

CO₂ 浓度升高对重金属污染下稻米品质影响的研究进展

王 潇^{1,2}, 宋正国^{1*}, 武慧斌¹, 邹洪涛²

(1.农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191; 2.沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要: 目前研究 CO₂ 浓度升高对农作物的影响主要集中在光合作用、生理生态反应和产量形成等方面, 对重金属污染胁迫下 CO₂ 浓度升高对水稻生长发育和品质影响的研究甚少。本文通过详述 Cu、Cd 等重金属污染条件下, CO₂ 浓度升高对水稻生长发育及稻米品质的影响, 揭示重金属污染条件下 CO₂ 浓度升高影响 Cu、Cd 在土壤-水稻系统中的运移状况及其稻米营养品质方面的相关机制, 为 CO₂ 浓度持续升高背景下复合污染农田风险评估、农产品安全调控提供科学依据, 也对于预测未来气候条件下人类稻米品质变化及水稻品种的选育意义重大。

关键词: CO₂ 浓度升高; 土壤污染; 水稻品质; 重金属; Cu; Cd

中图分类号: X171.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-4944(2013)05-0008-04

Progress of Rice Grown and Quality in Soil Contaminated with Heavy Metals Under Elevated CO₂ Levels

WANG Xiao^{1,2}, SONG Zheng-guo^{1*}, WU Hui-bin¹, ZOU Hong-tao²

(1. Agro-environmental protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: More researches highlight the photosynthesis, physiology, and production of crops under elevated CO₂ levels. A few researchers focus on the influence of CO₂, along with heavy metals, on the growth and quality of paddy. In this paper, the processes of copper and cadmium on the growth and grain quality of rice in elevated CO₂ levels were summarized, and the subsequent quality of paddy was studied. The study provides reference for the risk assessment of compound-contaminated soils, safe production and controlling of crops, and quality prediction of crops under the continual increase of global CO₂ level in the future.

Keywords: elevated CO₂; soil contaminated; rice quality; heavy metals; Cu; Cd

进入 21 世纪以来, 水稻育种、栽培研究出现了新的发展趋势^[1]。稻米生产不仅担负着确保我国粮食安全重任, 而且肩负着实现种粮增效、稻农增收的重大使命。随着工农业的迅速发展, 土壤重金属污染日趋严重, 土壤重金属污染已经成为一个世界性的难题。据不完全估计, 我国每年因重金属污染带来的粮食减产达 1 000 多万 t, 被重金属污染的粮食每年达 1 200 万 t, 年经济损失在 200 亿元以上^[2]。农田土壤环境的日益恶化, 不仅使稻米中重金属含量超标, 降低了其品质与安全性, 而且影响到消费者的健康水平以及稻米

的生产销售^[3-4]。且全球气候变化已对全球生态系统以及社会经济系统产生明显的影响, 大气 CO₂ 浓度的快速增长引起了科学家们对陆地生态系统的广泛关注。据预测, 到本世纪末 CO₂ 浓度可达到 800 μL·L⁻¹^[5]。

1 国内外研究现状

1.1 重金属污染胁迫对水稻生长及稻米品质的影响

目前, 我国许多地方的部分农田土壤中重金属含量较高, 污染严重, 主要包括有 Cd、Hg、Cr、Pb、Cu、Zn 等重金属的污染^[6-7]。重金属污染会影响到水稻体内生理生化指标, 不仅影响水稻生长发育, 造成产量下降, 更为严重的是重金属在水稻体内大量累积, 并通过食物链对人和动物的生命和健康构成严重威胁。Cu 和 Cd 作为土壤系统中的 2 种重要金属元素, 对水稻的生长发育与稻米的品质影响已不容忽视。有研究表

收稿日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071217)

作者简介: 王 潇(1987—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为污染环境的生物化学修复。E-mail: prettywangxiao@126.com

* 通信作者: 宋正国 E-mail: forestman1218@163.com

明,过量 Cu 会抑制 P、Mn、Fe、Ca 等的吸收^[8-9];也有研究报道,随着外源 Cu 含量的增加,作物对氮素的吸收降低,对整个植株的生长有明显影响^[10-11]。在主要的大田农作物中,Cd 易被水稻吸收^[12],有研究表明,Cd 是植物叶片光合作用的抑制剂^[13],且 Cd 胁迫对水稻叶片矿质元素积累有显著的抑制作用^[14]。

