

不同氮效率小麦品种氮素吸收利用 对 CO₂ 浓度升高的响应

许育彬^{1,2}, 沈玉芳^{1,3}, 李世清^{1,3}

(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. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以小麦氮低效品种小偃 6 号和氮高效品种小偃 22 为材料, 通过盆栽试验, 利用开顶式气室在 3 种施氮水平(0、150 和 300 mg N/kg 土)下, 分析了两个品种小麦干物质和氮素积累、氮素干物质和籽粒生产效率、氮素收获指数以及花前营养器官贮存氮素在花后向籽粒的转运量和转运率对大气 CO₂ 浓度升高的响应。结果表明, 施氮可增加小麦成熟期干物质和氮素积累量, 提高氮素收获指数以及花前贮存氮素的转运量和转运率, 但降低了氮素籽粒和干物质生产效率。与背景 CO₂ 浓度相比, 在一定施氮条件下, CO₂ 浓度升高对小麦以上指标具有正向效应, 但两个品种对 CO₂ 浓度升高响应的敏感程度存在一定差异, 氮素收获指数、氮素籽粒生产效率、花前营养器官贮存氮素转运率表现为小偃 22 敏感性高于小偃 6 号; 干物质和氮素积累量、花前贮存氮素转运量则在 150 mg/kg 土施氮水平下小偃 6 号敏感性较高, 在 300 mg/kg 土施氮水平下小偃 22 敏感性较高, 而氮素干物质生产效率表现正好相反。综合来看, 在施氮条件下, CO₂ 浓度升高可促进小麦干物质累积、氮素吸收和利用以及花前贮存氮素向籽粒的转运, 且在较高施氮水平下氮高效品种表现更为明显。

关键词: 小麦; 不同氮效率品种; 大气 CO₂ 浓度升高; 氮素吸收利用

中图分类号: S154.4; S512 文献标识码: A 文章编号: 1000-7601(2012)01-0012-07

CO₂ 浓度升高后, 小麦光合速率提高^[1-6], 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^[9-13]。CO₂ 浓度增加也抑制小麦对 NO₃⁻ 同化^[13-14], 降低植株不同器官氮含量^[14-17]。CO₂ 浓度升高明显降低春小麦对氮的吸收, 低氮时降低更明显^[18]。FACE(Free-air CO₂ enrichment) 条件下, 冬小麦氮素吸收显著增加, 在拔节期低氮和常氮处理下增幅分别为 20.8% 和 29.2%^[19], 生育中期的增幅明显大于生育前期和后期^[20]。Dijkstra 等^[21] 报道, CO₂ 浓度升高后, 冬小麦早春氮素吸收量降低, 但整个生育期的吸收量增加。也有研究表明, CO₂ 浓度升高对小麦氮素吸收的影响不显著^[22-23]。众多学者认为, CO₂ 浓度升高会增加小麦氮素吸收和利用效率^[18-26]。小麦对氮素的吸收利用存在基因型差异^[27-28]。从现有资料来看, 关于 CO₂ 浓度升高对小麦植株氮素吸收的影响目前研究结论尚不一致, 且基本上以单一品种为研究材料, 而品种间小麦氮素吸收利用对 CO₂ 浓度升高响应是否存在差异尚不清楚。本文利用开顶式气室, 以氮素利用效率不同

的两个冬小麦品种为材料, 通过盆栽试验, 探讨了大气 CO₂ 浓度升高对小麦氮素吸收利用的影响以及品种响应的差异, 以期进一步了解大气 CO₂ 浓度升高对小麦营养生理的影响机制。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2008 年 10 月—2009 年 5 月在中国科学院水土保持研究所进行, 供试小麦品种为小偃 6 号(氮低效型)和小偃 22(氮高效型)^[27]。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 13.58 g/kg, 全氮为 0.86 g/kg, 速效氮 74.31 mg/kg, 有效磷为 7.21 mg/kg(采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑钒比色法)和速效钾 101.66 mg/kg(NH₄AC 浸提-火焰光度法), pH 值为 8.16。土壤风干后, 过 5 mm 筛。试验盆钵均用 PVC 管制成, 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

收稿日期: 2011-06-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(QN2009083); 陕西省自然科学基金项目(SJ08C104)

作者简介: 许育彬(1970—), 男, 陕西武功人, 博士生, 编辑, 主要从事植物营养生理生态研究。E-mail: xuyubin928@163.com。

通讯作者: 李世清(1963—), 男, 甘肃天水人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤-植物氮素营养研究。E-mail: sqli@ms.iswc.ac.cn。

