

我国水资源合理配置的现状和未来

王 浩

1 前言

水资源危机是困扰世界的三大危机之一，目前世界上约有 80 多个国家、40% 的人口面临缺水问题。1997 年 1 月，联合国发布的《世界水资源综合评估报告》指出，水问题将严重制约 21 世纪全球的经济和社会发展，并可能导致国家间的冲突。

中国是世界上最为缺水的国家之一，人均水资源占有量仅为世界平均水平的 1/4，每亩耕地占有的水资源量仅为世界平均值的 80%。我国水资源不仅总量缺乏，而且时空分布也很不均匀。

从水资源的时间分布来看，年际年内变化很大。长江以南的中等河流，最大与最小年径流量的比值在 5 以下，北方则多在 10 以上。水资源的年际变化差异还表现在，径流量存在明显的丰枯交替及连续数年出现丰水或枯水的现象。径流年内分布也很不均匀。年径流量中连续 4 个最大月所占的比例，长江以南及云贵高原以东的地区为 60% 左右，西南地区为 60%—70%，长江以北则为 80% 以上，海河平原高达 90%。径流年际年内分布情况，给水资源的开发利用带来很大的困难。

从水资源的空间分布来看，南北差异较大。由于我国降雨分布由东南向西北递减的总趋势，形成南方水多、北方水少的局面。长江以南的南方地区河川径流量约占全国总径流量的 83%，而北方地区的河川径流量仅占全国总径流量的 17%。按流域面积平均，北方各大流域的水资源量均低于全国平均水平，如海滦河片仅达到全国平均值的 1/2，黄河片还不到全国平均值的 1/3。

水资源分布与需求的极端不一致也是我国水资源的一大特点。我国的水土资源分布情况是南方水多地少，北方水少地多。南方单位耕地面积所占的河川年径流量为 $45000\text{m}^3/\text{hm}^2$ ，为全国平均水平的 1.7 倍；北方单位耕地面积所占的水资源量为 $45103/\text{hm}^2$ ，为全国平均水平的 17%；南北差异达 10 倍。其中最高的浙闽片为全国平均水平的 2.43 倍，最低的海河流域单位耕地面积所占的水资源量只有全国平均水平的 11%，两者差距达 22 倍之多。按人口平均，长江流域以北的

北方片人均水资源占有量仅为南方片的 1/3, 其中最高的珠江流域为最低的海河流域的 12.9 倍。由于南北方水资源供需状况不同, 使南北方水资源供需矛盾呈现不同的特点, 南方水资源供需矛盾主要属于工程型、污染型或管理型缺水, 北方则以资源型缺水为主, 部分地区存在浪费型缺水。

水资源的时空分布与社会经济系统、生态系统对水资源需求的不一致性, 是人类对水资源进行调控的内在动因。

2 水资源合理配置含义辨析

水资源优化配置在我国是在水资源出现严重短缺和水污染不断加重这样一个背景下于上个世纪 90 年代初提出来的, 最初是针对的是水资源短缺地区和用水的竞争性问题, 以后随着可持续发展概念的深入, 其含义不仅仅针对水资源短缺地区, 对于水资源丰富的地区, 从可持续角度, 也应该考虑水资源合理利用问题, 因而也存在水资源合理配置问题, 只是目前在水资源短缺地区此问题更为迫切而已^[4]。

对于水资源合理配置的含义, 很多学者提出自己的解释。李令跃、甘泓^[4]从可持续发展的角度对水资源合理配置进行了定义, 即“在一个特定的流域或区域内, 以可持续发展为总原则, 对有限的、不同形式的水资源, 通过与非工程措施在各用水户之间进行科学分配”。

王顺久等^[5]认为水资源优化配置是指在一个特定流域或区域内, 工程与非工程措施并举, 对有限的不同形式的水资源进行科学合理的分配, 其最终目的就是实现水资源的可持续利用, 保证社会经济、资源、生态环境的协调发展, 水资源优化配置的实质就是提高水资源的配置效率, 一方面是提高水的分配效率, 合理解决各部门和各行业(包括环境和生态用水)之间的竞争用水问题。

赵斌等认为^[6]: 水资源合理配置是指在一定时段内, 对一特定流域或区域的有限的多水质水资源, 通过工程和非工程措施, 合理改变水资源的天然时空分布; 通过跨流域调水及提高区域内水资源的利用效率, 改变区域水源结构, 兼顾当前利益和长远利益; 在各用水部门之间进行科学分配, 协调好各地区及各用水部门之间的利益矛盾, 尽可能地提高区域整体的用水效率, 实现流域或区域的社会、经济和生态环境的协调发展。

