

刘 远, 潘根兴, 张 辉, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对麦田土壤呼吸和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1484–1491.

LIU Yuan, PAN Gen-xing, ZHANG Hui, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil respiration and enzyme activity in a wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1484–1491.

大气 CO₂ 浓度和温度升高对麦田土壤呼吸和酶活性的影响

刘 远¹, 潘根兴², 张 辉¹, 李 峰¹, 王光利^{1*}

(1. 淮北师范大学生命科学学院, 淮北 235000; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘 要:以同步模拟大气 CO₂ 浓度和温度升高的田间开放式气候变化平台为依托, 研究大气 CO₂ 浓度和温度的对照处理(CK)、CO₂ 浓度升高(CE)、试验增温(WA) 以及两者同时升高(CW) 对小麦土壤呼吸、脲酶和转化酶的影响。结果表明:与对照相比, CE 处理的小麦季土壤呼吸速率没有显著变化, 而升温处理(WA 和 CW) 的土壤呼吸速率显著提高; 在分蘖期土壤脲酶和转化酶活性没有明显变化, 在抽穗和成熟期, 升温处理显著提高了转化酶活性, 而 CE 处理显著提高了抽穗期转化酶活性; 与对照相比, CE 处理土壤脲酶活性没有变化, 而 WA 处理显著提高了抽穗期的土壤脲酶活性。可见, 大气 CO₂ 浓度和温度升高对不同生育期的土壤呼吸和酶活性影响存在差异, 而且土壤呼吸、脲酶和转化酶活性对温度升高的响应比较敏感。

关键词:CO₂ 浓度增加; 试验增温; 冬小麦; 酶活性; 土壤呼吸

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)08-1484-08 **doi:**10.11654/jaes.2016-1588

Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil respiration and enzyme activity in a wheat field

LIU Yuan¹, PAN Gen-xing², ZHANG Hui¹, LI Feng¹, WANG Guang-li^{1*}

(1. College of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The aim of this study was to examine the effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil respiration and urease and invertase activity in an open field. Field treatments included ambient CO₂ concentration and air temperature (CK), elevated CO₂ concentration (CE), experimental air warming (WA), and interactive CO₂ enrichment and air warming (CW). The results showed that soil respiration rates increased significantly under WA and CW as compared to that under CK, while those of CE did not change significantly in the wheat-growing season. At the tillering stage, there were no changes in the activities of urease or invertase. However, the invertase activity under CW and WA was increased significantly at the heading and ripening stages, while that of CE only increased at the heading stage. Compared to CK, there was no significant change in the urease activity under CE treatment, but WA treatment resulted in increases in the urease activity at ripening stages. These findings suggested that the effects of elevated CO₂ and warming on soil respiration and enzyme activities were different among the tillering, heading, and ripening stages. The responses of soil respiration, urease, and invertase were much more sensitive to warming than to elevated CO₂.

Keywords: elevated CO₂ concentration; experimental warming; winter wheat; enzyme activity; soil respiration

收稿日期: 2016-12-12

作者简介: 刘 远(1986—), 男, 安徽淮北人, 博士, 讲师, 主要研究全球气候变化和土壤微生物分子生态。E-mail: liuyuan0813@aliyun.com

* 通信作者: 王光利 E-mail: wanf-3344@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501304, 31100083); 公益性行业(农业)科研专项(200903003)

Project supported: The National Science Foundation of China(41501304, 31100083); Special Found for Agro-scientific Research in the Public Interest of China(200903003)

土壤呼吸是陆地生态系统中重要的碳通量过程,是有机碳以 CO₂ 释放大气中的主要途径^[1]。研究表明,每年从土壤释放大气中的碳已达到 98 Pg·a⁻¹^[2],因此,土壤呼吸的微小变化可能对大气 CO₂ 浓度产生很大影响。土壤酶主要在土壤颗粒、植物根系或微生物细胞表面发生酶促作用,易受到理化因素和生物因素的影响,土壤酶活性的变化是最能够反映土壤生态系统变化的过程^[3]。

IPCC(政府间气候变化专门委员会)第四次评估报告(2007)预测,到 21 世纪末全球平均 CO₂ 浓度将上升到 500~900 μmol·mol⁻¹, 全球气温将上升 1.4~5.8 °C^[4]。以大气 CO₂ 浓度和温度升高为主要特点的全球气候变化能够改变陆地生态系统的结构和功能^[5]。目前,国内外大部分研究表明大气 CO₂ 浓度升高促进了土壤呼吸速率^[6-8],但是也有研究发现 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸没有影响^[9],甚至抑制了土壤呼吸^[10]。温度是土壤酶活性的一个非常重要的影响因子,以气候变暖为主要特征的全球气候变化势必会影响到土壤酶的活性。温度升高可以直接作用于土壤酶活性和微生物^[11],也可以通过改变植物的生理特性而间接影响土壤酶活性^[12]。如 Zogg 等^[13]研究发现模拟升温改变了有机物质的分解模式,并通过影响土壤微生物而改变土壤酶的活性。但也有些学者认为,温度变化对土壤酶活性的影响很小甚至没有^[14-15]。可见供试土壤特性、植物类型、CO₂ 浓度或温度增加方式等的不同,导致大气 CO₂ 浓度升高和升温对土壤酶活性、土壤呼吸的研究尚未得出一致的结论。

