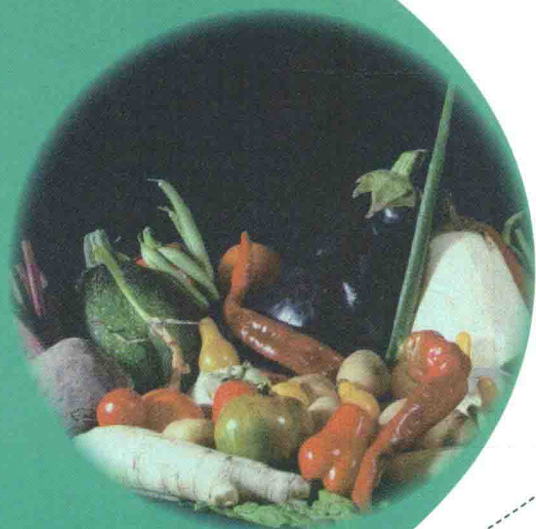


盐城工学院学术专著出版基金资助

不同贮藏方式 对果蔬品质影响的研究

◎ 赵云峰 著



东北师范大学出版社

盐城工学院学术专著出版基金资助

不同贮藏方式 对果蔬品质影响的研究

◎ 赵云峰 著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNNUP.COM

东北师范大学出版社

图书在版编目 (CIP)数据

不同贮藏方式对果蔬品质影响的研究 / 赵云峰著.

-- 长春: 东北师范大学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-5681-4064-5

I. ①不… II. ①赵… III. ①果蔬保藏—研究 IV.
①TS255.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 322816 号

☐ 责任编辑: 卢永康

☐ 责任校对: 房晓伟

☐ 策划编辑: 王春彦

☐ 封面设计: 优盛文化

☐ 责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春市净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

销售热线: 0431-84568036

传真: 0431-84568036

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbs@mail.jl.cn

河北优盛文化传播有限公司装帧排版

北京一鑫印务有限责任公司

2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

幅画尺寸: 170mm×240mm 印张: 14.5 字数: 243 千

定价: 51.00 元

果蔬营养对人体具有重要作用，是人体所需维生素和矿物质等营养素的重要来源。果蔬采后依然进行活跃的新陈代谢，导致营养物质的损失，其损失程度和速度主要受到果蔬不同贮藏方式的影响。果蔬采后保鲜是商业化的必要手段，不同贮藏保鲜方法会对果蔬品质产生不同的影响。果蔬品质包括外观品质和内在品质两部分，外观品质主要是果蔬的新鲜度、颜色和大小等外观特性，内在品质主要指风味、口感和营养价值等内在特性，果蔬的品质特性中，最重要的是其营养价值。本书阐述了不同贮藏方式对果蔬品质的影响及其研究进展，从保持营养的角度对不同贮藏方式的应用前景进行了展望，以期为果蔬采后贮藏保鲜方法的研究和发展提供参考。

一、果蔬营养品质与人体健康

饮食金字塔将食品分为谷物类，蔬菜、水果类，鱼、虾、肉、禽、蛋类，奶类及其制品、豆类及豆制品，油脂类等五大类。果蔬可以提供其他类食品所缺乏或含量较少的维生素、矿物质、膳食纤维和生物活性成分等与人体健康密切相关的营养成分。

果蔬中维生素含量非常丰富，是人体获取维生素的重要来源之一。维生素分为水溶性维生素和脂溶性维生素两大类，水溶性维生素主要包括 B 族维生素和维生素 C 等，脂溶性维生素主要包括维生素 A、D、E、K 等。这些维生素与人体健康密切相关，如维生素 D 与结肠癌风险呈显著负相关。人体每日摄取适量维生素对身体健康十分重要，如适量摄入维生素 A 和 C 能缓解女性代谢综合征状况；维生素 E 和维生素 C 对 60 ~ 75 岁老年人的认知能力有明显的积极作用，每天配合服用 400 mg 维生素 C 和 300 mg 维生素 E 可有效增强老年人的认知能力。

果蔬也是人体所需矿物质的重要来源。矿物质是构成人体组织、维持生理功能和生化代谢的重要物质，且人体自身无法合成，必须从外界食物中获得。摄入适量矿物质是保证身体健康的前提，如摄入量不当，很有可能导致人体生理生化功能改变，从而引起粥样动脉硬化、甲状腺肿大、贫血甚至癌症等病灶。流行病学研究表明，体内的微量元素锌、铜可以改变癌症发展方向，如血液中 Cu 浓度的增加可降低淋巴瘤和食管癌的发生，而低浓度的 Zn 可以对预防癌变有一定的作用。

