

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019060403

周巧巧, 任勃, 李有志, 等. 中国河湖水体重金属污染趋势及来源解析[J]. 环境化学, 2020, 39(8): 2044-2054.

ZHOU Qiaoqiao, REN Bo, LI Youzhi, et al. Trends and sources of dissolved heavy metal pollution in water of rivers and lakes in China[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(8): 2044-2054.

中国河湖水体重金属污染趋势及来源解析*

周巧巧^{1,3} 任勃^{1,3} 李有志^{1,3**} 牛艳东² 丁小慧^{1,3}
姚欣^{1,3} 边华林^{1,3}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙, 410128; 2. 湖南省林业科学院, 长沙, 410128;

3. 洞庭湖区农村生态系统健康湖南省重点实验室, 长沙, 410128)

摘要 水体重金属污染是我国主要的环境问题之一, 时空变化明显. 本文收集整理了1980—2016年间中国35条河流和64个湖泊水体的5种溶解态重金属(Cd、Pb、Zn、Cu和As)数据, 运用Mann-Kendall趋势检验判断污染趋势, 并采用主成分(PCA)分析结合多元线性回归解析其污染来源. 研究表明, 1980—2016年间水体溶解态重金属Cd、Zn和As浓度呈现升高趋势, 而Pb和Cu浓度呈现出下降趋势. 在1980—2010年, 河湖水体溶解态重金属的主要污染源为农业排放和工业排放; 2011—2016年主要污染源转变为自然排放和生活废弃物排放. 在我国四大经济区域(东北、东部、中部、西部)中, 河湖水体溶解态重金属浓度总体上以东北和中部地区最高, 西部次之, 东部地区最低. 东北区域污染源以农业和生活废弃物排放为主, 中部区域以工业和生活废弃物排放为主, 西部区域以农业排放为主, 东部区域工业、农业和生活废弃物排放比较均衡. 可见, 我国河湖水体重金属污染形势依然严峻, 其污染来源已由工农业排放转向自然和生活废弃物排放, 应重点控制生活的废弃物污染.

关键词 溶解态重金属, 污染趋势, 污染源, 废弃物排放, 政策措施.

Trends and sources of dissolved heavy metal pollution in water of rivers and lakes in China

ZHOU Qiaoqiao^{1,3} REN Bo^{1,3} LI Youzhi^{1,3**} NIU Yandong²
DING Xiaohui^{1,3} YAO Xin^{1,3} BIAN Hualin^{1,3}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China;

2. Hunan Academy of Forestry, Changsha, 410128, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Rural Ecosystem

Health in Dongting Lake Area, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China)

Abstract: Heavy metal pollution in water is a serious environmental problem and it differs by region and time. This study reviewed past sampling data across 35 rivers and 64 lakes in China from 1980 to 2016 and analyzed the trends and sources of five dissolved heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cu, and As) in water bodies by the Mann-Kendall trend test, and principal components analysis followed by multiple linear regressions. Water bodies in rivers and lakes showed increasing trend in Cd, Zn, and As, and decreasing trend in Pb and Cu from 1980 to 2016. The main sources of heavy metals in water of rivers and lakes were industrial and agricultural emissions from 1980 to 2010 and natural

2019年6月4日收稿(Received: June 4, 2019).

* 湖南省重点研发计划项目(2019NK2011)和湖南创新型省份建设专项社会发展领域重点项目(2019SK2336)联合资助.

Supported by the Key Research and Development Project of Hunan(2019NK2011) and Key Projects in Social Development Field of Hunan Innovative Province Construction (2019SK2336).

** 通讯联系人, E-mail: liyouzhi2004@163.com.

Corresponding author, E-mail: liyouzhi2004@163.com.

and domestic waste emissions from 2011 to 2016. Collectively, mean concentration of heavy metal in water was higher in northeast and central regions, intermediate in western region, and lower in eastern region. The main sources of heavy metals in water of rivers and lakes were different in the four regions: agricultural and domestic waste emissions in northeast region, industrial and domestic waste emissions in central region, agricultural emission in western region, and industrial, agricultural, and domestic waste emissions in eastern region. It was clear that the main source of heavy metal pollution in water has changed from industrial and agricultural emissions to natural and domestic waste emissions over times and the pollution control measures should be given attention on the domestic waste emissions.

Keywords: dissolved heavy metal, pollution trend, pollution sources, waste emissions, policy measures.

水是生命之源,其污染状况直接影响人类健康^[1-2].自 20 世纪 70 年代开始,国外就出现有关水体重金属污染的研究报道.1972 年,位于澳大利亚北部的塔斯马尼亚河(Tasmania River)水体溶解态 Cd、Zn、Cu、Fe 浓度分别为 115.33、1299.00、52.00、45.00 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[3].而在我国,最早关于水体重金属污染的研究见于 1979 年,该研究指出湘江水体溶解态 Cd、Pb、Zn、Cu 浓度分别为 0.30、0.88、62.27、2.16 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[4].在 20 世纪 80—90 年代,逐步出现了少量关于珠江^[5]、长江^[4,6]、黄河^[7]流域等水体重金属污染的研究报道.进入 21 世纪以后,水体重金属污染的研究明显增多,关注点也从大江大湖到一些中小型河湖,如海河^[8]、浑河^[9]、冰湖^[10]等.可见,重金属污染已是我国水体的共性环境问题,有必要揭示我国水体重金属污染状况与污染来源,为重金属污染防治提供理论依据.

重金属物质在自然界以溶解态与颗粒态并存,其中溶解态的重金属易汇集于水体,从而污染地表和地下水,对各生物及人体健康构成重大威胁^[11-14].重金属污染来源众多,包括自然条件下的岩石风化以及人为生产生活中排放含有重金属的废水、废气和废渣^[15-17].在云南省 38 个地表水体重金属污染来源的研究中,矿产资源的不合理开采、金属制造加工业所产生的废弃物是造成水体重金属污染的主要来源^[15,18].为控制重金属污染源,我国政府严格管理采矿冶炼及金属制造等产业,制定重金属排放标准^[1,19];要求废弃物必须处理后再排放,其中 Cd 浓度不得超过 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (GB8978—1996).2011 年 4 月初国务院批复了《重金属污染综合防治“十二五”规划》,该规划明确指出了重点区域行业的重金属污染物排放特别限值,要求各省市区域按照当地情况制定相关规定,设置多层监管并严格按照要求实施,为我国重金属污染防治提供了明确的指南.随着《重金属污染综合防治“十二五”规划》的大范围实施,我国水体重金属污染形势可能已发生了重大改变,但目前还未见全国范围内水体重金属污染状况和变化趋势的相关报道.

