

# 高氧对果蔬采后生理影响研究进展

段学武, 蒋跃明

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

**摘要:** 高氧(21%–100% O<sub>2</sub>)贮藏是近几年发展起来的果蔬采后处理技术之一。概述了高氧对果蔬采后生理如呼吸作用、乙烯合成、组织褐变、活性氧代谢及抗氧化能力、风味等方面的影响, 还介绍了高氧对病原微生物生长和采后果蔬腐烂控制的作用。

**关键词:** 综述; 高氧; 果蔬贮藏; 采后生理

中图分类号: Q945.66

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2005)06-0543-06

## Advances in Studies of the Effects of High Oxygen Concentrations on Postharvest Physiology of Fresh Fruits and Vegetables

DUAN Xue-wu, JIANG Yue-ming

(South China Botanical Garden, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** This review describes effects of high oxygen concentration on postharvest physiology and quality of fresh fruits and vegetables, including respiration, ethylene production and action, tissue browning, reactive oxygen species metabolism and antioxidative activity, and flavor. Responses of microorganisms *in vivo* and *in vitro* to elevated oxygen are also discussed.

**Key words:** Review; High oxygen concentration; Fruit and vegetable storage; Postharvest physiology

随着人民生活水平提高, 消费者对果蔬新鲜品质和食用安全性要求越来越高。调节气体包装(MAP) 由于使用简便和可减少甚至不用化学药剂, 而且效果良好而成为目前全球范围内使用最为广泛的果蔬贮藏保鲜技术。但由于果蔬具有旺盛的呼吸作用, 易导致袋内 O<sub>2</sub> 浓度偏低和 CO<sub>2</sub> 偏高, 形成无氧酵解, 积累乙醛乙醇等异味物质, 从而对果蔬产生毒害并影响风味, 还会促进一些厌氧致病菌在果蔬上生长繁殖, 影响果蔬的食用安全性。如何避免 MAP 贮藏技术应用过程中 O<sub>2</sub> 偏低所造成的危害已成为目前国内外采后生理学家关心的热点问题之一。

高氧(21%–100% O<sub>2</sub>)贮藏是近几年发展起来的果蔬采后处理技术之一。研究表明, 高氧可抑制某

些细菌和真菌的生长, 减少果蔬贮藏中的腐烂, 降低果蔬的呼吸作用和乙烯合成, 减缓组织褐变, 降低乙醛乙醇等异味物质的产生, 从而改进果蔬贮藏品质。因此, 高氧处理在果蔬保鲜方面具有潜在应用价值。本文概述了高氧对果蔬采后生理病理影响的最新研究进展。

### 1 对微生物生长的影响

#### 1.1 对离体微生物的影响

高氧对离体微生物生长的影响因微生物种类、生长温度的不同存在很大的差异, 它可能抑制或促进微生物生长, 也可能对微生物生长没有影响。Amanatidou 等报道 80% 和 90% O<sub>2</sub> 降低了大肠埃希

收稿日期: 2005-06-07 接受日期: 2005-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(30500353), 广东省自然科学基金项目(5300902), 国家杰出青年科学基金项目(30425040)资助

氏菌 (*Escherichia coli*)、肠炎沙门氏菌 (*Salmonella enteritidis*)、鼠伤寒沙门氏菌 (*Salmonella typhimurium*)、植物乳杆菌 (*Lactobacillus plantarum*)、季氏假丝酵母 (*Candida guilliermondii*) 的生长速率或最大产率,但对李斯特氏菌属 (*Listeria monocytogenes*)、肠膜明串珠菌 (*Leuconostoc mesenteroides*)、乳酸乳球菌 (*Lactococcus lactis*)、荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*)、成团肠杆菌 (*Enterobacter agglomerans*)、金杆菌属 (*Aureobacterium strain 27*) 的生长没有影响或有促进作用<sup>[1]</sup>。Wszelaki 和 Mitcham 也发现氧浓度高于 40% 可抑制灰霉菌 (*Botrytis cinerea*) 菌丝体的生长,生长速率随 O<sub>2</sub> 浓度的增加而减少,在 5℃ 下 7 d 菌丝体的生长降低了 70%; 但经高氧处理的菌丝体转入 20℃ 空气中时生长即迅速恢复,说明 O<sub>2</sub> 对灰霉菌离体生长的抑制作用无后续效应<sup>[2]</sup>。Jacxsens 等用调节气体包装研究高氧对离体微生物生长的影响,发现 70%、80% 和 90% 高氧显著抑制了荧光假单胞菌和朗比可假丝酵母 (*Candida lambica*)、灰霉菌、黄曲霉菌 (*Aspergillus flavus*) 和危害人体健康的嗜冷性机会致病菌豚鼠气单胞杆菌 (*Aeromonas caviae*) 的生长,而 95% O<sub>2</sub> 也会导致李斯特氏菌属 (*Listeria monocytogenes*) 滞后期的延长,但高氧处理对植物真菌胡萝卜软腐欧文氏菌 (*Erwinia carotovora*) 的生长则起促进作用<sup>[3]</sup>。单独采用 99% O<sub>2</sub> 处理不能有效抑制莓实假单胞菌 (*Pseudomonas fragi*)、嗜水气单胞菌 (*Aeromonas hydrophila*)、小肠结肠炎耶尔森氏菌 (*Yersinia enterocolitica*) 和单核李氏杆菌的生长<sup>[4]</sup>。Caldwell 和 Robb 分别用 10 个大气压的纯氧处理多种真菌和细菌,显著抑制了它们的生长;而细菌在转入空气之后迅速恢复生长,真菌则在经历不同时间后陆续恢复生长,说明高氧对真菌生长的抑制有后续效应,且后续效应随处理时间的延长而增加<sup>[5,6]</sup>。

