



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.022

司鹏飞, 牛小静, 余锡平. 跨/穿河建筑物上游河道采砂安全距离[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 143-148. SI Peng fei, NIU Xiao jing, YU Xi ping. Safe distance for upstream sand mining from river crossing structures[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 143-148. (in Chinese)

## 跨/穿河建筑物上游河道采砂安全距离

司鹏飞, 牛小静, 余锡平

(清华大学 水利水电工程系/水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**河道采砂会对附近跨/穿河建筑物的安全造成较大影响。针对实际工程中跨/穿河建筑物周边采砂安全距离的确定问题, 搜集整理了国内外对于结构物附近采砂活动的相关规范, 对采砂坑迁移及其对河床影响进行了系统地分析和综述, 并结合前人的相关理论研究及物理实验研究结果, 提出了计算跨/穿河建筑物上游安全采砂距离的公式。该公式可根据水流、泥沙及采砂坑尺寸等特征参数估算采砂坑的迁移影响范围, 进而根据实际工程情况确定跨/穿河建筑物周边的安全采砂范围。该公式与现有的实际河道采砂坑迁移观测结果进行了对比验证, 结果良好。最后, 利用该公式对安阳河河段的倒虹吸工程上游河道采砂安全距离进行了实例分析, 为规范工程所在河流上的采砂行为提供参考。

**关键词:** 跨/穿河建筑物; 采砂; 冲刷; 迁移规律; 安全距离

**中图分类号:** TV8   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0143-06

### Safe distance for upstream sand mining from river crossing structures

SI Peng fei, NIU Xiao jing, YU Xi ping

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Sand mining in a river is a huge threat to the safety of nearby river crossing structures. To determine how far a sand mining project would threaten the nearby river crossing structures, we firstly reviewed the standards about sand mining. Based on theoretical research and physical experiments on sand pit migration and its impact on riverbed, this paper proposed an empirical formula to determine the safe distance for upstream sand mining from river crossing structures. Based on hydraulic parameters, characteristics of sediment, and the size and geometry of the pit, the proposed formula can calculate the migration of sand pit, and then determine the safe distance. This formula was verified using the observation data in an actual river and the results were acceptable. Finally, the formula was applied to determine the safe distance for the inverted siphon project in Anyang River as a case study, and to provide a reasonable guide for sand mining activities along the river.

**Key words:** river crossing structures; sand mining; scour; migration pattern; safe distance

南水北调中线工程途经长江、淮河、黄河、海河四大流域, 与多条河流存在交叉, 沿线有众多跨(穿)河建筑物。跨/穿河建筑物附近的河道采砂严重影

响建筑物的稳定性, 进一步可能危害整个输水工程的安全。据有关文献报道, 南水北调中线某倒虹吸工程河段, 由于过度采砂原本平坦开阔的天然河道,

收稿日期: 2016-04-18   修回日期: 2017-01-16   网络出版时间:  
网络出版地址:

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAB07B07)

Funds: National Science and Technology Support Program(2015BAB07B07)

作者简介: 司鹏飞(1992-), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事水利工程方面研究。E-mail: spf14@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 牛小静(1981-), 女, 陕西人, 副教授, 博士, 主要从事水利工程方面研究。E-mail: nxj@tsinghua.edu.cn

已经形成连续的大坑,最大深度可达 7 m 并且局部岸坡塌陷严重,距离倒虹吸管身段最近不足 50 m<sup>[1]</sup>。滥采乱挖形成的采砂坑影响河流水沙动力特征,危害临近建筑物安全。而采砂坑在河道水沙动力作用下迁移演变,这使得即使其与跨/ 穿河建筑物相距一段距离也可能形成安全隐患。采砂活动对跨/ 穿河建筑物的冲刷影响已经引起了学者的广泛关注,但大多数研究集中于采用数值模型或物理实验针对理想问题或者特定河道研究已有采砂坑对河床形态、泥沙运输的改变<sup>2,5]</sup>以及采砂对桥墩的冲刷影响<sup>6,10]</sup>。对于距离多远范围内的采砂坑会对跨/ 穿河建筑物造成显著影响,并没有太多研究报道。本文收集整理了国内外对于结构物附近采砂活动的规范要求,并通过对采砂坑附近流动形态以及采砂坑的迁移特征的调研分析,基于前人对采砂坑迁移及其对河床影响的相关理论研究及物理实验研究结果,提出了估算跨/ 穿河建筑物上游安全采砂距

