

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫兰 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学

殷行行^{1,2,3}, 郭昌胜^{1,3}, 邓洋慧^{1,3}, 邱紫雯^{1,3}, 张艳^{1,3}, 滕彦国², 徐建^{1,2,3*}

(1. 中国环境科学研究院环境健康风险评估与研究中心, 北京 100012; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 国家环境保护化学品生态效应与风险评估重点实验室, 北京 100012)

摘要: 麻黄碱 (ephedrine, EPH) 是一种生物碱, 用于减轻感冒、过敏性鼻炎、鼻炎及鼻窦炎引起的鼻充血症状, 控制支气管哮喘等, 同时还是制造毒品冰毒的原料. EPH 已经在地表水中广泛检出, 并可能对水生生物甚至生态系统产生不利影响. 但目前, EPH 在水生生物中的摄取、器官分配和毒代动力学过程还没有受到关注. 本研究中将斑马鱼 (*Danio rerio*) 在半静态系统中暴露于 EPH, 研究斑马鱼的不同器官对 EPH 的吸收、蓄积以及 EPH 在斑马鱼体内的毒物代动力学. 暴露浓度分别为 0.01、1.00 和 100.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 暴露 14 d 后, 在斑马鱼脑、肝、肠、卵巢及肌肉中均检测到 EPH, 高浓度组斑马鱼脑中 EPH 最高达到 84.97 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; EPH 的平均含量的相对大小遵循以下顺序: 脑 > 卵巢 > 肝 > 肠 > 肌肉. 斑马鱼器官中的麻黄碱的摄取速率常数 (K_u) 为 0.23 ~ 570.31 $\text{L}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 消除速率常数 (K_e) 为 1.22 ~ 6.11 d^{-1} , 半衰期为 0.12 ~ 0.57 d. 观察到的生物富集系数 (BCF_o) 和动力学来源的生物富集系数 (BCF_k) 范围分别为 0.24 ~ 337.33 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.13 ~ 316.43 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$, 处于相同的水平.

关键词: 麻黄碱 (EPH); 生物富集系数 (BCF); 吸收和清除; 毒代动力学模型; 器官分配; 斑马鱼

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1496-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007235

Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (*Danio rerio*)

YIN Xing-xing^{1,2,3}, GUO Chang-sheng^{1,3}, DENG Yang-hui^{1,3}, QIU Zi-wen^{1,3}, ZHANG Yan^{1,3}, TENG Yan-guo², XU Jian^{1,2,3*}

(1. Center for Environmental Health Risk Assessment and Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Effect and Risk Assessment of Chemicals, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Ephedrine (EPH) is an alkaloid commonly used to relieve nasal congestion caused by colds, allergic rhinitis, rhinitis, and sinusitis, and to control bronchial asthma. It is also be used as a raw material in the manufacture of methamphetamine. Although the distribution of EPH in surface waters has been widely studied, its uptake, internal distribution, and toxicokinetic processing in exposed organisms have not been well investigated. In this study, we investigated the uptake, disposition, and toxicokinetics of EPH in zebrafish (*Danio rerio*) in a semi-static exposure system. EPH was consistently detected in zebrafish biological samples, with the highest concentrations of 84.97 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ detected in the brain tissue of fish in the high treatment group. Over the 14-d exposure period, the relative abundance of mean concentrations of EPH in biological samples generally followed the order of brain > ovary > liver > intestine > muscle. The uptake rate constants (K_u), elimination rate constants (K_e), and half-lives of EPH in the biological tissues were in the ranges 0.23-570.31 $\text{L}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 1.22-6.11 d^{-1} , and 0.12-0.57 d, respectively. The observed bioconcentration factor (BCF_o) and kinetically-derived bioconcentration factor (BCF_k) were similar, ranging 0.24-337.33 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 0.13-316.43 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. These results are helpful for understanding the behavior of psychoactive substances in aquatic organisms and have directive significance for studying their toxicity and ecological risks to aquatic organisms.

Key words: ephedrine (EPH); bioconcentration factor (BCF); uptake and elimination; toxicokinetic modeling; organ distribution; zebrafish (*Danio rerio*)

麻黄碱/伪麻黄碱 (ephedrine, EPH) 是从植物麻黄中分离出的一种芳烃仲胺类生物碱, 是一种兼具激动 α 与 β 受体作用的拟肾上腺素, 对中枢神经系统^[1]、心血管系统^[2]和平滑肌^[3]等具有广泛的药理作用. 同时, EPH 还是苯丙胺类兴奋剂的主要合成材料及前体化合物^[4], 在我国通过刑法和政府法规加以管控. EPH 已被证实对人类及其他哺乳动物有神经毒性, 可导致神经功能障碍^[5-7]. EPH 经人体摄入后, 随人类排泄物进入废水, 而目前的污水处理

设施不能将其全部清除, 导致其随污水处理设施的出水进入水生生态系统^[8, 9]. 世界范围内很多国家的地表水中均检测到 EPH 残留, 如在英国一条河流中的残留浓度范围为小于检出限 (< LOD) ~ 28.9 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10], 而西班牙中部马德里地区的 Jarama 河及

收稿日期: 2020-07-25; 修订日期: 2020-09-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07302001); 国家自然科学基金项目 (41673120)

