

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

史艳姝^{1,2}, 陈书涛^{1,2,3*}, 胡正华^{1,2}, 沈小帅^{1,2}, 张 勇^{1,2}

(1.南京信息工程大学江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 2.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3.中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要:为研究模拟酸雨对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸、硝化和反硝化作用的影响,在农田进行随机区组试验,布设4个区组,每块区组随机设置4个模拟酸雨处理,分别为去离子水 A1(pH=6.7)、A2(pH=4.0)、A3(pH=3.0)、A4(pH=2.0)。采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统对不同酸雨强度的冬小麦-大豆轮作农田进行土壤呼吸速率观测,并采用气压过程分离技术(BaPS)测定不同酸雨处理的土壤 CO₂ 产生速率、硝化速率和反硝化速率。试验结果表明,冬小麦田各处理间土壤呼吸速率无显著差异($P>0.05$);大豆田高强度模拟酸雨 A4 处理明显抑制了土壤呼吸作用($P<0.05$)。就冬小麦-大豆轮作生长季而言,各处理土壤呼吸速率无显著差异($P>0.05$),其平均土壤呼吸速率分别为 (2.26 ± 0.11) 、 (2.31 ± 0.20) 、 (1.91 ± 0.09) 、 $(2.03\pm 0.17)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。冬小麦田 A1、A3、A4 处理间土壤 CO₂ 产生速率、硝化速率和反硝化速率均无显著性差异($P>0.05$)。高强度模拟酸雨抑制了大豆田土壤 CO₂ 产生速率;大豆田 A1、A3、A4 处理的硝化速率测定均值分别为 (191.6 ± 36.1) 、 $(261.6\pm 36.3)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $(255.2\pm 45.1)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,这3个处理的反硝化速率均值分别为 (172.8 ± 19.8) 、 $(216.0\pm 45.7)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $(216.3\pm 44.6)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。研究表明,模拟酸雨强度升高未显著影响冬小麦田土壤呼吸、硝化和反硝化作用;高强度模拟酸雨(pH=2.0)降低了大豆田土壤呼吸速率和 CO₂ 产生速率,但对土壤硝化和反硝化作用有促进作用。

关键词:模拟酸雨;土壤呼吸;硝化作用;反硝化作用;农田

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)12-2503-08

Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration, Nitrification and Denitrification in a Winter Wheat-Soybean Rotation Cropland

SHI Yan-shu^{1,2}, CHEN Shu-tao^{1,2,3*}, HU Zheng-hua^{1,2}, SHEN Xiao-shuai^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. The State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to investigate the effects of simulated acid rain on soil respiration, nitrification and denitrification in a cropland under winter wheat-soybean rotation, randomized block experiments were carried out in the cropland. 4 blocks were arranged and there were 4 acid rain treatments, which were coded as A1 (pH=6.7), A2 (pH=4.0), A3 (pH=3.0) and A4 (pH=2.0) in each block. A portable soil CO₂ fluxes system (LI-8100) was used to measure soil respiration rates. Soil CO₂ production rates, nitrification and denitrification rates were determined by using a Barometric Process Separation (BaPS) method. Results indicated that there were no significant differences ($P>0.05$) in soil respiration rates among different treatments in the wheat growth season, while intensive acid rain significantly ($P<0.05$) inhibited soil respiration in the following soybean growth season. Given the winter wheat-soybean rotation season, simulated acid rain had no significant effects ($P>0.05$) on soil respiration. Mean soil respiration rates during the rotation season were (2.26 ± 0.11) , (2.31 ± 0.20) , (1.91 ± 0.09) , (2.03 ± 0.17)

收稿日期: 2011-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(41005088); 江苏省高校自然科学基金研究计划项目(10KJB610006); 中国博士后基金特别资助项目(201003597); 国家重点实验室开放课题(LAPC-KF-2010)

作者简介: 史艳姝(1986—), 女, 江苏金坛人, 硕士研究生, 主要研究方向为农田生态系统碳氮循环与气候变化。E-mail: honeys996@yahoo.cn

*** 通讯作者:** 陈书涛 E-mail: chenstyf@yahoo.com.cn

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for A1, A2, A3 and A4 treatments, respectively. All rates of soil CO_2 production, nitrification and denitrification were not significantly ($P>0.05$) different among the A1, A3 and A4 treatments during the winter wheat growth season. However, in the soybean growth season, intensive acid rain significantly ($P<0.05$) inhibited soil CO_2 production rates. Mean nitrification rates in the soybean planted cropland were (191.6 ± 36.1) , (261.6 ± 36.3) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ and (255.2 ± 45.1) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ for the A1, A3 and A4 treatments, respectively, while mean denitrification rates were (172.8 ± 19.8) , (216.0 ± 45.7) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ and (216.3 ± 44.6) $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, for the 3 treatments, respectively. It could be concluded that simulated acid rain had no significantly effects on all of the rates of soil respiration, CO_2 production, nitrification and denitrification in the winter wheat growth season. During the soybean growth season, intensive acid rain significantly inhibited soil respiration and CO_2 production rates, and led to the increase of nitrification and denitrification.

