

泥沙吸附磷前后 Zeta 电位变化试验

肖 洋^{1,2}, 沈 菲², 成浩科²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:选取长江南京段、淮河蚌埠段以及甬江口 3 种来源不同的细颗粒泥沙, 通过泥沙对磷的等温平衡吸附试验, 研究细颗粒泥沙吸附磷前后 Zeta 电位的变化。结果表明:泥沙的 Zeta 电位绝对值随着单位质量泥沙对固相磷的平衡吸附量的增大而增大, 泥沙稳定性增强, 不易絮凝;泥沙的 Zeta 电位绝对值变化量与单位质量泥沙对固相磷的平衡吸附量呈正比关系, 对于不同来源的泥沙, 单位质量泥沙对固相磷的平衡吸附量增量相同时, Zeta 电位绝对值的增幅不同, 甬江泥沙增幅最大, 淮河泥沙次之, 长江泥沙最小; Zeta 电位绝对值相对变化量与固相磷相对吸附量呈正比, 甬江泥沙 Zeta 电位绝对值相对变化量对固相磷相对吸附量变化的敏感度更高, 长江与淮河泥沙的敏感度相近。

关键词:泥沙; Zeta 电位; 溶解态磷; 吸附试验

中图分类号:TV141⁺.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0022-04

Experiment on Zeta potential variation before and after phosphorus adsorption by sediment//XIAO Yang^{1,2}, SHEN Fei², CHENG Haoke² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulics Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this paper, sediment samples of fine particles were collected from three rivers, the Nanjing reach of the Yangtze River, the Bengbu reach of the Huai River and the Yong River Estuary. Isothermal equilibrium adsorption experiments were carried out to study the variation of Zeta potential of sediment after phosphorus adsorption. It can be concluded that the absolute value of Zeta potential increases with the increasing equilibrium phosphorus adsorption amount per unit mass of sediment, resulting in an enhancing stability that restrains flocculation. Zeta potential variation is proportional to the equilibrium phosphorus adsorption amount, but the ratio is different for sediments with different origins. This ratio ranks from high to low respectively for sediments from the Yong River, the Huai River and the Yangtze River. Moreover, the relative variation of Zeta potential is proportional to the relative adsorption amount of phosphorus, and the ratio is the largest for sediment from the Yong River Estuary, followed by that from the Yangtze River and the Huai River, which have similar values.

Key words: sediment; Zeta potential; dissolved phosphorus; adsorption experiment

泥沙的表面电荷特性是泥沙的基本特性之一, 通过电泳法测得的泥沙 Zeta 电位(通常为负值)绝对值可以用来描述细颗粒泥沙在水体中的稳定性, 绝对值越大, 稳定性越高, 越不易絮凝^[1]。前人研究表明, Zeta 电位绝对值随着溶液 pH 值的升高先增大后减小^[2-3], 随盐度增大而减小^[4-6], 另外, 金属离子^[7-8]、电解质类型及浓度^[9]和有机物吸附^[10]等也会影响泥沙的 Zeta 电位。

近年来, 我国河湖水污染状况严重, 氮磷浓度严重超标造成的水体富营养化问题日益突出。磷对细颗粒泥沙有很强的亲和性, 但目前关于泥沙吸附磷

后 Zeta 电位变化情况的研究成果还不是很多。Amer 等^[11]以 CaCO₃ 为对象进行了初步研究, 发现吸附磷之后 Zeta 电位减小, 沉淀后又增大; 但泥沙的组分较为复杂, 尚不能确定该研究结果能否应用于细颗粒泥沙。为此, 本文通过等温平衡吸附试验, 研究泥沙吸附磷前后 Zeta 电位的变化, 以揭示不同来源泥沙吸附磷行为对于泥沙 Zeta 电位的影响。

1 试验材料与方法

1.1 样品采集

泥沙样品分别取自长江南京段(2015 年 11

月)、淮河蚌埠段(2015 年 6 月)和甬江口(2015 年 6 月),采用小型箱式分层底泥采样器采集后剔除杂物,于背阴通风处风干后碾压、研磨,混匀后过 325 目筛,获得粒径小于 45 μm 的细颗粒泥沙样品^[12]。

