

蠡湖沉积物质量评估体系的构建

李佳璐,姜霞*,王雯雯,王书航,赵丽 (中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,北京100012)

摘要: 为有效地开展蠡湖的生态环境保护工作,在对其上覆水、沉积物及底栖生物调查基础上,识别了蠡湖沉积物的主要问题,建立了由1个目标层、3个要素层、10个指标层构成的沉积物质量综合评估体系,开展了沉积物质量评估.结果表明,影响蠡湖沉积物质量评估的3个要素层相对重要性排序为底泥污染特征(0.522)>生态特征(0.322)>水体污染特征(0.146);指标层中的10个评估指标中权重较大的是底栖生物多样性指数(0.282)、氨氮释放通量(0.208)、水质类别(0.128)和溶解磷释放通量(0.109).蠡湖沉积物质量综合指数在49~79之间,处于轻度污染和中度污染,整体上呈现西蠡湖大于东蠡湖,沿岸小于湖心的分布趋势.各评估指标对沉积物质量综合指数的多元回归分析结果表明,蠡湖沉积物的主要问题是沉积物中氮磷的释放及底栖生物多样性单一.该评价结果与蠡湖各分区的实际调查情况相符,可为其他湖泊的沉积物质量评估提供一定的参考.

关键词: 蠡湖; 沉积物; 质量评估; 指标体系; 权重

中图分类号: X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2015)02-0565-09

Preliminary evaluation of the sediment quality for Lihu Lake. LI Jia-lu, JIANG Xia*, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, ZHAO Li (State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2015,35(2): 565~573

Abstract: In order to protect the ecological environment of Lihu lake, the main environmental problem of Lihu lake was recognized based on the investigation of its overlying water and sediment as well as the benthic organisms. According to investigation results, the paper established sediment quality comprehensive evaluation system composing of one target layer, three element layers, and ten index layers to evaluated the sediment quality in Lihu lake. Results showed that as for the sediment of Lihu lake, the relative important order of the three index layers was sediment pollution characteristics (0.522)>ecological characteristics (0.32)>water pollution characteristics (0.146). Benthic biodiversity index (0.282), ammonia flux (0.208), water quality classification (0.128), and phosphorus flux (0.109) had much more influence among the 10 assessment index in the index layer. Sediment quality comprehensive index (SQCI) of Lihu sediments was 49~79, and sediment quality classification of Lihu Lake was slightly polluted and moderately polluted. SQCI in west Lihu lake was higher than that in east Lihu Lake, and central lake was higher than coastal areas. Results of multi-regression analysis between evaluation indexes and SQCI indicated that release of nitrogen and phosphorus in sediments and single benthic biodiversity were the main problems of Lihu Lake sediments. The assessment results were coincident with the Lihu Lake situations, and the study may have some implications for the sediment quality evaluation of other lakes.

Key words: Lihu Lake; sediment; quality evaluation; index system; weight

我国对湖泊环境的管理主要集中在水质,但对于一些长期处于富营养化状态的湖泊,如果仅外源污染得到有效控制,水体会因沉积物中污染物质的释放而在相当长的时期内维持富营养或水质恶化状态^[1-3].因此,湖泊沉积物的质量状况是影响这类湖泊水质改善的重要因素.

沉积物质量评估主要用于评估沉积物污染

是否会给环境或人类带来不可接受的风险^[4-6].目前,沉积物质量评估方法主要从对物理、化学和生物3个方面进行单独的评估^[7],并且主要关

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-013)

* 责任作者, 研究员, jiangxia@craes.org.cn

注沉积物自身的污染程度,但沉积物质量状态不仅表现在营养物质、重金属和有毒有机物在沉积物中的富集,还表现在其与上覆水状况和底栖生物特征之间的相互影响等方面^[8-11]。同时,沉积物本身特有的理化性质,如吸附、解吸、缓冲容量等特征参数在时间和空间上的差异,都造成了沉积物质量评估相对于水环境质量评估更为复杂和不确定,因此,现阶段急需根据国内外已有的研究成果,建立一套行之有效的沉积物质量评估技术体系,诊断湖泊生态环境问题,分析其成因,从而为针对性的开展相应改善和保护工作提供技术支持。本研究建立了由目标层、要素层、指标层构成的沉积物质量评估体系,以蠡湖为研究对象,在对沉积物、水质及底栖生物详细调查的基础上,并结合蠡湖已实施的治理和修复工程和蠡湖的实际生态环境现状,定量评估蠡湖沉积物的质量状况,旨在为其他湖泊的沉积物质量评估方法的建立提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