Keywords: simulated acid rain; soil respiration; nitrification; denitrification; cropland

土壤呼吸是陆地生态系统中重要的碳通量过程之一,全球每年通过土壤呼吸向大气中释放的碳约为 $75\text{ Pg}^{[1]}$,土壤碳通过土壤呼吸作用以 CO_2 的形式进入大气圈将会导致温室效应加剧^[2-3]。 N_2O 是另一重要的温室气体,土壤的硝化作用和反硝化作用是土壤中矿质态氮循环的重要途径。近年来,我国南方地区酸雨呈逐渐加重态势,长期的酸性降雨对土壤具有较大的负面效应。研究表明,酸雨可加速土壤表层盐基离子的淋溶,使土壤养分流失,并会导致某些重金属元素释出与活化^[4-6];同时,酸雨会降低叶绿素含量,抑制其光合速率^[7-8],损伤作物生物膜,导致生物量减少^[9]。土壤呼吸和硝化、反硝化作用与土壤中的生物学过程和作物生长存在密切相关^[10]。虽然人们针对酸雨对农田生态系统的影响进行了不少研究,并且对农田土壤呼吸、硝化和反硝化作用也进行了大量观测,但目前关于酸雨对农田土壤呼吸、硝化和反硝化作用的影响规律的研究尚不多见。本研究拟通过观测模拟酸雨和对照条件下冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸、硝化和反硝化作用,分析模拟酸雨对这些关键的土壤碳氮转化过程的影响,以便为更清楚地了解农田土壤碳、氮循环过程在土壤酸化条件下的变化规律提供一定理论依据和基础研究资料。

1 材料与方法

1.1 观测地点概况

观测地点位于南京信息工程大学农业气象试验站(32.16°N , 118.86°E)试验田,于 2010 年春至 2010 年秋在该试验田进行冬小麦和大豆生长季田间试验观测。该区多年平均气温为 15.6°C ,多年平均降水量为 $1\,100\text{ mm}$ 。供试土壤为潞育型水稻土(灰马肝土属),质地为壤质粘土,耕层土壤黏粒含量为 26.1% ,土壤 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 值为 6.5 ,有机碳和全氮的含量分别为 $19.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为扬麦 12 号,于 2009 年 11 月至 12 月播种,在冬小麦生长季返青后进行不同浓度的模拟酸雨处理。供试大豆品种为八月白,于 2010 年 6 月播种,在大豆生长季进行不同浓度的模拟酸雨处理。

2001 至 2006 年本研究地点历年酸雨年平均 pH 值分别为 5.1 、 5.2 、 4.9 、 4.9 、 5.0 、 5.0 ,这 6 年的 pH 均值为 $5.0^{[11]}$,平均 H^+ 载荷为 $1\times10^{-2}\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。据此,模拟未来酸雨强度增强的情形,设置不同模拟酸雨处理,进行随机区组试验。试验地点布设 4 个区组,每个区组随机设置 4 个不同浓度模拟酸雨处理,其处理代码分别为 A1、A2、A3、A4,分别为浇灌去离子水的对照($\text{pH}=6.7$)以及浇灌酸雨 $\text{pH}=4.0$ 、 $\text{pH}=3.0$ 、 $\text{pH}=2.0$ 的处理。每个微区面积为 1 m^2 ,共 16 个微区,在各个小区之间挖较浅的壕沟,既防止处理间互相影响,又减少土壤旱田土壤水分的过度流失。

以试验地多年(2001—2006)酸雨平均 H^+ 量 $1\times10^{-2}\text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 为基准值,设定模拟酸雨强度的增加量值,其效应以酸雨中 H^+ 、 S 、 N 的总量来体现。根据我国酸雨成分以 SO_4^{2-} 为主、 NO_3^- 为次的特点,并参照当地以往的常规酸雨监测资料^[11],用 H_2SO_4 和 HNO_3 配制成 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 摩尔比为 $4.5:1$ 的酸雨母液,然后用适量母液与去离子水配制成 pH 分别为 4.0 、 3.0 、 2.0 的酸雨供试液,并以 pH 为 6.7 的去离子水作为对照。考虑到主要研究模拟酸雨中的离子效应,而非主要研究“水”的效应,参考以往的研究方法^[13],试验中酸雨的用量、浓度配比主要以累积 H^+ 、 S 、 N 载荷为度量(表 1)。另外,根据以往监测的酸雨频次和降水频次^[12],将酸雨处理次数设定每两周喷洒 1 次酸雨,从 2010 年 2 月 20 日开始,每次均匀喷于各自对应处理小区,每次每个处理用量为 5 L ,每个微区 1.25 L (相当于每次降水量 1.25 mm),酸雨处理时间为两个生长季。计算得到的不同处理的累积 H^+ 、 S 、 N 量见表 1。

这一试验设置方法考虑了酸雨中不同离子成分的增加量,与试验地多年(2001—2006)酸雨平均 H^+ 载荷 $1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 相比,设定的 A3 处理的 H^+ 、S、N 总量与南京市每年酸雨中 H^+ 、S、N 的增加总量在同一数量级上,同时,A4 处理为最高 H^+ 、S、N 量的酸雨处理,其量值大大高于每年酸雨中 H^+ 、S、N 的增加总量。