小麦是我国重要的农田生态系统之一,开展大气 CO₂ 浓度升高和升温对小麦系统土壤生物功能的影响研究,有助于阐明农田土壤对 CO₂ 浓度升高和升温的响应和反馈作用。本研究依托同步模拟大气 CO₂ 浓度和温度升高的田间开放式平台(该系统除了大气 CO₂ 浓度和温度增加外,其他条件十分接近自然生态环境),以我国太湖地区小麦土壤作为研究对象,利用田间原位测定方法对土壤呼吸进行测定,结合比色法测定土壤脲酶和转化酶活性,为预测未来气候变化背景下,农田土壤呼吸和酶活性的变化及其对碳氮循环的可能影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验平台位于江苏省常熟市古里镇康博村(31°30'N, 120°33'E),试验区地处太湖平原,年平均温度

16 °C, 年平均降水量大于 1100 mm, 年无霜期大于 200 d,耕作方式为夏水稻、冬小麦轮作。土壤类型为典型水稻土-乌栅土,耕层土壤(0~15 cm)基本性质:pH 7.0,有机碳含量 19.2 g·kg⁻¹,总氮含量 1.6 g·kg⁻¹,容重 1.2 g·cm⁻³。土壤质地:砂粒 33.8%,粉粒 38.6%,粘粒 27.6%。

1.2 试验设计

田间开放式气候变化试验平台建于 2010 年。共设置四个试验处理:大气 CO₂ 浓度增高至 500 μmol·mol⁻¹(CE);温度升高 2 °C(WA);大气 CO₂ 浓度和温度共同升高(CW),以及正常 CO₂ 浓度和温度的对照处理(CK),每个处理各设 3 个重复,共 12 个试验圈。平台设计见图 1,每个试验圈面积约 45 m²(直径 8 m,八边形构造),所有试验圈外观上基本保持一致。每个 CO₂ 浓度升高圈由 8 根 CO₂ 气体释放管构成八边形结构,放气管面向圈内一面有一排释放 CO₂ 气体的小孔,放气管高度可随着作物生长进行调节(放气管的高度保持在作物冠层上方 50~60 cm),以保证作物冠层有充分的气体扩散空间。每个圈内设定 17 个 CO₂ 传感器(Licor820)和数据采集控制装置,对小区内近冠层 CO₂ 浓度进行实时监测和控制,以判定圈内 CO₂ 浓度的控制均匀程度。根据不同风向控制电动阀门的开关,通过不同风速控制调节阀,控制放气管 CO₂ 喷气的方向和流量,达到均匀扩散的目的。升温设置按 IPCC 第四次评估报告的气候变化最大情景,根据中国气候变化的区域差异设置温度条件,设置升温 2 °C。温度升高处理圈采用红外辐射灯对作物冠层进行增温,并通过红外温度传感器及相应的数据采集器实时监测和控制作物冠层温度变化,每个圈内有 12 个红外灯,通过调节其不同的朝向,保证圈内作物冠层均匀受热。近冠层空气温度的监测结果表明实际气温

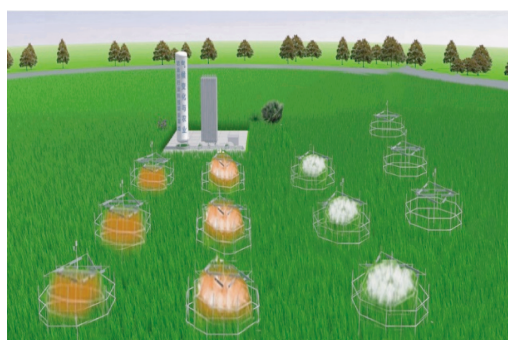


图 1 野外模拟气候变化试验平台示意

Figure 1 Schematic diagram of simulated climate change field condition platform

升高范围为 $(2.0\pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。试验平台的 CO_2 气体排放和升温在所允许的气候条件下为24 h全天候运行。

1.3 土壤呼吸测定

供试小麦品种为扬麦14号,试验各处理圈内小麦行距、施肥喷药等管理措施与小区外一致,2014年11月12日播种,播种密度为 $250\text{粒}\cdot\text{m}^{-2}$,行距20 cm,2015年6月6日收获。在播种前施用 $187\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素作为基肥,在抽穗期追施 $375\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 复合肥和 $150\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素。

从小麦生长季开始,埋设直径20 cm、高10 cm的PVC圈,将其插入土内5 cm左右,每个试验处理设置1个PVC圈。所有观测均于上午08:00—10:00进行,每7 d测定一次,采用便携式土壤呼吸测量仪CI-340(CID公司,美国)对各个试验圈的土壤呼吸进行测定。土壤5 cm温度由呼吸测量仪自带的温度探头在土壤呼吸测量圈周围测得。

1.4 土壤酶活性测定

选取小麦季的3个生育期进行采样:分蘖期、抽穗期和成熟期,采集0~15 cm根际土壤。根据不同生育期植株根系发育情况,随机选择3~5株,采用抖根法收集根周0~2 mm范围内土壤作为根际土壤,每个圈内根际土壤充分混合。将混合新鲜土样过2 mm筛

