

生物标志物在水产品检测中的应用

张晓梅*, 何京澄, 张鸿伟, 王凤美, 鲍蕾

(山东出入境检验检疫局检验检疫技术中心, 青岛 266001)

摘要: 水产品检测是保障水产品质量安全的重要手段。与传统的有毒有害物质化学检测方法相比, 生物标志物检测方法在关于有毒污染物对生物体健康的影响方面可以给出更完全的信息, 具有较高的灵敏度和可靠性。生物标志物已广泛应用于医学、环境科学、毒理学等学科研究, 成为不同领域的研究热点。本文介绍了利用不同生物标志物进行水产品质量安全检测的原理及方法, 综述了乙酰胆碱酯酶(AChE)、腺苷三磷酸酶(ATPase)、谷胱甘肽硫转移酶(GSTs)、抗氧化酶、细胞色素 P450、金属硫蛋白(MT)、热激蛋白 HSP70、卵黄蛋白原(VTG)和DNA损伤等多种生物标志物在水产品检测中的应用及范围, 分析了其对不同种类污染物的敏感性及其特异性, 并对生物标志物在检测领域中的应用进行了展望。

关键词: 生物标志物; 水产品; 化学污染物; 检测

The application of biomarkers in aquatic products detection

ZHANG Xiao-Mei*, HE Jing-Cheng, ZHANG Hong-Wei, WANG Feng-Mei, BAO Lei

(Technical Center of Shandong Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Qingdao 266001, China)

ABSTRACT: Aquatic detection is an important method to ensure the safety of aquatic products quality. Biomarker detection methods can give more information about the impact of toxic pollutants on the health of an organism compared with the traditional chemical detection methods, and have a higher sensitivity and reliability. Biomarkers have been widely used in medicine, environmental science, toxicology and other academic research, and have become a hot topic in different fields. This paper introduced the different principles of biomarkers, reviewed acetyl cholinesterase, adenosine triphosphate, glutathione S-transferase enzymes, antioxidant enzyme, cytochrome P450, metallothionein heat shock protein HSP70, vitellogenin, DNA damage and other biomarkers in the aquatic products detection, analyzed the sensitivity and specificity on different kinds of pollutants, and discussed the future application of biomarkers in the detection field.

KEY WORDS: biomarker; aquatic product; chemical pollutants; detection

1 引言

我国是水产品生产大国, 同时也是消费大国, 水产品的质量安全不仅关系着我国人民的生活健康, 也影响着我国水产品的进出口贸易。随着农、兽药的滥用及环境污染的日益加剧, 生物体持续暴露在多种污染物交叉的环境中,

造成了水产品遭受农残、兽残、重金属、微生物、持久性环境污染物等多种污染物同时污染的现象。目前, 对水产品中有毒有害物质的常规检测手段一般是化学方法, 包括提取、净化、气相色谱或液相色谱及各种质谱等大型仪器检测步骤, 这些方法需要用到大量有机试剂和大型仪器, 且不同种类污染物的前处理方法不一样, 易造成环境污染

基金项目: 山东出入境检验检疫局科技计划项目(SK201214)、质检公益项目(201510036-01)

Fund: Supported by the Scientific and Technological Project of Shandong Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau (SK201214) and the Commonweal Project of Inspection and Quarantine (201510036-01)

*通讯作者: 张晓梅, 工程师, 主要研究方向为食品安全检测。E-mail: sdsyw1@163.com。

*Corresponding author: ZHANG Xiao-Mei, Engineer, Technical Center of Shandong Entry-Exit Inspection & Quarantine Bureau, No.70, Qutangxia Road, Shinan District, Qingdao 266002, China. E-mail: sdsyw1@163.com

并增加检测成本。此外, 常规的化学检测方法只能对已知有毒有害目标物进行检测, 并且常常无法检测被生物体吸收代谢转化的系列次级代谢产物, 这会增加漏检某种未指定目标物甚至未知有毒有害物质的风险。

