

文章编号 0559-9350(2013)01-0010-08

泛流域水资源系统优化研究

彭少明^{1,2}, 王浩², 王煜¹, 贺丽媛¹

(1. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 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: 南水北调西线工程将雅砻江、大渡河和黄河连为一体, 形成泛流域水资源系统, 涉及确定合理的调水总量、调水规模与布局以及调水量合理分配等关键技术问题。针对该复杂大系统, 研究跨流域水资源多维尺度模拟和优化方法, 建立了3层结构的泛流域水资源时空优化调配模型系统, 将调水区7条河流与黄河受水区67地市统一优化调配。采用大系统协调技术和嵌套遗传算法动态调节机制求解泛流域水资源优化分配问题, 提出了一套适宜的调水规模、工程布局及调水量空间合理分配方案, 为南水北调西线工程的宏观决策提供科学支撑。

关键词: 南水北调西线工程; 泛流域; 时空优化; 嵌套模型; 配置方案

中图分类号: TV213

文献标识码: A

1 泛流域的概念及内涵

近年来随着我国横向开放经济带的崛起, 要求在更广的空间配置水资源, 摆脱单一流域水资源的制约、打破原有水系以分水岭为界的纵向联系, 实现水资源利用效益的最大化, 因此出现了泛流域水资源系统优化问题。泛流域是超出一个流域范畴, 指两个或两个以上流域, 通过水利工程打破原有水系相互独立的状态, 使水资源利用跨越流域界线, 形成了泛流域^[1]。我国现阶段开展的南水北调工程, 通过调水工程实现水系联通、南北互济, 形成了长江与黄淮海泛流域超大水系统。泛流域水资源配置要求对联通的水系统实行统一分配和管理, 强调从整体上考虑问题, 克服单一流域的局限性。

泛流域系统优化实际上也是对水资源和水环境承载能力的扩张和延伸, 提高大系统的整体性和协调性。近年来, 我国学者在流域水资源优化配置领域开展了大量的研究, 建立了系统的理论与方法, 但目前针对跨流域水资源配置的研究一般是在给定的调水量、确定的工程布局下开展, 没有真正解决泛流域水资源系统的优化问题。目前泛流域系统还仅限于概念上, 系统优化需要解决以下3个层面的问题: (1) 认知层面。重新审视调水河流的原生态保护、调水区经济发展的问题, 避免带来不可逆转的破坏; (2) 理论层面。泛流域优化的出现使系统的边界从单一流域拓展到多个流域, 需要泛流域水资源均衡理论的支撑; (3) 方法层面。泛流域涉及调水区与受水区、需求与供给、水与生态三重平衡关系, 影响因素众多, 系统结构复杂, 必须研究超大系统的水资源优化资源配置方法、创建系统优化平台, 在统一框架下调控、弱化流域制约、激发有利于可持续发展的因素。

2 南水北调西线工程泛流域问题的提出

2.1 黄河水资源不能支持经济社会发展需求 黄河流域在我国战略格局中的地位十分突出, 对于保障我国能源安全、粮食安全和生态安全具有十分重要的战略意义和不可替代的作用。随着我国西部

收稿日期: 2011-10-16

基金项目: 国家 十二五 科技支撑计划项目(2013BAC101302); 国家自然科学基金资助项目(50479024)

作者简介: 彭少明(1973-), 男, 河南信阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: pengshiming@163.com

大开发战略深入推进，黄河流域未来经济增长强劲，对水资源的需求强烈，要求提高水资源支撑能力。受气候变化与人类活动影响，黄河水资源衰减严重，供需矛盾十分尖锐。据预测^[2]，在实施强化节水、积极挖掘供水潜力等措施下，2030年黄河流域需水量将达到547.33亿m³，而可供水量仅为443.18亿m³，缺水量为104.15亿m³，见表1。

表1 黄河流域2030年水资源供需形势 (单位：亿m³)

项目	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	黄河流域
需水量	27.67	0.36	62.61	91.16	108.85	98.09	69.87	63.26	25.48	547.33
可供水量	20.44	0.35	43.55	68.91	90.77	73.79	64.39	60.25	20.73	443.18
缺水量	7.23	0.01	19.06	22.25	18.08	24.29	5.48	3.01	4.74	104.15

