

贵阳市清镇塘关灰场对红枫湖水质的影响*

金祖雪^{1,2} 王敬富² 陈 权^{2,3} 余萍萍^{1,2} 陈敬安²

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学
国家重点实验室, 贵阳 550081; 3. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 为评价贵阳市清镇塘关灰场对红枫湖水质的影响, 调查研究了灰场附近水域水质的空间变化特征, 并对粉煤灰及附近水域沉积物的形貌和成分进行了分析。结果表明: 1) 灰场对红枫湖水水质影响很小, 但对灰坝附近的将军湾库区底泥有一定贡献; 2) 后六河支流对将军湾库区水质造成一定影响, 建议加强对该支流的排污管理; 3) 受风蚀和强径流影响, 灰坝粉煤灰对附近库区造成潜在危害, 建议强化灰场水土保持。

关键词: 塘关灰场; 粉煤灰; 水环境影响; 红枫湖

DOI: 10.13205/j.hjgc.201906019

INFLUENCE OF TANGGUAN ASH YARD IN QINGZHEN TOWN IN GUIYANG ON THE WATER QUALITY OF HONGFENG LAKE

JIN Zu-xue^{1,2}, WANG Jing-fu², CHEN Quan^{2,3}, YU Ping-ping^{1,2}, CHEN Jing-an²

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To evaluate the influence of Tangguan Ash Yard on the water quality of Hongfeng Lake, this paper investigated and studied the spatial changes of the water quality in the water area near Tangguan Ash Yard, and analyzed the morphology and compositions of the fly ash and the lake sediments. The results showed that: 1) this ash yard has a little effect on the water quality of Hongfeng Lake, but had a little contribution to the sediments of Jiangjunwan reservoir area nearby; 2) Houliu River branch significantly affected the water quality of Jiangjunwan reservoir area, so it was suggested to strengthen its pollution management; 3) the fly ash could cause potential harm to the nearby reservoir area due to the wind erosion and strong runoff, so it was suggested to enhance the conservation of soil and water in Tangguan ash yard.

Keywords: Tangguan ash yard; coal ash; water environmental impact; Hongfeng Lake

0 引 言

粉煤灰是燃煤电厂燃烧后产生的固体废物之一。随着我国能源、电力工业的发展, 粉煤灰的排放量于 2013 年达到 5.32 亿 t^[1]。根据灰色预测模型估计, 到 2020 年, 我国粉煤灰的排放量将达到 9 亿 t^[2-3]。而当前粉煤灰的利用率仅有 25%, 其余粉煤灰被当作污染物或者废物处置^[4-5]。粉煤灰的堆存不仅侵占大量土地, 还会对周边环境造成污染^[6-7]。本文以贵州省贵阳市清镇塘关灰场为研究对象, 科学评估了灰

场粉煤灰对沿岸水域的水质影响, 为政府饮用水源地保护决策提供参考。

1 研究区域概况

1.1 塘关灰场概况

贵州华电清镇发电有限公司塘关灰场(简称“清电灰场”)建成于 1984 年, 紧邻红枫湖饮用水源 II 级保护区, 是电厂粉煤灰堆存的场所。灰场呈长方形, 形式为山谷型; 南北长 1700 m, 东南宽 800 m, 面积约 1.3 km², 设计库容约 2008 万 m³。粉煤灰保有资源量约 1785 万 m³, 已消耗使用粉煤灰 258 万 m³, 现存约 1527 万 m³。灰场坝高 11.26~23.71 m(以库底为基准面), 为二等库。2010 年, 贵州省政府对清镇电

* 贵州省重大应用基础研究计划(黔科合 J 重大字[2015]2001); 贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2013]2281) 联合资助。

收稿日期: 2018-09-25

厂实施异地技改,灰场于2011年12月31日停用。

1.2 红枫湖概况

红枫湖(106°19′E—106°28′E,26°26′N—26°35′N)是贵州高原中部1座典型的人工深水型水库,最大水深为45 m,平均水深为10.5 m,流域面积为1596 km²,水面面积为57.2 km²。红枫湖是省会贵阳市最重要的饮用水源地之一^[8]。因此,红枫湖水环境质量对黔中农业、经济以及社会的发展具有重要影响^[9]。