为此,本研究通过查阅公开发表的文献资料,收集我国典型河湖水体溶解态重金属浓度,剖析水体溶解态重金属污染时间上的趋势及在空间上的地域差异,解析出主要的重金属污染源,为我国重金属污染防治决策提供科学依据.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 数据来源

在百度学术、谷歌学术、中国知网、Springer、Science Direct、Web of Science 上,查阅关于我国河流与湖泊水体重金属污染的文献,收集 5 种溶解态重金属 (Cd、Pb、Zn、Cu、和 As) 的浓度数据 (图 1).根据文献中所提及的采样时间,确定样本的具体研究时间:若采样时间为 1 年以内,则选取该年作为样本的研究时间;若采样时间为两年,则以第 1 个年份作为样本的研究时间;若采样时间在 3 年及以上,则用中间年份作为样本的研究时间.若文献中未提到采样时间,则以论文出版时间的前半年作为样本的研究时间.本研究共收集到 1980—2016 年间的 64 个湖泊和 35 条河流的水体溶解态重金属数据 (表 1).

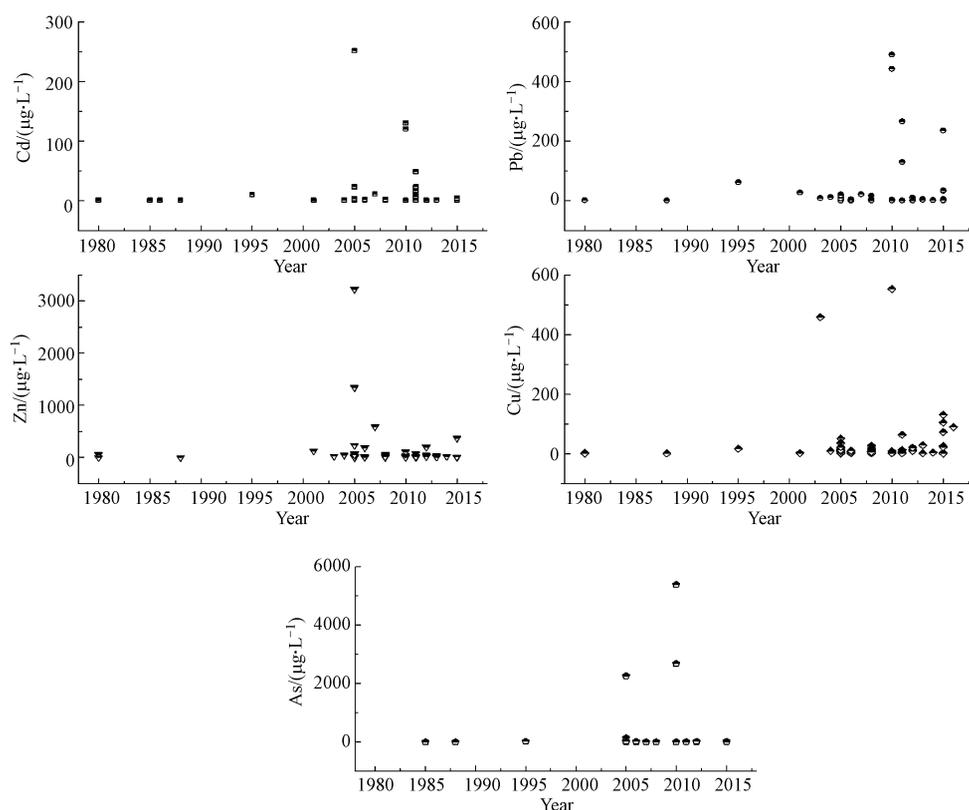


图1 1980—2016年中国河湖水体5种溶解态重金属浓度
(每个点代表一条河流或一个湖泊一年的溶解态重金属浓度的平均值)

Fig.1 Concentrations of five dissolved heavy metals in river and lake water in China from 1980 to 2016
(one point represents the mean in one river or lake for one year)

表1 本研究选取的中国河流与湖泊

Table 1 Chinese rivers and lakes selected in this study

类型 Type	数量 Number	河湖名称 Name of rivers and lakes
Rivers ^[4-9, 16, 18, 20-44]	35	长江、黄河、珠江、湘江、资水、澧水、赣江、黄浦江、海河、洋河、乐安河、汾河、汉江、九龙江、后河、东西河、东港河、西港河、泚江、滦河、抚河、信江、修水、昌江、饶河、老厂河、曼干河、浑龙河、肥外河、嘎洒河、驷马河、巴音河、昆仑河、尖山河、格尔木河
Lakes ^[10, 15, 42-56]	64	洞庭湖、鄱阳湖、青海湖、梁子湖、清水海、平地海子、石坡海、浑水海、滇池、洱海、西湖、茈碧湖、海西海、剑湖、拉市湖、属都海、碧塔海、碧沽天池、草海、程海湖、阳宗海、宜良草海、月湖、长湖、圆湖、无浪海子、长桥海、三角海、异龙湖、杞麓湖、抚仙湖、星云湖、太湖、百花湖、克钦湖、仙鹤湖、三里七湖、尹家湖、红星湖、西北湖、潘家湖、杨家湖、包公湖、铁塔湖、黑池、柳池、晋阳湖、乌梁素海、巢湖、克鲁克湖、托素湖、小柴旦湖、冰湖、海子边、黄金海湾、老君山、昆仑山泉、陈行水库、文笔海水库、海稍水库、清涧美水库、麻塘水库、前屯水库、李家凹

1.2 趋势分析

采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势检测法^[57-58], 揭示我国河湖水体重金属污染变化趋势. 该方法已广泛运用于检测重金属污染随时间的变化趋势^[59-60]. 由于 1980—2004 年间的水体溶解态重金属数据偏少, 因此将 2005 年以前的数据归为一个年份组. 2005—2016 年的样本数据相对较多, 以 5 年作为 1 个年份组. 将 1980—2016 年的样本共划分为 4 个年份组 (1980—2004 年、2005—2009 年、2010—2014 年和 2015—2016 年). 以各年份组的平均溶解态重金属浓度, 即该年份组内所有样本的平均溶解态重金属浓度, 来进行趋势分析, 并采用 95% 的置信区间. M-K 检验的具体计算公式如下^[61-62]:

Mann-Kendall 趋势检验法是关于观测值序列的秩次和时序的非参数秩次检验, 能有效区分某一自然过程是处于自然波动还是存在确定的变化趋势. 假设 H_0 为时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 服从 n 个独立的、随机变量同分布的样本, 那么统计变量 S 的基数公式为 (1), 其中 $\text{sgn}(x_j - x_i)$ 服从 (2) 的取值原则:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_i < x_j, \\ 0, & x_i = x_j, \\ -1, & x_i > x_j, \end{cases} \quad (2)$$

统计变量 S 服从正态分布, 均值 $E(S)$ 为零, 方差 $\text{Var}(S)$ 的公式如 (3), 标准正态统计量 Z 为 Kendall 秩相关系数, 公式如 (4) 所示:

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

当 n 增加时, Z 很快收敛于标准化正态分布, 显著性水平为 α , 双尾检验临界值为 $Z_{\alpha/2}$. 当 $|Z| < Z_{\alpha/2}$, 序列趋势不显著; 当 $|Z| > Z_{\alpha/2}$, 序列趋势变化显著, 而且 $Z > 0$, 序列呈上升趋势, $Z < 0$, 序列呈下降趋势. 当统计值 $|Z| \geq 1.64$ 时, 通过了置信区间为 95% 的显著性检验.

