

文章编号 : 0254 - 5357( 2008 ) 04 - 0263 - 06

## 内蒙古乌梁素海湖泊地球化学特征与初步评价

王喜宽<sup>1,2</sup>, 朱锁<sup>3</sup>, 赵锁志<sup>1,2</sup>, 张青<sup>2</sup>, 李世宝<sup>2</sup>, 苏美霞<sup>2</sup>

( 1. 中国地质大学( 北京 ), 北京 100083 ;

2. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020 ;

3. 内蒙古国土资源勘查开发院, 内蒙古 呼和浩特 010020 )

**摘要 :** 通过内蒙古乌梁素海表层沉积物和深层沉积物的研究分析, 对乌梁素海的湖泊沉积物特征有着明确的了解。乌梁素海深层沉积物中各元素与河套平原深层土壤中基本一致, 而表层沉积物中各元素则具有明显的特征。湖泊表层沉积物中主要富集 Cl、Cd、S、F、Sb、C、Bi、As、Li、MgO、CaO、Cu、Ni、Sn、W、Zn、Co、Mo、Au、Sc、Tl、Hg、I、Mn、U、Ce、La、Be、Se、Th 等。湖泊表层沉积物与深层沉积物相比, 在表层富集 S、orgC、N、Se、I、Br、Sr、C、U、Mo、Cl、CaO、Hg、P。在湖泊表层富集上述元素说明了黏土极易吸附这些元素, 有些元素的富集主要是由于人类活动造成的结果。同时在表层土壤中 pH 明显低于深层土壤和河套地区土壤的 pH, 这与工业排放等人类活动紧密相关。垂直剖面结果也表明, 人类活动对湖泊环境造成了严重影响。乌梁素海已出现富营养化和 Hg、F 污染, 需对其进行治理。

**关键词 :** 乌梁素海 ; 生态地球化学 ; 沉积物 ; 河套地区

中图分类号 : P596 ; S151.9

文献标识码 : A

## Primary Assessment on the Geochemical Characteristics of Wuliangshai Lake in Inner Mongolia

WANG Xi-kuan<sup>1,2</sup>, ZHU Suo<sup>3</sup>, ZHAO Suo-zhi<sup>1,2</sup>,

ZHANG Qing<sup>2</sup>, LI Shi-bao<sup>2</sup>, SU Mei-xia<sup>2</sup>

( 1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China ; 2. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Huhhot 010020, China ; 3. Institute of Land and Resources Exploitation and Development of Inner Mongolia, Huhhot 010020, China )

**Abstract :** Through the elemental analysis in sediments from the surface and deep layers of Wuliangshai Lake, the better understanding for sediment characteristics of the Wuliangshai Lake is gained. The element distribution in sediments from the deep layer of the Lake is basically identical with that from the deep soils in Hetao area and the distinct characteristics of element distribution in the surface sediments of the Lake are observed. It is discovered that elements of Cl, Cd, S, F, Sb, C, Bi, As, Li, MgO, CaO, Cu, Ni, Sn, W, Zn, Co, Mo, Au, Sc, Tl, Hg, I, Mn, U, Ce, La, Be, Se, Th, etc. are enriched in surface layer of the sediments. Compared with deep layer of the sediments, S, orgC, N, Se, I, Br, Sr, C, U, Mo, Cl, CaO, Hg and P are in abundant in surface layer of the sediments. It is explained that clay in surface layer of the sediments has strong trend to adsorb these elements and the enrichment of some elements has correlation with human activities. The value of the pH in the surface layer of

收稿日期 : 2008-01-20 ; 修订日期 : 2008-03-31

基金项目 : 国土资源地质大调查项目资助( 200414200005 ) ; 省部合作内蒙古河套农业经济区生态地球化学调查项目资助

作者简介 : 王喜宽( 1969 - ) 男, 内蒙古呼和浩特市人, 高级工程师, 在读博士, 地球化学专业, 长期从事勘查地球化学、环境地球化学、生态地球化学调查工作。E-mail : nmgwxk@126.com。

the sediments is lower than that in deep layer and in soils in Hetao area, which is assumed to originate from industrial discharge. The vertical section chart also indicates that the human activities have serious influence on environment of Wuliangsu Hai Lake. The eutrophication and pollution from Hg and F have appeared and serious attention should be paid to the environment pollution in this area.

**Key words:** Wuliangsu Hai Lake; ecological geochemistry; sediment; Hetao area

乌梁素海位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,是中国十大淡水湖之一,全球荒漠半荒漠地区极为少见的具有生物多样性和环保多功能的大型草原湖泊,是地球上同一纬度最大的自然湿地。乌梁素海原是古黄河北河河道,清道光三十年(公元1850年)北河上部淤塞,下部乌拉山西侧一段留下两个河迹湖,后因黄河洪泛、山洪汇聚而成海。解放前夕最大面积达700余 $\text{km}^2$ 。新中国初期,经过治理,海域缩小,现在水域总面积仅293 $\text{km}^2$ 。