2 样品与方法

2.1 样品的采集

利用分层采水器按表、中、底3层分别采集后六河(A)、将军湾库区(B1—B3)、对照区(C)及灰场沿岸(D1—D3、E1—E3、F1—F3、H1—H3)等湖水样品(图1)。水样采集后一部分装入聚乙烯瓶,用于水样理化指标测试;另一部分水样用0.45 μm的滤膜过滤后加HNO₃(1 mol/L)酸化,使其pH<2,用于水样重金属的测定^[10]。然后将水样放入冰盒中并迅速送回实验室,样品储存在4℃冷藏室中,尽快进行理化分析测试。

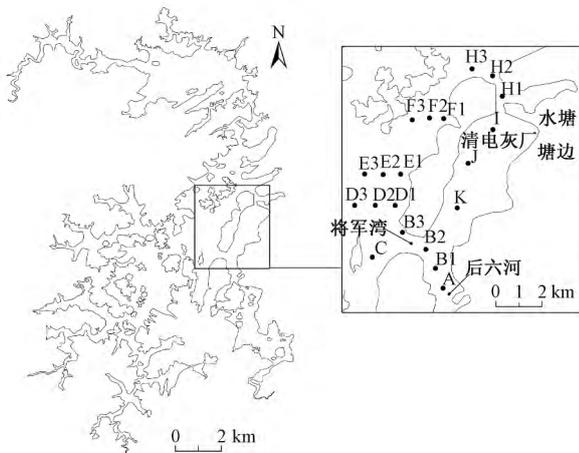


图1 红枫湖采样点分布

Fig.1 Sampling sites distribution of Hongfeng Lake

利用彼得森抓斗式采样器采集表层新鲜沉积物样品装入聚乙烯袋中,带回实验室。对获取的沉积物样品,首先在4500 r/min条件下离心10 min,滤去孔隙水的沉积物样品经过真空冷冻干燥仪(Techcomp FD-3-85-MP)冷冻干燥,用玛瑙研钵研磨至120目以下,装入封口袋中密封备用。

在灰场堆场选取具有代表性的3个点(I、J、K),抛去表层20 cm的覆盖粉煤灰,采集深度为20 cm以下的粉煤灰样品。对获取的粉煤灰样品,经过真空冷

冻干燥仪(Techcomp FD-3-85-MP)冷冻干燥,用玛瑙研钵研磨至120目以下,装入封口袋中密封备用。

采用HJ 557—2010《固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法》获取粉煤灰浸出液(浸I、浸J、浸K)。

2.2 样品分析方法

采集水样时,同步利用多水质参数仪(YSI6600-V2)现场测定水温(*T*)、pH、溶解氧(DO)和叶绿素a(Chl-a)。水样总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)分别采用钼酸铵分光光度法、纳氏试剂分光光度法测定^[11]。水样阴离子采用离子色谱仪(LCS-90)测定,水样阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。水样重金属(Cr、Cu、Zn、As、Pb、Cd)采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。粉煤灰和沉积物的形貌与成分分析采用扫描电镜(JSM-6460LV)进行测试。浸出液TP、NH₄⁺-N、阴阳离子、重金属等同水样的测定。

