

周 娅, 冯 倩, 王 玉, 等. 覆膜玉米不同生育期土壤酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1185–1192.
ZHOU Ya, FENG Qian, WANG Yu, et al. Effects of elevated CO₂ on soil enzyme activities at different growth stages of maize grown with plastic film mulching [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1185–1192.

覆膜玉米不同生育期土壤酶活性 对大气 CO₂ 浓度升高的响应

周 娅¹, 冯 倩¹, 王 玉¹, 张晓媛¹, 王丽梅^{1,2*}, 李世清^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探讨旱区覆膜玉米农田土壤酶活性对未来气候变化的响应,在田间条件下通过改进的开顶式气室(OTC)系统自动控制大气 CO₂ 浓度,设置自然大气 CO₂ 浓度(CK)、OTC 对照(OTC)、OTC 系统自动控制 CO₂ 浓度(700 μmol·mol⁻¹, OTC+CO₂) 3 个处理,研究了旱区覆膜高产栽培春玉米播前、六叶期(V6)、十二叶期(V12)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)及完熟期(R6)土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应特征。研究发现:OTC 处理条件下,土壤碱性磷酸酶活性相比 CK 在 V12 期降低 8.80% ($P<0.05$),而在 R6 期提高 8.95% ($P<0.05$);蔗糖酶活性在播前、V6、R1 期降低 12.65%~21.43% ($P<0.05$),R3 期升高 17.50% ($P<0.05$);过氧化氢酶活性在 V12、R1、R6 期均显著降低。大气 CO₂ 浓度升高对玉米各生育期土壤脲酶活性均无显著影响;使 R1、R6 期碱性磷酸酶活性降低 8.74% 和 6.39% ($P<0.05$);使 V6、R3 期蔗糖酶活性升高 30.18% 和 18.37% ($P<0.05$);此外,增加了 V12 期过氧化氢酶活性,而降低了 R3 期过氧化氢酶活性。结果表明:当前旱作覆膜高产栽培模式下,大气 CO₂ 浓度升高对春玉米农田土壤酶活性的影响因作物生育期和酶种类不同而异;土壤酶活性对 OTC 及大气 CO₂ 浓度升高的响应程度不一,在当前试验条件下,OTC 对土壤酶活性的影响较大气 CO₂ 浓度升高更为显著。

关键词:开顶式气室;大气 CO₂ 浓度升高;春玉米;土壤酶活性

中图分类号:S154 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)05-1185-08 doi:10.11654/jaes.2018-1149

Effects of elevated CO₂ on soil enzyme activities at different growth stages of maize grown with plastic film mulching

ZHOU Ya¹, FENG Qian¹, WANG Yu¹, ZHANG Xiao-yuan¹, WANG Li-mei^{1,2*}, LI Shi-qing^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: A field experiment was conducted in a semiarid area to investigate the response of soil enzyme activities to climate change in a farmland of spring maize where plastic film mulching was used. Open-top chamber(OTC) system was used to control elevated CO₂ concentrations(700 μmol·mol⁻¹, marked as OTC+CO₂) during the growing period of maize. At the same time, OTC systems with the current atmospheric CO₂ concentration(marked as OTC) and natural atmospheric CO₂ concentration(control, marked as CK) were also set up. Activities of soil urease, alkaline phosphatase, sucrase, and catalase, at the different growth stages of spring maize (i.e., pre-sowing, sixth leaf

收稿日期:2018-09-07 录用日期:2018-11-19

作者简介:周 娅(1994—),女,四川万源人,硕士研究生,主要从事农业生态环境与全球变化方面的研究。E-mail:18700903905@163.com

*通信作者:王丽梅 E-mail:sdwanglimei@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31470523);国家重点研发计划项目(2017YFC0504504);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JM3020);国家重点实验室开放基金项目(A314021402-1614)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31470523); The National Key Research and Development Program of China(2017YFC0504504); The Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(2017JM3020); The Open Foundation of State Key Laboratory, China(A314021402-1614)

(V6) stage, twelfth leaf (V12) stage, silking (R1) stage, milk (R3), and physiological maturity (R6) stage), were measured. The results showed that, compared with CK, OTC treatment decreased the activity of soil alkaline phosphatase by 8.80% at the V12 stage ($P < 0.05$), and increased it by 8.95% ($P < 0.05$) at the R6 stage, decreased the soil invertase activity by 12.65%~21.43% ($P < 0.05$) at the pre-sowing, V6, and R1 stages, but increased it by 17.50% ($P < 0.05$) at the R3 stage, and significantly decreased the activity of catalase at the V12, R1, and R6 stages under OTC. Compared with OTC, OTC+CO₂ treatment had no significant effect on soil urease activity, increased the activity of soil sucrase by 30.18% and 18.37% at the V6 and R3 stages ($P < 0.05$), respectively, and decreased the activity of alkaline phosphatase at the R1 and R6 stages by 8.74% and 6.39% ($P < 0.05$), respectively. In addition, elevated CO₂ increased activity of catalase at the V12 stage, but reduced it at the R3 stage. In conclusion, the effect of elevated CO₂ on soil enzyme activities in spring maize farmland varied with the growth period and the enzyme. Further, under the current experimental conditions, the effect of OTC on soil enzyme activities was more significant than that of elevated CO₂.

