

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201904058

赣江新干航电枢纽左库岸地下水浸没控制效果研究

张宇¹, 任国澄², 杨蕴¹, 周志芳¹, 郭生根³, 熊鸿强⁴

(1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510000; 3. 江西省港航管理局, 江西 南昌 330038; 4. 江西省水上搜救中心鄱阳湖分中心, 江西 南昌 330038)

摘要: 开展二元结构库岸渗控措施研究对于灾害区域地下水资源管理和浸没控制工程的布置具有重要意义。文章以赣江新干航电枢纽工程库区左岸为研究对象, 基于区域地下水流动动态数值模拟与预测技术, 构建地下水三维非稳定流有限元渗流模型, 开展水库蓄水后库区地下水浸没动态评价和基于工程组合措施(防渗墙、减压井和抬田)的浸没控制效果对比研究。结果表明: 无工程控制措施工况下, 水库蓄水三年内库区左岸沿江区域和岸内地势低洼地带会发生较严重的渗漏型浸没; 通过联合布设防渗墙、减压井和抬田工程等控制措施, 能够有效地将浸没范围控制在堤防工程范围以内; 在有防渗墙的截渗作用下, 减压井排渍水位是地下水浸没控制的最敏感的参数。渗控工程的建议布置参数: 防渗墙渗透系数为 17.28×10^{-3} m/d, 减压井间距设置为 30 m, 排渍水位 29 m, 减压井距防渗墙的距离为 30 m, 并在堤内低洼地带进行抬田复垦。本次研究结果可为水库蓄水前期渗控方案的布置提供应用技术支持。

关键词: 库区浸没; 数值模拟; 二元结构; 地下水; 防渗墙; 减压井; 抬田

中图分类号: TV697.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)03-0147-09

Research on the control effects of groundwater immersion on the left reservoir bank of Xingan Navigation and Power Junction in Ganjiang River

ZHANG Yu¹, REN Guocheng², YANG Yun¹, ZHOU Zhifang¹, GUO Shenggen³, XIONG Hongqiang⁴

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000, China; 3. Jiangxi Provincial Port and Waterway Construction Administration, Nanchang, Jiangxi 330038, China; 4. Jiangxi Water Search and Rescue Centre, Poyang Lake Branch, Nanchang, Jiangxi 330038, China)

Abstract: It is of great significance to study the seepage control measures of the dual structure reservoir bank for the management of groundwater resources and the layout of flood control projects in disaster areas. Taking the left bank of the Xingan Navigation and Power Junction on the Xingan section of the Ganjiang River as the research object, and on the basis of the regional groundwater flow dynamic numerical simulation technology, this study establishes a finite element seepage model of 3D unsteady groundwater flow, and a comparative study was made on the dynamic evaluation of groundwater infiltration in the reservoir area after storage and the effects of the combined measures of infiltration control (impervious wall, relief well and farmland-raised

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-09-07

基金项目: 江西省交通运输厅重点工程科技计划(2016C0053); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(B200202014)

第一作者: 张宇(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事区域地下水流模拟方向的研究。E-mail: zhangyuzy96@163.com

通讯作者: 杨蕴(1985-), 男, 副教授, 从事地下水数值模拟和优化管理方面的科研和教学工作。E-mail: yy_hhu@hhu.edu.cn

engineering). The research results show that, in the case of no seepage wall, serious seepage infiltration occurs in the area along the river on the left bank of the reservoir and the coastal low-lying areas within three years of reservoir storage. However, by jointly deploying the seepage prevention wall, the relief well, and the lifting project control measures, the immersion range can be effectively controlled within the levee project, and under the effect of impervious wall, the drainage level of the relief well is the most sensitive parameter for immersion control. Recommended layout parameters for control engineering include: the hydraulic conductivity of the impervious wall is set as 17.28×10^{-3} m/d, the well spacing is 30 m, the drainage water level of the relief well is 29 m, the distance between the relief well and impervious wall is 30 m. The results of this research can also provide scientific basis for the arrangement of seepage control schemes in the early stage of the project.

Keywords: reservoir immersion; numerical simulation; dual structure; groundwater; impervious wall; relief well; farmland-raised engineering

库区浸没是二元阶地结构平原地区水库工程最重要的水文地质和工程地质问题^[1]。由于库区河道往往切穿下部砂卵砾石含水层,与库岸二元阶地主含水层水力联系密切,在水库蓄水的过程中,壅高的河道水位将迅速向地下水排泄,致使库岸地下水位升高^[2],浅部土壤逐渐饱和,产生库区浸没现象。浸没持续发展会引发土壤沼泽化、潜育化、盐碱化等土壤地质灾害,以及建筑物和基础设施地基条件恶化等工程地质灾害,严重影响水库上游工农业生产和居民的生活安全与稳定^[3]。在定量评价水库蓄水后库岸地下水浸没过程的基础上,设计出经济和高效的浸没工程控制方案,是实现航电枢纽工程勘察设计和浸没灾害科学治理的关键。

