

增温及模拟酸雨对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响

翟晓燕, 陈书涛*, 刘义凡, 张 旭

(南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘 要:为研究增温及模拟酸雨对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸作用的影响,在农田随机设置 3 个区组试验,每个区组中包含对照(CK)、增温(W)、模拟酸雨(A)、增温及模拟酸雨(WA)共 4 个处理,采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统对不同处理下的农田土壤呼吸速率进行观测,并同步观测土壤温度、土壤湿度。试验结果表明,冬小麦-大豆轮作农田的土壤呼吸速率存在明显的季节变异趋势,其变异性与土壤温度之间存在一致性。在冬小麦-大豆轮作阶段,CK、W、A、WA 处理的平均土壤呼吸速率分别为 (2.69 ± 0.14) 、 (3.19 ± 0.20) 、 (2.59 ± 0.07) 、 $(2.99 \pm 0.18) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。配对 t 检验结果表明:冬小麦田各处理的土壤呼吸速率之间无显著差异($P > 0.05$);在大豆生长季,W 和 A 处理土壤呼吸速率之间存在显著差异($P < 0.05$),A 和 WA 处理之间存在极显著差异($P < 0.01$)。在整个冬小麦-大豆轮作阶段,CK 与 W 处理农田土壤呼吸速率存在差异($P = 0.054$),且 W 与 A 处理农田土壤呼吸速率存在极显著差异($P < 0.01$)。进一步的研究结果表明,每个处理的土壤呼吸与土壤温度之间的关系均可用指数方程描述。对于 A 处理而言,基于土壤温度和湿度的双因子模型比单纯指数模型提高了对土壤呼吸的可解释性。

关键词:增温;模拟酸雨;农田;土壤呼吸

中图分类号:S153 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)12-2381-08 doi:10.11654/jaes.2014.12.015

Effects of Warming and Simulated Acid Rain on Soil Respiration in a Winter Wheat-Soybean Rotation Field

ZHAI Xiao-yan, CHEN Shu-tao*, LIU Yi-fan, ZHANG Xu

(School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Soil respiration is an important process of global C cycling. Warming and acid rain may have impacts on soil respiration. The present study investigated the effects of warming and simulated acid rain on soil respiration in a winter wheat-soybean rotation field. There were control (CK), warming (W), acid rain (A), and warming plus acid rain (WA) combination treatments with three replicates. A randomized block experimental design was used. Soil respiration rates were measured using a portable soil CO₂ fluxes system (LI-8100). Soil temperature and moisture were also simultaneously measured at the time of measuring soil respiration rates. Soil respiration had obvious seasonal patterns during winter wheat-soybean growing period. Seasonal mean of soil respiration rates for CK, W, A, and WA was (2.69 ± 0.14) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $(3.19 \pm 0.20) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $(2.59 \pm 0.07) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and $(2.99 \pm 0.18) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Soil respiration rates were no significant ($P > 0.05$) differences among treatments during the winter wheat growing season, but significantly ($P < 0.05$) higher in W treatment than in A treatment during soybean growing season. Also, highly significant ($P < 0.01$) difference in soil respiration was found between A and WA treatments. During the whole winter wheat-soybean growing season soil respiration rates were higher in W treatment ($P = 0.054$) than in CK, whereas soil respiration means were highly significantly lower in A treatments than in W treatment ($P < 0.01$). For each treatment, soil respiration was significantly exponentially related ($P < 0.001$) with soil temperature. A model including soil temperature and moisture performed better in modeling soil respiration than exponential model did for the A treatment.

