



北江白石窑枢纽坝下航道稳定性初步分析*

倪志辉^{1,2}, 刘亚博¹, 张绪进², 杜宗伟², 谢 岷²

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 白石窑枢纽位于北江中游, 下游紧邻飞来峡枢纽, 且受其回水影响, 坝下河段水流条件十分复杂。因此采用河工模型进行研究, 且验证满足相似性要求。通过对研究河段进行河床演变分析, 根据定床试验结果, 从整治线走向与水流动力轴线、航槽轴线与主流夹角、整治前后流速、比降变化及输沙能力等方面初步分析其航道稳定性。基于动床试验得挖槽回淤量分布, 提出保持航道稳定的建议。

关键词: 河床演变; 水动力轴线; 挖槽回淤; 航道稳定

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0090-06

Analysis of waterway stability under the dam of Beijiang Baishiyao water conservancy

NI Zhi-hui^{1,2}, LIU Ya-bo¹, ZHANG Xu-jin², DU Zong-wei², XIE Min²

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education and National Engineering Research

Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing 400016, China)

Abstract: Baishiyao hydropower station is located on the middle reaches of the Beijiang river, downstream near Feilaixia hub, and the flow conditions of the reaches under the dam are very complicated by the influence of backwater. So the physical model is used to study it, and the model is proven to satisfy the similarity requirements through verification. Fluvial process analysis about the reaches is carried out. According to the results of fixed bed model test, a preliminary analysis of waterway stability is made from the regulation line of waterway and flow dynamic axis, the angle between channel axis and the stream thread, change of flow velocity between before and after channel improvement, gradient, as well as transportability of sediments. The amount of dredge-cut siltation is got based on the movable-bed model test. The suggestion is offered to keep the waterway stable.

Key words: fluvial process; flow dynamic axis; dredge-cut siltation; waterway stability

北江是珠江水系第二大河流, 东西两源各起于江西信丰及湖南临武, 并于广东韶关汇合成北江干流, 至三水思贤滘口与西江汇合后注入南海。许多学者对北江上的航道整治及河床演变进行研究, 如彭钜新^[1]分析了北江下游航道整治施工程序及河床的变形; 陆永军、谢凌峰等^[2-3]对北江下

游的航道整治工程建立二维泥沙数学模型并且对浅滩河段的浅滩进行了分析; 黄焕坤^[4]分析了飞来峡枢纽的建立对北江下游航道的影 响。河流修建枢纽将破坏河道原本的水沙条件及相对平衡的河道形态。国内外众多学者针对枢纽下游河道的河流动力变化及河床变形进行研究, 如 Donald

收稿日期: 2013-10-13

*基金项目: 重庆市自然科学基金 (cstc2012jjA30002); 省部共建水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金 (SLK2012A02)

作者简介: 倪志辉 (1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事河流海岸水动力学、环境及数值模拟方面的研究。

E Barbe^[5]对修建了大量水坝及整治工程后的美国密西西比河的河流动力变化及河床变形进行了分析, Stephen K^[6]分析了 Pantanal Wetland 主要通航河段内枢纽对航道的影 响; 陆永军等^[7-10]分析了三峡建成对长江中游河床演变的影响及其对葛洲坝下游近坝段航道与水位的影响。

1 河道概况

1.1 枢纽概况

白石窑枢纽位于广东省英德市上游 25 km 处, 下游紧邻飞来峡枢纽, 两枢纽相距 75.5 km, 是一座以发电为主, 兼顾灌溉、防洪、通航等功

能的低水头径流式电站。当上游来水流量 $Q \leq 3\ 830\ \text{m}^3/\text{s}$ 时, 水库水位随流量变化在 34.0 ~ 36.5 m 之间变动, 而当 $Q \leq 3\ 860\ \text{m}^3/\text{s}$ 后, 水库敞泄, 停止发电。在洪水过后, 水库逐步回蓄, 枢纽恢复正常运行状态。飞来峡枢纽位于广东省英德市下游 50 km 处, 是北江干支流上最大的水电站, 是以防洪为主, 同时兼有发电、航运、供水和改善生态环境等作用的低水头径流式电站, 枢纽于 1999 年底建成投入运行。白石窑坝下航道受白石窑枢纽和飞来峡水库运行的影响, 水流结构、泥沙运动及河床演变均十分复杂。该河段地理位置见图 1。

