

张 凯,王润元,王鹤龄,等. CO<sub>2</sub> 浓度升高对半干旱区春小麦生长发育及产量影响的试验研究[J]. 干旱气象,2017, 35(2):306-312. [ZHANG Kai, WANG Runyuan, WANG Heling, et al. Effects of Elevated CO<sub>2</sub> Concentration on Growth and Yield of Spring Wheat Based on Observational Experiment in Semi-arid Area[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(2):306-312], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0306

## CO<sub>2</sub> 浓度升高对半干旱区春小麦生长发育及产量影响的试验研究

张 凯<sup>1</sup>,王润元<sup>1</sup>,王鹤龄<sup>1</sup>,赵 鸿<sup>1</sup>,  
齐 月<sup>1</sup>,赵福年<sup>1</sup>,陈 斐<sup>1</sup>,雷 俊<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,中国气象局/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,  
甘肃 兰州 730020;2. 甘肃省定西市气象局,甘肃 定西 743000)

**摘 要:**利用典型半干旱区定西试验基地的开顶式气室(Open-Top Chamber,OTC)研究平台,以春小麦“定西24号”为供试品种,设置对照(370 μmol·mol<sup>-1</sup>)和增加90 μmol·mol<sup>-1</sup>(460 μmol·mol<sup>-1</sup>)、180 μmol·mol<sup>-1</sup>(550 μmol·mol<sup>-1</sup>)3个CO<sub>2</sub>浓度梯度,研究大气CO<sub>2</sub>浓度升高对半干旱区春小麦生长发育、产量及产量构成因素的影响。结果表明:CO<sub>2</sub>浓度升高使春小麦冠层空气温度和相对湿度增加,10 cm深处的土壤环境温度降低,春小麦根际浅层的土壤湿度增加;CO<sub>2</sub>浓度增高,春小麦发育加快,生育期相应提前,全生育期缩短2~4 d;CO<sub>2</sub>浓度升高对春小麦株高、叶面积指数和叶绿素含量有明显促进作用。其中,株高和叶面积指数在开花期增幅最大,叶绿素含量在灌浆后期到乳熟期增加更为显著;随着CO<sub>2</sub>浓度升高,穗长、穗重、小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重、产量均呈增加趋势,而无效小穗数、不孕率以及收获指数则呈下降趋势,在460 μmol·mol<sup>-1</sup>和550 μmol·mol<sup>-1</sup>浓度下,籽粒产量分别比对照提高8.88%和19.93%。

**关键词:**CO<sub>2</sub>浓度升高;春小麦;生长发育;产量;半干旱区

**文章编号:**1006-7639(2017)-02-0306-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-02-0306

**中图分类号:**S162.5

**文献标识码:**A

### 引 言

人类对化石燃料的大量使用以及土地利用方式的改变等行为导致大气中CO<sub>2</sub>浓度由工业革命前的270 μmol·mol<sup>-1</sup>增加至2012年的394 μmol·mol<sup>-1</sup><sup>[1]</sup>,且仍以1.5~2.0 μmol·mol<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>的速率在增加<sup>[2]</sup>。预计到2100年大气中CO<sub>2</sub>浓度最高可达936 μmol·mol<sup>-1</sup><sup>[3]</sup>。CO<sub>2</sub>是作物生境的重要因子,是绿色植物光合作用的反应底物,CO<sub>2</sub>浓度升高对作物生理以及产量形成具有重要影响<sup>[4]</sup>,因此,大气中CO<sub>2</sub>浓度升高及其影响一直是近年来全球关注的焦点问题,成为国内外生态和农业领域的研究热点。

大气中CO<sub>2</sub>浓度升高对作物生长发育及产量

影响的试验研究手段,基本上都是在控制条件下进行的。常见的有开顶式气室(Open-Top Chamber, OTC)和开放式空气CO<sub>2</sub>浓度增高系统(Free-air CO<sub>2</sub> Enrichment, FACE)。由于OTC通常由透明玻璃或各种塑料薄膜建造而成,光照强度、光质、温度、湿度、风等生态因素与自然状态下有明显差异,但是容易确定不同CO<sub>2</sub>浓度等级;FACE系统没有任何隔离设施,气体可以自由流通,更能反映真实状态,被普遍认为是研究作物对高CO<sub>2</sub>浓度响应的最理想方法,但是对CO<sub>2</sub>浓度等级的控制比较困难,极易受大风等环境因子影响。从目前情况来看,OTC还是被国内外大多数研究者所采用。

