



引文格式: 蔡春霞, 贾晓丹, 鲍国臣, 等. 典型燃煤电厂大气污染物沉降对周边水源地的影响及贡献研究[J]. 西北地质, 2024, 57(1): 64-72. DOI: 10.12401/j.nwg.2023128

Citation: CAI Chunxia, JIA Xiaodan, BAO Guochen, et al. Impact and Contribution of Atmospheric Pollutant Deposition from a Typical Power Plant on Surrounding Water Sources[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 64-72. DOI: 10.12401/j.nwg.2023128

## 典型燃煤电厂大气污染物沉降对周边水源地的影响及贡献研究

蔡春霞<sup>1</sup>, 贾晓丹<sup>2,\*</sup>, 鲍国臣<sup>1</sup>, 曹竞心<sup>1</sup>, 黄博雅<sup>1</sup>, 王忠臣<sup>1</sup>

(1. 北京国寰环境技术有限责任公司, 北京 100012; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心 / 西北地质科技创新中心, 陕西西安 710119)

**摘要:** 为揭示燃煤电厂大气污染物排放对周边水环境的影响, 以典型燃煤电厂为研究对象, 分析了 2008~2020 年电厂大气污染物(烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub> 和颗粒物重金属)及电厂周边典型水库的水质, 并估算了电厂大气污染物排放与水库水质的相关性及其对水库水体中硫化物、氮氧化物和重金属的贡献。结果显示, 2008~2020 年电厂烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和重金属(Hg、Cu、Zn、As、Cd、Cr 和 Pb)的排放量整体呈下降趋势, 2015~2020 年 NH<sub>3</sub> 的排放量呈波动状态; 2008~2020 年黄壁庄水库入口和中心处的水质均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)II 类水质标准以上, 水库入口和中心处水体中的重金属含量与电厂烟尘重金属排放量呈显著相关。CALPUFF 模型结果显示, 该燃煤电厂排放的 SO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>x</sub>、HNO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub>、Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 沉降到黄壁庄水库水面进入水中转化生成的水污染物 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HNO<sub>3</sub>、NH<sub>3</sub>-N、Hg、As、Cd、Cr<sup>6+</sup>、Cu、Pb 和 Zn 贡献浓度分别为 3.35×10<sup>-3</sup> mg/L、5.86×10<sup>-3</sup> mg/L、5.88×10<sup>-4</sup> mg/L、3.73×10<sup>-7</sup> mg/L、1.32×10<sup>-5</sup> mg/L、7.46×10<sup>-10</sup> mg/L、7.56×10<sup>-7</sup> mg/L、2.16×10<sup>-7</sup> mg/L、9.48×10<sup>-8</sup> mg/L 和 8.66×10<sup>-6</sup> mg/L, 各项污染物的占标率的大小排序为 Hg>NH<sub>3</sub>-N>HNO<sub>3</sub>>As>Cr<sup>6+</sup>>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>>Pb>Zn>Cu>Cd。

**关键词:** 燃煤电厂; 大气污染物; 重金属元素; 污染贡献

中图分类号: X773

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0064-09

### Impact and Contribution of Atmospheric Pollutant Deposition from a Typical Power Plant on Surrounding Water Sources

CAI Chunxia<sup>1</sup>, JIA Xiaodan<sup>2,\*</sup>, BAO Guochen<sup>1</sup>, CAO Jingxin<sup>1</sup>, HUANG Boya<sup>1</sup>, WANG Zhongchen<sup>1</sup>

(1. Beijing Guohuan Environmental Technology Co. Ltd, Beijing 100012, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

**Abstract:** To reveal the impact of atmospheric pollutant emissions from coal-fired power plants on the surrounding water environment, a typical coal-fired power plant was used as a research object to analyze the atmospheric pollutants (soot, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> and heavy metals in particulate matter) of the power plant and the water

收稿日期: 2023-02-01; 修回日期: 2023-07-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

作者简介: 蔡春霞(1980-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为环境影响评价。E-mail: 6316703@qq.com。

\* 通讯作者: 贾晓丹(1979-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为环境资源评价与保护。E-mail: jxiaodan@mail.cgs.gov.cn。

quality of typical reservoirs around the power plant from 2008 to 2020. The correlation between atmospheric pollutant emissions from power plants and reservoir water quality and their contributions to sulfide, nitrogen oxide, and heavy metals in reservoir waterbodies were estimated. The results showed that the emissions of soot,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and heavy metals (Hg, Cu, Zn, As, Cd, Cr and Pb) from the power plant showed an overall decreasing trend from 2008 to 2020, while the emissions of  $\text{NH}_3$  fluctuated from 2015 to 2020. From 2008 to 2020, the water quality at the entrance and centre of the reservoir all met the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838-2002). The heavy metal contents in the water at the entrance and centre of the reservoir were significantly correlated with the heavy metal emissions from the power plant. The results of CALPUFF model showed that water pollutants  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , Hg, As, Cd,  $\text{Cr}^{6+}$ , Cu, Pb, and Zn, which were transformed by  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NH}_3$ , Hg, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn deposited into the water surface of the reservoir from the power plant, contributed to the concentration of  $3.35 \times 10^{-3}$  mg/L,  $5.86 \times 10^{-3}$  mg/L,  $5.88 \times 10^{-4}$  mg/L,  $3.73 \times 10^{-7}$  mg/L,  $1.32 \times 10^{-5}$  mg/L,  $7.46 \times 10^{-10}$  mg/L,  $7.56 \times 10^{-7}$  mg/L,  $2.16 \times 10^{-7}$  mg/L,  $9.48 \times 10^{-8}$  mg/L,  $8.66 \times 10^{-6}$  mg/L, respectively. The order of proportion of various pollutants to standard was  $\text{Hg} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{HNO}_3 > \text{As} > \text{Cr}^{6+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd}$ .