生物标志物(biomaker)是利用生物体暴露于亚致死剂量的有毒化合物中发生异常变化的信号指标, 包括生物体生理、生化、免疫、细胞、分子水平的改变来进行生物效应的评估^[1]。与生物体内富集的有毒有害物质的化学测定相比, 生物标志物在关于有毒污染物对生物体健康的影响方面可以给出更完全的信息, 具有更高的灵敏度和可靠性。随着研究的不断深入, 生物标志物已广泛应用于医学、环境科学、毒理学等领域, 用来判断生物是否暴露于某些环境因素中(如有毒化学品、微生物等), 生物标志物已经成为不同领域关注的研究热点^[2-4]。本文对几种常见的生物标志物在水产品检测中的应用进行了综述, 介绍了每种生物标志物的作用机制, 分析了每种生物标志物对不同种类污染物的敏感性及其特异性, 并对其后续研究应用进行了展望。

2 生物标志物特点及分类

生物标志物这一概念首次出现于美国国家研究委员会(NRC)在 1983 年出版的红皮书《联邦政府风险评估》中^[5]。其一般具有如下特点: 敏感性(对于环境污染物具有较高的敏感性)、稳定性(能与环境污染物快速发生反应, 并具有一定的稳定时间)、相关性(能够与高级生物学效应如生长、繁殖等联系起来)、实用性(能够适应于野外)、简单易行(技术应该易于掌握)以及预警性(能够对生物的严重性伤害提供早期预警)。筛选和利用敏感性强、特异性高、操作简便和对生物损伤性低的生物标志物, 用于早期预测环境及其他有害因素对机体的可能损害, 评价其危险度, 从而提出有效的干预措施, 是生物标志物研究的主要目标^[2,6]。

生物标志物是阐明毒物接触与健康损害之间相互关系的重要工具, 根据功能可划分为三大类: 接触(暴露)标志物(biomarker of exposure)、效应标志物(biomarker of effect)、敏感性标志物(biomarker of susceptibility)^[7]。但三者之间并无严格的界限, 同一种标志物在一种情况下作为接触生物标志物, 而在另一种情况下则可能可作为效应生物标志物。接触(暴露)标志物是用来检测生物体暴露在污染物中而引发的某类生化反应, 或该生化反应的产物。效应标志物是用来检测生物体内某一内源性成分, 该内源性成分反应了生物体的功能变化。敏感性标志物用于指示个体之间机体对环境因素影响相关的响应差异, 与个体免疫功能差异和靶器官有关^[8-10]。

3 生物标志物在水产品检测中的应用

3.1 乙酰胆碱酶

乙酰胆碱酶(AChE)在神经冲动传递过程中起着重要

的作用, 通过催化乙酰胆碱水解为胆碱和乙酸传递突触信息, 是胆碱神经系统最重要的功能酶之一。AChE 上拥有与有机磷、氨基甲酸酯类化合物的作用位点, 当这两类化合物与 AChE 结合后, 会造成酶催化部位的磷酸化与氨基甲酰化, 使其对乙酰胆碱的乙酰化作用无法进行, 从而破坏正常的神经传导过程。以乙酰胆碱酶的活性作为标志物检测有机磷农药的毒性作用早在 19 世纪 60 年代初就被广泛接受。因此在生物体脑、血液或其他组织里的乙酰胆碱酶活性已经成为有机磷和氨基甲酸酯类毒物暴露和毒性效应的生物标志物。通常认为, 对乙酰胆碱酶活性抑制达到 20% 以上则证明暴露作用的存在, 达到 50% 以上的活性抑制则表明对生物的生存有危害。宋燕华等^[11]以乙酰胆碱酶为生物标志物检测钱塘江野生鲫鱼有机磷农药暴露情况, 结果表明钱塘江部分区域已被有机磷农药污染而导致了野生鲫鱼的乙酰胆碱酶活性抑制。吕林兰等^[12]研究了马拉硫磷对沙蚕体内的乙酰胆碱酶活性抑制作用。实验表明, 马拉硫磷在 0.0018~9 mg/L 时有抑制作用, 而且暴露时间越长, 抑制率越高。Xuereb 等^[13]研究了毒死蜱以及灭多虫对沟虾的乙酰胆碱酶的抑制作用, 结果表明沟虾的摄食率及运动损伤均受到了影响。大量研究表明, AChE 是用于检测有机磷最敏感、最特异的生物标志物。

