

# A Review on the Effects of Carbon Dioxide Enrichment on Wheat Water Use Efficiency\*

Yueyan Liu<sup>1,2</sup>, Yunzhou Qiao<sup>1</sup>, Baodi Dong<sup>1</sup>, Changhai Shi<sup>1</sup>, Hongmei Zhai<sup>1,2,3</sup>, Dongxiao Li<sup>1,2</sup>, Fuyan Si<sup>1,2</sup>, Mengyu Liu<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>Center for Agricultural Research, Institute of Genetics and Development Biology, Chinese Academy of Sciences; Hebei Key Laboratory of Water Saving Agriculture; Key Laboratory of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang

<sup>2</sup>Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>3</sup>Department of Chemistry, Shijiazhuang University, Shijiazhuang

Email: <sup>#</sup>liuyueyan3344@126.com

Received: Sep. 8<sup>th</sup>, 2012; revised: Oct. 10<sup>th</sup>, 2012; accepted: Oct. 20<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** In this paper, it will review the research progress of wheat water use efficiency under elevated carbon dioxide and point out the current problems and look forward so as to provide new ideas for further study. The effects of carbon dioxide enrichment on future agriculture receive much concern in our society. Wheat water use efficiency (WUE) at leaf level, population level and production level are all improved under elevated CO<sub>2</sub> condition. The WUE at leaf level improved more and it can be attributed to the increase of photosynthetic rate and the decrease of transpiration rate and stomatal conductance. At population level, there is a substantial increase in the biomass of wheat but little influence on evapotranspiration. At production level, the increase of tiller numbers is the key factors. In addition, the increase of WUE of wheat under elevated CO<sub>2</sub> has much relationship with other environmental factors, such as temperature, water and nutrient. In this paper, it will review the research progress of wheat water use efficiency under elevated carbon dioxide and point out the current problems and look forward so as to provide new ideas for further study.

**Keywords:** Elevated CO<sub>2</sub>; Wheat; Water Use Efficiency; Environmental Factors

## CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦水分利用效率的影响研究综述\*

刘月岩<sup>1,2</sup>, 乔匀周<sup>1</sup>, 董宝娣<sup>1</sup>, 师长海<sup>1</sup>, 翟红梅<sup>1,2,3</sup>, 李东晓<sup>1,2</sup>, 司福艳<sup>1,2</sup>, 刘孟雨<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北省节水农业重点实验室, 中国科学院农业水资源重点实验室, 石家庄

<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京

<sup>3</sup>石家庄学院化工学院, 石家庄

Email: <sup>#</sup>liuyueyan3344@126.com

收稿日期: 2012年9月8日; 修回日期: 2012年10月10日; 录用日期: 2012年10月20日

**摘要:** 本文综述了 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 小麦水分利用效率的研究进展, 并提出未来研究的重点与方向。CO<sub>2</sub> 浓度升高对未来农业的影响备受人们关注。CO<sub>2</sub> 浓度升高显著提高了小麦在叶片、群体及产量水平下的水分利用效率(WUE)。但叶片水平的 WUE 提高最为显著。在叶片水平, CO<sub>2</sub> 浓度升高主要是通过提高冬小麦的光合作用、降低气孔导度和蒸腾作用使叶片 WUE 大幅提高; 在群体水平, 主要是通过增加生物量, 但对耗水量影响不显著; 产量水平 WUE 的提高主要是亩穗数的增加带来的增产效应。此外, CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下小麦 WUE 与温度、水分、养分等环境因子的关系密切。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 浓度升高; 冬小麦; 水分利用效率; 环境因子

\*基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BADA3B-03-08)、中国科学院知识创新工程优秀青年科技专项(KSCX2-EW-Q-25)、国家自然科学基金项目(31170415, 30870411)、灌区高效节水灌溉标准化技术模式及设备(2012BADO8B02)。

<sup>#</sup>通讯作者。

## 1. 引言

CO<sub>2</sub> 浓度升高是引起气候变化的重要原因，为世界各国所关注。由于煤炭、石油等化石燃料的过度使用以及大规模滥伐森林，CO<sub>2</sub> 浓度逐步上升，大量监测与模拟结果均表明，未来 50~100 年间，地球表面大气 CO<sub>2</sub> 浓度将达到当前水平的两倍<sup>[1]</sup>。

