

## 太湖流域滆湖围网拆除后沉积物营养盐和重金属空间分布特征及评价<sup>\*</sup>

廖润华<sup>1</sup>, 吴小刚<sup>1,2</sup>, 王兆德<sup>2</sup>, 王宝莹<sup>2</sup>, 柯凡<sup>2</sup>, 韩超<sup>2\*\*</sup>, 周强<sup>3</sup>, 任静华<sup>3</sup>

(1:景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院,景德镇 333403)

(2:中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,南京 210008)

(3:自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心,江苏省地质调查研究院,南京 210018)

**摘要:**为评估滆湖围网拆除工程实施效果,采用高密度网格化布点方法,系统分析滆湖沉积物营养盐和重金属的空间分布和污染特征;并基于有机氮评价方法、综合污染指数评价方法、重金属地质累积指数法和重金属潜在生态风险评价方法进行污染风险评价。结果表明,滆湖沉积物总氮(TN)、总磷(TP)和总有机碳(TOC)的平均含量分别为( $3709\pm1004$ ) mg/kg、( $1127\pm650$ ) mg/kg 和( $78.39\pm23.88$ ) mg/g,三者空间分布特征较为一致;营养盐综合污染指数评价表明,全湖整体为重度污染,其中全湖TN均处于重度污染状态,TP绝大部分区域也处于重度污染状态。沉积物重金属Zn、Cr、As、Pb、Ni、Cu、Cd的平均含量分别为( $170.62\pm47.25$ )、( $105.18\pm34.91$ )、( $68.55\pm10.86$ )、( $52.43\pm14.73$ )、( $44.04\pm11.93$ )、( $42.57\pm12.43$ )、( $1.55\pm1.06$ ) mg/kg,整体上呈现出由南向北、自西向东逐渐增加的趋势,重金属含量最高值在湖区东北角;地积累指数法和潜在生态风险指数法评价结果均表明Cd和As是主要的生态风险贡献因子,其中Cr和Ni的污染程度表现为清洁,Cr、Ni、Cu、Zn和Pb的单项潜在生态风险等级表现为轻微风险。与围网拆除前比,湖中区西南部沉积物营养盐含量无显著变化,湖南区南部沉积物营养盐状况明显改善,但其余各区域沉积物营养盐状况均有不同程度的恶化;湖区沉积物中重金属元素平均含量均有极大的降低,降幅在29.50%~80.45%之间,表明在外源污染输入得到一定控制时,围网拆除在控氮、控磷效果及改善重金属污染状况方面有着积极作用。

**关键词:**滆湖;养殖围网;沉积物;营养盐;重金属;污染评价

## Spatial distribution and pollution assessment on the main nutrients and heavy metals in sediments of Lake Gehu, Taihu Basin after removing the aquaculture net<sup>\*</sup>

Liao Runhua<sup>1</sup>, Wu Xiaogang<sup>1,2</sup>, Wang Zhaode<sup>2</sup>, Wang Baoying<sup>2</sup>, Ke Fan<sup>2</sup>, Han Chao<sup>2\*\*</sup>, Zhou Qiang<sup>3</sup> & Ren Jinghua<sup>3</sup>

(1: School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic Institute, Jingdezhen 333403, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(3: Geological Survey of Jiangsu Province, Technical Innovation Center of Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable), Ministry of Natural Resource, Nanjing 210018, P.R.China)

**Abstract:** In this study, the spatial distribution characteristics of the main nutrients and heavy metals in sediments of Lake Gehu after completely removing the aquaculture net were investigated using high-density sampling methods, and their potential ecological risks were assessed based on organic nitrogen index, integrated pollution index, geo-accumulation index ( $I_{geo}$ ) and potential ecological risk index. Results showed that the average contents of TN, TP and TOC were ( $3709\pm1004$ ) mg/kg, ( $1127\pm650$ ) mg/kg

\* 2020-12-15 收稿;2021-01-15 收修改稿。

江苏省优秀青年基金项目(BK20180109)、国家自然科学基金项目(41773087)、国家水体污染防治与治理科技重大专项(2017ZX07603002)、江西省自然科学基金项目(2020BABL203037)、江西省教育厅项目(GJJ201311)和景德镇市科技计划项目(20192GYZD008-33)联合资助。

\*\* 通信作者;E-mail:chan@niglas.ac.cn.

and ( $78.39 \pm 23.88$ ) mg/g, respectively. The spatial distribution characteristics of TN, TP and TOC were relatively consistent, generally, those of the middle and upper part of the lake was higher than those of the southern part except the northern. Integrated pollution index showed that the whole lake was heavily polluted, meanwhile, the lake was severely TN-polluted and slightly TP-polluted in most areas. The average contents of heavy metals Zn, Cr, As, Pb, Ni, Cu and Cd were ( $170.62 \pm 47.25$ ), ( $105.18 \pm 34.91$ ), ( $68.55 \pm 10.86$ ), ( $52.43 \pm 14.73$ ), ( $44.04 \pm 11.93$ ), ( $42.57 \pm 12.43$ ) and ( $1.55 \pm 1.06$ ) mg/kg, respectively. Generally, the heavy metal contents increased from south to north, from west to east, and reached the highest level in the northeast corner.  $I_{geo}$  and the potential ecological risk assessment indicated that Cd and As were the most polluted elements and led to high potential ecological risk. According to the result of  $I_{geo}$ , Cr and Ni were not polluted, while Cr, Ni, Cu, Zn and Pb were at a slight potential ecological risk. Since the aquaculture net was being demolished, there was no significant change in the nutrient content in the southwestern part of the lake, and the nutrient status in the southern end of the Gehu Lake area was significantly improved, but the nutrient status in the rest of the area had deteriorated to varying degrees; the heavy metal content has a great reduction, ranging from 29.50% to 80.45%, indicating that when the input of external pollution is controlled to a certain extent, the removal of the fence has a positive effect on the effect of controlling nitrogen and phosphorus and improving the pollution of heavy metals.

