水源与饮用水保障

过子怡, 盛根明, 冯君逸, 等. 引江济太沿程小型过水湖泊典型重金属富集特征及潜在生态风险[J]. 净水技术, 2023, 42(4):52-61.
GUO Z Y, SHENG G M, FENG J Y, et al. Enrichment characteristics and potential ecological risks of typical heavy metals in small river-passing lakes along the water diversion project of Yangtze River to Taihu Lake[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4):52-61.

引江济太沿程小型过水湖泊典型重金属富集特征及潜在生态风险

过子怡[1],盛根明[2],冯君逸[1],陶 红[1],李飞鹏[1,*],陈瑞弘[2]
(1.上海理工大学环境与建筑学院,上海 200093;2.上海勘测设计研究院有限公司,上海 200439)

摘 要 为明晰引江济太沿程上小型过水湖泊漕湖中典型重金属的富集特征和潜在生态风险,通过对河湖系统表层沉积物中9种重金属(Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Sb和Hg)的含量分析,研究和分析了重金属的富集程度、生态风险和潜在来源。结果表明,除Co、Cr和Pb外,其余6种金属的平均含量均超过江苏省土壤背景值,Cd约是背景值的12.38倍,污染最为严重;重金属空间分布上主要集中在漕湖入湖口、圩区口、东西向中线附近以及支流口(CH11)处。地累积指数和潜在风险指数表明Cd为中污染,Zn、Sb和Hg表现为低污染水平;Cd作为主要的环境风险因子,表现为极高生态风险,表层沉积物中重金属污染整体表现为高风险水平。漕湖沉积物中重金属的富集受周边工业和农业活动的影响较大,Cd的污染与工业生产、引水和农业面源等关联较大。

关键词 引江济太 漕湖 表层沉积物 重金属 富集特征 潜在生态风险
中图分类号:X524 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-0177(2023)04-0052-10
DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.007

Enrichment Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Heavy Metals in Small River-Passing Lakes along the Water Diversion Project of Yangtze River to Taihu Lake

GUO Ziyi[1], SHENG Genming[2], FENG Junyi[1], TAO Hong[1], LI Feipeng[1,*], CHEN Ruihong[2]
(*1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*
2. Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200439, China)

Abstract In order to investigate the enrichment characteristics and potential ecological risks of typical heavy metals in the sediments of Caohu Lake which is a small river-passing lake along the water diversion project of Yangtze River to Taihu Lake, this study analyzed the contents of 9 heavy metals (Cr、Co、Ni、Cu, Zn, Cd, Pb, Sb and Hg) in the river-lake system, then evaluated the enrichment and as well as traced the sources of those heavy metals. The results demonstrated that the mean contents of metals except Cr, Co and Pb were beyond the background value of Jiangsu Province. In particular, the mean content of Cd was about 12.38 times the background value, presenting the greatest potential ecological risk. The high contents of heavy metals were mainly distributed at the inlet of Caohu Lake, outlets of polder areas, the east-west middle line of Caohu Lake and tributaries (CH11). The geo-accumulation index showed that Cd were in moderate pollution status, and Zn, Sb, and Hg were in low pollution. According to the assessment of potential ecological risk, all the surface sediments showed high potential ecological risk, Cd had very high ecological risk and was the main environmental risk metal. The enrichment characteristics of most heavy metals in Caohu Lake were greatly affected by the surrounding

[收稿日期] 2022-10-24
[基金项目] 上海勘测设计研究院有限公司科研项目[2022HJ(45)-001]
[作者简介] 过子怡(1999—),女,硕士,研究方向为河湖生态环境质量与风险,E-mail:guoziyi0202@163.com。
[通信作者] 李飞鹏(1983—),男,副教授,研究方向为环境质量监测与风险评价,E-mail:lifeipeng@usst.edu.cn。

industrial and agricultural activities, and Cd pollution was closely related to industrial production, water diversion and agricultural non-point sources.

Keywords water diversion project of Yangtze River to Taihu Lake Caohu Lake surface sediment heavy metal enrichment characteristic potential ecological risk

淡水湖泊是地球的珍贵饮用水资源之一,承担着蓄水、连接、转化的功能,能够有效调节气候和维护区域生态环境[1-2]。近年来,随着城镇化快速发展,湖泊水质退化、富营养化和重金属等污染事件频发,尤其是在河网密布、地势平坦、水动力条件弱的平原水网地区[3-5]。环境中重金属可通过降雨、径流和工农业生产等多种途径排入河流和汇入湖泊[6],而河网中湖泊往往被认为是污染物的最终蓄积场所。为改善水质和缓解富营养化,实施水系连通和引水工程成为改善水质和短期内恢复湖泊生态系统的重要手段[7],如日本的特加湖工程[8]、芬兰的费吕沃湖工程[9]和我国的滇中引水工程[10]等。然而,大量的水沙交换也增加了湖泊中重金属等污染物的风险。研究[11-13]表明,当外界环境因素(如水动力、气候、pH 等)发生改变后,沉积物中富集的重金属会重新释放到上覆水中,增加内源对湖泊及其相通河流污染的风险。针对河湖关系以及沉积物污染物在过水型湖泊的迁移和富集的研究,主要聚焦于大型通江湖泊,如洞庭湖、鄱阳湖、巢湖等及其生态环境影响,但对小型过水型湖泊的研究相对较少。

