

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2015.0486

张伯镇,王丹,张洪,等.2016.官厅水库沉积物重金属沉积通量及沉积物记录的生态风险变化规律[J].环境科学学报,36(2):458-465

Zhang B Z, Wang D, Zhang H, et al. 2016. The flux of sedimentary heavy metals and variation of ecological risks recorded by sediments from Guanting Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 36(2):458-465

官厅水库沉积物重金属沉积通量及沉积物记录的生态风险变化规律

张伯镇^{1,2,3}, 王丹¹, 张洪^{1,*}, 孟鑫^{1,3}, 雷沛^{1,4}, 朱晓磊^{1,4}, 单保庆¹, 李杰³

1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085

2. 兰州兰石重工有限公司, 兰州 730314

3. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070

4. 中国科学院大学, 北京 100049

收稿日期: 2015-04-13

修回日期: 2015-05-22

录用日期: 2015-05-25

摘要: 采集官厅水库沉积物柱状样, 分析了沉积物中 6 种重金属 (Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn) 的垂直分布特征和沉积通量, 并采用潜在生态危害指数评价其生态风险。结果表明: 6 种重金属平均含量分别为 0.205、65.5、37.6、39.5、33.6 和 104 mg·kg⁻¹, 与北京市土壤背景值相比, 超标 1.4~2.2 倍; 随着时间的变化, 沉积物中 Cd 和 Ni 含量相对稳定, 而 Cr、Cu、Pb 和 Zn 含量呈现先降低、80 年代后趋于平稳的趋势; 1980 年以来, 重金属沉积通量随时间呈现出规律的递减, 到 2014 年减少了约 40%。官厅水库沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的年沉积量分别为 0.0113、3.63、2.09、2.19、1.86 和 5.72 t。富集系数显示, 表层沉积物中各重金属均未发生富集 (富集系数小于 1.5)。官厅水库表层沉积物重金属的潜在生态风险指数 RI 值范围为 58.8~113.0, 均值为 80.9, 总体属于低生态风险; 垂直分布上, 在 1985 年后, 水库各采样点沉积物中重金属的风险程度 RI 随着时间均呈现减小的趋势。总体来说, 官厅水库沉积物中重金属污染相对较轻, 对水库水环境质量不构成威胁。

关键词: 官厅水库; 重金属; 沉积物; 垂向分布; 沉积通量; 潜在生态风险

文章编号: 0253-2468(2016)02-458-08

中图分类号: X52

文献标识码: A

The flux of sedimentary heavy metals and variation of ecological risks recorded by sediments from Guanting Reservoir

ZHANG Bozhen^{1,2,3}, WANG Dan¹, ZHANG Hong^{1,*}, MENG Xin^{1,3}, LEI Pei^{1,4}, ZHU Xiaolei^{1,4}, SHAN Baoqing¹, LI Jie³

1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. Lanzhou LS Heavy Machinery Co., Ltd, Lanzhou 730314

3. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Received 13 April 2015;

received in revised form 22 May 2015;

accepted 25 May 2015

Abstract: Based on vertical distribution characteristics and deposition fluxes, environmental risks of six sedimentary heavy metals (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn) in Guanting Reservoir were assessed by Håkanson potential ecological risk index. The results showed that the average concentrations of these heavy metals were 0.205, 65.5, 37.6, 39.5, 33.6 and 104 mg·kg⁻¹, respectively. All metals exceeded the background value of Beijing by 1.4~2.2 times. The concentrations of Cd and Ni in the sediment were relatively stable, while concentrations of Cr, Cu, Ni and Zn decreased gradually and leveled off since 1980. Moreover, deposition flux of heavy metals reduced by 40% since 1980. The annual deposition of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn were 0.0113, 3.63, 2.09, 2.19, 1.86 and 5.72 t, respectively. Enrichment factors for these heavy metals in the surface sediments were less than 1.5. The RI values of the Reservoir ranged from 58.8 to 113, with an average value of 80.9, which demonstrated low ecological risk. Since 1985, the RI values of metals in the

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 (中科院生态环境研究中心) 自主申请课题 (No.14Z01ESPCR)

Supported by the State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control (Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences) Independent Application Research (No. 14Z01ESPCR)

作者简介: 张伯镇 (1989—), 男, E-mail: bzhzhang925@sina.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: hongzhang@rcees.ac.cn

Biography: ZHANG Bozhen (1989—), male, E-mail: bzhzhang925@sina.com; * **Corresponding author**, E-mail: hongzhang@rcees.ac.cn

sediment samples of our sites had been decreasing. In general, the pollution of heavy metals was not serious in the sediments from Guanting Reservoir.

Keywords: Guanting Reservoir; heavy metal; sediment; vertical distribution; sedimentary flux; potential ecological risk

1 引言(Introduction)

水库是一种半自然半人工生态系统,容易受到人类活动的影响,具有水流缓慢、自净能力差、污染来源广泛、种类复杂等特点(胡国成等, 2011; Duker *et al.*, 2005).水库的建成不仅使河流水动力特性和原有水质发生变化,同时也使重金属等污染物因水流速度减缓而在库区大量沉积(余杨, 2013).沉积物是水库生态系统的重要组成部分,它不仅作为“汇”累积水体中重金属,当条件(氧化还原电位、温度、pH、溶解氧等)改变时,又可作为“源”将重金属再次释放到水体中,对水生生物产生毒害作用,并通过食物链传递对人体健康构成威胁(Hiller *et al.*, 2010; Yi *et al.*, 2011).