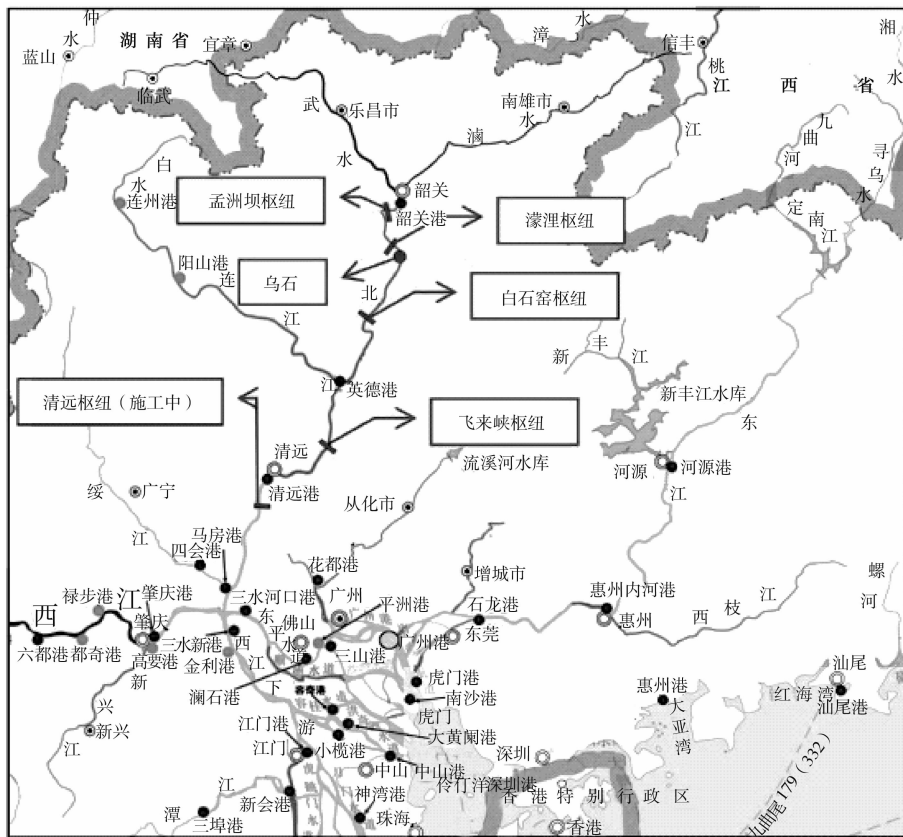


图 1 白石窑坝下河段地理位置

1.2 水运泥沙条件

北江流域植被覆盖良好, 水土流失不严重, 河流含沙量较小, 属于少沙河流。北江泥沙输移与来水相适应, 即洪水期同时也是泥沙输移较大的时期, 沙峰一般伴随洪峰或者稍微滞后, 输沙主要集中在汛期。北江泥沙以悬移质输移为主,

根据石角站实测资料, 其多年平均输沙量和含沙量分别为 572.8 万 t 和 $0.13\ \text{kg}/\text{m}^3$, 年最大输沙量为 1 400 万 t, 年最小输沙量为 91.14 万 t。其悬移质颗粒级配见表 1。白石窑坝下河段河床为沙质, 其中值粒径在 0.3 ~ 0.81 mm。

表1 石角站悬移质泥沙颗粒级配

粒径/mm	1	0.5	0.25	0.1	50	0.025	0.01	0.005
小于某一粒径级沙重百分比/%	100	99.97	98.1	91.7	80.4	65.6	42.4	27.1

2 模型设计与验证

由于白石窑枢纽坝下河段水沙条件十分复杂，为确保研究河段水沙运动，河床冲淤的相似性以及沙质推移质的运动相似和输沙率相似，根据航道整治目标及试验场地、设施等具体情况，选定定床模型比尺如表2所示。为满足动床模型相似条件，模型沙选用为模型特定配置的合成塑料沙，其中值粒径 $d_{50} = 0.24 \text{ mm}$ ，密度 1.16 t/m^3 ，干密度 0.69 t/m^3 。通过流向、流速分布及水面线验证，证明定床模型及动床模型均满足规范要求的相似性。

