

沿海中小河流域地表-地下水库联合调控洪水资源利用研究: II. 实例应用

王坤¹, 王宗志¹, 王敏慎², 白莹¹, 王宇³, 姜会杰⁴, 张明芳⁴

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 4. 威海市水文中心, 山东 威海 264299)

摘要:以山东半岛乳山河流域为例, 构建了时、日、月多时间尺度嵌套的乳山河流域地表-地下水库联合调控模型, 通过对地表水库泄流、河道闸坝控制水位、地表-地下水库供水等调控规则的优化, 提出了地表-地下水库联合调控洪水资源利用方案。研究表明: 在洪水来临之前通过地表-地下水库联合调控抬升河道控制水位、加大地下水库供水比例、增加河道入渗量, 可将地表水库多余水量适时转移到地下水库, 腾空地表水库拦洪库容, 有效增加流域洪水资源利用量; 联合调控方案下, 乳山河流域洪水资源的丰(2007年)、平(1994年)、枯(1967年)年, 洪水资源利用量分别增加了846.96万、728.77万、106.35万 m^3 , 验证了地表-地下水库联合调控模型的实际应用效果。

关键词:洪水资源利用; 联合调控; 地下水库; 多时间尺度; 乳山河流域

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)02-0055-09

Research on floodwater resources utilization by conjunctive regulation of surface and underground reservoirs in coastal small- and medium-sized river basins: II. case study//WANG Kun¹, WANG Zongzhi¹, WANG Minshen², BAI Ying¹, WANG Yu³, JIANG Huijie⁴, ZHANG Mingfang⁴(1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China; 4. Weihai Hydrology Center, Weihai 264299, China)

Abstract: Taking the Rushan River Basin in Shandong Peninsula as an example, a conjunctive regulation model of surface and underground reservoirs with multiple time scales of hours, days, and months was constructed. A floodwater resources utilization scheme through conjunctive regulation of surface and underground reservoirs was proposed based on the optimization of regulation rules of surface reservoir discharge, river gate and dam water level controlling, and surface and underground reservoir water supply. The results show that, through conjunctive regulation of surface and underground reservoirs to raise the river control level, increase the proportion of underground reservoir water supply, and increase the infiltration of rivers before floods, the excess water from surface reservoirs can be transferred to underground reservoirs timely, which can empty the storage capacity of the surface reservoir and effectively increase the amount of floodwater resources utilization in the watershed. Under the conjunctive regulation scheme, the floodwater resources utilization in the Rushan River Basin increased by 8.4696 million, 7.2877 million, and 1.0635 million m^3 , respectively, in 2007 (wet year), 1994 (normal year), and 1967 (dry year), verifying the practical application effect of the conjunctive regulation model of surface and underground reservoirs.

Key words: floodwater resources utilization; conjunctive regulation; underground reservoir; multiple time scales; Rushan River Basin

我国沿海独流入海流域经济发展、人口增长, 水资源短缺严重, 洪水资源开发需求强烈^[1-2]。但受独特的地形地貌条件影响, 往往难以修建大型地表水

库, 洪水调控能力弱, 洪水资源开发利用困难。在入海口附近修建地下水库, 阻断海水入侵的同时, 增加地下水调控能力, 已成为我国独流入海流域常用工

基金项目:水利技术示范项目(SF-202210); 江苏省基础研究计划自然科学基金青年基金项目(BK20230122); 南京水利科学院研究院基金项目(Y523004); 福建省水利科技项目(MSK202206)

作者简介:王坤(1992—), 男, 工程师, 博士, 主要从事流域水文水动力过程模拟与调控研究。E-mail: wkun0101@163.com

通信作者:王宗志(1977—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水资源复杂系统运行调度与管理研究。E-mail: zzwang@nhri.cn

程措施,特别是水资源短缺严重的山东半岛地区^[3-4]。地下水库为流域提供了新的储水空间,但地下水回补速度慢,很难直接调节利用过程短暂的洪水^[5]。通过地表水库、河道闸坝和地下水开采等工程的联合运用,择机将地表水库多余蓄水补给地下水库,腾空地表水库库容,增加洪水拦蓄利用量,是当前滨海流域水管理的迫切需求。

对于地表工程调控能力有限、水资源短缺严重的地区,地表水与地下水联合开发是解决水资源短缺危机的重要措施^[6]。国外从20世纪30年代就开始了相关实践与研究,如美国加州的“含水层储存和回采工程计划”,通过打井引渗将地表水蓄至地下含水层作为备用水源,提高供水稳定性与保障程度^[7]。荷兰阿姆斯特丹引莱茵河水,利用天然风积沙丘人工补给地下水,防止海水入侵的同时增加可供水量^[8]。我国在20世纪70年代提出地下水人工补给的概念,在华北地区展开了大规模的地下水人工回灌实践,并开始了地下水库建设与地表-地下水调蓄的探索^[9-10]。早期地表-地下水调蓄研究主要关注地下水促渗回补与合理开采,地下水模拟模型是揭示地表水与地下水相互作用的重要研究工具^[11]。随着水资源短缺加剧,通过优化地表-地下水联合调控方案,增加流域供水量的需求趋于强烈。由于地下水运动具有强烈的各向异性,简单的优化模型得出的结果与实际地下水流场存在明显差异^[12]。在定量模拟地表水与地下水相互作用的基础上,与优化调控模型进行耦合,进而提出优化调控方案的模拟优化法成为地下水优化管理的常用方法^[13]。经过多年发展,相关研究从单目标优化求解问题逐渐发展到多目标优化管理问题,从单纯地下水管理逐步向地表水与地下水联合管理迈进^[14-16]。如高玉芳等^[13-14]通过优化地下含水层开采与人工回灌方案防止海水入侵;Wu等^[16]基于替代模型对张掖流域地表水与地下水联合灌溉方案进行优化,结果表明调整地表水与地下水灌溉比例可有效节约灌溉用水;Nayak等^[17]提出了基于预报调度的地表水与地下水联合管理方法,显著增加了流域供水。但上述研究中,地下水管理的对象多是无工程控制的地下含水层,且多以兴利为目的,一定程度上避免了地表水与地下水运动速度差异给定量模拟与高效优化带来的困难^[16-18]。与地表水库优化调度直接优化水库下泄流量或水位过程不同^[19-22],地表-地下水库联合调控洪水资源利用需要地表水库与下游河道内闸坝、地下水库等工程配合,将地表水库下泄水量通过下游河道入渗补给地下水库,而河道下渗是一个相对缓慢且受河道水位和地下水位共同影响的

