

河套平原湖泊陈普海子沉积物粒度与元素分析

汪敬忠^{1,2*},朱 迟³,兰 波⁴,李 霄¹,刘 卓¹ (1.河北地质大学实验实践教学中心,河北 石家庄 050031; 2.中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室,陕西 西安 710061; 3.江苏省环境科学研究院,江苏省环境工程重点实验室,江苏 南京 210036; 4.重庆三峡学院,环境与化学工程学院,重庆 404000)

摘要:通过对河套地区不同类型沉积物进行粒度和元素分析,根据区域陈普海子沉积岩芯的年代和环境代用指标结果,借助于判别分析技术,结合历史文献资料,揭示区域近300a来两个典型时段的环境变化。结果表明,约1850a受黄河河道变迁引起的洪水活动影响,陈普海子岩芯55~50cm(CP1)沉积物表现为灰黄色黏土层,其粒度参数、分布曲线与黄河岸边缓流沉积物相似,两者的中值粒径和众数数值分别为3.8, 7.7μm和4.4, 5.0μm,元素及其比值K/Ti、Al/Ti和K/Sr(数值分别为7.1、21.5、102.7和6.2、20.7、87.8)的得分散点分布在判别得分散点图的同一区域,与其它类型沉积物的分布区域明显分离,元素比值K/Ti、Al/Ti和K/Sr可作为湖泊沉积指示洪水活动的环境代用指标;自1995年以来,由于区域人类活动,沙荒土地大规模开垦,致使风沙活动增强,岩芯15cm以上(CP2)沉积物粒度参数、分布曲线与风积物相似,两者的中值粒径和众数数值分别为20.1, 19.6 μm和41.6, 45.7 μm,元素的得分散点分布在判别得分散点图的同一区域,研究结果与文献记录具有较好的一致性。

关键词: 河套平原; 沉积物; 粒度; 元素; 判别分析; 环境变化

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2019)01-0358-08

The characteristics of grain size and elements from Lake Chenpu sediment in the Hetao Plain. WANG Jing-zhong^{1,2*}, ZHU Chi³, LAN Bo⁴, LI Xiao¹, LIU Zhuo¹ (1.Experiment and Practice Teaching Center, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3.Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Jiangsu Provincial Key Lab of Environmental Engineering, Nanjing 210036, China; 4.College of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404000, China). *China Environmental Science*, 2019,39(1): 358~365

Abstract: In this paper, grain size and element from different sediments in the Hetao Basin were analyzed, based on the results of age and environmental indicators from Lake Chenpu sediment, by means of canonical discriminant analysis technology, and combined with historical and literature materials, environmental changes were revealed during two typical periods in recent 300 years. Because of the flood activities from the migration of the Yellow River channel in about 1850AD, the grain size characteristics of the sediments at 55~50cm of Lake Chenpu sediment (CP1), which displayed grey-yellow clay layer, were closed related to the slow-flow sediment along the Yellow River bank, their median diameter and mode value were 3.8μm, 7.7μm and 4.4μm, 5.0μm respectively, and the values of the elements and their ratios (including K/Ti, Al/Ti and K/Sr) were 7.1, 21.5, 102.7 and 6.2, 20.7, 87.8 respectively, and their scattered points were also distributed in the same area in the canonical discriminant score scatter plot, which was separated from the distribution areas of other types of sediments, and the element ratios (including K/Ti Al/Ti and K/Sr) could be taken as environmental proxy indicators for the flood activity from the lake sediments. Since 1995, due to the large-scale reclamation of sandy land under human activities in this region, wind-sand activities enhancing, the grain size characteristics of the sediments at the top of 15cm (CP2) were similar to the aeolian sediment, their median diameter and mode value were 20.1μm, 19.6μm and 41.6μm, 45.7μm respectively, and their elements scattered points were also distributed in the same area, and the study results were in good agreement with the literature records.

Key words: Hetao Plain; sediment; grain size; element; canonical discriminant analysis; environmental change

河套平原位于内蒙古西部,黄河上游的末端,是我国最大的灌区之一,具有重要的经济地位^[1]。其北与阴山山脉为界,西与乌兰布和沙漠相接,东与包头市郊为邻,南缘为库布齐沙漠,黄河自西向东所穿过。历史上由于新旧河道支流在河套地区不断交替发生,泛滥成灾,损失严重,对两岸人民的生活、生产有

着重要的影响,至今在磴口地区仍有多条古河道遗迹^[2-3]。其邻边的乌兰布和沙漠曾是河套平原重要的

收稿日期: 2018-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41702165); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助项目(No. SKLLQG1717); 河北省自然科学基金资助项目(D2018403115); 河北省水利科技计划项目(2017-61)

* 责任作者, 助理研究员, myjingzhong@163.com

一部分,全新世甚至更早历经河流、湖泊与沙漠地貌的交替演化^[4-5]。

由于湖泊沉积物能真实地记录湖区在较长的历史时期各种环境变化的信息,使其成为揭示区域环境变化的指示器^[6-7]。本文通过对河套平原不同类型沉积物和湖泊沉积岩芯的粒度与元素指标分析,结合历史文献记录,提取湖泊沉积记录洪水活动的环境代用指标,揭示陈普海子区域近300a来两个典型时段的环境变化,为研究历史时期河-湖关系演化及洪涝灾害、风沙防治等提供相关理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套平原属温带大陆性半干旱草原气候,位于东亚季风边缘区,是当今我国最大的灌区之一。平原北部为阴山山脉,西部为乌兰布和沙漠,受西

