

# 采砂活动影响下的河道水面比降变化

田雨欣, 陈界仁

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:** 受河道无序采砂的影响, 局部河段水流流态变得复杂, 从而影响船舶通航条件。根据实测河道地形资料及水文资料, 分析了赣江下游樟树至外洲河道采砂后局部河床最大比降的历年变化, 并运用一维水流数学模型计算了历年不同流量的河道水面线变化, 分析了水面线局部最大比降与河床比降的关系。结果表明, 受河道采砂影响, 局部水面比降明显增加; 局部水面最大比降与河床比降密切相关; 随着流量的增加, 水面最大比降减小, 水面比降受河床的影响程度减弱。

**关键词:** 河床比降; 水面比降; 河道采砂; 数学模型

**中图分类号:** TV 85    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0704-04

## Water surface slope variation under sand extraction activity in the Ganjiang River

TIAN Yur xin, CHEN Jie ren

(College of Water conservancy and hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Due to the unordered sand extraction, the local flow pattern becomes more complex and the navigation conditions are effected. According to the measured river terrain data and hydrological data, the annual variations of maximum riverbed slope have been analyzed for the river reach between Zhangshu to Waizhou in the downstream of Ganjiang River after sand extraction. The river water surface variation is calculated using the one dimensional mathematical flow model under different flow discharge conditions, and the relationship between the local maximum water surface slope and riverbed slope is analyzed. The results show that local water surface slope increases significantly and local maximum water surface slope is closely related to riverbed slope due to the effects of sand extraction, and the maximum water surface slope decreases and the effects of riverbed on water surface slope weaken with the increasing of river flow discharge.

**Key words:** riverbed slope; water surface slope; sand extraction in the river channel; mathematical model

国内外关于河道采砂对河床形态及河床演变的影响方面已有一些研究<sup>[1-3]</sup>。黄才安<sup>[4]</sup>采用微尺度动床河工模型试验的方法研究了顺直、弯道与分汊等典型河道不同部位进行大规模采砂对河床局部变形及对河段变形的极限影响, 认为采砂坑的发展是采砂坑内及其附近的水流与采砂坑边界相互作用的结果。王国栋等<sup>[5]</sup>通过归类分析和总结发现, 大规模的河道采砂不仅破坏天然河床结构, 改变河道正常的物质运输过程和冲淤规律, 干扰河流自然演变, 威胁河道的行洪、通航、自身稳定, 而且会对相关涉水建筑物及河流生态系统产生影响。乔飞等<sup>[6]</sup>利用一维河流河床冲淤数学模型对东江干流岭下站至博罗站河段河床冲淤变化进行了分析和预测, 认为人工采砂直接影响研究河段河床冲淤变化形态, 对河道通航和引水工程等都有很大的影响。关于采砂活动对

河道水位的影响问题, 贾良文<sup>[7]</sup>通过对东江惠阳站和博罗站水位变化进行分析, 发现低水位较大幅度下降的主要原因是河床大量采砂导致河槽容积增大、河床高程明显降低; 而河床地形变化引起的三角洲河网区潮汐动力增强, 则是感潮河段低水位上升的主要原因。韩龙喜等<sup>[8]</sup>采用河网水动力数学模型计算了珠江三角洲东江流域河床采砂后河道水位变化及其对环境的影响, 分别预测分析了不同水平年在丰水期、枯水期两种代表水情下的水系水位、流量变化情况。肖洋<sup>[9]</sup>采用 fluent 软件计算了概化渠道中, 考虑采砂坑不同长度、宽度及深度条件下, 水位降低的变化过程。张强等<sup>[10,11]</sup>以长江天兴洲河段为例, 应用平面二维水沙数学模型, 研究了采砂区布置和采砂深度对分汊河道的影响。

总体来说, 以往关于采砂位置变化引起的河床比降变

收稿日期: 2014-08-26    修回日期: 2014-12-15    网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.1126.009.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB403303)