官厅水库地处北京和河北张家口交界,曾经是北京市饮用水供水水源地.由于流域上游工矿企业的大量排污,官厅水库自 1972 年开始遭受重金属和毒害有机物的污染(梁涛等, 2003).20 世纪 80 年代后,水库上游地区工农业快速发展,用水量和工业废水排放量逐年加剧,同时流域内水土流失严重,大量泥沙、农药和化肥进入库区,致使官厅水库水体出现了严重的水环境问题(刘培斌等, 2002).持续的水质恶化导致官厅水库于 1997 年被迫退出了城市生活饮用水体系.随着“21 世纪初期首都水资源可持续利用规划”的实施,官厅水库被列为全国重点的治理对象,经过近年来的持续治理,水库水质逐步改善,基本稳定在 IV 类,又成为了北京市应急备用水源地(杨喆等, 2015).

水库沉积物因具有良好的沉积物环境而具有储存信息量大、沉积连续性好等特点,可以提供长时间尺度、高分辨的环境演变序列(Zan *et al.*, 2011).研究沉积物中污染物沉积历史过程,可以阐明流域湖库水体的污染演替过程,为建立湖库污染物基准和水环境管理提供重要依据.水库沉积物重金属的垂直分布和沉积通量则反映了水环境中污染物的历史沉积过程(Zan *et al.*, 2011),而当前针对官厅水库沉积物重金属的研究主要集中在水库周边土壤和表层沉积物中重金属污染(梁夏天, 2014; Luo *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2002)等方面,针对水库沉积物中重金属的垂直分布、沉积通量及在时间尺度上的潜在生态风险关注相对较少.鉴于

此,本研究选取官厅水库沉积物柱状样为研究对象,对沉积柱中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的垂直分布和沉积通量进行探讨,同时评价其生态风险,以期为官厅水库水体的风险污染控制和治理提供理论依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 研究区域概况

官厅水库是建国后修建的第一座大型水库,位于永定河上游,距北京市约 100 km(图 1).流域面积约 4.34 万 km²,具有供水、防洪、发电、水产、灌溉等多种功能.官厅水库为东北-西南走向的狭长型水库,平均水深约为 10 m,最大水深 18.5 m,周边地形地貌呈高度异质性,山地、丘陵、河谷、盆地相间分布.入库水系有妫水河及桑干河和洋河交汇形成的永定河,其中,妫水河、桑干河和洋河中上游水质较好,而洋河的宣化区、下花区和沙城等中下游河段由于集中了工业区和较大城镇,环境污染严重,对水库水质影响较大(王静, 2012).

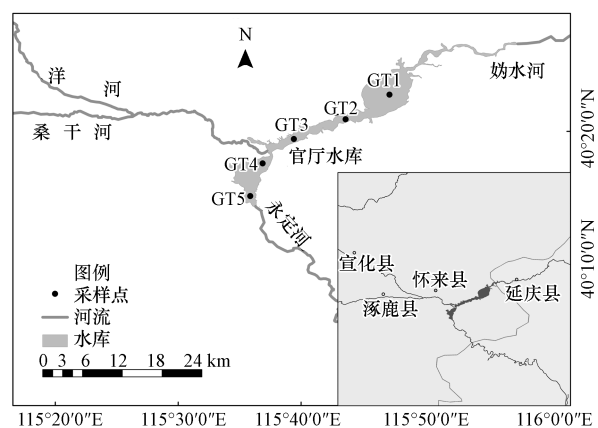


图 1 官厅水库采样点分布示意图

Fig.1 Sampling sites in Guanting Reservoir

2.2 样品采集与分析

2014 年 4 月 22 日,利用自重力柱状采样器(Corer 60, Uwitec, Austria)对布设样点(主要和官厅水库常规水质监测站点保持一致)进行柱状沉积物采集(图 1).每个采样点采集 3 根沉积柱,柱长均介于 30~58 cm 之间.采集的沉积柱保持竖直状态运回实验室,各样点选取一根沉积柱按前 10 cm 每 1 cm 分层、大于 10 cm 每 2 cm 分层,用于粒径、含水率、有机质等分析;另取一根沉积柱按每 2 cm 分层,

冷冻干燥后用于 TN、TP 和金属元素 (Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 及 Fe) 的测定;同时选取一根沉积样柱 (GT2)按每 1 cm 分层,用于构建水库沉积物年代学序列分析.分层后的沉积物样品分别放入聚乙烯自封袋中密封标记,并在-20 °C 下冷冻保存.

