DNP 和 ATP 对 *Phomopsis longanae* Chi 侵染的龙眼果实病害发生、能荷状态和呼吸代谢的调控

陈梦茵[1,2]，林河通[1,3]，洪延康[2]，张珅[1,3]，林艺芬[1,3]，陈艺晖[1,3]

（1.福建农林大学食品科学学院，福建福州 350002）（2.美国佐治亚大学食品科学与技术系，美国佐治亚州格里芬市 30223）（3.福建农林大学农产品产后技术研究所，福建福州 350002）

摘要：与拟茎点霉接种果实相比，DNP 能提高拟茎点霉接种果实的病害指数和果皮褐变指数，提高果实呼吸速率和果皮 COX、AAO、PPO 活性及 NAD 和 NADH 含量，降低果皮 NADK 活性和 NADP、NADPH 含量及能荷值。而 ATP 则能降低拟茎点霉接种果实的病害指数和果皮褐变指数，降低果实呼吸速率和果皮 COX、AAO、PPO 活性及 NAD 和 NADH 含量，提高果皮 NADK 活性和 NADP、NADPH 含量，维持较高的果皮能荷值。据此认为，DNP 处理促进拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生，与 DNP 加剧能量亏缺、削弱磷酸戊糖呼吸代谢途径及增强 COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性有关；而 ATP 处理延缓拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生，与 ATP 维持较高的能荷值、增强磷酸戊糖呼吸代谢途径及降低 COX、AAO、PPO 等呼吸末端氧化酶活性有关。

关键词：龙眼；采后病害；拟茎点霉；能荷状态；呼吸代谢

文章篇号：1673-9078(2015)5-49-58 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.009

Regulation of 2,4-dinitrophenol and Adenosine Triphosphate on Disease Development, Energy Status, and Respiratory Metabolism of *Phomopsis longanae* Chi-infected Longan Fruit

CHEN Meng-yin[1,2], LIN He-tong[1,3], HUNG Yen-Con[2], ZHANG Shen[1,3], LIN Yi-fen[1,3], CHEN Yi-hui[1,3]

(1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China) (2.Department of Food Science and Technology, University of Georgia, 1109 Experiment Street, Griffin, GA 30223, USA) (3.Institute of Postharvest Technology of Agricultural Products, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The DNP treatment increased the contents of nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) and reduced NAD (NADH), decreased NAD kinase (NADK) activity in the pericarp, and led to lower contents of NAD phosphate (NADP) and reduced NADP (NADPH) and a lower level of energy charge. By contrast, ATP treatment reduced the disease index and pericarp-browning index for *P. longanae*-inoculated longans, and decreased the respiration rate of the fruit as well as the activities of COX, AAO, and PPO in the pericarp. Additionally, ATP treatment reduced the contents of NAD and NADH, increased NADK activity in the pericarp, and led to higher contents of NADP and NADPH and a higher level of energy charge. These results suggest that DNP treatment accelerates the development of postharvest disease in *P. longanae*-infected longans through exacerbating energy deficiency, decreasing pentose phosphate pathway activity in respiration and metabolism, and increasing the activities of respiratory terminal oxidases such as COX, AAO, and PPO. On the other hand, ATP treatment likely delayed the development of postharvest disease in *P. longanae*-infected longans through maintaining a relatively high level of energy charge, increasing PPP activity in respiration and metabolism, and decreasing the activities of respiratory terminal oxidases such as COX, AAO, and PPO.

Key words: longan (*Dimocarpus longan* Lour.); postharvest disease; *Phomopsis longanae* Chi; energy status; respiratory metabolism

收稿日期：2014-12-27

基金项目：国家自然科学基金项目（30671464、30972070、311711776、31201445）、高等学校博士学科点专项科研基金项目（20123515120016、20133515110014）、福建省自然科学基金项目（2011J01079、2012J05040）、福建省财政厅项目（K81MLV01A）和福建农林大学高水平大学建设项目（612014042）

作者简介：陈梦茵（1989-），女，博士研究生。研究方向：农产品加工及贮藏工程

通讯作者：林河通（1967-），男，博士，教授，博士生导师，研究方向：农产品加工及贮藏工程；陈艺晖（1982-），男，博士，讲师

龙眼（*Dimocarpus longan* Lour.）果实成熟于 7~9 月的高温季节，采后容易发生果皮褐变和果实腐烂，其中病原菌侵染是导致龙眼果实果皮褐变和果实腐烂的主要因素，极大限制采后龙眼果实贮运和销售[1~2]。因此，很有必要深入研究龙眼果实采后病害的发生机制。前人研究认为，果蔬采后病害的发生可能与呼吸代谢和能量亏缺有关[3~6]，病原菌侵染会引起果蔬等感病植物组织呼吸速率增加、主要呼吸末端氧化酶[如细胞色素 C 氧化酶(COX)、抗坏血酸氧化酶(AAO)和多酚氧化酶（PPO）等]活性发生变化和能量亏缺等生理生化反应[1, 7~8]。Yi 等[9~10]研究报道，经荔枝霜疫霉菌（*Peronophythora litchii* Chen ex Ko, et al.）接种的荔枝果实随着贮藏时间的延长，其果皮三磷酸腺苷（ATP）含量下降，而果实病害指数和果皮褐变指数增加；外源 2,4-二硝基苯酚（DNP）处理会促进荔枝霜疫霉菌接种荔枝果实的病害发生和果皮 ATP 含量的下降；而外源提供 ATP 则能有效延缓荔枝霜疫霉菌接种荔枝果实的病害发生和果皮 ATP 含量的下降。

我们前期的研究发现，龙眼拟茎点霉（*Phomopsis longanae* Chi）是引起龙眼果实采后病害（果皮褐变和果实腐烂）最主要的病原菌[1, 11]。经拟茎点霉接种的龙眼果实病害指数极显著（P<0.01）高于对照未接种的龙眼果实；而果皮 ATP 含量和能荷值则极显著（P<0.01）低于对照未接种的龙眼果实；经拟茎点霉接种的龙眼果实随着贮藏时间的延长，其果实病害指数迅速增加，而果皮 ATP 含量和能荷值快速下降，且果皮 ATP 含量和能荷值与果实病害指数都呈极显著（P<0.01）负相关，相关系数分别-0.964 和-0.997[1]。Chen 等[4]研究外源不同浓度的 ATP 对龙眼果实采后生理、品质特性和耐贮性的影响，发现 0.8 mmol/L 的 ATP 处理效果最佳，能有效减少龙眼果实采后病害发生率和降低果皮褐变指数，较好保持龙眼果实品质。因此认为，龙眼果实采后病害的发生可能是由于能量亏缺所致。目前，有关能荷调控龙眼果实采后病害发生的机理尚不清楚，有关能荷状态对龙眼果实采后病害发生的影响及其与呼吸代谢的关系尚未见报道。本文以福建省主栽龙眼品种‘福眼’龙眼果实为材料，在前期研究的基础上，进一步深入研究 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生中果实呼吸速率、果皮能荷状态、呼吸末端氧化酶活性、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸激酶（NADK）活性及吡啶核苷酸含量的影响，旨在了解能荷状态对龙眼果实采后病害发生的影响及其与呼吸代谢的关系，以阐明龙眼果实采后病害发生的生理机制，为进一步控制龙眼果实采后病害提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与处理