由于水资源供需矛盾突出，黄河下游河道内生态环境水量也将受到影响，到2030年减少为185.8亿m³^[2]。按照黄河河道内低限生态环境需水量210亿m³^[3]计算，黄河河道内生态环境缺水24.2亿m³。

黄河水资源短缺不能支撑流域经济社会快速发展，供需矛盾突出、生态环境恶化，严重制约了流域健康协调发展，迫切需要实施跨流域调水补济黄河。

2.2 调水区水资源条件与可调水量 长江上游支流雅砻江、大渡河多年平均径流量分别为600.37亿m³和475.53亿m³，水资源丰沛，预测2030年雅砻江流域总需水量为30.51亿m³，大渡河流域总需水量为11.68亿m³，分别占两条河流的5.1%和2.5%。雅砻江、大渡河与黄河源头可形成自然落差，具备调水工程条件。根据前期研究，南水北调西线工程调水河流范围包括雅砻江干流，雅砻江支流达曲、泥曲，大渡河支流色曲、杜柯河、玛柯河和阿柯河，7河流具备调水工程建设的坝址依次为：热巴、阿安、仁达、洛若、珠安达、霍那和克柯^[3]。调水河流及坝址情况见表2。

表2 南水北调西线工程调水河流及坝址径流量 (单位：亿m³)

调水河流	雅砻江				大渡河									
	干流		达曲	泥曲	色曲	杜柯河	玛柯河	阿柯河						
调水河段	仁青里	甘孜	然充	东谷	章达	泥巴沟	色达	河西寺	年弄	壤塘	霍那	则曲口	克柯	阿坝
径流量	60.7~78.5		10~11.6	11.3~13.2	3.5~5.5		7.5~18.5		11.0~58.6		5.7~19.9			

通过研究调水坝址的生态环境现状特征及其保护目标、保护对象，采用Tennant法、湿周法、水力半径法等多种生态需水方法的比较分析计算，满足维持引水坝址下游临近河段生态流量分别为：热巴35m³/s，阿安、仁达、珠安达、霍纳均为5m³/s，洛若、克柯均为2m³/s^[3]。

将各坝址的入库径流扣除下游下泄流量需求作为坝址处的最大可调水量，则南水北调西线工程热巴、阿安、仁达、洛若、珠安达、霍那、克柯等7个坝址多年平均的最大可调水量为108.64亿m³。见表3。

表3 南水北调西线工程调水河流最大可调水量 (单位：亿m³)

调水河流	雅砻江			大渡河				总计
	热巴	阿安	仁达	洛若	珠安达	霍那	克柯	
坝址径流量	64.92	10.56	12.96	5.4	17.4	13.97	12.03	137.24
最小下泄径流	17.61	2.59	1.89	0.84	1.89	1.89	1.89	28.6
最大可调水量	47.31	7.97	11.07	4.56	15.51	12.08	10.14	108.64

2.3 南水北调西线调水系统优化问题的提出 南水北调西线工程通过调水可实现雅砻江、大渡河与黄河水系的联通，形成一个泛流域水资源系统。2030年黄河流域河道内外总缺水量为128.35亿m³，而调水河流的最大可调水量仅为108.64亿m³，实施跨流域调水一方面增加受水区收益但同时会在调出区造成一定的损失，因此南水北调西线工程将面临3个层面的问题需要优化解决：(1)调水区合理的调水总量问题，从泛流域的角度优化决策调多少水量；(2)调水工程的规模与布局问题，即7个调水工程的优化组合问题；(3)调水量在黄河流域受水区合理分配，最大限度体现调水的价值。

由此可见泛流域水资源系统是一个涉及多水源、多地区和多目标的高维、复杂的大系统工程，必须全面统筹、高效配置，平衡调水区与受水区，兼顾经济发展和河道生态环境用水，全面提高泛流域总福利水平、提升水资源承载能力。对于如此庞大的系统，此前研究仅关注给定调水量的分配问题^[5-6]，而对于涉及两个以上流域系统优化则显得束手无策，传统的流域水资源模型系统优化、求解面临巨大挑战。因此需要建立基于南水北调西线调水条件下的泛流域水资源系统优化模型，将调水区和受水区联系为统一整体，实施水资源的统一优化调配。