风和西北风的影响,沙丘及风沙流的移动由西北向东南直贯黄河河道,南部是库布齐沙漠,在暴雨季节,泥沙由十大孔兑流入黄河干流(图1)。区域总地势开阔平坦,自西南向东北方向微倾。历史上黄河河道变迁频繁,新旧河道支流在河套地区不断交替演变,形成现今广泛分布的古河床洼地、牛轭湖等古河道遗迹,目前这些湖泊总体表现为面积小,水位低,湖水咸化沼泽化,主要靠引黄灌水或者农田退水得以残留^[8-9]。

研究区气温偏低,年均气温约6.5℃,自东向西逐渐增高;降雨量较小,年均降水量为200~650mm,自西向东逐渐增多,且夏季降水量占年降水量的60%以上;蒸发量较大,水面年均蒸发量约2000~2600mm,其分布规律与年降水量分布相反,表现为自东向西逐渐增加;此外冬春季多大风,且风势强烈,平均风速约3m/s,年沙尘暴日约20d^[10]。

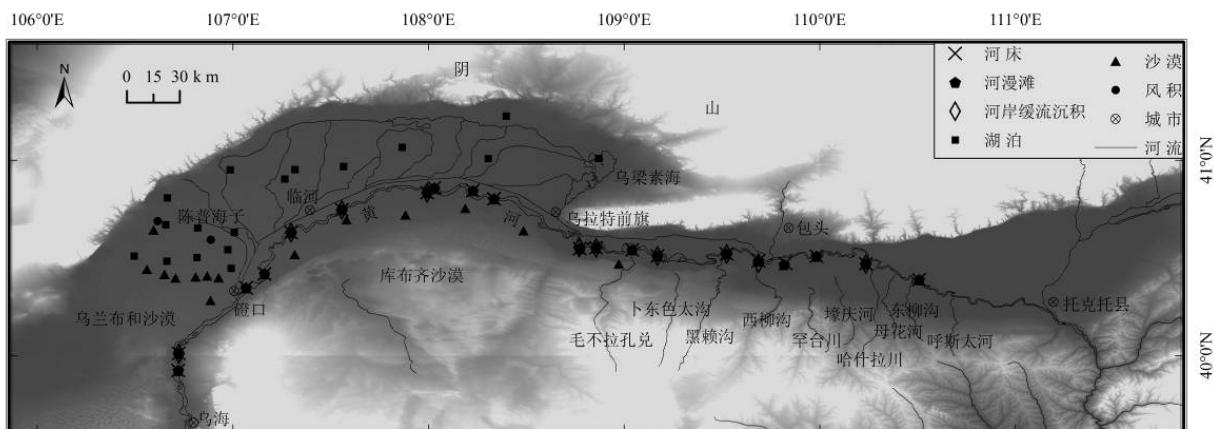


图1 河套地区不同类型沉积物样品的采样位点

Fig.1 Locations of different sediments and their sampling sites

1.2 样品采集

在河套地区共采集83个不同类型沉积物样品,包括黄河河床样品20个,黄河漫滩样品20个,河岸缓流沉积物样品10个,湖泊样品17个,沙漠(包括乌兰布和沙漠和库布齐沙漠)样品14个及风积物样品2个。黄河河床采集的样品位点与河漫滩样品对应,即河床样品位点确定后,在经过该点并垂直于河道岸边的位置采集河漫滩样品。若黄河岸边有缓流沉积物(橙黄色黏土)也一并分袋采集(图1)。此外,用重力采样器在陈普海子湖心(GPS 40.65471°N, 106.82136°E)采集沉积岩芯,长84cm,野外按1cm长度分割,保存于自封袋中,运回实验室内4°C冷藏以

待分析,测试工作在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室进行。

1.3 年代测定

²¹⁰Pb是在大气、江河等环境中自然过程散落的放射性核素,被广泛用于近百年来湖泊沉积岩芯的年代标定^[11]。测试样品先除去植物残体,过100目筛,放入5mL圆柱型塑料桶,采用美国EG&G Ortec公司生产的低本底高纯锗γ能谱仪井型探测器(HPG GWL 120-15)进行测定,测试误差<10%。

1.4 粒度测定

取0.13g烘干样品于烧杯中(每个样品做2个平行),分别加10mL 10%的H₂O₂和10mL 10%的稀HCl,

反应完全后,加 10mL 5%的六偏磷酸钠溶液,超声波振荡 15min,处理后的样品上机测试(Mastersizer 2000 型激光粒度仪),测量范围 0.02~2000μm,分析误差<2%.对于陈普海子沉积物,整个岩芯以 1cm 为单位进行粒度测试.

