

鄱阳湖入江水道和长江南京段泥沙表面特性研究

肖洋^{a,b,c}, 韩柯尧^b, 成浩科^b, 李青霞^b

(河海大学 a. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; b. 水利水电学院;
c. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098)

摘要: 为探究泥沙分级后表面特性的变化规律, 采集了鄱阳湖入江水道和长江南京段江心洲尾的泥沙, 依据粒径分组对泥沙颗粒的级配和表面特性(比表面积、孔体积及孔径)进行了实验分析, 结果表明, 鄱阳湖入江水道和长江南京段泥沙颗粒均以黏粒、粉粒和细砂粒为主, 比表面积范围为 $3.2 \sim 25.12 \text{ m}^2/\text{g}$, 属于中孔材料; 泥沙颗粒的比表面积随中值粒径的增大而减小, 两者呈良好的幂指数关系, 即在黏粒和细粉粒范围内, 比表面积随中值粒径的减少而迅速减小; 与分级沙样相比, 混合沙样中值粒径与比表面积的关系与分级沙样趋势相近, 量值略大于分级沙样; 泥沙颗粒的相对比表面积和轴比较大, 当粒径大于 $15 \mu\text{m}$ 时, 相对比表面积和轴比随泥沙粒径增大而缓慢增加, 而当粒径小于 $15 \mu\text{m}$ 时, 随泥沙粒径增大相对比表面积和轴比急剧上升。

关键词: 泥沙颗粒; 表面特性; 比表面积; 鄱阳湖; 长江

中图分类号: TV 143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0047-04

Surface Properties of Sediments in the Waterway of Poyang Lake to Yangtze River and the Nanjing Reach of Yangtze River

XIAO Yang^{a,b,c}, HAN Keyao^b, CHENG Haokel^b, LI Qingxia^b

(Hohai university a State key laboratory of hydrology-water resources and hydraulic engineering;

b. College of water conservancy and hydropower engineering, Nanjing 210098, China; c. National engineering research center of water resources efficient utilization and engineering safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: The surface characteristics of sediments are important to understand the environmental impact of sediments. In order to investigate the effects of grain size and grading of different origins on surface properties of sediments, sediment samples were collected from the Poyang Yangtze Waterway and Yangtze River in Nanjing, respectively. The sediments were divided into four particle size fractions: $0-30 \mu\text{m}$, $30-62 \mu\text{m}$, $62-90 \mu\text{m}$, and $90-125 \mu\text{m}$, and then the surface properties (specific surface area, pore volume, and pore diameter) were investigated. The results showed that (1) the sediments in the Poyang Lake and Yangtze River are mainly clay, silt, and fine sand, and the specific surface area is from 3.2 to $25.12 \text{ m}^2/\text{g}$, indicating that the sediments are mesoporous materials; (2) the specific surface area is in a power exponent relationship with grain size, and it decreases with the increasing of grain size for silt and clay; (3) the relationship between the median grain size of mixing sediments and specific surface area is similar to that of grading sediments, with a slightly higher magnitude; and (4) the values of axial ratio and relative surface area increase along with the increasing of median diameter, and the increasing rates of axial ratio and relative surface area are much higher when the median grain size is in the range of $0 \sim 15 \mu\text{m}$.

Key words: sediment; surface characteristics; specific surface area; Poyang Lake; Yangtze River

泥沙对污染物的物理吸附主要发生在泥沙颗粒表面, 其平衡吸附量和吸附动力学过程与泥沙的表面特性直接相关, 故研究泥沙颗粒的表面特性及其随粒径的变化规律是理解泥沙与污染物相互作用机理的基础。

在传统的泥沙研究中, 描述泥沙颗粒几何特性的参数主

要有: 粒径、形状、圆度等^[1]。近年来, 随着对“泥沙环境效应”问题的重视, 泥沙颗粒表面特性变化及其对污染物吸附的影响研究也越来越多。其中, 比表面积是反映泥沙颗粒物理吸附能力大小的重要参数。前人的研究成果表明, 泥沙粒径越小, 比表面积越大^[2,3], 吸附污染物的能力也越大^[4], 詹