3 泛流域优化模型的建立

3.1 泛流域水资源系统概化 南水北调西线工程从雅砻江干支流和大渡河支流引水，调水工程由7座水源水库和多段输水隧洞组成；调水从源头进入黄河，经黄河干流主要水库调节后分配到各个受水区。

水资源系统概化将实体抽象简化为参数表达的概念性元素，并通过数学语言描述各类元素之间水量联系^[6-7]。南水北调西线工程联通的雅砻江、大渡河以及黄河泛流域水资源系统包括黄河流域的67个地市，雅砻江干支流4地市以及大渡河支流5地市，水资源系统联系复杂，因此必须对其进行概化处理。根据泛流域调水工程布局、河流水系特征，将水资源系统概化为调水河流、调水工程、调水渠道、受水河流、受水水库和受水单元等六类基本元素，建立南水北调西线工程泛流域水资源配置系统概化关系，见图1。

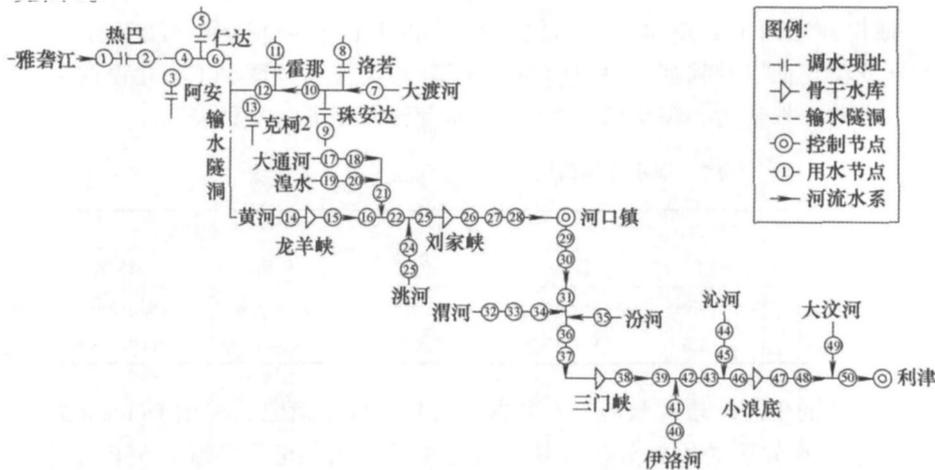


图1 南水北调西线工程泛流域水资源配置系统节点概化

3.2 模型优化目标 跨流域调水目标：通过工程措施克服单一流域的局限性，促进不同流域间水资源互补互济和谐演进，追求系统整体最优，模型包括以下3个目标。

(1)综合缺水最小目标。协调泛流域水资源供需矛盾、解决缺水地区的水资源短缺问题。确定以泛流域系统综合缺水率最低^[8](或综合水资源安全度最高)为目标：

$$\min f = \sum_{i=1}^n \omega_i \left[\frac{W_d^i - W_s^i}{W_d^i} \right]^\alpha \quad (1)$$

式中： ω_i 为*i*子区域对目标的贡献权重，以其经济发展目标、人口、经济规模、环境状况为准则，由层次分析法确定；*n*为所有调水区和受水区的地区数量； W_d^i 、 W_s^i 分别为*i*区域需水量和供水量； α ($0 < \alpha \leq 2$ ，在此取1.5)为幂指数，体现水资源分配原则： α 愈大则各分区缺水程度愈接近，水资源分配越公平；反之则水资源分配越高效。

(2)调水综合净效益最大化。泛流域系统综合净收益最大化，保证水资源的高效利用。调水后受水区的供水增加的收益与调水区水量减少的损失(含工程成本)之差最大：

$$B = \text{Max} \left(\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K TB(Q_{in}(i, j, k)) \right) - \sum_{n=1}^7 \sum_{m=1}^{12} TC(Q_{out}(m, n)) \quad (2)$$

式中： $TB(Q_{in}(i, j, k))$ 为受水区增加供水量 $Q_{in}(i, j, k)$ 时的收益增加量， $i=1, 2$ 指河道内、外的配置水量， $j=1, 2, \dots, J$ 指受水区数， $k=1, 2, \dots, K$ 指配水的部门； $TC(Q_{out}(m, n))$ 为调水量 $Q_{out}(m, n)$ 时的调水区损失总量， $m=1, 2, \dots, 12$ 指调水的月份， $n=1, 2, \dots, 7$ 指调水区。

