

地表臭氧胁迫对冬小麦籽粒品质的影响研究

郑有飞¹, 刘宏举^{2,3}, 吴荣军⁴, 赵 泽⁴, 胡程达⁴, 石春红⁴

(1.南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044; 2.河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050021; 3.河北省气象科技服务中心, 石家庄 050021; 4.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘 要:为深入探讨地表臭氧(O_3)对冬小麦品质的影响,采用开顶式气室(OTC),设置3个处理组:CK(对照组)、CF100(O_3 浓度为 $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$)、CF150(O_3 浓度为 $150\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$),通过大田试验和实验室分析,开展了 O_3 浓度增加对冬小麦蛋白质及其组分、氨基酸及其组成、淀粉含量等营养品质和加工品质的影响研究。结果表明:①籽粒氨基酸总量依次为 $\text{CF100}>\text{CF150}>\text{CK}$,而人体所需的必需氨基酸总量为 $\text{CF150}>\text{CF100}>\text{CK}$,处理间均差异显著($P<0.05$)。②粗蛋白含量随 O_3 浓度的升高而增加,但各组分间变化趋势不同:清蛋白、球蛋白的含量为 $\text{CF150}>\text{CF100}>\text{CK}$,醇溶蛋白、谷蛋白的含量则为 $\text{CF100}>\text{CF150}>\text{CK}$ 。③淀粉含量随着 O_3 浓度的升高而降低,两者呈显著负相关($P<0.05$),与CK相比,CF100、CF150冬小麦淀粉含量分别下降了4.06%和16.61%。可见, O_3 胁迫能促进籽粒营养品质和加工品质的合成。

关键词:臭氧;冬小麦;氨基酸;蛋白质;组分

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)04-0619-06

Effects of Elevated Surface Ozone Stress on Grain Quality in Winter Wheat

ZHENG You-fei¹, LIU Hong-ju^{2,3}, WU Rong-jun⁴, ZHAO Ze⁴, HU Cheng-da⁴, SHI Chun-hong⁴

(1.Ministry-province Key Laboratory for Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Hebei Key Laboratory of Meteorology and Eco-environment, Shijiazhuang 050021, China; 3.Hebei Provincial Service Center for Meteorological Science and Technology, Shijiazhuang 050021, China; 4.College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract:To in-depth understand the injury of increased ozone concentration at surface to grain quality of winter wheat, the Open-Top Chamber(OTC) was used to make field experiment in Nanjing area, which were designed to CF100 and CF150, controlled by $100\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ and $150\text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ in daytime during whole fumigating periods, and control (CK) by unfiltered air, respectively. The results of indoor experiments for the grain quality in winter wheat showed that there were significant differences among the treatments in contents of grain protein components and amino acid components; (1)The size order of total amino acids of grain was $\text{CF100}>\text{CF150}>\text{CK}$, but the essential amino acids was $\text{CF150}>\text{CF100}>\text{CK}$. It was significant difference between the three treatments ($P<0.05$). (2)The crude protein contents in winter wheat was increasing with the increase of ozone concentrations, but there were different variation trends for their compositions, among which the size order of albumin and globulin contents were $\text{CF150}>\text{CF100}>\text{CK}$, prolamin and glutenin content were $\text{CF100}>\text{CF150}>\text{CK}$. (3)Starch contents was decreased with the increasing of the ozone concentration, with significant negative correlation. The starch contents of winter wheat in CF100 and CF150 declined by 4.06% and 16.61%, compared with CK, respectively. On the whole, ozone stress on winter wheat was conducive to the nutritional quality of grain, improved processing quality.

Keywords:ozone; winter wheat; amino acid; protein; components

收稿日期:2009-07-27

基金项目:国家自然科学基金(40775072);江苏省高校自然科学研究重大项目(09KJA170004);中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金项目(AMF200904);南京信息工程大学科研基金(90215)

作者简介:郑有飞(1959—),江苏无锡人,教授,博士生导师,主要从事气候变化对农作物生理生态的影响研究。E-mail:zhengyf@nuist.edu.cn

近年来,由于化石燃料和含N化肥的大量使用,大气中 NO_x 、VOCs等 O_3 前体物含量剧增,导致近地面大气层中的 O_3 浓度迅速增加^[1],严重影响作物生长发育过程和产量^[2-5]。地表 O_3 浓度的增加也受到了政府组织和相关领域科学家的广泛重视,并开展了大量 O_3 对作物的影响研究。结果表明,经过一定时间和剂量的 O_3 熏蒸后,作物生育期将会发生改变,株高、叶面积和生物量等指标都显著降低^[6-11]。同时,对植株的气孔导度^[12-13]、膜透性^[13]、光合系统^[13-15]、抗氧化系统^[16]、呼吸作用^[17-18]等均有不良影响。

