

刘丽娜, 马春子, 张靖天, 等. 东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 520–529.

LIU Li-na, MA Chun-zi, ZHANG Jing-tian, et al. Distribution characteristics of pollution from nitrogen, phosphorus, and heavy metals in sediments of Shankou Lake in Northeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3): 520–529.

东北典型湖泊沉积物氮磷和重金属分布特征及其污染评价研究

刘丽娜^{1,2}, 马春子³, 张靖天³, 何卓识³, 霍守亮³, 席北斗^{3*}

(1.黑龙江工程学院土木与建筑工程学院, 哈尔滨 150050; 2.东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 3.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:以东北典型湖泊山口湖为研究对象,采用有机指数、有机氮、潜在生态风险指数及地累积指数评价研究区域沉积物氮磷和重金属污染状况,并对沉积物的生态风险进行评估。结果表明:丰水期和枯水期沉积物 TN 含量均值分别为 3968 mg·kg⁻¹ 和 5780 mg·kg⁻¹, TP 含量均值分别为 1557 mg·kg⁻¹ 和 1787 mg·kg⁻¹, 丰水期沉积物中 TN、TP 含量低于枯水期。丰水期沉积物 C/N 均值为 20.76,说明沉积物中污染物主要来自外源性颗粒态有机物的输入;枯水期沉积物 C/N 均值为 8.91,说明水体中藻类、水生动植物是沉积物中有机物的主要来源。无论是枯水期还是丰水期,山口湖沉积物氮污染处于 IV 级水平,受到一定的有机污染,丰水期沉积物 TN、TP 含量较高的区域位于上游湖叉入湖口,枯水期沉积物 TN、TP 含量较高的区域位于山口湖主河道及下游。不同水期沉积物中 Cd 的污染水平相对较高,而 Cu、Ni、As、Zn 基本未受到污染或污染水平相对较低,枯水期沉积物中重金属具有高生态风险,丰水期沉积物中重金属具有很高生态风险。

关键词:沉积物;氮;磷;重金属;生态风险

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)03-0520-10 doi:10.11654/jaes.2017-1131

Distribution characteristics of pollution from nitrogen, phosphorus, and heavy metals in sediments of Shankou Lake in Northeast China

LIU Li-na^{1,2}, MA Chun-zi³, ZHANG Jing-tian³, HE Zhuo-shi³, HUO Shou-liang³, XI Bei-dou^{3*}

(1.School of Civil and Architecture Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China; 2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 3.Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The organic index, organic nitrogen content, potential ecological risk index, and geo-accumulation index were used to estimate nitrogen, phosphorus, and heavy metal pollution in sediments from Shankou Lake, a typical mountain lake in the northeast region of China. The ecological safety of sediments was also evaluated. The results indicated that the average nutrients in sediments in the wet and dry seasons were 3968 mg·kg⁻¹ and 5780 mg·kg⁻¹ (total nitrogen, TN), and 1557 mg·kg⁻¹ and 1787 mg·kg⁻¹ (total phosphorous, TP), respectively. TN and TP contents in sediments during the wet season were significantly lower than those during the dry season. A high C/N ratio in sediments in the wet season (average: 20.76) indicated exogenous particulate organic matter was the main source of pollutants. The low C/N ra-

收稿日期:2017-08-19 录用日期:2017-12-04

作者简介:刘丽娜(1976—),女,黑龙江人,副教授,主要从事湖泊沉积物生态风险研究。E-mail:liulinahit@126.com

*通信作者:席北斗 E-mail:xibeidou@263.net

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-002);黑龙江省青年科学基金项目(QC2013C050)

Project supported: Mega-projects of Science Research for Water Environment Improvement (2012ZX07101-002); The Youth Science Foundation of Heilongjiang Province, China (QC2013C050)

tio in sediments (average: 8.91) in the dry season indicated that algae and aquatic organisms in the water column were the main sources of pollutants. Nitrogen pollution in sediments from Shankou Lake were at level IV in both the wet and dry seasons, indicating that sediments were always polluted by organic matter to some degree. High TN and TP contents in sediments were found in the upstream lake fork during the wet season, and in the main channel and downstream during the dry season. Cd pollution levels in the sediments were relatively high, while Cu, Ni, As, and Zn were either absent or observed at low levels. Heavy metals in sediments in the dry season posed a high ecological risk, while those in the wet season presented an even higher ecological risk.

Keywords: sediment; nitrogen; phosphorus; heavy metal; ecological risk

湖泊沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,是流域营养物质主要归宿^[1-2],其性质可以间接反映水体污染状况,作为湖泊主要的内负荷来源,对湖泊水体产生重要影响^[3-7]。沉积物中氮磷营养盐含量在一定程度上代表了湖泊生物生产力水平,影响着整个水体的营养盐循环^[8-10]。重金属进入水体后,不易自然降解,可在沉积物中积累而成为持久性污染物,通过一系列物理、化学和生物过程,沉积物会释放这些重金属,对水体造成“二次污染”^[11-13]。研究湖泊沉积物中氮磷及重金属的含量及其分布特征,对把握湖泊沉积物的生态风险具有重要意义^[14]。

山口湖位于黑龙江省五大连池市境内,是我国东北地区典型的内陆湿地和水域生态系统。华飞等^[15]对山口湖沉积物中溶解性有机氮(Dissolved Organic Nitrogen, DON)的浓度及其分布特征进行了探讨,为沉积物中DON循环转化的研究提供了有效依据。苏明舟等^[16]对山口湖沉积物溶解性有机氮藻类的可利用性进行了研究,揭示了不同来源沉积物DON组分对藻类的生物可利用性。上述研究均是关于山口湖沉积物中氮污染程度的研究,而关于沉积物中重金属的研究较少。山口湖作为国家良好湖泊、生态环境保护湖泊和五大连池市及下游地区备用饮用水源,目前水质相对较好,但其地处纬度较高,生育期短,各种生物生长缓慢,流域水域生物活动受到制约,山体土层脊薄,黑土层积累缓慢,生物生长力弱,一旦遭到破坏,生态环境极难恢复,属于生物更新脆弱地区,具有独特的生物地理特征,周围环境污染和生态破坏对山口湖生态安全的威胁日趋严重。另外,山口湖四季温差较大,每年11月至次年4月处于冰封期,5月温度升高后冻土中保存的营养物大量溶解到水体中,此后入湖径流量逐渐增大,在7月和8月达到最大,随着降雨量的减少,入库径流量逐渐减少,因而具有典型的东北山地湖泊特征。本文通过研究山口湖沉积物氮磷、重金属分布特征以及对重金属污染进行生态风险评估,以期对山口湖的综合治理及保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