Keywords: open-top chamber; elevated CO₂; spring maize; soil enzyme activity

自工业革命以来,由于人口的急剧增长与经济飞速发展等原因,地球大气中“温室气体”急速增加。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四次评估报告中指出,到21世纪中期大气CO₂浓度将达500 μmol·mol⁻¹以上,预计到21世纪末,大气中的CO₂浓度将超过700 μmol·mol⁻¹。大气CO₂浓度的升高,势必会影响农作物的生长发育及其对养分的吸收,进而影响作物产量及其地上部C、N含量等,地上部物质通过根系分泌物、凋落物或向地下输送等方式改变其生长的土壤环境^[2-3],从而影响土壤酶的活性和稳定性^[4]。

土壤酶是以稳定蛋白质存在于土壤之中的“生物催化剂”^[5],其活性可反映土壤生物化学过程的方向和强度,可作为评价土壤肥力、土壤质量等的重要指标^[6]。脲酶是土壤中氮素转化的关键酶,与土壤供氮能力密切相关;蔗糖酶参与土壤中有有机C循环,是表征土壤生物学活性的重要水解酶之一;磷酸酶能促进有机P化合物水解,对作物土壤中的P循环起到重要作用;过氧化氢酶参与土壤的物质和能量转化,它能分解由生物呼吸和有机物氧化产生的过氧化氢^[7],研究这4种土壤酶活性对于深入了解土壤营养物质转化、能量代谢等能力的强弱具有重要意义。前期大多数研究表明,升高CO₂浓度能够显著提高各类土壤酶活性,但也有研究指出,升高CO₂浓度对土壤酶活性没有明显的影响,或是降低了某些土壤酶的活性^[8-10]。如Das等^[8]对水稻土的研究表明,大气CO₂浓度升高条件下荧光素二乙酸水解酶、脱氢酶、β-葡萄糖苷酶,脲酶及磷酸酶活性显著升高;任欣伟等^[9]的研究指出大气CO₂浓度升高对土壤纤维素酶、蔗糖酶、脲酶、过氧化物酶、多酚氧化酶有促进作用,对中性磷酸酶有抑制作用,对淀粉酶及过氧化氢酶的作用与植物种类有关。由于试验所用土壤类别、种植的作物、地

区气候条件、水肥管理差异以及CO₂浓度升高方式等的不同,关于大气CO₂浓度升高对土壤酶活性的影响还需进一步深入研究。

玉米是我国主要粮食作物之一,目前关于大气CO₂浓度升高对玉米的研究多是室内或盆栽试验,田间试验鲜有报道,尤其是对旱地覆膜高产玉米地土壤酶活性的研究相对匮乏,且前期关于气候变化对作物影响的研究多是对某个时间进行探讨,较少考虑土壤酶活性随作物生育期在时间梯度上的变化^[11-12]。开顶式气室(OTC)被广泛用于研究气候变化对农业生产的影响^[13],但一些研究并未考虑OTC对土壤环境的影响^[11-12]。因此,本研究通过改进的OTC系统^[14]控制CO₂浓度,研究覆膜栽培玉米不同生育期土壤酶活性对OTC及大气CO₂浓度升高的响应特征。旨在为后期利用此OTC系统开展大田试验提供参考;为揭示未来气候条件下农田土壤酶活性对大气CO₂浓度升高的响应规律等提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

本试验于2017年在长武黄土高原农业生态试验站(35°12'N, 107°40'E)进行,该区位于黄土高原中南部陕甘交界处陕西省长武县洪家镇王东村,海拔1200 m。该地区年均降水量为584 mm,年均气温9.1℃,5—9月平均气温为19.0℃,无霜期171 d,地下水位50~80 m,年蒸发量高达1565 mm,属典型的旱作农业区。地带性土壤为黑垆土,质地均匀疏松。播前耕层土壤基本理化性质如下:pH 8.0,容重1.28 g·cm⁻³,有机质12.46 g·kg⁻¹,全氮0.98 g·kg⁻¹,速效磷(Olsen-P)22.2 mg·kg⁻¹,速效钾(NH₄OAc-K)181.9 mg·kg⁻¹,矿质氮16.9 mg·kg⁻¹。