王济干等^[7]提出了基于和谐性的水资源配置, 水资源和谐性配置指在一个特

定的区域（流域）、时间内，以和谐发展为总原则，将一定量和质的水资源，按不同的用途和需求，通过工程和管理措施在各用水户之间进行的科学合理的分配。

王浩、秦大庸、王建华等在黄淮海流域水资源合理配置中，针对北方干旱地区提出了水资源合理配置的定义：在水资源生态经济系统内，按照可持续性、有效性、公平性和系统性的原则，遵循自然规律和经济规律，对特定流域或区域范围内不同形式的水资源通过工程与非工程措施，对多种可利用水源在宏观调控下进行区域间和各用水部门间的科学调配^[6]。

我国颁布的《全国水资源综合规划大纲》对水资源合理配置给出了一个比较权威的定义，即“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配置”^[9]。

水资源合理配置是一个极其复杂的系统工程，随着人们的认识水平提高和科学技术的不断发展以及水资源合理配置实践的不断深化，水资源合理配置的概念逐步明确，其内涵日益丰富。在探索如何合理配置水资源的过程中，人们逐渐认识到，水资源配置的客观基础，是“社会经济—资源—生态—环境”复杂巨系统中宏观经济系统、水资源系统、生态系统以及环境在其发展运动过程中的相互依存与相互制约的定量关系，这一关系集中体现在用水竞争性和投资竞争性上。水资源优化配置的目标，是兼顾水资源开发利用的当前与长远利益、兼顾不同地区与部门间的利益、兼顾水资源开发利用的社会、经济和环境利益，以及兼顾效益在不同受益者之间的公平分配。有效性、公平性和可持续性水资源合理配置必须遵循的三大原则。水资源配置的主要内容包括，在空间上，通过跨地区、跨流域调水来调剂水资源的余缺；在时间上，通过水库等调节工程来解决年内和年际水资源分布不均匀的问题；在不同的国民经济用水部门间，按照协调发展的投入产出关系实行计划供水；在近期目标和长远目标之间，既注重满足当前需要，也要积极进行水资源的保护与治理以形成水资源开发的良性循环；在开源与节流的关系上，坚持在节约的基础上扩大供水能力，控制需水的过度增长；在水资源的开发利用模式上，不仅重视原水的开发，更要注重污废水的再生处理及回用；在

除害与兴利的关系上,要注重化害为利,将洪水转化为可用的水资源^[10]。

3 我国水资源配置研究历程

我国的水资源科学分配方面的研究始于 20 世纪 60 年代,最初的研究以水库优化调度为先导。80 年代初,由华士乾教授为首的研究小组对北京地区的水资源利用系统工程方法进行了研究,并在国家“七五”攻关项目中加以提高和应用,该项研究考虑了水量的区域分配、水资源利用效率、水利工程建设次序以及水资源开发利用对国民经济发展的作用,成为水资源系统中水量合理分配的雏形^[11]。

我国水资源配置方面的研究虽然起步较迟,但发展很快。特别值得注意的是改革开放以来的国家重点科技攻关计划对我国水资源合理配置发展起到的巨大推动作用。国家重点科技攻关计划通过组织大批科研力量联合攻关,取得了一大批在国内外有影响的、具有国际先进水平的成果,大大推动了我国水资源应用基础研究领域的发展,已经成为我国水资源领域包括水资源合理配置领域科学进步发展的里程碑。下面重点介绍以国家重点科技攻关计划为主线的水资源合理配置的五个发展阶段。

3.1 第一阶段 就水论水^[9]

水资源优化配置包括需水管理和供水管理两方面的内容。在需水方面通过调整产业结构与调整生产力布局,积极发展高效节水产业抑制需水增长势头,以适应较为不利的水资源条件。在供水方面则是协调各单位竞争性用水,加强管理,并通过工程措施改变水资源天然时空分布与生产力布局不相适应的被动局面。在水资源合理配置的第一阶段存在“以需定供”和“以供定需”两种片面思想的水资源合理配置模式。

一、“以需定供”的水资源配置

认为水资源是“取之不尽,用之不竭”,以经济效益最优为惟一目标。以过去或目前的国民经济结构和发展速度资料预测未来的经济规模,通过该经济规模预测相应的需水量,并以此得到的需求水量进行供水工程规划。这种思想将各水平年的需水量及过程均作定值处理而忽视了影响需水的诸多因素间的动态制约关系,着重考虑了供水方面的各种变化因素,强调需水要求,通过修建水利水电工程的方法从大自然无节制或者说掠夺式地索取水资源。其结果必然带来不利影

