

[特约专栏] · 西部陆海新通道——平陆运河工程建设专栏(1) ·

[编者按] 平陆运河是西部陆海新通道的骨干工程，是加快建设交通强国的标志性工程，对推动广西及西南地区发展具有战略意义。2023年12月，习近平总书记在广西考察时强调要共建西部陆海新通道，实施一批重大交通基础设施项目，高标准、高质量建设平陆运河。

工程起点为南宁横州市西津库区平塘江口，经钦州灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾。航道按内河Ⅰ级标准建设，可通航5000吨级船舶，将缩短西江中上游地区入海航程约560 km。平陆运河工程于2022年8月开工建设，预计2026年底具备通航条件。

以航运为主要开发功能的现代跨水系连通运河工程没有先例可遵循，前期工作周期长、研究内容覆盖面广、技术复杂，是一项集政策性、社会性、技术性、专业性于一体的系统工程。

在广西壮族自治区党委、政府和交通运输部的指导下，历时4年完成平陆运河项目规划、前期工作及专题研究、勘察设计等工作，突破一批核心关键技术，形成了丰富的研究成果，具有原创性和引领性，打造交通强国科技创新示范工程。

本专栏刊登的论文从项目前期立项、勘察设计、科技创新、建设管理、运营管理等角度进行系统总结，以指导类似跨水系连通运河工程的规划研究。

平陆运河工程建设关键问题研究与思考

刘 宁

摘要：平陆运河是西部陆海新通道的骨干工程，是新中国首个连通江海的运河工程。平陆运河建设规模巨大、综合效益明显、工程技术复杂，存在高效省水船闸、长寿命混凝土、智慧运河等关键技术难题。建设“优质工程、绿色工程、廉洁工程”，及时总结平陆运河的创新成果和实践经验，可以为我国未来建设运河工程提供借鉴。

关键词：平陆运河；省水船闸；长寿命混凝土；智慧运河；江海联运

中图分类号：U612.1+3

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)06-0001-11

Research and contemplation on key issues in construction of Pinglu Canal Project

LIU Ning

Abstract: The Pinglu Canal is a backbone project of the new western land-sea corridor, which is the first canal project connecting the river and the sea after the establishment of the People's Republic of China. The construction of the Pinglu Canal is huge in scale, evident in comprehensive benefits and complex in engineering technology, and there are key technical difficulties such as efficiency water-saving navigation locks, long-life concrete, and intelligent canal technology. Constructing high-quality project, green project, and integrity-based project, along with timely summarizing the innovative achievements and practical experience of the Pinglu Canal can provide reference guidelines for China's future construction of canal projects.

Keywords: Pinglu Canal; water-saving navigation lock; long-life concrete; intelligent canal; river-sea coordinated transport

收稿日期：2024-03-20

作者简介：刘宁（1962—），男，工学博士，教授级高级工程师，全国工程勘察设计大师（第五批，2006）。

平陆运河在广西境内将西江航运干线与钦州湾海运线相连，是西部陆海新通道的骨干工程，是有机衔接“一带一路”、服务构建新发展格局的重大战略工程，是加快建设交通强国的标志性工程，也是完善国家高等级航道布局、构建国家综合立体交通网的基础工程，已被纳入中共中央、国务院印发的《国家综合立体交通网规划纲要》^[1]，国务院批复的《珠江流域综合规划(2012—2030年)》^[2]、《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》^[3]，国家发展改革委印发的《西部陆海新通道总体规划》^[4]，是国家规划的“四纵四横两网”国家高等级航道的重要组成部分。

平陆运河工程有多年深入论证、审慎研究的

基础。2022年3月，经广西壮族自治区党委、政府同意，平陆运河工程正式审批立项；同年7月，自治区十三届人大常委会第三十一次会议审议通过关于同意建设平陆运河的决议，平陆运河工程可行性研究报告正式批复；8月，先导性建设工程（控制性单体工程）初步设计批复；12月，平陆运河整体初步设计批复。平陆运河起于南宁市横州市西津库区平塘江口，向西直通南宁、经右江由百色达云南，向东经西江航运干线由梧州连接粤港澳大湾区，向北经柳黔江直达来宾、柳州并溯都柳江达贵州，终点通过茅尾海向南由北部湾出海。西南地区货物经平陆运河出海，较经广东出海缩短内河航程约560 km。平陆运河位置见图1。

