

文章编号: 1673 1689(2010)05-0676-05

气调环境和温度对荔枝呼吸特性的影响

段华伟^{1,2}, 王志伟^{* 2}, 胡长鹰³, 侯美玲³

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 暨南大学 包装工程研究所, 广东 珠海 519070; 3. 暨南大学 食品科学与工程系, 广东 广州 510632)

摘 要: 采用密封系统法实验, 研究了不同温度和气调环境下荔枝的呼吸速率、呼吸商和呼吸发酵阈值的变化规律。结果表明: 温度与呼吸速率之间存在着明显的 Arrhenius 关系, 低体积分数 O₂ 高体积分数 CO₂ 能显著抑制荔枝的呼吸强度; 温度和气调环境对荔枝呼吸商的影响规律不明显; 温度对 O₂ 发酵阈值影响显著, 5 °C 到 25 °C 之间, O₂ 发酵阈值从体积分数 5.19% 升至 7.77%, 增幅近 50%。

关键词: 呼吸速率; 呼吸商; 发酵阈值

中图分类号: S 667.1

文献标识码: A

Effect of Temperature and Modified Atmosphere on Respiration Properties of Litchi Fruit

DUAN Hua wei^{1,2}, WANG Zhi wei^{* 2}, HU Chang ying³, HOU Mei ling³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Packaging Engineering Institute, Jinan University, Zhuhai 519070, China; 3. Department of Food Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: In order to provide the elementary data for the modified atmosphere packaging and storage of litchi fruit, the respiration rate, respiratory quotient and fermentive gas concentrations of litchi respiration were studied by using the closed system method under different temperatures and environmental modified atmospheres in this study. Results showed that the relationship between temperature and initial respiration rate accorded with the Arrhenius law. The low O₂/high CO₂ could significantly inhibit the respiration rate of litchi; that no manifest correlation was observed between respiratory quotient of litchi fruit and temperature as well as modified atmosphere; and that temperature had a significant impact on the O₂ ferment concentration of litchi fruit, which increased from 5.19% to 7.77% with about 50% increment accordingly as temperature rose from 5 °C to 25 °C.

Key words: respiration rate, respiratory quotient, fermentive threshold

收稿日期: 2009-11-23

基金项目: 广东省自然科学基金项目(07005952)。

作者简介: 段华伟 (1977-), 男, 河南周口人, 包装工程博士研究生, 主要从事食品包装研究。

Email: huaweiduan@163.com

* 通信作者: 王志伟 (1963-), 男, 江苏无锡人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事食品包装研究。

Email: wangzw@jnu.edu.cn

荔枝(*Litchi chinensis* Sonn.), 原产于中国华南地区, 在中国已有 3 500 多年的栽培历史。2005 年, 中国荔枝种植面积达 580 800 hm², 总产量为 1 440 589 t, 约占总世界总产量的 70%^[1]。但荔枝属于极不耐藏水果, 常温下存放 1 – 3 d 即发生褐变腐烂, 给贮运带来了极大困难。据统计, 每年因腐烂变质而造成的荔枝损失约占总产量的 20% 以上^[2]。

对荔枝保鲜的早期研究主要集中在采用化学试剂处理方面, 如采用 SO₂、HCl 或多胺类溶液浸泡处理^[3]。化学试剂保鲜容易损害荔枝风味且易导致试剂残留过量, 造成食品卫生安全隐患。近年来, 国内外学者逐渐关注荔枝的绿色无公害保鲜技术的研究, 其中, 气调贮藏和气调包装被证明是一种能够显著延长荔枝保质期的绿色保鲜方案^[4–7]。气调保鲜效果主要取决于被包装水果的呼吸代谢与包装件规格参数之间的精确匹配^[8–9], 因此, 研究鲜果呼吸特性对不同气调环境和温度作用的响应有助于气调包装和气调贮藏技术的正确应用。然而, 有关荔枝的这一部分研究工作国内外至今未见报道。