小麦在我国广泛种植,在国家粮食安全和社会经济发展中占有举足轻重的地位。西北地区是我国

收稿日期:2016-05-27;改回日期:2016-11-23

基金项目:国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106029、GYHY201506001-2)、国家自然科学基金(41575149)、甘肃省气象局气象科研项目(GSMAMs2016-14)和干旱气象科学研究基金(IAM201505)共同资助

作者简介:张凯(1976-),男,甘肃甘谷人,副研究员,主要从事干旱气候变化与应用气象方面研究。E-mail:lanzhouzhk@163.com

北方春小麦的主产区之一,其种植面积约占全国小麦种植面积的20%,占当地耕地面积和粮食作物播种面积分别为40%和51%<sup>[5]</sup>,占有十分重要的地位。小麦的生长不仅受自身遗传物质的控制,还受众多环境因子影响,如CO<sub>2</sub>、温度和水分等。自1970年以来,国内外学者在小麦对CO<sub>2</sub>浓度升高的响应方面做过许多相关研究<sup>[6-13]</sup>,认为大气中CO<sub>2</sub>的增加确实对小麦生长发育和产量有一定的促进作用,但不同区域、不同品种下的研究结果差异较大。在未来气候变暖趋势下,陇中半干旱雨养区春小麦的生长发育和产量状况如何?为此,本文基于大气CO<sub>2</sub>浓度控制试验,研究CO<sub>2</sub>浓度升高对陇中半干旱区春小麦生长发育及产量的影响,对我国半干旱区春小麦在未来气候变化条件下应对环境的适应能力有重要指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验基地概况

本试验在中国气象局兰州干旱气象研究所的定西半干旱气象与生态环境试验基地(104°37'E, 35°35'N)进行。该基地位于甘肃省中部,属于典型黄土高原半干旱气候区,海拔高度1 896.7 m,年平均气温6.7℃,年降雨量386.0 mm<sup>[14]</sup>。试验地土壤为黄绵土,碱性,肥力中等,其中土壤pH值7.8,有机质含量110.7 g·kg<sup>-1</sup>,有效氮、总氮分别为51.1 mg·kg<sup>-1</sup>和0.84 g·kg<sup>-1</sup>,有效磷、总磷分别为14.12 mg·kg<sup>-1</sup>和1.24 g·kg<sup>-1</sup><sup>[15]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验春小麦品种为“定西24号”,叶色灰绿,叶片狭长,茎秆细而有弹性,为当地常种品种。播种日期为2012年4月1日,收获日期为2012年7月26—30日,生育期约120 d;行距0.15 m,下籽量为225 kg·hm<sup>-2</sup>;施用农家肥56 000 kg·hm<sup>-2</sup>、磷酸二铵228 kg·hm<sup>-2</sup>和尿素138 kg·hm<sup>-2</sup>作基肥。试验过程中水肥条件适宜且一致,并适时进行病虫害防治,春小麦生长发育正常。

试验装置采用OTC系统试验平台(图1),由供气装置、控制系统、释放系统3大部分组成。试验有3个开顶式气室(边长2.15 m,高2.4 m,玻璃室壁,正八边形),包括2个试验气室和1个对照气室。室内对应由8根不锈钢管围成八边形,不锈钢管面向室内一面每隔100 mm有孔径约0.5 mm的小孔,用以释放纯CO<sub>2</sub>气体,并装有1个CO<sub>2</sub>气体监测器,用于采集CO<sub>2</sub>气样供控制系统分析圈内CO<sub>2</sub>浓度

分布。此外,还装有温湿度传感器,逐时采集开顶气室内的温湿度,传感器的架设高度随春小麦的高度而变化。开顶式气室通CO<sub>2</sub>的时间从5月初(分蘖期)开始到7月底(收获期)结束。根据对未来CO<sub>2</sub>升高预测结果以及前人采用的浓度,设计了3个开顶式气室,分别在对照大气CO<sub>2</sub>浓度(自然条件下该试验地CO<sub>2</sub>平均浓度为370 μmol·mol<sup>-1</sup>)的基础上增加90 μmol·mol<sup>-1</sup>、180 μmol·mol<sup>-1</sup>,即OTC1的浓度为370 μmol·mol<sup>-1</sup>作为对照,OTC2的浓度为460 μmol·mol<sup>-1</sup>,OTC3的浓度为550 μmol·mol<sup>-1</sup>。每个处理气室间不设重复,仅气室内重复取样。

