

二氧化碳浓度增高对稻、麦品质影响研究进展*

谢立勇^{1,2,3**} 林而达^{1,2}

(¹ 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; ² 农业部农业环境与气候变化重点实验室, 北京 100081;

³ 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110161)

摘要 作物品质的形成是品种遗传特性和环境条件综合作用的结果, 一般认为大气中 CO₂ 浓度增高将对作物品质产生重要影响. 本文分别从蛋白质与氮含量、微量元素以及其他品质性状等 3 个方面综述了国内外关于 CO₂ 浓度增高对水稻、小麦品质影响的研究进展, 强调了该领域研究的必要性和紧迫性, 并提出了研究的重点内容及主要方向. 主要包括: 大气中 CO₂ 浓度增高对水稻、小麦品质的直接影响及品种间的差异; 大气中 CO₂ 浓度增高及其与其它气候因子协同作用对水稻、小麦品质的综合影响及其指标量化; 大气中 CO₂ 浓度增高及气候变化对水稻、小麦品质形成过程的影响机理; 适应 CO₂ 浓度增高的水稻、小麦品质改良育种的方向与策略; 适应 CO₂ 浓度增高的水稻、小麦品质改良的综合生产技术体系和分子标记及转基因技术在水稻、小麦品质改良育种方面的应用.

关键词 水稻 小麦 品质 二氧化碳浓度增高 气候变化

文章编号 1001-9332(2007)03-0659-06 **中图分类号** S511 **文献标识码** A

Effects of CO₂ enrichment on grain quality of rice and wheat: a research review. XIE Li-yong^{1,2,3}, LIN Er-da^{1,2} (¹*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; ²*Key Laboratory of Agro-Environment and Climate Change of Agriculture Ministry, Beijing 100081, China*; ³*College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, **18**(3): 659-664.

Abstract: Crop grain quality is mainly depended on variety's genetic characteristics and environmental conditions, while elevated CO₂ concentration in atmosphere, one of the main factors resulting in global climate change, would have a significant effect on crop grain quality. In this paper, the research progress on the effects of CO₂ enrichment on rice and wheat grain quality was summarized from the aspects of protein and nitrogen contents, trace elements, and other characters, emphasized the necessity and urgency of the study in this field, and pointed out the key directions and contents of further study, *i. e.*, (a) direct effects of CO₂ enrichment on rice and wheat grain quality and their differences for different varieties, (b) integrated effects of CO₂ enrichment and other climate factors on rice and wheat grain quality and their quantitative indices, (c) action mechanisms of CO₂ enrichment and other climate factors on rice and wheat grain quality formation, (d) long-term directions and strategies of rice and wheat breeding in quality improvement to adapt climate change, (e) integrated planting technology systems in quality improvement for adapting climate change, and (f) application of molecule-marker and gene-transfer in rice and wheat breeding for quality improvement.

Key words: rice; wheat; quality; CO₂ enrichment; climate change.

1 引言

大气中 CO₂ 浓度增高是引起全球气候变化的

主要原因. 目前大气中 CO₂ 浓度已由工业革命前的 280 μmol · mol⁻¹ 增加到 380 μmol · mol⁻¹, 并且还以每年 0.5% 的速度增长^[21,24], 预计到 2050 年, 可增加到 550 μmol · mol⁻¹ (称为 CO₂ 倍增), 同时温度将升高 1 °C ~ 2 °C^[20,24]. 尽管在全球范围内正努力寻求控制措施, 但短期内很难控制其增长势头. CO₂ 是作物光合作用的基本原料之一, 研究表明

* 中国博士后科学基金(20060390547)、国家科技攻关项目(2004-BA611B-02)和中-澳国际合作资助项目.

** 通讯作者. E-mail: xly0910@yahoo.com.cn

2006-03-26 收稿, 2007-01-07 接受.

CO₂ 浓度与温度增高对作物产量和品质产生深刻影响^[2,22,33,38]. 因此,在作物生产方面关于 CO₂ 浓度增高的影响及适应对策的研究倍受关注.

