

汤浦水库沉积物碳、氮、磷的分布与评价

刘 鹄, 孟 婷, 程 文, 王 敏, 张 豆

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘 要: [目的] 研究汤浦水库沉积物中氮、磷及有机碳等污染物现状, 为水质安全保障提供依据。[方法] 在库区采集沉积物柱状样品, 分析其中碳、氮、磷的含量, 并采用有机指数法对沉积物污染现状进行评价。[结果] 沉积物中有机碳平均含量 12.23 g/kg, 总氮平均含量 1.22 g/kg, 总磷平均含量为 0.49 g/kg; 氮、磷及有机碳等污染物主要集中于沉积物表层 0—20 cm 范围内。随沉积物厚度的增加, 各类污染物含量下降, 40 cm 以下的沉积物中污染物含量变化不大; 有机指数评价结果显示, 水库沉积物有机指数为 0.13, 等级为 II 级, 较清洁。[结论] 汤浦水库沉积物受到的污染较小, 但沉积物中含氮物质略多, 应该引起重视。

关键词: 水库; 沉积物; 有机污染指数; 汤浦水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)02-0333-06

中图分类号: X524

文献参数: 刘鹄, 孟婷, 程文, 等. 汤浦水库沉积物碳、氮、磷的分布与评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 333-338. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20170303001; Liu Hu, Meng Ting, Cheng Wen, et al. Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Sediment Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Tangpu Reservoir [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 333-338. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170303001

Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Sediment Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Tangpu Reservoir

LIU Hu, MENG Ting, CHENG Wen, WANG Min, ZHANG Dou

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution of nutrients and pollution status of Tangpu reservoir were elucidated to provide relevant basis for water quality protection. [Methods] The contents of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), ammonium-nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate-nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$), total phosphorus (TP) and available phosphorous were analyzed. Meanwhile, the sediment pollution status was assessed using organic nitrogen index (ON) and organic index(OI). [Results] The mean contents of TOC, TN and TP in the basin were 12.23 g/kg, 1.22 g/kg and 0.49 g/kg, respectively. In 0—20 cm layer of sediment, TN, TP and TOC concentrations are higher than those in other layers of sediment. With the increase of sediment depth, the content of pollutants decreased. The concentrations of pollutants are roughly constant below 40 cm. The organic index of the sediment is 0.13 (level II). [Conclusion] The pollution of sediment in Tangpu Reservoir is slight, but the content of nitrogen is high. Therefore, attention should be paid to the nitrogen pollution in the sediment.

Keywords: reservoir; sediment; organic index; Tangpu Reservoir

湖泊、水库的内源污染问题是国内外水环境研究领域关注热点问题之一。随入库水流进入库区的各类营养盐, 大部分在输移过程中经过沉淀、吸附和生物吸收利用等方式最终沉积于水库底部, 成为水库沉

积物的重要组成部分。然而, 当沉积物环境条件, 如温度、溶解氧和氧化还原电位等改变时, 沉积物中营养盐可能释放进入水体, 成为水库内污染源^[1], 对水体富营养化有着非常重要的作用。湖泊、水库沉积物

收稿日期: 2015-06-30

修回日期: 2016-08-06

资助项目: 广东省水利科技创新项目“流溪河流域内农村饮用水中环境激素的污染与控制研究”(2015-06); 陕西水利科技计划项目(2014slkj-12)

第一作者: 刘鹄(1973—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事水污染控制方面的研究。E-mail: 1004761354@qq.com。

通讯作者: 孟婷(1993—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制研究。E-mail: 1570954140@qq.com。

中营养盐的迁移和转化制约着湖泊水库的水质变化^[2]。因此研究湖泊水库沉积物中氮磷及有机物的分布情况,并采取措施控制营养物释放,对于改善湖泊、水库生态环境质量和降低水体营养化具有重要作用^[3]。本研究以浙江省汤浦水库为研究对象,研究其沉积物中氮磷等污染物的分布特征,对于了解水源地水库中营养物质的迁移转化过程,进而为有效保护和改善水源地水质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

汤浦水库位于浙江省中部宁绍平原地区,该坝址

地理位置处于北纬 30°52',东经 120°47',坝顶海拔为 114 m,水库总库容为 $2.35 \times 10^8 \text{ mm}^3$,水面面积为 14 km²,设计日供水规模达 $1.00 \times 10^6 \text{ t}$,属国家大(II)型水库。该水库水质整体较好,只有水体氮磷出现阶段性超标,每年春夏之交(4—5月),水质较差,甚至发生局部水华现象。

