

# 水限制环境 CO<sub>2</sub> 与施氮交互作用 对春小麦水分利用效率的影响

李裕<sup>1,2</sup>, 齐月<sup>2</sup>, 王小恒<sup>3</sup>, 朱青青<sup>1</sup>, 岳平<sup>2</sup>, 张强<sup>2</sup>

(1. 西北民族大学化工学院, 甘肃省高校环境友好型复合材料及生物质利用省级重点实验室, 兰州 730030;

2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候气候变化与减灾重点实验室, 中国气象局干旱气候气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730020; 3. 西北民族大学医学院, 兰州 730030)

**摘要:**在模拟大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高环境条件下, 进行了不同施氮处理对春小麦水分利用效率的影响试验, 探索水资源限制地区提高春小麦水分利用率及其产量的途径。结果表明, CO<sub>2</sub> 浓度升高与施氮交互作用对小麦产量水分利用率有显著影响。在 CO<sub>2</sub> 浓度升高 90 μmol · mol<sup>-1</sup> 环境条件下, 135 kg · hm<sup>-2</sup> 和 315 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮处理春小麦产量的水分利用率与对照相比分别下降了 5.8% 和 15.1%; 225 kg · hm<sup>-2</sup> 和 405 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮处理春小麦产量的水分利用率与对照相比分别增加了 9.3% 和 8.9%; 225 kg · hm<sup>-2</sup> 和 405 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮处理使春小麦生物量水分利用率与对照相比分别提高了 10.4% 和 10.8%; 而 135 kg · hm<sup>-2</sup> 和 315 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮处理造成春小麦生物量水分利用率不同程度地下降。90 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度升高与施氮处理导致春小麦千粒重水分利用率下降, 其中 135 kg · hm<sup>-2</sup> 和 315 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮处理使春小麦千粒重水分利用率较对照分别下降了 13.9% 和 21.2%。在 CO<sub>2</sub> 浓度升高 180 μmol · mol<sup>-1</sup> 环境条件下, 施氮处理对春小麦产量水分利用率的影响不显著。尽管施氮处理提高了春小麦生物量水分利用率, 却导致春小麦千粒重水分利用率不同程度降低。综上可知, 在未来大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高背景下, 可以根据 CO<sub>2</sub> 浓度升高幅度, 从调控氮肥投入量途径入手, 提高春小麦水分利用效率及其产量。

**关键词:** 气候变化; 水限制地区; 春小麦; 水分利用效率; CO<sub>2</sub> 浓度升高; 施氮量

**中图分类号:** P49; S512.1<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A

## Interactive effects of CO<sub>2</sub> and nitrogen application on water use efficiency of spring wheat in water-limited environments

LI Yu<sup>1,2</sup>, QI Yue<sup>2</sup>, WANG Xiaoheng<sup>3</sup>, ZHU Qingqing<sup>1</sup>, YUE Ping<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Northwest University for Nationalities, Provincial Key Laboratory of Environmentally Friendly Composite Materials and Biomass Utilization in Universities of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730030, China;

2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China;

3. School of Medical Sciences, Northwest University for Nationalities, Lanzhou, Gansu 730030, China)

**Abstract:** A simulated change climatic manipulation was conducted to evaluate the effects of CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen level increase on water use efficiency in spring wheat at Dingxi Drought Meteorological and Ecological Environment Experimental Base of China Meteorological Administration in 2011. The objective of this study was to determine if increasing CO<sub>2</sub> and nitrogen level would significantly change water use efficiency in spring wheat. The results revealed that the interactivity of increasing in CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen level led to a significant change in water use efficiency of yield in spring wheat. Compared to CK, the interaction influence of water use efficiency of spring wheat in a 90 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen application of 135 kg · hm<sup>-2</sup> and 315 kg · hm<sup>-2</sup> decreased by 5.8% and 15.1%, respectively. The interaction effect in a 90 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>

收稿日期: 2022-02-07

修回日期: 2022-05-18

**基金项目:** 中国气象局兰州干旱气象研究所暨甘肃省(中国气象局)干旱气候气候变化与减灾重点(开放)实验室; 干旱气象科学基金项目(IAM202105); 甘肃省自然科学基金(20JR5RA502); 国家自然科学基金重点项目(41630426)

**作者简介:** 李裕(1964-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 教授, 主要从事气候变化预测和评估研究。E-mail: liyuxbmd@163.com

**通信作者:** 张强(1965-), 男, 甘肃靖远人, 研究员, 主要从事干旱气候、大气边界层、陆面过程等领域的研究。E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

concentration and nitrogen fertilization treatment increased yield water use efficiency of 9.3% and 8.9% in spring wheat under 225 kg · hm<sup>-2</sup> and 405 kg · hm<sup>-2</sup>, respectively. Likewise, the water use efficiency of spring wheat biomass in the nitrogen treatments of 225 kg · hm<sup>-2</sup> and 405 kg · hm<sup>-2</sup> decreased by 10.4% and 10.8% compared with CK, respectively. However, the nitrogen treatments of 135 kg · hm<sup>-2</sup> and 315 kg · hm<sup>-2</sup> decrease the water use efficiency of spring wheat biomass. The increase of 90 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen application resulted in the decrease of water use efficiency of 1000-grain weight. The water use efficiency of 1000-grain weight of spring wheat in the nitrogen treatments of 135 kg · hm<sup>-2</sup> and 315 kg · hm<sup>-2</sup> decreased by 13.9% and 21.2% compared with CK, respectively. A 180 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen treatments had no significant effects on water use efficiency of spring wheat biomass. Although nitrogen application increased the water use efficiency of spring wheat biomass, but it decreased the water utilization rate of 1000-grain weight in different degrees. In conclusion, the results obtained from this simulated experiment show that the interactivity of increasing in CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen level changed the water use efficiency dynamics in spring wheat. Regulating the fertilizer amount on the base of increase of CO<sub>2</sub> concentration should be beneficial in improving water use efficiency of spring wheat with global climate change variables.