1.1.1 材料

以约九成熟的‘福眼’龙眼（*Dimocarpus longan* Lour. cv. Fuyan）果实为材料，供试材料采自福建省惠安县龙眼科技示范场，果实采收当天运至福建农林大学农产品产后技术研究所（福州），经去除果梗和剪粒后，挑选大小、色泽一致，无损伤、无病虫害的健康果实为试验材料。

试验用的龙眼拟茎点霉(*Phomopsis longanae* Chi)菌株由福建农林大学农产品产后技术研究所食品贮藏保鲜实验室分离鉴定和保存。参照 Chen 等[1]的方法，拟茎点霉菌株于(28±1) ℃在燕麦培养基（100 g 燕麦，20 g 琼脂粉溶于 1000 mL 蒸馏水，经煮沸杀菌冷却后制成）上培养 15 d，随后用 200 mL 无菌水洗脱。所配制的孢子悬浮液用血球计数法测定，最终浓度为 1×10^5 孢子/mL。

1.1.2 无菌水、DNP、ATP 处理和拟茎点霉接种

预实验分别采用 0、0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 mmol/L DNP 溶液在 80 kPa 减压条件下真空渗透处理龙眼果实 5 min 后接种拟茎点霉(10^5 个孢子/mL)，并在(28±1) ℃、相对湿度 90%下贮藏，发现 0.1、0.2 mmol/L DNP 处理浓度的龙眼果实病害指数与对照果实差异不显著；0.4、0.5 mmol/L DNP 处理浓度的龙眼果实病害指数虽然与对照果实差异显著，但龙眼果实病害发生太快，不便观察和测定有关指标；而 0.3 mmol/L DNP 处理浓度的龙眼果实病害指数与对照果实差异显著，而且龙眼果实病害发生不是太快，方便观察和测定有关指标。所以，本论文正式试验 DNP 处理选择浓度为 0.3 mmol/L。ATP 处理的浓度则根据 Chen 等[4]，为 0.8 mmol/L。

从健康龙眼果实中取 150 个果实用于测定采收当天有关指标。其余 9000 个果实用 0.5%（*V*/*V*）次氯酸钠溶液浸泡消毒 10 s，无菌水冲洗 3 遍，果实沥干后随机分成 9 组（1000 个果实/ 组），之后进行以下 3 种处理：(1) 无菌水（对照处理）：随机取 1 组果实（1000 个），用无菌水在 80 kPa 减压条件下真空渗透处理 5 min；（2）DNP 处理：随机取 1 组果实（1000 个），用 0.3 mmol/L DNP 溶液在 80 kP 减压条件下真空渗透处理 5 min；（3）ATP 处理：随机取 1 组果实（1000 个），用 0.8 mmol/L ATP 溶液在 80 kP 减压条件下真空渗透处理 5 min。经过以上处理的果实取出晾干后接

种，分别用上述制备好的拟茎点霉孢子悬浮液（浓度为 10^5 个孢子/mL）浸泡接种 5 min。

上述3种处理接种之后的果实分别置于20个塑料托盘内（每个塑料托盘装果 50 个），每个塑料托盘用 0.015 mm 厚的聚乙烯薄膜袋密封包装，之后在 (28±1) ℃、相对湿度 90%下贮藏。上述每一处理重复 3 次试验。贮藏期间每天从每一处理的每个重复试验中随机取样 3 袋（共 150 个果实），观察果实病害和果皮褐变情况并测定生理生化指标。

1.2 指标测定

1.2.1 果实病害指数

每次随机取 50 个果实，按照 Chen 等[1]和陈艺晖等[11]的方法测定龙眼果实病害指数，果实病害指数=Σ（病害级数×该级果数）/（总果数×发病最重级的代表数值）。

1.2.2 果皮褐变评价

每次随机取 50 个果实，按照 Chen 等[1]和林河通等[2]的方法测定龙眼果皮褐变指数，果皮褐变指数=Σ(褐变级数×该级果数) / 总果数。

1.2.3 果皮能荷的测定

从 10 个龙眼果实中取果皮 5 g，按照 Chen 等[1]介绍的高压液相色谱法测定果皮三磷酸腺苷（ATP）、二磷酸腺苷（ADP）和一磷酸腺苷（AMP）含量，根据所得数值按照下列公式计算能荷(EC)：EC = [ATP+1/2ADP]/[ATP+ADP+AMP]

1.2.4 果实呼吸速率的测定

随机取 10 个果实，参照陈艺晖等[12]的方法，用 GXH-3051 型红外 CO_2 分析仪测定龙眼果实呼吸速率，结果以 CO_2 计，单位为 mg/(kg h)。

1.2.5 果皮 COX 活性的测定

从 10 个龙眼果实中取果皮 1 g，按照潘超美等[13]和陈京京等[14]的方法测定果皮 COX 活性，以每分钟氧化 1 微克细胞色素 C 需要的酶量为 1 个 COX 活性单位（U），结果以 U/mg protein 表示。

1.2.6 果皮 AAO 活性的测定

从 10 个龙眼果实中取果皮 1 g，按照 Pignocchi 等[15]的方法测定果皮AAO活性，以每分钟氧化1 μmol 抗坏血酸需要的酶量为 1 个 AAO 活性单位（U），结果以 U/mg protein 表示。

1.2.7 果皮 PPO 活性的测定

从 10 个龙眼果实中取果皮 1 g，按照林河通等[2]和赵云峰等[16]的方法测定果皮 PPO 活性。以每分钟在 525 nm 处的吸光值（OD_{525nm}）变化 0.01 为 1 个 PPO 活性单位（U），结果以 U/mg protein 表示。

1.2.8 果皮 NADK 活性的测定

从 10 个龙眼果实中取果皮 1 g，按照顾采琴等[17]的方法测定果皮 NADK 活性，以每分钟生成 1 μmol NADP 需要的酶量为 1 个 NADK 活性单位（U），结果以 U/mg protein 表示。

