

基于 SD 模型的博斯腾湖水量平衡系统分析与仿真研究

伊丽努尔·阿力甫江^{1,2,3}, 玉素甫江·如素力^{1,2,3}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054; 3. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘 要:在气候变化和人类活动的共同作用下,近几十年来内陆湖泊水量失衡,生态环境处于恶化趋势。系统地揭示影响内陆湖泊水量平衡要素之间的复杂错综关系及其作用机理是目前亟待解决的科学问题之一。研究运用系统科学理论和模拟技术,利用 1983—2013 年的气象、水文和社会经济资料,建立我国最大的内陆淡水湖——博斯腾湖水量平衡的系统动力学模型,进行水量平衡分析、敏感度分析和情景分析。结果表明:(1) 博斯腾湖水位的波动是气候变化和人类活动耦合作用的结果。其中,近十年来湖水位的下降主要是受人类社会经济活动影响的缘故,特别是孔雀河流域社会经济发展需水量猛增引起的;(2) 湖水位最敏感的自然要素:入湖地表水量>蒸发量>出湖水量,湖水位最敏感的人文要素:灌溉定额>灌溉面积>工业产值>人口;(3) 未来 30 a 的情景分析暗示:为了维持博斯腾湖水位优化生态环境,实现其周围区域社会经济的可持续发展,通过严格控制农业灌溉面积,普及节水技术,调整产业结构,有效利用水资源,调整社会经济用水与生态用水比例。

关键词:SD 模型; 博斯腾湖; 水量平衡; 情景分析

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0126-08

Analysis and Simulation of the Water Balance of Bosten Lake Based on System Dynamics Model

Ilnur · Ghalip^{1,2,3}, Yusufjiang · Rusuli^{1,2,3}

(1. College of Geographical Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Over the past few decades, inland lakes unbalanced and their ecological environments were deteriorating due to combined effects of climate change and human activities. At present, to open out systematically the complex relationships and interact rules between factors of lake water balance is an important scientific issue to be tackled. We studied largest inland fresh water lake-Bosten Lake based on system sciences and system dynamic modeling approach using metrological, hydrological and socio-economic data from 1983 to 2013. The results of dynamic water balance analysis, sensitivity analysis and scenario analysis demonstrated that: (1) the variation of lake water level and its environmental change were caused by coupling effect of climate changes and human activities, among which water table declining of Bosten Lake over the decades was mainly due to proliferation of water demand in Konqi River area; (2) the order of most sensitive natural factors to lake water level variation are: surface water inflows>evaporation>surface water outflows; the most sensitive socioeconomic factors to lake water level variation are: irrigation quota>irrigation area>industrial output>population; (3) the scenario analysis in the future 30 years indicate that following tasks have to done: controlling irrigation area, popularization of water-saving technology in agriculture, adjusting industrial structure, effective use of water resources, optimizing water using proportions between the socio-

收稿日期:2015-03-03

修回日期:2015-04-01

资助项目:新疆研究生科研创新项目(XJGR12014120);中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201419);国家自然科学基金资助项目(41461006,41161007,U1138302);新疆干旱区湖泊环境与资源实验室开放资助项目(XJDX0909-2010-12)

第一作者:伊丽努尔·阿力甫江(1989—),女(维吾尔族),新疆阿图什人,硕士研究生,主要从事干旱区水资源与生态环境研究。E-mail:elnur1103@163.com

通信作者:玉素甫江·如素力(1975—),男(维吾尔族),新疆喀什人,副教授,硕士研究生导师,主要从事流域水文与生态系统、3S 技术及其应用研究。E-mail:Yusupjan@xjnu.edu.cn

economic and ecology in order to maintain the water level at a proper level, the ecological environment well, and fulfill the sustainable development of socioeconomic system simultaneous.

Keywords: SD model; Bosten Lake; water balance; scenario analysis

水是地球生命系统中最基础的自然资源,也是关系一个国家或地区生态安全、粮食安全及社会经济健康和可持续发展的重要战略性资源。干旱地区水资源合理利用是一项世界性的重要课题。其中,水量平衡研究既是水资源评价方法的基础,也是农田节水调控,农业合理用水的依据^[1]。随着人类活动的加剧和气候变化的综合影响,大量湖泊生态环境退化、湿地旱化,湖区沼泽面积逐年缩小,并且湖泊水量失衡^[2-4]。已有研究表明近50年来国内湖泊变化显著^[5-6]。由于受气候暖干化的影响,位于干旱与半干旱地区的博斯腾湖,近几十年来水位下降,环境质量逐步恶化。湖泊水位由有记录的2002年最高水位1 049.39 m下降到2013年的1 045 m左右,已达湖水生态红线^[7]。由于社会、经济、环境系统及其关系的复杂性和动态性,以及博斯腾湖生态治理和水资源开发利用的不确定性和多目标性,使得各种水资源政策对博斯腾湖水安全格局的影响缺乏定量化的手段和方法^[8-10]。

博斯腾湖及其周围生态环境问题集中表现在博斯腾湖水量平衡和水位变化上。国内学者对博斯腾湖水量平衡的研究始于20世纪50年代。1958年,中国科学院新疆综合考察队对博斯腾湖的水量平衡进行过较为详细的研究^[11];后来,许多学者利用水文、气象实测资料,运用水量平衡方程定量分析计算博斯腾湖水量平衡要素及其与气象因素的关系^[12-15]。

