



谭世超, 潘虎强, 卫琼茹, 牛梦姣, 刘翠平, 张士宇, 郑亮, 齐丽彬, 熊淑萍. CO<sub>2</sub>浓度升高背景下氮形态对小麦光合性能及产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(04):128-137.

TAN Shichao, PAN Huqiang, WEI Qiongru, NIU Mengjiao, LIU Cuiping, ZHANG Shiyu, ZHENG Liang, QI Libin, XIONG Shuping. Effects of different nitrogen forms on the photosynthetic performance and yield of wheat under the background of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(04):128-137.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.11

## CO<sub>2</sub>浓度升高背景下氮形态对小麦光合性能及产量的影响

谭世超<sup>1</sup> 潘虎强<sup>1,2</sup> 卫琼茹<sup>1</sup> 牛梦姣<sup>1</sup> 刘翠平<sup>1</sup> 张士宇<sup>1</sup> 郑亮<sup>1</sup>  
齐丽彬<sup>3\*</sup> 熊淑萍<sup>1\*</sup>

(1. 河南农业大学 农学院/作物生长发育调控教育部重点实验室, 郑州 450046;

2. 陕西省农业技术推广总站, 西安 710003;

3. 三门峡职业技术学院, 河南 三门峡 472000)

**摘要** 为探究大气CO<sub>2</sub>浓度升高背景下不同形态氮肥对小麦的光合性能及产量的影响, 利用开顶式气室(OTC), 采用二因素完全区组试验设计, 设置400 μmol/mol(正常大气浓度, C)、600 μmol/mol(高于正常大气浓度, E)2个CO<sub>2</sub>浓度和硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, A)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, N)2种氮肥形态处理, 测定不同处理组合下小麦花后不同时间旗叶净光合速率(P<sub>n</sub>)、胞间CO<sub>2</sub>浓度(C<sub>i</sub>)、气孔导度(G<sub>s</sub>)、蒸腾速率(T<sub>r</sub>)、株高、地上部生物量及产量。2年结果表明, 高浓度CO<sub>2</sub>处理(E)可显著提高小麦旗叶P<sub>n</sub>、C<sub>i</sub>, 而对旗叶G<sub>s</sub>、T<sub>r</sub>均有显著抑制作用, 小麦的株高、地上部生物量及产量显著升高。高浓度CO<sub>2</sub>条件下, 2种氮形态处理的小麦光合参数和产量指标均具有显著差异。高浓度CO<sub>2</sub>处理(E)中, 施用NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N(A)的小麦地上部生物量、株高、产量比施用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N处理(N)分别增加5.00%~11.95%、1.92%~3.59%、7.17%~8.26%, 穗粒数增加4.41%~5.43%。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N处理(A)的小麦旗叶P<sub>n</sub>、T<sub>r</sub>分别比NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N处理升高7.91%~27.48%、4.91%~27.48%。综上, 高浓度CO<sub>2</sub>条件下施用NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N可有效提升小麦旗叶的光合能力, 使植株地上部生物量和产量升高。

**关键词** 小麦; CO<sub>2</sub>浓度升高; 氮形态; 光合作用; 产量

中图分类号 S512; S143

文章编号 1007-4333(2024)04-0128-10

文献标志码 A

## Effects of different nitrogen forms on the photosynthetic performance and yield of wheat under the background of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>

TAN Shichao<sup>1</sup>, PAN Huqiang<sup>1,2</sup>, WEI Qiongru<sup>1</sup>, NIU Mengjiao<sup>1</sup>, LIU Cuiping<sup>1</sup>,  
ZHANG Shiyu<sup>1</sup>, ZHENG Liang<sup>1</sup>, QI Libin<sup>3\*</sup>, XIONG Shuping<sup>1\*</sup>

(1. College of Agronomy/Key Laboratory of Regulating and Controlling Crop Growth and Development of Ministry of

Education, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. Shaanxi Provincial Agricultural Technology Extension Station, Xi'an 710003, China;

3. Sanmenxia Vocational and Technical College, Sanmenxia 472000, China)

**Abstract** To investigate the effects of different nitrogen forms on the photosynthetic performance and yield

收稿日期: 2023-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(32372239); 河南省重大科技项目(221100110800)

第一作者: 谭世超(ORCID:0009-0006-5477-5495)硕士研究生, E-mail: 1935771786@qq.com

通讯作者: 齐丽彬(ORCID:0009-0009-8959-9008)讲师, 主要从事农业资源环境研究, E-mail: lbqi04@163.com

熊淑萍(ORCID:0000-0001-8787-5237)教授, 主要从事小麦生理生态和智慧农业研究, E-mail: shupxiong@henau.edu.cn

of wheat under the background of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, this study utilized an open-top chamber (OTC) and employed a two-factor completely randomized design. Various combinations with two CO<sub>2</sub> concentrations, 400 μmol/mol (current atmospheric concentration, C) and 600 μmol/mol (simulated elevated concentration, E), and two nitrogen fertilizer forms, nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, A) and ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, N), were employed as treatments. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) of flag leaves, plant height, aboveground biomass, and yield were measured at different time after anthesis for wheat under different treatment combinations. The results from the 2-year study demonstrated that the elevated CO<sub>2</sub> concentration (E) significantly increased the net photosynthetic rate ( $P_n$ ) and intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ) of wheat flag leaves. However, it had a significant inhibitory effect on stomatal conductance ( $G_s$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) of the flag leaves. Furthermore, the elevated CO<sub>2</sub> concentration significantly enhanced plant height, aboveground biomass and yield. Under the elevated CO<sub>2</sub> treatment (E), the above-ground biomass, plant height and yield of wheat applied with NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N (A) respectively increased by 5.00%–11.95%, 1.92%–3.59% and 7.17%–8.26% when compared with those of wheat applied with NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, and the number of grains per spike also increased by 4.41%–5.43%. There were differences discovered in the related parameters of photosynthesis under NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N treatment compared to those under NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N treatment. The  $P_n$  and  $T_r$  of flag leaves were increased by 7.91%–27.48% and 4.91%–27.48%, respectively. In conclusion, the application of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N under elevated CO<sub>2</sub> is conducive to improving the photosynthetic capacity of wheat flag leaves, which can significantly increase above-ground biomass and yield of plants.

