

# CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对棉花干物质质量、 有机碳及全氮含量的影响

刘 瑜<sup>1</sup>,尹飞虎<sup>1,2\*</sup>,高志建<sup>1</sup>,陈 云<sup>1</sup>,吕 宁<sup>2</sup>  
(1.新疆农垦科学院 农田水利与土壤肥料研究所,新疆 石河子 832000;  
2.新疆农垦科学院,新疆 石河子 832000)

**摘要:** 通过田间小区试验研究 CO<sub>2</sub> 浓度(本底 CO<sub>2</sub> 浓度:360 μmol/mol,倍增 CO<sub>2</sub> 浓度:720 μmol/mol)对不同施氮水平(不施氮:0 kg/hm<sup>2</sup>,低氮:150 kg/hm<sup>2</sup>,常规施氮:300 kg/hm<sup>2</sup>,高氮:450 kg/hm<sup>2</sup>)棉花干物质积累、有机碳及全氮含量的影响。结果显示:CO<sub>2</sub> 浓度倍增,除常规施氮处理外各施氮处理地下部干物质质量均增加;地上部干物质质量随施氮量不同变化趋势不同;总体上降低了地上部分分配比例,增加了根冠比,提高了干物质含量百分比。降低了土壤有机碳积累量,20~40 cm 土层降幅高于 0~20 cm。随生育期延长,CO<sub>2</sub> 浓度倍增和施氮水平对土壤有机碳积累产生负效应;棉花叶片、蕾、茎秆中有机碳含量均表现为正积累,根中有机碳为负积累;CO<sub>2</sub> 浓度倍增和增加施氮量,总体均不同程度地增加了棉花不同器官中的全氮含量。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 浓度倍增;棉花;干物质质量;有机碳;全氮

**中图分类号:** S562      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-3268(2015)11-0028-06

## Effects of CO<sub>2</sub> Concentration and Nitrogen Application Rate on Dry Matter Weight, Organic Carbon and Total Nitrogen Contents of Cotton

LIU Yu<sup>1</sup>, YIN Feihu<sup>1,2\*</sup>, GAO Zhijian<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>1</sup>, LÜ Ning<sup>2</sup>  
(1. Institute of Field Water Conservancy, Soil and Fertilizer Research, Xinjiang Academy  
of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China;  
2. Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** The effect of carbon dioxide concentration (background value:360 μmol/mol; multiplication value:720 μmol/mol) on accumulation of dry matter weight and content of organic carbon and total nitrogen in cotton plant with different nitrogen application level (no nitrogen application:0 kg/ha; low nitrogen:150 kg/ha; conventional nitrogen application:300 kg/ha; high nitrogen: 450 kg/ha) through the plots experiment in the field. The results showed that, with the multiplication of carbon dioxide concentration, dry matter content of belowground increased under different nitrogen application level except conventional nitrogen treatment; dry matter content of aboveground had a different change trend with different nitrogen application level; overall, the percentage of aboveground decreased, the ratio of root to shoot increased, and the dry matter content all increased; accumulation of soil organic carbon reduced,

收稿日期:2015-05-07  
基金项目:国家自然科学基金项目(40973061);公益性行业农业科研专项(201203012);兵团青年科技创新资金专项(2012CB025);新疆农垦科学院青年科学基金项目(YQJ201105)  
作者简介:刘 瑜(1985-),女,江苏徐州人,助理研究员,硕士,主要从事干旱区植物营养生理生态研究。  
E-mail:shzliuyu@163.com  
\* 通讯作者:尹飞虎(1954-),男,湖南平江人,研究员,主要从事作物育种、栽培和植物营养方面的研究。  
E-mail:nkyfth@sohu.com

and degree of reduction in the 20—40 cm soil layer was higher than that in 0—20 cm. Nitrogen application level and carbon dioxide concentration multiplication made a negative effect on accumulation of soil organic carbon as cotton growth period extended. Organic carbon content in the cotton leaves, buds, stems were characterized by positive accumulation, which in the roots were negative. Total nitrogen content in different organs of cotton plant increased with the multiplication of carbon dioxide concentration and nitrogen application level.