蠡湖位于太湖北部(120.22°E~120.29°E, 31.48°N~31.55°N),东西长约 6km,南北宽 0.3~1.8km,面积约 8.6km²,常年水位 3.07m,丰水期和枯水期水位变幅较小,平均变动幅度为 0.72m。经梁溪河闸、五里湖闸与梅梁湖相通,通过曹王泾、长广溪等分别与京杭大运河、贡湖相连接,湖周围还有数条小河及断头浜,是一个既相对独立又与太湖相通的水体。蠡湖北面河道及西南侧山丘区河道以入湖为主,东南侧河道以出湖为主,平时总体流速均很小,水体流动性相对不大。

以物理标志蠡堤、宝界桥和蠡湖大桥为边界将蠡湖划分为 4 个区域(图 1),分别为 A 区,即退渔还湖区,原有大量鱼塘,污染严重,采用干湖清淤的方式去除底泥;B 区为底泥清淤区,为综合整治前的“西蠡湖”,采用机械法直接从湖水中清淤,同时在两边沿岸开展水生植被重建工程;C 区为生态修复区,以宝界桥和蠡湖大桥为界,实施了沿岸综合整治工程,并建有长广溪湿地;D 区为蠡湖“东出口区”,沿岸居民区较多。

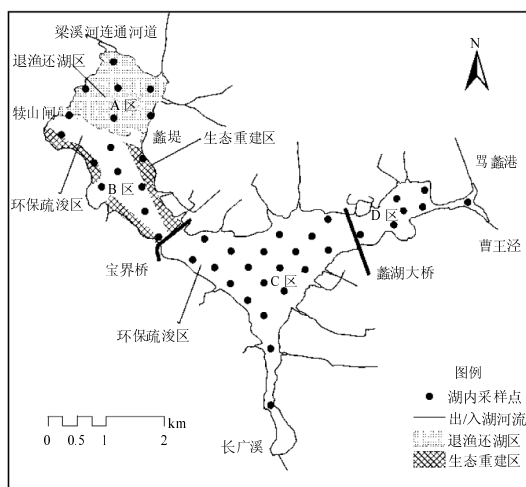


图 1 蠡湖已开展工程及采样点位置

Fig.1 The location of completed governance project and sampling sites in Lihu Lake

1.2 评估数据来源

选取 2012 年 4 月蠡湖水体、沉积物和底栖生物同步调查的 26 个点位进行沉积物质量评估。水体测定项目包括溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl.a)、高锰酸盐指数、透明度(SD)、总悬浮物(TSS);沉积物测定项目包括总氮(TN)、总磷(TP)、有机质(OM)、重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb);水生态调查包括浮游动物多样性和底栖生物多样性。具体的调查与分析测定方法参考《湖泊富营养化调查规范(第二版)》^[12]和《沉积物质量调查评估手册》^[13]。

本研究的释放通量根据 Fick 第一扩散定律计算^[14-15]:

$$F = -\phi D_s (\partial_c / \partial_x) \quad (1)$$

式中: F 为分子扩散通量,mg/(m²·d); ϕ 为表层沉积物的孔隙度; ∂_c / ∂_x 为界面浓度梯度(用表层沉积物间隙水浓度与上覆水浓度差估算求得),mg/(L·cm); D_s 为考虑了沉积物效应的实际分子扩散系数,cm²/s。 D_s 与 ϕ 之间的经验关系式:

$$D_s = \phi D_0 (\phi \leq 0.7) \quad (2)$$

$$D_s = \phi^2 D_0 (\phi > 0.7) \quad (3)$$

式中, D_0 为营养盐在无限稀释溶液中理想扩散系数,对于 NH₄⁺-N, D_0 取 19.1×10⁻⁶cm²/s,对于 DTP,本文 D_0 取 5×10⁻⁵cm²/s。

1.3 底泥空间分布和蓄积量调查

为摸清蠡湖污染底泥分布范围和厚度,确定污染底泥蓄积量,2013 年 8 月采用静力触探法对蠡湖淤泥厚度进行勘测,勘测网格为 50m×50m,在岸边和出入湖河口进行适当加密;同时采用钻孔取样法对淤泥厚度进行校正,校正网格为 500m×500m,淤泥厚度测定方法见《湖泊河流环保疏浚工程技术指南》^[16].

2 评估方法体系构建

2.1 评估方法的选择

选择合适的评估方法是进行沉积物质量评估的关键步骤.目前,沉积物质量评估方法主要分为数字标准评估和综合指标体系评估法^[17, 18].数字标准评估通过设定评估数字标准对沉积物进行定量评价与比较,方法简单,可操作性强,但是地区差异性较大,因而误差较大;综合指标体系评估法是则是通过建立多指标的综合体系,其结果可靠直观,问题针对性强,但对数据要求较高.借鉴其他湖泊的研究成果^[19-21],同时结合蠡湖处于半封闭状态、已有数据详实等特点,本研究选择综合指标体系评估法对蠡湖沉积物质量进行评估,建立由目标层、准则层和指标层组成的综合评估指标体系,计算蠡湖沉积物质量综合指数(SQCI).

2.2 指标体系构建

将蠡湖沉积物质量评估指标体系设计为由目标层、要素层和指标层.