后装入无菌自封袋带回实验室,在室温下风干,采用苯酚-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性,采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定转化酶活性。

1.5 数据处理

采用Microsoft Excel 2003进行数据统计分析,采用SPSS 20.0软件进行方差分析(ANOVA)和多重比较,检验同一采样时期处理之间差异是否显著使用Duncan法。

2 结果与分析

2.1 大气 CO_2 浓度和温度升高对土壤温度和土壤呼吸的影响

从图2a可以看出,小麦田CK、CE、WA和CW处理土壤温度分别介于 $9.4\sim 23.8^\circ\text{C}$ 、 $9.9\sim 24.2^\circ\text{C}$ 、 $10.9\sim 25.3^\circ\text{C}$ 、 $10.5\sim 25.5^\circ\text{C}$ 之间,不同处理土壤温度的季节变化规律相似,WA和CW处理土壤温度分别比CK高 1.26°C 和 1.14°C 。小麦土壤呼吸在冬季较低,进入春季后,土壤呼吸具有逐渐升高的趋势(图2b)。CK、CE、WA和CW处理土壤呼吸的季节变化范围分别为 $0.86\sim 2.55$ 、 $0.86\sim 2.81$ 、 $1.12\sim 3.55$ 、 $0.99\sim 3.28\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。小麦季CK、CE、WA和CW处理的平均土壤呼吸分别达到 1.41 、 1.53 、 2.13 、 $1.90\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3)。与

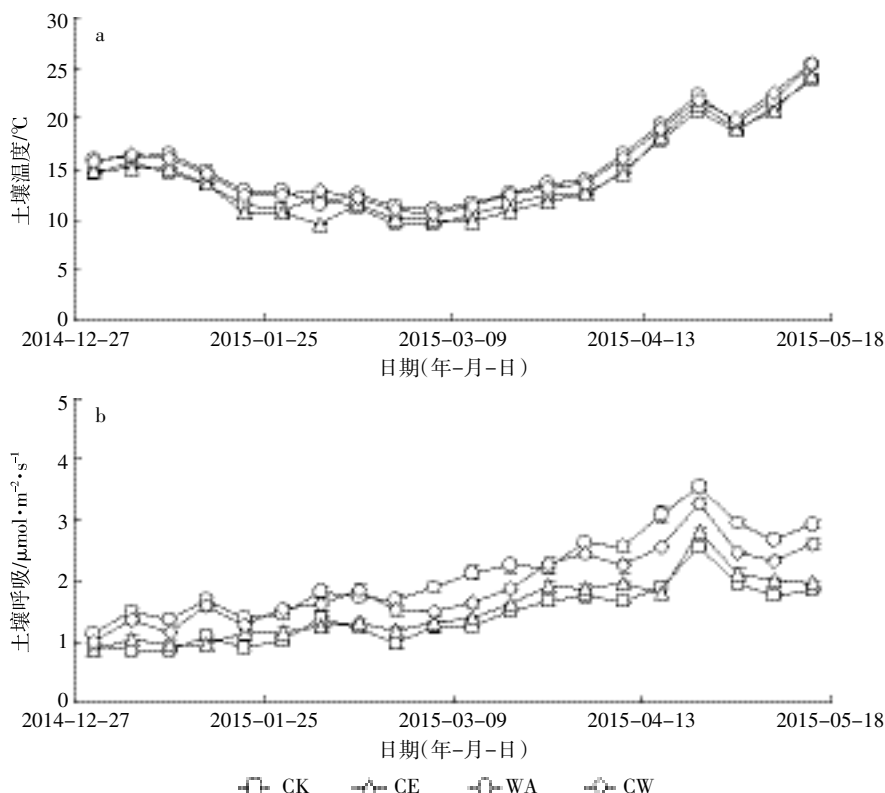


图2 大气 CO_2 浓度和温度升高条件下土壤温度和土壤呼吸的季节变化

Figure 2 Seasonal variabilities in soil temperature and respiration under elevated atmospheric CO_2 concentration and temperature

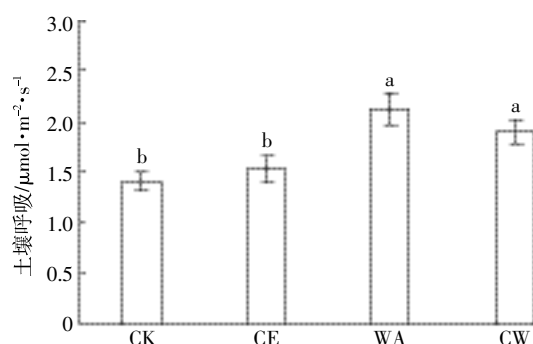


图3 小麦季的土壤呼吸平均值

Figure 3 Seasonal mean values of soil respiration

对照 CK 相比,CE 处理土壤呼吸提高了 8.5%,WA 和 CW 处理土壤呼吸提高幅度分别为 51.0%和 34.7%,已经达到显著水平。

2.2 土壤呼吸与土壤温度的关系

不同气候变化处理下土壤呼吸与土壤温度的关系均可用指数回归方程拟合(图 4)。结果表明,在小麦生长季,CK、CE、WA、CW 处理的指数回归方程的决定系数 R^2 分别为 0.343、0.288、0.335 和 0.311,表明指数回归方程可分别解释这 4 个处理 34.3%、28.8%、33.5% 和 31.1% 的变异,且 P 值均达到显著水

