



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.001

曾思栋, 夏军, 黄会勇, 等. 分布式水资源配置模型 DTVGM-WEAR 的开发及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 01-06. ZENG Si dong, XIA Jun, HUANG Hui yong, et al. Development and application of distributed water resources allocation model: DTVGM-WEAR[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 01-06. (in Chinese)

分布式水资源配置模型 DTVGM-WEAR 的开发及应用

曾思栋^{1,2}, 夏军², 黄会勇¹, 李波¹, 杜鸿³

(1. 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
3. 中南民族大学 化学与材料科学学院, 武汉 430074)

摘要: 构建了一个系统描述自然及人类活动作用下水循环路径的分布式水资源系统配置模型。通过将水文及其伴随过程与水资源配置过程进行“在线”或“离线”形式的耦合, 基于抽象概化规则框架的规则集合进行水资源配置模拟, 形成较为通用的水文-水质-水生态-水资源系统配置模型。该模型能够较好地反映不同配置规则下的水资源分配过程, 实现水量、水质、水生态要求的水资源综合配置。实例证明, 模型能够根据区域供用水结构特征及用水需求灵活地调整配置规则, 为水资源系统合理配置提供较为可靠的模拟结果。

关键词: 水资源系统; 水资源配置; DTVGM-WEAR; 综合配置; 规则框架

中图分类号: P33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0001-06

Development and application of distributed water resources allocation model: DTVGM-WEAR

ZENG Si dong^{1,2}, XIA Jun², HUANG Hui yong¹, LI Bo¹, DU Hong³

(1. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. South Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this study, a distributed water resources allocation model was developed, systematically representing the natural artificial water cycle. The model coupled the hydrological and accompanying processes with the water allocation process through "online" or "offline", and then the water allocation was simulated with rule ensembles based on abstract rule framework, which formed a common water resources allocation model considering the hydrological, water quality, ecological and water resources. The model could be well used under different rules, which realized integrated water resources allocation considering the water quantities, qualities and ecological requirement. Then the model was used for a case study. It was demonstrated that the model could provide reasonable results for water resources allocation by adjusting rules according to the water supply and demand.

Key words: water resources system; water resources allocation; DTVGM-WEAR; integrated allocation; rule framework

水资源的时空分布影响和改变着人类社会的生存和发展, 解决水资源时空分布与经济社会发展需

求矛盾、实现水资源在不同区域和用水户的有效公平分配、达到水资源可持续利用目的的关键手段是

收稿日期: 2016-03-30 修回日期: 2016-04-21 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1343.031.html>
基金项目: 长江勘测规划设计研究院自主创新项目(CX2013Z12; CX2013Z11)

Fund: CISPDR Independent Innovation Project(CX2013Z12; CX2013Z11)

作者简介: 曾思栋(1987-), 男, 江西抚州人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: sidong.zeng@qq.com

通讯作者: 夏军(1954-), 男, 湖北孝感人, 中国科学院院士, 主要从事陆地水文学及水资源方面研究。E-mail: xiaj@igsrr.ac.cn

水资源合理配置^[1]。水资源合理配置是指在流域或特定的区域范围内,遵循有效性、公平性和可持续性的原则,利用各种工程与非工程措施,按照市场经济的规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、保障有效供给、维护和改善生态环境质量等手段和措施,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行的调配^[2]。可见水资源合理配置应综合考虑流域或区域内水文特征,统筹生活、生产、生态用水包括“量”与“质”的需求,充分利用各类供水设施,通过合理的运行管理措施,有效保障各类用水产生实质效益,水资源合理配置中必须充分考虑水文-水质-水生态-水资源多过程的水系统耦合。

