

大气 CO₂ 浓度升高对旱作玉米不同生育期 土壤碳氮及组分的影响

冯倩¹, 周娅¹, 张晓媛¹, 王丽梅^{1,2}, 王玉¹, 李世清^{1,2}, 李海增³

(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; 3. 盛炎电子科技有限公司, 河北 邯郸 056001)

摘要: 为探明大气 CO₂ 浓度升高对旱作玉米不同生育期土壤碳氮及其组分的影响, 以旱作春玉米为研究对象, 基于田间定位试验, 利用改进的开顶式气室(OTC)模拟大气 CO₂ 浓度升高的环境, 设置当前自然大气 CO₂ 浓度(CK)、CO₂ 浓度升高(700 μmol/mol, OTC+CO₂)与 OTC 气室对照(OTC)3种处理, 研究大气 CO₂ 浓度升高对玉米各生育期土壤有机碳、全氮、水溶性有机碳、水溶性氮、易氧化有机碳的影响。结果表明: 与 OTC 相比, 大气 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂)对土壤有机碳及组分、土壤全氮均无显著影响, 使水溶性氮在 12 叶期(V12)降低 18.17%, 灌浆期(R3)升高 108.56% ($P < 0.05$)。与 CK 相比, OTC+CO₂ 处理显著降低了各生育期土壤有机碳(收获期 R6 除外)和全氮(V12 除外)含量, 降幅分别为 4.47%~14.42% 和 6.78%~12.48% ($P < 0.05$), 降低了苗期(V6)水溶性有机碳、V12 期水溶性氮、抽雄吐丝期(R1)与 R6 期易氧化有机碳含量, 升高了 R3 期水溶性有机碳含量 ($P < 0.05$)。因此, 试验设置条件下, 大气 CO₂ 浓度升高对土壤有机碳及组分、土壤全氮均无显著影响, 对水溶性氮的影响因生育期而异。在利用 OTC 系统模拟大气 CO₂ 浓度升高进行相关研究时, OTC 对试验结果的影响不可忽视。

关键词: 大气 CO₂ 浓度升高; OTC 气室; 土壤碳氮组分; 玉米

中图分类号: 153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0221-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.03.033

Effects of Elevated CO₂ on Soil Carbon and Nitrogen and Its Fractions at Different Growth Stages of Maize in a Semiarid Area

FENG Qian¹, ZHOU Ya¹, ZHANG Xiaoyuan¹, WANG Limei^{1,2},

WANG Yu¹, LI Shiqing^{1,2}, LI Haizeng³

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Sheng Yan Electronic Technology, Handan, Hebei 056001)

Abstract: A field experiment was conducted to study the contents of organic carbon, total nitrogen, dissolved organic carbon, dissolved total nitrogen and readily oxidized organic carbon in spring maize field under three different environmental conditions: Natural atmospheric CO₂ concentration (as the control, marked as CK), open-top chamber (OTC) system with CO₂ concentration of 700 μmol/mol (marked as OTC+CO₂) and OTC system with current atmospheric CO₂ concentration (marked as OTC). The results showed that compared with OTC, the elevated CO₂ had no significant effect on the contents of soil organic carbon, total nitrogen, dissolved organic carbon and readily oxidized organic carbon ($P > 0.05$), but decreased the dissolved total nitrogen by 18.17% ($P < 0.05$) at V12 stage, and increased the dissolved total nitrogen by 108.56% ($P < 0.05$) at R3 stage. Compared with CK, OTC+CO₂ treatment decreased the soil organic carbon (except R6) and total nitrogen (except V12) during the whole period of maize, by 4.47%~14.42% and 6.78%~12.48% ($P < 0.05$), respectively. The OTC+CO₂ decreased the dissolved organic carbon at V6 stage, dissolved total nitrogen at V12 stage and readily oxidized organic carbon at R1 and R6 stages; but increased dissolved organic carbon at R3 stage ($P < 0.05$). In conclusion, the elevated CO₂ had no significant effect on organic carbon and its fractions, total nitrogen, but significantly affected dissolved total nitrogen. The impact of

收稿日期: 2018-02-26

资助项目: 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)

第一作者: 冯倩(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事农业生态环境研究。E-mail: 727541367@qq.com

通信作者: 王丽梅(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事农业生态环境与全球变化研究。E-mail: sdwanglimei@163.com

OTC on the results could not be ignored when using the OTC system to do the research about elevated CO₂ concentrations.

