

水生生物重金属富集规律研究

陈美玉^{1,2}, 周雅琪^{1,2}, 黄佳茵^{1,2}, 李苑¹, 余海霞², 杨水兵², 胡亚芹^{1,2*}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 馥莉食品研究院, 智能食品加工技术与装备国家(地方)联合实验室, 农业部农产品产后处理重点实验室, 农业部农产品营养功能评价实验室, 浙江省农产品加工技术研究重点实验室, 杭州 310058; 2. 浙江大学舟山海洋研究中心, 舟山 316021)

摘要: 重金属对水生生物具有毒害作用, 已被列入水中优先控制污染物名单。影响水生生物富集重金属的主要因素包括生活水域、生活习性、特殊生理形态及季节变化。水生植物可通过根、茎、叶等营养器官富集重金属, 且不同植物对重金属的吸收方式、积累能力和耐受水平不同。水生动物则通过呼吸、粘附和食物链途径富集重金属, 体内重金属含量与食物链层级无明显对应关系, 摄食习惯是主要影响因素。此外, 本研究总结近3年(2015~2017)我国近岸海域的重金属污染现状, 以期为中国近岸海域中水生生物的保护和海洋资源的可持续利用提供参考依据。

关键词: 重金属; 水生生物; 生物因素; 生物富集规律; 近岸海域

Accumulations of heavy metal in aquatic organisms

CHEN Mei-Yu^{1,2}, ZHOU Ya-Qi^{1,2}, HUANG Jia-Yin^{1,2}, LI Yuan¹, YU Hai-Xia²,
YANG Shui-Bing², HU Ya-Qin^{1,2*}

(1. National Engineering Laboratory of Intelligent Food Technology and Equipment, Key Laboratory for Agro-Products Postharvest Handling of Ministry of Agriculture, Key Laboratory for Agro-Products Nutritional Evaluation of Ministry of Agriculture, Zhejiang Key Laboratory for Agro-Food Processing, Fuli Institute of Food Science, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Ocean Research Center of Zhoushan, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

ABSTRACT: Heavy metals were considered as priorities to be controlled in the pollutant list, due to its toxic effect on aquatic organisms. Main factors affecting the enrichment of heavy metals in aquatic organisms included their habitats, living habits, special physiological morphology and seasonal changes. Aquatic plants enriched heavy metals via different approaches including roots, stems and leaves, and they showed a diversity in heavy metal absorption, accumulation and tolerance. However, for aquatic animals, feeding habits were the main factors, heavy metals were concentrated through respiration, adhesion and food chains and had no significant correlation with the food chain level. In addition, this paper summarized the prevalence of heavy metal pollution in the coastal areas of China from 2015 to 2017, and aimed to provide references for aquatic organisms protection and marine resources sustainability in the coastal regions of China.

KEY WORDS: heavy metals; aquatic organisms; biotic factor; bioaccumulation regulation; the coastal areas

基金项目: 十三五重点计划课题(2017YFD0400403)

Fund: Supported by the 13-th National Key Research and Development Program of China (2017YFD0400403)

*通讯作者: 胡亚芹, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。E-mail: yqhu@zju.edu.cn

*Corresponding author: HU Ya-Qin, Ph.D, Professor, Aquatic Product Processing and Storage, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China. E-mail: yqhu@zju.edu.cn

1 引言

我国拥有 300 万平方公里的海洋国土,包括 4 大海区和 9 个重要河口海湾。2017 年,全国海洋生产总值达 77611 亿元,海洋渔业实现增加值 4676 亿元^[1]。但是近年来近海捕捞量出现大幅下降。除海洋自身资源持续减少外,近岸海域易受陆地活动影响也是原因之一。仅 2017 年,直排海污染源污水排放总量达 6.3×10^5 万吨^[2]。

重金属是直排海污水中的一种环境污染物,具有高积累性,易对水生生物造成外源性危害。重金属的浓度及其对水生生物的影响主要取决于^[3-6]: 1)重金属的化学形态; 2)金属迁移到孔隙水和上覆水的概率; 3)微生物的有机化; 4)与底泥中有机物反应; 5)不同金属的协同和拮抗作用; 6)生物扰动、水体硬度、pH 值和盐分含量等因素。

基于此,本文在总结影响重金属积累能力的生物因素基础上,综述不同水生动物、植物的重金属富集规律。通过对近 3 年中国近岸海域中重金属环境的分析,了解水生生物的生长环境,以期为中国近岸海域中水生生物的保护和海洋资源可持续利用提供参考依据。