响, 诸如河道断流, 土地荒漠化甚至沙漠化, 地面沉降, 海水倒灌, 土地盐碱化, 等等。另一方面, 由于以需定供没有体现出水资源的价值, 毫无节水意识, 也不利于节水高效技术的应用和推广, 必然造成社会性的水资源浪费。因此, 这种牺牲资源、破坏环境的经济发展, 需要付出沉重的代价, 只能使水资源的供需矛盾更加突出。

二、“以供定需”的水资源配置

“以供定需”的水资源配置, 是以水资源的供给可能性进行生产力布局, 强调资源的合理开发利用, 以资源背景布置产业结构, 它是“以需定供”的进步, 有利于保护水资源。但是, 水资源的开发利用水平与区域经济发展阶段和发展模式密切相关, 比如, 经济的发展有利于水资源开发投资的增加和先进技术的应用推广, 必然影响水资源开发利用水平。因此, 水资源可供水量是随经济发展相依托的一个动态变化量, “以供定需”在可供水量分析时与地区经济发展相分离, 没有实现资源开发与经济发展的动态协调, 可供水量的确定显得依据不足, 并可能由于过低估计区域发展的规模, 使区域经济不能得到充分发展。这种配置理论也不适应经济发展的需要。

3.2 第二阶段 基于宏观经济的区域水资源优化配置理论^[12]

无论是“以需定供”还是“以供定需”, 都将水资源的需求和供给分离开来考虑, 要么强调需求, 要么强调供给, 并忽视了与区域经济发展的动态协调。于是结合区域经济发展水平并同时考虑供需动态平衡的基于宏观经济的水资源优化配置理论应运而生^[6]。

为了借鉴国内外水资源管理的先进理论、方法和技术, 由国家科委组织各有关单位, 在 1986-1987 年期间与美国东西方研究中心环境与政策研究所合作, 对京津地区的水资源管理政策进行了先导性的合作研究, 建立了基本的区域水资源政策框架。在 1991-1993 年期间, 在国家科委和水利部的直接领导下, 开展了联合国开发计划署的技术援助项目《华北水资源管理》(UNDP CPR/88/068), 初步开发出了华北宏观经济水资源优化配置模型。UNDP 华北水资源项目为联合国对发展中国家援助的最大软科学项目, 由中国水利水电科学研究院负责主持研究, 北京信息控制研究所、清华大学等多家单位均派专家参加。这一项目重点研究了北

京、天津、太原、青岛、潍坊等缺水城市和河北全省的水供需问题，并分别建立了相应地区的宏观经济水资源管理模型。

90 年代以来，随着全球水资源危机的出现，以及经济、环境、社会协调发展，人口、资源、生态良性循环的可持续发展理论的日益深入人心，区域水资源规划与管理问题在理论和实践上均出现了一些列引人注目的变化。特别在我国华北地区，水资源已成为本区域乃至中国 21 世纪可持续发展过程中政治、经济、环境和社会发展诸多矛盾的焦点。一方面，为根本扭转华北水资源的短缺局面，更大范围内的水资源优化配置方案亟待做出决策；另一方面，为了使决策科学化，迫切需要在规划理论、决策方法和定量手段上实现一系列的突破。

在国家“八五”攻关《华北地区宏观经济水资源规划理论与方法》专题在项目办公室和课题专家组的指导下，以中国水利水电科学研究院水资源所为主持研究单位，航天工业总公司 710 研究所、清华大学水利水电工程系、水利部南京水文水资源研究所为参加单位，并会同北京、天津、河北、河南、山东和山西等地区的水利部门，进行了多学科多部门的深入研究，提出了基于宏观经济的区域水资源优化配置理论，提出了在区域水资源优化配置理论指导下的多层次多目标群决策方法，研制了具体体现这一多层次多目标群决策方法论的区域水资源优化配置决策支持系统，应用所研制的区域水资源优化配置决策支持系统实际进行了华北地区水资源优化配置的方案研究及其它若干重要的研究。

在对问题的描述上，基于宏观经济的区域水资源优化配置理论不是单纯着眼于水资源系统本身，而是认为水资源系统是区域自然—社会—经济协同系统的一个有机组成部分。区域宏观经济系统的长期发展，即受其内部因素的制约，诸如投入产出结构、消费积累结构、调入调出结构、技术进步政策、投资政策及产业政策的影响，同时也受到外部自然资源和生态环境条件的制约。一方面经济规模的增长会促进水需求的增长，另一方面水供给的紧缺也会限制经济的增长并促使经济结构作适应性的必要调整。

水资源系统的长期发展模式也受到宏观经济系统发展的巨大影响：一方面，经济的不同发展格局会在很大程度上改变水需求；另一方面水资源系统的投资也主要来源于当地经济的积累。该研究动态地对区域宏观经济系统和水资源系统同时进行描述，揭示出这两个系统间存在相互依存、相互制约的关系，为区域水资

