

文章编号: 1000-0550(2008) 03-0508-05

乌梁素海和岱海沉积磷形态分布的差异性研究¹

吕昌伟 何江 孙惠民 高兴东 薛红喜

(内蒙古大学生态与环境科学系 呼和浩特 010021)

摘 要 湖泊沉积物中磷的含量及形态分布等地球化学信息可以用来反演湖泊流域的古环境及污染历史。本文以乌梁素海和岱海两个不同类型的湖泊为研究对象,对两个湖泊沉积柱芯中磷形态分布的差异性进行了研究。结果表明,乌梁素海和岱海沉积柱芯中沉积磷的主导形态均为 $ACa-P$ 、 $De-P$ 和 $Or-P$,但乌梁素海表层沉积物和沉积柱芯中 $A+P$ 和 $ACa-P$ 的含量水平明显高于岱海,而 $Ex-P$ 、 $De-P$ 和 $Or-P$ 的含量水平明显低于岱海。两个湖泊沉积磷形态分布的差异性能较好地揭示出湖泊流域的地理环境、化学风化程度以及湖泊富营养化类型的差异性,沉积柱芯中 $ACa-P$ 含量及其分布特征能很好的指示湖泊自身发展过程中的富营养化水平,而 $De-P$ 含量及其分布特征则能较好的揭示出整个湖泊流域的古环境古气候信息。

关键词 磷 形态分布 差异性 乌梁素海 岱海

第一作者简介 吕昌伟 男 1979 年出生 在读博士生 环境地球化学

通讯作者 何江 E-mail: ndjhc@inu.edu.cn

中图分类号 P595 **文献标识码** A

地球化学形态是判别沉积物中磷的迁移能力、生态效应的重要参数^[1-4]。沉积物中 P 以无机磷及有机磷两大类形式存在,其中无机磷的存在形式还可以进一步分为易交换态或弱吸附态磷、铝结合磷、铁结合磷、钙结合磷、原生碎屑磷。不同区域由于各种物理化学条件和生物环境的变化,对沉积物中 P 的形态分布有很大的影响。因此,探讨沉积物中 P 的存在形态,有助于获得沉积环境的有关信息,了解物质迁移、成岩过程以及 P 和其他生物元素的循环,对揭示湖泊富营养化的机制将会大有裨益。

本文以内蒙古高原乌梁素海和岱海为例,结合二者富营养化表征差异状况,依据乌梁素海和岱海沉积柱芯中 P 形态分布特征的差异性,探讨了不同湖泊流域内环境条件对 P 形态分布的影响。本研究将有助于了解磷的生物地球化学特征和提取沉积磷所蕴藏的古气候和古环境变化的信息,并为进一步认识湖泊磷的生物地球化学循环规律,揭示湖泊富营养化发生机制提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

乌梁素海是内蒙古高原干旱区最典型的浅水草型湖泊,为地球上同一纬度最大的自然湿地^[5]。湖

区(40°47'~41°03'N, 108°43'~108°57'E)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,湖面高程 1 018.5 m,库容量 $2.5 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8 \text{ m}^3$,80% 水域水深 0.8~1.0 m,现有水域面积 368.5 km²。乌梁素海是以大型水生植物过量生长为主要表征的草型富营养化湖泊,大型水生植物共 6 科 6 属 11 种,以芦苇和龙须眼子菜为优势种,湖内沉水植物和挺水植物分布面积已占全湖的 85% 以上,目前腐烂水草正以 9~13 mm/a 的速度在乌梁素海湖底堆积,使其成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一^[6]。乌梁素海地处典型的温带大陆性季风气候区,多年平均降雨量仅为 215 mm,而蒸发量高达 2 200 mm,其补给水源主要是河套灌区的农田退水^[7],其次是工业废水、生活污水、大气降水和地下水,年总入湖水量约 $7 \times 10^8 \sim 9 \times 10^8 \text{ m}^3$,每年排入乌梁素海的总氮为 1 088.59 t,总磷为 65.75 t^[6]。

