

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

长江经济带PM<sub>2.5</sub>空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM<sub>2.5</sub>质量浓度演变及驱动因子分析 ..... 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>复合污染特征及来源分析 ..... 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM<sub>2.5</sub>来源解析 ..... 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 ..... 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 ..... 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM<sub>10</sub>中重金属浓度、来源及健康风险评估 ..... 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM<sub>2.5</sub>空间异质性和驱动因素的地理探测 ..... 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM<sub>2.5</sub>浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 ..... 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 ..... 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM<sub>2.5</sub>污染特征及影响因素 ..... 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 ..... 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 ..... 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O<sub>3</sub>浓度时空变化及潜在源区解析 ..... 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 ..... 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 ..... 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 ..... 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 ..... 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 ..... 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 ..... 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 ..... 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 ..... 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 ..... 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 ..... 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 ..... 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 ..... 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价 ..... 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 ..... 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 ..... 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 ..... 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征 ..... 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 ..... 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 ..... 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 ..... 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 ..... 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 ..... 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N<sub>2</sub>O扩散通量及控制因子 ..... 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 ..... 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 ..... 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 ..... 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 ..... 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 ..... 张冰, 孙展朝, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 ..... 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 ..... 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 ..... 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 ..... 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 ..... 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 ..... 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙灼兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 ..... 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 ..... 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 ..... 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 ..... 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 ..... 胡志娥, 肖谋良, 王双, 董瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 ..... 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N<sub>2</sub>O和N<sub>2</sub>排放的影响 ..... 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 ..... 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 ..... 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

# 粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中 Cd 形态空间分布特征及其影响因素

崔新月, 莫武秋, 廖建波\*

(东莞理工学院生态环境工程技术研发中心, 东莞 523808)

**摘要:** 在粤港澳大湾区典型潮间带开展了 14 个站位同步采样和观测, 分析各采样点表水、孔隙水、悬浮物和沉积物中 Cd 形态的空间分布特征, 并结合环境因子采用统计分析方法探讨不同介质中 Cd 形态分布差异的影响因素. 结果表明, 各潮间带环境表水、孔隙水、悬浮物和沉积物中 Cd 含量范围分别为  $0.41 \sim 15.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.41 \sim 27.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.41 \sim 4.88 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.20 \sim 5.30 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 东莞沙角湾 Cd 含量显著高于其他采样点, 主要与东莞发达的电子和制造业有关; 同一采样点表水中 Cd 浓度略低于孔隙水, 而悬浮物中 Cd 含量与沉积物相当. 形态分析结果显示: 表水和孔隙水中 Cd 均以离子态为主, 质量分数分别为 67.23%~97.56% 和 33.33%~97.16%; 悬浮物和沉积物中 Cd 均以残渣态为主, 质量分数分别为 45.45%~96.36% 和 45.80%~97.27%. Pearson 相关性分析表明溶液相中络合态 Cd 与氧化还原电位(ORP)和 pH 呈显著负相关, 与总有机碳呈显著正相关; 固相沉积物中生物有效态 Cd 与黏土含量、ORP 和固相有机碳呈显著正相关, 与 pH 呈显著负相关. 进一步采用单因子线性回归分析得出溶液相中 ORP 对络合态 Cd 影响最大, 回归系数分别为 0.864 和 0.824; 固相不同深度沉积物生物有效态 Cd 受黏土含量影响显著, 回归系数分别为 0.968、0.980、0.977 和 0.877. 上述结果综合表明, 大湾区典型潮间带环境 Cd 总含量分布受城市经济发展特色影响, 而形态分配则与环境因子密切相关.

**关键词:** 重金属形态; 潮间带; 多介质; 影响因素; 粤港澳大湾区

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1375-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105225

## Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors

CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo\*

(Research Center for Eco-Environmental Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** Simultaneous sampling and observation were conducted at 14 stations in typical intertidal zones of the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area. The spatial distribution characteristics of Cd morphology in surface water, pore water, suspended matters, and sediments at each sampling site were analyzed, and the influencing factors of Cd morphology changes in each medium were discussed using statistical analyses based on environmental factors. The results showed that the total contents of Cd in surface water, pore water, suspended matters, and sediments in each intertidal zone ranged from  $0.41\text{--}15.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.41\text{--}27.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $0.41\text{--}4.88 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and  $0.20\text{--}5.30 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. The contents of Cd in Shajiao Bay were significantly higher than those in other sampling sites, which should be related to the developed electronics and manufacturing industries in Dongguan. The concentration of Cd in surface water was slightly lower than that in pore water, whereas the content of Cd in suspended matter was comparable to that in sediment at the same sampling site. The results of morphological analysis showed that the ionic-state Cd was dominant in both surface water and pore water, accounting for 67.23%–97.56% and 33.33%–97.16%, respectively. In suspended matter and sediment, Cd was mainly in the residual state, accounting for 45.45%–96.36% and 45.80%–97.27%, respectively. Pearson correlation analysis showed that the complex-state Cd in the aqueous phase was negatively correlated with oxidation reduction potential (ORP) and pH and positively correlated with total organic carbon. The bioavailable Cd in solid sediment was significantly positively correlated with the proportion of clay, ORP, and solid organic carbon and significantly negatively correlated with pH. The single factor linear regression analysis showed that ORP had the greatest effect on the complex-state Cd in the aqueous phase, with regression coefficients of 0.864 and 0.824, respectively. The bioavailable Cd in solid sediment at different depths was significantly affected by the proportion of clay, and the regression coefficients were 0.968, 0.980, 0.977, and 0.877, respectively. The above results indicate that the distribution of total Cd content in the typical intertidal environment of the Greater Bay Area was affected by the characteristics of urban economic development, whereas the allocation of Cd morphology was closely related to environmental factors.

**Key words:** heavy metal morphology; intertidal zone; multiphase; influencing factors; Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area

潮间带是海洋和陆地的动态交汇地带, 是世界上最富生机的多功能生态系统之一, 具有显著的生态、水利和社会效益. 随着经济和城市化建设的快速发展, 大量人类活动导致潮间带环境质量不断退化, 尤其重金属对潮间带生态安全危害突出, 危及沿海旅游和水产养殖等<sup>[1,2]</sup>. Liao 等<sup>[3]</sup> 前期对珠江口滩涂沉积物重金属生态风险进行了研究, 发现 Cd、

Zn、Pb 和 Cu 含量均超过环境安全阈值, 地累积指数评价显示 Cd 达到中度至重度污染, Zn、Cu 和 Ni

收稿日期: 2021-05-21; 修订日期: 2021-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(42007362); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2020A1515110417); 东莞理工学院科研启动项目(GC300502-23)

作者简介: 崔新月(1997~), 女, 硕士研究生, 主要方向为流域环境重金属污染评价与生态修复, E-mail: cxy\_xinyue@163.com

\* 通信作者, E-mail: liaojb@dgut.edu.cn

部分为中度污染.虽然重金属总量可以反映赋存环境的污染程度,但难以表征其污染特征和生态效应,相比而言,重金属的形态更能揭示其生物毒性和迁移性,更有利于分析重金属的地球化学行为和风险<sup>[4,5]</sup>.在潮流周期性往复的潮间带,由于快速交替变化的环境,各相介质更为活跃,其赋存重金属形态变化更为显著<sup>[6~8]</sup>.因此,开展潮间带环境介质中重金属形态及其影响因素研究十分必要.