1.2 CO₂ 浓度升高对水稻生长及稻米品质的影响

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,大气 CO₂ 浓度升高必然会对植物的光合作用产生影响^[15-16],CO₂ 可通过改变光合速率、生理代谢以及干物质生产等因素来影响作物的品质^[17]。有研究报道,大气 CO₂ 浓度升高条件下会增加水稻植株的总生物量和产量,但不同光合途径的植物增加的幅度不同^[18-19]。

随着生活水平的提高,人们对稻米在营养品质方面,包括蛋白质含量和淀粉含量以及 Fe、Zn、Ca 等有益矿质元素的含量等也提出了更高的要求。已有研究报道,在 CO₂ 浓度升高条件下,农产品中营养成分变化比较复杂;但从总体上看,CO₂ 浓度升高使大宗作物籽粒中蛋白质含量下降,微量元素含量总体上有下降趋势,这对其籽粒品质有不利影响^[20]。Terao 等^[21]、Seneweera 等^[22-23]、Yang 等^[24]、Dong 等^[25]的研究结果一致表明,CO₂ 浓度增高降低了稻米中蛋白质的含量。Högy 等^[26]、Rogers^[27]等和 Wu 等^[28]的研究结果表明,CO₂ 浓度增高增加了淀粉含量,但与稻米中直链淀粉含量随 CO₂ 浓度升高变化的研究结论并不一致^[21-25]。稻米矿质元素含量也是水稻籽粒营养品质的一个重要指标,主要包括 N、S、P、Cu、Fe、Mn、Zn、K、Ca 和 Mg 等。大多研究表明,CO₂ 浓度升高可降低稻米 N 含量^[29-32];黄建晔等^[33]研究表明 CO₂ 浓度升高可降低稻米中 P 含量;而庞静等^[31]研究结果显示,CO₂ 浓度升高使稻米中 N、K 含量降低,但对 P、Ca、Mg、Cu、Zn、Mn、Fe 含量无显著影响。

1.3 重金属污染下 CO₂ 浓度升高对水稻生长及稻米品质的影响

近年来,大气 CO₂ 浓度升高及其引起的全球变暖已经受到人们的广泛关注。许多研究表明,高 CO₂ 浓度条件下,不仅植物地上部的生长会受到影响,而且其根系的长度、密度、粗细及根毛发育等形态特征也会发生明显改变^[34]。诸如养分、水分和温度等环境要素也会对 CO₂ 浓度升高影响植物根系生长产生互作效应。CO₂ 浓度升高可影响或改变植物器官的组织和功能^[35],可能会改变根系的生理生化功能,使其吸收

和向地上各器官转运矿质元素的能力减弱,最终导致籽粒中矿质元素含量减少。汪杏芬等^[36]研究表明,CO₂ 浓度升高能增加植物根系的表面积;王大力等^[37]发现,CO₂ 浓度倍增条件下,根系甲酸、乙酸总量以及分泌物总量明显增加,但根系分泌物的变化是否会影响重金属的生物可获得性这一问题还需要进一步深入研究。农田土壤重金属污染一般是多个因子的复合污染,且复合污染因子之间存在复杂的关系。宗良纲等^[38]研究则表明,重金属在复合污染条件下对植物的毒害及其在土壤中的迁移动态要比单一元素的污染复杂、严重。

大气中 CO₂ 浓度增加还能够强化植物对重金属等污染物的吸收甚至诱导植物超积累某些重金属。Yang 等^[24]研究结果表明,FACE 显著降低了 Cu 含量,降低幅度为 20%,而籽粒对 Cu 的吸收量基本不变。Tang 等^[39]的研究表明,CO₂ 浓度升高对植物抵抗 Cu 胁迫环境有显著的促进作用,而且显著促进了植物的地上部生物量,还可诱导植物超积累 Cu。在这种情况下,如果生长于 CO₂ 浓度升高条件下的植物中重金属含量和 CO₂ 浓度正常环境中相当,CO₂ 浓度升高条件下植物生物量和产量的增加无疑意味着增加重金属污染土壤植物修复的效率,缩短修复时间。李中阳等^[40]针对重金属胁迫下 CO₂ 浓度升高对水稻生长及稻米卫生品质的影响方面展开研究,其结果表明,CO₂ 浓度升高显著增加了水稻的总生物量,但 Cu、Cd 在水稻中的含量增减根据品种有所不同。水稻属于生理耐 Cd 性比较强的作物,Cd 污染一般不会导致显著减产,但 Cd 很容易在水稻籽实中累积,显著降低稻米的卫生品质和食用价值。根据目前对全球 CO₂ 浓度升高的预测,CO₂ 浓度升高导致水稻品种对重金属的高量吸收在将来会成为危害人体健康的一个潜在隐患,Cd 所带来的隐患要比 Cu 更为严重。

