

DOI: 10.5846/stxb202008122106

徐洲, 冯倩, 王玉, 赵金磊, 李常鑫, 王丽梅. 大气 CO₂ 浓度升高对春玉米土壤呼吸的影响. 生态学报, 2021, 41(18): 7331-7338.

Xu Z, Feng Q, Wang Y, Zhao J L, Li C X, Wang L M. Effects of elevated CO₂ on soil respiration of spring maize. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7331-7338.

大气 CO₂ 浓度升高对春玉米土壤呼吸的影响

徐 洲¹, 冯 倩¹, 王 玉¹, 赵金磊¹, 李常鑫¹, 王丽梅^{1,2,*}

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100

摘要:为探讨春玉米不同生育期土壤呼吸速率对大气 CO₂ 浓度升高的响应,以黄土高原旱作春玉米为研究对象,通过改进的开顶式气室(OTC)模拟大气 CO₂ 浓度升高的环境,在田间条件下设置自然大气 CO₂ 浓度(CK)、OTC 对照(OTC, CO₂ 浓度同 CK)与 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂, OTC 系统自动控制 CO₂ 浓度 700 μmol/mol) 3 种处理。研究了旱区覆膜高产栽培春玉米播前(V0)、六叶期(V6)、九叶期(V9)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)、蜡熟期(R5)及完熟期(R6)土壤呼吸速率对大气 CO₂ 浓度升高的响应特征,以及大气 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸速率的温度与水分效应的影响。研究发现, OTC+CO₂ 处理土壤呼吸速率,与 CK 相比,在 R3 和 R5 期分别增加 43%、104% ($P<0.05$),与 OTC 相比,R3 和 R5 期分别提升了 63%、109% ($P<0.05$);OTC 处理与 CK 相比,在整个生育期对土壤呼吸影响不显著;3 种处理条件下,土壤温度和水分随生育期变化趋势基本一致,土壤呼吸速率与土壤温度和水分分别呈指数相关和抛物线型相关;结果表明:大气 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的影响因生育期而异,土壤温度和土壤水分是影响旱地农田土壤呼吸的重要因素,CO₂ 浓度升高会使土壤呼吸温度效应值(Q_{10})降低,土壤呼吸对土壤水分响应的阈值提高。

关键词:CO₂ 浓度升高;OTC 气室;土壤呼吸;土壤温度;土壤水分

Effects of elevated CO₂ on soil respiration of spring maize

XU Zhou¹, FENG Qian¹, WANG Yu¹, ZHAO Jinlei¹, LI Changxin¹, WANG Limei^{1,2,*}

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China

Abstract: Understanding the effects of elevated atmospheric CO₂ on soil respiration is crucial for predicting the greenhouse gas emission in the future. A field experiment was conducted to study the effects of elevated CO₂ on soil respiration of spring maize under three atmospheric conditions (treatments): natural atmospheric conditions with the current CO₂ concentration (marked as CK), open-top chamber (OTC) system with the current atmospheric CO₂ concentration (as the contrast, marked as OTC), and OTC system with elevated CO₂ concentration of 700 μmol/mol (marked as OTC+CO₂). Soil respiration, soil temperature and moisture were measured at the main growth stages of spring maize including pre-sowing (V0), jointing stage (V6), ninth-leaf stage (V9), silking stage (R1), milk stage (R3), dent stage (R5), and physiological maturity stage (R6). The results showed that, compared with CK, OTC+CO₂ enhanced soil respiration rates by 43% and 104% ($P<0.05$), respectively, at the R3 and R5 stage. Compared with OTC, OTC+CO₂ increased soil respiration rates by 63% and 109% ($P<0.05$) at the R3 and R5 stage, respectively. There was no significant difference in soil respiration between OTC and CK during the whole growth period of spring maize. The changing dynamics of soil temperature with growth period for the three treatments were consistent, also soil moisture changing dynamics with growth

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)

收稿日期:2020-08-12; **网络出版日期:**2021-06-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sdwanglimei@163.com

period under the three atmospheric conditions were similar. Soil respiration showed an exponential and parabolic correlation with the soil temperature and soil moisture, respectively. In conclusion, the effects of elevated CO₂ on soil respiration varied with growth stage. Soil temperature and soil moisture were the main factors affecting soil respiration, the elevated CO₂ decreased the temperature effect value (Q_{10}), and increased the threshold value of soil respiration to soil moisture.