根据水深及地形状况,从库尾到坝前,共设置 10 个沉积物采样点,依次为库尾河段 A、B 和 I;过渡段 J、F、G 和 C,坝前主库区 H、D 和 E。

采用柱状采样器采集各点原状沉积物,现场密封后冷藏保存,运回实验室进行后续分析。各采样点沉积物厚度详见表 1。

表 1 各采样点沉积物采样深度

样点	入汇口 I	上川湾 F	托潭 C	庙下村 J	庙下湾 G	库中心 D	大安山 H	取水口 E	双江溪 A	王化溪 B
深度/cm	35	36	105	70	30	75	33	35	40	34

1.2 测定方法

由于目前中国没有相应的沉积物质量标准与检测方法,本研究中沉积物氮、磷及有机碳含量的分析参照国内外其他有关方法进行^[4]。

沉积物各形态磷的测定采用 SMT 分类提取法,参照《沉积物质量调查评估手册》^[5];TN 采用凯氏定氮法,氨氮和硝态氮分别采用 KCl 提取—纳氏比色法及饱和硫酸钙提取—紫外分光光度法,参照《湖泊沉积物—水界面过程:基本理论与常用测定方法》^[6];有机碳测定采用 multi NC 2100 碳/氮分析仪(德国耶拿公司)分析检测。

1.3 污染物评价方法

沉积物质量评价的方法有很多种,其中综合污染

指数法和有机污染指数法最常用^[7]。综合污染指数评价法将选用的评价参数 TN、TP 综合成一个概括的指数值来表征底泥污染程度,其相对于单一指数法而言具优越性,是综合信息输出。但是综合污染指数法忽略了有机质指标^[8],而对本水库而言,有机质污染是该水库面临的主要威胁之一,因此本文用有机污染指数法对该水库沉积物污染现状进行评价更符合该水库实际状况。有机指数评价标准详见表 2。有机指数及有机氮计算方法为:

$$\text{有机指数 IO} = \text{有机碳}(\%) \times \text{有机氮}(\%) \quad (1)$$

$$\text{有机氮 ON}(\%) = \text{总氮}(\%) - \text{氨氮}(\%) - \text{硝态氮}(\%) \quad (2)$$

$$\text{有机碳 OC}(\%) = \text{有机质}(\%) / 1.724 \quad (3)$$

表 2 沉积物有机指数及有机氮评价标准

类型	清洁	较清洁	尚清洁	有机污染
等级	I	II	III	IV
有机指数	<0.05	0.05~<0.20	0.20~<0.50	≥0.50
有机氮质量分数/%	<0.003 3	0.003 3~<0.066	0.066~<0.133	≥0.133

2 结果与讨论

2.1 沉积物中污染物垂向分布特征

2.1.1 有机碳垂向分布特征 沉积物中有机碳胶体碎屑是与重金属及有机污染物发生吸附—分配和络合等作用的活性物质,也是反映沉积物有机营养程度的重要标志。由图 1 可知,在垂向上,随着采样深度的增加,沉积物有机碳含量逐渐降低。采样深度超过

40 cm 后有机碳含量基本稳定在 8~9 g/kg,各点均表现出表层沉积物有机碳含量高的特征。在表层 0—20 cm 深度,有机碳含量均超过 10 g/kg。沉积物中有机碳含量较高为 G 和 H2 个采样点,含量最低为 F 采样点。其中 G 点最高有机碳含量 26.78 g/kg(表层 0—5 cm),最低含量 14.05 g/kg(底层 30 cm 附近),平均含量 20.0 g/kg;H 点最高有机碳含量 26.29 g/kg(表层 0—5 cm),最低含量 12.69 g/kg(底

层 40 cm 附近), 平均含量 21.4 g/kg; F 点最高含量 9.49 g/kg(表层), 最低含量 5.06 g/kg(底层 25 cm), 平均含量 7.19 g/kg。