2 水体中重金属种类及生物富集因素

2.1 水体中优先控制的重金属来源及其毒害效应

美国环境保护署 (environmental protection agency, EPA) 根据不同物质的毒性、生物降解性以及在水体中出现的概率等因素,筛选出 65 类优先控制的污染物 (priority pollutant list)。表 1 列出 6 种水中优先控制重金属及其化合物的来源、存在形式、毒性及毒害效应。

2.2 影响水生生物富集重金属的生物因素

水生生物对重金属的积累能力是多种生物因素共同作用的结果。进入水中的重金属在生物因素作用下从化学静态平衡转变为生理稳定状态^[13,14]。

2.2.1 生活水域

海水水域与淡水水域的渗透压不同,因此生活其中的生物对环境渗透压的耐受性也存在较大差异。在超渗透和低渗透介质中,水生生物对离子摄入和排出量也存在明显区别,这可能是通过改变生物酶活性和选择性基因表达而造成的^[15]。

此外,不同水域中的含水微粒物质(如粘土矿物)的组成不同,影响重金属污染物(如二价汞离子)的携带和释放作用不同。如在上海市 2018 年对水产品中重金属污染情况的一项调查中发现,结合重金属的 MPI 值(金属污染指数值),海水产品的重金属镉、铅、砷污染程度均高于淡水产品^[16]。

2.2.2 生活习性

水体环境具有很强的流动性,因此在调查取样时必须从相同的群落生境中选取生物,确保实验样品的一致性,减少环境因素的误差影响。Le 等^[17]证实日本鳗鲡(溯河洄游性鱼类)体内金属含量与环境沉积物相关性不显著,而非洄游性鱼类则与环境之间存在显著相关性。此外,水生生物的特殊发育阶段如脱皮、脱壳以及鱼种在幼年和成年阶段的不同觅食习惯也会影响重金属的含量^[18,19]。在对贝类进行长时间的暴露试验中发现,不同时期贝类中重金属积累速率存在变化,当重金属的积累速率低于生长速率时,表现出生物稀释作用。Qiu 等^[20]研究表明,随着馬拉巴笛鯛的体重增大,重金属 Pb、Zn、Cr 和 As 含量降低。

表 1 部分水中优先控制的重金属及其化合物
Table 1 Part of priority pollutant list of heavy metals and compounds in water

名称	水体中来源	存在形式及毒性	毒害效应
As	自然界分布	单质砷: 无毒; 有机砷: 毒性较弱; 三价砷: 剧毒	抑制酶活或者取代 ATP 形成中的磷酸盐, 破坏磷酸化作用 ^[7,8]
Cd	工业废水	胶粒态和颗粒态并存, 吸附沉淀; 离子态: 毒性大	体内钙离子流失, 引起病体骨质疏松、萎缩; 结合酶等大分子, 抑制生理活性 ^[9]
Cr	自然界分布、制革工业、镀铬厂、石油精炼厂冷凝水	六价态毒性最高, 三价态次之, 二价态和金属态毒性最小	引起鼻中隔糜烂、血铬、肺癌 ^[10]
Cu	工业废水、固体废弃物	多种存在形式, 其中以 Cu^{2+} 为主要致毒形式	适量时, 与酶结合催化生理反应; 缺乏或过量时, 引起机体代谢紊乱, 过量的 Cu^{2+} 是强烈的细胞代谢抑制剂 ^[11]
Pb	冶金、化工等工业废水, 农药残留, 汽油抗爆剂	硫化铅、氧化铅	随血液分布, 储存在器官中, 引起神经炎症等, 潜在的泌尿系统致癌物 ^[9,11]
Hg	含汞农药, 污水灌溉, 工业生产废料及含汞废气的沉降	烷基汞, 其中甲基汞剧毒	结合酰胺物质, 溶于类脂类化合物, 渗透血脑屏障, 影响神经系统 ^[12]

2.2.3 特殊生理形态结构

水生生物富集重金属的途径主要有食物链摄入和污染物接触吸附等, 因此特定物种的特殊生理形态结构对重金属吸附有较大影响。直接与污染介质(如重金属超标的水体、底泥、腐殖质等)接触的器官能调节体内金属含量。研究发现, 通过鳃、皮肤呼吸的生物对重金属的吸附作用不同于在空气中呼吸的生物体^[21]。相较于通过大气颗粒 PM2.5 进入呼吸道的重金属颗粒, 通过皮肤呼吸直接摄入的重金属对生物体的长期累积危害更为明显。此外, 动物外壳对重金属的吸收途径通常是被动转运, 其外壳结构也会影响吸收效率^[22,23]。例如环节动物体表的蛋白质薄且多孔, 而高等甲壳动物的骨架则由坚固的钙和甲壳素组成, 对重金属吸收有较好的抑制作用。

