

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升革,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去氮及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时问对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697,2713,2811)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价

汪慧娟^{1,2}, 旷泽行^{1,2}, 周贤², 覃晓青², 黄洪辉^{2*}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点实验室, 广州 510300)

摘要: 为了研究海南昌化江典型海岛型河口海域生物体多环芳烃(PAHs)的污染状况,应用气相色谱-质谱法(GC-MS)分析了33种海洋生物体内16种优先控制PAHs的含量,并探讨了PAHs组分、来源和潜在的食用风险。结果表明,底层鱼类(湿重,下同)、甲壳类和中上层鱼类生物体PAHs总量范围分别为5.52~787.98、12.18~154.64和10.20~199.79 ng·g⁻¹,平均含量分别为83.21、64.72和89.48 ng·g⁻¹。各类生物体中PAHs含量存在一定的差异,平均含量由高到低依次为:中上层鱼类、底层鱼类和甲壳类。与国内外其他地区相比,昌化江河口海域生物体PAHs污染处于中低水平。来源分析结果显示,33种海洋生物体中PAHs主要来源于燃烧源(石油燃烧和生物质燃烧)和石油源,且底层生物受到燃烧源影响较大,而中上层生物受到石油源影响较大。风险评价结果显示苯并[a]芘(BaP)含量处于欧盟规定的限值范围,昌化江河口海域大部分生物处于食用安全范围内,但长期食用这些海产品可能会有潜在的健康风险($1.0 \times 10^{-5} \leq \text{ILCR} < 1.0 \times 10^{-4}$)。

关键词: 多环芳烃(PAHs); 风险评价; 海洋生物; 河口海域; 昌化江

中图分类号: X508 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2942-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911094

Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province

WANG Hui-juan^{1,2}, KUANG Ze-xing^{1,2}, ZHOU Xian², QIN Xiao-qing², HUANG Hong-hui^{2*}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: To assess the contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in organisms in the estuary of Changhua River in Hainan, we determined the content of 16 priority PAHs by gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS). The composition, source, and potential edible risk of PAHs were studied. The results showed that the total PAHs of demersal fish (wet weight, same below), crustaceans, and pelagic fish were 5.52-787.98, 12.18-154.64, and 10.20-199.79 ng·g⁻¹, respectively, and the average contents were 83.21, 64.72, and 89.48 ng·g⁻¹, respectively. There were some differences in the content of PAHs in various organisms. The average content followed the order of pelagic fish > demersal fish > crustaceans. Compared with other areas in the country and abroad, the content of marine organisms'PAHs in the estuary of the Changhua River was above the medium level. The result of isomer characteristic ratio showed that the PAHs of 33 organisms mainly came from the combustion sources (petroleum combustion and biomass combustion) and petroleum sources. Moreover, demersal fish were greatly affected by combustion sources, while pelagic fish were greatly affected by petroleum sources. Human risk assessment indicated that the content of benzo[a]pyrene (BaP) was within the limits set by the European Union. Most of the organisms in the estuary of Changhua River were within the safe range of consumption, but the long-term consumption of these seafoods may pose a potential health risk ($1.0 \times 10^{-5} \leq \text{ILCR} < 1.0 \times 10^{-4}$).

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); human risk assessment; marine organisms; estuarine waters; Changhua River

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是指两个或两个以上苯环或环戊二烯稠合成的化合物,是持久性有机污染物的一种^[1]。迄今为止,已在环境中检测到200多种PAHs,其中许多已被确定为致癌、致突变和致畸^[2,3]。海洋环境中PAHs的存在不仅会造成海洋生物的DNA损伤、内分泌紊乱和畸形,还会通过食物链传递富集影响水产品质量安全,危害人体健康^[4~8]。有研究表明,PAHs在生物体内的富集与生物所处营养级^[9]、脂

肪含量^[10]、生活习性^[11]、食物链长度及结构^[12]、生物物种及生物量^[13]等诸多因素有关。针对生物生存环境的研究相对较少,PAHs含量随环境因素的变化而变化,如悬沙的浓度、悬沙的成分、盐度、温度、降水、水流量和生物循环等,而这些将会影响PAHs

收稿日期: 2019-10-10; 修订日期: 2019-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1407501); 农业部财政重大专项(NFZX2017)

作者简介: 汪慧娟(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为海洋

环境污染与风险评价, E-mail: huijuan_1209@163.com

* 通信作者, E-mail: huanghh@scafsri.ac.cn

的垂直分布. 因此, 研究和评价海洋不同水层生物中 PAHs 的污染状况具有重要意义.

海水鱼类和甲壳类动物因其高蛋白和富含对健康有益的低饱和脂肪酸而成为人们喜爱食用的水产品. 与此同时, 水产品的质量安全也备受人们关注. 我国是水产品生产和消费大国, 据统计, 2017 年, 我国天然海洋水产品产量达 1 321 万 t, 海南省就占了 8% 左右^[14]. 昌化江作为海南岛的第二大河, 其河口海域渔业资源丰富, 是海南省重要的渔业捕捞生产作业区, 国家二级渔港——昌化渔港就在区内. 而渔船燃油的泄漏及柴油燃烧等都会造成 PAHs 污染物的排放^[15,16]; 另外, 昌化江下游多条支流入海, 属典型的喇叭河口, 是汇集上游污染物的重要区域, 均是造成该河口海域生物体污染的重要因素.

近年来, 诸多学者对中国几大典型大陆型河口海域(如长江口^[17]、珠江口^[18]和黄河口^[19]等)的 PAHs 污染开展了大量研究工作, 但对海岛河流的研究相对较少. 因此, 本文以海南岛昌化江河口海域的海洋生物为研究对象, 测定 16 种 PAHs 的含量水平, 分析了其来源和生物累积, 并在日均摄入量基础之上, 评估不同栖息类型海洋生物的食用健康风险. 本文的结果有助于补充海岛型河口海域关于 PAHs 的研究空白, 对探讨昌化江河口海域海洋生物的健康消费有重要的参考价值.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

2019 年 3 月, 在海南岛昌化江河口海域进行 5 个断面的渔业资源底拖网调查(图 1), 采集的生物样品用密封袋装好, 做好标记带回实验室, 在 -20°C 条件下保存至分析. 其生物样品的基本生物学信息和采样量见表 1, 其中, 底层鱼类 19 种(长棘银鲈、乌塘鲤、触角沟鰕虎鱼、细鳞鲷、条尾鲱鲤、多鳞鱧、黄鳍鲷、黄鲫、单斑笛鲷、前鳞鲷、黄斑鰕、蛾眉条鰕、大鳞舌鰕、半滑舌鰕、黄斑蓝子鱼、大鳞舌鰕、截尾白姑鱼、拟矛尾鰕虎鱼、网纹裸胸鲿)、甲壳类 8 种(亨氏仿对虾、长叉口虾蛄、远海梭子蟹、红星梭子蟹、锯缘青蟹、近缘新对虾、宽突赤虾、脊尾白虾)和中上层鱼类 6 种(大甲鲈、斑鲈、颌针鱼、花鲈、沙丁鱼、鳓).

