

黑河流域中下游全境地表-地下水耦合模型与应用

朱金峰^{1,3},王忠静^{1,2*},郑航^{1,2},鲁学纲⁴,齐桂花⁵ (1.清华大学水利水电工程系,北京 100084; 2.清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084; 3.水利部水文局,北京 100053; 4.黑河水资源与生态保护研究中心,甘肃 兰州 730000; 5.甘肃省水利厅讨赖河流域水资源管理局,甘肃 酒泉 735000)

摘要: 耦合概念性水资源评价与规划模型 WEAP 和分布式地下水模型 MODFLOW,建立需求驱动的黑河流域中下游全境地表-地下水耦合模型,并利用地表水文站点和地下水观测点数据进行模型率定.结果表明,率定期和验证期地表水模拟的纳氏系数 >0.7 ,地下水位模拟的均方根残差 $<0.80\text{m}$.应用模型对流域历史水循环反演模拟表明,黑河干流(黑河东枝)2002~2012年水量统一调度使正义峡年均来流较原管理方式增加1.63亿 m^3 (约18%);讨赖河(黑河西枝)因人类活动改变了西部子水系河流水文情势,基本切断了与黑河干流下游尾闾水系的水力联系;黑河东西两枝人类活动和出山口径流变化共同影响着下游狼心山断面径流量,直接导致了居延海之前消失和现在的恢复.

关键词: 耦合模型; 水循环; 人类活动; 水资源管理; 黑河流域

中图分类号: X24

文献标识码: A

文章编号: 1000-6923(2015)09-2820-07

Coupling surface-groundwater model and application in Heihe River Basin. ZHU Jin-feng^{1,3}, WANG Zhong-jing^{1,2*}, ZHENG Hang^{1,2}, LU Xue-gang⁴, QI Gui-hua⁵ (1.Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2.State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3.Bureau of Hydrology, Ministry of Water Resources, Beijing 100084, China; 4.Heihe River water resources and ecology conservation research center, Lanzhou 730000, China; 5.Taolai River authority of Gansu Provincial Department of Water Resources, Jiuquan 735000, China). *China Environmental Science*, 2015,35(9): 2820~2826

Abstract: By coupling the conceptual water resources planning model WEAP and distributed groundwater model MODFLOW, the demand-based surface-groundwater model across the whole middle-down Heihe River Basin is developed. The hydrology gauge data and groundwater monitoring data are used for calibration and verification. For both the calibration and verification periods, the Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficients (NSE) for surface water are above 0.7, and the Root Mean Square Errors (RMSE) for groundwater table are less than 0.80m. The modelling results show that the unified water resources management and operation in the mainstream (Eastern Heihe Basin) from 2002 to 2012 have increased the released water for downstream by 163million m^3 (18%) annually. The human activities in the Taolai River (Western Heihe Basin) changed the river flow regime of the tributary, and blocked its hydraulic connections with downstream Heihe drainage. For both the east and west of Heihe River, the changes of discharges from the mountain and human activities contribute to the reduction of runoff through Langxinshan Gauge, downstream, which directly caused the disappearance times ago and recent restoration of the downstream Juyan Lake.

Key words: coupling surface-groundwater model; water cycle; human activity; water resources management; Heihe River Basin

在水资源紧缺的干旱半干旱流域,地表水与地下水转化是流域水循环分析与水资源管理中必须考虑的因素.由于各自特点,长期以来,地表水和地下水的运动过程和模拟研究多是在各自领域独自发展^[1-3].地表水模型通过对地表水循环过程的模拟分析,实现各部门需水分析、水量配置和情景分析等多种功能^[3-4].地下水模型通

过概化地下水系统的水文地质条件,模拟地下水的流动和水位变化,为水资源管理和生态改善提供科学依据^[5-6].随着气候变化和人类活动的影

收稿日期: 2015-01-19

基金项目: 国家自然科学基金(91125018);水利部公益性行业专项(201401031)

* 责任作者, 教授, zj.wang@tsinghua.edu.cn

响,流域地表水和地下水循环及相互作用更加频繁,尤其在河流冲积平原地区,地表水-地下水交换更加剧烈,揭示其交互循环规律对于诊断流域问题和合理的水资源可持续开发利用方案就更加必要.因此,考虑地表水循环和地下水运动的耦合模型在水资源管理和生态恢复中的应用日益广泛^[7-8].