我国的引江济太工程自 2002 年以来,通过望虞河引调长江水至太湖,以达到稀释污染物并缓解太湖富营养化风险的目的[14]。研究[15]表明,引水以来,太湖水质得到了显著提升。Li 等[16]采用 EFDC 三维水动力模型证实了引水工程的有效性。但是,引江济太过程中,也会导致一些污染物在局部的富集,例如一些研究[17-20]发现引江济太导致了磷等营养盐在太湖的富集。由于湖泊沉积物是重要的污染物汇,引水沿程上往往还存在较多的小型过水湖泊,其生态功能对区域经济的发展至关重要,但当前研究对其关注相对较少,在一些工农业相对集中的平原水网地区,这些湖泊的沉积物中重金属的富集及其风险管控亟待加强。

本研究以引江济太调水沿程上的小型过水湖泊漕湖为例,对河湖系统的重金属富集特征及其潜在生态风险进行了研究,以期为小型过水湖泊的生态环境保护与生态风险管控提供科学依据,对长江流域水沙环境质量的可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域属太湖流域,处于亚热带季风气候。本研究对望虞河引江济太沿程中穿越和连通 3 个湖泊(从北至南依次为嘉菱荡、鹅真荡和漕湖)进行了分析,选择漕湖作为重点研究对象。漕湖总体位于苏州市相城区,是典型的小型过水湖泊,为东西向狭长形湖泊,湖盆整体地形呈东深西浅的趋势。望虞河在漕湖西侧约 1/5 处穿过,与湖区存在频繁的水量交换,水环境关联度高。此外,漕湖沿岸另有 3 条小支流,分别为西岸的伯渎港、东岸的冶长河和永昌泾,其中,东岸两条支流以及鹅真荡东岸的无名支流都向东汇入元和塘,引水方向下游有伯渎港和西塘河相连。漕湖及其相通的望虞河输水河道流域总面积约为 270 km^2,水脉纵横,第二、三产业发达且工业比重较大,是贯通太湖和长江的水泊枢纽,具有优越的地理位置和区域优势,关系到长三角地区的供水质量。望虞河西岸位于澄锡虞高片区,东岸属于阳澄淀泖区,其中西岸地区属于典型的平原河网区,地势整体呈现东高西低的趋势,由于无锡市部分街镇中心临近望虞河,人口密度较高,对西岸支流及其相通湖泊的水环境产生了较大的压力。

1.2 采样点设置与采集

依据汛期后引江济太工程引长江入太湖频率较高的特点,2019 年 9 月—2020 年 10 月,在望虞河引水起一周后在漕湖、鹅真荡、嘉菱荡以及望虞河连通水域附近进行沉积物样品采集。采样点位的设定采用高次方根法计算沉积物采样点数的控制基数[21],根据 3 个湖泊的水面面积,湖泊采样点的基数为 6 个点位,因此,在湖泊中线处共布设 6 个点位;依据河湖关系或对采样对象的经验判断,按照确定性布点方法在河湖出入口、漕湖-望虞河连通段、圩区排口以及漕湖支流河口附近增设采样点位。22 个采样点位具体分布如图 1 所示,其中 WY1、WY2、WY3、WY4、WY5 和 WY6 位于望虞河入湖区;WY8、WY9、WY10 和 WY11 位于望虞河出湖区;WY7、

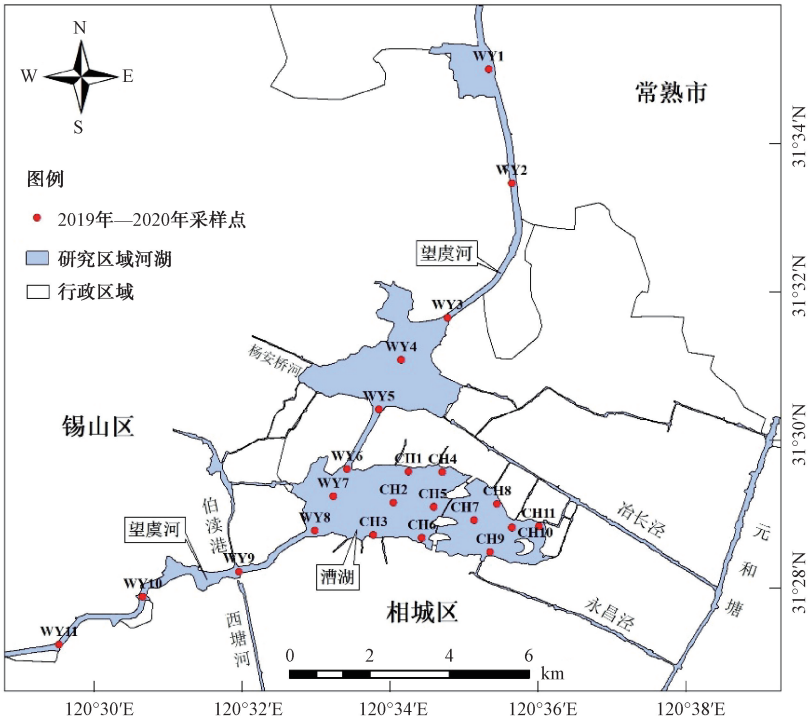

图 1　河湖系统表层沉积物采样点位示意图

Fig. 1　Schematic Diagram of Sampling Sites of Surface Sediments in the Lakes and Rivers System

CH2、CH5 和 CH7 位于漕湖东西向中线;CH1、CH3、CH4 和 CH6 位于漕湖圩区口;CH8、CH9、CH10、CH11 位于漕湖支流口。利用 Petersen 采泥装置对表层 0~5 cm 的沉积物进行取样,除去杂物和粗颗粒后,冷冻保存于洁净的聚乙烯自封袋,统一运回实验室。

