

# 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<sup>\*</sup>

王小娟<sup>1,2</sup> 王文明<sup>1</sup> 张振华<sup>1</sup> 张 力<sup>1</sup> 杨 春<sup>1</sup> 宋海星<sup>1\*\*</sup> 官春云<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>湖南农业大学资源环境学院, 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 农田污染控制与农业资源利用湖南省重点实验室, 植物营养湖南省普通高等学校重点实验室, 长沙 410128; <sup>2</sup>海南省农业科学院, 海口 571100; <sup>3</sup>国家油料改良中心湖南分中心, 长沙 410128)

**摘 要** 采用砂培试验, 在 2 种 CO<sub>2</sub> 浓度(自然 CO<sub>2</sub> 浓度 400 μmol · mol<sup>-1</sup> 和高 CO<sub>2</sub> 浓度 700 μmol · mol<sup>-1</sup>) 和 2 种供氮水平(常氮 15 mmol N · L<sup>-1</sup> 和氮胁迫 5 mmol N · L<sup>-1</sup>) 下, 研究了油菜营养生长阶段的干物质累积和氮素吸收利用的变化。结果表明: 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下, 油菜株高、根茎粗和干物质累积量增加, 其中, 常氮条件下, 根茎粗和地上部干重的增加幅度大于氮胁迫条件, 株高和根系干重增加幅度则常氮条件小于氮胁迫条件; 高 CO<sub>2</sub> 浓度下, 根体积、根系活跃吸收面积和总吸收面积在 2 个供氮水平下均增加, 而一级侧根数只在常氮条件下增加, 根长只在氮胁迫条件下增加; 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下, 油菜各器官含氮量下降, 其中, 叶片和根系的含氮素量下降幅度明显大于茎; 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下, 正常供氮时根、茎、叶氮素累积量均增加, 氮胁迫时茎氮素累积量增加, 而根和叶的氮素累积量减少; 高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下, 氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率均增加, 常氮条件下增加幅度大于低氮条件, 其中, 氮素利用效率对氮水平的响应更加明显。

**关键词** 干物质累积; 根系特性; 氮素吸收累积; 油菜

**中图分类号** Q945.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)1-0083-06

**Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and N application levels on the growth, N uptake and utilization of oilseed rape during vegetative stage.** WANG Xiao-juan<sup>1,2</sup>, WANG Wen-ming<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, YANG Chun<sup>1</sup>, SONG Hai-xing<sup>1\*\*</sup>, GUAN Chun-yun<sup>3</sup> (<sup>1</sup> College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Agricultural University, Hunan Provincial Key Laboratory of Farmland Pollution Control and Agricultural Resources Use, Hunan Provincial Key Laboratory of Plant Nutrition in Common University, Changsha 410128, China; <sup>2</sup> Hainan Province Academy of Agricultural Science, Haikou 571100, China; <sup>3</sup> National Center of Oilseed Crops Improvement, Hunan Branch, Changsha 410128, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(1): 83–88.

**Abstract:** Dry biomass and changes of nitrogen (N) uptake and utilization in oilseed rape during vegetative growth stage at two levels of CO<sub>2</sub> (natural: 400 μmol · mol<sup>-1</sup>, elevated: 700 μmol · mol<sup>-1</sup>) and two levels of N application (normal: 15 mmol · L<sup>-1</sup>, limited: 5 mmol · L<sup>-1</sup>) were studied in a sand culture experiment. Results showed that plant height, basal diameter and dry biomass were increased under the elevated CO<sub>2</sub> concentration, and the increment of either basal diameter or dry biomass at the normal N level was higher than that at the limited N level, but the increased degree of plant height and root dry weight showed an opposite pattern. Regardless of the N application levels, root volume, total active absorption area were increased under the elevated CO<sub>2</sub> concentration, but number of the first lateral root was only increased at the normal N level, root length was only increased at the limited N level. N content in organs of oilseed rape was declined under the elevated CO<sub>2</sub> concentration, and the declined degree of N contents in

