

模拟酸雨对不同 pH 值土壤农田系统暗呼吸的影响

朱雪竹, 张高川, 李辉

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要:为研究酸雨对不同 pH 值土壤农田系统呼吸的影响, 选择酸性(pH 5.48)、中性(pH 6.70)、碱性(pH 8.18)水稻土, 以冬小麦为实验对象在 2005~2007 年期间进行了盆栽实验. 种植期间利用雨水 T_1 (pH 6.0)、 T_2 (离子浓度为 T_1 的 2 倍, pH 6.0)、 T_3 (离子浓度为 T_1 的 2 倍, pH 4.4) 进行喷淋, 并采用静态暗箱-气相色谱技术测定农田系统暗呼吸速率. 结果表明, 酸雨通过影响农作物的呼吸过程而对农田系统暗呼吸产生影响, 且农田系统可适应酸雨污染. 2005~2006 年, 酸雨提高了碱性土壤(S_3)农田系统平均暗呼吸速率, S_3T_3 分别比 S_3T_1 、 S_3T_2 高 23.6%、27.6% ($p < 0.05$), 但对酸性土壤(S_1)和中性土壤(S_2)农田系统平均暗呼吸速率无显著影响($p > 0.05$). 在 3~4 月, 雨水离子浓度升高可促进酸性土壤农田系统暗呼吸, 雨水 pH 值降低可抑制酸性土壤农田系统暗呼吸. 结果证实, 在酸雨对农田系统暗呼吸影响过程中, 土壤酸碱性、农作物发挥了重要作用.

关键词:酸雨; 农田; 呼吸速率; 水稻土; pH

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2866-06

Effects of Simulated Acid Rain on Respiration Rate of Cropland System with Different Soil pH

ZHU Xue-zhu, ZHANG Gao-chuan, LI Hui

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: To evaluate the effects of acid rain on the respiration rate of cropland system, an outdoor pot experiment was conducted with paddy soils of pH 5.48 (S_1), pH 6.70 (S_2) and pH 8.18 (S_3) during the 2005-2007 wheat-growing seasons. The cropland system was exposed to acid rain by spraying the wheat foliage and irrigating the soil with simulated rainwater of T_1 (pH 6.0), T_2 (pH 6.0, ionic concentration was twice as rainwater T_1), and T_3 (pH 4.4, ionic concentration was twice as rainwater T_1), respectively. The static opaque chamber-gas chromatograph method was used to measure CO_2 fluxes from cropland system. The results showed that acid rain affected the respiration rate of cropland system through crop plant, and the cropland system could adapt to acid rain. Acid rainwater significantly increased the average respiration rate in alkaline soil (S_3) cropland system, while it had no significant effects on the average respiration rate in neutral soil (S_2) and acidic soil (S_1) cropland systems. During 2005-2006, after the alkaline soil cropland system was treated with rainwater T_3 , the average respiration rate was 23.6% and 27.6% higher than that of alkaline soil cropland system treated with rainwater T_1 and T_2 , respectively. During March to April, the respiration rate was enhanced with the increase of rainwater ionic concentration, while it was dropped with the decrease of rainwater pH value in acidic soil cropland system. It was demonstrated that soil pH and crop plant played important roles on the respiration rate of cropland system.

Key words: acid rain; cropland; respiration rate; paddy soil; pH

酸雨和全球变暖已成为危害地球生态系统、威胁人类生存的全球环境问题^[1,2]. 全球变暖的重要原因之一是大气中温室气体(CO_2 、 CH_4 等)浓度持续上升. 在全球碳平衡中, 陆地生态系统的呼吸作用扮演极其重要的角色^[3]. 农田生态系统占地球陆地面积的 10.5%^[4]. 为了减缓温室气体排放, 人们开始关注如何提高农田生态系统固碳能力^[5]. 因呼吸过程与固碳能力密切相关, 也受到了关注. 研究表明, 环境条件如水、热^[6]、营养^[7]等都将影响农田生态系统的呼吸过程. 化石燃料的燃烧不仅使大气 CO_2 浓度持续上升, 同时也造成雨水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 增多、pH 值下降^[8]. 酸雨改变了农田生态环境条件. 我国酸雨面积已超过国土面积的 40%^[9],