1.3 土壤呼吸速率测定

预先将直径为 20 cm、高 10 cm 的土壤呼吸底座(PVC)埋入土壤中,定期除去底座内的植物,以避免测定土壤呼吸时有植物的呼吸作用干扰,于每个采样日的上午进行观测,采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统(LI-COR 公司,美国),对不同酸雨处理的土壤呼吸速率实施测定。

1.4 CO_2 产生速率、硝化和反硝化速率测定

在冬小麦和大豆生长季,分别在作物生长后期采用气压过程分离法(简称 BaPS)测定两次不同酸雨处理的土壤 CO_2 产生速率、硝化速率和反硝化速率。用直径 6.0 cm、高 4.3 cm 的不锈钢环刀采集土壤样品,采后立即用塑料盖密封环刀,以防水分散失,并迅速送回实验室进行测定。测定前,将 BaPS 系统中的仪器温度设定为与田间温度一致,并在温度探头测定的温度与田间温度一致后再测定土壤 CO_2 产生速率、硝化速率和反硝化速率。测定时,取 4 个土壤样品放入 BaPS 系统中,最终测定结果为 4 个土壤样品的平均值。在每个处理中采集 12 个土壤样品,分 3 轮进行测定。

土壤 CO_2 产生速率、硝化速率和反硝化速率单位均为 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,其含义分别为每千克土壤每小时产生的以 CO_2 形式释放的碳的量和每千克土壤每小时通过硝化或反硝化作用转化的氮的量^[14]。

1.5 环境因子测定

每次测定土壤呼吸速率的同时采用 LI-8100 土

壤碳通量仪配备的温度、湿度探头测定试验地点的气温、5 cm 深处土壤的温度和湿度(体积含水量)。

1.6 数据分析

利用 SPSS16.0 统计软件进行方差分析,分析不同模拟酸雨处理的平均土壤呼吸速率差异,以及不同处理间土壤 CO_2 产生速率、硝化速率和反硝化速率的各自差异显著性。利用 SPSS16.0 进行酸雨处理、土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸观测数据的协方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤温度、土壤湿度和土壤呼吸动态变化

冬小麦田土壤温度介于 $8.3 \sim 27.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间(图 1a),大豆田土壤温度介于 $17.4 \sim 30.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间(图 1a)。冬小麦和大豆不同酸雨处理土壤温度的变异趋势与当地气温的变异趋势一致。冬小麦土壤湿度的变异范围为 $6.1\% \sim 32.8\%$ (图 1b),大豆田土壤湿度的变异范围为 $19.8\% \sim 42.9\%$ (图 1b)。5 月中旬的土壤湿度较其他月份略低,这与 5 月中旬降雨量偏少有关。冬小麦 A1、A2、A3 和 A4 处理的土壤呼吸速率的变异范围分别为 $0.61 \sim 3.94$ 、 $1.15 \sim 3.30$ 、 $0.67 \sim 3.33 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.95 \sim 3.43 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2),大豆 A1、A2、A3 和 A4 处理的土壤呼吸速率的变异范围分别为 $1.28 \sim 4.67$ 、 $0.95 \sim 4.82$ 、 $1.02 \sim 5.05$ 、 $0.83 \sim 3.04 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2)。冬小麦 4 个处理的土壤呼吸速率的季节变异趋势与土壤温度的变异趋势基本一致,但在 5 月中旬的 2 次测量中,虽然土壤温度较高,但是土壤呼吸速率有所下降,这与当时的土壤湿度较低有关(4 个处理 2010-05-12 的土壤湿度分别为 7.95% 、 6.71% 、 8.91% 和 8.74% ;2010-05-20 的土壤湿度分别为 6.13% 、 6.48% 、 7.68% 和 7.95%)。

冬小麦田 A1、A2、A3 和 A4 处理的平均土壤呼吸速率分别为 (2.22 ± 0.15) 、 (2.24 ± 0.15) 、 (1.90 ± 0.11) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $(2.25 \pm 0.13) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大豆田各处

表 1 不同处理的累积 H^+ 、S、N 载荷

Table 1 Accumulative H^+ , S and N loads for different treatments

处理 Treatments	pH	累积 H^+ 载荷	累积 S 载荷	累积 N 载荷
		Accumulative H^+ load/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	Accumulative S load/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	Accumulative N load/ $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
A1	6.7	6.48×10^{-6}	ND	ND
A2	4.0	2.50×10^{-3}	1.39×10^{-4}	5.56×10^{-4}
A3	3.0	2.50×10^{-2}	1.39×10^{-3}	5.56×10^{-3}
A4	2.0	2.50×10^{-1}	1.39×10^{-2}	5.56×10^{-2}

注:试验地多年(2001—2006)酸雨平均 H^+ 载荷为 $1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;ND 表示去离子水中 S、N 含量极低,未确定具体数值。

Notes: Mean annual H^+ load from 2001 to 2006 at the experimental site is $1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; ND represents that the S and N concentrations are very low in the deionized water, and the values of them are not determined.