作物品质的形成是品种遗传特性和环境条件综合作用的结果,在一定遗传基础上,环境作用至关重要. 在环境因子作用下,碳、氮和脂肪 3 种代谢相互协调、变化,达到平衡,表现为影响植株和颖果的生理过程^[4,15,34]. 水稻(*Oryza sativa*)、小麦(*Triticum aestivum*)等作物一般从籽粒灌浆到蜡熟期,环境因子的差异(包括 CO₂ 浓度、温度、水分等)对籽粒品质影响最大^[8,41]. 如气温是水稻灌浆结实期影响稻米品质的首要因子,高温会加快灌浆速率,缩短灌浆持续期,影响籽粒的充实度,稻米的出糙率、精米率、整精米率下降,垩白增大,糊化温度提高,胶稠度变硬,食味变差;同样,栽培措施和氮、磷、钾施量也对作物品质产生不同影响;大气环境是作物生长的重要环境因素之一,CO₂ 又是作物光合作用的必要原料,因此大气环境通过对光合速率、生理代谢及干物质生产的影响来影响作物的品质. 目前环境因素与作物品质关系的研究多集中在温度、光照、水分和肥力等因子上,并取得了相应的进展^[9-10,17,27,37,44-47],关于 CO₂ 对作物影响的研究多集中在光合作用、生长速度以及生物量积累等方面^[13,29,42],而对 CO₂ 浓度增高与作物籽粒品质关系的研究报道较少^[3,14,30,46]. CO₂ 浓度增高与作物籽粒品质关系的研究方法包括人工气候室(箱)、CO₂ 与温度梯度室、开顶式气室、开放式 CO₂ 富集系统(FACE)和微型开放式系统(Mini FACE),研究手段不断提高,特别是 FACE 和 Mini FACE 的模拟精度高,环境条件与自然生态环境相近,对作物生活环境干扰少,增加了实验的可信度,但是其它几种研究手段的研究结论仍有一定的可比性^[21],并且显示出各自的特点. 如 CO₂ 浓度-温度梯度室可以同时控制 CO₂ 浓度和温度梯度,且节约费用,但与自然环境差异相对较大;开顶式气室模拟较好,费用节约,但面积较小,实验条件变幅大,不易重复;FACE 系统最接近于自然大气状态,试验精度高,但价格昂贵,且不能控制温度梯度;Mini FACE 与 FACE 的原理功能相同,但节省了 CO₂ 消耗的费用,在一些研究领域成为 FACE 的替代手段.

水稻和小麦在我国乃至全世界都是人类赖以生存的重要粮食作物,世界一半以上人口以稻米为主食. 在我国 60% 以上的人口以稻米为主食,稻米是人们饮食结构中的重要组成部分,面粉次之^[5,43]. 由

于我国人口多、耕地少,长期以来,高产和稳产一直是科研与生产追求的首要目标,因此也使我国稻米和面粉品质的改进与提高相对缓慢^[25,43,47]. 在实现了粮食自给、富足之后,改善作物品质愈加显得重要和紧迫.

水稻与小麦同属于 C₃ 作物,受 CO₂ 浓度增高的影响较为明显^[6,20,29]. 加强 CO₂ 与水稻和小麦品质关系的研究,探索其影响机理可以促进大气中 CO₂ 浓度增高对水稻和小麦生理生化影响及适应对策的研究,为水稻和小麦品质改良、育种提供导向和依据,对规划水稻和小麦育种与生产有重要指导意义,也可以为种植结构调整和促进农产品加工等提供理论依据^[24-25]. 开展此项研究既是作物科学与全球气候变化的需要,也是中国赶超国际稻米和面粉品质的一个契机^[16,26].

