

堆场疏浚泥颗粒分选特性初步量化方法

杨瑞敏¹, 丁建文², 周志彦³, 徐桂中⁴, 张远兵¹

(1. 安徽科技学院建筑学院, 安徽 滁州 233100; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096;
3. 江苏鸿基岩土工程有限公司, 江苏 扬州 225002; 4. 盐城工学院土木工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要: 为了准确评估堆场存储能力和合理选择疏浚泥处理工艺, 以泥沙运动学为理论基础, 将疏浚泥颗粒分为 $d < 0.005 \text{ mm}$ 、 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$ 和 $d > 0.01 \text{ mm}$ 3 个粒组, 分析了各粒组相对含量的沿程变化规律, 明确了堆场疏浚泥分选的主要原因是 $d > 0.01 \text{ mm}$ 粒组与 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$ 粒组的相对运动; 以分选系数量化堆场疏浚泥分选的显著程度, 以偏离系数量化原泥颗粒组成对堆场疏浚泥分选的影响, 分析了分选系数、偏离系数分布与堆场疏浚泥土性分布的关系, 提出了堆场疏浚泥分选特性的初步量化方法。研究表明: 随着离吹填口距离的增大, 分选系数沿程减小, 呈幂函数分布, 堆场疏浚泥分选性沿程减弱, 吹填口附近分选系数最大, 颗粒分选显著, 粒度差异大, 退水口附近分选系数趋近于零, 分选不明显, 颗粒分布均匀; 偏离系数沿程先减小后增大, 呈勺形分布, 反映堆场前、后段疏浚泥土性与原泥相差较大, 而堆场中段疏浚泥土性与原泥接近; 分选系数、偏离系数的沿程分布与堆场疏浚泥土性分区具有良好的相关性。

关键词: 疏浚泥; 颗粒分选; 分选系数; 偏离系数; 量化方法; 堆场

中图分类号: TU447 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2017)03-0089-06

Preliminary quantitative method for grain sorting behaviors of dredged slurries in reclaimed land//YANG Ruimin¹, DING Jianwen², ZHOU Zhiyan³, XU Guizhong⁴, ZHANG Yuanbing¹ (1. College of Architecture, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China; 2. College of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Jiangsu Hongji Geotechnical Engineering Ltd., Yangzhou 225002, China; 4. College of Civil Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: In order to accurately evaluate the storage capacity of reclaimed land and reasonably select treatment technologies for dredged slurries, based on the theory of sediment transportation mechanics, dredged slurries are divided into three particle-size fractions: $d < 0.005 \text{ mm}$, $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$, and $d > 0.01 \text{ mm}$. The variation of relative content for each particle-size fraction was analyzed, and it was determined that the main reason for grain sorting of dredged slurries is the relative movement of particle-size fractions $d > 0.01 \text{ mm}$ and $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$. Using the sorting coefficient to quantify the significant degree of grain sorting of dredged slurries and the deviation coefficient to quantify the influence of grain composition of in situ mud on grain sorting, the relationships between the sorting coefficient and deviation coefficient and soil properties in reclaimed land were analyzed, and a preliminary quantitative method for grain sorting of dredged slurries in reclaimed land is proposed. The results show that the sorting coefficient decreases with the increase of the distance from the filling inlet and shows a power function distribution, and the significance of grain sorting decreases longitudinally. The sorting coefficient is at its maximum near the filling inlet, where grain sorting is remarkable and the particle-size difference is large. However, it is small near the water outlet, where grain sorting is unremarkable and particle-size distribution is uniform. The deviation coefficient decreases first and then increases longitudinally in reclaimed land, and shows a spoon-type distribution, showing that the soil properties in the forepart and posterior segment of reclaimed land are significantly different from those of in situ mud, but the soil properties in the middle segment of reclaimed land are similar to those of in situ mud. The longitudinal distributions of the sorting coefficient and deviation coefficient are strongly correlated with zoning of soil properties in reclaimed land.