1.5 元素测定

取 0.12g 过 200 目筛烘干的样品于消化罐中(每个样品做 2 个平行),加入 0.5mL HCl、4.0mL HNO₃ 和 3.0mL HF,180℃微波硝化系统中反应 15min.取出后加 0.5mL 高氯酸,180~200℃蒸干,再加 1:3 (V/V) 硝酸溶液 5mL,加热溶解残渣.冷却后定容至 25mL,进行上机测试(美国 Leeman Labs Profile 多道电感耦合等离子体原子发射光谱仪 ICP-AES),分析误差小于 2%.对于陈普海子沉积岩芯的样品,0~60cm 以 2cm 为单位进行元素测试,而 61cm 以下以 5cm 为单位进行元素测试.

1.6 数据分析

采用 ArcGIS 10.2 软件绘制河套平原采样位点分布图.根据陈普海子沉积岩芯中 ²¹⁰Pb 年代测定结果计算出沉积年代,用平均沉积速率推算出岩芯深度 55cm 以下的沉积年代.数据绘制运用 Excel、CorelDRAW13.0 等软件.此外,元素数据还采用 SPSS 17.0 软件进行判别分析.

2 结果

2.1 不同类型沉积物的粒度特征

河套平原不同类型沉积物的粒度组成和参数特征见表 1.河床和沙漠沉积物粒径相对较粗,岩性主要为砂,其中粒径>63μm 分别占 61.6% 和 88.8%,同类型沉积物的最大值与最小值差异相对明显,具有空间差异性,平均中值粒径分别为 88.6 和 193.2μm;河岸缓流沉积物粒径最小,其次为湖泊沉积物,岩性主要表现为黏土和砂质黏土,粒径<4μm、4~16μm、16~32μm、32~63μm 及>63μm 分别占 31.3% 和 18.9%、43.2% 和 33.6%、13.7% 和 19.1%、5.9%

和 16.7% 及 6.0% 和 11.7%,平均中值粒径分别为 7.7μm 和 15.8μm;河漫滩和风积物的平均粒径范围相差较小,岩性主要为粉砂,平均中值粒径分别为 31.7 和 29.7μm.

表 1 河套平原不同类型沉积物的粒度组成

Table 1 Particle size of different sediments in the Hetao Plain

沉积物类型	粒度(μm)					中值 粒径
	<4	4~16	16~32	32~63	>63	
最大值	9.9	12.1	24.6	34.4	86.5	141.5
河床 (20 个)	最小值	4.5	4.7	1.4	1.8	21.2
	平均值	6.6	7.2	7.0	17.5	61.6
	标准差	1.7	2.4	6.5	12.0	33.9
	最大值	18.9	33.3	32.1	41.6	36.4
河漫滩 (20 个)	最小值	6.6	8.1	14.1	15.2	6.0
	平均值	11.1	16.2	23.9	32.3	16.5
	标准差	3.2	6.7	5.7	7.1	8.7
	最大值	40.9	50.5	22.2	12.4	22.5
河岸缓流沉积 (10 个)	最小值	20.2	33.2	7.6	1.6	0.0
	平均值	31.3	43.2	13.7	5.9	6.0
	标准差	6.2	5.3	4.8	3.5	1.9
	最大值	31.4	41.7	22.5	23.1	26.6
湖泊 (17 个)	最小值	6.1	23.5	13.8	12.3	4.8
	平均值	18.9	33.6	19.1	16.7	11.7
	标准差	7.2	7.2	3.5	4.0	7.6
	最大值	7.9	8.9	9.8	24.2	95.8
沙漠 (14 个)	最小值	1.0	1.1	0.4	0.0	49.1
	平均值	3.9	3.4	1.9	2.0	88.8
	标准差	1.7	2.0	2.0	5.6	10.3
	最大值	17.7	32.6	24.0	18.1	39.8
风积 (2 个)	最小值	14.6	17.3	11.3	17.0	7.7
	平均值	16.1	25.0	17.6	17.5	23.7
	标准差	2.2	10.8	9.0	0.7	22.7
	最大值	17.7	32.6	24.0	18.1	39.8

2.2 不同类型沉积物的元素特征

河套平原不同类型沉积物的元素含量具有差异性(表 2).黄河岸边缓流沉积物与其他类型沉积物相比,元素 Al、Ca、Fe、K、Mg 和 Co、Cr、Cu、Mn、Sr 明显富集,含量最高,而 Na 元素含量最低,平均值仅 10.2mg/g;而沙漠沉积物中元素 Al、Ca、Fe、K、Mg、Ti 和 Co、Cr、Cu、Mn、Sr 相对亏损,含量最低;其它类型沉积物,包括河床、河漫滩、湖泊及风积沉积物元素含量居中.

