

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.06.009

博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统设计与实现

李肖杨^{1,2}, 陈亚宁¹, 刘璐^{1,2}, 马玉其³, 王新友³

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 为了提高博斯腾湖流域水资源管理水平, 设计开发了针对该流域的水资源管理决策支持系统。系统基于 Microsoft.NET 平台, 采用 Visual Studio、SQL Server、ArcGIS 工具集开发, 在流域“地-云-空”一体化监测体系和系统架构的基础上, 构建了地图要素管理、基本水文信息、流域生态流量等主要模块, 实现了流域空间可视化查询、实时流量动态模拟、流域生态基流计算以及水资源管理配置等功能。结合博斯腾湖流域 1956—2019 年水文资料及目前数据获取情况, 系统可为不同发展模式下水资源管理提供多方面参考信息和技术支撑, 能有效提高水资源管理部门决策效率。

关键词: 水资源管理; 决策支持系统; 生态基流; 博斯腾湖流域

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2020)06-0053-07

Design and implementation of water resources management decision support system in the Bosten Lake Basin// LI Xiaoyang^{1,2}, CHEN Yaning¹, LIU Lu^{1,2}, MA Yuqi³, WANG Xinyou³ (1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Bayingolin Management Bureau of Xinjiang Tarim River Basin, Korla 841000, China)

Abstract: In order to improve the water resources management level of the Bosten Lake Basin, a water resources management decision support system of the basin was designed and developed. The system was developed by Visual Studio, SQL Server, and ArcGIS tool sets based on the Microsoft.NET platform. On the basis of the “ground-cloud-space” integrated monitoring system and system architecture of the river basin, major modules such as map element management, basic hydrological information and river basin ecological flow were constructed. Functions including watershed spatial visualization query, real-time dynamic flow simulation, watershed ecological baseflow calculation and water resource management configuration have been implemented. Combined with the hydrological data from 1956 to 2019 and the current data acquisition situation in the Bosten Lake Basin, the system can provide multi-faceted reference information and technical support for water resources management under different development models, which can better improve the decision-making efficiency of water resources management departments.

Key words: water resources management; decision support system; ecological baseflow; Bosten Lake Basin

博斯腾湖流域位于新疆塔里木盆地东北边缘, 主要由开都河流域、博斯腾湖和孔雀河流域三大部分组成, 是典型的干旱区湖泊流域。博斯腾湖是我国最大的内陆淡水湖, 作为开都河的尾间、孔雀河的源头, 主要由开都河、黄水沟、清水河等补给, 孔雀河是水资源的主要耗散区^[1]。近年来, 由于流域内河流水资源开发过度, 导致博斯腾湖出入湖水量发生不稳定变化^[2], 长此以往将对湖区内水量平衡及周

边生态环境造成不良影响, 流域城镇的生产生活以及河流绿洲的生态安全也会受到严重威胁。此外, 气候变化改变着干旱区水循环要素, 加剧了水系统的不稳定性, 致使对流域水文实时变化情况的掌控难度加大^[3], 而流域内城市化进程的加快以及耕地面积的扩大, 也增加了流域水资源利用的复杂性, 对流域水资源的科学管理提出了新的挑战^[4]。

面对多元水文信息的半结构化、非结构化复杂

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100303)

作者简介: 李肖杨(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生态水文过程。E-mail: lixiaoyang18@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 陈亚宁, 研究员。E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

问题,传统的管理方式已很难适应不断发展的水资源管理需求^[5],而采用水资源管理决策支持系统(water resources management decision support system)辅助水资源管理是很好的解决方法。水资源管理决策支持系统在决策支持系统的基础上,建立起水资源管理人员与水文学家之间的连接通道^[6],其主要功能是解决水资源管理中多种因素的耦合问题,为决策者提供决策依据^[7]。随着水资源管理决策支持系统框架的不断完善,通用性越来越好,利用率也越来越高,能够运用计算机、地理信息系统、网络通信等多方面技术,将数据采集与管理、空间可视化表达、流域水资源实时情况、水文预警等功能融为一体,形成综合的管理决策体系^[8]。

