性, 而土壤过氧化氢酶能促进过氧化氢的分解, 进而减少对生物体有害的过氧化氢<sup>[77]</sup>。总体而言, 酸雨会减少土壤微生物量, 降低微生物活性, 使土壤呼吸强度减弱, 进而导致土壤  $CO_2$  排放减少。

## 2.3 凋落物

凋落物是土壤呼吸的重要碳源, 凋落物对全球森林生态系统土壤呼吸的平均贡献率为 33%, 并且森林土壤呼吸速率与凋落物量之间具有显著的线性关系<sup>[44]</sup>。凋落物对土壤呼吸的贡献主要源于两部分, 一是凋落物分解产生的  $CO_2$ , 二是新鲜凋落物的输入激活土壤中原有有机质的分解, 即“激发效应”<sup>[64, 81]</sup>。全球每年由土壤呼吸释放的  $CO_2$  中约有 50 Pg C 来自于凋落物和土壤有机质分解<sup>[82]</sup>。凋落物分解包括淋洗、机械破碎、土壤腐食动物的消化和腐生营养微生物对有机物的酶解等过程<sup>[83]</sup>。凋落物的分解速率受内在因素和外在因素的共同影响, 内在因素即凋落物自身的理化性质, 其中凋落物 C/N、木质素含量是影响凋落物分

解速率的重要因素,低 C/N 更易于凋落物分解<sup>[84]</sup>,但酸雨如何影响凋落物中的营养元素含量,以及凋落物的离子含量变化与酸雨之间的相互作用机理还不明确。外在因素则包括生物因子和非生物因子,而生物因子是主导因子,对凋落物分解起直接作用,生物因子即是指参与分解的土壤微生物<sup>[85]</sup>和土壤动物<sup>[86]</sup>。在凋落物分解过程中,前期以土壤动物贡献最大,后期以微生物为主<sup>[87]</sup>。有研究表明,凋落物分解速率的大小与土壤微生物数量的多少、酶活性的强弱以及营养元素含量变化规律基本一致<sup>[88]</sup>。酸雨导致土壤酸化后,使凋落物分解者(土壤动物和微生物)的种类和数量减少<sup>[89]</sup>,土壤微生物活性降低<sup>[13]</sup>,土壤酶活性降低<sup>[31]</sup>(图 1),最终导致凋落物的分解速率降低,土壤 CO<sub>2</sub> 通量减小<sup>[90]</sup>。

#### 2.4 根系生物量

研究发现 植物根系呼吸占土壤呼吸总量的 10%~90%,并且土壤呼吸和根系生物量之间呈显著的正相关关系<sup>[45]</sup>。酸雨会降低土壤肥力<sup>[77]</sup>,并抑制根系对土壤营养物质的吸收<sup>[31]</sup>,导致植物根系生长受阻,根系生物量下降<sup>[70, 91]</sup>(图 1)。Liang 等<sup>[11]</sup>和 Chen 等<sup>[8]</sup>研究发现,酸雨处理均降低了植物根系生物量,并且土壤呼吸速率也表现出相同的下降趋势。

酸雨抑制根系对土壤营养物质吸收的原因可能为:土壤酸化使土壤中重金属和 Al 等有害元素活化<sup>[69]</sup>,其中活化的 Al 会抑制植物根尖伸长,阻碍植物根系对营养物质的吸收,抑制植株根系生长<sup>[92]</sup>;

酸雨胁迫下,根系生长促进型激素(生长素(IAA)、赤霉素(GA)、玉米素(ZT))含量显著降低,抑制型激素(脱落酸(ABA))含量显著增加,IAA/ABA、GA/ABA 和 ZT/ABA 均下降,导致细胞代谢活动减弱,使根系细胞分裂和伸长受到抑制<sup>[93]</sup>,根长、根表面积、根体积和根鲜重明显下降,不利于根系吸收水分和营养元素<sup>[94]</sup>;酸雨使植物细胞内 H<sup>+</sup> 积存引发活性氧过量积累,膜脂过氧化加剧,质膜损伤引起膜上 H<sup>+</sup>-ATPase 构象发生变化,导致 H<sup>+</sup>-ATPase 活性显著降低<sup>[95]</sup>,无法为营养元素的吸收提供足够的质子驱动力<sup>[94]</sup>,次级运输能力降低,导致营养元素很难跨膜进入细胞<sup>[96]</sup>。

