

湛江市红树林湿地沉积物重金属来源研究进展

唐道斌¹, 李², 李巧云³ (1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃兰州 730070; 2. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075; 3. 岭南师范学院地理科学学院, 广东湛江 504048)

摘要 湛江拥有中国最大的红树林保护区, 部分学者对其境内红树林重金属污染进行研究。然而, 大多数研究只关注重金属含量、重金属形态分析、重金属污染评价几个方面, 对红树林湿地重金属污染来源仅做小篇幅的讨论, 缺少对红树林湿地重金属多方面来源的考虑。对广东湛江红树林湿地沉积物重金属的可能来源进行综述, 将自然因素与人为因素结合探讨, 结果表明, 大气沉降作用将人为活动产生的重金属污染物沉降于地面或水体, 是造成红树林湿地土壤中 Pb、Cd 和 Zn 等重金属元素污染的主要自然源, 同时也是红树林湿地局部气候环境中 Hg 元素的主要来源; 水动力条件对重金属来源及分布的作用主要体现在通过水流对污染物进行运移和沉降; 其余人为因素方面的影响主要是工业活动、农业活动和交通活动。

关键词 湛江市; 红树林; 重金属来源; 湿地; 沉积物

中图分类号 S714 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2023)01-0005-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.01.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on Source of Heavy Metals in Sediment of Mangrove Wetlands in Zhanjiang City

TANG Dao-bin¹, LI Qian², LI Qiao-yun³ (1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, Guangdong 510075; 3. School of Geographical Science, Lingnan Normal University, Zhanjiang, Guangdong 504048)

Abstract It is the largest mangrove reserve in Zhanjiang City of China, so a large number of scholars have studied the heavy metal pollution of mangroves in Zhanjiang. However, most studies only focus on the content of heavy metals, heavy metal speciation analysis and heavy metal pollution evaluation, and only make a small discussion on the sources of heavy metal pollution in mangrove wetlands, lacking the consideration of various sources of heavy metals in mangrove wetlands. Therefore, the possible sources of heavy metals in mangrove wetlands of Zhanjiang City are summarized, and the combination of natural factors and anthropic factors are discussed in this study. The results show that atmospheric sedimentation settles heavy metal pollutants produced by human activities to the ground or water body, which is the main natural source of heavy metal pollution such as Pb, Cd and Zn in mangrove wetland soil. It is also the main source of Hg in the local climate environment of mangrove wetland. The effect of hydrodynamic conditions on the source and distribution of heavy metals is mainly reflected in the migration and settlement of pollutants through water flow. Other anthropic factors are mainly industrial activities, agricultural activities and traffic activities.

Key words Zhanjiang; Mangrove; Sources of heavy metals; Wetland; Sediment

广东湛江红树林国家级自然保护区拥有中国最大的红树林保护区。红树林湿地具有较大的生态价值, 是防治浪潮、水土流失、洪水、风暴和海啸的一个天然屏障^[1]。随着我国对“双碳”工作的日益重视, 红树林湿地生态系统在碳汇方面对应气候变化的重要作用也逐渐显现。红树林湿地生态系统将 CO₂ 转化为有机碳的速度高于地球上任何其他种类的生物栖息地, 这种独特的生态系统的碳汇作用比森林碳汇具有更高的潜力^[2]。然而, 随着沿海地区经济的快速发展, 水路交通的增加、生活和工业污水的排放, 大量的重金属进入滨海湿地, 导致红树林湿地重金属污染日益加重, 严重影响到了红树林湿地的保护和恢复^[3], 对红树林湿地的生物多样性及人类健康产生极大的危害^[4]。加强红树林保护和修复是我国海洋生态文明建设和国土空间生态保护修复的重要内容。《红树林保护修复专项行动计划(2020—2050年)》指出对现有红树林实施全面保护, 提升红树林生态系统质量和功能, 为我国红树林生态修复工作提供指导^[5]。此前, 已有学者针对湛江红树林湿地沉积物、湿地植物、湿地水体进行了重金属含量及分布、重金属形态分析等方面的研

究, 从总体上了解红树林湿地的重金属污染状况、探讨红树林重金属污染来源以及变化迁移规律^[6-18]。在红树林湿地重金属来源方面, 学者运用相关性分析、因子分析、主成分分析等统计分析方法对红树林重金属进行来源解析。结果表明, 红树林湿地重金属污染的来源主要有工业活动、农业活动、交通活动以及生活污染。重金属污染来源复杂, 不仅仅是人为因素的作用, 自然因素的作用也不可忽视。而在自然因素方面, 大部分学者只考虑到了自然风化产物的输入作用, 对其他自然因素的影响作用的分析有所缺乏^[6-12]。系统地了解红树林湿地重金属来源, 有助于对红树林湿地的保护和修复, 更有针对性地研究修复方式, 从来源上减少甚至消除污染物排放这一威胁因素。因此, 该研究尝试将大气沉降、水动力这 2 个自然因素与人为因素结合, 对湛江红树林湿地的重金属来源展开分析, 以期对湛江红树林湿地重金属污染治理提供借鉴。