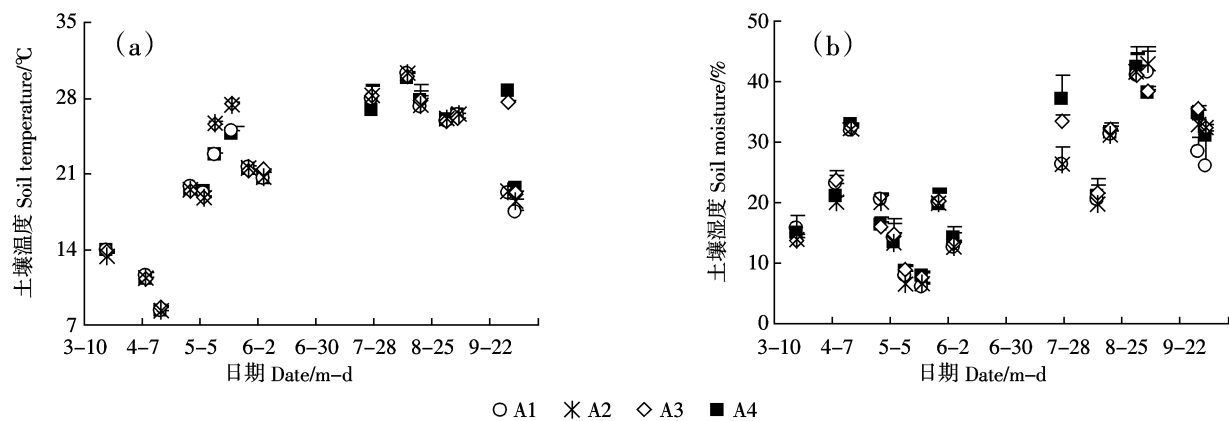


图 1 土壤温度、土壤湿度的季节变化
Figure 1 Seasonal changes of soil temperature and moisture

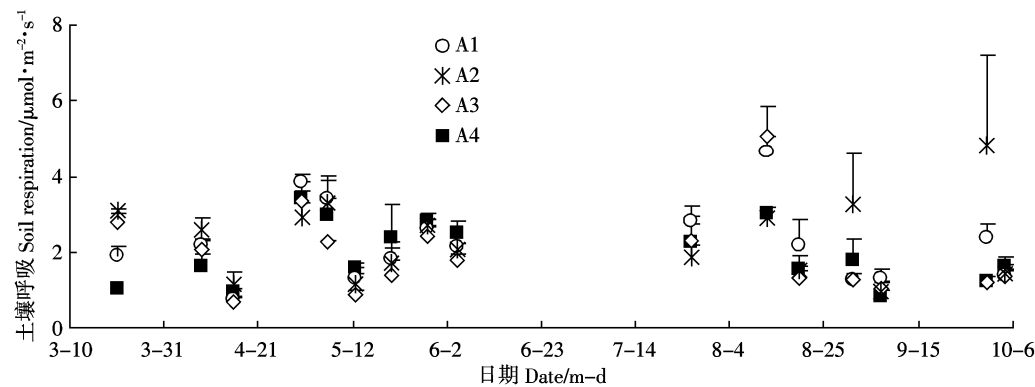


图 2 土壤呼吸的季节变化
Figure 2 Seasonal changes of soil respiration

理平均土壤呼吸速率分别为 (2.30 ± 0.06) 、 (2.39 ± 0.29) 、 $(1.92\pm0.16)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $(1.77\pm0.23)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,若以冬小麦-大豆轮作计,各处理平均土壤呼吸速率分别为 (2.26 ± 0.11) 、 (2.31 ± 0.20) 、 $(1.91\pm0.09)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $(2.03\pm0.17)\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。单因素方差分析结果表明,小麦田各处理土壤呼吸速率无显著差异;大豆田仅 A2 和 A4 处理土壤呼吸有显著差异,其余各处理无显著差异;冬小麦-大豆全生育期各处理无显著差异(表 2)。

在冬小麦生长季 5 月 14 日和 6 月 2 日的两次观测中,A1、A3、A4 处理土壤 CO_2 产生速率无显著差异;大豆生长季 9 月 7 日 A1、A3、A4 处理土壤 CO_2 产生速率分别为 (622.0 ± 39.1) 、 (394.3 ± 61.9) 、 $(242.0\pm64.3)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, A3、A4 两处理均显著低于 A1 处理,但 A3、A4 两处理之间的差异未达显著水平,9 月 17 日各处理土壤 CO_2 产生速率无显著差异。

由观测结果可见,大豆田土壤 CO_2 产生速率明显高于冬小麦田,模拟酸雨对冬小麦田土壤 CO_2 产生速率无显著影响,但显著抑制了大豆田土壤 CO_2 产生速

表 2 不同处理不同生长季的平均土壤呼吸速率($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
Table 2 Comparison of mean soil respiration rates($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) in different simulated acid rain treatments and different crop growth seasons

处理 Treatments	生长季 Growth season		
	冬小麦 Winter wheat	大豆 Soybean	冬小麦-大豆轮作 Winter wheat-soybean rotation
A1	$2.22\pm0.15(\text{a})$	$2.30\pm0.06(\text{ab})$	$2.26\pm0.11(\text{a})$
A2	$2.24\pm0.15(\text{a})$	$2.39\pm0.29(\text{a})$	$2.31\pm0.20(\text{a})$
A3	$1.90\pm0.11(\text{a})$	$1.92\pm0.16(\text{ab})$	$1.91\pm0.09(\text{a})$
A4	$2.25\pm0.13(\text{a})$	$1.77\pm0.23(\text{b})$	$2.03\pm0.17(\text{a})$

注:每列中括号内包含相同字母表示处理间无显著差异 ($P>0.05$),不包含相同字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

Notes: within each season, means followed by the same letter are not significantly different ($P>0.05$) among different treatments, while means without the same letter are significantly different ($P<0.05$).