小麦是世界范围内的重要粮食作物之一，CO<sub>2</sub> 浓度升高会对小麦的水分运移和利用产生重要影响，研究大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦水分利用的影响已成为国内外农业研究的重要课题。国内外专家学者已做了许多研究工作，多采用人工控制环境因子的方法，一致认为大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会提高小麦的 WUE，但作用程度大小以及机理响应方面的研究结果不尽一致<sup>[2-4]</sup>。研究内容主要涉及 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下的小麦形态结构、生长发育、光合生理、各水平 WUE，CO<sub>2</sub> 浓度升高与其他环境因子的交互作用等。本文综述了小麦 WUE 对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应与适应研究进展，研究结果将有助于我们尽早采取高效的水资源管理措施，提高小麦的 WUE，保证气候变化条件下农业的可持续发展，为应对和适应气候变化形势提供坚实的理论依据。

小麦 WUE 可以分为叶片、群体和产量三个水平。多数研究发现，CO<sub>2</sub> 浓度增加可改善植物体内水分供求关系，提高冬小麦叶片、群体和产量水平的 WUE<sup>[5,6]</sup>。

## 2. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦叶片水平 WUE 的影响

作物叶片水平的 WUE 常用净光合速率与蒸腾速率的比值表示。升高 CO<sub>2</sub> 浓度可以提高光合速率，降低蒸腾速率，从而提高小麦叶片水平 WUE。王润佳<sup>[7]</sup>等通过文献总结出，CO<sub>2</sub> 浓度倍增，植物叶片水平 WUE 提高 50%~200%。在大气 CO<sub>2</sub> 浓度倍增条件下，植物光合速率提高 10%~50%，叶片气孔导度降低 33%~50%，作物蒸腾量减少约 20%~27%，从而使叶片 WUE 提高。但是升高 CO<sub>2</sub> 浓度对光合作用和蒸腾作用两个过程哪个的影响更大一些还存在争议<sup>[8]</sup>，这主要取决于气孔关闭对 CO<sub>2</sub> 和水分那个影响的更大一些，还需在细胞分子水平加以分析。

## 2.1. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦光合作用的影响

光合速率提高，是升高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下小麦 WUE 提高的重要原因。蒋跃林<sup>[9]</sup>研究发现，与背景大气 CO<sub>2</sub> 浓度 350 μmol/mol 相比，当大气 CO<sub>2</sub> 浓度为 550 μmol/mol 和 750 μmol/mol 时，小麦抽穗期日平均净光合速率分别提高 20.8%、29.7%，并消除了光合午休现象。康绍忠<sup>[10]</sup>的研究也表明，CO<sub>2</sub> 浓度增加一倍，小麦光合速率平均增加 2.569 倍。升高 CO<sub>2</sub> 浓度提高小麦的光合速率，是由于增加了 CO<sub>2</sub> 对核酮糖 1,5 - 二磷酸羧化酶(RuBP)结合位点的竞争，从而提高羧化速率；同时抑制了光呼吸<sup>[11]</sup>。

Nie<sup>[12]</sup>等通过开放式 CO<sub>2</sub> 浓度升高(FACE)实验发现，小麦在 550 μmol/mol 高 CO<sub>2</sub> 浓度下 RuBP 羧化酶含量比对照高 15%。徐玲<sup>[13]</sup>等发现，CO<sub>2</sub> 浓度升高处理条件下，小麦叶片 Hill 反应活力有不同程度的增加，使 PS II 电子传递效率增加；小麦叶绿体中 Mg<sup>2+</sup>-ATPase, Mg<sup>2+</sup>-ATPase 活性也升高，使光合磷酸化增强。Andrew D. B. Leakey<sup>[14]</sup>等总结了前人 FACE 的研究结果得出，在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下，光合碳吸收和光合氮利用效率都有不同程度的增加。这些可能是 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下光合速率提高的内在生理原因。Amanda Pereira De Souza<sup>[15]</sup>等在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下通过对甘蔗 cDNA 的序列分析发现，和叶片光合、生长有关的 35 个基因的表达发生了变化。