1.2 样品前处理与测定分析

生物体中的 PAHs 的处理方法参照 GB 5009.265-2016《食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定》, 并进行优化^[20]. 具体为: 取生物样品中可食用部分, 均质. 称取 3 g 样品(湿重)放入 50 mL 玻璃离心管中, 加入 50 μL 质量浓度为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 内

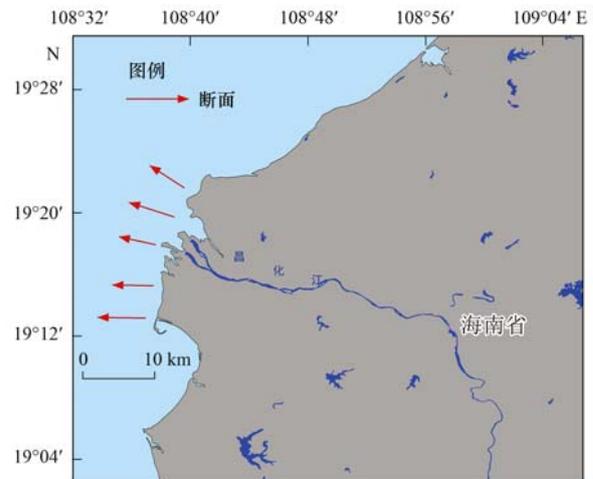


图 1 昌化江河口海域生物调查站位示意

Fig. 1 Map of biological survey stations in the estuary of Changhua River

标溶液, 加入 1 g 硅藻土, 加入 10 mL 正己烷 (HPLC, J. T. Baker) 充分提取, 涡旋直至充分混匀, 水浴超声 10 min, 充分提取; $3\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min, 提取上清液, 并重复提取一次. 氮吹干后, 加入 4 mL 乙腈 (HPLC, J. T. Baker), 加入净化填料 (0.9 g 硫酸镁、0.1 g PSA 和 0.1 g LC-C18) 涡旋直至充分混匀, $3\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min, 提取上清液, 如上清液净化不充分, 可按以上步骤重复净化一次. 氮吹干, 用正己烷定容至 1 mL, 上机待测, 内标法定量. 采用的是 Agilent 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS), 色谱柱是 HP-5MS 石英毛细管柱 ($30\ \text{m}\times 0.25\ \text{mm}\times 0.25\ \mu\text{m}$); 载气为高纯度氦气 (He, 纯度 $>99.99\%$), 载气流速为 $1.0\ \text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样模式为脉冲不分流, 进样量为 $1\ \mu\text{L}$; 程序升温条件为: 以 $15\ ^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升至 160°C , 保持 1 min, 再以 $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升至 280°C , 保持 5 min. 质谱条件: 选择离子 (SIM) 监测方式, 离子源选择电子轰击源 (EI), 电子能量为 70 eV, 离子源温度为 250°C , 接口温度为 280°C .

1.3 质量保证与质量控制

为保证监测数据的科学性和准确性, 实验过程均设置样品空白、样品平行和加标回收. 采用内标法定量, 定量内标分别为 蒎-d10、菲-d10、蒽-d12 和 菲-d12. 16 种 PAHs 的方法检出限为 $0.2\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (蒎: Nap、蒎烯: Acy、蒎: Ace、芴: Flu、菲: Phe、蒽: Ant、荧蒽: Fla、芘: Pyr); $0.3\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (苯并[a]蒽: BaA、蒽: Chry、苯并[b]荧蒽: BbF、苯并[k]荧蒽: BkF); $0.4\ \text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (苯并[a]芘: BaP、二苯并[a,h]蒽: DahA、茚芘[1,2,3-cd]芘: InP、苯并[g,h,i]芘: BghiP). 加标回收率为 72.06%~101.85%, 相对标准偏差为 5.12%~11.13%.

表 1 昌化江河口海域调查所采集的生物名录和生物信息

Table 1 List and information of biota species sampled in the estuary of Changhua River

生物种类	中文名	学名	数量/尾	体长/mm	体重/g	食性
	长棘银鲈	<i>Gerres filamentosus</i>	5	82 ~ 144	18 ~ 82	底栖性无脊椎动物、小型鱼类
	乌塘鳢	<i>Brionobutis koilomatodon</i>	3	122 ~ 135	40 ~ 43	鱼类、甲壳类
	触角沟鰕虎鱼	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>	5	122 ~ 135	30 ~ 35	水生昆虫
	拟矛尾鰕虎鱼	<i>Parachaeturichthys polynema</i>	5	141 ~ 151	23 ~ 28	甲壳类、鱼类、浮游植物
	细鳞鲷	<i>Rhabdosargus sarba</i>	5	89 ~ 164	16 ~ 33	小型鱼类、甲壳类、底栖无脊椎动物
	条尾鲱鲤	<i>Upeneus bensasi</i>	5	91 ~ 194	41 ~ 116	浮游生物
	多鳞鳢	<i>Sillago sihama</i>	5	112 ~ 124	12 ~ 21	浮游动物、小型甲壳类
	黄鳍鲷	<i>Sparus latus</i>	5	81 ~ 182	14 ~ 172	浮游动物
	黄鲫	<i>Setipinna taty</i>	5	148 ~ 157	36 ~ 47	甲壳类、鱼类
底层鱼类	单斑笛鲷	<i>Lufansongnigim</i>	5	192 ~ 252	178 ~ 210	鱼类、甲壳类
	前鳞鲷	<i>Osteomugil ophuyseni</i>	5	131 ~ 166	33 ~ 56	底栖生物、浮游生物
	黄斑鲷	<i>Leiognathus bindus</i>	5	71 ~ 22	10 ~ 15	底栖无脊椎动物
	蛾眉条鲷	<i>Zebrias quagga</i>	2	181 ~ 182	67 ~ 69	底栖无脊椎动物
	大鳞舌鲷	<i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	3	175 ~ 193	76 ~ 84	底栖无脊椎动物
	半滑舌鲷	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	3	102 ~ 133	320 ~ 333	底栖无脊椎动物
	黄斑蓝子鱼	<i>Siganus oramin</i>	5	182 ~ 183	144 ~ 188	底栖无脊椎动物
	大鳞舌鲷	<i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	4	181 ~ 193	74 ~ 84	底栖无脊椎动物、小鱼
	截尾白姑鱼	<i>Pennahia anea</i>	5	36 ~ 57	3 ~ 6	小型底栖动物、小鱼、蠕虫
	网纹裸胸鲿	<i>Gymnothorax reticularis</i>	5	222 ~ 282	178 ~ 376	底栖无脊椎动物、小鱼
	亨氏仿对虾	<i>Parapenaeopsis hungerfordi Alcock</i>	20	14 ~ 23	3 ~ 9	底栖无脊椎动物、浮游生物、小型鱼类
	长叉口虾蛄	<i>Oratosquilla nepa</i>	6	26 ~ 38	63 ~ 84	小型无脊椎动物
	远海梭子蟹	<i>Portunus pelagicus</i>	5	41 ~ 51	38 ~ 122	小鱼、甲壳类、浮游生物
	红星梭子蟹	<i>Portunus sanguinolentus</i>	5	33 ~ 42	24 ~ 105	有机碎屑
甲壳类	锯缘青蟹	<i>Scylla serrata</i>	5	41 ~ 51	38 ~ 122	杂食性,以动物性为主
	近缘新对虾	<i>Metapenaeus affinis</i>	20	12 ~ 26	1 ~ 30	浮游生物
	宽突赤虾	<i>Metapenaeopsis palmensis</i>	20	5 ~ 25	1 ~ 12	浮游生物
	脊尾白虾	<i>Exopalaemon carinicauda</i>	14	5 ~ 52	3 ~ 64	有机碎屑
	大甲鲈	<i>Megalapis cordyla</i>	3	152 ~ 183	54 ~ 81	底栖无脊椎动物
中上层 鱼类	斑鲈	<i>Clupanodon punctatus</i>	5	82 ~ 162	46 ~ 89	浮游生物、海底藻类
	颌针鱼	<i>Ablennes</i>	1	322	64	浮游动物、兼食昆虫
	花鲈	<i>Clupanodon thrissa</i>	5	134 ~ 141	33 ~ 44	浮游生物、藻类
	沙丁鱼	<i>Sardine</i>	5	86 ~ 141	46 ~ 95	浮游生物
	鳓	<i>Ilisha elongata</i>	1	186	100	头足类、甲壳类、小型鱼类

