

升温和大气CO₂浓度升高对不同品种小麦养分吸收的影响

孙宝宝, 刘晓雨, 袁睿, 刘成, 李婕, 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴

引用本文:

孙宝宝, 刘晓雨, 袁睿, 等. 升温和大气CO₂浓度升高对不同品种小麦养分吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1389–1399.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1376>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[CO₂]升高对粮食作物影响的研究进展

宋练, 蔡创, 朱春梧

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 786–796 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1360>

模拟增温对华北农田土壤碳排放的影响

杜锟, 李发东, 涂纯, 李兆

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 691–699 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1336>

大气CO₂浓度和温度升高对麦田土壤呼吸和酶活性的影响

刘远, 潘根兴, 张辉, 李峰, 王光利

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1484–1491 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1588>

水稻品质对主要气候变化因子的响应

王云霞, 杨连新

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 822–833 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0223>

我国保护性耕作对农田温室气体排放影响研究进展

张国, 王效科

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 872–881 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0102>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙宝宝, 刘晓雨, 袁睿, 等. 升温 and 大气 CO₂ 浓度升高对不同品种小麦养分吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1389–1399.

SUN Bao-bao, LIU Xiao-yu, YUAN Rui, et al. Effects of warming and atmospheric CO₂ enrichment on nutrient uptake of different wheat varieties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1389–1399.



开放科学 OSID

升温 and 大气 CO₂ 浓度升高对不同品种小麦养分吸收的影响

孙宝宝, 刘晓雨*, 袁睿, 刘成, 李婕, 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘要: 研究升温 and 大气 CO₂ 浓度升高对不同品种小麦养分吸收的影响, 为未来气候变化下农田土壤养分管理与作物施肥提供科学参考。在田间开放条件下模拟升温 and 大气 CO₂ 浓度升高, 设置对照 (CT)、大气 CO₂ 浓度升高 (C+T)、升温 (CT+) 以及两者同时升高 (C+T+) 4 个处理。每个处理种植扬麦 16、苏麦 188、鑫农 518 和镇麦 9 号 4 个品种。收获时测定小麦籽粒和秸秆中 N、P、K、Ca 和 Mg 的浓度, 并计算各养分在籽粒和秸秆间的分配比例。结果表明: 大气 CO₂ 浓度升高增加了 N、K、Ca 和 Mg 在小麦地上部分的总吸收量, 其中 N、K 和 Mg 的总吸收量受到大气 CO₂ 浓度升高和小麦品种的共同影响, 但是大气 CO₂ 浓度升高没有改变养分在小麦籽粒和秸秆间的分配。升温显著降低了各养分在地上部分的总吸收量, 此外升温还提高了 K、降低了 Ca 在籽粒中的分配比例。升温 and 大气 CO₂ 浓度升高下, 小麦养分吸收总量变化一方面与生物量有关, 另一方面与各养分含量 (浓度) 相关。大气 CO₂ 浓度升高显著降低了小麦籽粒和秸秆中 P 的含量, 但是对籽粒 N、Mg 和秸秆 N、P、K 含量的影响都与品种有关。升温降低了小麦秸秆 K 和籽粒 P、K、Ca、Mg 的含量, 其中只有 P 的吸收对升温的响应受品种的影响。升温 and 大气 CO₂ 浓度升高改变了小麦养分吸收过程, 而且大气 CO₂ 浓度升高对小麦养分吸收过程的改变与养分类型和作物品种密切相关。因此, 未来气候变化下有必要根据小麦品种选择合理的培肥和管理方式。

关键词: 气候变化; FACE; 小麦品种; 养分吸收

中图分类号: S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)06-1389-11 doi:10.11654/jaes.2019-1376

Effects of warming and atmospheric CO₂ enrichment on nutrient uptake of different wheat varieties

SUN Bao-bao, LIU Xiao-yu*, YUAN Rui, LIU Cheng, LI Jie, ZHANG Xu-hui, LI Lian-qing, PAN Gen-xing

(Institute of Resource, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effect of warming and atmospheric CO₂ enrichment on the nutrient uptake of different wheat varieties. The results could provide a scientific reference for soil nutrient management and crop fertilization under future climate change. This study was carried out in an open field experiment station, where crop canopy warming and atmospheric CO₂ enrichment were simulated. Four treatments were designed, including the control (CT), atmospheric CO₂ enrichment (C+T), warming (CT+), and both (C+T+). Four varieties of wheat, including Yangmai 16, Sumai 188, Xinnong 518, and Zhenmai 9, were grown. The concentrations of N, P, K, Ca, and Mg in the wheat grain and straw were determined by harvest and the nutrient content ratio of the grain and straw was calculated. Atmospheric CO₂ enrichment increased the total uptake of N, K, Ca, and Mg of wheat. The total uptake of N, K, and Mg was affected by both atmospheric CO₂ enrichment and wheat variety. However, atmospheric CO₂ enrichment did not affect the distribution of nutrients be-

收稿日期: 2019-12-13 录用日期: 2020-02-11

作者简介: 孙宝宝 (1995—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 从事气候变化下小麦生长和温室气体排放的研究。E-mail: 2017103085@njau.edu.cn

*通信作者: 刘晓雨 E-mail: xiaoyuli@njau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0300202); 中央高校基本科研业务费专项资金 (KYZ201622)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0300202); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (KYZ201622)

tween wheat grain and straw. Warming significantly reduced the total uptake of nutrients in the wheat. In addition, warming also increased the distribution ratio of K in the grain and reduced the distribution ratio of Ca in the grain. Under warming and atmospheric CO₂ enrichment, the change in total nutrient uptake of wheat was not only related to plant biomass but also to the nutrients' concentration. Atmospheric CO₂ enrichment reduced the concentration of P in wheat straw and grain. The effect of CO₂ enrichment on the concentration of N and Mg in the grain as well as N, P, and K in the straw was also related to the wheat variety. Warming reduced the concentrations of K in straw and P, K, Ca, and Mg in the grain, while the response of the P uptake to warming was affected by the variety. Therefore, it was determined that warming and atmospheric CO₂ enrichment altered the nutrient absorption process of wheat and that these changes were closely related to nutrient types and crop varieties. Therefore, soil fertilization and management need to be adjusted according to crop varieties under a changing climate.

Keywords: climate change; free-air CO₂ enrichment (FACE); wheat variety; nutrients uptake

政府间气候变化专门委员会第五次评估报告指出,工业革命以来大气中CO₂浓度大幅增加,同时全球平均气温显著升高。在温室气体排放量中等的情景下,估计2100年大气CO₂浓度将达到538~670 μmol·mol⁻¹,温度将上升1.1~6.4℃^[1]。以升温 and 大气CO₂浓度增加为主要表现的气候变化正深刻地影响着农业生产活动^[2]。已有研究表明,升温主要通过缩短生育期降低作物产量^[3],而大气CO₂浓度升高能够通过增强作物光合作用速率提高作物产量^[4],进而抵消升温带来的不利影响。作物生产经历了一系列复杂的生理过程,而养分吸收是其核心和基础^[5]。升温 and 大气CO₂浓度升高下作物生理过程的变化将会直接影响作物对养分的需求量和利用效率,特别是大气CO₂浓度升高下,作物的生长可能需要更多的养分投入^[6]。充分认识气候变化对作物养分吸收的影响,有助于更好地评估气候变化对作物生产的影响,进而为气候变化下农田土壤养分管理与作物施肥提供科学参考。

氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)等是植物生长的必需营养元素。一些研究表明,大气CO₂浓度升高会降低植物中养分元素的含量^[7-9],如Jin等^[10]发现大气CO₂浓度升高下4种作物籽粒中N和P的平均含量分别降低6%和5%。但是也有研究发现大气CO₂浓度升高对成熟期水稻秸秆中N含量没有显著影响,还显著提高了籽粒中N的含量^[11]。作物养分吸收对大气CO₂浓度升高的响应可能与作物类型有关。在大气CO₂浓度升高下,水稻和稗草的P含量显著升高^[12-13],而绿豆中没有显著变化^[14]。与大气CO₂浓度升高相似,升温对作物养分吸收的影响也存在不确定性,有研究表明升温增加了作物地上部分养分的含量^[15-16]。但是也有学者认为,升温降低了作物地上部分N、P和K的含量^[4,17]。Qiao等^[18]的研究发现,升温降

低了大豆和玉米籽粒中Ca的含量,提高了大豆籽粒中K含量,但是对玉米籽粒K含量没有显著的影响;升温下,籽粒P含量也在大豆和玉米两种作物上表现出相反的变化。以上研究表明升温对养分吸收的影响也与作物类型和养分类型有关。佴传飞^[19]对稻麦轮作系统的研究表明,温度和大气CO₂浓度同时升高显著降低了水稻地上部分N的含量,但是对小麦植株N含量没有影响。Nam等^[20]的研究进一步指出温度和大气CO₂浓度同时升高会增加水稻对化肥中N的吸收量。

目前,已有研究主要关注升温或大气CO₂浓度升高下作物对N、P和K吸收的变化,但较少关注Ca和Mg。此外,虽然已有研究表明不同作物类型养分吸收对升温或大气CO₂浓度升高响应存在显著差异,但同一作物不同品种在基因型和表现型上也存在显著差异^[21],这种差异是否会影响作物养分吸收对升温或大气CO₂浓度升高的响应并不是很清楚。因此,本文研究同一作物不同品种的养分吸收对升温 and 大气CO₂浓度升高的响应是否不同,研究结果能够为未来气候变化下农田养分管理和作物科学施肥提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在南京农业大学农业与气候变化野外试验平台进行。平台建于2010年,位于江苏省常熟市古里镇康博村(31°31'N, 120°33'E),该地区气候类型是典型的亚热带季风气候,年平均温度16℃,本研究期间大气平均温度为12.5℃(图1)。年平均降雨量1100~1200 mm,全年无霜期大于200 d。耕作方式为夏水稻-冬小麦轮作。土壤类型是发育于太湖地区湖积物而成的水稻土。试验前土壤基本性质为:pH

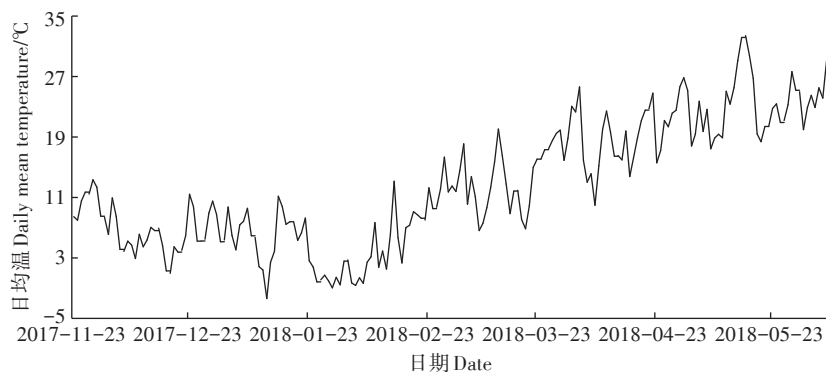


图1 生育期内每日平均温度

Figure 1 Daily mean temperature during growth period

7.0, 有机碳含量 $19.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷含量 $12.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾含量 $93.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性钙含量 $3.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性镁含量 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

平台共设置4个试验处理:对照,正常大气CO₂浓度和温度(CT);大气CO₂浓度升高至 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (C+T);温度较对照升高 2°C (CT+);大气CO₂浓度和温度同时升高(C+T+);每个处理设3次重复,共12个试验圈。每个试验圈呈正八边形结构,面积约 50 m^2 。CO₂处理圈每条边上都装有上下可移动的CO₂释放管,根据风速、风向和圈内CO₂浓度控制CO₂释放管开闭。升温方式是采用红外辐射灯对作物冠层进行加热处理,每个温度处理圈装有12个红外辐射灯。为了避免设备干扰的影响,12个试验圈均装有红外灯罩和CO₂释放管,从外观上保持一致。此外基地还装有一台小型气象站,可实时监测温度、风速和风向等气象数据,为模拟气候变化控制系统提供数据。本研究期内,大气CO₂浓度升高处理下平均CO₂浓度为 $505 \pm 14 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,升温处理温度平均增幅为 $1.6 \pm 0.7^\circ\text{C}$ 。供试冬小麦品种为:扬麦16、苏麦188、鑫农518和镇麦9号。每个试验圈等分为4个小区,每个小区随机播种1个品种。2017年11月23日播种,播种量为 $262.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距30 cm,2018年6月6号收获。播种前施用 $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 复合肥(N:P₂O₅:K₂O=15:15:15)作为基肥,返青期追施 $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素。其他田间管理措施与当地保持一致。

1.3 测定项目与方法

收获期随机采集小麦地上部分,用蒸馏水冲洗, 105°C 杀青30 min, 65°C 烘干,样品粉碎后过0.5 mm筛。全氮、全磷、全钾含量用浓硫酸-双氧水消煮,消煮液中氮、磷和钾含量分别用靛酚蓝比色法、钼锑抗

比色法和火焰光度计法测定^[22]。样品全钙、全镁含量用硝酸-高氯酸(4:1)消煮,原子吸收分光光度计测定^[23]。

1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2016软件进行数据处理与作图,图表中数据均以平均值±标准差的形式表示。统计分析在SPSS 19.0中进行。采用三因素方差分析研究大气CO₂浓度升高(C)、升温(T)和品种(V)对作物养分含量、吸收量和分配的影响,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 小麦产量和生物量的变化

如表1所示,尽管不同品种间小麦产量和生物量显著不同,但是大气CO₂浓度升高显著提高了小麦产量和生物量,升温显著降低了小麦产量和生物量,而且这种影响在不同品种小麦间一致。

2.2 小麦籽粒养分吸收变化

升温和大气CO₂浓度升高对小麦养分吸收的影响与品种类型或元素类型有关(表2)。升温对小麦籽粒N含量没有显著影响,而大气CO₂浓度升高对小麦籽粒N含量的影响与小麦品种存在显著交互效应。大气CO₂浓度升高下,鑫农518小麦籽粒N含量下降21.84%,但是对其余品种无显著影响(图2)。尽管不同小麦品种间籽粒P含量显著不同,但升温和大气CO₂浓度升高对小麦籽粒P含量的影响与品种无关。升温和大气CO₂浓度升高都降低了小麦籽粒中P的含量,降幅分别为5.88%和3.89%。升温显著降低了小麦籽粒K、Ca和Mg含量,不同品种的平均降低幅度分别为10.98%、41.30%和14.76%。大气CO₂浓度升高对小麦籽粒中K和Ca含量无显著影响。但是籽粒