Key Words: elevated CO₂; open-top chamber; soil respiration; soil temperature; soil moisture

工业革命以来,大气 CO₂浓度持续升高已是不争的事实。到 21 世纪末,大气中 CO₂浓度将可能达到甚至超过 700 $\mu\text{mol/mol}$ 。农田土壤呼吸是大气 CO₂排放的主要来源之一^[1-3],全球每年因土壤呼吸排放到大气中 CO₂约为 70—100 Pg,是化石燃料燃烧排放 CO₂的 12—16 倍^[4]。目前已有研究表明^[5-6],大气 CO₂浓度升高会对农田作物土壤呼吸产生一定影响。因此,土壤呼吸对大气 CO₂浓度升高具有重要贡献,反之,升高了的大气 CO₂浓度又势必会对农田土壤温室气体排放产生反馈作用,探明大气 CO₂浓度升高条件下农田土壤呼吸速率的改变,对于明确未来气候变化条件下,农田生态系统对气候改变的响应与反馈具有重要意义。

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节,是陆地生态系统中碳以 CO₂形式返回到大气的主要途径^[7]。研究表明^[8-9],植物通过光合作用将大气中的 CO₂以有机碳的形式储存到地下,其中部分以枯枝落叶形式进入土壤,成为生态系统碳储量的一部分^[10]。全球土壤碳储量的增加有利于减缓温室效应,而土壤呼吸的增加会加剧全球温室效应,造成一系列不可预计的后果。可见,土壤呼吸在全球碳收支中扮演着重要的角色,其微小的变化都可能给全球碳平衡带来重大影响。

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分^[11-13],研究农田生态系统中土壤呼吸对大气 CO₂浓度增加的响应是预测和评价农田系统乃至整个陆地生态系统土壤碳周转和碳收支的重要前提与基础。玉米是全世界分布最广的农作物之一^[14-16],也是我国重要的粮食作物。开展大气 CO₂浓度升高及土壤温度和水分对田间玉米土壤呼吸速率的影响研究,有助于阐明农田土壤呼吸对大气 CO₂浓度升高的响应和反馈。因此,本试验以玉米农田土壤为研究对象,通过改进的开顶式气室(OTC)系统自动控制大气 CO₂浓度,在春玉米播前(V0)、六叶期(V6)、九叶期(V9)、吐丝期(R1)、乳熟期(R3)、蜡熟期(R5)及完熟期(R6)对土壤呼吸速率进行测定,研究玉米农田土壤呼吸对大气 CO₂浓度升高的响应,以及与土壤温度、水分的互馈效应,以期对未来气候条件下农田生态系统碳循环提供基础数据,为全球气候变化背景下的农田土壤呼吸和碳固定及全球碳循环研究提供帮助。

1 材料和方法

1.1 试验区域概况

本试验地点位于长武黄土高原农业生态试验站(35°12'N, 107°40'E),该站海拔 1200 m,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 值为 8.0,容重 1.28 g/cm³,有机质 12.46 g/kg,全氮 0.98 g/kg,速效磷(Olsen-P) 22.2 mg/kg,速效钾(NH₄OAc-K) 181.9 mg/kg,矿质氮 16.9 mg/kg。

1.2 试验设计

1.2.1 处理设置

本试验采用田间定位试验,共设 3 种处理:大田自然大气条件下 CO₂浓度处理(CK)、设置气室但不通入 CO₂使其浓度与 CK 保持一致的 OTC 对照处理(OTC)及 OTC 系统自动控制 CO₂浓度(700 $\mu\text{mol/mol}$,OTC+CO₂)处理,其中设置 OTC 对照处理是为了去除 OTC 气室可能带来的增温影响。每个处理重复 3 次,共设 9 个小区。各小区以含氮量为 46%的尿素为氮源,施纯氮 225 kg/hm²,在播前、喇叭口期(V10)和抽雄期(VT)

分三次施入,施肥比为 4:3:3;在播前将过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)作为底肥一次性全部施入,施入量分别为 40、80 kg/hm²。试验种植春玉米品种为“郑单 958”,种植密度 70000 株/hm²,采用双垄沟播种技术,其中宽窄行分别为 60 cm 和 40 cm,低高垄分别为 5 cm 和 15 cm。于 2018 年 4 月 27 日播种,9 月 13 日收获。

玉米播种后,在每个小区中间埋设直径 20 cm、高 10 cm 的用 PVC 材料制成的塑料环,将塑料环垂直插入地面深 5 cm,露出地面的部分(5 cm)使用铁丝环加地膜将其封闭,测定时取下^[17]。

1.2.2 土壤呼吸速率测定

春玉米从每年 4 月中旬左右开始播种,9 月中旬收获。土壤呼吸测定采用 LI-8100A 型土壤碳通量自动测量系统(美国 LI-COR 公司)田间原位测定。土壤呼吸每个生育期的测定,开始前晴天天气需持续 3 d 以上,从而剔除降雨因素的影响,测定时间从 9:00—11:00。该仪器在测定田间土壤呼吸的同时,仪器自身所带的温度探针会同步测定地下 5 cm 的温度和环外土壤含水量。土壤呼吸速率和地下 5 cm 的土温、土壤含水率可由 LI-8100A 土壤碳通量分析仪在电脑上直接导出。

1.3 数据处理

数据整理和图表分析采用 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、重复测量方差分析(Repeated-analysis ANOVA)和皮尔逊相关性分析(Univariate),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 大气 CO₂ 浓度升高对春玉米土壤呼吸速率的影响