1 材料和方法

1.1 供试水果

实验所用荔枝为“黑叶”品种, 分两批定购于珠海市前山农贸市场, 均为当天采摘果。购回后, 挑选大小均匀、无伤痕无病虫害果实为测试样品。所有样品被剪除枝叶, 清洗干净, 分成数堆, 称重后, 用水置换法测量体积, 凉风吹干水份后, 放恒温恒湿箱调温待用。

1.2 密封系统法测量呼吸速率

进行 1 h 的调温后, 把样品放入已知容积的容器内, 然后用带有橡胶圈的密封盖把容器封闭, 密封盖上开有抽气孔, 抽气孔用硅胶密封垫覆盖, 容器封口处加涂凡士林膏以确保气密性, 封口时刻起记录时间。每隔 1 ~ 3 h 的时间间隔, 通过抽气孔用注射器抽取 1 mL 容器内顶空气体, 随即注入 CO₂/O₂ 浓度分析仪(Pac325, MOCON, U. S. A.) 测量气体浓度并记录数据。荔枝的呼吸速率采用如下公式计算^[8]:

$$R_{CO_2} = \frac{[CO_2]_{in}^n - [CO_2]_{in}^{n-1}}{\Delta t} \cdot \frac{V_f}{W} \quad (1)$$

$$R_{O_2} = \frac{[O_2]_{in}^{n-1} - [O_2]_{in}^n}{\Delta t} \cdot \frac{V_f}{W} \quad (2)$$

式中: R_{CO_2} 为 CO₂ 的释放速率, mL/(kg · h); R_{O_2} 为 O₂ 的消耗速率, mL/(kg · h); $[CO_2]_{in}^n$ 和 $[CO_2]_{in}^{n-1}$

分别为第 n 次和第 $n-1$ 次测量得到的容器内 CO₂ 的浓度, %; $[O_2]_{in}^n$ 和 $[O_2]_{in}^{n-1}$ 分别为第 n 次和第 $n-1$ 次测量得到的容器内 O₂ 的浓度, %; Δt 表示两次测量的时间间隔, h; V_f 为容器内自由体积, mL; W 为测量水果质量, kg。

1.3 数据分析

实验所用温度为 5、10、15、20 和 25 °C, 每个温度下的测试样品为 3 份。不同温度下的呼吸发酵阈值在 $\alpha = 0.05$ 水平上用 Tukey 单向多重方差检验判断数据间的差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 呼吸速率与温度的关系

鉴于密封系统法测量的是水果的动态呼吸速率, 取各温度下第一次测量得到的 CO₂ 呼出速率作为荔枝的呼吸速率, 即呼吸初值, 其与温度之间的关系如图 1 所示, 图中各数据点表示对 3 个测试样品测量值的平均值 ± 标准偏差。

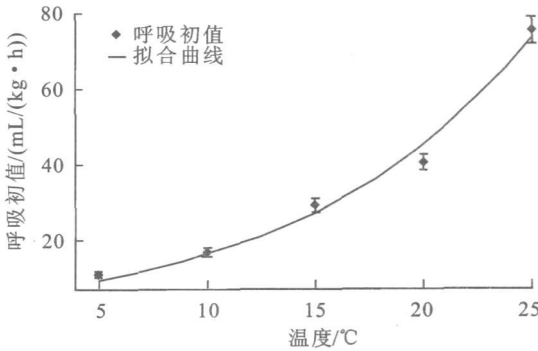


图 1 不同温度下荔枝的 CO₂ 呼吸初值
Fig. 1 Initial respiration rates of CO₂ for litchi at different temperatures

由图可见, 随着温度从 5 °C 上升到 25 °C, 荔枝的呼吸速率从 11 mL/(kg · g) 快速升至 75 mL/(kg · h) 左右, 增幅接近 7 倍。陈芳等^[10]观察到 20 °C 时“怀枝”荔枝的呼吸速率约为 35 mL/(kg · h), 略低于作者测得的同温度下的呼吸初值(约 40 mL/(kg · h)), 这可能是由荔枝品种不同所引起的。

