

开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦 P、K 吸收和 C:N, C:P 比的影响

马红亮^{1,2}, 朱建国¹, 谢祖彬¹, 刘 钢¹, 曾 青¹, 韩 勇¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:利用 FACE(Free air carbon dioxide enrichment)技术平台,在两种氮肥施用水平上,研究了 CO₂ 浓度升高对冬小麦整个生长期 P、K 吸收和 C:N, C:P 比的影响。实验设常规 CO₂ (Ambient CO₂)和设计 CO₂ (elevated CO₂, Ambient+200 μmol·mol⁻¹)两种 CO₂ 水平和常规氮(NN,250 kgN·hm⁻²)和低氮(LN,150 kgN·hm⁻²)两个 N 水平。结果表明,相对于对照处理,高 CO₂ 浓度条件下,小麦叶的 P 浓度分别在分蘖期显著降低,LN 处理降低幅度相对较大,叶、茎和穗的 P 浓度主要在成熟期增加,NN 处理增加幅度相对较大;小麦不同部位的 K 浓度降低幅度在 LN 处理较大。但是小麦对 P、K 的吸收增加,并且在拔节期和成熟期达到显著水平,LN 处理下对 P 的吸收增加幅度较大,NN 处理对 K 的吸收增加幅度较大。由于 CO₂ 浓度升高,拔节期以前,小麦对 P 和 K 的相对吸收速率(RAR)分别增加 33%(LN>NN)和 37%(LN<NN),拔节期以后分别降低 45%(LN>NN)和 101%(LN>NN)。CO₂ 浓度升高后主要显著增加了 LN 处理的 C:N 比,但是 C:P 比仅仅在分蘖期显著增加。

关键词:CO₂ 浓度升高; 冬小麦; 养分吸收; C:N; C:P

中图分类号:S314 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)06-1192-07

Effects of Free Air Carbon Dioxide Enrichment on Uptake of P, K and Mass Ratios of C:N, C:P in Winter Wheat

MA Hong-liang^{1,2}, ZHU Jian-guo¹, XIE Zu-bin¹, LIU Gang¹, ZENG Qing¹, HAN Yong¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract:The present study is conducted to show effects of elevated atmospheric CO₂ concentration on absorption of P and K and C:N and C:P ratios of winter wheat at different growth stages with FACE(Free air carbon dioxide enrichment)systems under two levels of atmospheric CO₂ concentration[Ambient and elevated(ambient+200 μmol·mol⁻¹)] with application of nitrogen fertilizer (NN,250 kgN·hm⁻² and LN,150 kgN·hm⁻²). The results showed that elevated CO₂ compared with ambient CO₂ decreased the P concentration in leave at tillering growth stage and it was higher at LN than at NN. P concentration in leaf, shoot and ear increased at ripening stage and was larger at NN than at LN. And decline of K concentration in each part of wheat occurred at LN rather than at NN due to elevated CO₂. But the uptake of P and K by winter wheat due to elevated CO₂ increased and it was significant at jointing and ripening stages. Elevated CO₂ increased P uptake more at LN and increased K uptake more at NN than other stages.

Keywords:enhancement of CO₂ concentration; winter wheat; uptake of nutrients; C:N; C:P

收稿日期:2005-02-24

基金项目:中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-408);国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(40120140817); 973 项目-中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究(CCDMCTE-2002CB412502)

作者简介:马红亮(1978—),男,山西省原平人,博士研究生,从事土壤环境化学研究,E-mail: mhl936@hotmail.com

联系人:朱建国 E-mail:jgzhu@issas.ac.cn

目前大气中 CO₂ 浓度(2001)大约为 370 μmol·mol⁻¹ [1],并继续以每年 1.8 μmol·mol⁻¹ 的速度递增 [2],到 21 世纪末将达到 700 μmol·mol⁻¹ [3]。研究表明,大气中 CO₂ 浓度升高促进植物光合作用,使植物生长增速 [4];作物的生长又离不开土壤养分的供给,因此 CO₂ 升高的影响程度可能会受到植物营养水平的限制 [5]。研究表明,土壤中矿物态 N 的有效性在植物响应高 CO₂ 浓度过程中起着关键的作用 [6],土壤中的其他营养元素,比如 P、K [7,8],在调控植物对 CO₂ 升高响应过程中同样起着重要的作用,但对此研究的不多。同时在考虑 C、N 循环时,植物的化学性质是影响物质在土壤中转化的一个重要因素 [9,10],对于它在 CO₂ 浓度升高条件下的变化和对土壤物质转化的影响值得观察和深入研究。