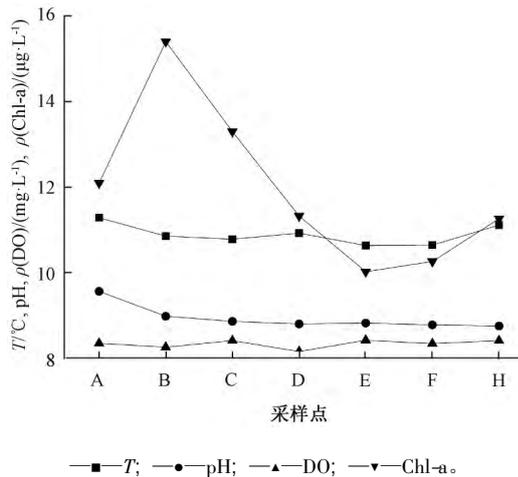
3 结果与讨论

3.1 上游水体流经灰场沿岸水域后的水质变化

上游水体流经灰场沿岸的水质变化如图2、图3所示。由图2可知:采样点A—H的水体表层*T*、DO的变化并不显著,其变化范围分别为10.64~11.29℃、8.17~8.43 mg/L。采样点A的pH值为9.57,超过GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[12]中的V类水质标准,这可能与该区域上游来水有关^[13]。自采样点A至采样点H,pH有缓慢降低的趋势。叶绿素a呈先增加后降低趋势,最高浓度位于将军湾,其最高浓度达15.4 μg/L。调查发现,该区域正在发生局部的蓝藻水华^[13-14],这可能与支流营养盐(TP)浓度高,且流入湖湾后湖面变宽、水流变缓,利于藻类生长有关。

由图3可知:采样点A的TP浓度(0.046 mg/L)显著高于其他点位,这指示了上游生活污水、农业面源污染等磷污染物输入对该支流下游水体可能造成潜在影响^[13]。采样点A—H,水质NH₄⁺-N浓度未呈现明显的变化规律,其中E点的NH₄⁺-N浓度较高,最高为0.258 mg/L。灰场沿岸水域区TP、NH₄⁺-N未出现超标现象,这与近年来红枫湖的水污染综合治理密切相关^[10]。综上,灰场对其沿岸水域水体的TP、NH₄⁺-N无明显影响。

表1所示为阴、阳离子及重金属主要成分分析结果。可知:灰场沿岸(A—H)水域的F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、



注: 本文显示的 B 代表 B1—B3, D 代表 D1—D3, E 代表 E1—E3, F 代表 F1—F3, H 代表 H1—H3, 均代表各点位表层水体; 代表点位 B、D、F、H 所选取的数值分别为 B1—B3、D1—D3、F1—F3、H1—H3 表层水体各指标的平均值, 下同。

图 2 表层水温度、pH、DO、Chl-a 的变化

Fig.2 Variation of temperature, pH, DO, Chl-a on surface water

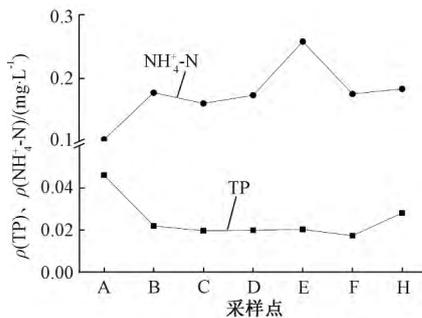


图 3 表层水体 TP、NH₄⁺-N 的含量变化

Fig.3 Variation of TP, NH₄⁺-N content in surface water

SO₄²⁻ 含量变化较为平缓, 其变化范围分别为 0.14~0.23, 4.13~5.06, 2.32~2.81, 52.00~54.54 mg/L。且将后六河(A)、将军湾区(B1—B3)以及灰场沿岸(D、E、F、H)与对照区(C)的各阴离子对比, 尚未表现出明显异常。这表明灰场对其沿岸水域水体阴离子影响很小。灰场沿岸水域采样点后六河(A)、将军湾区(B1—B3)以及灰场沿岸(D、E、F、H)阳离子, 其中 Al³⁺(0.01~0.02 mg/L)、Ca²⁺(50.73~59.79 mg/L)、K⁺(3.42~3.63 mg/L)、Mg²⁺(14.84~15.61 mg/L)、Na⁺(6.15~6.88 mg/L)、SiO₂(0.07~0.27 mg/L), 这与对照区(C)较为接近。由此看出, 灰场对其沿岸水域水体阳离子的影响很小。全部采样点表层水体重金属浓度的变化范围为 Cr(0.11~0.34 μg/L)、Cu(0.07~0.48 μg/L)、Zn(1.03~2.76 μg/L)、As(0.97~1.10 μg/L)、Pb(0.05~0.23 μg/L)、Cd(0.01~0.01 μg/L⁻¹)。这与对照点 C 的差异并不明显, 表明塘关灰场对其沿岸水域水体重金属的影响很小。参比 GB 3838—2002 可知, 灰场沿岸水域水体重金属未超标。

