

大气 CO₂ 含量增加对小麦籽粒营养品质的影响

蒋跃林¹ 张庆国¹ 张仕定² 岳伟¹ 谢超群¹

(1. 安徽农业大学 资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 中国科技大学 理化测试中心, 合肥 230026)

摘要 通过开顶式气室控制 CO₂ 含量, 对小麦籽粒品质实验测定, 研究了大气 CO₂ 增长对小麦籽粒蛋白质含量、蛋白质产量、氨基酸组分含量和主要营养元素含量的影响。结果表明: 在大气 CO₂ 含量(摩尔分数)为 550 和 750 μmol/mol 时, 与正常大气 CO₂ 水平相比, 小麦籽粒蛋白质含量和氨基酸总量有降低趋势, 但蛋氨酸、苯丙氨酸含量和蛋白质产量明显增加, 蛋氨酸升幅为 8.2% 和 29.6%, 苯丙氨酸升幅为 7.0% 和 17.9%; 小麦籽粒氨基酸评分值提高 3.1 和 4.6。小麦籽粒中磷、铁、钾含量随大气 CO₂ 含量增加而下降, 分别下降 8.9%~11.8%, 7.5%~10.8% 和 2.5%~7.7%; 而锌、硒、镁含量上升, 分别提高 11.3%~34.4%, 11.1%~44.4% 和 10.6%~13.6%, 大气 CO₂ 增加对小麦籽粒各矿质营养元素含量的影响存在差异。

关键词 小麦; 籽粒; 营养品质; CO₂ 增加

中图分类号 S 512.1; S 145.3

文章编号 1007-4333(2005)01-0021-05

文献标识码 A

Effects of increased atmospheric CO₂ concentration on nutrient quality of wheat grain

Jiang Yuelin¹, Zhang Qinguo¹, Zhang Shiding², Yue Wei¹, Xie Chaoqun¹

(1. College of Resources and Environment Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2. Center for Physics and Chemistry Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract The protein contents, protein yields, relative contents of amino acids in protein and main nutrient elements contents of wheat grains were measured under ambient and increased CO₂ conditions, and effects of increased atmospheric CO₂ concentration on nutrient quality of wheat grains were analysed. The results showed that the protein contents and total amino acids contents of wheat grains decreased. The protein yields, methionine and phenylalanine contents increased by 13.1% - 19.7%, 8.2% - 29.6% and 7.0% - 17.9% under elevated (550 and 750 μmol/mol) CO₂, compared to the ambient air CO₂ concentration. At the same time, the amino acid scores of the grain protein increased by 3.1 and 4.6. It was also found that P, Fe and K contents of wheat grains decreased by 8.9% - 11.8%, 7.5% - 10.8% and 2.5% - 7.7%. However, Zn, Se and Mg contents of wheat grains increased by 11.3% - 34.4%, 11.1% - 44.4% and 10.6% - 13.6% at two high CO₂ levels.

Key words wheat; grain; nutrient quality; increased CO₂

工业革命前大气 CO₂ 含量约为 265 μmol/mol, 20 世纪 60 年代约为 314 μmol/mol, 目前则达到约 350 μmol/mol, 21 世纪大气 CO₂ 含量将以平均每年 1.5~2.0 μmol/mol 的速度递增。近年的研究表明, 大气 CO₂ 含量增加的主要原因是煤炭、石油等的燃烧。预计到本世纪中叶, 大气 CO₂ 含量将达到工业

革命前的 2 倍^[1]。CO₂ 既是植物光合作用的反应底物, 同时又是 C₃ 植物光合作用的限制因子之一, 对植物生理生化过程有制约作用^[2]; 因此, 大气 CO₂ 含量增加造成的温室效应引起的全球气候变化不仅对作物产生间接影响, 还可直接影响作物的光合作用和生长发育。研究大气 CO₂ 含量的增加对作物

收稿日期: 2004-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70271062)