对于具有二元阶地结构特征的平原型水库的浸没评价问题,在实际工程应用评价中,一般按照水利水电工程地质规范及手册提供的预测方法进行,如使用卡明斯基公式^[4]。然而众多学者发现,该方法适用于砂性土地层,对于上覆黏土层比下伏主含水层渗透系数小 $10^2 \sim 10^3$ 数量级的二元结构库区,预测得出的浸没范围普遍偏大^[5]。因此,目前多采用地下水动力学解析法或结合地下水动力学法对卡明斯基公式进行改良,以适用于不同地质结构和不同蓄水条件下的库区浸没评价问题^[6]。虽然解析法使用简单方便,但其适用条件苛刻,大多只能描述地下水的稳定流态,不能动态刻画实际复杂水文地质条件下的地下水非稳定流态^[7]。在同时考虑浸没工程措施(如防渗墙和减压井)布设时,解析公式将不再适用于刻画减压排水井周围的地下水流态。2000年以后,随着科学技术的发展和对浸没问题的深入研究,地下水数值模拟法成为预测大区域、复杂水文地质条件下浸没问题的热门方

法,如解析元素法^[8]、有限差分法^[9]、有限单元法^[10]等。因此,本文考虑采用 FEFLOW^[11] 数值模拟软件,构建区域三维地下水非稳定流数值模型,评价江西省新干航电枢纽工程蓄水条件下库区左岸地下水浸没过程,对比研究工程控制措施对地下水动态浸没过程的影响,为工程前期渗控方案的优选提供数模评价工具。

防渗墙、减压井和抬田复垦是控制和治理水库浸没常用的工程措施^[12-14]。防渗墙可以有效减缓或阻滞库区河道水向库岸地下水的排泄,减压井可以迅速降低井周围壅高的地下水位,抬田复垦可以降低库岸低洼处的浸没风险,保障正常的农田种植和市政工程建设。目前,往往只是采用单一方式对库区浸没进行治理,并不能保证达到良好的浸没治理效果。因此,本文基于区域地下水非稳定流数值模型,设计多种联合浸没治理工程措施,对比分析浸没治理效果,优选出经济和高效的浸没控制方案,为新干航电枢纽工程蓄水前期渗控方案的布置提供应用技术支持。

1 工程概况

江西省赣江新干航电枢纽工程位于江西省吉安市新干县域内的赣江中游末段,新干赣江大桥下游约 20.0 km 处(图 1)。设计正常蓄水位为 32.5 m,相应的回水长度 56 km,总库容 5×10^8 m³,集水面积 64 776 km²,坝址处多年平均径流量为 533×10^8 m³,多年平均流量为 1 690 m³/s,主要建筑级别为 3 级,次要建筑物为 4 级,是以航运为主、兼顾发电等综合效益的航电枢纽工程。水库两岸均发育上细下粗的二元阶地水文地质结构,但分属不同的地貌单元。右岸东南方向约 2 km 处见低缓残丘分布,全新统地层至低山丘陵区逐渐消失,古近系新余群上段地层在低山丘陵区

出露,从基本地质条件初步判断库区右岸属渗漏顶托型浸没区^[12];左岸由河流一级阶地构成(在左岸界埠乡西侧残留有二级阶地),一级阶地在新干县城上游断续分布,下游则基本连续分布并由北向南逐渐展开,

