

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0126

马素英,孙梅英,白振江,等.河北省南水北调中线受水区水资源统一调配方案研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):66-76. MA S Y, SUN M Y, BAI Z J, et al. Study on the unified allocation of water resources in the water receiving area of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project in Hebei[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 66-76. (in Chinese)

河北省南水北调中线受水区水资源统一调配方案研究

马素英¹, 孙梅英¹, 白振江², 张爽¹

(1. 河北省水利科学研究院, 石家庄 050051; 2. 南水北调中线干线工程建设管理局 河北分局, 石家庄 050035)

摘要: 针对南水北调中线受水区外调水及当地地表水来水过程的不均匀性及来水频率的不确定性、供水系统的复杂性(多水源、多工程、多用户)等特点,以河北省南水北调受水区为研究对象,以多目标群决策理论和大系统分解协调理论为指导,以优化与模拟为主要技术,构建了基于 MIKE BASIN 的 1+7 受水区水资源优化调配模型,制定了基于不同年份、不同保证率、不同节水水平、不同用水户需求条件的受水区水资源优化调配方案。在 2020 年供水区来水频率组合(引江水 $P=50\%$ 、当地地表水 $P=50\%$)条件下,对基本节水及高效节水的优化调配方案优化效果进行了分析,以期在充分利用水资源、满足需水要求的情况下,寻求多水源与多用户之间最优的配水方案,实现区域综合效益最大化,促进区域经济可持续发展。

关键词: 南水北调受水区; 水资源优化调配; 多水源; 多用户; 多目标

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0066-11

Study on the unified allocation of water resources in the water receiving area of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project in Hebei

MA Suying¹, SUN Meiyang¹, BAI Zhenjiang², ZHANG Shuang¹

(1. Hebei Institute of Water Resources, Shijiazhuang 050051, China; 2. Hebei Branch of Construction and Administration Bureau of South to North Water Diversion Middle Route Project, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: Targeting the inhomogeneity of inflow process and uncertainty of inflow frequency of transferred water and local surface water in the water receiving area of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project as well as the complexity of the water supply system (multi source, multi project, multi user), we selected a water receiving area of the South to North Water Transfer Project in Hebei province as the research object. With the guidance of multi target group decision theory and large system decomposition coordination theory, we constructed a 1+7 optimal allocation model of water resources based on MIKE BASIN, and formulated an optimal allocation scheme for water resources in the water receiving area based on different years, different guarantee rates, different water saving levels, and different water users' demand conditions. Under the condition of inflow frequency combination in 2020 (transferred water $P=50\%$ and local surface water $P=50\%$), we analyzed the effects of the optimal allocation schemes for basic water saving and efficient water saving, with a view to finding the optimal water distribution scheme between multiple water sources and multiple users under the premise of utilizing water resources fully and satisfying the water demand. Exploring the optimal water distribution scheme between multiple water sources and multiple users will maximize the comprehensive benefits of the region and promote regional sustainable development.

Key words: South to North Water Transfer Area; optimal allocation of water resources; multiple water sources; multiple users; multiple objectives

收稿日期: 2018-05-18 修回日期: 2018-08-21 网络出版时间: 2018-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180827.1543.006.html>

作者简介: 马素英(1982-),女,山西晋城人,高级工程师,主要从事水资源管理及节约用水方面研究。E-mail: 18931136506@163.com

南水北调工程是迄今为止世界上最大的水利工程,是我国水资源优化配置的重大战略性基础设施^[1],其目的是用长江的水资源供给京、津、冀、豫及沿线城市工业及城镇生活用水,使其将本地水还给农业,同时有效改善当地生态环境。2014年12月12日中线一期工程干线全线通水,分配给河北30.4亿 m^3 (多年平均)。受配套工程建设进度等因素影响,截止2018年5月1日河北省累计利用引江水18.8亿 m^3 ,一定程度上缓解了河北省南水北调中线受水区水资源短缺状况。到2020年,引江水利用量将达到30.4亿 m^3 。不过,供水区不同年份来水过程在年内、年际分配上存在不均匀性,而受水区当地地表水不同年份也存在不均匀性,用水户需水量随着经济的发展和水平的提高也存在不确定性,同时受水区水源系统十分复杂,既有引江水、引黄水、当地地表水、地下水及非常规水等多水源系统,也有引江供水工程、当地地表水供水工程、地下水供水工程及污水处理回用工程等供水工程系统,还有生产、生活、环境等多用户的复杂用水系统,由此受水区形成了一个多水源、多工程、多用户的复杂水资源系统^[2]。在此情况下,受水区必须进行水资源统一的优化配置与合理调度,利用多种供水工程把多种水源调配给多端用水户,保证这个复杂多端的水资源系统正常、有序、高效运行,才能实现“引江水高效利用、地表水调节利用、地下水控制利用”的高效用水目标。

目前我国针对南水北调受水区水资源调配的研究逐渐由单水源单用户调配向多水源、多用户、多目标联合优化调配问题发展。闫宝伟等^[3]运用Copula方法理论对水源区与各受水区的丰枯遭遇进行了研究,康玲等^[4]运用贝叶斯网络理论对南水北调中线工程水源区和4个受水区的降水丰枯遭遇进行了深入的分析研究,梁钟元等^[5]分析了气候变化对南水北调中线受水区径流量影响,上述研究为南水北调工程水资源调度研究奠定了基础;廖卫红等^[6]研制了南水北调中线受水区简易地下水模型,程双虎等^[7]利用FE-FLOW模型软件建立了河北省南水北调受水区地下水模型,为科学、准确评价南水北调中线受水区地下水资源量奠定了基础;刘昌明等^[8]对南水北调中线主要城市节水潜力进行了分析,并提出了节水对策。朱永楠等^[9]构建了能够全面反映区域用水结构和全社会全过程用水效率的评价指标与评价标准,对南水北调受水区节水潜力进行了分析。上述研究为科学预测南水北调受水区各行业需水量奠定了基础;耿六成等^[10]开展了河北省南水北调受水区水资源合理配置研究,提出了科学的运行管理规则。吴泽宇等^[11]建

立了多水源大系统水资源配置模拟模型,开展了中线工程总干渠至各省市的分水量配置方法研究,实现了单一目标的多水源配置。张平等^[12]建立了南水北调中线受水区的水资源优化配置模型,王海云等^[13]采用AHP-LP法建立了河北省受水区水资源优化配置模型,进行了省级层面行业间的多目标、多水源优化配置。上述研究已充分考虑到水资源优化配置的多优化目标问题,同时也尝试了多水源在多用水户间的联合调配,但研究层面均停留在省(市)级,无法结合省(市)级所辖的供水目标实际供水条件,做到真正意义上的水资源优化配置。本文充分考虑了供水及节水的工程、政策、经济条件可行性,围绕河北省南水北调受水区多水源联合条件下各供水目标、各行业间的水资源统一调配问题进行了深入探索。

1 基于 MIKE BASIN 的水资源优化调配模型(WOMMB)