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(31071851 和 31101596)、湖南省高校创新平台开放基金项目(09K049)、国家油菜产业技术体系栽培生理岗位、国家支撑计划项目(2012BAD15B04 和 2010BAD01B01)、湖南省高校创新平台开放基金项目(12K064 和 10K034)和湖南省政府专项资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者 E-mail: haixingsong@yahoo.com.cn

收稿日期: 2013-06-27 接受日期: 2013-08-22

leaves and roots was significantly higher than that of stems. Under the elevated  $\text{CO}_2$  concentration, accumulation amount of N in roots, stems and leaves were increased at the normal N level, only increased in stems at the limited N level, and decreased in roots and leaves. N uptake efficiency, N use efficiency (NUE) and N efficiency were increased under the elevated  $\text{CO}_2$  concentration, and increased degree at the normal N level was higher than at the limited N level, and the response of NUE to N application levels was more obvious.

**Key words:** dry biomass accumulation; root character; nitrogen absorption and accumulation; oilseed rape.

大气  $\text{CO}_2$  浓度是影响植物生长的重要因素,其升高一方面可促进植物净光合速率增加生物量,另一方面则增加植物对矿质养分的需求 (Franklin *et al.*, 2009)。因此,在大气  $\text{CO}_2$  浓度条件下有限的矿质养分供应将限制植物的  $\text{CO}_2$  同化速率,从而限制植物生产潜力的充分发挥,抑制陆地生态系统作为大气  $\text{CO}_2$  库的功能。因此,研究  $\text{CO}_2$  浓度升高条件下作物养分的吸收利用变化及其与作物生长的关系,揭示植物生长及其养分需求对  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应机理,对指导  $\text{CO}_2$  浓度升高条件下作物的养分管理具有重要的指导意义。已有研究表明,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高促进植物生长,  $\text{CO}_2$  浓度升高  $300 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  的条件下,  $\text{C}_3$  谷物和  $\text{C}_4$  谷物的生产力分别提高 49% 和 20% (中国科学院城市环境研究所, 2010); 植物种类 (Weigel & Manderscheid, 2012)、养分状况 (张绪成等, 2011)、气候条件 (Roy *et al.*, 2012) 等均影响植物对大气  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应,其中,养分的影响是最受人们关注的方面。大气  $\text{CO}_2$  浓度升高降低植物地上部分氮素含量,增加 C/N (郭世伟等, 2006), 并提高植物对氮素的吸收和同化需求。氮素在  $\text{C}_3$  植物对  $\text{CO}_2$  浓度升高的适应中起着极重要的作用,氮素供应水平较高时,小麦、豆类等  $\text{C}_3$  植物的光合作用并不发生适应高  $\text{CO}_2$  浓度的下调现象,这与增施氮素调节植物体内 C/N 关系 (陈改苹等, 2006)、源库关系 (Reich *et al.*, 2006) 和降低同化产物积累有关 (Teng *et al.*, 2006)。但是,大气  $\text{CO}_2$  浓度升高条件下,将植物生长与养分效率结合起来的研究比较少。本试验以油菜为供试材料,研究大气  $\text{CO}_2$  浓度及供氮水平对其营养阶段生长与氮效率的影响,以期为指导  $\text{CO}_2$  浓度升高条件下油菜氮素营养管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2011 年在湖南农业大学温室大棚内进行。

温棚大小为  $12 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , 由钢架结构加透光性好的塑料薄膜制成。高  $\text{CO}_2$  浓度棚内装有  $\text{CO}_2$  钢瓶,棚内  $\text{CO}_2$  浓度用 GXH-3010E 型便携式红外线分析仪进行检测控制,棚内装有 2 台吊扇以保持棚内的空气流动和  $\text{CO}_2$  浓度均匀,每天供气时间为 6:00—18:00。对照棚内为自然大气  $\text{CO}_2$  浓度,2 个温棚的结构和大小完全一致。

