

洞庭湖及其支流沉积物重金属污染分布特征、风险及影响因子分析



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

陈方伟¹⁾, 李聪¹⁾, 郭军¹⁾, 张程安¹⁾, 毛雄¹⁾, 汤恒佳¹⁾, 廖琦¹⁾, 陈创¹⁾

中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 长沙, 410600

内容提要:洞庭湖区为我国重要的“鱼米之乡”,也是主要粮食生产区之一。近年来,伴随着经济的快速发展,洞庭湖及其支流重金属污染时有发生,特别是沿流域工业、生活污水的乱排滥放,导致流域重金属污染日益严重。重金属在自然界很难分解和易通过食物链累积,最终可能危害人体健康。而河流表层沉积物是重金属的“源和汇”,极易续集和二次释放。本文以洞庭湖流域为研究区,系统采集表层沉积物样品,通过地积累指数法、地理探测器、地理加权回归探究其重金属分布特征、污染现状及影响因素驱动分析,以期为相关部门抉择治理提供指导。经研究发现:洞庭湖及其支流沉积物 Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 七种重金属含量分别是洞庭湖水系底泥背景值的 5.06、1.69、1.74、2.02、1.54、1.58、1.67 倍。重金属 Cd 元素为背景值的 5 倍,个别点位超过土壤筛选值,已对周边环境造成危害。Mn 为背景值的 2 倍,在洞庭湖流域增长较快,需要加强监测;通过 I_{geo} (地积累指数)计算,研究区 Cd 元素的均值在 1~2 之间,属于中等污染,研究区沉积物重金属 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 元素的 I_{geo} 均小于 1,均属于轻度污染,洞庭湖及其支流沉积物重金属主要污染物 Cd。整体上来看,洞庭湖区各水系沉积物中重金属污染风险较高,整体呈现逐渐积累过程,且基本上处于轻度—偏中度污染水平。通过地理探测器模型发现,降雨、距乡镇距离、气温、据道路距离、土地利用类型、据铁路距离、NDVI、DEM 对洞庭湖区沉积物重金属地积累指数(I_{geo})具有较强的解释力,表明洞庭湖区沉积物重金属污染受到地理条件等自然因子的影响,同时也与人为活动密切相关;通过地理探测器,筛选出降雨、据公路距离、DEM 等对沉积物重金属 I_{geo} 空间分布解释力强的因子,年平均降雨量和距道路距离是双因子增强的效果外,其他因子交互作用均为非线性增强,表明选取的环境、自然因子共同对湖区表层沉积物重金属空间分布离散发挥一定的驱动作用。

关键词:洞庭湖流域;沉积物重金属;影响因子;地理探测器;地理加权回归(GWR)

湖泊凭借其自然资源禀赋,给人们生产生活提供了生态价值和经济价值,推动着地区经济快速发展。伴随着城市快速扩张和人类活动频繁,导致流域沉积物中重金属大量蓄积,给湖区生态环境造成巨大威胁。聚集在沉积物中的重金属一旦受到剧烈扰动就会再次释放,成为隐藏的“定时”炸弹。

且重金属物质生物毒性大,难以在环境中自然降解,易在食物链中累积,进而威胁到人体健康。

近年来,湖泊的生态环境问题受到越来越多的人关注,很多学者对湖泊表层沉积物重金属进行过研究,结果表明:太湖流域沉积物整体重金属污染为低生态风险,其中重金属元素中 Ni 和 Pb 的生态风险高于其他金属(刘莹等,2014)。鄱阳湖是我国最大的淡水湖,弓晓峰等认为鄱阳湖沉积物中存在不

同程度的重金属污染,主要污染元素 Cu、Pb、Zn、Cd 等(弓晓峰等,2006),还有研究表明鄱阳湖沉积物重金属潜在生态风险值为 165.4,整体上属于中等生态危害水平,空间区域上来,湖区东南部综合潜在生态风险最高(Niu Yong et al., 2020)。还有研究表明巢湖表层沉积物尚未受到重金属的污染,同时也有学者发现巢湖存在一定程度的 Hg、Cd 污染,在巢湖入湖口重金属综合污染可达到“强—极强”状态(刘刚等,2018)。湖泊底泥重金属污染呈现为广泛性和复杂性。

洞庭湖是长江之肾,国家粮食之仓,担负着流域生态安全、水安全和国家粮食安全的重要使命。很多学者也在此做过研究,郭晶等调查发现,洞庭湖底泥中各类重金属元素含量均超过其土壤环境背景

注:本文为中国地质调查局项目(编号:No. DD20230478)、湖南省自然科学基金(编号:2024JJ7620)的成果。

收稿日期:2024-09-23;改回日期:2024-12-08;网络首发:2025-01-20;责任编辑:李明,章雨旭。Doi:10.16509/j.georeview.2025.01.012

作者简介:陈方伟,男,1995年生,助理工程师,主要从事重金属污染防治研究。Email:1401453439@qq.com。通讯作者:李聪,男,1995年生,助理工程师,主要从事环境地球化学研究。Email:448557091@qq.com。

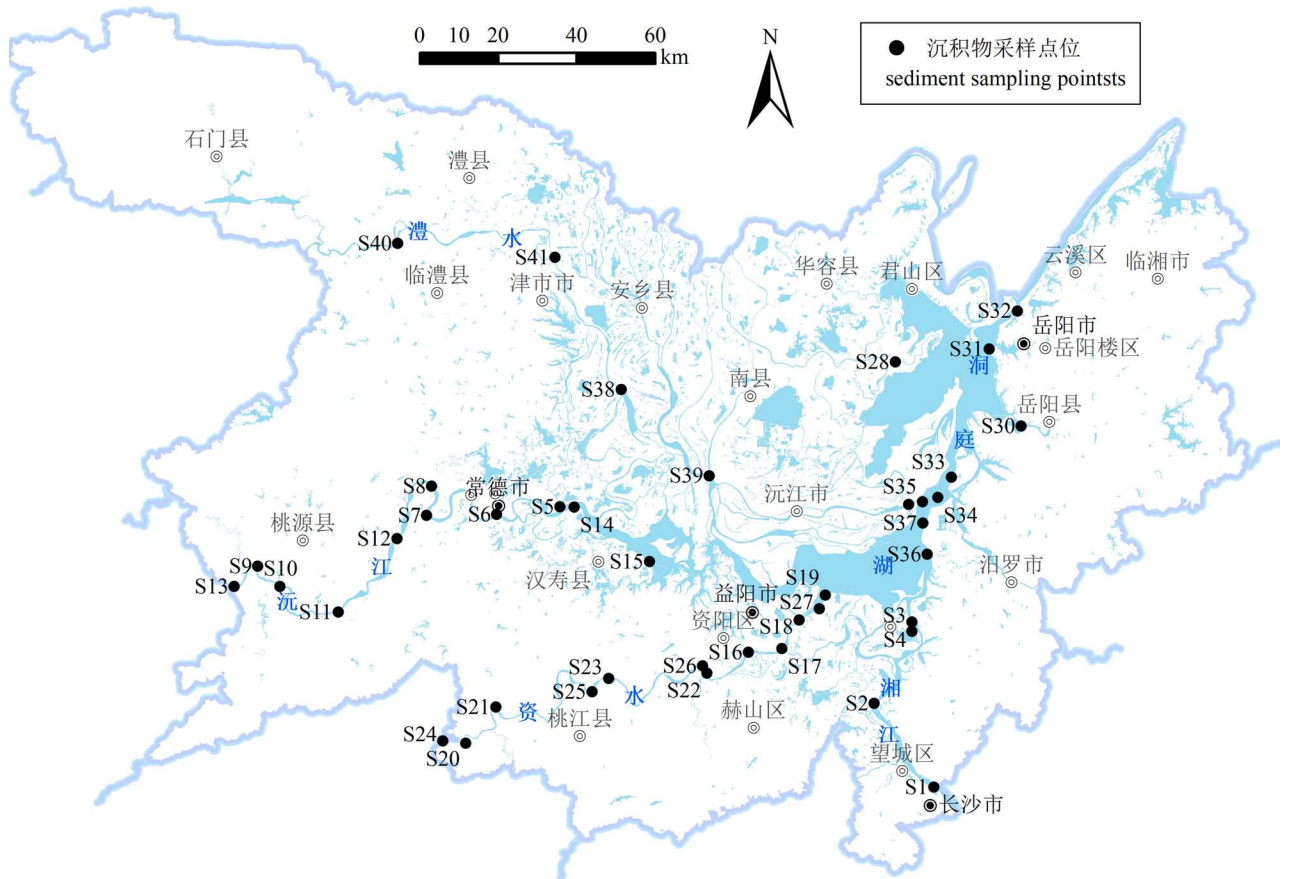


图1 洞庭湖区沉积物采样点位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sediment sampling points in the Dongting Lake District

值,且重金属高值区域主要集中在靠近工矿企业和人为活动较为频繁的地方,远离这些区域的地方湖泊底泥基本上不受重金属污染的影响,水体干净(郭晶等,2016)。但大多研究停留在风险评估、现状调查或定性分析来源的角度(杨阳等,2020;夏建东等,2020),缺乏多种影响因子共线性问题的探究和基于空间异质性的可视化表达,不利于湖区重金属的防治管控和污染治理。因此,本文通过探究河流重金属污染分布特征,结合地理因子和气候因子,探索一种更全面、更直观的展示方式,阐述洞庭湖及其支流底泥重金属污染分布特征及驱动因素,试图为职能部门精准施策提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