平。根据指数回归方程估算,小麦生长季 CK、CE、WA、CW 处理的土壤呼吸温度敏感系数分别为 1.55、1.49、1.57 和 1.51。

2.3 大气 CO₂ 浓度和温度升高对土壤酶活性的影响

如图 5 所示,小麦季土壤脲酶和转化酶活性变异较大,在分蘖期脲酶和转化酶的活性最高。然而,不同生育期的酶活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应不同。在分蘖期大气 CO₂ 浓度和温度升高对脲酶和转化酶活性没有影响,在抽穗期 CW 和 WA 处理的脲酶活性显著高于对照,成熟期只有 WA 处理的脲酶活性比对照有显著升高;而在抽穗和成熟期,WA 和 CW 处理的转化酶活性与对照相比显著提高,在抽穗期提高幅度最大(60.4%~73.5%)。

2.4 气候变化因子和物候对土壤呼吸及酶活性的影响

从重复测量方差分析结果(表 1)可以看出,生育期(S)、升温处理(T 和 CO₂×T)对土壤呼吸具有显著影响($P<0.001$)。但是,生育期与温度因子的交互作用对土壤呼吸没有显著影响($P>0.05$)。同时,生育期和升温处理对脲酶、转化酶活性具有显著影响($P<0.05$),而 CO₂ 单独升高只对转化酶活性有显著影响。另外,生育期与不同气候变化因子的交互作用对土壤呼吸没有显著影响($P>0.05$)。

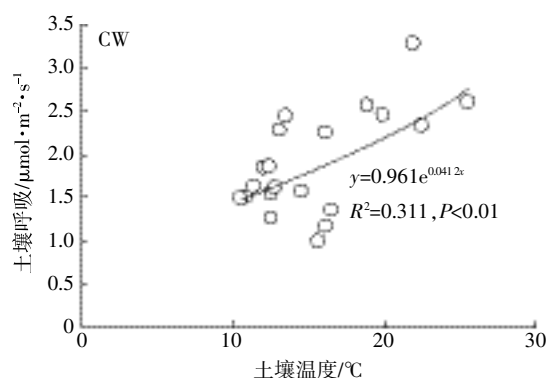
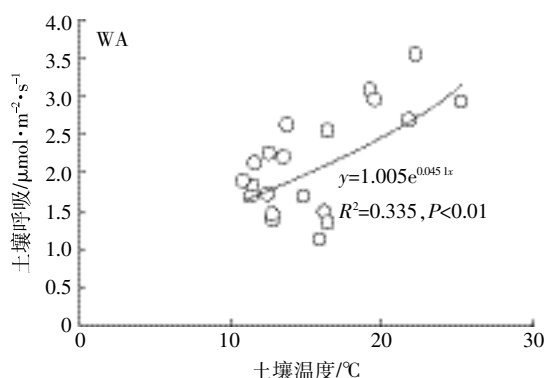
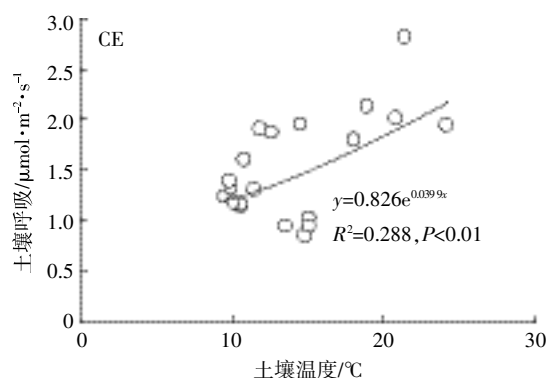
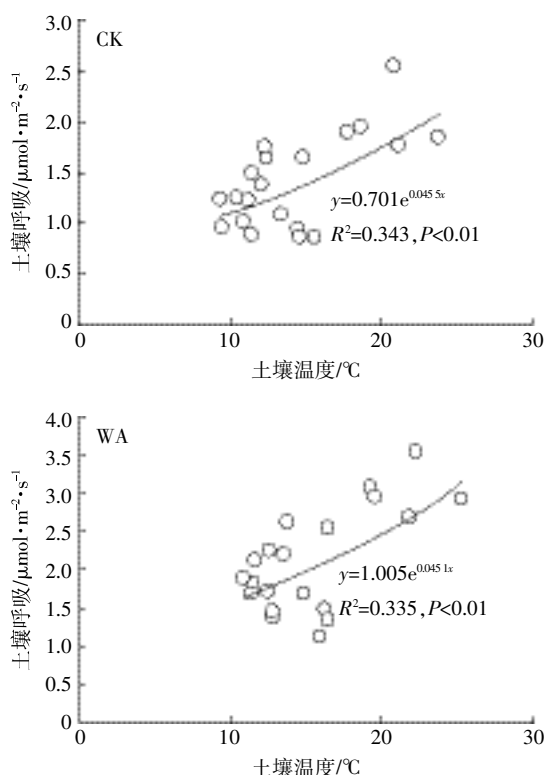