1.2.9 果皮烟酰胺腺嘌呤二核苷酸（NAD）、还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸（NADH）、烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸（NADP）、还原型烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸（NADPH）含量的测定

从 10 个龙眼果实中取果皮 1 g，按照顾采琴等[17]的方法测定果皮 NAD、NADH、NADP 和 NADPH 含量，结果以 μmol/g 表示。

1.2.10 果皮可溶性蛋白质含量的测定

按照林河通等[2]考马斯亮蓝 G250 染色法测定，以牛血清蛋白作标准曲线。

1.3 数据处理

以上所有指标测定均重复 3 次，采用 SPSS 13.0（SPSS Inc., Chicago, Illionis，USA）进行数据统计、差异显著性和相关系数分析。

2 结果与分析

2.1 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实病害指数和果皮褐变指数的影响

由图 1a 可知，在贮藏 0~1 d 内，经拟茎点霉接种的龙眼果实完好、基本无感病；之后随着贮藏时间的延长，龙眼果实病害指数快速上升。经 DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实病害指数随着贮藏时间的延长而快速增加，贮藏到第 2 d 时，其果皮表面出现明显病斑，随后几天果皮表面出现大面积病斑，且出现病斑部位的果皮软榻并伴有大量白色菌丝生长；贮藏到第 5 d 时，病斑蔓延至整个果实的外果皮，且果实表面长满菌丝。而经 ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实病害指数在整个贮藏期间均低于其它两组处理，如贮藏到第 5 d，其果实病害指数为 0.51，分别比 DNP 处理和对照果实的病害指数低 40%和 22%。统计分析表明，在贮藏 2~5 d 内，不同处理的龙眼果实病害指数差异极显著（$P<0.01$），且在整个贮藏期的同一贮藏时间，果实病害指数由大到小顺序为：DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实 > 拟茎点霉接种龙眼果实 > ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实。

由图 1b 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮褐变指数随着贮藏时间的延长呈逐渐上升的趋势。DNP

处理会加速拟茎点霉接种龙眼果实的果皮褐变，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，其果皮褐变指数显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。而 ATP 处理则能有效延缓拟茎点霉接种龙眼果实的果皮褐变，在贮藏 0~3 d 内，经 ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮褐变指数缓慢上升，贮藏 3 d 后则快速升高；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮褐变指数极显著（P<0.01）低于拟茎点霉接种龙眼果实。

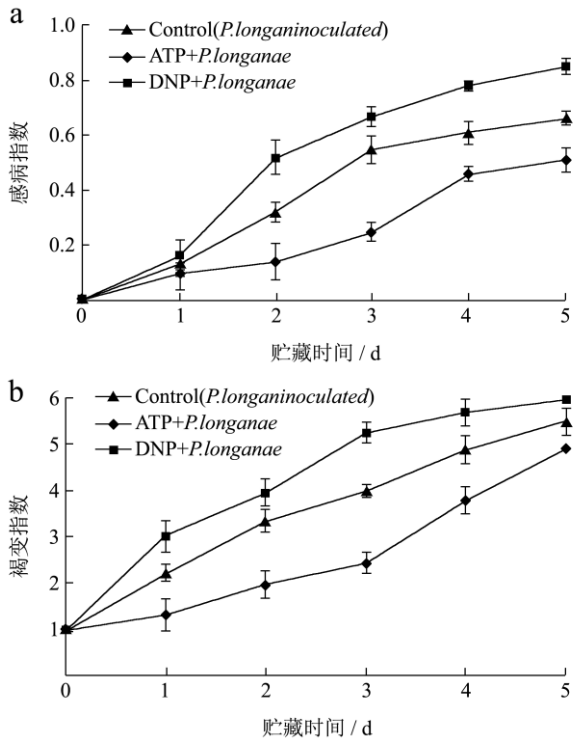


图 1 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实病害指数和果皮褐变指数的影响

Fig.1 Effects of DNP and ATP treatments on the fruit disease index and pericarp browning index in *P. longanae*-inoculated longans

上述结果表明，DNP 处理能显著促进拟茎点霉接种龙眼果实的病害发生和果皮褐变；而 ATP 处理则能有效延缓拟茎点霉接种龙眼果实的病害发生和果皮褐变。

2.2 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮能荷值的影响

由图 2 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮能荷值在贮藏 0~1 d 内缓慢上升，之后快速下降。DNP 处理会促进拟茎点霉接种龙眼果实果皮能荷值的下降，在贮藏 1~4 d 内的同一贮藏时期，其果皮能荷值显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。而 ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮能荷值在贮藏 0~1 d 内逐渐上升，之后快速下降；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮能荷值显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。上述结果表明，DNP 处理能显著降低拟茎点霉接种龙眼果实果皮的能荷值；而 ATP 处理则能有效维持较高的拟茎点霉接种龙眼果实果皮的能荷值。

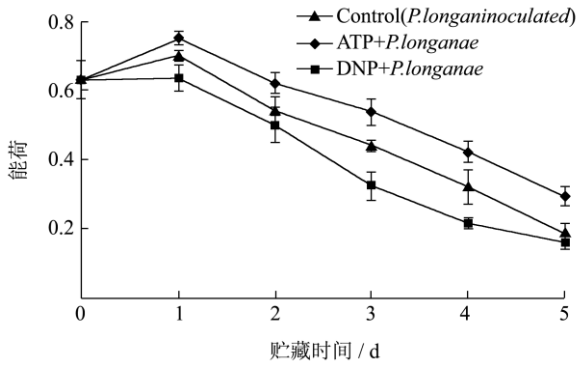


图 2 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮能荷的影响

Fig.2 Effects of DNP and ATP treatments on energy charge in the pericarp of *P. longanae*-inoculated longans

2.3 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实呼吸速率的影响

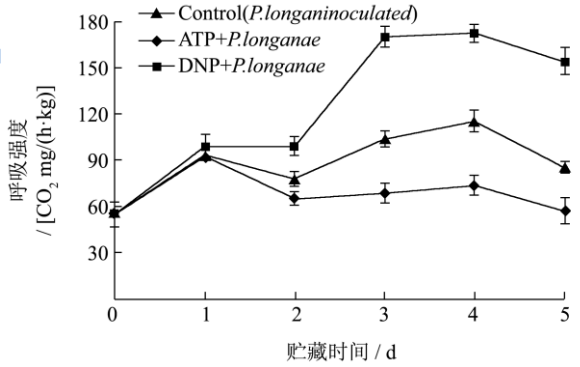


图 3 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实呼吸速率的影响

Fig.3 Effects of DNP and ATP treatments on the respiration rate of *P. longanae*-inoculated longans