岱海则属典型的地堑式断陷型盆地,位于我国北方环境敏感带的内蒙古中部凉城县境内,湖区(40°29'~40°37'N, 112°33'~112°46'E)地处半湿润与半干旱区的过渡带,对气候变化反应敏感^[8]。湖泊现有面积约 80.72 km²,湖面海拔 1 223 m,最大水深 16.05 m,平均水深 7.41 m^[9,10]。湖水主要来源于地表和地下径流及湖面降水,水量的支出主要是蒸发。

¹ 内蒙古自然科学基金和内蒙古大学“513”人才基金资助。

收稿日期: 2007-06-22 收修稿日期: 2007-09-17

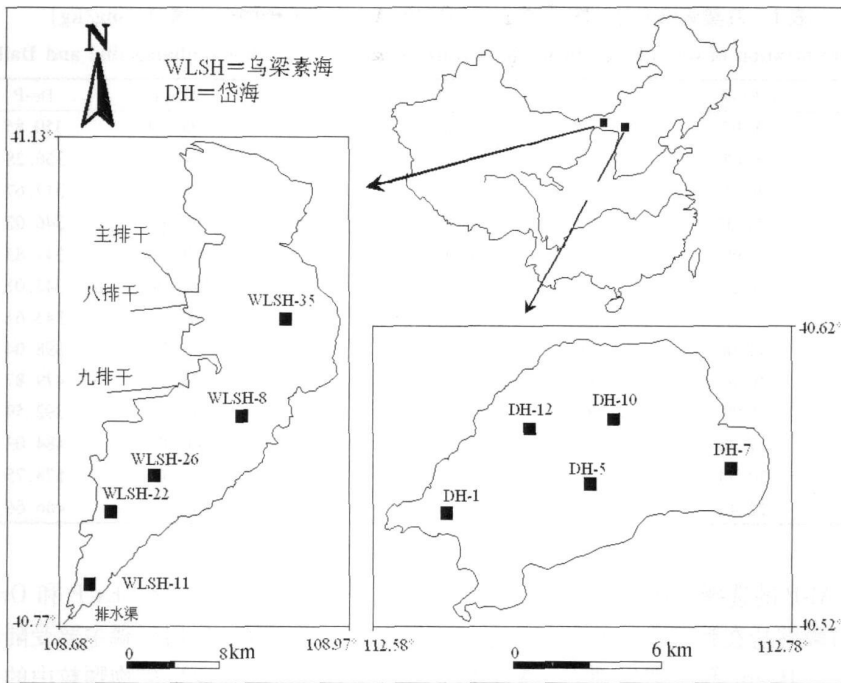


图 1 乌梁素海和岱海样点分布图

Fig 1 Location of sampling site in Wuliangsu Lake and Dahai Lake

岱海为藻型富营养化湖泊, 浮游植物是岱海水体的主要初级生产者, 岱海藻类有 76 属^[11], 其中绿藻门 28 属、硅藻门 21 属、蓝藻门 16 属、裸藻门 16 属、甲藻门、隐藻门、黄藻门、金藻门各 2 属。近年来湖水咸化程度增高, 湖泊富营养化进程加剧, 对水资源、渔业资源、滩地资源、经济作物资源的进一步开发利用构成了威胁。

1.2 样品采集及分析方法

于 2005 年 8 月对乌梁素海和岱海进行了系统的现场监测和样品采集。表层沉积物样 (0~10 cm) 与沉积柱芯均用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A och B 型无扰动采样器采集。沉积物柱芯长度为 30~45 cm, 现场以 2 cm 间隔分层, 装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存, 回实验室冷冻保存。采样站位用全球卫星定位系统 (GPS) 定位, 同时结合地形图校正 (图 1)。

形态磷的分析按照李悦、朱广伟等及 Ruttenberg 提出的沉积物中磷的连续提取方法进行^[2-4, 12]。

2 结果与讨论

沉积物中的磷主要来自上覆水体中颗粒的沉降和吸附作用, 在沉积过程中, 磷可与水体中的 Fe^{3+} (Fe^{2+}), Ca^{2+} , Al^{3+} 等离子相结合, 以可交换态磷 (Ex-P)、铝磷 (Al-P)、铁磷 (Fe-P)、闭蓄态磷 (Oc-P)、自生