**Keywords:** coal-fired power plant; atmospheric pollutant; heavy metal element; pollution contribution

中国作为世界上最大的煤炭生产国和消费国, 尽管能源结构在不断调整, 燃煤消耗逐年减少, 但燃煤仍是现阶段的主要能源, 2022 年中国煤炭消费量占能源消费总量的 56.2% (国家统计局, 2023)。电力和热力生产是燃煤消费的最主要渠道之一, 燃煤电厂的主要污染物包括  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟等, 可导致区域大气环境污染和酸雨等 (徐钢等, 2016; 王永英, 2019)。此外, 燃煤电厂生产过程中也会释放一定含量的重金属 (如 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Hg 等) (车凯等, 2022; 顾晨等, 2022), 这些污染物一般会吸附于颗粒物并随之以沉降的方式进入河、湖、渠、库等地表水环境以及农田、林地等土壤环境, 进而可能引起水体、土壤等污染问题, 从而破坏水体和土壤生态系统平衡 (郝素华等, 2022; 曹佰迪等, 2022; 蒋起保等, 2022)。因此, 燃煤电厂也是影响区域生态环境的重点固定污染源。对于水环境而言, 电厂燃煤过程中排放的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等污染物可影响水体中的硫化物、硝酸盐、氨氮等指标的含量, 颗粒物沉降至水体中的重金属含量也可能加重水体中重金属的含量 (潘莎等, 2019)。

黄壁庄水库是一座以防洪为主, 兼顾城市用水、灌溉、发电等综合利用的大 (I) 型水利枢纽工程, 是海河流域河北段的重要控制性工程。同时, 该水库承担着区域农业灌溉用水的任务, 也是河北省重要的大型水库型水源地 (王瑶等, 2020)。黄壁庄水库是岗南水库向南水北调应急供水的唯一途径, 其对于城市供水安全具有举足轻重的作用 (康文忠, 2022)。为了保护

黄壁庄水库饮用水水源地, 石家庄市先后出台了多项文件和政策以明确石家庄黄壁庄水库饮用水水源保护区的保护级别、范围和水质保护目标。本研究中的燃煤电厂位于黄壁庄水库西侧约 2km, 区域主导风向的上风向。

本研究聚焦于某典型燃煤电厂相关大气污染物对于黄壁庄水库的沉降贡献, 通过调查“源”的排放强度和“受体”的水环境质量, 厘清并分析电厂大气污染物沉降与黄壁庄水库相关污染物的响应关系和累积效应, 为科学判定燃煤电厂大气沉降入库污染负荷和影响程度提供支撑依据。

## 1 研究区概况

### 1.1 燃煤电厂概况

该燃煤电厂始建于 20 世纪 90 年代, 电厂现有  $4 \times 330$  MW 和  $2 \times 600$  MW 机组, 总装机容量合计 2 520 MW, 是当地电网装机容量最大的火力发电厂之一, 亦是河北省内重要的电源支撑点之一。

### 1.2 水库概况

黄壁庄水库位于石家庄市西部鹿泉区黄壁庄村附近的滹沱河干流上, 水面面积约为 4 094 万  $\text{m}^2$ , 集水面积约 23 030  $\text{km}^2$ 。库区流域范围属于温带季风气候, 太阳辐射季节性变化显著, 地面高低气压活动频繁, 四季分明, 夏秋多雨, 年内降水主要集中在 7~9 月份, 占年总降水量的 70%~80%。区内多年平均降水量

484.4 mm, 最大降水量 1211.0 mm, 最小降水量 220.0 mm。黄壁庄水库汇水范围内海拔 1 000 m 左右, 水源地保护区制高点为驼梁山, 海拔 2 281 m。黄壁庄水库上游区域主要植被类型为经济林、农田耕地、草场草地、灌木丛等(董文鹏等, 2022)。黄壁庄主要入库河流为滹沱河(岗黄区间段)与冶河。黄壁庄水库位于岗南水库下游, 岗南水库下泄水量经滹沱河(岗黄区间)入黄壁庄水库, 因此岗南水库是黄壁庄水库的重要水源补给。冶河长 39.4 km, 上游有绵河和甘陶河两条支流, 其中仅绵河常年有水, 两条支流于北横口处汇合。黄壁庄水库的主要流域汇水范围包括滹沱河、冶河、牧马河、绵河、清水河、乌河、松溪河、阳武河、云中河、永兴河、龙华河、南甸河、温河、桃河、南川河、甘陶河。研究区位置见图 1。



图1 研究区位置图

Fig. 1 The location of the study area

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与测试

对 2008~2020 年黄壁庄水库入口和中心监测点的水质进行逐月监测, 主要监测指标包括 pH 值、溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、氨氮、挥发酚、总磷、化学需氧量、阴离子洗涤剂、石油类、硫化物、铜、锌、总氰化物、氟化物、总砷、总汞、六价铬、总铅、总镉和硒等 21 项, 主要的测试方法以 X 射线荧光光谱法(XRF)、原子荧光光谱法(AFS)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)为主。

燃煤电厂污染物排放数据来自 2008~2020 年在线监测数据, 数据来源符合《固定污染源烟气(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物)排放连续监测技术规范》(HJ75-2017)和

《固定污染源烟气(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、颗粒物)排放连续监测系统技术要求及检测方法》(HJ76-2017)。

### 2.2 相关性分析

由于 Spearman 相关分析模型对数据条件的要求较低, 适用范围较广, 可满足数据条件(周永江等, 2020)。因此, 相关性分析首先采用 SPSS 22 软件中的 Spearman 相关分析模型对电厂排放大气污染物总量与对应黄壁庄水库水质指标进行相关性分析, 具体计算公式如下:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为相关系数,  $d_i$  为两个随机变量的第  $i$  个取值的差值, 即  $d_i = X_i - Y_i$ ,  $1 \leq i \leq n$ ;  $n$  为样本容量。若  $\rho$  介于 0~1 之间, 则变量间存在正相关关系; 若  $\rho$  介于 -1~0 之间, 则变量间存在负相关关系。 $\rho$  的绝对值越接近 1, 表明变量之间的相关性越强。

