

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20200903002

刘潇博, 黄海宁, 吴扬雨, 等. 中国沿海水生生物污染数据集及食用水产品的健康危害评估[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(3): 252-263

Liu X B, Huang H N, Wu Y Y, et al. Dataset on contamination of aquatic organisms and their health risk assessment in Chinese coastal areas [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(3): 252-263 (in Chinese)

中国沿海水生生物污染数据集及食用水产品的健康危害评估

刘潇博^{1,2}, 黄海宁^{2,3}, 吴扬雨^{2,3}, 黄乾生^{2,4,*}

1. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002

2. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

3. 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002

4. 国家基础学科公共科学数据中心, 北京 100190

收稿日期: 2020-09-03

录用日期: 2020-11-03

摘要: 沿海区域是污染物的汇集区域, 污染物的生态风险和健康危害广受关注。亟需开展污染物的监测, 评估污染的生态风险。已有研究提供了不同水域不同水生生物中各类污染物的含量数据, 但尚缺乏系统的沿海区域生物体污染物含量的数据集, 无法为沿海区域生态风险及其人体健康危害评估提供数据支撑。本研究通过 CNKI、Web of Science 和 PubMed 数据库, 搜集了 2000—2019 年间沿海区域物种-污染物含量相关文献的数据, 建立了中国沿海水生生物污染数据集。进一步提取了常见软体动物和鱼类的重金属含量数据, 运用靶标危害系数(target hazard quotients, THQ)模型进行了食用危害评估。结果显示, 中国沿海区域软体动物中的 8 种重金属平均浓度从高到低依次为锌($317.939 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铜($87.792 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铅($14.428 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铬($11.459 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、锰($5.384 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、砷($1.332 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、镍($1.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和汞($0.384 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。而鱼类中这 8 种重金属的平均浓度梯度为锌($172.025 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铜($11.637 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铅($9.604 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、锰($1.808 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、镍($1.573 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、砷($0.802 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、铬($0.546 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和汞($0.023 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。THQ 模型预测结果表明, 重金属并不会对成人产生健康影响, 唯一例外的是, 砷元素污染可能会对儿童产生潜在的健康危害。综上, 本数据集提供了中国沿海区域物种的污染物含量数据, 为污染物引起的人体健康危害评价提供了数据支撑。

关键词: 重金属; 沿海区域; 健康风险; 数据集; 靶标危害系数

文章编号: 1673-5897(2021)3-252-12

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Dataset on Contamination of Aquatic Organisms and Their Health Risk Assessment in Chinese Coastal Areas

Liu Xiaobo^{1,2}, Huang Haining^{2,3}, Wu Yangyu^{2,3}, Huang Qiansheng^{2,4,*}

1. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. CAS Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

3. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

4. National Basic Science Data Center, Beijing 100190, China

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFE0103300); 福建省科技厅项目(2018Y0081); 国家基础学科公共科学数据中心“环境健康主题数据库”(NBSDC-DB-21)

第一作者: 刘潇博(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学, E-mail: xbliu@iue.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author), E-mail: qshuang@iue.ac.cn

Received 3 September 2020 accepted 3 November 2020

Abstract: The coastal zone is a reservoir of pollutants. The pollution in the area has drawn wide attention for its ecological risk and adverse health impact. There is an urgent need for pollutant monitoring and thus the risk assessment in the area. Previous studies have extended our knowledge about the concentrations of varied pollutants in a variety of species across the area. However, dataset enriching multi-pollutants in multi-species is still lacking and unavailable to facilitate the risk evaluation in the region. In the study, we collected data on the pollutant concentration in wildlife from the literature between 2000—2019 through CNKI, Web of Science, and PubMed. These data were recruited together to compile a dataset of the pollutant levels in aquatic organisms in coastal China. Then, we extracted data on the concentrations of heavy metals in mollusks and fish commonly found in coastal areas. The target hazard quotient (THQ) model was then applied to assess the potential risk from consuming these aquatic products. The results showed that the average concentrations of eight types of heavy metals in mollusks were zinc ($317.939 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), copper ($87.792 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), lead ($14.428 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), chromium ($11.459 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), manganese ($5.384 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), arsenic ($1.332 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), nickel ($1.011 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), and mercury ($0.384 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). In contrast, the average concentrations in fish were zinc ($172.025 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), copper ($11.637 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), lead ($9.604 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), manganese ($1.808 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), nickel ($1.573 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), arsenic ($0.802 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), chromium ($0.546 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), mercury ($0.023 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). THQ model indicated that heavy metals did not show potential health risk to adults, but the arsenic in these fish products may pose a potential health risk to children. In summary, this dataset provides data on the pollutant levels in aquatic organisms distributed in coastal areas. It can facilitate the evaluation of human health hazards from consumption of aquatic products in coastal areas.

Keywords: heavy metals; coastal zone; health risk; dataset; target hazard quotient

大量污染物被排放进入水体、大气和土壤等环境介质中,在环境中广泛分布。污染物被生物直接摄入后,通过食物链传递到各营养级生物中,广泛分布于各区域各类生物体内^[1-3],南北极的生物体内也检测出污染物的存在^[4-5]。环境污染物给物种生存带来了严重的威胁,甚至会直接加速濒危物种的灭绝,据文献报道,我国一级保护动物中华鲟体内检测出三苯基锡(triphenyltin, TPT),可能影响中华鲟的孵化进而加速其灭绝^[6]。此外,环境污染物会在生物体内富集,并随食物链传递进入到人体,在人体中产生蓄积,对人体健康产生危害^[7-8]。

沿海区域聚集了密集的人口和工业,生活和生产产生的污水、废气和残渣等污染物,经过污水排放、雨水沉降和地表径流等多种方式进入水体,最终汇入海洋^[9-10],导致河口-近岸海域乃至整个沿海区域的污染程度日益严重。《2018年中国海洋环境质量公报》中指出,在我国受污染的海域中,近岸水域污染程度相对严重,主要污染物质是无机氮、磷酸盐以及有机物和重金属等^[11]。

水生生物是水环境污染的直接受害对象,研究表明,环境相关浓度的多环芳烃(polycyclic aromatic

hydrocarbons, PAHs)会破坏海洋青鳉的孵化过程,影响心脏的发育,可能会对鱼类种群的可持续发展产生深远的影响^[12]。墨西哥湾的石油泄漏引发当地水生生物的毒性反应,包括免疫毒性、胚胎异常和心脏毒性等,对生物生存造成极大的负面影响^[13]。我国近岸水域生物质量状况也不乐观,主要表现为主要经济物种体内有害物质含量偏高,部分区域鱼类、贝类体内残留的铅、镉、砷、六六六以及滴滴涕等有毒物质含量常年居高不下,水体生态系统结构失衡,水生生物种群数量减少^[14-16]。