2.2.4 季节性变化

重金属的季节性变化受生物代谢活性影响。当环境温度下降时, 生物体新陈代谢速度也随着下降, 从而导致重金属的渗入和释放速度发生变化。另外, 随着季节的变化, 生物体中的脂肪积累也发生改变。由于类脂类物质对重金属化合物具有很强的亲和力^[24], 因此脂肪含量的季节性变化对生物体有机金属化合物的储藏能力会产生较大影响。此外季节性降雨也会通过改变淡水水量和水体中重金属本底的变化, 从而影响生物体内重金属含量。

3 水生生物对重金属的富集规律

3.1 水生植物的重金属富集规律

常见的重金属污染对植物的毒害作用有: 抑制生长、限制呼吸作用、降低对矿物质的吸收、损坏细胞超微结构或降低光合强度等^[25,26]。通常认为, 植物通过改变根际的 pH 值和氧化还原电位, 使水体或土壤中的可溶性金属的转运到植物体内。根据不同植物积累重金属能力的不同, 可将植物大致分为 3 种类型, 排斥植物、指示植物和积累植物, 其中积累植物是指无论环境中金属离子浓度的高低, 植物都能将其吸收并富集在根和枝叶中^[27]。超富集植物是积累植物的一类, 富集能力通常是普通植物在同一生长条件下的 100 倍以上, 如东南景天。超富集植物对重金属的富集和耐受机制可能是: 根际对土壤重金属有活化效应; 对重金属具有快速吸收转运体系; 对重金属具有很强的解毒储存能力。目前该种植物多用于重金属环境污染的修复^[28-30]。

3.1.1 浮游植物

浮游植物的存活周期短, 对水体中重金属变化敏感, 易发生“水体中金属浓度不高, 但是浮游植物类却受到高度污染”的现象^[31]。因此一般情况下, 浮游植物总金属含量的增加不能指示水体中的实际金属浓度, 而只是用以判断水体的平均金属含量。

3.1.2 藻类

藻类大多浸没在水中, 与水体接触面积大; 同时其叶

片纤薄, 叶表皮没有角质层和蜡质层, 能直接吸收水分和矿物质元素, 因此藻类更有可能是依赖茎、叶而不是根从水体中吸收富集重金属^[32,33]。

相较于浮游藻类, 大型海洋藻类具有固着性和较长的生长周期, 能代表更长时期内水体中重金属污染的情况^[34]。同时藻类通过被贝类、甲壳类和鱼类摄入, 会造成食物链富集放大效应。这对研究水生生物重金属富集规律有重要意义, 因此是重金属污染的指示生物^[35]。

3.1.3 高等水生植物

高等水生植物主要指水生维管束植物, 它们具有发达的机械组织和高大的植物个体, 包括: 挺水植物、浮叶植物、漂浮植物和沉水植物^[36]。

不同于藻类, 高等水生植物利用根部从沉积物中结合更多的金属, 这主要是由于生理功能的差异所导致。通过根吸附进入高等水生植物体内的重金属必须是溶解状态, 因为根对重金属的吸收类似于对营养物质的吸收, 都是经由主动、被动传输或黏液富集的方式^[37]。Akmukhanova 等^[38]发现在同一物种中不同器官对 Cd、Zn、Pb 和 Cu 的重金属累积作用存在差别, 其中叶部中重金属含量通常最高。

3.2 水生动物的重金属富集规律

重金属进入水生动物体内有 3 种基本途径: 1)呼吸渗入(经由鱼鳃、皮肤等); 2)被吸附在动物身体表面后进入机体; 3)经由食物摄入(固态食物、溶解物质等)。因此水生动物的摄食习惯和再吸收速率是评价其体内重金属含量的主要因素。

3.2.1 浮游动物

大部分浮游动物都属于滤食类。季节变化对浮游动物吸附重金属有显著影响, 不同物种的浮游动物对重金属吸附效率也大相径庭。属于桡虫类的磷虾和属于腔肠动物的栉水母同为浮游动物, 但其对水体中锌和钴的吸附能力不同^[39]。

3.2.2 贝壳类

通常情况下, 在被重金属污染的水域中, 固态的沉积物、微粒和腐殖质中重金属含量最高^[40,41]。而贝壳类是底栖滤食性动物, 迁移能力弱, 活动范围小, 因此对区域性环境污染缺乏回避能力, 是最容易受到重金属污染的水产动物之一^[42,43]。

