

气象条件对作物品质和产量 影响的试验研究*

郭建平 高素华 刘玲

(中国气象科学研究院农业气象和遥感应用研究中心, 北京 100081)

摘 要 利用人工气候室试验研究了高温、高 CO_2 浓度和水分胁迫等气象条件变化对农作物籽粒品质以及粮食安全供给的影响。结果表明: 土壤水分胁迫有利于提高农作物籽粒的品质, 而大气中 CO_2 浓度升高并伴随高温出现不仅不利于农作物籽粒品质的提高, 而且对作物在干旱条件下提高作物籽粒品质的能力有抑制作用, 并将在大多数气候变化情景下对中国的粮食安全供给产生不利影响。

关键词: 气象条件; 作物品质; 粮食产量

1 引言

21 世纪的粮食生产将由以数量为主转向数量与质量并重的方向发展, 既要解决温饱问题, 又要解决粮食的营养价值问题。气象条件不仅对作物的产量产生显著的影响, 同时对作物产品的品质和营养成分的含量也有严重的影响。随着现代工业的不断发展和人口的迅猛增加, 大气中 CO_2 浓度不断增加, 这种增加的趋势目前仍在继续^[1,2]。大气中 CO_2 浓度增加导致的温室效应使得近地面层的气温上升, 并使中国大部分地区降水有所下降, 这种气候变化对农作物的生长发育及自然生态系统造成了严重的影响^[3]。从 20 世纪 90 年代开始, 国内外有关领域的科学家利用各种手段进行了大量的研究, 以便及早发现这种变化对农作物的影响程度并制定出相应的对策, 来缓解气候变化对农业生产可能造成的损失^[4~6]。但这些研究目前主要是关于气候变化对农作物生长发育的影响, 涉及作物品质的研究较少^[7], 而关于高温、高 CO_2 浓度和水分胁迫对作物籽粒品质的综合影响以及如何保证 21 世纪中国粮食安全供给的研究目前还未见有相关的报道。因此, 我们利用人工气候室模拟高温、高 CO_2 浓度和水分胁迫等气象条件, 研究了气象条件变化对小麦、大豆和玉米籽粒品质和粮食安全供给的影响情况。

2 试验材料和方法

本试验在黑龙江省农业科学研究所的人工气候室内进行。人工气候室内的温度、湿度和日照均自动控制, 使其满足试验设计的要求。每天早晚及阴天用生理日光灯进行补

2000-04-17 收到, 2001-03-07 收到再改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043400

光。该人工气候室的结构和性能可见文献[8]。

供试作物：冬小麦、大豆和玉米。均采用盆栽，盆口直径 36 cm，高 26 cm。盆内土壤质地均匀且一致，土壤肥力适宜，各处理的管理方法相同，播种后置于人工气候室内。其中冬小麦于 1998 年 11 月 10 日播种，大豆于 11 月 4 日播种，玉米于 11 月 3 日播种。

表 1 处理与对照的温度差异 °C

作物	第 1 月	第 2 月	第 3 月	第 4 月	第 5 月上
小麦、玉米	2.5	4.8	5.8	5.2	0.9
大豆	1.2	1.1	0.84	0.3	0.0

试验设置两个 CO₂ 浓度处理，一个为高 CO₂ 浓度和高温处理（CO₂ 浓度为环境浓度的 2 倍，约 700×10⁻⁶）。目前的研究结果表明，冬春季节升温较夏季明显，所以，在温度设置方面，根据作物生

长季的时间分布，冬春季节的温度升高要高于夏季（表 1）。另一个设置为对照，即 CO₂ 浓度为大气背景 的浓度，温度为作物正常的生长发育所需的温度。水分条件设置 2 个处理，一个为水分条件适宜（土壤相对湿度为田间持水量的 70%~80%），另一个为水分不足处理（土壤相对湿度为田间持水量的 30%~40%）。土壤湿度用灌溉量进行控制（玉米未进行水分处理）。

作物成熟后收获籽粒，在农业部谷物品质监督检验测试中心进行籽粒品质的分析。

3 气象条件对作物品质的影响

3.1 气象条件对小麦、玉米粗蛋白和粗淀粉的影响

粗蛋白和粗淀粉是作物籽粒品质的两个重要成分，蛋白质含量越高，籽粒的营养价值也越高。图 1 给出了小麦和玉米在不同处理中的粗蛋白和粗淀粉含量。由图 1 可见，在相同的水分条件下，高温和高 CO₂ 浓度使籽粒中粗蛋白的含量减少，在水分适宜情