环境中的Cd主要源于塑料、颜料、电镀、冶炼以及镍-镉和银-镉电池等工业废水、废气和废渣的排放<sup>[9,10]</sup>.进入水环境中的Cd危害性极大,可通过生物富集作用在人体放大引起肝脏、肺和肾功能损害等,因而引起国内外学者的广泛关注<sup>[11~14]</sup>.近年来,相关潮间带Cd富集与迁移转化方面的研究逐渐增多,例如,对上海枸杞岛潮间带沉积物重金属生态风险研究发现Cd的生态风险趋于严重级别<sup>[15]</sup>;黄河三角洲滨海湿地沉积物Cd呈现轻度污染,潜在生态风险指数介于59.21~158.63之间<sup>[16]</sup>;澳大利亚摩顿湾西侧近海岸Cd富集量为背景值的1.5~3倍,且Cd的生物有效态较高,对水生生物构成严重威胁<sup>[17]</sup>;马来西亚 Sungai Puloh 红树林河口沉积物Cd含量平均为 $(0.94 \pm 0.29) \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,风险评价达到中度污染水平<sup>[18]</sup>.此外,沉积物理化性质被广泛认为对其赋存重金属的迁移转化有重要影响<sup>[19]</sup>.Keshavarzifard等<sup>[20]</sup>的研究分析了伊朗Asaluyeh地区潮间带沉积物中Zn、Cu和Cd等金属的形态及其影响因素,发现阳离子交换容量、pH和颗粒粒径等会显著影响重金属的生物有效性.Zhang等<sup>[21]</sup>的研究发现东海岛潮间带沉积物Cd形态分布为:残渣态>可交换态>可氧化态>可还原态,沉积物组成及其有机质含量是影响重金属形态的关键.上述研究主要集中在沉积物重金属总量、形态含量测定和生态风险评价等方面,而对潮间带环境多相介质中Cd形态空间分布特征的研究较少,尤其对各相介质中Cd形态空间差异形成的影响因素认识不足.

粤港澳大湾区是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,是世界四大湾区之一.然而,随着经济的高速发展,区域环境问题如水环境质量退化、生态空间丧失和资源效率低等不断涌现,已成为制约其发展的重要因素.因此,本文以粤港澳大湾区城市群经济发展引发的环境问题为导向,选择典型流域环境与城市发展耦合作用较为密切的潮间带作为研究对象,拟分析区域典型潮间带不同环境介质(表水、孔隙水、悬浮物和沉积物)中Cd总含量及形态的空间分布特征,结合同步检测的环境因子采

用数理统计方法分析Cd形态多介质分布差异的影响因素,以期对粤港澳大湾区潮间带环境中Cd污染风险评价与生态修复提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

粤港澳大湾区(21°30'N~24°40'N, 111°21'E~114°53'E)位于中国华南地区,由广州、深圳、东莞、珠海、佛山、惠州、中山、江门和肇庆这9个珠三角城市以及中国香港和澳门特别行政区组成,总面积达5.6万km<sup>2</sup>.各城市沿水域依次排布,其中广州上游经由狮子洋汇入到南沙岛、东莞虎门、中山和深圳毗邻的伶仃洋,水体由淡水转为咸淡混合水;澳门、珠海、香港、大鹏湾和大亚湾靠临南海,主要以咸水为主.该区域属于亚热带季风气候,年平均气温21~23℃,平均日照240d左右,年均降水量1600~2300mm,汛期集中在4~9月<sup>[22,23]</sup>.上述背景、气候因素以及潮汐变化会显著影响潮间带环境中重金属形态.

在前期考察的基础上,于2019年8~9月选取珠海(州仔湾G01)、中山(燕石湾G02)、广州(南沙湾G03)、东莞虎门(沙角湾G04)、东莞长安(交椅湾G05)、深圳(前海湾G06、深圳湾G07)、大鹏湾(观海湾G08、南澳湾G09)和大亚湾(过店口G10、龙岐湾G11、霞涌湾G12、月亮湾G13、碧甲湾G14)这14个潮间带,每个潮间带分别采集表水、孔隙水和沉积物样品,采样点如图1所示.在每个潮间带采样点设置3个平行样品点,同一潮间带每个样品点之间间隔约50m.此外,每个样品点采集沉积物时将其垂直划分为4层(0~2、2~10、10~20和20~30cm).因此,共采集表水、孔隙水和不同深度沉积物样品各42个,所有的水体和沉积物样品分别装入无菌聚乙烯塑料瓶和塑料袋中,储存在带冰袋的泡沫箱中,并立即运送到实验室进行预处理和保存.

采样现场同步检测和记录溶液相中的温度(temperature, *T*)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、pH、电导率(electrical conductivity, EC)和氧化还原电位(oxidation reduction potential, ORP)以及固相中的*T*、DO和ORP.溶液样品在测试前进行0.45 μm膜过滤,滤液一部分加入2% HNO<sub>3</sub>酸化,并保存在4℃的冰箱中用于测定Cd总浓度;另外一部分直接保存在冰箱中用于测试总有机碳(total organic carbon, TOC)和离子态Cd;产生的悬浮固体(suspended solid, SS)与沉积物预处理方法类似.沉积物预处理采用Liao等<sup>[24]</sup>报道的方法,处理后的样

品用于分析黏土含量、理化性质、重金属总含量和形态等. 重金属形态分为残渣态和生物有效态, 其中生物有效态采用二乙烯三胺五乙酸 (DTPA) 提取<sup>[25]</sup>.