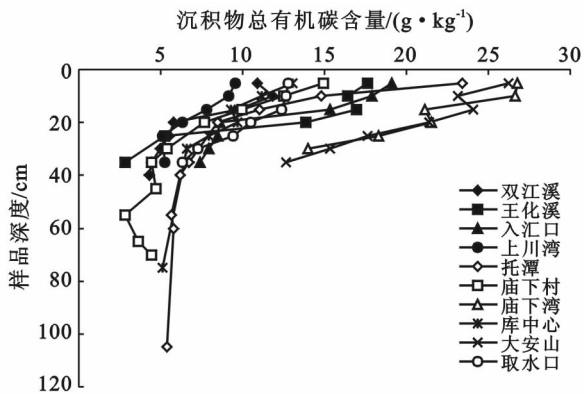


图 1 沉积物中有机碳垂向分布状况

由此可见, 在库区由于各采样点所处水力条件与沉积环境等的差异, 各沉积物样品中有机碳的含量差别很大。表层沉积物不断接受沉降的泥沙及有机颗粒碎屑, 而且沉积物表层固相—液相—气相并存, 在微生物的作用下进行着频繁的物质转化与分解, 因此表层有机碳含量较高, 而越往沉积物底层, 由于部分有机物被分解, 而且氧化还原环境与表层沉积物有

很大差异, 一般处于缺氧或者厌氧状态, 沉积物中剩余的有机物质分解非常缓慢, 因此有机碳的含量基本保持稳定, 随着深度的增加变化不大。G 和 H 两个点含量较高, 主要是由于 G 采样点位于凹岸, 水力停留时间长, 有利于沉积物累积, H 采样点周围岸上植被覆盖条件好, 雨季常有大量植物枯枝败叶等有机物被带入采样点附近, 故有机碳含量增加。

2.1.2 沉积物中各形态氮的垂向分布特征 由图 2 可以看出, 随着沉积物厚度的增加, 越往底层总氮含量逐渐减小, 表层以下 35 cm 沉积物中总氮含量基本保持在 0.5~0.6 g/kg。总氮含量最高部分集中在沉积物表层 0—20 cm 范围(图 2)。随着深度的增加, 各形态氮在沉积物中的分布状况整体相似, 只有氨氮的分布状况略有不同。随着深度的增加, 沉积物中氨氮含量先小幅度升高, 在表层以下 10—15 cm 达到最大含量, 继而开始逐步降低, 约在 30 cm 以下, 沉积物氨氮含量随厚度变化不大(图 2)。沉积物中有机氮含量也是由表层到底层逐步降低。表层 0—20 cm 段是有机氮存在的主要部分, 40 cm 以下沉积物样品中, 有机氮含量随厚度变化不大, 含量在 500 mg/kg 以下。从图 2 可以看出, 沉积物中硝态氮的含量很低, 也同样表现出随深度增加, 含量逐步降低的趋势。