3.2 灰场沿岸“由湖岸向湖心”的断面水质变化

图 4 所示为由湖岸到湖心表层水体 T、pH、DO、Chl-a、TP 变化。可知: 采样点 D、E、F、H 4 个断面表层水体 T、pH、DO 变化范围由湖岸到湖心, 未出现显著差异。采样点 D、E、F、H 断面水质 TP 浓度的变化范围这与图 4 中 Chl-a 的变化趋势类似。上述研究结果表明, 灰场对其沿岸水域 T、pH、DO、Chl-a 和 TP 浓度的影响很小。

表 1 阴、阳离子及重金属主要成分分析结果

Table 1 The analysis results of main anions cations and heavy metals										mg/L
元素	A	B1 表	B2 表	B3 表	C 表	D	E	F	H	
F ⁻	0.14	0.2	0.21	0.21	0.21	0.17	0.12	0.23	0.18	
Cl ⁻	4.83	4.61	4.81	4.86	5.06	4.93	4.86	4.13	4.89	
NO ₃ ⁻	2.41	2.5	2.78	2.32	2.81	2.56	2.59	2.5	2.46	
SO ₄ ²⁻	52	52.07	54.37	54.3	53.11	53.59	54.13	53.9	54.54	
HCO ₃ ⁻	25.43	26.55	26.89	27.1	25.78	26.99	26.16	26.93	25.14	
Al ³⁺	0.01	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	
Ca ²⁺	59.79	53.36	56.55	52.7	53.41	54.67	54.27	50.73	56.53	
K ⁺	3.48	3.52	3.56	3.42	3.71	3.46	3.47	3.57	3.63	
Mg ²⁺	15.43	15.49	15.45	14.84	15.99	15.08	15.04	15.28	15.61	
Na ⁺	6.21	6.31	6.43	6.15	6.72	6.37	6.33	6.49	6.88	
SiO ₂	0.11	0.27	0.24	0.18	0.25	0.08	0.09	0.08	0.07	
Cr	0.11×10 ⁻³	0.11×10 ⁻³	0.17×10 ⁻³	0.12×10 ⁻³	0.11×10 ⁻³	0.13×10 ⁻³	0.2×10 ⁻³	0.34×10 ⁻³	0.14×10 ⁻³	
Cu	0.43×10 ⁻³	0.41×10 ⁻³	0.45×10 ⁻³	0.41×10 ⁻³	0.49×10 ⁻³	0.07×10 ⁻³	0.48×10 ⁻³	0.41×10 ⁻³	0.46×10 ⁻³	
Zn	1.59×10 ⁻³	2.16×10 ⁻³	2.76×10 ⁻³	1.94×10 ⁻³	2.48×10 ⁻³	1.66×10 ⁻³	1.72×10 ⁻³	1.03×10 ⁻³	2.65×10 ⁻³	
As	1.10×10 ⁻³	1.10×10 ⁻³	1.08×10 ⁻³	1.06×10 ⁻³	1.05×10 ⁻³	1.05×10 ⁻³	1.01×10 ⁻³	1.02×10 ⁻³	0.97×10 ⁻³	
Pb	0.07×10 ⁻³	0.07×10 ⁻³	0.17×10 ⁻³	0.15×10 ⁻³	0.08×10 ⁻³	0.20×10 ⁻³	0.10×10 ⁻³	0.05×10 ⁻³	0.23×10 ⁻³	
Cd	0.01×10 ⁻³									