Keywords: elevated CO₂; open-top chamber; fractions of soil carbon and nitrogen; spring maize

由于燃料燃烧、水泥加工、土地利用方式改变以及其他人类活动干扰,大气 CO₂ 浓度不断上升,目前已达 400 μmol/mol 左右,并仍以每年大约 1~2 μmol/mol 的速度增长。已有研究^[1]表明,大气 CO₂ 浓度升高对植物的光合作用、地上和地下部碳氮含量以及生物量的分配比例产生一定影响,从而间接改变输入土壤中物质的质和量,影响土壤碳、氮动态与含量。在当前经济发展对环境影响愈演愈烈的前提下,重视全球气候变暖,开展大气 CO₂ 浓度升高对作物及农田土壤影响的研究,具有长远意义。

土壤有机碳(SOC)是全球碳循环中重要的碳库之一,土壤全氮(TN)反映了土壤氮素的贮量,二者皆是反映土壤质量和生产力的重要指标,其含量的变化在生物圈物质循环中起着重要作用,但由于有机碳、氮库含量巨大且稳定,因此单独测定土壤有机碳及全氮不足以反映当前土壤质量及肥力的变化情况^[2]。而水溶性有机碳(DOC)、水溶性氮(DTN)及易氧化有机碳(ROOC)因在土壤中具有极不稳定、易被分解、易被氧化的特点^[3],即使含量在土壤碳、氮中所占比例较小,仍可以敏感地对土壤质量和肥力作出反映。因此,在土壤有机碳及全氮测定基础上,开展水溶性有机碳、水溶性氮及易氧化有机碳研究,对评价由大气 CO₂ 浓度升高引起土壤碳、氮库的变化具有重要意义。

近年来,国内外学者对于大气 CO₂ 浓度升高对土壤碳氮及活性组分的影响开展了大量研究^[4-9],研究结果因土壤环境(土壤温度、土壤水分)、作物品种、土地利用方式、田间水肥管理措施及人类活动等不同而各异。前人^[10-11]利用 FACE 系统通过对稻田土壤研究发现升高 CO₂ 浓度可显著增加土壤有机碳、全氮及水溶性有机碳含量,但对水溶性氮无显著影响;陈婧等^[12]通过 OTC 系统对水溶性碳氮的研究结果表明,大气 CO₂ 浓度升高对水溶性有机碳无显著影响,但降低了水溶性有机氮含量。Wu 等^[13]证实,在大气 CO₂ 浓度升高的条件下,农田土壤有机碳及易氧化有机碳含量显著增加。但也有研究^[14-16]表明,不论是在田间还是室内条件下,大气 CO₂ 浓度升高对农田表层土壤有机碳及活性组分均无显著影响,对土壤全氮及水溶性氮的影响因施肥水平而异。目前已有研究大都以 C₃ 作物和室内栽培为主,不能真实反映田间条件下的状况,且对土壤碳氮含量影响的研究多集中在某一特定生育期,而不是整个生长季,对于

C₄ 作物尤其是旱作玉米在 CO₂ 浓度升高条件下土壤碳、氮及组分变化的研究鲜有报道。因此,本研究拟通过 OTC 系统控制大气 CO₂ 浓度(700 μmol/mol),探明大气 CO₂ 浓度升高对旱作玉米农田土壤碳、氮及其组分的影响,旨在为科学的土壤养分管理提供理论依据与基础数据,以期为未来气候条件下土壤肥力管理、碳氮循环等提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在陕西省咸阳市长武县王东村中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(107°40' E, 35°12' N)进行,海拔 1 220 m,年均温度 9.1 °C,年均降水量 582 mm,年无霜期 171 d,年日照时间 2 230 h。供试土壤属黑垆土,母质为中壤质黄土,土质疏松,土层深厚,通透性好^[17]。2015 年布设试验前土壤基本理化性质:pH 7.97,有机质 12.46 g/kg,全氮 0.98 g/kg,速效钾 194.72 mg/kg,速效磷 22.19 mg/kg,土壤容重 1.22 g/cm³。

1.2 试验设计

田间定位试验始于 2015 年,试验共设 3 种处理:当前自然大气 CO₂ 浓度处理(CK)、OTC 气室对照处理(OTC)、以及 OTC 气室内模拟 CO₂ 浓度升高处理(700 μmol/mol,OTC+CO₂)。设置 OTC 的目的是为了将 OTC 增温效应对研究结果的影响从 OTC+CO₂ 处理中剥离出来,加以甄别。每个处理设 3 个平行,共 9 个小区,包括 6 个气室内小区(每个小区面积 16 m²)与 3 个当前自然大气条件下小区(每个小区面积为 36 m²)。各处理随机排列且彼此之间设有 1.2 m 保护行。OTC 系统的运行方式与模拟精度同已有研究^[17]。供试春玉米品种为“郑单 958”,播种密度为 70 000 株/hm²,采用双垄沟播技术。每年 4 月下旬播种,9 月中下旬收获,收获后试验地休闲,播种前清除上一年的秸秆,田间管理同大田。以尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)、硫酸钾(含 K₂O 50%)为肥源,施肥量分别为 225,40,80 kg/hm²。施肥方式为磷、钾肥于播前结合耕地一次性施入,氮肥分别于播前、拔节期和抽雄吐丝期按照 4:3:3 的比例施入。

