

DOI: 10.5846/stxb202110202959

刘丰彩, 杨燕华, 江军, 俞梦笑, 夏诗婷, 闫俊华, 王应平. 酸雨对中国陆地生态系统土壤呼吸影响的整合分析. 生态学报, 2022, 42(24): 10191-10200.

Liu F C, Yang Y H, Jiang J, Yu M X, Xia S T, Yan J H, Wang Y P. Effects of acid rain on soil respiration in Chinese terrestrial ecosystems: A meta-analysis. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10191-10200.

酸雨对中国陆地生态系统土壤呼吸影响的整合分析

刘丰彩^{1,3}, 杨燕华², 江 军^{1,*}, 俞梦笑¹, 夏诗婷^{1,3}, 闫俊华¹, 王应平⁴

1 中国科学院华南植物园, 广州 510650

2 广东生态工程职业学院, 广州 510520

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 澳大利亚联邦科工组织, 维多利亚 3195

摘要:通过整合分析(Meta-analysis)国内外公开发表的 81 篇模拟酸雨实验论文的 2683 条有效观测数据,量化了酸雨对中国 3 个主要陆地生态系统(森林、草地和农田)土壤呼吸(R_s)及其组分(自养呼吸(R_a)、异养呼吸(R_h))的影响。结果表明,酸雨显著降低了 R_s (-9.6%)、 R_h (-7.7%)和 R_a (-11.7%);酸雨 pH 越低, R_s 及其组分的降幅越大;野外实验对 R_h 和 R_a 的负效应大于温室实验。酸雨对 R_s 的负效应在农田最大(-14.7%),草地次之(-10.8%),森林最小(-8.0%);森林 R_h 、 R_a 对酸雨的响应与 R_s 一致,不同林型间差异不显著;草地 R_h 和 R_a 在酸雨处理下分别显著降低和增加。 R_s 、 R_h 与土壤 pH 显著正相关,与土壤有机碳(SOC)显著负相关; R_h 和 R_a 分别与地上和地下生物量显著正相关。酸雨对 R_s 和 R_a 的负效应随纬度的增加而减弱,随年平均温的升高而增强,对 R_s 的正效应随年平均降水的降低而增强。研究表明,酸雨不仅降低了土壤 pH,抑制了植物生长,减少了植物向土壤的碳输入,还降低了微生物活性,减少了 R_h ,导致 SOC 分解降低,因而未显著改变土壤碳库。研究结果将为全球变化背景下我国陆地生态系统的碳预算提供科学借鉴。

关键词:有机碳;异养呼吸;生物量;土壤 pH

Effects of acid rain on soil respiration in Chinese terrestrial ecosystems: A meta-analysis

LIU Fengcai^{1,3}, YANG Yanhua², JIANG Jun^{1,*}, YU Mengxiao¹, XIA Shiting^{1,3}, YAN Junhua¹, WANG Yingping⁴

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou 510520, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Aspendale Victoria 3195, Australia

Abstract: Anthropogenic activities over the last four decades have increased depositions of sulfur dioxide (SO_2) and nitrogen oxides (NO_x) by three to five fold in China, which resulted in a serious problem of acid rain with adverse effects on terrestrial carbon cycle. Soil respiration (R_s) as the second largest flux for the most terrestrial carbon cycle, and its two components (i. e., autotrophic respiration (R_a) and heterotrophic respiration (R_h)) are extremely sensitive to anthropogenic acid rain due to its detrimental effects on plant growth and soil microbes. Although numerous ecosystem-level manipulative experiments were conducted to explore the underlying mechanisms how acid rain affected R_s , a quantitative synthesis of previous studies on the effects of acid rain on R_s and its two components across different terrestrial ecosystems

基金项目:国家自然科学基金项目(31901296);广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515010652);广州市基础研究计划项目(202102020289)

收稿日期:2021-10-20; **网络出版日期:**2022-07-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangjun@scib.ac.cn

was scarce. By conducting a meta-analysis of 2683 observations from 81 independent experimental studies, we quantified the directions and magnitudes of the responses of R_s , R_a , and R_h to simulated acid rain (SAR) in three major terrestrial ecosystems (i.e., forest, grassland, farmland) in China. Across all the experimental studies, our results showed that SAR significantly reduced R_s (-9.6%), R_h (-11.7%) and R_a (-11.7%), and the degree of reduction was proportional to the pH of SAR. The negative effects of SAR on R_h and R_a were greater in field experiment than that in pot experiment due to the differences in the intensity of SAR and experimental duration. Among different terrestrial ecosystem types, the negative effect of SAR on R_s was the most negative in farmland ecosystems (-14.7%), followed by grassland (-10.8%) and forest (-8.0%) ecosystems. The responses of R_h and R_a to SAR in forest ecosystems were consistent with that of R_s , and there were no significant differences among different forest types (i.e., coniferous forest, coniferous and broadleaved mixed forest and broadleaved forest). In grassland ecosystems, the response to SAR was negative for R_h , but positive for R_a . Linear-regression analysis showed that R_s and R_h were positively correlated with soil pH, but negatively correlated with soil organic carbon (SOC). R_h and R_a were positively correlated with aboveground biomass (AGB) and belowground biomass (BGB), respectively. Meta-regression analysis indicated that the negative effects of SAR on R_s and R_a were decreased with the increase of latitude, and increased with the increase of mean annual temperature (MAT), whereas the positive effect of SAR on R_s increased with a decrease in mean annual precipitation (MAP). Based on this meta-analysis, we found that SAR not only reduced soil pH, inhibited plant growth, and thus reduced plant carbon input to soil, but also inhibited microbial activities, reduced R_h , and SOC decomposition rate. Therefore, anthropogenic acid rain significantly altered the input and output of SOC, but did not significantly change the content of SOC in terrestrial ecosystems. These results will provide scientific basis for assessing the carbon budget of the Chinese terrestrial ecosystems in response to global change.

