

· 西部陆海新通道——平陆运河工程建设专栏 (8) ·



平陆运河航运枢纽梯级布置 全要素比选方法*

吕小龙, 吴 澎, 潘海涛

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 对于跨水系连通开发工程, 枢纽梯级布置方案的确定是重要前置工作。通过对不同航运枢纽梯级布置方案开展全要素比选, 综合考虑通航效率、供水、灌溉、防洪、生态、征地移民等影响, 进行工程投资和运维成本的差额经济性分析, 进一步提高工程技术经济性以及水资源综合利用功能。研究案例提出以航运为主的水系连通工程枢纽梯级布置方案论证比选方法可为类似工程提供借鉴。

关键词: 平陆运河; 枢纽梯级布置; 梯级开发规划; 航运效益

中图分类号: U612.33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0001-07

Multi-element comparison and selection method for cascade layout of Pinglu Canal navigation hubs

LYU Xiaolong WU Peng PAN Haitao

CCCC Water Transportation Consultants Co. Ltd. Beijing 100007 China

Abstract: The determination of the layout plan for the hub cascade is an important prerequisite for cross water system connectivity development projects. By conducting a comprehensive comparison and selection of different cascade layout schemes for navigation hubs taking into account factors such as navigation efficiency water supply irrigation flood control ecology and land acquisition and resettlement a differential economic analysis of engineering investment and operation costs is conducted to further improve the technical and economic efficiency of the project and the comprehensive utilization of water resources. The research case proposes a comparative method for the demonstration and selection of cascade layout schemes for water system connectivity engineering hubs mainly based on shipping which can provide reference for similar projects.

Keywords: Pinglu Canal; cascade layout of hub; cascade development planning; shipping benefits

枢纽梯级布置是通过在河流上布置一系列枢纽建筑物, 有效地控制和利用河流的水能、水资源, 实现航运、防洪、取排水、灌溉、环保、发电、旅游、水产养殖等部分功能, 达到水资源的综合利用^[1]。平陆运河通过建设航运枢纽和运河航道工程, 构建连接西江内河航道网和北部湾港的江海联运体系^[2], 对于新开发的运河工程, 确定枢纽梯级布置方案是重要的前置工作。

以往的河流梯级开发基本以发电、供水、防洪等功能需求为主, 更加注重水能、水资源效益, 而航运也是水资源综合利用的重要方向之一, 是平陆运河最主要的开发功能。平陆运河工程具有多年深入论证、研究的基础, 《广西壮族自治区平陆运河战略规划研究报告》初步提出采用四~六级的梯级布置方案。平陆运河规划研究阶段对枢纽梯级布置方案开展了专题研究^[3], 综合考虑通航

收稿日期: 2024-06-05

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3206101); 国家重点研发项目 (2023YFB2604704)

作者简介: 吕小龙 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程设计与咨询。

效率、工程投资、淹没影响、征地移民及土石方开挖处置等因素，暂推荐四梯级布置方案，后续结合进一步详实勘察资料进行深化比选论证。

预测平陆运河开通后以通过运量为主，梯级数量少可缩短通航时间，提高通航效率，减少枢纽维护成本，航运效益较高；梯级数量多可降低枢纽水头差，各梯级间更易实现水位的衔接，但会增大枢纽主体建筑物的工程量，并延长通航时间，降低通航效率。作为以发展航运为主的运河工程^[4]，在工程投资以及外部资源要素保障条件可控的情况下，应尽量减少梯级的数量，充分发

挥航运效益，并综合考虑其他功能任务要求，开展全面的技术经济分析。

1 工程概况

平陆运河是建设西部陆海新通道、加快建设交通强国的标志性工程，始于南宁市横州市西津库区平塘江口，终点为北部湾钦州港东航道。工程按内河 I 级航道标准建设，可通航 5 000 吨级船舶^[5]，船闸规模为双线单级 5 000 吨级，有效尺度 300 m×34 m×8.0 m(有效长度×有效宽度×最小门槛水深)。平陆运河航道线路走向与枢纽位置见图 1。