目标层(A)用以反映沉积物质量的总体水平,用沉积物质量综合指数(SQCI)表示.SQCI 是根据要素层和指标层逐层聚合的结果.

要素层(B)从不同侧面反映沉积物质量状况的属性和水平,是确定主要影响因子范围的关键构建层.根据沉积物质量评估的目的和沉积物污染对水环境和生态的影响,选择沉积物污染特征(B1)、水体污染特征(B2)和水生生物特征(B3)3个方面作为本次研究的要素层.

指标层(C)是在要素层下选择若干指标所组成,任何可测的、能够准确反映水-沉积物系统状态的环境特征都可以作为沉积物质量评估的指标.按照要素层设定的 3 个方面,共确定 10 个指标.1)沉积物污染特征选择了总氮(C11)、总磷(C12)、有机质(C13)、重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb)污染风险指数(C14)、氨氮释放通量(C15)、溶解磷释放通量(C16)6 项评价指标.由于蠡湖沉积物的有毒有机污染物尚属低风险范畴^[22],本研究忽略不计;2)水体污染特征选取了水质类别(C21)和综合营养指数(TN、TP、高锰酸盐指数、Chla 和 SD)(C22)2 项评价指标;3)生态特征选取了底栖动物多样性指数(C31)和浮游动物多样性指数(C32)2 个指标.

2.3 参照标准的确定

表 1 蠡湖沉积物质量评估指标参照标准及其依据
Table 1 The standard values for sediment quality assessment and their reference sources

指标因子	参照标准	设定依据
总氮 C11	670mg/kg	1960 年太湖底泥调查数据 ^[23]
总磷 C12	440mg/kg	
总有机质 C13	6800mg/kg	
重金属(Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg、Pb)污染风险指数 C14	150	中等潜在生态风险指数阈值 ^[24]
氨氮释放通量 C15	2.32mg/(m ² ·d)	退渔还湖区氨氮、溶解性磷释放通量均值
溶解性磷释放通量 C16	0.22mg/(m ² ·d)	
水质类别 C21	3	《蠡湖水环境深度治理和生态修复规划》中将蠡湖水质目标设定为湖库 III 类 ^[25]
综合营养指数 C22	50	湖泊中等营养标准的阈值 ^[16]
底栖动物多样性指数 C31	3	轻度污染对应底栖动物多样性的阈值 ^[26]
浮游动物多样性指数 C32	2.178	大太湖 1961~1987 年夏季调查数据 ^[26]

沉积物质量评估是建立在与本底值或者参 照标准对比的基础之上,用来参照或比较的标准

可以采用环境保护部已经制定的环境质量标准,也可以查询国外有关标准或公认的阈值或者采用生态系统所在地域的平均本底值.本研究中 10 项指标因子的参照标准值及其确定依据见表 1.

2.4 数据预处理和标准化

环境与生态的质量-效应变化符合 Weber-Fishna 定律,即当环境与生态质量指标成等比变化时,环境与生态效应成等差变化^[27].根据该定律,进行指标无量纲化:

正向型指标: $r_{ij}=x_{ij} / s_{ij}$ (4)

负向型指标: $r_{ij}=s_{ij} / x_{ij}$ (5)

式中: x_{ij} 是*i*指标在采样点*j*的实测值; s_{ij} 是指标因子的参考标准.其中,负向型指标包括总氮、总磷、总有机质、重金属污染风险指数、氨氮释放通量和溶解性磷释放通量;正向型指标包括底栖动物多样性指数和浮游动物多样性指数.

2.5 评价指标权重的确定

权重的确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法^[19,28].本研究将以上 2 种方法结合起来,使所确定的权重同时体现主观信息和客观信息,采用专家打分法确定要素层权重,熵值法确定指标层的权重.

(1) 要素层 B 权重的确定方法

该层次的权重系数采取专家打分法确定,将评价指标做成调查表,邀请专家进行打分,满分为 10 分,分值越高表示越重要.通过对咨询结果进

行整理后的判断矩阵,计算每个要素层的权重系数(见表 2).

(2) 指标层 C 权重的确定方法

①构建*n*个样本*m*个评价指标的判断矩阵*Z*

$$Z=\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1m} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \cdots & X_{nm} \end{bmatrix}$$
 (6)

②将数据进行无量纲化处理,得到新的判断矩阵,其中元素的表达式为:

$$R=(r_{ijn\times m})$$
 (7)

③根据熵的定义,*n*个样本*m*个评价指标,可确定评价指标的熵为:

$$H_i=-\frac{1}{\ln n}\left[\sum_{i=1}^n f_{ij}\ln f_{ij}\right]$$
 (8)

$$f_{ij}=\frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}$$
 (9)

其中, $0\leq H_i\leq 1$,为使 $\ln f_{ij}$ 有意义,假定 $f_{ij}=0, f_{ij}\ln f_{ij}=0, i=1,2\dots m; j=1,2\dots n$.