本试验 3 种处理条件下春玉米农田土壤呼吸速率自 V0 到 R6 期皆呈降-升-降趋势,其最大值出现在玉米生育中后期(图 1)。整个生育期,CK、OTC、OTC + CO₂ 3 种处理条件下土壤呼吸速率平均值分别为 16.59、17.36、26.64 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。V0 到 V6 期为土壤呼吸下降阶段,最低值出现在 V6 生育期,CK、OTC、OTC + CO₂ 3 种处理条件下土壤呼吸速率最低值分别为 11.41、9.88、18.95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。随后从 V6 期开始土壤呼吸速率逐渐上升并达到峰值,不同处理达到峰值时间不同,CK 在 R3 期达到峰值,为 22.57 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;OTC 在 R1 期达到峰值,为 21.04 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;OTC + CO₂ 在 R5 期达到峰值,为 34.88 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。之后各处理土壤呼吸速率开始下降,直至 R6 期结束,CK、OTC、OTC + CO₂ 3 种处理条件下土壤呼吸速率 R6 期分别为 9.79、10.96、25.07 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

相较于 CK,OTC + CO₂ 处理土壤呼吸速率在 R3 和 R5 期分别增加 43% 和 104% ($P < 0.05$),其他生育期影响不显著。而 OTC 相较于 CK,两种处理土壤呼吸速率各生育期均无显著差异,且变化趋势基本一致,仅在播前土壤呼吸速率差异较大,CK 为 15.22 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,OTC 为 22.43 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。相较于 OTC,OTC + CO₂ 处理土壤呼吸速率在 R3 和 R5 期分别增加 63% 和 109% ($P < 0.05$),其他生育期差异不显著。

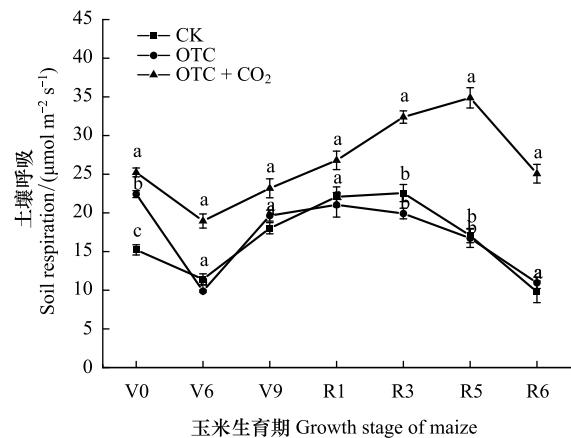


图 1 三种处理条件下春玉米各生育期的土壤呼吸

Fig.1 Soil respiration at different growth stage of spring maize under three atmospheric conditions

CK: 自然大气 Natural atmospheric conditions with the current CO₂ concentration; OTC: 开顶式气室对照 Open-top chamber system with the current atmospheric CO₂ concentration; OTC + CO₂: CO₂ 浓度升高处理 OTC system with elevated CO₂ concentration; V0: 播前 Pre-sowing; V6: 六叶期 Jointing stage; V9: 九叶期 Ninth-leaf stage; R1: 吐丝期 Silking stage; R3: 乳熟期 Milk stage; R5: 蜡熟期 Dent stage; R6: 完熟期 Physiological maturity stage

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的温度效应的影响

由图 2 可知,CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理条件下土壤温度随生育期变化趋势基本一致,均呈降-升-降趋势,V6 期温度最低,R3 期温度达到峰值,之后土壤温度下降直至 R6 期。整个生育期,3 种处理之间温度差异较小,在 0.21—1.94℃ 之间。CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理土壤温度变化范围分别为 16.76—32.57℃、15.32—31.25℃、18.21—31.74℃。

将农田春玉米各生育期土壤温度和土壤呼吸速率用回归方法进行统计分析得到图 3,结果表明,CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理条件下农田春玉米土壤呼吸和土壤温度呈指数相关,皆表现出显著性,3 种处理间显著性大小表现为 CK > OTC > OTC+CO₂。3 种处理条件下土壤温度敏感系数 Q_{10} 如表 1 所示,CK 和 OTC 处理条件下的 Q_{10} 值相差不大,分别为 1.52 和 1.54,而 OTC+CO₂ 处理条件下的 Q_{10} 值则较小,为 1.03,相较于 CK 和 OTC,OTC+CO₂ 处理 Q_{10} 值分别降低了 32% 和 33%。CK 和 OTC 处理条件下的 a 值(0℃ 的呼吸速率)差异不大,分别为 5.94 和 5.92 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,而 OTC+CO₂ 处理条件下的 a 值高达 13.95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

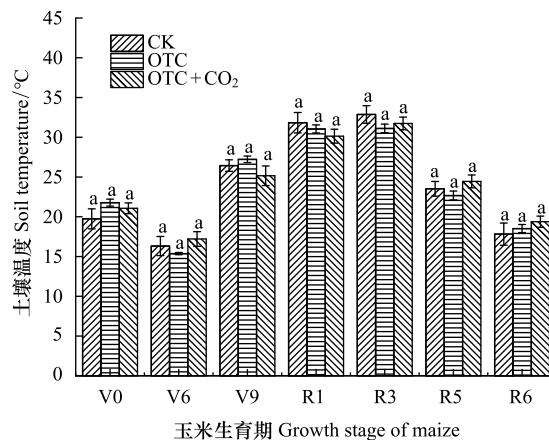


图 2 3 种处理条件下春玉米各生育期的土壤温度

Fig.2 Soil temperature at different growth stage of spring maize under three atmospheric conditions