2 CO₂ 浓度增高对蛋白质及氮含量的影响

蛋白质含量是作物籽粒营养品质的重要指标,一般蛋白质含量越高,籽粒的营养价值也越高. 但稻米中蛋白质含量的高低与米饭食味成负相关,所以二者应该处于一个平衡的关系,蛋白质含量的过高或过低都会对稻米蒸煮品质带来负面影响. Conroy 等^[11]研究表明,水稻籽粒中直链淀粉含量随 CO₂ 浓度升高而增加,而当温度和 CO₂ 浓度均增加时,水稻籽粒蛋白含量降低. Ziska 等^[49]、Seneweera 等^[32-33]在灌浆期用 700 μmol · mol⁻¹ CO₂ 对水稻进行短期刺激发现,籽粒中蛋白质含量降低,但总氮量没有变化. 张旭等^[48]运用梯度气室研究发现,600 μmol · mol⁻¹ CO₂ 长期作用下,稻米籽粒营养品质(蛋白质与氨基酸含量)显著下降. Lieffering 等^[23]运用 FACE (free-air CO₂ enrichment) 试验技术研究发现,水稻籽粒中氮含量降低,但其它元素含量均没有降低,认为是自然系统肥料供应充足所致. 董桂春等^[14]利用 FACE 系统研究发现,水稻在高于大气 CO₂ 浓度 200 μmol · mo⁻¹ 处理下,籽粒中蛋白质含量比对照降低了 0.6%. 低氮和低磷会进一步降低稻米蛋白质含量. 为研究全生育期氮的代谢和变化情况,谢祖彬等^[43]精确测量了 FACE 水稻叶片中的氮含量,结果表明,在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期分别比对照下降 8.43%、9.70%、10.16% 和 3.22%. 研究认为,CO₂ 浓度增高使不同生育期水稻植株含氮率显著或极显著下降,生育中期比前后期更为明显^[18]. 原因可能与植株的吸氮能力和土壤的氮供应能力之间的平衡有关^[46],即水稻生育中前期

茎鞘和后期稻穗的氮积累能力相对增强,叶片的氮积累能力相对变弱;也可能与碳/氮供应与需求的平衡有关。

总体上,与 C_4 作物相比(氮含量减少 7%), CO_2 浓度增高导致 C_3 作物氮含量减少 9%~16%。对小麦的初步研究认为, CO_2 浓度增加将降低籽粒含氮量和蛋白质含量^[7]。郭建平等^[16]采用人工气候室加日光灯照射的方法,当 CO_2 浓度为 $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 处理下,小麦粗蛋白含量减少了 4.82%;在水分胁迫条件下,粗蛋白减少 8.49%;而在相同温度和 CO_2 浓度条件下,水分胁迫使小麦籽粒的粗蛋白含量增加,在当前 CO_2 浓度下增加 24.92%,在高 CO_2 浓度下增加 19.93%。表明高 CO_2 浓度不利于提高小麦品质,而水分胁迫可以提高作物籽粒的粗蛋白含量,有利于提高籽粒品质。但高 CO_2 浓度限制了水分胁迫提高籽粒蛋白质含量的作用。郭建平等^[16]同时也测定了氨基酸的含量,发现高温和高 CO_2 浓度不利于作物氨基酸含量的提高,而水分胁迫能提高氨基酸含量,并且与 CO_2 浓度相比,水分胁迫作用占主导地位。原因在于 CO_2 浓度升高导致小麦呼吸速率降低,减缓了其营养吸收,加之光合作用下调,同化作用相应调节以满足库需,引起小麦叶片氮素减少,此外,还与 CO_2 浓度升高使生长加速引起小麦器官氮含量下降有关^[3,36,40]。研究表明,小麦籽粒中的氮含量在 FACE 下降低 3%~4%,若土壤中氮素不足时,可降低 9%,接近于水肥充足条件下小麦叶片氮含量降低的水平^[20]。

白莉萍等^[1-2]运用半开放式系统在小麦(中育 5 号和中优 9701)开花至腊熟期间施加 CO_2 处理,结果表明,面粉蛋白质含量随 CO_2 浓度增加(幅度为 $57 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)明显下降, CO_2 浓度从 $451 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增加到 $565 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,中育 5 号和中优 9701 小麦品种的面粉蛋白质含量分别下降了 4.5% 和 3.1%。蒋跃林等^[19]通过开顶式气室控制 CO_2 含量,测定其对小麦皖麦 33 籽粒品质的影响,结果表明,大气 CO_2 浓度为 $550 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 和 $750 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,小麦籽粒蛋白质含量和氨基酸总量均呈降低趋势,但蛋氨酸、苯丙氨酸和蛋白质含量明显增加,蛋氨酸增加了 8.2% 和 29.6%,苯丙氨酸增加了 7.0% 和 17.9%,小麦籽粒氨基酸评分值提高了 3.1 和 4.6。

