

# 两种氮水平下 CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦 生长和氮磷浓度的影响\*

李伏生

(广西大学农学院, 南宁 530005)

康绍忠

(西北农林科技大学, 教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘 要** 预计到 21 世纪末期大气 CO<sub>2</sub> 浓度将会比目前水平增加 1 倍, 约 700 μmol mol<sup>-1</sup> 左右。因此 CO<sub>2</sub> 浓度升高对作物的影响研究十分重要。本文探讨在两种氮(N) 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦 (*Triticum aestivum* L. cv. Ximong 8727) 生长和地上部 N、磷(P) 浓度的影响及原因。试验设 350 μmol mol<sup>-1</sup> 和 700 μmol mol<sup>-1</sup> 两种 CO<sub>2</sub> 浓度水平和 45 kg hm<sup>-2</sup> 和 90 kg hm<sup>-2</sup> 两种 N 肥施用水平。结果表明, CO<sub>2</sub> 浓度升高, 冬小麦株高和叶面积指数(LAI) 均增加, 净同化率(NAR) 值增加, 叶面积比率(LAR) 下降, 比叶重(SLW) 不增加。高 CO<sub>2</sub> 浓度对相对增长率(RGR) 的影响因施 N 水平而异, 低 N 时 RGR 不增加, 高 N 时明显增加。CO<sub>2</sub> 浓度增加, 小麦抽穗提早 7~8 d, 叶鞘、茎秆和地上部干物重提高, 叶片、叶鞘和茎秆 N、P 浓度降低, 但叶片、叶鞘和茎秆 N、P 吸收量增加均不明显。CO<sub>2</sub> 浓度升高, 氮磷利用效率(NUE 和 PUE) 提高, 而对相对氮磷积累速率(RNAR 和 RPAR) 影响不大。高 CO<sub>2</sub> 浓度冬小麦体内 N、P 浓度下降是由于稀释效应以及 NUE 和 PUE 提高之故。

**关键词** CO<sub>2</sub> 浓度升高, 氮水平, 生长分析, 氮磷浓度

**中图分类号** S154.4

据报道, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度逐步上升, 已由 100 年前的 260~280 μmol mol<sup>-1</sup> 上升到 358 μmol mol<sup>-1</sup> (1994 年), 并继续以每年 1~2 μmol mol<sup>-1</sup> 的速率上升, 预计到 21 世纪末期大气 CO<sub>2</sub> 浓度将会比目前水平增加 1 倍, 约 700 μmol mol<sup>-1</sup> 左右<sup>[1,2]</sup>。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 促进作物生长, 生物产量和经济产量都有较大的增加。在高 CO<sub>2</sub> 浓度下, 作物幼苗的干物重和叶面积均随外源 N 素水平的增加而增加, 并且 N 营养缺乏会削弱作物对高 CO<sub>2</sub> 浓度的响应<sup>[3]</sup>。所以植物对 CO<sub>2</sub> 浓度增加的反应会因 N 素或其它养分不足而受到限制, 因此面向未来全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 大田农业生产必须保证 N 素以及其它养分的相应供应。

有报道指出, 高 CO<sub>2</sub> 浓度时叶片矿质养分浓度降低, 如水稻、小麦、棉花、大豆、番茄、莴苣、黄瓜和玉米等<sup>[4-10]</sup>。如棉花在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 叶片内 N、Ca、K、Mg、P 浓度降低, 茎内和根内 N 浓度也降低<sup>[9]</sup>。高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下叶片矿质养分浓度降低的机理还不清楚, 可能有以下几方面的原因。(1) CO<sub>2</sub> 浓度升高, 植株生长较快, 植株增大及体内淀粉积累, 于是养分浓度降低。CO<sub>2</sub> 浓度升高, 火炬松 (*Pinus taeda* L.) 吸 N 量增加, 但生物量的增加幅度超过 N 吸收量的增加幅度, 生物量增加 60%, N 吸收量增加 30%, 因而植物体内 N 浓度降低<sup>[11]</sup>。(2) CO<sub>2</sub> 浓度升高, 气孔导度下降, 蒸腾速率减少, 水分利用效率增加, 这将减少质流运送养分如 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 到根系<sup>[12]</sup>。(3) 从生化水平来看, 高 CO<sub>2</sub> 浓度时 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶 (Rubisco) 的含量降低, CO<sub>2</sub> 浓度升高、光合效率提高可能引起 N 分配到 Rubisco 减少。此外, 高

