

跨流域调水的大尺度分布式水文模型研究与应用

夏 军¹, 叶爱中², 王 蕊¹, 王中根¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 变化环境下区域分布式水循环模拟研究, 是地球系统科学中的重大科学问题, 也是区域水安全和水资源风险管理需求的重要应用基础。本文开展了以南水北调中线工程联系的跨汉江、黄河和海河多个流域的区域水循环模拟、环境变化影响与水安全研究。重点论述了跨流域调水的大尺度分布式水文模型(LDTVGM)的研究与展望。目的是探讨变化环境下跨流域调水的分布式水循环模型的建立, 发展区域水循环动力学-非线性系统-多源不确定性分析与综合的理论及影响评估方法, 为分析应对气候变化和高强度人类活动影响的区域水资源安全及应对措施的风险管理, 提供科学依据。

关键词: 跨流域调水; 分布式水文模型; 地下水; 影响

中图分类号: P334.92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2011)01-0001-07

Large Scale Distributed Hydrological Model of Inter-basin Water Transfer and its Application

XIA Jun¹, YE Aizhong², WANG Rui¹, WANG Zhonggen¹

(1. Key Lab. of Water Cycle & Related Land Surface Processes,

Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Distributed water cycle simulation research under environment change is a important problem of earth system science. It is also the application foundation of regional water security and water resources risk management. This paper studied regional water cycle simulation, environment change and water security at Han River, Yellow River and Hai River which are linked with South to North Water Diversion Project. We focused on the research and prospects for the large scale inter basin water transfer distributed hydrological model (LDTVGM). There are two research purposes. First, to explore how to develop the large scale inter-basin water transfer distributed hydrological model under changing environment. Second, to develop the theory and impact assessment methods about regional water cycle dynamics - nonlinear systems - multiple sources of uncertainty analysis. This study can provide a scientific basis for regional water resources security and risk management of countermeasures under climate change and high intensity of human activities and.

Key words: Inter basin water transfer; distributed hydrological model; ground water; impact

1 研究背景

水循环是联系地球系统“地圈-生物圈-大气圈”的纽带。由于受全球变化和人类活动的影响,流域、区域和陆地不同尺度水资源形成、转化过程中的水循环机制变得越来越复杂,水与气候、水与生态、水与社会、水与经济的矛盾日益突出。以水循环为纽带由它们组成的水系统,正面临来自环境变化尤其是人类活动的深刻影响,成为21世纪国际国内水资源与环境领域重要的研究方向与科学问题^[1-2]。当前和未来的50年时间内,中国的经济社会将处在一个持续发展时期,面临更多来自跨流域和大尺度水循环科学问题与水资

源重大国家需求问题的挑战。

由于社会经济发展防御自然灾害和经济供水和能源的需求,截至2003年,全世界大坝4.97万座,中国修建的大坝就有2.58万座。目前,在我国黄土高原已建淤地坝11万多座,到2020年将规划修建16.3万座。在建的南水北调工程是迄今为止世界上最大的特大型跨流域调水工程,东、中、西三条调水线路规划的调水量达448亿m³,占整个长江径流量的5%,是海河径流量的1.7倍,涉及12个省(市)3亿多人口。

在国际上,全球变化和大规模水电工程建设和跨流域调水对陆地水系统与水资源安全影响,是全球水系统计划(GWSP)

收稿日期: 2010-12-20 修回日期: 2010-12-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(Kzcx2-yw-126); 国家自然科学基金项目(40671035)

作者简介: 夏 军(1954), 男, 湖北仙桃人, 研究员, 博士生导师, 国际水资源协会(IWRA)主席, 主要从事陆地水文学及水资源方面的研究。

重点研究的科学问题。GWSP 主席 Vörösmarty et al. 认为: 各种人为因素以直接或间接方式对全球水系统产生影响, 这些因素包括: 土地利用变化、河道工程措施、灌溉、耗水损失、水生栖息地的消失以及污染。大量证据表明人类在更广泛的领域干扰了水循环的基本特性。由此导致的水资源安全和生态安全的许多后果的机理问题急待研究, 尤其是发展中国家^[1]。从全球观点研究了大坝对大型河流系统的影响, 结果表明: 超过一半的大型河流系统受到大坝的影响, 与那些没有受到大坝影响的流域相比, 受大坝影响的流域面临着更高的水资源安全(如灌溉)压力。

中国的水电工程建设高潮引起世界的注目, 同时也面临诸多来自国际国内对大规模人类活动影响及未知后果的担忧。2006 年 8 月, *Sciences* 杂志曾发表专文, 报告中国南水北调工程实施中所迫切需要研究的水安全与生态安全的许多风险和未知后果问题的激烈讨论。客观上, 随着区域和全球社会经济的发展, 人类活动尤其是大规模跨流域调水, 正在深刻地改变大尺度水循环与水资源变化。1960 年以来, 全球范围内, 人类对地表径流人工控制能力增长了 3 倍多; 水库蓄水量达到湖泊和河流的 3~6 倍, 利用了近一半的可利用水资源。水资源利用每 10 年增加 20%, 15%~35% 的地区出现过度利用, 在 21 世纪水资源问题将成为制约全球社会经济发展最主要的因素。

我国由于地处地球环境变化最激烈的季风区, 导致水资源和生态环境复杂而易变, 对外界变化的响应和承受能力敏感而脆弱; 同时, 由于我国高速度的经济发展和高人口数量, 人类活动对环境的扰动尤为突出, 导致我国正面临世界上最为严重的水资源安全问题, 已构成我国经济与社会可持续发展的严重障碍。在人类活动和气候变化共同作用的挑战下, 我国水系统的变化格局和趋势如何? 变化规律和影响机制是什么? 如何从保障水系统的良性循环来支撑水资源的可持续利用? 如此诸多问题的解决不仅仅要研究人类活动影响所涉及的直观范围, 还要站在更大的水循环尺度上和从国家宏观管理层面上, 来分析和研究人类活动与水系统的相互作用关系, 探索我国水系统变化规律与影响机制, 以保障国家水安全、粮食安全、能源安全、生态安全, 促进经济社会可持续发展。