1.3　样品处理分析与质量控制

表层沉积物样品冷冻干燥后,用研钵碾碎研磨,过 200 目尼龙筛,充分混合均匀。采用多元酸消解体系(盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸)对样品进行预处理,Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、Sb 和 Hg 共 9 种金属使用电感耦合等离子质谱仪(NexION 300X,Perkin-Elmer 公司)进行测定。为确保精确度,本试验均用优级纯试剂,采用二次去离子水配置试剂溶液,试验过程避免金属物品接触,结束后用 5% 硝酸浸泡带盖消解罐浸泡 24 h。质量控制样品选用安徽五河淮河沉积物标准物质(GBW074550),各元素误差<10%,回收率均为 81%~90%;同时每批试验设置 2 个空白样,每隔 3 个样品设置 1 个平行样。

1.4　表层沉积物重金属评价方法

1.4.1　地累积指数法

地累积指数法被广泛用于水体重金属污染情况的定量评价[22]。其计算如式(1)。

$$I_{geo} = \log_2\left[\frac{C_i}{k \times B_i}\right] \tag{1}$$

其中:I_{geo}——地累积指数;

C_i——重金属 i 的实测质量浓度,mg/L;

k——修正系数,用于校正成岩作用对背景值的干扰,一般取 1.5;

B_i——重金属 i 的环境背景值,mg/L。

本研究选用江苏省表层土壤背景值[23]中重金属含量对研究区域背景值进行标定。此方法的金属污染程度分级如表 1 所示。

表 1　地累积指数等级划分

Tab. 1　Classification of Geo-Accumulation Indices

取值	等级	污染水平
$I_{geo} \leqslant 0$	0	无
$0 < I_{geo} \leqslant 1$	1	轻度
$1 < I_{geo} \leqslant 2$	2	偏中度
$2 < I_{geo} \leqslant 3$	3	中度
$3 < I_{geo} \leqslant 4$	4	偏重度
$4 < I_{geo} \leqslant 5$	5	重度
$I_{geo} \geqslant 5$	6	严重

1.4.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法由瑞典学者 Hakanson[24] 提出,是一种评估水体沉积物中有毒物质潜在风险的方法,综合考虑了多种重金属的毒性变动、不同累积程度下评价区域的敏感性及环境背景值的协同作用[25]。计算如式(2)。

$$S_{RI} = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum_{i=1}^{n} T_r^i \times \frac{C_0^i}{C_s^i} \quad (2)$$

其中:S_{RI}——多项金属综合潜在生态风险指数;

E_r^i——单项重金属 i 的潜在生态风险指数;

T_r^i——重金属 i 的毒性响应系数;

C_0^i——重金属 i 的实测质量浓度,mg/L;

C_s^i——重金属 i 的区域背景值,mg/L。

本研究以江苏省土壤背景值[23]为区域背景值,根据已有研究[26],Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Sb、Pb 和 Hg 的毒性响应系数分别取 2、5、5、5、1、30、7、5 和 40。此方法的评估标准如表 2 所示。

表 2 潜在生态风险评估指标划分

Tab. 2 Classification of Assessment Indices for Potential Ecological Risks

单项金属潜在风险指数	综合潜在生态风险	潜在生态风险等级
$0<E_r^i\leqslant 40$	$0<S_{RI}\leqslant 150$	低风险
$40<E_r^i\leqslant 80$	$150<S_{RI}\leqslant 300$	中风险
$80<E_r^i\leqslant 160$	$300<S_{RI}\leqslant 600$	较高风险
$160<E_r^i\leqslant 320$	$S_{RI}>600$	高风险
$E_r^i>320$	-	极高风险

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属含量及空间分布特征

漕湖及其相通的望虞河输水河道表层沉积物中重金属检出含量特征如表 3 所示。各元素质量浓度平均值排序为 Zn (143.56 mg/L) > Cr (41.38 mg/L) > Ni (33.53 mg/L) > Cu (28.48 mg/L) > Pb (17.18 mg/L) > Co (10.06 mg/L) > Cd (1.87 mg/L) > Sb (1.86 mg/L) > Hg (0.25 mg/L)。与当地的土壤背景值[23]相比,除了 Co、Cr 和 Pb 外,其余重金属在研究区域普遍存在富集状态,尤其是 Cd 的含量约为背景值的 12.38 倍,富集程度最高。与此同时,Cd 的变异系数为 58.80%,较高的不均匀度表明沉积物中重金属可能在部分区域形成了“汇”[27]。

表 3 各重金属含量描述性统计

Tab. 3 Descriptive Statistics of Each Heavy Metal Content

重金属	平均值/(mg·L^{-1})	最大值/(mg·L^{-1})	最小值/(mg·L^{-1})	标准差	变异系数	江苏省土壤背景值[23]/(mg·L^{-1})
Cr	41.38	103.35	19.83	18.89	45.65%	76
Co	10.06	14.59	7.02	1.89	18.77%	13.7
Ni	33.53	57.18	18.72	11.24	33.53%	32.9
Cu	28.48	47.63	10.44	9.93	34.87%	26
Zn	143.56	240.91	72.11	47.03	32.76%	73
Cd	1.87	4.34	0.45	1.10	58.80%	0.151
Sb	1.86	2.88	1.10	0.49	26.61%	0.96
Pb	17.18	26.53	8.58	4.77	27.78%	26.8
Hg	0.25	0.47	0.14	0.08	30.75%	0.082

将河湖系统表层沉积物重金属含量与我国典型过水型湖泊的重金属含量进行比较(表 4):Cd 的含量普遍超过其他湖泊;Cu 的含量略高于洪泽湖,低于其余大部分湖泊;Zn 的含量位于这些湖泊的平均水平;Hg 的含量高于太湖;Cr、Co、Ni、Sb、Pb 含量相对较低。

