

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：I. 方法与模型

王坤¹, 王宗志¹, 白莹¹, 刘群², 程亮¹, 杜慧华¹, 刘克林¹, 丁启¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 山东省水文中心, 山东 济南 250002)

摘要: 针对沿海中小河流域地表-地下水库复杂工程系统, 因缺少联合调控方法而导致洪水资源利用难的问题, 解析地表-地下水库系统结构与功能, 定量模拟地表水库调度、闸坝调控下河流和地下水动力过程, 并利用智能替代模型提升水动力过程计算速度; 在此基础上通过研发时/日/月多时间尺度模型耦合嵌套方法, 构建了兼顾计算精度与效率的地表-地下水库联合调控模型。该模型实现了洪水、地表-地下水相互作用和供水等时间尺度差异明显的调节过程的统一调配, 可为沿海中小河流域洪水资源利用提供新思路与技术支持。

关键词: 洪水资源利用; 地表-地下水库系统; 联合调控; 多时间尺度嵌套模型; 沿海中小河流域

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)01-0079-07

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 // WANG Kun¹, WANG Zongzhi¹, BAI Ying¹, LIU Qun², CHENG Liang¹, DU Huihua¹, LIU Kelin¹, DING Qi¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hydrology Center of Shandong Province, Jinan 250002, China)

Abstract: In response to the lack of joint regulation methods of the complex engineering system of surface-underground reservoirs in coastal small and medium-sized river basins, which leading to difficulties in flood resources utilization, the structure and function of surface-groundwater reservoir system was analyzed, the surface reservoir regulation and dynamic processes of rivers and groundwater under gate dam regulation were quantitatively simulated, and the intelligent replacement models to improve the calculation speed of hydrodynamic processes were used. A multi-time scale model coupling nesting method of hour/day/month was developed to construct a joint regulation model of surface-underground reservoirs that takes into account calculation accuracy and optimization efficiency. This model realized the unified allocation of floods, surface groundwater interactions, and water supply, which can provide new ideas and technical support for the utilization of floodwater resources in coastal small and medium-sized river basins.

Key words: flood resources utilization; surface-underground reservoir system; joint regulation; multi-time scale nesting model; coastal small and medium-sized river basin

受季风气候影响,我国北方沿海地区降水时程分布极不均匀,汛期一两场降雨占全年降水量的60%以上。加之沿海中小河流域地表水库调控能力弱,无法拦蓄调控洪水,导致大量淡水资源以洪水形式入海,非汛期无水可用,水资源短缺问题严重^[1]。在入海口附近修筑直达基岩的不透水地下坝,阻挡海水入侵的同时拦蓄淡水形成地下水库,已被越来越

越多的沿海中小河流域采用^[2]。为有效控制和利用地下水库,在库区上方河道内建设可控制河道入渗补给的闸坝,并合理布设地下水开采井,与流域上游水库共同组成地表-地下水库系统^[3]。在洪水来临之前或洪水末期,适时利用地表水库弃水为地下水库补水,可在不增加流域防洪风险的前提下有效增加流域水资源利用量,为沿海中小河流域提供了

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(Y523001);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

新的洪水资源利用工程措施。但由于地表-地下水系统结构复杂,涉及地表水、地下水、入渗补给等多个运动特性和时间尺度差别显著的过程^[4],目前尚缺乏科学建模方法与成功应用案例。

进入 21 世纪以来,受缓解水资源短缺需求驱动,国内开展了大量洪水资源开发利用的研究。旨在不增加流域防洪风险的前提下,依托现有工程体系,通过更为先进的调控与管理方法尽可能多地拦蓄利用洪水^[5]。水库、湖泊、闸坝等大型地表工程一直是实现流域防洪与兴利的主要工程手段,其优化调度也是洪水资源开发利用研究中的热点,并取得了丰硕成果^[6-7]。学者们以单个水库为研究对象,提出了动态汛限水位^[8]、汛期分期^[9]、预报调度^[10]等洪水资源开发利用技术与方法。针对水库群,Lu 等^[11]提出了库群汛限水位联合优化方法;钟平安等^[12]探索了梯级水库汛限水位动态控制域计算方法;丁涛等^[13]提出了平原河网控制水位动态优化方法,有效提升了沿海地区洪水资源化水平;王宗志等^[14]结合浅水湖泊工程特性,提出了浅水湖泊洪水资源适度开发规模优选模型,为南四湖流域洪水资源开发提供了科学指导。可以看出,提出与流域工程特性适应的优化调控方法是流域洪水资源开发利用的重要途径。国外虽未明确提出洪水资源利用的概念,但开展了大量平衡防洪与兴利矛盾的研究,特别是在利用洪水补给地下水方面进行了探索。例如:Shetkar 等^[15]提出建设拦河坝群滞缓洪水并增加地下水入渗补给量,在汛期将洪水尽可能多地转化为地下水,来缓解印度半岛水资源年内分布严重不均导致非汛期水资源短缺的问题;Nayak 等^[16]提出了通过预报调度在洪水来临之前将地表水库蓄水转移到含水层,以增加流域供水的方法。上述工作为流域洪水资源利用提供了新思路,但其研究对象是无控制工程的含水层,模拟与调控过程仅关注地下水回补量,对地表水地下水相互作用的动力过程描述较少,难以适用涉及地表水库、河道闸坝和地下水库等多类水利工程的滨海地表-地下水库系统。