本文根据博斯腾湖流域实际面临的水资源管理问题与性质,结合新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局对系统的功能需求,参考已有的水资源管理决策支持系统开发的成功经验,采用面向对象的开发方法,设计开发了博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统。

1 系统设计

1.1 系统架构

系统架构如图 1 所示,采用 Visual Studio 工具集开发,由数据采集层、中间服务层、外观层 3 层组成^[9]。在流域各项水文数据基础上,结合设计要求,以时空变换方式实现信息的动态模拟,其结果以人机交互方式提供给决策者。按照架构规划,系统实现过程可分为数据整合、模拟分析、系统开发和系统运行 4 个部分。

a. 数据整合。根据系统的设计要求,将流域已有的水文数据,包括流域中水文站、水电站、分水枢纽、排污渠、水质监测点的数据与空间地理数据进行整合。同时设计不同数据的存储规则,方便对实时

资料的获取处理以及数据库的构建。

b. 模拟分析。系统对博斯腾湖流域水文信息进行动态模拟,需借助 GIS 分析工具处理空间要素,同时也需借助专业分析工具,以相关模型和算法作为后台运行基础。例如为实现流域水文要素的空间可视化表达,将人工解译后的 30 m 分辨率 Landsat 8 影像作为流域底图存储到系统的空间数据库中,以方便系统调用;根据实际情况综合采用 Tennant 法^[10]、年型划分法、最枯月平均流量多年平均值法^[11]、90% 保证率法^[12]对流域生态基流进行计算,选择 Penman 法^[13]、潜水蒸发法、定额法^[14]等估算流域生态输水时的天然植被需水量等。系统所涉及的算法和模型利用 C#语言建立类库并与数据库连接,实现水资源的宏观统一管理和水情综合分析预报。

c. 系统开发。根据系统开发的复杂程度、开发时间以及用户的需求,以面向 Microsoft .Net 平台的 C#语言为程序设计语言,采用 Visual Studio 开发工具集进行开发,同时利用 ArcGIS Engine 搭建系统空间可视化平台,并以 Microsoft SQL Server 实现水文数据存储。在系统架构基础之上设计系统各模块和功能,整个系统开发过程借鉴组件式开发模式,可以独立开发业务功能组件,增强了系统的可扩展性。

d. 系统运行。系统目前在试运行中,将根据管理人员的使用反馈情况对系统更新维护,以便更好地服务于博斯腾湖流域管理。

1.2 系统功能模块

博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统由地图管理、基础信息管理、流域生态流量以及用户帮助等主要功能模块组成,其运行机制如图 2 所示。系统还设计了一些辅助模块,例如方便空间查询设计的鹰眼坐标窗口,为将基础信息表达融合到空间要素设计的属性表窗口等。系统主界面如图 3 所示,可分为菜单区、图层区、视图区、鹰眼区和坐标区 5 个部分。

