

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2011.01465

CO₂ 浓度升高和施氮对冬小麦花前贮存碳氮转运的影响

许育彬^{1,3} 沈玉芳^{1,2} 李世清^{1,2,*}

¹ 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ² 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³ 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100

摘要: 为探讨大气 CO₂ 浓度升高对冬小麦花前贮存碳氮转运的影响及氮素营养的调节作用, 以小偃 22 和小偃 6 号为材料, 于 2007—2009 连续 2 个生长季, 利用开顶式气室进行盆栽试验, 对背景 CO₂ 浓度(375 μL L⁻¹)和高 CO₂ 浓度(2007—2008 年度 680 μL L⁻¹, 2008—2009 年度 750 μL L⁻¹)条件下不同施氮处理的干物质和氮素在籽粒、花前地上部中的累积以及花后营养器官的转运进行了评价。2007—2008 年度设 4 个施氮水平, 分别是 0、0.1、0.2 和 0.3 g kg⁻¹ 土; 2008—2009 年度设 3 个施氮水平, 分别是 0、0.15 和 0.30 g kg⁻¹ 土。结果表明, 施氮和 CO₂ 浓度升高促进了干物质和氮素在籽粒和花前营养器官的积累, 增加了花前营养器官和地上部贮存干物质和氮素向籽粒的转运量, 适量施氮提高了 CO₂ 浓度升高对花前营养器官干物质和氮素累积以及花后向籽粒转运的正向效应。与背景 CO₂ 浓度相比, 高 CO₂ 浓度提高了花前营养器官和地上部干物质对籽粒产量的贡献率和转运率, 但 CO₂ 浓度升高对花前氮素的贡献率和转运率的影响因年份和品种而异。CO₂ 浓度升高后, 2007—2008 年度各营养器官和地上部, 以及 2008—2009 年度茎鞘和穗的氮素贡献率和转运率均增加, 但 2008—2009 年度 2 个品种叶片和地上部氮素贡献率在施氮时均显著降低, 小偃 22 叶片和地上部氮素转运率在施氮水平下以及小偃 6 号地上部氮素转运率在 0.13 g kg⁻¹ 土施氮水平下均明显增加。适量施氮也在大多数情况下增强了 CO₂ 浓度升高对营养器官干物质和氮素的贡献率和转运率的正向效应。说明 CO₂ 浓度升高后小麦产量和氮素积累增加与其促进花前干物质和氮素积累及花后向籽粒的转运密切相关。

关键词: 冬小麦; CO₂ 浓度; 施氮; 产量; 物质积累和转运

Effect of Elevated CO₂ Concentration and Nitrogen Application on Translocation of Dry Matter and Nitrogen Restored before Anthesis in Winter Wheat

XU Yu-Bin^{1,3}, SHEN Yu-Fang^{1,2}, and LI Shi-Qing^{1,2,*}

¹ State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; ² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; ³ College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Either CO₂ enrichment or nitrogen (N) application has effects to increase grain yield, as well as dry matter and N accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). To understand the effects and interaction of both factors on dry matter and N restored before anthesis and translocated from vegetative organs into grains, we carried out a pot experiment across two cropping seasons using wheat cultivars Xiaoyan 22 (2007–2008) and Xiaoyan 22 and Xiaoyan 6 (2008–2009). Wheat cultivars were grown in open top chambers (OTCs) under conditions of ambient CO₂ concentration (AT, 375 μL L⁻¹) and elevated CO₂ concentration (ET, 680 μL L⁻¹ in 2007–2008 and 750 μL L⁻¹ in 2008–2009). N fertilizer was applied at levels of 0, 0.1, 0.2, and 0.3 g kg⁻¹ soil in 2007–2008 and 0, 0.15, and 0.30 g kg⁻¹ soil in 2008–2009. Accumulation and translation of dry matter and N in pre-anthesis

本研究由中央高校基本科研业务费专项(QN2009083)和陕西省自然科学基金项目(SJ08C104)资助。

* 通讯作者(Corresponding author): 李世清, E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn

第一作者联系方式: E-mail: xuyubin928@163.com

Received(收稿日期): 2010-12-01; Accepted(接受日期): 2011-04-27; Published online(网络出版日期): 2011-06-13.

vegetative organs (stem + sheath, leaf blade, and spike) and shoot in all treatments were measured. CO₂ enrichment and N nutrition improvement increased dry matter and N accumulation in grain and pre-anthesis vegetative organs, and translocation amounts of dry matter and N from vegetative organs and shoot into grains. The reasonable N application promoted the positive effects of CO₂ concentration on dry matter and N accumulation and translocation. Compared to AT, ET advanced the contribution and translocation rates of dry matter from vegetative organs and shoot into grains. The effects of CO₂ enrichment on the N contribution and translocation rates in vegetative organs and shoot were different among years and cultivars. Elevated CO₂ increased the N contribution and translocation rates in every vegetative organ and shoot in 2007–2008 cropping season and those in stem + sheath and spike in 2008–2009 cropping season. However, in 2008–2009 cropping season, elevated CO₂ reduced the N contribution rate in leaf blade and shoot of both cultivars under N levels of 0.15 and 0.30 g kg⁻¹. The N translocation rates of leaf blade and shoot were increased in Xiaoyan 22 under all N levels and only the N translocation rate of shoot was increased in Xiaoyan 6 under N level of 0.3 g kg⁻¹. The interaction between CO₂ concentration and N nutrition positively affected the contribution and translocation rates of dry matter and N in vegetative organs and pre-anthesis shoot in most cases. This result suggested that elevated CO₂ enhanced grain yield and N accumulation through promoting accumulation before anthesis and translocation after anthesis of dry matter and nitrogen in vegetative organs and shoot in some way.