CO₂ 浓度升高对农作物籽粒吸收矿物元素的影响方面研究较多。在大气 CO₂ 浓度升高引起生物量增加的情况下,被作物吸收的矿质元素的含量会出现 3 种情况:一是作物在 CO₂ 浓度升高下吸收的元素的数量和正常环境条件下一样,则该含量降低;二是作物对元素的吸收和生物量同比增长,则该含量不变;三是相对于生物量的增加,作物对元素的吸收数量比值更大,则该含量增加。目前由于各试验所采用的植物品种、土壤类型和环境因素等不同,关于 CO₂ 浓度升高对植物矿质营养影响的结果不一,多数得到植株叶片矿质元素含量下降的结果,也有一些研究并没有观

察到 CO₂ 浓度升高使植物组织内的元素含量下降^[41]。吴健等^[42]研究表明,大气 CO₂ 浓度升高显著影响了水稻籽粒中各营养元素的含量,其中 P、K 和 Cu 的含量有随大气 CO₂ 浓度升高而呈逐步降低的趋势,Na、Zn、Mn 含量呈增长趋势。目前除了籽粒中 N 含量的降低外,关于 CO₂ 对元素含量存在的稀释效应,Lo-ladze^[43]指出主要粮食作物目前还缺乏足够多的数据来说明其他元素的稀释效应。

大气 CO₂ 浓度持续增加还会引起全球温度、地区降水量和农作物生长季长度的变化,同时对植物生物量和农作物产量的影响还与矿质营养、干旱、盐碱等多种环境胁迫因子有关^[44]。目前,对于气候因子是如何影响农作物对重金属吸收的研究较少。潘文杰等^[45]研究结果表明,日照时数和降水量与烤烟 Pb 含量呈较强的相关关系,日照时数、日均相对湿度和日均气温与烤烟 Cd 含量呈较强的相关关系。姚凤梅等^[46]报道了温度是影响水稻对重金属吸收能力的一个重要因素;增加温度,水稻产量呈下降趋势,随温度不断增加,产量下降幅度也越大。李亚平^[47]和 Yang 等^[24]研究报道水稻微量元素含量及吸收影响比较复杂,不仅与不同试验条件下的养分有效性和可移动性有关,还受水稻品种、土壤类型和环境胁迫因子等的影响,过程非常复杂,需要进一步研究,以利于在高 CO₂ 浓度下,选择适宜的品种,增强对有利元素的吸收效率。

综上所述,修复土壤重金属污染是目前环境污染治理的一大难题,且气候变化引起的陆地表层 CO₂ 浓度、温度升高和降雨量等变化,将对作物生产产生重要影响,这已成为国内外科研人员关注和研究的热点。目前全球气候变暖,CO₂ 浓度升高且土壤重金属污染现象日趋严重,严重影响了稻米产量与品质,开展水稻生长发育对 CO₂ 浓度升高的响应研究,对阐明未来大气 CO₂ 浓度升高条件下水稻的生产及营养价值的分析具有重要的科学意义。因此,充分利用气候变化,尤其 CO₂ 升高对农作物生产产生的有利影响,将是一个值得深入研究的课题。

2 展望

目前大气 CO₂ 升高和重金属污染在我国乃至世界范围内的加剧,以及水稻生产在我国和亚洲的重要性,开展重金属胁迫下 CO₂ 浓度升高对水稻生长以及稻米品质的影响势在必行。目前土壤-水稻系统重金属污染问题已取得了一定程度的进展,而对稻田生态系统矿质元素及 CO₂ 浓度升高诱导植物超积累重金

属的相关研究较少^[48],还有以下问题亟待解决。

(1)农田土壤重金属污染一般是多个因素的复合污染,且复合污染因子之间存在复杂的关系。因此,应该加强土壤-水稻系统重金属元素的复合污染及元素间的交互作用和拮抗关系的相关研究,明确复合污染条件下 CO₂ 浓度升高影响重金属在土壤-水稻系统中的运移状况。而且大气 CO₂ 浓度持续升高伴随着温度、降水量等的变化,这些因素对水稻吸收重金属的综合影响还需要进一步研究。