综上所述,酸雨对土壤呼吸的影响可主要概括为两个方面:长期的酸雨作用导致土壤酸化,微生物群落结构发生改变,微生物生物量减少,土壤酶活性降低,微生物的代谢活动及其对凋落物的分解作用受到抑制,从而使土壤呼吸速率降低;酸雨通过影响植物的生理生化过程,对植物地上地下部生长产生抑制作用,使光合作用受阻,根系生物量降低,导致根

系呼吸强度减弱,最终降低土壤总呼吸速率。

### 3 研究展望

由于酸雨对土壤呼吸过程的影响与机制比较复杂,目前的研究主要集中在单一类型酸雨对土壤呼吸的单一过程或单一组分的影响,而任何单一方面的研究结果均可能掩盖其他方面和土壤呼吸过程的作用规律。因此,开展不同类型酸雨对土壤呼吸的全方位、多过程、长期性的影响过程及其内在机制研究将是今后的重点领域之一(图 2)。

#### 3.1 开展土壤呼吸对不同类型酸雨的响应研究

酸雨可分为硫酸型、混合型和硝酸型酸雨,不同酸性离子来源不同,其对土壤呼吸过程的影响也不尽相同。由于我国经济发展以煤炭为主要燃料,煤炭燃烧产生的 SO<sub>2</sub> 是目前主要的致酸物质,当前我国酸雨以硫酸型酸雨为主,但有向混合型酸雨转变的趋势<sup>[2]</sup>。酸雨的组成类型发生改变后,对土壤呼吸的影响势必有所不同,因此,加强开展不同组成类型的酸雨对土壤呼吸的影响过程及其内在机制研究,可为开展不同区域酸雨组成变化背景下碳排放(土壤呼吸)的动态变化预测提供科学依据。

#### 3.2 加强与碳排放相关的土壤功能微生物对酸雨的响应研究

微生物参与全球碳排放的大部分过程,微生物介导碳的生物地球化学循环,并在生态系统碳循环中发挥关键作用,但目前的研究主要集中在微生物介导碳循环对气候变暖/CO<sub>2</sub> 升高的影响上,而与碳循环相关的微生物群落以及功能基因对酸雨响应和反馈机制的研究很少,因此,可采用宏基因组技术,如高通量测序和 GeoChip,从基因水平研究酸雨对参与碳循环过程相关的微生物功能基因的影响,对深入揭示酸雨对土壤呼吸作用的影响,以及建立酸雨-土壤微生物-碳排放-气温升高模型提供必要的科学依据。

#### 3.3 开展不同物候期的土壤呼吸对酸雨的响应研究

在不同物候期,植物的覆盖状况、形态结构、生理代谢过程及强度、土壤理化性质等都会发生变化,这些因素均不同程度地影响土壤呼吸的大小和过程,因此,在不同的物候期,植物-土壤系统对酸雨的缓冲能力及由此引起的土壤呼吸过程也势必发生相应的变化,而目前有关不同物候期,土壤呼吸如何响应酸雨而变化的动态规律及其潜在机理尚不明晰,相关研究还较少,因此,今后的研究,需要把不同植物物候期、酸雨和土壤呼吸过程与效应结合起来研究,相关研究结果将有助于弄清在植物覆盖条件下土壤呼

