

# 黑河流域水资源调配研究

□王浩 常炳炎 秦大庸

**摘要** 黑河流域目前面临水资源、经济和生态三方面问题,进行水资源调配研究是实现流域可持续发展的根本出路。流域水资源调配层次化结构体系以“模拟—配置—评价—调度”为基本环节,实现流域水资源的基础模拟、宏观规划与日常调度,以及各环节之间的耦合和嵌套,进而通过流域水资源调配管理信息系统的构建,为黑河流域水资源的规划配置和管理调度提供了较为全面的技术支持。目前多项研究成果已经应用于黑河流域水量调度和张掖市节水型社会建设等实践。

**关键词** 黑河流域 水资源 调配

## 一、攻关背景

### 1.流域概况和存在问题

黑河是我国西北地区第二大内陆河流域,总面积 14.3 万 km<sup>2</sup>。中游有历史悠久的“金张掖”,下游额济纳旗边境线绵延 500 多 km。黑河流域水资源合理开发利用及生态建设与环境保护,不仅事关流域内人民的生存和社会发展,也关系到西北、华北地区的环境质量,是关系民族团结、社会安定和国防稳固的大事。

黑河流域目前面临着水资源、经济和生态三方面问题。其中,水资源严重短缺,供需矛盾突出,用水结构不合理,利用效率和效益较低;社会经济问题主要包括产业结构不合理,高耗水的一产比重过高,二产发展严重滞后,社会经济发展水平相对落后;生态环境问题突出表现为下游天然植被大面积退化、土地盐碱化和沙漠化面积扩张、河湖萎缩退化等方面。

### 2.实践需求和攻关目标

黑河流域面临的三大问题相互关联,其根本原因是国民经济用水和生态环境用水两大系统之间,以及系统内部各用水部门强烈竞争背景下,流域水资源调配不当所引起的经济、生态后果,为此建立与流域水资源条件相适应的合理生态保护

格局和高效经济结构体系,统一合理调配水资源,是实现流域可持续发展的根本出路。

针对黑河水资源统一管理需求,科技部在“十五”期间将流域水资源调配技术作为我国水安全保障重大技术之一进行攻关,目标是在提出一套完整的流域水资源调配理论与方法基础上,建立一套可运行的黑河流域水资源调配管理信息系统,为流域水资源统一调配提供辅助决策支持,同时有效提升我国流域水资源管理决策和信息化水平。

## 二、流域水资源调配的层次化体系

流域水资源在循环演变过程中,支持和抚育了丰富多彩的天然生态系统和纷繁复杂的社会经济系统。受资源有限性的制约,水资源利用一开始就存在着明显的分配与竞争问题,包括社会经济、生态环境两大系统之间和内部各部门的分配与竞争。在无序状态下,这种分配和竞争依靠先天条件或手段的优势来完成。当这种无序竞争达到一定程度时,条件和手段处于“劣势”的用水户不可避免地遭到破坏。因此从系统观点出发,遵循流域水资源可再生演变机制、水分——生态演替驱动机制和水分——经济的互动机制,合理高效配置水资源,

是流域水资源调配总控框架不可或缺的重要环节。

流域水资源配置是一个典型的多目标优化决策过程,且包含大量的半结构化问题。受决策问题及过程复杂性的影响,加上优化方法存在的局限,尽管配置过程中充分重视各局部的优化,但为充分保障配置整体的合理性,仍需对配置方案合理性进行系统评价。

流域水资源配置属于水资源规划范畴,而水文信息和其他决策信息具有明显的随机特性,有限样本容量不可能完备描述实时调度所需的状态信息,因此以历史来水过程为基础的水资源合理配置方案不能直接应用于水资源调度实践。基于此,完整水资源调配最后一个环节就是以预测预报信息为基础,以合理配置方案及其提供的规则为决策依据,在决策过程中辅以滚动修正的水资源实时调度。