取分层后的沉积物鲜样用激光粒度分析仪 (Mastersizer 2000, Malvern, UK)测定粒度组成.用烘干差值法测定含水率和有机质(以烧失量表示, Loss On Ignition, LOI) (韩璐等, 2010).其余样品利用真空冷冻干燥机 (LGJ-10, 北京松源华兴科技发展有限公司)冷冻干燥后剔除砾石、塑料和动植物残体等杂质,用玛瑙研钵研磨并过 100 目筛后储存备用.用元素分析仪 (Vario EL III, Elementar, GER)测定沉积物中总氮含量(王巧环等, 2013);用 SMT 法测定沉积物总磷含量 (Ruban *et al.*, 2001).测重金属的沉积物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 法 (Presley *et al.*, 1992)在微波消解仪 (Mars X, CEM, USA)中消解,并用 ICP-OES (Optima 2000 DV, Perkin Elmer, USA) 或 ICP-MS (7500a, Agilent Technologies, USA)测定 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 及 Fe 等 7 种元素的含量.沉积物定年分析采用高纯铯能谱仪 (GCW1522, Canberra, USA)测定 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 在 24 h 后的活度,然后利用稳定输入通量-稳定沉积物堆积速率模型 (CFS 模型)估算官厅水库沉积物不同深度的沉积速率和年代 (Appleby *et al.*, 1978;朱晓磊等, 2015).

2.3 质量控制和数据处理

样品分析均平行测定 3 次,实验结果以均值表示.选用水系沉积物成分分析标准物质 GSD-4a (GBW07304a, 地球物理地球化学勘查研究所)来控制实验的准确性和精确性.各重金属元素的回收率范围为 85%~115%,符合质量控制要求.采样点分布图和数据制图分别采用 ArcGIS 10.0 和 Origin 8.5 完成.

2.4 沉积物重金属污染评价方法

2.4.1 富集系数法 富集系数法 (Enrichment Factor, EF)不仅可以评价沉积物中重金属的富集水平,也可以利用金属元素与惰性元素 (Fe 或 Al) 的比值来判断重金属的污染来源.由于 Fe 在地壳中具有丰度高、溶解度低(中性和碱性)、不易迁移、性质稳定和生物利用度低等特点,因此,本研究选择 Fe 作为富集系数法的参比元素 (Abraham *et al.*, 2008;雷沛等, 2013).富集系数按文献中 (Zhang *et al.*, 2008)推荐的公式计算:如果富集系数介于 0.5~1.5,表明重金属主要源自地壳和岩石圈的自然风化的过程;如果大于 1.5,表明人为输入成为重金属污染的明显来源.

2.4.2 潜在生态风险指数法 采用瑞典学者 Håkanson 提出的生态风险指数法来评估沉积物中重金属生态风险.该方法不仅考虑了沉积物中重金属的毒性、生态效应和环境效应的综合影响,同时可用定量的方法反映单种及多种重金属的污染程度和潜在生态风险程度,计算公式和风险等级参见文献 (Håkanson, 1980),本研究选用了北京市土壤背景值作为参比 (陈同斌等, 2004).

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 沉积物常规理化指标

沉积物理化指标在一定程度上会影响重金属在沉积物中的分布.由表 1 可知,官厅水库表层沉积物中各采样点含水率在 65%左右,有机质 (LOI) 含量在永定河入口 (GT4) 和水库出口 (GT5) 大于 8.0%,而其他样点在 5.39%~8.0%之间.表层沉积物中各采样点总磷和总氮含量分别介于 522~548 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2078~2977 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,其中,总氮在永定河入口 (GT4) 和水库出口 (GT5) 含量高达 3000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

表 1 表层沉积物常规理化指标统计

Table 1 Statistics of physical and chemical properties of the surface sediments

采样点 ^a	含水率	LOI	总磷/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	粒度组成 ^b		
					黏土	粉砂	砂
GT1	62.7%±2.86%	5.39%±1.40%	531.0±66.7	2078±289	17.2%±3.40%	81.2%±3.16%	1.56%±0.949%
GT2	65.9%±2.38%	7.10%±1.79%	522.0±66.6	2385±286	23.3%±6.96%	72.5%±6.91%	4.19%±0.840%
GT3	66.4%±5.03%	7.60%±0.762%	548.0±124.0	2234±321	29.6%±7.10%	69.4%±6.85%	1.02%±0.327%
GT4	62.4%±4.65%	8.30%±0.947%	524.0±119.0	2899±422	22.2%±1.98%	73.8%±3.41%	4.04%±1.61%
GT5	68.9%±2.18%	8.24%±0.448%	525.0±39.3	2977±252	19.0%±4.63%	80.8%±4.87%	0.208%±0.254%

注:^a, 妫水河入口 (GT1)、上游库心区 (GT2)、中游库心区 (GT3)、永定河入口 (GT4)、水库出口 (GT5);黏土(粒度 < 3.9 μm)、粉砂(粒度范围为 3.9~62.5 μm)、砂(粒度范围为 62.5~2000 μm).

官厅水库表层沉积物中各采样点粒度以粉砂和黏土为主,比例在 90% 以上,其中,妫水河入口 (GT1) 和水库出口 (GT5) 的粉砂含量均超过 80%, 上游库心区 (GT2) 和永定河入口 (GT4) 的含砂量相对较高,比例在 4% 左右.粉砂和黏土代表了水体沉积物中可被再悬浮部分,其表现为垂向加积,是弱水动力的标志(侯俊等, 2013),说明官厅水库水体受到水动力的影响较小.