**Keywords:** Lake Gehu; aquaculture net; sediments; nutrient; heavy metal; risk assessment

氮、磷等营养盐作为生物生长所必需营养元素,调节着水中藻类的生长,被认为是我国水体富营养化的主要限制因子<sup>[1-2]</sup>。重金属污染作为一类具有潜在危害性的污染,以其高毒性、累积性、迁移性、难降解等特性而倍受关注<sup>[3-4]</sup>,此外,该类污染物经过水生生物摄入和吸收,发生生物富集和食物链放大等效应,最终可能通过食物网进入人体,危及人类健康<sup>[5]</sup>。过量营养盐和重金属通过扩散、沉降等形式不断在沉积物中蓄积,而当外界环境(如温度、光照、pH等)改变或受人为干扰,蓄积污染物可能再次释放到水体中,造成水体二次污染(也称沉积物内源释放污染),因此沉积物既是污染物的“汇”又是“源”。当外源污染输入得到控制,沉积物内源释放是造成水环境污染的重要原因。因此,探明沉积物营养盐和重金属空间分布及污染特征,并对其进行污染风险分析评价,有助于相关部门对水环境安全和水产品安全的科学研判和指导。

滆湖( $31^{\circ}29' \sim 31^{\circ}42'N$ ,  $119^{\circ}44' \sim 119^{\circ}53'E$ ),水域面积  $164 km^2$ ,为苏南地区的第二大湖泊,是构成长江三角洲太湖流域的重要组成部分。长期以来,滆湖“围湖”、“围网”现象尤为严重,一直是养殖污染重灾区,且由于周边地区工业化和城市化的快速发展,大量工农业废水汇入滆湖,导致水体富营养化和重金属污染问题日益严重,使得湖区经济社会的健康发展和市民生产生活的供水安全遭受极大挑战,也严重影响国家对整个太湖流域环境治理目标的实现<sup>[6-9]</sup>。为改善滆湖水质,自2004年起政府便对滆湖开展“围网整治”和“退渔还湖”等工程。目前已有不少学者针对滆湖水质变化特征、水体生态系统健康评价及水污染控制技术等开展研究工作。如,吴晓东等<sup>[6]</sup>通过分析滆湖总悬浮物(TSS)的时空分布特征、组成及其季节变化规律,探明藻类暴发和泥沙再悬浮是影响滆湖水体悬浮物浓度的重要因素。张莉等<sup>[7]</sup>对2010—2016年滆湖水质现状及动态变化趋势研究表明,7年间滆湖水体中总氮(TN)、溶解氧(DO)、石油类浓度呈不显著下降趋势,而总磷(TP)、氨氮( $NH_3-N$ )等浓度呈不显著上升趋势。王彧<sup>[8]</sup>全面分析了滆湖全湖水质特征,指出滆湖水体营养状况全年长期属中度富营养化。在滆湖围网拆除工程实施期间,熊春晖等<sup>[9]</sup>于2014年初步调查分析了滆湖沉积物营养盐和重金属的污染特征,发现湖北区TN、TP含量显著低于其他湖区,重金属潜在生态风险指数(RI)表明滆湖沉积物存在很强到极强的潜在生态风险。2017—2019年3月底,全湖最后约 $1.51 \times 10^7 m^2$ 围网全面拆除。然而,当前针对围网拆除工程对滆湖沉积物污染状况的后续影响效果却鲜有人跟踪报道。目前,国内外针对水体围网拆除前后相关效果的研究多围绕水质及生态环境改善情况<sup>[10-11]</sup>,而针对沉积物的相关报道相对较少。因此,为科学评估围网拆除前后滆湖沉积物中营养盐和重金属元素变化状况,本文采用网格化布点方式在全湖精细布点,通过对滆湖表层沉积物中营养盐和重金属元素的大范围、高密度调查,分析其空间分异特征,并采用相关评价方法对营养盐污染和重金属潜在的生态风险进行了评价,以期为滆湖围网拆除后期重点湖区的清淤、生态修复等污染防治和生态恢复重建提供理论依据和数据支撑;也为滆湖科学治水、控源截污和渔业资源开发等工作的开展提供一定的建议及对策。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集与处理

为更精确地获取滆湖污染物的空间分布特征根据网格化布点法,全湖共布设33个采样点位(图1)。根据地理位置及湖区资源开发和修复情况,将整个湖区分为湖北区(点位1~3),湖中区东北部(点位4~14、17~19、23、33)、西南部(点位15、16、20~29)和湖南区(点位30~32)4片区域。于2019年7月,借助GPS全球定位系统,利用抓斗式采泥器(PBS-411)采集表层0~15 cm的沉积物,随即装入自封袋避光冷藏保存。现场同步利用便携式水质参数仪(YSI 6600)监测水温(T)、pH值、DO浓度等环境指标,结果见表1。采集后的沉积物样本低温保存送回实验室进行预处理。首先剔除沉积物中较大的动植物个体、石粒等,然后进行冷冻干燥处理。干燥过的沉积物样品用玛瑙研钵进行充分研磨并过筛(筛网孔径为74 μm),放入自封袋中放置于干燥阴凉处备用。

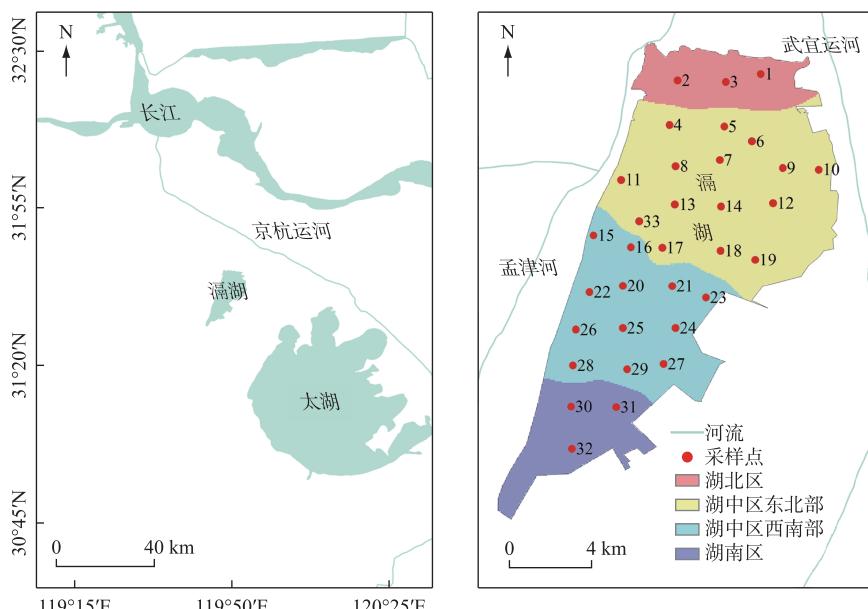


图1 滆湖采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in Lake Gehu

表1 采样点水质信息

Tab.1 Multiple parameters of water quality

水质参数	最大值	最小值	平均值
底泥深度/m	1.05	0.1	0.43±0.30
水深/m	3.1	1	1.60±0.40
温度/℃	28.83	24.46	26.58±1.10
DO/(mg/L)	17.73	8.24	10.75±1.23
pH	8.76	6.73	8.14±0.38
TDS/(g/L)	0.28	0.14	0.25±0.02
ORP/mV	259	162	214±24
电导率/(mS/cm)	0.43	0.24	0.38±0.03