1.1 建模方法

本次研究采用优化技术与模拟技术有机耦合的方法进行水资源优化调配。选择MIKE BASIN软件模拟河北省南水北调中线受水区水资源系统。MIKE BASIN是由丹麦水利研究院(DHI)开发的^[14]、完全与ArcGIS整合的一个用于综合性水资源管理和规划的决策支持工具,是一个可在流域(区域)尺度基础上,解决水量的优化配置、用水户连接、水库调度规则及水质模拟等问题的综合性水资源模拟软件。数据信息和模拟结果通过MIKE BASIN在ArcGIS的平台直观展示,并可进行空间和时间尺度上的分析。

本研究引入多目标优化算法,在MIKE BASIN水资源数学模型基础上,通过模型调度/运行规则、内置非线性优化算法及基于软件计算引擎进行的二次开发建立优化模型,把水资源系统模拟规则概化为该算法能识别的决策变量,然后把该算法与模拟模型进行嵌套调用,实现模拟与优化的耦合。模拟与优化技术耦合的方法详见图1。

1.2 建模思路

南水北调受水区水资源优化调配系统是一个规模庞大、结构复杂、功能综合、影响因素众多的大系统^[15],采用传统单一整体模型求解往往难以克服系统复杂、维数(阶数)众多、求解困难等缺陷^[16]。故采用分解协调等大系统优化技术,建立河北省南水北调中线受水区水资源优化调配模型,将复杂的大系统分解为若干子系统,以解决优化配置中更宏观

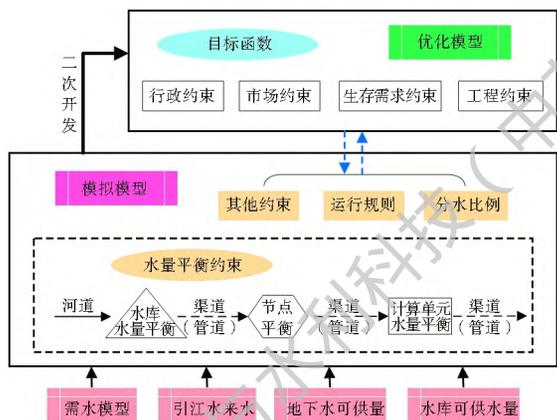


图 1 模拟与优化技术耦合的方法

Fig. 1 The method of coupling simulation and optimization

的问题,使得建模及求解过程较容易。模型包含两个级别,第一级(省级总模型),以市级计算单元为基础,进行整个受水区的优化调配;第二级(市级子模型),以县级计算单元为基础,进行各个子模型的优化调配。模型运行时,在给定的供、需水条件下,先进行第二级(市级子模型)的优化模拟,并将局部优化结果 $g(X)$ 反馈给第一级(省级总模型)。总模型根据各子模型的反馈结果,计算总系统的优化结果

$f(M)$; 同时将优化结果在各子模型重新进行分配,并再次进行各子模型的优化模拟,得到一组新的局部优化结果和总系统优化结果,如此反复进行,直到求得全局优化结果。建模思路见图 2。

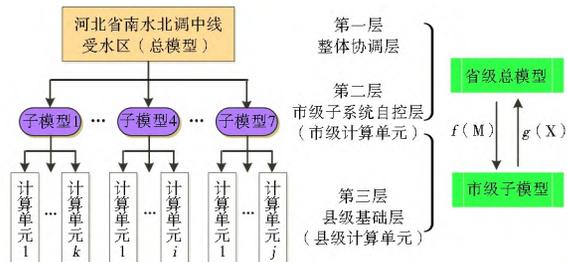


图 2 河北省受水区水资源优化调配模型结构

Fig. 2 Structure of the optimal allocation model of water resources in water receiving area of Hebei Province

1.3 系统概化

根据建模思路,将受水区水资源系统设计为三层谱系结构:第一层为河北省南水北调中线受水区整体协调层,第二层为市级子系统自控层(亦为市级计算单元),第三层为县级基础层(亦为县级计算单元,即基本计算单元)。详见图 3。

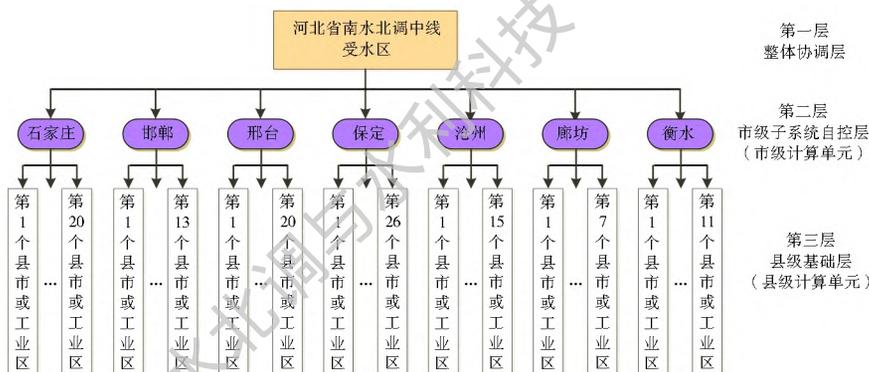


图 3 水资源优化调配系统结构

Fig. 3 Structure of the optimal allocation system of water resources

受水区水资源系统构成复杂,其组成要素主要包括点、线和面等信息。为将水资源系统中的各类元素有机联系起来,实现对水资源系统网络的描述,故在模型中将用水户、水源、河流节点、分水口等概化为点,并将其分为两类用水节点和供水节点;将河流、渠道等概化为线;将河网、受水区概化为面,即计算单元。经概化后:系统节点 704 个,其中用水节点 329 个(生活用水节点 110 个,工业用水节点 111 个,环境用水节点 108 个);供水节点 375 个(引江水供水节点 112 个,地表水供水节点 38 个,地下水供水节点 112 个,再生水供水节点 112 个,海水淡化水供水节点 1 个)。计算单元共 119 个,其中市级计算单元 7 个,县级计算单元 112 个。详见表 1。

表 1 水资源系统概化对象统计

Tab. 1 Statistical table of generalizability of water resources system

网络对象	特性类	属性表
河流节点		DH_I_M bRiverNodes
电站		DH_I_M bHydr oPowerN odes
用水户	点 (DH_I_NodeFeatures)	DH_I_M bWaterU sersNodes
水库		DH_I_M bReservoirNodes
分水口门		DH_I_M bWaterDiv irthsNodes
河流		
渠道	线 (DH_I_BranchFeatures)	DH_I_M bReaches
管道		
集雨区 (受水区)	面 (DH_I_Cathment)	DH_I_CMparameterSets

1.4 模型建立

1.4.1 目标函数

本次研究确定水资源优化调配的总目标为,在满足社会环境、生态环境和技术经济等方面限制条件下,追求经济效益、社会效益和环境效益的权衡最优^[17]。依据《河北省水资源综合规划》、《河北省实行最严格水资源管理制度实施方案》、《河北省南水

北调中线配套工程规划》、《河北省水中长期供求规划》等成果中涉及到的优水优用原则、水资源优化配置原则、南水北调中线工程建设目标、地下水保护政策等,在明确受水区供水水源及用水户的供水、用水优先级顺序基础上(详见 1.4.3 运行规则),结合河北省实际工程条件及现状用水习惯,最终确定了优化目标的优先级。模型目标函数设置详见表 2。

