

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.012

石臼湖表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价

李志清¹, 吴苏舒¹, 诸晓华^{2,3}, 郭刘超¹, 肖鹏¹, 徐季雄¹

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029;
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为揭示石臼湖表层沉积物营养盐和重金属的污染特征,于2018年2月采集表层沉积物,分析了石臼湖营养盐和重金属的含量、空间分布特征。结果表明:全湖有机质、TP和TN的平均质量比分别为30.25 mg/kg、585 mg/kg和776 mg/kg,TP为无污染风险级别,有机质和TN处于低污染风险级别;重金属Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb平均质量比分别为94.92 mg/kg、41.25 mg/kg、38.42 mg/kg、124.33 mg/kg、16.48 mg/kg、0.17 mg/kg、0.05 mg/kg和35.92 mg/kg,均超过了江苏省的土壤重金属背景值,Hg和Cd污染相对较重,全湖为中等危害等级;在空间分布上,东部区域的采样点8、9营养盐质量比较高,重金属污染较重。

关键词:沉积物;营养盐;重金属;污染评价;石臼湖

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)02-0073-06

Distribution of nutrients and heavy metals in surface sediments of Shijiu Lake and its pollution assessment // LI Zhiqing¹, WU Sushu¹, ZHU Xiaohua^{2,3}, GUO Liuchao¹, XIAO Peng¹, XU Jixiong¹ (1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China; 2. Jiangsu Provincial Water Resources Department, Nanjing 210029, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to reveal the pollution characteristics of nutrients and heavy metals in the surface sediments of Shijiu Lake, surface sediments were collected in February 2018, and the contents and spatial distribution of nutrients and heavy metals in Shijiu Lake were analyzed. The results showed that the average values of organic matter, total phosphorus and total nitrogen were 30.25 mg/kg, 585 mg/kg and 776 mg/kg, respectively, and total phosphorus were in no ecological risk level, organic and total nitrogen were in low ecological level; The average values of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg and Pb were 94.92 mg/kg, 41.25 mg/kg, 38.42 mg/kg, 124.33 mg/kg, 16.48 mg/kg, 0.17 mg/kg, 0.05 mg/kg and 35.92 mg/kg, respectively, all of them exceeded the background values of heavy metals in soils in Jiangsu Province. Hg and Cd pollution is relatively heavy, and the whole lake is of medium hazard grade. In the spatial distribution, the nutrient quality of sampling sites 8 and 9 in the eastern region was higher, and the heavy metal pollution was more serious.

Key words: sediment; nutrient; heavy metal; pollution assessment; Shijiu Lake

近年来随着经济的快速发展,农村城市化的进程加速推进,区域河网水质污染严重,湖泊流域正经历前所未有的变化,水生态问题日益凸现^[1-4],主要表现为湖泊富营养化和重金属污染。水体富营养化可导致沉水植被衰退、蓝藻水华暴发和水质恶化等危害^[5-7];重金属具有毒性大、易富集和难分解等特性,而且能通过生物放大作用进入食物链,危害巨大^[8-12]。

水体中的营养盐(主要为碳氮磷),通过沉降、扩散等形式汇入沉积物中,重金属通过吸附沉降作

用富集在沉积物中。当水体中营养盐和重金属累积到一定程度时,在风浪扰动、底栖扰动和氧化还原环境改变等条件下,营养盐通过扩散、对流和再悬浮等形式不断向上覆水体释放^[13-16],重金属则通过形态改变、浓度扩散、界面特性改变、释放和溶解等作用,由间隙水进入上覆水,成为湖泊的内源污染^[17-19]。诸多治湖经验表明,在沉积物内营养盐和重金属未有效降低前,即使无外源污染,湖泊依然可能在数年内呈现富营养化和重金属高污染化状态^[20-22]。因

基金项目:江苏省科技计划(BM2016031,2018028);水利部技术示范项目(SF-201816);江苏省水利科技项目(2015033,2016016)