作者简介: 田雨欣(1989-), 男, 内蒙古人, 主要从事水力学及河流动力学方面研究。E-mail: 327840300@qq.com

通讯作者: 陈界仁(1964-), 男, 江苏靖江人, 教授, 博士, 主要从事河流模拟及泥沙工程、流域产沙数学模型研究。E-mail: ges008@126.com

化、河道水面线或者水面比降的变化影响研究相对较少。本文依据实测河道地形、水文等资料,分析河道采砂后的河床变化及水面线变化,并采用一维水流数学模型计算方法,计算河床采砂后不同流量级的水面线变化,分析水面比降的演变,并考虑不同流量条件下的水面比降集中程度及变化,分析采砂对河道水动力学条件变化。

### 1 一维水流数学模型验证

一维非恒定流基本方程组

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{n^2 Q^2}{A^2 H^{4/3}} \right) = 0 \tag{2}$$

式中:  $A$  为断面过水面积;  $Q$  为流量;  $Z$  为水位;  $n$  为断面平均水深;  $n$  为曼宁糙率系数;  $g$  为重力加速度;  $t$  为时间坐标;  $x$  为空间坐标。

一维恒定水流数学模型采用有限差分法对基本方程进行离散求解,模型计算采用的边界条件是上游进口给定流量,下游出口边界为水位。

模型验证计算河段为赣江下游樟树至市汊河段,河段长 55.4 km,共布置计算断面 69 个,设计水位下各断面的水面宽为 305.1~1 305.3 m,平均值为 572.2 m,各断面过水面积为 1 217~9 853 m<sup>2</sup>,平均值为 2 754 m<sup>2</sup>。顺直河段断面形态为近似抛物型或矩形,分汊河段为近似 W 型。对樟树水文站流量为 500 m<sup>3</sup>/s(2011 年 12 月)时的实测水面线进行模型验证,验证计算中根据水位确定糙率值为 0.024。图 1 为河段沿程计算水面线与实测结果比较图,可见计算水位与实测水位偏差一般小于 0.04 m,最大不超过 0.06 m,满足内河航道整治技术规程的要求。

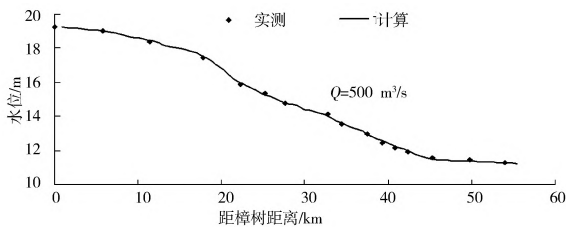


图 1 赣江水面线验证

Fig. 1 Verification of water surface in the Ganjiang River

### 2 采砂引起的河床比降及水面线变化

樟树水文站至南昌市外洲水文站河段为赣江下游,属冲积平原河道,河段全长 92 km,河道顺直微弯,弯曲系数约为 1.1~1.3,河槽宽浅,平面形态多为莲藕状(见图 2),两岸有宽阔的河漫滩。枯水河宽约为 350~1 000 m,最大为 1 300 m,最小为 280 m;洪水河宽约为 700~1 400 m,最大为 3 000 m,最小为 640 m。本河段河漫滩由细沙组成,洪水时滩面水深在 3~6 m。樟树至南昌外洲站河段的河床长期受水流作用,岸线基本稳定。全河段进口处有樟树水文站,出口处有外洲水文站,中间段有丰城和市汊水位站。

依据 2003 年、2008 年和 2011 年不同年份的实测河道地形资料,分析樟树至外洲河段河床深泓线的沿程变化情况,

结果见图 3。

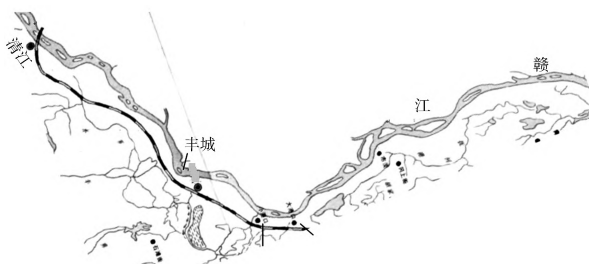


图 2 赣江下游河道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of downstream channel of the Ganjiang River