洞庭湖位于湖南省与湖北省之间,其南有湘江、资江、沅江、澧水“四水”汇入。其中,湘江位于湖南省东部,为湖南人民的“母亲河”,是湖南省内最大

的河流,自南向北流,在洞庭湖区该流域自长沙流经岳阳汇入洞庭湖。资水位于湖南省中部,由西南以雪峰山脉和沅江流域分界,东面与衡山山脉与湘水流域相接,南面与五岭山脉和广西桂水流域相接,自西南往东北在洞庭湖区经安化、桃江、益阳等县市,流入洞庭湖。沅江又称沅水,位于湖南省西部,是湖南省第二大河,在洞庭湖区自西南向东北流经沅陵县、桃源县、常德市区、汉寿县等县市,注入洞庭湖。澧水位于湖南省西北部,发源于湘鄂交界的山区,自西向东经桑植县、张家界市区、慈利县、石门县、澧县等县市,在津市流入洞庭湖,北有松滋口、虎渡口、藕池口连接长江。

每年7~8月为丰水期,湖区容纳四方来水,吸纳长江过剩水量,11月~次年4月为枯水期,湖水显著补给长江,维持长江航道的水位,确保正常通航。洞庭湖地区为亚热带季风性气候,四季分明、气候宜人、降雨充足、日照和无霜期长,热辐射量较低,平均气温在16.4~17℃间,年平均降雨量约1100~1400

mm。洞庭湖因其在调蓄径流、净化环境、维持生态平衡方面具有重要作用,被称为“长江之肾”(李健等,1986;李跃龙,2013)。保护好洞庭湖生态环境不仅对区域经济发展和人类健康具有现实的促进作用,更为长江经济带绿色、循环高效发展提供强有力的支撑。

1.2 数据来源

1.2.1 样品采集

于2021年8~10月在洞庭湖的相关水域采集表层底泥(水体底部0~15 cm),采样时应在水域中间位置采集表层沉积物样品,采用专门研制的采样工具(抓斗式采泥器),取样深度可达20 cm。3个点各采集一次均匀混合成一个样品,用塑料勺取适量样品装入样品袋中,扎紧袋口,进行密封保存,本次共采集41件沉积物样品(图1)。其中,湘江流域4个点,澧水4个点,沅江11个点,资水12个点,洞庭湖内部流域10个点。

1.2.2 数据获取

根据本文实际需求收集:数字高程数据(digital elevation model, DEM 30 m)、归一化植被指数(normalized difference vegetation Index, NDVI)、年平均温度、年平均降雨量、土壤类型、土地利用和距公路、铁路、乡镇距离等11种影响因子。其中,数字高程数据(DEM 30 m)下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),气温、降雨、中国年度植被指数(NDVI)数据下载于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),其中,气温和降雨均为2020年度数据,中国植被指数为2018年度数据。底图等矢量数据来源于全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>),其余数据来源于(<https://www.openstreetmap.org/>)。在Arcgis 10.8对数据进行相应预处理及成图。

1.3 样品分析测试

1.3.1 样品处理与分析

将采集回来的沉积物样品悬挂在自然通风条件下风干,通过充分研磨后去掉多余杂质,过254 mm尼龙筛,采用缩分法提取分析化验样品,根据测试样品种类和分析项目特点,选用不同的处理方法(酸水解),利用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定Cr、Cu、Mn、Ni、Zn;电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定Pb、Cd。本文所有沉积物样品重金属分析均由湖南省地质实验测试中心(具备CNAS测试资质)测得。

1.3.2 化验分析质量管理与控制

根据相关规范中土壤元素全量分析方法准确度、精密度控制的有关要求,选用12个国家一级标准物质(GBW07301a、GBW07317、GBW07318、GBW07403、GBW07404、GBW07408、GBW07423、GBW07424、GBW07425、GBW07426、GBW07427、GBW07429),对每一个标准物质进行12次平行分析,并分别计算每个标准物质平均值与标准值之间的对数偏差($\overline{\Delta \lg C}$)和相对标准偏差(RSD),结果均满足《规范》要求(分析方法准确度、精密度要求见表1)。相关规范包含《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130-2006)、《多目标区域地球化学调查规范》(DZ/T0258-2014)、《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》(DD2005-03)等。

1.4 表层沉积物生态危害风险评价

1.4.1 地积累指数法

地积累指数(index of geoaccumulation, Igeo)通常称为Muller指数,是由德国沉积学家Muller于20世纪60年代晚期提出来的用于研究沉积物及其它物质中重金属污染程度的定量指标。与其他方法相比,该方法充分考虑外在条件的影响以及环境本底

表1 土壤全量分析方法准确度和精密度要求

Table 1 Accuracy and precision requirements of full soil analysis methods

含量范围	准确度	精密度
	$\overline{\Delta \lg C}(\text{GBW}) = \lg \bar{C}_i - \lg C_s $	$RSD(\text{GBW}) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_s)^2}{n-1}}}{C_s} \times 100\%$
检出限3倍以内	≤ 0.1	$\leq 17\%$
检出限3倍以上	≤ 0.05	$\leq 10\%$
>1%	≤ 0.04	$\leq 8\%$

注: \bar{C}_i 为每个GBW标准物质12次实测值的平均值; C_s 为GBW标准物质的标准值; n 为每个GBW标准物质测量次数; C_i 为每个GBW标准物质单次实测值。

表 2 I_{geo} 污染程度分级Table 2 The I_{geo} contamination level classification

范围	$I_{geo} \leq 0$	$0 < I_{geo} \leq 1$	$1 < I_{geo} \leq 2$	$2 < I_{geo} \leq 3$	$3 < I_{geo} \leq 4$	$4 < I_{geo} \leq 5$	$I_{geo} > 5$
污染程度	无污染	轻度污染	偏中度污染	中度污染	偏重污染	重污染	严重污染
污染级别	0	1	2	3	4	5	6

条件。地积指累指数法的表达式为 (1):

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{KB_n} \right) \quad (1)$$

式中, C_n 为 n 元素在表层沉积物中的实测含量; K 为考虑各地区岩石差异可能会引起背景值的变化而取的系数(本文取值 1.5), B_n 为该元素洞庭湖水系沉积物的背景值(李健等, 1986)。各元素的污染程度分级见表 2。

1.4.2 地理探测器

地理探测器是利用空间分层异质性, 被广泛用于进行驱动力分析和因子分析。包含因子探测器、交互探测器等 4 个部分, 其中因子探测器可以探究影响因子对因变量的空间分异性, 可表示为探测因子 X 多大程度上解释属性 Y 的空间分异, 用 q 值来表示大小, 表达式为 (2) (朱雪凝等, 2021); 交互探测器可以探测两两因子之间的相互作用。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: q 为驱动因子解释力, L 是驱动因子的类型总数, N_h 是驱动因子中数据类型为 h 的样本数, N 整体的样本数。

本文利用模型中的因子探测器与交互探测器对研究区表层沉积物重金属污染程度影响驱动因子进行检测分析, 以此探究表层底泥重金属污染的主导因子, 交互类型如表 3 所示。

2 结果与讨论

2.1 洞庭湖沉积物重金属

2.1.1 沉积物重金属描述分析

洞庭湖水系沉积物背景值参考“洞庭湖水系水体环境背景值调查研究”(李健, 1986), 土壤筛选值、管控值来自《土壤环境质量农用地土壤污染管控标准试行》(GB15618-2018), 选取 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 时的各项指标(岳阳市耕地区土地质量地球化学调查项目沉积物 pH 均值为 5.98)。

由表 4 可知, 洞庭湖沉积物 7 种重金属含量(共采集底泥样品 41 件, $\text{pH} = 5.64$) 与洞庭湖水系底泥背景值相比, Cd 、 Cr 、 Cu 、 Mn 、 Ni 、 Pb 、 Zn 均值分别是背景值的 5.06、1.69、1.74、2.02、1.54、1.58、1.67 倍。洞庭湖及其支流沉积物中各重金属元素呈普遍上升趋势。其中, 重金属 Cd 元素为背景值的 5 倍、 Mn 为背景值的 2 倍, 污染较为突出, 其余元素均在 1.5 倍左右。污染最严重的为 Cd 元素, 其平均值超过土壤筛选值, 尚未超过土壤管控值, 同时存在个别点位超过土壤管控值, 可能已经对其周边环境造成影响, 需要重点关注。有关学者对长江流域 3 大主要湖泊沉积物重金属 Meta 分析发现, Cd 在 3 大湖泊中最主要的污染元素, 且洞庭湖沉积物中大部分点位 Cd 处于偏重度污染水平, 主要污染源为工业污染(李贺等, 2023)。变异系数可以体现不同元素在地理空间上变异程度(Zhang Yin hao et al., 2020), 洞庭湖区沉积物中 Cd 、 Mn 、 Pb 的变异系数分别是, 0.82、0.42、0.49, 其中, Cd 元素变异系数大于 0.5, 空间分布差异大, 受人为活动影响较大, 其余元素属于中等变异。

