

内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征研究

张宪伟^{1,2}, 潘纲^{1*}, 王晓丽^{3,4}, 陈灏¹, 郭博书³, 包华影⁴

(1. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 内蒙古师范大学化学与环境科学学院, 呼和浩特 010022; 4. 北京师范大学化学学院, 北京 100875)

摘要: 研究了黄河干流内蒙古段6个地理位置的沉积物对磷的吸附行为, 并分析了沉积物组成及其理化性质与磷吸附特征的关系. 结果表明, 沉积物对磷的最大吸附量为43.64~85.46 mg/kg, 吸附能力较弱. 各沉积物的吸附/解吸平衡磷浓度(EPC_0)范围在0.0003~0.0198 mg/L, 与可解吸的内源磷含量正相关, 与地理位置没有表现出相关性. 本研究条件下, 在石嘴山、乌拉特前旗、清水河断面, 沉积物对磷表现为“源”; 在乌海、临河、包头断面表现为“汇”, 但释放量和吸附量不大. 内蒙古段黄河沉积物对磷吸附的Langmuir吸附常数(k)与阳离子交换量(CEC)、有机质含量、粘土含量均呈正相关, 与平均粒径呈负相关. 活性态Fe含量与最大吸附量显著正相关, 是沉积物对磷的主要持留因素.

关键词: 黄河; 沉积物; 磷; 吸附; 沉积物组成; 相关性分析

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0172-06

Characteristics of Phosphorus Sorption on Yellow River Sediments from Inner Mongolia Reach

ZHANG Xian-wei^{1,2}, PAN Gang¹, WANG Xiao-li^{3,4}, CHEN Hao¹, GUO Bo-shu³, BAO Hua-ying⁴

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Chemistry & Environment Science College, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China; 4. College of Chemistry, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Sorption behavior of phosphorus on sediment samples taken from Inner Mongolia reach of the Yellow River in 6 different geographical sites was determined in laboratory, and the correlation between chemical-physical properties of the sediments and their phosphorus sorption characteristics was analyzed. The maximum sorption capacities were 43.64-85.46 mg/kg. The zero equilibrium P concentration (EPC_0) of the sediments ranged from 0.0003 to 0.0198 mg/L, which was positively correlated to the contents of native adsorbed P (NAP). The sediments played a dual role of sink and source of P at different geographical sites. Sediments from Shizuishan, Wulateqianqi and Qingshuihe along the Yellow River were sources of phosphorus, while sediments from Wuhai, Linhe and Baotou cross sections were sinks of phosphorus, at the typical P concentrations of the river water. However, both the sorption and desorption capacities were low at the conditions tested here. The Langmuir sorption constant (k) was positively correlated to the cation exchange capacity (CEC), organic matter and clay mineral content, but negatively correlated to the particle size of the sediments. The maximum sorption capacity of phosphorus was remarkably correlated to the active Fe content. Active Fe played a key role in holding phosphorus on the sediments.

Key words: Yellow River; sediment; phosphorus; sorption; sediment composition; correlation analysis

磷是一种重要的生源要素, 其在海-陆相互作用中的迁移与循环直接影响到水体的初级生产力, 并因此影响到全球碳循环^[1]. 在内陆水域磷的循环过程中, 沉积物作为其输送、积累和再生的重要场所, 对该过程有着重要的影响^[2~4]. 河流是向海洋输送磷的重要途径之一, 研究其沉积物对磷的吸附特征, 对于理解磷的地球化学循环和海-陆相互作用具有重要意义^[5]. 但是如何根据沉积物样品来判断其是磷的“源”还是“汇”仍是一个难题. 潘纲等^[6]提出了环境体系中磷吸附的交叉型吸附等温式, 可通过对沉积物 EPC_0 (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.