虽然国内对博斯腾湖水量平衡的研究很多^[16-22],但大多数是在研究水量平衡时用湖泊水量平衡方程式计算,没有考虑博斯腾湖上游和下游的社会经济要素对水量平衡的影响以及它们之间的双向反馈关系。这样,由湖盆地貌形态决定的湖水位—库容—水面面积、湖泊水量平衡要素及周围社会经济要素等之间的非线性关系不能表达出来,会影响水量平衡模拟结果的正确性。因此本文会在前人研究的基础上,采用系统动力学方法(SD, System Dynamics),通过构建博斯腾湖水量平衡模型及对湖水未来30年的水位变化进行多种情景分析及趋势预测,为今后的博斯腾湖及其周围水资源、生态环境和社会经济的可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

博斯腾湖流域位于新疆塔里木盆地的西北和西北边缘。由山区地表水资源形成区(包括开都河上游、黄水沟上游、清水河上游和20条时令河上游)、焉耆盆地

绿洲耗水区(包括博斯腾湖)和孔雀河流域耗水区(包括库尔勒市)三大单元组成,是一个典型的水—生态—经济复合系统。山区地表水资源形成区人类活动影响较少,水文过程主要受气候变化、地质地貌和土地覆盖类型的影响。焉耆盆地绿洲耗水区和孔雀河流域耗水区受人类活动影响显著。

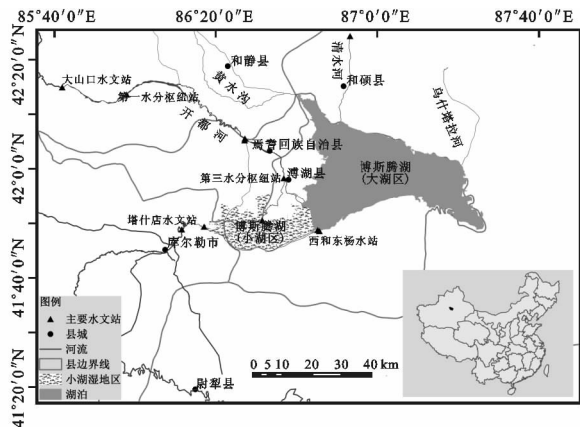


图1 博斯腾湖地理位置及水系

博斯腾湖是整个流域的枢纽,是焉耆盆地的最低凹处,气候干旱,降水稀少,蒸发强烈,曾是我国最大的内陆淡水湖,既是开都河的尾间,又是孔雀河的源头,是新疆巴音郭勒蒙古自治州各族人民生活、生产的水源地。博斯腾湖水域辽阔,东西长达55 km,南北平均宽约20 km。在最高水位1 048.75 m时,水面面积1 002.4 km²,容积为88亿m³,在水位1 048 m时,平均水深为7.8 m,最深为17 m^[23-25]。1958—2013年期间,水位变化幅度为1987年的1 044.95 m到2002年的1 049.39 m,非常洪水位和极限死水位之间相差近4 m,变化幅度较大。博斯腾湖主要依赖入湖河流补给,入湖河流有开都河、黄水沟、清水河等,常年性入湖河流只有开都河,孔雀河是博斯腾湖唯一的出湖河流,出湖水量自1982年后由人为控制,即扬水泵站投入使用。

2 数据与方法

2.1 数据分析

本文利用的资料主要有大湖水水位资料为大河口水文站1983—2013年逐年观测数据;河水流量资料为1983—2013年的开都河出山口径流量(大山口水文站)逐年观测资料;1983—2013年的开都河东、西支入湖水流量(宝浪苏木分水闸)逐年观测资料;1983—2013年的扬水泵站逐年水量资料。蒸发与降水数据:大河口水文站1983—2013年逐年降水观测

值;博湖县气象站 1983—2013 年逐年观测资料;社会经济年系列资料:主要包括总人口、牲畜头数、盆地灌区灌溉面积、灌溉定额、工业产值等等;数据来源 1983—2013 年新疆统计年鉴与相关文献。

2.2 研究方法

2.2.1 模型构建 本文以博斯腾湖水量平衡为核心,全面考虑博斯腾湖上游和下游的社会经济发展和可能的气候变化因素,结合系统动力学原理和应用要求,构建以博斯腾湖上游社会经济发展需水量,博斯腾湖水量平衡和博斯腾湖下游(孔雀河流域)社会经济发展需水量三部分组成的博斯腾湖水量平衡系统动力学模型,并绘制系统流图(图 2)。博斯腾湖水量平衡中入湖水量大致分为三个部分:降水、地表水和地下水补给;耗水量包括博斯腾湖水面蒸发损失、蒸腾和博斯腾湖扬水等。系统参数主要由查阅相关资料、参考他人的研究成果和结合研究区实际情况而确定的。在相关的反馈回路里水位—库容—面积三个因素之间的非线性关系就是通过 Lookup Function 表达(图 3)。模型模拟时间设置为 1983—2013 年,共 31 a,模拟步长为 1 a,以 1982 年的统计数据为初始值。

博斯腾湖水量平衡仿真模型中,所选择的变量共有

70 多个,各个因素(变量)之间相互作用形成的因果反馈环路构成了模型的基本结构。本文给出了几个最基本的要素(变量)之间的因果关系回路图(见图 2)。可以看出,图中有 7 个主要反馈环,其中正反馈环有 5 个:

→→I:博斯腾湖上游:增长率+农田灌溉面积+农田灌溉面积增长量。

→→II:博斯腾湖上游:人口增长率+人口数量+人口增长量。

→→→III:博斯腾湖:大湖水面面积+湖面降水量+大湖地表入流量+博斯腾湖(大湖)。

→→IV:博斯腾湖下游:农田灌溉面积增长率+农田灌溉面积+农田灌溉面积增长量。

→→V:博斯腾湖下游:流域人口增长率+流域人口数量+流域人口增长量。

负反馈环有 2 个:

→→VI:博斯腾湖:大湖水面面积+博斯腾湖(大湖)—蒸发量。

→→VII:博斯腾湖:博斯腾湖(大湖)+模拟水位+出大湖总水量—博斯腾湖(大湖)

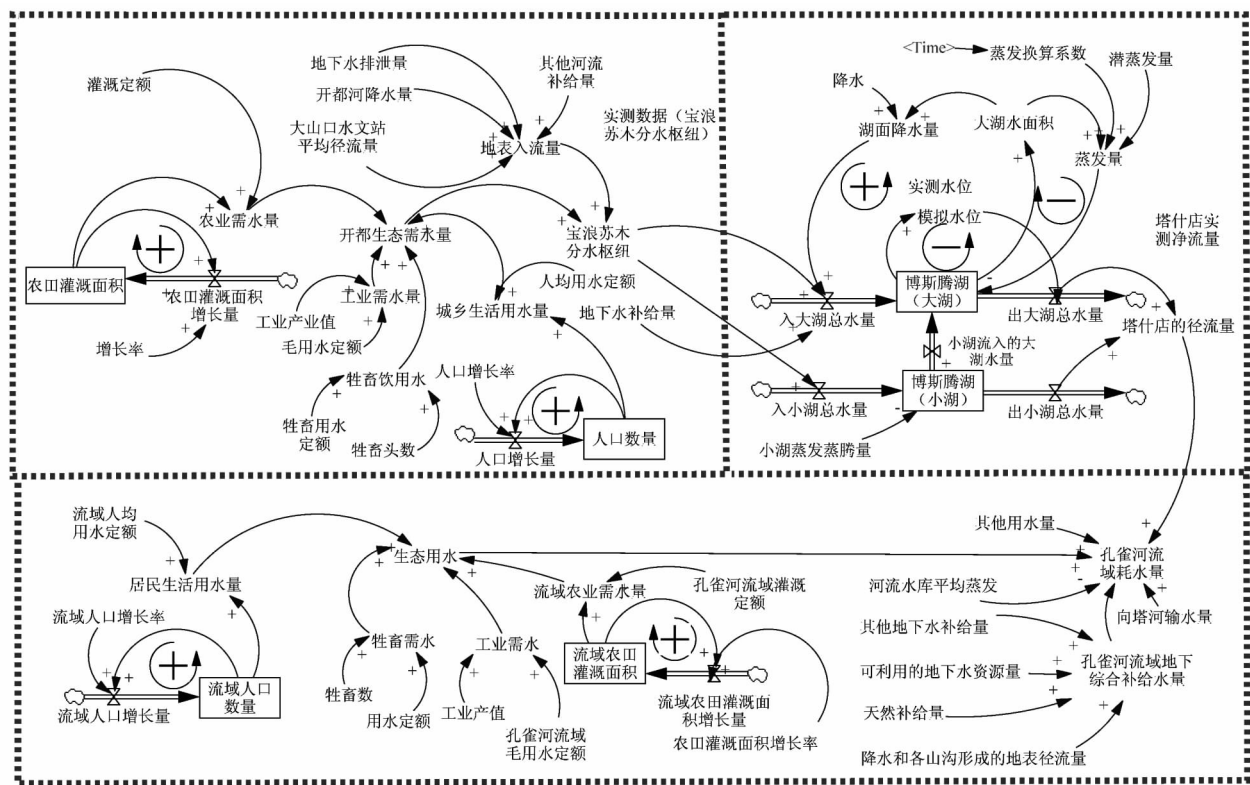


图 2 博斯腾湖水量动态平衡的系统动力学模型

2.2.2 有效性检验 根据博斯腾湖 1983—2013 年历年水量平衡数据运行模型,进行有效性检验,所得模拟数据与历史监测数据进行比较,验证其吻合度。由于模型变量较多,笔者主要对博斯腾湖水位、博湖

上游的宝浪苏木分水枢纽(第三水分枢纽)站径流量和博湖下游的塔什店径流量数据进行历史验证。模型通过相对误差法(公式 1 所示)进行验证。相对误差通过模拟所造成的绝对误差与真值之比乘以

100%所得的数值,以百分数表示。相对误差公式为:

$$\delta=\Delta/L\times100\%$$
 (1)