**Keywords:** climate change; water-limited environments; spring wheat; water use efficiency; CO<sub>2</sub> concentration increasing; nitrogen level

水资源限制环境区域是指包括干旱、半干旱和半湿润区(统称为旱地)在内,约占全球土地面积 50%的地区<sup>[1]</sup>,仅我国干旱、半干旱区土地面积高达 243 万 km<sup>2</sup>。随着全球变暖和陆地生态系统可能增加的干旱程度,预计本世纪末全球旱地面积还将增加 11%~23%<sup>[2]</sup>。干旱是限制农作物生产最主要的因素之一,尤其在水资源限制地区对农业生产的影响更为突出<sup>[3-4]</sup>,如何有效应对农业干旱成为这些地区亟待解决的问题。

水分利用效率作为衡量作物干旱适应性、农业增产经济性和环境污染程度等方面的重要指标,长期以来受到高度关注<sup>[4-6]</sup>。近年来,不少农业技术的研究尤其关注水分利用率、氮利用效率,以及粮食产量和质量等的协同改进<sup>[7-9]</sup>。Wang 等<sup>[10]</sup>收集并分析了 1950—2017 年间有关施氮对中国小麦产量及氮肥利用率影响的文献报道,发现施氮虽然在我国西北、华北地区,甚至南方地区显著提高了小麦产量,但仅在中国年平均降水量大于 800 mm 的地区,表现出小麦产量增加幅度最大的施氮肥效。Hochman 等<sup>[11]</sup>估计,由于缺氮引起的作物对有限水资源低效率利用,导致澳大利亚农业潜在产量可能存在 40%上升空间仍未实现。不仅如此,氮素水平和水分条件直接影响小麦产量和干物质积累,干旱胁迫条件下,增施氮肥还导致小麦产量和品质下降<sup>[11]</sup>。依据张健等<sup>[12]</sup>研究发现,全球变暖会增加作物无效蒸发,导致作物生物量积累和产量的水分利用效率降低。并且,全球变暖将进一步导致干旱发生频率增加和持续时间延长,增加了粮食生产的

需水量<sup>[13]</sup>,加剧了社会水资源紧张现状。因此,探索提高粮食产量水分利用率的途径,尤其在水资源限制地区,是应对气候变化的当务之急。

目前农业施氮实践和全球变暖背景下,未来的农业生态系统将包括土壤中氮浓度升高和大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高,会对农业生态系统产生较大的影响<sup>[14-15]</sup>。虽然不断升高的大气 CO<sub>2</sub> 浓度有望促进农作物的生长,然而,增加的 CO<sub>2</sub> 和氮供应对植物的综合影响目前仍不甚明确。不同 CO<sub>2</sub> 水平(400、700 μmol · mol<sup>-1</sup> 和 1 400 μmol · mol<sup>-1</sup>) 以及 3 种氮水平(3、6 g · m<sup>2</sup> 和 12 g · m<sup>2</sup>) 控制条件下生长的 C<sub>3</sub> 作物豌豆(*Pisum sativum* L.) 试验发现,高 CO<sub>2</sub> (700 μmol · mol<sup>-1</sup> 和 1 400 μmol · mol<sup>-1</sup>) 与氮交互作用对豌豆生长的水分利用效率、地上生物量、蒸腾速率和气孔导度等参数都有显著影响,证明豌豆的 CO<sub>2</sub> 生理反应对氮供应具有高度依赖性<sup>[16]</sup>。模拟 CO<sub>2</sub> 浓度升高(760 μmol · mol<sup>-1</sup>) 试验环境条件下,增施氮肥能提高小麦叶片蒸腾速率、瞬时水分利用效率和光合作用速率,且叶片气孔导度与瞬时水分利用效率、蒸腾速率和光合作用速率显著正相关<sup>[17]</sup>。不仅如此,CO<sub>2</sub> 富集实验<sup>[18-19]</sup>、生态系统模型、同位素分析<sup>[20-22]</sup> 等研究,有力支持了作物水分利用效率随大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加而增加的结论。不仅如此,农业试验也证实了作物水分利用效率一定程度上受到氮营养限制<sup>[23]</sup>,而 CO<sub>2</sub> 浓度与氮素对作物水分利用率交互作用的影响尚需探索。

