

重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征

田林锋¹,胡继伟^{1*},秦樊鑫¹,黄先飞¹,刘峰¹,罗桂林²,金梅² (1.贵州师范大学省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室,贵州 贵阳 550001; 2.贵州师范大学化学与材料科学学院,贵州 贵阳 550001)

摘要:以贵州红枫湖为研究对象,分析了该湖 13 个采样点的上覆水、表层沉积物间隙水和表层沉积物中的 Cd、Pb、Cu、Zn、Fe、Mn 6 种重金属的浓度.其中,上覆水和间隙水中的金属浓度呈现相同的分布趋势:Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Cd;而沉积物中的金属浓度略有不同,为 Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>Cd.同种重金属在三者间的分布顺序为:沉积物>间隙水>上覆水,表明该湖中的重金属有从沉积物向上覆水扩散的可能.相关性分析表明,上覆水、表层沉积物间隙水和沉积物中的金属浓度之间没有明显的相关性;通过主成分分析,对该湖水体重金属的来源及迁移趋势进行评估,其中沉积物中重金属提取出一个主成分(贡献率为 67.7%),而间隙水和上覆水的分析中分别提取出 2 个主成分,其中间隙水贡献率为 73.6%和 16.73%,上覆水为 44.2%和 25.1%.红枫湖水体重金属元素含量相对国内湖泊偏高,其中北湖水体各金属元素含量普遍高于南湖水体.

关键词: 重金属; 上覆水; 间隙水; 沉积物

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2011)03-0481-09

Distribution of heavy metal elements in the water body from Lake Hongfeng. TIAN Lin-feng¹, HU Ji-wei^{1*}, QIN Fan-xin¹, HUANG Xian-fei¹, LIU Feng¹, LUO Gui-lin², JIN Mei² (1.Guizhou Provincial Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2.School of Chemistry and Materials Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China). *China Environmental Science*, 2011,31(3): 481~489

Abstract: Thirteen groups of samples (overlying water, pore-water and sediment) were collected from Hongfeng Lake, located on Yunnan-Guizhou Plateau in southwestern China, to study the behavior and fate of six heavy metals (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe and Mn). The results demonstrate that pollution levels of these metals in overlying water and pore-water share the same order: Fe > Mn > Zn > Pb > Cu > Cd, while metal concentrations in the sediment is slightly different: Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Cd. For a single element among these heavy metals, its concentration in sediment was highest, and then that in pore-water was higher than in overlying water. This phenomenon probably means that the heavy metals in the sediment of the lake may be released from the sediment into the overlying water. Although statistical analysis suggested that there was no significant correlation between the concentrations of these metals occurred in overlying water, pore-water and sediment, there are some correlations between these elements. To present a more insight analysis, principal component analysis was applied to study the pollution source of heavy metals concerned. It was found that only one component (representing 67.7% of total variance) was extracted for concentrations of these elements in sediments and two components for those in pore-water (representing 73.6% and 16.73% of total variance respectively) and overlying water (representing 44.2% and 25.1% of total variance respectively).

Key words: heavy metals; overlying water; pore-water; sediments

在自然环境条件下的湖泊体系中,重金属离子的含量很低,主要以他生矿物或内生沉淀物、络合物等形式存在^[1].但随着工业化和城市化进程的快速发展,由人类活动导致的污水排放中的重金属元素以不同途径进入了湖泊水体及大气沉降^[2-6],这些重金属在沉积物-水相界面进行着

一系列的迁移转化过程,如离子交换、吸附-释放和沉淀溶解等^[7],其中间隙水是该界面变化过程中的一个关键要素.在水体沉积物中的重金属在

收稿日期: 2010-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20967003)

* 责任作者, 教授, jiwei.hu@yahoo.com

一定的环境条件下,可能被重新释放到表层沉积物间隙水中,并通过生物或物理化学过程回到上覆水中,造成了重金属在上覆水、间隙水和沉积物系统中不间断的迁移交换.一旦重金属处于沉积物/水两相之间或水体中,将很可能迁移转化进入食物链,最终导致生态风险^[8-10].本实验以贵州红枫湖为研究对象,探讨了重金属Cd、Pb、Cu、Zn、Fe、Mn 在该湖泊上覆水、表层沉积物间隙水和表层沉积物中的含量分布情况,并对重金属在三者间的浓度进行相关分析.通过比较各水体环境单元重金属浓度的差异,对各水体环境单元进行分类,考察这 6 种重

金属在红枫湖水体的含量分布特征,为红枫湖水质规划与管理提供了依据.