解决水资源合理配置的基本手段是构建水资源配置模型,很多研究将水资源配置模型应用到国内外各流域或区域水资源研究、水资源规划等领域^[3-7]。这些模型根据建立及求解方法,一般分为模拟模型、优化模型和优化-模拟结合模型^[8,9]。由于水资源系统多过程耦合的复杂性,优化模型在描述水资源系统方面往往存在不足,且易出现“维数灾”问题。模拟模型通过合理的调配规则可精准地描述水资源系统的详细过程,更加灵活且适用性更强。目前优化-模拟结合模型的基础大多是优化方法,在描述实际水资源系统及其配置过程时较模拟模型略有不足,且受理论方法及硬件平台的限制。可见水资源配置模拟模型仍然是水资源配置研究特别是生产实践中应用最为广泛的方法。国外在水资源系统模拟的框架下,开发了一系列具有代表性的模型软件,如 MIKE BASIN^[10]、WEAP^[11]、Waterware^[12]、HEC-ResSim^[13]等,而国内还比较缺乏相对成熟且通用的水资源配置模型软件^[14]。此外,目前水资源配置主要还是从水量上考虑水资源的分配问题,综合考虑水文、水质、水生态、水资源多过程耦合的仍然较少,仍需进一步研究。

针对目前水资源配置模型存在的问题以及国内水资源配置模型的发展需求,本研究开发了一个较为通用的水资源系统配置模型 DTVGM-WEAR (Water Evaluation, Allocation and Regulation)。该模型基于水文-水质-水生态-水资源多过程的水系统耦合,对水资源系统的水循环路径进行跟踪,在基于抽象概化配置规则框架的规则集合下对水循环路径进行控制,实现水资源的合理配置。

1 模型框架

DTVGM-WEAR 模型的核心模块包括水循环及其伴随的生物地球化学过程的模拟及评估 (Evalu-

tion)、水资源配置 (Allocation) 及其调度 (Regulation)。

水循环及其伴随过程的模拟。根据流域数字高程模型 (DEM) 划分不同的计算单元 (子流域或网格),进一步考虑流域下垫面的空间变异性 (土地利用及土壤类型的不同) 将计算单元划分为多个亚计算单元 (次网格或水文响应单元)。在每个亚单元内进行能量传输包括冠层辐射传输、土壤热运动、能量平衡的模拟以及水分交换包括植被截留、蒸散发、产流、土壤水、地下水的模拟。同时考虑水循环伴随的生物地球化学过程的模拟包括植被 (作物) 的生长过程、碳/氮/磷循环的流域面源产污过程。流域内横向水分传输包括在计算单元内的进行坡面汇流计算以及在计算单元间通过构建自然水系网络图进行河道汇流演算。

水资源配置及其调度过程的模拟。根据自然水系网络图、水源工程及用水户分布,水源工程与用水户之间的供用水关系,通过自然水系及概化渠系将水源工程、用水户进行供、排连接,形成自然-人工相互作用与反馈的水资源配置系统网络图 (Water Allocation Network),其实质是一个有向无环图。在流域计算单元及水资源系统网络的统一编码基础上,将水循环及其伴随过程的模拟结果作为水资源系统配置的边界条件,进行水资源配置过程的综合“在线”模拟,即在每个水文单元上进行水文过程及其伴随过程的模拟,在进入河网系统后,基于一定配置规则集合,各供水工程对用水户进行水资源分配,同时用水户退水又对自然水循环发生反馈。在考虑简化计算时,模型可以进行水资源配置的“离线”模拟,即将实测或还原的径流资料作为边界条件直接输入水资源配置系统网络对应节点进行水资源配置。DTVGM-WEAR 模型水系统水流路径见图 1。

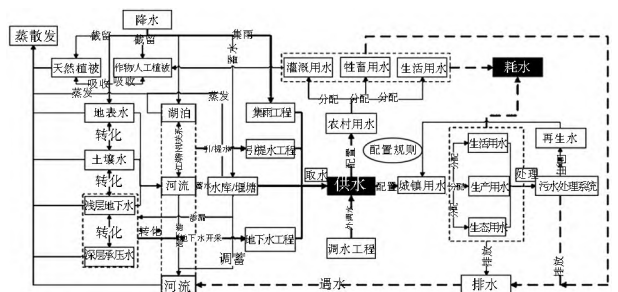


图 1 DTVGM-WEAR 模型水系统水流路径

Fig. 1 The water system route of DTVGM-WEAR

2 模型理论方法

2.1 自然水循环及其伴随过程

DTVGM-WEAR 模型的水文及其伴随过程模

拟主要基于分布式时变增益模型 DT VGM (Distributed Time Variant Gain Model), 并在此基础上耦合流域产污模型及河道水质水生态模型进行水量-水质-水生态过程的联合模拟。