为揭示我国关于河湖水体溶解态重金属污染的空间格局, 参考中国统计年鉴中关于中国四大经济区域的划分, 其中东北地区包括黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东部(通辽、赤峰、呼伦贝尔和兴安盟), 东部地区包括北京、天津、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、海南及港澳台, 中部地区包括山西、河南、湖北、湖南、江西和安徽, 西部地区包括重庆、四川、贵州、云南、广西、陕西、甘肃、宁夏、青海、西藏、新疆及内蒙古中西部. 对某一经济区域而言, 河湖水体溶解态重金属浓度以该区域内所有河湖水体溶解态重金属浓度的平均值来表示.

1.3 污染来源分析

主成分分析(principal component analysis, PCA)和多元线性回归(multiple linear regression, MLR)方法广泛用于辨析重金属污染来源贡献百分比^[63]. 首先, PCA 用于提取特征值大于 1 的主要污染因子; 通过对主因子载荷进行评估, 可以确定各主因子的重金属来源; 然后, 将标准化的 PCA 主因子得分和总溶解态重金属浓度标准化的正态偏差分别作为 MLR 的自变量和因变量进行线性回归; 最后, 用回归系数来估算各主要重金属来源的贡献率.

本研究将重金属污染来源归为四个主要类型: 自然排放、农业排放、工业排放和生活排放. 其中, 自然排放是指岩石等由于气候等非人为因素引起的风化作用, 主要排放 Mn、Co、Ni、Cu 和 Zn 等重金属^[64]; 农业排放是指农业活动中产生的农业废弃物, 主要排放重金属包括农药化肥中的 Cd、Pb、Hg、Zn、Cu 和 As 等^[65-67]; 工业排放是指矿产开采冶炼、金属及非金属等加工制造过程中产生的工业废弃物, 其排放的重金属种类很多, 如 Cd、Pb、Fe、Cu、Hg 和 As 等^[68]; 生活排放是指人类生活中产生的废弃物, 包含重金属 Cd、Pb、Cr、Ni、Cu、As 和 Zn 等^[69-70]. 本研究采用 SPSS V22.0 软件(美国 IBM 公司), 分别比较了在 2011 年国务院批复的《重金属污染综合防治“十二五”规划》实施前后河湖水体溶解态重金属来源的变化以及四大经济区域水体溶解态重金属来源的差异.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 重金属污染趋势和来源随时间变化特征

中国的河湖水体 5 种溶解态重金属浓度中, Cd(2005—2014 年)、As(2005—2014 年)、Pb(2010—2014 年)超过 GB3838—2002 的地表水 III 类水质标准值(表 2), 而其他重金属均低于此标准. 河湖水体溶解态重金属浓度在 4 个年份组(1980—2004 年、2005—2009 年、2010—2014 年和 2015—2016 年)之间差异明显. 例如, Cd 浓度在 2010—2014 年份组最高($30.50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 而在 1980—2004 年份组最低($1.12 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). 在所选取的河湖水体中, 以山西汾河、云南滇池和浑水海、黑龙江克钦湖和仙鹤湖、西藏

冰湖和小柴旦湖等的污染最为严重.2007年,云南泚江水体溶解态重金属 Cd、Pb、As 的浓度分别达到 10.46、20.81、2.36 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[20].2010年,黑龙江克钦湖水体溶解态重金属 Cd、Pb、As 的浓度更高达120.3、442、5380 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[45].Mann-Kendall 趋势检验结果表明,在 1980—2016 年间,水体溶解态 Cd、Zn 和 As 浓度呈升高趋势,而 Pb 和 Cu 浓度呈下降趋势(表 2).可见,我国的河湖水体重金属污染总体趋势还在增加,污染形势依然严峻.

表 2 中国河湖水体溶解态重金属浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)及 Mann-Kendall(M-K)检验

Table 2 Dissolved heavy metal concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), sample number (SN) in river and lake water in China and Mann-Kendall test results from the 1980 to 2016

重金属 Heavy metals	Cd	Pb	Zn	Cu	As
1980—2004					
平均值±标准误 Mean ± SE	1.12±1.02	15.53±8.43	44.50±19.62	61.80±56.72	5.36±3.65
样本数 SN	9	7	6	8	4
2005—2009					
平均值±标准误 Mean ± SE	6.42±4.76	4.75±0.79	100.99±52.93	10.25±1.01	71.90±60.99
样本数 SN	53	54	66	69	37
2010—2014					
平均值±标准误 Mean ± SE	30.50±10.57	95.30±36.63	39.09±11.05	51.15±29.10	1469.79±664.39
样本数 SN	22	25	21	27	12
2015—2016					
平均值±标准误 Mean ± SE	1.18±0.59	30.84±23.08	47.80±40.31	41.44±14.75	5.76±2.57
样本数 SN	9	10	9	11	8
1980—2016					
M-K 检验 M-K text	1.02	-0.34	0.34	-0.34	1.02
样本数 SN	93	96	102	115	61
GB3838—2002					
地表水Ⅲ类水质标准 Standards for grade III surface water	5	50	1000	1000	50

在时间尺度上的 PCA 分析结果表明,1980—2010 年间,成分轴特征值大于 1 的 2 个污染因子累计百分数为 72.58%.其中,农业和工业排放是河湖水体溶解态重金属的主要污染源,两者对重金属污染的贡献值超过 92.83%.2011—2016 年间,成分轴特征值大于 1 的 2 个污染因子累计百分数为 60.13%.其中,生活和自然排放是这一时期的主要污染源,两者对重金属污染的贡献值超过 60.73%(表 3).有研究表明,2005 年,开采冶炼是云南湖泊水库重金属污染的主要来源^[15].而在工业上广泛使用的建筑材料混凝土在 30 d 内重金属 Cr、As、Ni、Cd 的释放量分别达到 4.43、0.46、1.50、0.02 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[71],可见工业上重金属排放量之大.2012 年中央一号文件《中共中央、国务院关于进一步推进农业科技创新持续增强农产品供给保障能力的若干意见》要求,加快农业面源污染治理,推进农业清洁生产,引导农民合理使用化肥农药.