3.2 沉积物中重金属的分布特征及沉积通量研究

3.2.1 重金属总量垂直分布特征 由图 2 可知,官厅水库沉积柱中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 0.205、65.5、37.6、39.5、33.6 和 104 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与北京市土壤背景值相比,这 6 种重金属元素分别超标 1.7、2.2、2.0、1.5、1.4、1.8 倍.官厅水库

沉积物中重金属含量存在一定空间分布上的差异,妫水河入口 (GT1) 处沉积物中重金属 Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量均低于其他采样点,其中, Pb 含量的平均值为 18.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于北京市土壤背景值,而 Cd、Cr、Cu、Ni 和 Zn 的含量分别为 0.151、44.3、23.4、27.9 和 60.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均略高于背景值.官厅水库下游沉积物中重金属含量高于中上游,以 Cd、Cu 和 Pb 在不同采样点差异最为显著,这与洋河中下游河段集中了大量工业区和较大城镇有关(谭冰等, 2014);从垂直分布来看,沉积物中 Cd 和 Ni 的含量相对稳定,而 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的含量随时间推移呈现先降低,在 80 年代后逐渐趋于平稳的趋势,这与官厅水库水中重金属含量的变化趋势一致 (Shen *et al.*, 1991).

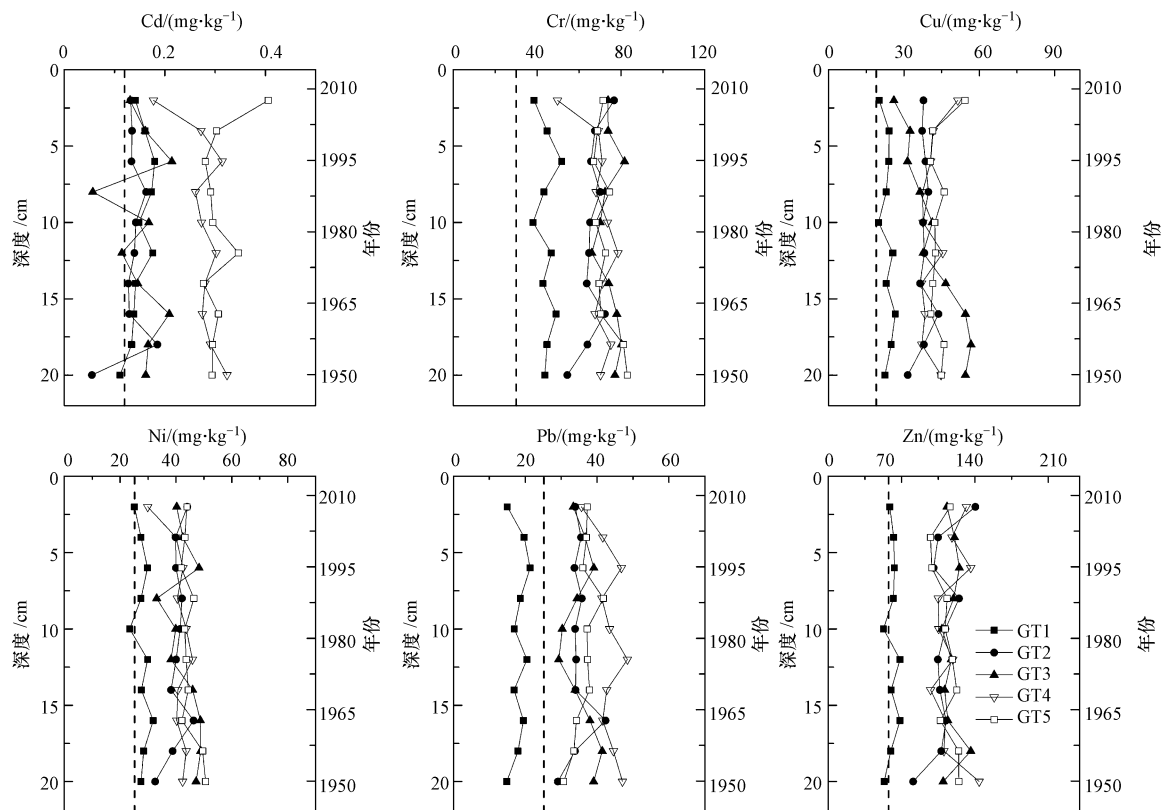


图 2 官厅水库重金属垂直分布图(图中虚线为北京市各元素土壤背景值(陈同斌等, 2004))

Fig.2 Vertical distribution of heavy metals in the Guanting Reservoir

与其他水库表层沉积物重金属含量相比较(表 2),官厅水库表层沉积物中重金属 Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量略高于汤峪水库和高州水库(1.0~2.2 倍),而低于其他水库.本次研究中重金属含量平均值与 10

年前的研究结果相比(Zhang *et al.*, 2002), Cd、Cu、Pb 和 Zn 含量均有减少,只有 Cr 含量略变大,说明近年来官厅水库沉积物中重金属污染状况总体减轻.