由图 3 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实呼吸速率在贮藏 0~1 d 内快速上升，在贮藏 1~2 d 内缓慢下降，在贮藏 2~4 d 内较快上升，之后快速下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实呼吸速率在贮藏 0~1 d 内快速上升，在贮藏 1~2 d 内没有明显的变化，在贮藏 2~3 d 内急剧上升，贮藏 3 d 之后则略有下降；进一步的比较发现，在贮藏 2~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实呼吸速率极显著（P<0.01）高于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的

拟茎点霉接种龙眼果实呼吸速率在贮藏 0~1 d 内快速上升，与对照拟茎点霉接种龙眼果实差异不大；在贮藏 1~2 d 内，其果实呼吸速率快速下降，在贮藏 2~4 d 内变化不明显，贮藏 4 d 之后则略有下降；进一步的比较发现，在贮藏 2~5 d 内，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实呼吸速率显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。上述结果表明，DNP 处理会显著提高拟茎点霉接种龙眼果实的呼吸速率；而 ATP 处理则能有效降低拟茎点霉接种龙眼果实的呼吸速率。

2.4 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮 COX、AAO 和 PPO 活性的影响

COX、AAO 和 PPO 是植物主要的呼吸末端氧化酶。由图 4a 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 COX 活性在贮藏 0~2 d 内逐渐上升，贮藏 2 d 后则随着贮藏时间的延长而逐渐下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 COX 活性在贮藏 0~2 d 内急剧上升，贮藏至第 2 d 时达到 COX 活性高峰，之后急剧下降；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 COX 活性都高于拟茎点霉接种龙眼果实，其中贮藏第 2 天时的 COX 活性差异极显著（P<0.01）。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 COX 活性在贮藏 0~1 d 内快速下降，在贮藏 1~5 d 内没有明显的变化；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 COX 活性显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。

由图 4b 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 AAO 活性在贮藏 0~2 d 内略有上升，在贮藏 2~4 d 内没有明显的变化，贮藏 4 d 之后则逐渐下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 AAO 活性在贮藏 0~2 d 内变化不大，在贮藏 2~3 d 内急剧上升，贮藏至第 3 天时达到 AAO 活性高峰，之后急剧下降；进一步的比较发现，在贮藏 3~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 AAO 活性都显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 AAO 活性的变化趋势与拟茎点霉接种龙眼果实相似，其果皮 AAO 活性在贮藏 0~4 d 内略有下降，贮藏 4 d 后则较快下降；进一步的比较发现，在贮藏 3~5 d 内，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 AAO 活性显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。

由图 4c 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 PPO 活性在贮藏 0~1 d 内变化很小，在贮藏 1~4 d 内较快上升，贮藏 4 d 后则逐渐下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 PPO 活性在贮藏 0~1 d 内变化不大，贮藏 1 d 后急剧上升；进一步的比较发现，在贮藏 3~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 PPO 活性都显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 PPO 活性随着贮藏时间的延长而逐渐增加，而且在贮藏 3~4 d 内的同一贮藏时期，其果皮 PPO 活性显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。

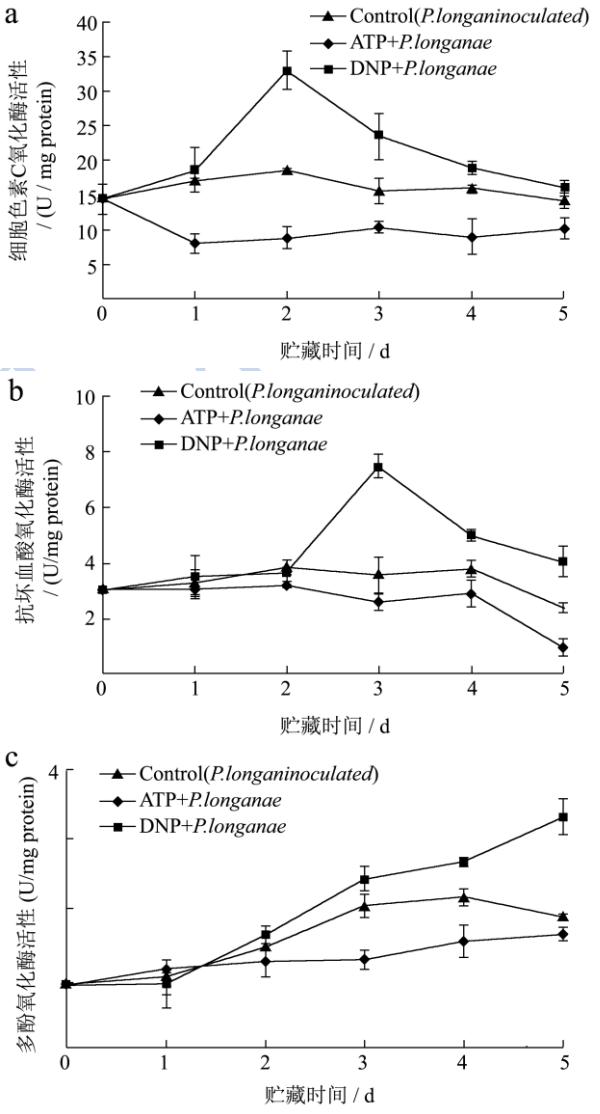


图 4 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮细胞色素 C 氧化酶(COX)、抗坏血酸氧化酶(AAO)活性和多酚氧化酶（PPO）活性的影响

Fig.4 Effects of DNP and ATP treatments on the activities of COX, AAO, and PPO in the pericarp of *P. longanae*-inoculated longans

上述结果表明，DNP 处理能提高拟茎点霉接种龙眼果实果皮 COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性；而 ATP 处理则能降低拟茎点霉接种龙眼果实果皮

COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性。

2.5 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性的影响

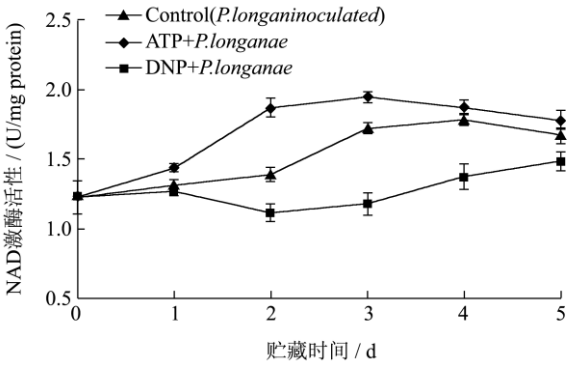


图 5 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NAD 激酶(NADK)活性的影响

Fig.5 Effects of DNP and ATP treatments on NADK activity in the pericarp of *P. longanae*-inoculated longans