**Key words:** CO<sub>2</sub> concentration doubling; cotton; dry matter weight; organic carbon; total nitrogen

由于人类活动的影响,大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度不断增加,已由工业革命前的 270 μmol/mol 增加到现在的 360 μmol/mol,预计 21 世纪末将增加至现有浓度的 1 倍<sup>[1]</sup>。棉花是我国重要的经济作物,其生育过程对环境条件反应十分敏感<sup>[2]</sup>。大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的持续增加,必然会影响棉花生长和对养分的需求<sup>[3]</sup>。已有很多专家学者研究得出,大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加,作物生物量随之增加,从总生物量来看,大豆增长最大,其次是冬小麦和棉花,玉米生物量增加最小<sup>[4-6]</sup>。许育彬等<sup>[7]</sup>、王小娟等<sup>[8]</sup>通过研究 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下水稻、棉花、玉米、小麦、油菜等多种作物器官中氮素含量变化,发现氮素浓度降低。郭金强等<sup>[9]</sup>通过研究不同施氮量对棉花氮素吸收的影响后得出,施氮可显著提高棉株对氮素的吸收,且植株氮素累积量随施氮量的增加而增加。

新疆兵团是中国最重要的的优质商品棉生产基地和优质棉花产区之一。当前关于新疆兵团 CO<sub>2</sub> 浓度倍增及不同供氮水平两因素互作对棉花生长发育的影响鲜有报道,花铃期作为棉花产量、品质形成的关键时期,也是对外界环境反应最敏感的时期,本试验通过设置倍增 CO<sub>2</sub> 浓度和 4 个施氮水平,研究盛花期短期 CO<sub>2</sub> 浓度倍增和施肥量对棉花 C、N 积累及干物质质量的影响,以期为大气 CO<sub>2</sub> 浓度不断增加的情况下合理施肥及田间管理提供一定的理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2012 年在新疆农垦科学院农试场进行,该区属典型的温带大陆性气候。供试土壤为灌耕灰漠土,土壤类型为中壤土。土壤基础养分含量:有机质 6.94 g/kg、碱解氮 41 mg/kg、速效磷 21 mg/kg、速效钾 99 mg/kg, pH 值 8.48。

### 1.2 试验设计

供试作物为棉花,品种为新陆早 33 号。试验采用机械铺膜播种,1 膜 4 行双毛管配置,棉花宽窄行播种,种植行距为 (20 + 50 + 20) cm,株距为 12 cm。滴灌毛管铺设在棉花窄行的中间,棉花密度为

1.95 × 10<sup>5</sup> 株/hm<sup>2</sup>。

试验采用裂区设计方法,为两因素完全随机设计;主区设 2 个大气 CO<sub>2</sub> 浓度,新疆本底 CO<sub>2</sub> 浓度:360 μmol/mol (C360) 和倍增 CO<sub>2</sub> 浓度:720 μmol/mol (C720);副区设 4 个施氮水平:不施氮 0 kg/hm<sup>2</sup> (N0)、低氮 150 kg/hm<sup>2</sup> (N150)、常规施氮 300 kg/hm<sup>2</sup> (N300)、高氮 450 kg/hm<sup>2</sup> (N450);氮肥为尿素 (N 含量 46%)。试验共 8 个处理,分别为:处理 1 (C360 - N0)、2 (C360 - N150)、3 (C360 - N300)、4 (C360 - N450)、5 (C720 - N0)、6 (C720 - N150)、7 (C720 - N300)、8 (C720 - N450),每个处理重复 3 次,共计 24 个小区。主区之间设保护行,主区面积 168 m<sup>2</sup>;副区之间相邻,副区面积为 42 m<sup>2</sup>。主区四周分别用透光塑料膜包围,膜高度为 1.5 m。为准确控制主区内大气 CO<sub>2</sub> 浓度,单独铺设通气管,通气管铺于地膜之上,在棉花盛花期,连续通气 20 d,每天 12:00—15:00 运用通气管将钢瓶中的 CO<sub>2</sub> 气体均匀分布于整个主区内。CO<sub>2</sub> 气体浓度误差控制在目标值的 5% 以内。各处理单独设置施肥装置,滴灌设置和管理同大田。