Keywords: warming; simulated acid rain; cropland; soil respiration

收稿日期:2014-07-02

基金项目:国家自然科学基金(41375006,41175136);江苏省“青蓝工程”项目

作者简介:翟晓燕(1989—),女,江苏姜堰人,硕士研究生,主要研究方向为农田生态系统碳氮循环与全球变化。E-mail:zhaixy117@sina.com

* 通信作者:陈书涛 E-mail:chenstf@alinyun.com

温室气体排放所导致的全球变暖已引起了人们的广泛关注。全球变暖对生态系统具有重要影响,人们认为全球变暖与温室气体排放有密切关系, CO_2 是最主要的温室气体。酸雨也是严重的环境污染问题,我国酸雨污染日趋严重,不仅在部分南方省市出现了年平均 $\text{pH}<4.0$ 的地区,在北方也有加重趋势^[1-4]。目前,我国很多地区受到严重的酸雨危害,而且据预测未来酸雨污染会继续加重^[5-8]。研究表明:温度升高、酸雨对农田生态系统碳循环过程均会产生影响。为了解未来气候变暖情形下生态系统物质循环和能量流动的规律,人们设计了增温试验来进行科学研究。国内外学者从不同角度研究了增温对生态系统的影响,研究领域主要有:增温对氮循环过程的影响^[9],增温对土壤微生物的影响^[10-11],增温对碳循环过程的影响^[12]等。研究发现,升温可影响作物与周围空气的气体交换速率,提高作物的光合速率,增加其干物质积累^[13],同时温度升高也会提高土壤微生物活性并加速有机碳的分解^[14]。在模拟酸雨对生态系统的影响这一研究领域也已进行了一些研究工作,其中针对农田生态系统的试验研究可以归纳为以下两个方面:一是酸雨对作物生理生长的影响。酸雨会降低作物叶绿素含量,影响作物的光合作用^[15-18],研究表明,酸雨会影响叶片中的细胞器的功能,破坏叶片的膜系统,腐蚀叶肉组织,进而导致作物生物量减少。二是酸雨对土壤微生物及土壤理化性质的影响。酸雨还会影响土壤微生物群落结构和活性^[19],并加速土壤表层盐基离子的淋溶^[20-22]。

土壤呼吸(即土壤 CO_2 排放)是全球碳循环的一个重要过程,全球每年因土壤呼吸作用向大气中释放的碳的估算值为 $75\sim 120 \text{ Pg}^{[23]}$,仅次于全球陆地总初级生产力(GPP)的估算值^[24]。土壤呼吸主要包括土壤中的植物根系呼吸、土壤动物和微生物呼吸,通常可将土壤呼吸划分为植物根系的自养呼吸和土壤微生物的异养呼吸^[25]。大量研究表明,增温、模拟酸雨会对土壤微生物和作物生长产生影响,而土壤呼吸与土壤微生物和作物密切相关,因而在农田生态系统中,受增温或酸雨影响下的土壤呼吸作用可能会呈现出与正常环境条件下不同的变异规律。进一步而言,在全球温度、酸雨强度可能是同时变化的,那么,增温及酸雨对农田土壤呼吸的复合影响规律是怎样的?两个因子的影响效应会互相抵消还是会得以加强?目前还没有足够的研究资料来对这些问题进行解释。因此,有必要在研究温度、酸雨单因子变化对农田土壤呼吸的影响规律的基础上,进一步研究增温及酸雨对农田土

壤呼吸的复合影响规律及机理,并比较这种复合影响与单因子影响的异同。目前,关于酸雨对土壤呼吸的影响研究较少,已有的一些研究主要见于森林生态系统^[26],而在农田生态系统中的相关田间观测试验则更为鲜见。本研究拟通过观测增温及模拟酸雨条件下冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸作用,为更清楚地了解农田土壤呼吸在全球增温和酸雨日趋严重环境下的变异规律提供一定的理论依据和基础研究资料。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

田间试验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),于2012年11月至2013年11月在该试验田进行冬小麦和大豆生长季的大田试验观测。该研究区域多年平均气温为 15.6°C ,多年平均降水量为 1100 mm 。土壤为黄棕壤,灰马肝土属,耕层土壤质地为壤质黏土,黏粒含量为 26.1% ,土壤 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 值为 6.3 ,土壤有机碳和全氮的含量分别为 $19.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,其碳氮比为 16.9 。

1.2 试验设计

供试验的小麦品种为扬麦12号,于2012年11月播种;大豆品种为八月白,于2013年6月播种。在作物的生长季出苗后进行增温及模拟酸雨的处理。采用随机区组实验,试验地划分为3个区组(即3个重复),每个区组设置对照、增温、酸雨、增温及模拟酸雨4个处理,这4个处理对应的编号为:CK、W、A、WA。田间试验小区共计12个,每个小区面积为 $2.5 \text{ m}\times 2.5 \text{ m}$ 。对每个试验小区按照当地常规田间管理模式进行管理。

