

# 海南岛社会经济发展对红树林表层 土壤重金属污染的影响

黄子茵<sup>1</sup>, 管东生<sup>1</sup>, 王刚<sup>2</sup>

(1.中山大学 环境科学与工程学院, 广东 广州 510275; 2.广东工业大学 管理学院, 广东 广州 510520)

**摘要:** 重金属污染属于持久性污染物, 具有富集性和毒性, 长时间的累积会对生态环境和人体的安全造成威胁。本研究对海南岛不同区域红树林表层土壤重金属含量与其所在市县的土地利用、社会经济发展指标、污染物排放量进行相关性分析, 定量探讨社会经济发展对海南岛红树林湿地重金属污染来源的影响。相关性分析表明海南红树林土壤中的 Zn、Ni、Hg 和 Co 等重金属元素含量之间显著正相关, 表明这几类重金属元素之间可能存在相似的污染源。与土地利用间的相关分析发现, 随着区域建设用地面积的增加, 土壤中的 Cu、Zn 和 Hg 的含量也随之增加。其次, 红树林土壤中的 Cu、Zn、Hg 和 Co 含量分别与地区发展总值呈显著正相关和极显著正相关, Cu、Zn 含量与常住人口数量极显著正相关, 表明红树林土壤中这类重金属元素可能主要来源于城市建设开发活动、交通废气排放等。

**关键词:** 重金属; 红树林; 土地利用; 社会发展; 海南

中图分类号: 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(\$article\_year)00-0001-07

## Heavy metal contents of mangrove surface soils affected by the social and economic development in Hainan Island

HUANG Zi-yin<sup>1</sup>, GUAN Dong-sheng<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2.School of Management, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

**Abstract:** Heavy metal elements are persistent pollutants which are easy to be accumulated in the environment. Those poisonous pollutions will cause serious threats to ecological security and human health because of their long-term accumulation in environment, especially in the surface sediments. To find out the effect of social and economic development on the mangrove wetlands, correlation analysis was used to address how heavy metal contents in mangrove wetlands were affected by surrounding land use/cover types, social and economic development indicators and pollutant emission of different cities in Hainan Island. The result showed there were significantly positive correlations between Zn, Ni, Hg, and Co, indicating that those heavy metal elements may come from the same or similar sources. Furthermore, it was found that both Zn and Cu contents increased with the increasing of construction land area; Cu, Zn, Hg are significantly positively correlated with GDP, while Cu and Zn are significantly positively correlated with permanent population. All mentioned above results of correlation analysis generally showed those heavy metal elements may come from urban construction and vehicle exhaust.

**Key words:** heavy metals; mangrove wetland; land use; social development; Hainan

收稿日期: 2019-09-16, 修订日期: 2019-10-28

基金项目: 广东省高校省级重大科研项目(2017KQNCX060); 广东省自然科学基金项目(2018A030313891)

作者简介: 黄子茵 (1996-), 女, 广东韶关人, 硕士, 主要从事红树林环境与生态研究, E-mail: 840044128@qq.com

通讯作者: 王刚 (1983-), 男, 四川内江人, 博士, 讲师, 主要从事区域环境与生态研究, E-mail: gdut\_tony@163.com

红树林广泛分布于热带与亚热带海岸潮间带,在调节气候、防风消浪、净化环境、物种多样性保护等多方面发挥着重要作用,是重要的滨海湿地资源<sup>[1-3]</sup>。然而随着红树林分布区人口的增长和城市的发展,人类活动对红树林生态系统的干扰与破坏已不容忽视<sup>[4-5]</sup>。与其它滨海湿地相比,由于红树林土壤有机质、Fe 和 S 等的含量更高,根系更加复杂庞大,更加利于重金属元素的富集过程<sup>[6]</sup>。红树林沉积环境中的重金属可来源于区域的岩石风化,也可能源自灰尘、降雨等分散污染源,同时人类的工农业活动也会给红树林中重金属的积累带来影响<sup>[7-8]</sup>。由于重金属生物毒性大、迁移转化速率较慢,且大部分沉积在土壤中<sup>[9]</sup>,故研究红树林土壤重金属的含量及其影响因素,对保护红树林湿地资源有着重要意义。