2.2.2 沉积物重金属含量空间分布特征

采用地积累指数法(I_{geo})评价洞庭湖及其支流沉积物重金属的污染累积程度。结果表明(表 4), Cd 元素的均值在 1~2 之间, 属于中等污染, 研究区沉积物重金属 Cr 、 Cu 、 Mn 、 Ni 、 Pb 、 Zn 元素的 I_{geo} 均小于 1, 均属于轻度污染, 洞庭湖及其支流沉积物重金属主要污染物 Cd , 此评价结果与(祝云龙, 2008; 李芬芳, 2017)的结果基本一致。由(图 3, 表 5)洞庭湖区各点位沉积物地累积指数(I_{geo})空间分布可

表 3 交互作用类型

Table 3 Type of interactions

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}[q(X1), q(X2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X1), q(X2)] < q(X1 \cap X2) < \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}[q(X1), q(X2)]$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	相互独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

注: q —自变量, 表示对因变量的解释程度; X_i —自变量, 表中以评价因子 X_1 、 X_2 为例。

表 4 洞庭湖沉积物重金属含量 ($\mu\text{g/g}$) 特征Table 4 Characteristics of heavy metal content ($\mu\text{g/g}$) in the sediment of the Dongting Lake

种类	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
总数	41	41	41	41	41	41	41
均值	1.67	74.14	35.24	910.76	32.57	36.73	139.11
标准差	1.27	15.28	11.8	282.49	8.93	16.09	55.82
变异系数	0.76	0.21	0.33	0.31	0.27	0.44	0.4
最小	0.15	32	13.3	474	14.7	-	-
最大	4.64	98.8	69.7	1580	54.1	81.8	279
背景值(底泥)	0.33	44	20.2	450	21.2	23.3	83.3
土壤筛选值	0.3	150	50	-	70	500	200
土壤管控值	2	850	-	-	-	500	-

注:该背景值来自(李健,1986),土壤筛选值来自《土壤环境质量农用地土壤污染管控标准试行》(GB15618-2018),选取 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 时的筛选值(岳阳市耕地区土地质量地球化学调查项目沉积物 pH 均值为 5.98)。

表 5 洞庭湖沉积物各重金属污染水平特征

Table 5 Characteristics of various heavy metal pollution levels in the Dongting Lake sediment

种类	I_{geo}							污染水平
	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
本文研究区	1.24	0.13	0.13	0.36	-0.03	0.04	0.11	偏中度污染
污染分级	2	1	1	1	0	1	1	

知,洞庭湖及其支流沉积物重金属复合污染分布呈现区域性差异特征,在洞庭湖的资江流域及湘江入洞庭湖口和东洞庭湖内部水域,沉积物点位大多呈现强—极严重污染水平。在湘江和资水流域底泥中重金属 Cd 累积率较高,达到 1.97 和 1.83,在沅江和洞庭湖内部累积率为 0.97 和 1.08,而在澧水流域累积率为负值,各流域重金属累积存在明显差异性。许友泽等研究湘江底泥重金属污染发现,湘江底泥重金属 Cd、Mn 超标率 100%,污染最严重,且污染来源主要与支流沿岸工矿企业的废水排放有关(许友泽等,2016)。湘江流域底泥重金属存在从上游向下游输送现象,且持续向洞庭湖内部输入。杨帆等对湖南省主要水系沉积物重金属污染进行研究时发现,各水系潜在生态风险大小顺序为洞庭湖>资江>湘江>澧水>沅江,主要为 Cd 元素,中度污染,其余元素为轻微污染(杨帆等,2022)。沅江流域沉积物底泥呈现偏中等程度污染。唐振平对东洞庭湖表层沉积物重金属赋存形态进行研究时发现,Cu、Pb、Zn 和 Cr 以残渣态为主,Cd 以弱酸可提取态为主,有效态占比较高,毒性较大,其他元素稳定性较强,毒性较低,对湖区环境影响较小(唐振平,2020)。

2.2.3 不同流域沉积物重金属含量空间分布特征

通过(表 6)来看,洞庭湖及其支流沉积物重金属污染较为突出的为 Cd 元素,在湘江、沅江、资水、

洞庭湖内部、澧水流域中底泥中 Cd 的值分别超洞庭湖水系底泥背景值 7.6、4、5.51、4.5、1.36 倍。其中,湘江流域 Cd 元素均值超过土壤管控值,已对周边环境已经造成危害,需要加强监控。湘江、资水流域 Cd 累积率达 1.98、1.98,具有较强的累积率,且各流域 Cu、Ni、Zn 等元素也均超过洞庭湖环境背景值。整体上来看,洞庭湖及其支流底泥中重金属复合污染有逐渐加重趋势,除 Cd 外,其它均未超过土壤管控制,污染风险总体可控。通过(表 7)可知,湘江流域、洞庭湖内部流域、资水流域底泥重金属污染水平为偏中度污染水平,沅江流域、澧水流域污染水平为轻度污染水平。

相关研究发现,洞庭湖区“四水”流域中,湘江流域以发育有色金属矿床为主,有一大批大型、超大型多金属矿床(童霆 2005;彭勃 2011;方小红,2018);资江流域则广泛分布铁锰等黑色金属和有色金属矿床,单个矿床成矿元素相对单一,如锡矿山锑矿等(曾祥英,2012);研究发现,河流沉积物的带入是洞庭湖沉积物重金属的最主要输入途径(Mao Longjiang et al., 2013;李明琦等,2023)。这些金属矿床的开采可能导致湘江、资江流域底泥重金属污染。同时,洞庭湖流域为我国主要粮食生产区,周边城市人口众多,沿江工农业较为发达,结合近年来工业污水乱排滥放的新闻频有发生,洞庭湖流域及其支流底泥重金属污染受其直接影响较大。同时,

表 6 洞庭湖不同流域沉积物重金属含量 ($\mu\text{g/g}$) 分布特征Table 6 Distribution characteristics of heavy metals content ($\mu\text{g/g}$) in different sediments of the Dongting Lake

不同流域 ($n=41$)		Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
湘江 ($n=4$)	均值	2.37	78.48	38.78	1121.5	33.78	65.68	195.25
	最大	4.64	98.6	57.5	1578	50.1	81.8	279
	最小	0.78	56.5	28.5	857	22.8	55.7	144
	累积率	1.98	0.21	0.3	0.69	0.01	0.89	0.59
沅江 ($n=11$)	均值	1.25	64.17	26.39	879.27	27.33	27.49	127.47
	最大	2.56	78	32.5	1322	37.4	34.1	222
	最小	0.15	56	19.4	504	19.4	20.1	79.7
	累积率	0.98	-0.05	-0.22	0.33	-0.25	-0.36	-0.04
资水 ($n=12$)	均值	1.84	53.99	25.39	782.85	23.82	35.67	131
	最大	4.39	92.4	69.7	1413	54.1	40.1	238
	最小	0.57	64.3	25.6	596	27.9	28.6	98.2
	累积率	1.98	0.29	0.44	0.33	0.19	-0.04	0.28
洞庭湖内部 ($n=10$)	均值	1.49	76.65	37.68	987.9	34.28	53.52	163.78
	最大	4	98.8	58.9	1580	44.6	116	331
	最小	0.37	32	13.3	480	14.7	24.8	59.8
	累积率	1.09	0.15	0.23	0.45	0.04	0.46	0.23
澧水 ($n=4$)	均值	0.45	69.18	28.18	706.25	28.08	27.53	85.37
	最大	0.71	79.9	36.4	834	35	33.5	112
	最小	0.29	43.7	15.7	474	14.7	18.8	49.9
	累积率	-0.22	0.03	-0.18	0.03	-0.26	-0.38	-0.61
背景值(底泥)		0.33	44	20.2	450	21.2	23.3	83.3
土壤筛选值(土壤)		0.3	150	50	-	70	500	200
土壤管控值(土壤)		2	850	-	-	-	500	-

表 7 洞庭湖及其支流沉积物各重金属污染水平特征

Table 7 Characteristics of various heavy metal pollution levels in the sediments of the Dongting Lake and its tributaries

采样区域		I_{geo}							污染水平
		Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	
湘江	数值	1.98	0.21	0.3	0.69	0.01	0.89	0.59	偏中度污染
	等级	2	1	1	1	1	1	1	
沅江	数值	0.98	-0.05	-0.22	0.33	-0.25	-0.36	-0.04	轻度污染
	等级	1	0	0	1	0	0	0	
资水	数值	1.98	0.29	0.44	0.33	0.19	-0.04	0.28	偏中度污染
	等级	2	1	1	1	1	0	1	
洞庭湖内部	数值	1.09	0.15	0.23	0.45	0.04	0.46	0.23	偏中度污染
	等级	2	1	1	1	1	1	1	
澧水	数值	-0.22	0.03	-0.18	0.03	-0.26	-0.38	-0.61	轻度污染
	等级	0	1	0	1	0	0	0	

人为不当生产经营,如滥用化肥、农药、生活污水直排等也对周边流域生态环境造成不利影响。根据图 2 洞庭湖及其支流沉积物地积累指数分布图来看,重金属污染程度在湘江、资水存在从上游到下游逐渐减弱的趋势,在洞庭湖内部水域逐渐累积,污染程度变高。

2.3 沉积物重金属污染影响因子分析

2.3.1 影响因子分类

河流底泥重金属污染影响因素呈现多样化,除

了与人为活动密切相关外,也与区域气温、降雨和土壤类型等地理影响因素有关(林静,2016)。李雨等利用地理探测器模型,定量描述了自然环境因子对农田土壤重金属污染的影响(李雨,2017),但研究仅停留在各影响因子的定量表达上。通过对洞庭湖区沉积物重金属地积累指数(I_{tot})的影响因素进行分析,结合自然因素和人为活动等影响因素,本文系统收集 DEM、NDVI、温度、降雨、土壤类型、土地利用和距公路、铁路、乡镇距离数据,利用 ArcGIS 10.8

