

# 全球环境变化对农作物影响的研究进展\*

白莉萍 周广胜\*\*

(中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室 北京 100093)

**摘要** 从 CO<sub>2</sub> 浓度升高、CO<sub>2</sub> 浓度与温度升高以及 CO<sub>2</sub> 浓度与水分变化的协同作用、CO<sub>2</sub> 浓度升高与环境盐胁迫的协同作用和作物产量预测模拟及其适应对策 4 个方面总结了近年来国内外关于农业生产对全球环境变化的响应与适应及其变化趋势的研究进展,指出目前人类关于农业生产对未来全球环境变化响应机理的理解与预测很有限,提出中国未来需要加强的研究领域. 参 38

**关键词** 农作物; 关键环境因子; 响应与适应; 全球环境变化

CLC S181

## RESEARCH OF EFFECT OF GLOBAL ENVIRONMENT CHANGE ON AGRICULTURAL CROPS\*

BAI Liping & ZHOU Guangsheng\*\*

(Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract** Global environment change would directly and indirectly seriously affect agricultural crop production, and threaten the ability of global food supply. New advances in the studies on the responses of agricultural crop production to the global environment change were reviewed in four aspects: increasing CO<sub>2</sub> concentration; interactions between increasing CO<sub>2</sub> concentration and temperature, and between CO<sub>2</sub> concentration increasing and water change; interaction between increasing CO<sub>2</sub> concentration and saline stress, and prediction simulation and adaptation strategy on the responses of crop yield to global environment change. The results suggested that the human abilities for understanding and predicting the responses mechanism of agricultural production to global environment change were very limited at present; especially the future directions related to the responses of agricultural production to global environment change were emphasized in China. Ref 38

**Keywords** agricultural crop; key environmental factors; responses and adaptation; global environment change

CLC S181

由于人类活动影响的加剧,全球生态环境变化日趋严重. 目前以“大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高”为标志的全球环境变化不仅包括“全球变暖”或“气候变化”,而且其内涵已拓展到环境退化诸如盐渍化以及土地利用变化等内容. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高不但影响气候变化,更直接影响作物生长,并且与气候变化诸如温度升高及降水变化等带来的间接影响综合在一起对农业生产的冲击必定是极其复杂的. 最新农业影响评估表明,若全球年均气温升高几度或更高,粮食供给能力的增长将滞后于需求增长,势必影响粮食价格上涨,继而危及国家粮食安全. 近几年,有关 CO<sub>2</sub> 浓度增加对作物生长发育和产量影响的研究急剧增加,并日渐扩展到 CO<sub>2</sub>、温度、水分和其它环境胁迫因子如盐渍化等对农作物生产力的综合影响研究. 为准确评价全球环境变化对农业生产的可能影响及其发展趋势,制订适应与减缓全球环境变化不良影响的对策与措施,极有必要对近年来国内外农作物影响研究进展作一述评.

收稿日期: 2003-05-06 接受日期: 2003-06-17

\* 国家重大基础研究规划(G1999043407)、中国科学院知识创新工程(KSCX2-1-07, KZCX1-SW-01-12)及国家自然科学基金(40231018, 49905005, 40231018)项目资助 Supported by the National Key Basic Research Foundation; the “Knowledge Innovation Project” of the Chinese Academy of Sciences and National Natural Science Foundation of China