1 湛江红树林分布特征

广东湛江红树林国家级自然保护区位于中国大陆最南端, 分为 72 个保护小区, 总面积 20 278.8 hm²。保护区西北以高桥片(高桥红树林)为主, 地理坐标为 109°44'9"~109°56'10" E, 21°9'19"~21°34'15"N; 东北以官渡片为主, 最东以湖光片为主, 东南以和安片为主, 西南片以角尾片为主。横跨徐闻县、雷州市、遂溪县、廉江市、吴川市五县(市)及麻章、坡头、东海岛、霞山四区^[19]。作为我国红树林面积最大的自然

基金项目 广东省湛江市海洋青年人才创新项目(2021E05018); 国家级大学生创新创业训练计划(20211057900); 广东省大学生创新创业训练计划(S201910579019)。

作者简介 唐道斌(1997—), 男, 广东湛江人, 硕士研究生, 研究方向: 第四纪地质和环境地球化学。

收稿日期 2022-03-03

保护区(图 1), 现有红树林 7 242.0 hm^2 , 人工造林未成林 25.6 hm^2 , 天然更新红树林 509.4 hm^2 [20]。湛江红树林主要以红海榄群 (*Rhizophora* Formation)、林榄群落、秋茄群落

(*Kandellia* Formation)、白骨壤 (*Avicennia* Formation) 和桐花树群 (*Aegiceras* Formation) 为主 [21]。

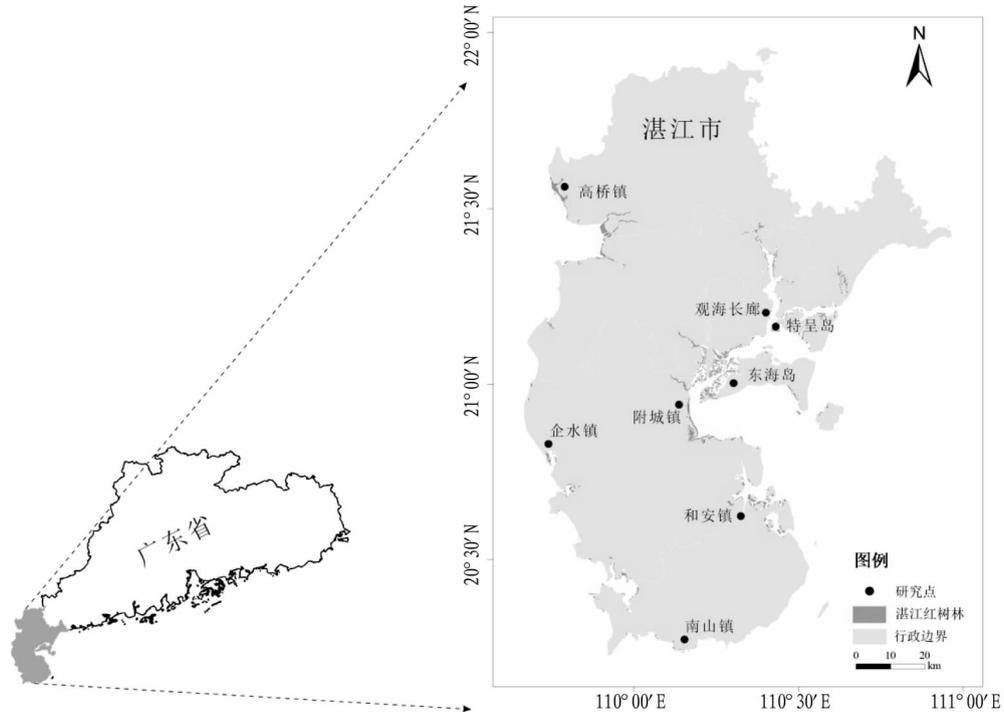


图 1 湛江市红树林分布区

Fig. 1 Mangrove Distribution Area in Zhanjiang City

2 湛江红树林湿地重金属含量及分布

目前红树林湿地沉积物重金属研究主要集中在砷 (As)、镉 (Cd)、钴 (Co)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、汞 (Hg)、锰 (Mn)、镍 (Ni)、铅 (Pb)、锌 (Zn) 元素。湛江红树林湿地沉积物重金属含量统计如图 2 所示, 在 8 个红树林湿地分布区域 11 种重金属元素里, As、Cd、Co、Cr、Cu、Hg、Mn、Ni、Zn 9 种元素重金属含量平均值超过雷州半岛土壤环境背景值 [22]。但在东海岛和南山镇的 As、高桥镇的 Pb 超过了国家土壤环境质量一级标准 (GB 15618—1995)。通过比较, 除了 Co、Cr、Cu、Ni、Pb、V 外, As、Cd、Hg、Mn、Zn 在 8 个红树林湿地分布区域中有明显差异。其中, 在东海岛, 除了重金属 Cd、Cu、Pb、Hg, 重金属 As、Co、Cr、Ni、Mn、Zn、V 的含量对比观海长廊等其他红树林湿地分布区域都比较高。尤其是东海岛和南山镇重金属 As 含量, 分别为 18.025 0 和 16.202 6 mg/kg , 分别是背景值的 3.34 和 3.00 倍, 明显高于其他分布区域; 东海岛和高桥镇重金属 Mn 含量差异也明显; 观海长廊重金属 Cd 含量为 0.151 mg/kg , 是背景值的 5.03 倍, 明显高于其他研究区域; 除了特呈岛和企水镇, 其他研究区域重金属 Hg 含量都较高, 均超过背景值。总体来看, 各研究区的 11 种重金属平均含量: 东海岛 > 附城镇 > 高桥镇 > 南山镇 > 观海长廊 > 和安镇 > 特呈岛 > 企水镇。雷州半岛西岸红树林湿地分布区重金属平均含量的总和低于东岸红树林湿地分布区。