国内关于冬小麦对 CO₂ 浓度升高响应的研究不多 [7],还没有在开放式空气 CO₂ 浓度增加即 FACE(Free Air Carbon-dioxide Enrichment)条件下对冬小麦整个生长期生长的研究进行过报道。本文利用建在我国无锡的 FACE 平台,研究了不同 N 水平下,高 CO₂ 浓度对冬小麦 P、K 和 C:N、C:P 比的影响。

表 1 2001—2002 小麦施肥情况(kg·hm⁻²)

Table 1 The situation of fertilizer supply during winter wheat growing in 2001—2002(kg·hm⁻²)

处理	肥料	11 月 13 日	12 月 4 日	3 月 3 日	4 月 5 日
NN	复合肥	333.3	—	166.67	—
	尿素	108.7	108.7	54.35	108.7
LN	复合肥	333.3	—	166.67	—
	尿素	—	54.35	—	54.35

1.3 采样与分析

2001—2002 年小麦季,从 2001 年 11 月 8 日小麦播种开始,分别于 3 月 17 日(分蘖期,128 d)、4 月 10 日(拔节期,152 d)、4 月 29 日(抽穗期,171 d)、5 月 30 日(成熟期,202 d)采集植株 20~40 棵(多数在 30 左右),数出棵数。植株采回后,按叶、茎、穗、根不同部位分别用蒸馏水洗净,在 105℃下杀青 2 h,然后在 80℃下至少烘 48 h,烘干后称重,磨细至可以过 60 目筛。植株全 C 用元素分析仪(PERKIN ELMER 2400, Series II, CHNS/O Analyzer)测定;采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,钼兰比色法和火焰光度法分别对小麦植株全磷和全钾进行测定 [12]。养分阶段性吸收速率:

$$RAR=(\ln A_2-\ln A_1)/(t_2-t_1)(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$$

式中:A₂和 A₁是在 t₂和 t₁(分别是小麦播种后的天数)的养分固定(吸收)量(g·m⁻²)。由于小麦根系在处理过程中用到水洗,可能会影响 P、K 的浓度,因此

1 材料与方法

1.1 研究地概况

稻麦轮作 FACE 系统平台 [11]位于江苏省无锡市安镇镇年余农场(31°37'N,120°28'E)。土壤类型为水耕人为土(俗称黄泥水稻土),年降水量 1 100~1 200 mm,年平均温度约 16℃,年日照时间大于 2 000 h,年无霜天数大于 230 d,耕作方式为水稻-冬小麦轮作。土壤基本性质为:砂粒(0.05~1 mm) 92 g·kg⁻¹,粉砂粒(0.001~0.05 mm) 657 g·kg⁻¹,粘粒(<0.001 mm) 251 g·kg⁻¹,容重 1.2 g·cm⁻³,有机 C 15 g·kg⁻¹,全 N 1.59 g·kg⁻¹,全 P 1.23 g·kg⁻¹,速效 P 10.4 mg·kg⁻¹,pH 6.8。

1.2 试验设计

试验采用裂区设计。CO₂ 浓度为主处理,N 肥料处理为副处理。FACE 圈(高 CO₂ 圈)比对照大气升高 200 mL·L⁻¹,FACE 和 Ambient 圈(对照圈)内设两个 N 水平:常规氮(NN,250 kgN·hm⁻²),低氮(LN,150 kgN·hm⁻²);常规 P 水平为 70 kgP₂O₅·hm⁻²,即组合成两个处理:LN,NN,施肥情况见表 1。2001 年 11 月 8 日播种,移栽行距 20 cm,密度 300 万株·hm⁻²。

没有给出根系的结果。

本文采用 ANOVA、F-检验和 LSD 方法,在不同 CO₂ 浓度条件下对所需数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度升高对小麦各部分 P 浓度及总体对 P 吸收的影响

在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,LN 处理下,CO₂ 浓度升高相对于对照处理,使小麦叶的 P 浓度分别降低 20.8%(P<0.001)(表 2)、增加 1.1%、1.4%和 2.3%,NN 处理下,分别降低 7.7%(P=0.035)、4.1%、增加 2.5%和 9.8%。在小麦拔节期、抽穗期和成熟期,CO₂ 浓度升高相对于对照处理,使茎的 P 浓度在 LN 处理下分别降低 5.8%、0.6%和增加 9.2%,NN 处理下分别降低 2.0%、增加 2.1%和 52.3%(P=0.005);穗的 P 浓度在 LN 处理下分别降低 2.2%、2.8%和增