(2)水稻籽粒中蛋白质含量在 CO₂ 浓度升高条件下的降低可能与植株体内 N 含量下降有关。目前对 CO₂ 浓度升高条件下植株体内 N 含量的下降还没有明确的解释,所以有必要加强研究 CO₂ 浓度升高对稻米中 N 含量变化的影响机制。

(3)目前研究 CO₂ 浓度升高对农作物的影响主要集中在光合作用、生理生态反应和产量形成等方面,而对重金属污染胁迫下 CO₂ 浓度升高对水稻生长发育和品质影响的研究甚少,且稻米中直链淀粉及矿质元素的含量随 CO₂ 浓度升高变化的研究结论并不一致,还需要进一步探讨其生理生化机制及不同品种间基因型的差异。

(4)目前研究 CO₂ 浓度升高对不同品种水稻的品质影响,大多建立在人工控制条件下的短期试验,不少结论仍有一定的局限性。应在大范围内开展 CO₂ 浓度升高对不同水稻品种产品品质影响的研究,总结出稻米品质变化的总体趋势及不同品种间的反应差异,以期在未来高浓度 CO₂ 条件下我国筛选适应环境变化的优良品种提供依据。

参考文献:

- [1] 路甬祥. 世界科技的发展趋势[J]. 中国科技信息, 2005(11): 3.
- [2] 武正华. 土壤重金属污染植物修复研究进展[J]. 盐城工业学院学报, 2002, 15(6): 53-57.
- [3] 肖美秀, 梁义元, 梁康迺, 等. 水稻重金属污染及其控制技术的研究进展[J]. 亚热带农业研究, 2005, 1(3): 40-43.
- [4] 程式华, 胡培松. 中国水稻科技发展战略[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(3): 223-226.
- [5] Eds Parry, M L, et al. Climate change 2007 synthesis report[M]. UK: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 史海娃, 宋卫国, 赵志辉. 我国农业土壤污染现状及其成因[J]. 上海农业学报, 2008, 24(2): 122-126.
- [7] 孙 波, 周生路, 赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 248-251.
- [8] Lidon F C, Henriques F S. Effects of copper toxicity on growth and up-take and translocation of metals in rice plants[J]. J Plant Nutr, 1993, 16: 1449-1464.