源的规划与管理增加了新的内涵。

国家“八五”攻关《华北地区宏观经济水资源规划理论与方法》在国内外首次提出了区域水资源优化配置的交互式多层次多目标多决策者的决策方法 (IHGMOA)。这一决策方法是在基于宏观经济的区域水资源优化配置理论的指导下的、不同层次的多个决策者参与的、定性与定量分析互补的、优化与模拟技术联合应用的一种人机交互多目标分析过程。较之于以往的决策方法,其主要优点在于:充分发挥了决策过程中决策者与计算机各自的特长,符合区域水资源决策问题的方式,接近决策过程中人的思维方式,从理论上保证了省城方案的代表性及客观性,向决策者提供信息的充分性,可处理大规模多目标问题。

3.3 第三阶段 基于二元水循环模式的水资源合理配置^[13]

水资源合理配置的目标,是协调社会经济系统、水资源系统、生态系统以及环境之间的关系,追求各系统的可持续发展。“八五”攻关成果虽然考虑了宏观经济系统和水资源系统之间相互依存、相互制约的关系,但是忽视了水循环演变过程与生态系统系统之间的相互作用关系。水资源系统和生态系统之间相互依存、相互制约的关系主要体现在两个方面:一方面,生态系统影响着截留、蒸发、产流、汇流等水循环过程,生态系统的种类和规模对水资源的数量和质量起着至关重要的作用;另一方面,水是支撑生态系统的基础资源,它的演变影响着生态系统的演化。

国家“九五”攻关专题《西北地区水资源合理配置和承载能力研究》在“八五”攻关的基础上,针对内陆干旱绿洲生态的特点,进一步将水资源系统与社会经济系统、生态系统三者联系起来统一考虑水资源的合理配置问题,提出了基于二元水循环模式的水资源合理配置理论与方法,对“八五”攻关提出的基于宏观经济的水资源合理配置理论进行了一系列的拓展。

在决策服务对象上,将单纯考虑社会经济系统,拓展为同时考虑社会经济和生态环境系统;在决策目标上,将单纯经济效益最大,拓展为经济效益与生态效益之和最大。在合理配置问题涉及的生态系统方面,过去仅涉及属于人工生态的城市、工业、农业和畜牧业等,本次研究不仅包括了人工生态系统,而且包括了天然生态系统。

迄今为止的水资源合理配置研究,其决策对象是各类水资源开发利用问题,

从流域水循环角度看,均属于人工侧支水循环的范畴。本次研究的另一进展,是同时考虑了人工侧支水循环和天然水循环,且考虑了人工水循环和天然水循环的相互作用。这一拓展,不但使水资源开发利用保护的资源基础更为合理,而且为生态需水研究和水资源演变研究奠定了科学基础。

需水结构是水资源合理配置的前提条件。以往水资源合理配置研究的一个重大进展,是考虑的发展进程中的经济结构变化;本次研究更进一步,不但考虑了经济结构的变化,而且考虑了生态系统层圈结构的变化,从而使经济需水的配置和生态需水的配置同时成为定量决策系统的内生变量。

在节水潜力的估计方面,传统方法是考虑产业结构调整节水效果和工程系统的节水措施,并以工程系统用水效率的提高作为节水的衡量标准。本次研究由于有二元模型作为基础,可以从流域水循环过程中的有效蒸发和无效蒸发的消涨来考虑问题,因而增加了从区域水资源利用效率提高的角度来考察水资源配置合理程度的手段。

在对供水对象的考虑上,过去是单纯配置经济用水,本次研究是同时配置经济用水和生态环境用水。并针对西北干旱区实际,对生态用水赋予了更高的优先级。事实上,也只有统一考虑流域水循环的基础上,才能对生态用水、经济用水、水资源演变、生态环境演变作一全面的定量分析。

在水资源配置应当保持的基本平衡关系上,本次研究在水土平衡中拓展了天然生态面积变化与水资源支撑条件关系的变化;在水量平衡中拓展了经济用水和生态用水的平衡;在水化学平衡中着重突出了水盐平衡的问题。