Key Words: organic carbon; heterotrophic respiration; biomass; soil pH

工业革命以来,人类社会的生产活动向大气排放了大量的硫氧化物(SO_2)与氮氧化物(NO_x),导致了不容忽视的酸雨问题^[1-2]。截至目前,世界上已先后出现了西欧、北美以及中国南方三大酸雨分布区^[3-5]。如何最大限度地降低酸雨对生态系统的负面影响已成为许多环境与生态学家的共同关切。尽管自 20 个世纪 80 年代以来,欧美等西方发达国家的酸雨问题得到了有效缓解,许多遭受酸雨危害的生态系统正逐渐恢复^[6-8],但中国的酸雨问题依然十分严峻^[5, 9-11]。特别是亚热带地区,硫(S)和氮(N)的湿沉降速率已分别高达 $32.6 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $34.4 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[5]。如此高强度酸性物质输入在降低土壤 pH 的同时,势必会对植物生长与微生物活性产生抑制作用,进而导致整个生态系统碳循环过程的改变^[10, 12-14]。

作为陆地生态系统碳循环过程的关键环节,土壤呼吸(R_s)代表着土壤碳库的气态输出形式,由异养呼吸(R_h)和自养呼吸(R_a)组成^[15]。前者主要源于土壤有机质与凋落物的分解进程,后者则包括活体根系以及根系共生体的呼吸^[16-17]。 R_s 是大气与陆地生态系统之间的第二大碳通量,其微小变化都会对大气二氧化碳(CO_2)浓度和气候变化产生显著影响^[15, 18]。因此,在我国人为酸雨问题未得到有效解决的背景下,充分认识 R_s 及其组分对酸雨的响应与反馈机制,对预测全球变暖趋势以及国家固碳减排政策的制定都具有重要的科学意义。

许多学者基于不同尺度的数据源(长期观测数据、站点数据)、实验方法(原位观测、盆栽实验、恒温培养实验)与分析手段(如模型模拟)对酸雨影响 R_s 的过程与机理进行了探究^[2, 5, 7, 19-23],但这些研究大多基于特定的研究站点,由于受限于较小的时空尺度,所得出的结论在更大区域范围内的普适性较差,不利于对酸雨影响 R_s 与陆地生态系统碳循环过程的准确评估。因此,本研究将基于中国境内所开展的模拟酸雨实验的 81 篇论文的 2683 条数据,运用 Meta 分析方法,探究酸雨对我国主要陆地生态系统 R_s 及其组分的影响。本研究结果将对全球变化背景下生态系统碳循环响应与反馈机制的揭示,以及实现我国“碳达峰”、“碳中和”目标提供科学借鉴。

1 材料和方法

1.1 数据编译

利用谷歌学术(<http://scholar.google.com/>)、Web of Science(<http://apps.webofknowledge.com/>)和中国知网(<http://www.cnki.net/>)文献检索系统,搜集已发表的模拟酸雨实验的研究论文,文献检索时间截止到2020年12月31日。检索关键词为:“acid deposition”、“sulfur deposition”、“simulated acid rain”和“carbon cycle”、“soil respiration”、“microbial respiration”、“CO₂ efflux”以及“酸沉降”、“硫沉降”、“模拟酸雨”和“土壤呼吸”、“碳循环”、“微生物”、“CO₂”等。根据检索词,总计搜集到127篇论文。为进一步遴选出合适的文献,设定如下原则:(1)只收集在中国陆地生态系统进行的酸雨实验的论文数据,其它国家或地区的相关研究被排除;(2)实验处理组和对照组最初的环境条件、植被类型与土壤特性基本一致,且两组目标变量的观测值在相同时间获得;(3)对于多因子交互实验,只选取对照与模拟酸雨处理组的实验数据;(4)目标变量的均值、标准差(误)和样本量可从文中图表直接获取或通过间接方式计算得出;(5)文中对实验方式(野外或温室盆栽实验)、酸雨形式(H₂SO₄/HNO₃/H₂SO₄和HNO₃)、酸雨强度(pH值)以及处理时间(年)都做了清晰阐述。

最后,81篇文献的2683条有效观测数据满足要求,组成本研究的数据集。数据集除包含目标变量(Rs、Ra和Rh)外,还包括土壤pH、植物地上、地下部分生物量(AGB和BGB)、凋落物量(LF)、微生物生物量碳(MBC)以及土壤有机碳(SOC)等变量。所涉及的主要陆地生态系统类型包括森林、草地和农田。森林又细分为针叶林、针阔叶混交林以及阔叶林。各类研究数据从文章的文本或表格中直接提取,或利用图形数字化软件GetData Graph Digitizer(<http://getdata-graph-digitizer.com/>)编译间接获得。此外,各研究样地的经纬度、年平均气温(MAT)、年平均降水量(MAP)、土壤pH以及植被类型等数据也被一并收集。对于原始文献中缺失的环境变量数据,则从其参考文献或全球数据库(<https://www.worldclim.org/>)中获取。

1.2 数据分析

本研究中,模拟酸雨处理的效应值通过计算反应比的自然对数(lnRR)进行量化^[24-25],即:

$$\ln RR = \ln\left(\frac{\bar{X}_t}{\bar{X}_c}\right) = \ln(\bar{X}_t) - \ln(\bar{X}_c) \quad (1)$$

式中, $\bar{X}_t$ 和 $\bar{X}_c$ 分别是目标变量处理组(t)和对照组(c)的平均值,lnRR的方差(v)由公式(2)计算:

$$v = \frac{S_t^2}{n_t \bar{X}_t^2} + \frac{S_c^2}{n_c \bar{X}_c^2} \quad (2)$$

式中, n_t 、 n_c 、 s_t 和 s_c 分别是目标变量处理组(t)和对照组(c)的样本量(n_t 和 n_c)和标准差(s_t 和 s_c);lnRR的加权平均值 $\ln RR_{++}$ 和标准误 $[s(\ln RR_{++})]$ 分别由公式(3)和(4)计算:

$$\ln RR_{++} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k w_{ij} RR_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k w_{ij}} \quad (3)$$

$$s(\ln RR_{++}) = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k w_{ij}}} \quad (4)$$

式中, m 是组数, k 是第 i 组比较次数, w 是权重。由于除了单个独立研究内的方差(即抽样误差)外,各不同研究之间同样存在着随机变异(即研究间方差),因此用随机效应模型来计算 $\ln RR_{++}$ 和 $s(\ln RR_{++})$ 。选择随机效应模型还因为在处理生态学的数据合成时原假设更容易被验证^[26]。因此,每项研究的 w 由公式(5)计算:

$$w = 1/(v + \tau^2) \quad (5)$$

式中, τ^2 为研究间方差,由最大似然法(REML)估算^[27]。 $\ln RR_{++}$ 的95%置信区间(CI) = $\ln RR_{++} \pm C_{\alpha/2} \times s$