表2 白石窑枢纽坝下河段水泥石沙定床模型试验比尺

平面比尺	垂直比尺	模型变率	流速比尺	水流时间	流量比尺	糙率比尺
λ_L	λ_h	η	λ_v	比尺 λ_t	λ_Q	λ_n
150	60	2.5	7.75	19.36	69 713.70	1.25

3 航道稳定性分析

研究河段位于白石窑枢纽和飞来峡枢纽之间，水流条件和河床演变受枢纽运行的影响较大，因此坝下河道形式多变，特性迥异。该河段包括尾

水不衔接段（自白石窑坝下至观音岩）、变动回水区段（由观音岩至大罗肚）、常年回水段即库尾潜段（从大罗肚到飞来峡）。

3.1 河床演变分析

白石窑枢纽建成后，水库清水下泄导致坝下游河道冲刷下切，坝下至观音岩河段普遍冲深 $1 \sim 2 \text{ m}$ ；飞来峡水库运行后，观音岩以下河段受库区回水影响，流速减小，河床将以淤积为主，尤其是常年回水区的淤积厚度会逐年增大。

以2001和2011年河道实测地形资料为依据来分析研究河段的河床演变情况。白石窑坝下至坑口嘴，河床普遍冲刷；坑口嘴至出瓦埭附近，河床则呈现左冲右淤的态势；出瓦埭至白沙洲附近，河床变化表现为左淤右冲的趋势；白沙洲至猫儿石河段，有冲有淤，河床形态基本一致，无明显变化；猫儿石至飞来峡枢纽段河床有所淤高。

再看深泓线的变化，图2显示了尾水不衔接段深泓线平面变化。从图2可知：在观音洲附近2011年深泓线较2001年深泓线有左偏趋势，其余河段虽有所摆动，但摆动幅度不大，走向基本一致。纵向来看，白石窑坝下至大罗肚河段因冲刷致深泓线降低，变化范围为 $1 \sim 2 \text{ m}$ ；大罗肚以下河段冲淤交替，深泓线有升亦有降，但是变化不大。

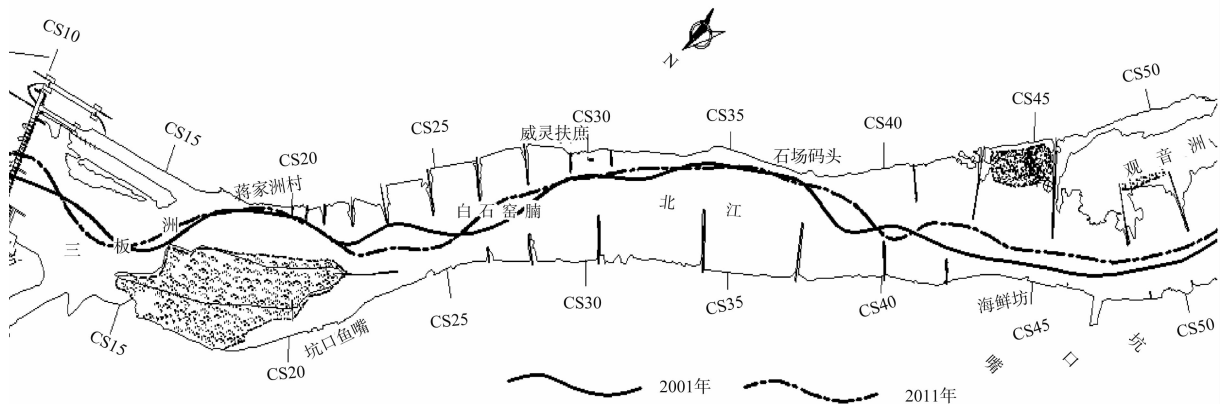


图2 尾水不衔接河段深泓线平面位置

3.2 定床试验

定床试验整治方案选择方案2^[11]，该方案的

航道尺度为 $2.5 \text{ m} \times 60 \text{ m} \times 330 \text{ m}$ ，整治流量 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ，并在历次整治的丁坝群上对个别丁坝进