综上所述,流域水资源调配的总控框架可简要概括为“模拟—配置—评价—调度”,这一层次化逻辑体系实现了流域水资源规划与管理的有机衔接,也是此次攻关的技术主线。

## 三、黑河流域水循环的过程模拟

随着水循环过程信息采集与系统模拟技术的不断提高,水循环模型由“黑

箱”逐渐走向“白箱”。在现代空间信息手段的支持下,构建有物理机制的流域分布式水循环模拟模型,在统一的GIS平台上描述自然—人工二元驱动下的流域水循环的地表全过程已经成为可能。

#### 1.黑河流域分布式水循环模型

为精细描述黑河流域水循环全过程和各要素关系,该研究采用有物理机制的分布式模拟方法,构建了IWHRWEP模型来实现流域水文过程的模拟。

IWHRWEP模型以长方形或正方形网格为计算单元,是网格分布式流域水文模型,便于使用GIS和卫星遥感数据,并具有物理概念强、计算精度高和速度快等特点。

针对黑河流域中下游地区地表水、地下水转化频繁的特点,增强了IWHRWEP模型的地下水模拟功能,构建了与之耦合嵌套的黑河流域中下游地区地下水数值模拟模型,以完成流域二元水循环地表、地下全过程的精确描述。

#### 2.黑河流域水循环过程模拟

黑河流域分布式二元水循环模型具有良好的物理机制,并以大量的实测水文数据和钻孔地质资料为基础,能系统模拟水循环全过程与各个环节,经多方验证具有很高的模拟精度。该集成模型不仅能够定量计算流域水循环过程的各平衡收支项,包括年降水量、年蒸发总量及分项量、径流总量及分项量、农灌引水量和地下水蓄变量等。另外模型还能够进行中长期和短期径流预报,土壤墒情和积雪预报,以及对生态建设情景水收支状况进行模拟。

黑河流域分布式二元水循环模型的另一大特点是能系统描述水循环过程内部转化关系。如分区域地表水与地下水的转换量、引用水与耗水之间的转化关系、地表水引用水量与河道退水之

间的定量关系、不同行政区间地下水交换量、各灌区间地下水交换量等。上述模型应用成果为流域水资源统一调配与管理奠定了系统的定量基础。

### 四、黑河流域水资源合理配置

#### 1.面向全属性功能的流域水资源配置概念

天然条件下,水资源具有三种原生的基本属性,即因其物理性质所具有的自然属性,因其化学性质而具有的环境属性,因其生命组成物质特性而具有的生态属性。自社会经济系统取水开始,水资源便具有了特定的社会经济服务功能,水资源具备明显的社会属性和经济属性。上述五种基本属性关联伴生,某一属性的破坏不仅影响与其伴生的资源服务功能,而且还会给其他属性功能的实现带来负面影响,因此流域水资源合理配置必须以维护水资源自然、生态、环境、社会和经济等全属性功能为目标。其内在决策机制包括五个方面,自然属性的维护必须以流域水资源可再生性维持机制为准则,社会属性的维护是以人权平等机制为准则,生态属性的维护以水分—生态演替驱动关系为决策机制,经济属性的维护以水分—经济的互动机制为准则,环境属性的维护是以水环境可承载性维持为准则。

#### 2.黑河流域生态需水和国民经济需水预测

黑河流域是一个典型的内陆流域,中下游地区水资源最主要的属性功能包括生态、社会和经济三大属性功能,因此基于合理的生态经济目标进行生态和社会经济需水预测是水资源合理配置的基础。

在黑河中下游地区生态恢复目标制定上,主要依据《黑河流域近期治理规划》中提出,到2010年“下游天然绿洲恢复到20世纪80年代中期规模”,

基于这一宏观目标,将生态恢复区根据生态类型和立地条件的差异进行分区,然后以多源遥感信息和历史调查资料为依据,在统一的GIS平台上,结合省际分水方案,进行生态空间的综合决策,确立生态恢复目标。然后分天然绿洲、水域(河流、湖泊)、地下水三大系统计算生态需水。计算结果表明,一般年份现状年需要哨马营断面配水量5.48亿 $m^3$ ,要实现2010、2020、2030年的生态恢复目标,需要哨马营断面的生态配水量分别为6.32亿、6.35亿、6.35亿 $m^3$ 。