($\ln RR_{++}$), 其中 $C_{\alpha/2}$ 是标准正态分布的双尾临界值^[15]。若 $\ln RR_{++}$ 的 95% *CI* 不与零线相交, 则认为对目标变量的处理效应是显著的^[26]。为了更加直观地反映模拟酸雨的处理效应, 将 $\ln RR_{++}$ 及其 95% *CI* 换算成百分比, 即效应值 = $(e^{\ln RR} - 1) \times 100\%$ 。

模拟酸雨对某一目标变量 (如 R_s) 总体效应值的计算是假定所有研究均来自同一总体, 总体异质性 (Q_T) 由自由度为 $n-1$ 的 χ^2 分布检验^[26]。显著的 $Q_T (P < 0.05)$ 表明效应值之间的方差大于抽样误差, 需要引入其它解释变量^[26, 28]。因此, 进一步评估了分类变量和连续变量对 R_s 及其组分的影响。对于每一个分类变量, Q_T 被分割成组内异质性 (Q_W) 和组间异质性 (Q_B), 并使用混合效应模型进行评估。本研究中, 编译的数据集被分成生态系统类型 (森林、草地和农田)、森林类型 (针叶林、针阔叶混交林和阔叶林)、实验方式 (野外、温室) 和酸雨强度 ($pH \geq 4.5$, $3.5 \leq pH < 4.5$ 和 $pH < 3.5$) 4 个亚组。其中, 酸雨强度的划分主要是基于酸雨的定义 (一般降雨 $pH < 5.6$ 称为酸雨, $pH < 4.5$ 称为重酸雨) 和大多数模拟实验酸雨 pH 的取值范围。所有亚组即为不同分类变量, 将分别评估其对酸雨处理效应的影响。为了增加研究结果的可信度, 没有足够数据点的亚组 ($n < 3$) 被逐一排除。采用 Meta 回归的方法评估连续变量 (纬度、MAT 和 MAP) 与目标变量 (如 R_h) 之间的关系^[27]; 用一般线性回归模型分析土壤 pH 、土壤碳库 (SOC、MBC 和 DOC) 以及植被碳库 (AGB、BGB) 对目标变量 (R_s 、 R_h 和 R_a) 的影响。

本研究用漏斗图的方法判断发表偏倚, 如果数据点以倒立的漏斗状均匀分布, 则不存在发表偏倚^[29-30]。然而, 当目标变量的样本量非常小时 (如 $n < 10$), 很难直观地用漏斗图的方法判断发表偏倚。因此, 对于样本量较小 (如 $n < 10$) 且有显著差异的效应值, 将通过进一步计算失安全系数 (N) 来判断发表偏倚; 如果 N 远大于观测值的样本量 (k) (即 $N > 5k + 10$), 则该分析结果是真实可靠的^[31]。所有统计分析均在 Meta 分析软件 OpenMEE (<http://www.cebm.brown.edu/openmee/>) 中进行^[27], 文中所有图形用 SigmaPlot 14.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH、土壤碳库和植被碳库对模拟酸雨的响应

模拟酸雨对 SOC 无显著影响 (0.8% , $P = 0.544$), 但却显著降低了土壤 pH 、植被碳库 (AGB、BGB 和 LF) 以及土壤活性碳库 (DOC、MBC) ($P < 0.001$)。其中, 土壤 pH 降幅最小 (-4.6%), LF 次之 (-6.8%), AGB、BGB、DOC 与 MBC 的降幅均在 10% 左右 (表 1)。

表 1 模拟酸雨对植被碳库、土壤碳库和土壤 pH 的影响
Table 1 Effects of simulated acid rain on plant C pools, soil C pools and soil pH

变量 Variable	效应值 Effect size/%	样本量 Sample size	P
植被碳库 Plant C pool			
地上部分生物量 AGB	-8.0 [-11.4, -4.5]	202	<0.001 ***
地下部分生物量 BGB	-9.9 [-14.3, -5.4]	180	<0.001 ***
凋落物量 LF	-6.8 [-10.3, -3.3]	48	<0.001 ***
土壤碳库 Soil C pool			
可溶性有机碳 DOC	-8.0 [-11.2, -4.5]	137	<0.001 ***
微生物生物量碳 MBC	-10.5 [-13.7, -7.3]	185	<0.001 ***
土壤有机碳 SOC	0.8 [-1.8, 3.5]	285	0.544
土壤 pH Soil pH	-4.6 [-5.3, -3.9]	485	<0.001 ***

*** 表示 $P < 0.001$; AGB:地上生物量 Aboveground biomass; BGB:地下生物量 Belowground biomass; LF:凋落物量 Litter fall; DOC:可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; MBC:微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon

2.2 R_s 及其组分对模拟酸雨的响应

总体而言, 模拟酸雨显著降低了 R_s (-9.6%)、 R_h (-7.7%) 和 R_a (-11.7%)。不同生态系统中, 森林、草地和农田 R_s 对模拟酸雨的响应一致, 分别显著降低了 8.0%、10.8% 和 14.7%; 模拟酸雨对农田 R_h 的影响不明显

(-1.3%),但却显著降低了森林和草地 Rh (-6.9%和-17.0%);森林和草地 Ra 在模拟酸雨处理下分别显著降低(-21.7%)和显著增加(25.4%),但农田 Ra 响应不明显。尽管针叶林、针阔叶混交林和阔叶林 Rs、Rh 和 Ra 在模拟酸雨处理下均表现出不同程度的降低趋势,但各林型间的差异不显著(图 1)。