1 材料与方法

1.1 采样点布置

红枫湖是贵阳市郊喀斯特人造河道深水湖泊,为贵阳市的主要饮用水源地,海拔 1108m,湖泊面积 32.15km²,流域面积为 1596km²,湖泊补给系数是 49.64,最大水深 45m,平均水深 9.3m,湖水寄宿时间为 0.325 年^[11].本次调查共设置 13 个采样点(结合湖泊形状和周边环境),采样点位置如图 1 所示(南湖为饮用水源地,采样船未能进入).

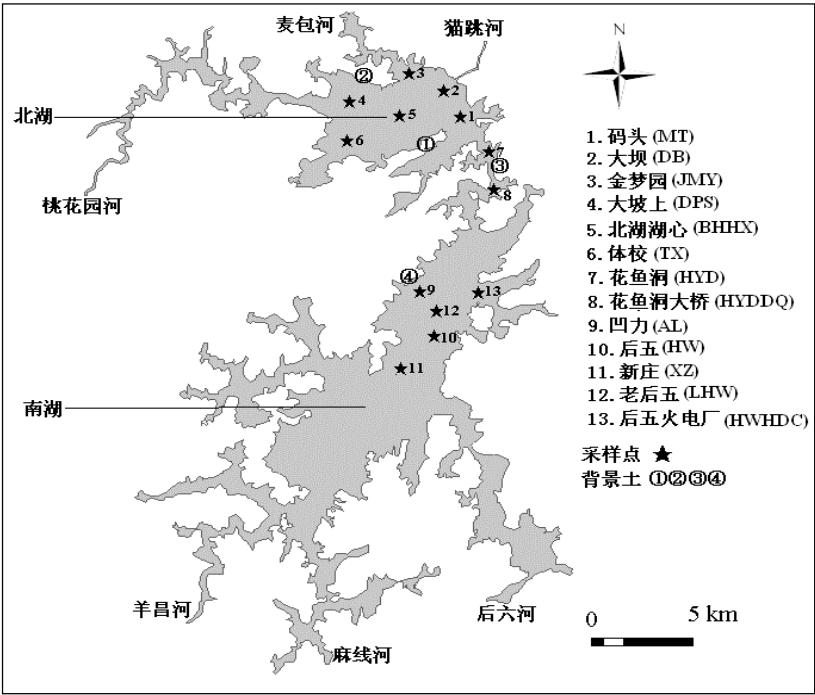


图 1 采样站位示意
Fig.1 Location of sampling stations

1.2 样品采集

每个采样点采集 3 份上覆水水样,混合均匀后装入预先用 HNO₃ 浸泡并清洗过的 500mL 聚乙烯瓶中,立即用 1:1 的 HNO₃ 酸化(pH<2).采用抓斗式采样器采集湖泊表层沉积物样品,将其混合均匀后放入聚乙烯袋中,带回实验室后,在开放环境下以 4000r/min 的速度离心分离,上清液立

即用 0.45μm 的醋酸纤维滤膜过滤,该过程快速完成,尽量减少环境的影响.

1.3 样品处理及测试

水样:分 2 次将 300mL 待测水样置于 250mL 锥形瓶中,加入 10mL 硝酸后置于电热板上浓缩至 2mL 左右,再用 0.5%的硝酸定容至 25mL,冷藏待测.

沉积物:离心后的沉积物样品在室温下自然风干,研细,过 0.25mm 的尼龙筛后储存于玻璃瓶中待测.取沉积物样品 0.1g 于聚四氟乙烯烧杯中,加入 15mL 的 HNO₃/HF/HClO₄(体积比为 2:1:2)混合液后置于电热板上加热至澄清后,再继续加热至近干,冷却后的残渣用 5mL 10%的 HNO₃ 溶解并用去离子水定容至 25mL,再转移到聚乙烯管中保存待测.