1.2 田间试验设计

本试验 OTC 系统建于 2015 年,采用田间定位试验,共设置 3 种处理:大田自然大气 CO₂ 浓度处理 (CK)、OTC 对照处理 (OTC) 及 OTC 系统自动控制 CO₂ 浓度 (700 μmol·mol⁻¹) 处理 (OTC+CO₂), 其中设置 OTC 对照处理是指气室直接立于田间土壤之上,无额外加热系统,不通入 CO₂ 气体,为剥离 OTC 所带来的被动增温效应。每个处理重复 3 次,共 9 个小区,各小区面积为:自然大气条件下 6 m×6.5 m=39 m²,气室内 2 m×2 m=4 m²。各小区均施尿素 [w(N)≥46%] 225 kg N·hm⁻²,分三次施入,其中基肥占 40%,喇叭口期 (V10) 追肥 30%;抽雄期 (VT) 追肥 30%;均施过磷酸钙 [w(P₂O₅)≥12%] 40 kg P·hm⁻² 和氧化钾 [w(K₂O)≥45%] 80 kg K·hm⁻² 作底肥一次性全部施入,施氮、磷、钾量均为纯氮、磷、钾量。小区内均全地膜覆盖。

供试玉米品种为:“郑单 958”,种植密度为 70 000 株·hm⁻²,播种方式为宽窄行 (60 cm 和 40 cm) 低高垄 (5 cm 和 15 cm) 沟播。于 2017 年 4 月 23 日播种,9 月 15 日收获。玉米全生育期间不进行灌溉,天然降雨是其唯一的水分来源;不喷施任何农药,杂草均由人工及时去除。

1.3 试验方法

分别在春玉米播前、六叶期 (V6)、十二叶期 (V12)、吐丝期 (R1)、乳熟期 (R3) 及完熟期 (R6) 时,于田间试验小区内采用梅花布点法选取 5 个点,采样深度为 0~20 cm 土层,现场混匀,去除土壤中植物残体和根系后置于塑封袋中,带回实验室。土样经风干过 1 mm 筛后进行土壤酶活性的测定。脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定;蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸

比色法测定^[15]。土壤含水率采用烘干法测得,利用温度传感器 (YX-TRWD) 对 5 cm 土层进行监测。

1.4 数据处理

数据整理和图表分析采用 Microsoft Office Excel 2016 和 Origin 8.5。采用 SPSS 20.0 统计软件进行单因素方差 (One-way ANOVA) 检验和重复测量方差分析 (Repeated-analysis ANOVA),采用 Duncan 法在 $P < 0.05$ 水平作各生育期处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 春玉米各生育期不同处理下土壤水分和温度变化

与 CK 相比,OTC 和 OTC+CO₂ 处理下各生育期土壤水分含量均有所降低。CK、OTC、OTC+CO₂ 处理下土壤水分含量范围分别为:12.37%~23.02%、8.91%~20.12%、8.38%~21.15%。不同处理土壤水分含量随生育期的变化规律相似,呈现先降低后升高的趋势,在 R3 期最低。与 CK 相比,开顶式气室 (OTC 及 OTC+CO₂ 处理) 能够提高表层土壤温度。CK、OTC、OTC+CO₂ 处理下玉米全生育期土壤温度变化范围分别为:19.29~24.15、20.23~25.77、20.31~26.00 °C。

2.2 春玉米各生育期土壤酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应

2.2.1 土壤脲酶活性对大气 CO₂ 浓度升高的响应

由图 2 可知,脲酶活性最大值出现在 V6 期。与 CK 相比,OTC 处理使春玉米农田播前土壤脲酶活性显著增加 17.32% ($P < 0.05$),对其余各生育期影响不显著;与 OTC 相比,CO₂ 浓度升高 (OTC+CO₂ 处理) 对春玉米各生育期土壤脲酶活性均无显著影响。OTC 与 CO₂ 浓度升高的交互作用使春玉米土壤脲酶活性较 CK 呈升高趋势且在 R3、R6 期显著升高 7.52% 和 13.85% ($P < 0.05$)。

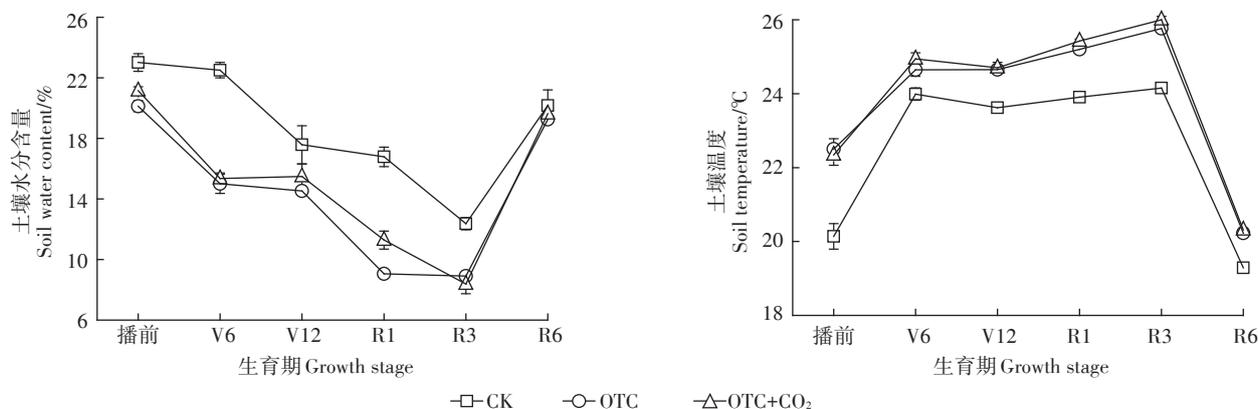
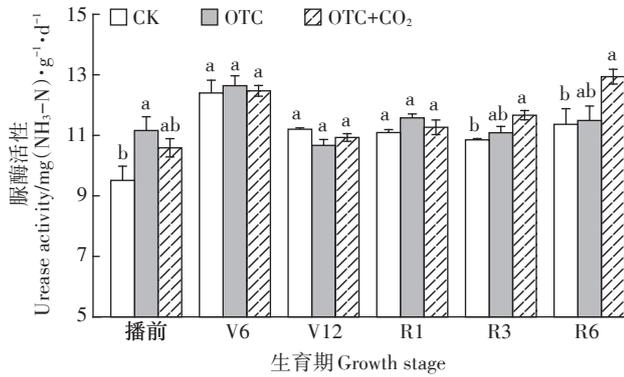