另一方面,附加 CO<sub>2</sub> 可以促进高氧对微生物生长的抑制作用。Hoogerwienf 等用 80% O<sub>2</sub> + 20% CO<sub>2</sub> 培养离体软腐菌 (*Rhizopus stolonifer*)、灰霉菌和青霉菌 (*Penicillium discolor*) 显著抑制了它们的生长<sup>[7]</sup>。80% 或 90% O<sub>2</sub> 结合 10% 或 20% CO<sub>2</sub> 处理对大肠埃希氏菌、肠炎沙门氏菌、植物乳杆菌、高里假丝酵母、肠膜明串珠菌、乳酸乳球菌、荧光假单胞菌、成团肠杆菌、金杆菌属均有显著的抑制作用<sup>[1]</sup>。

高氧对微生物生长的直接抑制作用可能与高

氧胁迫诱导了微生物细胞内活性氧 ROS (包括 O<sub>2</sub><sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、OH<sup>·</sup>) 的生成,从而对细胞产生毒害有关。当前研究得较为深入的是乳酸菌。Amanatidou 等研究了氧敏感性不同的清酒乳杆菌 (*Lactobacillus sake*<sup>sensu</sup> DSM6333 和 *L. sake*<sup>insu</sup> NCFB2813) 在高氧下的反应,发现 90% O<sub>2</sub> 显著降低了 *L. sake*<sup>sensu</sup> DSM6333 的生长速率和生活力,而对 *L. sake*<sup>insu</sup> NCFB2813 的生长却没有影响。在细胞生长稳定期,*L. sake*<sup>sensu</sup> 胞质超氧离子 (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 的浓度是 *L. sake*<sup>insu</sup> 中的 10 倍;而 *L. sake*<sup>insu</sup> 胞质中 SOD 活性比 *L. sake*<sup>sensu</sup> 高 10 到 20 倍,表明活性氧清除能力在 *L. sake* 抵御高氧胁迫中起重要作用<sup>[8]</sup>。进一步研究还发现,在高氧条件下氧不敏感型 *L. sake*<sup>insu</sup> NCFB2813 中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 分解速度较快,表明 *L. sake*<sup>insu</sup> 中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 清除能力较强,对细胞毒害也较弱,有利于细胞的生长。令人感到意外的是,*L. sake*<sup>insu</sup> 中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的清除能力虽然较强,但并不能检测到 CAT 活性,而且高氧对 *L. sake* 的抗氧化特性 (OH<sup>·</sup> 清除水平,亚铁螯合能力以及还原力) 无明显影响<sup>[9]</sup>。Yi 等认为 *L. sake* 中 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 水平可能是通过 NADH 氧化酶/过氧化物酶系统来进行调控的,即 NADH 氧化酶产生 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,而 NADH 过氧化物酶催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 还原为 H<sub>2</sub>O<sup>[10]</sup>,这和生长受到抑制的 *L. sake*<sup>sensu</sup> 中 NADH 氧化酶活性较高而 NADH 过氧化物酶活性较低的结果相一致<sup>[9]</sup>。Gregory 和 Fridovich 也报道在 *E. coli* 中存在着两种 SOD,一种含铁,它在低氧水平时在 *E. coli* 细胞生长过程中本身存在,不被诱导;而另一种含锰,在厌氧条件下缺乏,可在高氧条件下被诱导以清除过量超氧自由基的毒害<sup>[11]</sup>。