表 3 中国河湖水体溶解态重金属主要来源

Table 3 Main sources of dissolved heavy metals in river and lake water in China

重金属种类 Heavy metal species	1980—2010 年		2011—2016 年	
	PC1	PC2	PC1	PC2
Cd	0.88	-0.09	-0.11	0.88
Pb	0.45	0.44	0.27	0.26
Zn	0.84	-0.25	0.81	-0.05
Cu	0.05	-0.10	0.83	-0.29
As	0.95	0.06	0.48	0.64
Eigenvalue	2.60	1.03	1.67	1.33
Cumulative percentage	51.90	72.58	33.46	60.13
Possible sources a	IE/AE	DWE	NE/DWE	AE/IE
Contribution percentage/%	92.83	7.17	60.73	39.27

注: ^aNE,自然排放 natural emissions; AE,农业排放 agricultural emissions; IE,工业排放 industrial emission; DWE,生活排放 domestic waste emission.

根据中华人民共和国国家统计局统计数据,2011—2016 年间全国农药使用增长趋势得以控制,基

本稳定在每年 1.78×10^9 — 1.80×10^9 kg.相反,生活中重金属废弃物排放却在持续增长.随着人口增长和城市化进程,2011—2015 年间城市生活废水的排放总量在逐年增涨(6.59×10^{13} — 7.35×10^{13} kg)(中华人民共和国国家统计局).此外,有研究发现,夏季的成都市区生活垃圾中 Cd、Pb、Cu 的含量分别达到 30.05—65.29、0.39—0.86、89.37—125.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中以餐厨、塑料、餐纸、包装纸和尘土为主^[72].可见,随着时间的变化,河湖水体重金属污染来源已由工农业排放转变成了自然和生活废弃物排放.

2.2 重金属污染趋势和来源的空间变化特征

河湖水体 5 种溶解态重金属浓度在四大经济区域之间差异明显,其中东北地区水体溶解态 Cd、Pb、As 和中部地区水体 Cd、As 均超过 GB3838—2002 中地表水Ⅲ类水质标准值(图 2).总体来讲,河湖水体 5 种溶解态重金属平均浓度在东北地区最高,中部地区次之,西部和东部地区最低.如东北地区的河湖水体溶解态 Cd、Pb 和 As 浓度分别高达 GB3838—2002 中地表水Ⅲ类水质标准值的 14 倍、4 倍和 53 倍,中部地区水体溶解态 Cd、Fe 和 As 也分别达到此标准值的 2 倍、6 倍和 4 倍,而东部和西部地区的水体溶解态重金属均低于此标准.

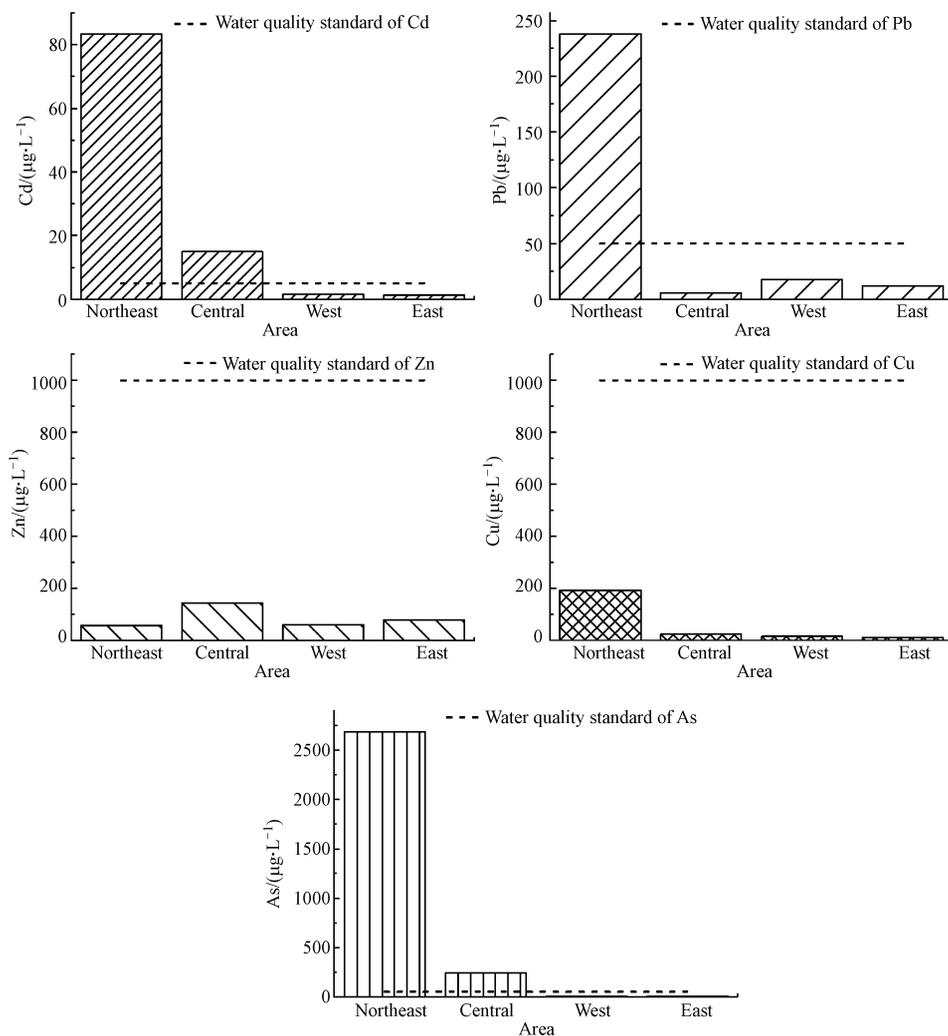


图 2 中国四大经济区域的河湖水体 5 种溶解态重金属平均浓度及 GB3838—2002 中地表水Ⅲ类水质标准值(水平虚线表示)

Fig.2 Mean concentrations of five dissolved heavy metals in river and lake water in four economic regions in China and heavy metal concentration standards for the grade III surface water quality in GB3838—2002 (dashed line)

在空间尺度上的 PCA 分析结果表明,东北区域,成分轴特征值大于 1 的 3 个污染因子累计百分数为 100%,农业和生活排放是这一地区河湖水体溶解态重金属的主要污染源,两者对重金属污染的贡献值超过 58.16%.在中部区域,成分轴特征值大于 1 的 3 个污染因子累计百分数为 90%,工业和生活排放

是这一地区主要的污染源,两者对重金属污染的贡献值超过 71.76%。在西部区域,成分轴特征值大于 1 的 2 个污染因子累计百分数为 65.68%,农业排放是这一地区主要的重金属污染源,其贡献值超过 73.23%。在东部区域,成分轴特征值大于 1 的 2 个污染因子累计百分数为 80.75%,工业、生活和农业排放均是河湖水体溶解态重金属的主要污染源,三者的贡献率比较均衡(表 4)。可见,河湖水体溶解态重金属污染的主要来源在四大经济区域之间差异显著。这种不同区域之间重金属污染来源的差异也体现了各地区在工业生产、农业发展及生活水平上的差异。如在东部地区,有研究指出,上海太浦河水体重金属主要来自于周边工业排放^[2],而福建九龙江的重金属来源种类较多包括生活、农业及自然排放^[21]。