本文在解析典型流域地表-地下水库系统结构基础上,提出工程系统概化方法,进而构建兼顾计算精度与优化效率的多时间尺度地表-地下水库联合模拟与调控模型,以期为建有地表水库、地下水库的沿海中小河流域洪水资源开发利用提供模型方法。

1 地表-地下水库系统结构与概化方法

流域尺度的地表水、地下水管理涉及水体类型众多、工程体系复杂。且由于地下水库库区储水介质为含水层,库区内水流运动特性与地表水库迥异,

导致地下水库的调蓄过程和调控手段与地表水库差异明显。从流域水资源综合管理角度进行地表-地下水库联合调控,应在厘清地表-地下水库系统结构与功能的基础上,分析系统各组成部分水力特性与水力联系,进而提出系统概化与模拟方法。

1.1 地表-地下水库系统结构与功能解析

建有地下水库和地表水库的沿海中小河流域,一般地表水库位于流域上游,地下水库位于流域下游^[17]。由于地下水库库区储水介质多是一定厚度的含水层,其内水流速度慢,无法像地表水库一样快速拦蓄和放空库区水量。为加快河道入渗速度,延长入渗时间,山东半岛等典型地区的地下水库库区河道内多建有拦河闸坝,通过闸坝控制河道水位调节地下水回补过程。同时在适当位置建设开采井,开发利用库区地下水。因此,一个可进行联合调控的地表-地下水库系统基本工程包括地表水库、地下水库、地下水回补工程、地下水开采工程、地表水库供水工程,其基本结构如图 1 所示。

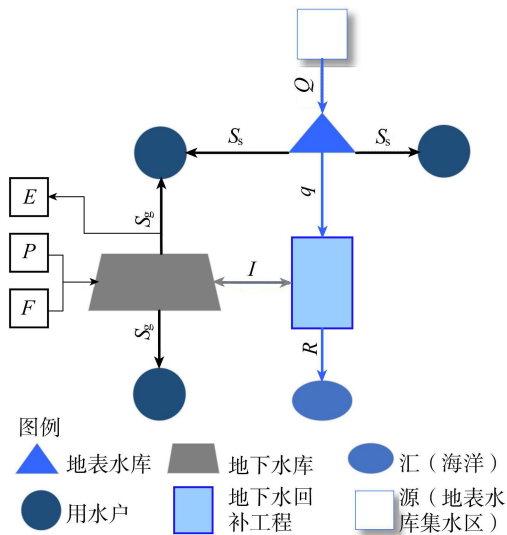


图1 地表-地下水库系统基本结构和水力联系
Fig.1 Basic structure and hydraulic connection of surface-underground reservoir system

广义的地下水库是指具有一定储水空间的地下水含水层,狭义的地下水库是指在地下含水层建有地下坝而形成的地下水存储场所^[18]。本研究中地下水库为狭义地下水库,建有地下坝且具有明确的储水空间与控制工程,即地下坝以上含水层与地下水开采、回补工程。地下水库在地表-地下水库系统中的主要功能是储蓄地表水库弃水、供水与防止海水入侵。通过在非汛期开采库区内地下水增加流域供水量,同时腾空库容,在汛期到来之前或汛中接纳地表水库弃水与洪水,增加流域洪水资源利用量。

地表水库往往具有较大的调节库容,是天然径流的主要调节场所,可在汛期迅速拦蓄洪水,并在非

汛期为流域内经济社会提供生产、生活和生态用水,是流域防洪、兴利的主要手段。但地表水库在汛期一般以防洪为主要任务,为保证下游和水库自身防洪安全,水库水位需保持在汛限水位以下,往往导致水库在汛期来临之前和汛期内大量弃水。在地表-地下水库系统中,地表水库的主要功能是在汛期主要起拦蓄和调节洪水作用;在非汛期,主要为地下水库补水,与地下水库进行联合供水。

地下水回补工程包括人工回灌井、人工回灌渠、回灌场和闸坝调控的天然河道等工程^[19],可通过人为调控,增加地下水库入渗回补速度与回补量。多数地下水库以天然补给系统为主(如河道、下渗条件好的洼地、农田等),人工建造为辅。建有闸坝的天然河道是滨海流域地下水库运用最为广泛的地下水回补措施,其主要功能是通过控制工程内地表水位高度增加地下水库回补速度,与地表水库配合延长地下水库回补时间。