近岸水域蕴含丰富的具有较高经济价值的生物资源,其不仅是多种水生生物栖息和发育的重要场地,也是许多洄游鱼类必经之地和繁殖场所。2018年中国海洋捕捞量为1 044.46万t,远洋捕捞量仅占21.46%,78.54%的海洋捕捞量来自污染严重的近海。沿海区域作为人口密集、经济发达区域,水产品的消费量一直位列前茅。《2019年中国统计年鉴》公布的官方数据显示,我国海南省、上海市和福建省人均水产品消费量分别为27.02、24.49和23.95 kg^[17]。食用水产品带来的健康危害引起了社会的广泛关注,但相应的食用风险评估研究不足以提供科

学的认知,这进一步加剧了公众的担忧。在美国,环境保护局定期发布各个州鱼类及贝壳类的食用指南,为公众水产品消费提供了科学指导,并达到了降低民众,尤其是孕妇和儿童体内污染物含量的良好效果(<https://www.epa.gov/fish-tech>)。由于污染程度随区域和物种的不同而改变,我们有必要基于我国的污染特点,开展水产品消费的健康风险评估。

当前,大量文献报告了环境中物种的污染物含量^[18-19],但数据都过于零散,关注的物种和污染物较为单一,尚未进行数据整合分析,缺乏环境介质与栖息物种污染物负荷数据的集成和挖掘分析研究。相关数据库中,美国环境保护局 ECOTOX 数据库专注于记录各类化合物的生态毒性数据,缺乏污染物在生物体内的浓度信息(<https://cfpub.epa.gov/ecotox/>)。中国科学院化合物参考数据库聚焦于化工领域,对化合物的命名、结构、基本性质、毒性、谱学、鉴定方法和化学反应等信息进行了整合,但未涉及污染物在生物体内残留的数据。沿海区域的环境污染较为严重,亟需开展污染的监测和防治工作。因此,有必要了解各类物种体内各类污染物的含量,建立区域物种的污染物负荷数据集;进而运用模型评估该区域生物的食用健康危害,为公众提供水产品食用建议。

1 数据集的设计与实现 (Design and implementation of the dataset)

1.1 研究区域概况

本研究收集了山东省、江苏省、浙江省、福建省、广东省、海南省、中国香港以及中国南海等沿海区域物种污染物含量数据,采样信息见附件表 S1。该区域均为我国人口密集、经济发展发达和工业化程度高的地区。该区域包含了中国东江、珠江、西江、北江、闽江、洪泽湖、三山湖、黄海海域、淀山湖、杭州湾、阳江海域、茂名海域、南澳海域、舟山渔场及北部湾等诸多水系、流域和海域,是生活污水、工业废水的主要汇集区域。

1.2 数据集构建流程

1.2.1 数据来源

本研究的数据来源于公开发表的文献。利用 CNKI(中国知网)、Web of Science 以及 PubMed 数据库,分别以我国沿海地区的各个“省份名称”+“污染物”作为关键词进行检索,收集筛选出 2000—2019 年发表的关于水生生物体污染物含量的文献,提取文献中物种污染物含量的数据,按照一定的标准录入数据集。

1.2.2 数据质量控制

文献的筛选标准为:(1)文献中包含物种体内污染物浓度数据,采样地点位于沿海区域,有明确的采样时间、样本数;(2)数据需源于野外采样数据而非实验室暴露数据;(3)污染物浓度检测采用质谱法、色谱法和光谱法,并进行严格的质量控制,提供回收率、标准曲线和检测限等质量控制参数。

1.2.3 数据录入

数据录入内容包括:污染物信息、物种信息、数据来源信息以及物种污染物负荷信息。(1)污染物信息包括污染物中英文名称、物理性质(熔点、沸点等)、化学性质(腐蚀性、致癌性及生态毒性等);(2)物种信息包括拉丁名、中英文名;(3)数据来源信息包括文献名称、作者和出版日期;(4)物种污染物负荷信息包括采样信息、检测信息以及污染数据,其中,采样信息包括采样地点、采样时间和采集的样本数量;检测信息包括检测部位(器官)和检测类型(干湿质量);污染物含量数据包括最大值、最小值、平均值及标准差(standard deviation, SD)值,录入单位统一换算为 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2.4 模型分析

靶标危害系数法(target hazard quotients, THQ)常用于评估重金属对人体健康的危害。该方法通过评估人体摄入食物中重金属的剂量是否超出相应的参考剂量来评估食物对人体健康产生的危害^[20-21],计算公式为:

$$\text{THQ}_i = \frac{\text{EF} \times \text{ED} \times \text{FIR} \times c}{\text{RFD} \times \text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-3}$$

式中:EF 为暴露频率($365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$);ED 为暴露时间(a),本文假设为 70 a;FIR 为食物摄取率,鱼类 $36 \text{ g}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$,软体类 $9.80 \text{ g}\cdot(\text{人}\cdot\text{d})^{-1}$;c 为重金属的含量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);RFD 为摄入参考剂量($\text{mg}\cdot(\text{d}\cdot\text{kg})^{-1}$),本文选取的 8 类重金属砷(As)、镉(Cd)、汞(Hg)、锰(Mn)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)和铅(Pb),参考剂量分别为 0.0003、0.001、0.0001、0.14、0.02、0.04、0.3 和 0.004 $\text{mg}\cdot(\text{d}\cdot\text{kg})^{-1}$;BW 为体质量,儿童 30 kg,成人 70 kg;AT 为平均暴露时间,为 $\text{ED} \times 365 \text{ d}\cdot\text{a}^{-1}$ 。通常认为 THQ 值 <1 ,没有可见风险。反之,如果 THQ >1 ,有关接触人群可能面临潜在的健康危害。

2 研究结果 (Results)