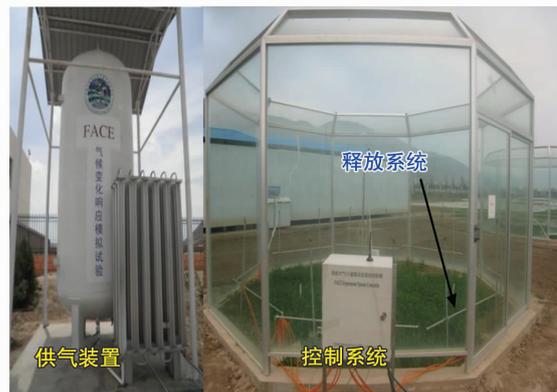


图1 OTC系统试验平台

Fig. 1 OTC experiment platform

### 1.3 观测项目与方法

自动观测冠层空气温湿度、土壤温度;播种至成熟前时期,每个生育期观测0—100 cm土层每隔20 cm的土壤含水量,用土钻取土,然后用烘干法测定;按照《农业气象观测规范》<sup>[16]</sup>观测不同处理情况下春小麦生育期,记录春小麦播种、出苗、拔节、开花、孕穗、抽穗、灌浆、成熟的日期,以及三叶期、拔节期、开花期、孕穗期、抽穗期、灌浆期的天数;株高、叶面积指数、叶绿素含量等春小麦生长指标,选取10株(定株)进行测量。其中,株高采用田间直接测量法,叶面积指数采用LAI-2000仪器测定,叶绿素含量采用SPAD-502型叶绿素计测定(以SPAD值表示)。春小麦成熟后,按照《农业气象观测规范》测定春小麦的产量结构。选取20株小麦穗,观测穗粒数,重复5次,取平均值。试验小区采取人工方式收割小麦,实打实收,观测产量。对每个试验小区收获的小麦籽粒随机取样,用电子天平测定千粒重,重复5次,取平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub> 浓度增加对春小麦冠层和土壤环境温湿度的影响

为了使对比差异更加明显,只选取 2 个处理(370 和 550  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )来分析 CO<sub>2</sub> 浓度增加对春小麦冠层和土壤环境温湿度的影响(图 2)。图 2a 和图 2b 显示,在半干旱区,春小麦分蘖—成熟期 OTC 中的大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加 180  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  (CO<sub>2</sub> 平均浓度为 550  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )后,春小麦冠层空气温度为 18.51  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 68.58%,而对照处理(CO<sub>2</sub> 平均浓度为 370  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )的春小麦冠层空气温度为 18.26  $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 67.46%,CO<sub>2</sub> 增加处理稍高于对照处理,表明 CO<sub>2</sub> 浓度升高促使春小麦冠层空气温度、相对湿度小幅增加。相对湿度增加,可缩小饱和差,提高净光合作用速率<sup>[17]</sup>,有利于春小麦叶片进行光合作用。

当大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加 180  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 后,春小麦地块 10 cm 深处的土壤温度为 16.35  $^{\circ}\text{C}$ ,较对照处理(17.84  $^{\circ}\text{C}$ )明显偏低(图 2c),可见 CO<sub>2</sub> 浓度升高可降低春小麦地 10 cm 深处的土壤环境温度。CO<sub>2</sub> 浓度升高,使春小麦蒸腾蒸发减弱,根系吸水减少,根际浅层的土壤湿度增加。从图 2d 可以看出,CO<sub>2</sub> 增加处理下春小麦地 0—20 cm 层的土壤含

水量比对照处理高 1.21%;0—20 cm 土壤含水量的变化具有阶段性,在发育前期,2 种处理差异明显,后期差异很小,这可能与 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致蒸腾蒸发减小的幅度在春小麦发育前期比后期大有关<sup>[18]</sup>。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦生长发育的影响

#### 2.2.1 对生育期的影响

表 1 给出半干旱区不同 CO<sub>2</sub> 浓度下春小麦的生育期。可以看出,CO<sub>2</sub> 浓度增高,使得春小麦发育加快,生育期相应提前,全生育期缩短。CO<sub>2</sub> 浓度对照处理下(OTC1)春小麦的全生育期为 120 d,CO<sub>2</sub> 浓度增加至 550  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  (OTC3)后,春小麦的全生育期为 116 d,比对照处理缩短 4 d;CO<sub>2</sub> 浓度增加至 460  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  (OTC2)后,春小麦的全生育期为 118 d,比对照处理缩短 2 d。与对照试验相比,在拔节期、抽穗期、开花期、乳熟期、成熟期,OTC3 浓度处理比对照处理分别提前 1、3、3、4、4 d,而 OTC2 浓度处理比对照处理分别提前 1、2、2、2、2 d,可见 CO<sub>2</sub> 浓度增加对春小麦生育期后期影响更大。