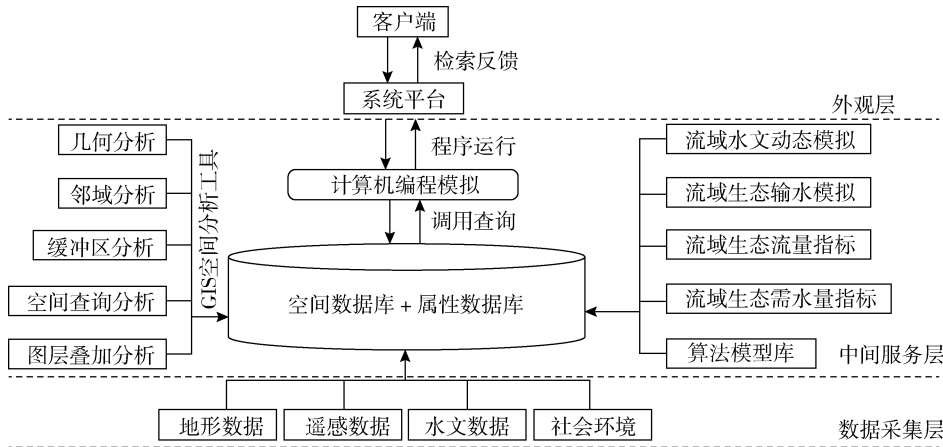


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

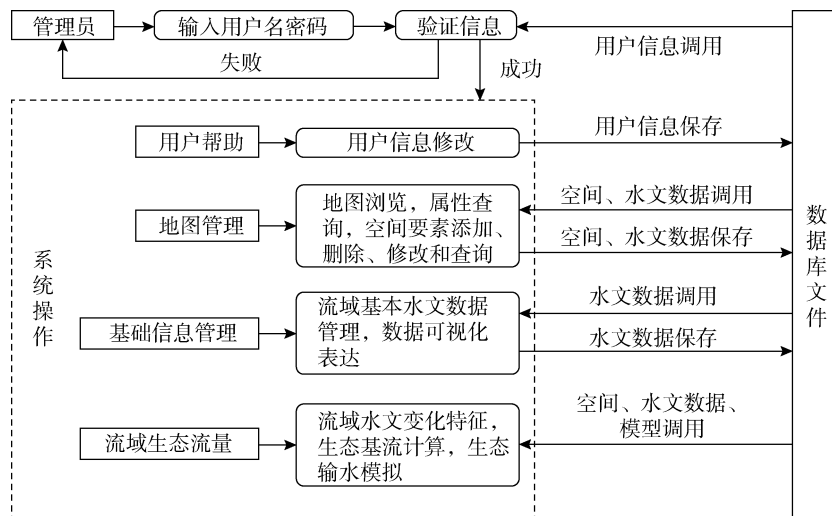


图2 系统主要模块运行机制

Fig.2 Operation mechanism of main modules of the system



图3 系统主界面

Fig.3 Main interface of the system

a. 地图管理。此模块主要辅助用户进行流域空间浏览和查询,包括对主要空间要素的添加、删除、修改和保存。系统所有的地图要素都提前使用 ArcGIS 编辑好并存储在空间地理数据库中,用户成功登录后,系统主界面将会通过接口自动实现流域地图要素的显示,且每个地图要素都有各自对应的空间地理坐标和属性表内容,属性表中包含要素的水文数据,用户可利用空间查询功能实现水文要素空间查询及其属性内容的显示。

b. 基础信息管理。为方便博斯腾湖流域水文信息的管理,根据水系分布情况,将流域划分为上、中、下游 3 个部分,上游包括开都河、黄水沟、清水河流域,中游以博斯腾湖为主,下游为孔雀河流域。基础信息管理模块分为“流域水文站点信息”和“博斯腾湖信息”两个子模块。“流域水文站点信息”按各

子流域进行划分,每个子流域中包含其现有水文站点信息;“博斯腾湖信息”包括水位和水质等信息。每个数据窗口具有数据编辑、数据导出和数据统计图显示等功能,可实现水文数据增加、删除、修改、查询以及动态模拟的可视化表达等功能。

c. 流域生态流量。该模块分为“开都、孔雀河生态流量管理”“博斯腾湖生态水位管理”和“适宜流量及水位计算”等子模块。用模块中集合的水文站点多年监测数据分析流域水量、水位年内和年际变化特征,并计算出适宜生态基流及生态需水量,同时根据计算结果和流域生态流量调度方案,结合空间模型模拟河流生态输水。在模块显示的各个界面中设有提示弹窗对一些专业概念进行解释说明,以帮助管理人员理解系统运行的结果。

d. 用户帮助。用户可在此模块中注册用于登

录系统的管理员信息,同时也可修改、删除相关的用户名和密码。模块提供系统使用的说明文档,可帮助用户详细了解系统使用方法,也给出了系统中所涉及计算公式的解释说明。

1.3 系统监测体系

系统采用“地-云-空”一体化监测体系来准确反映研究区水资源情况,并获取实时水文数据,如图4所示。“地”表示根据博斯腾湖流域实地情况,合理设置水文监测站点和布设水位、流量、水质自动检测设备,结合已有的监测体系形成博斯腾湖流域水资源监测网络。“云”是通过 GPRS 移动通信技术,将自动采集的水位、流量等数据经过解析后定时传输到流域水资源管理部门数据中心,经处理后形成实时水资源数据存储到相应数据库中。“空”是根据流域管理者要求,通过 Landsat 遥感卫星定时更新流域影像图,供系统搭建空间可视化平台使用。