2.1 数据集内容

中国沿海水生生物污染数据集由 4 个数据子集组成。如表 1 所示,Exrecord 数据集即物种-污染物数据集,是本数据集的总集,记录每条数据的物种编

号、污染物编号、数据来源编号、采样时间、采样点地理信息和物种污染物负荷值等信息;表2为污染物数据集,记录每种污染物的名称、性质、毒性及致癌性的信息;表3为物种数据集,记录了每种物种的名称、拉丁名和俗名等信息;表4为文献来源数据集,记录每条数据来源文献的作者、题目和发表年份等信息。Exrecord数据集(表1)通过poid字段、spid字段和paid字段分别与污染物数据集、物种数据集和文献来源数据集关联。使用者查看数据时,可以通过在Exrecord数据集点击数据对应的poid编号,数据集界面会直接跳转至污染物信息数据集(表2)中,查看到该poid编号对应污染物的详细信息;同样,也可以通过spid编号和paid编号跳转至物种数据集(表3)和数据来源数据集(表4),查看该数据对应的物种信息和数据来源信息。

中国沿海水生生物污染数据集共收集数据13 109条,源文献共计58篇,采样地点共140处,多分布在河流、海域等区域。采集物种主要为植物类、常见水产品类以及鸟类,覆盖食物链多个层级;共290种,其中,植物58种、软体类35种、甲壳类22种、鱼类155种、鸟类3种以及其他物种17种。其中,包含多种国家保护物种,如:香樟树(*Cinnamomum camphora*)、宽吻海豚(*Tursiops truncatus*)和中华白海豚(*Sousa chinensis*)等;以及多种环境指示物种,如:铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)和鳊鱼(*Parabramis pekinensis*)等。污染物210种,其中,重金属17种,包括Hg、Pb、Cd、As、Cu和Ni等;农药27种,包括滴滴涕(DDT)、滴滴涕(DDD)、滴滴伊(DDE)、氯丹和艾氏剂等;有机污染物165种,包括六氯环己烷、多溴联苯醚、多氯联苯和多环芳烃等。

污染物分布广泛,不同物种中浓度差异较大。数据集中2种残留严重的农药类污染物1,1,1-三氯-2,2-双对氯苯基乙烷(*p,p'*-DDT)和1,1,1-三氯-2-邻氯苯基-2-对氯苯基乙烷(*o,p'*-DDT)在37种物种中被检出,浓度范围分别为0.08~712 mg·kg⁻¹ lw(脂肪质量)和0~200 mg·kg⁻¹ lw,平均浓度分别为115.19 mg·kg⁻¹ lw和26.4025 mg·kg⁻¹ lw。重金属Cr在113种物种中被检出,浓度范围为0~16 320 mg·kg⁻¹ ww(湿质量),平均值为1 093.8 mg·kg⁻¹ ww。有机污染物六氯环己烷(HCH)的4种同分异构体 α -HCH、 β -HCH、 γ -HCH和 δ -HCH在28种物种被检出,浓度范围分别为0~79.8、0~430.9、0~109.2和0.01~

293.6 mg·kg⁻¹ lw,平均浓度为9.094、96.34、8.686和35.4175 mg·kg⁻¹ lw。单个物种体内存在多个污染物类型。数据集中鲤鱼体内共有污染物29种,包括金属12种,有机污染物17种;环境指示物种河蚬体内共检测出了33种污染物,其中金属元素8种,有机污染物16种,农药类污染物9种。

2.2 THQ模型评估

本研究选取了我国沿海地区常见的7种鱼类和11种软体动物的污染物负荷数据,利用THQ模型评估其食用健康风险。这些鱼类和软体类动物都为沿海地区产量和消费量较大的种类,物种信息如表5所示。在数据集中,通过查找这几种鱼类和软体动物对应的spid和重金属污染物对应的poid,将数据从数据集中提取出来,数据提取流程和数据来源文献如图1所示,选取的数据来自28篇不同的研究,其中研究对象仅为软体动物的文献9篇^[22-30],既包含鱼类又包含软体动物的文献7篇^[3,31-36],仅研究鱼类的文献12篇^[37-48]。在表6中展示了这些水产品的重金属含量情况。由表6可知,我国沿海区域水产品中重金属含量差异较大,软体动物中8种重金属平均浓度由高到底依次为Zn(317.939 mg·kg⁻¹),Cu(87.792 mg·kg⁻¹),Pb(14.428 mg·kg⁻¹),Cd(11.459 mg·kg⁻¹),Mn(5.384 mg·kg⁻¹),As(1.332 mg·kg⁻¹),Ni(1.011 mg·kg⁻¹),Hg(0.384 mg·kg⁻¹)。鱼类中8种重金属的平均浓度由高到低依次为Zn(172.025 mg·kg⁻¹),Cu(11.637 mg·kg⁻¹),Pb(9.604 mg·kg⁻¹),Mn(1.808 mg·kg⁻¹),Ni(1.573 mg·kg⁻¹),As(0.802 mg·kg⁻¹),Cd(0.546 mg·kg⁻¹),Hg(0.023 mg·kg⁻¹)。除了Ni元素外,其余重金属元素在软体动物中的含量都高于鱼类中重金属元素的含量,其中含量差异最显著的是Cd元素,软体动物中的Cd元素浓度约为鱼类中的21倍。

本研究在利用THQ模型进行评估时,根据成人和儿童的食用量的不同,分别计算了成人和儿童食用水产品的THQ值。如图2(a)所示,我国沿海区域软体类生物体内重金属的THQ值从高到低排序依次为As、Cd、Cu、Zn、Hg、Pb、Ni和Mn。其中,Cd和As这2种金属THQ值远高于其他金属,尤其是As元素,成人食用后的THQ值接近1,而儿童食用后THQ值已经超过1,表明软体类物种体内的As元素含量可能会对儿童健康产生负面影响。食用鱼类也具有相似的健康风险,如图2(b)所示,我国沿海区域鱼类As元素的含量对儿童的THQ值也超过1,

表明沿海区域鱼类中 As 元素含量也可能会对儿童健康产生负面影响。与软体动物不同的是,鱼类中 THQ 值排在第 2 位的是 Hg 元素,而软体动物中 THQ 值仅次于 As 的元素为 Cd 元素。鱼类中重金属的 THQ 值的排序依次为 As、Hg、Zn、Pb、Cd、Cu、Ni 和 Mn。对比 2 种水产品中重金属的 THQ 值,结

果显示,2 种水产品中 Hg 和 Cd 的 THQ 值差异较大,鱼类中 Hg 的 THQ 值远大于软体动物,而软体动物中 Cd 的 THQ 值却远大于鱼类的 THQ 值;其余金属的 THQ 值差异并不明显;相较之下,鱼类中 Pb、Zn、Ni 和 Mn 金属的 THQ 均略高于软体动物,仅有 Cu 的 THQ 值略小于软体动物。