Keywords: Winter wheat; CO₂ concentration; Nitrogen application; Grain yield; Matter accumulation and translocation

CO₂ 浓度影响小麦植株光合、生长、物质积累和产量。大气 CO₂ 浓度升高后, 小麦净光合速率增加^[1-6], 其中抽穗期增幅最大^[1], 光合午休现象消除^[2]。高 CO₂ 浓度下随着光合速率的提高, 小麦碳同化率增强^[7-8], 地上部生物量增加, 有利于产量形成和提高^[9-15]。CO₂ 浓度升高后, 小麦生物产量和籽粒产量的增加主要是日净同化率和光合有效辐射提高、灌浆前日光合有效辐射与温度的负相关性减弱的结果^[16]。FACE 试验结果^[14-15]进一步表明, CO₂ 浓度升高对小麦地上部生物量的促进效应主要表现在生育前、中期。CO₂ 浓度增加也抑制了小麦对 NO₃⁻ 的同化^[13,17], 降低了小麦植株不同器官氮含量, 影响氮吸收量^[17-22]。供氮不足时, CO₂ 浓度升高对小麦干物质积累、养分吸收和产量的影响较小^[14-15,22-29]。开花前贮存同化产物在花后向籽粒的转运是小麦产量形成的重要物质来源, 其中籽粒氮素大部分为花前氮素的再分配。然而, 目前的研究主要集中于 CO₂ 浓度对小麦产量、物质积累的影响, 针对 CO₂ 浓度升高后小麦花前同化产物转运及其对籽粒贡献变化的研究尚未见报道。本试验利用开顶式气室, 通过盆栽方法研究了不同施氮水平下大气 CO₂ 浓度升高对冬小麦花前贮存干物质和氮素花后转运的影响, 以进一步丰富大气 CO₂ 浓度升高对小麦产量形成和氮素积累的影响机制及氮素营养的调节作用。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2007—2009 年度连续 2 个生长季在中国科学院水土保持研究所进行盆栽试验, 供试品种 2007—2008 年度为小偃 22, 2008—2009 年度为小偃 6 号和小偃 22。供试土壤采自西北农林科技大学农作一站

大田, 为肥熟土垫旱耕人为土, 前茬为夏玉米, 含有机质 6.38 g kg⁻¹、全氮 0.86 g kg⁻¹、有效磷 2.97 mg kg⁻¹ 和速效钾 101.66 mg kg⁻¹, pH 8.16。土壤风干后, 过 5 mm 筛。2 年试验盆钵均用 PVC 管制成, 第一年盆高 30 cm, 直径 15 cm, 每盆装干土 1.8 kg; 第二年盆高 30 cm, 直径 20 cm, 每盆装风干土 3.7 kg。

1.2 试验装置

采用目前应用较为广泛的开顶式气室 (Open Top Chambers, OTCs) 装置。气室高 2.5 m, 横截面为正方形 (1.2 m × 1.2 m), 顶部开口 0.5 m × 0.5 m, 底部与空气压缩机和装有 CO₂ 的钢瓶相连, 不断输入空气和 CO₂, 在保证 CO₂ 气体稳定供应的同时, 通过增加气室内外空气交换速度, 以保证内外温度一致。通过 CO₂ 减压流量阀控制 CO₂ 输入基本流量; 通过 GXH-3010F 红外线气体分析仪 (北京市华云分析仪器研究所) 进行每天定时测定气室内实际 CO₂ 浓度。在气室内安装风扇, 以促进气室内 CO₂ 分布均匀。

1.3 试验设计

两年均于 10 月 21~23 日播种, 每盆播种冬小麦 10~12 粒, 三叶期间苗, 两年分别留苗 6 株和 8 株, 返青期前将各盆移入开顶式气室, 持续通入 CO₂ 气体, 直至成熟。设背景浓度 375 μL L⁻¹ 以及高 CO₂ 浓度 680 μL L⁻¹ (2007—2008 年度) 和 750 μL L⁻¹ (2008—2009 年度)。每个 CO₂ 浓度设 2 个气室。第一年设纯氮 0、0.1、0.2 和 0.3 g kg⁻¹ 土 4 个施氮水平, 第二年设纯氮 0、0.15 和 0.3 g kg⁻¹ 土 3 个施氮水平。每个施氮水平 16 盆, 随机均等放置于 4 个气室中。每盆均施 P₂O₅ 0.15 g kg⁻¹ 土和 K₂O 0.10 g kg⁻¹ 土, 氮磷钾肥均与风干土混匀装盆。适时浇水, 保持土壤湿润。

1.4 转运参数及其计算方法

在小麦开花期和成熟期每处理各取 4 盆测定植株各部分生物量和含氮量, 地上部按不同器官分开, 在 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干 24 h 后称干重。采用凯氏定氮法测定氮素含量。小麦收获后统计每盆产量及其构成因素。

干物质转运量(g pot⁻¹) = 开花期营养器官干物重(g pot⁻¹) - 成熟期营养器官干物重(g pot⁻¹);

干物质转运率(%) = (干物质转运量/开花期营养器官干物重) × 100%;

干物质对籽粒产量的贡献率(%) = (干物质转运量/籽粒产量) × 100%;

氮素累积量(mg pot⁻¹) = 器官氮素含量(%) × 器官干物重(g pot⁻¹) × 1000;

氮素转运量(mg pot⁻¹) = 开花期营养器官氮素累积量 - 成熟期营养器官氮素累积量;

氮素对籽粒氮素的贡献率(%) = (营养器官氮素转运量/籽粒氮素累积量) × 100%;

氮素转运率(%) = (营养器官氮素转运量/开花期营养器官氮素累积量) × 100%。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 DPS3.01 进行整理和统计分析试验数据, 显著性测验按照随机区组进行。

2 结果与分析

2.1 小麦籽粒、花前地上部干物质和氮素积累

两年的试验结果(表 1)表明, 施氮水平、CO₂ 浓度及二者互作对 2 个小麦品种籽粒和花前地上部干物质积累量均有显著的影响(P<0.05); 除 2007—2008 年度籽粒外, 对籽粒和花前地上部氮素累积量影响也均达到显著水平。2007—2008 年度籽粒氮素累积量只受到施氮水平显著影响。在 2 个 CO₂ 浓度水平下, 小麦籽粒和花前地上部干物质和氮素积累量均随施氮水平的提高而增加。在不施氮条件下, 小麦籽粒和花前地上部干物质和氮素积累量, 与背景 CO₂ 浓度(AT)处理相比, 高 CO₂ 浓度(ET)处理差异不显著或显著降低, 而在施氮水平下 ET 处理均高于 AT 处理, 且多数达到显著水平, 尤其是在最高施氮水平(0.3 g kg⁻¹ 土)下除 2007 年籽粒氮素累积量外, 2 个 CO₂ 浓度处理间差异均显著。说明 CO₂ 浓度升高对干物质和氮素在籽粒和花前地上部的累积有明显促进效应, 且提高施氮水平可增强这种效应。