#### 2.2.2 对植株形态的影响

CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦株高有明显的促进作用,且 CO<sub>2</sub> 浓度越高,春小麦株高也越高,但不同生育期的增幅不同(图 3a)。具体表现为,CO<sub>2</sub> 浓度增加的 OTC3 和 OTC2 处理下的春小麦株高与对照处

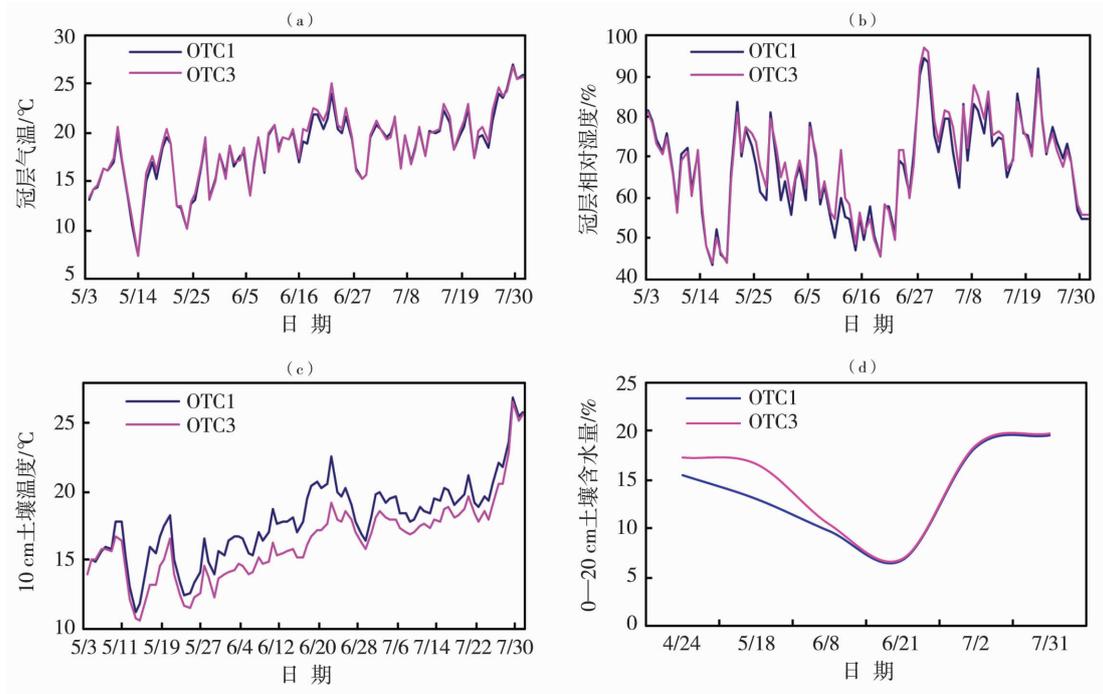


图 2 不同 CO<sub>2</sub> 浓度下春小麦冠层气温(a)、相对湿度(b)以及 10 cm 土壤温度(c)和 0—20 cm 土壤含水量(d)变化

Fig. 2 Variation of canopy air temperature and relative humidity of spring wheat, soil temperature at 10 cm depth and soil water content at 0—20 cm depth under different CO<sub>2</sub> concentration conditions

表 1 半干旱区不同 CO<sub>2</sub> 浓度下春小麦的生育期

Tab. 1 The growth period of spring wheat under different CO<sub>2</sub> concentration conditions in semi - arid area

生育期	日 期			播后天数/d		
	OTC1	OTC2	OTC3	OTC1	OTC2	OTC3
出苗期	04 - 24	04 - 24	04 - 24	23	23	23
拔节期	05 - 20	05 - 19	05 - 19	49	48	48
抽穗期	06 - 10	06 - 09	06 - 07	70	69	67
开花期	06 - 21	06 - 19	06 - 18	81	79	78
乳熟期	07 - 12	07 - 10	07 - 08	102	100	98
成熟期	07 - 30	07 - 28	07 - 26	120	118	116