地下水开采工程是地表-地下水库系统的重要组成部分,主要包括生活生产开采井、农灌井、傍河集中开采井等。地下水开采工程相当于地表水库的取水工程,既是实现地下水库兴利的工程手段,也是调控库水位、水质、水生态的关键办法。控制地下水库开发利用方式可有效调控地表水库和地下水库水位,包括开采方式、开采量及地表-地下水库的供水比例。且对于采用天然回补工程的地下水库,其水位反过来会影响地下水回补速度。在地表-地下水库系统中,地下水开采工程的主要功能是与地表水供水工程配合完成流域供水任务,以及通过改变开采方式和开采量影响地下水库水位,调节地下水回补速度。

地表水库与地下水库可看作串、并联混合的水库群系统。地表水库入流来自水库集水区,地下水库则来自降雨入渗、侧向补给和地表水入渗。地表水库和地下水库入流多数情况是无联系的,为并联水库群;当地表水库下泄水流流经地下水库库区时,两者产生水力联系,地表水库出流成为地下水库入流,为串联水库群。地表-地下水库系统中水力联系如图 1 所示,地表水库来水(Q)经过水库调节后,一部分通过供水工程供给流域内社会经济用水(S_g),依据水库控制要求或下游用水要求将部分水量下泄到下游(q),这部分水量在地下水库入渗回补工程内与地下水库发生水量交换(I)。地下水回补工程内的水与地表水库作用完成后,多余的水量以弃水形式流出流域(R)。地下水库除在入渗回补工程内与地表水大量交换外,其蓄水状态还受流域降雨(P)、蒸发(E)、地下水侧向补给与排泄(F)等自然

过程影响。此外,地下水库同样承担流域社会经济用水的供给任务,通过地下水开采(S_g)配合地表水库满足流域用水需求。可以看出,地表-地下水交换量 I 是联系地表水库与地下水库关键纽带,也是系统调控的主要对象之一。对于无外加压力的入渗工程,如地面补给入渗、河库补给入渗和不加压力的回灌井补给等,其入渗量由地表水位和地下水位的相对值和地下含水层特性决定。

1.2 地表-地下水库系统概化与模拟框架

通过上述分析可知,在地表-地下水库系统调节过程中,有 3 个主要调控环节,分别是地表水库对入库径流的调节、地下水回补工程对地表水库下泄水量的调节和地下水库蓄水状态的调节。因此,本研究拟将地表-地下水库联合调控系统概化为地表水库调度、地下水补水调控与地下水库调控 3 个模块,并提出了系统建模框架(图 2)。地表水库调度模块主要模拟天然径流在不同供水与调控规则下,水库蓄水状态和下泄流量变化过程。目前,常用的水库调度研究模型将其概化为一个水量点,利用水量平衡方程作为水库调度的控制方程,利用水位库容曲线模拟蓄量变化,最终构建地表水库调度模型。地下水补水调控模块则需反映在一定地表水库下泄流量和补水工程控制方案下工程内水位变化过程,以闸坝控制的河道为例,可采用水动力学模型进行模拟。地下水库调控模块则应反映不同自然因素与人类调控方式下,地下水库状态的变化过程。由于地下水运动在三维空间上具有强烈各向异性,目前常用方法是通过构建三维地下水动力学模型模拟地下水状态对各种自然因素(如降水、蒸发、侧向补给)与人工调控因素(地下水开采、回补)的响应过程。考虑到水动力学模型计算效率低,特别是三维地下水动力学模型,难以与水库调度模型耦合联算,本研究根据率定好的地下水模型,利用人工神经网络等智能算法建立其替代模型,然后与调度模型耦合嵌套,建立地表-地下水库联合调控模型。

2 地表-地下水库联合调控模型

考虑到地下水库入渗回补速度慢,难以直接调控利用过程短暂的洪水,本研究的基本思路为:在洪水到来前,通过地表水库、闸坝和供水规则的改变,提前将地表水库的水转移至地下水库,腾空地表水库库容,增加地表水库防洪库容,增加洪水拦蓄量的同时降低超汛限水位的可能。因此,地表-地下水库联合调控要将非汛期和汛期结合起来,延长调控时间,涉及洪水、地表水地下水相互作用和供水等多个时间尺度差异明显的过程。对于水力联系复杂、水