目前,土地利用变化和经济发展对红树林重金属污染影响方面的研究相对较少,而主要集中于风险评价、来源分析等。罗斯(Ross)<sup>[7]</sup>指出,在区域和生态层面,岩石风化和人类活动是重金属输入的重要来源。宋成军等<sup>[10]</sup>在对土地利用/覆盖变化对重金属分布的影响研究中发现,流域尺度上的土地利用情况极大上决定了工业活动类型的强度与类型,以及农业用地的施肥量和耕作管理制度,这些因素都会影响在空间上重金属的差异性分布。郭欣等<sup>[11]</sup>运用主成分分析法对成都平原干溪河流域的不同用地类型的重金属来源进行计算分析,指出 Zn、Cu、Cd、Cr、Ni 来源于交通和工业污染,Pb 污染主要与原本铅蓄电池迹地有关。李楠等<sup>[12]</sup>运用 TOPSIS 方法评估了杭州湾滨海湿地的生态安全状况,表明人口增长率、人均 GDP、工业废水排放量以及生活废水排放量是影响滨海湿地安全的重要因素,说明经济发展、城市化加剧、污染负荷会使得湿地安全风险增加。鉴于人类活动和土地利用方式对环境中重金属污染迁移转化的重要影响,本研究选取海南岛各市县红树林为研究对象,定量分析了土地利用方式、社会经济发展以及污染物排放量对红树林表层土壤重金属含量的影响,以探讨土地利用以及社会发展对红树林沉积环境的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

海南岛位于中国华南地区,介于东经 108°37′—111°03′,北纬 18°10′—20°10′之间。海南岛拥有丰富的红树林资源,拥有 35 种红树、半红树植物,其总面积占全国红树林的 33%。本研究收集的红树林土壤重金属研究数据已囊括了海南岛的主要红树林分布区,包括海口东寨港红树林自然保护区、文昌八门湾(清澜港)红树林保护区、澄迈富力湾红树林保护区、临高新盈港红树林自然保护区、儋州洋浦港红树林保护区、三亚亚龙湾红树林和三亚湾红树林。根据对海南岛各区域红树林湿地表层土壤重金属的含量与空间分布分析,部分区域的土壤重金属含量超过国家标准,存在一定的生态风险。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 重金属与社会经济发展数据源

通过万方、知网等数据库收集海南省各市县红树林重金属相关的研究文献,全面收集红树林表层土壤重金属含量的数据,再根据样本数据量,求得各区域的重金属平均含量。海南岛各研究区红树林土壤重金属含量分析样品数量、采样深度、采样时间等详见表 1,其中,重金属含量测定一般使用质谱仪,仅有个别使用火焰原子吸收法。社会经济发展数据摘自 2015 年 6 个研究区国民经济与社会发展公报以及《2015 年海南省统计年鉴》,包括各地区的地区生产总值、工业增加值、常住人口、农药使用量、化肥(包括磷肥、钾肥、氮肥、复合肥)使用量、工业废水排放量、生活废水排放量和废气排放量(二氧化硫排放量、机动车尾气排放量)。

#### 1.2.2 土地利用数据(遥感数据)源

利用 30 m 土地利用数据集 FROM-GLC (2015 年)提取各市县 9 种用地类型的面积。该土地利用数据的一级监督分类整体精度达到 70.2%。该数据集来源于国家科技基础条件平台:国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn>)。数据集的坐标系统 WGS-84,已经过地面控制点的几何校正。利用海南省各市县矢量数据,提取并分析相应市县的土地利用状况。

表 1 各研究区红树林表层土壤重金属含量及其他信息

Tab.1 Heavy metal content in mangrove wetlands surface sediments in each study area and other information