(3)调水保证率尽可能高。优化调水规模和工程布局，保障泛流域水资源系统稳定。通过优化选择调水规模和工程布局，满足在一定调水量条件下，调水的保证率最高：

$$Pr = \text{Max} \left(1 - \left(P(Q < Q_0) \right) \right) \quad (3)$$

式中： Pr 为调水量满足设计调水量的概率； $P(Q < Q_0)$ 为调水量 Q 低于设计调水量 Q_0 的概率。

因此建立的泛流域水资源系统优化实际是兼顾泛流域系统缺水、综合效益以及系统保证率的多目标优化模型，通过优化调水规模和工程布局以及合理配水，实现泛流域调度系统整体最优。

3.3 模型的约束条件和原则 (1)调水区用水优先原则。为维持调水区水资源系统稳定、使调水河流的原生态得到有效保护，应优先保障调水区用水需求。

$$W_{ds\text{调水}} \leq KW_{ds\text{受水}}, \text{ 且 } K \leq 0.5 \quad (4)$$

式中： $W_{ds\text{调水}}$ 、 $W_{ds\text{受水}}$ 分别为调水区和受水区的水资源承载力供需平衡压力指数，即水资源承载状况和承载能力的比值 $W_{ds} = W_d / W_s$ ，其中： W_s 为区域可供水量， W_d 为区域水资源需求总量。

(2)水资源系统安全原则。为维持流域水资源系统的安全、和谐，调水后各水资源不安全地区脱离不安全状态，且各受水区水资源承载力供需平衡压力指数当量接近。

$$W_{ds} = w_d / w_s \leq 1.2 \quad (5)$$

$$w_{ds}^i \approx w_{ds}^j \quad (6)$$

式中， W_{ds}^i 、 W_{ds}^j 分别为不同区域的水资源承载力供需平衡压力指数。

(3)河道内补水优先原则。长期以来黄河流域水资源开发利用已经超过了其承载能力，引发了一系列的生态环境问题，为此在西线调水后设定保证生态环境具有优先补水权。

$$W_{ds\text{河道外}} \geq \gamma W_{ds\text{河道内}} \quad (7)$$

式中： $W_{ds\text{河道内}}$ 、 $W_{ds\text{河道外}}$ 分别为河道内、外水资源承载力供需平衡压力指数， γ ($\gamma > 1$)为倍比数。

河道内水资源承载力当量应不小于一定倍比的河道外水资源承载当量，河道内水资源压力不大于河道外水资源压力，否则调入水量应优先补给河道内。

(4)高效用水原则。调入水量配置按照效率优先原则进行，通过权重来实现。根据对黄河流域水资源不安全地区的缺水分析，由层次分析法确定不同层次级别的权重：第一层次，大城市，缺水影响特别严重，缺水影响人民生活用水，重要性9，权重 $\omega_i=1.9$ ；第二层次，较大城市及重要工业项目，缺水影响严重，缺水影响重点产业和能源化工产业的发展以及河道内生态环境用水，重要性7，权重 $\omega_i=1.7$ ；第三层次，小城市，缺水影响一般工业发展用水，重要性3，权重 $\omega_i=1.3$ ；第四层次，农村，缺水影响农业灌溉和灌区发展，重要性1，权重 $\omega_i=1.1$ 。

4 优化模型求解

4.1 优化模型求解的理论基础 泛流域水资源系统中，调水区水资源相对丰富而受水区水资源贫乏，通过跨流域调水工程实现水系联通，从富水的调水区调出水量补给贫水的受水区，使系统的总福利水平得到改善，借助经济学边际效益和边际成本理论，可求解泛流域水资源系统合理调水量的均衡点。

4.1.1 水资源利用的边际效用递减原理 水资源利用的边际效益是指在技术水平一定、其他生产要素投入保持不变的情况下，每增加一单位用水量所带来的收益增量。经济学原理表明，在技术水平不变的条件下，如果其他投入不变而持续增加某一要素的投入，那么该要素的边际效益将会递减。