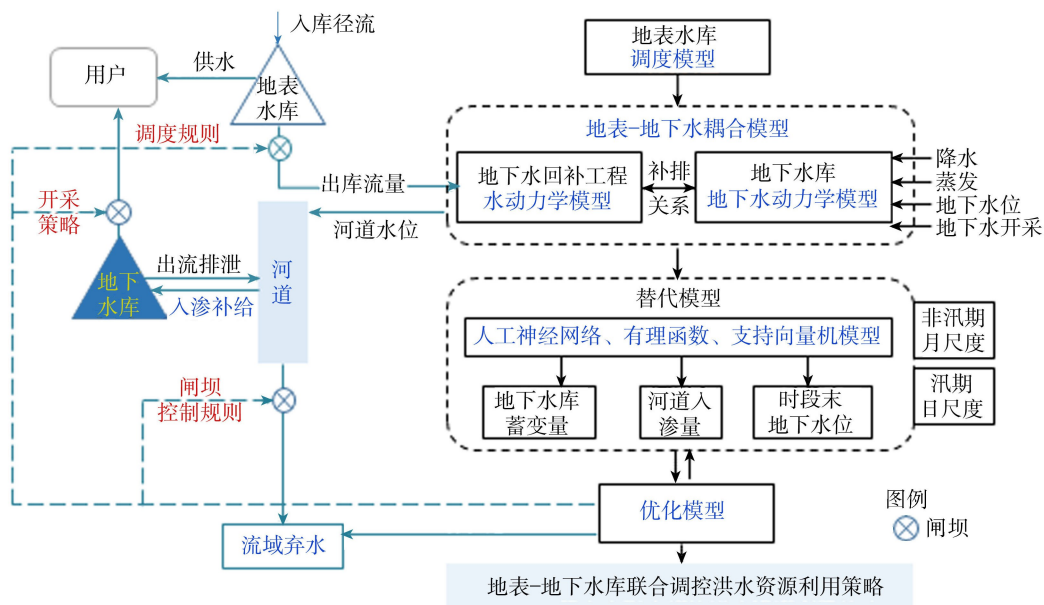


图2 地表-地下水库联合调控建模框架

Fig.2 Modeling framework of surface-underground reservoir joint regulation

流运动差异明显的地表-地下水库调控系统,需要在构建合理的地表-地下水库系统联合模拟模型的基础上,构建兼具计算效率与精度的地表-地下水库联合调控模型。地表水库状态对系统的输入及调控规则变化响应迅速,而地下水库状态的响应相对滞后,地下水回补工程涉及地表水和地下水运动过程,其回补过程对系统变量的响应速度介于地表水库和地下水库之间。为此,拟构建多时间尺度嵌套的地表-地下水库联合调控模型。汛期内地下水位变动按月尺度计算,地表水与地下水交换量及河道出流按日尺度计算,地表水库按小时尺度计算。非汛期径流与降水等过程相对平稳,为减少模型计算量,地表水和地下水统一按月尺度计算。

2.1 地表水库调度过程模拟

不考虑漏损与蒸发损失情况下,地表水库水量平衡方程式为

$$V_{t+1} = Q_t + V_t - W_{s,t} - q_t \quad (1)$$

式中: V_t 、 V_{t+1} 分别为 t 时段初和时段末地表水库库容; Q_t 为 t 时段地表水库来水量; q_t 为 t 时段地表水库弃水量; $W_{s,t}$ 为 t 时段地表水库供水量。

a. 非汛期调度规则。假设地表水库优先满足供水,即只要时段来水加上水库可用水量大于河道外经济社会对地表水库需水,按需供水。供水规则可采用下式模拟:

$$W_{s,t} = \begin{cases} W_{d,t} & V_t + Q_t - V_d \geq W_{d,t} \\ \max[0, V_t + Q_t - V_d] & V_t + Q_t - V_d < W_{d,t} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $W_{d,t}$ 为 t 时段河道外经济社会对地表水库需水

量; V_d 为地表水库死库容。

供水之后,若地表水库仍有可用水量则,按下游生态需水放水:

$$q_t = \begin{cases} V_t + Q_t - W_{s,t} - V_n & V_t + Q_t - W_{s,t} \geq V_n \\ E_t & V_n > V_t + Q_t - W_{s,t} \geq V_d \\ 0 & V_t + Q_t - W_{s,t} < V_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_n 为水库正常蓄水位对应库容; E_t 为 t 时段下游生态需水,包括河道内生态环境需水和地下水库补水需水。

b. 汛期调度规则。水库汛期调度同样优先满足河道外需水,供水规则与非汛期保持一致。水库水位应保持在汛限水位以下,水位在汛限水位与防洪高水位之间时,泄洪应按下游河道安全泄量要求尽快泄洪,超过防洪高水位时应敞泄。汛期水库下泄过程可用下式模拟:

$$q_t = \begin{cases} 0.36 q_M & V_t \geq V_c \\ \min(0.36 q_a, V_t + Q_t - W_{s,t} - V_1) & V_c > V_t + Q_t - W_{s,t} \geq V_1 \\ E_t & V_1 > V_t + Q_t - W_{s,t} \geq V_d \\ 0 & V_t + Q_t - W_{s,t} < V_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_M 为水库泄洪能力,可由水库水位-泄量曲线得到; q_a 为下游河道的安全泄量; V_c 为水库防洪高水位对应库容; V_1 为水库汛限水位对应库容; 0.36 为流量到小时水量的单位换算因子。