生物活性成分的种类和含量在果蔬中尤为丰富，是来自生物体内且对生命现象有重要影响的微量或少量物质，具有预防心血管疾病、增强人体免疫力与抗肿瘤的作用。例如，苹果多酚可以治疗口腔疾病，预防口腔癌等。另外，饮食摄入番茄红素，可降低前列腺癌的风险。综上所述，果蔬对人体健康具有十分重要的作用，在进行果蔬贮藏保鲜时必须尽可能减少其营养物质的损失。

二、果蔬主要贮藏方法及对营养成分的影响

果蔬采后依然进行活跃的新陈代谢，使其内部成分和组织结构发生不可逆转的变化，逐渐丧失原有风味特征，导致果蔬营养价值降低。因此，尽可能保持果蔬贮藏过程中的营养价值，是各种贮藏保鲜方法追求的目标。

果蔬贮藏方法主要分为物理法、化学法和生物法三大类，虽然各种贮藏保鲜手段的侧重点不同，但都是对保鲜品质起关键作用的因素进行调控并优化。不同方法各有其原理和特点，保鲜效果不同，导致果蔬中不同的营养损失。物理法没有化学污染，但有较高的成本和技术要求。生物法具有成本相对低、效果相对好的优势。综上所述，除非有新的技术突破，物理法中的冷藏及其在冷藏基础上形成的冷链，是果蔬贮藏保鲜技术的发展方向。

果蔬贮藏保鲜技术在近几十年没有突破性的进展，国内外的大多数研究在实际应用方面都是对某种果蔬或其不同品种的贮藏参数进行优化，从而为实际生产提供技术支持。

三、果蔬主要贮藏方法对有害物质的影响

良好的果蔬贮藏保鲜方法可以有效保存果蔬中原有的营养物质，最大限度地减少营养损失。但是，果蔬贮藏过程中不可避免地发生着各种生理生化变化，可能导致一些有害物质的产生和积累，其中较为普遍的现象是在贮藏过程中产生对人体有害的硝酸盐或亚硝酸盐物质。这是在关注贮藏保鲜方法对果蔬营养物质的影响时，必须着重考虑的一个方面。

鲁奇林等采用高效液相色谱法，测定常温贮藏和低温冷藏条件下大白菜中硝酸盐和亚硝酸盐含量的变化情况，结果表明，在不同贮藏温度和贮藏方式下，硝酸盐和亚硝酸盐的含量随着贮藏时间的延长均呈现先增加后降低再上升的趋势，但低温相对常温贮藏有减缓硝酸盐和亚硝酸盐含量上升的效果。李红等研究了蔬菜在常温、冷藏和冷冻贮藏过程中亚硝酸盐含量的变化，结果表明三种贮藏方式都出现“亚硝峰”，尤其在不同的贮藏方式中叶菜类亚硝酸盐含量的变

化最为突出，在室温、冷藏、冷冻三种贮藏方式下亚硝酸盐峰值依次降低，说明较高的贮藏温度促进叶菜类中亚硝酸含量的上升。李岩等研究结果表明低温密闭气体环境能有效降低菠菜中硝酸盐和亚硝酸盐含量的累积。上述研究结果说明，低温贮藏保鲜是降低蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐累积的有效措施。

贮藏过程中，生物毒素的控制也是果蔬贮藏保鲜应该考虑的因素。研究表明，减压贮藏可以有效地促进果蔬中挥发性有害气体向外扩散，从而减少这些物质引起的生理病害以及微生物污染等。王秋芳等研究表明 1.5 kGy 和 2.5 kGy 的电子束辐射巨峰葡萄可使霉菌灭菌率分别达到 88% 和 90%。但辐射保鲜的不合理使用会对果蔬产生不利影响甚至巨大的毒性，Rojas-Argudo 等报道，柑橘果实中促进人体健康的物质会因辐射而改变，因为氧化压力引起的离子辐射会直接影响柑橘果实中生物活性物质，如香豆素（植物抗毒素）和多甲氧基黄酮的含量。Jones 等研究发现，从果蔬表面上分离出的拈抗性酵母菌用于果蔬贮藏保鲜，可以限制供给病原菌的营养物质，从而减少这些病原菌的生物毒素在果蔬中的积累。综上所述，合理选择贮藏保鲜方法是控制果蔬贮藏过程中生物毒素的产生和积累的有效手段。

四、展 望

过去，因为果蔬较低的产量，贮藏保鲜的重点在于控制贮藏过程中的腐烂，关注的贮藏指标主要是保持果蔬的原有色泽、减少水分损失和降低腐烂率等。随着生产水平的提高，果蔬产量的大幅度上升以及人们生活水平的提高，人们更关心的不是果蔬不腐烂，而是果蔬的品质。影响贮藏果蔬状况的主要是贮藏保鲜方法。因此，研究不同贮藏方法对果蔬品质的影响，对于提供外观和内在品质都能满足人们需求的贮藏果蔬，意义重大。