**Keywords** wheat; elevated CO<sub>2</sub> concentration; nitrogen forms; photosynthesis; yield

自20世纪70年代以来,大气CO<sub>2</sub>升高对农业生产的影响已成为学术界和相关政府部门关注的重大问题<sup>[1]</sup>。政府间气候专门委员会(IPCC)的评估报告指出,当前大气CO<sub>2</sub>已达到421 μmol/mol,相较工业革命前增加50%,大气CO<sub>2</sub>浓度将会在21世纪中期达到500~700 μmol/mol,在本世纪末达到1 000 μmol/mol<sup>[2]</sup>。大气CO<sub>2</sub>浓度升高关系到全球粮食安全供应<sup>[3]</sup>。小麦是世界上种植面积最广的粮食作物,其产量对全球粮食安全的影响超过其他任何作物<sup>[4]</sup>。因此,研究大气CO<sub>2</sub>浓度升高背景下提高小麦产量的技术措施和机理对于保障全球粮食安全和农业可持续发展具有非常重要的意义。

已有研究表明,大气CO<sub>2</sub>浓度升高可缩短作物生育期<sup>[5]</sup>,促进作物光合作用<sup>[6]</sup>,提升作物的地上部生物量及产量<sup>[7-8]</sup>。短时间内的CO<sub>2</sub>浓度升高会促进作物叶片 $P_n$ ,抑制 $G_s$ 、 $T_r$ <sup>[9-10]</sup>,但长期处于CO<sub>2</sub>浓度升高下会引起作物叶片早衰,对光合作用的促进效果降低<sup>[11]</sup>。氮素是作物光合构建的重要组成部分<sup>[12]</sup>,氮形态对光合器官构建、光合作用过程及相关参数存在影响<sup>[13]</sup>。Bloom等<sup>[14-15]</sup>研究证明,无机氮素的形态(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N或NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)是作物响应大气CO<sub>2</sub>浓度升高

的关键因素,小麦等C<sub>3</sub>植物在NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N处理下比NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N更能积极应对大气CO<sub>2</sub>浓度的升高。门中华等<sup>[16]</sup>研究认为大气CO<sub>2</sub>浓度升高并不抑制小麦对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的同化,但能增强植株对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的吸收、同化能力。Andrews等<sup>[17]</sup>认为大气CO<sub>2</sub>浓度升高条件下,小麦和大豆对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的响应不如NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N积极。目前,小麦响应CO<sub>2</sub>浓度升高的过程中,外源无机氮素形态(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N或NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)对产量影响的研究尚未见报道。本研究利用开顶式气室(Open-top chamber, OTC)系统,设置正常大气CO<sub>2</sub>(400 μmol/mol)和高于正常大气CO<sub>2</sub>(600 μmol/mol)2种CO<sub>2</sub>浓度以及硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)2种形态施氮处理,测定不同处理组合下小麦花后不同时期旗叶净光合速率( $P_n$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、株高、地上部生物量及产量,旨在探究大气CO<sub>2</sub>升高条件下不同氮形态对小麦光合作用及产量构成的影响,以期为应对未来气候变化过程中优化小麦生产措施提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于2020—2022年小麦生长季在河南农业

大学许昌校区试验田(34.14° N, 113.82° E)进行。试验区属温带季风气候,年降雨量544.58 mm,年蒸散量635.78 mm,年平均气温16.76 °C,年日照时间2 280 h,年无霜期217 d

(图1)。试验地的土壤质地为壤土,播种前土壤有机质含量为16.53 g/kg,全氮含量为1.30 g/kg,速效磷含量为7.61 mg/kg,速效钾含量为115.14 g/kg。

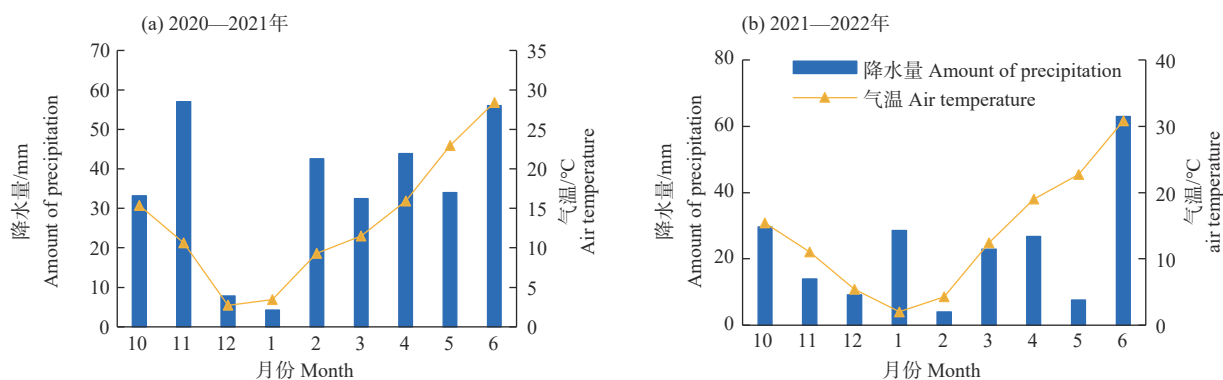


图1 2020—2022年小麦全生育期气温和降雨量

Fig. 1 Precipitation and air temperature during the whole growth period of wheat from 2020 to 2022

采用开顶式气室(open-top chamber)模拟大气CO<sub>2</sub>浓度升高,并根据试验需求加以改造,见图2。OTC气室为长方体钢架结构,长5.6 m,宽3.9 m,高1.93 m,面积21.84 m<sup>2</sup>,气室中安装了低速电风扇以混合气室内的空气,保证温度和CO<sub>2</sub>浓度均匀,墙壁采用钢化玻璃,透光性极好。使用传感器持续监测每日CO<sub>2</sub>浓度,以30 min为间隔记录天气数据。CO<sub>2</sub>传感器(EE820,奥地利

