

天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量及动态特征

吴光红^{1,2}, 曹珊珊¹, 于雅琴¹, 鞠瑾¹, 苏睿先²

(1. 天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; 2. 天津师范大学城市与环境科学学院, 天津 300387)

摘要:对天津4个典型水环境(于桥水库、海河干流、海河大沽口和渤海湾天津近岸海域)表层沉积物(0~25 cm)中有机物(OM)、总氮(TN)、总磷(TP)、有效磷(BAP)等的含量进行了测定,采用与土壤背景值及历年监测数据进行比较的方法,研究天津典型水环境表层沉积物中营养盐富集水平和动态特征.结果表明,天津4种典型水环境表层沉积物均已受人为污染,但仍属于多数底栖生物可承受的污染水平,海河干流营养盐含量明显比海河大沽口、于桥水库和天津近岸海域高,呈现由海河干流、海河大沽口和天津近岸海域递减的趋势,OM、TN、TP和BAP的富集系数(EF)分别达到了1.6~6.5、0.9~2.7、0.9~2.6和4.4~9.2;不同水环境沉积物中BAP含量的高低与TP含量并不一致,于桥水库表层沉积物中BAP占TP的比值最大,达到16.3%,表明内源释放严重,富营养化问题突出;于桥水库沉积物中OM和BAP含量与1988年相比均有大幅度的增加,TP基本持平,TN略有上升;海河干流底泥清淤后,表层沉积物中OM、TN和TP含量下降了42.3%、17.2%和14.8%,对底泥营养盐的去除起到一定作用.

关键词:营养盐; 分布特征; 沉积物; 水环境; 天津市

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2009)03-0726-07

Distribution and Enrichment of Nutrients in Superficial Sediment in Tianjin Typical Waters

WU Guang-hong^{1,2}, CAO Shan-shan¹, YU Ya-qin¹, JU Jin¹, SU Rui-xian²

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Environment and Water Resource, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. Urban and Environmental Science College, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Concentrations of organic matter (OM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and bioavailable phosphorus (BAP) were determined in superficial sediment (0-25 cm) collected from 4 selected typical waters (Yuqiao reservoir, Haihe River, Haihe estuary and Bohai Bay) in Tianjin, China. Pollution index (P_i) and enrichment factors (EF) were taken to analyze nutrients enrichment and dynamic characteristic. The results show that 4 typical waters are polluted by anthropogenic source and much higher than the permissible limits which most benthos can bearing, the concentrations of OM, TN, TP and BAP are decreasing progressively by the order: Haihe River > Haihe estuary > Bohai Bay Tianjin Sea Area. EF for OM, TN, TP and BAP reaches 1.6-6.5, 0.9-2.7, 0.9-2.6 and 4.4-9.2, respectively. The concentrations of BAP in different waters are inconsistent with those of TP, the ratio of BAP to TP in Yuqiao reservoir is the biggest, 16.3%, which shows endogenous source release is serious and eutrophication is the key problems of water pollution. The concentrations of OM and BAP increase in large scale between 1988 and 2005, TP basically keeps unchanging and TN slightly increases. Around Haihe River sediment dredging, nutrient concentrations (OM, TN and TP) of superficial sediments in Haihe River reduce to 57.7%, 82.8% and 85.2% of original concentration, respectively. And sediment dredging plays a positive role in nutrients removal.

Key words: nutrient; distribution characteristic; sediment; waters; Tianjin City

天津位于海河流域下游地区,上游污染物的输入已使水体受到污染,下游地区的污染源又加重水质恶化的趋势,富营养化问题非常突出^[1].富营养化直接与水体中N和P等限制性因素有关^[2,3],目前关于沉积物中N和P形态的连续提取及其有效性以及内源释放和抑制的研究较多^[4~7],但针对沉积物中营养本底与富集水平以及环保疏浚前后动态特征的研究鲜见报道,也很少借鉴土壤中有效磷的测定来了解水环境沉积物中P的供应状况.本研究选择天津地区的4个典型水环境(于桥水库、海河干流、海河大沽口和渤海湾天津近岸海域)为对象,采用与区域土壤的自然含量以及历年的调查数据相比