此外,研究表明,高浓度 O_3 处理后的小麦籽粒中蛋白质和氨基酸总含量均显著增加^[7-8,19-21]、淀粉含量显著下降^[22]。然而,小麦籽粒品质的优劣不仅由蛋白质和氨基酸的总含量所决定,更取决于其内部蛋白质的组分及氨基酸的组成。而国内外关于这方面的研究还存在着较大的不足^[23-24],对于深入了解地表 O_3 胁迫下农作物品质的变化略显单薄。因此,本文以冬小麦为供试作物,利用开顶式气室(OTC)在大田试验条件下系统研究了地表 O_3 浓度增加对冬小麦籽粒蛋白质及其组分、氨基酸及其组成的影响,为地表高浓度 O_3 胁迫下小麦品质变化的评估及粮食安全的适应性对策研究提供科学依据。

1 材料与方法

实验在南京信息工程大学内的生态与农业气象实验田(32°14'N,118°42'E)进行,供试材料为冬小麦(*Triticum aestivum* cv *yangmai13*)种子,品种为扬麦13号。试验地前茬为水稻,土壤为潮土,土壤肥力的测定于播种前进行,0~30 cm土层有机质含量 $12.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $57.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $70.94 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $50.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 7.26,肥力中等。小麦于2007年11月12日播种,播种量为 $22 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,采用撒播的方式,播种前田间施底肥。 O_3 曝气前进行间苗,使单位面积内冬小麦苗数一致;2008年3月7日(返青前)开始通 O_3 曝气处理,曝气时段是每天8:00—16:00,5月10日(灌浆期)停止曝气,5月27日收获。整个生长期水肥供应适量,其他农田管理措施均相同,无病虫害及杂草的影响。

1.1 试验设计

开顶式气室(OTC)主要由气室、通风系统、 O_3 发生系统、 O_3 浓度控制和监测系统4个部分组成。气室选用聚乙烯塑料膜作室壁材料,结构框架为圆形不锈钢管,为高1.9 m、内部直径2 m的圆柱形,在气室顶

部有一个与水平方向呈30°的锥形收口,整个气室体积为 5.3 m^3 ; O_3 发生器是南京市万杰臭氧机电设备厂生产的WJ-H-Y5型 O_3 发生器,通过电解空气中的 O_2 产生 O_3 ;采用新西兰aeroQUAL公司生产的S200型 O_3 检测仪对冠层处的 O_3 浓度进行检测,通过一阀门对室内浓度进行调节和控制。试验设置3个处理:(1)CK组,通未经处理的空气;(2)CF100,气室内 O_3 浓度为 $100 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$;(3)CF150,气室内 O_3 浓度为 $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。每个处理3次重复。

1.2 O_3 浓度的设定

3月初对试验田周围的 O_3 浓度值进行了为期一周的监测,由早上8:00至晚上22:00。测试时段内一周的平均 O_3 浓度为 $56.6 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 。目前应用比较多的反映 O_3 剂量对农作物伤害的阈值是美国的 SUM_{06} 和联合国欧洲经济委员会的 AOT_{40} ,其定义的 O_3 对作物产生伤害的浓度阈值分别为60和 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$;而实测值 $56.6 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 刚好位于两者之间,所以默认为农田周围本底值为 $50 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。因此,气室浓度设置的主要依据:(1)基于中国区域大气本底站瓦里关山、龙凤山和临安的实际观测结果,长三角地区白天的大气本底值已接近或超过 $50 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25-26];(2)试验田区域内较长时间的观测结果,浓度分别为100和 $150 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 具有特别的意义,大致为农田本底浓度的2倍和3倍,也是一般所认为的 O_3 对作物伤害阈值的2~3倍;(3)国外同类研究所认同的,目前国内外此类研究大都采用这样的浓度,也便于处理计算。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 籽粒氨基酸及其组成的测定