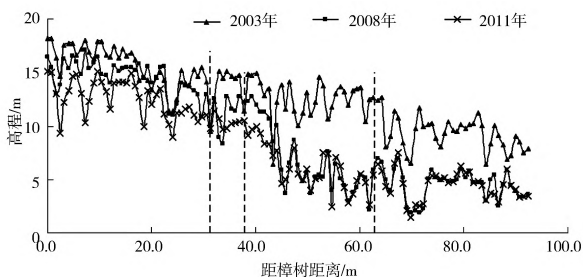


图 3 樟树至外洲河段深泓线变化

Fig. 3 Variation of thalweg in the river reach between Zhangshu and Waizhou

根据 2003 年、2008 年和 2011 年河道地形资料分析,2003 年河道局部河床最大比降为 1.56%,出现在市汊下游约 8 km 附近。2003 年至 2008 年河床的高程普遍下切,在樟树水文站下游 45 km 开始,河床深泓下降幅度很大,下降值在 2.7~10.5 m 之间,在龙头山下约 6 km 处附近形成陡坎;在 1.6 km 河段长度内,深泓高程从 10.08 m 下降至 3.68 m,局部河床比降达 4%。从 2008 至 2011 年,樟树至小港口河段河床下切,最大下切幅度为 6.8 m;小港口至外洲河段河床变化较小。在丰城大桥上游附近形成陡坎,局部河床比降为 1.87%。据此分析,樟树至外洲河段 2003 年至 2008 年间的采砂活动主要位于丰城以下至外洲河段,2008 年后主要集中在樟树至龙头山河段,采砂有向上游发展的趋势。根据樟树与外洲水文站实测输沙量与河床冲淤量分析,总冲刷量中输沙量引起的冲刷量占 6%,其余 94% 是采砂引起的<sup>[12]</sup>。

考虑下游边界水位不变,依据 2003 年、2008 年和 2011 年河道地形,计算樟树至外洲河段的设计流量对应的水面线变化,结果见图 4。

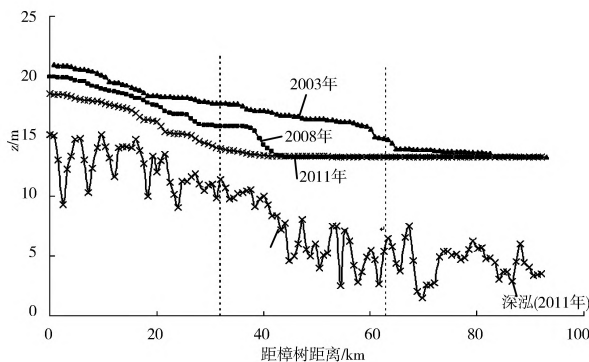


图 4 设计流量时不同年份的水面线变化对比

Fig. 4 Comparison of water surfaces in different years under design flow condition

由图 4 可见, 由于河道地形条件变化, 樟树下游河段设计流量的水面线发生明显下降变化, 2008 年较 2003 年水位下降最大值 3.44 m, 出现在大港口附近, 在樟树水位下降了 1.02 m; 2011 年较 2008 年水位最大下降值为 2.23 m, 发生在龙头山附近, 在樟树站水位下降了 1.43 m。

计算分析 2003 年、2008 年和 2011 年三年设计流量的水面线变化: 2003 年樟树至外洲河段水面落差为 7.69 m, 平均比降为 0.083‰, 市汊河段出现明显的水位陡降, 2.4 km 河段内水位落差达 0.85 m, 局部水面比降达 0.353‰。至 2008 年, 樟树至外洲河段水面落差为 6.70 m, 平均比降为 0.072‰, 在龙头山下附近游的 4.8 km 河段内水位落差为 2.28 m, 水面比降达到 0.475‰, 水位比降较大。在 2011 年, 樟树至外洲河段水面落差为 5.67 m, 平均比降为 0.061‰, 在樟树下游约 20 km 附近河段长度 2.4 km 内, 水位落差为 0.97 m, 局部水面比降值为 0.404‰。