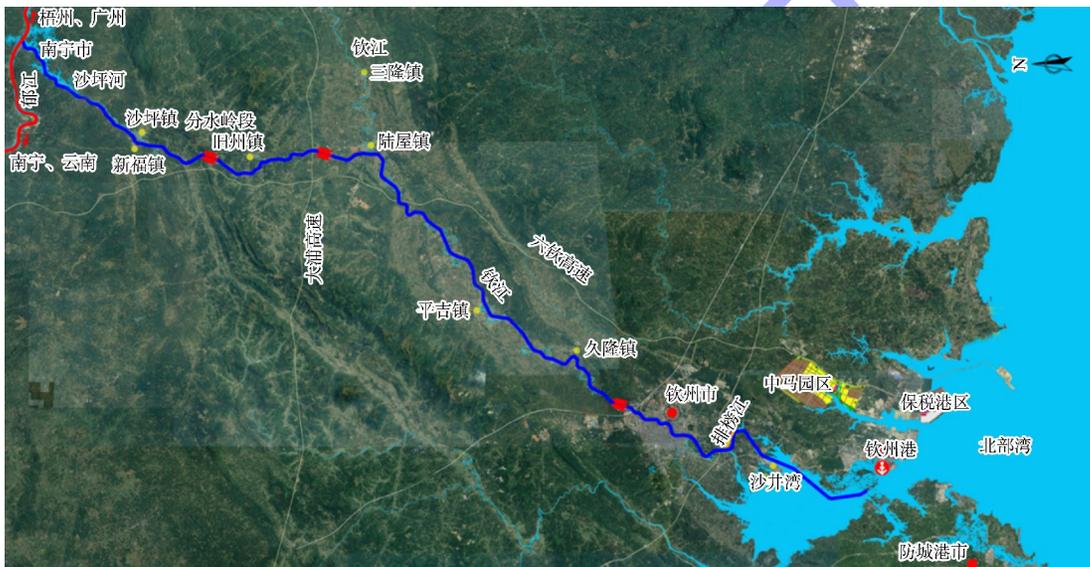


图 1 平陆运河航道线路与枢纽位置
Fig. 1 Route and hub location of Pinglu Canal

2 梯级布置原则

1) 根据河道的水文、地形、地质等自然条件，充分考虑通航水位衔接、淹没影响、防洪排涝、水资源综合利用要求等，通过综合比选合理设置梯级位置、数量和水位。

2) 运河沿线两岸除越岭段，两岸地势平坦、滩地分布较多、村庄多，采取连续渠化方案保证航道通航尺度，正常蓄水位下河道水面线尽可能不出河槽，尽量不淹没两岸土地。

3) 考虑淹没损失、社会稳定、防洪排涝、运行维护等要求，不采用大范围筑堤以提高正常蓄水位的方案。为减少开挖工程量并充分利用开挖料，正常蓄水位可稍高于枢纽上游局部滩地高程，

通过建设堤防或抬田的方式满足沿线防洪要求，并减少淹没影响。

4) 枢纽坝址位置满足通航建筑物和挡泄水建筑物的布置要求，并考虑远期发展需求，优先考虑地形开阔、地质条件良好的顺直河段。

5) 梯级布置应结合运河沿线的城镇总体规划，有利于城市发展和生态环境改善^[6]。

3 梯级布置思路

运河北侧最上游西津水库正常蓄水位为 62.3 m，经水库回水区沙坪河接分水岭。分水岭高程为 66~102 m，高于 75 m 部分仅 2 km，且分水岭汇水面积小，无天然补水水库，因此运河上端第 1 个梯

级可布置在分水岭以南的钦江流域一侧, 水位与西津水利枢纽水位衔接, 并满足西津库区防洪要求。分水岭南侧第1个较大的城镇为旧州镇, 为减少淹没影响, 第1个梯级应布置在旧州镇的上游侧, 并与分水岭山体结合布置, 保证西津水库的成库条件。

钦江下游包含已建的青年水闸, 水闸以下水位受潮汐影响明显, 属于感潮河段, 且水闸下游为钦州市区, 临近入海口, 两岸地形较低, 基本不具备再布置梯级的条件, 因此青年枢纽可作为平陆运河最下游一级梯级。

平陆运河梯级布置受两端(西津库区和青年水闸)条件、里程长度、自然条件和城镇分布的控制, 可调节和比选的余地较小, 重点在中间梯级的布置。最上游梯级和最下游梯级之间航道沿线主要分布旧州镇、陆屋镇、平吉镇、久隆镇4个城镇。梯级布置以不淹没这4个城镇为基本原则, 梯级间水位充分衔接主要依靠梯级渠化和浚深航道实现。