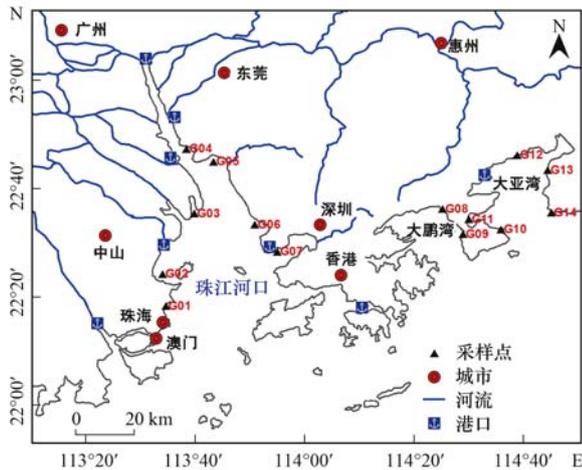


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Diagram of sampling sites

## 1.2 样品分析与质量控制

溶液相和固相 ORP 同步采用便携式水质分析仪测定 (MTC101, 美国); 溶液相 TOC 和固相有机碳 (solid organic carbon, SOC) 测定前首先要用盐酸酸化去除无机碳, 随后采用带固体燃烧炉的总有机碳分析仪分别测定 (Vario TOC, 德国). 固相 pH 和 EC 测定前按照 1:2.5 的比例进行溶解, 随后分离上清液并分别采用 pH 计和电导率仪进行测定. 采用电感耦合等离子体质谱仪 (iCAP RQ, 美国) 分别测定溶液相中 Cd 总量及络合态 Cd 含量以及固相中 Cd 总量和生物有效态含量.

采用标准操作规程、试剂空白和方法空白进行质量保证和质量控制. 在测定过程中, 所有样品均平行测试 2 次, 并采用标准参考物质 (GBW08303) 对重金属分析方法的回收率进行分析, 评价测试方法的可靠性; Cd 的检出限为  $0.05 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 回收率为 94.5%. 此外, 每测试样品 30 次后均进行空白和标准样品校正.

## 1.3 统计分析

数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件包完成. 为了表征结果, 数据统计分析采用最大值、最小值、平均值、标准差和分析样本数. 采用 Pearson 相关性和单因子线性回归分析潮间带环境中各相介质中 Cd 形态差异与环境因子的关系.

## 2 结果与讨论

### 2.1 溶液相中 Cd 总浓度与形态空间分布特征

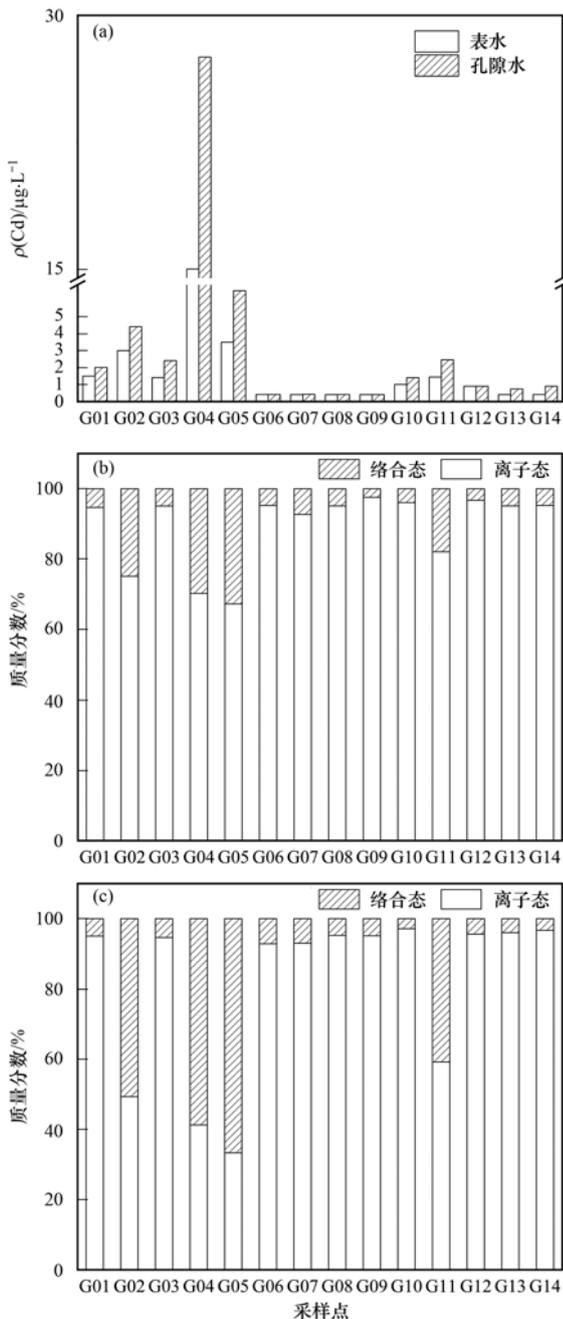
水-沉积物界面存在着重要的水-孔隙水交

换<sup>[26,27]</sup>, 是导致重金属迁移的主要原因之一. 图 2 (a) 显示, 受粤港澳大湾区城市经济发展影响, 潮间带环境各相介质中的 Cd 总含量空间分布存在显著差异, 14 个潮间带表水中 Cd 浓度分布范围为  $0.41 \sim 15.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而孔隙水中 Cd 浓度范围是  $0.41 \sim 27.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 整体上, 孔隙水中 Cd 浓度不低于表水, 尤其东莞虎门沙角湾 (G04) 孔隙水中 Cd 浓度是表水的 1.8 倍, 推测其主要是由区域沉积物组成差异造成的. 此外, 沙角湾表水和孔隙水中 Cd 总浓度显著高于其他采样点, 这与 Liu<sup>[28]</sup> 报道的结果吻合. 该潮间带异常高的 Cd 浓度可能主要是受点源汇入影响, 调查发现上游交椅湾海岸线附近汇入河流起源于东莞长安电子产业聚集区, 该区域因制造业、电子业以及高密度聚集人群导致大量含重金属废水产生, 而未经处理或是处理不完全的废水是导致 Cd 高浓度富集的主要原因.

溶液相中 Cd 形态主要包括络合态和离子态, 图 2(b) 和图 2(c) 分别显示了各潮间带表水和孔隙水中 Cd 形态空间分布. 观察到不同采样点表水和孔隙水中 Cd 形态分配具有显著差异, 其中, 中山燕石湾 (G02)、东莞虎门沙角湾 (G04) 和东莞长安交椅湾 (G05) 这 3 个潮间带因受海产养殖和工业废水排放等影响, 其络合态质量分数显著更高, 对应表水中络合态 Cd 质量分数分别达到 24.92%、29.81% 和 32.77%, 孔隙水中络合态 Cd 质量分数分别达到 50.68%、58.76% 和 66.67%; 同一潮间带不同溶液相中 Cd 形态的赋存特征也不完全相同, 大多数潮间带表水和孔隙水中络合态 Cd 质量分数相当, 平均在 5% 左右. 结合现场观察发现受人类活动影响较大区域采集的沉积物组成中黏土和 TOC 含量相对更高, 可能是导致水体中络合态 Cd 质量分数高的主要原因<sup>[29]</sup>. 这与课题组前期研究结果相吻合, 观察到沙质潮间带水体中重金属形态分布主要受沉积物组成影响. 整体上, 14 个潮间带表水和孔隙水中 Cd 均以离子态为主, 结果与孙彤等<sup>[30]</sup> 报道的相似, 其发现有机质含量低的溶液中 Cd 主要以离子态为主, 因而具有较高的迁移性和生态风险<sup>[30]</sup>.