率,这也说明土壤 CO_2 产生过程对酸雨的响应需经过一定的时间后才会显现。

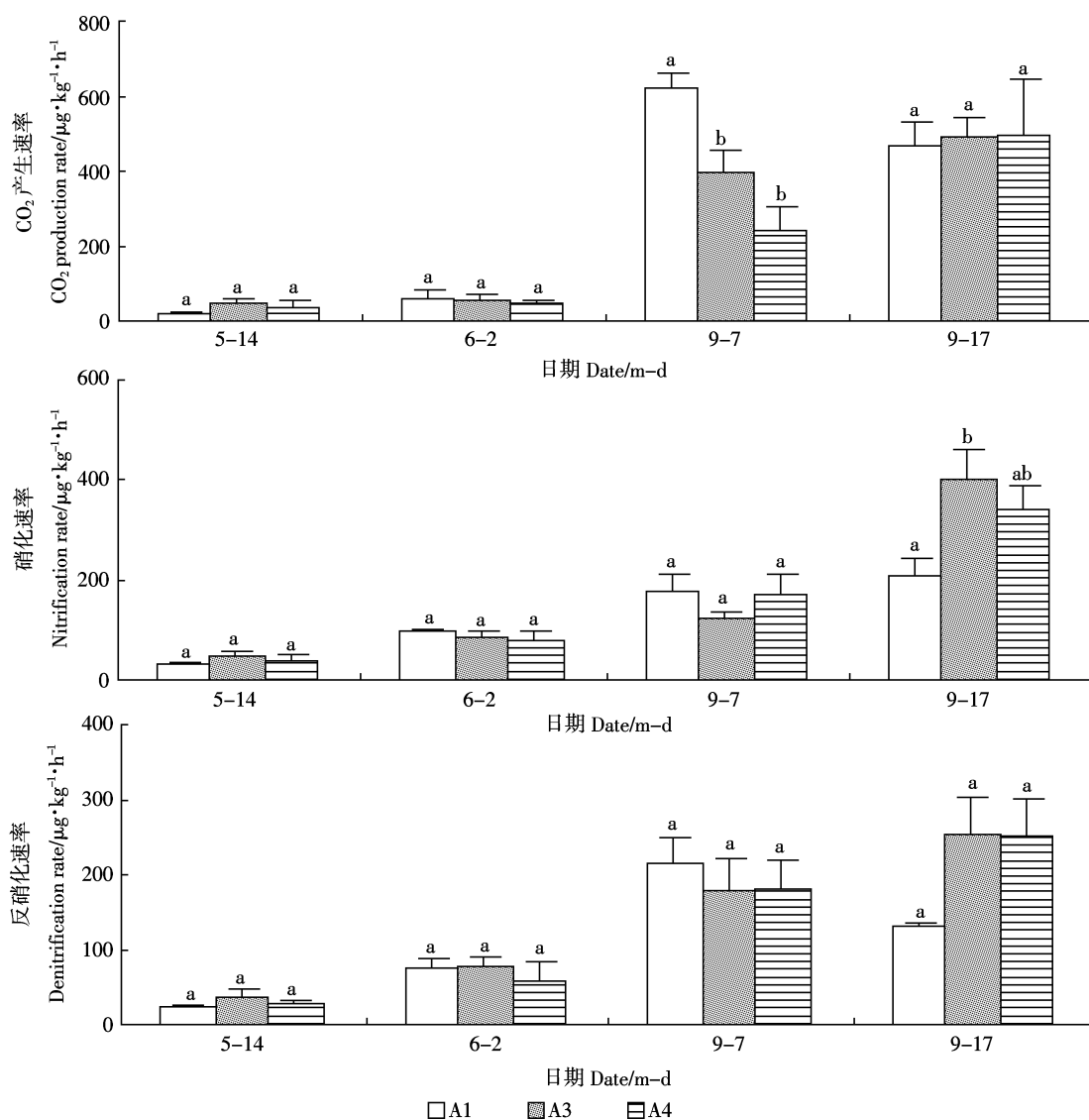
2.2 土壤硝化速率和反硝化速率

观测结果表明,大豆田硝化速率明显高于冬小麦

田,模拟酸雨对冬小麦土壤硝化速率无显著影响,但在9月17日的大豆田中,A3处理土壤硝化速率显著高于A1处理;大豆田反硝化速率明显高于冬小麦田,模拟酸雨对冬小麦、大豆田土壤反硝化速率无显著影响(图3)。基于试验假设和对于土壤呼吸的观测结果,低浓度模拟酸雨对土壤相关性质的影响较小(图2),故在测定时仅考虑了对照A1和较高浓度的A3、A4处理的土壤硝化和反硝化速率的测定。另外,9月17日大豆田A3、A4与A1的反硝化速率差异显著性分别为 $P=0.078$ 和 $P=0.082$,若以 $P<0.1$ 为显著性标准,则达到显著差异。冬小麦生长季A1、A3、A4处