离的经验公式,可为管理和规范交叉河流采砂提供参考。

## 1 目前国内外采砂相关规范要求

砂石作为重要的建筑材料,需求量巨大,国内外河道采砂的情况均很普遍,但目前缺乏有关跨/ 穿河建筑物附近采砂安全距离的具体规范标准和计算方法。在国内外关于河道采砂的现有相关文件中,对跨/ 穿河建筑物周边的采砂行为常是原则性的规定。部分文件中规定了安全距离的数值,也各不相同,有时相差 1~ 2 个数量级。国内外各地对于安全采砂的规范要求详见表 1,可以看出国内外对于采砂安全距离并没有明确的计算公式,只是宏观地给出了粗略的标准。因此,根据不同河道的具体情况给出相应跨/ 穿河建筑物安全采砂距离的计算公式,对保障实际工程中跨/ 穿河建筑物的安全具有重要意义,是亟待解决的问题。

表 1 国内外采砂相关标准规范

Tab. 1 Domestic and international standards for sand mining

国家(地区)	规范要求	信息来源
中国大陆	南水北调相关工程中重点跨/穿河建筑物保护范围上游 500~1 000 m,下游 1 000~3 000 m;长江下游段跨/穿河建筑物保护范围上游 100 m,下游 50 m	《黄河流域省区干支流重要河道采砂管理规划》 《长江中下游干流河道采砂规划上海段实施方案》
中国台湾	桥墩 500 m 范围内禁止采砂 <sup>[11]</sup>	Tung & Yeh (1993)
印度	采砂坑限制最大深度 3 m,距两岸护堤最少 3 m	印度地质勘测局《河道采砂影响和系统科学方法》
马来西亚	采砂坑限制最大深度 1.5 m,距两岸护堤最少 10 m <sup>[12]</sup> ,距重点跨河建筑物至少 1 000 m	马来西亚《河道采砂管理规范》
Victoria 市(加拿大)	建议采砂坑深度不超过 2 m,面积不超过 2 000 m <sup>2</sup> <sup>[12]</sup>	Victoria 市流域管理局
Kansas 州(美国)	采砂坑限制最大长度 1.5 英里(2 414 m),上游采砂坑距坝址最少 750 英尺(228.6 m),距桥墩、取水建筑物最少 500 英尺(152.4 m);埋深 10 英尺(3 m)以内的管线,500 英尺范围内禁止采砂	《Kansas 河商业采砂规范》

## 2 采砂坑对河道的影响及迁移特征

由于水流、泥沙及不断变化的采砂坑边界的相互作用,河道中采砂坑附近的流场会呈现较复杂的流态,

进而对河床形态产生一系列的影响。本文考虑简化的矩形采砂坑情况,参照代尔夫特水力研究所(DHL)的采砂坑实验设置<sup>[13]</sup>,首先通过三维数值模拟对采砂坑周围的流场进行了分析,具体的参数设置见表 2。

表 2 采砂坑附近流场数值模拟参数设置

Tab. 2 Parameter settings for numerical simulation of flow field around sand pit

	流量 $Q / (m^3 \cdot s^{-1})$	水深 $h / m$	流速 $U / (m \cdot s^{-1})$	弗劳德数 $Fr$	砂坑深度 $H / m$	砂坑长度 $L / m$	砂坑宽度 $W / m$
(a)	0.4	0.5	0.5	0.23	0.3	4	上底 0.6, 下底 0.4
(b)	2.0	0.5	2.4	1.08	0.3	4	上底 0.6, 下底 0.4

由图 1(a)、(b)采砂坑所在纵断面模拟结果可知,当水流流经采砂坑区域,流动会发生分离,采砂坑上下游缘口处的流速均会增加,坑内缘口附近会形成回流,特别是当局部水流处于急流状态(即弗劳德数  $Fr > 1$ )时,采砂坑所在断面会产生明显的壅水现

象。由图 1(c)、(d)采砂坑所在横断面模拟结果可知,采砂坑内部会产生一定强度的横向次生流,沿两岸边坡也观察到微弱的横向流,同时采砂坑的存在也会对所在断面的平面流场产生一定的影响,模拟得到的现象符合前人的实测资料以及物理模型中的