作者简介: 殷行行 (1989 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: ryinxingxing@126.com

* 通信作者, E-mail: xujian@caes.org.cn

Tajo 河中发现 EPH 残留高达 $30.6 \sim 1\,020.0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[11]. 在笔者先前的研究中发现,北京市 7 条城市河流中的 EPH 检出率为 94%~100%,浓度范围为 $<\text{LOD} \sim 185.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[12,13]. 对北京市 16 个市辖区的 24 个地表水样及 19 个地下水样进行检测,发现地表水中 EPH 的检出率达 42%,浓度范围在 $<\text{LOD} \sim 70.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,平均浓度为 $10.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 地下水中未发现 EPH 残留^[14]. 尽管目前还没有在野生水生生物中检测到 EPH 的相关报道,但是由于 EPH 作用机制复杂,且在低浓度水平下就会产生药理作用,因此,地表水环境中的 EPH 残留对水生生物甚至是水生生态系统的潜在危害应该得到重视.

目前,针对 EPH 的研究主要集中在作为治疗药物的药理及副作用、不同样品中检测方法的建立、对哺乳动物的毒副作用,以及水环境中的监测,EPH 在生物体内的蓄积及代谢没有得到关注. 污染物的生物毒性及其对生态环境的影响主要取决于到达器官或组织的污染物的量. Wei 等^[15] 以小鼠为研究对象分析了包含 EPH 在内的 5 种麻黄碱生物碱血浆药代动力学特征,发现小鼠血液中 EPH 的浓度在 $0.33 \sim 1.33 \text{ h}$ 后达到峰值 ($1\,180.44 \sim 2\,556.87 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$),其半衰期为 $1.00 \sim 9.76 \text{ h}$. 但是目前还没有水生生物体内 EPH 生物蓄积及代谢的相关研究,而对水环境中的 EPH 污染的毒性效应研究以及

生态风险评价等均基于水相中的浓度^[12~14]. 因此,有必要对 EPH 的器官特异性蓄积和毒代动力学进行研究.

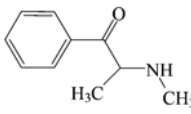
本文拟开展暴露于恒定浓度的半静态系统中斑马鱼(*Danio rerio*)对 EPH 的吸收和器官特异性生物富集研究,同时,利用毒代动力学模型计算斑马鱼摄取和清除 EPH 的毒代动力学指数,结果将揭示 EPH 在水生生物体不同器官内的吸收、分布和清除过程,以期对 EPH 的生态风险评估提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

超高效液相色谱-串联四极杆质谱联用仪 (ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS, Waters 公司, 美国); SPE 装置 (Supelco, 德国); Oasis MCX 固相萃取柱 ($60 \text{ mg}, 3 \text{ cc}$, Waters 公司, 美国); 尼龙针筒式微孔滤膜 ($13 \text{ mm} \times 0.22 \text{ }\mu\text{m}$, 津腾, 天津); 玻璃纤维滤膜 ($47 \text{ mm} \times 0.45 \text{ }\mu\text{m}$, Whatman 公司, 英国). 甲醇、乙腈、甲酸、乙酸、氨水 (色谱纯, Fisher Scientific 公司, 美国); 实验用水为 Milli-Q 净化系统 (Millipore 公司, 美国) 制备的超纯水; EPH 及其氘代物 EPH-d3 标准品纯度 $\geq 99.8\%$ (Sigma-Aldrich 公司, 美国), 基本信息见表 1.

表 1 麻黄碱及其氘代物的基本信息
Table 1 Physicochemical properties of EPH and EPH-d3

物质	结构	分子式	相对分子质量	CAS 号	p <i>K</i> _a
EPH		C ₁₀ H ₁₅ NO	165.23	299-42-3	10.3
EPH-d3	—	C ₁₀ H ₁₂ D ₃ NO	168.25	285979-73-9	—

1.2 斑马鱼培养与暴露实验

120 日龄的成年雌性斑马鱼购自上海费曦生物有限公司,体重约 400 mg. 将斑马鱼在实验室条件下驯养两周后开始正式实验. 实验遵循 OECD 化学品测试指南^[16]. 暴露实验用水为活性炭过滤后充分曝气的自来水,本实验温度为 $(26 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,光照/黑暗周期为 14 h: 10 h. 每天喂食一次新孵化的丰年虾.

本实验采用水暴露的方式给药,将长势相同的 540 尾成年雌性斑马鱼随机分配到 9 个玻璃水缸 ($30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$, 装有 20 升水),每个水缸 60 尾. 每个水缸被随机分配到 3 个 EPH 暴露浓度 (低浓度组为 $0.01 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 中浓度组为 1.00

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 高浓度组为 $100.00 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 每个浓度 3 个重复. 进行 14 d 的生物蓄积实验 (暴露阶段), 14 d 后将斑马鱼转移到不含 EPH 的清水中进行 7 d 的清除实验 (清除阶段). 实验在半静态状态下进行, 每 24 h 更新一次暴露水. 在实验的第 1、2、4、7、10 和 14 d (暴露阶段) 以及第 15、16、17、19 和 21 d (清除阶段) 对斑马鱼进行采样. 采样时, 从每个水缸中取出 5 尾斑马鱼, 在冰上处死后用滤纸擦干. 每天更换暴露水前采集 $950 \text{ }\mu\text{L}$ 水样, 加入内标过滤后, 直接测定, 检测 EPH 的浓度.