理的硝化速率两次测定均值分别为 (65.1 ± 3.2) 、 (65.1 ± 11.5) 、 $(59.3\pm15.7)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,反硝化速率均值分别为 (49.9 ± 7.1) 、 (56.9 ± 11.5) 、 $(42.9\pm14.9)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。大豆生长季A1、A3、A4个处理的硝化速率两次测定均值分别为 (191.6 ± 36.1) 、 (261.6 ± 36.3) 、 $(255.2\pm45.1)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,反硝化速率均值分别为 (172.8 ± 19.8) 、 (216.0 ± 45.7) 、 $(216.3\pm44.6)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

冬小麦、大豆田土壤硝化、反硝化速率的变异与土壤温度的变化有内在联系^[15],两次观测的冬小麦田土壤温度在15~20℃范围内,大豆田土壤温度在25~27℃范围内,前者低于后者,这可能是造成大豆田硝



图中不同字母代表在某一观测日处理间差异达到显著水平($P<0.05$)

In the Figure, the different letters represent that there are significant ($P<0.05$) difference among treatments. The P values between the A3 and A1 treatments, and between the A4 and A1 treatments are 0.078 and 0.082, respectively, which represents that the difference is significant at the level of $P<0.1$.

图3 不同处理的土壤CO₂产生速率、硝化和反硝化速率

Figure 3 Soil CO₂ production, nitrification and denitrification rates in different treatments

化、反硝化速率明显高于冬小麦田的原因。

2.3 土壤呼吸的影响因素

在本研究中,不同模拟酸雨处理下的土壤呼吸速率在不同的测定日期存在差异,这种差异可能与土壤温度、土壤湿度等环境因子的变异存在交互作用,故采用协方差分析法来研究模拟酸雨处理、土壤温度、土壤湿度对土壤呼吸的影响。分析结果(表 3)表明,在本试验阶段内,不同模拟酸雨处理的土壤呼吸速率之间无显著差异($P>0.05$),但土壤温度和土壤湿度与土壤呼吸速率之间存在显著差异($P<0.05$)。土壤温度是在一定水分条件下起作用的,土壤水分处于干旱和过湿时,温度的作用降低,甚至失去作用^[16-17]。

3 讨论

3.1 模拟酸雨对土壤呼吸的影响

Bewley 等^[18]和 Pennanen 等^[19]发现,模拟酸雨抑制了土壤微生物呼吸。Ouyang 等^[20]的研究表明,低强度模拟酸雨促进了土壤 CO₂ 的产生,但高强度模拟酸雨(pH=3.05)抑制了土壤 CO₂ 的产生。朱雪竹等^[21]报道,模拟酸雨显著降低了生长期冬小麦-土壤系统的呼吸速率,但对小麦收获后的土壤呼吸速率无显著影响;同时,模拟酸雨提高了单位生物量生长所消耗的能量(呼吸速率与生物量的比值增大),但未显著影响土壤有机碳的分解^[22]。

本研究发现,冬小麦田模拟酸雨各处理土壤呼吸速率无显著差异,pH=2.0 处理的模拟酸雨显著抑制了大豆田土壤呼吸作用。大量研究表明,酸雨会损伤作物叶片^[23]、影响作物光合作用和营养元素的吸收^[6,24];酸雨还可改变土壤中的栖息者特别是分解者

的种群数量、群落结构和生物活性^[25],酸雨中的 H⁺对土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶活性具有抑制作用^[26];另一方面,土壤对外源酸性物质的添加具有很强的缓冲能力。因此,模拟酸雨对土壤呼吸的影响可能体现为长期效应,短期、低浓度的模拟酸雨对农田土壤呼吸无显著影响。

土壤在短期内对酸雨具有一定的缓冲能力^[27],本试验中冬小麦-大豆轮作农田的模拟酸雨喷淋时间段可能仍比较短,以至模拟酸雨对土壤呼吸的影响可能未充分显现出来,酸雨对农田土壤生态系统的影响是一个长期累积的过程。相对其他模拟酸雨处理而言,高强度酸雨处理造成土壤酸化的能力更强,对土壤呼吸的抑制能力也更强一些^[28],在本研究中则表现为高强度模拟酸雨 A4 处理(pH=2.0)显著抑制了土壤呼吸作用^[19,29-30]。

此外,大豆田土壤 CO₂ 产生速率明显高于冬小麦田,这可能与两个生长季处于不同的观测温度有关,大豆田土壤温度明显高于冬小麦田,造成了大豆田的土壤呼吸速率更高。

3.2 模拟酸雨对土壤硝化、反硝化作用的影响

在农田土壤中,低强度模拟酸雨对土壤 pH 无明显影响,硫和氮素的输入有利于农田土壤营养状况的改善。在本研究中模拟酸雨未对冬小麦的土壤硝化和反硝化速率产生影响,但由于酸雨中氮源的持续添加,在大豆生长后期,模拟酸雨对土壤硝化和反硝化速率产生了促进作用,这一现象与 Francis^[31]的研究结果基本一致。同时,本研究还表明,大豆田土壤硝化、反硝化速率高于冬小麦田,这可能与大豆田更高的土壤温度有关,Breuer 等^[26]报道土壤温度的升高与总硝