1.3 样品采集与测定

土壤样品采集于 2017 年 4—9 月,分别于玉米苗期(V6,6 月 13 日)、12 叶期(V12,7 月 8 日)、抽雄吐丝期(R1,7 月 21 日)、灌浆期(R3,8 月 5 日)及收获

期(R6,9月15日),按照“S”形采样法采集各小区0—20 cm土样,剔除石块、动植物残体等杂物并混匀,装于自封袋并迅速带回实验室于4℃保存。土壤鲜样过2 mm筛后,一部分用于水溶性有机碳和水溶

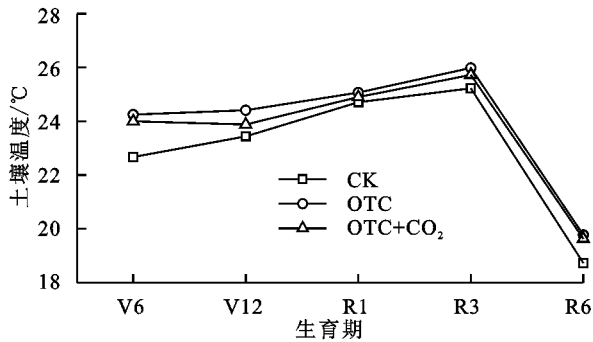
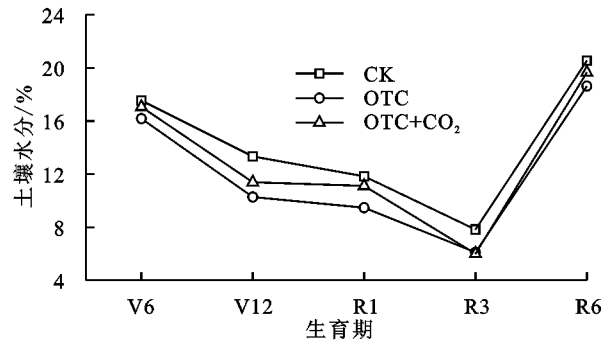


图1 各生育期样品采集时土壤温度及水分变化

性氮的测定,另一部分风干后磨碎过0.149 mm筛和0.25 mm筛后分别用于易氧化有机碳、有机碳和全氮的测定。2017年春玉米各生育期采样土壤温度及含水量变化见图1。



土壤有机碳及全氮分别采用重铬酸钾—外加热法、半微量凯氏定氮法^[18]测定;水溶性有机碳、总氮的提取及测定参考 Jones 等^[19]方法进行,水溶性有机碳采用 TOC 分析仪测定;水溶性氮采用氢氧化钠—过硫酸钾氧化,分光光度计测定^[16];易氧化有机碳依据 Blair 等^[20]方法采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法测定;pH 采用 pH 测定仪^[18]测定;土壤含水量采用烘干法^[18]测定;土壤温度数据由各小区中央设立的温度传感器而来^[17]。

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理, Origin 8.5 软件作图, SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析,处理间差异显著性用最小显著差法(LSD_{0.05})表示。

2 结果与分析

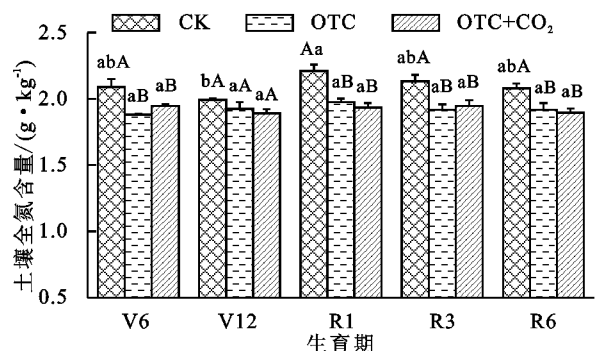
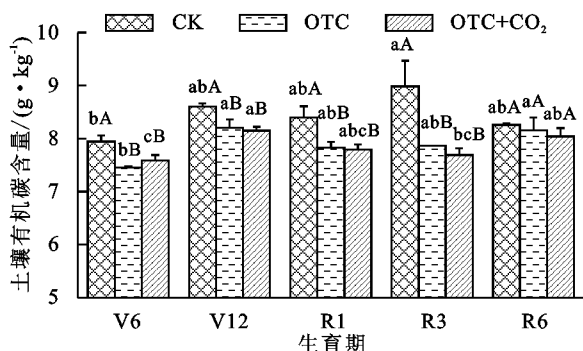
2.1 大气 CO₂ 浓度升高对土壤有机碳及全氮的影响