作者简介: 蒋跃林, 副教授, 主要从事植物环境生理生态研究。

的影响已成为国内外农业研究的重要课题。

小麦蛋白质含量、氨基酸组成的数量和种类,以及小麦籽粒营养元素含量,是评价小麦营养品质的重要指标^[3]。小麦营养品质除受品种遗传性、栽培措施等因素影响外,还受到生态环境条件的制约^[4,5]。关于环境大气 CO₂ 含量增加与作物的关系,研究较多的是作物的光合作用、生长速度以及生物量积累的变化^[6,7],作物品质的响应仅有少量研究^[8,9],而作物籽粒营养元素与大气 CO₂ 含量增加关系的系统研究尚未见报道。本研究旨在通过对大气 CO₂ 含量的控制,研究 CO₂ 含量增加对小麦籽粒营养品质的影响,为将来在大气 CO₂ 含量增加的环境下,小麦优质栽培和进一步开发利用提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2003—2004 年在安徽农业大学实验农场进行,以小麦 (*Triticum aestivum* L.) 品种皖麦 33 为材料,采用盆栽方式,盆高 35 cm,直径 30 cm。2003 年 10 月 28 日播种,留 10 株基本苗,每个气室 15 盆,土壤质地相同,全生育期管理方法相同,水肥条件基本满足需要,无病虫害和杂草。试验土壤为黄褐土, pH 6.3,有机质质量分数 1.20%,全氮质量分数 0.11%,速效氮 107.1 μg/g,速效磷 38.3 μg/g,速效钾 162.4 μg/g。小麦收获后取籽粒进行蛋白质、氨基酸组分以及营养元素含量的测定分析。

1.2 试验设计

制作开顶式气室做大气 CO₂ 含量增加控制试验^[9]。气室为六边型结构,高 2 m,边长 1.4 m,室壁为无色透明玻璃。以钢瓶装纯 CO₂ 为气体发生源,用 YQB-02 加热型 CO₂ 气体减压流量计控制流量,在 CO₂ 导入气室过程中用风机抽入空气,混合后分别配制成含量均匀且稳定的高 CO₂ 含量空气通入

气室,设 2 个含量处理,分别为 550 和 750 μmol/mol,以大气 CO₂ 背景含量约 350 μmol/mol 为对照。于 2004 年春季日平均气温稳定通过 3℃,小麦返青生长(2 月 10 日)开始通气,每天供气时间为 07:00—17:00,至成熟收获供气结束。试验过程中,经典型天气进行太阳辐射、气温、空气湿度等气象要素动态对比观测,结果表明,各气室与对照基本一致;因此,本项试验为 CO₂ 不同梯度处理的单要素控制试验。

1.3 测定项目

小麦收获后采用半微量凯氏定氮法测定籽粒的含 N 量,乘以系数 5.7,换算成蛋白质含量^[10]。氨基酸用日立 835-50 型氨基酸自动分析仪测定,小麦籽粒硒元素含量用北京万拓公司生产的原子荧光光度计(AFS-230a)测定,钾、钙、锌等营养元素用日本岛津公司 XRF-1800 型 X 射线荧光光谱仪测定。测定项目均重复 4 次。

2 结果与分析

2.1 大气 CO₂ 含量增加对小麦籽粒蛋白质含量的影响

试验研究表明,与大气 CO₂ 背景含量相比,CO₂ 增加到 550 和 750 μmol/mol,籽粒产量分别提高 14.5%和 24.9%(表 1),这是由于大气 CO₂ 是小麦光合作用的底物,其含量升高可显著提高小麦叶片光合速率,并抑制光呼吸强度,使光合产物积累速率加快^[11]。另一方面,由于大气 CO₂ 含量增加,小麦籽粒中碳水化合物含量增加明显,蛋白质含量则呈下降趋势,CO₂ 含量升高至 550 和 750 μmol/mol,蛋白质含量分别下降 1.4%和 4.1%,对小麦品质产生不利影响;但是 CO₂ 含量增加使小麦籽粒产量增加的效果更为显著,因此每盆小麦的蛋白质产量随大气 CO₂ 含量增加而增加,提高幅度分别为 13.1%和 19.7%。

表 1 大气 CO₂ 增加对小麦籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的影响

Table 1 Protein content and protein yield of wheat grain affected by high CO₂ levels

CO ₂ 摩尔分数/ (μmol·mol ⁻¹)	籽粒产量/ (g·盆 ⁻¹)	籽粒产量/ %	蛋白质含量/ (g·(100 g 籽粒) ⁻¹)	蛋白质含量 相对值/ %	蛋白质产量/ (g·盆 ⁻¹)	蛋白质产量 相对值/ %
350(CK)	41.3 ±1.1	100	14.8 ±0.3	100	6.1 ±0.2	100
550	47.3 ±1.4	114.5	14.6 ±0.2	98.6	6.9 ±0.2	113.1
750	51.6 ±1.5	124.9	14.2 ±0.2	95.9	7.3 ±0.3	119.7