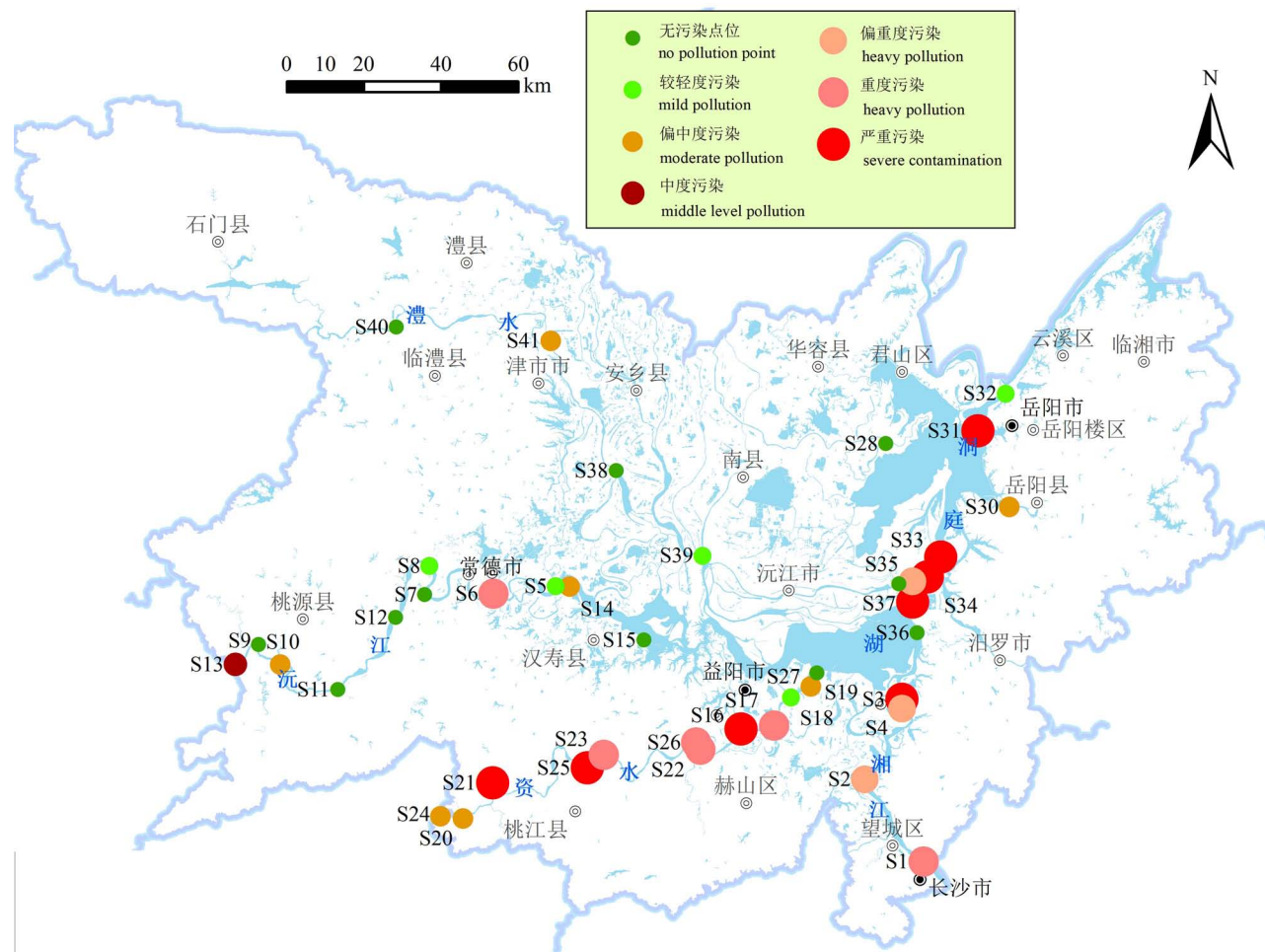


图2 洞庭湖及其支流沉积物地积累指数分布图

Fig. 2 Cumulative ential distribution of sediment accumulation in the Dongting Lake

进行数据处理,利用采样实际点位提取对应栅格数据,在 Arcgis 10.8 中采用自然间断法分类,NDVI、DEM、温度、降雨、据公路、据铁路、据乡镇均分为 6 类,土壤类型按照粉砂、沙土、黏土的占比分为 4 类,土地利用按照实际情况进行分类(图 3)。

2.3.2 洞庭湖及其支流底泥重金属污染空间分布的主导因素分析

地理探测器中的因子探测可以反应各影响因子对沉积物重金属地积累指数(I_{tot})的解释力,用 q 值大小表示。各影响因子的 q 值降序为:降雨(0.242)>距乡镇距离(0.24)>气温(0.19)>据道路距离(0.18)>土地利用类型(0.17)>据铁路距离(0.16)>NDVI(0.15)>DEM(0.12)>黏粒(0.04)>沙粒(0.02)>粉粒(0.008)。其中,降雨、距乡镇距离、气温、DEM、据道路距离、土地利用类型、据铁路距离、NDVI、DEM 对洞庭湖区沉积物重金属地积累

指数(I_{tot})具有较强的解释力,表明洞庭湖区沉积物重金属污染受到地理条件等自然因子的影响,同时也与人为活动密切相关。降水可以对沉积物产生冲刷作用,从而影响沉积物的污染负荷(艾东升等,2011)。此外降水量的多少直接影响湖泊水体中污染物的浓度,进而改变污染物的沉降,影响其在沉积物中的空间分布(王金南等,2014)。湖水重金属通常通过地表径流带进河流、湖中,其重金属影响因素与污染源、地形地貌、人类活动等密切相关。

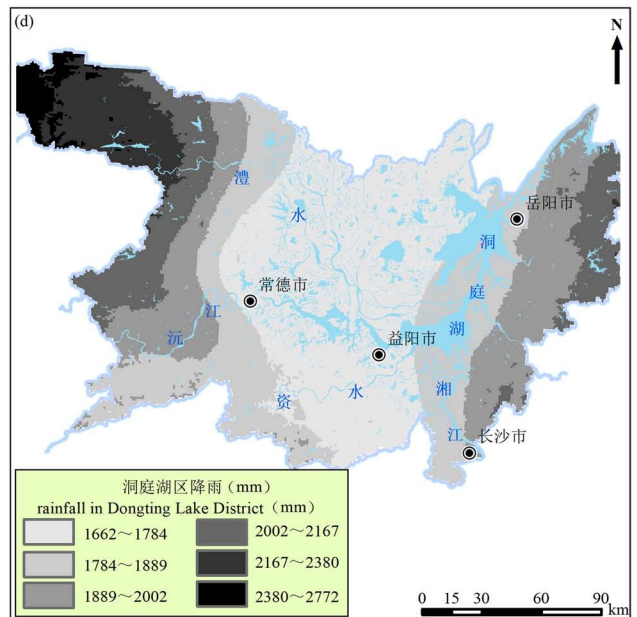
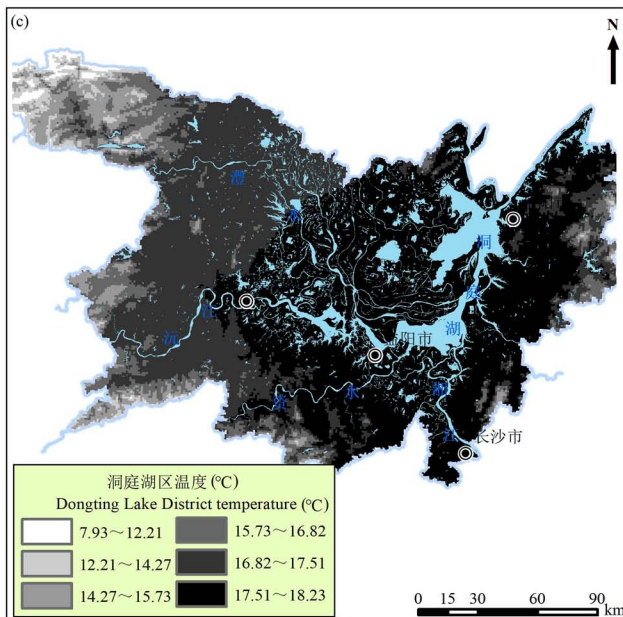
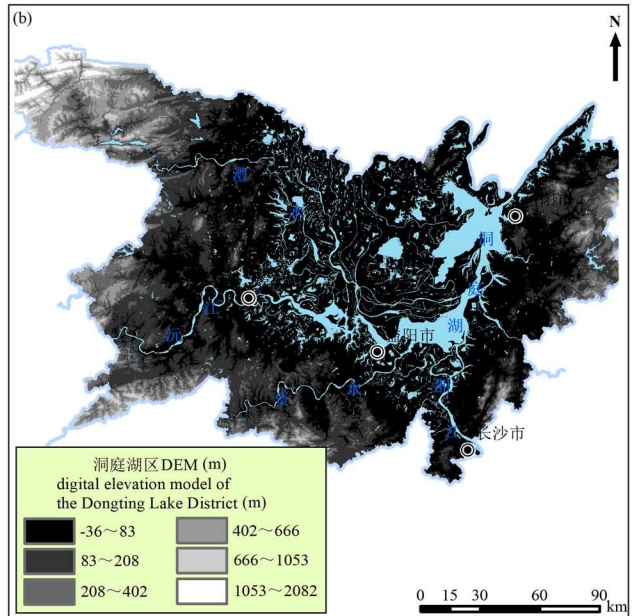
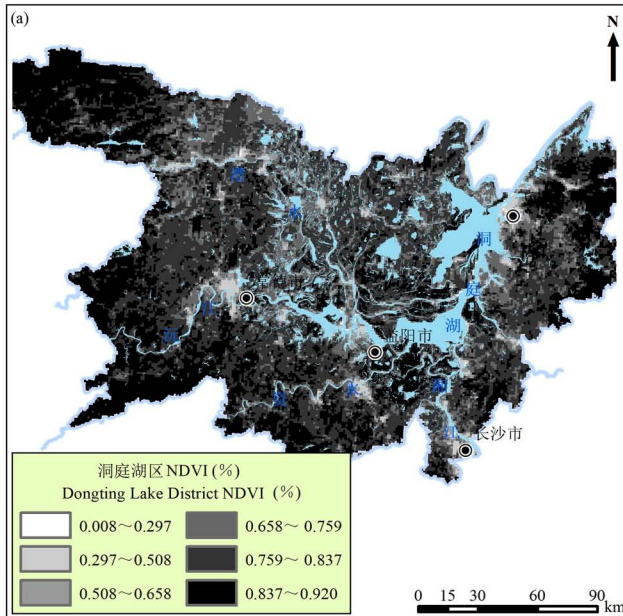
2.3.3 重金属污染影响因子分析