\* 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999011708) 资助

收稿日期: 2002-02-05; 收到修改稿日期: 2002-09-06

CO<sub>2</sub> 浓度, 光呼吸减少, 也减少 N 进入叶片中的数量, 其结果是 CO<sub>2</sub> 浓度升高, C3 植物氮利用效率提高<sup>[13]</sup>。(4) 高 CO<sub>2</sub> 浓度时, 植物体内 N、P 分布发生变化, 这是由于 CO<sub>2</sub> 浓度升高时, 水分由根系向叶片输送下降, 从而养分向地上部转移的数量下降<sup>[5]</sup>。据研究, CO<sub>2</sub> 浓度升高无论是低 N 或者高 N 处理, 植物总吸 N 量不发生变化, 但根系吸 N 量增加 23% ~ 33%; 而地上部吸 N 量下降 9% ~ 18%<sup>[14]</sup>。因此, CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下叶片矿质养分浓度降低的原因十分复杂, 可能是多方面的因素综合作用的结果。CO<sub>2</sub> 浓度升高, 碳水化合物浓度增高, 会导致植物体内养分浓度降低, 其中 60% ~ 65% 养分浓度下降是稀释作用的结果, 35% ~ 40% 是专性反应如 Rubisco 和其它酶含量下降的结果<sup>[15]</sup>。

CO<sub>2</sub> 浓度升高, 小麦吸 N 量增加, 但对玉米吸 N 量没有什么影响<sup>[13]</sup>。水稻单株吸 N 量只随 N 肥用量增加而增加, 而 CO<sub>2</sub> 浓度不影响吸 N 量<sup>[3]</sup>。Ziska 等<sup>[6]</sup>也报道水稻地上部吸 N 量不受 CO<sub>2</sub> 浓度的影响。CO<sub>2</sub> 浓度对棉花吸 N 量的影响因 N 肥供应水平而异, 低氮(N, 0~17 mg kg<sup>-1</sup>) 时 900 μmol mol<sup>-1</sup> 和 350 μmol mol<sup>-1</sup> 吸 N 量相差不大, 而高氮(N, 133 mg kg<sup>-1</sup>) 时 900 μmol mol<sup>-1</sup> 比 350 μmol mol<sup>-1</sup> 吸 N 量明显增加<sup>[7]</sup>。因此有关 CO<sub>2</sub> 浓度增加时作物对 N 素的吸收影响还没有一致的结果, 还需要更进一步的试验研究。

国内关于 N 肥施用对冬小麦 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应影响试验的报道不多, 本文探讨在两种 N 水平下, CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦生长和地上部 N、P 浓度的影响和原因。

## 1 材料与与方法

供试作物为 C3 作物冬小麦(西农 8727)。试验土壤为 土, 其土壤 pH 8.7, 碱解氮(N) 24.5 mg kg<sup>-1</sup> (康维皿法), 速效磷(P) 11.3 mg kg<sup>-1</sup> (Olsen 法), 速效钾(K) 178.4 mg kg<sup>-1</sup> (1.0 mol L<sup>-1</sup> 中性 NH<sub>4</sub>OAc)。