注: B1 表、B2 表、B3 表为水体表面, 下同。

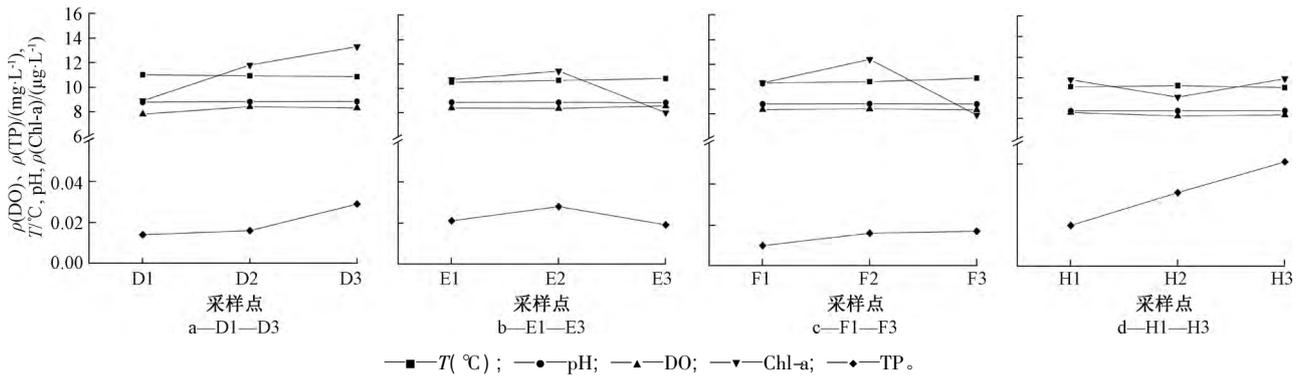


图 4 由湖岸到湖心(D1—D3、E1—E3、F1—F3、H1—H3) 表层水体温度、pH、DO、Chl-a、TP 变化

Fig.4 Variation of temperature , pH, DO , Chl-a , TP on surface water from lakeshore to the center of lake

由表 2、表 3 可知: 由湖岸到湖心(D1—D3 ,E1—E3) 表层水体重金属浓度变化由湖岸到湖心 ,水质重金属浓度表现出一致的变化特征 ,即先升高后降低 ,表明灰场对其沿岸水域水体重金属浓度的影响很小。

3.3 灰场粉煤灰浸出液与湖水的水质对比

由图 5 可知 ,浸出液 TP 含量(浸 I 为 0.059 mg/L、浸 J 为 0.059 mg/L、浸 K 为 0.060 mg/L) 略高于灰场沿岸水域 TP 的含量(A 为 0.046 mg/L) ,表明随着雨水的淋滤 ,灰场对其附近水域可能是潜在的磷源。目前灰场对沿岸水域水质 TP 浓度的影响尚小 ,其沿

表 2 湖岸到湖心(D1—D3 ,E1—E3) 表层水体重金属变化

Table 2 Vairation of heavy metals on surface water

from lakeshore to the center of the lake						μg/L
采样点	$\rho(\text{Cr})$	$\rho(\text{Cu})$	$\rho(\text{Zn})$	$\rho(\text{As})$	$\rho(\text{Pb})$	$\rho(\text{Cd})$
D1 表	0.10	0.37	1.24	1.05	0.08	0.01
D2 表	0.15	1.23	2.03	1.11	0.30	0.01
D3 表	0.13	0.39	1.73	0.99	0.22	0.01
E1 表	0.11	0.51	1.59	1.01	0.10	0.01
E2 表	0.12	0.43	1.43	1.02	0.11	0.01
E3 表	0.37	0.50	2.15	1.00	0.09	0.01