采用红外辐射加热管对目标小区(即增温小区、增温及模拟酸雨复合处理小区)的土壤增温,每个增温小区中采用3个增温红外辐射加热管,每天通过红外辐射加热管不间断增温。增温管安装在不锈钢罩下,不锈钢罩边缘向下倾斜,防止雨水斜向进入不锈钢罩内淋湿增温管,对照处理仅有不锈钢罩,无红外辐射加热管。每个加热管均通过供电发热,继而对土壤进行散射加热。增温管各自具有独立的电源控制开关,并由漏电总开关控制其开启和关闭。关于增温处理的试验设置亦可见于以往的研究^[27-28]。根据我国酸雨成分以硫酸根为主、硝酸根为次的特点,模拟酸雨的效应以酸雨中氢离子、硫酸根和硝酸根的总量来体现,预先用硫酸和硝酸配制成硫酸根和硝酸根摩尔比为 $4.5:1$ 的酸雨母液,然后用适量母液与去离子水配制

成酸雨供试液。从 2012 年 11 月 20 日至 2013 年 11 月 5 日,每两周喷洒一次模拟酸雨。喷洒模拟酸雨处理的为酸雨处理(A)和增温及酸雨处理(WA)对应的小区,共 6 个小区。每小区每次酸雨中对应的氢离子用量为 $0.016 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$,全年共喷洒 25 次模拟酸雨,每小区每次酸雨量为 1 L,将酸雨以小喷壶均匀喷于各对应处理小区,并在除酸雨处理外的其他处理中喷洒去离子水作为对照以排除水分补充的影响。关于模拟酸雨的试验设置亦可见于以往的研究^[29]。

1.3 土壤呼吸速率测定

在每个生长季开始时,埋设 PVC 材质的土壤呼吸底座,土壤呼吸底座直径 20 cm、高 10 cm,底座埋入土壤中 3 cm,底座周边土壤压紧,以防止底座漏气。于每个采样日的上午采用 LI-8100 开路式土壤碳通量测量系统(LI-COR 公司,美国)对所有处理的土壤呼吸速率进行测定。定期除去底座内的植物,使测定土壤呼吸时无植物呼吸作用影响。

1.4 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 5 cm 深处土壤温度和湿度(体积含水量)。

1.5 数据分析

采用加权累积法计算土壤呼吸总量,然后除以土壤呼吸的观测天数得到加权平均土壤呼吸速率。利用 SPSS16.0 统计软件进行配对 *t* 检验,分析不同生长季各处理的平均土壤呼吸速率差异。利用 Excel2003 制作土壤呼吸与土壤温度之间的指数回归图。利用 Systat10 软件建立基于土壤温度和土壤湿度的土壤呼吸双因素模拟模型。

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-大豆轮作农田的土壤温度存在明显的季节变异趋势。冬小麦田土壤温度介于 $8.7 \sim 27.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,大豆田温度介于 $18.2 \sim 32.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 1a)。W 处理、WA 处理分别比 CK 的年平均土壤温度高 $0.67 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.60 \text{ }^{\circ}\text{C}$,*t* 检验结果表明,其差异达到统计意义上的极显著水平($P < 0.001$)。冬小麦土壤湿度的变异范围为 $5.6\% \sim 20.7\%$,大豆土壤湿度的变异范围为 $9.8\% \sim 22.6\%$ (图 1b)。4 月中旬的土壤湿度较其他月份略低,与当地降雨量的季节性有关。在冬小麦生长季,冬季土壤温度较低时土壤湿度相对较高;在大豆生长季,土壤温度和土壤湿度的最高值均出现在夏季

(8 月初)。冬小麦 CK、W、A、WA 处理土壤呼吸速率的变化范围分别为 $0.63 \sim 2.50$ 、 $0.67 \sim 3.77$ 、 $0.59 \sim 2.74$ 、 $0.76 \sim 2.52 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大豆 CK、W、A、WA 处理土壤呼吸速率的变化范围分别为 $1.97 \sim 6.76$ 、 $1.74 \sim 5.38$ 、 $1.88 \sim 7.26$ 、 $1.25 \sim 6.98 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 1c)。冬小麦和大豆田 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,而在 5 月份土壤呼吸速率略有下降,可能与该阶段土壤湿度相对较低有关(图 1b、c)。

对于冬小麦-大豆轮作周期而言,最高土壤呼吸速率出现在 8 月底至 9 月初,该阶段处于大豆旺盛生长的时期,虽然该阶段土壤温度低于 8 月初,但该期间大豆根呼吸随着植物的旺盛生长而增强,由此导致大豆田最高土壤速率出现于 8 月底至 9 月初这一阶段。

