

顺直分汊河段枢纽施工及运行初期河床变形规律分析

路莅枫¹, 乾东岳², 宋辉¹

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南长沙 410011;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 针对顺直分汊河段坝下河床在枢纽运行初期河床变形剧烈影响通航的问题, 本文以沅水末级梯级桃源枢纽为例, 在搜集施工期及运行初期水文资料、遥感图像以及实测地形资料的基础上, 进行了河床演变分析。分析结果表明, 坝下河床粗化后以推移质运动为主, 且河床粗化始于枢纽施工期; 运行期同期来流空间分布变化、施工导流束窄或封堵支汊、无序人工采砂对坝下河床重塑有较大影响, 其中施工导流、人工采砂对河床的影响随机性较强, 可预测难度较大。

关键词: 分汊河段; 河床变形; 施工期; 运行初期; 人工采砂; 桃园水利枢纽

中图分类号: TV147

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0151-06

Riverbed deformation analysis of straight branching channel in project construction and initial operation period

LU Lifeng¹, QIAN Dongyue², SONG Hui¹

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China; 2. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Aiming at solving the problem that the river bed in the dam downstream of the straight branching reach is deformed severely in the initial stage of the operation of the project, which affects navigation, this paper takes the last cascade Taoyuan Project of Yuanshui as an example to analyze the river bed evolution on the basis of collecting hydrological data, remote sensing images and topographic data during the construction period and the initial operation stage. The analysis results showed that the bed coarsening under the dam was dominated by bed load movement, and the bed coarsening began during the construction period of the project. During the same period of operation, the variation of spatial distribution of incoming flow, narrow construction diversion bundle, blocking branch and disorderly artificial sand mining had great influence on the remodeling of river bed under dam. Among them, the influence of construction diversion and artificial sand mining on river bed was very random, and difficult to predict.

Key words: branching river; riverbed deformation; construction period; initial operation period; artificial sand mining; Taoyuan hydro-junction

1 研究背景

顺直分汊河段枢纽建成后受侵蚀基准变化^[1-3]、水沙时空分布的变化^[4-8]、人工采砂^[9]等因素的影响, 易产生剧烈的坝下河床变形。目前较为统一的认识是分汊河段枢纽布置应尽可能减少对原始河道平面形态的破坏, 保持江心洲原貌, 并维持分

流比与自然条件下接近^[10-11]。然而受人类活动影响, 仅保持天然分流比难以解决坝下支汊汇流段工程泥沙问题。同时, 施工期工程建设对分汊河段河床变形影响较大, 以往施工导流设计主要关注施工期通航^[12]与施工期防洪^[13]问题, 对施工期河床变形研究较少。

以桃源枢纽为例, 枢纽投产运行后河床变形剧

收稿日期: 2018-07-11; 修回日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509118); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201717); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS180301)

作者简介: 路莅枫(1973-), 男, 湖南长沙人, 硕士, 高级工程师, 主要从事湖南省水运重点工程项目建设管理工作。

通讯作者: 乾东岳(1987-), 男, 河南鹤壁人, 硕士, 助理研究员, 主要从事枢纽通航水力学问题研究。

烈,河床重塑导致船闸下引航道辅导墙隔水堤冲毁约100m。因航道回淤严重,船闸下引航道口门区及其连接段需每年进行一次航道维护性疏浚。即使经过航道维护性疏浚,枯水期仍需通过加大电站出力,释放 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 左右的助航流量,帮助坝下船舶进入下引航道。由于桃源枢纽库容有限,遇枯水年时,一周仅可释放3次助航流量,一次持续2~4h,造成船闸通航效率远低于设计值。本文通过搜集施工期及运行初期遥感及实测地形资料,分析桃源枢纽坝下河床变形成因,为类似航电枢纽设计、施工及运行管理提供参考。

2 桃源枢纽概况

2.1 桃源枢纽布置及施工导流方案

桃源枢纽所在河段为分汊河段,河心有两座相连的江心洲(双洲岛)。枢纽建设前,左槽顺直开阔,中枯水期左槽分流量大于右槽;右槽中下部有一浅滩,枯水期河槽蜿蜒曲折。桃源枢纽坝址布置于分汊河段中下部,船闸位于双洲岛的左侧,电站厂房紧依双洲岛右侧布置,泄水闸分别布置于左右两侧主槽。左槽为14孔泄水闸,右槽11孔泄水闸,闸孔净宽 $20\ \text{m}^{[14]}$ 。桃源枢纽施工期及运行初期历史遥感影像见图1。