岸水域 TP 浓度的变化主要受控于上游来水。

表 3 阴、阳离子和重金属离子主要成分分析结果

Table 3 The main component of anions , cations and heavy metals

元素	浸 I	浸 J	浸 K	A	B1 表	B2 表	B3 表	C 表
$\rho(\text{F}^-)$	15.43	15.49	15.27	0.14	0.19	0.21	0.21	0.21
$\rho(\text{Cl}^-)$	6.21	6.31	6.27	4.83	4.61	4.81	4.86	5.06
$\rho(\text{NO}_3^-)$	0.11	0.27	0.17	2.41	2.50	2.78	2.32	2.81
$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	0.25	0.26	0.26	52.00	52.07	54.37	54.30	53.11
$\rho(\text{HCO}_3^-)$	—	—	—	25.43	26.55	26.89	27.10	25.78
$\rho(\text{Al}^{3+})$	0.04	0.15	0.07	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04
$\rho(\text{Ca}^{2+})$	3.71	7.27	4.27	59.79	53.36	56.55	52.7	53.41
$\rho(\text{K}^+)$	0.22	0.32	0.13	3.48	3.52	3.56	3.42	3.71
$\rho(\text{Mg}^{2+})$	0.18	0.36	0.24	15.43	15.49	15.45	14.84	15.99
$\rho(\text{Na}^+)$	0.29	0.35	0.49	6.21	6.31	6.43	6.15	6.72
$\rho(\text{SiO}_2)$	0.53	1.21	1.02	0.11	0.27	0.24	0.18	0.25
$\rho(\text{Cr})$	0.18×10^{-3}	0.53×10^{-3}	0.24×10^{-3}	0.11×10^{-3}	0.11×10^{-3}	0.17×10^{-3}	0.12×10^{-3}	0.11×10^{-3}
$\rho(\text{Cu})$	0.41×10^{-3}	0.6×10^{-3}	0.47×10^{-3}	0.43×10^{-3}	0.41×10^{-3}	0.45×10^{-3}	0.41×10^{-3}	0.49×10^{-3}
$\rho(\text{Zn})$	1.61×10^{-3}	1.64×10^{-3}	1.93×10^{-3}	1.59×10^{-3}	2.16×10^{-3}	2.76×10^{-3}	1.94×10^{-3}	2.48×10^{-3}
$\rho(\text{As})$	1.70×10^{-3}	8.27×10^{-3}	6.48×10^{-3}	1.10×10^{-3}	1.10×10^{-3}	1.08×10^{-3}	1.06×10^{-3}	1.05×10^{-3}
$\rho(\text{Pb})$	0.07×10^{-3}	0.08×10^{-3}	0.07×10^{-3}	0.07×10^{-3}	0.07×10^{-3}	0.17×10^{-3}	0.15×10^{-3}	0.08×10^{-3}
$\rho(\text{Cd})$	0.04×10^{-4}	0.09×10^{-4}	0.11×10^{-4}	0.09×10^{-4}	0.01×10^{-3}	0.13×10^{-4}	0.01×10^{-3}	0.09×10^{-4}

浸出液 (I、J、K) 中的 F^- (15.40 mg/L) 、 Cl^- (6.26 mg/L) 离子浓度明显高于后六河(A) ,将军湾区(B1—B3) 以及对照点(C) ;相反 , NO_3^- (0.18 mg/L) 、 SO_4^{2-} (0.26 mg/L) 含量则远低于后六河(A) 、将军湾区(B1—B3) 以及对照点(C) 。将军湾区域(B1—

B3) 的 F^- 和 Cl^- 浓度亦并未高出对照区(C) ,表明灰场对附近水域水体阴离子的含量贡献很小。但该灰场浸出液中存在较高浓度的 F^- 和 Cl^- ,指示了灰场对其附近水域水质存在潜在影响。粉煤灰浸出液(浸 I、浸 J、浸 K) 各阳离子(K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+}) 含量显著