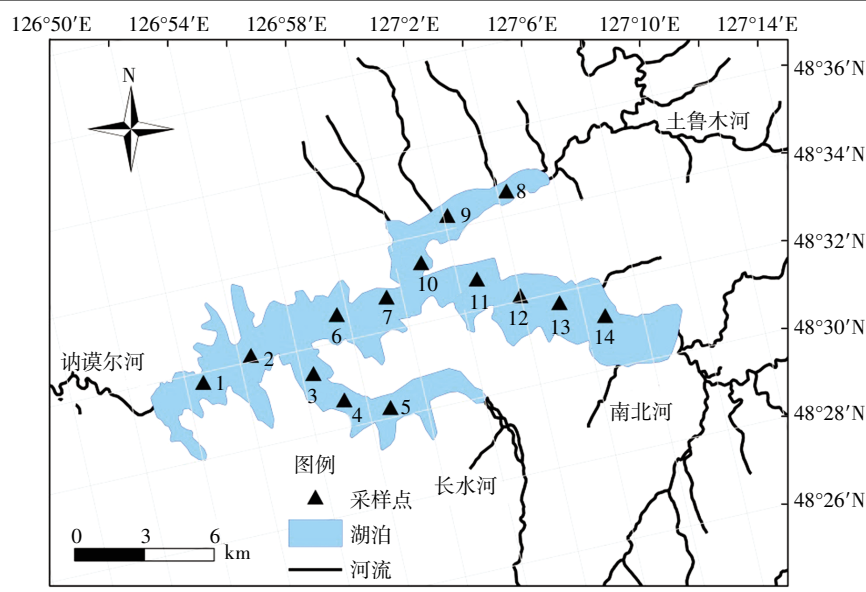
山口湖(126°50′46.86″E~126°50′48.34″E, 48°31′40.75″N~48°31′15.30″N)属寒温带大陆季风气候,水域面积84 km²,平均水深16 m,最大水深40 m。山口湖由南北河、土鲁木河、长水河3条支流汇集而成,3条河自东向西流经山口湖,在坝口拦截后汇入讷漠尔河。以南北河长度和径流量最大,土鲁木河次之,长水河最小。

根据《区域地球化学勘察规范(DZ/T 0167—2006)》,同时参考山口湖的地形及周围污染源分布情况,及山口湖不同时期水位和库容的差异,在2014年6月和10月,选取14个点位,开展表层沉积物采样工作。采样点的分布如图1所示。根据山口水利枢纽管理处提供的数据:2014年6月山口湖入湖径流量较少,平均水位为312.10 m,库容量为66 772 万m³,记为丰水期;10月山口湖入湖径流量较大,平均水位为310.40 m,库容量为54 631 万m³,记为枯水期。

采用彼得森采泥器采集湖底表层10 cm左右的沉积物样品,除去表面的碎石、贝壳等大块异物后,装入自封袋于保温箱中低温密闭保存,带回实验室后冷冻保存,将冻实的表层沉积物样品放在FD-1A-50型真空冷冻干燥机中冷冻干燥12 h,研磨过100目筛,分别测定总氮(TN/%)、总磷(TP/%)、有机质(有机碳, Org-C/%)及Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni、As等重金属指标。TP采用硫酸-高氯酸消解法或钼锑抗分光光度法, TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法,有机质采用高温燃烧法。重金属采用微波消解及电感耦合等离子体质谱仪检测。

1.2 沉积物中氮磷污染评价方法

考虑到TN是山口湖及其入湖河流中主要的超标污染物,本文采用有机指数(Org-Index)和有机氮(Org-N/%)评价研究区域沉积物污染状况。有机指数通常用来表示水域沉积物的环境状况,有机氮通常用来衡量湖泊表层沉积物是否遭受氮污染^[17-18],其计算



下游 SKH-1、SKH-2;长水河湖叉 SKH-3、SKH-4、SKH-5;主河道 SKH-6、SKH-7;土鲁木河湖叉 SKH-8、SKH-9、SKH-10;
南北河湖叉 SKH-11、SKH-12、SKH-13、SKH-14

图 1 山口湖采样点分布图

Figure 1 Sampling sites in Shankou Lake

方法及评价标准如下:

$$\text{Org-Index}=\text{Org-C}(\%) \times \text{Org-N}(\%)$$
$$\text{Org-N}(\%)=\text{TN}(\%) - [\text{NH}_4^+-\text{N}(\%)] - [\text{NO}_3^--\text{N}(\%)]$$

沉积物中有机指数及有机氮评价标准见表 1。

表 1 沉积物中有机指数及有机氮评价标准^[17-18]

Table 1 The evaluation standards of organic index and organic nitrogen index in sediments^[17-18]

等级	Org-Index	Org-N/%	类型
I	<0.05	<0.003 3	清洁
II	[0.05-0.20)	0.003 3~0.066	较清洁
III	[0.20-0.50)	0.066~0.133	尚清洁
IV	≥0.50	>0.133	有机污染