表 2 模型目标函数设置

Tab. 2 Settings of the objective function of the model

目标函数	水源供水量最大				环境缺水量最小	地下水开采量最小	经济净效益最大	废污水回用量最大
	污水回用水	海水淡化水	引江水	当地地表水				
优先级	1	1	1	2	3	1	1	1

社会效益目标是一个不易度量的目标,仅以水资源对社会影响的角度考虑,可以认为缺水量大小或缺水程度直接影响到社会的发展和安定,是社会效益的一个侧面反映,在需水一定的条件下,供水利用量最大即缺水量最小。河北省属水资源严重短缺、地下水长期超采地区,生态环境需水长期被挤

占,而南水北调工程的主要目的就是解决我国北方的上述问题。故本次研究确定社会效益目标为供水利用量最大及地下水开采量最小,其中供水利用量最大目标包括中水回用水利用量最大、海水淡化水利用量最大、引江水利用量最大及当地地表水利用量最大。目标函数如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{子模型 Max } F_{1,c-i} = \sum_j Y_{RA,c-i}^j, \text{ 总模型 Max } F_{1,m} = \sum_j Y_{RA,m}^j \quad \forall c-i, j \\ \text{子模型 Max } F_{2,c-i} = \sum_j Y_{DW,c-i}^j, \text{ 总模型 Max } F_{2,m} = \sum_j Y_{DW,m}^j \quad \forall c-i, j \\ \text{子模型 Max } F_{3,c-i} = \sum_j Y_{DA,c-i}^j, \text{ 总模型 Max } F_{3,m} = \sum_j Y_{DA,m}^j \quad \forall c-i, j \\ \text{子模型 Max } F_{4,c-i} = \sum_j Y_{SA,c-i}^j, \text{ 总模型 Max } F_{4,m} = \sum_j Y_{SA,m}^j \quad \forall c-i, j \\ \text{子模型 Min } F_{5,c-i} = \sum_j Y_{CA,c-i}^j, \text{ 总模型 Min } F_{5,m} = \sum_j Y_{CA,m}^j \quad \forall c-i, j \end{array} \right.$$

式中: $\text{Max } F_{1,c-i}$ 至 $\text{Max } F_{4,c-i}$ 为求市级子模型中第 1 至 4 个目标函数最大值,其中 F_1 至 F_4 表示第 1 至 4 个目标函数; $c-i$ 表示第 i 个市级计算单元下属县级计算单元集合; $Y_{RA,c-i}^j$ 为第 i 个市级子模型中第 j 个县级计算单元的中水回用水利用量, Y_{RA} 表示中水回用水利用量, j 表示第 j 个县级计算单元; $\text{Max } F_{1,m}$ 为求省级子模型中第 1 个目标函数最大值, m 表示市级计算单元集合; $\text{Min } F_{5,c-i}$ 为求市级子模型中第 5 个目标函数最小值; Y_{DW} 、 Y_{DA} 、 Y_{SA} 、 Y_{CA} 分别为海水淡化水供水利用量、引江水供水利用量、当地地表水供水利用量、地下水供水利用量。

经济效益目标用一定运行规则条件下供水带来的直接净效益最大表示,为最大区域经济效益与最低供水成本之差。

$$\begin{aligned} \text{子模型 Max } F_{6,c-i} &= \sum_j Y_{DA,c-i}^j (U_{DA,c-i}^j - C_{DA,c-i}^j) + \sum_j Y_{SA,c-i}^j (U_{SA,c-i}^j - C_{SA,c-i}^j) \quad \forall c-i, j \\ \text{总模型 Max } F_{6,m} &= \sum_j Y_{DA,m}^j (U_{DA,m}^j - C_{DA,m}^j) + \sum_j Y_{SA,m}^j (U_{SA,m}^j - C_{SA,m}^j) \quad \forall c-i, j \end{aligned}$$

式中: U_{DA} 、 C_{DA} 、 U_{SA} 、 C_{SA} 分别为单位引江水供水量

效益系数、单位引江水供水量成本系数、单位地表水供水量效益系数、单位地表水供水量成本系数。

对于环境效益目标,考虑河北省实际,依据《河北省水中长期供求规划》,全省近期“生态环境需水量”只能是通过“以供定需”方式基本达到“最小生态环境需水量”(详见 1.4.2 约束条件),而对地下水的有效保护则通过取多年平均浅层地下水可开采量(在经济合理,技术可行且利用后不会造成地下水位持续下降、水质恶化、海水入侵、地面沉降等环境地质问题和不对生态环境造成不良影响的情况下,允许从地下含水层中取出的最大水量)作为地下水开采量上限值加以体现(详见 1.4.2 约束条件)。故本次充分考虑优水优用配置原则,优先配置处理达标的再生水作为生态环境用水水源,将废污水回用量最大和环境缺水量最小作为环境目标。

废污水回用量最大:

$$\text{子模型 Max } F_{7,c-i} = \sum_j Y_{RA,c-i}^j, \text{ 总模型 Max } F_{7,m} = \sum_j Y_{RA,m}^j \quad \forall c-i, j$$

环境缺水量最小:

子模型 $\text{Min}F_{8,c-i} = \sum_j L_{ME,c-i}^j$, 总模型 $\text{Min}F_{8,m} = \sum_j L_{ME,m}^j \quad \forall c-i, j$
 式中: L_{ME} 为环境缺水量。

1.4.2 约束条件

为使水资源开发利用与生态环境保护相协

调, 使水资源利用促进经济社会发展, 谋求水资源净效益最大^[18], 在进行优化模拟计算过程中要考虑多方面的约束条件, 其中主要包括行政约束、市场约束、生存需求约束、工程约束等。具体表达式详见表 3。