### 2.2 固相 Cd 总含量与形态空间分布特征

悬浮物作为重金属从水体到沉积物的运输纽带<sup>[31]</sup>, 其组成和特性对水环境中重金属的迁移转化起着重要作用. 对各潮间带悬浮物重金属总含量及形态进行分析, 结果如图 3 所示. 图 3(a) 显示各采样点悬浮物中  $\omega(\text{Cd})$  存在显著差异, 范围为  $0.41 \sim 4.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其沿程分布规律与水体一致. 鉴于受人类活动影响, 东莞虎门沙角湾 (G04) 采样点  $\omega(\text{Cd})$  高达  $4.88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 显著高于其他潮间带, 为



(a) Cd 总浓度, (b) 表水中 Cd 形态分布,  
(c) 孔隙水中 Cd 形态分布

图 2 表水和孔隙水中 Cd 总浓度和形态空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of total concentration and morphology of Cd in surface water and pore water

深圳湾(G07)的12倍.图3(b)显示除东莞长安交椅湾(G05)采样点外,其余采样点Cd残渣态质量分数均高于生物有效态,约80%采样点的残渣态Cd质量分数为90%,最高达到96.36%,表明大湾区潮间带环境悬浮物中Cd主要以残渣态为主,推测具有较弱的迁移性和较低的生物有效性<sup>[32]</sup>.

表水和悬浮物中赋存的重金属最终会通过吸附和沉降作用进入到沉积物中而变得更加稳定,但当环境条件改变时又可成为水环境的污染源<sup>[33]</sup>.图4

(a)显示了各潮间带不同深度沉积物的 $\omega(\text{Cd})$ 分布,范围为 $0.20 \sim 5.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与表水、孔隙水和悬浮物中Cd含量分布规律相似,表明Cd空间分布特征与污染源显著相关,主要受区域人类活动和经济发展模式影响.同样地,东莞虎门沙角湾(G04)和东莞长安交椅湾(G05)两潮间带沉积物中Cd含量随采样深度增加而降低,其余潮间带Cd总含量基本不随深度变化而改变.该结果表明沉积物组成特性差异或受人类活动影响能显著促进重金属的迁移.据报道,Cd在砂质沉积物中沉积速度较快,不受沉积深度的影响,而以黏土为主的沉积物的沉积速率与沉积深度显著相关<sup>[34,35]</sup>.通常情况下,在湖泊和海洋沉积物研究中,重金属的纵向分布常被用来进行沉积物定年,但对于砂质河流和潮间带并不适用<sup>[36,37]</sup>.

图4(b)显示了各采样点不同深度沉积物中Cd形态分布的空间差异,发现中山燕石湾(G02)、东莞虎门沙角湾(G04)和东莞长安交椅湾(G05)这三个潮间带微表层(0~2 cm)的生物有效态Cd质量分数分别为41.45%、45.10%和50.44%,且随着沉积深度增加而逐渐降低.其余样品的残渣态Cd质量分数均超过90%,显著高于生物有效态.与悬浮物相比,因受人类活动影响导致黏土和TOC含量较高的采样点中微表层生物有效态Cd相当,其他以砂质为主的沉积物中生物有效态Cd略低于同一采样点的悬浮物.整体上,上述结果表明大湾区典型潮间带沉积物中重金属Cd的迁移性相对较弱,但综合考虑水-沉积物多相介质,其危害性并不能完全被解释,还需结合环境因素进行综合分析.

## 2.3 Cd 形态空间分布的影响因素分析

### 2.3.1 溶液相中 Cd 形态空间分布的影响因素

河流水体中重金属的分布主要受水动力、污染源以及pH、DO、盐度和TOC等水质因素的影响<sup>[38,39]</sup>.同步检测14个潮间带表水和孔隙水中的EC、DO、ORP、pH和TOC,结果如表1所示.可以看出,各采样点表水EC、DO、ORP、pH和TOC空间分布范围分别为 $0.33 \sim 50.01 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $5.59 \sim 10.34 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $161.71 \sim 539.50 \text{ mV}$ 、 $6.82 \sim 8.28$ 和 $0.52 \sim 17.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,对应孔隙水中的空间分布范围分别为 $0.70 \sim 47.60 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、 $2.60 \sim 7.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $33.11 \sim 516.50 \text{ mV}$ 、 $7.37 \sim 8.42$ 和 $0.86 \sim 38.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .这与前人报道的结果范围相吻合<sup>[20]</sup>,其中,pH值范围表明大湾区各潮间带水环境都属于中性偏弱碱性水体;除受人类活动显著影响区域外,其余采样点相对较低的TOC表明该区域水体对重金属离子具有较低的络合能力;EC值因受海水混入影响而相

对较高,可能有助于重金属离子在沉积物中稳定<sup>[40]</sup>. 此外,检测到的 DO 和 ORP 值与自然河流表水相

近,推测研究区域潮间带表水和孔隙水以及它们与固相界面环境交换较为密切<sup>[41]</sup>.

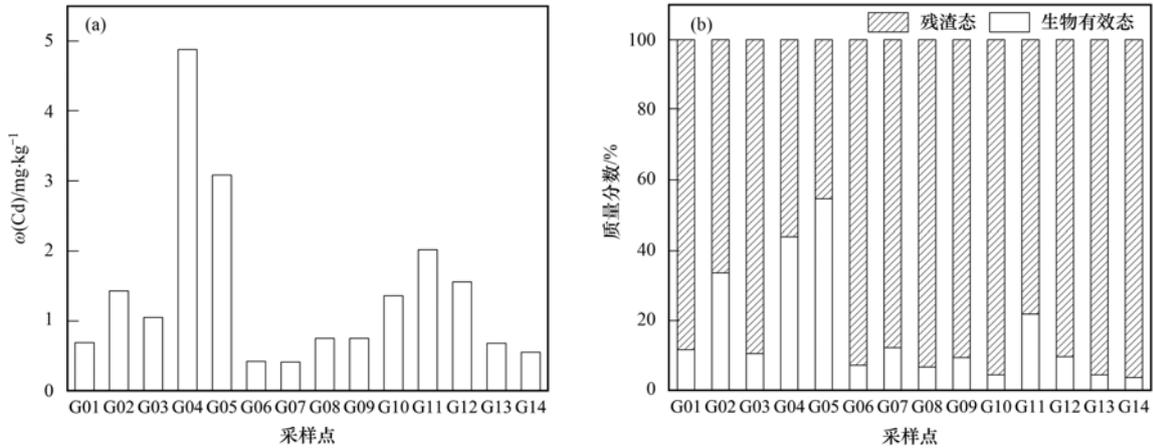


图 3 悬浮物中 Cd 总含量和形态空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of total content and morphology of Cd in suspended matters