④C 层评估指标对要素层 B 层的熵权的计算:

$$W_i=\frac{1-H_i}{m-\sum_{i=1}^m H_i}$$
 (10)

式(10)中, W_i 即 $W(CB)_i$,为 C 层评估指标对要素层 B 层的权重,且满足 $\sum W_i=1$.

表 2 沉积物质量评估指标体系权重设置
Table 2 The index-weight for sediment quality assessment

目标层 A	要素层 B	指标层 C	指标层 C 权重	
			W_i	$W(CA)_i$
沉积物质量 综合指数 (SQCI)	沉积物污染 B1(0.522)	总氮 C11	0.086	0.045
		总磷 C12	0.098	0.051
		总有机质 C13	0.102	0.053
		重金属污染风险指数 C14	0.107	0.056
		氨氮释放通量 C15	0.398	0.208
		溶解性磷释放通量 C16	0.209	0.109
	水体污染 B2(0.146)	水质类别 C21	0.875	0.128
		综合营养指数 C22	0.125	0.018
	生态特征 B3(0.322)	底栖动物多样性指数 C31	0.851	0.282
		浮游动物多样性指数 C32	0.149	0.050

⑤C 层指标因子相对于目标层 A 的权重计算

$$W(CA)_i=W_i\times W(BA)_i$$
 (11)

式(11)中,即 $W(BA)_i$ 为要素层 B 相对于目标层 A 的权重; $W(CA)_i$ 为 C 层指标因子相对于目标层 A 的权重.

沉积物质量评估要素层和指标层的权重系数最终计算结果见表 2.

2.6 沉积物质量综合指数计算及分级

各指标的无量纲化值和指标权重确定后,代入式(12),求得沉积物质量综合指数:

$$SQCI=\sum_{j=1}^m W(CA)_i \times r_{ij} \times 100 \tag{12}$$

式中,SQCI 为沉积物质量综合指数值; r_{ij} 为评价指标的无量纲化值,此处需满足 $0\leq r_{ij}\leq 1$,大于 1 的按 1 取值.

参照其他湖泊类似生态系统的健康评价分级标准^[19],设置沉积物质量综合指数(SQCI)分级标准(表 3).

表 3 沉积物质量综合指数分级
Table 3 The classification of SQCI

分级	SQCI	质量描述
I	80~100	清洁
II	60~80	轻度污染
III	40~60	中度污染
IV	20~40	重度污染
V	0~20	严重污染

3 结果与讨论

3.1 蠡湖底泥的空间分布

蠡湖底泥主要分布在犊山闸至宝界桥的西蠡湖,东蠡湖的湖心、金城湾和长广溪等区域,以带状或块状分布为主(图 2).

利用地理信息系统中的 3D 分析模块对蠡湖 7.8km²(不包括犊山闸以西及湖中小岛)湖区分析表明,底泥蓄积量为 4.81×10⁶m³,平均厚度为 0.62m,其中小于 0.1m 的面积为 0.18km²,仅占总面积的 2%;0.1~0.2m 之间的面积为 0.98km²,占总面积的 13%;0.2~0.5m 之间的占总面积的 27%;0.5~1m 之间的占研究区的 33%;而>1m 的占总面积的 25%.

统计表明,A 区、B 区、C 区和 D 区的底泥

厚度分别为(0.34±0.3)m、(0.88±0.51)m、(0.57±0.41)m、和(0.65±0.44)m,在退渔还湖区(A 区)厚度较小,而在原西蠡湖(B 区)的厚度较高,但总体上看已经显著低于 1997~1999 年调查的 1.3m,正好也与 2002 年底泥生态疏浚工程在原蠡湖(不包括退渔还湖区的 5.7km²)平均疏挖了 0.5m 相互印证.