表1 升温 and 大气CO₂浓度升高下不同品种小麦产量和生物量

Table 1 Crop yield and biomass of different wheat varieties under warming and atmospheric CO₂ enrichment

项目 Item	处理 Treatments	扬麦 16	苏麦 188	鑫农 518	镇麦 9 号		
产量/g·m ⁻²	CT	672.80±74.69a	569.40±78.05ab	585.32±49.77a	473.30±48.62ab		
	C+T	718.04±53.72a	663.23±31.51a	618.09±22.89a	523.60±12.31a		
	CT+	523.85±56.72b	507.33±46.15b	476.74±44.47b	403.74±29.97c		
	C+T+	622.90±79.39ab	626.59±95.26ab	506.76±6.01b	426.18±29.05bc		
生物量/g·m ⁻²	CT	597.03±75.41a	513.50±52.77a	443.73±58.50a	509.13±82.99ab		
	C+T	624.53±49.57a	533.83±37.33a	483.63±29.74a	550.97±123.71a		
	CT+	498.01±42.46a	370.47±64.51b	365.88±104.69a	358.47±41.26b		
	C+T+	563.34±208.70a	512.80±16.09a	422.21±19.82a	401.14±18.19ab		
	C	T	V	C*V	T*V	C*T	C*T*V
产量	<0.001	<0.001	<0.001	0.294	0.366	0.696	0.805
生物量	0.024	<0.01	0.001	0.344	0.927	0.594	0.794

注:C:大气CO₂浓度升高;T:升温;V:品种。同列不同小写字母表示同一品种气候变化处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: C: Atmospheric CO₂ enrichment; T: Warming; V: Variety. The different lowercase letters on the same line indicate significant differences among climate change treatments of the same wheat variety ($P<0.05$). The same below.

表2 升温、大气CO₂浓度升高和品种对小麦籽粒中N、P、K、Ca、Mg含量影响的三因素方差分析

Table 2 Three-way ANOVA for the effects of warming, atmospheric CO₂ enrichment and variety on the concentration of N, P, K, Ca and Mg in the wheat grain

项目 Item	N	P	K	Ca	Mg
C	0.422	0.044	0.541	0.494	0.275
T	0.822	0.003	<0.001	<0.001	<0.001
V	0.167	0.008	<0.001	0.018	0.328
C*T	0.123	0.833	0.243	0.314	0.564
C*V	0.006	0.314	0.903	0.088	0.039
T*V	0.099	0.380	0.848	0.239	0.064
C*T*V	0.510	0.246	0.678	0.345	0.495

Mg 含量受到大气CO₂浓度升高和品种的交互影响,大气CO₂浓度升高显著降低了镇麦9号籽粒Mg含量,但是对其余品种没有显著影响。

2.3 小麦秸秆养分吸收变化

如表3所示,大气CO₂浓度升高对不同品种小麦秸秆N含量的影响不同,在大气CO₂浓度升高的处理下,扬麦16秸秆全N含量下降39.66%,其余品种无显著变化(图3)。升温对小麦秸秆N含量没有显著影响。大气CO₂浓度升高显著降低了秸秆P含量,不同品种平均降幅为13.87%,且与品种之间存在显著的交互效应,大气CO₂浓度升高显著降低了扬麦16和苏麦188秸秆中P的含量,但是对另外两个品种没有显著影响。升温对不同品种小麦秸秆P含量的影响不同,升温显著降低了苏麦188秸秆P的含量,其余品种无显著变化。在对小麦P含量的影响上,大气CO₂

浓度升高和升温之间存在显著的交互作用,单独升温 and 大气CO₂浓度升高对鑫农518和镇麦9号秸秆P含量都没有显著的影响,但是两者同时升高的情况下,鑫农518秸秆P含量增加57.58%,而镇麦9号秸秆P含量下降58.89%(图3)。大气CO₂浓度升高对小麦秸秆K含量影响与品种密切相关,扬麦16的秸秆K含量下降19.80%,但是其余品种无显著变化;升温显著降低了秸秆K含量,平均降幅为10.98%。升温 and 大气CO₂浓度升高对小麦秸秆Ca、Mg的含量无显著影响。

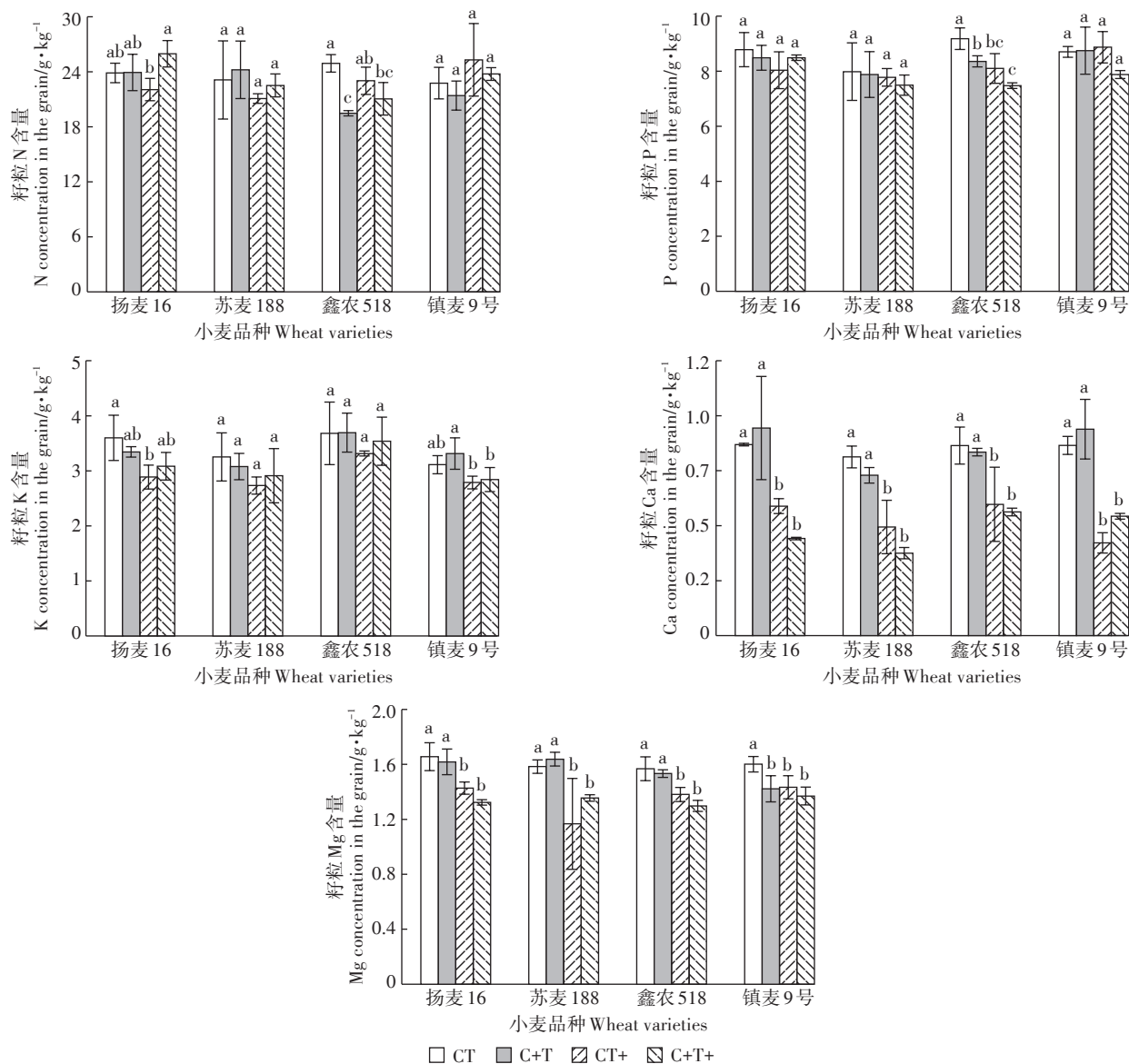
2.4 养分在秸秆和籽粒间分配变化

如表4所示,升温 and 大气CO₂浓度升高对小麦N分配没有显著影响。升温对小麦P分配的影响与品种有关,而且与大气CO₂浓度升高之间存在显著的交互作用。升温对扬麦16和镇麦9号的P分配没有影响,但是影响了另外两个品种P的分配。升温提高了苏麦