2.2 小麦花前贮存干物质和氮素的转运

2.2.1 干物质和氮素转运量 2 个 CO₂ 浓度下, 2 个小麦品种茎鞘、叶片、穗以及地上部花前贮存的干物质和氮素在花后向籽粒的转运量均随施氮水平的提高呈增加或先增后减的趋势。与 AT 处理相比, 在不施氮条件下, ET 处理各营养器官和地上部干物

表 1 施氮和 CO₂ 浓度升高对小麦籽粒和花前地上部干物质及氮素累积的影响

Table 1 Effects of N application and elevated CO₂ concentration on dry matter and N accumulation in grain and pre-anthesis vegetative organs of winter wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	籽粒产量 GY (g pot ⁻¹)		籽粒氮素 NAG (mg pot ⁻¹)		地上部干物质 DMS (g pot ⁻¹)		地上部氮素 NAS (mg pot ⁻¹)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007-2008									
小偃 22	0	2.5 d	2.4 d	60.9 d	53.8 d	3.9 g	3.9 g	51.3 g	54.4 g
Xiaoyan 22	0.1	4.6 cd	7.7 b	139.7 cd	190.2 cd	3.9 g	4.0 g	151.3 f	194.8 e
	0.2	7.5 bc	12.2 a	354.9 ab	444.6 a	8.4 f	11.7 c	292.7 d	388.0 b
	0.3	4.8 bcd	10.6 a	248.6 bc	426.3 a	10.7 e	15.2 b	338.8 b	497.7 a
2008-2009									
小偃 6 号	0	5.6 c	4.9 c	131.5 d	94.8 d	8.7 e	7.5 f	111.7 d	84.8 d
Xiaoyan 6	0.15	9.5 b	18.0 a	366.8 c	459.6 b	16.9 d	26.4 b	397.0 c	482.9 b
	0.3	11.6 b	19.0 a	408.7 bc	608.4 a	19.5 c	28.9 a	467.8 b	605.2 a
小偃 22	0	8.6 c	5.9 c	165.6 c	102.4 c	9.6 d	10.0 d	107.2 e	99.5 e
Xiaoyan 22	0.15	14.1 b	21.9 a	447.9 b	468.4 b	19.0 c	27.6 b	428.6 c	386.4 d
	0.3	13.3 b	25.5 a	404.5 b	728.7 a	19.0 c	29.4 a	456.8 b	552.8 a

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异(P<0.05)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at P < 0.05 among treatments within the same cultivar and cropping year. GY: grain yield; NAG: nitrogen accumulation in grain; DMS: dry matter accumulation in shoot; NAS: N accumulation in shoot.

质和氮素转运量变化不明显或显著降低; 在施氮条件下, ET 处理均高于 AT 处理, 且 2 个 CO₂ 浓度处理间多数情况下差异达到显著水平, 尤其是在最高施氮水平(0.3 g kg⁻¹ 土)下差异均显著。各营养器官、地上部干物质和氮素转运量 ET 处理的平均值均相对于 AT 处理增加, 其中小偃 22 地上部干物质增幅

两年分别为 98.6%和 95.8%, 氮素转运量增幅分别为 77.4%和 19.0%; 小偃 6 号地上部干物质和氮素转运量增幅分别为 78.2%和 13.8% (表 2 和表 3)。说明增施氮肥和 CO₂ 浓度升高均可促进小麦地上部花前贮存干物质和氮素在花后向籽粒的转运, 氮素营养的改善有助于增强 CO₂ 浓度升高的效应。

表 2 施氮和 CO₂ 浓度升高对小麦地上部花前贮存干物质转运量的影响

Table 2 Effects of N application and elevated CO₂ concentration on translocation of dry matter in vegetative organs of winter wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	茎鞘 Stem and sheath (g kg ⁻¹)		叶片 Leaf blade (g kg ⁻¹)		穗 Spike (g kg ⁻¹)		地上部 Shoot (g kg ⁻¹)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007-2008									
小偃 22 Xiaoyan 22	0	0.2 cd	0.2 d	0.2 g	0.2 g	0.0 f	0.0 f	0.4 e	0.4 e
	0.1	0.6 bcd	1.1 b	0.5 f	0.8 c	0.1 e	0.2 d	1.2 d	2.1 c
	0.2	1.8 a	2.3 a	0.8 d	1.5 b	0.2 d	0.4 b	2.8 b	4.2 a
	0.3	0.8 bc	2.2 a	0.6 e	1.5 a	0.3 c	0.7 a	1.7 cd	4.4 a
2008-2009									
小偃 6 号 Xiaoyan 6	0	0.5 e	0.4 e	0.3 e	0.2 f	0.1 d	0.1 d	1.0 e	0.8 f
	0.15	1.6 d	3.5 b	0.7 d	2.0 b	0.3 c	1.1 a	2.5 d	6.5 b
	0.3	2.2 c	3.9 a	1.7 c	2.1 a	0.5 b	1.0 a	4.4 c	6.9 a
小偃 22 Xiaoyan 22	0	0.9 e	0.6 f	0.6 e	0.6 e	0.1 d	0.0 e	1.5 e	1.3 f
	0.15	2.0 d	3.6 b	0.8 d	2.2 b	0.4 c	0.7 b	3.2 d	6.5 b
	0.3	2.6 c	5.4 a	1.4 c	2.6 a	0.4 c	1.0 a	4.4 c	9.1 a

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ among treatments within the same cultivar and cropping year.

表 3 施氮和大气 CO₂ 浓度升高对小麦地上部花前贮存氮素转运量的影响

Table 3 Effect of N application and elevated CO₂ concentration on translocation of N in vegetative organs of winter wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	茎鞘 Stem and sheath (mg kg ⁻¹)		叶片 Leaf blade (mg kg ⁻¹)		穗 Spike (mg kg ⁻¹)		地上部 Shoot (mg kg ⁻¹)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007-2008									
小偃 22 Xiaoyan 22	0	10.7 d	13.1 d	13.2 d	13.7 d	4.7 d	4.4 d	28.6 d	31.2 d
	0.1	33.8 cd	50.3 bc	35.2 cd	49.8 bc	12.4 cd	21.2 b	81.4 c	121.3 bc
	0.2	72.0 b	113.2 a	70.8 b	115.0 a	18.7 bc	48.7 a	161.4 b	277.0 a
	0.3	58.3 bc	124.4 a	59.9 bc	121.0 a	17.6 bc	47.5 a	135.8 b	292.8 a
2008-2009									
小偃 6 号 Xiaoyan 6	0	27.7 d	29.4 d	38.1 d	19.0 e	2.4 d	3.0 d	68.1 e	51.4 f
	0.15	120.6 b	144.3 a	168.4 a	137.6 bc	2.8 d	31.1 a	291.8 c	313.1 a
	0.3	80.0 c	145.2 a	136.8 c	139.8 b	6.0 c	13.4 b	222.8 d	298.4 b
小偃 22 Xiaoyan 22	0	23.0 d	22.6 d	25.7 e	27.3 e	3.8 e	2.6 f	52.5 c	52.5 c
	0.15	92.3 c	106.3 b	139.4 b	115.1 d	12.3 c	21.7 b	244.0 b	243.1 b
	0.3	96.9 c	151.8 a	134.0 c	169.7 a	10.9 d	23.5 a	241.7 b	345.0 a

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ among treatments within the same cultivar and cropping year.