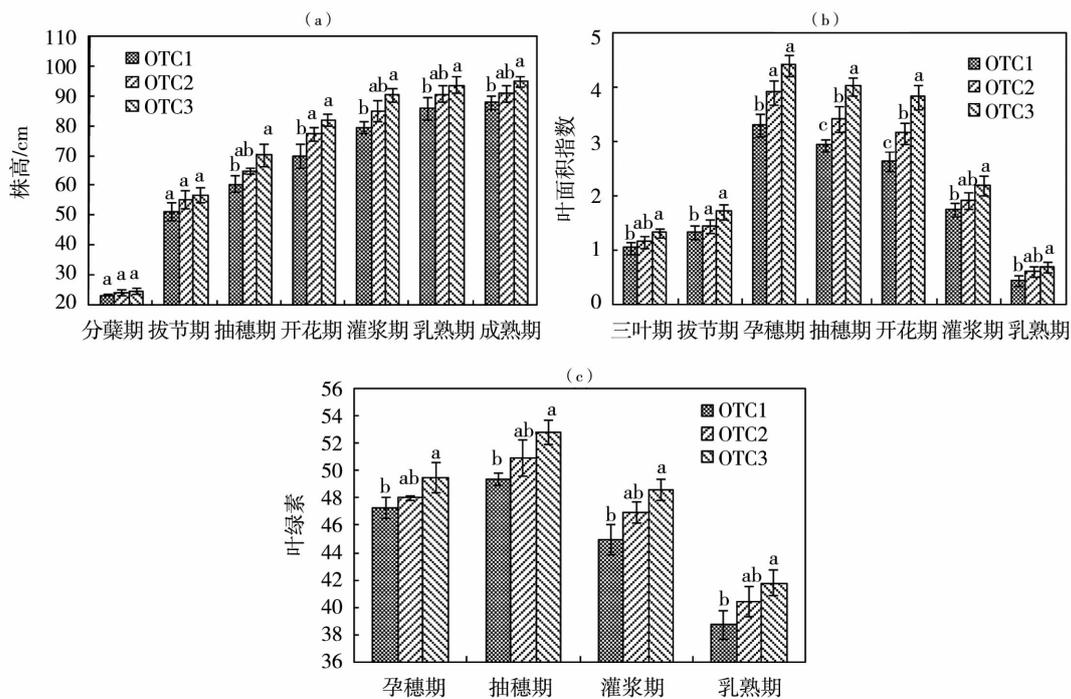


图 3 半干旱区 CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦株高(a)、叶面积指数(b)和叶绿素(c)的影响  
(不同字母表示处理间差异显著,下同)

Fig. 3 Effects of CO<sub>2</sub> concentration increase on plant height (a), leaf area index (b) and chlorophyll content (c) of spring wheat in semi - arid area

(Different letters indicate the significant difference under different treatments, the same as below)

理相比,拔节期株高分别提高 10.85% 和 7.56%,抽穗期分别提高 15.98% 和 7.06%,开花期分别提高 17.32% 和 10.54%,灌浆期分别提高 13.39% 和 7.01%,乳熟期分别提高 9.05% 和 5.45%,成熟期分别提高 8.00% 和 3.39%。可见,大气 CO<sub>2</sub> 浓度的升高对春小麦开花期的株高影响最明显,株高增幅最大。这可能与春小麦开花期生长旺盛,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高满足了春小麦光合作用原料的需要,光合产物增多原因有关。

图 3b 显示,在整个生长期,春小麦叶面积指数

呈单峰型发展趋势,孕穗期最大;CO<sub>2</sub> 浓度升高促进春小麦叶面积指数的增加,但不同生育期增幅不一样。具体表现为:OTC3 和 OTC2 浓度增加处理下的春小麦叶面积指数与对照处理相比,拔节期叶面积指数分别提高 26.71% 和 7.65%,孕穗期分别提高 33.09% 和 18.16%,抽穗期分别提高 36.66% 和 16.79%,开花期分别提高 45.09% 和 20.11%,灌浆期分别提高 25.88% 和 9.78%,乳熟期分别提高 34.27% 和 17.22%。可见,开花期叶面积指数增幅最大。

图 3c 显示, CO<sub>2</sub> 浓度对春小麦叶绿素含量同样具有明显的调节作用, CO<sub>2</sub> 浓度升高促进春小麦叶绿素含量的增加,但在不同生育期增幅不一样。表现为:与对照处理相比, OTC3 和 OTC2 浓度增加处理下的春小麦叶绿素孕穗期分别提高 4.75% 和 1.54%, 抽穗期分别提高 6.46% 和 2.79%, 灌浆期分别提高 7.48% 和 4.03%, 乳熟期分别提高 7.34% 和 3.97%。可见,灌浆后期到乳熟期,随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高,叶绿素含量增加更为显著,说明在 CO<sub>2</sub> 高浓度条件下,春小麦衰老过程中旗叶叶绿素的降低速度有所减缓,使得旗叶功能期延长,对提高春小麦产量具有积极作用。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦产量及其构成要素的影响