表3 升温、大气CO₂浓度升高和品种对小麦秸秆中N、P、K、Ca、Mg含量影响的三因素方差分析

Table 3 Three-way ANOVA for the effects of warming, atmospheric CO₂ enrichment and variety on the concentration of N, P, K, Ca and Mg in the wheat straw

项目 Item	N	P	K	Ca	Mg
C	0.093	0.016	0.052	0.636	0.653
T	0.405	0.753	<0.001	0.179	0.076
V	0.085	0.001	0.001	0.059	<0.001
C*T	0.272	0.001	0.134	0.215	0.877
C*V	0.026	0.002	0.028	0.913	0.933
T*V	0.146	0.006	0.295	0.225	0.498
C*T*V	0.019	0.001	0.789	0.661	0.657



不同小写字母表示同一品种气候变化处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

The different lowercase letters indicate significant differences among climate change treatments of the same wheat variety ($P < 0.05$). The same below

图2 升温 and 大气CO₂浓度升高下不同品种小麦籽粒养分含量的变化

Figure 2 Nutrients' concentration in the grain of different wheat varieties under warming and atmospheric CO₂ enrichment

188籽粒P的分配比例,降低了鑫农518的P在籽粒中的占比,但是在温度和大气CO₂浓度共同升高下,鑫农518的P在籽粒中的比例没有变化。升温显著提高了K在小麦籽粒的分配比例,增幅为33.45%;降低了Ca在小麦籽粒的分配比例,降幅为28.61%。大气CO₂浓度升高对小麦K和Ca的分配没有显著影响。Mg在不同品种小麦籽粒与秸秆间的分配显著不同,但其不受升温 and 大气CO₂浓度升高的影响。

2.5 养分总吸收量变化

如表5所示,升温显著降低了小麦地上部养分的总吸收量,不同品种间N、P、K、Ca、Mg的平均降幅分

别为15.06%、19.78%、14.09%、29.87%、27.32%。大气CO₂浓度升高对小麦地上部分P的总吸收量没有显著影响,但是显著提高了N、K、Ca和Mg的吸收量,增幅分别为8.03%、18.98%、13.74%和11.26%。其中,大气CO₂浓度升高对N、K和Mg的影响都与品种存在显著的交互作用。

3 讨论

3.1 大气CO₂浓度升高对小麦养分吸收的影响

本研究发现,大气CO₂浓度升高提高了小麦地上部分N、K、Ca和Mg等元素的总吸收量,增加幅度与

元素类型和品种相关。养分总吸收量增加主要是由于地上部生物量增加引起的,其中籽粒和秸秆生物量平均提高了11.52%和12.09%。Pang等^[24]也发现大气CO₂浓度升高提高了水稻植株N的总吸收量,但是Li等^[25]的研究发现大气CO₂浓度升高降低了小麦K、Ca和Mg的总吸收量。不同的研究结果可能是因为作物类型或品种不同。在本研究中大气CO₂浓度升高情况下,小麦N、K和Mg总吸收量的变化与小麦品种密切相关。以N为例,大气CO₂浓度升高下苏麦188地上部分N吸收总量提高了27.54%,而鑫农518降低了8.37%。然而苏麦188地上部分总生物量在大气CO₂浓度升高下增加了19.10%,鑫农518升高了8.50%,

该结果表明大气CO₂浓度升高不仅改变了小麦生物量,也改变了小麦地上部养分吸收过程,且养分吸收过程的改变与品种密切相关。

许多研究认为大气CO₂浓度升高下,作物地上部分养分含量降低是由“稀释效应”引起的,即大气CO₂浓度升高提高了地上部分生物量,进而导致作物养分浓度的下降^[26-28]。但是本研究结果表明,“稀释效应”不能完全解释大气CO₂浓度升高下作物养分含量的变化,特别是P含量的变化。本研究中,大气CO₂浓度升高降低了小麦籽粒和秸秆中P含量,与Myers等^[26]的研究结果一致。但是也有研究认为,大气CO₂浓度升高改善了作物根系形态^[12],根系的增大以及根

