

外源 NO 调控红松幼苗光合作用与抗氧化酶活性的浓度效应

李德文¹, 付金颖¹, 魏晓雪^{2*}, 唐中华¹, 祖元刚¹

(1. 东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省科学院火山与矿泉研究所, 黑龙江五大连池 164155)

摘要 [目的] 探讨不同浓度外源 NO 对红松针叶光合色素和抗氧化酶活性的影响。[方法] 以 3 年生红松针叶为试验材料, 测定喷施不同浓度外源 NO 供体亚硝酸钠溶液(0、0.01、0.10、0.50 和 1.00 mmol/L SNP) 处理下其光合色素含量、抗氧化酶活性、丙二醛(MDA)含量和过氧化氢(H₂O₂)含量等生理指标。[结果] 净光合速率(*Pn*)、蒸腾速率(*Tr*)和呼吸速率(*Rd*)会随着 SNP 浓度增加而增加, 分别在 SNP 喷施 0.10 和 0.50 mmol/L 时达到最大值; 喷施 0.01 mmol/L SNP 有效提高了气孔导度(*Gs*)、胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)、光合色素含量、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性, 而超氧化物歧化酶(SOD)活性、H₂O₂ 含量和 MDA 含量在喷施外源 NO 时显著降低。[结论] 施加适量浓度外源 NO 会显著增加光合参数、光合色素含量、CAT 活性、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性、POD 活性, 但施加外源 NO 降低了 SOD 活性、H₂O₂ 含量、MDA 含量, 从而降低了细胞膜脂过氧化程度, 减轻了红松幼苗受到的伤害。

关键词 红松; 外源 NO; 生理指标

中图分类号 S718 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)26-0004-03

Concentration Effects of Exogenous Nitric Oxide on Photosynthesis and Activity of Antioxidant Enzymes in *Pinus koraiensis* Seedlings
LI De-wen¹, FU Jin-ying¹, WEI Xiao-xue^{2*} et al (1. Key Laboratory of Forest Plant Ecology of the Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040; 2. Institute of Volcanoes and Mineral Springs, Heilongjiang Academy of Science, Wudalianchi, Heilongjiang 164155)

Abstract [Objective] To discuss the concentration effects of exogenous nitric(NO) oxide on photosynthesis and activity of antioxidant enzymes in *Pinus koraiensis* seedlings. [Method] 3-year-old *P. koraiensis* seedlings were treated with sodium nitroprusside (SNP), a NO donor, at 5 different concentrations (0, 0.01, 0.10, 0.50 and 1.00 mmol/L). The contents of photosynthetic pigment, malondialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide (H₂O₂), and the activity of antioxidant enzymes in the needles of *P. koraiensis* were determined. [Result] Net photosynthetic rate (*Pn*), transpiration rate (*Tr*) and respiration rate (*Rd*) increased with the increase of SNP concentration, and reached a maximum when SNP concentration was 0.10 or 0.50 mmol/L. Spraying 0.01 mmol/L SNP would significantly increase stomatal conductance (*Gs*), intercellular CO₂ concentration (*Ci*) and photosynthetic pigment content, the activity of catalase (CAT) and peroxidase (POD). On the contrary, the activity of superoxide dismutase (SOD), H₂O₂ and MDA content would decrease after the spraying of SNP. [Conclusion] Appropriate concentration of nitric oxide (NO) can significantly increase photosynthetic parameters, photosynthetic pigment content, CAT, APX and POD activity. Spraying SNP can decrease SOD activity, H₂O₂ and MDA content. Exogenous NO can relieve the membrane lipid peroxidation of *P. koraiensis* seedlings to reduce the damage to the seedlings.

Key words *Pinus koraiensis*; Exogenous nitric oxide; Physiological indicators

NO 是一种广泛存在于生物体的气体活性分子, 既是氧化还原信号分子和毒性分子, 也是一种活性氮(RNS)。NO 在植物体内主要通过一氧化氮合成酶(NOS)和硝酸还原酶(NR)催化形成^[1]。NO 对植物的种子萌发、根和叶的生长发育、植物组织的成熟和衰老、呼吸作用、光形态建成、胁迫响应、逆境诱发的细胞程序死亡等生理过程均有调节作用, 尤其是在植物抗病防御反应中的作用引人注目, 研究表明 NO 在植物细胞中是一种重要的第二信使^[2]。Beligni 等^[3]认为植物 NO 具有双重生理效应, 高浓度 NO 具有生理毒性, 低浓度 NO 具有保护作用^[4], 并与细胞的微环境和 NO 的实际浓度有关, 如高浓度 NO 抑制玉米^[5]、豌豆^[6-7]、水稻^[8]等植物细胞的生长, 低浓度 NO 则促进细胞生长。