### 1.2 样品分析方法

1.2.1 沉积物TN和TP的分析方法 采用过硫酸钾联合消解法测定积物中TN、TP含量<sup>[12]</sup>。具体方法为:称取约0.02 g干泥样于比色管中,加入25 mL氧化剂(20 g K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>,3 g NaOH溶于1 L去离子水中),再加入25 mL去离子水,加塞后置于121℃的YXQ-LS-50G灭菌锅中消解30 min。取3 mL消解后溶液于比色皿中,用紫外可见分光光度计在210 nm处测定TN含量,另取3 mL加入0.3 mL钼-锑-抗显色剂,于700 nm处测定TP含量。

1.2.2 沉积物重金属总量的测定方法 称取0.10 g左右干泥样于比色管中,再加入2 mL HF,1 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>和1

mL HNO<sub>3</sub>,然后置于 Mars6 微波消解炉中消解 4 h,冷却后取 1 mL 上清液并将其稀释到 10 mL。重金属(As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn)的含量使用安捷伦 7700X 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。

1.2.3 沉积物中总有机质(TOC)含量测定方法 采用灼烧法<sup>[13]</sup>测定沉积物中 TOC 含量。将坩埚于 95℃马弗炉中灼烧至前后两次量差低于 0.5 mg,记作  $m_1$ 。取 0.5 g 土样于坩埚中,于 105℃下烘 12 h 后取出,冷却,称量,记作  $m_3$ ;于 550℃灼烧 5 h 后取出,冷却,称量,记作  $m_2$ 。烧失量( $LOI$ )的计算公式为:

$$LOI = \frac{m_3 - m_2}{m_3 - m_1} \times 100\% \quad (1)$$

### 1.3 污染评价方法

目前国内外针对沉积物中氮、磷的污染评价方法有很多,本文采用有机氮评价方法和综合污染指数评价方法对滆湖表层沉积物中的氮、磷污染进行评价。

1.3.1 有机氮评价方法 有机氮是衡量湖泊表层沉积物是否受到氮污染的重要指标。计算公式<sup>[14]</sup>为:

$$W_{ON} = 0.95W_{TN} \quad (2)$$

式中, $W_{ON}$ 为有机氮含量, $W_{TN}$ 为总氮含量。有机氮评价等级见表 2。

表 2 沉积物有机氮评价标准

Tab.2 Evaluation standards of organic nitrogen in sediments

项目	$W_{ON} < 0.033\%$	$0.033\% \leq W_{ON} < 0.066\%$	$0.066\% \leq W_{ON} < 0.133\%$	$W_{ON} \geq 0.133\%$
类型 等级	清洁 I	较清洁 II	尚清洁 III	有机氮污染 IV

1.3.2 营养盐综合污染指数评价方法 采用综合污染指数评价表层沉积物中 TN、TP 的污染程度。计算方法为:

$$S_j = C_j/C_s \quad (3)$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{MAX}^2}{2}} \quad (4)$$

式中,FF 为综合污染指数; $S_j$ 为单项评价指数或标准指数, $S_j > 1$  表示因子  $j$  含量超过评价标准值; $C_j$ 为评价因子  $j$  的实测值,g/kg; $C_s$ 为评价因子  $j$  的评价标准值,按文献[15]取值, $W_{TN}$ 的  $C_s$  为 1.00 g/kg, $W_{TP}$  的  $C_s$  为 0.42 g/kg ( $W_{TN}$  和  $W_{TP}$  为背景值,即湖泊未受人类活动影响时,湖泊沉积物中 TN、TP 实测值的平均值); $F$  为  $n$  项污染指数的平均值(即公式(3)中  $S_{TN}$  和  $S_{TP}$  的平均值); $F_{MAX}$  为最大单项污染指数(即  $S_{TN}$  和  $S_{TP}$  中的最大值)。FF 的大小与污染等级关系见表 3。

表 3 沉积物综合污染程度分级

Tab.3 Standard and level of comprehensive pollution in sediment

等级划分	$S_{TN}$	$S_{TP}$	FF	等级
1	$S_{TN} < 1.0$	$S_{TP} < 0.5$	$FF < 1.0$	清洁
2	$1.0 \leq S_{TN} < 1.5$	$0.5 \leq S_{TP} < 1.0$	$1.0 \leq FF < 1.5$	轻度污染
3	$1.5 \leq S_{TN} < 2.0$	$1.0 \leq S_{TP} < 1.5$	$1.5 \leq FF < 2.0$	中度污染
4	$S_{TN} \geq 2.0$	$S_{TP} \geq 1.5$	$FF \geq 2.0$	重度污染

1.3.3 重金属地质累积指数法 地质累积指数法是德国海德堡大学沉积物研究所的 Müller<sup>[16]</sup> 提出的,将人为污染因素、地球化学背景值以及由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素综合考虑,其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C/(k \cdot B)] \quad (5)$$

式中, $I_{geo}$ 为重金属的地质积累指数; $C$ 为重金属在沉积物中的实测浓度,mg/kg; $B$ 为重金属在沉积岩中所测的地球化学背景值,采用江苏省土壤重金属环境背景值<sup>[17]</sup>(表 4); $k$ 为考虑到成岩作用可能会引起背景值变

动而设定的常数,一般  $k=1.5^{[18]}$ .  $I_{\text{geo}}$  大小与污染等级见表 5.

表 4 重金属评价背景值和毒性系数  
Tab.4 Reference values and toxicity coefficients of heavy metals

重金属元素	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
江苏省土壤背景值/(mg/kg)	9.4	0.151	76	26	32.9	26.8	73
毒性系数	10	30	2	5	5	5	1

表 5 重金属污染程度与  $I_{\text{geo}}$  的关系  
Tab.5 The relationship between heavy metal pollution and  $I_{\text{geo}}$

项目	$I_{\text{geo}} \leq 0$	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	$I_{\text{geo}} > 5$
程度 级数	清洁 0	轻度 1	偏中度 2	中度 3	偏重度 4	重度 5	严重 6

1.3.4 重金属潜在生态风险评价方法 为综合反映沉积物中重金属的潜在生态影响,需考虑到重金属毒性、评价区域对重金属污染的敏感性,以及重金属区域背景值的差异,故选用 Håkanson<sup>[19]</sup> 提出的污染评价方法,其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot c_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{c^i}{c_n^i} \quad (6)$$

式中,  $RI$  为潜在生态风险指数;  $E_r^i$  为重金属  $i$  的潜在生态风险系数(即重金属单项潜在生态风险指数);  $T_r^i$  为重金属  $i$  的毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度;  $C_r^i$  为重金属  $i$  的污染指数;  $c^i$  为沉积物中重金属  $i$  的实测值;  $c_n^i$  为重金属  $i$  的背景值. 江苏省地区的重金属背景值和毒性系数<sup>[20]</sup> 见表 4,  $E_r^i$ 、 $RI$  和潜在生态风险等级见表 6.

#### 1.4 数据处理

利用 Excel 软件进行数据处理和图表绘制. 利用 ArcGIS 10.2 软件进行反距离权重插值法绘制沉积物营养盐和重金属元素的二维空间分布特征图. 利用 SPSS 25.0 软件进行相关性分析.