在黑河流域水文、生态和社会经济的演化机制和发展趋势研究中,地表地下水模型的研究是其关键的科学问题^[9].黑河流域的地下水数值模型研究已有较多成果,包括黑河干流中游的甘肃二水模型^[10],中游张掖盆地多含水层的三维数值模型^[11],讨赖河流域酒泉盆地的地下水数值模型^[12],下游额济纳盆地的地下水模型等^[13];地表地下水耦合模型也有一些成果,包括分布式模拟地表水文过程和人类活动的 WEP 模型^[14],以及结合 GIS、RS 和 FEFLOW/MIKE 建立的流域三维地下水模型系统^[15].然而,无论是地下水模型还是地表地下水耦合模型,对于该流域的研究仍有缺憾.一是已有成果的模型及应用研究范围多限于单个盆地,或是黑河干流中游张掖盆地,或是干流下游额济纳盆地,或是黑河西枝的酒泉盆地,缺乏对黑河中下游整体水循环及水量调度的模拟;二是已有成果多是地表地下水分离,并需要较多引水及地下水开采数据支撑,因而一定程度上限制了其广泛应用^[7,16].

本文基于需求驱动的 WEAP 地表水模型和基于地下水动力学的 MODFLOW 地下水模型,在月时间尺度和灌区网格空间尺度耦合,模拟人类-自然二元水循环过程,并应用于黑河流域中下游全境整体的水循环模拟与生态下泄水量的分析.

1 黑河中下游地表水-地下水耦合模型

1.1 研究范围及工具

黑河是中国第二大内陆河,发源于祁连山区,自南向北流经青海、甘肃和内蒙古三省区,干流全长约 928km.它东接石羊河流域,西邻疏勒河流域,南起祁连县境内的南北分水岭,北至内蒙古额济纳旗境内的居延海.研究范围包括黑河中下游全境,由四个盆地组成,张掖盆地、酒泉盆地、金

塔-鼎新盆地和额济纳盆地,见图 1.2000 年国务院批准实施黑河流域近期治理规划和水量统一调度,主要集中在黑河干流(含梨园河),涉及张掖和额济纳两个盆地.为更全面揭示黑河流域水循环机制,本研究范围有所扩大,将与讨赖河(黑河西枝)相联系的酒泉盆地和金塔-鼎新盆地纳入模型,一体化描述.黑河流域中下游全境地表水-地下水耦合模型采用采用斯德哥尔摩环境研究院(SEI)开发的通用水资源分析管理工具 WEAP (Water Evaluation And Planning)和美国地质调查局开发的 MODFLOW 进行构建,一体化耦合.

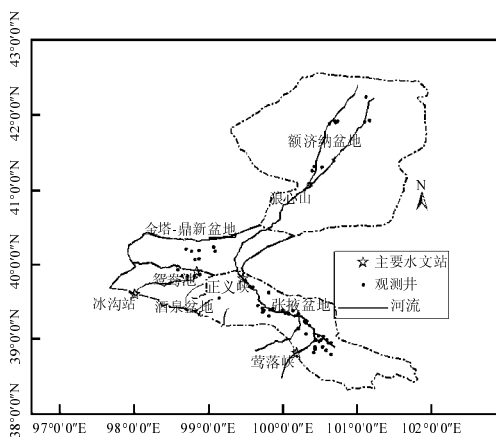


图1 黑河流域水系与观测点

Fig.1 Heihe river network

1.2 地表水模型概化

WEAP 是具有经济和物理意义的概念性模型,能够很好的模拟流域或区域尺度社会需水和地表水的循环过程.模型概化分为点、线、面 3 类,将水资源供需与传输中不同的物理单元进行概化.水库、汇流点、水文及河道断面等概化为点,渠道、河道等表现水力联系的单元概化为线,灌区概化为面.如灌区(面)通过渠道(线)从河道断面(点)或水库(点)引水灌溉,并回流至下游河道断面(点).模型以黑河干流的莺落峡、梨园河的梨园堡及讨赖河的冰沟站等出山口水文站为上边界入流,中游通往下游河道的水文控制站为正义峡站(黑河干流)和鸳鸯池(讨赖河),狼心山水文站以下进入额济纳盆地,终端尾间湖为居延海.