较的方法,分析了天津水环境沉积物中营养盐污染特点和含量动态特征,以及海河干流清淤前后营养盐含量的变化,以期为饮用水源地、景观河道以及渤海湾天津近岸海域的富营养化防治工作提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区域

收稿日期:2008-04-07;修订日期:2008-06-24

基金项目:天津市科技发展计划项目(06YFSZSF05100);天津师范大学滨海新区研究项目(52LE27)

作者简介:吴光红(1971~),男,博士,副教授,主要研究方向为水资源与水环境保护, E-mail: wuguanghong@hotmail.com

于桥水库:位于天津北部的蓟县,燕山山脉边缘地带的州河盆地,是一座山谷形盆地水库.水库始建于 1959 年 12 月,1982 年作为引滦入津的调蓄水库,正常蓄水位 21.16 m,库容 $3.85 \times 10^8 \text{ m}^3$,目前是天津市唯一的饮用水源地.

海河干流:是京、津、华北和西北的入海通道,全长 72 km,水深 3~5 m,西起金刚桥,东到海河闸,横贯天津市区、东丽区、津南区,于塘沽区汇入渤海,具有排涝、供水、蓄水、灌溉和旅游等功能.

海河大沽口:是海河干流和大沽排污河排放的污染物进入渤海湾的主要交汇区域,大沽排污河位于天津市海河南部,是一条重要的城市排污河道,全长 63 km,水深 0.8~2.1 m,主要接纳沿途的工业废水和生活污水.

渤海湾天津近岸海域:位于渤海湾的西部,沿岸有蓟运河、永定新河、海河和大沽排污河等多条河流入海,是海陆相互作用最活跃的地区.

1.2 样品采集与分析

采样时间为 2005 年 10 月中、下旬,利用自制的采样器采集表层沉积物,在每个水环境分别布设 5 个采样点,共设置了 20 个采样点(见图 1).在每个采样点用梅花点采样法采集表层沉积物(0~25 cm) 5 个重复样,在塑料盆中充分搅匀混合为 1 个样品,并剔除砾石和动植物残体,取 2 kg 左右装入密实塑料袋,运回实验室,自然风干后,四分法取样,用玛瑙研钵碾磨成粉末、过 100 目尼龙筛后供测试使用.

沉积物样品的分析项目包括:pH、有机质(OM)、总磷(TP)、有效磷(BAP)和总氮(TN),pH 采用玻璃电极法(水土质量比为 2.5:1),OM 测定采用重铬酸钾容量法(外加热法),TP 测定采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法,BAP 测定采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,TN 测定采用凯氏法,均按照文献[8]中的方法进行测定.实验分析过程采用平行样和空白试验进行质量控制.数据统计分析(均值计算及差异显著性检验等)由 SPSS 软件完成.

2 结果与讨论

2.1 营养盐含量分布

天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量统计结果见表 1.从中可见,海河干流表层沉积物中 TN、TP、OM 和 BAP 含量明显比其它水环境沉积物中的含量高,其主要原因是在海河改造工程实施之前,市区工业废水和生活污水直接排入海河^[9],1958 年后,海河干流建设了两道防潮闸,河水流动性差,营