汛期和非汛期的地表水库调度除了调度规则不同外,考虑汛期与非汛期径流特性不同,采用变时间尺度模型对水库调节进行模拟。由于汛期洪水过程

一般历时很短,为准确反映地表水库调控的影响,模型模拟采用小时尺度;非汛期则径流过程平缓,为节省计算时间,非汛期模型模拟采用月尺度。

2.2 地下水回补工程调控过程模拟

地下水回补工程水位状态是影响地下水回补速度和回补量的关键。以河、渠作为地下水回补工程的地下水库,一般在地下水库坝址处的河渠内建有闸坝工程,来调控工程内水位,进而调节地下水回补与地表水下泄。因此,首先需要模拟不同来水和闸坝控制条件下工程内水位变化,常用方法是一维水动力学模型。但水动力学模型计算效率较低,难以与地表水库的优化调度模型进行耦合联算。通过构建水动力学模型的替代模型,即基于率定验证过的水动力学模型,利用人工智能方法建立相关输入变量与输出变量之间的响应关系(或称为映射)。对于地表-地下水库联合调控模型来说,主要关注上游来水即为水库泄流和闸坝调控方案对工程内水位影响。为简化计算,用河段平均水位代表地下水回补工程水位,模型表达式为

$$L_t=f_1(q_t,M) \tag{5}$$

式中: L_t 为 t 时段地下水回补工程平均水位; M 为闸坝控制规则,即闸门上游河道控制水位; f_1 为一定闸坝调控规则 M 下,地表水库泄流 q_t 到回补工程水位 L_t 的映射关系。

地下水回补工程与地下水库之间交换水量受河道水位与地下水位相对位置影响,因此需要构建地表水地下水交换量与地下水库水位、地下水回补工程水位之间的函数关系。由于地下水回补速率受地下水位、地表水位和地下水开采量等多个要素影响,需在地下水动力学模型基础上,利用替代模型构建高效模拟方法。在调控模型中,其表达式为

$$I_t=f_2(Z_{g,t},L_t,S_{g,t},P_t) \tag{6}$$

式中: I_t 为 t 时段河道与地下水交换量,正值代表河道补给地下水,负值代表地下水补给河道; $Z_{g,t}$ 为 t 时段初地下水库水位; P_t 为 t 时段流域日净降水量,为降水量减去蒸发量; $S_{g,t}$ 为 t 时段地下水库开采量; f_2 为 $Z_{g,t}$ 、 P_t 、 $S_{g,t}$ 和 L_t 到 I_t 的映射。

根据水量平衡,流域弃水量为

$$R_t=q_t-I_t \tag{7}$$

式中 R_t 为 t 时段流域弃水量。

2.3 地下水库调控过程模拟

在洪水资源利用中,主要关注地下水库蓄水量与供水量等水量状态的变化。地下水库蓄水量主要受地下水开采量、地下水回补工程水位、流域净降雨等因素影响。因此,在地表-地下水库联合调控模型

中需要定量模拟地下水库蓄水量在上述影响因素下的变化过程。三维地下水动力学模型能较为精确地刻画流域尺度地下水运动过程,是模拟流域地下水位变化的常用方法。但地下水动力学模型计算效率低,而优化模型需要多次计算,目前还很难实现流域尺度地下水动力学模型与优化模型的结合。这里同样建立地下水动力学模型的替代模型,提升地下水库变化过程在地表-地下水库联合调控模型中的计算效率,模型表达式为

$$Z_{g,t+1}=f_3(Z_{g,t},L_t,S_{g,t},P_t) \tag{8}$$

式中 f_3 为 $Z_{g,t}$ 、 P_t 、 L_t 、 $S_{g,t}$ 到 $Z_{g,t+1}$ 的映射。

2.4 多时间尺度嵌套的地表-地下水库联合调控模型计算流程

3 个计算模块时间尺度不同,通过水力联系相互影响,图 3 为多时间尺度嵌套的地表-地下联合调控模型计算流程。模型计算时,一般从非汛期开始,非汛期所有模块均采用月尺度计算。计算步骤为:①将地表水库入库月径流量、河道外月需水量、下游河道月生态需水量、地表水库初始水位输入到地表水库调度模型中,计算得到地表水库月出库水量、月实际供水量、水库月末水位。②将地下水补水工程调控规则(一般是控制水位)输入到地下水回补工程替代模型中。根据得到的地表水库出库水量和调度规则,计算得到地下水回补工程月均水位。③将流域月净降水量、地下水月需水量和地下水库月初水位输入到地下水库替代模型中,再根据得到的地下水回补工程月均水位,计算地下水回补工程与地下水库时段交换水量、地下水库月末水位和地下水开采量。④根据计算得到的地表水库月出库量、地下水回补工程与地下水库交换量,通过河段水量平衡计算流域出口断面月均流量。⑤当前时段计算全部完成后,将地表水库和地下水库时段末水位作为下一时段初始水位进行下一时段计算。