\*\* 通讯作者 Corresponding author

## 1 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应与适应

### 1.1 光合生理生态

CO<sub>2</sub> 浓度升高可使作物光合速率增加. 700 μmol mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度下使大豆从三叶至结荚期的净光合速率比 350 μmol mol<sup>-1</sup> 和 500 μmol mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> 浓度下分别增长 42%~79% 和 13%~61%<sup>[1]</sup>; CO<sub>2</sub> 浓度增加使水稻叶片光合速率提高 30%~70%<sup>[2]</sup>. 同样也使小麦净光合速率增大,光合时间延长<sup>[3]</sup>. 目前就作物对 CO<sub>2</sub> 浓度增加的光合适应或驯化现象说法不一,不同品种对 CO<sub>2</sub> 浓度增加的短期响应和长期适应有所不同. 高浓度 CO<sub>2</sub> 下(600 μmol mol<sup>-1</sup>),有些水稻品种如普通野生稻叶片的平均光合放氧速率比对照有所提高,而药用野生稻的光合速率反而低于对照<sup>[4]</sup>. 水稻幼苗在 CO<sub>2</sub> 浓度 600 μmol mol<sup>-1</sup> 下处理 1 d 叶片光合速率比对照(300 μmol mol<sup>-1</sup>)增加 45.4%,但 7 d、14 d 后则比对照分别降低 13.7% 和 21.1%,即出现了光合适应或驯化现象,且水稻幼苗在高 CO<sub>2</sub> 浓度环境下适应一段时间后,其体内的 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(Rubisco)的表达到在转录水平上受到调节<sup>[5]</sup>. 据研究光合作用下调往往伴随 Rubisco 含量和活性的降低;同时也可能是碳水化合物积累产生的反馈抑制作用<sup>[6]</sup>. 亦有研究发现,饱和光强下,水稻光合作用在 250~1 200 μmol mol<sup>-1</sup> 范围内随细胞间隙 CO<sub>2</sub> 浓度升高而加强(N 素供应充足的条件下),没有出现所谓的光合适

应现象,表明营养元素如 N 素的重新分配可能改变了 1,5-二磷酸核酮糖 (RuBP) 再生循环的限制<sup>[7]</sup>。随后有人观测高 CO<sub>2</sub> 浓度下 [(650 ± 30) μmol mol<sup>-1</sup>] 水稻分蘖和孕穗期的叶净光合速率也没有光合下调<sup>[8]</sup>。Horie 等认为,利用气体交换技术测定单叶生物化学水平上的酶含量和活性下降所造成的光合下调,固然有可能导致冠层光合功能降低,但同时也存在不降低的可能性<sup>[2]</sup>。显然作物对 CO<sub>2</sub> 浓度增加的光合适应现象不一致,可能与所选品种、生育时期及环境条件差异如 CO<sub>2</sub> 浓度处理水平或处理时间不同有关。

对光反应过程的影响研究表明,CO<sub>2</sub> 倍增可提高大豆叶绿素和类胡萝卜素的含量(不同品系提高幅度不同)及大豆 PS II 活性、PS II 原初光能转化率和光合作用潜在量子转化效率<sup>[9]</sup>。高 CO<sub>2</sub> 浓度下,杂交稻及其父母本的 PSII 原初光能转化效率和潜在活性分别提高 8% 和 24%、18% 和 29% 及 5% 和 21%<sup>[10]</sup>。亦有结论表明,整个生育期内 CO<sub>2</sub> 浓度增加 (600 μmol mol<sup>-1</sup>), 5 个水稻品种的 PSII 原初光化学效率 (Fv/Fm) 与对照相比无明显差异,水稻叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量降低,生长后期降解加快,抑制水稻的暗呼吸<sup>[4]</sup>。可见 CO<sub>2</sub> 浓度增加对作物光反应过程的影响因作物种类和品种不同而存在明显差异。