在 WEAP 模型中对黑河流域地表水循环与利用关系的概化见图 2.

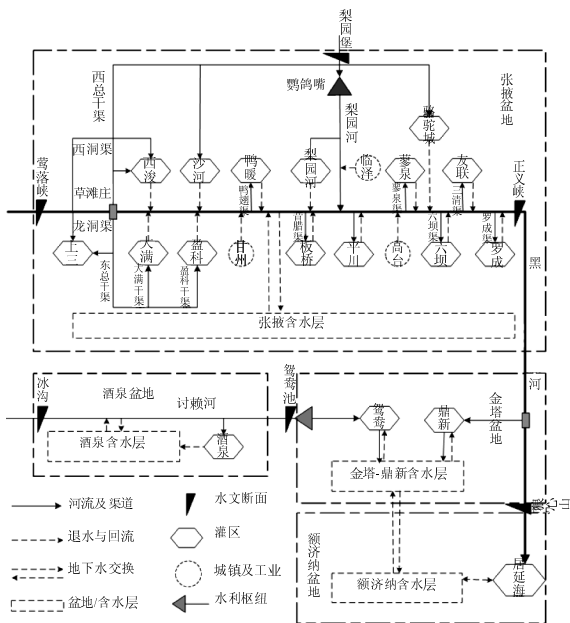


图 2 研究区水循环及利用概化图
Fig.2 Schematic of water supply system

黑河中游有 30 个重要灌区,沿河分布有众多引水口门,截至 2012 年底,干流上的引水工程 42 处,梨园河上的引水口门 7 处.利用黑河流域管理局遥感调查、资料收集以及现场调查的数据,灌溉需水量根据统计的各灌区面积、种植结构及灌溉制度进行确定,2010 年的中游灌溉面积约 270 万亩.WEAP 根据各需求单元的优先顺序进行水量分配.在调度中首先向优先级最高的需水部门(如城市及生活)供水,然后依次向优先级较低的部门(如灌溉)供水.当水量不足时,则按需水优先级自高到低依次消减.通常,该调度规则能够保证优先级最高的用水.

目前,WAEP 模型能够反映河道的径流变化和水资源供需关系,但其将地下水只作为供水端进行概化,不能反映地下水在横向空间的流动,在地表水和地下水作用强烈的地区就容易失真,需要耦合分布式的地下水模型^[7].

1.3 地下水模型建立

MODFLOW 是国际上常用的地下水模型,能

够对不同地下含水层单元的水流进行分布式模拟,并容易同其他模型进行连接.建立黑河流域尺度的地下水数值模型时,将研究区活动区域面积 6.62 万 km² 划分为 13791 个矩形网格每个网格大小为 2.4km×2km.由于含水层厚度相比水平尺度很小,水流可视为水平流动而垂向速度可以忽略,按单层地下含水层进行概化.

黑河干流莺落峡以上是主要产汇流区;莺落峡到正义峡区间为张掖盆地农业引水的灌溉平原区,在山前地带河水渗漏补给地下水,在灌溉平原区地表水地下水转化频繁;正义峡以下为径流消耗区,含水层主要以潜水蒸发的形式大量排泄.根据资料和已有成果条件,对地质参数/特性和初始及边界条件进行预处理:地表高程采用 30m 精度数字高程模型(DEM)差值;河道边界根据黑河流域水系分布,确定相应网格的河流单元属性,输入初始水位,与地表水模型 WEAP 耦合可对每一步计算的河道水位进行更新;研究区上边界山前有微弱的基岩裂隙水补给,为弱透水的第二类边界,额济纳盆地东部的巴丹吉林沙漠存在侧向补给,在盆地东南沿线深层补给地下水约为 1.36 亿 m³/a^[8],其它水平边界均为隔水边界.含水层的垂向计算中,潜水蒸发采用 MODFLOW 自带程序包 ETS 处理,对蒸发能力和潜水埋深关系采用分段线性表示;地下水以排水沟或泉的形式的排泄,采用模型自带的 DRN 模块进行模拟.黑河中游河道蒸发相对河道径流量和渗漏量非常小,可以忽略.