E+E公司)安装在每个OTC中心距离地面0.5 m的位置,采用压缩钢瓶中的液态CO<sub>2</sub>为气源,使用上海天川仪表公司生产的减压阀控制高浓度CO<sub>2</sub>(E)气室CO<sub>2</sub>浓度。小麦返青期开始进行高CO<sub>2</sub>浓度处理,高浓度CO<sub>2</sub>(E)气室供应8~10 h/d CO<sub>2</sub>气体(600 μmol/mol)(白天),正常大气CO<sub>2</sub>(C)气室为大气环境CO<sub>2</sub>浓度(400 μmol/mol),见图3。

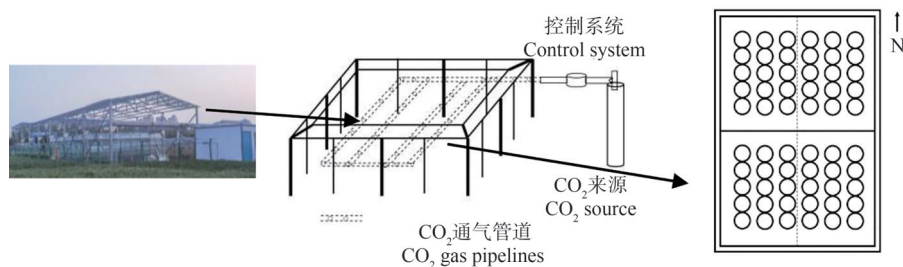


图2 开顶式气室示意图

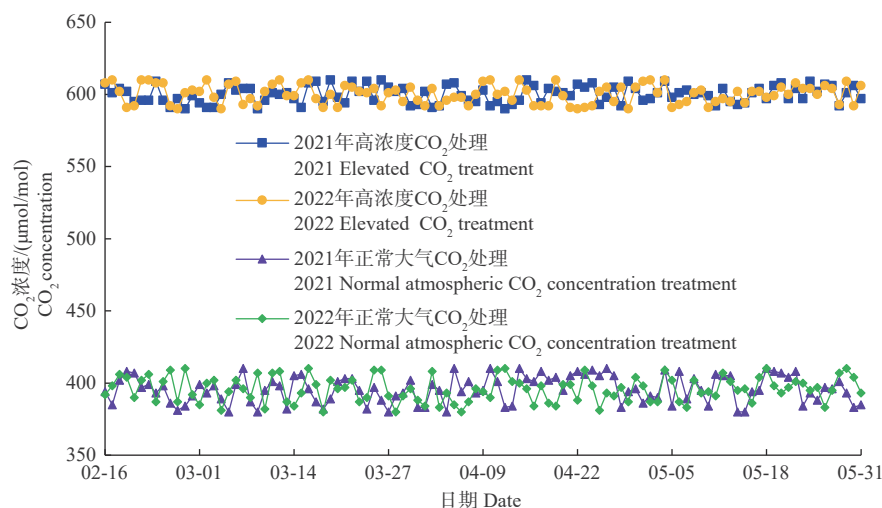
Fig. 2 Diagram of the open-top chamber

## 1.2 试验设计

采用盆栽试验,土壤取自大田耕层,2年试验土壤在同一处试验田选取,保持一致。装土前过筛,每盆装土10 kg(盆钵直径20 cm,深30 cm)。小麦供试材料采用优质弱筋品种‘扬麦15’,每盆播种10粒,3叶1心时定苗,每盆定7株。定期定量灌水,每个处理15盆,共60盆,完全随机排列(图1)。设置2个CO<sub>2</sub>浓度和2种形态氮肥二因素随机区组试

验设计,分为4个不同的处理:400 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N肥(CA),400 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N肥(CN),600 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N肥(EA),600 μmol/mol CO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N肥(EN)。分别于2020年10月20日和2021年10月22日播种,2021年5月30日和2022年5月24日收获。

CN、EN处理播种前每盆施纯硝酸钠5.94 g/盆(折合纯氮0.98 g/盆),过磷酸钙8.70 g/盆(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

图3 2021和2022年小麦生育期内每日CO<sub>2</sub>浓度Fig. 3 Daily CO<sub>2</sub> concentration during wheat growth period on 2021 and 2022

1.04 g/盆)和氯化钾 1.74 g/盆(含 K<sub>2</sub>O 1.04 g/盆),拔节期每盆追施硝酸钠 5.94 g/盆;CA、EA处理播种前每盆施纯氯化铵 3.75 g/盆(折合纯氮 0.98 g/盆),过磷酸钙 8.70 g/盆(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1.04 g/盆)和氯化钾 1.74 g/盆(含 K<sub>2</sub>O 1.04 g/盆),拔节期每盆追施氯化铵 3.75 g/盆。返青期开始进行 CO<sub>2</sub>处理,直至收获。其他田间管理措施同一般高产田管理。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 光合参数测定

在小麦花后 0、8、16、24 d,分别进行光合参数的测定。选取长势一致的小麦,每个处理分别选定 10 株,测定每株小麦主茎的旗叶。在上午 8:30—11:30 使用 Li-6400XT 便携式光合气体分析系统(Li-Cor, Lincoln, NE, USA)进行光合生理指标的测定,内置红蓝光源,光强设置为 1 000 μmol/(m<sup>2</sup>·s),参比室 CO<sub>2</sub>浓度 CA 和 CN 处理设定为 400 μmol/mol, EA 和 EN 处理设定为 600 μmol/mol。分别记录叶片净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )、蒸腾速率( $T_r$ )。

#### 1.3.2 叶片叶绿素相对含量(SPAD)测定

选定 1.3.1 测完光合作用的旗叶,使用叶绿素仪(SPAD-502)测定 SPAD,每个处理测定 10 片叶,每片叶测定 3 次,取平均值。

#### 1.3.3 株高的测定

在小麦开花期,每个处理于 15 盆中选取共 10 株长势均匀一致的小麦,分别用卷尺测量每株小麦的株高,取平均值。

#### 1.3.4 地上部生物量的测定

在花后 0、8、16、24 和 32 d(成熟期),每个时期分别从 3 盆中各选取 3 株小麦作为重复,105 °C 下杀青 30 min,70 °C 烘干至恒重后称重。

#### 1.3.5 产量及构成因素的测定

在成熟时收获盆内的所有小麦后,测定盆内穗数,每个处理随机选取 20 个麦穗测定穗粒数,千粒重为 1 000 粒小麦籽粒重量,重复 3 次。

### 1.4 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理与制图;采用 SPSS Statistics 26.0 进行显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 高浓度 CO<sub>2</sub>下不同氮形态对小麦农艺性状的影响