红松(*Pinus koraiensis*)是我国寒温带针阔混交林的主要树种, 以红松为主的针阔叶混交林是东北地区最具有代表性的森林类型。红松以树干通直高大、材质优良、寿命长、生产力高、种子营养丰富等独特的用途和价值而闻名于世, 是目

前世界上珍贵而稀有的多用途树种之一^[9]。由于天然红松林分布的局限性, 人们对其的研究主要集中在俄罗斯、日本和韩国。目前, 红松的研究主要集中在红松个体、群落生态及天然阔叶红松林生态系统合理经营和恢复等方面^[10-11], 对红松生理学的研究很少, 主要集中在干旱、地温、大气 CO₂ 浓度升高等环境因子对红松生理生化指标的影响方面, 但关于外源物质对红松生长及生理影响的研究较少。鉴于此, 笔者选用不同浓度的 NO 供体 SNP 对红松幼苗进行处理, 探讨了不同浓度的外源 NO 信号对红松针叶光合特性和生理指标的影响, 明确了外源 NO 优化调控红松幼苗生长的最适浓度。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验于 2010 年 4 月 21 日开始, 在东北林业大学森林植物生态学重点实验室温室进行。试验材料为 3 年生红松幼苗, 于帽儿山林场苗圃区移取, 并采用盆栽的方式在东北林业大学森林植物生态学教育部重点实验室的温室内进行日常管理和培育。供试土壤的基本理化性状为: pH 5.6、有机质 25 g/kg、速效氮 200 mg/kg、速效磷 90 mg/kg、速效钾 200 mg/kg。

1.2 材料 试剂包括亚硝酸钠(SNP, 上海国药集团)。仪器包括 LI-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司)和 UV-2550 型紫外可见分光光度计(日本岛津公司)。

基金项目 中央高校基本科研业务费专项(2572015CA03); 国家自然科学基金项目(31000133); 黑龙江省科学院青年创新基金项目。

作者简介 李德文(1981-), 女, 黑龙江鸡西人, 副教授, 博士研究生, 从事植物逆境生理生态学研究。* 通讯作者, 副研究员, 博士研究生, 从事植物生态学研究。

收稿日期 2016-07-08

1.3 试验设计 将红松幼苗随机分为 5 组,每组 50 株,外源 NO 供体采用硝普钠,先用蒸馏水配制 1.00 mmol/L 的母液,4 ℃ 保存,用时按试验所需的浓度进行稀释。试验设 5 个处理:CK(对照,0 mmol/L SNP)、T₁(0.01 mmol/L SNP)、T₂(0.10 mmol/L SNP)、T₃(0.50 mmol/L SNP)、T₄(1.00 mmol/L SNP),CK 用 100.0 mL 清水均匀喷施于叶面,T₁、T₂、T₃、T₄ 分别使用响应浓度的 100.0 mL SNP 溶液喷施于叶面。处理 7 d 后测定各项生理指标,每个处理均随机取样,重复 3 次。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 光合参数测定。在实验室处理周期内,在晴天 9:00 ~ 11:00 选取完全展开、生长状况良好、叶位一致的叶片,使用 LI-6400 便携式光合仪,在人工红蓝光源、气温 24 ~ 27 ℃、相对湿度 50% ~ 70%、CO₂ 浓度为 400 μmol/(m²·s) 条件下测定净光合速率(*Pn*)、气孔导度(*Gs*)、胞间 CO₂ 浓度(*Ci*)、蒸腾速率(*Tr*)等各项指标,每个处理测定 5 株,每株重复测定 5 次,取平均值。

1.4.2 光合色素含量测定。参照前人的试验方法^[12-13]。取 0.05 g 样品,剪碎,加入 5.0 mL 二甲亚砜(DMSO),黑暗条件下 60 ℃ 水浴反应直至样品组织完全变白,以 DMSO 为空白,使用紫外可见分光光度计分别测定提取液在 480、649、665 nm 波长处的吸光值,计算叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素的含量。