1.4 模型耦合与验证

地表水模型和地下水模型的耦合,在时间尺度上以月步长耦合,在空间尺度上以灌区-网格的大小耦合.WEAP 模型输出的地下水开采、入渗,河流水位,地表径流等,作为 MODFLOW 的相应网格的边界条件输入值;MODFLOW 计算得到的地下水位,含水层内的侧向流,地表水地下水交换量,作为 WEAP 的输入值.耦合模型在 WEAP 平台上运行,数据传递贯穿每一计算步长.

耦合模型参数率定包括对地表水部分(以控制站断面的河道径流为指标)和地下水部分(以地下水位观测值为指标)的率定.选取干流中游

正义峡站和讨赖河鸳鸯池水库站作为河道径流率定的控制断面,以研究区内分布的观测井作为地下水率定的控制点(图1),率定效果分别采用纳氏效率系数 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency coefficient)和均方根残差 RMSE 进行评价,评价指标定义如下.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{sim}} - Q_{i\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{obs}} - Q_{\text{obs}}^0)^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{i\text{sim}} - h_{i\text{obs}})^2} \quad (2)$$

式中, $Q_{i\text{sim}}$ 为第*i*个模拟流量, $Q_{i\text{obs}}$ 为第*i*个观测流量, Q_{obs}^0 为观测流量均值, n 为拟合数据总数; $h_{i\text{sim}}$ 为第*i*个模拟地下水位, $h_{i\text{obs}}$ 为第*i*个实测地下水位.

以1989年为预热期,利用1990~1999年共10年的水文系列及需水数据资料进行模型的率定(1990~1994年)和验证(1995~1999年).根据黑河干流(东枝)正义峡断面和讨赖河(西枝)鸳鸯池水库的实测月径流资料,利用耦合模型率定模拟的河道径流水量如图3所示.正义峡河道径流模拟的纳氏效率系数NSE在率定期和验证期分别为0.82和0.90,水量误差分别为1.20%和6.35%;鸳鸯池河道径流模拟的纳氏效率系数NSE在率定期和验证期分别为0.70和0.71,水量误差分别为1.1%和1.0%,率定期和验证期的径流模拟效果均比较满意.分析黑河径流特征,黑河干流正义峡来水由莺落峡的出山径流和细土平原的泉水溢出组成,并受到中游人类引水灌溉及渠系渗漏回归水量的影响,在汛期(7~9月)河道水量较大,非汛期4~6月因灌溉需水量较大引水较多而河道径流较小,12月至次年3月虽为枯水期,但也无灌溉引水,中下游河道受地下水补给,到达正义峡的径流相对较高.黑河西枝讨赖河中下游的径流变化和人类活动影响同黑河干流具有相同的规律,率定的模型在验证期的径流表达表明,其可较好地反映这些水文规律.

地下水模型率定所需的开采量、渠系渗漏及灌溉回归水入渗量等,由WEAP模型根据实际情况模拟计算得到,并匹配到与地表水单元

相对应的地下水网格.地下水位动态由地下水观测站网数据得到,率定中将模型模拟的地下水位与实测值对比,以均方根残差RMSE为评价准则.对张掖、酒泉、金塔-鼎新和额济纳盆地各观测孔地下水位的模拟值和观测值进行对比分析(图4),模拟期内各个盆地的RMSE分别为0.74、0.64、0.80、0.63m,均在0.80m以下.黑河中下游全境所有观测孔的地下水位在900~1600m,在模拟期内的模拟效果整体较为满意.同时,统计所有观测孔在率定期和验证期内的拟合误差的绝对值,不同误差分布区间的统计结果如表1所示.