乌梁素海湖水来源主要是河套灌区各大干渠的灌溉余水(即黄河水)和山洪补给水。同时,乌梁素海还是内蒙古重要的鸟类迁徙地和繁殖地。从20世纪80年代以来,由于农业施肥以及工业的不断发展,使乌梁素海湖泊环境发生了巨大变化。根据巴彦淖尔市环境监测站的监测记录,目前乌梁素海主要受到氮、磷等营养元素和化学耗氧量(有机物)的污染,总氮、总磷、氨氮和化学耗氧量常年处于超标状态。近几年来的监测结果表明,乌梁素海的水质呈不断恶化趋势。“十五”期间,中、瑞、挪三国共同对其进行综合整治研究,总体目标是“使湖泊成为一个真正的湖泊”<sup>[2]</sup>,但受各方面条件限制,成效较差。还有不少单位对乌梁素海进行了研究,针对乌梁素海富营养化日趋严重和湿地面积逐渐萎缩,系统地研究了其生态环境地球化学效应<sup>[3]</sup>。在乌梁素海设立试验示范基地,进行较大规模富营养化适度控制的试验研究<sup>[4]</sup>。这些研究与探索主要是对湖泊的富营养化情况进行研究并提出治理意见,但对湖泊沉积物与湖泊水中重金属及其他元素的分布状况很少涉及。湖泊水中重金属与湖泊沉积物之间也具有紧密相关的关系。湖泊沉积物一方面是重金属的载体,另一方面沉积物中的重金属在一定条件下又会重新释放进入水体而成为潜在污染源,因此水体沉积物的重金属含量可以反映湖泊受重金属的污染状况<sup>[5]</sup>。本次工作就是对乌梁素海沉积物与湖泊水中重金属元素进行分析研究,对乌梁素海的环境特征进行总体评价。

目前在全国重要经济区带开展的多目标区域地球化学调查工作,包括了我国重要的湖泊区,均进行了湖泊表层沉积物(0~20 cm)、深层沉积物(150~200 cm)样品的采集,测定其中54种元素指标<sup>[6]</sup>。这些指标对研究湖泊环境具有重要的意义。本文就是通过开展多目标区域地球化学调查工作及生态地球化学评价工作,对乌梁素海的环境状况进行评价。

## 1 样品采集与分析

### 1.1 样品采集

本次工作是按照《1:25万多目标区域地球化学调查规范》<sup>[7]</sup>对乌梁素海沉积物进行样品采集工作。表层湖泊沉积物是采集湖泊底部0~20 cm以淤泥质为主的湖泊沉积物,深层沉积物是采集湖泊底部-150~-200 cm的沉积柱。表层采样密度为每4 $\text{km}^2$ 一个点,采集样品62件,深层采样密度为每16 $\text{km}^2$ 一个点,采集样品21件,均直接进行单点分析。

由于乌梁素海湖底比较平坦,湖泊比深不大,一般为1~2 m,样品采集时选择的湖泊水深基本一致,因此样品深度上处于同一层位(表层和深层)的样品具有各自的可比性。

### 1.2 样品分析

根据《规范》要求,对样品测定54种元素指标,样品由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所中心实验室分析。样品分析质量和河套地区多目标区域土壤地球化学样品一起,被中国地质调查局组织的专家评为优秀。

## 2 乌梁素海湖泊沉积物地球化学特征

### 2.1 湖泊深层沉积物地球化学特征

乌梁素海深层柱状沉积物共采集了21件,样品深度为湖泊底部-150~-200 cm的沉积柱,样品介质主要是粉砂质黏土、细粉砂等,与湖泊周围河套平原东部的深层土壤样品性质基本一致。从表1可以看出,乌梁素海深层沉积物的地球化学特征如下。

(1) 根据各元素变异系数(CV),深层沉积物变异系数较大的组分是Cl、S、Mo、Se、Br、orgC,这些组分分布不均匀;其他绝大多数组分在深层湖泊沉积物中分布均匀。

(2) 与河套地区土壤基准值相比,具有如下特征。

① 深层沉积物中富集(即 $C_1 \geq 1.2$ )的组分有: Cl、Cd、S、F、Sb、C、Bi、As、Li、MgO、CaO、Cu、Ni、Sn、W、Zn、Co、Mo、Au、Sc、Tl、Hg、I、Mn、U、Ce、La、Be、Se、Th。

② 相对富集(即 $1.2 > C_1 \geq 1.1$ )的组分有: Sr、Y、B、P、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Ag、Ga、Br、Pb、Rb、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

③ 基本一致(即 $1.1 > C_1 \geq 0.9$ )的组分有: Cr、Ti、N、K<sub>2</sub>O、Ge、Nb、orgC、pH、Na<sub>2</sub>O、Ba。

④ 明显贫化(即 $C_1 < 0.9$ )的组分有: SiO<sub>2</sub>、Zr。

表1 乌梁素海湖泊深层沉积物地球化学特征<sup>①</sup>  
Table 1 Geochemical characteristics of the deep layer sediments from the Wuliangsu Lake