3.2 腺苷三磷酸酶

腺苷三磷酸酶是细胞膜或细胞质内将腺苷三磷酸(ATP)催化分解为腺苷二磷酸(ADP)和无机磷酸, 同时释放出能量的一类酶, 简称 ATP 酶。反应释放出的能量用于生物体的生命活动。

ATP 酶作为生物标志物可用来检测水产品受重金属物质的污染的情况。有研究表明, 重金属 Pb 能够抑制印度对虾后期幼体 ATP 的活性^[14]。而含有 Ag 和 Cr 的染毒液对翡翠贻贝体内的 ATP 酶受到明显抑制^[15]。ATP 酶不仅能够用来指示水产品受重金属污染的情况, 还能用来指示其他污染物的污染情况, 如表面活性剂、印染工业废水、石油化工废水等等。Cotou 等^[16]研究发现基于表面活性剂的消油剂对卤虫幼体 ATP 酶的活性的刺激可以用于指示该消油剂的毒性胁迫。但由于 ATP 酶活性能够受到多种环境污染物的抑制, 因此在进行试验时必须充分考虑影响因素。

3.3 谷胱甘肽硫转移酶

谷胱甘肽硫转移酶(GSTs)是生物体内一组多功能同工酶, 其主要作用是催化某些内源性或外来有害物质的亲电基团与还原性谷胱甘肽反应, 增加其疏水性, 使其更容易通过细胞膜而排出体外, 因此它在生物体受到杀虫剂、农药、重金属、化学致癌剂等危害时起解毒和抗氧化的功能从而保护生物体。

GSTs 对许多外源化合物及其代谢产物起作用, 像致癌剂、突变剂、农药、药物、抗生素等都可以是 GSTs 的

作用底物^[17]。Chen 等^[18]研究发现厦门岛周边采样点的僧帽牡蛎消化腺和鳃中 GSTs 的活性与整个组织石油碳氢化合物的含量有很好的相关性。多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)等有机物对 GSTs 的活性也具有一定影响,研究发现不同水生生物在经过 PAHs 暴露后,肝脏内的 GSTs 活性都有明显升高。金属离子对 GSTs 活性也具有诱导作用。刘慧等^[19]研究了水中 Cu^{2+} 离子浓度对水生生物 GSTs 的影响,结果表明,当 Cu^{2+} 离子浓度明显小于我国渔业水质标准 0.01 mg/L 时,就对 GSTs 产生了明显诱导,这表明 GSTs 对 Cu^{2+} 极为敏感,是指示 Cu^{2+} 离子污染极好的生物标志物。Yadwad VB^[20]发现暴露于硫丹中的螃蟹,在 48 h 后其肝胰脏 GST 开始活性升高,在 96 h 和 192 h 之间表现出最大活性,认为 GSTs 可以作为指示硫丹的生物标志物,也有研究发现经林丹暴露后的淡水蚌的角质层中 GST 活性升高了 70%^[21]。尹大强等^[22]研究了有机氯农药林丹和菊酯类农药氯菊酯对钩虾 GSTs 的活性影响,经统计分析认为这两种农药对钩虾的 GST 活性都有较高的剂量效应关系。Davies PE^[23]研究发现将三种不同的淡水鱼 *S.gairdneri*, *G.maculatus*, *G.truttaceus* 暴露于百菌清中 96 h 后,肝 GST 活性有显著升高,鲶鱼暴露于百菌清中 72 h 后,其鳃 GST 活性也升高^[24]。