如图 2 所示,重金属含量空间分布中 Cr、Co、Ni、Cu 和 Zn 具有一致性,含量高值主要集中在漕湖圩区口、东西向中线附近以及支流口(CH11)处;Pb 和 Hg 的空间分布总体相似但略有区别,Pb 的高值集中于望虞河汇入漕湖口、靠近过流河道的圩区口以及南北岸支流口,Hg 的高值不仅出现在入湖口和圩区口,还在东西向中线附近富集;Sb 含量在漕湖湖区均有较高分布,主要聚集于过流河道东侧至湖

表 4　我国典型过水型湖泊表层沉积物重金属质量浓度　(单位:mg/L)

Tab. 4　Mass Concentration of Heavy Metals in the Surface Sediments of Typical River-Passing Lakes at Home　(Unit: mg/L)

湖泊	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Sb	Pb	Hg
漕湖(本研究)	41. 38	10. 06	33. 53	28. 48	143. 56	1. 87	1. 86	17. 18	0. 25
东洞庭湖[28]	42. 9	–	–	42. 6	88. 8	5. 5	–	58. 6	–
太湖[12]	102. 46	–	45. 5	44. 71	163. 62	0. 479	–	37	0. 109
洪泽湖[29]	66. 78	–	33. 89	25. 35	74. 77	0. 23	–	27. 2	–
鄱阳湖[30]	132. 49	–	–	44. 89	142. 79	0. 7	–	49. 39	–
固城湖(湖区)[31]	82. 97	16. 81	41. 03	39. 6	145. 33	0. 56	–	41. 17	–
沉石荡[32]	41. 2~86. 6	9. 68~18. 1	24. 6~43. 38	14. 9~43. 5	50. 5~135. 2	0. 05~0. 33	0. 58~5. 99	15. 7~34. 3	–

注:"–"代表无数据。

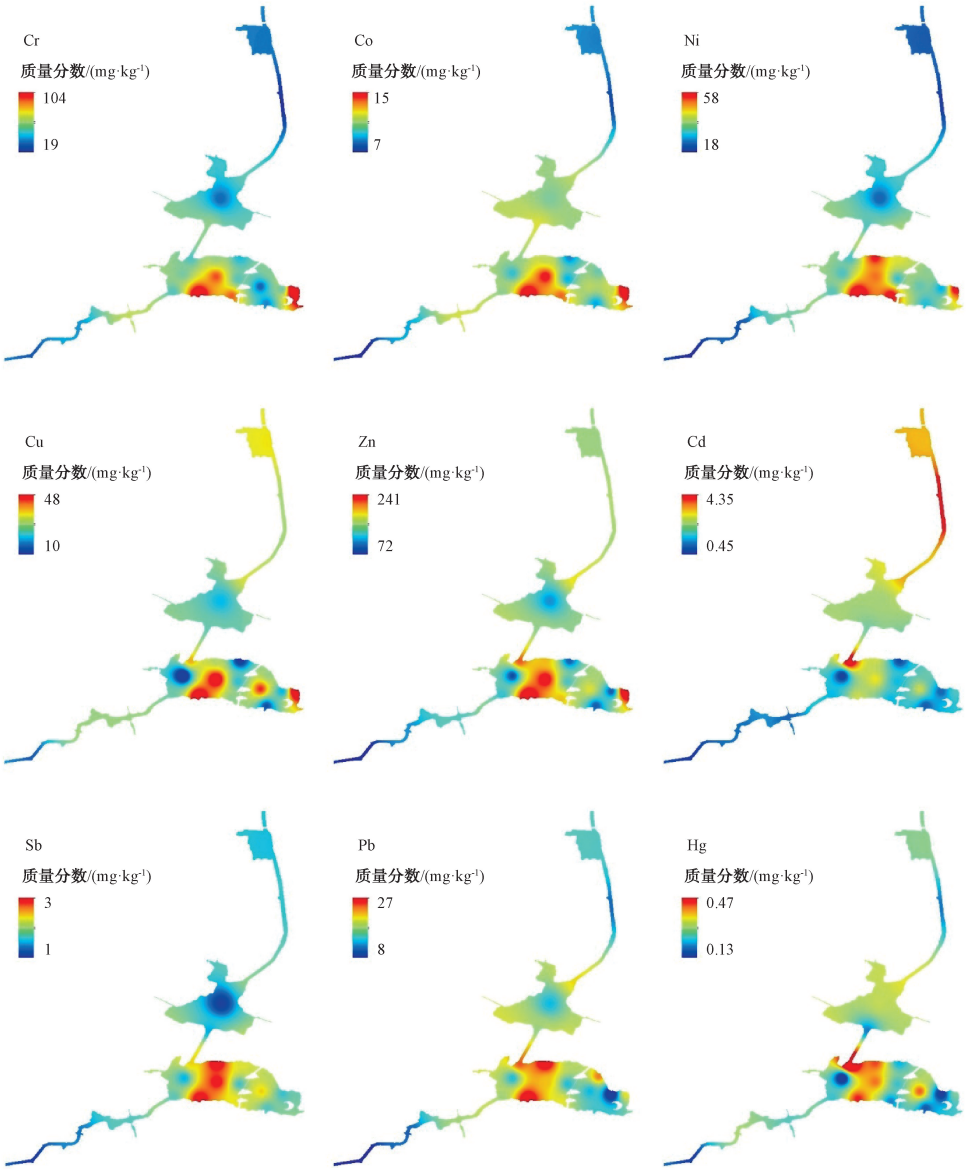

图 2　表层沉积物各重金属含量空间分布

Fig. 2　Spatial Distribution of Heavy Metals in the Surface Sediments

心三岛西侧区域;Cd 含量的空间分布情况与其他金属差异较大,具有空间异质性,高值主要出现于望虞河河段(WY2)附近以及漕湖的入湖口。整体来看,除 Cd 外,漕湖表层沉积物重金属元素普遍偏高,呈现一定程度的富集。