黑河流域经济发展目标确定的主要依据包括:一是党的十六大报告提出的全面建设小康社会的奋斗目标和西部大开发战略;二是流域社会经济水平现状;三是流域未来经济发展规划,尤其是产业结构调整规划。该研究构建了流域宏观经济年度模型为根据,预测未来社会经济发展指标。然后再考虑流域节水型社会建设等相关规划,对用水水平进行系统预测,以确定各行业用水定额,计算社会经济需水量。结果表明,现状年黑河流域社会经济需水总量为20.89亿 $m^3$ ,2010、2020和2030年分别为17.38亿、16.91亿和16.89亿 $m^3$ 。

#### 3.黑河流域水资源合理配置方案和供需平衡分析

综合水资源合理配置的基本理念和流域实际,此次配置坚持公平公正、可持续、高效和系统原则,具体采取准则配置结合模拟模型的方法生成配置方案的非劣集合,进而结合后评价来生成推荐方案,有效解决了优化方法在处理生态系统和经济系统所面临的障碍。

黑河流域水资源配置方案设置的主要调控措施大致分为三类:一是区域水资源调控的基本准则,二是用水结构和用水水平,三是重大工程的建设与布局。上述三类措施共同组成方案生成的条件因子集,方案生成就是在此三维向量空间中寻优过程。

根据流域水资源配置现状,结合

不同水平年的相关规划,对上述三类主要影响因子进行可能的组合,得到配置方案的初始集。进一步考虑合理配置方案的非劣特性,采用人机交互的方式排除了初始方案集中大量的代表性不够和明显较差的方案,得到水资源合理配置方案集,通过筛选,2010年有6个方案,2020年有2个方案,2030年设置1个方案。

以26个计算单元为基础,对上述各方案进行1956~2000年45年间长系列逐月模拟计算,多年平均条件下黑河流域不同水平年水资源供需平衡情况见表1。

从供需平衡结果来看,通过农业节水、经济结构调整、退耕还林还草和正义峡分水方案的实现、正义峡和黄藏寺水利枢纽上马等一系列水资源合理配置措施的实施,黑河流域不同水资源配置方案农业和生态缺水率均有明显下降,这也说明西北干旱地区通过节水型社会建设能够实现有限资源约束下的社会经济的可持续发展。

## 五、流域水资源配置合理性评价

### 1. 评价准则与技术

在评价的过程中,影响评价结果的关键因素有三个,一是评价指标的选取,二是指标权重的确定,三是评价方法的选择。因此水资源配置评价的关键技术主要包括指标筛选技术、赋权技术和综合评价方法三项。针对此次黑河流域水资源合理配置的特点,在配置方案合理性评价过程中,提出了一套集指标体系构建、指标筛选、协商定权、组合评价、群组决策于一体的,完整实用且有理论基础的水资源配置合理性评价方法体系,其中指标筛选采用以主成分分析方法为主的现代多元统计学方法;赋权技术提出了综合主客观权重优势的组合赋权法定权,并运用混沌优化算法解决了多维非线性权重模型的不易求解的问题;在评价方法上,引入物元

可拓理论、数据包络分析方法用于水资源配置方案的优选过程。

### 2. 配置方案评价

配置合理性评价体系是一个三层递阶的层次化结构,从上而下为目标层、准则层和指标层。目标层是评价的总控,主要通过是否在公平的情况下促进全流域社会、经济、生态环境、资源的协调发展来进行衡量;准则层包括社会合理性、经济合理性、生态环境合理性、资源合理性、效率合理性与发展协调度六条准则,整体构成水资源配置合理性的评价准则体系;指标层包括评价因子与评价指标两部分。评价因子是构成评价准则的主要因素,可反映准则的特征状态,而评价指标是评价因子的基本元素和单元,此次评价在6个准则评价因子99个指标中筛选了63个指标作为评价指标群。