1.3 样品前处理

将斑马鱼解剖, 得到脑、肝、肠、卵巢及肌肉样品. 将样品称重后添加氘代内标, 立即冷冻在 -80°C

下保存直至提取. 前处理过程遵循实验室建立的方法^[17, 18]. 将器官样品在 10 mL 离心管中匀浆, 加入 5 mL 含 1% 乙酸的甲醇作为萃取溶剂, 超声提取 20 min, 在 -20℃ 冷冻 30 min, 4℃ 离心得到上清液. 重复以上步骤一次, 将上清液合并, 用去离子水稀释至 50 mL, 通过玻璃微纤维过滤除去固体颗粒, 然后用 HCl 酸化至 pH≈2. Oasis MCX 固相萃取柱依次用 5 mL 甲醇和 5 mL Milli-Q 水活化平衡. 将提取液以 1 mL·min⁻¹ 的速度流过 Oasis MCX 萃取柱. 样品加载完毕后, 使用 6 mL 超纯水对固相萃取柱进行淋洗, 继续抽真空 30 min. 用 6 mL 含 5% 氨水的甲醇溶液洗脱. 洗脱液收集于 10 mL 玻璃离心管中, 40℃ 水浴下在平行浓缩仪中以弱氮气流吹干. 含 10% 乙腈的水溶液(体积比)重建样品至 1 mL, 经 0.22 μm 尼龙滤膜过滤后待测.

1.4 仪器分析

使用 UPLC-MS/MS 对样品进行测定, 三重四极杆质谱仪 (Xevo TQ-S micro IVD system, Waters 公司, 美国) 配备电喷雾电离源 (electrospray ionization, ESI).

1.4.1 色谱条件

使用 Waters ACQUITY UPLC BEH C18 色谱柱

(2.1 mm × 50 mm, 1.7 μm, Waters, 美国) 进行分离. 流动相 A 相为含 1% 甲酸的水, B 相为乙腈, 色谱柱的温度为 40℃, 梯度洗脱程序如表 2, 进样量为 5 μL.

表 2 色谱柱梯度洗脱条件

Table 2 Gradient elution conditions of the chromatographic column

序列	t/min	流速 /mL·min ⁻¹	流动相 A 比例 /%	流动相 B 比例 /%
1	Initial	0.45	98	2
2	0.5	0.45	98	2
3	2.5	0.45	50	50
4	2.6	0.45	2	98
5	4.0	0.45	2	98
6	4.2	0.45	98	2
7	5.5	0.45	98	2

1.4.2 质谱条件

采用电喷雾正离子模式 (ESI +) 电离, 多反应监测模式 (MRM) 监测, 毛细管电压为 1.00 kV, 去溶剂气温度为 800℃, 去溶剂气流速为 1 000 L·h⁻¹, 碰撞气流速为 0.14 mL·min⁻¹, 离子源温度为 150℃, 雾化气压力为 600 kPa. 使用软件 MassLynx 和 TargetLynx V4.1 进行数据采集和处理. EPH 及其内标物质 EPH-d3 的特征选择离子及质谱检测条件如表 3 所示.

表 3 EPH 和 EPH-d3 的质谱条件及 MRM 特征选择离子

Table 3 Mass spectrometer parameters and characteristic selective ions (m/z) used for the MRM of EPH and EPH-d3

化合物	母离子(m/z)	锥孔电压/V	定性离子(m/z)	碰撞能/eV	定量离子(m/z)	碰撞能/eV
EPH	166.05	35	148.10	18	133.20	20
EPH-d3	169.10	16	129.10	19	—	—

1.5 数据处理

使用经典伪一级毒代动力学模型, 根据每个样品在每个采样时间点的 EPH 的平均含量进行吸收和消除毒理动力学分析^[19~21]. 消除率常数 (K_e , d⁻¹) 通过拟合公式 (1) 的非线性回归获得. 统计软件 Origin 用于模型拟合.

$$C_t = ae^{-K_e t}$$
 (1)

式中, a 是常数, t 是时间 (d), C_t 是在时间 t 时生物样品中化学物质的含量 (μg·kg⁻¹).

通过拟合公式 (2) 的非线性回归来计算摄取速率常数 [K_u , L·(kg·d)⁻¹].

$$C_t = \frac{K_u}{K_e} c_w (1 - e^{-K_e t})$$
 (2)

式中, c_w 是平均水浓度 (μg·L⁻¹), K_e 是公式 (1) 得的消除速率常数.

根据 公式 (3) 估算生物样品中化学物质的半衰期 ($t_{1/2}$, d).

$$t_{1/2} = \ln 2 / K_e$$
 (3)

式中, K_e 是公式 (1) 获得的消除速率常数.

生物富集系数 (bioconcentration factor, BCF) 可以反映化合物在生物体内的富集能力. 动力学来源的生物富集系数 (BCF_k, L·kg⁻¹) 通过公式 (4) 计算.

$$BCF_k = K_u / K_e$$
 (4)

式中, K_e 是公式 (1) 获得的消除速率常数, K_u 是公式 (2) 获得的摄取速率常数.