收稿日期: 2013-12-23 修回日期: 2014-03-17 网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.04.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179055; 51239003)

作者简介: 肖洋(1974), 男, 贵州铜仁人, 教授, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: sediment_lab@hhu.edu.cn

义正等^[5]建立了颗粒相对比表面积与轴比之间的函数关系;Walter等^[6]发现,占泥沙总重16%的细颗粒对总表面积的贡献量达到了76%;陈静生等^[7]研究了我国东部11条河流的表层沉积颗粒($< 63 \mu\text{m}$)的表面特性,结果显示,不同河流泥沙颗粒的比表面积差异较大,这种差异主要归因于粘土矿物含量的不同。但目前大部分研究只关注于混合沙样的比表面积,并未对泥沙颗粒进行系统的分级,而将泥沙颗粒分级可以降低级配沙样比表面积结果的影响,更加准确地分析泥沙颗粒表面特性随粒径的变化规律。同时,泥沙来源、输移过程不同,泥沙颗粒的组成成分和表面特性也可能存在差异,但目前,相关研究较少。

本文以鄱阳湖入江水道(边滩和主槽)和长江南京段表层泥沙为例,探究了泥沙颗粒的粒径分布和不同来源泥沙颗粒表面特性的变化规律,建立了泥沙颗粒表面特性、相对比表面积、轴比与粒径的关系。

1 泥沙样品的采集与预处理

泥沙样品分别采集于鄱阳湖入江水道和长江南京段见图1。鄱阳湖泥沙颗粒样品于2011年11月采集自鄱阳湖入江水道处,共布置A至E5个采样断面,每个断面在主槽和边滩布置两个采样点:A1至E1采集于边滩,A2至E2采集于主槽;长江泥沙颗粒样品于2011年3月采集自长江南京河段江心洲洲尾处,选取5个点,间隔200m取一个点,将5个点处的沙样充分混合成一个沙样。采集时取表层以下5cm床沙,共3组平行样,混合均匀后4℃冷藏保存。样品在实验室内自然风干,剔除杂质,研磨,过100目筛,放入棕色玻璃瓶冷藏保存以备分析。

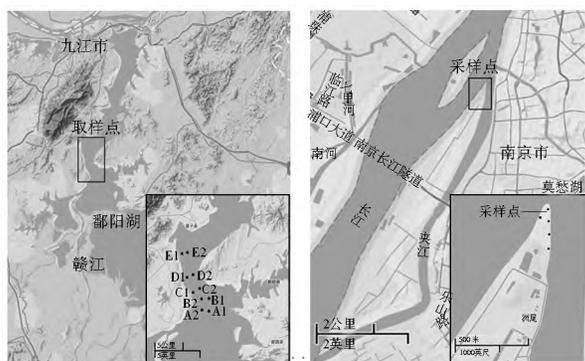


图1 鄱阳湖与长江采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in the Poyang Lake and Yangtze River

2 泥沙分级及表面特性测量

取待测沙样若干,先以振动筛将泥沙筛分为0~62、62~90、90~150 μm 三个粒径组;然后依据《河流泥沙颗粒分析规程》使用沉降法将0~62 μm 的泥沙分为0~30 μm 和30~62 μm ;最终将泥沙分为0~30、30~62、62~90、90~150 μm 四个粒径组。用马尔文 Mastersizer 2000型全自动激光粒度分析仪检测分级后的泥沙,然而由于筛分法、沉降法与激光粒度法的原理不同,分级后的泥沙符合率一般较差,需用沉降法反复提纯,最终使0~30 μm 、30~60 μm 的泥沙符合率达到70%以上,60~90 μm 、90~150 μm 的泥沙主要采用筛分

法进行分级,由于筛分所的粒径与激光粒度仪的测试粒径存在偏差,故这两个粒级的泥沙分级的符合率为60%以上。

取得未分级混合沙样、150 μm 以下混合沙样以及0~30、30~62、62~90、90~150 μm 四个粒径组的沙样,采用四分法取适量样品,配制成悬浊液,预先采用超声波分散均匀,使用马尔文 Mastersizer 2000型全自动激光粒度分析仪进行粒度测定;使用JW-BK型静态容量法氮吸附仪对150 μm 以下混合沙样和0~30、30~62、62~90、90~150 μm 四个粒径组的沙样进行 N_2 吸附-脱附实验,使用BET(Brunauer Emmett Teller)多点法和BJH(Barrett-Joyner-Halenda)方法分别计算颗粒比表面积和孔隙分布、孔容等表面特性。