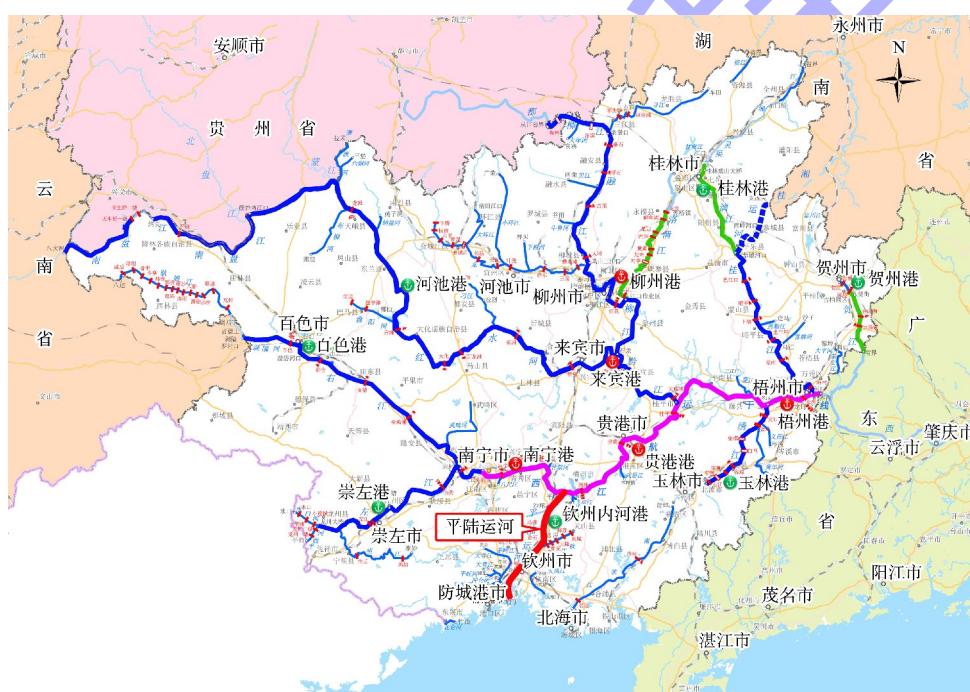


图1 平陆运河位置

工程按照“通江达海、整体规划、一次建成、系统运行”的总体建设方案，于2022年8月28日正式开工建设，截至2024年5月底，项目累计完成投资329亿元，占总概算的45.2%；土石方开挖2.03亿m³，占总量的63%，工程正在安全、高效、有序建设。平陆运河工程通航技术指标见表1，通航建筑物技术指标见表2。平陆运河工程其他技术指标为：1) 建设征地指标为永久征地2 767万m²（4.15万亩）、临时征地5 587万m²（8.38万亩）、

迁移人口1.43万人、拆迁房屋2 875户、拆迁企事业单位23个。2) 工程施工指标包括工程量和施工参数，其中工程量为陆上土方开挖1.287 330亿m³、陆上石方开挖1.165 534亿m³、水下疏浚3 530.28万m³、水下炸礁4 034.11万m³、混凝土1 199.01万m³；施工参数为施工工期52个月、最大边坡高度188 m（马道枢纽2#边坡）、土石方开挖最大月强度3 000万m³/月、混凝土浇筑最大月强度45万m³/月、最大人员投入量2.4万人、

最大设备投入量 7 200 台(套)(含最大船舶投入量 200 艘);3) 经济指标为静态总投资 704.40 亿元、

建设期贷款利息 22.79 亿元、总投资 727.19 亿元。

表 1 平陆运河工程通航技术指标

航道 技术 等级	航道里 程长度/ km	航道主尺度(宽度×水深×最小弯曲半径)/m					桥梁通 航净高/ m	设计 船型	年单向 通过能力/ 万 t
内河 I 级, 可通航		平塘江口— 青年枢纽	青年枢纽— 水上服务区	水上服务区— 沙井钦江大桥	沙井钦江大桥— 沙井岛下游	沙井岛下游— 钦州港东航道			
5 000 吨级 船舶(双线)	134.2	80×6.3×360	90×6.3×450	100×6.5×450	130×6.5×540	140×6.5×540	≥18	5 000 吨级 散货船 (长 90 m、 宽 15.8 m、 吃水 5.0 m)	近期 8 400, 远期 8 900
5 000 吨级 船闸)									

表 2 通航建筑物技术指标

枢纽	形式	有效尺度/m			设计通航水位/m		最大工作 水头/m	省水 形式	省水 效率/%	消能 方式	输水阀门速度/(m·min ⁻¹)	
		长	宽	最小门槛水深	上游	下游					启	闭
马道	双线 船闸	300	34	8	57.80~ 63.60	34.00~ 35.92	29.60	叠合式三 级省水池	>60	闸室为盖板消能, 下闸首为格栅消能	8.1	16.1
企石	双线 船闸	300	34	8	34.00~ 35.00	8.00~ 20.02	27.00	叠合式三 级省水池	>60	闸室为盖板消能, 下闸首为格栅消能	8.1	16.1
青年	双线 船闸	300	34	8	8.00~ 9.32	-1.62~ 6.50	10.32	互灌互泄	50	闸室为明沟消能, 下闸首为格栅消能	2.0	4.0

1 工程总体方案

1.1 建设规模

平陆运河开发任务以发展航运为主,兼顾供水、灌溉、防洪、改善水生态环境等功能,项目起于南宁市横州市西津库区平塘江口,经钦州市灵山县陆屋镇沿钦江进入北部湾、接钦州港东航道起点,全长 134.2 km,考虑内河航运发展和江海联运需要,按内河 I 级航道标准建设,可通航 5 000 吨级船舶。通过建设梯级枢纽对航道进行连续渠化,各枢纽同步建设双线 5 000 吨级船闸,工程等别均为一等,船闸有效尺度均为 300 m × 34 m × 8 m(有效长度×有效宽度×最小门槛水深)。

1.2 运量测算

平陆运河的货物运量需求预测基于综合立体交通网视角,构建了一套针对从无到有的内河水运新通道货运量预测方法体系。根据技术经济性比较,明确平陆运河直接腹地主要为钦州、南宁、贵港、百色、来宾、柳州、河池、崇左等八地市,间接腹地可辐射广西全区以及贵州、云南等省部分区域;随着湘桂运河开发,平陆运河远景腹地有望拓展至湖南省部分地区。

工程可行性研究阶段,运用四阶段法、综合

运输分担法、产运销平衡法等常规方法预测,2035、2050 年平陆运河运量将分别达到 9 550 万、1.2 亿 t。采用投入产出等预测方法预测平陆运河经济带及沿线地区产业发展产生的诱增运量将达到 3 000 万~6 000 万 t,展望 2050 年平陆运河货物输运量将达到 1.5 亿~1.8 亿 t^[5]。

1.3 水资源论证

水资源是关系国家环境与发展的战略性经济资源,也是保障平陆运河航运安全的关键要素^[6-7]。郁江本地水资源总量丰富,但丰枯分配不均,通过开展规划水资源论证,深入分析水资源条件对规划的保障能力与约束因素,科学论证地区规划布局与水资源承载能力的适应性,提出平陆运河航运用水近、远期水资源配置方案,保障平陆运河航运用水的需要。

平陆运河近期用水流量需求为 24 m³/s(含引郁入钦工程枯水期 20 m³/s 的流量),年均需水量约 7 亿 m³,通过优化百色水库发电调度机制,实施百色、澄碧河、西津、瓦村、左江、老口等 6 库联合调度,在满足流域内经济社会发展用水需求及贵港断面流量目标要求的前提下,满足 2035 年平陆

