

磷在不同类型湖泊沉积物上的吸附特征及形态再分布研究

吕昌伟^{1,2}, 孟婷婷¹, 张细燕¹, 崔 萌¹, 万丽丽¹, 何 江^{1,2}, 白 帆¹, 杨 旭¹

(1.内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2.内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021)

摘 要:以乌梁素海和岱海表层沉积物为吸附剂,开展了磷在沉积物上的吸附动力学和等温吸附实验研究,采用交叉型 Langmuir 模型描述了磷在 2 个湖泊沉积物上的吸附行为,并分析测定了等温吸附后沉积物中磷的形态分布。结果表明,不同浓度条件下沉积物对磷的吸附动力学过程基本相似,Elovich 方程能较好地描述 2 个湖泊沉积物对磷酸盐的吸附动力学过程;Langmuir 交叉型吸附等温式能较好地描述磷在岱海和乌梁素海沉积物上的等温吸附行为($R^2=0.990$),模型中的 k 、 Q_m 、 EPC_0 、 NAP 等参数较好地反映了 2 个湖泊沉积物在成因、粒度及矿物组成等方面的差异;吸附磷的形态再分布揭示颗粒物所吸附的水相磷主要分布于 $Ex-P$,且 $Or-P$ 是沉积物中重要的潜在生物有效性磷源,对湖泊富营养化的作用不容忽视。

关键词:吸附特征;形态分布;磷;沉积物

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)02-0402-08

Adsorption Characters and Form Distribution of Phosphorus in Sediments from Different Type Lakes

LÜ Chang-wei^{1,2}, MENG Ting-ting¹, ZHANG Xi-yan¹, CUI Meng¹, WAN Li-li¹, HE Jiang^{1,2}, BAI Fan¹, YANG Xu¹

(1.College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China; 2.Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: Taking surface sediments from the Wuliangsuhai and Daihai Lake as adsorbent, the adsorption kinetics and isothermal adsorption experiments were carried on and the adsorption behavior was explained by Langmuir crossover-type equations, then the form distribution characters of phosphorus were studied after adsorption in this work. The results showed that the adsorption kinetics processes were similar under different initial concentrations of phosphorus and the Elovich model can be used to fit the adsorption kinetics processes of phosphorus adsorption on the two lakes sediments; from the view of adsorption rates, the maximum of adsorption rates were found at the first 0~1 min and the adsorption rates of phosphorus on the sediments from Daihai Lake and Wuliangsuhai Lake were up to $961.08 \sim 7\ 036.18\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ and $563.35 \sim 4\ 464.29\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ respectively at different initial phosphorus concentration. During the first 0~1 h, the percentages of adsorption capacity of phosphorus on sediments from Daihai Lake and Wuliangsuhai Lake were 88%~99% and 75%~93% respectively; the Cross-Langmuir model can be used to fit the isothermal adsorption ($R^2=0.990$), and the parameters such as k , Q_m , EPC_0 and NAP revealed the differences on sediments origin, grains and mineral composition between the two lakes; the form distribution characters after adsorption indicated that phosphorus adsorbed on particles were mainly added on the form of the exchangeable phosphorus, and the organic phosphorus had important potential bioavailability.

Keywords: adsorption behavior; form distribution; phosphorus; sediment

磷在天然水体颗粒物、土壤及沉积物上的吸附—

收稿日期:2011-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41003049);内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601);“国家大学生创新性实验计划”项目(20081012614)

作者简介:吕昌伟(1979—),博士,副教授,研究方向为环境地球化学和污染生态学。E-mail:lcw2008@imu.edu.cn

解吸作用是影响其环境地球化学行为的重要过程^[1]。含磷污染物进入水体后会随水体扩散、迁移,其中部分污染物会被水体中的悬浮泥沙颗粒吸附,并随泥沙颗粒迁移或沉降。沉积物是磷累积和再生的重要场所,它与水体间存在吸附/释放的动态平衡;若环境条件发生改变,被泥沙或沉积物颗粒吸附的磷可通过

水-沉积物界面释放至上覆水中,成为湖泊生态系统的重要营养源^[2],加大富营养化的发生风险^[3-4]。目前,国内外学者在磷的形态分布^[5-7]、吸附行为及其影响因素^[8-9]等方面开展了大量工作。但以往研究注重于沉积物磷的形态分布,采用 Henry、Langmuir 和 Freundlich 等模型描述颗粒物对磷的吸附行为^[10-13],忽略了沉积物自身吸持的可解吸磷^[14-15]及吸附磷在沉积物中的形态再分布问题。本研究以乌梁素海和岱海沉积物为吸附剂,开展了2个湖泊沉积物对磷的吸附特征研究,采用交叉型 Langmuir 模型描述了磷在2个湖泊沉积物上的吸附行为,并厘定了吸附磷的形态再分布特征,可为揭示水环境中磷的吸附/解吸机制,评价沉积物内源释放风险,以及判别吸附磷再循环能力积累基础数据,对深入探讨湖泊富营养化发生与控制机制及内源负荷治理具有重要的参考价值。