表 3 约束条件表达式汇总

Tab. 3 Summary of constraint condition expressions

名称	适用模型	表达式
行政约束	总模型	$\sum_j (Y_{DC,m}^j + Y_{DL,m}^j + Y_{DE,m}^j) = \sum_j Y_{DM,m}^j \leq \sum_j A_{T,m}^j$ $0.95 \times D_{C,m}^j \leq Y_{DC,m}^j + Y_{SC,m}^j + Y_{GC,m}^j \quad 0.90 \times D_{L,m}^j \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j$
	子模型	$0.95 D_{C,c-i}^j \leq Y_{DC,c-i}^j + Y_{SC,c-i}^j + Y_{GC,c-i}^j \quad 0.90 D_{L,c-i}^j \leq Y_{DL,c-i}^j + Y_{SL,c-i}^j + Y_{RL,c-i}^j + Y_{SDI,c-i}^j$
市场约束	子模型	$Y_{DC,c-i}^j + Y_{SC,c-i}^j \leq D_{C,c-i}^j \left(\frac{V_{NC,c-i}^j}{V_{PC,c-i}^j} \right) - E_{C,c-i}^j$ $Y_{DL,c-i}^j + Y_{SL,c-i}^j + Y_{RL,c-i}^j + Y_{SDI,c-i}^j \leq D_{L,c-i}^j \left(\frac{V_{NL,c-i}^j}{V_{PL,c-i}^j} \right) - E_{L,c-i}^j$
	子模型	基本节水方案(方案一): $Y_{DC,c-i}^j + Y_{SC,c-i}^j + Y_{GC,c-i}^j \geq D_{C,c-i}^j$ 高效节水方案(方案二): $Y_{DC,c-i}^j + Y_{SC,c-i}^j + Y_{GC,c-i}^j \geq P_{C,c-i}^j \times Q_{C,c-i}^j$
生活基本需水约束	总模型	基本节水方案(方案一): $Y_{DC,m}^j + Y_{SC,m}^j + Y_{GC,m}^j \geq D_{C,m}^j$ 高效节水方案(方案二): $Y_{DC,m}^j + Y_{SC,m}^j + Y_{GC,m}^j \geq P_{C,m}^j \times Q_{C,m}^j$
	子模型	方案一 $D_{P,c-i}^j \leq Y_{DL,c-i}^j + Y_{SL,c-i}^j + Y_{GL,c-i}^j + Y_{RL,c-i}^j + Y_{SDI,c-i}^j \leq D_{L,c-i}^j$ $\frac{P_{C,c-i}^j \times M_{W,c-i}^j}{Q_{L,c-i}^j} \leq Y_{DL,c-i}^j + Y_{SL,c-i}^j + Y_{GL,c-i}^j + Y_{RL,c-i}^j + Y_{SDI,c-i}^j \leq D_{L,c-i}^j$
生存条件约束	子模型	方案二 $D_{P,c-i}^j \leq Y_{DL,c-i}^j + Y_{SL,c-i}^j + Y_{GL,c-i}^j + Y_{RL,c-i}^j + Y_{SDI,c-i}^j \leq Q_{L,c-i}^j \times I_{AV,c-i}^j$ $\frac{P_{C,c-i}^j \times M_{W,c-i}^j}{Q_{L,c-i}^j} \leq Y_{DL,c-i}^j + Y_{SL,c-i}^j + Y_{GL,c-i}^j + Y_{RL,c-i}^j + Y_{SDI,c-i}^j \leq Q_{L,c-i}^j \times I_{AV,c-i}^j$
	总模型	方案一 $D_{P,m}^j \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{GL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j \leq D_{L,m}^j$ $\frac{P_{C,m}^j \times M_{W,m}^j}{Q_{L,m}^j} \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{GL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j \leq D_{L,m}^j$
社会净效益约束	子模型	方案二 $D_{P,m}^j \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{GL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j \leq Q_{L,m}^j \times I_{AV,m}^j$ $\frac{P_{C,m}^j \times M_{W,m}^j}{Q_{L,m}^j} \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{GL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j \leq Q_{L,m}^j \times I_{AV,m}^j$
	总模型	方案二 $D_{P,m}^j \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{GL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j \leq Q_{L,m}^j \times I_{AV,m}^j$ $\frac{P_{C,m}^j \times M_{W,m}^j}{Q_{L,m}^j} \leq Y_{DL,m}^j + Y_{SL,m}^j + Y_{GL,m}^j + Y_{RL,m}^j + Y_{SDI,m}^j \leq Q_{L,m}^j \times I_{AV,m}^j$
生态补水约束	子模型	$Y_{DE,c-i}^j + Y_{SE,c-i}^j + Y_{RE,c-i}^j + Y_{SDE,c-i}^j \geq D_{NE,c-i}^j$
	总模型	$Y_{DE,m}^j + Y_{SE,m}^j + Y_{RE,m}^j + Y_{SDE,m}^j \geq D_{NE,m}^j$

行政约束主要包括引江水分水量约束、供水目标供水保证程度约束。因中线工程分配给河北省的分水指标是一定的, 故引江水利用量必须在此分水指标范围内, 而对于受水区的 112 个供水目标, 虽然亦有分水指标控制, 但是考虑到河北省水资源的统一优化管理调度, 允许调配给受水区内任意供水目标。至于供水目标保证程度约束, 则根据用水户(供水目标)的性质不同来确定: 对于生活用水户来说供水保证程度需达到 95% 以上; 工业用水户供水保证程度需达到 90% 以上, 最低需水量取需水量的 90%; 对于一些特殊地区(特区、工业园区)如雄安新区等, 则依据正式出台的相关政策文件、规划及方案等, 设置其不同供水目标的需水保证程度约束条件。

市场约束可解释为由于水价的变化引起的用水

户需水量变化^[19], 而形成的用水户用水量约束。对于生活用水户来说, 其提出的需水量为其在现状水价条件下需水量, 当水价发生变化时, 用水户对水的需求量则随之发生变化, 变为规划水价条件下的需水量, 而经优化调配后的生活用水户利用水量需小于此值。同样, 对于工业用水户来说, 经优化调配后的工业用水户利用水量需小于规划水价条件下的需水量。

生存条件约束是从满足人类基本需求角度, 要求水资源开发利用首先必须要解决人类生存问题, 发展带来的社会净效益必须满足人类最低生活标准的需要^[20], 主要包括生活基本需水约束、社会净效益约束、生态补水约束等。生活基本需水约束按两种情景考虑: 一是各用水户根据自身需水要求上报的需水量, 即基本节水条件下(方案一)需水量; 二是本次研

究参照《河北省实行最严格水资源管理制度实施方案》中“三条红线”用水指标,确定的各用水户需水量,即高效节水条件下(方案二)需水量。社会净效益约束必须满足人类最低生活标准的需要^[20],本次以河北省最低工资标准代替,同时采用万元工业增加值取水量折算为工业最小需水量。另外考虑到电力行业是关系国计民生和社会发展的基础产业,其用水需优先满足,故亦将充分考虑节能减排措施条件的电力需水量作为工业需水量的下限值。工业需水量上限值,同样按两种情景考虑,同生活基本需水约束,不再赘述。生态补水约束即环境用水量需满足环境最低需水量,本次以现状环境需水量代替。

工程约束主要包括水库库容约束、河/渠(管)道流量约束、地表水供水约束、地下水供水约束、中水回用水及海水淡化水约束,其中后四个约束包括供水量及供水能力两方面约束。

1.4.3 运行规则

水资源配置模拟模型的核心是其在优化模型基础上确定的配置规则和运行规则,配置与运行规则直接影响模拟模型对实际情况的反映程度。在河北省南水北调受水区水资源系统模拟运算中,各供水节点与用水节点均需要设置具体的运行规则及优先顺序,故本次运行规则分为两类:供水节点(供水水源)运行规则和用水节点(用水户)运行规则。

供水节点(供水水源)运行规则。参考《河北省水资源综合规划》、《河北省实行最严格水资源管理制度实施方案》及《河北省南水北调中线配套工程规划》,河北省南水北调受水区各水源使用的优先次序是:非常规水源(淡化海水、中水回用水)优先配置和使用;外调水优先于水库供水首先直供,有余水时存蓄于地下水或地表水库;当地地表径流利用优先于水库供水,水库供水除结合汛前泄水供水外,主要在汛后配合外调水用于城市、工业等;浅层地下水配合外调水和地表水参与调蓄、利用。