过程,河道闸坝的控制水位是联系地表水库与地下水库的关键。此外,通过地表-地下水库联合调控实现洪水资源利用,需优化调控运动速度差异明显的洪水、地表水和地下水,显著提高了建模难度与优化效率,目前缺乏可供借鉴的成功案例。

乳山河流域是山东半岛东南部的独流入海流域,年内降雨分布严重不均,流域内唯一一座大型地表水库总库容仅1.04亿 m^3 ,是乳山市工业生活用水的主要供水水源^[23]。为缓解日趋严峻的水资源短缺和海水入侵问题,在入海口附近含水层内修筑了两道地下坝,建成了乳山河梯级地下水库^[24]。为配合地下水库运行,在地下水库坝址上方的河道修建了可调控河道水位的闸坝,形成了由地表水库、河道闸坝、地下水库组成的复杂水利工程群。如何调控地表-地下水库工程群,增加流域洪水资源利用量,已成为流域水管理亟待解决的难题。为此,本文基于滨海流域地表-地下水库联合调控洪水资源利用模型与方法^[25],构建了乳山河流域地表-地下水库联合调控洪水资源利用模型,针对流域洪水资源的丰、平、枯不同年型,对地表水库调度规则、闸坝控制规则、地表-地下水库供水规则等进行优化,提出地表-地下水库联合调控洪水资源利用方案。

1 研究区概况

1.1 水文气象

乳山河流域位于山东半岛乳山市,处于东经 $120^{\circ}10' \sim 120^{\circ}50'$ 和北纬 $36^{\circ}45' \sim 37^{\circ}15'$ 之间,为独流入海流域,流域总面积约1045 km^2 (图1)。据1956—2013年逐月降水资料统计分析,乳山河流域多年平均降水量为753.2 mm。乳山河流域属典型

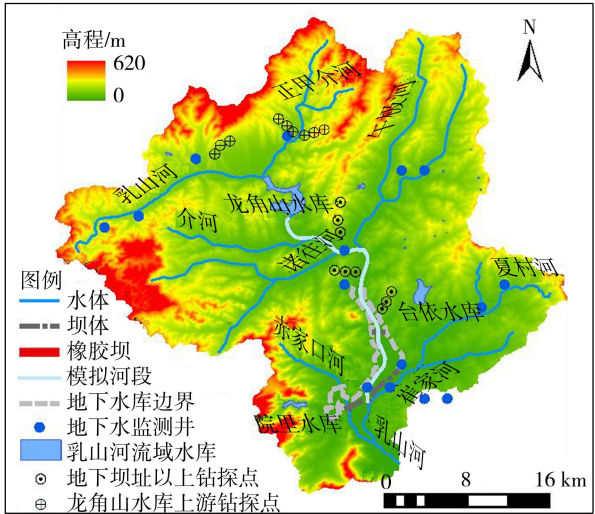


图1 乳山河流域水文、地貌及工程分布

Fig.1 Hydrology, geomorphology, and engineering distributions in the Rushan River Basin

的暖温带海洋性季风气候,降水量年际分布不均,最大年降水量达 1 345.5 mm,出现在 1964 年,最小年降水量仅 360.3 mm,出现在 1999 年,丰枯比为 3.73 : 1。降水量年内分配不均,主要集中在 6—9 月,约占多年平均年降水量的 74.5%。

1.2 地形地貌

乳山河流域位于胶东低山丘陵区,地面高程为 0~620 m,境内山地、丘陵、平原相间,山地平均高程大于 300 m,占流域总面积的 22.4%;丘陵高程为 100~300 m,占总面积的 50.3%;平原区占总面积的 27.3%。总体地势为“U”型,自北向南呈台阶式降低。东、西两侧及北部大多为山地,中部和南部多为丘陵。

1.3 水利工程

受地形与面积限制,流域内难以修筑大型地表水库,仅建有龙角山水库一座大型地表水库,总库容 1.08 亿 m³,兴利库容 0.59 亿 m³。另建有两座中型水库,其中台依水库兴利库容 0.13 亿 m³;院里水库兴利库容 0.07 亿 m³,基本不参与乳山市供水。龙角山水库是一座以防洪、城市生活及工业供水为主的多年调节大(Ⅱ)型水库,于 1960 年 6 月建成蓄水,坝顶高程 44.8 m,设计死水位为 29.35 m,设计兴利水位为 41.00 m,汛限水位为 38.55 m。龙角山水库是目前乳山市的主要水源地,每年通过第三水厂为乳山市提供工业和生活用水 1 850 万 m³。根据有关规划,近期将扩建第三水厂,供水量将达到 2 640 万 m³。

为缓解流域内水资源短缺情势,防止海水入侵,在流域下游地下含水层基岩以上修筑了两道地下防渗墙,阻断地下水流动,在坝址上游形成两级地下水库——乳山河地下水库。地下水库库区面积 19.6 km²,总库容 2 197 万 m³,其中调节库容 1 686 万 m³,静库容 511 万 m³。第三水厂已在地下水库库区内乳山河河道两侧建设地下水开采井,作为备用水源地。为了配合地下水库运行,在地下水库坝址位置的河道内,建设了两座拦河闸,调控河道水位,控制地下水库入渗回补。