但有些报道结果并不一致。王春乙等^[37-38]利用同化箱与开顶式气室分别对小麦中麦 3 号和京东 6

号从拔节到抽穗期进行处理,发现 CO_2 浓度增加使小麦籽粒的蛋白质、赖氨酸、脂肪含量增高,淀粉含量下降,品质得到提高; $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 的小麦籽粒粗蛋白、赖氨酸、粗脂肪、粗淀粉比 $350 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 分别增长 3.0%、3.0%、8.5% 和 -2.3%。 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 比 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 分别增长 4.4%、9.1%、11.3% 和 -1.7%。这里可能有实验手段不同导致的误差,也可能是不同品种之间存在差异,其原因有待于进一步深入研究。

3 CO_2 浓度增高对微量元素含量的影响

一般将稻米品质分为外观品质、加工品质、蒸煮品质和营养品质 4 个方面。营养品质除了蛋白质以外,还包括微量元素。微量元素在生物体中以不同形式存在,对人的生命过程起调控作用,由于它们不能在代谢过程中分解和合成,必须从外界摄入,所以显得更为重要。稻米和面粉中的微量元素也是人体获取的重要来源之一,所以日渐受到关注。Seneweera 等^[31-32]用 $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} CO_2$ 在灌浆期对水稻进行短期刺激发现,稻米的蒸煮品质发生变化,米饭柔软性变差;籽粒中磷含量升高,并且发现磷含量的增高与镁含量变化密切相关;同时对人体营养很重要的铁和锌元素含量下降。张旭等^[48]用 $600 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} CO_2$ 对水稻进行全生育期处理发现,稻米(特三矮 2 号)蒸煮品质(包括直链淀粉含量、胶稠度和碱消值)没有受到影响。董桂春等^[14]利用 FACE 系统研究发现,水稻武香粳 14 号在高于大气 CO_2 浓度 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 处理下,稻米直链淀粉含量没有受到影响,蛋白质含量比对照降低了 0.6%。高氮和高磷有利于降低稻米直链淀粉含量,低氮和低磷有利于降低稻米蛋白质含量。为了研究微量元素动态,Yamakawa 等^[46]通过 FACE 对高 CO_2 浓度下水稻植株微量元素进行了测定,发现穗分化期钾和镁的含量显著下降,钙和镉含量变化不大;成熟期钾含量显著下降,而镁、钙和镉含量变化不大;高 CO_2 浓度使水稻穗分化期植株的钾、钙、镁和镉的吸收量显著增加;在成熟期只有镉吸收量增加显著,而钾、镁和钙的吸收量变化不大。认为水稻穗分化前植株对钾的吸收量主要决定于植株的吸收能力,穗分化后主要取决于土壤供应钾的能力,而对钙和镁的吸收量主要取决于植株对钙和镁的需求及其吸收能力。

郭建平等^[16]采用开顶式气室对小麦进行 $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} CO_2$ 浓度处理时,发现不同气候条件下作物籽粒中的微量元素变化差异巨大。干旱条件下,

小麦的锌、铁、镁、钙、硫 5 种元素含量呈增加趋势,高温和高 CO₂ 浓度时,除硫以外,其它都呈下降趋势.蒋跃林等^[19]用开顶式气室进行控制试验发现,大气 CO₂ 浓度为 550 μmol · mol⁻¹ 和 750 μmol · mol⁻¹ 时,小麦籽粒中磷、铁、钾含量分别下降了 8.9% ~ 11.8%、7.5% ~ 10.8% 和 2.5% ~ 7.7%;而锌、硒、镁含量分别提高了 11.3% ~ 34.4%、11.1% ~ 44.4% 和 10.6% ~ 13.6%.可见,大气 CO₂ 浓度增加对小麦籽粒不同矿质营养元素含量具有不同的影响.