在春玉米整个生育期中,土壤有机碳在 CK 处理下的变化范围为 7.94~8.99 g/kg,OTC 处理为 7.46~8.20 g/kg,OTC+CO₂ 处理为 7.59~8.15 g/kg(图 2)。与自然大气对照(CK)相比,OTC+CO₂ 处理 V6、V12、R1 和 R3 期土壤有机碳含量分别降低了 4.47%、5.25%、7.21%、14.42%($P<0.05$),而对 R6 期土壤有机碳含量影响不显著。与 OTC 相比,大气 CO₂ 浓度升高

(OTC+CO₂)对土壤有机碳含量在各个生育期均无显著影响。随生育期推移,CK 处理表现为 R3 期高于 V6 期,OTC 处理表现为 V12 和 R6 期高于 V6 期,OTC+CO₂ 处理下土壤有机碳的变化趋势与 OTC 基本一致。其中,CK 处理最大值出现在 R3 期,而 OTC、OTC+CO₂ 处理最大值出现在 V12 期。

在 0—20 cm 土层下,3 种处理土壤全氮含量在春玉米整个生长过程中分别为 1.99~2.21(CK 处理),1.88~1.97(OTC 处理),1.89~1.95 g/kg(OTC+CO₂ 处理)。与 CK 相比,OTC+CO₂ 处理显著降低了整个生长季(V12 期除外)土壤全氮含量,降幅为 6.78%~12.48%($P<0.05$)。与 OTC 相比,大气 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂)对土壤全氮含量在各个生育期均无显著影响(图 2)。随生育期推移,CK 处理表现为 R1 期显著高于 V12 期,其余各生育期差异不显著。OTC、OTC+CO₂ 不同时期均无显著变化。

因此,总体来看,在大气 CO₂ 浓度升高单一条件影响下,玉米农田土壤有机碳和全氮含量无显著改变,而在 OTC 气室与 CO₂ 浓度升高的复合影响(OTC+CO₂)下,土壤有机碳含量(R6 期除外)与全氮含量(V12 期除外)显著降低。



注:图中不同大写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示各生育期间差异显著($P<0.05$)。下同。

图2 大气 CO₂ 浓度升高对各生育期土壤有机碳及全氮的影响

2.2 大气 CO₂ 浓度升高对土壤水溶性有机碳及水溶性氮的影响

不同处理 0~20 cm 水溶性有机碳含量在春玉米整个生育期浮动较大,其中 CK 处理为 14.25~51.44 mg/kg,变幅 37.19 mg/kg; OTC 处理为 17.87~54.75 mg/kg,变幅 36.88 mg/kg; OTC+CO₂ 处理为 11.46~72.02 mg/kg,变幅 60.56 mg/kg(图 3)。与 CK 相比,OTC+CO₂ 处理使水溶性有机碳在 V6 期显著降低 74.53%,R3 期显著升高 40.01% ($P<0.05$),对 V12、R1、R6 期无显著影响。与 OTC 相比,大气 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂)对各生育期水溶性有机碳含量均无显著影响。不同处理水溶性有机碳含量随生育期动态变化不太一致,CK 处理在 V6 至 R3 期无显著变化,而 R6 期显著降低。OTC 和 OTC+CO₂ 处理表现为 V12 期上升,R1 期无显著变化,R3 期上升,R6 期降低。3 种处理最大值均