表 2 河套平原不同类型沉积物的元素含量

Table 2 Element content of different sediments in the Hetao Plain

沉积物类型	Al	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Sr	Ti*
河床 (20 个)	最大值	55.1	48.3	10.1	67.1	17.1	25.0	17.4	12.9	505.4	14.7	218.9
	最小值	48.9	25.9	6.8	40.0	9.2	17.8	15.8	6.3	330.1	14.5	199.5
	平均值	51.6	38.7	8.8	56.3	13.0	21.8	16.8	9.8	430.8	14.6	209.3
	标准差	3.0	8.9	1.3	9.5	3.7	2.7	0.4	2.5	67.0	0.1	10.3

续表 2

沉积物类型	Al	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Sr	Ti*
河漫滩 (20个)	最大值	57.4	50.5	11.1	72.2	20.6	27.5	18.1	15.6	561.9	17.4	281.1
	最小值	54.6	47.6	9.3	57.1	18.5	25.5	17.0	12.9	512.2	14.0	217.3
	平均值	56.1	49.5	10.0	64.3	19.5	26.4	17.6	14.1	538.0	15.0	235.9
	标准差	1.4	1.4	0.5	6.1	0.9	0.7	0.5	1.3	17.3	1.9	35.0
河岸缓流沉积 (10个)	最大值	72.5	76.7	15.9	85.0	71.7	49.1	22.3	20.5	2257.3	11.8	242.5
	最小值	54.7	33.9	7.6	49.4	17.6	23.6	18.8	10.6	457.4	8.4	212.6
	平均值	66.2	55.1	12.4	71.3	35.2	35.5	19.8	17.3	954.5	10.2	225.4
	标准差	7.2	19.1	3.1	13.4	21.0	9.6	1.4	3.9	735.6	1.3	11.0
湖泊 (17个)	最大值	56.4	99.6	11.0	59.5	34.0	27.2	18.4	21.5	829.0	23.3	1333.3
	最小值	43.7	37.6	7.7	44.5	12.0	21.2	14.0	9.7	417.5	7.1	237.6
	平均值	50.5	65.7	9.3	55.1	22.0	25.0	16.7	15.6	595.9	13.4	607.0
	标准差	4.6	23.6	0.7	2.7	7.0	0.6	1.5	3.6	146.8	6.9	412.8
沙漠 (14个)	最大值	48.1	22.2	6.6	43.0	11.6	18.0	48.9	6.3	333.7	15.9	182.2
	最小值	40.6	15.0	4.2	24.3	5.8	12.6	14.9	4.3	234.9	12.8	156.6
	平均值	43.8	18.5	5.3	32.8	8.1	15.0	16.1	5.3	274.1	13.6	170.8
	标准差	2.7	2.7	0.9	6.3	1.7	1.8	1.2	0.7	31.6	1.0	8.5
风积 (2个)	最大值	57.6	53.9	10.3	62.5	23.5	29.0	19.0	18.2	588.9	14.2	347.6
	最小值	49.9	41.6	7.7	48.2	14.7	22.2	17.4	10.6	388.0	12.3	258.6
	平均值	53.8	47.7	9.0	55.4	19.1	25.6	18.2	14.4	488.5	13.2	303.1
	标准差	5.4	8.7	1.8	10.1	6.2	4.8	1.1	5.4	142.1	1.3	62.9

注:*元素Al、Ca、Fe、K、Mn、Na、Ti单位为mg/g, Co、Cr、Cu、Mg、Sr单位mg/kg.

2.3 湖泊沉积岩芯的岩性和年代序列

陈普海子沉积物主要由细颗粒组成,其中岩芯55cm以下包括灰色黏土和粉砂质黏土层;岩芯55~50cm表现为灰黄色黏土;岩芯50~15cm主要表现为灰色黏土层,中间夹杂粉砂质黏土层;岩芯15cm以上为粉砂层(图2).

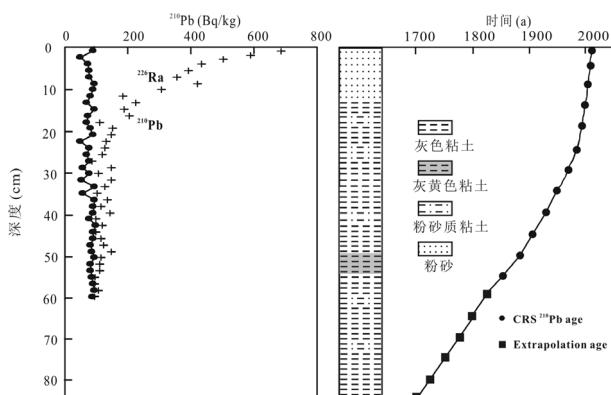


图2 陈普海子沉积岩芯总 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 垂直分布以及年代与深度关系图

Fig.2 Vertical distribution of ^{210}Pb , ^{226}Ra and the depth-age relationship of Lake Chenpu

陈普海子沉积岩芯的 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 强度随深度的垂直分布变化见图2。 ^{210}Pb 总强度从表层700Bq/kg开始下降,到深度55cm处强度为80Bq/kg,

之后维持稳定, ^{210}Pb 总强度与 ^{226}Ra 强度在深度55cm处达到平衡,表明 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 数值接近0,即为衰变的终点。沉积岩芯年代标定使用CRS恒定补给模式计算^[12]。结果表明岩芯15cm处约为1995年,55cm年代结果为1850年,平均沉积速率为0.2cm/a,其中55~50cm处沉积速率最大,数值为0.33cm/a,陈普海子整个沉积岩芯深度与年代的对应关系见图2。