包括微量元素在内的营养品质是稻米品质中最为关键的一个因素,CO₂ 浓度增高及其与全球气候变化的交互作用对不同品种水稻营养品质的影响,及其在生理、代谢、生态方面的影响机理有必要做更深入更系统的研究.

4 CO₂ 浓度增高对其它品质性状的影响

稻米的外观品质和加工品质主要与品种遗传特性相关,但环境因素也会产生显著影响.董桂春等^[14]在 FACE 系统下用高于大气 CO₂ 浓度 200 μmol · mol⁻¹ 处理水稻武香粳 14 号,结果表明,稻米出糙率比对照提高 1.4%,整精米率比对照降低 12.3%,低氮水平有利于提高出糙率,高氮水平有利于提高整精米率;垩白粒率比对照提高 11.9%,垩白度比对照提高 2.8%,高氮和高磷有利于降低垩白大小、垩白粒率和垩白度;糊化温度比对照高 0.52 °C,胶稠度略有增加,低氮有利于降低糊化温度,低氮和高磷有利于降低胶稠度.

白莉萍等^[1]运用半开放式系统在小麦(中育 5 号和中优 9701)开花至腊熟期间施加 CO₂ 气体,结果表明,在 451 ~ 565 μmol · mol⁻¹ 范围内,CO₂ 浓度增加使沉降值降低,但影响较小;而对面团流变学特性如面团形成时间和延伸性有负面影响,其中对小麦品种中优 9701 的粉质参数影响微小;CO₂ 浓度增加不利于面团烘烤品质,尤其面包体积下降明显.

目前有关小麦营养品质的研究报道相对较多,而有关小麦加工品质的研究报道较少.未来研究小麦面包烘烤品质至关重要,高质量发酵面包需要较高的硬粒小麦籽粒蛋白质含量.小麦籽粒中,淀粉含量约占 70%,小麦面粉蒸煮、烘烤品质很大程度受淀粉特性影响的,但 CO₂ 浓度增高对作物淀粉合成及其特性影响的研究尚很少见报道^[3,12,36].

综上所述,CO₂ 浓度增高对作物影响的研究多集中在产量与生理性状上,而在品质方面研究较少,

不但没有形成完整的体系,且研究结果也不尽一致.而大气中 CO₂ 浓度的持续增加对稻米与小麦等作物品质的影响将更加明显.

5 展 望

大气中 CO₂ 浓度增高趋势明显,研究者们已经通过试验、模拟等多种手段加以分析、预测和研究.为了最大限度地利用 CO₂ 的肥效作用及其它有利方面,减小 CO₂ 浓度增高对作物品质的不利影响,迫切需要加强 CO₂ 及全球气候变化对作物品质影响的研究.

根据目前国内外的研究现状,未来我国关于 CO₂ 浓度增高对水稻、小麦品质影响的研究主要应从以下几方面实施:1)大气中 CO₂ 浓度增高对水稻、小麦品质的直接影响及品种间的差异.由于中国地域辽阔、气候多样,各地的主栽品种差异较大,不同品种对 CO₂ 浓度增高的反映会存在差异,因此有必要开展品种间品质的差异研究;2)大气中 CO₂ 浓度增高及与其它气候因子协同作用对水稻、小麦品质的综合影响及其指标量化^[28,41].大气中 CO₂ 浓度增高引起全球温度升高,导致全球气候变化,从而影响作物品质,所以环境综合模拟更具有实际意义;3)大气中 CO₂ 浓度增高及气候变化对水稻、小麦品质形成过程的影响机理;4)适应 CO₂ 浓度增高的水稻、小麦品质改良育种的方向与策略.除了高产优质和提高抗性以外,适应 CO₂ 浓度和温度增高的影响将被列入育种的主要方向之一;5)适应 CO₂ 浓度增高的水稻、小麦品质改良的综合生产技术体系^[35,39].栽培和育种在作物生产中具有同等作用,因此,不断提高和改进田间管理水平也是适应 CO₂ 浓度增高的主要研究内容之一;6)分子标记及转基因技术在水稻、小麦品质改良育种适应方面的应用.