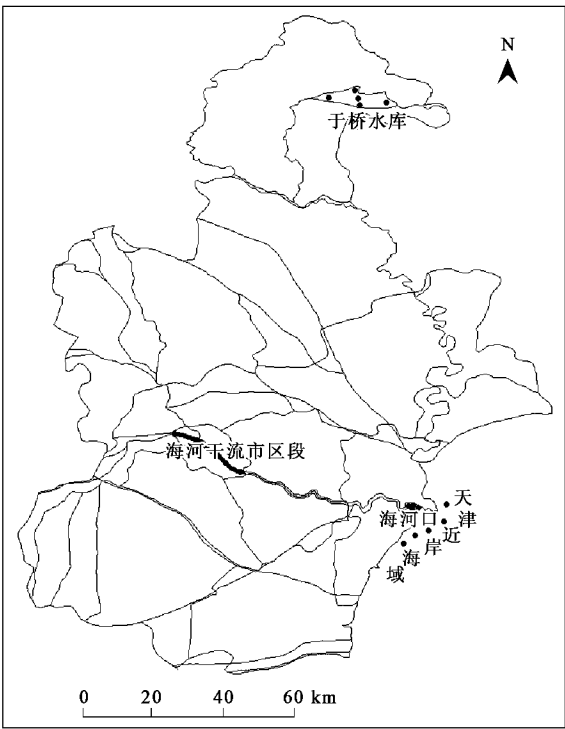


图 1 研究地点和采样点分布

Fig.1 Investigation location and distribution of sampling sites

养盐长期沉积造成的.海河大沽口营养盐含量次之,海河大沽口是海河干流及大沽排污河污水下泄的集中场所,是陆海相互作用的交汇区,营养盐在此沉积造成的.天津近岸海域表层沉积物营养盐含量最低,其主要是由于营养盐从河口入海后,逐渐沉降,同时得到大量海水冲刷和稀释,含量逐渐降低. Devi 等^[10]的研究也认为营养盐大多吸附在悬浮颗粒物上,并随颗粒物沉降而逐渐转移到沉积物中.营养盐含量分布呈现由海河干流、海河大沽口和天津近岸海域递减的趋势,并且在海河干流和天津近岸海域之间均达到了显著性差异(表 1),这也说明渤海湾沉积物中 N 和 P 主要来自陆源.秦延文等^[11]也认为渤海湾表层沉积物中的营养盐含量表现为近岸海域高,远离海岸的海湾低的特点.于桥水库是天津的唯一水源地,长期以来收纳了水库周边地区果园、村庄和农田的地表径流^[12],以及河北遵化等地区的生活污水和工业废水^[13],造成于桥水库沉积物中营养盐含量也较高.

2.2 营养盐富集水平

为了评估人类活动对天津地区 4 个典型水环境表层沉积物中营养盐的污染水平和富集特征,以加拿大安大略省环境和能源部(1992 年)发布的沉积物中能引起水环境生态风险效应的营养物(TN、TP

表 1 表层沉积物中 TN、TP、BAP 和 OM 质统计结果¹⁾

Table 1 Descriptive statistics of TN, TP, BAP, OM and pH in superficial sediments					
水环境名称	项目	OM/%	TN/mg•kg ⁻¹	TP/mg•kg ⁻¹	BAP/mg•kg ⁻¹
于桥水库	均值	3.6 ^b	1 364.6 ^a	480.3 ^c	78.4 ^{ab}
	范围	3.1 ~ 4.4	501.1 ~ 2 040.1	248.0 ~ 769.3	61.0 ~ 101.5
海河干流市区段	均值	6.6 ^a	1 756.4 ^a	1 450.6 ^a	109.7 ^a
	范围	3.5 ~ 11.5	1 049.0 ~ 2 342.8	978.4 ~ 2 480	70.8 ~ 177.1
海河大沽口	均值	5.1 ^{ab}	1 420 ^a	992 ^{ab}	68.4 ^b
	范围	4.4 ~ 6.8	1 202.4 ~ 1 642.8	829.6 ~ 1 345.3	49.2 ~ 88.5
渤海湾天津近岸海域	均值	1.6 ^c	598.5 ^b	564.8 ^{bc}	52.0 ^b
	范围	1.4 ~ 1.8	426.9 ~ 942.8	489.6 ~ 645.3	45.6 ~ 58.5

1)同一列字母相同表示差异不显著,字母不同表示差异显著($p < 0.05$)

和 OM)含量评价标准^[14]及城市化和工业化前、天津蓟县地区土壤中营养盐均值为背景参照值^[15](表 2),分别计算表层沉积物中营养盐的污染指数(P_i)和富集系数(CF_i),见表 3. P_i 的计算公式为: $P_i = C_i/C_{0i}$, CF_i 的计算公式为: $CF_i = C_i/C_{BV}$, 式中, P_i 为第 i 种营养盐的污染指数, CF_i 为第 i 种营养盐的富集系数, C_i 为第 i 种营养盐实测含量, C_{0i} 为环境质量评价标准, C_{BV} 为环境背景参照值. 从表 3 可看出,海河干流、海河大沽口表层沉积物中营养盐污染和富集最为严重,表明近 20 年来天津市的城市化和工业化造成了沉积物中营养盐有较大的增加. 于桥

水库次之,且 TN 污染也较为严重,其主要原因是于桥水库在输送和贮水过程中,也接纳了水库周边的农业非点源污染和上游遵化等地区生活污水和工业废水输入的营养性物质,尤其是遵化化肥厂、建明化肥厂和糠醛厂的废水排入黎河,遵化市生活污水和奥太啤酒厂废水排入沙河,最后汇入于桥水库^[13],造成沉积物中 N 的富集较严重. 天津近岸海域营养盐污染和富集水平最低,基本属于安全级. 营养盐富集程度依次为海河干流 > 海河大沽口 > 于桥水库 > 渤海湾天津近岸海域.