1 研究区概况

乌梁素海(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,系黄河改道后形成的牛轭湖,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊,是亚洲湿地公约组织名录中的大型湿地生物多样性保护区,是我国北方候鸟的重要栖息和繁殖地。湖区现有水域面积 333.48 km²,湖面高程 1 018.5 m,库容量 2.5×10⁸~3×10⁸ m³,80%水域水深 0.8~1.0 m。湖中有大型水生植物共 6 科 6 属 11 种,以芦苇、龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种。受河套灌区农田退水的影响,近 10 年来乌梁素海富营养化进程加剧^[6],加速了湖泊富营养化和沼泽化进程。

岱海(40°29'27"~40°37'6"N, 112°33'31"~112°46'40"E)位于内蒙古凉城县境内,是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊,位处温带半干旱区向干旱区的过渡带。湖区现有水域面积约 80.72 km²^[17],湖面高程 1 223 m,最大水深 16.05 m,平均水深 7.41 m。湖中有藻类共 76 属,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;有浮游动物共 29 种,其中原生动物 1 种、轮虫 14 种、枝角类 9 种、桡足类 5 种。岱海补给水源来自大气降水以及弓坝河、五号河、步量河、天成河、目花河等间歇性河流。近年来因气候干旱,湖泊水位逐年下降、水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高,富营养化加剧,使该区环境问题日益突出,成为我国全球变化研究中倍受重视的地区。

2 材料与方法

2.1 样品采集

于 2009 年 8 月对乌梁素海(WLSH)、岱海(DH)进行沉积物样品采集,依据《湖泊生态系统观测方法》,针对各湖泊现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点(图1)。表层沉积物视湖泊深度分别用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A och B 型无扰动采样器或荷兰 Eijkelpamp 公司产 SA Beeker 型沉积物原状采样器采集;沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于-24℃冷冻保存。

2.2 实验方法

2.2.1 吸附动力学实验

在一系列 50 mL 离心管中分别加入乌梁素海表层沉积物样品 0.500 0 g,于室温下加入磷含量为 2.0 mg·L⁻¹的 KH₂PO₄ 溶液,迅速置于转速为 260 r·min⁻¹的振荡器上振荡并开始计时,分别于 1、2、8、15、30 min 和 1、2、3、4、6、8 h 时刻迅速取样,取样后立即离心提取上清液,过 0.45 μm 滤膜后用钼-锑-抗比色法测定上清液中溶解性磷酸盐的含量。

磷含量为 4.0 mg·L⁻¹和 8.0 mg·L⁻¹处理浓度下的吸附动力学实验同上。岱海表层沉积物对磷的吸附动力学实验同上。

2.2.2 吸附等温实验及吸附磷的形态再分布实验

在一系列 50 mL 离心管中加入 0.500 0 g 乌梁素海表层沉积物样品,然后加入磷的初始质量浓度分别为 0、0.04、0.08、0.10、0.20、0.40、0.80、1.60、3.20、6.00、12.00 mg·L⁻¹的 KH₂PO₄ 溶液,于室温下振荡 24 h(260 r·min⁻¹),取样后立即离心提取上清液,过 0.45 μm 滤膜后用钼-锑-抗比色法测定上清液中溶解性磷酸盐的含量。同时分析测定等温吸附后沉积物中磷的形态分布。

本研究中磷的形态分析按照李悦^[18]、朱广伟^[19]等及 Ruttenberg^[20]提出的沉积物中磷的连续提取方法进行。数据处理软件为 Excel 2003 和 SPSS 16.0。

3 结果与讨论

3.1 吸附动力学

吸附是十分复杂的动力学过程,包括快吸附和慢吸附。本文开展了不同浓度条件下的吸附动力学实验研究。实验结果表明,吸附反应初始阶段(1 h 内),岱海和乌梁素海沉积物对磷的吸附量随时间增加较快,吸附动力学曲线斜率较大,反映出吸附以表面吸附为