行调整。

1) 整治线走向与水动力轴线。

该定床试验方案整治线依托主导河岸, 沿河道深槽布置, 走向与河势基本一致。模型试验表明: 工程前水流动力轴线在白沙洲附近摆动幅度较大, 由于白沙洲及其上游河头处为碍航浅段, 河道在河头下游方向发生急转, 致使白沙洲附近的水流动力轴线部分越出航槽线, 而在其余河段, 水流动力轴线与航槽走向均基本一致。工程后因为对碍航浅段的疏浚及丁坝的加长, 白沙洲附近水流动力轴线归于航槽, 其它河段与整治前变化不大。工程河段各洪水期水流动力轴线相对集中, 并与航道走向基本吻合, 有利于水流归槽和维持航槽稳定。

2) 航槽轴线与主流夹角。

该方案挖槽轴线沿河道深泓线布置并做适当调整, 模型试验表明: 整治后航槽轴线与各洪水期主流流向基本一致, 对航槽稳定有利。

3) 整治前后流速变化。

一般来讲, 使航道保持稳定的基本条件是: 整治后航槽流速大于整治前流速。由图 3 所示, 当流量 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 尾水不衔接段航槽流速在 $0.81 \sim 1.29 \text{ m/s}$, 与整治前相比流速变化幅度为 $-0.01 \sim 0.05 \text{ m/s}$; 变动回水区段航槽流速为 $0.54 \sim 1.47 \text{ m/s}$, 与整治前相比流速变化幅度为 $0 \sim 0.04 \text{ m/s}$; 常年回水区河段航槽流速较多在 0.9 m/s 以下, 较整治前略有增加, 增幅在 $0.01 \sim 0.04 \text{ m/s}$ 。试验表明, 经整治后挖槽流速普遍略大于或接近整治前流速, 有利于对航道保持稳定。

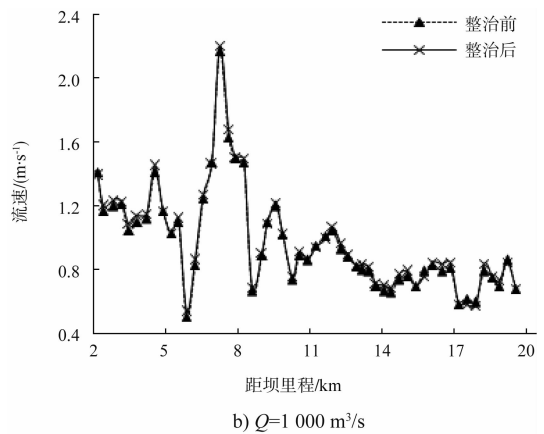


图 3 整治前后挖槽轴线流速分布

4) 整治前后比降变化。

通过定床试验, 得到各流量下河段的水位变化, 见图 4。

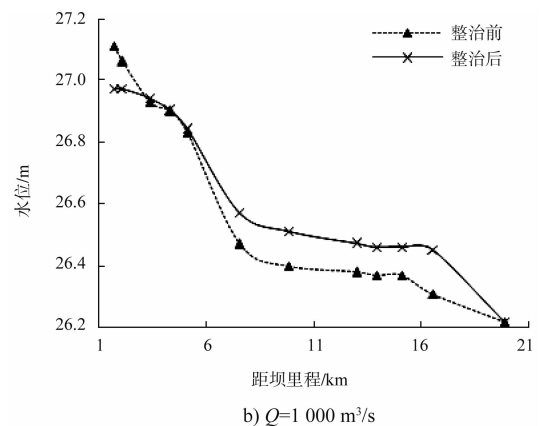
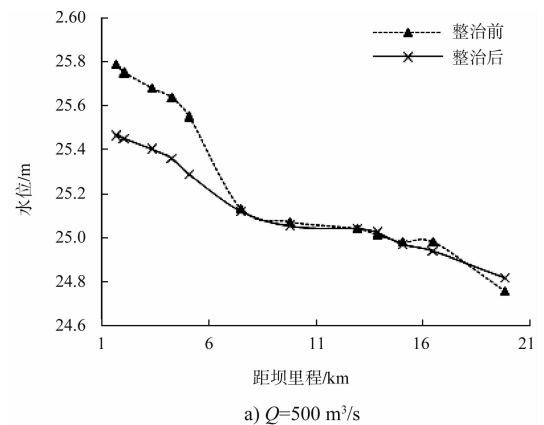
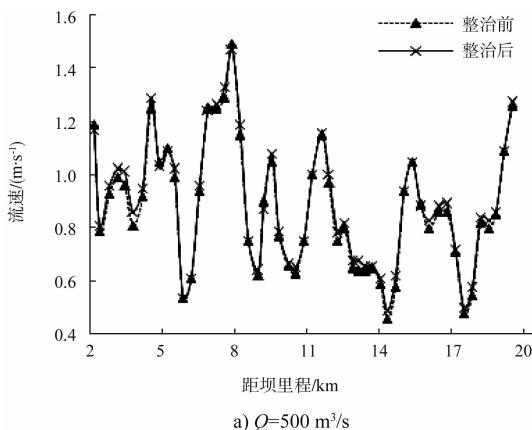