3 湛江红树林湿地重金属来源

3.1 大气沉降 大气沉降是指大气中的污染物通过一定的

途径被沉降至地面或水体的过程, 分为干沉降和湿沉降 [23]。通过大气沉降, Pb、Cd、Zn 等重金属进入土壤, 是土壤重金属污染的重要来源之一, 尤其是在靠近垃圾焚烧池、采矿、冶炼等活动地区。近年, 随着湛江东海岛宝钢、中科炼化、晨鸣纸业、冠豪高新特种纸业等项目落户建成, 排放的废气经大气沉降后不断地在红树林湿地沉降下来并累积, 是红树林湿地重金属污染的重要来源之一。郑娜等 [24] 对锌冶炼厂周围土壤有毒元素研究表明, Cd、Pb、Zn、Hg 等有毒元素浓度非常高, 且主要来源于大气沉降。而重金属元素中 Hg 常温下为液态, 易挥发, 是大气沉降主要的重金属元素。湛江红树林保护区阳光充足, 年平均太阳总辐射强度达到 4 500 ~ 5 600 MJ/m^2 。光照条件下, 湿地沉积物中其他化学形态的 Hg 转化为 Hg^0 [25], 大量释放到大气中。进入大气中的汞一部分通过植物吸收和大气沉降重新回到红树林湿地, 造成红树林湿地局部小循环, 另一部分随大气循环迁移到其他地方, 参与全球性大气循环 [26]。因此, 对于靠近红树林湿地的居民区居民来说, 会造成潜在的健康风险, 如观海长廊、金沙湾等地区。

3.2 水动力 水动力条件对重金属元素含量分布的作用主要是通过水流对污染物的运移和沉降来实现。目前普遍认为大量重金属废水排入海后, 由于各种物理、化学过程, 迅速由水相转化为固相, 吸附在悬浮物中, 而悬浮物在随水流运动过程中, 逐渐转化为沉积物。尤其是在河口地区, 大量的陆源污染物汇入海洋, 随着洋流扩散到其他地区, 对沿海