Key words: dredged slurry; grain sorting; sorting coefficient; deviation coefficient; quantitative method; reclaimed land

为了改善内陆河道的通航能力和泄洪能力, 我国每年都要开展大规模的疏浚清淤工作, 从而产生

大量的疏浚泥^[1-4]。例如长江口深水航道治理工程仅三期工程的基建疏浚量就达 1.7 亿 m^3 左右, 工程

竣工后每年维护产生的疏浚量约 3 000 万 m^3 ^[2]; 南水北调东线江苏段仅一期工程的疏浚量就超过 2.0 亿 m^3 ^[5]; 珠江三角洲地区每年的疏浚量高达 8 000 万 m^3 ^[4]。目前, 我国内陆河湖多采用绞吸式疏浚方式, 河湖底泥被挖泥船耙头前端的切盘或高压水切碎并与水混合后, 通过高速离心泵泵送至岸边的堆场堆放处置, 泥浆从吹泥口卸载后, 粗颗粒(主要为疏浚时未充分切割或打碎的底泥大块, 其尺寸可达厘米级) 迅速从泥浆中脱离, 掉落于吹泥口下方形成粗颗粒扇形堆积区, 细颗粒泥浆经堆场沉积区向退水口方向流动。此疏浚方式具有连续作业、施工效率高、成本低和不需要断流施工的优点, 但产生的疏浚泥含水率极高(如金宝航道疏浚工程疏浚泥含水率高达 1 000%^[6], 连云港庙岭新港疏浚工程疏浚泥含水率高达 900%^[7]), 当河道底泥细颗粒含量较高时, 疏浚泥含水率将长期居高不下, 疏浚泥堆放处置时, 必然需要征用大量的土地, 且征地时间长, 而我国目前土地资源日趋紧缺, 势必引发各种社会、经济矛盾。为了有效缓解这些矛盾, 需要进行堆场优化设计和对疏浚泥进行脱水固结处理。然而众多工程实践表明^[6,8-13], 吹填过程中高含水率疏浚泥的水力分选现象明显, 容易造成堆场疏浚泥土性分布不均, 从而影响堆场的优化设计和疏浚泥处理工艺的选择。

实际疏浚工程中通常存在如下问题: ①堆场存储容积设计偏保守, 导致堆场存储容积设计过大, 造成土地资源浪费; ②能否有效预测堆场疏浚泥土性分布, 从而有针对性地选择淤泥的处理工艺, 以期达到良好的处理效果。上述问题的解决与堆场疏浚泥颗粒分选量化方法的研究密切相关, 徐桂中等^[6,14-15]对泥浆垂直分选的研究表明, 颗粒的相对运动导致泥浆的颗粒分选, 而泥浆的分选形态与泥浆的含水率、物质组成等有关(例如细颗粒含量低、含水率较高时, 泥浆通常呈“上小下大”的正粒序分选形态, 随着细颗粒含量增大、含水率降低, 泥浆呈“上大下小”的反粒序和“混杂”粒序分选形态)。徐桂中^[6]提出了“分选度”的概念, 对自重沉积时疏浚泥的分选进行定量描述, 但仅限于疏浚泥垂直方向分选的定量评估, 而实际吹填工程中疏浚泥分选受水动力条件影响较大, 且工程上较为关注的是堆场疏浚泥水平方向的分选。本文基于泥沙运动学理论和现场试验, 分析疏浚泥 $d < 0.005 \text{ mm}$ 、 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$ 和 $d > 0.01 \text{ mm}$ 3 个粒组的沿程分布规律, 提出吹填动水条件下疏浚泥颗粒分选特性量化方法, 明确疏浚泥分选与土性分区的相关性。

1 堆场疏浚泥颗粒分选特性

国内外一些学者的现场试验研究^[8,10-12]发现:

吹填后堆场疏浚泥颗粒粒度、界限含水率、含水率、强度及渗透性等呈区域分布, 即堆场内疏浚泥颗粒粒径沿程减小, 细颗粒含量沿程增大, 界限含水率、含水率沿程增大, 渗透性和强度则沿程减小。堆场疏浚泥土性的区域分布是由于吹填中疏浚泥颗粒分选造成的, 受原泥颗粒组成、初始含水率、吹填速率及堆场几何边界等因素的影响。从泥沙运动学角度分析, 疏浚泥颗粒分选是指在一定的水动力条件(如流速梯度、紊动强度等)下, 颗粒由于尺寸、密度等的差异, 在堆场内分区沉积的行为, 颗粒的相对运动造成泥浆的颗粒分选^[13,16-18]。