3 实验结果与讨论

3.1 泥沙颗粒基本特性

图2和图3分别为鄱阳湖入江水道和长江南京段未分级混合泥沙样品的颗粒级配曲线,可以看出,鄱阳湖入江水道泥沙和长江南京段泥沙均以粘粒、粉粒和细砂粒为主。其中,鄱阳湖入江水道主槽泥沙的平均中值粒径为226.25 μm ,变化范围在182.41~276.23 μm ,分选系数 S 的范围在1.64~3.30,粉粒及以下($< 62 \mu\text{m}$)占总量14%~35.8%,150 μm 以下颗粒占总量约28%~45.1%;边滩泥沙的平均中值粒径为129.16 μm ,变化范围在97.18~167.17 μm ,分选系数 S 的范围在1.66~2.75,粉粒及以下($< 62 \mu\text{m}$)占总量19.5%~39.4%,150 μm 以下颗粒占总量约43.6%~68.4%;长江南京段泥沙的中值粒径为87.45 μm ,分选系数 S 的范围在1.42,粉粒及以下($< 62 \mu\text{m}$)占总量27.12%,150 μm 以下颗粒占总量约87.84%。由于主槽与边滩水动力条件不同,鄱阳湖入江水道边滩泥沙颗粒的中值粒径明显小于主槽泥沙,150 μm 以下的细颗粒也更多,而边滩与主槽泥沙颗粒的分选性相差不大,范围相近。

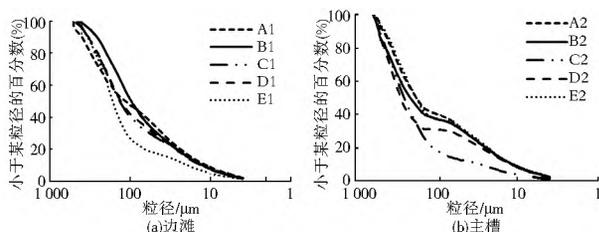


图2 泥沙颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of sediments in the Poyang Lake

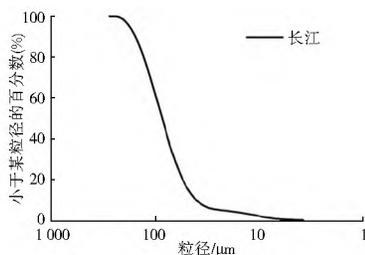


图3 长江泥沙颗粒级配曲线

Fig. 3 Gradation curves of sediments in the Yangtze River

鄱阳湖入江水道与长江泥沙颗粒样品的等温线类型类似,属于第0类多孔介质多层吸附模型,如样品B1的吸附-脱附等温线(见图4),其中横坐标为相对压力,纵坐标为单位

质量吸附剂吸附的氮气体积。

鄱阳湖入江水道泥沙样品比表面积范围为 $4 \sim 25 \text{ 12} \text{ m}^2/\text{g}$, 孔体积范围为 $0.003 \sim 0.068 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均孔径范围为 $3.1 \sim 10.2 \text{ nm}$, 属于中孔材料。长江泥沙样品比表面积范围为 $3.2 \sim 11.38 \text{ m}^2/\text{g}$, 孔体积范围为 $0.006 \sim 0.0248 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均孔径范围为 $4.71 \sim 8.13 \text{ nm}$, 也属中孔材料。