3.4 抗氧化酶

在生物长期的进化过程中,由于对抗环境系统中的各种环境因素的变化,如环境污染、环境突变所引起的过量活性氧(ROS)所造成的蛋白质变性、DNA 复制错误、生物膜损伤等危害,维持体内平衡而形成了一套完整的抗氧化防御体系。此体系分为非酶系统和酶系统,抗氧化酶则是此体系的重要组成部分。抗氧化酶能够被环境中的污染物诱导或抑制,从而成为检测环境污染物的生物标志物。

抗氧化酶的作用机制主要分为 2 个方面:(1) 催化简单抗氧化剂,如谷胱甘肽还原酶(GR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)和单脱氢抗坏血酸还原酶(MDHAR);(2) 与 ROS 相互作用的酶,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、非特异性过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等^[25]。

抗氧化酶作为生物标志物已经得到了广泛的研究,并取得了一定的研究成果。陈琳琳等^[26]研究了汞和硒暴露对紫贻贝抗氧化酶系统的影响,结果表明汞在短期内能够诱导抗氧化酶活性,然而随着暴露时间的延长则表现出明显的抑制作用,而硒能够增加抗氧化酶的活性,对汞导致的氧化损伤具有拮抗作用。闫博等^[27]研究通过将长江华溪蟹暴露于 Cd^{2+} 亚致死浓度中,发现其肝胰脏中 SOD、CAT 活性均呈现出先升高后降低的趋势,证明 SOD 和 CAT 活性能够灵敏地反映 Cd^{2+} 对水生动物的胁迫程度和毒性大小。

3.5 细胞色素 P450

对细胞色素 P450 的研究早在 50 多年前便已经开始,

而近十年才开始将细胞色素 P450 作为生物标志物的毒性以及检测性研究。P450 广泛的存在于动植物体内,其作用是将许多内源性和外源性的化学物质,尤其是对环境有害化合物存在有氧氧化代谢作用,以实现机体的解毒作用,但在代谢过程中,存在着将外来物质转化为具细胞毒性、致突变性或致癌作用更强的物质的风险^[28]。

现已有研究将鱼肝细胞色素 P4501A1 作为有机污染物的生物标志物,并且细胞色素与污染物之间存在着明显的剂量反应^[29]。Stegeman 等^[30]研究了以细胞色素 P450 作为生物标志物检测水生生物暴露在致癌物中时,致癌物的代谢过程。P Flammarion 等^[31]使用白鲑(*Ceuciscus cephalus*)中细胞色素 P4501A 作为研究 Mossele River(法国)野生鱼类对污染物的反应的生物标志物,并取得了满意的结果。

3.6 金属硫蛋白

金属硫蛋白(MT)是一类广泛存在于生物中的低分子量、富含半胱氨酸、热稳定性、可诱导型非酶蛋白^[32]。其主要生理功能有重金属解毒作用以及自由基的清除作用。当生物体暴露在重金属污染环境时,重金属进入机体内,引发 MT 的表达,使得 MT 大量和重金属结合从而减少细胞与重金属的非特异性结合,达到保护生物体的目的。因此 MT 能够作为重金属污染的生物标志物用来检测重金属污染的程度。

MT 作为重金属生物标志物的研究已经成为了相关领域的热点。柯翎等^[33]利用菲律宾花蛤的金属硫蛋白作为镉污染的检测指标,取得了满意的结果。Linde 等^[34]分别检测了污染区和未污染区中褐鳟鱼和欧洲鳊鱼肝脏 MT 含量,结果发现污染区 MT 含量明显高于未污染区,且数据具有统计学意义。Ghedira 等^[35]在实验室中利用黑鲷体内的 MT 做生物标志物检测 Cd^{2+} 和 Cu^{2+} 的浓度,发现 2 d 后黑鲷体内肝脏、鳃肾中 MT 水平均显著升高,尤其肝脏 MT 含量最高。