黄河是世界上泥沙含量最大的河流, 其流经的内蒙古段区域是农业发达、城市较多的河套平原, 有较多农、工业的面源、点源磷输入^[7]. 并且该区域周边有乌兰布和、库布齐、毛乌素、巴丹吉林、腾格里五大沙漠, 每年借风力有上亿吨含磷沙尘刮入黄河中^[8,9], 这是我国北部海域“内蒙古西部沙漠-沙尘暴-黄河-黄河口-渤海”磷循环的起点和重要组成部

收稿日期: 2008-01-06; 修订日期: 2008-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(20467002); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412308)

作者简介: 张宪伟(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为富营养化与环境地球化学, E-mail: zhangxianweicas@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: gpan@rcees.ac.cn

分. 因此, 考察该区域的磷进入黄河水体后与沉积物的相互作用规律, 对于了解该区域乃至更大范围内磷的地球化学循环有着重要意义, 但目前鲜见有该区域沉积物对磷吸附行为的研究. 基于此, 试验研究了内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附特征及其 EPC_0 值, 考察了不同沉积物对磷的源或汇的作用, 并分析了各吸附参数与沉积物组成之间的关系, 试图揭示出宏观吸附特征与沉积物组成之间的内在规律性.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样时间为 2006 年 10 月, 沿黄河干流分别采集宁夏回族自治区的石嘴山断面、内蒙古自治区的乌海、临河、乌拉特前旗、包头、清水河断面(图 1), 共 6 个采样点的表层沉积物及上覆水. 沉积物沥干水分后密封于塑料采样袋中, 尽快带回实验室冷冻保存. 同时取适量沉积物自然风干后过 240 目尼龙筛^[10], 备用做以下各吸附及表征实验. 上覆水样品装于聚乙烯水壶中并添加数滴氯仿做抑菌剂^[11], 密封后尽快带回实验室用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤, 并保存于 4℃ 冷库中^[12]. 同时取适量水样进行分析.

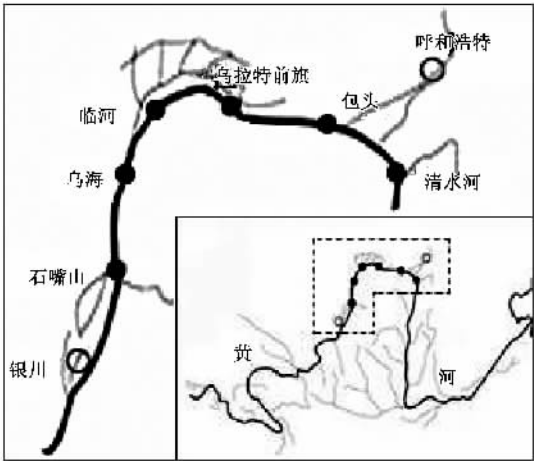


图 1 采样点位置

Fig.1 Map of the Yellow River sampling location

1.2 样品分析方法

上覆水理化参数的分析: 用过硫酸钾消解和钼锑抗分光光度法^[12]测定溶解态总磷(DTP)与溶解态无机磷(DIP), 用 YSI-556 型水质仪测定其电导率, 用 ICP-AES 测定水体含 Ca 量, 具体结果如表 1 所示.

沉积物理化性质的表征: 粒径分析用 Mastersizer2000 激光粒度分析仪进行. CEC 用乙酸

表 1 采样点位置及其状况

Table 1 Position and brief description of sampling sites

采样点	采样时间	位置	海拔/m	上覆水部分理化参数			
				DIP/mg·L ⁻¹	DTP/mg·L ⁻¹	Ca/mg·L ⁻¹	电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
石嘴山	2006-10-11	N39°14.445', E106°47.012'	1 082	0.003	0.022	63.67	980.7
乌海	2006-10-12	N39°41.257', E106°47.542'	1 063	0.010	0.014	61.67	732.8
临河	2006-10-13	N40°44.218', E107°25.592'	1 028	0.005	0.012	63.64	749.2
乌拉特前旗	2006-10-14	N40°43.286', E108°37.500'	1 012	0.003	0.015	62.85	743.4
包头	2006-10-16	N40°31.889', E109°54.827'	998.5	0.010	0.016	68.22	839.7
清水河	2006-10-20	N40°02.165', E111°24.488'	978.5	0.001	0.008	65.70	937.2