作者简介:李志清(1980—),男,高级工程师,主要从事水环境与水生态研究。E-mail:hhulzq@163.com

而研究表层沉积物中营养盐和重金属的含量、分析空间分布特征和进行污染评价,对湖泊防止富营养化和抑制重金属污染都具有重要意义。

石臼湖为长江下游唯一的直接通江湖泊,位于长江右岸水阳江入江尾间,地处南京市域西南部。由于受到流域人类活动以及湖区的渔业养殖的干扰,湖泊水生态出现退化趋势。当前对石臼湖水生态研究较少,特别是针对表层沉积物营养盐和重金属污染的研究鲜有报道。本文基于2018年2月从石臼湖表层沉积物采集的样品,分析表层沉积物营养盐和重金属空间分布特征,以期为石臼湖湖泊生态治理提供数据支撑。

1 材料与方 法

石臼湖又名北湖,历史上曾经是古丹阳湖的一部分,湖区东北、东南及西部片区行政分属江苏省溧水区、高淳区和安徽省当涂县。石臼湖汇水区域内主要入湖河道有新桥河、天生桥河、石固河等。石臼湖属于构造型淡水湖泊,湖盆呈不规则四边形,东西向最长约22 km,南北向最宽约14 km,湖泊面积214.7 km²,正常蓄水位5.04 m,相应库容3.4亿 m³,主要功能为防洪调蓄、水资源供给、维护生态、航运、渔业养殖、旅游等。

1.1 采样点设置

只有科学合理地在湖区内布设采样点,才能获得的数据客观反映湖泊生态环境现状,为此,采样点按以下原则布设:①重点突出原则,即主要的出入湖河口、养殖区、水源保护区等均应设置采样点;②全面覆盖原则,依据《江苏省省管湖泊保护规划》(苏政复[2006]99号)对石臼湖生态功能区的划分(生态养殖区、生态净化与恢复区、资源保留区和渔业资源繁保区),保证每个生态功能区都有采样点,石臼湖安徽段没有划分功能区,考虑到采样点应分布到整个湖区,安徽段布设采样点10、11和12。全湖共设置12个采样点,如图1所示。

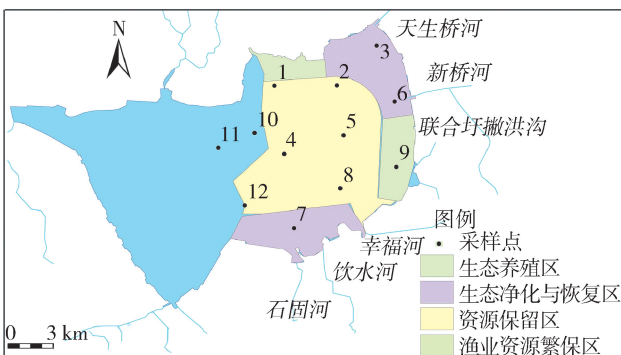


图1 石臼湖采样点分布

Fig.1 Distribution of Shijiu Lake sampling points

1.2 样品采集与分析方法

用柱状取泥器采集表层0~5 cm沉积物,取样后立即用聚乙烯袋密封,经冷冻干燥机处理后,去除杂物,用玛瑙研钵研磨至粉末状,过200目尼龙网筛后储备使用。

有机质(OM)、总磷(TP)和总氮(TN)质量比分别采用重铬酸钾容量法、钼锑抗分光光度法和凯式定氮法测定;重金属Cr、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb采用电感耦合等离子体质谱仪测定,As和Hg采用荧光分光光度计测定。

1.3 评价方法

国内尚无系统针对湖泊沉积物营养盐的生态风险评价标准,加拿大安大略省1992年制定了《水生环境沉积物污染评价与控制指南》^[23],本文营养盐污染评价参考该指南进行,重金属污染评价采用潜在生态风险指数法^[24]。

1.3.1 《水生环境沉积物污染评价与控制指南》

加拿大安大略省根据生态毒性效应制定了《水生环境沉积物污染评价与控制指南》,其对OM、TP和TN评价标准见表1,表中 w_L 为低效应水平,该水平为大多数底栖生物的耐受质量比; w_S 为严重影响水平,在此质量比下污染物可能对底栖生物产生不利影响。当污染物质量比低于 w_L 时,为无污染风险;当污染物质量比在 w_L 与 w_S 之间时,为较低污染风险;当污染物质量比高于 w_S 时,为较高污染风险。

表1 沉积物OM、TP、TN污染评价标准

Table 1 Criteria for evaluating OM, TP and

| 污染物 | TN in sediments | |
|-----|-----------------|--------|
| | w_L | w_S |
| OM | 17.24 | 172.40 |
| TP | 600 | 2000 |
| TN | 550 | 4800 |