非汛期计算完成后进入汛期计算过程,将调控模型计算的非汛期最后一个时段末地表水库水位和地下水库水位作为汛期第一个时段的初始状态,继续迭代计算。①根据地表水库入库径流(小时尺度)、河道外需水(小时尺度)、下游河道生态需水(小时尺度)和时段初始水位,利用地表水库调度模型,计算得到地表水库小时出库水量、小时实际供水量、水库小时末水位。②根据计算得到的地表水库出库水量和地下水回补工程调度规则,利用地下水回补工程替代模型,计算河道逐小时水位。③每天 24 个时段的地表水库调度和地下水回补工程水位迭代计算完成以后,统计当天河道日均水位。将河

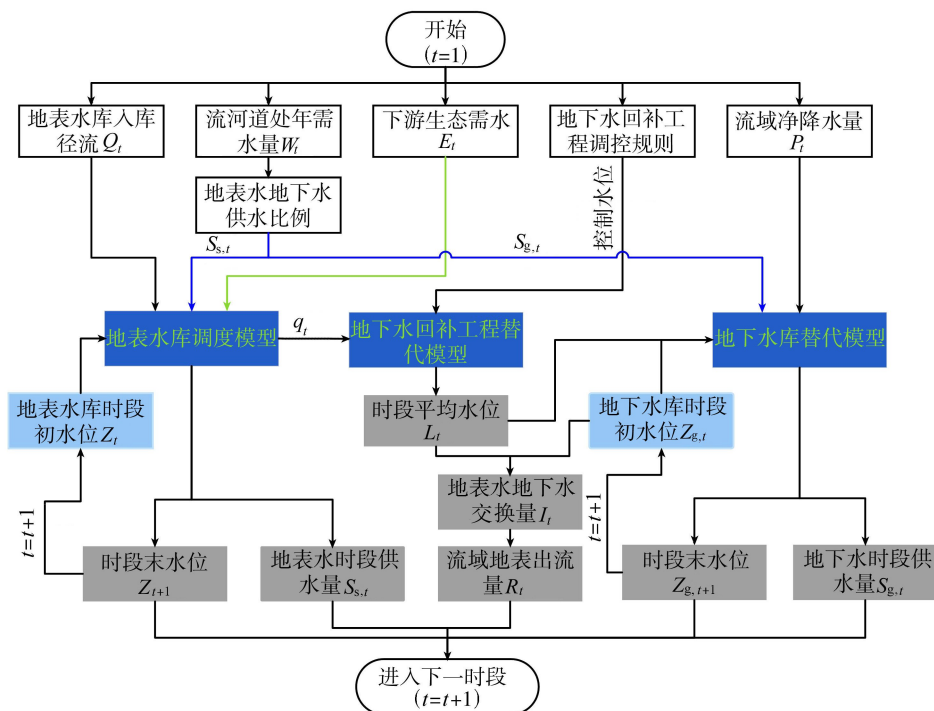


图3 多时间尺度嵌套的地表-地下水库联合调控模型计算流程

Fig.3 Computation flow of surface-underground reservoirs joint simulation model nested at multi-time scale

道日均水位、流域日净降水量、月初地下水库水位、地下水日开采量输入日尺度地下水替代模型中,计算当日河道与地下水库交换量。⑤根据计算得到的地表水库日出库量、河道与地下水库日交换量,通过河段水量平衡计算流域出口断面日出流量。⑥当月逐日过程计算完成以后,统计月均河道水位、月净降水量和月地下水开采量,再将其与月初地下水位一起输入到月尺度地下水库替代模型中,计算月末地下水库水位。⑦计算时,先进行地表水库小时尺度调算,24个时段迭代计算完成后,进行地下水回补量的逐日计算,每月逐日调算完成后,更新地下水库状态。