表 1 土壤呼吸与土壤温度指数相关系数 a 和 Q_{10}

Table 1 Correlation coefficients a and Q_{10} between soil respiration and soil temperature

处理 Treatment	0℃ 的呼吸速率 a Soil respiration rate at 0℃	P	温度敏感系数 (Q_{10}) Temperature sensitivity of soil respiration
自然大气 Natural atmospheric conditions (CK)	5.94	0.025	1.52
开顶式气室对照 (OTC) Open-top chamber system with the current atmospheric CO ₂ concentration	5.92	0.036	1.54
CO ₂ 浓度升高处理 × OTC system with elevated CO ₂ concentration	13.95	0.038	1.03

2.3 大气 CO₂ 浓度升高对土壤呼吸的水分效应的影响

春玉米各生育期土壤含水量如图 4 所示,从 V0 期到 V6 期,OTC 和 OTC+CO₂ 两种处理条件下土壤水分有所下降,CK 土壤水分有所上升。除去 V0 期,在其他玉米生育期,CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理条件下土壤水分变化趋势基本一致,呈先升后降趋势。春玉米土壤水分从 V6 期开始持续上升,R3 期达到峰值,之后土壤水分下降直至 R6 期。整个春玉米生育期,3 种处理之间土壤水分无明显差异。CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理土壤水分变化范围分别为 19.84%—39.29%、20.46%—37.2%、19.63%—38.14%。

将农田春玉米各生育期土壤水分和土壤呼吸速率用回归方法进行统计分析得到图 5,结果表明,CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理条件下农田春玉米土壤呼吸和土壤水分皆呈抛物线型相关,表现出显著性 ($P < 0.05$)。3 种处理间土壤水分对土壤呼吸速率影响大小分别为 OTC > OTC+CO₂ > CK。

3 讨论

农田生态系统作为陆地主要生态系统之一,研究未来气候变化对其产生的影响已有 50 多年的历史^[18-21],农田土壤呼吸的微小变动都会对全球碳循环产生重要影响,针对 CO₂ 浓度升高对农田土壤呼吸及其环境因子影响的研究受到越来越多关注。

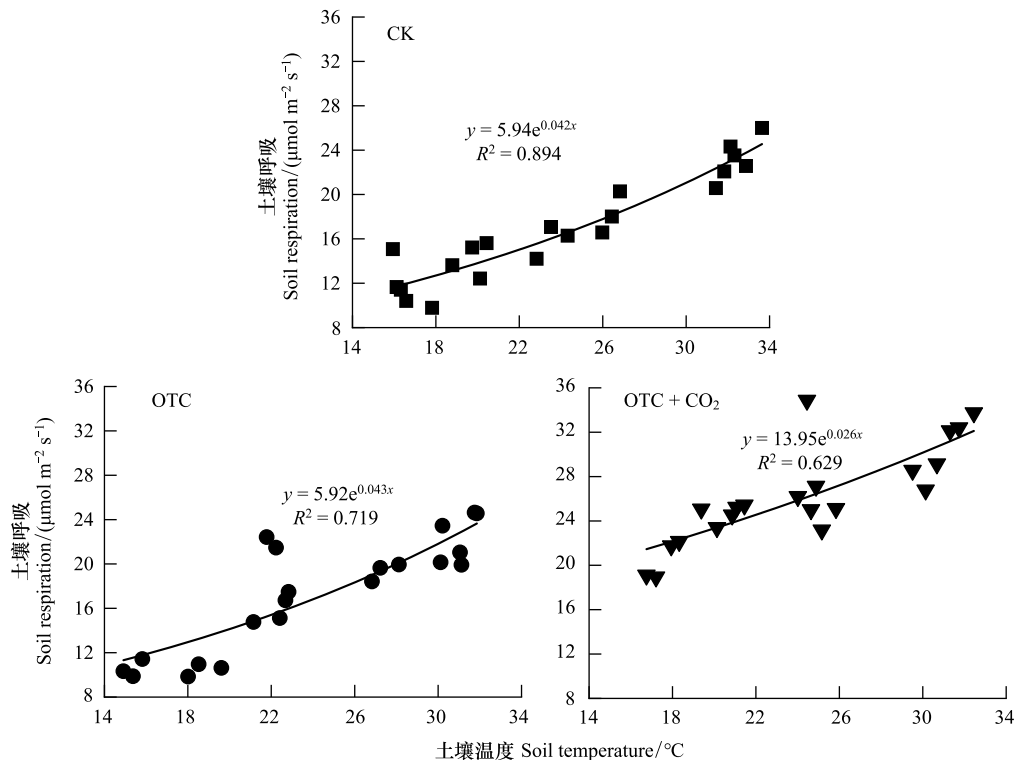


图 3 3 种处理条件下土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig.3 Relationship between soil respiration and soil temperature under three atmospheric conditions