## 2.2. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦气孔及蒸腾速率的影响

CO<sub>2</sub> 浓度升高，小麦气孔会部分关闭，光合与蒸腾速率都会降低，由于蒸腾速率的降低大于光合速率的下降，从而 WUE 提高。蒋跃林<sup>[9]</sup>等研究表明，植物气孔导度随 CO<sub>2</sub> 浓度增加而下降，当大气 CO<sub>2</sub> 浓度为 550 μmol/mol 和 750 μmol/mol 时，不同生育期平均降低 15.3%和 21.7%，蒸腾速率则平均下降 4.5%和 9.4%。大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高，导致胞间 CO<sub>2</sub> 的增加，为保持胞间 CO<sub>2</sub> 分压始终低于大气 CO<sub>2</sub> 分压(20%~30%)，必须调节气孔开闭程度，进而减少胞间 CO<sub>2</sub><sup>[14,16]</sup>。气孔部分关闭的生理机制：一般认为在高浓度 CO<sub>2</sub> 下冬小麦的光合作用增强，保卫细胞内光合产物多，碳糖浓度随之提高，进入细胞的 K<sup>+</sup>也增多，

细胞水势降低, 这样保卫细胞吸水膨胀, 从而使气孔关闭。气孔的部分关闭使水分由内向外排放的阻力增大, 蒸腾速率降低, WUE 升高<sup>[17,18]</sup>。

还有研究表明, CO<sub>2</sub> 浓度升高, 植物气孔密度会减少。杨惠敏等<sup>[19]</sup>发现小麦叶片的气孔密度随 CO<sub>2</sub> 浓度的升高有明显的下降趋势, 其分布也趋向均匀。叶片的气孔密度减少的一种直接生理结果可能是气孔导度长期而且不可逆的降低。因此, 在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 植物可能是通过改变气孔密度来刺激光合作用对 CO<sub>2</sub> 的吸收, 降低蒸腾吸水, 从而提高 WUE<sup>[7]</sup>。

所以, 降低气孔密度和提高作物 Rubisco 活性是提高作物水分利用效率的有效生理调控途径, 这一结论对于培育高水分利用效率和节水作物品种具有一定的启示。

### 3. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦群体 WUE 的影响

小麦群体水平 WUE 的变化与总的干物质积累以及总的水分消耗有关, 通常为群体 CO<sub>2</sub> 净同化量与蒸散量(耗水量)之比。王明娜<sup>[20]</sup>等运用能量平衡法得出, FACE(CO<sub>2</sub> 浓度较正常大气 CO<sub>2</sub> 浓度高 200 μmol/mol) 使冬小麦蒸散量减小 9.5%, 结合小麦生物量增加 13%, 群体 WUE 增加约 19%。王修兰<sup>[21]</sup>等的研究表明, 小麦从拔节期到乳熟期, CO<sub>2</sub> 浓度 700 μmol/mol、500 μmol/mol 比 350 μmol/mol 群体 WUE 提高 4.9%~19.9%和 8.6%~10%。Wu<sup>[22]</sup>等得出的结果表明, 在充足水分条件下, CO<sub>2</sub> 浓度升高一倍使小麦群体 WUE 提高 62%。

由于 CO<sub>2</sub> 浓度增加导致整个小麦群体的叶面积指数增加, 会抵消一部分因气孔阻力增大而使蒸腾减少的效应, 使总的蒸发蒸腾下降的幅度远小于蒸腾速率下降的幅度, 但由于总的生物量增加, 仍会导致群体水平 WUE 增加, 但群体 WUE 的提高了幅度要远小于叶片水平 WUE<sup>[23]</sup>。

#### 3.1. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦生物量的影响

大量实验表明, CO<sub>2</sub> 浓度升高, 小麦的生物量会增加。尹飞虎(2011)<sup>[24]</sup>等进行文献总结得出, CO<sub>2</sub> 浓度升高一倍, C<sub>3</sub> 植物的生物量平均提高 41%。白月明<sup>[25]</sup>等通过实验得出, 当 CO<sub>2</sub> 浓度为 700 μmol/mol 和 500 μmol/mol 时, 冬小麦生物总量分别比对照增加 34.2%和 24.5%。王春乙<sup>[26]</sup>研究发现, CO<sub>2</sub> 浓度倍增,