2.4 湖泊沉积岩芯的粒度特征

陈普海子沉积岩芯粒度随深度的变化特征见图3。整个岩芯以粉砂和黏土为主,粉砂(粒径范围4~63μm)和黏土(粒径<4μm)含量分别占58.6%和38.5%,砂(粒径>63μm)含量仅占2.9%。

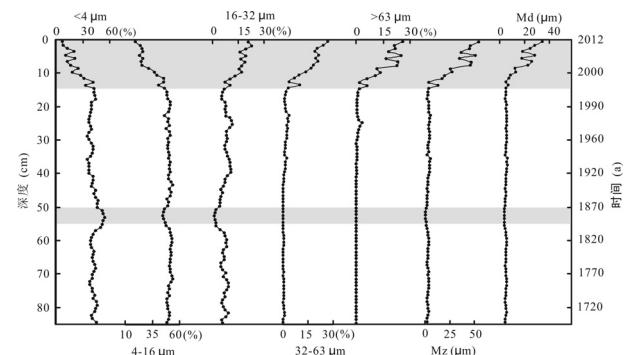


图3 陈普海子沉积岩芯粒度随深度的变化特征

Fig.3 Changes of grain-size parameters versus depth of Lake Chenpu sediment

不同粒级组分随深度的曲线变化表现异同,黏土(粒径<4μm)和中粉砂(粒径16~32μm)随深度的曲线变化相反,而平均粒径(Mz)和中值粒径(Md)的曲线变化与粗颗粒(粒径>32μm)较为一致。岩芯55~50cm,粒径<4μm含量显著增加,占52.3%,而粒径4~32μm含量减小,其它粒级组分变化不明显,中值粒径大小为3.8μm。岩芯15cm以上,表现为Mz和Md明显增大,平均数值分别为30.7μm和20.1μm,>63μm的粗颗粒约占15%。

2.5 湖泊沉积岩芯的元素特征

陈普海子沉积岩芯元素及其比值随深度的变化特征见图4。

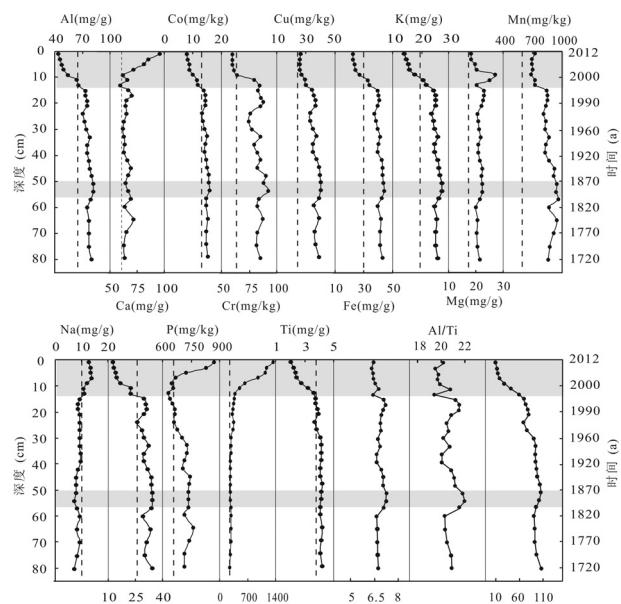


图4 陈普海子沉积岩芯元素及其比值随深度的变化特征
(虚线为区域元素背景值)

Fig.4 Changes of elements and their ratios versus depth of Lake Chenpu sediment (the dotted line represents element background value in the studied area)

整个岩芯15cm以下元素含量变化较为稳定,Al、Ca、Fe、K、Mg、Na和Co、Cr、Cu、Mn、Ni、P、Sr、Ti元素含量平均值分别为76.46、65.61、41.17、25.22、21.5、8.68mg/g和14.65、83.64、36.81、875.47、31.23、706.99、287.58、3.67mg/kg。但在55~50cm出现一次较明显的波动,元素Al、Co、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn含量及元素比值K/Ti、Al/Ti、K/Sr显著增大,指示沉积环境发生变化,与上述粒度变化有较好的一致性。在岩芯15cm以上(约1995年之后),Al、Fe、Mg、K、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、

Ti含量呈显著下降,大部分元素含量数值小于对应元素的背景值(Cu、Mg以及Mn除外),而元素Ca、Na、P及Sr含量上升。

2.6 陈普海子湖泊沉积物与表层不同沉积物的指标对比分析

通过对陈普海子沉积物的岩性、粒度和元素分析,发现岩芯55~50cm(约1850~1865年)以及15cm以上沉积物(约1995年以来)的岩性和环境代用指标发生明显的变化,表明当时的沉积环境发生改变。为了进一步探讨当时沉积环境变化的原因,对陈普海子上述变化明显的沉积物与现代不同类型沉积物进行对比分析。