### 1.2 生长发育和产量

研究表明,CO<sub>2</sub> 倍增 (700 μmol mol<sup>-1</sup>) 环境下作物生育期有缩短趋势,如棉花开花盛期和吐絮盛期分别比对照 (350 μmol mol<sup>-1</sup>) 提早 6 d 和 8 d; 大豆各生育期平均提前 2 ~ 3 d<sup>[11, 12]</sup>; 冬小麦抽穗、开花及乳熟期约提早 2 ~ 4 d<sup>[12, 13]</sup>。但玉米生育期则几乎不受影响<sup>[12]</sup>。可见 CO<sub>2</sub> 浓度增加对 C<sub>3</sub> 植物的生长发育时期影响显著,对 C<sub>4</sub> 植物的影响微小。CO<sub>2</sub> 浓度升高对作物地上、地下部分及总生物量等均呈现正效应。CO<sub>2</sub> 浓度倍增下的棉花果枝数和有效铃数均有所增加,地下和地上部分生物量分别增加 66.2% 和 64.5%<sup>[14]</sup>; 大豆从三叶至结荚各生育阶段干物重增长 5% ~ 39%<sup>[11]</sup>; 冬小麦与玉米的根系增重最为明显<sup>[11, 12]</sup>。亦有试验表明:冬小麦生育后期的地上部干物质累积大于地下部<sup>[13]</sup>。说明不同物种其地下和地上部分的生物量增加量不平衡。

CO<sub>2</sub> 浓度升高既利于作物干物质积累,也有益于产量提高。CO<sub>2</sub> 浓度倍增使棉花、玉米、冬小麦和大豆的产量分别增加 27.4%<sup>[12]</sup>、22.9%<sup>[12]</sup>、32% ~ 55.4%<sup>[11, 13]</sup> 和 33% ~ 66%<sup>[11, 15]</sup>。显然 CO<sub>2</sub> 浓度升高对作物生产力的影响幅度因品种而异。目前试验研究大多仍采用控制环境如人工气候室或开顶式气室的人工模拟系统,较集中于作物对 CO<sub>2</sub> 浓度升高的短期反应,而长期适应及接近农田自然生态条件下的试验研究尚不多见。关于大田水稻(适宜温度范围内)在长期 CO<sub>2</sub> 倍增环境下产量提高的合理估测应在 30% 左右<sup>[2]</sup>。而最为接近大田状况 Free Air Carbon Dioxide Enrichment (FACE) 试验 CO<sub>2</sub> 浓度 550 μmol mol<sup>-1</sup> 下,棉花产量可提高 37% ~ 48%<sup>[16]</sup>。

### 1.3 品质

全球环境变化对作物籽粒和饲料品质影响的重要性倍受关注。水稻籽粒直链淀粉含量(决定蒸煮品质的一个主要因素)将随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而增加<sup>[17]</sup>, 对人体营养很重要的 Fe 和 Zn 元素则会下降<sup>[18]</sup>。温度和 CO<sub>2</sub> 浓度均增加的环境中水稻籽

粒蛋白含量降低<sup>[19]</sup>。CO<sub>2</sub> 浓度倍增环境下,大豆籽粒粗脂肪增加 1.22%,饱和与不饱和脂肪酸分别增加 0.34% 和 2.02%,而粗蛋白含量下降 0.83%; 玉米籽粒氨基酸、直链淀粉、粗蛋白、粗纤维以及总糖含量均呈下降趋势; 冬小麦籽粒粗淀粉含量增加 2.2%,而蛋白质和赖氨酸含量却分别下降 12.8% 和 4%<sup>[11]</sup>。棉花纤维质量影响不显著<sup>[14]</sup>。总体而言,CO<sub>2</sub> 浓度升高对品质影响亦因作物品种而异,对主要农作物品质不利。

高 CO<sub>2</sub> 浓度下,由于牧草水溶性碳水化合物的大量增加<sup>[20]</sup>,可能导致反刍动物瘤胃更快地进行消化,但 C<sub>3</sub> 牧草含 N 量下降会降低饲料作物的蛋白品质<sup>[21]</sup>。