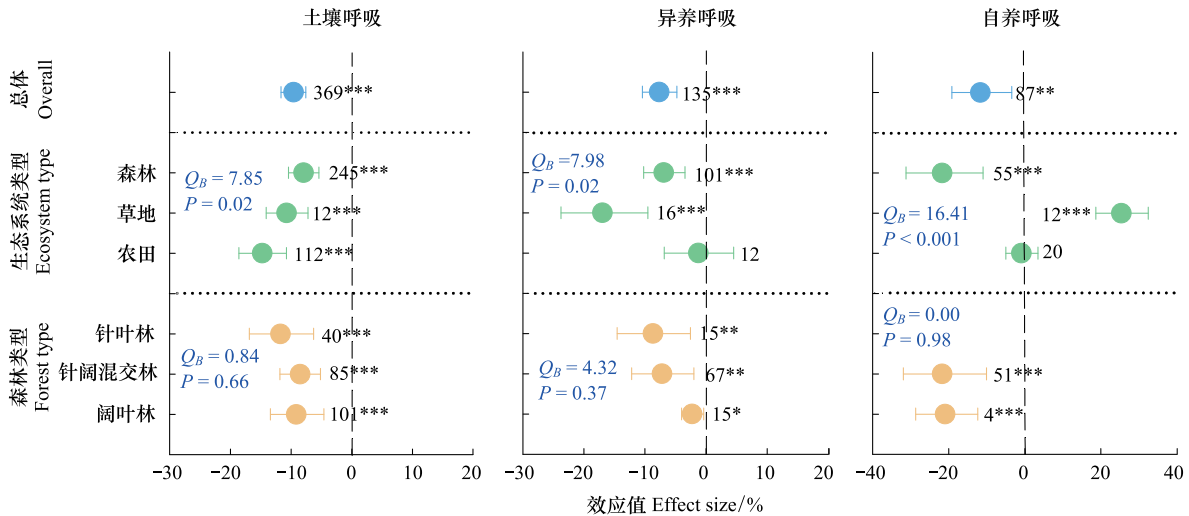


图 1 Rs、Rh 和 Ra 对模拟酸雨的响应在不同生态系统和森林类型间的差异

Fig.1 Differences in responses of Rs, Rh and Ra to simulated acid rain across different ecosystems and forest types

Rs: 土壤呼吸 Soil respiration; Rh: 异养呼吸 heterotrophic respiration; Ra: 自养呼吸 autotrophic respiration; 误差线表示 95% 的置信区间 (CI), 后面数字表示对应的样本量, 如果 $\ln RR_{+}$ 的 95% CI 不与零线相交, 则认为目标变量的处理效应是显著的; *** $P < 0.001$, ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$

野外原位模拟酸雨对 Rs、Rh 和 Ra 的负效应大于温室盆栽实验(图 2)。在野外原位观测条件下, Rs、Rh 和 Ra 分别显著降低了 8.7%、9.7% 和 14.7%; 在温室盆栽实验条件下, 模拟酸雨显著降低了 Rh (-3.2%), 但对 Rs 和 Ra 的影响不明显。模拟酸雨对 Rh 和 Ra 的负效应随酸雨 pH 的降低而增强, 当酸雨 pH < 4.5 时, Rs 也表现出类似的规律性(图 2)。

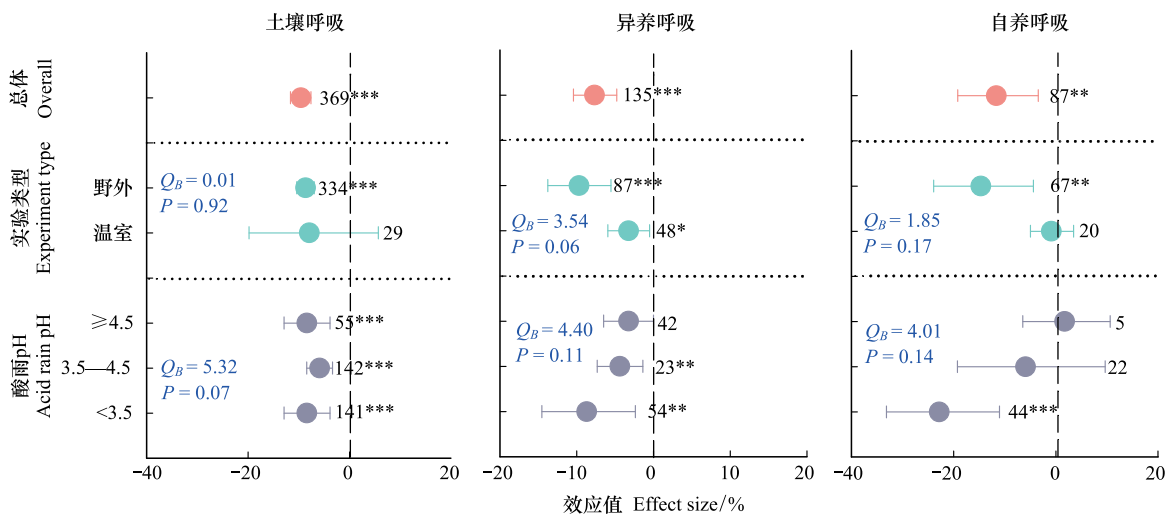


图 2 Rs、Rh 和 Ra 对模拟酸雨的响应在不同实验类型和酸雨 pH 下的差异

Fig.2 Differences in responses of Rs, Rh and Ra to simulated acid rain under different experiment types and pH of acid rain

2.3 Rs 及其组分与土壤 pH、土壤碳库和植物生物量的关系

线性回归分析表明, Rs、Rh 与土壤 pH 显著正相关, 但 Ra 与土壤 pH 的线性关系不显著; Rs、Rh 与 SOC

显著负相关,但与 MBC 或 DOC 的关系不显著;Rh 与 AGB 显著正相关,Ra 与 BGB 显著正相关,但 Rs 与 AGB 和 BGB 的线性关系都不显著(表 2)。

表 2 模拟酸雨条件下 Rs、Rh 和 Ra 效应值与土壤 pH、土壤碳库以及植物生物量效应值的关系

Table 2 Relationships between $\ln RR_v$ of Rs, Rh and Ra and $\ln RR$ of soil pH, soil carbon pools and plant biomass in response to simulated acid rain