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法综合考虑了重金属的毒性、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,可用于评价沉积物中重金属的潜在生态影响。潜在生态风险指数分为单项重金属潜在风险指数和综合重金属风险指数,计算公式为

$$E_{ri} = \sum_{i=1}^m T_{ri} \frac{w_i}{w_{ni}} \quad (1)$$

$$I_R = \sum_{i=1}^m E_{ri} \quad (2)$$

式中: E_{ri} 为重金属*i*的潜在生态风险指数; T_{ri} 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; w_i 为重金属*i*质量比

的实测值, mg/kg ; w_{ni} 为重金属 i 质量比的背景值, mg/kg ; I_R 为综合潜在生态风险指数。重金属 As、Hg、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn、Cd 的 T_{ni} 分别为 10、40、2、5、5、5、1、30。重金属污染生态危害程度划分标准见表 2。

表 2 重金属污染生态危害程度划分标准

Table 2 Classification standard for ecological harm degree of heavy metal pollution

| 生态危害程度 | E_{ni} | I_R |
|--------|------------|------------|
| 轻微 | <40 | <150 |
| 中等 | [40~80) | [150~300) |
| 强 | [80~160) | [300~600) |
| 很强 | [160~320) | ≥ 600 |
| 极强 | ≥ 320 | |

2 结果分析

2.1 营养盐空间分布特征和污染评价

石臼湖表层沉积物营养盐的质量比如表 3 所示,空间分布如图 2 所示。从表 3 和图 2 可知,采样点表层沉积物 OM 空间分布呈现南部区域高于北部区域;TP 和 TN 变异系数较小,空间分布较均匀,南部和东北部区域 TP 质量比略高,东南部区域氮质量比相对略高。总体而言,东部区域的营养盐质量比相对较高,尤其是采样点 8 和 9 附近。采样点 9 位于生态养殖区,靠近骆山,骆山附近有骆山村、山北史家村和小陈家村等村落,居民较多,渔业养殖过程中饵料投喂导致大量的氮、磷和有机质汇入湖泊,并不断在沉积物中累积,加上人类活动产生的生活污染侵入湖泊,从而造成该区域附近营养盐质量比较高。

表 3 石臼湖表层沉积物营养盐监测结果

Table 3 Nutrient monitoring results of surface sediments in Shijiu Lake

| 测定指标 | 营养盐质量比/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | | | 变异系数 |
|------|---|--------|--------|------|
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 | |
| OM | 13.11 | 48.94 | 30.25 | 0.41 |
| TP | 366.37 | 788.90 | 585.12 | 0.24 |
| TN | 525.30 | 990.00 | 776.45 | 0.20 |

参考加拿大安大略省《水生环境沉积物污染评价与控制指南》,TP 为无污染风险级别,OM 和 TN 处于低污染风险级别,总体情况良好。采样点 8、9 区域营养盐质量比相对较高,建议采取生态清淤等措施,以降低表层沉积物内源污染的风险。

2.2 重金属空间分布特征和污染评价

表层沉积物重金属质量比统计结果如表 4 所示,重金属 Zn 的平均质量比最高,Hg 最低。从变异系数角度来看,空间分布差异性不大,变异系数在 0.2 附近。与江苏省的土壤重金属背景值^[25]相比,