加 12.7% ($P=0.032$), NN 处理分别降低 0.6%、增加 4.7%和 0.6%。在 LN 和 NN 处理,小麦叶、茎和穗的 P 浓度在成熟期最低,但是 CO₂ 浓度升高对 P 浓度增加的幅度最大。

CO₂ 浓度升高相对于对照处理,在 LN 处理下小麦对 P 的吸收在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期分别增加 19.5%、64.6% ($P=0.003$)、27.3%和 31.0% ($P=0.010$), NN 处理分别增加 0.5%、43.5% ($P=0.011$)、13.7%和 24.5% ($P=0.041$), 见图 1。小麦对 P 的吸收增加,而且 LN 处理,CO₂ 浓度升高使 P 吸收增加幅度较大,这可能与 LN 处理小麦生物量增加幅度大于 NN 处理^[13]有关。

2.2 CO₂ 浓度升高对小麦各部分 K 浓度及总体对 K 吸收的影响

相对于对照处理,CO₂ 浓度升高条件下,小麦 K 浓度变化趋势不明显(表 3)。在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期, LN 处理下叶的 K 浓度分别降低

10.4%、增加 4.6%、18.6%和降低 1.2%, NN 处理下分别降低 13.5%、增加 8.0%、10.0%和 3.6%;在小麦拔节期、抽穗期和成熟期,相对于对照处理,CO₂ 浓度升高使茎的 K 浓度在 LN 处理分别降低 11.2%、5.7%和增加 1.2%,在 NN 处理下分别降低 8.0%、增加 1.4%和降低 11.5%;穗的 K 浓度分别降低 11.2%、7.4%和 5.4%, NN 处理分别降低 3.3%、1.9%和增加 3.2%。CO₂ 浓度升高平均使小麦的 K 浓度在分蘖期地上部分降低 12.0%,在拔节期、抽穗期和成熟期,茎和穗的 K 浓度降低 1.2%~9.7%。

在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,CO₂ 浓度升高使小麦对 K 的吸收在 LN 处理下分别增加 24.8%、60.5% ($P=0.007$)、28.8%和 8.3%,在 NN 处理分别降低 5.4%、增加 45.3% ($P=0.027$)、33.3%和 25.1% ($P=0.079$), 见图 1。表 3 显示,CO₂ 浓度升高相对于对照处理,小麦在拔节期和抽穗期对 K 的吸收显著增加,那么长期以往,土壤中 K 的浓度会变的缺乏,所以作

表 2 CO₂ 浓度升高对不同施肥水平小麦各部位 P 浓度的影响(g·kg⁻¹)

Table 2 Effects of elevated CO₂ concentration on P concentration in winter wheat parts under different N levels (g·kg⁻¹)

采样时间	植株部位	F			A		
		LN	NN	Mean	LN	NN	Mean
128 d	苗	3.05±0.05	3.34±0.15	3.20±0.19	3.86±0.11	3.62±0.19	3.74±0.19
152 d	叶	3.45±0.24	3.21±0.27	3.33±0.26	3.41±0.08	3.35±0.01	3.38±0.06
	茎	2.01±0.18	2.19±0.11	2.10±0.17	2.14±0.03	2.23±0.04	2.18±0.06
	穗	3.51±0.48	3.83±0.62	3.67±0.53	3.59±0.25	3.85±0.50	3.72±0.38
171 d	叶	2.95±0.58	2.75±0.20	2.85±0.40	2.91±0.16	2.69±0.07	2.80±0.16
	茎	155±0.38	1.46±0.20	1.51±0.27	1.56±0.09	1.43±0.12	1.50±0.12
	穗	3.04±0.12	3.25±0.34	3.15±0.26	3.13±0.05	3.11±0.07	3.12±0.05
202 d	叶	1.05±0.04	1.08±0.11	1.07±0.08	1.03±0.06	0.98±0.03	1.01±0.05
	茎	0.55±0.06	0.79±0.14	0.67±0.16	0.51±0.04	0.52±0.06	0.51±0.05
	穗	3.30±0.11	2.96±0.22	3.13±0.25	2.93±0.11	2.94±0.23	2.94±0.16

注:F、A、LN 和 NN 分别表示高 CO₂ 浓度(elevated CO₂)、对照(ambient)、低氮和常规氮处理(以下同)。

表 3 CO₂ 浓度升高对不同施肥水平小麦各部位 K 浓度的影响(g·kg⁻¹)