图1 春玉米各生育期土壤水分和温度变化

Figure 1 Soil water content and temperature at different growth stages of maize



图中不同小写字母表示各生育期不同处理间差异显著($P<0.05$), 误差棒表示标准误。下同
Different letters in the figure indicate significant differences between treatments at each growth period($P<0.05$), error bar represents the standard error. The same below

图2 CO₂浓度升高对玉米各生育期土壤脲酶活性的影响
Figure 2 Effects of elevated CO₂ on soil urease activities at different growth stages of maize

2.2.2 土壤碱性磷酸酶活性对大气CO₂浓度升高的响应

由图3可知,碱性磷酸酶活性最大值出现在R3期。与CK相比,OTC处理使V12期土壤碱性磷酸酶活性显著降低8.80% ($P<0.05$),R6期碱性磷酸酶活性显著升高8.95% ($P<0.05$);与OTC相比,CO₂浓度升高(OTC+CO₂处理)使R1、R6期碱性磷酸酶活性显著降低8.74%和6.39% ($P<0.05$),对其余各生育期影响不显著。在OTC与CO₂浓度升高的交互作用下,春玉米碱性磷酸酶活性在播前、V6、V12、R1期较CK呈降低趋势,R3、R6期呈升高趋势,其中V12、R1期均变化显著($P<0.05$)。

2.2.3 土壤蔗糖酶活性对大气CO₂浓度升高的响应

由图4可知,整个生育进程中,蔗糖酶活性表现

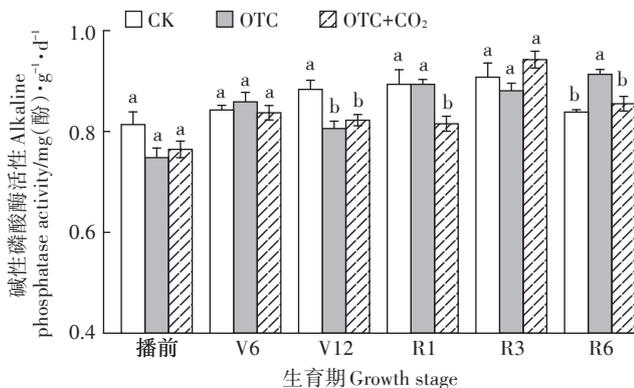


图3 CO₂浓度升高对玉米各生育期碱性磷酸酶活性的影响
Figure 3 Effects of elevated CO₂ on alkaline phosphatase activities at different growth stages of maize

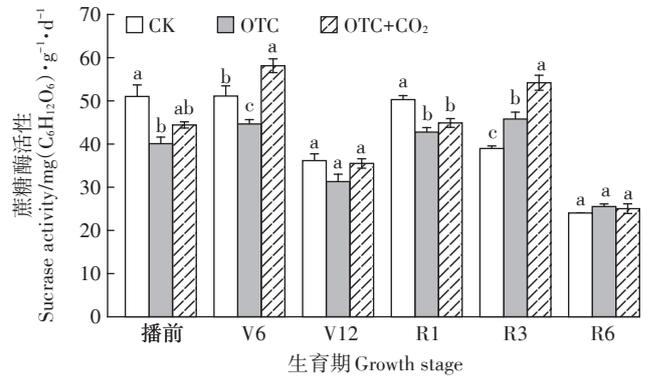


图4 CO₂浓度升高对玉米各生育期蔗糖酶活性的影响

Figure 4 Effects of elevated CO₂ on sucrose activities at different growth stages of maize