由图 5 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 NADK 活性在贮藏 0~2 d 内逐渐上升，在贮藏 2~3 d 内较快上升，在贮藏 3~4 d 内略有上升，贮藏 4 d 后则逐渐下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性在贮藏 0~1 d 内变化不大，在贮藏 1~2 d 内较快下降，贮藏 2 d 后则逐渐上升；而且在贮藏 2~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性都显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性在贮藏 0~2 d 内快速上升，在贮藏 2~3 d 内略有上升，贮藏 3 d 后则逐渐下降；进一步的比较发现，在贮藏 1~3 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。上述结果表明，DNP 处理会降低拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性；而 ATP 处理则能维持较高的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADK 活性。

2.6 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NAD、NADH、NADP 和 NADPH 含量的影响

植物细胞中吡啶核苷酸主要包括 NAD、NADH、NADP、NADPH。由图 6a 可知，经接种拟茎点霉的龙眼果实果皮 NAD 含量在贮藏 0~1 d 内快速上升，贮藏至第 1 天时达到最大值，在贮藏 1~3 d 内则快速下降，在贮藏 3~5 d 内没有明显的变化。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NAD 含量在贮藏 0~1 d 内急剧上升，之后随着贮藏时间的延长而快速下降，且在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NAD 含量都显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NAD 含量在贮藏 0~1 d 内逐渐上升，在贮藏 1~4 d 内快速下降，贮藏 4 d 之后变化不大；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NAD 含量都极显著（P<0.01）低于拟茎点霉接种龙眼果实。

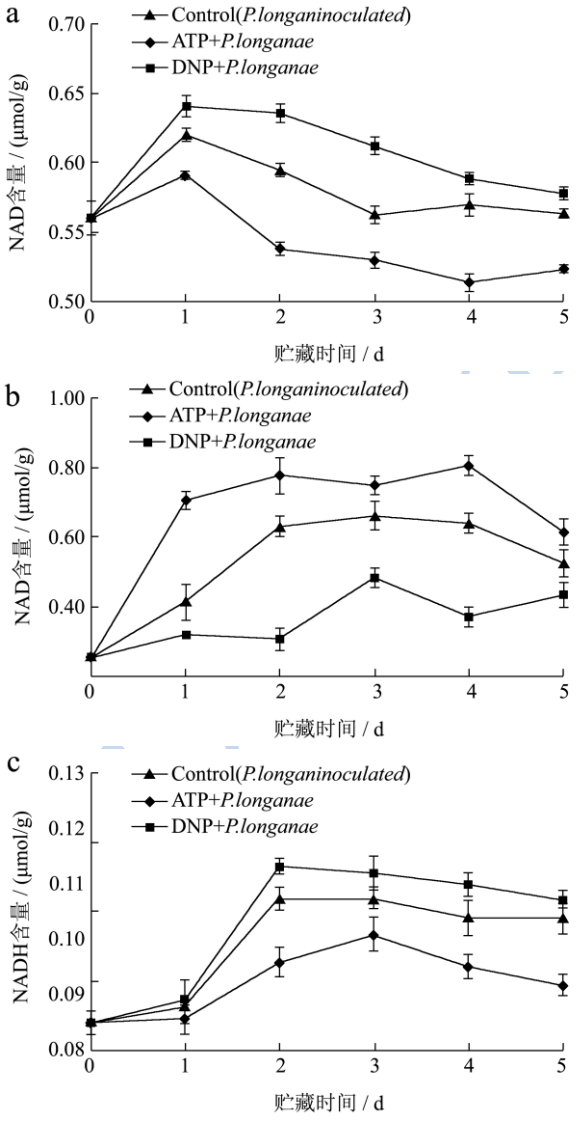
由图 6b 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 NADP 含量在贮藏 0~2 d 内快速上升，在贮藏 2~3 d 内略有上升，贮藏 3 d 之后则逐渐下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADP 含量在贮藏 0~2 d 内变化不大，在贮藏 2~3 d 内较快上升，在贮藏 3~4 d 内较快下降，贮藏 4 d 之后则略有上升；且在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADP 含量都显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADP 含量在贮藏 0~1 d 内急剧上升，在贮藏 1~2 d 内略有上升，在贮藏 2~4 d 内变化不大，贮藏 4 d 之后快速下降；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADP 含量都极显著（P<0.01）高于拟茎点霉接种龙眼果实。

由图 6c 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 NADH 含量在贮藏 0~1 d 内略有上升，在贮藏 1~2 d 内快速上升，贮藏 2 d 之后则逐渐下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADH 含量在贮藏 0~1 d 内略有上升，在贮藏 1~2 d 内急剧上升，贮藏 2 d 之后则缓慢下降；且在贮藏 2~4 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADH 含量都显著（P<0.05）高于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADH 含量在贮藏 0~1 d 内变化很小，在贮藏 1~3 d 内较快上升，贮藏 3 d 之后则较快下降；进一步的比较发现，在贮藏 2~5 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADH 含量都显著（P<0.05）低于拟茎点霉接种龙眼果实。

由图 6d 可知，经拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 NADPH 含量在贮藏 0~3 d 内缓慢上升，贮藏 3 d 之后则缓慢下降。DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADPH 含量在贮藏 0~1 d 内略有下降，在贮藏 1~3 d 内较快上升，在贮藏 3~4 d 内变化不大，贮藏 4 d 之

后则较快下降；进一步的比较发现，在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADPH 含量都低于拟茎点霉接种龙眼果实，其中贮藏至第 1 天时的果皮 NADPH 含量显著（$P<0.05$）低于拟茎点霉接种龙眼果实。ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADPH 含量在贮藏 0~2 d 内逐渐上升，在贮藏 2~3 d 内急剧上升，贮藏 3 d 之后则急剧下降；且在贮藏 1~5 d 内的同一贮藏时期，ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADPH 含量都高于拟茎点霉接种龙眼果实，其中贮藏至第 3 天时的果皮 NADPH 含量极显著（$P<0.01$）高于拟茎点霉接种龙眼果实。