呼吸速率和温度之间存在着良好的 Arrhenius 关系($r = 0.992$), 拟合得到的 Arrhenius 方程为:

$$R_{CO_2}^{Initial} = 1.99 \times 10^{14} \exp(-8528.57/T) \quad (3)$$

式中: $R_{CO_2}^{Initial}$ 表示荔枝的 CO₂ 呼吸初值, mL/(kg · h); T 表示绝对温度, K。

表 1 所示为 5~25 °C 之间荔枝呼吸初值的温度系数, 即温度每升高 10 °C 呼吸初值增大的倍数。低温区(5 ~ 15 °C)的温度系数值最高, 随着温度范围升至 10 ~ 20 °C, 温度系数略微下降, 越过此温

度区域进入 15 ~ 25 ℃后, 温度系数又略有回升, 但还是低于此前 5 ~ 15 ℃内的数值。文献中未见荔枝呼吸温度系数的相关报道。根据美国农业部^[11]提供的数据, 计算得到 10 ~ 20 ℃区间内荔枝呼吸的温度系数在 2.42 ~ 2.55 之间, 作者测得数值略低于此范围。

表 1 荔枝呼吸初值的温度系数(Q_{10})
Tab. 1 Temperature coefficient (Q_{10}) for litchi

温度/℃	Q_{10}
5~ 15	2.65
10~ 20	2.41
15~ 25	2.58
平均值	2.55 ± 0.12

2.2 呼吸商与温度的关系

呼吸商表示水果在单位时间内呼出的 CO₂ 量与吸收的 O₂ 量之比, 用 RQ 表示, 即: $RQ = R_{CO_2} / R_{O_2}$ 。图 2 所示为 5 个温度水平下荔枝的呼吸商值, 图中各数据点表示对 3 个测试样品各取 5 个测量值共 15 个数据的平均值 ± 标准偏差。

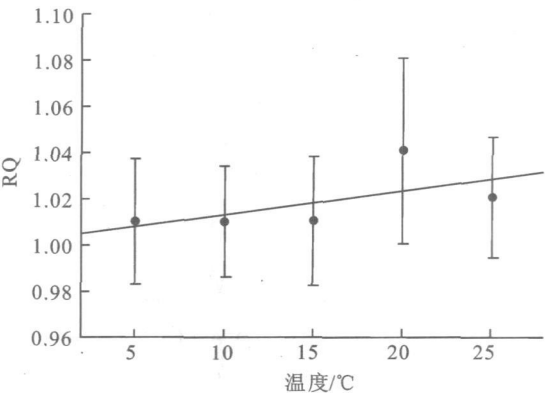


图 2 不同温度下荔枝的呼吸商

Fig. 2 Respiratory quotients of litchi at different temperatures

由图可见, 温度对荔枝呼吸商有一定程度的影响, 但影响规律不明显。5 ~ 15 ℃之间的 3 个温度点, 荔枝呼吸商的平均值几乎没有太大的改变, 约在 1.00 ~ 1.02 之间。20 ℃时的呼吸商是 5 个温度点中的最高值, 平均值达到了 1.04; 25 ℃时的呼吸商平均值略高于 5 ~ 15 ℃的值, 但低于 20 ℃时的观测值。另外, 相同温度下的荔枝呼吸商的数值波动较大。

荔枝的这种呼吸商特性可能与其自身的果体大小、形状以及所含物质成份有关。荔枝果呈近似球状, 单果质量小(约 20 g), 外有果壳, 内含硬核, 可食部分(假种皮)相对于整果质量的比例小。由

于荔枝不能后熟, 一般情况下, 采摘时荔枝的成熟度都很高, 在八成熟左右, 此时的果肉多汁, 含糖量高, 有机酸含量少^[12]。所以, 荔枝的呼吸底物中, 糖类应占主要比例, 因此, 其有氧呼吸的呼吸商接近于 1。荔枝体积较小, 表皮组织结构疏松, 果肉部分较薄, 气体很容易渗透全部果肉, 这保证了即使在温度升高呼吸速率增大时, 荔枝果肉内仍具有充足的氧气供给, 因此, 呼吸商随温度的变化也较为平稳。相同温度下呼吸商的波动较大, 可能是由仪器的测量误差引起的。