1.4 健康风险评价

根据 USEPA (1993) [21] 规定,即以各个单体的 BaP 毒性当量因子 (TEF) 和含量进行估算 BaP 等效含量 BaP_{eq} , 计算公式如下:

$$BaP_{eq} = \sum_i^n C_i \times TEF_i \quad (1)$$

式中, C_i 为第 i 种 PAHs 同系物在生物体中的含量 ($ng \cdot g^{-1}$, 湿重), TEF_i 为第 i 种 PAHs 同系物在生物体中的含量。

PAHs 致癌风险评价采用 USEPA 推荐使用的终身致癌风险 (incremental lifetime cancer risk, ILCR) 评价方法:

$$ILCR = \frac{BaP_{ep} \times CSF \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中, CSF 是致癌斜率因子, 其值为 $7.3 mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$, IR 是海产品摄入速率 [22], 鱼类 (湿重, 下同) $0.059 kg \cdot d^{-1}$, 甲壳类 $0.049 kg \cdot d^{-1}$. EF

是暴露频率, 这里取值 $365 d \cdot a^{-1}$, ED 是暴露持续时间, 这里取值 70 a, BW 是人体体重, 这里取值为 70 kg, AT 是平均年龄, 其值为 70 a.

1.5 数据处理方法

采用 ArcGIS10.2、Origin 9.1 及 R 语言进行数据处理和专业图形的绘制. 采用 One-way ANOVA 及 q 检验比较不同种类生物体内 PAHs 含量, $P < 0.05$ 表明差异显著.

2 结果与分析

2.1 生物体中 PAHs 含量水平分析

33 种海洋生物样品的 16 种 PAHs 的检测结果显示 (表 2 和图 2), 底层鱼体中 $\sum 16PAHs$ 含量 (湿重, 下同) 范围为 $5.52 \sim 787.98 ng \cdot g^{-1}$, 平均值为 $83.21 ng \cdot g^{-1}$; 甲壳类含量范围为 $12.18 \sim 154.64 ng \cdot g^{-1}$, 平均值为 $64.72 ng \cdot g^{-1}$; 中上层鱼类含量范围为 $10.20 \sim 199.79 ng \cdot g^{-1}$, 平均值为 89.48

ng·g⁻¹. 不同栖息类型海洋生物体中, 平均值含量差异性不显著 ($P < 0.05$), 但略有不同, 中上层鱼类 PAHs 平均值含量最高, 其次是甲壳类, 底层鱼类最低. 此外, 同类不同种生物体中 PAHs 含量也有差异. 总体来说, 底层鱼类中 PAHs 含量由高到低依次为触角沟鰕虎鱼 > 蛾眉条鰕 > 乌塘鲤 > 黄鲫 > 网纹裸胸鲷 > 单斑笛鲷 > 细鳞鲷 > 多鳞鱈 > 截尾白姑鱼 > 前

鳞鲷 > 拟矛尾鰕虎鱼 > 黄鳍鲷 > 条尾鲱鲤 > 黄斑蓝子鱼 > 大鳞舌鰕 > 大鳞舌鰕 > 半滑舌鰕 > 黄斑鰕; 甲壳类中为红星梭子蟹 > 亨氏仿对虾 > 远海梭子蟹 > 宽突赤虾 > 脊尾白虾 > 近缘新对虾 > 长叉口虾蛄 > 锯缘青蟹; 中上层鱼类中为颌针鱼 > 大甲鲈 > 斑鰕 > 鰕 > 花鰕 > 沙丁鱼. 且底层鱼类和中上层鱼类种间差异显著 ($P < 0.05$), 甲壳类种间差异不明显.

表 2 昌化江河口海域生物体中 PAHs 含量水平/ng·g⁻¹

Table 2 Concentrations of PAHs in marine organisms in the estuary of Changhua River/ng·g⁻¹

PAHs 组分	环数	底层鱼类		甲壳类		中上层鱼类	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
萘 (Nap)	2	ND ¹⁾ ~ 401.7	30.6	ND ~ 51.76	11.25	ND ~ 23.40	12.79
蒽 (Acy)	3	0.52 ~ 11.38	1.35	0.572 ~ 1.14	0.83	0.62 ~ 1.03	0.88
苊 (Ace)	3	ND ~ 22.05	2.95	ND ~ 5.04	2.14	ND ~ 8.29	3.98
芴 (Flu)	3	ND ~ 287.8	25.83	ND ~ 28.27	10.67	ND ~ 51.98	21.28
菲 (Phe)	3	0.04 ~ 17.3	6.05	ND ~ 22.12	10.66	ND ~ 55.26	20.76
蒽 (Ant)	3	0.51 ~ 1.76	1.13	0.64 ~ 1.74	1.33	0.76 ~ 3.36	1.77
荧蒽 (Fla)	4	2.75 ~ 6.44	4.23	3.4 ~ 7.36	5.40	2.94 ~ 11.95	6.47
芘 (Pyr)	4	1.22 ~ 3.13	1.89	1.49 ~ 4.96	2.99	1.34 ~ 5.17	3.06
苯并[a]蒽 (BaA)	4	0.48 ~ 1.02	0.08	1.74 ~ 1.74	1.74	2.69 ~ 22.79	12.73
䓑 (Chry)	4	ND	ND	1.41 ~ 4.12	1.02	ND	ND
苯并[b]荧蒽 (BbF)	5	ND ~ 35.1	8.28	2.93 ~ 26.21	14.82	1.15 ~ 15.86	5.06
苯并[k]荧蒽 (BkF)	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[a]芘 (BaP)	5	ND	0.04	ND ~ 0.18	0.04	0.70	0.12
二苯并[a,h]蒽 (DahA)	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND
茚并[1,2,3-cd]芘 (InP)	6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[g,h,i]芘 (BghiP)	6	ND	ND	ND	ND	ND	ND
∑16PAHs		5.52 ~ 787.98	83.21	12.18 ~ 154.64	64.72	10.20 ~ 199.79	89.48