2.1.1 水文过程模拟

DTVGM 将水文非线性系统理论与分布式模型框架有机的结合起来, 有明确的物理意义, 能够反映流域下垫面土壤类型及土地利用/植被覆盖变化等的复杂空间变异性。同时模型简单易用, 对于不同流域、水文资料信息不完整或不确定性干扰下的水文模拟具有较强的适应能力, 已经在很多流域得到验证, 如黑河流域^[15]、黄河流域^[16]、淮河流域^[17]、滦河流域^[18]等。

DTVGM 产流模型是一个水量平衡模型, 通过迭代求解各水文要素包括蒸散发、土壤含水量、地下含水量、地表径流、壤中流与地下径流。汇流过程通过数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 得到每个网格的流向、水流累积值, 提取河网水系, 将河网建立成有向无环图的网络, 在每个子流域内用运动波计算坡面汇流, 通过网络连接采用运动波或马斯京根法进行河网汇流计算。DTVGM 模型原理见文献[15]。

2.1.2 水质及水生态过程模拟

目前水资源配置研究大多是针对水量进行, 较少考虑不同用水户对水质的要求, 然而满足水质要求的水资源才能对相应的用水户产生效益。考虑水质要求的水资源配置的基础是流域及河道内水质的模拟, 包括流域面源污染、人类活动点源排放、河道内污染物迁移转化模拟。本模型中流域生态过程以 DTVGM-CASACNP^[18] 对碳、氮、磷循环的模拟为基础, 进一步耦合通用流域污染负荷模型 GWLF 关于各源汇项的计算进行流域非点源估算, 由于篇幅限制具体原理见文献[19]。河道内水质水生态过程以 DTVGM-QUAL2E 为基础^[20], 根据计算步长选择零维或一维污染物迁移转化模型进行模拟, 河流中水生态过程主要反映在物质循环包括各物质的生物、物理、化学过程, 如藻类生长、生物降解等。对于缺乏数据情况下, 可采用集中反映河流生态要求的生态流量对生态过程要求进行概化处理, 实现水量-水质-水生态过程的耦合。

2.2 水资源配置过程

2.2.1 水资源配置系统网络图

水资源配置系统网络图是水资源配置及水流控制的基本路径。模型中以自然河网水系为基础, 连

接水源工程与各类型用水户及其取退水, 构建水资源配置系统网络图, 其基本要素是节点和有向路径。

节点包括河流节点、水源节点、用水户节点等。河流节点包括径流节点、入流节点、汇水节点、分水节点、出流节点; 水源节点按照水源划分为地表水(水库、湖泊)、地下水(浅层地下水和深层地下水)、外调水、其他水源如再生水、海水淡化等; 用水户节点根据生活、生产、生态不同用水类型设置。有向路径包括自然河网水系和人工渠道或管道, 包括取水渠道、退水渠道、调水渠道等, 通过有向路径将各节点进行有序连接, 形成有向无环图。

2.2.2 水资源配置的边界条件

(1) 来水边界。

来水边界是水资源配置的基础来源, 是水资源配置成果准确与否的基本保障。来水边界根据水源划分, 包括地表水来水边界(河网入流边界、区间来流边界)、地下水可开采量边界、外调水量边界等, 其中对于地下水开采、外调水来水量还受到实际开采能力以及外调水输水规模的限制。根据实际情况, 在配置过程中来水量可通过水循环过程的模拟进行“在线”实时计算, 也可以采用实测或还原的径流资料进行“离线”输入。对于考虑水质取用水需求时, 需进行水质的“在线”模拟或“离线”输入的水质边界条件。

(2) 需水预测。

需水预测是各用水户对水资源需求的预测。需水预测根据用水户分类口径及其层次结构进行分类预测及汇总, 包括生活、生产、生态用水。生活用水包括城镇生活和农村生活用水; 生产用水包括第一产业、第二产业和第三产业用水; 生态用水包括河道内和河道外生态用水。需水预测可通过“离线”输入, 也可以通过“在线”计算, 对于农业灌溉采用水循环过程降水、蒸散发及土壤水的“在线”模拟确定灌溉需水量理论上更加准确可靠。