阶地面较为宽阔平坦,高程在 32 ~ 38 m 之间,西侧至袁水(在樟树汇入赣江),左岸库区为典型的二元结构河间地块地质单元,初步判断库区左岸属渗漏型浸没区。

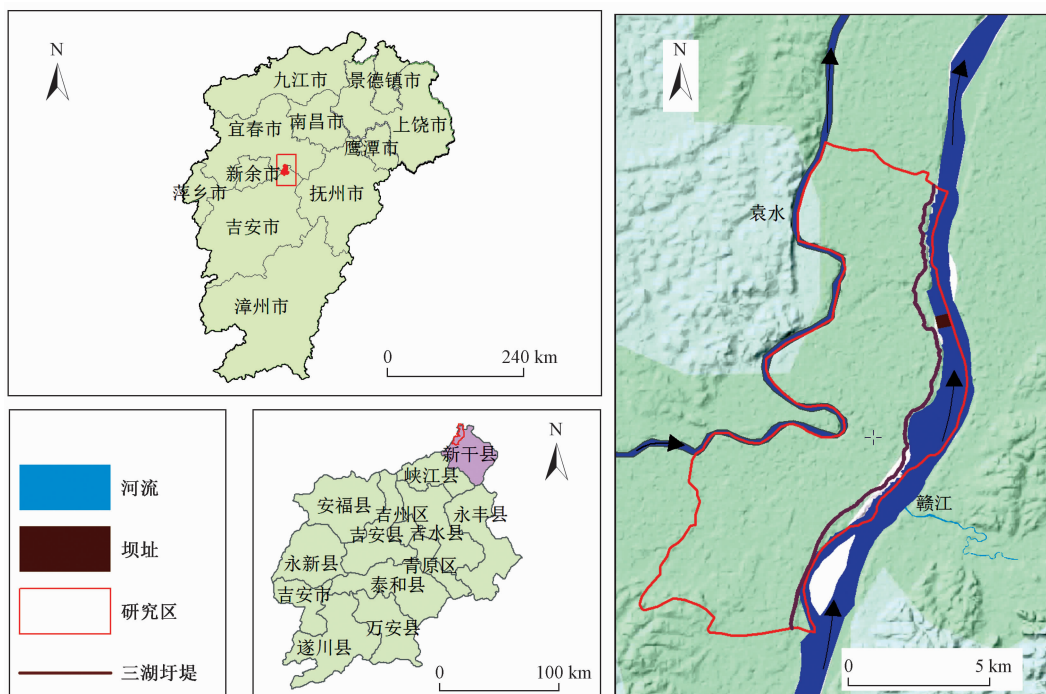


图1 地理位置图

Fig.1 Geographical location of the study area

赣江从南往北流经本区,属于少沙河流,河谷平缓开阔,河宽约 820 ~ 920 m (枯期为 450 ~ 750 m),河床面高程为 20 ~ 25 m,切割下更新统细砂至砂卵石微承压、承压含水层。坝址处赣江多年平均水位 26 ~ 27 m,平均水力坡降为 0.21‰。在项目可研阶段,采用解析解法计算堤围台地内可能浸没面积约为 22 km²,潜在浸没的区域包括仁和镇、界埠镇、荷浦镇、三湖镇等城镇。因此,水库蓄水后引起的库区浸没影响将成为本区最主要的环境地质问题。

2 库区左岸地下水流数值模型

2.1 水文地质概念模型

库区左岸垂向上从上到下沉积的地层有第四系全新统(Q₄)松散沉积物和古近系新余群上段(Exn²)红层,对应的含水层为第四系全新统填土、粉质黏土弱含水层和下更新统细砂至砂卵石微承压、承压含水层,具有典型的二元结构水文地质特征。平面上,库区左岸为夹在赣江(东侧)和袁水(西侧)之间的河间地块。研究区范围包括仁和堤、长排堤和赣江西堤,平面上北

至蒋家村,南至黄家巷村,南北长约 15.0 km,东西长约 6.0 km,全区总面积约 83.9 km²,其中赣江河床面积约 5.89 km²,袁水河床面积约 0.60 km²,如图 2(a)平面图所示。

库区左岸共布置了 15 个水文地质钻孔,以查明左岸水文地质分层信息,开展水文地质试验和地下水位动态监测。研究区从上到下细分为 5 层,分别为第四系全新统填土层(L1)、粉质黏土层(L2)、细砂层(L3)、砂卵石层(L4)和古近系新余群上段基岩底板(L5),其中 L1 为潜水含水层,L2 为相对隔水层,L3、L4 为细砂、中粗砂和砂卵石微承压-承压含水层,L5 为相对隔水底板。填土覆盖全区,赣江和袁水河床仅有砂卵石层和基岩层,研究区水文地质剖面图如图 2(b)所示。赣江和袁水均切割至承压含水层,设置为第一类边界,模型南北(图 2a 中 AB 和 DE 段)选取地下水位流线为零通量边界。模型底部为隔水边界,模型顶部为自由水面边界,接受降雨入渗补给和蒸发排泄。