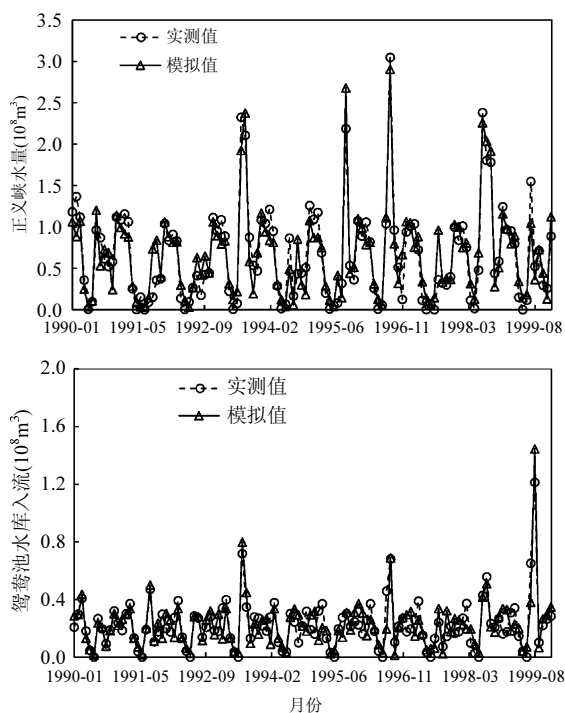


图3 黑河干流(正义峡)和讨赖河(鸳鸯池)径流模拟值与实测值比较

Fig.3 The simulated and observed runoff for mainstream (Zhengyixia Gauge) and Taolai Tributary (Yuanyangchi Gauge)

可见,模拟的水头误差小于1m的点在率定期和验证期均达到了80%以上,表明耦合模型可较好地刻画黑河流域的水文地质条件,用于流域水循环过程的模拟和水资源配置情景分析.

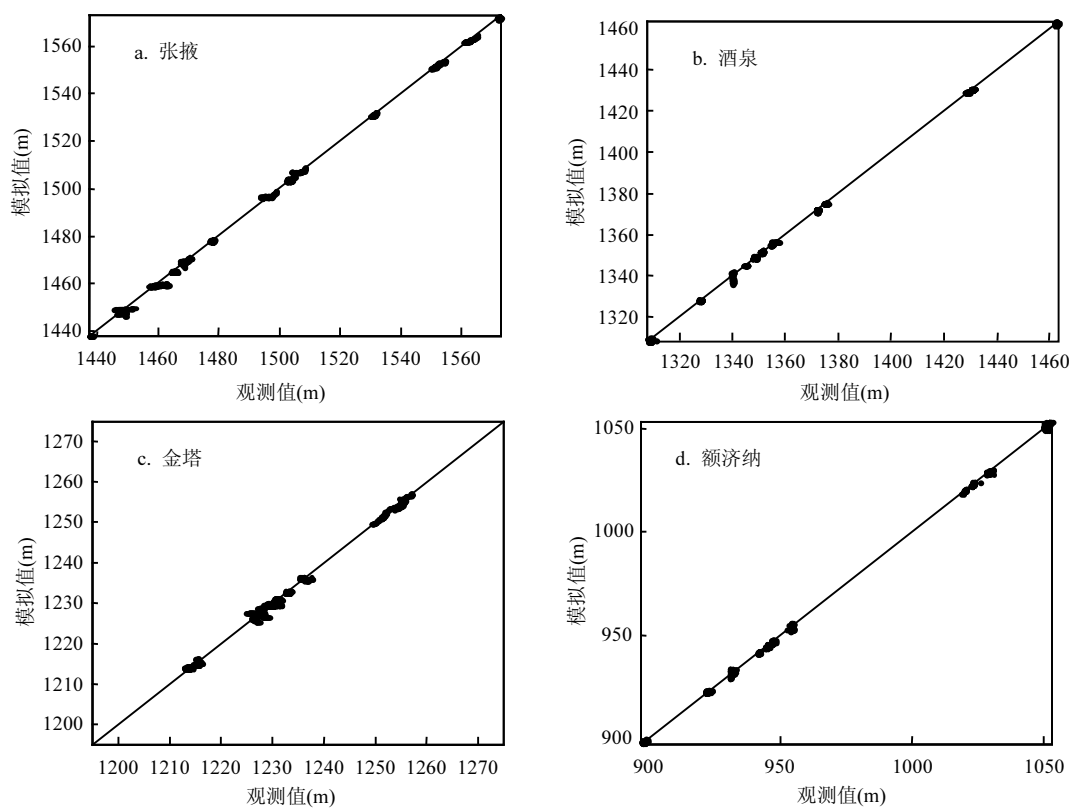


图 4 各盆地观测孔的模拟值与实测值对比

Fig.4 Comparison between simulated and observed groundwater tables for each basin