氨基酸含量的测定采用日立L-8900型氨基酸全自动分析仪,测定指标包括冬小麦籽粒氨基酸总量和17种组成氨基酸含量等。

1.3.2 籽粒蛋白质及其组分的测定

用半自动凯氏定氮仪法测定粗蛋白含量^[27],测定仪器为丹麦FOSS的Kjeltec™ 2200半自动凯氏定氮仪,以氮含量乘以5.7计算小麦籽粒粗蛋白含量。蛋白质组分的测定采用连续振荡提取法,称取样品0.5 g置于研钵中,分别用蒸馏水、10%NaCl、75%乙醇和0.2%NaOH连续提取清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白,然后用半自动凯氏定氮仪法测定各组分含量。蛋白质产量为单位面积籽粒产量与粗蛋白含量的乘积,籽粒产量数据参考已发表文献[28]。

1.3.3 淀粉的测定

籽粒淀粉的测定采用蒽酮比色法,准确称取40

mg 粉碎、过 60 目筛的小麦样品,放入 50 mL 的容量瓶,加 0.5 mL·L⁻¹ NaOH 溶液,在水浴锅中加热至分散,用蒸馏水定容至 50 mL,静置。取上清液 5 mL 稀释至 50 mL,取样品 1 mL 加入蒽酮-硫酸溶液 6 mL,沸水加热 7 min 后测定光密度^[27]。

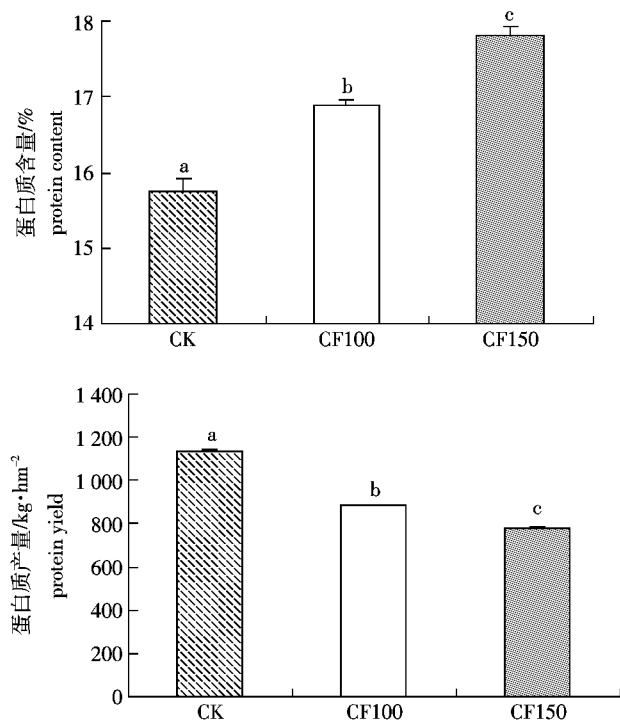
1.4 数据处理

主要通过 SPSS 和 Excel 软件对数据进行统计处理和分析:将观测数据进行统计分析,求出均值、方差、标准差,并对不同处理间的差异进行方差分析。用 LSD 法检验处理组之间差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 O₃ 处理对冬小麦籽粒蛋白质及其组分的影响

由图 1 可知,随着 O₃ 浓度上升,籽粒蛋白质含量明显增加,两者呈极显著正相关($r=0.968^{**}$)。CF100 和 CF150 分别比 CK 增加了 7.17% 和 12.94%, 均达 5% 差异显著水平。虽然籽粒蛋白质含量有了显著提高,但由于产量差异显著,高浓度 O₃ 胁迫下冬小麦的蛋