运河航运用水需求。远期结合航运发展需要，利用新建引调水工程，满足平陆运河航运用水需求。

1.4 通航标准

航道等级的确定是航道工程建设的关键问题。通过分析西江航运干线现状通航船舶发展趋势，西江航运干线达到Ⅰ级航道标准后，5 000 吨级船舶数量将快速增长。综合考虑货运发展需求，以及与西江航运干线和北部湾国际枢纽海港的协调性，平陆运河按内河Ⅰ级航道标准建设，主要航段尺度：平塘江口—青年枢纽段航道底宽 80 m、水深 6.3 m，青年枢纽—沙井港段航道底宽 90 m、水深 6.3 m，沙井港—钦州港段航道底宽 130 m、水深 6.5 m，可通航 5 000 吨级船舶。跨河桥梁最小通航净高为 18 m，一孔跨过通航水域确保通航净宽，为远期通航更大船舶预留了基础条件。

1.5 线路选择

平陆运河总体线路布局充分利用天然地形及河势条件，统筹考虑自然资源、生态环境、工程投资以及综合效益等因素。通过对分水岭段冲顶派和出水坳线路，入海口段钦江、茅岭江和大风江线路等多方案比选，确定南宁市横州市西津库区平塘江口—沙坪河—分水岭（出水坳线路）—陆屋镇钦江干流—北部湾钦州港东航道方案。运河沿

线分为 5 个区段，分别为沙坪河段、分水岭段、钦江干流段、钦州城区段和入海口近海段，总长度 134.2 km。平陆运河线路见图 2。



图 2 平陆运河线路

1.6 梯级布置

梯级布置需从航运、供水、防洪、生态景观、土石方利用、征地移民、工程投资等多方面进行技术经济综合比选^[8]，工程拟定了三级、四级、五级、六级航运梯级布置方案，平陆运河梯级布置见图 3。平陆运河最大通航总水头约 65 m，水位衔接依靠梯级渠化和航道浚深实现，设置梯级越多，单级通航水头越小，有利于航道水位衔接并减少航道开挖，但影响整体通航效率；设置梯级越少，通航效率越高，但将增加单级枢纽通航水头和航道开挖工程量。

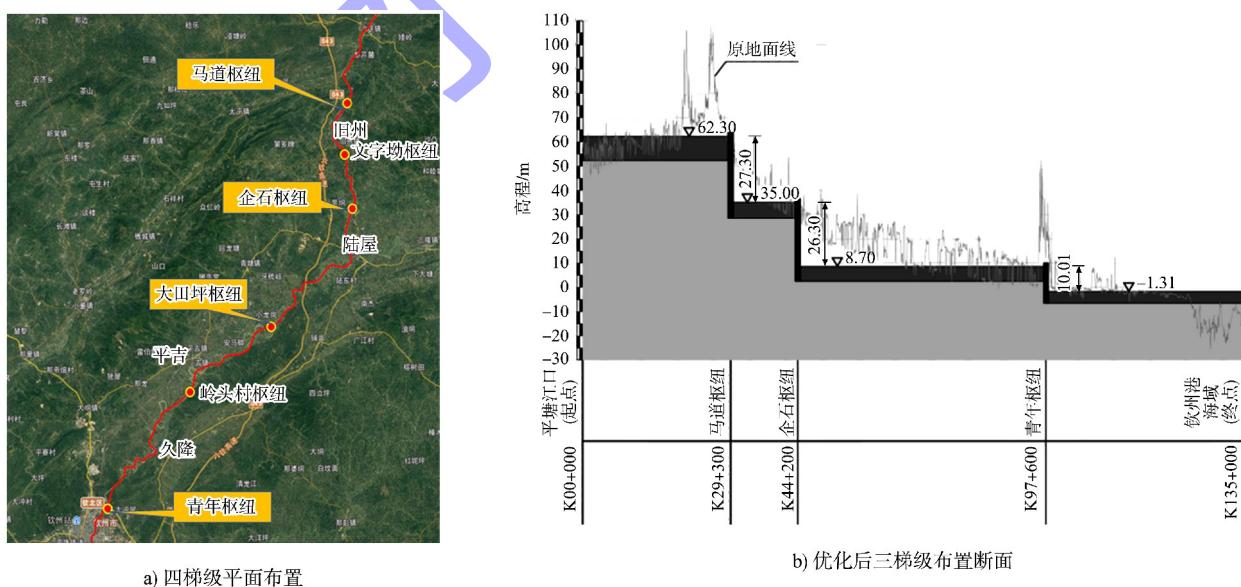


图 3 平陆运河梯级布置

三、四级方案较五、六级方案投资更省且通航效率更高，作为初选方案。经进一步比选，三、

四级方案在供水灌溉、防洪影响、生态景观、土石方利用等方面差异不大，虽三级方案较四级方

案投资多11亿元，但增加投资的内部经济收益率为11.87%，差额净现值为24.1亿元，增加投资产生的经济效益较为显著；三级方案较四级方案的征地拆迁及影响人口少，且通航效率最优，比四级船闸减少通行时间约2 h，最终选定三级方案。正常设计水位下，马道、企石、青年枢纽各级正常运行水头分别为27.30、26.30、10.01 m。

2 重大问题应对策略

平陆运河沿线地形地貌和水文地质条件复杂，开挖土石方量和枢纽混凝土浇筑量较大，需要统筹解决好船闸高效运行、资源利用、工程安全以及江海联运等系列问题。

2.1 高效省水船闸

2.1.1 船闸设计

马道枢纽和企石枢纽位于天然径流量短缺的分水岭区段，船闸用水主要来自郁江流域的西津水库，枯水年份流域水资源供需矛盾较突出，平陆运河梯级船闸须采取省水措施。开展枢纽水工整体物理模型试验、输水系统数学模型及物理模型试验、复杂航段船舶操纵模拟等模型试验研究，并根据研究成果和结论等进一步优化枢纽、船闸输水系统设计。马道和企石枢纽省水池创新地采用三级叠合式布置，即一、三级省水池上下重叠布置成组合结构，二级省水池平行布置于组合结构旁侧，可节省船闸用水量60%以上，年节水量约12亿m³。马道枢纽船闸最大运行水头为29.6 m，企石枢纽船闸最大运行水头为27.0 m，船闸工作闸门均采用人字闸门，主输水廊道和省水池廊道工作阀门均采用平面阀门。船闸输水系统在闸室内采用闸底纵支廊道四区段盖板消能，船舶停泊在闸室内不同位置所受的最大纵、横向力和泊稳条件满足设计规范要求。运河沿线船闸、管理区、服务区消防设施呈多点布设，连接成线，在马道、企石、青年枢纽均设置消防供水泵站，船闸两侧布置环状消防管线，对侧交叉布置消火栓接口，为运河整体消防安全提供有力保障。