2.2.3 水资源配置规则框架

水资源配置规则是水资源综合配置模拟及水流路径的控制器, 也是实现水资源合理配置的关键要素。本研究的水资源配置规则包括基本规则和运行规则, 基本规则主要是供用水的优先级顺序, 运行规则包括各类水源供水具体算法、生态或防洪控制断面的流量规则以及限制性规则。

(1) 供、取、用、排水优先级。

供用水优先级包括水源供水优先级、用水户取用水优先级。一个水源可能供给多个用水户, 根据实际情况该水源对用水户的供给存在优先顺序。一

个用水户可能有多个水源,该用水户在现状或规划工程下根据自身对水资源包括量和质的需求,结合经济合理性对不同水源的取水同样有优先顺序。用水户内存在多个用水部门,该用水户在取水后对各用水部门的分配也存在优先次序。用水户在用水后消耗一部分水量,将废水或污水排入自然水体中,排水过程根据实际工程情况有排水优先次序。水资源开发利用的供水、取水、用水、排水的这些过程的优先顺序在实际配置过程中往往需要依据水源来水情况实时变化进行水资源实时调度。为简化模型本研究采用静态优先级,即在模型初始化时即设定水资源利用过程的优先次序。

(2) 供水规则。

水库调度在满足防洪及生态下泄要求下,水库可供水量由时段初蓄水量及来水量决定,根据一定比例和优先级顺序依次给各用水户供水,时段末水库蓄水量依据水量平衡原理由初始库容、来水量以及从水库取水量及下泄水量决定。对于水库群的联合调度,遵循自上游到下游的水力联系以及用水户取水优先级的配置顺序。此外,对于离线水库需要根据其实际供水动态过程及来水条件进行充库规则设置。

引提水工程指从河道、湖泊等地表水体分别采用自流引水和扬水站的取水工程。引提水工程供水量根据取水口的径流量、引提水工程的能力以及用户需水要求进行计算。地下水源工程指利用地下水的水井工程,包括浅层地下水和深层承压水取水,根据水井所在计算单元地下水含水量、水井抽水规模以及用户需水要求进行供水量计算。

(3) 流量控制规则。

由于河道内生态环境保护的需求及河道防洪要求等,往往需要保证河道内某一断面流量满足最小生态流量需求以及不高于最大流量要求。对此,模型设置流量控制规则,根据河道内实际断面流量要求对断面进行流量控制。

(4) 限制性规则。

用水户从水源工程取水或者水源工程向用水户供水过程中,由于用水户需求过程变化或者水源工程来水过程变化,水量或水质有时无法满足水源工程自身调节要求或用水户用水需求,就会产生限制性因素。基于此,模型根据实际水源和用水节点情况,设置三种限制类型,包括水位限制、流量限制以及水质限制。当存在某一限制或多个限制因素时,需根据水源节点或用水节点的需求进行供水或取水限制。

3 模型开发

DTVGM-WEAR 模型包括水文、水质、水生态、水资源多个过程的模拟,模块多且数据量大。为提高模型在生产实践中的通用性和可扩展性,本模型采用插件式架构、面向对象模块化开发。DTVGM-WEAR 模型软件集成 GIS 平台、数据库,采用 C# 语言通过对水系统各要素进行面向对象的抽象,对实现各水系统要素及过程进行模块化开发,同时通过插件式的架构以插件的修改及解析实现模型功能的控制与扩展。具有如下优点:(1)采用面向对象模块化开发,程序结构清晰易维护;(2)采用插件式架构,在不修改宿主程序情况下通过插件解析实现功能拓展,提高了模型的扩展性;(3)集成 GIS 平台易于实现模型的交互以及模型的预/后处理及成果可视化等。DTVGM-WEAR 模型系统架构图如下:

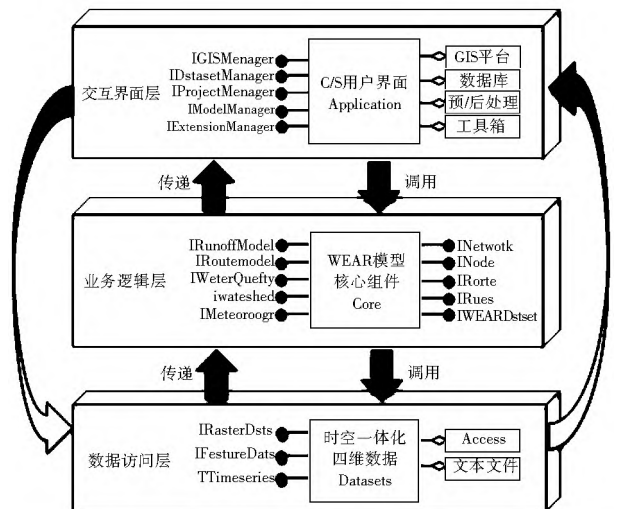


图 2 DT VGM-WEAR 模型开发软件架构

Fig. 2 The framework of the software development for DT VGM-WEAR

4 应用实例

本研究选取宜昌市主城区及东风渠灌区为研究区域。宜昌市位于中亚带和北亚热带的过渡地带,属亚热带季风性气候,年平均降水量 1 188.9 mm,水资源丰富但时空分布不均。宜昌市主城区水源地包括长江、黄柏河东支、官庄水库、楠木溪水库和善溪冲水库,为提高城市的供水安全保障程度,对宜昌市主城区及涉及影响的东风渠灌区范围进行水资源配置模拟。

根据 DT VGM-WEAR 水资源配置模型构建思路和方法,构建宜昌市主城区及东风渠灌区水资源系统配置模型,考虑不同配置方案进行水资源供需

平衡模拟情景分析。本研究将研究区域划分为 45 个计算单元,每个计算单元根据实际情况分为农村生活、农村生产、城镇生活、城镇生产和城镇生态五类用水户。参与水资源配置的供水工程包括大中型水库 14 座,小型水库 196 座、堰塘 39 943 处、引提水工程 94 处,计算中将小型水库、堰塘合并处理,大中型水库进行调节或反调节计算。根据区域内水系及供水工程与用水户的供用水关系构建水资源配置系统网络图(图 3),采用 1956 年-2000 年长系列数据进行水文过程及水质过程的模拟,为水资源配置实现“在线”边界模拟,对于水生态过程采用集中反映河流生态要求的生态流量进行“离线”的边界输入,对 2030 水平年不同配置规则方案下进行水资源供需平衡分析。

模拟计算包括 5 种方案:方案 1,考虑高生态要求,东风渠引水优先满足主城区供水;方案 2 考虑中生态要求,东风渠引水优先满足主城区供水;方案 3 在方案 2 基础上考虑供水水源水质的影响;方案 4 东风渠引水优先满足东风渠灌区用水;方案 5 在方案 4 的基础上新建长江提水工程。由于篇幅限制,模型计算主要结果见表 1 所示,在东风渠引水不同的优先配置目标及河流生态要求下,由于现有供水工程的供水能力不足或水源水质条件不达标,2030 水平年下将存在不同程度的工程性或水质性缺水,其中在东风渠引水优先供给东风渠灌区时,宜昌市主城区将缺水 3 1 亿 m³。通过方案 5 计算结果可知在新建长江提水工程且满足用水水质要求下可解决该区域的供水安全保障问题。

表 1 2030 水平年不同方案下宜昌市主城区水资源供需平衡成果

Tab. 1 The water balance in Yichang main urban region under different scenarios in 2030

/万 m³

方案	供需平衡			供水结构			
	需水量	供水量	缺水量	蓄水工程	东风渠引水	提水	合计
方案 1	68 361	50 042	18 319	6 546	19 627	23 869	50 042
方案 2	68 361	53 558	14 803	7 260	22 429	23 869	53 558
方案 3	68 361	48 170	20 191	7 260	19 538	21 372	48 170
方案 4	68 361	37 794	30 567	7 260	4 535	25 999	37 794
方案 5	68 361	68 361	0	7 260	4 535	56 566	68 361