2.3 有效磷含量分布

表 2 沉积物中 OM、TN 和 TP 的评价标准和环境背景值¹⁾

Table 2 Standard and background value of OM, TN and TP in superficial sediments					
项目	级别	OM/%	TN/mg•kg ⁻¹	TP/mg•kg ⁻¹	BAP/mg•kg ⁻¹
加拿大安大略省环境和能源部发布沉积物中营养盐的环境质量评价标准(1992 年) ^[14]	安全级	—	—	—	—
	最低级	1.724	550	600	—
	严重级	17.24	4 800	2 000	—
蓟县潮褐土亚类土壤背景值 ^[15]		1.02	650	550	11.9

1)安全级,此时在水生生物中未发现中毒效应;最低级,此时沉积物已受污染,但是多数底栖生物可以承受;严重级,此时底栖生物群落已遭受明显的损害

表 3 沉积物中 OM、TN 和 TP 的污染指数和富集系数

Table 3 Pollution indexes and enrichment factors of OM, TN and TP in superficial sediments								
水环境名称	OM		TN		TP		BAP	
	P_i ¹⁾	CF_i ²⁾	P_i	CF_i	P_i	CF_i	P_i	CF_i
于桥水库	2.1	3.5	2.5	2.1	0.8	0.9	—	6.6
海河干流	3.8	6.5	3.2	2.7	2.4	2.6	—	9.2
海河大沽口	3.0	5.0	2.6	2.2	1.6	1.8	—	5.7
天津近岸海岸	0.9	1.6	1.1	0.9	0.9	1.0	—	4.4

1)为与表 2 中最低级标准值比较的污染指数;2)为与蓟县潮褐土亚类土壤背景值相比较的富集系数

水体中 P 的含量是影响藻类生长繁殖的限制性因素之一^[4,5],P 在某种条件下可从沉积物中释放进入水体,为植物或藻类的生长所利用,BAP 是指能溶解于水、被植物吸收的 P 养分,其含量能反映沉积物

中营养盐的污染及内源释放潜力^[16,17]. 于桥水库、海流干流、海河大沽口和天津近岸海域 BAP 的含量见表 1,其分别占 TP 的 16.3%、7.6%、6.9% 和 9.2%. 朱广伟等^[18]发现在长江中下游浅水湖泊的

沉积物中 90% 以上的 P 是以生物较难利用的形态存在的,于桥水库 BAP 占 TP 的比重高达 16.3%,内源释放潜力较大.天津典型水环境表层沉积物中 BAP 含量高低与 TP 含量并不完全一致,反映 P 的生物地球化学循环受到诸多因素的控制,朱广伟等^[18]在长江中下游浅水湖泊开展的研究也得到了相似的结果.隋少峰等^[19]在东湖以及 Huang 等^[20]在巢湖和太湖底泥释 P 特点的研究中,发现 pH 是 P 存在形态和迁移的关键因素,在较高或较低 pH 值时,底泥释 P 量倍增.于桥水库 BAP 含量较高的原因主要是库区水质呈现高 pH,2004 年于桥水库出水口 pH 达到 7.97~8.70^[21],1985~2004 年于桥水库的年均 pH 为 8.10~8.74,在碱性条件下能大幅度提高沉积物中 P 的释放形成 BAP.秦保平等^[22]的研究认为,于桥水库及其下游 pH 值较高的现象起因于水库水体的富营养化促使 pH 上升,pH 上升可能又加剧了沉积物中的 P 释放.较大 BAP/TP 比值表明于桥水库可能由营养盐的汇向源转化,富营养化问题应给予特别关注.