为升-降-升-降的趋势,其中V6期土壤蔗糖酶最高,R6期土壤蔗糖酶活性最低。与CK相比,OTC处理使播前、V6、R1期春玉米土壤蔗糖酶活性显著降低12.65%~21.43% ($P<0.05$),R3期显著升高17.50% ($P<0.05$);与OTC相比,CO₂浓度升高(OTC+CO₂处理)使春玉米V6、R3期土壤蔗糖酶活性分别提高30.18%和18.37% ($P<0.05$),对其余生育期有升高趋势但影响不显著。OTC与CO₂浓度升高的交互作用使V6、R3期蔗糖酶活性较CK显著升高13.72%和39.09% ($P<0.05$),R1期显著降低10.75% ($P<0.05$)。

2.2.4 土壤过氧化氢酶活性对大气CO₂浓度升高的响应

由图5可知,在春玉米各生育期中,R3期过氧化氢酶活性最低。与CK相比,OTC处理使春玉米V12、R1、R6期土壤过氧化氢酶活性分别显著降低9.05%、8.07%和7.30% ($P<0.05$),其余生育期(除R3)有降低趋势但差异不显著;与OTC相比,CO₂浓度升高

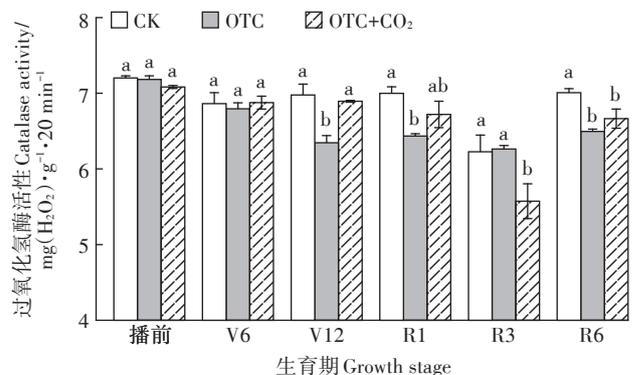


图5 CO₂浓度升高对玉米各生育期过氧化氢酶活性的影响
Figure 5 Effects of elevated CO₂ on catalase activities at different growth stages of maize

(OTC+CO₂处理)使V6、V12、R1、R6期过氧化氢酶活性呈升高趋势且在V12期显著升高8.64% ($P<0.05$), R3期显著降低11.01% ($P<0.05$)。在OTC与CO₂浓度升高的交互作用下,春玉米R3、R6期过氧化氢酶活性较CK显著降低 ($P<0.05$),其余生育期无显著影响。

2.3 OTC、CO₂和生育期对土壤酶活性的影响

从表1的重复测量方差分析结果可看出,OTC及其与生育期的交互作用对春玉米土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性均具有显著影响 ($P<0.05$);与OTC相比,CO₂浓度升高仅对蔗糖酶活性影响显著 ($P<0.05$),对其他三种酶活性无显著影响 ($P>0.05$);OTC与CO₂的交互作用(OTC+CO₂处理)、生育期(GP)、生育期与CO₂的交互作用对四种酶活性均具有显著影响 ($P<0.05$);OTC、CO₂及生育期的交互作用仅对土壤蔗糖酶活性具有显著影响 ($P<0.05$)。说明OTC和大气CO₂浓度对春玉米农田土壤各类酶活性的影响程度不同,其中OTC的影响更为显著;生育期也是影响土壤酶活性的一个重要因素。

3 讨论

土壤酶活性与土壤特性及土壤环境条件密切相关,被广泛用于评价土壤质量和土壤生物化学活性^[16]。土壤脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蔗糖酶对土壤环境变化较为敏感,对土壤C、N、P等元素的转化及循环起着重要作用^[17]。已有研究发现温度和大气CO₂浓度升高能够通过影响土壤微生物群落组成、微生物呼吸作用、土壤有机物质的分解和矿化、植物生长代谢水平等因素间接影响土壤酶活性^[18-19]。

3.1 OTC对春玉米土壤酶活性的影响

温度对植物的物质代谢和土壤中微生物活动等具有重要影响,而OTC本身不可避免地会产生一定

的增温效应。徐振锋等^[20]指出,增温通过酶动力学、土壤微生物、动物和植物的活动以及土壤养分矿化速率等因素直接或间接影响土壤酶活性。王学娟等^[21]采用OTC增温对长白山苔原生态系统的研究结果表明,增温使土壤脲酶和过氧化氢酶活性有所提高,但也有研究发现,增温降低了土壤酶活性或对酶活性无显著影响。如韩玮等^[22]对水稻土的研究指出,增温降低土壤脲酶和过氧化氢酶活性;而Steinweg等^[23]的研究表明增温没有对酶活性产生显著影响。本试验中OTC处理使多个生育期土壤蔗糖酶及过氧化氢酶活性降低,可能是因为玉米生长期该地区降水较少,土壤水分含量处于较低水平,而OTC处理的土壤水分含量相对更低(图1),土壤中生物化学过程受到水分限制,从而抵消了增温对土壤酶活性的正效应^[24],马志良等^[25]也表明OTC增温导致土壤含水量降低会限制土壤酶活性,这与陈晓丽等^[26]的研究结果一致。此外,OTC处理能一定程度降低土壤有机碳含量^[27],减少了酶作用的底物,使酶活性降低。前期对玉米进行的田间定位试验研究结果表明,改进的OTC系统大气日平均增温仅为0.4℃^[14],与他人研究相比,空气温度升高幅度较小,酶活性对小幅度的增温响应并不敏感^[28],土壤微生物也可能对增温条件产生适应性^[21],且OTC处理下玉米叶茎干质量、株高、茎粗、光合作用等均无显著变化^[29],作物对土壤酶活性的间接影响较小,因而使得OTC对脲酶和磷酸酶整体来说没有影响。