1.4 地质构造

地下水库库区内主要为第四系沉积岩,土壤孔隙率大,含水层介质连通性与富水性较好。第四系孔隙潜水为区内主要地下水类型,主要赋存于乳山河及支流河床地层中,少量赋存于河床两岸山前坡洪积地层中。含水层主要为河流相的细砂、砾质粗砂以及海陆交互相的中细砂、中粗砂。根据野外抽水试验,这些砂层的渗透系数一般为 11.63~41.16 m/d。第四系孔隙潜水主要受大气降水、河川

径流、基岩裂隙水侧渗补给,地下水总流向为由北向南。基岩裂隙潜水主要分布于水库库区边界附近中生代燕山晚期侵入岩的风化、构造裂隙中,在水库库尾南北山一带以及库首乳山屯村附近出露的下元古界荆山群变质岩风化裂隙中也有少量分布。因基岩所处的构造部位、地貌单元、埋藏条件不同,富水性及透水强度变化很大,单位出水量一般小于 1 m³/(h·m)。

2 模型构建

2.1 乳山河流域地表-地下水库工程系统概化

构建地表-地下水库联合调控模型的前提是对流域工程系统进行合理概化,乳山河流域地表-地下水库工程系统可概化为图 2 所示的洪水资源利用工程系统。该系统中,龙角山水库是上游控制性地表水库,承担调节入库径流(Q)、为第三水厂供水和为地下水库补水的任务,主要通过控制向第三水厂供水量(S_s)和下泄流量(q)来实现;地下水库库区乳山河河段为地下水库补给工程,通过河道内橡胶坝调控河道内水位,调节河道与地下水库间的交换水量(I),河道与地下水库作用完成后,多余的水量(R)以弃水形式入海;乳山河地下水库是地下水控制工程,承担调蓄流域地下水和供水的任务,其蓄水状态除了受地下水开采量(S_g)、地表-地下水交换量等人为调节影响,还受降水(P)、蒸发(E)、地下水侧向补给与排泄(F)等自然因素的影响;第三水厂是流域供水主体,承担为乳山市供水任务,通过控制地表水库和地下水库供水量分配,满足乳山市用水量需求(W_d),同时调节地表水库和地下水库状态。

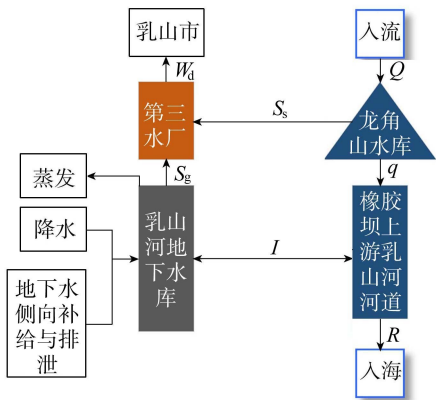


图 2 洪水资源利用工程系统

Fig. 2 Floodwater resources utilization engineering system

2.2 河道水动力学模型构建

乳山河河道水动力学模型采用地表水模拟中最为常用的 MIKE 11 水动力学模型^[26]。模型以龙角山坝址下游 500 m 处河道断面为上边界,下游乳山寨水文站为下边界,全长 25 km(图 1 中模拟河段)。

利用52个河道大断面反映河道地形变化,断面间隔100~500 m。模型上边界输入龙角山水库出库流量,下边界采用乳山寨水文站水位,乳山河支流设置为侧向入流边界。通过模型的构筑物模块模拟闸坝调控方案对河道水流演进的影响。

采用2012年于家庄水文站实测流量数据对模型参数进行率定。率定期模拟与实测流量过程如图3所示。总体而言,实测流量过程与模拟流量过程吻合度良好,洪峰到达时间基本一致,可以满足本研究需求。经率定,乳山河河道糙率取值为0.025~0.031。

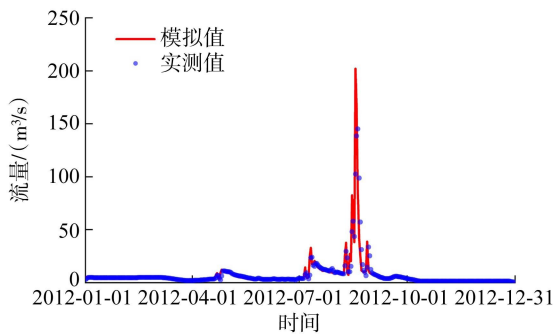


图3 率定期于家庄水文站流量过程

Fig.3 Flow process of Yujiashuang Hydrological Station in calibration period

2.3 地下水动力学模型构建

乳山河地下水数值模型采用目前流域尺度地下水流模拟中最常用的 MODFLOW 软件^[22]。

2.3.1 计算范围与边界条件

考虑到地下水库库区范围是人为划定的,库区边界与周围地下水交换频繁且难以观测,选择乳山河流域作为地下水动力学模型模拟范围,模型计算范围面积为998 km²。模拟范围与边界条件设定如图1所示,研究区西北部及东南部饱水的构造断裂带和北部支流汇入断面均设为水头边界,水头由当年地下水实测值插值形成;龙角山、台依、院里水库设为湖泊边界,特征水位由水库设计水位给定;南部乳山河口为流域出口,设为定水头边界,水头由统计年鉴平均潮位资料给定;模型上边界由DEM高程差赋值;内边界设为河流,由实测地表水水位和 MIKE 11 水动力学模型模拟的河道水位控制。

2.3.2 模型建立与网格剖分

乳山河流域中,上游岩层多为白垩纪的岩浆岩及震旦纪与此前形成的变质岩,下游多为第四纪沉积岩。根据地下水库库区含水层特性,本研究模拟过程中将目标含水层概化为垂直方向的两层,分别为上层孔隙含水层和下层裂隙含水层。模型网格边长100 m,约20万个单元格。