表 1 物种-污染物数据集字段
Table 1 Field description in Exrecord dataset

字段符号	字段全称	字段含义说明	示例
Field title	Field name	Field description	Example
id	ID 号	物种-污染物编号	632
	ID number	Data number	
poid	污染物 ID 号	污染物编号,对应 Pollutant 表格中的 poid 编号	25
	Pollutant ID number	The number of the pollutant corresponds to the poid number in the pollutant table	
spid	物种 ID 号	物种编号,对应 Species 表格中的 spid 编号	93
	Species ID number	The species number corresponds to the spid number in the species table	
paperid	来源 ID 号	来源文献编号,对应 Paper 表格中的 paid 编号	21
	Reference ID number	The reference number corresponds to the paid number in the paper table	
time	采样时间	根据可获得的数据,细化到年、月或日	2 005.04
	Sample time	Sample collection time specific to the month	
province	省 Province	采样点对应的省级行政区	山东省 Shandong Province
		Province of the sampling site	
county	县/区 County	采样点对应的县级行政区	威海市 Weihai City
		County or district name of the sampling site	
locality	小地名 Locality	采样点对应的地方名称,允许为空	威海玛伽山码头 Majiashan wharf, Weihai City
		Specific site name of the sampling site	
lon	经度 Longitude	采样点对应的经度(十进制,保留六位小数)	122.266533
		Longitude of the sampling site	
lat	纬度 Latitude	采样点对应的纬度(十进制,保留六位小数)	36.761570
		Latitude of the sampling site	
organ	器官 Organ	污染物检测器官	肌肉 Muscle
		Organ detection of samples	
max	最大浓度	最大浓度,允许为空,表明无此数据	44 457.00
	Maximum concentration	The maximum concentration of the sample detected	
min	最小浓度	最小浓度,允许为空,表明无此数据	658.00
	Minimum concentration	The minimum concentration of the sample detected	
avg	平均浓度	平均浓度,允许为空,表明无此数据	9 732.00
	Average concentration	The average concentration of the sample detected	
SD	标准差	检测值的标准差,允许为空,表明无此数据	3 042.00
	Standard deviation	Standard deviation of detection values	
dw/ww/lw	干质量/湿质量/脂肪质量	检测的生物样本组织是否经烘干处理,是否为脂肪中的含量	ww
	Dry weight, wet weight, lipid weight	The state of the sample at the time of testing	
unit	质量单位 Unit	统一换算成 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
		Unit conversion to $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	

表 2 污染物数据集
Table 2 Field description in pollutant dataset

字段符号 Field title	字段全称 Field name	字段含义说明 Field description	示例 Example
poid	污染物 ID 号 Pollutant ID number	污染物编号 The number of the pollutant	25
poname_c	中文名 Chinese name	污染物中文名称 Chinese name of pollutant	铜
poname_e	英文简称 English abbreviation	污染物英文简称 English abbreviation of pollutant	Cu
poname_e_full	英文全称 English name	污染物英文全称 English name of pollutant	Copper
CAS number	CAS 编号 CAS number	美国化学会物质数字识别号码 Chemical abstracts service registry number	7440-50-8
molecular weight	分子量 Molecular weight	污染物的分子量 Molecular weight of pollutant	65.4 g·mol ⁻¹
melting point	熔点 Melting point	污染物的熔点 Melting point of pollutant	1 082.78 °C
boiling point	沸点 Boiling point	污染物的沸点 Boiling point of pollutant	2 595.00 °C
carcinogenicity	致癌性 Carcinogenicity	污染物的致癌性 Carcinogenicity of pollutant	美国环境保护局(US EPA): 未分类人类致癌性 United States Environmental Protection Agency (US EPA): Not classifiable as to human carcinogenicity
Exposure Routes	暴露途径 Exposure routes	污染物可能存在的暴露途径 Potential exposure pathways for pollutant	人类暴露途径为吸入和摄取 The substance can be absorbed into the body by inhalation and by ingestion
Ecotoxicity Values	生态毒性值 Ecotoxicity values	污染物的生态毒性值,允许为空 Ecotoxicity value of pollutant	空 No such information available

表 3 物种信息数据集
Table 3 Field description in species dataset

字段符号 Field title	字段全称 Field name	字段含义说明 Field description	示例 Example
spid	物种 ID 号 Species ID number	物种的编号 The number of the species	93
latinname	物种拉丁学名 Latin name	物种拉丁学名 Latin name of the species	<i>Hexagrammos otakii</i> Jordan & Starks
cname	中文名 Chinese name	物种中文名称 Chinese name of the species	大泷六线鱼
commonname	俗名 Common name	物种俗名 Common name of the species	黄鱼、海黄鱼
ename	英文名 English name	物种英文名称 English name of the species	croak

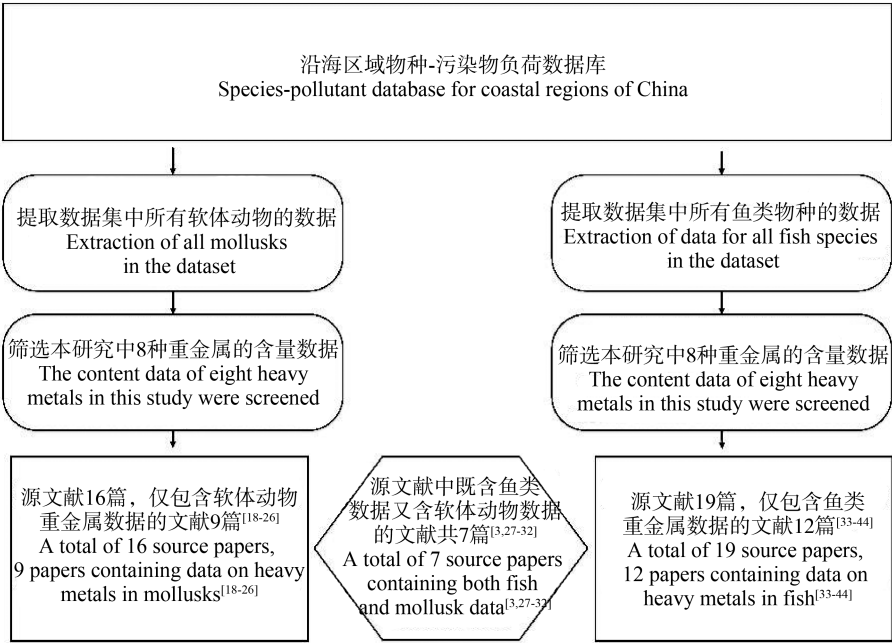


图 1 数据提取流程和数据来源
Fig. 1 Data selection process and data source

3 讨论 (Discussion)