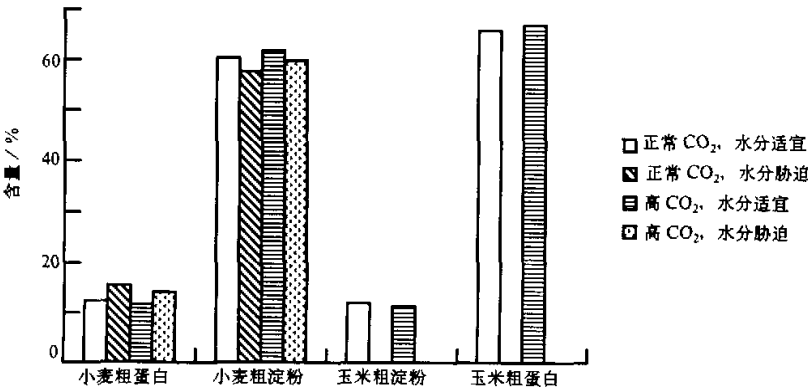


图 1 气象条件对小麦、玉米粗蛋白和粗淀粉的影响

况下，小麦粗蛋白含量减少 4.82%，玉米减少 4.22%；在水分胁迫情况下，高温、高 CO₂ 浓度使小麦的粗蛋白含量减少 8.49%。而在相同的温度和 CO₂ 浓度情况下，水分胁迫使小麦籽粒的粗蛋白含量增加，在目前 CO₂ 浓度下，水分胁迫使小麦籽粒粗蛋白增加 24.92%，在高温、高 CO₂ 浓度下，增加 19.93%。而粗淀粉的变化趋势正好与粗蛋白的变化趋势相反。由此可见，高温、高 CO₂ 浓度不利于提高作物的品质，而水分胁迫虽不利于产量的增加，但却可以提高作物籽粒的粗蛋白含量，有利于提高籽粒的品质。同时，从结果还可以看出，高温、高 CO₂ 浓度也限制了水分胁迫提高籽粒粗蛋白含量的作用。

3.2 气象条件对大豆粗蛋白和粗脂肪的影响

大豆是高蛋白植物，多食大豆对人体健康有诸多益处。因此，大豆中蛋白质含量是衡量大豆品质的重要指标。图 2 给出了在不同处理中生长的大豆的粗蛋白和粗脂肪含量。由图 2 可见，高温和高 CO₂ 浓度使大豆的粗蛋白含量减少，不利于提高大豆的品质。在水分适宜时，高温、高 CO₂ 浓度使大豆粗蛋白减少 6.64%，有水分胁迫时减少 7.69%。在相同的温度和 CO₂ 浓度下，水分胁迫可提高大豆粗蛋白的含量，在目前 CO₂ 浓度下，水分胁迫使大豆粗蛋白含量增加 10.55%，在高温、高 CO₂ 浓度下，水分胁迫使大豆粗蛋白含量增加 9.31%，高温、高 CO₂ 浓度对水分胁迫下提高粗蛋白的含量有限制作用。高温、高 CO₂ 浓度同样能增加大豆粗脂肪的含量，且在水分适宜时增加的幅度要大于有水分胁迫时的增加幅度，而在高温、高 CO₂ 浓度下，水分胁迫不利于增加大豆粗脂肪的含量。