基于上述梯级布置思路, 形成三~六梯级布置方案见图2和表1。

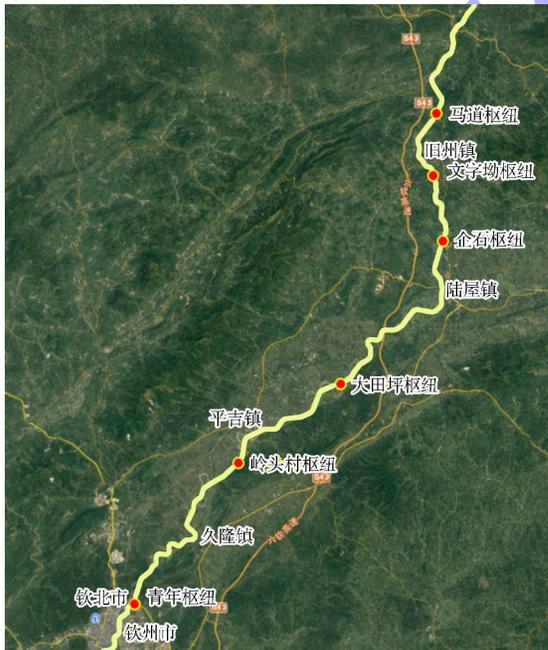


图2 梯级布置方案位置

Fig. 2 Locations of cascade layout plans

表1 梯级布置方案

Tab. 1 Cascade layout plans

梯级布置方案				梯级位置
三级	四级	五级	六级	
马道枢纽	马道枢纽	马道枢纽	马道枢纽	旧州镇上游
-	-	-	文子坳枢纽	旧州镇下游
企石枢纽	企石枢纽	企石枢纽	企石枢纽	陆屋镇上游
-	大田坪枢纽	大田坪枢纽	大田坪枢纽	平吉镇上游
-	-	岭头村枢纽	岭头村枢纽	久隆镇上游
青年枢纽	青年枢纽	青年枢纽	青年枢纽	钦州市区上游

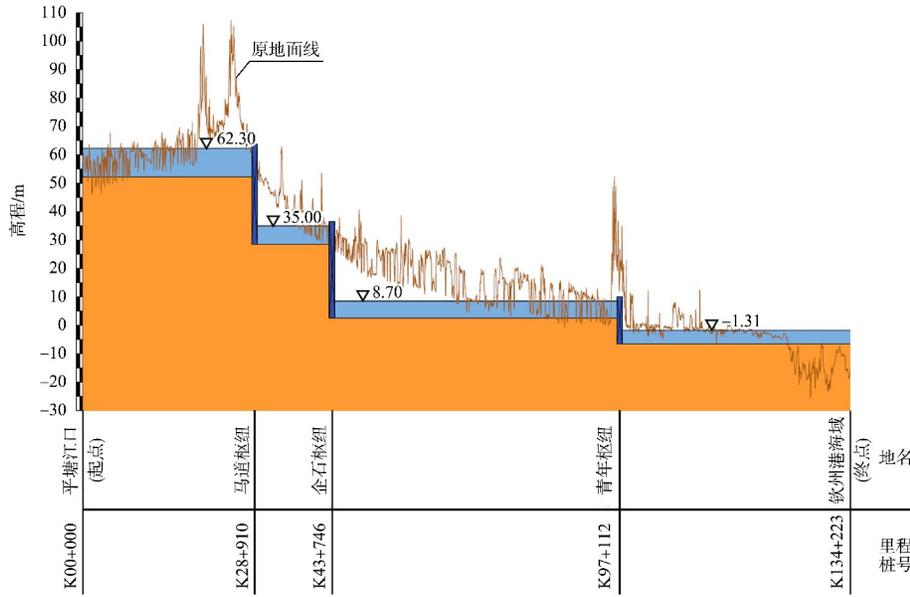
对于在三梯级方案基础上进一步取消中间梯级, 即只布置第1个梯级马道枢纽和最下游梯级青年枢纽的两梯级方案。由于存在梯级间水位衔接困难、开挖工程量巨大、航运用水量大以及防洪、排涝、浸没、渗漏、地下水影响、社会风险等问题, 不具备技术经济性, 因此不予考虑。