2.3 发酵阈值与温度的关系

当气体环境中 O₂ 浓度过低或 CO₂ 浓度过高时, 水果细胞代谢因缺乏充足的氧供应而发生厌氧呼吸, 即发酵代谢。由于发酵代谢过程中积累的诸如乙醇、乙酸乙酯等物质对水果本身有损害作用, 所以, 贮藏过程中应该防止和避免水果发生厌氧呼吸。一般情况下, 水果的有氧呼吸商在 0.7 ~ 1.3 之间波动^[13], 因此, 呼吸商值大于 1.3 时即可认为水果发生了厌氧呼吸^[14]。文献中常把能够诱发水果发生厌氧呼吸的 CO₂ 和 O₂ 浓度临界值称为发酵阈值^[13-14]。

5 个实验温度下荔枝的 O₂ 和 CO₂ 发酵阈值如表 2 所列。基于 Tukey 法的单向多重分析表明, 温度对荔枝呼吸的发酵阈值总体影响非常显著 ($P < 0.001$), 5 个温度点的氧气发酵阈值两两之间差异显著; 至于 CO₂ 的阈值浓度, 15 ℃分别与 20 ℃和 25 ℃之间没有明显差异, 其他温度两两之间的差异显著。温度升高过程中, 氧气的发酵阈值从 5 ℃时的 5.19% 上升至 25 ℃时的 7.77%, 上升幅度近 50%; 二氧化碳的发酵阈值从 5 ℃时 15.83% 下降到 25 ℃时的 13.67%, 下降幅度为 10.3%。

Ke 等^[15] 把水果对发酵代谢的控制机理归纳为两个途径: 一是在 PDC、ADH 和 LDH 分子水平上的粗调控制(coarse control), 二是在低 O₂/高 CO₂ 气氛下基于催化反应的精准控制(fine control)。文献^[16]在微观水平上更为详细地论述了低 O₂/高 CO₂ 气调环境对鲜果发酵代谢的调控机制, 认为鲜果呼吸对气调环境刺激的响应主要取决于鲜果本身具有的对上述两种发酵代谢途径的控制能力。在以果体为研究对象的中观水平上, 水果自具的组织结构可以当作设计精密的微气调包装系统^[17]。水果的最外层果皮通常被认为是这个微气调包装系统的阻隔材料, 其功能是阻止果体内外的气体交换^[17]。即使是在相同的气体体积分数中, 由于外果皮的透气性不同, 水果内部的气体体积分数也会不

同。对于带腊质层果皮的水果, 由于生长期细胞要求的氧浓度就很低, 果实的发酵阈值往往也低, 如苹果, 氧气发酵阈值仅为 1. 04% ~ 1. 20%^[18]。对于果皮含有气孔或质地粗糙的水果, 情况刚好相反, 其氧气发酵阈值通常要高些。荔枝的果皮构造特殊, 角质层薄, 龟裂片上有许多小裂口, 透气性大。因此, 荔枝的氧气发酵阈值稍高, 5℃时的发酵阈值仍高达 5. 19%, 明显高过苹果的发酵阈值。

表 2 中的数据还表明, 随着温度的升高, 荔枝的氧气发酵阈值呈上升趋势。这说明, 低温时荔枝能够容忍较低的氧气体积分数值而不发生厌氧呼吸, 高温时则相对较易诱发厌氧呼吸。这种情形与文献中报道的温度对其它水果种类氧气发酵阈值的影响状况大致相同, 比如樱桃^[14]、苹果^[19]、鳄梨^[20]。

表 2 不同温度下荔枝的发酵阈值

Tab. 2 Ferment point of litchi at different temperatures

温度/℃	O ₂ 体积分数/ %	CO ₂ 体积分数/ %
5	5. 19 ± 0. 04a	15. 83 ± 1. 13a
10	5. 73 ± 0. 03b	15. 28 ± 0. 08b
15	7. 23 ± 0. 03c	13. 83 ± 0. 03cd
20	7. 43 ± 0. 03d	13. 88 ± 0. 07c
25	7. 77 ± 0. 09e	13. 67 ± 0. 04de