1.2 中值粒径及级配

经筛分后,长江泥沙粒径小于 45 μm 的占 94.76%,淮河泥沙和甬江泥沙分别占 92.81% 和 89.47%,符合试验要求。

从马尔文激光粒度仪试验结果中提取中值粒径等特征粒径,结果如表 1 所示。

表 1 泥沙特征粒径及分选系数

样 品	$d_{25}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{75}/\mu\text{m}$	S_0
长江泥沙	5.554	12.837	19.423	1.870
淮河泥沙	14.439	25.128	31.645	1.480
甬江泥沙	6.652	18.227	28.890	2.084

分选系数 S_0 反映了泥沙的均匀程度, S_0 越大,表示泥沙粒径变化范围越大,越不均匀。分选系数表达式为

$$S_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}} \tag{1}$$

由表 1 可知,3 组泥沙样品中淮河泥沙中值粒径最大,分选系数最小,最为均匀;长江泥沙中值粒径最小,分选系数居中,较为不均匀;甬江泥沙中值粒径居中,分选系数最大,最不均匀。泥沙样品的颗分曲线如图 1 所示。

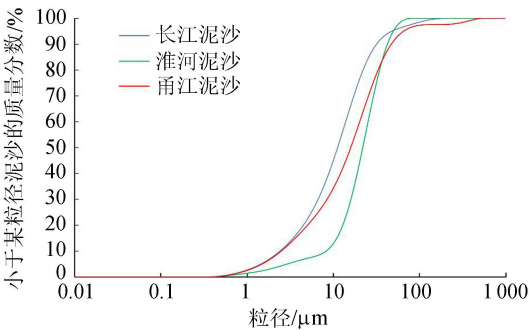


图 1 泥沙样品颗分曲线

1.3 试验方案

将泥沙样品加入不同初始质量浓度的 KH_2PO_4 溶液中进行等温平衡吸附试验。 KH_2PO_4 溶液初始体积均为 50 mL,初始质量浓度分别为 0 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L、1.5 mg/L、2.0 mg/L、2.5 mg/L、3.0 mg/L、4.0 mg/L、5.0 mg/L、6.0 mg/L;泥沙样品为 0.3 g,置于 150 r/min、温度为 $(18\pm0.5)^\circ\text{C}$ 的恒温振荡箱中恒温震荡 24 h 后通过抽滤使水沙分离,采用钼锑抗分光光度法测定溶液中磷的质量浓度,将滤出的泥沙溶于 20 mL 去离子水中,利用 Malvern Zetasizer Nano ZS90 纳米粒径电位分析仪测量 Zeta 电位。吸附试验重复进行 2 次。

2 试验结果与分析

2.1 泥沙对磷的等温平衡吸附过程拟合

赵雪松等^[13-14] 研究发现 Langmuir 和 Freundli 等模型可以用于描述泥沙对磷的平衡吸附过程。由于试验所用泥沙未对泥沙的吸附磷本底值 Q_{NAP} 进行处理,本文采用考虑泥沙吸附磷本底值的改进 Langmuir 型等温吸附模型^[11] 研究等温平衡吸附过程。改进 Langmuir 型等温吸附模型为

$$\frac{(\rho_{\text{溶液}} - \rho_{\text{eq}}) V_1}{m} = \frac{Q_{\text{max}} \rho_{\text{eq}}}{k_c + \rho_{\text{eq}}} - \left(\frac{Q_{\text{max}} \rho_{\text{eq0}}}{k_c + \rho_{\text{eq0}}} + \frac{\rho_{\text{eq0}} V_1}{m} \right) \tag{2}$$

式中: $\rho_{\text{溶液}}$ 为 KH_2PO_4 溶液的初始质量浓度,mg/L; ρ_{eq} 为泥沙吸附磷达到平衡状态时的液相磷质量浓度,mg/L; ρ_{eq0} 为 $\rho_{\text{溶液}} = 0$ mg/L 时泥沙吸附磷达到平衡状态时的液相磷质量浓度,mg/L; V_1 为 KH_2PO_4 溶液的初始体积,L; m 为泥沙的干质量,g; Q_{max} 为饱和情况下单位质量泥沙对固相磷最大吸附量,mg/g; k_c 为经验系数,mg/L。