2.4 动态特征

2.4.1 于桥水库

于桥水库作为天津唯一饮用水源地和引滦输水

工程的调蓄水库,对沉积物中营养盐已进行了多次监测.将本研究的统计结果与文献[23,24]的调查结果进行比较,由图 2 可见,于桥水库表层沉积物中 OM 和 BAP 含量在不断增加,与 1988 年的调查数据相比,到 2000 年和 2005 年 BAP 均值分别增加了 169% 和 402%,OM 也分别增加了 189% 和 216%,而 TN 和 TP 的均值范围分别为 800~1 364 mg·kg⁻¹ 和 480.3~620 mg·kg⁻¹,TP 基本持平,TN 略有上升,但总体变化不大,这说明长期以来于桥水库富营养化的防治措施取得一定成效,输入水库中的 N、P 负荷没有继续造成沉积物中营养盐的大量增加,但 BAP 含量的增加又说明沉积物开始向水体释放 P,其可能成为水体中营养盐的部分来源.BAP 增加致使水生生物异常繁殖,1986~1987 年浮游动、植物生物量均值分别为 1.64 mg·L⁻¹、3.06 mg·L⁻¹,1997 年浮游动、植物生物量均值分别为 2.55 mg·L⁻¹、6.61 mg·L⁻¹,1999~2000 年浮游动物生物量均值为 6.57 mg·L⁻¹^[25,26],生物量显示出逐渐增高的趋势.王新华等^[25]也通过对浮游动物的调查认定于桥水库为中营养型向富营养型过渡类型,并呈现富营养化加剧的趋势.富营养化使于桥水库的生态系统和水体功能受到阻碍和破坏,使引滦水资源的利用受到

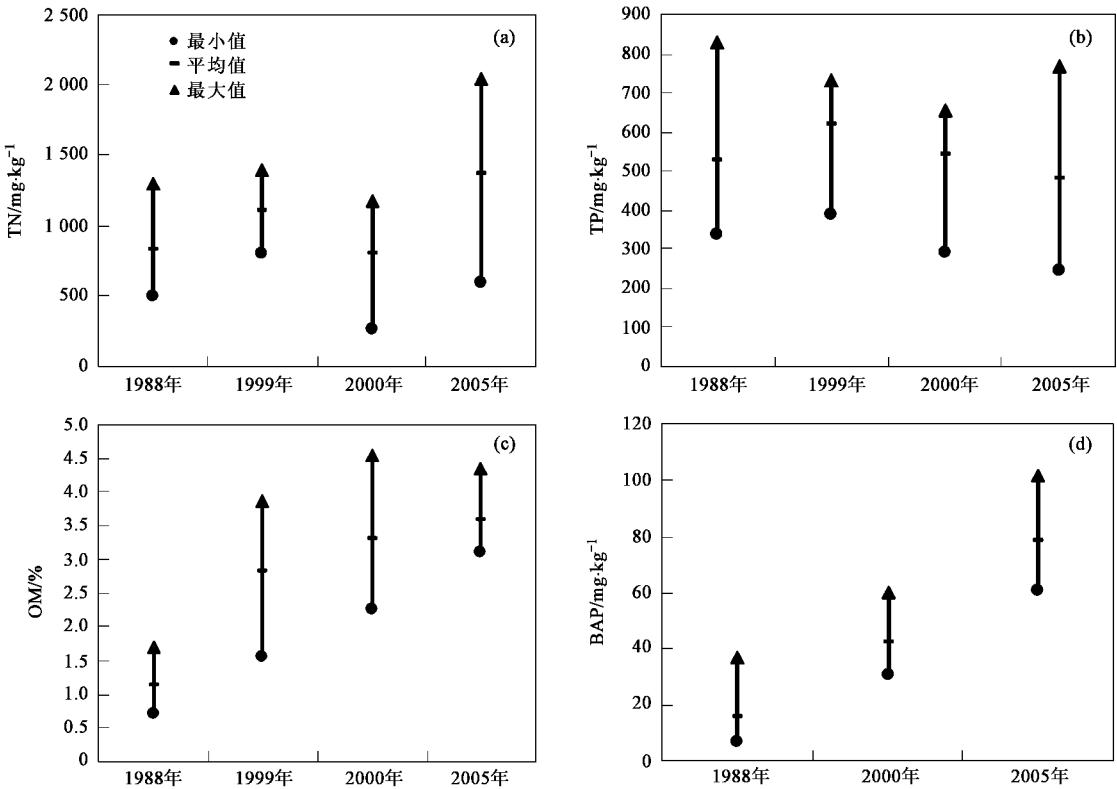


图 2 于桥水库表层沉积物中营养盐含量变化情况

Fig.2 Trends of nutrient concentrations of superficial sediments in Yuqiao Reservoir