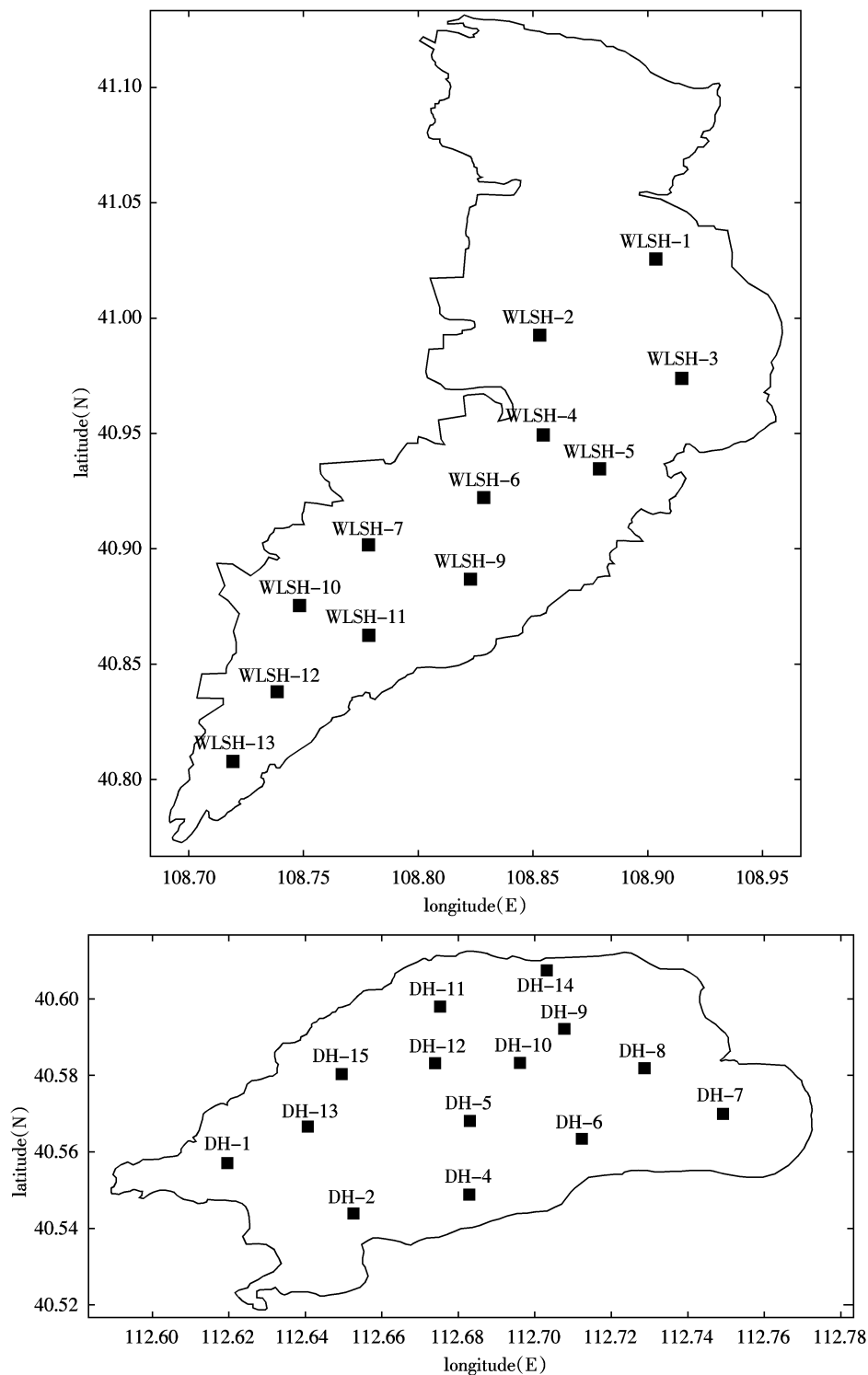


图 1 乌梁素海和岱海采样站位分布图

Figure 1 Locations of sampling points in the Wuliangsu and Daihai Lake

主的特点,此阶段内乌梁素海沉积物对磷吸附达到最大吸附量的 80%~87%,而岱海则达到 94%以上;随吸附时间延长,沉积物表面吸附点位减少,磷的吸附和解吸渐趋平衡,吸附量随时间增加缓慢,吸附进入慢

吸附阶段,吸附动力学曲线渐趋平缓(图 2)。总体而言,不同浓度条件下沉积物对磷吸附的动力学过程基本相似,但不同浓度条件下沉积物对磷吸附的浓度效应明显,即浓度越高平衡吸附量越大。从吸附速率来