沿海区域污染严重,表现为污染范围广、污染源复杂、积累量大;污染引起的生态和健康风险大。因而,急需加强对沿海区域污染程度的认知,评估其风险^[49]。本研究建成的数据集,收集了 2000—2019 年,我国沿海区域物种污染物含量的数据,便于研究人员、相关部门及公众快速有效地获取沿海区域物种污染数据。数据集中数据存量丰富,内容详细,生物体污染物含量数据达到 13 109 条,而且将定期更新。数据包含物种 290 种,污染物 210 种,采样地点 195 处。

数据的完整性和代表性是数据集建设的核心问

题^[50],因此,本数据在数据的质量控制上进行 2 次筛选,第一次为对文献的筛选,确认文献中数据是否完整,数据内容是否符合要求;第二次是对数据的筛选,确保数据是经过标准的实验流程获取的,有严格的质量控制,避免数据的重复和冗余。同时,这些存量数据均来自科研文献,具有一定的科研意义,Niu 等^[51]在其研究中指出在缺乏长期检测数据的情况下,对已发表文献中的检测数据进行统计分析是非常必要的,这将有助于我们对环境介质中的污染情况有一个更清楚地了解。本研究仅用数据进行了健康方面的模型分析,但数据集的应用不仅于此,将来也可以运用该数据集数据进行预警分析,评价区域污染程度。

表 4 文献来源数据集
Table 4 Field description in the paper dataset

字段符号 Field title	字段全称 Field name	字段含义说明 Field description	示例 Example
paid	来源 ID 号 Reference ID number	参考文献的编号 The number of the reference	20
author	作者 Author	文献第一作者 First author of the literature	孟凡信 Meng Fanxin
year	发表年份 Publication year	文献发表的年份 Year of publication of the literature	2006
title	标题 Article title	文献的题目 Title of the literature	威海沿岸几种海洋鱼类重金属含量的研究

如本研究结果所示,我国同一污染物在不同物种中分布广泛,37 种物种中都检测出了 p,p' -DDT 和 o,p' -DDT 的存在,Cr 元素则在 113 种物种中被检出。此外,污染物的浓度范围跨度较大,Cr 元素在不同物种中的浓度范围为 $0 \sim 16.320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ww}$,平均值为 $1.0938 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ ww}$,可见物种间污染物浓度差异大,这可能是由于生存环境、采样时间以及不同物种对污染物富集能力的差异引起的。如表 6 所示,我国沿海区域的软体动物中除 Ni 元素外,其余重金属元素浓度都高于鱼类体内重金属浓度,2 类物种在食物链等级上并无生物放大效应,刘军^[52]在对中国东部沿海江豚种群的研究中也未发现明显的生物放大效应。然而,我们的结果与 Sang 等^[53]的研究结果有所差异。Sang 等^[53]发现,中国三峡水库水生生物体中 Hg 和 Cd 有明显的生物放大作用,而 Pb、Cu、铁(Fe)和 Zn 表现出较弱的生物放大能力,这种差异可能是区域不同导致的。Espejo 等^[54]推测 Cu、Zn 等重金属在生物体内的放大作用具有物种和区域的特异性。

环境污染日益加剧,已经严重影响到我国的水产品质量安全,需尽快加强对于水产品的食用安全风险评估。全国多省份已经组织开展水产品质量安全例行监测,评估水产品质量安全,提高水产品质量,监测结果表明,重金属、农药兽药残留和持久性有机污染物等已经成为影响我国水产品质量安全的主要因素^[55]。米娜莎^[56]在其研究中发现,淡水产品中

主要为兽药残留,而海产品中的主要污染是重金属和致病菌。As、Cd、Cr 和 Pb 等重金属元素已被国际癌症研究中心(International Agency for Research on Cancer, IARC)和美国环境保护局综合风险信息

表 5 靶标危害系数法 (THQ) 模型所纳入的物种信息
Table 5 Species information used in target hazard quotients (THQ)

分类	拉丁学名	中文名
Category	Latin name	Chinese name
鱼类 Fish	<i>Silurus asotus</i>	鲶鱼
	<i>Carassius auratus</i>	鲫鱼
	<i>Channa argus</i>	乌鳢
	<i>Cyprinus carpio</i>	鲤鱼
	<i>Oreochromis mossambicus</i>	非鲫
	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	草鱼
	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	鲢鱼
软体动物 Molluscs	<i>Corbicula fluminea</i>	河蚬
	<i>Mytilus edulis</i>	贻贝
	<i>Chlamys farreri</i>	扇贝
	<i>Mytilus coruscus</i> Gould	厚壳贻贝
	<i>Ostrea gigas</i> Thunberg	牡蛎
	<i>Crassostrea gigas</i>	长牡蛎
	<i>Saccostrea cucullata</i>	僧帽牡蛎
	<i>Bullacta exarata</i> (Philippi)	泥螺
	<i>Bellamya aeruginosa</i>	铜锈环棱螺
	<i>Cerithidea djadjaricensis</i>	铁尖拟蟹守螺
	<i>Cipangopaludina chinensis</i>	中国圆田螺

表 6 中国沿海区域水生生物重金属浓度概况
Table 6 Concentrations of heavy metals in aquatic organisms in coastal areas in China

	汞 Hg	铅 Pb	镉 Cd	砷 As	铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni	锰 Mn
(mg·kg ⁻¹)								
软体动物 Mollusks								
最小值 Minimum	ND	ND	ND	ND	0.001	ND	0.480	0.270
标准差 Standard deviation	2.728	132.605	85.971	0.936	396.042	1 807.481	0.808	7.973
中位数 Median	0.011	0.310	1.600	1.542	4.836	36.450	0.598	1.340
平均值 Average	0.384	14.428	11.459	1.332	87.792	317.939	1.011	5.384
最大值 Maximum	20.800	1 900.00	1 022.00	3.072	4 280.00	1 962.00	2.894	26.434
鱼类 Fish								
最小值 Minimum	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.039
标准差 Standard deviation	0.021	63.669	4.629	1.148	81.893	1 122.384	2.374	2.037
中位数 Median	0.021	0.110	0.024	0.377	0.810	11.600	0.420	1.060
平均值 Average	0.023	9.604	0.546	0.802	11.637	172.025	1.573	1.808
最大值 Maximum	0.223	2 340.00	68.000	6.990	1 080.00	18 660.00	10.610	9.650

注:ND 表示未检出。
Note: ND means not detected.