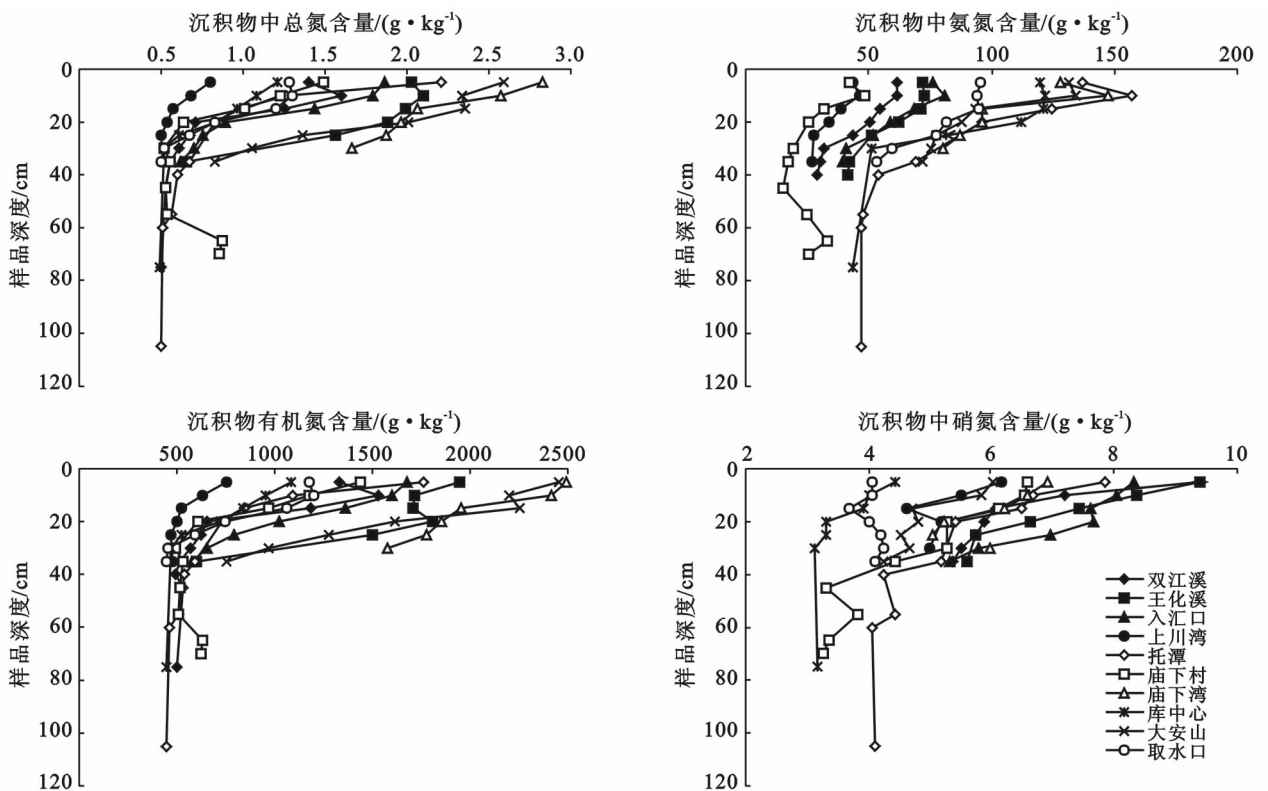


图 2 沉积物中各形态氮的垂向分布状况

由此可见,总氮在沉积物中的分布特征与有机碳相似,也是表层含量较高,越往底层含量逐步下降,并最终到达一定深度后含量稳定在一定范围。就各个采样点而言,G和H采样点沉积物中总氮含量较其他点高,最高含量 2.85 g/kg ,F采样点含量最低(0.8 g/kg),其中J采样点底层 $65\text{--}70\text{ cm}$ 段,沉积物中总氮含量略有增加。这跟这一段沉积物的性质(颜色发黑、有机物含量高)有关。该水库中污染物的表层富集现象,与其他有关湖泊沉积物研究结果一致^[9],一方面由于外源和内源污染物不断向沉积物表层沉积;另一方面沉积物中的N,P在微生物作用下不断矿化分解,从而使其含量随沉积物深度的增加呈下降趋势。

各采样点沉积物中氨氮含量差别较大,C点沉积物 10 cm 段氨氮含量最高(157.15 mg/kg),在此段内,沉积物中氨氮含量最小的采样点为上川湾F,含量仅有 46.25 mg/kg 。沉积物氨氮含量在 $10\text{--}15\text{ cm}$ 段含量增加,一方面是由于上层沉积物中氨氮在水—沉积物界面进行复杂的物理、化学及生物的交流作用,从而扩散进入上层水体;而在该段,由于沉积物中有机氮的大量存在,氨化作用显著,铵态氮在此蓄积,但深度增加的话沉积物中氧含量降低,硝化作用将受到抑制,氨氮无法进一步转化为其他形式,导致该层沉积物氨氮含量进一步增加;在此段以下的沉积物

中,氨氮含量逐步降低,主要是由于氧含量迅速降低后,沉积物中各类微生物的活性与数量减少,氨化作用减弱,在缺氧或者厌氧条件下,反硝化作用开始进行,氨氮含量随之下降。

沉积物表层有机氮是该水库沉积物中含氮污染物的主要赋存形态,这与国内其他研究结果一致^[10-11]。其中有机氮含量最高的为H(2452.6 mg/kg)和G(2493.9 mg/kg)2个点,而含量最低的点为D(443.2 mg/kg)和C(448.6 mg/kg)2个点。各形态氮中硝态氮的含量在10个采样点的沉积物中都很低,其中在入库位置采样的沉积物中硝态氮含量略高;而在D和E近大坝位置,沉积物中硝态氮含量最低。这两个采样点水深较大,沉积物粒径很小,沉积物处于缺氧或厌氧状态,各类微生物的反硝化作用可能比较显著,导致沉积物硝态氮含量降低。