## 1.2 对果蔬腐烂的影响

高氧对离体微生物产生直接的影响必然会延伸到果蔬上微生物的生长和组织腐烂,这对果蔬保鲜技术研究来说显得更为重要。Wszelaki 和 Mitcham 发现高氧对草莓腐烂的影响与对离体微生物生长的影响相似,60%–100% O<sub>2</sub> 显著抑制了草莓在 5℃ 时灰霉病的发生,且 90% 和 100% O<sub>2</sub> 处理的效果好于单独用 15% CO<sub>2</sub> 处理<sup>[2]</sup>。Jacxsens 等研究表明,95% O<sub>2</sub> 结合 High-barrier 膜包装显著抑制了鲜切根芹菜和菊苣在 4℃ 贮藏时因酵母生长引起的腐烂,但高氧包装对鲜切蘑菇腐烂没有影响<sup>[2]</sup>。同样高氧包装也明显抑制了树莓腐烂,树莓在 7℃ 中贮藏 14 d,单独用聚乙烯袋 (PE) 包装的果实因非真

菌和真菌引起腐烂的重量损失分别为20%和10%,而同期用PE袋充高氧包装的果实损失分别仅为3%和0%<sup>[12]</sup>。Allende等用95% O<sub>2</sub>结合High-barrier膜冷藏混合蔬菜色拉,显著抑制了色拉表面乳酸菌和肠杆菌科细菌(Enterobacteriaceae)的生长;但酵母的生长则被高氧所促进,而嗜冷性细菌和李斯特氏菌属的生长则不受影响<sup>[7]</sup>。此外,采用70% O<sub>2</sub>也可有效抑制甜樱桃<sup>[13]</sup>和龙眼<sup>[14]</sup>冷藏中果实腐烂。高氧对果蔬腐烂的控制可能是高氧对微生物直接和间接共同作用的结果:一方面高氧对微生物的生长产生直接抑制作用,另一方面高氧可能非直接地诱导寄主抗病性(如抗菌物质的生成)和改变一些与活性氧代谢和细胞壁降解有关酶的活性。

## 2 对呼吸作用的影响

高氧对采后果蔬呼吸作用的影响因果蔬种类、品种、成熟度、氧浓度、处理时间、温度以及环境中CO<sub>2</sub>和乙烯的浓度变化而变化。研究表明,高氧可以提高葡萄柚、柠檬<sup>[15]</sup>、鲜切蘑菇<sup>[16]</sup>、冷藏草莓<sup>[16]</sup>、香蕉<sup>[17]</sup>、荔枝<sup>[18]</sup>等果蔬的呼吸强度。鲜切芹菜和菊苣<sup>[19]</sup>则对氧不敏感。

高氧对许多果蔬的呼吸作用也有抑制作用。如纯氧不仅抑制了苹果果实的呼吸作用<sup>[19]</sup>,而且经纯氧预处理桃果实<sup>[20]</sup>,或经纯氧处理的苹果加工成苹果片后<sup>[21]</sup>,在随后的冷藏过程中呼吸作用也受到明显抑制,表现出后续效应。同样,Srilaong和Tatsumi应用纯氧和低温贮藏黄瓜,显著抑制了果实的呼吸作用<sup>[22]</sup>。另外,高氧还显著降低了鲜切梨<sup>[15]</sup>和枇杷<sup>[23]</sup>果实的呼吸强度。Wszelaki和Mitcham则发现,高氧抑制了‘Camarosa’草莓在5℃贮藏过程中前期呼吸作用,而促进了后期呼吸强度的增加<sup>[2]</sup>。30%和50% O<sub>2</sub>对常温下番茄果实呼吸起促进作用,而80%和100% O<sub>2</sub>则起抑制作用<sup>[15]</sup>。

高氧不仅影响果蔬呼吸作用,还可能改变呼吸途径。如高氧显著提高了马铃薯切片在2℃下抗氰呼吸作用,线粒体交替呼吸途径随氧浓度增加而提高,而低氧则降低了交替呼吸途径<sup>[24]</sup>。鳄梨的抗氰呼吸速率也随氧浓度的提高而增强<sup>[25]</sup>。Purvis等人认为,高氧诱导交替途径的加强有利于降低线粒体电子传递链产生活性氧<sup>[26-28]</sup>;交替氧化酶途径被认为在细胞色素途径电子流达到饱和和后作为电子溢流机制发挥作用<sup>[29]</sup>。Maxwell等进一步证实,过量表达