2.1.2 启闭系统

省水船闸按省水模式运行时，船闸灌泄水步骤多、时间长，为实现高效可靠运行须研发工作阀门

快速启闭技术。平陆运河省水船闸平均灌（泄）水时间控制在16 min内，工作阀门启、闭门速度分别达到8.1、16.1 m/min以上，大幅超过现有行业规范推荐速度^[9-14]，并超越了国际标准推荐的速度^[15-16]。通过技术攻关，工程创新采用迷宫式缓冲结构，有效解决了液压油缸无级调速和缓冲保护等船闸快速启闭的技术难题^[17-18]。

2.2 长寿命混凝土

船闸混凝土浇筑施工时，由于混凝土内外温差大极易产生裂缝^[19-21]；同时，船闸结构服役环境复杂，对混凝土耐腐蚀、耐冲刷提出较大挑战^[22]，防裂和长寿命混凝土的研发应用是打造百年品质工程的关键。

2.2.1 抗裂技术

为有效控制温度裂缝，建立混凝土收缩变形时变模型，揭示抗裂性能提升机制，提出平陆运河枢纽不同部位水工混凝土高抗裂关键指标；研究膨胀材料离子掺杂改性方法及膨胀历程优化设计方法，明晰膨胀历程和中热硅酸盐水泥混凝土温度及收缩历程匹配机制，并研制适合水工混凝土专用的水化温升抑制剂^[23-24]。平陆运河工程应用混凝土抗裂性能智能化监控与预警系统，和基于施工过程数据驱动的混凝土质量保障技术，实时监测混凝土抗裂性能关键参数，对大仓面温度应力进行仿真计算以及动态分析施工温差、温降阈值等创新工艺技术，指导混凝土现场浇筑施工，抑制混凝土开裂，提高工程质量。具体措施包括：在设计阶段合理划分结构分缝，避免单一块段尺寸过大造成开裂风险增加；在施工过程中严格控制混凝土分层浇筑厚度，基础强约束区1.5~2 m层厚，弱约束区2~3 m层厚，脱离约束区3 m层厚。优化混凝土配合比设计，采用8 cm大粒径低坍落度混凝土，降低胶凝材料用量减少水化热。进行混凝土施工全过程温度控制，预冷混凝土采用一次集料风冷+片冰+冷水的方式进行降温，确保高温季节出机口温度不超过16 °C，并采用制冷水通水冷却严格控制混凝土核心温度和外表温差，混凝土浇筑完成后及时覆盖并养护。

2.2.2 高性能研发

平陆运河枢纽船闸长期受海水及地下水侵蚀、

高频高速水流冲磨破坏等, 马道、企石枢纽需要重点解决混凝土抗冲刷、钙溶蚀等问题, 青年枢纽需要克服盐水腐蚀问题, 因此须研发抗渗、耐蚀与抗冲磨性能更高的特殊混凝土材料^[25-26], 同时针对船闸输水廊道、阀门井二期混凝土等重要结构件和特殊部位开展专门的配合比设计和防腐设计, 以达到设计使用年限 100 年以上的长寿命目标。设计使用年限 100 年时青年枢纽混凝土配

合比与耐久性试验结果见表 3。通过开展侵蚀环境下混凝土劣化规律、混凝土功能性材料设计与构筑的研究以及混凝土耐久性设计优化, 研发出长寿命关键材料, 提升中热硅酸盐水泥混凝土的抗氯离子渗透性、耐酸腐蚀与抗冲磨性能, 同时建立混凝土超现行设计使用年限的高耐久成套技术, 攻克平陆运河航运枢纽工程混凝土长寿命难题。

表 3 设计使用年限 100 年时青年枢纽混凝土配合比与耐久性试验结果

使用部位	强度等级	混凝土							配合比/(kg·m ⁻³)			60 d 抗压强度/MPa	氯离子扩散系数/(10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)	
		水	水泥	I 级粉煤灰	S95 级矿渣粉	CPA	减水剂	河砂	石子	5~20 mm	20~40 mm	40~80 mm		
水位变动区	C ₆₀ 35	109	151	61	61	30	4.5	655	418	418	557	56.6	7.1	4.9
水下区	C ₆₀ 30	104	141	56	56	28	3.9	685	417	417	556	48.1	9.0	7.3

2.3 航道设计

平陆运河航道设计主要遵循 JTS 180-2—2011《运河通航标准》^[27]、GB 50139—2014《内河通航标准》^[28], 综合考虑航行速度、断面系数、断面形状、通航条件、地质条件等因素, 运河航道主要设计参数为: 设计航速 12 km/h, 最大横向流速 0.3 m/s, 最大回流流速 0.4 m/s, 航道断面尺度(80~130 m)×(6.3~6.5 m)(宽度×水深), 107 个转弯段航道半径 360~2 000 m。

平陆运河航道设计优化需要考虑土石方工程量、边坡高度、线路长度、征地拆迁等因素, 其中航道弯道段设计是重点, 包括转弯半径、转向角、两反向转弯之间直线段长度、航道局部加宽等内容, 以及各指标之间的相互关系。例如 K28+500 段航道高边坡, 通过优化航道与枢纽连接段设计, 降低了左岸高边坡开挖高度 11 m, 减少了土石方开挖 1.4 万 m³, 同时有效改善船舶通航条件。