3.7 热激蛋白 HSP70

热激蛋白是细胞保护最保守的机制之一。在受到不良环境胁迫如重金属胁迫、有机污染物胁迫、热胁迫时,热激蛋白会大量表达,从而保护细胞不受或少受应激破坏。热激蛋白 HSP70 是由应激反应诱导产生的,因此通过 HSP70 能够指示生物体受到的环境胁迫的程度从而成为生物标志物。

3.8 卵黄原蛋白

卵黄原蛋白(VTG)是一类重要的激素类蛋白,其广泛地存在于非哺乳类性成熟的卵生雌性动物的血淋巴、脂肪体和卵中,是几乎所有卵生动物卵黄蛋白的前体,能为正在发育的胚胎提供氨基酸、脂肪、碳水化合物、维生素和微量元素等营养和功能性物质。其作为生物标志物已经得到了广泛的应用。目前,世界经济合作与发展组织已将卵

黄蛋白原作为监测环境雌激素化学物理理想的标志物^[36]。

VTG 作为生物标志物在实验室和野外都得到了广泛的应用。Codi KS 等^[37]利用鲈鱼目中血清中的 VTG 含量来检测雌激素污染情况。Asturiano 等^[38]利用野生鲑鱼种的 VTG 含量来监测其受环境污染的程度。Martín-Díaz^[39]发现雌蟹血清中的 VTG 含量与环境底泥中的污染物的浓度呈相关性。

3.9 DNA 损伤

脱氧核糖核酸(DNA)是存在于所有生物体内的遗传信息携带体。任何 DNA 的改变都能导致生物体的突变, 这种突变可能会遗传给后代, 导致物种畸形, 变异甚至灭绝。DNA 损伤包括 DNA 断裂、加合、核仁的损伤等。DNA 损伤作为生物标志物用来检测污染物暴露情况已得到了广泛研究。

在实验室中, Garman 等^[40]将海胆胚胎分别暴露于 3 种重金属溶液(As^{5+} 、 Ni^{5+} 、 Cr^{6+})中, 48 h 后, 发现海胆胚胎的畸变和 DNA 蛋白质交联率水平均有显著增加, 并且 As^{5+} 和 Ni^{5+} 两种金属浓度与交联率之间存在着相关性。Ching 等^[41]将贻贝暴露在 3 ppb 苯并芘中, 发现贻贝部分核酸出现不可逆断裂。Chang 等^[42]发现暴露在重金属 Cd^{2+} 中的水生生物可产生 DNA 损伤。经大量实验表明, 重金属、有机污染物、农药等物质都能够引起水生生物 DNA 损伤, 因此其可反映水产品受到的污染程度。

4 小结与展望

生物标记检测技术是一种快速、可靠、低成本, 用于有毒有害化学污染物初筛的有效方法。无论是在实验室, 还是在野外, 生物标志物已经开始运用到了水产品的检测当中, 逐渐成为水产品质量安全的重要检测手段之一。该技术最大的优点是无论生物体内含有何种污染物, 其含量都能够通过生物标志物的变化检测出来, 具有较高的灵敏度和可靠性。但其不足之处在于不能确定污染毒物具体种类, 只能作为初筛手段弥补化学方法检测不全面的不足; 其次, 针对不同污染物还需选择不同的合适的生物标志物种类, 这有待于更多生物标志物的发现。

目前, 生物标志物的研究方向还主要集中在发展新的生物标志物方面, 对于已知生物标志物的应用研究还亟待加强。每一种生物标志物有其各自的适用范围及特点, 多种生物标志物联合应用检测会成为有毒污染物的检测、监督、管理和风险评估的重要手段, 也是研究发展趋势。