钙磷 (ACa-P)、碎屑钙磷 (De-P) 和有机磷 (Or-P) 等不同形态赋存于沉积物中。沉积物中不同形态磷的含量水平和分布特征不仅记录着环境污染的程度, 而且包含了有关环境地球化学信息, 从而更有助于揭示和理解沉积磷与环境变化的相互关系。由于不同形态磷的形成是多种环境参数的函数, 且不同形态磷的相对比例对环境变化的反映更为灵敏, 因此利用它们的相对百分含量不仅能揭示磷的来源, 而且也是指示古气候和古环境变化极为重要的参数。

2.1 沉积磷形态分布的差异性

研究表明 (表 1 和 2), 乌梁素海表层沉积物和沉积柱芯中 Al-P 和 ACa-P 的含量水平明显高于岱海, 而 Ex-P、De-P 和 Or-P 的含量水平则明显低于岱海。Ex-P、Al-P 和 Fe-P 主要来源于铁铝氧化物和氢氧化物对正磷酸盐的吸附¹³或羟基磷灰石¹⁴, 是最易于被生物直接利用的形态磷。乌梁素海表层沉积物和沉积柱芯中 Al-P 的含量高于岱海可能与乌梁素海承纳河套灌区农田退水、上游城市生活污水和工业废水而导致湖泊上覆水中可溶性磷酸盐和 Al^{3+} 含量较高, 且乌梁素海的碱性水环境 ($7.73 < \text{pH} < 9.17$) 有利于 $\text{PO}_4^{3-} + \text{Al}^{3+} \rightarrow \text{AlPO}_4$ ($K_{sp} = 6.3 \times 10^{-19}$), 并在湖底沉积有关; 此外, 乌梁素海表层沉积物和沉积柱芯中 Al-P 的含量高于岱海也可能反映乌梁素海大量的挺水

表 1 乌梁素海和岱海表层沉积物 (0~10 cm) 中形态磷的含量情况 (mg/kg)

Table 1 The concentration of phosphorus forms in surface sediments from the Wuliangsu Hai and Daihai Lake (mg/kg)

点号	Ex-P	A-P	Fe-P	Oe-P	ACa-P	De-P	Or-P
WLSH-5	8.97	6.82	13.94	23.47	166.24	350.85	44.70
WLSH-8	8.03	8.15	11.77	22.51	164.43	356.28	44.11
WLSH-11	9.11	6.34	4.05	21.06	143.91	317.67	51.47
WLSH-22	20.07	8.63	17.68	35.66	162.62	346.02	67.15
WLSH-26	2.96	5.86	4.89	22.75	150.55	347.83	52.31
WLSH-35	6.22	6.10	3.81	16.72	243.46	343.01	38.56
Average (WLSH)	9.23	6.98	9.36	23.69	171.87	343.61	49.72
DH-1	11.00	2.76	19.85	24.59	33.20	398.04	98.64
DH-5	16.05	2.68	14.36	15.58	74.67	479.87	177.41
DH-7	2.99	2.00	19.09	17.97	30.97	392.59	92.52
DH-10	17.78	2.81	17.40	30.72	66.49	484.03	164.24
DH-12	14.44	3.36	10.83	26.43	80.58	578.75	173.90
Average (DH)	12.45	2.72	16.31	23.06	57.18	466.66	141.34

植物和沉水植物对 A-P 的选择性吸收不强。已有研究表明, 铁氧化物对磷酸盐在颗粒物上的存在形态起主要控制作用^[14~16]。Heam 等研究发现^[17], 无定形铁氧化物是控制 Potomac 河可溶性磷酸盐的主要悬浮颗粒物。与长江中下游浅水淡水湖泊相比^[2], 乌梁素海和岱海沉积物中 Fe-P 和 Oe-P 的含量相对较低, 这是由于乌梁素海和岱海均为微咸水湖, 高盐度环境下铁氢氧化物 (Fe(OH)₃) 的电荷由正变负, 抑制活性铁磷的吸附、沉淀和结晶过程, 从而失去对磷的吸附能力。