3.1 CO₂浓度升高对农田春玉米土壤呼吸的影响

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,Bachman 等^[22]在研究 CO₂浓度升高对落叶松土壤呼吸的影响时发现,将 CO₂浓度提升至 550 μmol/mol,白桦地土壤呼吸速率升高了 15%—70%。Bernhardt 等^[23]利用 FACE 平台将 CO₂浓度提升至 700 μmol/mol 研究森林土壤呼吸速率的变化,发现相比于 CK,大气 CO₂浓度提升为 700 μmol/mol 的试验组在前两年土壤呼吸速率显著提升了 30%—34%。但是也有研究发现 CO₂浓度升高对土壤呼吸没有影响,甚至抑制了土壤呼吸。例如,马红亮等^[24]在研究 CO₂浓度升高对水稻土壤呼吸的影响时发现,大气 CO₂浓度增加降低了土壤呼吸排放速率。同时,有研究发现^[25-26],CO₂浓度升高对农田土壤呼吸的影响因作物生长期不同而存在明显差异。Soe 等^[27]在对甜菜进行研究时发现,将大气 CO₂浓度从 380 μmol/mol 增加到 550 μmol/mol,甜菜作物在最旺盛生长阶段土壤呼吸速率显著增加了 34%,而在甜菜其它生长阶段则没有达到显著增加。寇太记等^[28]在对冬小麦的研究中也发现,CO₂浓度升高对冬小麦土壤呼吸速率的影响会随着冬小麦生长阶段不同而呈现明显的季节性差异,在冬小麦生长旺盛期,农田土壤呼吸速率达到最大。本试验研究了春玉米整个生育期 CO₂浓度升高对土壤呼吸的影响后发现,将 CO₂浓度提升至 700 μmol/mol,相较于对照组 (OTC),试验组 (OTC+CO₂) 土壤呼吸在玉米生殖生长为中心

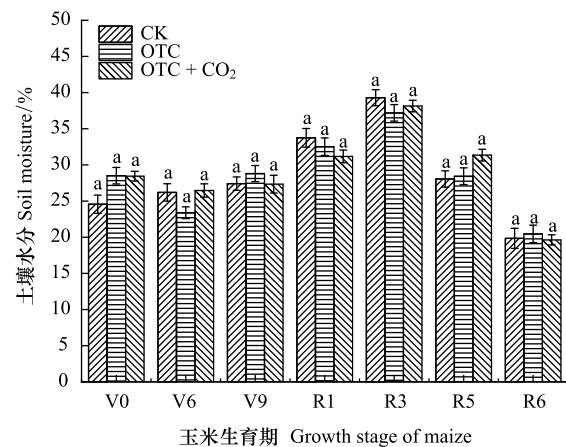


图 4 3 种处理条件下春玉米各生育期的土壤水分

Fig.4 Soil moisture at different growth stage of spring maize under three atmospheric conditions

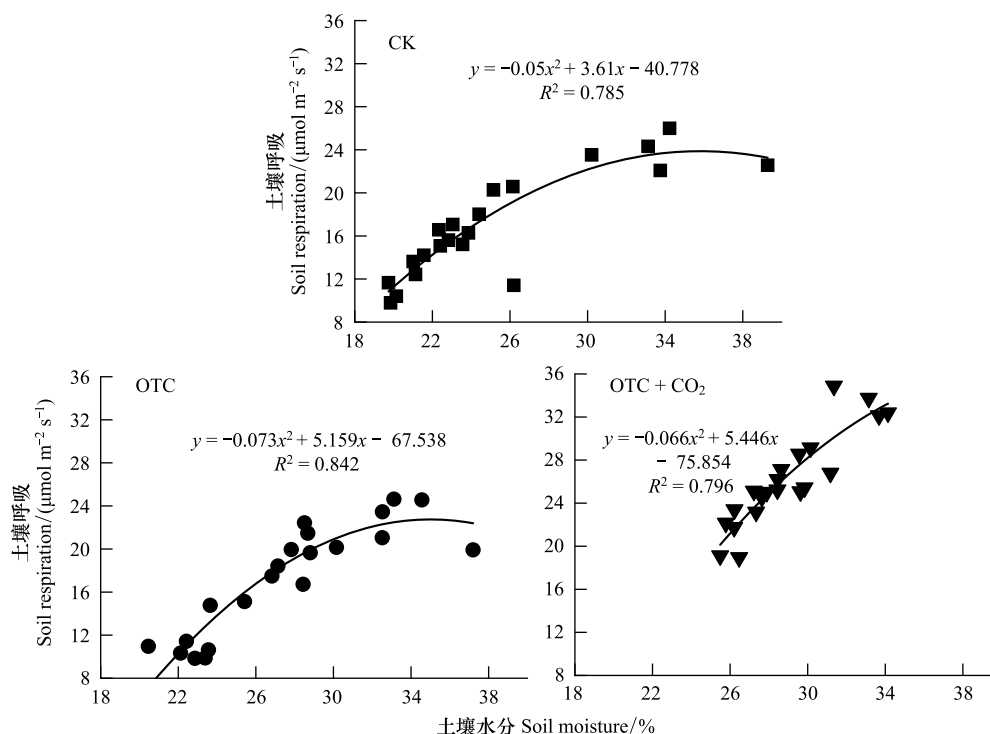


图5 3种处理条件下土壤呼吸与土壤水分的关系

Fig.5 Relationship between soil respiration and soil moisture under three atmospheric conditions