参考文献

- [1] Goksoyr A. Biomarker responses in flounder(*Platichthys flesus*) and their use in pollution monitoring [J]. *Mar Pollut Bull*, 1999, 33(1-6): 36-45.
- [2] 刘娜. 菲律宾蛤仔(*Venerupis philippinarum*) 在苯并(a)芘胁迫下差异基因的筛选与分子生物标志物的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [3] Liu N. Selection of differential expression genes and study of molecular biomarkers of clam *Venerupis philippinarum* exposed to benzo (a) pyrene [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [4] Oost R, Beyer J, Vermeulen NPE. Fish bioaccumulation and biomarkers in environmental risk assessment: a review [J]. *Environ Toxicol Phar*, 2003, 13: 57-149.
- [5] Lake J, Gravel C, Koko GK, *et al.* Combining suppressive subtractive hybridization and cDNA microarrays to identify dietary phosphorus-responsive genes of the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) kidney [J]. *Comp Biochem Phys Part D*, 2010, 5(1): 24-35.
- [6] 庄志雄, 张桥. 分子生物标志物研究的现状与展望[J]. *中华劳动卫生职业病杂志*, 1997, 15(3): 131-133.
- [7] Zhuang ZX, Zhang Q. Prospects of molecular biomarkers [J]. *J Indus Hyg Occup Disease*, 1997, 15(3): 131-133.
- [8] WHO. IPCS Environmental Health Criteria, Vol 155: Biomarkers and risk assessment: concepts and principles [Z]. Geneva: World Health Organization, 1993.
- [9] Hulka BS, Garrett P. Influence of biomarkers on the design, methods and interpretation of epidemiologic studies [J]. *J Toxicol Environ Health*, 1993, 40(2-3): 389-396.
- [10] Cheung CCC, Zheng GJ, Li AMY. Relationships between tissue concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and antioxidative responses of marine mussels, *Perna viridis* [J]. *Aquat Toxicol*, 2001, 52: 189-203.
- [11] 叶细标, 倪为民, 傅华. 分子生物标志物及其应用[J]. *中国工业医学杂志*, 2002, 15(1): 32-34.
- [12] Ye XB, Ni WM, Fu H. The application of molecular biomarkers [J]. *Chin J Ind Med*. 2002, 15(1): 32-34.
- [13] 宋燕华, 吴惠杰, 蔡德雷, 等. 用乙酰胆碱酯酶为生物标志物反映钱塘江水环境野生鲫鱼有机磷农药暴露的研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2009, 11(19): 2957-2659.
- [14] Song YH, Wu HJ, Cai DL, *et al.* Study on cholinesterase as biomarkers in wild carp from aquatic environment of Qiantang river exposed to organophosphorus pesticide [J]. *Chin J Health Lab Tech*, 2009, 11(19): 2957-2659.
- [15] 吕林兰, 杨家新, 董学兴, 等. 马拉硫磷对双齿围沙蚕乙酰胆碱酯酶和过氧化氢酶的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(3): 431-436.
- [16] Lv LL, Yang JX, Dong XX, *et al.* Effect of malation on the activity of acetylcholinesterase and catalase of polychaete *Perinereis aibuhitensis* [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, 29(3): 431-436.
- [17] Xueare B, Lefevre E. Acetylcholinesterase activity in *Cammarus fossarum* (Crustacea Amphipoda): linking AChE inhibition and behavioural alteration [J]. *Aquatic Toxicol*, 2009, 94(2): 114-122.
- [18] Satyavathi C, Bao YP. Inhibition of Na^+-K^+ -ATPase in *penaeus indius* postlarvae by lead [J]. *Compar Biochem Phys C: Pharmacol Toxicol Endocrinol*, 2000, 127(1): 11-22.
- [19] Vijayavel K, Gopalakrishnan S, Balasubramanian MP. Sublethal effect of silver and chromium in the green mussel *Perna viridis* with reference to alterations in oxygen uptake, filtration rate and membrane bound ATPase system as biomarkers [J]. *Chemosph*, 2007, 69(6): 979-986.
- [20] Cotou E, Castritsi-Catharios A I, Moraitou-Apostolopoulou M. Surfactant-based oil dispersant toxicity to developing nauplii of *Artemia*: effects on