1.4.3 H₂O₂ 含量测定。称取新鲜植物组织 0.50 g,按材料与提取剂 1:1 的比例加入 4 ℃ 预冷的丙酮和少许石英砂,研磨成匀浆,3 000 r/min 离心 10 min,弃残渣,上清液即样品提取液。吸取样品提取液 1.0 mL,向试管中分别加入 0.1 mL 5% 硫酸钛和 0.2 mL 浓氨水,待沉淀形成后,3 000 r/min 离心 10 min,弃上清液。沉淀用丙酮反复洗涤 3 ~ 5 次直至去

除植物色素,向洗涤后的沉淀中加入 2 mol/L 硫酸 5.0 mL,待沉淀完全溶解后,将其转入 10.0 mL 容量瓶中,并用少量蒸馏水多次冲洗离心管,合并洗涤液后定容,测定 415 nm 波长处吸光值^[14]。

1.4.4 抗氧化酶活性测定。取 0.50 g 叶片,液氮研磨,参照文献^[15]方法测定抗氧化酶活性。过氧化氢酶(CAT)活性:以 1 min A₂₄₀ 的变化值表示酶活性大小;抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性:以 1 min A₂₉₀ 的变化值表示酶活性大小;过氧化物酶(POD)活性:以 1 min A₄₇₀ 的变化值表示酶活性大小;超氧化物歧化酶(SOD)活性:以单位时间内抑制氮蓝四唑光化还原 50% 为 1 个酶活性单位(U)。

1.4.5 丙二醛(MDA)含量测定。称取 0.50 g 样品于预冷的研钵中,液氮研磨,转入离心管中,加入预冷的 10% 三氯乙酸(TCA)5.0 mL 提取,混合液在 4 ℃ 下 4 000 r/min 离心 10 min,合并上清液^[16]。从玻璃试管中吸取 3.0 mL 上清液,与 2.0 mL 0.5% TBA 混匀,加塞。混合液在沸水浴中煮沸 15 ~ 30 min(出现气泡开始计时),迅速放入冷水中冷却,8 000 r/min 离心 15 min。取上清液测定 532、450、600 nm 波长处吸光值,空白为 0.5% 的 TBA。

1.5 数据处理 应用 SPSS 和 Excel 软件进行数据分析,并采用单因素方差分析检验各处理组间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 SNP 对红松针叶光合参数的影响 由表 1 可知,不同浓度 SNP 处理对 *Pn*、*Gs*、*Ci* 和 *Tr* 的影响不同。*Pn*、*Tr* 最大值出现在 0.10 mmol/L 浓度 SNP 处理,*Ci*、*Gs* 最大值出现在 0.01 mmol/L 浓度 SNP 处理。与对照相比,低浓度 SNP(≤0.50 mmol/L)显著提高了 *Pn*、*Gs*、*Tr*;高浓度 SNP(≥0.50 mmol/L)显著提高了 *Rd*。

表 1 不同浓度 SNP 对红松幼苗 *Pn*、*Gs*、*Ci*、*Tr* 和 *Rd* 的影响

Table 1 Effects of different concentrations of SNP on the *Pn*, *Gs*, *Ci*, *Tr* and *Rd* of *P. koraiensis* seedlings

处理 Treatment	<i>Pn</i> μmol/(m ² ·s)	<i>Gs</i> mmol/(m ² ·s)	<i>Ci</i> mmol/(m ² ·s)	<i>Tr</i> mmol/(m ² ·s)	<i>Rd</i> μmol/(m ² ·s)
CK	2.067 ± 0.18 c	0.008 0 ± 0.000 3 c	124.187 ± 7.20 d	0.435 ± 0.006 d	0.238 ± 0.022 b
T ₁	4.041 ± 0.27 b	0.012 1 ± 0.000 7 a	323.133 ± 5.04 a	0.668 ± 0.013 b	0.223 ± 0.015 b
T ₂	8.123 ± 0.38 a	0.009 5 ± 0.000 4 b	250.223 ± 2.46 b	0.726 ± 0.018 a	0.271 ± 0.008 b
T ₃	4.538 ± 0.17 b	0.009 2 ± 0.000 5 b	246.733 ± 7.71 b	0.550 ± 0.011 c	0.476 ± 0.035 a
T ₄	2.488 ± 0.12 c	0.007 9 ± 0.000 2 c	141.340 ± 5.49 c	0.438 ± 0.003 d	0.468 ± 0.026 a

注:同列数据后不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

表 2 不同浓度 SNP 对红松幼苗针叶光合色素的影响

Table 2 Effects of different concentrations of SNP on photosynthetic pigment content in the needles of *P. koraiensis* seedlings