在分准则和综合评价的基础上,采用不同评价方法对各方案进行了对比分析,见表2。综合上述评价结果,方案2配置最合理,作为本次配置的推荐方案。

## 六、黑河流域水资源实时调度

### 1. 流域水资源实时调度方法

流域水资源调度是一个典型的多时段序贯决策过程,决策的依据主要是不同时段的来水信息,决策目标包括当前时段的配水效益最大和余留期望效益最大。受水文过程随机性和实时调度事前决策的影响,合理配置

方案不能直接应用于水资源实时调度。此次攻关提出了与合理配置方案相嵌套的实时调度的方案生成与操作方法,概括为“宏观总控、长短嵌套、实时决策、滚动修正”方法,其中“宏观总控”是指实时调度以流域水资源合理配置方案作为总控;“长短嵌套”是根据中长期气象和来水预报信息制定长时段调度预案,并以此为上层嵌套方案,根据实时调度时段预报信息制定短期调度方案;“实时决策”是逐时段预报当前时段降雨、径流、气象、土壤墒情信息,并结合水情状况做出当前时段的调度决策;“滚动修正”就是根据新的径流信息、气象信息、土壤墒情信息修正历史预报信息所带来的偏差,逐时段、逐月滚动修正,直到调度期结束。通过上述过程,有效实现了宏观水资源配置规划方案和实时调度操作方案的总控与嵌套,保障了实时调度的宏观合理性及可操作性。

### 2. 黑河流域水资源实时调度仿真模拟

黑河流域水资源实时调度模型与水资源合理配置模型、地下水数据模拟模型、中长期径流预报模型、分布式水文模型、土壤墒情预报模型和水资源实时调配模型,整体形成了实时调度决策系统。主要输入信息包括工程信息、水文信息、计算单元需水信息以及预报信息等,输入结果包括实时调度结果和中长期统计结果,输出项如短时径流预报

表1 黑河流域多年平均供需平衡结果 (单位:万 m<sup>3</sup>,%)

水平年	需水	供水	缺水量			缺水率			
			农业	生态	总量	农业	生态	综合	
现状年	270146	237686	18598	13861	32459	10.7	15.9	12.0	
2010年	方案1	245472	223020	10327	12126	22453	8.7	10.9	9.2
	方案2/6	245472	228446	6422	10605	17027	5.4	9.5	6.9
	方案3	245472	221868	11089	12516	23605	9.3	11.2	9.6
	方案4	245472	226373	5843	13256	19099	4.9	11.9	7.8
	方案5	250693	229371	7854	13467	21321	6.1	12.6	8.5
2020年	方案1	242847	229417	3174	10256	13430	2.9	9.3	5.5
	方案2	242847	226195	5561	11091	16652	5.1	10.1	6.9
2030年	246089	234535	2440	9114	11554	2.4	8.3	4.7	

数据,灌区不同作物的土壤墒情和需水量,各时段引水口门引水量,水库蓄放水量,计算单元生活、工业、农业和生态需水量、供水量和缺水量,以及时段河道各计算断面的过水量。

利用构建的实时调度系统对 2001 和 2002 年进行模拟仿真,包括土壤墒情预报模拟、不同时间段的河道过水量、平原水库运行状况、全年需水变化动态过程等,从历史调度仿真结果看,所构建的实时调度系统能够较好地模拟调度过程,可用于未来水量实时调度决策。

### 七、研究成果的实践应用

#### 1. 中游分水方案和主要断面控制性过流指标

初始水权分配应采取逐级分配方式。此次攻关在国务院批复的黑河干流省际分水方案的框架下,在摸清了中游地区水循环规律的基础上,结合区域水资源合理配置方案,给出了黑河干流中游地区甘州、临泽、高台三区县取、耗水两套口径的区域初始水权分配方案。