乌梁素海表层沉积物和沉积柱芯中 ACa-P 的含量高于岱海而 Ex-P、De-P 和 Or-P 的含量却低于岱海 (表 1 和 2) 的地球化学信息则反映了湖泊流域的地理环境、化学风化程度以及湖泊富营养化类型的差异性。乌梁素海和岱海分别地处不同气候区且具有不同的富营养化特征。前者湖区位于内蒙古高原干旱半干旱区, 为浅水草型富营养化湖泊; 后者则地处半湿润与半干旱区的过渡带, 为藻型富营养化湖泊。乌梁素海沉积柱芯中 ACa-P 的含量高于岱海的主要原因是乌梁素海湖区以芦苇为优势种的挺水植物和以龙须眼子菜为优势种的沉水植物的分布面积已占全湖的 89% 以上, 而且湖内目前生活着 100 多种鸟类, 其生物量远大于岱海, 导致因生物作用而沉积和固结的颗粒磷即 ACa-P (如羟基磷灰石等) 含量升高。Ex-P 是最易于被生物所利用的一种磷的形态, 而有机磷在早期成岩过程中可部分地随有机质降解而释放, 向其它结合态磷转化^[18,19], 是具有部分活性的形态磷。乌梁素海大量挺水植物和沉水植物的生长需求是造

成乌梁素海沉积柱芯中 Ex-P 和 Or-P 的含量低于岱海的主要原因。碎屑钙磷主要受陆源物质输入影响, 是包含在沉积物原生矿物颗粒中的一部分磷, 故其在沉积柱芯中的含量水平能揭示湖泊流域的古环境古气候信息。岱海沉积柱芯中 De-P 的含量高于乌梁素海, 一方面揭示了岱海流域风化壳和土壤中含钙较丰富^[20], 另一方面揭示了岱海流域的气候环境较乌梁素海流域温暖湿润, 降水量大且流域化学风化作用强。

2.2 ACa-P 和 De-P 的环境意义

乌梁素海和岱海沉积柱芯中含量最多的三种形态磷为 ACa-P、De-P 和 Or-P (表 2)。图 2 显示, 乌梁素海沉积柱芯中 ACa-P 占 ACa-P、De-P 和 Or-P 含量之和的百分比明显高于岱海, 而 Or-P 含量占 ACa-P、De-P 和 Or-P 含量之和的百分比要低于岱海, 揭示了乌梁素海较高的初级生产力; 乌梁素海沉积柱芯中 De-P 占 ACa-P、De-P 和 Or-P 含量之和的百分比低于岱海, 揭示岱海流域的环境气候条件较乌梁素海流域要温暖湿润, 且具有较强的化学风化作用。结合上述分析可知, 磷的形态含量及其分布特征包涵了非常丰富环境地球化学信息, 不仅记录着环境污染的程度, 更能揭示出沉积磷与环境变化的相互关系。研究表明, 湖泊沉积柱芯中 ACa-P 含量及其分布特征能很好的指示湖泊自身发展过程中的富营养化水平, 而 De-P 含量及其分布特征则能较好的揭示出整个湖泊流域的古环境古气候信息。因此, ACa-P 和 De-P 可作为古环境古气候研究中的有效代用指标。

表 2 乌梁素海和岱海沉积柱芯中形态磷的含量情况 (mg/kg)

Table 2 The concentration of phosphorus forms in sediment cores from the Wuliangsu Hai and Da Hai Lake (mg/kg)

Sediment cores	Ex-P	Al-P	Fe-P	OC-P	ACa-P	De-P	Or-P
WLSH-8	Max	12.45	10.20	16.47	17.20	149.95	286.24
	Min	5.98	5.74	6.10	5.62	102.08	180.11
	Average	7.83	7.70	9.54	8.79	125.08	213.47
WLSH-11	Max	12.13	10.08	9.11	29.75	180.72	398.51
	Min	6.34	3.68	3.08	15.03	137.28	319.48
	Average	8.04	6.13	5.22	21.65	162.37	359.72
WLSH-35	Max	14.30	13.22	18.04	48.09	314.05	406.96
	Min	5.86	5.13	3.08	14.91	228.98	376.19
	Average	9.51	9.24	10.34	28.76	260.45	391.98
DH-5	Max	18.39	5.33	17.63	56.13	92.13	519.37
	Min	6.24	1.91	10.81	11.92	66.12	352.65
	Average	13.90	3.02	13.95	30.09	75.82	446.54
DH-12	Max	17.16	3.93	16.53	46.31	86.34	597.52
	Min	8.89	1.78	3.69	20.41	73.57	374.77
	Average	13.56	2.53	9.42	28.10	81.11	510.14