表 3 模拟酸雨处理与协变量(土壤温度、土壤湿度)对土壤呼吸影响的协方差分析
Table 3 Covariance analysis for the effects of simulated acid rain treatments and the covariates(soil temperature and moisture) on soil respiration

变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	DF	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
修正模型 Corrected model	27.42	15	1.83	2.26	0.08
截距 Intercept	3.95	1	3.95	4.90	0.05
处理 Treatment	0.26	3	0.09	0.11	0.96
温度 Temperature	5.23	1	5.24	6.48	0.03
湿度 Moisture	4.20	1	20	5.20	0.04
处理×温度 Treatment × Temperature	0.23	3	0.08	0.09	0.96
处理×湿度 Treatment × Moisture	0.24	3	0.08	0.10	0.96
温度×湿度 Temperature × Moisture	4.90	1	4.90	6.07	0.03
处理×温度×湿度 Treatment × Temperature × Moisture	0.21	3	0.07	0.09	0.97
误差 Error	9.69	12	0.81		
总变异 Total variation	160.20	28			
修正的总变异 Corrected total variation	37.11	27			

化速率呈正相关关系,此外,相比非豆科作物小麦而言,种植豆科作物的土壤具有更高的氮转化速率,这也造成了土壤硝化、反硝化速率的差异。

在两个生长季的田间试验结束后测定的土壤 pH 结果表明,各处理的土壤 pH 变异范围在 6.5~7.0 之间,方差分析表明各处理之间无显著差异($P>0.05$)。其可能的原因是:一方面农田生态系统是具有较强缓冲能力的复杂生态系统^[32-33],在 1 a 的处理中其差异不明显;另一方面是当地土壤的渗透性较好,使喷淋的酸性离子进入到较深层土壤。然而,本研究仅进行了 1 a 的酸雨喷淋,长期的模拟酸雨喷淋对土壤性质的影响规律还未能进行研究。因此,无论是土壤呼吸、硝化和反硝化作用,还是土壤 pH 等性质,其对酸雨的响应程度均应通过长期的定位观测试验来研究,并且这种长期(多年尺度)效应要与短期(生长季或轮作年尺度)效应进行对比和验证分析,从而研究其差异性。今后的研究将设置更全面的酸雨处理梯度(从 pH5.0~pH2.0),并进行土壤生物学性质、作物指标和土壤理化性质的同步监测,以求更准确地阐明酸雨对农田土壤碳、氮循环过程的影响规律。

4 结论

(1)模拟酸雨对冬小麦田和大豆田土壤呼吸、硝化和反硝化作用的影响规律存在差异。在考虑酸雨总离子载荷的情况下,模拟酸雨强度升高未显著影响冬小麦田土壤呼吸、硝化和反硝化作用;然而,高强度模拟酸雨降低了大豆田土壤呼吸速率和 CO_2 产生速率,但对大豆田土壤硝化和反硝化作用有促进作用。

(2)种植不同作物以及作物的生长时段对土壤呼吸、硝化和反硝化作用有显著影响,夏季大豆田土壤呼吸、硝化和反硝化作用明显高于春季的冬小麦田。

(3)土壤温度和土壤湿度是影响冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸季节性变异的重要因子。在本研究所处的温度、湿度范围内,土壤呼吸作用随土壤温度、湿度的升高而增强。

参考文献:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48:7-20.
- [2] Matthews E. Global litter production, pools, and turnover times: Estimates from measurement data and regression models[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(15):18771-18800.
- [3] Cox P M, Betts R A. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feed backs in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000, 408:184-187.
- [4] 张新明, 张俊平, 刘素萍, 等. 模拟酸雨对荔枝园土壤氮素迁移和土壤酸化的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6):18-21.
ZHANG Xin-ming, ZHANG Jun-ping, LIU Su-ping, et al. Effects of simulated acid rain on nitrogen transplant and acidifying potential in litchi orchard soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6):18-21.
- [5] Varies D, Posh M, Kamari J. Simulation of the long-term soil response to acid deposition in various buffer ranges[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, 48:349-383.
- [6] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 臭氧和模拟酸雨对冬小麦气体交换、生长和产量的复合影响[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(9):1542-1548.
ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Combined impact of ozone and simulated acid rain on gas exchange, growth and yield of field-grown winter wheat[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(9):1542-1548.
- [7] 童贵和, 程 滨, 胡云虎. 模拟酸雨及其酸化土壤对小麦幼苗生物量和某些生理活动的影响[J]. *作物学报*, 2005, 31(9):1207-1214.
TONG Guan-he, CHENG Bin, HU Yun-hu. Effect of Simulated acid rain and its acidified soil on the biomass and some physiological activities of wheat seedlings[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(9):1207-1214.
- [8] Singh B, Agrawal M. Impact of simulated acid rain on growth and yield of two cultivars of wheat[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2004, 152:71-80.
- [9] 麦博儒, 郑有飞, 梁 骏, 等. 模拟酸雨对小麦叶片同化物、生长和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10):2227-2233.
MAI Bo-ru, ZHENG You-fei, LIANG Jun, et al. Effects of simulated acid rain on leaf photosynthate, growth, and yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2227-2233.
- [10] 张 勇, 陈书涛, 王连喜, 等. 臭氧浓度升高对冬小麦田土壤呼吸、硝化和反硝化作用的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(12):156-162.
ZHANG Yong, CHEN Shu-tao, WANG Lian-xi, et al. Effects of elevated ozone concentration on soil respiration, nitrification and denitrification in a winter wheat farmland[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(12):156-162.
- [11] 梁 骏, 郑有飞, 唐信英, 等. 南京江北酸雨分布特征及其与气象条件的关系[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(6):96-100.
LIANG Jun, ZHENG You-fei, TANG Xin-ying, et al. Distribution characteristics of acid rain and its relation with meteorological conditions in north bank of Yangtze River, Nanjing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 32(6):96-100.
- [12] 郑有飞, 唐信英, 徐建强, 等. 南京市江北工业区降水酸性及化学成分分析[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(4):45-51.
ZHENG You-fei, TANG Xin-ying, XU Jian-qiang, et al. Analysis of precipitation acidity and chemical composition in the industrial estate located on north bank of the Yangtze River, Nanjing[J]. *Research of Environmental Science*, 2007, 20(4):45-51.
- [13] 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.
- [14] Chen S T, Huang Y. Determination of respiration, gross nitrification