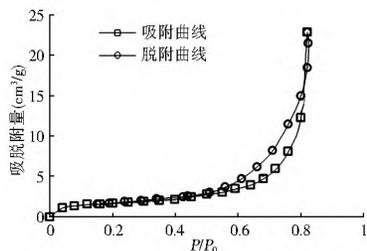


图4 泥沙颗粒对 N_2 的吸附-脱附等温线

Fig. 4 Adsorption-desorption isotherms of sediments on N_2

3.2 分级泥沙颗粒表面特性

为探讨颗粒分级对泥沙表面特性的影响, 将 $150 \mu\text{m}$ 以下的混合沙样和分级后的四个粒径组的沙样进行测量分析。以鄱阳湖入江水道边滩泥沙测量结果见图5为例, 数据点为A1-E1边滩泥沙 $150 \mu\text{m}$ 以下的混合沙样和分级沙样的中值粒径、比表面积的值。从图5可以看出, 分级沙样的粒径与比表面积成良好的幂指数关系, 随着粒径的增大, 比表面积减小, 其中, 在粘粒和细粉粒范围内, 尤其在 $30 \mu\text{m}$ 以下, 随粒径增大比表面积迅速减小, 而在粗粉粒和砂粒范围内, 减幅较缓。与分级沙样相比, 混合沙样中值粒径与比表面积的关系与分级沙样趋势相近, 量值略大于分级沙样, 表明混合沙样中所含的小粒径泥沙对比表面积的贡献大; 但混合沙样中值粒径范围在 $36.11 \sim 75.85 \mu\text{m}$, 变化较小, 难以精确表述中值粒径与比表面积的关系。

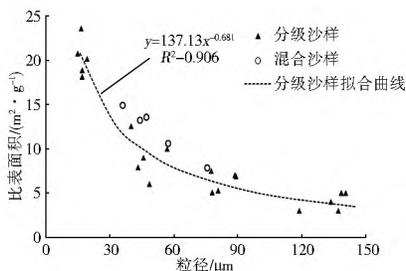


图5 泥沙颗粒粒径与比表面积关系

Fig. 5 Relationship between grain size and specific surface

3.3 不同来源泥沙颗粒表面特性

泥沙的表面特性并不仅仅受粒径和颗粒级配的影响, 而且受泥沙来源影响^[8-12]。选取前人的研究中^[8-12]与本文分级沙样中值粒径和颗粒级配都接近的数据, 将长江南京段、鄱阳湖入江水道、淮河蚌埠段^[11]、官厅水库^[12]泥沙的比表面积与中值粒径关系进行拟合和比较分析, 结果见图6。可以看出, 泥沙颗粒的比表面积与粒径均呈现较好的幂指数关系, 但相互之间有一定差异: 官厅水库、鄱阳湖入江水道泥沙的比表面积相近, 大于长江南京段与淮河蚌埠段泥沙的比表面积, 可能原因是湖库水的流速较小, 细颗粒含量较高, 故其比表面积较河流泥沙的大。对比鄱阳湖的主槽泥沙与边滩泥

沙, 由于边滩和主槽的泥沙颗粒在随水流运动时经常会发生迁移和交换, 总体上差异并不大。但是可以看出, 随着粒径的减小, 差异逐渐增大, 在粒径小于 $60 \mu\text{m}$ 时, 尤其是小于 $30 \mu\text{m}$ 时, 差异更明显。

为进一步比较江、湖泥沙的差异, 将鄱阳湖入江水道和长江南京段泥沙分级后的级配曲线进行对比, 由图7可见, 在 $0 \sim 30 \mu\text{m}$ 和 $30 \sim 60 \mu\text{m}$ 粒径, 鄱阳湖泥沙的细颗粒含量大于长江泥沙, 这也是其比表面积较大的一个原因。

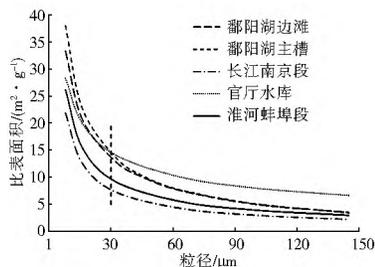


图6 泥沙颗粒中值粒径与比表面积关系

Fig. 6 Relationship between median grain size D_{50} and specific surface S_g of sediments