交替氧化酶的细胞中活性氧产量只有对照的一半;而反义抑制交替氧化酶的细胞,活性氧产量为对照的5倍<sup>[30]</sup>。

关于高氧抑制呼吸作用的机理,Baker和Mapson认为高氧抑制了三羧酸(TCA)循环中柠檬酸向酮戊二酸的转化<sup>[31]</sup>;另有报道,高氧也可能抑制TCA循环中琥珀酸脱氢酶(SDH)活性,抑制琥珀酸向延胡索酸的转化,从而对呼吸起抑制作用<sup>[22]</sup>。而Tucker和Laties则认为当氧浓度超过呼吸链末端氧化酶饱和浓度时,O<sub>2</sub>对呼吸速率起负反馈抑制<sup>[25]</sup>。

## 3 对乙烯合成的影响

乙烯在果蔬采后成熟和衰老进程中起着重要的调控作用。由于乙烯合成需要氧的参与,因此,氧浓度的高低影响到乙烯合成。在O<sub>2</sub>浓度50%以下,离体向日葵ACC氧化酶活性随氧浓度增加而增加<sup>[32]</sup>。高氧也促进了采后香蕉果实乙烯合成,在21%至100% O<sub>2</sub>浓度之间,乙烯释放高峰随着氧浓度的增加而升高,峰出现时间也提前<sup>[17]</sup>。我们的研究也表明,高氧有利于采后荔枝果实乙烯合成<sup>[33]</sup>。

高氧也可能对乙烯的合成起抑制作用。如鲜切‘Bartlett’梨在10℃和40%、60%或80% O<sub>2</sub>中贮藏4 d,乙烯合成速率分别降低了7%、13%和27%<sup>[15]</sup>。经过短期纯氧处理的苹果加工成苹果片后贮藏于1℃,苹果切片的乙烯合成速率显著降低<sup>[21]</sup>。同样,100% O<sub>2</sub>预处理可显著降低桃冷藏过程中乙烯的合成<sup>[20]</sup>,表明高氧对乙烯合成的抑制具有后续效应。不过,单纯高氧或高氧结合CO<sub>2</sub>处理对‘Camarosa’草莓冷藏期间乙烯的合成没有影响<sup>[2]</sup>。

此外,高氧对乙烯的生理作用也有影响。Altman和Corey报道,100 kpa O<sub>2</sub>虽然不能加速西瓜乙烯的合成,但能增加果实对乙烯的敏感性<sup>[34]</sup>。Jiang等研究了香蕉对高氧的反应,发现高氧有利于乙烯受体位点的合成,对香蕉果实软化有促进作用<sup>[35]</sup>。

## 4 对组织褐变的影响

褐变是影响采后果蔬贮藏商品价值的重要因素之一。Tian等报道,70% O<sub>2</sub>可以抑制‘储良’和‘石硖’龙眼冷藏中果皮褐变<sup>[14]</sup>;而90% O<sub>2</sub>对冷藏枇杷果心褐变则起抑制作用<sup>[23]</sup>。另外,高氧预处理或高氧

结合包装还抑制了某些鲜切果蔬如苹果<sup>[21]</sup>、芹菜、菊苣<sup>[3]</sup>、混合蔬菜色拉<sup>[7]</sup>等的褐变,但不影响鲜切梨和蘑菇褐变<sup>[3]</sup>。相反,高氧处理对甜樱桃<sup>[13]</sup>褐变则起促进作用。

有关高氧对果实组织褐变抑制作用机理的研究不多。Day 推测高氧抑制果蔬褐变可能是高氧对多酚氧化酶(PPO)具有基质抑制作用,酚类物质氧化生成的醌类物质对 PPO 产生负反馈抑制<sup>[36]</sup>。我们的研究表明,纯氧处理显著抑制了荔枝果实常温贮藏期间果皮褐变<sup>[37-39]</sup>,并认为纯氧抑制荔枝果皮褐变是多因素共同作用的结果:(1)纯氧抑制荔枝果皮褐变与其保持细胞超微结构和细胞膜的完整性有关<sup>[37]</sup>;(2)纯氧处理抑制了多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)和花色素苷酶活性,维持了较高的苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性水平,延缓了荔枝果皮花色素苷的降解和酚类物质的氧化,从而对荔枝果皮褐变起抑制作用<sup>[38]</sup>;(3)纯氧提高了荔枝果皮组织细胞色素氧化酶 c 活性和呼吸作用,维持了较高的 ATP 含量和能荷水平,对保持细胞膜完整性有利<sup>[39]</sup>;(4)纯氧诱导了荔枝果皮组织超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等抗氧化酶活性,减少了 $O_2^-$ 和 $H_2O_2$ 积累,降低了膜脂过氧化程度<sup>[18]</sup>。可见,高氧对果实组织褐变的抑制作用是多因素共同作用的结果。