表 2 官厅水库与其他水库表层沉积物重金属平均含量的比较

Table 2 Comparison of heavy metals in the surface sediments of in Guanting reservoir and other regions

水库名称	地区	采样年份	样点数	重金属含量/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)						文献来源
				Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
官厅水库	北京市	2014	5	0.205	64.6	36.1	38.4	33.5	104	本研究
官厅水库 ^a	北京市	2000	4	0.780	61.7	42.2	41.0	62.4	163	Zhang <i>et al.</i> , 2002
沙河水库	北京市	2010	7	—	51.0	51.3	45.6	29.3	262	张伟等, 2012
密云水库	北京市	2011	22	0.300	77.9	38.0	38.9	29.3	107	乔敏敏等, 2013
高州水库	广东高州	2009	9	0.200	96.6	16.4	22.8	56.9	307	胡国成等, 2011
汤峪水库	陕西西安	—	6	0.540	66.1	26.2	—	34.0	74.8	王禄仕等, 2010
大伙房水库	辽宁抚顺	2010	9	2.38	81.9	65.2	—	36.7	138	罗燕等, 2011
北京市土壤背景值				0.12	29.8	18.7	26.8	24.6	57.5	陈同斌等, 2004

注:a. 选取官厅水库与本研究相近 4 个采样点的平均值(Zhang *et al.*, 2002).

3.2.2 重金属沉积通量 重金属沉积通量由沉积物中重金属的含量及沉积速率共同决定.从图 3 可以看出,官厅水库沉积物中各重金属的沉积通量均随时间呈现有规律的递减,1980 年以前,水库沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的沉积通量随

时间变化较小,测得沉积通量的平均值分别为 0.0311 、 10.1 、 5.92 、 6.13 、 5.11 和 $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;而 1980 年以后,表层沉积物各重金属沉积通量随时间推移表现出明显的减小,目前沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的沉积通量相比 1980 年减少了

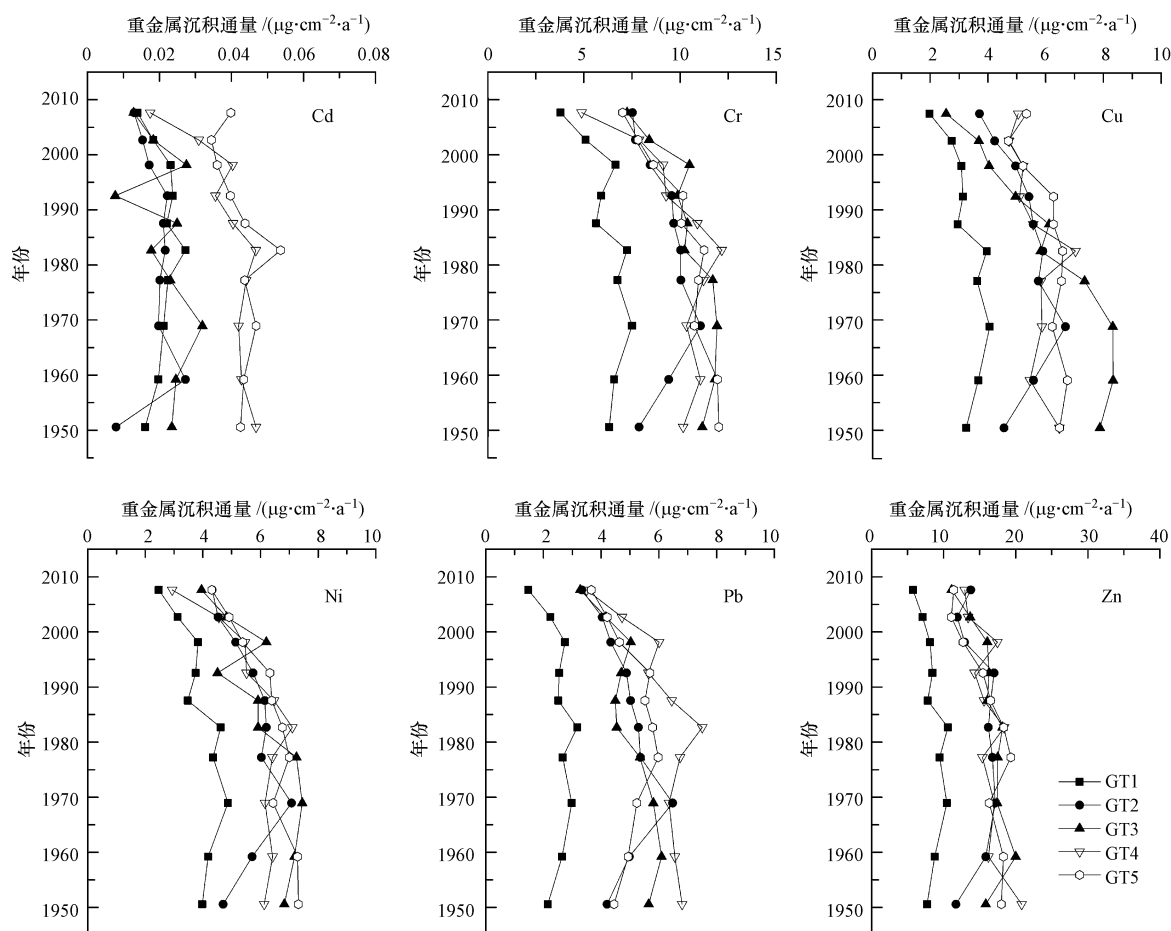


图 3 官厅水库重金属沉积通量的年代分布

Fig.3 Chronological distribution of sedimentation fluxes of trace metals in the Guanting Reservoir