常规单级船闸可运行水头为10~30 m, 个别大于40 m, 平陆运河上下游总水头差约65 m, 总体线路不长, 第一级梯级马道枢纽与最后一级梯级青年枢纽之间里程仅68 km, 考虑通航效率以及运营维护成本等因素, 中间不宜布置过多梯级, 因此六梯级以上的方案亦不考虑。

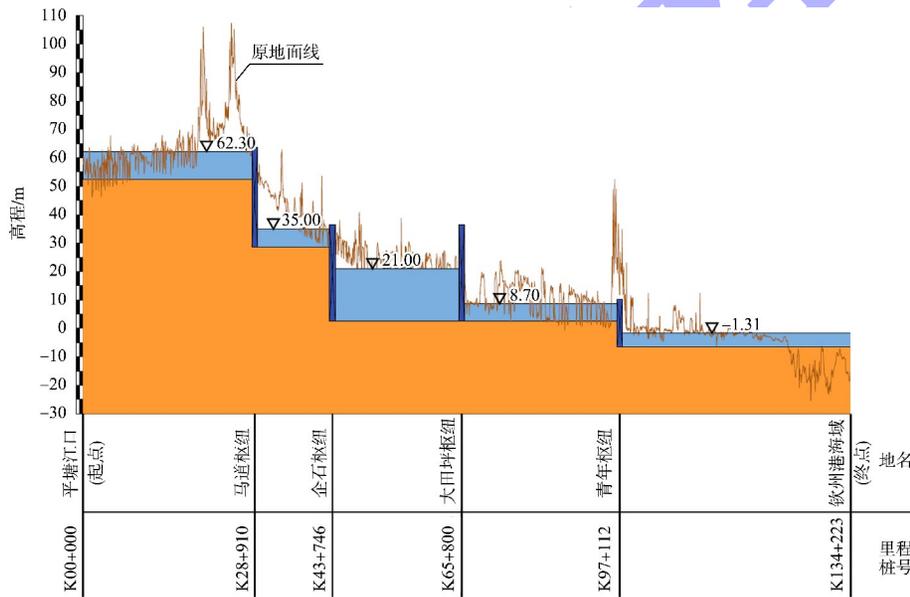
4 方案综合比选

4.1 方案初选

通过对三~六梯级布置方案工程指标进行对比, 五和六梯级方案的征地面积、淹没损失均高于三和四梯级方案, 其余指标相近, 投资提高约20亿~40亿元, 且通航效率低, 技术经济性差, 因此不作为优选方案^[7]。三和四梯级方案在工程指标上各有优劣, 因此从航运效益、供水灌溉、防洪排涝、生态景观、工程投资等方面对2个方案进行综合要素比选。三、四梯级方案主要特征指标见表2, 梯级纵断面见图3^[8]。



a) 三梯级方案



b) 四梯级方案

图 3 纵断面

Fig. 3 Longitudinal section

表 2 主要特征指标

Tab. 2 Main characteristic indicators

方案	枢纽名称	里程	区间距离/km	水头/m	正常蓄水位/m
三梯级	马道枢纽	K28+910	28.910	29.60	62.30
	企石枢纽	K43+746	14.836	27.00	35.00
	青年枢纽	K97+112	53.366	10.32	8.70
四梯级	马道枢纽	K28+910	28.910	29.60	62.30
	企石枢纽	K43+746	14.836	15.00	35.00
	大田坪枢纽	K65+800	22.054	13.00	21.00
	青年枢纽	K97+112	31.312	10.32	8.70

4.2 综合要素比选

4.2.1 供水灌溉

平陆运河全线新增供水灌溉规模主要受上游从郁江引水流量以及下游入海流量之间的差额决定。根据水资源调配方案^[9]，2个梯级方案从郁江引水流量以及下游入海流量相同，因此沿线新增用水规模相同，但是单个枢纽库区供水能力则由各枢纽间航运用水量差额决定。