2.2 土壤呼吸的季节平均值比较

冬小麦 CK、W、A、WA 处理的平均土壤呼吸速率分别为 (1.65 ± 0.10) 、 (1.99 ± 0.24) 、 (1.65 ± 0.03) 、 $(1.54 \pm 0.12) \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,大豆生长季 CK、W、A、WA 处理的平均土壤呼吸速率均高于小麦生长季,分别为 (4.13 ± 0.19) 、 (4.85 ± 0.42) 、 (3.90 ± 0.14) 、 $(5.01 \pm 0.36) \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 1)。配对 *t* 检验结果表明,在大豆生长季,CK 和 WA 处理间的土壤呼吸存在差异($P = 0.065$),W 和 A 处理间差异显著($P < 0.05$),A 和 WA 处理间差异极显著($P < 0.01$);在冬小麦-大豆轮作期内,CK 和 W 处理间的土壤呼吸速率存在差异($P = 0.054$),W 和 A 处理间存在极显著差异($P < 0.01$)。由于不同处理的观测天数相同,对于不同生长季的总 CO_2 量而言,其季节总 CO_2 排放量的统计分析结果与季节平均值一致。统计分析结果表明,无论是在冬小麦生长季、大豆生长季,相对于 CK 处理而言,增温、模拟酸雨两因子对土壤呼吸无交互作用。这可能是由于增温对土壤呼吸的促进作用和模拟酸雨对土壤呼吸的抑制作用相互抵消所致。进一步分析可见,大豆生长季和冬小麦-大豆轮作阶段不同处理的土壤呼吸速率具有一致性,即:增温相对于对照而言促进土壤呼吸,模拟酸雨相对于对照而言抑制土壤呼吸,在两因子复合处理中,增温的促进作用和模拟酸雨的抑制作用抵消。

2.3 土壤呼吸的影响因素

土壤温度是影响土壤呼吸时间变异的主要决定因子。由图 2 可见不同处理的 R^2 均在 50% 以上,CK、W、A、WA 处理的 R^2 分别为 0.632 、 0.694 、 0.597 、 0.719 ,表明 CK、W、A、WA 处理的土壤温度可以决定