半干旱区 OTC 试验结果(表 2)表明,随着 CO<sub>2</sub> 浓度的升高,穗长、穗重、小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重及产量均呈增加趋势,而无效小穗数和不孕率呈下降趋势。与 OTC1 对照处理相比,OTC3 浓度增

加处理下的穗长、穗重、小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重和产量分别增加 7.34%、12.15%、8.62%、12.64%、17.87%、4.64% 和 19.93%, 无效小穗数和不孕率分别下降 13.04% 和 19.86%; OTC2 浓度增加处理下的穗长、穗重、小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重和产量分别增加 5.14%、2.34%、3.11%、5.06%、6.31%、1.16% 和 8.88%, 无效小穗数和不孕率分别下降 7.37% 和 10.25%。

收获指数反映作物群体光合同化物转化为经济产品的能力,为作物收获时经济产量(籽粒、果实等)与生物产量之比<sup>[19]</sup>。从表 2 中看出,随着 CO<sub>2</sub> 浓度增加,春小麦收获指数略呈下降趋势。表明 CO<sub>2</sub> 浓度升高,增强了春小麦的同化作用和净光合速率,较大地促进植株茎叶的生长,而籽粒的相对增加量较小,故而干物重增长率比籽粒高,与之相应的收获指数则下降。与 OTC1 对照处理相比,OTC3 和 OTC2 浓度增加处理下的收获指数分别降低 0.014 和 0.005。

表 2 半干旱区 CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦产量及其构成要素的影响

Tab. 2 Effects of CO<sub>2</sub> concentration increase on yield and its formation factors of spring wheat in semi-arid area

产量及其构成要素	OTC3	OTC2	OTC1
穗长/cm	12.73 ± 0.36a	12.47 ± 0.43a	11.86 ± 0.36b
穗重/g	2.40 ± 0.06a	2.19 ± 0.13b	2.14 ± 0.15b
总小穗数/个	36.67 ± 1.62a	34.81 ± 1.17ab	33.76 ± 1.03b
无效穗/个	4.60 ± 0.25a	4.90 ± 0.44a	5.29 ± 0.72a
不孕率/%	12.59 ± 1.14a	14.10 ± 1.43ab	15.71 ± 2.43b
穗粒数/个	32.07 ± 2.18a	29.91 ± 1.33ab	28.47 ± 2.12b
穗粒重/g	1.794 ± 0.07a	1.618 ± 0.04b	1.522 ± 0.08b
千粒重/g	55.95 ± 2.08a	54.09 ± 1.74a	53.47 ± 1.19a
产量/g · m <sup>-2</sup>	297.48 ± 18.96a	270.06 ± 12.59ab	248.04 ± 15.23b
收获指数	0.44 ± 0.03a	0.45 ± 0.04a	0.46 ± 0.02a

注:数据为平均值 ± 标准差

## 3 结论与讨论

(1)通过对半干旱区气室内白天和夜间的资料平均分析表明,CO<sub>2</sub> 浓度升高使半干旱区春小麦冠层空气温度、相对湿度均小幅增加。这与很多学者将白天和夜间单独来分析的结果明显不同。王明娜等<sup>[20]</sup>研究认为,白天 FACE 系统小麦冠层空气温度基本高于对照,空气湿度低于对照;夜间 FACE 系统小麦冠层空气温度低于对照,空气湿度差别不大。本研究还表明,CO<sub>2</sub> 浓度升高使春小麦地块 10 cm

深处的土壤环境温度降低,春小麦根际浅层的土壤湿度增加,而土壤湿度增加可能与 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致春小麦蒸腾、蒸发减弱,继而根系吸水减少有关。

(2)CO<sub>2</sub> 浓度升高,使得春小麦发育加快,生育期相应提前,全生育期缩短。CO<sub>2</sub> 浓度增加至 550 μmol · mol<sup>-1</sup>、460 μmol · mol<sup>-1</sup> 处理下的春小麦出苗一成熟期分别比对照处理(370 μmol · mol<sup>-1</sup>) 缩短 4 d 和 2 d。这与王修兰等<sup>[21]</sup>的研究结果“当大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加至 700 μmol · mol<sup>-1</sup> 和 500 μmol · mol<sup>-1</sup> 时,小麦抽穗—乳熟期分别缩短