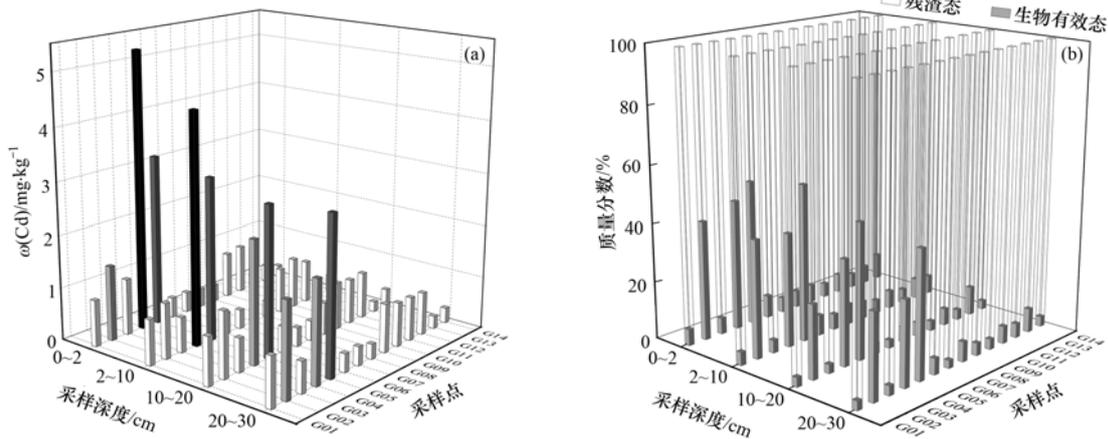


图 4 沉积物中 Cd 总含量和形态空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of total content and morphology of Cd in sediments

表 1 各采样点表水和孔隙水的基本水质特征

Table 1 Basic water quality characteristics of surface water and pore water at each sampling site

溶液相类型	项目	EC/mS·cm <sup>-1</sup>	DO/mg·L <sup>-1</sup>	ORP/mV	pH	ρ(TOC)/mg·L <sup>-1</sup>
表水 (n = 42)	最大值	50.01	10.34	539.50	8.28	17.44
	最小值	0.33	5.59	161.71	6.82	0.52
	平均值	26.04	7.29	430.56	7.93	3.32
	标准差	20.18	1.21	114.78	0.41	4.60
孔隙水 (n = 42)	最大值	47.60	7.26	516.50	8.42	38.59
	最小值	0.70	2.60	33.11	7.37	0.86
	平均值	21.62	4.83	375.38	0.29	7.62
	标准差	18.64	1.80	147.85	7.89	11.51

采用 Pearson 相关性分析各潮间带基本水质指标与溶液相中 Cd 形态分配的关系,结果如表 2 所示.可以看出,各潮间带表水和孔隙水中络合态 Cd 与 ORP 和 pH 呈显著负相关,而与 TOC 呈显著正相关,表明 ORP、pH 和 TOC 对溶液相中 Cd 形态分配具有重要影响.有研究报道在水体环境中,当 pH 和 ORP 降低时,Cd 易从固体颗粒上解吸,导致水体中

的 Cd 浓度升高,而当 TOC 含量升高时,溶液中络合态 Cd 含量会显著增加<sup>[20,21]</sup>.此外,观察到 TOC 和溶液相中络合态 Cd 呈显著正相关,还可以推断出这两者可能来源于同类型污染源<sup>[42]</sup>,主要是来自人为源.鉴于表水和孔隙水中络合态 Cd 与环境 ORP 的相关系数分别为 -0.935 和 -0.915,相关性系数的绝对值高于其他 4 个因素,从而确定 ORP 对

络合态 Cd 的空间分布影响最显著. 进一步对 ORP 与表水和孔隙水中 Cd 络合态质量分数进行单因子线性回归分析, 结果如图 5(a) 所示. 发现表水和孔隙水中络合态 Cd 质量分数与 ORP 呈显著负线性相关, 回归系数分别为 0.864 和 0.824. 因此, ORP 可以确定为大湾区潮间带环境溶液相中 Cd 形态空间差异的关键影响因素, 对预测水环境中 Cd 的迁移转化有重要指示作用.

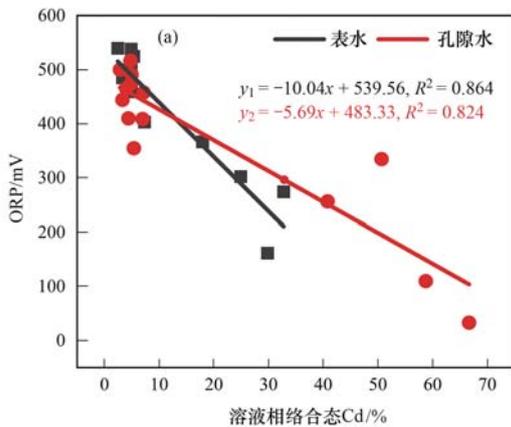


图 5 关键理化因子与 Cd 形态的线性关系

Fig. 5 Linear relationship of key physicochemical properties against Cd morphology

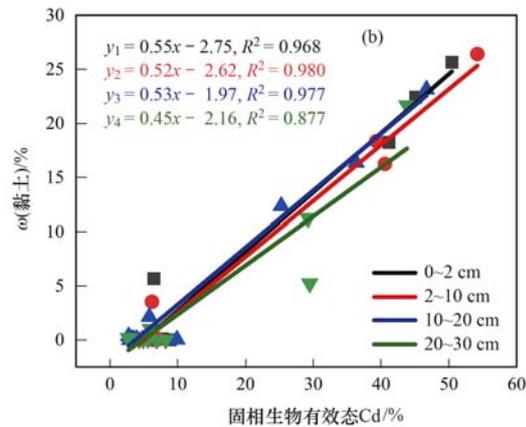
### 2.3.2 沉积物中 Cd 形态空间分布的影响因素

表 3 显示了各潮间带不同深度沉积物的理化性质, 可以看出不同区域及环境条件下的沉积物在矿物组成和理化性质上表现出显著差异. 除中山燕石湾 (G02)、东莞虎门沙角湾 (G04) 和东莞长安交椅湾 (G05) 这 3 个采样点各理化指标随沉积深度增加而逐渐降低之外, 其余各潮间带在同一采样点的 ORP 和 EC 随沉积深度的增加而呈波动式变化, 而 SOC 在所有采样点都随采样深度的变化而波动; pH 与黏土含量空间变化呈相反规律, pH 随沉积深度增加而略微升高, 黏土含量则是逐渐降低. 这表明中山燕石湾 (G02)、东莞虎门沙角湾 (G04) 和东莞长安交椅湾 (G05) 这 3 个采样点处于咸淡水交替地带, 且受人类活动影响较大导致黏土含量相对较高, 从而对离子的拦截能力相对较强, 进一步揭示以砂质为主的沉积物对盐分和离子的转运速度较快<sup>[43,44]</sup>. 整体上, 对比 14 个潮间带的采样点, ORP 和 pH 的波动幅度相对较小, 而 SOC、EC 和黏土含量的空间差异较大, 最大倍数差分别为 289.6、94.7 和 2 641 倍, 这可能与潮间带的地理位置以及区域经济发展模式有关, 尤其狮子洋两岸及伶仃洋上游的东莞、佛山和中山等地主要以电子行业聚集的工业经济和水产养殖业为主, 人为带来的污染较为严重; 而珠海和大亚湾等地周边多以旅游业为主, 其潮间带多被人为沙化, 因而导致不同潮间带沉积物理化