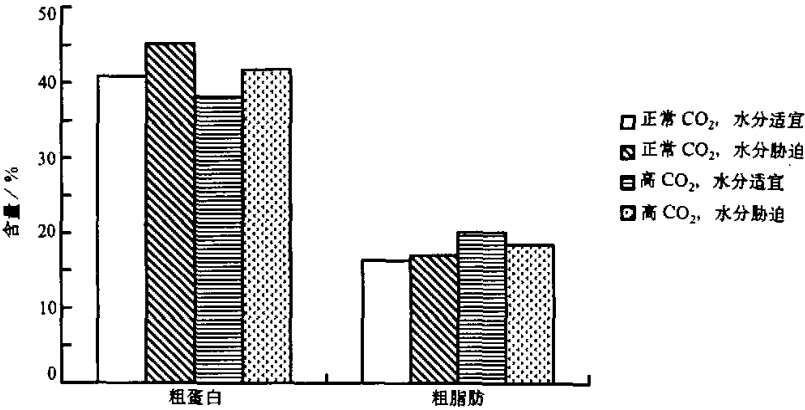


图 2 气象条件对大豆粗蛋白和粗脂肪的影响

3.3 气象条件对氨基酸含量的影响

氨基酸是合成蛋白质的主要成分，氨基酸的含量同时也影响到蛋白质的含量。我们测定了所试作物的 17 种主要氨基酸的含量（表 2）。从这 17 种主要氨基酸的总含量来

看, 高温、高 CO_2 不利于提高作物氨基酸的含量, 水分胁迫能提高氨基酸含量。在水分条件适宜情况下, 小麦的氨基酸总量下降 4.14%, 大豆下降 9.95%, 玉米下降 4.10%; 在水分胁迫情况下, 小麦的氨基酸总量下降 8.19%, 大豆下降 21.09%。在目前 CO_2 浓度下, 水分胁迫使小麦氨基酸含量提高 22.01%, 大豆增加 27.25%; 在高温、高 CO_2 浓度条件下, 小麦增加 16.86%, 大豆提高 11.51%。由此可见, 水分胁迫对氨基酸含量增加的正效应大于高温和高 CO_2 的负效应, 水分胁迫占主导作用。

食物蛋白质的氨基酸组成和人体的蛋白质需要有密切关系。成年人必须的氨基酸有赖氨酸、蛋氨酸、色氨酸(本试验未作分析)、苏氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸等 8 种, 而对于婴儿, 除上述 8 种外, 还需增加组氨酸。从表 2 可以看出, 上述几种人体必须的氨基酸在不同气候条件下的变化趋势与氨基酸总量的变化趋势是基本一致的, 即水分胁迫有利于提高籽粒氨基酸的相对含量, 而高温、高 CO_2 对提高籽粒的氨基酸含量有不利的影响。

表 2 气象条件对氨基酸含量(%)的影响

处理	小 麦				大 豆				玉 米	
	正常 CO_2 , 水分适宜	正常 CO_2 , 水分胁迫	高 CO_2 , 水分适宜	高 CO_2 , 水分胁迫	正常 CO_2 , 水分适宜	正常 CO_2 , 水分胁迫	高 CO_2 , 水分适宜	高 CO_2 , 水分胁迫	正常 CO_2	高 CO_2
门冬氨酸	0.66	0.72	0.66	0.77	3.66	4.74	3.18	3.78	0.82	0.78
苏 氨 酸	0.38	0.42	0.36	0.43	1.11	1.55	1.02	1.18	0.45	0.46
丝 氨 酸	0.40	0.48	0.38	0.40	1.02	1.24	0.78	0.90	0.35	0.32
谷 氨 酸	3.82	4.96	3.54	4.39	5.68	7.18	5.17	5.82	2.28	2.08
甘 氨 酸	0.46	0.54	0.46	0.55	1.27	1.57	1.14	1.26	0.42	0.40
丙 氨 酸	0.46	0.54	0.44	0.48	1.42	1.62	1.24	1.36	0.84	0.77
胱 氨 酸	0.20	0.24	0.19	0.20	0.24	0.24	0.24	0.26	0.10	0.10
缬 氨 酸	0.58	0.68	0.58	0.61	1.42	1.74	1.28	1.46	0.58	0.54
蛋 氨 酸	0.28	0.31	0.28	0.22	0.48	0.50	0.44	0.45	0.22	0.20
异亮氨酸	0.44	0.53	0.42	0.44	1.27	1.56	1.14	1.29	0.41	0.38
亮 氨 酸	0.86	1.06	0.84	0.98	2.30	2.90	2.10	2.40	1.48	1.36
酪 氨 酸	0.46	0.56	0.46	0.53	1.18	1.49	1.10	1.22	0.53	0.52
苯丙氨酸	0.61	0.75	0.57	0.70	1.52	1.94	1.41	1.60	0.60	0.56
赖 氨 酸	0.36	0.42	0.36	0.40	2.00	2.42	1.88	2.04	0.36	0.34
组 氨 酸	0.32	0.38	0.30	0.36	0.97	1.10	0.86	0.94	0.34	0.34
精 氨 酸	0.62	0.77	0.60	0.76	3.09	5.05	2.46	3.00	0.62	0.56
脯 氨 酸	1.40	1.66	1.36	1.57	2.82	3.18	2.88	2.62	1.30	1.51
合 计	12.31	15.02	11.80	13.79	31.45	40.02	28.32	31.58	11.70	11.22

3.4 气象条件对微量元素含量的影响

微量元素对人的生命过程起着调控作用, 与人的健康、疾病、长寿、智力、美容等相关。微量元素在生物体中尽管以不同形式存在, 但它们在代谢过程中既不能被分解也不能转化为其他元素。因此, 检测人体不同组织和体液中各种元素的含量, 就可以在一定程度上了解人体代谢规律, 进而掌握人的健康状况。微量元素不像某些维生素那样能在人体内自行合成, 而必须通过膳食、服(或注射)药物、呼吸及皮肤渗透等从外界摄入, 在人体所需的营养中, 它们往往比维生素等更重要。为此, 我们测定了 5 种人体所必需的微量元素(Zn、Fe、Mg、Ca、S)。