组分	原始数据 (n=21)					剔除后数据				C <sub>1</sub>	
	平均值	离差	CV	最小值	最大值	样数	平均值	离差	CV		河套基准值
Cl	1057.7	1714.7	1.62	115	7258	20	747.65	985.11	1.32	338.48	2.21
Cd	151.43	44.29	0.29	67	243	21	151.43	44.29	0.29	100.75	1.5
S	384.43	417.83	1.09	103	1907	20	308.3	235.92	0.77	207.01	1.49
F	677.86	224.64	0.33	350	1290	21	677.86	224.64	0.33	478.72	1.42
Sb	1.15	0.37	0.32	0.53	1.92	21	1.15	0.37	0.32	0.81	1.42
C	1.92	0.54	0.28	0.7	3.0	21	1.92	0.54	0.28	1.36	1.41
Bi	0.32	0.12	0.36	0.14	0.56	21	0.32	0.12	0.36	0.23	1.39
As	13.05	4.26	0.33	4.63	21.3	21	13.05	4.26	0.33	9.61	1.36
L	39.19	11.47	0.29	18.2	62.1	21	39.19	11.47	0.29	29.13	1.35
MgO	2.72	1.07	0.39	1.39	6.17	20	2.55	0.74	0.29	1.91	1.34
CaO	7.8	1.65	0.21	4.21	11.01	21	7.8	1.65	0.21	5.89	1.32
Cu	24.74	7.37	0.3	12.1	41.1	21	24.74	7.37	0.3	18.88	1.31
Ni	31.34	9.11	0.29	17.4	54.1	21	31.34	9.11	0.29	24.21	1.29
Sn	2.84	0.64	0.22	1.66	3.88	21	2.84	0.64	0.22	2.24	1.27
W	1.69	0.39	0.23	0.93	2.31	21	1.69	0.39	0.23	1.33	1.27
Zn	67.24	19.38	0.29	36.5	109.7	21	67.24	19.38	0.29	52.8	1.27
Co	12.18	3.24	0.27	6.3	18.53	21	12.18	3.24	0.27	9.68	1.26
Mo	0.81	0.47	0.58	0.18	2.46	20	0.72	0.29	0.4	0.57	1.26
Au	1.78	0.75	0.42	0.84	3.43	21	1.78	0.75	0.42	1.42	1.25
Sc	10.95	2.72	0.25	6.5	16.7	21	10.95	2.72	0.25	8.79	1.25
Tl	0.65	0.17	0.27	0.17	0.96	21	0.65	0.17	0.27	0.52	1.25
Hg	20.75	7.25	0.35	10.3	33.3	21	20.75	7.25	0.35	16.84	1.23
I	2.0	0.69	0.35	0.89	3.37	21	2.0	0.69	0.35	1.63	1.23
Mn	621.24	167.31	0.27	364	979	21	621.24	167.31	0.27	506.01	1.23
U	2.34	0.5	0.22	1.19	3.15	21	2.34	0.5	0.22	1.92	1.22
Ce	59.81	9.37	0.16	39.7	74.3	21	59.81	9.37	0.16	49.37	1.21
La	31.71	4.86	0.15	20.9	38.7	21	31.71	4.86	0.15	26.31	1.21
Be	1.99	0.38	0.19	1.38	2.82	21	1.99	0.38	0.19	1.66	1.2
Se	0.12	0.06	0.5	0.04	0.27	21	0.12	0.06	0.5	0.1	1.2
Th	11.13	2.45	0.22	7.0	15.9	21	11.13	2.45	0.22	9.29	1.2
V	78.4	16.92	0.22	47.4	117.2	21	78.4	16.92	0.22	65.44	1.2
Sr	323.71	145.95	0.45	222	874	20	296.2	75.41	0.25	248.01	1.19
Y	22.7	3.64	0.16	15.4	28.8	21	22.7	3.64	0.16	19.22	1.18
B	49.78	10.75	0.22	24.9	73	21	49.78	10.75	0.22	42.71	1.17
P	567.03	74.69	0.13	352.9	657.8	21	567.03	74.69	0.13	494.65	1.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.17	0.99	0.24	2.55	6.25	21	4.17	0.99	0.24	3.62	1.15
Ag	62.9	13.37	0.21	36	88	21	62.9	13.37	0.21	55.85	1.13
Ga	15.13	2.35	0.16	11.4	19.9	21	15.13	2.35	0.16	13.36	1.13
Br	2.7	2.11	0.78	0.9	8.5	21	2.7	2.11	0.78	2.44	1.11
Pb	21.67	4.48	0.21	15.9	31.7	21	21.67	4.48	0.21	19.67	1.1
Rb	96.52	18	0.19	72.4	137.3	21	96.52	18	0.19	87.58	1.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.13	1.24	0.1	9.95	14.29	21	12.13	1.24	0.1	11.03	1.1
Cr	61.71	19.1	0.31	37.1	128.8	20	58.36	11.63	0.2	54.13	1.08
Ti	3260.9	464.91	0.14	2178	3820	21	3260.9	464.91	0.14	3049.9	1.07
N	376.57	169.66	0.45	120	870	21	376.57	169.66	0.45	354.29	1.06
K <sub>2</sub> O	2.37	0.28	0.12	2.06	3.05	21	2.37	0.28	0.12	2.26	1.05
Ge	1.24	0.09	0.08	1.06	1.41	21	1.24	0.09	0.08	1.21	1.02
Nb	11.71	1.8	0.15	8.3	13.5	21	11.71	1.8	0.15	11.54	1.01
orgC	0.24	0.14	0.59	0.08	0.67	20	0.22	0.1	0.46	0.22	1.0
Na <sub>2</sub> O	1.86	0.35	0.19	0.98	2.58	21	1.86	0.35	0.19	1.92	0.97
Ba	480.33	37.01	0.08	430	563	21	480.33	37.01	0.08	524.11	0.92
SiO <sub>2</sub>	57.68	7.49	0.13	41.6	71.2	21	57.68	7.49	0.13	65.13	0.89
Zr	180.05	39.59	0.22	123	280	21	180.05	39.59	0.22	215.02	0.84
pH	8.78	0.29	0.03	8.17	9.41	21	8.78	0.29	0.03	8.9	0.99