### 2.3 CALPUFF 模型

由于该燃煤电厂排放的大气污染物 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 进入大气后转化成中间污染物硫酸盐和硝酸盐, 因此本次预测需模拟中间产物硫酸盐、硝酸盐沉降量(于洋, 2012; 冯紫艳, 2013); 结合本次模拟干湿沉降及预测范围(城市尺度)等预测特征, 故选择 CALPUFF 模型。CALPUFF 模拟系统包括诊断风场模型 CALMET、高斯烟团扩散模型 CALPUFF 和后处理软件 CALPOST 等 3 部分。CALMET 利用质量守恒原理对风场进行诊断, 输出包括逐时风场、混合层高度、大气稳定度(PGT 分类)、微气象参数等; CALPUFF 模式可运用于静风、复杂地形等非定常条件; CALPOST 为计算结果后处理软件, 对 CALPUFF 计算的浓度进行时间分配处理, 并计算出干(湿)沉降通量、能见度等(卢燕宇等, 2017)。

CALPUFF 基本原理为高斯烟团模式, 利用在取样时间内进行积分的方法来节约计算时间, 输出主要包括地面和各指定点的污染浓度; 烟团分裂利用采样函数方法对烟团的空间轨迹、浓度分布进行描述; 烟云抬升采用 Briggs 抬升公式(浮力和动量抬升), 考虑稳定层结中部分烟云穿透, 过渡烟云抬升等因素(邹伟等, 2010)。

### 2.4 贡献浓度计算

#### 2.4.1 污染物大气沉降-水体转化系数

假设水库垂直上空大气中的污染物在整个水体为均匀分布, 则大气沉降的污染物通量转换到水体中的浓度  $C_T$  可按如下公式计算:

$$C_T = F_T \cdot S_w \cdot T/V \quad (2)$$

式中,  $C_T$ (mg/L)为大气沉降的污染物通量转换到水体中的浓度;  $F_T$ (mg/(m<sup>2</sup>·d))为总沉降通量;  $S_w$ (km<sup>2</sup>)为水域面积;  $V$ (m<sup>3</sup>)为水库库容;  $T_n$ (无量纲)为转换系数,按照大气污染物与水污染物分子量折算, n 为 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、重金属(Hg、As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn)等。

#### 2.4.2 污染物土壤-水体转化系数

依据对浙江省老虎滩水库流域的研究建立的源头溪流一维水质模型(金树权, 2008),并以此为基础建立了入河系数多目标优化模型。水质模型见下式。

$$L_e = \sum_{i=1}^n q_i [e^{-k \sum_{j=1}^n l_j}] + \frac{L_n}{kl} (1 - e^{-kl}) + \frac{C_b Q_e}{kl} (1 - e^{-kl}) \quad (3)$$

式中,  $L_e$ 为段末污染物月平均输入负荷(kg/mon);  $k$ 为单位河段污染物平均综合降解系数(1/km);  $l$ 为河段总长度(km);  $l_i$ 为第  $i$  个点源污染排放口离河流段末的长度(km);  $q_i$ 为第  $i$  个点源污染物月排放量(kg/mon);  $L_n$ 为流域内面源污染物月入河量(kg);  $C_b$ 为污染物环境背景浓度(mg/L),  $Q_e$ 为河流月累计流量(m<sup>3</sup>/mon)。

本研究只考虑面源污染项  $L_n/kl \cdot (1 - e^{-kl})$ 。根据该研究建立的模型,面源污染物输入负荷受污染物综合降解系数和面源污染物入河量的影响(宋保平等, 2013)。本研究按沉降到黄壁庄水库补给河流全部汇

水区域的污染物经地表径流、补给方式全部进入黄壁庄水库考虑,忽略水污染物在迁移过程中的衰减。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 大气沉降污染物排放状况

根据河北省地方标准《燃煤电厂大气污染物排放标准》(DB 13/2 209-2015)和《地表水环境质量标准》(GB 3 838-2002),以常见的燃煤电厂大气污染物为主要指标,结合地表水环境和燃煤中均包含的重金属元素(王毓秀等, 2019),通过烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、Hg、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Cr等排放量明确大气沉降污染物的排放状况。电厂污染物排放数据采用在线监测系统监测数据。2008~2020年该电厂的烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、Hg、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Cr年均排放量(图 2)分别为 1 271.00 t/a、4 649.81 t/a、11 411.30 t/a、68.50 t/a、0.21 t/a、0.22 t/a、4.86 t/a、0.15 t/a、1.27 kg/a、0.42 t/a、0.07 t/a,电厂的烟尘排放量在 2009 年之后逐年降低,SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>排放量在 2012~2017 年有所降低,2008~2020 年电厂烟尘、SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放量整体呈下降趋势,2015~2020 年NH<sub>3</sub>的排放量呈波动状态。电厂Cu、Zn、As、Cd、Cr和Pb的排放量均于 2009 年达到峰值之后逐年下降,Hg 排放量于 2009 年达到峰