2.2.2 干物质和氮素转运贡献率 在相同 CO₂ 浓度下, 随施氮水平的提高, 2 个小麦品种茎鞘、叶片、穗以及地上部花前贮存的干物质贡献率的变化趋势与转运量基本一致。在不施氮时, 小麦各营养器官贡献率多数情况下 ET 处理与 AT 处理差异不显著; 施氮时, 除 2007—2008 年度小偃 22 的茎鞘贡献率在 0.2 g kg⁻¹ 和 0.3 g kg⁻¹ 施氮水平、2008—2009 年度小偃 22 和小偃 6 号的叶片贡献率在 0.3 g kg⁻¹ 施氮水平下 ET 处理低于 AT 处理外, 其他情况下各营养器官贡献率均为 ET 处理高于 AT 处理, 且差异多数达到显著水平。从地上部总贡献率来看, 小偃 22 在不同施氮水平下均表现为 ET 处理高于 AT 处理; 而小偃 6 号 ET 处理在 0 和 0.15 g kg⁻¹ 施氮水平下显著高于 AT 处理, 在 0.3 g kg⁻¹ 施氮水平下显著低于 AT 处理。从 2 个 CO₂ 浓度的平均值来看, 除 2007—2008 年度小偃 22 的茎鞘和 2008—2009 年小偃 6 号的叶片平均贡献率 ET 处理低于 AT 处理外, 其他情况下各营养器官和地上部贡献率均表现为 ET 处理高于 AT 处理, 其中小偃 22 地上部干物质平均贡献率两年增幅分别为 2.3 和 5.6 个百分点, 小偃 6 号增幅为 1.8 个百分点, 差异均显著(表 4)。说明适当施氮条件下 CO₂ 浓度升高可提高小麦营养器官和地上部花前贮存干物质的贡献率。

在相同 CO₂ 浓度下, 小麦各营养器官和地上部

花前贮存氮素的转运对籽粒氮素累积的贡献率大多数情况下表现为施氮处理显著高于不施氮处理, 施氮处理间差异表现不一致。与 AT 处理相比, 2007—2008 年度 ET 处理小偃 22 各营养器官以及地上部的氮素贡献率平均值均增加; 2008—2009 年度 2 个品种茎鞘和穗平均值均增加, 但 2 个品种叶片和小偃 6 号地上部氮素贡献率却下降, 其中小偃 22 地上部氮素贡献率增幅两年分别为 13.8 和 1.5 个百分点, 小偃 6 号降低 4.8 个百分点。2007—2008 年度, 在不同施氮水平下, 小偃 22 除穗氮素贡献率在 2 个 CO₂ 浓度处理间差异不显著外, 茎鞘、叶片以及地上部氮素贡献率均表现为 ET 处理高于 AT 处理, 且差异多数达到显著水平, 其中地上部增幅为 6.8~17.2 个百分点, 以 0.2 g kg⁻¹ 施氮水平增幅最大。2008—2009 年度, 小偃 22 叶片的氮素贡献率在不施氮时, ET 处理相对 AT 处理显著增加, 在其他施氮水平下均表现为显著下降, 而小偃 6 号叶片在各施氮水平下均表现为 ET 处理显著低于 AT 处理; 2 个品种其他营养器官和地上部的氮素贡献率在不施氮时 ET 处理均显著高于 AT 处理, 在施氮时茎鞘和穗 ET 处理大多高于 AT 处理, 而地上部则显著低于 AT 处理(表 5)。说明适当施氮和 CO₂ 浓度升高可提高小麦茎鞘和穗花前贮存氮素转运对籽粒氮素累积的贡献率, 但在年份和品种间结果有所不同。

表 4 施氮和 CO₂ 浓度升高对小麦地上部花前贮存干物质转运贡献率的影响
Table 4 Effect of N application and elevated CO₂ concentration on contribution rate of dry matter translocated from vegetative organs into grain of winter wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	茎鞘 Stem and sheath (%)		叶片 Leaf blade (%)		穗 Spike (%)		地上部 Shoot (%)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007—2008									
小偃 22 Xiaoyan 22	0	9.8 f	9.3 f	7.4 f	10.7 cd	1.7 f	1.2 g	18.9 h	21.4 g
	0.1	13.6 e	16.2 d	10.0 cd	11.3 c	2.1 e	2.9 d	25.7 f	30.4 e
	0.2	23.1 a	18.9 c	10.6 cd	12.4 b	3.2 c	3.6 b	34.8 d	36.8 c
	0.3	22.1 a	20.9 b	9.4 e	14.5 a	7.4 a	7.4 a	38.8 b	42.8 a
2008—2009									
小偃 6 号 Xiaoyan 6	0	9.2 c	8.9 c	6.1 d	4.0 e	2.4 d	2.5 d	17.7 e	15.5 d
	0.15	16.9 b	19.5 a	7.1 c	10.9 b	2.7 d	5.8 a	26.8 c	36.2 b
	0.3	19.3 a	20.5 a	14.4 a	10.8 b	4.7 c	5.3 b	38.4 a	36.6 b
小偃 22 Xiaoyan 22	0	10.5 e	10.2 e	5.8 d	9.9 b	0.9 d	0.7 d	17.8 f	21.4 d
	0.15	13.8 d	16.5 c	6.4 c	10.6 a	3.1 c	3.2 c	19.3 e	29.5 c
	0.3	19.6 b	21.3 a	10.5 a	10.3 ab	3.4 b	4.1 a	33.5 b	35.6 a

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ among treatments within the same cultivar and cropping year.