南水北调西线工程调水区经济相对落后、水资源相对丰富，供需水量基本平衡，水资源边际效益相对较低；而受水区为我国能源化工产业基地，水资源短缺，水资源边际效益相对较高。实施水系联通后，调水会提高泛流域系统的总收益，但在边际效益递减规律的作用下，随调水量增加泛流域系统效益增量 MP_w 将会减少。

4.1.2 水资源开发边际成本递增原理 西方经济学研究发现，当持续增加某一稀缺资源使用量时，会引起该资源利用的边际成本提高，即资源使用边际成本呈半U型。

南水北调西线工程泛流域水资源系统中，当跨流域调水量达到一定规模后，继续增加调水量将引起调水工程投资增加、调水区的损失等成本剧增，即引起调水的边际成本 MC_w 递增。

泛流域系统优化以水资源利用净边际效益(NMP_w)分析为基础^[9]，在调水量边际效益递减和边际成本递增的双重作用下，净边际效益均衡点即为优化的调水量。根据式(2)净收益最大化目标，求解拉格朗日极值函数可得出如下关系：

$$NMP_w = MP_w - MC_w = 0 \quad (8)$$

式中： NMP_w 、 MP_w 、 MC_w 分别为水资源开发利用的边际净效益、边际效益和边际成本。

式(8)符合收益最大化的条件，即边际成本等于边际效益。

4.2 优化模型求解

4.2.1 模型系统的实现 模型系统构建由宏观层、中观层和微观层构成的3层总分结构框架，逐层求解。首先解决宏观层面的调水量问题，其次解决调水工程布局和调水量部门分配等中观问题，最后解决微观层次的调水工程合理调度以及受水区水量的优化分配问题。上一层模型的解可作为内部参数输入下一层模型中，通过参数传递，层层嵌套，见表4。

表4 基于跨流域调水的泛流域水资源优化模型系统

模型	建模目标	解决问题	固定参数	求解变量
M0	总体协调模型	规模优化	α	$Q_{\text{总量}}$
M1	调水工程布局优化	布局优化	n	$Q_{\text{out}}(m, n)$
M2	受水区水量分配	分配优化	λ	$QP_{\text{in}}(i, j, k)$
M3	成本收益优化	模型求解模块	$\lambda(i, j, k), \theta(m, n)$	B

M0从宏观层面解决调水总量优化问题，按照综合缺水最小目标，在调水区和受水区间按式(1)进行优化决策，确定调水总量 $Q_{\text{总量}}$ ，并作为输出实现与调水区的工程规模和布局优化模块 M1 及受水区的调水量分配优化模块 M2 之间的数据联络。

M1从调水区层面解决7个调水坝址的规模和布局优化问题；M1根据M0给定的调水规模 $Q_{\text{总}} = \sum_{n=1}^7 \sum_{m=1}^{12} Q(m, n)$ 和调水保证率 $P(Q) > P_0$ 的要求，按照调水损失和调水影响最小化，实现7个调水区的工程规模和布局方案组合，并将提出的调水区规模造价及其损失影响参数传递给M3。

M2模型从受水区层面解决调入水量的时空优化分配问题，按照调水量分配的效益最大化，实现调水总量在时间（通过黄河干流水库的调节作用）和不同空间（在不同受水区之间）的优化分配，满足分配水量约束 $Q_{\text{总}} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Q(m, n)$ ， $i=1, 2$ 为河道内外配水， $j=1, 2, \dots, 67$ 为配水地区， $k=1, 2, \dots, 6$ 为配水部门，地区、时间和部门均为自由变量，实质是水资源 $Q_{\text{in}}(i, j, k)$ 在三维空间中的优化，M2产生不同的分配方案和效益分析参数传递M3。

M3是联接优化模块，M3在接收M1成本和M2收益数据基础上调用系统经济优化模块进行评估，通过分析对比各分项工程边际投入、调水区边际成本和受水区边际效益，调用分析子程序确定优化方案，并对泛流域调水系统目标实现程度进行决策。