#### 2.1.1 株高

由表 1 可知,2 种不同氮形态处理下,高浓度 CO<sub>2</sub>条件(E)的小麦株高比正常大气 CO<sub>2</sub>浓度(C)增加 2.00%~6.84%。高浓度 CO<sub>2</sub>条件(E)下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理(A)的小麦株高比 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理(N)2 年平均增加 2.93%,差异达到显著水平( $P < 0.05$ )。正常大气 CO<sub>2</sub>浓度(C)条件下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理下(A)的小麦株高比 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理(E)2 年平均增加 3.43%。

#### 2.1.2 地上部生物量

由图 4 可知,2 种不同氮形态处理下,高浓度 CO<sub>2</sub>条件(E)的小麦地上部生物量比正常大气 CO<sub>2</sub>

表1 高浓度CO<sub>2</sub>条件下不同形态氮肥处理小麦株高  
Table 1 Wheat plant height treated with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration cm

| 处理 Treatment | 2021年        | 2022年        |
|--------------|--------------|--------------|
| CN           | 79.17±0.59 d | 70.07±0.79 d |
| EN           | 81.09±0.42 c | 71.71±0.51 c |
| CA           | 82.32±0.82 b | 72.09±0.44 b |
| EA           | 84.00±0.27 a | 73.09±0.51 a |

注: CN, 400 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 肥; EN, 600 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 肥; CA, 400 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 肥; EA, 600 μmol/mol CO<sub>2</sub>、施 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 肥。同一列数据后不同字母表示不同处理间存在显著差异(*P*<0.05)。下同。

Note: CN, 400 μmol/mol CO<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; EN, 600 μmol/mol CO<sub>2</sub> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; CA, 400 μmol/mol CO<sub>2</sub> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N; EA, 600 μmol/mol CO<sub>2</sub> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N. Different lowercase letter in the same columns indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. The same below.

浓度(C)增加 8.72%~20.16%。高浓度 CO<sub>2</sub> 条件(E)下, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理(N)的小麦地上部生物量比 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理(A)在花后 0、8 d 高 5.45%~6.67%。

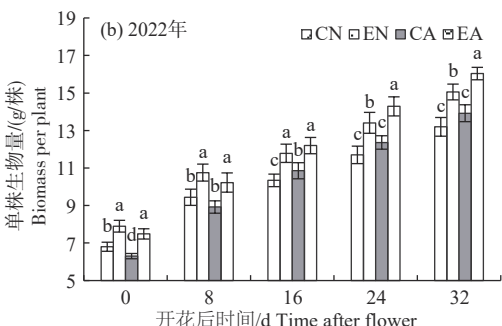
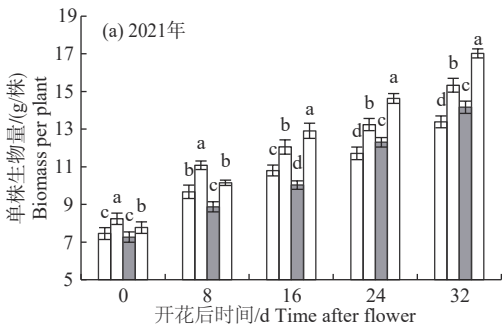
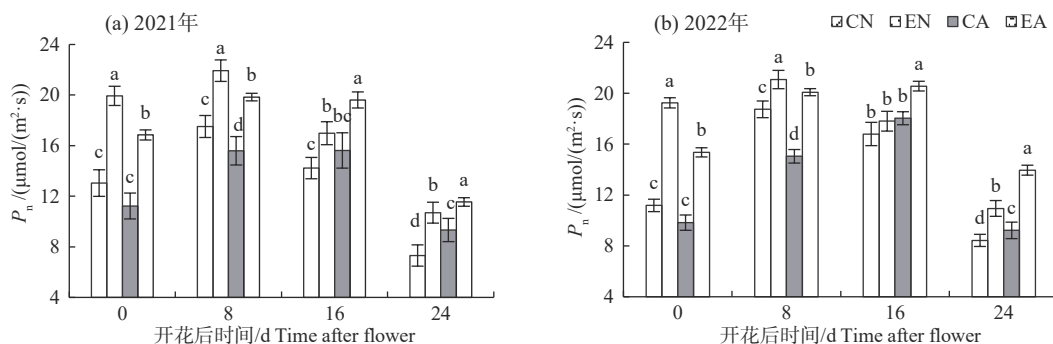


图4 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的小麦地上部生物量

Fig. 4 Above-ground biomass of wheat treated with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration

表2 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的花后小麦旗叶SPAD  
Table 2 SPAD of flag leaves of wheat treated with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration

| 年份<br>Year | 处理<br>Treatment | 花后时间/d Time after flowering |              |              |              |
|------------|-----------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|
|            |                 | 0                           | 8            | 16           | 24           |
| 2021       | AN              | 62.74±1.71 a                | 63.05±1.22 a | 63.60±1.96 a | 58.51±1.94 a |
|            | EN              | 63.27±1.91 a                | 63.53±1.01 a | 64.08±1.40 a | 59.61±1.57 a |
|            | AA              | 61.90±1.32 a                | 62.94±1.21 a | 63.35±1.56 a | 59.68±3.39 a |
|            | EA              | 62.58±1.59 a                | 63.04±1.82 a | 64.99±1.50 a | 59.70±3.41 a |
| 2022       | AN              | 56.86±2.83 a                | 57.26±1.94 a | 57.57±1.70 a | 52.98±3.03 a |
|            | EN              | 57.87±1.66 a                | 58.00±2.52 a | 58.40±1.08 a | 54.20±1.49 a |
|            | AA              | 57.48±2.18 a                | 57.60±1.80 a | 58.06±1.92 a | 54.46±1.81 a |
|            | EA              | 57.11±2.18 a                | 57.90±2.05 a | 58.67±3.00 a | 54.82±0.83 a |