沉积物结构成分复杂,重金属的空间污染分布往往是由地理条件等自然因子和人为活动共同作用的结果(Mao Longjiang et al.). 因此,利用交互作用探测器探测多种因子对沉积物重金属空间分布的交互影响因素,有利于准确辨别洞庭湖区沉积物中重金属分布的深层驱动机制,以期为当地今后污染防

止与治理提供理论参考。图4是影响因子对洞庭湖研究区沉积物 I_{tot} 的交互作用解释力,其中 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 、 x_9 、 x_{10} 、 x_{11} 分别代表洞庭湖区土地利用类型、DEM、粉粒、NDVI、年平均降雨量、沙粒、黏粒、年平均气温、距道路距离、距乡镇数据、距铁路数据(上标 b 表示交互探测双因子增强效果,未标表示表示非线性增强效果)。结果表明,除年平均降雨量和距道路距离是双因子增强的效果外,各影响因子的交互作用均显示独立非线性增强的效果,交互作用大于单独因素的影响,年平均降雨量和距道路距离对洞庭湖区沉积物 I_{tot} 空间分布共同产生促进作用。有关学者研究了交通干线两侧土壤,结果表面两侧土壤均已遭受 Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 等重

金属污染,超标率高达 20.3%(中华人民共和国生态环境部,2014)。

其中,NDVI 与 DEM、NDVI 与距道路距离、NDVI 距铁路距离,土地利用与年平均气温、土地利用与距铁路距离解释力较强。结合研究区自然地理状况,洞庭湖区东西跨度大、南北距离长,周边公路铁路路网多,还有大量乡镇和城镇,且周围支流众多,重金属元素通过降雨和大气干湿沉降到地面,进入地表环境系统(艾东升,2011;李雨,2017),通过地表径流最终汇入洞庭湖区,且最终在河流底泥中富集。结合交互探测结果,表明降雨、气温等地理环境因子、气温因子都较强的影响沉积物重金属的空间分布,由于受限于项目经费和任务实际,并未设置气



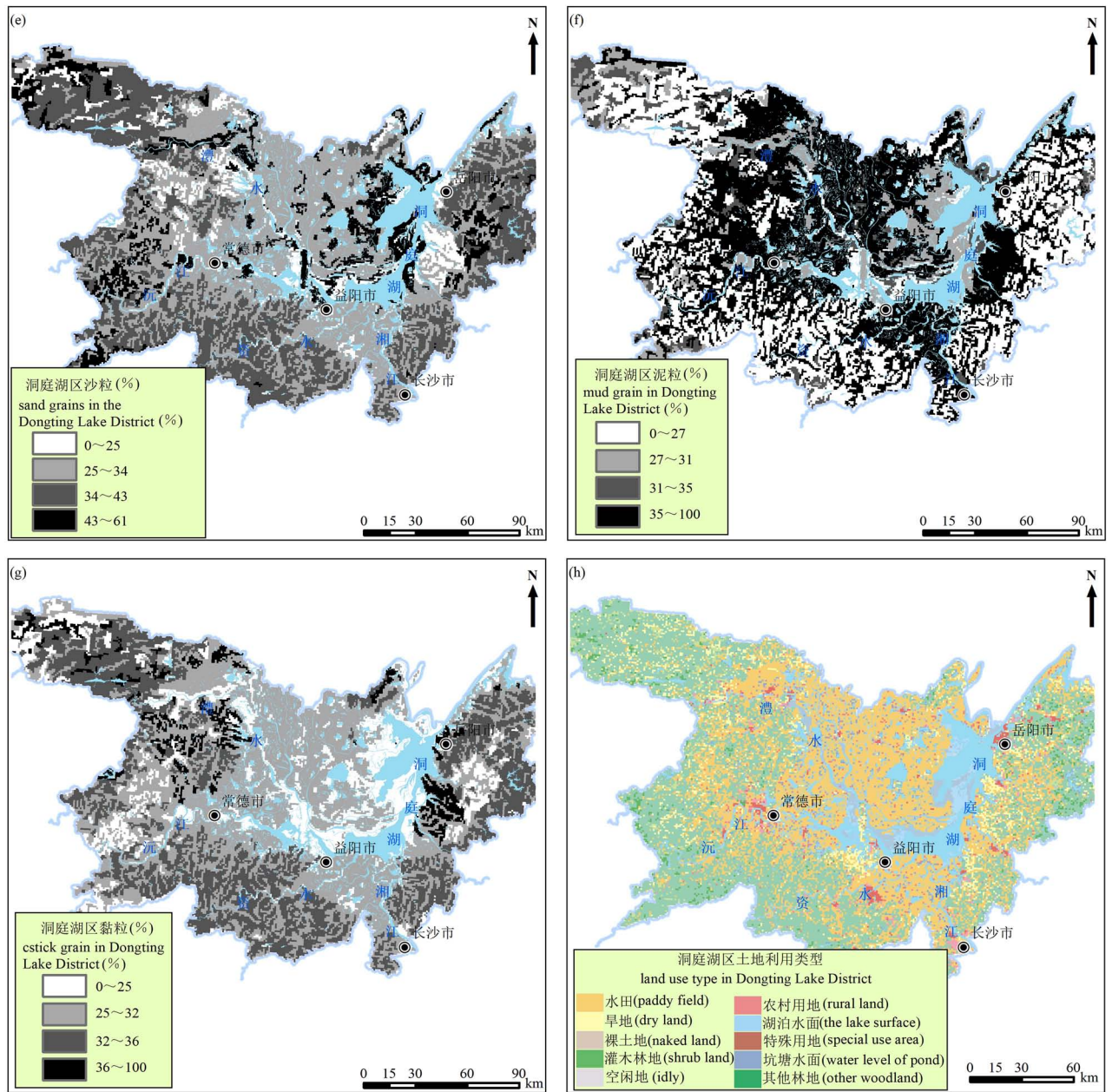


图3 洞庭湖区影响因子分类

Fig. 3 Impact factor classification in the Dongting Lake District

(a) 洞庭湖区归一化植被指数(*NDVI*); (b) 洞庭湖区数字高程模型(*DEM*); (c) 洞庭湖区温度; (d) 洞庭湖区降雨;
(e) 洞庭湖区沙粒; (f) 洞庭湖区泥粒; (g) 洞庭湖区黏粒; (h) 洞庭湖区土地利用类型

(a) Normalized vegetation index *NDVI* in the Dongting Lake District; (b) the Dongting Lake district digital elevation model; (c) temperature in the Dongting Lake District; (d) rainfall in the Dongting Lake District; (e) the Dongting Lake area sand grain; (f) mud grain in the Dongting Lake District; (g) cstick grain in the Dongting Lake District; (h) land use type in the Dongting Lake District

温、降雨自动监测采集装置,采用的是年平均降雨、年平均气温因子,如果区分季节性温度、降雨量的影响可能会更好的揭示沉积物重金属空间变异的驱动因素,产生更有趣的现象。

2.4 重金属污染主导因子回归分析

为进一步对沉积物重金属污染主导因子的驱动力分析探讨,本文利用最小二乘法 *ols* 模型做回归,根据各影响因子的回归报告结果逐步剔除具有共线性影响的因子,最终筛选出 *DEM*、*NDVI*、距道路距