表 4 中国四大经济区域的河湖水体溶解态重金属主要来源

Table 4 Main sources of dissolved heavy metals in river and lake water in four economic regions in China

重金属种类 Heavy metal species	东北 Northeast region			中部 Central region			西部 Western region		东部 Eastern region	
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC1	PC2
Cd	0.74	-0.24	-0.63	0.94	-0.03	0.26	0.97	0.04	0.91	-0.33
Pb	0.58	0.79	0.19	-0.20	0.64	0.69	-0.08	0.66	0.87	-0.41
Zn	0.60	-0.02	0.80	0.94	-0.07	0.30	0.98	0.08	0.41	0.83
Cu	0.11	0.93	-0.34	0.16	0.84	-0.43	0.01	0.82	0.69	0.52
As	-0.91	0.41	0.10	0.72	0.12	-0.45	-0.17	0.47	0.76	-0.06
Eigenvalue	2.08	1.73	1.20	2.34	1.14	1.02	1.95	1.34	2.80	1.23
Cumulative percentage	41.57	76.08	100.00	46.74	69.51	90.00	38.99	65.68	56.07	80.75
Possible sources ^a	DWE/AE	IE	AE	IE/DWE	IE	DWE	AE	IE	IE/DWE	AE
Contribution percentage/%	58.16	36.40	5.44	71.76	9.31	18.93	73.23	26.77	45.60	54.40

注: ^aNE,自然排放 natural emissions; AE,农业排放 agricultural emissions; IE,工业排放 industrial emission; DWE,生活排放 domestic waste emission.

2.3 重金属污染防控

针对严重的水体重金属污染,国内外出台了一系列政策,旨在控制水体重金属的来源。2008年修订的《中华人民共和国水污染防治法》要求,淘汰严重污染水环境的落后工艺和设备;2011年国务院批复的《重金属污染综合防治“十二五”规划》明确提出要严格监管采矿冶炼和金属制造业。在欧盟,相关政策要求,电子电气设备的生产者在废弃物回收处理中需要承担主要责任,包括产品的回收与利用,并分担废弃产品的回收处理费用^[73]。在荷兰,严格限定了磷肥中重金属添加,要求 Cd 含量的最高值为 35 mg·kg⁻¹,其次采用生物制剂(如多肽寡聚物)和生物防治来逐步替代化学农药制剂^[74-76]。

此外,在重金属污染的处理上,目前有物理、化学和生物等方法的研究运用。对物理方法而言,一些新材料已广泛用于吸附水体重金属。如硅胶-聚合胺复合材料可以提取废水中 99%的 Cu²⁺^[77],静电纺丝化的二氧化钛纳米纤维可使废水中的 Pd²⁺浓度降低 99.9%^[78]。对化学方法而言,用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)能移除废水中 99.6%的 Cd²⁺^[79],碱性试剂石灰(CaCO₃)和氢氧化钠(NaOH)能有效降低废水中 Cr 的浓度^[80]。对生物方法而言,红缘层孔菌对重金属 Cd 浓度为 10 mmol·L⁻¹的污水富集浓度为 130.2 mg·g⁻¹^[81];凤眼莲在 15d 内对污水中 Cd、Cu、Pb 的去除率分别可达到 98%、96%、78.5%^[82]。可见,物理、化学和生物方法在重金属污染处理方面都有各自的特点。其中,物理和化学方法处理效果很好,适用于工业和生活污水,而前者处理成本偏高,难以推广,后者若处理不当,可能造成二次污染;生物方法是一种绿色、可持续的处理技术,应用成本较低,操作简单,易推广,适用于农业污染,但对生物种类和数量要求高,稳定性差且不易回收^[83-84]。因此,针对不同的重金属污染源,可以合理地采用物理、化学和生物措施治理重金属污染。

3 结论与展望(Conclusion and prospect)

(1) 在 1980—2016 年间,我国河湖水体溶解态重金属污染依然严重,在东北和中部地区 Cd 和 As

浓度均超过 GB3838—2002 的地表水Ⅲ类水质标准值,而在东部和西部未见超标现象。随着时间的变化,水体重金属污染来源已由工农业排放向自然及生活排放转变,因此应重点防控生活废弃物污染。在四大经济区域间重金属污染来源差异明显,比如在东北地区以农业和生活排放为主,中部地区以工业和生活排放为主,应实施有针对性的措施来防控重金属污染。

(2)本研究揭示了河湖水体溶解态重金属污染趋势及污染来源,科学认识我国重金属污染形势提供了有力支撑。然而,在自然界,水体中重金属除了以溶解态存在以外,还以悬浮态、颗粒态等形态赋存,且不同形态重金属之间存在转换关系,明确水体重金属总量及形态特征是全面认识河湖水体重金属污染的基础,因此在以后的研究中应对水体重金属做全方位解析。

参考文献 (References)