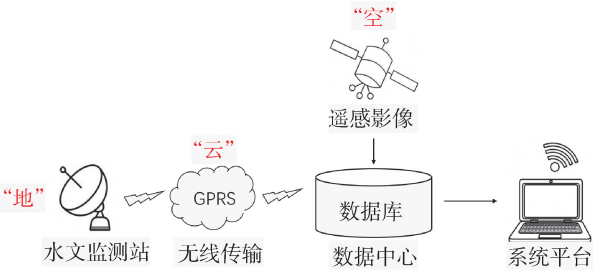


图4 “地-云-空”一体化监测体系

Fig. 4 “Ground-cloud-space” integrated monitoring system

2 功能实现

2.1 博斯腾湖流域水资源量空间信息查询

博斯腾湖流域水系呈西北—东南分布,其中开都河、博斯腾湖、孔雀河是流域内主要的水系分布

区。流域水文站中,大山口、塔什店水文站作为开都河出山口站和孔雀河出湖口站,对于水资源量的监测管理具有重要意义。博斯腾湖流域水资源量管理功能基于系统基础信息管理模块和流域生态流量模块来实现,并结合主要水文站的分布和博斯腾湖实际地理位置实现空间信息显示,具体可分为多年径流变化查询和实时流量变化查询。

系统以 1956—2019 年各月平均径流量为基础,实现流域多年径流量变化查询。如图5所示,根据界面弹窗信息和流域年际水文变化特征可知,开都、孔雀河多年平均径流量分别为 35.04 亿 m^3 和 13.64 亿 m^3 ,且大山口和塔什店水文站径流量以每 10 a 1.38 亿 m^3 和 0.85 亿 m^3 的速度递增。博斯腾湖水位整体呈现的波动现象,与开都河宝浪苏木分水枢纽同时期入湖水量呈相同变化趋势。与提供大部分入湖水量的开都河大山口水文站多年径流变化曲线相比,二者曲线波动极为一致,宝浪苏木分水枢纽的入湖水量直接受开都河大山口水文站来水量的影响。由此可以推断自然来水及相应入湖水量的变化是造成博斯腾湖水位波动的重要原因。

另外,径流量变化曲线在 2000 年之后呈突变式升高,这是因为 20 世纪 90 年代以来西北干旱区冰川退缩趋势加剧导致流域水资源量升高,但随着冰川萎缩或消失所出现的冰川消融拐点的影响将不容忽视^[15]。对此,系统在基础信息管理模块中实现了对流域水资源量的实时变化查询,如图6所示。通过提取数据库中水文监测站点每天定时传输的流量数据,对其整理制表并进行可视化表达,实现流域内流量变化实时查询,方便管理部门及时处理突发水文情况。