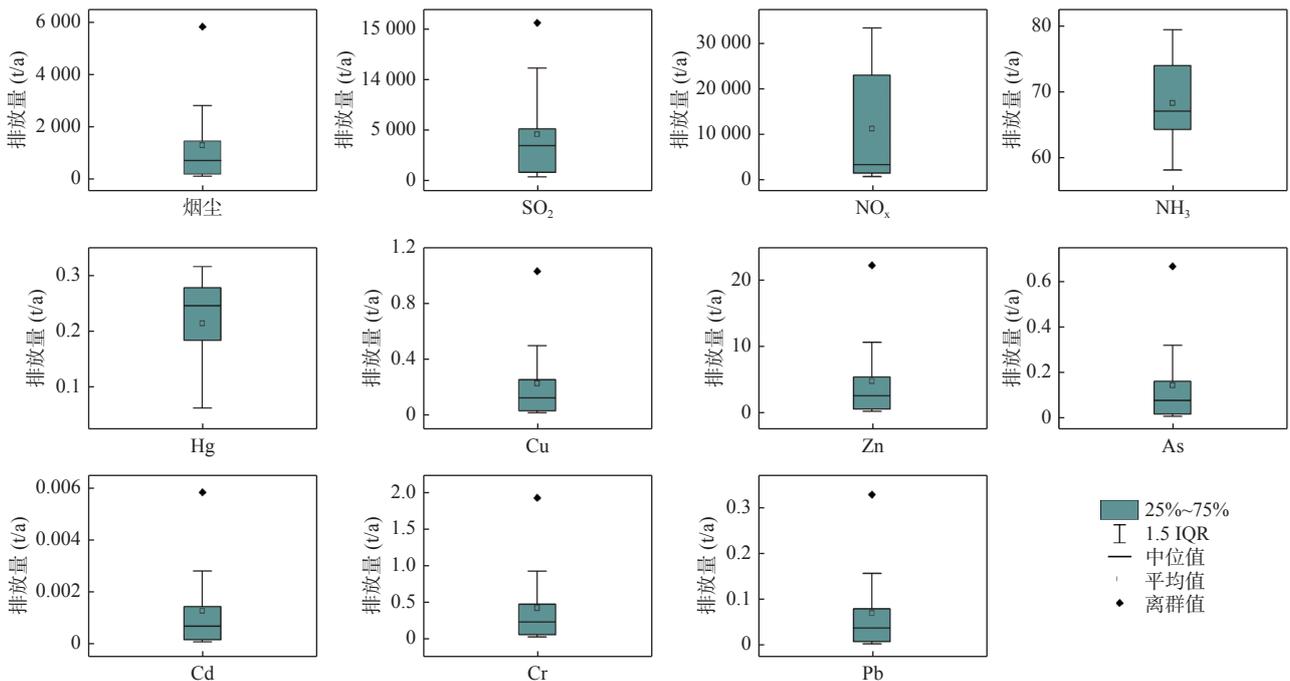


图2 2008~2020年燃煤电厂大气污染物(烟尘、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、Hg、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Cr)排放量统计图

Fig. 2 Emissions of soot, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, Hg, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Cr from power plants from 2008 to 2020

值后,呈现总体下降的趋势,2011年、2016~2017年和2020年出现了略微回升,但整体削减量可观(图3)。2015年电厂通过加装湿式电除尘器完成了烟气“超低排放”改造,烟尘排放量得到大量削减(烟尘排放削减量为2292.6 t/a);此外,2015年起烟气中重金属

(Cu、Zn、As、Cd、Cr和Pb)排放量也出现了明显下降。2000年之后,国家在煤行业采取的一系列措施在SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和PM<sub>2.5</sub>排放量的减排等方面均取得了一定的成效,全国煤电行业SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>的排放量由千万吨级降至百万吨级(顾晨等,2022)。

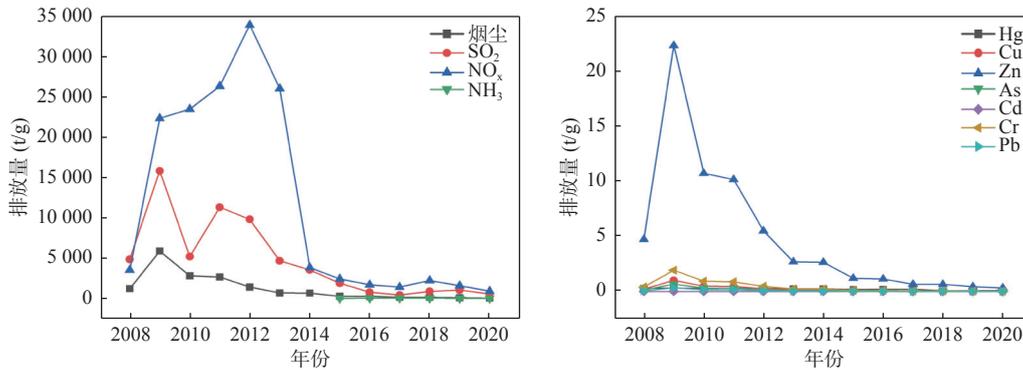


图3 2008~2020年燃煤电厂大气污染物排放量变化图

Fig. 3 Change in emissions of atmospheric pollutants from power plants from 2008 to 2020

### 3.2 地表水水质情况

2008~2020年黄壁庄水库入口和中心处的21项水质监测指标中,高锰酸盐指数、氨氮、TP、COD和Cu等5项指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)II类水质标准,其余16项水质指标均可达到I类水质标准(图4)。黄壁庄水库入口处的高锰酸盐指数仅在2019年达到I类水质标准,其余年份均为II类水质标准;中心处的高锰酸盐指数在2008~2017年达到II类水质标准,2018~2020年可达I类水质标准,黄壁庄水库入口和中心处的NH<sub>3</sub>-N在2009年、2015年和2017年达到II类水质标准,其余年份均达到I类水质标准。除黄壁庄入口和中心处2010年的TP达到I类水质标准外,各点位其余年份的TP均达到II类水质标准。各监测点位的COD仅2008年为II类水质标准,2009~2020年均达到I类水质标准。2009年黄壁庄水库中心处Cu、Zn、Cd、Pb和Hg浓度达到了峰值,分别为0.02 mg/L、0.02 mg/L、0.000 05 mg/L、0.000 5 mg/L和0.000 04 mg/L,除Cu满足II类水质标准外,其余重金属浓度均满足I类水质标准。其中,Zn、Cd、Pb和Hg浓度远低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)规定分析方法的检出限(分别为0.05 mg/L、0.001 mg/L、0.01 mg/L和0.000 05 mg/L),即2009~2020年黄壁庄水库中心水体中Zn、Cd、Pb和Hg的浓度处于极低的水平并呈持续降低趋势。2013年起,黄壁庄水库水体中Cu浓度均未超过0.002 5 mg/L,满足

I类水质标准,且远低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)规定分析方法的最低检出限0.001 mg/L,2013年之后水体Cu含量亦呈现整体持续降低的趋势,水质持续转好。