自模型M0-M3，模型的决策变量及其自由度逐渐增加，可供优化运筹的空间增加^[10]，同时，运筹难度增加。模型系统各模型之间的关系及数据传递见图2。

4.2.2 模型求解方法和流程 为求解南水北调西线工程泛流域水资源优化配置这一超大系统问题，采用大系统分解协调技术及逐步优化算法和嵌套遗传算法。首先模型采用大系统分解协调方法将系统分解为调水区和受水区，由嵌套的外层遗传算法生成不同的调水量传递给调水区的工程优化和受水区的配置优化；而后，模型系统设置两个并行的模型 M1、M2 分别计算各调水区的调水量优化和受水区的配水量优化，调水区工程优化采用逐步优化算法(Progressive Optimization Algorithm, POA)提出工程的规模、布局 and 运用方式等参数，受水区配置优化，采用嵌套的内层遗传算法生成不同地区的水资源配置方案及调水收益等参数；最后系统采用系统优化的目标函数进行识别并得出优化结果。模型求解流程见图 3。

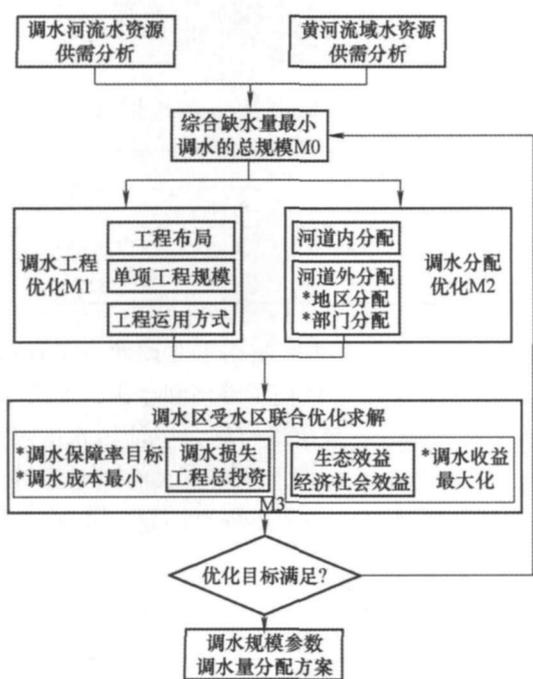


图2 模型结构与流程

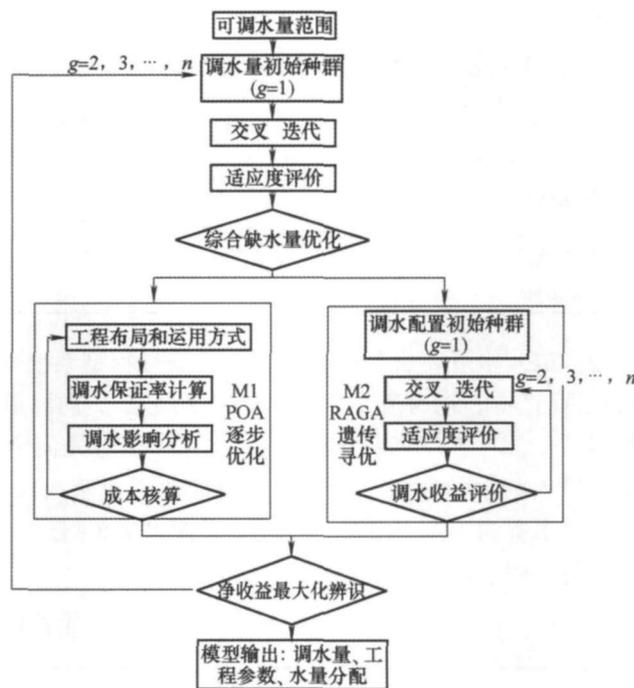


图3 南水北调西线工程泛流域水资源配置模型求解流程

根据调水河流最大可能调水量 108.64 亿 m^3 ，设定调水量有效搜索范围为 0~108.64 亿 m^3 ，模型 M0 中遗传算法模块，随即生成调水量的第一代种群，按照杂交、变异、演化迭代，求解式(1)，M1 接收 M0 调水总量按照 POA 逐步优化，根据可调水量约束提出各调水坝址调水量：

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 1) \leq 47.31 ; 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 2) \leq 7.97 ; \\ 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 3) \leq 11.03 ; 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 4) \leq 4.56 ; \\ 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 5) \leq 15.51 ; 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 6) \leq 12.08 ; \\ 0 \leq \sum_{m=1}^{12} Q(m, 7) \leq 10.14 \end{cases} \quad (10)$$