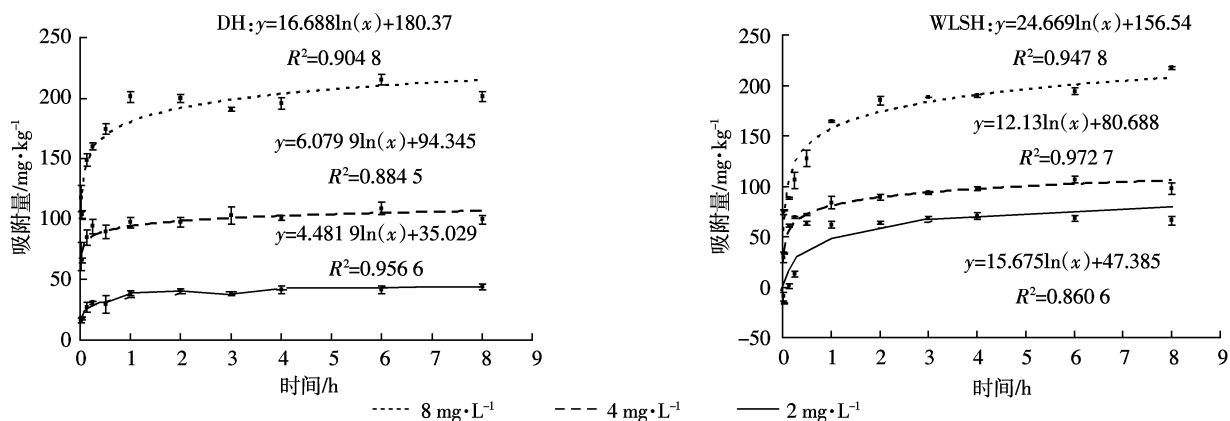


图2 乌梁素海和岱海沉积物对磷的吸附动力学方程

Figure 2 Description of adsorption kinetics of phosphorus on lakes sediments

看, 0~1 min 的吸附速率最大; 不同浓度条件下, 岱海和乌梁素海沉积物对磷的吸附速率分别达 $961.08 \sim 7\,036.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $-563.35 \sim -4\,464.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 为以后各时段吸附速率的几十至几百倍。0~1 h 时段内, 2 个湖泊沉积物对磷的吸附速率均较高, 岱海和乌梁素海沉积物对磷的吸附量分别占平衡吸附量的 88%~99% 和 75%~93%。

近年来, 越来越多的学者采用化学动力学方法研究土壤与金属离子或阴离子的相互作用, 动力学方程也越来越多地被用来解释这些离子或物质在土壤中的化学行为。结果显示, Elovich 方程对磷酸盐在乌梁素海和岱海沉积物上吸附动力学的拟合结果较好, 2 个湖泊沉积物对磷的吸附动力学拟合的回归系数达 0.927 7 以上(图 2)。

3.2 吸附等温实验

吸附等温模型是描述吸附平衡特征及吸附动力学过程的有效手段^[14], 如 Langmuir 等温模型已被广泛应用于真实环境体系中吸附过程的描述^[13, 21~24]。目前, Langmuir 方程已成功用于描述磷在单一矿物上的吸附过程, 但近 20 年研究发现, 在许多自然水体中, 吸附等温线存在一些反常变化^[25~26]。天然沉积物一般含有内源磷, 所以其对磷的吸附等温线不是过原点而是过浓度坐标的。可见, Langmuir 方程忽略了沉积物中已吸持磷, 在描述天然沉积物对磷的吸附时, 需要对 Langmuir 方程进行修正^[14~15]。吸附等温线与平衡浓度轴的交叉点所对应的磷平衡浓度值即为吸附/解吸平衡磷浓度。潘纲等^[14]提出了实际环境体系中磷吸附的交叉型吸附等温式, 可通过对沉积物吸附/解吸平衡磷浓度参数的测定、分析, 定性、定量地判断沉积物在不同环境中对磷所起的源或汇的作用。

Langmuir 交叉型吸附等温式如下:

$$P_{\text{sor}} = \frac{Q_m k (c - EPC_0)}{(1 + kc)(1 + k \cdot EPC_0)} \quad (1)$$

$$NAP = \frac{Q_m k \cdot EPC_0}{1 + k \cdot EPC_0} \quad (2)$$

式(1)中, Q_m 为最大吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为吸附常数; EPC_0 为吸附等温线与平衡浓度轴的交叉点所对应的磷平衡浓度值即吸附/解吸平衡磷浓度; 式(2)中, NAP 表示原先结合在沉积物上、实验条件下可解吸的磷, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

因此, 当水体磷浓度小于沉积物的 EPC_0 值时, 吸附量(P_{sor})为负值, 沉积物向水体释放磷, 表现为磷的“源”; 反之, 吸附量为正值, 表现为磷的“汇”^[15]。可见, EPC_0 点是吸附等温线上的关键点, 考察它对研究沉积物的吸附特征有重要意义。本实验测得磷在岱海和乌梁素海沉积物上的吸附等温线如图 3 所示, 并利用 SPSS 软件的非线性回归方程拟合得出乌梁素海、岱海的 Langmuir 交叉型吸附等温方程, 结果见表 1。

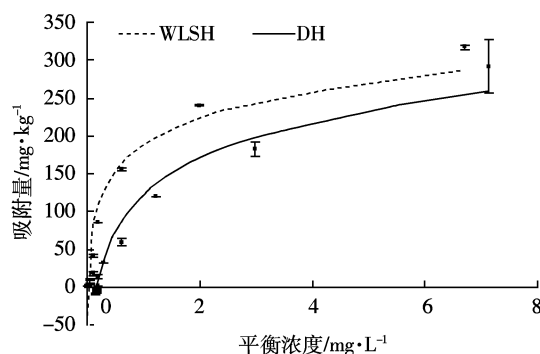


图3 乌梁素海和岱海沉积物对磷的吸附等温线

Figure 3 Description of adsorption isotherms of phosphorus on the lakes sediments