因此,本研究采用中国气象局定西干旱气象与生态环境野外试验基地的开顶式气室(OTC)系统

平台,在模拟大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高与不同施氮水平的环境条件下,以春小麦为研究对象,探求大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高与不同施氮水平交互作用对春小麦水分利用率的影响,为半干旱水资源限制区应对气候变化提高小麦水分利用效率探索新的技术途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在中国气象局定西干旱气象与生态环境试验基地进行,该基地位于甘肃省定西市安定区(104°37'E,35°35'N,海拔 1 896.7 m),属于黄土高原半干旱雨养农业区,是我国典型的水资源限制区域。该区年平均气温 6.7℃,年日照时数 2 433.0 h,年太阳总辐射为 5 923.8 MJ·m<sup>-2</sup>;年降水量 386 mm,且分布不均匀,全年降水量的 50%~70%集中在 6—8 月。供试土壤为黄绵土,土质疏松,易耕作,保水保肥能力差,在蒸发较大时,土壤易受干旱威胁。

### 1.2 试验材料与试验设计

春小麦试验品种为‘定西 40 号’,于 2011 年 3 月 25 日播于直径 28 cm、高 30 cm 的圆柱形塑料桶中,每桶装土 13 kg,播种 100 粒,出苗后每桶定苗 20 株。试验设计为双因素(CO<sub>2</sub> 浓度升高和施氮肥)<sup>[24-25]</sup>,每个处理 6 个重复,其中 1 个重复专门用作试验过程中土壤水测定。播种前 0~20 cm 土层土壤养分含量:有机质 72.0 mg·kg<sup>-1</sup>,全氮 82.4 mg·kg<sup>-1</sup>,水解氮 33.6 mg·kg<sup>-1</sup>,全磷 26.8 mg·kg<sup>-1</sup>,速效磷 5.54 mg·kg<sup>-1</sup>。

CO<sub>2</sub> 浓度处理利用开顶气室(Open-Top Chambers,OTC)实现。开顶式气室设计为正八边形,直径为 6 m,边长 2.15 m,高度 2.5 m,底面积 9.7 m<sup>2</sup>,顶部向内收缩(图 1)。试验基地共有 4 个 OTC 试验装置,OTC 与 OTC 之间间隔 20 m,以防止 CO<sub>2</sub> 释放对其他圈 CO<sub>2</sub> 的浓度造成影响。采用计算机监控实现 OTC 气室模拟气体质量浓度智能控制系统的优化模式,实现了对气室内指定气体质量浓度的远程控制。CO<sub>2</sub> 浓度监控采用芬兰维莎拉 CARBOCAP 的 CO<sub>2</sub> 探头 GMP343,CO<sub>2</sub> 浓度监测范围为 0~1 000 μmol·mol<sup>-1</sup>。

根据对未来大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高预测的结果,试验在 3 个 OTC 内分别设计 CO<sub>2</sub> 浓度升高 0、90 μmol·mol<sup>-1</sup> 和 180 μmol·mol<sup>-1</sup>。根据当地氮肥施用水水平,施肥处理在 3 个 OTC 内均设置对照(N0,0 kg·hm<sup>-2</sup>)、低肥(N1,135 kg·hm<sup>-2</sup>)、中肥(N2,225 kg·hm<sup>-2</sup>)、高肥(N3,315 kg·hm<sup>-2</sup>)和超高肥(N4,405 kg·hm<sup>-2</sup>)5 个水平,每处理 6 个重复,其中 1 个重复专门用作试验过程中土壤水测定。N 肥 60%作



图 1 开顶式气室(OTC)

Fig.1 Open-top chambers(OTC)

基肥,40%在返青期作追肥。待春小麦长至三叶期时开始昼夜不间断通 CO<sub>2</sub> 至收获。

每个施氮水平下,磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>,14%)、钾(KCl)均作为基肥,施用量为 120 kg·hm<sup>-2</sup>。各处理春小麦全生育期灌水量相同,灌水量以试验土壤含水量维持在田间持水量的 70%左右为标准,小麦成熟期和后期的含水量维持在田间持水量的 60%左右。各生育时期的降水量为:播种至出苗期 9.4 mm、苗期至拔节期 5.5 mm、拔节至开花期 8.2 mm、开花至成熟期 7 mm,总计 40.1 mm。

试验过程中对春小麦各生育期叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度指标进行观测,收获期按处理和重复分类随机抽取 10~15 株样品贮于聚乙烯袋中,测定各处理总干物质质量(生物量)、千粒重和籽粒产量等。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品与水分测定方法 土壤水分用烘干法测定<sup>[24]</sup>。试验开始从田间用土钻取样,试验期间根据试验设计在专门为土壤水分测定设计的桶中取土样。所取土样装入铝盒,重复 3 次。在室内称量铝盒加湿土的质量 W<sub>湿</sub>,放入烘箱中在 105℃ 下烘至恒重(12 h)测定铝盒和烘干土的重量 W<sub>干</sub>。参照下式计算土壤含水量:土壤含水量(%)=(W<sub>湿</sub>-W<sub>干</sub>)/(W<sub>干</sub>-W)×100%。式中,W<sub>湿</sub>为湿土和铝盒重(g),W<sub>干</sub>为干土和铝盒重(g),W为铝盒重(g)。体积含水量(%)=重量含水量(%)×土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>)。