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	回归模型 Regression model	样本量 Sample size	R^2	P
Rs	Soil pH	$y = 0.2704x - 0.0557$	115	0.0399	0.032
	MBC	$y = 0.1791x - 0.0868$	68	0.039	0.107
	DOC	$y = -0.1101x - 0.1118$	31	0.0276	0.371
	SOC	$y = -0.7686x - 0.0662$	50	0.2627	< 0.001
	AGB	$y = 0.0662x - 0.034$	28	0.0017	0.837
	BGB	$y = -0.0233x + 0.0132$	25	0.0015	0.853
Rh	Soil pH	$y = 0.6368x - 0.0309$	49	0.2939	< 0.001
	MBC	$y = -0.0126x - 0.1069$	20	0.0003	0.940
	SOC	$y = -0.8411x - 0.0601$	25	0.4222	< 0.001
	AGB	$y = 0.7086x - 0.19$	10	0.503	0.022
	BGB	$y = -0.0477x - 0.1133$	13	0.0206	0.640
Ra	Soil pH	$y = 1.674x + 0.0171$	27	0.0347	0.352
	AGB	$y = 0.1414x + 0.0624$	26	0.0684	0.197
	BGB	$y = 1.593x - 0.0503$	29	0.8847	< 0.001

Rs:土壤呼吸 Soil respiration;Rh:异养呼吸 heterotrophic respiration;Ra:自养呼吸 autotrophic respiration

2.4 Rs 及其组分与纬度、MAT 和 MAP 的关系

Meta 回归分析表明,Rs、Ra 的效应值与纬度之间存在显著的正相关关系,随着纬度升高,模拟酸雨对 Rs 和 Ra 的负效应逐渐减弱,正效应逐渐增强;Rs、Ra 的效应值与 MAT 显著负相关,随着 MAT 的升高,模拟酸雨对 Rs 和 Ra 的正效应逐渐减弱,负效应逐渐增强;Rs、Rh 和 Ra 的效应值都随 MAP 的升高而降低,但仅有 Rs 与 MAP 的关系达到显著水平 ($R^2 = 0.005$; $P = 0.04$),随着 MAP 的增加,模拟酸雨对 Rs 的负效应逐渐增强(图 3)。

3 讨论

3.1 生态系统类型对 Rs、Rh 和 Ra 的影响

本研究发现,森林 Rs 在模拟酸雨处理下降幅最小,草地次之,农田最大(图 1),表明陆地生态系统类型不同,Rs 对酸雨的响应不同。在森林生态系统中,林冠层、林下植被层以及地表凋落物层的截留作用都会降低酸雨对土壤微生物和植物根系的负效应^[32],而在草地或农田生态系统,由于地被层酸缓冲物质的相对缺乏,酸性物质(如 H^+)更易直接进入土壤,抑制微生物活性,降低 Rs^[33]。另外,农田由于长期耕作和施加氮肥,土壤酸化严重^[13],其抗酸能力相较于森林和草地更差^[34],因而导致更低的 Rs。尽管 Rs、Rh 在各生态系统均出现不同程度的降低,但草地 Ra 在模拟酸雨处理下却显著增加(图 1),这一发现与 Chen 等的研究结果一致^[35]。究其原因,可能是酸雨导致的土壤酸化驱使草地植物群落结构由多年生丛生禾草向根茎禾草转变,而后者具有更大的 BGB 和更高的比根呼吸速率^[35]。在不同森林类型中,梁国华等的研究发现,阔叶林 Rs 对酸雨响应的敏感性最强,针阔叶混交林次之,针叶林最弱^[36],因为针叶林土壤盐基饱和度高于阔叶林,酸缓冲能力更强^[37]。同时,阔叶林凋落物分解速率大于针阔叶混交林和针叶纯林^[38],因而地表现存凋落物量最少,不利于酸的缓冲,导致 Rs 的降低。然而本研究表明,尽管模拟酸雨引起针叶林、针阔叶混交林和阔叶林 Rs、Rh 和 Ra 的显著降低,但各林型之间的差异并不显著(图 1),这与前人的研究结果不一致。因为本研究是基于更

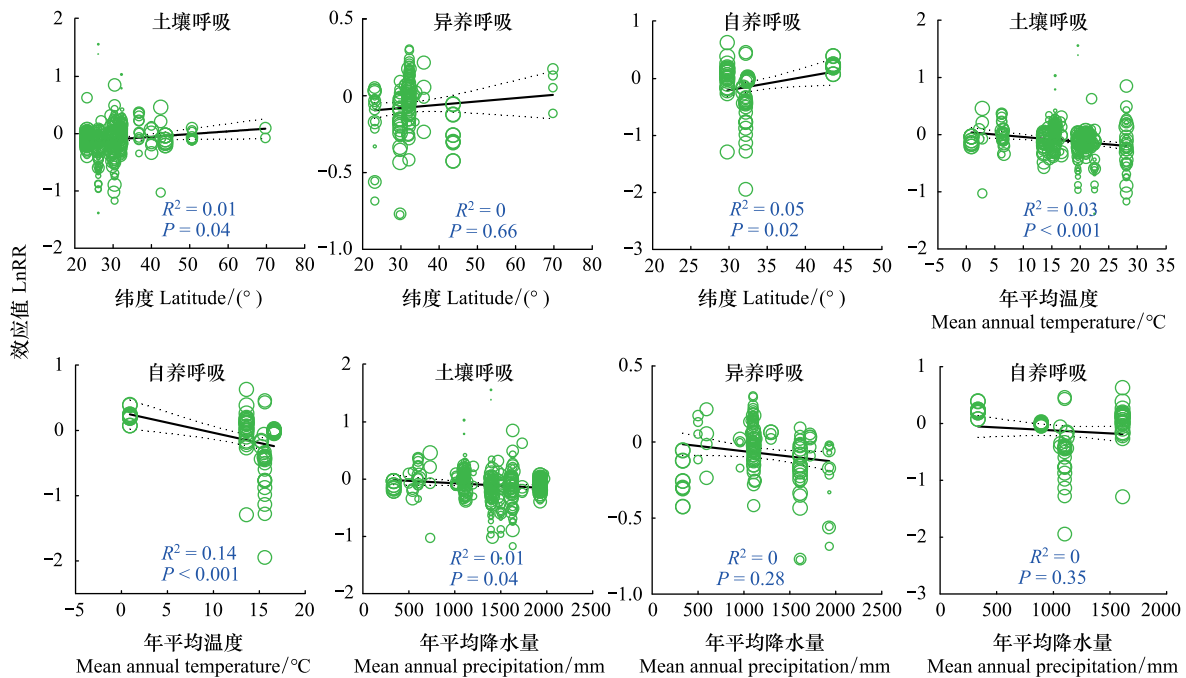


图3 模拟酸雨条件下 Rs、Rh 和 Ra 与纬度、年均温及年均降水量的关系

Fig.3 Relationships between lnRR of Rs, Rh and Ra and latitude, MAT and MAP in response to simulated acid rain