2.2 数学模型

根据上述水文地质概念模型,将研究区地下水流系

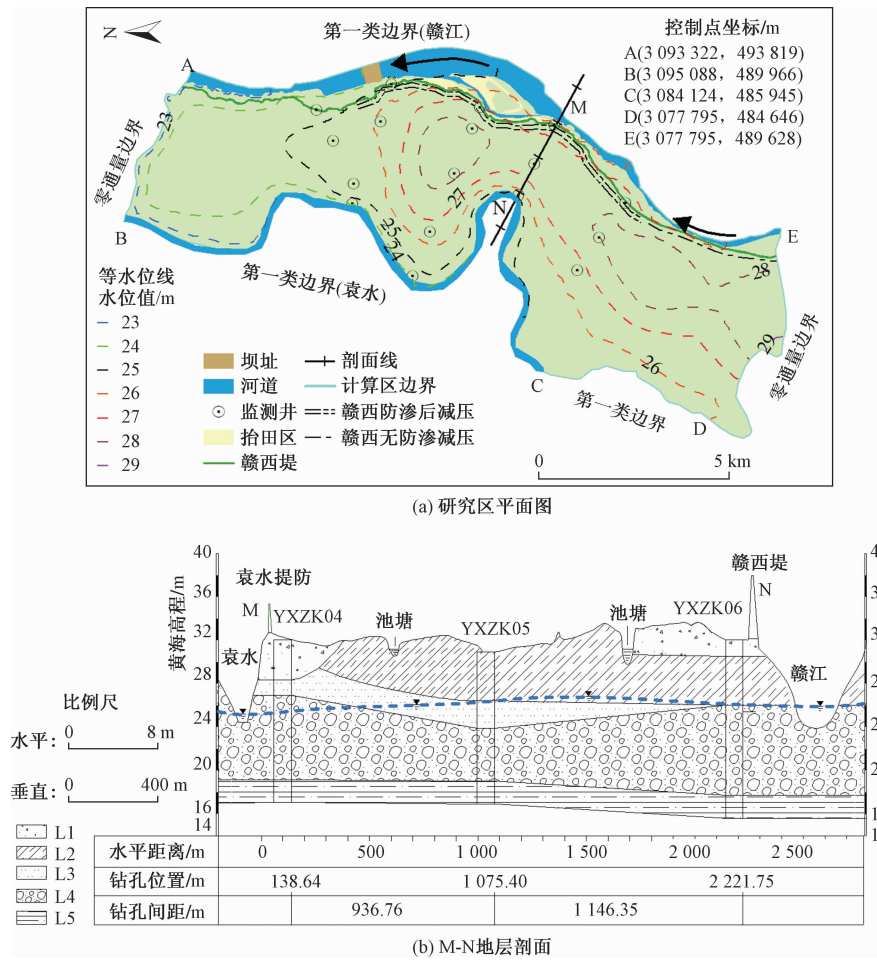


图2 研究区平面与地层剖面图

Fig. 2 Map of study area showing the (a) plane and (b) stratigraphic section M-N

统概化成三维非均质各向同性非稳定流数学模型^[15]。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t} (x, y, z \in \Omega, t \geq 0) \quad (1)$$

$$H(x, y, z, t) |_{t=0} = H_0(x, y, z, t_0) (x, y, z \in \Omega) \quad (2)$$

$$H(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = H_1(x, y, z) (x, y, z \in \Gamma_1) \quad (3)$$

$$\frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = 0 (x, y, z \in \Gamma_2) \quad (4)$$

$$H(x, y, z, t) |_{\Gamma_3} = z (x, y, z \in \Gamma_3) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial H}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \varepsilon = \mu \frac{\partial H}{\partial t} (x, y, z \in \Gamma_3, t \geq 0) \quad (6)$$

式中: Ω ——渗流区域;

K ——渗透系数/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

H ——水位/m;

S_s ——贮水率/ m^{-1} ;

μ ——饱和差或给水度;

W ——单位时间从单位体积含水层流入或流出的水量/ d^{-1} ;

ε ——单位时间在垂向上从单位面积含水层自由面流入或流出的水量/($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$);

H_0 ——初始水位/m;

H_1 ——第一类边界水位/m;

n ——隔水边界的法线方向;

x, y, z ——空间位置;

Γ_1 ——第一类边界;

Γ_2 ——第二类边界(隔水边界);

Γ_3 ——自由面边界。

利用地下水水流模拟软件 FEFLOW 建立库区左岸三维地下水非稳定流模型,并基于有限单元法对建立的数学模型进行求解。模型涉及的相关数据来源:(1)地形数据来自于国家数据库下载的 30 m 精度的 DEM 数据和项目测绘的 1:10 000 的地形图高程点和

1:5 000 河道断面高程点;(2)水文地质分层、水文地质参数和地下水动态监测数据由现场水文地质钻探工程、振荡试验获取;(3)河流水文数据利用吉安市水文信息服务系统(<http://www.unhyd.com/ja/rainindex.aspx>)的实时水情资料。

2.3 模型校正

模型平面上共剖分 63 239 个节点,最小三角形边长约 3 m,模型总共 373 434 个单元(垂向上从上往下剖分为 6 层,每层 63 239 个单元)。以 2017 年 1—6 月作为模型校正时段,时间步长为 5 d。根据地形地貌、地层岩性,L1 层划分了 11 个降雨入渗系数分区(图 3a),L1—L4 层统一划分了 15 个渗透系数、给水度、贮水系数分区(图 3b),L5 层未设置水文地质参数分区。模型的初始水文地质参数,包括砂卵石层及粉质黏土层渗透系数、砂卵石层贮水率,由野外现场抽水试验和振荡试验得到,其余各层相关参数初始值依据水利水电工程地质勘察规范^[16]取值。

选取 17 个观测孔 2017 年 1—6 月的监测水位进行地下水位拟合,在给定的模型初始条件和边界条件的基础上,手动调试渗透系数、给水度、贮水系数和降雨入渗净补给系数使得计算水位与实际观测水位能较好地拟合,如图 4 所示(选择 1 月 6 日和 5 月 18 日拟合数据绘图),从而得出拟合后各层的水文地质参数

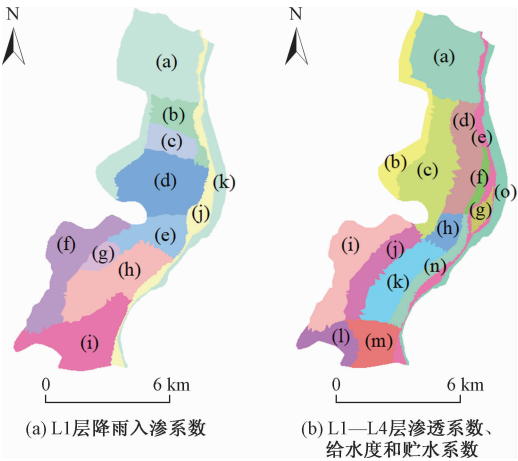


图3 模型参数分区图

Fig.3 Parameter zonation of (a) net recharge rate in L1

(表 1)。拟合结果显示多数钻孔的观测水位和模拟模型计算得到的区域水位总体比较接近,误差值最小为 0.003 m,最大为 1.95 m,平均误差为 0.54 m,误差绝对值在 0.5 m 范围内的观测孔占比 65.3%,误差在 0.5~1 m 范围内占比 20.8%,大于 1 m 的观测孔占比 13.9%。拟合结果表明:左岸区模型能够良好地体现天然地下水形态,基本符合实际情况,拟合程度较好,可用于进行新干枢纽工程左岸区水库浸没预测和控制方案评价。