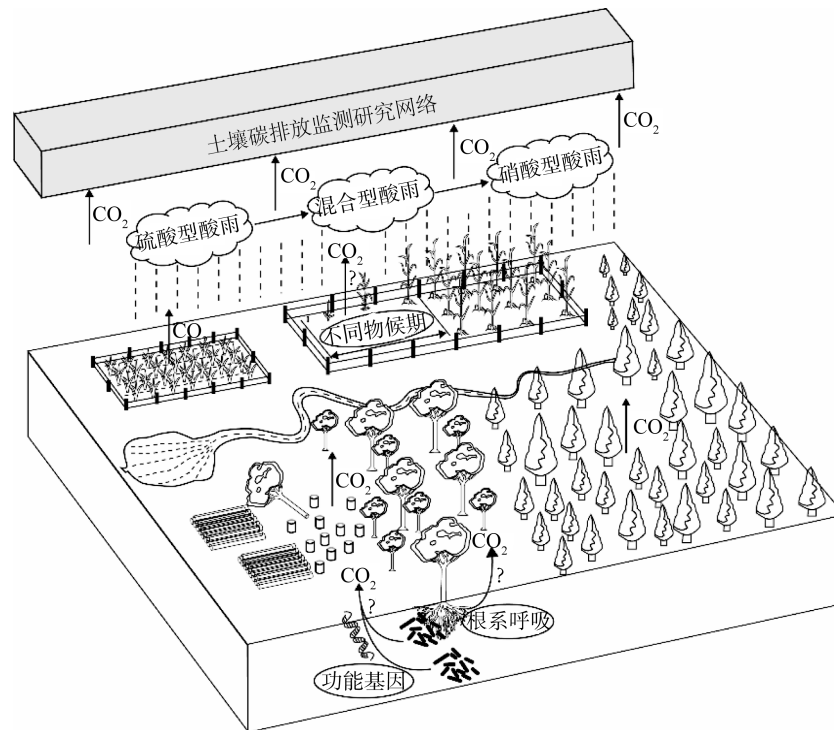


图 2 酸雨对土壤呼吸作用影响的研究展望

Fig. 2 Research prospect for effects of acid rain on soil respiration

吸对酸雨的响应规律和内在机理,以便在更大的时空尺度上预测未来全球气温的变化趋势与规律。

### 3.4 加强土壤呼吸各相关过程对酸雨的响应研究

目前,有关土壤呼吸各个过程对酸雨的响应及其内在机制的研究并不多,主要原因在于精确地区分不同的呼吸组分过程在实验和技术上仍是一个难点。例如,将根系呼吸从土壤呼吸中精确分离出来的方法很多,包括组分综合法、根系分离测定法、根生物量外推法和根移出法等,但均存在明显的缺陷。因此,探索、改进土壤呼吸各组分的区分方法及其测定技术手段,加强土壤呼吸各组分与过程对酸雨响应的研究仍将是今后研究的一个重要内容。

### 3.5 建立全球酸雨地区的碳排放监测研究网络

目前,全球有关酸雨监测的站点以及研究机构很多,涉及多种生态系统、植被类型、演替阶段和气候条件,也积累了大量的数据资料,存在着很大的时空异质性,但目前尚缺乏全球酸雨发生地区的横向比较研究。因此,亟需加强全球大尺度酸雨地区的联网监测及其对比研究,利用多尺度、多因素、多过程、多途径的综合分析等手段以及模型数据融合方法,分析全球尺度下土壤呼吸对酸雨的综合响应特征及其时空动态变化规律,该方面的研究结果将为科学评估酸雨背景下全球不同类型生态系统中的碳排放动态及其对全球气候变化的影响风险提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 5-11
- [2] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532
- [3] 吴丹, 王式功, 尚可政. 中国酸雨研究综述[J]. 干旱气象, 2006, 24(2): 70-77
- [4] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464(7288): 132-579
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 1992, 44(2): 81-99
- [6] Wang C, Guo P, Han G, 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]. Science of the Total Environment, 2010, 408(13): 2706-2713
- [7] 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 等. 模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1235-1244
- [8] Chen S, Shen X, Hu Z, et al. Effects of simulated acid rain on soil CO<sub>2</sub> emission in a secondary forest in subtropical China[J]. Geoderma, 2012, 189: 65-71
- [9] 邓琦, 刘世忠, 刘菊秀, 等. 南亚热带森林凋落物对土壤呼吸的贡献及其影响因素[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 976-986