泥沙运动学的研究^[17-18]表明, 泥浆中形成絮凝的颗粒临界粒径为 0.01 mm 左右, 当泥浆中颗粒粒径 $d < 0.01 \text{ mm}$ 时, 颗粒的絮凝作用明显, $d < 0.01 \text{ mm}$ 的颗粒含量对泥浆物理力学特性的影响显著; 而在土的形成过程中, $d < 0.005 \text{ mm}$ 的黏粒含量对黏性土物理力学性质的影响至关重要^[19]。为了分析颗粒的相对运动对堆场疏浚泥分选的影响, 将疏浚泥颗粒分为 3 个粒组, 即 $d < 0.005 \text{ mm}$ 粒组、 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$ 粒组和 $d > 0.01 \text{ mm}$ 粒组(以下简称粒组 1、粒组 2 和粒组 3)。前期的研究^[6,10-11]表明: 远离吹填口粒组 1 的颗粒含量沿程增大, 粒组 3 的颗粒含量沿程减小, 而粒组 2 的颗粒含量沿程变化不大; 粒组 3 与粒组 2 的相对含量沿程变化幅度最大, 而粒组 3 与粒组 1 的相对含量、粒组 1 与粒组 2 的相对含量沿程变化幅度均较小。粒组相对含量沿程变化幅度越大, 粒组间的相对运动越明显, 疏浚泥中粒组 3 与粒组 2 之间颗粒的相对运动显著, 而粒组 3 与粒组 1 之间、粒组 1 与粒组 2 之间颗粒的相对运动均不明显, 笔者认为粒组之间相对运动越明显, 堆场疏浚泥颗粒分选越明显, 因此吹填时粒组 3 与粒组 2 之间颗粒的相对运动是造成堆场疏浚泥颗粒分选的内在因素。

2 堆场疏浚泥颗粒分选量化参数

为了量化堆场疏浚泥颗粒的分选性, 提出分选系数的概念; 定义分选系数为粒组 3 与粒组 2 的相对含量沿程变化关系曲线的斜率(取绝对值)。由于实际工程中粒组相对含量的沿程变化关系由实测离散数据点获得, 考虑到实际工程中的可操作性, 分选系数采用增量形式表示:

$$F_x = \frac{1}{\Delta x} \left| \frac{P_{3,x+\Delta x}}{P_{2,x+\Delta x}} - \frac{P_{3,x}}{P_{2,x}} \right| \quad (1)$$

式中: F_x 为分选系数, 以粒组相对含量的沿程变化幅度反映颗粒相对运动大小, 从而量化堆场疏浚泥颗粒分选的显著程度; $P_{3,x}$ 、 $P_{3,x+\Delta x}$ 分别为堆场内距

离吹填口 $x, x+\Delta x$ 处粒组 3 的质量分数; $P_{2,x}, P_{2,x+\Delta x}$ 分别为堆场内距离吹填口 $x, x+\Delta x$ 处粒组 2 的质量分数。增量 Δx 取值大小主要取决于工程精度要求。

现场试验研究^[8-11,12]表明:随离吹填口距离增大,堆场疏浚泥中粒组 3 和粒组 2 的相对含量关系曲线的斜率(取绝对值)沿程减小,即分选系数沿程减小,疏浚泥分选性沿程减弱,吹填口附近分选系数最大,颗粒分选显著,粒度差异大;退水口附近分选系数趋近于零,分选不明显,颗粒分布均匀。分选系数的沿程分布规律可用幂函数描述:

$$F_x = ax^b \quad (x \geq 0) \quad (2)$$

式中 a, b 为系数,与原泥颗粒组成、初始含水率和吹填速率等有关。

国内一些学者^[6,9-11]的研究发现:原泥颗粒组成是堆场疏浚泥颗粒分选的内在控制因素。为了考虑原泥颗粒组成对分选的影响,提出偏离系数的概念:定义偏离系数为堆场内疏浚泥第 i 粒组质量分数与原泥第 i 粒组质量分数之差与原泥第 i 粒组质量分数之比,即:

$$D_{i,x} = |P_{i,x} - P_{0,i}| / P_{0,i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中: $D_{i,x}$ 为堆场内距离吹填口 x 处疏浚泥的偏离系数,反映堆场内不同位置的疏浚泥颗粒组成与原泥的偏离程度,通常偏离系数越大,堆场内疏浚泥土性与原泥的差异越大; $P_{0,i}$ 为原泥第 i 粒组的质量分数; $P_{i,x}$ 为堆场内距离吹填口 x 处疏浚泥第 i 粒组的质量分数; $i=1, 2, 3$ 代表粒组 1, 2, 3。