### 3.3 电厂排放与水源地水质状况相关性分析

以燃煤电厂排放的典型大气污染物为基础,同时结合该电厂燃煤成分、燃煤烟尘中的化学组分和《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中涉及的水质因子(王毓秀等,2016),采用Spearman相关性分析方法对电厂排放的大气污染与水库对应水质指之间的关系进行分析(图5)。相关性分析结果显示,黄壁庄水库入口处水体重金属(Hg、As、Pb、Cd、Cr<sup>6+</sup>、Cu、Zn)和电厂排放的大多数烟尘重金属Hg、As、Pb、Cr<sup>6+</sup>、Zn之间呈显著相关性( $p < 0.05$ ),其中水库入口处水体中Hg与电厂烟尘其他重金属呈显著负相关;电厂排放烟尘中Cd和Cu与水库入口处水体中重金属基本无显著相关性。黄壁庄水库中心处水体重金属(Hg、As、Pb、Cd、Cr<sup>6+</sup>、Cu、Zn)和电厂排放的大多数烟尘重金属Hg、As、Pb、Cd、Cu、Zn之间呈显著相关性( $p < 0.05$ ),其中水库中心处水体中Hg与电厂烟尘其他重金属呈显著负相关;电厂排放烟尘中Cr<sup>6+</sup>与水库中心处水体中重金属基本无显著相关性。然而,2016年起黄壁庄水库中Zn和Pb浓度出现了略微回升,电厂烟尘重金属的排放量仍在下降,即电厂烟尘重金属的排放对黄壁庄水库水质的影响可能有所降低。已