表 5 施氮和 CO₂ 浓度升高对小麦地上部花前贮存氮素转运贡献率的影响Table 5 Effect of N application and elevated CO₂ concentration on contribution rate of N translocated from vegetative organs into grain of winter wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	茎鞘 Stem and sheath (%)		叶片 Leaf blade (%)		穗 Spike (%)		地上部 Shoot (%)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007-2008									
小偃 22 Xiaoyan 22	0	17.3 f	24.8 cd	22.4 f	25.9 cd	8.2 a	8.2 a	47.9 c	58.9 b
	0.1	25.2 cd	27.4 b	25.4 d	27.4 b	3.6 a	11.6 a	59.6 b	66.4 b
	0.2	20.2 e	25.8 c	19.9 g	26.3 c	5.3 a	11.1 a	45.4 c	63.2 b
	0.3	24.1 d	32.9 a	23.8 e	30.8 a	9.2 a	13.0 a	57.1 b	76.7 a
2008-2009									
小偃 6 号 Xiaoyan 6	0	21.1 d	31.0 b	29.0 c	20.0 e	1.8 d	3.2 b	51.8 d	54.2 c
	0.15	32.9 a	31.4 b	45.9 a	29.9 c	0.8 f	6.8 a	79.6 a	68.1 b
	0.3	19.6 e	23.9 c	33.5 b	23.0 d	1.5 e	2.2 c	54.5 c	49.1 e
小偃 22 Xiaoyan 22	0	13.9 e	22.1 bc	15.5 f	26.7 c	2.3 e	2.5 d	31.7 e	51.3 c
	0.15	20.6 d	22.7 ab	31.1 b	24.6 d	2.7 c	4.6 a	54.5 b	51.9 c
	0.3	24.0 a	20.8 cd	33.1 a	23.3 e	2.7 cd	3.2 b	59.8 a	47.4 d

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ among treatments within the same cultivar and cropping year.

2.2.3 干物质和氮素转运率 2 个 CO₂ 浓度下, 小麦营养器官和地上部花前干物质转运率大多数情况下随施氮水平的提高呈增加或先增后减趋势。从不同施氮水平来看, 除 2008—2009 年度不施氮的小偃 22 叶片外, 2 个品种各营养器官和地上部转运率 ET 处理都与 AT 处理没有显著差异, 而在施氮条件下 ET 处理均高于 AT 处理, 且差异大多数达到显著

水平, 其中小偃 22 地上部两年均在 0.3 g kg⁻¹ 施氮水平下增幅最大(分别为 8.7 和 7.5 个百分点), 而小偃 6 号在 0.15 g kg⁻¹ 施氮水平下增幅最大(9.8 个百分点)。对 2 个 CO₂ 浓度下各营养器官和地上部转运率, ET 处理平均值均高于 AT 处理, 其中小偃 22 地上部平均增幅 2 年分别为 4.3 和 3.7 个百分点, 小偃 6 号则平均增加 3.1 个百分点(表 6)。表明适量施氮

表 6 施氮和 CO₂ 浓度升高对小麦地上部花前贮存干物质转运率的影响Table 6 Effect of N application and elevated CO₂ concentration on translocation rate of dry matter accumulated in pre-anthesis vegetative organs of winter wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	茎鞘 Stem and sheath (%)		叶片 Leaf blade (%)		穗 Spike (%)		地上部 Shoot (%)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007-2008									
小偃 22 Xiaoyan 22	0	9.6 g	7.3 h	17.4 f	16.1 g	3.4 d	9.0 bcd	10.6 f	8.7 g
	0.1	13.5 f	19.0 d	21.0 e	25.3 c	6.1 cd	7.2 cd	14.0 e	18.1 d
	0.2	22.2 c	30.0 a	22.8 d	29.3 a	13.8 bc	16.0 ab	21.2 c	27.6 a
	0.3	17.5 e	23.6 b	13.6 h	26.1 b	13.8 bc	21.5 a	15.4 e	24.1 b
2008-2009									
小偃 6 号 Xiaoyan 6	0	10.1 d	8.8 e	13.9 c	12.2 d	14.6 c	13.8 c	11.7 d	10.1 e
	0.15	18.3 c	24.2 a	11.4 d	25.2 a	11.7 d	25.6 a	15.0 c	24.8 a
	0.3	21.6 b	24.5 a	24.9 a	23.2 b	22.1 b	24.0 a	22.8 b	24.0 a
小偃 22 Xiaoyan 22	0	14.7 e	9.3 f	20.9 d	23.8 c	8.8 c	4.7 d	15.9 d	12.8 e
	0.15	21.2 d	23.5 c	11.4 e	26.1 b	17.7 b	17.8 b	16.9 c	23.5 b
	0.3	26.8 b	34.8 a	20.4 d	27.8 a	18.4 b	23.6 a	23.4 b	30.9 a

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ among treatments within the same cultivar and cropping year.

和 CO₂ 浓度增加均可提高小麦营养器官和地上部花前干物质的转运率, 有利于籽粒干物质积累。

各营养器官和地上部花前贮存氮素转运率, 除 2008—2009 年度小偃 6 号叶片在 ET 处理、穗在 AT 处理以及小偃 22 叶片在 ET 处理中随施氮水平的提高而下降外, 其他情况下均表现为施氮处理高于不施氮处理。与 AT 处理相比, ET 处理除 2007—2008 年度不施氮时小偃 22 叶片和 2008—2009 年度小偃 22 穗的氮素转运率显著下降外, 其他情况下 ET 处理的各营养器官和地上部的氮素转运率均高于 AT 处理, 且多数差异显著, 其中地上部增幅两年均在 0.3 g kg⁻¹ 氮水平下最大, 达 18.8 和 9.6 个百分点; 小偃 6 号叶片氮素转运率在不同施氮水平下均表现为

ET 处理低于 AT 处理, 且在施氮条件下差异显著, 茎鞘和穗在各施氮水平下均为 ET 处理显著高于 AT 处理, 地上部也仅在 0.3 g kg⁻¹ 氮水平下 ET 处理显著高于 AT 处理。对 2 个 CO₂ 浓度的转运率平均, ET 处理小偃 22 营养器官和地上部的氮素转运率均高于 AT 处理; ET 处理小偃 6 号茎鞘和穗的氮素转运率高于 AT 处理, 而叶片和地上部 ET 处理却低于 AT 处理。ET 处理的地上部转运率小偃 22 平均增幅两年分别为 11.2 和 6.4 个百分点, 小偃 6 号的平均降幅 2.46 个百分点(表 7)。说明适量施氮和 CO₂ 浓度升高均可提高小麦营养器官花前氮素的转运率, 有利于花后氮素在籽粒中累积, 施氮比较有利于小偃 22 对 CO₂ 浓度升高的正向反应。