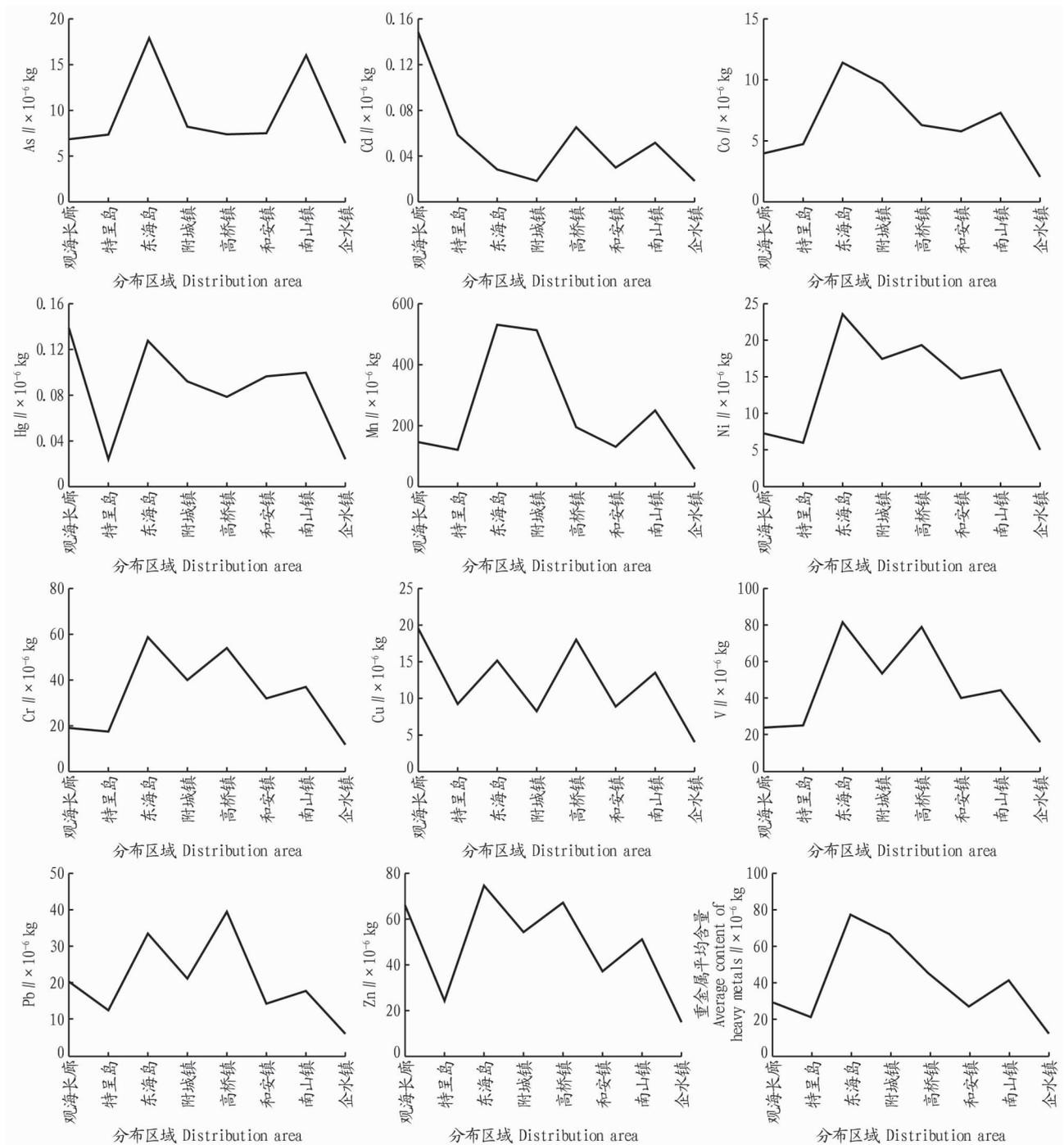


图 2 湛江市红树林湿地重金属含量分布特征^[7-8]

Fig. 2 Distribution characteristics of heavy metals in mangrove wetlands of Zhanjiang City^[7-8]

城市造成一定的海水污染等环境问题。由图 3 可知,广东存在着—股终年向西的沿岸流,即粤西沿岸流^[27]。在粤西沿岸流的作用下,珠江口排放的重金属污染物沿着海岸线向西扩散,同时谭江、漠阳江和鉴江流域的城区的“三废”污染物等也在粤西沿岸流作用下向西扩散,到达雷州半岛的东部海域,并在潮汐等水动力作用下,被雷州半岛东岸红树林湿地截留。陈亮^[28]对雷州半岛东部海域常量元素分析表明,该海域沉积物主要来自珠江流域及粤西径流的陆源物质。夏季,在雷州半岛东部的气旋式环流^[29-30]和海南岛东部的终年较强的东北向的南海暖流^[31]的双重作用下,雷州半岛东部

地区红树林湿地沉积物重金属更难以向远洋扩散,造成了雷州半岛东岸红树林区不断地累积粤西沿岸流带来的重金属污染物,这可能是雷州半岛东岸红树林区(附城镇)重金属平均含量高于西岸红树林区(企水镇)的原因之一。相似地,海口市南渡江排放的污染物在琼州海峡终年向西的潮流作用下^[28],带至南山镇红树林湿地沉积物里。湛江港由东海岛、南三岛、特呈岛、东头山岛四岛围绕形成,是一个典型的口小腹大的海湾,水流平稳,是天然的深水港,但不利于污染物扩散到湾外。由于湛江湾地形的影响,在东头山岛与特呈岛之间存在着一股顺时针运动涡流^[32],而南柳河入海口恰好位