注:各种量的相对值均为与 CK 的比值。

2.2 大气 CO₂ 含量增加对小麦籽粒氨基酸含量的影响

试验结果表明(表 2), 大气 CO₂ 含量升高到 550 和 750 μmol/mol, 小麦籽粒氨基酸组分的变化存在差异, 其中天门冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、半胱氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、色氨酸、精氨酸和脯氨酸 10 种氨基酸含量随大气 CO₂ 增加而下降, 以半胱氨酸和色氨酸下降幅度最大, 分别为 13.8%~20.7% 和 9.7%~22.6%; 而苏氨酸、丝氨酸无明显变化; 丙氨酸、蛋氨酸、酪氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸和组氨酸含量增加, 增加幅度较大的是蛋氨酸和半胱氨酸; 而氨基酸总量降低。大气 CO₂ 含量为 550 和 750 μmol/mol 时, 与对照相比, 小麦籽粒氨基酸总量分别降低 1.6% 和 3.0%。总体而言, 必需氨基酸含量的下降幅度比氨基酸总量下降幅度小, 因此, 小麦籽粒必需氨基酸与氨基酸总量的比值随大气 CO₂ 含量的升高而有增加的趋势。

表 2 不同 CO₂ 含量小麦籽粒氨基酸组分含量的变化

Table 2 Changes of amino acid composition in wheat grain under different elevated CO₂ levels g/ (100 g 籽粒)

氨基酸组分	CO ₂ 摩尔分数/(μmol·mol ⁻¹)		
	350(CK)	550	750
天门冬氨酸 Asp	0.74	0.70	0.71
苏氨酸 Thr*	0.52	0.53	0.49
丝氨酸 Ser	0.58	0.55	0.57
谷氨酸 Glu	3.89	3.84	3.72
甘氨酸 Gly	0.50	0.42	0.44
丙氨酸 Ala	0.48	0.54	0.55
半胱氨酸 Cys	0.29	0.25	0.23
缬氨酸 Val*	0.61	0.59	0.58
蛋氨酸 Met*	0.29	0.31	0.36
异亮氨酸 Ile*	0.57	0.55	0.51
亮氨酸 Leu*	0.90	0.89	0.86
酪氨酸 Tyr	0.25	0.28	0.27
苯丙氨酸 Phe*	0.91	0.96	1.03
赖氨酸 Lys*	0.42	0.44	0.44
色氨酸 Try*	0.31	0.28	0.24
组氨酸 His	0.36	0.38	0.42
精氨酸 Arg	0.49	0.48	0.45
脯氨酸 Pro	1.48	1.38	1.31
氨基酸总量	13.59	13.37	13.18
必需氨基酸总量	4.53	4.55	4.51
必需氨基酸与氨基酸总量比/%	33.33	34.03	34.22

注: * 为必需氨基酸

小麦必需氨基酸含量与配比决定蛋白质的质量, 8 种必需氨基酸的配比有其基本标准^[12], 对照世界粮农组织标准可知, 小麦籽粒蛋白质的限制氨基酸(即必需氨基酸低于标准水平)为苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸和赖氨酸。其中赖氨酸为第一限制性氨基酸, 由于它是人体必需的首要氨基酸, 常将赖氨酸含量当作评定食品蛋白质营养价值的指标。表 3 中氨基酸评分是以小麦籽粒蛋白质中赖氨酸相对含量为基础计算得到的蛋白质营养指标^[12]。由表 3 可以看出, 大气 CO₂ 含量升高至 550 和 750 μmol/mol, 使小麦籽粒蛋白质中缬氨酸、异亮氨酸、色氨酸含量有所降低, 其中色氨酸降幅较大, 为 8.1% 和 19.1%, 而苏氨酸、亮氨酸变化较小; 蛋氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸含量则有升高的趋势, 其中蛋氨酸升幅为 8.2% 和 29.6%, 苯丙氨酸升幅为 7.0% 和 17.9%。从氨基酸评分结果看, 小麦籽粒氨基酸评分值有提高的趋势, 分别提高 3.1 和 4.6。因此, 虽然大气 CO₂ 含量的增加, 使小麦蛋白质含量和氨基酸总量有所降低, 但含硫氨基酸蛋氨酸和含苯环氨基酸(苯丙氨酸与酪氨酸), 以及赖氨酸含量的增加, 使蛋白质营养价值有所提升, 一定程度上弥补了蛋白质含量降低对小麦品质的不利影响。

表 3 大气 CO₂ 增加小麦籽粒蛋白质中必需氨基酸含量和氨基酸评分

Table 3 Contents of indispensable amino acid in wheat grain protein and amino acid scores under different elevated CO₂ levels mg/g