长江以南绝大部分地区降水的 pH 值低于 4.5. 国内外许多研究表明, 高离子浓度和低 pH 值酸雨能影响植物的生长^[10, 11]、农田土壤 CO_2 排放^[12-14], 但影响趋势并不一致. 导致酸雨影响结果不一致的原因中, 土壤酸碱性是重要因素^[15]. 虽然酸雨、土壤酸性^[16]均对农田碳循环产生了影响, 但目前农田碳循环研究中很少考虑这 2 个因素. 人们不清楚酸雨污染日益严重的情况下, 酸雨怎样影响农田碳循环过程.

本研究选择酸性、中性、碱性 3 种不同 pH 值的

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2009-03-17

作者简介: 朱雪竹(1969~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为环境生物学, E-mail: zhuxuezhu@njau.edu.cn

水稻土,进行模拟酸雨浇灌下的盆栽实验,定期测定该系统暗呼吸速率,探讨酸雨对不同 pH 值土壤农田系统暗呼吸的影响,以期为酸雨污染下农田碳循环研究提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验土壤

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soils							
土壤编号	采样地	土壤类型	pH	有机 C/g·kg ⁻¹	全 N/g·kg ⁻¹	C/N	<0.01 mm 土粒 %
S ₁	宜兴	酸性水稻土	5.48	22.79 ± 0.09	1.89 ± 0.10	12.1	56
S ₂	南京	中性水稻土	6.70	10.28 ± 0.23	1.00 ± 0.05	10.3	46
S ₃	淮阴	碱性水稻土	8.18	11.09 ± 0.15	1.00 ± 0.10	11.1	42

盆栽试验于 2005 ~ 2007 年在南京农业大学校园网室进行.盆钵用紫砂泥烧制而成,钵高、直径均为 20 cm 左右,盆钵上口有 1.5 cm 深的凹型槽用以在采样时注水与采样箱密封.为使盆钵的温度与大田土壤温度一致并减小盆钵间的温度差异,盆钵的 4/5 高度埋入土壤.

小麦种植期间利用喷壶将模拟雨水自小麦叶片喷淋而下,同时利用喷雾器将酸雨喷至叶片,酸雨

本实验选取江苏省宜兴市官林土城村(31°28'N, 119°40'E)、南京市孝陵卫(31°52'N, 118°50'E)、淮阴市渔钩镇四树园(33°43'N, 118°53'E)长期水旱轮作的水稻土,其基本理化性状见表 1. 土壤样品采回后风干过 4 目筛,准确称量 6 kg 装盆,保持每盆土壤重量一致.

1.2 小麦种植

喷淋频率 11 月 ~ 次年 2 月为每周 1 次,3 ~ 5 月为每周 2 次,喷淋雨水量参考南京 1970 ~ 2000 年 30 a 的月平均降水量.收割后酸雨喷淋与种植期相同.为了比较雨水离子浓度和 pH 值对系统呼吸的影响,分别设置了雨水离子浓度与 pH 值存在差异的 3 种雨水处理(T₁、T₂、T₃),雨水成分见表 2. 本种植试验共有 2 个试验因子(土壤、雨水),9 个处理组合,每处理 3 次重复^[13].

表 2 模拟雨水的离子浓度/μmol·L⁻¹

Table 2 Ionic concentration in simulated acid rain/μmol·L ⁻¹										
模拟雨水	pH 值	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
T ₁	6.0	68.5	28	5	10	60	47.5	5	20	5
T ₂	6.0	137	55	10	20	120	85	10	40	10
T ₃	4.4									