冬小麦的生物量增长了 37.4%。

#### 3.2. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦蒸散量(ET, 耗水量)的影响

在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 小麦的耗水量也会发生变化。康绍忠<sup>[10]</sup>通过筒栽春小麦实验计算得出, CO<sub>2</sub> 浓度增加, 作物蒸发蒸腾量呈减少趋势; CO<sub>2</sub> 浓度增加一倍, 试验期内的总蒸发蒸腾量平均减少 10.04%, 但前期减少的幅度比后期的要大。Andrew D. B. Leakey<sup>[14]</sup>等对大量的 FACE 试验结果总结出, 在 CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下, 作物 ET 减少 5%~20%。B. A. Kimball<sup>[27]</sup>等总结得出, CO<sub>2</sub> 浓度升高对 ET 的影响作用是气孔导度降低、叶面积增加和冠层温度升高三者共同作用的结果, 且 CO<sub>2</sub> 浓度升高对 ET 的影响很有限。

#### 4. CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦群体 WUE 的影响

小麦产量水平的 WUE 为籽粒产量与耗水量之比。CO<sub>2</sub> 浓度升高并没有显著影响小麦的蒸散量(ET)<sup>[27,28]</sup>, 却能够大幅提高产量, 因而产量水平 WUE 也大幅度提升。

温民和王春乙<sup>[29]</sup>研究得出 CO<sub>2</sub> 浓度倍增时冬小麦产量可提高 32%。CO<sub>2</sub> 浓度升高对产量的提高作用主要是通过影响小麦的产量构成三要素, 即穗数、穗粒数和千粒重, 而且对穗数的影响最大。韩雪<sup>[30]</sup>等通过实验得出 CO<sub>2</sub> 浓度升高使单位面积穗数平均增加 42.08 个/m<sup>2</sup>, 穗粒数平均增加 3.45 粒/穗。吴越(2011)<sup>[31]</sup>等的实验表明 FACE 处理显著增加小麦产量, 平均增产 13.83%; 使小麦单位面积穗数、穗粒数和千粒重分别比对照增加 8.14%、5.39%和 2.7%。这些都说明高 CO<sub>2</sub> 浓度促进小麦分蘖, 增加养分的积累和向籽粒输送的能力, 促进穗粒形成, 为提高产量提供了物质基础。王修兰<sup>[32]</sup>等也得出了相似的结论。

由多种实验手段得出结果的综合评价认为, CO<sub>2</sub> 浓度每升高 100 μmol/mol, 小麦产量会提高 7%~11%<sup>[33,34]</sup>。此外光合速率提高、碳水化合物更为充足, WUE 提高, 氮利用效率提高等也是增产的主要原因<sup>[28,34]</sup>。

#### 5. CO<sub>2</sub> 浓度升高与其它环境因子交互作用对小麦 WUE 的影响

与大气 CO<sub>2</sub> 浓度的升高相伴随的是温度、降水的变化, 以及土壤养分的改变, 因此 CO<sub>2</sub> 浓度升高对小

麦 WUE 的影响要综合考虑作物与水分、温度、矿质营养等环境因素的关系。目前这方面的研究已取得了一些进展,但仍需大量的研究工作。

### 5.1. CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下土壤水分状况对小麦 WUE 的影响

CO<sub>2</sub> 浓度升高提高小麦的 WUE 已被大多数学者强化研究,但是不同的水分处理显著影响着小麦的 WUE。

康绍忠<sup>[35]</sup>等通过在大型人工气候室内的实验,设计了 350 和 700 μmol/mol 两种 CO<sub>2</sub> 浓度和高、中、低三种土壤水分处理,分析了不同土壤水分条件和大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的共同作用对春小麦 WUE 的影响。结果表明,大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对小麦 WUE 的影响在不同的土壤水分条件下明显不同,WUE 在低水分条件下增加的比例大于高、中水分处理。

QIAO<sup>[28]</sup>等的研究也表明,升高 CO<sub>2</sub> 浓度条件下,冬小麦在干旱胁迫条件下 WUE 提高的更多;正常水分条件下,WUE 提高 9.9%,干旱胁迫条件下 WUE 提高 13.8%。但 CO<sub>2</sub> 浓度升高并没有显著影响耗水量。

CO<sub>2</sub> 浓度升高时干旱处理的小麦 WUE 提高的更多,可能的原因是在水分亏缺过程中,气孔的部分关闭对蒸腾的影响大于光合,使蒸腾作用下降大于光合作用下降,因此在一定程度水分亏缺范围内,植物干物质下降的比率往往低于水分消耗下降的比率,从而使植物的 WUE 提高<sup>[36]</sup>。这说明 CO<sub>2</sub> 浓度升高有助于小麦在有限水资源供给条件下的产量提高。