- [1] 晏闻博,柳丹,彭丹莉,等.重金属矿山生态治理与环境修复技术进展[J].浙江农林大学学报,2015,32(3):467-477.
YAN W B, LIU D, PENG D L, et al. Technology advances of ecological restoration and environmental remediation of heavy metal mines [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2015, 32(3): 467-477 (in Chinese).
- [2] 王漫漫.太湖流域典型河流重金属风险评估及来源解析[D].南京:南京大学,2016.
WANG M M. Risk assessment and source apportionment of heavy metals in typical rivers of Taihu basin [D]. Nanjing: Nanjing University, 2016 (in Chinese).
- [3] THORP V J, LAKE P S. Pollution of a Tasmanian River by mine effluents. II. distribution of macroinvertebrates [J]. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1973, 58(6): 885-892.
- [4] ZHANG S, DONG W J, ZHANG L C, et al. Geochemical characteristics of heavy metals in the Xiangjiang River, China [J]. Hydrobiologia, 1989, 176-177(1): 253-262.
- [5] 罗伟权.珠江口海域重金属污染浅析[J].海洋通报,1984,3(5):64-69.
LUO W Q. Preliminary analysis of heavy metals pollution in the Zhujiang River (Pearl River) estuarine area [J]. Marine Science Bulletin, 1984, 3(5): 64-69 (in Chinese).
- [6] 陈喜保,章申.湘江水体中重金属的化学形态及分布特征的研究[J].环境科学学报,1986,6(2):131-140.
CHEN X B, ZHANG S. A study on chemical speciation and distribution characteristics of heavy metals in Xiangjiang River water [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1986, 6(2): 131-140 (in Chinese).
- [7] HUANG W W, MARTIN J M, SEYLER P, et al. Distribution and behaviour of arsenic in the Huanghe (Yellow River) Estuary and Bohai Sea [J]. Marine Chemistry, 1988, (25): 75-91.
- [8] 史香爽.海河干流水体中重金属元素地球化学及时空分布特征[D].天津:天津师范大学,2014.
SHI X S. The time and space distribution and geochemical characteristics of heavy metals in Haihe River trunk stream water [D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2014 (in Chinese).
- [9] 王辉,孙丽娜,刘哲,等.浑河水环境健康风险特征研究[J].生态毒理学报,2015,10(2):394-402.
WANG H, SUN L N, LIU Z, et al. Study on the character of health risk in the water environment of Hun River [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2015, 10(2): 394-402 (in Chinese).
- [10] 闫露霞,孙美平,姚晓军,等.青藏高原湖泊水质变化及现状评价[J].环境科学学报,2018,38(3):900-910.
YAN L X, SUN M P, YAO X J, et al. Lake water in the Tibet Plateau: Quality change and current status evaluation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(3): 900-910 (in Chinese).
- [11] DE M E, IRIBARREN I, CHACON E, et al. Risk-based evaluation of the exposure of children to trace elements in playgrounds in Madrid (Spain) [J]. Chemosphere, 2007, 66(3): 505-513.
- [12] MUHAMMAD S, SHAH M T, KHAN S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region, northern Pakistan [J]. Microchemical Journal, 2011, 98(2): 334-343.
- [13] 刘小兰,贺传奇,罗玉龙.几种典型重金属污染对环境的危害[J].科技创新导报,2015,12(16):117.
LIU X L, HE C Q, LUO Y L. Harm of several typical heavy metal pollution to environment [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(16): 117 (in Chinese).
- [14] 徐连伟,曲婷婷,赵彦涛.水产品中重金属污染的来源危害及防治措施[J].农业与技术,2018,38(1):30-32.
XU L W, QU T T, ZHAO Y T. Source harm and prevention measures of heavy metal pollution in aquatic products [J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(1): 30-32 (in Chinese).
- [15] 刘总堂,李春海,章钢娅.运用主成分分析法研究云南湖库水体中重金属分布[J].环境科学研究,2011,23(4):459-466.
LIU Z T, LI C H, ZHANG G Y. Application of principal component analysis to the distributions of heavy metals in the water of lakes and reservoirs in Yunnan Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 23(4): 459-466 (in Chinese).
- [16] 张鸿龄,孙丽娜,赵国苹.运用主成分分析法评价浑河水体中重金属污染来源[J].沈阳大学学报(自然科学版),2012,24(5):5-9.
ZHANG H L, SUN L N, ZHAO G P. Sources of heavy metals in surface water from Hunhe River by principal component analysis [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science Edition), 2012, 24(5): 5-9 (in Chinese).
- [17] 刘静,马克明,曲来叶.湛江红树林湿地水体重金属污染评价及来源分析[J].水生态学杂志,2018,39(1):23-31.
LIU J, MA K M, QU L Y. Heavy metal pollution assessment and source analysis in the water of Zhanjiang mangrove swamp [J]. Journal of Hydroecology, 2018, 39(1): 23-31 (in Chinese).

- [18] 胡成, 苏丹, 张利红, 等. 基于主成分分析法的辽河水体中溶解性金属来源分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(4): 22-27.
HU C, SU D, ZHANG L H, et al. Principal component analysis (PCA) for estimation the source of dissolvable metal in Liaohe River[J]. Environmental Pollution and Control, 2012, 34(4): 22-27 (in Chinese).
- [19] 曹斌, 何松洁, 夏建新. 重金属污染现状分析及其对策研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2009, 18(1): 29-33.
CAO B, HE S J, XIA J X. The actuality analysis of pollution for heavy metal and its countermeasure research[J]. Journal of the CUN (Natural Sciences Edition), 2009, 18(1): 29-33 (in Chinese).
- [20] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 滇西珠江流域水体中重金属元素的地球化学特征[J]. 地质通报, 2008, 27(7): 1071-1078.
LI R P, WANG A J, CAO D H, et al. Geochemical characteristics of heavy metals in water bodies and sediments of the Bijiang River drainage area[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(7): 1071-1078 (in Chinese).
- [21] 张莉, 祁士华, 瞿程凯, 等. 福建九龙江流域重金属分布来源及健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2014, 32(8): 2133-2139.
ZHANG L, QI S H, QU C K, et al. Distribution, source and health risk assessment of heavy metals in the water of Jiulong River, Fujian [J]. China Environmental Science, 2014, 32(8): 2133-2139 (in Chinese).
- [22] 万金保, 闫伟伟, 谢婷. 鄱阳湖流域乐安河重金属污染水平[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 421-427.
WANG J B, YAN W W, XIE T. Research on heavy metal pollution status of Le'an River, Lake Poyang basin[J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(4): 421-427 (in Chinese).
- [23] 杨忠芳, 夏学齐, 余涛, 等. 湖南洞庭湖水系 As 和 Cd 等重金属元素分布特征及输送通量[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 897-908.
YANG Z F, XIA X Q, YU T, et al. Distribution and fluxes of As and trace metals in the Dongting Lake water system, Hunan province, China[J]. Geoscience, 2008, 22(6): 897-908 (in Chinese).
- [24] 程晨, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海市黄浦江水源地重金属铅、镉多介质富集特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(10): 948-953.
CHENG C, CHEN Z L, BI C J, et al. Accumulate characteristics of lead, cadmium in drinking water sources of Huangpu River, Shanghai [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(10): 948-953 (in Chinese).
- [25] 李晓燕. 云南大红山铜矿周围河流和土壤中 Cu 等重金属元素分布特征研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
LI X Y. Study on distribution characteristics of Cu and other heavy metal elements in rivers and soil around the Dahongshan copper mine in Yunnan Province [D]. Beijing: Capital Normal University, 2009 (in Chinese).
- [26] 李永丽, 刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1177-1184.
LI Y L, LIU J L. Health risk assessment on heavy metal pollution in the water environment of Luan River[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1177-1184 (in Chinese).
- [27] 孙超, 陈振楼, 张翠, 等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(1): 60-65.
SUN C, CHEN Z L, ZHANG C, et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(1): 60-65 (in Chinese).
- [28] 李鸣, 刘琪璟, 周文斌. 鄱阳湖流域水体重金属污染物健康风险评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(32): 18278-18280.
LI M, LIU Q J, ZHOU W B. Assessment on health risks associated with heavy metal pollutants for water environment of watersheds of Poyang Lake[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2010, 38(32): 18278-18280 (in Chinese).
- [29] CUI B, ZHANG Q, ZHANG K, et al. Analyzing trophic transfer of heavy metals for food webs in the newly-formed wetlands of the Yellow River Delta, China[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(5): 1297-1306.
- [30] 龚玲兰. 山西汾河河流生态地球化学特征与重金属污染机制[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
GONG L L. The characteristics of eco-geochemistry and heavy metals pollution in Fenhe river in Shanxi province [D]. Changsha: Central South University, 2011 (in Chinese).
- [31] 张晓军, 胡明安. 大冶铁山地区河流水体及水系沉积物中重金属元素分布特征[J]. 地质科技情报, 2006, 25(2): 89-92.
ZHANG X J, HU M A. Heavy metal distribution of creek water and its sediments in Tieshan, Daye, Hubei Province [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(2): 89-92 (in Chinese).
- [32] 邓金川, 顾敏敏, 陈棉彪, 等. 广州河涌污染物调查及重金属污染物之间的相关性[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2016, 29(4): 38-43.
DENG J C, GU M M, CHEN M B, et al. Investigation of pollutants in Guangzhou River and their correlation with the heavy metals [J]. Journal of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2016, 29(4): 38-43 (in Chinese).
- [33] 张香群, 王克勤, 华锦欣, 等. 尖山河小流域尖山河重金属分布[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(2): 42-48.
ZHANG X Q, WANG K Q, HUA J X, et al. The distribution of heavy metals in Jianshan River of Jianshan River watershed [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2016, 36(2): 42-48 (in Chinese).
- [34] 程鹏, 李叙勇. 洋河流域不同时空水体重金属污染及健康风险评价[J]. 环境工程学报, 2017, 11(8): 4513-4519.
CHENG P, LI X Y. Heavy metals pollution and related health risk assessment of Yang River: Spatial and temporal variation [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(8): 4513-4519 (in Chinese).
- [35] 王艺涵, 刘胤序, 刘海红, 等. 青海典型内陆河流域地表水化学组成及其重金属分布特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 734-742.
WANG Y H, LIU Y X, LIU H H, et al. Chemical composition and heavy metal distribution in surface water of typical inland rivers in Qinghai [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(3): 734-742 (in Chinese).
- [36] 刘晖, 张昭, 李伟. 梁子湖水体和底泥中微量元素及重金属的空间分布格局及污染评价[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(S1): 105-111.
LIU H, ZHANG Z, LI W. Assessment and spatial patterns of trace elements and heavy metals from water body and sediments in the Liangzi Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(S1): 105-111 (in Chinese).
- [37] ELBAZ-POULICHET F, MARTIN J M, HUANG W W, et al. Dissolved Cd behaviour in some selected french and chinese estuaries. Consequences on Cd supply to the ocean [J]. Marine Chemistry, 1987, 22: 125-136.