根据泥沙运动学理论^[13,16-18],在一定的水流条件下,疏浚泥中粗颗粒由于自重较大,将最先沉积于吹填口附近的堆场前段,而细颗粒由于自重较小,将随泥浆转移至退水口附近沉积,导致堆场前段粗颗粒聚集,疏浚泥颗粒分布不均,颗粒组成与原泥相差较大,同时容易造成退水口附近细颗粒大量富集,颗粒组成与原泥亦相差较大,但细颗粒分布相对均匀,从而在吹填口与退水口之间必然存在一个区域,疏浚泥颗粒组成与原泥相近,所以堆场内疏浚泥偏离系数沿程先减小后增大,最后在退水口附近保持某一定值,堆场内疏浚泥偏离系数沿程呈勺形分布,可近似用一个分段函数描述:

$$D_x = \begin{cases} k_1x + f & 0 \leq x < -\frac{f}{k_1} \\ k_2x + \frac{k_2f}{k_1} & -\frac{f}{k_1} \leq x \leq \frac{c}{k_2} - \frac{f}{k_1} \\ c & x > \frac{c}{k_2} - \frac{f}{k_1} \end{cases} \quad (4)$$

式中 k_1, k_2, c, f 为系数,与原泥颗粒组成、吹填速率及初始含水率等有关。

实际吹填工程中堆场疏浚泥分选受原泥颗粒组成、吹填工艺等因素的影响,所以本文提出的分选系数和偏离系数两个量化参数,适用于内陆河湖采用绞吸式、水力冲挖式疏浚且原泥颗粒组成非均匀(不均匀系数 $C_u > 10$)时,堆场疏浚泥颗粒分选特性的初步定量评估。

3 验证与讨论

选取国内外 3 个典型疏浚泥堆场的现场试验结果,验证本文提出的分选系数、偏离系数的沿程分布规律,分析分选系数、偏离系数分布与堆场疏浚泥土性分区的关系。选取的 3 个堆场为南水北调东线江苏段疏浚工程的金宝航道 N1 堆场、白马湖堆场和美国的 Browns Lake 堆场,堆场基本情况如表 1 所示。

表 1 3 个堆场基本情况

堆场名称	原泥颗粒质量分数/%			初始含水率/%	吹填速率
	粒组 1	粒组 2	粒组 3		
N1 堆场 ^[11]	45	11	44	1000	3 600 m ³ /h 水土混合泥浆
白马湖堆场 ^[8-9]	20	26	54	370	
Browns Lake 堆场 ^[12]	25	13	62	500	

3 个堆场试验区的形状均近似长方形,堆场疏浚泥的取样均从吹填口开始至退水口结束,取样的路线及取样点的布置如图 1 所示。N1 堆场在距离吹填口较近的堆场前段疏浚泥取样间距约 10 m,远离吹填口的堆场中、后段取样间距 20 ~ 40 m(据现场调查,越靠近退水口颗粒分布越趋于均匀,故取样间距沿程可加大);白马湖堆场疏浚泥取样间距为 10 m; Browns Lake 堆场在距离吹填口较近的堆场前段疏浚泥的取样间距约 20 m,在堆场中、后段取样间距约 40 m; 3 个堆场疏浚泥的取样深度均为 1/2 泥深处。N1 堆场^[11]和 Browns Lake 堆场^[12]疏浚泥的颗粒分析、含水率和界限含水率等试验参照 ASTM 规范进行,白马湖堆场^[8-9]疏浚泥的室内试验参照 SL237—1999《土工试验规程》进行。