从贮藏过程中果实营养损失的角度来说，不同贮藏保鲜有不同特点，同一种类不同品种的果蔬，在贮藏过程中也表现出不同的营养损失状况。因此，研究寻求最佳的果蔬贮藏方法时，一定要结合果蔬的特点来综合考虑。

为适应现代社会的进步和发展，保证日常饮食营养均衡，研发应用安全、经济、方便、无污染的贮藏保鲜方法，最大限度地保存食物本身所含营养品质将是重要的研究方向。采用科学合理地贮藏保鲜技术，有效地延长新鲜果蔬的贮藏期，调节淡旺季，繁荣果蔬市场。研究和推广符合我国果蔬生产情况的保鲜技术，将果蔬的生产和采后保鲜有机地结合起来，提高良品率，改善果蔬的保鲜效果。

第一章	果蔬采后生理基础知识	001
第一节	果蔬的呼吸代谢	001
第二节	果蔬的蒸腾作用	010
第三节	乙烯对果蔬成熟和衰老的影响	015
第四节	果蔬的休眠	018
第五节	果蔬的生理病害	021
第六节	果蔬的物理损伤	031
第二章	果蔬的采后处理	035
第一节	果蔬的采收	035
第二节	果蔬预冷处理	039
第三节	果蔬分级和包装	046
第四节	果蔬的其他采后处理	053
第三章	果蔬的贮藏方式	061
第一节	简易贮藏	061
第二节	通风库贮藏	066
第三节	冷藏库贮藏	068
第四节	气调贮藏	073
第五节	减压贮藏	082
第四章	主要水果的贮藏保鲜技术	085
第一节	苹果的贮藏	085
第二节	梨的贮藏	090
第三节	葡萄的贮藏	093
第四节	柑橘的贮藏	097

第五节	桃的贮藏	/	101
第六节	柿子的贮藏	/	103
第七节	荔枝的贮藏	/	106
第八节	菠萝的贮藏	/	109
第九节	芒果的贮藏	/	110
第十节	草莓的贮藏	/	113
第十一节	樱桃的贮藏	/	115
第十一节	香蕉的贮藏	/	116
第十二节	板栗的贮藏	/	118

第五章 主要蔬菜的贮藏保鲜技术 121

第一节	白菜的贮藏	/	122
第二节	菠菜的贮藏	/	130
第三节	芹菜的贮藏	/	133
第四节	萝卜与胡萝卜的贮藏	/	136
第五节	马铃薯的贮藏	/	140
第六节	大葱的贮藏	/	146
第七节	大蒜的贮藏	/	147
第八节	姜的贮藏	/	148
第九节	芦笋的贮藏	/	151
第十节	莲藕的贮藏	/	152
第十一节	番茄的贮藏	/	154
第十二节	辣椒的贮藏	/	160
第十三节	茄子的贮藏	/	163
第十四节	黄瓜的贮藏	/	165
第十五节	南瓜的贮藏	/	170
第十六节	冬瓜的贮藏	/	171
第十七节	菜豆的贮藏	/	172
第十八节	蒜薹的贮藏	/	176
第十九节	花椰菜的贮藏	/	181