上述方案已经得到甘州、临泽和高台三区(县)水务部门和政府的认同

和接受,于 2003 年 6 月经张掖市人民政府批准,以“张政发[2003]60 号”文件下发试运行一年,作为甘州、临泽、高台三区(县)2004 年用水总量控制的指导性文件。目前张掖市政府和水务部门依据这一方案完成了甘州、临泽、高台三区(县)初始水权证的发放工作。

#### 2. 下游配水方案和主要断面控制性过流指标

下游各行政区单元的不同水平年水资源合理配置方案见表 3。

3. 2003 年黑河水量调度中的应用  
此次攻关所开发的水量调配软件系统相关模型和调配方法在 2003 年度黑河水量实时调度中得到了应用,具体包括五个方面:

①进行中长期出山口径流预报,为调度人员制定余留期调度预案提供径流资料参考。

②制定各月调度预案,结合专家经验,帮助调度人员选择各月调度方式。

③进行实时出山口径流预报,为制定短期调度提供决策依据。

④进行实时各灌区土壤墒情预报,

为调度决策提供土壤墒情信息,在三次全线闭口的决策和第二次决定延长闭口时间过程中起到了较好的辅助作用。

#### ⑤模拟预测河道水情。

黑河流域 2003 年度水量调度工作取得重大突破,圆满完成了国务院制定的 3 年水量调度任务,突出表现在:狼心山断面以下断流天数较往年减少了 90 天左右,有效补充了下游河段地下水;实现全干流过流,时间长达 27 天;首次实现了 3 年黑河水量统一调度以来的西居延海入水,累计入湖水量约 0.27 亿 m<sup>3</sup>;下游灌溉面积大大加大,有效地恢复了下游生态系统。

### 八、实现黑河流域水资源统一调配的若干建议

根据此次攻关研究取得的认识,结合黑河流域水资源管理和生态恢复的需求与态势,提出以下六点建议,即:①尽快批复中下游地区水资源配置方案,确定主要断面过流指标;②将黑河流域作为全国流域节水型社会建设试点流域;③加强水分调控保障,推进黑河流域生态恢复工程;④完善流域用水计量和水情监测网络;⑤加快干流骨干调蓄工程建设;⑥尽快启动“数字黑河”工程。

#### 参考文献:

1 陈家琦,王浩,杨小柳等.水资源学.北京:科学出版社,2002

2 王浩,王建华等.流域水资源合理配置的研究进展与发展方向.水科学进展,2003.6

3 王浩,陈敏建,秦大庸等.西北地区水资源合理配置与承载能力研究.郑州:黄河水利出版社,2003.5

(作者王浩为中国水利水电科学研究院水资源所所长,教授级高工;常炳炎为水利部黄河水利委员会黑河流域管理局局长,教授级高工;秦大庸为中国水利水电科学研究院水资源所副所长,教授级高工) 责任编辑 唐瑾

表 2 不同配置方案比较

评价方法		方案	方案	方案	方案	方案	方案
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
投影法	流域评价价值	0.500	0.672	0.362	0.577	0.609	0.660
	排序	5	1	6	4	3	2
模糊物元法	流域评价价值	0.653	0.989	0.452	0.827	0.876	0.966
	排序	5	1	6	4	3	2
灰色关联法	流域评价价值	0.839	0.998	0.777	0.880	0.897	0.976
	排序	5	1	6	4	3	2
方法综合集结	流域评价价值	0.664	0.886	0.531	0.761	0.794	0.867
	排序	5	1	6	4	3	2

表 3 下游各行政区水资源合理配置方案 (单位:万 m<sup>3</sup>)

区域	现状年		2010 年		2020 年	
	地表水	地下水	地表水	地下水	地表水	地下水
鼎新	10668	1857	8900	560	8315	697
东风场	2985	10724	4507	11904	4703	11578
额济纳	40581	2738	49905	2427	50063	2630
合计	54234	15319	63312	14891	63081	14905

说明:①表中的东风场配水包括东风场和哨马营~狼心山区间的天然生态耗水;