图1 桃源枢纽建设期及施工期遥感影像

桃源枢纽采用分期施工导流设计,导流一期围右槽泄水闸及电站厂房,导流二期围左槽泄水闸。工程于2010年9月开始导流一期施工,2012年4月底将导流一期电站厂房部分围堰加固加高,改为全年围堰。2012年6月右槽泄水闸段围堰拆除,厂房围堰保留并继续施工。2012年9月一期围堰拆除,并于2012年10月2日转入二期截流,2014年3月二期围堰拆除^[15]。

2.2 边界条件变化

左槽有效河宽束窄:桃源枢纽布置于双洲尾部,船闸位于左洲洲面,电站位于右洲洲尾。图2为桃源枢纽建成前、后江心洲范围对比图。由图2可知,

工程建成后船闸下引航道直线段外挑。与工程前左洲尾部浅滩相比,船闸下引航道外挑约135m,左槽河宽束窄14.7%。

河床粗化:因采砂及来流空间分布调整,导致河床覆盖层被冲刷,坝下河床明显粗化。桃源枢纽建设前河床覆盖层中值粒径 $d_{50} = 1.75\ \text{mm}$ 。图3为工程建设前桃源枢纽坝下河床实拍图。

根据2016年年底实测资料以及实地踏勘发现,目前河床覆盖层以少沙、无沙的卵砾石为主(见图3),坝下各采样点覆盖层粒径基本在17mm以上,各测点平均中值粒径可达 $d_{50} = 35\ \text{mm}$ 。

同期来流空间分布调整:施工期及运行初期来流

空间分布较天然状态有较大的改变。枢纽施工阶段汛期来流集中于单个支汊,导致主河槽覆盖层被大量冲刷。枢纽建成后,枯水期仅电站泄流,泄流宽度约 189 m,且集中从原双洲洲尾滩面进入下游主河道。而原天然状态枯期来流主要走左槽,部分走右槽,总有效河宽

约 210 m。

河段输沙量变幅较大:桃源水文控制站位于桃源枢纽坝下 1.2 km 处,表 1 为桃源水文控制站实测水沙特征值统计表。



图 2 工程前后江心洲范围对比



图 3 桃源枢纽坝下河床实拍图

表 1 桃源水文控制站实测水沙特征值统计表

年份	年径流量/ 10^8 m^3	年输沙量/ 10^4 t	年平均含沙量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	输沙模数/ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	备注
2005	519.5	49.0	0.009	5.76	
2006	448.8	10.3	0.002	1.21	
2007	574.8	70.0	0.012	8.21	
2008	594.6	52.2	0.009	6.13	
2009	546.8	15.0	0.003	1.76	
2010	666.1	146.0	0.022	17.10	右槽截流
2011	379.4	14.3	0.004	1.68	
2012	692.1	110.0	0.016	12.90	左槽截流
2013	586.9	41.0	0.007	4.81	
2014	787.1	294.0	0.037	34.50	围堰全部拆除
2015	718.2	90.1	0.013	10.60	
2016	822.7	159.0	0.019	18.70	

注:数据来自 2013 年中国河流泥沙公报。

实测水文特征值表明,枢纽建设前年平均输沙率在 $10.3 \times 10^4 \sim 70.0 \times 10^4 \text{ t}$ 之间,施工期(2010 - 2014 年),特别是工程形象有较大改变的年份,年输沙量可达 $294.0 \times 10^4 \text{ t}$ 。桃源枢纽运行期初期(2015 - 2016 年)输沙量明显高于枢纽建设前较为稳定的年份(2005 - 2009 年),年平均增幅达 3.1 倍。

3 施工期河床变形

为分析施工期河床变形规律,分别在坝址上、下游布置 6 个典型断面,各典型断面布置如图 4 所示。对比工程建设前(2010 年)与工程建设后(2015 年)的实测地形图,对施工期河床变形情况分述如下。