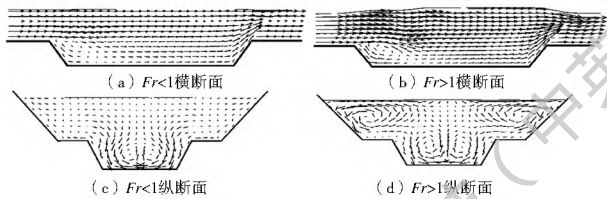


图1 采砂坑断面水流流态  
Fig. 1 Flow pattern in a sand pit

相关结论<sup>[14-15]</sup>。由于河床上有了采砂坑的影响,下游缘口水面会向下跌落呈弯曲线,水流运动明显加速,水流的挟沙能力会有显著提高,冲刷能力加强。实际中采砂坑的存在会引发河床的自动调整,即冲刷河床的突出部位而回淤低洼处,在此过程中采砂坑断面不断展宽、范围不断扩大。这一调整过程在洪水的作用下会明显加快,造成采砂坑发生快速、大范围的迁移运动,可能危及堤岸及跨/穿河建筑物的安全。

根据河道的水流条件和采砂坑的几何形态等不同要素,采砂坑会沿河道向上、下游迁移<sup>[16-17]</sup>。在采砂坑迁移的过程中,一方面由于采砂坑所在位置水流断面较大,流速较小,所以来自上游的推移质和悬移质泥沙会在此沉积,使采砂坑趋于消失;另一方面由于河道各处挟沙力的调整,因此会使采砂坑下游边坡发生冲刷,进一步促进了采砂坑的迁移。根据以往的物理实验和现场观测结果,河道中采砂坑的变形和迁移一般可以分为两个阶段,从采砂坑开始变形迁移开始,到采砂坑的上边缘迁移到初始采砂坑的下边缘为第一阶段,这一阶段主要受对流作用控制,沙坑最大深度基本保持不变<sup>[18-19]</sup>,如图2(a)所示;从第一阶段结束开始到采砂坑最后的迁移消失为第二阶段,这一阶段主要受扩散作用控制,采砂坑的深度会随着迁移过程中泥沙的不断淤积而逐渐变小,见图2(b)。

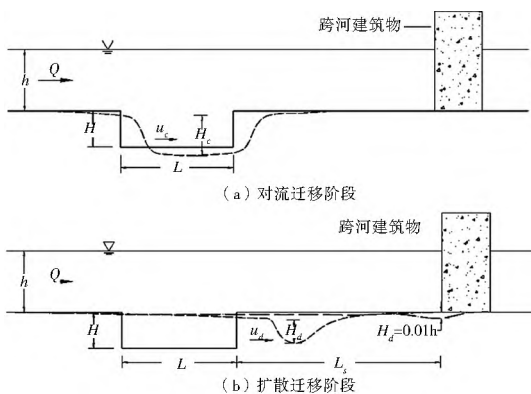


图2 采砂坑迁移阶段及安全采砂距离示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pit migration and safe mining distance

众多因素的影响。假设采砂坑为标准矩形采砂坑,则采砂坑的几何形态参数包括宽度( $W$ )、长度( $L$ )和深度( $H$ );考虑顺直河道的情况,水力要素包括水深( $h$ )、上游摩阻流速( $u^*$ );另外还包括泥沙的属性参数,如泥沙的密度( $\rho_s$ )、中值粒径( $D_{50}$ )。另外水流的粘性、河道纵向坡度也会影响采砂坑的迁移过程。相关研究结果<sup>[18-19]</sup>表明采砂坑在对流阶段和扩散阶段的迁移速度都可以近似为常数,采砂坑的最大冲刷深度随水流挟沙力的增加而减小,有效迁移长度随水流挟沙力的增加而增加。