### 1.4 蒸腾与水分

一般 CO<sub>2</sub> 浓度升高可使叶片气孔部分关闭,蒸腾速率降低及水分利用效率提高。CO<sub>2</sub> 倍增条件下冬小麦、大麦、马铃薯和高粱 4 种作物叶片的气孔导度显著下降<sup>[22]</sup>。高 CO<sub>2</sub> 浓度下,C<sub>4</sub> 植物主导的高秆草草原日蒸散量下降幅度较大<sup>[23]</sup>; 玉米个体水分利用减少,且 CO<sub>2</sub> 浓度增加促进玉米生长发育可能主要由于改善其水分关系和提高水分利用效率(WUE)<sup>[24]</sup>。高 CO<sub>2</sub> 浓度下 [(650 ± 30) μmol mol<sup>-1</sup>] 水稻 WUE 较对照 (300 μmol mol<sup>-1</sup>) 提高了 75% ~ 115%,且品种间差异显著<sup>[8]</sup>。而 Horie<sup>[2]</sup> 的研究表明,最适宜温度下 CO<sub>2</sub> 浓度倍增使水稻 WUE 可提高 40% ~ 50%,主要原因是生物量增加及蒸腾减少,当温度超过最适宜范围时 WUE 则急剧下降。另外,当 N 肥供应充足时,CO<sub>2</sub> 浓度升高对棉花<sup>[25]</sup> 和春小麦<sup>[26]</sup> 每单位土地面积的蒸散都影响不大。

## 2 CO<sub>2</sub> 浓度与温度升高以及 CO<sub>2</sub> 浓度与水分变化的协同响应

关于 CO<sub>2</sub> 浓度与温度升高对植物生长的相互作用已有阐述<sup>[27]</sup>, 这里仅以水稻为例对农作物进行说明。温度对水稻生长发育有特别重要的影响,高温使无效分蘖增加,超过 35 °C 有可能引起花粉不育,但 CO<sub>2</sub> 浓度增加可使水稻最高生理耐受温度提高,并对高温引起的不育有所缓解<sup>[28]</sup>。研究发现 CO<sub>2</sub> 浓度和温度对水稻叶片光合作用有一定的协同促进作用,单叶光合受到的促进作用大于群体光合,对群体光合作用的促进则随时间推移而减弱; 叶面积指数只在营养生长期受到促进; 群体呼吸(包括茎秆)增加及冠层叶片早衰可能是后期 CO<sub>2</sub> 对群体光合促进作用下降的原因<sup>[29]</sup>。亦有研究表明,温度超过 26 °C 时,每升高 1 °C 则水稻产量下降 10%,尤其开花期出现极端高温 (36.5 °C 以上) 时,CO<sub>2</sub> 浓度升高对水稻产量影响甚至可能是负效应<sup>[2]</sup>。不过,温度增加使物候发育加速或者播种期提早均有可能使籽粒灌浆期前移,由此也可部分避开高温的不利影响。

CO<sub>2</sub> 浓度增加可提高气孔阻抗,但气孔阻抗在高 CO<sub>2</sub> 浓度下会随着温度上升而有所减少。当温度 26 °C 且 CO<sub>2</sub> 浓度升高时会减少大田水稻季节总蒸散量 15%,但温度上至 29.5 °C,季节总蒸散量则增加 20%<sup>[2]</sup>。水分胁迫下的 C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 作物对 CO<sub>2</sub> 浓度升高后的主要响应是由于 WUE 增加并使生产力提高<sup>[23, 30]</sup>。在不同土壤水分条件下,CO<sub>2</sub> 浓度倍增对小麦、玉米、棉花等作物的影响明显不同,低水分条件下作物光合速率、株高、叶面积指数和 WUE 增加效应都明显大于高水分处理,说明 CO<sub>2</sub> 浓度增加对

光合速率和生长的正效应及其对蒸发蒸腾抑制作用削弱了水分胁迫对作物光合和生长产生的不利影响<sup>[31]</sup>。全球气候变化(气温和降水等变化)及大气中 CO<sub>2</sub> 升高都有可能影响土壤水分变化,但目前把土壤-植物-大气作为一个整体系统来考察 CO<sub>2</sub> 浓度增加对此系统中的水分运行的影响研究仍然较少。因此为了实际预测作物产量以及地区蒸发,有必要在 CO<sub>2</sub> 浓度升高、高温以及水分变化之间的相互关系方面做更多研究。