第二十节 甜玉米的贮藏 / 184

第二十一节 芹菜的贮藏 / 186

第二十二节 茭白的贮藏 / 188

第二十三节 甘蓝与紫甘蓝的贮藏 / 189

第二十四节 洋葱的贮藏 / 191

第二十五节 食用菌的贮藏 / 196

第二十六节 香菜的贮藏 / 201

第二十七节 芋头与山药的贮藏 / 202

第二十八节 荷兰豆的贮藏 / 204

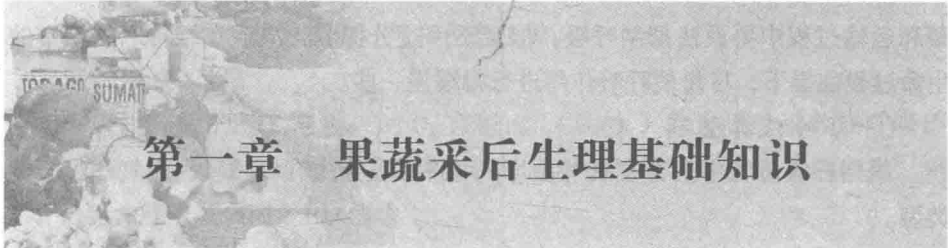
第二十九节 青椒的贮藏 / 206

第三十节 甘薯的贮藏 / 208

第三十一节 菜花的贮藏 / 212

第三十二节 结球生菜的贮藏 / 214

参考文献 216



第一章 果蔬采后生理基础知识

果蔬在田间生长发育到一定阶段，达到鲜食、贮藏、加工等要求后，就需要进行采收。采收后，虽然器官失去了来自土壤或母体的水分和养分供应，但其仍是一个有生命的有机体，在产品处理、运输、贮藏过程中，继续进行着各种生理活动，成为一个利用自身已有贮藏物质进行生命活动的独立个体。果蔬在贮藏过程中进行一系列复杂的生理生化变化，其中最主要的有呼吸作用、蒸腾作用、成熟和衰老、休眠、生理病害、物理损伤等，这些生理活动影响着产品的耐贮性和抗病性，必须进行有效的调控，以最大限度地保持果蔬的鲜活品质。

第一节 果蔬的呼吸代谢

呼吸代谢是果蔬采后最主要的生理活动，也是生命存在的重要标志。果蔬在贮藏和运输中，尽可能保持低而正常的呼吸代谢，是其贮藏和运输的基本原则与要求。研究果蔬成熟期间的呼吸代谢及其调控，对控制果蔬采后的品质变化、生理失调、贮藏寿命等方面具有重要意义。

一、呼吸的基本概念

果蔬采收以后，失去了水和无机物的来源，同化作用基本停止，但仍然是活体，其主要代谢过程是呼吸作用。呼吸是呼吸底物在一系列酶参与的生物氧化下，经过许多中间环节，将生物体内的复杂有机物分解为简单物质，并释放出化学键能的过程。呼吸底物在氧化分解中形成各种中间产物，其中一些是合成其他新物质的原料，而新物质的合成及细胞结构和功能维持所需要能量，可由呼吸作用中的高能化合物 ATP 随时提供。由于呼吸作用同各种果蔬的生理生化过程有着密切联系，并制约着生理生化变化，因此必然会影响水果和蔬菜采后的品质、成熟、耐贮性、抗病性以及整个贮藏寿命。呼吸作用越旺盛，各种生理生化过程进行得越快，采后寿命就越短。因此，我们在水果和蔬菜采后贮

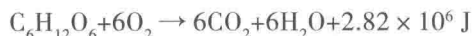
藏和运输过程中要设法抑制呼吸，但又不可过分抑制，应该在维持产品正常的生命过程前提下，尽量使呼吸作用进行得缓慢一些。

（一）呼吸类型

根据呼吸过程中是否有氧气参与，可将呼吸分为有氧呼吸和无氧呼吸两种类型。

1. 有氧呼吸

有氧呼吸是指在有氧气参与条件下，通过氧化酶的催化作用，使农产品的呼吸底物被彻底氧化分解，生成二氧化碳和水，同时释放大量能量的过程。呼吸作用中被氧化的有机物称为呼吸底物，碳水化合物、有机酸、蛋白质、脂肪都可以作为呼吸底物。通常所说的呼吸作用，主要是指有氧呼吸。以葡萄糖作为呼吸底物为例，有氧呼吸的总反应为：



2. 无氧呼吸

一般指在无氧条件下，使有机物分解成不彻底的氧化产物，同时释放少量能量的过程。高等植物无氧呼吸生成乙醇的反应如下：



除乙醇外，无氧呼吸也可产生乙醛、乳酸等物质，并释放少量的能量。

无氧呼吸中除少部分呼吸底物的碳被氧化成 CO_2 外，大部分底物仍以有机物的形式存在，故释放的能量远比有氧呼吸少。为了获得同等数量的能量，需要消耗大量的呼吸底物来补偿，而且无氧呼吸的最终产物乙醇和乙醛对细胞有毒害作用，因此，无氧呼吸对植物是不利的。但果蔬的有些内层组织气体交换比较困难，长期处于缺氧的条件下，故进行部分无氧呼吸，这是果蔬对环境的适应表现，只是这种无氧呼吸在整个呼吸中所占的比重不大。在果蔬贮藏中，不论何种原因引起的无氧呼吸的加强都被看成是正常代谢的被干扰和破坏，对贮藏都是有害的。

（二）呼吸强度和呼吸商

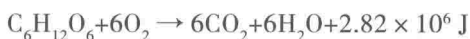
1. 呼吸强度

呼吸强度也叫呼吸速率，农产品的贮藏寿命与呼吸强度成反比，呼吸强度大，呼吸作用旺盛，农产品贮藏寿命就短；反之，呼吸强度小，贮藏寿命就长。呼吸强度只能反映呼吸作用的量，而不能反映呼吸作用的性质。例如，在 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，马铃薯的呼吸强度（以产 CO_2 计）是 $8 \sim 16 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ，而菠菜的呼吸强度（以产 CO_2 计）是 $172 \sim 287 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ，约是马铃薯的 20 倍，因此，菠菜不耐贮藏，更易腐烂变质。测定农产品呼吸强度常用的方法