在贝壳类中, 影响重金属吸收动力学的因素主要有: 季节变化、金属浓度、接触时长、不同器官对金属的吸收和贮藏效率、多种金属间的协同和拮抗作用等^[44]。Marasinghe 等^[45]实验证明, 淡水双壳类 *Hyridella australis* 积累的 Cd 含量与中 Ca 含量成负相关, 存在金属间的拮抗效应。

3.2.3 甲壳类

甲壳类动物尤其是高等甲壳动物比贝壳类处于更高食物层级, 因此除了与贝类相似的生物因素, 一些特殊生

理状态也会影响甲壳类体内的重金属。据报道,蟹的每次脱壳,都会使其失去较高百分比的 Zn^[46]。不同甲壳类动物体内的重金属含量和种类存在差异:克氏原螯虾内脏对 Mn 的富集能力最大,达到 241.43 mg/kg^[47],而南美白对虾头部对铅(Pb)富集能力较强,高达 230 mg/kg^[48]。

此外,特定重金属在甲壳类动物的组织体内具有重要的生物学意义,如 Cu²⁺是甲壳类动物血液中血蓝蛋白的中心原子;Mg 对激活克氏原螯虾体内代谢酶活性有重要作用,是其外壳结构的必需微量元素等。

3.2.4 鱼类

鱼类处在水生食物链的顶端,是重要的水产经济物种,研究鱼体尤其是肌肉中重金属含量可以得到重金属随食物链富集进入鱼体的规律。

鱼体器官对重金属的亲合特性、吸附能力和代谢水平的不同,决定重金属在器官中的分布存在差异。研究发现,鱼肌肉组织中的重金属绝对值往往低于其他器官^[49,50]。

根据摄食习惯的不同,与沉积物有关的生物体内重金属水平高于其他生物。Ciesielski 等发现^[51],杂食性鱼类比单纯肉食鱼体内重金属含量更高,而底栖类的甲壳类和贝类对重金属富集能力强于鱼类。Sakurai 等^[52]发现沉积物中的持久性污染物存在向海洋底栖鱼类的非食物链转移方式。这说明在水生系统的食物链中,重金属富集规律不同与传统意义上认为在食物链顶端能找到最高的污染物含量(如有机杀虫剂 DDT),在水生系统中重金属的富集规律与食物链所处层级无显著对应关系^[53]。

4 2015~2017 年中国近岸海域重金属环境现状

近岸海域是与大陆、岛屿、群岛等海岸相毗连、领海外部界限向陆一侧的海域,其中渤海近岸海域为沿岸低潮线向海 12 海里以内的海域。对 2015~2017 年中国近岸海域的上覆水和沉积物进行分析,了解其中重金属的污染现状。

4.1 近岸海域水质的重金属分析

近岸海域水质评价项目共有 29 项,涉及到重金属种类的有 9 项:汞、镉、铅、铬(六价铬、总铬)、铜、锌、硒、镍,其中砷作为类重金属物质,也被列入海洋重要渔业水域水质评价项目。

通过对 2015~2017 年《中国近岸海域生态环境质量公报》分析^[2,54,55],发现近 3 年全国近岸海域水质基本保持稳定,主要超标因子为无机氮和活性磷酸盐,但部分海域存在重金属超标现象。2015 年和 2016 年,渤海海域均监测到超标现象,超标重金属有铜、铅、锌。就全国重金属排放量分析,渤海铅排放量最大,达 1155.37 kg;东海镉排放量最大,达 344.02 kg。2017 年,南海海区有 3 个点位监测到铜超标现象。表 2 显示的是超标重金属的具体项目、浓度范围、平均浓度和超标所在海域^[56]。

表 2 2015~2017 年全国近岸海域重金属超标因子统计
Table 2 Statistics of heavy metal exceeded standard in coastal nationwide between 2015 and 2017

监测项目	标准限值浓度 /(mg/L)	浓度范围 /(mg/L)	超标所在 海域
2015 年			
铅	≤0.005	未检出~0.0124	锦州
2016 年			
铅	≤0.005	未检出~0.0268	锦州
铜	≤0.010	未检出~0.0259	锦州、葫芦岛
锌	≤0.050	未检出~0.124	葫芦岛
2017 年			
铜	≤0.010	未检出~0.0288	江门、湛江

4.2 近岸海域沉积物中重金属分析

重要海湾沉积物质量评价项目包括 10 项^[56]:石油类、铬、砷、铜、锌、镉、铅、总汞、有机碳、硫化物,其中有 7 项与重金属或类重金属相关,达标评价按二类标准限值。表 3 所示是 2015~2017 年部分重要海湾沉积物的分类和主要超标污染物。