目前, 尽管国家在实施南水北调工程论证中已经开展了细致的工程环境影响评价工作, 制定了相应的保护规划。但是, 在跨流域调水中线工程建设即将全面完工, 面临实际运行和管理阶段, 将面临更多新的机遇与挑战, 面临来自科学基础和国家需求迫切需要研究回答的问题^[3]。例如, 大规模的水工程建设将在哪些方面可能改变或影响陆地区域和流域的水循环时空分布? 在气候变化影响下, 对中国陆地水系统可能产生什么样的影响? 如何应对不断变化的环境, 在发挥水利水电工程经济效益的同时, 也能够有效的维系陆地水系统健康和与水相关的生态、环境与资源安全? 关键问题是要研究和回答: 大规模人类活动(大型水电建设和跨流域调水工程)和气候变化迭加下对跨流域水系统影响和变化的量级; 大型水电工程和跨流域调水工程实施与陆地水系统变化的相互作用与反馈机理; 中国大规模调水实施后陆地水系统的适应能力及调控机制。

在中国科学院和国家自然科学基金委的支持下, 近些年中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室与武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室等合作, 开展了以南水北调中线工程联系的跨汉江、黄河和海河多个流域的区域水循环模拟与环境变化影响与水安全研究, 取得一些新的进展。其中包括: 跨流域分布式水系统综合模拟研究。建立中国陆地水系统综合模型, 揭示环境变化影响下陆地、区域或流域多尺度水循环相互作用与转化规律等。

本文是研究成果之一的跨流域分布式水循环模拟研究, 后续论文将分别介绍其应用与影响分析。

2 跨流域大尺度分布式水文模型(LDTVGM)

流域分布式水循环模型是国内外的热点问题^[5-7]。除了实地调研, 观测和分析跨流域调水的水文、水库、工程以及社会经济基础数据, 开展跨流域分布式水文模型研制是定量分析跨流域调水对区域水循环影响的关键环节之一。与传统的闭合流域分布式水文模型的区别在于: ①跨流域模拟计算; ②流域间存在水份的交换; ③人类活动影响更加的剧烈, 模型中须有类活动影响模块。由作者们主要研发的跨流域调水等人类活动影响的分布式时变增益模型结构如图 1 所示。

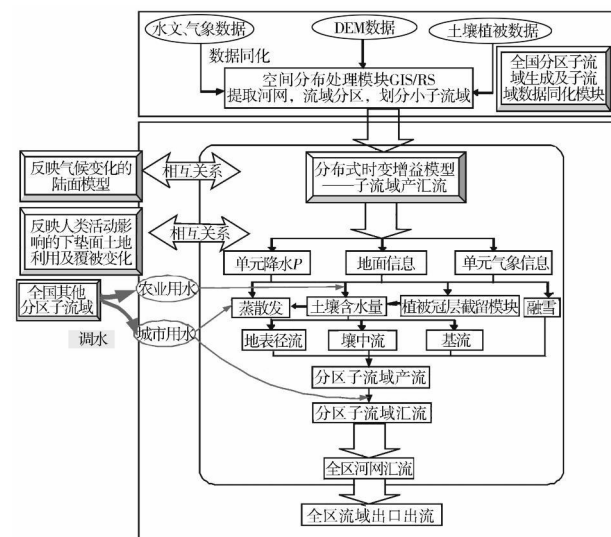


图 1 陆地水系统分布式时变增益模型结构关系示意图

Fig. 1 Structure of land water system distributed time variant gain model

建立跨流域分布式水文模型(LDTVGM)的思路是: 将多个流域视为一个大流域, 同时进行产汇流计算, 但在产汇流的同时加入了人类活动影响。对于调出水流域主要影响流域的下游的水循环, 通过减少河道的水量从而减少了取水。对于受水流域, 将对受水区的水循环及下游均产生影响, 受水区的取水将影响蒸发、土壤湿度等, 回归水到河道后一定的程度增加下游的河道水量。它们由 LDTVGM 系统的产流模块、汇流模块、地下水模块、用水耗水模块、水库调度模块、工程调水模块和参数优化模块等构成(图 2)。

关于作者研发的 DT VGM 模型, 文献[4, 8]已经有专门的介绍。很多的水文模型是通过计算下渗来计算地表产流的, 分布式时变增益模型中总结了降雨产流的关系后, 通过

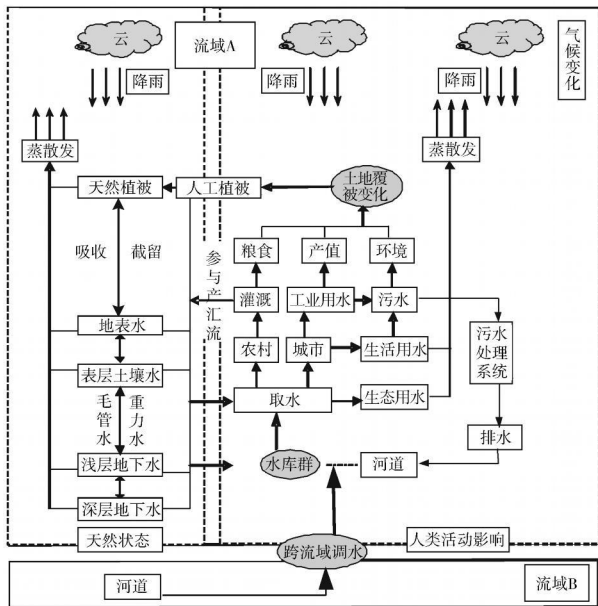


图 2 跨流域分布式水文模型 LDTVGM 框架图

Fig.2 Framework of inter-basin water transfer distributed hydrological model

时变因子优先计算地表径流,而后计算下渗量。对地表径流影响最大的因素是土壤层的植被与表层很薄的一层土壤。所以在分布式时变增益模型中将采用下式计算地表径流:

$$R_s = g_1 \left(\frac{A W_u}{W M_u \cdot C} \right)^{g_2} \cdot P$$

式中: R_s —子流域地表产流量(mm); $A W_u$ —子流域表层土壤湿度(mm); $W M_u$ —表层土壤饱和含水量(mm); P —子流域

雨量(mm); g_1, g_2 —时变增益因子的有关参数, ($0 < g_1 < 1, 1 < g_2$) 其中 g_1 为土壤饱和后径流系数, g_2 为土壤水影响系数; C —覆被影响参数。