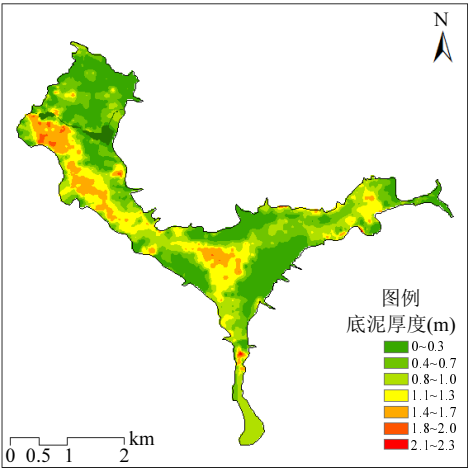


图 2 蠡湖底泥空间分布
Fig.2 Sediment spatial distribution in Lihu Lake

3.2 蠡湖沉积物质量评估结果

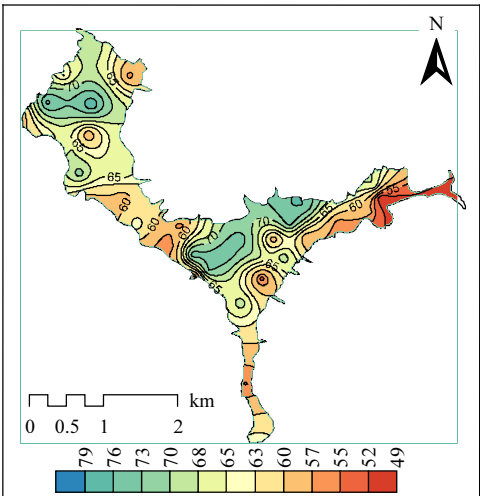


图 3 蠡湖沉积物质量综合指数空间分布特征
Fig.3 Spatial distribution of SQCI of Lihu Lake

蠡湖沉积物质量综合指数在 49~79 之间,平

均为 64,整体上呈现西蠡湖大于东蠡湖,沿岸小于湖心的分布趋势(图 3).

结合沉积物质量综合指数分级可以看出,蠡湖沉积物基本处于轻度污染和中度污染.26 个点中处于轻度污染和中度污染的比例分别为 61% 和 39%,并且 SQCI 得分较高的区域主要分布在西蠡湖的退渔还湖区和东蠡湖的湖心区;而 SQCI 得分较低的区域主要集中在入湖河口、宝界桥及其蠡湖的东出口及其南出口的长广溪区域.

从分区评估来看,蠡湖沉积物 SQCI 得分排序为 A 区>C 区>B 区>D 区.得分最高的是 A 区(退渔还湖区),平均得分 69,并且最大值达到 79,已经基本处于无污染的水平.C 区的分数也较高,平均达到 66,其中中部和北部的得分较高,基本处于 70 以上,而岸边及南出口的长广溪区域基本处于 65 以下,部分河口区域甚至在 60 以下.B 区是综合整治前的西蠡湖,底泥污染较厚,平均达到 0.88m,SQCI 得分平均为 63,已经接近中度污染水平.D 区沉积物污染较为严重,平均得分为 56,除极少数点位达到 60 以上,整个区域基本处于 60 以下.各湖区的沉积物质量评估结果详见表 4.

表 4 蠡湖各分区沉积物质量综合指数
Table 4 The SQCI of different zones in Lihu Lake

区域	最小值	最大值	平均值	中位数	方差	质量状态
A	56	79	69	68	7.78	轻度污染
B	57	71	63	64	4.93	轻度污染
C	53	76	66	68	7.92	轻度污染
D	49	67	56	56	6.09	中度污染
全湖	49	79	64	66	7.81	轻度污染

3.3 讨论

能够准确反映沉积物污染状况、污染物的生物可利用性及其对水生态系统影响的关键是沉积物质量评估指标的选择.一般来说,选择的指标体系须能完整准确地反映沉积物污染状况的同时,应能够对生存在底泥中的底栖生物及其与之相关的胁迫进行监测,以寻求沉积物质量下降或者好转的原因,并且可以定期为政府决策、科学研究及公众要求等提供沉积物质量现状、变化及趋势的统计总结.本次研究中,选取了 6 个反映沉

积物污染的指标,其中总氮、总磷和有机质含量主要反映了蠡湖沉积物营养盐的蓄积程度,8 种重金属的生态风险指数主要反映了重金属的污染状况,而氮、磷的释放通量重点反映了沉积物对上覆水体营养状态的影响;选取了水质类别和营养状态指数来反映水体污染状况;同时选取了底栖动物多样性指数和浮游动物多样性指数来反映底泥的生态特征.综合来看,10 个指标体系可较为全面地反映蠡湖沉积物的污染状况,同时能体现沉积物污染对上覆水状况和底栖生物特征的影响.

3.3.1 关于评估权重 在沉积物质量评估体系中,权重的确定是重点也是难点,它反映了各因素指标在综合评判过程中所占的地位或所起的作用,直接影响评估的结果.要素层 B 相对于目标层 A 的权重是根据专家打分并进行统计处理后得到的.按照权重系数的大小,要素层 B 各个因素的相对重要性排序为:底泥污染特征(0.522)>生态特征(0.322)>水体污染特征(0.146).其中底泥污染特征的权重最大,已经超过了 50%,说明在沉积物质量评估中,氮、磷、有机质和重金属含量仍是沉积物质量评估的关注点,尤为重要;同时可以看到,生态特征也占到了 30%以上,主要是因为大多数底栖生物相对来说都是定居的,与沉积环境有着紧密的联系,因此对于栖息地、沉积物和水质状况的短期和长期变化,都非常敏感.