此外, 根据每个鱼类器官中的平均含量和随后的水相中相应的实际浓度, 根据公式 (5) 计算了脑、肝、肠、卵巢和肌肉中目标化合物的观测生物富集系数 (BCF_o, L·kg⁻¹)^[19, 22].

$$BCF_o = C_{f(s)} / c_w$$
 (5)

式中, $C_{f(s)}$ 是摄取阶段结束时每个斑马鱼器官中化学物质的含量 (μg·kg⁻¹, 湿重), c_w 摄取阶段水相中相应的平均实际浓度 (μg·L⁻¹).

2 结果与讨论

2.1 暴露实验用水中麻黄碱的浓度

在暴露实验过程中, EPH 水溶液的浓度见表 4, 以平均值和标准偏差表示. 在摄取阶段, 低浓度暴露

组中 EPH 的水中浓度为 $(0.010 \pm 0.0014) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 中浓度暴露组为 $(1.00 \pm 0.10) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 高浓度暴露组为 $(97.78 \pm 8.35) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 均接近标称浓度. 在整个暴露阶段, 浓度保持稳定, 并且测定浓度的相对标准偏差(RSD)均在标称浓度的 30% 以内, 在可接受的范围内. 净化阶段(第 15 ~ 21 d), 水中 EPH 浓度小于 LOD.

表 4 暴露阶段(14d)水相中 EPH 的标称浓度和
测量浓度(平均值 $\pm$ 标准差)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Nominal and measured concentrations (mean $\pm$ SD) of EPH in water during the exposure phase (14 d)/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$			
分组	低浓度组	中浓度组	高浓度组
标称浓度	0.01	1.00	100.00
测定浓度	0.010 ± 0.0014	1.00 ± 0.10	97.78 ± 8.35

2.2 麻黄碱在斑马鱼中的器官特异性蓄积

本实验的暴露和清除阶段, 3 个暴露浓度下, 斑马鱼健康状况良好, 实验过程中未出现斑马鱼死亡. 以时间为横坐标、含量为纵坐标得到 EPH 的含量-时间曲线, 来表示斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉中 EPH 含量随时间的变化, 如图 1 所示. 斑马鱼暴露于 EPH 水溶液 24 h 后即可在各器官中检出 EPH, 暴露后在 7 ~ 14 d 药物含量达到峰值. 暴露 14 d 后, 中等浓度暴露组($1.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 斑马鱼中的 EPH 的含量约为低浓度暴露组($0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 的 3 倍. 说明污染物在生物体内的蓄积不一定与暴露环境中的浓度呈线性关系, 这与先前的研究结果相似^[18, 19]. 与其他器官相比, 斑马鱼的脑对 EPH 的生物蓄积能力最强, 当暴露于 $100.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 EPH 时, 斑马鱼脑中 EPH 的平均含量最高达到了 $84.97 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 说明脑是水环境中 EPH 作用于水生生物的一个靶器官. 暴露 14 d 后, 器官样品中 EPH 含量顺序为: 脑 > 卵巢 > 肝 > 肠 > 肌肉. 根据化学性质和药物作用原理的不同, EPH 在斑马鱼体内存在器官特异性蓄积, 这与笔者先前研究结果中精神活性物质 METH 及 KET 等一致^[18], 包括抗生素等药物在内的研究也普遍证实了有机污染物在鱼体中存在器官分布和生物富集的差异^[23~26]. 暴露于 EPH 溶液 14 d 后, 卵巢中 EPH 含量处于较高水平, 且高于肝脏. 普遍认为鱼的肝脏是药物代谢的主要生物区室^[19, 27], 因此 EPH 卵巢中的生物蓄积原理还需要进一步研究. 同时, EPH 在卵巢的生物蓄积表明卵巢是其进入斑马鱼体内后的靶器官, 这将会引起鱼类的繁殖毒性, 甚至破坏生态系统平衡. 高浓度暴露实验时, 除卵巢组织外, EPH 在各器官中均达到饱和状态, 可见斑马鱼对 EPH 的吸收机制主要为主动转运. 为了更好地了解斑马鱼对 EPH 的吸收、生物转化与消除途径等

机制, 还需进一步开展体内、外母体及代谢产物的定量研究.