为保障平陆运河通航要求以及沿线居民生产生活需求, 结合沿线村镇规模、交通需求和远期发展规划, 项目涉及新(改)建 27 座桥梁, 其中改建 20 座桥梁、新建 6 座桥梁、防护加固桥梁 1 座。此外, 工程建设 16 座互通桥梁, 保障施工期间两岸通行需求。

2.4 土石方综合利用

平陆运河工程土石方开挖量较大、达到 3.21 亿 m³, 工程自用、邻近区域矿坑回填等方式

仅能消纳小部分土石方。工程沿线周边涉及永久基本农田、自然保护区、海洋公园、水源保护区、生态公益林等生态敏感区域, 若剩余土石方全部弃用将对生态环境产生较大不利影响, 因此必须进行资源化利用^[29-30], 主要措施包括: 使用自身开挖料进行工程区回填以减少外运量。开挖料中强度高且密度大的灰岩、大理岩、花岗岩以及疏浚河砂用作绿色建材。成立专业化机构统筹全线开挖料的加工利用, 确保能用尽用。合理规划、充分利用工程土石方堆场用于生态保护与修复、土地整治和高标准农田建设、城镇和工业园区建设。通过土石方资源化利用, 做到耕地保护、生态修复、城乡建设、产业发展的融合, 促进平陆运河沿线的经济发展。截至 2024 年 5 月底, 已开挖 2.03 亿 m³ 土石方, 全部实现综合利用。平陆运河土石方综合利用情况见表 4。

表 4 平陆运河土石方综合利用情况

利用方向	已利用土石方/亿 m ³	利用率/%
抬填造地	1.19	58.62
园区回填	0.46	22.66
海上吹填造地*	0.00	0.00
工程利用	0.13	6.40
绿色建材	0.01	0.49
矿坑修复	0.04	1.97
土地复垦	0.15	7.39
其他(临时堆存、外抛疏浚淤积物)	0.05	2.47
总计	2.03	100.00

注: * 海上吹填造地视沿海航道疏浚工程进展情况有序实施。

2.5 高边坡稳定控制

平陆运河分水岭段劈岭开挖连通沙坪河与旧州江，钦州干流段裁弯取直、加深、加宽开挖，沿线形成高度不等的航道边坡，其中位于分水岭段的马道枢纽上游引航道的2#边坡最高达188 m。马道枢纽上游引航道边坡地层主要有前泥盆纪地槽型沉积、晚古生代地台型沉积、中生代和新生代陆缘活动带盆地型沉积三大类。受隆起运动及构造应力影响，局部坡段原生层面及结构面倾向变化范围较大，局部形成顺坡或倒倾，且层面、结构面发育密集，部分张开、部分夹泥质充填、部分层面间发育成软弱夹层。边坡稳定控制涉及工程投资、坡面防护等系列问题，工程建设采取了多种措施，主要包括优化布置、降低高度、将船闸主体段适当下移、使底高程较高的引航道布置在相对较高地形区域，从而减小边坡开挖高度近40 m。开挖自稳、支护保稳，按照“边坡总体坡形开挖基本自稳、浅表坡面防护、深层岩体锚固和加强排水”等原则进行开挖及支护加固，在确保边坡稳定的同时节省投资^[31-32]。实时监测、动态设计，布置55个全球导航卫星系统(GNSS)地表位移监测点、39个深部位移监测点以及39个地下水位监测点，实时监测并跟踪分析边坡变形，反馈设计^[33-34]。

截至2024年5月底，马道枢纽上游引航道边坡地表最大累计水平变形40 mm，深层累计最大变形6.72 mm，均趋于收敛稳定状态，马道枢纽2#高边坡位移监测数据见表5。但高边坡尚未经历通水运行及设计暴雨工况等运行条件考验，只有经过大自然验收才是真正成功的工程，后续仍须加强监测和反馈分析。

表5 平陆运河马道枢纽2#高边坡位移监测数据

监测时间	地表最大累计 水平变形/mm	深层累计 最大变形/mm
2023年5月	23.00	6.57
2023年9月	32.00	6.55
2023年12月	34.00	6.60
2024年3月	40.00	6.59
2024年5月	33.00	6.72

2.6 江海联运方案

平陆运河建成后，将实现西江航运干线与北

部湾港的直接连通，但江船入海、海船入江仍面临较大挑战。为解决江海联运难题，通过“相当A级航区”的划定保障江船入海，打造江海直达船型解决海船进江，谋划建设江海联运港区实现江船与海船的中转换装，确保5000吨级船舶江海顺畅通航，充分发挥平陆运河江海联运的优势。

2.6.1 相当A级航区划定

平陆运河入海口近海段和钦州港海域属于沿海航区，按国家相关规定，内河船禁止在海域内航行。为实现内河船舶通过平陆运河直达海港，大力提升平陆运河运输效率和经济性，须开展内河船舶在海域的适航性研究。考虑到钦州湾水域是河海交界区，较传统沿海航区掩护条件较好，更符合内河A级航区标准^[35]。通过开展该区域波浪数值模拟与波浪特征研究、水流数值模拟和水流特征研究、气象水文条件对船舶安全的影响分析等一系列研究，最终划定钦州湾“相当A级航区”范围^[36]。为进一步保障运河通航后钦州湾水上交通组织平稳有序，还需开展该水域水上交通管理、船舶交通流变化对通航秩序影响分析等后续补充研究，验证航区划分的合理性，提出内河A级航区船舶的适航指标，为平陆运河建成后的船舶营运和海事监管提供依据与支撑。

2.6.2 江海直达船型

平陆运河的建设会带动产业布局调整，触发西江沿线与海南洋浦港、越南海防港及岘港等地区近洋运输需求，5000吨级及以上的江海直达船型的运输经济性凸显，将在重要物资保通保畅和国内国际产业循环中发挥重要作用。受船型尺度约束海船进江难度较大，须开发适应内河航道条件的江海直达船型。平陆运河江海直达船型设计综合考虑内河、沿海两种航区特点，在船舶载重量、航行性能、绿色能源应用、智能航行、高效过闸等方面开展深入研究^[37]，既满足海上航行时抗风性、耐波性及航向稳定性的要求，又具备内河航行时良好的回转性与操纵性，合理确定系列船型参数，保证不同航线、不同货种船舶的建造和营运经济性。