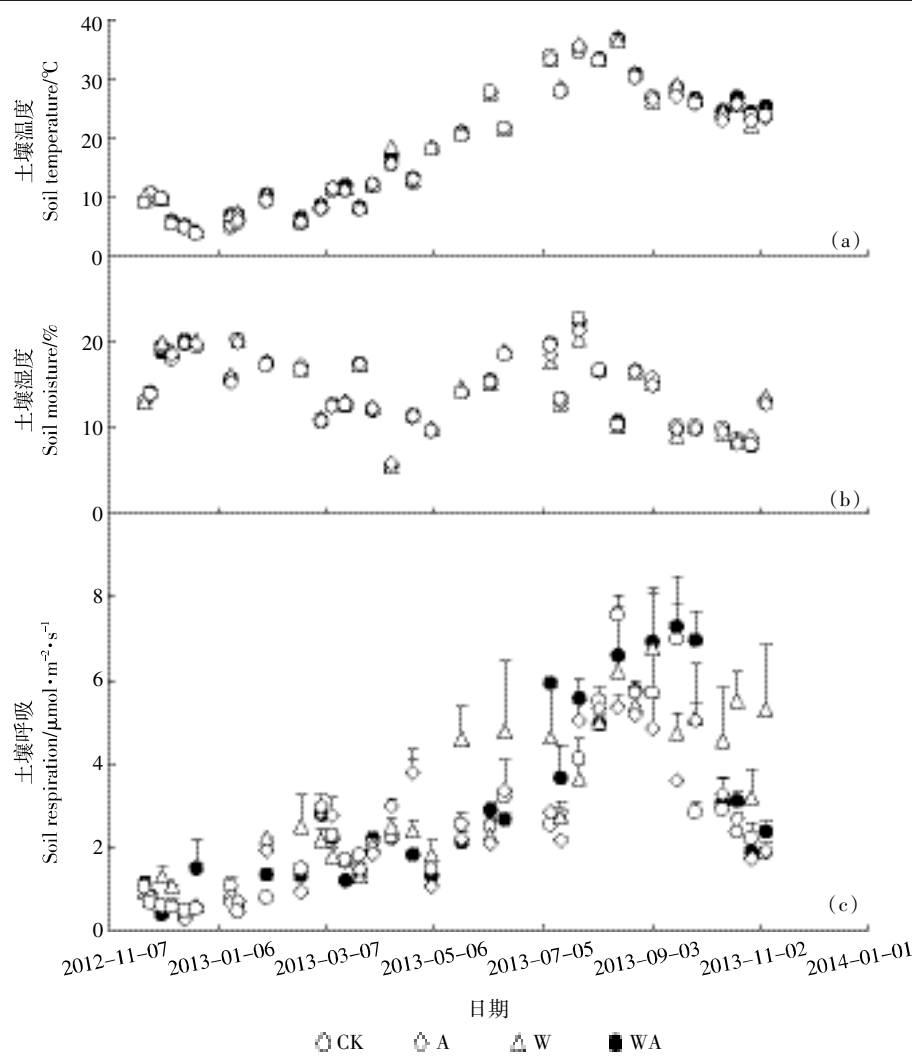


图 1 土壤温度、土壤湿度以及土壤呼吸速率的季节变化

Figure 1 Seasonal changes of soil temperature, moisture and respiration rate in winter wheat–soybean system

表 1 不同生长季的平均土壤呼吸速率(μmol·m⁻²·s⁻¹)

Table 1 Average soil respiration rates(μmol·m⁻²·s⁻¹) during different growth periods

生长季	处理			
	CK	W	A	WA
冬小麦	1.65±0.10a	1.99±0.24a	1.65±0.03a	1.54±0.12a
大豆	4.13±0.19ac	4.85±0.42bc	3.90±0.14a	5.01±0.36b
冬小麦-大豆轮作	2.69±0.14a	3.19±0.20b	2.59±0.07a	2.99±0.18ab

注:配对 *t* 检验结果表明,在大豆生长季,CK 和 WA 处理间的土壤呼吸存在差异($P=0.065$),W 和 A 处理间差异显著($P<0.05$),A 和 WA 处理间差异极显著($P<0.01$);在冬小麦-大豆轮作期内,CK 和 W 处理间的土壤呼吸速率存在差异($P=0.054$),W 和 A 处理间存在极显著差异($P<0.01$).

63.2%、69.4%、59.7%、71.9%的土壤呼吸的变异,其 P 值均达到极显著差异水平。CK、W、A、WA 处理的 Q_{10} 值分别为 1.85、1.85、1.81、2.00, 处理间的 Q_{10} 未达到显著差异水平。由图 2 可见,W 处理的基础土壤呼吸值(即温度为零时的土壤呼吸速率)高于其他 3 个处理,表明增温显著促进了基础土壤呼吸速率。

由于土壤呼吸可能受土壤温度与土壤湿度双因

素控制,故在土壤呼吸与土壤温度的指数关系的基础上增加土壤湿度项,以期提高对土壤呼吸的可解释性。与图 2 相比,增加土壤湿度的线性项之后模型对于 A 处理土壤呼吸的可解释性有所提高(图 2、表 2),A 处理模型的决定系数 R^2 从 0.597 增大为 0.637。除 A 处理之外,其他处理在土壤温度单因子模型基础上增加湿度项并未提高对土壤呼吸的可解释性。