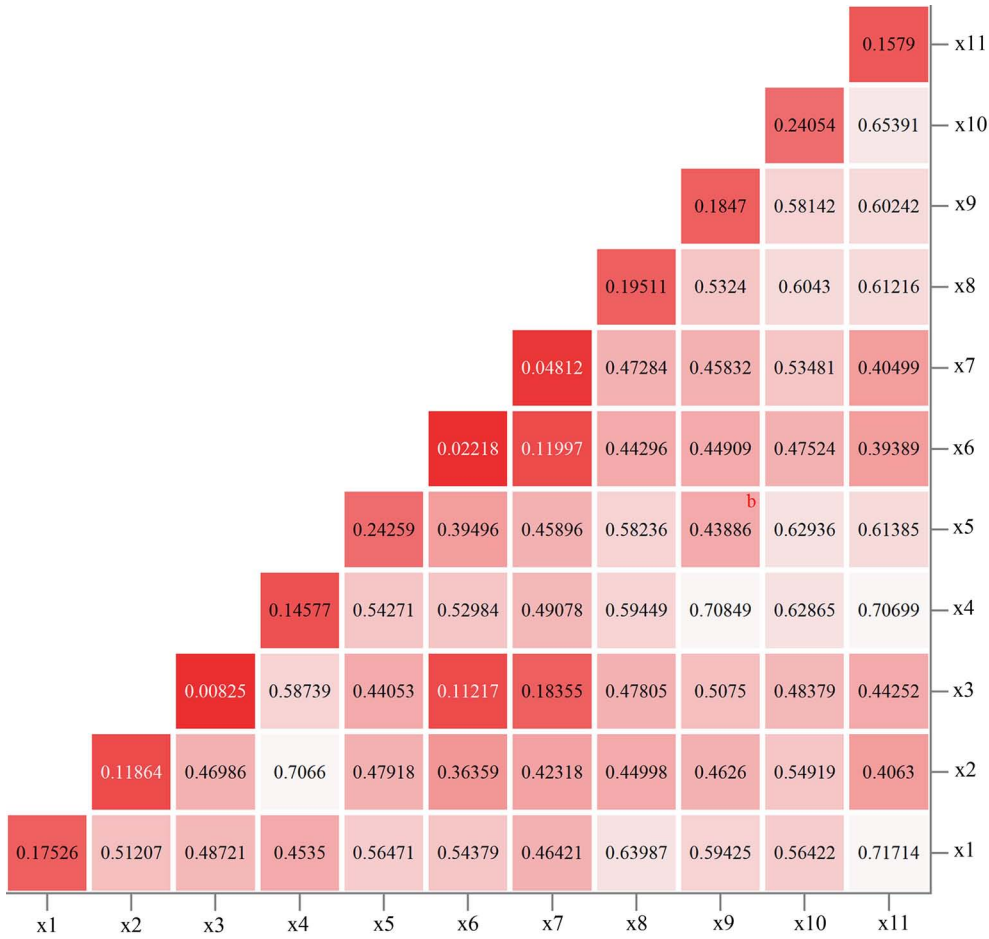


图4 不同影响因子对 *Itot* 的交互作用解释力

Fig. 4 Interaction explanatory power of different influence factors on *Itot*

湖内部,周边 *NDVI* 逐渐变小,回归系数也逐渐变小。沅江流域、资江上游周边主要以丘陵地带林业为主,森林植被较为发达,洞庭湖内部周边主要以水域为主, *NDVI* 对重金属分布驱动力较弱。

据道路距离的回归系数在洞庭湖区变化不大(回归系数为-1.0208~0.270729),据道路距离与 *Itot* 在洞庭湖全区呈现负相关,高值主要是沿着资江、湘江流域,为负相关,实地调查发现,两条流域主要以穿越湖南主要城市中心为主,流域周边建设有大量公路和跨江大桥,车辆废气排放和损耗可能起到一定驱动作用。可能受其地貌类型条件决定,在平原区公路、道路密集,车流量大,而丘陵

地带生态环境好植被吸附效果好。

据铁路距离的回归系数变化不大(回归系数为-1.42703~0.221372),据铁路距离与 *Itot* 在洞庭湖全区呈现负相关,其在沅江流域的上游、资江流域的上游、湖区岳阳段的据铁路回归系数较大,主要是因为铁路建设存在明显的空间布局,其中岳阳段有京广线,常德段有黔常线、石长线的影响。由于洞庭湖区的重金属污染的成因复杂,各种影响因子相互交织,因此在进行地理加权回归的分析过程中只能结合现有调节进行探讨,以为洞庭湖区生态环境保护,土壤重金属污染防治提供理论指导和参考。

3 结论

(1) 洞庭湖沉积物 7 种重金属含量(共采集底泥样品 41 件)($pH = 5.64$)与洞庭湖水系底泥背景值相比,Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 分别是洞庭湖区 5.06、1.69、1.74、2.02、1.54、1.58、1.67 倍,呈普遍

离、距铁路距离等因子,并采用“地理加权回归”, Geographically weighted regression, GWR 评估各因子之间的关系,结果如下。

DEM 回归系数为-1.87498~0.284044, *DEM* 与 *Itot* 在洞庭湖全区以负相关为主,回归系数的高值区域位于湖区沅江上游、资水上游,该地区高程为 600~700 m,且随着水流汇入湖区,高程逐渐降低, *DEM* 回归系数逐渐变小。由于湖区位于传统农耕区,地势较为平坦、人口众多,人为活动的影响较为明显,这可能是造成湖区重金属污染聚集的原因。

NDVI 回归系数变化较为明显(回归系数为-0.811832~1.1738), *NDVI* 与 *Itot* 在洞庭湖全区有着明显的地域差异性,表现为在洞庭湖区的沅江流域和资水的上游流域、沅江上游, *NDVI* 与 *Itot* 呈现正相关,在洞庭湖区主体水域内部和湘江流域呈现负相关。高值正相关出现在沅江流域、资江流域上游,该地区点位周边 *NDVI* 较高,随着流域汇入洞庭

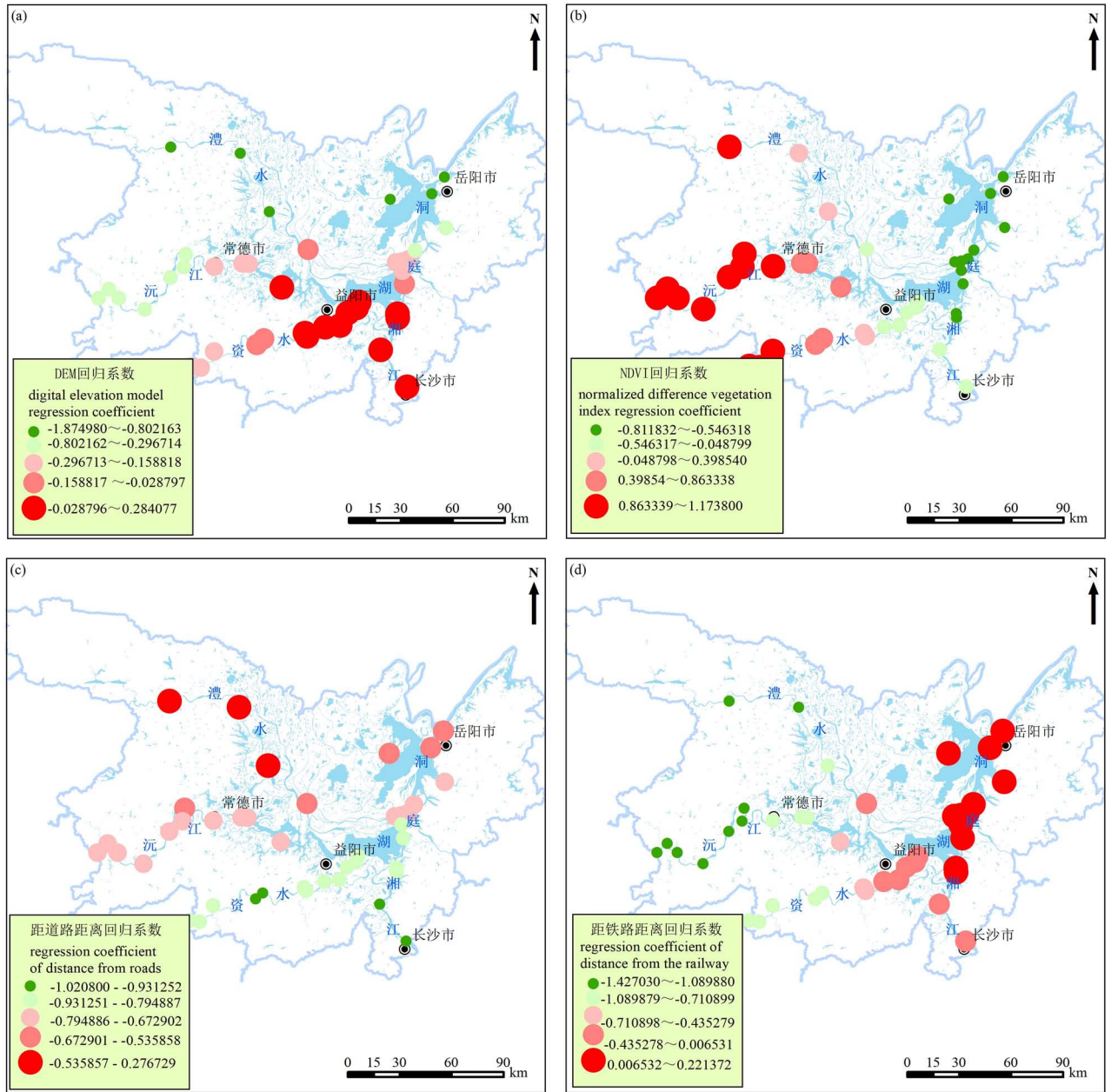


图5 洞庭湖沉积物重金属污染主导因子回归系数

Fig. 5 Regression coefficients of dominant factors of heavy metal pollution in sediments of the Dongting Lake