的阶段 R3 和 R5 期分别显著提升 63% 和 109% ($P < 0.05$)。相较于 CK, 试验组 (OTC+ CO_2) 土壤呼吸在玉米生长最旺盛的 R3 和 R5 期分别显著提升 43% 和 104% ($P < 0.05$)。这与上述研究结果基本一致, 表明 CO_2 浓度升高对土壤呼吸的影响随着作物生育期的不同而存在明显差异, 这可能与 CO_2 浓度升高影响了植物根系生长有关。我们相关田间结果表明, R3 和 R5 期玉米根系相对发达, OTC+ CO_2 处理玉米根系生物量 (R3 和 R5 期分别为 41.38 g/m^2 、 49.52 g/m^2) 显著高于 OTC 处理 (R3 和 R5 期分别为 31.42 g/m^2 、 35.46 g/m^2) 与 CK (R3 和 R5 期分别为 33.07 g/m^2 、 34.42 g/m^2)。韩广轩等^[29]在对玉米土壤呼吸的研究中也发现, 在空间尺度上, 土壤呼吸作用与根系生物量呈显著的线性关系。这表明高 CO_2 浓度是通过促进植物根系生长来影响土壤呼吸。

3.2 大气 CO_2 浓度升高对土壤呼吸的温度效应的影响

土壤温度是影响土壤呼吸速率的重要环境因素^[30-32]。土壤温度主要是通过对土壤有机碳的分解和作物根系自养呼吸的影响来影响土壤呼吸, 前人研究表明^[33-34], 在土壤水分保持在田间最大持水量 50%—80% 左右时, 土壤呼吸速率随着土壤温度的增加而升高, 呈指数型趋势。本研究将 CK、OTC 和 OTC+ CO_2 3 种处理条件下农田春玉米土壤呼吸和土壤温度进行拟合后发现, 无论是 CK、OTC, 还是 OTC+ CO_2 , 土壤呼吸和土壤温度皆呈现出显著的指数关系, 表明土壤温度是影响土壤呼吸速率的重要环境因子。温度敏感系数 Q_{10} 表示气温每增加 10°C 土壤呼吸增加的倍数, OTC+ CO_2 处理条件下的 Q_{10} 值均低于 CK 和 OTC, 表明大气 CO_2 浓度升高降低了土壤呼吸对土壤温度的敏感性。且 OTC+ CO_2 处理条件下的 a 值高达 $13.95 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 这可能是由于大气 CO_2 浓度升高和土壤温度变化两者间互相影响所致。

3.3 大气 CO_2 浓度升高对土壤呼吸的水分效应的影响

土壤水分主要通过调控土壤通透性及地下微生物的生理活动来影响土壤呼吸^[35-36]。前人研究表明^[37-39], 在土壤水分充足的条件下, 土壤呼吸与土壤水分呈正相关, 表现为抛物线型函数、线性函数、指数函数等形式。本研究通过对 CK、OTC 和 OTC+ CO_2 3 种处理条件下农田春玉米土壤呼吸和土壤水分进行拟合后

表明,3 种处理土壤呼吸与土壤水分皆满足抛物线型关系,表现出显著性($P<0.05$)。可知土壤水分是影响土壤呼吸速率的重要环境因子。土壤水分对土壤呼吸的影响具有一定的调节范围。当土壤处于缺水状态时,微生物的活动减弱,土壤呼吸减少,这时土壤水分的增加会促进土壤呼吸。土壤含水量过高时,土壤空隙被堵塞,土壤中氧气含量减少,抑制微生物有氧呼吸从而降低土壤呼吸。因此,必然存在一个阈值,让土壤呼吸开始受到土壤水分的抑制。根据抛物线函数的特性可知,CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理土壤呼吸对土壤水分响应的阈值分别为 36.1%、33.5%、41.2%。与 CK、OTC 相比,OTC+CO₂处理土壤呼吸对土壤水分响应的阈值分别提升了 14%和 23%。

3.4 大气 CO₂浓度升高土壤温度和水分对土壤呼吸的影响

基于 CK、OTC 和 OTC+CO₂ 3 种处理条件下农田土壤温度、水分和呼吸数据,就土壤温度和水分与土壤呼吸的相关性进行皮尔逊分析如表 2 所示。分析表明,CK 处理土壤温度和水分与土壤呼吸均呈极显著相关,OTC 处理土壤温度和水分与土壤呼吸均呈显著相关,而 OTC+CO₂处理土壤温度和水分与土壤呼吸均未达显著相关水平。CK、OTC 处理条件下,土壤温度对土壤呼吸的影响程度均大于土壤水分。OTC+CO₂处理土壤温度和水分与土壤呼吸均未达显著相关水平。表明大气 CO₂浓度升高导致土壤温度和土壤水分对土壤呼吸解释的信息量减少,不确定因素增多。