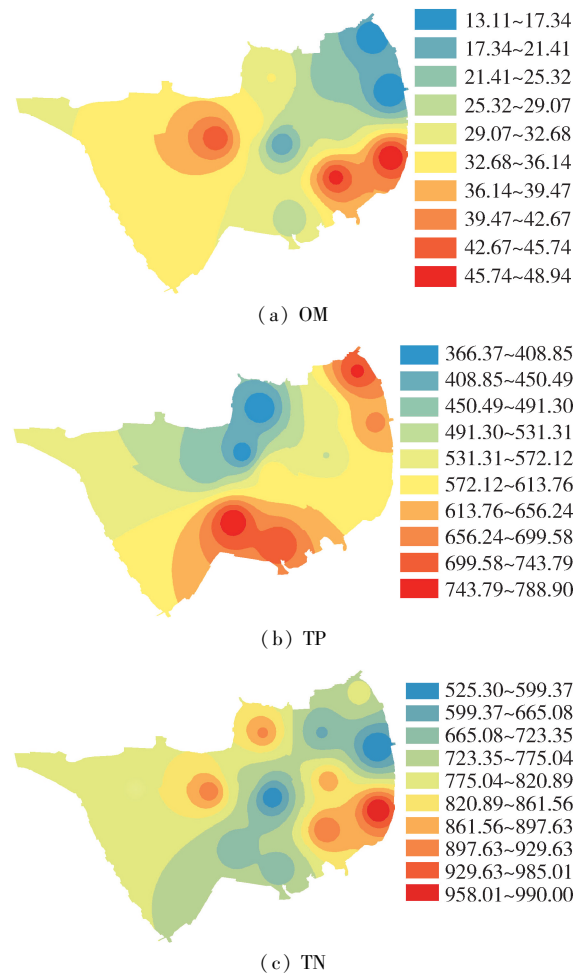


图 2 不同采样点表层沉积物中营养盐的质量比(单位: mg/kg)

Fig. 2 Mass ratio of nutrients in surface sediments at different sampling points (unit: mg/kg)

表 4 石臼湖表层沉积物重金属监测结果

Table 4 Results of heavy metals monitoring in surface sediments in Shijiu Lake

| 测定指标 | 重金属质量比/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) | | | | | 变异系数 | 单项金属潜在生态风险指数 |
|------|---|--------|--------|-------|-------|------|--------------|
| | 最小值 | 最大值 | 平均值 | 背景值 | 标准方差 | | |
| Cr | 74.00 | 113.00 | 94.92 | 75.60 | 10.56 | 0.11 | 2.51 |
| Ni | 36.00 | 51.00 | 41.25 | 32.80 | 4.25 | 0.10 | 6.29 |
| Cu | 31.00 | 48.00 | 38.42 | 23.40 | 5.76 | 0.15 | 8.21 |
| Zn | 96.00 | 193.00 | 124.33 | 64.80 | 32.35 | 0.26 | 1.92 |
| As | 12.10 | 30.30 | 16.48 | 9.40 | 4.77 | 0.29 | 17.53 |
| Cd | 0.11 | 0.28 | 0.17 | 0.09 | 0.05 | 0.29 | 60.39 |
| Hg | 0.03 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.33 | 75.00 |
| Pb | 28.00 | 47.00 | 35.92 | 22.00 | 6.04 | 0.17 | 8.16 |

8 种重金属质量比均超过了背景值,Cd、Zn、Hg、As、Cu 和 Pb 质量比分别达到了背景值的 2.01、1.92、1.88、1.75、1.64 和 1.63 倍;对照图 3,从空间分布角度来看,东部区域的重金属质量比较高,尤其是采样点 5 附近区域污染严重,重金属质量比都比较高,该区域附近的采样点 8、9 的重金属质量比也较高。采样点 5 区域附近污染严重可能是由于骆山附近的