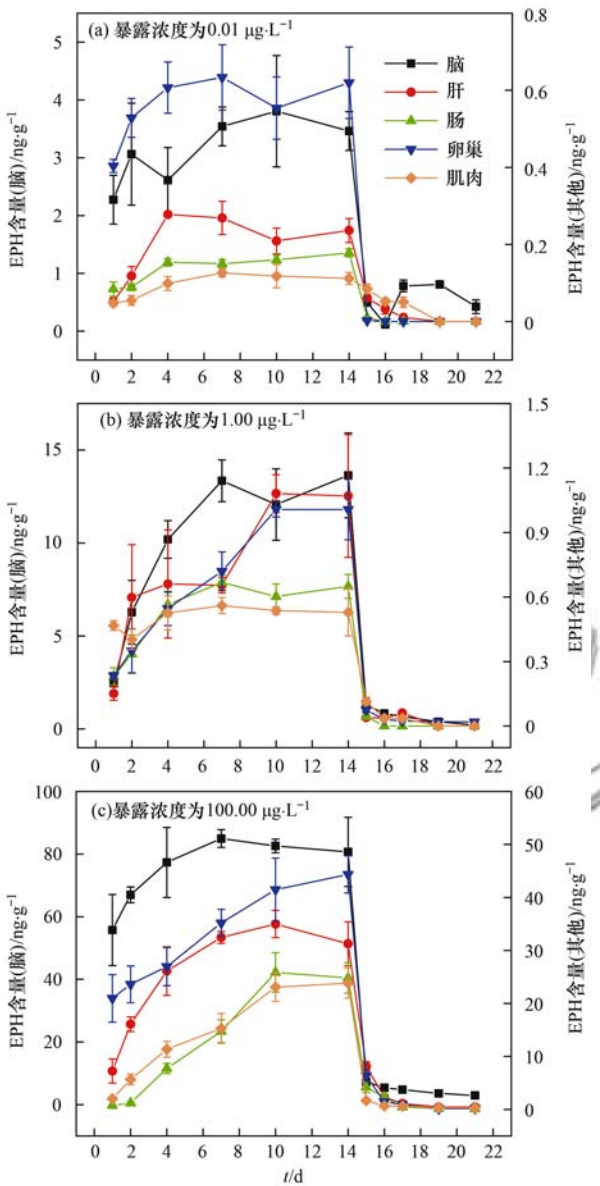


图 1 暴露和清除过程中斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉中 EPH 的含量 ($n=3$, 均值 $\pm$ 标准差)

Fig. 1 Uptake and elimination phase concentrations of EPH in brain, liver, intestine, ovary and muscle of zebrafish ($n=3$, mean $\pm$ SD)

2.3 吸收和清除动力学

图 1 显示了斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉随时间在暴露水中摄取和消除 EPH 的过程. 除高浓度暴露组的卵巢外, 在 3 个暴露浓度下, 斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉内的 EPH 含量均在暴露的 7 ~ 10 d 内基本达到平稳. 低浓度暴露组脑、肝、肠和卵巢以及中浓度组的脑和肠中 EPH 的吸收曲线在一定程度呈现双峰吸收模式, 即含量逐步增加达到第一个峰值后, 缓慢下降并在第 14 d 达到第二个峰值. 这可能是因为 EPH 在斑马鱼体内器官之间存在相互转运, 例如肝肠循环等^[28]. 使用经典伪一级毒代动

力学模型,在每个样品采集时间点,根据样品中 EPH 的含量,进行摄取和消除毒性动力学分析.对各器官数据进行拟合,除低浓度暴露组的肌肉拟合失败外,EPH 在各器官中的消除速率常数(K_e)和吸收速率常数(K_u)以及对应的半衰期如表 3 所示. K_u 和 K_e 值可能反映了药物进入鱼体中各个器官的分布的相对可及性,其中肌肉和肝脏与污染物的接触最直接,特别是肝脏是主要的排毒器官^[19,29],而大脑通常被认为是精神活性物质的目标器官^[30~32].

暴露于 EPH 的斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉中目标化合物的 K_u 值 [$L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$] 在 3 种浓度下分别介于 $(25.37 \pm 1.89) \sim (570.31 \pm 27.03)$ (低浓度暴露组)、 $(0.77 \pm 0.02) \sim (22.41 \pm 2.02)$ (中浓度暴露组)和 $(0.23 \pm 0.04) \sim (1.77 \pm 0.05)$ (高浓度暴露组)之间. K_u 值随暴露浓度的增加而降低,这与本研究的另外两种精神活性物质 METH 和 KET (数据未发表)呈现相同的规律,这表明当环境浓度改变时,斑马鱼积累目标化合物的相对速度也发生了改变^[26].这可能是因为当水浓度较低时,化学物质可以更容易地通过鳃等部位进入鱼体内;也可能是在高浓度暴露条件下,斑马鱼体内的 EPH 与相关的蛋白结合达到饱和状态,影响了吸收速率.在 3 个暴露浓度下,EPH 在脑中的 K_u 值显著大于其他器官,这也证实了脑作为中枢神经系统是 EPH 的靶器官^[5~7].

表 5 EPH 在斑马鱼的脑、肝、肠、卵巢和肌肉中的毒代动力学参数¹⁾

Table 5 Toxicokinetic indices of EPH in brain, liver, intestine, ovary, and muscle of zebrafish

器官	低浓度暴露组				中浓度暴露组				高浓度暴露组			
	K_e/d^{-1}	$K_u/L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	$t_{1/2}/d$		K_e/d^{-1}	$K_u/L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	$t_{1/2}/d$		K_e/d^{-1}	$K_u/L \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	$t_{1/2}/d$	
脑	$1.81 \pm 0.52(0.79)$	$570.31 \pm 27.03(0.77)$	0.38		$2.23 \pm 0.37(0.97)$	$22.41 \pm 2.02(0.51)$	0.31		$2.27 \pm 0.36(0.97)$	$1.77 \pm 0.05(0.89)$	0.31	
肝	$1.22 \pm 0.10(0.97)$	$25.37 \pm 1.89(0.65)$	0.57		$6.11 \pm 25.95(0.93)$	$4.32 \pm 0.48(0.37)$	0.11		$1.33 \pm 0.10(0.98)$	$0.36 \pm 0.03(0.66)$	0.52	
肠	$2.89 \pm 0.22(1.00)$	$38.77 \pm 2.25(0.69)$	0.24		$2.69 \pm 0.26(0.99)$	$1.40 \pm 0.10(0.60)$	0.26		$1.65 \pm 0.15(0.98)$	$0.23 \pm 0.04(0.26)$	0.42	
卵巢	$5.58 \pm 8.07(0.98)$	$303.3 \pm 11.72(0.83)$	0.12		$2.51 \pm 0.37(0.98)$	$1.66 \pm 0.17(0.43)$	0.28		$1.91 \pm 0.12(0.99)$	$0.65 \pm 0.04(0.69)$	0.36	
肌肉	F	F	F		$1.46 \pm 0.18(0.95)$	$0.77 \pm 0.02(0.88)$	0.48		$2.54 \pm 0.33(0.99)$	$0.36 \pm 0.05(0.32)$	0.27	