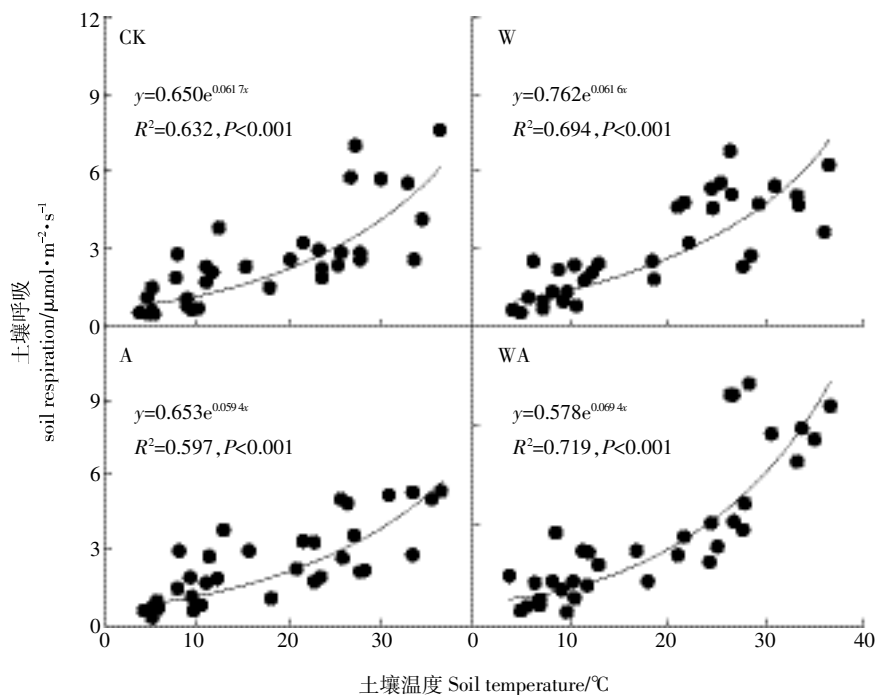


图 2 土壤呼吸与土壤温度的关系

Figure 2 Relationship between soil respiration and soil temperature

表 2 不同处理的土壤呼吸与土壤温度、湿度的拟合方程

Table 2 Equations fitting the relationship between soil respiration and soil temperature and soil moisture under different treatments

处理	拟合方程	R^2	P
CK	$R_s=0.308e^{0.088t}-10.539m+2.314$	0.636	<0.001
W	$R_s=0.566e^{0.062t}-9.299m+2.181$	0.630	<0.001
A	$R_s=0.676e^{0.055t}-7.088m+1.362$	0.637	<0.001
WA	$R_s=1.277e^{0.049t}-3.719m-0.202$	0.718	<0.001

注:方程中 R_s 、 t 、 m 分别代表土壤呼吸、土壤温度、土壤湿度。

3 讨论

3.1 增温对土壤呼吸的影响

增温对土壤呼吸的影响规律及其机理是增温对生态系统碳循环过程影响研究中的热点,以往采用野外增温试验研究土壤呼吸的工作主要在草地、森林或苔原地进行。一些研究结果表明,土壤呼吸对温度升高呈现出正反馈的响应规律,即增温促进土壤呼吸作用;另一些研究结果则表明,增温虽然在短期内可促进土壤呼吸作用,但在较长的时间尺度内无明显促进作用^[30],并且土壤呼吸对温度的敏感性随温度的升高而降低^[30-31]。本研究,在冬小麦-大豆轮作生长季增温处理的土壤呼吸速率高于对照,即增温促进了土壤呼吸作用。增温往往会增大植物光合速率,使其 NPP 增加^[32],从而促进根呼吸作用并增加了根际分泌物

向土壤的输送^[25];温度升高本身还会促进土壤微生物呼吸和根呼吸^[33]。Rustad 等^[34]通过对增温试验的结果进行大样本数据分析后指出,平均而言,土壤增温 0~6 °C 可使土壤呼吸增加 20%。我们前期的研究结果显示增温促进冬小麦生长季和大豆生长季土壤呼吸^[27],但本研究的结果显示增温并未促进冬小麦生长季和大豆生长季的土壤呼吸(表 1)。Luo 等^[30]在美国俄克拉荷马州草地进行的研究也表明,在试验前期增温显著促进了草地土壤呼吸作用,然而随着时间延长,土壤呼吸对增温的响应程度减弱,产生了对增温的适应效应。造成这种适应效应的原因可能是由于土壤微生物群落发生了变化以及土壤养分对于土壤呼吸量增加的限制性^[30]。

3.2 模拟酸雨对土壤呼吸的影响

本研究为了排除水分补充的影响,在用模拟酸雨喷洒酸雨处理的同时在无酸对照中喷洒去离子水,其他处理也喷洒了等同量的去离子水,以避免不同处理因水分量不同给试验结果带来的影响。另外,本研究中采用了高酸雨浓度、低模拟酸雨用量的试验方案,是基于避免模拟酸雨灌溉效应的考虑。

以往的研究表明,酸雨会影响土壤性质,这种影响以负面为主^[21-22],酸雨会加速土壤表层盐基离子的淋溶,使土壤养分缺乏,导致减产^[20-22]。还有研究表明,酸雨对作物生理生长也会产生负面影响^[15,18]。目前,关

于酸雨对土壤呼吸的直接影响的研究主要见于森林生态系统,酸雨对土壤呼吸的影响也主要是负面影响^[26]。我们以往的研究表明,模拟酸雨未显著影响冬小麦田土壤呼吸作用,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^[29]。在本研究中,酸雨处理的土壤呼吸速率与对照处理无显著差异,但显著低于增温处理,说明酸雨对土壤呼吸的抑制作用客观存在。此外,模拟酸雨对土壤呼吸的影响规律在不同的生长季有所不同,模拟酸雨仅在大豆生长季抑制了土壤呼吸作用(表1),冬小麦田模拟酸雨对土壤呼吸速率无显著影响。一方面,酸雨中的 H^+ 对土壤微生物、酶活性具有抑制作用^[35-36],进而会影响到土壤呼吸作用;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,观测结束后,测定的各处理土壤pH值与试验前的量值无显著差异($P>0.05$),可能与土壤对模拟酸雨的缓冲作用有关。因此,模拟酸雨对土壤呼吸的影响可能体现为长期效应,短期的模拟酸雨对农田土壤呼吸无显著影响。