1.2.2 计算方法 水分利用率为单位面积单位耗水量的籽粒产量或总干物质(生物量)。水分利用效率 WUE 计算公式如下:

$$WUE = Y(BM, QLZ) / [P + I - (We - Wi)]^{[24-26]}$$

式中,Y为籽粒产量,BM为生物量,QLZ为千粒重,P为降雨量,I为灌溉量,Wi为初始土壤含水量,We为生育期末土壤含水量。

1.2.3 数据分析 试验数据采用 SPSS 19.0 软件进行统计和分析,使用 Excel 2013 和 Origin 9.0 进行部分数据分析与制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub>与氮交互作用对小麦产量水分利用率的影响

CO<sub>2</sub>浓度与氮交互作用显著影响了春小麦产量的水分利用率( $P < 0.05$ , 图2)。在大气CO<sub>2</sub>浓度升高0 μmol·mol<sup>-1</sup>处理环境下,小麦产量的水分利用率与施氮量之间存在曲线回归关系: $y = -2.51x^2 + 19.36x - 1.87$  ( $R^2 = 0.7331$ ),尤以高氮315 kg·hm<sup>-2</sup>处理条件下,小麦产量的水分利用率最高,为38.97 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>,比对照提高了194.0%。亦即在目前的大气CO<sub>2</sub>浓度环境下,提高春小麦产量水分利用率的最佳施氮量应为315 kg·hm<sup>-2</sup>。

但在模拟气候变化CO<sub>2</sub>浓度升高90 μmol·mol<sup>-1</sup>环境条件下,低肥135 kg·hm<sup>-2</sup>、高肥315 kg·hm<sup>-2</sup>和超高肥405 kg·hm<sup>-2</sup>处理,小麦产量的水分利用率比对照分别下降了29.4%、46.7%和15.7%。同样,CO<sub>2</sub>浓度升高180 μmol·mol<sup>-1</sup>的环境条件下,低肥、高肥和超高肥处理,小麦产量的水分利用率

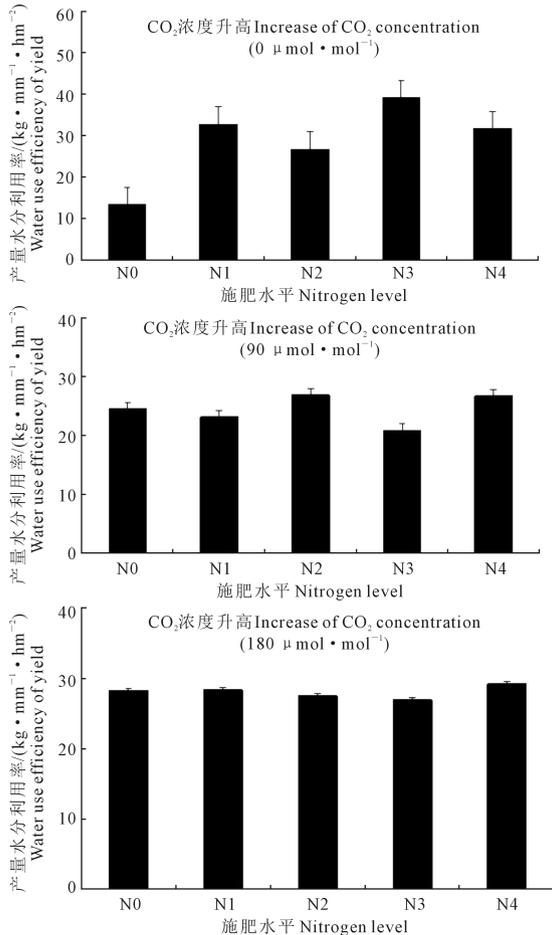


图2 CO<sub>2</sub>浓度与施氮交互作用对春小麦产量水分利用率的影响

Fig.2 Water use efficiency of spring wheat yield in response to CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen level

比对照分别下降13.4%、31.0%和7.8%。

根据试验结果,CO<sub>2</sub>浓度升高90 μmol·mol<sup>-1</sup>环境下,施氮量中肥水平225 kg·hm<sup>-2</sup>更有利于提高春小麦产量水分利用率。而在CO<sub>2</sub>浓度升高180 μmol·mol<sup>-1</sup>的环境条件下,不同施氮水平之间小麦产量的水分利用率无显著差异( $P > 0.05$ )。因此,从提高春小麦产量水分利用率的角度出发,在气候变化CO<sub>2</sub>浓度升高背景下,未来水资源限制地区春小麦生产,应视CO<sub>2</sub>浓度升高幅度及施氮量与春小麦产量水分利用率之间关系,在目前施氮水平基础上适度调整氮肥投入,以达到提高春小麦产量水分利用率的目的。

### 2.2 CO<sub>2</sub>与氮交互作用对小麦生物量水分利用率的影响

CO<sub>2</sub>浓度升高条件下,不同施氮处理对春小麦生物量水分利用率的影响如图3。CO<sub>2</sub>浓度升高与施氮交互作用对春小麦生物量水分利用率有显著影响( $P < 0.05$ )。在升高0 μmol·mol<sup>-1</sup>大气CO<sub>2</sub>浓度条件下,春小麦生物量的水分利用率与施氮量之间存在曲线回归关系: $y = -2.84x^2 + 23.42x + 16.57$ ,