式中: δ ——实际相对误差; Δ ——绝对误差; L ——真值(其中:绝对误差=模拟测得值-真值)。宝浪苏木分水枢纽(第三水分枢纽)站径流量、博斯腾湖水位和

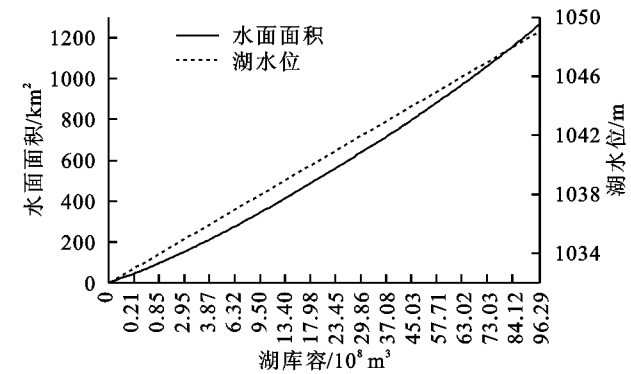
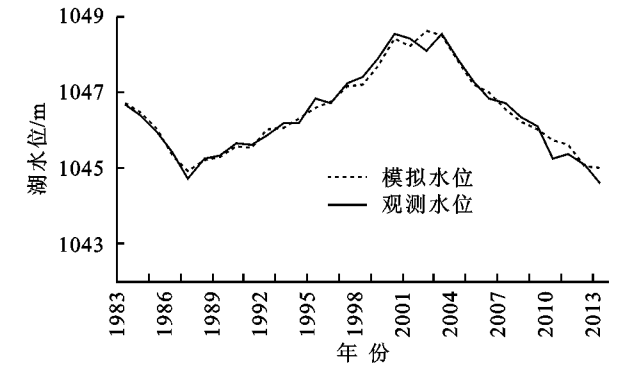


图 3 博斯腾大湖水位—面积—库容曲线



3 结果与分析

3.1 水量平衡分析

以 1983—2013 年历年水文、气象、社会经济等资料为基础,按模型要求将数据存入模型的输入文件中,应用上述模型进行模拟,得到相应的模拟结果(图 5)。

从 1983—2013 年的博斯腾湖入(出)湖水量、湖面蒸发耗水量、开都河生态需水量和孔雀河生态需水量的变化曲线(图 5)看出,博斯腾湖水量变化的影响因素是多方面的,其中入湖河水、出湖水量、湖面蒸发量等是影响博斯腾湖湖水位的主要自然因素,开都河

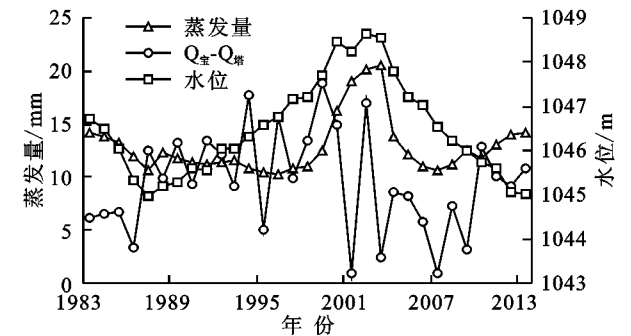
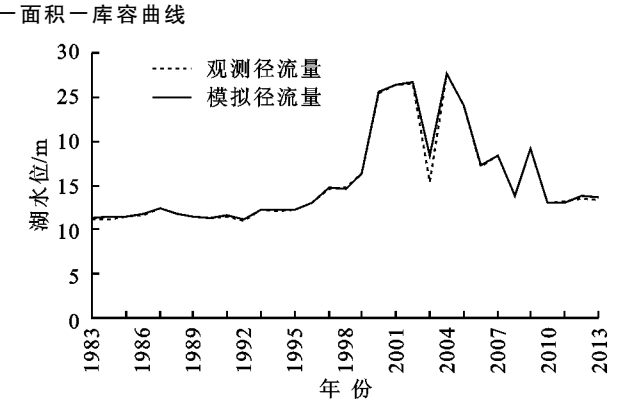
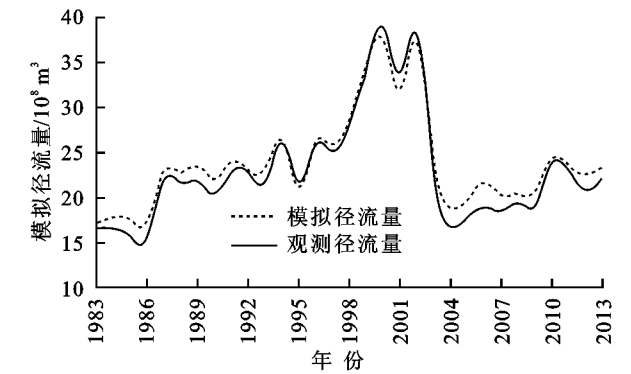


图 5 博斯腾湖入(出)水(蒸发)量及生态需水量变化曲线

塔什店径流量的相对误差分别 3.9%,1.6%,1.2%,实测数据与模型数据基本吻合,最大误差不超过 5%,得出历史数据与模拟数据基本吻合(图 4),表明模型具有较好的强壮性,能够反映博斯腾湖水量平衡系统的实际特征。



和孔雀河生态需水量是影响博斯腾湖水位的主要人为因素。进入博斯腾湖的入湖水量直接受焉耆盆地自然来水的影响,随自然来水量而变化。1983—2013 年,从大湖出的总水量为 14.4 亿 m^3 ,多年平均入湖总水量为 23.9 亿 m^3 ,湖区总耗水量为 9.5 亿 m^3 ,开都河东支入湖河水流量 16.1 亿 m^3 ,西支入湖河水流量 7.2 亿 m^3 。西泵站建成后,出湖水量由人为控制,即扬水泵站投入使用,解放一渠直接向孔雀河输水量也相继减少,则孔雀河是博斯腾湖唯一的出湖河流,其中大湖区出流占到了 50%,多年平均约 9 亿 m^3 ,小湖区出流约 6.4 亿 m^3 。