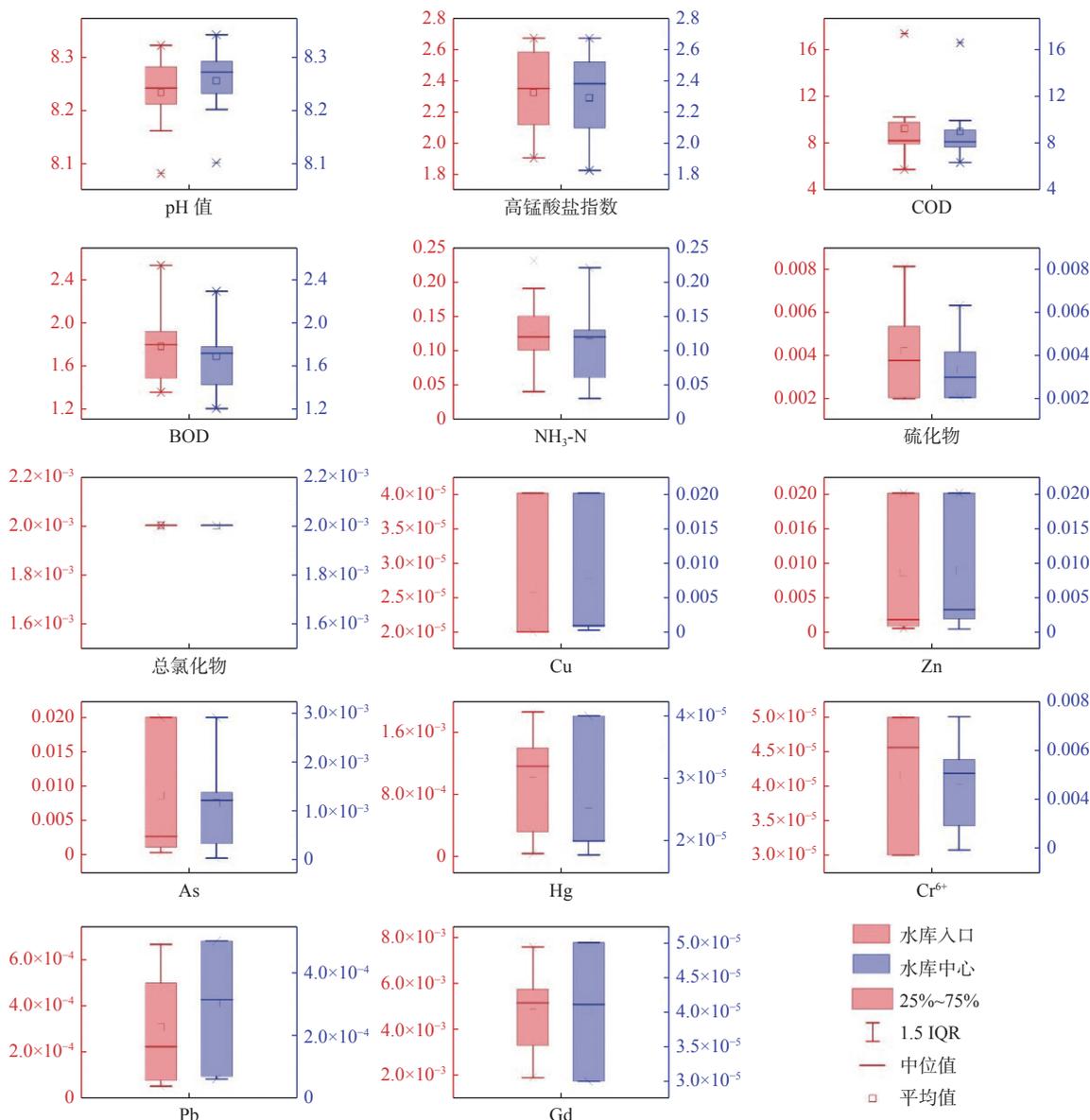


图4 2008~2020年黄壁庄水库入口和中心处的水质统计图

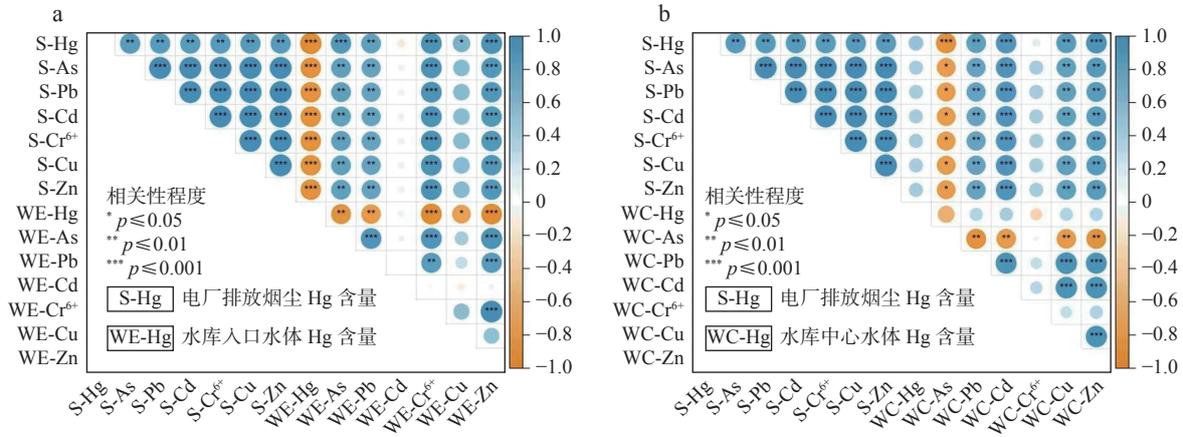
Fig. 4 Water quality at the entrance and centre of the reservoir from 2008 to 2020

有研究显示, 燃煤电厂周边河流中的重金属含量随着样点与电厂距离的增加而减小(李旭等, 2022), 因此, 燃煤电厂虽在一定程度上可影响周边水体中重金属的含量, 但在本研究中影响较小。

### 3.4 电厂大气沉降对水源地的影响预测

采用 CALPUFF 模型对该电厂排放的大气污染物在黄壁庄水库的沉降量进行分析, 结果显示, 因该电厂大气污染物排放导致的黄壁庄水库中水体 SO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>x</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>3</sub>、Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 沉降量分别为 955.48 kg/a、81.23 kg/a、1.87 t/a、119.49 kg/a、151.11 kg/a、173.00 g/a、6.14 kg/a、0.35 g/a、351.00 g/a、100.00 g/a、44.00 g/a、4.02 kg/a; 电厂排放的大气

污染物沉降到补给源(岗南水库、滹沱河、冶河、牧马河、绵河、清水河、乌河、松溪河、阳武河、云中河、永兴河、龙华河、南甸河、温河、桃河、南川河、甘陶河等)水体中的 SO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>x</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>3</sub>、Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 总沉降量分别为 4.51 t/a、638.53 kg/a、3.70 t/a、1.19 t/a、575.22 kg/a、604.00 g/a、21.41 kg/a、1.65 g/a、1.22 kg/a、348.00 g/a、154.00 g/a、14.03 kg/a; 电厂排放大气污染物沉降到补给源周边陆域的 SO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>x</sub>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>3</sub>、Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 总沉降量分别为 87.49 t/a、16.49 t/a、67.12 t/a、22.71 t/a、10.37 t/a、10.85 kg/a、384.91 kg/a、22.00 g/a、22.02 kg/a、6.27 kg/a、2.77 kg/a、252.26 kg/a。黄壁庄水库水



a.水库入口水体与电厂大气污染物相关性；b.水库中心水体与电厂大气污染物相关性

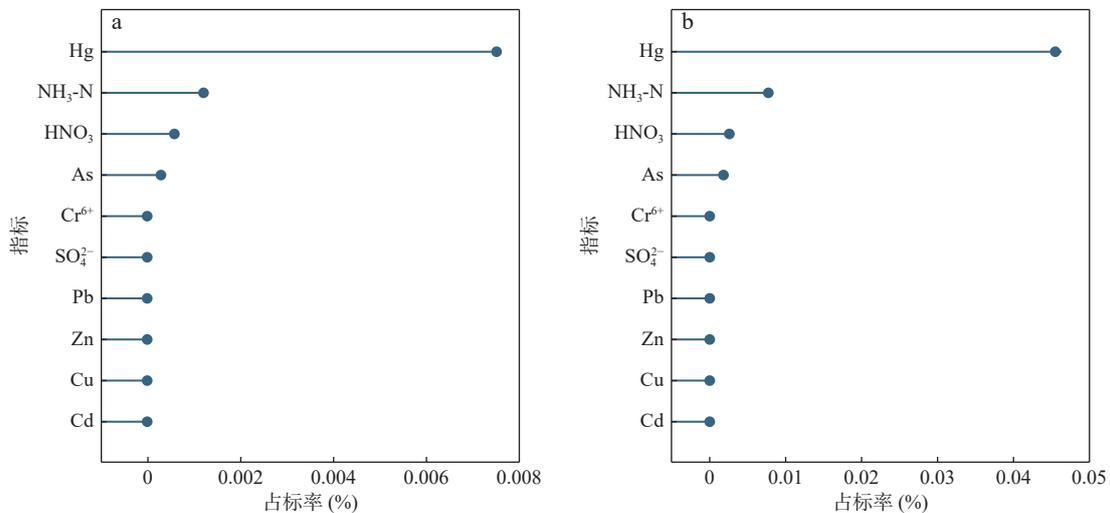
图5 燃煤电厂大气污染物和库区水质的相关性分析图

Fig. 5 Correlation analysis of atmospheric pollutants of power plants and water quality in reservoirs

面、补给源水面与陆域-水体沉降量的  $SO_2$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_x$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_3$ 、Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 总沉降量为 22.97 t/a、4.02 t/a、18.99 t/a、5.85 t/a、2.79 t/a、2.95 kg/a、104.53 kg/a、6.00 g/a、5.98 kg/a、1.70 kg/a、752.00 g/a、68.50 kg/a。

该电厂排放污染物转化为水污染物的指标率见图 6。排放的  $SO_2$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $NO_x$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_3$ 、Hg、As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 沉降到黄壁庄水库水体中转化生成的水污染物  $SO_4^{2-}$ 、 $HNO_3^-$ 、 $NH_3-N$ 、Hg、As、Cd、 $Cr^{6+}$ 、Cu、Pb、Zn 贡献浓度分别为  $3.35 \times 10^{-3}$  mg/L、 $5.86 \times 10^{-3}$  mg/L、 $5.88 \times 10^{-4}$  mg/L、 $3.73 \times 10^{-7}$  mg/L、 $1.32 \times 10^{-5}$  mg/L、 $7.46 \times 10^{-10}$  mg/L、 $7.56 \times 10^{-7}$  mg/L、 $2.16 \times 10^{-7}$  mg/L、 $9.48 \times 10^{-8}$  mg/L、