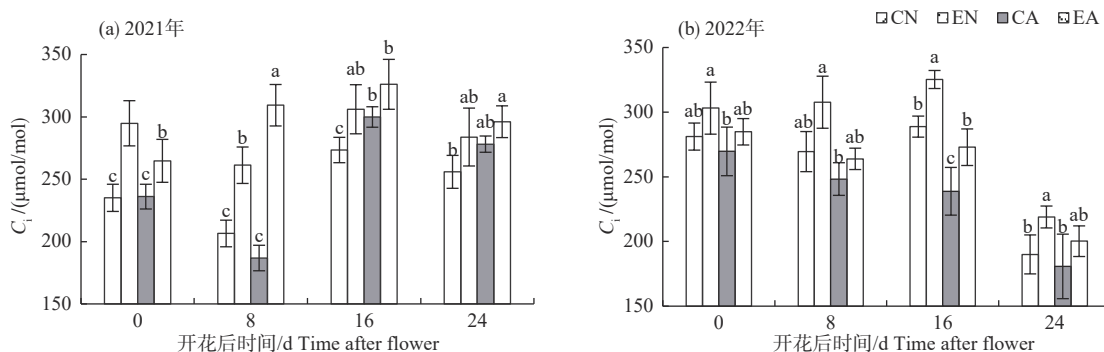
图5 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的小麦净光合速率 ( $P_n$ )Fig. 5  $P_n$  of wheat with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration ( $P_n$ )

( $P < 0.05$ ), 但  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  处理下旗叶  $P_n$  在花后 16、24 d 比  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  处理高 7.38%~27.48%, 差异达到显著水平 ( $P < 0.05$ )。

### 2.3.2 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $C_i$ )

由图6可知, 2种不同氮形态处理下, 高浓度CO<sub>2</sub>条

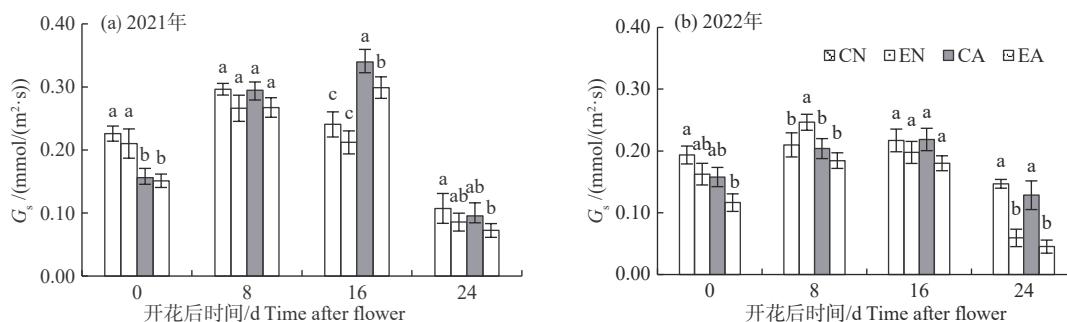
件可使小麦旗叶  $C_i$  比正常大气CO<sub>2</sub>浓度增加 5.62% 和 65.59%。高浓度CO<sub>2</sub>条件下, 施用  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  处理下小麦旗叶  $C_i$  在2021年花后0 d、2022年花后16 d比  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  处理减少 10.22% 和 16.10%, 在2021年花后8 d增加 18.42%, 其他时期均未达到显著水平。

图6 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的小麦胞间CO<sub>2</sub>浓度 ( $C_i$ )Fig. 6  $C_i$  of wheat with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ )

### 2.3.3 气孔导度 ( $G_s$ )

由图7可知, 2种氮形态处理下, 高浓度CO<sub>2</sub>条件可使小麦旗叶  $G_s$  比正常大气CO<sub>2</sub>浓度降低 3.24%~64.81%, 在2022年的花后24 d 差异达到

显著水平, 其他时期差异均未达到显著水平(图4)。高浓度CO<sub>2</sub>条件下,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  处理下的小麦旗叶  $G_s$  在2021年花后16 d、2022年花后8 d与  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  处理差异都达到显著水平, 其他时期差异均不显著。

图7 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的小麦气孔导度 ( $G_s$ )Fig. 7  $G_s$  of wheat with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration ( $G_s$ )

2.3.4 蒸腾速率( $T_r$ )

由图8可知,2种不同氮形态处理下,高浓度CO<sub>2</sub>条件下小麦旗叶 $T_r$ 比正常大气CO<sub>2</sub>浓度在花后8、16 d降低6.71%~54.94%,在花后0、24 d无显著性差异

( $P<0.05$ )。高浓度CO<sub>2</sub>条件下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N处理的小麦 $T_r$ 在2022年花后8、16 d比NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N处理增加24.79%~38.51%,在花后0 d降低27.42%,2021和2022年花后24 d的 $T_r$ 无显著差异( $P<0.05$ )。

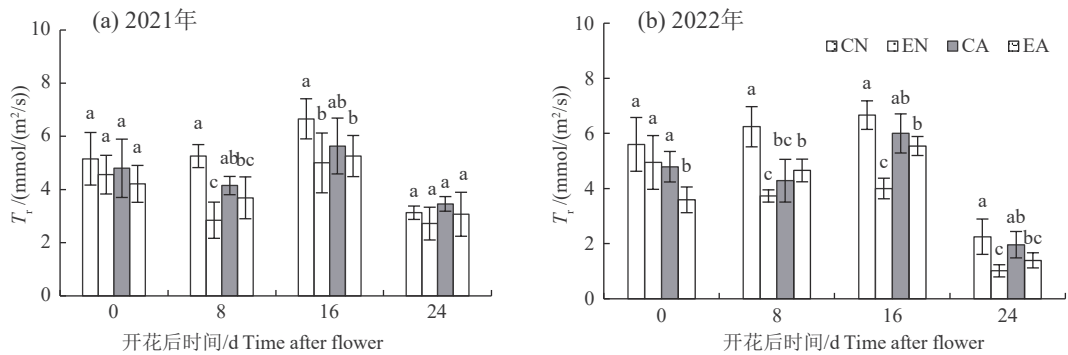


图8 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的小麦蒸腾速率( $T_r$ )  
Fig. 8  $T_r$  of wheat with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration

2.4 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮对小麦产量及构成因素的影响

由表3可知,2种不同形态氮处理下,高浓度CO<sub>2</sub>可使小麦穗粒数、千粒重和产量比正常大气CO<sub>2</sub>浓度下显著增加,对穗数却无显著影响( $P<0.05$ )。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N处理下小麦穗粒数、千粒重和产量2年平均分别增加4.65%、4.86%和3.79%。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N处理下小麦穗粒数、千粒重和产量2年平均