图 4 典型断面布置图

3.1 施工期人工采砂对右槽河床形态扰动较大

图5为枢纽建设前后BR-BR'断面河床形态对比图, BR-BR'断面位于坝下右汊出口处(见图4)。图6为枢纽建设前后C-C'断面河床形态对比图, C-C'断面位于坝下分汊河段汇流区(见图4)。

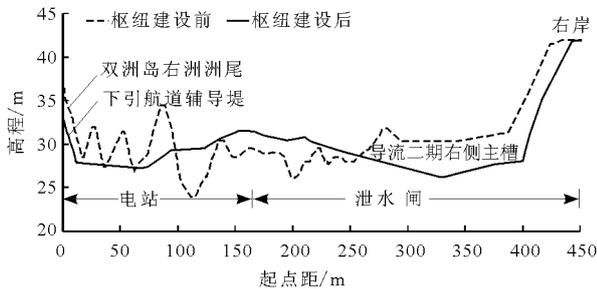


图5 枢纽建设前后 BR-BR'断面河床形态对比图

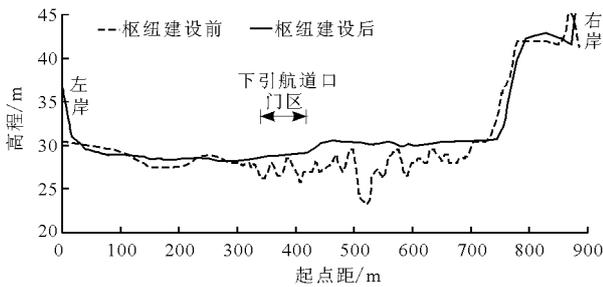


图6 枢纽建设前后 C-C'断面河床形态对比图

由图4可知:

施工期因人工采砂弃渣导致右槽出口处形成多处长条状沙陇, 弃渣沙陇最大可高出原河床9 m(见图5)。右槽截流期, 弃渣沙陇散乱分布, 甚至封堵右汊出口。枢纽建设前, 左右两汊总有效过流面积7 532 m², 而二期围堰施工初期右汊有效过流面积仅4 531 m², 减幅达40%。因沙陇突出河床, 且密实度较低, 一期围堰拆除后, 河床迅速坦化, 有效过流面积增加约12%, 大量泥沙被带入支汊出口处的汇流区, 形成淤积(见图6), 平均淤积厚度达4.7 m。

3.2 施工期截流导致过流汊主槽冲刷

图7为枢纽建设前后AL-AL'断面河床形态对比图, AL-AL'断面位于桃源枢纽坝上左汊, 由图7可知:

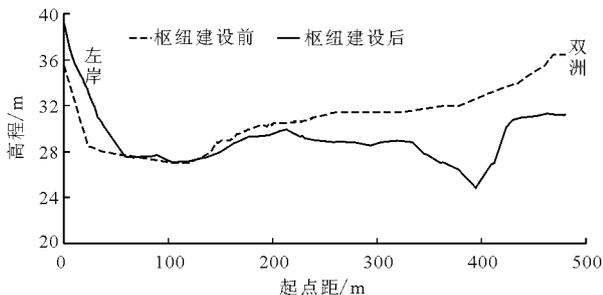


图7 枢纽建设前后 AL-AL'断面河床形态对比图

围堰施工一期右槽截流, 导致汛期洪水集中走左槽, 覆盖层被冲走、河床下切。从图7典型断面AL-AL'对比可知, 除因工程疏浚导致起点距390m处局部河床下切8.1 m外, 其余区域均因右槽截流导致河床下切, 平均下切深度3.5m, 枢纽建设前后有效过流面积增幅达21%。从图1中2011年与2012年遥感影像对比也可看出, 双洲左侧沙波状浅滩范围收缩, 河床下切。

图8为枢纽建设前后AR-AR'断面河床形态对比图, AR-AR'断面位于桃源枢纽坝上右汊, 由图8可知:

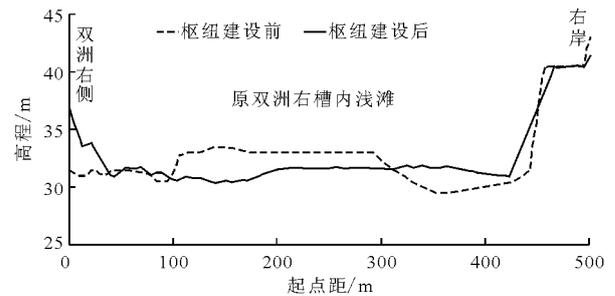


图8 枢纽建设前后 AR-AR'断面河床形态对比图

围堰二期施工导致右槽冲深扩展, 原右槽坝址附近浅滩消失, 河槽冲刷下切, 最大冲深3.7 m, 工程前后10年一遇洪水位降低0.39 cm, 湿周增加13%。且起动的泥沙集中淤积在下游汇流区及左侧边滩处, 形成多个不规则浅滩, 见图1(2012年)。

3.3 支汊深泓重塑

图9为枢纽建设前后BL-BL'断面河床形态对比图, BL-BL'断面位于桃源枢纽坝下左汊出口, 由图9可知:

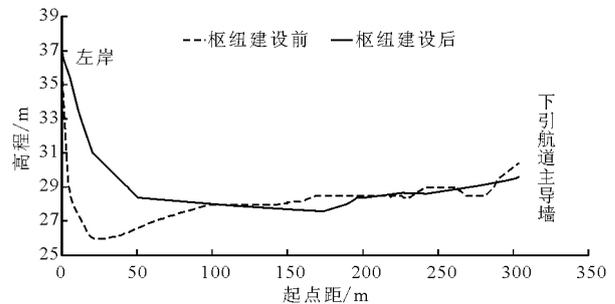


图9 枢纽建设前后 BL-BL'断面河床形态对比图

左槽只布置有14孔泄水闸, 泄流水流均匀, 左槽表现为深槽合并, 深泓呈现从两侧向中间运动的趋势(见图8与9)。右侧因施工期泄水闸段曾单独开闸度汛, 同时枯期仅电站泄流, 分别在电站尾水下游以及泄水闸下游形成两个靠岸的深泓。深泓的重

塑导致坝下河床与设计初期采用的天然河床有较大改变。

4 运行期河床变形

4.1 人工无序采砂对运行初期河床影响显著

图 10 为桃源枢纽运行初期 2015 年 4 月与 2016 年 9 月典型断面 C - C' 对比图,由图 10 可知:

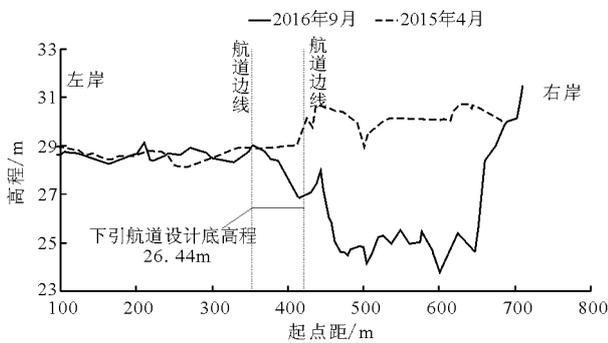


图 10 枢纽运行初期典型断面 C - C' 对比图

因人工无序采砂,坝下汇流区右侧河床大幅降低形成深潭。2015 年时河床左底右高,最大落差 1.8 m。至 2016 年 9 月,一年内形成一个长约 900 m,宽约 300 m,最大采砂深度达 6.3 m 的采砂坑,造成汇流区河床左高右低,断面横向落差约 4 m。因深槽吸流效应,采砂坑的出现导致下引航道口门区横比降较大,危及下引航道船舶通航安全;同时人工采砂导致坝下水位降落、航槽淤积,航槽水深严重不足,极大的限制该航段通航保证率。

4.2 右槽电站尾水冲击河床

受工程前后边界条件改变、人工采砂等因素影响,运行期电站下游形成一个较为明显的枯水深槽,沿船闸下引航道右侧辅导墙向下延伸,并在辅导墙堤头进入船闸口门区。图 11 和 12 分别为枢纽运行初期 BR - BR' 断面年际变化与年内变化图。由图 11、12 可知:枯水期电站尾流强度较大,2016 年年底实测水文资料显示,最大垂线平均流速可达 3.2 m/s,大于 10 年一遇洪水期河段最大垂平流速。