2.3.3 参数率定与模型验证

本文构建乳山河地下水水动力学模型的相关水文地质参数主要包括上层孔隙含水层的渗透系数(K_1)、给水度(μ)以及下层基岩裂隙含水层的渗透系数(K_2)、贮水系数(S)。建模中,首先根据水文地质勘察资料,分区给定参数初值,通过水位拟合进行参数识别后确定各参数的分区值,各水文地质参数分区如图4所示。此外,模型源汇项考虑了大气降水入渗、地表水入渗、地下水侧向径流3个补给量和潜水蒸发量、地下水径流排泄量、地下水开采量3个排泄量。率定、验证期源汇项均来自实测资料。

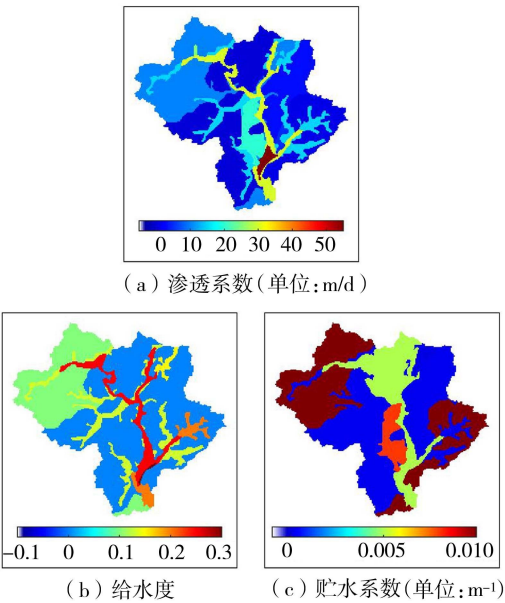


图4 地下水动力学模型地质参数分区
Fig.4 Geological parameters zoning of groundwater dynamics model

模型的模拟期为2004年1月1日至2006年12月31日,以一个自然月为一个应力期,时间步长为5 d。其中率定期为2004年1月1日至2004年12月31日,验证期为2005年1月1日至2006年12月31日。采用试估-校正法对渗透系数的分区和取值进行手动调整,不断降低模型的残差。模型率定期与验证期地下水水位计算值与实测值的散点图如图5所示,地下水水位模拟值和实测值的散点均匀分布在1:1相关线两侧附近,相关系数分别为0.9997和0.9994,绝对平均误差分别为0.57 m和0.58 m,表明模型拟合效果较好,满足精度要求。经过率定验证, K_1 取值为0.1~55 m/d, K_2 取值为0.1~0.26 m/d, μ 取值为0~0.25, S 取值为0.0002~0.01 m⁻¹。

2.4 替代模型构建

替代模型又称响应面模型,是通过有限数量的输入参数及实际模型模拟结果拟合一系列数学函数

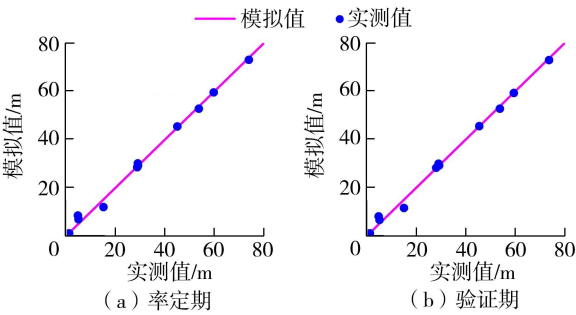


图5 模型地下水水位拟合结果

Fig.5 Fitting results of groundwater level

(如多项式函数),近似模拟实际模型输入-输出关系,也称为原始模型的元模型。智能替代模型在功能上接近于原模拟模型,其计算负荷小,耗时少,是实现流域地下水优化管理的重要工具。构建替代模型的关键是确定模型的输入与输出变量,选择合适的拟合方法。根据文献[25],在地表-地下水库联合调控模型中需要构建的替代模型包括乳山河河道水动力学模型的替代模型(以下简称“河道替代模型”)、乳山河流域地下水库水动力学模型的替代模型(以下简称“地下水库替代模型”)。

乳山河河道替代模型用于快速计算龙角山水库下泄流量和于家庄橡胶坝控制方案共同作用下的河道水位(L),该模型的表达式为

$$L_t = f_1(q_t, H) \quad (1)$$

式中: L_t 为 t 时段河道内平均水位; q_t 为 t 时段地表水库泄流量; H 为于家庄橡胶坝控制水位。

乳山河流域地下水库替代模型用于计算降水、蒸发以及地下水库库区内地下水开采、河道水位作用下的地下水库水位、乳山河与地下水库交换水量等,该模型的表达式为

$$Z_{g,t+1} = f_3(Z_{g,t}, L_t, S_{g,t}, P_{e,t}) \quad (2)$$

$$I_t = f_2(Z_{g,t}, L_t, S_{g,t}, P_{e,t}) \quad (3)$$

式中: $Z_{g,t}$ 、 $Z_{g,t+1}$ 分别为 t 时段和 $t+1$ 时段第三水厂

取水点地下水水位;为 $P_{e,t}$ 为 t 时段流域日净降水量,即降水量减去蒸发量; $S_{g,t}$ 为 t 时段地下水库地下水开采量; I_t 为 t 时段乳山河与地下水库交换水量, $I_t > 0$ 表示河道水量补给地下水库, $I_t < 0$ 表示地下水库水量补给河道。

替代模型有多种构建方法,文献[25]给出了替代模型详细构建步骤。文中利用人工神经网络方法构建乳山河地下水动力学模型的替代模型。采用拉丁超立方法对训练样本进行初始化,根据输入数据的取值范围,生成初始输入样本集,代入率定好的乳山河流域地下水动力学模型生成模拟值,形成初始输出样本集,二者组合作为替代模型的训练数据集。分别根据2004—2019年乳山河流域净降水量、地表水库和地下水库工程参数与调度规则、于家庄橡胶坝工程参数、第三水厂供水量等数据,确定了模型输入参数取值范围,如表1所示。