其中表层土壤湿度的计算采取的仍是土壤厚度与土壤含水率的乘积形式,即:

$$A W_u = Thick_u \cdot W_u$$

$$A W M_u = Thick_u \cdot W M_u$$

如果能够得到实际流域中的土壤厚度,当土壤厚度很小,低于理论上对产流的影响厚度时就用实际的土壤厚度值(如我国南方的山区);当土壤厚度很厚时(如我国黄土高原地区),就用理论上对产流影响土壤厚度计算。针对不同的雨强与降雨历时以及不同的模拟时间尺度该厚度是有所不同的,在实际模拟时往往是通过模型拟定得到该值。基本的规律是时间尺度越长影响产流的土壤厚度就越厚,雨强越大也就越小。对于覆被的影响现在仍然存在很多的争论,但大多数学者认为随着覆被的密度增加是减小产流量的。如密林地相对与草地,密林地植被截留能力显然要强一些,直接导致的地表径流的产流起始时间晚,产流量小。大量的人工降雨实验中也说明草地的地表径流产流量远远小于裸地产流量,甚至只有裸地的 1/3。但植被的存在使下渗的水量最多,对土壤水的补充较多,这样壤中流与地下径流将增大。流域中的总产流量一般认为还是减小的,因为植被增加了无效蒸发。

C 为覆被影响参数,一般按照裸地、耕地、草地、林地, C 依次增大,具体值将由实验与模型拟合确定,下表给出的是 C 值的参考值。

表 1 不同土地类型 C 值
Table 1 C value of different land type

土地类型	水田	旱地	有林地	灌木林	疏林地	其他林地	高覆盖度草地	中覆盖度草地	低覆盖度草地	河渠	湖泊	水库坑塘
C	1	0.7	1	1	1	1	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0.1
土地类型	滩涂	滩地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	沙地	戈壁	盐碱地	沼泽地	裸土地	裸岩石砾地	其他
C	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.58	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

由于篇幅的限制,本文重点介绍 DTVGM 模型中针对南水北调中线工程研发的几个特色耦合模块。

2.1 地下水模块

分布式时变增益水文模型地表水采用子流域计算,地下水采用网格计算,子流域与网格嵌套使用(图 3)。每个地表水的子流域中包含多个网格。地表水采取逐时段、逐子流域计算,在计算地表水子流域的同时计算该流域包含的地下水网格水力运动。

分布式时变增益水文模型地表部分主要计算每个子流域的降水产流过程、农业灌溉用水过程、工业及生活用水、汇流、水库调度、地下水抽取量;地下水模型计算每个网格的水力运动、水量平衡、水位变化以及地表水与地下水之间的双向补给(图 4、图 5)。

2.2 用水耗水模块

人类为了满足自己的生存要求,总是在不断的征服自然、改造自然、甚至破坏自然,受到自然的惩罚后开始保护自然。这些都完全改变了天然的降雨产流模式。现在一般能

够得到的覆被变化资料是不同覆被的面积。从土地利用图上能够得到的覆被类型是 25 种,一般综合考虑其中为主的 6 种类型,分别是耕地、林地、草地、水域、沙漠,另外还有城乡、工矿和居民用地。人类用水主要包括农业用水、工业用水、生活用水等。在干旱半干旱地区人类的用水占水资源的比重越来越大,甚至是全部的水资源,尤其是农业用水,大面积

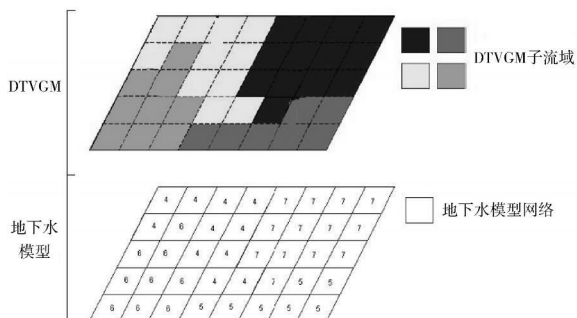


图 3 DTVGM 地下水建模示意图

Fig.3 Ground water module of DTVGM

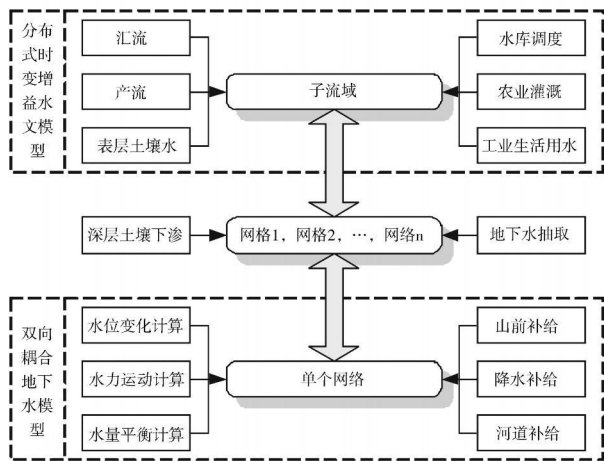


图 4 DTVM 地下水建模框架结构图

Fig. 4 Structure of ground water module frame of DTVM

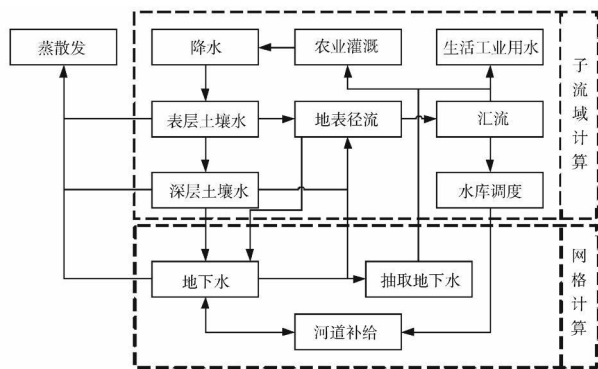


图 5 DTVM 地下水建模流程图

Fig. 5 Flow chart of ground water module of DTVM

的漫灌造成河流的断流,在分布式水文模型中必须得考虑这部分的影响。

工农业、生活用水在水循环中涉及到了土壤水、蒸散发、地下水、河道汇流等多个环节,其中农业用水主要影响土壤水、地下水、蒸散发。工业用水主要影响蒸散发、河道汇流、地下水。生活用水主要是影响地下水、蒸散发、河道汇流。