威胁.同时于桥水库还表现出 TP 和 BAP、OM 的变化存在明显不同,OM 和 BAP 的变化较一致的特点,这可能与水库沉积物中 P 活化释放机制有关,BAP 来自表层沉积物有机质矿化降解,主要是在植物残体内以大量有机态存在.在不同形态的有机磷中,活性有机磷是沉积物有效磷的重要来源,而大量以无机态存在的 P 则相对稳定.朱广伟等^[27]通过相关的研究认为不同水环境中可交换态 P 的含量与 P 的化学形态及 OM 的相关关系存在较大差异,水体的生物状况和水动力条件等对沉积物中磷的地球化学行为起重要作用.

2.4.2 海河干流

底泥疏浚是近年来新兴的行业,是以清除水体中受污染的沉积物为主要任务的环境工程,当前人们普遍采用疏浚的方式来消除底泥中营养盐污染和控制水体富营养化风险^[28-29].但对清淤后的效果很少报道,并且存在争议^[30].濮培民等^[31]认为疏浚底泥无法从根本上解决湖泊富营养化问题,水质问题还是需要用生态方法来解决.王栋等^[32]在五里湖生态疏浚的效果研究中发现,疏浚后半年内水体中 TP 和溶解磷含量比疏浚前下降了 10%~25%,底泥 P 的含量下降了 30%,取得一定的效果.天津市 2000 年提出了海河综合改造和开发,根据海河水生态修复的需要于 2003 年初开始对海河干流底泥进行清淤工作,历时 2a,清淤深度约为 100 cm,清淤量达 $280 \times 10^4 \text{ m}^3$.以河流干流光明桥站位清淤前、后表层沉积物中营养盐含量进行比较(见图 3).由图 3 可见,清淤后沉积物(0~25 cm)中营养盐含量均有所降低,OM、TN 和 TP 的含量减少至清淤前的 57.7%、82.8%和 85.2%,但与清淤前沉积物(100~110 cm)中营养盐含量相比又显著增加了,这也可能与在汛期后采样有关,海河干流又接受了雨水、污水的排

放,营养盐开始重新沉积.可见清淤对沉积物中营养盐的消除起到一定作用,但清淤的效果应综合考虑水环境自身特点(内源污染和外源输入)、疏浚方式和疏浚的环境经济效益等因素.

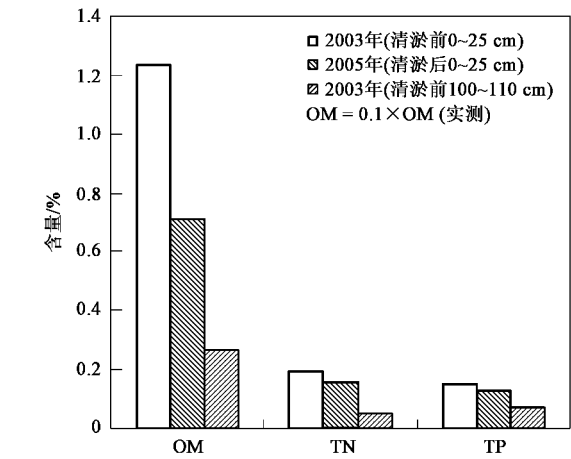


图 3 海河干流市区段清淤前后沉积物中营养盐含量比较
Fig.3 Comparison of nutrient concentrations of superficial sediments in Haihe River around sediment dredging

3 与其它水环境比较

将天津典型水环境表层沉积物中营养盐含量与文献^[29, 33~37]中有关水库和河口沉积物中的含量进行列表比较(见表 4).由表 4 发现,于桥水库表层沉积物中 OM 要比北京密云水库和官厅水库表层沉积物中的含量高,TN 含量接近,而 TP 含量较低,但 BAP 含量较高,于桥水库沉积物中内源磷污染不容忽视.海河大沽口沉积物中 OM、TP 和 TN 含量普遍比我国长江口、珠江口水体沉积物中的含量高,其主要原因是海河大沽口接纳了天津市海河南部大沽排污河长期排放的工业废水和生活污水,反映了污染物排放量的时间累积效应.