通过拟合得出 Q_{max} 和 k_c 的值,计算泥沙样品中磷的本底值 Q_{NAP} 和泥沙对固相磷吸附量为零时的液相磷质量浓度 ρ_{EPC} ,计算公式为

$$Q_{\text{NAP}} = \frac{Q_{\text{max}} \rho_{\text{eq0}}}{k_c + \rho_{\text{eq0}}} + \frac{\rho_{\text{eq0}} V_1}{m} \tag{3}$$

$$\rho_{\text{EPC}} = \frac{k_c Q_{\text{max}} \rho_{\text{eq0}} / (k_c + \rho_{\text{eq0}}) + k_c \rho_{\text{eq0}} V_1 / m}{k_c Q_{\text{max}} / (k_c + \rho_{\text{eq0}}) - \rho_{\text{eq0}} V_1 / m} \tag{4}$$

根据计算得到的改进 Langmuir 型等温吸附模型参数见表 2 (表中 $\frac{Q_{\text{NAP}}}{\rho_{\text{EPC}}}$ 反映固相(泥沙)和液相(水)对磷的相对亲和力)。由表 2 可见,泥沙吸附基本呈现泥沙粒径越小,吸附量越大、吸附能力越强的规律^[15]。长江泥沙 Q_{max} 值最大,淮河泥沙最小。

表 2 泥沙样品改进 Langmuir 型等温吸附模型拟合参数

泥沙样品	$Q_{\text{max}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$k_c/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho_{\text{eq0}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$Q_{\text{NAP}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$\rho_{\text{EPC}}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\frac{Q_{\text{NAP}}}{\rho_{\text{EPC}}}$
长江泥沙 1	0.298	2.064	0.079	0.024	0.183	0.133
长江泥沙 2	0.319	2.043	0.140	0.044	0.324	0.135
淮河泥沙 1	0.213	1.979	0.061	0.037	0.412	0.089
淮河泥沙 2	0.263	3.799	0.079	0.019	0.289	0.064
甬江泥沙 1	0.246	1.971	0.135	0.038	0.362	0.105
甬江泥沙 2	0.248	2.508	0.120	0.031	0.362	0.086

将等温平衡吸附试验结束时测得的 ρ_{eq} 与计算所得的单位质量泥沙对固相磷的平衡吸附量 Q_{eq} 数据绘于图 2,并用改进的 Langmuir 型等温吸附模型对泥沙吸附结果进行拟合。当溶液初始磷浓度 $\rho_{\text{溶液}}$ 较低时,由于 Q_{NAP} 的存在,3 种来源的泥沙均表现出一定的释放能力,此时 Q_{eq} 为负值。不同泥沙样品

的 Q_{eq} 值随 $\rho_{溶液}$ 的增大而增大,在 $\rho_{溶液}$ 较小时增速较快,其后增速逐渐减小,与吉飞等^[16] 研究结论相同。这是由于泥沙对磷的吸附存在一个饱和值,随着泥沙不断吸附磷,吸附磷的速率会不断减小^[17]。