大空间尺度,各个森林类型跨越了不同的纬度和气候带,土壤本底条件并不一致,从而掩盖了林型对 Rs 的影响,而梁等的研究则是基于我国亚热带某单一站点,各林型土壤发育于相同的成土母质^[36],因而林型的效应得到进一步凸显。

3.2 实验方式与酸雨 pH 对 Rs、Rh 和 Ra 的影响

本研究发现,模拟酸雨对 Rh 和 Ra 的负效应在野外实验条件下要强于温室盆栽实验(图 2),这可能与处理时间和酸雨强度有关。在本研究所构建的数据集中,野外实验的处理时间和酸雨强度普遍大于盆栽实验,因而导致 Rh 和 Ra 更为强烈的响应。Rs、Rh 和 Ra 在 pH<3.5 酸雨处理下降幅最大进一步证明了这一点(图 2)。一方面,随着酸雨 pH 的降低,外源 H⁺ 的输入增加,土壤交换性阳离子库和土壤 pH 的降低进程加速^[5, 10],进一步抑制了微生物活性,减少了微生物生物量^[2, 35, 39–40],降低 Rh;另一方面,随着酸雨 pH 的降低,过量 H⁺ 的输入会进一步破坏叶组织与细胞结构^[41],同时植物根系中硝酸还原酶与谷氨酸合成酶的活性也会受到抑制,从而导致植株吸收利用氮素能力的降低^[42–43],抑制植物生长,降低 Ra^[44]。

3.3 土壤 pH、植物生物量与土壤碳库对 Rs、Rh 和 Ra 的影响

本研究结果表明,Rs、Rh 都与土壤 pH 显著正相关(表 2),这与梁国华等^[36]在亚热带森林和 Chen 等^[35]在温带草原的研究结果一致,表明酸雨通过降低土壤 pH 来抑制 Rs,而且这种抑制主要是通过减少 Rh 来实现的。因为在较低 pH (<4.2) 的土壤环境,铝被活化^[5, 45],土壤溶液中增加的游离态铝离子(Al³⁺)对土壤微生物产生了毒理效应^[46],从而导致微生物生物量与活性的降低,减少了微生物对 SOC 的分解^[47],这也被本研究 Rs、Rh 与 SOC 之间显著的负相关关系所证实(表 2)。在酸雨条件下,由于 Rh 的降低,更多的碳被储存在土壤中^[48–49]。另外,酸雨除了直接作用于 Rs,还能通过影响 AGB 和 BGB 间接影响 Rs(图 4),因为 AGB 和 BGB 分别是 Rh 和 Ra 的重要基质,两两之间均存在显著的正相关关系(表 2)。本研究中,酸雨显著降低了 AGB、地上凋落物输入以及 BGB(表 1),这与 Shi 等最新的研究结果一致^[50]。一方面,酸雨会增加淀粉粒和酚类化合物在细胞中的累积,损害气孔,引起光合作用与蒸腾作用的改变,抑制植物(尤其是叶片)生长,导致 AGB 和凋落物量的降低^[51–52],减少 Rh。另一方面,酸雨会抑制植物体的代谢活性,阻止碳水化合物由叶片向

根部的传输,降低根系密度^[53],减少 R_a 。

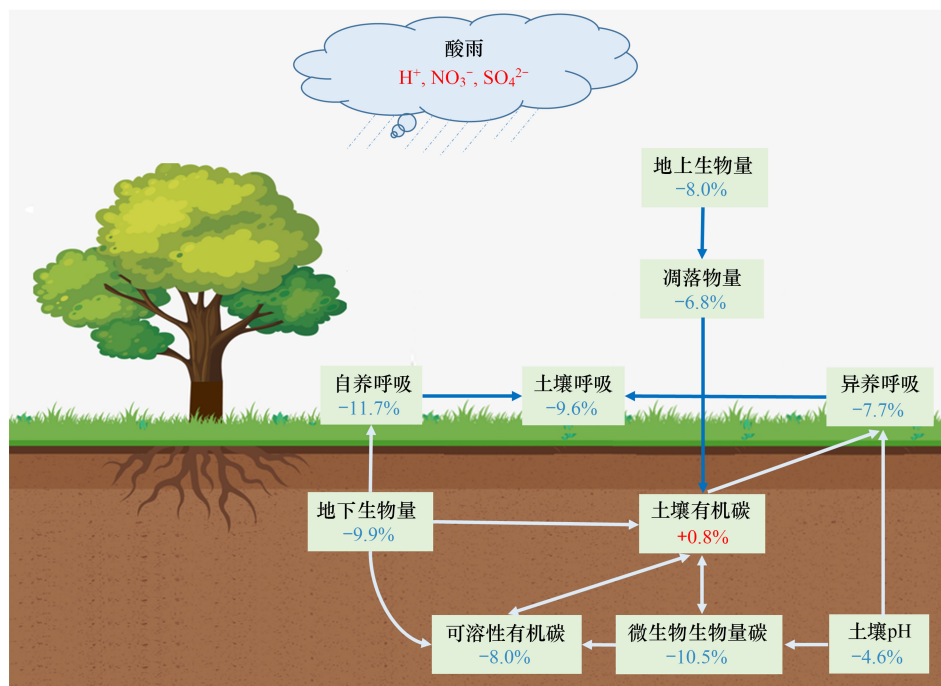


图4 酸雨对土壤呼吸及其组分影响的机理

Fig.4 The mechanism of the effects of acid rain on soil respiration and its components

