

CO₂ 浓度升高对不同水分养分条件下 小麦幼苗生长的影响

司福艳^{1,2}, 乔匀周¹, 董宝娣¹, 师长海¹, 姜净卫³,
陈骏骏^{1,2}, 郑 鑫^{1,2}, 刘孟雨¹

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心,

河北省节水农业重点实验室, 中国科学院农业水资源重点实验室, 石家庄 050021;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘 要: 设置了 5 个氮素浓度梯度 (N₀、N₁、N₂、N₃、N₄)、3 个 PEG (P₀、P₁、P₂) 浓度梯度以及 2 个 CO₂ 浓度 (370 ± 50 μmol·mol⁻¹; 700 ± 50 μmol·mol⁻¹) 水平的盆栽试验, 探究了小麦幼苗生长、物质积累与分配以及植株水分条件的变化规律。结果表明: 小麦幼苗株高、地上部干重、根干重、生物量以及叶水势的最大值以及高浓度 CO₂ 的最大刺激作用均出现在处理 N₁P₀; 而根长和根冠比的最大值分别出现在处理 N₀P₀ 和 N₁P₂, 高浓度 CO₂ 的最大刺激值也分别出现在处理 N₀P₀ 和 N₁P₂; 适宜养分条件下, 高浓度 CO₂ 能够最大限度地促进小麦幼苗的生长, 同时高浓度 CO₂ 通过提高小麦幼苗叶水势, 一定程度上缓解了低浓度 PEG 胁迫的不利影响。因此, 未来 CO₂ 浓度升高将对水肥条件好的小麦产生促进作用, 可缓解轻度水分不足的不利影响, 而对严重干旱胁迫下小麦的生长作用不明显。

关键词: CO₂ 浓度升高; 氮素; 水分胁迫; 小麦幼苗; 干物质积累

中图分类号: S162.5; S512.1 **文献标志码:** A

Effects of elevated CO₂ concentration on the growth of wheat seedlings under different water potential and nutrition concentrations

SI Fu-yan^{1,2}, QIAO Yun-zhou¹, DONG Bao-di¹, SHI Chang-hai¹, JIANG Jing-wei³,
CHEN Qin-qin^{1,2}, ZHENG Xin^{1,2}, LIU Meng-yu¹

(1. Center for Agricultural Research, Institute of Genetics and Development Biology, Chinese Academy of Sciences;

Hebei Key Laboratory of Water saving Agriculture; Key Laboratory of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Sciences,

Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Water conservancy and Civil engineering colleges, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: On the basis of hydroponic experiment, this pot study included five nitrogen concentration levels (N₀、N₁、N₂、N₃、N₄), three PEG concentration levels (P₀、P₁、P₂), and two CO₂ concentrations (370 ± 50 μmol·mol⁻¹; 700 ± 50 μmol·mol⁻¹). We studied the growth, dry matter accumulation and distribution, and water relation of wheat seedlings in different conditions. The results showed that plant height, shoot dry weight, root weight, biomass, and leaf water potential reached their maximums at N₁P₀, and so were the effects of elevated CO₂ concentration. Maximal root length and root to shoot ratio appeared at N₀P₀ and N₁P₂ respectively. The biggest influence of elevated CO₂ arose under the same condition. High CO₂ concentration could mostly improve the growth of wheat seedlings at appropriate condition. At the same time, elevated CO₂ could improve leaf water potential of wheat seedlings, which reduced the negative effects of PEG stress to some extent. Therefore, elevated CO₂ concentration would improve the growth of wheat and remit the

收稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2012BAD08B02, 2013BAD05B02); 国家自然科学基金 (31170415, 31100191, 30870411); 河北省自然科学基金 (C2011503003, C2012503003); 河北省科技支撑项目 (14226403D)

作者简介: 司福艳 (1988—), 女, 陕西渭南人, 硕士, 研究方向为全球气候变化对作物生理生态的影响。E-mail: sify1988@163.com。

通信作者: 刘孟雨 (1961—), 男, 河北深泽人, 研究员, 博士生导师, 主要从事作物高效用水生理生态基础和农业节水调控与技术等方面研究。E-mail: mengyuliu@sjziam.ac.cn。

negative effects of mild water stress, whereas subtle effect might be observed if wheat growth was under severe drought.