- [10] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 南亚热带不同演替阶段森林土壤呼吸对模拟酸雨的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(1): 125–134
- [11] Liang G, Liu X, Chen X, et al. Response of soil respiration to acid rain in forests of different maturity in southern China[J]. *PLoS One*, 2013, 8(4): e622074
- [12] 吴建平, 梁国华, 熊鑫, 等. 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影响[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6686–6693
- [13] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 模拟酸雨对鼎湖山季风常绿阔叶林土壤呼吸的初期影响[J]. 广西植物, 2016, 36(2): 145–153
- [14] Liang G, Hui D, Wu X, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration and its components in a subtropical mixed conifer and broadleaf forest in southern China[J]. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 2016, 18(2): 246–255
- [15] 刘义凡. 模拟酸雨对亚热带次生林土壤碳氮循环关键过程的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015
- [16] 沈小帅. 模拟酸雨对天然次生林土壤呼吸的影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012
- [17] Chen S, Zhang X, Liu Y, et al. Simulated acid rain changed the proportion of heterotrophic respiration in soil respiration in a subtropical secondary forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 86: 148–157
- [18] 张勇, 王连喜, 陈书涛, 等. 模拟酸雨对北亚热带天然次生林土壤呼吸的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1541–1547
- [19] 张勇. 北亚热带林带和农田土壤呼吸及环境影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011
- [20] 刘源月, 江洪, 李雅红, 等. 模拟酸雨对亚热带阔叶树苗土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 563–569
- [21] 刘源月, 江洪, 李雅红, 等. 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, 2010, 30(8): 2010–2017
- [22] 谢小赞, 江洪, 余树全, 等. 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, 2009, 29(10): 5713–5720
- [23] Ouyang X, Zhou G, Huang Z, et al. Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4): 503–514
- [24] Vanhala P, Fritze H, Neuvonen S. Prolonged simulated acid rain treatment in the subarctic: Effect on the soil respiration rate and microbial biomass[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, 23(1): 7–14
- [25] 翟晓燕, 陈书涛, 刘义凡, 等. 增温及模拟酸雨对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12): 2381–2388
- [26] 翟晓燕. 增温及模拟酸雨对农田土壤碳氮循环关键过程的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015
- [27] 史艳妹, 陈书涛, 胡正华, 等. 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, 2011, 30(12): 2503–2510
- [28] 张旭. 增温及模拟酸雨对农田土壤呼吸及酶活性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016
- [29] 刘艳. 模拟增温对农田土壤呼吸、硝化及反硝化作用的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013
- [30] 安婉丽, 曾从盛, 王维奇. 模拟酸雨对福州平原水稻田温室气体排放的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 3984–3994
- [31] Chen D, Wang Y, Lan Z, et al. Biotic community shifts explain the contrasting responses of microbial and root respiration to experimental soil acidification[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2015, 90: 139–147
- [32] 周迎平. 模拟增温和酸雨对冬小麦-大豆旱作农田 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013
- [33] Arredondo T, Delgado-Balbuena J, Huber-Sannwald E, et al. Does precipitation affects soil respiration of tropical semiarid grasslands with different plant cover types?[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 218–225
- [34] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2): 273–284
- [35] Wei H, Guenet B, Vicca S, et al. High clay content accelerates the decomposition of fresh organic matter in artificial soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 77: 100–108
- [36] Wei H, Chen X, Xiao G, et al. Are variations in heterotrophic soil respiration related to changes in substrate availability and microbial biomass carbon in the subtropical forests?[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 18370
- [37] Wei H, Xiao G, Guenet B, et al. Soil microbial community composition does not predominantly determine the variance of heterotrophic soil respiration across four subtropical forests[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 7854
- [38] Kuzyakov Y, Gavrichkova O. Review: Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: A review of mechanisms and controls[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(12): 3386–3406
- [39] Han G, Xing Q, Luo Y, et al. Vegetation types alter soil respiration and its temperature sensitivity at the field scale in an estuary wetland[J]. *PLoS One*, 2014, 9(3): e91182
- [40] 马和平, 郭其强, 李江荣, 等. 色季拉山 4 种林型土壤呼吸及其影响因子[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 253–260
- [41] 李典鹏, 姚美思, 韩东亮, 等. 新疆达坂城盐湖不同植物群落土壤呼吸研究[J]. 土壤, 2017, 49(3): 621–629
- [42] Liu M, Xia H, Fu S, et al. Tree diversity regulates soil respiration through accelerated tree growth in a mesocosm experiment[J]. *Pedobiologia*, 2017, 65: 24–28
- [43] Han G, Luo Y, Li D, et al. Ecosystem photosynthesis regulates soil respiration on a diurnal scale with a short-term time lag in a coastal wetland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68: 85–94
- [44] Wang Q, He T, Wang S, et al. Carbon input manipulation affects soil respiration and microbial community composition in a subtropical coniferous forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 178: 152–160