1.3 沉积物中重金属污染评价方法

1.3.1 潜在生态风险指数法

采用沉积物潜在生态风险指数法^[19]对山口湖沉积物中重金属的污染状况进行评价。潜在生态风险指数法利用沉积学的原理来评价重金属污染及其对生物的影响^[20]。沉积物中重金属潜在生态风险指数表示为:

$$RI=\sum_{i=1}^n E_r^i$$
$$E_r^i=T_r^i \times C_f^i=T_r^i \times C_s^i/C_n^i$$

式中:RI 为累积重金属潜在生态风险指数; E_r^i 为单一

重金属潜在风险指数; T_r^i 为重金属的生物毒性响应因子(参考《黑龙江省农业环境质量报告(1984—1989)》),反映重金属在水相、固相和生物相之间的响应关系; C_f^i 为单一重金属污染指数; C_s^i 为重金属实测值; C_n^i 为计算所需要的参照值(表 2)^[21-22]。不同的 E_r^i 值对应的潜在生态风险: $E_r^i<40$,低潜在生态风险; $40\leq E_r^i<80$,中潜在生态风险; $80\leq E_r^i<160$,较高潜在生态风险; $160\leq E_r^i<320$,高潜在生态风险; $E_r^i\geq 320$,很高潜在生态风险。不同的 RI 值范围所对应的潜在生态风险: $RI<150$,低潜在生态风险; $150\leq RI<300$,中潜在生态风险; $300\leq RI<600$,较高潜在生态风险; $600\leq RI<1200$,高潜在生态风险; $RI\geq 1200$,很高潜在生态风险^[19-20]。

1.3.2 地累积指数法

近年来国内外学者专家广泛采用地累积指数法^[19-20]评价人为活动产生的重金属对土壤的污染,其计算公式如下:

$$I_{geo}=\log_2\left(\frac{C_n}{K\times C_b}\right)$$

表 2 沉积物中重金属的参照值(C_n^i)和毒性系数(T_r^i)^[21-22]
Table 2 Reference value(C_n^i) and toxic coefficient(T_r^i)
for heavy metals in sediments^[21-22]

项目	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	As
$C_n^i/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	0.04	10.52	14.36	67.28	58.60	21.24	7.30
T_r^i	30	5	5	1	2	5	2

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为元素 n 在沉积岩中的实测浓度; C_b 为黏质沉积岩(普通页岩)中该元素的地球化学背景值^[23];常量 K 是为消除各地岩石差异可能引起背景值的变动转换系数,通常为 1.5。不同 I_{geo} 值对应的沉积物污染程度: $I_{geo}<0$, 无污染; $0\leq I_{geo}<1$, 无污染~中污染; $1\leq I_{geo}<2$, 中污染; $2\leq I_{geo}<3$, 中污染~重污染; $3\leq I_{geo}<4$, 重污染; $4\leq I_{geo}<5$, 重污染~极重污染; $I_{geo}\geq 5$, 极重污染。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中氮磷污染评价

2.1.1 沉积物中氮磷含量及其分布特征

如表 3 所示,2014 年 6 月丰水期沉积物中 TN 含量在 2210~5190 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 3968 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;IN(无机氮)占 TN 比例在 4.46%~13.78%,均值为 8.60%;TP 含量在 677~4261 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 1557 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;IP(无机磷)占 TP 比例在 29.23%~89.19%之间,均值为 55.78%。2014 年 10 月枯水期沉积物中 TN 含量在 3048~7692 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为 5780 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;IN 占 TN 比例在 2.51%~10.66%,均值为 6.11%;TP 含量在 818~3928 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 1787 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;IP 占 TP 比例在 38.84%~88.27%之间,均值为 65.48%。

枯水期水体流速减缓,流入湖体的污染物易于沉降,因而沉积物中 TN、TP 含量很高,枯水期沉积物中 TN、TP 含量均值比丰水期沉积物中均值分别高出 45.67%和 14.77%。枯水期和丰水期沉积物中 IN/TN

均值都在 10%以下,这说明沉积物中的氮都以有机态为主要存在形式,沉积物中磷以 IP 为主,但 IP/TP 低于 IN/TN,这与大多数湖泊的污染状况相一致。

两次调查的结果均显示:山口湖下游(点位 1、2、6 和 7)沉积物 TN 含量高于上游 3 个湖叉 TN 含量,尤其是在下游靠近坝口和饮用水源地取水口(点位 1 和 2)附近,这是因为下游的污染物主要来自 3 个湖叉污染物的不断堆积。其中,长水河湖叉(点位 3、4、5)的 TN 含量较高,在平均值以上:枯水期 TN 含量在 5284~6564 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 6005 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;丰水期 TN 含量在 4595~4756 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 4686 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而南北河湖叉(点位 11、12、13、14)和土鲁木河湖叉(点位 8、9、10)的沉积物 TN 含量相对较低,枯水期和丰水期均值分别为 4823、3698 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 5260、3471 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这是因为长水河湖叉中沉积物的 TN 污染主要来自湖叉南岸农田的面源径流及长水河农场排放的生活污水,TN 的输入量较高,同时,由于长水河湖叉的径流量较小,污染物易沉积,导致沉积物中 TN 含量较高。南北河湖叉沉积物的 TN 来自湖叉南岸的农田及流经通北林业局林地、草地的地表径流,土鲁木河湖叉沉积物的 TN 主要来自沾河林业局林地的径流,因而污染相对较轻。在山口湖下游,来自 3 个湖叉的污染物不断堆积,导致沉积物 TN 含量较高,高于全湖平均值。TP 和 IP 的分布状况与 TN 类似,即南北河湖叉和土鲁木河湖叉沉积物 TP、IP 较低,低于平均值,长水河湖叉和下游沉积物 TP、IP 较

表 3 山口湖沉积物氮磷含量及其分布特征
Table 3 The contents and distribution of nitrogen and phosphorus in sediments of Shankou Lake

点位	2014 年 6 月				2014 年 10 月			
	TN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	(IN/TN)/%	TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	(IP/TP)/%	TN/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	(IN/TN)/%	TP/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	(IP/TP)/%
1	4304	7.35	677	38.60	6198	7.48	3928	88.27
2	4582	7.90	856	69.61	7692	8.05	3203	78.56
3	4595	9.65	2644	72.72	6564	3.43	1711	69.62
4	4709	8.73	2091	69.07	5284	5.59	2076	82.22
5	4756	9.35	4261	89.19	6165	4.95	1654	71.23
6	5190	7.88	1232	41.37	7226	9.18	2242	78.89
7	2210	13.78	1429	29.23	6722	3.62	893	38.84
8	4219	10.06	1596	55.75	3048	2.51	818	40.57
9	3038	10.17	1464	60.43	6228	2.81	1505	66.24
10	3156	6.40	1005	32.46	6505	6.69	1284	62.54
11	3208	6.44	1106	55.61	5065	7.00	1668	39.57
12	4140	11.27	1347	61.55	5255	7.24	1612	53.51
13	3605	6.97	1148	31.10	5082	6.37	1117	62.87
14	3840	4.46	949	46.27	3890	10.66	1307	83.82