表 1 地下水位拟合绝对误差统计						
Table 1 Statistic bias of the simulated groundwater						
时段	参数	误差绝对值				
		[0,0.2)	[0.2,0.5)	[0.5,1)	[1,1.2)	>1.2
率定期	出现频数	1089	1257	1013	164	437
	百分比(%)	27.5	31.7	25.6	4.1	11.0
验证期	出现频数	907	1028	809	141	283
	百分比(%)	28.6	32.5	25.5	4.5	8.9

2 流域水循环的模拟反演

2.1 中游人类活动的影响分析

根据自 1949 年以来流域水文、径流及社会经济发展资料,重新构建流域水循环变化历史的数据集.利用率定的耦合模型,对黑河流域中下游 1949~2012 年的水文及用水变化情况进行模拟反演,以定量分析水文径流和人类用水活动对流域水循环及下游额济纳盆地生态水量的影响.长系列模拟反演的黑河干流正义峡的径流变化过

程如图 5(a)所示.

在 1962~2001 年期间,模拟值与实测值接近,能够很好反映流域水文过程及人类用水活动变化.1961 年以前,由于正义峡水文站 1955 年刚建成试观测,受到大跃进及自然灾害影响,各类数据调查与观测可靠度较低,故与模拟值相差较大;且实测值和人类活动模拟均可能存在误差.2002 年以后,正义峡河道径流的模拟值系统性偏小,反映了黑河水量统一调度活动开始主导正义峡的下泄水量.如果中游按照原有的人类用水行为、没有干流量统一调度的实施,2002~2012 年正义峡河道下泄的水量会比实际年均偏小 1.63 亿 m³ 左右(约 18%).

黑河西枝的讨赖河水系,历史上其下游在金塔-鼎新盆地鼎新附近汇入黑河干流.1949 年修建了鸳鸯池水库,库容 0.12 亿 m³,1962 年加高,库容 1.1 亿 m³.模拟的讨赖河鸳鸯池断面的径流过程如图 5(b).由于鸳鸯池水库的调蓄作用,水库下

泄河道水量在 1949 年以后呈减小趋势,1962 年以后几乎没有下泄金塔盆地河道的水量,入库水量基本被灌溉利用,基本截断了原有的讨赖河水系同黑河干流的水力联系。从图中还可看出,1984 年之前,进入鸳鸯池水库的径流相对较丰,水文年际变异性较大,变异系数 CV 为 0.37;1984 年之后,进入鸳鸯池水库的径流减少,水文变异性变小,CV 值减小到 0.27。这是由于中游酒泉盆地在八十年代大规模建设和完善渠系设施等水利工程,中游盆地的人类活动改变了年际水文丰枯变化的程度,对下游鸳鸯池断面的河道水文产生了明显影响。

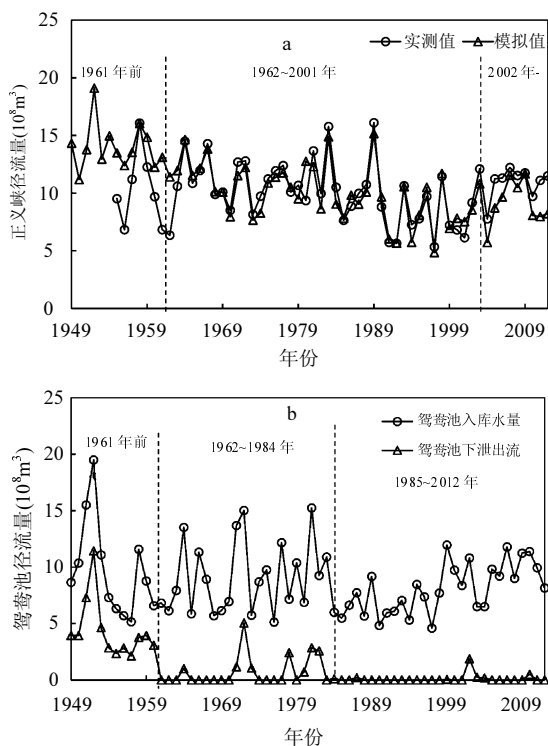


图 5 (a)黑河正义峡断面与 (b)讨赖河鸳鸯池断面径流模拟反演结果

Fig.5 The results of runoff simulation in (a) Zhengyixia Gauge and (b) Yuanyangchi Gauge