## 2 结果与讨论

### 2.1 围网拆除后滆湖沉积物营养盐空间分布特征

滆湖表层沉积物各位点营养盐含量具有很大的空间异质性(图 2). TN 含量为 1101~5725 mg/kg, 平均值为  $(3709 \pm 1004)$  mg/kg, 最高值出现在点位 27 处. 整个湖区 TN 含量呈现出较明显的区域性分布, 即湖北区 ( $P<0.001$ ) 及湖中区西南部 ( $P=0.002$ ) 显著低于湖中区东北部. TP 含量为 450~3950 mg/kg, 均值为  $(1127 \pm 650)$  mg/kg, 最高值也出现在点位 27 处. 整体而言, 湖中区西南部表层沉积物 TN 含量相对较低, 但在点位 27 处出现一个明显的总磷富集区. TOC 含量的空间分布与 TN、TP 含量分布具有很大的相关性. TOC 含量为 32.66~152.51 mg/g, 均值为  $(78.39 \pm 23.88)$  mg/g, 最高值也出现在点位 27 处, 也进一步反映了土壤有机质是沉积物中 N、P 等有机营养元素的主要贡献者.

总体而言, 湖北区及南区南部营养盐含量较湖中区低, 主要原因在于湖北区沿岸生态公园的截留与净化作用, 以及 2010 年进行了底泥疏浚<sup>[21]</sup> 和水生植被恢复等生态修复工作; 湖南区南部湖道狭长, 水生植物生长密集. 湖中区东北部由于湖岸两旁居民区较为密集, 农业面积大, 生活污水及工农业废水的大量排放,

加之此前的围网养殖<sup>[22]</sup>,都导致了营养盐含量的升高;湖区东部沿岸由北至南有4个主要的营养盐富集区,所处位点为10、19、27和31,分别临近大洪港、太滆运河、漕桥河和殷村港的出湖口,说明这些出湖河流均受到不同程度的营养盐污染,并有污染物最终蓄积在出湖口沉积物中,这与陈雷等<sup>[23]</sup>的研究结果相符;湖区西部沿岸由北至南有两个主要的营养盐富集区,所处位点为4和30,分别临近孟津河与滆湖的交汇处和中干河的入湖口,表明这些入湖河流均会向湖区排放大量营养盐,这与蔡金榜等<sup>[24]</sup>的研究结果相符。

与围网拆除前<sup>[9]</sup>相比,滆湖湖南区南部营养盐状况明显改善,如在点位32处TN和TP含量均下降43%左右,说明外源污染输入得到控制时,围网拆除控磷、控氮效果显著,这与班璇等<sup>[22]</sup>的研究结果较为一致;湖中区西南部营养盐含量无显著变化,可能在于围网拆除的积极效应与入湖河流裹挟营养盐的影响相互消弭,其余各区域营养盐状况均有不同程度的恶化,其中犹以点位27处最为严重,TN、TP含量分别增加73%和338%左右,这与流入湖区的大量污染物有直接关系,在加强直接入湖污染物(如饲料、直接排入湖区的生活污水及工农业废水等)的监管和治理的同时,也应重视出入湖河流及其沿岸点源、面源污染的整治和管理。

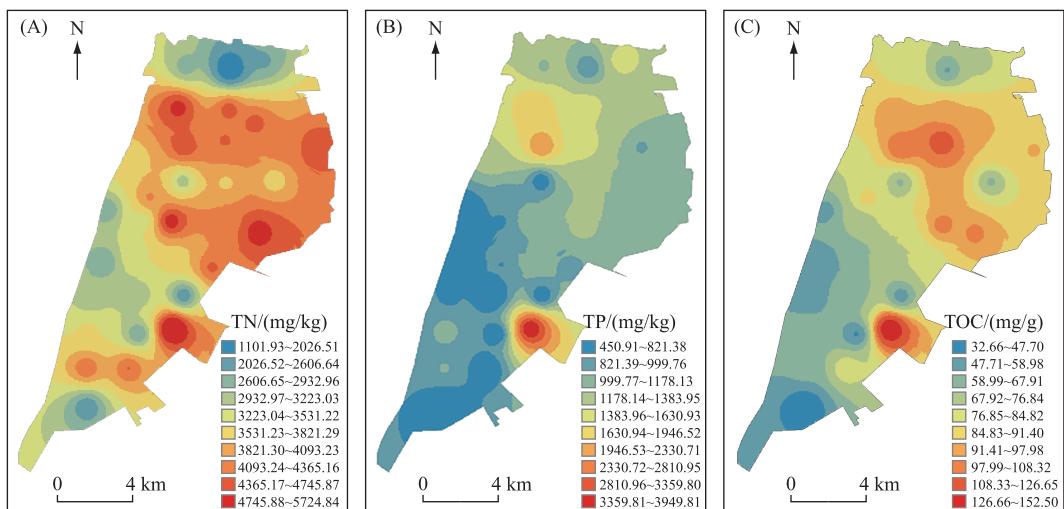


图2 滆湖表层沉积物营养盐的空间分布  
Fig.2 Spatial distributions of the main nutrients in the surface sediments of Lake Gehu

## 2.2 围网拆除后滆湖沉积物重金属空间分布特征

滆湖沉积物中重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb)的空间分布见图3。各重金属平均含量与江苏背景值比值为Cd( $10.30$ )>As( $7.29$ )>Zn( $2.34$ )>Pb( $1.96$ )>Cu( $1.64$ )>Cr( $1.38$ )>Ni( $1.34$ ),各重金属平均含量分别为( $1.55\pm1.06$ )、( $68.55\pm10.86$ )、( $170.62\pm47.25$ )、( $52.43\pm14.73$ )、( $42.57\pm12.43$ )、( $105.18\pm34.91$ )和( $44.04\pm11.93$ )mg/kg。因此都存在一定程度的污染,其中犹以Cd和As最为严重。Zn、Pb、Ni和Cu的变异系数在20%~30%之间,As、Cr和Cd的变异系数分别为15.84%、33.19%和68.17%(表9),说明这7种重金属含量具有一定的空间异质性;依据Wilding对变异系数( $C_v$ )的分类<sup>[25]</sup>,As、Zn、Pb、Ni、Cu和Cr为中等变异( $15\% < C_v < 36\%$ ),Cd为高度变异( $C_v > 36\%$ ),表明人类活动是造成重金属空间分布差异的主要因素<sup>[26]</sup>,也表明Cd受人为污染影响最为严重。整体呈现由南向北、自西向东逐渐增的趋势,在湖区东北角重金属含量达到最高。从图3可以看出,Zn、Cr和As含量的高值位点均出现在湖北区东部,都在东北角达到各自的最高值;Ni、Cu分布具有很大的一致性,在湖中区东北部与西南部出现明显的区别,值得一提的是,Pb、Cd含量的最高值都出现在湖心部位,Cd在湖区北部与南部含量较低,Pb含量的高低值区域较为分散,但高值部分多集中在湖中与东部沿岸;在重金属含量高值区域点位3污染较低,在相对低值区域点位27污染较高。其中点位1地处湖区东北角,是武南河出湖口,点位2临近扁担河和夏溪河入湖口,点位19与27分别临近太滆运河和漕桥河出湖口,表明河流出入湖口的沉积物重金属含量普遍高于其他湖区,这与刘新

