

环境与生物因素对鱼体甲基汞生物富集的协同作用：研究进展与展望

田甜¹ 刘雨洁¹ 王婷婷² 陈路锋^{1*} 曹梦西^{1*}

1 江汉大学环境与健康学院 2 华中农业大学资源与环境学院

DOI:10.12238/eep.v8i3.2575

[摘要] 甲基汞作为高毒性有机汞形态,通过食物链的生物放大效应在鱼体富集,严重威胁生态系统和人类健康。本文系统综述了鱼体甲基汞生物富集的多维度影响因素及其相互作用机制。环境因素方面,重点探讨了水体甲基汞本底浓度、温度、溶解氧、pH以及溶解性有机质等关键参数的作用规律。生物因素方面,深入分析了营养级效应、鱼类生理特性、生物稀释效应以及微生物群落的调控机制。特别阐述了甲基汞在鱼体内的吸收、分配过程,包括(1)通过L-氨基酸转运体跨肠吸收;(2)与血红蛋白Cys93残基结合的红细胞转运过程;(3)靶器官中与硫醇/硒醇蛋白的特异性结合。本综述揭示,甲基汞的生物富集是环境-生物-分子多层因素非线性耦合的结果,其中溶解氧与温度协同调控的甲基化-去甲基化平衡,以及DOM分子特性决定的汞生物有效性是当前研究的薄弱环节。未来研究应重点关注环境-生物-人为活动的多因素耦合机制,建立跨尺度预测模型,并阐明甲基汞在生物体内动态归趋的分子调控网络,为制定差异化的汞污染防控策略和水产品安全保障体系提供了理论依据。

[关键词] 鱼; 甲基汞; 生物富集; 影响因素; 健康风险

中图分类号: P618.68 文献标识码: A

The synergistic effect of environmental and biological factors on the bioaccumulation of methylmercury in fish: research progress and prospects

Tian Tian¹ Yujie Liu¹ Tingting Wang² Lufeng Chen^{1*} Mengxi Cao^{1*}

1 School of Environment and Health, Jiangnan University

2 College of Resources & Environment of Huazhong Agricultural University

[Abstract] Methylmercury, as a highly toxic form of organic mercury, accumulates in fish through the biomagnification effect of the food chain, posing a serious threat to ecosystems and human health. This article systematically reviews the multidimensional influencing factors and their interaction mechanisms of methylmercury bioaccumulation in fish. In terms of environmental factors, the focus was on exploring the effects of key parameters such as methylmercury background concentration, temperature, dissolved oxygen, pH, and dissolved organic matter in water bodies. In terms of biological factors, in-depth analysis was conducted on trophic level effects, physiological characteristics of fish, biological dilution effects, and regulatory mechanisms of microbial communities. Specially elaborated on the absorption and distribution process of methylmercury in fish, including(1) cross intestinal absorption through L-amino acid transporters;(2) The red blood cell transport process that binds to the Cys93 residue of hemoglobin;(3)Specific binding to thiol/selenol proteins in target organs. This review reveals that the bioaccumulation of methylmercury is the result of nonlinear coupling of environmental, biological, and molecular factors. Among them, the methylation demethylation equilibrium regulated by the synergistic regulation of dissolved oxygen and temperature, as well as the mercury bioavailability determined by DOM molecular characteristics, are currently weak areas in research. Future research should focus on the multi factor coupling mechanism of environment, biology, and human activities, establish cross scale prediction models, and elucidate the molecular regulatory network of methylmercury's

dynamic fate in organisms, providing a theoretical basis for developing differentiated mercury pollution prevention and control strategies and aquatic product safety assurance systems.

[Key words] fish; Methylmercury; Biological enrichment; Influencing factors; Health risks

引言

汞(Hg)是一种广泛存在的全球性持久性污染物,具有高毒性、高累积性和长距离迁移的特征。自然界中的汞在化学形态上分为元素汞(Hg^0)、二价无机汞(Hg^{2+})和有机汞(甲基汞(MeHg)、二甲基汞(DMeHg)等)。不同形态的汞呈现出不同的理化性质和毒性,且三种汞形态之间可以发生相互转化。与元素汞和无机汞相比,甲基汞因其高脂溶性,更容易在生物体内蓄积,对人类健康的威胁更大^[1]。甲基汞可造成神经系统、心血管系统、免疫系统和肾脏等多器官的毒性损伤,尤其会对胎儿的中枢神经发育产生严重损伤,严重时甚至可能导致死亡^[2]。食用被甲基汞污染的鱼类等水产品是人类暴露甲基汞的主要途径之一,历史上发生过多次甲基汞中毒事件,包括上世纪日本的水俣病事件、伊拉克汞中毒事件^{[3][4,3]}以及我国的松花江汞污染事件。