2.6.1 陈普海子湖泊沉积物与表层不同沉积物的粒度分布对比 对于湖泊而言,沉积物的粒度频率分布曲线能够灵敏的反映水动力条件,是识别沉积作用和沉积环境的重要图解形式^[13-14]。通过对研究区河床、河漫滩、河岸缓流沉积、湖泊、沙漠及风积沉积物的粒度频率分布曲线分析,不同类型沉积物的粒度分布形态差别较为明显,均表现为单峰,其众数分别为120.2、34.6、5.0、13.1、208.9及45.7μm(图5)。从陈普海子岩芯55~50cm处沉积物(CP1表示)的频率分布曲线来看,众数值为4.4μm,与黄河岸边缓水流沉积物相近,且它们的粒度分布特征较为相似,表明两者的沉积作用存在关联或者沉积物来源较为一致。同样,沉积岩芯15cm以上沉积物(CP2表示),众数数值为41.6μm,与风积物粒度分布特征类似。

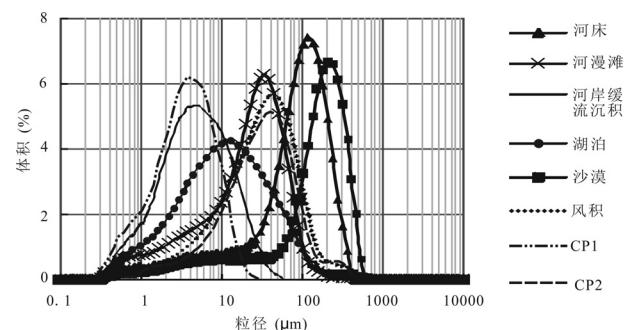


图5 湖泊沉积物(CP1和CP2)与不同类型沉积物的粒度频率曲线对比

Fig.5 Comparison of grain-size distribution curves between lake sediment and different sediment types

2.6.2 陈普海子湖泊沉积物与表层不同沉积物的元素对比

多个独立样本检验是要解决多个独

立样本间是否具有相同分布的问题,该检验为单向方差分析,检验多个独立样本在中位数上是否有差异^[15].对研究区不同类型沉积物的元素及其比值进行多个独立样本检验,检验结果如表3所示,

选取系数 $P<0.05$ 检验显著的元素及元素比值进行下一步的判别分析,包括 Al、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Sr、Ti 及元素比 K/Ti、Al/Ti、K/Sr.

表 3 河套平原不同类型沉积物的元素检验结果

Table 3 The test results of elements from different sediments in the Hetao Plain

项目	Al	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn
卡方	20.841	22.777	20.677	22.500	19.111	22.686	16.542	23.007	21.194
P	0.01*	0.000*	0.01*	0.000*	0.002*	0.000*	0.005*	0.001*	0.001*
项目	Na	Sr	Ti	K/Ti	Al/Ti	K/Sr			
卡方	17.039	22.103	17.196	23.539	24.196	21.546			
P	0.004*	0.001*	0.004*	0.000*	0.000*	0.001*			

注:*表示 $P<0.05$ 时检验显著.

河套地区不同类型沉积物的典型判别得分见图 6,其中横坐标为第一典型判别方程(函数 1 表示)得分,纵坐标为第二典型判别方程(函数 2 表示)得分(以样本代入典型判别方程得分计算得到).图 6(a)中以上述检验显著系数 $P<0.05$ 的元素(包括 Al、Ca、Co、Cr、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Na、Sr 和 Ti)为变量进行判别分析,结果表明不同类型沉积物有各

自的分布区域,建立的判别函数有较好的判别精度,其中陈普海子岩芯 55~50cm 处的沉积物(CP1)与河岸缓流沉积物分布在散点图的同一区域,15cm 以上沉积物(CP2)与风积物分布在另一区域,表明 CP1 与河岸缓流沉积物以及 CP2 与风积物的沉积环境或者沉积物来源相近,与上述粒度指标的分析结果一致.

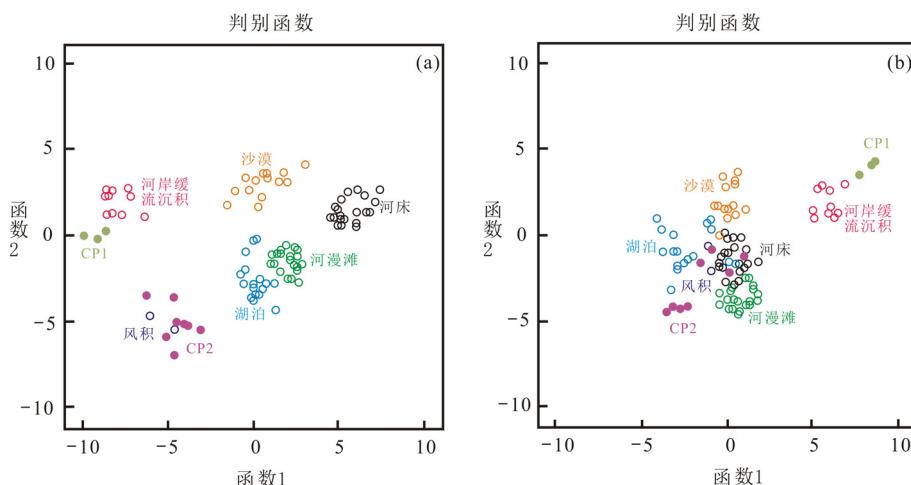


图 6 湖泊沉积物(CP1 和 CP2)与不同沉积物元素及元素比值(K/Ti、Al/Ti 和 K/Sr)的判别分析对比

Fig.6 Comparison between lake sediment (CP1and CP 2) and canonical discriminant analysis results of elements (a) and element ratios (including K/Ti、Al/Ti and K/Sr) (b) from different sediment types