总之,从 CO₂ 与稻米和面粉品质性状关系描述基础工作开始,到影响因子的指标量化,逐步深入研究影响品质形成过程的机理机制,最终寻求适应 CO₂ 浓度增高和气候变化的水稻、小麦品质改良育种方向与策略和综合生产技术体系,以指导生产实践.

参考文献

- [1] Bai L-P (白莉萍), Lin E-D (林而达), Rao M-J (饶敏杰). 2005. Effects of irrigation schemes on yield and quality of winter wheat on different sites. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **25**(4): 917-922 (in Chinese)
- [2] Bai L-P (白莉萍), Tong C-F (仝乘风), Lin E-D (林

- 而达), *et al.* 2005. Quality characteristics of bread wheat grown under elevated CO₂ and temperature. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **29**(5): 814 - 818 (in Chinese)
- [3] Bai L-P (白莉萍), Zhou G-S (周广胜). 2004. Responses and adaptations of wheat to elevated CO₂ concentration and temperature rise. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), **12**(4): 24 - 26 (in Chinese)
- [4] Baker JT, Allen LH, Boote KJ. 1990. Growth and yield response of rice to carbon dioxide concentration. *Journal of Agricultural Science*, **115**: 313 - 320
- [5] Batey IL, Boote KJ. 1997. Optimization of rapidvisco analyser test conditions for predicting Asian noodle quality. *Cereal Chemistry*, **74**: 497 - 503
- [6] Benjian B, Lane PW. 1986. Protein concentration of grain in relation to some weather and soil factors during 17 years of English winter-wheat experiment. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **37**: 435 - 445
- [7] Blumenthal C, Rawson HM, Mckenzie E, *et al.* 1996. Changes in wheat grain quality due to doubling the level of atmospheric CO₂. *Cereal Chemistry*, **73**: 762 - 766
- [8] Cai Y-X (蔡一霞), Xu D-Y (徐大勇), Zhu Q-S (朱庆森). 2004. Recent advances in physiological mechanisms of rice quality development. *Chinese Bulletin of Botany* (植物学通报), **21**(4): 419 - 428 (in Chinese)
- [9] Cai Y-X (蔡一霞), Zhu Q-S (朱庆森), Wang Z-Q (王志琴), *et al.* 2002. Effects of soil moisture on rice quality during grain-filling period. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **28**(5): 601 - 608 (in Chinese)
- [10] Cheng F-M (程方民), Zhu B-Y (朱碧岩). 1998. Present research on the effect of meteor-ecological factors on rice quality. *Chinese Journal of Agro-meteorology* (中国农业气象), **19**(5): 39 - 45 (in Chinese)
- [11] Conroy JP, Seneweera S, Basra AS, *et al.* 1994. Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth yields and grain quality of cereal crops. *Australian Journal of Plant Physiology*, **21**: 741 - 758
- [12] Crosbie GB, Rosse AS, Moro T, *et al.* 1999. Starch and protein quality requirements of Japanese alkaline noodle (Ramen). *Cereal Chemistry*, **76**: 328 - 332
- [13] Dijkstra P, Schapendonk AHMC, Groenwold K, *et al.* 1999. Seasonal changes in the response of winter wheat to elevated atmospheric CO₂ concentration grown in open top chambers and field tracking chambers. *Global Change Biology*, **5**: 563 - 576
- [14] Dong G-C (董桂春), Wang Y-L (王余龙), Huang J-Y (黄建晔), *et al.* 2004. Responses of rice grain quality traits to free-air CO₂ enrichment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(7): 1217 - 1222 (in Chinese)