3~4 d 和 1~2 d”基本一致。

(3)CO<sub>2</sub>浓度升高对半干旱区春小麦株高、叶面积指数和叶绿素含量有明显促进作用。即随着CO<sub>2</sub>浓度升高,春小麦株高增高,叶面积指数增大,叶绿素含量增加,且不同生育期增幅略有差异,这跟前人的研究结果一致<sup>[8]</sup>。另外,株高和叶面积指数在开花期增幅最大,这可能与春小麦开花期生长旺盛,大气CO<sub>2</sub>浓度升高满足了春小麦光合作用原料的需要,光合产物增多有关;叶绿素含量在灌浆后期到乳熟期增加更为显著,说明在CO<sub>2</sub>高浓度条件下,春小麦衰老过程中旗叶叶绿素的降低速度有所减缓,致使旗叶功能期延长,对提高春小麦产量有积极作用。

(4)小麦产量是一重要的经济参数,对于CO<sub>2</sub>高浓度可增加小麦产量已成共识。Cure<sup>[22]</sup>通过气室研究认为,当大气CO<sub>2</sub>浓度为550 μmol·mol<sup>-1</sup>时,在充足的水氮供应条件下,小麦的产量可以增加19%,在低氮条件下可增加9%;王修兰等<sup>[21]</sup>研究结果认为,当大气CO<sub>2</sub>浓度为700 μmol·mol<sup>-1</sup>和500 μmol·mol<sup>-1</sup>时,小麦的产量分别增加36.1%和17.2%。本试验研究表明,随着CO<sub>2</sub>浓度的升高,穗长、穗重、小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重及产量均呈增加趋势,其中在550、470 μmol·mol<sup>-1</sup>浓度处理下春小麦籽粒产量分别增加19.93%和8.88%,与上述研究结果差别不大。收获指数(也称作物的经济系数)反映了作物同化产物在籽粒和营养器官上的分配比例,是作物超高产突破的一个重要生物学参数。杨连新等<sup>[23]</sup>研究表明,随着CO<sub>2</sub>浓度增加,FACE系统冬小麦收获指数略有下降,这与本文的研究结果一致。

本文仅探讨了CO<sub>2</sub>浓度单因子对半干旱区春小麦的直接影响,未综合考虑气候变化对春小麦带来的其他改变(如增温、降水)和CO<sub>2</sub>浓度增加导致的间接影响。此外,试验资料仅1 a,只得到了一个初步结果,为了更深入认识CO<sub>2</sub>浓度增加对春小麦的影响及其机制,还需要开展进一步的试验和研究。