在所考虑的主要约束条件方面,本次研究的重要拓展是增加了生态系统层圈结构的合理比例和最小生态需水量等内容,为生态保护准则的制定提供了第一手的依据。

在基本的定量手段方面,除地面观测信息外,又增加了遥感信息,地面和空中两套数据相互校核,增加了研究的可靠性。

最后,在系统决策机制方面,除了考虑经济机制外,还同时考虑了水资源演变机制和水与生态系统的相互作用机制,从而使所得结论建立在更为科学合理的基础之上。

基于流域二元演化模式的水资源合理配置理论与方法,与基于宏观经济的水

资源合理配置理论与方法之间的分项比较, 参见表 1。

表1 基于二元模式的水资源合理配置理论方法研究进展

	基于宏观经济的水资源配置	基于二元模式的水资源配置
决策服务对象	社会经济系统	社会经济系统
		生态环境系统
决策目标	经济效益最大	经济效益与生态效益之和最大
涉及生态系统	人工生态	人工生态
		天然生态
水资源配置范畴	流域人工侧支水循环	流域人工侧支水循环
		流域天然水循环
水资源配置基础	不考虑水资源演变	考虑水资源演变的数量与分布特征
		考虑水资源演变的资源与环境效应
需水结构	国民经济产业结构	国民经济产业结构
		生态系统层圈结构
节水潜力	产业结构调整	产业结构调整
	从工程角度考虑节水	从工程角度考虑节水
		从区域水循环角度考虑节水
供水对象	社会经济用水	社会经济用水
		生态环境用水
基本平衡关系	水土平衡	水土平衡
	经济用水的供需平衡	经济用水的供需平衡
		经济用水和生态用水的平衡
	污水排放与治理的平衡	水盐平衡与水化学平衡
水沙平衡		
主要约束条件	水资源可利用量	国民经济水资源可利用量
	投资	投资
		生态系统的层圈结构
		最小生态需水量
		流域水资源的可再生性维持
基本定量手段	地面观测信息与数学模型	地面观测信息与数学模型
		遥感信息与地理信息系统
决策机制	经济机制	经济机制
		水资源演变机制
		水与生态系统相互作用机制

根据合理配置问题的决策特点, 本研究建立了相应的多层次、多目标、群决策求解方法。对流域水资源、社会经济和生态环境三个系统分别用数学模型加以描述和模拟, 再用总体模型进行综合集成与优化。流域水资源二元演化模型描述天然循环和人工侧支循环之间此消彼涨的相互作用和“四水”转化关系。宏观

经济模型描述产业部门之间的投入—产出关系，地区之间的调入—调出关系，以及年度之间的积累—消费关系。生态需水模型描述伴随水循环演变的水与生态系统的相互作用过程。多层次、多目标、群决策模型作为总体模型描述合理配置问题的各主要方面。通过总体模型与分系统模型的信息反馈，实现优化与模拟的结合，实现群决策过程中各决策主体间的交流，将决策风险和利益冲突减至最小。

3.4 第四阶段 以宏观配置方案为总控的水资源实时调度^[14]

随着我国人口增长和社会经济的发展，用水量不断攀升，造成或进一步加剧一些流域河湖干涸、河道断流、地下水位下降、林木枯亡、草场退化、沙尘暴肆虐等生态环境问题，不利于流域社会、经济、生态、环境的可持续发展。深层次分析这些流域所面临种种问题，其核心是在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之间强烈竞争背景下，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，统一合理调配流域水资源，是实现流域可持续发展的根本出路。

受流域水资源管理体制的约束，我国流域水资源统一调配实践未能实质性地全面铺开，一些问题严重的流域更多地依靠行政手段进行管理。随着流域水资源问题的普遍化和严重化，流域水资源统一调配与管理具有重大的现实意义和紧迫性，一些流域开始尝试对流域水资源实行统一调配，如黄河流域实行非汛期水量统一调度，防止河道断流。但由于流域水资源真正的统一调配刚刚起步，在调配的技术和系统建设方面还处于探索阶段，能够真正应用于区域水资源管理的调配系统很少，且区域水资源宏观优化配置与微观实时调度系统耦合尚有待加强，现状技术条件远远跟不上流域水资源统一管理和调配的要求。

在此形势下，国家“十五”攻关计划启动《黑河流域水资源调配管理信息系统》专题研究，开展以黑河流域为代表的我国北方半干旱流域水资源统一管理与调度实践研究。该专题在水资源调配基础理论方法研究中最突出的成果体现在两个方面：