Keywords: elevated CO₂ concentration; nitrogen; water stress; wheat seedling; dry matter accumulation

大气 CO₂ 浓度升高已经成为过去半个世纪最受关注的环境问题之一。当前大气 CO₂ 浓度比 100 年前增加了近 30%, 保守估计, 到 21 世纪末大气 CO₂ 浓度将超过 700 μmol·mol⁻¹[1]。除此之外, CO₂ 浓度以及其他温室气体的变化将导致气温升高以及降雨类型的变化, 加剧了世界范围内大部分地区的干旱[2-3]。与此同时, 大气 CO₂ 浓度的变化以及土壤水分状况也会引起植物对氮素营养需求的变化[4]。因此, 探究农作物在不同水分胁迫以及不同氮素营养条件下对 CO₂ 浓度升高的反应有重要的意义。

高浓度 CO₂ 能够减轻干旱对农作物的不利影响, Sionit 等[5] 研究结果表明, 高浓度 CO₂ + 水分胁迫的小麦产量和干物质积累与正常 CO₂ 浓度 + 无水分胁迫的小麦相等。还有研究表明, 不同的水分胁迫下, 高浓度 CO₂ 的刺激作用也不同[6]。此外, 高浓度 CO₂ 能够提高植物的水分利用效率[7-8], 从而提高其抗旱能力。土壤含氮量很大程度上会影响到植物的功能属性, 进而影响其水和碳的利用率[9-10]。高浓度 CO₂ 对小麦的影响取决于所处的氮水平, 中氮和高氮时, 高浓度 CO₂ 对小麦干物质的积累增加比较明显[11-12], 在低氮下, 高浓度 CO₂ 对总物质积累无显著影响[13]。

目前大部分研究考虑了水分或者氮素养分与高浓度 CO₂ 的交互作用[4-5, 12, 14], 仅有很少的研究探究水分、养分与高浓度 CO₂ 三者之间的交互作用[13]。并且各个研究对于干旱以及氮素水平的定义不是很统一, 使得结果具有一定的局限性。为此, 本研究通过设置一系列的水分和养分梯度, 探究高浓度 CO₂ 对小麦幼苗生长、物质分配以及水分关系的影响。

1 方法与材料

1.1 材料与处理

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 济麦 22 为黄淮麦区高产节水品种。选取饱满且胚完整的种子, 经 0.1% HgCl₂ 消毒约 15 min, 用自来水和蒸馏水各冲洗 3 次, 放于托盘中浸种萌发, 于室温下生长。待小麦出现第一片真叶时, 移栽至不透光的玻璃瓶 ($r = 5$ cm, $h = 11$ cm), 在人工气候培养箱 (赛福 PRX-1000C-CO₂) 中进行培养。昼/夜温度为 (20 ± 1) °C / (17 ± 1) °C, 光强为 1 782 μmol·m⁻²·s⁻¹, 光照/黑暗时间

10 h/14 h。培养箱中 CO₂ 使用外接 CO₂ 钢瓶提供, 培养箱内的 CO₂ 传感器可以准确控制箱内 CO₂ 浓度。

1.2 试验设计

试验设当前 CO₂ 浓度 (Ambient CO₂ concentration, AC, 370 ± 50 μmol·mol⁻¹) 和 CO₂ 浓度升高 (Elevated CO₂, EC, 700 ± 50 μmol·mol⁻¹) 两个水平, 5 种培养液 NPK 浓度和 3 种 PEG 胁迫程度。营养液母液氮素浓度按照土壤溶液养分含量 (常量) 的 100 倍配置: KNO₃ 40.4 g·L⁻¹, NH₄H₂PO₄ 5.8 g·L⁻¹, 然后稀释成 30 倍、8 倍、5 倍、2 倍、0 倍 8 个浓度, 依次为 N₀ (N: 0 molL⁻¹; P: 0 molL⁻¹; K: 0 molL⁻¹)、N₁ (N: 0.009 molL⁻¹; P: 0.001 molL⁻¹; K: 0.008 molL⁻¹)、N₂ (N: 0.023 molL⁻¹; P: 0.003 molL⁻¹; K: 0.020 molL⁻¹)、N₃ (N: 0.036 molL⁻¹; P: 0.004 molL⁻¹; K: 0.032 molL⁻¹)、N₄ (N: 0.135 molL⁻¹; P: 0.015 molL⁻¹; K: 0.120 molL⁻¹)。以聚乙二醇 (PEG6000) 模拟水分胁迫, 分别设置 0 g·100ml⁻¹, 10 g·100ml⁻¹, 30 g·100ml⁻¹, 3 个水分胁迫梯度 (简写为 P₀, P₁, P₂)。每个处理种植两盆, 每盆种 10 株。为保证处理浓度的稳定性, 每天补充营养液至固定刻度, 处理期间每 3 d 更换一次培养液。