- [15] Grausgruber H, Oberforster M, Werteker M, *et al.* 2000. Stability of quality traits in Austrian grown winter wheats. *Field Crops Research*, **66**: 257 - 267
- [16] Guo J-P (郭建平), Gao S-H (高素华), Liu L (刘玲). 2001. An experiment study of the impacts of meteorological condition on crops qualities and yield. *Climate and Environment Research* (气候与环境研究), **6**(3): 361 - 367 (in Chinese)
- [17] Huang F-S (黄发松), Sun Z-X (孙宗修), Hu P-S (胡培松), *et al.* 1998. Present situations and prospects for the research on rice grain quality forming. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), **12**(3): 172 - 176 (in Chinese)
- [18] Huang J-Y (黄建晔), Yang H-J (杨洪建), Yang L-X (杨连新), *et al.* 2004. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on nitrogen nutrition at different growth stages in rice (*Oryza sativa* L.) cultivar Wuxiangjing 14. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **30**(12): 1237 - 1243 (in Chinese)
- [19] Jiang Y-L (蒋跃林), Zhang Q-G (张庆国), Zhang S-D (张仕定). 2005. Effects of increased atmospheric CO₂ concentrations on nutrient quality of wheat grain. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), **10**(1): 21 - 25 (in Chinese)
- [20] Kimball BA, Morris CF, Pinter PJ, *et al.* 2001. Wheat grain quality as affected by elevated CO₂, drought, and soil nitrogen. *New Phytologist*, **150**: 295 - 303
- [21] Kimball BA, Zhu J-G (朱建国), Cheng L (程磊), *et al.* 2002. Responses of agricultural crops to free-air CO₂ enrichment. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**(10): 1323 - 1338 (in Chinese)
- [22] Li Y-G (李永庚), Jiang G-M (蒋高明), Yang J-C (杨景成). 2003. Effects of temperature on carbon and nitrogen metabolism, yield and quality of wheat. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **27**(2): 164 - 169 (in Chinese)
- [23] Loeffering M, Kim HY, Kobayashi K, *et al.* 2004. The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field-grown rice grains. *Field Crops Research*, **88**: 279 - 286
- [24] Lin ED, Xiong W, Ju H, *et al.* 2005. Climate change impacts on crop yield and quality with CO₂ fertilization in China. *Philosophical Transactions of Royal Society B*, **360**: 2149 - 2154
- [25] Lü W-Y (吕文彦), Cao P (曹萍), Hou X-Y (侯秀英), *et al.* 2000. Study on rice quality and relationship between quality and yield of rice in Liaoning province. *Liaoning Agriculture Science* (辽宁农业科学), (5): 1 - 4 (in Chinese)
- [26] Ma X-M (马新明), Li L (李琳), Liao X-Z (廖祥正). 2004. Effect of different water control on kernel quality and photosynthetic characteristics of flag leaves in winter wheat. *Journal of He'nan Agricultural University* (河南农业大学学报), **38**(1): 13 - 16 (in Chinese)
- [27] Mao F-W (毛凤梧), Zhao H-J (赵会杰), Xu L-X (徐立新), *et al.* 2001. Regulating effect of strategy of irrigation and fertilization on the formation of quality of wheat. *Journal of He'nan Agricultural University* (河南农业大学学报), **35**(1): 13 - 16 (in Chinese)
- [28] Monje O, Bugbee B. 1998. Adaptation to high CO₂ con-