用 Hoagland 营养液进行砂培 (珍珠岩) 试验,每天每株油菜营养液供应量为越冬期 80 mL、抽薹期 150 mL。试验设  $\text{CO}_2$  浓度、供氮水平 2 个因子,每个因子 2 水平。 $\text{CO}_2$  浓度为自然浓度 ( $A[\text{CO}_2]$ ) 和高  $\text{CO}_2$  浓度  $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  ( $E[\text{CO}_2]$ ), 供氮水平为正常供氮 ( $15 \text{ mmol N} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和  $1/3$  正常供氮。供试油菜品种为 742 和 814 (2 个品种只作试验材料,试验数据不作品种间对比),共 8 个处理,每品种每个处理重复 5 次,共 40 钵。

### 1.2 取样

抽薹完毕临开花前取全株样品,量株高和根茎粗后洗净擦干,按器官分开称鲜重,茎和叶直接杀青后烘干;根系分为主根和侧根,量其一级侧根数和根长,尔后取一部分侧根测定根系活力、根系总吸收面积和活跃吸收面积,余下的侧根称鲜重后和主根一起杀青烘干。烘干后的样品称干重,粉碎过筛后测氮含量,根据烘干部分侧根的鲜干重之比以及用于鲜样测定的侧根鲜重推算出所有侧根的干重。

### 1.3 测定项目与方法

根长用方格交叉法、根系体积用排水法、根系总吸收表面积和活跃吸收表面积用甲烯蓝吸收附法测定,植株氮含量用浓硫酸混合催化剂消化后 FOSS 全自动凯氏定氮仪测定。

### 1.4 数据处理

试验所得数据采用 Excel 和 SPSS 17.0 专业版软件处理。

氮素吸收效率 = 单株总氮 / 总施氮量

氮素利用效率 = 干物质累积量 / 单株总氮

氮效率=干物质累积量/总施氮量。

2 结果与分析

2.1 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜前期生长及干物质累积的影响

从表 1 可见,在常氮和氮胁迫条件下,单株总干重分别较正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度处理增加 29.23% 和 20.76% ( $P<0.05$ )。不同器官的增加程度有所不同,正常供氮和氮胁迫条件下,根干重分别增加了 27.64% 和 33.41% ( $P<0.05$ ),叶干重分别增加了 20.70% 和 4.60%,茎干重分别增加了 39.49% ( $P<0.05$ ) 和 35.92%,茎重增加的幅度最大,其次是根,增加幅度最小的是叶片。供氮水平也影响不同器官干重的增加幅度,地上部干重增幅常氮下 (29.76%) 大于氮胁迫 (16.90%),根系则相反。因为促进根系生长是植物在氮胁迫环境中的适应性反应,显然,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高加剧了氮胁迫。根冠比的测定结果也反映了同样的现象,即大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下根冠比增加,但氮胁迫条件下增加幅度 (16.45%) 明显大于常氮条件 (0),说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高对根系生长的促进作用要大于地上部,且在氮胁迫条件下以上促进作用更加明显,但 2 个因素及其互

作效应差异均不显著。氮胁迫条件下促进根系生长,必然以限制地上部生长为代价的。不同供氮水平下,从高 CO<sub>2</sub> 浓度增加茎叶干重的幅度上看,茎重增加受氮水平的影响较小,而叶重增加受氮水平的影响最大。即在大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下,受氮胁迫影响最大的器官是叶片,不难看出,在高 CO<sub>2</sub> 浓度下氮素供应不足对主要的同化器官不良影响最明显。

株高和根茎粗的测定结果表明 (表 1),无论供氮水平如何,二者均表现为随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高而增长的趋势,在正常供氮和氮胁迫条件下,株高分别增加了 3.76% 和 12.34%,根茎粗分别增加了 13.6% 和 6%。差异显著性分析结果表明,株高和根茎粗在不同 CO<sub>2</sub> 浓度之间存在显著差异,在不同施氮水平之间则无显著差异,且 2 个因素之间互作效应不显著。