表1 Langmuir 交叉型吸附等温方程拟合参数
Table 1 Parameters of Langmuir crossover-type equations
simulated by non-linear fit for the P adsorption isotherm

项目	k	Q_m	EPC_0	NAP	R^2
岱海	0.374	422.904	0.154	23.03	0.990
乌梁素海	1.459	349.818	0.016	7.98	0.990

拟合结果显示(表1), R^2 均为0.990,揭示Langmuir交叉型吸附等温式均能较好地描述磷在岱海和乌梁素海沉积物上的吸附行为。 k 为吸附反应平衡参数,表示沉积物胶体与无机磷酸二氢根离子亲和能力的高低,物理意义为当吸附量达到最大吸附容量的一半时溶液中磷的平衡浓度,其大小反映了沉积物吸附基质与磷素之间吸附力的变化。 ΔG^0 是自由能, $\Delta G^0 = -RT \ln k$,因此 k 值的大小一定程度上反映沉积物的吸附能级与反应的自发程度, k 值越大,反应的自发程度就越强,生成物则越稳定,对磷的吸附能力强。乌梁素海沉积物对磷的Langmuir吸附常数(k)明显大于岱海(表1),反映了乌梁素海沉积物吸附基质与磷素之间吸附力、吸附能级及吸附反应的自发程度均高于岱海沉积物,相应地吸附反应的生成物较稳定,对磷的吸附能力较强,这从一个侧面反映了2个湖泊沉积物在来源、粒度及矿物组成等方面的差异。岱海和乌梁素海沉积物对磷的最大吸附量(Q_m)均低于美国的Little Rock Lake^[27]、英国River Lugg^[28]及中国太湖、贡湖和五里湖^[29],但却远高于内蒙古黄河段沉积物;2个湖泊相比而言,乌梁素海沉积物对磷的最大吸附量(Q_m)较小,可能与乌梁素海为黄河改道后形成的牛轭湖,沉积物砂质成分较高及有机质含量相对较低有关,也可能与沉积物粒度、矿物组成及吸附点位等有关。

表1结果表明,岱海和乌梁素海 NAP 相差较大(分别为23.03、7.98 mg·kg⁻¹),反映了2个湖泊沉积物自带可解吸磷含量的差异性,与岱海沉积物中可交换态磷含量较高的前期研究结果相一致^[6,30]。与内蒙古段黄河沉积物^[15]相比,2个湖泊沉积物自带的可解吸磷含量较高,揭示了湖相沉积物与河流沉积物的粒度矿物等理化性质对其吸附能力的影响。岱海和乌梁素海的 EPC_0 分别为0.154、0.016 mg·L⁻¹,与本研究小组前期对该2个湖泊上覆水中磷的研究结果相比,岱海沉积物的 EPC_0 值高于相应上覆水的DIP值,沉积物表现为上覆水的磷“源”,在实验条件下向水体中释磷;乌梁素海沉积物的 EPC_0 值小于相应上覆水的DIP,沉积物表现为上覆水的磷“汇”,在实验条件下上

覆水中磷向沉积物迁移。总体上,岱海沉积物主要来源于流域及湖相沉积,颗粒物粒度较小,自身结合的可解吸磷含量较高, EPC_0 值和最大吸附量也较大,揭示内源负荷已成为岱海上覆水的重要磷源;与岱海不同,乌梁素海是黄河改道形成的牛轭湖,沉积物中磷的背景含量相对较低,流域内尤其是河套灌区农田退水导致沉积物中磷负荷不断升高,其自身结合的可解吸磷含量已远高于黄河沉积物^[15],也成为乌梁素海富营养化治理中不可忽视的磷源。

3.3 吸附后形态再分布

沉积物中磷的形态分布是影响沉积磷生物有效性的关键因素,被沉积物吸附磷的形态再分布是评价水环境中磷的再循环能力和潜在释放风险的重要判据。

研究表明,吸附实验对沉积物中不同形态磷的影响程度不同。实验结果显示,岱海沉积物中Ex-P有先降低后升高的趋势(图4)。当处理浓度小于0.2 mg·L⁻¹时,岱海沉积物中Ex-P含量低于吸附前,表明沉积物向上覆水体释磷,成为上覆水的磷源,揭示岱海沉积物中自身结合的可解吸磷较高,这与Langmuir交叉型吸附等温方程的拟合结果相一致,即岱海沉积物的 NAP 较高为23.03 mg·kg⁻¹,且 EPC_0 为0.154 mg·L⁻¹。当处理浓度由0.2 mg·L⁻¹升高至12.0 mg·L⁻¹时,即水相磷深度超过 EPC_0 时,沉积物开始吸附水相磷,吸附磷主要迭加在Ex-P上。吸附后,乌梁素海沉积物中Ex-P的含量主要表现为随处理浓度升高而升高的趋势,这与Langmuir交叉型吸附等温方程拟合的乌梁素海沉积物中 NAP 仅为7.98 mg·kg⁻¹有关。