3.2 CO₂浓度升高对春玉米土壤酶活性的影响

有研究报道,大气CO₂浓度升高能够促进植物的光合作用,提高根系生物量及分泌物,并改变根系输入到土壤中的物质组分^[12],引起土壤化学和微生物学的明显变化^[30]。植物代谢功能及土壤微生物对大气

表1 OTC、CO₂和生育期对土壤酶活性的重复测量方差分析

Table 1 Repeated measures ANOVA for the effects of OTC, CO₂, growth stage and their interaction on soil enzyme activities

因子 Factor	脲酶 Urease		碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase		蔗糖酶 Sucrase		过氧化氢酶 Catalase	
	F	P	F	P	F	P	F	P
OTC	3.179	0.149	6.268	0.067	26.855	0.007	165.620	<0.001
CO ₂	1.214	0.332	3.714	0.126	55.710	0.002	0.988	0.376
OTC×CO ₂	21.226	0.010	10.619	0.031	43.241	0.003	30.080	0.005
生育期(GP)	19.720	<0.001	18.028	<0.001	174.825	<0.001	42.752	<0.001
OTC×GP	2.490	0.149	4.114	0.057	12.166	0.006	5.505	0.036
CO ₂ ×GP	4.255	0.035	5.562	0.024	9.406	0.002	11.463	0.010
OTC×CO ₂ ×GP	2.952	0.131	2.818	0.089	17.740	0.001	2.220	0.180

注:OTC×CO₂表示OTC+CO₂处理。

Note:OTC×CO₂ represent OTC+CO₂ treatment.

CO₂浓度升高的响应,均可能对在生态系统中发挥着重要作用的土壤酶活性产生影响。有关大气CO₂浓度升高对土壤酶活性的影响,国内外已有很多学者做了相关研究。Wang等^[31]研究表明,CO₂浓度升高通过刺激植物根系分泌引起转化酶和过氧化氢酶活性的增加,Manna等^[10]指出,CO₂浓度升高不会影响水稻土脱氢酶、双乙酸荧光素和酸性磷酸酶活性。本试验中,大气CO₂浓度升高总体上对土壤脲酶、碱性磷酸酶、过氧化氢酶活性没有影响,可能的原因有:(1)玉米生长季节土壤温度较高,土壤酶反应处于较适宜的温度范围,微生物活性较大,掩盖了CO₂浓度造成的酶活性的差异。(2)冯瑞芳等^[32]以原状土柱作为研究对象(未栽种植物)的研究结果表明,CO₂浓度升高对土壤酶作用不明显,可见CO₂浓度对土壤酶活性的影响主要通过植物代谢和根分泌等间接作用。而大气CO₂浓度升高对玉米的光合作用及生长没有很大促进作用^[29],因而对其物质代谢、根系分泌及土壤微生物群落影响较小。有研究表明,CO₂浓度升高增加外源C输入,为根系微生物提供更多底物,从而提高微生物活性,刺激微生物生长代谢,也加速了养分的矿化过程,促进土壤有机质的转化,导致土壤转化酶活性增加^[33],本试验也证明CO₂浓度升高可一定程度提高土壤蔗糖酶活性。

3.3 OTC与CO₂浓度升高的交互效应及生育期对春玉米土壤酶活性的影响

大气CO₂浓度和温度均是影响作物生长的重要环境因子,二者互作可能通过植物-土壤这一系统影响土壤理化性质、微生物群落组成及活性、呼吸作用以及土壤基质利用率等,进而影响土壤酶活性。本试验中CO₂浓度升高仅对蔗糖酶活性有显著影响,但是OTC+CO₂处理对土壤4种酶活性均具有显著影响(表1),说明温度升高和干旱可能会加剧未来气候条件下大气CO₂浓度升高对玉米农田土壤酶活性的影响。刘远等^[34]通过田间开放式平台的研究表明,麦田土壤酶活性对温度的反应较CO₂更为敏感,与本试验中OTC对土壤酶活性的影响大于CO₂浓度升高一致。究其原因主要有:温度对土壤酶活性具有直接作用,CO₂浓度升高主要通过作物的间接影响;OTC引起土壤水分含量降低,而土壤酶活性高低与土壤水分密切相关。因此后期利用此OTC系统进行田间试验时应考虑其对土壤环境可能造成的影响。