2.6.3 江海联运港区

与运河同步规划建设江海联运港区，是完善

北部湾国际枢纽海港集疏运体系，发挥平陆运河通江达海功能的重要措施。钦州港域具有天然地理区位和衔接条件，相当 A 级航区可覆盖至茅尾海湾口金谷港区勒沟和果子山作业区，大榄坪港区大榄坪南作业区、大环作业区水域范围，为内河船舶直运提供了良好基础，江海联运港区的江海联运条件较为完备。随着运河江海联运货运规模的发展，未来钦州港域散货转运存在能力缺口，需要新建散货泊位或由防城港江海联运分担解决；已批复相当 A 级航区未覆盖防城港域，可通过江海直达船舶中转运输解决。

2.7 智慧运河建设

为加快构建广西智慧水运网络，推动平陆运河高质量建设与运行，智慧运河建设势在必行。智慧运河建设要紧密围绕工程建设、运营管理、通航服务、流域开发等各阶段实际需求，统筹谋划、科学确定建设重点与技术路径，夯实数字基础，强化数字技术与业务深度融合，加快技术迭代，将平陆运河建设成世界一流的智慧运河。

2.7.1 智慧运河数字底座

通过感知基础设施建设与外部数据接入相结合的方式，打造涵盖水运、水利、海事、环境等多行业、涉及陆域、水域、空域等多方位的全面感知网，提高平陆运河各要素的自动化监测水平和动态监测能力。通过第五代移动通信网络和第五代固定通信网络(5G/F5G)、北斗卫星导航等通信技术的融合应用，打造高速通信网。最终以建筑信息模型(BIM)、地理信息系统(GIS)和物联网设备为数据载体，融合全面感知网和高速通信网，打造平陆运河数字孪生平台，夯实智慧运河数字底座。截至目前，平台已承载 BIM 模型、影像和倾斜摄影等数据达 2 TB，完成建设期 20 套信息化系统超过 1 亿条数据的接入和呈现。

2.7.2 智慧运河数据大脑

以数字孪生平台为底座，通过云计算、大数据、物联网、人工智能等先进技术的融合应用，打造数据、算法与应用服务为一体的数据大脑。在业务应用过程中，加快技术迭代，不断增强数据大脑的智慧化服务能力，提高平陆运河建、管、养、运

全过程的管控水平。截至目前，大数据平台集成了 15 个业务系统的数据，规模累计约 2 463 万条，共享接口累计 43 个，现阶段主要为跨线桥系统、智慧建造和数字孪生系统提供数据服务支撑。

2.7.3 智慧运河应用

智慧运河建设目标是实现建设期智慧化管理和运营期运河船舶安全高效航行。平陆运河建设期数字孪生平台已完成建设管理、智慧工地、综合监控等 6 大功能板块和工程建设“一屏掌控”、BIM 模型“一模到底”、工地现场“一物感知”等 8 大应用场景构建。在安全运营方面，智慧运河应对运河航道、支流口等进行长期跟踪观测和演变分析预测，开展重点航段泥沙观测、水情水文动态跟踪，建设运河船闸设备设施健康监测系统，加强对水工建筑物、输水系统、金属结构及启闭机等的实时监测和动态评估，强化对危险货物船舶运行及过闸状态等的实时掌控，保障运河安全，目前已对 32 个高大边坡进行监测，安装监测设备 681 套。接入了 6 个河道水文站、3 个河道水位站和 3 个水库水位站的实时与预测水文数据，可预测未来 72 h 流量、水位，实现淹没范围分析和预警。在通行效率方面，智慧运河应实现过闸船舶禁停和超速监测，融合西江干线船运数据，在现有西江干线过闸智能调度的基础上实现基于“西江航运干线—平陆运河”的多级多线船闸的联合智能调度，提升过闸效率；同时还应积极响应内河集装箱运输、铁水联运、公水联运等运输结构调整政策，加强运河水系周边船闸信息双向互通，大力提高江铁海多式联运能力和自动化水平。

3 高标准高质量建设

工程是人的本质力量的对象化，无不打上时代的烙印。平陆运河打造“优质工程、绿色工程、廉洁工程”是习近平总书记的殷殷嘱托，是项目建设的根本遵循。广西成立优质工程检查专家组、绿色工程检查专家组、廉洁工程监督指导组，紧盯工程建设关键环节、关键技术、关键工序，加强监督检查，聚焦实现“零重大安全事故、零死亡、零生态环境严重破坏”的“三零”目标，高标准高质量推进平陆运河建设。

3.1 全力打造优质工程

组建一流管理团队，招标选择一流设计、施工、监理企业，选定一流方案，施行一流管理。聚焦运河关键技术难题开展 70 余项专题研究，为运河建设提供高科技支撑。制定设计、施工、质量检验三大企业标准。通过动态设计、持续优化，施工图设计较初步设计累计优化混凝土 91.5 万 m³，节省投资近 10 亿元。秉承工匠精神，推进精品建造，推行质量风险预防管理，严格落实专项施工方案论证审查制度，强化技术方案分级分类审核责任；把牢施工质量管理人员设备进场关、开工关、材料关、工艺关、检测验收关；落实质量管理首件工程认可制、隐蔽工程验收认可制、材料报备检验制、工程质量考评制、工程质量责任追究备查制。加强安全管理，筑牢安全底线，创建“平安百年品质工程”示范项目。压紧压实安全生产管理责任，从源头上防范化解重大安全风险，确保实现“三零”目标；深入推进文明工地建设，打造平陆运河文明工程标杆。