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, 保证内外温度基本一致。CO₂ 输入流量通过 CO₂ 减压流量阀控制; 气室内实际 CO₂ 浓度通过 GXH-3010F 红外线气体分析仪(北京市华云分析仪器研究所)进行每天定时测定和调控。在气室内安装风扇, 以促进气室内 CO₂ 分布均匀。对气室温度的测定发现, 背景 CO₂ 气室白天温度与室外基本无差别, 高 CO₂ 浓度气室略高于室外 0~1.1℃, 夜晚基本无差异。

1.3 试验设计

试验采用盆栽方法, 10 月 21 日播种, 每盆播种冬小麦 10~12 粒, 三叶期留苗 8 株, 返青前将各盆移入开顶式气室中, 持续通入 CO₂ 气体, 直至成熟。CO₂ 浓度设两个水平, 即背景浓度 375 μL/L(杨凌地区大气 CO₂ 浓度变化范围 370~380 μL/L)、高 CO₂ 浓度 750 ± 10 μL/L。每个 CO₂ 浓度设两个气室, 共 4 个气室。施氮设 3 个水平, 即纯氮 0、150 mg/kg 和 300 mg/kg 土。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 150 mg/kg 土和 K₂O 100 mg/kg 土, 氮磷钾肥均与风干土混匀装盆。适时浇水, 保持土壤湿润(田间持水量的 70% 左右)。在小麦拔节期和抽穗期喷三唑酮防治条锈病和白粉病, 抽穗期喷 10% 吡虫啉可湿性粉剂 500 倍液防治蚜虫。

1.4 氮吸收利用指标及其计算方法

分别于小麦开花期(4 月 16 日)和成熟期(5 月 22 日)每处理各取 4 盆, 将地上部按茎鞘、叶片、籽粒和颖壳(开花期只有穗)分开, 地下部分先给盆子充分灌水, 1~2 h 后, 用自来水轻轻冲洗根系表面泥土, 去掉杂质, 再用蒸馏水冲洗 2~3 次, 滤纸吸干表面水分。所有样品在 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 下烘干 24 h 后称干重。植物样品粉碎后, 用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法消煮, 采用 FOSS-8100 全自动凯氏定氮仪测定氮素含量。

参照孙传范等^[28]的方法计算氮素利用指标:

各器官氮素累积量(mg/pot) = 含氮量(%) × 干物质质量(g/pot) × 1000

植株氮素总累积量(mg/pot) = 各器官氮素累积量之和

氮素籽粒生产效率(g/g) = 植株籽粒产量/植株氮素累积量 × 1000

氮素干物质生产效率(g/g) = 植株干物质质量/植株氮素累积量 × 1000

氮素收获指数(%) = 籽粒氮素累积量/地上部氮素累积量 × 100%

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

氮素转运率(%) = 营养器官氮素转运量/开花期氮素累积量 × 100%

1.5 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel(2003) 和 DPS3.01 软件进行整理和统计分析, 按照 3 因素随机区组模型进行 *F* 测验, 处理间多重比较采用 SSR 法。

2 结果与分析

2.1 不同氮效率小麦品种植株干物质累积和氮素吸收对 CO₂ 浓度升高的响应

施氮水平、品种以及 CO₂ 浓度对小麦籽粒、地上部、整株干物质和氮素累积均具有显著的影响(*P* < 0.05)(表 1)。随施氮水平的提高, 在背景 CO₂ 浓度(AT)和高 CO₂ 浓度(ET)下, 小偃 6 号的籽粒、地上部、整株干物质和氮素累积量均呈增加趋势, 而小偃 22 呈先增后减或持续增加的趋势。与 AT 处理相比, 在不施氮时, ET 处理的小麦籽粒、地上部、整株干物质和氮素累积量有所降低; 而在施氮时, 小麦籽粒、地上部和整株干物质累积量 ET 处理均不同程度增加, 且多数达到显著水平, 而氮素累积量除小偃 22 的地上部和整株在 150 mg/kg 土施氮水平下外, 其余情况下均增加, 且差异多数显著。其中在 150 mg/kg 土施氮水平下, 小偃 22 的籽粒、地上部和整株干物质累积量增幅(55.3%、46.0%、43.9%)和氮素累积量增幅(4.6%、-3.8%、-3.0%)低于小偃 6 号增幅(89.5%、59.7%、53.0%和 25.3%、33.3%、30.1%), 而在 300 mg/kg 土施氮水平下, 小偃 22 增幅(93.2%、63.2%、61.2%和 80.1%、50.9%和 49.5%)高于小偃 6 号增幅(62.9%、53.8%、50.5%和 48.9%、39.8%、38.4%)(表 1)。说明在施氮条件下, 大气 CO₂ 浓度升高促进小麦干物质累积的同时, 增进了植株对氮素吸收, 且在施氮 150 mg/kg 土时小偃 6 号植株干物质积累和氮素吸收对 CO₂ 浓度升高的响应较敏感, 而在施氮 300 mg/kg 时小偃 22 表现较敏感。