- [38] MARTIN J M, GUAN D M, ELBAZ-POULICHET F, et al. Preliminary assessment of the distributions of some trace elements (As, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn) in a pristine aquatic environment; the Lena River estuary (Russia) [J]. *Marine Chemistry*, 1993, 43: 185-199.
- [39] 曾清如,杨仁斌,铁柏青,等.郴县东西河流域重金属污染农田的防治技术和生态利用模式[J].*农业环境保护*,2002,21(5):428-431.
ZENG Q R, YANG R B, TIE B Q, et al. Control of pollution of heavy metals on farmland by ecological engineering in east and west valley in Chen county [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 428-431 (in Chinese).
- [40] 吴攀,刘从强,张国平,等.黔西北炼锌地区河流重金属污染特征[J].*农业环境保护*,2002,21(5):443-446.
WU P, LIU C Q, ZHANG G P, et al. Characteristics of heavy metal pollution in stream of zinc smelting area, northwest of Guizhou [J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5): 443-446 (in Chinese).
- [41] FAN Q Y, HE J, XUE H X, et al. Heavy metal pollution in the Baotou section of the Yellow River, China [J]. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 2008, 20(2): 65-76.
- [42] 张鸿龄,孙丽娜,罗庆,等.浑河流域水体污染的季节性变化及来源[J].*生态学杂志*,2011,30(1):119-125.
ZHANG H L, SUN L N, LUO Q, et al. Seasonal variations and sources of pollutants in surface water of Hunhe River [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(1): 119-125 (in Chinese).
- [43] LI S, ZHANG Q. Risk assessment and seasonal variations of dissolved trace elements and heavy metals in the Upper Han River, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1-3): 1051-1058.
- [44] 刘凤,李梅,张荣飞,等.拉萨河流域重金属污染及健康风险评估[J].*环境化学*,2012,31(5):580-585.
LIU F, LI M, ZHANG R F, et al. Pollution analysis and health risk assessment of heavy metals in Lhasa River [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(5): 580-585 (in Chinese).
- [45] 吴彬,臧淑英,李苗.克钦湖水体重金属分布特征及评价[J].*中国农学通报*,2012,28(5):289-294.
WU B, ZANG S Y, LI M. The distribution features and evaluation analysis of heavy metals in Keqin Lake [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(5): 289-294 (in Chinese).
- [46] WANG Z, YOA L, LIU G, et al. Heavy metals in water, sediments and submerged macrophytes in ponds around the Dianchi Lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 107: 200-206.
- [47] 岳荣,张红,史锐,等.乌梁素海水体重金属元素统计分布特征研究[J].*安徽农业科学*,2015,43(31):376-379.
YUE R, ZHANG H, SHI R, et al. Research on statistical distribution characteristics of heavy metals in Wuliangsu Lake [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2015, 43(31): 376-379 (in Chinese).
- [48] 蔡晓强,高强立.基于内梅罗指数法评价开封市湖泊水质污染特征[J].*吉林农业*,2016(11):82-83.
CAI X Q, GAO Q L. Characteristics of lake water pollution in Kaifeng City were evaluated based on Nemerow index method [J]. *Agriculture of Jilin*, 2016 (11): 82-83 (in Chinese).
- [49] 陆健刚,钟燮,吴海真,等.不同流速下湖泊水体重金属含量垂向分布特征[J].*农业机械学报*,2016,47(2):179-184.
LU J G, ZHONG X, WU H Z, et al. Vertical distribution characteristics of heavy metals in lake under different hydrodynamic conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(2): 179-184 (in Chinese).
- [50] 田林锋,胡继伟,秦樊鑫,等.基于统计的百花湖表层水中重金属分布特征[J].*环境科学研究*,2011,24(3):259-267.
TIAN L F, HU J W, QIN F X, et al. Statistical analysis of distribution characteristics of heavy metals in surface water from Baihua Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(3): 259-267 (in Chinese).
- [51] JIANG X, WANG W, WANG S, et al. Initial identification of heavy metals contamination in Taihu Lake, a eutrophic lake in China [J]. *Journal of Environmental Science (China)*, 2012, 24(9): 1539-1548.
- [52] 孟祥琪.滇池水域重金属污染的历史追溯及生态风险评估[D].昆明:昆明理工大学,2016.
MENG X Q. Distributions, historical trends and potential risk assessment of heavy metals in Dianchi Lake, China [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016 (in Chinese).
- [53] YU T, ZHANG Y, HU X N, et al. Distribution and bioaccumulation of heavy metals in aquatic organisms of different trophic levels and potential health risk assessment from Taihu lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 81: 55-64.
- [54] 孙清展,臧淑英.水体重金属污染评价方法对比研究——以扎龙湿地湖水为例[J].*农业环境科学学报*,2012,31(11):2242-2248.
SUN Q Z, ZANG S Y. Pollution evaluation and forecast of heavy metal in lake of Zhalong wetland, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2242-2248 (in Chinese).
- [55] 毛欣,陈旭,李长安,等.大冶市城市湖泊表层水体中重金属的分布特征及其来源[J].*安全与环境工程*,2013,20(5):33-37.
MAO X, CHEN X, LI C A, et al. Distribution of heavy metal elements in surface water from three lakes in Daye City [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(5): 33-37 (in Chinese).
- [56] 张静娴.晋阳湖水体及沉积物中重金属分布特征及农用研究[D].太原:山西大学,2013.
ZHANG X J. The research on distribution characteristics of heavy metals and agricultural application in water and sediment of Jinyang Lake [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013 (in Chinese).
- [57] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [58] KENDALL M G. Rank correlation methods [J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [59] GAO Q, LI Y, CHENG Q, et al. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013 [J]. *Water Research*, 2016, 92: 262-274.
- [60] SHARLEY D J, SHARP S M, BOURGUES S, et al. Detecting long-term temporal trends in sediment-bound trace metals from urbanised catchments [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 705-713.
- [61] KISI O, AY M. Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 362-375.