### 3 CO<sub>2</sub> 浓度升高与环境盐胁迫的协同响应

盐胁迫是限制农作物产量提高的重要环境因子,世界上灌溉区 35% 的耕地受到盐胁迫的威胁,在我国约有 1/10 耕地为次生盐渍化土壤<sup>[32]</sup>。在盐胁迫下 CO<sub>2</sub> 浓度倍增能提高冬小麦和春小麦叶片单位鲜重叶绿素(Chl)和类胡萝卜素的含量及含等量 Chl 的叶绿体对光能的吸收能力,增强 Mg<sup>2+</sup> 对两个光系统(PSI 和 PSII)之间激发能分配的调节能力;同时还提高荧光猝灭速率( $\Delta Fv/T$ ),从而加速 PSII 原初反应进程<sup>[33,34]</sup>。然而,盐胁迫对上述各参数有降低作用,与高 CO<sub>2</sub> 浓度的作用恰恰相反,说明高浓度 CO<sub>2</sub> 能够减轻盐胁迫对小麦光合功能的不利效应,提高盐渍地小麦的抗逆性。此外,盐胁迫对普通小麦三羧酸循环和光呼吸关键酶有刺激作用,而高浓度 CO<sub>2</sub> 则会抑制它们的活性<sup>[35]</sup>。CO<sub>2</sub> 倍增环境下不同抗盐性小麦幼苗叶片一价阳离子 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量升高,二价阳离子 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 呈下降趋势,同时利于游离脯氨酸的积累,为植物进行渗透调节提供大量碳源。而在有盐胁迫和无盐胁迫下 CO<sub>2</sub> 倍增均能提高植物有机物干重,其正效应在盐处理植株上更为明显<sup>[36]</sup>。总之,CO<sub>2</sub> 倍增能提高小麦的耐盐能力,刺激植物生长,减轻盐胁迫的毒害效应并提高产量。

### 4 产量预测模拟及适应对策

农业生产受众多因素的影响包括自然气候变化、人为气候变化以及社会经济技术等。目前关于作物产量的预测方法可分为二类<sup>[37]</sup>:一类是依据气候变化情景的方法,回答“在给定的气候变化情景下,农业将如何?”而所谓的情景就是指未来气候要素变化的预测值以及农业在新环境要素下的响应。另一类则是阈值的方法,即预测农业生态系统在目前环境下对气候变化的最大承受力,回答“什么样的气候变化(包括类型以及变率等)会明显影响农业生态系统,如何影响?”,此方法要求渐进的气候变化情景。两类方法都要构建一种从个体至群体生理生态适应机制到区域、国家或世界农业系统以及社会经济影响的因果关系。由于模拟技术的限制,过去常利用平衡条件下的气候变化情景,而短期气候变化情景用在农业影响评估已取得实质性进展,如在短期气候变化情景下基于 CERES 模型模拟的冬小麦产量平均增加(+21%)较平衡式气候变化情景下模拟的冬小麦产量平均增加(+17%)高出<sup>[38]</sup>。由于未来气候预测的不确定性及作物模型自身的缺陷(难以涉及社会经济技术条件的变化和土壤和病虫害的间接影响等)使得目前模拟预测和经济分析均有不确定性。

适应对策分析是全球气候变化影响的一个重要方面,一些农业技术可成为农田或农户水平的生理适应技术如改变播期、肥料比例的调整、灌溉利用、品种选择等。经济手段(如价格政策)及经营方式的改变(如规模经营)也能成为间接的适

应措施。但在农业适应性的模拟方法上却无多少进展,一方面所模拟的适应对策仅限于小区域可能低估适应能力;另一方面适应措施若不被农民所接受又高估其效用。无论如何采取适应对策都有可能减少极端气候异常对作物产量造成的损失。