### 1.3 土壤样品采集及测定

播种前采用多点混合法在试验地采集 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土壤测定土壤本底养分含量。通气前及结束后采集各副区土壤样品,分别采集表层 (0 ~ 20 cm) 和下层 (20 ~ 40 cm) 土壤,在不破坏土壤团粒结构的情况下使其自然风干,拣出肉眼可见的杂物、细根,过孔径为 0.149 mm 的筛,用于测定土壤有机碳含量<sup>[10]</sup>。

### 1.4 植株样品的采集及分析

通气前及结束后,采集各处理小区具有普遍代表性的植株 5 株,按器官将每株分叶、蕾、茎、根 4 部分,分别称质量后放入 105 ℃ 烘箱杀青 30 min,然后 80 ℃ 至恒定质量,取出称质量,将各部分器官粉碎后分别测定有机碳、全氮含量<sup>[10]</sup>。干物质含量百分比为干物质占植物总鲜质量的百分比。

### 1.5 数据处理与分析

试验数据分析时采用多次重复的平均值,数据处理和方差分析用 Excel 2003 及 SPSS 18.0 软件进

行,处理间的差异显著性采用 Duncan’s 新复极差法进行单因素和双因素多重比较。

2 结果与分析

2.1 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对棉花植株干质量、根冠比的影响

由表 1 可看出,CO<sub>2</sub> 浓度倍增和施氮处理对棉花各器官干质量都会产生影响。正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,叶片、蕾干质量均随着施氮量增加表现出增加趋势,茎、根干质量在常量施氮范围内随施氮量增加而增加,超量施氮反而降低了干质量;随施氮量增加,地上部分分配比例先降后升,根冠比则表现出先升后降

趋势;干物质含量百分比表现为增加。倍增 CO<sub>2</sub> 浓度下,随施氮量增加,叶片、蕾、根干质量均表现为“升—降—升”的变化趋势,茎干质量则显示出先降后逐渐升高的趋势。地上部分分配比例表现为下降趋势,根冠比表现为上升趋势;干物质含量百分比在常量施氮范围内随施氮量增加而降低。同氮水平下,倍增 CO<sub>2</sub> 浓度总体上降低了地上部分分配比例,增加了根冠比,提高了干物质含量百分比。CO<sub>2</sub> 浓度倍增处理棉株根冠比增大,可能是由于 CO<sub>2</sub> 浓度倍增条件下有更多的光合产物运输到地下而有利于根系生长,该结果与周莉等<sup>[11]</sup>研究结果一致。

表 1 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对植株各器官干质量的影响

处理	干质量/g				地上部分分配比例/%	根冠比	干物质含量百分比/%
	叶	蕾	茎	根			
1	9.86 ± 0.29f	16.51 ± 0.08d	6.53 ± 0.39e	3.60 ± 0.10e	90.13	0.110	18.44
2	13.74 ± 0.54d	17.75 ± 0.04c	8.19 ± 0.44d	4.99 ± 0.18d	88.83	0.126	18.67
3	16.58 ± 0.37b	24.15 ± 0.40a	12.32 ± 0.05a	6.45 ± 0.11a	89.16	0.122	19.12
4	16.84 ± 0.22b	24.28 ± 0.75a	11.13 ± 0.21b	5.37 ± 0.06c	90.68	0.103	19.46
5	12.10 ± 0.74e	9.03 ± 0.51f	11.87 ± 0.82a	3.68 ± 0.08e	89.96	0.112	25.72
6	15.40 ± 0.23c	24.01 ± 0.02a	8.95 ± 0.40c	5.93 ± 0.23b	89.07	0.123	22.46
7	13.89 ± 0.17d	13.53 ± 0.24e	9.13 ± 0.11c	4.69 ± 0.09d	88.62	0.128	20.47
8	18.52 ± 0.51a	20.98 ± 0.32b	9.62 ± 0.39c	6.47 ± 0.50a	88.36	0.132	21.11
CO <sub>2</sub>	**		**	**			
N		*	**				
CO <sub>2</sub> × N	**	**	**				