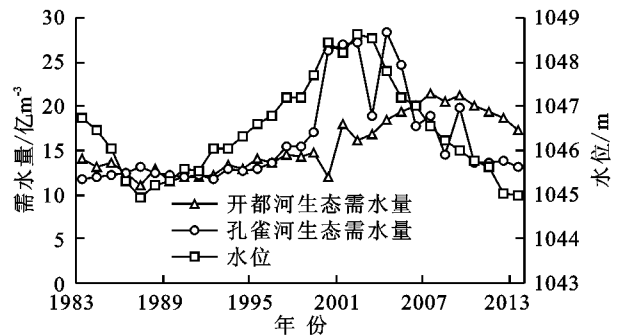


图 5 博斯腾湖入(出)水(蒸发)量及生态需水量变化曲线

出湖水蒸发量受水域面积(水位)影响。1983—2013 年蒸发量波动范围为 10.3~20.4 亿 m³,而大湖水位变化范围为 1 045~1 048.62 m。SD 模型模拟计算表明,在过去的 31 a 间(1983—2013 年)博斯腾湖年均蒸发量为 12.8 亿 m³,增长速率为 0.416 亿 m³/a。其中,1983—1994 年博斯腾湖大湖区水面年均蒸发量为 12.02 亿 m³,1995—2013 年均蒸发量达到 13.43 亿 m³,增加了 11.73%。而且,随着湖区蒸发耗水量的增加,博斯腾湖水位还有下降的趋势。

通过模拟计算得到开都河流域 1983 年、2000 年和 2013 年生态需水量分别为 14.16 亿 m³,12.05 亿 m³,17.41 亿 m³;孔雀河流域 1983 年、2000 年和 2013 年生态需水量分别为 11.87 亿 m³,26.19 亿 m³,13.26 亿 m³。1983—2013 年开都河、孔雀河流域生态需水量变化发现,近 31 a 来,该流域生态需水量呈增加趋势,特别是 2000 年之后增加迅速,特别是孔雀河流域需水量增加更明显,在此期间,水位处于下降趋势。

3.2 参数敏感度分析

敏感度分析(Sensitivity Analysis),又称敏感性分析。参数敏感度分析的目的正是量化各系统参数对系统输出的影响程度,从而对系统参数进行筛选,所得影响因子亦用于后续参数估计。表达式为^[26]:

表 2 8 个重要参数的敏感度值

各参数	+10%	-10%	敏感度级别	各参数	+10%	-10%	敏感度级别
入湖地表水量	1.420	0.940	很高	盆地灌溉定额	0.570	0.290	高
蒸发量	-0.790	-0.810	高	盆地灌溉面积	0.380	0.370	高
出湖水量	0.680	0.660	高	工业产值	0.030	0.031	低
降水量	0.581	0.563	高	人口	0.0072	0.0073	低

3.3 情景分析

情景分析法是考虑影响未来发展诸多因素,系统分析相关问题,构建出多种可能的未来发展态势,再对系统发展态势作出自始至终的情景与画面的描述^[27-28]。其基本观点是虽未来充满不确定性,但有部分内容可以预测,这是由不确定性决定的。博斯腾湖水位过高或过低都会给生态环境和农业生产带来影响。因而,在供水管理中最重要的是确定允许的水位范围,允许水位确定之后,才能对湖泊的可利用水量进行合理分配,如灌溉、城市用水等。如低于此值允许范围生态系统就会遭到破坏,因此,维护湖泊的合理水位已经成为淡水资源科学配置和永续利用的基本保证。

入湖流量作为湖泊水量的主要输入项,对湖泊水位的变化有着显著性的影响。开都河 1958—1976 年属平水年,博斯腾湖水位呈波状缓慢下降趋势;1976—1985 年开都河多年平均年径流量达到历史最

$$S=\frac{Y-Y_0}{Y_0}/\frac{P-P_0}{P_0}=\frac{\Delta Y}{Y}/\frac{\Delta P}{P} \quad (2)$$

式中:S——模型参数敏感度;Y——变化后的状态变量;Y₀——基准条件下状态变量值;ΔY——由参数变化引起的状态变量的变化幅度;P——变化后的模型参数;P₀——基准条件下模型参数值;ΔP——参数的变化幅度。具体含义见表 1。

表 1 敏感度取值

分类	因子值	敏感度
I	<0.05	低
II	0.05~0.2	中
III	0.2~1	高
IV	>1	很高

通过公式(2)对主要参数进行敏感度分析。敏感度较明显的主要参数及其敏感度值和敏感度级别在表 1 所示。结果表明(表 2),入湖径流的敏感度值为最高,其次是湖面蒸发量、出湖水量和湖面降水量。其中,湖面蒸发量作为湖泊水量的支出项,与其水位呈负相关关系。表中蒸发量的敏感度值为负,是因为模型中蒸发量与博斯腾湖水位属于负反馈回路,蒸发量增大水位减少。敏感度值排序为:入湖地表水量>蒸发量>出湖水量>降水量>灌溉定额>灌溉面积>工业产值>人口。

低点,博斯腾湖水位也达到历史最低点;1986—1995 年多年平均径流量开始回升,博斯腾湖水位呈急速上升趋势;1996—2002 年开都河多年平均径流量达到历史的最高点,博斯腾湖水位也达到历史最高点。2003—2013 年开都河多年平均径流量开始减少,博斯腾湖水位呈急剧下降趋势。从以上分析可以得出,入湖流量和水升降的变化规律非常接近。

气候变化加剧了开都河年径流变化的不确定性。从短期来看,随着气候变暖,冰雪融水增加,近期内河流地表径流可能呈增加或减少波动状态,甚至表现为增加趋势,然而,长时间而言,随着气候变化天山山脉雪线上移,山区冰川储量减少,来水量减少,开都河流域水文情势可能会发生很大变化,年径流量在气候变化的影响下可能会出现重大波动,导致博斯腾湖水位变幅增加。为了避免大规模灌溉引水、跨流域调水以及土地利用变化等人类活动对径流的影响,本研究选择大山口水文站径流数据为研究对象,可以较为单纯