表1 模型输入参数取值范围

Table 1 Ranges of model input parameters

模拟时段	数值类型	P_n	$S_g/\text{万 m}^3$	H/m	Z_{go}/m
非汛期 (月尺度)	最大值	0.003 0	300	9.3	9.0
	最小值	-0.002 5	0	6.0	5.5
汛期 (日尺度)	最大值	0.003	10	9.3	9.0
	最小值	0	0	6.0	5.5

注: P_n 为净降雨入渗补给系数; Z_{go} 为第三水厂取水点初始地下水水位。

采用 Matlab 平台,利用 SUMO 自适应智能替代模型软件包对模型进行训练,构建乳山河流域地下水库智能替代模型。图6和图7分别为地表-地下水交换量和地下水水位的替代模型切片。

本文选择相对平方根误差(RRSE)和均方误差(MSE)作为模型误差的评价指标,采用交叉验证法进行替代模型泛化评估。由结果可知,汛期替代模型中地下水库与河道交换水量 I 、地下水库蓄变量 D 和地下水库控制点月末地下水水位 Z_g 的评价

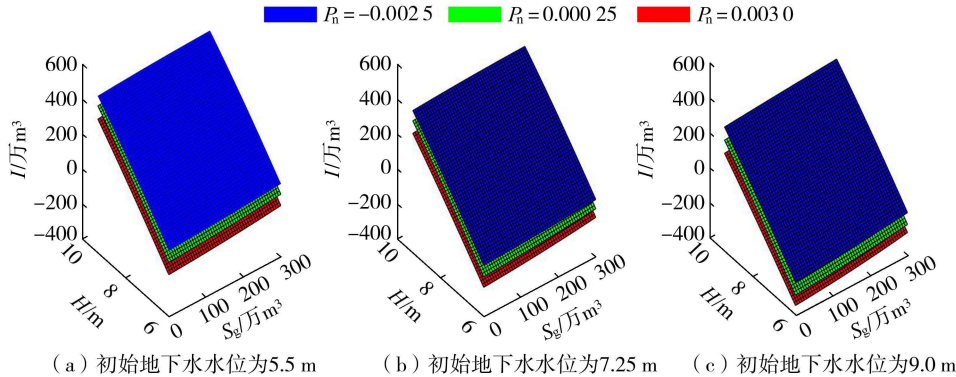


图6 非汛期乳山河与地下水库交换水量(月尺度)替代模型切片

Fig.6 Surrogate model slices of monthly water exchange between the Rushan River and underground reservoir in non-flood season

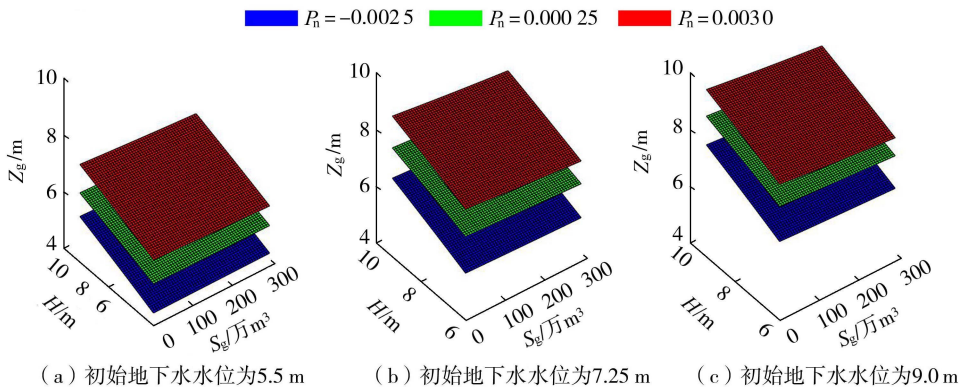


图7 非汛期月末控制点地下水水位替代模型切片

Fig.7 Surrogate model slices of month-end groundwater level at control point in non-flood season

指标 RRSE 分别为 1.66%、9.55% 和 10.54%，评价指标 MSE 分别为 0.1331 万 m³/d、0.1571 万 m³/d 和 0.0115 m；非汛期替代模型中地下水库与河道交换水量 I 、地下水库蓄变量 D 和地下水库控制点月末地下水水位 Z_g 的评价指标 RRSE 分别为 5.74%、5.80% 和 10.57%，评价指标 MSE 分别为 0.0923 万 m³/月、0.0709 万 m³/月和 0.0104 m。表明替代模型精度较高，满足模拟精度要求，可用于后续地表-地下水库联合调度模型构建。

2.5 乳山河流域地表-地下水库联合调控模型构建

将构建的替代模型与滨海流域地表-地下水库联合调控模型^[25]相结合，将龙角山水库调度模型与乳山河河道替代模型、乳山河地下水库替代模型进行耦合，构建乳山河流域地表-地下水库联合调控模型。联合调控模型的目标函数、约束条件、状态变量详见文献[25]。除了地表水库、地下水库和河道闸坝工程水量平衡的等式约束外，根据乳山河流域龙角山水库、于家庄橡胶坝和乳山河地下水库工程参数设置调控模型约束条件的具体取值，如表 2 所示。

表 2 乳山河流域地表-地下水库联合调控模型约束条件取值范围

Table 2 Ranges of constraint conditions of conjunctive regulation model of surface and underground reservoirs in the Rushan River Basin

工程	时期	变量	最小值	最大值
地表水库	汛期	库容约束(万/m ³)	502	4877
		下泄流量(m ³ /s)	0	500
		供水量约束(万 m ³ /月)	0	220
	非汛期	库容约束(万 m ³)	502	4802
		供水量约束(万 m ³ /月)	0	220
地下水库	全年	水位约束(m)	5.5	9.0
		开采量约束(万 m ³ /月)	0	300
橡胶坝	全年	水位约束(m)	6.0	9.3