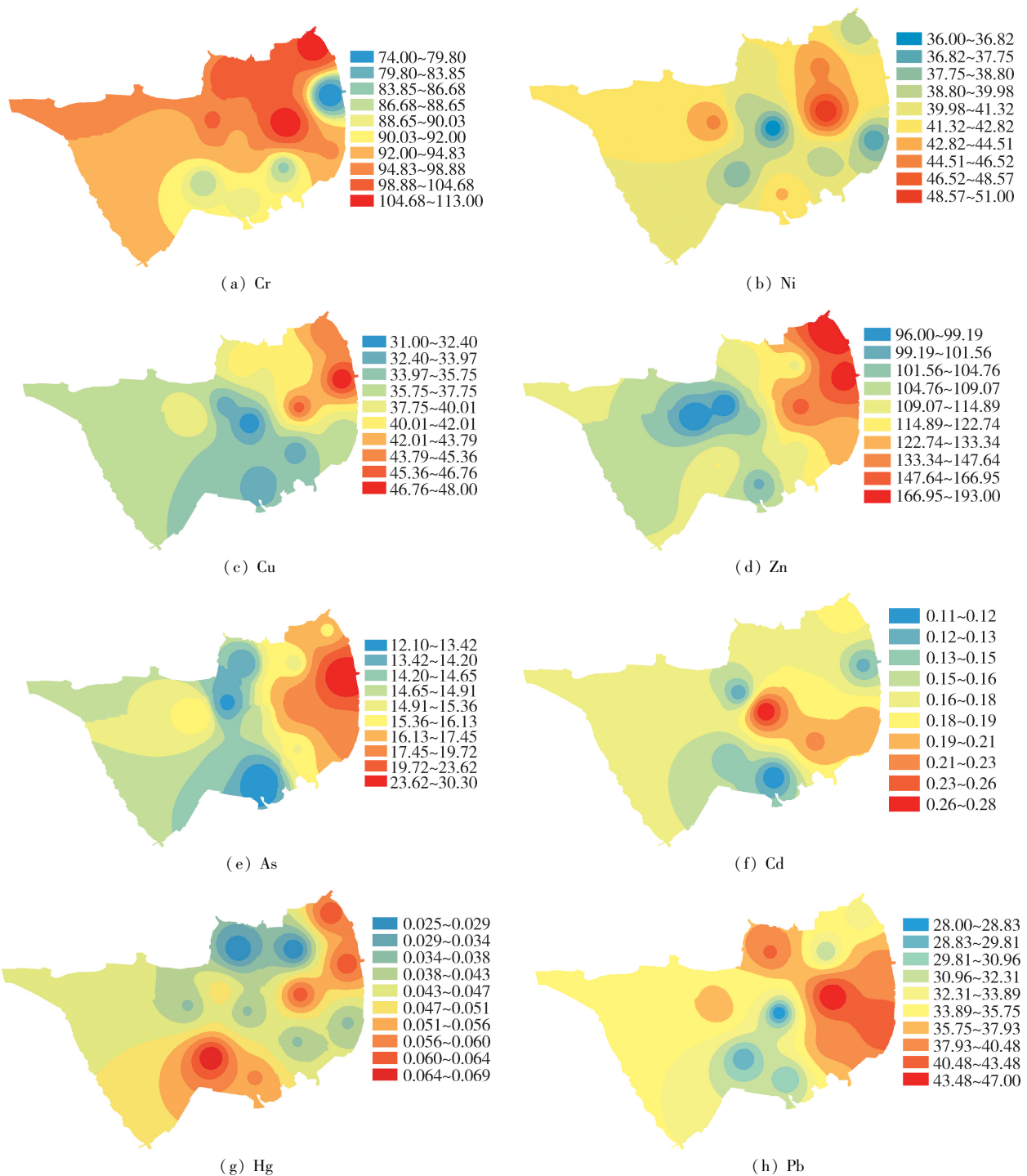


图3 不同采样点表层沉积物重金属的质量比分布(单位:mg/kg)

Fig. 3 Mass ratio distribution of heavy metals in surface sediments from different sampling points(unit: mg/kg)

村镇(骆山村、山北史家村、小陈家村等)企业排污、农业污染和入湖的幸福河污染等共同导致的结果,需加强治理。

采用潜在生态风险指数法对重金属污染水平和生态危害进行评价,单项重金属潜在风险指数结果表明,Hg和Cd污染相对较重,8种重金属毒性从大到小顺序为Hg、Cd、As、Cu、Pb、N、Cr、Zn,对照表2,Hg和Cd为中等危害等级,其余重金属为轻度危害等级。综合重金属风险指数为180.01,为中等

危害等级,这主要是因为Hg和Cd的污染贡献较大,需及时治理。Hg污染较重的采样点为3、5、6、7和12,采样点3附近的入湖河道为天生桥河,采样点5、6附近的入湖河道为新桥河,采样点7、12附近的入湖河道为石固河;Cd污染较重的为采样点4、8和9,采样点4、9附近的入湖河道为饮水河,采样点8附近的入湖河道为幸福河,可见控制入湖河道的污染对于湖泊的重金属污染治理具有重大意义。

3 结 论

a. 各采样点营养盐变异系数较小,分布相对均匀,OM、TP和TN质量比相对不高,参考加拿大安大略省《水生环境沉积物污染评价与控制指南》,TP为无污染风险级别,OM和TN处于低污染风险级别,总体情况良好。

b. 8种重金属质量比均超过江苏省的土壤重金属背景值,空间分布差异性不大。Hg和Cd污染相对较重,全湖为中等危害等级。

c. 东部区域的采样点8、9营养盐质量比较高,重金属质量比较大,需控制重金属污染。

参考文献:

[1] 朱威,周小平,蔡杰.太湖流域水环境综合治理及其启示[J].水资源保护,2016,32(3):149-152. (ZHU Wei, ZHOU Xiaoping, CAI Jie. Lessons from comprehensive management of water environment in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(3):149-152. (in Chinese))

[2] 杨平.人与自然关系的修复:日本琵琶湖治理与生活环境主义的应用[J].湖泊科学,2014,26(5):807-812. (YANG Ping. Restoration of the relationship between human beings and nature; the application of Lake Biwa mitigation and life environmentalism [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(5):807-812. (in Chinese))

[3] 秦伯强,吴庆农,高俊峰,等.太湖地区的水资源与水环境:问题、原因与管理[J].自然资源学报,2002,17(2):221-228. (QIN Boqiang, WU Qingnong, GAO Junfeng, et al. Water environmental issues in Taihu Lake of China: problems, causes and management [J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(2):221-228. (in Chinese))

[4] 胡开明,李冰,王水,等.太湖流域(江苏省)水质污染空间特征[J].湖泊科学,2014,26(2):200-206. (HU Kaiming, LI Bing, WANG Shui, et al. Spatial distribution characteristics of water quality pollution in the Lake Taihu basin, Jiangsu Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(2):200-206. (in Chinese))

[5] 胡旭,何亮,曹特,等.富营养化湖泊围隔中重建水生植被及其生态效应[J].湖泊科学,2014,26(3)349-357. (HU Xu, HE Liang, CAO Te, et al. Restoration of aquatic vegetation and its ecological effects in the enclosure of an eutrophic lake [J]. Journal of Lake Sciences, 2014, 26(3)349-357. (in Chinese))

[6] MOE S J, HAANDE S, COUTURE R M. Climate change, cyanobacteria blooms and ecological status of lakes: a Bayesian network approach [J]. Ecological Modelling, 2016, 337:330-347.

[7] 倪利晓,陈春明,马艳艳.镉胁迫对铜绿微囊藻的抑制作用及营养盐浓度对其的减缓效应[J].水资源保护,2017,33(6):96-101. (NI Lixiao, CHEN Chunming, MA Yanyan. Inhibitory effects of cadmium stress on *Microcystis aeruginosa* and the alleviation effects of nutrient concentrations [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6):96-101. (in Chinese))

[8] 包先明,晁建颖,尹洪斌.太湖流域太湖底泥重金属赋存特征及其生物有效性[J].湖泊科学,2016,28,(5):1010-1017. (BAO Xianming, CHAO Jianying, YIN Hongbin. Occurrence characteristics and bioavailability of heavy metals in surface sediments of Lake Gehu, Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28, (5):1010-1017. (in Chinese))

[9] 匡帅,保琦蓓,康得军,等.典型小型水库表层沉积物重金属分布特征及生态风险[J].湖泊科学,2018,30(2):336-348. (KUANG Shuai, BAO Qibei, KANG Dejun, et al. Distribution patterns and ecological risk assessment of heavy metal contamination in surface sediments deposited in a typical small sized water reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2):336-348. (in Chinese))

[10] VINODHINI R, NARAYANAN M. Bioaccumulation of heavy metals in organs of fresh water fish *Cyprinus carpio* (Common carp) [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2008, 5(2):179-182.

[11] ZHANG L, WANG W. Size-dependence of the potential for metal biomagnification in early life stages of marine fish [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, 26(4):787-794.

[12] BOCHER P, CAURANT F, MIRAMAND P, et al. Influence of the diet on the bioaccumulation of heavy metals in zooplankton-eating petrels at Kerguelen archipelago, Southern Indian Ocean [J]. Polar Biology, 2003, 26(12):759-767.

[13] VICENTE ID, SERRANO L, AMORES V, et al. Sediment phosphate fractionation and interstitial water phosphate concentration in two coastal lagoons (Albuferas de Adra, SE Spain) [J]. Hydrobiologia, 2003, 492(1/2/3):95-105.

[14] SØNDERGAARD M, JENSEN J P, JEPPESEN E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. Hydrobiologia, 2003, 506(1/2/3):135-145.

[15] PETTICREW E L, AROCENA J M. Evaluation of iron-phosphate as a source of internal lake phosphorus loadings [J]. Science of the Total Environment, 2001, 266(1/2/3):87-93.