上述结果表明，DNP 处理拟茎点霉接种龙眼果实能保持其较高的果皮 NAD 和 NADH 含量，降低其果皮 NADP 和 NADPH 含量；而 ATP 处理拟茎点霉接种龙眼果实则能降低其果皮 NAD 和 NADH 含量，保持其较高的果皮 NADP 和 NADPH 含量。



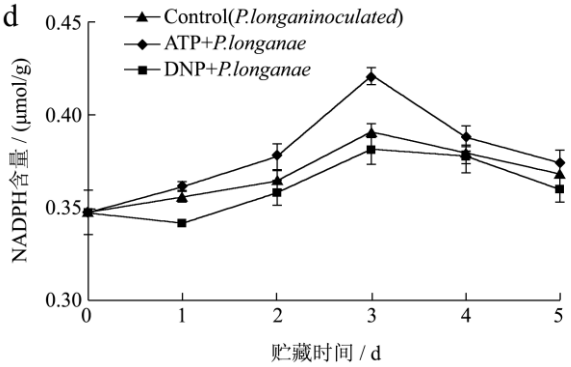


图 6 DNP 和 ATP 处理对拟茎点霉接种龙眼果实果皮果皮 NAD、NADP、NADH 和 NADPH 含量的影响

Fig.6 Effects of DNP and ATP treatments on the contents of NAD, NADP, NADH, and NADPH in the pericarp of *P. longanae*-inoculated longans

3 讨论

3.1 DNP 和 ATP 调控拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与能荷状态的关系

前人研究认为，病原菌侵染所致果蔬采后病害可能与组织能荷状态有关[1,3,5,6]。病原菌侵染果蔬等植物组织时，果蔬会对病原菌的侵染产生应激反应，会通过产生和积累植保素、活性氧等物质来抵御病原菌的侵染，而这一过程会消耗大量的能量。由于病原菌侵染需要果蔬等植物组织消耗大量能量，而果蔬组织会通过加速线粒体的运转来产生足够的 ATP 以满足能量需求。当 ATP 合成低于一定阈值时，能量亏缺会导致细胞膜的修复能力下降，最终破坏细胞结构，造成果蔬褐变，及丧失果蔬对病原菌的抗病性，导致果蔬采后病害的发生[3, 6]。DNP 是氧化磷酸化解耦联剂，可以通过破坏跨越线粒体内膜质子梯度的形成抑制 ATP 的合成。Yi 等[5, 9~10]研究发现，在荔枝霜疫霉菌（*P. litchii*）侵染所致荔枝果实采后病害和果皮褐变发生进程中，其果皮 ATP 和能荷值下降；外源 DNP 处理在促进采后荔枝果实病害和果皮褐变发生的同时，会加剧采后荔枝果实果皮 ATP 含量和能荷值的下降；而外源提供 ATP 则能有效维持较高的荔枝果皮 ATP 含量和能荷值，延缓荔枝果实采后病害的发生。认为采后荔枝果实病害和果皮褐变的发生可能与能量亏缺有关。我们前期的研究发现，在拟茎点霉（*P. longanae* Chi）侵染所致龙眼果实采后病害和果皮褐变发生进程中，其果皮 ATP 和能荷值下降，认为拟茎点霉侵染所致能量亏缺可能会加速采后龙眼果实衰老和抗病性下

降，因而促进龙眼果皮褐变和果实病害的发生[1]。本研究发现，在整个贮藏时期，经 DNP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实病害指数和果皮褐变指数都高于对照拟茎点霉接种龙眼果实（图 1a、图 1b），而果皮能荷值却低于对照拟茎点霉接种龙眼果实（图 2）；经 ATP 处理的拟茎点霉接种龙眼果实病害指数和果皮褐变指数都低于对照拟茎点霉接种龙眼果实（图 1a、图 1b），而果皮能荷值却高于对照拟茎点霉接种龙眼果实（图 2）。相关分析表明，拟茎点霉接种龙眼果实病害指数（y）（图 1a）与果皮能荷值（x）（图 2）呈显著负相关（$y=-1.289x+0.984$，$r=0.842$，$P<0.05$）。据此认为，能量亏缺在拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生中起重要作用；DNP 处理促进拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与 DNP 进一步加剧能量亏缺有关；而外源提供 ATP 延缓拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与 ATP 保持较高能荷值、减少能量亏缺有关。

3.2 DNP 和 ATP 调控拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与呼吸速率的关系

呼吸代谢是果蔬等植物组织产生能量的基本途径，植物呼吸代谢强弱受细胞中能荷状态的调控。当能荷值降低时，细胞内的 ATP 合成途径被激发，促进呼吸代谢；反之，则抑制呼吸代谢[3, 7]。果蔬等植物组织受到病原菌侵染后的呼吸作用增强，能量合成升高，以供应抵御病原菌侵染所需的能量[7~8]。本研究发现，拟茎点霉接种的龙眼果实在贮藏初期（0~1 d），其果实呼吸速率快速上升（图 3）果皮能荷值缓慢上升（图 2），但果实基本完好、无明显感病，果实病害指数低（图 1a）；而在贮藏后期（4~5 d），其果实呼吸速率（图 3）和果皮能荷值快速下降（图 2），果实感病指数快速上升，果实病害发生严重（图 1a）。据此认为，拟茎点霉侵染龙眼果实初期，呼吸作用的增强与 ATP 等能量物质的产生以抵御拟茎点霉的侵染有关；而拟茎点霉侵染龙眼果实后期，果实病害的严重发生与呼吸作用降低、ATP 等能量物质的产生减少及果实的抗病性下降有关。

本研究还发现，与对照拟茎点霉接种龙眼果实相比，DNP 处理会显著提高拟茎点霉接种龙眼果实的病害指数（图 1a）和果皮褐变指数（图 1b），降低果皮能荷值（图 2）和提高果实呼吸速率（图 3）；而 ATP 处理会显著降低拟茎点霉接种龙眼果实的病害指数（图 1a）和果皮褐变指数（图 1b），提高果皮能荷值（图 2）和降低果实呼吸速率（图 3）。据此认为，呼吸代谢在拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生中起重要作用；DNP 处理促进拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与 DNP 促进呼吸代谢有关；而外源提供 ATP 延缓拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与 ATP 降低促进呼吸代谢有关。