于两岛之间。南柳河排放的陆源污染物在涡旋的作用下,迁移到特呈岛南侧的红树林湿地并沉积下来,这可能是特呈岛

红树林湿地重金属来源之一,而不仅仅是附近居民生活污水排放、化肥、渔船涂料^[11]。

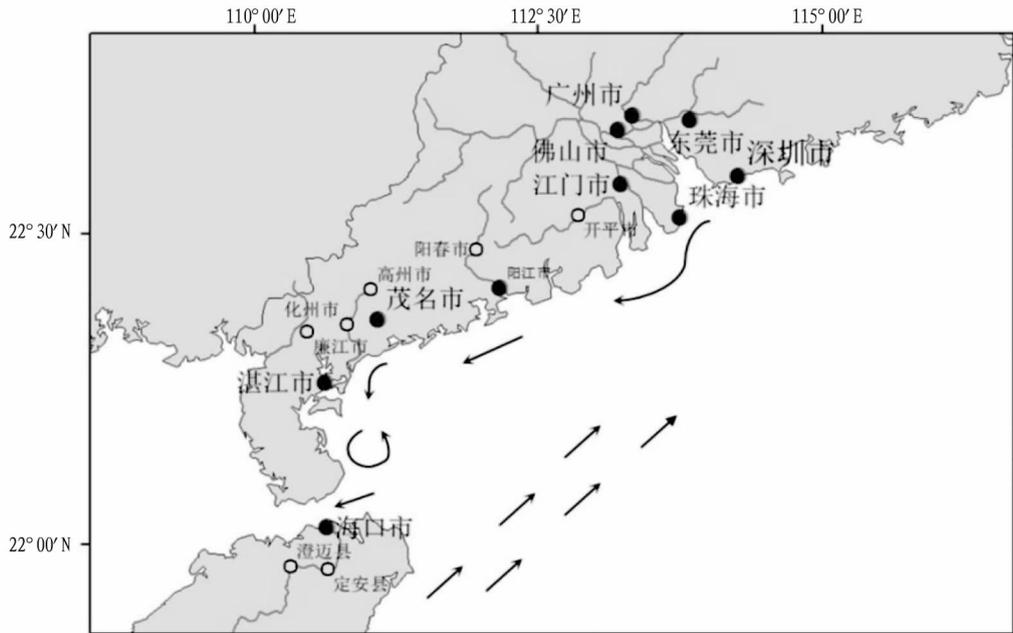


图3 广东沿海流示意

Fig. 3 Schematic Diagram of Guangdong Coastal Current

3.3 工业活动 工业活动是红树林湿地重金属污染的重要来源之一,如矿山开采、冶炼、电镀和染料等活动过程中产生的废水、废渣、废气等。湛江湾是湛江市工业活动集中区域,包括宝钢、中科炼化和港口等,同时也是观海长廊、特呈岛、东海岛和南三岛红树林湿地分布的区域。湛江港沿海区、调顺岛沿海区、麻斜沿海区,这些海区都是湛江居民密集区,工业和港口集中所在地,大量的陆源污染物和工业排放物排入湾内^[33],易造成湾内红树林湿地重金属污染。郭笑宇等^[34]研究表明,Cd、Cu和Pb的含量最高值恰好在特呈岛的北岸海域,即霞山区沿海、麻斜地区的出水口。观海长廊位于湛江沿海,工业较为集中,电镀、染料厂排放的“三废”^[35]加上濠塘河的入海口位于观海长廊红树林区,以及附近工地建筑活动对观海长廊红树林重金属污染造成一定影响。特呈岛和南三岛上虽然没有发现工业和企业,其红树林湿地重金属污染来源之一可能是大气沉降和海湾涡旋的作用,将湾内工业活动产生的污染物带至特呈岛和南三岛红树林区。通明海的红树林湿地所在的对岸有湛江晨鸣纸业公司,受其废水排海的影响,该区Zn的含量普遍较高^[16]。

3.4 农业活动 雷州半岛东海岸的南渡河、通明港、城月河,西海岸的流沙河、英利河、海康河等都是湛江红树林比较集中的地区^[17],也是农田和水产养殖比较集中的地区。在南渡河两岸分布着大片的农田区。通明港、流沙港和安铺等港口分布着大片的水产养殖基地,特别是安铺港,建有东南亚最大的万亩连片养虾生产基地——龙营围虾塘,虾塘数量达到537丘,养殖面积8.67 km²^[36]。雷州、徐闻、廉江工业和企业很少,周边红树林湿地接纳农田径流和畜禽养殖产生的

污染物,这可能是雷州半岛西岸红树林湿地重金属含量相对偏高的原因。

湛江的网箱养殖区主要分布在特呈岛,饲养过程中部分饵料的溶解和鱼类粪便排泄物进入水中^[10,17]。由于饲料添加剂广泛使用,养殖排放的污水含有较高的Cu和Zn^[37-39],故该水域的Cu污染现象可能与饲料添加剂的使用有关。南三岛NHD站附近水产养殖池塘较多,养殖污水通过暗管直接排入红树林,引起Cu和Zn污染^[6]。东海岛红树林As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn这6种重金属元素,推测其来源主要与水产养殖排污及农业面源污染有关^[8]。陈碧珊等^[11]调查发现,TCD1~TCD3处于耕地附近,耕作过程常用到有机肥、堆肥、粪便和化肥农药等,导致红树林沉积物中As、Cd、Cu、Hg、Zn等重金属含量较高。

3.5 交通活动 湛江红树林湿地大多分布在沿海滩涂上,往来船舶频繁,尤其湛江湾,航运发达,拥有多个万吨级港口。在船舶运输过程中,排放的废物、船舶涂料的脱落和零件损耗等产生的重金属进入海里,经过絮凝、沉淀等方式在红树林湿地沉积物中累积。研究表明,海水比河水更能促进Cd和Cu的释放^[40]。目前船舶涂料中主要含Cu、Zn、Pb和Cd等重金属元素。Ni、Cu和Pb因其耐海水腐蚀而被广泛应用于船舶保护,且Ni也是汽油中的微量金属元素,在船舶运输过程中易对红树林湿地土壤造成重金属污染^[41]。这是东海岛和观海长廊红树林沉积物中的重金属Cu、Zn、Pb和Cd含量较高的原因之一。除了船舶运输对红树林重金属污染有影响,交通活动也是湿地沉积物重金属的来源之一。交通运输主要是车辆尾气、轮胎磨损颗粒、街道表面风化粒子及汽车制动摩擦的磨损粒子等在干湿沉降下造成湿地沉积物

重金属的积累^[42]。汽车尾气排放的 Hg、轮胎磨损产生的 Cu 和 Zn 是道路周边土壤重金属的主要来源^[43]。观海长廊红树林区靠近观海路和海景路等城市重要道路,其车流量大,加上附近有海上巴士和渔船停靠,汽车尾气、轮胎磨损、渔船防护漆脱落及其燃油排放等产生的重金属是观海长廊红树林重金属污染源之一。南山镇红树林靠近粤海铁路港口,重金属来源与列车轨道、列车车轮轴和零件的磨损有一定的关系^[44]。通明港、流沙港和湛江湾等港口内红树林重金属来源主要与渔船涂料脱落和汽油排放等有关。