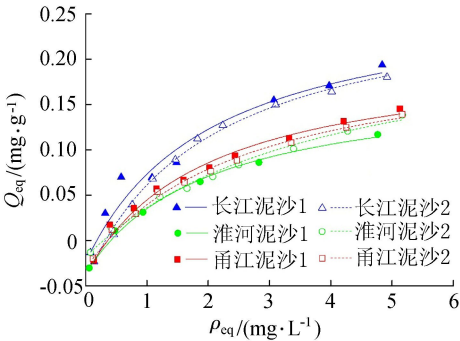


图2 泥沙等温平衡吸附过程

2.2 泥沙吸附磷前后 Zeta 电位的变化

试验测得的泥沙吸附磷前后 Zeta 电位绝对值 ζ' 如表 3 所示。

将不同来源泥沙在不同 $\rho_{溶液}$ 值时的 Q_{eq} 值与吸附前后 Zeta 电位绝对值的变化量 $\Delta\zeta'$ 绘于图 3,当 $Q_{eq}=0\text{ mg/g}$ 时,即泥沙样品未吸附磷时,假设 Zeta 电位没有变化, $\Delta\zeta'=0\text{ mV}$ 。从图 3 可知,过原点的拟合直线的相关性较好 ($R^2>0.9$)。当溶液初始磷质量浓度 $\rho_{溶液}$ 较低时,泥沙解吸磷, Q_{eq} 为负值,而 ζ' 值减小, $\Delta\zeta'$ 也为负值。当 $\rho_{溶液}$ 较高时,泥沙吸附磷, ζ' 随着 Q_{eq} 的增大而增大, $\Delta\zeta'$ 与 Q_{eq} 呈正比关系,在本文试验范围内, Q_{eq} 值每增大 0.1 mg/g , 甬江、淮河、长江泥沙的 $\Delta\zeta'$ 值分别为 7.7 mV 、 5.3 mV 和 4.1 mV 。

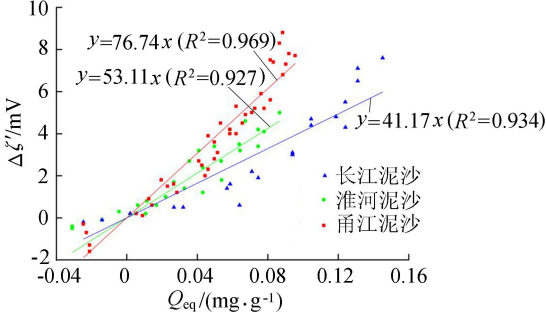


图3 泥沙吸附磷后 Zeta 电位的变化

表 3 泥沙吸附磷前后 Zeta 电位绝对值

$\rho_{溶液}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	长江泥沙 1		长江泥沙 2		淮河泥沙 1		淮河泥沙 2		甬江泥沙 1		甬江泥沙 2	
	吸附前	吸附后	吸附前	吸附后	吸附前	吸附后	吸附前	吸附后	吸附前	吸附后	吸附前	吸附后
0	14.4	14.3	15.5	15.3	15.4	15.0	14.7	14.6	15.5	15.2	15.9	14.6
0.5	14.4	14.7	15.5	15.7	15.4	16.0	14.7	14.9	15.5	16.1	15.9	16.1
1.0	14.4	15.0	15.5	16.0	15.4	16.4	14.7	16.4	15.5	16.7	15.9	17.7
1.5	14.4	16.0	15.5	16.9	15.4	17.0	14.7	17.4	15.5	17.5	15.9	18.4
2.0	14.4	16.6	15.5	17.4	15.4	17.2	14.7	17.9	15.5	18.3	15.9	19.5
2.5	14.4	17.4	15.5	18.6	15.4	17.6	14.7	18.1	15.5	19.7	15.9	20.4
3.0	14.4	19.1	15.5	19.9	15.4	18.1	14.7	18.9	15.5	20.5	15.9	21.2
4.0	14.4	18.7	15.5	20.3	15.4	18.7	14.7	19.3	15.5	21.1	15.9	21.1
5.0	14.4	21.5	15.5	21.0	15.4	18.9	14.7	18.8	15.5	22.8	15.9	23.4
6.0	14.4	22.0	15.5	22.0	15.4	19.4	14.7	19.7	15.5	23.2	15.9	24.7

不同来源泥沙样品的 ζ' 值随其 Q_{eq} 值变化的趋势相同,但斜率不同,甬江泥沙最大,淮河泥沙次之,长江泥沙最小。当水体中的磷浓度增大时,泥沙颗粒会吸附液相磷,使表面电荷的数量及分布发生变化, ζ' 值随之增大,泥沙稳定性增强,变得不易絮凝。