注: 表中数据表示为 3 个样本的平均值 ± 标准偏差; 相同字母表示 Tukey 法单向多重方差检验在 $\alpha = 0. 05$ 水平上差异不显著, 不同字母表示差异显著。

由于 CO₂ 的存在能够抑制水果呼吸中的三羧酸循环, 进而激发 ADH 活性, 因而, 过高的 CO₂ 能促使水果发生厌氧呼吸。Beaudry 等^[21] 曾报道 CO₂ 体积分数的增加提高了蓝莓的氧气发酵阈值。由此可见, 单纯研究 O₂ 的影响得到的发酵阈值浓度并不适合往往含高 CO₂ 低 O₂ 的气调包装和气调贮藏。作者采用密封系统法, 以 RQ 值跃升至 1. 3 时

的拐点为发酵判定标准, 得到的发酵阈值既包含低 O₂ 限值又包含与之对应的高 CO₂ 浓度值(如表 2 所示), 这比仅研究一种气体成份更接近气调包装的实际情况。值得注意的是, 正是因为采用的是密封系统法, 实验得到的 O₂ 阈值和 CO₂ 阈值之间存在一定的相关性。

作者对荔枝发酵阈值的研究是在气体浓度动态变化的情况下进行的, 与在气体平衡状态下得的数据可能多少会有些不同, 至于两种状态下数据之间的差异程度及相关的分析对比将留待后续研究。

3 结 语

1) 荔枝的呼吸速率随温度升高而增加, 5 ~ 25℃区间内, 荔枝呼吸的温度系数平均为 2. 55; Arrhenius 方程可以很好地拟合荔枝呼吸初值与温度之间的关系; 因此, 为降低呼吸代谢消耗果实营养成分的速度, 延长荔枝的保鲜期, 应尽量采用低温贮藏方式, 且贮藏过程中, 应严格控制环境温度以避免温度漂移造成荔枝呼吸代谢紊乱。

2) 温度和气体体积分数对荔枝呼吸商的影响规律不明显, 5 ~ 15℃之间, 荔枝呼吸商的平均值在 1. 00 ~ 1. 02 之间, 20℃时的平均值为 1. 04, 25℃时的平均值降至 1. 02 左右; 气调保鲜设计时, 应根据不同温度下的呼吸商值选择与荔枝呼吸最为匹配的包装材料, 即不同的贮存温度不能采用相同的呼吸商值。

3) 温度对荔枝呼吸的氧气发酵阈值有非常显著的影响, 对二氧化碳发酵阈值的影响规律不明显, 温度从 5℃上升到 25℃时, 荔枝的氧气发酵阈值从 5. 19% 升至 7. 77%, 增幅为 49. 71%; 气调贮藏时, 应保证环境中 O₂ 体积分数不能低于相应温度下的氧气发酵阈值, CO₂ 体积分数不能高于对应温度下的二氧化碳发酵阈值。

参考文献(References):

[1] WU Y, YI G, ZHOU B, et al. The advancement of research on litchi and longan germplasm resources in China[J]. **Scientia Horticulturae**, 2007, 114: 143– 150.

[2] 张秀梅, 杜丽清, 谢江辉. 荔枝采后贮藏保鲜研究进展[J]. 中国南方果树, 2004, 33(5): 53– 55, 57.

ZHANG Xir mei, DU Li qing, XIE Jiang hui. Research Progress on Postharvest Storage of Litchi Fruit[J]. **South China Fruits**, 2004, 33(5): 53– 55, 57.

[3] Holcroft D M, Mitcham E J. Postharvest physiology and handling of litchi (*Litchi chinensis* Sonn)[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 1996, 9: 265– 281.

[4] JIANG Y M, FU J R. Postharvest browning of litchi fruit by water loss and its prevention by controlled atmosphere storage at high relative humidity[J]. **Lebensm. Wiss. Technology**, 1999, 32: 278– 283.