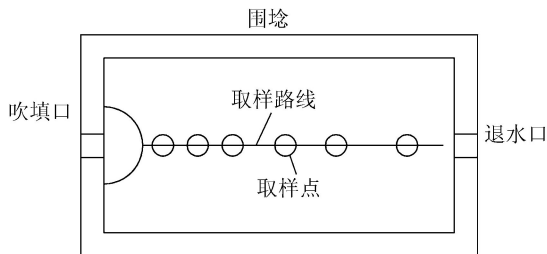


图 1 堆场疏浚泥取样布置

根据 3 个堆场的颗分试验结果^[8-12],可得 3 个粒组相对含量的沿程分布规律如图 2 所示,综合考

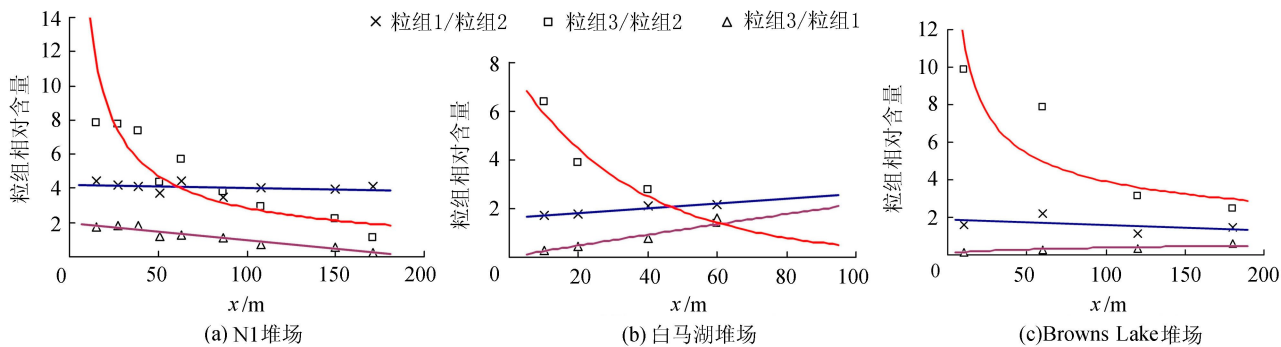


图2 3个堆场疏浚泥各粒组相对含量沿程分布

考虑3个堆场的疏浚泥颗粒粒度、含水率及界限含水率分布,堆场一般可划分为粗粒土区、过渡区和细颗粒富集区。

从图2可知,3个堆场疏浚泥粒组3与粒组2相对含量沿程变化幅度最大,粒组3与粒组1的相对含量、粒组1与粒组2的相对含量沿程变化幅度均较小。

根据式(1)分选系数的定义,考虑图2中粒组3与粒组2相对含量的沿程变化关系,可知3个堆场疏浚泥分选系数的沿程分布规律均满足式(2)的幂函数分布,对于N1堆场, $a=-60, b=-1.7$;对于白马湖堆场, $a=-33, b=-1.8$;对于Browns Lake堆场, $a=-18, b=-1.5$ 。3个堆场疏浚泥分选系数的沿程分布规律如图3所示,随着距离吹填口距离的增大,堆场疏浚泥分选系数沿程减小,即疏浚泥分选性沿程减弱,吹填口附近分选系数沿程减小幅度较大,远离吹填口分选系数沿程减小幅度较小,退水口附近分选系数趋近于零。3个堆场分选系数具有相同的