各梯级枢纽近期航运用水量见图 4，四梯级方

案各枢纽航运用水量从上游往下游依次减少, 可以在运河沿线逐步实现水资源的综合利用, 即每个枢纽库区都有一定的区间供水能力。三梯级方案中马道枢纽与企石枢纽航运用水量基本相当, 企石枢纽库区基本不具备区间供水能力, 水资源配置功能需在青年库区实现。随着远期钦江沿线灌区的规划建设, 四梯级方案灌区取水口位置可设置在水位较高的企石库区, 三梯级方案灌区取水口只能设置在水位较低的青年库区, 提水扬程增加, 取水设施运营维护费用提高约 50 万元/a。从供水灌溉角度考虑, 四梯级方案优于三梯级方案。

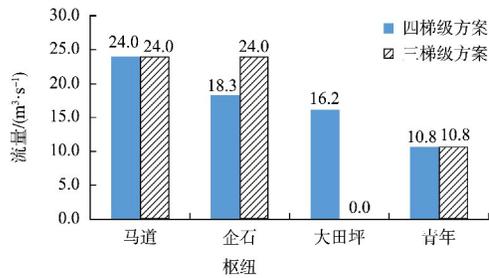


图 4 航运用水量

Fig. 4 Water consumption for shipping

4.2.2 防洪影响

针对工程建成后的洪水影响, 三、四梯级方案区别主要在于企石枢纽至大田坪枢纽段, 沿线涉及的

乡镇、村屯的防洪标准分别为 20 a 一遇和 5 a 一遇。

由于运河主要通过对原有河道的开挖、疏浚以实现梯级间水位衔接, 因此库区回水基本均低于工程建设前天然的同频率水面线, 三、四梯级方案对沿线防洪均有利。三梯级方案取消了大田坪枢纽, 大田坪枢纽至企石枢纽段航道的洪水水面线进一步降低。陆屋镇工程前后 20 a 一遇水位对比见表 3。

表 3 主要城镇 20 a 一遇水位对比

Tab. 3 Comparison of water levels

with a recurrence interval of 20 years in major towns

主要村镇	高程对比/m			
	村镇地面	工程前	三梯级方案	四梯级方案
陆屋镇	28.00	31.35	20.08	28.90

四梯级方案在陆屋镇存在少许淹没, 三梯级方案基本不存在淹没。在 5 a 一遇洪水条件下, 三、四梯级方案沿线均不存在淹没村屯的情况。从防洪影响角度考虑, 三梯级方案优于四梯级方案, 但相比于现状, 2 个方案对沿线防洪均无不利影响。