注:同列不同字母表示处理间差异达到显著性水平(P<0.05);\*表示P<0.05,r=0.388;\*\*表示P<0.01,r=0.496,n=24。下同。

2.2 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对土壤有机碳含量的影响

由图 1 可以看出,棉花盛花期通气后各处理土壤有机碳含量随着大气 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量变化均发生了变化,整体显示倍增 CO<sub>2</sub> 浓度处理土壤有机碳含量低于正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度处理,0~20 cm 土层高于 20~40 cm 土层。通过对通气后土壤中有有机碳积累量的研究(图 2)发现,0~20 cm 土壤有机碳含量在正常 CO<sub>2</sub> 浓度下,不施氮和低氮处理降幅分别为 5.25% 和 20.36%,常规施氮和高氮处理增加了其值;倍增 CO<sub>2</sub> 浓度下,高氮处理增加了土壤有机碳含量,其余 3 个氮水平都降低了有机碳含量,C720-N150 和 C720-N300 处理降幅分别达到 27.19% 和 17.37%。20~40 cm 土壤有机碳含量在

正常 CO<sub>2</sub> 浓度水平下,不施氮和高氮处理有机碳积累量表现为下降,高氮处理降幅高达 28.76%,低氮和常规施氮处理增加了下层土壤有机碳含量;倍增 CO<sub>2</sub> 浓度水平下,有机碳含量呈现出“降—升—降”的无规则变化规律。通过分析得出,CO<sub>2</sub> 浓度和施氮水平共同作用对土壤上下层有机碳积累量有极显著影响(P<0.01)。

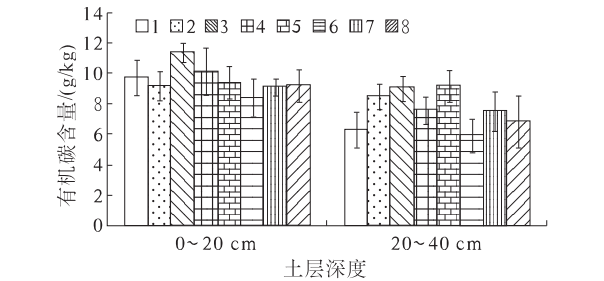


图 1 不同处理及土层深度土壤有机碳含量

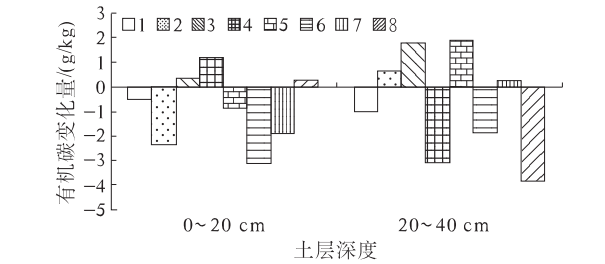


图 2 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对不同土层深度有机碳积累量的影响

2.3 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对棉花植株各器官有机碳含量的影响

由图 3 可看出,不同 CO<sub>2</sub> 浓度和氮肥处理,棉花叶、蕾、茎、根中有有机碳含量虽然都发生了变化,但是各处理中除 C720-N450 处理外,棉株器官有机

碳含量均表现为蕾 > 根 > 茎 > 叶。其中,蕾中有机碳含量随着 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量变化幅度略高于其余器官。通过对棉株各器官中有机碳积累量的分析(图 4)可看出,正常 CO<sub>2</sub> 浓度水平下,通气结束后叶片和蕾中有机碳均为正积累,其中叶中有机碳积累量 N300 处理最高,通气后较通气前增幅为 6.7%;蕾中有机碳积累量随着施氮量增加呈现增加趋势;茎和根中有机碳积累表现出不一致变化规律,不施氮和低氮处理棉花茎及常规施氮处理棉花根中有机碳出现负积累。