3.3 增温及模拟酸雨对土壤呼吸的复合影响

在本研究中,增温对土壤呼吸表现为正效应,即促进土壤呼吸作用;模拟酸雨对土壤呼吸未表现出抑制作用;虽然模拟酸雨处理与对照处理土壤呼吸未达到显著差异水平,但模拟酸雨处理相对于增温处理而言显著抑制了土壤呼吸作用。增温及模拟酸雨双因子处理对土壤呼吸的影响表现为两因子各自效应的复合,两因子复合后未显著影响农田土壤呼吸速率,这也从另一方面说明增温对土壤呼吸的促进作用和模拟酸雨对土壤呼吸的抑制作用。在以往的研究中,我们已经分别研究了增温和模拟酸雨对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响,综合以往研究和本研究结果可见,不同研究中增温和模拟酸雨对农田土壤呼吸的单因子影响效应基本一致。然而,在以往的研究中增温、模拟酸雨对农田土壤呼吸的这种复合影响机制尚未报道^[27-29],在今后的研究中,有必要更深入地研究两因子对土壤呼吸的复合影响机制。

3.4 土壤温度、湿度对土壤呼吸季节变异的影响

土壤温度和湿度是影响土壤呼吸的主要环境因子。目前,人们描述土壤温度与土壤呼吸关系的方程主要有线性方程、指数方程、Arrhenius模型等^[37]。这些方程在模拟土壤呼吸时各有优点,如:Lloyd和Taylor^[37]指出,由于Arrhenius模型中低温条件下的活化能较高,它对于低温条件下土壤呼吸速率的估算结果尤为准确;Fang和Moncrieff^[38]的研究表明,指数模

型可以较好地模拟农田土壤呼吸与土壤温度的关系,土壤温度可以模拟大部分的土壤呼吸的变异。本研究结果与以往结果具有一致性,在4个处理中土壤温度均可以解释59%以上的土壤呼吸的变异(图2),无论在增温还是模拟酸雨条件下土壤温度都是影响农田土壤呼吸季节性变异的主控因子。

研究表明,在土壤温度相对稳定的旱地,土壤呼吸与湿度的函数关系可以表示为指数函数,前者随后者的增大而增加^[38-39],土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响还常常有交互作用^[40]。在本研究中,在考虑土壤温度和土壤湿度两因子的条件下,仅模拟酸雨处理在原有土壤温度对土壤呼吸的指数影响函数的基础上增加土壤湿度线性项可增加对土壤呼吸的可解释性。在其他处理条件下,加入土壤湿度的线性项未能增加对土壤呼吸的可解释性。此外,由于图2土壤呼吸与温度之间关系的数据点较为离散,且表2所示线性回归的可解释性并不充分(土壤呼吸与湿度的关系还可能体现为其他影响方式),因而关于不同处理条件下土壤呼吸与土壤湿度的关系还有待进一步深入研究。

4 结论

(1)在冬小麦生长季,对照、增温、模拟酸雨、增温及模拟酸雨土壤呼吸速率之间无显著差异;在大豆生长季,增温处理土壤呼吸速率显著高于模拟酸雨处理,增温及模拟酸雨处理的土壤呼吸速率极显著高于模拟酸雨处理。

(2)对于冬小麦-大豆轮作农田而言,增温与对照处理的土壤呼吸速率存在差异,前者高于后者的土壤呼吸速率;模拟酸雨处理的土壤呼吸速率极显著地低于增温处理。

(3)土壤温度是影响冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸季节性变异的最重要的因子,土壤呼吸与温度之间的关系可用指数方程解释。模拟酸雨处理在增加土壤湿度的线性项之后可增加对于土壤呼吸的可解释性,而其他处理增加湿度项后并未提高对于土壤呼吸的可解释性。