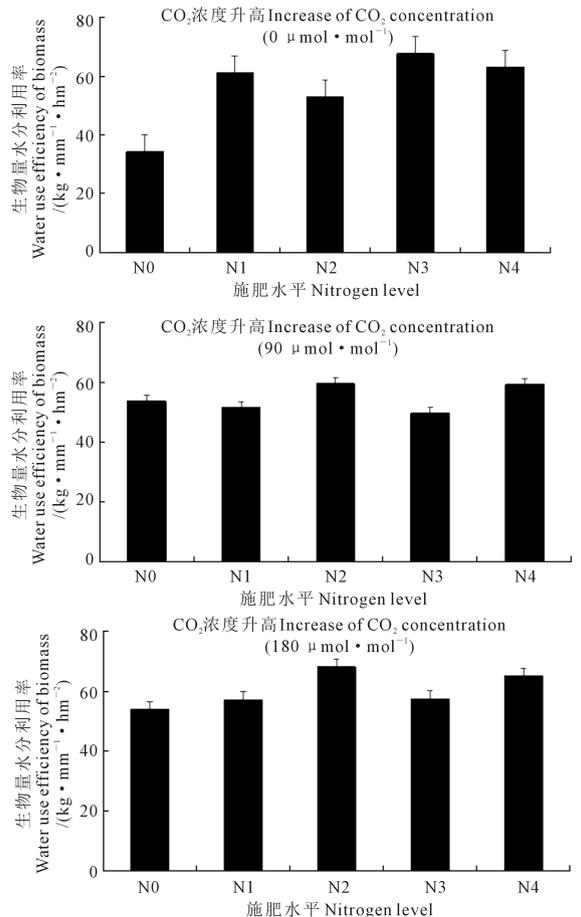


图3 CO<sub>2</sub>浓度与施氮交互作用对春小麦生物量水分利用率的影响

Fig.3 Water use efficiency of spring wheat biomass in response to CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen level

以高肥 ( $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理环境春小麦生物量的水分利用率最高, 达到  $67.44 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 与对照相比提高了 97.6%。CO<sub>2</sub> 浓度升高  $90 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  环境条件下, 中肥 ( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和超高肥 ( $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理使春小麦生物量水分利用率与对照相比分别提高了 10.4% 和 10.8%, 但低肥 ( $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和高肥 ( $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理使春小麦生物量水分利用率不同程度地下降。

在 CO<sub>2</sub> 浓度升高  $180 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  环境条件下 (图 3), 不同施氮处理使春小麦生物量水分利用率不同程度地提高, 低肥 ( $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、中肥 ( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、高肥 ( $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和超高肥 ( $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理下春小麦生物量水分利用率与对照相比分别提高了 5.9%、26.0%、6.5% 和 20.6%。说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高  $180 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  环境下, 增施氮有利于春小麦生物量的积累, 以中肥 ( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和超高肥 ( $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理春小麦生物量提高幅度较明显。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 与氮交互作用对小麦千粒重水分利用率的影响

CO<sub>2</sub> 浓度升高与施氮交互作用对春小麦千粒重水分利用率无显著影响 (图 4,  $P > 0.05$ )。在大气的 CO<sub>2</sub> 浓度升高  $0 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  环境条件下, 施氮处理使春小麦千粒重水分利用率相比对照有不同程度提高。

CO<sub>2</sub> 浓度升高  $90 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  与施氮增加处理交互作用使春小麦千粒重水分利用率不同程度下降, 尤以高肥 ( $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和超高肥 ( $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理影响程度较大, 使春小麦千粒重水分利用率与对照相比分别下降了 16.2% 和 12.3%。CO<sub>2</sub> 浓度升高  $180 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  环境下, 低肥 ( $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、中肥 ( $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、高肥 ( $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和超高肥 ( $405 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 处理使春小麦千粒重水分利用率与对照相比分别下降了 14.9%、22.9%、15.1% 和 21.3%。因此, 未来 CO<sub>2</sub> 浓度升高情况下, 增施氮肥反而会引引起春小麦千粒重水分利用率的下降。

## 3 讨论

尽管全球变暖可能持续地增加全球旱地面积<sup>[2]</sup>, 但旱地具有应对气候变化增加粮食产量的巨大潜力, 事关粮食安全的重大关切<sup>[13]</sup>, 由此提升了水限制环境旱地在未来社会生态的重要性。而旱地粮食产量增加的关键在于如何调控水分与养分相互作用过程, 目前此方面的研究文献报道很少, 如 Markus 等<sup>[16]</sup>发现, 高浓度 CO<sub>2</sub> 与氮交互作用通过调