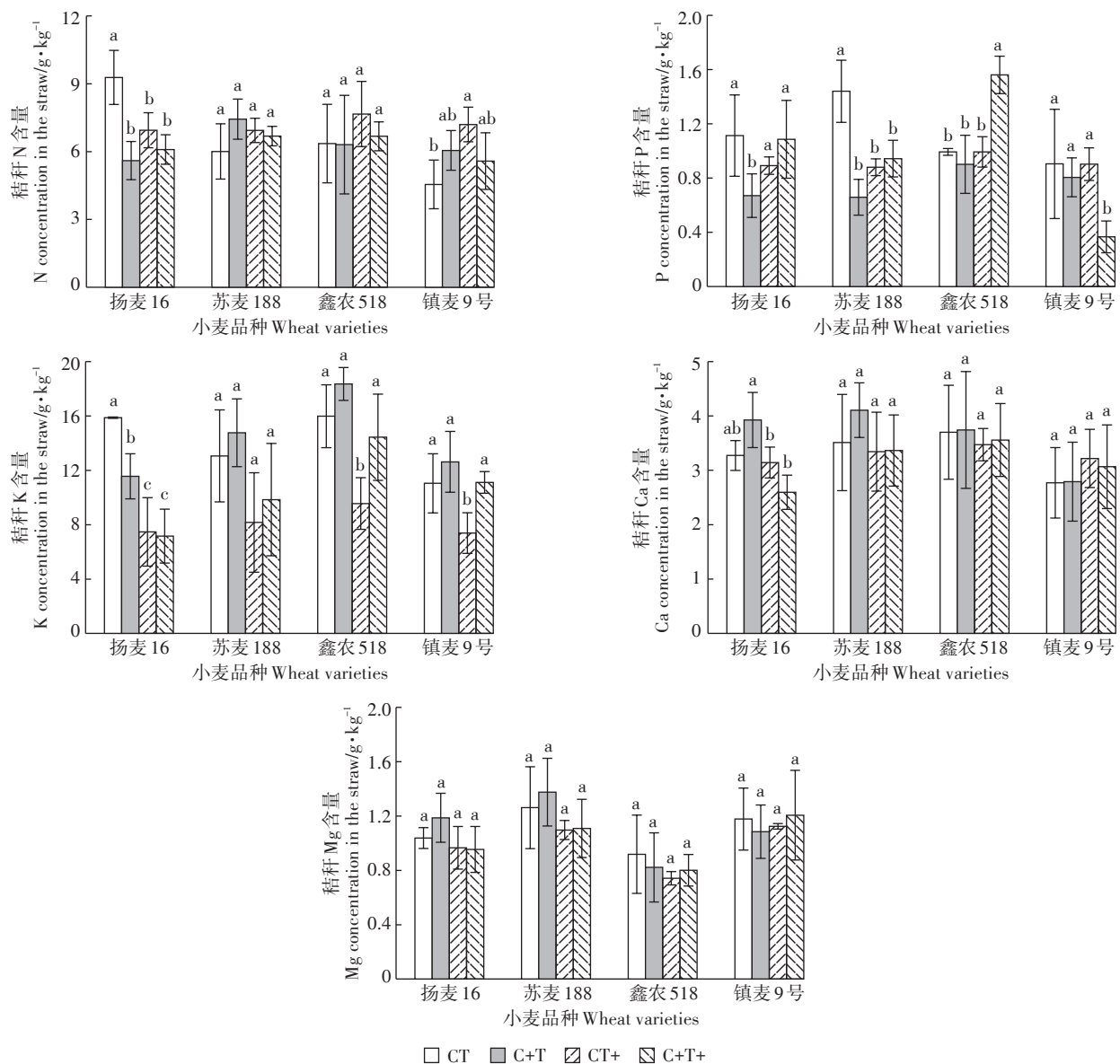


图3 升温 and 大气CO₂浓度升高对不同品种小麦秸秆养分含量的变化

Figure 3 Nutrients' concentration in the straw of different wheat varieties under warming and atmospheric CO₂ enrichment

表4 升温 and 大气CO₂浓度升高下不同品种小麦籽粒养分(N、P、K、Ca、Mg)吸收量占地上部总吸收的百分比Table 4 The percentage of grain nutrients(N, P, K, Ca and Mg) uptake as part of the above ground of different wheat varieties under warming and atmospheric CO₂ enrichment

品种 Varieties	处理 Treatments	N/%	P/%	K/%	Ca/%	Mg/%
扬麦 16	CT	74.42±2.27b	89.94±2.42a	20.31±1.20a	22.43±2.61a	64.18±4.58a
	C+T	83.11±1.67a	93.67±0.68a	25.09±1.07a	20.95±4.58a	61.17±3.07a
	CT+	76.97±1.49b	90.40±1.11a	30.01±7.94a	15.96±1.64a	60.91±5.40a
	C+T+	82.71±4.96a	88.93±7.33a	34.20±12.07a	16.27±4.82a	61.45±7.91a
苏麦 188	CT	80.82±4.04a	85.82±2.96b	22.24±5.79a	20.41±5.57a	58.49±5.32a
	C+T	80.05±3.09a	93.75±0.55a	20.74±1.70a	17.56±1.03a	59.86±4.24a
	CT+	80.72±1.70a	92.41±0.71a	33.37±9.60a	16.85±6.17a	58.69±4.94a
	C+T+	80.14±3.71a	90.61±1.19a	27.78±7.77a	12.06±4.43a	59.81±8.38a
鑫农 518	CT	84.05±2.84a	92.40±1.03a	23.35±0.53ab	23.22±2.95a	69.85±3.91a
	C+T	79.93±6.58a	92.28±1.32a	20.46±1.14b	22.29±5.42a	70.90±5.20a
	CT+	79.19±9.62a	91.16±3.80a	32.71±11.91a	18.73±9.33a	70.96±6.96a
	C+T+	79.06±2.04a	85.15±1.96b	23.00±1.68ab	15.69±2.51a	66.07±5.09a
镇麦 9 号	CT	81.89±7.54a	89.32±7.12a	21.47±6.24b	22.43±5.17ab	56.21±3.52a
	C+T	77.31±3.62a	91.18±2.25a	20.66±4.70b	24.27±4.43a	56.06±3.74a
	CT+	79.72±2.60a	91.75±0.81a	30.18±1.68a	12.65±2.65c	58.98±0.80a
	C+T+	81.95±3.69a	95.81±1.34a	21.38±1.53b	15.70±2.87bc	55.18±5.78a
	C	0.507	0.314	0.156	0.436	0.541
	T	0.975	0.854	<0.001	<0.001	0.738
	V	0.867	0.586	0.450	0.395	<0.001
	C*T	0.467	0.014	0.183	0.876	0.578
	C*V	0.056	0.068	0.175	0.427	0.827
	T*V	0.649	0.020	0.746	0.716	0.877
	C*T*V	0.642	0.134	0.903	0.929	0.665

系分泌物的增多^[29]都有利于作物对P的吸收^[30],提高P在作物地上部分的含量。这可能是因为不同作物对P的吸收能力存在明显的遗传学差异^[31-32]。本研究也进一步发现不同品种的小麦植株中P含量的变化在大气CO₂浓度升高下有很大的差异,如苏麦188秸秆P含量降低30.97%,但是鑫农518则升高24.03%。本研究中大气CO₂浓度升高对小麦籽粒和秸秆N含量的影响也与作物品种相关。与王建青^[33]研究结果不同的是,本研究中大气CO₂浓度升高没有降低小麦N含量,这是由于本研究增加了小麦品种。王建青研究的小麦品种为扬麦16,在本研究中也表现出秸秆N含量的降低,但是其余品种在大气CO₂浓度升高下对N的吸收和转运与扬麦16之间均存在差异。受基因型差异的影响^[34-35],不同品种小麦对N素的需求量、吸收和利用效率不同,小麦N效率关键因子叶片硝酸还原酶活性、叶绿素含量和光合速率与小麦品种的关系密不可分^[36]。此外,很多研究认为大气CO₂浓度升高下,作物气孔导度的降低会减少通过质流吸收的养

分的量^[37-38],包括N。但是也有大量研究证明田间N肥的充足供应会抵消大气CO₂浓度升高对N吸收的不利影响^[28,39-40]。高量的N肥投入下(393 kg·hm⁻²,本研究N肥投入仅为143 kg·hm⁻²),大气CO₂浓度升高甚至会增加小麦籽粒中的N含量^[41]。豆科作物的N含量不受大气CO₂浓度升高的影响^[42],这也可能是因为豆科作物的固N能力给自身生长发育提供了充足的N。但是如果没有N肥投入,大气CO₂浓度升高也会降低豌豆中N含量^[10]。许育彬等^[43]研究表明,不同N效率的小麦对N的吸收在高供N水平和低供N水平下对大气CO₂浓度升高的响应完全相反,这说明作物品种和田间供N水平在大气CO₂浓度升高下,对N吸收都起到了不可忽视的作用。小麦Ca含量不受品种影响,但是不同品种小麦K和Mg含量对大气CO₂浓度升高的响应有所不同,这说明气候变化对作物养分浓度影响各不相同,甚至在同一作物不同品种之间也有所不同,这些变化的相关机制可能是物种特异性造成的^[44]。

表5 升温和大气CO₂浓度升高下不同品种小麦地上部N、P、K、Ca、Mg总吸收量的变化
Table 5 Changes in the above ground nutrients(N, P, K, Ca and Mg) uptake of different wheat varieties under warming and atmospheric CO₂ enrichment