表 7 施氮和 CO₂ 浓度升高对小麦地上部花前贮存氮素转运率的影响

Table 7 Effect of nitrogen application and elevated CO₂ concentration on translocation rate of N accumulated in pre-anthesis vegetative organs of wheat

品种 Variety	施氮水平 N level (g kg ⁻¹)	茎鞘 Stem and sheath (%)		叶片 Leaf blade (%)		穗 Spike (%)		地上部 Shoot (%)	
		AT	ET	AT	ET	AT	ET	AT	ET
2007—2008									
小偃 22 Xiaoyan 22	0	53.6 d	61.4 c	56.0 b	52.7 c	58.0 c	60.9 bc	55.7 de	57.1 cd
	0.1	60.7 c	72.9 b	47.1 d	50.0 c	58.8 c	63.6 b	53.8 e	62.2 b
	0.2	54.8 d	79.1 a	56.8 b	63.6 a	50.6 d	75.8 a	55.2 de	71.4 a
	0.3	46.2 e	59.7 c	34.7 e	57.1 b	42.8 e	60.8 bc	40.0 f	58.8 c
2008—2009									
小偃 6 号 Xiaoyan 6	0	54.1 d	58.4 c	73.6 b	70.3 b	27.3 c	40.8 b	61.0 c	60.6 c
	0.15	69.8 b	77.7 a	80.6 a	64.2 c	8.6 f	50.4 a	73.5 a	64.8 b
	0.3	42.8 e	55.0 d	56.7 d	50.9 e	15.3 e	20.1 d	47.6 e	49.3 d
小偃 22 Xiaoyan 22	0	44.0 d	45.1 d	55.5 e	64.6 b	44.5 b	35.9 c	49.0 d	52.7 c
	0.15	55.9 b	61.0 a	61.3 c	68.4 a	34.1 c	49.5 a	56.9 b	62.9 a
	0.3	52.0 c	61.4 a	58.0 d	68.0 a	26.9 d	42.0 b	52.8 c	62.4 a

AT 和 ET 分别表示背景和高 CO₂ 浓度处理。数据后不同字母表示同一年度、同一品种内两种 CO₂ 条件下各处理有显著差异 ($P < 0.05$)。

AT and ET denote the treatments with ambient and elevated CO₂ concentrations, respectively. Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ among treatments within the same cultivar and cropping year.

3 讨论

干物质和氮素积累是小麦产量和品质形成的物质基础。本研究表明, CO₂ 浓度升高对干物质和氮素在籽粒和花前地上部的累积有明显促进效应, 提高施氮水平可增强这种效应。这与前人有关干物质积累的研究结果^[9,14-15,23-29]基本一致。本研究对氮素积累的试验结果与 FACE 条件下获得的结果相符^[22,30], 而有别于李伏生和康绍忠^[21]在人工气候室条件下春

小麦对氮素吸收减少的结论, 推测可能与试验条件和小麦材料不同有关。另外, 本研究中小偃 22 籽粒产量和开花期地上部干物重的 2 年结果存在差异, 这主要是 2007—2008 年冬季持续降雪和早春降雨天气较多, 气温较低, 小麦返青晚于正常年份, 单株分蘖也明显偏少, 影响了干物质积累和产量。

开花前营养器官贮存物质的转运是小麦籽粒产量和氮素累积的重要来源。有研究认为, CO₂ 浓度升高对小麦干物质累积的促进效应主要表现在开花

前^[14-15], 因此籽粒形成过程中可能有更多的开花前贮存物质再分配到籽粒中, 尤其是在氮素转运很大程度上取决于干物质质量、CO₂ 浓度上升又引起植株氮素含量下降^[17-22]的情况下。本研究结果表明, CO₂ 浓度升高明显增加了小麦花前营养器官干物质和氮素向籽粒的转运量, 提高营养器官以及地上部干物质的贡献率和转运率, 但 CO₂ 浓度升高对花前氮素的贡献率和转运率的影响因年份和品种而异。与背景 CO₂ 浓度相比, 高 CO₂ 浓度下, 氮素贡献率在 2007—2008 年度各营养器官及地上部平均值均增加, 2008—2009 年度 2 个品种虽然茎鞘和穗平均值均提高, 但小偃 6 号叶片在各施氮水平下均显著下降, 小偃 22 叶片以及 2 个品种地上部在不施氮时增加, 施氮时均下降。两年试验中, 氮素转运率在小偃 22 的各营养器官以及地上部均呈现高 CO₂ 浓度下较背景 CO₂ 浓度下增加, 而在小偃 6 号中, 仅茎鞘和穗的氮素转运率增加, 叶片和地上部均下降。叶片是重要的氮素储存器官, 其对地上部在花后的转运起决定性作用。氮素贡献率和转运率在年份间的差异可能与两年的气温和光照影响了小麦生长有关, 品种间的差异可能与对氮素利用能力不同(小偃 22 对氮素利用效率高于小偃 6 号)有关。本试验结果也表明, 适当施氮有利于 CO₂ 浓度升高对干物质和氮素转运的正向效应。这一结果为上述推测提供了试验证据, 也说明 CO₂ 浓度升高后籽粒产量和氮素累积量的增加与其促进花前营养器官贮存物质在花后的转运密切相关。CO₂ 浓度升高对小麦干物质转运的影响可能与源库关系变化有关。Sild 等^[31]研究发现, CO₂ 浓度升高后, 小麦叶片水溶性糖、果聚糖和非结构糖含量在开花前明显增加, 开花后这些糖类物质含量下降时间早于背景 CO₂ 浓度, 说明 CO₂ 浓度升高导致叶片提前衰老。Zhu 等^[32]认为, 高 CO₂ 浓度导致小麦穗碳库受限, 使糖分含量、己糖激酶活性和糖磷酸化水平提高, 而籽粒氮库容增加, 籽粒对旗叶氮的需求要高于对碳的需求, 加快了旗叶氮在生育后期向籽粒的再动员, 促进旗叶衰老。由于高 CO₂ 浓度对穗光合促进效应大于旗叶, 因此较高的穗光合会进一步促进旗叶衰老。因此, 在衰老的加快情况下, 叶片作为主要源器官, 在生育后期光合产物累积以及对籽粒的贡献就会相对减少, 营养器官花前贮存物质的转运水平也就相对增加。施氮与 CO₂ 浓度对物质转运产生互作效应的原因可能是施氮对库能力有调节作用^[28], 促进高 CO₂ 浓度下物质