处理 Treatment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content//mg/g	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content//mg/g	叶绿素 a/b Ration of chlorophyll a to chlorophyll b	类胡萝卜素含量 Carotenoid content//mg/g	总叶绿素含量 Total chlorophyll content//mg/g
CK	1.127 ± 0.096 b	0.423 ± 0.032 b	2.66	0.185 ± 0.017 b	1.549 ± 0.018 b
T ₁	2.215 ± 0.703 a	0.691 ± 0.120 a	3.21	0.418 ± 0.142 a	2.906 ± 0.813 a
T ₂	1.116 ± 0.071 b	0.418 ± 0.024 b	2.67	0.201 ± 0.015 b	1.564 ± 0.095 b
T ₃	0.954 ± 0.162 b	0.355 ± 0.047 b	2.68	0.146 ± 0.023 b	1.309 ± 0.209 b
T ₄	0.899 ± 0.027 b	0.334 ± 0.009 b	2.69	0.145 ± 0.006 b	1.233 ± 0.019 b

注:同列数据后不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

2.2 不同浓度 SNP 对红松针叶光合色素的影响 由表 2 可知,不同浓度 SNP 处理红松幼苗 7 d 后,光合色素含量在 SNP 浓度为 0.01 mmol/L 时最高,在 1.00 mmol/L 时最低。T₁ 处理与其他处理组差异显著,而其他各处理组之间差异不显著,说明 T₁ 处理有效提高了光合色素含量。

2.3 不同浓度 SNP 对红松针叶抗氧化酶活性的影响 不同浓度 SNP 对抗氧化酶活性的影响不同(表 3),SNP 浓度为

0.01 mmol/L 时显著提高了 CAT 和 POD 活性,POD 活性为 107.441 U/(g·min),较对照提高了 130%,在 SNP 浓度为 1.00 mmol/L 时两者活性均最低。在 SNP 浓度为 0.10 mmol/L APX 活性有所提高但差异不显著,SNP 浓度为 1.00 mmol/L 时显著降低了 APX 活性;不同浓度 SNP 对 SOD 活性无显著影响。

表 3 不同浓度 SNP 对红松幼苗针叶抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of different concentrations of SNP on the activity of antioxidant enzymes in the needles of *P. koraiensis* seedlings

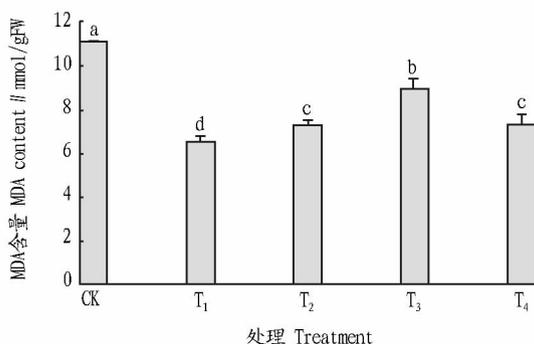
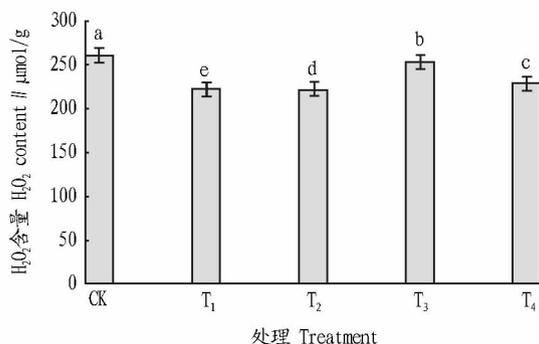
处理 Treatment	CAT 活性 CAT activity //U/(g·min)	APX 活性 APX activity //U/(g·min)	POD 活性 POD activity //U/(g·min)	SOD 活性 SOD activity //U/(g·min)
CK	1.039 ± 0.037 c	1.807 ± 0.026 ab	46.525 ± 0.639 c	77.684 ± 2.423 a
T ₁	3.787 ± 0.264 a	1.450 ± 0.078 b	107.441 ± 3.423 a	76.026 ± 3.562 b
T ₂	2.523 ± 0.094 b	2.352 ± 0.023 a	29.782 ± 0.737 d	76.855 ± 3.285 ab
T ₃	0.985 ± 0.081 c	2.215 ± 0.021 a	62.324 ± 1.705 b	75.332 ± 2.673 b
T ₄	0.804 ± 0.029 c	0.784 ± 0.008 c	20.624 ± 1.054 e	75.731 ± 1.433 b

注:同列数据后不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column mean significant differences at 0.05 level.