3 结果与分析

模型采用遗传算法进行优化求解，种群大小取

800，进化取 1000 代。根据乳山河流域洪水资源潜力评价结果^[23]，分别对流域洪水资源的丰(2007 年)、平(1994 年)、枯(1967 年)年内的调度过程进行优化。通过模型求解得到联合调控规则，即汛期地表水库供水占比为 59%，即以 203.4 万 m³为月供水目标，地下水库供给目标为 141.3 万 m³；而非汛期地下水库供水任务更重，供水占比为 56%，即以 193.0 万 m³为月供水目标，地表水库月供水目标为 151.7 万 m³；非汛期橡胶坝坝高抬高至 7.74m，汛期橡胶坝坝高下降至 6.12 m。

图 8 为不同来水年联合调控方案与常规调度方案下乳山河流域地表-地下水库工程的调控过程。其中，图 8(a)~(c)为地表水库调节过程，图 8(d)~(f)为地下水库调节过程，河道与地下水库交换水量为正值表示河道补给地下水库，为负值表示地下水库补给河道。可以看出，联合调控方案下，龙角山水库通过非汛期增加下泄水量，在汛期来临之前有效消落地表水库水位，为汛期拦蓄洪水提供了更大库容。汛期来水量较少的 1967 年(图 8(a))，在常规调度方案下，龙角山水库水位于 8 月 19 日 0 时上涨至汛限水位后，直至 26 日 8 时，其间水库一直弃水；而联合调控方案下，通过地表-地下水库的联合调控，在汛期来临将地表水库多余蓄水转移至地下水库，地表水库水位在整个汛期内都未抬升至汛限水位，地表水库无弃水。而非汛期地表水库下泄的水量均通过河道下渗到地下水库中，从图 8(d)可以看出，联合调控方案下乳山河每月向地下水库补水量约为 200 万 m³。由图 8(b)可以看出，汛期来水量相对较多的年份(1994 年)，常规调度方案下龙角山水库未提前泄水，水库水位很早就抬升至汛限水位(7 月 16 日 14 时)，汛期内大量弃水；联合调控方案下，汛期来临前通过提前泄水腾空地表库容，则显著延后了地表水库水位到达汛限水位的时间(7 月 27 日 12 时)，增加了洪水的拦蓄

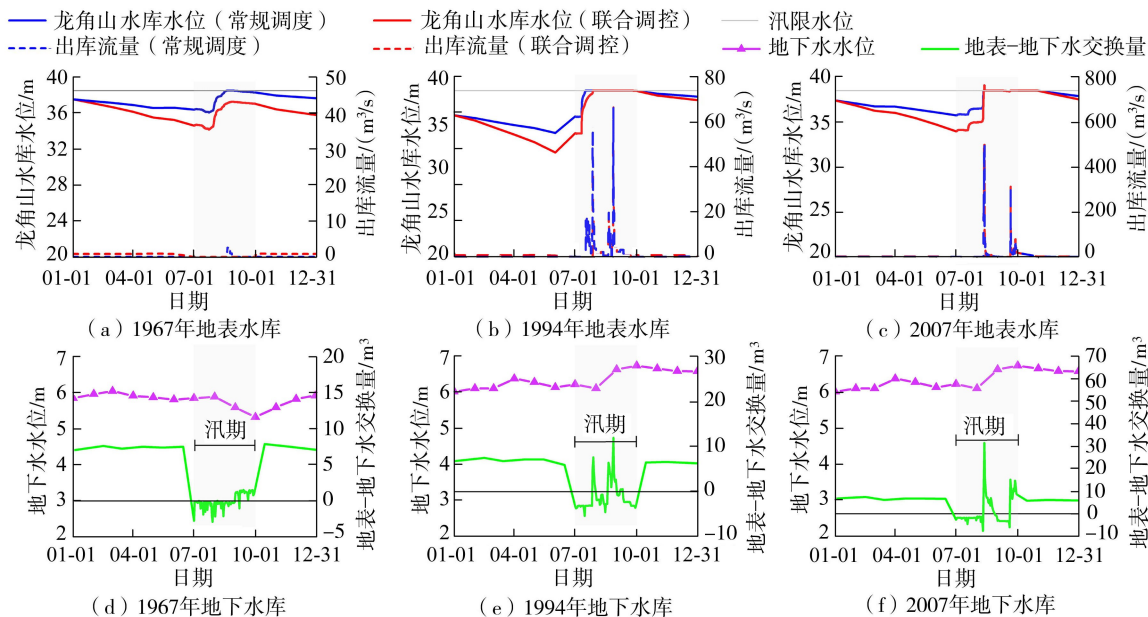


图8 不同来水情景联合调控方案与常规调度方案下乳山河流域地表-地下水库的调控过程

Fig. 8 Regulation processes of surface and underground reservoirs in the Rushan River Basin under conventional and conjunctive regulation schemes in different water flow scenarios

量。2007 年乳山河流域汛期来水量很大,尤其是发生在 7 月 8 日的洪水将库水位很快抬升至汛限水位,常规调度和联合调控方案下流域均发生了大量弃水(图 8(c))。但联合调控方案通过非汛期将地表水库中的水入渗至地下水库,增加了流域洪水资源利用。1967 年、1994 年、2007 年来水条件下,联合调控方案的运用使乳山河流域洪水资源利用量分别增加了 106.35 万、728.77 万、846.96 万 m^3 。该结果表明,地表-地下水库联合调控方案可有效增加流域洪水资源利用量。

从龙角山水库调度过程来看,地表-地下水库联合调控方案既可保证地表水库水位不超过汛限水位,又能保障下泄流量低于下游安全泄量。其主要原因是,联合调控通过在汛期来临之前将地表水库蓄水转移至地下水库,腾空地表水库防洪库容。而由于地下水库基本无防洪风险,使得地表-地下水库联合调控方案真正做到了在不增加流域防洪风险的前提下进行洪水资源利用,这是当前动态汛限水位^[27]、分期汛限水位^[28]、预报调度^[29]等洪水资源利用技术难以做到的。