用水节点(用水户)运行规则。规则可分为两种:按用水类别可将用水节点分为生活用水户、工业用水户、环境用水户,其优先级顺序为生活、工业、环境;按用水区域分的用水节点(用水户)运行规则,是在按用水类别分的用水节点(用水户)运行规则的基础上设定的主要用水计算单元间供水量调配过程中的运行规则。按用水区域可将用水节点分为地下水资源严重匮乏地区用水单元(缺水率 $> 50\%$)、严重缺水用水单元($30 < \text{缺水率} \leq 50\%$)、一般缺水用水单元($0 < \text{缺水率} \leq 30\%$)。涉及到计算单元间供水量调配的水源主要是引江水、地表水,优先接受引江

水调配水量的用水单元,依次为:地下水资源严重匮乏地区用水单元、严重缺水用水单元、一般缺水用水单元;按用水节点重要程度可将用水节点分为一类目标(国家级特区、设区市、重点工业区)、二类目标(县级市)、三类目标(县城)。优先接受引江水和地表水调配水量的用水单元依次为一类目标(设区市、重点工业区)、二类目标(县级市)、三类目标(县城)。

2 模型求解

模型求解时,首先在供水预测与需水预测的基础上,充分考虑基于决策者、用水户及水市场而制定的约束条件,确定水资源优化调配模型的供水方案集合和需水方案集合,形成水资源供需方案组合。其次,根据既定的目标函数及运行规则,采用顺序决策法对确定的若干级优化目标进行求解,高优先权的目标比低优先权的目标优先得到满足,每一个最优化的目标均遵从模型约束限制,以确保其他具有更高优先级的目标不受到负面影响。同一优先级的多个优化目标,则采用遗传算法进行求解。通过优化和模拟模型的相互反馈和不断调整,得出不同水资源供需方案组合下的推荐调配方案集合。最后,将推荐方案提交至意见征询系统,根据决策者、用水户及水市场对推荐方案的反应,调整调配模型的约束条件、运行规则及目标函数,重新运行优化调配模型系统,得出推荐方案。这一过程一直进行到意见征询系统无信息反馈,决策者满意为止。最终的推荐方案即决策方案。可以说本模型的求解过程是一个“滚动修正,不断寻优”的过程。受水区水资源优化调配模型求解思路详见图4。

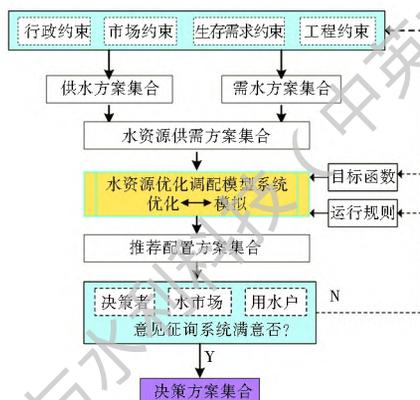


图4 受水区水资源优化调配模型求解思路

Fig. 4 Solution of optimal allocation model of water resources in water receiving area

3 结果分析

本优化调配模型可根据设定的水平年、节水条

件(基本节水方案、高效节水方案)、配置方式等要素,或任意用水户、任意决策者、任意水源、任意供水工程水资源影响因素的不同,生成无数组优化调配方案,本次以 2020 年供受水区来水频率组合 50% + 50% 调配方案(供受水区来水频率均为 $P=50%$ 、不同节水水平条件下 2020 年受水区优化调配方案,下同)为例,对计算结果进行分析。

3.1 2020 年供受水区来水频率组合 50% + 50% 基本节水方案调配结果

引江水利用情况分析。由图 5 和表 4 可知,在 2020 年供受水区来水频率均为 $P=50%$ 、城市各业用水均为基本节水条件下,经过优化调配,受水区利用引江水量总计 29.8 亿 m^3 ,利用率 100%。其中邯郸 3.6 亿 m^3 、廊坊 2.3 亿 m^3 、石家庄 8.1 亿 m^3 、保定 5.4 亿 m^3 、邢台 3.4 亿 m^3 、沧州 4.2 亿 m^3 、衡水 2.8 亿 m^3 。

减少地下水开采情况分析。经过优化调配,与无引江水相比减少地下水开采量 26.6 亿 m^3 ,其中邯郸

2.6 亿 m^3 、廊坊 2.3 亿 m^3 、石家庄 7.1 亿 m^3 、保定 5.0 亿 m^3 、邢台 3.0 亿 m^3 、沧州 4.2 亿 m^3 、衡水 2.4 亿 m^3 。

水资源供需平衡分析。全省南水北调受水区总供水量为 44.3 亿 m^3 、需水量 49.9 亿 m^3 ,经过优化调配,受水区不同供水水源得到充分利用,置换出(剩余)水量 3.2 亿 m^3 , (其中地下水 2.1 亿 m^3 、非常规水 1.1 亿 m^3 ,可用于环境与农业),缺水 8.8 亿 m^3 ,缺水率 17.6%。从行业来看,生活用水优先全部得到满足,工业需水量及环境需水量分别缺水 8.2 亿 m^3 和缺水 0.6 亿 m^3 ,缺水率分别为 29.2% 和 13.6%。从地区来看,邯郸缺水 0.4 亿 m^3 ,缺水率 5.9%;廊坊缺水 0.2 亿 m^3 ,缺水率 7.4%;石家庄缺水 0.1 亿 m^3 ,缺水率 0.9%;保定缺水 0.1 亿 m^3 ,缺水率 1.4%;邢台市缺水 0.5 亿 m^3 ,缺水率 8.6%;沧州市缺水 6.4 亿 m^3 ,缺水率 53.8%;衡水市缺水 1.1 亿 m^3 ,缺水率 25.6%。可见 2020 年保持现状节水力度,不足以支撑受水区的水资源供需平衡。

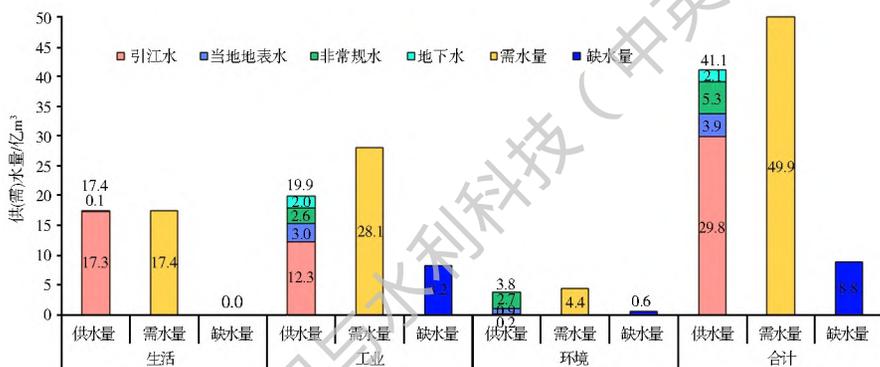


图 5 2020 年供受水区来水频率组合 50% + 50% 基本节水方案调配结果

Fig. 5 Allocation results of the basic water saving scheme with an inflow frequency combination of transferred water $P=50%$ and local surface water $P=50%$ in 2020