2.2.1 农业

人类用水中以农业用水为主,农业灌溉用水由灌溉的面积及作物的种类决定,本文中考虑到可行性与实用性,采用下式模拟农业需水 I_{rn} 。

$$I_{rn} = \alpha_j \beta S_1 \sqrt{S}$$

式中: α_j —农业耗水不同月的分配,由灌溉时期确定($j = 1, 2, \dots, 12$); β —农业的单位面积年耗水量(mm),由作物的类型及灌溉方式确定,一般有实测资料; S_1 —耕地面积; S —子流域总面积。

α_j, β 理论上是随时间变化的,并且受气候、人类需求、以及先进的灌溉技术使用都将改变其值。在短时间内 α_j, β 变化不是很大。

针对每个子流域,灌溉用水量还得同时考虑同时时间点的降水量 P ,当降水发生时,灌溉量将相应减小,实际灌溉量等于需水量扣除降水量,即:

$$I_r = \begin{cases} I_{rn} - P & I_{rn} > P \\ 0 & I_{rn} \leq P \end{cases}$$

式中: I_r —灌溉水量(mm); P —降水(mm); I_{rn} —灌溉需水

(mm)。

农业用水除了很少的部分回归到了流域中,大部分还是被蒸散发消耗。相当于人为的在给耕作区域进行了降水,故灌溉水量在模型水循环计算中直接加到该子流域该时段的降水中。

2.2.2 工业

在水文模型中,尤其是大流域的水文模型,很难实时的统计到该流域的实际工业用水,但每个区域的工业 GDP 及单位 GDP 耗水有统计信息。GDP 同工业耗水有很好的相关性,所以此处通过 GDP 来估算每个水文单元工业用水。

$$I_{ln} = GDP \cdot GDPN \cdot \Delta t$$

式中: I_{ln} —工业需水; GDP —国民生产总值; $GDPN$ —单位 GDP 单位时间耗水量; Δt —计算时间。由于不同区域的工业耗水率存在差异, $GDPN$ 在不同水文单元中计算需要考虑不同的空间分布,即每个水文单元中值存在差异。

工业用水部分在工业循环中部分蒸发消耗,部分经过污水处理厂、或者直接回归到河道中。在水文模型中用下式计算:

$$I_n = I_{ln} \cdot (1 - \varphi_l)$$

式中: I_n —工业耗水; I_{ln} —工业需水; φ_l —工业用水回归系数。

回归的水量直接到当前水文单元的河道中参与汇流计算。

2.2.3 生活用水

生活用水主要是指日常生活所耗水。生活用水和人口数量相关性高,所以此处通过人口数量来确定生活用水量。

$$L_{in} = P_o \cdot P_N$$

$$L_i = L_{in} \cdot \varphi_l$$

式中: L_{in} —生活需水量; L_i —生活耗水; P_o —人口数; P_N —人均耗水; φ_l —生活用水回归系数。

生活用水直接从河道或者地下水中抽取,部分水变为蒸发消耗,部分水再次回归到河道中参与汇流。

2.2.4 用水取水方案

每个水文单元先计算出需水,再找最近的河道或水库或抽取地下水,对水库、河道及地下水按次序取水,即优先水库取水,若无水库则河道取水,若河道供水不足则抽取地下水。当所有供水都不足时,按照生活用水、工业用水、农业用水依次满足,即供水不足时,首先减少农业用水,其次工业用水。

2.3 水库群调度模块

水库是现在水文模型中无法回避的一个模块。大量的水库及闸坝等水利工程完全改变了天然的水循环。水库调度分为规则调度与优化调度。在日常运行中,大部分水库采用规则调度,即按照预先制定好的调度规程进行调度。本模型中采用规则调度方案。

针对每个时段的单个水库调度主要考虑到以下几个方面:水库的死库容,即保证水库不能低于死库容运行;水库的汛限水位,即汛期水库不能超过汛限水位运行;水库的正常蓄水位,即非汛期水库不能超过正常蓄水位运行;生态需水最小流量,即水库的出流要保证最小生态需水流量。

对于流域中的多级水库,优先考虑上游水库,在计算下游入库时,不仅要考虑库区的产水,同时考虑上游水库库容的调蓄作用。在汇流的同时,从上游到下游依次对每个水库进行调度计算,同时计算每个水库的供水情况。针对水库在

水文模型中实现问题,提出相应的计算方法。水文计算是以水文单元(子流域或网格)为最小单元进行产汇流计算。水库与水利工程很不均匀的分布在每个水文单元上,很多水文单元上没有水库,少数水文单元上有多个水库。为了统一计算,给出2个假设:①假设每个水文单元上都有一个水库;②假设所有水库都正好在计算的水文单元出口处。建模时,实际无水库的水文单元库容为0;有多个水库的水文单元将多个水库特征库容相加转换为一个水库。

水库调度计算在每个水文单元汇流计算完成后计算,水文单元河道汇流计算的流量作为该单元水库的入流,通过调度计算获得水库出流作为该单元的输出。

2.4 跨流域调水模块

跨流域调水人为的改变天然水循环模式,也打破了传统的流域闭合理论。调水的主要目的是满足工农业与生活用水。一般是从源头的水库调水,通过人工河道将水分配到沿途的水库或河道中。然后从水库或河道中抽水提供给工农业与生活用水。调水计算主要有如下三个过程。

2.4.1 源头水库调度(保证是否有水可调)