汛期迭代计算完成后,将调控模型计算的汛期最后一个时段末地表水库水位和地下水库水位作为非汛期第一个时段的初始状态,继续迭代计算。

3 面向洪水资源利用的地表-地下水库联合调控模型构建及求解

调度模型是基于上述各模拟模型,将模型的控制方程和调度规则转化为调控模型的目标函数、调控变量和约束条件而建立的,具体如下:

a. 目标函数。地表-地下水库联合调控的目的是在保障流域防洪安全的前提下,通过地表-地下水库系统优化调控最小化流域汛期弃水,最小弃水量目标函数 F_1 为

$$F_1 = \min \sum_{i=k}^m R_i \quad (9)$$

式中: R_i 为第*i*个时段流域弃水; k 和*m*分别为汛期开始和结束时段。

最小化超过汛限水位库容目标函数 F_2 为

$$F_2 = \min \sum_{i=k}^m (V_{s,i+1} - V_i) \quad (10)$$

式中 $V_{s,i+1}$ 为*i*时段末地表水库蓄量。

b. 调控变量。对于地表-地下水库系统,地表-地下水库供水方案和地下水补水工程调控方式是决定流域弃水量的关键,因此将地表-地下水库供水比例($S_s : S_g$)和补水工程控制水位(L)作为调控变量。

c. 约束条件。①地表水库水量平衡约束(式(1));②地下水库补水工程水位变化函数约束(式(5));③地下水库水位状态变化函数约束(式(7));④地下水回补工程与地下水库交换量函数约束(式(6));⑤地表水库最大泄量约束: $\min(q_a, Q_z)$, q_a 为下游安全泄量, Q_z 为库水位为*Z*时水库下泄能力;⑥地下水库水位约束:地下水库水位范围不能超过最低和最高水位蓄水位;⑦地下水回补工程水位约束:工程内水位不能超过最低和最高水位。⑧非负约束:地表水库出流、供水量、地下水库供水量、流域弃水等均非负。

综上,面向洪水资源利用的地表-地下水库联合调控模型可采用NSGA-II、MOPSO等基于Pareto支

配理论的经典多目标进化算法求解,或者通过权重法、罚函数等将上述目标转变为单目标优化问题再利用传统优化方法进行求解。

4 结 语

本文针对建有地表水库、地下水库及地下水库运用配套工程的沿海中小河流域,解析了地表-地下水库系统的结构与功能,提出了地表-地下水库联合调控的工程系统概化与定量模拟框架。在该框架中,首先定量模拟地表水库调度过程、考虑闸坝调控的河道水动力学过程和地下水库水动力学过程,然后利用人工智能方法构建水动力学模型的替代模型,提升其计算效率;提出了时/日/月多时间尺度模型耦合嵌套方法,协调地表水与地下水运动特性和防洪调节与兴利调节在时间尺度上的差别,构建了兼具计算效率与精度地表-地下水库联合调控模型。基于该模型,以流域洪水资源开发利用为目的,构建了面向洪水资源利用的地表-地下水库联合调控模型。通过调节地下水回补工程水位和地表-地下水库供水规则等,提高流域洪水资源利用量。研究为地表-地下水库联合调控洪水资源利用提供了建模思路与工具,有望成为沿海地区增加洪水资源利用量的新途径。

参考文献:

[1] 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]. Advance in Earth Science,2020,35(2): 154-166. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 王宗志,王宇,王坤,等. 滨海地下水库建设与利用方式对含水层水盐运移规律的影响[J]. 水资源保护,2023, 39(4):69-78. (WANG Zongzhi, WANG Yu, WANG Kun, et al. Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater transport law in aquifers [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(4): 69-78. (in Chinese))

[4] 胡立堂,王忠静,赵建世,等. 地表水和地下水相互作用

及集成模型研究[J]. 水利学报,2007,38(1):54-59. (HU Litang, WANG Zhongjing, ZHAO Jianshi, et al. Advances in the interactions and integrated model between surface water and groundwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 54-59. (in Chinese))

[5] 王宗志,王银堂,胡四一,等. 流域洪水资源利用的理论框架探讨 I :定量解析[J]. 水利学报,2017,48(8): 883-891. (WANG Zhongzhi, WANG Yintang, HU Siyi, et al. Theoretical framework of floodwater resources utilization in a basin I: quantitative interpretation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 883-891. (in Chinese))

[6] 王蔚,董增川,崔璨,等. 基于洪水资源化的洪泽湖后汛期蓄水策略[J]. 水资源保护,2023,39(2):168-179. (WANG Wei, DONG Zengchuan, CUI Can, et al. Water storage strategy in post-flood period for Hongze Lake based on flood utilization [J]. Water Resources Protection, 2023,39(2):168-179. (in Chinese))

[7] DING W, ZHANG C, CAI X, et al. Multi objective hedging rules for flood water conservation [J]. Water Resources Research, 2017(53): 1963-1981 .

[8] GONG Y, LIU P, CHENG L, et al. Determining dynamic water level control boundaries for a multi-reservoir system during flood seasons with considering channel storage[J]. Journal of Flood Risk Management, 2020,13(1):1-17.