1) F 表示拟合失败,下同;括号外表示数值 $\pm$ 标准差,括号内表示 R^2

2.4 BCF

3 个暴露浓度下,EPH 在斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉中的观测来源以及动力学来源的生物浓缩因子(BCF_o 及 BCF_k)值汇总于表 6.比较了 EPH 在各器官中的 BCF_o 和 BCF_k 的值,发现两者在相同的水平, BCF_o 略高于 BCF_k ,且 BCF_o 在各器官中的大小顺序与 BCF_k 呈现相同的规律.低浓度暴露组中不同器官 EPH 的 BCF_o ($L \cdot kg^{-1}$) 值范围为 $10.90 \sim 337.33$,中浓度暴露组为 $0.53 \sim 13.71$,高浓度暴露组为 $0.24 \sim 0.83$.低浓度暴露组中不同器官 EPH 的 BCF_k ($L \cdot kg^{-1}$) 值范围为 $13.45 \sim 316.43$,中浓度暴露组为 $0.50 \sim 9.40$,高浓度暴露组为 $0.13 \sim 0.72$.目前 EPH 在水生生物体内的蓄积还没有相关报道,但是本研究中 EPH 的 BCF 值与其

在随后 7 d 的消除阶段,斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉中蓄积的精神活性物质被迅速清除,几乎无法检测到,显示出较大的清除率常数和较短的半衰期(表 5).暴露于 EPH 的斑马鱼脑、肝、肠、卵巢和肌肉中目标化合物的 K_e 值 (d^{-1}) 在 3 种浓度下分别介于 $(1.22 \pm 0.10) \sim (5.58 \pm 8.07)$ (低浓度暴露组)、 $(1.46 \pm 0.18) \sim (6.11 \pm 25.95)$ (中浓度暴露组)和 $(1.33 \pm 0.10) \sim (2.54 \pm 0.33)$ (高浓度暴露组)之间;相应的半衰期(d)分别为 $0.12 \sim 0.57$ 、 $0.11 \sim 0.48$ 、 $0.27 \sim 0.52$.Wei 等^[15]研究了小鼠经口服的方式摄取 EPH 等物质后,污染物的血浆药代动力学特征,其中 EPH 的半衰期(h)为 $(1.00 \pm 0.24) \sim (9.76 \pm 5.56)$,与本研究结果相当.EPH 的 K_e 值随着暴露浓度的增加而增加,表明当环境浓度较高时,斑马鱼将更快地消除目标化合物.Papazi 等^[33]的研究指出,在含有高浓度外源污染物的环境中,生物更趋向于将能量用于有毒物质的生物降解排毒,而不是增加生物量,这支持了本研究结果.EPH 的 K_e 值随着暴露浓度增加而增大,可能是高浓度的 EPH 影响了斑马鱼的生理健康而导致其 K_u 值降低,进而呈现出 K_e 值增大的现象.低浓度暴露组中肌肉 K_e 拟合失败,这与肌肉组织中较低含量的 EPH 更难排出体外有关,同时,清除阶段斑马鱼体内存在 EPH 由其他器官向肌肉转运的过程.

化学合成产物 METH 在野生鱼类器官中的 BAF ($L \cdot kg^{-1}$) 相近 ($0 \sim 62.82$)^[17].较高的暴露浓度会增加 EPH 在斑马鱼器官中的含量,但其在鱼器官中的 BCF 值随着暴露浓度的增加而呈下降趋势,这与其他外源污染物呈现规律相同,如醋酸环丙孕酮、双酚 A 和雌激素^[34~36].这可能是因为:①高浓度暴露下斑马鱼各器官对 EPH 的摄取/清除过程达到了饱和状态;②高浓度暴露下斑马鱼的新陈代谢功能遭到损害致使其摄取/清除过程受到抑制甚至终止;③斑马鱼体内存在有毒物质的排泄和生物降解过程^[36].在 3 个暴露浓度下,EPH 在各器官的 BCF_k 值大小顺序为:脑 > 卵巢 > 肝 > 肠 > 肌肉.这也说明 EPH 在斑马鱼体内存在器官特异性蓄积.