图 4 整治前后纵断面水位变化

由图 4 可知: 当 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 尾水不衔接段水位为 $25.29 \sim 25.46 \text{ m}$, 较工程前减小 $0.26 \sim 0.39 \text{ m}$, 比降减小 $0.01\% \sim 0.08\%$ 。变动回水区段水位为 $25.04 \sim 25.12 \text{ m}$, 较工程前减小 0.02 m



左右；比降减小0.01‰~0.11‰。常年回水区河段水位为24.76~25.04 m，较工程前减小0~0.04 m；比降减小0.01‰左右。

整治后，比降普遍减小，且随着流量的增加，工程对水位、比降的影响也逐渐减小，整治前后试验河段的水位、比降慢慢接近，将有利于船舶的航行安全及航道的通过能力。

5) 输沙能力。

对于长河段挖槽的稳定来说，要求输沙能力保持沿程递增的态势，即下浅段的输沙能力应大于上浅段；浅段的输沙能力应大于深槽。只有这样，挖槽的稳定才能维持。由试验资料计算整治流量下各段的输沙率。

根据沙莫夫推移质输沙率公式：

$$g_b = 0.95D^{\frac{1}{2}} \left[\frac{U}{(U_c/1.2)} \right]^3 \left(U - \frac{U_c}{1.2} \right) \left(\frac{D}{h} \right)^{1/4} \quad (1)$$

式中： U_c 为起动流速。

$$U_c = 1.4 \sqrt{gD} \ln \frac{h}{7D} \quad (2)$$

根据实测资料，上式中 D 为0.55 mm。计算结果见表3。

由表3知，整治流量下，变动回水区浅段的输沙能力略大于尾水不衔接段，浅段的输沙能力明显大于深槽，有利于减少泥沙回淤。而常年回水区浅段流速明显小于上游河段，水流输沙能力

较弱，挖槽局部回淤在所难免。

表3 工程河段推移质输沙率 ($Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$)

位置	推移质输沙率/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	
尾水不衔接段	浅区	0.017 2
	深槽	-0.000 1
变动回水区段	浅区	0.020 6
	深槽	0.000 5
常年回水区段	浅区	0.002 5
	深槽	-0.000 1

3.3 动床试验

动床试验选用丰（原珠委科研所动床模型试验报告）、中（2010年）和枯（2011年）3个代表年组成长系列年进行河床冲淤试验。动床试验的方案[11]选择及模型布置在定床试验基础上进行。

整治后，除坝下至坑口嘴河段挖槽回淤较小外，其余河段（尤其是常年回水区河段）水流输沙能力明显不足，挖槽回淤速度快、回淤量大。且泥沙主要淤积在坑口嘴、出瓦埭、白沙洲及猫儿石村等重点碍航浅段，见表4。动床试验表明：挖槽3 a末回淤量为11.28万 m^3 ，年均淤积量为3.76万 m^3 。

碍航浅段的最小航道宽度小于设计宽度60 m，因此需每年进行维护性疏浚，以保持航道稳定。

表4 研究河段3 a末挖槽回淤情况

河段	浅滩	淤积部位	淤积量/万 m^3	浅段长度/m	最小航道宽度/m
尾水不衔接段	坑口嘴	凸岸边滩	1.81	500	50
	量水井	挖槽左、右两侧	0.63	430	45
变动回水区	凤凰嘴	挖槽左侧	0.83	530	30
	大罗肚	凸岸边滩、挖槽左侧	0.50	210	40
常年回水区	出瓦埭	上下深槽过渡段淤积	2.26	750	
	河头	弯道凸岸淤积体伸入航槽	0.67	100	
	白沙洲	挖槽下段右侧航槽淤积	2.92	750	40
	猫儿石村	原淤积区	1.66	810	30