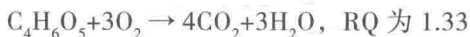
有气流法、红外线气体分析仪、气相色谱法等。

2. 呼吸商

呼吸中释放的 CO_2 与吸入的 O_2 容积比 (CO_2/O_2) 称为呼吸系数或呼吸商 (RQ)。在一定程度上可根据呼吸商来估计呼吸的性质与呼吸底物的种类。例如, 己糖为呼吸基质时, RQ 值为 1:



有机酸是氧化程度比糖高的物质, 作为呼吸底物时, 吸收的 O_2 少于释放出的 CO_2 , $\text{RQ} > 1$ 。例如, 苹果酸氧化时, 反应式为:



脂肪是高度还原性的物质, 分子内的 O/C 值比糖小, 所以作为呼吸基质时, $\text{RQ} < 1$ 。例如, 硬脂酸氧化时, 反应式为:



因此, 根据呼吸商的大小可大致了解呼吸底物或基质的种类。上述只是有氧呼吸时的情况, 如进行部分无氧呼吸, 由于只释放 CO_2 而不吸收 O_2 , 整个呼吸过程的 RQ 值就要增大。假设有氧呼吸和无氧呼吸同时消耗 1 分子己糖, 则 $\text{RQ} = (6+2) \text{CO}_2 / (6+0) \text{O}_2 = 1.33$, 大于单纯的有氧呼吸。无氧呼吸所占比重越大, RQ 值也越大。因此根据 RQ 值的大小还可大致了解无氧呼吸的程度。

呼吸是一个很复杂的综合过程, 它可以同时有几种氧化程度不同的底物参与反应, 可以同时进行几种不同的氧化代谢方式。因此测定所得到的呼吸商, 只能综合反映呼吸的总趋向, 并不能准确指出呼吸底物的种类或无氧呼吸的程度, 因受一些理化因素的影响, 会使测定的呼吸强度发生偏差。此外, O_2 和 CO_2 还可能有呼吸以外的来源, 或者呼吸产生的 CO_2 又被固定在细胞内或合成另外的物质。

(三) 呼吸消耗与呼吸热

呼吸消耗即在呼吸过程中所消耗底物的量, 对果蔬产品而言所消耗的底物主要为糖, 呼吸消耗是果蔬在贮藏中发生失重 (自然损耗) 和变味的重要原因之一。呼吸热则特指在呼吸中不能用于维持生命活动及合成新物质, 而以热能形式释放到环境中的能量。呼吸热的释放会使环境温度升高, 所以, 在果蔬贮运过程中应尽可能降低产品的呼吸强度, 减少呼吸热的释放。其计算如下。

根据呼吸反应方程式, 消耗 1 mol 己糖产生 6 mol (264 g) CO_2 并释放出 $2.82 \times 10^6 \text{ J}$ 能量计算, 则每产生 1 mg CO_2 , 应同时释放 10.9 J 的热能。假设这些热能全部转变为呼吸热, 则可以通过测定果蔬的呼吸强度计算呼吸热:

$$\text{呼吸热 } [\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{h})] = \text{呼吸强度 } [\text{mg} / (\text{kg} \cdot \text{h})] \times 10.9 \text{ J/mg}$$

例如，甘蓝在 5℃时的呼吸强度为 24.8 mg / (kg · h)，则每吨甘蓝每天产生的呼吸热为：

$$24.8 \times 10.9 \times 1\,000 \times 24 = 6\,487\,680 \text{ (J)} \approx 6.49 \times 10^6 \text{ (J)}$$