表1 研究区各地层水文地质参数

Table 1 Hydrogeological parameters of each layer in the study area

	$K/(m \cdot d^{-1})$					μ					净补给系数
	L1	L2	L3	L4	L5	L1	L2	L3	L4	L5	
参数	0.5 ~	0.001 ~	0.1 ~	6.0 ~	0.01	0.05 ~	0.02 ~	$6.25 \times 10^{-6} \sim$	$6.25 \times 10^{-6} \sim$		0.003 ~
区间	2.0	0.35	3.5	80.0		0.08	0.04	2.50×10^{-5}	1.25×10^{-5}	1.00×10^{-8}	0.078

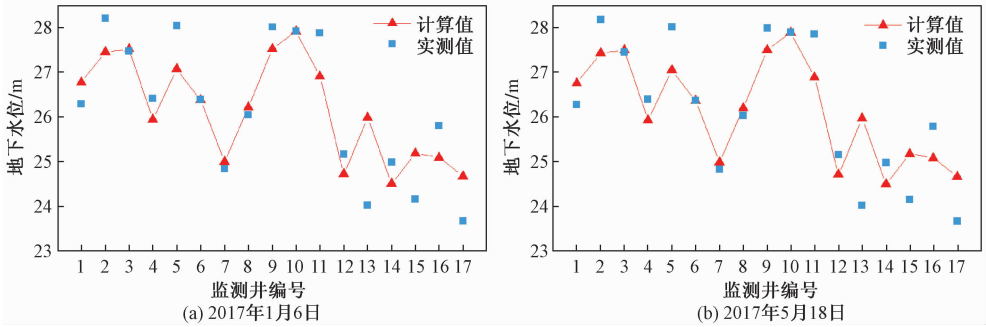


图4 监测孔水位计算值与实测值拟合图

Fig.4 Fitting diagram of simulated groundwater level against the observed value

3 浸没动态预测与工程控制评价

根据野外实测勘察及上游水利工程实际发生浸没

水位埋深的类比分析,本区划分了两种浸没程度,分别为严重和轻度,其安全超高值为 0.5 m 和 1.5 m。根据实际野外试验结果,土壤毛细上升高度取 0.6 m,则

两种浸没程度对应的地下水临界埋深分别为 0 ~ 1.1 m 和 1.1 ~ 2.1 m。

3.1 浸没控制方案

为满足通航和发电需求,新干航电枢纽工程设计库水位需常年保持在 32.5 m,在前文建立的区域三维非稳定流数值模型的基础上,设置坝址上游回水范围内赣江边界为固定水位 32.5 m,区内源汇项保持不变,按无工程控制措施和 7 种不同的防渗墙、减压井和抬田复垦工程组合方案(表 2)进行浸没动态预测和评价,渗控工程布置如图 5 所示。

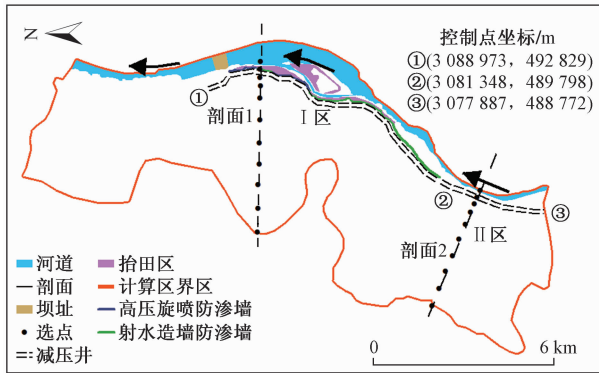


图 5 渗控工程措施布置图

Fig.5 Layout of engineering measures for immersion control

表 2 浸没控制工程组合方案

Table 2 Combination schemes of engineering measures for immersion control

方案	防渗墙渗透系数 (设计值倍数)	减压井			抬田 复垦
		排渍 水位/m (堤内)	位置 /m	井间 距/m	
无控制工程	无防渗	-	-	-	否
方案 1	1	29	30	30	是
方案 2	2	29	30	30	是
方案 3	5	29	30	30	是
有控制工程	方案 4	2	30	30	是
方案 5	2	31	30	30	是
方案 6	2	30	50	30	是
方案 7	2	30	100	30	是

防渗墙按工艺可分为高压旋喷防渗墙和射水造墙防渗墙,沿堤段布设,始于坝址,止于②号控制点处(图 5)。防渗墙均贯穿至基岩面以下,射水造墙和混凝土墙厚度分别为 0.22 m 和 0.40 m,设计渗透系数均为 8.64×10^{-3} m/d。考虑到实际工况下防渗墙的施工质量会导致防渗效果存在差异,如防渗墙和基岩接触面的闭合程度和垂直接触处的闭合质量等,所以在浸没控制方案中,分别考虑防渗墙正常工况、防渗墙渗透系数 $\times 2$ 和防渗墙渗透系数 $\times 5$ 三种情形。减压