① 各组分含量单位: Au、Ag、Cd、Hg 为 ng/g; SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、CaO、MgO、C、orgC 为 %; 其他为 μg/g; pH 无量纲。样品分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查所中心实验室分析, 按多目标区域地球化学调查规范要求进行。C<sub>1</sub> 为乌梁素海湖泊深层沉积物剔除离差值后的平均值与河套基准值之比, 即 w 平均值/w 基准值。

从上述数据可以看出, 乌梁素海绝大多数深层元素要比河套地区的基准值含量高, 这与乌梁素海深层土壤中物质成分有很大的关系, 这些深层土壤中以黏土质物质为主, 黏土矿物容易吸附各种元素, 从而使绝大多数元素含量增高。其中地球化学性质活泼的元素如 Cl、S、F、Sb、C、MgO、CaO、Mo、I、U、Se 等在湖泊深层沉积物明显聚集, 这些组分容易在黄河水中迁移, 在进入乌梁素海一带水流变缓产生沉积富集。

贫化的组分 SiO<sub>2</sub> 在细粒级物质中含量较少, 主要存在于砂粒中; Zr 则由于其化学性质稳定, 迁移较难, 更集中于在原地存留。

## 2.2 湖泊表层沉积物地球化学特征

乌梁素海是现代的湖泊沉积物, 其表层沉积物来源广泛, 不仅有黄河灌溉退水携带的物质, 也有附近旗县工业排放流入的工业废水。既有自然物质进入, 也有现代人类活动的明显影响。从表 2 可以看出, 乌梁素海表层沉积物各元素具有以下特征。

(1) 根据各元素变异系数, 表层沉积物中变异系数(CV)较大元素有: I、Sr、Mo、Se、U、Cl、Hg、orgC, 这些元素分布不均匀。其他绝大多数元素在表层沉积物中分布均匀。

(2) 与河套地区土壤背景值相比, 乌梁素海湖泊表层沉积物具有如下特征。

① 明显比河套地区土壤背景值高(即 C<sub>2</sub> ≥ 1.2)的组分有: S、I、N、orgC、Sr、C、Mo、Se、Br、U、Cl、CaO、F、Cd、Mg、Ni、Mn、Cu、Zn。

② 比河套地区相对高(即 1.1 ≤ C<sub>2</sub> < 1.2)的组分有: As、P、Co、Sb、Sc、Li、Hg、Bi、B、Tl、W、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、V。

③ 与河套地区背景值基本一致(0.9 ≤ C<sub>2</sub> < 1.1)的组分有: Au、Th、La、Y、Pb、Ce、Cr、Ag、Ga、Be、Rb、Ti、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O、pH、Ba、Ge。

④ 比河套地区土壤背景值稍低(0.8 ≤ C<sub>2</sub> < 0.9)的组分有: Sn、Nb、Na<sub>2</sub>O。

⑤ 明显比河套地区表层土壤背景值低(C<sub>2</sub> < 0.8)的组分有: Zr、SiO<sub>2</sub>。

从上述特征可以看出, 乌梁素海表层沉积物中富含大多数元素, 以比值 C<sub>2</sub> 大于 1 来统计, 有 43 个组分在乌梁素海表层沉积物中的含量要高于河套地区的表层土壤背景值。明显小于河套地区背景值的组分只有 Zr 和 SiO<sub>2</sub>。比河套地区背景值高的组分中, S、I、N、orgC、Sr、C、Mo、Se、Br、U、Cl、CaO 明显高于河套地区背景值。乌梁素海湖底表层沉积物主要是淤泥, 物质成分主要是黏土、粉砂土, 富含有机质, 黏土对上述元素具有特别明显的吸附作用。其中 N 的富集与河套地区农业用肥有关, 长期使用以氮肥为主的化肥, 经退水携带 N 及其他元素被汇入乌梁素海沉积下来形成富集, 湖水中的沉积物在长期缺氧情况下逐渐变化, 富含有机物, 而有机物的增多也进一步加剧了黏土对上述元素的吸附。

表2 乌梁素海表层沉积物地球化学特征<sup>①</sup>

Table 2 Geochemical characteristics of the surface layer sediment from the Wuliangsuhai Lake