表 3 2015~2017 年部分重要海湾沉积物状况
Table 3 Characteristics of the deposition in some important estuaries between 2015 and 2017

海湾	2015 年			2016 年			2017 年		
	第一类/%	第二类/%	超标污染物	第一类/%	第二类/%	超标污染物	第一类/%	第二类/%	超标污染物
辽东湾							88.5	11.5	
渤海湾	42.9	57.1	石油类、砷	100			66.7	33.3	
黄河口				100			100	0	
胶州湾	75	15	滴滴涕	60	40	铬 ^a 、铜	100	0	
长江口	77.8	22.2	铜	88.9	11.1	铜 ^b	100	0	
杭州湾	100			100			83.3	16.7	
闽江口				100			0	100	
珠江口(深圳海域)	16.7	83.3	铜、锌				60	40	
北部湾	100			95.7	4.3	镉	86.2	3.4	铬、石油类

注: %: 该海湾沉积物符合相应类别限值的比率; a: 超 0.14 倍; b: 超 0.04 倍。

5 结 论

重金属能通过摄食、呼吸等方式蓄积在生物体内, 影响生物大分子的重要生理功能, 毒害效应显著。而生活水域、生活习性、特殊生理形态以及季节性变化等因素会影响水生生物对重金属的积累。水生植物可通过根、茎、叶富集重金属, 不同植物的吸收方式、积累能力不同, 对重金属的耐受水平也不尽相同; 水生动物则通过呼吸、粘附和食物链富集重金属, 但其富集能力不随食物链层级的提高而显著增强, 摄食习惯是主要影响因素。了解水体的污染现状, 对评估水产品的重金属安全性十分必要。2015~2017 年全国近岸海域水质基本保持稳定, 渤海和南海海域的水体中存在部分重金属超标现象; 胶州湾、长江口、珠江口(深圳海域)及北部湾等重要海湾的沉积物中也存在重金属污染现象, 但总体近岸海域水质良好。