1) ND 表示未检测出

2.2 生物体中 PAHs 组分分析

生物体中 PAHs 不同环数所占质量分数见图 3. 不同栖息类型生物体中 PAHs 环数组成比例差异不明显 ($P > 0.05$). 其中在底层鱼类、甲壳类、中上层鱼类体中, 2~3 环低环 (Nap、Acy、Ace、Flu、Phe 和 Ant) 的数值范围分别为 9.71%~96.33% (平均值为 63.41%)、36.81%~81.32% (平均值为 56.65%) 和 55.27%~85.86% (平均值为 75.33%). 4 环中环 (Fla、Pyr、BaA 和 Chry) 的数值范围分别为 1.14%~51.62% (平均值为 18.27%)、7.18%~27.56% (平均值为 16.01%) 和 12.20%~25.81% (平均值为 17.18%). 5~6 环高环 (BbF、BkF、BaP、DahA、InP 和 BghiP) 的数值范围分别为 ND~65.73% (平均值为 18.31%)、4.24%~48.03% (平均值为 27.34%) 和 1.32%~18.91% (平均值为 7.48%).

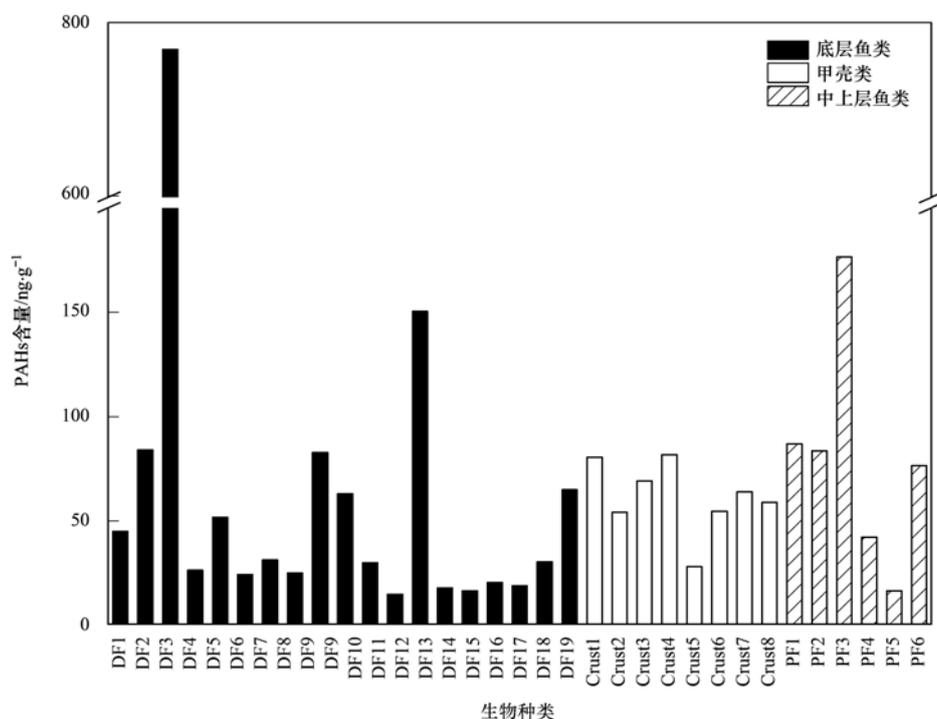
2.3 生物体中来源分析

PAHs 的污染来源常运用同分异构体特征比值法来判断, 常用的有 Ant/(Ant + Phe)、Fla/(Fla + Pyr)、BaA/(BaA + Chry) 和 Phe/Ant^[23,24]. 考虑到某些单体低于检出限, 本文采用 Ant/(Ant + Phe)、Fla/(Fla + Pyr) 两种比值对昌化江河口海域生物体

PAHs 进行来源分析, 结果如图 4 所示, Ant/(Ant + Phe) 的比值范围在 0.05~0.96, 其中石油源 [Ant/(Ant + Phe) < 0.1] 占 32.26%, 燃烧源 [Ant/(Ant + Phe) > 0.1] 占 67.74%, Fla/(Fla + Pyr) 的比值范围为 0.52~0.74, 均大于 0.5, 判断为生物质燃烧源 (煤炭、木材等). 从整体上来看, 33 种海洋生物体主要来源于燃烧源 (石油燃烧和生物质燃烧) 和石油源; 不同栖息类型的生物体的 PAHs 的来源表现有明显差异, 底层生物 Ant/(Ant + Phe) > 0.1 占了 73.68%, 而中上层生物 Ant/(Ant + Phe) < 0.1 占了 66.67%, 底层生物受到燃烧源影响较大, 而中上层生物受到石油源影响较大.

2.4 与其他海域生物体中 PAHs 比较

国内尚未有海洋生物体中 PAHs 污染程度的评价标准, 因此很难对生物体的 PAHs 污染程度做出定量评价^[25]. Baumard 等^[26] 提出生物体中的 PAHs 污染程度可以分为 4 个级别: 无污染和低污染 (< 10 ng·g⁻¹)、中等污染 (10~99 ng·g⁻¹)、高污染 (100~1 000 ng·g⁻¹) 和极高污染 (> 1 000 ng·g⁻¹), 结果表明昌化江河口海域的 PAHs 污染处于中等水平. 表 3 列出了国内一些海域的生物



DF1: 长棘银鲈 *Gerres filamentosus*; DF2: 乌塘鲤 *Bostrychus sinensis*; DF3: 触角沟鰕虎鱼 *Chaeturichthys stigmatias*; DF4: 拟矛尾鰕虎鱼 *Parachaeturichthys polynema*; DF5: 细鳞鲷 *Rhabdosargus sarba*; DF6: 条尾鲷 *Upeneus bensasi*; DF7: 多鳞鲷 *Sillago sihama*; DF8: 黄鳍鲷 *Sparus latus*; DF9: 黄鲫 *Setipinna taty*; DF10: 单斑笛鲷 *Lutjanostigm*; DF11: 前鳞鲷 *Mugiliformes*; DF12: 黄斑鰕 *Leiognathus bindus*; DF13: 蛾眉条鲷 *Zebrias quagga*; DF14: 大鳞舌鲷 *Cynoglossus macrolepidotus*; DF15: 半滑舌鲷 *Cynoglossus semilaensis*; DF16: 黄斑篮子鱼 *Siganus oramin*; DF17: 大鳞舌鲷 *Cynoglossus macrolepidotus*; DF18: 截尾白姑鱼 *Pennahia anea*; DF19: 网纹裸胸鲷 *Gymnothorax reticularis*; Crust1: 亨氏仿对虾 *Parapenaopsis hungerfordi* Alcock; Crust2: 长叉口虾蛄 *Oratosquilla nepa*; Crust3: 远海梭子蟹 *Portunus pelagicus*; Crust4: 红星梭子蟹 *Portunus sanguinolentus*; Crust5: 锯缘青蟹 *Scylla serrata*; Crust6: 近缘新对虾 *Metapenaeus affinis*; Crust7: 宽突亦对虾 *Metapenaeopsis palmensis*; Crust8: 脊尾白虾 *Exopalaemon carinicauda*; PF1: 大甲鲈 *Megalaplis cordyla*; PF2: 斑鲷 *Clupanodon punctatus*; PF3: 颌针鱼 *Ablennes*; PF4: 花鲷 *Clupanodon thrissa*; PF5: 沙丁鱼 *Sardine*; PF6: 鲷 *Ilisha elongate*