重金属浓度:Pb、Cd、Cu 用石墨炉/火焰原子吸收光谱法测定^[12];Zn、Fe 和 Mn 以电感耦合等离子体发射光谱法测定^[13].所有的样品均设置 2 个平行样,数据自动读取 3 次,取平均值,样品空白仪器自动扣除,实验所用试剂均为优级纯,实验过程所用水均为超纯水.ESS-1(GSBZ500013-87)和 ESS-2(GSBZ500012-87)对沉积物中重金属浓度进行全程监测.

2 结果与讨论

2.1 背景土壤中重金属的含量分布

在全国土壤环境背景值调查中,贵州省土壤背景值 Cd、Pb、Cu、Zn、Fe、Mn 的平均含量分别为 0.659mg/kg,35.2mg/kg,32.0mg/kg, 99.5mg/kg, 4.17%,529mg/kg.全国土壤背景值的最高频率所示的含量范围分别为 Cd 0.052~0.103mg/kg,Pb 21.1~26.2mg/kg,Cu 18.8~23.4mg/kg,Zn 63.8~76.0mg/kg, Fe 2.49%~2.89%、Mn 487~609mg/kg^[14].在本次调查中,红枫湖 Cd、Pb、Cu、Zn、Fe 和 Mn 在湖区周边土壤背景中的平均含量分别为:Cd 0.16mg/kg,

Pb 24.0mg/kg,Cu 43.6mg/kg,Zn 127mg/kg, Fe 5.0%, Mn 546mg/kg (表 1),从表 1 可以看出红枫湖湖区周边土壤背景值与贵州省整体土壤背景值基本上保持一致,甚至有些元素还低于贵州省整体水平,但均在国家二级土壤要求范围之内.

2.2 上覆水和表层沉积物间隙水中重金属浓度

在湖泊水体金属元素迁移转化过程中,沉积物中的金属离子首先进入间隙水中,然后在金属浓度梯度作用下扩散交换到上覆水中,而上覆水中的金属离子在氧化-还原条件下,通过改变金属离子价态再次进入沉积物中^[15-16].因此,沉积物中的间隙水和上覆水在湖泊体系金属的地球化学循环过程中都起重要作用.红枫湖上覆水和表层沉积物间隙水中重金属含量见表 2,从结果可以看出,这 6 种重金属在该区域水体中最大值和最小值之间相差较大,特别是间隙水.与已有文献中报道的其他自然水体相比,红枫湖中重金属整体含量水平略低^[17-18],但相对国内一些湖泊,红枫湖间隙水及沉积物中重金属含量普遍较高^[19-21].从红枫湖主要入水口南湖-北湖到主要出水口,上覆水中 Cd、Pb、Zn、Fe 的浓度波动性较大,可能是因为该湖泊较深(平均水深 20m),上覆水受水体对流扩散作用的影响比较少,从而很难使可溶性金属趋于均质化.沿南湖至北湖方向,Mn、Cu 的浓度出现逐渐下降趋势,这可能和水流带动作用有关.而间隙水中这 6 种重金属在金梦园和后五处出现较大峰值,整体趋势与上覆水相似,这可能是因为该处为旅游点,人为干扰比较大.

表 1 红枫湖区土壤背景值及土壤环境质量标准(mg/kg)
Table 1 The value of background soil in Lake Hongfeng (μg/kg)

项目	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Mn
背景土①	0.03	22.7	48.0	105	51860	60
背景土②	0.34	33.5	16.5	167	38360	490
背景土③	0.23	10.7	30.5	149	58770	682
背景土④	0.06	29.0	79.5	88	49610	952
平均值	0.16	24.0	43.6	127	49650	546
一级土壤	≤0.2	≤35	≤35	≤100	—	—
二级土壤	≤0.6	≤350	≤200	≤300	—	—
三级土壤	≤1.0	≤500	≤400	≤500	—	—

注:①、②、③、④为红枫湖周边土壤背景值采样点

从表 2 中还可以看出,上覆水和表层沉积物间隙水中的金属浓度呈现相同趋势:Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>Cd,整个水体 Fe 的含量相当的高,一方面可能是因为沉积物Fe的含量较高,从而导致间隙水中 Fe 向上覆水扩散的速度大于由于氧化而重新沉淀的速度,另一方面可能是因为周围水体存有新的铁污染源(红枫湖为贵州铁铝合金厂排水处).