本文大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的研究用自制温棚装置(2 栋), 温棚装置尺寸为 490 cm(长) × 360 cm(宽) × 180 cm(高), 顶部开一小天窗(20 cm × 20 cm), 温棚用钢材搭架, 然后用透光性好的塑料薄膜覆盖制成(开顶式试验, OTC)。试验在西北农林科技大学节水灌溉试验站渗漏池小区[1.5 m(长) × 1 m(宽) × 2 m(深)] 中进行。试验设 Ambient(约 350 μmol mol<sup>-1</sup>), Ambient + 350 μmol mol<sup>-1</sup> (700 μmol mol<sup>-1</sup> ± 30 μmol mol<sup>-1</sup>)。CO<sub>2</sub> 浓度升高处理所用气源为瓶装 CO<sub>2</sub>, 温棚内 CO<sub>2</sub> 浓度由 CO<sub>2</sub> 气体分析仪进行监测, 通过控制器决定电磁阀的开关, 以自动调节 CO<sub>2</sub> 输入量, 使 CO<sub>2</sub> 浓度保持在设定的浓度水平。Ambient 处理只通空气, 据抽查测定, 中午棚内 CO<sub>2</sub> 浓度仅略低于当前 CO<sub>2</sub> 浓度水平。CO<sub>2</sub> 试验处理期间, 两温棚内均装有一台电风扇以保持棚内空气流动和保持棚内 CO<sub>2</sub> 分布均匀。为研究在不同土壤氮素条件下, 作物对 CO<sub>2</sub> 浓度增高的响应, 还分别在两种 CO<sub>2</sub> 浓度处理设计了两种 N 肥施用水平, 施 N 量分别为 45 kg hm<sup>-2</sup> (N<sub>1</sub>, 低 N) 和 90 kg hm<sup>-2</sup> (N<sub>2</sub>, 高 N), N 肥用尿素(分析纯, AR), 每个 N 肥水平重复 3 次。N 肥施用分两次进行, 基肥占 70%(播种前施用), 追肥占 30%(2001 年 3 月 2 日)。各 N 肥处理均施用 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (AR) 作基肥, P、K 用量分别为 45 kg hm<sup>-2</sup> 和 56 kg hm<sup>-2</sup>, 不施有机肥。

试验播种时间为 2000 年 10 月 29 日。试验用 CO<sub>2</sub> 处理前, 一直在自然条件下生长。为进行 CO<sub>2</sub> 浓度升高处理, 于 2001 年 3 月 15 日才将温棚建好, 3 月 18 日开始 CO<sub>2</sub> 处理, 此时小麦已进入拔节期。4 月 18 日结束供气, 此时小麦已抽穗或正在抽穗, 4 月 23 日所有处理(无论 CO<sub>2</sub> 浓度升高与否) 小麦全部抽穗。在 CO<sub>2</sub> 处理过程中, CO<sub>2</sub> 供气时间为早 8 时至晚 6 时, 晚上不供气。CO<sub>2</sub> 试验处理期间, 温棚内气温比外部温度高 2~7℃, 湿度也比外面高 10%~15%, 两温棚之间温度和湿度没有差异。

试验中作物生长状况的测定项目主要是株高、叶面积指数(LAI)、相对增长率(RGR)、净同化率(NAR)、叶面积比率(LAR)和比叶重(SLW)。每小区分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d 取代表性植株 10 株测定株高、叶面积和地上部干物重, 然后计算 LAI、RGR、NAR、LAR 和 SLW。株高测量取 10 株小麦植株的高度, 取平均值获得。叶面积测定, 量 10 株小麦各株每张叶片长度与叶片最大宽度, 并将它们相乘再乘以经验系数 0.75<sup>[16]</sup>, 最后将所有叶片的叶面积相加获得; LAI 用 10 株叶面积除以其所占的土地面积获得。LAR、SLW、RGR 和 NAR 分别用下列公式计算<sup>[16]</sup>。

$$\text{叶面积比率(LAR)} = L/w(\text{cm}^2 \text{g}^{-1}) \quad (1)$$

这里  $w$  为某一阶段的植株地上部干物重(g),  $L$  为叶面积(cm<sup>2</sup>)。

$$\text{比叶重(SLW)} = w_1/L(\text{g dm}^{-2}) \quad (2)$$

这里  $w_L$  为某一阶段的植株叶片干物重(g),  $L$  为叶面积(dm<sup>2</sup>)。

$$\text{相对生长率(RGR)} = \frac{\ln w_2 - \ln w_1}{t_2 - t_1}(\text{DW, g d}^{-1}) \quad (3)$$

这里  $w_2$  和  $w_1$  是在  $t_1$  和  $t_2$  (分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d 取样) 地上部干物重(g)。

$$\text{净同化率(NAR)} = \frac{(w_2 - w_1)(\ln L_2 - \ln L_1)}{(t_2 - t_1)(L_2 - L_1)}(\text{DW, g cm}^{-2} \text{ d}^{-1}) \quad (4)$$

这里  $w_2$  和  $w_1$ ,  $L_2$  和  $L_1$  是在  $t_1$  和  $t_2$  (分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d 取样) 地上部干物重(g) 和叶面积(cm<sup>2</sup>)。