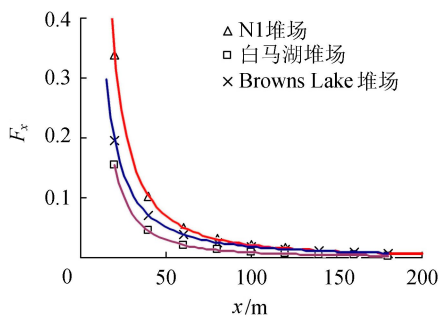


图3 3个堆场分选系数沿程分布规律

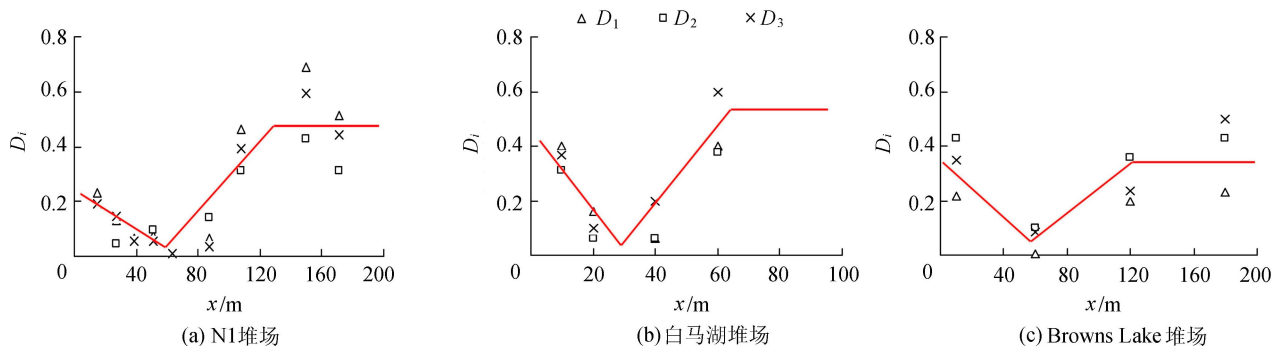


图4 偏离系数沿程分布规律

分布规律,但在距离吹填口相同位置处,N1堆场分选系数比Browns Lake堆场大,而Browns Lake堆场分选系数又比白马湖堆场大,这主要是由于原泥颗粒组成、初始含水率及吹填速率等不同造成的。

根据式(3)偏离系数的定义,并考虑分选试验结果^[8,11-12],可得堆场疏浚泥偏离系数的分布如图4所示,可知3个堆场偏离系数均满足式(4)的勺形分布,对于N1堆场, $k_1=-0.004, k_2=0.007, c=0.5, f=0.22$;对于白马湖堆场, $k_1=-0.014, k_2=0.016, c=0.55, f=0.43$;对于Browns Lake堆场, $k_1=-0.006, k_2=0.006, c=0.35, f=0.35$ 。3个堆场的偏离系数 D_1, D_2, D_3 均沿程先减小后增大,最后在退水口附近保持在某一定值。

分选系数、偏离系数的分布与堆场疏浚泥土性分区具有良好的相关性,如图5所示。

图5中I区为粗粒土区、II区为过渡区、III区为细颗粒富集区,粗粒土区疏浚泥分选系数较大,沿程急剧减小,偏离系数沿程减小,表明疏浚泥颗粒分选明显,颗粒间粒度差异大,疏浚泥颗粒组成与原泥逐渐接近;过渡区疏浚泥分选系数沿程逐渐减小,偏离系数沿程增大,表明疏浚泥颗粒分选性沿程逐渐减弱,疏浚泥颗粒组成与原泥逐渐偏离;细颗粒富集区疏浚泥分选系数趋近于零,偏离系数保持在某一定值,表明颗粒分选不明显,颗粒分布均匀,疏浚泥颗粒组成与原泥保持某一固定偏离值。

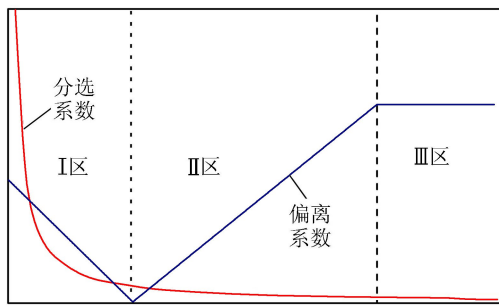


图5 分选系数、偏离系数分布与堆场疏浚泥土性分区

4 结论

a. 颗粒的相对运动越显著,堆场疏浚泥分选越明显, $d > 0.01 \text{ mm}$ 粒组与 $0.005 \text{ mm} \leq d \leq 0.01 \text{ mm}$ 粒组的相对运动是造成堆场疏浚泥颗粒分选的内在因素。

b. 分选系数可量化堆场疏浚泥分选的显著程度,分选系数越大,颗粒分选越明显,反之,颗粒分选越不明显;分选系数沿程减小,呈幂函数分布,堆场疏浚泥分选性沿程减弱,吹填口附近分选系数最大,颗粒分选显著,粒度差异大,退水口附近分选系数趋近于零,分选不明显,颗粒分布均匀。

c. 偏离系数可量化原泥颗粒组成对堆场疏浚泥分选的影响,偏离系数沿程先减小后增大,呈勺形分布,反映堆场前、后段疏浚泥土性与原泥相差较大,而堆场中段疏浚泥土性与原泥相近。

d. 分选系数、偏离系数分布和堆场疏浚泥土性分区具有良好的相关性,粗粒土区分选系数较大,沿程急剧减小,偏离系数沿程减小;过渡区分选系数沿程逐渐减小,偏离系数沿程增大;细颗粒富集区分选系数趋近于零,偏离系数保持在某一定值。

参考文献:

[1] 中国疏浚协会. 中国疏浚业发展战略研究总报告[R]. 北京:中国疏浚协会,2009.