表 2 红枫湖上覆水和表层沉积物间隙水中重金属含量(μg/L)
Table 2 The content of heavy metals in overlying water and pore-water from Hongfeng Lake (μg/L)

采样点	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Mn	采样点	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Mn
HS-MT	0.15	5.52	1.30	35.4	326	26	JX-MT	1.14	14.9	18.9	70.0	18720	5619
HS-DB	0.07	3.14	0.63	46.1	131	37	JX-DB	0.45	9.9	14.7	96.9	15070	1425
HS-JMY	0.13	7.09	1.09	27.5	480	41	JX-JMY	3.00	46.7	64.3	193.3	47390	4952
HS-DPS	0.12	5.60	0.68	39.9	138	14	JX-DPS	2.07	36.6	73.0	174.3	39660	4209
HS-BHHX	0.07	3.56	0.58	33.7	161	18	JX-BHHX	1.28	27.3	31.7	84.3	20370	5052
HS-TX	0.10	3.51	0.90	42.7	182	15	JX-TX	0.75	27.2	26.8	104.4	25430	2510
HS-HYD	0.12	4.51	0.99	37.9	237	20	JX- HYD	1.05	13.3	14.0	82.3	26490	8960
HS-HYDDQ	0.15	4.12	1.24	23.1	143	31	JX-HYDDQ	1.20	26.6	17.7	111.6	24990	5051
HS-AL	0.13	8.09	1.54	41.4	372	66	JX- AL	0.43	6.9	8.9	68.8	14550	2229
HS-HW	0.16	5.77	1.82	13.2	238	77	JX- HW	1.11	30.3	15.9	123.3	40250	3864
HS-XZ	0.06	2.05	1.71	44.7	376	71	JX- XZ	0.42	13.8	6.7	67.7	19990	3195
HS-LHW	0.16	4.73	2.69	20.9	281	61	JX-LHW	0.53	23.9	9.4	69.8	18220	2633
HS-HWHDC	0.08	2.45	0.92	24.4	143	70	JX-HWHDC	1.17	15.0	16.7	120.8	23630	2078
最小值	0.06	2.05	0.58	13.2	131	14	最小值	0.42	6.9	6.7	193.3	14550	1425
最大值	0.16	8.09	2.69	46.1	480	77	最大值	3.00	46.7	73.0	67.7	47390	8960
HS-平均值	0.11	4.63	1.24	33.1	247	42	JX-平均值	1.12	22.5	24.5	105.2	25751	3983