②额济纳为狼心山以下东河、西河、达镇及胡杨林保护区和东居延海各种耗水。

## Abstracts

### Analysis of Safety Factor of Water Resources in China in 2020 and Strategy Suggestion

Song Jianjun, Zhang Qingjie, Liu Yingqiu

**Abstract:**To meet the goal that the GDP will two doubled in China by 2020 based on that in 2000, water resources is necessary as supporting condition. At present, there are more and more water apply in China with the stretching coefficient of water apply being obviously decreasing, the change of water apply structure and the change of industry structure tending towards synchronization, low output efficiency from water apply. By 2020, the development will get into a new level in China. In order to ensure a balance between supply and demand of water resources, we must build an economic system suitable to the water resources bearing capacity. Therefore, a guarantee system suitable to water-saving society must be built by strengthening construction of law system, an engineering technical system suitable to optimized water resources configuration must be built through technical innovation. In addition, we should build a water market system with combination of administration configuration, water user participation and market regulating as well.

**Key words:**Water resources    Balance between supply and demand    Guarantee    Strategy

### Research on the Water Resources Allocating in the Heihe River Basin

Wang Hao, Chang Bingyan, Qin Dayong

**Abstract:**In the research on the water resources allocating in the Heihe River Basin, it puts forward to finish the base simulation of the water resources, macro-planning and daily dispatching with "simulation-configuration-evaluation-dispatch" as a hiberarchy system for water resources allocating in the basic sectors of the river basin. Otherwise, it has realized coupling and inlay between the various sectors by constructing management information system of water resources allocating. All these will provide comprehensive technical support for the configuration planning and management dispatching of the water resources in the Heihe River Basin. Now, some research results have been applied in water dispatching of the Heihe River Basin and construction of a water-saving society in the Zhangye City.

**Key words:**the Heihe River Basin  
Water resources    Allocation

### A Study on Trend and Driving Forces of Carrying Capacity Change for Water Resources in Beijing City

Meng Fande, Wang Xiaoyan

**Abstract:**Firstly, the characteristics and influence factor

of water resources bearing capacity are analyzed in this paper. Then, according to the statistical data of city and county in Beijing area, the trend of water resources carrying capacity and its driving forces in Beijing City during the last 22 years are discussed. The results showed that population, GDP and society total production valual are main driving forces, which play an important role in the changing of water resources bearing capacity. By using regressive equation, along with population growth and economic development, the prediction of water resources in Beijing city is done for 2010 and 2015.The analytical results and conclusion of this paper will provide scientific basis for sustainable development of water resources in Beijing city.

**Key Words:**Water resources bearing capacity  
Driving forces    Regressive prediction  
Beijing city

### Discussion on the Financial Compensation for Water Resources Renewing

Zhang Chunling, Yang Xiaoliu, Ruan Benqing

**Abstract:**It is a link necessary to renew water resources for the sustainable development of water resources. The financial compensation is helpful to maintain normal water cycle and water body function, ensure water resources protection, improve sustainable utilization of water resources, and accelerate renewing water resources, by means of financial encouragement and benefit coordination. It is a very complicated system project to build and perfect the mechanism of financial compensation for water resources renewing, which involves many subjects such as economy, society, resources and environment. Therefore, the concerned research should be strengthened.

**Key words:**Water resources    Renew    Compensation

### Research on Area Source Pollution Controlling Technology for the Dianchi Lake

Chen Jining, Li Guanghe, Wang Hongtao

**Abstract:**With such point source pollution has been effectively controlled as industrial waste water and domestic sewage, China is in the period that pollution structure has a fast transformation with the load proportion of the area source pollution raising. After making research on how to control area source pollution in the Dianchi Lake, the project team mainly from Qinghua University have got a series of important results in the respects of area source controlling technology, project implementing, software developing and running management, which will provide a beneficial reference to control area source pollution in large scale.

**Key words:**Area source pollution    Controlling technology  
Dianchi Lake