(a) DEM 回归系数; (b) NDVI 回归系数; (c) 距道路距离回归系数; (d) 距铁路距离回归系数

(a) DEM regression coefficient; (b) NDVI regression coefficient; (c) regression coefficient of distance from roads;

(d) regression coefficient of distance from the railway

上升趋势。其中,重金属 Cd 元素为背景值的 5 倍、Mn 为背景值的 2 倍,在洞庭湖流域增长较快,需要加强监测。

(2) 通过地积累指数(I_{geo})计算,研究区 Cd 元素的均值在 1~2 之间,属于中等污染,研究区沉积物重金属 Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 元素的 I_{geo} 均小于 1,均属于轻度污染,洞庭湖及其支流沉积物重金属

主要污染物 Cd。整体上来看,洞庭湖区各水系沉积物中重金属污染风险较高,整体呈现逐渐积累过程,且基本上处于轻度—偏中污染水平。在湘江和资水流域底泥中重金属 Cd 累积率较高,达到 1.97 和 1.83,在沅江和洞庭湖内部累积率为 0.97 和 1.08,而在澧水流域累积率为负值,各流域重金属累积存在明显差异性。

(3) 影响洞庭湖区域沉积物重金属 *Itot* 主要因子顺序为: 降雨 > 距乡镇距离 > 气温 > 距道路距离 > *DEM*, 年平均降雨量和距道路距离是双因子增强的效果外, 各影响因子的交互作用均显示独立非线性增强的效果, 年平均降雨量和距道路距离对洞庭湖区沉积物 *Itot* 空间分布共同产生促进作用。 *DEM* 与 *Itot* 在洞庭湖全区以负相关为主, 回归系数的高值区域位于湖区沅江上游、资水上游, 且随着水流汇入湖区, 高程逐渐降低, *DEM* 回归系数逐渐变小。 *NDVI* 与 *Itot* 在洞庭湖全区有着明显的地域差异性, 表现为在洞庭湖区的沅江流域和资水的上游流域、沅江上游, *NDVI* 与 *Itot* 呈现正相关, 在洞庭湖区主体水域内部和湘江流域呈现负相关。 据道路距离与 *Itot* 在洞庭湖全区呈现负相关, 高值主要是沿着资江、湘江流域。 据铁路距离与 *Itot* 在洞庭湖全区呈现负相关, 其在沅江流域的上游、资江流域的上游、湖区岳阳段的据铁路回归系数较大, 主要是因为铁路建设存在明显的空间布局, 各影响因子共同驱动洞庭湖及其支流表层沉积物重金属空间分布。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

艾东升. 2011 上海市大气降水化学组成特征及物源解析. 导师: 郑祥民. 上海: 华东师范大学硕士学位论文: 1~70.

方小红, 彭渤, 张坤, 杨梓璇, 肖瑶, 谢伟城, 颜川云, 谢依婷, 谭长银, 王大娟, 王欣. 2018. 沅江入湖河床沉积物重金属污染演化地球化学分析. 环境科学学报, 38(7): 2586~2598.

弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 简敏菲, 张振辉. 2006. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价. 环境科学, 27(4): 732~736.

郭晶, 李利强, 黄代中, 卢少勇, 黄艳芳, 王琦, 田琪. 2016. 洞庭湖表层水和底泥中重金属污染状况及其变化趋势. 环境科学研究, 29(1): 44~51.

李芬芳, 符哲, 李利强, 尹宇莹, 黄代中. 2017. 洞庭湖表层沉积物重金属污染状况评估. 环境化学, 36(11): 2462~2471.

李贺, 王书航, 车霏霏, 姜霞, 牛勇. 2023. 巢湖、洞庭湖、鄱阳湖沉积物重金属污染及来源的 Meta 分析. 中国环境科学, 43(2): 831~842.

李健, 曾北危, 姚岳云, 张立成, 丘昌强, 钱杏珍. 1986. 洞庭湖水系水体环境背景值调查研究. 环境科学, 7(4): 62~68+104.

李明琦, 万难难, 刘帅, 王启宇, 张森, 刘煜. 2024. 鄱阳湖表层沉积物中全氟化合物的空间分布及其影响因素的地理探测器分析. 环境科学学报, 44(2): 214~226.

李雨, 韩平, 任东, 罗娜, 王纪华. 2017. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析. 中国农业科学, 50(21): 4138~4148.

李跃龙. 2013. 洞庭湖志. 长沙: 湖南人民出版社: 211~266.

林静, 张健, 杨万勤, 简毅. 2016. 岷江下游五通桥段小型集水区大气降水中 pH 值对重金属含量的影响. 环境科学学报, 36(4): 1419~1427.

刘刚, 蒋晨韵, 李小龙, 王璨, 钱新. 2018. 巢湖沉积物重金属浓度

分布及风险指数. 环境科学与技术, 41(S1): 376~380.

刘莹, 肖琳. 2014. 太湖沉积物重金属污染生态风险的综合评价. 环境保护科学, 40(3): 46~50+96.

彭渤, 唐晓燕, 余昌训, 谭长银, 涂湘林, 刘茜, 杨克苏, 肖敏, 徐婧喆. 2011. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其 Pb 同位素地球化学示踪. 地质学报, 85(2): 282~299.

唐振平, 马如莉, 周霞飞, 赵文惠, 霍正, 陈亮. 2020. 东洞庭湖表层沉积物重金属赋存形态及风险评价. 南华大学学报(自然科学版), 34(4): 48~53.

童霆. 2005. 河口三角洲元素含量与矿产资源——以湘资沅澧为例. 第四纪研究, 25(3): 298~305.

王金南, 雷宇, 宁森. 2014. 实施《大气污染防治行动计划》: 向 PM_{2.5} 宣战. 环境保护, 42(6): 28~31.

夏建东, 龙锦云, 高亚萍, 陈悦, 孟晶, 周云桥, 陈书琴. 2020. 巢湖沉积物重金属污染生态风险评价及来源解析. 地球与环境, 48(2): 220~227.

许友泽, 刘锦军, 成应向, 戴友芝, 付广义. 2016. 湘江底泥重金属污染特征与生态风险评价. 环境化学, 35(1): 189~198.

杨帆, 袁隆湖, 黎一夫, 何丹丹, 刘旭冉, 王冬波. 2022. 湖南省主要水系底泥重金属污染特征及其生态风险评价. 生态学报, 42(5): 1934~1946.

杨阳, 李小龙, 杨碧莹, 杨金香, 胡友彪, 刘翔. 2020. 巢湖表层沉积物重金属污染特征研究. 安徽理工大学学报(自然科学版), 40(4): 46~54.

曾祥英, 王晨, 于志强, 秦延文, 张雷, 盛国英, 傅家谟. 2012. 湘江岳阳段沉积物重金属污染特征及其初步生态风险评估. 地球化学, 41(1): 63~69.

中华人民共和国生态环境部, 中华人民共和国国土资源部. 2014. 全国土壤污染状况调查公报: 1~5.

朱雪凝, 刘跃斌, 张逸冰, 梁轶群, 张远, 兰建林, 樊景森, 牛红亚. 2021. 沅阳河邯郸段地表水重金属污染特征研究. 能源环境保护, 35(6): 94~101.

祝云龙, 姜加虎, 黄群, 孙占东, 王红娟, 周云凯. 2008. 东洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中 Cd、Pb、Hg、As 的含量分布及相互关系. 农业环境科学学报, 27(4): 1377~1384.

Ai Dongsheng. 2011&. hemical composition characteristics and provenance analysis of atmospheric precipitation in Shanghai. Shanghai: East China Normal University Master Thesis.

Fang Xiaohong, Peng Bo, Zhang Kun, Yang Zixuan, Xiao Yao, Xie Weicheng, Yan Chuanyun, Xie Yiting, Tan Changyin, Wan Dajuan, Wang Xin. 2018&. Geochemical study on evolution of heavy-metal contamination developed in bed sediments from the Yuanjiang River inlet to Dongting Lake, China. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(7): 2586~2598.

Gong Xiaofeng, Chen Chunli, Zhou Wenbin, Jian Minfei, Zhang Zhenhui. 2006&. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang Lake. Environmental Science, 27(4): 732~736.

Guo Jing, Li Liqiang, Huang Daizhong, Lu Shaoyong, Huang Yanfang, Wang Qi, Tian Qi. 2016&. Assessment of heavy metal pollution in surface water and sediment of Dongting Lake. Research of Environmental Sciences, 29(1): 44~51.

Li Fenfang, Fu Zhe, Li Liqiang, Yin Yuying, Huang Daizhong. 2017&. Assessment on heavy metal pollution in the surface sediments of Dongting Lake. Environmental Chemistry, 36(11): 2462~2471.