源头水库调水计算是供需平衡计算:①首先根据源头来水情况,判断出可供水量;②计算调水受水区工农业及生活需水,计算需水量不能超过调水口设计水量;③对供需水进行平衡分析计算,当供水大于需水时,满足所有需水;当供水小于需水时,以供水作为源头输出水量进行计算。

$$Q_{so} = \min(Q_n, Q_s)$$

式中: Q_{so} —源头调水流量; Q_n —受水区需水流量; Q_s —源头可供水流量。

2.4.2 调水中工程汇流计算(运动波)

整个调水工程从源头到最后一个出水口,中间有一段很长的人工河道。如南水北调中线输水总干渠从陶岔渠首闸至北京团城湖全长1267 km。水流在该河道中的时间可能接近一个月。所以在调水工程人工河道中采用运动波进行汇流计算。每个分水口处作为汇流计算节点。即从源头到分水口逐级向受水区进行汇流计算。

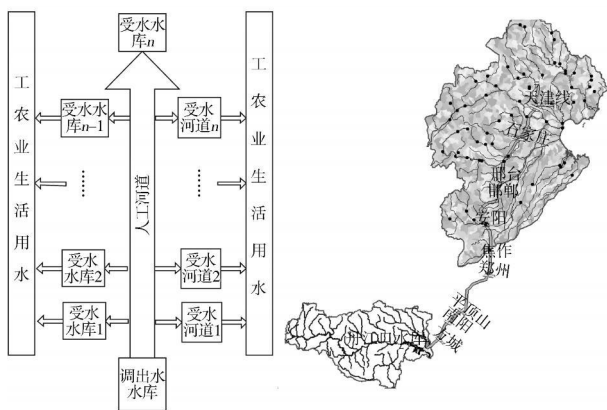


图6 调水示意图

Fig. 6 Sketch of water transfer

2.4.3 沿途分水计算(分水到沿途水库,供需平衡)

当调水到每个分水口后,每个分水口都需进行供需平衡计算。①根据源头供水量,同设计供水量进行对比,给出相应的分水口供水修正系数;对每个分水口可能的供水进行修

正。②确定每个分水口的需水。③对分水口进行供需平衡分析计算。

2.5 模型率定及不确定性分析

水循环模拟的不确定性研究是个难点问题^[10-11]。本模型以汉江、海河流域多个代表性水文站的流量过程进行的率定,同时考虑模拟期末实测和模拟的浅层地下水流程。完成模型率定后,进一步分析参数的不确定性:从模型中挑出控制水循环过程量的6个主要参数,定量分析对比各个参数的敏感度;用GLUE方法进行分析,从Monte Carlo散点图看出,模型多个参数、输入的系统误差均可以导致模型的异参同效。但是,随着资料的增加和参数率定的多目标化,相关参数的不确定性将大大减少而模型的不确定性也将随之减少。

3 气候变化和跨流域调水对海河流域水循环的影响分析

气候变化和高强度人类活动对水循环的研究是当前国际水系统研究的热点问题^[9]。影响选取南水北调中线工程的3大流域资料分析,长江流域汉口站多年平均年经流量为7392亿 m^3 ,而1980年汉口站的年经流为8062亿 m^3 ,1981年汉口站的年经流量低于平均数为6870亿 m^3 。黄河流域兰州站多年平均径流量为346亿 m^3 ,1980年兰州站的年径流量低于平均数为263亿 m^3 ,1981年兰州站的年径流量高于平均数为471亿 m^3 。因此,可以分析得出,1980年为南丰北枯年份,而1981年为南枯北丰年份。所以挑选它们为样本年,进行情景模拟,比较调水前和调水后3大流域的各子流域的径流变化。

3.1 情景方案设计

为了分析调水实施后,在不同调水方案(高、中、低)和不同气候变化情景的组合下,南水北调中线受水区——海河流域地表水与地下水的变化规律。不考虑土地利用、灌溉制度、经济增长等的变化,保持现状的用水需求,选取SRES A1B、A2和B1三种不同的排放情景。A1情景:经济增长非常快,全球人口数量峰值出现在21世纪中叶并随后下降,新的更高效的技术被迅速引进。主要特征是:地区间的趋同、能力建设、以及不断扩大的文化和社会的相互影响,同时伴随着地域间人均收入差距的实质性缩小。A1B是各种能源之间的平衡(平衡在这里定义为:在所有能源的供给和终端利用技术平行发展的假定下,不过分依赖于某种特定能源)。A2情景描述了一个极不均衡的世界。主要特征是:自给自足,保持当地特色。各地域间生产力方式的趋同异常缓慢,导致人口持续增长。经济发展主要面向区域,人均经济增长和技术变化是不连续的,低于其它情景的发展速度。B1情景描述了一个趋同的世界:全球人口数量与A1情景相同,峰值也出现在21世纪中叶并随后下降。所不同的是,经济结构向服务和信息经济方向迅速调整,伴之以材料密集程度的下降,以及清洁和资源高效技术的引进。其重点放在经济、社会和环境可持续发展的全球解决方案,其中包括公平性的提高,但不采取额外的气候政策干预。

结合南水北调中线工程的低(95亿 m^3)、中(122亿

m³)、高(143亿 m³) 3种调水规模设置多种组合方案,模拟海河流域的水循环状况。

不同调水情景与气候变化情景的组合如表2所示。

表2 气候变化与调水的不同组合情景

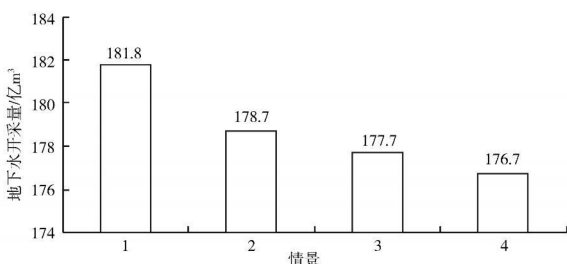
Table 2 Scenarios of climate change and water transfer