表 6 EPH 在斑马鱼各器官中的生物富集系数 (数值 ± 标准差) / L · kg⁻¹

器官	低浓度组		中浓度组		高浓度组	
	BCF _k	BCF _o	BCF _k	BCF _o	BCF _k	BCF _o
脑	316.43	337.33 ± 32.60	9.40	13.71 ± 2.29	0.72	0.83 ± 0.11
肝	20.83	23.04 ± 3.03	0.66	1.08 ± 0.29	0.25	0.32 ± 0.04
肠	13.45	17.35 ± 1.03	0.49	0.65 ± 0.06	0.13	0.25 ± 0.03
卵巢	54.46	60.38 ± 9.03	0.62	1.01 ± 0.14	0.31	0.45 ± 0.04
肌肉	F	10.90 ± 1.51	0.50	0.53 ± 0.11	0.13	0.24 ± 0.03

3 结论

(1)暴露 14 d 后,在斑马鱼脑、肝、肠、卵巢及肌肉中均检测到 EPH,高浓度组斑马鱼脑中 EPH 含量最高达到 84.97 ng · g⁻¹; EPH 平均含量遵循脑 > 卵巢 > 肝 > 肠 > 肌肉的顺序. EPH 在斑马鱼体内存在器官特异性蓄积.

(2)斑马鱼器官中的麻黄碱的摄取速率常数 (K_u) 为 0.23 ~ 570.31 L · (kg · d)⁻¹,消除速率常数 (K_e) 为 1.22 ~ 6.11 d⁻¹,半衰期分别为 0.12 ~ 0.57 d.

(3)观察到的生物富集系数 (BCF_o) 和动力学来源的生物富集系数 (BCF_k) 范围分别为 0.24 ~ 337.33 L · kg⁻¹ 和 0.13 ~ 316.43 L · kg⁻¹,二者处于相同的水平.

参考文献:

[1] Edmonds M E, Archer A G, Watkins P J. Ephedrine: a new treatment for diabetic neuropathic oedema [J]. The Lancet, 1983, **321** (8324): 548-551.

[2] Erkinaro T, Kavasmaa T, Pääkkilä M, *et al.* Ephedrine and phenylephrine for the treatment of maternal hypotension in a chronic sheep model of increased placental vascular resistance [J]. British Journal of Anaesthesia, 2006, **96** (2): 231-237.

[3] Featherstone N, Stanwell J, Affleck S, *et al.* Ephedrine hydrochloride: novel use in the management of resistant non-neurogenic daytime urinary incontinence in children [J]. Journal of Pediatric Urology, 2013, **9** (6): 915-918.

[4] Zhu B L, Conlan X, Cao J, *et al.* Case studies on illegal production of ephedrine/pseudoephedrine within Fujian China [J]. Forensic Science International, 2020, **312**, doi: 10.1016/j.forsciint.2020.110326.

[5] Xie L, Ma Y, Huang J Z, *et al.* Exploring the neuromechanism of chronic ephedrine addiction in rhesus monkeys: a behavioural and brain resting-state fMRI study [J]. Behavioural Brain Research, 2019, **359**: 807-813.

[6] Chen W L, Tsai T H, Yang C C H, *et al.* Acute effects of ephedra on autonomic nervous modulation in healthy young adults [J]. Clinical Pharmacology & Therapeutics, 2010, **88** (1): 39-44.

[7] Chen W L, Tsai T H, Yang C C H, *et al.* Effects of ephedra on autonomic nervous modulation in healthy young adults [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, **130** (3): 563-568.

[8] Subedi B, Kannan K. Mass loading and removal of select illicit drugs in two wastewater treatment plants in New York State and

estimation of illicit drug usage in communities through wastewater analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48** (12): 6661-6670.

[9] Yadav M K, Short M D, Aryal R, *et al.* Occurrence of illicit drugs in water and wastewater and their removal during wastewater treatment [J]. Water Research, 2017, **124**: 713-727.

[10] Baker D R, Kasprzyk-Hordern B. Spatial and temporal occurrence of pharmaceuticals and illicit drugs in the aqueous environment and during wastewater treatment: new developments [J]. Science of the Total Environment, 2013, **454-455**: 442-456.

[11] Mendoza A, Rodríguez-Gil J L, González-Alonso S, *et al.* Drugs of abuse and benzodiazepines in the Madrid Region (Central Spain): seasonal variation in river waters, occurrence in tap water and potential environmental and human risk [J]. Environment International, 2014, **70**: 76-87.

[12] 张艳, 张婷婷, 郭昌胜, 等. 北京市城市河流中精神活性物质的污染水平及环境风险 [J]. 环境科学研究, 2016, **29** (6): 845-853.

Zhang Y, Zhang T T, Guo C S, *et al.* Pollution status and environmental risks of illicit drugs in the urban rivers of Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29** (6): 845-853.

[13] Zhang Y, Zhang T T, Guo C S, *et al.* Drugs of abuse and their metabolites in the urban rivers of Beijing, China: occurrence, distribution, and potential environmental risk [J]. Science of the Total Environment, 2017, **579**: 305-313.

[14] 张艳, 张婷婷, 陈卫平, 等. 北京市水环境中精神活性物质污染特征 [J]. 环境科学, 2017, **38** (7): 2819-2827.

Zhang Y, Zhang T T, Chen W P, *et al.* Distribution characteristics of drugs of abuse and their metabolites in aqueous environment of Beijing, China [J]. Environmental Science, 2017, **38** (7): 2819-2827.