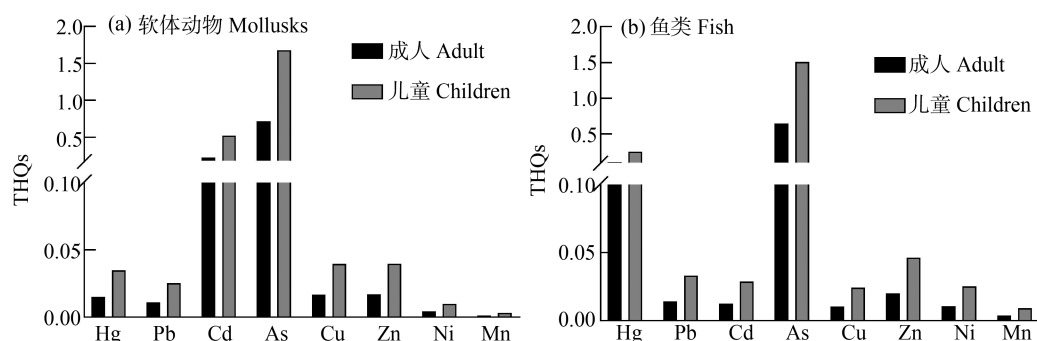


图 2 沿海区域水产品中重金属对人体健康风险评估

Fig. 2 Human health risk assessment of heavy metals in aquatic products from coastal areas of China

系统(Integrated Risk Information System, IRIS)划分为具有潜在毒性的化学致癌物^[57]。有研究表明,As的毒性和它的形态有关,无机砷的毒性大于有机砷,长期无机砷暴露可能会导致皮肤损伤、心血管疾病、中枢和外周神经系统损害、胎盘发育障碍问题,甚至引发皮肤癌和呼吸系统癌症^[58]。本研究在评估As的食用风险时采用的是总砷的含量,而水产品中的As主要为低毒性的有机砷,这可能过高地估计了水产品中As的健康危害。但评估结果显示,沿海地区水产中总砷含量对儿童的健康危害不可忽视,建议对儿童水产品消费限度进行优化控制,在进行水产品消费时可以参考李昇昇等^[59]给出的建议。

综合表 6 和图 2 的结果,中国沿海区域水产品中,Zn、Cu 和 Pb 这 3 种元素含量相对较高,但 THQ 的结果显示,这 3 种重金属摄入并未对人体产生健康危害。而 As、Hg 和 Cd 这 3 种金属虽然含量较低,但健康风险却高于 Zn、Cu 和 Pb。因此,在防污控制的过程中,要以污染物的危害阈值作为导向,而不能简单以污染物质量浓度高低作为依据。此外,食用鱼类风险结果显示,THQ 值排在第 2 位的是 Hg 元素,而软体动物中 THQ 值仅次于 As 的元素为 Cd 元素。这种差异与两者的不同生活环境密切相关,软体动物多为底栖动物,生活在水底的淤泥中,而鱼类多生活在水体中,两者的生活环境不同可能是导致两者 THQ 值之间产生差异的主要原因之一。这从侧面反映出沿海区域水体中除 As 外,Hg 的含量也比较高,水体沉积物中除 As 外,Cd 的金属含量较高,这与莫小荣等^[60]和孙启耀^[61]的研究结果相似,在沿海敏感区域的表层沉积物中,Cd 的污染程度高于 Zn、Cr、Pb 和 Ni 等其他重金属。

综上所述,中国沿海区域水生生物重金属含量

差异较大,不同物种中重金属含量也存在明显差异。THQ 模型结果表明,沿海区域水生生物的重金属含量并未对成人产生健康影响,但物种中的 As 污染可能会对儿童产生潜在的健康危害。建议对儿童水产品消费限度进行优化控制,同时尽快加强沿海区域 As 元素污染的治理防治。

通讯作者简介:黄乾生(1982—),男,博士,研究员,主要研究方向为环境毒理学。

参考文献 (References):

- [1] Fang S H, Chen X W, Zhao S Y, et al. Trophic magnification and isomer fractionation of perfluoroalkyl substances in the food web of Taihu Lake, China [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(4): 2173-2182
- [2] Lavoie R A, Jardine T D, Chumchal M M, et al. Biomagnification of mercury in aquatic food webs: A worldwide meta-analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(23): 13385-13394
- [3] Qiu Y W. Bioaccumulation of heavy metals both in wild and mariculture food chains in Daya Bay, South China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 7-14
- [4] Krey A, Ostertag S K, Chan H M. Assessment of neurotoxic effects of mercury in beluga whales (*Delphinapterus leucas*), ringed seals (*Pusa hispida*), and polar bears (*Ursus maritimus*) from the Canadian Arctic [J]. Science of the Total Environment, 2015, 509-510: 237-247
- [5] Brasso R L, Polito M J, Lynch H J, et al. Penguin egg-shell membranes reflect homogeneity of mercury in the marine food web surrounding the Antarctic Peninsula [J]. Science of the Total Environment, 2012, 439: 165-171
- [6] Hu J Y, Zhang Z B, Wei Q W, et al. Malformations of the endangered Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*, and its causal agent [J]. Proceedings of the National Academy of