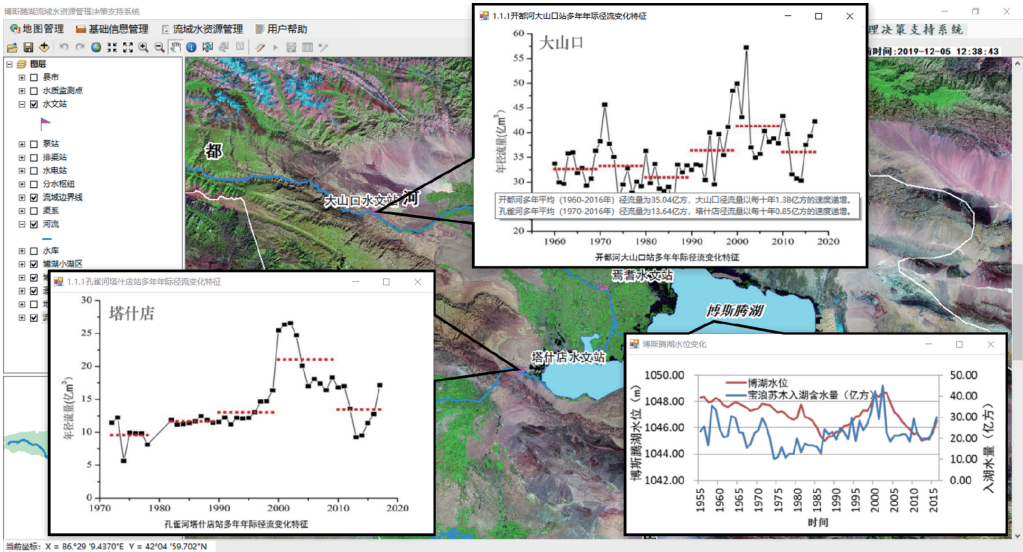


图5 流域年际径流量变化信息查询

Fig. 5 Interannual runoff change information query of the river basin

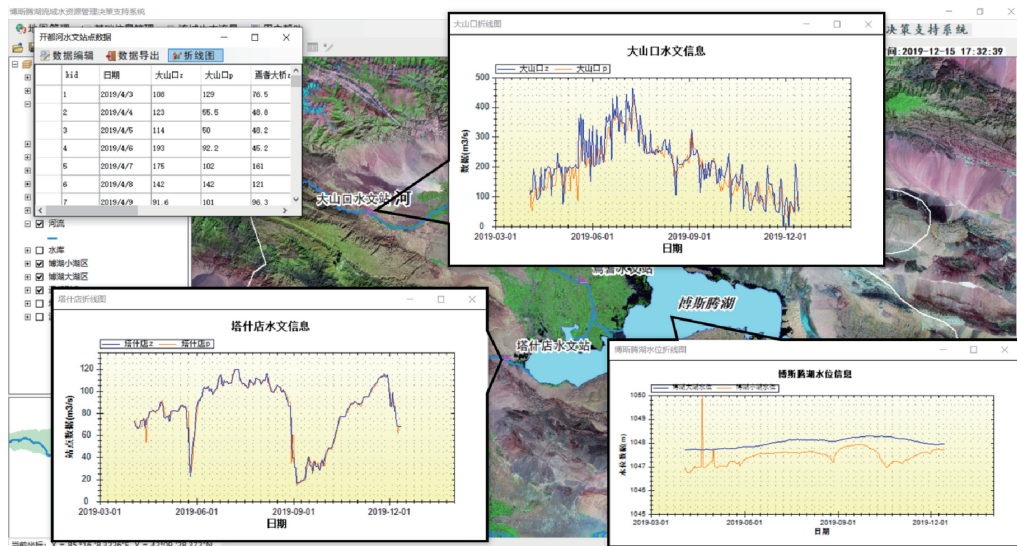


图6 流域实时流量变化信息查询

Fig.6 Real-time flow change information query of the river basin

2.2 博斯腾湖流域生态基流与基本生态环境需水量计算

河流生态基流是指为了防止河道水体断流,维持河流水体生存所应具有的最小流量^[16]。为防止流域断流、萎缩,同时提高对河流两岸荒漠植被的保护能力,系统在流域生态流量模块中,利用相关算法和流域水文数据,实现生态基流和需水量计算预警功能。

开都河以天山山脉自然来水为主要补给,大山口水文站为出山口站,选择 Tennant 法、年型划分法、最枯月平均流量多年平均值法和 90% 保证率法对大山口水文站年内平均生态基流和对应的基本生态环境需水量进行计算^[17-18],结果如表 1 所示。与大山口至博斯腾湖河段 2000—2018 年最大河损值 10.06 亿 m^3 相比,大山口水文站按照 Tennant 法估算的年内平均生态基流对应的基本生态环境需水量在无区间引水的情况下,难以满足最大河损需求,生态基流对应的基本生态环境需水量偏低,特定情况下无法保证大山口至博斯腾湖不断流;而采取年型划分法、最枯月平均流量多年平均值法估算,相比最大河损值基本生态环境需水量偏大,保证率受到限制,故最终选定 90% 保证率法的估算结果作为开都

表 1 大山口水文站年内平均生态基流和基本生态环境需水量
Table 1 Annual average ecological baseflow and basic ecological environment water demand of Dashankou hydrological station