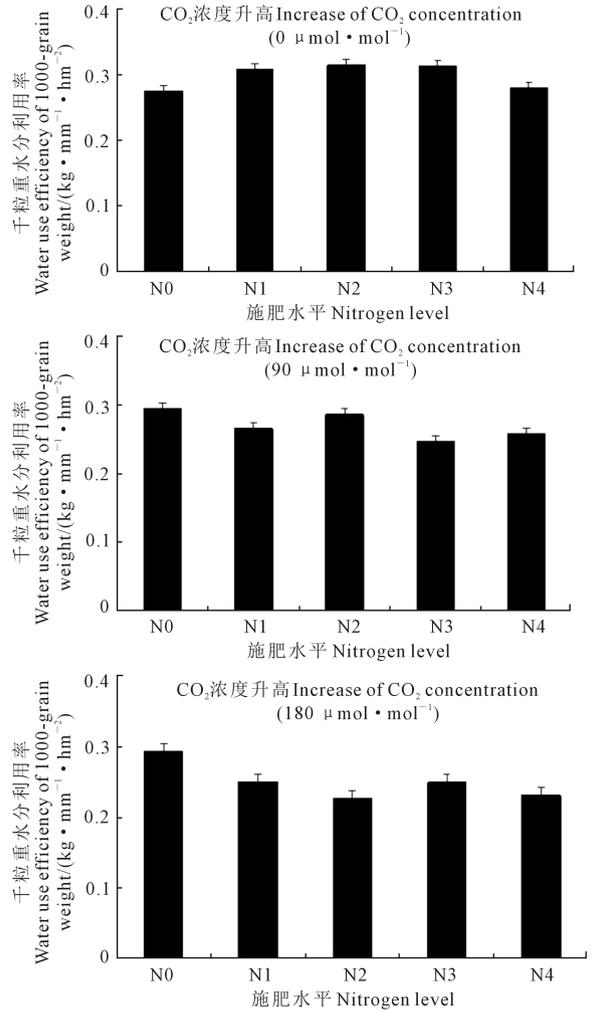


图 4 CO<sub>2</sub> 浓度与施氮交互作用对春小麦千粒重水分利用率的影响

Fig.4 Water use efficiency of thousand grain weight of spring wheat in response to CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen level

控豌豆蒸腾速率和气孔导度等生理参数, 从而对豌豆产量和地上生物量水分利用效率造成显著影响。

本研究模拟 CO<sub>2</sub> 浓度升高与增加施氮量的双因素春小麦试验发现, 尽管 CO<sub>2</sub> 与氮交互作用显著地改变了春小麦产量水分利用率 ( $P < 0.05$ ), 却只有在 CO<sub>2</sub> 浓度升高  $0 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  与高氮施肥处理  $315 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  组合条件下, 春小麦获得最高产量水分利用率  $38.97 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 并相比对照增加了 194.0%, 可能是因为高氮处理适宜的土壤营养环境, 在一定程度上协调了小麦的水肥关系, 提高了小麦茎叶渗透调节能力和气孔调节能力, 增加了叶片净光合速率和水分利用效率<sup>[27]</sup>。

而在  $90 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  和  $180 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  CO<sub>2</sub> 浓度升高环境条件下, 除中肥  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  处理外, CO<sub>2</sub> 与其他施氮处理交互作用造成了春小麦产量水分利用率不同程度地下降, 尤其是高肥  $315 \text{ kg} \cdot$

hm<sup>-2</sup>施氮处理,使春小麦产量的水分利用率相比对照分别下降了46.7和31.0%。根据前人的单因素试验结果,CO<sub>2</sub>浓度升高对春小麦叶片光合作用的正效应<sup>[27-28]</sup>,与CO<sub>2</sub>浓度升高引起的气孔导度降低效应<sup>[29]</sup>、蒸腾作用减小效应<sup>[30]</sup>,以及高氮处理对小麦作物蒸散量降低效应<sup>[28]</sup>,削弱了水分胁迫对小麦光合作用产生的抑制作用,说明单因素CO<sub>2</sub>浓度升高或高氮处理环境的独立作用都提高了小麦产量的水分利用率。相反,90、180 μmol·mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>浓度升高和增加氮肥处理交互作用却降低了小麦产量水分利用率。类似研究发现,高CO<sub>2</sub>浓度与氮缺乏协同作用使小麦叶光合能力显著降低,并且,CO<sub>2</sub>浓度升高与增施氮交互作用对提升小麦叶片光合能力的影响也不显著<sup>[31]</sup>。另有文献也报道增施氮肥与400 μmol·mol<sup>-1</sup>和600 μmol·mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>两种处理的人工杨树林中,氮肥增加处理对杨树冠层叶片光合作用,无论长期影响或短期影响都没有显著差异<sup>[32]</sup>。由此推测,90、180 μmol·mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>浓度升高与氮增加交互作用可能对小麦光合作用造成负面影响,不利于营养器官中的碳水化合物和氮素向籽粒转移<sup>[17]</sup>,导致小麦产量水分利用效率的降低。

同理,春小麦千粒重水分利用率在CO<sub>2</sub>浓度升高90 μmol·mol<sup>-1</sup>和180 μmol·mol<sup>-1</sup>与施氮处理环境下应该呈现不同程度下降。本研究发现,CO<sub>2</sub>浓度升高180 μmol·mol<sup>-1</sup>环境下,低肥(135 kg·hm<sup>-2</sup>)、中肥(225 kg·hm<sup>-2</sup>)、高肥(315 kg·hm<sup>-2</sup>)和超高肥(405 kg·hm<sup>-2</sup>)处理使春小麦千粒重水分利用率相比对照分别下降了14.9%、22.9%、15.1%和21.3%,这也证实了推测的正确性。