高,尤其是长水河湖叉,IP/TP 高达 74.36%。

2.1.2 沉积物中有机质含量及其分布特征

全湖沉积物中有机质采用 TOC 来表示,沉积物中有机质是重金属、有机物等污染物发生吸附、分配、络合作用的活性物质,也是反映沉积物有机营养程度的重要标志^[14]。枯水期和丰水期的山口湖沉积物中有机质含量及其分布见图 2。

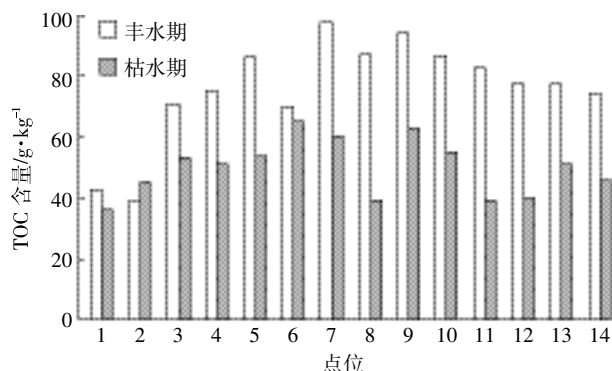


图 2 山口湖沉积物不同水期有机质(TOC)含量及其分布特征
Figure 2 The contents and distribution of organic matter(TOC) in Shangkou Lake sediments at different seasons

如图 2 所示,枯水期沉积物 TOC 含量在 36.20~65.07 g·kg⁻¹ 之间,均值为 49.86 g·kg⁻¹。丰水期沉积物 TOC 含量比枯水期高,在 39.23~98.00 g·kg⁻¹ 之间,均值为 75.95 g·kg⁻¹。以长水河湖叉(点位 6、7、8)和南北河湖叉(点位 9、10、11)样点沉积物 TOC 含量较高,均值分别为 85.16 g·kg⁻¹ 和 87.96 g·kg⁻¹。丰水期沉积物中 TOC 含量明显高于枯水期,这是因为丰水期 3 个湖叉入湖河流夹带了大量土壤颗粒、林木和草地碎屑等颗粒状有机污染物,水位上涨导致湖滨带大量有机污染物进入水体,并沉降到底泥中。同时,6 月处于春耕期,降雨径流导致长水河湖叉两岸和南北河湖叉南岸大量旱坡耕作的农田中的污染物进入湖体,进一步增加了沉积物中的有机物含量。

2.1.3 沉积物中营养盐比值(C/N)

湖泊沉积物的 C/N 在一定程度上可以体现沉积物中有机质来源的差异性^[24]。C/N 越低,表示有机质主要来自内源,包括水体中营养盐沉积、浮游生物排泄物和尸体的沉积等;C/N 越高,则表示有机物主要来自外源性输入,包括自然和人类活动产生的污染物。藻类、低等水生植物含有较多的蛋白质,其 C/N 值一般小于 7,而维管束陆生植物的 C/N 值通常大于 20。枯水期山口湖表层沉积物中 C/N 变化范围为 5.84~12.78 之间,平均值为 8.91,各点位之间差

异较小。这说明山口湖沉积物中有机质大多来自内源性污染物的输入。丰水期山口湖表层沉积物中 C/N 变化范围为 8.56~44.35 之间,平均值为 20.76,说明山口湖沉积物中有机质大多来自外源性污染物的输入。这与山口湖独特的地理环境密不可分,山口湖周围遍布森林和草地,且在南北河、长水河南岸及部分湖叉有少量旱地耕地,林地和高覆盖草地分别占山口湖流域总面积的 68.13%和 8.29%。在枯水期时,由于入湖河流来水量的减少,入湖径流带来的污染物总量减少,同时,秋收结束使得周围耕地处于闲置状态,农田径流带来的污染物质也较少,沉积物中有机质大多来源于湖内浮游动植物、水生生物尸体的腐烂、分解后沉降及水体中溶解性有机物在湖底的累积。而在丰水期,由于入湖径流量的增大及耕作期间农田面源径流污染物增加,陆源性有机物的输入量开始增加,导致沉积物中有机质主要来源于外源性污染物的输入。从所采集的沉积物样本表现性质来看,枯水期沉积物粘性较大、质地均匀,冷冻干燥研磨后样品呈灰色,丰水期沉积物中含有大量枯枝、落叶、草屑等有机物,冷冻干燥研磨后样品呈现很重的黑色,说明其有机质含量较高。

采用 Person 指数对山口湖沉积物中 TN、TP、IP 和 TOC 进行分析,结果发现:TN 与 TOC 极显著相关,相关系数为 0.931,说明山口湖中氮的含量与有机质的含量具有很强的相关性;TP 与 IP 极显著相关,相关系数为 0.962,说明 IP 是沉积物中磷的主要来源。

2.1.4 氮磷污染评价

根据有机指数和有机氮评价方法和标准,枯水期和丰水期山口湖各采样点的表层沉积物有机指数等级及有机氮等级评价结果见表 4。

由表 4 可知,丰水期山口湖各点位有机指数范围介于 1.66~3.71 之间,均值为 2.69,各点位有机氮质量分数介于 0.19%~0.48%,均值为 0.36%;枯水期山口湖各点位有机指数范围介于 1.16~4.27 之间,均值为 2.76,各点位有机氮质量分数介于 0.30%~0.71%,均值为 0.54%。无论是枯水期还是丰水期,这两种方法的评价结果均显示山口湖各采样点位沉积物受到有机污染,属于 IV 级范畴。