- [5] Mahajan P V, Goswami T K. Extended storage life of litchi fruit using controlled atmosphere and low temperature[J]. **Journal of Food Processing and Preservation**, 2004, 28: 388– 403.
- [6] TIAN S P, LI B Q, XU Y. Effects of O₂ and CO₂ concentrations on physiology and quality of litchi fruit in storage[J]. **Food Chemistry**, 2005, 91: 659– 663.
- [7] Reuck K D, Sivakumar D, Korsten L. Integrated application of 1- methylcyclopropene and modified atmosphere packaging to improve quality retention of litchi cultivars during storage[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2009, 52: 71– 77.
- [8] 卢立新, 陶瑛. 青豌豆呼吸速率的测定与模型表征[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(2): 33– 36.
LU Lixin, TAO Ying. Respiration rate measurement and mathematical modelling for pea[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2006, 25(2): 33– 36.
- [9] 安建申, 张慙, 陆起瑞, 等. 不同厚度薄膜气调包装对水蜜桃贮藏品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2005, 24(3): 76– 79.
AN Jian shen, ZHANG Min, LU Qirui, et al. Effect of different thickness films on the quality of modified atmosphere packaging honey peaches during the storage[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2005, 24(3): 76– 79.
- [10] 陈芳, 李月标, 陈绵达. 荔枝果实贮藏中乙烯的产生和控制[J]. 园艺学报, 1986, 13(3): 151– 155.
CHEN Fang, LI Yuebiao, CHEN Jinda. The production of ethylene of litchi fruit during storage and its control[J]. **ACTA Horticulturae Sinica**, 1986, 13(3): 151– 155.
- [11] Paull R E, Chen C C, Chen N J. Litchi: the commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks[EB/OL]. (2004– 05– 5)[2009– 01– 09]. <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/085litchi.pdf>
- [12] 王育林, 彭永宏. 热空气处理对荔枝生理特性和贮藏效果的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(2): 137– 140.
WANG Yulin, PENG Yonghong. Effect of hot air treatment on physiological characteristics and storage quality of litchi[J]. **Chinese Journal of Applied Environment Biology**, 2003, 9(2): 137– 140.
- [13] Ooraikul B, Stiles M E. Modified Atmosphere Packaging of Food[M]. Chichester: Ellis Horwood Limited, 1991. 169– 245.
- [14] Petracek P D, Joles D W, Shirazi A, et al. Modified atmosphere packaging of sweet cherry (*Prunus avium* L, cv. ‘Sams’) fruit: metabolic responses to oxygen carbon dioxide, and temperature[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 2002, 24: 259– 270.
- [15] Ke D, Yahia E, Hess B, et al. Regulation of fermentative metabolism in avocado fruit under oxygen and carbon dioxide stresses[J]. **Journal of American Society of Horticulture Science**, 1995, 120(3): 481– 490.
- [16] Ke D, Mila M, Kader A A. Regulation of fermentative metabolism in fruits and vegetables by controlled atmospheres [C]. Proceedings of the 6th International Controlled Atmosphere Research Conference. New York: Cornell University, 1993. 63– 77.
- [17] Ahvenainen R. Novel Food Packaging Techniques[M]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003. 337– 346.
- [18] Yearsley C W, Banks N H, Ganesh S, et al. Determination of lower oxygen limits for apple fruit[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 1996, 8: 95– 109.
- [19] Yearsley C W, Banks N H, Ganesh S. Temperature effects on the internal lower oxygen limits of apple fruit[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 1997, 11: 73– 78.
- [20] Valle Guadarrama S, Saucedo Veloz C, Penar Valdivia C B, et al. Aerobic– anaerobic metabolic transition in Hass’avocado fruits[J]. **Food Science and Technology International**, 2004, 10(6): 391– 398.
- [21] Beaudry R M. Effect of carbon dioxide partial pressure on blueberry fruit respiration and respiratory quotient[J]. **Postharvest Biology and Technology**, 1993, 3: 249– 258.

(责任编辑: 朱明)