## 5 对果蔬组织活性氧代谢和抗氧化能力的影响

氧是植物获得能量和维持生命活动的重要因素,但氧水平过高可能对植物造成伤害,如高氧浓度对水稻种子萌发和幼苗生长产生毒害<sup>[40]</sup>,加速种子衰老<sup>[41]</sup>。高氧造成植物细胞伤害的一个重要原因是引起膜脂过氧化作用<sup>[42]</sup>,而膜脂过氧化作用是和抗氧化系统活力下降相联系的。最近的研究表明,不同果蔬对高氧浓度具有不同的反应。刘海用 40%、60%和 100%  $O_2^-$  处理香蕉果实,与对照相比,高氧促进了果皮和果肉中 $O_2^-$ 和 $H_2O_2$ 的积累,加剧了膜脂过氧化作用,而且氧浓度越高,这种作用越明显;高氧只是诱导了果实贮藏前期抗氧化酶如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性升高<sup>[7]</sup>。而我们的研究得到相反的结论,即纯氧处理降低了 $O_2^-$ 和 $H_2O_2$ 的积累以及膜脂

过氧化作用,有利膜完整性的保持<sup>[18]</sup>。对桃果实在 5% $O_2^-$ +5% $CO_2$ 和 0℃贮藏前,用 70%  $O_2$  预处理 15 d,诱导了果实 SOD 和 CAT 活性,保持了膜的完整性,但并没有明显降低果实冷害<sup>[43]</sup>。

活性氧积累是造成生物体膜脂过氧化的重要原因之一。植物体内活性氧清除系统除包括 SOD、APX、CAT 和 GR 等酶促系统外,还包括类胡萝卜素、维生素 C、维生素 E 和还原型谷胱甘肽等非酶促系统;最近,酚类物质作为抗氧化物质也逐渐受到重视<sup>[44]</sup>。高氧对酚类物质等抗氧化物质含量也有重要影响。Zheng 等用 60%、80%和 100%  $O_2$  处理越桔,显著提高了越桔果实中总酚、总花色素苷含量和抗氧化能力,并且总酚、总花色素苷含量和抗氧化能力之间存在相关性<sup>[45]</sup>。我们在荔枝果实上也得到了相似的结果,100%  $O_2$  处理明显抑制了果实贮藏期间总酚和总花色素苷含量的降低,提高了果实果皮活性氧清除能力(包括超氧离子、羟自由基和 DPPH 自由基)和还原力,有利于膜完整性的保持<sup>[8]</sup>。

## 6 对果蔬贮藏品质的影响

调节气体包装(MAP)最明显的一个缺点是由于果蔬具有旺盛的呼吸作用,易导致袋内 $O_2$ 浓度偏低、 $CO_2$ 偏高,导致无氧呼吸积累乙醛、乙醇、乙酸乙酯等异味物质,从而影响到果蔬风味。高氧不仅可以减少气调贮藏时缺氧导致的挥发性异味物质的产生,而且可以降低高 $CO_2$ 胁迫所导致的异味物质的积累。用 80%  $O_2$  或 80%  $O_2$ +15%  $CO_2$  可以降低葡萄柚在 5℃或 15℃下贮藏 2 周后乙酸乙酯的合成<sup>[15]</sup>;而龙眼在 2℃和 70%  $O_2$  条件下贮藏 40 d,乙醇含量仅为 MAP 包装的三分之一<sup>[14]</sup>;鲜切莴苣用 0.06 mm 厚的聚乙烯薄膜袋包装并充入 80%  $O_2$  + 20%  $CO_2$  混合气体后密封,在 5℃下贮藏 8 d,袋内氧和 $CO_2$ 分别维持在 30%和 20%左右,所产生的异味物质明显减少<sup>[46]</sup>;100%  $O_2$  预处理也显著降低了桃冷藏过程中乙醛、乙醇和乙酸等异味物质的释放<sup>[20]</sup>。另外,单独高氧或高氧结合 $CO_2$ 处理均显著地促进了草莓挥发性物质的合成<sup>[2,47]</sup>。