3.4 纬度、MAT 和 MAP 对 R_s 、 R_h 和 R_a 的影响

本研究中,模拟酸雨对 R_s 、 R_h 和 R_a 的负效应表现出随纬度降低而增加的模式(图3),这一结果是我国南北方土壤酸化程度差异的具体体现。在我国南方地区,由于长期高强度人为酸雨的影响,土壤酸化比北方更为严重,许多森林土壤 pH 甚至低于 4.2,土壤的酸缓冲能力更低^[5]。在如此高酸的土壤上进行模拟酸雨实验,无疑会加大对 R_s 、 R_h 和 R_a 的抑制作用。同时,这种纬度模式也与 MAT 和 MAP 随纬度的变化有关, R_s 、 R_h 或 R_a 与 MAT 或 MAP 之间的负相关关系正好说明了这一点(图3)。在高纬地区,由于气温较低,植物或微生物的活性往往被抑制^[54],因而降低了 R_s 对酸雨响应的敏感性。在低纬地区,较高的降水导致土壤交换性阳离子的大量淋溶,促进了土壤酸化^[55-56],引起酸雨处理下 R_s 、 R_h 或 R_a 更大幅度的降低。此外,低纬地区较高的降水频率或强度还可能导致土壤含水量过高而降低氧气含量,进一步抑制微生物活性和植物根系呼吸^[57]。

4 结论

本研究通过 Meta 分析的方法量化了我国主要陆地生态系统(森林、草地和农田) R_s 及其组分对酸雨的响应。研究结果显示,酸雨对 R_s 、 R_h 和 R_a 的影响因生态系统类型而异,同时受到实验方式、酸雨强度、土壤性质以及土壤或植被碳库的影响,并表现出明显的纬度模式。本研究表明,在我国陆地生态系统中,酸雨一方面降低了土壤 pH,抑制了植物生长,减少了植物体向土壤的碳输入,另一方面也降低了微生物活性,抑制了 R_h ,导致 SOC 分解降低,因而未显著改变土壤有机碳库(图4)。该结果将为全球变化背景下我国陆地生态系统的碳预算提供科学借鉴。

参考文献(References):

- [1] Vet R, Artz R S, Carou S, Shaw M, Ro C U, Aas W, Baker A, Bowersox V C, Dentener F, Galy-Lacaux C, Hou A, Pienaar J J, Gillett R,

- Forti M C, Gromov S, Hara H, Khodzher T, Mahowald N M, Reid N W. A global assessment of precipitation chemistry and deposition of sulfur, nitrogen, sea salt, base cations, organic acids, acidity and pH, and phosphorus. *Atmospheric Environment*, 2014, 93: 3-100.
- [2] Chen S T, Shen X S, Hu Z H, Chen H S, Shi Y S, Liu Y. Effects of simulated acid rain on soil CO₂ emission in a secondary forest in subtropical China. *Geoderma*, 2012, 189: 65-71.
- [3] Driscoll C T, Driscoll K M, Mitchell M J, Raynal D J. Effects of acidic deposition on forest and aquatic ecosystems in New York State. *Environmental Pollution*, 2003, 123(3): 327-336.
- [4] Kirk G J D, Bellamy P H, Lark R M. Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. *Global Change Biology*, 2009, 16: 3111-3119.
- [5] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, Cao N N, Yan J H. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology*, 2018, 501: 86-94.
- [6] Monteith D T, Stoddard J L, Evans C D, de Wit H A, Forsius M, Högåsen T, Wilander A, Skjelkvåle B L, Jeffries D S, Vuorenmaa J, Keller B, Kopáček J, Vesely J. Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature*, 2007, 450(7169): 537-540.
- [7] Evans C D, Monteith D T, Reynolds B, Clark J M. Buffering of recovery from acidification by organic acids. *Science of the Total Environment*, 2008, 404(2-3): 316-325.
- [8] Kirk G J D, Bellamy P H, Lark R M. Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. *Global Change Biology*, 2009, 16: 3111-3119.
- [9] 陈展, 尚鹤. 接种外生菌根菌对模拟酸雨胁迫下马尾松营养元素的影响. *林业科学*, 2014, 50(1): 156-163.
- [10] Jiang J, Wang Y P, Yu M X, Li K, Shao Y J, Yan J H. Responses of soil buffering capacity to acid treatment in three typical subtropical forests. *Science of the Total Environment*, 2016, 563: 1068-1077.
- [11] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, Luo Y Q, Mo J M. Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems. *Global Change Biology*, 2014, 20(12): 3790-3801.
- [12] Chen S T, Zhang X, Liu Y F, Hu Z H, Shen X S, Ren J Q. Simulated acid rain changed the proportion of heterotrophic respiration in soil respiration in a subtropical secondary forest. *Applied Soil Ecology*, 2015, 86: 148-157.
- [13] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [14] Yang Y H, Ji C J, Ma W H, Wang S F, Wang S P, Han W X, Mohammad A, Robinson D, Smith P. Significant soil acidification across Northern China's grasslands during 1980s-2000s. *Global Change Biology*, 2012, 18(7): 2292-2300.
- [15] Zhou L Y, Zhou X H, Shao J J, Nie Y Y, He Y H, Jiang L L, Wu Z T, Bai S H. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3157-3169.
- [16] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [17] Luo Y, Zhou X. *Soil Respiration and the Environment*. Academic Press, an imprint of Elsevier, 2006.
- [18] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [19] Duan L, Yu Q, Zhang Q, Wang Z F, Pan Y P, Larssen T, Tang J, Mulder J. Acid deposition in Asia: Emissions, deposition, and ecosystem effects. *Atmospheric Environment*, 2016, 146: 55-69.
- [20] Gruba P, Mulder J. Tree species affect cation exchange capacity (CEC) and cation binding properties of organic matter in acid forest soils. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 655-662.
- [21] Liang G H, Hui D F, Wu X Y, Wu J P, Liu J X, Zhou G Y, Zhang D Q. Effects of simulated acid rain on soil respiration and its components in a subtropical mixed conifer and broadleaf forest in Southern China. *Environmental Science Processes and Impacts*, 2016, 18(2): 246-255.
- [22] 李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦. 三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应. *环境科学*, 2019, 40(3): 1457-1467.
- [23] 王楠, 潘小承, 白尚斌. 模拟酸雨对我国亚热带毛竹林土壤呼吸及微生物多样性的影响. *生态学报*, 2020, 40(10): 3420-3430.
- [24] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis. *Ecology*, 2006, 87(1): 53-63.
- [25] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [26] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. MetaWin: statistical software for meta-analysis. version 2. *The Quarterly Review of Biology*, 1998, 73(1): 126-128.
- [27] Wallace B C, Lajeunesse M J, Dietz G, Dahabreh I J, Trikalinos T A, Schmid C H, Gurevitch J. Open MEE: Intuitive, open-source software for meta-analysis in ecology and evolutionary biology. *Methods in Ecology and Evolution*, 2017, 8(8): 941-947.
- [28] Kolbe R H, Cooper H M. Integrating research: a guide for literature reviews. *Journal of Marketing Research*, 1991, 28(3): 380-381.
- [29] Egger M, Smith G D. Meta-analysis bias in location and selection of studies. *BMJ-British Medical Journal*, 1998, 316(7124): 61-66.
- [30] Light R J, Pillemer D B. *Summing up: the science of reviewing research*. Harvard university press, 1984, 227(4685): 407.
- [31] Scheithauer H. MetaWin: Statistical software for meta-analysis. *Zeitschrift Fur Klinische Psychologie Psychiatrie Und Psychotherapie*, 2003, 51