植株地上部各部分样品经烘干(在 60~70℃ 烘 3 d)、粉碎过筛保存, 然后进行植株养分测定。地上部各部分全 N、P 含量的测定用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 湿灰化法消煮后, 全 N 用凯氏蒸馏定氮法, 全 P 用钼蓝比色法。全 N 和 P 含量均以干物质为基础表示。地上部各部分 N 或 P 吸收量是用地上部各部分全 N 或 P 含量与其干物质质量相乘所得。地上部 N 或 P 吸收总量是地上部各部分 N 或 P 吸收量之和。值得指出的是, 在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 由于植株生物量不多, 没有将地上部各部分分开, 只测定了地上部 N、P 浓度及生物量。

本文中养分利用效率(g 干物质 g<sup>-1</sup> N 或 P) 定义为植物地上部干物质质量(本试验未能采集根系) 与其 N 或 P 吸收总量的比率<sup>[13]</sup>。

相对氮磷累积速率(RNAR 和 RPAR) 可用式(5) 计算<sup>[13]</sup>:

$$\text{RNAR} = \frac{\ln N_2 - \ln N_1}{t_2 - t_1}(\text{N, mg mg}^{-1} \text{ d}^{-1}) \quad (5)$$

这里  $N_1$  和  $N_2$  分别是  $t_1$  和  $t_2$  (分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d) 地上部分 N 吸收量。RPAR 计算式同 RNAR, 只是将 N 换成 P 而已。

由于 CO<sub>2</sub> 浓度处理各只有一个温棚, 故未进行多因素方差分析, 只进行 4 个处理的简单方差分析和多重比较, 多重比较用 Duncan 新复极差法。

## 2 结果和讨论

### 2.1 冬小麦生长和干物质积累

CO<sub>2</sub> 浓度倍增, 冬小麦株高和叶面积指数(LAI) 明显增加, N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 处理株高比对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理均增加 21%, LAI 分别增加 50% 和 65% (表 1)。CO<sub>2</sub> 浓度增高对小麦叶面积比率(LAR) 有显著的影响, 表现为 LAR 值降低, 约下降一半; 而高 CO<sub>2</sub> 浓度和 N 肥对比叶重(SLW) 没有显著的影响, SLW 值并不随 CO<sub>2</sub> 浓度增加而明显增加(表 1)。CO<sub>2</sub> 浓度升高, 小麦叶面积比率(LAR) 值下降, 可能是地上部叶片 N 浓度下降的结果<sup>[4]</sup>。

表 1 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥施用对冬小麦生长的影响(CO<sub>2</sub> 处理后 25 d 取样)

Table 1 Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and N supply on growth parameters of winter wheat sampled at 25 d after CO<sub>2</sub> treatment

N 用量 N supply	CO <sub>2</sub> 水平 CO <sub>2</sub> levels	株高 Height (cm)	LAI	LAR (cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	SLW (g dm <sup>-2</sup> )	NAR (g cm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	RGR (g d <sup>-1</sup> )
N <sub>1</sub>	C	53.3(1.0) b	2.63(0.34) c	133.1(10.6) a	0.358(0.012) a	0.245(0.009) c	0.080(0.002) b
	E	64.5(0.1) a	3.98(0.04) b	78.5(9.1) b	0.383(0.023) a	0.326(0.003) b	0.082(0.000) b
N <sub>2</sub>	C	55.7(0.7) b	3.77(0.56) bc	143.3(14.2) a	0.352(0.003) a	0.262(0.007) c	0.079(0.002) b
	E	67.6(2.5) a	6.22(0.15) a	83.6(8.8) b	0.395(0.055) a	0.431(0.032) a	0.089(0.002) a

注: 括号内为标准误差, 不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。C, 对照 CO<sub>2</sub> 浓度(约 350 μmol mol<sup>-1</sup>); E, 700 μmol mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度。N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、LAI、LAR、SLW、NAR 和 RGR 见文中说明