钠-火焰光度法测定^[13]. 全磷含量用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 熔融法测定^[14]. 有机质含量用重铬酸钾容量法-稀释热法测定^[14]. 金属含量分析用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 消解, ICP-AES 测定^[15]. 活性态 Fe 和 Al 含量分析采用酸性草酸铵溶液溶出, ICP-AES 测定^[16,17]. 烧失量采用 950℃ 灼烧测定^[18]. 沉积物矿物组分和含量采用 XRD(日本理学 D/MAX-RC)分析, 测试参照标准为: SY/T 5163-1995(沉积岩粘土矿物). 实验所用器皿均用 1 mol/L 盐酸浸泡 24 h 以上, 所用药品均为分析纯.

1.3 吸附实验方法

在一系列 50 mL 的聚乙烯离心管中, 分别加入

0.030 g 各沉积物样品, 再加入用不同量 KH_2PO_4 调节好的上覆水 30 mL, 得到初始 P 浓度为 0 ~ 0.6 mg/L, 固体浓度为 1 g/L 的系列溶液. 调节 pH 后, 离心管加盖, 在 25℃ ± 1℃, 150 r/min 条件下, 控制 pH 为 8.35 ± 0.05, 恒温振荡 50 h, 然后在恒温离心机中 5 000 r/min 离心 10 min, 并将上清液过 0.22 μm 滤膜, 用钼锑抗分光光度法测定滤液磷浓度. 每条等温线做 4 组平行样.

2 结果与讨论

2.1 环境中 Langmuir 型磷吸附等温式

磷在单一矿物上的吸附可采用 Langmuir 方程来

描述:

$$\Gamma = Q_m kc / (1 + kc) \tag{1}$$

式中, $\Gamma(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 为磷在沉积物上的吸附密度; $c(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 为磷的平衡浓度; $Q_m(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 为最大吸附容量; k 为 Langmuir 吸附常数, 与吸附能有关, 可反映沉积物对磷的吸附能力.

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. 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 EPC_0 (吸附/解吸平衡磷浓度). 描述天然沉积物对磷的吸附时, 需要对方程(1)进行修正. 根据参考文献[6], 由以下过程推导出实际环境中磷的 Langmuir 交叉型吸附等温式.

用 $\text{NAP}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 表示原先结合在沉积物上、实验条件下可解吸的磷, 则吸附密度(Γ)应表示为:

$$\Gamma = \text{NAP} + P_{\text{sor}} \tag{2}$$

$P_{\text{sor}}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 是实验中沉积物对磷的吸附量. 将式(2)代入式(1):

$$P_{\text{sor}} = \frac{Q_m kc}{1 + kc} - \text{NAP} \tag{3}$$

根据 EPC_0 的定义, 当 $c = \text{EPC}_0$ 时, $P_{\text{sor}} = 0$,

$$\text{NAP} = \frac{Q_m k \cdot \text{EPC}_0}{1 + k \cdot \text{EPC}_0} \tag{4}$$

$$Q_m = \frac{\text{NAP}(1 + k \cdot \text{EPC}_0)}{k \cdot \text{EPC}_0} \tag{5}$$

将式(5)代入式(3), 整理得:

$$P_{\text{sor}} = \frac{\text{NAP}(c - \text{EPC}_0)}{\text{EPC}_0(1 + kc)} \tag{6}$$

将式(4)代入式(6), 整理得:

$$P_{\text{sor}} = \frac{Q_m k (c - \text{EPC}_0)}{(1 + kc)(1 + k \cdot \text{EPC}_0)} \tag{7}$$

式(6)或(7)是修正 Langmuir 方程后得到的 Langmuir 交叉型吸附等温式. 可以看出, 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”. 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.

2.2 磷吸附等温线

实验测得磷在内蒙古段黄河沉积物上的吸附等温线如图 2 所示.