甲基汞在鱼类中的生物富集不仅威胁食品安全和人类健康,还对全球渔业经济产生深远影响。高汞污染区域的水产品常因消费警示或贸易限制而面临市场价值下降,直接影响渔业收入。例如,某些高营养级鱼类(如金枪鱼、鲨鱼)因甲基汞富集水平较高,其捕捞和销售受到严格监管。据估算,全球每年因汞污染导致的渔业经济损失可达数十亿美元,包括直接收益减少、监测成本增加以及生态修复支出(UNEP. (2019). Global Mercury Assessment 2018. Geneva:United Nations Environment Programme.)。随着全球汞污染治理(如《水俣公约》)的推进,渔业生产模式可能进一步调整,包括推广低汞品种养殖、优化捕捞策略以及加强供应链溯源,以平衡经济效益与健康风险。因此,深入理解甲基汞生物富集规律对制定可持续渔业管理政策至关重要。

本文系统综述了鱼体甲基汞生物富集的多维度影响因素及其相互作用机制,阐述了甲基汞在鱼体内的吸收、分配过程,并结合水产养殖过程中可能涉及到的环境因素变化讨论了水产品安全风险,最后展望了甲基汞生物富集的未来研究方向。

1 甲基汞的来源与分布

1.1 甲基汞的来源。大气中的元素汞通过沉降作用进入土壤和水体环境后会转变为无机汞,随后在环境因素的影响以及微生物的甲基化作用下转化为难降解且高毒性的甲基汞^{[5][6,7]}。除了汞形态的自然转化外,农业活动中含汞农药的使用、生产活动中产生的工业废水、以及汞矿的开采等人类活动也是甲基汞的重要来源^[8]。

现有研究表明,环境条件(pH、温度、湿度等)、水体和土壤中微生物的种类和数量和有机底物的可利用性等因素都会影响甲基汞的生成。Dai等人使用随机森林和结构方程模型综合分析了78个实地采样样本和来自文献的417个样本后发现,温度和降水是甲基汞生成的重要调节因素^[5]。此外,Zhang和Du调查发现稻田和海洋环境的沉积物中具有较高浓度的甲基汞^[9,10],进一

步研究发现这主要是因为二者的沉积物中富含有机质和硫酸盐还原菌(SRB)^[11],而硫酸盐还原菌和铁还原菌是甲基汞生成的主要微生物^[12]。值得注意的是,沉积物中的有机质、硫化物和汞的可利用性也是影响甲基汞生成的影响因素。Xia等人研究发现高有机废水的输入会显著增加沉积物中SRB的数量,从而促进甲基汞的生成^[13]。

1.2 甲基汞的分布。甲基汞在环境中的分布受到环境因素、生物因素和人类活动的影响^[14]。过往研究发现,稻田、红树林湿地和滨海湿地的沉积物中甲基汞浓度普遍较高,尤其是稻田系统,其甲基汞浓度可达 $55.7 \mu\text{g}/\text{kg}$ ^[5,15,16]。稻田系统中甲基汞的高富集程度主要归因于其特有的土壤条件、高浓度的溶解性有机质以及水稻对甲基汞较强的富集能力^[17]。值得注意的是,中国主要红树林湿地中的沉积物同样表现出高水平的甲基汞富集,但是不同地区之间存在显著的地域差异。丁振华等研究表明,广西大冠沙红树林的甲基汞含量最高($1.86 \pm 1.04 \text{ng}/\text{g}$),而海南三亚最低($0.24 \pm 0.04 \text{ng}/\text{g}$)^[15]。此外,沉积物的特性也是影响甲基汞分布的重要因素。Chen等人分析了从高雄港的20个地点采集的120个表层沉积物样本,发现不同采样地点的甲基汞的含量存在显著差异,进一步的相关性分析结果表明沉积物的特性(粒度、汞种类和有机质含量)和气候变化是主要影响因素^[5]。同样的,人类活动导致的外源性输入也是影响甲基汞分布的重要原因。王娅等人对贵州省万山汞矿区2个流域7个地点采集的168个大米样品进行分析,发现万山汞矿区大米的总汞含量范围为 $2.4 \sim 401.0 \text{ng}/\text{g}$,其中51%的样品总汞含量超过我国食品汞限量标准,甲基汞占总汞的平均比例为44.8%^[18]。除上述因素外,如温度、降水、微生物种类和数量以及底栖生物的存在等其他因素也会影响甲基汞的分布。大气中的元素汞通过沉降作用进入土壤和水体环境后会转变为无机汞,随后在环境因素的影响以及微生物的甲基化作用下转化为难降解且高毒性的甲基汞^[6,7]。除了汞形态的自然转化外,农业活动中含汞农药的使用、生产活动中产生的工业废水、以及汞矿的开采等人类活动也是甲基汞的重要来源^[8]。