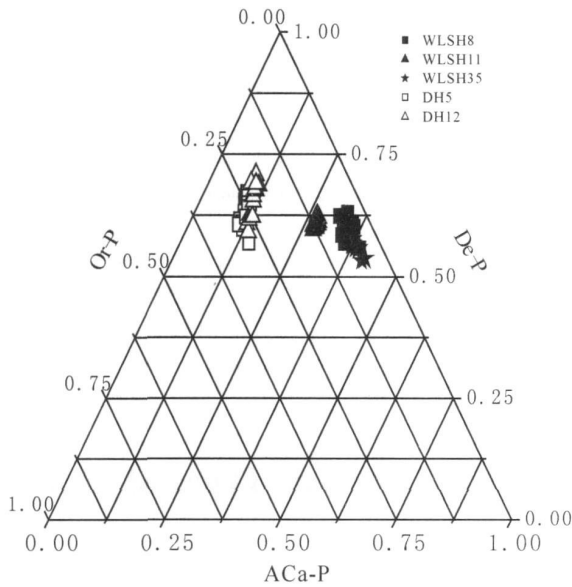


图 2 乌梁素海与岱海沉积柱芯中 ACa-P、De-P 和 Or-P 百分比的三角相图

Fig 2 The percentages of ACa-P, De-P and Or-P in sediment cores from the Wuliangsu Hai Lake and the Da Hai Lake

3 结论

乌梁素海和岱海沉积磷的主导形态均为 ACa-P、De-P 和 Or-P, 但乌梁素海表层沉积物和沉积柱芯中 Al-P 和 ACa-P 的含量水平明显高于岱海, 而 Ex-P、De-P 和 Or-P 的含量水平明显低于岱海。乌梁素海和岱海沉积磷的形态分布较好的记录了地处不同气候区、不同类型湖泊的富营养化水平及流域的古环境古气候信息。笔者认为, 湖泊沉积柱芯中 ACa-P 含

量及其分布特征能很好的指示湖泊自身发展过程中的富营养化水平, 而 De-P 含量及其分布特征则能较好的揭示出整个湖泊流域的古环境古气候信息, 可将 ACa-P 和 De-P 作为古环境古气候研究中的有效代用指标。

参考文献 (References)

- 付永清, 周易勇. 沉积物磷形态的分级分离及其生态学意义 [J]. 湖泊科学, 1999, 11(4): 376-381 [Fu Yongqing Zhou Yiyong. Species and fractionation of phosphorus in sediments and their ecological significance [J]. Journal of Lake Sciences, 1999, 11(4): 376-381]
- 朱广伟, 秦伯强, 高光. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系 [J]. 环境科学学报, 2004, 24(3): 381-388 [Zhu Guangwei Qin Boqiang Gao Guang. Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China [J]. Acta Scientiarum Circumstantiae, 2004, 24(3): 381-388]
- 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义 [J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1): 15-20 [Li Yue Wu Danian Xue Yongxian. A development sequential extraction method for different forms of phosphorus in the sediments and its environmental geochemical significance [J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(1): 15-20]
- Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(7): 1460-1482
- 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 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 [Sun Huimin He Jiang Lv Changwei et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Hai Lake [J]. Geographical Research, 2006, 25(6): 1003-1012]
- 于瑞宏, 李畅游, 刘廷玺, 等. 乌梁素海湿地环境的演变 [J]. 地理