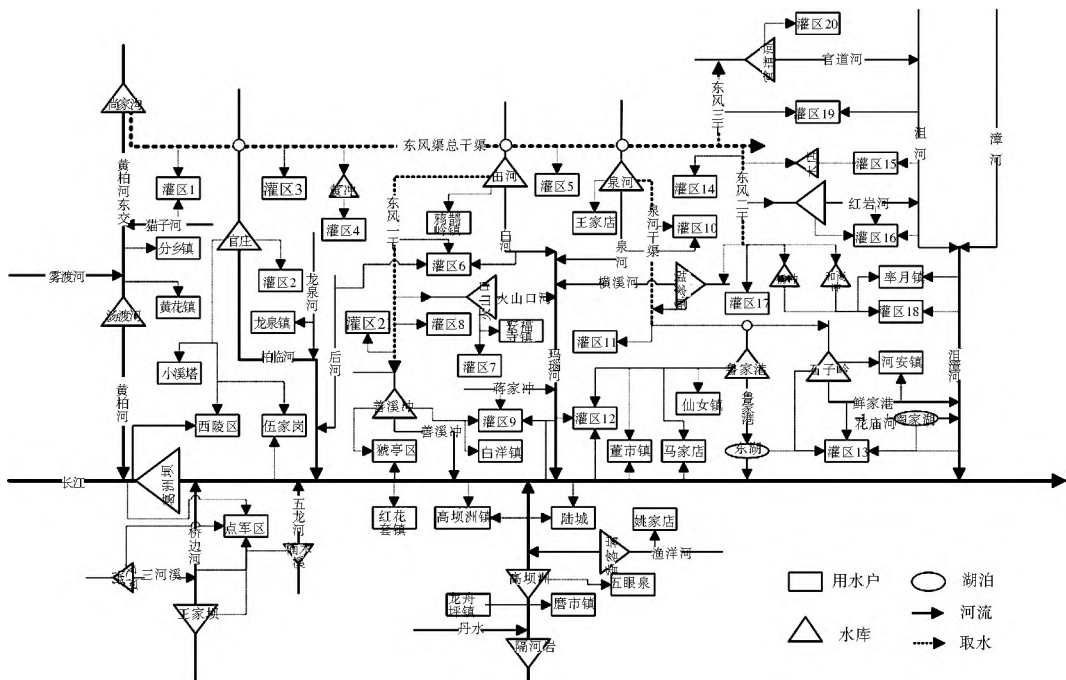


图 3 宜昌市主城区及东风渠灌区水资源配置系统网络图

Fig. 3 Water allocation network of Yichang main urban region and Dongfengqu Irrigation Area

5 结语

本文在充分考虑流域或区域内水文-水质-水生

态-水资源多过程的水系统耦合上,构建了一个分布式水资源系统配置模型。模型通过将水文及其伴随过程与水资源配置过程进行“在线”或“离线”形式的

耦合,基于一定的规则集合进行水资源配置模拟,能够较好地反映不同配置规则下的水资源分配过程,实现水量、水质、水生态要求的水资源综合配置。

为提高模型的适用性,今后工作包括:(1)考虑市场经济及行政手段的调控,对水资源配置规则框架进行进一步完善;(2)建立水资源合理配置的后评价体系,提高水资源配置模拟的可靠性。(3)本研究实例中由于数据缺乏,对全过程的耦合验证不够,仍然需要再进一步开展更加广泛和深入的模型验证及应用研究。

参考文献(References):