1.3 测量指标

在处理 30 d 后, 每盆选取长势相当的小麦幼苗 3 株, 自根结处剪断, 用滤纸吸干表面水分, 自然拉直, 平铺在实验台上, 测定株高、根长, 每盆测定指标取 3 株的平均值。随后将小麦幼苗于 105 °C 杀青 0.5 h, 而后置于 80 °C 烘箱中, 72 h 后测定各部分干重。采用美国基因有限公司生产的 WP4 露点水势仪测定小麦幼苗叶水势, 取 3 次测量的均值代表该处理水势。

1.4 数据分析

高浓度 CO₂ 对各指标的影响用相对差异 (RD: relative difference) 表示, $RD = (EC - AC) / AC \times 100\%$ [15]

采用 Microsoft Excel 软件进行数据处理和绘图, 用 SPSS16.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对小麦幼苗地上部分生长的影响

两种 CO₂ 浓度下, 小麦幼苗株高和地上部干重

均为 N_1P_0 处理最大。培养液氮素浓度为 N_1 时($N:0.009\text{ molL}^{-1};P:0.001\text{ molL}^{-1};K:0.008\text{ molL}^{-1}$),高浓度 CO_2 对株高和地上部干重的促进作用最大;氮素浓度大于 N_1 时,高浓度 CO_2 的相对差异值(RD)随氮素浓度增加而降低。 CO_2 浓度升高对株高和地上部干重的 RD 值随培养液 PEG 浓度的增加而下降。只考虑 PEG 浓度和氮素浓度时, CO_2 浓度升高对小麦幼苗株高和地上部干重相对差异的极限值分别为 28.2% 和 16.9%(表 1,表 2)。

表 1 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO_2 浓度升高对小麦幼苗株高的影响/cm				
Table 1 Effects of elevated CO_2 concentration on seedling height of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations				
CO_2 浓度 CO_2 concentration $/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	氮素水平 N level	PEG 浓度/ $(g\cdot 100\text{ml}^{-1})$ PEG concentration		
		P_0	P_1	P_2
370 ± 50	N_0	18.7 ± 2.3	16.2 ± 0.8	12.8 ± 1.8
	N_1	22.0 ± 2.1	20.9 ± 1.6	15.6 ± 0.7
	N_2	19.6 ± 2.3	18.5 ± 0.3	13.5 ± 1.4
	N_3	19.8 ± 0.3	18.7 ± 4.0	13.6 ± 0.7
	N_4	16.8 ± 1.7	15.0 ± 2.1	11.1 ± 0.3
700 ± 50	N_0	23.3 ± 3.0	19.7 ± 4.4	14.8 ± 0.8
	N_1	28.2 ± 0.8	25.6 ± 0.8	18.1 ± 0.3
	N_2	22.7 ± 1.4	20.5 ± 1.3	14.5 ± 0.1
	N_3	22.7 ± 1.4	20.0 ± 2.3	14.7 ± 3.0
	N_4	18.1 ± 0.6	15.6 ± 0.4	11.1 ± 1.1
$RD/\%$	N_0	24.6	21.6	15.6
	N_1	28.2	22.5	16.0
	N_2	15.8	10.8	7.4
	N_3	14.6	7.0	8.1
	N_4	7.7	4.0	0.0