(a)湖泊沉积物与不同沉积物元素的判别分析对比;(b)湖泊沉积物与元素比值的判别分析

图 6(b)是以上述检验显著系数 $P<0.05$ 的元素比值(K/Ti、Al/Ti 和 K/Sr)为变量进行判别分析的结果,河床、河漫滩、湖泊、沙漠及风积沉积物的得分散点基本分布在同一大区域,而河岸缓流沉积物和湖泊芯在 55~50cm 处沉积物(CP1)分布在另一区域,与上述其他类型沉积物的分布区域分离,表明元素

比值 K/Ti、Al/Ti 和 K/Sr 能将它们很好的区分,可作为河岸缓流沉积物和湖泊岩芯在 55~50cm 处沉积物(CP1)的代用指标.

3 讨论

3.1 约 1850 年陈普海子区域的环境变化

据文献记载^[16-18],历史上河套平原地区黄河河道变迁频繁,约1850年之前黄河流入河套平原后分为南北两支,其中北支为黄河主流,经磴口县沿阴山山脚东流,后在乌梁素海地区形成一段南北走向的河道(图7).约1850年,黄河北支被泥沙淤塞断流,西岸决口,大量河水滞留在河套平原西部(包括陈普海子地区),形成河滩地;北支断流改称乌加河,黄河南支东流逐渐形成现今黄河,此时乌梁素海等洼地积水而形成河迹湖(图7)^[9].

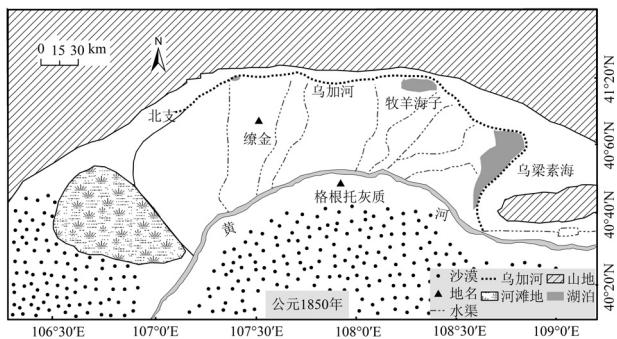


图7 约1850年河套平原黄河河道的空间变化^[9]

Fig.7 Spatial variation and the Yellow River channel migration across the Hetao Plain in about 1850AD^[9]

据此,陈普海子岩芯在约1850年沉积环境发生显著的变化是由于黄河河道变迁所致,黄河北支淤塞,河岸决口,河道高水位的细颗粒随河水流入湖泊并参与沉积,通过上述研究发现携带的颗粒主要是现黄河岸边缓流沉积物,利用其粒度分布曲线(众数数值为5.0 μm)及元素(包括元素比K/Ti、Al/Ti和K/Sr,数值分别为6.2、20.7、87.8)能与区域其它类型沉积物很好的识别和区分,可作为湖泊沉积指示洪水活动的环境代用指标。

3.2 1995年以来陈普海子区域的环境变化

20世纪90年代中期,河套平原西部的磴口县提出了“一县变两县”的土地开发政策,大规模的沙荒土地开垦导致流动沙丘面积显著扩张,有数据显示,磴口地区从1996a~2003a流沙面积扩展了1.2万hm²,增长近21.7%^[19].这一政策直接导致沙丘活化,开垦区在同风速条件下地表侵蚀作用加大.陈普海子位于磴口县中北部地区,自1995年以来,区域沙荒土地开垦,风沙活动增强,致使该湖泊沉积物粒径显著增大,这也与上述粒度和元素的研究结果一致.由于近几十年来人类活动作用方式以及湖泊流域自身环

境的差异,与陈普海子相比,位于河套平原东部地区的乌梁素海,自1965年以来,农田灌溉退水所携带的大量流域物质是控制该湖泊粒径变化的主要原因^[20].

4 结论

4.1 约1850年受黄河河道变迁引起的洪水活动影响,陈普海子岩芯55~50cm沉积物表现为灰黄色黏土层,其粒度和元素特征与黄河岸边缓流沉积物相似,元素比值K/Ti、Al/Ti和K/Sr可作为湖泊沉积指示洪水活动的代用指标.

4.2 自1995年后,由于区域人类活动下沙荒土地大规模开垦,致使风沙活动增强,岩芯15cm以上沉积物粒度和元素特征与风积物相似.