等<sup>[27]</sup>针对巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属含量的研究结果一致。

与围网拆除前<sup>[9]</sup>相比,湖区沉积物各重金属平均含量均有极大程度的降低,平均降幅为59.95%,降幅之最属Cu和As,分别为29.50%和80.45%.但局部地区部分重金属元素含量有所增加,如湖区东北角点位1处As含量和湖心处Pb和Cd含量。同时滆湖重金属平均含量均高于周边湖泊长荡湖<sup>[28]</sup>,仅Ni含量略低于阳澄湖<sup>[29]</sup>,其中As的含量更是太湖流域<sup>[30]</sup>的5.2倍。表明滆湖沉积物重金属平均含量仍处于很高水平,仍亟待进一步的治理。尤其是湖区东北角及湖心区域,渔民合理渔业资源开发及利用时应规避该处湖区,防止该处水产品摄入过量重金属元素后又被市民所食用,进而对人体健康造成潜在危害。

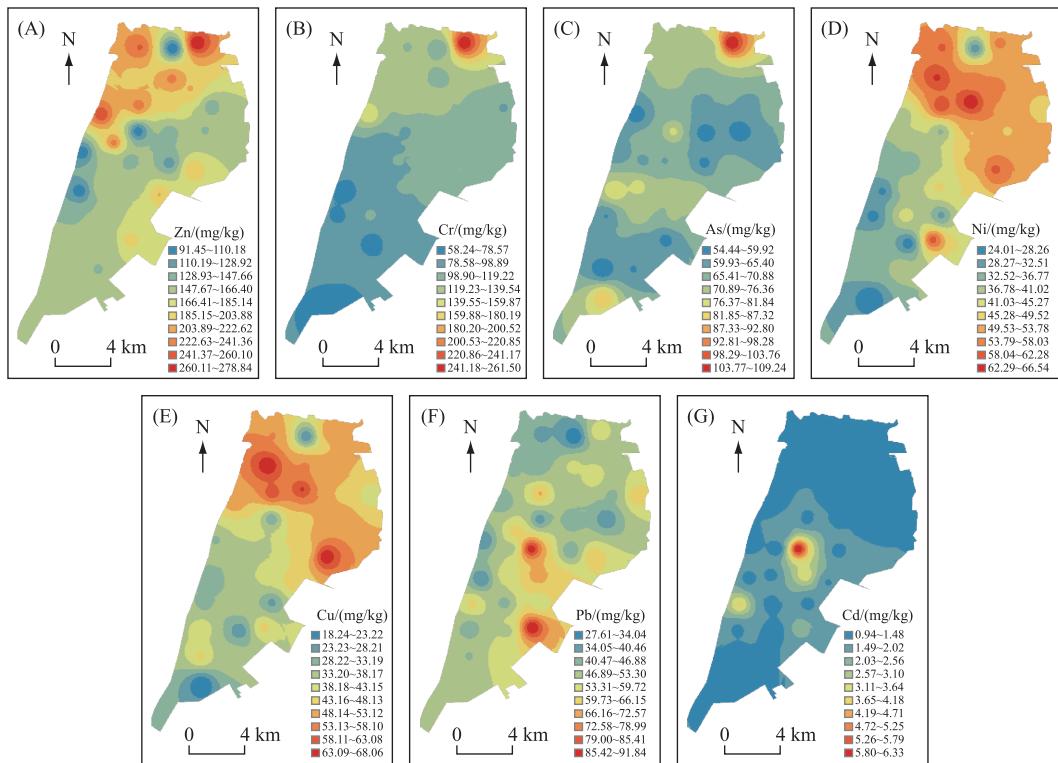


图3 滩湖表层沉积物重金属的空间分布

Fig.3 Spatial distributions of heavy metals in the surface sediments of Lake Gehu

### 2.3 滩湖沉积物营养盐污染评价

滆湖所有点位表层沉积物有机氮污染均属IV级,其中湖心中北部有机氮污染十分严重,且重灾区出现在湖区东南部点位27处,说明整个滆湖表层沉积物氮污染问题已刻不容缓。

单项评价指数 $S_{TN}$ 清洁比例为0,轻度污染比例为3.03%,中度污染比例为0,重度污染比例为99.97%; $S_{TP}$ 清洁比例和轻度污染比例均为0,中度污染比例为15.15%,重度污染比例为84.85%;综合污染指数 $FF$ 值为4.39,属于重度污染。综合以上所得数据及图2A、2B,说明就整个湖区而言,当外源污染输入未得到有效控制时,围网拆除效果并不显著,使得滆湖表层沉积物氮、磷污染情况仍然十分严峻,这与学者就滆湖底栖动物群落、浮游藻类植物的污染评价结果一致<sup>[31-32]</sup>,也与滆湖水质污染状况影响评价相一致<sup>[33]</sup>。研究表明,沉积物中的氮、磷一部分来自于水生生物的腐败,另一部分则来自于外源性输入<sup>[34]</sup>。近年来,随着滆湖周边地区人口数量的增加及工业化和城市化的快速发展,大量工农业废水和生活污水流入其中,加之此前围网养殖的饲料投加,均是滆湖沉积物中营养盐的贡献者。

数据表明,沉积物中的TN和TP含量分别是范成新<sup>[35]</sup>于1995年对滆湖沉积物营养盐调查结果的13和49倍,是熊春晖等<sup>[9]</sup>于2014年对围网拆除前滆湖沉积物营养盐调查结果的1.7和1.6倍,表明当外源污染输入尚未得到有效控制时,围网拆除工程能有效减弱沉积物中氮、磷的进一步蓄积。但整个湖区表层沉积物营养盐含量逐年增加是需要我们足够的重视并进一步监管和治理的。

#### 2.4 滆湖沉积物重金属污染评价

2.4.1 重金属地质累积指数法 地累计指数法评价结果如表7所示,除Cr和Ni表现为清洁外,其余元素均表现为不同程度的污染,污染程度大小为Cd>As>Zn>Pb>Cu>Cr>Ni,其中Cd和As是主要污染物,属中度污染。