2.2 CO_2 浓度升高对小麦幼苗地下部分生长的影响

两种 CO_2 浓度下,小麦幼苗根长最大值均出现在 N_0P_0 处。高浓度 CO_2 相对差异值随氮素浓度或 PEG 浓度增加而降低。只考虑 PEG 和氮素浓度的情况下, CO_2 浓度倍增对小麦幼苗根长相对差异的极限值为 7.6%(表 3)。

任意 CO_2 浓度下,小麦幼苗根干重均为 N_1P_0 处理最大。当培养液氮素浓度为 N_1 时($N:0.009\text{ molL}^{-1};P:0.001\text{ molL}^{-1};K:0.008\text{ molL}^{-1}$),高浓度 CO_2 对地下部干重的刺激最大;随着氮素浓度的增加,高浓度 CO_2 的相对差异值降低。 RD 值随培养液 PEG 浓度增加而降低。只考虑 PEG 和氮素浓度的情况下, CO_2 浓度倍增对小麦幼苗根干重相对差

异的极限值为 13.0%(表 4)。

表 2 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO_2 浓度升高对小麦幼苗地上部干重的影响/ $(\text{mg}\cdot\text{株}^{-1})$				
Table 2 Effects of elevated CO_2 concentration on seedling shoot dry weight of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations/ $(\text{mg}\cdot\text{plant}^{-1})$				
CO_2 浓度 CO_2 concentration $/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	氮素水平 N level	PEG 浓度/ $(g\cdot 100\text{ml}^{-1})$ PEG concentration		
		P_0	P_1	P_2
370 ± 50	N_0	26.3 ± 1.0	22.1 ± 2.7	15.8 ± 0.3
	N_1	34.3 ± 4.7	29.5 ± 2.1	21.5 ± 2.1
	N_2	34.5 ± 6.4	28.9 ± 0.1	22.0 ± 4.2
	N_3	34.5 ± 3.5	29.1 ± 1.6	21.0 ± 1.4
	N_4	30.5 ± 6.4	24.0 ± 1.4	15.9 ± 1.7
700 ± 50	N_0	30.1 ± 4.1	24.4 ± 3.4	16.0 ± 2.8
	N_1	40.1 ± 1.3	32.8 ± 3.1	23.2 ± 3.1
	N_2	39.8 ± 3.1	31.7 ± 2.4	22.7 ± 3.3
	N_3	39.2 ± 1.1	31.3 ± 1.8	21.5 ± 0.4
	N_4	30.7 ± 1.8	24.05 ± 1.3	12.5 ± 1.8
$RD/\%$	N_0	14.4	10.4	1.3
	N_1	16.9	11.2	7.9
	N_2	15.4	9.7	3.2
	N_3	13.6	7.6	2.4
	N_4	0.7	0.2	-21.4

表 3 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO_2 浓度升高对小麦幼苗根长的影响/cm				
Table 3 Effects of elevated CO_2 concentration on seedling root length of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations				
CO_2 浓度 CO_2 concentration $/(\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1})$	氮素水平 N level	PEG 浓度/ $(g\cdot 100\text{ml}^{-1})$ PEG concentration		
		P_0	P_1	P_2
370 ± 50	N_0	23.6 ± 1.6	19.4 ± 0.8	13.4 ± 2.3
	N_1	18.2 ± 2.3	14.9 ± 3.4	10.8 ± 2.0
	N_2	15.4 ± 2.1	12.9 ± 0.8	8.6 ± 0.8
	N_3	15.0 ± 1.8	11.7 ± 1.1	7.9 ± 1.8
	N_4	10.5 ± 2.5	7.7 ± 1.8	4.1 ± 1.1
700 ± 50	N_0	25.4 ± 2.7	20.4 ± 1.6	13.6 ± 0.8
	N_1	19.2 ± 1.6	15.5 ± 1.0	10.9 ± 3.4
	N_2	16.3 ± 1.6	13.3 ± 0.4	8.5 ± 1.7
	N_3	15.8 ± 2.4	12.1 ± 0.6	7.9 ± 1.6
	N_4	10.6 ± 2.3	7.8 ± 1.0	3.0 ± 1.4
$RD/\%$	N_0	7.6	5.2	1.5
	N_1	5.5	4.0	0.9
	N_2	5.8	3.1	-1.2
	N_3	5.3	3.4	0.0
	N_4	1.0	1.3	-26.8