### 3 跨/穿河建筑物上游安全采砂距离的确定

#### 3.1 安全采砂距离的经验公式与验证

目前在跨/穿河建筑物的设计规范中,并没有考虑采砂对跨/穿河建筑物的冲刷影响,因此为保证跨/穿河建筑物的稳定性安全,要确保采砂坑的运移不会影响到跨/穿河建筑物所在断面,即采砂坑的存在只改变跨/穿河建筑物断面的泥沙来量条件,水位及相应的水力要素(如流速、挟沙力等)认为基本不变。这种情况下便能满足跨/穿河建筑物相关设计规范中的前提条件,使得跨/穿河建筑物不会因采砂坑的存在而过度冲刷。通常认为当采砂坑的深度小于当地水深的1%时,即可忽略采砂坑对该断面河床的冲刷影响<sup>[14]</sup>,见图2(b),即满足  $H_s < 0.01h$ ,此时采砂坑迁移所经历的总时间为  $T_e$ 。目前对于采砂坑迁移普遍规律的定量研究十分匮乏,最具应用价值的工作是 Lee 在 1993 年、1995 年分别针对均匀沙和非均匀沙河床的采砂坑迁移进行了一系列物理实验<sup>[19-20]</sup>。经过实验数据拟合得到了采砂坑的迁移速度、最大冲刷深度和对流阶段迁移距离等与水力因素、采砂坑基本参数间的经验关系式,各无量纲化之后的特征参数适用范围见表3。

表3 物理实验参数适用范围<sup>[19]</sup>

Tab. 3 Ranges of applicability of experimental parameters

特征变量	最小值	最大值
$Fr$	0.4	0.74
$u_s / u_{s,c}$	1.00	1.59
$H / h$	0.36	0.87
$L / h$	3.51	7.83

采砂坑的迁移发展(包括最大深度、迁移距离)主要受水力、泥沙、采砂坑尺寸这几方面因素共同影响。对于采砂坑迁移这样一个比较复杂的现象,由于众多影响参数都具有较大的不确定性,因此目前较多研究采用量纲分析的方法来分析解释采砂坑的

采砂坑的迁移会受到水流条件和采砂坑性质等

迁移规律, 具体的理论推导详见 Lee 等人的采砂坑迁移实验<sup>19,20</sup>。通常河床的最大冲刷深度出现在采砂坑对流迁移阶段结束时, 即采砂坑的上边缘迁移到初始采砂坑的下边缘, 基于 Lee 对采砂坑迁移的实验观测数据, 无量纲化之后的采砂坑最大冲刷深度可表示为:

$$H_{\max}/h = 1.657(u^*/u_c^*)^{-1.085} (H/h)^{1.117} \quad (1)$$

式中:  $u^*$  表示采砂坑上游的摩阻流速;  $u_c^*$  表示临界摩阻流速, 可通过希尔兹曲线确定。  $u^*/u_c^*$  表示河床剪切应力与泥沙起动应力的比值, 反映了不同水流条件下泥沙的运动强度。当采砂坑开始扩散迁移时, 采砂坑的最大冲刷深度  $H_d$  随时间不断地变化,  $H_d$  可利用式 (2) 计算, 其中  $T_c$  表示采砂坑完成对流迁移阶段所需时间:

$$H_d/H_{\max} = \exp\left[-\left(\frac{t-T_c}{T_c}\right)\left(\frac{u^*-u_c^*}{u_c^*}\right)^{1.5}\right] \quad (2)$$

无量纲化之后的采砂坑对流阶段迁移速度和扩散阶段迁移速度  $u_c$ 、 $u_d$  可由式 (3)、式 (4) 分别给出, 在不考虑采砂坑横向迁移的情况下, 采砂坑的长度和深度无量纲参数 ( $H/h$ ,  $L/h$ ) 反映了采砂坑的尺寸影响因素。其中对流阶段结束时采砂坑下移距离  $L_c/h = 8.690(u^*/u_c^*)^{0.852} (H/h)^{0.734} (L/h)^{0.592}$ :

$$u_c/u_c^* = 1.013 \times 10^{-2} (u^*/u_c^* - 1)^{3.163} (H/h)^{-0.582} (L/h)^{0.740} \quad (3)$$

$$u_d/u_c^* = 8.570 \times 10^{-7} (u^*/u_c^* - 1)^{3.196} (H_{\max}/h)^{-3.550} (L_c/h)^{3.119} \quad (4)$$

本文综合 Lee 对各研究变量的拟合经验公式, 提出对于跨/穿河建筑物上游的采砂安全距离  $L_s$  的经验计算公式:

$$L_s = u_d(T_e - T_c) = 7.274 \times 10^{-4} (H_{\max}/h)^{-3.550} (H/h)^{2.289} (L/h)^{1.846} u_c^* (u^*/u_c^* - 1)^{3.196} (u^*/u_c^*)^{2.657} (T_e - T_c) \quad (5)$$