表 2 土壤温度和水分与土壤呼吸的相关性分析
Table 2 Correlation of soil temperature and moisture with soil respiration

因素 Factor	CK		OTC		OTC+CO ₂	
	皮尔逊相关系数 Pearson correlation	<i>P</i>	皮尔逊相关系数 Pearson correlation	<i>P</i>	皮尔逊相关系数 Pearson correlation	<i>P</i>
土壤温度 Soil temperature	0.966 **	0.001	0.776 *	0.04	0.619	0.139
土壤水分 Soil moisture	0.903 **	0.05	0.775 *	0.041	0.615	0.141

* 表示数值间呈显著相关关系 ($P<0.05$); ** 表示数值间呈极显著相关关系 ($P<0.01$)

大气 CO₂浓度升高、土壤水分和土壤温度都会对土壤呼吸产生一定的影响。那么,大气 CO₂浓度升高是否会对土壤呼吸的水分与温度效应产生影响,即大气 CO₂浓度升高与土壤温度和水分对土壤呼吸影响的耦合作用是什么呢? 目前有关这方面的研究较少,寇太记等^[40]在研究 CO₂浓度升高对冬小麦土壤呼吸速率的影响时发现,CO₂浓度升高会降低土壤呼吸对温度的敏感性。本研究也发现,与 CK、OTC 相比,OTC+CO₂处理条件下 Q_{10} 分别降低了 12%和 9%。此外,OTC+CO₂处理条件下的 α 值是其他处理条件下的两倍多。分析原因可能是,CO₂浓度升高促进了玉米根系的生长和土壤碳的固定,增强了同温度条件下的土壤呼吸。研究表明,大气 CO₂浓度升高确实会使土壤温度和水分对土壤呼吸产生一定的耦合作用,但该耦合作用的机理、限制因素和影响程度还需要进一步的研究加以探讨。

4 结论

- (1)CO₂浓度升高对土壤呼吸的影响随春玉米生育期改变,在 R3 和 R5 期明显提高了土壤呼吸作用。
- (2)土壤温度和水分均影响土壤呼吸,分别呈现出指数相关性和抛物线型相关性。相同条件下,土壤温度对土壤呼吸的影响大于土壤水分。
- (3)大气 CO₂浓度升高降低了土壤呼吸对土壤温度的敏感性,提高了土壤呼吸对土壤水分响应的阈值。

参考文献 (References):