表 2 水质特征与水体中络合态 Cd 之间的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Pearson correlation coefficient between water quality characteristics and complexation Cd in water					
	EC	DO	ORP	pH	TOC
表水	-0.502	-0.272	-0.935 **	-0.704 **	0.818 **
孔隙水	-0.300	-0.308	-0.915 **	-0.587 *	0.892 **

1) \*\* 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关, \* 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关



性质产生显著差异.

为探究各潮间带沉积物理化指标对生物有效态 Cd 的影响, 对二者进行 Pearson 相关性分析 (表 4), 结果显示各层沉积物中生物有效态 Cd 与固相 ORP、SOC 和黏土含量存在显著正相关性, 而与 pH 呈显著负相关, 其相关系数范围分别为 0.872 ~ 0.891、0.860 ~ 0.947、0.942 ~ 0.991 和 -0.810 ~ -0.898. 通过相关系数可以确定黏土含量对沉积物中生物有效态 Cd 的影响最为显著.

结合相关研究, ORP 与生物有效态 Cd 呈显著正相关表明沉积物氧化环境会提高 Cd 暴露风险; pH 与生物有效态 Cd 呈显著负相关则说明降低 pH 可以通过改变 Cd 可交换态和碳酸盐结合态来影响沉积物重金属形态分布. 进一步对沉积物黏土含量和生物有效态 Cd 进行单因子线性回归分析, 结果如图 5(b) 所示, 发现两者之间具有显著的线性相关性, 回归系数分别为 0.968、0.980、0.977 和 0.877. 这表明沉积物黏土含量可以显著促进固相中 Cd 向生物有效态转化. 黏土矿物主要通过共沉淀、吸附、表面络合、离子交换等方式与重金属结合, 从而影响重金属的移动性和生态风险<sup>[45]</sup>. 此外, 有研究报道有机碳和黏土可以快速促进土壤重金属的积累, 它们能够分别提供足够的官能团和较大的比表面积来增强土壤对重金属的吸附固定, 二者的有机结合能显著提高赋存重金属生物有效态的质量分

表 3 各采样点不同深度沉积物的理化性质

Table 3 Physicochemical properties of sediment at different depths of each sampling site

沉积物分层/cm	项目	ORP/mV	$\omega(\text{SOC})/\%$	pH	EC/ $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\omega(\text{黏土})/\%$
0~2 (n=42)	最大值	527.10	6.95	7.95	1563.24	25.65
	最小值	174.50	0.04	6.96	34.24	0.02
	平均值	403.27	1.40	7.74	713.34	5.20
	标准差	127.12	2.11	0.31	505.07	9.39
2~10 (n=42)	最大值	523.20	6.63	8.14	2006.45	26.41
	最小值	55.10	0.03	6.92	90.28	0.02
	平均值	381.25	1.26	7.92	760.92	4.67
	标准差	161.51	2.01	0.36	573.03	8.79
10~20 (n=42)	最大值	548.20	6.00	8.25	2984.25	23.12
	最小值	15.40	0.05	7.12	140.35	0.01
	平均值	364.27	1.28	8.03	857.48	3.91
	标准差	181.73	1.88	0.34	781.76	7.56
20~30 (n=42)	最大值	530.30	6.23	8.36	3242.15	21.65
	最小值	5.30	0.02	7.33	156.61	0.01
	平均值	358.37	1.42	8.14	812.93	2.83
	标准差	199.65	1.92	0.30	780.99	6.26

表 4 沉积物理化性质与生物有效态 Cd 之间的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson correlation coefficient between physicochemical properties and bioavailability Cd in sediments

	ORP	SOC	pH	EC	黏土含量
0~2 cm	0.873 **	0.877 **	-0.810 **	0.534 *	0.985 **
2~10 cm	0.891 **	0.903 **	-0.833 **	0.505	0.991 **
10~20 cm	0.882 **	0.947 **	-0.898 **	0.505	0.990 **
20~30 cm	0.872 **	0.860 **	-0.875 **	0.389	0.942 **

1) \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

数<sup>[46~48]</sup>. 总的说来, 潮间带沉积物的组成和理化性质是影响赋存重金属含量分布和形态差异的主要因素.

### 3 结论

(1) 各潮间带溶液相中 Cd 总浓度存在显著空间差异, 同一采样点孔隙水中 Cd 浓度不低于表水, 最大相差 1.8 倍; 溶液相中 Cd 以离子态为主, 部分采样点受人类活动影响导致孔隙水中络合态 Cd 显著高于表水.

(2) 固相中 Cd 分布沿程变化规律与溶液相一致, 总体上以残渣态为主; 沉积物的组成不同导致生物有效态 Cd 质量分数空间差异显著, 并呈现不同区域及沉积深度变化特征.

(3) Pearson 相关性和单因子线性回归分析表明: 表水和孔隙水中络合态 Cd 与 ORP 和 pH 呈显著负相关, 而与 TOC 呈显著正相关, ORP 确定为溶液相中 Cd 形态空间差异的关键因素; 各层沉积物中生物有效态 Cd 与 ORP、SOC 和黏土含量呈显著正相关性, 而与 pH 呈显著负相关, 其中黏土含量对沉积物生物有效态 Cd 空间分布的影响最为显著.

致谢: 感谢北京师范大学环境学院刘新会教授、东莞理工学院生态环境工程技术研发中心牛军峰教

授和华南理工大学能源与环境学院韦朝海教授对本研究的支持和指导. 钱骁、刘芳、吴舒哲、陈坤榕和姜因耀等在采样和实验方面提供帮助, 在此一并感谢!