### 5.2. CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下土壤养分对小麦 WUE 的影响

N 元素是小麦生长的必须营养元素之一,N 素对小麦叶绿素、光合速率、暗反应的主要酶以及光呼吸等都有明显的影响。在大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的条件下,不同的 N 水平条件对小麦的 WUE 影响很大。

于显枫<sup>[37]</sup>等研究了氮素对长期高大气 CO<sub>2</sub> 浓度下小麦 WUE 的影响。结果表明,在长期高大气 CO<sub>2</sub> 浓度下,增施氮肥能提高小麦叶片光合速率、蒸腾速率和叶片水平 WUE;李伏生<sup>[38]</sup>等通过设定 350 和 700 μmol/mol<sup>-1</sup> 两种 CO<sub>2</sub> 浓度水平和 0、50、100、150、200 mg·N·kg<sup>-1</sup>± 5 种氮肥施用水平进行研究。结果表明,CO<sub>2</sub> 浓度加对春小麦群体 WUE 的影响均取决于

土壤 N 素水平。高氮处理群体 WUE 明显增加;而低氮处理增加不明显。总之,氮肥施用对春小麦群体 WUE 有显著影响,在一定氮肥用量范围内,增施氮肥明显提高作物 WUE。因此,未来 CO<sub>2</sub> 浓度升高的条件下,保证对作物的氮肥供应很重要。

### 5.3. CO<sub>2</sub> 浓度升高条件下水肥交互对小麦 WUE 的影响

目前,多数研究局限于 CO<sub>2</sub> 浓度升高和水分(或是与肥料)交互作用对作物 WUE 的影响;然而 CO<sub>2</sub> 浓度升高和水分养分交互作用对 WUE 的影响比单独升高 CO<sub>2</sub> 浓度的作用复杂的多,机理也尚不明确;小麦 WUE 随不同 N 肥浓度、水分梯度的变化规律也不清楚。只有李伏生<sup>[39]</sup>等少数人有过研究。

李伏生<sup>[39]</sup>的研究发现,干旱处理小麦叶片 WUE 升高大于湿润处理;随着氮肥用量增加,群体 WUE 增加,而不施氮肥的群体 WUE 最低。在不同 N 肥用量和土壤水分条件下,CO<sub>2</sub> 浓度增加,群体 WUE 增加。CO<sub>2</sub> 浓度倍增时,湿润和干旱处理(5 种氮肥用量平均)的群体 WUE 分别增加 10%和 12%,且干旱处理比湿润处理的群体 WUE 提高的更明显;不同氮肥用量(0, 50, 100, 150, 200 mg/kg±, 两种水分平均)的群体 WUE 分别增加 3%、11%、13%、14%和 15%。其可能的原因是土壤水分正常供应条件下,缺氮会造成植物光合速率、光合量子效率和碳代谢酶类的活性降低。氮素营养可提高作物叶片水势,提高叶片渗透调节能力,抑制作物蒸腾,提高作物的 WUE<sup>[40]</sup>。

### 5.4. CO<sub>2</sub> 浓度升高与温度交互作用对小麦 WUE 的影响

CO<sub>2</sub> 浓度升高的同时温度也会升高。郭建平<sup>[41]</sup>等研究发现高温、高 CO<sub>2</sub> 浓度情况下小麦的光合速率增加 15.6%,蒸腾速率下降 18.9%,WUE 提高 42.5%。但目前 CO<sub>2</sub> 浓度升高和温度升高交互作用对小麦 WUE 的影响方面的研究存在的争议较多。例如,在叶片水平上,CO<sub>2</sub> 浓度升高后,气孔导度的降低能引起蒸腾速率的下降,但同时,气温升高引起叶温升高,提高了叶内水汽压,又会促使蒸腾速率上升<sup>[42-45]</sup>。在农田水平上,气温和 CO<sub>2</sub> 浓度升高可能会改变土壤水分状况,进而影响到作物水分关系,比如,气温升高会增加田间蒸散量从而使土壤含水量减少,CO<sub>2</sub> 浓度

升高则通过减少蒸散量增加土壤含水量<sup>[44]</sup>。因此不同的 CO<sub>2</sub> 浓度升高幅度、温度升高幅度及其各种组合状况下, 小麦 WUE 如何变化需要更多的研究加以明确<sup>[3]</sup>。