[2] 徐元,朱治. 长江口深水航道治理工程疏浚土综合利用[J]. 水运工程,2009(4):127-133. (XU Yuan, ZHU Zhi. Study and practice of comprehensive utilization of dredging soil of the Yangtze estuary deepwater channel engineering [J]. Port & Waterway Engineering, 2009(4):127-133. (in Chinese))

[3] 徐元. 港口建设与疏浚之间关系浅议;兼谈第6届世界疏浚大会有关情况[J]. 中国港湾建设,2001(6):65-68. (XU Yuan. A preliminary study on relationship between port construction and dredging with an introduction to related subjects of 16th World Dredging Congress [J]. China Harbour Engineering, 2001(6):65-68. (in Chinese))

[4] 林瑞建. 航道整治疏浚物的综合利用[J]. 珠江水运, 2004(5):26-27. (LIN Ruijian. Comprehensive utilization of dredging material for waterway regulation [J]. Pearl River Water Transport, 2004(5):26-27. (in Chinese))

[5] 南水北调东线江苏水源有限公司,中国国际工程咨询公司. 南水北调东线第一期工程可行性研究报告[R]. 南京:南水北调东线江苏水源有限公司,2005.

[6] 徐桂中. 疏浚泥堆场颗粒分选及对工程特性影响规律试验研究[D]. 南京:河海大学,2013.

[7] 霍守亮,荆一凤,席北斗,等. 环保疏浚堆场余水处理生产性试验研究[J]. 环境科学研究,2007,20(1):75-79. (HUO Shouliang, JING Yifeng, XI Baidou, et al. Full-scale experimental research on residual water treatment for environmental dredging [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, 20(1):75-79. (in Chinese))

[8] 汪顺才,张春雷,黄英豪,等. 堆场疏浚淤泥含水率分布规律调查研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2823-2827. (WANG Shuncai, ZHANG Chunlei, HUANG Yinghao, et al. Study of diversification of water contents in dredged sediment storage yard [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9):2823-2827. (in Chinese))

[9] 吴学春,孙衣春,丁建文,等. 南水北调东线工程3个疏浚泥堆场踏勘调查及试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(4):47-50. (WU Xuechun, SUN yichun, DING Jianwen, et al. Field and experimental investigations on three reclaimed yards of dredged soil in Eastern Route of South to North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(4):47-50. (in Chinese))

[10] 杨瑞敏,徐桂中,丁建文,等. 堆场疏浚泥颗粒分选规律及机理研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2013, 43(3):639-643. (YANG Ruimin, XU Guizhong, DING Jianwen, et al. Grain sorting laws and mechanisms in reclaimed land of dredged slurries [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, (43)3:639-643. (in Chinese))

[11] 徐桂中,杨瑞敏,丁建文,等. 高含水率疏浚泥堆场颗粒分选规律现场试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2013, 43(3):634-638. (XU Guizhong, YANG Ruimin, DING Jiangwen, et al. Field experiment on grain sorting behaviors in reclaimed land of dredged slurries with high water contents [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(3):634-638. (in Chinese))

[12] US Army Engineer Waterways Experiment Station. Technical report D-77-21: sizing of containment area for dredged material [R]. Washington, D. C. :US Army Corps of Engineers, 1977.

[13] POWELL D M. Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers [J]. Progress in Physical Geography, 1998(22):11-32.

[14] 倪晋仁,曲轶众. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选模型[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2003,18(3):349-