品种 Varieties	处理 Treatments	N/g·m ⁻²	P/g·m ⁻²	K/g·m ⁻²	Ca/g·m ⁻²	Mg/g·m ⁻²
扬麦 16	CT	21.58±2.50a	6.56±0.76a	11.91±1.66a	2.53±0.45ab	1.74±0.19a
	C+T	20.60±1.04a	6.53±0.84a	9.59±1.01a	3.10±0.37a	1.90±0.18a
	CT+	14.98±1.40b	4.67±0.71b	5.31±1.78b	1.87±0.27bc	1.23±0.17b
	C+T+	19.45±0.46a	5.93±0.34ab	5.85±0.82b	1.69±0.36c	1.34±0.01b
苏麦 188	CT	16.22±2.98ab	5.32±1.13a	8.51±1.33a	2.22±0.30ab	1.54±0.18ab
	C+T	20.09±3.07a	5.58±0.76a	9.99±2.17a	2.64±0.15a	1.82±0.08a
	CT+	13.26±1.39b	4.27±0.47a	4.35±1.09b	1.49±0.41c	1.00±0.23c
	C+T+	17.51±1.82ab	5.16±0.64a	6.86±2.19ab	1.96±0.33bc	1.42±0.09b
鑫农 518	CT	17.33±1.17a	5.80±0.20a	9.15±0.58ab	2.09±0.17a	1.31±0.07a
	C+T	15.13±1.40b	5.60±0.08a	11.15±0.87a	2.32±0.60a	1.35±0.17a
	CT+	13.88±0.84b	4.24±0.48b	5.21±1.64c	1.54±0.28a	0.93±0.04b
	C+T+	13.47±0.63b	4.45±0.02b	7.85±1.36b	1.78±0.33a	1.00±0.04b
镇麦 9 号	CT	13.14±0.94a	4.61±0.23a	7.08±1.07ab	1.80±0.33a	1.35±0.07a
	C+T	14.51±1.21a	5.03±0.61a	8.77±2.54a	1.97±0.27a	1.33±0.06a
	CT+	12.82±2.30a	3.90±0.28b	3.75±0.50c	1.32±0.24a	0.98±0.12b
	C+T+	12.35±0.57a	3.50±0.16b	5.68±0.59bc	1.44±0.25a	1.06±0.10b
	C	0.016	0.075	0.004	0.013	0.001
	T	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	V	<0.001	<0.001	0.007	<0.001	<0.001
	C*T	0.148	0.251	0.167	0.349	0.447
	C*V	0.004	0.376	0.040	0.717	0.021
	T*V	0.313	0.570	0.384	0.221	0.188
	C*T*V	0.081	0.164	0.706	0.430	0.789

小麦地上部分养分总吸收量的增加表明在未来大气CO₂浓度升高的情况下,随着作物收获,作物生产系统的养分总量的降幅有所增大,未来可能需要更多的养分投入来维持作物的产量,尤其是K、Ca和Mg,可能需要增加施肥量,但是P的养分供应可能需要针对作物品种,更加精准地考虑。

3.2 升温对小麦养分吸收的影响

本研究发现,升温显著降低了小麦地上部分各养分的总吸收量,这与前人的研究结果一致^[19,27,45]。温度升高下,小麦地上部生物量降低是养分总吸收量降低的主要原因。本研究中,虽然不同元素的总吸收量都表现出了一致的下降,但是在产量降低15.14%、生物量降低18.06%的情况下,小麦N的总吸收量下降了14.58%,而Ca的总吸收量却下降了29.30%,说明升温对小麦养分吸收生理过程也产生了影响,这种变化在不同品种小麦间一致,但不同养分元素间又有差别。

本研究中升温显著降低了养分在小麦地上部分

的含量,尤其是秸秆中K含量和籽粒中K、Ca、Mg含量,这可能是因为增温不仅缩短了冬小麦的生育期,减少了作物从土壤中吸收养分的时间以及养分从茎叶向籽粒转运的时间,而且降低了根吸收营养物质的能力。Li等^[25]的研究认为增温下小麦木质部汁液中养分含量的降低可能是根系养分吸收能力下降所导致,根系吸收的养分主要靠木质部向上运输,木质部汁液中养分的降低可能会减少营养物质在木质部的运输,这可能也是小麦地上部分养分含量降低的原因。但是K、Ca和Mg之间不同的吸收特性导致了小麦植株K、Ca和Mg的含量变化对升温的响应不完全一致。K⁺以扩散为主要运输方式^[46],Ca⁺、Mg⁺以质流为主要运输方式^[47],而蒸腾是以质流运输为主的养分向上迁移的主要动力,所以Ca和Mg的运输受植物蒸腾强度的影响较大。高温通常伴随大气湿度的降低,为了减少水分的散失,作物会调节气孔关闭,降低蒸腾作用^[48]。本研究中,升温下籽粒Ca含量下降41.30%,Mg含量下降14.78%,K含量下降10.98%。

李惠霞等^[49]对番茄的研究也表明,蒸腾作用受到抑制会降低植物对K、Ca和Mg的吸收,且影响程度为Ca>Mg>K,这可能也进一步说明,升温通过降低蒸腾强度减少了小麦对K、Ca和Mg的吸收。还有研究表明气孔的张开和K的吸收有关^[50],增温会增加植物细胞的渗透性,这也会导致K的大量流失^[51]。与籽粒相比,秸秆中较高的K含量与K扩散运输的特质可能是K在籽粒中分配比例上升的原因。但是Ca属于难迁移的元素,又以质流为主要运输方式,蒸腾拉力的降低直接影响了Ca从地下向地上部分的迁移以及茎秆向籽粒的转运^[52],这可能是造成Ca在籽粒中分配比例下降的原因。Qiao等^[18]研究指出升温诱导的油分含量的升高也会降低作物籽粒中Ca的含量。Högy等^[53]和Mcgrath等^[54]的研究也得到了升温会降低籽粒中Ca浓度的结果。Mg与K和Ca不同,虽然Mg与Ca都是以质流为主要运输方式,但是Mg在植物体内属于易迁移的元素,蒸腾引起的木质部运输的减少将通过韧皮部运输得到补充^[55],这可能是蒸腾作用的降低只减少10%左右的Mg含量^[54],降幅远不及Ca含量的原因。

然而也有大量研究发现升温增加了K、Ca和Mg以外元素在作物地上部分的含量^[16,56],Kim等^[15]对水稻的研究认为增温可以促进土壤养分的矿化速率,从而增加水稻地上部分N的含量。也有学者认为温度升高会导致更多N以NH₃和N₂O的形式损失^[57],这也可能会导致作物可利用N的减少。但是Cai等^[4]认为,抽穗后小麦籽粒较高的N含量需要大量的N从绿叶中向籽粒中迁移,升温会导致叶片快速衰老,这促进了N的迁移速率,因而可能会降低一部分茎秆中N的含量。本研究中升温对小麦地上部分N含量没有显著影响,不同的试验结果可能是由于不同作物、不同环境以及施肥管理,尤其是作物生长时的温度差异所造成的。李娜等^[17]的研究表明,适当升温(0.5~1.5℃)会促进小麦对养分的吸收,但是增温幅度过高(2℃以上)会对养分吸收产生负作用。王建青^[33]在同一试验地的结果表明升温显著增加了小麦N和P的含量,是基于当年小麦生育期大气日均温度为11.2℃,而本研究期日均温高达12.5℃。气候变暖对较冷地区的农业生产是有益的^[58],但是已经处于较高温度条件下的农作物,升温可能会使光合作用受阻,影响作物的正常生长^[59]。Bhattacharyya等^[60]3a的研究发现,升温对水稻P吸收的影响每一年都不同,这表明年际效应也是导致作物养分吸收不确定性的一