对图 2 中的吸附等温线用 Origin 7.0 软件进行非线性拟合, 拟合方程选用上面推导的 Langmuir 交叉型吸附等温式(7), 并用方程(4)计算 NAP, 结果

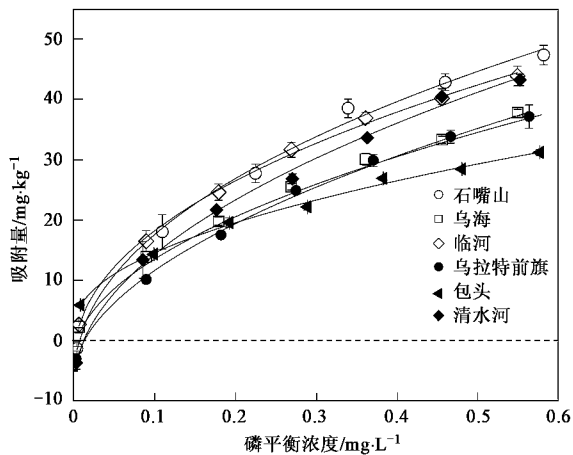


图 2 黄河沉积物对磷的吸附等温线

Fig.2 Description of sorption isotherms of phosphorus on the Yellow River sediments

见表 2.

表 2 黄河沉积物吸附磷的 Langmuir 交叉吸附等温式非线性拟合参数

Table 2 Parameters of Langmuir crossover-type equations simulated by non-linear fit for the P sorption isotherm on the Yellow River sediments

沉积物	<i>k</i>	<i>Q_m</i>	<i>EPC₀</i>	NAP	<i>R</i> ²
石嘴山	2.50	85.46	0.007 1	1.49	0.994 9
乌海	2.12	64.78	0.003 8	0.52	0.996 0
临河	2.99	67.82	0.002 4	0.48	0.999 2
乌拉特前旗	2.49	69.24	0.013 2	2.21	0.999 0
包头	2.45	43.64	0.000 3	0.03	0.994 7
清水河	2.32	77.33	0.019 8	3.39	0.990 9

从表 2 可看出, 其 R^2 均在 0.99 以上, 说明推导出的 Langmuir 交叉型吸附等温式能很好地描述磷在内蒙古段黄河沉积物上的吸附行为. Langmuir 吸附常数(k)的范围在 2.12 ~ 2.99 之间且相差不大, 说明此系列沉积物对磷的吸附能力差别不是很大, 这也是图 2 中各吸附等温线不是明显分开的直接原因. 对于最大吸附量(Q_m), 其范围在 43.64 ~ 85.46 mg/kg , 相比于其它天然水体沉积物, 如中国的太湖、贡湖^[19], 美国的 Little Rock Lake^[11], 英国的 River Lugg^[20]等, 该值较低, 说明该段黄河沉积物对磷的吸附能力较弱, 这可能与黄河沉积物的砂质成分较高及有机质含量较低, 或者其它理化因素有关. 计算出的最大和最小的 Q_m 值分别出现在石嘴山和包头.

通过表 2 还可知, NAP 值范围在 0.03 ~ 3.39

mg/kg, 说明内蒙古段黄河沉积物上自带的可解吸磷含量较低. EPC_0 范围在 $0.000\ 3 \sim 0.019\ 8$ mg/L, 其值也较低, 并未表现出与地理位置相关的规律性, 但与 NAP 值正相关, 可见沉积物自带的可解吸的内源磷是影响其 EPC_0 值的重要参数.

结合表 1 中上覆水的 DIP 浓度, 对于石嘴山、乌拉特前旗、清水河沉积物, 其 EPC_0 值大于相应上覆水的 DIP 值, 沉积物表现为水体中磷的“源”, 实验条件下向水体中释磷; 而对于乌海、临河、包头沉积物, 其 EPC_0 小于相应上覆水的 DIP, 沉积物表现为水体中磷的“汇”, 实验条件下吸附水体中的磷. 而本实验条件的确定是尽量模拟了自然环境, 所以

此结果对沉积物实际自然环境下的吸附行为具有参考价值. 值得注意的是, 即使对于表现为“源”的沉积物, 由于其 EPC_0 值不高, 所以向水体释放磷的量也不大. 当上覆水体磷浓度达到或高于 0.02 mg/L 这一富营养化发生的判断标准^[21]时, 这些沉积物都将表现为“汇”, 从上覆水体中吸附磷, 从而在磷浓度条件上对富营养化的发生起缓解作用.