一、首次提出并实践了以“模拟—配置—评价—调度”为基本环节的流域水资源调配四层总控结构，为流域水资源调配研究提供较为完整的框架体系。流域

水资源形成和演化依存于水循环, 流域水循环过程模拟是水资源调配的科学基础。随着人类活动对于下垫面和水循环路径的影响加剧, 传统集总式模拟方法已不能全面描述“自然—人工”二元模式下的流域水资源演变过程, 模拟手段趋向基于多源信息的流域水循环分布式全过程模拟; 在水循环模拟信息的支持下, 配置是对流域二元水循环及其伴生的经济与生态过程统一调控的有效手段。宏观水资源配置首先要实现生态环境用水和社会经济用水的平衡调控, 所遵循的调控决策机制主要包括流域水资源可再生性维持机制、水分—生态演替驱动机制和水分—经济的互动机制。进而对生态用水和社会经济用水进行再分配, 依据合理生态景观格局实现生态用水的合理配置, 通过水资源利用效率的提高和经济结构的调整实现国民经济用水的合理配置。由于流域水资源配置是一个复杂的多目标优化决策过程, 包含有大量的半结构化问题。受决策目标及决策过程复杂性的影响, 尽管在水资源配置过程中充分重视各局部的优化, 但配置方案合理性评价仍然是流域水资源调配总控体系中不可或缺的重要环节, 配置方案的合理性评价应针对配置方案对水资源全属性功能的维护和实现进行, 包括社会公平性、经济合理性、生态合理性、效率合理性和协调性等。由于水资源配置属于规划和事前决策范畴, 有限样本容量不可能完备描述实时调度所需的状态信息, 为实现配置方案在操作层面上的落实, 本次攻关提出了以合理配置方案为总控的水资源实时调度方案的生成方法和决策过程。上述“模拟—配置—评价—调度”层次化逻辑体系的提出, 为流域水资源调配的研究和实践提供了整体框架, 是流域水资源调配研究领域的重大突破。

二、首次在流域层面实现了水资源宏观配置方案和实时调度方案的耦合与嵌套, 为流域水资源统一管理提供了有效手段。流域水资源合理配置方案采用的是长系列过程模拟方法, 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。本次攻关提出了与合理配置方案相嵌套的水资源实时调度的方案生成与操作方法, 即“宏观总控、长短嵌套、实时决策、滚动修正”方法, 其中“宏观总控”是指实时调度是以流域水资源合理配置方案做为总控; “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，有效实现了规划层面的宏观水资源配置方案和操作层面的实时调度方案的总控与嵌套，保障了水资源实时调度的宏观合理性及可操作性。流域水资源实时调度决策过程示意图如图 1 所示。

3.5 第五阶段 经济生态系统广义水资源合理配置^[15]

水资源合理配置是解决区域水资源供需平衡的基础，以往国内外的水资源配置都未能将社会、经济、人工生态和天然生态统一纳入到配置体系中，并且在配置水源上，仅考虑地表水和地下水的配置，而对土壤水的配置涉及较少，甚至没有；配置目标也仅考虑传统的人工取用水的供需平衡缺口，对于区域经济社会和生态环境的耗水机理并未详细分析；由于以往的水资源合理配置模型未能与区域水循环模型进行耦合计算，仅根据经验或实验结果对区域水循环之间的转化关系进行简单处理，因此不能正确反映区域各部门、各行业之间的需水要求，导致水资源配置也不尽合理。

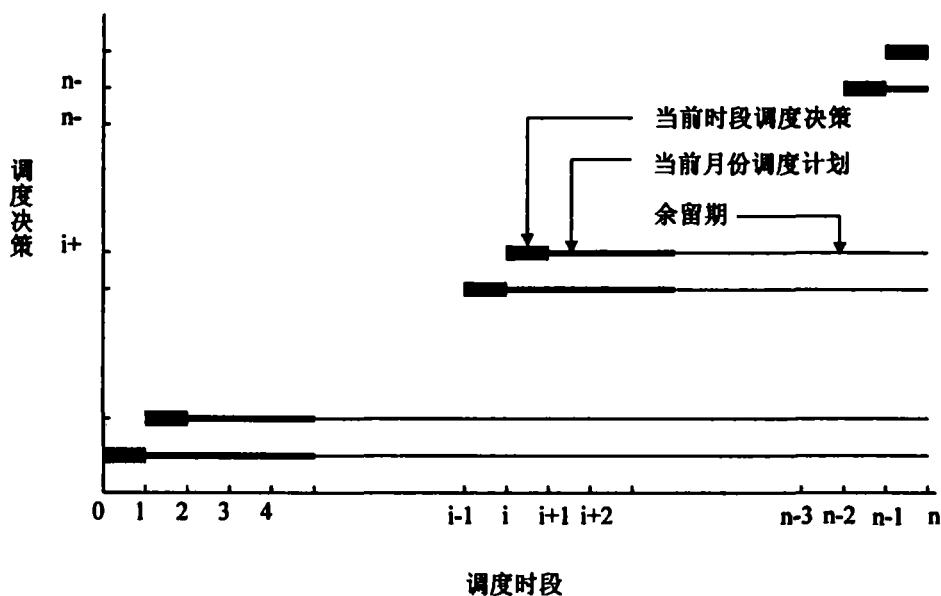


图 1 流域水资源实时调度决策过程示意图

《宁夏经济生态系统水资源合理配置》攻关项目提出了全新的广义水资源合理配置理论及其研究方法，从广义水资源合理配置的内涵出发，在配置目标上，满足经济社会用水和生态环境用水的需要，维系了区域社会-经济-生态系统的可