必需氨基酸	FAO/WHO 推荐氨基酸模式	CO ₂ 摩尔分数/(μmol·mol ⁻¹)		
		350(CK)	550	750
苏氨酸 Thr	40	35.1	36.3	34.5
缬氨酸 Val	50	41.2	40.4	40.8
蛋氨酸 Met	35	19.6	21.2	25.4
异亮氨酸 Ile	40	38.5	37.7	35.9
亮氨酸 Leu	70	60.8	61.0	60.6
苯丙氨酸 Phe	60	61.5	65.8	72.5
赖氨酸 Lys	55	28.4	30.1	30.9
色氨酸 Try	10	20.9	19.2	16.9
氨基酸评分	100	51.6	54.7	56.2

注: 氨基酸评分 = 待评蛋白质中氨基酸质量/参考蛋白质中氨基酸质量 × 100

2.3 大气 CO₂ 增加对小麦籽粒矿质营养元素含量的影响

研究表明, 大气 CO₂ 含量增加条件下, 小麦籽粒中矿质营养元素含量发生了一定程度的变化(表

4)。一方面,随大气 CO₂ 含量的增加,小麦籽粒中磷、钾、铁、铜、钠和钼的含量有降低趋势,其中磷、铁、钾元素含量降幅较大,与对照相比,CO₂ 含量为 550 和 750 μmol/mol 时,磷含量降低 8.9% 和 11.8%,铁含量降低 7.5% 和 10.8%,钾含量降低 2.5% 和 7.7%,铜、钠、钼含量下降幅度相对较小。钙元素含量随大气 CO₂ 含量增加无明显变化趋势。另一方面,在大气 CO₂ 含量增加情况下,小麦籽粒

中镁、锌、锰、硒、碘含量呈增长趋势,其中锌和硒含量提高幅度较大,锌增加 11.3% 和 34.4%,硒增加 11.1% 和 44.4%,镁含量上升幅度为 10.6% 和 13.6%,锰和碘提高幅度相对较小,在 7.0% 和 8.8% 之间。由此可见,大气 CO₂ 含量的增加,使小麦籽粒磷、铁等元素含量下降,影响小麦营养品质,但锌、硒、碘等元素含量增加,又有利于小麦营养品质的提升。

表 4 大气 CO₂ 增加对小麦籽粒矿质营养元素的影响

Table 4 Effect of elevated CO₂ concentration on the contents of nutrient elements in wheat grain

CO ₂ 摩尔分数/ (μmol·mol ⁻¹)	质量分数 w					
	P/(mg·g ⁻¹)	K/(mg·g ⁻¹)	Ca/(mg·g ⁻¹)	Mg/(mg·g ⁻¹)	Fe/(μg·g ⁻¹)	Zn/(μg·g ⁻¹)
350(CK)	4.16 ±0.18	3.62 ±0.21	0.69 ±0.04	1.32 ±0.08	69.41 ±2.31	23.67 ±1.03
550	3.79 ±0.15	3.53 ±0.18	0.65 ±0.02	1.46 ±0.05	64.22 ±2.56	26.34 ±2.25
750	3.67 ±0.17	3.34 ±0.14	0.76 ±0.04	1.50 ±0.09	61.89 ±1.93	31.81 ±1.88
CO ₂ 摩尔分数/ (μmol·mol ⁻¹)	质量分数 w/(μg·g ⁻¹)					
	Mn	Cu	Se	Na	Mo	I
350(CK)	28.27 ±1.90	5.59 ±0.23	0.09 ±0.01	57.01 ±3.21	3.18 ±0.33	1.71 ±0.09
550	30.69 ±2.61	5.54 ±0.18	0.10 ±0.01	53.23 ±4.35	3.03 ±0.18	1.83 ±0.13
750	30.43 ±2.32	5.32 ±0.31	0.13 ±0.02	55.65 ±3.86	2.96 ±0.29	1.86 ±0.12

3 结论与讨论

1) 本项研究表明,在大气 CO₂ 含量增加时,小麦籽粒中氮以及蛋白质含量呈降低趋势,CO₂ 含量升高 200 和 400 μmol/mol 时,小麦籽粒氮含量下降幅度分别为 1.35% 和 4.04%,这是由于生长环境中 CO₂ 含量的增加,使小麦对碳素利用增多,造成其籽粒中碳与氮之间的平衡发生了变化。Kimball 等¹³ 测定了小麦谷物氮的含量,发现 CO₂ 升高到 550 μmol/mol 时,氮含量平均降低约 3%,低于小麦叶片氮的降低幅度,这与笔者结论相似。从小麦氮收益来看,由于 CO₂ 增加使小麦籽粒产量增加幅度加大,因此,小麦氮收益是增加的。Prior 等¹⁴ 也报道,CO₂ 上升使 C3 植物氮产量提高约 20%。大气 CO₂ 含量增加,小麦将从土壤中吸收更多的氮来满足其生长需求,在生产实践中,必须适当增施氮肥。一方面,小麦可以较多获得氮素,为植株体内碳氮平衡提供条件;另一方面,可促进小麦体内合成更多的以蛋白质为主体的光合碳循环中的各种酶和叶绿素等,加速光合作用各有关过程的进行,提高转能效率,使生境中增加的碳源得到更充分的利用,也使小