4.2.3 生态景观

平陆运河沿线涉及的主要城镇为旧州镇、陆屋镇、平吉镇、久隆镇及钦州市区, 三、四梯级布置方案建成后的正常蓄水位与沿线天然水面线、地面高程线的对比情况见图 5。

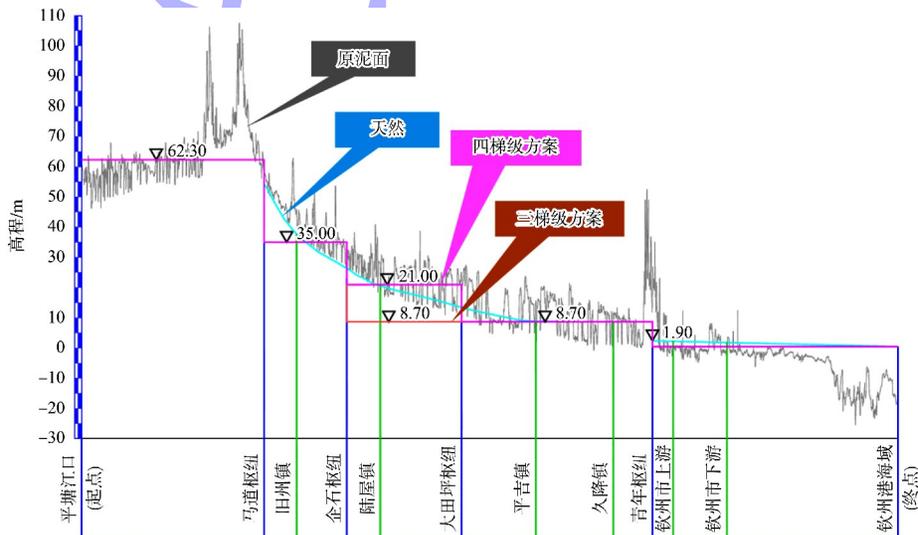


图 5 水位与水面线对比

Fig. 5 Comparison of water level and water surface profile

三梯级方案取消了大田坪枢纽, 需对企石至大田坪段航道进一步挖深, 导致区间水位下降约 4~17 m, 其中陆屋镇位置下降约 12 m, 地面至水

面高差达到 20 m, 对陆屋镇水景观打造产生一定影响, 同时水位降低将造成部分裁弯取直后的原河道处于干涸状态, 不利于生态涵养区建设。干涸后的

原河道可以容纳一定数量的开挖土石方，回填后可开垦为耕地或其他用地，可集约利用资源。从生态景观角度考虑，三梯级与四梯级方案各有优劣。

4.2.4 征地移民

经对比，三梯级方案在征地面积、耕地占用、房屋征拆、人口搬迁等指标方面均低于四梯级方案，其中征地面积减少4.3%，影响人口可减少6%，房屋拆迁面积减少11%，耕地占用减少11%，征地移民投资减少约14亿元。根据项目经验，尽量减少征地移民是控制投资的关键，也是确保项目有效实施推进的重要环节，因此从征地移民和有利于项目推进角度考虑，三梯级优于四梯级方案。

4.2.5 其他工程影响

三梯级方案取消大田坪枢纽可相应减少跨枢纽桥梁1座。同时，大田坪至企石枢纽段航道共涉及改建桥梁7座，新建桥梁1座，相比于四梯级方案，三梯级方案航道的进一步挖深使得桥梁设计最高通航水位明显降低，桥梁建设高度自下游至上游降低约0.1~9.2 m。

根据正在编制的《钦州内河港总体规划(2035年)》，平吉至陆屋段航道未来将规划建设南北港区平吉作业区和灵山港区陆屋作业区。三梯级方案陆屋作业区段航道正常蓄水位为8.7 m，正常蓄水位与设计最高通航水位差约10 m，码头方案要考虑分层系缆需求，码头前沿结构高度高，建设投入相应增加。同时，日常运行状态下水位与码头面高差约12 m，码头工艺设备的作业行程增加，进而导致作业效率降低以及用电量的增加。但以上问题在山区峡谷河流中的码头建设中较为常见，现有的技术条件能够妥善解决，不存在制约性因素。由于平陆运河沿线内河码头目前仍处于规划编制阶段，因此码头建设投资影响不纳入比选范围。

4.2.6 工程投资

三、四级方案投资对比情况见表4。

三梯级方案取消了大田坪枢纽，企石枢纽水头增加，枢纽工程费用减少约28亿元，但大田坪至企石段航道水位降低导致航道开挖量增加，受施工工艺影响，航道工程投资增加约52亿元；2个方案的跨、拦河建筑物与水利设施改建工程投资差异不大，总工程费用三梯级方案增加约23亿元；

三梯级方案取消了大田坪枢纽库区，避免了新建大田坪枢纽产生的库区淹没，征地移民费用较四梯级方案减少约7亿元；综合计算，三梯级较四梯级方案静态总投资增加约11亿元，增加比例为1.6%。

表4 投资对比
Tab. 4 Investment comparison

工程或费用名称	三梯级方案投资减去四梯级方案投资/亿元
枢纽工程	-28
工程	
航道工程	52
费用	
跨、拦河建筑物改建工程	-1
水利设施改建工程	0
合计	23
征地移民专项费用	-14
静态总投资	11

注：工程建设其他费用与预留费用非主要对比项，未在表中体现。

四梯级方案枢纽工程和征地移民投资较高，其中枢纽工程投资高，主要来源于增加大田坪枢纽带来的钢筋混凝土工程量的大幅增加。由于钢筋混凝土材料组成比较固定，且材料需求量大，后期实施过程中成本降低空间较小，征地移民费用在后期优化空间同样较小。三梯级方案的高投资主要来源于航道土石方工程，但在工程实施过程中土石方开挖精确调度，以及新型施工装备和施工工艺的采用等可有效降低开挖成本，从而缩小2个方案的投资差额，开挖料的综合利用也将产生溢出效益。

4.3 航运效益分析

与四梯级方案相比，三梯级方案投资较高，但梯级数量减少使得直接航运效益提升，可表现为通航效率提升带来的船舶营运费用降低、货值利息节约，以及枢纽数量减少从而节约船闸的运行维护费用，见表5。