2.2 下游盆地生态水量的变化

黑河下游尾间湖居延海的变化一直是研究关注的热点^[13,17]。西居延海曾是黑河下游最大的终端湖,但在 1961 年秋全部干涸;东居延海在 20 世纪七八十年代出现干涸-充水-干涸的变

化,1991 年后基本消失,导致生态环境恶化^[17]。除了以讨赖河水系为代表的水系联系减少的影响外,干流水文径流和人类活动也是导致居延海消失和变化的主要因素。根据水系关系,狼心山断面的河道径流全部进入额济纳盆地,该水量可以反映盆地生态和东居延海湖面的生态供水条件。利用地表水-地下水耦合模型,对历史系列模拟反演得到的狼心山径流变化如图 6 所示。

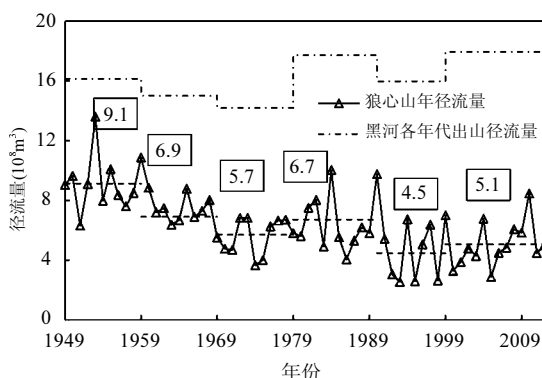


图 6 历史反演的狼心山断面河道径流变化

Fig.6 The simulated historical runoff through Langxinshan Gauge

由图 6 可见,黑河经狼心山进入下游额济纳的水量在 20 世纪 50 年代、60 年代和 70 年代分别为 9.13 亿 m^3 、6.90 亿 m^3 和 5.70 亿 m^3 。60 年代比 50 年代降低了 24%,注入居延海的水量迅速减少,这可能是导致西居延海的消失重要因素,狼心山下泄的水量仅能注入到东居延海。1980 年以后,虽然黑河中游灌溉面积和人类用水进一步扩大,但由于黑河水量在 80 年代偏丰,狼心山的水量(6.70 亿 m^3)比 70 年代有所增加,还能勉强维持东居延海湖面的存在。进入 90 年代,黑河经历了出山径流连续偏枯阶段,同时中游灌溉面积和人类用水继续扩大,使得狼心山的径流量(4.47 亿 m^3)显著减小,尤其是 1991 年(3.05 亿 m^3)和 1992 年(2.54 亿 m^3)的径流量相比 1990 年(5.42 亿 m^3)骤减 50%左右,直接导致了东居延海在 1992 年的干涸消失。黑河水量统一调度的实施(2000 年以后),增加了狼心山的下泄水量,使得东居延海再次出现和生态环境的恢复,2008 年后湖面面积达到 40 km^2 。

表 2 狼心山径流量及其上游耗水量变化模拟(亿 m³)
Table 2 Simulated Runoff through Langxinshan (10⁸m³)

水量	1950s	1960s	1970s	1980s	1990s	2000-	均值
出山径流	16.14	15.01	14.20	17.73	15.97	17.95	16.16
区间损耗量	7.01	8.11	8.49	11.02	11.50	12.89	9.84
狼心山径流	9.13	6.90	5.70	6.71	4.47	5.06	6.33

表 2 列出了各年代黑河莺落峡出山径流和狼心山径流量历史变化情况,其中区间水量损耗的变化基本是由中游人类活动导致的.以多年均值为参照,枯水年代(如 90 年代)出山径流量略有减小(-0.19 亿 m³)、人类活动用水较大增加(-1.67 亿 m³),导致狼心山径流量显著减少(-1.86 亿 m³),其贡献率分别为 10%和 90%;丰水年代(如 80 年代),出山径流量显著增大(+1.56 亿 m³)、人类活动用水也在增加(-1.18 亿 m³),两者共同影响,仅使狼心山径流量的略有增加(+0.38 亿 m³),其贡献率分别为 57%和 43%.

对于黑河中下游流域地下水位的时空变化、水资源利用的供需过程及人类用水活动的影响,将来还需通过模型进行更详细的计算分析,WEAP-MODFLOW 耦合模型在黑河的应用表明,该模型具有通用性,将来可广泛用于不同流域和区域地表水-地下水联合调度和生态环境的模拟分析.