- [1] 王浩,游进军.水资源合理配置研究历程与进展[J].水利学报,2008,39(10):1168-1175.(WANG Hao, YOU Jir jun. Advancements and development course of research on water resources deployment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1168-1175. (in Chinese))
- [2] 水利部水利水电规划设计总局.全国水资源综合规划技术大纲[R].北京:水利部水利水电规划设计总局,2002.(China Renewable Energy Engineering Institute. Technology Outline of National Integrated Water Resources Planning[R]. Beijing: China Renewable Energy Engineering Institute, 2002. (in Chinese))
- [3] 甘泓,尹明万,等.河北省邯郸市水资源规划管理决策支持系统应用研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,1998.(GAN Hong, YIN Ming wan, et al. Research on water resources planning, management and decision support system in Handan, Hebei[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 1998. (in Chinese))
- [4] 赵建世,王忠静,翁文斌.水资源复杂适应配置系统的理论与模型[J].地理学报,2002,57(6):639-647.(ZHAO Jian shi, WANG Zhong jing, WONG Wen bin. Theory and model of water resources complex adaptive allocation system[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(6): 639-647. (in Chinese))
- [5] 游进军,甘泓,王浩,等.基于规则的水资源系统模拟[J].水利学报,2005,36(9):1043-1049,1056.(YOU Jir jun, GAN Hong, WANG Hao, et al. Simulation of water resources system based on rules[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1043-1049, 1056. (in Chinese))
- [6] 胡铁松,曾祥,郭旭宁,等.并联供水水库解析调度规则研究 I: 两阶段模型[J].水利学报,2014,45(8):883-891.(HU Tie song, ZENG Xiang, GUO Xu ning, et al. Analytical operating rule for parallel multi reservoir system I. Two period model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(8): 883-891. (in Chinese))
- [7] 杜思思,游进军,陆垂裕,等.基于水资源配置情景的地下水演变模拟研究[J].南水北调与水利科技,2011,9(2):64-68.(DU Si si, YOU Jir jun, LU Chui yu, et al. Simulation study of groundwater evolution based on water resources allocation scenarios: a case study in Haihe River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(2): 64-68. (in Chinese))
- [8] 雷晓辉,王旭,蒋云钟,等.通用水资源调配模型 WROOM I: 理论[J].水利学报,2012,43(2):225-231.(LEI Xiaohui, WANG Xu, JIANG Yun zhong, et al. Water resources optimal operation Model WROOM I. Theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(2): 225-231. (in Chinese))
- [9] LAXMI Narayan Sethi, SUDHINDRA N Panda, MANOJ K Nayak. Optimal crop planning and water resources allocation in a coastal groundwater basin, Orissa, India[J]. Agricultural Water Management, 2006, 83(3): 209-220.
- [10] MANOJ K. Jha, ASHIM Das Gupta. Application of Mike Basin for Water Management Strategies in a Watershed[J]. Water International, 2003, 28(1): 27-35.
- [11] AJAY Gajanan Bhawe, ASHOK Mishra, NARENDRA Singh Raghuvanshi. A Combined Bottom up and Top down Approach for Assessment of Climate Change Adaptation Options[J]. Journal of Hydrology, 2014, 51: 150-161.
- [12] Fedra K. GIS and simulation models for Water Resources Management: A case study of the Kelantan River, Malaysia[J]. GIS Development, 2002, 6(8): 39-43.
- [13] Klipsch J D. HEC-ResSim: Reservoir System Simulation, Users' Manual[M]. Davis: Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Centre, 2003.
- [14] 徐斌,何发智,刘攀,等.基于组件模型的地表水资源配置系统设计[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):525-529.(XU Bin, HE Fa zhi, LIU Pan, et al. Design of component based surface water resources allocation system[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 525-529. (in Chinese))
- [15] 夏军,王纲胜,吕爱锋,等.分布式时变增益流域水循环模拟[J].地理学报,2003,58(5):789-796.(XIA Jun, WANG Gang sheng, LYU Ai feng, et al. A Research on Distributed Time Variant Gain Modeling[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 789-796. (in Chinese))
- [16] 叶爱中,夏军,王刚胜.黄河流域时变增益分布式水文模型(II)-模型的校验与应用[J].武汉大学学报(工学版),2006,39(4):29-32.(YE Ai zhong, XIA Jun, WANG Gang sheng. A distributed time varying gain model applied to Yellow River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(4): 29-32. (in Chinese))
- [17] ZHAN Cheng sheng, SONG Xiaomeng, XIA Jun, et al. An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters[J]. Environmental Modelling & Software, 2013(41): 39-52.
- [18] 曾思栋,夏军,杜鸿,等.气候变化、土地利用/覆被变化及CO₂浓度升高对滦河流域径流的影响[J].水科学进展,2014,25(1):10-20.(ZENG Si dong, XIA Jun, DU Hong, et al. Effects of climate change, land use and cover change and CO₂ enrichment on runoff: A case study of the Luanhe River basin[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 10-20. (in Chinese))
- [19] HAITH D A, MANDEL R, WU R S. GWLF(Generalized Watershed Loading Functions): Version 2. 0. User's Manual[K]. Ithaca, N. Y.: Cornell University, Department of Agricultural and Biological Engineering, 1992.
- [20] XIA Jun, ZHAI Xiaoyan, ZENG Si dong, et al. Systematic solutions and modeling on eco water and its allocation applied to urban river restoration: case study in Beijing, China[J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2014(14): 39-54.