2.3 沉积物表征及相关性分析

为了揭示沉积物吸附特征的深层次原因, 必须考察沉积物本身的理化性质. 测试了各沉积物的全磷、烧失量、有机质含量、CEC、粒径、活性态铁铝含量、金属含量、矿物种类和含量, 数据见表 3.

表 3 沉积物样品理化参数
Table 3 Chemical-physical parameters of sediments from the Yellow River

项目		石嘴山	乌海	临河	乌拉特前旗	包头	清水河
全磷/%		0.019	0.024	0.035	0.035	0.026	0.031
烧失量/%		7.49	6.93	8.14	7.00	7.00	6.55
有机质含量/%		0.36	0.23	0.39	0.26	0.23	0.15
CEC/cmol•kg ⁻¹		4.81	3.39	5.78	4.14	4.23	3.76
平均粒径/μm		39.009	48.785	34.346	43.665	44.293	50.196
活性态 Fe 和 Al/mg•g ⁻¹	活性态 Fe	0.764	0.698	0.746	0.744	0.658	0.708
	活性态 Al	0.238	0.179	0.215	0.196	0.188	0.170
金属含量/mg•g ⁻¹	Fe	24.72	25.28	28.39	24.59	23.36	28.34
	Al	41.33	61.88	59.99	61.11	57.71	56.36
	Ca	36.49	29.40	32.73	32.62	29.25	36.86
	Mn	0.51	0.53	0.54	0.49	0.49	0.55
矿物种类和含量/%	石英	42.2	47.8	39.0	44.6	45.7	50.7
	钾长石	3.5	2.6	5.1	4.2	3.4	5.4
	斜长石	17.2	19.2	17.4	15.2	15.7	15.4
	方解石	11.7	9.1	9.5	11.4	9.6	8.5
	白云石	4.5	1.4	3.1	3.3	3.9	2.6
	角闪石	1.0	1.6	1.6	1.4	1.7	0.9
	粘土矿物	19.9	18.3	24.3	19.9	20.0	16.5

由表 3 数据可看出, 实验所用黄河沉积物以粗粉粒($10 \sim 50\ \mu\text{m}$)为主, 其有机质含量较低, 活性态 Fe 和 Al 的含量也很低. 土壤有机质具有胶体特性, 能提高土壤的吸附能力; 而沉积物中的活性态 Fe 和 Al 往往对磷的持留发挥重要的作用^[15], 所以其含量低很可能是内蒙古段黄河沉积物对磷的吸附能力不强的重要原因. 从以上沉积物的表征中发现, 各沉积物的各项理化指标的差别都不是很大, 这与图 2 中吸附等温线没有很明显分开相一致, 可能是导致其吸附能力近似的深层次原因.

对以上宏观吸附特征值和沉积物理化性质参数进行相关性分析, 可找出影响吸附特征的主要原因. 使用 SPSS 13.0 统计软件进行相关性分析, 结

果见表 4.

通过表 4 中各参数之间的相关系数可以发现, 反映吸附能力的 Langmuir 吸附常数(k)与 CEC 相关性最好, 与粘土含量和反映有机质含量的烧失量也都显著正相关, 与平均粒径显著负相关. 吸附能力与 CEC 极显著的相关关系也有过报道^[22,23], 但其最为密切的原因还鲜见证实. 而 CEC 作为反映沉积物离子交换能力的一个参数, 从根本上也是受沉积物本身成分影响的. 一般来讲, 粘粒(或有机质)含量越高的土壤, 其 CEC 也越大^[24]. 这与表 4 中 CEC 与有机质含量和粘土矿物含量显著正相关一致. 土壤有机质由于具有胶体特性, 往往与粘土矿物结合在一起. 粘土矿物最重要的结构特征就是由硅(铝)氧