地反映自然条件下博斯腾湖水位的变化。

农业用水包括灌溉用水和林木渔业用水两部分,其中,灌溉用水占的比例非常大。农业是高耗水行业,灌溉用水对水资源的需求远远超过了工业用水、生活用水和牲畜用水,位居第一位。博斯腾湖流域灌溉用水占农业用水的比例非常大,因此,在研究中主要考虑灌溉用水。2013 年,研究区用水总量为 17.42 亿 m³,其中灌溉用水量 13.93 亿 m³,占总用水量的 80%,所以提高农业用水效率,减少灌溉用水量,把农业部门节约出来的水资源转移到工业用水、生活用水和牲畜用水,从而可以缓解水资源短缺,这在干旱区显得尤为重要。灌溉用水量取决于灌溉面积、灌溉定额和灌溉面积增长率。因此,根据博斯腾湖水量平衡最敏感影响因子和博斯腾湖流域水资源供需平衡与优化配置^[29],笔者设置两种情景方案,预测分析博斯

腾湖未来 30 a 的水位变化情景。

A 方案设置如下:情景 1 是用 2013 年的数据,各项参数保持不变进行模拟分析;情景 2 是除开都河多年平均径流量 34.3 亿 m³(属平水年)外,各项参数保持不变进行模拟分析;情景 3 是除开都河多年平均径流量 30.53 亿 m³(属枯水年)外,其他数据和参数与情景 2 相同;情景 4 是除开都河多年平均径流量 45 亿 m³(属丰水年)外,其他数据和参数与情景 2 相同。

B 方案设置如下:情景 1 是用 2013 年的数据,各项参数保持不变进行模拟分析;情景 2 是开都河年平均径流量保持不变、灌溉定额、灌溉面积增长率等人为因素数据和参数,进行模拟分析;情景 3 是除改变人为因素数据和参数外,开都河年平均径流量与情景 2 相同;情景 4 是除改变人为因素数据和参数外,开都河年平均径流量与情景 2 相同。B 方案的情景指标值见表 3。

表 3 2014—2044 年 B 方案的情景指标值

情景	灌溉定额/ (m ³ ·hm ⁻²)	灌溉面积 增长率/%	人口增 长率/%	生活定额/ [L/(人/d)]	工业定额/ (m ³ /万元)	牲畜定额/ [L/(头/d)]
1	1000.5	4.57	0.6	155	45	16
2	9000	4.00	0.5	150	40	14
3	8700	3.80	0.4	145	35	12
4	6000	3.00	0.3	140	30	10

盆地绿洲区总耗水量的减少则可增加博斯腾湖总入水量。情景 2,3,4 都是在提高农业用水效率,减少灌溉用水量的条件下盆地绿洲区实施相同的情景方案,因此它们的农业耗水量也相同,年均约为 5.84

亿 m³,比情景 1 减少 1.87 亿 m³。方案 A 通过开都河平水年、枯水年和丰水年情景,模拟得到博斯腾湖 2014—2044 年的未来 30 a 的水位变化趋势。博斯腾湖多年平均水量平衡指标汇总结果见表 4。

表 4 博斯腾湖水量平衡主要指标汇总

方案 A							方案 B						
情景	入湖水量		出湖水量		湖区耗水量		情景	入湖水量		出湖水量		湖区耗水量	
	大湖	小湖	大湖	小湖	大湖	小湖		大湖	小湖	大湖	小湖	大湖	小湖
1	19.86	11.27	10.02	2.61	15.65	2.85	1	19.86	11.27	10.02	2.61	15.65	2.85
2	18.40	10.41	9.71	2.43	14.22	2.45	2	16.84	9.50	8.74	2.54	13.30	1.76
3	16.15	9.09	8.22	2.14	12.32	2.56	3	17.63	9.96	8.49	2.21	13.92	2.97
4	25.56	14.60	13.45	3.67	20	3.04	4	20.9	11.9	10.47	2.87	16.35	3.11

方案 A—情景 1:开都河多年平均径流量约为 36.3 亿 m³,入湖水量为 31.13 亿 m³,其中,东支入大湖水量年均 19.86 亿 m³,西支入小湖水量年均 11.27 亿 m³,出湖水量为 12.63 亿 m³,博斯腾湖水位波动范围为 1 043.46~1 047 m,多年平均水位是 1 045.68 m,未来 30 a 博斯腾湖水位持续下降。

情景 2:开都河属平水年,多年平均径流量约为 34.3 亿 m³,入湖水量为 28.81 亿 m³,其中,东支入大湖水量年均 18.4 亿 m³,西支入小湖水量年均 10.41 亿 m³,出湖水量为 12.14 亿 m³,有所减少,但减少幅度不大,博斯腾湖水位波动范围为 1 042.97~1 047 m,多年平均水位是 1 044.69 m,水位比情景 1

下降 1.01 m,未来 30 a 博斯腾湖水位还是下降状态。

情景 3:开都河属枯水年,多年平均径流量约为 30.53 亿 m³,入湖水量为 25.24 亿 m³,其中,东支入大湖水量年均 16.15 亿 m³,西支入小湖水量年均 9.09 亿 m³,出湖水量 10.36 亿 m³,有所减少,减少幅度比情景 1,2 大,博斯腾湖水位波动范围为 1 041.01~1 047 m,多年平均水位是 1 043.27 m,水位比情景 1 下降 2.41 m,平均每年下降 0.07 m,未来 30 a 博斯腾湖水位还是下降状态。