对比图 8(d) ~ (f) 可以看出,在联合调控方案下,地下水库非汛期月入渗补给量比较稳定,约为 200 万 m^3 。这是因为河道入渗回补量主要受河道水位与地下水库水位相对位置的影响^[24],而乳山河流域非汛期河道来水量少,河道水位受橡胶坝高度控制,变化很小。此外,流域来水越少,地下水库水位越低,则地下水库非汛期月入渗补给量越大,该结

果与已有研究一致^[30-32],证明了联合调控模型的合理性。

4 结 论

a. 乳山河流域的实践证明,基于率定好的地下水水动力学模型建立其替代模型,可显著提升地下水水库水动力过程的模拟计算效率,实现地下水水库调度过程与地表水库、闸坝调度过程的联合模拟;采用时、日、月多时间尺度嵌套技术构建地表-地下水库联合调控模型,既保证了对历时短暂洪水的精细调节,又避免了非汛期内模型时间尺度过短导致计算效率低的问题,是建有地下水库的沿海中小流域洪水资源利用可行的方法。

b. 地表-地下水库联合调控实现洪水资源利用的关键是在洪水来临前或洪水消退期,通过地表水库、下游河道闸坝、地下水库的配合,将地表水库多余水量适时适量地补给地下水库,腾空地表水库防洪库容,在不增加流域防洪风险的前提下,有效增加流域洪水资源利用量。联合调控方案下洪水资源利用量随汛期洪量的增加而增加,且洪水资源利用量存在上限,主要受下游河道下渗速度的限制。本文提出的模型可为滨海流域地表-地下水库管理提供支持。

参考文献:

[1] 丁涛,楼越平,马小兵. 滨海平原河网洪水资源利用研究[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊 1): 356-359. (DING

- Tao, LOU Yueping, MA Xiaobing. Research on flood water resources utilization in littoral plain river networks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38 (Sup1): 356-359. (in Chinese))
- [2] 许畅畅,温瑶,成思,等.长江口滨岸浅层地下水化学组分时空分布特征及影响机制[J].水资源保护,2022,38(3):181-188. (XU Changchang, WEN Yao, CHENG Si, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and mechanisms of chemical composition of shallow groundwater in coastal area of Yangtze River estuary[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (3): 181-188. (in Chinese))
- [3] 谢和平,许唯临,刘超,等.地下水利工程战略构想及关键技术展望[J].岩石力学与工程学报,2018,37(4):781-791. (XIE Heping, XU Weilin, LIU Chao, et al. The subversive idea and key technical prospects on underground hydraulic engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (4): 781-791. (in Chinese))
- [4] 孙金华,吴永祥,林锦,等.黄渤海沿海地区海水入侵防治与地下水管理研究[J].中国水利,2021(7):20-23. (SUN Jinhua, WU Yongxiang, LIN Jin, et al. Seawater intrusion prevention and groundwater management and study in the coastal area of the Yellow Sea and the Bohai Sea[J]. China Water Resources, 2021 (7): 20-23. (in Chinese))
- [5] 李旺林,束龙仓,殷宗泽.地下水库的概念和设计理论[J].水利学报,2006,37(5):613-618. (LI Wanglin, SHU Longcang, YIN Zongze. Concept and design theory of groundwater reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (5): 613-618. (in Chinese))
- [6] 李克飞,侯红雨,贺丽媛,等.区域多水源联合调配研究[J].水力发电,2018,44(12):19-23. (LI Kefei, HOU Hongyu, HE Liyuan, et al. Study on joint dispatching of regional water resources[J]. Water Power, 2018, 44 (12): 19-23. (in Chinese))
- [7] SCANLON B R, REEDY R C, FAUNT C C, et al. Enhancing drought resilience with conjunctive use and managed aquifer recharge in California and Arizona[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11 (3): 035013.
- [8] MICHAEL H A, POST V E A, WILSON A M, et al. Science, society, and the coastal groundwater squeeze[J]. Water Resources Research, 2017, 53 (4): 2610-2617.
- [9] 孙颖,叶超,韩爱果,等.北京地区水资源养蓄方案初探[J].水土保持研究,2006,13(6):129-132. (SUN Ying, YE Chao, HAN Aiguo, et al. The protection and accumulation scheme of water resource of Beijing area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13 (6): 129-132. (in Chinese))
- [10] 李璇,束龙仓,鲁程鹏,等.石川河地下水建库条件分析及地下水位动态预测[J].水资源保护,2017,33(3):13-18. (LI Xuan, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Analysis of groundwater reservoir construction conditions and prediction of groundwater level variation in Shichuan River groundwater reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (3): 13-18. (in Chinese))
- [11] 杨柳,汪妮,李朦,等. MODFLOW 模型与地表水量调度系统联合运用研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(1):218-224. (YANG Liu, WANG Ni, LI Meng, et al. Joint operation of MODFLOW model and surface water regulation system [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2017, 45 (1): 218-224. (in Chinese))
- [12] 杨改强,郭萍,李睿环,等.基于排队理论的灌区渠系地表水及地下水优化配置模型[J].农业工程学报,2016,32(6):115-120. (YANG Gaiqiang, GUO Ping, LI Ruihuan, et al. Optimal allocation model of surface water and groundwater based on queuing theory in irrigation district [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (6): 115-120. (in Chinese))
- [13] 高玉芳,陈耀登,张展羽.沿海地区地下水模拟优化管理模型[J].水科学进展,2010,21(5):622-627. (GAO Yufang, CHEN Yaodeng, ZHANG Zhanyu. Simulation-optimization modeling for groundwater management in coastal areas [J]. Advances in Water Science, 2010, 21 (5): 622-627. (in Chinese))
- [14] 杨蕴,吴剑锋,林锦,等.控制海水入侵的地下水多目标模拟优化管理模型[J].水科学进展,2015,26(4):579-588. (YANG Yun, WU Jianfeng, LIN Jin, et al. A multi-objective simulation-optimization model constrained by the potential seawater intrusion [J]. Advances in Water Science, 2015, 26 (4): 579-588. (in Chinese))
- [15] 郭芷琳,马瑞,张勇,等.地下水污染物在高度非均质介质中的迁移过程:机理与数值模拟综述[J].中国科学:地球科学,2021,51(11):1817-1836. (GUO Zhilin, MA Rui, ZHANG Yong, et al. Contaminant transport in heterogeneous aquifers: a critical review of mechanisms and numerical methods of non-Fickian dispersion [J]. Scientia Sinica Terrae, 2021, 51 (11): 1817-1836. (in Chinese))
- [16] WU Bin, ZHENG Yi, WU Xin, et al. Optimizing water resources management in large river basins with integrated surface water-groundwater modeling: a surrogate-based approach[J]. Water Resources Research, 2015, 51 (4): 2153-2173.
- [17] NAYAK M A, HERMAN J D, STEINSCHNEIDER S. Balancing flood risk and water supply in California: policy search integrating short-term forecast ensembles with conjunctive use[J]. Water Resources Research, 2018, 54 (10): 7557-7576.
- [18] 李莱,曹凯华,付强,等.不确定条件下考虑水循环过程的灌区多水源高效配置[J].农业工程学报,2021,37