CO<sub>2</sub> 浓度增加, 净同化率(NAR) 值明显增加, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理比对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理分别增加 33% 和 65%。施 N 对 NAR 的影响因 CO<sub>2</sub> 浓度高低而异, 在当前 CO<sub>2</sub> 浓度条件下, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的 NAR 值并无明显的差异; 但在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, N<sub>1</sub> 比 N<sub>2</sub> 处理的 NAR 值明显增加。CO<sub>2</sub> 浓度对相对生长率(RGR) 的影响因 N 肥用量大小而异, 低 N(N<sub>1</sub>) 时不增加, 高 N(N<sub>2</sub>) 时明显增加。

此外, CO<sub>2</sub> 浓度升高加速冬小麦的生育进程, 抽穗提早 7~8 d, 因而 CO<sub>2</sub> 处理后 25 d 取样测定时, 对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理尚未抽穗, 而 CO<sub>2</sub> 浓度升高处理已抽穗。Katsu 和 Manami 报道, 700 μmol mol<sup>-1</sup> 比 350 μmol mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度水稻提早 6~7 d 抽穗<sup>[7]</sup>。

CO<sub>2</sub> 浓度增加处理的冬小麦茎秆和叶鞘干物重和地上部干物重比对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理高, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的茎秆和叶鞘干物重分别增加 78% 和 93%, 地上部干物重均增加 80%, 叶片干物重略有增加(表 2)。Hocking 和 Meyer 曾报道, 不同氮不平衡条件下(从缺乏到足量), CO<sub>2</sub> 浓度升高, 小麦干物质量平均增加 112%<sup>[13]</sup>。由于 CO<sub>2</sub> 浓度升高加速冬小麦的生育进程, 抽穗提早, 因而 CO<sub>2</sub> 浓度升高处理的地上部干物重还包括穗重部分。无论 CO<sub>2</sub> 浓度是当前水平或是倍增水平, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 对小麦茎秆与叶鞘干物重及地上部干物重的影响差异不明显。

表 2 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥施用对冬小麦干物质积累的影响(在 CO<sub>2</sub> 处理后 25 d 取样, g 株<sup>-1</sup>)

Table 2 Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and N supply on dry matter accumulation of winter wheat sampled at 25 d after CO<sub>2</sub> treatment (g plant<sup>-1</sup>)

N 用量 N supply	CO <sub>2</sub> 水平 CO <sub>2</sub> levels	叶片重 Leaves	叶鞘和茎秆重 Sheaths and stalks	穗重 Ears	地上部干物重 Dry mass of the ground part
N <sub>1</sub>	C	0.328(0.010) a	0.363(0.021) b	—	0.690(0.011) b
	E	0.371(0.024) a	0.646(0.055) a	0.235(0.07)	1.251(0.148) a
N <sub>2</sub>	C	0.360(0.004) a	0.359(0.062) b	—	0.719(0.058) b
	E	0.421(0.034) a	0.692(0.065) a	0.179(0.039)	1.291(0.060) a

注: 括号内为标准误差, 不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。C、E、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 的意义同表 1

## 2.2 冬小麦地上各部分氮磷浓度和吸收量

CO<sub>2</sub> 浓度增加, CO<sub>2</sub> 浓度处理后 8 d 地上部 N、P 浓度均降低, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理 N 浓度分别下降 19.2% 和 11.2%; P 浓度分别下降 13.6% 和 15.9% (表 3)。CO<sub>2</sub> 浓度处理后 25 d 叶片、叶鞘和茎秆 N、P 浓度也降低。其中 N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理叶片 N 浓度分别下降 17.2% 和 10.5%, P 浓度分别下降 9.7% 和 15.2% (表 3)。叶鞘和茎秆 N 浓度分别下降 38.7% 和 36.6%, P 浓度分别下降 39.3% 和 46.7% (表 3)。两次结果均表明, CO<sub>2</sub> 浓度增加地上部分 N、P 浓度均下降, 尤其是叶鞘和茎秆下降更为明显, 这可能是 CO<sub>2</sub> 浓度增加叶鞘和茎秆中 N、P 向穗部转移的结果, 前已指出, CO<sub>2</sub> 浓度升高的处理冬小麦抽穗提早, 穗部要消耗养分, 而对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理尚未抽穗。

两种 N 肥水平条件下, CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦地上部 N 吸收量有一定的影响, 但不显著, 无论是叶片还是叶鞘和茎秆及地上部总吸收量均不表现明显增加(表 4)。CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦地上部 P 吸收总量增加, 但对叶片及叶鞘和茎秆 P 吸收量无影响(表 4)。