采样点	样品数量	采样深度/cm	采样年份	采样点	样品数量	采样深度/cm	采样年份
富力湾 <sup>[13]</sup>	7	0~5	2013	新盈港 <sup>[21]</sup>	6	0~5	2014
洋浦港 <sup>[13]</sup>	6	0~5	2013	新盈港 <sup>[25]</sup>	8	0~5	-
新英港 <sup>[14]</sup>	2	0~10	2012	新盈港 <sup>[23]</sup>	7	0~5	2015
东寨港 <sup>[15]</sup>	14	0~20	2007	三亚河 <sup>[14]</sup>	4	0~10	2012
东寨港 <sup>[16]</sup>	5	-	-	三亚湾 <sup>[15]</sup>	8	0~20	2007
东寨港 <sup>[14]</sup>	24	0~10	2012	三亚湾 <sup>[24]</sup>	13	0~5	2008
东寨港 <sup>[17]</sup>	13	0~5	2013	亚龙湾 <sup>[24]</sup>	6	0~5	2008
东寨港 <sup>[18]</sup>	47	0~40	2014	清澜港 <sup>[20]</sup>	6	0~10	2011
东寨港 <sup>[19]</sup>	8	0~5	2013	清澜港 <sup>[21]</sup>	5	0~5	2014
东寨港 <sup>[20]</sup>	5	0~10	2011	清澜港 <sup>[22]</sup>	8	0~10	2011
东寨港 <sup>[21]</sup>	6	0~5	2014	清澜港 <sup>[23]</sup>	7	0~5	2015
东寨港 <sup>[22]</sup>	9	0~10	2011	清澜港 <sup>[14]</sup>	5	0~10	2012
东寨港 <sup>[23]</sup>	7	0~5	2015	八门湾 <sup>[16]</sup>	5	-	-
东寨港 <sup>[24]</sup>	45	0~5	2008	八门湾 <sup>[26]</sup>	24	0~10	2013
东寨港 <sup>[14]</sup>	4	0~10	2012	清澜港 <sup>[25]</sup>	24	0~10	2011
新盈港 <sup>[13]</sup>	9	0~5	2013	八门湾 <sup>[13]</sup>	18	0~5	2013
新盈港 <sup>[20]</sup>	4	5~10	2011				

### 1.2.3 数据处理

利用 Excel 对收集的各市县红树林表层土壤重金属含量数据进行统计、整理, 并计算平均值; 由于重金属数据和社会经济发展指标的量纲不同, 需先进行标准化。本研究中, 使用 Z-score 标准化方法对原始数据进行线性变换。利用 Arcgis 10.2 提取土地利用数据; 利用 SPSS 19.0 对标准化处理后的各种重金属之间、重金属含量与其他变量(土地利用数据、经济发展指标和污染物排放/使用量)进行相关性分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属的空间分布与相关性分析

海南省各市县红树林表层土壤重金属含量如表 2 所示, 位于海口市的红树林表层土壤重金属含量较高, 其 Cu、Pb、Zn、Cr、Co、Ni、Hg 的含量均处于首位, 而位于儋州市的红树林表层土壤中 Cd 的含量最高。这主要是由于海口市靠近琼州海峡, 具备优越的地理位置, 社会经济发展较快, 频繁的人类活动影响导致了红树林表层土壤重金属的富集<sup>[27-28]</sup>。与海南省土壤重金属含

表 2 海南岛各区域红树林表层土壤重金属含量

Tab.2 Heavy metal content in mangrove wetlands surface sediments in Hainan Island

区域	重金属元素质量分数/mg·kg <sup>-1</sup>								
	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Co	Ni	Hg
海口	26.84	25.40	97.23	70.91	0.41	10.57	17.47	40.95	0.26
三亚	8.60	23.35	48.19	11.23	0.12	5.65			0.08
文昌	11.44	18.14	56.20	50.57	0.49	10.52		23.75	0.06
儋州	16.23	23.19	64.97	60.01	0.87	13.08	9.93	34.61	
澄迈	7.09	16.62	42.22	57.97	0.71	14.07	6.70	19.15	
临高	11.91	17.09	56.81	51.42	0.54	11.33	5.29	22.82	
背景值	4.95	22.34	35.11	15.24	0.05	1.14		4.12	