2.3 Zeta 电位绝对值相对变化量与固相磷相对吸附量的关系

将不同泥沙的 $\Delta\zeta'$ 值除以初始 ζ' 值得到 ζ' 值的相对变化量 $n_{\zeta'}$,将 Q_{eq} 值除以 Q_{max} 值得到固相磷相对吸附量 n_Q ,结果绘于图 4,并用过原点的直线拟合,所得拟合直线的相关性较好 ($R^2>0.9$)。由图 4 可见,在本文试验范围内, $n_{\zeta'}$ 与 n_Q 呈正比,长江与淮河泥沙拟合直线的斜率十分接近,分别为 0.849 和 0.842,而甬江泥沙拟合直线的斜率明显更大,为 1.207,表明甬江泥沙 $n_{\zeta'}$ 值对 n_Q 值变化的敏感度更高,而长江和淮河泥沙的敏感度接近。这可能是由于甬江泥沙取自河口地区,其所处的环境(如 pH、盐度等)与取自河流下游的长江泥沙和淮河泥沙差异较大,导致泥沙组分与理化特性差异较大。

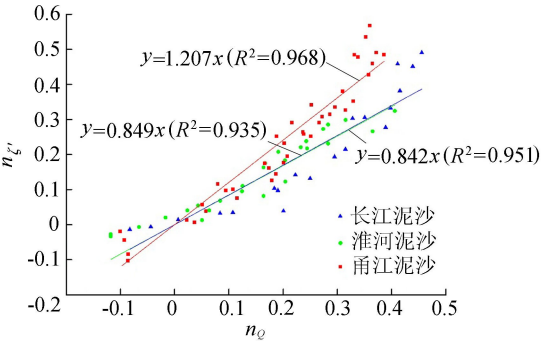


图4 $n_{\zeta'}$ 与 n_Q 的关系

3 结 论

a. 细颗粒泥沙吸附磷后, Zeta 电位绝对值变大,稳定性增强。不同来源泥沙样品的初始 Zeta 电位绝对值相差不大,均在 15 mV 左右,当溶液中的初始磷质量浓度增加到 6 mg/L 时,泥沙吸附磷之后

Zeta 电位绝对值增大到 20 mV 以上,属于开始稳定状态。

b. 单位质量泥沙对固相磷吸附量越大,泥沙 Zeta 电位绝对值的变化量越大,两者呈正比关系。单位质量泥沙对固相磷吸附量每增大 0.1 mg/g,不同来源泥沙 Zeta 电位绝对值变化量增幅不同,甬江泥沙最大,长江泥沙最小。

c. 泥沙 Zeta 电位绝对值相对变化量与固相磷相对吸附量呈正比,取自河口地区的甬江泥沙的 Zeta 电位绝对值相对变化量对固相磷相对吸附量变化的敏感度更高,而同样取自河流下游的长江泥沙和淮河泥沙的敏感度十分接近。

参考文献:

[1] 黄磊,方红卫,陈明洪,等.黏性细颗粒泥沙的表面电荷特性研究进展[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(6):747-752. (HUANG Lei, FANG Hongwei, CHEN Minghong, et al. Review of surface charge characteristics of fine sediments[J]. Journal of Tsinghua University (Sciences and Technology), 2012, 52(6): 747-752. (in Chinese))

[2] 丘耀文,王肇鼎,张正斌,等.珠江口悬浮颗粒物质的电泳性质[J].热带海洋,1994,13(4):48-54. (QIU Yaowen, WANG Zhaoding, ZHANG Zhengbin, et al. A study on electrophoretic properties of suspended particles in Zhujiang Estuary[J]. Tropic Oceanology, 1994, 13(4): 48-54. (in Chinese))

[3] 蔡卫君,陈邦林,夏福兴,等.河口细颗粒泥沙界面化学研究:污水排放对长江口泥沙稳定性的影响[J].海洋通报,1998,7(3):18-22. (CAI Weijun, CHEN Banglin, XIA Fuxing, et al. Study on interfacial chemistry of fine sediment in estuary: effect of sewage discharge on sediment stability in Changjiang Estuary [J]. Marine Science Bulletin, 1998, 7(3): 18-22. (in Chinese))

[4] NEIHOF R A, LOEB G I. The surface charge of particulate matter in seawater [J]. Limnology and Oceanography, 1972, 17(1): 7-16.