表 4 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO₂ 浓度升高
对小麦幼苗根干重的影响/(mg·株⁻¹)

Table 4 Effects of elevated CO ₂ concentration on seedling root dry weight of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations/(mg·plant ⁻¹)				
CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	氮素水平 N level	PEG 浓度/(g·100ml ⁻¹) PEG concentration		
		P ₀	P ₁	P ₂
370±50	N ₀	17.7±2.4	14.2±1.1	10.8±1.1
	N ₁	24.6±0.8	19.7±1.8	15.7±0.4
	N ₂	21.9±2.7	17.2±4.0	13.4±2.0
	N ₃	19.0±0.8	15.2±1.1	12.3±1.0
	N ₄	12.6±1.4	9.0±1.4	7.4±0.8
700±50	N ₀	19.1±1.3	15.1±1.3	11.2±0.3
	N ₁	27.8±2.5	22.0±2.8	17.7±1.8
	N ₂	23.3±1.0	18.2±1.1	14.4±0.8
	N ₃	20.1±1.3	16.1±0.1	13.1±1.3
	N ₄	12.0±1.4	8.4±0.3	5.6±0.6
RD/%	N ₀	7.9	6.3	3.7
	N ₁	13.0	11.7	12.7
	N ₂	6.4	5.8	7.5
	N ₃	5.8	5.9	6.5
	N ₄	-4.8	-6.7	-24.3

2.3 CO₂ 浓度升高对小麦幼苗生物量和根冠比的影响
在任意 CO₂ 浓度下,小麦幼苗总生物量均为 N₁P₀ 处理最大。培养液氮素浓度为 N₁ 时(N:0.009 molL⁻¹;P:0.001 molL⁻¹;K:0.008 molL⁻¹),CO₂ 浓度倍增对总生物量积累的刺激最大;当氮素浓度大于 N₁ 时(N:0.009 molL⁻¹;P:0.001 molL⁻¹;K:0.008 molL⁻¹),高浓度 CO₂ 的作用随氮素浓度增加而降低。CO₂ 对总生物量的刺激随 PEG 浓度的增加而下降,无 PEG 胁迫时高浓度 CO₂ 表现出最大促进作用。只考虑 PEG 和氮素浓度的情况下,RD 值的极限值为15.3%(表 5)。

两种 CO₂ 浓度下,小麦幼苗根冠比的最大值均为 N₁P₂ 处理。当培养液氮素浓度为 N₁ 时(N:0.009 molL⁻¹;P:0.001 molL⁻¹;K:0.008 molL⁻¹),高浓度 CO₂ 对根冠比的刺激作用最大;随着 PEG 浓度的增加,高浓度 CO₂ 对根冠比的影响由抑制变为促进。只考虑 PEG 和氮素浓度的情况下,CO₂ 浓度倍增对小麦幼苗根冠比 RD 值的极限值为 4.3%(表 6)。

2.4 CO₂ 浓度升高对小麦幼苗叶水势的影响

两种 CO₂ 浓度下,小麦幼苗叶水势的最大值均出现在 N₁P₀ 处。培养液氮素浓度为 N₁ 时(N:0.009 molL⁻¹;P:0.001 molL⁻¹;K:0.008 molL⁻¹),高浓度

表 5 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO₂ 浓度升高
对小麦幼苗生物量的影响/(mg·株⁻¹)

Table 5 Effects of elevated CO ₂ concentration on seedling biomass of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations/(mg·plant ⁻¹)				
CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	氮素水平 N level	PEG 浓度/(g·100ml ⁻¹) PEG concentration		
		P ₀	P ₁	P ₂
370±50	N ₀	44.0±3.4	36.3±3.8	26.6±1.4
	N ₁	58.9±3.8	49.2±0.3	37.2±1.7
	N ₂	56.4±3.7	46.1±3.8	35.4±6.2
	N ₃	53.5±4.4	44.3±2.7	33.3±2.4
	N ₄	43.1±5.0	33.0±2.8	23.3±0.8
700±50	N ₀	49.2±5.4	39.5±4.7	27.2±2.5
	N ₁	67.9±3.8	54.8±0.3	40.9±5.0
	N ₂	63.1±2.1	49.9±1.3	37.1±4.1
	N ₃	59.3±0.1	47.4±1.7	34.6±1.7
	N ₄	42.7±0.4	32.45±1.1	18.1±2.4
RD/%	N ₀	11.8	8.8	2.3
	N ₁	15.3	11.4	9.9
	N ₂	11.9	8.2	4.8
	N ₃	10.8	7.0	3.9
	N ₄	-0.9	-1.7	-22.3