从春小麦生物量水分利用率试验结果来看,CO<sub>2</sub>浓度升高0、90 μmol·mol<sup>-1</sup>和180 μmol·mol<sup>-1</sup>与氮增加交互作用,不同程度地增加了春小麦生物量积累,也大幅度地提高了其生物量水分利用率。一方面,CO<sub>2</sub>浓度本身具有肥效及促进春小麦叶片光合作用的正效应<sup>[27-28]</sup>,同时还具有降低气孔导度和减小蒸腾作用的效应<sup>[29-30]</sup>;另一方面,高氮处理具有降低蒸散量的效应<sup>[28]</sup>。因此,总体来看,CO<sub>2</sub>浓度升高与氮增加交互作用有可能削弱水限制环境小麦生长的水分胁迫作用,提高小麦生物量及其水分利用率。本研究还表明,在CO<sub>2</sub>浓度升高90 μmol·mol<sup>-1</sup>环境条件下,低肥(135 kg·hm<sup>-2</sup>)和高肥(315 kg·hm<sup>-2</sup>)处理使春小麦生物量水分利用率不同程度地下降。究其原因,可能低氮或氮胁迫条件下,植株有限利用光合产物的反馈作用引起光合作用减弱,导致低氮处理条件下生物量及其水分利

用率并未增加<sup>[10]</sup>,但高肥处理为什么引起生物量水分利用率下降,其原因尚不清楚。事实上,在本试验处理环境下,即便是低肥(135 kg·hm<sup>-2</sup>)处理也不足以产生氮胁迫问题,因此,CO<sub>2</sub>浓度升高90 μmol·mol<sup>-1</sup>与低肥和高肥处理造成生物量水分利用率下降的原因还需进一步研究。

## 4 结 论

模拟CO<sub>2</sub>浓度升高与氮增加处理交互作用显著改变了春小麦产量和生物量水分利用率( $P < 0.05$ ),并且显著影响了水资源限制环境下小麦营养器官中的碳水化合物和氮素向籽粒转移,导致小麦产量水分利用效率降低。而CO<sub>2</sub>浓度升高对春小麦叶片光合作用的正效应、对叶片气孔导度和蒸腾作用的降低效应,与高氮处理的蒸散量降低效应,共同提高了水资源限制环境下春小麦生物量积累及其水分利用率。因此,未来气候变化CO<sub>2</sub>浓度升高背景下,水限制环境春小麦生产应根据CO<sub>2</sub>浓度升高幅度调控氮肥投入。在大气CO<sub>2</sub>浓度升高90 μmol·mol<sup>-1</sup>环境条件下,从提高春小麦产量和生物量水分利用率角度看,水限制环境春小麦施氮量以225 kg·hm<sup>-2</sup>为宜;若未来大气CO<sub>2</sub>浓度升高到180 μmol·mol<sup>-1</sup>,水限制环境春小麦生产应在当前施氮水平基础上减少投入。本结果可为水资源限制地区春小麦生产应对气候变化提供新的技术途径。

**致谢:**对周勇和余杰在试验研究过程中认真而辛勤的工作,表示特别致谢!

## 参 考 文 献:

- [1] SCHIMMEL D S. Climate. Drylands in the earth system[J]. *Science*, 2010, 327(5964): 418-419.
- [2] HUANG J P, YU H P, GUAN X D, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [3] 殷文, 郭瑶, 范虹, 等. 西北干旱灌区不同地膜覆盖利用方式对玉米水分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(22): 4750-4760.  
YIN W, GUO Y, FAN H, et al. Effects of different plastic film mulching and using patterns on soil water use of maize in arid irrigated area of northwestern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(22): 4750-4760.
- [4] 赵鸿, 王润元, 尚艳, 等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. *干旱气象*, 2016, 34(1): 1-12.  
ZHAO H, WANG R Y, SHANG Y, et al. Progress and perspectives in studies on responses and thresholds of major food crops to high temperature and drought stress[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(1): 1-12.
- [5] 方彦杰, 张绪成, 于显枫, 等. 半干旱区立式深旋耕和有机无机肥配施对饲用玉米水分利用效率和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1327-1336.