[9] 郭生练,刘攀,王俊,等. 再论水库汛期水位动态控制的必要性和可行性[J]. 水利学报,2023,54(1):1-12. (GUO Shenglian, LIU Pan, WANG Jun, et al. Revisiting necessity and feasibility for dynamic control of reservoir water level during flood season [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(1): 1-12. (in Chinese))

[10] 刘招,黄文政,黄强,等. 基于水库防洪预报调度图的洪水资源化方法[J]. 水科学进展,2009,20(4):578-583. (LIU Zhao, HUANG Wenzheng, HUANG Qiang, et al. Floodwater resources utilization based on flood forecast information of reservoir operation chart [J]. Advance in Water Science, 2009, 20(4): 578-583. (in Chinese))

[11] LU Q W, ZHONG P A, XU B, et al. Stochastic programming for floodwater utilization of a complex multi-reservoir system considering risk constraints[J]. Journal of Hydrology,2021,599(1):126388.

[12] 钟平安,孔艳,王旭丹,等. 梯级水库汛限水位动态控制域计算方法研究[J]. 水力发电学报,2014,33(5): 36-43. (ZHONG Pingan, KONG Yan, WANG Xudan, et al. Study on method for estimation of dynamic control bounds of flood limited water level in cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014,33(5): 36-43. (in Chinese))

[28] 凡来,张大玉. 北京街区活力影响机制及空间分异特征研究:基于多尺度地理加权回归[J]. 城市规划,2022,46(5):27-37. (FAN Lai,ZHANG Dayu. Research on the influence mechanism and spatial heterogeneity characteristics of block vitality in Beijing:based on multi-scale geographically weighted regression[J]. City Planning Review,2022,46(5):27-37. (in Chinese))

[29] 牛全福,冯尊斌,党星海,等. 黄土区滑坡研究中地形因子的选取与适宜性分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(12):1584-1592. (NIU Quanfu,FENG Zunbin,DANG Xinghai, et al. Suitability analysis of topographic factors in loess landslide research[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19 (12): 1584-1592. (in Chinese))

[30] 刘樯漪,程维明,郭良,等. 北天山流域地貌特征及其构造活动分析[J]. 地理与地理信息科学,2017,33(4):79-85. (LIU Qiangyi,CHENG Weiming,GUO Liang, et al. Geomorphology of Northern Tianshan and its structural analysis [J]. Geography and Geo-Information Science, 2017,33(4):79-85. (in Chinese))

[31] 欧阳晓. 区域土壤侵蚀地形指标研究[D]. 西安:西北大学, 2011.

[32] 唐钰嫣,潘耀忠,范津津,等. 土地利用景观格局对城市内涝灾害风险的影响研究[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(12):1-11. (TANG Yuyan,PAN Yaozhong,FAN Jinjin, et al. The influence of landscape pattern on the risk of urban wateloggng disaster [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021,52(12):1-11. (in Chinese))

[33] 袁雯,杨凯,徐启新. 城市化对上海河网结构和功能的发育影响[J]. 长江流域资源与环境,2005(2):133-138. (YUAN Wen,YANG Kai,XU Qixin. Effect of urbanization on growth of Shanghai river function and stream structure [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2005(2):133-138. (in Chinese))

[34] 何隆华,赵宏. 水系的分形维数及其含义[J]. 地理科学,1996(2):124-128. (HE Longhua,ZHAO Hong. The fractal dimension of river networks and its interpretation [J]. Scientia Geographica Sinica, 1996 (2): 124-128. (in Chinese))

(收稿日期:2023-02-16 编辑:王芳)

+++++

(上接第85页)

[13] 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(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(Sup1):356-359. (in Chinese))

[14] 王宗志,刘克琳,刘友春,等. 浅水湖泊洪水资源适度开发规模优选模型[J]. 水科学进展,2020,31(6):908-916. (WANG Zongzhi,LIU Kelin,LIU Youchun, et al. Optimizing the moderate size using floodwater in a large-scale shallow lake[J]. Advance in Water Science,2020,31(6):908-916. (in Chinese))

[15] SHETKAR R V,MAHESHA A A. Tropical, seasonal river basin development through a series of vented dams [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011,16(3):292-302.

[16] 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.

[17] 郭生练,熊立华,熊丰,等. 梯级水库运行期设计洪水理论和方法[J]. 水科学进展,2020,31(5):734-745. (GUO Shenglian,XIONG Lihua,XIONG Feng, et al. Theory and method of design flood in cascade reservoir operation period[J]. Advance in Water Science, 2020,31(5):734-745. (in Chinese))

[18] 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))

[19] 李伟,李砚阁,龙玉桥. 地下水人工补给井研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):410-416. (LI Wei,LI Yange, LONG Yuqiao. A review of research on artificial groundwater recharge wells [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(5):410-416. (in Chinese))

(收稿日期:2023-04-24 编辑:王芳)