果蔬在贮藏中,糖、酸和维生素 C(Vc)等物质的变化会影响到果蔬的风味和品质。由于糖、酸通常作为呼吸作用的底物,而 Vc 作为抗氧化物质,因此,高氧可通过调节果蔬呼吸作用和活性氧水平而

改变它们的含量,从而影响果蔬的风味和品质。如纯氧结合低温贮藏‘Shoufeng’草莓可抑制可滴定酸和Vc含量的下降,但对可溶性固形物影响不大<sup>[16]</sup>;而低温贮藏的‘Camarosa’草莓在高氧条件下可溶性固形物含量更低,可滴定酸与对照之间则没有差异<sup>[2]</sup>;高氧对冷藏的越桔可滴定酸影响不大,但明显维持了果实可溶性固形物水平<sup>[45]</sup>。枇杷用90% O<sub>2</sub>包装后在1℃下贮藏35 d,其可溶性固形物和可滴定酸含量显著高于空气中贮藏的果实<sup>[23]</sup>。Day等报道高氧结合MAP能维持鲜切莴苣Vc水平<sup>[48]</sup>;但70% O<sub>2</sub>对龙眼可溶性固形物和Vc含量没有影响<sup>[14]</sup>。可见,高氧对不同果蔬或同一果蔬不同品种风味和品质的影响是不同的。

## 7 结语

综上所述,适当的高O<sub>2</sub>处理不仅能够抑制果蔬后熟衰老、组织褐变和腐烂,还可避免低O<sub>2</sub>气调贮藏和调节气体包装的不足之处,因而在采后园艺作物中有极大的应用前景。由于此项研究才刚刚开展,人们对高氧影响果蔬乙烯合成及作用以及对病原微生物生长的机制尚不清楚,适合各种果蔬保鲜的高O<sub>2</sub>浓度范围、临界高O<sub>2</sub>浓度以及CO<sub>2</sub>等影响高氧作用效果的因素了解也较少。深入揭示这些问题,将有利于阐明高O<sub>2</sub>在果蔬采后保鲜中的作用及其机制,可为高O<sub>2</sub>气调贮藏技术提供理论依据。