3.2 全力打造绿色工程

集约利用资源，强化国土空间规划引领和项目建设用地规模管控，最大限度避让永久基本农田和生态保护红线。按照“总体平衡、保本微利”原则，做好工程开挖土石方综合利用。集约节约使用林地，强化水资源消耗总量和强度双控，优化海洋资源保护与利用格局，做到资源节约利用最优。强化环境污染防控、湿地和生物多样性保护，全线建造动物专用通道桥梁 1 座，设置鱼道、鱼类增殖站及 36 个生态涵养区，建设生态护岸、柔性护坡和生物多样性观测站，构筑了沿运河的生态廊道；强化流域环境综合整治和生态修复，严格落实红树林生态恢复、监测和管护要求；加强生态环境保护执法，完善生态环境保护制度体系，做到生态保护最优。严格执行水土保持防治标准，加大重点区域防治力度^[38]，做到水土流失管控最优。创建“趋零碳”运河示范，建立健全碳排放统计监测体系，做到绿色低碳发展最优。

3.3 全力打造廉洁工程

创新实施“147”监督工作模式，探索建立

“室组地企”和审计、监理等多方联动的“1 套监督工作机制”，做到工程合同和廉洁合同同步签订、技术交底和廉洁交底同步开展、质量监督和廉洁监督同步进行、项目工程和廉洁工程同步验收，强化工程项目设计、概预算、招投标、施工、变更、工程验收、资金拨付等流程监督，推动全过程监督走深走实。压实企业全面从严治党主体责任，督促和推动各参建单位落实清廉建设责任，做到责任落实过硬。规范内控体系建设，紧盯工程决策、招投标、计量支付等关键环节，做到内控机制过硬。完善国资监管体系，严格重大事项监管，开展“穿透式”审计，强化信访维稳工作，做到外部监督过硬。

4 思考与展望

平陆运河连通西江航运干线与北部湾国际枢纽海港，通过公水铁联运服务广大中西部地区，在推动完善国家综合立体交通网、优化区域国土空间利用、释放“海”的潜力、激发“江”的活力、促进西部地区更好融入新发展格局等方面意义重大。下一步，要充分发挥平陆运河西部陆海新通道骨干工程的骨干作用，持续提升西部陆海新通道开放能级和通达能力，加快构建繁荣兴旺的运河经济影响区，更好服务新时代西部大开发战略，深度融入共建“一带一路”。

4.1 构建高水平物流运输体系

发挥平陆运河的牵引作用，大力发展战略性新兴产业，进一步提升沿海对广西乃至西南地区的辐射能力，打通广西内河航运的“内循环”与北部湾海运的“外循环”，对广西乃至西南地区发展具有重要战略意义。加快实施西江航运提升行动，按照“先干后支、先下后上、先通后畅”的原则，分步推进西江干支线航道提级工程；有序推进碍航建筑物整治，实现与平陆运河有效衔接。积极推进“公转水”、“铁转水”，打造和培育一批联运品牌线路，推动铁水联运班列与中欧班列、长江航运、西江航运高效衔接，进一步降低全社会物流成本。发挥南宁面向东盟的国际物流枢纽、北部湾国际枢纽海港的双核带动作用，打造柳州、桂林、来

宾、河池多点支撑的枢纽网。创新平陆运河运输组织模式，建立码头、船公司、供应链企业“利益共同体”，规范引导重点企业组织货源，深化港区物流合作，提升与西部陆海新通道沿线省份以及东盟国家贸易发展水平，努力实现平陆运河双向货运平衡运输。

4.2 提前谋划航运扩能

平陆运河建成后，原高运输成本时无法进行的经济活动得以开展，除了对沿线地区经济产业格局产生深刻影响以外，借助珠江水系高等级航道网的传导，也将对高等级航道沿线地区经济产业格局产生深远影响，吸引西部地区产业沿江沿河集聚，从而产生更多的诱增需求。国内同类工程经验表明，大型航运工程的建设会引发水运比较优势的快速显现和货运量爆发式增长：如长江三峡船闸提前 19 年达到单向设计通过能力；西江长洲水利枢纽一、二线船闸于 2007 年建成后设计通过能力很快饱和，2015 年扩建完成三、四线船闸，2023 年长洲枢纽过闸货运量已达到 1.84 亿 t，其下行货运量已超过设计通过能力，目前长洲枢纽第五线船闸也已启动前期工作。随着西部陆海新通道战略的深入实施，平陆运河辐射范围不断扩大，广西水运软硬件条件不断完善，平陆运河运能大、价格低、能耗少的优势将进一步发挥，预测近、中、远期货运需求将显著提升，2030、2035 和 2050 年货运需求量将分别达到 1.26 亿、1.95 亿和 2.60~3.30 亿 t。谋划航运扩能升级意义重大，可通过以下两种方式实现：对平陆运河航道进行扩宽挖深并同步建设三线船闸，或另外选线建设江海连通通道，做好北流江—南流江、鲁塘江出海方案等通道前期研究。

4.3 加快建设运河经济影响区

平陆运河建设打通广西开放发展“任督二脉”，带动北部湾经济区及西江水系连通的西部内陆地区实现向海发展，有效形成了主轴带动整体、多点联动发展、沿海沿江沿边三区统筹的运河经济影响区发展格局，成为广西及西南地区向海而兴、向海图强，打造国家经济新增长极的重要战略支点和突破口。要把平陆运河建设作为贯彻

落实习近平总书记赋予广西“三大定位”新使命的重要举措，持续扩大对内对外开放，从更高层面、更大范围、更广视野谋划建设运河经济影响区，加快形成运河建设带动流域产业发展、引领区域经济繁荣兴旺的发展局面，助力铸牢中华民族共同体意识示范区、国内国际双循环市场经营便利地、粤港澳大湾区重要战略腹地、沿边临港产业园区和西部陆海新通道“一区两地一园一通道”建设。力争到 2035 年，平陆运河经济影响区基本形成畅通、绿色、繁荣、开放、创新、幸福的经济带，建成水陆联动的综合运输走廊和河海陆统筹发展的壮美画廊，成为广西融入和服务新发展格局的战略载体、国际国内贸易互联互通的组织平台、区域经济重要增长带和高质量发展重要动力源；到 2050 年，全面建成高质量、高水平的社会主义现代化运河经济影响区，运河两端现代化大都市靓丽呈现，平陆运河高效运行，运河流域生态系统健康稳定，现代化经济体系成熟完善，高质量发展水平、综合经济实力以及竞争力、创新力、影响力大幅提高，全面形成生态优美、宜居宜业、充满活力、和谐有序的发展局面，成为国际知名运河经济带和经济影响区，为水运发展、江海连通、港城繁荣提供有益方案。