4 结语

经过多年的研究,广东湛江红树林湿地沉积物重金属污染已经积累了大量的有价值的数据和研究经验,得到较多的成果。该研究通过对湛江红树林湿地重金属来源可能途径进行论述,认为大气沉降和水动力这 2 种自然因素与工业、农业和交通活动是红树林湿地重金属污染来源途径,可为今后湛江红树林湿地重金属污染研究以及其他地区相关研究中重金属来源讨论提供参考。同时,针对上述研究不足,在未来应加强以下几方面的研究:①在研究红树林生态系统内的重金属污染时,不仅要注意人为源的排放所导致的重金属污染,也要注意自然源的影响。②大多数研究者均单独研究沉积物、水、植物的重金属含量状况,而对“水—沉积物—植物”界面重金属的迁移转化机理缺乏研究,对植物根系微生物、抗重金属蛋白等研究也比较少。红树林沉积物中元素的存在并非孤立的,它们是在各种复杂环境因素作用下形成特定的统一体。通过对沉积物中元素统一体进行研究,不仅能宏观把握沉积物地球化学特性,而且对红树林生态系统内重金属的迁移转化具有重要意义。③目前对红树林重金属迁移转化的研究涉及红树林水生动物这一领域较少,例如鱼类、贝类等水生动物体内的重金属含量直接影响人类的健康。因此构建生物体与重金属关系以及沉积物污染的生物评价指标是未来研究有关红树林重金属研究的方向。

参考文献

[1] 尹超,耿俊杰,黄亮亮,等. 我国红树林湿地重金属污染研究进展[J]. 工业安全与环保,2015,41(12):83-86.

[2] Global Mangrove Alliance. The State of World's Mangroves [EB/OL]. [2021-06-26]. <https://www.nature.org/en-us/what-we-do/our-insights/perspectives/state-of-world-mangroves/>.

[3] 李柳强. 中国红树林湿地重金属污染研究[D]. 厦门:厦门大学,2008.

[4] LIU J L, WU H, FENG J X, et al. Heavy metal contamination and ecological risk assessments in the sediments and zoobenthos of selected mangrove ecosystems, South China [J]. CATENA, 2014, 119: 136-142.

[5] 自然资源部, 国家林业和草原局. 自然资源部 国家林业和草原局关于印发《红树林保护修复专项行动计划(2020—2050年)》的通知[EB/OL]. (2020-08-14) [2021-06-26]. http://gi.mnr.gov.cn/202008/120200828_2544810.html.

[6] 罗松英, 邢雯林, 梁绮霞, 等. 湛江湾红树林湿地表层沉积物重金属形态特征、生态风险评价及来源分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 348-358.

[7] 陈碧珊, 苏文华, 罗松英, 等. 雷州半岛红树林土壤重金属空间分布特征及来源分析[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 922-928.

[8] 罗松英, 王嘉琦, 周敏, 等. 湛江东海岛红树林湿地表层土壤重金属空间分布特征及生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(8): 1547-1555.

[9] 易小青, 高常军, 魏龙, 等. 湛江红树林国家级自然保护区湿地生态系

统服务价值评估[J]. 生态科学, 2018, 37(2): 61-67.

[10] 刘静, 马克明, 曲来叶. 湛江红树林湿地水体重金属污染评价及来源分析[J]. 水生态学杂志, 2018, 39(1): 23-31.

[11] 陈碧珊, 苏文华, 罗松英, 等. 湛江特呈岛红树林湿地土壤重金属含量特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 159-165.

[12] 莫莹, 陈碧珊, 苏文华, 等. 湛江观海长廊红树林湿地土壤重金属污染现状及生态风险评价[J]. 岭南师范学院学报, 2016, 37(6): 156-163.

[13] 刘芳文, 颜文, 苗莉, 等. 湛江港海域海水和表层沉积物重金属分布特征及其污染评价[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(2): 74-82.

[14] 张际标, 刘加飞, 姚兼辉, 等. 湛江东海岛潮间带沉积物硫化物(AVS)和重金属(SEM)及其生物毒性评估[J]. 海洋通报, 2014, 33(4): 405-412.

[15] 甘华阳, 林进清, 梁开, 等. 雷州半岛滨海湿地表层沉积物中重金属含量分布与生态风险评价[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(3): 79-87.

[16] 刘加飞. 东海岛潮间带表层沉积物重金属含量、形态分布及其潜在生态风险评价[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013.

[17] 刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠. 特呈岛红树林自然保护区水环境质量评价[J]. 海洋湖沼通报, 2012(3): 115-122.

[18] 黄剑坚, 韩维栋, 刘素青. 雷州半岛高桥红树林沉积物中砷的分布[J]. 广东海洋大学学报, 2012, 32(4): 88-93.

[19] 孟佩. 广东湛江红树林国家级自然保护区功能区调整与评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.

[20] 林寿明, 林大中. 湛江市红树林资源调查报告[R]. 广东省林业勘测设计院, 2002.

[21] 王燕, 吴晓东. 湛江市红树林资源状况及其保护成效[J]. 林业科技管理, 2004(2): 33-34, 36.

[22] 许炼峰, 刘鸿辉. 广东土壤环境背景值和临界含量的地带性分异[J]. 华南农业大学学报, 1996, 17(4): 58-62.