气象条件的变化对作物微量元素的含量有显著的影响（表 3）。由表 3 可见，在不同的气象条件下作物籽粒中的微量元素量是不同的，有的差异达数倍之多。在干旱情况下，小麦的 5 种微量元素含量均呈增加趋势，而大豆除 Zn 以外，基本都呈减少趋势，这可能与大豆的喜湿性有关，在干旱条件下，不利于微量元素的积累。高温和高 CO₂ 对微量元素含量的影响规律不十分明显，但大多数情况下是减少趋势，其中小麦除 S 增加外都呈下降趋势，玉米除 Ca 增加外都呈下降趋势，大豆的变化规律不明显，Fe 和 S 呈下降趋势，Mg 和 Ca 在干旱情况下呈下降趋势，而在湿润情况下则增加，Zn 含量则与 Mg 和 Ca 的变化趋势相反。

表 3 气象条件对作物籽粒微量元素含量（mg/kg）的影响

作物	CO ₂ 浓度	水分处理	Zn	Fe	Mg	Ca	S
小麦	700 × 10 ⁻⁶	适宜	5.536	29.04	1118	319.6	1835
		干旱	7.670	33.55	1162	396.0	1836
	350 × 10 ⁻⁶	适宜	6.497	31.72	1114	357.0	1263
		干旱	7.765	37.63	1234	437.0	1604
大豆	700 × 10 ⁻⁶	适宜	3.912	66.75	1890	1513	2927
		干旱	9.972	60.62	318.2	167.6	937.8
	350 × 10 ⁻⁶	适宜	5.014	72.90	1870	1324	3130
		干旱	6.394	63.36	1678	1218	2824
玉米	700 × 10 ⁻⁶	适宜	2.869	19.33	11.36	99.05	1028
	350 × 10 ⁻⁶	适宜	3.587	20.67	13.02	81.10	1194

农作物通过光合作用首先合成的是碳水化合物，碳水化合物在酶的作用下进一步转化成其他有利于人体吸收的营养物质，如蛋白质、氨基酸、维生素等。而植物中微量元素的含量主要是通过植物从外界，如土壤、大气中通过根系或气孔吸收，然后贮存在植物体内。外界气象条件的变化首先会影响植物体内酶活性的变化，从而影响到植物体内物质的转换、运输和分配，并最终影响到作物的品质。从试验结果看，CO₂ 浓度的升高虽然能提高作物的光合作用速率，增加作物产量，但使作物体内碳水化合物向氨基酸和蛋白质转换的速率下降，使作物体内氨基酸和蛋白质的含量下降。而土壤水分胁迫正好相反，有利于提高氨基酸和蛋白质的相对含量。

4 气象条件对粮食安全的影响

粮食安全除了需要一定的粮食数量，解决温饱问题外，还必须对粮食的营养状况有一定的要求。而在温饱问题得到基本解决之后，人们对食物的营养结构和营养价值有了更强烈的要求，也就是对高品质食品的需求。因此，粮食生产既要保证有一定的数量，又必须提高粮食的品质，才能保证 21 世纪粮食的安全供给。

从上面的分析结果已经看出，土壤水分胁迫能提高作物蛋白质和氨基酸的相对含量，而高温、高 CO₂ 浓度对提高作物的品质是不利的。但同时，土壤水分胁迫又将使作物大幅度减产（表 4）。因此，仅从粮食数量的变化来分析粮食安全是不全面的。保证粮食的安全供给必须从粮食的数量和质量两个方面来加以考虑。综合粮食的品质（主要指蛋白质和氨基酸含量）和作物产量分析，为保证当前状况下的营养水平，在正常

CO₂ 浓度但有水分胁迫情况下, 小麦将短缺 26.43%, 大豆短缺 38.50%; 在高 CO₂ 浓度、高温但水分适宜情况下, 小麦短缺 8.22%, 大豆富余 3.45%, 玉米短缺 5.59%; 在高 CO₂ 浓度、高温但水分胁迫情况下, 小麦短缺 28.07%, 大豆短缺 36.19%。中国是一个农业大国, 人口多, 耕地少, 后备耕地资源不足, 要想通过扩大作物的种植面积来提高粮食总产的可能性不大, 因此, 为了解决中国 21 世纪粮食的安全供给, 必须通过新品种的培育、提高农业管理水平、改善环境条件来实现。