2.1.3 沉积物中有各形态磷的垂向分布特征 沉积物中总磷和有效磷的垂向分布状况如图3所示。总磷含量整体呈现出随着沉积物深度的增加,含量逐步下降的趋势,在沉积物表层 20 cm 以内,总磷含量较高,这段以下的沉积物中总磷含量随着深度增加迅速下降, 40 cm 以下的沉积物中总磷含量基本稳定,保持 0.30 g/kg 左右。各沉积物样品中有效磷含量差别较大,垂向分布特征也表现出随着沉积物深度的增加,逐步下降,最后稳定在 10 mg/kg 左右。

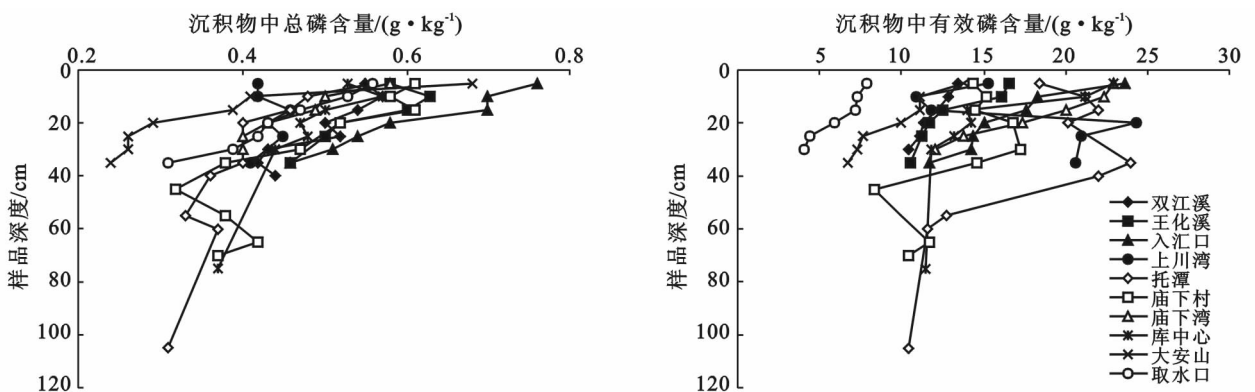


图3 沉积物中磷的垂向分布状况

就各个采样点而言,I沉积物中总磷含量最高为 0.76 g/kg ,含量最低为F采样点 0.42 g/kg 。沉积物中有效磷含量各点差别较大,F,C和J3个采样点中有效磷含量在垂向上波动较大,其他各点沉积物有效磷含量在 20 cm 以下有明显下降趋势。

2.2 沉积物污染物的水平分布特征

根据各采样点沉积物中氮、磷及有机碳的垂向分布特征可以看出,各采样点沉积物中污染物主要集中在表层,尤其在 $0\text{--}20\text{ cm}$ 段含量最高,在 40 cm 以下

的沉积物中,各类污染物含量变化不大。因此可以认为 $0\text{--}40\text{ cm}$ 段是氮磷等污染物的主要蓄积段。以该段沉积物中各类污染物的平均值代表各采样点污染物含量,来分析该水库沉积物中污染物的水平分布状况(表3)。

从表3可以看出,沉积物中有机碳、总氮的分布状况相似,而总磷的分布状况与其他两个略有差别。在水库河流区,包括A,B和I,3个采样点,从上游到下游沉积物有机碳和总氮含量逐步升高;在水库过渡

区和湖泊区沉积物中,有机碳和总氮表现出右侧高于左侧的特征。沉积物中总磷的分布在库尾及河流区

也表现为,由上游到下游含量增加,且该段沉积物总磷含量高于库区其他各部分。

表 3 水库沉积物中污染物空间分布状况

样点	河流区				过渡区			湖泊区		
	双江溪 A	王化溪 B	入汇口 I	上川湾 F	托潭 C	庙下村 J	庙下湾 G	库中心 D	大安山 H	取水口 E
有机碳 g/kg	7.62	12.17	12.09	7.19	12.87	9.13	21.39	9.61	20.04	10.18
总磷 g/kg	0.50	0.55	0.61	0.43	0.46	0.53	0.47	0.50	0.36	0.44
总氮 g/kg	0.97	1.70	1.15	0.60	1.19	0.91	2.16	0.87	1.79	0.90