表 4 沉积物理化参数与磷吸附参数的相关性分析¹⁾

Table 4 Coefficients of correlation between P sorption parameters and chemical-physical parameters of sediments from the Yellow River												
	k	Q_m	NAP	EPC ₀	CEC	粒径	有机质	烧失量	全磷	活性态铁	活性态铝	粘土
Q_m	0.028											
NAP	-0.241	0.638										
EPC ₀	-0.288	0.577	0.994**									
CEC	0.967**	0.134	-0.304	-0.371								
粒径	-0.904*	-0.120	0.420	0.487	-0.964**							
有机质	0.757	0.240	-0.529	-0.529	0.867*	-0.955**						
烧失量	0.862*	0.110	-0.511	-0.567	0.930**	-0.961**	0.955**					
全磷	0.477	-0.132	0.257	0.304	0.246	-0.130	-0.055	0.119				
活性态铁	0.458	0.819*	0.315	0.249	0.531	-0.581	0.664	0.539	0.104			
活性态铝	0.584	0.411	-0.250	-0.344	0.744	-0.847*	0.906*	0.764	-0.299	0.718		
粘土	0.902*	-0.163	-0.587	-0.619	0.897*	-0.928**	0.859*	0.940**	0.324	0.364	0.616	
石英	-0.854*	-0.073	0.496	0.555	-0.913*	0.986**	-0.970**	-0.960**	-0.114	-0.573	-0.840*	-0.942**

1) **表示在 0.01 水平上显著相关; *表示在 0.05 水平上显著相关

四面体片和金属-氧(羟基)八面体片构成的层状结构,表面上存在大量的Si—OH、Al—OH等基团;并且与其它矿物相比,粘土矿物的内外表面积均较大,且常带有不饱和电荷,所以对土壤和水体中磷元素有较好的吸附能力^[25].由此可以认为,内蒙古段黄河沉积物中粘土(或有机质)含量是影响其对磷的吸附能力以及阳离子交换容量的重要因素.同时,表 4 中沉积物平均粒径与 k 值有显著负相关关系,说明粒径也是影响其吸附能力的重要因素.

最大吸附量(Q_m)与沉积物中活性态 Fe 的含量显著正相关,一般来说,沉积物中对磷吸附的主要承担者是 Fe 和 Al 的(水合)氧化物^[26].本实验中,内蒙古段黄河沉积物的活性态 Al 的量远低于活性态 Fe,所以,其对磷的主要持留因素是活性态 Fe,这与表 4 中相关性分析的结果相一致.

EPC₀ 与其他参数(除 NAP 外)之间,特别是反映土壤理化性质的参数没有表现出显著的相关性,这与长江中下游的湖泊沉积物有所不同^[27].可能原因除其 EPC₀ 值是受多因素系统复杂影响外,还跟其 NAP 和 EPC₀ 值过小,可能带来的相对误差较大有关.

石英含量与其他参数之间的相关性,正好与粘土含量相反.这是由于石英和粘土含量显著负相关所致.对于实验所用的内蒙古段黄河沉积物,石英含量和粘土含量所占比例最大,而其他矿物含量较低且相差不大,所以石英含量与粘土含量此消彼长,产生本实验结果.表 4 中未列出的其它矿物成分以及金属含量,与磷吸附参数之间没有表现出显著相关性.

3 结论

(1)内蒙古段黄河干流水体和沉积物磷污染并不严重.沉积物对磷的吸附等温线用推导出的 Langmuir 交叉型吸附等温式能很好地描述.不同地点沉积物对磷的吸附行为相差不大,吸附能力都较弱.

(2)内蒙古段黄河沉积物的 EPC₀ 值范围在 0.000 3~0.019 8 mg/L,没有表现出与地理位置或其它参数相关的规律性,仅与可解吸的内源磷含量正相关.自然条件下,只靠其内源磷的释放,不会使水体磷浓度达到富营养化发生所需浓度.在石嘴山、乌拉特前旗、清水河断面,沉积物对磷表现为“源”,但释放量不大;在乌海、临河、包头断面表现为“汇”,但吸附量不大.自然条件下内蒙古段黄河沉积物对其水体富营养化有缓解作用.