均分别增加3.80%、2.39%和4.15%。高浓度CO<sub>2</sub>条件下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N处理的小麦穗粒数2年平均比NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N处理增加4.07%,产量增加8.09%。正常大气CO<sub>2</sub>条件下,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N处理小麦穗粒数2年平均比NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N增加4.92%,产量增加7.72%。因此,高浓度CO<sub>2</sub>处理可使小麦穗重显著升高,提高籽粒产量,施用NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N能进一步提高小麦产量。

表3 高CO<sub>2</sub>浓度下不同形态氮肥处理的小麦产量及构成因素

Table 3 Yield and yield component factors of wheat with different nitrogen forms under elevated CO<sub>2</sub> concentration

| 年份   | 处理        | 穗数/(个/盆)     | 穗粒数                    | 千粒重/g              | 产量/(g/盆) |
|------|-----------|--------------|------------------------|--------------------|----------|
| Year | Treatment | Spike number | Grain number per spike | 1 000 grains weigh | Yield    |
| 2021 | CN        | 25.8 ab      | 38.73 c                | 48.93 c            | 45.88 c  |
|      | EN        | 24.5 b       | 39.93 b                | 49.91 ab           | 47.85 bc |
|      | CA        | 26.6 a       | 40.13 b                | 47.97 c            | 49.65 ab |
|      | EA        | 25.7 ab      | 42.10 a                | 51.67 a            | 51.28 a  |
| 2022 | CN        | 24.2 a       | 38.61 c                | 52.23 b            | 45.50 c  |
|      | EN        | 23.5 a       | 40.35 b                | 53.68 a            | 47.32 b  |
|      | CA        | 25.2 a       | 40.36 b                | 50.89 c            | 49.12 ab |
|      | EA        | 24.0 a       | 42.13 a                | 51.91 ab           | 51.23 a  |

3 讨论

3.1 CO<sub>2</sub>浓度和氮形态对光合性能的影响

光合作用强弱是决定小麦生物量和产量的重要因素,旗叶是小麦叶片中最重要的光合器官,其

净光合速率反映小麦的光合能力,是小麦生长发育和产量形成的基础<sup>[18]</sup>。Leakey等<sup>[19]</sup>研究表明,高浓度CO<sub>2</sub>(600 μmol/mol)处理可使旗叶的光合碳同化能力显著升高。周宁<sup>[11]</sup>研究认为,随着生育时期推进叶片 $P_n$ 逐渐降低,生长在高浓度CO<sub>2</sub>下的水稻不

同生育时期的叶片  $P_n$  较正常大气 CO<sub>2</sub> 下均增加,但增幅随时间推移呈下降趋势。本研究结果与其类似,高浓度 CO<sub>2</sub> (600  $\mu\text{mol/mol}$ ) 处理使小麦旗叶  $P_n$  增加 5.99%~72.11%,可使小麦的光合能力显著升高。

张秦泽等<sup>[13]</sup>研究认为,氮形态对光合器官构建、光合作用过程及相关参数存在显著影响。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会抑制小麦的氮代谢,在小麦生育后期 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理比 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 更有利于  $P_n$  的升高和  $T_r$  的降低,这可能是 CO<sub>2</sub> 浓度升高抑制小麦的氮代谢,小麦对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 同化能力减弱<sup>[14]</sup>。由此可见,CO<sub>2</sub> 浓度升高促进小麦旗叶  $P_n$  提高,但是随着小麦生育时期的推进,高 CO<sub>2</sub> 浓度处理对小麦旗叶  $P_n$  的促进作用下降,小麦出现光合适应。光合适应现象的产生一般认为有 2 种原因:一是长期处于高 CO<sub>2</sub> 浓度下,叶片的 Rubisco 含量及比活性降低<sup>[20]</sup>;二是随着 CO<sub>2</sub> 浓度的增加, $P_n$  的升高使光合产物合成超过运输和利用能力时,造成光合产物的反馈抑制<sup>[21]</sup>,而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理相较于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理更有利于 Rubisco 活性的升高,促进小麦干物质积累。本研究结果表明,高浓度 CO<sub>2</sub> 下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理的小麦干物质重在花后 16、24 d 的地上部生物量比 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理高 5.32%~8.78%,因此,高浓度 CO<sub>2</sub> 下, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理有助于促进小麦旗叶  $P_n$  的升高,促进小麦生育后期的干物质积累,减缓光合适应,从而减缓小麦的衰老过程,延长小麦的光合时间,使小麦地上部生物量和产量升高。

### 3.2 CO<sub>2</sub>浓度和氮形态对农艺性状的影响

作物对环境因素变化的响应,最直观的表现在于其形态方面<sup>[22]</sup>。吴浩等<sup>[23]</sup>研究认为,高浓度 CO<sub>2</sub> (600  $\mu\text{mol/mol}$ ) 处理增强了高氮对冬小麦株高的促进作用。胡晓渝等<sup>[24]</sup>研究认为, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的施入可以改善作物形态指标。本研究表明,高浓度 CO<sub>2</sub> 下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理的株高显著高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理。CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦株高有促进作用,而施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 对 CO<sub>2</sub> 浓度升高下小麦的生长发育有显著的促进作用。

Ruiz-Vera 等<sup>[8]</sup>研究认为,大气 CO<sub>2</sub> 升高可增加作物地上部生物量。胡晓渝等<sup>[23]</sup>研究认为,施加 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 有助于作物地上部生物量增加。本研究表明,高浓度 CO<sub>2</sub> 下,与施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 相比,施用 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在花后第 16 天前有更高的生物量,而花后 16 d 施

用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 却有更高的地上部生物量,这可能是由于在花后 0、8 d NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理的  $P_n$  高于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,小麦有较高的光合产物积累,因而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的处理有更高的地上部生物量。但花后 16 d NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理的  $P_n$  高于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N,因而 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理可使小麦有更高的生物量。CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦地上部生物量有促进作用,但随着 CO<sub>2</sub> 升高处理时间增加,地上部生物量增加幅度减缓。而在 CO<sub>2</sub> 浓度升高下施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 有助于提高小麦旗叶的  $P_n$ ,从而促进小麦光合产物的积累,提高地上部生物量。