表 6 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO₂ 浓度升高
对小麦幼苗根冠比的影响

Table 6 Effects of elevated CO ₂ concentration on seedling root to shoot ratio of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations				
CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	氮素水平 N level	PEG 浓度/(g·100ml ⁻¹) PEG concentration		
		P ₀	P ₁	P ₂
370±50	N ₀	0.67±0.1	0.64±0.0	0.68±0.1
	N ₁	0.73±0.1	0.67±0.1	0.73±0.1
	N ₂	0.65±0.2	0.60±0.1	0.61±0.0
	N ₃	0.55±0.0	0.52±0.0	0.59±0.0
	N ₄	0.43±0.1	0.37±0.0	0.47±0.1
700±50	N ₀	0.64±0.0	0.62±0.0	0.71±0.1
	N ₁	0.69±0.0	0.68±0.2	0.76±0.0
	N ₂	0.59±0.1	0.58±0.1	0.64±0.1
	N ₃	0.51±0.0	0.52±0.0	0.61±0.0
	N ₄	0.39±0.1	0.35±0.0	0.45±0.0
RD/%	N ₀	-5.1	-3.6	4.3
	N ₁	-4.5	0.9	4.0
	N ₂	-9.9	-3.1	4.3
	N ₃	-7.0	-1.3	4.0
	N ₄	-8.0	-6.4	-4.5

CO₂ 对叶水势的影响最大;当氮素浓度大于 N₁ 时

(N: 0. 009 molL⁻¹; P: 0. 001 molL⁻¹; K: 0. 008 molL⁻¹), *RD* 值随氮素浓度增加而降低。高浓度 CO₂ 对叶水势的刺激随着 PEG 浓度的增加而下降。只考虑 PEG 和氮素浓度的情况下,小麦幼苗叶水势的极限 *RD* 值为 10.1%(表 7)。

2.5 方差分析

CO₂ 浓度对小麦幼苗株高、地上部干重、生物量以及绝对含水量都有显著影响,而根长、根干重、根冠比以及叶水势不受 CO₂ 浓度影响。除根冠比外,其它指标均受 PEG 浓度显著影响。氮素浓度显著影响小麦幼苗生长的所有指标。CO₂ 浓度、PEG 浓度以及氮素浓度两因素或三因素的交互作用对小麦幼苗均无影响(表 8)。

3 讨 论

哪些环境因素会影响高浓度 CO₂ 对小麦生长的效应并没有一致的认识。本研究结果表明,CO₂ 浓度对小麦幼苗生长、生物量分配以及水分状况的影响与营养液氮素浓度和 PEG 浓度密切相关。在充分光照和适宜空气湿度条件下,通过一系列的氮素和 PEG 浓度组合研究发现,CO₂ 浓度加倍对植物生长、生物量分配和水分状况的影响是有极限的。这是因为只有生长条件良好时,高浓度 CO₂ 才能充分发挥其效应提高光合速率从而促进生长^[16]。且不同的指标对生长条件的响应也不同,小麦幼苗株高、地上部干重、根干重、生物量和叶水势的 *RD* 极大值均出现在 N₁P₀ 处理,而根长和根冠比的 *RD* 极限值分别出现在 N₀P₀ 和 N₁P₂ 处理。这是由于小麦各部位对营养以及水分的需求不同所致^[17]。

各 PEG 浓度及氮素浓度组合下,升高 CO₂ 浓度使小麦幼苗株高、地上部干重、生物量平均分别增加 13.6%、6.2%、5.4%;使根冠比平均降低 2.4%;对根长(1.75%)、根干重(1.55%)和叶水势(0.1%)均没有显著影响。但是不同氮素浓度或 PEG 浓度水平上,CO₂ 浓度的作用存在明显差异,这与大部分研究结果一致^[11-13]。