2 鱼体甲基汞生物富集的影响因素

甲基汞是目前已知的少数几种可以在海洋食物链中被生物放大的化合物之一,多项研究表明,在海洋中处于食物链上游的鱼类体内含有较高浓度的甲基汞^[19-21]。此外,由于鱼类富含丰富的蛋白质、不饱和脂肪酸以及维生素等多种营养物质,鱼肉已经成为了人类重要动物蛋白来源之一。据调查,2015年,鱼类占全球动物蛋白质摄入量的20%^[22]。因此,食用鱼肉被认为是人类暴露甲基汞的主要途径之一^[23,24]。环境中的甲基汞可通过摄食过程沿水生食物链由低营养级向高营养级传递并富集,鱼体甲基汞的生物富集水平遵循高营养级高于低营养级的规律。但是,单纯从食物链富集的角度很难解释一些调研发现的鱼体中的甲

基汞含量差异。目前研究表明,甲基汞在鱼体中的生物富集受到环境因素、生物因素等多种因素的影响。

2.1 环境因素对鱼体甲基汞生物富集的影响。

2.1.1 环境中甲基汞的浓度对鱼体甲基汞生物富集影响。水环境中甲基汞的浓度是影响鱼体中甲基汞的生物富集水平最直接、最主要的因素,一般情况下水环境中的甲基汞浓度与鱼体富集的甲基汞水平呈正相关。Barbosa等检测了西太平洋和中太平洋中的总汞在金枪鱼的血液和肌肉中的富集程度,结果发现金枪鱼血液与肌肉中总汞的比例随着金枪鱼物种栖息地深度的增加而增加,这主要是因为较深的栖息地中甲基汞的浓度更高^[25]。

2.1.2 温度对鱼体甲基汞生物富集影响。温度不仅可以通过调控微生物对汞的甲基化作用,改变水体中甲基汞的浓度,进而影响鱼体内甲基汞的富集,还会影响水生生物对甲基汞的摄取与清除速率。Amanda等研究发现,较高的温度促进了端足动物对甲基汞的摄取^[26]。同样,Ana等将欧洲鲈鱼(*Dicentrarchus labrax*)暴露于不同温度的甲基汞中28天,并检测了其肌肉、肝脏和大脑三种组织中的甲基汞含量。结果显示,欧洲鲈鱼大脑中的甲基汞含量最高,在22°C时为8.1mg/kg(w.w.),而在18°C时为6.2mg/kg(w.w.)。此外,在经过28天的净化后发现,肝脏对甲基汞的消除百分比在18°C时为64.2%,而在22°C时下降至50.3%^[27]。这表明温度升高会导致甲基汞在欧洲鲈鱼大脑中其他的积累浓度显著增加,而抑制其消除速率。

2.1.3 溶解氧对鱼体甲基汞生物富集影响。海洋是甲基汞的主要储存库^[28]。海水中甲基汞的浓度随深度的增加而升高,海洋鱼类体内的甲基汞含量呈现显著的深度依赖性增加。Liu等研究发现,深海区鱼类体内的甲基汞富集程度随海拔深度升高而降低,生活在马绍海沟(深约6990米),总汞浓度为224±186ng/g(w.w.),但MeHg浓度却较低(5.1±1.3ng/g(w.w.)),生活在新不列颠海沟(深约8903米)平均THg浓度为59±17ng/g(w.w.),但是甲基汞浓度较高为47±25ng/g湿重^[29]。而现有研究并不能完全解释甲基汞生物富集存在差异的现象。例如,有研究表明,在某些甲基汞的低生成转化区,鱼体中仍出现高甲基汞富集^[30]。此外,在西藏等低汞背景地区,鱼体中也检测到高浓度的甲基汞富集。Zhang等通过对青藏高原13个采样点的13类166条鱼肉的汞浓度测定发现,总汞和甲基汞浓度分别为25.1-1218.0ng/g和24.9-1196.0ng/g,显著高于平原地区^[31]。对这一现象,主要归因于青藏高原特殊的低温环境以及较为完整的食物链结构导致的鱼体代谢速率较低和生物放大效应增加。然而,除了食物链长度,高原独特的低氧环境也可能在这一过程中发挥了重要作用。青藏高原因其海拔高被称为“世界屋脊”,其空气中氧含量在150-170g/m³左右,远低于平原地区(250-260g/m³)。拉萨地区年平均空气中氧气含量仅为平原地区的64.3%,导致了其水体中溶解氧浓度比内地低约2.68mg/L。值得注意的是,海水中除了甲基汞浓度与海水深度有关外,溶解氧也同样表现出海水深度依赖性降低的趋势。这些研究提示,溶解氧可能是影响鱼体甲基汞的生物富集的重要因素之一。