井从①号控制点开始,沿防护堤布设至③号控制点,减压井布设贯穿至砂卵砾石含水层,井间距均设置为 30 m,排渍水位设置为 29 m、30 m 和 31 m,距离堤防的垂直距离设置为 30 m、50 m 和 100 m。由于防渗墙沿堤防布设,减压井沿着防渗墙在堤内布设,堤外农田区不受浸没控制工程保护,在低洼区将发生浸没现象,因此,考虑在堤外低洼农田区进行抬田复垦(图 5)。

3.2 浸没动态预测结果

在无浸没控制工程的条件下,以 2018 年 1 月 1 日作为预测初始时间,预测蓄水 3 a 后研究区的浸没程度和范围(图 6)。模拟预测结果表明:研究区由于库水位抬升发生渗漏型浸没,地下水流场迅速向堤内推进,曾坊岛东侧沿江阶地推进幅度最大,荷浦乡南部推进幅度最小。浸没区分为沿江区和岸内区,沿江区分布在赣江上游,从江边到岸上逐渐削弱,坝址上游附近的朱家村一带浸没最严重;岸内区主要分在庙前至张家巷一带,主要由于地表高程较低,出现范围性的轻微浸没。

此外,分别模拟出 0.5 a、1 a、2 a 和 3 a 32 m 水位线向库岸推进的情况,预测结果显示:江水与地下水连通,地下水流场迅速向堤内推进,天然条件下的地下水流动态发生改变;正常蓄水 2 a 后,流场基本稳定,产生浸没的面积如表 3 所示。蓄水至第三年末,32 m 的地下水位等值线向堤内推进了 0.09 ~ 1.04 km,浸没面积增大至 10.91 km²。

在无控制工程措施的情形下,水库蓄水 3 a 内库区左岸沿江区域和岸内地势低洼地带发生较严重的渗漏型浸没。鉴于此,本文基于第 2 节构建的区域地下水流数值模型,开展基于 7 种工程组合措施(防渗墙、减压井和抬田)(表 2)的浸没控制效果对比分析,评价不同渗控措施布设方案下库区的浸没控制效果(表 3)。此外,选择剖面 1 和剖面 2,分别穿越防渗区和非防渗区(图 5),对比不同工况下 2 条剖面线上选点的水位,结果如图 7 所示。

方案 1—方案 3:与无控制工程方案相比,工程蓄水后,库内河道水缓慢地向堤内推进,但在渗控工程措施下堤内地下水位可以控制在 30 m 以下(图 8),研究区的浸没面积减少约 60%。而在保持减压井排渍水位、井间距以及与防渗墙的距离不变的条件下,工程蓄水后浸没区分布于不受浸没控制工程保护的堤外区域,随着防渗墙渗透系数的减小,浸没面积略有增加,主要由于防渗墙起到了减缓堤外壅高的库水向堤内地下水的排泄,加重了堤外浸没程度。剖面 1(穿越防渗

区)上堤外区选点,方案 1 地下水位高于方案 2 和 3, 方案 1—方案 3 地下水位接近。
而剖面 2(穿越非防渗区),由于减压井排渍水位相同,

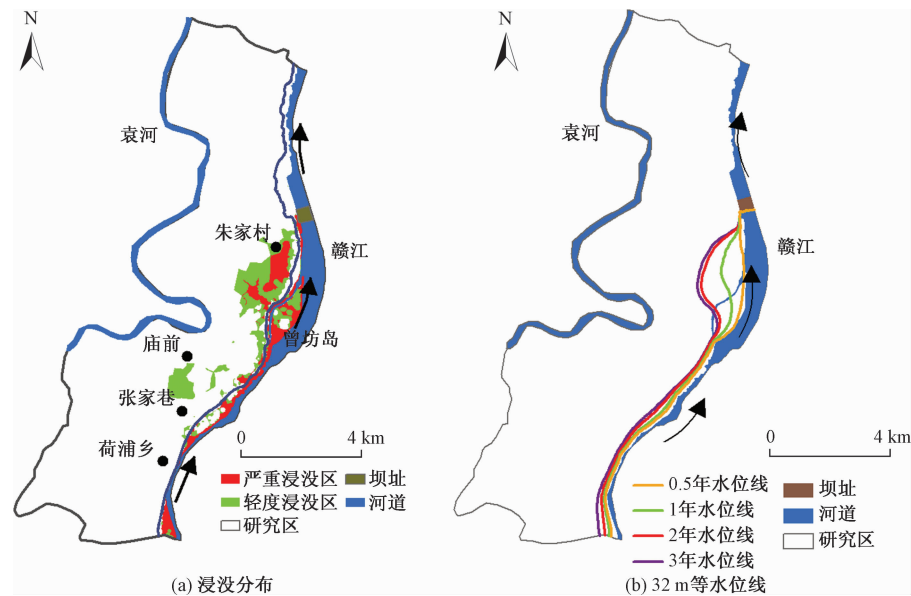


图 6 无工程控制方案浸没程度图

Fig. 6 Map of (a) immersion range and (b) groundwater level contour of 32 m under non-engineering scheme