持续发展；在配置基础上，以区域经济社会可持续发展以及区域人工—天然复合水循环的转化过程为基础，揭示了水资源配置过程中的水资源转化规律，以及配置后经济社会和生态系统的响应状况，为区域水资源的可持续利用提供依据；在配置内容上，不仅对可控的地表水和地下水进行配置，还对半可控的土壤水以及不可控的天然降水进行配置，配置的内容更加丰富；在配置对象上，在考虑传统的对生产、生活和人工生态的基础上，增加了对天然生态配水项，配置对象更加全面，同时在对水资源量进行调控的同时，还对水环境即水质情况也进行调控，实现水量水质统一配置；在配置指标上，将配置指标分为三层：第一层为传统的供需平衡指标，反映人工供水量与需水量之间的缺口，用缺水量或缺水率表示；第二层为理想的需要消耗的地表地下水量与实际消耗的地表地下水量之间的差值，本次研究主要用于分析区域消耗黄河水资源量与黄河水量指标限制的关系；第三层是广义水资源（包括降水转化的土壤水在内）的供需平衡指标，即经济和生态系统实际蒸腾蒸发消耗的水量与理想状态下所需水量的差值，反映的是所有供水水源与实际耗水量之间的缺口。

所建立的经济生态系统广义水资源合理配置模型由多重模型动态耦合而成，以水资源合理配置模拟模型为核心，嵌套了区域水资源承载力模型、水循环模拟模型、宏观经济发展预测模型、水资源多目标优化模型、水资源合理配置模拟模型、工程经济效益分析模型和绿洲生态稳定性预测模型等。

4 我国水资源配置研究展望

4.1 水质水量联合配置和调度

可持续发展要求以水资源可持续利用支撑和保障经济社会的可持续发展，这就要求在水资源配置研究中，充分考虑代际间发展和用户之间分配的公平性，以及经济发展与水资源、环境之间的相互协调。因此，如何从理论和技术上体现水资源配置的公平性和水资源配置与经济、环境、人口的协调，是水资源配置研究必须解决的问题之一。一方面，随着经济社会发展，水资源开发程度的加剧，各行业用水量大幅度增加，相应的污水排放量也急剧增加；另一方面，根据水功能区划的要求，一定区域范围内的水体纳污能力是有限的，这就客观要求将反映水质特征的水环境容量视为一种资源，和水资源量统一协调地进行配置。可见，水体

的水环境容量, 污水与用水之间的关系, 污水排放和水体纳污量间的关系, 以及水质水量联合优化配置的理论、模型和方法, 是水资源优化配置的重要研究课题^[16]。

和水量配置一样, 只有以流域为单位进行水质水量统一配置, 才能真正实现流域水环境质量的根本改善, 水质水量联合调度面临在统一调度理论、方法、技术方面进展。首先, 在水质水量联合配置过程中, 一方面, 通过改进生产工艺、进行污水处理等措施控制污染物排放, 另一方面, 根据不同用水户对水质不同的需求分质供水, 实现水资源系统最大限度地支撑社会经济系统和生态系统的可持续发展。根据不同用水户对供应不同水质的响应, 研究基于分质供水的水量水质合理配置模型和方法, 是今后的研究方向之一。其次, 配置方案合理性评价也是流域水资源调配理论的重要组成部分之一, 水量水质联合配置由于具有与单纯的水量配置不同的配置对象, 其评价指标体系与评价方法需要专门研究。再次水量水质实时调度需要考虑水文和其他决策信息的随机特性, 以预报信息为基础, 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量水质联合实时调度方法值得研究。

4.2 基于水循环的水资源合理配置

流域水循环是流域水资源调配的科学基础, 对流域水循环的模拟是水资源调配的前提条件。“九五”攻关《西北地区水资源合理配置和承载能力研究》(简称“西北‘九五’攻关”)^[13]虽然提出了二元水循环的认知模式, 但真正实现二元水循环模拟以及提出基于分布式水文模型的层次化全口径水资源评价方法是在“973”《黄河流域水资源演变规律与二元演化模型》(简称“黄河‘973’项目”)^[17]研究中, 该研究将流域分布式水文模型和集总式水资源调配模型耦合起来, 是实现二元水循环过程的整体模拟的关键。水资源评价是水资源合理配置的基础, 西北“九五”攻关^[13]提出了层次化的水资源评价口径, 估算了西北地区广义水资源量, 黄河“973”项目基于分布式水文模型提出了层次化全口径水资源评价方法, 并在黄河流域进行了应用。