注:字母代表在 5% 水平上 LSD 多重比较结果,不同字母表示彼此差异显著($P<0.05$)。

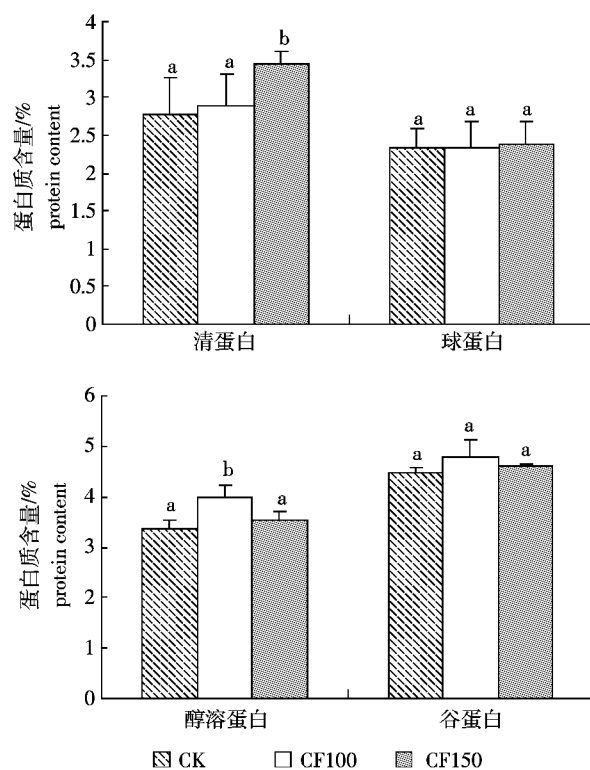
Note: Superscript letters a, b, c indicate significant ($P<0.05$) differences between treatments of O₃ level.

图 1 不同浓度 O₃ 处理对籽粒蛋白质含量和蛋白质产量的影响

Figure 1 Effects of ozone treatment on total protein content and protein yield of the wheat

白质产量与 CK 相比差异明显 ($P<0.05$), CF100、CF150 下降幅度分别为 22.29%、31.30%。

从各处理看(图 2),高浓度 O₃ 处理的小麦籽粒中清蛋白含量有显著提高($P<0.05$), CF150 与 CK、CF100 相比分别提高了 24.65% 和 19.50%, CF100 和 CK 差异不显著。球蛋白各处理差异不显著($P>0.05$)。CF100 中醇溶蛋白和谷蛋白含量均最高,其中醇溶蛋白含量 CF100 比 CK、CF150 分别提高了 18.21% 和 12.52%, 提高显著($P<0.05$), CF150 和 CK 之间差异不明显;谷蛋白各处理组之间差异均不明显,由高到低依次为 CF100、CF150、CK。



注:字母代表在 5% 水平上 LSD 多重比较结果,不同字母表示彼此差异显著($P<0.05$)。

Note: Superscript letters a, b indicate significant ($P<0.05$) differences between treatments of O₃ level.

图 2 不同浓度 O₃ 处理对籽粒蛋白质各组分含量的影响

Figure 2 Effects of ozone treatment on each component of protein content in the wheat

2.2 O₃ 处理对冬小麦籽粒氨基酸及其组成的影响

O₃ 浓度增加对籽粒氨基酸总量及 17 种组成氨基酸的影响如表 1 所示。可以看出,各处理氨基酸总量由高到低依次为 CF100>CF150>CK, 其中 CF100、CF150 比 CK 分别增加了 7.33% 和 4.63%, 处理间差异显著 ($P<0.05$)。非必需氨基酸含量依次为 CF100>

CF150>CK, 其中 CK 与 CF150 差异不显著 ($P>0.05$), 但与 CF100 差异显著 ($P<0.05$); 必需氨基酸的含量依次为 CF150>CF100>CK, CF150、CF100 比 CK 分别提高了 13.23% 和 5.86%。第一限制性氨基酸赖氨酸的含量为 CF150 最高, 比 CF100 与 CK 提高了 18.92%, 处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 1 不同浓度 O_3 处理对籽粒氨基酸组成的影响

Table 1 Effects of ozone treatment on each component of the amino acid in the wheat