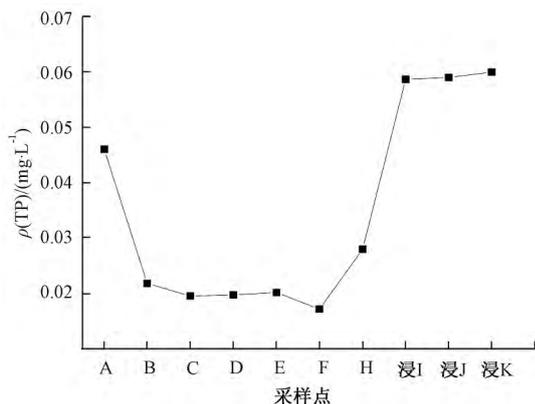


图 5 表层水体与粉煤灰浸出液的 TP 情况

Fig.5 The comparison of TP on surface water and the lixivium of coal fly ash

小于灰场沿岸的后六河 (A)、将军湾区 (B1—B3) 及对照点 C; Al³⁺、SiO₂ 除外, 主要原因是粉煤灰中 Al、Si 元素含量相对较高^[15]。将军湾库区 (B1—B3) 水质阳离子浓度都与对照区 (C) 接近, 表明灰场对沿岸水域水质阳离子贡献很小。浸出液重金属中 Cr、As 浓度较高, 其中 Cr、As 浓度最高者均为浸 J, 分别是 0.53 8.27 μg/L, 其浓度约为后六河 (A)、将军湾 (B1—B3) 以及对照区 (C) Cr、As 浓度的 5~8 倍。浸出液其余重金属浓度与灰场沿岸水体重金属浓度差异不大。结果表明: 目前灰场对沿岸水域水体重金属浓度的影响很小; 但粉煤灰浸出液表现出较高浓度的

Cr 和 As, 对沿岸水域造成潜在威胁。

3.4 灰场粉煤灰与库区沉积物形貌与化学组成对比

由表 4 及图 6 可知: K 点粉煤灰 O、Si、C、Fe、Al 含量相对较高, 质量分数分别为 35.85%、23.54%、15.99%、12.02%、8.53%; 同时含有少量的 Mg、K、Ca、Ti 等; 将军湾 B2 点沉积物中 O、Si、Al 含量较高, 其质量分数分别为 41.99%、31.98%、8.45%, 这与粉煤灰主要成分相似^[16], 同时含有少量的 C、K、Ca、Na、Mg、Fe、Ti; 对照区 C 点沉积物 O、C、Al、Si 含量较高, 其质量分数分别为 49.21%、17.37%、13.25%、11.36%, 而 Mg、K、Ca、Fe 含量相对较低。

表 4 K 点粉煤灰、B2 点沉积物及 C 点沉积物 SEM-DEX 成分

Table 4 The SEM-DEX's element of the coal fly ash from K site, and sediment from B₂ and C site %

元素	K		B		C	
	W _i	A _i	W _i	A _i	W _i	A _i
C	15.99	26.41	7.34	12.38	17.37	25.58
O	35.85	44.46	41.99	53.15	49.21	54.4
Na	8.53	6.27	0.83	0.73	—	—
Mg	—	—	1.13	0.94	2.6	1.9
Al	23.54	16.63	8.45	6.34	11.36	7.45
Si	—	—	31.98	23.06	13.25	8.34
K	1.75	0.89	1.6	0.83	0.9	0.41
Ca	—	—	0.76	0.39	1.95	0.86
Ti	0.99	0.041	0.65	0.27	—	—
Fe	12.02	4.27	5.26	1.91	3.36	1.06