2.1.4 其他环境因素。除了水环境中的甲基汞浓度、水体温度、溶解氧外,pH以及溶解性有机质(DOM)等因素也是影响甲基汞在鱼体富集的主要环境因素^[10]。在自然环境中,无机汞主要通过厌氧微生物的甲基化过程转化成甲基汞。适宜的pH值有利于无机汞通过微生物的甲基化作用生成甲基汞。Douglas J等的研究表明,在pH值为6.0-6.5或更低的低碱度湖泊中,鱼体的汞富集水平通常高于附近pH值较高的湖泊中的鱼体汞富集水平^[32]。Zhou等研究铁还原菌对汞的甲基化影响及其影响因素,发现pH6.0的厌氧条件下,铁还原菌对汞的甲基化速率可达38%^[33]。

此外,环境DOM也是影响汞甲基化的重要因素。分子量小、结构简单的有机质可以增强微生物对有机质的利用从而促进汞的甲基化,最终增加鱼体中甲基汞的富集浓度^[34]。Duan等的研究表明,在红树林沉积物中,落叶输入可以促进汞的甲基化。这是因为落叶中的有机质主要来源于植物的凋落物,包含了各种小分子有机物,如糖类、氨基酸等,这些低分子量的有机质可以为无机汞提供甲基化所需的碳源,极大地促进了厌氧环境下汞的甲基化^[35]。

2.2 生物因素对鱼体甲基汞生物富集的影响。除了环境因素,营养级水平、鱼类的生理特性以及生物稀释效应等生物因素也是影响甲基汞生物富集的重要因素。生物因素包括营养级水平、鱼类的生理特性以及生物稀释效应等生物因素也是影响甲基汞生物富集的重要因素。

2.2.1 营养级水平对鱼体甲基汞生物富集的影响。食物链的长度和鱼类所处的营养级水平是影响甲基汞生物富集的重要因素。由于生物放大效应,一般情况下,所处食物链营养级越高的鱼类(如大型肉食性鱼类),其体内甲基汞的富集浓度也越高。因此,通常认为不同食性的鱼类甲基汞含量水平依次为:肉食性>杂食性>草食性^[36]。Morrison等调查了3种不同营养级的鱼类肌肉中甲基汞的含量,结果显示草食性的线尾鱼(*Acanthuridae*, lined surgeonfish, n=40)体内的总汞积累量为1.05±0.04ng/g湿重,其中约65%以甲基汞的形式存在;中层肉食性的山羊鱼(*Parupeneus* spp, n=10)的总汞含量为29.8±4.5ng/g湿重,约99%为甲基汞;而顶级肉食性的黑鳍梭鱼(*Sphyraenidae*, blackfin barracuda, n=3)肌肉组织总汞含量分别为105、650和741ng/g湿重,全部为甲基汞,且3种不同营养级的鱼类的甲基汞浓度随体重增加而增加^[37]。

2.2.2 鱼类的生理特性对鱼体甲基汞生物富集的影响。鱼类的生活习性和生理特性,如体型、年龄和代谢水平等,也会影响甲基汞在鱼体的富集。在相同海拔不同栖息地的鱼群中,底栖鱼类的甲基汞含量比表层鱼类的甲基汞含量更高^[38]。此外,鱼体内总汞和甲基汞的生物积累效应与体长和体重呈正相关。由于大型鱼类生命周期长且代谢速率慢,其体内更容易积累甲基汞。Lucyna等对长嘴鱼(*Belone belone*)肌肉中THg和MeHg浓度的测定显示,体长最长的样本(80cm)中THg(0.210mg/kg)和MeHg(0.154mg/kg)的浓度最高,并且长嘴鱼肌肉中的THg和MeHg浓度与其体长、体重和年龄等因素呈现依赖性增加的趋势^[39]。值得注意的是,中国沿海地区长期以来采用的短期快速的养殖模式和过度捕捞的