注:HS-上覆水,JX-表层沉积物间隙水

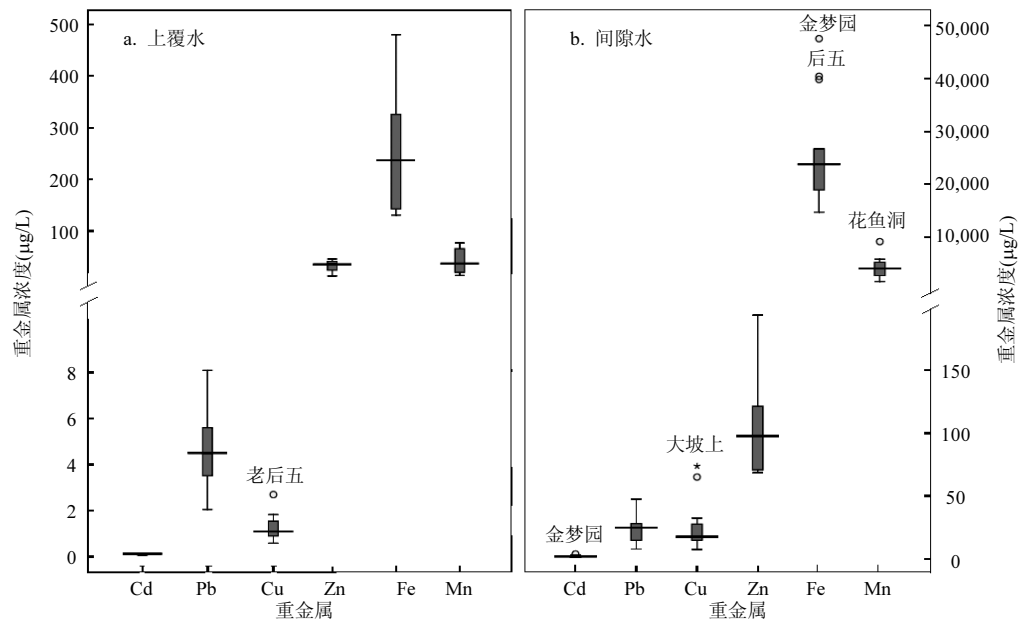


图 2 红枫湖上覆水和间隙水中重金属含量盒须图

Fig.2 Box and whisker plot of concentrations of overlying water and pore-water from Lake Hongfeng
图中°为温和异常值,*为极端异常值

盒须图(图 2)呈现了整个湖区这 6 种重金属含量的分布集散状态,在上覆水中老后五样点的 Cu 出现异常值;在间隙水中,Cd 在金梦园样点出现异常值,大坡上的 Cu 出现极端异常,Fe 在金梦园和后五样点也都出现异常值,Mn 在花鱼洞处出现温和异常值,这可能是因为金梦园样点位于红枫湖和麦包河出水口之间,上游污染物都要经过此处,并且该处人为活动比较频繁,所以该处的所有金属浓度普遍比较高.而花鱼洞样点在南湖和北湖连接的纽带出,此处的地理环境比较复杂,影响该处重金属含量的因素也很多,所以该处也出现了异常值.

2.3 上覆水/间隙水中重金属相关性分析

从表 3 可以看出,上覆水中重金属之间的相关性比较小,只有 Cu 和 Mn 为正相关($r=0.644$, $P<0.05$),Zn 和 Cd 呈现出负相关($r=-0.695$, $P<0.05$).在间隙水中除 Mn 以外,其他 5 种重金属

的 Pearson 相关系数在 0.743~0.884 (双尾)之间,表现出较强的相关性,这说明了间隙水中各金属之间互相影响可能具有相同的来源.因为 Mn 为敏感元素,即使微小的氧化-还原条件变化也会直接影响其化学形态.在还原条件下,表层沉积物中 Mn 获得电子充当氧化剂,本身被还原为低价溶解态的离子,从而发生解吸作用进入间隙水中^[22-23],所以间隙水中 Mn 的含量难以控制,这可能也是 Mn 与其他 5 种金属元素的相关性不大的原因,Fe 也属于敏感元素,但该元素和其它元素相关性比较大,有必要在以后的科研中更深层次的探索研究.其它元素由于浓度梯度的扩散作用,从而使得整体水平保持在一个相互均衡制约的基础上,因为这与其它 5 种重金属离子从间隙水向上覆水扩散过程中,不会因为氧化还原条件的变化而发生重新沉淀现象,这也是间隙水中重金属浓度高出上覆水 10 多倍的原因.

表 3 上覆水、间隙水各污染物含量的相关性分析
Table 3 The correlation coefficients between the concentration of pollutants

重金属	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Mn
Cd	1	0.823**	0.877**	0.876**	0.840**	0.379
Pb	0.695**	1	0.800**	0.807**	0.850**	0.177
Cu	0.538	0.202	1	0.864**	0.743**	0.175
Zn	-0.608*	-0.172	-0.464	1	0.884**	0.047
Fe	0.266	0.523	0.450	0.011	1	0.297
Mn	0.075	0.033	0.644*	-0.402	0.357	1

注:灰色部分为上覆水中各污染物含量相关系数,无色部分为间隙水中各污染物含量相关系数; **相关性显著水平 0.01 (双尾), *相关性显著水平 0.05 (双尾)

2.4 表层沉积物中重金属含量

X-射线多晶衍射分析仪测定红枫湖各采样点沉积物的主要成分见表 4.沉积物中重金属含量见表 5,从中可以看出,沉积物中的重金属含量远远高于水体中的含量,其中 Cd 0.1~0.3mg/kg, Pb 29.2~80.0mg/kg,Cu 44~174mg/kg,Zn 72~208mg/kg, Fe 34520~49630mg/kg,Mn 367~916mg/kg,Fe 和 Mn 的含量远高于其他几种重金属.与已有的研究结果相比,近年红枫湖沉积物中金属离子浓度变化不大^[24].沉积物中的金属浓度呈现出这样的分布趋势:Fe > Mn > Zn > Cu > Pb > Cd,这与上覆水和间隙水中的分布模式略有不同.红枫湖为