图4 土壤呼吸与土壤温度的指数回归方程拟合结果

Figure 4 Relationship between soil respiration and soil temperature

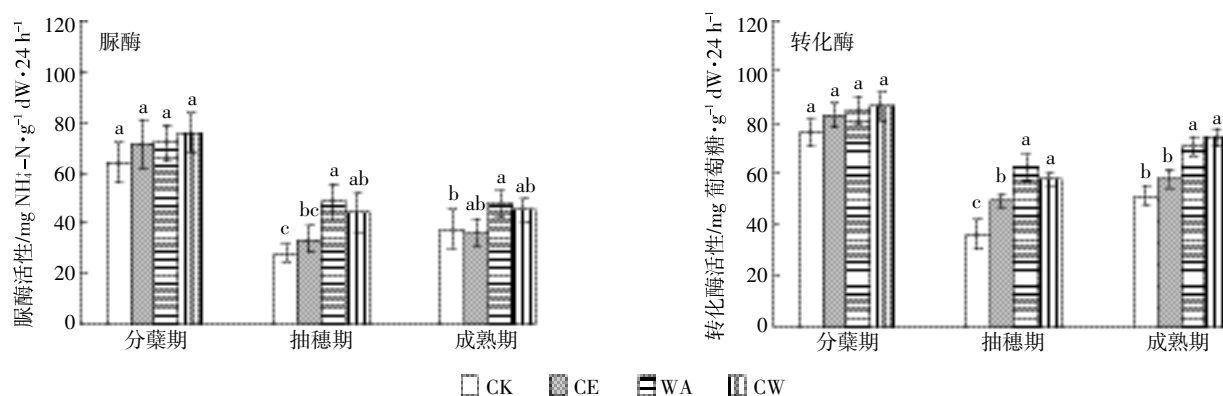
图5 大气CO₂浓度和温度升高对根际土壤脲酶和转化酶活性的影响Figure 5 Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on rhizosphere soil urease and invertase activities

表1 气候变化因子和小麦生育期对土壤呼吸、脲酶和转化酶活性的重复测量方差分析

Table 1 Repeated measures ANOVA for the overall effects of climate change factor, growth stage and their interaction on soil respiration, urease and invertase activities

因子	土壤呼吸		脲酶活性		转化酶活性	
	<i>F</i>	Sig.	<i>F</i>	Sig.	<i>F</i>	Sig.
CO ₂	4.41	0.104	3.12	0.152	13.02	0.023
CO ₂ ×T	60.29	0.001	16.39	0.015	78.05	0.001
温度(T)	126.17	<0.001	13.03	0.023	64.80	0.001
生育期(S)	161.53	<0.001	40.28	<0.001	85.34	<0.001
S×CO ₂	0.54	0.604	0.62	0.561	1.33	0.317
S×CO ₂ ×T	2.66	0.130	0.61	0.570	3.43	0.084
S×T	1.1	0.353	1.83	0.248	4.53	0.052

注: CO₂×T 表示大气 CO₂ 和温度同时升高。Note: CO₂×T, combination of elevated CO₂ and air warming.

3 讨论

根际是植物-土壤-微生物与其环境条件相互作用的场所,根系的呼吸作用、根系分泌有机物质的作用以及根对养分和水分的吸收特性,都决定着根际动态的方向和强度。根系分泌物和沉淀物的作用,以及根际内丰富的微生物,使根际土壤生物、物理和化学等方面的特性明显不同于土体土壤^[16]。相对于非根际土壤,根际土壤微生物对气候变化的响应更敏感^[17]。土壤呼吸和酶活性等生化过程主要是由土壤微生物调控的,研究发现,大气 CO₂ 浓度升高和升温能够影响土壤生化过程^[18-20]。

土壤呼吸主要包括根系自养呼吸和土壤微生物异养呼吸。一方面,大气 CO₂ 浓度升高对植物一般有施肥效应,促进了植物根系生长,增加根系生物量和根系呼吸^[21-22];另一方面,大气 CO₂ 浓度升高增加了根

系分泌物和生物量,并能促进植物的光合作用,使更多的光合产物流向根系,为微生物提供了更多的可利用碳源,从而促进了土壤微生物呼吸^[23-24]。但是,周玉梅等^[10]通过 CO₂ 浓度倍增试验发现 CO₂ 浓度升高抑制根系呼吸和微生物呼吸的原因可能是土壤表面的高浓度 CO₂ 阻碍了 CO₂ 的扩散。Norby 等^[9]对森林生态系统研究表明,CO₂ 浓度升高对土壤呼吸没有影响,可能是由于 CO₂ 浓度升高对植物生长的增加作用受到氮有效性的限制。