以后需要进行的研究工作包括: ①在《宁夏经济生态系统水资源合理配置》^[16]以及黄河“973”项目成果的基础上, 基于分布式水文模型和集总式水资源调配模型, 研究广义水资源的合理配置。②污染物运移模拟是水量水质统一调度的

科学基础,随着人类活动的加剧,传统的集总式模型已经不能全面描述越来越复杂的点源和面源污染物扩散、汇集、稀释、转化等物理化学过程,应重视有物理机制的、能反映污染物运移过程的分布式水质模型的研究,并基于此研究水质水量联合配置。③在提出流域水质水量联合合理配置成果的前提下,吸收黑河“十五”攻关的成果,把分布式水文、水质模型和集总式水资源调配模型动态耦合起来,互相反馈,实现基于分布式模拟的水量水质联合实时调度。

5 结语

本文以国家重点科技攻关计划为主线,综述了我国流域水资源合理配置发展历程,即就水论水、基于宏观经济的区域水资源优化配置理论、基于二元水循环模式的水资源合理配置、以宏观配置方案为总控的水资源实时调度、经济生态系统广义水资源合理配置五个阶段,从理论、方法、实践方面对五个阶段的标志性成果进行了总结。指出了今后水资源合理配置发展的方向,即由单一的流域水量配置和调度向全流域水质水量统一配置和调度发展,由集总式的、静态的水循环模拟和调控向分布式的、动态的水循环模拟与调控发展。

参考文献

- [1] 沈振荣等. 节水新概念——真实节水的研究与应用. 北京: 中国水利水电出版社. 2000 年
- [2] 沈振荣, 苏人琼主编. 中国农业水危机对策研究. 北京: 中国农业科技出版社. 1998
- [3] 李远华主编. 节水灌溉理论与技术. 武汉: 武汉水利电力大学出版社. 1999 年
- [4] 李令跃, 甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展. 2000. Vol.11(3)
- [5] 王顺久, 侯玉, 张欣莉, 丁晶. 中国水资源优化配置研究的进展与展望[J]. 水利发展研究. 2002. Vol.2 (9)
- [6] 赵斌, 董增川, 徐德龙. 区域水资源合理配置分质供水及模型[J]. 人民长江. 2004.Vol.35 (2)
- [7] 王济干. 区域水资源配置及水资源系统的和谐性研究. 河海大学博士论文. 2003
- [8] 王浩, 秦大庸, 王建华等. 黄淮海流域水资源合理配置. 北京: 科技出版社. 2003
- [9] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术细则. 2002
- [10] 王浩, 王建华, 秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J]. 水科学进展. 2004. Vol.15 (1)
- [11] 李雪萍. 国内外水资源配置研究概述[J]. 海河水利. 2002. No.5

[12] 许新宜, 王浩, 甘泓. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法. 郑州: 黄河水利出版社. 1997

[13] 王浩, 陈敏建, 秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究. 郑州: 黄河水利出版社. 2003

[14] 中国水利水电科学研究院水资源研究所. “十·五”国家重点科技攻关项目“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”课题“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”第三专题“黑河流域水资源合理配置评价研究”(2001BA610A-02-03) 研究报告. 2004

[15] 中国水利水电科学研究院水资源研究所. 宁夏经济生态系统水资源合理配置. 2005

[16] 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展. 灌溉排水学报. 2004. 23(2)

[17] 中国水利水电科学研究院水资源研究所. 国家重点基础研究(973)发展规划项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”(G1999043602). 2004

报告人简介

王浩, 男, 1953 年出生, 1978 年考入清华大学水利系农田水利专业, 1985 年硕士毕业于清华大学水利系水文水资源专业, 同年进入中国水利水电科学研究院工作, 1989 年博士毕业于清华大学经济管理学院系统工程专业. 1994 年成为水利部首批破格的教授级高工, 1997 年被聘为博士生导师, 2001 年起享受国务院政府特殊津贴, 2004 年被中央国家机关工委授予中央国家机关“五一”劳动奖章, 2005 年被全国总工会授予“全国先进工作者”称号. 现任中国水科院水资源研究所所长, 被清华大学、武汉大学等 4 所高校聘为兼职教授, 兼任水利部科学技术委员会委员、国家林业局专家顾问委员会委员、水资源与水电工程科学国家重点实验室学术委员会委员、中国自然资源学会副理事长、中国水利学会理事兼水资源专业委员会主任、中国可持续发展研究会常务理事兼水问题专业委员会主任等社会职务.