组分	原始数据 (n=62)					剔除后数据					C <sub>2</sub>
	平均值	离差	CV	最小值	最大值	样数	平均值	离差	CV	河套 基准值	
S	5072.6	1906.4	0.38	460	8009	62	5072.6	1906.4	0.38	353.07	14.37
I	6.88	4.52	0.66	1.31	28.3	61	6.53	3.6	0.55	1.36	4.80
N	2243	881.34	0.39	525	4710	62	2243	881.34	0.39	510.09	4.40
orgC	2.1	0.93	0.45	0.34	4.67	62	2.1	0.93	0.45	0.53	3.96
Sr	778.81	452.72	0.58	226	2612	61	748.75	389.15	0.52	244.07	3.07
C	4.74	1.69	0.36	1.5	10.1	61	4.65	1.55	0.33	1.59	2.92
Mo	1.61	0.98	0.61	0.27	5.16	61	1.55	0.87	0.56	0.56	2.77
Se	0.45	0.36	0.79	0.07	2.1	61	0.43	0.29	0.68	0.16	2.69
Br	9.06	4.02	0.44	2.0	28.4	61	8.74	3.18	0.36	3.45	2.53
U	5.18	2.56	0.49	1.42	12.8	62	5.18	2.56	0.49	2.06	2.51
Cl	1232.4	724.58	0.59	220	5214	61	1167.1	514.99	0.44	499.62	2.34
CaO	11.48	4.09	0.36	4.33	24.5	61	11.27	3.76	0.33	5.51	2.05
F	702.58	127.24	0.18	384	1137	61	695.46	115.16	0.17	483.37	1.44
Cd	174.53	71.08	0.41	82	543	60	163.52	36.74	0.22	120.3	1.36
MgO	2.69	0.47	0.17	1.62	4.37	61	2.66	0.42	0.16	1.96	1.36
Ni	32.19	6.15	0.19	16.4	49.3	62	32.19	6.15	0.19	24.5	1.31
Mn	638.61	112.69	0.18	347	928	62	638.61	112.69	0.18	507.93	1.26
Cu	23.66	5.33	0.23	13.4	36.3	62	23.66	5.33	0.23	19.17	1.23
Zn	67.79	14.1	0.21	39.5	111.9	61	67.07	13.01	0.19	55.67	1.20
As	11.49	2.9	0.25	6.09	18.6	62	11.49	2.9	0.25	9.68	1.19
P	694.34	85.47	0.12	469.2	861.5	62	694.34	85.47	0.12	585.63	1.19
Co	11.72	2.22	0.19	6.59	16.6	62	11.72	2.22	0.19	9.93	1.18
Sb	0.97	0.25	0.26	0.57	1.61	62	0.97	0.25	0.26	0.83	1.17
Sc	10.64	1.75	0.16	6.11	14.87	62	10.64	1.75	0.16	9.11	1.17
Li	34.21	6.48	0.19	18.8	50.8	62	34.21	6.48	0.19	29.32	1.17
Hg	31.17	21.05	0.68	14.5	141.6	60	27.96	11.2	0.4	24.28	1.15
Bi	0.3	0.09	0.29	0.17	0.64	60	0.29	0.06	0.22	0.26	1.12
B	51.71	11.56	0.22	28.6	100.5	61	50.91	9.78	0.19	44.9	1.13
Tl	0.6	0.11	0.18	0.34	0.85	62	0.6	0.11	0.18	0.53	1.13
W	1.46	0.25	0.17	0.83	2.07	62	1.46	0.25	0.17	1.32	1.11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.05	0.72	0.18	2.36	5.97	62	4.05	0.72	0.18	3.68	1.10
V	71.93	12.63	0.18	45.9	100.9	62	71.93	12.63	0.18	65.53	1.10
Au	1.72	0.72	0.42	0.51	5.13	61	1.67	0.57	0.34	1.58	1.06
Th	10.39	1.84	0.18	5.3	15.3	62	10.39	1.84	0.18	9.55	1.09
La	30.46	4.72	0.16	16.9	42.5	62	30.46	4.72	0.16	28.0	1.09
Y	21.56	3.05	0.14	12.0	27.6	61	21.72	2.82	0.13	19.87	1.09
Pb	20.26	4.09	0.2	6.1	33.1	59	20.07	2.92	0.15	18.76	1.07
Ce	57.29	8.81	0.15	31.3	77.1	62	57.29	8.81	0.15	54.31	1.05
Cr	58.9	11.18	0.19	33.3	83.1	62	58.9	11.18	0.19	56.37	1.04
Ag	60.42	12.92	0.21	35	107	61	59.66	11.53	0.19	57.99	1.03
Ga	13.86	1.85	0.13	8.5	19.1	62	13.86	1.85	0.13	13.42	1.03
Be	1.76	0.28	0.16	0.93	2.37	62	1.76	0.28	0.16	1.72	1.02
Rb	89.29	13.34	0.15	48.9	127.6	61	89.96	12.38	0.14	87.32	1.03
Ti	3025.7	396.08	0.13	1884	3761	62	3025.7	396.08	0.13	3079.8	0.98
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.65	1.44	0.13	5.69	13.4	61	10.73	1.3	0.12	11.17	0.96
K <sub>2</sub> O	2.18	0.26	0.12	1.28	2.88	61	2.19	0.24	0.11	2.29	0.96
pH	8.01	0.21	0.03	7.64	9.1	61	7.99	0.16	0.02	8.69	0.92
Ba	481.26	29.04	0.06	424	580	61	479.64	26.31	0.05	522.35	0.92
Ge	1.11	0.13	0.12	0.84	1.49	62	1.11	0.13	0.12	1.22	0.91
Sn	2.07	0.56	0.27	0.61	3.65	62	2.07	0.56	0.27	2.32	0.89
Nb	9.82	2.27	0.23	2.3	12.9	61	9.95	2.07	0.21	11.6	0.86
Na <sub>2</sub> O	1.57	0.27	0.17	0.96	2.19	62	1.57	0.27	0.17	1.93	0.81
Zr	161.44	41.89	0.26	59	252	62	161.44	41.89	0.26	216.87	0.74
SiO <sub>2</sub>	47.51	7.31	0.15	28.7	68.3	62	47.51	7.31	0.15	65.38	0.73