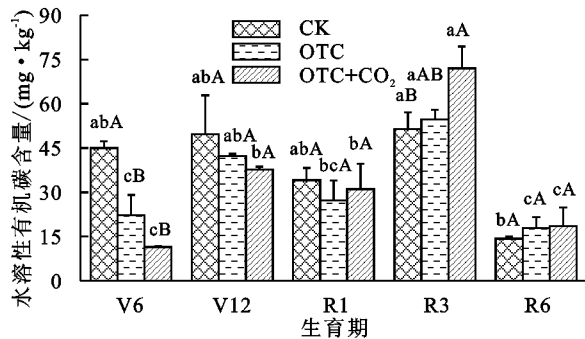


图 3 大气 CO₂ 浓度升高对各生育期水溶性有机碳及水溶性氮的影响

2.3 大气 CO₂ 浓度升高对土壤易氧化有机碳的影响

在春玉米整个生长过程中,土壤易氧化有机碳在 CK 处理下的变化范围为 1.71~2.19 g/kg,OTC 处理下为 1.44~1.82 g/kg,OTC+CO₂ 处理下为 1.52~1.90 g/kg(图 4)。与 CK 相比,OTC+CO₂ 处理显著降低了 R1 和 R6 期易氧化有机碳含量,降幅为 13.33%~24.46% ($P<0.05$)。与 OTC 相比,OTC+CO₂ 处理易氧化有机碳含量在各个生育期均无显著差异。本研究中,3 种处理易氧化有机碳随生育期均呈单峰曲线变化趋势,即 V6 期含量较低,V12、R1 及 R3 期含量有所上升,R6 期又下降到 V6 水平。其中,CK 处理在 R1 期达到最大值,OTC 和 OTC+CO₂ 处理在 R3 期达到最大值。

因此,仅升高大气 CO₂ 浓度对玉米农田土壤易氧化有机碳含量无显著影响,而 OTC 气室与 CO₂ 浓度升高的复合效应(OTC+CO₂)显著降低了个别生育期土壤易氧化有机碳含量。

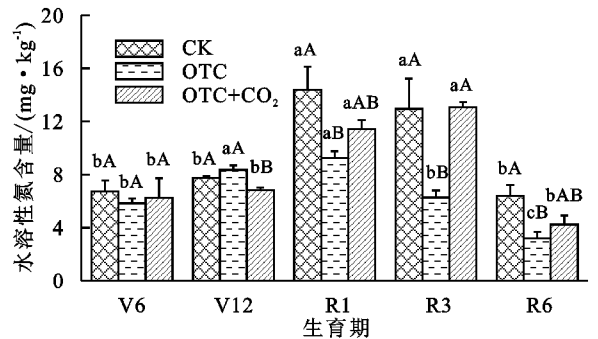
2.4 相关性分析

相关性分析结果(表 1)表明,土壤有机碳与易氧化有机碳、全氮与水溶性氮呈显著正相关($P<0.05$),土

出现在 R3 期。

水溶性氮含量在整个生长季分别为 6.41~14.39 (CK 处理),3.19~9.25(OTC 处理),4.25~13.08 mg/kg (OTC+CO₂ 处理)。与 CK 相比,OTC+CO₂ 处理使水溶性氮在 V12 期显著降低 11.91% ($P<0.05$),对其他生育期无显著影响。与 OTC 相比,大气 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂)使水溶性氮在 V12 期显著降低 18.17%,R3 期显著升高 108.56% (图 3, $P<0.05$)。其中,CK 和 OTC+CO₂ 处理表现为 R1 和 R3 期水溶性氮含量显著高于其他 3 个生育期,OTC 处理呈现 V12 和 R1 期显著高于 V6 期,而 R3 和 R6 期下降的趋势。

因此,在大气 CO₂ 浓度升高的单一条件下,玉米农田土壤水溶性有机碳含量无显著影响,但水溶性氮含量因作物生育期不同而异。而在 OTC 气室与 CO₂ 浓度升高的复合条件(OTC+CO₂)下,对水溶性有机碳、氮个别生育期产生显著影响。



壤碳、氮与其活性组分虽有不同却密切相关,土壤碳氮活性组分含量的变化受土壤有机碳及全氮的影响较大。而水溶性有机碳、水溶性氮以及易氧化有机碳两两之间存在着显著性 ($P<0.05$),其中易氧化有机碳与水溶性氮达到了极显著水平 ($P<0.01$),说明尽管土壤碳氮各组分存在差异,但可以用一种活性组分的变化来判断其他的变化,土壤碳氮活性组分均可作为衡量土壤质量与肥力的指标。土壤水分及温度与水溶性有机碳、氮之间呈极显著相关 ($P<0.01$),这也说明土壤水分及温度是影响水溶性有机碳、氮的重要因素。

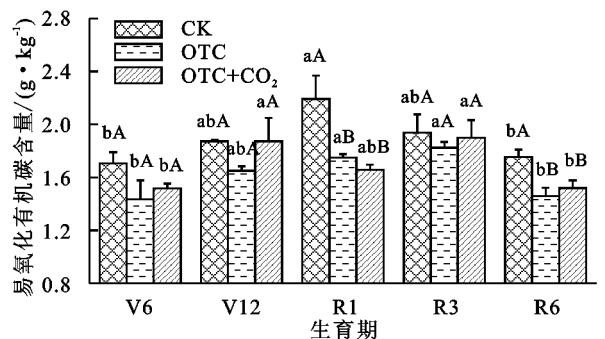


图 4 大气 CO₂ 浓度升高对各生育期易氧化有机碳的影响

表 1 土壤各指标相关性分析

项目	SOC	TN	DOC	DTN	ROOC	土壤水分
TN	0.587*					
DOC	0.212	0.128				
DTN	0.287	0.573*	0.534*			
ROOC	0.583*	0.672**	0.587*	0.752**		
土壤水分	-0.087	-0.015	-0.779**	-0.661**	-0.571*	
土壤温度	-0.117	0.035	0.653**	0.655**	0.448	-0.891**