约 40%,各重金属沉积通量的最大值分别是最小值的 4.17、3.22、3.56、2.88、5.08 和 3.20 倍,这与沉积物沉积速率的年变化趋势相似(朱晓磊等, 2015)。沉积物重金属含量年变化幅度不大(图 2),因此,1980 年后官厅水库的沉积通量下降的原因可能有:一是国家政策对排污总量的有效控制的显现;二是流域内来沙量减少(周小飞, 2002; 刘世海等, 2008)导致研究区域沉积速率下降。结合官厅水库目前的水域面积 40 km²(马振刚等, 2014),估算官厅水库泥沙的沉积量为 5.5×10⁴ t·a⁻¹,沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的年均沉积量分别为 0.0113、3.63、2.09、2.19、1.86 和 5.72 t。

3.3 沉积物中重金属污染评价

3.3.1 富集系数 由图 4 可知,表层沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的平均富集系数分别为 1.17、1.49、1.33、0.984、0.934 和 1.24,各重金属元素富集系数小于 1.5,均未发生富集。空间分布来看,各采样点表层沉积物中不同重金属的富集系数差异性较大,除奶水河入口(GT1)和永定河入口(GT4)样点外,其它样点表层沉积物 Cr 的富集系数均大于 1.5。水库出口(GT5)样点的重金属 Cd、Cr 和 Cu 均出现了富集,说明下游的污染相对比较严重。

3.3.2 潜在生态风险评价 以北京市土壤背景值作参照,计算官厅水库表层沉积物中重金属的单项潜在生态风险指数(E_r^i)和综合生态风险指数(RI),

表 3 表层沉积物中重金属的生态风险系数(E_r^i)和潜在生态风险指数(RI)

Table 3 Potential ecological risk indexes and risk level of the surface sediments

样点名称	E_r^i						RI	风险等级
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
GT1	40.2	2.90	5.94	4.98	3.73	1.04	58.8	低
GT2	35.3	4.64	10.20	7.74	7.02	2.03	66.9	低
GT3	36.5	4.99	8.96	7.61	7.07	2.04	67.2	低
GT4	64.9	4.45	11.20	7.34	8.49	2.07	98.4	低
GT5	78.8	4.70	12.00	8.15	7.70	1.87	113.0	低
平均值	51.2	4.34	9.66	7.16	6.8	1.81	80.9	低

由潜在生态风险指数判断官厅水库各采样点沉积柱中重金属的综合生态风险程度(图 5),从空间分布来看,水库的 RI 大小顺序为 GT5> GT4> GT3> GT2> GT1,其中,水库出口(GT5)的 RI 均值为 113,属于低生态风险。从垂直分布来看,中游库心区(GT3)和永定河入口(GT4)的 RI 随时间变化,生态风险逐渐减小;除水库出口(GT5)外,其他采样点在 1985 年后 RI 随着时间的推移均呈现减小的趋

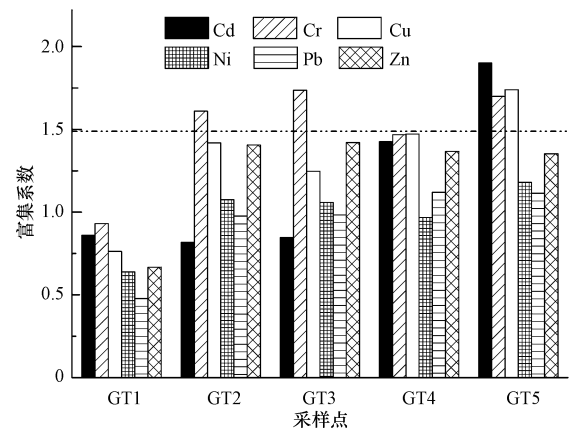


图 4 官厅水库表层沉积物重金属元素富集系数

Fig.4 Sediment enrichment factor of heavy metals in the sediment from Guanting reservoir

结果如表 3 所示。从单项潜在生态风险指数来看,其大小依次 Cd > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn。其中,污染贡献最大的是 Cd,表现为中等生态风险(平均值为 51.2),最高值出现在水库出口 GT5(E_r^i 值为 78.8),属于中等生态风险;而其它重金属元素则均呈现轻微的生态风险。从综合潜在生态风险指数(RI)来看,官厅水库出口(GT5)表层沉积物的 RI 值相对较高,超过 100,处于低生态风险;官厅水库表层沉积物 RI 值范围为 58.8~113,平均值为 80.9,总体属于低生态风险。