- and denitrification in soil profile using BaPS system[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5):937-943.
- [15] Chang S C, Tseng K H, Hsia Y J, et al. Soil respiration in a subtropical montane cloud forest in Taiwan[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(5):788-798.
- [16] Almagro M, López J, Querejeta J I, et al. Temperature dependence of soil CO₂ efflux is strongly modulated by seasonal patterns of moisture availability in a Mediterranean ecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(3):594-605.
- [17] Bewley R J F, Stotzky G. Simulated acid rain (H₂SO₄) and microbial activity in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1983, 15(4):425-429.
- [18] Pennanen T, Fritze H, Vanhala P, et al. Structure of a microbial community in soil after prolonged addition of low levels of simulated acid rain[J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1998, 64(6):2173-2180.
- [19] Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, et al. Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(4):503-514.
- [20] 朱雪竹, 张高川, 李 辉. 模拟酸雨对不同 pH 值土壤农田系统暗呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, 30(10):2866-2871.
ZHU Xue-zhu, ZHANG Gao-chuan, LI Hui. Effects of simulated acid rain on respiration rate of cropland system with different soil pH[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(10):2866-2871.
- [21] 朱雪竹, 黄 耀, 杨新中. 模拟酸雨对不同土壤有机碳和作物秸秆分解的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(2):480-484.
ZHU Xue-zhu, HUANG Yao, YANG Xin-zhong. Effects of simulated acid rain on decomposition of soil organic carbon and crop straw[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2):480-484.
- [22] Sant'Anna-Santos B F, de Araújo J M, Alves E F, et al. Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1-3):158-168.
- [23] Horswill P, O'Sullivan O, Phoenix G K, et al. Base cation depletion, eutrophication and acidification of species-rich grasslands in response to long-term simulated nitrogen deposition[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 155(2):336-349.
- [24] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L. Microbial community response to nitrogen deposition in northern forest ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36:1443-1451.
- [25] Liu G S, Xu D M, Li K B, et al. Effect of acid rain, copper, and atrazine on soil hydrolase activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):127-130.
- [26] Breuer L, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(3):834-844.
- [27] Hutchinson T C, Watmough S A, Sager E P S, et al. 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 and Soil Pollution*, 1999, 109(1-4):17-39.
- [28] Reth S, Reichstein M, Falge E. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux-A modified model[J]. *Plant and Soil*, 2005, 268(1):21-33.
- [29] 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.
XIE X Z, JIANG H, YU S Q, et al. Effect of simulated acid rain on soil respiration of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10):5713-5720.
- [30] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 等. 土壤酸化对温室气体排放影响的培育实验研究[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(4):465-470.
OUYANG X J, ZHOU G Y, HUANG Z L, et al. The incubation experiment studies on the influence of soil acidification on greenhouse gases emission[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(4):465-470.
- [31] Francis A J. The ecological effects of acid deposition, Part II: Acid rain effects on soil and aquatic microbial processes [J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 1986, 42(5):455-465.
- [32] 段小华, 邓泽元, 胡小飞, 等. 模拟酸雨和外源铝对茶树铝及一些营养元素吸收积累的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(10):1936-1942.
DUAN Xiao-hua, DENG Ze-yuan, HU Xiao-fei, et al. Effects of simulated acid rain and exogenous Al on assimilation and accumulation of Al and some nutrition elements of tea plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10):1936-1942.
- [33] 薛忠财, 高辉远, 刘 鹏, 等. 利用冠层和叶片水平的反射光谱研究模拟酸雨对小麦的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(2):228-235.
XUE Zhong-cai, GAO Hui-yuan, LIU Peng, et al. Study on the effects of simulated acid rain on wheat using the spectral reflectance at canopy and leaf level[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):228-235.