氨基酸 Amino acid	处理 Treatment		
	CK	CF100	CF150
天冬氨酸 Asp	0.70±0.010a	0.80±0.020b	0.81±0.020b
谷氨酸 Glu	4.10±0.035a	5.02±0.006b	5.29±0.020c
丝氨酸 Ser	0.60±0.020a	0.68±0.025b	0.68±0.006b
组氨酸 His	0.81±0.006a	0.51±0.060b	0.31±0.020c
甘氨酸 Gly	0.57±0.025a	0.66±0.006b	0.67±0.006b
丙氨酸 Ala	0.51±0.031a	0.59±0.006b	0.57±0.006b
精氨酸 Arg	0.50±0.035a	0.57±0.020b	0.58±0.006b
酪氨酸 Tyr	0.73±0.020a	0.66±0.006b	0.68±0.010b
胱氨酸 Cys	0.62±0.010a	0.62±0.006a	0.53±0.020b
脯氨酸 Pro	1.81±0.025a	1.71±0.015b	0.93±0.040c
小计	10.94±0.125a	11.82±0.075b	11.07±0.040a
苏氨酸 * Thr	0.43±0.025a	0.50±0.035b	0.47±0.006ab
缬氨酸 * Val	0.84±0.015a	0.86±0.006a	1.00±0.025b
蛋氨酸 * Met	0.51±0.006a	0.40±0.025b	0.43±0.006b
苯丙氨酸 * Phe	0.89±0.020a	1.02±0.021b	1.07±0.015c
异亮氨酸 * Ile	0.52±0.015a	0.58±0.012b	0.63±0.010c
亮氨酸 * Leu	1.06±0.021a	1.17±0.015b	1.18±0.017b
赖氨酸 * Lys	0.37±0.010a	0.37±0.015a	0.44±0.021b
小计	4.61±0.061a	4.88±0.046b	5.22±0.040c
氨基酸总量 Total	15.56±0.084a	16.70±0.101b	16.28±0.040c

注:表中数字为平均值±标准差,字母代表在 5%水平上 LSD 多重比较结果,不同字母表示彼此差异显著 ($P<0.05$)。

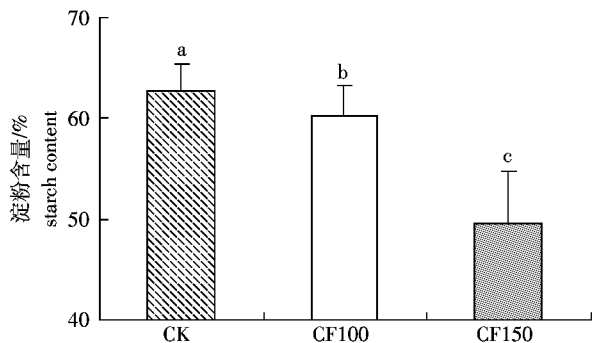
Note: Numbers are mean values and standard error. Superscript letters a, b, c indicate significant ($P<0.05$) differences between treatments of O_3 level.

2.3 O_3 处理对冬小麦籽粒淀粉含量的影响

图 3 所示的是 O_3 处理对冬小麦籽粒淀粉含量的影响。由图可知,籽粒的淀粉含量随着 O_3 浓度的升高而降低,两者呈显著负相关 ($r=-0.702^*$),三处理间均达 5% 差异显著水平,其中与 CK 相比,CF100、CF150 淀粉含量分别下降了 4.06% 和 16.61%。

3 讨论

国内外关于 O_3 胁迫对小麦品质的影响已经有了大量研究^[23-24,29-30],结果表明,大气中 O_3 浓度的增加能



注:字母代表在 5%水平上 LSD 多重比较结果,不同字母表示彼此差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Superscript letters a, b, c indicate significant ($P<0.05$) differences between treatments of O_3 level.

图 3 不同浓度 O_3 处理对籽粒淀粉含量的影响

Figure 3 Effects of ozone treatment on starch content in the winter wheat

显著提高冬小麦籽粒中蛋白质和氨基酸的含量,淀粉的含量则随着 O_3 浓度的升高而降低。本研究的结论也证实了这点。

在试验中,冬小麦籽粒淀粉含量随着 O_3 浓度的升高而降低,且两者呈显著负相关 ($r=-0.702^*$),其原因主要有以下 3 点:(1)高浓度 O_3 胁迫会使冬小麦发育期改变,生育期提前、灌浆期缩短^[28],导致灌浆不足;(2)冬小麦旗叶受到伤害,叶片提前衰老,影响了碳水化合物的合成和积累^[22];(3)高浓度 O_3 更会抑制小麦茎秆子叶中的碳水化合物向籽粒中转移^[31-32],碳水化合物是胚乳中淀粉的重要源,因而影响到籽粒中淀粉的合成。

籽粒蛋白质含量会随着 O_3 的升高而升高,其原因很可能为:在籽粒发育的初期,籽粒中氮的积累较快而碳水化合物的积累较少,皮层占的比例较大,且皮层的蛋白质含量又高于胚乳^[33],而灌浆的后期籽粒中氮和碳水化合物的积累特点刚好相反。 O_3 胁迫使得冬小麦提前衰老,灌浆期缩短,因而灌浆不足,减小了后期合成的淀粉对蛋白质的稀释^[21],使蛋白质含量随着 O_3 浓度的升高而增加,淀粉含量则呈相反的趋势,随着 O_3 浓度的升高而降低。同时,研究中小麦有效穗粒数、千粒重的量随着 O_3 浓度的升高而降低^[28],也说明了这一点。