量背景值相比, 六个市县红树林土壤中的 Cu、Zn、Cr、As、Ni 含量均超过了背景值; 其中海口市、文昌市、儋州市的红树林土壤表层土壤中 Pb 的含量超过背景值; 海口市、儋州市、澄迈市的红树林表层土壤中 Cd 的含量超过了背景值。说明受海南岛人类社会经济活动污染排放的影响, 红树林土壤受到一定程度的重金属污染, 但污染程度不高。

一般而言, 来源相同或相似的重金属会在含

量上表现一定的相关性。海南岛红树林表层土壤中不同重金属含量间的相关性如表 3。从表 3 可知, Zn 与 Cu、Zn 与 Ni、Co 与 Hg 之间显著相关, 相关系数分别是 0.871、0.941、0.959; Zn 与 Co、Co 与 Hg 相关性极显著, 相关系数为 0.999。海南岛红树林表层土壤中部分重金属元素间呈现显著相关关系, 这些重金属元素可能是存在相同或相似的污染源, 因其地球化学性质相似而发生沉降积累。

表 3 重金属含量之间的相关性及其系数

Tab.3 Correlation coefficients of heavy metal elements in surface sediments

重金属	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Co	Ni
Pb	0.456							
Zn	0.871*	0.739						
Cr	0.700	0.440	0.557					
Cd	0.478	0.444	0.618	0.420				
As	0.192	-0.062	-0.127	0.579	0.255			
Co	0.871	0.858	0.999*	0.407	0.453	-0.907		
Ni	0.717	0.794	0.947*	0.581	0.638	-0.188	0.934	
Hg	0.767	0.615	0.949*	0.481	0.714	-0.420	0.999*	0.959*

注: \*在0.05水平上显著性相关; \*\*在0.01水平上显著性相关

## 2.2 不同土地利用类型对重金属污染的影响

海南岛土地利用与重金属含量的相关性及其系数如表 4 所示, Cu、Zn、Hg 与建设用地面积间极显著正相关, 相关系数为 0.853、0.870 和 0.913; Co 与湿地、建设用地之间分布呈极显著正相关和显著正相关, 相关系数为 0.997 和 0.990。据前人的研究可知, 建设用地中重金属的含量远高于未利用地和乡村地表径流中重金

属的含量<sup>[29]</sup>, 在强对流天气较多、台风气候较多的海南岛尤为明显<sup>[18]</sup>。土壤中 Cu、Zn 的人为来源主要包括工业源和交通源<sup>[30-31]</sup>。建设用地包括工矿用地、能源、交通、水利等公共基础设施用地和居住用地, 是工业三废和交通废气的重要输入源。Imperto 等<sup>[32]</sup>通过对意大利那不勒斯不同功能区地表土壤重金属含量的检测中, 工业区重金属含量最大, 城市发展地区次之, 居住区重

表 4 海南省土地利用与重金属含量相关性及其系数

Tab.4 Correlation coefficients between heavy metal elements in surface sediments and landuse types

土地利用类型	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Ni	Co	Hg
农田	0.649	0.315	0.644	0.613	0.256	0.253	0.622	0.734	0.367
森林	-0.244	-0.107	-0.320	-0.012	0.596	0.377	0.021	-0.315	-0.379
草地	-0.218	-0.100	-0.182	-0.289	-0.284	-0.344	-0.179	0.533	-0.809
灌丛	-0.430	0.092	-0.484	-0.420	0.290	0.021	-0.086	-0.470	-0.713
湿地	0.492	0.157	0.514	0.440	0.016	0.069	0.360	0.997**	0.155
水体	0.658	0.585	0.627	0.482	0.332	0.200	0.762	0.746	0.562
建设用地	0.853*	0.669	0.870*	0.419	-0.217	-0.126	0.793	0.990**	0.913*
裸地	0.079	0.436	0.090	-0.334	-0.290	-0.484	0.329	0.627	0.136