[15] Wei P, Huo H L, Ma Q H, *et al.* Pharmacokinetic comparisons of five ephedrine alkaloids following oral administration of four different Mahuang-Guizhi herb-pair aqueous extracts ratios in rats [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2014, **155** (1): 642-648.

[16] OECD. OECD guidelines for the testing of chemicals-test no 305: bioaccumulation in fish: aqueous and dietary exposure [M]. OECD, 2012.

[17] Yin X X, Guo C S, Lv J P, *et al.* Biomimetic accumulation of methamphetamine and its metabolite amphetamine by diffusive gradients in thin films to estimate their bioavailability in zebrafish [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2019, **6** (12): 708-713.

[18] Yin X X, Guo C S, Teng Y G, *et al.* Development and application of the analytical method for illicit drugs and metabolites in fish tissues [J]. Chemosphere, 2019, **233**: 532-541.

- [19] Zhao J L, Furlong E T, Schoenfuss H L, *et al.* Uptake and disposition of select pharmaceuticals by Bluegill exposed at constant concentrations in a flow-through aquatic exposure system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (8): 4434-4444.
- [20] Chen F F, Gong Z Y, Kelly B C. Bioaccumulation behavior of pharmaceuticals and personal care products in adult zebrafish (*Danio rerio*): influence of physical-chemical properties and biotransformation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(19): 11085-11095.
- [21] Landrum P F, Lee II H, Lydy M J. Toxicokinetics in aquatic systems: model comparisons and use in hazard assessment [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1992, **11**(12): 1709-1725.
- [22] Nowell L H, Capel P D, Dileanis P D. Pesticides in stream sediment and aquatic biota: distribution, trends, and governing factors [M]. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999.
- [23] Shi Y L, Vestergren R, Zhou Z, *et al.* Tissue distribution and whole body burden of the chlorinated polyfluoroalkyl ether sulfonic acid F-53B in crucian carp (*Carassius carassius*): evidence for a highly bioaccumulative contaminant of emerging concern [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49** (24): 14156-14165.
- [24] Jeong Y S, Xue J C, Park K J, *et al.* Tissue-specific accumulation and body burden of parabens and their metabolites in small cetaceans [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(1): 475-481.
- [25] Valdez Domingos F X, Oliveira Ribeiro C A, Pelletier é, *et al.* Tissue distribution and depuration kinetics of waterborne ¹⁴C-labeled light PAHs in mummichog (*Fundulus heteroclitus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45** (7): 2684-2690.
- [26] Arnnok P, Singh R R, Burakham R, *et al.* Selective uptake and bioaccumulation of antidepressants in fish from effluent-impacted Niagara River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(18): 10652-10662.
- [27] Huerta B, Margiotta-Casaluci L, Rodríguez-Mozaz S, *et al.* Anti-anxiety drugs and fish behavior: establishing the link between internal concentrations of oxazepam and behavioral effects [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, **35**(11): 2782-2790.
- [28] 陈曦, 马越鸣, 钟杰. 药物浓度-时间曲线双峰现象研究进展 [J]. *中国新药与临床杂志*, 2012, **31**(8): 432-437.
- Chen X, Ma Y M, Zhong J. Research progress in double peak phenomenon of concentration-time curve [J]. *Chinese Journal of New Drugs and Clinical Remedies*, 2012, **31**(8): 432-437.
- [29] Zhao H X, Liu S S, Chen J W, *et al.* Biological uptake and depuration of sulfadiazine and sulfamethoxazole in common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Chemosphere*, 2015, **120**: 592-597.
- [30] Imeh-Nathaniel A, Rincon N, Orfanakos V B, *et al.* Effects of chronic cocaine, morphine and methamphetamine on the mobility, immobility and stereotyped behaviors in crayfish [J]. *Behavioural Brain Research*, 2017, **332**: 120-125.
- [31] Riehl R, Kyzar E, Allain A, *et al.* Behavioral and physiological effects of acute ketamine exposure in adult zebrafish [J]. *Neurotoxicology and Teratology*, 2011, **33**(6): 658-667.
- [32] Pittman J, Hylton A. Behavioral, endocrine, and neuronal alterations in zebrafish (*Danio rerio*) following sub-chronic coadministration of fluoxetine and ketamine [J]. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 2015, **139**: 158-162.
- [33] Papazi A, Karamanli M, Kotzabasis K. Comparative biodegradation of all chlorinated phenols by the microalga *Scenedesmus obliquus*—The biodegradation strategy of microalgae [J]. *Journal of Biotechnology*, 2019, **296**: 61-68.
- [34] Wu M H, Pan C Y, Yang M, *et al.* Chemical analysis of fish bile extracts for monitoring endocrine disrupting chemical exposure in water: Bisphenol A, alkylphenols, and norethindrone [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2016, **35**(1): 182-190.
- [35] Huang B, Sun W W, Li X M, *et al.* Effects and bioaccumulation of 17 β -estradiol and 17 α -ethynylestradiol following long-term exposure in crucian carp [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, **112**: 169-176.
- [36] Liu S, Su H C, Li H X, *et al.* Uptake, elimination, and biotransformation potential of a progestagen (Cyproterone Acetate) in tilapia exposed at an environmental concentration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53** (12): 6804-6813.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polys to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)