## 参考文献

- [1] Amanatidou A, Smid E J, Gorris L G M. Effect of elevated oxygen and carbon dioxide on the surface growth of vegetable-associated micro-organisms [J]. J Appl Microbiol, 1999, 86 (3):429-438.
- [2] Wszelaki A L, Mitcham E J. Effects of superatmospheric oxygen on strawberry fruit quality and decay [J]. Postharv Biol Techn, 2000, 20 (2):125-133.
- [3] Jacxsens L, Devlieghere F, Van der Steen C, et al. Effect of high oxygen modified atmosphere packaging on microbial growth and sensorial qualities of fresh-cut produce [J]. Inter J Food Microbiol, 2001, 71 (2-3):197-210.
- [4] Gonzalez-Roncero M I, Day B P F. The effect of elevated oxygen and carbon dioxide modified atmosphere on psychotropic pathogens and spoilage microorganisms associated with fresh prepared produce [R]. Chipping Campden: Campden and Chorleywood Food Research Association, UK Research Summary, 1998.
- [5] Caldwell J. Effects of high partial pressures of oxygen on fungi and bacteria [J]. Nature, 1965, 206:323-323.
- [6] Robb S M. Reactions of fungi to exposure to 10 atmospheres pressure of oxygen [J]. J Gen Microbiol, 1966, 45:17-29.
- [7] Allende A, Jacxsens L, Devlieghere F, et al. Effect of superatmospheric oxygen packaging on sensorial quality, spoilage, and *Listeria monocytogenes* and *Aeromonas caviae* growth in fresh processed mixed salads [J]. J Food Prot, 2002, 65 (10):565-573.
- [8] Amanatidou A, Bennis M H J, Gorris L G M, et al. Superoxide dismutase plays an important role in the survival of *Lactobacillus sake* upon exposure to elevated oxygen [J]. Arch Microbiol, 2001, 176 (1-2):79-88.
- [9] Amanatidou A, Smid E J, Bennis M H J, et al. Antioxidative properties of *Lactobacillus sake* upon exposure to elevated oxygen concentrations [J]. FEMS Microbiol Lett, 2001, 203 (1):87-94.
- [10] Yi X, Kot E, Bezkorovainy A. Properties of NADH oxidase from *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* [J]. J Sci Food Agri, 1998, 78:527-534.
- [11] Gregory E M, Fridovich I. Oxygen metabolism in *Lactobacillus plantarum* [J]. J Bacteriol, 1974, 117:166-169.
- [12] Van der Steen C, Jacxsens L, Devlieghere F, et al. Combining high oxygen atmospheres with low oxygen modified atmosphere packaging to improve the keeping quality of strawberries and raspberries [J]. Postharv Biol Techn, 2002, 26 (1):49-58.
- [13] Jiang A L, Tian S P, Xu Y. Effects of controlled atmospheres with high O<sub>2</sub> or high CO<sub>2</sub> concentrations on postharvest physiology and storability of 'Napoleon' sweet cherry [J]. Acta Bot Sin, 2002, 44 (8):925-930.
- [14] Tian S P, Xu Y, Jiang A, et al. Physiological and quality response of longan fruit to high O<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub> atmospheres in storage [J]. Postharv Biol Techn, 2002, 24:335-340.
- [15] Kader A A, Ben-Yehoshua A. Effects of superatmospheric oxygen levels on postharvest physiology and quality of fresh fruits and vegetables [J]. Postharv Biol Techn, 2000, 20:1-13.
- [16] Zheng Y H (郑永华), Su X G (苏新国), Mao H Y (毛杭云). A preliminary study on the effects on pure oxygen on strawberry fruit storage [J]. J Nanjing Agri Univ (南京农业大学学报), 2001, 24(3):85-88. (in Chinese)
- [17] Liu H (刘海). Effect of high oxygen concentration on respiratory metabolism of postharvest banana fruit [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2003. (in Chinese)
- [18] Duan X W (段学武). Physiological mechanisms of pure oxygen on browning inhibition of fruit pericarp of harvested litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [D]. Guangzhou: South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [19] Solomas T, Whitaker B, Lu C. Deleterious effects of pure oxygen on 'Gala' and 'GrannySmith' apples [J]. HortScience, 1997, 32:458.
- [20] Lü C W (吕昌文), Cheng R P (程瑞平), Guo Y (郭郢), et al. Pretreatments with jasmonate and high O<sub>2</sub> promoting favorable quality of juicy peach fruits during cold storage [J]. Acta Agri Boreali-Sin (华北农学报), 1999, 14 (4):137-141. (in Chinese)
- [21] Lu C W, Toivonen P M A. Effect of 1 and 100 kPa O<sub>2</sub> atmospheric pretreatments of whole 'Spartan' apples on subsequent quality