$8.66 \times 10^{-6}$  mg/L，其浓度占标率分别为  $1.34 \times 10^{-3}\%$ 、 $5.86 \times 10^{-2}\%$ 、0.12%、0.75%、 $2.65 \times 10^{-2}\%$ 、 $1.49 \times 10^{-5}\%$ 、 $1.51 \times 10^{-3}\%$ 、 $2.16 \times 10^{-5}\%$ 、 $9.48 \times 10^{-4}\%$ 、 $8.66 \times 10^{-4}\%$ ，各项污染物的占标率的大小排序为  $Hg > NH_3-N > HNO_3 > As > Cr^{6+} > SO_4^{2-} > Pb > Zn > Cu > Cd$ ，均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 II 类标准限值要求。电厂排放的污染物沉降到黄壁庄水库水面、补给源水面以及陆域的污染物最终进入水库中转化生成的水污染物  $SO_4^{2-}$ 、 $HNO_3^-$ 、 $NH_3-N$ 、Hg、As、Cd、 $Cr^{6+}$ 、Cu、Pb、Zn 贡献浓度分别为  $3.11 \times 10^{-2}$  mg/L、 $2.62 \times 10^{-2}$  mg/L、 $3.91 \times 10^{-3}$  mg/L、 $2.27 \times 10^{-6}$  mg/L、 $8.03 \times 10^{-5}$  mg/L、 $4.88 \times 10^{-9}$  mg/L、 $4.60 \times 10^{-6}$  mg/L、 $1.31 \times 10^{-6}$  mg/L、



a.水库入口处水体；b.水库中心处水体

图6 电厂排放污染物和补给水源对水库污染物的占标率排序图

Fig. 6 Ranking of pollutants discharged from power plants and recharge sources to reservoir pollutants as a percentage of the standard

$5.78 \times 10^{-7}$  mg/L、 $5.27 \times 10^{-5}$  mg/L, 浓度占标率分别为 0.01%、0.26%、0.78%、4.53%、0.16%、 $9.76 \times 10^{-5}$ %、 $9.19 \times 10^{-3}$ %、 $1.31 \times 10^{-4}$ %、 $5.78 \times 10^{-3}$ %、 $5.27 \times 10^{-3}$ %, 各项污染物的占标率的大小排序为  $\text{Hg} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{HNO}_3 > \text{As} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cr}^{6+} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd}$ , 各污染物浓度均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 II 类标准限值要求。已有研究表明, 燃煤电厂生产过程中排放的含 Hg 废气和粉尘是环境中 Hg 的重要来源, 也是导致周边水体中 Hg 含量较高的一个原因(刘瑞平等, 2017; 李昌鑫等, 2020; 刘昭等, 2021)。电厂排放的 Hg 及其化合物直接沉降到黄壁庄水库水体以及沉降到黄壁庄水库水面、补给源水面和陆域最终间接进入水库中转化生成的水污染物 Hg 在各水污染物中浓度占标率最高, 但分别为 0.75% 和 4.53%, 水平极低, 表明电厂排放的 Hg 对黄壁庄水库水质的影响很小。

## 4 结论

(1) 2008~2020 年该燃煤电厂的大气污染物(如烟尘、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、重金属等)排放量整体呈降低趋势, 在此期间, 黄壁庄水库的水质均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 II 类及以上水体限值要求, 大部分水质指标达到了 I 类标准。

(2) 相关性分析结果证明了电厂排放烟尘中的重金属 Hg、As、Pb 和水库入口处、中心处水体中对应重金属含量之间有显著相关性, Cd 和 Cu 与水库入口处水体中对应重金属基本无显著相关性,  $\text{Cr}^{6+}$  与水库中心处水体中对应重金属基本无显著相关性。

(3) 电厂排放的大气污染物直接沉降到黄壁庄水库水体后转化生成的各水污染物中对水库水质影响最大的污染物是 Hg 及其化合物, 其进入水体转化生成的水污染物 Hg 的浓度占标率在各水污染物中最大, 但也仅为 0.75%, 水平极低, 对水库水质的影响很小。

## 参考文献(References):

- 曹佰迪, 李文明, 周一凡, 等. 鄱阳湖流域沉积物中重金属元素分布特征及生态风险浅析[J]. 西北地质, 2022, 55(04): 343-353.
- CAO Baidi, LI Wenming, ZHOU Yifan, et al. Geochemical Characteristic and Fluxes of Trace Metal in Water System of the Poyang Lake[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(04): 343-353.
- 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 等. 燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险[J]. 环境科学, 2022, 43(10): 4578-4589.
- CHE Kai, CHEN Chongming, ZHENG Qingyu, et al. Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils[J]. Environmental Science, 2022, 43(10): 4578-4589.
- 董文鹏, 陈占辉, 霍巧云, 等. 黄壁庄水库消落区植物自然分布特征与多样性研究[J]. 中国水土保持, 2022, 483(06): 43-47+9.
- DONG Wenpeng, CHEN Zhanhui, HUO Qiaoyun, et al. Distribution Characteristics and Diversity of Plants in the Drawdown Area of Huangbizhuang Reservoir[J]. Soil and Water Conservation in China, 2022, 483(06): 43-47+9.
- 冯紫艳. 硫酸盐还原菌和蓝藻对太湖底泥形成湖泛的模拟研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013: 158.
- FENG Ziyang, The simulation study of the formation of lacustrine black bloom in Taihu Lake sediment on the effect of algae and sulfate-reducing bacteria [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013: 158.
- 顾晨, 赵瑜. 中国燃煤电厂大气污染物排放研究进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4352-4361.
- GU Chen, ZHAO Yu. Research progress of air pollutant emissions of Chinese coal-fired power plant[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4352-4361.
- 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2023-03-01(009).
- 郝紫华, 张志勇. 燃煤电厂  $\text{SO}_3$  脱除、测试技术研究进展[J]. 资源节约与环保, 2022, 253(12): 5-10.
- HAO Suhua, ZHANG Zhiyong. Research progress in  $\text{SO}_3$  removal and testing technology for coal-fired power plants[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2022, 253(12): 5-10.
- 蒋起保, 欧阳永棚, 章敬若, 等. 江西省贵溪市水系沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 西北地质, 2022, 55(03): 326-334.
- JIANG Qibao, OUYANG Yongpeng, ZHANG Jingruo, et al. Evaluation of Heavy Metal Pollution and Its Potential Ecological Risk in Stream Sediments in Guixi City, Jiangxi Province[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(03): 326-334.
- 金树权. 水库水源地水质模型预测与不确定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2008: 124.
- JIN Shuquan, Modeling and prediction of water quality in headwater area of reservoir and uncertainty analysis [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 124.
- 康文忠. 石家庄市滹沱河水利工程管护模式探索[J]. 水科学与工程, 2022, (03): 84-88.
- KANG Wenzhong. Exploration on the management and maintenance