从表8中可以看出,在所有位点中,As处于偏中度污染状态的占3.03%,中度污染的占96.97%;Cd处于中度污染的占87.88%,偏重度污染的占12.12%;Cr和Ni主要表现为清洁状态,但其中Cr有3.03%的位点处于偏中度污染;Cu、Zn和Pb主要表现为轻度污染,但Zn和Pb有部分位点处于偏中度污染。

表8 滆湖表层沉积物中7种重金属元素地累积指数分级频率分布

Tab.8 Graded frequency distribution of  $I_{geo}$  of 7 heavy metals in the surface sediments of Lake Gehu

元素	最小值	最大值	平均值	级数	污染程度
Cr	-0.97	1.2	-0.17	0	清洁
Ni	-1.04	0.43	-0.22	0	清洁
Cu	-1.1	0.8	0.06	1	轻度
Zn	-0.26	1.35	0.58	1	轻度
As	1.95	2.95	2.27	3	中度污染
Cd	2.05	4.81	2.61	3	中度污染
Pb	-0.54	1.19	0.33	1	轻度

2.4.2 重金属潜在生态风险评价方法 滆湖沉积物中重金属单项潜在生态风险等级如表9所示,可以看出,Cr、Ni、Cu、Zn和Pb所有位点的单项潜在生态风险等级均表现为轻微风险;As的所有位点中81.82%的位点单项潜在生态风险等级均表现为中等风险,其余位点表现为强风险;Cd的所有位点中87.88%的位点单项潜在生态风险等级均表现为很强风险,其余位点表现为极强风险。显然,Cd和As对潜在生态风险的贡献很大,分别为75.06%和17.71%,其余5种重金属的贡献总值仅为7.23%。因此Cd和As是滆湖表层沉积物中生态风险的主要贡献因子,单项重金属对其贡献大小依次为Cd>As>Pb>Cu>Ni>Cr>Zn。

滆湖表层沉积物中7种重金属的RI介于274.96~1362.17之间,均值为411.73±230.75,风险等级除轻微风险外其他各类风险均有所体现,其中处于强风险的位点占所有位点的78.79%,其RI值也均远高于阳澄湖<sup>[29]</sup>、长荡湖<sup>[28]</sup>和太湖湿地<sup>[30]</sup>,加之滆湖西连长荡湖,东接太湖,更应重视滆湖沉积物重金属污染的治理,防止其迁移至周边湖泊,造成异地污染。

研究表明,冶炼工业是造成湖泊沉积物Cd污染的主要原因之一,电镀、原油燃烧和合金制造以及农药和化肥的施加等过程也会排放大量的Cd<sup>[36-37]</sup>;As和Cu主要来自农药和工业废水的排放<sup>[38]</sup>;Pb主要来自矿石和汽油的燃烧以及含铅工业的排放,城市生活污水的排放也会贡献少量Pb<sup>[39]</sup>。汽车制动过程的器械摩擦、设备磨损会造成Pb、Cu和Ni进入水体并在沉积物中积蓄<sup>[40-41]</sup>。Cr和Zn的主要来源与Cd的工业源大致相同,为合金制造厂、电镀厂等<sup>[42-43]</sup>。地积累指数法和潜在生态风险指数法的评价结果较为一致,显示Cd

和 As 是最主要的重金属污染物(与围网拆除前<sup>[9]</sup>结论一致,但二者污染程度和风险等级有明显改善,不过其在湖心处含量仍在进一步蓄积),表明滆湖沉积物重金属污染主要来自工业源与农业源,这与湖区周边工业的生产、农业化肥的施用及湖区养殖业饲料的投加有着密切的关系,应以此次围网拆除为契机,完善对饲料、化肥的监管机制,合理施用,加强对滆湖保护区内产污排污企业整治工作的同时,也应加大对滆湖沉积物重金属高蓄积区的长期监测和修复治理.

表 9 滆湖表层沉积物中 7 种重金属元素潜在生态风险指数描述性统计与等级划分

Tab.9  $E_r^i$ , RI and the grading of 7 heavy metals in the surface sediments of Lake Gehu

风险指数	描述统计结果				风险等级/%			
	均值	范围	变异系数/%	轻微	中等	强	很强	极强
单项潜在生态风险指数 $E_r^i$	As	72.93±11.56	57.91~116.24	15.8	—	81.82	18.18	—
Ni	6.69±1.81	3.65~10.11	27.1	100	—	—	—	—
Zn	2.34±0.65	1.25~3.82	27.7	100	—	—	—	—
Pb	9.78±2.45	5.15~17.13	28.1	100	—	—	—	—
Cu	8.19±2.39	3.51~13.09	29.2	100	—	—	—	—
Cr	2.77±0.92	1.53~6.88	33.2	100	—	—	—	—
Cd	309.03±210.68	185.76~1258.61	68.2	—	—	—	87.88	12.12
综合潜在生态风险指数 RI	411.73±230.75	274.96~1362.17	56.0	—	12.12	78.79	6.06	3.03

### 3 结论

1) 滆湖表层沉积物营养盐空间分布特征较为一致,湖中区东北部普遍高于其他区域,但营养盐含量最高值皆出现在湖区东南沿岸点位 27 处. 其中 TN、TP 和 TOC 的含量分别为 1100~5725 mg/kg、450~3950 mg/kg 和 32.65~152.51 mg/g, 平均值为 (3709±1004) mg/kg、(1127±650) mg/kg 和 (78.39±23.88) mg/g. 整个湖区表层沉积物均出现有机氮污染. 营养盐综合污染指数评价表明,全湖整体为重度污染,其中全湖 TN 几乎均处于重度污染状态,TP 在绝大部分区域也处于重度污染状态.

2) 滆湖表层沉积物重金属各元素平均含量与江苏省土壤背景值相比,超标倍数为 Cd (10.30) > As (7.29) > Zn (2.34) > Pb (1.96) > Cu (1.64) > Cr (1.38) > Ni (1.34), 前者分别为 (1.55±1.06)、(68.55±10.86)、(170.62±47.25)、(52.43±14.73)、(42.57±12.43)、(105.18±34.91) 和 (44.04±11.93) mg/kg. 重金属含量整体大致呈现出由南向北、自西向东逐渐增加的趋势,在湖区东北角重金属含量达到最高.

3) 地累积指数法结果表明,除 Cr 和 Ni 外其他元素均处于不同程度的污染,其中 Cd 和 As 为主要污染物,且滆湖已受到 Cd 中度一偏重度污染. 重金属潜在生态风险评价法结果表明,除 Cd 和 As 存在中等及以上风险等级外,其余元素均处于轻微生态风险等级. 单项重金属的生态危害顺序为: Cd > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn, 其中 Cd 和 As 是滆湖表层沉积物中生态风险的主要贡献因子.