注: \*在0.05水平上显著性相关; \*\*在0.01水平上显著性相关

金属含量最少。在对东洞庭湖土壤的分析中, 万群等<sup>[33]</sup>利用 PCA(主成分分析)法将 Hg 归于工业来源。因此, 建设用地面积越大, 通过工业和交通源输入到环境中的 Zn、Hg 也随之增加, 其通过大气沉降、水力迁移等方式进入红树林湿地, 使得其表层土壤的 Zn 含量增加。Co 是一种具有放射性的污染物, 主要来源于工业矿采、原子能排放的废物、医疗和科研放射废物等<sup>[34]</sup>。其所代表的工业用地、能源设施与市政公用设施用地均属于建设用地。建设用地面积的增加, 可能意味着工业、核能发电或者医疗污染物排放进入环境的 Co 也相应增加, 最终导致红树林土壤中 Co 含量逐渐增加。

### 2.3 社会经济发展对重金属污染的影响

社会经济发展指标与红树林表层土壤重金属含量间的相关性分析发现, Cu、Zn、Hg 与地区生产总值显著正相关, 相关系数分别为 0.813、0.830、0.985; Hg 与工业增值显著正相关, 相关系数为 0.990; Ni 与常住人口显著正相关, 相关系数为 0.916; Cu、Zn、Co、Hg 与常住人口极显著正相关, 相关系数为 0.938、0.939、0.916、0.995。其他经济发展指标与重金属的相关性及其系数如表 5 所示。

陈碧珊等<sup>[35]</sup>对雷州半岛红树林表层土壤重金属的来源分析中发现, 土壤中重金属元素的富

集与人为排放关系密切, 工业较发达、人为活动影响较频繁的地区重金属生态风险也较高。从重金属之间的相关性来看, 其相关系数可以较为准确反映来源途径的相似性, 在本研究中 Zn 与 Ni、Ni 与 Hg、Co 与 Hg 之间显著正相关, 可能意味着它们存在相同或相似的来源; 这 4 种重金属均与常住人口的数量显著正相关。各市县的人口多, 城市发展的需求大, 人为排放的污染增加, 红树林表层土壤的重金属含量随之增加。张伟燕等<sup>[36]</sup>在对博尔塔拉河地表水重金属元素含量分析中, 提出 Zn、Hg 的含量受工业、交通污染源的共同影响; 龚亚玲等<sup>[37]</sup>对东阳江边滩表层土壤进行重金属元素来源分析, 表明 Zn、Hg 可能来自于工业生产和交通污染的排放。河流汇聚、大气沉降是红树林表层土壤重金属的重要来源, 因此 Cu、Zn 的含量与地区整体发展状况关系密切, 本研究推测海南省红树林湿地表层重金属 Cu、Zn 的污染主要来源于工业生产、交通废气带来的污染排放。

### 2.4 污染物排放(使用)对重金属污染的影响

如图 1 所示, 海口市、儋州市的废水、废气排放量远高于其余四个研究区, 其红树林表层土壤重金属的平均含量也高于其他研究区, 而三亚市、临高县、澄迈县的化肥、农药使用量比较高, 而三亚市、临高县红树林表层土壤重金属含量

表 5 海南省经济发展指标与重金属的相关性及其系数

Tab.5 Correlation coefficients between heavy metal elements in surface sediments and development indicators

	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Ni	Co	Hg
地区生产总值	0.813*	0.727	0.830*	0.286	-0.366	0.218	0.776	0.804	0.985*
工业增值	0.646	0.554	0.591	0.640	0.493	0.485	0.729	0.749	0.990*
常住人口	0.938**	0.802	0.939**	0.435	0.161	-0.086	0.916*	0.995**	0.995**