- of Hutuo River water conservancy project in Shijiazhuang[J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2022, (03): 84–88.
- 李昌鑫, 王昊, 叶坚锴, 等. 燃煤电厂区域颗粒物及颗粒物汞分布特征研究[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(08): 2944–2951.
- LI Changxin, WANG Hao, YE Jiankai, et al. Pollution characteristics of particulate matter and particulate mercury near a coal-fired power plant[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(08): 2944–2951.
- 李旭, 张军. 燃煤电厂周边河流中重金属污染特征及其风险评价研究[J]. *环境科学与管理*, 2022, 47(05): 168–173.
- LI Xu, ZHANG Jun. Study on the characteristics of heavy metal pollution in rivers around coal-fired power plants and its risk evaluation[J]. *Environmental Science and Management*, 2022, 47(05): 168–173.
- 刘瑞平, 徐友宁, 何芳, 等. 某金矿带双桥河河水-底泥-悬浮物中Hg含量时程分布特征[J]. *西北地质*, 2017, 50(03): 231–237.
- LIU Ruiping, XU Youning, HE Fang, et al. The Mercury Concentration Time and Space Characterized of Shuangqiao River in the Gold Mine Area[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(03): 231–237.
- 刘昭, 周宏, 曹文佳, 等. 清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2021, 42(01): 175–183.
- LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wenjia, et al. Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(01): 175–183.
- 卢燕宇, 孙维. 基于CALPUFF模型的NO<sub>2</sub>剩余大气环境容量测算及污染源布局优化——以合肥市为例[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(12): 1358–1362.
- LU Yanyu, SUN Wei. Estimation of NO<sub>2</sub> remainder atmospheric environmental capacity and layout optimization of emission sources based on CALPUFF model: a case study in Hefei[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2017, 39(12): 1358–1362.
- 潘莎, 陈再琴, 汪钊宇, 等. 燃煤电厂周边河流中氟、砷和重金属污染健康风险评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31(04): 33–37.
- PAN Sha, CHEN Zaiqin, WANG Zhaoyu, et al. Health Risk Assessment of Fluorine, Arsenic and Heavy Metals in River around Coal-fired Power Plant[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, 31(04): 33–37.
- 宋保平, 过仲阳, 郑艳侠, 等. 近50年来滹沱河流域水资源变化规律与影响因素[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(04): 17–21.
- SONG Baoping, GUO Zhongyang, ZHENG Yanxia, et al. Variation Characteristics and Their Impact Factors of Water Resources in the Hutuo River Basin during Last 50 Years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water*, 2013, 11(04): 17–21.
- 王瑶, 王慧勇, 安丽娟, 等. 黄壁庄水库水质评价及氮污染成因分析[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(04): 60–63.
- WANG Yao, WANG Huiyong, AN Lijuan, et al. Water Quality Evaluation and Cause Analysis of Nitrogen in Huangbizhuang Reservoir[J]. *Water Resources and Power*, 2020, 38(04): 60–63.
- 王毓秀, 彭林, 王燕, 等. 电厂燃煤烟尘PM<sub>2.5</sub>中化学组分特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(01): 60–65.
- WANG Yuxiu, PENG Lin, WANG Yan, et al. Characteristics of Chemical Components in PM<sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(01): 60–65.
- 王永英. 我国燃煤大气污染物控制现状及对策研究[J]. *煤炭经济研究*, 2019, 39(08): 66–70.
- WANG Yongying. Research on current situation and countermeasures of coal-fired air pollutants control in China[J]. *Coal Economic Research*, 2019, 39(08): 66–70.
- 徐钢, 王春兰, 许诚, 等. 京津冀地区散烧煤与电采暖大气污染物排放评估[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 1735–1742.
- XU Gang, WANG Chunlan, XU Cheng, et al. Evaluation of air pollutant emissions from scattered coal burning and electric heating in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(12): 1735–1742.
- 于洋, 王晓燕. 自然生境中氨氧化细菌的分子生物学研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(11): 79–85.
- YU Yang, WANG Xiaoyan. Molecular analysis of ammonia-oxidizing bacteria in natural environments[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(11): 79–85.
- 周永江, 姚宜斌, 熊永良, 等. 基于Spearman秩相关系数的PWV与PM<sub>2.5</sub>相关性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2020, 40(03): 236–241.
- ZHOU Yongjiang, YAO Yibin, XIONG Yongliang, et al. Study of correlation between PWV and PM<sub>2.5</sub> based on Spearman rank correlation coefficient[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(03): 236–241.
- 邹伟. CALPUFF模型在洋浦区域环境空气影响评价中的应用[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(10): 186–189.
- ZOU Wei. The application of CALPUFF model in atmospheric environmental impact assessment of Yangpu economic development zone[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(10): 186–189.