由于土壤酶活性对环境变化较为敏感,因而不同生育期能够显著影响土壤酶活性并与处理因素存在

交互效应,且因酶种类不同而存在差异。张玉兰等^[35-36]早期对稻麦轮作系统的研究也表明土壤酶活性对CO₂浓度升高的响应与生育期有关。此外,大量研究表明土壤酶活性对小幅度增温的响应明显小于季节性温度变化引起的响应^[28,37-38];李亦霏等^[39]的研究也指出土壤微生物和酶活性与作物生物量没有显著相关性却受作物生育期的显著影响。可见作物在不同生育期的生理活性和土壤环境的变化是影响土壤酶活性的重要因子。

4 结论

(1)生育期对覆膜玉米农田土壤酶活性具有显著影响,不同种类酶活性随生育期的变化趋势不同。

(2)当前旱作覆膜高产栽培模式下,玉米农田土壤酶活性对OTC的响应较大气CO₂浓度升高更为显著。

(3)升温 and 干旱可能会加剧未来气候条件下大气CO₂浓度升高对玉米农田土壤酶活性的影响。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014:533-535.
- [2] 路娜, 胡维平, 邓建才, 等. 大气CO₂浓度升高对植物影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2011, 42(2):477-482.
LU Na, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ concentrations on growth of plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(2):477-482.
- [3] Xu M, He Z, Deng Y, et al. Elevated CO₂ influences microbial carbon and nitrogen cycling[J]. *BMC Microbiol*, 2013, 13(1):1-11.
- [4] 刘捷豹, 陈光水, 郭剑芬, 等. 森林土壤酶对环境变化的响应研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(1):110-117.
LIU Jie-bao, CHEN Guang-shui, GUO Jian-fen, et al. Advances in research on the responses of forest soil enzymes to environmental change [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1):110-117.
- [5] 高彦波, 翟鹏辉, 谭德远. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(6):100-101.
GAO Yan-bo, ZHAI Peng-hui, TAN De-yuan. Research progress of relationship between soil enzyme activity and soil fertility[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(6):100-101.
- [6] 郭碧林, 陈效民, 景峰, 等. 外源Cd胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9):1850-1855.
GUO Bi-lin, CHEN Xiao-min, JING Feng, et al. Effects of exogenous cadmium on microbial biomass and enzyme activity in red paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9):1850-1855.

- [7] 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, 73(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, 73(2): 703-709.
- [8] Das S, Bhattacharyya P, Adhya T K. Interaction effects of elevated CO₂ and temperature on microbial biomass and enzyme activities in tropical rice soils[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2011, 182(1/2/3/4): 555-569.
- [9] 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 concentrations[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2014, 36(5): 44-53.
- [10] Manna S, Singh N, Singh V P. Effect of elevated CO₂ on degradation of azoxystrobin and soil microbial activity in rice soil[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(4): 2951-2960.
- [11] 吕宁, 尹飞虎, 陈云, 等. 大气CO₂浓度增加与氮肥对棉花生物量、氮吸收量及土壤脲酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3337-3344.
LÜ Ning, YIN Fei-hu, CHEN Yun, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ and nitrogen application on cotton biomass nitrogen utilization and soil urease activity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3337-3344.
- [12] 施翠娥, 艾弗逊, 汪承润, 等. 大气CO₂和O₃升高对菜地土壤酶活性和微生物量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1103-1109.
SHI Cui-e, AI Fu-xun, WANG Cheng-run, et al. Effects of elevated atmospheric CO₂ and O₃ on soil enzyme activities and microbial biomass[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1103-1109.
- [13] 曹嘉晨, 郑有飞, 赵辉, 等. 开顶式气室对冬小麦的生长及产量的影响[J]. 作物杂志, 2018(1): 88-95.
CAO Jia-chen, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, et al. Influence of open-top chamber on growth and yield of winter wheat[J]. *Crops*, 2018(1): 88-95.
- [14] 郭艳亮, 王晓琳, 张晓媛, 等. 田间条件下模拟CO₂浓度升高开顶式气室的改进及其效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1034-1043.
GUO Yan-liang, WANG Xiao-lin, ZHANG Xiao-yuan, et al. Improvement and performance of open-top chambers used for simulating elevated CO₂ under field conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1034-1043.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986: 274-338.
GUAN Song-yin. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 274-338.
- [16] Liu G, Zhang X, Wang X, et al. Soil enzymes as indicators of saline soil fertility under various soil amendments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 237: 274-279.
- [17] 蒋容, 余一, 唐玉蓉, 等. 增温和生物炭添加对农田土壤酶活性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1): 72-77.
JIANG Rong, YU Yi, TANG Yu-rong, et al. Effects of warming and biochar addition on soil enzyme activities in farmland[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2018, 36(1): 72-77.
- [18] 杨林, 陈亚梅, 和润莲, 等. 高山森林土壤微生物群落结构和功能对模拟增温的响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2855-2863.
YANG Lin, CHEN Ya-mei, HE Run-lian, et al. Responses of soil microbial community structure and function to simulated warming in alpine forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2855-2863.
- [19] 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.
- [20] 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]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2727-2733.
XU Zhen-feng, TANG Zheng, WAN Chuan, et al. Effects of simulated warming on soil enzyme activities in two subalpine coniferous forests in west Sichuan[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2727-2733.
- [21] 王学娟, 周玉梅, 王秀秀, 等. 长白山苔原生态系统土壤酶活性及微生物生物量对增温的响应[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 166-175.
WANG Xue-juan, ZHOU Yu-mei, WANG Xiu-xiu, et al. Responses of soil enzymes in activity and soil microbes in biomass to warming in tundra ecosystem on Changbai mountains[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 166-175.
- [22] 韩玮, 孙晨曦, 苏敬. 模拟增温和酸雨对水稻土酶活性及温度敏感性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(12): 1117-1124.
HAN Wei, SUN Chen-xi, SU Jing. Effects of elevated temperature and simulated acid rain on enzyme activity and temperature sensitivity of paddy soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(12): 1117-1124.
- [23] Steinweg J M, Dukes J S, Paul E A, et al. Microbial responses to multi-factor climate change: Effects on soil enzymes[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 1-11.
- [24] Bft B, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 44(1): 9-20.
- [25] 马志良, 赵文强, 刘美, 等. 高寒灌丛生长季土壤转化酶与脲酶活性对增温和植物去除的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2211-2216.
MA Zhi-liang, ZHAO Wen-qiang, LIU Mei, et al. Responses of soil invertase and urease activities to warming and plant removal during the growing season in an alpine scrub ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2211-2216.
- [26] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 等. 山地森林表层土壤酶活性对短期增