表5 船闸及船舶运营费用节约情况
Tab. 5 Savings in operating costs of ship locks and vessels

年份	船闸运营维护费用节约/(万元·a ⁻¹)	船舶营运费用节约/(亿元·a ⁻¹)	年货值利息节约/(万元·a ⁻¹)	合计/(亿元·a ⁻¹)
2035	6 000	1.66	242	2.28
2050	6 000	2.71	403	3.35

差额内部收益率是指相比较的2个方案各年净现金流量差额的现值之和等于零时的折现率，当差额内部收益率大于或等于基准收益率或设定折现率时，则投资额大的方案较优^[10]。经分析，

三梯级较四梯级方案静态总投资增加约 11 亿元, 2035、2050 年分别可节约运营维护费用 2.28 亿和 3.35 亿元, 差额内部收益率为 11.87%, 大于社会折现率, 差额净现值为 24.1 亿元, 说明三梯级方案投资增加所形成的经济效益可观。

5 结语

1) 三梯级和四梯级方案在供水灌溉、防洪影响、生态景观等方面差异不大, 对征地移民的影响体现在工程投资中, 方案比选可侧重于经济指标分析。

2) 三梯级较四梯级方案投资增加 11 亿元, 差额投资经济内部收益率为 11.87%, 大于社会折现率, 差额净现值为 24.1 亿元, 说明三梯级方案投资增加所形成的经济效益可观。

3) 综合考虑通航效率、生态景观、防洪、取排水、灌溉、水资源配置等因素, 结合工程投资和运维成本的差额经济性分析, 三梯级方案经济效益好, 征地拆迁及影响人口少, 有利于项目总体推进, 推荐采用三梯级布置方案。

4) 三梯级方案的高投资主要来源于航道土石方工程, 但在工程实施过程中土石方开挖精确调度和新型施工装备采用等可降低开挖成本, 从而缩小 2 个方案的投资差额, 开挖料的综合利用也将产生溢出效益。

5) 未来国家对内河船舶的安全和环保性能的要求将会逐渐提高, 船舶建造成本随之提高, 船舶营运时间节省效益将进一步增加, 三梯级方案的经济效益优势将更加显著。

参考文献:

- [1] 渠化工程枢纽总体设计规范: JTS 182-1—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Design code for hydrojunction general layout of canalization works: JTS 182-1-2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [2] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程, 2024(6): 1-11.
LIU N. Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project[J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 1-11.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河总体线路及梯级布置方案研究[R]. 北京: 中

交水运规划设计院有限公司, 2020.

CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Research on the overall route and cascade layout plan of western land-sea new corridor (Pinglu) canal project[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2020.

- [4] 潘海涛, 吴澎, 袁和平, 等. 西部陆海新通道(平陆)运河工程规划设计方案综述[J]. 水运工程, 2024(11): 1-7.
PAN H T, WU P, YUAN H P, et al. Overview of planning and design scheme for western land-sea new corridor (Pinglu) canal project[J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 1-7.
- [5] 吕小龙, 吴澎, 刘晓玲. 平陆运河航道等级论证[J]. 水运工程, 2021(10): 266-270.
LYU X L, WU P, LIU X L. Demonstration on waterway classification of Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 266-270.
- [6] 潘海涛, 吴晓磊, 刘晓玲, 等. 新时代我国内河水运高质量发展思路[J]. 水运工程, 2021(10): 14-19.
PAN H T, WU X L, LIU X L, et al. High-quality development strategy for inland water transportation in China in the new era[J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 14-19.
- [7] 中交水运规划设计院有限公司. 平陆运河项目建议书[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Western land-sea new corridor (Pinglu) canal project proposal[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [8] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河工程可行性研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2022.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Western land-sea new corridor (Pinglu) canal project feasibility study report [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2022.
- [9] 高成岩, 程建中, 蔡翠苏, 等. 平陆运河水资源论证[J]. 水运工程, 2024(11): 8-12, 47.
GAO C Y, CHENG J Z, CAI C S, et al. Water resources assessment for Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 8-12, 47.
- [10] 刘晓玲, 吴晓磊, 王桃, 等. 新时期超大型运河开发综合效益评价[J]. 水运工程, 2024(9): 7-13.
LIU X L, WU X L, WANG T, et al. Comprehensive benefit evaluation of development of super large canal in new period[J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 7-13.

(本文编辑 赵娟)