4) 围网拆除后,湖区表层沉积物营养盐在湖南区南部有所下降,湖中区西南部营养盐含量无显著变化,其余各区域营养盐状况均有不同程度的恶化. 湖区沉积物中重金属平均含量均有极大的改善,但局部地区部分重金属元素含量有所增加. 表明在外源污染输入得到一定控制时,围网拆除在控氮、控磷效果及降低重金属污染方面有着积极作用.

### 4 参考文献

- [ 1 ] Zhao HT, Li XY. Risk assessment of metals in road-deposited sediment along an urban-rural gradient. *Environmental Pollution*, 2013, 174: 297-304. DOI: 10.1016/j.envpol.2012.12.009.
- [ 2 ] Wang LJ, Lu XW, Ren CH et al. Contamination assessment and health risk of heavy metals in dust from Changqing industrial park of Baoji, NW China. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(5): 2095-2104. DOI: 10.1007/s12665-013-2613-7.

- [ 3 ] Li JL, Jiang X, Wang SH *et al.* Heavy metal in sediment of Danjiangkou Reservoir: Chemical speciation and mobility. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4) : 1207-1217. [李佳璐, 姜霞, 王书航等. 丹江口水库沉积物重金属形态分布特征及其迁移能力. 中国环境科学, 2016, **36**(4) : 1207-1217.]
- [ 4 ] Fujita M, Ide Y, Sato D *et al.* Heavy metal contamination of coastal lagoon sediments: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Chemosphere*, 2014, **95**: 628-634. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.10.023.
- [ 5 ] Wei LL, Zhou Q, Xie CX *et al.* Bioaccumulation and biomagnification of heavy metals in Three Gorges Reservoir and effect of biological factors. *Environmental Science*, 2016, **37**(1) : 325-334. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.01.042. [韦丽丽, 周琼, 谢从新等. 三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响. 环境科学, 2016, **37**(1) : 325-334.]
- [ 6 ] Wu XD, Wang L, Chao JY *et al.* Characteristics and its influencing factors of suspended solids distribution in Lake Gehu, Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(6) : 1848-1857. DOI: 10.18307/2020.0624. [吴晓东, 王露, 晁建颖等. 太湖流域滆湖水体悬浮物分布特征及其影响因素. 湖泊科学, 2020, **32**(6) : 1848-1857.]
- [ 7 ] Zhang L, Wang MR, Zou HH *et al.* Current water quality and its dynamic change of Gehu Lake. *Journal of Huaiyin Institute of Technology*, 2018, **27**(1) : 30-35. [张莉, 王美蓉, 邹宏海等. 滆湖水质现状及动态变化趋势研究. 淮阴工学院学报, 2018, **27**(1) : 30-35.]
- [ 8 ] Wang Y. Investigation and evaluation on the eutrophication of Gehu Lake. *Journal of Huaiyin Institute of Technology: Natural Science Edition*, 2016, **25**(3) : 88-91. [王彧. 滆湖水质富营养化调查与评价. 淮海工学院学报: 自然科学版, 2016, **25**(3) : 88-91.]
- [ 9 ] Xiong CH, Zhang RL, Wu XD *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from lake Gehu in southern Jiangsu Province, China. *Environmental Science*, 2016, **37**(3) : 925-934. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.03.017. [熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东等. 滆湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价. 环境科学, 2016, **37**(3) : 925-934.]
- [ 10 ] Ji LY, Yin DY, Gong P. Temporal-spatial study on enclosure culture area in Yangcheng Lake with long-term landsat time series. *Journal of Remote Sensing*, 2019, **23**(4) : 717-729. DOI: 10.11834/jrs.20197439. [计璐艳, 尹丹艳, 宫鹏. Landsat 长时间序列的阳澄湖湖面围网时空变化. 遥感学报, 2019, **23**(4) : 717-729.]
- [ 11 ] Zhang QJ, Wang YY, Wang JD *et al.* Succession pattern of phytoplankton and its drivers in lake luoma, Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2020, **41**(4) : 1648-1656. DOI: 10.13227/j.hjkx.201909146. [张庆吉, 王业宇, 王金东等. 骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子. 环境科学, 2020, **41**(4) : 1648-1656.]
- [ 12 ] Qian JL, Fu LM. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in persulfate oxidation method. *Environmental Science*, 1987, **8**(1) : 81-84. DOI: 10.13227/j.hjkx.1987.01.019. [钱君龙, 府灵敏. 用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷. 环境科学, 1987, **8**(1) : 81-84.]
- [ 13 ] Zhu GW, Qin BQ, Gao G *et al.* Effects of ignition on determination of loss on ignition, iron and phosphorus in sediments. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2004, **23**(9) : 72-76. [朱广伟, 秦伯强, 高光等. 灼烧对沉积物烧失量及铁、磷测定的影响. 分析试验室, 2004, **23**(9) : 72-76.]
- [ 14 ] Sui GR. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake. *J Lake Sci*, 1996, **8**(4) : 319-324. DOI: 10.18307/1996.0405. [隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价. 湖泊科学, 1996, **8**(4) : 319-324.]
- [ 15 ] Zhang M. The mechanisms of eutrophication and heavy metal pollution in shallow lakes along The Yangze River [Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2005. [张敏. 长江中下游浅水湖泊富营养化机制与重金属污染研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院研究生院水生生物研究所, 2005.]
- [ 16 ] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geojournal*, 1969, **2**(3) : 108-118.
- [ 17 ] Liao QL, Liu C, Xu Y *et al.* Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province. *Geology in China*, 2011, **38**(5) : 1363-1378. [廖启林, 刘聪, 许艳等. 江苏省土壤元素地球化学基准值. 中国地质, 2011, **38**(5) : 1363-1378.]
- [ 18 ] Jiang HM, Zheng XP, Li W. Source and risk assessment of heavy metal in sediment of China. *China Population Resources and Environment*, 2018, **28**(S1) : 108-112. [姜会敏, 郑显鹏, 李文. 中国主要湖泊重金属来源及生态风险评估. 中国人口·资源与环境, 2018, **28**(S1) : 108-112.]
- [ 19 ] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, **14**(8) : 975-1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.