1.3 指标分析

1.3.1 农田系统暗呼吸速率的测定

农田系统暗呼吸速率采用静态暗箱-气相色谱法测定^[17],气样采集时间为 07:30 ~ 10:00,为避免采样时间差异对农田系统暗呼吸的影响,相同土壤组同步采样.气样采集同时测定土壤含水量、温度.气体采样箱为圆筒型,用 PVC 材料制成,高 1 m.为减小采样期间由于太阳辐射引起的箱内温度变化,所有采样箱外侧均先包有一层海绵,然后覆盖一层铝箔.气体样品用带有开关的针筒采集,采样时间分别为关箱后的 0、10、20 min,每次抽样 40 mL 左右.样品的 CO₂ 混合比用 Agilent 4890D 气相色谱仪检测.通过对每组 3 个样品的 CO₂ 混合比与相对应的采样间隔时间(0、10、20 min)进行直线回归,求得系统暗呼吸速率.所有测定结果表明,20 min 内的 CO₂ 浓度均呈线性增加($R^2 > 0.95$).

1.3.2 土壤理化指标的测定

土壤 pH 值测定为 H₂O 浸提后用 pH 计测定(水土比为 2.5:1).土壤有机碳和全氮分别用重铬酸钾外加热氧化法和半微量开氏法测定^[18].

1.4 统计分析

用 SYSTAT10 软件进行相关分析和多因素方差(ANOVA)分析,然后用 LSD 多重检验法检验农田生态系统暗呼吸速率在不同处理间的差异显著性.

2 结果与讨论

2.1 小麦种植期不同雨水处理农田系统暗呼吸速率

从图 1 可以看出,雨水离子浓度与 pH 值的差异并未改变农田系统暗呼吸的季节动态,小麦生长旺盛的 3、4 月农田系统呼吸速率较高,苗期(11、12 月)暗呼吸速率较低.

2.1.1 酸性土壤农田系统暗呼吸速率

2005~2007 年小麦种植期间, 高离子浓度雨水 (T_2) 可显著地提高酸性土壤农田系统暗呼吸速率 ($p < 0.01$) (图 1). 2006~2007 年 3、4 月间达到最大值, S_1T_2 组呼吸速率最高比 S_1T_1 组高 76.1%.

雨水 pH 值降低可使酸性土壤农田系统呼吸速率下降 ($p < 0.01$), 同样是 2006~2007 年差异较明显, S_1T_3 组最多比 S_1T_2 组低 37.2% (2007-03-30).

高离子浓度、低 pH 值雨水 T_3 未对酸性土壤农田系统暗呼吸速率产生显著影响. 在 2 a 种植小麦期间, S_1T_3 组与 S_1T_1 组暗呼吸速率均未出现显著差异 ($p > 0.05$).

2.1.2 中性土壤农田系统暗呼吸速率

酸雨对中性土壤农田系统暗呼吸速率的影响, 随小麦生长而改变 (图 1). 高离子浓度雨水 (T_2) 可降低苗期农田系统暗呼吸速率, S_2T_2 组最大比 S_2T_1 组低 62.5% ($p < 0.05$); 但 T_2 可提高拔节期农田系统呼吸速率, S_2T_2 组最高可比 S_2T_1 组高 103.5%

(2007-03-20) ($p < 0.05$). 抽穗期, 高离子浓度、低 pH 值雨水 T_3 可降低中性土壤农田系统暗呼吸速率, 2007 年 4 月上旬 S_2T_3 组比 S_2T_2 组、 S_2T_1 组低 30% 以上 ($p < 0.01$), 但在灌浆期 (2006-05-11、2007-04-24、2007-05-11) T_3 提高了农田系统暗呼吸速率, S_2T_3 组最大比 S_2T_2 组、 S_2T_1 组高 88.6% ($p < 0.05$).

2.1.3 碱性土壤农田系统暗呼吸速率

在 2005~2006 年小麦种植季, 酸雨 (T_3) 显著地提高了碱性土壤农田系统呼吸速率. 在 2006~2007 年, S_3T_3 组只在 3 月份前显著地高于 S_3T_1 组和 S_3T_2 组, 3 月后各雨水处理间农田暗呼吸速率并无显著差异 ($p > 0.05$) (图 1).