方案	中线调水/亿 m ³	气候情景
现状	0	现状年
情景1	95	A1B
情景2	95	A2
情景3	95	B1
情景4	95	现状年
情景5	122	A1B
情景6	122	A2
情景7	122	B1
情景8	122	现状年
情景9	143	A1B
情景10	143	A2
情景11	143	B1
情景12	143	现状年

3.2 不同情景的模拟分析

3.2.1 中下游平原区地下水的变化

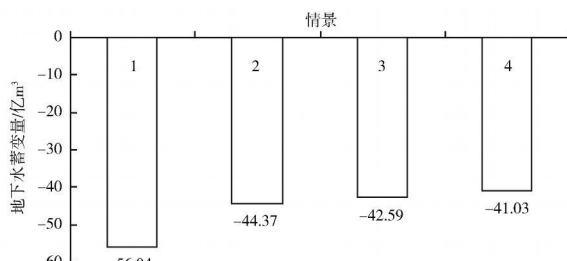
分析现状(根据1995年-2000年年实测资料),未来情景(4种组合情景)下平原区潜水水位变化,维持现状用水状况,工业、生活用水仍需开采的地下水量。结果表明:随着年调水量的增加,流域所需开采的地下水量逐步减少(图7)。由于补给项的增加,开采量的减少,地下水蓄量逐步增加(图8)。



注:情景1:现状年无调水;情景2:现状年调水95亿 m³,进海河流域54.29亿 m³;情景3:现状年调水122亿 m³,进海河流域69.71亿 m³;情景4:现状年调水143亿 m³,进海河流域82.86亿 m³。

图7 不同调水情景下海河流域平均地下水开采量

Fig. 7 Average groundwater exploitation under different water transfer scenarios in Hai River Basin



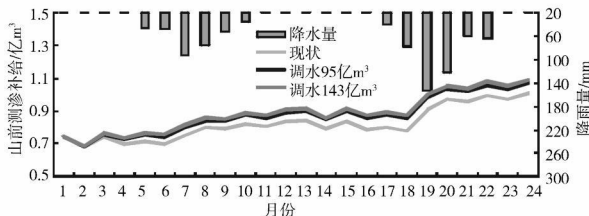
注:情景1:现状年无调水;情景2:现状年调水95亿 m³,进海河流域54.29亿 m³;情景3:现状年调水122亿 m³,进海河流域69.71亿 m³;情景4:现状年调水143亿 m³,进海河流域82.86亿 m³。

图8 不同调水情景下海河流域年均地下水蓄变量

Fig. 8 Average groundwater change under different water transfer scenarios in Hai River Basin

调水实施前后,山前侧渗补给随雨量增加,增幅明显加大。随着调水量的增加,山前侧渗补给稳定增加。调水实施后,与现状相比,山前侧渗补给各月增加量较稳定。可见,降水对山前侧渗补给的影响相对较大,调水对山前侧渗补给的影响相对较小(图9)。

分析还表明,调水143亿 m³后,北京、天津、衡水及保定市区地下水位有所回升。



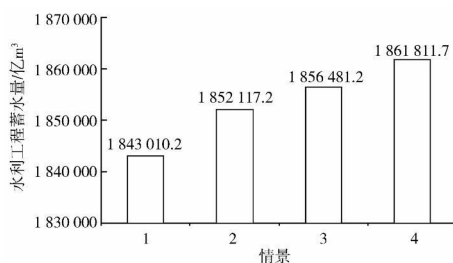
注:情景设置:①现状:现状年无调水;②调水95亿 m³:现状年调水95亿 m³,进海河流域54.29亿 m³;③调水143亿 m³:现状年调水143亿 m³,进海河流域82.86亿 m³。

图9 不同调水情景下海河流域山前侧渗补给月过程对比图

Fig. 9 Monthly groundwater supply at front hill under different water transfer scenarios in Hai River Basin

3.2.2 海河流域水利工程蓄水变化

在气候条件维持现状的情况下,调水实施后,水利工程蓄水量随调水量的增加逐步增加(图10)。



注:情景1:现状年无调水;情景2:现状年调水95亿 m³,进海河流域54.29亿 m³;情景3:现状年调水122亿 m³,进海河流域69.71亿 m³;情景4:现状年调水143亿 m³,进海河流域82.86亿 m³。

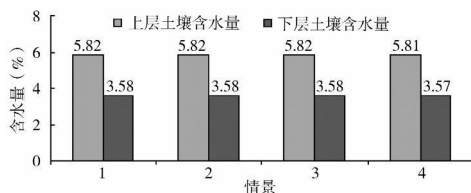
图10 不同调水情景下海河流域水利工程年均蓄水量

Fig. 10 Average yearly water storage of reservoir under different water transfer scenarios in Hai River Basin

分析表明:在调水143亿 m³后,2059年-2060年,3种气候情景下的水利工程蓄水量较现状年份都有了显著提高,而3种未来情景彼此之间的差异相对并不显著。

3.2.3 海河流域实际蒸发、土壤含水量和径流变化

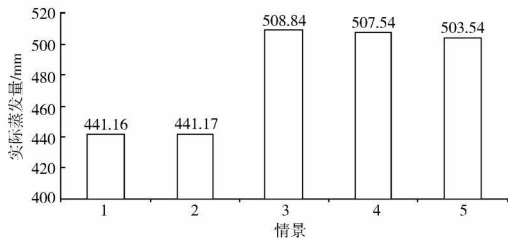
不同调水情景下,海河流域年均土壤含水量,平均实际蒸发量、平均径流量变化见图11-图13。



注:情景1:现状年无调水;情景2:现状年调水95亿 m³,进海河流域54.29亿 m³;情景3:现状年调水122亿 m³,进海河流域69.71亿 m³;情景4:现状年调水143亿 m³,进海河流域82.86亿 m³。

图11 不同调水情景下海河流域年均土壤含水量

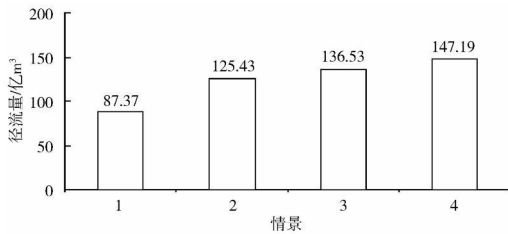
Fig. 11 Annual average soil under different water transfer scenarios in Hai River Basin