表 7 不同 PEG 和氮素浓度组合下 CO₂ 浓度升高对小麦幼苗叶水势的影响/MPa

Table 7 Effects of elevated CO ₂ concentration on seedling leaf water potential of wheat in combination with different PEG and nitrogen concentrations				
CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	氮素水平 N level	PEG 浓度/(g·100ml ⁻¹) PEG concentration		
		P ₀	P ₁	P ₂
370±50	N ₀	-2.7±0.2	-3.1±0.2	-3.9±0.1
	N ₁	-2.3±0.3	-2.5±0.0	-3.1±0.2
	N ₂	-2.7±0.6	-2.6±0.1	-3.8±1.7
	N ₃	-3.0±0.2	-3.0±0.3	-4.1±0.7
	N ₄	-3.6±0.3	-3.8±0.2	-4.5±0.5
700±50	N ₀	-2.7±0.5	-3.1±0.2	-4.1±0.3
	N ₁	-2.1±0.0	-2.3±0.0	-3.1±0.3
	N ₂	-2.5±0.2	-2.6±0.2	-3.9±0.1
	N ₃	-3.0±0.2	-3.0±0.1	-4.3±0.2
	N ₄	-3.6±0.3	-4.0±0.2	-4.8±0.3
<i>RD</i> /%	N ₀	1.8	0.3	-3.5
	N ₁	10.1	6.9	0.8
	N ₂	6.8	1.5	-2.9
	N ₃	-0.3	-0.2	-5.0
	N ₄	-2.0	-5.8	-7.0

表 8 不同 CO₂ 浓度、PEG 浓度以及氮素浓度对小麦幼苗生长影响的方差分析

Table 8 ANOVA results of the effects of different CO₂, series of PEG, and nitrogen concentrations on growth of wheat seedlings

项目 Items	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	PEG 浓度(P) PEG concentration	氮素浓度(N) Nitrogen concentration	CO ₂ × P	CO ₂ × N	P × N	CO ₂ × P × N
株高 Plant height	* * *	* * *	* * *	NS	NS	NS	NS
地上部干重 Shoot dry weight	* *	* * *	* * *	NS	NS	NS	NS
根长 Root length	NS	* * *	* * *	NS	NS	NS	NS
根干重 Root dry weight	NS	* * *	* * *	NS	NS	NS	NS
生物量 Biomass	* * *	* * *	* * *	NS	NS	NS	NS
根冠比 Root/shoot	NS	NS	* * *	NS	NS	NS	NS
叶水势 Leaf water potential	NS	* * *	* * *	NS	NS	NS	NS

注: NS 表示相应差异在 $P < 0.05$ 水平上未达显著水平, * * * 和 * * 分别表示相应差异在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 上达显著水平。
Note: NS indicates no significant difference at $P < 0.05$; * * * and * * denote significant differences at $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively.

随氮素浓度变化,CO₂ 浓度对小麦幼苗株高、地上部干重、根干重、生物量、根冠比、叶水势的 *RD* 值均在 N₁ 浓度处最大,说明适宜的氮素浓度条件下,高浓度 CO₂ 的作用最大。N₀ 和 N₂(或 N₃)处理小于

N₁ 处理,说明 CO₂ 效应的最大值介于 N₀ 和 N₂ 之间,若要知道极值具体出现在哪个氮素浓度处,还应该对这一氮素浓度区间进行更为详细地划分和试验研究。有研究发现,CO₂ 的刺激作用随氮浓度增加而增加^[18];也有研究表明,高氮下 CO₂ 的刺激作用小于低氮^[13],可能与所研究的氮浓度范围有关。在未来 CO₂ 升高的大背景下,氮素浓度保持在适宜范围,才能最大限度地发挥 CO₂ 的作用,大量施用氮肥反而会降低 CO₂ 的正效应。