(3)内蒙古段各黄河沉积物理化性质相差不大,反映其对磷吸附能力的 Langmuir 吸附常数(k)与 CEC、有机质含量、粘土含量显著正相关,与平均粒径显著负相关.活性态 Fe 与最大吸附量显著正相关,是沉积物对磷的主要持留因素.

参考文献:

[1] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System [J]. Science, 2000, 290: 291-296.

[2] Medowell R, Sharpley A, Withers P. Indicator to predict the movement of phosphorus from soil to subsurface flow [J]. Environ Sci Technol, 2002, 36(7): 1505-1509.

[3] Herut B, Zohary T, Robarts R D, et al. Adsorption of dissolved phosphate onto loess particles in surface and deep Eastern Mediterranean water [J]. Marine Chemistry, 1999, 64(4): 253-

- 265.
- [4] Zhou A, Tang H, Wang D. Phosphorus adsorption on natural sediments: Modeling and effects of pH and sediment composition [J]. *Water Research*, 2005, **39**(7): 1245-1254.
- [5] House W A, Denison F K. Exchange of inorganic phosphate between river waters and bed-sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(20): 4295-4301.
- [6] Pan G, Krom M D, Herut B. Adsorption-desorption of phosphate onto airborne dust and riverborne particulates in East Mediterranean seawater [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, **36**(16): 3519-3524.
- [7] 郭玉华, 叶俊峰. 内蒙古河套灌区面源污染防治初步设想 [J]. *内蒙古环境保护*, 2004, **16**(1): 16-17.
- [8] 赵存福, 董青, 韩新永. 巴盟境内乌兰布和沙漠对黄河的危害及其防治对策 [J]. *内蒙古水利*, 2002, **2**: 51-53.
- [9] 李北罡, 郭博书. 库布齐沙漠颗粒物中磷的化学形态分析 [J]. *岩矿测试*, 2007, **26**(1): 9-12.
- [10] 陈静生, 王飞越, 陈江麟. 论小于 63 μm 粒级作为水体颗粒物重金属研究介质的合理性及有关粒级转换模型研究 [J]. *环境科学学报*, 1994, **14**(4): 419-425.
- [11] Naoml E D, Patrick L B. Phosphorus sorption by sediments from a soft-water seepage lake. 1. An evaluation of Kinetic and Equilibrium Models [J]. *Environ Sci Technol*, 1991, **25**(3): 395-403.
- [12] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-248.
- [13] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 28-29.
- [14] 南京农业大学. 土壤农化分析 [M]. (第二版). 北京: 农业出版社, 1994.
- [15] 周爱民. 生源要素磷(P)在天然沉积物-水界面上的吸附与分配 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2005.
- [16] McKeague J A, Day J H. Dithionite-and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils [J]. *Can J Soil Sci*, 1966, **46**: 13-22.
- [17] Phillips E J P, Lovley D R. Determination of Fe(III) and Fe(II) in oxalate extracts of sediment [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, **51**: 938-941.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 282-283.
- [19] 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.
- [20] Jarvie H P, Jürgens 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**: 51-74.
- [21] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [22] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(3): 38-43.
- [23] 崔理化, 朱夕珍, 骆世明. 人工湿地基质磷吸附特性与其物理化学性质的关系 [J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(2): 250-254.
- [24] 李法虎. 土壤物理化学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [25] 吴平霄. 黏土矿物材料与环境修复 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [26] Lopez P, Lluch X, Vidal M, *et al.* Adsorption of phosphorus on sediments of the balearic islands (Spain) related to their composition [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1996, **42**(2): 185-196.
- [27] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕, 等. 湖泊沉积物对磷酸盐的负吸附研究 [J]. *生态环境*, 2004, **13**(4): 493-496.