渔业方式,显著降低了水生食物网中汞的生物放大效应。这主要是因为生长稀释效应在甲基汞的生物富集中发挥了重要作用^[40]。

2.2.3其他生物因素对鱼体甲基汞生物富集的影响。除上述因素以外,生物稀释效应和微生物也会影响鱼体甲基汞生物富集,生物稀释效应是指低营养级生物量增加导致污染物浓度被稀释的现象,其对鱼体甲基汞的富集较为复杂,浮游植物群落结构变化可改变甲基汞的初始富集效率。例如,海洋酸化促进小型浮游植物(如硅藻)生长,其高比表面积和代谢活性增强了对甲基汞的吸收,可能加剧后续食物链的富集^[41],快速生长的鱼类可通过组织增重稀释体内甲基汞浓度。然而,这一效应常被高摄食率抵消,尤其在污染严重水域中^[42]。微生物如SRB对甲基汞的还原转化,以及其他微生物对甲基汞的去甲基化作用也会影响鱼体甲基汞生物富集^[43]。

2.3甲基汞在体内的运输和分配对鱼体甲基汞生物富集的影响。甲基汞在鱼体内的运输和分配是一个复杂的动态过程,涉及吸收、运输、蓄积和代谢等多个环节,具有明显的器官特异性。已有研究表明,肾脏、肝脏、脑和肌肉是甲基汞在鱼体内的主要蓄积器官^[44]。其中,肾脏不仅是甲基汞蓄积的主要部位,也是甲基汞排泄的主要器官。在高甲基汞暴露条件下,肾脏中的甲基汞浓度通常较高^[45]。肝脏作为甲基汞代谢与蓄积的重要器官,在长期暴露情况下,其甲基汞浓度通常高于其他组织^[46]。此外,甲基汞能够穿透血脑屏障并在脑组织中蓄积,可导致神经功能障碍,甚至引发神经退行性疾病^[47],因此脑组织是甲基汞的主要靶器官之一。肌肉组织也是甲基汞在鱼体内的主要蓄积部位^[48],由于其占鱼体总质量的较大比例,且是人类食用鱼类时摄入甲基汞的主要途径,因此其甲基汞浓度通常被用作评估鱼类污染水平的重要指标。

甲基汞在鱼体内的运输和分配过程依赖于其与特异性分子的结合作用。研究表明,甲基汞可以与含有硒醇(-SeH)和硫醇(-SH)结构的物质结合^[14]。生物体内富含大量的游离巯基(如半胱氨酸(Cys)、谷胱甘肽等),这些巯基中的硫原子带有孤对电子,能够与 Hg^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 等金属离子形成稳定的配位键^[49],参与重金属的解毒作用,在维持机体的氧化还原平衡中发挥重要作用。因此,生物体各组织中巯基的含量可能与其富集甲基汞的能力密切相关。

甲基汞经胃肠道消化吸收后进入血液循环系统,随后通过血液循环完成其在体内的运输和分配^[50]。血红蛋白是红细胞的主要成分,约占红细胞质量的33%,在氧气和二氧化碳的体内运输和分配中发挥着关键作用,是生物体内最重要的蛋白质之一^[51]。研究表明,鱼体血液中90%的甲基汞都蓄积在红细胞中^[52]。Rikuo等发现,在大鼠、小鼠和人类的红细胞中,甲基汞能够与血红蛋白上的半胱氨酸残基结合^[53]。此外,Zayas等研究发现,白海豚肝脏中的甲基汞主要与血红蛋白 β 链上的半胱氨酸残基结合^[45]。这些研究结果共同表明,甲基汞进入生物体后可以与血红蛋白发生结合,以血红蛋白为运载体在体内进行运输和分配。

3 总结与展望

综合上述,甲基汞在鱼体中的运输和分配过程是一个受多层次因素调控的复杂动态系统(图1)。从分子尺度看,甲基汞与血红蛋白Cys93残基、金属硫蛋白等生物分子的结合决定了其在生物体内的归趋;在个体水平上,鱼类的营养级水平、生理状态(如年龄、代谢率等)通过影响解毒能力调控生物富集的强度;而在生态系统层面,温度、溶解氧、pH等环境参数通过改变汞的甲基化/去甲基化平衡,影响鱼体的甲基汞暴露负荷。