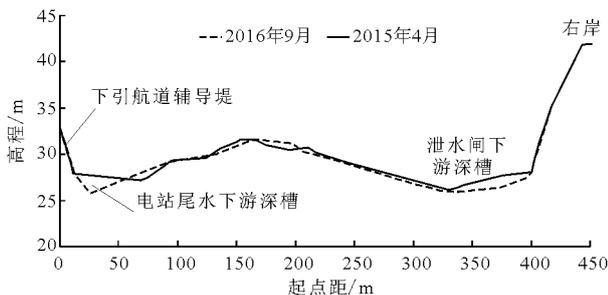


图 11 枢纽运行初期 BR - BR' 断面年际变化

由于电站尾水水流强度较大,该枯期深槽形态呈逐年冲刷下切趋势,且主要集中在中枯水期电站发电的时段内,同时该深槽下切趋势在逐渐减缓。

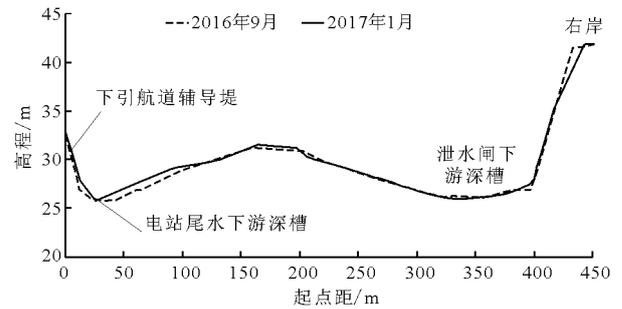


图 12 枢纽运行初期 BR - BR' 断面年内变化

因受电站尾水的冲击,下引航道右侧辅导堤冲刷破坏约 100 m,运行初期电站下游河床平均下切 1.9 m。坝体土方以及深槽起动的泥沙输移至口门区造成航道大范围回淤,严重影响船舶通航。船闸下引航道口门区航道已开展多次应急抢通疏浚,疏浚后航道迅速回淤,水深仍无法达到设计要求。

4.3 左槽冲刷下切

图 13 为运行初期左汉坝下 BL - BL' 断面河床变化对比图,图 14 为运行初期汇流区 K - K' 断面河床变化对比图。各典型断面平面位置见图 4。由图 13、14 可知:运行初期因船闸下引航道左导墙外挑,左汉有效过流宽度束窄,汉道内中部及左侧河床刷深。左汉的右侧因外挑导墙掩护,河床基本稳定。左槽河床冲起的泥沙在汇流区进入航槽,形成泥沙淤积碍航。

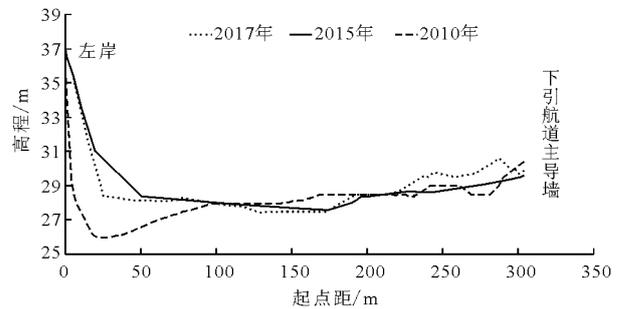


图 13 左槽坝下代表断面(BL - BL' 断面)河床变化对比图

4.4 口门区航道淤积严重

设计航道标高 26.44 m,较两侧河床底约 2 m 左右,同时船闸口门区位于分汉河段的汇流区,泥沙易于堆积。从图 10 和 14 可以看出,2015 - 2017 年船闸口门区均有不同程度的航道回淤问题。其中 C - C' 断面处航道内来沙以从左侧进入航道的推移质泥沙为主(见图 10),K - K' 断面处航道内来沙以从右侧下引航道堤头进入航道的推移质泥沙为主(见图 14)。