① 表注同表1。其中C<sub>2</sub>为乌梁素海湖泊表层沉积物剔除离差值后的平均值与河套基准值之比。

比河套背景值低的组分是Zr、SiO<sub>2</sub>，主要是与其化学性质稳定有关。

### 2.3 乌梁素海湖底表层沉积物与深层沉积物对比

对乌梁素海表层与深层沉积物含量进行比较。从表3看出，表层沉积物比深层沉积物富集多的有S、orgC、N三种组分，S在乌梁素海湖底表层中富集最多，这有多方面的原因：一是S在自然界中本身含量比较高，在表生作用中很容易迁移，被河水带入湖泊而沉积下来；二是河套地区西部狼山山脉中富含许多硫化物矿床，近50年来正在大规模开采，这些硫化物经山洪冲刷带入河套平原，形成极易迁移的硫酸盐，被河水带入乌梁素海。资料显示，在沉积岩的黏土中S的含量可达到0.3%<sup>[8]</sup>。orgC在湖泊表层沉积物中含量较高，是湖泊沉积物经生物作用由无机变化为有机的结果，而且其与S也具有很高的相关性。N主要是与农业施肥有关，大量施入农田的化肥没有全部被土壤吸收，有相当一部分被带走，其中绝大部分被带入乌梁素海。根据乌梁素海当地居民介绍，自从有了化肥以后，乌梁素海中的芦苇生长十分旺盛，水草也十分发育，这些均是湖泊的富营养化造成的结果。

Se、I、Br、Sr、C、U、Mo、Cl、CaO、Hg、P在湖泊表层富集，说明了黏土、粉砂质黏土极易吸附这些组分，同时也是由于人类活动造成的结果。Se、Hg、P等元素在表层富集，与人类活动有着密切的关系；I、Br、C、U、Mo、CaO在表层富集，主要与土壤黏土的吸附作用分不开，土壤中的黏土矿物对这些元素具有亲和性；Cl主要是由于河套地区盐碱化十分强烈，且盐类又极易溶于水，在水流的携带下被带到乌梁素海沉积下来。

在表层较深层中相对贫化的组分有：Ge、Bi、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Be、As、Li、W、Nb、Na<sub>2</sub>O、Sb、SiO<sub>2</sub>；明显贫化的组分是Sn；其他大多数元素在表层和深层中含量基本接近。

### 3 乌梁素海湖泊水地球化学特征及湖泊水质量初步评价

根据乌梁素海湖泊沉积物特征，对乌梁素海湖泊水和进出乌梁素海的水样进行了采样分析。根据已有的渔业水质标准<sup>[9]</sup>中的重金属元素标准，对主要的重金属和有毒有害元素Cd、Ni、Co、Pb、Cu、Zn、As、Hg、Cr、F等进行了分析。

#### 3.1 乌梁素海湖泊水地球化学特征

根据在乌梁素海湖泊中心处采集的3处水样分析结果(见表4)表明，Cd、Ni、Co、Pb、Cu、Zn、As、Cr(VI)在湖水中含量均较低，与渔业水质标准相比均低于标准上限值；但Hg和F较高，Hg高出

渔业用水标准近 10 倍, F 高出 2 ~ 3 倍, 说明乌梁素海湖水已出现 Hg、F 的污染。湖泊水的 pH 在 W2 点处达到 9.13, 呈强碱性特征, 与湖泊水的酸碱碱性分布不均有关。湖泊水样品反映出在局部地区湖泊水的 pH 呈碱性。

表 3 乌梁素海湖底表层沉积物与深层沉积物中组分平均含量对比<sup>①</sup>

Table 3 Comparison of analytical results of components in surface layer and deep layer of the sediment samples from the Wuliangsu Hai Lake

Table with 4 columns: 组分 (Component), 均值 (Mean), C3 (Ratio), and 组分 (Component). It compares surface and deep layer concentrations for various elements like S, N, P, K, Ca, Mg, Fe, etc.