积累, 并提高了物质再分配过程贮存物质的转化和输出水平, 其具体机理有待进一步研究。

4 结论

施氮和 CO₂ 浓度升高可促进干物质和氮素在小麦籽粒和花前地上部的累积, 增加地上部花前贮存干物质和氮素在花后向籽粒的转运量, 提高花前营养器官和地上部干物质对籽粒产量的贡献率和转运率, 但 CO₂ 浓度升高对花前氮素的贡献率和转运率的影响因年份和品种而异。通过施氮可调控 CO₂ 浓度升高对花前营养器官干物质和氮素累积以及花后向籽粒转运的效应。

References

- [1] Wang X-L(王修兰), Xu S-H(徐师华), Li Y-X(李祥), Cui D-C(崔读昌). Physiological reaction of wheat to doubling CO₂ concentration. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1996, 22(3): 340-344 (in Chinese with English abstract)
- [2] Jiang Y-L(蒋跃林), Zhang G-Q(张庆国), Zhang S-D(张仕定), Wang G-M(王公明), Yue W(岳伟), Yao Y-G(姚玉刚). Responses of photosynthetic characteristics, stomatal conductance and transpiration of wheat to the increase of atmospheric CO₂ concentration. *J Anhui Agric Univ* (安徽农业大学学报), 2005, 32(2): 169-173 (in Chinese with English abstract)
- [3] Kang S-Z(康绍忠), Zhang F-C(张富仓), Liang Y-L(梁银丽), Ma Q-L(马清林), Hu X-T(胡笑涛). Effects of soil water and the atmospheric CO₂ concentration increase on evapotranspiration, photosynthesis, growth of wheat, maize and cotton. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1999, 25(1): 55-63 (in Chinese with English abstract)
- [4] Wang J(王静), Feng Y-Z(冯永忠), Yang G-H(杨改河), Ding R-X(丁瑞霞). Responses of wheat photosynthetic characteristics to the increase of CO₂ concentration. *Agric Res Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2009, 27(3): 179-183 (in Chinese with English abstract)
- [5] Chen X(陈雄), Wu D-X(吴冬秀), Wang G-X(王根轩), Ren H-X(任红旭). Effect of elevated CO₂ concentration on photosynthesis and antioxidative enzyme activities of wheat plant grown under drought condition. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2006, 17(6): 881-884 (in Chinese with English abstract)
- [6] Li F-S(李伏生), Kang S-Z(康绍忠), Zhang F-C(张富仓). Effects of CO₂ enrichment, nitrogen and water on photosynthesis, evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2003, 14(3): 387-393 (in Chinese)

- with English abstract)
- [7] Dempster W F, Nelson M, Silverstone S, Allen, J P. Carbon dioxide dynamics of combined crops of wheat, cowpea, pinto beans in the laboratory biosphere closed ecological system. *Adv Space Res*, 2009, 43: 1229–1235
- [8] Li F-S(李伏生), Kang S-Z(康绍忠). Effect of CO₂ concentration, nitrogen and water on plant carbon fixation in spring wheat. *Chin J Soil Sci (土壤通报)*, 2004, 25(5): 546–549 (in Chinese with English abstract)
- [9] Li F-S(李伏生), Kang S-Z(康绍忠), Zhang F-C(张富仓). Effects of CO₂ enrichment, nitrogen and soil moisture on growth and dry matter accumulation of spring wheat. *Chin J Eco-Agric (中国生态农业学报)*, 2003, 11(2): 37–40 (in Chinese with English abstract)
- [10] Pleijel H, Gelang J, Sild E, Danielsson H, Younis S, Karlsson P E, Wallin G, Skärby L, Selldén G. Effects of elevated carbon dioxide, ozone and water availability on spring wheat growth and yield. *Physiol Plant*, 2000, 108: 61–70
- [11] Wu D X, Wang G X, Bai Y F, Liao J X. Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agric Ecosyst Environ*, 2004, 104: 493–507
- [12] Högy P, Wieser H, Köhler P, Schwadorf K, Breuer J, Franzaring J, Muntiferer R, Fangmeier A. Effects of elevated CO₂ on grain yield and quality of wheat: results from a 3-year free-air CO₂ enrichment experiment. *Plant Biol*, 2009, 11(suppl): 60–69
- [13] Pal M, Rao L S, Jain V, Srivastava A C, Pandey R, Raj A, Singh K P. Effects of elevated CO₂ and nitrogen on wheat growth and photosynthesis. *Biol Plant*, 2005, 49: 467–470
- [14] Yang L-X(杨连新), Wang Y-L(王余龙), Li S-F(李世峰), Huang J-Y(黄建晔), Dong G-C(董桂春), Zhu J-G(朱建国), Liu G(刘钢), Han Y(韩勇). Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and allocation in wheat. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 2007, 18(2): 339–346 (in Chinese with English abstract)
- [15] Kimball B A, Pinter P J Jr, Garcia R L, Lamorte R L, Wall G W, Hunsaker D J, Wechsung G, Wechsung F, Kartschall T. Productivity and water use of wheat under free air CO₂ enrichment. *Global Change Biol*, 1995, 1: 429–442
- [16] Manderscheid R, Burkart S, Bramm A, Weigel H J. Effect of CO₂ enrichment on growth and daily radiation use efficiency of wheat in relation to temperature and growth stage. *Eur J Agron*, 2003, 19: 411–425
- [17] Cousins A B, Bloom A J. Oxygen consumption during leaf nitrate assimilation in a C₃ and C₄ plant: the role of mitochondrial respiration. *Plant Cell Environ*, 2004, 27: 1537–1545
- [18] Del Pozo A, Perez P, Gutierrez D, Alonso A, Morcuende R, Martinez-Carrasco R. Gas exchange acclimation to elevated CO₂ in upper-sunlit and lower-shaded canopy leaves in relation to nitrogen acquisition and partitioning in wheat grown in field chambers. *Environ Exp Bot*, 2007, 59: 371–380
- [19] Van Vuuren M M I, Robinson D, Scrimgeour C M, Raven J A, Fitter A H. Decomposition of ¹³C-labelled wheat root systems following growth at different CO₂ concentrations. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 404–413
- [20] Smart D R, Ritchie K, Bloom A J, Bugbee B B. Nitrogen balance for wheat canopies (*Triticum aestivum* cv. Veery 10) grown under elevated and ambient CO₂ concentrations. *Plant Cell Environ*, 1998, 21: 753–763
- [21] Li F-S(李伏生), Kang S-Z(康绍忠). Effects of CO₂ concentration enrichment, nitrogen and water on soil nutrient content and nutrient uptake of spring wheat. *Plant Nutr Fert Sci (植物营养与肥料学报)*, 2002, 8(3): 303–309 (in Chinese with English abstract)
- [22] Yang L-X(杨连新), Huang J-Y(黄建晔), Li S-F(李世峰), Yang H-J(杨洪建), Zhu J-G(朱建国), Dong G-C(董桂春), Liu H-J(刘红江), Wang Y-L(王余龙). Effects of free-air CO₂ enrichment on nitrogen uptake and utilization of wheat. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, 2007, 18(3): 519–525 (in Chinese with English abstract)
- [23] Bencze S, Veisz O, Janda T, Bedö Z. Effects of elevated CO₂ level and N and P supplies on two winter wheat varieties in the early developmental stage. *Cereal Res Commun*, 2000, 28: 123–130
- [24] Bencze S, Veisz O, Bedö Z. Effects of high atmospheric CO₂ and heat stress on phytomass, yield and grain quality of winter wheat. *Cereal Res Commun*, 2004, 32: 75–82
- [25] Bencze S, Kerésztenyi E, Veisz O. Change in heat stress resistance in wheat due to soil nitrogen and atmospheric CO₂ levels. *Cereal Res Commun*, 2007, 35: 229–223
- [26] Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, Pinter P, Sayre K, Bowden J W, Howden S M. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂. *Field Crops Res*, 2004, 85: 85–102
- [27] Jensen B, Christensen B T. Interactions between elevated CO₂ and added N: effects on water use, biomass, and soil ¹⁵N uptake in wheat. *Acta Agric Scandinavica (Sec B: Soil & Plant Sci)*, 2004, 54: 175–184
- [28] Rogers G S, Milham P J, Gillings M, Conroy J P. Sink strength may be the key to growth and nitrogen responses in N-deficient