其中  $T_c$  可由式 (3) 先计算得到  $u_c$ , 进而利用式  $T_c = L/u_c$  近似求得;  $T_e$  根据式 (2), 当  $H_d = 0.01 h$  时, 求出对应时间  $t$  的值。由式 (5) 可知, 跨/穿河建筑物周围采砂安全距离的确定与采砂坑的原始尺寸, 该河段水流条件及采砂坑迁移速度相关。

针对得出的安全采砂距离公式, 本文采用 Neyshabouri<sup>[21]</sup> 的实地观测结果进行简单地验证。观测河道位于伊朗西北部, 采砂坑长 1.2 m, 宽 2 m, 深 1.2 m, 当地水深 0.6 m, 流速 2 m/s, 相关参数设置、计算结果以及观测到的实际数据详见表 4。由于观测期较短, 并没有观测到采砂坑的整个迁移过程 (即  $H_d = 0.01 h$ ), 所以计算得到的采砂坑迁移距离大于观测值 (21 d), 通过对比可知, 由式 (5) 所得

的采砂坑迁移时间和迁移距离估算结果与实际观测值相比还是可以接受的。这在一定程度上反映了该计算公式在实际河流中应用的可行性。

表 4 采砂坑迁移计算结果与实际观测数据

Tab. 4 Calculation results and observation data of mining pit migration

	L/m	W/m	H/m	h/m	D <sub>50</sub> /m	u <sup>*</sup> /u <sub>c</sub> <sup>*</sup>	T <sub>c</sub> /d	L <sub>s</sub> /m
计算值	1.2	2	1.2	0.6	0.018	1.11	11.3	4.14
实际值	1.2	2	1.2	0.6	0.018	1.11	10~17	2(21d)

### 3.2 实际工程安全采砂距离计算分析

安阳河渠道倒虹吸是南水北调中线总干渠的重要节点工程之一, 位于河南省安阳市殷都区西梁村及南士旺村之间的安阳河上, 为总干渠下穿安阳河道的河渠交叉建筑物, 承担流量控制、检修并向总干渠下游输水的任务。河道采砂是影响安阳河倒虹吸安全的一个重要因素。针对安阳河内倒虹吸实际工程情况, 由地质勘测资料得知倒虹吸建筑物所处河段河底高程 77.0 m, 20 年一遇 (5%) 洪水流量为 1 680 m<sup>3</sup>/s, 对应水位为 82.99 m; 50 年一遇 (2%) 洪水流量为 2 390 m<sup>3</sup>/s, 对应水位为 84.14 m; 100 年一遇 (1%) 洪水峰量为 3 570 m<sup>3</sup>/s, 对应水位为 85.7 m。交叉河段为宽浅河道, 河床以中粗沙为主, 局部有卵石滩, 泥沙粒径近似取为 25 mm<sup>[22]</sup>。假设采砂坑为标准矩形, 利用上文所得经验计算公式 (5), 计算分析不同水深条件和采砂坑尺寸设置情况下的采砂安全距离。假设采砂河段为均匀流, 其中临界摩阻流速  $u_c^*$  可利用泥沙粒径等资料根据希尔兹曲线查得, 取值为 0.142;  $u^*$  的计算利用式  $u^* = \sqrt{ghJ}$  求得, 其中  $J$  为安阳河交叉河段的平均坡降, 取为 1/2 500<sup>[23]</sup>, 具体参数设置与计算结果详见表 5。

根据表 5 的计算结果, 可以初步得知安阳河段的水力特征参数及一般采砂坑几何参数基本处于经验公式 (5) 的涵盖范围内。由于不同水流条件和采砂坑几何尺寸设置, 采用经验公式 (5) 计算所得的安阳河段采砂安全距离范围为 283.9~2 821.4 m, 基本符合现行采砂实践中的一般要求, 因此式 (5) 作为工程实践中安全采砂距离确定的经验公式是具有一定指导参考价值的。从计算结果对比分析可知, 当水流条件一定时, 采砂坑长度是决定迁移距离的关键因素, 坑长的增加会较大程度地增加采砂坑的迁移速度和迁移时间, 加大采砂坑的影响范围; 而采砂坑的初始深度对采砂坑沿河道纵向的迁移距离影响较小, 但由公式 (2) 可知, 采砂坑迁移过程中的最大深