由上述可知, 水面线的变化与河床变化密切相关。2003 年前在市汊以下河段河床采砂量大, 水面比降最大位置位于市汊以下河段。2003 年后河道采砂向上游延伸, 在龙头山以下河段采砂量较大, 在 2008 年, 河床在龙头山附近形成跌坎, 水面比降最大段也向上延伸。2011 年河床比降及水面比降最大值上移至丰城以上河段, 水面陡降的位置与河床采砂引起的河床突变基本对应。

### 3 河床比降与水面比降的变化分析

根据设计流量下计算的河道水面线, 在 2008 年, 樟树至龙头山 40.5 km 河段水位落差为 6.05 m, 占全河段总落差的 90.3%, 龙头山以下 51.5 km 河段内水位落差仅为 0.65 m。2011 年, 樟树至丰城 37.25 km 的河段水位落差为 5.1 m, 占全河段总落差的 90.0%, 丰城以下 54.75 km 河段内水位落差仅为 0.67 m。因此, 局部水面比降的集中程度增大。

利用数学模型计算了设计流量、整治流量、平滩流量、多年平均洪峰流量及 20 年一遇洪水时的河段水面线, 各级流量的糙率根据水文(位)站资料率定, 为 0.025~0.028。据此分析了各级流量下的局部河段的水面最大比降, 结果见表 1。河道水面最大比降与河床最大比降的关系见图 5, 不同年份计算的水面最大比降与流量关系见图 6。

表 1 河床最大比降与水面最大比降

Tab. 1 Maximum riverbed slope and maximum water surface slope

年份	河床比降(‰)	设计流量(‰)	整治流量(‰)	平滩流量(‰)	平均洪峰(‰)	20 年洪水(‰)
2003	1.56	0.353	0.205	0.139	0.134	0.103
2008	4.00	0.475	0.33	0.203	0.193	0.187
2011	1.87	0.404	0.234	0.194	0.184	0.163

由图 5 可知, 在各级流量条件下, 水面局部最大比降随河床比降的增加而增大, 呈现一定的相关特性。在中枯水(即设计流量与整治流量)时, 水面局部比降值较大, 受河床比降的影响较明显, 且呈线性相关; 在中洪水(即大于等于平滩流量)时, 水面局部比降值较中枯水时小, 当河床比降较大时, 水面比降变化很小, 表明受河床比降的影响减小。

由图 6 可知: 局部水面最大比降与河道流量存在一定关

系, 总体上, 随着流量的增大, 水面局部最大比降减小, 小流量时降幅大, 表明水面比降受河床影响大; 大流量时水面比降随流量变化较小, 当流量大于 5000 m<sup>3</sup>/s 后, 水面比降变化很小, 表明水面比降受河床影响减小。

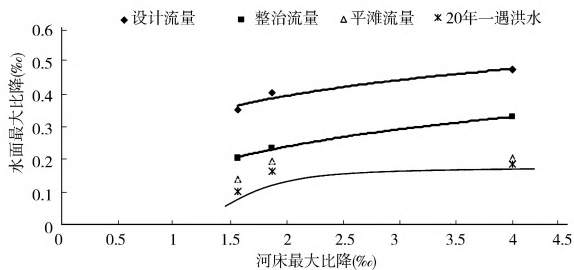


图 5 水面最大比降与河床最大比降关系

Fig. 5 Relationship between maximum water surface slope and maximum riverbed slope

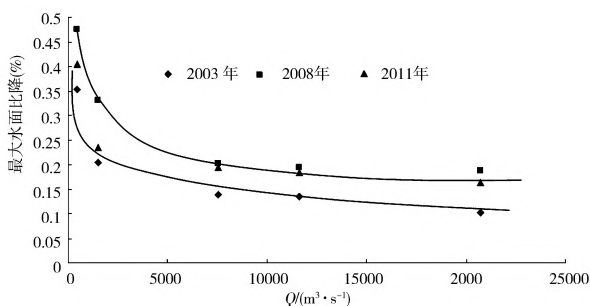


图 6 不同年份水面最大比降与流量关系

Fig. 6 Relationship between maximum water surface slope and flow discharge in different years