个原因,但是作物养分吸收的年际变异性主要还是因为年际温度的不确定性^[9]。

本研究中,大气CO₂浓度升高和升温之间没有显著的交互作用,这说明尽管未来气候变化是复杂的,但气候因子不是单独发生变化的,以往单独研究大气CO₂浓度升高和升温对小麦养分影响的结果仍有一定的参考意义。小麦承担了人类相当可观的营养摄入来源,气候变化下小麦籽粒养分含量的大量下降可能会带来人类粮食安全的风险,尤其是Ca和Mg的吸收受温度的影响极大,我们应当考虑在未来温度上升的情况下施用一定量的Ca肥和Mg肥,甚至更多其他的中微量元素来保证小麦籽粒的养分含量。

4 结论

(1)升温 and 大气CO₂浓度升高改变了小麦养分总吸收量和养分吸收的生理过程,大气CO₂浓度升高以增加养分的总吸收量为主,这种影响与其对小麦植株养分含量的影响都与小麦品种密切相关。

(2)升温以降低养分总吸收量和籽粒中养分含量为主,除P的吸收以外,这种影响与小麦品种无关。

(3)未来气候变化下,有必要根据作物品种选择合理的培肥和管理方式。

参考文献:

- [1] IPCC. The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 潘根兴. 气候变化对中国若干作物和动物生产的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(21): 4397-4398.
- [3] PAN Gen-xing. Studies on climate change impact on crop and animal production from China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(21): 4397-4398.
- [4] Wheeler T R, Craufurd P Q, Ellis R H, et al. Temperature variability and the yield of annual crops[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 82(1): 159-167.
- [5] Cai C, Yin X Y, He S Q, et al. Responses of wheat and rice to factorial combinations of ambient and elevated CO₂ and temperature in FACE experiments[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 856-874.
- [6] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6): 645-653.
- [7] WANG Wei-ni, LU Jian-wei, HE Yu-qing, et al. Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(6): 645-653.
- [8] Lemonnier P, Ainsworth E A. Food security and climate change[M]. India: John Wiley & Sons, Inc, 2019: 51-69.
- [9] Bloom A J, Burger M, Jose S R A, et al. Carbon dioxide enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and *Arabidopsis*[J]. *Science*, 2010,

- 328(5980):899-903.
- [8] Jin J, Tang C X, Armstrong R, et al. Phosphorus supply enhances the response of legumes to elevated CO₂(FACE) in a phosphorus-deficient vertisol[J]. *Plant and Soil*, 2012, 358(1/2):91-104.
- [9] Wang J Q, Li L Q, Lam S K, et al. Changes in nutrient uptake and utilization by rice under simulated climate change conditions: A 2-year experiment in a paddy field[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250/251:202-208.
- [10] Jin J, Armstrong R, Tang C X. Impact of elevated CO₂ on grain nutrient concentration varies with crops and soils: A long-term FACE study[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651:2641-2647.
- [11] Roy K S, Bhattacharyya P, Neogi S, et al. Combined effect of elevated CO₂ and temperature on dry matter production, net assimilation rate, C and N allocations in tropical rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Field Crops Research*, 2012, 139:71-79.
- [12] Yang L X, Wang Y L, Huang J Y, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on phosphorus uptake and utilization of rice at three levels of nitrogen fertilization[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(2):141-150.
- [13] Zeng Q, Liu B, Gilna B, et al. Elevated CO₂ effects on nutrient competition between a C₃ crop (*Oryza sativa* L.) and a C₄ weed (*Echinochloa crusgalli* L.)[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(1):93-104.
- [14] Li P, Han X, Zong Y Z, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the uptake and utilization of N, P and K in *Vigna radiata* [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 202:120-125.
- [15] Kim H, Lim S, Kwak J, et al. Dry matter and nitrogen accumulation and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) exposed to experimental warming with elevated CO₂[J]. *Plant and Soil*, 2011, 342(1/2):59-71.
- [16] Ge L Q, Cang L, Liu H, et al. Effects of warming on uptake and translocation of cadmium (Cd) and copper (Cu) in a contaminated soil-rice system under Free Air Temperature Increase (FATI)[J]. *Chemosphere*, 2016, 155:1-8.
- [17] 李娜, 张峰举, 许兴, 等. 气候变暖将显著降低引黄灌区春小麦产量和氮磷钾吸收利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10):1868-1878.
- LI Na, ZHANG Feng-ju, XU Xing, et al. Climate warming may significantly reduce grain yield and nitrogen, phosphorus and potassium uptake of spring wheat in irrigation area of Yellow River[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(10):1868-1878.
- [18] Qiao Y F, Miao S J, Li Q, et al. Elevated CO₂ and temperature increase grain oil concentration but their impacts on grain yield differ between soybean and maize grown in a temperate region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666:405-413.
- [19] 侣传飞. CO₂浓度增加与温度升高对冬小麦和水稻氮素吸收与分配的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
- SI Chuan-fei. Effects of elevated CO₂ and increased temperature on nitrogen uptake and partitioning in winter wheat and rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [20] Nam H, Kwak J, Lim S, et al. Fertilizer N uptake of paddy rice in two soils with different fertility under experimental warming with elevated CO₂[J]. *Plant and Soil*, 2013, 369(1/2):563-575.
- [21] 张国平, 张光恒. 小麦氮素利用效率的基因型差异研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(4):331-336.
- ZHANG Guo-ping, ZHANG Guang-heng. Studies on variation among wheat genotypes in N utilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1996, 2(4):331-336.
- [22] 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, 1999.
- LU Ru-kun. Analytical methods of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 1999.
- [23] Yuen S, Pollard A. Determination of nitrogen in agricultural materials by the nessler reagent. II. Micro-determinations in plant tissue and in soil extracts[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1954, 8(5):364-369.
- [24] Pang J, Zhu J G, Xie Z B, et al. A new explanation of the N concentration decrease in tissues of rice (*Oryza sativa* L.) exposed to elevated atmospheric pCO₂[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 57:98-105.
- [25] Li X G, Jiang D, Liu F. Soil warming enhances the hidden shift of elemental stoichiometry by elevated CO₂ in wheat[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1):1-10.
- [26] Myers S S, Zanobetti A, Kloog I, et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition[J]. *Nature*, 2014, 510(7503):139-142.
- [27] 张立极, 潘根兴, 张旭辉, 等. 大气CO₂浓度和温度升高对水稻植株碳氮吸收及分配的影响[J]. 土壤, 2015, 47(1):26-32.
- ZHANG Li-ji, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, et al. Effect of experimental CO₂ enrichment and warming on uptake and distribution of C and N in rice plant[J]. *Soil*, 2015, 47(1):26-32.
- [28] Lam S K, Chen D, Norton R, et al. Nitrogen dynamics in grain crop and legume pasture systems under elevated atmospheric carbon dioxide concentration: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18:2853-2859.
- [29] Haase S, Neumann G, Kania A, et al. Elevation of atmospheric CO₂ and N-nutritional status modify nodulation, nodule-carbon supply, and root exudation of *Phaseolus vulgaris* L.[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(9):2208-2221.
- [30] Jin J, Tang C X, Sale P. The impact of elevated carbon dioxide on the phosphorus nutrition of plants: A review[J]. *Annals of Botany*, 2015, 116(6):987-999.
- [31] 王树亮, 田奇卓, 李娜娜, 等. 不同小麦品种对磷素吸收利用的差异[J]. 麦类作物学报, 2008, 28(3):476-483.
- WANG Shu-liang, TIAN Qi-zhuo, LI Na-na, et al. Differences of phosphorus utilization efficiency among different wheat varieties[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2008, 28(3):476-483.
- [32] Valizadeh G R, Rengel Z, Rate A W. Wheat genotypes differ in growth and phosphorus uptake when supplied with different sources and rates of phosphorus banded or mixed in soil in pots[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2002, 42:1103-1111.
- [33] 王建青. 模拟大气CO₂浓度升高和冠层增温条件下稻麦产量及品质、农田养分与水分利用的变化[D]. 南京:南京农业大学, 2018.
- WANG Jian-qing. Changes in crop productivity and grain quality, nutrient and water utilization in rice and wheat under simulated CO₂ enrichment and canopy warming conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.
- [34] 徐晴, 许甫超, 董静, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异及