[23] 张志锋. 中国近岸海洋环境质量评价与污染机制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2013.

[24] 郑娜, 王超起, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤—蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1349-1354.

[25] 单长青, 刘汝海, 单红仙. 潮间带沉积物/大气 Hg 的释放的模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(5): 417-421.

[26] 刘金铃. 中国主要红树林湿地中汞的迁移、转化规律[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.

[27] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报: 中文版, 2003, 25(6): 1-8.

[28] 陈亮. 琼州海峡及周边海域沉积污染特征及历史过程[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.

[29] 谢玲玲, 曹瑞雪, 尚庆通. 粤西近岸环流研究进展[J]. 广东海洋大学学报, 2012, 32(4): 94-98.

[30] 严金辉, 陈达森. 粤西水东单点系泊海域潮流和低频流特征[J]. 海洋湖沼通报, 2005(3): 8-15.

[31] WANG D X, HONG B, GAN J P, et al. Numerical investigation on propulsion of the counter-wind current in the northern South China Sea in winter [J]. Deep sea research part I: Oceanographic research papers, 2010, 57(10): 1206-1221.

[32] 李希彬. 东海大堤对湛江湾水动力环境影响的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

[33] ZHANG J B, ZHOU F X, CHEN C L, et al. Spatial distribution and correlation characteristics of heavy metals in the seawater, suspended particulate matter and sediments in Zhanjiang Bay, China [J]. PLoS One, 2018, 13(8): 1-25.

[34] 郭笑宇, 黄长江. 粤西湛江港海底沉积物重金属的分布特征与来源[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(5): 91-96.

[35] 关卉, 万洪富, 王洗民, 等. 雷州半岛土壤重金属分布特征及其污染评价[J]. 环境污染与防治, 2006, 28(10): 757-760, 771.

[36] 邓琰, 喻泽斌, 周炎武, 等. 安铺港表层沉积物中重金属污染现状及潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(3): 398-405.

[37] 戴婷, 章明奎. 长期禽畜养殖污水灌溉对土壤养分和重金属积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 36-39.

[38] 刘源, 崔二革, 李中阳, 等. 再生水和养殖废水灌溉下土壤—植物系统养分和重金属迁移特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 45-51.

[39] 刘红恩, 聂兆君, 刘世亮, 等. 养殖污水灌溉对土壤养分和重金属含量的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 47-51.

些研究都表明,通过在土壤中施加外源硒可以降低镉向地上部转移,降低茎、叶、果实中镉的含量,缓解镉对植物的毒害,从而实现安全生产。

3 展望

综上所述,通过土壤和叶面施硒这2种方式,在一定程度上可以调控土壤-植物系统中硒的积累,以及通过硒对镉的拮抗作用缓解对植物的胁迫来达到降镉的目的。总结已有研究发现,针对同种作物,施硒降镉的作用因品种不同差异较大。施硒降镉不是硒用量越多越好,可以开展针对原植物-土壤体系中镉的浓度来设计硒的浓度梯度寻找合适的降镉浓度。在作物不同生长期,镉向根、茎、叶和果实的运转迁移也有差异,低浓度促进镉向地上部分迁移,高浓度抑制镉向地上部分迁移。利用这2种不同的施硒方式可以开展针对农作物的农艺性状和各部位硒含量的影响的研究,找出适合富硒的农产品以及不同植物中降低镉含量和缓解重金属镉毒害作用的适宜施硒浓度,对重金属污染土壤在植物修复技术中的有效应用具有重要意义。

参考文献

- [1] 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[J]. 油气田环境保护,2014,24(3):66.
- [2] 湛润生,王莉,岳新丽,等. 镉胁迫对芥菜型油菜幼苗生理特性的影响[J]. 种子,2020,39(10):109-112.
- [3] 熊愈辉. 镉在土壤-植物系统中的形态与迁移特性研究进展[J]. 安徽农业科学,2008,36(30):13355-13357,13414.
- [4] 杨居荣,查燕,刘虹. 污染稻、麦籽实中Cd、Cu、Pb的分布及其存在形态初探[J]. 中国环境科学,1999,19(6):500-504.
- [5] 赵会会,方志刚,马睿,等. 耐镉根际促生菌的筛选及其对一年生黑麦草镉吸收积累的影响[J]. 草地学报,2017,25(3):554-560.
- [6] 李江遐,张军,马友华,等. 不同水稻品种对镉的吸收转运及其非蛋白巯基含量的变化[J]. 生态环境学报,2017,26(12):2140-2145.
- [7] 尹俊钦,涂路遥,赵小虎,等. 镉对菜地土壤镉微区分布及其吸附解吸特性的影响[J]. 环境科学学报,2015,35(7):2254-2260.
- [8] 杨肇铭,胡岗,范成五,等. 提高土壤硒生物有效性的技术措施研究进展[J]. 安徽农业科学,2022,50(1):12-14.
- [9] PYRZYŃSKA K. Determination of selenium species in environmental samples[J]. Microchimica acta,2002,140(1/2):55-62.
- [10] 宋崎. 土壤和植物中的硒[M]//龚子同. 土壤地球化学的进展和应用. 北京:科学出版社,1985.
- [11] TERRY N, ZAYED A M, DE SOUZA M P, et al. Selenium in higher plants[J]. Annual review of plant physiology and plant molecular biology, 2000,51:401-432.
- [12] 周进财,曹艳玲,刘凤兰. 外源硒浸种对油菜幼苗根系生长及生理特性的影响[J]. 种子,2019,38(10):107-109,118.
- [13] 蒋方山,张海军,吕连杰,等. 叶面喷施亚硒酸钠对黑粒小麦籽粒硒含量、产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报,2018,38(12):1496-1503.
- [14] 彭玲,贾芬,田小平,等. 硒对油菜根尖镉胁迫的缓解作用[J]. 环境科

学学报,2015,35(8):2597-2604.