### 参考文献:

- [1] Tan Q G, Lu S H, Chen R, *et al.* Making acute tests more ecologically relevant: Cadmium bioaccumulation and toxicity in an estuarine clam under various salinities modeled in a toxicokinetic-toxicodynamic framework [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2873-2880.
  - [2] Zhao M W, Wang E K, Xia P, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in the intertidal zone environments of typical sea areas in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **138**: 397-406.
  - [3] Liao J B, Deng S, Liu X H, *et al.* Influence of soil evolution on the heavy metal risk in three kinds of intertidal zone of the Pearl River estuary[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, **32**(2): 583-596.
  - [4] Tang W Z, Zhang W Q, Zhao Y, *et al.* Basin-scale comprehensive assessment of Cadmium pollution, risk, and toxicity in riverine sediments of the Haihe Basin in north China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **81**: 295-301.
  - [5] 陈莹, 刘汉斌, 刘娜, 等. 农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3494-3506.
- Chen Y, Liu H Y, Liu N, *et al.* Screening and evaluation of methods for determining available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in farmland Soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**

- (7): 3494-3506.
- [ 6 ] Gu Y G. Heavy metal fractionation and ecological risk implications in the intertidal surface sediments of Zhelin Bay, South China [ J ]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **129** ( 2 ): 905-912.
- [ 7 ] O'Day P A, Carroll S A, Randall S, *et al.* Metal speciation and bioavailability in contaminated estuary sediments, Alameda Naval Air Station, California [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34** ( 17 ): 3665-3673.
- [ 8 ] 杨梦丽, 叶明亮, 马友华, 等. 基于重金属有效态的农田土壤重金属污染评价研究 [ J ]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31** ( 1 ): 10-13, 38.  
Yang M L, Ye M L, Ma Y H, *et al.* Review on heavy metal pollution evaluation in farmland soil based on bioavailable form of heavy metal [ J ]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31** ( 1 ): 10-13, 38.
- [ 9 ] Khan Z H, Gao M L, Qiu W W, *et al.* Mechanisms for Cadmium adsorption by magnetic biochar composites in an aqueous solution [ J ]. *Chemosphere*, 2020, **246**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125701.
- [ 10 ] 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 等. 酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd( II )吸附性能 [ J ]. *环境科学*, 2020, **41** ( 1 ): 293-303.  
Xie X, Xu Y M, Yan C X, *et al.* Substructure characteristics of combined acid-base modified sepiolite and its adsorption for Cd( II ) [ J ]. *Environmental Science*, 2020, **41** ( 1 ): 293-303.
- [ 11 ] Diao Z H, Qian W, Zhang Z W, *et al.* Removals of Cr( VI ) and Cd( II ) by a novel nanoscale zero valent iron/peroxydisulfate process and its Fenton-like oxidation of pesticide atrazine: coexisting effect, products and mechanism [ J ]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, **397**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125382.
- [ 12 ] 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 等. 纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 [ J ]. *环境科学*, 2019, **40** ( 4 ): 1849-1856.  
Li Y J, Yang Z M, Chen Y C, *et al.* Adsorption, reclaim, and regeneration of Cd by magnetic calcium dihydrogen phosphate nanoparticles [ J ]. *Environmental Science*, 2019, **40** ( 4 ): 1849-1856.
- [ 13 ] Zhang S Q, Cui M, Chen J H, *et al.* Modification of synthetic zeolite X by thiourea and its adsorption for Cd ( II ) [ J ]. *Materials Letters*, 2019, **236**: 233-235.
- [ 14 ] 白冬锐, 张涛, 包峻松, 等. 苏州古城区河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 [ J ]. *环境科学*, 2021, **42** ( 7 ): 3206-3214.  
Bai D R, Zhang T, Bao J S, *et al.* Pollution distribution and ecological risk assessment of heavy metals in river sediments from the Ancient Town of Suzhou [ J ]. *Environmental Science*, 2021, **42** ( 7 ): 3206-3214.
- [ 15 ] 黄宏, 赵旭, 陈亮然, 等. 枸杞岛潮间带表层沉积物重金属污染及潜在生态危害 [ J ]. *安全与环境学报*, 2016, **16** ( 3 ): 361-365.  
Huang H, Zhao X, Chen L R, *et al.* Heavy metal contaminants and their potential ecological threats in the surface sediments of the intertidal zone in Gouqi Island [ J ]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16** ( 3 ): 361-365.
- [ 16 ] 齐月, 李俊生, 马艺文, 等. 黄河三角洲滨海滩涂湿地沉积物重金属空间分布及生态风险评价 [ J ]. *环境科学研究*, 2020, **33** ( 6 ): 1488-1496.  
Qi Y, Li J S, Ma Y W, *et al.* Distribution and risk assessment of heavy metals of surface sediments in intertidal flats of the Yellow River Delta, China [ J ]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** ( 6 ): 1488-1496.
- [ 17 ] Morelli G, Gasparon M. Metal contamination of estuarine intertidal sediments of Moreton Bay, Australia [ J ]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **89** ( 1-2 ): 435-443.
- [ 18 ] Udechukwu B E, Ismail A, Zulkifli S Z, *et al.* Distribution, mobility, and pollution assessment of Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, and Fe in intertidal surface sediments of Sg. Puloh mangrove estuary, Malaysia [ J ]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22** ( 6 ): 4242-4255.
- [ 19 ] Sharifi R, Moore F, Keshavarzi B. Mobility and chemical fate of arsenic and antimony in water and sediments of Sarouq River catchment, Takab geothermal field, northwest Iran [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **170**: 136-144.
- [ 20 ] Keshavarzifard M, Moore F, Sharifi R. The influence of physicochemical parameters on bioavailability and bioaccessibility of heavy metals in sediments of the intertidal zone of Asaluyeh region, Persian Gulf, Iran [ J ]. *Geochemistry*, 2019, **79** ( 1 ): 178-187.
- [ 21 ] Zhang J B, Yang B, Chen T, *et al.* Metal speciation and pollution assessment of Cd and Pb in intertidal sediments of Donghai Island, China [ J ]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, **6**: 37-48.
- [ 22 ] 张运林, 睢晋玲, 吴娴, 等. 粤港澳大湾区PM<sub>2.5</sub>时空分布特征及其与气象要素的关系 [ J ]. *生态学报*, 2021, **41** ( 6 ): 2272-2281.  
Zhang Y L, Sui J L, Wu X, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and its relationship with meteorological factors in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41** ( 6 ): 2272-2281.
- [ 23 ] 张宁, 张盛, 杨海超, 等. 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 [ J ]. *环境科学*, 2019, **40** ( 12 ): 5581-5592.  
Zhang N, Zhang S, Yang H C, *et al.* Visualized quantitative research of soil pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [ J ]. *Environmental Science*, 2019, **40** ( 12 ): 5581-5592.
- [ 24 ] Liao J B, Ru X, Xie B B, *et al.* Multi-phase distribution and comprehensive ecological risk assessment of heavy metal pollutants in a river affected by acid mine drainage [ J ]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **141**: 75-84.
- [ 25 ] 孙媛媛, 孙友宝, 盖荣银, 等. 二乙烯三胺五乙酸(DTPA)提取 ICP-AES 法测定土壤中有效态元素 [ J ]. *环境化学*, 2015, **34** ( 8 ): 1578-1579.
- [ 26 ] 张家泉, 田倩, 许大毛, 等. 大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价 [ J ]. *环境科学*, 2017, **38** ( 6 ): 2355-2363.  
Zhang J Q, Tian Q, Xu D M, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in water and sediment from Daye Lake [ J ]. *Environmental Science*, 2017, **38** ( 6 ): 2355-2363.
- [ 27 ] 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 等. 截污调水后滇池表层沉积物中 16 种 PAHs 的分布特征 [ J ]. *环境科学*, 2019, **40** ( 8 ): 3501-3508.  
Hu X Y, Gao B L, Chen T, *et al.* Distribution of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons in Dianchi Lake surface sediments after the integrated water environment control project [ J ]. *Environmental Science*, 2019, **40** ( 8 ): 3501-3508.
- [ 28 ] Liu J J, Ni Z X, Diao Z H, *et al.* Contamination level, chemical fraction and ecological risk of heavy metals in sediments from Daya Bay, South China Sea [ J ]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **128**: 132-139.