- 温及凋落物分解的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(21):7071-7079.
CHEN Xiao-li, WANG Gen-xu, YANG Yan, et al. Response of soil surface enzyme activities to short-term warming and litter decomposition in a mountain forest[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21):7071-7079.
- [27] 郭艳亮. 大气CO₂浓度升高对旱作覆膜玉米农田土壤碳氮过程的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
GUO Yan-liang. Effect of elevated CO₂ on soil carbon and nitrogen processes in maize field[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [28] Jing X, Wang Y, Chung H, et al. No temperature acclimation of soil extracellular enzymes to experimental warming in an alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Biogeochemistry*, 2014, 117(1):39-54.
- [29] 王晓琳. 旱作覆膜玉米生物学过程对大气CO₂浓度升高的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.
WANG Xiao-lin. The effects of elevated CO₂ on biological processes of maize with plastic film mulching in a semiarid region[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [30] Kim S, Jung S, Kang H, et al. Effects of elevated CO₂ on growth of *Pinus densiflora* seedling and enzyme activities in soil[J]. *Journal of Ecology & Environment*, 2010, 33(2):133-139.
- [31] Wang Y, Yan D, Wang J, et al. Effects of elevated CO₂ and drought on plant physiology, soil carbon and soil enzyme activities[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(5):846-855.
- [32] 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.
- [33] 陈栋, 郁红艳, 邹路易, 等. 土壤碳转化对大气CO₂升高响应机制研究进展[J]. 核农学报, 2017, 31(8):1656-1663.
CHEN Dong, YU Hong-yan, ZOU Lu-yi, et al. Research progress on soil carbon transformation mechanism responses to elevated atmospheric CO₂[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8):1656-1663.
- [34] 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.
- [35] 张玉兰, 张丽莉, 陈利军, 等. 稻-麦轮作系统土壤水解酶及氧化还原酶活性对开放式空气CO₂浓度增高的响应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6):1014-1018.
ZHANG Yu-lan, ZHANG Li-li, CHEN Li-jun, et al. Response of soil hydrolase and oxidoreductase activities to free air carbon dioxide enrichment(FACE) under rice-wheat rotation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6):1014-1018.
- [36] 张丽莉, 张玉兰, 陈利军, 等. 稻-麦轮作系统土壤糖酶活性对开放式CO₂浓度增高的响应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6):1019-1024.
ZHANG Li-li, ZHANG Yu-lan, CHEN Li-jun, et al. Response of soil saccharidase activities to free-air carbon dioxide enrichment(FACE) under rice-wheat rotation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6):1019-1024.
- [37] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3):820-828.
- [38] 张丽, 吴福忠, 徐振锋, 等. 川西高山森林不同时期土壤转化酶和脲酶活性对模拟气候变暖的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(16):5352-5360.
ZHANG Li, WU Fu-zhong, XU Zhen-feng, et al. Responses of soil invertase and urease activities in an alpine forest of western Sichuan to simulated climate warming at different critical periods[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16):5352-5360.
- [39] 李奕霏, 肖谋良, 袁红朝, 等. CO₂倍增对稻田土壤碳氮水解酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9):3474-3480.
LI Yi-fei, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-chao, et al. Effects of doubled concentration of CO₂ on soil hydrolase activities related to turnover of soil C and N in a rice-cropping system[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(9):3474-3480.