- [15] 曾宇斌. 土壤添加硒对大豆拮抗重金属的影响[D]. 广州:华南理工大学,2016.
- [16] 郭锋,樊文华,冯两蕊,等. 硒对镉胁迫下菠菜生理特性、元素含量及镉吸收转运的影响[J]. 环境科学学报,2014,34(2):524-531.
- [17] 孙红艳,王杰文,王宇娜,等. 硒对镉胁迫下黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(12):175-177.
- [18] FENG R W, WEI C Y, TU S X, et al. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidences from the uptake of Cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice[J]. Biological trace element research, 2013, 151(1):113-121.
- [19] HUANG G X, DING C F, GUO F Y, et al. Underlying mechanisms and effects of hydrated lime and selenium application on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Environmental science and pollution research international, 2017, 24(23):18926-18935.
- [20] 周健,郝苗,刘永红,等. 不同价态硒缓解小油菜镉胁迫的生理机制[J]. 植物营养与肥料学报,2017,23(2):444-450.
- [21] 张海英,韩涛,田磊,等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. 园艺学报,2011,38(3):409-416.
- [22] 于广武,何长兴,陶国臣,等. 可溶性叶面肥及其发展趋势——黄萎叶喷剂的研究新进展[J]. 腐植酸,2006(3):9-14.
- [23] 刘永贤,潘丽萍,黄雁飞,等. 外源喷施硒与硅对水稻籽粒镉累积的影响[J]. 西南农业学报,2017,30(7):1588-1592.
- [24] 黄青青,刘艺芸,徐应明,等. 叶面硒肥与海泡石钝化对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学与技术,2018,41(4):116-121,159.
- [25] 方勇,陈曦,陈悦,等. 外源硒对水稻籽粒营养品质和重金属含量的影响[J]. 江苏农业学报,2013,29(4):760-765.
- [26] 谭旭生,曾跃华,李智谋,等. 硒肥施用对稻米中镉等重金属含量的影响[J]. 中国稻米,2014,20(1):76-77.
- [27] 张翠翠,常介田,赵鹏. 叶面施硒对西瓜镉和铅积累的影响[J]. 华北农学报,2013,28(3):159-163.
- [28] 杨燕君,刘晓华,宁婵娟,等. 叶面施硒对甜柿果实品质及重金属含量的影响[J]. 园艺学报,2013,40(3):523-530.
- [29] 吕选忠,官象雷,唐勇. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报,2006,43(5):868-870.
- [30] 张璐,周鑫斌,苏婷婷. 叶面施硒对水稻各生育期镉吸收的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版),2017,39(7):50-56.
- [31] 高敏,周俊,刘海龙,等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(2):215-222.
- [32] 刘春梅,罗盛国,刘元英. 硒对镉胁迫下寒地水稻镉含量与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(1):190-199.
- [33] 卞威尔斯,闫家普,崔良,等. 施硒对花生镉吸收与抗性及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1094-1101.
- [34] 江念,杨强,万佐玺,等. 硒对延龄草生长及硒、镉、砷、铅、汞吸收规律的影响[J]. 中药材,2016,39(9):1960-1965.
- [35] 陈大清. 植物硒同化的研究进展及其耐硒突变体的筛选[J]. 氨基酸和生物资源,2004,26(2):65-71.
- [36] 刘达,涂路遥,赵小虎,等. 镉污染土壤施硒对植物生长及根际镉化学行为的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(3):999-1005.
- [37] 王波,张然然,杨如意,等. 外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报,2020,39(12):2710-2718.
- [38] 卞威尔斯,田侠,丁效东,等. 施硒对花生幼苗硒、镉吸收及光合效应的影响[J]. 环境化学,2017,36(11):2349-2356.

(上接第9页)

- [40] WU G H, PAN L, WEI Q, et al. Decreased mobility of heavy metals in Haihe River sediments: The possible role of tide gate[J]. Journal of geochemical exploration, 2015, 157:92-99.
- [41] 张婷,刘爽,宋玉梅,等. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评估[J]. 环境科学学报,2019,39(3):706-715.

- [42] WEI B G, YANG L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China[J]. Microchemical journal, 2010, 94(2):99-107.
- [43] JOHANSSON C, NORMAN M, BURMAN L. Road traffic emission factors for heavy metals[J]. Atmospheric environment, 2009, 43(31):4681-4688.
- [44] 肖宇红,艾应伟,陈黎萍,等. 原子吸收光谱法测定铁路岩石边坡土壤中重金属含量[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(9):2576-2578.