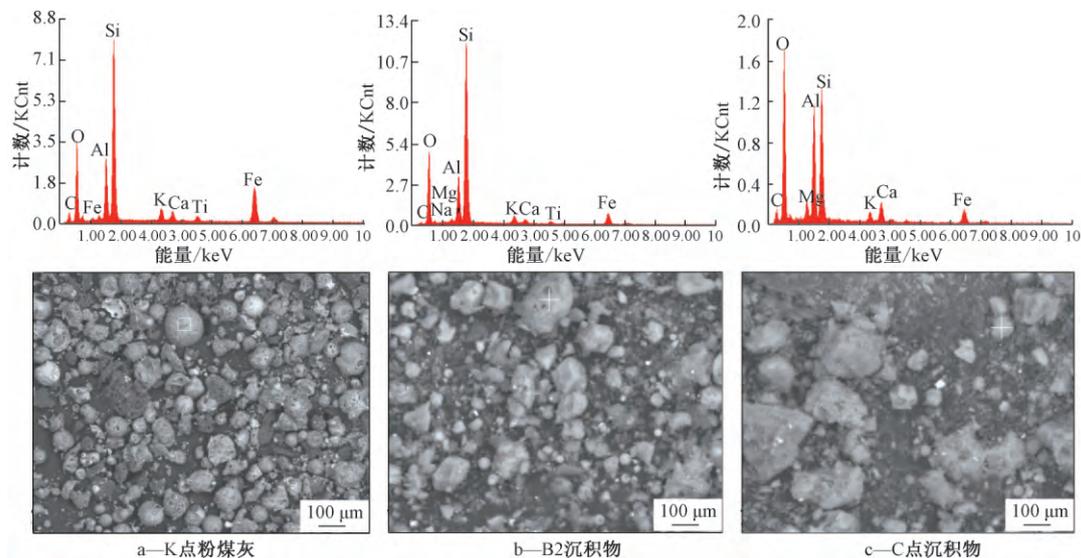


图 6 K 点粉煤灰、B2 点沉积物及 C 点沉积物 SEM-DEX 图像

Fig.6 The SEM-DEX's picture of the coal fly ash from K site, and sediment from B₂ and C site

综上, 粉煤灰主要由 O、Si、Al 组成, 其中 O>Si>Al; 而对照区沉积物中 O>C>Si>Al, 亦含少量 Ca、Mg

等元素, 两者在形貌和成分上差异明显, 表明库区底泥受粉煤灰影响很小。同时, 将军湾 (B2) 沉积物形

貌成分与粉煤灰(K)具有相似性,表明灰场粉煤灰在受到强地表径流和风蚀作用等情况下可能会对局部库区(如将军湾)底泥污染物蓄积产生一定贡献。

4 结论

1) 贵阳市清镇电厂灰场对红枫湖饮用水源保护区水质的影响很小,但灰场粉煤灰通过降雨径流、风蚀作用等对灰坝以下的将军湾库区底泥有一定影响。

2) 红枫湖后六河上游来水对将军湾库区水质造成一定影响,建议加强对将军湾上游(后六河)的水质监控和排污管理。

3) 塘关灰场虽然建有灰坝拦蓄,但受风蚀作用和强径流冲刷影响,仍有灰坝粉煤灰流失情况出现,对将军湾库区及周边居民造成潜在威胁。建议强化塘关灰场(特别是灰坝区域)的水土保持工作。

参考文献

- [1] Tang Z H, Ma S H, Ding J, et al. Current status and prospect of fly ash utilization in China [C] // World of Coal Ash Conference, Lexington Kentucky US, 2013: 22-25.
- [2] 晋晓彤, 鄢国平, 纪娜, 等. 粉煤灰合成分子筛的研究进展[J]. 环境化学, 2015, 34(11): 2025-2038.
- [3] 孙淑静, 刘学敏. 我国粉煤灰资源化利用现状、问题及对策分析[J]. 粉煤灰综合利用, 2015(3): 45-48.
- [4] Blissett R S, Rowson N A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash[J]. Fuel, 2012, 97: 1-23.
- [5] Sommerville R, Blissett R, Rowson N, et al. Producing a synthetic zeolite from improved fly ash residue[J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 124(6): 20-25.
- [6] 朱广利, 王浩宇, 李海龙, 等. 粉煤灰脱炭研究进展及展望[J]. 洁净煤技术, 2017, 23(1): 110-114.
- [7] Yao Z T, Ji X S, Sarker P K, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141: 105-121.
- [8] 徐洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(1): 68-74.
- [9] 郭云, 赵宇中, 龙胜兴, 等. 湖泊富营养化治理成效阶段水环境特征研究: 以贵阳市饮用水源地红枫湖为例[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(6): 55-62.
- [10] 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.
- [11] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [12] 中华人民共和国环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [13] 杨通铨, 刘鸿雁, 喻阳华. 红枫湖水质变化趋势及原因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(增刊1): 96-102.
- [14] 李峰, 秦红超, 龙汉武, 等. 红枫湖蓝藻水华的成因及其控制对策[J]. 贵州科学, 2017, 35(3): 11-18.
- [15] 季慧慧, 黄明丽, 何键, 等. 粉煤灰对土壤性质改善及肥力提升的作用研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(4): 665-669.
- [16] 孙德帅, 郑强强, 张晓东, 等. 粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2590-2595.

第一作者: 金祖雪(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染与控制。zjxin.gzu@foxmail.com

通信作者: 王敬富(1983-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为湖泊环境。wangjingfu@vip.skleg.cn