模型系统根据生成的第一代种群启动大系统的分解协调，M1 按照逐步优化方法根据长系列径流资料，在水库水位允许变幅范围内拟定一条初始调度线 $V_t^k (t=1, 2, \dots, n-1, n)$ ，固定 V_{t-1}^k, V_{t+1}^k 调整 V_t^k (采用 0.618 法)，使得工程成本 C_d 最小，即求解式(2)；M2 为区间优化启动 RAGA 模块，进行调水量及其分配的空间优化，各受水地区配水量满足模型规则约束：

$$\begin{cases} 0 \leq \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^k Q(i, j, k) \leq QS(i, j, k) ; 0 \leq Q(i, j, k) \leq QS(i, j, k) \\ w_d(i, j, k) / w_s(i, j, k) < 1.2 ; w_d(1, j, k) < w_d(2, j, k) \end{cases} \quad (11)$$

M3 为空间经济分析和优化，模型求解按照式(3) 式(5)同时满足式(6)条件约束，模型优化满足调水边际成本等于边际收益，实现式(3)的最大化：

$$MP_w - MC_w = 0 \quad (12)$$

4.3 系统优化结果 采用泛流域水资源优化模型求解南水北调西线工程调水的泛流域水资源系统，水资源数据采用 1956—2005 系列，黄河流域水资源量为 609.40 亿 m³[2]，工程投资及效益数据以 2008 年为基准[4]，模型以月为计算时段。

4.3.1 调水规模及布局优化 经过模型系统分解协调以及双嵌套基于实码的遗传算法(Real code Accelerating Genetic Algorithm, RAGA)和 POA 求解，南水北调西线工程适宜调水规模为 82.31 亿 m³，其中热巴 43.11 亿 m³、阿安 7.0 亿 m³、仁达 7.5 亿 m³、洛若 2.5 亿 m³、珠安达 11.20 亿 m³、霍那 7.5 亿 m³、克柯为 3.5 亿 m³。调水工程规模及布局优化结果见表 5。

表 5 南水北调西线调水量及工程规模布局优化参数 (单位：流量，m³/s；水量，亿 m³)

调水河流	雅砻江			大渡河			总计	
	干流	达曲	泥曲	色曲	杜柯河	玛柯河		阿柯河
调水流量	153.8	25.91	27.33	19.92	36.32	27.43	12.63	303.34
调水量	43.11	7.5	8.0	2.5	10.2	7.5	3.5	82.31

4.3.2 调入水量的配置优化 通过泛流域模型系统配置优化，2030 水平年实施南水北调西线工程调水 82.31 亿 m³，向河道外配置水量 55.20 亿 m³，向河道内补水 27.11 亿 m³，体现了经济和生态效益兼顾原则。经济社会配置的 55.20 亿 m³ 水量中，首先向重要城市配水 24.2m³ 解决城市居民生活用水问题，体现以人为本的原则；其次向重要能源工业基地配置 22.1m³ 解决发展问题，体现调水的效益原则；第三向水资源不安全及生态脆弱地区配水量 8.8 亿 m³，解决主要受水区水资源不安全问题，体现了公平原则。调水量配置方案见表 6。

表 6 南水北调西线工程调水量河道外配置方案 (单位：亿 m³)

地区	青海	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	合计
重要城市	4.9	5.9	4.2	7.7	0.6	1.0	24.2
能源基地	0.0	2.8	5.9	7.8	3.5	2.1	22.1
水资源不安全及生态脆弱地区	0.8	1.8	1.3	2.6	1.1	1.3	8.8
小计	5.7	10.5	11.3	18.1	5.1	4.5	55.2

4.3.3 调水后黄河流域水资源供需平衡分析 实施南水北调西线工程调水后，2030 水平年黄河流域内多年平均缺水量减少为 23.66 亿 m³，河道外缺水率为 4.0%，见表 7，可有效缓解黄河流域资源性缺水的矛盾，实现黄河流域水资源的持续协调发展。黄河河道内生态补水 25.71 亿 m³，可满足黄河生态环境需水量要求，实现黄河生态健康的良性维持。