- centration in an optimal environment; Radiation capture, canopy quantum yield and carbon use efficiency. *Plant, Cell and Environment*, **21**: 315 – 324
- [29] Nakagawa H, Horie T. 2000. Rice responses to elevated CO₂ and temperature. *Global Environment Research*, **3**: 101 – 113
- [30] Rogers GS, Gras PW, Betay IL, *et al.* 1998. The influence of atmospheric CO₂ concentration on the protein, starch and mixing properties of wheat flour. *Australian Journal of Plant Physiology*, **25**: 387 – 393
- [31] Seneweera S, Blakeney A, Milham P, *et al.* 1996. Influence of rising atmospheric CO₂ and phosphorus nutrition on the grain yield and quality of rice. *Cereal Chemistry*, **73**: 239 – 243
- [32] Seneweera SP, Conroy JP. 1997. Growth grain yield and qualities of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO₂ and phosphorus nutrition reprinted from Plant nutrition for sustainable food production and environment. *Soil Science and Plant Nutrition*, **43**: 1131 – 1136
- [33] Seneweera SP, Conroy JP, Ghannoum O, *et al.* 2002. Changes in source-sink relations during development influence photosynthetic acclimation of rice to free air CO₂ enrichment (FACE). *Functional Plant Biology*, **29**: 945 – 953
- [34] Smika DE, Greb BW. 1973. Protein content of winter wheat grain as related to soil and climatic factors in the semiarid central Great Plains. *Agronomy Journal*, **65**: 433 – 436
- [35] Sosulski FW, Paul EA, Hutcheon WI. 1963. The influence of soil moisture, nitrogen fertilization and temperature on quality and amino acid composition of Thatcher wheat. *Canadian Journal of Soil Science*, **43**: 219 – 228
- [36] Tester RF, Morrison WR, Ellis RH, *et al.* 1995. Effects of elevated growth temperature and carbon dioxide levels on some physicochemical properties of wheat starch. *Journal of Cereal Science*, **22**: 63 – 71
- [37] Wang C-Y (王春乙), Bai Y-M (白月明), Zheng C-L (郑昌玲), *et al.* 2004. The study on effects of double CO₂ and O₃ on crops. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), **62**(6): 875 – 881 (in Chinese)
- [38] Wang C-Y (王春乙), Guo J-P (郭建平), Cui D-C (崔读昌), *et al.* 2000. The experiment research about the effects of CO₂ enrichment on wheat and corn quality. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **26**(6): 931 – 936 (in Chinese)
- [39] Wang Q-S (王强盛), Zhen R-H (甄若宏), Ding Y-F (丁艳锋), *et al.* 2004. Effects of Potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of Japonica rice. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), **37**(10): 1444 – 1451 (in Chinese)
- [40] Wang X-L (王修兰), Xu S-H (徐师华), Li Y-X (李佑祥), *et al.* 1996. Physical response of wheat on double CO₂ concentration. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **22**(3): 340 – 344 (in Chinese)
- [41] Wu DX, Wang GX, Bai YF, *et al.* 2004. Effects of elevated CO₂ concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **104**: 493 – 507
- [42] Xie L-Y (谢立勇), Lin E-D (林而达), Sun F (孙芳), *et al.* 2006. Effect of CO₂ enrichment and temperature increase during growth duration on physiological characteristics of rice. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), **11**(1): 17 – 21 (in Chinese)
- [43] Xie Z-B (谢祖彬), Zhu J-G (朱建国), Zhang Y-L (张雅丽), *et al.* 2002. Responses of rice growth and its C, N and P composition to FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment) and N, P fertilization. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**(10): 1223 – 1230 (in Chinese)
- [44] Xin W-L (辛文利), Qi S-Y (祁适雨). 1998. The questions and suggestions of wheat variety quality in China. *Heilongjiang Agricultural Science* (黑龙江农业科学), (4): 44 – 46 (in Chinese)
- [45] Xu Z-Z (许振柱), Yu Z-W (于振文), Wang D (王东), *et al.* 2003. Effect of irrigation condition on protein composition accumulation of grain and its quality in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), **29**(5): 682 – 687 (in Chinese)
- [46] Yamakawa Y, Saigusa M, Okada M, *et al.* 2004. Nutrient up take by rice and soil solution composition under atmospheric CO₂ enrichment. *Plant and Soil*, **259**: 367 – 372
- [47] Zhang G-F (张国发), Ding Y-F (丁艳锋). 2004. Effects of temperature and light on rice grain quality. *Chinese Rice* (中国稻米), (1): 11 – 14 (in Chinese)
- [48] Zhang X (张旭), Liu Y-Z (刘彦卓), Kong Q-X (孔清霞), *et al.* 1998. Growth, grain yield and kernel quality of high-yield rice variety Te-San—Ai 2 growing in a simulated CO₂-enriched habitat. *Chinese Journal of Applied and Environment Biology* (应用与环境生物学报), **4**(3): 238 – 342 (in Chinese)
- [49] Ziska LH, Namuco O, Moya T, *et al.* 1997. Growth and yield response of field grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature. *Agronomy Journal*, **89**: 45 – 53

作者简介 谢立勇,男,1969年生,博士,副教授.主要从事气候变化、作物生理生态与农业可持续发展研究,已发表论文16篇. E-mail: xly0910@yahoo.com.cn

责任编辑 张凤丽