2个湖泊沉积物中,Al-P和Fe-P含量虽较低,但也表现出了随处理浓度升高的趋势(图4)。值得注意的是,2个湖泊沉积物中Or-P含量随处理浓度升高均表现出先略微降低后升高的趋势(图4)。初始阶段,沉积物中Or-P含量的降低揭示水相磷浓度较低时,沉积物中Or-P将成为重要的潜在生物有效性磷源,有机磷的生物有效性及其对湖泊富营养化的作用不容忽视^[7];随处理浓度的升高,沉积物中Or-P含量的升高趋势则反映了沉积物中有机质对水相磷的吸持作用。吸附前后,2个湖泊沉积物中Oc-P、Aca-P和De-P的含量变化不大(图4),表明Oc-P、Aca-P和De-P与沉积物结合紧密,受吸附实验的影响不大,也揭示表生条件下Oc-P、Aca-P和De-P对湖泊富营养化的作用有限。

总体上,从吸附前后沉积物中形态磷的百分比分布来看(图5),随处理浓度升高,2个湖泊沉积物中Ex-P

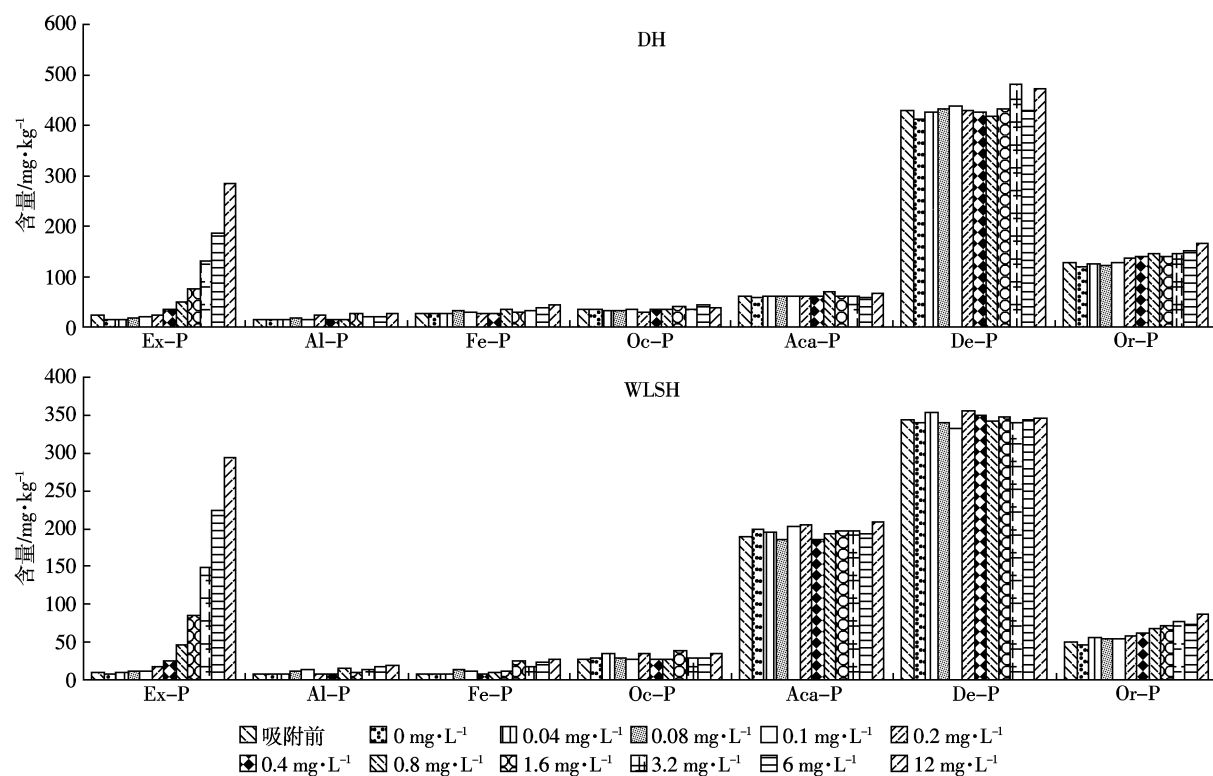


图4 乌梁素海和岱海沉积物吸附磷后的形态再分布

Figure 4 Form distribution of phosphorus after adsorption in the sediments from the two lakes