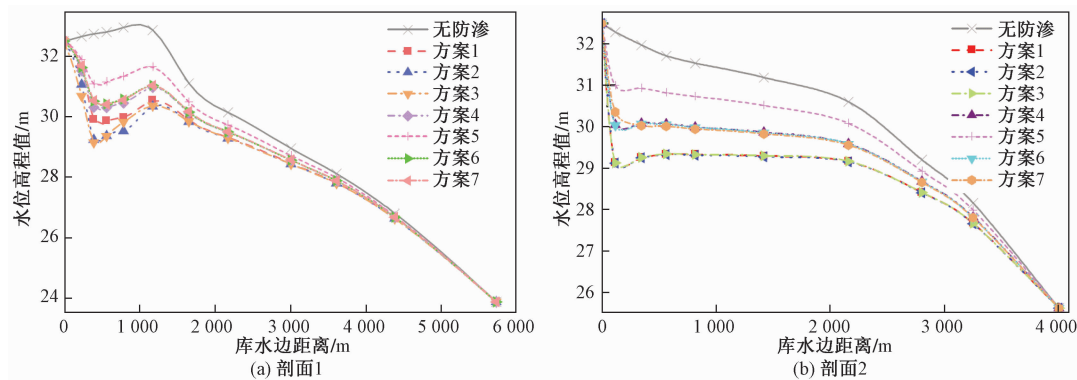


图 7 各工况下剖面水位对比图

Fig. 7 Comparison of groundwater levels in profile 1 (a) and profile 2 (b) under different engineering measures

表 3 各工况下浸没面积统计

Table 3 Immersion area under different engineering measures

方案编号	严重浸没区 面积/km ²	轻微浸没区 面积/km ²	计算区浸没 面积合计/km ²
无防渗	4.000	6.930	10.910
方案 1	1.571	2.724	4.295
方案 2	1.551	2.615	4.166
方案 3	1.539	2.567	4.106
方案 4	1.626	2.654	4.863
方案 5	2.077	5.596	7.673
方案 6	1.760	3.131	4.891
方案 7	1.773	3.178	4.951

方案 2、方案 4 和方案 5:保持防渗能力、减压井间

距以及与防渗墙距离不变的条件下,设置不同的排渍水位。随着排渍水位的升高,工程蓄水后方案 4 和方案 5 浸没面积不断扩大,剖面 1 和剖面 2 上堤内外各选点的地下水位也随之提高,变幅较大,表明在有防渗墙工程的条件下,减压井排渍水位是地下水浸没控制工程的重要参数。

方案 4、方案 6 和方案 7:保持防渗能力、减压井排渍水位与间距不变的条件下,设置不同的减压井与防渗墙的距离(分别设置为 30 m、50 m 和 100 m),工程蓄水后浸没面积随着减压井与防渗墙距离的增大略有增加,剖面 1 和剖面 2 上堤内外各选点的地下水位接近,整体变化幅度不大。

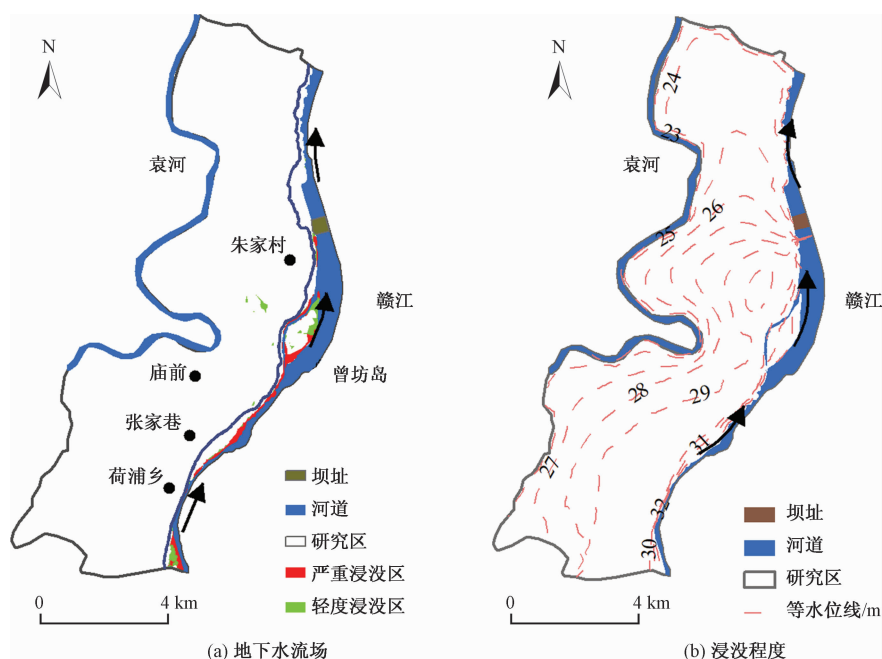


图8 渗控方案2条件下蓄水3 a后地下水流场和浸没程度图

Fig.8 Groundwater flow (a) and immersion diagram (b) after reservoir impoundment of three years under scheme 2

4 结论

本文以赣江新干航电枢纽工程二元结构库区为研究对象,基于区域地下水流动数值模拟技术,开展水库蓄水后库区地下水浸没动态评价和基于工程组合措施(防渗墙、减压井和抬田)的浸没控制效果对比研究,为枢纽工程前期渗控方案的布置提供科学依据。主要得到以下结论:

(1)在未作任何防渗减排措施条件下,枢纽蓄水将导致地下水位迅速上升,赣西地区出现较严重的大面积渗漏型浸没,主要分布在赣江上游沿江地区以及中部地势较低的农田区。

(2)通过布置防渗墙、减压井和抬田联合工程措施,可以有效地进行浸没控制。在有防渗墙的截渗作用下,减压井排渍水位是地下水浸没控制的最敏感的参数,而防渗墙的渗透系数和减压井与防渗墙的距离是次敏感参数。随着减压井排渍水位的降低,堤内地下水位和浸没面积将随之明显下降,而随着防渗墙渗透系数的减小(防渗性能增加),未受浸没控制工程保护的堤外区域浸没面积将略微增加。综合对比分析结果,建议浸没防控工程组合参数设置如下:防渗墙渗透系数为 $17.28 \times 10^{-3} \text{ m/d}$,减压井间距设置为 30 m,排渍水位 29 m,减压井距防渗墙的距离为 30 m,并在堤内低洼地带进行抬田复垦。

参考文献 (References):

- [1] 戚筱俊. 工程地质及水文地质[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997. [QI X J. Engineering Geology and Hydrogeology[M]. Beijing: China Water Power Press, 1997. (in Chinese)]
- [2] 王俊梅,刘海宁. 水库蓄水引发的地下水位抬升和渗控措施研究[J]. 水文地质工程地质,2011, 38(5): 115 - 119. [WANG J M, LIU H N. Seepage control of unsaturated soil based on the SWCC[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(5): 115 - 119. (in Chinese)]
- [3] FINCH J W, BRADFORD R B, HUDSON J A. The spatial distribution of groundwater flooding in a chalk catchment in southern England [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(5): 959 - 971.
- [4] 卡明斯基. 地下水动力学原理[M]. 北京地质学院水文地质教研组译. 北京:地质出版社,1955. [Г И КАМЕНСКИЙ. Principle of groundwater dynamics [M]. Beijing: Geological Processes, 1955. (in Chinese)]
- [5] 王碧,杜兴武,胡成,等. 二元结构平原地区水库浸没预测方法研究[J]. 安全与环境工程,2018, 25(4): 51 - 57. [WANG B, DU X W, HU C, et al. A case study on the reservoir immersion predicting methodology in alluvial plain with dual-formation

- structure[J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(4): 51–57. (in Chinese)]
- [6] 胡广冲, 梁杏, 潘欢迎, 等. 浸没评价中二元阶地水位雍高值的计算方法对比[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 191–197. [HU G C, LIANG X, PAN H Y, et al. Comparison of calculation method for the banked-up water level of double-layer structural terrace in the immersion evaluation[J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 34(1): 191–197. (in Chinese)]
- [7] GRAAF I E M D, BEEK L P H, WADA Y, et al. Dynamic attribution of global water demand to surface water and groundwater resources: Effects of abstractions and return flows on river discharges[J]. Advances in Water Resources, 2014, 64(1): 21–33.
- [8] CRAIG J R, RABIDEAU A J, SURIBHATLA R. Analytical expressions for the hydraulic design of continuous permeable reactive barriers[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(1): 99–111.
- [9] 吴乐, 张有全, 宫辉力, 等. 北京市西山地区地下水数值模拟及预测[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(3): 29–36. [WU L, ZHANG Y Q, GONG H L, et al. Numerical simulation of groundwater flow for Xishan area in Beijing [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(3): 29–36. (in Chinese)]
- [10] KARATZAS, GEORGE P. Developments on modeling of groundwater flow and contaminant transport[J]. Water Resources Management, 2017, 31(10): 3235–3244.
- [11] LI J, MAO X M, LI M. Modeling hydrological processes in oasis of Heihe River Basin by landscape unit-based conceptual models integrated with FEFLOW and GIS [J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 338–351.
- [12] 陈社明, 刘宏伟, 卢文喜, 等. 悬挂式防渗墙作用下非均质地层的渗流量研究——以松花江干流群力堤为例[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 14–19. [CHEN D M, LIU H W, LU W X, et al. Calculation of seepage under the effect of a suspended anti-seepage wall in the heterogeneous formation, exemplified by the Qunli Dam in the Songhua River [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(4): 14–19. (in Chinese)]
- [13] 李明远, 周志芳, 杨蕴, 等. 新干航电枢纽工程右岸浸没评价与控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 203–210. [LI M Y, ZHOU Z F, YANG Y, et al. Immersion assessment and control of the right bank of Xingan Navigation and Power Junction[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(3): 203–210. (in Chinese)]
- [14] 郝红科, 詹美礼, 盛金昌等. 多元结构抬田饱和-非饱和渗流三维控制数模优化分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 259–262. [HAO H K, ZHAN M L, SHENG J C, et al. Optimizing saturated and unsaturated seepage of raising farmland based on multi-component three-dimensional finite element analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(5): 259–262. (in Chinese)]
- [15] CHEN C, KUANG X, JIAO J. Methods to derive the differential equation of the free surface boundary (Reply to comments) [J]. Groundwater, 2011, 48(4): 486–493.
- [16] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程地质勘察规范: GB50287—99 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. [The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code for water resources and hydropower engineering geological investigation: GB50287—99 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)]

编辑: 汪美华