- [45] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry* (Dordrecht), 2000, 48(1): 115–146
- [46] Wei H, Guenet B, Vicca S, et al. Thermal acclimation of organic matter decomposition in an artificial forest soil is related to shifts in microbial community structure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 71: 1–12
- [47] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778–785
- [48] 魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 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*, 2013, 22(4): 689–704
- [49] 郑永红, 张治国, 胡友彪, 等. 煤矿复垦重构土壤呼吸季节变化特征及其环境影响因子[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(11): 2300–2306
- [50] 凌大炯, 章家恩, 黄倩春, 等. 模拟酸雨对砖红壤盐基离子迁移和释放的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(3): 444–450
- [51] Högborg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. *Nature* (London), 2001, 411(6839): 789–792
- [52] Högborg P, Nordgren A, Agren G I. Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest[J]. *Oecologia*, 2002, 132(4): 579–581
- [53] 黄继山, 温文保, 蔺万煌, 等. 酸雨对树木叶细胞伤害的模拟研究[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(2): 219–224
- [54] 黄晓华, 陆天虹, 周青, 等. 酸雨伤害植物机理与稀土调控研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(3): 121–123
- [55] Lee Y, Park J, Im K, et al. Arabidopsis leaf necrosis caused by simulated acid rain is related to the salicylic acid signaling pathway[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44(1): 38–42
- [56] 黄湘, 李卫红, 马建新, 等. 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*, 2011, 31(5): 1167–1173
- [57] 孙亚琴. 模拟酸雨对夹竹桃生理特性的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010
- [58] Bahn M, Rodeghiero M, Anderson-Dunn M, et al. Soil respiration in European grasslands in relation to climate and assimilate supply[J]. *Ecosystems*, 2008, 11(8): 1352–1367
- [59] 王应军, 邓仕槐, 姜静, 等. 酸雨对木芙蓉幼苗光合作用及抗氧化酶活性的影响[J]. *核农学报*, 2011, 25(3): 588–593, 581
- [60] 王妮敏, 严丹丹, 邹华, 等. 酸雨和铅对大豆幼苗光合作用的复合影响[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(5): 331–334
- [61] Baldocchi D, Tang J, Xu L. How switches and lags in biophysical regulators affect spatial-temporal variation of soil respiration in an oak-grass savanna[J]. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2006, 111(G2): G2008
- [62] Szaniawski R K, Kielkiewicz M. Maintenance and growth respiration in shoots and roots of sunflower plants grown at different root temperatures[J]. *Physiologia Plantarum*, 1982, 54(4): 500–504
- [63] Yu J Q, Ye S F, Zhang M F, et al. Effects of root exudates and aqueous root extracts of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals, on photosynthesis and antioxidant enzymes in cucumber[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2003, 31(2): 129–139
- [64] Crow S E, Lajtha K, Bowden R D, et al. Increased coniferous needle inputs accelerate decomposition of soil carbon in an old-growth forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(10S1): 2224–2232
- [65] Merbach W, Mirus E, Knof G, et al. Release of carbon and nitrogen compounds by plant roots and their possible ecological importance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1999, 162(4): 373–383
- [66] Gabara B, Sklodowska M, Wyrwicka A, et al. Changes in the ultrastructure of chloroplasts and mitochondria and antioxidant enzyme activity in *Lycopersicon esculentum* Mill. leaves sprayed with acid rain[J]. *Plant Science*, 2003, 164(4): 507–516
- [67] 张梦如, 杨玉梅, 成蕴秀, 等. 植物活性氧的产生及其作用和危害[J]. *西北植物学报*, 2014, 34(9): 1916–1926
- [68] Wang Q, Yu Y, He T, et al. Aboveground and belowground litter have equal contributions to soil CO<sub>2</sub> emission: An evidence from a 4-year measurement in a subtropical forest[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421(1/2): 7–17
- [69] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 等. 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*, 2015, 24(6): 911–918
- [70] Rousk J, Brookes P C, Baath E. Contrasting soil pH effects on fungal and bacterial growth suggest functional redundancy in carbon mineralization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(6): 1589–1596
- [71] Liu X, Zhou J, Li W, et al. The combined effects of urea application and simulated acid rain on soil acidification and microbial community structure[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(10): 6623–6631
- [72] Belnap J. The world at your feet: Desert biological soil crusts[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, 1(4): 181–189
- [73] Grote E E, Belnap J, Housman D C, et al. Carbon exchange in biological soil crust communities under differential temperatures and soil water contents: Implications for global change[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2763–2774
- [74] 王爱国, 赵允格, 许明祥, 等. 黄土丘陵区不同演替阶段生物结皮对土壤 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 659–666
- [75] 李玉强, 赵哈林, 赵玮, 等. 生物结皮对土壤呼吸的影响作用初探[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 106–109
- [76] 齐玉春, 董云社, 金钊, 等. 生物结皮对内蒙古沙地灌丛草地土壤呼吸特征的影响[J]. *地理科学*, 2010, 30(6): 898–903
- [77] 张萍华, 申秀英, 许晓路, 等. 酸雨对白木土壤微生物及酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2005(2): 227–229