势,但污染仍以 Cd 为主,其中,采样点永定河入口(GT4)、水库出口(GT5) Cd 的 E_r^i 值分别为 69.2、77.4,均属于中等生态风险。从整体来看,官厅水库沉积物中重金属的风险程度随着时间的推移变化不明显,各采样点的 RI 值中起主要贡献的是 Cd 元素,其余重金属元素贡献较低,这与 Cd 的毒性系数较高有关,也是上游化工厂废物排放导致 Cd 污染的显现(王铁宇等, 2007; Zhang *et al.*, 2002)。

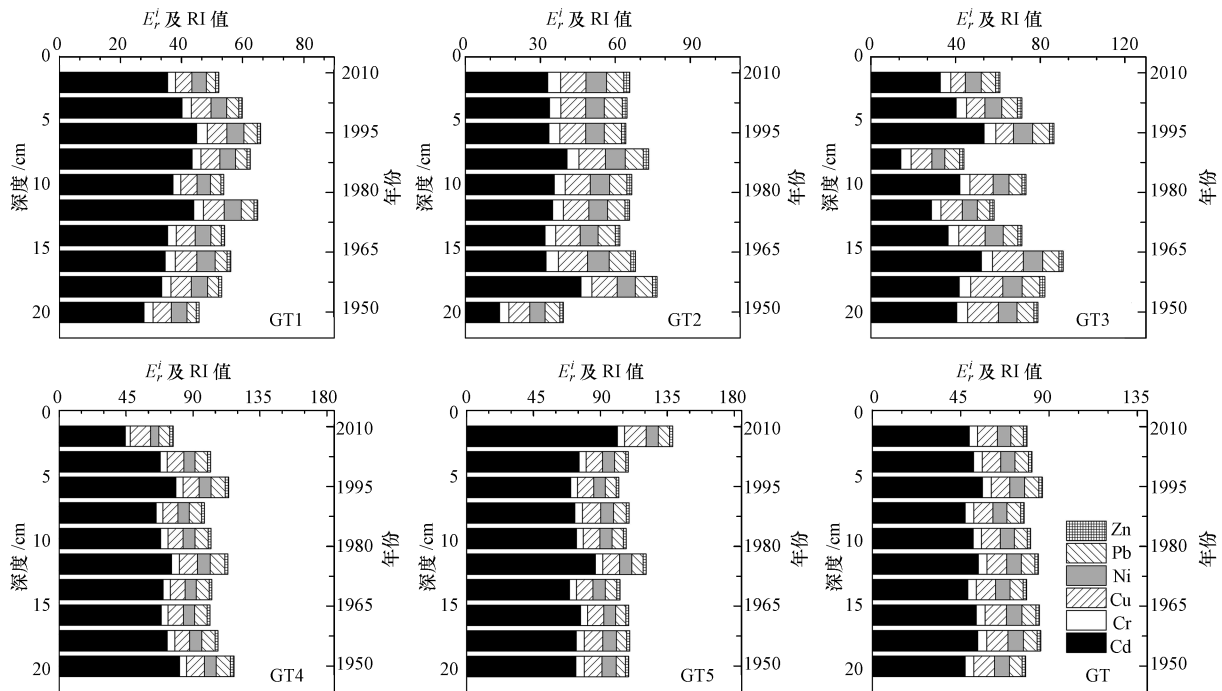


图5 官厅水库沉积物重金属 E_r^i 及 RI 垂向分布

Fig.5 The vertical distribution of both E_r^i and RI of heavy metals in sediment core taken from Guanting Reservoir

4 结论 (Conclusions)

1) 水库沉积柱中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 平均含量分别为 0.205、65.5、37.6、39.5、33.6 和 $104 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与北京市土壤背景值相比, 超标 1.4~2.2 倍。垂直分布上, 沉积物中 Cd 和 Ni 的含量相对稳定, 而 Cr、Cu、Pb 和 Zn 的含量随时间推移均呈现出先降低, 80 年代后趋于平稳的趋势。官厅水库下游沉积物中重金属含量高于中上游, 且与 10 年前相比, 污染程度有所减轻。

2) 官厅水库各重金属沉积通量随时间推移表现出明显的减小, 以 1980 年以后最为明显, 到 2014 年减少了约 40%。据估算, 水库沉积物中重金属 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的年沉积量分别为 0.0113、3.63、2.09、2.19、1.86 和 5.72 t。

3) 富集系数表明, 表层沉积物中各重金属的 EF 小于 1.5, 均未发生富集。水库下游表层沉积物中重金属 Cd、Cr 和 Cu 均出现了富集, 说明下游的污染相对比较严重。

4) 官厅水库表层沉积物 RI 值范围为 58.8~113, 平均值为 80.9, 总体属于低生态风险。垂直分布上, 官厅水库自 1985 年以来, 各采样点沉积物中重金属的风险程度 RI 随着时间的推移均呈现减小的

趋势, 污染以 Cd 为主, 且表现为中等生态风险。

参考文献 (References):