- ATPase enzymatic system [J]. *Chemosph*, 2001, 42(8): 959–964.
- [17] Hayes JD, Pulford DJ. The glutathione S-transferase super-gene family: regulation of GST and the contribution of the isoenzymes to cancer chemoprotection and drug resistance [J]. *Crit Rev Biochem Mol Biol*, 1995, 30: 445–600.
- [18] Chen R, Zheng WY, Yu Q, *et al.* Effect of oil pollution on glutathione and relative enzyme in oyster (*Saccostrea cuculiat*) [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 22(1): 145–150.
- [19] 刘慧, 王晓蓉, 王为木, 等. 低浓度锌及其 EDTA 配合物长期暴露对鲫鱼肝脏锌富集及抗氧化系影响[J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 173–176.
Liu H, Wang XR, Wang WM, *et al.* Effects of long-term exposure of low level zinc and Zn-EDTA complex on zinc accumulation and antioxidant defense system in liver of *carassius auratus* [J]. *Environ Sci*, 2005, 26(1): 173–176.
- [20] Yadwad VB. Effect of endosulfan on glutathione S-transferase and glutathione content of the premoult field crab *Paratelphusa hydrodromus* [J]. *Bullet Environ Contamination Toxicol*, 1989, 43: 597–602.
- [21] Boryslawskij M, Garrod AC, Pearson JT, *et al.* Elevation of glutathione S-transferase activity as a stress response to organochlorine compounds, in the freshwater mussel *Sphaerium corneum* [J]. *Marin Environ Res*, 1988, 24: 101–104.
- [22] 尹大强, 金洪钧, 于红霞, 等. 钩虾胆碱酯酶(ChE)和谷胱甘肽转 S-酶(GST)的敏感性和特异性比较研究[J]. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 615–618.
Yin DQ, Jin HJ, Yu HX, *et al.* Sensitivity and specificity comparative study of *Gammarus cholinesterase* (ChE) and glutathione S-transferase (GST) for *Gammarus pulex* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12(4): 615–618.
- [23] Davies PE. The toxicology and metabolism of chlorothalonil in fish. III Metabolism, enzymatics and detoxication in *Salmo* spp. and *Galaxias* spp [J]. *Aquatic Toxicol*, 1985, 7: 277–299
- [24] 尹晓晖. 麦穗鱼谷胱甘肽 S-转移酶及三种杀虫剂对其影响作用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005.
Yin XH. Effects of Three insecticides on the specific activities of GSTs in *Pseudorasbora parva* [D]. Wulumuqi: Xinjiang Agricultural University, 2005.
- [25] Jovanovic ZS, Milosevic JD, Radovic SR. Antioxidative enzymes in the response of Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) to ultraviolet Bradiation [J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54: 9472–9478.
- [26] 陈琳琳, 张高生, 陈静, 等. 汞、硒暴露对紫贻贝(*mytilus edulis*) 抗氧化酶系统的影响[J]. *生态毒理学报*, 2011, 6(4): 383–388.
Chen LL, Zhang GS, Chen J, *et al.* Exposure effects of mercury and selenium on antioxidant enzymes of blue mussel *Mytilus edulis* [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2011, 6(4): 383–388.
- [27] 闫博, 王兰, 李涌泉, 等. 镉对长江华溪蟹肝胰腺抗氧化酶活力的影响[J]. *动物学报*, 2007, 53(6): 1121–1128.
Yan B, Wang L, Li YQ, *et al.* Effects of cadmium on hepatopancreatic antioxidant enzyme activity in a freshwater crab *Sinopotamon yangtsekiense* [J]. *Acta Zoolozica Sinica*, 2007, 53(6): 1121–1128.
- [28] 黄俊勇, 冷欣夫. 细胞色素 P450 酶系的研究进展[J]. *昆虫知识*, 1991, 28(5): 308–312.