从对蛋白质各组分的影响来看,醇溶蛋白对形成面团的延伸性起主要作用,而麦谷蛋白是影响面团弹性的重要因素^[34-35],由此可见,100 nL·L⁻¹ 的 O_3 处理后的冬小麦在形成面团的延伸性和弹性上有提高,加工

品质要好于CK、CF150。清蛋白和球蛋白则代表了蛋白质的营养品质^[34-35],因此,150 nL·L⁻¹的O₃处理后的冬小麦营养品质要高于CK、CF100。其原因可能是清蛋白、球蛋白的积累主要在籽粒发育的前期,即灌浆初期,醇溶蛋白和谷蛋白的合成则比较晚^[33]。高浓度O₃胁迫下的小麦前期发育比较完全,灌浆期短,因此早期发育的清蛋白、球蛋白的含量相对较高,后期发育的醇溶蛋白和谷蛋白含量则相应降低。

O₃对小麦品质的影响不仅在于对氨基酸总量的影响,更在于对氨基酸组成的影响。王绍中等^[36]研究表明,水分、土壤等环境因素对小麦籽粒氨基酸的含量有很大影响,其影响约为基因型影响的1.5倍,且对各组成氨基酸的影响各不相同。在本研究中,各处理组氨基酸总量依次为CF100>CF150>CK,而不是完全随着O₃的升高而增加,但两处理组之间相差不大。必需氨基酸含量和赖氨酸含量顺序一致,依次为CF150>CF100>CK;小麦所缺乏的其他必需氨基酸,比如苏氨酸、异亮氨酸、缬氨酸、亮氨酸等,在高浓度的O₃胁迫下含量均有显著的增加,除了苏氨酸为CF100>CF150>CK外,其余均为CF150>CF100>CK。由于清蛋白和球蛋白中含有丰富的必需氨基酸,醇溶蛋白和谷蛋白中含有较多的非必需氨基酸,因而在本试验中,清蛋白和球蛋白较高的CF150处理组其必需氨基酸含量要显著高于其他两处理组($P<0.05$),而醇溶蛋白和谷蛋白含量高的CF100处理组其非必需氨基酸含量要高于CF150和CK($P<0.05$)。可见,O₃浓度的增加有利于籽粒品质的提高。有关O₃对小麦品质影响的生化、分子机制等方面还有待进一步的研究。

4 结论

(1)籽粒粗蛋白含量随O₃浓度的升高而增加,但各组分间变化趋势有所差异:清蛋白、球蛋白的含量依次为CF150>CF100>CK,CF150处理组营养品质最高;醇溶蛋白、谷蛋白的含量依次为CF100>CF150>CK,CF100的加工品质要高于其他处理组。

(2)氨基酸总量依次为CF100>CF150>CK,而人体所需的必需氨基酸总量为CF150>CF100>CK,各处理间差异显著($P<0.05$),O₃浓度的增加有利于小麦品质的提高。

(3)淀粉含量随着O₃浓度的升高而降低,与CK相比,CF100、CF150淀粉含量分别下降了4.06%和16.61%。整体而言,O₃胁迫有利于冬小麦籽粒营养品

质和加工品质的提高。

参考文献:

- [1] 郑向东,陈尊裕,崔宏,等.长江三角洲地区春季低空大气臭氧垂直分布特征[J].中国科学D辑,2004,34(12):1184-1192.
ZHENG Xiang-dong, CHEN Zun-yu, CUI Hong, et al. The vertical distribution of ozone at low altitude in spring of Yangtze River Delta[J]. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2004, 34(12):1184-1192.
- [2] Chameides W L, Li X S, Tang X Y, et al. Is ozone pollution affecting crop yield in China?[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(7):867-870.
- [3] Oltmans S J, Lefohn A S, Sheel H E, et al. Trend of ozone in the troposphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25:139-142.
- [4] Collins W J, Stevenson D S, Johnson C E, et al. The European regional ozone distribution and its links with the global scale for the years 1992 and 2015[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34:255-267.
- [5] Feng Z W, Jin M H, Zhang F Z, et al. Effects of ground level ozone(O₃) pollution on the yields of rice and winter wheat in the Yangtze River Delta[J]. *Journal of Environ Science and Health*, 2000, 15(3):360-362.
- [6] 王春乙,白月明,温民,等.CO₂和O₃浓度倍增及复合效应对大豆生长和产量的影响[J].环境科学,2004,25(6):6-10.
WANG Chun-yi, BAI Yue-ming, WEN Min, et al. Effects of double CO₂ and O₃ on growth and yields in soybean[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(6):6-10.
- [7] 王春乙,郭建平,白月明,等.O₃浓度增加对冬小麦影响的实验研究[J].气象学报,2002,60(2):238-242.
WANG Chun-yi, GUO Jian-ping, BAI Yue-ming, et al. Experimental study of impacts by increasing ozone concentration on winter wheat[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2):238-242.
- [8] 王春乙,白月明,郑昌玲,等.CO₂和O₃浓度倍增对作物影响的研究进展[J].气象学报,2004,62(5):875-881.
WANG Chun-yi, BAI Yue-ming, ZHENG Chang-ling, et al. The study on effects of double CO₂ and O₃ on crops[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5):875-881.
- [9] 白月明,王春乙,温民,等.臭氧浓度和熏气时间对菠菜生长和产量的影响[J].中国农业科学,2004,37(12):1971-1975.
BAI Yue-ming, WANG Chun-yi, WEN Min, et al. Influences of different ozone concentrations and fumigation days on spinach growth and yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12):1971-1975.
- [10] 白月明,王春乙,郭建平,等.大气臭氧变化对油菜影响的模拟试验[J].中国环境科学,2003,23(4):407-411.
BAI Yue-ming, WANG Chun-yi, GUO Jian-ping, et al. Simulation experiment of the effects of airborne ozone changes on Chinese cabbage[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(4):407-411.
- [11] 白月明,王春乙,郭建平,等.油菜产量响应臭氧胁迫的试验研究[J].农业环境科学学报,2003,22(3):279-282.
BAI Yue-ming, WANG Chun-yi, GUO Jian-ping, et al. Response of cole yields towards ozone stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(3):279-282.
- [12] Elagöz V, Han S S, Manning W J. Acquired changes in stomatal characteristics in response to ozone during plant growth and leaf development