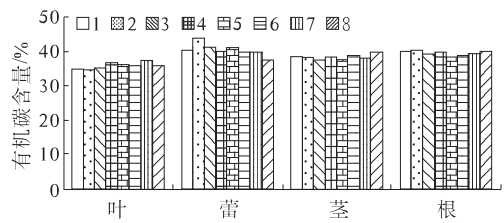


图 3 不同处理植株有机碳含量

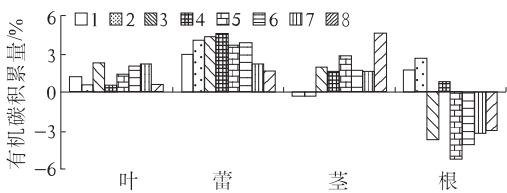


图 4 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对棉株各器官有机碳积累量的影响

倍增 CO<sub>2</sub> 浓度下,通气后,棉花叶片、蕾、茎中有机碳含量均表现为正积累,根中有机碳为负积累。随着施氮量增加,叶片、根中有机碳积累量呈增加趋势,但超量施氮反而降低了叶片中有机碳积累量,根中有机碳虽为负积累,但随着施氮量增加,其积累量表现出缓慢增加趋势;蕾中有机碳积累量呈降低趋势。

通过分析得出,CO<sub>2</sub> 浓度和施氮水平共同作用对棉花各器官有机碳积累量均有极显著影响( $P < 0.01$ )。

2.4 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对棉花植株各器官全氮含量的影响

正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度下,叶、蕾中全氮含量随施氮量增加而增加,茎、根中全氮含量在常规施氮范围内表现出增加趋势,但超量施氮反而降低了其全氮含量。CO<sub>2</sub> 浓度倍增后,棉花蕾、茎、根中全氮含量总体有不同程度增加;随着施氮量增加,根中全氮含量呈增加趋势,叶片、蕾、茎中全氮含量表现不一(表 2)。与正常 CO<sub>2</sub> 浓度相比,CO<sub>2</sub> 浓度倍增,棉花茎中全氮含量分配比率增加,叶、根中全氮含量分配比率总体降低;蕾中全氮含量分配比率随施氮量增加而增加,但过量施氮后反而降低其值。各处理中叶、蕾中全氮含量分配比率之和达到 76.73% ~ 79.95%。

表 2 CO<sub>2</sub> 浓度和施氮量对植株各器官全氮含量的影响

处理	全氮含量/%				全氮含量分配比率/%			
	叶	蕾	茎	根	叶	蕾	茎	根
1	1.76 ± 0.006e	1.67 ± 0.002h	0.52 ± 0.001g	0.36 ± 0.001e	40.80	38.78	12.04	8.38
2	1.84 ± 0.006d	1.79 ± 0.002g	0.63 ± 0.008f	0.39 ± 0.003cd	39.52	38.61	13.52	8.36
3	1.84 ± 0.006d	1.83 ± 0.001f	0.65 ± 0.006e	0.44 ± 0.002a	38.58	38.45	13.68	9.29
4	2.00 ± 0.026a	2.06 ± 0.011c	0.63 ± 0.004f	0.38 ± 0.003d	39.34	40.61	12.46	7.59
5	1.89 ± 0.038c	2.11 ± 0.043b	0.68 ± 0.002d	0.35 ± 0.003f	37.53	41.99	13.55	6.92
6	2.03 ± 0.005a	2.03 ± 0.018d	0.72 ± 0.003b	0.39 ± 0.006c	39.22	39.21	14.00	7.57
7	1.52 ± 0.013f	2.27 ± 0.007a	0.74 ± 0.001a	0.41 ± 0.002b	30.78	45.95	14.91	8.36
8	1.95 ± 0.046b	1.88 ± 0.003e	0.71 ± 0.004c	0.44 ± 0.003a	39.11	37.80	14.20	8.90
CO <sub>2</sub>	**			**				
N	*	**						
CO <sub>2</sub> × N	**	**	**	**				