表 1 不同施氮水平下 CO₂ 浓度增加对小麦植株干物质和氮素累积量的影响Table 1 Effects of CO₂ enrichment on dry matter and nitrogen accumulation of wheat plant

| 品种 Variety | CO ₂ | 施氮水平 N level (mg/kg soil) | 籽粒 Grain | | 地上部 Shoot | | 整株 Whole plant | |
|---------------------|-----------------|---------------------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | | | MAA (g/pot) | NAA (mg/pot) | MAA (g/pot) | NAA (mg/pot) | MAA (g/pot) | NAA (mg/pot) |
| 小偃 6 Xiaoyan 6 | AT | 0 | 5.6 h | 131.5 e | 13.1 i | 175.0 i | 16.1 i | 199.3 d |
| | | 150 | 9.5 fg | 366.8 d | 23.8 f | 472.0 g | 27.0 g | 515.2 c |
| | | 300 | 11.6 ef | 408.6 cd | 26.6 e | 653.6 c | 29.5 f | 696.8 b |
| | ET | 0 | 4.9 h | 94.8 e | 11.7 i | 128.2 k | 14.0 j | 144.7 d |
| | | 150 | 18.0 c | 459.6 c | 38.0 c | 629.4 d | 41.3 d | 670.2 b |
| | | 300 | 18.9 c | 608.4 b | 40.9 b | 913.8 b | 44.4 c | 964.4 a |
| 小偃 22 Xiaoyan 22 | AT | 0 | 8.6 g | 165.6 e | 16.5 g | 241.1 h | 18.6 h | 256.7 d |
| | | 150 | 14.1 d | 447.9 cd | 29.1 d | 636.1 d | 32.1 e | 675.8 b |
| | | 300 | 13.2 de | 404.5 cd | 27.7 de | 620.5 e | 29.9 f | 652.8 b |
| | ET | 0 | 5.9 h | 102.4 e | 14.8 h | 149.4 j | 16.7 i | 162.7 d |
| | | 150 | 21.9 b | 468.4 c | 42.5 b | 611.7 f | 46.2 b | 655.8 b |
| | | 300 | 25.5 a | 728.7 a | 45.2 a | 936.5 a | 48.2 a | 976.2 a |

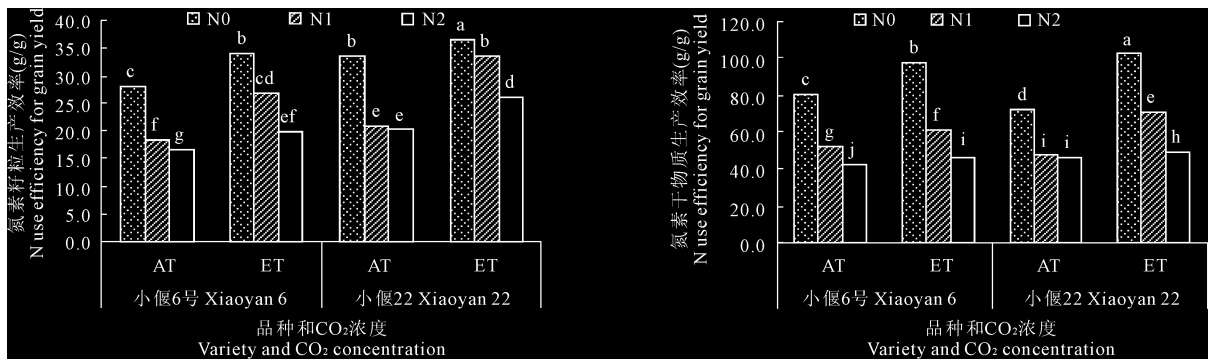
注: AT 和 ET 分别代表 375 和 750 μL/L 两种 CO₂ 浓度; 同列数据后的字母不同表示处理间差异显著 ($P > 0.05$)。MAA: 干物质累积量; NAA: 氮素累积量。整株干物质和氮素累积量分别为地上部和地下部干物质和氮素累积量的总和。

Note: AT and ET represent the two CO₂ concentrations of 375 and 750 μL/L, respectively. Different letters after the values within a same column mean significant difference among treatments at the 0.05 level. MAA: Dry matter accumulated amount; NAA: Nitrogen accumulated amount; MAA and NAA of whole plant are the total of MAA and NAA of shoot and root, respectively.