Table 3 Effects of enriched CO₂ concentration on K concentration in winter wheat parts under different N levels(g·kg⁻¹)

采样时间	植株部位	F			A		
		LN	NN	Mean	LN	NN	Mean
128 d	苗	25.64±2.09	26.58±2.78	26.11±2.26	28.63±5.53	30.73±2.10	29.68±3.91
152 d	叶	22.68±2.18	20.47±3.43	21.57±2.84	21.69±3.41	18.95±1.96	20.32±2.90
	茎	18.84±1.60	18.14±0.38	18.49±1.11	21.21±2.73	19.72±1.05	20.47±2.02
	穗	14.27±1.44	15.63±1.29	14.95±1.43	16.07±0.93	16.15±0.81	16.11±0.78
171 d	叶	20.87±1.59	15.83±1.56	18.35±3.10	17.60±1.42	14.40±0.46	16.00±1.99
	茎	1280±1.64	12.33±1.05	12.57±1.26	13.57±0.91	12.17±0.93	12.87±1.12
	穗	7.93±0.42	8.40±0.36	8.17±0.43	8.57±0.40	8.57±0.42	8.57±0.37
202 d	叶	2.63±0.35	2.87±0.15	2.75±0.27	2.67±0.06	2.77±0.49	2.72±0.32
	茎	16.40±0.95	13.37±2.15	14.88±2.23	16.20±1.49	15.10±1.35	15.65±1.41
	穗	4.07±0.42	4.33±0.31	4.20±0.36	4.30±0.35	4.20±0.10	4.25±0.23

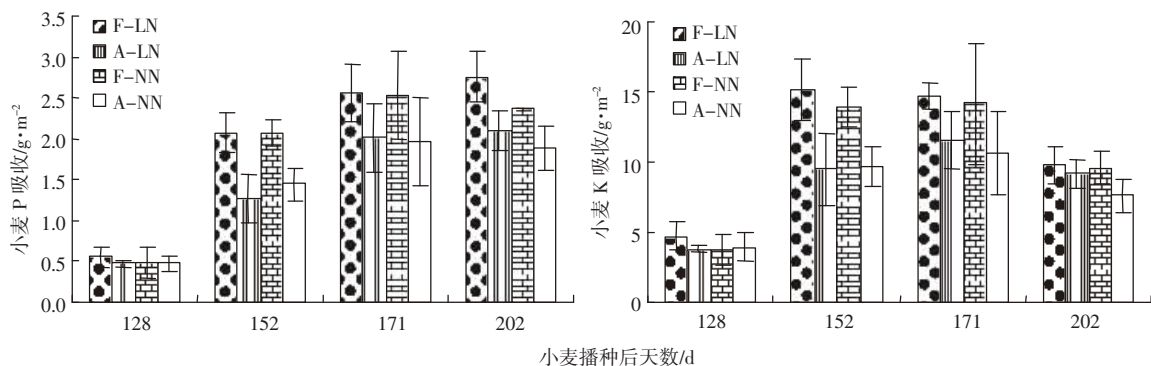


图1 在不同N水平下,CO₂浓度升高对小麦P、K吸收的影响

Figure 1 Effects of enriched CO₂ concentration on P and K uptake in winter wheat parts under different N levels.

F: FACE; A: Ambient; LN and NN mean low nitrogen (150 kg N·hm⁻²) and normal nitrogen (250 kg N·hm⁻²), respectively. (The same below.)