- FANG Y J, ZHANG X C, YU X F, et al. Effects of vertical rotary subsoiling with combined organic and inorganic fertilization on water use efficiency and yield of forage maize in a semi-arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1327-1336.
- [6] 时元智, 时红, 崔远来, 等. 基于涡度相关法的长江中下游稻田水分利用效率变化规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 130-139.
- SHI Y Z, SHI H, CUI Y L, et al. Variation of water use efficiency in a paddy field in the middle and lower reaches of the Yangtze River using eddy covariance method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(4): 130-139.
- [7] 刘亮, 郝立华, 李菲, 等. CO<sub>2</sub>浓度和温度对玉米光合性能及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 122-129.
- LIU L, HAO L H, LI F, et al. Effects of CO<sub>2</sub> concentration and temperature on leaf photosynthesis and water use efficiency in maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 122-129.
- [8] SAINJU U M. Determination of nitrogen balance in agroecosystems[J]. MethodsX, 2017, 4: 199-208.
- [9] HUANG M T, PIAO S L, ZENG Z Z, et al. Seasonal responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change[J]. Global Change Biology, 2016, 22(6): 2165-2177.
- [10] WANG Y Q, YANG J P, ZHANG R, et al. Synthesis of climate, soil factors, and nitrogen management practices affecting the responses of wheat productivity and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer in China[J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3533.
- [11] HOCHMAN Z, HORAN H. Causes of wheat yield gaps and opportunities to advance the water-limited yield frontier in Australia[J]. Field Crops Research, 2018, 228: 20-30.
- [12] 张健, 张明, 侯云鹏, 等. 干旱胁迫对甘肃中部春小麦生理性状及灌水利用效率的影响[J]. 干旱气象, 2019, 37(1): 139-145.
- ZHANG J, ZHANG M, HOU Y P, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics and irrigation water use efficiency of spring wheat in central Gansu[J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(1): 139-145.
- [13] MORENO-JIMÉNEZ E, PLAZA C, SAIZ H, et al. Aridity and reduced soil micronutrient availability in global drylands[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(5): 371-377.
- [14] KEENAN T F, HOLLINGER D Y, BOHRER G, et al. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise[J]. Nature, 2013, 499(7458): 324-327.
- [15] MYERS S S, ZANOBEITI A, KLOOG I, et al. Increasing CO<sub>2</sub> threatens human nutrition[J]. Nature, 2014, 510(7503): 139-142.
- [16] DIER M, MEINEN R, ERBS M, et al. Effects of free air carbon dioxide enrichment (FACE) on nitrogen assimilation and growth of winter wheat under nitrate and ammonium fertilization[J]. Global Change Biology, 2018, 24(1): e40-e54.
- [17] 于显枫, 张绪成, 郭天文, 等. 氮素对高大气 CO<sub>2</sub>浓度下小麦叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2342-2346.
- YU X F, ZHANG X C, GUO T W, et al. Effects of nitrogen fertilization on wheat leaf photosynthesis under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(9): 2342-2346.
- [18] GIGUÈRE-CROTEAU C, BOUCHER É, BERGERON Y, et al. North America's oldest boreal trees are more efficient water users due to increased [CO<sub>2</sub>], but do not grow faster[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(7): 2749-2754.
- [19] LI Y Y, HECKMANN D, LERCHER M J, et al. Combining genetic and evolutionary engineering to establish C<sub>4</sub> metabolism in C<sub>3</sub> plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(2): 117-125.
- [20] XU G B, LIU X H, BELMECHERI S, et al. Disentangling contributions of CO<sub>2</sub> concentration and climate to changes in intrinsic water-use efficiency in the arid boreal forest in China's Altay mountains[J]. Forests, 2018, 9(10): 642.
- [21] 李辉尚, 胡晨沛, 曲春红. 中国小麦主产区生产效率时空演变特征分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(10): 91-99.
- LI H S, HU C P, QU C H. Spatio-temporal feature of wheat production efficiency in main producing provinces of China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(10): 91-99.
- [22] 魏爱丽, 杨茂, 黄琴, 等. 小麦不同进化材料叶与非叶器官 C<sub>4</sub>光合酶活性及 δ13C 值差异[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(2): 183-190.
- WEI A L, YANG M, HUANG Q, et al. Difference of C<sub>4</sub> photosynthetic enzyme activity and δ13C value between leaf and non-leaf organs of different wheat evolutionary materials[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(2): 183-190.
- [23] 牛晓光, 杨荣全, 李明, 等. 大气 CO<sub>2</sub>浓度升高与氮肥互作对玉米光合特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(2): 255-264.
- NIU X G, YANG R Q, LI M, et al. Effects of interaction between elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristic and yield of maize[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2020, 28(2): 255-264.
- [24] 王韶唐. 植物的水分利用效率和旱地农业生产[J]. 干旱地区农业研究, 1987, (2): 67-80.
- WANG S T. Plant water use efficiency and dryland agriculture[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1987, (2): 67-80.
- [25] LI Y, ZHANG Q, WANG R Y, et al. Temperature changes the dynamics of trace element accumulation in *Solanum tuberosum* L[J]. Climatic Change, 2012, 112(3): 655-672.
- [26] 王小燕, 王东, 于振文. 水氮互作对小麦旗叶光合特性、籽粒产量及氮素和水分利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 17-22.
- WANG X Y, WANG D, YU Z W. Interactions of water management and nitrogen application on photosynthetic character and kernel yield and nitrogen use efficiency and water use efficiency in wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(6): 17-22.
- [27] PARRY M A J, REYNOLDS M, SALVUCCI M E, et al. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(2): 453-467.
- [28] LARIGAUDERIE A, HILBERT D W, OECHEL W C. Effect of CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen availability on resource acquisition and resource allocation in a grass, *Bromus mollis* [J]. Oecologia, 1988, 77(4): 544-549.
- [29] GARCIA R L, LONG S P, WALL G W, et al. Photosynthesis and conductance of spring-wheat leaves; field response to continuous free-air atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment[J]. Plant Cell & Environment, 1998, 21(7): 659-669.
- [30] TRICKER P J, TREWIN H, KULL O, et al. Stomatal conductance and not stomatal density determines the long-term reduction in leaf transpiration of poplar in elevated CO<sub>2</sub>[J]. Oecologia, 2005, 143(4): 652-660.
- [31] MIGLIETTA F, GIUNTOLI A, BINDI M. The effect of free air carbon dioxide enrichment (FACE) and soil nitrogen availability on the photosynthetic capacity of wheat[J]. Photosynthesis Research, 1996, 47(3): 281-290.
- [32] CALFAPIETRA C, TULVA I, EENSALU E, et al. Canopy profiles of photosynthetic parameters under elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization in a poplar plantation[J]. Environmental Pollution, 2005, 137(3): 525-535.