注: \*在0.05水平上显著性相关; \*\*在0.01水平上显著性相关

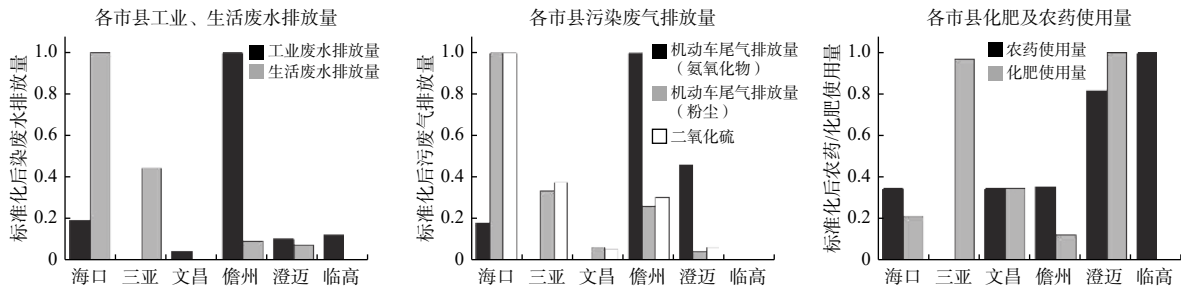


图 1 各研究区污染物排放情况

Fig. 1 Pollutants discharge in each study area

则较低,可能是相较于化工生产和尾气的排放,化肥和农药施用导致的重金属积累较少。说明污染物的排放与红树林表层土壤积累重金属之间存在一定相关关系。研究表明,大气沉降是区域重金属的重要来源<sup>[38]</sup>,因此废气的排放对重金属的累积影响可能更为显著。

如表 6 所示,污染物排放(使用量)与红树林表层土壤的重金属含量间的相关性分析发现,Cu、Pb、Zn 均与机动车尾气排放量( $\text{NO}_x$ /粉尘)显著正相关;Pb 与化肥使用量显著负相关,相关系数为 0.818;Co 与生活废水排放量显著正相关,相关系数为 0.970;Co 与机动车尾气排放量( $\text{NO}_x$ /粉尘)极显著正相关,相关系数为 0.993 和 0.996。从相关性分析的结果来看,红树林表层土壤中重金属的污染与工业废气、工业废水、机动车废气和生活废水的排放量存在明显的正相关关系。罗松英等<sup>[39]</sup>对湛江湾红树林表层土壤

重金属进行来源分析中发现,湾内红树林重金属污染主要来自生活、工业以及养殖排污,其次是自然风化产物的排入;Zn、Cu 与机动车尾气排放量呈正相关,说明 Zn 来源于交通源可能是由于 ZnO 作为硬化剂被加入到轮胎中,约占轮胎的 0.4%~4%<sup>[40]</sup>,而 Cu 被用作制备汽车的散热器,随着轮胎和散热器的磨损,产生含有 Cu、Pb 的粉尘,通过地表径流、大气沉降进入红树林湿地<sup>[41]</sup>。Pb 可来源于平衡轮胎的铅块磨损<sup>[40]</sup>和汽车尾气的排放;汽车尾气中的铅主要来自四乙基铅,它主要作为抗爆震剂加入到汽油中<sup>[42]</sup>。2000 年我国已全面禁止使用含铅汽油,重金属可能是早年的汽车尾气沉积带来的,造成汽车尾气排放与 Pb 的含量存在相关关系。Pb 的含量与农药施用量负相关,可能是因为城市化建设是导致 Pb 积累的主要来源,而农药施用量越高,代表城市化水平较低。

表 6 污染物排放(使用)量与重金属含量相关性及其系数

Tab.6 Correlation coefficients between heavy metal elements in surface sediments and pollutant emission

污染排放因素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Ni	Co	Hg
农药使用量	-0.586	0.104	-0.577	-0.553	-0.352	-0.281	-0.495	-0.199	-0.565
化肥使用量	0.217	-0.818*	-0.220	0.498	0.521	0.688	-0.814	-0.827	0.094
工业废水排放量	0.305	0.347	0.231	0.387	0.715	0.468	0.478	0.093	0.840
生活废水排放量	0.773	0.833	0.793	0.096	-0.494	-0.407	0.845	0.970*	0.806
二氧化硫排放量	0.138	0.212	0.058	0.419	0.797	0.624	0.295	0.013	0.018
机动车尾气( $\text{NO}_x$ )	0.867*	0.853*	0.876*	0.263	-0.321	-0.250	0.807	0.993**	0.762
机动车尾气(PM)	0.856*	0.874*	0.860*	0.246	-0.308	-0.250	0.809	0.996**	0.753