[5] NEIHOF R, LOEB G I. Dissolved organic-matter in seawater and electric charge of immersed surfaces [J]. Journal of Marine Research, 1974, 32(1): 5-12.

[6] 张曼平,郑士淮,张正斌,等.黄河口泥沙颗粒表面电荷的微电泳研究[J].山东海洋学院学报,1987,17(4):44-49. (ZHANG Manping, ZHENG Shihuai, ZHANG Zhengbin, et al. Study on the electrophoretic properties of the surface charge of sediment particles in the Huanghe River Estuary [J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1987, 17(4): 44-49. (in Chinese))

[7] 黄岁梁,万兆惠.河流泥沙吸附-解吸重金属污染物试验研究现状(一)[J].水利水电科技进展,1995,15(1):25-30. (HUANG Suiliang, WAN Zhaohui. The

research status of sediment in rivers adsorption and desorption of heavy metals experimental (1) [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1995, 15(1): 25-30. (in Chinese))

[8] 黄岁梁,万兆惠.河流泥沙吸附-解吸重金属污染物试验研究现状(二)[J].水利水电科技进展,1995,15(2):27-31. (HUANG Suiliang, WAN Zhaohui. The research status of sediment in rivers adsorption and desorption of heavy metals experimental (2) [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1995, 15(2): 27-31. (in Chinese))

[9] 郭玲,武海顺,金志浩.电解质对细颗粒泥沙稳定性的影响研究[J].山西师范大学学报(自然科学版),2004,18(3):67-71. (GUO Ling, WU Haishun, JIN Zhihao. Study on the stability of electrolyte for fine sediment [J]. Journal of Shanxi Teachers University (Natural Science Edition), 2004, 18(3): 67-71. (in Chinese))

[10] GIBBS R J. Effect of natural organic coatings on the coagulation of particles [J]. Environmental Science & Technology, 1983, 17(4): 237-240.

[11] AMER F, MAHMOUD A A, SABET V. Zeta potential and surface area of calcium carbonate as related to phosphate sorption [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(5): 1137-1142.

[12] 宋晓阳,周晶晶,邓樑斌.电解质对细颗粒泥沙絮凝影响的实验研究[J].人民长江,2013,44(9):67-71. (SONG Xiaoyang, ZHOU Jingjing, DENG Liangbin. Experimental research of electrolytic effect on fine sediment flocculation [J]. Yangtze River, 2013, 44(9): 67-71. (in Chinese))

[13] 赵雪松,胡小贞,卢少勇,等.不同粒径方解石在不同 pH 值时对磷的等温吸附特征与吸附效果[J].环境科学学报,2008,28(9):1872-1877. (ZHAO Xuesong, HU Xiaozhen, LU Shaoyong, et al. Phosphorus sorption by natural calcite and the effects of pH and grain size [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 28(9): 1872-1877. (in Chinese))

[14] 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):1206-1208. (LI Min, WANG Guangqian, NI Jinren, et al. Adsorption isotherm model of phosphate by suspended sediments from Changjiang Estuary [J]. Journal of Tsinghua University (Sciences and Technology), 2005, 45(9): 1206-1208. (in Chinese))

[15] 肖洋,陆奇,成浩科,等.泥沙表面特性及其对磷吸附的影响[J].泥沙研究,2011,12(6):64-68. (XIAO Yang, LU Qi, CHENG Haoke, et al. Surface properties of sediments and its effect on phosphorus adsorption [J]. Journal of Sediment Research, 2011, 12(6): 64-68. (in Chinese))

(下转第 65 页)