2.2 不同氮效率小麦品种的氮素籽粒和干物质生产效率对 CO₂ 浓度升高的响应

在两种 CO₂ 浓度下, 随施氮水平的提高, 两个小麦品种氮素籽粒和干物质生产效率均呈下降趋势, 施氮处理与不施氮处理间差异显著。在三个施氮水平下, 两个小麦品种氮素籽粒和干物质生产效率的 ET 处理均显著高于 AT 处理。其中, 在 0、150 和 300 mg/kg 土施氮水平下小偃 6 号氮素籽粒生产效率的增幅分别为 21.3%、46.0% 和 18.2%; 氮素干物质生产效率增幅分别为 20.5%、17.3% 和 8.7%。小

偃 22 在三个施氮水平下氮素籽粒生产效率的增幅分别为 9.1%、59.7% 和 28.5%; 氮素干物质生产效率增幅分别为 41.8%、48.3% 和 7.6% (图 1)。说明 CO₂ 浓度升高对小麦氮素籽粒和干物质生产效率均具有促进效应, 且在施氮时小偃 22 氮素籽粒生产效率对 CO₂ 浓度升高的反应比小偃 6 号敏感, 而氮素干物质生产效率则在 0 和 150 mg/kg 土施氮水平下小偃 22 较小偃 6 号相对敏感, 300 mg/kg 土施氮水平下, 小偃 6 号略敏感于小偃 22。



注: AT 和 ET 分别代表 375 和 750 μL/L 两种 CO₂ 浓度; 柱上不同字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著; N0、N1 和 N2 分别代表 0、150 和 300 mg/kg 土 3 个施氮水平。下同。

Note: AT and ET represent the two CO₂ concentrations of 375 and 750 μL/L, respectively. Different letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). N0, N1 and N2 represent the three nitrogen application levels of 0, 150 and 300 mg/kg soil, respectively. The same as below.

图 1 不同施氮水平下 CO₂ 浓度增加对小麦氮素籽粒和干物质生产效率的影响Fig. 1. Effects of CO₂ enrichment on N use efficiency for grain yield and dry matter production of wheat

2.3 不同氮效率小麦品种氮素向籽粒的分配和转运对 CO₂ 浓度升高的响应

2.3.1 不同氮效率小麦品种氮素收获指数对 CO₂ 浓度升高的响应 氮素收获指数指籽粒氮素累积量占植株地上部吸收氮素的比例,可反映植株地上部累积氮素向籽粒的分配状况。随施氮水平的提高,两个小麦品种氮素收获指数在 AT 下随施氮水平的提高均呈先增后减趋势,在 ET 下小偃 6 号和小偃 22 分别呈降低和增加趋势。在不施氮时,两个品种氮素收获指数均表现为 ET 处理低于 AT 处理,但差异不显著;在 150 和 300 mg/kg 土施氮水平下,小偃 22 ET 处理较 AT 处理显著增加,增幅分别为 6.2 和 12.6 个百分点,而小偃 6 号 ET 处理较 AT 处理分别降低 4.7 个百分点和增加 4.2 个百分点,且差异均显著(图 2)。说明在一定施氮条件下,CO₂ 浓度升高对地上部氮素向籽粒的分配具有促进效应,且在小偃 22 上表现较小偃 6 号敏感。

2.3.2 不同氮效率小麦品种地上部营养器官花前贮存氮素转运对 CO₂ 浓度升高的响应 在两种 CO₂ 浓度下,随施氮水平的提高,小偃 6 号地上部营养器官花前贮存氮素在花后向籽粒的转运量和转运率均呈先增后降趋势,处理间均差异显著;小偃 22 地上部营养器官花前贮存氮素转运量和转运率均表现为施氮处理显著高于不施氮处理。不施氮时,与 AT 处理相比,两个小麦品种 ET 处理的花前贮存氮素