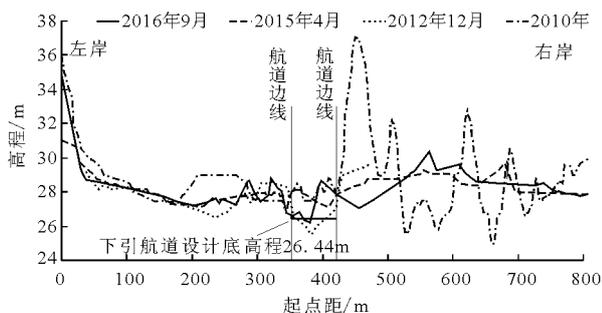


图 14 汇流区代表断面(K-K'断面)河床变化对比图

5 结论

本文通过搜集历史遥感影像和历年实测地形资料,结合桃源水文站历年输沙率实测资料,分析桃源枢纽施工期及运行期河床变形规律,通过分析发现:

(1)坝下河床粗化开始于施工期,坝下床面覆盖层粗化后一般以推移质运动为主。因此,顺直分汊河段坝下工程泥沙问题研究应充分考虑覆盖层破坏、河床粗化对坝下泥沙运动的影响。

(2)施工导流方案改变了分汊河段施工期来流的空间分布,易引起开敞支汊河床覆盖层冲刷并输移至汇流区落淤,造成河床形态大幅调整,增加运行初期坝下河床变形的不可控性。在以往的枢纽建设过程中,施工导流设计重点关注施工防洪及施工通航问题,而桃源枢纽工程的建设表明,施工期河床变形也应作为施工导流设计重点关注的问题之一。

(3)枢纽运行期的运行调度方案应充分考虑河床抗冲性能,并尽量保持与原天然条件下来流的空间分布一致。如桃源枢纽将电站布置于分汊河段副汊,且下游为原江心洲洲尾边滩。由于电站尾流强度较大,导致电站下游河床持续冲刷。

(4)运行期同期来流空间分布变化、施工期导流方案以及贯穿工程建设至今的无序人工采砂对坝下河床重塑有较大影响。其中施工期导流和人工采砂等人类活动的影响,导致工程河段外部条件一直处于动态变化状态,坝下河床变化规律随机性较强,

可预测难度较大。从管理角度,应尽快规范人工采砂;从工程建设角度,建议加强动态设计,应对不可控的外部条件对枢纽的影响。

参考文献:

- [1] 常温花,王平,侯素珍,等.黄河宁蒙河段冲淤演变特点及趋势分析[J].水资源与水工程学报,2012,23(4):145-147.
- [2] 李思维,乔富斌.河流演变规律的实验研究[J].水资源与水工程学报,2012,23(6):132-136.
- [3] 王培道,张根广.潼关以下库区冲淤机理分析[J].水资源与水工程学报,2007,18(6):62-64.
- [4] 王毓莹.基于泄洪移民区域分汊河道泄流相互影响的模型试验研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):139-145.
- [5] 李向阳,许立祥,解赞琪,等.2014年汛期小浪底库区异重流演进规律分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(6):163-167.
- [6] 毕银霞,王相印.北洛河改道入黄对黄、渭、洛河汇流区影响分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(3):79-83.
- [7] 李红.长江中下游典型弯曲分汊河道水力特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.
- [8] 安梦雄.渭南龙河水库冲淤规律的分析[J].水资源与水工程学报,1992,3(4):83-88.
- [9] 石长伟,张英,梁林江,等.渭河下游近期冲淤变化及其原因分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):134-137+143.
- [10] 郝品正,李军,徐国兵.微弯分汊河段航电枢纽总体布置与通航条件优化试验研究[J].水运工程,2004(11):66-69.
- [11] 朱玉德,华奋飞,刘鹏飞.长江中下游顺直放宽和弯曲分汊连接段河道特征及治理思路[J].水运工程,2013(4):142-145.
- [12] 虞东亮.桃源水电站施工导流及临时通航方案研究[J].水利水电工程设计,2011,30(1):4-8+56.
- [13] 杨正广,傅光正.桃源水电站工程建设期洪水风险管控[J].水力发电,2014,40(6):5-8.
- [14] 虞东亮,陈钰,周洁,等.桃源水电站施工导流设计与实践[J].水力发电,2014,40(6):30-34+41.
- [15] 奉伟清,崔金虎,王红斌,等.桃源水电站枢纽布置方案设计综述[J].水力发电,2014,40(6):25-29.