- Sciences of the United States of America, 2009, 106(23): 9339-9344
- [7] Fok T F, Lam H S, Ng P C, et al. Fetal methylmercury exposure as measured by cord blood mercury concentrations in a mother-infant cohort in Hong Kong [J]. *Environment International*, 2007, 33(1): 84-92
- [8] Yassa H A. Autism: A form of lead and mercury toxicity [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2014, 38(3): 1016-1024
- [9] 吴海燕. 近岸海域生态质量状况综合评价方法及应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2012: 2-3
- Wu H Y. The study on integrated assessment method of ecological quality status and its application in coastal waters [D]. Nanjing: Nanjing University, 2012: 2-3 (in Chinese)
- [10] Cheung K C, Leung H M, Wong M H. Metal concentrations of common freshwater and marine fish from the Pearl River Delta, South China [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 54(4): 705-715
- [11] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年中国海洋环境质量公报 [OL]. (2019-05-29) [2020-09-03]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/shj/jagb/>
- [12] Zheng Y Q, Li Y J, Yue Z H, et al. Teratogenic effects of environmentally relevant concentrations of phenanthrene on the early development of marine medaka (*Oryzia melastigma*) [J]. *Chemosphere*, 2020, 254: 126900
- [13] Honda M, Suzuki N. Toxicities of polycyclic aromatic hydrocarbons for aquatic animals [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(4): 1363
- [14] Yang G H, Sun X L, Song Z G. Trophic level and heavy metal pollution of *Sardinella albella* in Liusha Bay, Beibu Gulf of the South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111204
- [15] 张培玉. 渤海湾近岸海域底栖动物生态学与环境质量评价研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 140-143
- Zhang P Y. Studies on ecology of zoobenthos and environmental quality assessment in coastal waters of Bohai Bay [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005: 140-143 (in Chinese)
- [16] 张秋丰. 天津近岸海域海洋生态健康评价与分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 37-40
- Zhang Q F. Marine ecosystem health assessment and analysis of Tianjin coastal marine areas [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006: 37-40 (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019: 70-75
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019: 70-75 (in Chinese)
- [18] Zhang A Q, Wang P, Lu Y L, et al. Occurrence and health risk of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in seafood from Yellow Sea, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 1026-1034
- [19] Zhou S S, Pan Y Q, Zhang L N, et al. Biomagnification and enantiomeric profiles of organochlorine pesticides in food web components from Zhoushan Fishing Ground, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 131 (Pt A): 602-610
- [20] Fakhri Y, Saha N, Miri A, et al. Metal concentrations in fillet and gill of parrotfish (*Scarus ghobban*) from the Persian Gulf and implications for human health [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 118: 348-354
- [21] Ezemonye L I, Adebayo P O, Enuneku A A, et al. Potential health risk consequences of heavy metal concentrations in surface water, shrimp (*Macrobrachium macrobrachion*) and fish (*Brycinus longipinnis*) from Benin River, Nigeria [J]. *Toxicology Reports*, 2019, 6: 1-9
- [22] Wu Y, Zhou Y H, Qiu Y L, et al. Occurrence and risk assessment of trace metals and metalloids in sediments and benthic invertebrates from Dianshan Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(17): 14847-14856
- [23] Li X B, Jia L Z, Zhao Y L, et al. Seasonal bioconcentration of heavy metals in *Onchidium struma* (Gastropoda: Pulmonata) from Chongming Island, the Yangtze Estuary, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(2): 255-262
- [24] Luo H T, Wang Q, Nie X P, et al. Heavy metal contamination in the cultivated oyster *Crassostrea rivularis* and associated health risks from a typical mariculture zone in the South China Sea [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, 101(1): 33-41
- [25] 王许诺, 陈成桐, 王增焕. 广东省主要养殖贝类体微量元素含量及其风险分析[J]. *中国渔业质量与标准*, 2016, 6(3): 14-19
- Wang X N, Chen C T, Wang Z H. Content characteristics and risk analysis for trace elements in shellfish from Guangdong coastal region [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2016, 6(3): 14-19 (in Chinese)
- [26] 王增焕, 林钦, 王许诺, 等. 华南沿海牡蛎重金属含量特征及其风险评估[J]. *水产学报*, 2011, 35(2): 291-297
- Wang Z H, Lin Q, Wang X N, et al. The variation features of heavy metal contents in oyster samples from the Coast of South China Sea and their safety assessment [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(2): 291-297 (in Chi-

- nese)
- [27] 王增焕, 林钦, 王许诺. 大亚湾海洋生物体内铅的含量与风险评估[J]. 南方水产, 2010, 6(1): 54-58
Wang Z H, Lin Q, Wang X N. Analysis of lead content in marine organisms and risk assessment in Daya Bay [J]. South China Fisheries Science, 2010, 6(1): 54-58 (in Chinese)
- [28] 阮金山. 厦门海域养殖贝类体内重金属的初步研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(2): 32-37
Ruan J S. Preliminary study of heavy metals concentrations in the culture-shellfish from Xiamen coastal waters, China [J]. Marine Sciences, 2009, 33(2): 32-37 (in Chinese)
- [29] 刘桂荣. 扇贝中重金属残留及食用风险分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 10-16
Liu G R. The residue of heavy metal and safety assessment as food of scallop [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005: 10-16 (in Chinese)
- [30] 胡晴晖. 枫亭湾滩涂底质、蛸蛸的重金属污染与评价[J]. 福建环境, 2001(3): 20-22
Hu Q H. Pollution and evaluation of heavy metal in the *Siliqua minima* and the intertidal sediment at Fengting Bay [J]. Fujian Environment, 2001(3): 20-22 (in Chinese)
- [31] Zhao B F, Wang X M, Jin H B, et al. Spatiotemporal variation and potential risks of seven heavy metals in seawater, sediment, and seafood in Xiangshan Bay, China (2011-2016) [J]. Chemosphere, 2018, 212: 1163-1171
- [32] Gu Y G, Huang H H, Liu Y, et al. Non-metric multidimensional scaling and human risks of heavy metal concentrations in wild marine organisms from the Maowei Sea, the Beibu Gulf, South China Sea [J]. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2018, 59: 119-124
- [33] 高淑英, 邹栋梁. 湄洲湾生物体内重金属含量及其评价[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(1): 39-45
- [34] 方杰. 浙江沿海沉积物和海洋生物中持久性有机污染物及重金属的分析与研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 71-89
Fang J. Persistent organic pollutants and heavy metals in surface sediments and marine organisms from coastal areas [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 71-89 (in Chinese)
- [35] 王茂波, 刘正毅, 李静, 等. 烟台市海域水产品中重金属和砷污染状况调查[J]. 中国食品卫生杂志, 2012, 24(1): 67-70
Wang M B, Liu Z Y, Li J, et al. Investigation on the contamination of some heavy metals and arsenic in marine products originated from Yantai Sea areas [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2012, 24(1): 67-70 (in Chinese)
- [36] 谢文平, 马丽莎, 郑光明, 等. 珠江河网淡水鱼、虾和河蚬重金属污染特性及安全性评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 839-846
Xie W P, Ma L S, Zheng G M, et al. Pollution status and safety assessment of heavy metals in natural fish, shrimp, and shellfish from Pearl River waterway [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(6): 839-846 (in Chinese)
- [37] 张纹, 苏永全, 王军, 等. 5种常见养殖鱼类肌肉营养成分分析[J]. 海洋通报, 2001, 20(4): 26-31
Zhang W, Su Y Q, Wang J, et al. Biochemical composition of five common reared fishes [J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(4): 26-31 (in Chinese)
- [38] 方富永, 徐美奕, 蔡琼珍, 等. 海水养殖鱼类肌肉中微量元素的测定[J]. 广东微量元素科学, 2006, 13(11): 60-63
Fang F Y, Xu M Y, Cai Q Z, et al. Determination of trace elements in muscle of mariculture fishes [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2006, 13(11): 60-63 (in Chinese)
- [39] 孟凡信. 威海沿岸几种海洋鱼类重金属含量的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006: 17-35
- [40] 谢文平, 陈昆慈, 朱新平, 等. 珠江三角洲河网区水体及鱼体内重金属含量分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1917-1923
Xie W P, Chen K C, Zhu X P, et al. Evaluation on heavy metal contents in water and fishes collected from the waterway in the Pearl River Delta, South China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(10): 1917-1923 (in Chinese)
- [41] 王丽, 陈凡, 马千里, 等. 东江惠州段鱼类重金属污染及健康风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 70-76
Wang L, Chen F, Ma Q L, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of fish in Huizhou section of the Dongjiang River [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, 33(1): 70-76 (in Chinese)
- [42] Liang P, Wu S C, Zhang J, et al. The effects of mariculture on heavy metal distribution in sediments and cultured fish around the Pearl River Delta region, South China [J]. Chemosphere, 2016, 148: 171-177
- [43] Leung H M, Leung A O, Wang H S, et al. Assessment of heavy metals/metalloid (As, Pb, Cd, Ni, Zn, Cr, Cu, Mn) concentrations in edible fish species tissue in the Pearl River Delta (PRD), China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1-2): 235-245
- [44] Kwok C K, Liang Y, Wang H, et al. Bioaccumulation of heavy metals in fish and Ardeid at Pearl River Estuary, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014,