注: 情景设置: ①现状: 现状年无调水; ②调水 143: 现状年调水 143 亿 m^3 , 进海河流域 82.86 亿 m^3 ; ③A2& 143: 气候情景 A 2 加调水 143 亿 m^3 , 进海河流域 82.86 亿 m^3 ; ④B1& 143: 气候情景 B1 加调水 143 亿 m^3 , 进海河流域 82.86 亿 m^3 ; ⑤A1B& 143: 气候情景 A1B 加调水 143 亿 m^3 , 进海河流域 82.86 亿 m^3 。

图 12 不同调水情景下海河流域年均实际蒸发量

Fig. 12 Average yearly actual evaporation under different water transfer scenarios in Hai River Basin

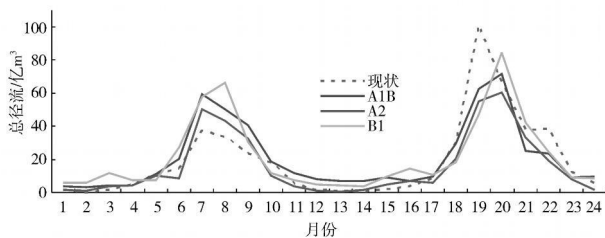


注: 情景 1: 现状年无调水; 情景 2: 现状年调水 95 亿 m^3 , 进海河流域 54.29 亿 m^3 ; 情景 3: 现状年调水 122 亿 m^3 , 进海河流域 69.71 亿 m^3 ; 情景 4: 现状年调水 143 亿 m^3 , 进海河流域 82.86 亿 m^3 。

图 13 不同调水情景下海河流域年均径流量

Fig. 13 Average yearly runoff under different water transfer scenarios in Hai River Basin

从上述图中可以看出由于调水进入受水区后, 主要用于解决生活和工业用水需求, 而情景模拟假定农业灌溉和用水不变, 因此主要减少了地下水的开采量, 蒸发量略有变化, 而对流域土壤含水量影响不大, 这也是跟模拟的情景设定和假定相符合的, 结果是合理的。而随着跨流域调水量的增加, 海河流域总径流也随之增大(图 14)。



注: 情景设置: ①现状: 现状年无调水; ②A2: 气候情景 A 2 无调水; ③B1: 气候情景 B1 无调水; ④A1B: 气候情景 A1B 无调水)

图 14 不同气候情景下海河流域总径流对比图

Fig. 14 Annual total runoff under different water transfer scenarios in Hai River Basin

4 结语

跨流域大尺度分布式水文模型的研究, 是当前国内外陆地水循环与水系统研究的难题。本文以流域分布式时变增益非线性模型为基础, 针对南水北调工程跨流域输水的特点, 分别从地表水-地下水耦合、流域产汇流过程与农业、生产生活用水特点、水库群调节和调水多模块耦合特点, 建立了考虑跨流域调水和气候变化影响的大尺度水循环系统模型(LDTVGM), 它不仅考虑了自然的地产汇流规律, 同时考虑了人类活动的影响, 将分布式水文模型与地下水数值模型

耦合, 比较好的考虑地表水地下水相互作用、水库群运行的调节作用与影响。研究中探索了模型输入特别是参数的不确定性。

选取了现状及 SRES A1B、A2 和 B1 四种不同的排放情景, 并结合无调水及南水北调中线工程的低(95 亿 m^3)、中(122 亿 m^3)、高(143 亿 m^3)四种调水规模设置了 16 种不同组合情景, 用于分析跨流域调水影响中下游平原区地下水及水利工程蓄水变化以及气候变化加调水影响下, 海河流域实际蒸发、土壤含水量和径流变化。

模型模拟的结果表明: 在现状气候条件下, 随着年调水量的增加, 海河流域地下水开采量逐步减少, 河道补给、山前侧渗补给、地下水蓄量逐步增加; 跨流域调水使得北京、天津、衡水、石家庄及保定市地下水水位有较明显的回升; 跨流域调水增加了海河流域水利工程蓄水量, 在增加年径流量的同时, 也加大了实际蒸散量。总的看, 变化环境下中国北方地区海河流域的水循环变化, 人类活动的影响较气候变化影响为大, 未来南水北调工程需要考虑来自气候变化的影响风险, 但是适应对策和水资源的管理更为重要。这也是跨流域调水工程建设后, 面对的重大课题。

由于资料有限和气候变化影响存在很大的不确定性, 本文分析的结论有待进一步研究和验证。

参考文献:

- [1] Vöörsmarty, C.; Lettenmaier, D.; Leveque, C.; Meybeck, M.; Paht Westl, C.; Alcamo, J.; Cosgrove, W.; Grassl, H.; Hoff, H.; Kabat, P.; Lansigan, F.; Lawford, R.; Naiman, R. (as Members of the Framing Committee of the GWSP) (2004): Humans Transforming the Global Water System. Eos, Transactions, American Geophysical Union, 85: 48(30 November 2004).
- [2] 夏军. 全球变化与水文学科新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7. (XIA Jun. Hydrological Science Towards Global Change: Progress and Challenge[J]. Resources Science, 2002, 24(3): 1-7. (in Chinese))
- [3] 李善同, 许新宜. 南水北调与中国发展[M]. 北京: 经济科学出版社, 2004. (LI Shantong, XU Xinyi. Enforcement of Southerr to North Water Development of China[M]. Beijing: Economy Science Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 夏军, 王纲胜, 谈戈, 等. 水文非线性系统与分布式时变增益模型[J]. 中国科学 D 辑地球科学, 2004, 34(11): 1062-1071. (XIA Jun, WANG Gang-sheng, TAN Ge, et al. Development of Distributed Time variant Gain Model for Nonlinear Hydrological Systems[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2004, 34(11): 1062-1071. (in Chinese))
- [5] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (JIA Yang-wen, WANG Hao, NI Guang-heng, et al. Theory and Practice of Distributed Basin Hydrological Model[M]. Beijing: Chinese Water Resources and Hydrology Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 熊生华, 郭生练. 分布式流域水文模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (XIONG Sheng-hua, GUO Sheng-lian. Distributed Basin Hydrological Model[M]. Beijing: Chinese Water Resources and Hydrology Press, 2004. (in Chinese))