### 4 结语

受河道无序采砂影响, 河床比降及水面局部最大比降产生明显变化, 根据实测河道地形资料分析, 赣江下游樟树至外洲河段的河床局部最大比降 2003 年、2008 年及 2011 年分别为 1.56‰、4.00‰和 1.87‰; 局部河段水面最大比降分别为 0.353‰、0.475‰和 0.404‰。水面陡降的位置与河床的比降位置基本对应, 且水面陡降受河床采砂的影响有向上游延伸的趋势。运用数学模型计算了不同流量条件下的最大水面比降变化, 结果表明, 水面局部最大比降随河床比降的增加而增大。在中枯水时, 水面局部比降值较大, 为 0.475‰; 在中洪水时, 水面局部比降值较中枯水时小, 为 0.203‰。水面最大比降与流量条件有关, 随着流量的增大, 水面最大比降减小, 在小流量时局部比降大, 河床形态影响较明显, 大流量时水面比降相对稳定, 受河床影响小。

#### 参考文献(References):

[1] 袁林, 季成康. 长江下游砂料开采对河道演变的影响[J]. 人民长江, 1997, 28(7): 33-34. (YUAN Lin, JI Cheng kang. Effects of sand mining on the River in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Yangtze River, 1997, 28(7): 33-34. (in Chinese))

[2] Macdonald A. Predicting channel recovery from sand and gravel extraction in Naugatuck River and adjacent floodplain[A]. Proceedings of the 1988 National Conference on Hydraulic Engineering[C]. Colorado Springs, CO, USA, 1988, 8: 8-12.