土壤呼吸对温度较为敏感,一些研究表明,升温促进了土壤呼吸作用;还有一些研究表明,升温在短期内可促进土壤呼吸,但在较长时间内对土壤呼吸没有影响。如图 2 和图 3 所示,温度升高增强了小麦土壤呼吸作用,增幅达到 34.7%~51.0%。Cox 等^[25]研究发现温度上升会提高土壤呼吸速率,进而增加土壤与大气之间的碳净转化量,对全球气候变化产生正反馈作用。大气温度升高会直接影响土壤微生物呼吸,预计全球平均气温升高 2℃,由微生物主导的土壤碳排放会增加到 10 Pg^[26]。温度升高能够改变植物群落多样性和植物的生长速率^[27],促进植物生长,使凋落物、根系分泌物和细根周转率提高,土壤碳输入增加,从而影响到土壤微生物群落的数量和功能,进而促进土壤微生物呼吸。土壤呼吸对温度升高的响应较为复杂,因为温度对土壤呼吸的影响还与其他因素有关,如土壤湿度、酶活性和植物生理生长等^[28-29]。在一片森林草原交错地带,连续 4 年升温处理可使土壤呼吸速率降低 7%~15%。这可能与温度升高导致的土壤含水量降低有关^[30]。

本研究中,升温对土壤呼吸具有显著促进作用;大气 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸没有明显影响($P>$

0.05),但与升温处理相比显著抑制了土壤呼吸。虽然升温和 CO₂ 浓度升高交互作用显著提高了土壤呼吸速率,但提高幅度比单独升温处理低 16.3%,因此 CO₂ 浓度升高在一定程度上能够减弱升温对土壤呼吸的增强幅度,这也表明升温和 CO₂ 浓度升高交互作用对土壤呼吸的影响表现为各自效应的复合。然而,目前关于升温和大气 CO₂ 浓度升高交互作用对农田土壤呼吸影响机制的研究报道较少,在未来需要更多地深入研究多个气候变化因子的交互影响机制。

土壤脲酶和转化酶分别参与土壤氮转化和有机碳循环,能够反映土壤微生物活性。本研究发现,大气 CO₂ 浓度升高和升温促进了土壤转化酶活性,仅有升温处理(WA 和 CW)显著促进了土壤脲酶活性(图 4)。苑学霞等^[31]在 FACE 系统中研究发现大气 CO₂ 浓度升高刺激脱氢酶、转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性,与贾夏等^[32]和任欣伟等^[11]的研究结果相一致。大气 CO₂ 浓度升高通过影响输入土壤的植物残体及根系分泌物的性质和数量来影响土壤酶活性^[19]。贾夏等^[32]利用开顶箱装置研究发现,CO₂ 浓度升高条件下长白赤松土壤脲酶、转化酶、脱氢酶、过氧化物酶等活性均升高,认为高浓度 CO₂ 增加了长白赤松光合速率、生长量、根系生物量和分泌物,改变了土壤微生物所需 C、N 源的结构,从而促进了这些来源于微生物的酶活性。一些研究发现大气 CO₂ 浓度升高显著地增强了土壤脲酶和转化酶活性^[33]。土壤转化酶很大一部分来源于根系分泌物,其活性与土壤微生物生物量和高密度有机碳有相关性^[34]。土壤脲酶表征氮循环的微生物代谢速率,土壤中可利用碳的增加能够刺激脲酶活性^[35-38]。

温度对土壤酶有直接作用,在一定范围内,增温可以直接提高土壤酶活性^[11]。冯瑞芳等^[14]利用原状土柱作为研究对象,研究表明增温显著促进土壤有机层的转化酶和脲酶活性。升温也可以通过对植物、土壤微生物的作用改变土壤生物过程而间接影响土壤酶活性。Majdi 等^[39]研究表明,增温通过刺激北方针叶林细根生长,间接促进了土壤酶活性。Zhang 等^[40]研究表明,增温使土壤养分有效性增加,为微生物提供更多的底物和能源,促进了土壤微生物的生长和代谢,进而提高了土壤酶活性。潘新丽等^[41]通过一年升温试验研究发现,土壤脲酶和转化酶都有不同程度的提高,并认为其与土壤微生物数量增加有一定的关系。因此,大气 CO₂ 浓度升高和升温时,植物的生理活性发生变化,根系分泌物和沉积物进入土壤使微生物量增

加,微生物活性增强,进而提高土壤酶活性。

土壤酶活性是土壤中生物学过程的微观反映,酶活性的大小决定着土壤中生物学过程的反应速度,土壤呼吸则是土壤中生物学过程的宏观反映,呼吸速率的大小决定着土壤中生物学过程的强弱。陈书涛等^[37]的研究表明,增温处理的小麦土壤呼吸与土壤酶活性存在显著的线性关系,表明土壤中不同生物学过程具有内在相关性。在吴静等^[42]的研究结果中,土壤微生物呼吸与转化酶有显著的相关性,也验证了土壤呼吸与酶活性存在一定的联系。升温会促进土壤酶活性,大气 CO₂ 浓度升高为土壤中微生物提供了基质,间接促进土壤酶活性。土壤酶活性的增强,可以加快土壤有机质转化,促进土壤微生物活动,从而导致土壤碳库通过土壤呼吸作用释放更多 CO₂^[25,41-42]。虽然本研究未测定土壤微生物数量和群落结构,但可以推测土壤微生物多样性的变化能部分地解释土壤呼吸、酶活性对大气 CO₂ 浓度升高和升温的响应。在接下来的研究中,我们会通过高通量测序分析土壤微生物群落的变化特征,明确土壤微生物与土壤呼吸、酶活性之间的关系。