4 结语

1) 通过物理模型试验对白石窑坝下航道进行研究，经验证表明定床模型及动床模型均能满足相似性。

2) 经河床演变分析，飞来峡水库尾水不衔接段河床冲刷下切，观音岩以下河段呈淤积态势，尤其常年回水区淤积厚度逐年增大。

3) 通过定床试验，对航道稳定性进行初步分

析,整治线走向与水流动力轴线,航槽轴线与主流夹角,整治前后流速、比降变化均能满足航道稳定要求,而由于常年回水区水流输沙能力明显较上游弱,挖槽回淤无可避免。

4) 经动床试验表明,整治后挖槽3 a末累计回淤量11.28万 m^3 (年均淤积量3.76万 m^3),部分浅段的最大航宽不满足60 m设计航宽要求。因此,为确保航道通畅及稳定,应对碍航浅段及时进行清淤。

参考文献:

- [1] 黄焕坤.飞来峡水利枢纽运行对北江河道演变的影响分析[J].泥沙研究,2004(2):72-75.
- [2] 彭钜新.北江芦苞浅段航道整治工程河床变形分析[J].水运工程,2002(2):27-30.
- [3] 谢凌峰,陆永军,王义安.北江山塘至石角浅滩河段航道整治研究[J].泥沙研究,2001(1):62-69.
- [4] 陆永军,谢凌峰,王义安.二维泥沙数学模型在北江下游航道整治工程中的应用[J].水利水运工程学报,2001(2):16-20.
- [5] Donald E B. Effects on dredging due to diversions from the lower Mississippi river [J]. Journal of Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering, 2000, 126(3): 121-129.
- [6] Stephen K H. Potential effects of a major navigation project on Inundatio Pantanal Flood plains[J]. Regulated Rivers: Resarch&management, 1999, 15(4): 289.
- [7] 陆永军,陈稚聪,赵连白,等.三峡工程对葛洲坝枢纽下游近坝段水位与航道影响研究[J].中国工程科学,2002(10):67-72.
- [8] 梁应辰.长江三峡工程泥沙和航运问题研究成果汇编[M].北京:交通运输部三峡办公室,1997.
- [9] 师哲,龙超平.葛洲坝枢纽下游河段河床演变分析[J].长江科学院院报,2000(2):13-16.
- [10] 殷瑞兰,陈力.三峡坝下游冲刷荆江河段演变趋势研究[J].泥沙研究,2003(12):1-6.
- [11] 费晓昕,张绪进,倪志辉,等.北江白石窑水利枢纽坝下变动回水区航道整治试验研究[J].水运工程,2013(4):146-150.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第81页)

4.4 优化南京港集疏运洁净系统

南京港集疏运洁净系统优化包含:1)南京市港口外部集疏运子系统优化。包括南京市港口腹地网络线路和节点的设计、总量上的协调优化,以及各集疏运方式的空间布局的优化。2)南京市港口集疏运衔接系统的优化设计。主要是对连接港区和内陆交通的集疏运线路、衔接运输设施等各方面的优化设计,使得港口集疏运与内陆集疏运协调衔接。3)南京市港口内部集疏运系统的优化设计。对港区内部集疏运基础设施的协调设计,包括码头泊位能力、装卸、线路等基础设施的能力协调设计,以及对港区内部集疏运运输组织的优化和信息系统的建设。

参考文献:

- [1] 吕安涛,张存保,石永辉,等.山东省港航系统节能减排评价指标体系研究[J].交通信息与安全,2009,27(6):52-59.
- [2] 邵超峰,鞠美庭,楚春礼,等.我国生态港口的建设思路与发展对策[J].生态学报,2008,28(11):5603-5609.
- [3] 金乐琴,刘瑞.低碳经济与中国经济发展模式转型[J].经济问题探索,2009(1):84-87.
- [4] 郑又新,马韵馨.港口节能减排的措施与建议[J].集装箱化,2009,20(8):19-23.
- [5] 徐德麟.上海港节能降耗技术的研究与应用[J].水运工程,2011(1):198-202.

(本文编辑 武亚庆)