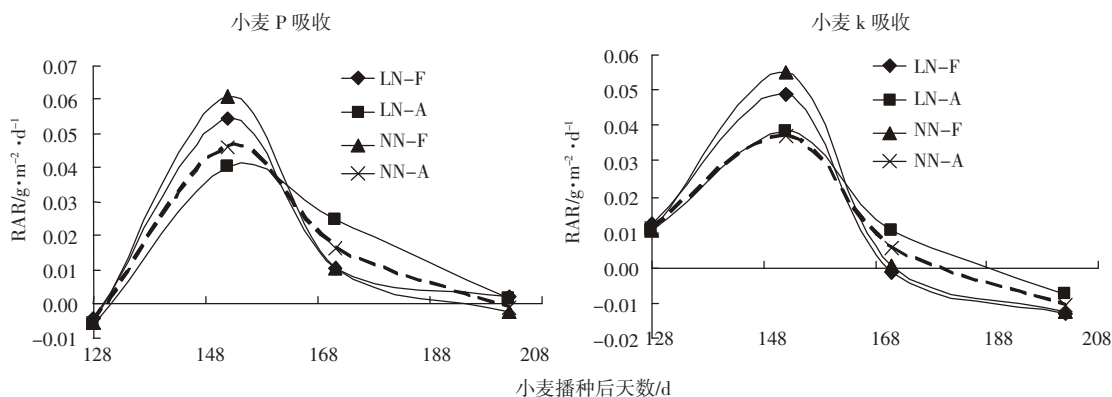


图2 在不同N水平下,CO₂浓度升高对小麦不同生长期P和K阶段性相对吸收速率(RAR)的影响

Figure 2 Elevated CO₂ concentration on relative absorb rate of P and K in different growth stages with winter wheat growing under different N levels

物生长期必须有适当的、平衡的营养供给。

2.3 CO₂浓度升高对养分阶段性吸收速率的影响

从图2可以看出,小麦对P、K的阶段性吸收速率如此相似,小麦对P、K的吸收速率出现先增加后降低的趋势。相对于对照处理,从分蘖期到拔节期,高CO₂浓度使小麦在LN和NN处理下对P的平均吸收速率分别升高33.9%和31.9%,对K的吸收速率分别升高27.0%和47.5%,它们是小麦吸收养分最快的时期。而且不论在FACE,还是在对照中,小麦对P的吸收速率都是在NN处理比LN处理大,但是同样从分蘖期到拔节期,小麦对K的吸收在LN处理较大。

在小麦拔节期到抽穗期,小麦对P和K的吸收速率都开始降低,总体上,在高CO₂浓度下降低程度最大(图2),在LN和NN处理下比对照分别降低55.9%和34.9%,115.4%和86.6%;甚至在成熟期,小麦没有再吸收K,而且还存在向外分泌的情况,高CO₂浓度更是促进了这种情况的发生。

2.4 CO₂浓度升高对小麦C:N和C:P比的影响

相对于对照处理,小麦各器官的C:N比在CO₂浓度升高条件下增加,而且LN处理增加幅度明显大于NN处理(图3和表4)。在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,叶的C:N比LN处理下分别增加34.0%、29.2%、23.6%和47.6%,NN处理下分别增加10.8%、10.4%、4.8%和降低3.6%;根的C:N比LN处理下分别增加20.5%、39.5%、88.0%和33.0%,NN处理下分别降低0.4%、增加6.7%、6.6%和2.3%。在小麦拔节期、抽穗期和成熟期,相对于对照处理,高CO₂浓度使茎的C:N比LN处理下分别增加56.0%、16.2%和80.1%,NN处理下分别增加25.4%、6.7%和降低13.3%;穗的C:N比LN处理下分别增加17.7%、12.2%和25.1%,NN处理下分别增加5.7%、5.5%和11.1%。表4显示,小麦叶和根的C:N比在LN处理显著增加,NN处理下没有达到显著水平,而且在成熟期小麦各部位的C:N比LN处理显著增加。