方 法	年内平均生态基流/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	基本生态环境需水量/亿 m^3
90% 保证率法	33.23	10.48
年型划分法	37.00	11.67
最枯月平均流量多年平均值法	45.54	14.36
Tennant 法	30.58	9.69

河大山口控制断面目标值。

另外,根据陈亚宁等^[1]得到的博斯腾湖水位适宜范围,对于出入流受人为控制的孔雀河河段, Tennant 法的计算结果符合其上游未断流区域中塔什店水文站生态基流及需水标准。因此,将 90% 保证率法、Tennant 法编译到系统当中,设计了“流域适宜生态流量及水位计算”功能,如图 7 所示。在此功能中系统可自动调取相应算法以及数据计算河流生态基流与对应的基本生态环境需水量,同时在图 7 所示界面中,用户可以输入当月实际生态流量及水位数据,系统会对比输入值与自动计算出的该月生态流量及水位指标之间差异,实现辅助决策和一定的预警功能。

2.3 博斯腾湖流域生态输水模拟

自 2000 年以来博斯腾湖流域下游的孔雀河地区经济快速发展,但作为整个流域的水资源耗散区,在人工绿洲面积不断扩大,人们生活水平大幅度提升的同时,河流绿洲外围荒漠化加剧发展,断流河道植物大面积死亡,生态问题日益凸显。对此,系统以整个孔雀河流域生态需水量为保证水量,模拟孔雀河生态输水。

根据社会环境数据,在综合考虑输水水源、输水路线距离、输水沿途可能的损耗和各引水枢纽实施生态输水的可行性并兼顾流域水资源时空差异等要素后,确定向孔雀河生态输水模拟采用多渠道、多水源、多路线分段协同实施的方案,并基于博斯腾湖丰、平、枯水年不同水位情况,以保证基本生态环境需水量为标准,对孔雀河流域生产生活用水量、不同保护目标的生态需水量进行调整,再进行输水方案的水量平衡计算,结果如图 8 所示。输水分东线、中