3.3 DNP 和 ATP 调控拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与呼吸末端氧化酶活性的关系

COX、AAO 和 PPO 是果蔬等植物组织呼吸代谢的主要末端氧化酶，其活性与呼吸代谢、病原菌侵染有关。前人研究认为，病原菌侵染会导致呼吸代谢途径和呼吸末端氧化酶活性发生变化，与健康植物组织相比，通常感病植物组织的呼吸作用增强（尤其是磷酸戊糖途径增强），COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶明显活化，其活性升高[3,7~10]。本研究发现，拟茎点霉接种的龙眼果实果皮 COX 和 AAO 活性在贮藏前期（0~2 d）上升（图 4a，图 4b），果皮 COX 活性在贮藏 2 d 之后下降（图 4a），果皮 AAO 活性在贮藏贮藏 2~4 d 内变化不明显但在贮藏 4 d 之后下降（图 4b）；而果皮 PPO 活性在贮藏初期（0~1 d 内）变化很小，在贮藏 1~4 d 内快速上升，贮藏 4 d 之后则逐渐下降但仍然维持较高 PPO 活性（图 4c）。据此认为，COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶在拟茎点霉侵染龙眼果实的不同时期起作用，其中 COX 在拟茎点霉侵染龙眼果实的 0~2 d 内起主要作用，AAO 在拟茎点霉侵染龙眼果实的 1~2 d 内起一定的作用，而 PPO 在拟茎点霉侵染龙眼果实的 1~4 d 内（尤其在 2~4 d 内）起主要作用。

本研究还发现，与对照拟茎点霉接种龙眼果实相比，DNP 处理会显著提高拟茎点霉接种龙眼果实的病害指数（图 1a）和果皮 COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性（图 4）；而 ATP 处理能有效降低拟茎点霉接种龙眼果实的病害指数（图 1a）和果皮 COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性（图 4）。据此认为，COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性变化在拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害的发生中起作用；DNP 处理促进拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与 DNP 提高 COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性有关；而外源提供 ATP 延缓拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与 ATP 降低 COX、AAO

和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性有关。

3.4 DNP 和 ATP 调控拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与吡啶核苷酸含量的关系

NAD、NADH、NADP、NADPH 植物细胞中主要的吡啶核苷酸种类，吡啶核苷酸参与植物细胞呼吸代谢的调节和电子传递等代谢过程；NADK 是催化 NAD 与 ATP 磷酸化生成 NADP 的唯一酶，NAD 在 NADK 的作用下生成 NADP；NAD 和 NADP 是植物细胞中起关键作用的氧化剂，其含量的改变会改变细胞的氧化还原状态，同时与呼吸代谢途径有关[17]。NAD 主要参与呼吸代谢的糖酵解（EMP）-三羧酸循环(TCA) 途径，而 NADP 则主要参与呼吸代谢的磷酸戊糖途径（PPP）[17]。正常健康的采后果蔬等植物组织以 EMP-TCA 作为主要的呼吸途径，而 PPP 则作为支路；但在感病植物组织中呼吸代谢明显倾向 PPP，而 EMP-TCA 呼吸代谢途径被削弱，感病植物组织中呼吸代谢 PPP 的增强可能与植物组织对病原菌侵染的应激反应有关[7, 17]。

本研究发现，经拟茎点霉接种龙眼果实的果皮 NADK 活性在贮藏 0~4 d 内快速上升（图 5），相关分析表明，拟茎点霉接种龙眼果实病害指数（y）（图 1a）与果皮 NADK 活性（x）（图 5）呈显著正相关（y=1.108x-1.307，r=0.917，P<0.05）。NADP 含量在贮藏 0~3 d 内快速上升且在贮藏 3~4 d 内仍然维持较高水平（图 4b），而果皮 NAD 含量在贮藏 1~3 d 内快速下降且在贮藏 3~4 d 内维持较低水平（图 4a）。据此认为，在拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生进程中，呼吸代谢的 PPP 增强而 EMP—TCA 的途径被削弱。

本研究还发现，与对照拟茎点霉接种龙眼果实相比，DNP 处理能有效降低拟茎点霉接种龙眼果实的果皮 NADK 活性（图 5）和果皮 NADP 含量（图 4b），但显著提高果皮 NAD 含量（图 4a）；而 ATP 处理能保持较高的拟茎点霉接种龙眼果实的果皮 NADK 活性（图 5）和果皮 NADP 含量（图 4b），降低果皮 NAD 含量（图 4a）。据此推断，DNP 处理加速拟茎点霉侵染所致采后龙眼果实病害发生的进程中，其果实呼吸代谢以 EMP-TCA 途径为主，而对拟茎点霉侵染应激反应有关的 PPP 呼吸代谢途径被削弱；ATP 处理有效延缓拟茎点霉侵染所致采后龙眼果实病害发生的进程中，其果实呼吸代谢以对拟茎点霉侵染应激反应有关的 PPP 呼吸代谢途径为主，而 EMP-TCA 呼吸代谢途径被削弱。因此认为，DNP 或 ATP 处理可以通过调控拟茎点霉侵染龙眼果实果皮的 NADK 活性而改变 NAD 和 NADP 含量，从而改变其呼吸代谢途径和呼吸代谢速率，进而调控拟茎点霉侵染所致采后龙眼果实病害的发生。

NADH 和 NADPH 分别为 NAD 和 NADP 获得电子后的还原态形式，作为电子供体进一步参与呼吸代谢的电子传递[17]；NADH、NADPH 含量高低可被分别用来评价 EMP—TCA 呼吸代谢途径和 PPP 呼吸代谢途径的强弱[18]。本研究发现，与对照拟茎点霉接种龙眼果实相比，DNP 处理能保持较高的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADH 含量（图 4c）和较低的 NADPH 含量（图 4d）；而 ATP 处理能保持较低的拟茎点霉接种龙眼果实果皮 NADH 含量（图 4c）和较高的 NADPH 含量（图 4d）。据此进一步证实，DNP 处理加速拟茎点霉侵染所致采后龙眼果实病害发生的进程中，其果实呼吸代谢以 EMP-TCA 呼吸代谢途径为主，而对拟茎点霉侵染应激反应有关的 PPP 被削弱；ATP 处理有效延缓拟茎点霉侵染所致采后龙眼果实病害发生的进程中，其果实呼吸代谢以对拟茎点霉侵染应激反应有关的 PPP 呼吸代谢途径为主，而 EMP-TCA 呼吸代谢途径被削弱。

4 结论

4.1 拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生与能荷状态、呼吸速率、呼吸末端氧化酶和 NADK 活性及 NAD、NADH、NADP、NADPH 等吡啶核苷酸含量的变化有关，认为能量亏缺、PPP 呼吸代谢途径增强、COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性变化在拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害的发生中起重要作用。