- 相关特性分析[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14):2647-2657.
- XU Qing, XU Fu-chao, DONG Jing, et al. Genotypic difference of nitrogen use efficiency of wheat and correlation analysis of the related characters[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(14):2647-2657.
- [35] Górny A G, Garczyński S, Banaszak Z, et al. Genetic variation in the efficiency of nitrogen utilization and photosynthetic activity of flag leaves among the old and modern germplasm of winter wheat[J]. *Journal of Applied Genetics*, 2006, 47(3):231-237.
- [36] 张敏敏, 翟丙年, 宋翔, 等. 冬小麦不同基因型氮素利用效率的差异及机理分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(8):245-249.
- ZHANG Min-min, ZHAI Bing-nian, SONG Xiang, et al. Difference and mechanism of nitrogen use efficiency (NUE) in different winter wheat genotypes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(8):245-249.
- [37] Wullschlegel S D, Tschaplinski T J, Norby R J. Plant water relations at elevated CO₂: Implications for water-limited environments[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(2):319-331.
- [38] Ainsworth E A, Rogers A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: Mechanisms and environmental interactions[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2007, 30(3):258-270.
- [39] Rogers G S, Milham P J, Gilling M, et al. Sink strength may be the key to growth and nitrogen responses in N-deficient wheat at elevated CO₂[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1996(23):253-264.
- [40] 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.
- LI Fu-sheng, KANG Shao-zhong. Effects of CO₂ concentration enrichment, nitrogen and water on soil nutrient content and nutrient uptake of spring wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2002, 8(3):303-309.
- [41] Porteous F, Hill J, Ball A S, et al. Effect of Free Air Carbon dioxide Enrichment (FACE) on the chemical composition and nutritive value of wheat grain and straw[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2009, 149(3/4):322-332.
- [42] Jablonski L M, Wang X Z, Curtis P S. Plant reproduction under elevated CO₂ conditions: A meta-analysis of reports on 79 crop and wild species[J]. *New Phytologist*, 2002, 156:9-26.
- [43] 许育彬, 沈玉芳, 李世清. 不同氮效率小麦品种氮素吸收利用对CO₂浓度升高的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1):12-18.
- XU Yu-bin, SHEN Yu-fang, LI Shi-qing. Response of nitrogen uptake and use of wheat varieties with different nitrogen use efficiencies to CO₂ concentration enrichment[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1):12-18.
- [44] Dietterich L H, Zanobetti A, Kloog I, et al. Impacts of elevated atmospheric CO₂ on nutrient content of important food crops[J]. *Scientific Data*, 2015, 2(1):1-8.
- [45] Eichelmann H, Oja V, Peterson R B, et al. The rate of nitrite reduction in leaves as indicated by O₂ and CO₂ exchange during photosynthesis[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(6):2205-2215.
- [46] Bradbury I K, Malcolm D C. The effect of phosphorus and potassium on transpiration, leaf diffusive resistance and water-use efficiency in Sitka spruce (*Picea sitchensis*) seedlings[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1977, 14:631-641.
- [47] 徐明岗, 张一平, 张君常, 等. 两种土壤中钙镁磷钾向根系的运移机理[J]. 中国农业科学, 1996, 29(5):77-83.
- XU Ming-gang, ZHANG Yi-ping, ZHANG Jun-chang, et al. Mechanisms for the movement of Ca, Mg, P and K to plant roots growing in two soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1996, 29(5):77-83.
- [48] 张之为, 李晓静, 白金瑞, 等. 高温条件下CO₂对黄瓜叶片光合速率和气孔特性的影响[J]. 作物杂志, 2016(5):81-86.
- ZHANG Zhi-wei, LI Xiao-jing, BAI Jin-rui, et al. Effects of CO₂ on cucumber leaf photosynthetic rate and stomatal characters under high temperature[J]. *Crops*, 2016(5):81-86.
- [49] 李惠霞, 刘岩, 陈竹君, 等. 抑制蒸腾对番茄生长及植株镁、钾、钙吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4):111-116.
- LI Hui-xia, LIU Yan, CHEN Zhu-jun, et al. Effect of anti-transpiration on growth and magnesium, potassium and calcium uptake in tomato plant[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(4):111-116.
- [50] 王忠. 植物生理学[M]. 二版. 北京: 中国农业出版社, 2008:67-68.
- WANG Zhong. Plant physiology[M]. 2ed Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2008:67-68.
- [51] Taiz L, Zeiger E. Plant physiology[M]. Sinauer Associates, Inc, 2006:67-68.
- [52] Wang J Q, Liu X Y, Cheng K, et al. Winter wheat water requirement and utilization efficiency under simulated climate change conditions: A Penman-Monteith model evaluation[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197:100-109.
- [53] Hügy P, Franzaring J, Schwadorf K, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment on energy traits and seed quality of oilseed rape[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(1/2):239-244.
- [54] Mcgrath J M, Lobell D B. Reduction of transpiration and altered nutrient allocation contribute to nutrient decline of crops grown in elevated CO₂ concentrations[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2013, 36(3):697-705.
- [55] Cakmak I, Hengeler C, Marschner H. Changes in phloem export of sucrose in leaves in response to phosphorus potassium and magnesium deficiency in bean plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45(9):1251-1257.
- [56] Wang J Q, Zhang X H, Li L Q, et al. Changes in micronutrient availability and plant uptake under simulated climate change in winter wheat field[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(12):2666-2675.
- [57] Dueri S, Calanca P L, Fuhrer J. Climate change affects farm nitrogen loss: A Swiss case study with a dynamic farm model[J]. *Agricultural Systems*, 2007, 93(1/2/3):191-214.
- [58] Ortiz R, Sayre K D, Govaerts B, et al. Climate change: Can wheat beat the heat?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 126(1/2):46-58.
- [59] Polley H W. Implications of atmospheric and climatic change for crop yield and water use efficiency[J]. *Crop Science*, 2002, 42(1):131-140.
- [60] Bhattacharyya P, Roy K S, Dash P K, et al. Effect of elevated carbon dioxide and temperature on phosphorus uptake in tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53:28-37.