向籽粒的转运量显著下降或变化不显著;在施氮 150 和 300 mg/kg 土时小偃 6 号的 ET 处理均显著增加,增幅分别为 7.3% 和 33.9%,而小偃 22 的 ET 处理分别下降 0.4% 和增加 42.7%,其中在 300 mg/kg 土施氮水平下差异达到显著水平。相对于 AT 处理,小偃 6 号花前贮存氮素转运率在不施氮和施氮 150 mg/kg 土时,ET 处理均下降,而施氮 300 mg/kg 土时显著升高 1.7 个百分点;而小偃 22 在三个施氮水平下分别增加 3.7、6.0 和 9.6 个百分点(图 3)。说明在一定施氮条件下小麦地上部花前营养器官贮存氮素向籽粒的转运对 CO₂ 浓度升高表现出正向效应,尤其是在施氮 300 mg/kg 土时小偃 22 表现更为明显。

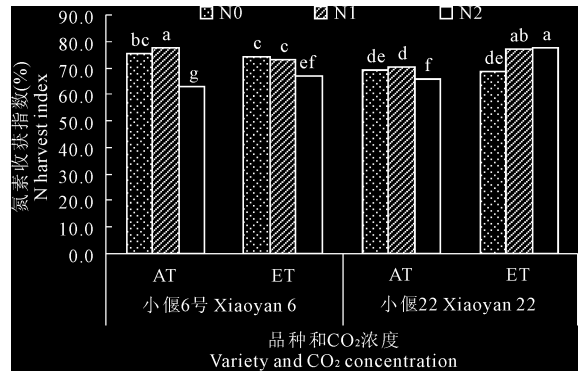


图 2 不同施氮水平下 CO₂ 浓度增加对小麦氮素收获指数的影响

Fig. 2 Effects of CO₂ enrichment on N harvest index of wheat

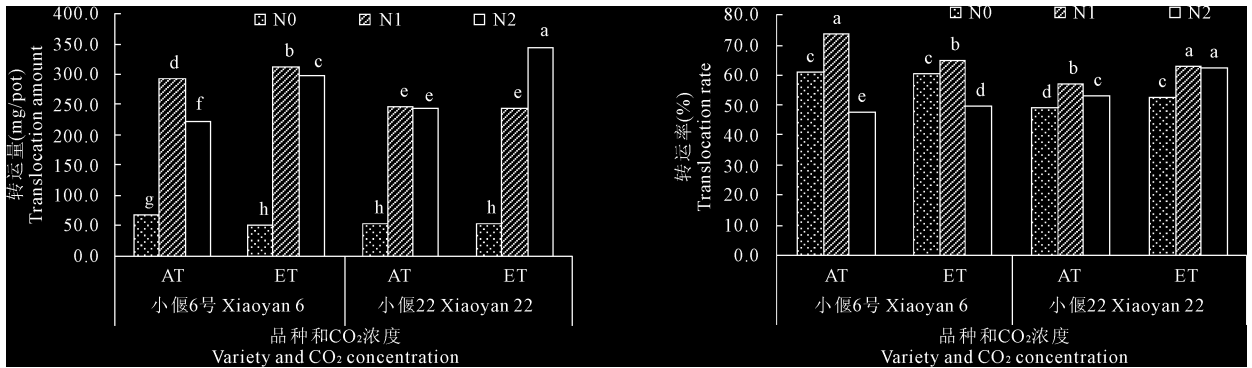


图 3 不同施氮水平下 CO₂ 浓度增加对小麦花前贮存氮素转运的影响

Fig. 3 Effects of CO₂ enrichment on the translocation of nitrogen restored before anthesis to grain of wheat

3 讨论

关于 CO₂ 浓度对小麦氮素吸收的影响,目前的研究结果尚不一致。李伏生等^[18]报道,CO₂ 浓度升高明显降低了春小麦对氮的吸收,低氮时降低更明显;一些研究认为,CO₂ 浓度升高后,冬小麦氮素吸收显著增加^[19-21]。也有研究表明,CO₂ 浓度升高对

小麦氮吸收影响不显著^[22-23]。这些研究结论的差异可能与实验条件和材料有关。许多研究认为,CO₂ 浓度升高可增加小麦氮素吸收和利用效率^[18-26]。然而,目前的研究基本以单一品种为材料,而关于不同氮效率小麦品种氮素吸收利用对 CO₂ 浓度升高的响应是否存在差异尚未见报道。在本试验中,与背景 CO₂ 浓度(AT)相比,在不施氮时,