2.2 表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价

2.2.1 地累积指数法评价

河湖系统表层沉积物中重金属地累积指数统计结果如图 3 所示。各重金属的污染程度为 Cd>Hg>Zn≈Sb>Cu>Ni>Co>Pb>Cr。根据地累积指数分级标准,Cr、Co、Ni、Cu 和 Pb 的地累积指数平均值<0,整体处于清洁状态,为无污染风险水平;Zn、Sb 和 Hg 的地累积指数平均值分别为 0.32、0.32 和 0.97,大部分点位为轻度污染;Cd 的地累积指数平均值为 2.79,多数点位的污染等级为中污染水平,部分点位处于偏重度污染。综上,Cd 对沉积物污染风险的贡献最大,因此,研究区域表层沉积物中 Cd 是污染程度较大的潜在有毒污染物。

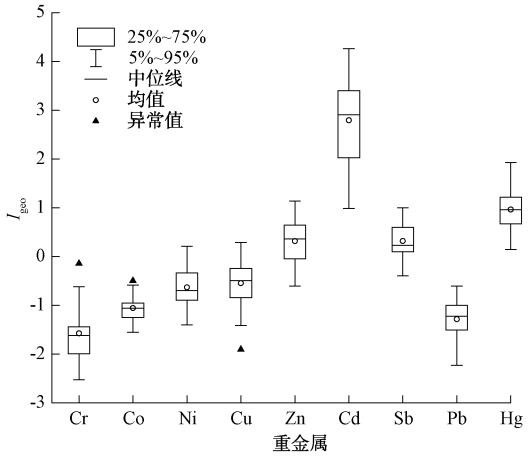

图 3 表层沉积物重金属地累积指数箱线图

Fig. 3 Box Chart of Geo-Accumulation Index of Heavy Metals in Surface Sediments

2.2.2 潜在风险指数法评价

河湖系统表层沉积物中各项金属单项潜在生态风险指数平均值分别为:Cr(1.09)、Co(3.67)、Ni(5.10)、Cu(5.48)、Zn(1.97)、Cd(371.08)、Pb(3.21)、Sb(13.56)和 Hg(122.26)。如图 4 所示,Cd 的潜在生态风险指数平均值处于极高风险水平,Hg 处于较高风险水平,其余 7 种重金属完全处于低风险水平。

如图 5 所示,研究区域各采样点综合潜在生态风险指数为 181~1 128,平均值为 527,整体处于高风险水平。河湖系统中,22.7%的点位处于中风险,40.9%的点位为高风险,36.4%的点位则处于极高风险水平。从各金属对综合潜在生态风险指数的贡献来看,Cd 的贡献率达到了 70.4%,是最主要的生态风险贡献因子,其结果与地累积指数法一致,应引起相关部门的高度重视。

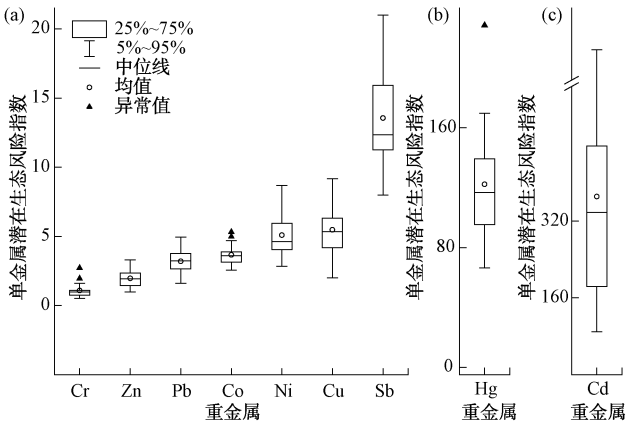

图 4 表层沉积物单项重金属潜在生态风险指数箱线图

Fig. 4 Box Chart of Potential Ecological Risk Index of Single Heavy Metal in the Surface Sediments

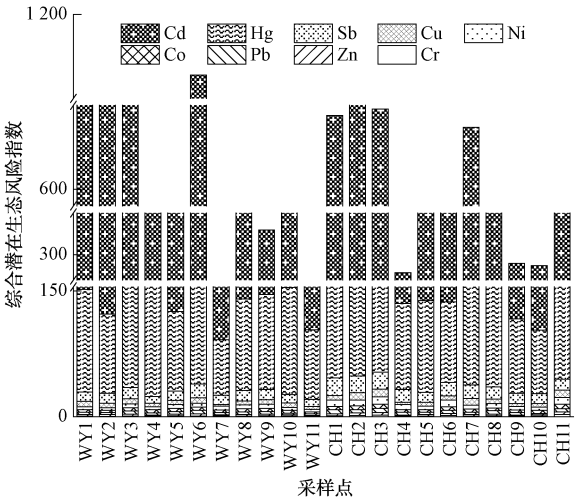

图 5 表层沉积物综合生态风险指数

Fig. 5 Comprehensive Ecological Risk Indices in the Surface Sediments

2.3 表层沉积物重金属的相关性及源分析

沉积物中重金属含量间若呈显著相关性,则说明它们可能具有相同的来源[33]。由表 5 可知,有 1 对和 26 对重金属分别在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上呈显著正相关,其中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn 两两互呈极显著关系。Cu 和 Zn 的相关系数在各金属

间最大(R^2 = 0.910),且 Cr 和 Co(R^2 = 0.905)、Cr 和 Ni(R^2 = 0.818)、Co 和 Ni(R^2 = 0.826)的相关系数皆大于 0.8,表明河湖系统的重金属之间具有潜在的相似来源与地球化学迁移途径。Cd 和 Cr、Ni 呈现负相关,可能来自不同的源或它们之无任何关联。