注: \*在0.05水平上显著性相关; \*\*在0.01水平上显著性相关

从相关性分析可知,海南岛红树林表层土壤重金属的含量主要受到人类活动的影响。其中工业污染排放、城市开发、交通运输是使得红树林重金属发生积累的主要影响因素。结合重金属含量间的相关分析,表层土壤中 Cu、Pb、Zn、Hg 主要来源于工业污染排放、城市开发以及机动车尾气排放;Cr 和 Ni 受成土母质的影响,但在表层土壤中的含量仍超过背景值,说明人类活动对其具有一定程度的影响。

### 3 结 论

(1)海南岛红树林表层土壤重金属的含量受社会经济的影响,从土地利用现状来看,

Cu、Zn、Hg 与建设用地之间相关系数分别为 0.853、0.870 和 0.913,存在显著正相关关系,表明建设用地的人类活动、工业生产等干扰使得土壤表层重金属含量增加;

(2)从经济发展指标来看,Hg 与工业增长值显著正相关,相关系数为 0.990;同时,Cu、Zn、Hg 与地区发展总值也存在显著正相关关系,说明城市发展、工业活动是造成区域红树林表层土壤重金属增加的重要原因;

(3)从污染物的排放量来看,重金属的积累与机动车尾气的排放量密切相关,以 Cu、Zn、Pb 为代表,这些重金属通过大气传输,最终汇入红树林,使得表层土壤重金属的含量增加。