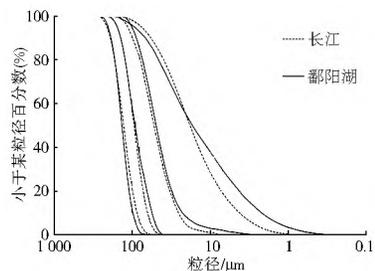


图7 分级泥沙颗粒级配曲线

Fig. 7 Gradation curves of grading sediments

3.4 泥沙的轴比和相对比表面积

相对比表面积 S_r 为单位质量所含泥沙颗粒的总表面积 S_g 与单位质量相同中值粒径球体总表面积 S_d 之比, 可由下式确定:

$$S_r = S_g / S_d \quad (1)$$

轴比是反映颗粒表面形态的参数之一, 表示实际颗粒形状与球体偏离程度。由于细颗粒泥沙多呈薄片状, 多采用圆盘模式来概化泥沙, 若以 a 表示圆盘的直径, b 表示圆盘的厚度, 则轴比 $J = a/b$ 。此时, 轴比 J 与相对比表面积 S_r 的关系为:

$$J = 8 \sqrt{2S_r^3 / 3\cos^3\beta} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{1}{3} \arccos(-\sqrt{3/2S_r^3}) \quad (3)$$

其中, S_r 由比表面积 S_g 和中值粒径 D_{50} 确定。

分别将长江南京段、鄱阳湖入江水道、淮河蚌埠段^[11]、官厅水库^[12]泥沙的相对比表面积以及轴比与中值粒径的关系进行拟合和比较分析, 结果见图8和图9, 图中数据点为根据 S_g 和 D_{50} 计算的 S_r 和 J 的实际值, 线段为计算值经线性拟合得到的拟合直线。由图可见, 相对比表面积的变化范围为 $61.70 \sim 244.65$, 说明泥沙颗粒实际比表面积显著大于其相同粒径球体的比表面积, 泥沙颗粒偏离球态的程度较大, 主要原因是泥沙颗粒具有复杂的表面形态和孔结构; 轴比的

变化范围为 3 165.7~ 24 993.3, 表示若以圆盘模式概化泥沙颗粒, 泥沙颗粒非常接近片状。

与比表面积不同, 泥沙颗粒的相对比表面积随泥沙颗粒的中值粒径增大, 但在不同粒径段, 其增大幅度不同, 当粒径大于 15 μm (图中虚线), 各处泥沙的变化规律相似, 鄱阳湖入江水道、长江南京段、官厅水库的泥沙颗粒的相对比表面积随粒径呈线性缓慢增大; 当粒径小于 15 μm, 官厅水库和淮河蚌埠段的泥沙颗粒的相对比表面积随粒径急剧增大。鄱阳湖入江水道和长江南京段泥沙颗粒的相对比表面积随粒径的变化趋势相同, 拟合直线的斜率也相近, 说明两处泥沙的物理特性相似。而鄱阳湖入江水道泥沙的相对比表面积大于长江南京段泥沙, 说明鄱阳湖入江水道的泥沙有更加复杂的结构和表面形态, 从而比表面积更大。轴比随粒径的变化规律与相对比表面积类似。由于同样受到来源和级配的影响, 故不同来源泥沙颗粒的相对比表面积和轴比的变化规律与比表面积类似: 官厅水库、鄱阳湖入江水道较大, 而长江南京段与淮河蚌埠段较小。

通常情况下, 可根据比表面积 S_g 来确定相对比表面积 S_r 的大小。但在无实测值的情况下, 作为估算, 可由图 8 中的拟合线反查得出 S_r 。式(4)和式(5)分别为图 8 中鄱阳湖入江水道和长江南京段泥沙相对比表面积随粒径变化的拟合表达式。

$$S_r = 0.739D_{50} + 148.55 \quad (4)$$

$$S_r = 0.846D_{50} + 65.714 \quad (5)$$

式中: D_{50} 单位为 μm, 公式适用范围为 15~ 150 μm。

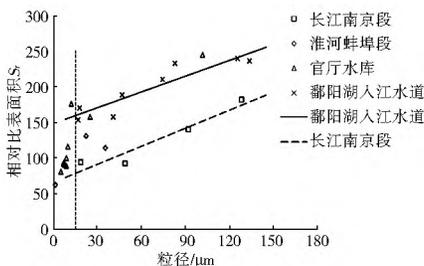


图 8 泥沙颗粒中值粒径与相对比表面积关系

Fig. 8 Relationship between median grain size D_{50} and relative specific surface S_g of sediments