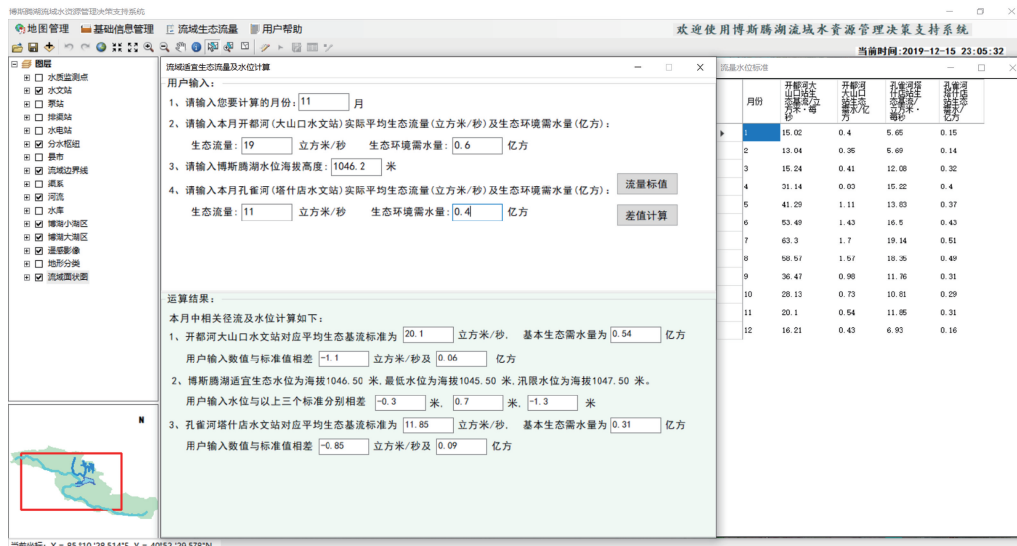


Fig. 7 Calculation of river basin suitable ecological flow and water level

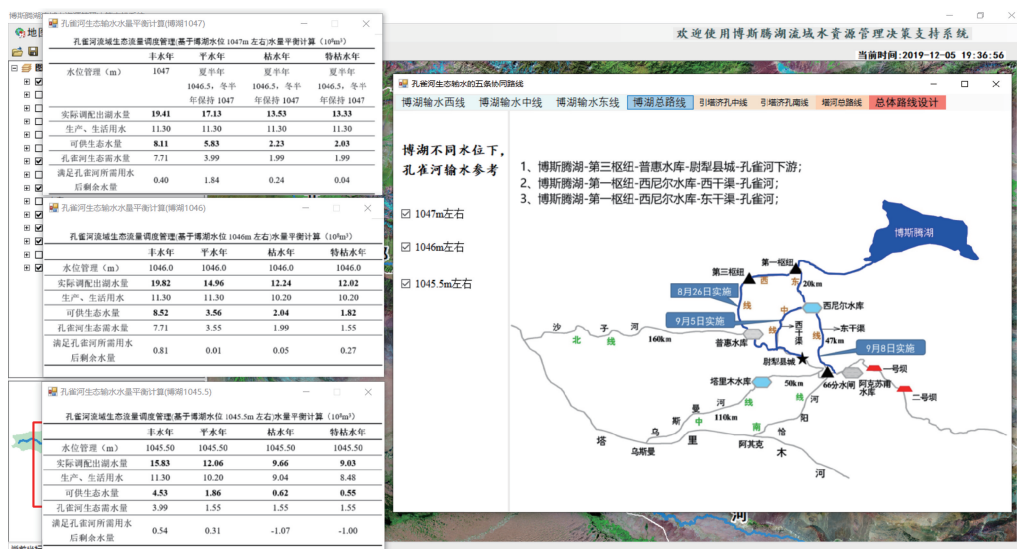


Fig.8 Simulation of ecological water transportation in the Peacock River

线和西线三线分段实施,西线从博斯腾湖调水沿孔雀河河道经第三分水枢纽、普惠水库至阿恰枢纽,这一路线输水以中线为辅助路线加快输水进程;输水时间为灌区用水高峰结束初期的夏末秋初,河道、渠系尚未干涸之前。东线从博斯腾湖调水经第一分水枢纽、西尼尔水库沿东干渠至 66 分水闸,直接向孔雀河下游输水;输水时间可在 8 月下旬至 9 月,胡杨落种和非农业用水高峰期。由系统计算的孔雀河生态输水水量平衡结果可知,当博斯腾湖水位高于 1 046 m 时,调水基本可满足孔雀河不同情况下的生态需水量,而湖泊水位在 1 045 m 左右时,由于在枯水年实际调配出湖水量无法满足孔雀河最低生态环境需水标准,可根据塔里木河上游来水量的大小改变向孔雀河调水的水源区,实行“引塔济孔”。