2.2 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜抽薹期根系特性的影响

由表 2 可以看出,在高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下根系各项指标以增加为主要趋势,但个别指标有所减少。常氮条件下,根体积、一级侧根数、根系活跃吸收面积和总吸收面积均表现为正效应,分别增加 21.24% ( $P<0.05$ )、9.18%、4.33% 和 0.78%,而总根长则表现为负效应,减少了 4.77%;低氮条件下,

表 1 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜生长及干物质累积的影响  
Table 1 Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth and dry biomass accumulation of oilseed rape

处理		根干重	叶干重	茎干重	地上部干重	单株总干重	根冠比	株高	根茎粗
		(g · plant <sup>-1</sup> )	(g · plant <sup>-1</sup> )	(g · plant <sup>-1</sup> )	(g · plant <sup>-1</sup> )	(g · plant <sup>-1</sup> )		(cm · plant <sup>-1</sup> )	(cm · plant <sup>-1</sup> )
常氮 (NN)	E[CO <sub>2</sub> ]	25.49 a	38.26 a	41.01 a	79.27 a	104.77 a	0.33 a	128.95 a	2.89 a
	A[CO <sub>2</sub> ]	19.97 ab	31.69 ab	29.40 b	61.09 b	81.07 b	0.33 a	124.28 a	2.54 ab
低氮 (LN)	E[CO <sub>2</sub> ]	18.37 bc	28.77 b	24.18 bc	52.96 bc	71.33 bc	0.35 a	109.53 ab	2.61 ab
	A[CO <sub>2</sub> ]	13.77 c	27.50 b	17.79 c	45.30 c	59.07 c	0.30 a	97.50 b	2.25 b
差异	N	0.0019 **	0.007 **	0.0002 **	0.0001 **	0.0001 **	0.871	0.3765	0.075
显著性	CO <sub>2</sub>	0.0153 *	0.1106	0.0128 *	0.0021 **	0.0005 **	0.4918	0.0181 *	0.0299 *
	CO <sub>2</sub> ×N	0.8183	0.2757	0.4527	0.1862	0.2301	0.5131	0.6955	0.9643

采用 SPSS 统计进行方差分析 (LSD),不同字母表示为  $P<0.05$  显著性差异; \* 显著性差异, \* 极显著性差异; NN: 常氮; LN: 低氮; A[CO<sub>2</sub>]: 自然 CO<sub>2</sub> 浓度; E[CO<sub>2</sub>]: CO<sub>2</sub> 增高浓度,下同。

表 2 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜抽薹期根系特性的影响  
Table 2 Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on root characteristics of oilseed rape during bolting-stage

处理		根体积	一级侧根数	根系活跃吸	总根长	总吸收面积
		(cm <sup>3</sup> · plant <sup>-1</sup> )	(个)	收面积 (cm <sup>2</sup> · plant <sup>-1</sup> )	(m · plant <sup>-1</sup> )	(cm <sup>2</sup> · plant <sup>-1</sup> )
常氮 (NN)	E[CO <sub>2</sub> ]	254.00 a	44.00 a	119.97 a	165.19 a	243.67 a
	A[CO <sub>2</sub> ]	209.50 b	40.30 a	114.99 ab	173.47 a	241.78 a
低氮 (LN)	E[CO <sub>2</sub> ]	174.00 bc	32.30 a	105.71 ab	161.50 a	221.68 a
	A[CO <sub>2</sub> ]	159.00 c	35.70 a	88.28 b	156.19 a	204.24 a
差异显著性	N	0.0001 **	0.1524	0.041 *	0.6983	0.2209
	CO <sub>2</sub>	0.0283 *	0.9787	0.2672	0.9561	0.6847
	CO <sub>2</sub> ×N	0.2646	0.5283	0.4453	0.8014	0.7437