- Abraham G M S, Parker R J. 2008. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1/3): 227-238
- Appleby P G, Oldfield F. 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment [J]. *Catena*, 5(1): 1-8
- 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 2004. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究 [J]. *环境科学*, 25(1): 117-122
- Duker A A, Carranza E J M, Hale M. 2005. Arsenic geochemistry and health [J]. *Environment International*, 31(5): 631-641
- Håkanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 14(8): 975-1001
- 韩璐, 黄岁樑, 王乙震. 2010. 海河干流柱芯不同粒径沉积物中有机质和磷形态分布研究 [J]. *农业环境科学学报*, 29(5): 955-962
- Hiller E, Jurkovič L, Šutriepka M. 2010. Metals in the surface sediments of selected water reservoirs, Slovakia [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 84(5): 635-640
- 侯俊, 王超, 王沛芳, 等. 2013. 太湖表层沉积物粒度组成时空分布特征及分类命名 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 41(2): 114-119
- 胡国成, 许振成, 赵学敏, 等. 2011. 高州水库表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *环境科学研究*, 24(8): 949-957
- 雷沛, 张洪, 单保庆. 2013. 丹江口水库典型库湾及支流沉积物重金属

- 污染分析及生态风险评估[J].长江流域资源与环境,22(1): 110-117
- 梁涛,王浩,丁士明,等.2003.官厅水库近三十年的水质演变时序特征[J].地理科学进展,22(1): 38-44
- 梁夏天.2014.北京官厅水源地重金属分布与形态特征研究[D].北京:首都师范大学
- 刘培斌,张凤君,孟庆义,等.2002.官厅水库底泥污染物的分布与释放预测研究[J].云南地理环境研究,14(2): 61-64
- 刘世海,胡春宏,李希霞,等.2008.近 50a 来官厅水库上游流域泥沙输移平衡研究[J].水土保持通报,28(3): 128-132
- Luo W, Wang T Y, Lu Y L, *et al.* 2007. Landscape ecology of the Guanting Reservoir, Beijing, China: multivariate and geostatistical analyses of metals in soils[J]. Environmental Pollution, 146(2): 567-576
- 罗燕,秦延文,张雷,等.2011.大伙房水库表层沉积物重金属污染分析与评价[J].环境科学学报,31(5): 987-995
- 马振刚,李黎黎,张利雅.2014.1978 年—2013 年官厅水库水域面积变化及相关因素分析[J].天津师范大学学报(自然科学版),34(2): 56-60
- Presley B J, Taylor R J, Boothe P N. 1992. Trace metal concentrations in sediments of the Eastern Mississippi Bight[J]. Marine Environmental Research, 33(4): 267-282
- 乔敏敏,季宏兵,朱先芳,等.2013.密云水库沉积物中重金属形态分析及风险评估[J].农业环境科学学报,32(7): 1423-1431
- Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* 2001. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments - A synthesis of recent works[J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 370(2/3): 224-228
- Shen X C, Yang M S, Feng H H. 1991. Heavy metals in the water and sediments of Guan-Ting reservoir [C]//Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment. Trends and Explanation. Proceedings of the Vienna Symposium. Vienna: IAHS Publ. 203: 367-374
- 谭冰,王铁宇,朱朝云,等.2014.洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策[J].环境科学,35(2): 719-726.
- 王静.2012.北京官厅水库主要水质指标空间分布及人工湿地修复效果研究[D].北京:中国林业科学研究院
- 王禄仕,张亚宁,朱维晃.2010.汤峪水源水库沉积物中重金属形态分布特征及潜在生态风险评估[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),42(4): 567-572
- 王巧环,任玉芬,孟龄,等.2013.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J].分析试验室,32(10): 41-45
- 王铁宇,罗维,吕永龙,等.2007.官厅水库周边土壤重金属空间变异特征及风险分析[J].环境科学,28(2): 225-231
- 杨喆,程灿,谭雪,等.2015.官厅水库及其上游流域水环境容量研究[J].干旱区资源与环境,29(1): 163-168
- Yi Y J, Yang Z F, Zhang S H. 2011. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin [J]. Environmental Pollution, 159(10): 2575-2585
- 余杨.2013.三峡水库蓄水初期鱼类中重金属污染研究[D].北京:中国水利水电科学研究院
- Zan F Y, Huo S L, Xi B D, *et al.* 2011. A 100 year sedimentary record of heavy metal pollution in a shallow eutrophic lake, Lake Caohu, China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 13(10): 2788-2797
- Zhang H, Shan B Q. 2008. Historical records of heavy metal accumulation in sediments and the relationship with agricultural intensification in the Yangtze - Huaihe region, China [J]. Science of the Total Environment, 399(1/3): 113-120
- Zhang S Z, Wang S X, Shan X Q. 2002. Distribution and speciation of heavy metals in surface sediments from Guanting Reservoir, Beijing [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 37(4): 465-478
- 张伟,张洪,单保庆.2012.北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究[J].环境科学,33(12): 4284-4290
- 周小飞.2002.官厅水库底泥污染分析、评价与控制研究[D].海口:华南热带农业大学
- 朱晓磊,张洪,雷沛,等.2015.官厅水库沉积物中大量元素的历史分布特征[J].环境科学学报,doi:13671/j.hjkxxb.2015.0475