[1] 王森,姬兰柱,李秋荣,刘延秋. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2003, 14(8):1234-1238.
[2] 李玉宁,王关玉,李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘, 2002, 9(2):351-357.
[3] Dorrepaal E, Toet S, Van Logtestijn R S P, Swart E, Van De Weg M J, Callaghan T V, Aerts R. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. Nature, 2009, 460(7255):616-619.
[4] 邓琦,周国逸,刘菊秀,刘世忠,段洪浪,陈小梅,张德强. 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. 植物生态学报, 2009, 33(6):1023-1033.
- [5] 刘世荣, 王晖, 梁军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19):5437-5448.
- [6] 寇太记, 朱建国, 谢祖彬, 刘钢, 曾青. 冬小麦旺盛生长期 CO₂ 浓度升高对根际呼吸的影响. 生态学报, 2007, 27(4):1420-1427.
- [7] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. Nature, 2010, 464(7288):579-582.
- [8] 路娜, 胡维平, 邓建才, 陈效民. 大气 CO₂ 浓度升高对植物影响的研究进展. 土壤通报, 2011, 42(2):477-482.
- [9] 陈书涛, 桑琳, 张旭, 胡正华. 增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响. 环境科学, 2016, 37(2):703-709.
- [10] Carbone M S, Richardson A D, Chen M, Davidson E A, Hughes H, Savage K E, Hollinger D Y. Constrained partitioning of autotrophic and heterotrophic respiration reduces model uncertainties of forest ecosystem carbon fluxes but not stocks. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(9):2476-2492.
- [11] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 毛伟, 崔夺, 曲浩, 连杰, 罗永清. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(15):4890-4901.
- [12] Davidson E A, Verchot L V, Catt  nio J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. Biogeochemistry, 2000, 48(1):53-69.
- [13] 姜艳, 王兵, 汪玉如, 杨清培. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟. 应用生态学报, 2010, 21(7):1641-1648.
- [14] 李亚森, 丁松爽, 刘国顺. 农田生态系统土壤呼吸测定方法研究进展. 土壤通报, 2018, 49(3):743-749.
- [15] Contosta A R, Burakowski E A, Varner R K, Frey S D. Winter soil respiration in a humid temperate forest: the roles of moisture, temperature, and snowpack. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(12):3072-3088.
- [16] 李少昆, 王立春, 王璞, 陆卫平, 王俊河, 杨祁峰, 王子明, 赵久然, 董树亭, 赵明. 中国玉米栽培研究进展与展望. 中国农业科学, 2017, 50(11):1941-1959.
- [17] Yonemura S, Nouchi I, Nishimura S, Sakurai G, Togami K, Yagi K. Soil respiration, N₂O, and CH₄ emissions from an Andisol under conventional-tillage and no-tillage cultivation for 4 years. Biology and Fertility of Soils, 2014, 50(1):63-74.
- [18] 王妮, 汪涛, 彭书时, 方精云. 冬季土壤呼吸: 不可忽视的地气 CO₂ 交换过程. 植物生态学报, 2007, 31(3):394-402.
- [19] Kim Y, Kodama Y, Fochesatto G J. Environmental factors regulating winter CO₂ flux in snow-covered black forest soil of Interior Alaska. Geochemical Journal, 2017, 51(4):359-371.
- [20] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 史雅娟, 屈波, 况星. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律. 环境科学学报, 2006, 26(6):992-999.
- [21] 郭慧敏, 张彦军, 刘庆芳, 姜继韶, 李俊超, 王蕊, 李娜娜, 李如剑, 郭胜利, 李春越. 黄土高原半干旱区土壤呼吸对土地利用变化的响应. 自然资源学报, 2014, 29(10):1686-1695.
- [22] Bachman S, Heisler-White J L, Pendall E, Williams D G, Morgan J A, Newcomb J. Elevated carbon dioxide alters impacts of precipitation pulses on ecosystem photosynthesis and respiration in a semi-arid grassland. Oecologia, 2010, 162(3):791-802.
- [23] Bernhardt E S, Barber J J, Pippet J S, Taneva L, Andrews J A, Schlesinger W H. Long-term effects of free air CO₂ enrichment (FACE) on soil respiration. Biogeochemistry, 2006, 77(1):91-116.
- [24] Drake J E, Stoy P C, Jackson R B, Delucia E H. Fine-root respiration in a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) forest exposed to elevated CO₂ and N fertilization. Plant, Cell & Environment, 2008, 31(11):1663-1672.
- [25] 马红亮, 朱建国, 谢祖彬, 刘钢, 曾青, 韩勇. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦 P、K 吸收和 C:N, C:P 比的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1192-1198.
- [26] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3):798-805.
- [27] S  e A R B, Giesemann A, Anderson T H, Weigel H J, Buchmann N. Soil respiration under elevated CO₂ and its partitioning into recently assimilated and older carbon sources. Plant and Soil, 2004, 262(1/2):85-94.
- [28] 寇太记, 徐晓峰, 朱建国, 谢祖彬, 郭大勇, 苗艳芳. CO₂ 浓度升高和施氮条件下小麦根际呼吸对土壤呼吸的贡献. 应用生态学报, 2011, 22(10):2533-2538.
- [29] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 杨扬, 刘景利, 史奎桥. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献. 生态学报, 2007, 27(12):5254-5261.
- [30] 张赛, 王龙昌, 周航飞, 罗海秀, 张晓雨, 马仲炼. 西南丘陵区不同耕作模式下玉米田土壤呼吸及影响因素. 生态学报, 2014, 34(21):6244-6255.
- [31] Reynolds L L, Johnson B R, Pfeifer-Meister L, Bridgman S D. Soil respiration response to climate change in Pacific Northwest prairies is mediated by a regional Mediterranean climate gradient. Global Change Biology, 2015, 21(1):487-500.
- [32] 吴丹娜, 江洪, 张金梦. 农田生态系统土壤呼吸作用的研究进展. 北方园艺, 2015, (6):178-182.
- [33] 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. 应用生态学报, 2006, 17(9):1757-1760.
- [34] Schaeffer S M, Evans R D. Pulse additions of soil carbon and nitrogen affect soil nitrogen dynamics in an arid Colorado Plateau shrubland. Oecologia, 2005, 145(3):425-433.
- [35] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 阎志丹. 水分对土壤呼吸的影响及机理. 生态学报, 2003, 23(5):972-978.
- [36] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, Turnipseed A A, Delany A C, Williams M W, Schmidt S K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. Nature, 2006, 439(7077):711-714.
- [37] 陈亮, 刘子亭, 韩广轩, 初小静, 孙宝玉, 刘海防, 李建文. 环境因子和生物因子对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸的影响. 应用生态学报, 2016, 27(6):1795-1803.
- [38] Chen X P, Tang J, Jiang L F, Li B, Chen J K, Fang C M. Evaluating the impacts of incubation procedures on estimated Q_{10} values of soil respiration. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(12):2282-2288.
- [39] 陈敏鹏, 夏旭, 李银坤, 梅旭荣. 土壤呼吸组分分离技术研究进展. 生态学报, 2013, 33(22):7067-7077.
- [40] 寇太记, 苗艳芳, 庞静, 朱建国, 谢祖彬. 农田土壤呼吸对大气 CO₂ 浓度升高的响应. 生态环境, 2008, 17(4):1667-1673.