3.2 2020 年供受水区来水频率组合 50% + 50% 高效节水方案调配结果

引江水利用情况分析。由图 6 和表 5 可知,在 2020 年供受水区来水频率均为 $P=50%$ 、城市各业用

水均为高效节水条件下,经过优化调配,受水区利用引江水量总计 29.8 亿 m^3 ,利用率 100%。其中邯郸 2.7 亿 m^3 、廊坊 2.2 亿 m^3 、石家庄 7.1 亿 m^3 、保定 5.3 亿 m^3 、邢台 3.3 亿 m^3 、沧州 6.9 亿 m^3 、衡水 2.3 亿 m^3 。

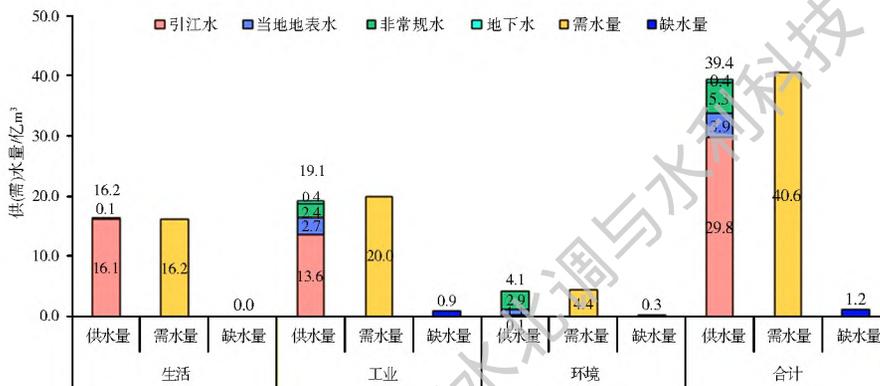


图 6 2020 年供受水区来水频率组合 50% + 50% 高效节水方案调配结果

Fig. 6 Allocation results of the efficient water saving scheme with an inflow frequency combination of transferred water $P=50%$ and local surface water $P=50%$ in 2020

表4 2020年供水区来水频率组合50%+50%基本节水方案调配结果

Tab.4 Allocation results of the basic water saving scheme with an inflow frequency combination of transferred water $P=50\%$ and local surface water $P=50\%$ in 2020

行政分区		邯郸市	廊坊市	石家庄市	保定市	邢台市	沧州市	衡水市	合计		
可供 水量 /亿 m ³	引江水	3.6	2.3	8.1	5.4	3.4	4.2	2.8	29.8		
	当地水	当地地表水	1.6	0.0	1.3	0.8	0.2	0.0	0.0	3.9	
		地下水	1.3	0.0	1.5	0.7	0.7	0.0	0.0	4.2	
		非常规水	1.0	0.3	1.2	0.6	1.3	1.3	0.7	6.4	
		小计	3.9	0.3	4.0	2.1	2.2	1.3	0.7	14.5	
当地水与引江水合计		7.5	2.6	12.1	7.5	5.6	5.5	3.5	44.3		
生活、工业、环境需水量/亿 m ³		6.8	2.7	11.1	7.3	5.8	11.9	4.3	49.9		
水资源 调配 方案	生活需水量/亿 m ³		2.5	1.1	4.7	3.6	2.1	2.5	0.8	17.4	
	供水 量 /亿 m ³	引江水	2.5	1.1	4.7	3.6	2.1	2.5	0.8	17.3	
		当地地表水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		地下水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	
		小计	2.5	1.1	4.7	3.6	2.2	2.5	0.8	17.4	
	缺水率/亿 m ³		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	缺水率(%)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	工业需水量/亿 m ³		3.5	1.3	5.0	3.1	3.1	8.8	3.3	28.1	
	工业 /亿 m ³	引江水	1.1	1.0	3.4	1.8	1.3	1.7	2.0	12.3	
		供水 量	当地地表水	1.6	0.0	0.5	0.7	0.2	0.0	0.0	3.0
			非常规水	0.3	0.1	0.4	0.2	0.5	0.9	0.2	2.6
			地下水	0.3	0.0	0.7	0.4	0.6	0.0	0.0	2.0
		小计	3.3	1.1	5.0	3.1	2.6	2.6	2.2	19.9	
	缺水率/亿 m ³		0.2	0.2	0.0	0.0	0.5	6.2	1.1	8.2	
	缺水率(%)		5.7	15.4	0.0	0.0	16.1	70.5	33.3	29.2	
环境需水量/亿 m ³		0.8	0.3	1.4	0.6	0.5	0.6	0.2	4.4		
环境 /亿 m ³	供水 量	非常规水	0.6	0.1	0.5	0.4	0.5	0.4	0.2	2.7	
		引江水	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	
		当地地表水	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.9	
	小计	0.6	0.3	1.3	0.5	0.5	0.4	0.2	3.8		
缺水率/亿 m ³		0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.2	0.0	0.6		
缺水率(%)		25.0	0.0	7.1	16.7	0.0	33.3	0.0	13.6		
供水 利用量 /亿 m ³	引江水	3.6	2.3	8.1	5.4	3.4	4.2	2.8	29.8		
	当地地表水	1.6	0.0	1.3	0.8	0.2	0.0	0.0	3.9		
	非常规水	0.9	0.2	0.9	0.6	1.0	1.3	0.4	5.3		
	地下水	0.3	0.0	0.7	0.4	0.7	0.0	0.0	2.1		
	合计	6.4	2.6	11.0	7.2	5.3	5.5	3.2	41.1		
调配 结果 /亿 m ³	当地地表水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	置换 (剩余) 水量	地下水	1.0	0.0	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0	2.1	
		引江水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		非常规水	0.1	0.1	0.3	0.0	0.3	0.0	0.3	1.1	
	小计	1.1	0.1	1.1	0.3	0.3	0.0	0.3	3.2		
	置换 当地 水	当地地表水	0.0	0.0	0.6	0.0	0.3	0.0	0.0	0.9	
		地下水	1.0	0.0	2.4	0.2	0.0	0.0	0.0	3.6	
小计	1.1	0.0	3.0	0.2	0.3	0.0	0.0	4.5			
减少地下水开采量/亿 m ³ (与无引江水比)		2.6	2.3	7.1	5.0	3.0	4.2	2.4	26.6		
缺水率/亿 m ³		0.4	0.2	0.1	0.1	0.5	6.4	1.1	8.8		
缺水率(%)		5.9	7.4	0.9	1.4	8.6	53.8	25.6	17.6		

表 5 2020 年供水区来水频率组合 50% + 50% 高效节水方案调配结果
 Tab. 5 Allocation results of the efficient water saving scheme with an inflow frequency combination of transferred water $P=50\%$ and local surface water $P=50\%$ in 2020