## 2.3 氮磷利用效率及相对氮磷累积速率

CO<sub>2</sub> 浓度升高处理的氮利用效率(NUE) 比对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理显著提高, CO<sub>2</sub> 处理后 8 d N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的 NUE 分别增加 23.6% 和 13.4%, 而 25 d 则分别增加 50.6% 和 28.4% (表 5)。对照 CO<sub>2</sub> 浓度时 N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理之间 NUE 差异不大, 但 CO<sub>2</sub> 浓度升高时 N<sub>1</sub> 处理 NUE 则明显比 N<sub>2</sub> 处理高。CO<sub>2</sub> 处理后 8 d, CO<sub>2</sub> 浓度升高处理的磷利用效率(PUE) 与对照 CO<sub>2</sub> 浓度处理相近, 但 CO<sub>2</sub> 处理后 25 d 则明显提高, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理的 PUE 分别增加 21.1% 和 35.2% (表 5)。无论 CO<sub>2</sub> 浓度升高与否, N<sub>1</sub> 和 N<sub>2</sub> 处理之间 PUE 差异不大。

表 3 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥施用对冬小麦地上部分氮(N)和磷(P)浓度(mg g<sup>-1</sup>)的影响(分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d 取样)Table 3 Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and N supply on N and P (mg g<sup>-1</sup>) in shoots of winter wheat sampled at 8 d and 25 d after CO<sub>2</sub> treatments, respectively

氮用量 N supply	CO <sub>2</sub> 水平 CO <sub>2</sub> levels	8 d		25 d					
		地上部		叶片		叶鞘和茎秆		穗部	
		Shoots		Leaves		Sheaths and stalks		Ears	
		N	P	N	P	N	P	N	P
N <sub>1</sub>	C	45.4±0.1 a	4.4±0.1 ab	40.8±0.3 a	3.1±0.0 ab	19.1±0.6 a	2.8±0.1 a	—	—
	E	36.7±0.1 b	3.8±0.2 ab	33.8±1.7 b	2.8±0.1 b	11.7±0.1 b	1.7±0.0 b	19.4±1.2	3.7±0.3
N <sub>2</sub>	C	44.7±0.4 a	4.4±0.1 a	41.9±0.4 a	3.3±0.1 a	20.2±0.8 a	3.0±0.0 a	—	—
	E	39.4±0.9 b	3.7±0.1 b	37.5±1.4 ab	2.8±0.1 b	12.8±0.7 b	1.6±0.1 b	22.1±1.4	4.1±0.3

注: 数值为平均值±标准误差, 不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。C、E、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>的意义同表 1表 4 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥施用对冬小麦地上部分氮(N)磷(P)吸收量(mg 株<sup>-1</sup>)的影响(分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d 取样)Table 4 Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and N supply on N and P uptake(mg plant<sup>-1</sup>) by shoots of winter wheat sampled at 8 d and 25 d after CO<sub>2</sub> treatments, respectively

项目 Items	氮用量 N supply	CO <sub>2</sub> 水平 CO <sub>2</sub> levels	8 d		25 d			地上部 Shoots	
			地上部		叶片		叶鞘和茎秆		
			Shoots		Leaves		Sheaths and stalks		
氮吸收量	N <sub>1</sub>	C	8.06±0.09 a	13.39±0.38 a	6.94±0.48 a	—	20.65±0.09 a		
		E	11.34±0.96 a	12.56±1.20 a	7.56±0.54 a	4.43±0.68	24.93±2.45 a		
	N <sub>2</sub>	C	8.45±0.77 a	15.06±0.02 a	7.16±0.59 a	—	22.59±0.61 a		
		E	11.19±0.18 a	15.84±1.48 a	8.88±1.09 a	4.02±0.85	29.16±1.75 a		
磷吸收量	N <sub>1</sub>	C	0.77±0.00 b	1.00±0.02 a	1.01±0.09 a	—	2.01±0.07 b		
		E	1.16±0.05 a	1.04±0.03 a	1.12±0.04 a	0.83±0.12	3.00±0.19 a		
	N <sub>2</sub>	C	0.83±0.06 b	1.20±0.02 a	1.09±0.13 a	—	2.29±0.16 ab		
		E	1.05±0.03 a	1.17±0.10 a	1.12±0.15 a	0.74±0.15	3.04±0.09 a		