354. (NI Jinren, QU Yizhong. Modeling of vertical segregation of solid particles in sediment-laden flow [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. A, 2003, 18(3):349-354. (in Chinese))
- [15] 曲轶众,倪晋仁,孟晓刚. 固液两相流中固体颗粒的垂直分选机理[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2003, 18(4):483-488. (QU Yizhong, NI Jinren, MENG Xiaogang. Mechanism of vertical segregation of solid particles in sediment-laden flow [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser. A, 2003, 18(4):483-488. (in Chinese))
- [16] 钱宁. 高含沙水流运动[M]. 北京:清华大学出版社, 1989.
- [17] 费祥俊,吴保生,傅旭东. 两相非均质流输沙平衡关系及挟沙力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(7):757-764.
- (FEI Xiangjun, WU Baosheng, FU Xudong. Equilibrium sediment transport relation and sediment carrying capacity of two-phase heterogeneous flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(7):757-764. (in Chinese))
- [18] 费祥俊. 高含沙水流长距离输沙机理与应用[J]. 泥沙研究, 1998(3):55-61. (FEI Xiangjun. The mechanism of long distance transport for hyper-concentrated flows and its application [J]. Journal of Sediment Research, 1998(3):55-61. (in Chinese))
- [19] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior [M]. New York:John Wiley & Sons, Inc., 1993.

(收稿日期:2016-02-29 编辑:熊水斌)

(上接第 76 页)

- [9] 明波,黄强,王义民,等. 基于改进布谷鸟算法的梯级水库优化调度研究[J]. 水利学报, 2015, 46(3):341-349. (MING Bo, HUANG Qiang, WANG Yimin, et al. Cascade reservoir operation optimization based-on improved cuckoo search [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(3):341-349. (in Chinese))
- [10] 郑慧涛,梅亚东,胡挺,等. 改进差分进化算法在梯级水库优化调度中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2013, 46(1):57-61. (ZHENG Huitao, MEI Yadong, HU Ting, et al. Improved differential evolution algorithm in the cascade reservoirs application[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(1):57-61. (in Chinese))
- [11] 钟平安,张卫国,张玉兰,等. 水电站发电优化调度的综合改进差分进化算法[J]. 水利学报, 2014, 45(10):1147-1155. (ZHONG Pingan, ZHANG Weiguo, ZHANG Yulan, et al. Comprehensive modified differential evolution algorithm for optimal operation of the hydropower station [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(10):1147-1155. (in Chinese))
- [12] 纪昌明,李继伟,张新明. 梯级水电站短期发电优化调度的免疫蛙跳算法应用研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1):29-36. (JI Changming, Li Jiwei, ZHANG Xinming. Application of immune-shuffled frog-leaping algorithm to optimized operation of cascade hydropower stations for short-term power generation [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(1):29-36. (in Chinese))
- [13] 纪昌明,李继伟,张新明,等. 基于免疫蛙跳算法的梯级水库群优化调度[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8):2125-2132. (JI Changming, LI Jiwei, ZHANG Xinming, et al. Optimal operation of cascade reservoirs based on immune-shuffled frog leaping algorithm [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8):2125-2132. (in Chinese))
- [14] 王建群,贾洋洋,肖庆元. 狼群算法在水电站水库优化调度中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3):1-4. (WANG Jianqun, JIA Yangyang, XIAO Qingyuan. Application of wolf pack search algorithm to optimal operation of hydropower station [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3):1-4. (in Chinese))
- [15] 崔东文,金波. 改进鸟群算法及其在梯级水库优化调度中的应用[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(6):4-14. (CUI Dongwen, JIN Bo. Improve bird swarm algorithm and its application in reservoir optimal operation [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(6):4-14. (in Chinese))
- [16] 崔东文. 正弦余弦算法-投影寻踪水污染物总量分配模型[J]. 水资源保护, 2016, 32(6):75-81. (CUI Dongwen. Sine cosine algorithm-projection pursuit model for water pollutant load allocation [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):75-81. (in Chinese))
- [17] 崔东文,金波. 基于 WDO-PP 模型的文山州近 10 年水资源承载力评价[J]. 水利经济, 2016, 34(6):43-49. (CUI Dongwen, JIN Bo. Evaluation of carrying capacity of water resources of Wenshan Prefecture in latest 10 years based on WDO-PP model [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2016, 34(6):43-49. (in Chinese))
- [18] 崔东文. 文山州近 10 年水资源利用效率评价 SLC-PP 模型及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2):129-136. (CUI Dongwen. Projection pursuit model for evaluation of water use efficiency based on soccer league competition algorithm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2):129-136. (in Chinese))
- [19] 吴学文. 考虑生态的多目标水电站水库混沌优化调度研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011.
- [20] MIRJALILI S, LEWIS A. The whale optimization algorithm [J]. Advances in Engineering Software, 2016, 95:51-67.

(收稿日期:2016-05-20 编辑:熊水斌)