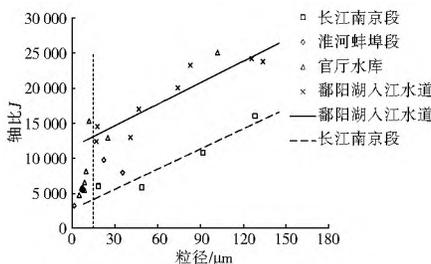


图 9 泥沙颗粒中值粒径与轴比关系

Fig. 9 Relationship between median grain size D_{50} and axial ratio

4 结论

(1) 鄱阳湖入江水道和长江南京段泥沙颗粒均以黏粒、粉粒和细砂粒为主, 属于中孔材料。鄱阳湖入江水道泥沙颗粒分选性较差, 比表面积范围为 4.2~ 25.12 m²/g, 孔体积分

围为 0.003~ 0.068 cm³/g, 平均孔径范围为 3.1~ 10.2 nm。长江南京段泥沙颗粒比表面积范围为 3.2~ 11.38 m²/g, 孔体积分范围为 0.006~ 0.0248 cm³/g, 平均孔径范围为 4.71~ 8.13 nm。

(2) 研究区域泥沙颗粒的比表面积随中值粒径的增大而减小, 两者呈良好的幂指数关系, 在粘粒和细粉粒范围内, 随粒径增大比表面积迅速减小。与分级沙样相比, 混合沙样中值粒径与比表面积的关系与分级沙样趋势相近, 量值略大于分级沙样。

(3) 不同来源泥沙颗粒的比表面积与粒径均呈现较好的幂指数关系, 但相互之间有一定差异。官厅水库、鄱阳湖入江水道泥沙的比表面积相近, 大于长江南京段与淮河蚌埠段泥沙的比表面积。

(4) 泥沙颗粒具有较大的相对比表面积和轴比, 说明泥沙颗粒偏离球态的程度较大。泥沙颗粒的相对比表面积和轴比随泥沙颗粒的中值粒径增大, 但在不同粒径段, 其增大幅度不同, 当粒径大于 15 μm 时, 相对比表面积和轴比随泥沙粒径增大而缓慢增加; 当粒径小于 15 μm 时, 随泥沙粒径增大相对比表面积和轴比急剧上升。

参考文献 (References):

- [1] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. (QIAN Ning, WAN Zhaohui. Sediment Transport Mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [2] Horowitz A J., Elrick K A. The Relation of Stream Sediment Surface Area, Grain Size and Composition to Trace Element Chemistry. [J]. Applied Geochemistry, 1987(2): 437-451.
- [3] Murray K S., Cauvet D, Lybeer M, et al. Particle Size and Chemical Control of Heavy Metals in Bed Sediment from the Rouge River, Southeast Michigan. [J]. Environmental science & technology, 1999, 33(7): 987-992.
- [4] Stone M., Mudroch A. Effect of Particle Size, Chemistry and Mineralogy of River Sediments on Phosphate Adsorption [J]. Environmental Technology Letters, 1989, 10(5): 501-510.
- [5] 詹义正, 陈立, 王明甫, 等. 泥沙比表面积的测定 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1996, 29(5): 6-9. (ZHAN Yizheng, CHEN Li, WANG Mingfu, et al. Determination of Specific Surface Area of Sediment [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 1996, 29(5): 6-9. (in Chinese))
- [6] Walter L M., Morse J W. Reactive Surface Area of Skeletal Carbonates during Dissolution; Effect of Grain Size [J]. Journal of Sedimentary Research, 1984, 54(4): 1081-1090.
- [7] 陈静生, 陈江麟, 王飞越. 中国东部主要河流沉积物的比表面及其地域差异研究 [J]. 环境化学, 1994, 13(6): 479-485. (CHEN Jingsheng, CHEN Jianglin, WANG Feiyue. Specific Surface Areas of the Sediments from the Main Rivers in the Eastern China [J]. Environmental Chemistry, 1994, 13(6): 479-485. (in Chinese))
- [8] 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(6): 64-68. (XIAO Yang, LU Qi, CHENG Haokel, et al. Surface Properties of Sediments and Its Effect on Phosphorus Adsorption [J]. Journal of Sediment Research, 2011(6): 64-68. (in Chinese))