注: 数值为平均值±标准误差, 不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。C、E、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>的意义同表 1表 5 CO<sub>2</sub> 浓度升高和氮肥施用对冬小麦氮磷利用效率(NUE 和 PUE)及相对氮磷累积速率(RNAR 和 RPAR)的影响(分别在 CO<sub>2</sub> 处理后 8 d 和 25 d 取样)Table 5 Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and N supply on N and P use efficiencies (NUE, PUE) and relative N and P accumulation rates (RNAR, RPAR) of winter wheat sampled at 8 d and 25 d after CO<sub>2</sub> treatments, respectively

氮用量 N supply	CO <sub>2</sub> 水平 CO <sub>2</sub> levels	8 d		25 d		RNAR (× 10 <sup>-2</sup> )	RPAR (× 10 <sup>-3</sup> )
		NUE	PUE	NUE	PUE		
N <sub>1</sub>	C	22.0±0.1 c	229.8±4.7 a	33.4±0.2 c	343.6±8.8 b	5.54±0.09 a	5.63±0.18 a
	E	27.2±0.1 a	265.2±11.6 a	50.3±0.7 a	416.0±9.0 a	4.62±0.08 a	5.57±0.14 a
N <sub>2</sub>	C	22.4±0.2 c	226.3±3.3 a	31.8±1.0 c	314.3±3.8 b	5.83±0.70 a	5.95±0.81 a
	E	25.4±0.6 b	270.8±8.8 a	44.4±1.2 b	425.0±0.9 a	5.62±0.45 a	6.24±0.33 a

注: 数值为平均值±标准误差, 不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。C、E、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>的意义同表 1

CO<sub>2</sub> 浓度升高对 RNAR 和 RPAR 影响不大(表 5)。这与 Hocking 和 Meyer 报道 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 小麦 RNAR 有所增加的结果不一致<sup>[3]</sup>, 原因可能是两试验采样的生育时期不同, Hocking 和 Meyer 的采样时期在苗期, 而本试验采样时期在拔节~ 抽穗前后时期。

CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下叶片矿质养分浓度降低的机理目前并没有一致的认识。上述结果表明, CO<sub>2</sub> 浓度增加, 地上部如叶片、叶鞘和茎秆 N、P 浓度下降(表 3), 但其吸收量均不表现减少, 反而有所增加(表 4), 而茎秆和叶鞘干物重明显增加, 叶片干物重也有所增加(表 2), 且 NUE 和 PUE 提高(表 5), 因而 CO<sub>2</sub> 浓度升高, 冬小麦体内 N、P 浓度下降是由于稀释效应以及 NUE 和 PUE 提高之故。此外, 高 CO<sub>2</sub> 浓度时冬小麦地上部 P 吸收总量增加, 主要是 CO<sub>2</sub> 浓度升高加速冬小麦的生育进程, 抽穗提早, 其地上部 P 吸收总量还包括穗部中的 P。