- 106: 62-67
- [45] Gu Y G, Lin Q, Huang H H, et al. Heavy metals in fish tissues/stomach contents in four marine wild commercially valuable fish species from the western continental shelf of South China Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(2): 1125-1129
- [46] Gu Y G, Lin Q, Wang X H, et al. Heavy metal concentrations in wild fishes captured from the South China Sea and associated health risks [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 96(1-2): 508-512
- [47] Liu J L, Xu X R, Ding Z H, et al. Heavy metals in wild marine fish from South China Sea: Levels, tissue- and species-specific accumulation and potential risk to humans [J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24(7-8): 1583-1592
- [48] Liu Y, Liu G J, Yuan Z J, et al. Heavy metals (As, Hg and V) and stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) in fish from Yellow River Estuary, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 462-471
- [49] 刘勇, 黄朋江. 近海岸海洋污染源分析和保护措施[J]. *北方环境*, 2013, 25(7): 94-96
- Liu Y, Huang P J. Coastal marine pollution source analysis and protection measures [J]. *Northern Environment*, 2013, 25(7): 94-96 (in Chinese)
- [50] 张笑东. 大健康数据智能分析关键方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 2-8
- Zhang X D. Research on key methods of data intelligent analysis of big-health [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 2-8 (in Chinese)
- [51] Niu Y, Jiang X, Wang K, et al. Meta analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 700: 134509
- [52] 刘军. 中国东部沿海江豚种群重金属暴露的健康风险及 MTs 多态性与重金属富集的关联性探究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015: 36-39
- Liu J. Exploring the health risk of heavy metal exposure and the association between MTs polymorphism and heavy metal enrichment in the eastern Chinese coastal finless porpoise population[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015: 36-39 (in Chinese)
- [53] Sang C, Zheng Y Y, Zhou Q, et al. Effects of water impoundment and water-level manipulation on the bioaccumulation pattern, trophic transfer and health risk of heavy metals in the food web of Three Gorges Reservoir (China) [J]. *Chemosphere*, 2019, 232: 403-414
- [54] Espejo W, Padilha J A, Kidd K A, et al. Concentration and trophic transfer of copper, selenium, and zinc in marine species of the Chilean Patagonia and the Antarctic Peninsula area [J]. *Biological Trace Element Research*, 2020, 197(1): 285-293
- [55] 田甜, 文金华, 曾祥林, 等. 鲜活水产品质量安全风险监测与评估现状及展望[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(24): 8524-8530
- Tian T, Wen J H, Zeng X L, et al. Research status and prospect of quality and safety risk monitoring and assessment of fresh aquatic products [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(24): 8524-8530 (in Chinese)
- [56] 米娜莎. 我国水产品质量安全风险体系现状与问题研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015: 10-35
- Mi N S. Studies on present situation and application of aquatic products quality and safety risk analysis in China [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015: 10-35 (in Chinese)
- [57] Hedberg Y S, Lidén C, Odnevall Wallinder I. Correlation between bulk- and surface chemistry of Cr-tanned leather and the release of Cr(III) and Cr(VI) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 280: 654-661
- [58] Sidhu M S, Desai K P, Lynch H N, et al. Mechanisms of action for arsenic in cardiovascular toxicity and implications for risk assessment [J]. *Toxicology*, 2015, 331: 78-99
- [59] 李昇昇, 李敏, 朱晓辉, 等. 大亚湾海产中重金属的健康风险与海产消费建议[J]. *环境化学*, 2020, 39(2): 352-361
- Li S S, Li M, Zhu X H, et al. Heavy metals in selected marine organisms from Daya Bay: Human health risk assessment and advice for seafood consumption [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(2): 352-361 (in Chinese)
- [60] 莫小荣, 管超毅, 罗良娟, 等. 近年钦州沿海海水、沉积物及牡蛎重金属污染分析和评价[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(3): 554-561
- Mo X R, Guan C Y, Luo L J, et al. Analysis and evaluation of heavy metals pollution in seawater, sediments and oysters of Qinzhou coastal area in recent years [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(3): 554-561 (in Chinese)
- [61] 孙启耀. 烟台海岸典型生态敏感区表层沉积物重金属污染研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2011: 38-44
- Sun Q Y. Studies on heavy metals pollution in surface sediment from typical ecologically regions of Yantai coastal zone [D]. Yantai: Yantai University, 2011: 38-44 (in Chinese) ◆