表 5 表层沉积物重金属含量间的 Pearson 相关系数

Tab. 5 Pearson Correlation Coefficients of Heavy Metal Contents in the Surface Sediments

重金属	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Sb	Pb	Hg
Cr	1.000	–	–	–	–	–	–	–	–
Co	0.905**	1.000	–	–	–	–	–	–	–
Ni	0.818**	0.826**	1.000	–	–	–	–	–	–
Cu	0.620**	0.736**	0.528**	1.000	–	–	–	–	–
Zn	0.744**	0.821**	0.735**	0.910**	1.000	–	–	–	–
Cd	−0.063	0.105	−0.002	0.540**	0.564**	1.000	–	–	–
Sb	0.414	0.550**	0.783**	0.562**	0.696**	0.340	1.000	–	–
Pb	0.518*	0.579**	0.766**	0.511**	0.733**	0.364	0.792**	1.000	–
Hg	0.161	0.348	0.317	0.658**	0.649**	0.659**	0.618**	0.657**	1.000

注:* 表示在 P <0.05 水平上显著相关;** 表示在 P<0.01 水平上显著相关。

为进一步了解河湖系统重金属的污染来源,对 9 种重金属进行了主成分分析。利用 KMO 度量值检验(0.706>0.6)和 Bartlettde 球型检验(0.00<0.05)对标准化后的污染因子数据样本进行检验,结果表明各元素进行主成分分析是有效的[34-35]。如表 6 及表 7 所示,研究区域表层沉积物重金属主要有两个来源,主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)初始特征值分别为 5.702(>1)和 1.733(>1),对应方差贡献率为 63.356%和 19.256%,累积方差贡献率为 82.612%,能代表全部数据的大部分信息。

表 6 表层沉积物重金属主成分分析矩阵

Tab. 6 Principal Component Analysis Matrix of Heavy Metals in the Surface Sediments

重金属	PC1	PC2
Zn	0.965	0.082
Co	0.855	−0.394
Cu	0.850	0.173
Ni	0.846	−0.434
Pb	0.836	0.077
Sb	0.815	0.094
Cr	0.758	−0.570
Hg	0.684	0.602
Cd	0.442	0.807

PC1 中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Pb、Sb 和 Hg 荷载值为正值且具有较高载荷,PC2 中 Cd 和 Hg 具有较高载荷,说明 Hg 污染可能是多种不同来源所致。

表 7 表层沉积物重金属主成分分析矩阵特征值

Tab. 7 Characteristics Values of Principal Component Analysis Matrix of Heavy Metals in the Surface Sediments

项目	PC1	PC2
初始特征值	5.702	1.733
方差贡献率	63.356%	19.256%
累积方差	63.356%	82.612%

研究[36]表明,Cu、Cr、Co、Ni 和 Zn 是金属冶炼、印刷电路板等工业生产的潜在来源,可能受到漕湖附近工业园区较多的精密仪器和电子器件制造业的影响,而周边纺织业活动可能是 Sb 的主要人为来源。研究[37]发现,Sb_2O_3 作为纺织业催化剂会导致 Sb 阳离子在布料酸洗和改性修饰中被带入水环境。地表环境中 Pb 除了受到燃煤发电和铅矿熔炼工业影响[38],还可通过含铅燃油废气的大气沉降进入湖区积累在沉积物中[39]。Hg 可能主要来自于周边工农业生产、大气沉降和地表径流等复合源[40-41]。研究[42-43]表明,长江中下游流域 Cd 的生态风险最高且存在流域内迁移的可能,一些相通湖泊的沉积物中 Cd 的污染风险较高。Cd 为农药和化肥标志性元素[44-46],容易析出并被土壤颗粒携带,可通过土壤侵蚀和地表径流进入水体[42,47]。由于河湖连通性,吸附在悬浮物上的 Cd 容易随着引水运输过程扩散,进而在漕湖沉积物中形成“汇”。

总体上,漕湖沉积物中重金属的污染富集主要

表现为外源输入,受人类活动影响显著。因此,需加强漕湖及望虞河引水路线附近工农业的排污管理,减少引江济太调水沿程上水体、沉积物中重金属的输入,以提升区域水环境质量。

3 结论

(1)漕湖与望虞河的河湖系统中表层沉积物重金属整体呈现为 Zn>Cr>Ni>Cu>Pb>Co>Cd>Sb>Hg。除 Co、Cr 和 Pb 外,其余重金属平均值含量均超过江苏省土壤背景值;除 Cd 外漕湖沉积物中重金属含量普遍高于望虞河输水通道,主要集中在入湖口、漕湖圩区口、东西向中线附近以及支流口(CH11)处,Cd 的空间分布异质性显著。

(2)地累积指数结果表明,Cd 在河湖系统沉积物中为中污染,Zn、Sb 和 Hg 表现为低污染水平,其余重金属无污染风险;潜在生态风险指数表明,Cd 的单项潜在生态风险指数显示出极高风险,Hg 为较高风险,其余金属生态风险较低,整个河湖系统的综合潜在生态风险指数在 181~1 128,平均值为 527,整体为高风险水平,Cd 风险指数贡献率达到了 70.4%,是主要的环境风险因子。

(3)相关性和来源分析结果显示,漕湖表层沉积物中 Cu、Cr、Co、Ni 和 Zn 的富集可能主要受工业活动影响,Hg 表现为复合污染源,Cd 的富集与周边工业生产、引水和农业面源等关联较大。

参考文献

[1] CHEN H, JING L, YAO Z, et al. Prevalence, source and risk of antibiotic resistance genes in the sediments of Lake Tai (China) deciphered by metagenomic assembly: A comparison with other global lakes[J]. Environment International, 2019, 127: 267-275. DOI: 10.1016/j.envint.2019.03.048.