图2 昌化江河口海域生物体中 PAHs 含量 (以湿重计)

Fig. 2 Concentration of PAHs in organisms in the estuary of Changhua River

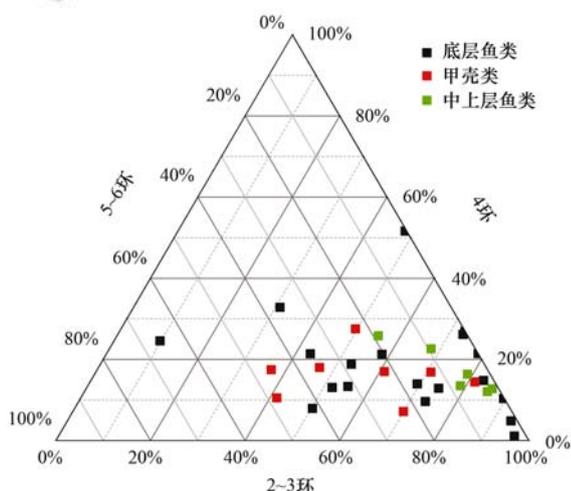


图3 昌化江河口海域生物体中不同环数 PAHs 的质量分数

Fig. 3 PAHs percentages of organisms with different ring numbers in the estuary of Changhua River

体中 PAHs 含量, 数据结果显示, 本文鱼类中的 PAHs 平均值含量显著低于南海北部其他海域 (珠江三角洲、南海岛礁、湛江港、大亚湾和湛江红树林海域) 的值, 与鱼类相比, 甲壳类研究相对较少。

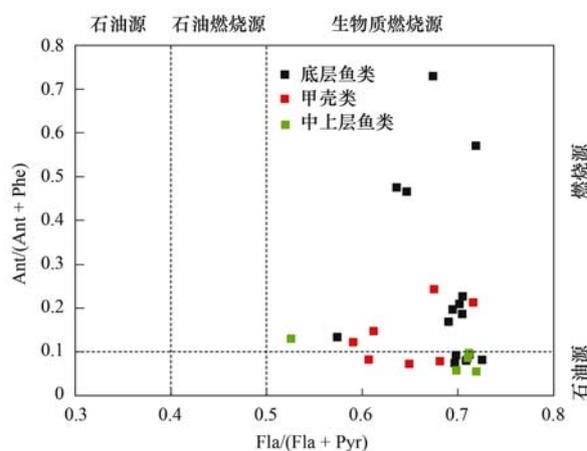


图4 昌化江河口海域生物体中 Fla/(Fla + Pyr) 和 Ant/(Ant + Phe) 比值

Fig. 4 Fla/(Fla + Pyr) and Ant/(Ant + Phe) ratios of organisms in the estuary of Changhua River

甲壳类中 PAHs 含量也显著低于深圳大鹏湾, 湛江红树林海域. 总体来看, 昌化江河口海域 PAHs 含量显著低于南海其他渔港, 比如湛江港, 处于中低污染水平。

表 3 昌化江河口海域生物体中 PAHs 含量与国内外比较¹⁾

Table 3 Comparison of PAHs levels in marine organisms from the estuary of Changhua River with other locations

生物种类	研究海域	PAHs 数/种	PAHs 含量/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$	采样年份	分析方法	文献
鱼类	昌化江河口	16	5.52 ~ 787.98 (86.35) ²⁾	2019	GC-MS	本研究
	珠江三角洲	16	1.91 ~ 224.03	2001 ~ 2002	GC-MS	[27]
	湛江港	16	86.7 ~ 256 (150)	2013	GC-MS	[24]
	南海岛礁	16	51.16 ~ 1 637.12 (286.76)	2016	GC-MS	[1]
	大亚湾	16	1 760 ~ 8 320	2012	GC-MS	[28]
	湛江红树林海域	15	1 392 ~ 2 192 (1396.8)	2014	GC-MS	[7]
甲壳类	昌化江河口	16	12.18 ~ 154.64 (64.72)	2019	GC-MS	本研究
	深圳大鹏湾	16	315.48 ~ 1 007.6 (686.08)	2011	GC-MS	[29]
	湛江红树林海域	15	1 348 ~ 2 072 (1697.2)	2014	GC-MS	[7]

1) 根据湿重报告的数据, 采用湿/干的比率为 4 进行比较; 2) 括号内表示平均含量

2.5 健康风险评价

2.5.1 生物体中苯并[a]芘含量

苯并[a]芘属于多环芳烃中毒性最大的一种强烈致癌物, 其在生物体中残留不仅影响生物体本身, 还可被生物富集并通过食物链(网)累积, 对生态系统及人体健康造成危害^[30]. 由于国内尚未对生物体中苯并[a]芘含量残留制定限制标准, 因此, 参考欧盟标准 No. 208/2005^[31] 对昌化江河口海域生物体中苯并[a]芘进行评价, 其中鱼类和甲壳类对苯并[a]芘的最大可接受含量(湿重, 下同)分别为 $2 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $10 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 在本文中, 底层鱼类中黄斑鰹、蛾眉条鰹、大鳞舌鰹、半滑舌鰹和中上层鱼类颌针鱼有 BaP 检出, 其含量分别为 0.05、0.30、0.16、0.13 和 $0.70 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 甲壳类中叉口虾蛄、锯缘青蟹有 BaP 检出, 含量分别为 $0.18 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.15 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.