4 结论

在小麦生长季,温度升高对土壤呼吸、脲酶和转化酶活性具有重要影响。大气 CO₂ 浓度单独升高对土壤呼吸没有显著影响,但是温度升高及其与 CO₂ 浓度同时升高处理土壤呼吸分别增加 51.0%和 34.7%。在小麦不同生育期,脲酶和转化酶活性对大气 CO₂ 浓度升高和升温的响应存在差异。在分蘖期,土壤脲酶和转化酶活性没有变化,而在抽穗和成熟期,温度升高及其与 CO₂ 浓度同时升高处理显著提高了转化酶活性,脲酶活性仅在抽穗期比对照显著增高。因此,小麦土壤呼吸、脲酶和转化酶活性对温度的反应较为敏感。

参考文献:

- [1] 杨庆朋,徐 明,刘洪升,等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
YANG Qing-peng, XU Ming, LIU Hong-sheng, et al. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [2] Bond B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579-582.
- [3] 曹 慧,孙 辉,杨 浩,等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(1): 105-109.
CAO Hui, SUN Hui, YANG Hao, et al. A review: Soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. *Chinese Journal of Applied Envi-*

- ronmental Biology*, 2003, 9(1): 105–109.
- [4] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] Rosenzweig C, Casassa G, Karoly D J, et al. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems[J]. *Climate Change*, 2007; 79–131.
- [6] 邓琦, 周国逸, 刘菊秀, 等. CO₂ 浓度倍增、高氮沉降和高降雨对南亚热带人工模拟森林生态系统土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1023–1033.
- DENG Qi, ZHOU Guo-yi, LIU Ju-xiu, et al. Effects of CO₂ enrichment, high nitrogen deposition and high precipitation on a model forest ecosystem in Southern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(6): 1023–1033.
- [7] 张方月, 王清奎, 于小军. CO₂ 浓度升高和 N 沉降对中亚热带森林土壤呼吸的短期影响[J]. 生态学报, 2015, 34(6): 1638–1643.
- ZHANG Fang-yue, WANG Qing-kui, YU Xiao-jun, et al. Short-term effects of CO₂ enrichment and N deposition on soil respiration in a mid-subtropical forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(6): 1638–1643.
- [8] Oishi A C, Palmroth S, Johnsen K H, et al. Sustained effects of atmospheric CO₂ and nitrogen availability on forest soil CO₂ efflux[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(4): 1146–1160.
- [9] Norby R J, Warren J M, Iversen C M, et al. CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(45): 19368–19373.
- [10] 周玉梅, 韩士杰, 辛丽花. CO₂ 浓度升高对红松和长白松土壤呼吸作用的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1757–1760.
- ZHOU Yu-mei, HAN Shi-jie, XIN Li-hua. Effects of elevated CO₂ concentration on soil respiration in *Pinus koraiensis* and *P. sylvestri-form* forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1757–1760.
- [11] 任欣伟, 唐景毅, 柳静臣, 等. 不同氮水平下 CO₂ 升高及增温对幼苗土壤酶活性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(5): 44–53.
- REN Xin-wei, TANG Jing-yi, LIU Jing-chen, et al. Effects of elevated CO₂ and temperature on soil enzymes of seedlings under different nitrogen concentration[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(5): 44–53.
- [12] 毛子军, 贾桂梅, 刘林馨. 温度增高, CO₂ 浓度升高, 施氮对蒙古栎幼苗非结构碳水化合物积累及其分配的综合影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1174–1184.
- MAO Zi-jun, JIA Gui-mei, LIU Lin-xin. Combined effects of elevated temperature, elevated CO₂ and nitrogen supply on non-structural carbohydrate accumulation and allocation in *Quercus mongolica* seedlings[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(10): 1174–1184.
- [13] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B, et al. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(2): 475–481.
- [14] 冯瑞芳, 杨万勤, 张健, 等. 模拟大气 CO₂ 浓度和温度升高对亚高山冷杉(*Abies faxoniana*)林土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4019–4026.
- FENG Rui-fang, YANG Wan-qin, ZHANG Jian, et al. Effects of simulated elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4019–4026.
- [15] 刘琳, 朱霞, 孙庚, 等. 模拟增温与施肥对高寒草甸土壤酶活性的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(8): 1405–1410.
- LIU Lin, ZHU Xia, SUN Geng, et al. Effects of simulated elevated temperature and fertilizer on soil enzymes activity in Qinghai-Tibetan alpine meadows[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(8): 1405–1410.
- [16] Hussain Q, Liu Y Z, Zhang A F, et al. Variation of bacterial and fungal community structures in the rhizosphere of hybrid and standard rice cultivars and linkage to CO₂ flux[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2011, 78(1): 116–128.
- [17] Xu Z H. Fingerprinting global climate change and forest management within rhizosphere carbon and nutrient cycling processes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2006, 13(5): 293–298.
- [18] Das S, Bhattacharyya P, Adhya T. Interaction effects of elevated CO₂ and temperature on microbial biomass and enzyme activities in tropical rice soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 182(4): 555–569.
- [19] 曹宏杰, 倪红伟. 大气 CO₂ 升高对土壤碳循环影响的研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(11): 1846–1852.
- CAO Hong-jie, NI Hong-wei. Research progress on the effects of elevated CO₂ concentration on carbon cycling[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2013, 22(11): 1846–1852.
- [20] 沈菊培, 贺纪正. 微生物介导的碳氮循环过程对全球气候变化的响应[J]. 2011, 31(11): 2957–2967.
- SHEN Ju-pei, HE Ji-zheng. Responses of microbes-mediated carbon and nitrogen cycles to global climate change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 31(11): 2957–2967.
- [21] 李青超, 张远彬, 王开运, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对红桦幼苗根系的影响[J]. 生态学报, 2007, 26(10): 1674–1678.
- LI Qing-chao, ZHANG Yuan-bin, WANG Kai-yun, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on *Betula albosinensis* seedling roots[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(10): 1674–1678.
- [22] Drake J E, Stoy P C, Jackson R B, et al. Fine-root respiration in a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) forest exposed to elevated CO₂ and N fertilization[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2008, 31(11): 1663–1672.
- [23] Phillips R P, Finzi A C, Bernhardt E S. Enhanced root exudation induces microbial feedbacks to N cycling in a pine forest under long-term CO₂ fumigation[J]. *Ecology Letters*, 2011, 14(2): 187–194.
- [24] Drissner D, Blum H, Tscherko D, et al. Nine years of enriched CO₂ changes the function and structural diversity of soil microorganisms in a grassland[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 260–269.
- [25] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 184–187.
- [26] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. *Nature*, 2010, 464(7288): 579–582.