Li He, Wang Shuhang, Che Feifei, Jiang Xia, Niu Yong. 2023&. Mate analysis of heavy metal pollution in sediments of Chaohu Lake, Dongting Lake and Poyang Lake. China Environmental Science,

- 43(2): 831~842.
- Li Jian, Zeng Beiwei, Yao Yueyun, Zhang Licheng, Qiu Changqiang, Qian Xingzhen. 1986&. Studies on environmental background levels in waters of Dongting Lake system. *Environmental Science*, 7(4): 62~68+104.
- Li Mingqi, Wan Nannan, Liu Shuai, Wang Qiyu, Zhang Miao, Liu Yu. 2024&. Geo-detector analysis of the spatial distribution and influencing factors of perand polyfluoroalkyl substances in surface sediments of Poyang Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 44(2): 214~226.
- Li Yu, Han Ping, Ren Dong, Luo Na, Wang Jihua. 2017&. Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector. *Scientia Agricultura Sinica*, 50(21): 4138~4148.
- Li Yuelong. 2013#. *The Dongting Lake Annals*. Changsha: Hunan People's Publishing House: 211~266.
- Lin Jing, Zhang Jian, Yang Wanqin, Jian Yi. 2016&. Effect of p H on heavy metal concentrations in the precipitation of a small catchment at the downstream (Wutongqiao section) of Minjiang River. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 36(4): 1419~1427.
- Liu Gang, Jiang Chenyun, Li Xiaolong, Wang Can, Qian Xin. 2018&. The concentration distribution and risk index of sediment heavy metals in lake Chaohu. *Environmental Science & Technology*, 41(S1): 376~380.
- Liu Ying, Xiao Lin. 2014&. Comprehensive evaluation of ecological risk of heavy metal pollution in the surface sediments of Taihu Lake. *Environmental Protection Science*, 40(3): 46~50+96.
- Mao Longjiang, Mo Duowen, Guo Yuanyuan, Fu Qiang, Yang Jinghong, Jia Yaofeng. 2013. Multivariate analysis of heavy metals in surface sediments from lower reaches of the Xiangjiang River, southern China. *Environ Earth Sci*, 69(3): 765~771.
- Ministry of Ecology and Environment, People's Republic of China, Ministry of Land and Resources, People's Republic of China. 2014#. *National Soil Pollution Investigation Bulletin*: 1~5.
- Niu Yong, Jiang Xia, Wang Kun, Xia Jiandong, Jiao Wei, Niu Yuan, Yu Hui. 2020. Meta analysis of heavy metal pollution and sources in surface sediments of Lake Taihu, China. *Science of the Total Environment*, 700: 134509.
- Peng Bo, Tang Xiaoyan, Yu Changxun, Tan Changyin, Tu Xianglin, Liu Qian, Yang Kesu, Xiao Min, Xu Jingzhe. 2011&. Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang River and Pb isotopic geochemical implication. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 282~299.
- Tang Zhenping, Ma Ruli, Zhou Xiafei, Zhao Wenhui, Huo Zheng, Chen Liang. 2020&. Speciation and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment of east Dongting Lake. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 34(4): 48~53.
- Tong Ting. 2005&. Element concentrations in river delta sediments and mineral resources potential in the drainage basin; A case study in the Xiangjiang, Zishui, Yuanjiang, and Lishui rivers basins. *Quaternary Sciences*, 25(3): 298~305.
- Wang Jinnan, Lei Yu, Ning Miao. 2014&. Implementing the action plan for air pollution prevention: Declaring war on PM_{2.5}. *Environmental Protection*, 42(6): 28~31.
- Xia Jiandong, Long Jinyun, Gao Yaping, Chen Yue, Meng Jing, Zhou Yunqiao, Chen Shuqin. 2020&. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metal pollutions in sediments of the Chaohu Lake. *Earth and Environment*, 48(2): 220~227.
- Xu Youze, Liu Jinjun, Cheng Yingxiang, Dai Youzhi, Fu Guangyi. 2016&. Characteristics and ecological risk assessment of heavy metals contamination in sediments of the Xiangjiang River. *Environmental Chemistry*, 35(1): 189~198.
- Yang Fan, Yuan Longhu, Li Yifu, He Dandan, Liu Xuran, Wang Dongbo. 2022&. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of main water systems in Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, 42(5): 1934~1946.
- Yang Yang, Li Xiaolong, Yang Biying, Yang Jinxiang, Hu Youbiao, Liu Xiang. 2020&. Study on heavy metal pollution characteristics of surface sediments in Chaohu Lake. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 40(4): 46~54.
- Zeng Xiangying, Wang Chen, Yu Zhiqiang, Qin Yanwen, Zhang Lei, Sheng Guoying, Fu Jiamo. 2012&. The occurrence, distribution and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River (Yueyang Section). *Geochimica*, 41(1): 63~69.
- Zhang Yinghao, Lai Xijun, Zhang Lin, Song Kaishan, Yao Xin, Gu Luhua, Pang Cuichao. 2020. The influence of aquatic vegetation on flow structure and sediment deposition; A field study in Dongting Lake, China. *Journal of hydrology*, 584: 124644.
- Zhu Xuening, Liu Yuebin, Zhang Yibing, Liang Yiqun, Zhang Yuan, Lan Jianlin, Fan Jingsen, Niu Hongya. 2021&. Study on heavy metal pollution characteristics of surface water in Handan section of Fuyang River. *Energy Environmental Protection*, 35(6): 94~101.
- Zhu Yunlong, Jiang Jiahu, Huang Qun, Sun Zhandong, Wang Hongjuan, Zhou Yunkai. 2008&. Contents, distribution and correlation of Cd, Pb, Hg, As in water, sediment and organisms from east Dongting Lake and Datong Lake. *Journal of Agro-Environment Science*, 27(4): 1377~1384.

Distribution characteristics and risk of heavy metal pollution in the sediments of Dongting Lake and its tributaries and the impact factor analysis

CHEN Fangwei, LI Cong, GUO Jun, ZHANG Cheng'an, MAO Xiong, TANG Hengjia, LIAO Qi, CHEN Chuang
Changsha General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Changsha, 410600

Objectives: To study the distribution characteristics, risks and driving force of heavy metal pollution in the sediments of the Dongting Lake and its tributaries can provide a scientific scheme for the treatment of heavy metal pollution in the surface sediments of the basin, and plays a vital role in ensuring the ecological security of the

basin.

Methods: This paper evaluates the content of 7 kinds of heavy metal elements in the Dongting Lake Basin, combined with different distribution characteristics. Introduce geographic detector model for spatial differentiation of surface sediments, combined with the I_{geo} and geographical weighted regression model, quantitative explore various influence factors on the geographical space of the lake surface sediments of heavy metal pollution distribution driver, and the Arcgis of the main influence factor correlation coefficient of spatial visual expression.

Results: ① The content of heavy metals in Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Ni, Zn and Zn are 5.06, 1.69, 1.74, 2.02, 1.54, 1.58 and 1.67 times of the background values of sediment in the Dongting Lake water system, respectively. The heavy metal Cd element is 5 times of the background value, and some points exceed the soil screening value, which has caused harm to the surrounding environment. Mn is twice the background value, which grows rapidly in the Dongting Lake basin and requires enhanced monitoring. ② Calculated by I_{geo} (Earth accumulation index), the mean value of Cd elements in the study area is between 1 and 2, which belongs to moderate pollution. I_{geo} of heavy metals Cr, Cu, Mn, Ni, Pb and Zn in the study area are less than 1, all belonging to mild pollution, the main heavy pollutant Cd of sediments in the Dongting Lake and its tributaries. On the whole, the risk of heavy metal pollution in the sediments in the Dongting Lake area is high, showing the overall gradual accumulation process, and basically at the mild-moderate pollution level. ③ through the geographic detector model, rainfall, distance from the villages and towns, air temperature, according to the road distance, land use type, according to the railway distance (0.16), *NDVI*, *DEM* on the Dongting Lake sediment heavy metal accumulation index (I_{geo}) has strong interpretation, shows that the Dongting Lake sediment heavy metal pollution by geographical conditions such as natural factors, but also closely related to human activities.

Conclusions: ① On the whole, the average value of all elements in the sediments in the Dongting Lake area is 2, which belongs to the medium pollution degree. ② The serious pollution areas are mainly concentrated in the Zijiang River basin and the Xiangjiang River into the Dongting Lake basin and the center of the Dongting Lake, and the sediment sediment in the Yuanjiang River basin shows moderate pollution. ③ through the geographical detector, select rainfall, according to the highway distance, *DEM* of sediment heavy metal *Itot* spatial distribution of strong factors, annual average rainfall and distance from the road is the effect of double factor enhancement, other factors interaction are nonlinear enhancement, shows that the selection of environment and natural factors on the lake surface sediment of heavy metal spatial distribution discrete play a driving role.

Keywords: Dongting Lake Basin; heavy metals in sediment; impact factors; geographic detectors; geographic weighted regression (GWR)

Acknowledgements: This paper was jointly funded by the China Geological Survey project “the Dongting Lake Wetland Ecological Restoration Comprehensive Survey Project (No. DD20230478)”, the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2024JJ7620) and the Key Research and Development Program Fund of Hunan Province (No. 2023SK2066).

First author: CHEN Fangwei, male, born in 1995, bachelor's degree, mainly engaged in geochemistry research; Email: 1401453439@qq.com.

Corresponding author: LI Cong, Male, born in 1995, undergraduate degree, mainly engaged in environmental pollution investigation and research; Email: 448557091@qq.com.

Manuscript received on: 2024-09-23; Accepted on: 2024-12-08; Published online on: 2025-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2025.01.012

Edited by: LI Ming, ZHANG Yuxu