成熟后小麦氮素累积吸收量、氮素收获指数的高 CO₂ 浓度(ET) 处理变化不显著或显著下降; 在施氮时, 除小偃 22 的氮素累积吸收量以及小偃 6 号的氮素收获指数在 150 mg/kg 土施氮水平下下降外, 其余情况下两个品种氮素累积吸收量、氮素收获指数 ET 处理相对 AT 处理均不同程度增加, 且两种 CO₂ 浓度间差异大多数达到显著水平。小麦氮素籽粒和干物质生产效率在三个施氮水平下 ET 处理均较 AT 处理显著增加。由此可见, 在施氮条件下, CO₂ 浓度升高总体上对小麦氮素吸收和利用具有促进效应。这与以前在冬小麦上的研究结果^[19-21] 相一致。

从试验结果看, 两个氮效率不同的品种的氮素吸收和利用对 CO₂ 浓度升高的反应存在差异。在 150 mg/kg 土施氮水平下, 氮低效品种小偃 6 号的氮素累积吸收量 ET 处理相对于 AT 处理的增幅高于氮高效品种小偃 22, 而 300 mg/kg 土施氮水平下表现相反; 而氮素干物质生产率 ET 处理相对于 AT 处理的增幅, 小偃 22 在施氮 0 和 150mg/kg 土时表现较高, 在施氮 300 mg/kg 土时小偃 6 号表现较高; 氮素籽粒生产效率和氮素收获指数在施氮时 ET 处理增幅小偃 22 均高于小偃 6 号。说明不同氮效率品种氮素的吸收和利用对 CO₂ 浓度升高的响应差异因施氮水平而不同, 且不同指标的表现不一致。总体来看, 在未来大气环境条件下, 较高施氮水平更有利于氮高效品种氮素的吸收和利用对 CO₂ 浓度升高的响应。小麦品种间氮素吸收利用对 CO₂ 浓度升高的响应差异可能与其生理特性有关。研究表明, 小麦氮高效品种较氮低效品种具有较高的氮素同化、光合和膜脂抗氧化能力^[27-29]。虽然小偃 6 号和小偃 22 分别属于氮低效低响应型和氮高效高响应型基因型^[27], 但随着 CO₂ 浓度的升高, 植株氮素同化受到了抑制, 氮素含量降低, 植株生长发育对氮素营养的需求会增加, 反过来导致植株对低氮的耐性减弱, 因此对氮素营养低响应的小偃 6 号对低氮营养供应就会表现出很好的适应性, 而氮素营养高响应的小偃 22 则显得不适应而表现出对 CO₂ 浓度升高的不敏感, 在供氮水平较高时, 这种趋势完全发生变化, 从而显示相反的结果, 这可以解释氮素吸收量等指标对 CO₂ 升高反应的品种差异与施氮水平的关系, 但由于本试验选材有限, 具体原因今后有待于进一步研究探讨。

小麦籽粒氮素主要来源于花前营养器官贮存氮素的转运。杨连新等^[20] 研究表明, 与对照相比, FACE 处理下小麦不同生育时期吸 N 量显著增加

(7.4% ~ 25.4%), 生育中期的增幅明显大于生育前、后期。因此, 在高 CO₂ 浓度条件下可能有更多的花前贮存氮素在花后转运到籽粒中, 但这方面目前尚缺乏系统的研究。本试验结果表明, CO₂ 浓度升高后, 在施氮 300 mg/kg 土时, 小麦地上部营养器官花前贮存氮素在花后向籽粒的转运量和转运率均明显提高, 尤以小偃 22 表现更为明显, 说明在一定施氮条件下, CO₂ 浓度升高促进了小麦花前贮存氮素在花后向籽粒的转运, 有利于小麦籽粒氮素的累积, 且不同氮效率品种花前贮存氮素转运对 CO₂ 浓度升高响应存在差异。在施氮 150 和 300 mg/kg 土时, CO₂ 浓度升高后, 小偃 6 号花前贮存氮素转运量分别增加 7.3% 和 33.9%, 小偃 22 分别增加 -0.4% 和 42.7%; 而花前贮存氮素转运率小偃 6 号只在施氮 300 mg/kg 土时升高 1.7 个百分点, 小偃 22 则在三个施氮水平下分别增加 3.7、6.0 和 9.6 个百分点。氮素转运与籽粒库容量大小密切相关, 高产基因型作物能为茎、叶等营养器官氮素的转运提供较大库容量, 因而有利于氮素向籽粒的转运。Zhu 等^[31] 研究认为, CO₂ 浓度升高导致小麦籽粒氮库增加, 加快了旗叶氮在生育后期向籽粒的再动员。在本试验中, 两个品种分属中产和高产类型品种, 具有不同的籽粒库特性。因此, 在较高施氮条件下, 具有较大库潜力小偃 22 对 CO₂ 浓度升高的响应就相对比较明显。