表 7 南水北调西线调水量分配及黄河流域水资源供需形势 (单位：亿 m³)

省区	青海	四川	甘肃	宁夏	内蒙古	陕西	山西	河南	山东	黄河流域
调水后缺水量	1.71	0	1.43	1.59	1.72	6.22	3.24	3.01	4.74	23.66

5 结论

(1)流域水资源优化配置一般是在给定的调水量以及确定的工程布局下开展研究，目前对于涉及两个或以上流域的泛流域，水资源优化调配面临困难。本文以南水北调西线工程调水为研究对象，从泛流域的概念和内涵出发，建立了具有 3 层结构泛流域多维尺度优化模型，提出了南水北调西线工程泛流域适宜的调水规模、工程布局及调水量空间合理分配方案，为西线工程的宏观决策提供了科

学支撑。(2)目前泛流域水资源优化调配研究还处于探索阶段,需要对泛流域的概念和内涵开展进一步研究,建立考虑调水区与受水区、需求与供给、水与生态等平衡关系的优化调配模型,实现不同流域间水资源实行统一分配和管理。(3)泛流域水资源优化调配是一个多水源、多地区、多目标的高维、复杂的系统优化问题,通常需采用降维技术降低优化模型求解的难度。本文采用大系统协调技术和嵌套遗传算法动态调节机制对优化配置模型进行求解,通过系统参数的内部传递,实现超大系统的优化求解。

参 考 文 献:

- [1] 刘宁. 泛流域的出现及认识[J]. 水科学进展, 2005, 16(6): 810-599 .
- [2] 黄河水利委员会. 黄河水资源综合规划[R]. 2009 .
- [3] 黄河水利委员会. 黄河的重大问题及其对策[R]. 2004 .
- [4] 黄河水利委员会设计研究院. 南水北调西线一期工程项目建议书[R]. 2008 .
- [5] 冯耀龙, 练继建, 王宏江, 等. 水资源承载力分析跨流域调水的合理性[J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 595-599 .
- [6] 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 .
- [7] 邵东国. 跨流域调水工程优化决策模型研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(5): 500-505 .
- [8] 尹宏伟, 李勇, 郑垂勇. 跨流域调水工程受水区水资源优化配置的模型[J]. 统计与决策, 2007(23): 38-41 .
- [9] 雷声隆, 覃强荣, 郭元裕, 等. 自优化模拟及其在南水北调东线工程中的应用[J]. 水利学报, 1989, (5): 1-13 .
- [10] 王劲峰, 刘昌明, 于静洁. 区际调水时空优化配置理论模型探讨[J]. 水利学报, 2001(4): 7-14 .
- [11] 游进军, 王忠静, 甘泓, 等. 两阶段补偿式跨流域调水配置算法及应用[J]. 水利学报, 2008, 39(7): 870-876 .
- [12] 刘建林, 马斌, 解建仓, 等. 跨流域多水源多目标多工程联合调水仿真模型 南水北调东线工程[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 75-79 .
- [13] 高鸿业. 西方经济学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2000: 42-47 .

Study on the pan-basin optimization of water resources system

PENG Shao-ming^{1,2}, WANG Hao², WANG Yu¹, HE Li-yuan¹

(1. Yellow River Engineering Consult Co.ltd, Zhengzhou 450003, China;

2. 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: Western Route project of South-to-North Water Transfer will connect the Yellow River with the Yalong and the Dadu rivers to form an integral pan-basin water resources system, which includes some key technology, such as diverted water volume, project scale and layout and the rational allocation of diverted water. Multi-dimensional simulation and optimization for pan-basin water resources was put forward and a model of three-layer structure for water resources allocation in pan-basin was built. Seven rivers in water transferring areas and 67 cities in the water receiving areas are optimized by fitted into an integrated allocation model system. Technology of decomposition and coordination of huge system, nested searching RA-GA (real code genetic algorithm) and dynamic control mechanism are adopted to solve the problem of water resources optimal allocation. The scenario about rational scale and optimal allocation of the western route water transfer, which can provide technical reference for the macro decision-making of the western route project of south-to-north water transfer, was put forward.

Key words: West Route of South-to-North Water Transfer Project; pan-basin; spatial-temporal optimization; nesting model; water allocation

(责任编辑: 王成丽)