采用插值法对山口湖沉积物 TN、TP 进行空间分析,分析结果见图 3。

通过对山口湖沉积物营养盐的空间分析发现,丰水期沉积物 TN 和 TP 含量分别在平均值 3539 mg·

kg⁻¹ 和 1557 mg·kg⁻¹ 以上的分布区域分别占研究区域的 60.20%和 38.20%,主要集中在南北河湖叉、土鲁木河湖叉入湖口、长水河湖叉入口处及下游坝口处。丰水期沉积物 TN、TP 含量分别在平均值以下的分布区域分别占研究区域的 39.80%和 61.80%。枯水期沉积物 TN、TP 含量分别在平均值 5780 mg·kg⁻¹ 和 1787 mg·kg⁻¹ 以上的分布区域分别占研究区域的 60.07%和 36.91%,主要集中在主河道及下游。枯水期沉积物

表 4 不同水期山口湖沉积物有机指数及有机氮含量
Table 4 The organic indexes and organic nitrogen concentrations in Shankou Lake sediments at different seasons

点位	丰水期					枯水期				
	有机碳质量 分数/%	有机氮质量 分数/%	有机指数	有机指数 等级	有机氮 等级	有机碳质量 分数/%	有机氮质量 分数/%	有机指数	有机指数 等级	有机氮 等级
1	4.27	0.40	1.70	IV	IV	3.62	0.57	2.08	IV	IV
2	3.92	0.42	1.66	IV	IV	4.50	0.71	3.19	IV	IV
3	7.10	0.42	2.95	IV	IV	5.34	0.63	3.38	IV	IV
4	7.51	0.43	3.23	IV	IV	5.14	0.50	2.56	IV	IV
5	8.61	0.43	3.71	IV	IV	5.38	0.59	3.15	IV	IV
6	7.01	0.48	3.35	IV	IV	6.51	0.66	4.27	IV	IV
7	9.80	0.19	1.87	IV	IV	6.04	0.65	3.91	IV	IV
8	8.74	0.38	3.32	IV	IV	3.90	0.30	1.16	IV	IV
9	9.42	0.27	2.57	IV	IV	6.29	0.61	3.81	IV	IV
10	8.67	0.30	2.56	IV	IV	5.48	0.61	3.32	IV	IV
11	8.29	0.30	2.49	IV	IV	3.91	0.47	1.84	IV	IV
12	7.74	0.37	2.84	IV	IV	4.02	0.49	1.96	IV	IV
13	7.79	0.34	2.61	IV	IV	5.15	0.48	2.45	IV	IV
14	7.46	0.37	2.73	IV	IV	4.55	0.35	1.58	IV	IV

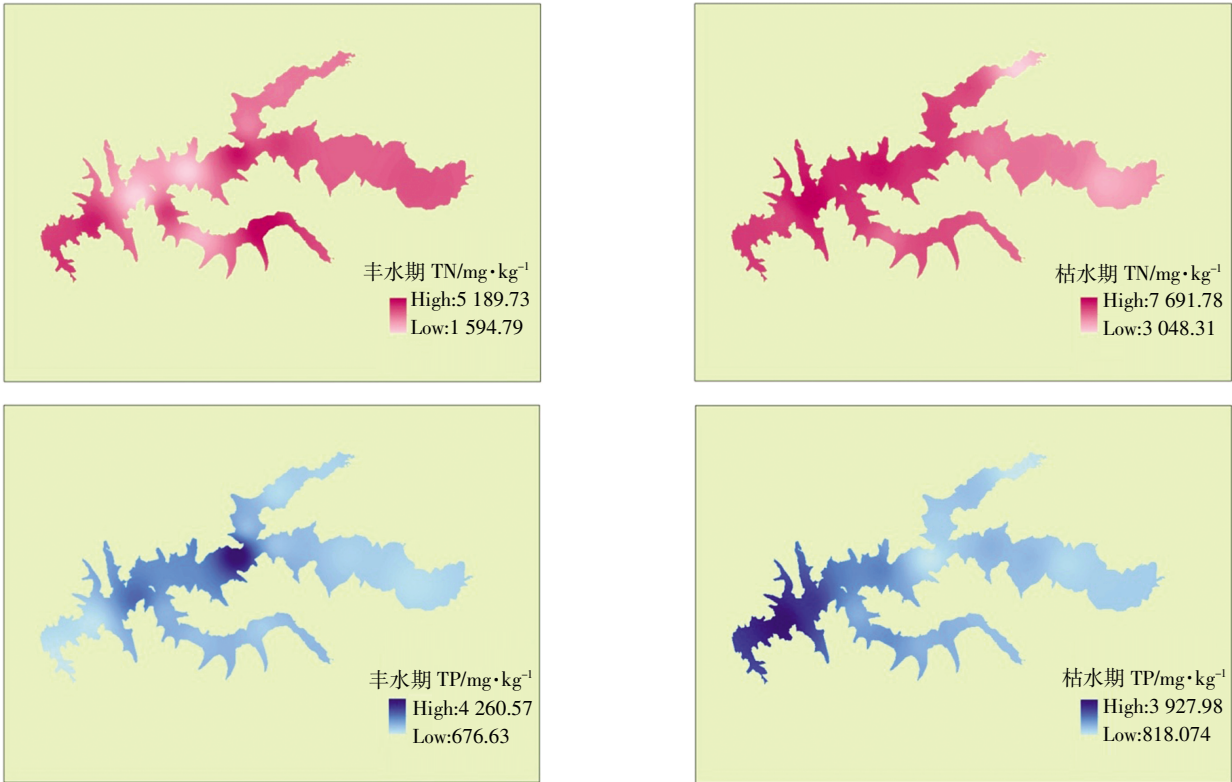


图 3 山口湖沉积物 TN 和 TP 不同水期空间分布
Figure 3 The spatial distribution of TN and TP in Shankou Lake sediments at different seasons

TN、TP 含量分别在平均值以下的分布区域分别占研究区域的 39.93%和 63.09%。

2.2 沉积物中重金属污染评价

2.2.1 潜在生态风险指数法评价结果

根据 2014 年 6 月和 10 月实验实测得到的山口湖表层沉积物中重金属 Cd、Pb、Cu、Zn、Cr、Ni、As 的总量数据,计算得到重金属的潜在生态风险指数结果如表 5 所示。