(下转第 95 页)

- [3] 王西琴,刘昌明,杨志峰.生态及环境需水量研究进展与前瞻[J].水科学进展,2002,13(4):507-514.(WANG Xi qin, LIU Chang ming, YANG Zhi feng. Research Advance in Ecological Water Demand and Environmental Water Demand[J]. Advances in Water Science,2002,13(4):507-514.(in Chinese))
- [4] 杨爱民,唐克旺,王浩,等.生态用水的基本理论与计算方法[J].水利学报,2004,(12):39-45.(YANG Ai min, TANG Ke wang, WANG Hao, et al. Theory and Calculation Method of Ecological Water Use[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004,(12):39-45.(in Chinese))
- [5] 占车生,夏军,丰华丽,等.河流生态系统合理生态用水比例的确定[J].中山大学学报:自然科学版,2005,44(2):121-124.(ZHAN Che sheng, XIA Jun, FENG Hua li, et al. Determination of the Reasonable Proportion of Ecological Water Used of River Ecological System[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2005,44(2):121-124.(in Chinese))
- [6] 严登华,王浩,王芳,等.我国生态需水研究体系及关键研究课题初探[J].水利学报,2007,38(3):267-273.(YAN Deng hua, WANG Hao, WANG Fang, et al. Frame of Research Work on Ecological Water Demand and Key Topics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007,38(3):267-273.(in Chinese))
- [7] 马广慧,夏自强,郭利丹,等.黄河干流不同断面生态径流量计算[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(5):496-500.(MA Guang hui, XIA Zi qiang, GUO Li dan, et al. Ecological Runoff of Different Cross sections of the Mainstream of Yellow River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007,35(5):496-500.(in Chinese))
- [8] 常福宣,陈进,黄薇.河道生态流量计算方法综述及在汉江上游的应用研究[J].南水北调与水利科技,2008,6(1):11-13.(CHANG Fu xuan, CHEN Jin, HUANG Wei. Environment Water Demand in the Upper Stream of Hanjiang River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008,6(1):11-13.(in Chinese))
- [9] 苏飞,陈敏建,董增川.河流生态需水观点及计算方法评述[J].浙江水利科技,2009,(4):1-3.(SU Fei, CHEN Min jian, DONG Zeng chuan. Comment on Viewpoints and Computation Methods for Ecological Water Requirements in a River[J]. Zhejiang Hydraulics, 2009,(4):1-3.(in Chinese))
- [10] Boner M C, Furland L P. Seasonal Treatment and Variable Effluent Quality Based on Assimilative Capacity[J]. Journal Water Pollution Control Field, 1982,54:1408-1416.
- [11] Tennant D L. Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources[A]. In: Orshorn J F, Allman C H. (eds). Proceedings of Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs II[C]. Bethesda: American Fisheries Society, 1976:359-373.
- [12] 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流系统生态环境需水量计算[J].地理学报,2000,55(4):496-500.(LI Li juan, ZHENG Hong xing. Environmental and Ecological Water Consumption of River Systems in Haihe Luanhe Basins[J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(4):496-500.(in Chinese))
- [13] Mosely M P. The effect of Changing Discharge on Channel Morphology and Instream Uses and in a Braided River, Ohau River[J]. New Zealand. Water Resources Researches, 1982,18:800-812.
- [14] Lamb B L. Quantifying Instream Flows: Matching Policy and Technology[M]. Covelo: Island Press, 1989:23-29.
- [15] Bovee K D. A Guide to Stream Habitat Analyses Using the Instream Flow Incremental Methodology[J]. Instream Flow Information Paper No. 12, FWS/OBS-82/26, Cooperative Instream Flow Group, US Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, 1982.
- [16] Giesecke J, Jorde K. Ansätze Zur Optimierung Von Mindestabflurbregelungen in Ausleitungsstrecken[J]. Wasserwirtschaft, 1997,87:232-237.
- [17] 郝伏勤,黄锦辉,李群.黄河干流生态环境需水研究[M].郑州:黄河水利出版社,2005:122-123.(HAO Fu qin, HUANG Jin hui, LI Qun. Research on Yellow River Ecological Water Demand[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005:122-123.(in Chinese))
- [18] 王西琴,刘昌明,张远.黄淮海平原河道基本环境需水研究[J].地理研究,2003,22(2):169-176.(WANG Xi qin, LIU Chang ming, ZHANG Yuan. Study of the Basic Environmental Water Requirement of the Rivers in Huang Hua Hai Plain[J]. Geographical Research, 2003,22(2):169-176.(in Chinese))
- [19] 王西琴.河流生态需水理论、方法与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2007:170-174.(WANG Xi qin. River Environmental Water Requirements[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007:170-174.(in Chinese))

(上接第7页)

- [7] 刘昌明,郑红星,王中根.流域水循环分布式模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2006.(LIU Chang ming, ZHENG Hong xing, WANG Zhong gen. Basin Water Cycle Distributed Simulation[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006.(in Chinese))
- [8] 夏军.水文非线性系统理论与方法[M].武汉:武汉大学出版社,2002.(XIA Jun. Hydrological Nonlinear Theories and Approaches[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002.(in Chinese))
- [9] XIA Jun, 2010, Screening for Climate Change Adaptation: Water Problem, Impact and Challenges in China, International Journal on Hydropower & Dams, 17(2), 78-81.
- [10] J. Bogardi & Z W. Kundzewicz, 2002, Risk, Reliability, Uncertainty, and Robustness of Water Resources System, International Hydrology Series, Cambridge University Press.
- [11] 夏军.水问题的复杂性与不确定性研究与进展[M].北京:中国水利水电出版社,2004.(XIA Jun. Complexity and Uncertainty of Water Problem: Progress and Research[M]. Beijing: Chinese Water Resources and Hydrology Press, 2004.(in Chinese))