## 6. 问题与展望

不断挖掘小麦生理节水的潜力, 将会大幅度提高小麦的 WUE, 并且生物量、产量也会有明显的增加, 而高浓度的 CO<sub>2</sub> 条件则为提高小麦的 WUE 提供了可能。CO<sub>2</sub> 浓度升高一方面通过提高小麦光合作用, 促进小麦生长, 提高小麦生物量和产量; 另一方面促使小麦气孔关闭, 降低蒸腾作用和 ET。因此, 小麦叶片、群体、产量水平的 WUE 都有了明显的提高。CO<sub>2</sub> 浓度升高和其他环境因子的交互作用对小麦的 WUE 影响很大, 各种 CO<sub>2</sub> 浓度和环境因子的组合状况下, 小麦 WUE 如何变化仍需大量的研究工作。目前对小麦叶片水平 WUE 的研究最多, 对群体水平和产量水平的 WUE 的研究较少, 尤其是对升高 CO<sub>2</sub> 条件下的冬小麦产量构成要素的变化及其内在机理需要深入探讨, 而且小麦 WUE 对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应过程及变化阈值及其机理尚不明确, 需要加强研究。

## 参考文献 (References)

[1] J. H. Christensen, B. Hewitson, A. Busuioac, et al. Regional climate projections. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Avery, M. Tignor and H. L. Miller (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.

[2] 温达志. 大气二氧化碳浓度增高与植物水分利用效率[J]. 热带亚热带植物学报, 1997, 5(3): 83-90.

[3] 白丽萍, 周广胜. 小麦对大气 CO<sub>2</sub> 浓度及温度升高的响应与适应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 23-26.

[4] S. M. Brouder, J. J. Volenc. Impact of climate change on crop nutrient and water use efficiencies. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 705-724.

[5] 康绍忠, 蔡焕杰, 刘晓明. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对春小麦水分利用与蒸发蒸腾的影响[J]. 1995, 23(3): 1-5.

[6] D. J. Hunsaker, B. A. Kimball, P. J. Pinter Jr., et al. CO<sub>2</sub> enrichment and soil nitrogen effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104(2): 85-105.

[7] 王润佳, 高世铭, 张绪成. 高大气 CO<sub>2</sub> 浓度下 C<sub>3</sub> 植物叶片水分利用效率升高的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 190-195.

[8] 俞满源, 黄占斌, 山仑. 不同水分条件下 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植物生长及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 110-112.

[9] 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 CO<sub>2</sub> 浓度升高的反应[J]. 安徽农业大学学报,

2005, 32(2): 169-173.

[10] 康绍忠, 蔡焕杰, 刘晓明等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对农田蒸发蒸腾和作物水分利用的影响[J]. 水利学报, 1996, 4: 18-26.

[11] 林伟宏. 植物光合作用对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的反应[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 529-538.

[12] G. Y. Nie, S. P. Long, R. L. Garcia, et al. Effect of free air CO<sub>2</sub> enrichment on the development of the photosynthetic apparatus in wheat, as indicated by changes in leaf proteins. *Plant, Cell and Environment*, 1995, 18(8): 855-864.

[13] 徐玲, 赵天宏, 胡莹莹等. CO<sub>2</sub> 浓度升高对春小麦光合作用和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2008, 25(8): 867-872.

[14] A. D. B. Leakey, E. A. Ainsworth, et al. Elevated CO<sub>2</sub> effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: Six important lessons from FACE. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(10): 2859-2876.

[15] A. P. De Souza, M. Gaspar, et al. Elevated CO<sub>2</sub> increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31(8): 1116-1127.

[16] 郝兴宇, 韩雪, 李萍等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对绿豆叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2776-2780.

[17] 蒋高明, 林光辉, B. D. V. Marino 等. 美国生物圈二号内生长在高 CO<sub>2</sub> 浓度下的 10 种植物气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率的变化[J]. 植物学报, 1997, 39(6): 546-553.

[18] E. A. Ainsworth, A. Rogers. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO<sub>2</sub>: Mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment*, 2007, 30(3): 258-270.

[19] 杨惠敏, 王根轩. 干旱和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对干旱区春小麦气孔密度及分布的影响[J]. 植物生态学报, 2001, 25(3): 312-316.