- [3] 毛野. 初论采砂对河床的影响及控制[J]. 河海大学学报, 2000(28): 92-96. (MAO Ye. A study on the effect of sand & gravel extraction on riverbed and its control[J]. Journal of Hohai University, 2000(28): 92-96. (in Chinese))
- [4] 毛野, 黄才安. 采砂对河床变形影响的试验研究[J]. 水利学报, 2004(5): 64-69. (MAO Ye, HUANG Cai an. Experimental study on effect of sand mining on riverbed deformation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5): 64-69. (in Chinese))
- [5] 王国栋, 杨文俊. 河道采砂对河道及涉水建筑物的影响研究[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 69-72 (WANG Guo dong, YANG Wen jun. Research review on impact of sand mining on river channel and water involved structures[J]. Yangtze River, 2013, 44(15): 69-72. (in Chinese))
- [6] 乔飞, 孟伟, 张万顺, 等. 人工采砂对东江干流局部河段河床冲淤的影响研究[J]. 泥沙研究, 2014(2): 64-69. (QIAO Fei, MENG Wei, ZHANG Wan shun et al. Study on the effect of sand excavation on the local riverbed variation in the Dongjiang River[J]. Journal of Sediment Research, 2014(2): 64-69. (in Chinese))
- [7] 贾良文, 陆永军, 莫思平. 大量采砂对东江下游及东江三角洲河道低水位的影响[J]. 水利水运工程学报, 2006(3): 1-8. (JIAN Liang wen, LU Yong jun, MO Si ping. Study on the effect of sand excavation on the local riverbed variation in the Dongjiang River[J]. Hydro Science and Engineering, 2006(3): 1-8. (in Chinese))
- [8] 韩龙喜, 计红, 陆永军, 等. 河道采砂对珠江三角洲水情及水环境的影响分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 685-690. (HAN Long xi, JI Hong, LU Yong jun, et al. Impact of sand excavation in Pearl River delta on hydrology and environment[J]. Advances In Water Science, 2005, 16(5): 685-690. (in Chinese))
- [9] 肖洋, 张九鼎, 雷鸣, 等. 矩形采砂坑形态对明渠水位降低的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 702-707. (XIAO Yang, ZHANG Ji u ding, LEI Ming, et al. Effect of rectangular sandpit on drawdown of open channel flow[J]. Journal of Hohai University, 2011, 39(6): 702-707. (in Chinese))
- [10] 张强, 张小峰. 采砂深度对分汊河道影响分析[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2009, 5(3): 127-135. (ZHANG Qiang, ZHANG Xiao feng. Research on the effect of the sand mining depth in a braided channel[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2009, 5(3): 127-135. (in Chinese))
- [11] 张强, 张小峰. 采砂区布置对分汊河道的影响分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(2): 153-157. (ZHANG Qiang, ZHANG Xiao feng. Analysis of effect of sand mining areas on braided channel[J]. Wuhan University: Engineering Journal, 2009, 42(2): 153-157. (in Chinese))
- [12] 唐洪武. 赣江三湖至南昌河段河床演变对航道影响分析及对策研究[R]. 南京: 河海大学, 2013. (TANG Hong Wu. Analysis and Countermeasures on the influence on navigation of bed evolution of Ganjiang River from Sanhu to Nanchang[R]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- (上接第 694 页)
- [6] 程吉林, 张礼华, 张仁田, 等. 泵站单机组变速运行优化方法研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 72-76. (CHENG Ji lin, ZHANG Li hua, ZHANG Ren tian, et al. Optimal methodology of single unit variable speed operation in pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 72-76. (in Chinese))
- [7] 贾仁甫, 金明宇, 王红, 等. 国内泵站优化调度研究的发展现状[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2006, 26(6): 96-99. (JIA Ren fu, JIN Ming yu, WANG Hong, et al. Present situation and development of optimal operation study of pumping station in China[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 96-99. (in Chinese))
- [8] 冯晓莉, 仇宝云, 杨兴丽, 等. 大型泵站运行优化方法及其应用[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 127-132. (FENG Xiao li, QIU Bao yun, YANG Xing li, et al. Optimal methods and its application of large pumping station operation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 127-132. (in Chinese))
- [9] 贾仁甫, 王红, 金明宇, 等. 调水工程中梯级泵站的优化调度研究[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2006, 9(2): 69-73. (JIA Ren fu, WANG Hong, JIN Ming yu, et al. Study on the optimal operation for multi stage pumping station in water delivery project[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2006, 9(2): 69-73. (in Chinese))
- [10] 汪安南, 伍杰. 大型轴流泵站最优运行方式探讨[J]. 农田水利与小水电, 1993, 11: 36-38. (WANG An nan, WU Jie. The discussion on optimal operation mode of large axial flow pump stations[J]. China Rural Water and Hydropower, 1993, 11: 36-38. (in Chinese))
- [11] 刘家春, 莫金平. 取水泵站经济运行转速的确定[J]. 水泵技术, 2003(2): 41-43. (LIU Jia chun, MO Jin ping. The determination of economic operation speed of water pump station[J]. Pump Technology, 2003(2): 41-43. (in Chinese))
- [12] 杨鹏, 纪晓华, 史旺旺. 基于遗传算法的泵站优化调度[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2001, 4(3): 72-74. (YANG Peng, JI Xiao hua, SHI Wang wang. Genetic algorithm in optimal operation of pumping station[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2001, 4(3): 72-74. (in Chinese))
- [13] 龙新平, 朱劲木, 刘梅清, 等. 基于性能曲面拟合的泵站优化调度分析[J]. 水利学报, 2005(11): 27-32. (LONG Xin ping, ZHU Jin mu, LIU Mei qing, et al. Optimized dispatch of pumping stations based on performance curve surface fitting[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(11): 27-32. (in Chinese))
- [14] 桑国庆, 曹升乐, 郭瑞, 等. 基于分时电价的梯级泵站输水系统日优化运行[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 688-695. (SANG Guo qing, CAO Dong sheng, GUO Rui, et al. Optimization of cost per day of cascade pumping station water delivery system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(8): 688-695. (in Chinese))
- [15] 桑国庆, 张林, 董庆杰, 等. 叶片全调节泵站抽水装置性能计算[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 14-17. (SANG Guo qing, ZHANG Lin, Dong Qing jie, et al. Calculation and research on pumping equipment performance of blade adjustment pump station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 14-17. (in Chinese))