Huang JY, Leng XF. Research progress of cytochrome P450 [J]. *Entomol Knowle*, 1991, 28(5): 308–312.
- [29] Porter TD, Coon MJ. Cytochrome P450: Multiplicity of isoforms, substrates, and catalytic and regulatory mechanisms [J]. *J Bio Chem*, 1991, 266: 13469–13472.
- [30] Stegeman JJ, Lech JJ. Cytochrome P450 monooxygenase systems in aquatic species: carcinogen metabolism and biomarkers for carcinogen and pollutant exposure [J]. *Environ Health Perspect*, 1991, 90: 101–109.
- [31] Flammarion P, Devaux A. Multibiomarker responses in fish from the moselle river(France) [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2002, 51: 145–153.
- [32] Kagi JHR. Overview of metallothionein [J]. *Method Enzymol*, 1991, 205: 613–626.
- [33] 柯翎, 骆庭伟, 林志超. 利用菲律宾花蛤的金属硫蛋白作为镉污染物的检测指标[J]. *漳州师范学院学报*, 2004, 17(1): 60–64.
Ke L, Luo TW, Lin ZC. Detection cadmium contamination using metallothionein of Philippine Clam [J]. *J Zhangzhou Teachers College*, 2004, 17(1): 60–64.
- [34] Linde AR, Sanchez-Galan, Valles-Mota P, *et al.* Metallothionein as bioindicator of freshwater metal pollution: European eel and brown trout [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2001, 49(1): 60–63.
- [35] Ghedira J, Jebali J, Bouraoui Z, *et al.* Metallothionein and metal levels in liver, gills and kidney of *Sparus aurata* exposed to sublethal doses of cadmium and copper [J]. *Fish Phys Biochem*, 2009, 35(2): 293–299.
- [36] Sumpter JP, Jobling S. Vitellogenesis as a biomarker for estrogenic contamination of the aquatic environment [J]. *Environ Health Persp*, 1995, 103 Suppl 7: 173–8.
- [37] Codi KS, Hassell K, Nugegoda D, *et al.* The assessment of vitellogenin as a biomarker of exposure to estrogenic compounds in two Australian perciformes [J]. *Mari Environ Res*, 2008, 66(1): 116–118.
- [38] Asturiano JF, Romaguera F, Aragon P, *et al.* Sandwich immunoassay for determination of vitellogenin in golden grey mullet (*Liza aurata*) serum as a field exposure biomarker [J]. *Anal Bioanaly Chem*, 2005, 381(6): 1152–60.
- [39] Martín-Díaz ML, Sales D, Delvals A. Toxicokinetic approach for the assessment of endocrine disruption effects of contaminated dredged material using female *Carcinus maenas* [J]. *Ecotoxicol*, 2008, 17(6): 495–503.
- [40] Garman GD, Anderson SL, Cherr GN. Developmental abnormalities and DNA-protein crosslinks in sea urchin embryos exposed to three metals [J]. *Aquatic Toxicol*, 1997, 39(3-4): 247–265.
- [41] Ching EW, Siu WH, Lam PK, *et al.* DNA adduct formation and DNA strand breaks in green-lipped mussels (*Perna viridis*) exposed to benzo[a]pyrene: dose- and imedependent relationships [J]. *Marine Pollut Bull*, 2001, 42(7): 603–610.
- [42] Chang M, Wang WM, Wang AL, *et al.* Effects of cadmium on respiratory burst, intracellular Ca^{2+} and DNA damage in the white shrimp *litopenaeus vannamei* [J]. *Compa Biochem Physiol C: Phar Toxicol Endocrinol*, 2009, 149(4): 581–586.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



张晓梅, 博士, 工程师, 主要研究方向为食品检测。

E-mail: sdsywl@163.com