- [9] 徐加宽, 杨连新, 王志强, 等. 土壤铜含量对水稻氮素吸收利用及其产量的影响[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2008, 29(2): 72-76.
- [10] 康立娟, 赵明宪, 赵成爱. 铜对水稻的影响及迁移积累规律的研究[J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(4): 43-44.
- [11] 康立娟, 赵明宪, 庄国臣. 铜的单元及复合污染中水稻对铜吸收累积规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 503-504.
- [12] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to remediate soil Cd risks[J]. *Biometals*, 2004, 17: 549-553.
- [13] Anderson J M, Park Y I, Chow W S. Photoinactivation and photoprotection of photosystem II in nature[J]. *Physiologia Plantarum*, 1997, 100(2): 214-223.
- [14] 杨春刚, 朱智伟, 章秀福, 等. 重金属镉对水稻生长影响和矿质元素代谢的关系[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 176-178.
- [15] 赵天宏, 王美玉, 张巍巍, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1096-1100.
- [16] 徐 玲, 赵天宏, 胡莹莹, 等. CO₂ 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, 28(5): 867-872.
- [17] 邓西民. 大气 CO₂ 浓度上升和全球气候变化对我国农业生产的影响[J]. 科技导报, 1995(7): 33-35.
- [18] Kimball B A, 朱建国, 程 磊, 等. 开放系统中农作物对空气 CO₂ 浓度增加的效应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1323-1338.
- [19] Ceulemans R, Mousseau M. Tansley review No.71: Effects of elevated atmospheric CO₂ on woody plants[J]. *New phytol*, 1997, 127: 425-446.
- [20] 柴如山, 牛耀芳, 朱丽青, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对农产品品质影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2765-2775.
- [21] Terao T, Miura S, Yanagihara T, et al. Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005, 85: 1861-1868.
- [22] Seneweera S, Blakeney A, Milham P, et al. Influence of rising atmospheric CO₂ and phosphorus nutrition on the grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* cv. Jar-rah)[J]. *Cereal Chemistry*, 1996, 73: 239-243.
- [23] Seneweera S P, Conroy J P. Growth, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO₂ and phosphorus nutrition[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43: 1131-1136.
- [24] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, et al. The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102: 128-140.
- [25] Dong G-C, Wang Y-L, Huang J-Y, et al. Response of rice grain quality traits to free-air CO₂ enrichment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1217-1222.
- [26] Högy P, Fangmeier A. Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat[J]. *J Cereal Sci*, 2008, 48(3): 580-591.
- [27] Rogers G S, Gras P W, Batey I L, et al. The influence of atmospheric CO₂ concentration on the protein, starch and mixing properties of wheat flour[J]. *Australian J Plant Physiol*, 1998, 25: 387-393.
- [28] 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]. *Agr Ecosyst Environ*, 2004, 104: 493-507.
- [29] 谢祖彬, 朱建国, 张雅丽, 等. 水稻生长及其体内 C、N、P 组成对开放式空气 CO₂ 浓度增高和 N、P 施肥的响应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1223-1230.
- [30] Loeffering M, Kim H Y, Kobayashi K, et al. The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field-grown rice grains[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88: 279-286.
- [31] 庞 静, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由空气 CO₂ 浓度升高对水稻营养元素吸收和籽粒中营养元素含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 350-354.
- [32] 唐世荣, 李中阳, 赵玉杰, 等. CO₂ 浓度升高对农作物品质影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2437-2444.
- [33] 黄建晔, 杨连新, 杨洪建, 等. 水稻磷素对开放式空气 CO₂ 浓度增高响应的研究[J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 25(4): 1-6.
- [34] Rogers H H, Peterson C M, McCrimmon J N, et al. Response of plant roots to elevated atmospheric carbon dioxide[J]. *Plant Cell Environ*, 1992, 15: 749-752.
- [35] Booker F L, Maier C A. Atmospheric carbon dioxide, irrigation, and fertilization effects on phenolic and nitrogen concentrations in loblolly Pine (*Pinus taeda*) needles[J]. *Tree Physiology*, 2001, 21: 609-616.
- [36] 汪杏芬, 李世仪, 白克智, 等. 大气 CO₂ 浓度倍增对植物根系表面积和泡囊-丛枝菌根侵染活力和强度的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(19): 2083-2084.
- [37] 王大力, 林伟宏. CO₂ 浓度升高对水稻根系分泌物的影响——总有机碳、甲酸和乙酸含量变化[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 570-572.
- [38] 宗良纲, 丁 园. 土壤重金属 (Cu, Zn, Cd) 复合污染的研究现状[J]. 农业环境保护, 2001, 20(2): 126-128.
- [39] Tang S R, Xi L, Zheng J M, et al. Responses to elevated CO₂ of Indian mustard and sunflower growing on copper contaminated soil[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2003, 71: 988-997.
- [40] 李中阳, 唐世荣, 邓小芳, 等. 不同品种水稻在 CO₂ 浓度升高下对 Cu 和 Cd 吸收差异性的比较研究[C]//第三届全国农业环境科学学术研讨会论文集, 2009: 10.
- [41] Idso S B, Idso K E. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on plant constituents related to animal and human health[J]. *Environ & Exp Bot*, 2001, 45: 179-199.
- [42] 吴 健, 蒋跃林. 大气 CO₂ 浓度升高对水稻生育生理及产量品质影响的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2008: 6.
- [43] Loladze I. Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry[J]. *Trends Ecol Evol*, 2002, 17(10): 457-461.
- [44] 康 辉. 环境 CO₂ 浓度升高对植物的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(22): 42-44.
- [45] 潘文杰, 姜超英, 唐远驹, 等. 烤烟铅镉含量及其与环境的关系[J]. 土壤, 2007, 39(3): 369-374.
- [46] 姚凤梅, 张佳华, 孙白妮, 等. 气候变化对中国南方稻区水稻产量影响的模拟和分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(5): 659-666.
- [47] 李亚平. 稻米品质对大气 CO₂ 浓度升高响应的基因型差异—FACE 研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2010: 5.
- [48] 郭 嘉. 稻田水环境对大气 CO₂ 浓度升高的响应特征及其机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 6.