① 各组分含量单位同表 1 表注。C3 为表层均值与深层均值的比值。

3.2 进出乌梁素海的水地球化学特征

根据表 5 进入乌梁素海的水样 W4 中 Hg、F 均超标; W5 中 Hg 超标, F 接近标准上限。在退出乌梁素海的水样 W6 中, Hg、F 均超标。其中, W4 为乌加河中的退水样, W5 为另一退水渠水样。乌加河中加入了由五原县等旗县排出的工业和生活污水, 形成了 Ni、Co、Zn、As 等含量较高的特征。在该类水中 pH 均小于 8, 呈弱碱性, 与河套地区浅层地下水的总体酸碱特征相比要偏酸性。该处主要是各类生活、工业废水以及农业退水, 水中 pH 相对较低, 反映了工业与生活废水对水酸碱性质的影响。

3.3 乌梁素海湖泊水质初步评价

从上述特征可见, 乌梁素海中 Hg、F 超标较为严重。结合土壤沉积物特征, 上述 10 种重金属及有毒

有害元素除 Hg 在表层湖泊沉积物中富集外, 其余的在表层湖泊沉积物与深层湖积物中含量基本接近。

表 4 乌梁素海湖水样品元素含量<sup>①</sup>

Table 4 Analytical results of elements in lake water from the Wuliangsu Hai Lake

Table with 12 columns: 样号 (Sample No.), Cd, Ni, Co, Pb, Cu, Zn, As, Hg, Cr(VI), F, pH. It lists concentrations for samples W1, W2, and W3.

① 样品由内蒙古自治区地质矿产实验室分析。各成分分析方法: pH 测量采用玻璃电极为指示电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 插入水样中形成原电池, 以标准 pH 溶液校正仪器刻度, 酸度计直接测定; 分光光度法测定 Cr(VI); 原子荧光光谱法测定 As、Hg; 离子选择性电极测定 F; 等离子体发射光谱法测定 Cd、Co、Cu、Ni、Pb、Zn。采用加标统计计算回收率, 为 93.5% ~ 105%。F 含量单位为 mg/L。

表 5 进出乌梁素海的水化学样品元素含量<sup>①</sup>

Table 5 Analytical results of elements in lake water passing into and out from the Wuliangsu Hai Lake

Table with 12 columns: 样号 (Sample No.), Cd, Ni, Co, Pb, Cu, Zn, As, Hg, Cr(VI), F, pH. It lists concentrations for samples W4, W5, and W6.

① 表注同表 4。

Hg 在湖泊表层富集, 但在河套平原中基本为背景, 在进入乌梁素海的退水中富集, 说明 Hg 富集不是自然成因形成, 主要是由人类工业活动造成。F 在表层与深层含量基本相似, 但含量远高于世界与全国土壤的平均值。在河套平原中 F 含量也高于全国平均值。F 极易溶于水, 说明湖泊水中的高 F 主要与河套地区的地质背景有关。此外, 国外有人估计, 因施肥带入土壤中的 F 可达 5.3 ~ 13.3 kg/(亩·年)<sup>[10]</sup>, 这样在地质背景本身比较高的基础上加入人类活动带入的 F, 使河套地区的 F 含量高于其他地区。

4 乌梁素海的历史地球化学变化

4.1 乌梁素海沉积柱中元素垂直剖面特征

对乌梁素海湖泊沉积物进行了湖泊沉积柱的采集, 并分析了 N、P、Cu、Pb、Zn、Cr 等元素, 图 1 为乌梁素海沉积柱重金属和营养元素垂直分布特征, 可以看出, 重金属元素含量垂直分布特征具有相似性, 从湖泊底部 0 ~ -40 cm, 重金属元素含量出现增长, 到 -40 cm 左右, 含量出现最高峰; 从 -40 cm ~ -160 cm, 含量变化比较稳定。

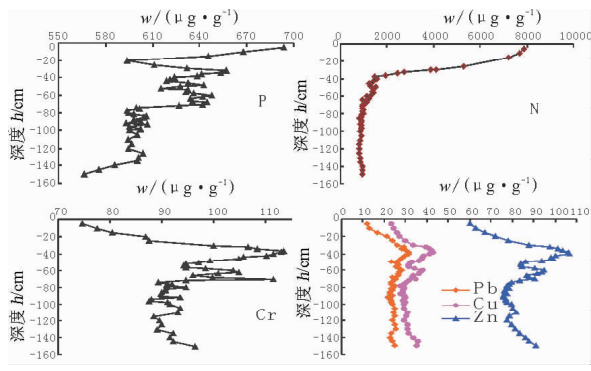


图1 乌梁素海 P、N、Cr、Pb、Cu、Zn 元素垂直剖面图

Fig. 1 Vertical section charts of P, N, Cr, Pb, Cu, Zn in sediment from the Wuliangsuhai Lake