#### 参考文献

- [1] Scripps Institution of Oceanography. CO<sub>2</sub> Program. Annual data atmospheric CO<sub>2</sub> [OL]. <http://CO2now.org/Current-CO2/CO2-Now/annual-CO2.html>, 2013.
- [2] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [R]. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2007.
- [3] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergov-
- ernmental panel on climate change [R]. Cambridge & New York: Cambridge University Press, 2013.
- [4] Huang J G, Bergeron Y, Denneler B, et al. Response of forest trees to increased atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2007, 26(5-6): 265-283.
- [5] 吴宏亮, 康建宏, 姚珊, 等. 花后高温干旱对春小麦淀粉形成的影响 [J]. *新疆农业科学*, 2013, 50(11): 1974-1984.
- [6] Kimball B A. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations [J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75: 779-788.
- [7] Morison J I L. Sensitivity of stomata and water use efficiency to high CO<sub>2</sub> [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1985, 8: 467-474.
- [8] 王修兰, 徐师华, 李佑祥. CO<sub>2</sub>浓度倍增对小麦生育性状和产量构成的影响 [J]. *生态学报*, 1996, 16(3): 328-332.
- [9] 白莉萍, 全乘风, 林而达, 等. CO<sub>2</sub>浓度增加对不同冬小麦品种后期生长与产量的影响 [J]. *中国农业气象*, 2002, 23(2): 13-16.
- [10] 蒋跃林, 张庆国, 张仕定, 等. 大气CO<sub>2</sub>浓度升高对小麦旗叶衰老和产量的影响 [J]. *种子*, 2006, 25(5): 1-3.
- [11] 杨连新, 李世峰, 王余龙, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 75-80.
- [12] 刘月岩, 刘会灵, 乔匀周, 等. CO<sub>2</sub>浓度升高对不同水分条件下冬小麦生长和水分利用的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(11): 1365-1370.
- [13] 姜帅, 居辉, 吕小溪, 等. CO<sub>2</sub>浓度升高与水分互作对冬小麦生长发育的影响 [J]. *中国农业气象*, 2013, 34(4): 403-409.
- [14] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 增温对半干旱区春小麦田间水分特征的影响 [J]. *干旱气象*, 2015, 33(1): 52-58.
- [15] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 67-75.
- [16] 国家气象局. 农业气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 1993.
- [17] 许大全. 田间小麦叶片光合作用“午睡”现象的研究 [J]. *植物生理学报*, 1984, 10(3): 269-276.
- [18] 康绍忠, 蔡焕杰, 梁银丽, 等. 大气CO<sub>2</sub>浓度增加对春小麦冠层温度、蒸发蒸腾与土壤剖面水分动态影响的试验研究 [J]. *生态学报*, 1997, 17(4): 412-417.
- [19] 潘晓华, 邓强辉. 作物收获指数的研究进展 [J]. *江西农业大学学报*, 2007, 29(1): 1-5.
- [20] 王明娜, 罗卫红, 孙彦坤, 等. 开放式空气CO<sub>2</sub>浓度升高对小麦冠层微气候的影响 [J]. *中国农业气象*, 2008, 29(4): 392-396.
- [21] 王修兰, 徐师华, 梁红. CO<sub>2</sub>浓度增加对C3、C4作物生育和产量影响的实验研究 [J]. *中国农业科学*, 1998, 31(1): 55-61.
- [22] Cure J D. Carbon dioxide doubling responses: A crop survey. In *Direct effects of increasing carbon dioxide on Vegetation* (eds. B R Strain and J D Cure) [R]. Washington DC: United States Department of Energy, 1985.
- [23] 杨连新, 王余龙, 李世峰, 等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦物质生产与分配的影响 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 339-346.

## Effects of Elevated CO<sub>2</sub> Concentration on Growth and Yield of Spring Wheat Based on Observational Experiment in Semi – arid Area

ZHANG Kai<sup>1</sup>, WANG Runyuan<sup>1</sup>, WANG Heling<sup>1</sup>, ZHAO Hong<sup>1</sup>,

QI Yue<sup>1</sup>, ZHAO Funian<sup>1</sup>, CHEN Fei<sup>1</sup>, LEI Jun<sup>2</sup>

(1. *Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration / Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou 730020, China*; 2. *Dingxi Meteorological Bureau of Gansu Province, Dingxi 743000, China*)

**Abstract:** Based on the Open – Top Chamber (OTC) experiment platform at Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Experimental Station of Arid Meteorology Institute of China Meteorological Administration, an experiment was conducted to investigate the effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration (370 μmol · mol<sup>-1</sup> (CK), 460 μmol · mol<sup>-1</sup> and 550 μmol · mol<sup>-1</sup>) on growth, development and yield of spring wheat. The results are as follows: with the increase of CO<sub>2</sub> concentration, the air temperature and relative humidity above spring wheat canopy increased, while the soil temperature at 10 cm depth decreased and the shallow soil water content increased in semi – arid area. Under CO<sub>2</sub> concentrations with 460 μmol · mol<sup>-1</sup> and 550 μmol · mol<sup>-1</sup>, the growth and development of spring wheat were accelerated, and the whole growth period was shortened by 2 – 4 days. The rise of CO<sub>2</sub> concentration could obviously promote the increase of plant height, leaf area index and chlorophyll content of spring wheat, and the increase magnitudes of plant height and leaf area index were largest during the flowering stage, while the chlorophyll content increased significantly from the late grain filling stage to milk ripe stage. Panicle length, panicle weight, spikelet number, grains per panicle, grains weight per panicle, 1 000 – grain weight and yield increased, while sterile spikelet number, spikelet sterility rate and harvest index showed downward trend with the increase of CO<sub>2</sub> concentration. The grain yield of spring wheat under 460 μmol · mol<sup>-1</sup> and 550 μmol · mol<sup>-1</sup> concentrations respectively increased by 8.88% and 19.93% than CK (370 μmol · mol<sup>-1</sup>). The research can provide the theoretical references for the sensitivity and adaptability of spring wheat in semi – arid area of China under global climate change.

**Key words:** elevated CO<sub>2</sub> concentration; spring wheat; growth and development; yield; semi – arid area