参考文献:

- [1] 王修兰, 徐师华, 李耀祥, 等. 小麦对 CO₂ 浓度倍增的生理反应[J]. 作物学报, 1996, 22(3): 340-344.
- [2] 蒋跃林, 张庆国, 张仕定, 等. 小麦光合特性、气孔导度和蒸腾速率对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2): 169-173.
- [3] 康绍忠, 张富仓, 梁银丽, 等. 土壤水分和 CO₂ 浓度增加对小麦、玉米、棉花蒸散、光合及生长的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(1): 55-63.
- [4] 王静, 冯永忠, 杨改河, 等. 小麦光合特性对二氧化碳浓度升高的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 179-183.
- [5] 陈雄, 吴冬秀, 王根轩, 等. CO₂ 浓度升高对干旱胁迫下小麦光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6): 881-884.
- [6] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. CO₂ 浓度、氮和水分对春小麦光合、蒸散及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 387-393.
- [7] Dempster W F, Nelson M, Silverstone S, et al. Carbon dioxide dynamics of combined crops of wheat, cowpea, pinto beans in the laboratory biosphere closed ecological system[J]. Adv Space Res, 2009, 43(8): 1229-1235.

- [8] 李伏生,康绍忠. CO₂ 浓度、氮素和水分对春小麦碳素固定的影响[J]. 土壤通报, 2004, 25(5): 546-549.
- [9] 李伏生,康绍忠,张富仓. CO₂ 浓度升高、氮与土壤水分对春小麦生长及干物质积累的效应[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 37-40.
- [10] Pleijel H, Gelang J, Sild E, et al. Effects of elevated carbon dioxide, ozone and water availability on spring wheat growth and yield [J]. *Physiologia Plantarum*, 2000, 108: 61-70.
- [11] Wu D X, Wang G X, Bai Y F, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels [J]. *Agric, Ecosyst Environ*, 2004, 104: 493-507.
- [12] Anthor J S. Effects of atmospheric CO₂ concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO₂ concentration [J]. *Field Crops Research*, 2001, 73: 1-34.
- [13] Pal M, Rao L S, Jain V, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen on wheat growth and photosynthesis [J]. *Biol Plant*, 2005, 49: 467-470.
- [14] Cousins A B, Bloom A J. Oxygen consumption during leaf nitrate assimilation in a C₃ and C₄ plant: the role of mitochondrial respiration [J]. *Plant Cell & Environ*, 2004, 27: 1537-1545.
- [15] Del Pozo A, Perez P, Gutierrez D, et al. 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 [J]. *Environ Exp Bot*, 2007, 59: 371-380.
- [16] Van Vuuren M M I, Robinson D, Scrimgeour C M, et al. Decomposition of ¹³C-labelled wheat root systems following growth at different CO₂ concentrations [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32: 404-413.
- [17] Smart D R, Ritchie K, Bloom A J, et al. Nitrogen balance for wheat canopies (*Triticum aestivum* cv. Veery 10) grown under elevated and ambient CO₂ concentrations [J]. *Plant, Cell & Environ*, 1998, 21: 753-763.
- [18] 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.
- [19] 马红亮,朱建国,谢祖彬,等. 开放式空气 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和 N 吸收的影响 [J]. 作物学报, 2005, 31(12): 1634-1639.
- [20] 杨连新,黄建晔,李世峰,等. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦氮素吸收利用的影响 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 519-525.
- [21] Dijkstra P, Groenwold K, Jansen M, et al. Seasonal changes in the response of winter wheat to elevated atmospheric CO₂ concentration grown in Open-Top Chambers and field tracking enclosures [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5(5): 563-576.
- [22] 李伏生,康绍忠. 两种氮水平下 CO₂ 浓度升高对冬小麦生长和氮磷浓度的影响 [J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 599-606.
- [23] Fangmeier A, Hög P, Vemhoren B, et al. Effects of elevated CO₂ nitrogen supply and tropospheric ozone on spring wheat. II. nutrients (N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn) [J]. *Environmental Pollution*, 1997, 96(1): 43-59.
- [24] Fangmeier A, Temmeman L de, Mortensen L, et al. Effects on nutrients and on grain quality in spring wheat crops grown under elevated CO₂ concentrations and stress conditions in the European, multiple-site experiment 'SPACE-wheat' [J]. *European Journal of Agronomy*, 1999, 10(3/4): 215-229.
- [25] Li F S, Kang S Z, Zhang J H. CO₂ enrichment on biomass accumulation and nitrogen nutrition of spring wheat under different soil nitrogen and water status [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26(4): 769-788.
- [26] Theobald J C, Mitchell R A C, Parry M A J, et al. Estimating the excess investment in ribulose 1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in leaves of spring wheat grown under elevated CO₂ [J]. *Plant physiology*, 1998, 118(3): 945-955.
- [27] 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, 2003, 23(8): 245-249.
- [28] 孙传范,戴廷波,荆奇,等. 小麦品种氮利用效率的评价指标及其氮营养特性研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 983-987.
- [29] 路文静,张树华,郭程瑾,等. 不同氮素利用效率小麦品种的氮效率相关生理参数研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 985-991.
- [30] 董依平,李继云,李振声. 农作物素利用效率基因型差异及其机理 [J]. 生态农业研究, 1999, 7(2): 23-27.
- [31] Zhu Chunwu, Zhu Jianguo, Zeng Qing, et al. Elevated CO₂ accelerates flag leaf senescence in wheat due to ear photosynthesis which causes greater ear nitrogen sink capacity and ear carbon sink limitation [J]. *Functional Plant Biology*, 2009, 36(4): 291-299.