根体积、根系活跃吸收面积、总根长和总吸收面积增加,分别增加 9.43%、19.74%、3.40% 和 8.54%,而一级侧根数则减少 9.52%。说明氮胁迫条件下抑制根系生长首先反映在限制侧根数方面。

2.3 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜抽薹期氮素含量及氮素累积量的影响

CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下,油菜各器官氮素含量均下降(表 3),这与小麦的研究结果基本一致(Reich *et al.*, 2006)。但下降幅度因氮水平和器官而异,在常氮水平下,根、茎、叶及单株氮素含量分别下降 16.75% ( $P<0.05$ )、10.61%、13.84% ( $P<0.05$ )、19.72% ( $P<0.05$ ),在氮胁迫水平下,根、茎、叶及单株氮素含量分别下降 21.15% ( $P<0.05$ )、1.87%、19.33% ( $P<0.05$ )、14.55% ( $P<0.05$ ),可见,CO<sub>2</sub> 浓度升高时油菜叶片和根系的氮素含量下降幅度明显大于茎。在不同 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,根、叶片和单株的氮素含量差异达到了显著水平,茎的氮素含量差异未达到显著水平。

CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜根总氮量、茎总氮量、叶总氮量影响见表 4。由于氮素累积量是氮素含量和生物量共同决定的,因此,在高 CO<sub>2</sub> 浓度下虽然各器官氮素含量下降,但其氮素累积量以增加趋势为主。在正常供氮情况下,CO<sub>2</sub> 浓度升高使根、茎、叶及单

表 3 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜氮素含量的影响 (mg · kg<sup>-1</sup>)  
Table 3 Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on N content of oilseed rape

指标		根	茎	叶	单株
常氮 (NN)	E[CO <sub>2</sub> ]	13.22 b	14.33 a	21.22 b	15.47 b
	A[CO <sub>2</sub> ]	15.88 a	16.03 a	24.63 a	19.27 a
低氮 (LN)	E[CO <sub>2</sub> ]	11.15 c	11.53 b	14.27 d	12.27 c
	A[CO <sub>2</sub> ]	14.14 ab	11.75 b	17.69 c	14.36 b
	N	0.0040 **	0.0003 **	0.0001 **	0.0001 **
	CO <sub>2</sub>	0.0001 **	0.2811	0.0015 **	0.0001 **
	CO <sub>2</sub> ×N	0.1703	0.4052	0.9983	0.2235

表 4 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜氮素累积量的影响 (mg · plant<sup>-1</sup>)  
Table 4 Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on accumulation amount of N in oilseed rape

指标		根	茎	叶	单株
常氮 (NN)	E[CO <sub>2</sub> ]	306.75 a	548.70 a	797.35 a	603.35 a
	A[CO <sub>2</sub> ]	302.09 ab	458.79 a	776.83 a	499.03 a
低氮 (LN)	E[CO <sub>2</sub> ]	187.32 c	264.37 b	408.50 b	283.02 b
	A[CO <sub>2</sub> ]	213.95 bc	204.24 b	467.98 b	222.85 b
	N	0.0042 **	0.0001 **	0.0001 **	0.0001 **
	CO <sub>2</sub>	0.5685	0.0423 *	0.6691	0.0385 *
	CO <sub>2</sub> ×N	0.8362	0.6784	0.3822	0.5677

株氮素累积量增加,分别增加 1.54%、19.60%、2.64% 和 20.90%;在氮胁迫条件下,CO<sub>2</sub> 浓度升高使茎和单株的氮素累积量增加,分别增加了 29.44% 和 27%,而使根和叶的氮素累积量减少,分别下降了 12.45% 和 12.71%。