2006~2007 年, 与中性土壤农田系统相似, 酸雨对碱性土壤农田系统暗呼吸的影响随小麦生长改变. 高离子浓度雨水 (T_2) 降低了苗期农田系统暗呼吸速率, S_3T_2 组 12 月平均暗呼吸速率比 S_3T_1 组低 23.7% ($p < 0.05$); 但提高了拔节期 (2007-03-08、2007-03-13) 农田呼吸速率, 最大增幅为 58.9% ($p < 0.05$).

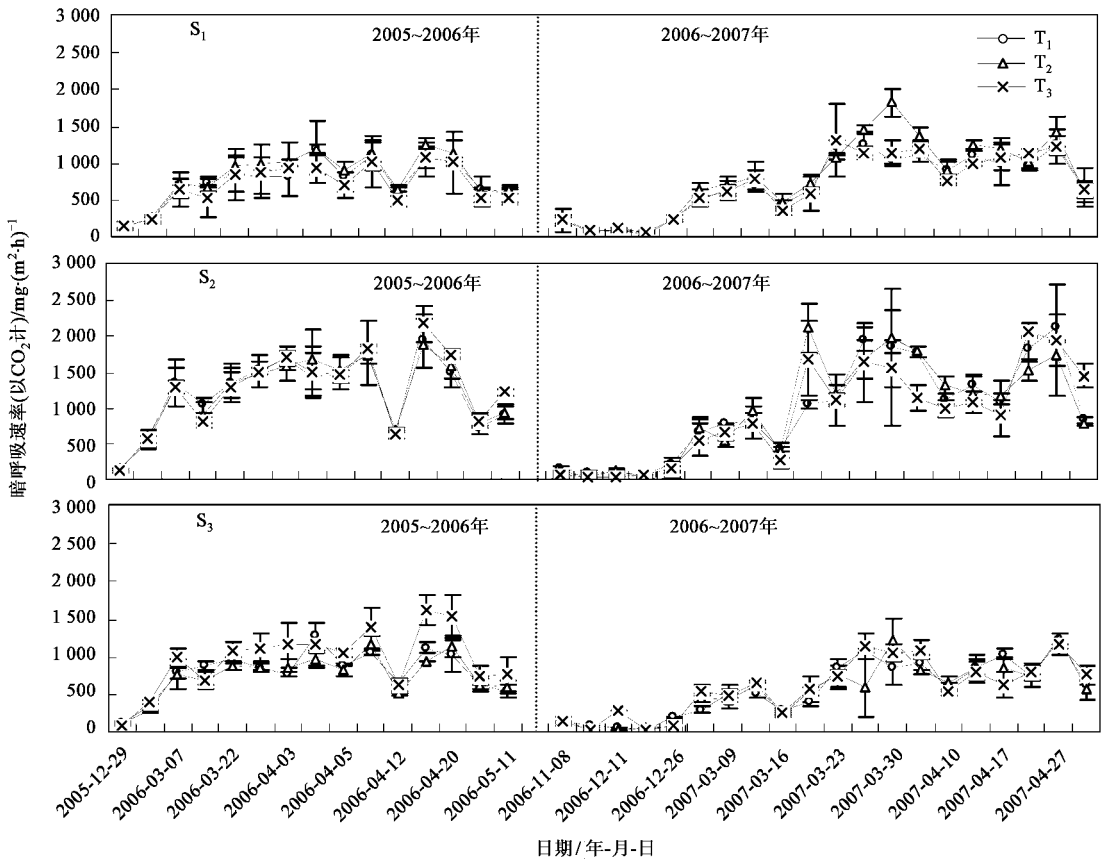


图 1 不同处理农田生态系统暗呼吸速率

Fig.1 Respiration rate of cropland system under different treatments

从农田系统暗呼吸速率的季节变化可见,在小麦苗期、抽穗期、灌浆期,农田较易受酸雨影响.这与酸雨对植物影响相一致.很多研究报道,植物在苗期易受酸雨影响^[19],且生殖期比营养期更易受到酸雨影响^[20, 21].考虑到出苗后到返青期前小麦吸收的养分和积累的干物质较少、暗呼吸速率较低^[22].而拔节至抽穗是小麦吸收养分和积累干物质最快的时期^[23].由此,本研究认为如果在小麦抽穗和灌浆期发生酸雨污染,农田系统碳循环更易受影响.