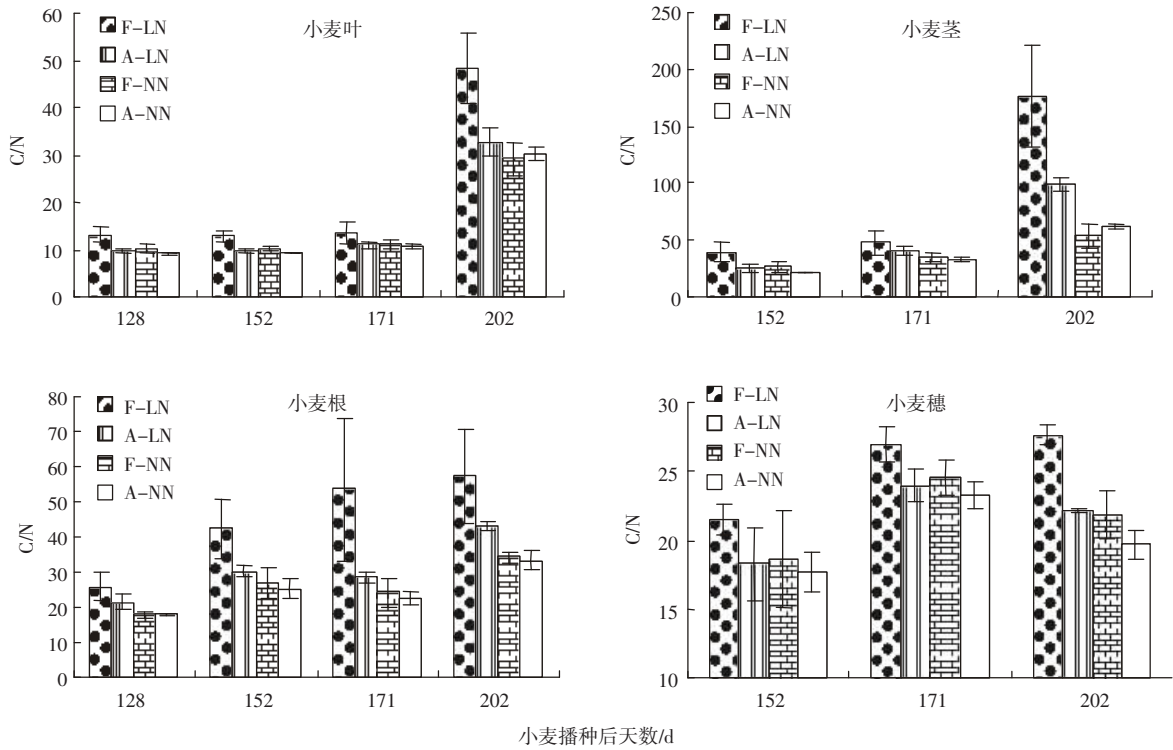


图3 在不同施肥水平下,CO₂ 浓度升高对麦 C:N 比的影响
Figure 3 Effects of CO₂ enrichment on C:N of winter wheat under different N levels

表 4 CO₂ 浓度升高对不同施肥处理小麦 C:N 和 C:P 影响的显著性检验

Table 4 Probability of treatment differences in C:N and C:P ratio in winter wheat treated with CO₂ elevated

采样时间	施肥	C:N				C:P		
		叶	茎	穗	根	叶	茎	穗
		PCO ₂						
128d	LN	0.003			0.056	0.000		
	NN	0.234			0.973	0.022		
152d	LN	0.002	0.012	0.133	0.022	0.884	0.139	0.747
	NN	0.159	0.253	0.618	0.701	0.283	0.594	0.977
171d	LN	0.040	0.231	0.016	0.000	0.981	0.751	0.446
	NN	0.644	0.709	0.218	0.584	0.868	0.934	0.459
202d	LN	0.002	0.003	0.000	0.037	0.814	0.350	0.046
	NN	0.768	0.670	0.039	0.894	0.164	0.006	0.969

参见图 4 和表 4,在小麦分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,LN 处理叶的 C:P 分别增加 26.4% ($P<0.001$)、降低 0.7%、增加 0.26%和降低 1.2%,NN 处理分别增加 9.6% ($P<0.05$)、5.4%、降低 1.3%和降低 7.5%;在小麦拔节期、抽穗期和成熟期,与对照比较, LN 处理茎 C:P 分别增加 7.3%、3.9%和降低 8.8%,NN 处理分别降低 2.5%、0.9%和 33.0%;LN 处理穗 C:P 分别增加 3.3%、3.4%和降低 11.5%,NN 处理分别增加 0.3%、降低 3.3%和 0.2%。NN 处理下,CO₂ 浓度升高更倾向于降低小麦叶和茎的 C:P 比;增加成熟期穗

的 C:P 比。

3 讨论

大气中 CO₂ 浓度升高促进作物的生长,作物在生物量增加的前提下必然需要相应增加对养分的需求,打破原来作物和土壤之间养分的供需关系,不但会影响到养分的量,而且很有可能会改变养分元素之间的协作或竞争平衡,重新调整作物和土壤的关系。在众多的养分元素中,氮素由于它的重要性,成为研究的首先考虑对象,有关的研究较多^[14],但是对于其他养