- and shelf life of slices stored in modified atmosphere packages [J]. *Postharv Biol Techn*, 2000, 18:99–107.
- [22] Srilaong V, Tatsumi Y. Oxygen action on respiratory processes in cucumber fruit (*Cucumis sativus*) stored at low temperature [J]. *J Hort Sci Biotechn*, 2003, 78:629–633.
- [23] Zheng Y H (郑永华), Su X G (苏新国), Li Q S (李欠盛), et al. The effect of high oxygen on respiratory rate, polyphenol oxidase activity and quality in postharvest loquat fruits [J]. *Plant Physiol Comm* (植物生理学通讯), 2000, 36(4):318–320. (in Chinese)
- [24] Janes H W, Rychter A, Frenkel C. Development of cyanide-resistant respiration in mitochondria from potato tubers treated with ethanol, acetaldehyde and acetic acid [J]. *Planta*, 1981, 151: 201–205.
- [25] Tucker M L, Laties G G. The dual role of oxygen in avocado fruit respiration: kinetic analysis and computer modeling of diffusion-affected respiratory oxygen isotherms [J]. *Plant Cell Environ*, 1995, 8:117–127.
- [26] Purvis A C, Shewfelt R L. Does the alternative pathway ameliorate chilling injury in sensitive plant tissues? [J] *Physiol Plant*, 1993, 88:712–718.
- [27] Purvis A C, Shewfelt R L, Gegogenine J W. Superoxide producing by mitochondria isolated from green bell pepper fruit [J]. *Physiol Plant*, 1995, 94:743–749.
- [28] Purvis A C. The role of adaptive enzymes in carbohydrate oxidation by stressed and senescing plant tissues [J]. *HortScience*, 1997, 32:1165–1168.
- [29] Laties G G. The cyanide-resistant, alternative path in higher plant respiration [J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1982, 33:519–555.
- [30] Maxwell D P, Wang Y, McIntosh L. The alternative oxidase lowers mitochondrial reactive oxygen production in plant cells [J]. *PNAS, USA*, 1999, 96:8271–8276.
- [31] Barker J, Mapson L W. Studies in the respiratory and carbohydrate metabolism of plant tissues. VII. Experimental studies with potato tubers of an inhibition of the respiration and of a ‘block’ in the tricarboxylic acid cycle induced by ‘oxygen poisoning’ [J]. *Proc R Soc London Ser B*, 1955, 143:523–549.
- [32] Bailly C, Bogatek R, Dumet D, et al. Effects of 1-aminocyclopropane -1-carboxylic acid and oxygen concentrations on *in vivo* and *in vitro* activity of ACC oxidase of sunflower hypocotyl segments [J]. *Plant Growth Regul*, 1995, 17:133–139.
- [33] Jiang Y M, Duan X W, Su X G, et al. Physiological and quality response of postharvest litchi fruit to high O<sub>2</sub> atmospheres [A]. In: Li J R, Li Z. *Evolution of Food Safety and Nutrition* [C]. Beijing: China Agricultural Press, 2002. 12–16.
- [34] Altman S A, Corey K A. Enhanced respiration of muskmelon fruits by pure oxygen and ethylene [J]. *Sci Hort*, 1987, 31:275–281.
- [35] Jiang Y M, Joyce D C. Softening response of 1-methylcyclopropene-treated banana fruit to high oxygen atmosphere [J]. *Plant Growth Regul*, 2003, 41(3):225–229.
- [36] Day B P F. High oxygen modified atmosphere packaging for fresh prepared produce [J]. *Postharv News Infor*, 1996, 7 (3):31–34.
- [37] Duan X W (段学武), Jiang Y M (蒋跃明), Su X G (苏新国), et al. Effects of pure oxygen on browning and ultrastructure of postharvest litchi fruit [J]. *J Trop Subtrop Bot* (热带亚热带植物学报), 2004, 12(6):565–568. (in Chinese)
- [38] Duan X W, Jiang Y M, Su X G, et al. Effects of pure oxygen on enzymatic browning and quality of postharvest litchi fruit [J]. *J Hort Sci Biotechn*, 2004, 79(6):859–862.
- [39] Duan X W, Jiang Y M, Su X G, et al. Role of pure oxygen treatment in browning of litchi fruit after harvest [J]. *Plant Sci*, 2004, 167(3):665–668.
- [40] Luo G H (罗广华), Wang A G (王爱国), Shao C B (邵从本), et al. Injury of high oxygen concentration on seed germination and seedlings growth [J]. *Acta Phytophysiol Sin* (植物生理学报), 1987, 13:161–167. (in Chinese)
- [41] Halliwell B. The toxic effects of oxygen on plant tissues [A]. Oberley L W. *Superoxide Dismutase Vol. II* [C]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1982. 389–402.
- [42] Wang A G (王爱国), Luo G H (罗广华), Shao C B (邵从本), et al. Plant oxygen metabolism and injury of reactive oxygen species on cell [A]. In: *Acta Botanical Austro Sinica Vol.5* [C]. Beijing: Science Press, 1989. 11–23. (in Chinese)
- [43] Wang Y S, Tian S P, Xu Y. Effects of high oxygen concentration on pro- and anti-oxidant enzymes in peach fruits during postharvest periods [J]. *Food Chem*, 2005, 91:99–104.
- [44] Bloknina O, Virolainen E, Fagerstedt K V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review [J]. *Ann Bot*, 2003, 91:179–194.
- [45] Zheng Y H, Wang C Y, Wang S Y, et al. Effect of high oxygen atmospheres on blueberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity [J]. *J Agri Food Chem*, 2003, 51:7162–7169.
- [46] Heimdal H, Kuhn B F, Poll L, et al. Biochemical changes and sensory quality of shredded and MA-packaged iceberg lettuce [J]. *J Food Sci*, 1995, 60:1265–1268.
- [47] Perez A G, Sanz C. Effect of high-oxygen and high-carbon-dioxide atmospheres on strawberry flavor and other quality traits [J]. *J Agri Food Chem*, 2001, 49 (5):2370–2375.
- [48] Day B P F, Bankier W J, Gonzalez M I. Novel modified atmosphere packaging (MAP) for fresh prepared produce [R]. Chipping Campden: Campden and Chorleywood Food Research Association, UK Research Summary, 1998.