无论是在枯水期还是丰水期,山口湖表层沉积物中 Pb、Cu、Zn、Cr、Ni、As 的 E_i 值均在 40 以下,具有低的潜在生态风险。重金属 Cd 的 E_i 值远高于其他重金属,枯水期 Cd 的 E_i 值在 978.57~1 185.71 之间,均值为 1 067.86,丰水期在 797.38~1 439.78 之间,均值为 1 166.98,具有很高的潜在生态风险。这 7 种重金属的潜在生态风险指数顺序为 Cd>Pb>Cu>Ni>As>Cr>Zn。除 Zn、As 外,各点位沉积物重金属的潜在生态风险差异不大。与枯水期相比,丰水期沉积物各重金属的 E_i 值和 RI 值略高,具有相对较高的潜在生态风险。

从表 5 中可以得知,枯水期山口湖沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等 7 种重金属的潜在生态风险指数 RI 均值为 1 101.57,处于 $600 \leq RI < 1200$,具有高的潜在生态风险,丰水期的 RI 均值为 1 229.24,处于 $RI \geq 1200$,具有很高的潜在生态风险,会对周边环境

带来威胁。Cd 对潜在生态风险的贡献率在 90%以上,这主要是因为 Cd 的背景值较低,该值主要参考黑龙江地区土壤 Cd 的背景值。其他金属的 E_i 值较低,对周边环境的威胁较小。采用淡水沉积物质量基准法进一步评价沉积物中 Cd 的污染程度,加拿大淡水沉积物中 Cd 的确定产生效应的临界浓度值(TEL)和必然产生效应的浓度值(PEL)分别为 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [25],枯水期和丰水期沉积物中 Cd 含量均值分别为 $1.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是 Cd 的 TEL 值的 2.5 倍和 2.7 倍,但低于 Cd 的 PEL 值,说明山口湖沉积物中 Cd 的污染程度较轻,这与潜在风险指数法的评价结果不一致,可能是所选定的沉积物中 Cd 的背景值偏低的原因。

2.2.2 地累积指数法评价结果

根据枯水期和丰水期实验实测出的山口湖表层沉积物中 7 种重金属的总量计算得到的沉积物重金属的地累积指数如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,枯水期山口湖 14 个采样点沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 元素的地累积指数分别在 $-1.43 \sim -0.48$ 、 $-0.80 \sim -0.01$ 、 $-0.59 \sim 0.21$ 、 $-1.34 \sim -0.13$ 、 $-0.58 \sim 1.65$ 、 $4.44 \sim 4.72$ 、 $0.58 \sim 1.13$ 之间。山口湖沉积物中,各种重金属的富集程度为 Cd>Pb>As>Cu>Ni>Zn>Cr。丰水期山口湖沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Pb 元素的地累积指数的分布与枯水期类

表 5 2014 年山口湖沉积物重金属的潜在风险指数
Table 5 The potential ecological risk indexes of Shankou Lake sediments in 2014

点位	E_i														RI	
	Cr		Ni		Cu		Zn		As		Cd		Pb			
	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月	6 月	10 月		
1	1.34	1.34	4.14	5.72	8.05	6.52	1.16	0.80	2.09	5.30	797.38	1 021.43	17.13	13.50	831.29	1 054.61
2	1.37	1.39	5.54	7.46	7.37	8.57	1.54	1.01	4.07	9.44	1 206.37	1 171.43	19.19	16.36	1 245.44	1 215.66
3	1.57	1.62	5.61	7.14	11.39	8.11	1.81	0.72	4.05	4.85	1 295.98	1 100.00	28.63	14.55	1 349.04	1 136.98
4	1.74	1.61	6.86	6.65	15.88	7.11	1.68	0.59	4.62	4.16	1 439.78	1 064.29	25.62	11.81	1 496.19	1 096.22
5	1.68	1.57	5.99	6.20	9.07	7.32	2.00	0.72	4.24	3.83	1 115.89	1 071.43	38.76	12.50	1 177.62	1 103.56
6	1.83	1.48	6.48	7.10	8.70	8.14	1.55	0.89	2.08	6.75	1 042.29	1 107.14	39.89	15.68	1 102.83	1 147.18
7	1.36	1.34	7.74	5.44	12.16	6.62	1.81	0.96	2.60	2.61	1 286.76	1 050.00	40.76	13.01	1 353.20	1 079.96
8	1.71	1.38	7.23	4.30	11.69	4.99	1.78	0.73	2.98	2.01	1 254.00	985.71	49.99	11.20	1 329.37	1 010.32
9	2.14	1.11	6.86	4.53	11.17	7.00	1.46	1.37	2.34	2.24	1 173.30	978.57	47.37	12.91	1 244.65	1 007.74
10	1.65	1.63	4.46	6.84	8.24	8.66	1.23	1.01	1.94	3.54	1 002.38	1 107.14	55.79	15.87	1 075.70	1 144.69
11	1.81	1.56	5.77	6.03	9.13	7.35	1.22	1.04	1.87	2.61	1 060.61	1 000.00	50.60	12.62	1 131.01	1 031.21
12	2.03	1.87	7.26	6.63	13.68	7.95	1.36	0.96	2.69	2.59	1 260.53	1 092.86	49.46	12.85	1 337.02	1 125.71
13	2.23	1.83	13.34	6.49	13.47	7.49	0.99	1.02	2.38	4.27	1 088.84	1 185.71	49.41	13.74	1 170.65	1 220.56
14	2.40	2.16	7.92	6.54	12.82	7.57	1.72	0.96	2.39	3.42	1 313.61	1 014.29	24.55	12.61	1 365.40	1 047.55
均值	1.78	1.56	6.80	6.22	10.92	7.39	1.52	0.91	2.88	4.12	1 166.98	1 067.86	38.37	13.51	1 229.24	1 101.57

似。分析结果表明,沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn 的平均地累积指数小于 0,说明基本上未受到 Cr、Ni、Cu、Zn 的污染,这与潜在生态风险指数的评价结果相一致。沉积物中 As、Pb 的平均地累积指数在 0~1 之间,表现出无污染到中污染水平,其中部分点位的 As 地累积指数在 0 以下,污染较小。与 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 相比,Cd 的污染最重,其平均地累积指数在 4 以上,这与潜在生态风险指数的评价结果相一致。整个山口湖沉积物中重金属地累积指数分布相对均匀,As 和 Zn 的地累积指数空间分布差异性较大。