- [78] 梁春芳, 刘方, 卜通达, 等. 黔中煤矿区矸石堆场周边土壤藻类群落变化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2011, 30(2): 304–310
- [79] 叶华勋, 兰利琼, 卿人韦, 等. 土壤藻类对植物生长影响的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 950–956
- [80] Fan H B, Wang Y H. Effects of simulated acid rain on germination, foliar damage, chlorophyll contents and seedling growth of five hardwood species growing in China[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 126(3): 321–329
- [81] Liu X, Lin T, Yang Z, et al. Increased litter in subtropical forests boosts soil respiration in natural forests but not plantations of *Castanopsis carlesii*[J]. Plant and Soil, 2017, 418(1/2): 141–151
- [82] Raich J W, Potter C S, Bhagawati D. Interannual variability in global soil respiration, 1980–1994[J]. Global Change Biology, 2002, 8(8): 800–812
- [83] Facelli J M, Pickett S T A. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure[J]. The Botanical Review, 1991, 57(1): 1–32
- [84] 吕富成, 王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(2): 225–231
- [85] Cha S, Lim S M, Amirasheba B, et al. The effect of simulated acid rain on microbial community structure in decomposing leaf litter[J]. Journal of Ecology and Environment, 2013, 36(4): 223–233
- [86] 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
- [87] 李志安, 邹碧, 丁永祯, 等. 森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 77–83
- [88] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 44–51
- [89] 任来阳, 于澎湃, 刘霞, 等. 重庆酸雨区马尾松与木荷的叶凋落物分解特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(2): 246–250
- [90] Wan S, Norby R J, Ledford J, et al. Responses of soil respiration to elevated CO<sub>2</sub>, air warming, and changing soil water availability in a model old-field grassland[J]. Global Change Biology, 2007, 13(11): 2411–2424
- [91] Liu X, Zhao W, Meng M, et al. Comparative effects of simulated acid rain of different ratios of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> to NO<sub>3</sub><sup>-</sup> on fine root in subtropical plantation of China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 336–346
- [92] Kochian L V, Pineros M A, Hoekenga O A. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity[J]. Plant and Soil, 2005, 274(1/2): 175–195
- [93] Fu X D, Harberd N P. Auxin promotes Arabidopsis root growth by modulating gibberellin response[J]. Nature, 2003, 421(6924): 740–743
- [94] Zhu Y, Di T, Xu G, et al. Adaptation of plasma membrane H<sup>+</sup>-ATPase of rice roots to low pH as related to ammonium nutrition[J]. Plant Cell and Environment, 2009, 32(10): 1428–1440
- [95] Liu E, Liu C. Effects of simulated acid rain on the antioxidative system in *Cinnamomum philippinense* seedlings[J]. Water Air and Soil Pollution, 2011, 215(1/2/3/4): 127–135
- [96] 吴玺, 梁婵娟. 模拟酸雨对水稻根系激素含量与生长的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(3): 568–574

## Effects of Acid Rain on Soil Respiration and Underlying Mechanisms: A Review

LIU Ziqiang<sup>1</sup>, WEI Hui<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Jiaen<sup>1,2,3,4\*</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>, LI Dengfeng<sup>1</sup>

(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China; 2 Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510642, China; 3 Guangdong Provincial Engineering Center for Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China; 4 Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-circular Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Soil respiration is the greatest carbon fluxes from terrestrial ecosystem to the atmosphere, and therefore any tiny changes in soil respiration could result in great impact on the global carbon balance. Due to anthropogenic activities, acid rain has been one of the most serious environmental problems, but its impacts on soil respiration and the underlying mechanisms remain inconclusive. This paper reviewed the responses of soil respiration to acid rain in different ecosystems, summarized and discussed the underlying mechanisms by which acid rain changes soil respiration. Results showed that strong acid rain suppressed soil respiration, while medium and low acids did not alter soil respiration consistently across studies. Four important biological factors including photosynthesis process, microbial communities, litter decomposition and root-productivity were discussed in details. Moreover, further studies in regard to acid rain effects on soil respiration could highlight in these aspects as listed below: 1) how different types of acid rain would affect soil respiration; 2) how acid rain would affect functional microbes and related genes involving the terrestrial C cycling; 3) whether soil respiration at different plant phenological stages would respond similarly to acid rain; 4) how different soil respiration components and related processes (e.g., autotrophic and heterotrophic soil respiration) would respond differently to acid rain; and 5) a global monitoring network should be established to further understand effects of acid rain on soil respiration across climatic zones and ecosystems in the acid rain affected areas.

**Key words:** Acid rain; Soil respiration; Controlling factors