3 结论

3.1 基于水均衡原理,建立了需求驱动的黑河流域中下游全境基于 WEAP-MODFLOW 的地表地下水耦合模型,综合了 WEAP 模型数据要求相对低、易于操作和数据管理的特点,和 MODFLOW 模型模拟复杂区域地下水流的功能,可为复杂流域水循环的模拟和水资源的配置研究提供平台.

3.2 对黑河流域中下游水循环的历史反演表明:黑河干流水量的统一调度实施,使得 2002~2012 年正义峡河道下泄的水量比原有方式增加了 1.63 亿 m³,改善了下游河道水量和生态环境;西枝讨赖河水系的人类活动,既降低了河道水文径流的丰枯情势,也切断了下游水系同黑河干流的水力联系;除了黑河支流水系改变的影响外,人类活动和出山径流变化共同影响着下游额济纳盆

地的入流量,狼心山径流的减少直接导致了居延海的消失.人类用水活动、河流-地下含水层的相互作用能够放大枯水年份出山口径流对下游盆地入流水量的影响,减小丰水年份出山口径流对下游盆地入流水量的影响.

参考文献:

[1] 王蕊,王中根,夏军.地表水和地下水耦合模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2008,27(4):37-41.

[2] 王浩,陆垂裕,秦大庸,等.地下水数值计算与应用研究进展综述[J]. 地学前缘, 2010,17(6):1-12.

[3] 刘年磊,蒋洪强,吴文俊.基于不确定性的水资源优化配置模型及其实证研究[J]. 中国环境科学, 2014,34(6):1607-1613.

[4] 杨志峰,赵彦伟,脆保山,等.面向生态城市的水资源供需平衡分析[J]. 中国环境科学, 2004,24(5):636-640.

[5] 李玮,何江涛,刘丽雅,等. Hydrus-1D 软件在地下水污染风险评估中的应用[J]. 中国环境科学, 2013,33(4):639-647.

[6] 徐海量,宋郁东,陈亚宁.生态输水后塔里木河下游地下水的动态变化[J]. 中国环境科学, 2003,23(3):327-331.

[7] 胡立堂,王忠静,Robin Wardlaw,等.改进的 WEAP 模型在水资源管理中的应用[J]. 水利学报, 2009,40(2):173-179.

[8] 武强,徐军祥,张自忠,等.地表河网-地下水流系统耦合模拟 II:应用实例[J]. 水利学报, 2005,36(6):754-758.

[9] 王旭升,周剑.黑河流域地下水流数值模拟的研究进展[J]. 工程勘察, 2009,(9):35-38.

[10] 周兴智,赵剑东,王志广,等.甘肃省黑河干流中游地区地下水资源及其合理开发利用勘察研究[R]. 张掖:甘肃省地勘局第二水文地质工程地质队, 1990:66-95.

[11] Litang Hu, Chongxi Chen, Jiu Jimmy Jiao, et al. Simulated groundwater interaction with rivers and springs in the Heihe river basin[J]. Hydrological Processes, 2007,21:2794-2806.

[12] 王刚,周启友,魏国孝,等.酒泉盆地地下水系统数值模拟与预测[J]. 工程勘察, 2009,(2):37-41.

[13] 武选民,陈崇希,史生胜,等.西北黑河额济纳盆地水资源管理研究——三维地下水流数值模拟[J]. 中国地质大学学报, 2003, 28(5):527-532.

[14] 贾仰文,王浩,严登华.黑河流域水循环系统的分布式模拟:模型开发与验证[J]. 水利学报, 2006,37(5):534-542.

[15] 周剑,程国栋,王根绪,等.综合遥感和地下水数值模拟分析黑河中游三水转化及其对土地利用的响应[J]. 自然科学进展, 2009,19(12):1343-1354.

[16] Tian Yong, Zheng Yi, Wu Bin, et al. Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture[J]. Environmental Modelling and Software, 2015, 63:170-184.

[17] 王根绪,程国栋.近 50a 来黑河流域水文及生态环境的变化[J]. 中国沙漠, 1998,18(3):233-238.

作者简介: 朱金峰(1987-),男,山东潍坊人,博士,主要从事水文水资源研究.发表论文 3 篇.