典型的高原喀斯特深水湖泊,其特点除了水深以外(本次采样点水深均在 20m 左右),还存在复杂的喀斯特地理特征;而沉积物本身就处在一种厌氧高压的还原状态下,厌氧微生物的生理活动对重金属的价态同样存在很大的影响,这些都是影响其含量的因素.在大多数情况下,由于重金属离子易被黏土、碳酸盐、铁锰氧化物和有机物颗粒络合,转化为水体悬浮物,进而沉降下来形成沉积物^[25-27],所以沉积物中重金属含量一般比水体中重金属含量高出许多.图 3 中 Mn 的含量同样出现异常值,再次说明敏感元素 Mn 在喀斯特深水湖泊中具有特殊的地球化学行为.

表 4 红枫湖表层沉积理化参数

Table 4 Physical and chemical parameters about the sediments from Lake Hongfeng

采样点	颜色状态	水深(m)	主要成分	pH 值	有机质(%)
1 码头	黑色泥状	26	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Na _{0.3} Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7.68	12.69
2 大坝	黑色泥状	33	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Ni _{2.4} Cu _{3.04} As _{5.6} (OH) ₁₆ (CO ₃) _{1.28} ·9.84H ₂ O	7.54	14.81
3 金梦园	黑色泥状	17	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Ca _{0.3} (Cr,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7.74	11.24
4 大破上	黑色泥状	24	SiO ₂ 、CaCO ₃	7.60	12.64
5 北湖湖心	黑色泥状	36	SiO ₂ 、CaCO ₃	7.63	11.55
6 体校	黑带黄泥状	25	SiO ₂ 、CaCO ₃	7.60	13.21
7 花鱼洞	黑色泥状	35	SiO ₂ 、CaCO ₃	7.66	11.43
8 花鱼洞大桥	黑色泥状	25	SiO ₂ 、CaCO ₃ Na _{0.3} Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7.89	13.58
9 凹力	黑色泥状	25	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Ca _{0.3} (Cr,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7.66	12.38
10 后五	黑色泥状	19	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Na _{0.3} Fe ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7.76	9.09
11 新庄	黑色泥状	18	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Ca _{0.3} (Cr,Mg) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	7.71	11.09
12 老后五	黑色泥状	15	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 C ₁₅ H ₁₁ ClN ₂ O ₂	7.63	11.14
13 后五火电厂	黑带黄泥状	20	SiO ₂ 、CaCO ₃ 、 Mn ₃ Ta ₂ O ₈	7.82	10.72

注:石英的主要成分为SiO₂,方解石的主要成分为CaCO₃,蒙脱石的主要成分Na_{0.3}Fe₂Si₄O₁₀(OH)₂·4H₂O,高岭石的主要成分为Ca_{0.3}(Cr,Mg)₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂·4H₂O,其他成分暂不明了;有机质含量采用烧失法

表 5 红枫湖表层沉积物中重金属含量(mg/kg)

Table 5 The content of heavy metals in surface sediments from Lake Hongfeng (mg/kg)

采样点	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Mn
SE-MT	3.6	39.8	76	138	42700	723
SE-DB	1.5	36.1	121	189	46870	578
SE-JMY	2.8	54.8	124	117	41500	707
SE-DPS	2.4	67.0	165	142	47370	604
SE-BHHX	2.5	80.0	174	161	49440	916
SE-TX	1.0	56.1	141	124	49630	617
SE-HYD	1.2	30.9	52	74	35810	633
SE-HYDDQ	0.9	35.9	51	72	39000	525
SE-AL	0.8	34.1	55	138	38310	401
SE-HW	1.2	38.8	63	208	45090	455
SE-XZ	0.6	32.8	44	96	39540	556
SE-LHW	0.7	30.0	45	83	34520	377
SE-HWHDC	0.8	29.2	55	79	36760	367
最小值	0.6	29.2	44	72	34520	367
最大值	3.6	80.0	174	208	49630	916
SE-平均值	1.5	43.5	90	125	42042	574