表 3 小麦收割后农田系统暗呼吸速率(以 CO₂ 计)¹⁾/mg·(m²·h)⁻¹

Table 3 Respiration rate of cropland system under different treatments after harvest/mg·(m ² ·h) ⁻¹											
收割后 天数/d	S ₁			S ₂			S ₃			土壤温 度/℃	土壤含 水量/%
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃	T ₁	T ₂	T ₃		
1	275.0±9.2a	214.8±43.9a	230.6±28.9a	232.9±12.3a	188.1±4.7b	184.8±47.9ab	259.6±54.2a	269.2±71.1a	259.4±8.6a	17.2	26.9
2	260.6±10.6a	290.4±19.6a	247.7±81.0a	230.7±17.8a	232.2±24.6a	306.2±82.9a	293.5±34.3a	323.2±97.5a	298.7±49.2a	19.3	25.0
3	326.1±25.6a	318.6±19.7a	315.4±150.1a	299.8±8.1a	319.4±26.6a	347.5±60.0a	429.1±79.9a	470.5±30.0a	419.7±70.1a	22.0	25.9
4	329.6±38.9a	314.1±9.7a	361.3±50.5a	276.7±86.8a	362.7±89.2a	275.5±21.5a	499.7±38.4a	476.3±48.5a	476.8±46.8a	21.7	23.0
5	340.5±42.7a	379.2±29.3a	342.0±85.9a	332.9±83.3a	346.1±75.2a	284.6±43.1a	438.4±68.2a	394.1±15.8a	374.7±78.4a	20.1	21.9

1) 同行中不同小写字母表示相同土壤不同雨水处理组间存在显著差异, $p < 0.05$

2.3.1 暗呼吸速率影响因素统计分析

根据小麦种植期间农田系统暗呼吸速率数据,以种植日期(D)、土壤(S)、模拟雨水(R)对暗呼吸速率差异做 3 因子方差分析(表 4).结果表明,2005~2006 年小麦种植期,雨水、时间、土壤均对农田系

2.2 小麦收割后不同处理农田系统暗呼吸速率

2005~2006 年小麦收割后,连续 5 d 测定土壤系统呼吸速率(表 3).可见,只在收割后第 1 d,酸雨使中性土壤农田系统暗呼吸速率降低了 20%左右.其它时间,雨水差异未对农田暗呼吸速率产生显著差异($p > 0.05$).另发现,第 3 d 后暗呼吸速率有所上升,推测与测定时土壤温度、光照等天气因素有关^[24].

2.3 雨水对农田系统暗呼吸作用的影响因素分析

统暗呼吸速率产生了显著的影响.酸雨与时间两因素的互作不显著,说明酸雨的作用随时间而变化.2006~2007 年小麦种植季,雨水差异未对农田系统暗呼吸速率产生显著影响,但雨水、时间、土壤 3 因素的互作对暗呼吸产生了极显著的差异.

表 4 不同土壤(S)、酸雨(R)和种植日期(D)对农田系统暗呼吸速率的方差分析

Table 4 Variance analysis of the soil type, acid rain and date effects on dark respiration rate

方差来源	自由度	2005 ~ 2006 年				2006 ~ 2007 年			
		平方和	均方	F-ratio	p	平方和	均方	F-ratio	p
D	19	9.203E+07	4.844E+06	210.178	0.000 0	1.145E+08	6.027E+06	209.729	0.000 0
S	2	1.107E+07	5.535E+06	235.617	0.000 0	1.256E+07	6.282E+06	218.616	0.000 0
R	2	151 991.078	75 995.539	3.235	0.040 5	146 998.491	73 499.245	2.558	0.078 9
D×S	38	1.020E+07	268 490.040	11.429	0.000 0	1.377E+07	362 429.178	12.612	0.000 0
D×R	38	1.149E+06	30 243.663	1.287	0.125 8	3.636E+06	95 674.345	3.329	0.000 0
S×R	4	921 253.145	230 313.286	9.804	0.000 0	487 956.770	121 989.193	4.245	0.002 3
D×S×R	76	1.456E+06	19 154.308	0.815	0.859 4	4.292E+06	56 479.856	1.965	0.000 0
误差	360	8.457E+06	23 491.927			1.035E+07	28 736.943		