### 5 研究展望

全球环境变化特别是 CO<sub>2</sub> 浓度增加及其与气候因子和环境胁迫因子的协同作用,对农作物生长和产量影响已引起了各国政府与科学家的高度重视。尽管近年来全球环境变化研究正逐步深入、综合,但目前关于农业生产对未来全球环境变化响应机理的理解与预测能力有限,特别在我国研究尚待重视和加强。为了解全球环境变化对于农业的影响机制,提高预测农业生产力的能力,为制订国家政策的科学行动计划提供理论依据,同时也与国际全球环境变化研究接轨,未来中国拟加强的研究领域有:(1)农作物对全球环境变化响应的多因子(CO<sub>2</sub> 浓度、温度、降雨量和环境胁迫因子等)协同作用的响应机制研究,以揭示农业生产对全球环境变化的响应与适应机理;(2)生态脆弱地区农牧业生态系统的生物地球物理过程的研究,并与遥感技术相结合,了解大气-植被-土壤系统的水分与热量循环过程在农业生产力形成中的作用;(3)以生产力为核心的生态脆弱地区农牧业生态系统的生物地球化学循环过程研究;(4)发展和建立以生产力为核心的耦合生物地球物理过程和生物地球化学循环于一体的多尺度集成生态模型;(5)加强人类活动,特别是施肥等人为措施对农业生产影响的研究,探讨农业对于全球环境变化的适应对策与技术措施;(6)全球环境变化的农作物生产安全指标体系与预警系统研究;(7)建立集数据库、模型库和专家系统于一体的以农业生产力为核心的农业生态系统信息系统,以实现农作物生产对全球环境变化反应的动态仿真,便于政府针对全球环境变化做出适宜对策。

#### References

- 1 Wang XL(王修兰), Xu SH(徐师华). Effect of CO<sub>2</sub> concentration doubling on photosynthesis and dry matter production in different growth stages of soybean plant. *Acta Agron Sin*(作物学报), 1994, **20**(5): 520 ~ 527
- 2 Horie TJT, Baker H, Nakagawa and T. Matsui. Crop ecosystem responses to climatic change: rice. In: Reddy KR, Hodges HF ed. *Climate Change and Global Crop Productivity*. Wallingford, United Kingdom: CAB International Press, 2000. 81 ~ 106
- 3 Wang XL(王修兰), Xu SH(徐师华), Li YX(李佑祥), Cui DC(崔读昌). Physiological reaction of wheat to doubling CO<sub>2</sub> concentration. *Acta Agron Sin*(作物学报), 1996, **22**(3): 340 ~ 344
- 4 Peng CL(彭长连), Lin ZF(林植芳), Sun ZJ(孙梓健), Lin GZ(林桂珠), Chen YZ(陈贻竹). Response of rice photosynthesis to CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Phytohyssiol Sin*(植物生理学报), 1998, **24**(3): 272 ~ 278
- 5 Tang RH(唐如航), Guo LW(郭连旺), Chen GY(陈根云), Li LR(李立人). Effect of double atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on rice photosynthesis and Rubisco. *Acta Phytohyssiol Sin*(植物生理学报), 1998, **24**(3): 309 ~ 312
- 6 Koch KE. Carbohydrate - modulated gene expression in plants. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1996, **47**: 509 ~ 540
- 7 Ziska LH, Teramura AH. Intraspecific variation in the response of rice to increases CO<sub>2</sub> photosynthetic, biomass and reproductive characteristics. *Physiol Plant*, 1992, **84**: 269 ~ 274