2.4 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜抽薹期氮效率的影响

根据氮素吸收量、氮素供应量和干物质累积量,可计算出氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率(图 1)。由图 1 可以看出,高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,以上 3 项指标均增加。在常氮和氮胁迫条件下,氮素吸收效率分别增加了 40.3% 和 37.5%,氮素利用效率增加 35.6% 和 7.9%,氮效率增加 85.8% 和 59.8%,即常氮条件下氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率的增加幅度明显大于氮胁迫条件,其中不同氮水平间氮素利用效率增加幅度的差异尤其明显。可见,虽然常氮条件下的氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率低于氮胁迫条件,但在高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下这 3 项指标的进一步提高,尤其是氮素利用效率的提高,即高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下干物质生产能力的充分发挥,是以充足的氮素营养为前提的。差异显著性分析表明,CO<sub>2</sub> 浓度对氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率的影响均达到了极显著水平,供氮

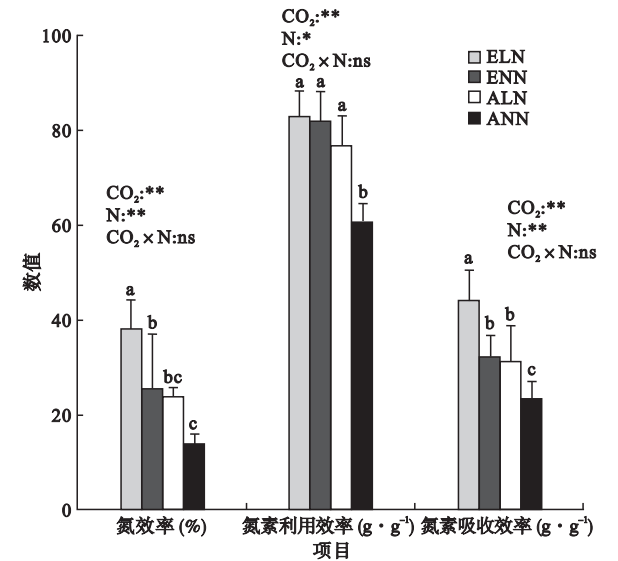


图 1 CO<sub>2</sub> 浓度升高对油菜抽薹期氮效率、氮素利用效率和吸收效率的影响

Fig. 1 Effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on N efficiency, N use efficiency and N uptake efficiency of oilseed rape during bolting stage

不同字母表示为  $P<0.05$  显著性差异, \* 显著性差异, \*\* 极显著性差异, ns 没有显著性差异; ALN: 自然 CO<sub>2</sub> 浓度下低施氮量; ANN: 自然 CO<sub>2</sub> 浓度下正常施氮量; ELN: 高 CO<sub>2</sub> 浓度下低施氮量; ENN: 高 CO<sub>2</sub> 浓度下正常施氮量。



水平对氮素吸收效率和氮效率的影响均达到了极显著水平,而对氮素利用效率的影响均达到了显著水平,但是两个因素之间互作效应不显著。

### 3 讨论

大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高,必然影响农田作物的生长以及作物对养分的需求。寇太记等(2008)研究表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度促进了高氮和低氮处理的冬小麦地上部与地下部的生物量积累。本研究也得到类似的结果,即高 CO<sub>2</sub> 浓度处理的油菜地上部分和地下部分生物量均有增加,但两部分干物质累积量增加幅度却有所不同,地下部分增加幅度大于地上部分,因而表现为根冠比增大,这可能是由于高 CO<sub>2</sub> 条件下有更多的光合产物运输到地下而有利于根系生长有关。高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下植物光合作用的适应研究发现,固氮作物(Ainsworth *et al.*, 2003)和多年生树木(郭建平和高素华,2004)的适应现象相对不明显甚至没有适应现象,主要原因可能是固氮作物的根瘤生长以及多年生树木粗大的茎秆与发达的根系增加了植物体内的库容量。可见,在高 CO<sub>2</sub> 浓度下促进根系生长是调节植物体内源-库关系,防止源器官因光合产物残留而产生的光合适应现象的重要途径之一。本试验还表明,高 CO<sub>2</sub> 浓度对油菜生长和干物质累积的促进作用还受供氮水平影响,根茎粗和地上部干重的增加幅度常氮处理大于氮胁迫处理,根系干重的增加幅度则常氮处理小于氮胁迫处理。说明供氮充足时,地上部生长加快且根系的源-库平衡作用和加快生长而增加养分吸收的作用都有所减弱,供氮不足时则反之。