参考文献

- [1] 2017 中国土地矿产海洋资源统计公报[N]. [2018-5-21]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/tjgb/>
- Statistical bulletin of China Resources in 2017 [N]. [2018-5-21]. <http://www.mnr.gov.cn/sj/tjgb/>
- [2] 2017 中国生态环境状况公报[N]. [2018-5-31]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkqb/lnzghjzkqb/>
- Statistical bulletin of China Ecological Environment in 2017 [N]. [2018-5-31]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkqb/lnzghjzkqb/>
- [3] Puttiwongrak A, Suteerasak T, Mai PK, *et al.* Application of multi-monitoring methods to investigate the contamination levels and dispersion of Pb and Zn from tin mining in coastal sediments at Saphan Hin, Phuket, Thailand [J]. *J Cleaner Prod*, 2019, 218(1): 108–117.
- [4] Quintela FM, Lima GP, Silveira ML, *et al.* High arsenic and low lead concentrations in fish and reptiles from taim wetlands, a Ramsar site in southern Brazil [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 660(2): 1004–1014.
- [5] Fajardo C, Costa G, Nande M, *et al.* Heavy metals immobilization capability of two iron-based nanoparticles: Soil and freshwater bioassays to assess ecotoxicological impact [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 656(1): 421–432.
- [6] Jeong C, Kang H, Lee M, *et al.* Effects of polluted seawater on oxidative stress, mortality, and reproductive parameters in the marine rotifer *Brachionus koreanus* and the marine copepod *Tigriopus japonicus* [J]. *Aquatic Toxicol*, 2019, (3): 39–46.
- [7] Potgieter S, Pinto A, Sigudu M, *et al.* Long-term spatial and temporal microbial community dynamics in a large-scale drinking water distribution system with multiple disinfectant regimes [J]. *Water Res*, 2018, 139(22): 406–419.
- [8] Coryell M, Mcalpine M, Pinkham NV, *et al.* The gut microbiome is required for full protection against acute arsenic toxicity in mouse models [J]. *Nature Commun*, 2018, 9(1): 203–215.
- [9] Lanier C, Bernard F, Dumez S, *et al.* Combined toxic effects and DNA damage to two plant species exposed to binary metal mixtures (Cd/Pb) [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 167(12): 278–287.
- [10] Sethy TR, Sahoo PK. Highly toxic Cr (VI) adsorption by (chitosan-g-PMMA)/silica bionanocomposite prepared via emulsifier-free emulsion polymerization [J]. *Int J Biolog Macromol*, 2019, 122(4): 1184–1190.
- [11] Guy M, Accrombessi M, Fievet N, *et al.* Toxics (Pb, Cd) and trace elements (Zn, Cu, Mn) in women during pregnancy and at delivery, South Benin, 2014–2015 [J]. *Environ Res*, 2018, 167(21): 198–206.
- [12] Yoo B, Kim B, Joshi P, *et al.* Effect of dietary patterns on the blood/urine concentration of the selected toxic metals (Cd, Hg, Pb) in Korean children [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2018, 27(4): 1227–1237.
- [13] Maresca V, Fusaro L, Sorbo S, *et al.* Functional and structural biomarkers to monitor heavy metal pollution of one of the most contaminated freshwater sites in Southern Europe [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2018, 163(5): 665–673.
- [14] Alzahrani DA, Selim EM, El-sherbiny MM. Ecological assessment of heavy metals in the grey mangrove (*Avicennia marina*) and associated sediments along the Red Sea coast of Saudi Arabia [J]. *Oceanologia*, 2018, 60(4): 513–526.
- [15] Vagner M, Santigosa E. Characterization and modulation of gene expression and enzymatic activity of delta-6 desaturase in teleosts: A review [J]. *Aquaculture*, 2011, 315(1-2): 131–143.
- [16] 蔡华, 罗宝章, 熊丽蓓, 等. 上海市水产品中重金属污染情况[J]. *卫生研究*, 2018, 47(5): 740–743.
- Cai H, Luo BZ, Xiong LB, *et al.* Heavy metal pollution in aquatic products in Shanghai [J]. *J Hyg Res*, 2018, 47(5): 740–743.
- [17] Le DQ, Chino N, Shirai K, *et al.* Trace metals in Japanese eel *Anguilla japonica* in relation to ecological migratory types and growth stages [J]. *Estuarine, Coastal Shelf Sci*, 2010, 87(3): 405–410.
- [18] Marschner L, Triebkorn R, Köhler H. Arresting mantle formation and redirecting embryonic shell gland tissue by platinum 2⁺ leads to body plan modifications in *Marisa cornuarietis* (Gastropoda, Ampullariidae) [J]. *J Morphol*, 2012, 273(8): 830–841.
- [19] Jezierska B, Ługowska K, Witeska M. The effects of heavy metals on embryonic development of fish (a review) [J]. *Fish Physiol Biochem*, 2009, 35(4): 625–640.
- [20] Qiu Y, Lin D, Liu J, *et al.* Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2011, 74(3): 284–293.
- [21] Kumar A, Singh N, Pandey R, *et al.* Biochemical and molecular targets of heavy metals and their actions [J]. *Biomed Appl Metals*, 2018, 21(27): 297–319.
- [22] Aydoğan Z, Şişman T, İncekara Ü, *et al.* Heavy metal accumulation in some aquatic insects (coleoptera: hydrophilidae) and tissues of *Chondrostoma regium* (Heckel, 1843) relevant to their concentration in water and sediments from Karasu River, Erzurum, Turkey [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2017, 24(10): 9566–9574.
- [23] Prabhakar D, Prasad D, Vidyarthi AS. Heavy metals: Their impact on ecosystem and methods of detection [J]. *Indian J Environ Protect*, 2016, 36(9): 751–766.
- [24] Li S, Du L, Tsona NT, *et al.* The interaction of trace heavy metal with lipid monolayer in the sea surface microlayer [J]. *Chemosphere*, 2018, 196(24): 323–330.
- [25] Christou A, Theologides CP, Costa C, *et al.* Assessment of toxic heavy