由于沉积物中氮和碳的来源一般具有一致性,本研究中从氮碳分布图中也可以看出,两者的分布规律也比较相似;而沉积物总磷的来源一般与氮碳不同,因此其分布状况与氮碳分布差异较大。沉积物中氮碳含量在河流段,从上游到下游逐渐增加,主要是由于河流入库后过水断面增加,水流速度减小,水流携带的各类物质尤其是各类有机物颗粒逐步沉积,导致该部分沉积物中氮磷及有机碳含量增加;在水库过渡区及湖泊区,右侧沉积物中有机碳和总氮高于左侧,可能是由于原河道靠近库区右侧,而且水库右岸山势陡峭,树林茂盛,而左岸多为低山区,坡度缓和。在雨期尤其是暴雨季节,右岸水土流失状况要比左岸严重,大量营养物质及枯枝败叶等进入水库,并在水库右侧沉积,可能导致该部分沉积物中有机碳和总氮含量高于左侧沉积物。

2.3 沉积物污染状况评价

比较不同水库沉积物与该水库沉积物中氮、磷及有机碳含量可以看出(表 4),汤浦水库沉积物中总氮含量与官厅水库中总氮含量接近;总磷含量与阿哈水库和于桥水库中总磷含量相当。

表 4 不同水库沉积物中污染物含量 g/kg

项 目	总氮	有机碳	总磷	
汤浦水库	1.22	12.23	0.49	
高州水库 ^[12]	1.5	—	0.54	
密云水库 ^[13]	1.9	22.7	0.9	
官厅水库 ^[14]	1.2	2.13 ^b	0.84	
于桥水库 ^[15]	1.4	3.6 ^b	0.48	
阿哈水库 ^[16]	3.5	—	0.49	
太湖流域 ^[11]	1.75	14.45	0.76	
鹤地水库 ^[12]	2.36	12.7 ^b	0.67	
长江口 ^[17]	0.34	2.54 ^b	0.42	
安全级	—	—	—	
评价标准 ^[18]	最低级	0.55	1.72 ^b	0.6
	严重级	4.8	17.2 ^b	2

注:b表示以有机质(OM)计;安全级:水生生物中未发现中毒效应;最低级:沉积物已受污染,但多数底栖生物可以承受;严重级:底栖生物群落已遭受明显的损害;沉积物中营养盐的环境质量评价标准为加拿大安全大略省环境和能源部^[18]。

全国范围来看,不同地域不同流域,各水库沉积物中碳、氮和磷含量的差异较大。本文采用有机污染指数法对各采样点沉积物进行污染等级划分,具体评价结果详见表 5。

表 5 沉积物有机污染评价结果

样点	有机碳/%	总氮/%	有机氮/%	有机指数	有机指数等级	有机氮等级	
河 道 区	双江溪 A	1.22	0.17	0.14	0.17	较清洁 II	有机污染 IV
	王化溪 B	0.76	0.10	0.09	0.07	较清洁 II	尚清洁 III
	入汇口 I	0.13	0.12	0.10	0.01	清洁 I	尚清洁 III
	平均	0.71	0.13	0.11	0.08	较清洁 II	尚清洁 III
过 渡 区	托潭 C	1.29	0.12	0.08	0.10	较清洁 II	尚清洁 III
	庙下湾 G	2.14	0.22	0.18	0.39	较清洁 II	有机污染 IV
	庙下村 J	0.91	0.09	0.08	0.07	较清洁 II	尚清洁 III
	上川湾 F	0.72	0.06	0.05	0.04	较清洁 II	较清洁 II
平均	1.27	0.13	0.10	0.15	较清洁 II	尚清洁 III	
湖 泊 区	大安山 H	2.01	0.18	0.17	0.34	较清洁 II	有机污染 IV
	库中心 D	0.96	0.09	0.07	0.07	较清洁 II	尚清洁 III
	取水口 E	1.02	0.09	0.08	0.08	较清洁 II	尚清洁 III
	平均	1.33	0.12	0.11	0.16	较清洁 II	尚清洁 III
平均	1.12	0.09	0.10	0.13	较清洁 II	尚清洁 III	