(四) 呼吸跃变

一些果实进入完熟期时，呼吸强度急剧上升，达到高峰后又转为下降，直至衰老死亡，这个呼吸强度急剧上升的过程称为呼吸跃变，这类果实称为呼吸跃变型果实。

另一类果实在成熟过程中没有呼吸跃变现象，呼吸强度只表现为缓慢的下降，这类果实称为非呼吸跃变型果实。绝大多数蔬菜不发生呼吸跃变。

一般呼吸跃变前期是果实品质提高的阶段，到了跃变后期，果实衰老开始，品质变劣，抗性降低。一些果实的呼吸高峰发生在最佳食用品质阶段，而另一些果实的呼吸高峰则发生在最佳食用品质阶段略前一些。凡表现出后熟现象的果实都具有呼吸跃变，后熟过程所特有的除呼吸外的一切其他变化，都发生在呼吸高峰时期内，所以研究人员常把呼吸高峰作为后熟和衰老的分界。因此，要延长呼吸跃变型果实的贮藏期就要推迟其呼吸跃变。跃变型果实无论是长在树上还是采收后，都可以发生呼吸跃变，并完成整个后熟过程，但在树上的果实呼吸跃变出现较晚。果实的种类不同，呼吸跃变出现的时间和峰值也不同。原产于热带和亚热带的果实，跃变峰值的呼吸强度分别比跃变前高 3 ~ 5 倍和 10 倍，但高峰维持时间很短。原产于温带的果实，跃变峰值的呼吸强度比跃变前只增加 1 倍，但跃变高峰维持时间较长。

呼吸跃变期是果实发育进程中的一个关键时期，对果实贮藏寿命有重要影响。它既是成熟的后期，也是衰老的开始，此后产品就不能继续贮藏。生产中要采取各种手段来推迟跃变型果实的呼吸高峰以延长贮藏期。

二、呼吸代谢的途径

在果蔬中存在着多条呼吸代谢的生化途径，这是植物在长期进化过程中对环境条件适应的体现。果蔬的呼吸途径主要有糖酵解途径、三羧酸循环、戊糖磷酸途径、乙醛酸循环等。

(一) 糖酵解

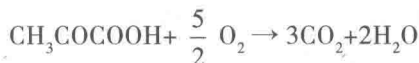
糖酵解是糖的磷酸化衍生物形成的过程，在这个过程中将己糖转化为 2 分子丙酮酸，其反应式如下：



由于 1 mol NADH+H⁺ 产生 3 mol ATP, 由上式可知 1 mol 葡萄糖通过糖酵解氧化为丙酮酸时, 可以释放出 8 mol ATP, 为各种代谢作用提供能量。之后果蔬以分裂磷酸盐键的方式利用能量, 其反应式如下: $\text{ATP} \rightarrow \text{ADP} + \text{Pi} + \text{能量}$

(二) 三羧酸循环

糖酵解途径的最终产物丙酮酸, 在有氧条件下进一步氧化脱羧, 最终生成 CO₂ 和 H₂O, 在此过程中产生含有三羧酸的有机酸, 且过程最后形成一个循环, 故这一过程称为三羧酸循环。三羧酸循环普遍存在于动物、植物、微生物细胞中, 在线粒体基质中进行。三羧酸循环的起始底物 CoA 不仅是糖代谢的中间产物, 也是脂肪酸和某些氨基酸的代谢产物。因此, 三羧酸循环是糖、脂肪和蛋白质三大类物质的共同氧化途径, 是生物利用糖和其他物质氧化获得能量的主要途径。其反应式如下:



每氧化 1 mol 丙酮酸可得到 15 mol ATP, 2 mol 的丙酮酸共得到 30 mol ATP, 加上糖酵解途径得到的 8 mol ATP, 因此每分解 1 mol 葡萄糖总共可得到 38 mol ATP。完全氧化 1 mol 葡萄糖可以释放 2 815.83 kJ 热量, 每 1 mol ATP 最少可以释放出 33.47 kJ 的热量, 38 mol ATP 最少可以将 1 271.94 kJ 的能量贮存起来, 占总释放能量的 45.2%, 其余的 1 543.90 kJ 能量以热的形式释放出来, 约占总释放能量的 54.8%, 这部分热量称为呼吸热。

在无氧或其他不良条件下 (如果皮透性不良、果蔬组织内的氧化酶缺乏活性), 丙酮酸就进行无氧呼吸或分子内呼吸, 即发酵, 此时丙酮酸脱羧生成乙醛, 再被 NADH 还原为乙醇或直接还原为有机酸 (乳酸)。其反应的第一步是丙酮酸脱羧为乙醛, 第二步是乙醛还原为乙醇。

(三) 戊糖磷酸途径

戊糖磷酸途径 (PPP) 又称为己糖磷酸途径 (HMP) 或己糖磷酸支路, 是葡萄糖氧化分解的一种方式。此途径在胞质中进行, 可分为两个阶段。第一阶段由 6-磷酸葡萄糖脱氢氧化生成 6-磷酸葡萄糖酸内酯, 然后自发水解生成 6-磷酸葡萄糖酸, 再氧化脱羧生成 5-磷酸核酮糖。NADP⁺ 是所有上述氧化反应中的电子受体。第二阶段是 5-磷酸核酮糖经过一系列转酮基及转醛基反应, 经过磷酸丁糖、磷酸戊糖及磷酸庚糖等中间代谢物, 最后生成 3-磷酸甘油醛及 6-磷酸果糖, 后两者还可重新进入糖酵解途径而进行代谢。戊糖磷酸途径有以下特点和生理意义: ① 戊糖磷酸途径是葡萄糖直接氧化分解的生化途径, 每氧化