[16] 杜奕衡,刘成,陈开宁,等.白洋淀沉积物氮磷赋存特征

- 及其内源负荷[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1537-1551. (DU Yiheng, LIU Cheng, CHEN Kaining, et al. Occurrence and internal loadings of nitrogen and phosphorus in the sediment of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1537-1551. (in Chinese))
- [17] 薛培英, 赵全利, 王亚琼, 等. 白洋淀沉积物-沉水植物-水系统重金属污染分布特征[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1525-1536. (XUE Peiyong, ZHAO Quanli, WANG Yaqiong, et al. Distribution characteristics of heavy metals in sediment-submerged macrophyte-water systems of Lake Baiyangdian [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6): 1525-1536. (in Chinese))
- [18] 蔡艳洁, 张恩楼, 刘恩峰, 等. 云南阳宗海沉积物重金属污染时空特征及潜在生态风险[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1121-1133. (CAI Yanjie, ZHANG Enlou, LIU Enfeng, et al. Spatio-temporal characteristics of heavy metal pollution and potential ecological risk in the sediments of Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5): 1121-1133. (in Chinese))
- [19] 马培, 鲍锦磊. 沙颍河表层沉积物中氮与重金属的分布特征及污染评价[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 61-67. (MA Pei, BAO Jinlei. Characterization and ecological risk assessment of nitrogen and heavy metal pollution in surface sediments of Shaying River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 61-67. (in Chinese))
- [20] KLEEBERG A, KOHL J G. Assessment of the long-term effectiveness of sediment dredging to reduce benthic phosphorus release in shallow Lake Müggelsee (Germany) [J]. Hydrobiologia, 1999, 394(3): 153-161.
- [21] NÜMBERG G K, TARVAINEN M, VENTELÄ A M, et al. Internal phosphorus load estimation during biomanipulation in a large polymictic and mesotrophic lake [J]. Inland Waters, 2015, 2(3): 147-162.
- [22] JEPPESEN E, MEERHOFF M, JACOBSEN B A, et al. Restoration of shallow lakes by nutrient control and biomanipulation-the successful strategy varies with lake size and climate [J]. Hydrobiologia, 2007, 581(1): 269-285.
- [23] LEIVUORI M, NIEMIST L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia [J]. Chemosphere, 1995, 31(8): 3839-3856.
- [24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [25] 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 Qilin, LIU Cong, XU Yan, et al. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province [J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1363-1378. (in Chinese))
- (收稿日期: 2019-03-13 编辑: 熊水斌)

(上接第 58 页)

- [19] 宋培争, 汪嘉杨, 刘伟, 等. 基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 886-893. (SONG Peizheng, WANG Jiayang, LIU Wei, et al. Water resources security evaluation model based on PSO optimized logistic curve [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 886-893. (in Chinese))
- [20] 孙智慧. 北京地区水资源安全研究[D]. 北京: 中央财经大学, 2016.
- [21] 鲁婷婷, 俞淞, 王红瑞, 等. 基于熵权的集对分析在地下水质量评价中的应用[J]. 水利经济, 2013, 31(1): 34-37. (LU Tingting, YU Song, WANG Hongrui, et al. Application of set pair analysis based on entropy weight in groundwater quality evaluation [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013, 31(1): 34-37. (in Chinese))
- [22] 潘争伟, 吴成国, 金菊良. 水资源系统评价与预测的集对分析评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [23] 匡舒雅, 李天宏. 五元联系数在长江下游生态航道评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 93-101. (KUANG Shuya, LI Tianhong. Application of five-element connection number to assessment of ecological waterway in the lower reaches of Yangtze River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 93-101. (in Chinese))
- [24] 金菊良, 沈时兴, 郦建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 1-9. (JIN Juliang, SHEN Shixing, LI Jianqiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2018, 39(1): 1-9. (in Chinese))
- [25] 金菊良, 张浩宇, 陈梦璐, 等. 基于灰色关联度和联系数耦合的农业旱灾脆弱性评价和诊断研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 1-7. (JIN Juliang, ZHANG Haoyu, CHEN Menglu, et al. Evaluation and diagnosis of agricultural drought vulnerability based on grey correlation and connection number coupling [J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 1-7. (in Chinese))
- (收稿日期: 2019-03-18 编辑: 熊水斌)