2.3.2 农田系统平均暗呼吸速率分析

计算 3~5 月平均暗呼吸速率(表 5),分析酸雨在此期间对暗呼吸的影响程度.2005~2006 年,酸雨显著提高了碱性土壤农田系统平均暗呼吸速率,但 2006~2007 年,酸雨对农田系统平均暗呼吸速率无显著影响.本研究认为这与农田系统对酸雨的适应有关^[25].

与 T₁ 雨水相比,高离子浓度雨水 T₂ 未对 3 种土壤农田系统平均暗呼吸速率产生显著影响($p > 0.05$).但值得注意的是,2 a 的 S₁T₂ 组平均暗呼吸

速率均比 S₁T₁ 组高 8% 以上,虽未达到显著水平,但 3~4 月数据显示, T₂ 可显著提高酸性土壤农田系统暗呼吸速率.这表明 T₂ 雨水通过对酸性土壤上植物^[11, 26]、土壤微生物^[27]的施肥作用,在一定程度上促进了酸性土壤农田系统暗呼吸.

与 T₂ 相比,低 pH 值雨水 T₃ 显著提高了碱性土壤农田系统平均暗呼吸速率, S₃T₃ 组比 S₃T₂ 组高 27.6% ($p = 0.021$).相反,2 a 的 S₁T₃ 组平均暗呼吸速率均比 S₁T₂ 组低 12% 以上,虽然未达到显著水

平,但数据显示, T_3 雨水在3月底至4月中旬期间可显著降低酸性土壤农田系统暗呼吸速率,本研究认为雨水pH值的降低对酸性土壤农田系统暗呼吸具有一定的抑制作用.

与 T_1 相比,高离子浓度、低pH值雨水 T_3 ,使碱性土壤农田系统平均暗呼吸速率提高了23.6% ($p = 0.041$),但对酸性和中性土壤农田系统无显著影响($p > 0.05$).

小麦种植期农田系统暗呼吸包含了土壤呼吸、小麦暗呼吸、以及土壤中有有机碳化学氧化等过程,

其中小麦暗呼吸排放的 CO_2 占主要部分.由试验结果可见:雨水的差异并未显著影响小麦的地上部分生物量(表5)、收割后的农田系统暗呼吸速率(表3),但显著影响了小麦种植期农田系统暗呼吸速率(表4、表5).同时, T_3 处理下,3种土壤农田系统平均暗呼吸速率与生物量的比值均呈现升高的趋势(2005 ~ 2006年),特别是 S_3T_3 组比 S_3T_1 组高32.2% ($p < 0.05$)(表5).由此,本研究认为酸雨主要通过影响小麦的呼吸过程而影响农田系统暗呼吸速率.