注:SE=表层沉积物

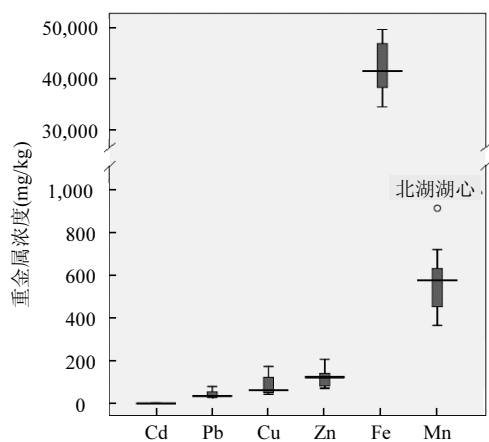


图3 红枫湖表层沉积物中重金属含量盒须图

Fig.3 Box and whisker plot of concentrations of surface sediments from Lake Hongfeng

°为温和异常值

2.5 表层沉积物中重金属相关性分析

在本次试验所给定的研究区域内,沉积物中各元素含量及其之间的比率具有相对的稳定性,当沉积物来源相同或相似时,其中的各个元素具有显著的相关性,见表 6.通过对重金属元素以及

沉积物特征参数之间的相关分析,可以确定重金属的来源及其在沉积物中含量变化的控制因素.大部分元素之间均呈现出较显著的相关性,只有 Zn 与大部分元素相关性较差,反映出沉积物中 Zn 还有其它的重要来源,比如大气沉降.然而,这几种重金属在上覆水、间隙水和沉积物中的含量的相关性比较小,这可能是由于湖泊体系中的微量金属迁移不仅受到金属自身浓度的影响,还受到金属的赋存化学形态以及 pH 值、氧化还原条件、有机物和微生物等环境条件的影响,影响因素比较复杂,从而导致其变化规律性较差.

2.6 上覆水、表层沉积物间隙水及表层沉积物中重金属主成分分析及聚类分析

本文通过主成分分析,对红枫湖水体重金属的来源及迁移趋势进行评估,其中,从沉积物中的重金属元素提取出一个主成分(贡献率为 67.7%),而表层沉积物间隙水和上覆水的分析中各自提取出两个主成分,贡献率分别为:间隙水 73.6%和 16.73%,上覆水 44.2%和 25.1%,贡献率并不是很大,这同样说明该湖泊的这几种重金属的来源相对比较单一.

表 6 表层沉积物中重金属相关性分析

Table 6 The correlation coefficients between the concentration of pollutants in surface sediments

重金属	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe	Mn
Cd	1					
Pb	0.563*	1				
Cu	0.556*	0.921**	1			
Zn	0.337	0.374	0.466	1		
Fe	0.436	0.772**	0.852**	0.722**	1	
Mn	0.730**	0.746**	0.685**	0.237	0.589*	1

注: **相关性显著水平0.01 (双尾); *相关性显著水平0.05 (双尾)

因为水体环境单元的属性是由 m 个污染因子共同决定的,但不同的污染因子其单位的数量级往往存在较大差异,若直接使用原始数据,就会使绝对值大的污染因子的作用被“放大”,绝对值小的污染因子的作用被“缩小”,从而影响到最终的结果^[27,28-30],所以本文在对所测定 6 种重金属元素进行聚类分析前,先进行数量级统一化(即 $\log_{10}+2$),然后采用组间的类平均法进行变量标准化,距离测量采用平方欧氏距离,最后得到图 4 的采样点聚类分析和重金属聚类分析树形图,从

图中可以清楚的看到整个水域的聚类过程.上覆水、间隙水、沉积物在聚类过程差别比较大,其中聚类过程区域间隔比较大,聚类后的各点并不是在同一区域,这可能也是喀斯特地理环境导致的,具体情况有待进一步深入研究.