- metals concentrations in soils and wild and cultivated plant species in Limni abandoned copper mining site, Cyprus [J]. *J Geochem Explorat*, 2017, 178(86): 16–22.
- [26] Clemens S, Ma JF. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods [J]. 2016, 15(21): 489–512.
- [27] Khare S, Khare R, Jaya. Removal of toxic heavy metals from biosphere by plants [J]. *Int J Chem Sci*, 2016, 14(3): 1541–1548.
- [28] Ravanbakhsh M, Ronaghi A, Taghavi SM, *et al.* Screening for the next generation heavy metal hyperaccumulators for dryland decontamination [J]. *J Environ Chem Eng*, 2016, 4(2): 2350–2355.
- [29] 杨瑞卿, 肖扬, 申晨. 采煤塌陷区土壤重金属污染及植物吸收富集特征[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(20): 291–294.
Yang RQ, Xiao Y, Shen C, *et al.* Heavy metal pollution and plant absorption and enrichment characteristics in coal mining subsidence area [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(20): 291–294.
- [30] 吴先亮, 黄先飞, 全文选, 等. 黔西煤矿区周边土壤重金属形态特征、污染评价及富集植物筛选[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 313–321.
Wu XL, Huang XF, Quan WX, *et al.* Chemical forms and risk assessment of heavy metals in soils and selected hypertolerant plants around a coal mining area in western Guizhou province [J]. *Bulle Soil Water Conserv*, 2018, 38(5): 313–321.
- [31] 王颖雪, 王沛芳, 王超, 等. 太湖浮游植物中重金属含量的季节变化特征及湖区差异[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(2): 258–265.
Wang YX, Wang PF, Wang C, *et al.* Seasonal variation and distribution characteristics of heavy metals in phytoplankton of different parts of Lake Taihu [J]. *J Lake Sci*, 2015, 27(2): 258–265.
- [32] Singh NK, Raghubanshi AS, Upadhyay AK, *et al.* Arsenic and other heavy metal accumulation in plants and algae growing naturally in contaminated area of West Bengal, India [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2016, 130(31): 224–233.
- [33] 王奇, 葛姝洁, 王传花, 等. 水华期间藻类分层胞外聚合物与重金属的相互作用机制研究[J]. *环境保护与循环经济*, 2017, 37(3): 35–40.
Wang Q, Ge SJ, Wang CH, *et al.* The interaction mechanism of algae stratified extracellular polymeric substances with heavy metals during algae bloom [J]. *Environ Protect Circul Econom*, 2017, 37(3): 35–40.
- [34] Sinaei M, Loghmani M, Bolouki M. Application of biomarkers in brown algae (*Cystoseira indica*) to assess heavy metals (Cd, Cu, Zn, Pb, Hg, Ni, Cr) pollution in the northern coasts of the Gulf of Oman [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2018, 164(42): 675–680.
- [35] Kipigroch K. The use of algae in the process of heavy metal ions removal from wastewater [J]. *Desalinat Water Treat*, 2018, 134(46): 289–295.
- [36] Chappuis E, Gacia E, Ballesteros E. Environmental factors explaining the distribution and diversity of vascular aquatic macrophytes in a highly heterogeneous Mediterranean region [J]. *Aquat Botany*, 2014, 113(14): 72–82.
- [37] Kumar V, Singh J, Chopra AK. Assessment of plant growth attributes, bioaccumulation, enrichment, and translocation of heavy metals in water lettuce (*Pistia stratiotes* L.) grown in sugar mill effluent [J]. *Int J Phytoremed*, 2018, 20(5): 507–521.
- [38] Akmukhanova NR, Zayadan BK, Sadvakasova AK, *et al.* Consortium of higher aquatic plants and microalgae designed to purify sewage of heavy metal ions [J]. *Russian J Plant Physiol*, 2018, 65(1): 143–149.
- [39] Benson NU, Adedapo AE, Fred-ahmadu OH, *et al.* New ecological risk indices for evaluating heavy metals contamination in aquatic sediment: A case study of the Gulf of Guinea [J]. *Region Stud Marine Sci*, 2018, 18(3): 44–56.
- [40] Wang Z, Wang Y, Hou Y, *et al.* Relationship between landscape pattern and spatial variation of heavy metals in aquatic sediments in headwaters area of Yuqiao Reservoir [J]. *Huanjing Kexue/Environ Sci*, 2016, 37(9): 3423–3429.
- [41] Isibor PO. Heavy metals, nutrients, total hydrocarbons and zooplankton community structure of Osse River, Edo State, Nigeria [J]. *Jordan J Biolog Sci*, 2017, 10(2): 109–116.
- [42] Wang X, Gu Y, Wang Z, *et al.* Biological risk assessment of heavy metals in sediments and health risk assessment in bivalve mollusks from Kaozhouyang Bay, South China [J]. *Marine Pollut Bull*, 2018, 133(24): 312–319.
- [43] Farrell H, Baker P, Webster G, *et al.* An assessment of potential heavy metal contaminants in bivalve shellfish from aquaculture zones along the coast of New South Wales, Australia [J]. *Food Protect Trend*, 2018, 38(1): 18–25.
- [44] Ragi AS, Leena PP, Cheriyan E, *et al.* Heavy metal concentrations in some gastropods and bivalves collected from the fishing zone of South India [J]. *Marine Pollut Bull*, 2017, 118(1-2): 452–458.
- [45] Marasinghe CM, Taylor AM, Krikowa F, *et al.* Exposure of the freshwater bivalve *Hyridella australis* to metal contaminated sediments in the field and laboratory microcosms: Metal uptake and effects [J]. *Ecotoxicology*, 2017, 26(3): 415–434.
- [46] Chuan OM, Ali NM, Shazili NM, *et al.* Selected heavy metals concentration in edible tissue of the mud crab, genus scylla from Setiu Wetlands, Terengganu [J]. *J Sustainab Sci Manag*, 2017, 12(2): 112–118.
- [47] Yuan J, Gu Z, Zheng Y, *et al.* Accumulation and detoxification dynamics of microcystin-LR and antioxidant responses in male red swamp crayfish *Procambarus clarkia* [J]. *Aquatic Toxicol*, 2016, 177(42): 8–18.
- [48] Lobato RO, Manske NS, Fattorini D, *et al.* The effect of diet enriched with lipoic acid in the accumulation and metabolization of metals in different organs of *Litopenaeus vannamei* [J]. *Aquacult Res*, 2018, 49(12): 3702–3710.
- [49] Zhang X, Wang J, Zhao Y, *et al.* Residue characteristics of heavy metals in cultured fish muscles from the south bank of the Yellow River in Zhengzhou [J]. *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environ Sci*, 2018, 38(6): 2363–2370.
- [50] Khallaf EA, Authman MN, Alne-na-ei AA. Contamination and ecological hazard assessment of heavy metals in freshwater sediments and *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) fish muscles in a Nile River Canal in Egypt [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25(14): 13796–13812.
- [51] Ciesielski TM, Pastukhov MV, Leeves SA, *et al.* Differential bioaccumulation of potentially toxic elements in benthic and pelagic food chains in Lake Baikal [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(15): 15593–15604.
- [52] Sakurai T, Kobayashi J, Imaizumi Y, *et al.* Non-food-chain transfer of sediment-associated persistent organic pollutants to a marine benthic fish [J]. *Marine Pollut Bull*, 2009, 58(7): 1072–1077.
- [53] 2016 中国环境状况公报[N]. [2017-6-05]. [http:// www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/](http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/) Statistical bulletin of China Ecological Environment in 2016 [N].