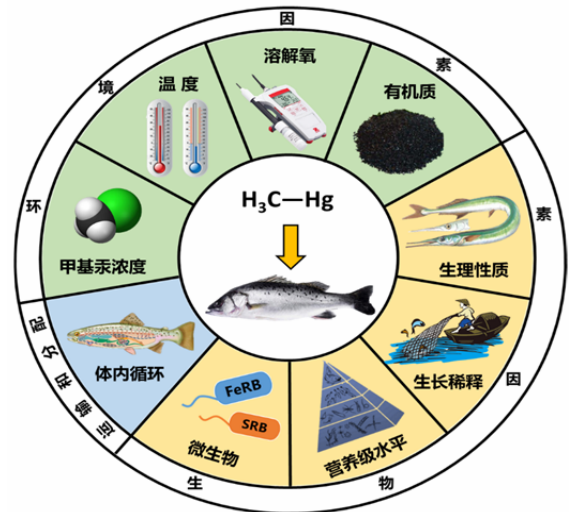


图1 鱼体甲基汞富集影响因素

我国是水产养殖和消费大国,在全球水产养殖业中占据主导地位(年产量占全球的60%,USDA2025)。近年来随着近海渔业资源的衰退,海水养殖业也获得了迅猛发展。然而,水产养殖过程中会产生大量的人为干扰,如高养殖密度造成的鱼粮、鱼粪等有机废物的不断积累、溶解氧变化、pH改变、微生物群落变化等^[42,54-58]。这些过程均会直接影响甲基汞在鱼体内的生物富集水平。此外,在青藏高原等特定环境条件下的鱼类甲基汞的代谢半衰期延长2-3倍,汞暴露风险也应该受到特殊的关注。

尽管已明确多种影响甲基汞生成和分布的因素,未来仍需进一步探究:(1)环境因素、生物因素及人类活动如何协同作用影响甲基汞在不同生态系统中的生成与分布,尤其是在全球气候变化背景下,温度、降水等因素变化对甲基汞循环的影响;(2)目前虽已分别研究环境和生物因素对鱼体甲基汞生物富集的影响,但各因素间相互作用复杂,需综合考虑多因素联合作用,建立更全面的模型评估鱼体甲基汞富集风险,为制定针对性防控措施提供依据;(3)甲基汞在生物体内运输分配的动态变化过程仍不明晰,未来应聚焦不同发育阶段、生理状态下甲基汞在各器官组织中的蓄积、代谢和排泄规律,以及内源性和外源性因素对这一动态过程的调控机制,为保障人类健康提供理论支持。

【参考文献】

- [1]Tepper K,King J,Manuneedhi Cholan P,et al.Methylmercury demethylation and volatilization by animals expressing microbial enzymes[J].Nature Communications, 2025,16(1):1117.
- [2]Boening D W.Ecological effects, transport,and fate of

mercury:a general review[J].Chemosphere,2000,40(12):1335–1351.

[3]Bakir F,Damluji S F,Amin-Zaki L,et al.Methylmercury poisoning in Iraq[J].Science,1973,181(4096):230–241.

[4]Harada M,Nakanishi J, Yasoda E, et al.Mercury pollution in the Tapajos River basin, Amazon:mercury level of head hair and health effects[J].Environment International, 2001,27(4): 285–290.

[5]Dai S S,Yang Z,Tong Y,et al.Global distribution and environmental drivers of methylmercury production in sediments [J].Journal of Hazardous Materials,2021,407:124700.

[6]Yu R Q,Flanders J R,Mack E E,et al.Contribution of Coexisting Sulfate and Iron Reducing Bacteria to Methylmercury Production in Freshwater River Sediments[J].Environmental Science & Technology,2012,46(5):2684–2691.

[7]Hines M E,Poitras E N,Covelli S,et al.Mercury methylation and demethylation in Hg-contaminated lagoon sediments (Marano and Grado Lagoon,Italy)[J].Estuarine, Coastal and Shelf Science,2012,113:85–95.

[8]Yang N,Hu J,Yin D,et al.Mercury and methylmercury in Hg-contaminated paddy soil and their uptake in rice as regulated by DOM from different agricultural sources[J].Environmental Science and Pollution Research,2023,30(31):77181–77192.

[9]张慧敏,李雁宾.海洋环境汞甲基化/去甲基化研究进展[J].环境化学,2023,42(3):679–692.

[10]Du H,Guo P,Wang T,et al. Significant bioaccumulation and biotransformation of methyl mercury by organisms in rice paddy ecosystems:A potential health risk to humans[J].Environmental Pollution,2021,273:116431.

[11]Chen C,Li L,Huang K,et al.Sulfate-reducing bacteria and methanogens are involved in arsenic methylation and demethylation in paddy soils[J].The ISME Journal,2019,13(10):2523–2535.

[12]Tang W, Tang C, Lei P.Sulfur-driven methylmercury production in paddies continues following soil oxidation[J].Journal of Environmental Sciences,2022,119:166–174.