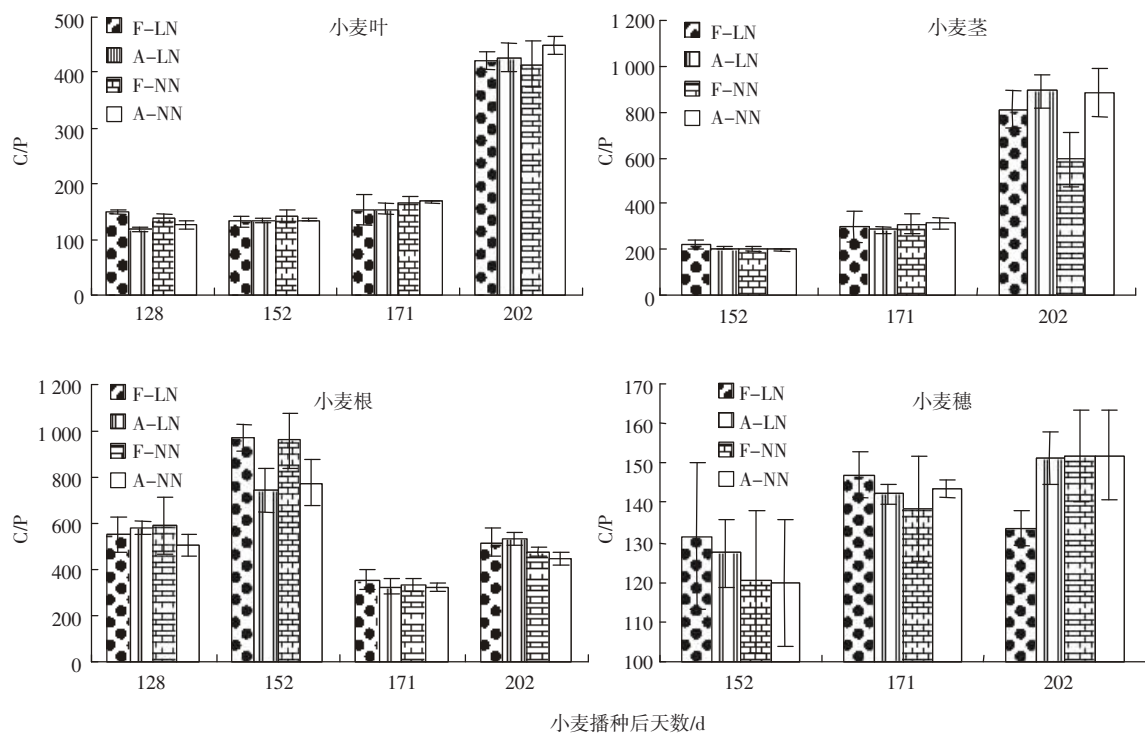


图4 在不同施肥水平下,CO₂浓度升高对麦C:P比的影响

Figure 4 Effects of CO₂ enrichment on C:P of winter wheat under different N levels

分元素的研究也是不可缺少的。目前就作物P、K响应CO₂浓度升高的研究比较少,本文在关于小麦P、K浓度和对其吸收的研究结果显示,CO₂浓度升高对小麦各器官P、K浓度在不同生长期的影响不同,与N的结果^[13]所不同的是,高CO₂浓度没有完全降低小麦P和K的浓度,比如在成熟期,它们是增加的。对于许多研究中讨论的N浓度降低的结果,有多种可能,但是本文的结果表明作物器官中的N浓度降低,稀释效应^[15]可能不是主要的原因,因为高CO₂浓度对小麦P、K浓度影响的结果证明如是。所以作物养分浓度的变化应该主要是作物自身代谢发生变化调节的,而这一点有多少可以解释试验结果,还有待深入研究。

作物对养分的吸收(需求)情况向来受到很高的重视,本研究结果显示,大气中CO₂浓度升高不同程度地显著增加了作物对P、K的吸收,在作物生物量增加的情况下,有这样的结果是可以理解的,那自然会增加对土壤养分的索取。相反,在CO₂浓度升高条件下土壤中矿物养分P、K的有效供给将影响作物对大气CO₂升高的响应,产生胁迫效应,就像Curtis^[16]提到的,养分的限制倾向于减弱CO₂对生物量的促进^[17],当然也就影响到作物对养分的吸收。CO₂浓度升高增加了小麦对P、K的吸收,不单是作物生物量增加的原因。根据Aben^[18]报道,在水稻快速生长的分蘖期,

CO₂浓度升高可能会改变水稻的营养生理。本文的试验结果也显示,在不同的生长期,无论是小麦不同部位P、K的浓度,还是小麦对他们的吸收,都有所不同,尤其是浓度的变化,表明在不同的时期,小麦响应高CO₂浓度的生理反应不同。因此在作物对养分吸收增加的表观之下,有着生理生化的机理在起作用,也许这方面的研究会更有意义。