注: * 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($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 大气 CO₂ 浓度升高对玉米农田土壤碳氮及组分的影响

CO₂ 是植物进行光合作用必不可少的原料,大气 CO₂ 浓度升高会对植物生长产生一定影响^[21],从而间接改变植物地上部和地下部的分配比例,促进光合碳向土壤输送以及土壤有效氮的吸收^[9]。大气 CO₂ 浓度升高在促进碳积累的同时也刺激了微生物活性,增强了土壤呼吸,加快了土壤碳、氮库的分解^[22]。本研究中,与 OTC 对照比较,大气 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂)对玉米各生育期土壤有机碳、全氮含量均无显著影响,这与赵光影等^[14]利用 OTC 系统对湿地土壤、陈栋等^[8]利用 FACE 平台对农作物土壤的研究结果一致,两者均发现在常规施氮水平下,大气 CO₂ 浓度升高并不能显著改变土壤有机碳和全氮含量。出现这一结果可能与有机碳、氮库含量巨大且变化缓慢有关^[2],而本试验年限较短,未能使之发生明显变化。

水溶性有机碳、易氧化有机碳因其不稳定、易转化,因此对大气 CO₂ 浓度升高比较敏感^[3]。但本研究结果发现,大气 CO₂ 浓度升高对水溶性有机碳及易氧化有机碳含量在整个生长季无显著影响,这与龙凤玲等^[23]的报道一致,但与 Guo 等^[11]的研究结果不同,后者表明升高 CO₂ 浓度可显著降低水溶性有机碳含量,这应该是因试验条件、土壤肥力、植物生长状况及微生物活性不同所导致。本研究 2 种活性碳含量无显著差异,一方面可能是升高 CO₂ 浓度虽在一定程度上促进玉米光合作用,但长期在高 CO₂ 浓度下玉米更易出现光适应现象,从而导致光合速率的促进作用会随时间的推移而逐渐下降、甚至消失^[24];另一方面可能与二者在土壤中均不稳定、易于分解有关^[3],从而体现不出处理间的差异。

此外,本研究还发现,大气 CO₂ 浓度升高对水溶性氮产生明显作用,在 V12 期显著降低,R3 期显著升高。这应该是 V12 期属玉米生长旺盛阶段,升高 CO₂ 浓度促进植物的光合作用,增强植物对土壤养分的汲取,特别是氮素的吸收^[16],从而显著降低水溶

性氮含量。与此同时,大气 CO₂ 浓度升高也可增加根系分泌物及非结构性碳水化合物^[25],使根系微生物活性旺盛,加速土壤氮的矿化^[26],随时间推移,在持续较长时间大气 CO₂ 浓度升高影响下,加之玉米生长后期枯枝落叶聚集于表层,此时土壤氮的来源量大于消耗量,导致玉米生长后期土壤水溶性氮含量增加,这种影响在 R3 期尤为显著,可能与 R1 期采样后追肥有关。这一结果与王小治等^[27]利用 FACE 系统、陈婧等^[12]利用 OTC 系统在田间条件下对稻田土壤氮的研究相似。本研究中,OTC+CO₂ 与 OTC 的对比,剥离了 OTC 带来的影响,明确了土壤碳氮及组分对大气 CO₂ 浓度升高的响应。

3.2 OTC+CO₂ 处理对玉米农田土壤碳氮及组分的影响

本研究结果表明,相对于 CK,OTC+CO₂ 处理使土壤有机碳在整个生长季(R6 除外)显著降低($P < 0.05$),土壤全氮在 V6、R1、R3 和 R6 期显著降低($P < 0.05$)。已有研究^[28]发现,OTC 气室通过减缓交换室内气体与外界气体的原理来减少热量损失,从而具有增温作用,增温幅度在 0.6~3.0 °C 左右。本研究采用改进的 OTC 气室,OTC+CO₂ 处理气室内温度比大田高 0.2~0.8 °C^[17],土壤温度比大田高 0.2~1.3 °C 左右(图 1)。而温度对于植物、土壤微生物有直接作用^[29],在一定范围内,升温因促进植物、微生物的活性而改变土壤生物过程,影响土壤碳氮及其组分的变化。Bader 等^[30]研究表明,当土壤温度大于 15 °C 时,升高 CO₂ 浓度,土壤呼吸作用增加,从而限制了土壤碳储存。Van Groenigen 等^[31]、虞凯浩等^[32]研究也表明,温度升高可以加速土壤碳分解和氮矿化,加快土壤碳氮流失,降低土壤碳氮含量。