- 8 Lin WH(林伟宏), Bai KZ(白克智), Kuang TY(匡廷云). Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on rice photosynthesis, transpiration and water use efficiency. *Eco - Agric Res* (生态农业研究), 1996, **4** (2): 40 ~ 43
- 9 Zhang QD(张其德), Lu CM(卢从明), Liu LN(刘丽娜), Bai KZ(白克智), Kuang TY(匡廷云). Effects of doubled CO<sub>2</sub> on contents of photosynthetic and on kinetic parameters of fluorescence induction in different genotypes of soybean. *Acta Bota Sin* (植物学报), 1997, **39** (10): 946 ~ 950
- 10 Lu CM(卢从明), Zhang QD(张其德), Tang CQ(唐崇钦), Kuang TY(匡廷云). The effect of elevated CO<sub>2</sub> on efficiency of primary conversion of light energy and excitation energy distribution between PS I and PS II in hybrid rice and its parents. *Acta Biophys Sin* (生物物理学报), 1996, **12** (4): 731 ~ 734
- 11 Gao SH(高素华), Wang CY(王春乙), Guo JP(郭建平). The experimental study of impact of high CO<sub>2</sub> concentration on main crops in China. In: Fu CB(符淙斌), Yan ZW(严中伟) ed. Global change and the future trend of ecological environment evolution in China. Beijing: Meteorological Press, 1996. 314 ~ 321
- 12 Wang CY(王春乙), Pan YR(潘亚茹), Bai YM(白月明), Wen M(温民). The experiment study of effects doubled CO<sub>2</sub> concentration on several main crops in China. *Acta Meteorol Sin* (气象学报), 1997, **55** (1): 86 ~ 94
- 13 Wang XL(王修兰), Xu SH(徐师华), Li YX(李佑祥). The effects of CO<sub>2</sub> on growing and developing characters and yield for wheat. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1996, **16** (3): 328 ~ 332
- 14 Wen M(温民), Wang CY(王春乙). Effect of doubled CO<sub>2</sub> concentration on growth and production of cotton. *Agric Meteorol* (中国农业气象), 1995, **16** (3): 19 ~ 22
- 15 Wang CY(王春乙), Gao SH(高素华), Pan YR(潘亚茹), Bai YM(白月明), Wen M(温民). Experiment with influence of CO<sub>2</sub> concentration in simulated atmosphere on soybean. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1995, **15** (2): 148 ~ 154
- 16 Mauney JR, Kimball BA, Pinter PJ Jr, LaMorte RL, Lewin KF, Nagy J, Hendrey GR. Growth and yield of cotton in response to a free - air carbon dioxide enrichment (FACE) environment. *Agric & For Meteorol*, 1994, **70**: 49 ~ 67
- 17 Conroy JP, Seneweera S, Basra AS, Rogers G, Nissenwooller B. Influence of rising atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and temperature on growth yield and grain quality of cereal crops. *Austr J Plant Physiol*, 1994, **21**: 741 ~ 758
- 18 Seneweera SP, Conroy JP. Growth grain yield and qualities of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO<sub>2</sub> and phosphorus nutrition (reprinted from Plant nutrition for sustainable food production and environment. *Soil Sci & Plant Nutr*, 1997, **43**: 1131 ~ 1136
- 19 Ziska LH, Namuco O, Moya T, Quilang J. Growth and yield response of field-grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. *Agron J*, 1997, **89**: 45 ~ 53
- 20 Casella E, Soussana JF. Long - term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grass sward. *J Exper Bot*, 1997, **48**: 1309 ~ 1321
- 21 Soussana JF, Casella E, Loiseau P. Long - term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on a temperate grass sward II: plant nitrogen budgets and root fraction. *Plant & Soil*, 1996, **182**: 101 ~ 114
- 22 Bunce JA. Directed and acclimatory responses of stomatal conductance to elevated carbon dioxide in four herbaceous crop species in the field. *Global Change Biol*, 2001, **7**: 323 ~ 332