- 学报, 2004, 59(6): 948-955 [Yu Ruihong, Li Changyou, Liu Tingxi *et al*. Change of wetland environment in Wuliangsu Hai [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 948-955]
- 7 孙惠民, 何江, 高兴东, 等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征 [J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 579-584 [Sun Huimin, He Jiang, Gao Xingdong *et al*. Distribution of total phosphorus in sediments of Wuliangsu Hai Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 579-584]
 - 8 王苏民, 冯敏. 内蒙古岱海湖泊环境变化与东南季风强弱变化的关系 [J]. 中国科学 (B 辑), 1991, 21(7): 759-768 [Wang Sumin, Feng Min. The relations of environment change and southeast monsoon strong and weak change in Dahai Lake, Inner Mongolia [J]. *Science in China (Series B)*, 1991, 21(7): 759-768]
 - 9 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 93-95 [Sun Qianli, Zhou Jie, Xiao Jule. Grain-size Characteristics of lake Dahai sediments and its palaeoenvironment significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 93-95]
 - 10 于兴河, 王德发, 孙志华. 湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型——内蒙古岱海现代三角洲沉积考察 [J]. 沉积学报, 1995, 13(1): 48-58 [Yu Xinghe, Wang Defa, Sun Zhihua. Lithofacies types, vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin: the observation on deposition of modern deltas in Dahai lake, Inner Mongolia [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(1): 48-58]
 - 11 王苏民, 吴瑞金, 余源盛, 等. 岱海湖泊环境与气候变化 [J]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990 [Wang Sumin, Wu Ruijin, Yu Yuansheng *et al*. Dahai Lake Environment and Climate Change [M]. Hefei University of Science and Technology of China Publishing House, 1990]
 - 12 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 349-352 [Zhu Guangwei, Qin Boqiang. Chemical sequential extraction of phosphorus in lake sediments [J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(3): 349-352]
 - 13 Fox L E. Phosphorus chemistry in the tidal Hudson River [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(6): 1529-1538
 - 14 Fox L E, Sager S L, Wofsy S C. Factors controlling the concentrations of soluble phosphorus in the Mississippi Estuary [J]. *Limnology and Oceanography*, 1985, 30(4): 826-832
 - 15 Fox L E, Sager S L, and Wofsy S C. The chemical control of soluble phosphorus in the Amazon estuary [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(5): 783-794
 - 16 Froelich P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: a primer on the phosphate buffer mechanism [J]. *Limnology and Oceanography*, 1988, 33(4): 649-668
 - 17 Heam P P. Controls on phosphorus mobility in Potomac river near the Blue Plains waste water treatment plant [R]. US Geological Survey Water Supply Paper, 1995, 2231: 46
 - 18 Filippelli G. M. and Delaney M L. Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(9): 1479-1495
 - 19 Sundby B, Gobeil C, Silverberg N, *et al*. The phosphorus cycle in coastal marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(6): 1129-1145
 - 20 刘培桐, 王华东, 潘宝林, 等. 岱海盆地的水文化学地理 [J]. 地理学报, 1965, 31(1): 36-61 [Liu Peitong, Wang Huadong, Pan Baolin, *et al*. Dahai lake basin hydrology chemical geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1965, 31(1): 36-61]

The Difference of Phosphorus Forms between Different Types of Lakes

LV Chang-wei HE Jiang SUN Huimin GAO Xing-dong XUE Hong-xi

(Department of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021)

Abstract The sediments hold information of, for example, phosphorus, which can be used to reconstruct the paleoecological and pollution history of the lakes and their drainage basins. In this paper, phosphorus forms in sediment cores from the Wuliangsu Hai Lake and the Dahai Lake were extracted by a sequential extraction technique. The results indicate that the contents of A+P and ACa-P in the Wuliangsu Hai Lake are notably higher than those in the Dahai Lake. However, the contents of Ex-P, De-P and Or-P in the Wuliangsu Hai Lake are obviously lower than those in the Dahai Lake. The distribution of phosphorus forms can archive the information of eutrophication level and the palaeoenvironment and paleoclimate of the drainage basin of the two lakes located in different climatic regions. The contents of authigenic apatite, CaCO₃-bound P, and biogenic apatite (ACa-P) and detrital apatite (De-P) can be used as effective parameters in the study of palaeoenvironment and paleoclimate.

Key words phosphorus forms; distribution character; Wuliangsu Hai Lake; Dahai Lake