本试验中 OTC+CO₂ 处理下,相对于 CK,水溶性有机碳在 V6 期显著降低,R3 期显著升高($P < 0.05$),水溶性氮在 V12 期显著降低($P < 0.05$)。这可能是因为玉米营养生长阶段(V6 和 V12),大气 CO₂ 浓度升高与 OTC 气室增温的交互作用改善了土壤条件,促进植株生长的同时也刺激土壤微生物活动^[16,33],增加了水溶性有机碳、氮的消耗,导致其含量降低。而在 R3 期,玉米生长缓慢,对水溶性有机

物的需求量减少;此外,R1 期采样后追施了氮肥,可能氮肥进一步促进了 OTC 气室与大气 CO₂ 浓度升高对微生物活性的影响,分解产物增加^[16],最终表现为水溶性有机碳含量较 CK 处理升高。本研究中,较 CK 处理而言,OTC+CO₂ 使整个生长季易氧化有机碳含量呈降低趋势,其中在 R1 和 R6 期达到显著差异 ($P<0.05$)。以往研究^[34]表明,易氧化有机碳与有机碳呈正相关关系,本研究结果也证明了这一点,这也说明土壤易氧化有机碳与有机碳对环境变化的反应是一致的。因此,土壤碳氮各组分对外界条件包括温度、水分与 CO₂ 浓度等的改变高度敏感,即使微小的变化也会影响土壤碳氮的分解转化。

此外,本试验中还观察到,相对于自然大气而言,OTC+CO₂ 对于土壤碳、氮及其活性组分的影响与 OTC 气室大体一致,仅在个别生育期略有不同。这也表明,OTC+CO₂ 处理对于土壤碳氮及组分的影响表现为各自效应的叠加,且 OTC 的增温效应对于土壤碳氮及各组分的影响相对更为显著。因此,在利用 OTC 系统模拟大气 CO₂ 浓度升高并进行相关研究时,OTC 的影响不可忽视。本研究结果表明,在试验中加入 OTC 对照,从而剥离 OTC 系统对试验结果的影响,是一个可行的解决方案。

4 结论

(1)与 OTC 相比,大气 CO₂ 浓度升高对各个生育期土壤有机碳、全氮、易氧化有机碳及水溶性有机碳含量均无显著影响,对水溶性氮的影响因生育期而异。

(2)相对自然大气,OTC 气室与大气 CO₂ 浓度升高(OTC+CO₂) 共同作用下,土壤表层有机碳(R6 期除外)与全氮含量(V12 期除外)显著降低;易氧化有机碳与水溶性氮在个别生育期显著降低;而对水溶性有机碳的影响因生育期而异。

(3)在利用 OTC 系统模拟大气 CO₂ 浓度升高并进行相关研究时,为剥离 OTC 系统对试验结果的影响,在试验设计中加入 OTC 对照是一个可行的解决方案。

参考文献:

[1] Chen X M, Liu J X, Deng Q, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen addition on soil organic carbon fractions in a subtropical forest [J]. *Plant and Soil*, 2012, 357(1/2): 25-34.

[2] 付鑫,王俊,赵丹丹. 地膜覆盖对黄土高原旱作春玉米田土壤碳氮组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 240-243.

[3] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.

[4] Ross D J, Newton P C D, Tate K R. Impact of a low

level of CO₂ enrichment on soil carbon and nitrogen pools and mineralization rates over ten years in seasonally dry, grazed pasture [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58(2): 265-274.