表 4 不同气象条件下粮食的短缺 (%) 状况

作物	小 麦			大 豆			玉 米
	正常 CO ₂ , 水分胁迫	高 CO ₂ , 水分适宜	高 CO ₂ , 水分胁迫	正常 CO ₂ , 水分胁迫	高 CO ₂ , 水分适宜	高 CO ₂ , 水分胁迫	高 CO ₂ , 水分适宜
粗 蛋 白	24.92	-4.82	14.15	10.55	-6.64	2.06	-4.72
氨 基 酸	22.01	-4.14	12.02	27.25	-9.95	0.41	-4.10
产量变化	-44.47	-3.15	-38.80	-48.05	14.50	-38.21	-0.63
粮食短缺	-26.43	-8.22	-28.07	-38.50	3.45	-36.19	-5.59

注: 表中数据为相对于当前气象条件的变化值

5 结论与讨论

通过对试验资料的结果分析可以看出, 当大气中 CO₂ 浓度增加并伴随温度升高对提高农作物籽粒品质是不利的, 而当土壤出现水分胁迫时, 有利于提高农作物籽粒的品质, 并且其正效应大于高温和高 CO₂ 的负效应。因此, 适度的干旱不仅有利于产量的形成, 更有利于作物籽粒品质的提高。同时还看出, 高温和高 CO₂ 浓度不仅本身不利于作物品质的提高, 而且对土壤干旱时提高作物品质有抑制作用, 使作物在干旱条件下提高作物品质的能力受到抑制。此外, 由文献[5]和表 4 可以看出, CO₂ 浓度倍增可以使冬小麦增产 32%, 大豆增产 36%, 玉米增产 23%。高温使作物生育期缩短, 籽粒灌浆不足而减产, 冬小麦将减产 35%, 大豆减产 21%, 玉米减产 24%。干旱(土壤湿度占田间持水量的 30%~40%)使冬小麦减产 9%, 大豆减产 27%。因此, 对冬小麦来说, 高温的负作用最大, 而土壤干旱的负作用最小; 而对于大豆, CO₂ 浓度增加的正效应最大, 高温的抑制作用最小; 对于玉米, 高温的负效应与高 CO₂ 浓度的正效应相当。总的来看, 高温和土壤干旱对作物的不利影响要大于高 CO₂ 浓度的有利影响, 从而使粮食产量有较大幅度的下降, 这将对我国 21 世纪的粮食安全供给产生严重影响。因此, 在当前农业生产提倡“两高一优”的情况下, 要适当控制作物用水, 避免滥灌, 这样不仅可起到节水的作用, 更有利于提高作物的品质。

参 考 文 献

- 1 Keeling, C. D., R. B. Bacastow, T. T. Whorf, Measurement of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii, CO₂ Review, W. C. Clark Ed., Oxford Press, London, 1982, 377~385.
- 2 Bacastow, R. B., C. D. Keeling, T. T. Whorf, Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at

- Mauna Loa, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**, 10529~10540.
- 3 Strain, B. R., Direct effects of increasing atmospheric CO₂ on plants and ecosystems, *Trends in Ecol. Evol.*, 1985, No.2, 18~21.
- 4 Bhattacharya, N. C., Prospects of agriculture in a carbon dioxide-enriched environment, *A Global Warming Forum Scientific, Economic and Legal Overview*, A. G. Richzrd Ed., CRC Press, Boca Raton, FL., 1992, 487~505.
- 5 王春乙、郭建平、郑有飞, 二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农作物生产, 北京: 气象出版社, 1997.
- 6 王修兰, 二氧化碳, 气候变化与农业, 北京: 气象出版社, 1996.
- 7 高素华、王春乙, CO₂ 对冬小麦和大豆籽粒成分的影响, *环境科学*, 1994, **15**(5), 65~70.
- 8 高素华、郭建平、张国民等, 低温对玉米幼苗生理反应的影响, *应用气象学报*, 1999, **10**(2), 238~242.

An Experimental Study of the Impacts of Meteorological Condition on Crops Qualities and Yield

Guo Jianping, Gao Suhua and Liu Ling

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The impacts of high temperature, CO₂ enrichment and soil water stress on crops qualities and food safety supply are studied by using climatic chamber. The results show that the soil water stress is favorable to raise crop qualities, but atmospheric CO₂ enrichment combining high temperature is disadvantageous to raise the crop qualities. Under the drought condition, CO₂ enrichment combining high temperature restrain crops qualities enrichment. In most climate change cases, the impact on Chinese food safety supply is disadvantageous and resulted in food shortage.

Key words: meteorological condition; crop quality; yield.