[2] 王中根, 李宗礼, 刘昌明, 等. 河湖水系连通的理论探讨[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 523-529.
WANG Z G, LI Z L, LIU C M, et al. Discussion on water cycle mechanism of interconnected river system network[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 523-529.

[3] PAERL H W, HUISMAN J. Blooms like it hot[J]. Science, 2008, 320(5872): 57-58. DOI: 10.1126/science.115539.

[4] ZHAO G, GAO J, TIAN P, et al. Spatial-temporal characteristics of surface water quality in the Taihu Basin, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(3): 809-819. DOI: 10.1007/S12665-011-0902-6.

[5] 姚春雨, 夏霆, 朱玲, 等. 太湖流域水生态功能分区沉积物污染评估[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2022, 44(1): 57-67.
YAO C Y, XIA T, ZHU L, et al. Assessment of sediment pollution in the aquatic ecological function areas of Taihu Lake Basin[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2022, 44(1): 57-67.

[6] ZHANG W, JIN X, DI Z, et al. Heavy metals in surface sediments of the shallow lakes in eastern China: Their relations with environmental factors and anthropogenic activities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(24): 25364-25373. DOI: 10.1007/s11356-016-7643-8.

[7] 冯君逸, 田丰彦, 吉锋, 等. 河湖关系变化对过水型湖泊的生态环境影响研究进展[J]. 中国水运, 2022, 22(7): 73-75.
FENG J Y, TIAN F Y, JI F, et al. Research progress on the ecological environment of water-passing lakes due to changes in the relationship between rivers and lakes[J]. China Water Transport, 2022, 22(7): 73-75.

[8] AMANNO Y, SAKAI Y, SEKIYA T, et al. Effect of phosphorus fluctuation caused by river water dilution in eutrophic lake on competition between blue-green alga *Microcystis aeruginosa* and diatom *Cyclotella* sp.[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(11): 1666-1673. DOI: 10.1016/S1001-0742(09)60304-1.

[9] HOSPER S H. Stable states, buffers and switches: An ecosystem approach to the restoration and management of shallow lakes in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(3): 151-164. DOI: 10.1016/S0273-1223(98)00066-3.

[10] 凌书勤. 滇中引水工程对滇池水质与水环境改善研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
LING S Q. Research on the Dianchi Lake water quality and ecology improvement of Dianzhong water transfer project[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018.

[11] LI R, TANG X, GUO W, et al. Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River[J]. Science of the Total Environment, 2020, 714: 136779. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136779.

[12] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2202-2210.
ZHANG J, GUO X Y, ZENG Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2202-2210.

[13] 季晔鑫. 崇明环岛运河表层沉积物重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 净水技术, 2021, 40(s1): 351-355, 371.
JI Y X. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments from canal surrounding Chongming Island[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(s1): 351-355, 371.

[14] HU W, ZHAI S, ZHU Z, et al. Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 2008, 34(1): 30-49. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.05.018.

[15] 吴浩云, 甘月云, 金科. "引江济太"20年:工程实践、成效和未来挑战[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1393-1412.
WU H Y, GAN Y Y, JIN K. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002—2021: Practice, achievements and future challenges[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(5): 1393-1412.

[16] LI Y, TANG C, WANG C, et al. Improved Yangtze River Diversions: Are they helping to solve algal bloom problems in Lake Taihu, China? [J]. Ecological Engineering, 2013, 51: 104-116. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.077.

[17] XU R, PANG Y, HU Z, et al. Influence of water diversion on spatial and temporal distribution of flow field and total phosphorus (TP) concentration field in Taihu Lake[J]. Water Supply, 2020, 20(3): 1059-1071. DOI: 10.2166/ws.2020.031.

[18] 朱广伟, 秦伯强, 张运林, 等. 近70年来太湖水体磷浓度变化特征及未来控制策略[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 957-973.
ZHU G W, QIN B Q, ZHANG Y L, et al. Fluctuation of phosphorus concentration in Lake Taihu in the past 70 years and future control strategy[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 957-973.

[19] 杨显. 望虞河引水工程对贡湖湾水质及主要取水口总磷的影响[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 80-85.
YANG X. Influence of diversion project of Wangyu River on water quality of Gonghu Bay and TP of main water intakes[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 80-85.

[20] 陈典坤, 杨显. "引江济太"新建工程对梅梁湾总磷总氮分布的影响[J]. 净水技术, 2022, 41(2): 34-39, 110.
CHEN D K, YANG X. Influence of the newly-built project of "Yangtze River-Taihu Lake water diversion" on TP and TN distribution in Meiliang Bay[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 34-39, 110.

[21] 姜霞, 王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
JIANG X, WANG S H. Sediment quality investigation and assessment manual[M]. Beijing: Science Press, 2012.

[22] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geo Journal Library, 1969, 2(3): 108-118.

[23] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1363-1378.
LIAO Q L, LIU C, XU Y, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1363-1378.

[24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.

[25] 徐争启, 倪师军, 庹先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008(2): 112-115.
XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. Environmental Science & Technology, 2008(2): 112-115.

[26] FRIEDMAN G M, SANDERS J E. Principles of sedimentology[M]. New York: Wiley, 1978.

[27] WANG S, WANG W, CHEN J, et al. Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments: A case study in Lihu Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 978-986. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.098.