- wheat at elevated CO₂. *Aust J Plant Physiol*, 1996, 23: 253–264
- [29] Amthor J S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration. *Field Crops Res*, 2001, 73: 1–34
- [30] Adamsen F J, Wechsung G, Wechsung F, Wall G W, Kimball B A, Pinter P J, Lamorte R L, Garcia R L, Hunsaker D J, Leavitt S W. Temporal changes in soil and biomass nitrogen for irrigated wheat grown under free-air carbon dioxide enrichment (FACE). *Agron J*, 2005, 97: 160–168
- [31] Sild E, Younis S, Pleijel H, Sellden G. Effect of CO₂ enrichment on non-structural carbohydrates in leaves, stems and ears of spring wheat. *Physiol Plant*, 1999, 107: 60–67
- [32] Zhu C W, Zhu J G, Zeng Q, Liu G, Xie Z B, Tang H Y, Cao J L, Zhao X Z. Elevated CO₂ accelerates flag leaf senescence in wheat due to ear photosynthesis which causes greater ear nitrogen sink capacity and ear carbon sink limitation. *Funct Plant Biol*, 2009, 36: 291–299

科学出版社生物分社新书推介

《中国农业与环境中的硫》

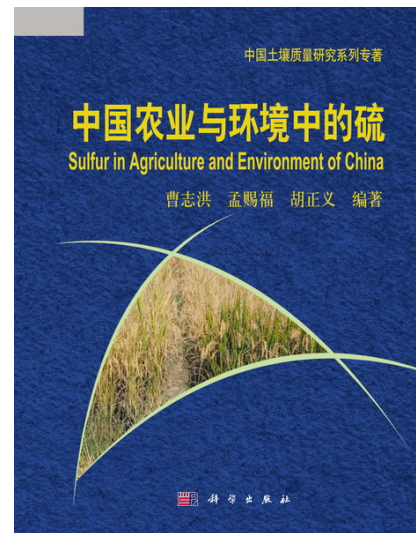
曹志洪, 孟赐福, 胡正义 著

2011年6月出版

定价: ¥ 120.00

书号: 978-7-03-031167-2/X · 541

本书是以中国硫肥协作网的研究成果为基础, 并归纳了近年来部分国内外农业与环境中有硫研究的最新理论和进展编著而成的。全书分四篇共三十章。第一篇, 生态系统中的硫循环与转化: 第一至七章探讨土壤、大气和水体中硫的含量、循环、转化和平衡, 硫与酸雨的关系及其对陆地生态系统和环境的影响, 土壤中硫素的氧化还原反应等。第二篇, 动植物的硫素营养: 第八至十三章综述植物和动物(反刍动物和非反刍动物)的硫营养和补硫的响应, 植物对硫的吸收和代谢, 植物硫素营养与其他营养元素的交互作用及缺硫的诊断, 作物硫素营养与农产品质量的一般关系等。第三篇, 硫肥、硫农药和土壤调理剂: 第十四至十八章介绍含硫肥料、含硫农药及含硫土壤改良剂/调理剂的主要类型、品种、需求、生产技术或研究进展及其应用方法和效果等。第四篇, 主要作物硫肥的使用与效应: 第十九至三十章, 论述主要粮食作物(水稻、小麦、玉米)、油料作物(油菜、大豆、花生)、经济作物(茶叶、蚕桑、棉花、烟草)、蔬菜作物、果树作物等的硫营养及其对硫肥的响应以及缺硫诊断和矫正。本书适于从事土壤、农学、生态、环境、畜牧、植物生理、林业科学的研究人员, 大专院校的师生和从事大农业技术推广和环境治理的广大科技工作者阅读。同时, 也适于政府部门、产业等与生态建设和环境保护有关的干部和工程技术人员参考。



欢迎各界人士邮购科学出版社各类图书

联系人: 科学出版社科学销售中心 周文宇 电话: 010-64031535 E-mail: zhouwenyu@mail.sciencep.com

网上订购: <http://shop.sciencepress.cn>

联系科学出版中心生物分社: 010-64012501 <http://www.lifescience.com.cn> E-mail: lifescience@mail.sciencep.com

更多精彩图书请登陆网站, 欢迎致电索要书目