从沉积物有机污染指数评价结果来看,整个库区表层沉积物平均有机指数为 0.13,属于较清洁类型。河道区、过渡区及湖泊区沉积物有机污染指数分别为 0.08,0.15,0.16,可见由入库到坝前沉积物有机污染指数略有增加,但依然属于较清洁的类型。以有机氮等级划分状况来看,整个库区沉积物平均有机氮质量分数为 0.13%,属于尚清洁类型。河道区沉积物有机氮平均质量分数为 0.11%,过渡区为 0.1%,湖泊区为 0.11%。整个库区的所有采样点中,只有 A、G 及 H 采样点的沉积物有机氮质量分数大于 0.13%,表现为有机污染状态。从评价结果看,汤浦水库沉积物污染状况较轻,有机指数等级为 II 级,较清洁;有机氮污染等级为 III 级,尚清洁。说明沉积物中含氮污染物的含量普遍较高,这与该水库现状相符合。

3 结论

(1) 由于各采样点的水力特性、沉积条件和生物活动等条件的不同,沉积物中有机碳、氮及磷的分布各不相同,有机碳平均含量 12.23 g/kg,总氮含量 1.22 g/kg,总磷含量为 0.49 g/kg。

(2) 沉积物中污染物主要集中在沉积物表层 0—20 cm 段内,随着沉积物厚深度的增加,氮碳磷含量逐步下降,在 40 cm 以下的沉积物中碳氮磷含量趋于稳定。沉积物中氮和有机碳含量在库尾段表现出从上游到下游,含量逐渐增加的趋势,在水库过渡段和湖泊段表现为右侧沉积物中含量高于左侧。

(3) 有机指数评价结果显示,库区沉积物有机指数等级为 II 级,说明沉积物较清洁,但是有机氮等级高于有机指数,说明沉积物中氮含量较高。

[参 考 文 献]

- [1] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(4):1474-1480.
- [2] 姜敬龙,吴云海.底泥磷释放的影响因素[J].*环境科学与管理*,2008,33(6):43-46.
- [3] 张路,范成新,池俏俏,等.太湖及其主要入湖河流沉积物磷形态分布研究[J].*地球化学*,2004,33(4):423-432.
- [4] 陆敏,张卫国,师育新,等.太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素[J].*湖泊科学*,2003,15(3):213-220.
- [5] 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.
- [6] 王圣瑞.湖泊沉积物—水界面过程:基本理论与常用测定方法[M].北京:科学出版社,2014.
- [7] Yasuhiro Satoh, Toshiya Katano, Takeshi Satoh, et al. Nutrient limitation of the primary production of phytoplankton in Lake Baikal [J]. *Limnology*, 2006, 7(3): 225-229.
- [8] Xu Hai, Hans W P, Qin Boqiang, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(1):420-432.
- [9] 吴光红,曹珊珊,于雅琴,等.天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量及动态特征[J].*环境科学*,2009,30(3):726-732.
- [10] 余辉,张文斌,卢少勇,等.洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J].*环境科学*,2010,31(4):961-968.
- [11] 甘树,卢少勇,秦普丰,等.太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价[J].*环境科学*,2012,33(9):3064-3069.
- [12] 苟婷,李思阳,许振成,等.高州水库沉积物中总氮与总磷的分布特征研究[J].*环境科学与管理*.2014,39(7):31-35.
- [13] 徐清,刘晓瑞,王辉锋,等.密云水库沉积物内源磷负荷的研究[J].*中国科学(D):地球科学*,2005,35(S):281-287.
- [14] 苏德纯,胡育峰,宋崇渭,等.官厅水库坝前疏浚沉积物的理化特征和土地利用研究[J].*环境科学*,2007,28(6):1319-1323.
- [15] 金丹越,黄艳菊.天津于桥水库主要环境问题及其防治对策[J].*环境科学研究*,2004,17(S1):77-79.
- [16] 蒋晓霞.阿哈水库表层沉积物中重金属时空变化对硅藻分布影响的研究[D].贵州 贵阳:贵州师范大学,2009.
- [17] 盛菊江,范德江,杨东方,等.长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J].*环境科学*,2008,29(9):2405-2412.
- [18] Mudroch A, Azcue J. *Manual of Aquatic Sediment Sampling*[M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1995.