2.5.2 生物体中苯并[a]芘等效含量

生物体中苯并[a]芘等效含量 (BaP_{eq}) 采用公式(1)计算, 16 种 PAHs 的毒性当量因子采用 EPA 的规定值(见表 4). 结果如表 5 所示, 昌化江河口海域生物体中 BaP_{eq} 含量(湿重, 下同)范围为 $0.03 \sim 4.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $1.15 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 底层鱼类 BaP_{eq} 含量范围为 $0.03 \sim 4.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $0.96 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 甲壳类生物 BaP_{eq} 含量范围为 $0.39 \sim 2.66 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $1.61 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$; 中上层鱼类 BaP_{eq} 含量范围为 $0.26 \sim 4.73 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 1.13

表 4 PAHs 各组分的 BaP 毒性当量因子

PAHs 组分	毒性当量因子	PAHs 组分	毒性当量因子
Nap	0.001	BaA	0.1
Acy	0.001	Chry	0.01
Ace	0.001	BbF	0.1
Flu	0.001	BkF	0.1
Phe	0.001	BaP	1
Ant	0.01	DahA	0.1
Fla	0.001	InP	1
Pyr	0.001	BghiP	0.001

$\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 结果表明, 各类生物 BaP 等效含量平均含量由高到低排序为: 甲壳类 > 中上层鱼类 > 底层鱼类, 其中甲壳类显著高于底层鱼类 ($P < 0.05$).

2.5.3 生物体中 PAHs 致癌风险评价

昌化江河口海域生物体内 PAHs 导致的终身致癌风险 (ILCR) 依据公式(2)计算. 结果表明, 整体上致癌风险值介于 $2.21 \times 10^{-7} \sim 3.40 \times 10^{-5}$, 最高风险值出现在颌针鱼体内, 最低风险值出现在黄斑蓝子鱼, 平均值为 7.77×10^{-6} . 底层鱼类内 PAHs 残留对人体的致癌风险范围为 $2.21 \times 10^{-7} \sim 2.60 \times 10^{-5}$, 平均值为 6.88×10^{-6} ; 甲壳类 PAHs 对人体的致癌风险范围为 $2.31 \times 10^{-6} \sim 1.58 \times 10^{-5}$, 平均值 9.62×10^{-6} ; 中上层鱼类 PAHs 对人体的致癌风险范围为 $1.84 \times 10^{-6} \sim 3.40 \times 10^{-5}$, 平均值为 8.14×10^{-6} . 不同栖息类型生物体 PAHs 残留的致癌风险由高到低排序为: 甲壳类 > 中上层鱼类 > 底层鱼类.

3 讨论

3.1 生物体 PAHs 含量的种间差异

不同物种因生活习性、摄食行为、体内代谢以及栖息地环境等的不同导致对相同污染物的累积程度不同^[32]. 很多学者研究表明 PAHs 在生物体内的含量与生物体所处的营养级呈正相关^[33]. 本文中不同栖息类型海洋生物体 PAHs 平均含量排序为中上层鱼类 > 底层鱼类 > 甲壳类. 这可能是因为海洋生物体内有着复杂的代谢机制, 水生生物的污染物累积的主要途径是摄食行为, 单纯的应用营养级而不考虑生物体内的代谢机制、生长发育以及污染物的形态和生物有效性等因素, 并不能准确有效地评价其在食物链上的传递累积^[34]. 昌化江河口海域同类生物体中 PAHs 含量也表现出较大的差异. 如底层鱼类中触角沟鰹虎鱼和蛾眉条鰹含量显著高于其他底层鱼类 ($P < 0.05$); 中上层鱼类中颌针鱼含量显著高于其他中上层鱼类 ($P < 0.05$). 这可能与生物对

表 5 昌化江河口海域生物体中苯并[a]芘等效含量(BaP_{eq})和 PAHs 致癌风险水平¹⁾

Table 5 BaP equivalent concentration and incremental lifetime cancer risk levels of PAHs in marine organisms from the estuary of Changhua River

生物种类	中文名	拉丁学名	PAHs 含量 /ng·g ⁻¹	BaP 含量 /ng·g ⁻¹	BaP _{eq} 等效含量 /ng·g ⁻¹	终身致癌 风险指数
	长棘银鲈	<i>Gerres filamentosus</i>	44.94	ND	0.61	4.41E-06
	乌塘鲤	<i>Bostrychus sinensis</i>	84.04	ND	3.62	2.60E-05
	触角沟鰕虎鱼	<i>Chaeturichthys stigmatias</i>	768.36	ND	2.70	1.94E-05
	细鳞鲷	<i>Rhabdosargus sarba</i>	51.85	ND	1.86	1.34E-05
	条尾鲱鲤	<i>Upeneus bensasi</i>	24.28	ND	0.03	2.49E-07
	多鳞鳢	<i>Sillago sihama</i>	31.37	ND	1.02	7.29E-06
	黄鳍鲷	<i>Sparus latus</i>	24.98	ND	0.54	3.89E-06
	黄鲫	<i>Setipinna taty</i>	82.69	ND	1.49	1.07E-05
	单斑笛鲷	<i>Lutjanostigm</i>	63.13	ND	0.16	1.17E-06
底层鱼类	前鳞鲷	<i>Mugiliformes</i>	29.90	ND	0.10	7.45E-07
	黄斑鲷	<i>Leiognathus bindus</i>	14.90	0.05	0.07	5.28E-07
	蛾眉条鰕	<i>Zebrias quagga</i>	150.38	0.30	0.63	4.55E-06
	大鳞舌鰕	<i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	17.88	0.16	0.81	5.84E-06
	半滑舌鰕	<i>Cynoglossus semilaevis</i>	16.60	0.13	0.16	1.14E-06
	黄斑蓝子鱼	<i>Siganus oramin</i>	20.55	ND	0.03	2.21E-07
	大鳞舌鰕	<i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	18.90	ND	1.25	9.00E-06
	截尾白姑鱼	<i>Pennahia anea</i>	30.41	ND	0.99	7.13E-06
	拟矛尾鰕虎鱼	<i>Parachaeturichthys polynema</i>	26.36	ND	0.96	6.88E-06
	网纹裸胸鱧	<i>Gymnothorax reticularis</i>	64.99	ND	1.15	8.22E-06
	亨氏仿对虾	<i>Parapenaeopsis hungerfordi</i> Alcock	80.46	ND	2.03	1.21E-05
	长叉口虾蛄	<i>Oratosquilla nepa</i>	54.13	0.18	2.14	1.28E-05
	远海梭子蟹	<i>Portunus pelagicus</i>	69.13	ND	0.39	2.31E-06
甲壳类	红星梭子蟹	<i>Portunus sanguinolentus</i>	81.78	ND	1.95	1.16E-05
	锯缘青蟹	<i>Scylla serrata</i>	28.01	0.15	1.45	8.62E-06
	近缘新对虾	<i>Metapenaeus affinis</i>	54.58	ND	2.66	1.58E-05
	宽突赤虾	<i>Metapenaeopsis palmensis</i>	64.03	ND	0.86	5.11E-06
	脊尾白虾	<i>Exopalaemon carinicauda</i>	58.89	ND	1.45	8.63E-06
	大甲鰩	<i>Megalapis cordyla</i>	87.03	ND	0.48	3.47E-06
	斑鰩	<i>Clupanodon punctatus</i>	83.66	ND	0.32	2.32E-06
中上层鱼类	颌针鱼	<i>Ablennes</i>	176.52	0.70	4.73	3.40E-05
	花鰩	<i>Clupanodon thrissa</i>	42.37	ND	0.26	1.84E-06
	沙丁鱼	<i>Sardine</i>	16.61	ND	0.33	2.40E-06
	鳓	<i>Ilisha elongata</i>	76.41	ND	0.68	4.86E-06

1) ND 表示未检出

PAHs 的累积代谢以及栖息环境的污染特征有关,触角沟鰕虎鱼和蛾眉条鰕均有洄游特性,可能受陆源污染物影响较大,颌针鱼喜栖息在近海内湾或河口附近,河口、港湾等湾内水域是陆源排污和船舶含油废水的主要容纳场所,受人类活动影响较大.同时,受陆源淡水稀释的影响,湾内水域盐度往往较湾外低^[35].而盐度的降低往往能加速环境中 PAHs 的溶解,从而促进生物体中 PAHs 的积累,这可能对以上 3 种鱼类中 PAHs 含量的增加也有一定程度的影响.