- (2): 176-178.
- [32] Spangenberg A, Kölling C. Nitrogen deposition and nitrate leaching at forest edges exposed to high ammonia emissions in southern Bavaria. *Water Air and Soil Pollution*, 2004, 152(1-4): 233-255.
- [33] 魏样. 陕西省不同生态区大气氮沉降及酸雨监测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [34] Fujii K, Hayakawa C, Panitkasate T, Maskhao I, Funakawa S, Kosaki T, Nawata E. Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 80-87.
- [35] Chen D M, Wang Y, Lan Z C, Li J J, Xing W, Hu S J, Bai Y F. Biotic community shifts explain the contrasting responses of microbial and root respiration to experimental soil acidification. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 90: 139-147.
- [36] 梁国华, 吴建平, 熊鑫, 吴小映, 褚国伟, 周国逸, 曾任森, 张德强. 南亚热带不同演替阶段森林土壤呼吸对模拟酸雨的响应. *生态学杂志*, 2016, 35(1): 125-134.
- [37] 温达志, 周国逸, 孔国辉, 郁梦德. 南亚热带酸雨地区陆地生态系统植被、土壤与地表水现状的研究. *生态学杂志*, 2000, 19(5): 11-18.
- [38] Huang Y H, Li Y L, Xiao Y, Wenigmann K O, Zhou G Y, Zhang D Q, Wenigmann M, Tang X L, Liu J X. Controls of litter quality on the carbon sink in soils through partitioning the products of decomposing litter in a forest succession series in South China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1170-1177.
- [39] 刘源月, 江洪, 李雅红, 原焕英. 模拟酸雨对杉木幼苗-土壤复合体系土壤呼吸的短期效应. *生态学报*, 2010, 30(8): 2010-2017.
- [40] Kuzyakov Y. Response to the comments by Peter Höglberg, Nina Buchmann and David J. Read on the review 'Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods' (*Soil Biology and Biochemistry* 38, 425-448): Object- versus method-oriented terminology. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2999-3000.
- [41] 单运峰, 冯宗炜. 模拟酸雨对马尾松和杉木幼树的影响. *环境科学学报*, 1988, 8(3): 307-315.
- [42] 齐泽民, 钟章成, 邓君. 模拟酸雨对杜仲叶氮代谢的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 544-548.
- [43] 麦博儒, 郑有飞, 梁骏, 刘霞, 李璐, 钟燕川. 模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2227-2233.
- [44] 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. *环境科学学报*, 2017, 37(10): 3984-3994.
- [45] Bowman W D, Cleveland C C, Halada L, Hreško J, Baron J S. Negative impact of nitrogen deposition on soil buffering capacity. *Nature Geoscience*, 2008, 1(11): 767-770.
- [46] Joner E J, Eldhuset T D, Lange H, Frostegård Å. Changes in the microbial community in a forest soil amended with aluminium *in situ*. *Plant and Soil*, 2005, 275(1-2): 295-304.
- [47] 刘源月, 江洪, 李雅红, 原焕英. 模拟酸雨对亚热带阔叶树苗土壤呼吸的影响. *土壤学报*, 2011, 48(3): 563-569.
- [48] Liu Z Q, Li D F, Zhang J E, Saleem M, Zhang Y, Ma R, He Y N, Yang J Y, Xiang H M, Wei H. Effect of simulated acid rain on soil CO₂, CH₄ and N₂O emissions and microbial communities in an agricultural soil. *Geoderma*, 2020, 366:114222.
- [49] Wu J P, Liang G H, Hui D F, Deng Q, Xiong X, Qiu Q Y, Liu J X, Chu G W, Zhou G Y, Zhang D Q. Prolonged acid rain facilitates soil organic carbon accumulation in a mature forest in Southern China. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 94-102.
- [50] Shi Z J, Zhang J E, Xiao Z H, Lu T T, Ren X Q, Wei H. Effects of acid rain on plant growth: a meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297:113213.
- [51] Francisco Sant'Anna-Santos B, Campos da Silva L, Alves Azevedo A, Marcos de Araújo J, Figueiredo Alves E, Antônio Monteiro da Silva E, Aguiar R. Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1-3): 158-168.
- [52] Neufeld H S, Jernstedt J A, Haines B L. Direct foliar effects of simulated acid rain. i. damage, growth and gas exchange. *New Phytologist*, 1985, 99(3): 389-405.
- [53] Rennenberg H, Herschbach C, Polle A. Consequences of air pollution on shoot-root interactions. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3-4): 296-301.
- [54] Zheng M H, Zhou Z H, Luo Y Q, Zhao P, Mo J M. Global pattern and controls of biological nitrogen fixation under nutrient enrichment: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2019, 25(9): 3018-3030.
- [55] Lucas R W, Klaminder J, Futter M N, Bishop K H, Egnell G, Laudon H, Höglberg P. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: implications for plants, soils, and streams. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 95-104.
- [56] Tian D S, Niu S L. A global analysis of soil acidification caused by nitrogen addition. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(2): 024019.
- [57] 赵成义. 陆地不同生态系统土壤呼吸及土壤碳循环研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2004.