情景 4:开都河属丰水年,多年平均径流量约 45 亿 m³,入湖水量 40.16 亿 m³,其中,东支入大湖水量年均 25.56 亿 m³,西支入小湖水量年均 14.6 亿 m³,

出湖水量为 17.12 亿 m^3 , 有所增加, 增加幅度大, 博斯腾湖水位波动范围为 1 047~1 048.13 m, 多年平均水位是 1 048.41 m, 水位比情景 1 增加 2.73 m, 平均每年增加 0.089 m, 未来 30 a 博斯腾湖水位处于高水位。全球气候发生重大变化的情况下, 开都河也很难一直保持丰水年状态。因此, 情景 2 适合博斯腾湖的未来实际情况, 多年平均水位处于最佳运行水位。

方案 B—情景 1: 开都河多年平均径流量约 36.3 亿 m^3 , 多年平均农业引取水量均值 7.71 亿 m^3 , 生态用水量均值 11.18 亿 m^3 , 农业引水量较低, 博斯腾湖大湖区水位介于 1 043.45~1 047 m。

情景 2: 开都河多年平均径流量约 36.3 亿 m^3 , 多年平均农业引取水量均值 12.7 亿 m^3 , 生态用水量均值 15.82 亿 m^3 , 农业引水量高, 博斯腾湖大湖区水位介于 1 039.83~1 047 m。

情景 3: 开都河多年平均径流量约 36.3 亿 m^3 , 多年平均农业引取水量均值 11.89 亿 m^3 , 生态用水量均值 14.60 亿 m^3 , 农业引水量较高, 博斯腾湖大湖区水位介于 1 041~1 047 m。

情景 4: 开都河多年平均径流量约 36.3 亿 m^3 , 多年平均农业引取水量均值 7.15 亿 m^3 , 生态用水量均值 9.5 亿 m^3 , 农业引水量低, 博斯腾湖大湖区水位介于 1 045~1 047 m。农业引水量越小, 来水量越多, 博斯腾湖水位会明显提升。社会经济发展需水日益加之的今天, 在短时间内大幅度减少农业用水量是不客观的。因此, 情景 4 适合博斯腾湖的未来实际情况, 水位处于最佳运行水位。

从上面的情景分析可以看出, 方案 A 的情景 2 和方案 B 的情景 4 为最适合博斯腾湖及其上下游生态经济可持续发展的最佳选择。为了实现如上情景, 应尽量保持现在的农业灌溉面积, 有效控制农业灌溉面积的再扩大, 通过高科技和产业结构的调整减少农业灌溉定额。

4 结论

博斯腾湖上下游区域人类活动愈发频繁, 加之环境变化下博斯腾湖及其周围区水—经济—生态复合系统的复杂性和不确定性, 使得水资源变成博斯腾湖流域社会经济发展的瓶颈。因此, 揭示该系统要素之间的复杂反馈关系及其影响机制变成社会经济和生态环境协调发展的关键。本文证明系统动力学方法是研究复杂水—经济—生态复合系统研究的最佳选择。结果表明:

(1) 环境变化下保持博斯腾湖及其周围环境良好是一个具有挑战性的任务。博斯腾湖水位的波动

是气候变化和人类活动耦合作用的结果。其中, 近年来湖水位的下降主要是受博斯腾湖上下游人类社会经济活动影响的缘故, 孔雀河流域社会经济发展需水量猛增引起的影响更为突出。

(2) 从敏感度分析可知, 博斯腾湖水量平衡主要是入湖水量、蒸发量、出湖水量与降水量波动等自然因素和灌溉定额、灌溉面积、工业产值与人口等人为因素共同作用的结果, 且自然因素的综合影响程度高于人为因素。

(3) 方案 A 在保持其他参数不变情况下, 调节开都河年平均径流量, 方案 B 在开都河年平均径流量保持不变的情况下, 调节灌溉定额、灌溉面积增长率等人为因素数据和参数, 由这两个方案来产生不同的水位状况并预测未来 30 a 的湖泊水位变化。结合方案 A 与方案 B 分析可知, 单一增加入湖径流量等自然因素或者减少灌溉面积、灌溉定额等人为因素并不能使博斯腾湖流域社会经济实现可持续发展。例如, 加大博斯腾湖上游区域节水力度可以有效保证博斯腾湖入湖径流量。此外, 在干旱区保持较高或较低湖泊水位对上下游区域社会经济发展造成影响。

综合考虑博斯腾湖不同水位变化情景, 对于气候变化与人类活动影响均较为突出的博斯腾湖流域, 在未来气候变化这个大环境下, 为了维持博斯腾湖水位在生态水位之内, 同时实现周围区社会经济的可持续发展, 必须用严格控制农业灌溉面积, 加大农业节水技术等方法来有效缓解博斯腾湖水位的剧降和水量失衡问题。调整社会经济用水与生态用水比例以及各产业用水比例, 推进节水型社会建设, 提高水资源利用率。

参考文献:

- [1] 张红亚, 吕明辉. 水文学概念[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [2] 高华中, 姚亦锋. 近 50 a 来人类活动对博斯腾湖水位影响的量化研究[J]. 地理科学, 2005, 25(3): 305-309.
- [3] 马丽娟, 赵景峰, 张宏俊, 等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2): 210-216.
- [4] 李新国, 李会志, 王影, 等. 开都河下游灌区土壤盐渍化研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 111-114.
- [5] 秦伯强. 气候变化对内陆湖泊的影响分析[J]. 地理科学, 1993, 13(3): 212-219.
- [6] 李佳秀, 徐长春, 王晓, 等. 开都河流域极端水文事件变化及其对气候的响应[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 285-291.
- [7] 陈亚宁. 严守新疆博斯腾湖生态红线[EB/OL]. (2013-12-31)[2015-03-05]. 中国科学报.