根系的表面积直接影响根系对土壤养分的吸收能力,根分枝、根长及根直径是决定根表面积的3个重要因子。从迄今的研究结果来看,CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下根系吸收面积的增加基本没有异义,但其增加原因分歧较大。如Rogers等(1992)在大豆的研究结果和Berntson等(1996)在桦树、红花槭的研究结果均显示,高 CO<sub>2</sub> 浓度下的根系长度显著增加,但根的分枝数却没有变化。但是王义琴等(1998)和Janssens等(1998)指出,高浓度 CO<sub>2</sub> 处理显著增加植物根系的分枝。一级侧根数和根长并没有受高 CO<sub>2</sub> 浓度和氮水平影响的报道(Larigauderie *et al.*, 1994)。本研究表明,CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下根重、根体积与根表面积的变化不受供氮水平的影响,而一级侧根数和根长的变化与供氮水平密切相关,表现

为正常供氮条件下,一级侧根数增加,而低氮条件下则根长增加。说明根系在不同施氮水平下对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应不同,在常氮条件下,主要是通过增加侧根(分支数),而在低氮条件下,主要是通过增加根长来促进吸收。这可能是由于不同植物的根系对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应不同所致。

水稻、棉花、玉米小麦等多种作物的研究均已证明,在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下器官氮素浓度降低,但是氮素累积量受干物质累积量增加和氮素浓度下降2个过程的综合影响,且因前者的影响往往大于后者使其大小呈增加趋势(许育彬等,2001)。这与本试验正常供氮条件下的结果一致,但在氮胁迫条件下,CO<sub>2</sub> 浓度升高时根和叶片的氮素累积量下降,说明氮营养不足限制了油菜的生物量增加潜力,当然由于茎氮素累积量增加幅度较大,单株总氮素累积量仍显示增加,以上结果说明高 CO<sub>2</sub> 浓度下茎中的氮素含量受供氮水平的影响相对较小,这可能是与抽薹期茎是主要生长部位有关。在一定供氮水平下,植株干物质累积量和氮素累积量决定着氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率。本试验表明,无论氮水平如何,由于 CO<sub>2</sub> 浓度升高均增加了单株干物质累积量和氮素累积量,使高 CO<sub>2</sub> 浓度处理的油菜抽薹期的氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率均高于自然 CO<sub>2</sub> 浓度,且除氮胁迫条件下的氮素利用效率之外,其余差异均达到了显著水平,再次证明了高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,供氮水平是氮素利用的重要限制因素。另外,虽然 CO<sub>2</sub> 浓度对氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率产生较大的影响,但并未改变因供氮水平变化的规律,即2种 CO<sub>2</sub> 浓度条件下的氮素吸收效率、氮素利用效率和氮效率均表现为常氮处理低于低氮处理。

### 4 结论

高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,油菜株高、根茎粗和干物质累积量增加,其中,根茎粗和地上部干重的增加幅度常氮条件大于氮胁迫条件,株高和根系干重增加幅度则常氮条件小于氮胁迫条件;根体积、根系活跃吸收面积和总吸收面积在2个供氮水平下均增加,而一级侧根数只在常氮条件下增加,根长只在氮胁迫条件下增加;油菜各器官氮素含量下降,其中,叶片和根系的氮素含量下降幅度明显大于茎,正常供氮时根、茎、叶氮素累积量均增加,氮胁迫时茎氮素累积量增加,而根和叶的氮素累积量减少;氮素吸收效