致谢:感谢南京信息工程大学苏欢、王鹏和刘玉汐在样本采集及测定中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Wang W X, Xu P J. Research progress in precipitation chemistry in China[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(2-3):266-281.
- [4] Zhang X Y, Jiang H, Jin J X, et al. Analysis of acid rain patterns in Northeastern China using a decision tree method[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46(1):590-596.
- [5] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析[J]. *应用气象学报*, 2004, 15(增刊):85-94.
- DING Guo-an, XU Xiao-bin, WANG Shu-feng, et al. Database from the acid rain network of China meteorological administration and its preliminary analyses[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(Suppl):85-94.
- [6] 赵艳霞, 侯 青. 1993—2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. *气象学报*, 2008, 66(6):1032-1042.
- ZHAO Yan-xia, HOU Qing. An analysis on spatial/temporal evolution of acid rain in China(1993—2006) and its causes[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(6):1032-1042.
- [7] Menz F C, Seip H M. Acid rain in Europe and the United States: An update[J]. *Environmental Science and Policy*, 2004, 7(4):253-265.
- [8] Fenger J. Air pollution in the last 50 years – from local to global[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1):13-22.
- [9] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures[J]. *Ecological Applications*, 1994, 4(3):617-625.
- [10] 张卫建, 许 泉, 王绪奎, 等. 气温上升对草地土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(8):1742-1747.
- ZHANG Wei-jian, XU Quan, WANG Xu-kui, et al. Impacts of experimental atmospheric warming on soil microbial community structure in a tallgrass prairie[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8):1742-1747.
- [11] Papatheodorou E M, George P S, Anna G. Response of soil chemical and biological variables to small and large scale changes in climatic factors[J]. *Pedobiologia*, 2004, 48(4):329-338.
- [12] Wan S Q, Xia J Y, Liu W X, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration[J]. *Ecology*, 2009, 90(10):2700-2710.
- [13] Reddy R A, Reddy K R, Hodges H F. Interactive effects of elevated carbon dioxide and growth temperature on photosynthesis in cotton leaves[J]. *Plant Growth Regulation*, 1998, 26(1):33-40.
- [14] Knorr W, Prentice I C, House J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. *Nature*, 2005, 433(7023):298-301.
- [15] 童贯和, 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.
- [16] 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.
- [17] 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(9):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.
- [18] 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(1):71-80.
- [19] 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 and Environmental Microbiology*, 1998, 64(6):2173-2180.
- [20] Hans M S, Zhao D W, Xiong T L, et al. Acidic deposition and its effects in Southwestern China[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2005, 85(4):2301-2306.
- [21] 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.
- [22] Varies D, Posh M, Kämäri J. Simulation of the long-term soil response to acid deposition in various buffer ranges[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1989, 48(3):349-390.
- [23] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M, et al. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems[J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73(1):29-70.
- [24] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44B(1):81-99.
- [25] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3):425-448.
- [26] 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.
- [27] 刘 艳, 陈书涛, 胡正华, 等. 模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2012, 33(12):4205-4211.
- LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, et al. Effects of simulated warming on soil respiration in a cropland under winter-soybean rotation[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(12):4205-4211.
- [28] 刘 艳, 陈书涛, 刘 燕, 等. 增温对农田土壤碳氮循环关键过程的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(4):674-679.
- LIU Yan, CHEN Shu-tao, LIU Yan, et al. Effects of simulated warming

- on the key processes of soil carbon and nitrogen cycling in a cropland[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(4):674-679.
- [29] 史艳姝, 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.
- SHI Yan-shu, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, et al. Effects of simulated acid rain on soil respiration, nitrification and denitrification in a winter wheat soybean rotation cropland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2503-2510.
- [30] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856):622-625.
- [31] Tjoelker M G, Oleksyn J, Reich P B. Acclimation of respiration to temperature and CO₂ in seedlings of boreal tree species in relation to plant size and relative growth rate[J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(6):679-691.
- [32] Peñuelas J, Cardon C, Llorens L. Nonintrusive field experiments show different plant responses to warming and drought among sites, seasons, and species in a North-South European gradient[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(6):598-612.
- [33] Höglberg P, Nordgren A, Buchmann N, et al. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration[J]. *Nature*, 2001, 411(6839):789-792.
- [34] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and above-ground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126(4):543-562.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. *Functional Ecology*, 1994, 8(3):315-323.
- [38] Fang C M, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(2):155-165.
- [39] Hui D, Luo Y. Evaluation of soil CO₂ production and transport in Duke Forest using a process-based modeling approach[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(4), GB4029, doi: 10.1029/2004GB002297.
- [40] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2):217-227.