(下转第 115 页)

- [6] 李凡. 岩土材料破损特性的颗粒流研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 78-81. (LI Fan, A Study on the Breakage Properties of Geological Materials using Particle Flow Simulation[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 78-81. (in Chinese))
- [7] 邵磊, 迟世春, 贾宇峰. 堆石料大三轴试验的细观模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊1): 239-243. (SHAO Lei, CHI Shi chun, JIA Yu feng. Mesoscopic Simulation of a Large Scale Triaxial test of Rockfill Materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Supp. 1): 239-443. (in Chinese))
- [8] 张超, 展旭财, 杨春和. 粗粒料强度及变形特性的细观模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2077-2083. (ZHANG Chao, ZHAN Xu cai, YANG Chun he. Mesoscopic Simulation of Strength and Deformation Characteristics of Coarse Grained Materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2077-2083. (in Chinese))
- [9] Potyondy D O, Cundall P A. A Bonded particle Model for Rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [10] Hoek E, Brown E T. Practical Estimates of Rock Mass Strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1998, 34(8): 1165-1186.
- [11] Cho N, Martin C D, Segol D C. A Clump Particle Model for Rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2007, 44(7): 997-1010.
- [12] 周健, 池永. 砂土力学性质的细观模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 901-906. (ZHOU Jian, CHI Yong. Mesoscopic Simulation of Sand Mechanical Properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(6): 901-906. (in Chinese))
- [13] 罗勇, 龚晓南, 连峰. 三维离散颗粒单元模拟无黏性土的工程力学性质[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 292-297. (LUO Yong, GONG Xiaonan, LIAN Feng. Simulation of Mechanical Behaviors of Granular Materials by Three dimensional Discrete Element Method Based on Particle Flow code [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 292-297. (in Chinese))
- [14] 姜景山, 刘汉龙, 程展林等. 密度和围压对粗粒土力学性质的影响[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(8): 46-50. (JIANG Jingshan, LIU Hanlong, CHENG Zhanlin, et al. Influences of Density and Confining Pressure on Mechanical Properties for Coarse Grained soils[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(8): 46-50. (in Chinese))
- [15] 迟明杰, 赵成刚, 李小军. 砂土剪胀机理的研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 99-104. (CHI Mingjie, ZHAO Chenggang, LI Xiaojun. Stress dilation Mechanical of Sands[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(3): 99-104. (in Chinese))

(上接第 50 页)

- [9] 郭长城, 王国祥, 喻国华. 天然泥沙对富营养化水体中磷的吸附特性研究[J]. 中国给水排水, 2006, 22(9): 10-13. (GUO Changcheng, WANG Guoxiang, YU Guohua. Study on Adsorption of Phosphorus in Eutrophied Water Body By Natural Sediment[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(9): 10-13. (in Chinese))
- [10] 胡康博, 王毅力, 李俊清, 等. 引黄水库泥沙条渠沉积物的表面理化及分形特征研究[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1986-1993. (HU Kangbo, Wang Yili, Li Junqing, et al. Surface Physicochemical and Fractal Characteristics of Sediments in Desilting Basin from Yellow River Diversion Reservoir[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1986-1993. (in Chinese))
- [11] 李青霞. 不同粒径细颗粒泥沙物理特性研究[D]. 河海大学, 2013. (LI Qingxia. Study of Sediment Physical Properties of Fine Particles[D]. Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [12] 陈明洪. 泥沙颗粒吸附磷的规律及微观形貌变化的研究[D]. 清华大学, 2008. (CHEN Minghong. The Phosphorus Adsorption Rule and Surface Microtopography Change of Sediment Particle[D]. Tsinghua University, 2008. (in Chinese))