参考文献：

- [1] 中共中央, 国务院. 国家综合立体交通网规划纲要[A]. 北京: 国务院, 2021.
- [2] 水利部珠江水利委员会. 珠江流域综合规划(2012—2030 年)[A]. 广州: 水利部珠江水利委员会, 2013.
- [3] 国务院.“十四五”现代综合交通运输体系发展规划[A]. 北京: 国务院, 2021.
- [4] 国家发展改革委. 西部陆海新通道总体规划[A]. 北京: 国家发展改革委, 2019.
- [5] 中交水运规划设计院有限公司. 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.
- [6] 张光斗. 我国的水资源及可持续发展: 在中国工程院科技论坛“中国的水问题”报告会上讲话[J]. 中国工程科学, 2000(10): 50.
- [7] 潘家铮, 王家柱. 科学论证是重大工程正确决策的基础: 三峡工程论证结论的实践验证[J]. 中国工程科学, 2001, (3): 21-26.

- [8] 郑守仁, 钮新强. 三峡工程建筑物设计关键技术问题研究与实践[J]. 中国工程科学, 2011, 13(7): 20-27.
- [9] 刘浩, 李大伟, 周兵, 等. 大藤峡船闸液压启闭机设计[J]. 东北水利水电, 2019, 37(11): 9-11.
- [10] 胡亚安, 潘明鸿, 王常义, 等. 大藤峡水利枢纽船闸水力学关键技术研究与实践 [J]. 中国水利, 2023(21): 11-17, 24.
- [11] 齐俊麟, 陈冬元, 吴澎, 等. 长江和西江大型船闸通航运行关键技术研究与展望[J]. 水运工程, 2024(1): 137-143.
- [12] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸启闭机设计规范: JTJ 309—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [13] 姚立军. 启闭闸门开度的测量与控制[C]// 福建省水利学会青年学术工作委员会. 福建省第九届水利水电青年学术交流会论文集. 泉州: 福建省水利学会, 2005: 170-173.
- [14] 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司. 液压启闭机设计及应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [15] LAZARO P, DE CESARE G, MADAU A, et al. Heightening of the Maccheronis dam in Sardinia (Italy) - Surélévation du barrage de Maccheronis en Sardaigne (Italy) [J]. Cadernos de saúde pública, 2006, 21 (29): 15-18.
- [16] GIEBELER C, ADELERHOF D J, KUIPER A, et al. Robust GMR sensors for angle detection and rotation speed sensing[J]. Sensors & actuators (A Physical), 2001, 91(1/2): 16-20.
- [17] 张增磊, 巫世晶, 钟建英, 等. 高速大流量阀控液压缸缓冲优化设计[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3646-3655.
- [18] 杨艳红. 带不同级数的省水池船闸输水水力特性数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [19] 杨富亮, 熊祖云, 黄寿良. 三峡工程大坝混凝土长龄期耐久性能试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2016, 14(4): 285-290.
- [20] YU B Y, FANG Z, GAO Y X, et al. Carbonation of supersulfated cement concrete after 8 years of natural exposure [J]. Cement and concrete composites, 2023, 142: 105165.
- [21] ROSENQVIST M, BERTRON A, FRIDH K, et al. Concrete alteration due to 55 years of exposure to river water: Chemical and mineralogical characterisation [J]. Cement and concrete research, 2017, 92: 110-120.
- [22] 李洪奇. 高水头船闸阀门启闭过程及体型优化三维数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [23] 刘豫. 水电站大坝大体积混凝土浇筑裂缝控制技术研究及应用[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- [24] 苏忠纯, 彭英俊, 杨润来, 等. 水化温升抑制剂对大体积混凝土性能的影响 [J]. 中国港湾建设, 2023, 43(3): 49-53.
- [25] 陈益民, 张洪涛, 林震. 三峡大坝粉煤灰的水化反应速率与大坝混凝土贫钙问题[J]. 水利学报, 2002(8): 7-11.
- [26] KHUNTHONGKEAW J, TANGTERMSIRIKUL S, LEELAWAT T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete [J]. Construction & building materials, 2006, 20(9): 744-753..
- [27] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 运河通航标准: JTS 180-2—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [28] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [29] 姜德文. 新国标实施后水土保持方案重要内容探讨[J]. 中国水土保持, 2019(9): 1-5.
- [30] 肖建庄, 沈剑羽, 马少坤, 等. 平陆运河土石方多路径利用的基础问题与解决途径 [J]. 中国工程科学, 2024, 26 (1): 251-262.
- [31] 刘宁. 三峡主体工程设计与施工综述[J]. 工程力学, 2000(S2): 190-195.
- [32] 郑守仁, 刘宁. 三峡工程主体建筑物设计主要技术问题 [J]. 中国水利, 2000(5): 21-23.
- [33] 翁永红, 谢向荣, 范五一. 三峡工程施工设计与实践 [J]. 中国工程科学, 2011, 13 (7): 111-116.
- [34] 张超然. 三峡永久船闸高边坡工程的实践及验证 [J]. 中国工程科学, 2001(5): 22-27.
- [35] 中华人民共和国海事局. 航区划分规则 2021[A]. 北京: 中华人民共和国海事局, 2021.
- [36] 中国船级社武汉规范研究所, 中交水运规划设计院有限公司, 等. 平陆运河钦州湾航区划定研究[R]. 武汉: 中国船级社武汉规范研究所, 2022.
- [37] 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.
- [38] 郑守仁, 刘宁. 21 世纪长江流域治理开发方略探讨 [J]. 中国水利, 2000(9): 10-12.