- of bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) indicate phenotypic plasticity[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140:395-400.
- [13] Pleijel H, Eriksen A B, Danielsson H, et al. Differential ozone sensitivity in an old and a modern Swedish wheat cultivar-grain yield and quality, leaf chlorophyll and stomatal conductance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56:63-71.
- [14] Farage P K, Long S P. The effect of O₃ fumigation during leaf development on photosynthesis of wheat and pea: An in vivo analysis[J]. *Photosynthesis Research*, 1999, 59:1-7.
- [15] Bender J, Weigel H J, Wegner, et al. Response of cellular antioxidants to ozone in wheat flag leaves at different stages of plant development[J]. *Environmental Pollution*, 1994, 84(1):15-21.
- [16] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 不同熏气方式对油菜光合速率、生物量和产量的影响[J]. *生态毒理学报*, 2006, 1(4):323-329.
- ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Impact of different ozone exposure regimes on photosynthetic rate, biomass and yield of field-grown oil seed rape[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(4):323-329.
- [17] 郑启伟, 王效科, 冯兆忠, 等. 臭氧对原位条件下冬小麦叶片光合色素、脂质过氧化的影响[J]. *西北植物学报*, 2005, 25(11):2240-2244.
- ZHENG Qi-wei, WANG Xiao-ke, FENG Zhao-zhong, et al. Ozone effects on chlorophyll content and lipid peroxidation in the in situ leaves of winter wheat[J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin*, 2005, 25(11):2240-2244.
- [18] 赵天宏, 史 奕, 王春乙, 等. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及其复合作用对大豆叶绿素含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2003, 22(6):117-120.
- ZHAO Tian-hong, SHI Yi, WANG Chun-yi, et al. Effect of doubled CO₂ and O₃ on chlorophyll content of soybean[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22(6):117-120.
- [19] Fuhrer J, Grandjean Grimm A, Tschannen W, et al. The response of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) to ozone at higher elevations. II: Changes in yield, yield components and grain quality in response to ozone flux [J]. *New Phytologist*, 1992, 121:211-219.
- [20] Pleijel H, Skarby L, Wallin G, et al. Yield and grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L. cv) exposed to different concentrations of ozone in open-top chambers [J]. *Environmental Pollution*, 1991, 69:151-168.
- [21] Piikki K, Temmerman L D, Ojanpera K, et al. The grain quality of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in relation to elevated ozone uptake and carbon dioxide exposure[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28:245-254.
- [22] Sild E. Impact of increasing concentrations of O₃ and CO₂ on wheat, clover and pasture[D]. Ph. D. Thesis, Tartu University. ISBN(1999) 9985-56-427-8.
- [23] Fuhrer J, Lehnerr B, Moeri P B, et al. Effects of ozone on the grain composition of spring wheat grown in open-top field chambers[J]. *Environmental Pollution*, 1990, 65:181-192.
- [24] Pleijel H, Mortensen L, Fuhrer J, et al. Grain protein accumulation in relation to grain yield of spring wheat grown in open-top chambers with different concentration of ozone, carbon dioxide and water availability[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1999, 72:265-270.
- [25] 周秀骥. 长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- ZHOU Xiu-ji. The interaction of lower atmosphere and ecosystem in Yangtze River Delta[M]. Beijing: Meteorological Press, 2004.
- [26] 金赛花, 樊曙先, 王自发. 青海瓦里关地面臭氧浓度的变化特征[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(3):198-202.
- JIN Sai-hua, FAN Shu-xian, WANG Zi-fa, et al. The variation characteristics of surface ozone concentration at Waliguan in Qinghai[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(3):198-202.
- [27] 田纪春. 谷物品质测试理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 71-182.
- TIAN Ji-chun. Grain quality testing theory and methods[M]. Beijing: Science Press, 2006:71-182.
- [28] 刘宏举, 郑有飞, 吴荣军, 等. 地表臭氧浓度增加对南京地区冬小麦生长与产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(2):195-200.
- LIU Hong-ju, ZHENG You-fei, WU Rong-jun, et al. Impacts of increasing surface ozone on growth and yield of winter wheat in Nanjing Area[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2):195-200.
- [29] 郭建平, 王春乙, 白月明, 等. 大气中臭氧浓度变化对冬小麦生理过程和籽粒品质的影响[J]. *应用气象学报*, 2001, 12(2):255-256.
- GUO Jian-ping, WANG Chun-yi, BAI Yue-ming, et al. The impact for concentration of ozone change in the atmosphere to the physiological processes and grain quality of winter wheat[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2001, 12(2):255-256.
- [30] Pleijel H, Ojanper K, Mortensen L. Effects of tropospheric ozone on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Nordic countries[J]. *Soil and Plant Science*, 1997, 47:20-25.
- [31] Grantz D A, Farrar J F. Acute exposure to ozone inhibits rapid carbon translocation from source leaves of Pima cotton[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 50:1253-1262.
- [32] Schnyder H. The role of carbohydrate storage and redistribution in the source sink relations of wheat and barley during grain filling in a review[J]. *New Phytologist*, 1993, 123:233-245.
- [33] 曹广才, 王绍中. 小麦品质生态[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1994:48-56.
- CAO Guang-cai, WANG Shao-zhong. Wheat ecological quality[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1994:48-56.
- [34] Stone P J, Gras P W, Nicolas M E. The influence of recovery temperature on the effects of a brief heat shock on wheat III: Grain protein composition and dough properties [J]. *Journal of Cereal Science*, 1997, 25:129-141.
- [35] Wesley A S, Lukow O M, McKenzie R, et al. Effect of multiple substitutions of glutenin and gliadin proteins on flour quality of Canada prairie spring wheat[J]. *Cereal Chemistry*, 2001, 78(1):69-73.
- [36] 王绍中, 李春喜, 罗艳蕊, 等. 基因型和地域分布对小麦籽粒氨基酸含量的影响研究[J]. *西北植物学报*, 2001, 21(3):437-445.
- WANG Shao-zhong, LI Chun-xi, LUO Yan-rui, et al. Investigation on effects for genotypes and region distribution to the grain amino acid contents of winter wheat[J]. *Acta Bot Boreal Occident Sin*, 2001, 21(3):437-445.