## 参考文献

1. Houghton J T, Meria Filho L G, Callander B A. Climate Change 1995: the Science of Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996
2. Watson R T, Rodhe H, Oeschger H, *et al.* Greenhouse gases and aerosols. In: Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. eds. Climate: the IPCC Scientific Assessment. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press, 1990. 1~ 40
3. Wong S C. Elevated atmospheric partial pressure of CO<sub>2</sub> and plant growth I. Interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> plants. *Oecologia*, 1979, 40: 68~ 74
4. Aben S K, Seneweera S P, Ghannoum O, *et al.* Nitrogen requirements for maximum growth and photosynthesis of rice, *Oryza Sativa* L. cv. Jarrah grown at 36 and 70 Pa CO<sub>2</sub>. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1999, 26: 759~ 766
5. Makino A, Harada M, Sato T, *et al.* Growth and N allocation in rice plants under CO<sub>2</sub> enrichment. *Plant Physiol.*, 1997, 115: 199~ 233
6. Ziska L H, Weerakoon W, Namuco O S, *et al.* The influence of nitrogen on the elevated CO<sub>2</sub> response in field grown rice. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1996, 23: 45~ 52
7. Rogers G S, Milham P J, Thihaud M C, *et al.* Interactions between rising CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen supply in cotton I. Growth and leaf nitrogen concentration. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1996, 23: 119~ 125
8. Townend J. Effects of elevated CO<sub>2</sub>, water and nutrients on *Picea sitchensis* (Bong.) Carr seedlings. *New Phytol.*, 1995, 130: 193~ 206
9. Huluka G, Hileman D R, Biswas P, *et al.* Effects of elevated CO<sub>2</sub> and water stress on mineral concentration of cotton. *Agric. For. Meteorol.*, 1994, 70: 141~ 152
10. Rogers G S, Payne L, Milham P, *et al.* Nitrogen and phosphorus requirements of cotton and wheat under changing atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. *Plant Soil*, 1993, 155/156: 231~ 234
11. BassiriRad H, Griffin K L, Reynolds J F, *et al.* Changes in root NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> absorption rates of loblolly and ponderosa pine in response to CO<sub>2</sub> enrichment. *Plant Soil*, 1997, 190: 1~ 9
12. 李伏生, 康绍忠. 不同氮和水分条件下 CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦碳氮比和碳磷比的影响. *植物生态学报*, 2002, 26 (3): 295~ 302
13. Hocking P J, Meyer C P. Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen stress on growth, and partitioning of dry matter and nitrogen in wheat and maize. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1991, 18: 339~ 356
14. van Ginkel J H, Gorissen A, van Veen J A. Carbon and nitrogen allocation in *Lolium perenne* in response to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> with emphasis on soil carbon dynamics. *Plant Soil*, 1997, 188: 299~ 308
15. Penuelas J, Idso S B, Ribas A, *et al.* Effects of long-term atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on the mineral concentration of *Citrus aurantium* leaves. *New Phytol.*, 1997, 135: 439~ 444
16. 赵增煜. 常用农业科学试验法. 北京: 农业出版社, 1986. 20
17. Katsu I, Manami O S. Effect of temperature on CO<sub>2</sub> dependence of gas exchange in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> crop plants. *Japan. J. Crop Sci.*, 1991, 60 (1): 139~ 145

## INFLUENCE OF CO<sub>2</sub> ENRICHMENT ON GROWTH OF AND N AND P CONCENTRATIONS IN WINTER WHEAT UNDER TWO N LEVELS

Li Fu-sheng

(Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Kang Shao-zhong

(Key Laboratory of Agricultural Soil & Water Engineering in the Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest Sci-Tec University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

### Summary

Atmospheric CO<sub>2</sub> levels are expected to exceed 700  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  by the end of 21st century. Therefore the influence of increased CO<sub>2</sub> concentration on crop plants is of major concern. This study is an analysis of growth of and N and P concentrations in winter wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Xinong 8727) grown under two levels of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration (350  $\mu\text{mol mol}^{-1}$  and 700  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) and of nitrogen fertilizer (45 kg  $\text{hm}^{-2}$  and 90 kg  $\text{hm}^{-2}$ ). Results showed that plant height, leaf area index (LAI) and net assimilation rate (NAR) increased, while leaf area ratio (LAR) reduced and specific leaf weight (SLW) remained unchanged under the high atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. The influence of CO<sub>2</sub> enrichment on relative growth rate (RGR) was dependent on N level. Higher CO<sub>2</sub> concentration increased RGR significantly in the high N treatment, but did not increase in the low N treatment. Tasseling of winter wheat advanced by 7~8 days and masses of leaf sheaths, stalks and shoots also increased with CO<sub>2</sub> concentration increasing. Higher CO<sub>2</sub> decreased N and P concentrations in leaves, leaf sheaths and stalks, however it increased N uptake by winter wheat slightly. Higher CO<sub>2</sub> concentration increased use efficiencies of N and P (NUE and PUE), but did not affect relative nitrogen and phosphorus accumulation rates (RNAR and RPAR). Dilution of N and P due to increased dry mass and the enhancement of the use efficiencies of N and P can explain the decline in plant N content in the present experiment.

**Key words** Higher CO<sub>2</sub> concentration, Nitrogen level, Growth analysis, N and P concentration