- (18): 62-73. (LI Mo, CAO Kaihua, FU Qiang, et al. Efficient allocation of multiple water sources in irrigation areas considering water cycle process under uncertainty [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(18): 62-73. (in Chinese))
- [19] 高玉琴, 周桐, 马真臻, 等. 考虑天然水文情势的水库调度图优化[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 60-67. (in Chinese))
- [20] 董增川, 陈牧风, 倪悦宽, 等. 考虑模糊区间的水库群优化调度决策方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 233-240. (DONG Zengchuan, CHEN Mufeng, NI Xiaokuan, et al. Decision method of optimal operation of reservoir group considering fuzzy interval[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 233-240. (in Chinese))
- [21] 黄志鸿, 董增川, 周涛, 等. 面向生态友好的水库群调度模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 202-208. (HUANG Zhihong, DONG Zengchuan, ZHOU Tao, et al. Group operation model for ecological friendly reservoir [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 202-208. (in Chinese))
- [22] 薛联青, 廖淑敏, 刘远洪, 等. 基于地下水动态模拟的生态输水累积效应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 322-328. (XUE Lianqing, LIAO Shumin, LIU Yuanhong, et al. Cumulative effects of ecological water conveyance based on groundwater dynamic simulation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 322-328. (in Chinese))
- [23] WANG Kun, WANG Zongzhi, LIU Kelin, et al. Assessing the floodwater utilization potential in a reservoir-controlled watershed: a novel method considering engineering regulations and an empirical case from China [J]. Ecological Informatics, 2022, 68: 101581.
- [24] 陈学群, 刘丹, 张文静, 等. 氯化消毒水源回灌过程地下水化学特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(5): 1-6. (CHEN Xuequn, LIU Dan, ZHANG Wenjing, et al. Research on the hydro-chemical characteristics of the groundwater caused by managed aquifer recharge with chlorinated water source [J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(5): 1-6. (in Chinese))
- [25] 王坤, 王宗志, 白莹, 等. 沿海中小河流域地表-地下水联合调控洪水资源利用研究: I. 方法与模型[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 79-85. (WANG Kun, WANG Zongzhi, BAI Ying, et al. Research on joint regulation and utilization of flood resources by surface-underground reservoirs in coastal small and medium-sized river basins: I. methods and models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 79-85. (in Chinese))
- [26] WANG Kun, WANG Zongzhi, LIU Kelin, et al. Optimizing flood diversion siting and its control strategy of detention basins: a case study of the Yangtze River, China [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126201.
- [27] 刘攀, 郭生练, 王才君, 等. 三峡水库动态汛限水位与蓄水时机选定的优化设计[J]. 水利学报, 2004, 35(7): 86-91. (LIU Pan, GUO Shenglian, WANG Caijun, et al. Optimization of limited water level in flood season and impounding scheme for reservoir in three gorges project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(7): 86-91. (in Chinese))
- [28] 王宗志, 王银堂, 吴浩云, 等. 基于模糊时序有效聚类的太湖流域汛期分期研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 29-34. (WANG Zongzhi, WANG Yintang, WU Haoyun, et al. Novel flood season division method based on fuzzy time series-effective cluster and its application to Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 29-34. (in Chinese))
- [29] 王本德, 周惠成, 卢迪. 我国水库(群)调度理论方法研究应用现状与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 337-345. (WANG Bende, ZHOU Huicheng, LU Di. The state-of-the-art review in the theory research and its application of multi-reservoir system operation in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 337-345. (in Chinese))
- [30] 张宇, 王建力, 杨平恒, 等. 河水-地下水侧向交互流运动机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(11): 1349-1356. (ZHANG Yu, WANG Jianli, YANG Pingheng, et al. Movement of lateral hyporheic flow between stream and groundwater [J]. Scientia Sinica Terrae, 2017, 47(11): 1349-1356. (in Chinese))
- [31] 曹天正, 韩冬梅, 宋献方, 等. 滨海地区地表水-地下水相互作用研究进展的文献计量分析[J]. 地球科学进展, 2020, 35(2): 154-166. (CAO Tianzheng, HAN Dongmei, SONG Xianfang, et al. Bibliometric analysis of research progress on coastal surface water and groundwater interaction [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(2): 154-166. (in Chinese))
- [32] 束龙仓, 宫荣, 栾佳文, 等. 地下水与地表水水量交换识别及交换量计算: 以新汴河宿州段为例[J]. 水科学进展, 2022, 33(1): 57-67. (SHU Longcang, GONG Rong, LUAN Jiawen, et al. A integrated method to quantify flow exchanges between surface water and groundwater: take Suzhou section of the Xinbian River as an example [J]. Advances in Water Science, 2022, 33(1): 57-67. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-04-24 编辑: 施业)