- [5] 张蕊,赵钰,何洪波,等. 基于稳定碳同位素技术研究大气 CO₂ 浓度升高对植物-土壤系统碳循环的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2379-2388.
- [6] Van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage [J]. *Science*, 2014, 344 (6183): 508-509.
- [7] 李彦生,王光华,金剑. 大气 CO₂ 升高与农田土壤碳循环研究[J]. *土壤与作物*, 2015, 4(1): 19-26.
- [8] 陈栋,郁红艳,邹路易,等. 大气 CO₂ 浓度升高对不同层次水稻土有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2559-2565.
- [9] 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.
- [10] Guo J, Zhang M Q, Wang X W, et al. Elevated CO₂ facilitates C and N accumulation in a rice paddy ecosystem [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 29: 27-33.
- [11] Guo J, Zhang M Q, Zhang L, et al. Responses of dissolved organic carbon and dissolved nitrogen in surface water and soil to CO₂ enrichment in paddy field [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 140: 273-279.
- [12] 陈婧,陈法军,刘满强,等. 温度和 CO₂ 浓度升高下转 Bt 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1481-1489.
- [13] Wu Q C, Zhang C Z, Yu Z H, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen addition on organic carbon and aggregates in soil planted with different rice cultivars [J]. *Plant and Soil*, 2018, 432: 245-258.
- [14] 赵光影,刘景双,张雪萍,等. CO₂ 浓度升高对三江平原湿地土壤碳氮含量的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 6-9.
- [15] Baek W J, Kim Y J, Yun S I, et al. Sequestration of roots-derived carbon in paddy soil under elevated CO₂ with two temperature regimes as assessed by isotope technique [J]. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2011, 54(3): 403-408.
- [16] 肖列,刘国彬,李鹏,等. 氮素添加和 CO₂ 浓度升高对白羊草根际和非根际土壤水溶性有机碳、氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 64-70.
- [17] 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.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 1999: 33-53.
- [19] Jonse D L, Willett V B. Experimental evaluation of

- methods to quantify dissolved organic nitrogen and dissolved organic carbon in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(5): 991-999.
- [20] Blair G J, Lefory R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [21] Terrer C, Vicca S, Hungate B A, et al. Mycorrhizal association as a primary control of the CO₂ fertilization effect [J]. *Science*, 2016, 353(6294): 72-74.
- [22] 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.
- [23] 龙凤玲,李义勇,方熊,等. 大气 CO₂ 浓度上升和氮素添加对南亚热带模拟森林生态系统土壤碳稳定性的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(10): 1053-1063.
- [24] 谢晓金,李仁英,张耀鸿,等. CO₂ 浓度升高对水稻和玉米叶片光合生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(10): 120-123.
- [25] Cheng Y, Zhang J B, Zhu J G, et al. Ten years of elevated atmospheric CO₂ doesn't alter soil nitrogen availability in a rice paddy [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 98: 99-108.
- [26] 张继舟,倪红伟,王建波,等. 模拟氮沉降和 CO₂ 浓度增加对三江平原小叶章群落土壤总有机碳和氮素含量的影响[J]. *地球与环境*, 2013, 41(3): 217-225.
- [27] 王小治,张海进,孙伟,等. 大气 CO₂ 浓度升高对稻田土壤氮素的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2161-2165.
- [28] 雷振锋,郑海峰,沈国强,等. 垄距和天气对玉米灌浆期开顶式气室(OTCs)增温效果的影响[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(1): 79-88.
- [29] 刘元,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.
- [30] Bader K F, Körner C. No overall stimulation of soil respiration under mature deciduous forest trees after 7 years of CO₂ enrichment [J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2830-2843.
- [31] Van Groenigen K J, Xia J Y, Osenberg C W, et al. Application of a two-pool model to soil carbon dynamics under elevated CO₂ [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4293-4297.
- [32] 虞凯浩,陈效民,陈旭,等. 模拟气候变化条件下太湖地区典型农田氮素的变化[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(1): 96-100.
- [33] 肖列,刘国彬,李鹏,等. 短期 CO₂ 浓度升高和干旱胁迫对白羊草土壤碳氮和微生物根际效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3251-3259.
- [34] 周欢,蔡立群,张仁陟,等. 不同耕作方式下秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(1): 63-68.
- (上接第 220 页)
- [10] 王慧,刘金山,惠晓丽,等. 旱地土壤有机碳氮和供氮能力对长期不同氮肥用量的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(15): 2988-2998.
- [11] 袁嫚嫚,邬刚,胡润,等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 27-35.
- [12] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 11(2): 403-427.
- [13] 尚杰,耿增超,陈心想,等. 施用生物炭对旱作农田土壤有机碳、氮及其组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(3): 509-517.
- [14] 廖敏,彭英,陈义. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 129-133.
- [15] 汤宏,沈健林,刘杰云,等. 稻秸的不同组分对水稻土微生物量碳氮及可溶性有机碳氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 264-271.
- [16] 徐嘉晖,孙颖,高雷,等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 222-230.
- [17] 谢锦升,杨玉盛,解明曙,等. 土壤轻组有机质研究进展[J]. *福建林学院学报*, 2006, 26(3): 281-288.
- [18] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等. 秸秆和生物质炭对苹果园土壤容重,阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 47(2): 366-373.
- [19] 丁少男,薛蕙,刘国彬. 施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳,氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2146-2154.
- [20] Wu F P, Jia Z K, Wang S G, et al. Contrasting effects of wheat straw and its biochar on greenhouse gas emissions and enzyme activities in a Chernozemic soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(5): 555-565.
- [21] 李新华,郭洪海,朱振林,等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130-135.