参考文献:

- [1] Wang JZ, Wu JL, Zeng HA. Sediment record of abrupt environmental changes in Lake Chenpu, upper reaches of Yellow River Basin, north China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015,73(10):6355-6363.
- [2] 侯仁之,俞伟超.乌兰布和沙漠的考古发现和地理变迁 [J]. 考古, 1973,2:92-107.
- [3] Hou R Z, Yu W C. Environmental variance and archaeological findings in the Ulan Buh Desert [J]. Archaeology, 1973,2:92-107.
- [4] 贾铁飞,银山.乌兰布和沙漠北部全新世地貌演化 [J]. 地理科学, 2004,24(2):217-221.
- [5] Jia T F, Yin S. Geomorphic evolution in northern Ulan Buh Desert in the Holocene [J]. Scientia Geographica Sinica, 2004,24(2):217-221.
- [6] Zhao H, Li G Q, Sheng YW, et al. Early-middle Holocene lake-desert evolution in northern Ulan Buh Desert, China [J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2012,331-332(5):31-38.
- [7] Chen F H, Li G Q, Zhao H, et al. Landscape evolution of the Ulan Buh Desert in northern China during the late Quaternary [J]. Quaternary Research, 2014,81(3):476-487.
- [8] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志 [M]. 北京:科学出版社, 1998:374-377.
- [9] Wang S M, Dou H S, eds. Memoirs of lakes in China [M]. Beijing: Science Press, 1988:374-377.
- [10] 沈吉.湖泊沉积研究的历史进展与展望 [J]. 湖泊科学, 2009, 21(3):307-313.
- [11] Shen J. Progress and prospect of palaeolimnology research in China [J]. Journal of Lake Science, 2009,21(3):307-313.
- [12] 冯伟莹,焦立新,张生,等.乌梁素海沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 [J]. 中国环境科学, 2013,33(6):1068-1074.
- [13] Feng W Y, Jiao L X, Zhang S, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in the sediments of Wuliangsu Lake [J]. China Environmental Science, 2013,33(6):1068-1074.
- [14] Wang J Z, Wu J L, Pan B T, et al. Sediment records of Yellow River channel migration and Holocene environmental evolution of the Hetao Plain, northern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018,

156:180–188.

- [10] 汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌. 内蒙古河套地区陈普海子湖泊沉积物粒度特征及其环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(5): 137–144.

Wang J Z, Wu J L, Zeng H A. Grain-size characteristics and its environmental significance of Lake Chenpuhai sediment in Hetao Plain, Inner Mongolia [J]. Marine Geology & Quaternary Geology.

- [11] 万国江. 现代沉积的²¹⁰Pb 计年 [J]. 第四纪研究, 1997, 17(3): 230–239.

Wan G J. ²¹⁰Pb dating for recent sedimentation [J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(3): 230–239.

- [12] Appleby P, Oldfield F. The calculation of lead-210dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment [J]. Catena, 1978, 5(1): 1–8.

- [13] Chen G Q, Yi L, Chen S L, et al. Partitioning of grain-size components of estuarine sediments and implications for sediment transport in southwestern Laizhou Bay, China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2013, 31(4): 895–906.

- [14] Xiao J L, Fan J W, Zhou L, et al. A model for linking grain size component to lake level status of a modern clastic lake [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69(12): 149–158.

- [15] 陈惟财, 陈伟琪, 张珞平, 等. 九龙江流域地表水中硝酸盐来源辨析 [J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1484–1487.

Chen W C, Chen W Q, Zhang L P, et al. Identifying sources of nitrate in surface water of Jiulong River Watershed [J]. Environmental Science, 2008, 29(6): 1484–1487.

- [16] 牛俊杰, 赵淑贞, 任世芳, 等. 历史时期乌兰布和沙漠北部的环境变迁 [J]. 中国沙漠, 1999, 19(3): 26–30.

Niu J J, Zhao S Z, Ren S F, et al. Environmental evolution in northern

Ulan Buh Desert in historical time [J]. Journal of Desert Research, 2003, 58(2): 239–246.

- [17] 李炳元, 葛全胜, 郑景云. 近 2000 年来内蒙古后套平原黄河河道演变 [J]. 地理学报, 2003, 58(2): 239–246.

Li B Y, Ge Q S, Zheng J Y. Evolution of the Yellow River in the Houtao Plain of Inner Mongolia in the past 2000 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 239–246.

- [18] Wu J L, Ma L, Yu H, et al. Sediment geochemical records of environmental change in Lake Wuliangsuh, Yellow River Basin, north China [J]. Journal of Paleolimnology, 2013, 50(2): 245–255.

- [19] 张国庆. 乌兰布和沙漠东北部磴口县生态环境受水资源的影响及对策 [J]. 内蒙古水利, 2007, 4: 80–81.

Zhang G Q. The measure of ecological environment influenced by water resources in Dengkou county of the northeast of Ulan Buh Desert [J]. Inner Mongolia Water Resources, 2007, 4: 80–81.

- [20] 马龙, 吴敬禄, 温军会, 等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义 [J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 646–652.

Ma L, Wu J L, Wen J H, et al. Grain size characteristics and environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsuh Lake, Inner Mongolia [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 646–652.

致谢: 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所吴敬禄研究员和地球环境研究所金章东研究员在文章写作中的指导与建议;感谢兰州大学潘保田教授和高红山副教授及其科研团队在野外采样中的指导与帮助;感谢审稿专家提出的宝贵意见。

作者简介: 汪敬忠(1986—),男,江苏淮安人,助理研究员,博士,湖泊沉积与环境研究。发表论文 10 余篇。