3 结论与讨论

随着全球工业化进程步伐的加快,大气 CO<sub>2</sub> 浓度不断升高,不但会对全球气候和整个人类生存环境产生重大影响,而且会影响到农田生态系统。农田作物的生长必然受到大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的影响。寇太记等<sup>[12]</sup>研究表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度促进了冬小麦地上部与地下部的生物量积累。王小娟等<sup>[8]</sup>研究也

得出,高 CO<sub>2</sub> 浓度处理的油菜生物量增加,地下部分增加幅度大于地上部分。本研究显示,倍增 CO<sub>2</sub> 浓度处理总体上增加了棉株根冠比,降低了地上部分分配比率。潘红丽等<sup>[13]</sup>认为,作物生物量的显著增加是土壤碳积累的主要原因。周莉等<sup>[11]</sup>通过对前人试验结果分析表明,随着 CO<sub>2</sub> 浓度增加,C3 豆类植物根冠比无变化,棉花的根冠比增加,本研究中 CO<sub>2</sub> 浓度倍增下棉花根冠比结果与其一致。李伏生

等<sup>[6]</sup>研究表明,随施氮量的增加,春小麦根冠比减少。王艳哲等<sup>[14]</sup>通过冬小麦试验,也认为施氮量增加降低了冬小麦根冠比;与本结论相反,这可能是不同作物组织、生理结构不同及作物所处生长状况及环境条件不同导致的。

土壤有机碳作为土壤中重要的养分,可为作物生长提供营养元素,改善土壤质量,提高土壤蓄水保肥能力<sup>[15]</sup>。对于大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加是否会引起土壤中有机碳含量的增加,还没有统一的结论。Goudriaan 等<sup>[16]</sup>研究显示,CO<sub>2</sub> 浓度升高会减慢土壤原有机质的分解,最终导致土壤碳的积累。Cardon 等<sup>[17]</sup>通过研究也发现,暴露于高 CO<sub>2</sub> 浓度下的草地,土壤原有有机碳的分解减缓;张继舟等<sup>[18]</sup>表示,CO<sub>2</sub> 浓度升高连续运行 2 个生长季后,三江平原土壤有机碳含量没有显著变化。但是, Lamborg 等<sup>[19]</sup>认为,CO<sub>2</sub> 浓度升高不会引起土壤中碳的积累。乌兰巴特尔等<sup>[20]</sup>认为,短期内 CO<sub>2</sub> 浓度富集降低了土壤可溶性无机碳和有机碳储量,但是施氮量对其影响不显著。本研究结果与乌兰巴特尔等<sup>[20]</sup>研究结果相似,即短期 CO<sub>2</sub> 浓度倍增降低了土壤有机碳积累量,20 ~ 40 cm 土层降幅高于 0 ~ 20 cm。土壤有机碳积累量降低可能是由于大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加加速了棉花植株的生长,棉株需要从土壤中吸取更多的有机物质来提供养分有关。土壤中有机碳含量的变化也将影响到棉花植株各器官中有机碳含量的变化。郭建平<sup>[21]</sup>研究显示,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度升高使沙地优势植物种根、茎、叶固定的碳明显增加,分配至茎的碳最多,其次是叶,根中获得的碳最少;侯晶东等<sup>[22]</sup>研究发现,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高,枸杞苗木枝的有机碳含量升高,叶的有机碳含量则降低。本研究棉花盛花期短期大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增试验结果显示,CO<sub>2</sub> 浓度倍增,棉花叶片、蕾、茎中有机碳含量均表现为正积累,根中有机碳为负积累。