表 5 参数设置及采砂坑安全距离计算结果

Tab. 5 Parameter settings and calculation results of safe mining distance

	$Q / (m^3 \cdot s^{-1})$	$h / m$	$Fr$	$L / m$	$H / m$	$L / h / m$	$H / h / m$	$u_* / u_{*c}$	$L_s / m$
1	1 680	6.0	0.398	30	2.5	5.00	0.42	1.08	388.7
°	1 680	6.0	0.398	50	2.5	8.33	0.42	1.08	1091.3
»	1 680	6.0	0.398	80	2.5	13.33	0.42	1.08	2821.4
¼	1 680	6.0	0.398	30	3	5.00	0.50	1.08	374.9
½	1 680	6.0	0.398	30	2	5.00	0.33	1.08	404.8
¾	1 680	8.7	0.398	30	2.5	3.45	0.29	1.08	283.9
ı	2 390	7.1	0.402	30	2.5	4.20	0.35	1.18	439.4
Å	3 570	8.7	0.408	30	2.5	3.45	0.29	1.3	615.3

注: ¾ 在 ½ 的基础上只改变水深条件

度会随初始深度的增加而增加,因此会对河道两岸的稳定性造成较大影响,这也是在现行采砂工程中限制采砂深度的主要原因。当保持采砂坑尺寸不变时,采砂坑的迁移影响范围主要由摩阻流速与当地水深共同决定,当采砂坑周围水流的摩阻流速确定的情况下,水深的增加会减小采砂坑的影响范围,有利于跨/穿河建筑物的安全稳定。但在实际河流中,当地水深与摩阻流速之间相互影响,水深的增加有利于抑制采砂坑的迁移,而摩阻流速的增加又会加速采砂坑的迁移过程,加大迁移影响范围。因此本文分别针对安阳河倒虹吸交叉河段不同重现期流量情况进行分析,结果表明流量越大,即水深和摩阻流速共同增加的情况下,采砂坑的迁移范围会增加,安全采砂距离也会相应增大。

#### 4 结论

本文综述了采砂坑对河道的影响、采砂坑的迁移特征以及跨/穿河建筑物上游安全采砂距离的研究现状,基于前人对采砂坑迁移及其对河床影响的相关理论研究及物理实验研究结果,针对工程中跨/穿河建筑物周边采砂规范的实际问题,提出了计算跨/穿河建筑物上游安全采砂距离的经验公式,并根据现场观测数据进行了验证。针对实际河段的水流、泥沙条件及采砂坑的具体布置情况,可通过公式计算得到采砂坑的影响范围,进而根据实际工程情况确定跨/穿河建筑物周边的安全采砂范围。本文提出的经验公式有利于指导采砂工程的有序规范进行,以保障跨/穿河建筑物的安全稳定。

#### 参考文献(References):

[1] 严勇. 采砂河道河渠交叉建筑物防洪安全复核与处理[J]. 南北水调与水利科技, 2015(z02): 1-4. (YAN Yong. Design research about flood prevention safety review and treatment measures of river graff cross building of riverway in relation to

sand mining[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(z02): 1-4. (in Chinese))

[2] Li J Z, Qi M L. Local scour induced by upstream riverbed level lowering[J]. Natural Hazards, 2015, 77(3): 1811-1827. DOI: 10.1007/s11069-015-1677-y

[3] Chen D, Liu M F. One and two dimensional modeling of deep gravel mining in the Rio Salado[C]. // Starrett S. Proceedings world environmental and water resources congress. ASCE, Kansas City. 2009: 3462-3470. DOI: 10.1061/41036(342)350

[4] Wu W M, Wang S S Y. Simulation of morphological evolution near sediment mining pits using a FD mixed regime flow and sediment transport model[C]. // World Environmental and Water Resources Congress. 2008: 10. DOI: 10.1061/40976(316)473

[5] Yanmaz A M, Cicekdog O. Channel Mining induced stream bed instability around bridges[J]. Watershed Management and Operations Management, 2000, 1-8. DOI: 10.1061/40499(2000)15