表 4 不同水环境表层沉积物中营养盐含量比较				
Table 4 Comparison of nutrient concentration of superficial sediments in different waters				
水环境名称	OM/%	TN/mg•kg ⁻¹	TP/mg•kg ⁻¹	BAP/mg•kg ⁻¹
北京密云水库 ^[33,34]	2(1.47~2.35) ¹⁾	1 900(1 000~3 200)	895(800~1 030)	— ²⁾
北京官厅水库 ^[29]	2.13	1 200	841	32.6 ³⁾
天津于桥水库	3.6(3.1~4.4)	1 364.6(501.1~2 040.1)	480.3(248.0~769.3)	78.4(61.0~101.5)
长江口 ^[35,36]	2.54(1.13~3.10)	343.3(263~508)	422.4(372.8~504)	—
珠江口 ^[37]	—	1 649(1 203~2 365)	455.94(340~581)	—
海河大沽口	5.1(4.4~6.8)	1 420.0(1 202.4~1 642.8)	992(829.6~1 345.3)	68.4(49.2~88.5)

1)括号内数据为含量范围; 2)“—”表示没有相应的数据; 3)表示 Olsen-P 值

4 结论

(1)天津 4 个典型水环境表层沉积物中营养盐

含量的分布差异很大,海河干流营养盐含量最高,海河大沽口和于桥水库次之,渤海湾天津近岸海域最低.OM、TN 和 TP 含量超过了加拿大安大略省环境

和能源部发布的沉积物中,能引起水环境生态风险效应的营养物含量评价标准,沉积物已受污染,但仍属于多数底栖生物可承受的污染水平.与 1982 年天津蓟县潮褐土亚类土壤中 OM、TN、TP 和 BAP 的自然含量比较均出现较大的富集,CF 分别达到 1.6 ~ 6.5、0.9 ~ 2.7、0.9 ~ 2.6 和 4.4 ~ 9.2.

(2) 水环境表层沉积物中 BAP 含量与 TP 含量并不一致,于桥水库、海河干流、海河大沽口和渤海湾天津近岸海域的 BAP 分别占 TP 的 16.3%、7.6%、6.9%和 9.2%.于桥水库 BAP 占 TP 的比重超出绝大部分湖泊沉积物中 BAP 所占 10%的比例,内源释放潜力较大,鉴于 BAP 是藻类等生物易吸收的形态,这对于饮用水源地的保护非常不利,其对水体富营养化的影响应引起特别关注.

(3)海河干流底泥环保疏浚后,OM、TN 和 TP 含量均有不同程度下降,分别减少到清淤前的 57.7%、82.8%和 85.2%.总的来看,清淤对去除底泥中 N、P 等营养盐物质的效果不仅与水环境自身的特点有关,还与清淤方式以及汛期后雨水、污水排放和污染物重新沉积等因素有关.

参考文献:

[1] 刘成,王兆印,何耘,等.环渤海湾诸河口水质现状的分析[J]. 环境污染与防治, 2003, **25**(4): 222-225.

[2] Satoh Y, Katano T, Satoh T, *et al.* Nutrient limitation of the primary production of phytoplankton in Lake Baikal [J]. *Limnology*, 2006, **7**(3): 225-229.

[3] Dokulil M, Chen W, Cai Q. Anthropogenic impacts to large lakes in China: the Tai Hu example [J]. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 2000, **3**(1): 81-94.

[4] Gao L, Zhou J M, Yang H, *et al.* Phosphorus fractions in sediment profiles and their potential contributions to eutrophication in Dianchi Lake[J]. *Environmental Geology*, 2005, **48**(7): 835-844.

[5] Zhang T X, Wang X R, Jin X C. Variations of alkaline phosphatase activity and P fractions in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Taihu)[J]. *Environmental Pollution*, 2007, **150**(2): 288-294.

[6] Sen S, Haggard B E, Chaubey I, *et al.* Sediment phosphorus release at Beaver Reservoir, northwest Arkansas, USA, 2002-2003: A preliminary investigation[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2007, **179**(1-4): 67-77.