氮是植物最重要的结构物质,对植物生长和生理代谢有重要作用<sup>[23]</sup>。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会使植物体内氮素积累量发生改变,植株氮素养分积累情况又会直接影响作物的生长发育。CO<sub>2</sub> 浓度升高对作物氮素积累量的影响已有学者做过研究。Booker 等<sup>[24]</sup>研究显示,CO<sub>2</sub> 浓度增加降低了植物组织的含氮量。杜启燃等<sup>[25]</sup>研究也得出,CO<sub>2</sub> 浓度增加后,栓皮栎叶中氮含量降低,但差异并不显著。Daep 等<sup>[26]</sup>研究结果显示,CO<sub>2</sub> 浓度升高使禾本科 C3 植物叶片氮含量平均减少 9%。Prior 等<sup>[27]</sup>还测定了棉花其他器官的氮含量,结果表明,整个植株的总氮含量降低了 11%,而种子部分降低幅度相对较小,

降低了 7%。本研究结果显示,倍增 CO<sub>2</sub> 浓度增加了不施氮、低氮处理的棉花叶、蕾、茎全氮含量,常规施氮增加了蕾和茎中全氮含量,高氮增加了茎和根中全氮含量。随着 CO<sub>2</sub> 浓度倍增,棉花茎中全氮含量分配比率增加,叶、根中全氮含量分配比率总体降低,蕾中全氮含量分配比率随施氮量增加而增加,但过量施氮后反而降低其值。叶片中全氮分配比率降低,可能和高 CO<sub>2</sub> 浓度对植物的光合速率促进作用随时间延长而逐渐降低,即“光合下调”作用有关。

#### 参考文献:

- [1] Neftel A, Moor E, Oeschger H, *et al.* Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO<sub>2</sub> in the past two centuries[J]. *Nature*, 1985, 315: 45-47.
- [2] 刘绍东, 张思平, 张立祯. 不同基因型棉花地上部干物质积累对氮素的响应[J]. *棉花学报*, 2010, 22(1): 77-82.
- [3] 尹飞虎, 李晓兰, 董云社, 等. 干旱半干旱区 CO<sub>2</sub> 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 235-244.
- [4] Kimball B A. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75: 779-789.
- [5] 王春乙, 潘亚茹, 白月明, 等. CO<sub>2</sub> 浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究[J]. *气象学报*, 1997, 55(1): 87-95.
- [6] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. CO<sub>2</sub> 浓度升高、氮与土壤水分对春小麦生长及干物质积累的效应[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(2): 37-40.
- [7] 许育彬, 沈玉芳, 李世清. CO<sub>2</sub> 浓度升高和施氮对冬小麦花前贮存碳氮转运的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(8): 1465-1474.
- [8] 王小娟, 王文明, 张振华, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和供氮水平对油菜前期生长及氮素吸收利用的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(1): 83-88.
- [9] 郭金强, 危常州, 侯振安, 等. 施氮量对膜下滴灌棉花氮素吸收、积累及其产量的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(9): 139-142.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1): 99-105.
- [12] 寇太记, Guo-Jian Z, 谢祖彬, 等. CO<sub>2</sub> 浓度增加和不同氮肥水平对冬小麦根系呼吸及生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(4): 922-931.
- [13] 潘红丽, 谢祖彬, 朱建国, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对农田土壤颗粒组成及其碳周转的影响[J]. *生态环境*,

2007,16(2):269-274.

[14] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):282-289.

[15] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000:44-48.

[16] Goudriaan J, Ruiter H E. Plant growth in response to CO<sub>2</sub> enrichment at two levels of nitrogen and phosphorus supply. I. Dry matter, leaf area and development[J]. Netherlands Journal Agricultural Science, 1983, 31: 157-169.

[17] Cardon Z G, Hungate B A, Cambardella C A, et al. Contrasting effects of elevated CO<sub>2</sub> on old and new soil carbon pools[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(3):365-373.

[18] 张继舟,倪红伟,王建波,等. 模拟氮沉降和 CO<sub>2</sub> 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):216-225.

[19] Lamborg M R, Hardy R W F, Paul E A. Microbial effects [C]//Lemon E R. The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. Colorado: Westview Press,1983:131-176.