营养元素 N 和 P 含量分布特点,与重金属截然不同。N 元素分布特点较为简单,从 0 ~ -40 cm, N 含量急剧降低;从 -40 cm ~ -160 cm, 含量基本没有变化。P 从 0 ~ -20 cm, 含量急剧降低;从 -20 ~ -60 cm, P 含量在一个相对高的含量范围内波动;从 -80 ~ -140 cm, P 含量又降了一个台阶;从 -140 ~ -160 cm, P 含量达到极小值。

沉积柱中 N、P 含量具有很明显的特征,即 0 ~ -20 cm 的柱芯中含量均表现随深度增加而递减的趋势。相关研究表明,乌梁素海的沉积速率为 9 ~ 13 mm/a<sup>[11]</sup>, 按此推算, 0 ~ 20 cm 代表了近 20 年的沉积, N、P 在该层沉积物中的变化特征与河套灌区化肥用量逐年加大, 以及近年来大量生活污水和工业废水排入乌梁素海相吻合, 说明人类活动对乌梁素海沉积物中 N、P 的累积有重大影响。

#### 4.2 乌梁素海沉积柱中氮和磷的历史变化特征

N 和 P 在沉积剖面的分布特征存在着较大的差异性, 反映了 N、P 两种元素本身具有不同的地球化学性质, 但在表层 0 ~ -40 cm 的深度内, N 和 P 都表现出明显的递减趋势, 表明人类活动所排放的含有大量 N、P 等营养盐的工业废水、农田退水和生活污水对乌梁素海水体产生巨大的影响, 进而导致 N、P 等营养组分在表层沉积物中累积富集。

N 在乌梁素海沉积剖面中可明显划分为两个不同阶段, 即 0 ~ -40 cm 和 -40 ~ -160 cm, 其分布特征能基本反映出富营养化进程。乌梁素海目前的沉积速率为 9 ~ 13 mm/a, 按此推算, 沉积剖面上 -40 cm 处对应于 20 世纪 70 年代左右。这与河套地区开始使用化肥的时代相对应。P 在总体上与 N 的特征相似。随着时间越晚, 化肥施用量越高, 加入湖泊的 N、P 含量越高。

值得注意的是, 几乎所有重金属元素在 0 ~ -40 cm 与 N、P 呈反相关特征, 可能与有机质吸附这些元素后由于重力作用在湖泊底部的重力沉积造成。

## 5 综合分析

根据湖泊水及湖泊表层土壤、深层土壤的 pH 对比, 在深层土壤中 pH 较高, 平均值为 8.78, 而在表层土壤中 pH 平均值为 7.99, 除去一处湖泊水中 pH 值较高外, 在湖泊水及进出湖泊水中的 pH 总体为 7.8 左右。湖泊水及表层湖积物中的 pH 与河套地区土壤背景值、河套地区浅层地下水中 pH 相比总体偏酸性, 是工业化造成的结果。由于不断地向乌梁素海排入工业污水, 使湖泊表层中不断富集酸性物质, 在表层中的 S 是深层中的 16.45 倍, 使湖泊水不断向酸性发展, 造成湖泊表层沉积物和湖泊水中 pH 由深层的碱性向中性过渡。这种 pH 的变化和湖泊中有害元素 Hg、F 等的富集以及农业施肥造成 N、P 的富集, 使乌梁素海的湖泊环境发生严重的污染, 富营养化十分严重, Hg、F 超标。乌梁素海中原来鱼类资源十分丰富, 有鲤鱼、鲢鱼、草鱼、鲫鱼、鳙鱼、瓦氏雅罗鱼等各种鱼类, 但现在湖泊中只有鲫鱼一种鱼类了。如今湖泊中水草、芦苇发育, 几乎覆盖了整个湖面, 而且湖水发臭。这种种特征说明了乌梁素海污染已十分严重, 需要对其进行全面持续的治理, 否则将会造成十分严重的后果。

## 6 参考文献

- [1] 关玉璋. 乌梁素海的形成与演变 [J]. 人民黄河, 1989 (6): 61-63.
- [2] 邱滢霞. 国际合作整治乌梁素海问题研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2007: 1-47.
- [3] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 高兴东, 樊庆云, 薛红喜, 田慧娟. 乌梁素海沉积物中有机质和全氮含量分布特征 [J]. 应用生态学报, 2006 (4): 4620-4624.
- [4] 张云, 王俊, 金曙光, 申庆泰, 李旭英, 杜健民, 尚士友. 乌梁素海富营养化及其防治研究 [J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2003 (4): 7-12.
- [5] Forstner U, Wittmann G T W. Metal pollution in the aquatic environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979: 110-192.
- [6] 奚小环. 多目标区域地球化学调查与生态地球化学——第四纪研究与应用的新方向 [J]. 第四纪研究, 2005 25(3): 269-274.
- [7] 中国地质调查局. DD 2005—1, 1: 25 多目标区域地球化学调查规范 [S].
- [8] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学导论 [M]. 北京: 地质出版社, 1995: 1-254.
- [9] 国家环境保护局. GB 11607—89 渔业水质标准 [S].
- [10] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 132.
- [11] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 高兴东, 樊庆云, 薛红喜. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局 [J]. 地理研究, 2006 25(6): 1003-1012.