表 5 农田系统 3~5 月平均暗呼吸速率						
Table 5 Average respiration rate of cropland system treated with simulated rain during March to May						
处理组	2005 ~ 2006 年			2006 ~ 2007 年		
	3 ~ 5 月暗呼吸速率 (以 CO_2 计) / $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	地上部分生 物量/g	暗呼吸/生物量	3 ~ 5 月暗呼吸速率 (以 CO_2 计) / $mg \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$	地上部分生 物量/g	暗呼吸/生物量
S_1T_1	788.8 ± 139.8a	26.9 ± 5.8a	29.5 ± 1.2a	882.1 ± 98.8a	37.6 ± 0.9a	23.5 ± 3.1a
S_1T_2	851.6 ± 24.9a	27.5 ± 3.3a	31.3 ± 3.3a	1 023.6 ± 62.5a	38.6 ± 1.6a	26.6 ± 2.5a
S_1T_3	731.0 ± 245.2a	23.5 ± 5.2a	30.6 ± 5.1a	894.0 ± 120.7a	38.8 ± 1.1a	23.1 ± 3.3a
S_2T_1	1 236.9 ± 173.4a	38.9 ± 1.2a	31.8 ± 4.1a	1 254.9 ± 70.5a	35.0 ± 0.7a	35.9 ± 2.8a
S_2T_2	1 229.8 ± 139.6a	37.8 ± 3.5a	32.9 ± 6.3a	1 235.8 ± 92.5a	42.3 ± 6.2a	29.8 ± 6.3ab
S_2T_3	1 270.6 ± 25.2a	36.0 ± 1.5a	35.4 ± 1.8a	1 202.0 ± 197.1a	37.8 ± 8.5a	32.1 ± 2.6b
S_3T_1	827.4 ± 53.1a	23.9 ± 2.4a	34.8 ± 4.6a	726.6 ± 22.8a	28.7 ± 7.0a	26.3 ± 6.5a
S_3T_2	801.6 ± 69.8a	22.9 ± 1.8a	35.2 ± 4.2a	717.1 ± 58.9a	31.3 ± 5.4a	23.2 ± 3.1a
S_3T_3	1 022.7 ± 122.0b	22.3 ± 2.8a	46.0 ± 2.9b	754.9 ± 23.0a	28.7 ± 1.0a	26.3 ± 0.1a

植物暗呼吸速率是其生长过程中能量代谢状态或受胁迫程度的间接反映^[28].呼吸速率与生物量比值的改变,表明单位生物量生长所消耗能量的变化.该比值的提高,表明酸雨胁迫提高了小麦生长过程中的能量消耗.本研究认为,酸雨通过损伤小麦叶片^[29]、影响小麦营养元素的吸收^[30]、降低光合速率和气体交换^[31]等途径,干扰小麦能量代谢,从而影响农田碳循环.当然酸雨对农田系统暗呼吸的作用机制可能更加复杂.即使酸雨污染程度相近,由于各地土壤酸碱性等差异,不同区域农田碳循环对酸雨的反应并不一致.

3 结论

(1)雨水离子浓度与pH值的差异未改变农田系统暗呼吸的季节动态,但在小麦苗期、抽穗等生长期影响了农田系统暗呼吸速率;雨水通过影响农作物的呼吸过程而对农田系统暗呼吸产生影响;该影响随土壤酸碱性、农作物生长而变化;同时,农田系统能够适应酸雨污染,其暗呼吸速率在酸雨喷淋第1年反应显著.

(2)与中性土壤和酸性土壤农田系统相比,碱性土壤农田系统更易受酸雨的影响, S_3T_3 组平均暗呼吸速率分别比 S_3T_1 组和 S_3T_2 组高23.6%、27.6%(2005 ~ 2006年) ($p < 0.05$);酸雨未显著影响中性土壤和酸性土壤农田系统平均暗呼吸速率 ($p > 0.05$),但雨水离子浓度升高对酸性土壤农田系统暗呼吸具有促进作用,雨水pH值降低对酸性土壤农田系统暗呼吸具有抑制作用.

参考文献:

[1] Menz F C, Seip H M. Acid rain in Europe and the United States: an update [J]. Environ Sci Policy, 2004, 7: 253-265.

[2] IPCC. Climate Change 2001 [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/>, 2001.

[3] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, *et al.* Respiration as main determinant of carbon balance in European forests [J]. Nature, 2000, 404: 861-865.

[4] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change [J]. Geoderma, 2004, 123: 1-22.

[5] Johnson J M F, Franzluebbers A J, Weyers S L. Agricultural opportunities to mitigate greenhouse gas emissions [J]. Environ Pollut, 2007, 150: 107-124.

[6] Zhang X H, Li L Q, Pan G X. Topsoil organic carbon mineralization

and CO₂ evolution of three paddy soils from South China and the temperature dependence [J]. J Environ Sci, 2007, **19**: 319-326.