- (CEN Weijun. Advances in research of defects and leakage of (composite) geomembrane in earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 1-7. (in Chinese))
- [8] NOSKO V, TOUZE-FOLTZ N. Geomembrane liner failure; modeling of its influence on contaminant transfer [C]//Proceedings of the 2nd Eurogeo Geosynthetics Conference. Bologna: [s. n.], 2000: 557-560.
- [9] GIROUD J P. Design of geotextiles associated with geomembranes [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles. Las Vegas: NV, 1982: 37-42.
- [10] 岑威钧,和浩楠,温朗昇. 防渗土工膜的缺陷特性与缺陷渗漏研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017,45(1): 36-44. (CEN Weijun, HE Haonan, WEN Langsheng. Research progress on defect property and defect induced leakage of impermeable geomembrane[J]. Journal of Hohai University(Nature Science), 2017, 45(1): 36-44. (in Chinese))
- [11] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes-part: I [J]. Geomembrane liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(1): 27-67.
- [12] GIROUD J P, BONAPARTE R. Leakage through liners constructed with geomembranes-part: II [J]. Geomembrane liners, Geotextiles and Geomembranes, 1989, 8(2): 71-111.
- [13] GIROUD J P, KHIRI M V, MCKELVEY J A. Rate of leachate migration through a defect in a geomembrane underlain by a saturated permeable medium [J]. Geosynthetics International, 1997, 4(3/4):323-334.
- [14] ELOY-GIORNI C, PELTE T, PIERSON P. Water diffusion through geomembranes under hydraulic pressure [J]. Geosynthetics International, 1996, 3(6):741-769.
- [15] 岑威钧,和浩楠,李邓军. 土工膜缺陷对土石坝渗流特性的影响及控制措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3): 61-65, 71. (CEN Weijun, HE Haonan, LI Dengjun. Influence of geomembrane defect on seepage property of earth-rock dams and measures of seepage control [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 61-65, 71. (in Chinese))
- [16] 岑威钧,王蒙,杨志祥. (复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性[J]. 水利水电科技进展, 2012,32(3): 6-9. (CEN Weijun, WANG Meng, YANG Zhixiang. Partial saturated seepage properties of (composite) geomembrane earth-rock dams [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 6-9. (in Chinese))
- [17] 介玉新,李广信. 有限元计算中土工合成材料渗流问题的处理[J]. 水利水电科技进展,2009,29(6):42-43, 62. (JIE Yuxin, LI Guangxin. FEM calculation of seepage through geosynthetics [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(6): 42-43,62. (in Chinese))
- [18] 高康,兰吉武. 电学渗漏探测法用于垃圾填埋场防渗土工膜施工的破坏分析[J]. 环境卫生工程,2008,16(1):16-18. (GAO Kang, LAN Jiwu. Analysis about construction destruction of impervious geomembrane using electrical seepage measurement method in waste landfill sites[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2008,16(1):16-18. (in Chinese))

(收稿日期:2017-06-15 编辑:骆超)

(上接第 53 页)

- [15] 陆健辉,阮龙飞,王永庆. 长江口软土地基水库围堤的防渗体结构探讨[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊1): 195-202. (LU Jianhui, RUAN Longfei, WANG Yongqing. Impervious structure of reservoir embankment in soft soil foundation of Yangtze Estuary [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup1): 195-202. (in Chinese))
- [16] 张海龙,马斌,梁亚平. 充填袋装砂围堰防渗结构研究[J]. 陕西水利,2017(1):102-104. (ZHANG Hailong, MA Bin, LIANG Yaping. Study on anti-seepage structure of filled sand-bag cofferdam [J]. Shaanxi Water Resources,2017(1):102-104. (in Chinese))
- [17] MULLER L. 岩石力学[M]. 李世平,冯震海,译. 北京:煤炭工业出版社,1981:276-278.
- [18] 张有天. 岩石水力学与工程[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005:115-118.

(收稿日期:2017-05-24 编辑:熊水斌)

(上接第 25 页)

- [16] 吉飞,李志伟,赵汗青. 水动力作用下泥沙对磷的吸附特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1): 56-62. (JI Fei, LI Zhiwei, ZHAO Hanqing. Characteristics of adsorption of phosphorus by sediment under hydrodynamic action [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(1):56-62. (in Chinese))
- [17] 肖洋,余维维,成浩科,等. 淮河中游泥沙对磷吸附/解吸规律[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):307-312. (XIAO Yang, YU Weiwei, CHENG Haoke, et al. Phosphorus adsorption and desorption behavior of sediments in midstream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 307-312. (in Chinese))

(收稿日期:2017-06-06 编辑:熊水斌)