2.4 不同浓度 SNP 对红松针叶 H₂O₂ 和 MDA 含量的影响 与 CK 相比,不同浓度 SNP 都显著降低了 H₂O₂ 和 MDA

的含量(图 1)。



注:柱上不同字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level.

图 1 不同浓度 SNP 对红松幼苗针叶 H₂O₂ 和 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of SNP on H₂O₂ and MDA content in the needles of *P. koraiensis*

3 结论

外源施加 NO 显著提高了光合气体参数。随着施加 SNP 浓度的升高光合色素含量出现单峰现象,即先升高后降低,但是只有在浓度为 0.01 mmol/L 时与其他处理有显著差异,故提高光合色素含量的 SNP 最适浓度为 0.01 mmol/L。出现这一结果的原因可能是低浓度外源 NO 供体能够激活光合色素生物合成过程中的某些酶类。

总体来说,外源施加 NO 会提高抗氧化酶活性,降低 H₂O₂ 含量和 MDA 含量,但是对超氧化物酶活性无影响;抗氧化酶系统能够有效清除自由基和过氧化物的酶,可有效阻止活性氧的积累。

参考文献

[1] 樊怀福,郭世荣,焦彦生,等.外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响[J].生态学报,2007,27(2):546-553.

[2] JIA Y X,ZHANG L J,ZENG F L. Study of the function of ferritin in cucumber seedling leaves under oxidative stress[J]. Journal of Lanzhou Uni-

versity (Natural Sciences),2006,42(5):37-43.

[3] BELIGNI M V,LAMATTINA L. Is nitric oxide toxic or protective[J]. Trends Plant Sci,1999,4(8):299-300.

[4] 王宪叶,沈文彪,徐胡莱.外源一氧化氮对渗透胁迫下小麦幼苗叶片膜质过氧化的缓解作用[J].植物生理与分子生物学学报,2004,30(2):195-200.

[5] 张少颖,任小林,程顺昌,等.外源一氧化氮供体浸种对玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J].植物生理学通讯,2004(3):309-310.

[6] LESHEM Y Y,HARAMALY E. Plant aging: The emission of NO and effect of NO-releasing compounds on growth of pea foliage[J]. Plant Physiol,1996,148:258-263.

[7] GOUVCA C M C P,SOUZA J F,MAGALHAES C A N,et al. NO releasing substances that induce growth elongation in maize root segments[J]. Plant Growth Regul,1997,21:183-187.

[8] 杨亚平,田春娥,姜孝成,等.外源一氧化氮(NO)供体对水稻种子萌发和幼苗生长的影响[J].种子,2008(6):18-21.

[9] 胡静.红松偏雄、偏雌性类型鉴定技术研究[D].北京:中国林业科学研究院,2008:1-2.

[10] 汪金松,范秀华,范娟,等.地上竞争对林下红松生物量分配的影响[J].生态学报,2012(8):2447-2457.

[11] 王丽霞,段文标,陈立新,等.红松阔叶混交林林隙大小对土壤水分空间异质性的影响[J].应用生态学报,2013(1):17-24.

干燥,条件为装载量 100 g,真空度为 7.37 kPa,微波功率分别设定在 250、500、750、1 000 W。在此条件下,对虾仁进行干燥至水分含量为 15%,测定干制品复水后的复水比,取出后测量虾仁的水分活度。

1.2.5 检测方法。

1.2.5.1 复水比测定。将干燥后的样品浸泡在 80 ℃ 水中复水 3 min,测定复水前后质量比。

1.2.5.2 水分活度测定。采用快速水分活度仪进行测定。

2 结果与分析

2.1 微波功率对复水比的影响 从图 2 可以看出,在装载量、微波时间和真空度固定的条件下,随着微波功率的升高,干燥后的虾仁复水比呈现上升趋势。这是因为功率越高,微波产生的热量能量越高,组织收缩越小,产品越疏松多孔,但过高的微波功率会导致物料温度升高,肌原纤维蛋白质会发生很大的结构变化,甚至引起分解,特别在肌球蛋白重链上显著出现,造成复水比降低^[4]。因此,微波功率并不是越高越好。所以该试验中微波功率为 500 W 时,复水比相对较高。