[7] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO₂ emissions in central Iowa [J]. Appl Soil Ecol, 2008, **39**: 264-270.

[8] Stracher G B, Taylor T P. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe [J]. Int J Coal Geol, 2004, **59**: 7-17.

[9] 吴丹, 王武功, 尚可政. 中国酸雨研究综述 [J]. 干旱气象, 2006, **24**(2): 70-77.

[10] 曾庆玲, 黄晓华, 周青. 酸雨对水稻、小麦和油菜种子萌发的影响 [J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 181-184.

[11] Solberg S, Andreassen K, Clarke N, *et al.* The possible influence of nitrogen and acid deposition on forest growth in Norway [J]. Forest Ecol Manag, 2004, **192**: 241-249.

[12] Blodau C, Moore T R. Micro-scale CO₂ and CH₄ dynamics in a peat soil during a water fluctuation and sulfate pulse [J]. Soil Biol Biochem, 2003, **35**: 535-547.

[13] 王德宣, 张丽华, 宋长春. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响 [J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1257-1263.

[14] 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.

[15] 徐冬梅, 刘广深, 许中坚, 等. 模拟酸雨对土壤酸性磷酸酶活性的影响及机理 [J]. 中国环境科学, 2003, **23**(2): 176-179.

[16] Kemmitt S J, Wright D, Goulding K W T, *et al.* pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils [J]. Soil Biol Biochem, 2006, **38**: 898-911.

[17] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型 [M]. 北京: 气象出版社, 2003.

[18] 南京农学院. 土壤农化分析 [M]. 北京: 农业出版社, 1982.

[19] Munzuroglu O, Obek E, Geckil H. Effects of simulated acid rain on the pollen germination and pollen tube growth of apple (*Malus Sylvestris Miller* cv. *Golden*) [J]. Acta Biol Hung, 2003, **54**(1): 95-103.

[20] Gadallah M A A. Effects of acid mist and ascorbic acid treatment on the growth, stability of leaf membranes, chlorophyll content and some mineral elements of *Carthamus tinctorius*, the safflower [J]. Water Air Soil Poll, 2000, **118**: 311-327.

[21] 隋跃宇, 焦晓光, 张兴义. 不同施肥制度对小麦生育期土壤微生物量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2006, **3**: 48-50.

[22] 王鹤松, 张劲松, 孟平, 等. 华北低山丘陵区冬小麦田土壤呼吸变化规律及其影响机制 [J]. 中国农业气象, 2007, **28**(1): 21-24.

[23] 蔡瑞国, 张敏, 尹燕桦, 等. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究 [J]. 中国农业科学, 2008, **41**(1): 53-56.

[24] 朱咏莉, 吴金水, 童成立, 等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征 [J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1040-1044.

[25] Vrba J, Kopacek J, Fott J, *et al.* Long-term studies (1871-2000) on acidification and recovery of lakes in the Bohemian Forest (central Europe) [J]. Sci Total Environ, 2003, **310**: 73-85.

[26] Chu H Y, Hosen Y, Yagi Y. NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese Andisol was affected by N fertilizer management [J]. Soil Biol Biochem, 2007, **39**: 330-339.

[27] Chung H, Zak D R, Reich P B, *et al.* Plant species richness, elevated CO₂, and atmospheric nitrogen deposition alter soil microbial community composition and function [J]. Global Change Biol, 2007, **13**: 980-989.

[28] 冯玉龙, 曹坤芳, 冯志立, 等. 四种热带雨林树种幼苗比叶重, 光合特性和暗呼吸对生长光环境的适应 [J]. 生态学报, 2002, **22**(6): 901-910.

[29] Sant' Anna-Santos B F, Silva L C, Azevedo A A, *et al.* Effects of simulated acid rain on the foliar micromorphology and anatomy of tree tropical species [J]. Environ Exp Bot, 2006, **58**: 158-168.

[30] 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]. Environ Pollut, 2008, **155**(2): 336-349.

[31] 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.