[2017-6-05]. [http:// www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/](http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/)

[54] 2015 中国环境状况公报[N]. [2016-6-01]. [http:// www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/Statistical_bulletin_of_China_ecological_environment_in_2015 \[N\].](http:// www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/Statistical_bulletin_of_China_ecological_environment_in_2015_[N].) [2016-6-01]. <http:// www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/>

[55] Goodyear KL, McNeill S. Bioaccumulation of heavy metals by aquatic macro-invertebrates of different feeding guilds: A review [J]. Sci Total Environ, 1999, 229(1-2): 1-19.

[56] GB 18668-2002 中华人民共和国国家标准 海洋沉积物质量标准[S]. GB 18668-2002 PRC national standard-Marine sediment quality [S].

(责任编辑: 武英华)

作者简介



陈美玉, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工。
E-mail: my_chen@zju.edu.cn



胡亚芹, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。
E-mail: yqhu@zju.edu.cn



“发酵食品及其安全性评价” 专题征稿函

发酵食品因其独特的风味受到消费者的普遍欢迎。发酵是一种传统的食品储存与加工方法, 是指利用有益微生物加工制造的一类食品, 包括发酵乳制品、酒类、泡菜、酱油、食醋、豆豉等。由于其独特的加工方式, 发酵食品或存在一定的安全隐患, 可能会影响人体健康。

鉴于此, 本刊特别策划了“**发酵食品及其安全性评价**”专题, 主要围绕**(1)菌种的选育和保藏; (2)发酵工艺的条件优化, 发酵机制, 发酵工程动力学; (3)发酵食品的分析与检测; (4)发酵食品的安全性评价及风险评估类; (5)发酵食品的种类与加工方式; (6)发酵食品的营养成分及其对人体健康的影或您认为有意义的相关领域**展开论述和研究, 本专题计划在 2019 年 8 月出版。

鉴于您在该领域的成就, 本刊主编吴永宁研究员及编辑部全体成员特别邀请您为本专题撰写稿件, 以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。综述及研究论文均可, 请在 2019 年 6 月 15 日前通过网站或 E-mail 投稿。我们将快速处理并优先发表。

同时, 希望您能够推荐该领域的相关专家并提供电话和 E-mail。

感谢您的参与和支持!

投稿方式:

网站: www.chinafoodj.com

E-mail: jfoodsqa@126.com

《食品安全质量检测学报》编辑部