重金属在红枫湖上覆水、表层沉积物间隙水、表层沉积物中的分类基本相同,大概可以分为 3 类,第 1 类只有 Cd,第 2 类包括 Pb、Cu、Zn,第 3 类包括 Fe、Mn,这种聚类可能是由于其毒性以及其本身性质决定的,Cd 为毒性最强的元

- 潜在生态风险 [J]. 中国环境科学, 2007,27(1):89-92.
- [11] 梁小兵,朱建明,刘丛强,等.贵州红枫湖沉积物有机质的酶及微生物降解 [J]. 第四纪研究, 2004,23(5):555-572.
- [12] 国家环境保护总局科技标准司.中国环境保护标准汇编 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2000.
- [13] 国家环境保护总局.全国土壤污染状况调查样品分析测试技术规定 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2006:96-100.
- [14] 中国环境监测总站主编.中国土壤元素背景值 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:87-256.
- [15] 王洪君,王为东,尹澄清,等.湖滨带氧化还原环境的时空变化及其环境效应 [J]. 环境科学学报, 2007,27(1):23-27.
- [16] Wetzel R G. Limnology Lake and River Ecosystems 3rd edition [M]. San Diego, San Francisco, New York: Academic Press, 2001:274-288.
- [17] Jerzy G, Teresa S. Voltammetric method for the determination of Zn, Cd, Pb, Cu and Ni in interstitial water [J]. Fresenius Journal of Analytical Chemistry, 1996,354:735-737.
- [18] Doyle C J, Pablo F, Lim R P. Assessment of metal toxicity in sediment pore water from Lake Macquarie, Australia [J]. Archives of Environment Contamination and Toxicology, 2003,44: 343-350.
- [19] 王小庆,郑乐平,孙为民.淀山湖沉积物孔隙水中重金属元素分布特征 [J]. 中国环境科学, 2004,24(4):400-404.
- [20] 杨丽原,沈吉,张祖陆,等.南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析 [J]. 中国环境科学, 2003,23(2):206-209.
- [21] 滑丽萍,华璐,高娟,等.中国湖泊底泥的重金属污染评价研究 [J]. 土壤, 2006,38(4):366-37.
- [22] 罗莎莎,万国江.云贵高原湖泊沉积物-水界面铁、锰、硫体系的研究进展 [J]. 地质地球化学, 1999,27(3):47-52.
- [23] Tessier A, Fortin D, Belzile N, et al. Metal sorption to diagenetic iron and manganese oxyhydroxides and associated organic matter: Narrowing the gap between field and laboratory measurements [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996,60(3):387-404.
- [24] 黄先飞,秦樊鑫,胡继伟,李存雄,等.红枫湖沉积物中重金属污染特征与生态危害风险评价 [J]. 环境科学研究, 2008,21(2): 18-23.
- [25] Hart B T. Uptake of trace metals by sediments and suspended particulates: a review [J]. Hydrobiologia, 1982,91/92:299-313.
- [26] Jain C K, Singhal D C, Sharma M K. Metal pollution assessment of sediment and water in the River Hindon, India [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2005,105:193-207.
- [27] Liu W X, Coveney R M, Chen J L. Environmental quality assessment on a river system polluted by mining activities [J]. Applied Geochemistry, 2003,18:749-764.
- [28] 孙世群.南淝河水体环境单元分类的模糊聚类方法及结果分析 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998,21(3):111-116.
- [29] 田丽,陈俊,吕元锋.模糊聚类法在水环境质量评价中的应用 [J]. 兵工自动化, 2005,24(5):69-70.
- [30] 倪小东,殷福才,孙世群,等.出入巢湖东湖水体环境单元模糊聚类分析 [J]. 安徽化工, 2007,33(6):57-60.

作者介绍: 田林锋(1983-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要从事环境分析化学.发表论文 7 篇.

李克强对环境保护工作作出重要批示

中共中央政治局常委、国务院副总理李克强近日对环境保护工作作出重要批示,要求环保战线广大干部职工紧紧围绕推动科学发展和加快转变经济发展方式,努力解决突出环境问题,提高生态文明水平,促进绿色发展,更好地顺应人民群众对生态环境的新期待。

李克强批示指出,“十一五”时期,我国环境保护力度不断加大,环保工作取得重要进展,主要污染物减排任务超额完成.希望环保战线广大干部职工紧紧围绕推动科学发展和加快转变经济发展方式,坚持以人为本、环保为民,加强综合治理,完善体制机制,努力解决突出环境问题,提高生态文明水平,促进绿色发展,更好地顺应人民群众对生态环境的新期待。

摘自《中国环境报》

2011-01-14