- [8] 李二辉,穆兴民,赵广举. 1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163.
- [9] 汪鹭. 博斯腾湖流域主要入湖河流径流序列分析[D]. 成都: 四川师范大学, 2008.
- [10] 王维霞,王秀君,姜逢清,等. 开都河流域上下游过去50 a气温降水变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(5): 747-753.
- [11] 巴州国土规划博湖规划组. 新疆巴音郭楞蒙古自治州国土规划博斯腾湖保护治理和资源开发规划报告[R]. 1984: 4-9.
- [12] Rusuli Y, Li L, Ahmad S, et al. Dynamics model to simulate water and salt balance of Bosten Lake in Xinjiang, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 74(3): 1-12.
- [13] 裴新国. 博斯腾湖水盐动态及其平衡的研究[J]. 干旱区地理, 1988, 1(13): 1-7.
- [14] 裴新国. 排入博斯腾湖的农田废水水量、盐量的估算[J]. 干旱环境监测, 1989, 3(2): 43-45.
- [15] 成正才,李宇安. 博斯腾湖的水盐平衡与矿化度[J]. 干旱区地理, 1997, 20(3): 43-49.
- [16] 王亚俊,李宇安,王彦国,等. 20世纪50年代以来博斯腾湖水盐变化及趋势[J]. 干旱区研究, 2005, 22(3): 355-360.
- [17] 孙占东,王润. 气候背景下冰川在博斯腾湖水量平衡中的作用[J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 484-489.
- [18] 钟瑞森,董新光,王新菊. 博斯腾湖水盐变化及可调出水量预测[J]. 人民黄河, 2007, 29(11): 45-47.
- [19] 钟瑞森,董新光. 新疆博斯腾湖水盐平衡及水环境预测[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 58-64.
- [20] Rusuli Y, Li L, Ahmad S, et al. Dynamics model to simulate water and salt balance of Bosten Lake in Xinjiang, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 74(3): 1-12.
- [21] 刘丽梅,赵景峰,张建平,等. 近50 a博斯腾湖逐年水量收支估算与水平衡分析[J]. 干旱区地理, 2013, 33(1): 33-40.
- [22] 伊丽努尔·阿力甫江,海米提·依米提,麦麦提·吐尔逊,等. 1958—2012年博斯腾湖水位变化驱动力[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 240-247.
- [23] 李卫红,袁磊. 新疆博斯腾湖水盐变化及其影响因素探讨[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 223-227.
- [24] 夏军,左其亭,邵民成. 博斯腾湖水资源可持续利用: 理论、方法、实践[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [25] 孙占东,王润,黄群. 近20 a博斯腾湖与岱海水位变化比较分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 56-60.
- [26] 谢媛媛. SWAT模型在黄土丘陵区参数敏感度分析及率正研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 204-206.
- [27] 刘浏,胡昌伟,徐宗学,等. 情景分析技术在未来太湖水位预见中的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(4).
- [28] 吴威,吴松,陈爽. 基于SD模型分析的环鄱阳湖地区发展模式探讨[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 252-258.
- [29] 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, 2012.

~~~~~  
(上接第125页)

- [6] 李久生,饶敏杰,张建君. 干旱区玉米滴灌需水规律的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 16-21.
- [7] 康少忠,史文娟,胡笑涛,等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 1998, 14(4): 82-87.
- [8] 段玉田. 限水灌溉对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 山西农业科学, 1994(2): 16-19.
- [9] 黄久常. 补充供水对于干旱地区小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 1990(4): 105-109.
- [10] 杨九刚,马英杰,马亮,等. 滴灌带布设方式对棉田土壤盐分运移规律的影响研究[J]. 节水灌溉, 2012(5): 36-40.
- [11] 王允喜,李明思,蓝明菊. 膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 112-117.
- [12] 冉立忠,蔡新宏. 棉花膜下滴灌不同毛管间距对产量和效益的影响[J]. 中国棉花, 2005(S1): 57-58.
- [13] 李高华,林性粹. 不同滴灌带配置方式对棉花生长及产量的影响[J]. 新疆农垦科技, 2009, 49(3): 1-2.
- [14] 刘敏杰,何新林,王振华,等. 哈密地区特色林果滴灌毛管优化设计研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2013.
- [15] 杨相昆,魏建军,张占琴,等. 不同滴管带配置对冬小麦干物质动态变化的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(7): 72-76.
- [16] 郭庆法,王庆成,汪黎明,等. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [17] 王立敏,魏永霞,王斌,等. 有限供水对玉米干物质积累影响的研究[J]. 河海水利, 2004(6): 34-37.
- [18] 杨国虎,李建生,罗湘宁,等. 干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2005, 33(5): 27-32.
- [19] 张芮,成自勇,李有先. 水分亏缺对膜下滴灌制种玉米生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2): 125-128.
- [20] 张振化,蔡焕杰. 水分亏缺对覆膜玉米生长发育及产量的影响[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 13-16.