[13]Xia J,Yuan Z,Jiang F.Global metagenomic survey identifies sewage-derived hgcAB+ microorganisms as key contributors to riverine methylmercury production[J].Nature Communications,2024,15(1):9262.

[14]Nogara P A,Oliveira C S,Schmitz G L,et al.Methylmercury's chemistry:From the environment to the mammalian brain[J].Biochimica et Biophysica Acta(BBA)- General Subjects,2019,1863(12):129284.

[15]丁振华,吴浩,刘洋.中国主要红树林湿地中甲基汞的分布特征及影响因素初探[J].环境科学,2010,31(8):1701–1707.

[16]郑冬梅,杨继松,李航.辽河口不同类型湿地土壤汞、甲

基汞含量及其影响因素[J].生态学杂志,2017,36(4):1067–1071.

[17]胡婕.农业源溶解性有机质调控稻田土壤汞甲基化及其生物富集的机制研究[D].贵州:贵州大学,2023.

[18]王娅,李平,吴永贵.万山汞矿区大米汞污染及人体甲基汞暴露风险[J].生态学杂志,2015,34(5):6.

[19]Verbeke W,Sioen I,Pieniak Z,et al.Consumer perception versus scientific evidence about health benefits and safety risks from fish consumption[J].Public Health Nutrition,2005, 8(4):422–429.

[20]Domingo J L,Bocio A,Falcó G,et al.Benefits and risks of fish consumption: Part I. A quantitative analysis of the intake of omega-3 fatty acids and chemical contaminants[J].Toxicology,2007,230(2):219–226.

[21]Hicks C C,Cohen P J,Graham N A J,et al.Harnessing global fisheries to tackle micronutrient deficiencies[J].Nature,2019,574(7776):95–98.

[22]Department F F and A.The state of world fisheries and aquaculture.:2018:meeting the sustainable development goals [M].Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.

[23]Ahn J,Kang K W,Kang W,et al.Mercury poisoning in a fisherman working on a pelagic fishing vessel due to excessive tuna consumption[J].Journal of Occupational Health, 2018,60 (1):89–93.

[24]Lavoie R A,Bouffard A,Maranger R,et al.Mercury transport and human exposure from global marine fisheries[J].Scientific Reports,2018,8(1):6705.

[25]Barbosa R V,Point D,Médieu A,et al.Mercury concentrations in tuna blood and muscle mirror seawater methylmercury in the Western and Central Pacific Ocean[J].Marine Pollution Bulletin,2022,180:113801.

[26]Curtis A N,Bourne K,Borsuk M E,et al.Effects of temperature, salinity, and sediment organic carbon on methylmercury bioaccumulation in an estuarine amphipod[J].Science of The Total Environment,2019,687:907–916.

[27]Maulvault A L,Custódio A,Anacleto P,et al.Bioaccumulation and elimination of mercury in juvenile seabass(Dicentrarchus labrax)in a warmer environment[J].Environmental Research,2016,149:77–85.

[28]Lamborg C H,Hammerschmidt C R,Bowman K L,et al.A global ocean inventory of anthropogenic mercury based on water column measurements[J].Nature,2014,512(7512):65–68.

[29]Liu M,Xiao W,Zhang Q,et al.Methylmercury Bioaccumulation in Deepest Ocean Fauna: Implications for Ocean Mercury Biotransport through Food Webs[J].Environmental Science & Technology Letters,2020,7(7):469–476.