3.2 生物体中 PAHs 组成的种间差异

通常,辛醇-水分配系数(K_{ow})在低环(2~3 环) PAHs 中相对较低,因此低环易溶于水;而高环 PAHs 的 K_{ow} 相对较高,易被悬浮颗粒物和沉积物吸附^[36]. 各类生物体内 PAHs 分布主要以低环 2~3 环

为主,占 $\sum 16$ PAHs 的 9.71%~96.33%,平均值为 63.41%,且主要贡献单体为 Nap,这可能与频繁的海上交通运输及船只燃油的泄漏有关^[37].且底层生物受到燃烧源影响较大,而中上层生物受到石油源影响较大,这可能是因为废油的密度比较小,一般会漂浮在海面,中上层鱼类更易接触船只泄漏的燃油,因此受其影响较大.本次调查的生物样品中高环(5~6) PAHs 几乎未被检出,其余组分均有检出,并且检出组分中主要以 2~3 环亲水性 PAHs 为主,这说明生物体中 PAHs 主要是通过表皮吸收或鳃对水的过滤吸收.这也从另一个方面解释了中上层生物受到石油源影响较大的原因.此外,底层鱼类和甲壳类中 PAHs 高环(5~6)组分显著高于中上层鱼类($P < 0.05$),这种差异在很大程度上与 PAHs 各组分的理化性质有关.一般来说 PAHs 组分中 $\lg K_{ow} < 5$ 则

较易溶于水相(2~4环),而 $\lg K_{ow} > 5$ (5~6环)则主要分配到悬浮颗粒和沉积物^[38, 39]. 海洋环境中,底层鱼类虽为游泳生物,但其大部分都是底栖生活,和甲壳类一样,受到沉积物的影响较大. 相反,与水相直接接触往往要少于中上层鱼类.

3.3 生物体 PAHs 的健康风险评价

在本研究的生物样品中,苯并[a]芘含量仅在黄斑魮、蛾眉条鲷、大鳞舌鲷、半滑舌鲷、颌针鱼、长叉口虾蛄和锯缘青蟹这7种生物体中检出,其含量均小于 $2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,表明所有生物 BaP 含量均低于欧盟标准 No. 208/2005^[31]规定的限值,结果表明河口海域生物受到 BaP 污染的程度较低.

各类生物 BaP 等效含量平均含量呈甲壳类 > 中上层鱼类 > 底层鱼类的特征,该结果区别于 PAHs 含量平均值的趋势,这说明生物体 PAHs 含量高并不等同于食用的致癌风险高. USEPA 提出最大可接受的致癌风险是 $\text{ILCR} \leq 1.0 \times 10^{-5}$,而 $\text{ILCR} > 1.0 \times 10^{-4}$ 被认为有严重致癌风险. 此次调查的生物体底层鱼类中(乌塘鲤、触角沟鰕虎鱼、细鳞鲷、黄鲫)、甲壳类(亨氏仿对虾、长叉口虾蛄、红星梭子蟹、近缘新对虾)以及中上层鱼类(颌针鱼)的 $1.0 \times 10^{-5} \leq \text{ILCR} < 1.0 \times 10^{-4}$,表明昌化江河口海域存在一定的食用致癌风险,但大部分处于食用安全范围内. 但是也显著高于南海海洋生物的 ILCR($1.32 \times 10^{-10} \sim 4.49 \times 10^{-10}$)^[2]、大亚湾($1.32 \times 10^{-10} \sim 4.49 \times 10^{-9}$)^[3]、湛江红树林海域($3.07 \times 10^{-6} \sim 6.15 \times 10^{-6}$)^[7],因此应该加强对该海域鱼类食用的管理和引导以及加强环境的保护和治理.

4 结论

(1)昌化江河口海域不同栖息类型海洋生物体中的 PAHs 的含量存在差异,中上层鱼类 PAHs 平均值含量最高,其次是甲壳类,底层鱼类最低,与国内其他海域相比,该河口海域污染处于中低水平. 生物体中高环(5~6)PAHs 几乎未被检出,其余组分均有检出,并且检出组分中主要以 2~3 环亲水性 PAHs 为主.

(2)33 种海洋生物体中 PAHs 主要来源于燃烧源(石油燃烧和生物质燃烧)和石油源,不同栖息类型生物的 PAHs 来源表现有明显差异,底层生物受到燃烧源影响较大,而中上层生物受到石油源影响较大.

(3)生物体 PAHs 残留的致癌风险由高到低排序为:甲壳类 > 中上层鱼类 > 底层鱼类. 生物体底层鱼类中(乌塘鲤、触角沟鰕虎鱼、细鳞鲷、黄鲫)、甲壳类(亨氏仿对虾、长叉口虾蛄、红星梭子蟹、近缘

新对虾)和中上层鱼类(颌针鱼)的 ILCR 略高于最大可接受风险阈值,存在一定的食用健康风险,需加强对该海域水产品的消费管理.

参考文献:

- [1] Li Y L, Wang C L, Zou X Q, *et al.* Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in coral reef fish from the South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **139**: 339-345.
- [2] Ke C L, Gu Y G, Liu Q, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wild marine organisms from South China Sea: Occurrence, sources, and human health implications[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **117**(1-2): 507-511.
- [3] Sun R X, Lin Q, Ke C L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments and marine organisms from the Daya Bay, South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **103**(1-2): 325-332.
- [4] Abdel-Shafy H I, Mansour M S M. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation [J]. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016, **25**(1): 107-123.
- [5] 冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 等. 典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4594-4603.
Ran Z X, Chen J Y, Wang Y T, *et al.* Characteristics and influencing factors of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from typical industrial areas of Chengdu[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4594-4603.
- [6] Tongo I, Ogebeide O, Ezemonye L. Human health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in smoked fish species from markets in Southern Nigeria [J]. *Toxicology Reports*, 2017, **4**: 55-61.
- [7] 于紫玲, 林钦, 谷阳光, 等. 湛江红树林海域生物体中多环芳烃污染水平及其健康风险评价[J]. *中国水产科学*, 2015, **22**(5): 994-1006.
Yu Z L, Lin Q, Gu Y G, *et al.* Levels and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in marine organisms from Zhanjiang mangrove waters [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, **22**(5): 994-1006.
- [8] Vethaak A D, Baggelaar P K, Van Lieverloo J H M, *et al.* Decadal trends in polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) contamination assessed by 1-hydroxypyrene in fish bile fluid in the Netherlands: Declining in marine waters but still a concern in estuaries[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2016, **3**: 1-13.
- [9] 贾立明, 赵然, 陈鑫, 等. 松花江干流水体中的多环芳烃分布特征与营养级转移评估[J]. *环境化学*, 2015, **34**(3): 599-601.
- [10] Wan Y, Jin X H, Hu J Y, *et al.* Trophic dilution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a marine food web from Bohai Bay, North China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(9): 3109-3114.
- [11] Wang D Q, Yu Y X, Zhang X Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fish from Taihu Lake: Their levels, sources, and biomagnification [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **82**: 63-70.
- [12] Gao L R, Zhang Q, Zhang B, *et al.* Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in water and six fish species from Dongting Lake, China[J]. *Chemosphere*, 2014, **114**: 150-157.
- [13] 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 等. 大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4291-4301.
Wang X D, Qi S Y, Zhang Y H, *et al.* Pollution characteristics and ecological risk assessment of PAHs in water and fishes from