- 23 Ham JM, Owensby CE, Coyne PI & Bremer DJ. Fluxes of CO<sub>2</sub> and water vapor from a prairie ecosystem exposed to ambient and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Agric & For Meteorol*, 1995, **77**: 73 ~ 93
- 24 Samarakoon A, Gifford RM. Elevated CO<sub>2</sub> effects on water use and growth of maize in wet and drying soil. *Austr J Plant Physiol*, 1996, **23**: 53 ~ 62
- 25 Kimball BA, LaMorte RL, Seay RS, Pinter J, Pinter PJ, Rokey RR, Hunsaker DJ, Dugas WA, Heuer ML, Mauney JR. Effects of free - air CO<sub>2</sub> enrichment on energy balance and evapotranspiration of cotton. *Agric & For Meteorol*, 1994, **70**: 259 ~ 278
- 26 Kimball BA, Pinter PJ Jr, Garcia RL, LaMorte RL, Wall GW, Hunsaker DJ, Wechsung G, Wechsung F, Karschall T. Productivity and water use of wheat under free - air CO<sub>2</sub> enrichment. *Global Change Biol*, 1995, **1**: 429 ~ 442
- 27 Yang JY(杨金艳), Yang WQ(杨万勤), Wang KY(王开运). Effects of interactions between elevated [CO<sub>2</sub>] and increased temperature on growth of plants. *Chin J Appl Environ Biol* (应用与环境生物学报), 2002, **8** (3): 319 ~ 324
- 28 Lin WH(林伟宏), Bai KZ(白克智), Kuang TY(匡廷云). Global climate change and rice. *Chin Bull Bot* (植物学通报), 1995, **12** (4): 8 ~ 12
- 29 Lin WH(林伟宏), Bai KZ(白克智), Kuang TY(匡廷云). Effects of elevated CO<sub>2</sub> and high temperature on single leaf and canopy photosynthesis of rice. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1999, **41** (6): 624 ~ 628
- 30 Drake BG, Gonzales - Meler MA, Long SP. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annu Rev Physiol Plant Mol Biol*, 1997, **48**: 607 ~ 637
- 31 Kang SZ(康绍忠), Zhang FC(张富仓), Liang YL(梁银丽), Ma qL(马清林), HuXT(胡笑涛). Effects of soil water and the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration increase on evapotranspiration, photosynthesis, growth of wheat, maize and cotton. *Acta Agron Sin* (作物学报), 1999, **25** (1): 55 ~ 63
- 32 Zhao KF(赵可夫) ed. Plant Salt Resistance Physiology. Beijing, Science and Technology Press in China, 1993. 1 ~ 189
- 33 Zhang QD(张其德), Zhu XG(朱新广), Lu CM(卢从明), Feng LJ(冯丽洁), Kuang TY(匡廷云), Zhang JH(张建华). Effects of doubled CO<sub>2</sub> concentration on light absorption and excitation energy distribution between PSII and PSI in chloroplasts of winter wheat under salt stress. *Acta Biophys Sin* (生物物理学报), 1998, **14** (3): 537 ~ 542
- 34 Zhang QD(张其德), Wen XG(温晓刚), Lu CM(卢从明), Feng LJ(冯丽洁), Kuang TY(匡廷云), Zhang JH(张建华). Effects of CO<sub>2</sub> doubling on some photosynthetic functions of spring wheat under salt stress. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), 2000, **24** (3): 308 ~ 311
- 35 Liu JY(刘家尧), Yi YJ(衣艳君), Bai KZ(白克智), Liang Z(梁焯). Influences of CO<sub>2</sub>/salt shock on respiratory enzyme activities in wheat seedling with different salt tolerance. *Acta Bot Sin* (植物学报), 1996, **38** (8): 641 ~ 646
- 36 Liu JY(刘家尧), Yi YJ(衣艳君), Bai KZ(白克智), Liang Z(梁焯). The physiological responses of wheat seedlings to salt stress under elevated atmospheric concentrations of CO<sub>2</sub>. *Acta Ecol Sin* (生态学报), 1998, **18** (4): 408 ~ 412
- 37 Lin ED(林而达) ed. Climate Change and Agricultural sustainable development. Beijing: Beijing Press, 2001. 32 ~ 86
- 38 Smith JB, Huq S, Lenhart S, Mata LJ, Nemesova I, Toure S. Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Interim Results from the U. S. Country Studies Program. Dordrecht, the Netherlands and Boston, MA, USA: J. Kluwer Academic Publishers, 1996. 366