### 3.3 CO<sub>2</sub>浓度和氮形态对小麦产量及构成因素的影响

Li 等<sup>[25]</sup>研究认为,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高可显著提升小麦产量。马新明等<sup>[26]</sup>研究认为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 相较于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 有助于显著提升弱筋型小麦的产量。本研究表明,高浓度 CO<sub>2</sub> 下,与施用 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 相比,施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理的小麦产量显著增加。CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦产量有促进作用,但小麦长期处于高浓度 CO<sub>2</sub> 环境下会出现光合适应现象,导致小麦植株光合产物减少,从而减少干物质的积累,因此,本研究结果中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理的产量较低。Zhang 等<sup>[27]</sup>研究认为,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高可使冬小麦的穗数和穗粒数均显著增加,但对其千粒重无显著影响。居辉等<sup>[7]</sup>研究认为施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 可显著提升小麦的穗粒数和千粒重,与本研究结果一致,高浓度 CO<sub>2</sub> 下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理的小麦穗粒数比 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 增加 4.92%,产量增加 7.72%。本研究仅对 2 种不同氮形态在 2 种 CO<sub>2</sub> 浓度下对小麦光合性能和产量的影响进行研究,未设置氮肥施用梯度,未来应进一步设置合理的 CO<sub>2</sub> 浓度和氮梯度探究适宜高 CO<sub>2</sub> 浓度背景下小麦生长的养分条件。

## 4 结 论

高浓度 CO<sub>2</sub> (600  $\mu\text{mol/mol}$ ) 下 2 种氮形态 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 均使小麦旗叶  $P_n$  显著升高。相较于 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 处理,施用 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 可使小麦旗叶  $P_n$  在高浓度 CO<sub>2</sub> 下比正常大气 CO<sub>2</sub> (400  $\mu\text{mol/mol}$ ) 浓度升高 17.43%,进一步促进高浓度 CO<sub>2</sub> 下小麦  $P_n$  的升高。高浓度 CO<sub>2</sub> 可使小麦株高比正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度的 2 种氮形态处理平均增加 4.42%、地上部生物量、产量、穗粒数和千粒重平均分别增加 8.48%、3.97%、4.25% 和 3.62%。综上,在大气 CO<sub>2</sub> 升高

背景下,施用  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  可使小麦叶片  $P_n$  增加 34.11%,有效增加光合产物,提升小麦生物量及产量。

## 参考文献 Reference

- [1] 李彦生,金剑,刘晓冰.作物对大气  $\text{CO}_2$  浓度升高生理响应研究进展[J]. 作物学报, 2020, 46(12): 1819-1830  
Li Y S, Jin J, Liu X B. Physiological response of crop to elevated atmospheric carbon dioxide concentration: A review [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(12): 1819-1830 (in Chinese)
- [2] Chavan S G, Duursma R A, Tausz M, Ghannoum O. Elevated  $\text{CO}_2$  alleviates the negative impact of heat stress on wheat physiology but not on grain yield[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(21): 6447-6459
- [3] Schmidhuber J, Tubiello F N. Global food security under climate change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(50): 19703-19708
- [4] IPCC. The physical science basis: Contribution of working group I to the VI assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021
- [5] 姬兴杰,朱业玉,刘晓迎,熊淑萍,王鸽.气候变化对北方冬麦区冬小麦生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4): 576-581  
Ji X J, Zhu Y Y, Liu X Y, Xiong S P, Wang G. Impacts of climate change on the winter wheat growth stages in North China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4): 576-581 (in Chinese)
- [6] 宗毓铮,张函青,李萍,张东升,林文,薛建福,高志强,郝兴宇. 大气  $\text{CO}_2$  与温度升高对北方冬小麦旗叶光合特性、碳氮代谢及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23): 4984-4995  
Zong Y Z, Zhang H Q, Li P, Zhang D S, Lin W, Xue J F, Gao Z Q, Hao X Y. Effects of elevated atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration and temperature on photosynthetic characteristics, carbon and nitrogen metabolism in flag leaves and yield of winter wheat in North China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(23): 4984-4995 (in Chinese)
- [7] 居辉,姜帅,李靖涛,韩雪,高霁,秦晓晨,林而达. 北方冬麦区  $\text{CO}_2$  浓度增高与氮肥互作对冬小麦生理特性和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(24): 4948-4956  
Ju H, Jiang S, Li J T, Han X, Gao J, Qin X C, Lin E D. Interactive effects of elevated  $\text{CO}_2$  and nitrogen on the physiology and yield of winter wheat in north winter wheat region of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(24): 4948-4956 (in Chinese)
- [8] Ruiz-Vera U M, Siebers M, Gray S B, Drag D W, Rosenthal D M, Kimball B A, Ort D R, Bernacchi C J. Global warming can negate the expected  $\text{CO}_2$  stimulation in photosynthesis and productivity for soybean grown in the Midwestern United States [J]. *Plant Physiology*, 2013, 162(1): 410-423
- [9] Cai C, Li G, Yang H L, Yang J H, Liu H, Struik P C, Luo W H, Yin X Y, Di L J, Guo X H, Jiang W Y, Si C F, Pan G X, Zhu J G. Do all leaf photosynthesis parameters of rice acclimate to elevated  $\text{CO}_2$ , elevated temperature, and their combination, in FACE environments? [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1685-1707
- [10] Wang B, Cai W W, Li J L, Wan Y F, Li Y E, Guo C, Wilkes A, You S C, Qin X B, Gao Q Z, Liu K W. Leaf photosynthesis and stomatal conductance acclimate to elevated  $[\text{CO}_2]$  and temperature thus increasing dry matter productivity in a double rice cropping system [J]. *Field Crops Research*, 2020, 248(1): 107735-107746
- [11] 周宁. 开放式空气中  $\text{CO}_2$  浓度和温度升高对粳稻生长和光合的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2020  
Zhou N. Effect of elevated  $\text{CO}_2$  on *Japonica* rice growth, development and photosynthetic [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020 (in Chinese)
- [12] Hu M J, Wan S Q. Effects of fire and nitrogen addition on photosynthesis and growth of three dominant understory plant species in a temperate forest [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019, 12(4): 759-768
- [13] 张秦泽,郝广,李洪远. 外源输入氮的有效性及其对植物生长与生理影响的研究进展 [J/OL]. 生态学杂志, (2023-03-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230309.1116.016.html>  
Zhang Q Z, Hao G, Li H Y. Effects of availability and form of exogenous nitrogen on plant growth and physiology: Progress and prospects [J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*, (2023-03-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230309.1116.016.html>. (in Chinese)
- [14] Bloom A J. The increasing importance of distinguishing among plant nitrogen sources [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2015, 25: 10-16
- [15] Bloom A J, Burger M, Asensio J S R, Cousins A B. Carbon dioxide enrichment inhibits nitrate assimilation in wheat and *Arabidopsis* [J]. *Science*, 2010, 328(5980): 899-903
- [16] 门中华,李生秀.  $\text{CO}_2$  浓度对冬小麦氮代谢的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 320-326  
Men Z H, Li S X. Effect of  $\text{CO}_2$  concentration on nitrogen metabolism of winter wheat [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2): 320-326 (in Chinese)
- [17] Andrews M, Condron L M, Kemp P D, Topping J F, Lindsey K, Hodge S, Raven J A. Elevated  $\text{CO}_2$  effects on nitrogen assimilation and growth of C3 vascular plants are similar regardless of N-form assimilated [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(2): 683-690
- [18] 蔡瑞国,张敏,尹燕桦,王平,张体彬,顾锋,戴忠民,梁太波,邹云海,王振林. 小麦灌浆过程中旗叶光合及抗氧化代谢与氮素营养关系研究 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 53-62  
Cai R G, Zhang M, Yin Y P, Wang P, Zhang T B, Gu F, Dai Z M, Liang T B, Wu Y H, Wang Z L. Photosynthetic characteristics and antioxidative metabolism of flag leaves in responses to nitrogen application in wheat during grain filling [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 53-62 (in Chinese)
- [19] Leakey A D B, Uribeharrea M, Ainsworth E A, Naidu S L, Rogers A, Ort D R, Long S P. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of  $\text{CO}_2$  concentration in the absence of drought [J]. *Plant Physiology*, 2006, 140(2): 779-790
- [20] Peet M M, Huber S C, Patterson D T. Acclimation to high  $\text{CO}_2$  in monoecious cucumbers: II carbon exchange rates, enzyme activities, and starch and nutrient concentrations [J]. *Plant Physiology*, 1986, 80(1): 63-67
- [21] Peet M M, Kramer P J. Effects of decreasing source/sink ratio in soybeans on photosynthesis, photorespiration, transpiration and yield [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1980, 3(3): 201-206
- [22] Raza A, Razzaq A, Mehmood S S, Zou X L, Zhang X K, Lv Y, Xu J S. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review [J/OL]. *Plants*, (2019-01-30). DOI: [doi.org/10.3390/plants8020034](https://doi.org/10.3390/plants8020034)
- [23] 吴浩. 不同  $\text{CO}_2$  浓度和施氮处理对冬小麦生理、生长和产量的影响 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022  
Wu H. Effects of different  $\text{CO}_2$  concentration and nitrogen application on