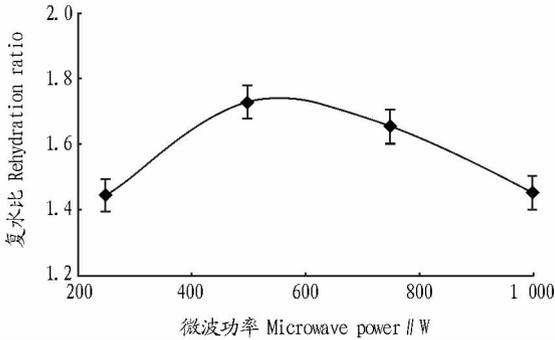


图 2 微波功率对复水比的影响

Fig. 2 Effects of microwave power on the rehydration ratio

2.2 微波功率对水分活度的影响 由图 3 可以看出,当微波功率小于 500 W 时,随着微波功率的增加干燥后虾仁的水分活度随之增加,这是因为微波对肌肉组织的破坏作用,使得结合水与组织的结合牢固程度降低,从而使物料的水分活度变大;但是较大的微波功率使得物料内部组织状态皱缩,部分水分子被“锁住”,从而使水分活度降低。

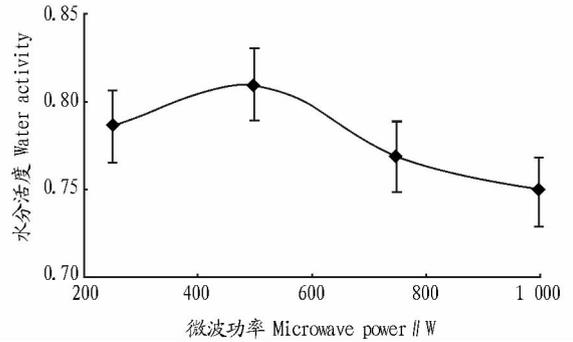


图 3 微波功率对水分活度的影响

Fig. 3 Impacts of microwave power on the water activity

3 结论与讨论

真空微波干燥的微波功率、预干燥时间对对虾的品质有一定影响。李文盛等^[5]通过对南美白对虾虾仁的真空微波干燥试验,得出了真空微波干燥对虾仁品质的影响规律。当真空微波干燥的微波功率较大时,对虾仁原有的组织破坏越大;预干燥时间对复水比和水分活度都有一定的影响,随着预干燥时间的增加,虾仁的弹性减小;随着装载量的增加,虾仁的复水比越大,但是装载量对虾仁的弹性几乎没有影响。通过混合正交试验得到最适宜的干燥条件为微波功率 500 W,预干燥时间 20 min,装载量 100 g。

综合上述,随着微波功率的增加,虾仁的复水比先升高,然后逐渐减小逐步趋于稳定;当微波功率增加时,干燥后样品的水分活度先升高后降低。由此可以看出,微波功率对干燥后样品的品质是有影响的,可以为真空微波干燥其他水产品提供借鉴。

参考文献

- [1] 张国琛,毛之怀,牟晨晓,等.微波干燥扇贝柱的物理和感官特性研究[J].农业工程学报,2004(3):141-144.
- [2] 张常松,张良,刘书成,等.微波真空干燥纹巴非蛤肉工艺的研究[J].广东海洋大学学报,2010(3):95-98.
- [3] 赵伟,杨瑞金,谢乐生,等.南美白对虾虾仁微波真空干燥规律的研究[J].食品与发酵工业,2010(7):58-61,66.
- [4] 何学连.白对虾干燥工艺的研究[D].无锡:江南大学,2008.
- [5] 李文盛,孙金才,桑卫国.真空微波干燥对南美白对虾虾仁品质的影响[J].食品科技,2015(9):154-158.

(上接第 6 页)

- [12] GAO Q,ZHANG L X. Ultraviolet-B-induced oxidative stress and antioxidant defense system responses in ascorbate-deficient vte1 mutants of *Arabidopsis thaliana* [J]. Journal of plant physiology, 2008, 165 (2): 138-148.
- [13] WANG C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests[J]. Forest ecology and management, 2006, 222:9-16.

- [14] PATTERSON B D, MACRAE E A, FERGUSON B. Estimation of hydrogenperoxide in plant extract using titanium(IV)[J]. Analytical biochemistry, 1984, 139(2): 487-492.
- [15] JIANG M Y,ZHANG J H. Water stress-induced abscisic acid accumulation triggers the increased generation of reactive oxygen species and up-regulates the activities of antioxidant enzymes in maize leaves[J]. Journal of experimental botany, 2002, 53(379): 2401-2410.
- [16] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.