行政分区		邯郸市	廊坊市	石家庄市	保定市	邢台市	沧州市	衡水市	合计		
可供 水量 / 亿 m^3	引江水	2.7	2.2	7.1	5.3	3.3	6.9	2.3	29.8		
	当地水	当地地表水	1.6	0.0	1.3	0.8	0.2	0.0	0.0	3.9	
		地下水	1.3	0.0	1.5	0.7	0.7	0.0	0.0	4.2	
		非常规水	1.0	0.3	1.2	0.6	1.3	1.3	0.7	6.4	
		小计	3.9	0.3	4.0	2.1	2.2	1.3	0.7	14.5	
当地水与引江水合计		6.6	2.5	11.1	7.4	5.5	8.2	3.0	44.3		
生活、工业、环境需水量/ 亿 m^3		5.2	2.5	9.5	7.0	4.6	9.2	2.6	40.6		
水资源 调配 方案	生活需水量/ 亿 m^3		2.2	1.0	4.5	3.6	1.9	2.3	0.7	16.2	
	供水量 / 亿 m^3	引江水	2.1	1.0	4.5	3.6	1.9	2.3	0.7	16.1	
		当地地表水	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	
		地下水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		小计	2.2	1.0	4.5	3.6	1.9	2.3	0.7	16.2	
	缺水率/ 亿 m^3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	缺水率(%)		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	工业需水量/ 亿 m^3		2.2	1.2	3.6	2.8	2.2	6.3	1.7	20.0	
	工业 / 亿 m^3	引江水	0.6	1.1	2.6	1.7	1.4	4.6	1.6	13.6	
		供水量	当地地表水	1.3	0.0	0.5	0.7	0.2	0.0	0.0	2.7
			非常规水	0.3	0.1	0.5	0.2	0.4	0.8	0.1	2.4
			地下水	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.4
		小计	2.2	1.2	3.6	2.8	2.2	5.4	1.7	19.1	
缺水率/ 亿 m^3		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.9		
缺水率(%)		0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	13.8	0.0	4.4		
环境 / 亿 m^3	环境需水量/ 亿 m^3		0.8	0.3	1.4	0.6	0.5	0.6	0.2	4.4	
	供水量	非常规水	0.6	0.2	0.6	0.4	0.5	0.4	0.2	2.9	
		引江水	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	
		当地地表水	0.2	0.0	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	1.1	
		小计	0.8	0.3	1.4	0.5	0.5	0.4	0.2	4.1	
	缺水率/ 亿 m^3		0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.3	
缺水率(%)		0.0	0.0	0.2	9.8	10.6	28.2	0.0	7.7		
供水 利用量 / 亿 m^3	引江水	2.7	2.2	7.1	5.3	3.3	6.9	2.3	29.8		
	当地地表水	1.6	0.0	1.3	0.8	0.2	0.0	0.0	3.9		
	非常规水	0.9	0.3	1.1	0.6	0.9	1.2	0.5	5.3		
	地下水	0	0	0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.4		
	合计	5.2	2.5	9.5	6.9	4.6	8.1	2.6	39.4		
调配 结果 / 亿 m^3	当地地表水		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
	置换 (剩余) 水量	地下水	1.3	0.0	1.5	0.5	0.5	0.0	0.0	3.8	
		引江水	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
		非常规水	0.1	0.0	0.1	0.0	0.4	0.1	0.4	1.1	
	小计	1.4	0.0	1.6	0.5	0.9	0.1	0.4	4.9		
	置换 当地 水	当地地表水	0.1	0.0	0.6	0.0	0.3	0.0	0.0	1.0	
		地下水	1.3	0.0	2.6	0.3	0.3	0.0	0.0	4.5	
		小计	1.4	0.0	3.2	0.3	0.6	0.0	0.0	5.5	
	减少地下水开采量/ 亿 m^3 (与无引江水比)		1.3	2.3	5.3	4.7	2.5	6.9	1.9	24.9	
	缺水率/ 亿 m^3		0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	1.1	0.0	1.2	
缺水率(%)		0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	12.0	0.0	3.0		

减少地下水开采情况分析。经过优化调配,减少地下水开采量 24.9 亿 m^3 , 其中邯郸 1.3 亿 m^3 、廊坊 2.3 亿 m^3 、石家庄 5.3 亿 m^3 、保定 4.7 亿 m^3 、邢台 2.5 亿 m^3 、沧州 6.9 亿 m^3 、衡水 1.9 亿 m^3 。

水资源供需平衡分析。全省南水北调受水区总供水量为 44.3 亿 m^3 、需水量 40.6 亿 m^3 , 经过优化调配, 受水区不同供水水源得到充分利用, 置换出(剩余)水量 4.9 亿 m^3 (其中地下水 3.8 亿 m^3 、非常规水 1.1 亿 m^3 , 可用于环境与农业), 缺水 1.2 亿 m^3 , 缺水率 3.0%。从行业来看, 生活用水优先全部得到满足, 工业需水量及环境需水量分别缺水 0.9 亿 m^3 和缺水 0.3 亿 m^3 , 缺水率分别为 4.4% 和 7.7%。从地区来看, 其中邯郸、廊坊、石家庄、邢台、衡水不缺水; 保定缺水 0.1 亿 m^3 , 缺水率 1.4%; 沧州市缺水 1.1 亿 m^3 , 缺水率 12.0%。可见通过加大节水力度, 大部分设区市可以实现受水区的水资源供需平衡。

4 结语

本文以河北省南水北调中线受水区为研究区, 以基础数据需求分析为起点, 以多目标群决策理论为基础, 以优化与模拟为主要技术, 构建了基于 MIKE BASIN 的水资源优化调配模型(WOMMB), 解决了多水源、多区域、多层次、多用户水资源统一调配问题, 模型可根据规划年不同保证率、不同节水水平条件、不同用水户需求, 提出综合效益最优的受水区水资源优化调配方案, 为验证调配方案的合理性及调配效果的显著性, 以 2020 年供受水区来水频率组合 50%+50% 调配方案为例, 采用受水区总缺水量与缺水率、生活及工业供水保证率、置换(剩余)地表水与地下水量、引江水利用量与利用率、减少地下水开采量等指标, 对优化调配前后结果进行对比。结果显示, 5 项指标均较优化调配前效果显著, 各项指标达到最优, 调配结果合理。

(1) 缺水量及缺水率经优化调配后, 基本节水条件下受水区缺水量减少了 0.4 亿 m^3 , 缺水率降低 0.8%, 为 17.6%; 高效节水条件下受水区缺水量减少了 3.0 亿 m^3 , 缺水率降低 7.4%, 为 3.0%。

(2) 生活、工业供水保证率经优化调配后, 生活供水保证率达到 100%; 工业供水保证率, 基本节水条件下提高 1.4%, 达到 70.8%, 高效节水条件下提高 15.0%, 达到 95.6%, 实现了模型的既定目标。