4.2 与对照拟茎点霉接种龙眼果实相比，DNP 处理会显著促进拟茎点霉接种龙眼果实病害指数和果皮褐变指数的增加，降低果皮能荷值，提高果实呼吸速率和果皮 COX、AAO、PPO 等呼吸末端氧化酶活性，降低果皮 NADK 活性，提高果皮 NAD 和 NADH 含量，降低果皮 NADP 和 NADPH 含量。认为 DNP 处理促进拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生，可能与 DNP 进一步加剧能量亏缺、削弱对拟茎点霉侵染应激反应有关的磷酸戊糖呼吸代谢途径及增强 COX、AAO 和 PPO 等呼吸末端氧化酶活性有关。

4.3 与对照拟茎点霉接种龙眼果实相比，ATP 处理能有效降低拟茎点霉接种龙眼果实病害指数和果皮褐变指数，维持较高的果皮能荷值，降低果实呼吸速率和果皮 COX、AAO、PPO 等呼吸末端氧化酶活性，提高果皮 NADK 活性，降低果皮 NAD 和 NADH 含量，

提高果皮 NADP 和 NADPH 含量。认为 ATP 处理延缓拟茎点霉侵染所致龙眼果实采后病害发生，可能与 ATP 维持较高的能荷值、增强对拟茎点霉侵染应激反应有关的磷酸戊糖呼吸代谢途径及降低 COX、AAO、PPO 等呼吸末端氧化酶活性有关。

参考文献

[1] Chen Y H, Lin H T, Jiang Y M, et al. *Phomopsis longana*e Chi-induced pericarp browning and disease development of harvested longan fruit in association with energy status [J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 93: 24-28

[2] 林河通,席玙芳,陈绍军.龙眼果实采后失水果皮褐变与活性氧及酚类代谢的关系[J].植物生理与分子生物学学报,2005,31(3):287-297
LIN He-tong, XI Yu-fang, CHEN Shao-jun. The relationship between the desiccation-induced browning and the metabolism of active oxygen and phenolics in pericarp of postharvest longan fruit [J].Journal of Plant Physiology and Molecular Biology, 2005, 31(3): 287-297

[3] Tian S P, Qin G Z, Li B Q. Reactive oxygen species involved in regulating fruit senescence and fungal pathogenicity [J]. Plant Molecular Biology, 2013, 82 (6): 593-602

[4] Chen M Y, Lin H T, Zhang S, et al. Effects of adenosine triphosphate (ATP) treatment on postharvest physiology, quality and storage behavior of longan fruit. Food and Bioprocess Technology,2015,DOI: 10.1007/s11947- 014-1462- z

[5] Yi C, Qu H X, Jiang Y M, et al. Roles of energy in senescence and disease development of harvested litchi fruit [J]. Acta Horticulturae, 2008, 804: 347-353

[6] Rawyler A, Pavelic D, Gianinazzi C, et al. Membrane lipid integrity relies on a threshold of ATP production rate in potato cell cultures submitted to anoxia [J]. Plant Physiology, 1999, 120 (1): 293-300

[7] Prusky D, Alkan N, Miyara I, et al. Mechanisms modulating postharvest pathogen colonization of decaying fruits [A]. In: Prusky D, Gullino M L (Eds). Postharvest Pathology [M]. Springer Publishing Company, New York, USA. 2010: 43-55

[8] Rojas C M, Senthil-Kumar M, Tzin V, et al. Regulation of primary plant metabolism during plant-pathogen interactions and its contribution to plant defense [J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 17

[9] Yi C, Jiang Y M, Shi J, et al. Effect of adenosine triphosphate on changes of fatty acids in harvested litchi fruit infected by *Peronophythora litchi* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 54 (3): 159-164

[10] Yi C, Jiang Y M, Shi J, et al. ATP-regulation of antioxidant properties and phenolics in litchi fruit during browning and pathogen infection process[J]. Food Chemistry. 2010, 118 (1): 42-47

[11] 陈艺晖,林河通,林艺芬,等. 拟茎点霉侵染对龙眼果实采后果皮褐变和活性氧代谢的影响[J].中国农业科学，2011, 44(23):4858-4866
CHEN Yi-hui, LIN He-tong, LIN Yi-fen, et al. Effects of *Phomopsis Longanae* Chi infection on browning and active oxygen metabolism in pericarp of harvested longan fruit [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(23): 4858-4866

[12] 陈艺晖,张华,林河通,等.1-MCP处理对杨桃果实采后生理和贮藏品质的影响[J].现代食品科技,2014,30(1):16-21
CHEN Yi-hui, ZHANG Hua, LIN He-tong, et al. Effects of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) treatment on postharvest physiology and storage quality of carambola fruits [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(1): 16-21

[13] 潘超美,陈汝民,李玲.菌根真菌感染墨兰与建兰根状茎对呼吸速率和几种氧化酶活性的影响[J].热带亚热带植物学报,2002,10(1):46-50
PAN Chao-mei, CHEN Rui-min, LI Ling. Effect of mycorrhizal infection on respiration aand activities of some oxidase in rhizome of *Cymbidium Sinense* and *C.Ensifolium* [J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2002, 10(1): 46-50

[14] 陈京京,金鹏,李会会,等.低温贮藏对桃果实冷害和能量水平的影响[J].农业工程学报,2012,28(4):275-281
CHEN Jing-jing, JIN Peng, LI Hui-hui, et al. Effects of low temperature storage on chilling injury and energy status in peach fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Enginerring, 2012, 28(4): 275-281

[15] Pignocchi C, Fletcher J M, Wilkinson J E, et al. The function of ascorbate oxidase in tobacco [J]. Plant Physiology, 2003, 132(3): 1631-1641

[16] 赵云峰,林河通,林艺芬,等.热处理延缓采后龙眼果实果皮褐变及其与酚类物质代谢的关系[J].现代食品科技，2014, 30(5):218-224
ZHAO Yun-feng, LIN He-tong, LIN Yi-fen, et al. Effect of heat treatment on browning delaying and phenolics metabolism in pericarp of harvested longan fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(5): 218-224

[17] 顾采琴,朱冬雪,李棋.草莓果实采后NAD激酶活性与NAD(H)、NADP(H)含量及活性氧代谢的关系[J].中国农业科学,2007,40(2):352-357

GU Cai-qin, ZHU Dong-xue, LI Qi. Relationship between NAD Kinase and NAD(H), NADP(H) and active oxygen during ripening and senescence of postharvested strawberry fruit [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(2): 352-357

[18] Blenkinsop R W, Copp L J, Yada R Y, et al. Effect of chlorpropham (CIPC) on carbohydrate metabolism of potato tubers during storage [J]. Food Research International, 2002, 35: 651-655

现代食品科技