[20] 乌兰巴特尔,魏江生,程淑兰,等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度富集对华北平原农田土壤可溶性碳含量的影响[J]. 土壤学报,2014,51(1):194-199.

[21] 郭建平,高素华. 高 CO<sub>2</sub> 和土壤干旱对沙地优势植物 C、N 固定及分配的影响[J]. 自然科学进展,2003,13(12):1275-1279.

[22] 侯晶东,曹兵. 大气 CO<sub>2</sub> 摩尔分数升高对宁夏枸杞植株与土壤 C、N 分配的影响[J]. 东北林业大学学报,2011,39(9):75-77.

[23] 赵平,孙谷畴,彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究[J]. 生态科学,1998,17(2):39-44.

[24] Booker F L. Influence of carbon dioxide enrichment, ozone and nitrogen fertilization on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) leaf and root composition[J]. Plant Cell and Environment,2000,23(6):573-583.

[25] 杜启燃,雷静品,刘建锋,等. CO<sub>2</sub> 浓度增加和施氮对栓皮栎幼苗生理生态特征的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(1):24-30.

[26] Daepf M, Suter D, Almeida P F, et al. Yield response of *Lolium perenne* swards to free air CO<sub>2</sub> enrichment increased over six years in a high N input system on fertile soil[J]. Global Change Biology,2000,6:805-816.

[27] Prior S A, Torbert H A, Runion G B, et al. Effects of carbon dioxide enrichment on cotton nutrient dynamics[J]. Journal of Plant Nutrition,1998,21:1407-1426.

(上接第 23 页)

植物遭受水分胁迫时常用叶片相对含水量反映叶片或植株的整体水分状况。本研究表明,在干旱条件下,旱地品种叶片相对含水量较高,水地品种相对含水量较低。

目前,常用丙二醛含量作为检测膜脂伤害的重要指标,其可以反映植物遭受干旱伤害的程度,含量越高,则生物膜破坏越严重,抗逆性越弱<sup>[5]</sup>。本试验结果表明,旱地品种丙二醛含量较低,水地品种的丙二醛含量较高。

相关性分析表明,水分胁迫条件下,小麦扬花期叶片丙二醛含量、相对含水量、叶绿素含量这 3 个指标均与抗旱指数呈极显著相关,可以作为小麦扬花期抗旱性鉴定指标。这与董建力<sup>[6]</sup>的研究结果基本一致,与齐永清<sup>[10]</sup>的结论相反,他认为不同抗旱性小麦品种的丙二醛含量差异不明显。

由于本试验品种的数量有限,拟进一步拓展研究范围。

参考文献:

[1] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京:中国农业出版社,

1996:8.

[2] 刘桂茹. 冬小麦抗旱性鉴定指标的研究[J]. 华北农学报,1996,11(4):84-88.

[3] 张荣芝. 旱地小麦抗旱性形态特征及生理特性的初步研究[J]. 河北农业大学学报. 1991,14(2):10-14.

[4] 王贺正. 水稻开花期抗旱性鉴定指标的筛选[J]. 作物学报,2005,31(11):1485-1489.

[5] 郝建军. 植物生理学实验技术[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社,1994:9.

[6] 董建力. 干旱胁迫对不同春小麦叶绿素含量的影响及与抗旱性的关系[J]. 华北农学报,2011,26(3):120-123.

[7] 沈波. 不同供水条件下水稻叶绿素含量的 QTL 分析[J]. 浙江大学学报,2007,33(4):400-406.

[8] 谢亚军. 干旱胁迫对甘草幼苗活性氧代谢及保护酶活性的影响[J]. 农业科学研究,2008(12):19-22.

[9] 陈荣敏. 冬小麦抗旱性鉴定指标随生育时期的变化规律及用于鉴定的最佳时期[J]. 华北农学报,1999,14(增刊):45-49.

[10] 齐永清. 不同小麦品种的抗旱生理特性及其抗旱性评价的研究[D]. 保定:河北农业大学,2003.