## 参考文献:

- [1] 林鹏. 中国红树林研究进展[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2001, 40(2): 592-603.
- [2] 黄桂林. 中国红树林湿地的保护与发展[J]. 林业资源管理, 1996, (5): 14-17.
- [3] LEE S Y, PRIMAVERA J H, DAHDUH-GUEBAS F, et al. Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment[J]. *Global Ecology & Biogeography*, 2014, 23(7): 726-743.
- [4] VALIELA I, BOWEN J L, YORK J K. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments[J]. *BioScience*, 2001, 51(10): 807-815.
- [5] 国家海洋局. 中国海洋21世纪议程[M]. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [6] 程皓, 陈桂珠, 叶志鸿. 红树林重金属污染生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3893-3900.
- [7] ROSS S M. Retention, transformation and mobility of toxic metals[C]//*Toxic Metals in Soil-Plant Systems*. Soil. UK: John Wiley and Sons Ltd, 1994: 63-152.
- [8] 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.
- [9] 黄星. 红树林土壤有机碳、重金属特征对红树林景观格局变化的响应——以海南东寨港和广西钦州湾为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [10] 宋成军, 张玉华, 刘东生, 等. 土地利用/覆被变化(LUCC)与土壤重金属积累的关系研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(5): 617-624.
- [11] 郭欣, 姚苹, 杜焰玲, 等. 典型土地利用方式下土壤重金属污染物分布特征与源解析——以成都平原干溪河流域为例[J]. *环境工程*, 2019, 37(1): 1-5.
- [12] 李楠, 李龙伟, 陆灯盛, 等. 杭州湾滨海湿地生态安全动态变化及趋势预测[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2019, 43(3): 107-115.
- [13] 邹焯燏. 海南岛北部潮间带红树林沉积物-孔隙水-植物系统中重金属元素迁移富集规律研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2014: 17-35.
- [14] 李翠. 海南红树林湿地积累重金属的功能研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2012: 14-32.
- [15] DING Z H, LIU J L, LI L Q, et al. Distribution and speciation of mercury in surficial sediments from main mangrove wetlands in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(9): 1319-1325.
- [16] VANE C H, HARRISON I, KIM A W, et al. Organic and metal contamination in surface mangrove sediments of South China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(1): 134-144.
- [17] 季一诺, 赵志忠, 吴丹. 东寨港红树林湿地沉积物和秋茄中重金属的富集特征[J]. *安全与环境工程*, 2015, 22(2): 66-73.
- [18] 李敏. 东寨港红树林湿地生态系统健康压力诊断[D]. 海口: 海南师范大学, 2015: 22-48.
- [19] 邹焯燏, 李勇, 赵志忠, 等. 东寨港红树林沉积物重金属的垂直分异及污染评价[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(8): 327-330.
- [20] 韩卓汝, 赵志忠, 袁建平, 等. 海南岛北部红树林湿地表层沉积物重金属元素分布相关特征及其污染源分析[J]. *海南师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 26(1): 66-70.
- [21] 季一诺. 海南岛北部红树林湿地沉积物重金属分布及其生物有效性研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2016: 14-80.
- [22] 王鹏. 海南岛北部红树林湿地重金属富集及生态效应研究[D]. 海口: 海南师范大学, 2012: 8-20.
- [23] 叶心媛, 王鹏, 李香, 等. 海南岛东北部红树林湿地表层重金属富集研究[J]. *生态经济: 学术版*, 2014, (1): 318-321, 328.
- [24] 丘耀文, 余克服. 海南红树林湿地沉积物中重金属的累积[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(2): 102-108.
- [25] 郭菊兰, 朱耀军, 武高洁, 等. 海南清澜港红树林湿地沉积物环境质量评价[J]. *林业资源管理*, 2013, (6): 121-126.
- [26] 吴丹, 赵志忠, 季一诺, 等. 海南岛八门湾红树林湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. *海南师范大学学报: 自然科学版*, 2015, 28(4): 432-437.
- [27] TURNBULL R, ROGERS K, MARTIN A, et al. Human impacts recorded in chemical and isotopic fingerprints of soils from Dunedin City, New Zealand[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 455-469.
- [28] OGRI O R, EJA M E, MALU S P. Seasonal variations of heavy metals (V, Fe, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, and Hg) in surface sediments from Great Kwa River Estuary (G. K. R. E.), South Eastern Coast of Nigeria[J]. *International Journal of Applied Environmental Sciences*, 2011, 6(2): 155-164.
- [29] SARTOR J D, BOYD G B, AGARDY F J. Water pollution aspects of street surface contaminants[J]. *Journal-Water Pollution Control Federation*, 1974, 46(3): 458-467.
- [30] 罗飞, 巴俊杰, 苏春田, 等. 武水河上游区域土壤重金属污染风险及来源分析[J]. *岩矿测试*, 2019, 38(2): 195-203.
- [31] 马牧源, 于一雷, 郭嘉, 等. 襄阳入江中小河流表层沉积物重金属污染特征及其潜在的生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(9): 3144-3153.
- [32] IMPERATO M, ADAMO P, NAIMO D, et al. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy)[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(2): 247-256.
- [33] 万群, 李飞, 祝慧娜, 等. 东洞庭湖沉积物中重金属的分布特征、污染评价与来源辨析[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(12): 1378-1384.
- [34] 谢洪科, 邹朝晖, 彭选明, 等. 重金属钴污染土壤的修复研究进展[J]. *现代农业科技*, 2013, (7): 222-223.
- [35] 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.
- [36] 张伟燕, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 博尔塔拉河地表水重金属来源分析及其污染评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(7): 100-106.
- [37] 龚亚玲, 胡忠行, 周云鹏, 等. 东阳江表层沉积物重金属污染评价及来源分析[J]. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 41(4): 466-473.
- [38] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太滂运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J/OL]. (2019-07-09)[2019-08-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201903252>.
- [39] 罗松英, 邢雯淋, 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.
- [40] ADACHI K, TAINOSHO Y. Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust[J]. *Environment International*, 2004, 30(8): 1009-1017.
- [41] 李晓燕, 刘艳青. 我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源[J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3648-3653.
- [42] APEAGYEI E, BANK M S, SPENGLER J D. Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(13): 2310-2323.