- [30]孙松,李楚娴,张成,等.三峡库区消落带沉积物对鱼体富集汞的影响[J].环境科学,2017,38(4):1689-1696.
- [31]Zhang Q,Pan K,Kang S,et al.Mercury in Wild Fish from High-Altitude Aquatic Ecosystems in the Tibetan Plateau[J].Environmental Science & Technology,2014,48(9):5220-5228.
- [32]Spry D J,Wiener J G.Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: A critical review[J].Environmental Pollution,1991,71(2):243-304.
- [33]Zhou Yan,Si You Bing,Yan Xue,et al.Research on Mercury Methylation by *Geobacter sulfurreducens* and Its Influencing Factors[J].Environment Science,2012,33(9):3247-3252.
- [34]何湘琳,刘吉宝.硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响[J].环境科学,2020,41(3):1425-1431.
- [35]Duan D,Lei P,Lan W,et al.Litterfall-derived organic matter enhances mercury methylation in mangrove sediments of South China[J].Science of The Total Environment,2021,765:142763.
- [36]Jin-jin J,Qiang J,Lan-lan L,et al.Review of Risk Assessment of Methylmercury Intake[J].Agricultural Science & Technology,2018,19(1):64-70.
- [37]Morrison R J,Peshut P J,West R J,et al.Mercury (Hg) speciation in coral reef systems of remote Oceania: Implications for the artisanal fisheries of Tutuila, Samoa Islands[J].Marine Pollution Bulletin,2015,96(1-2):41-56.
- [38]Romero-Romero S,García-Ordiales E,Roqueñi N,et al.Increase in mercury and methylmercury levels with depth in a fish assemblage[J].Chemosphere,2022,292:133445.
- [39]Lucyna P J.Total mercury and methylmercury in garfish (*Belone belone*) of different body weights, sizes, ages, and sexes[J].Journal of Trace Elements in Medicine and Biology,2023,79:127220.
- [40]Pan K,Chan H,Tam Y K,et al.Low mercury levels in marine fish from estuarine and coastal environments in southern China[J].Environmental Pollution,2014,185:250-257.
- [41]Xu D,Tong S,Wang B,et al.Ocean acidification stimulation of phytoplankton growth depends on the extent of departure from the optimal growth temperature[J].Marine Pollution Bulletin,2022,177:113510.
- [42]崔玉华,陈建弛.深圳周边海域鱼类肌肉中甲基汞浓度影响因素研究[J].中国渔业质量与标准,2024,14(6):20-26.
- [43]Yang T T,Liu Y,Tan S,et al.The role of intestinal microbiota of the marine fish (*Acanthopagrus latus*) in mercury bio transformation[J].Environmental Pollution,2021,277:116768.
- [44]程金平,刘晓洁,冀秀玲,等.总汞、甲基汞和硒在汞暴露大鼠脑、肝、肾中的分布[J].中国环境科学,2006(3):376-379.
- [45]Pedrero Zayas Z,Ouerdane L,Mounicou S,et al. Hemoglobin as a major binding protein for methylmercury in white-sided dolphin liver[J].Analytical and Bioanalytical Chemistry,2014,406(4):1121-1129.
- [46]Mellingén R M,Rasinger J D,Nøstbakken O J,et al.Dietary protein affects tissue accumulation of mercury and induces hepatic Phase I and Phase II enzyme expression after co-exposure with methylmercury in mice[J].The Journal of Nutritional Biochemistry,2024,133:109712.
- [47]陈芳,郇小玉,张长琴,等.围产期甲基汞暴露对子代成年大鼠神经递质代谢及学习记忆能力的影响[J].生态毒理学报,2023,18(4):360-368.
- [48]Bielmyer-Fraser G K,Courville J M,Ward A, et al. Mercury and Selenium Accumulation in the Tissues of Stranded Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*) in Northeast Florida, 2013-2021[J].Animals:an Open Access Journal from MDPI,2024,14(11):1571.
- [49]Huang Y,Zhang S,Pu J,et al.Synthesis and Morphology Control of Thiol-Functionalized Metal-Organic Framework Nanoparticles[J].Journal of Advances in Physical Chemistry,2024,13:96.
- [50]SR B,苏鲁.甲基汞和无机汞的代谢模式[J].国外医学(卫生学分册),1985(2):92-94.
- [51]Scheffer F W,Bistoilas N,Liu S,et al. Thirty years of haemoglobin electrochemistry[J].Advances in Colloid and Interface Science,2005,116(1-3):111-120.
- [52]Olson K R,Bergman H L,Fromm P O.Uptake of Methyl Mercuric Chloride and Mercuric Chloride by Trout:A Study of Uptake Pathways into the Whole Animal and Uptake by Erythrocytes in vitro[J].Journal of the Fisheries Research Board of Canada,1973,30(9):1293-1299.
- [53]Doi R,Tagawa M.A study on the biochemical and biological behavior of methylmercury[J].Toxicology and Applied Pharmacology,1983,69(3):407-416.
- [54]姜子禹,曹玲.海洋渔业资源—生态—社会复合系统研究进展与展望[J].中国科学基金,2024,38(6):984-991.
- [55]范道麟.浅谈水产养殖池塘中溶解氧的变化及调控[J].农家顾问,2015(4):150.
- [56]黄文豪,刘婷,郑明刚.日照贝类养殖区海水微生物群落结构特征及其影响因素[J].海洋科学进展,2023,41(2):295-308.
- [57]汤金伟,黄冲,李肖凡,等.水产养殖微生物研究进展[J].安徽农业科学,2024,52(9):8-11,29.
- [58]王静香,赵跃龙,刘子飞,等.我国沿海地区渔业绿色高质量发展路径及建议[J].江西农业学报,2022,34(4):230-237.

作者简介:

田甜(2000—),女,土家族,湖南湘西人,硕士研究生,研究方向:环境毒理。