- [27] Weltzin J F, Bridgham S D, Pastor J, et al. Potential effects of warming and drying on peatland plant community composition[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 141–151.
- [28] 付 刚, 沈振西, 张宪洲, 等. 草地土壤呼吸对全球变化的响应[J]. 地理科学进展, 2011, 29(11): 1391–1399.
FU Gang, SHEN Zhen-xi, ZHANG Xian-zhou, et al. Responses of soil respiration in the grassland to global climate change[J]. *Progress in Geography*, 2011, 29(11): 1391–1399.
- [29] 珊 丹, 韩国栋, 赵萌莉, 等. 控制性增温和施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 106–112.
SHAN Dan, HAN Guo-dong, ZHAO Meng-li, et al. Effects of regulated warming and N fertilizer on soil respiration in desert steppe[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(9): 106–112.
- [30] Lellei-Kovács E, Kovács-Láng E, Kalapos T, et al. Experimental warming does not enhance soil respiration in a semiarid temperate forest-steppe ecosystem[J]. *Community Ecology*, 2008, 9(1): 29–37.
- [31] 苑学霞, 林先贵, 褚海燕, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对不同施氮土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 48–53.
YUAN Xue-xia, LIN Xian-gui, CHU Hai-yan, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ on soil enzyme activities at different nitrogen level [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 26(1): 48–53.
- [32] 贾 夏, 韩士杰, 赵永华, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对长白赤松幼苗土壤酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010, 38(12): 87–92.
JIA Xia, HAN Shi-jie, ZHAO Yong-hua, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on soil enzyme activities associated with *Pinus sylvestris* seedlings[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2010, 38(12): 87–92.
- [33] Das S, Bhattacharyya P, Adhya T. Interaction effects of elevated CO₂ and temperature on microbial biomass and enzyme activities in tropical rice soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 182(4): 555–569.
- [34] Chen J H, Liu X Y, Zheng J W, et al. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 71: 33–44.
- [35] Stemmer M, Gerzabek M H, Kandeler E. Invertase and xylanase activity of bulk soil and particle-size fractions during maize straw decomposition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 31(1): 9–18.
- [36] Sardans J, Peñuelas J, Estiarte M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39(2): 223–235.
- [37] 陈书涛, 桑 琳, 张 旭, 等. 增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 703–709.
CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, et al. Effects of warming and straw application on soil respiration and enzyme activity in a winter wheat cropland[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 703–709.
- [38] 徐振锋, 唐 正, 万 川, 等. 模拟增温对川西亚高山两类针叶林土壤酶活性的影响[J]. 2010, 21(11): 2727–2733.
XU Zhen-feng, TANG Zheng, WAN Chuan, et al. Effects of simulated elevated temperature on soil enzyme activities in two subalpine coniferous forests in west Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2727–2733.
- [39] Majdi H. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 182–188.
- [40] Zhang W, Parker K M, Luo Y, et al. Soil microbial responses to experimental warming and clipping in a tallgrass prairie[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 266–277.
- [41] 潘新丽, 林 波, 刘 庆. 模拟增温对川西亚高山人工林土壤有机碳含量和土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1637–1643.
PAN Xin-li, LIN Bo, LIU Qing. Effects of simulated elevated temperature on soil organic carbon and soil respiration under subalpine coniferous forest in western Sichuan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(8): 1637–1643.
- [42] 吴 静, 陈书涛, 胡正华, 等. 不同温度下的土壤微生物呼吸及其与可溶性有机碳和转化酶的关系[J]. 环境科学, 2015, 36(4): 1497–1506.
WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, et al. Soil microbial respiration under different soil temperature conditions and its relationship to soil dissolved organic carbon and invertase[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1497–1506.