- [62] MONDAL A, KUNDU S, MUKHOPADHYAY A. Rainfall trend analysis by Mann-Kendall test: A case study of North-Eastern part of Cuttack district, Orissa[J]. *International Journal of Geology*, 2012, 2(1): 70-78.
- [63] LARSEN R K, BAKER J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: A comparison of three methods[J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(9): 1873-1881.
- [64] 朴河春,袁芷云,洪业汤.碳及重金属在岩石风化过程中释放规律的初步研究[J].*地球化学*,1987,9(3):269-273.
PIAO H C, YUAN Z Y, HONG Y T. A preliminary study of the rule of release of carbon and heavy metals during weathering of rocks[J]. *Geochimica*, 1987, 9(3): 269-273 (in Chinese).
- [65] SOARES S F D, MOURA N B D A S, MAZUR N, et al. Heavy metals contamination in soil and plants by intensive use of pesticides and fertilizers[C]. 17th WCSS, 2002, 29, 1441: 1-6.
- [66] 王起超,麻壮伟.某些市售化肥的重金属含量水平及环境风险[J].*生态与农村环境学报*,2004,20(2):62-64.
WANG Q C, MA Z W. Heavy metals in chemical fertilizer and environmental risks[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(2): 62-64 (in Chinese).
- [67] ATAFAR Z, MESDAGHINIA A, NOURI J, et al. Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1-4): 83-89.
- [68] 张家旗.我国省域工业废水重金属排放绩效研究[D].开封:河南大学,2014.
ZHANG J Q. Research on the performance of heavy metal emissions from industrial wastewater in China[D]. Kaifeng: Henan University, 2014 (in Chinese).
- [69] 孙玉焕,骆永明,吴龙华,等.长江三角洲地区城市污水污泥重金属含量研究[J].*环境保护科学*,2009,35(4):26-29,37.
SUN Y H, LUO Y H, WU L H, et al. Heavy metals concentration in sewage sludge of Yangtze River delta[J]. *Environmental Protection Science*, 2009, 35(4): 26-29, 37 (in Chinese).
- [70] 李娟英,陈洁芸,沈燕萍,等.污水污泥及其浸出液重金属污染的化学分析与评价[J].*安全与环境学报*,2013,13(3):115-121.
LI J Y, CHEN J Y, SHEN Y P, et al. Chemical analysis and assessment of the heavy metal pollution in the sewage sludge and leaching solution[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(3): 115-121 (in Chinese).
- [71] 杨玉飞,黄启飞,张霞,等.废物水泥窑共处置产品中重金属释放量研究[J].*环境科学*,2009,30(5):1539-1544.
YANG Y F, HUANG Q F, ZHANG X, et al. Release amount of heavy metals in cement product from co-processing waste in cement kiln [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(5): 1539-1544 (in Chinese).
- [72] 银燕春,王莉淋,肖鸿,等.成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J].*环境工程学报*,2015,9(1):392-400.
YING C Y, WANG L L, XIAO H, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in urban, suburban and rural domestic waste of Chengdu, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(1): 392-400(in Chinese).
- [73] KELESSIDIS A, STASINAKIS A S. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries[J]. *Waste Management*, 2012, 32(6): 1186-1195.
- [74] ANON. Cadmium in phosphates: One part of a wider environmental problem[J]. *Phosphorus and Potassium*, 1989, 162: 23-30.
- [75] WYCKHUYS K A G, LU Y H, MORALES H, et al. Current status and potential of conservation biological control for agriculture in the developing world[J]. *Biological Control*, 2013, 65: 152-167.
- [76] MONTEIRO S, CARREIRA A, FREITAS R, et al. A nontoxic polypeptide oligomer with a fungicide potency under agricultural conditions which is equal or greater than that of their chemical counterparts[J]. *Plos One*, 2015, 10(4): e0122095.
- [77] FISCHER R, PANG D, BEATTY S, et al. Silica-polyamine composite materials for heavy metal ion removal, recovery, and recycling. II metal ion separations from mine wastewater and soft metal ion extraction efficiency[J]. *Separation Science and Technology*, 1999, 34: 3125-3137.
- [78] DAI Y, FORMO E, LI H, et al. Surface-functionalized electrospun titania nanofibers for the scavenging and recycling of precious metal ions [J]. *ChemSusChem*, 2016, 9: 1-6.
- [79] FUENTES A, MERCEDES L, JOSE S, et al. Simple and sequential extractions of heavy metals from different sewage sludges [J]. *Chemosphere*, 2004, 54: 1039-1047.
- [80] MIRBAGHERI S A, HOSSEINI S N. Pilot plant investigation on petrochemical wastewater treatment for the removal of copper and chromium with the objective of reuse[J]. *Desalination*, 2005, 171(1): 85-93.
- [81] GABRIEL J, VSAHLO J, BALDRIAN P. Biosorption of cadmium to mycelial pellets of wood-rotting fungi [J]. *Biotechnology Techniques*, 1996, 10(5):345-348.
- [82] 刘美伶.凤眼莲对有机氯农药与重金属复合污染水体的修复效果研究[D].重庆:重庆大学,2017.
LIU M L. Removal of otgano-chlorine pesticide and heavy metals in waterbody by water hyacinth[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017(in Chinese).
- [83] 何苗苗,胡晓钧,宋雪英.水体重金属污染的处理方法简述[J].*环境保护与循环经济*,2014,34(3):50-52.
HE M M, HU X Y, SONG X Y. Brief description of treatment methods for heavy metal pollution in water bodies[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2014, 34(3): 50-52(in Chinese).
- [84] AHLUWALIA S S, GOYAL D. Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(12): 2243-2257.