指标层 C 相对于要素层 B 的权重是用熵值统计法得出的.在底泥污染特征 B1 所对应的 6 个指标中,氨氮释放通量 C15 权重最大,其次为溶解性磷释放通量 C16,两者权重之和(0.607)大于 0.5,说明蠡湖沉积物的首要问题还是氮磷的释放问题,其次才是有机质和重金属的污染问题.水体污染特征对应的两个指标中,水质类别 C21 的权重为 0.875,相对于营养状态指数占绝对优势,说明蠡湖水体的主要问题还是水体氮、磷超标问题,这也与底泥污染特征中氨氮释放通量 C15 和溶解性磷释放通量 C16 的权重较大相呼应.生态特征 B3 中,底栖生物多样性指数 C31 的权重为 0.851,远远高于浮游动物多样性指数 C32,说明蠡湖沉积物污染对底栖生物已产生严重影响.

指标层 C 相对于目标层 A 的权重是由公式 (11) 计算得出的, 可以通过该层权重的大小直接判断所有指标因子的相对重要性。10 个评估指标的权重较大的是底栖动物多样性指数 C31(0.282)、氨氮释放通量 C15(0.208)、水质类别 C21(0.128) 和溶解磷释放通量 C16(0.109), 这 4 个因子的权重之和为 0.727, 在本次沉积物质量评估中起到决定性的作用, 也说明蠡湖沉积物的主要问题是底栖生物多样性单一及其沉积物中氮磷的释放。

3.3.2 关于评价结果 根据评估结果, 蠡湖沉积物质量综合指数平均为 64.3 个要素层(底泥污染特征、水体污染特征和生态特征)得分分别为 32.22、11.43 和 20.35, 说明底泥污染特征仍然是本次沉积物评估的最重要方面(图 4)。

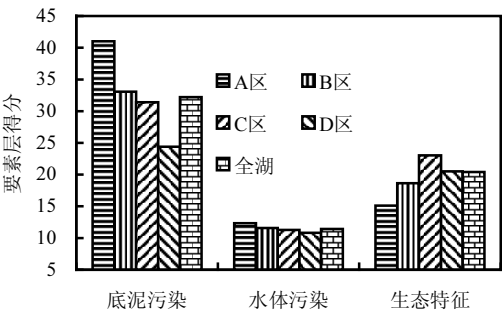


图 4 蠡湖不同区域要素层得分空间差异

Fig.4 Spatial diversity of factor layer score in different areas of Lihu Lake

同时, 从图 4 可以看出, 不同分区在各要素得分差异较大。在底泥污染特征(B1)方面, A 区得分最高, 为 41 分, 显著高于全湖平均值($p<0.01$), 而 D 区得分最低, 仅为 24 分, 说明 D 区的底泥污染问题相对于其它区域最为严重。在水体污染特征(B2)方面, 不同区域得分排序为 A 区>B 区>C 区>D 区, 但不同区域差异较小, 不足以影响各个分区的沉积物质量评估结果。在生态特征(B3)方面, 不同区域得分排序为 C 区>D 区>B 区>A 区, 沉积物污染程度最轻的 A 区得分最低, 可能是 A 区为退渔还湖区, 以底质以硬质为主; C 区得分最高, 为 23 分, 主要因为 C 区湖面比较宽阔, 并且分布

有长广溪湿地自然保护区, 水生态相对较好。本方法的计算结果与张博^[29]、胡佳晨^[30]等对蠡湖沉积物各分区的实际调查情况相符合。同时, 要想进一步提高蠡湖沉积物质量, 需在 A 区和 B 区应加强底栖生物的保护及人工放殖本地土著底栖物种, 并且为底栖生物生存、生长和繁殖创造环境; 在 D 区和 C 区应通过底泥环保疏浚等措施进一步对污染沉积物进行治理。

为了进一步识别影响蠡湖沉积物质量的关键指标, 采用多元逐步回归分析法分析了各评估指标对沉积物质量综合指数贡献的“最优”回归方程, 见表 5。

表 5 蠡湖沉积物质量综合指数与评估指标的多元回归方程

Table 5 Multiple stepwise regression between SQCI and evaluating indexes for Lihu Lake

区域	逐步回归方程	显著性检验
A 区	$y = 1.23x_{C15} + 64.56$	$P<0.05$
B 区	$y = 13.76x_{C15} + 112.55x_{C22} - 52.94$	$P<0.01$
C 区	$y = 14.18x_{C15} + 29.80x_{C32} + 18.88x_{C11} + 12.11x_{C21} + 17.65$	$P<0.01$
D 区	$y = 23.98x_{C13} + 19.94x_{C15} + 42.31$	$P<0.01$
全湖	$y = 34.47x_{C11} + 25.14x_{C32} + 34.47$	$P<0.01$

注: y 为沉积物质量综合指数; x_{C15} 为氨氮释放通量的标准化值; x_{C22} 为综合营养状态指数的标准化值; x_{C32} 为底栖生物多样性的标准化值; x_{C11} 为总氮的标准化值; x_{C21} 为水质类别的标准化值; x_{C13} 为有机质的标准化值