麦茎叶和籽粒的氮和蛋白质含量保持较高水平。在大气 CO₂ 含量增加的背景下,进一步加强土壤氮磷钾及其他元素的营养动态监测和科学管理,是提高小麦品质和产量的必要措施。

2) 在大气 CO₂ 含量增加的过程中,小麦籽粒蛋白质含量有所降低,但蛋白质产量增加;而且蛋白质中氨基酸组分配比的变化,有利于小麦品质的提高。小麦籽粒各营养元素含量变化趋势和变化幅度有较大差异,在进行大气 CO₂ 含量增加对小麦品质影响的评价时,应根据小麦用途作相应分析,并进行综合评判。此外,本项研究是在合肥地区气候背景和土壤条件下小麦籽粒品质对大气 CO₂ 含量增加的响应分析,若种植纬度、土壤状况、小麦品种等因素发生改变,大气 CO₂ 含量增加对小麦籽粒品质的影响将会出现何种变化,有待在较大范围联合试验,进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] Genthon C, Barnola J M, Raynaud D, et al. Vostok ice core: climate response to CO₂ and orbital forcing changes over the last climatic cycle[J]. Nature, 1987, 329: 414

- 418
- [2] Kimball B A, 朱建国, 程磊, 等. 开放系统中农作物对空气 CO₂ 浓度增加的响应[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1323 - 1338
- [3] 杨学举. 我国小麦品质改良的主攻目标及途径分析[J]. 国外农学—麦类作物, 1995, (5): 45 - 46
- [4] 张宝军, 蒋纪芸. 小麦籽粒品质及其影响因素分析[J]. 国外农学—麦类作物, 1995, (4): 29 - 32
- [5] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 农业出版社, 1996. 157 - 177
- [6] Delucia E H, Hamilton J G, Naidu S L, et al. Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO₂ enrichment[J]. Science, 1999, 284: 1177 - 1179
- [7] Kimball B A. Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 430 prior observations[J]. Agron J, 1983, 75: 779 - 788
- [8] 王春乙, 郭建平, 崔读昌, 等. CO₂ 浓度增加对小麦和玉米品质影响的实验研究[J]. 作物学报. 2000, 26(6): 931 - 936
- [9] 王修兰, 徐师华. 二氧化碳气候变化与农业[M]. 北京: 气象出版社, 1996. 13 - 21.
- [10] 王宪泽, 张树芹, 田纪春, 等. 喷洒亚硫酸钠对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(3): 277 - 281
- [11] 林伟宏. 植物光合作用对大气 CO₂ 浓度升高的反应[J]. 生态学报, 1998, 18(5): 529 - 535
- [12] 赵广才. 冬小麦籽粒发育中蛋白质和氨基酸含量的变化及喷氮效应的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(5): 25 - 34
- [13] Kimball B A, Morris C F, Pinter Jr P J, et al. Wheat grain quality as affected by elevated CO₂, drought, and soil nitrogen[J]. New Phytologist, 2001, 150: 295 - 303
- [14] Prior S A, Torbert H A, Runion G B, et al. Effects of carbon dioxide enrichment on cotton nutrient dynamics[J]. J plant Nutrit, 1998, 21: 1407 - 1426

(上接第 12 页)

- [8] Chen Xinping, Zhou J C, Wang X R, et al. Optimal rates of Nitrogen fertilization for a winter wheat-corn cropping system in Northern China [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(3): 583 - 597
- [9] 陈新平, 张福锁. 美国玉米带的推荐施肥技术[J]. 土壤肥料, 1997(3): 45 - 47
- [10] 同延安, 张文孝, 韩稳社, 等. 不同氮肥种类在黄土及黄绵土中的转化[J]. 土壤通报, 1994, 25(3): 107 - 108
- [11] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 NO₃-N 在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 538 - 546
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 南京: 中国农业科技出版社, 2000: 150 - 160
- [13] 王晶. 硝酸盐快速测试方法(试粉和试纸)的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 1999
- [14] 宋建国, 王晶, 林杉. 用连续流动分析仪测定土壤微生物态氮的方法研究[J]. 植物营养与肥料学报. 1999, 5(3): 282 - 287
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 102
- [16] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1982: 80