- [29] 王芳婷, 陈植华, 包科, 等. 海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4581-4589.  
Wang F T, Chen Z H, Bao K, *et al.* Content and distribution of Cadmium in soil and fluvial sediments in the sea-land interaction zone[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4581-4589.
- [30] 孙彤, 纪艺凝, 李可, 等. 弱碱性玉米地土壤重金属赋存形态及生态风险评价[J]. 环境化学, 2020, **39**(9): 2469-2478.  
Sun T, Ji Y N, Li K, *et al.* The speciation distributions of heavy metals in weakly alkaline maize soils and its potential ecological risk[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(9): 2469-2478.
- [31] 王行行, 王杰, 崔玉环. 基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1207-1216.  
Wang H H, Wang J, Cui Y H. Remote sensing monitoring on spatial differentiation of suspended sediment concentration in a river-lake system based on sentinel-2 MSI imaging: a case for Shengjin Lake and connected Yangtze River section in Anhui Province [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1207-1216.
- [32] Kadhum S A, Ishak M Y, Zulkifli S Z, *et al.* Evaluation of the status and distributions of heavy metal pollution in surface sediments of the Langat River basin in Selangor Malaysia [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **101**(1): 391-396.
- [33] Islam S, Ahmed K, Raknuzzaman M, *et al.* Heavy metal pollution in surface water and sediment: a preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. Ecological Indicators, 2015, **48**: 282-291.
- [34] Zhao G M, Ye S Y, Yuan H M, *et al.* Distribution and contamination of heavy metals in surface sediments of the Daya Bay and adjacent shelf, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, **112**(1-2): 420-426.
- [35] Maia F, Pinto C, Waerenborgh J C, *et al.* Metal partitioning in sediments and mineralogical controls on the acid mine drainage in Ribeira da água Forte (Aljustrel, Iberian Pyrite Belt, Southern Portugal) [J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(6): 1063-1080.
- [36] Guo H T, Xu Y H, Pan S M, *et al.* Distinctive distribution and migration of global fallout plutonium isotopes in an alpine lake and its implications for sediment dating [J]. Chemosphere, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130535.
- [37] Li W P, Li X X, Mei X, *et al.* A review of current and emerging approaches for Quaternary marine sediment dating [J]. Science of the Total Environment, 2021, **780**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146522.
- [38] Fu J, Zhao C P, Luo Y P, *et al.* Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **270**: 102-109.
- [39] Ouyang Y, Nkedi-Kizza P, Wu Q T, *et al.* Assessment of seasonal variations in surface water quality [J]. Water Research, 2006, **40**(20): 3800-3810.
- [40] 廖宝淦, 刘秋辛, 贾珍珍, 等. 珠江口磨刀门水体中重金属分布、分配特征及其影响因素 [J]. 海洋环境科学, 2021, **40**(1): 8-15.  
Liao B G, Liu Q X, Jia Z Z, *et al.* Heavy metal distribution patterns and their influence factors in Modaomen estuary of the Pearl River [J]. Marine Environmental Science, 2021, **40**(1): 8-15.
- [41] 张伟, 张丽丽. 贵州阿哈水库不同季节水体和沉积物重金属分布特征及污染评价 [J]. 生态学杂志, 2021, **40**(6): 1753-1765.  
Zhang W, Zhang L L. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in water and sediments of Aha Reservoir of Guizhou in different seasons [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(6): 1753-1765.
- [42] Zhang J F, Gao X L. Heavy metals in surface sediments of the intertidal Laizhou Bay, Bohai Sea, China: Distributions, sources and contamination assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **98**(1-2): 320-327.
- [43] Alzahrani D A, Selim E M M, El-Sherbiny M M. Ecological assessment of heavy metals in the grey mangrove (*Avicennia marina*) and associated sediments along the Red Sea coast of Saudi Arabia [J]. Oceanologia, 2018, **60**(4): 513-526.
- [44] Chai M W, Shi F C, Li R L, *et al.* Heavy metal contamination and ecological risk in *Spartina alterniflora* marsh in intertidal sediments of Bohai Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **84**(1-2): 115-124.
- [45] Wang Z S, Wang Y S, Chen L Q, *et al.* Assessment of metal contamination in coastal sediments of the Maluan Bay (China) using geochemical indices and multivariate statistical approaches [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **99**(1-2): 43-53.
- [46] Liu G N, Wang J, Liu X, *et al.* Partitioning and geochemical fractions of heavy metals from geogenic and anthropogenic sources in various soil particle size fractions [J]. Geoderma, 2018, **312**: 104-113.
- [47] Zhang G L, Bai J H, Xiao R, *et al.* Heavy metal fractions and ecological risk assessment in sediments from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Estuary, China [J]. Chemosphere, 2017, **184**: 278-288.
- [48] Bradl H B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2004, **277**(1): 1-18.

## CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020 .....	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM <sub>2.5</sub> in Wuhan City Based on Random Forest Model .....	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China .....	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan .....	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM <sub>1</sub> Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou .....	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Economic Belt .....	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM <sub>2.5</sub> Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region .....	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities .....	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> in Shanxi Province Based on Wavelet Transform .....	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China .....	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province .....	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O <sub>3</sub> Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas .....	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an .....	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City .....	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo .....	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province .....	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking .....	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants .....	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin .....	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing .....	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment .....	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries .....	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors .....	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers .....	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia .....	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years .....	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin .....	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain .....	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River .....	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake .....	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm .....	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake .....	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics .....	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N <sub>2</sub> O from Coastal Rivers in Tianjin City .....	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland .....	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level .....	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network .....	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism .....	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge .....	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District .....	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province .....	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide .....	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM .....	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III) .....	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties .....	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress .....	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River .....	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil .....	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure .....	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland .....	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions .....	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N <sub>2</sub> O and N <sub>2</sub> Emission in a Winter Wheat Field .....	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis .....	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis .....	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)