2.2.3 评价方法比较

从结果对比中可以看出,两种方法划分的重金属污染等级及重金属污染区域基本一致,显示整个山口湖沉积物中 Cd 的污染水平相对较高,而基本未受到 Cu、Ni、As、Zn 污染或其污染水平相对较低。

潜在生态风险指数法和地累积指数法均是以背景值为参比值的方法,所以在没有淡水沉积物质量标准的时候,将黑龙江地区土壤背景值引入,使得这两种方法在应用上更显得科学合理。而且潜在生态风险指数法不仅考虑了沉积物的背景值,同时还考虑到了

不同重金属对生态系统和人体具有不同毒性作用,因此更加具有科学性。结合山口湖沉积物中重金属污染情况,建议采取潜在生态风险指数法对山口湖沉积物中重金属污染进行评价。潜在生态风险指数的评价结果表明:枯水期和丰水期山口湖沉积物重金属具有较高的潜在生态风险,其中,Cd 的贡献率最大。

2.2.4 山口湖沉积物重金属污染等级划分

采用潜在生态风险指数法对山口湖沉积物重金属污染进行划分,评价结果如图 5 所示。通过山口湖沉积物重金属 RI 的空间分析发现,枯水期沉积物重金属具有高潜在生态风险($600 \leq RI < 1200$)的分布区域占研究区域的 97.87%, 枯水期沉积物重金属具有很高潜在生态风险($RI \geq 1200$)的分布区域占研究区域的 2.13%。丰水期沉积物重金属具有高潜在生态风险($600 \leq RI < 1200$)的分布区域占研究区域的 24.73%, 丰水期沉积物重金属具有很高潜在生态风险($RI \geq 1200$)的分布区域占研究区域的 75.27%。

3 结论

(1)山口湖沉积物中 TN 含量在 2210~7692 mg·

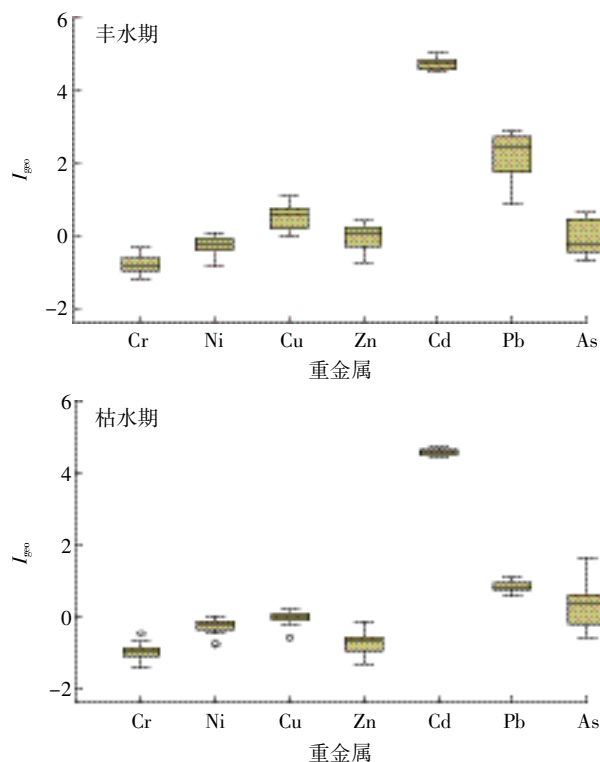


图 4 山口湖沉积物地累积指数箱图

Figure 4 The box plot of geo-accumulation index in Shankou Lake sediments

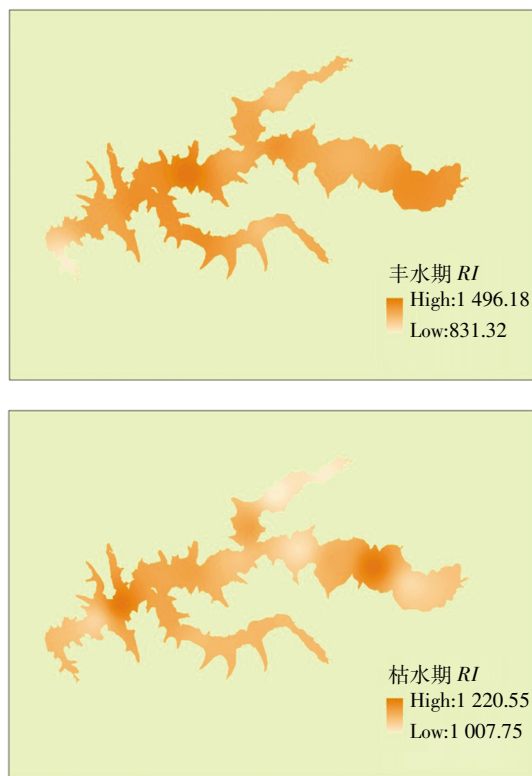


图 5 山口湖沉积物 RI 指数不同水期空间分布

Figure 5 The spatial distribution of RI index in Shankou Lake sediments at different seasons

kg^{-1} 之间, 均值为 $4874 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; TP 含量在 $677 \sim 4261 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 均值为 $1672 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。IN/TN、IP/TP 在 50% 以上, 其中长水河湖叉和下游沉积物 TN、TP 污染较严重。枯水期沉积物 TOC 含量较低, 在 $36.20 \sim 65.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 丰水期沉积物 TOC 含量较高, 在 $39.23 \sim 98.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。

(2) 无论是枯水期还是丰水期, 山口湖沉积物氮污染处于 IV 级水平, 受到一定的有机污染。山口湖沉积物中 Cd 的污染水平相对较高, 而基本未受到 Cu、Ni、As、Zn 污染或其污染水平相对较低。

(3) 枯水期沉积物 TN、TP 含量较高的区域位于山口湖主河道及下游, 丰水期沉积物 TN、TP 含量较高的区域位于上游 3 个湖叉入湖口处。从全湖区域上看, 枯水期沉积物中重金属具有高的生态风险, 丰水期沉积物中重金属具有很高的生态风险。

参考文献:

- [1] 范成新, 张路, 王建军, 等. 湖泊底泥疏浚对内源释放影响的过程与机理[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1523-1528.
FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, WANG Jian-jun, et al. Process and mechanism of lake sediment dredging on endogenous release[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1523-1528.
- [2] 薛滨, 姚书春, 王苏民, 等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 122-127.
XUE Bin, YAO Shu-chun, WANG Su-min, et al. Enrichment of nutrients and analysis of its reason in sediments of different kinds of lakes at middle and lower Yangtze River basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(1): 122-127.
- [3] Von Gunten H R, Sturm M, Moser R N. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(8): 2193-2197.
- [4] 吴艳宏, 王苏民. 湖泊沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算: 以龙感湖为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 843-848.
WU Yan-hong, WANG Su-min. Estimate of anthropogenic nutrient element fluxes recorded in lacustrine sediments: A case study in Longgan-Lake[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 843-848.
- [5] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 近四十年来山东四湖环境演化的元素地球化学记录[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 453-460.
YANG Li-yuan, SHEN Ji, ZHANG Zu-lu, et al. A 40-year element geochemical record and its environment implication in Lake Nansihu, Shandong Province[J]. *Geochimica*, 2003, 32(5): 453-460.
- [6] 伍钧, 孟晓霞, 李昆. 铅污染土壤的植物修复研究进展[J]. 土壤, 2005, 37(3): 258-264.
WU Ju, MENG Xiao-xia, LI Kun. Phytoremediation of soils contaminated by lead[J]. *Soils*, 2005, 37(3): 258-264.
- [7] Li Q M, Zhang W, Wang X X, et al. Phosphorus in interstitial water induced by redox potential in sediment of Dianchi Lake, China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(6): 739-746.
- [8] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 301-309.
WANG Yu-chun, WAN Guo-jiang, YIN Cheng-qing, et al. Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments of two lakes in Guizhou Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2002, 14(2): 301-309.
- [9] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-lakes Volvi and Koronia, N. Greece[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(8): 1147-1155.
- [10] Ahlgren J, Reitzel K, De Brabandere H, et al. Release of organic P forms from lake sediments[J]. *Water Research*, 2011, 45(2): 565-572.
- [11] Loska K, Wiechula D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. *Chemosphere*, 2003, 51(8): 723-733.
- [12] Singh K P, Malik A, Sinha S, et al. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River (India) using principal component analysis[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 166(1/2/3/4): 321-341.
- [13] 胡国成, 许振成, 彭晓, 等. 广东长潭水库表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1166-1171.
HU Guo-cheng, XU Zhen-cheng, PENG Xiao, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediment from Changtan Reservoir, Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1166-1171.
- [14] 郭泌汐, 刘勇勤, 张凡, 等. 西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 490-498.
GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals in core sediments from Lakes of Tibet[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 490-498.
- [15] 华飞, 赵广超, 张靖天, 等. 山口湖沉积物中溶解性有机氮的分布特征[J]. 环境工程技术学报, 2015, 5(2): 129-135.
HUA Fei, ZHAO Guang-chao, ZHANG Jing-tian, et al. A study on distribution characteristics of dissolved organic nitrogen (DON) in the sediments of Lake Shankou[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2015, 5(2): 129-135.
- [16] 苏明舟, 张靖天, 余红, 等. 沉积物溶解性有机氮藻类的可利用性[J]. 环境工程学报, 2016, 10(8): 4569-4576.
SU Ming-zhou, ZHANG Jing-tian, YU Hong, et al. Algal uptake of dissolved organic nitrogen in lake sediment to *Selenastrum capricornutum* [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(8): 4569-4576.
- [17] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价[J]. 湖泊科学, 1996, 8(4): 323-324.
SUI Gui-rong. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake[J]. *Journal of Lake Science*, 1996, 8(4): 323-324.
- [18] 孙顺才, 黄漪平. 太湖[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 224-228.
SUN Shun-cai, HUANG Yi-ping. Lake Taihu[M]. Beijing: China Ocean

- Press, 1993; 224–228.
- [19] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Environ*, 1980, 14(8):975–1001.
- [20] 余秀娟, 霍守亮, 管逢宇, 等. 巢湖表层沉积物中重金属的分布特征及其污染评价[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(2):439–450.
- YU Xiu-juan, HUO Shou-liang, ZAN Feng-yu, et al. Distribution characteristics and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(2):439–450.
- [21] 孟宪玺, 余中盛, 刘桂琴, 等. 东北地区中部主要农业土壤中若干金属元素的背景值[J]. *生态学报*, 1985, 5(2):114–125.
- MENG Xian-xi, SHE Zhong-sheng, LIU Gui-qin, et al. Background values of certain metal elements in main agricultural soil of Middle Northeastern in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1985, 5(2):114–125.
- [22] 孙 晶, 郝文博, 朱明霞, 等. 黑河市张地营子乡土壤重金属污染综合评价[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(29):16308–16309, 16342.
- SUN Jing, HAO Wen-bo, ZHU Ming-xia, et al. Comprehensive assessment of heavy metals pollution in the soil of Zhangdiyingzi[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(29):16308–16309, 16342.
- [23] 沈亦龙, 何晶晶, 邵立明. 太湖五里湖底泥污染特性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, 13(6):584–588.
- SHEN Yi-long, HE Pin-jing, SHAO Li-ming. Characteristics of contaminated sediments in Wuli Lake of Tai Lake[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13(6):584–588.
- [24] 蔡金榜, 李文奇, 刘 娜, 等. 洋河水库底泥污染特征性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3):892–893.
- CAI Jin-bang, LI Wen-qi, LIU Na, et al. Characteristics of contaminated sediments in Yanghe Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):892–893.
- [25] 王立新, 陈静生, 刘华民, 等. 应用生物效应数据库法建立沉积物重金属质量基准的初步研究[J]. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 2004, 35(4):467–472.
- WANG Li-xin, CHEN Jing-sheng, LIU Hua-min, et al. Research on deriving sediment quality criteria for heavy metals using the biological effect database approach: As Jinzhou Gulf, Bohai Sea an example[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Ne Mongol*, 2004, 35(4):467–472.