随 PEG 浓度变化,CO₂ 浓度对株高、地上部干重、根长、根干重、生物量、叶水势的影响均在 P₀ 处理下最大,说明无 PEG 胁迫时,高浓度 CO₂ 最大限度发挥作用。随着 PEG 浓度增加,高浓度 CO₂ 的 RD 值迅速减小,限制了 CO₂ 作用的发挥。Meng Guang-tao^[14] 等研究表明在无水分胁迫下高浓度 CO₂ 对生物量的影响大于干旱胁迫, Samuelson and Seiler 研究发现在水分充足的条件下,高浓度 CO₂ 下的红云杉有更大的株高和叶干重^[19]。同时,高浓度 CO₂ 能够通过提高叶水势缓解一定的干旱,因此在轻度干旱条件下,升高 CO₂ 浓度能够缓解干旱带来的不利影响^[7,13]。

本研究主要针对苗期,不能反应升高 CO₂ 浓度对作物整个生长周期的影响。同时盆栽容器的大小一定程度上会影响植物的生长发育,干扰最终的结果^[20]。从研究结果来看,氮素浓度的选择还存在一定的问题,今后的研究中,应该将氮素浓度进一步细化,以便获取植物在不同氮浓度下对升高 CO₂ 浓度更详实的响应数据。

参 考 文 献:

[1] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

[2] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2001.

[3] Trenberth K E. Changes in precipitation with climate change[J]. Climate Research, 2011,47:123-138.

[4] Stitt M, Krapp A. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background[J].

Plant, Cell & Environment, 1999,22(6):583-621.

[5] Sionit N, Hellmers H, Strain B R. Growth and yield of wheat under CO₂ enrichment and water stress[J]. Crop Science, 1980,20(6):687-690.

[6] 王美玉,赵天宏,张巍巍,等.CO₂ 浓度升高与温度、干旱相互作用对植物生理生态过程的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):99-103.

[7] 王润佳,高世铭,张绪成.高大气 CO₂ 浓度下 C₃ 植物叶片水分利用效率升高的研究进展[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):190-195.

[8] 王润佳,张绪成,高世铭,等.大气 CO₂ 浓度增高和施氮量对抽穗期春小麦光合参数及水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):32-37.

[9] Driessche R. Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedling in response to nursery drought, nitrogen, and potassium treatments[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1992,22:740-749.

[10] Salifu K F, Timmer V R. Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003,33:1287-1294.

[11] Arp W J, Van Mierlo J E M, Berendse F, et al. Interactions between elevated CO₂ concentration, nitrogen and water: effects on growth and water use of six perennial plant species[J]. Plant, Cell & Environment, 1998,21(1):1-11.

[12] 李伏生,康绍忠.两种氮水平下 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和氮磷浓度的影响[J].土壤学报,2003,40(4):599-605.

[13] 李伏生,康绍忠.CO₂ 浓度升高、氮和水分对春小麦养分吸收和土壤养分的效应[J].植物营养与肥料学报,2002,8(3):303-309.

[14] Meng G T, Li G X, He L P, et al. Combined effects of CO₂ enrichment and drought stress on growth and energetic properties in the seedlings of a potential bioenergy crop *Jatropha curcas*[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2013,32(3):542-550.

[15] Hattenschwiler S, Miglietta F, Raschi A, et al. Thirty years of situ tree growth under elevated CO₂: a model for future forest responses? [J]. Global Change Biology, 1997,3(5):463-471.

[16] 蒋高明,韩兴国.大气 CO₂ 浓度升高对植物的直接影响[J].植物生态学报,1997,21(6):489-502.

[17] 张定一,张永清,杨武德,等.不同基因型小麦对低氮胁迫的生物学响应[J].小麦研究,2006,27(1):1-9.

[18] Stulen I, Hertog J. Root growth and functioning under atmospheric CO₂ enrichment[J]. Vegetatio, 1993,104-105(1):99-115.

[19] Samuelson, Lisa J, Seiler, John R. Interactive role of elevated CO₂, nutrient limitations, and water stress in the growth responses of red spruce seedlings[J]. Forest Science, 1993,39(2):348-358.

[20] Ainsworth E A, Davey P A, Bernacchi C J, et al. A meta-analysis of elevated CO₂ effects on soybean (*Glycine max*) physiology, growth and yield[J]. Global Change Biology, 2002,8(8):695-709.