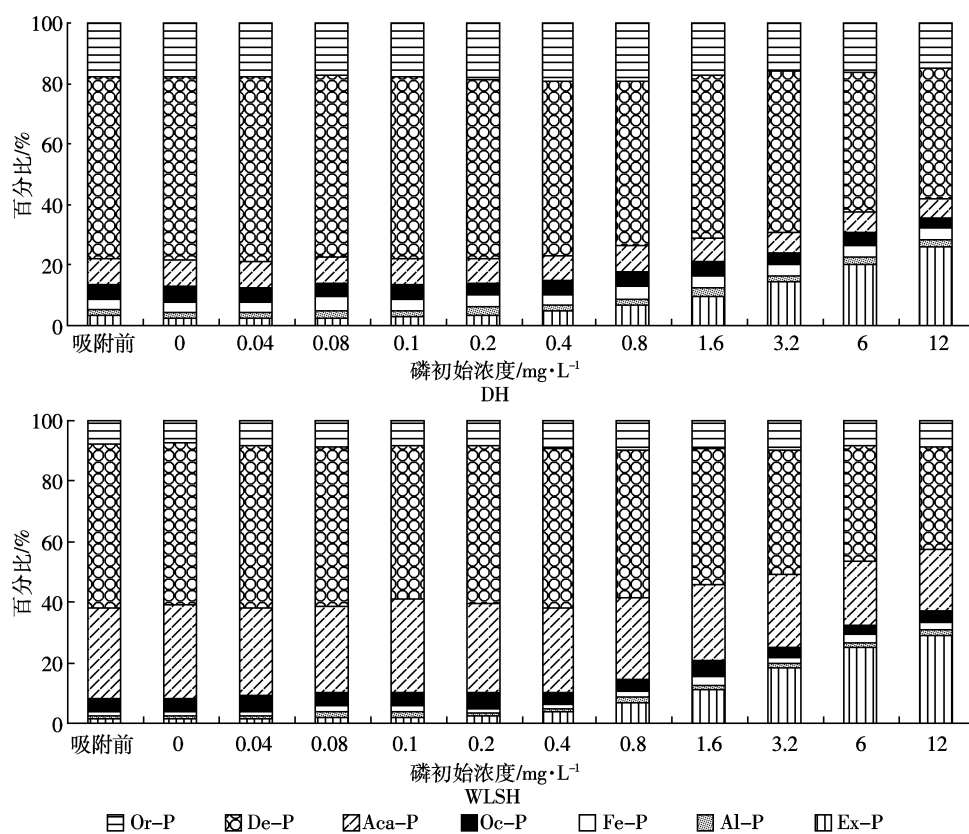


图5 乌梁素海和岱海沉积物吸附磷后的形态百分比变化

Figure 5 Percentage of phosphorus forms after adsorption in the sediments from the two lakes

的含量升高趋势明显,即颗粒物所吸附的水相磷主要分布于Ex-P。此外,图4和图5所反映的2个湖泊沉积物中形态磷的差异性,如乌梁素海沉积物中Aca-P高于岱海,与本研究小组的前期研究结果相一致^[6]。

4 结论

实验表明,吸附反应初始阶段的1 h内,乌梁素海沉积物对磷吸附达到最大吸附量的80%~87%,而岱海则达到94%以上;不同浓度条件下沉积物对磷的吸附动力学过程基本相似,Elovich方程能较好地描述2个湖泊沉积物对磷酸盐的吸附动力学过程。

等温吸附实验结果表明,Langmuir交叉型吸附等温式均能较好地描述磷在岱海和乌梁素海沉积物上的吸附行为($R^2=0.990$),2个湖泊沉积物的吸附能力(k)、最大吸附量(Q_m)、吸附解吸平衡深度(EPC_0)及自身吸持可解吸磷(NAP)的差异较好地反映了2个湖泊沉积在成因、粒度及矿物组成等方面的差异。

吸附前后,2个湖泊沉积物中磷的形态变化揭示,颗粒物所吸附的水相磷主要分布于Ex-P,且Or-P是沉积物中重要的潜在生物有效性磷源,对湖泊富营养化的作用不容忽视。

参考文献:

- [1] 汤鸿霄. 微界面水质过程的理论与模式应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(1): 2-9.
TANG Hong-xiao. Application of surface coordination principle and modeling on aquatic micro-interfacial processes impacting the water quality[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(1): 2-9.
- [2] 陈明洪, 方红卫, 陈志和. 泥沙颗粒表面磷吸附分布的实验研究[J]. 泥沙研究, 2009(4): 51-57.
CHEN Ming-hong, FANG Hong-wei, CHEN Zhi-he. Experiment of phosphorus distribution on sediment surface[J]. *Journal of Sediment Research*, 2009(4): 51-57.
- [3] Aminot A, Andrieux F. Concept and determination of exchangeable phosphate in aquatic sediments[J]. *Water Research*, 1996, 30(11): 2805-2811.
- [4] Sharpley A N, Chapra S C, Wedepohl R, et al. Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 437-451.
- [5] 黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态[J]. 湖泊科学, 2006, 18(3): 199-206.
HUANG Qing-hui, WANG Lei, WANG Zi-jian. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(3): 199-206.
- [6] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海和岱海沉积磷形态分布的差异性研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 508-512.
LÜ Chang-wei, HE Jiang, SUN Hui-min, et al. The difference of phosphorus forms between different types of lakes[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 508-512.
- [7] 吕昌伟, 何江, 毛海芳, 等. 乌梁素海和岱海的水-沉积物系统中有机磷分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 541-545.
LÜ Chang-wei, HE Jiang, MAO Hai-fang, et al. Distribution characters of organic phosphorus in the overlying water-sediment system of the Wuliangsuhai and Daihai in the Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(3): 541-545.
- [8] Wang S, Jin X, Bu Q, et al. Effects of particle size, organic matter and ionic strength on the phosphate sorption in different trophic lake sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 128(2-3): 95-105.
- [9] Wang S, Jin X, Zhao H, et al. Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediments[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2007, 297(1-3): 154-162.
- [10] 黄岁梁. 泥沙解吸重金属污染物动力学模式研究[J]. 地理学报, 1995, 50(6): 497-505.
HUANG Sui-liang. A study on heavy-metal pollutant desorption by sediment with different grain sizes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(6): 497-505.
- [11] 钟德钰, 禹雪中, 丁赞. 挟沙水流中石油类污染物输移转化的数值模拟[J]. 泥沙研究, 2007(2): 24-29.
ZHONG De-yu, YU Xue-zhong, DING Yun. Simulation of petroleum hydrocarbons transported by sediment flows[J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(2): 24-29.
- [12] 李敏, 王光谦, 倪晋仁, 等. 长江口沉积物对磷酸盐吸附的等温模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(9): 1026-1029.
LI Min, WANG Guang-qian, NI Jin-ren, et al. Adsorption isotherm model of phosphate by suspended sediments from Changjiang Estuary[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(9): 1026-1029.
- [13] An W C, Li X M. Phosphate adsorption characteristics at the sediment water interface and phosphorus fractions in Nansi Lake, China, and its main inflow rivers[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 148(1): 173-184.
- [14] Pan G, Krom M D, Herut B. Adsorption-desorption of phosphate on airborne dust and riverborne particulates in East Mediterranean seawater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(16): 3519-3524.
- [15] 张宪伟, 潘纲, 王晓丽, 等. 内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 172-177.
ZHANG Xian-wei, PAN Gang, WANG Xiao-li, et al. Characteristics of phosphorus sorption on Yellow River sediments from Inner Mongolia Reach[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 172-177.
- [16] 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 Hui-min, HE Jiang, LÜ Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsuhai Lake[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1003-1012.
- [17] 周云凯, 姜加虎, 黄群, 等. 内蒙古岱海水体营养状况分析[J]. 干旱区地理, 2006, 29(1): 42-46.
ZHOU Yun-kai, JIANG Jia-hu, HUANG Qun, et al. Analysis on the

- trophic status of the Daihai Lake in Inner Mongolia[J]. *Arid Land Geography*, 2006, 29(1):42-46.
- [18] 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 Da-nian, XUE Yong-xian. 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.
- [19] 朱广伟, 秦伯强, 高 光, 等. 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 Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang, et al. 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 Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3):381-388.
- [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.
- [21] Bajpai A K, Rajpoot M, Mishra D D. Static and kinetic studies on the adsorption behavior of sulfadiazene[J]. *Adsorption*, 2000, 6(4):349-357.
- [22] Agyei N M, Strydom C A, Potgieter J H. An investigation of phosphate ion adsorption from aqueous solution by fly ash and slag[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(5):823-826.
- [23] Ho Y S, McKay G. Competitive sorption of copper and nickel ions from aqueous solution using peat[J]. *Adsorption*, 1999, 5(4):409-417.
- [24] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. *Water Research*, 1998, 32(2):393-399.
- [25] O'Connor D J, Connolly J P. The effect of concentration of adsorbing solids on the partition coefficient[J]. *Water Research*, 1980, 14(10):1517-1523.
- [26] Honeyman B D, Santschi P H. Metals in aquatic systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 1988, 22(8):862-871.
- [27] Detenbeck N E, Brezonik P L. Phosphorus sorption by sediments from a soft-water seepage lake. I. An evaluation of kinetic and equilibrium models[J]. *Environmental Science & Technology*, 1991, 25(3):395-403.
- [28] Jarvie H P, Jurgens M D, Williams R J, et al. Role of river bed sediments as sources and sinks of phosphorus across two major eutrophic UK river basins: The Hampshire Avon and Herefordshire Wye[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1-4):51-74.
- [29] 王圣瑞, 金相灿, 庞 燕. 不同营养水平沉积物在不同 pH 下对磷酸盐的等温吸附特征[J]. *环境科学研究*, 2005, 18(1):53-57.
WANG Sheng-rui, JIN Xiang-can, PANG Yan. The sorption isotherms of phosphate to different nutrient levels of sediments in different pH[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, 18(1):53-57.
- [30] Lü C W, He J, Sun H M, et al. Application of allochthonous organic carbon and phosphorus forms in the interpretation of past environmental conditions[J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(6):1279-1289.