- Daqing Lakes [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (11): 4291-4301.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 中国统计出版社, 2017. 102
- [15] 胡志远, 章昊晨, 谭丕强, 等. 生物柴油公交车颗粒物可溶有机组分和多环芳烃排放[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, **7**(7): 1046-1054.
- Hu Z Y, Zhang H C, Tan P Q, *et al.* Emission characteristics of soluble organic fraction and polycyclic aromatic hydrocarbons from a diesel bus fueled with waste cooking oil-based biodiesel blends [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, **7** (7): 1046-1054.
- [16] 雷利利, 裔静, 周俊, 等. 柴油机颗粒物排放物中可溶性有机物的成分分析[J]. 车用发动机, 2016, (2): 66-70.
- Lei L L, Yi J, Zhou J, *et al.* Analysis of SOF composition for diesel engine particulate matter [J]. *Vehicle Engine*, 2016, (2): 66-70.
- [17] 母清林, 方杰, 邵君波, 等. 长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 839-846.
- Mu Q L, Fang J, Shao J B, *et al.* Distribution, sources and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang coastal areas [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 839-846.
- [18] 李海燕, 赖子尼, 曾艳艺, 等. 珠江口表层水中多环芳烃的分布特征及健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2018, **34** (2): 64-72.
- Li H Y, Lai Z N, Zeng Y Y, *et al.* Distribution and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water of the Pearl River Estuary[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34** (2): 64-72.
- [19] 张晨晨, 高建华, 郭俊丽, 等. 长江口及废黄河口海域表层沉积物中多环芳烃分布特征和生态风险评价[J]. 海洋通报, **37**(1): 38-44.
- Zhang C C, Gao J H, Guo J L, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of PAHs in surface sediments from the Yangtze Estuary and the Old Yellow River Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, **37**(1): 38-44.
- [20] GB 5009. 265-2016, 食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定[S].
- [21] USEPA 823-R-95-007, Guidance for assessing chemic contaminant, data for use in fish advisories, vol. 1: fish sampling and analysis[S].
- [22] Zhang B, Zhai F Y, Du S F, *et al.* The China health and nutrition survey, 1989-2011 [J]. *Obesity Reviews*, 2013, **15** Suppl 1: 2-7.
- [23] Rocha A C, Palma C. Source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil sediments: Application of different methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 1077-1089.
- [24] Sun R X, Sun Y, Li Q X, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments and marine organisms; Implications of anthropogenic effects on the coastal environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **640-641**: 264-272.
- [25] Zhao X, Qiu W H, Zheng Y, *et al.* Occurrence, distribution, bioaccumulation, and ecological risk of bisphenol analogues, parabens and their metabolites in the Pearl River Estuary, South China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **180**: 43-52.
- [26] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P, *et al.* Concentrations of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) in various marine organisms in relation to those in sediments and to trophic level [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1998, **36**(12): 951-960.
- [27] Kong K Y, Cheung K C, Wong C K C, *et al.* The residual dynamic of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in fishponds of the Pearl River delta, South China [J]. *Water Research*, 2005, **39**(9): 1831-1843.
- [28] Sun R X, Lin Q, Ke C L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments and marine organisms from the Daya Bay, South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **103**(1-2): 325-332.
- [29] 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 等. 深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 [J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3832-3839.
- Sun R X, Ke C L, Gu Y G, *et al.* Residues and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the surface sediments and marine organisms from Dapeng Bay, Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3832-3839.
- [30] Shi J C, Zheng G J, Wong M H, *et al.* Health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons via fish consumption in Haimen bay (China), downstream of an e-waste recycling site (Guiyu) [J]. *Environmental Research*, 2016, **147**: 233-240.
- [31] Commission Regulation (Ec) No1881/2006, Setting maximum levels for certain contaminants in food stuffs[S].
- [32] 彭菲, 尹杰, 王茜, 等. 鱼外渔场海洋生物体内重金属和多环芳烃含量水平与食用风险评价[J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(1): 168-179.
- Peng F, Yi J, Wang Q, *et al.* Occurrence and risk assessment of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in marine organisms from Yuwai fishing ground [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, **14**(1): 168-179.
- [33] Zhao Z H, Zhang L, Wu J L, *et al.* Distribution and bioaccumulation of organochlorine pesticides in surface sediments and benthic organisms from Taihu Lake, China [J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(9): 1191-1198.
- [34] Yu Z L, Lin Q, Gu Y G, *et al.* Bioaccumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wild marine fish from the coastal waters of the northern South China Sea: Risk assessment for human health [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **180**: 742-748.
- [35] 甘居利, 贾晓平. 南海北部鱼类石油烃含量地理差异原因浅析[J]. 湛江海洋大学学报, 1998, **18**(1): 29-32.
- Gan J L, Jia X P. The region distribution and its main reasons on petroleum hydrocarbons in marine fish from northern south China Sea [J]. *Journal of Zhanjiang Ocean University*, 1998, **18**(1): 29-32.
- [36] Burgos-Núñez S, Navarro-Frómata A, Marrugo-Negrete J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals in the Cispata Bay, Colombia: A marine tropical ecosystem [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **120**(1-2): 379-386.
- [37] 王军帅. 厦门地区海产品中多环芳烃污染水平及膳食暴露评估研究[D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- Wang J S. Research for pollution level and dietary exposure assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in aquatic products from Xiamen [D]. Xiamen: Jimei University, 2015.
- [38] Viñas L, Franco A, Bargiela X, *et al.* Temporal and spatial changes of PAH concentrations in *Mytilus galloprovincialis* from Ria de Vigo (NW Spain) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(2): 529-539.
- [39] Liang Y, Tse M F, Young L, *et al.* Distribution patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the sediments and fish at Mai Po Marshes Nature Reserve, Hong Kong [J]. *Water Research*, 2007, **41**(6): 1303-1311.

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)