- [20] Zhao B, Zhu SX, Yang XQ *et al.* Pollution status and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Caohai Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(2) : 235-245. [赵斌, 朱四喜, 杨秀琴等. 草海湖沉积物中重金属污染现状及生态风险评价. 环境科学研究, 2019, **32**(2) : 235-245.]
- [21] Mao ZG, Gu XH, Lu XM *et al.* Ecological effects of dredging on aquatic ecosystem in the different regions of eastern Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3) : 385-392. DOI: 10.18307/2014.0308. [毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明等. 太湖东部不同类型湖区底泥疏浚的生态效应. 湖泊科学, 2014, **26**(3) : 385-392.]
- [22] Ban X, Yu C, Wei K *et al.* Analysis of influence of enclosure aquaculture on water quality of Honghu Lake. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33**(9) : 125-129. [班璇, 余成, 魏珂等. 围网养殖对洪湖水质的影响分析. 环境科学与技术, 2010, **33**(9) : 125-129.]
- [23] Chen L, Yuan Y, Lu SY *et al.* The analysis of pollutant characteristics in surface sediments of the stream inlets and outlets of the main rivers around Taihu Lake. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, **27**(1) : 294-299. [陈雷, 远野, 卢少勇等. 环太湖主要河流出入湖口表层沉积物污染特征研究. 中国农学通报, 2011, **27**(1) : 294-299.]
- [24] Cai JB, Sun X, Su LH *et al.* Investigation and analysis of pollution sources of Gehu Lake. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(5) : 224-227. [蔡金榜, 孙旭, 苏良湖等. 溧湖污染源调查与分析. 江苏农业科学, 2018, **46**(5) : 224-227.]
- [25] Wilding LP. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil survey. *Spatial Variations*, 1985 : 166-194.
- [26] Lv JS, Zhang ZL, Liu Y *et al.* Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(7) : 971-984. [吕建树, 张祖陆, 刘洋等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价. 地理学报, 2012, **67**(7) : 971-984.]
- [27] Liu X, Jiang Y, Gao JF *et al.* Pollution characteristics of heavy metals and the risk assessment for the surface sediments from Lake Chaohu and its main tributary rivers. *J Lake Sci*, 2016, **28**(3) : 502-512. DOI: 10.18307/2016.0305. [刘新, 蒋豫, 高俊峰等. 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价. 湖泊科学, 2016, **28**(3) : 502-512.]
- [28] Li ZQ, Wang J, Wu SS *et al.* Distribution and pollution assessment of nutrient and heavy metals in surface sediments from Changdang Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (11) : 115-118, 128. [李志清, 王俊, 吴苏舒等. 长荡湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价. 中国农村水利水电, 2019, (11) : 115-118, 128.]
- [29] Jiang Y, Wu ZS, Zhao ZH *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and heavy metals in surface sediments of Lake Yangcheng, Jiangsu Province, China. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(11) : 1590-1599. [蒋豫, 吴召仕, 赵中华等. 阳澄湖表层沉积物中氮磷及重金属的空间分布特征及污染评价. 环境科学研究, 2016, **29**(11) : 1590-1599.]
- [30] Yu JJ, Yin HB, Gao YN *et al.* Characteristics of nutrient and heavy metals pollution in sediments of Taihu watershed. *China Environmental Science*, 2017, **37**(6) : 2287-2294. [于佳佳, 尹洪斌, 高永年等. 太湖流域沉积物营养盐和重金属污染特征研究. 中国环境科学, 2017, **37**(6) : 2287-2294.]
- [31] Wang LQ, Wu L, Zhang RL *et al.* Spatiotemporal variation of zoobenthos community and bio-assessment of water quality in Gehu Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(8) : 1990-1996. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2012.0266. [王丽卿, 吴亮, 张瑞雷等. 溧湖底栖动物群落的时空变化及水质生物学评价. 生态学杂志, 2012, **31**(8) : 1990-1996.]
- [32] Chen LJ, Peng ZR, Kong YJ *et al.* Characteristics of community structure of planktonic algae in Gehu Lake of Jiangsu Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, **27**(9) : 1549-1556. [陈立婧, 彭自然, 孔优佳等. 江苏滆湖浮游藻类群落结构特征. 生态学杂志, 2008, **27**(9) : 1549-1556.]
- [33] Wang YS. Water environment evolution and its causes analysis of Gehu Lake. *Water Resources Planning and Design*, 2013, (8) : 37-40, 55. [汪院生. 溧湖水环境演变及其原因分析. 水利规划与设计, 2013, (8) : 37-40, 55.]
- [34] Wang LL, Wu WJ, Zhang B *et al.* Distribution characteristic of heavy metals and nutrient in sediments of Liangzi Lake. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(6) : 197-203. [王玲玲, 吴卫菊, 张斌等. 梁子湖沉积物中重金属及营养盐分布特征研究. 环境科学与技术, 2015, **38**(6) : 197-203.]
- [35] Fan CX. Physicochemical characteristics of sediments in Gehu Lake and simulation of its phosphorus release. *J Lake Sci*, 1995, **7**(4) : 341-350. DOI: 10.18307/1995.0408. [范成新. 溧湖沉积物理化特征及磷释放模拟. 湖泊科学, 1995, **7**(4) : 341-350.]

- [36] Xie XJ, Kang JC, Li WJ *et al.* Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai. *Environmental Science*, 2010, **31**(3) : 768-774. DOI: 10.13227/j.hjkx.2010.03.010. [谢小进, 康建成, 李卫江等. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析. 环境科学, 2010, **31**(3) : 768-774.]
- [37] Zhang MK, Wang H, Zhang HM. Distinguishing different sources of heavy metals in soils on the coastal plain of Eastern Zhejiang Province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10) : 1946-1954. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2008.10.003. [章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识. 环境科学学报, 2008, **28**(10) : 1946-1954.]
- [38] Zhang J, Guo XY, Zeng Y *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin. *Environmental Science*, 2019, **40**(5) : 2202-2210. DOI: 10.13227/j.hjkx.201809168. [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. 环境科学, 2019, **40**(5) : 2202-2210.]
- [39] Duzgoren-Aydin NS. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou. *Science of the Total Environment*, 2007, **385**(1/2/3) : 182-195. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.06.047.
- [40] Shao L, Xiao HY, Wu DS *et al.* Review on research on traffic-related heavy metals pollution. *Earth and Environment*, 2012, **40**(3) : 445-459. [邵莉, 肖化云, 吴代赦等. 交通源重金属污染研究进展. 地球与环境, 2012, **40**(3) : 445-459.]
- [41] Xia JD, Long JY, Gao YP *et al.* Ecological risk assessment and source analysis of heavy metal pollutions in sediments of the Chaohu Lake. *Earth and Environment*, 2020, **48**(2) : 220-227. [夏建东, 龙锦云, 高亚萍等. 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, 2020, **48**(2) : 220-227.]
- [42] Liu SR, Wang TY, Tang J *et al.* Source apportionment methods of soil heavy metals in typical urban units: An empirical study. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(4) : 1278-1289. DOI: 10.5846/stxb201809121963. [刘胜然, 王铁宇, 汤洁等. 典型城市单元的土壤重金属溯源方法与实证研究. 生态学报, 2019, **39**(4) : 1278-1289.]
- [43] Li YJ, Zhang LY, Wu YW *et al.* GIS spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of shallow lakes in Jiangsu Province. *Environmental Science*, 2016, **37**(4) : 1321-1329. DOI: 10.13227/j.hjkx.2016.04.017. [李莹杰, 张列宇, 吴易雯等. 江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属GIS空间分布及生态风险评价. 环境科学, 2016, **37**(4) : 1321-1329.]