率、氮素利用效率和氮效率均增加,常氮条件下增加幅度大于低氮条件,其中,氮素利用效率对氮水平的响应更加明显。

## 参考文献

- 陈改苹,朱建国,庞 静,等. 2006. CO<sub>2</sub>浓度升高对水稻抽穗期根系有关性状及根碳氮比的影响. 中国水稻科学, **20**(1): 53–57.
- 郭建平,高素华. 2004. CO<sub>2</sub>浓度和辐射强度变化对沙柳光合作用速率影响的模拟研究. 生态学报, **24**(2): 181–185.
- 郭世伟,冉 炜,周 毅,等. 2006. 试论 CO<sub>2</sub>浓度升高条件下水稻碳氮代谢变化及其调控途径. 中国水稻科学, **20**(5): 560–566.
- 寇太记,朱建国,谢祖彬,等. 2008. 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. 植物生态学报, **32**(4): 922–931.
- 王义琴,张慧娟,杨奠安,等. 1998. 大气 CO<sub>2</sub>浓度倍增对植物幼苗根系生长影响的分形分析. 科学通报, **43**(16): 1736–1738.
- 许育彬,沈玉芳,李世清. 2011. 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. 作物学报, **37**(8): 1465–1474.
- 张绪成,于显枫,王红丽,等. 2011. 高大气 CO<sub>2</sub>浓度下氮素对小麦叶片光合能量分配的调节. 作物学报, **37**(6): 1069–1076.
- 中国科学院城市环境研究所. 2010. 大气二氧化碳浓度升高对全球生物的影响[EB/OL]. [2013–5–23]. <http://www.iue.cas.cn/xwzx/kydt/201004/t201004062813522.html>
- Ainsworth AE, Alistair R, Blum H, *et al.* 2003. Variation in acclimation of photosynthesis in *Trifolium repens* after eight years of exposure to free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE). *Journal of Experimental Botany*, **54**: 2769–2774.
- Berntson GM, Bazzaz FA. 1996. Belowground positive and negative feedbacks on CO<sub>2</sub> growth enhancement. *Plant and Soil*, **187**: 119–131.
- Franklin O, McMurtrie RE, Iversen CM, *et al.* 2009. Forest fine-root production and nitrogen use under elevated CO<sub>2</sub>: Contrasting responses in evergreen and deciduous trees explained by a common principle. *Global Change Biology*, **15**: 132–144.
- Janssens IA, Taylor G, Ceulemans R, *et al.* 1998. Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> increases fine root production, respiration, rhizosphere respiration and soil CO<sub>2</sub> efflux in Scots pine seedlings. *Global Change Biology*, **4**: 871–878.
- Larigauderie A, Reynolds JF, Strain BR. 1994. Root response to CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen supply in loblolly pine. *Plant and Soil*, **165**: 21–32.
- Reich PB, Hobbie SE, Lee T, *et al.* 2006. Nitrogen limitation constrains sustainability of ecosystem response to CO<sub>2</sub>. *Nature*, **440**: 708–922.
- Rogers HH, Peterson CM, McCrinmon JN, *et al.* 1992. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant, Cell & Environment*, **15**: 749–752.
- Roy KS, Bhattacharyya P, Neogi S, *et al.* 2012. Combined effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on dry matter production, net assimilation rate, C and N allocations in tropical rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, **139**: 71–79.
- Teng NJ, Wang J, Chen T, *et al.* 2006. Elevated CO<sub>2</sub> induces physiological, biochemical and structural changes in leaves of *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist*, **172**: 92–103.
- Weigel HJ, Manderscheid R. 2012. Crop growth responses to free air CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *European Journal of Agronomy*, **43**: 97–107.

---

作者简介 王小娟,女,1985年10月生,硕士,助理研究员,研究方向植物营养与生理。E-mail: HNNKYWXJ@163.com  
责任编辑 王 伟

---