[20] 王明娜, 孙彦坤, 罗卫红等. FACE 条件下小麦冠层能量平衡和水分利用率的变化[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 266-272.

[21] 王修兰, 徐师华, 李佑祥等. 小麦对 CO<sub>2</sub> 浓度倍增的反应[J]. 作物学报, 1996, 22(3): 340-344.

[22] D.-X. Wu, G.-X. Wang, Y.-F. Bai and J.-X. Liao. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104: 493-507.

[23] 李伏生, 康绍忠. CO<sub>2</sub> 浓度升高、N 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.

[24] 尹飞虎, 李晓兰, 董云社等. 干旱半干旱地区 CO<sub>2</sub> 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(2): 235-244.

[25] 白月明, 王春乙, 温民. 不同 CO<sub>2</sub> 浓度处理对冬小麦的影响[J]. 气象学报, 1996, 22(2): 7-11.

[26] 王春乙, 白月明, 郑昌玲等. CO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度倍增对作物影响的研究进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 875-881.

[27] B. A. Kimball, 朱建国, 程磊等. 开放系统中农作物对空气 CO<sub>2</sub> 浓度增加的响应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1323-1338.

[28] Y.-Z. Qiao, B.-D. Dong, M.-Y. Liu, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on growth and water use efficiency of winter wheat under two soil water regimes. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11): 1742-1748.

[29] 温民, 王春乙, 高素华等. CO<sub>2</sub> 浓度倍增对冬小麦生长发育产量形成及发芽率的影响[J]. 生态农业研究, 1994, 2(2): 37-42.

[30] 韩雪. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对冬小麦生理生态的影响[D]. 中国农业科学院, 2009.

[31] 吴越, 胡静, 宋学堂等. 开放式空气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对中筋小麦扬麦 14 产量形成的影响[J]. 浙江农业科学, 2011, 1: 150-154.

[32] 王修兰, 徐师华, 李佑祥. CO<sub>2</sub> 浓度倍增对小麦生育性状和产量构成的影响[J]. 生态学报, 1996(16): 328-332.

[33] S. G. Pritchard, J. S. Amthor. *Crops and environmental change*.

## CO<sub>2</sub> 浓度升高对小麦水分利用效率的影响研究综述

- An introduction to effects of global warming, increasing atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations, and soil salinization on crop physiology and yield. New York: Food Product Press, Birmingham: The Haworth Press, 2005.
- [34] S. P. Long. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: Has its importance been underestimated? *Plant, Cell and Environment*, 1991, 14(8): 729-739.
- [35] 康绍忠. 土壤水分和 CO<sub>2</sub> 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.
- [36] 廖建雄. 干旱、CO<sub>2</sub> 和温度升高对春小麦光合、蒸发蒸腾及水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 547-550.
- [37] 余显枫, 张绪成, 郭天文. 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): 2342-2349.
- [38] 李伏生, 康绍忠. CO<sub>2</sub> 浓度和氮素水平对春小麦水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2002, 28(6): 835-840.
- [39] 李伏生, 康绍忠. CO<sub>2</sub> 浓度升高、N 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.
- [40] F. S. Li. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub>, water status and applied nitrogen on water- and nitrogen-use efficiencies of wheat. *Plant and Soil*, 2003, 254(2): 279-289.
- [41] 郭建平, 高素华. 高温、高 CO<sub>2</sub> 对农作物影响的试验研究[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1): 17-20.
- [42] D. J. Hunsaker, B. A. Kimball, P. J. Printer Jr., et al. CO<sub>2</sub> enrichment and soil nitrogen effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 85-105.
- [43] K. Hikosaka, Y. Onoda, T. Kinugasa, et al. Plant responses to elevated CO<sub>2</sub> concentration at different scales: Leaf, whole plant, canopy, and population. *Ecological Research*, 2005, 20(3): 243-253.
- [44] I. Aranjueloa, J. J. Irigoyea, P. Perezb, et al. Response of nodulated alfalfa to water supply, temperature and elevated CO<sub>2</sub>: Productivity and water relations. *Environment and Experimental Botany*, 2006, 55(1-2): 130-141.
- [45] A. Robredo, U. Pérez-López, H. S. de la Maza, et al. Elevated CO<sub>2</sub> alleviates the impact of drought on barely improving water status by lowering stomatal conductance and delaying its effects on photosynthesis. *Environment and Experimental Botany*, 2007, 59: 252-263.