1 mol 葡萄糖可产生 12 molNADP+H⁺, 有较高的能量转化率; ② 该途径中的一些中间产物是许多重要有机物生物合成的原料, 如可合成与植物生长、抗病性有关的生长素、木质素、咖啡酸等; ③ 戊糖磷酸途径在诸多植物中存在, 特别是在植物感病、受伤时, 该途径可占全部呼吸的 50% 以上。由于该途径和糖酵解三羧酸循环的酶系统不同, 因此, 当糖酵解三羧酸循环受阻时, 戊糖磷酸途径则可代替正常的有氧呼吸。在糖的有氧降解中, 糖酵解三羧酸循环与戊糖磷酸途径所占的比例, 随植物的种类、器官、年龄和环境而发生变化, 这也体现了果蔬呼吸代谢的多样性。

三、影响呼吸强度的因素

果蔬采后的呼吸变化, 除由本身的代谢特性、发育阶段等内部因素所决定外, 还受到外界因素(如温度、湿度、气体浓度、机械损伤等)的影响, 而外界因素的影响仍是通过改变内部因素而发生作用的。

(一) 内部因素

1. 种类和品种

不同种类和品种的果蔬呼吸强度差异较大, 这主要是由其遗传特性所决定的。一般来说, 热带、亚热带产品的呼吸强度比温带产品大, 高温季节成熟的产品比低温季节成熟的产品大。就种类而言, 浆果类的呼吸强度较大, 柑橘类和仁果类的呼吸强度较小; 叶菜类呼吸强度最大, 果菜类次之; 作为贮藏器官的根和块茎蔬菜(如马铃薯、胡萝卜等)的呼吸强度相对较小, 也较耐贮藏。同一器官的不同部位, 其呼吸强度的大小也不同, 如蕉柑的果皮和果肉的呼吸强度差异较大。

2. 发育年龄和成熟度

在果蔬个体发育和器官发育的过程中, 幼龄时期的呼吸强度最大, 随着发育的继续, 其呼吸强度逐渐下降, 但跃变型果实在衰老之前还有短暂的呼吸高峰, 待高峰过后, 呼吸强度就一直下降。幼嫩蔬菜的呼吸最强, 由于其处于生长最旺盛的阶段, 各种代谢活动均十分活跃, 且此时表皮保护组织尚未发育完全, 组织内细胞间隙较大, 便于气体的交换, 内层组织也能获得较充足的 O₂。老熟的瓜果和其他蔬菜, 新陈代谢强度降低, 表皮组织蜡质化、角质层加厚并变得完整, 因此, 其呼吸强度较低, 耐贮藏性加强。此外, 块茎、鳞茎类蔬菜在田间生长期间呼吸作用不断下降, 进入休眠期, 呼吸强度降至最低点, 休眠结束, 呼吸强度再次升高。

(二) 外界因素

1. 温度

温度是影响果蔬呼吸作用最重要的环境因素。在 $0^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ ，随着温度的升高，酶活性增强，呼吸强度增大。在 $0^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 时，温度系数往往比其他范围的温度系数值要大，这说明越接近 0°C ，温度的变化对果蔬的呼吸强度影响越大。因此，在不出现冷害的前提下，果蔬采后应尽量降低贮运温度，且保持温度的恒定。

高于一定温度时，呼吸强度在短时间内可能增加，但稍后呼吸强度很快就急剧下降。其原因有两个：一是温度过高导致酶的钝化或失活；二是过高的温度条件下， O_2 的供应不能满足组织对 O_2 消耗的需求， O_2 过度积累又抑制了呼吸作用的进行。降低温度不但使呼吸减慢，还使跃变型果实的跃变高峰延迟出现，峰的高度降低，甚至不出现跃变高峰，减少干物质消耗。但是如果温度太低，导致冷害，果蔬反而会出现不正常的呼吸反应。