[28] 唐聪, 钱宝, 李炜钦, 等. 洞庭湖区表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. 人民长江, 2020, 51(6): 49-56, 62.
TANG C, QIAN B, LI W Q, et al. Pollution characteristic and risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Dongting Lake[J]. Yangtze River, 2020, 51(6): 49-56, 62.

[29] 訾鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 等. 洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5355-5363.
ZI X Y, ZHANG M, GU X H, et al. Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment[J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5355-5363.

[30] 王琳杰, 曾贤刚, 段存儒, 等. 鄱阳湖沉积物重金属污染影响因素分析——基于STIRPAT模型[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8): 3683-3692.
WANG L J, ZENG X G, DUAN C R, et al. Analysis on influencing factors of heavy metal pollution in sediments of Poyang Lake based on STIRPAT Model[J]. China Environmental Science, 2020, 40(8): 3683-3692.

[31] 贾冰婵, 张鸣, 武娟, 等. 固城湖退圩还湖区沉积物重金属特征及生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4741-4751.
JIA B C, ZHANG M, WU J, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Guchenghu Lake and its retreating and returning lake area[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4741-4751.

[32] MAO L, YE H, LI F, et al. Enrichment assessment of Sb and trace metals in sediments with significant variability of background concentration in detailed scale[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(3): 2794-2805. DOI: 10.1007/s11356-018-3836-7.

[33] 曾维特, 杨永鹏, 张东强, 等. 海南岛北部海湾沉积物重金

属来源、分布主控因素及生态风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1085-1094.
ZENG W T, YANG Y P, ZHANG D Q, et al. Sources, distribution of main controlling factors, and potential ecological risk assessment for heavy metals in the surface sediment of Hainan Island North Bay, south China [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1085-1094.

[34] BHARDWAJ R, GUPTA A, GARG J K. Evaluation of heavy metal contamination using environmetrics and indexing approach for River Yamuna, Delhi stretch, India [J]. Water Science, 2017, 31(1): 52-66. DOI: 10.1016/j.wsj.2017.02.002.

[35] 王漫漫. 太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析[D]. 南京: 南京大学, 2016.
WANG M M. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in typical rivers of Taihu Basin[D]. Nanjing: Nanjing University, 2016.

[36] LIN K N, LIM Y C, CHEN C W, et al. Spatiotemporal variation and ecological risk assessment of heavy metals in industrialized urban river sediments: Fengshan River in southern Taiwan as a case study[J]. Applied Sciences, 2022, 12(3): 1013. DOI: 10.3390/app12031013.

[37] XUE F, TANG B, BIN L, et al. Residual micro organic pollutants and their biotoxicity of the effluent from the typical textile wastewater treatment plants at Pearl River Delta [J]. Science of the Total Environment, 2019, 657: 696-703. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.008.

[38] 王成, 赵艳萍, 谢鸣捷. 苏南典型工农业交错区土壤铅富集特征及源解析——基于PCA-PMF方法[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 279-287.
WANG C, ZHAO Y P, XIE M J. Characteristics of lead enrichment in the soil from a typical peri-urban agricultural area of the southern Jiangsu and source appointment based on the PCA-PMF method[J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 279-287.

[39] MOKHTAR N F, ARIS A Z, PRAVEENA S M. Preliminary study of heavy metal (Zn, Pb, Cr, Ni) contaminations in Langat River Estuary, Selangor[J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 30: 285-290. DOI: 10.1016/j.proenv.2015.10.051.

[40] 陈卓, 刘文晓, 张丹, 等. 典型化工废渣污染土壤中汞的空间分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 422-431.
CHEN Z, LIU W X, ZHANG D, et al. Spatial distribution and vertical migration of mercury in soil contaminated by chemical waste residues [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 422-431.

[41] 李林骏. 施用不同有机物料对稻田系统甲基汞生成与富集的影响[D]. 重庆:西南大学, 2021.
LI L J. Effects of different organic materials on the formation and enrichment of methyl mercury in paddy field system [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.

[42] LUO M, YU H, LIU Q, et al. Effect of river-lake connectivity on heavy metal diffusion and source identification of heavy metals in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 125818. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125818.

[43] 徐泽锋, 赵晓丽, 赵建, 等. 长江流域沉积物重金属污染特征及优控因子筛选[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(s1): 101-109.
XU Z F, ZHAO X L, ZHAO J, et al. Inspiration for priority control of heavy metals in sediments of Yangtze River Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(s1): 101-109.

[44] 亢晓琪, 刘倩, 罗明科, 等. 千峡湖沉积物重金属含量空间分布及污染风险评价[J]. 人民长江, 2022, 53(7): 50-56.
KANG X Q, LIU Q, LUO M K, et al. Spatial distribution and pollution risk assessment of heavy metal content in sediments of Qianxia Lake[J]. Yangtze River, 2022, 53(7): 55-56.

[45] 文典, 李富荣, 张宋, 等. 施用鸡粪肥对土壤Cd、Pb、As生物有效性及蔬菜生长的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(8): 82-86.
WEN D, LI F R, ZHANG S, et al. Effects of chicken manure application on bioavailability of Cd, Pb and As in soil and vegetable growth[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(8): 82-86.

[46] 谷佳林, 苏世鸣, 陈延华, 等. 施肥与填闲种植籽粒苋对油麦菜Cd和土壤Cd的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2198-2204.
GU J L, SU S M, CHEN Y H, et al. Effects of fertilizers and Amaranthus hypochondriacus as a catch crop on cadmium uptake of lettuce and soil cadmium content [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2198-2204.

[47] 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 等. 东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3048-3057.
ZHAO X L, LI X, LU H B, et al. Analysis of heavy metal pollution characteristics and potential ecological risks of surface sediments in Dongjiang Lake[J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 3048-3057.