(3) 地表水与地下水置换(剩余)量经优化调配后, 地表水剩余量进一步得到充分利用, 基本节水和

高效节水条件下, 地表水剩余量置换(剩余)量分别从 0.4 亿 m^3 、2.1 亿 m^3 降低至 0。地下水置换(剩余)量优化调配前后未发生变化。

(4) 引江水利用量与利用率经优化调配后, 引江水进一步得到充分利用, 引江水利用量达到上限 29.8 亿 m^3 , 利用率达到 100%。

(5) 减少地下水开采量经优化调配后, 与无引江水对比, 基本节水和高效节水条件下, 分别较优化调配前减少地下水开采量 0.4 亿 m^3 和 3.0 亿 m^3 。

本文通过河北省南水北调中线受水区水资源统一调配方案研究, 提出了综合效益最优的受水区水资源优化调配方案, 可实现“引江水高效利用、地表水调节利用、地下水控制利用”的高效用水目标, 从水资源的开发利用及保护等方面为水资源管理部门提供决策支持, 为实现水资源的可持续利用及经济社会的可持续发展提供保障。

参考文献(References):

- [1] 高文君. 南水北调中线工程建设对河南省经济的促进作用[J]. 法制与社会, 2013(9): 214-215, 224. (GAO W J. Promoting effect of middle route project of south to north water diversion on Henan economy[J]. Legal System and Society, 2013(9): 214-215, 224. (in Chinese)) DOI: 10.19387/j.cnki.1009-0592.2013.09.114.
- [2] 高亮, 张玲玲. 区域多水源多用户水资源优化配置研究[J]. 节水灌溉, 2015(3): 38-41. (GAO L, ZHANG L L. Study on Optimal Allocation of Regional Water Resources with Multiple Resources and Multiple Users[J]. Water Saving Irrigation, 2015(3): 38-41. (in Chinese))
- [3] 闫宝伟, 郭生练, 肖义. 南水北调中线水源区与受水区降水丰枯遭遇研究[J]. 水利学报, 2007(10): 1178-1185. (YAN B W, GUO S L, XIAO Y. Synchronous-asynchronous encounter probability of rich-poor precipitation between water source area and water receiving areas in the Middle Route of South to North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(10): 1178-1185. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.10.005.
- [4] 康玲, 何小聪, 熊其玲. 基于贝叶斯网络理论的南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇风险分析[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 908-913. (KANG L, HE X C, XIONG Q L. Risk analysis for precipitation rich-poor encounter between source area and receiving area of the Middle Route of South to North Water Transfer Project Based on Bayes-net theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 908-913. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.08.005.
- [5] 梁钟元, 王海潮, 雷晓辉. 气候变化对南水北调中线受水区径流量影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 137-141, 145. (LIANG Z Y, WANG H CH, LEI X H. Impact of climate change on the intake area runoff in the Middle Route of South

- to North Water Diversion Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 137-141, 145. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2014.02.032.
- [6] 廖卫红, 雷晓辉, 蒋云钟. 简易地下水模型 EasyGWM 在南水北调中线受水区的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(4): 8-12. (LIAO W H, LEI X H, JIANG Y ZH. Application of Easy Groundwater Model in the Reception Area of the Middle Route of South to North Water Diversion Project in China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 8-12. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04008.
- [7] 程双虎, 李明良, 张俊芝, 等. 河北省南水北调受水区地下水模型研究[J]. 北京水务, 2016(3): 3-8. (CHENG SH H, LI M L, ZHANG J Z, et al. Application of FEFLOW in groundwater modeling in intake area of the South to North water transfer project in Hebei province[J]. Beijing Water, 2016(3): 3-8. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1673-4637.2016.03.002.
- [8] 刘昌明, 左建兵. 南水北调中线主要城市节水潜力分析与对策[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(1): 1-7. (LIU CH M, ZUO J B. Water saving potential analysis and countermeasures for major cities for the Midline of South to North Water Transfer Project (SNWTP) [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(1): 1-7. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.01.001.
- [9] 朱永楠, 王庆明, 任静, 等. 南水北调受水区节水指标体系构建及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 187-195. (ZHU Y N, WANG Q M, REN J, et al. The construction and application of water saving index system in the South to North Water Transfer Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 187-195. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2017.06.027.
- [10] 耿六成, 冯战洪, 赵玲. 南水北调受水区水资源合理配置研究[J]. 河北水利水电技术, 2003(1): 40-41. (GENG L CH, FENG ZH H, ZHAO L. Research on rational allocation of water resources in Water Area of South to North Water Diversion[J]. HeBei Water Resources And Hydropower Engineering, 2003(1): 40-41. (in Chinese))
- [11] 吴泽宇, 蒋为群, 肖万格, 等. 南水北调中线受水区水资源配置[J]. 人民长江, 2007(5): 101-103. (WU Z Y, JIANG W Q, XIAO W G, et al. Water resources allocation of water service area of Middle Route Project of S N Water Transfer[J]. Yangtze River, 2007(5): 101-103. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2007.05.045.
- [12] 张平, 郑垂勇. 南水北调中线受水区水资源优化配置研究[J]. 统计与决策, 2006(06): 38-41. (ZHANG P, ZHENG CH Y. Optimal allocation of water resources in the receiving area of the Middle Route of the South to North Water Transfer Project[J]. Statistics and Decision, 2006(6): 38-41. (in Chinese))
- [13] 王海云, 高太忠, 高京, 等. 基于 AHP-LP 法的南水北调中线水资源优化配置——以河北省受水区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2007(5): 588-592. (WANG H Y, GAO T ZH, GAO J, et al. Water resources optimal allocation in the Middle Line of South to North Water Transfer Project using AHP-LP——A case of Hebei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007(5): 588-592. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2007.05.008.
- [14] 卢书超. 基于 MIKE BASIN 的石羊河流域水资源管理模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2016. (LU S C. Research on simulation model of Water Resources Management Based on MIKE BASIN for Shiyanghe River Basin[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese))
- [15] 赵璧奎. 城市原水系统水质水量联合调度优化方法及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013. (ZHAO B K. Study on optimization method and application of water quality and quantity joint scheduling of urban raw water system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013. (in Chinese))
- [16] 毕方明. 空间信息处理的 P2P 分层网络模型的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2010. (BI F M. Research on P2P hierarchical network model of spatial information processing[D]. Beijing: China University of Mining, 2010. (in Chinese))
- [17] 李晓娜. 不确定环境下城市需水量预测及多水源联合供水调度研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2018. (LIX N. Prediction of urban water demand under uncertain environment and joint water supply scheduling with multiple water sources[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018. (in Chinese))
- [18] 龙艺. 沱江流域水资源合理配置及开发利用研究[J]. 考试周刊, 2011(46): 238-240. (LONG Y. Study on Rational Allocation and Exploitation of Water Resources in Tuojiang River Basin[J]. KaoShiZhouKan, 2011(46): 238-240. (in Chinese))
- [19] 汪党献. 水资源需求分析理论与方法研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002. (WANG D X. Study on The theory and method of water resource demand analysis[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2002. (in Chinese))
- [20] 邵东国, 贺新春, 黄显峰, 等. 基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J]. 水利学报, 2005(9): 1050-1056. (SHAO D G, HE Q CH, HUANG X F, et al. Optimal water resources deployment model based on maximal net benefit[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(9): 1050-1056. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.09.005.