Response of nitrogen uptake and use of wheat varieties with different nitrogen use efficiencies to CO₂ concentration enrichment

XU Yubin^{1,2}, SHEN Yufang^{1,3}, LI Shiqing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Department of Natural Resources and the Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A pot experiment with open top chambers (OTCs) was conducted to investigate the effect of CO₂ enrichment on nitrogen uptake and use of winter wheat and the difference between two varieties, Xiaoyan 6 with a low nitrogen use efficiency and Xiaoyan 22 with a high nitrogen use efficiency. Wheat plants were grown under two CO₂ concentrations

(375 and 750 $\mu\text{L/L}$) and three nitrogen application levels(0, 150 and 300 mg/kg soil). The results showed that nitrogen application could increase dry matter accumulated amount (MAA), nitrogen accumulated amount(NUA), nitrogen harvest index (NHI), translocation amount (NTA) and translocation rate (NTR) of pre-anthesis nitrogen to grain, but it reduced nitrogen use efficiency for grain yield and dry matter production(NGUE and NDUE). Compared the ambient CO_2 concentration (375 $\mu\text{L/L}$), under some nitrogen nutrition condition, elevated CO_2 had positive effects on these indexes of wheat. Therefore, of the sensitivity of two varieties responding to CO_2 enrichment in the indexes were different. Xiaoyan 22 was more sensitive than Xiaoyan 6 in NHI, NGUE and NTR. In NDUE, the variety of with higher sensitivities was Xiaoyan 6 under the nitrogen application level of 150 mg/kg soil and was Xiaoyan 22 under the nitrogen application level of 300 mg/kg soil. However, the responses of two varieties to CO_2 elevation in the other indexes were contrary in NDUE. Comprehensively, CO_2 enrichment could promote the dry matter accumulation, nitrogen uptake and use of wheat under nitrogen application condition, and the effect would more obvious on varieties with high nitrogen use efficiency under higher nitrogen level.

Keywords: wheat; varieties with different nitrogen use efficiencies; CO_2 concentration enrichment; nitrogen uptake and use

(上接第 11 页)

Influence of fertilizer application on transform characteristics of soil urea under single film hole infiltration

DONG Yu-yun¹, FEI Liang-jun², MU Hong-wen³

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

3. Gansu Design Institute of Electric Power, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Based on lab experiment, the influence of fertilization application on transform characteristics of soil urea under film hole single point infiltration was researched. The results show that the transform laws of urea under different fertilization modes are the same. The $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content comes to the maximum value in 5 days after fertilization and decreases to the background value rapidly in the succedent 10 days. While the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content increases all along and comes to the maximum value in 15 days after fertilization. The distribution characteristics $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ after transform of soil urea are different. The soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under irrigation with fertilizer decrease with the distance further from the film hole center. The distribution of soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under surface application concentrate in the 7~ 15 cm scope below soil surface. The distribution of soil $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ content and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content under deep application concentrate in the 5~ 17 cm scope below soil surface. The results lay a foundation for study of film hole irrigation fertilizer technique.

Keywords: film hole irrigation; point source infiltration; fertilizer application; urea; transform characteristics