由表 5 可以看出, 沉积物总氮 C11、氨氮释放通量 C15 和底栖生物多样性 C32 是决定沉积物质量状况的关键指标, 并且不同区域影响沉积物质量综合指数得分的因子也稍有差异, 如综合营养状态指数 C22、水质类别 C21 和有机质 C13 分别也是 B 区、C 区和 D 区的关键因子。

由于蠡湖与周边河流基本上以闸控的方式隔绝, 与周边水体之间基本上已没有水量的交换, 因此蠡湖水体中氮磷主要来源于湖体本身的内源及通过大气干湿沉降进入湖体的外源污染。先前的研究表明, 沉积物氮的释放通量约 20~30t/a, 磷约 1~2t/a, 约占蠡湖水体氮、磷污染负荷的 60% 以上^[31-32]。本研究中, 底栖生物 Shannon-Wiener

多样性指数在 0.24~2.66 之间,平均为 1.65,整体属于中等污染水平,并且优势种都是摇蚊、水丝蚓等比较耐污的种类,而且沉积物中底栖生物的分布也极为不均匀,一些点位中仅发现 1~2 种,这些都与氮磷释放通量、底栖生物多样性指数是影响蠡湖沉积物质量的主要指标相呼应。

从上面对蠡湖沉积物质量综合指数的空间分布、影响因素及 3 个要素层的空间差异性分析可以看出,要想改善蠡湖沉积物的质量,可以从控制底泥氮磷释放、改造基质以营造底栖动物生长和繁殖环境以及污染严重区域(D 区)的有机质清除等方面入手。根据沉积物质量评估结果,本研究将沉积物质量综合指数小于 60,即处于中度污染的区域定义为重点控制区,需要采取工程措施进行底泥修复;沉积物质量综合指数处于 60~65 之间的区域一般处于中等污染的边缘,处于轻度污染到中度污染的过渡阶段,本研究定义为“一般控制区”,此区域可结合湖区水文水动力等特点及水下地形情况适当进行生态修复;而综合指数大于 65 的区域,底泥污染较轻,定义为“规划保护区”,现阶段可以不采取工程措施,主要以自然修复为主。结合底泥厚度的空间分布,并扣除底泥厚度小于 10cm 区域,得到蠡湖沉积物分类控制的空间分布图,见图 5。

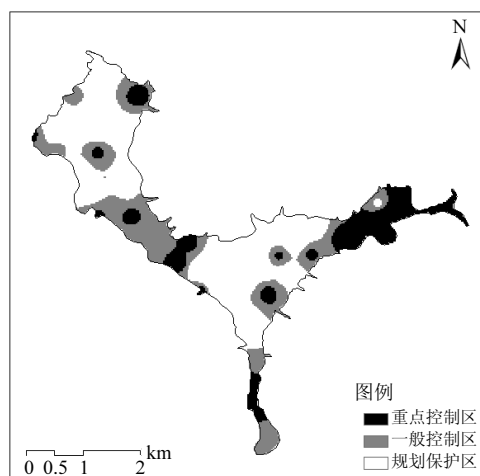


图 5 蠡湖分类控制区域分布

Fig.5 Spatial distribution of classification control areas for Lihu Lake

从图 5 可以看出,蠡湖沉积物重点控制区主要分布在 D 区的大部分区域、C 区的长广溪区域以及宝界桥和蠡湖大桥周围。利用地理信息系统空间统计表明,蠡湖重点控制区面积达到 1.76km^2 ,占整个蠡湖水面面积的 22.55%。

4 结论

4.1 3 个要素层相对重要性排序为底泥污染特征 (0.522)> 生态特征 (0.322)> 水体污染特征 (0.146);10 个评估指标的权重较大的是底栖生物多样性指数 C31(0.282)、氮氮释放通量 C15(0.208)、水质类别 C21(0.128)和溶解磷释放通量 C16(0.109),这 4 个因子的权重之和为 0.727。

4.2 蠡湖沉积物质量综合指数在 49~79 之间,平均为 64,整体上呈现西蠡湖大于东蠡湖,沿岸小于湖心的分布趋势;46 个点位中处于轻度污染和中度污染的比例分别为 61%和 39%。

4.3 多元统计表明,沉积物总氮 C11、氮氮释放通量 C15 及其底栖生物多样性 C32 是决定沉积物质量的关键指标,表明蠡湖沉积物的主要问题是底栖生物多样性单一及其沉积物中氮磷的释放。

4.4 综合底泥厚度空间分布、沉积物质量评估综合指数分级的相关结果,将蠡湖沉积物分为“重点控制区”、“一般控制区”和“规划保护区”,其中重点控制区面积为 1.76km^2 ,占整个蠡湖水面面积的 22.55%。

参考文献:

- [1] Gao L, Zhang L, Hou J, et al. Decomposition of macroalgal blooms influences phosphorus release from the sediments and implications for coastal restoration in Swan Lake, Shandong, China [J]. Ecological Engineering, 2013,60:19-28.
- [2] Wetzel M A, Wahrendorf D S, Von der ohe P C. Sediment pollution in the Elbe estuary and its potential toxicity at different trophic levels [J]. Science of The Total Environment, 2013,449(1):199-207.
- [3] Xu Q, Liu X D, Wang H F, et al. Study on the endogenous phosphorus load of sediments in Miyunreservoir [J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2005,48(2):333-340.
- [4] Li F, Huang J H, Zeng G M, et al. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from

- the Dongting Lake, Middle China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012,132:75-83.
- [5] Traven L. Sources, trends and ecotoxicological risks of PAH pollution in surface sediments from the northern Adriatic Sea (Croatia) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013,77(1/2):445-450.
- [6] Fu J, Hu X, Tao X C, et al. Risk and toxicity assessments of heavy metals in sediments and fishes from the Yangtze River and Taihu Lake, China [J]. *Chemosphere*, 2012,93(9):1887-1895.
- [7] 向友权,韩建波,韩庚辰.海洋沉积物的质量评价与管理 [J]. *海洋环境科学*, 2006,25(2):96-100.
- [8] 刘 涛,胡志新,杨柳燕,等.江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 [J]. *环境科学*, 2012,33(9):3057-3063.
- [9] Delongchamp T M, Ridal J J, Lean D R S, et al. Mercury transport between sediments and the overlying water of the St. Lawrence River area of concern near Cornwall, Ontario [J]. *Environmental Pollution*, 2010,158(5):1487-1493.
- [10] Barakat A O, KHAIRY M, AUKAILY I. Persistent organochlorine pesticide and PCB residues in surface sediments of Lake Qarun, a protected area of Egypt [J]. *Chemosphere*, 2013,90(9):2647-2476.
- [11] Kadokami K, Li X H, Pan S Y, et al. Screening analysis of hundreds of sediment pollutants and evaluation of their effects on benthic organisms in Dokai Bay, Japan [J]. *Chemosphere*, 2013, 90(2):721-728.
- [12] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范 [M]. 2 版.北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [13] 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.
- [14] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved nutrient flux from the near shore sediment of Bowling Green Bay, Central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. *Estuarine, Coastland Shelf Science*, 1987,24(3):289-303.
- [15] 龚春生,姚 琪,范新成.城市浅水型湖泊底泥释磷的通量估算—以南京玄武湖为例 [J]. *湖泊科学*, 2006,18(2):179-183.
- [16] 金相灿,李进军,张晴波.湖泊河流环保疏浚工程技术指南 [M]. 北京:科学出版社, 2013.
- [17] A.V. Arakel. Towards developing sediment quality assessment guidelines for aquatic systems: An Australian perspective [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1995,42(4):335-369.
- [18] Sherri L S, Donald D M, et al. A Preliminary Evaluation of Sediment Quality Assessment Values for Freshwater Ecosystems [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 1996,22(3):624-638.
- [19] 李春华,叶 春,赵晓峰,等.太湖湖滨带生态系统健康评价 [J]. *生态学报*, 2012,32(12):3806-3815.
- [20] 张 松,郭怀成,盛 虎,等.河流流域生态安全综合评估方法 [J]. *环境科学研究*, 2012,25(7):826-832.
- [21] 巴雅尔,郭家盛,卢少勇,等.博斯腾湖大湖区近 20 年生态健康状况评价 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(3):503-507.
- [22] 姜 霞,张晴波,王书航.太湖有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚规划研究 [M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [23] 秦伯强,胡维平,陈伟民.太湖水环境演化过程与机理 [M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [24] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1001.
- [25] 国家环境保护部. GB383-2002 地表水环境质量标准(S).北京:中国环境科学出版社出版, 2002.
- [26] 孙顺才,黄漪平.太湖 [M]. 北京:海洋出版社, 1993.
- [27] 李祚泳,丁 晶,彭荔红.环境质量评价原理与方法 [M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [28] 刘 永,郭怀成,戴永立,等.湖泊生态系统健康评价方法研究 [J]. *环境科学学报*, 2004,24(4):723-729.
- [29] 张 博,李永峰,姜 霞,等.环境治理工程对蠡湖水体中磷空间分布的影响 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(7):1271-1279.
- [30] 胡佳晨,姜 霞,李永峰,等.环境治理工程对蠡湖水体中氮空间分布的影响 [J]. *环境科学研究*, 2013,26(4):380-388.
- [31] 余 辉,张璐璐,燕姝雯,等.太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率 [J]. *环境科学研究*, 2011,24(11):1210-1219.
- [32] 刘 涛,杨柳燕,胡志新,等.太湖氮磷大气干湿沉降时空特征 [J]. *环境监测管理和技术*, 2012,24(6):20-24.

作者简介: 李佳璐(1988-),女,河南开封人,中国环境科学研究院硕士研究生,主要从事湖泊水环境管理研究.发表论文 4 篇.