2. 湿度

与温度相比，湿度对呼吸的影响较为次要，由于不同种类的果蔬对湿度的反应不同，因此无法得出两者之间的确切关系，但湿度对呼吸强度仍具有一定的影响。一般来说，果蔬采收后轻微干燥比湿润条件下更有利于降低呼吸强度，这种现象在温度较高时表现得更为明显。例如，在大白菜采后稍微晾晒，使产品轻微失水，有利于降低呼吸强度。柑橘类果实，较湿润的环境条件对其呼吸作用有所促进，过湿的条件使果肉部分生理活动旺盛，果汁很快消失，此时果肉的水分和其他成分向果皮转移，果实的外表表现为较饱满、鲜艳、有光泽，但果肉干缩，风味淡薄，食用品质较差，形成“浮皮”果实，严重者可引起枯水病。低湿不仅有利于洋葱的休眠，还可降低其呼吸强度；但薯类要求高湿，干燥会促进呼吸，产生生理伤害。此外，湿度过低对香蕉的呼吸作用和完熟也有影响。香蕉在 90% 以上的相对湿度时，采后出现正常的呼吸跃变，果实正常完熟；当相对湿度下降到 80% 以下时，不能出现正常的呼吸跃变，不能正常完熟。即使能勉强完熟，果实也不能正常黄熟，果皮呈黄褐色而且无光泽。

3. 气体成分

气体成分是影响呼吸作用的另一个重要因素。从呼吸作用总反应式可知，环境中的 O_2 和 CO_2 浓度的变化对呼吸作用有直接的影响。在不干扰组织正常呼吸代谢的前提下，适当降低贮藏环境 O_2 浓度或适当提高 CO_2 浓度，可有效地降低呼吸强度和延缓呼吸跃变的出现，并且抑制乙烯的生物合成，从而延长果蔬

的贮藏寿命,更好地维持产品品质,这是气调贮藏的基本原理。

O_2 是进行有氧呼吸的必要条件,当 O_2 浓度降到 20% 以下时,植物的呼吸强度便开始下降;当浓度低于 10% 时,无氧呼吸出现并逐步增强,有氧呼吸迅速下降。在氧浓度较低的情况下,呼吸强度(有氧呼吸)随 O_2 浓度的增大而增强,但 O_2 浓度增至一定程度时,对呼吸就没有促进作用,这一 O_2 浓度称为氧饱和点。一般果蔬贮藏环境中 O_2 浓度不可低于 3% ~ 5%,有的热带、亚热带作物要高达 5% ~ 9%。但也有例外的情况,如菠菜为 1%,芦笋为 2.5%,豌豆和胡萝卜为 4%。过高的 O_2 浓度(70% ~ 100%)对果蔬有毒,这可能与活性氧代谢形成自由基有关。但目前也有研究发现,超大气高氧处理反而会降低果实的呼吸强度,如 80% 和 100% 的氧处理能够降低绿熟番茄的呼吸强度。

提高环境中的 CO_2 浓度,呼吸作用也会受到抑制。多数果蔬比较适合 CO_2 浓度为 1% ~ 5%,各种果蔬对 CO_2 敏感性差异很大。 CO_2 浓度过高会使细胞中毒,导致某些果蔬出现异味,如苹果、黄瓜的苦味,西红柿、蒜薹的异味等。但是,高 CO_2 浓度(20% ~ 40%)对新鲜果蔬做短时间(几小时至几十小时)处理,有抑制产品呼吸及成熟之效,而产品不至于受害,可以用作运输前处理。在空气中香蕉的呼吸跃变在采后第 15 天出现,把 O_2 浓度降低到 10%,可将呼吸跃变延缓至约第 30 天出现,如再配合高浓度的 CO_2 (10% O_2 +5% CO_2),则可将呼吸跃变延迟到第 45 天出现,在 10% O_2 +10% CO_2 条件下,不出现呼吸跃变。

乙烯是一种促进成熟衰老的植物激素。果蔬在采后,自身代谢并积累乙烯,其中一些对乙烯敏感的产品的呼吸作用受到较大的影响。果蔬在积累了乙烯的环境中贮藏时,空气中的微量乙烯又能促进呼吸强度提高,加快果蔬成熟和衰老。因此,贮藏库要通风换气或放入乙烯吸收剂以排除乙烯,防止其过量积累。

4. 机械损伤

果蔬在采收、采后处理及贮运过程中很容易受到机械损伤。一般认为,伤口和创面破坏了细胞结构,加速了气体的扩散,也增加了酶与底物接触的机会,必然会加强呼吸作用。组织因受伤引起呼吸强度不正常的增加称为“伤呼吸”。机械损伤对产品呼吸强度的影响因种类、品种以及受伤程度的不同而不同。

5. 化学物质

在采收前后和贮藏期间进行各种化学药剂处理,如青鲜素(MH)、矮壮素(CCC)、比久(B9)、6-苄氨基嘌呤(6-BA)、赤霉素(GA)、2,4-D、重氮化合物、脱氢醋酸钠、一氧化碳等,对呼吸强度都有不同程度的抑制作用,其中一些也可作为果蔬保鲜剂的重要成分。