方案。

3 结 语

博斯腾湖流域水资源管理决策支持系统根据目前流域水资源管理面临的主要问题,进行设计开发,由系统分析可知,该流域年来水量呈现增加趋势,应加强水资源实时监控力度,防止冰川消融拐点所带来水资源量的不确定性变化。同时为防止河道断流,需维持河流基本生态流量,保证博斯腾湖生态水位,合理调配出入湖水量,系统功能基本达到辅助水资源管理决策的需求。随着数据量及可利用的高科技手段的增加,需及时跟进水资源管理的需求分析,更新数据和系统,为变化环境下的博斯腾湖流域水资源管理提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 陈亚宁,杜强,陈跃滨,等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [2] 努尔比耶·艾合麦提托合提. 气候变化与人类活动对开都河径流量的影响研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2015.
- [3] 陈亚宁,杨青,罗毅,等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理,2012,35(1):1-9. (CHEN Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China [J]. Geography of Arid Areas, 2012, 35(1): 1-9. (in Chinese))
- [4] 盖迎春,李新. 黑河流域中游水资源管理决策支持系统设计与实现[J]. 冰川冻土,2011,33(1):190-196. (GAI Yingchun, LI Xin. Design and implementation of water resources management and decision support system in the Middle Reaches of Heihe River [J]. Glacial and Frozen Soil, 2011, 33(1): 190-196. (in Chinese))
- [5] 马彪,钟平安,万新宇,等. 水资源综合管理决策支持系统开发及应用[J]. 水资源保护,2015,31(5):96-101. (MA Biao, ZHONG Pingan, WAN Xinyu, et al. Development and application of decision support system for integrated water resources management [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 96-101. (in Chinese))
- [6] 盖迎春,李新. 水资源管理决策支持系统研究进展与展望[J]. 冰川冻土,2012,34(5):1248-1256. (GAI Yingchun, LI Xin. Water resources management decision support system: review and prospect [J]. Glacial Frozen Soil, 2012, 34(5): 1248-1256. (in Chinese))
- [7] ARNOTT D, PERVAN G. Eight key issues for the decision support systems discipline[J]. Decision Support Systems, 2008, 44(3): 657-672.
- [8] 丁斌,吴晖. 新疆塔里木河流域信息化规划设计研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(4):158-161. (DING Bin, WU Hui. The informatization planning and design on Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(4): 158-161. (in Chinese))
- [9] 严栋飞,姜仁贵,解建仓,等. 基于数字地球的渭河流域水资源监控系统研究[J]. 计算机工程,2019,45(4):55-61. (YAN Dongfei, JIANG Rengui, XIE Jiancang, et al. Research on water resources monitoring system of Weihe River Basin based on digital globe [J]. Computer Engineering, 2019, 45(4): 55-61. (in Chinese))
- [10] TENNAN D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources [J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
- [11] 魏雯瑜,刘志辉,冯娟,等. 天山北坡呼图壁河生态基流量估算研究[J]. 中国农村水利水电,2017(6):92-96. (WEI Wenyu, LIU Zhihui, FENG Juan, et al. A study of the estimation of the Hutubi River ecological base flow in the north slope of the Tianshan Mountains [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2017(6): 92-96. (in Chinese))
- [12] 石永强,左其亭. 基于多种水文学法的襄阳市主要河流生态基流估算[J]. 中国农村水利水电,2017(2):50-59. (SHI Yongqiang, ZUO Qiting. The estimation of ecological base flow of main rivers in Xiangyang City based on multiple hydrological methods [J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2017(2): 50-59. (in Chinese))
- [13] 刘宏伟,余钟波. 用 Hargreaves 法与 Penman-Monteith 法计算 ET_0 : 以太湖流域的应用为例[J]. 水资源保护,2010,26(1):6-8. (LIU Hongwei, YU Zhongbo. Application of Hargreaves and Penman-Monteith equation to estimating ET_0 : a case study in Taihu Basin [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 6-8. (in Chinese))
- [14] 刘新华,徐海量,凌红波,等. 塔里木河下游生态需水估算[J]. 中国沙漠,2013,33(4):1198-1205. (LIU Xinhua, XU Hailiang, LING Hongbo, et al. Ecological water requirements in the lower reaches of the Tarim River [J]. China Desert, 2013, 33(4): 1198-1205. (in Chinese))
- [15] 陈亚宁,李稚,范煜婷,等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报,2014,69(9):1295-1304. (CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China [J]. Journal of Geography, 2014, 69(9): 1295-1304. (in Chinese))
- [16] 王东升,袁树堂,杨祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析[J]. 水资源保护,2019,35(4):35-41. (WANG Dongsheng, YUAN Shutang, YANG Qi. Analysis of hydrological minimum evolution and ecological base flow guarantee in Yunnan area of Jinshajiang River Basin, China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 35-41. (in Chinese))
- [17] 武玮,徐宗学,左德鹏. 渭河关中段生态基流量估算研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(10):68-74. (WU Wei, XU Zongxue, ZUO Depeng. Ecological baseflow in the Guanzhong reach of the Wei River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 68-74. (in Chinese))
- [18] 于松延,徐宗学,武玮. 基于多种水文学方法估算渭河关中段生态基流[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2013,49(2):175-179. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei. Ecological baseflow in the Guanzhong reach of the Wei River estimated by using different hydrological methods [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2013, 49(2): 175-179. (in Chinese))

(收稿日期:2019-12-16 编辑:熊水斌)