- physiology, growth and yield of winter wheat [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2022 (in Chinese)
- [24] Hu X Y, Wang X M, Abbas T, Fang T, Miao D N, Li Y F, Chang S X, Li Y C. Higher ammonium-to-nitrate ratio shapes distinct soil nitrifying community and favors the growth of Moso bamboo in contrast to broadleaf tree species[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(8): 1171-1182
- [25] Li H, Wang Z S, Li S X, Wang Y S, Liu S Q, Song F B, Liu F L, Brestic M, Li X N. Multigenerational elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration induced changes of wheat grain quality via altering nitrogen reallocation and starch catabolism[J/OL]. *Environmental and Experimental Botany*, [2023-10-01]. DOI: doi. org/10.1016/j. envexpbot. 2022. 105127
- [26] 马新明, 王小纯, 王志强. 氮素形态对不同专用型小麦生育后期光合特性及穗部性状的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(12): 2587-2593
- Ma X M, Wang X C, Wang Z Q. Effects of N-form on photosynthetic characteristics in late growth stages and spikes of wheat cultivars with specialized end-uses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2587-2593 (in Chinese)
- [27] Zhang Y L, Lam S K, Li P, Zong Y Z, Zhang D S, Shi X R, Hao X Y, Wang J. Early-maturing cultivar of winter wheat is more adaptable to elevated [CO<sub>2</sub>] and rising temperature in the eastern Loess Plateau [J/OL]. *Agricultural and Forest Meteorology*, [2023-10-01]. DOI:doi. org/10.1016/j. agrformet. 2023. 109356

责任编辑: 吕晓梅



**第一作者简介:** 谭世超, 硕士研究生, 现就读于河南农业大学农学院作物栽培学与耕作学专业。参与国家自然科学基金(32372239); 河南省重大科技项目(221100110800); 国家十四五重点研发项目(2021YFD1700900); 获得河南农业大学校级学业奖学金二等奖。



**通讯作者简介:** 齐丽彬, 讲师, 河南三门峡职业技术学院讲师, 主要从事土壤物理, 农业资源环境, 参与国家自然科学基金(40601041 & 90502006)。发表论文8篇, 其中EI收录1篇, SCI收录1篇。第二发明人申请国家发明专利2项, 并获得授权1项。获中国科学院水土保持与生态环境研究中心所长二等奖学金、三门峡市十大杰出青年科技奖和青年科技专家称号等奖励。



**通讯作者简介:** 熊淑萍, 河南农业大学农学院教授, 博士生导师, 从事小麦生理生态和智慧农业研究。现任中国作物学会智慧农业分会副会长、中国农学会耕作制度分会常务理事/副秘书长、中国仿真学会农业建模与仿真专业委员会委员。主持国家自然科学基金、国家重点研发项目子课题、河南省重大科技专项课题等项目12项。发表论文120余篇。获得河南省科学进步一等奖、神农中华农业科技一等奖、河南省科技进步二等奖等成果奖励4项, 获得国家级、省级、校级教育教学奖项10余项。出版专著和教材各10部。