[7] 张亚雷,章明,李建华,等. CaO₂ 不同投加方式对底泥磷释放的抑制效果分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2188-2193.

[8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005. 25-97.

[9] 天津市水利局水利志编撰委员会. 天津水利志(海河干流志)[M]. 天津: 天津市科学技术出版社, 2003. 77-79.

[10] Devi R, Tesfahun E, Legesse W, *et al.* Assessment of siltation and

nutrient enrichment of Gilgel Gibe dam, Southwest Ethiopia [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(5): 975-979.

[11] 秦延文, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾水环境氮、磷营养盐分布特点[J]. *海洋学报*, 2005, **27**(2): 172-175.

[12] 陆海明, 尹澄清, 王夏晖, 等. 于桥水库周边农业小流域地表径流和亚表层流的磷素流失浓度特征[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(10): 1702-1708.

[13] 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.

[14] Mudroch A, Azcue J. *Manual of Aquatic Sediment Sampling* [M]. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, 1995. 194-200.

[15] 蓟县农业区划委员会土壤普查办公室. 蓟县土壤普查报告[R]. 天津: 天津市农业区划委员会, 1982. 23-26.

[16] An W C, Li X M. Phosphate adsorption characteristics at the sediment-water interface and phosphorus fractions in Nansi Lake, China, and its main inflow rivers [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **148**(1-4): 173-184.

[17] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 221-225.

[18] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(3): 381-388.

[19] 隋少峰, 罗启芳. 武汉东湖底泥释磷特点[J]. *环境科学*, 2001, **22**(1): 102-105.

[20] Huang Q H, Wang Z J, Wang D H, *et al.* Origins and mobility of Phosphorus forms in the Sediments of Lakes Taihu and Chaohu, China [J]. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, 2005, **40**(1): 91-102.

[21] 天津市环境保护局. 天津市环境质量报告书(2004 年度)[R]. 天津: 天津市环境保护局, 2005. 87.

[22] 秦保平, 孙韧, 王德龙. 等. 引滦河道中水质偏碱的起因研究[J]. *环境科学研究*, 1999, **12**(5): 38-42.

[23] 天津市环境保护科学研究所. 于桥水库富营养化及防治研究[R]. 天津: 天津市环境保护科学研究所, 1991. 94.

[24] 天津市环境监测中心. 引滦输水工程流域生态环境状况及污染防治对策研究[R]. 天津: 天津市环境监测中心, 2000. 47-96.

[25] 王新华, 吕昀, 秦保平, 等. 引滦入津输水工程流域浮游动物和水质评价[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2002, **35**(1): 16-21.

[26] 王新华, 纪炳纯, 李明德, 等. 引滦工程上游浮游植物及其水质评价[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(4): 18-24.

[27] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(6): 714-719.

[28] 吴永红, 胡俊, 金向东, 等. 滇池典型湖湾沉积物氮磷化学特性及疏浚层推算[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 77-82.

[29] 苏德纯, 胡育峰, 宋崇渭, 等. 官厅水库坝前疏浚底泥的理化特征和土地利用研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(6): 1319-1323.

[30] 钟继承, 范成新, 等. 底泥疏浚效果及环境效应研究进展[J]. *湖泊科学*, 2007, **19**(1): 1-10.

- [31] 濮培民, 王国祥, 胡春华, 等. 底泥疏浚能控制湖泊富营养化吗? [J]. 湖泊科学, 2000, **12**(3): 269-279.
- [32] 王栋, 孔繁翔, 刘爱菊, 等. 生态疏浚对太湖五里湖湖区生态环境的影响[J]. 湖泊科学, 2005, **17**(3): 263-268.
- [33] 徐清, 刘晓端, 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 辑(地球科学), 2005, **35**(S1): 281-287.
- [34] 刘浏, 刘晓端, 徐清, 等. 密云水库沉积物中磷的形态和分布特征[J]. 岩矿测试, 2003, **22**(1): 81-86.
- [35] 吕晓霞, 翟世奎, 于增慧, 等. 长江口内外表层沉积物中营养元素的分布特征研究[J]. 海洋通报, 2005, **24**(2): 40-45.
- [36] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 488-494.
- [37] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 111-117.