由于作物的化学性质,比如木质素的含量、C:N、C:P比等,在CO₂浓度升高条件下的变化,将影响作物秸秆、根系等物质的去向,影响土壤环境和过程的发生和变化,很多研究把作物的化学性质作为研究的对象,用来间接研究C和N等养分的循环,了解CO₂浓度升高的影响。本文就小麦的C:N、C:P比进行了研究,发现CO₂浓度升高条件下小麦的C:N增加,尤其是根。这很可能会导致作物残体分解减缓,土壤中积累较多的C,也会影响土壤有机质分解、C和N循环以及矿化的方向^[19]。同时由于有机质矿化的减少,再加上作物生长吸收更多养分,土壤将面临养分短缺,进而遏制作物对高CO₂浓度的响应。分析认为小麦C:N比的增加主要是CO₂浓度升高引起N浓度降低^[13]的结果,因为C浓度变化不大(结果没有给出)。CO₂浓度升高使C:N增加,在不同N处理水平下的影响不同,在LN水平下小麦C:N比增加幅度较大。但是

CO₂ 浓度升高只是在分蘖期显著增加小麦 C:P 比,与李伏生等^[15]研究的结果一致,他们指出,CO₂ 浓度升高,冬小麦地上部分和根系的 C:P 比增加。由于在 CO₂ 浓度升高条件下对 C:P 比研究的不多或变化较大^[10],所以有关作物化学组成的变化还需继续观察。

参考文献:

[1] Sage R F, Coleman J R. Effects of low atmospheric CO₂ on plants: more than a thing of the past [J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(1):18–24.

[2] Mendelsohn R, Rosenberg N J. Framework for integrated assessments of global warming impacts [J]. *Climate Change*, 1994, 28:15–44.

[3] Mitchell J F B, Gregory J M. Climatic consequences of emissions and a comparison of IS92a and SA90[A].p.173–175.In J.T.Houghton et al.(ed) Climate Change[C]. The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge Univ. Press. Cambridge.UK. 1992.

[4] Rogers H H, Dahlman R C. Crop responses to CO₂ enrichment[J]. *Vegetatio*, 1993,104/105:117–131.

[5] Kleemola J, Peltonen J, Peltonen-sainio P. Apical development and growth of barley under different CO₂ and nitrogen regimes [J]. *J Agron Crop Sci*, 1994, 173: 79–92.

[6] Gloser V, Jezikova M, Luscher A, et al. Soil mineral nitrogen availability was unaffected by elevated atmospheric pCO₂ in a four year old field experiment (Swiss FACE) [J]. *Plant and Soil*, 2000, 227:291–299.

[7] 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.

[8] Walker R F, Geisinger D R, Johnson D W, et al. Enriched atmospheric CO₂ and soil P effects on growth and ectomycorrhizal colonization of juvenile ponderosa pine [J]. *Forest Ecology and Management*, 1995,78: 207–215.

[9] Cotrufo M F, Ineson P. Does elevated atmospheric CO₂ concentrations affect wood decomposition? [J]. *Plant and Soil*, 2000, 224:51–57.

[10] Gifford R M, Barrett D J, Lutze J L. The effects of elevated [CO₂] on the C:N and C:P mass ratios of plant tissues[J].*Plant and Soil*, 2000, 224:1–14.

[11] 刘 钢,韩 勇,朱建国,等. 稻麦轮作 FACE 系统平台 I .系统结构与控制[J].应用生态学报,2002,13(10):1253–1258.

[12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 2000.166–168.

[13] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等.开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和 N 吸收的影响[J].作物学报, 2005, 31(12):1634–1639.

[14] Luscher A, Hartwig U A, Suter D, et al. direct evidence that aymbiotic N₂ fixation is an important trait for a strong response of the plant to elevated atmospheric CO₂[J].*Global Change Boil*, 2000,6:655–662.

[15] 李伏生, 康绍忠. 不同氮和水分条件下 CO₂ 浓度升高对小麦碳氮比和碳磷比的影响[J].植物生态学报, 2002, 26(3):295–302.

[16] Curtis P S. A meta-analysis of leaf gas exchange and nitrogen in trees grown under elevated carbon-dioxide [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1996, 19:127–137.

[17] Mcguire A D, Melillo J M, Joyce L A. The role of nitrogen in the response of forest net primary production to elevated atmoosheric carbon dioxide [J]. *Annu Rev Ecol Syst*, 1995, 26:473–503.

[18] Aben S K, Seneweera S P, Ghannoum O. Nitrogen requirements for maximum growth and photosynthesis of rice, *Oryza sativa* L.cv.Jarrah growth at 36 and 70 Pa CO₂[J]. *Aust J Plant Physiol*, 1999, 26:759–766.

[19] Hart S C, Nason G E, Myrold D D, et al. Dynamics of gross nitrogen transformations in an old-growth forest: the carbon connection[J]. *Ecology*, 1994, 75:880–891.