[6] Gob F, Houbrechts G, Petit F. River dredging, channel dynamics and bedload transport in an incised meandering river (the River Semois, Belgium). River Research and Applications 21. 7 (2005): 791-804. DOI: 10.1002/rra.883

[7] 吴济栋. 沙坑演变对桥下河床冲刷影响研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011. (WU Jidong. The influence of a dredged hole evolution in riverbed on the scour under bridge[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese))

[8] 李健. 河道采砂影响的数值模拟研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2008. (LI Jian. Numerical simulation on river sand extraction effect[D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2008. (in Chinese))

[9] 李健, 杨文俊, 陈辉. 不同条件下矩形沙坑影响的数值模拟对比研究[J]. 泥沙研究, 2009(6): 74-80. (LI Jian, YANG Wenjun, CHEN Hui. Numerical simulation on effect of rectangular sand pit on channel bed variation[J]. Journal of Sediment Research, 2009(6): 74-80. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0468-155X.2009.06.012

[10] 齐梅兰, 孟国清. 河道采砂对大桥基础安全影响研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2006, 20(6): 750-754. (QI Meilan, MENG Guoqing. Study on the effect of sandpits at riverbed on bridge foundation safety[J]. Journal of Hydrodynamics:

- Ser. A, 2006, 20(6): 750-754. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 4874. 2005. 06. 010
- [11] Tung Y K, Yeh K C. Evaluation of safety of hydraulic structures affected by migrating pits[J]. Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1993, 7(2): 131-145. DOI: 10. 1007/BF01581421
- [12] Padmalal D, Maya K. Impacts of River Sand Mining[M]. Sand Mining. Springer. 2014: 31-56. DOI: 10. 1007/978-94-017-9144-1
- [13] Van Rijn L C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering 112. 5 (1986): 541-559. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-950X(1986) 112: 5(541)
- [14] Chen D. Modeling channel response to instream gravel mining [J]. INTECH Open Access Publisher, 2011. DOI: 10. 5772/21348
- [15] 毛野. 初论采沙对河床的影响及控制[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(4): 92-96. (MAO Ye. A study on the effect of sand gravel extraction on riverbed and its control[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2000, 28(4): 92-96. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000 1980. 2000. 04. 019
- [16] Jang C L, Shimizu Y, Lee G H. Numerical simulation of the fluvial processes in the channels by sediment mining [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(3): 771-778. DOI: 10. 1007/s12205-012-0608-7
- [17] Wishart D, Warburton J, Bracken L. Gravel extraction and planform change in a wandering gravelbed river: The River Wear, Northern England [J]. Geomorphology, 2008, 94(1): 131-152. DOI: 10. 1016/j. geomorph. 2007. 05. 003
- [18] Azar M G, Namaee M R, Rostami M. Evaluating a numerical model to simulate the variation of river bed due to mining pit based on experimental data[J]. Asian J Appl Sci, 2012, 5(3): 154-163. DOI: 10. 3923/ajaps. 2012. 154. 163
- [19] Lee H Y, Fu D T, Song M H. Migration of rectangular mining pit composed of uniform sediments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993, 119(1): 64-80. DOI: 10. 1061/(ASCE) 0733-9429(1993) 119: 1(64)
- [20] Lee H Y, Chen S C. Migration of rectangular mining pit composed of nonuniform sediments[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 1996, 19(2): 255-264. DOI: 10. 1080/02533839. 1996. 9677785
- [21] Neyshabouri S, Farhadzadeh A, Amini A. Experimental and field study on mining pit migration[J]. International Journal of Sediment Research, 2002, 17(4): 323-331.
- [22] 王勤香, 何江. 南水北调中线与安阳河交叉工程河段概化模型[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 129-31. (WANG Qir xiang, HE Jiang. Conceptual model for the crossover section between the middle route of the south to north water transfer project and Anyang river [J]. Yangtze River, 2007, 38(6): 129-31. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001 4179. 2007. 06. 049
- [23] 李舒瑶, 赵志贡. 南水北调跨安阳河倒虹吸工程对河道的影响[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(3): 43-46. (LI Shuyao, ZHAO Zhigong. The influence on stream channels of the inverted siphon project across the Anyang River in the South Water to North Project [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(3): 43-46. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-3317. 2007. 03. 011