

文章编号: 0559-9350 (2002) 08-0001-06

流域水资源规划的系统观与方法论

王浩¹, 秦大庸¹, 王建华¹

(1 中国水利水电科学研究院 水资源所, 北京 100044)

摘要: 本文系统地阐述了在市场经济条件下, 水资源总体规划体系应建立以流域系统为对象、以流域水循环为科学基础、以合理的配置为中心的系统观, 以多层次、多目标、群决策方法作为流域水资源规划的方法论。另外在规划方案具体设置当中, 要兼顾可能和需要两方面因素。

关键词: 流域; 水资源; 规划; 方法

中图分类号: TV212 TU981

文献标识码: A

1 流域水资源规划的系统观

1.1 水资源规划指导思想的转变 中国水资源人均占有量 2220m^3 , 约为世界平均水平的 $1/4$, 而且水资源与土地资源的分布不匹配, 降水的多年变化和年内集中程度均很大, 导致一级流域年际间来水量可相差数倍, 年内最大 4 个月来水可达全年径流的 80% ^[1]。不利的水资源先天条件, 一是造成中国北方地区生态环境的相对脆弱; 二是导致了灌溉农业的巨大用水需求; 三是易于形成较为频繁的水旱灾害。

随着人口的不断增长和经济的持续高速发展, 大江大河的洪旱灾害虽得到一定程度的控制, 但区域水资源供需矛盾日益尖锐, 北方缺水地区的水资源开发利用程度已很高, 河道断流和湖泊洼淀萎缩现象频频; 南方水网地区用水后大量超标排水, 造成水体污染及富营养化严重; 西北干旱半干旱地区经济用水大量挤占生态环境用水, 导致荒漠化趋势蔓延和灌区次生盐渍化发展; 西南地区坡陡田高水低, 水资源开发利用十分困难。从整体情况看, 水资源现状承载能力和生态环境容量明显不足, 水资源开发、利用、治理、配置、节约、保护方面的基础设施建设相对滞后, 水资源统一管理体制和高效利用机制亟待加强。

相对脆弱的水资源基础条件, 以及为实现国家现代化目标提供保障的艰巨任务, 使得我国流域水资源规划在指导思想和方法两方面必须实现一系列的转变^[2]。

防洪方面, 实现从单纯抗御洪水与水争地, 到主动适应洪水规律与自然和谐相处的转变; 从单纯依靠工程体系防洪, 发展到同步进行生态建设和生产力布局调整以全面降低洪灾风险。

水资源供需方面, 实现从单纯扩大供水能力以满足用水需求, 到开源与节流并举; 从依靠工程措施的外延型扩大供水规模为主, 进化到依靠管理措施, 提高用水效率的内涵性挖潜为主。如农业灌溉应实现从单纯扩大灌溉面积满足粮食需求, 到努力提高满足效率并相应调整农林牧供水结构的转变, 实现从大水漫灌的传统方式, 到雨水、地表水、地下水补偿利用的设施化现代节水农业的转变; 城市与工业供水方面, 应实现从单纯扩大供水规模, 到调整产业结构和进行水资源需求管理的转变; 实现从以利用一次性水源为主, 向提高水循环利用率方向努力并积极开发替代性和再生性水源转变。

收稿日期: 2001-04-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (G1999043602)

作者简介: 王浩 (1953-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文水资源研究。

水资源保护方面，实现从单纯管理水量到水质水量统一管理，饮用水水源地和一般水体分别保护的转变；实现从单纯注重开发利用，到水源地涵养、供水排水、污水处理、再生回用的全过程管理，进行地表水、地下水的统一保护的转变。

生态环境建设方面，实现从单纯注重为经济发展供水，到经济发展用水与生态环境用水兼顾的转变；今后要为维持地下水适宜水位、维持河道生态基流、维持湖泊洼淀适宜水面面积、保持河道泥沙冲淤平衡、维持城市水环境景观等生态环境需求提供不同程度的保障，并为生态建设重点工程直接供水。

在相对严峻的水资源供需形式下，流域规划中更为强调体现当地的主要发展需求。在北方水资源短缺地区，以水量为中心进行水资源的合理配置，发电、航运等开发目标服从于供水。在南方水环境污染的水网地区，以水资源保护为重点进行江河水体的功能划分和水质的分级管理。在西北内陆干旱区和黄土高原地区，优先为生态环境建设安排用水。在西南水能资源丰富的山地丘陵地区，通过水能开发促进当地的生态环境保护和社会经济发展。对少数民族地区、落后贫困山区及边远地区，优先解决其生活饮水困难并改善供水水质。在发达地区和中心城市，在满足生活与生产需求的情况下注重开发水体的环境景观和旅游娱乐功能。对于人均水资源占有量在 500m^3 左右的海河、淮河、黄河、辽河等流域片，分期实施跨流域调水工程，在更大范围内进行水资源的合理配置。水资源规划指导思想的转变，已经或将要带来水资源规划方法产生了一系列进步。

1.2 现代流域水资源规模体系

1.2.1 以流域系统为对象进行水资源整体配置 流域是具有层次结构和整体功能的复合系统，由社会经济系统、生态环境系统、水资源系统构成，并通过水量、水质和投资形成了相互依存与制约的关系（图1），流域系统是最能体现水资源综合特性和功能的独立单元。因此，流域系统就成为了水资源整体配置最为适宜的对象，配置行为主要在三个层次上展开。

(1) 区域发展层次。在区域发展层次上的水资源整体配置必须兼顾除害与兴利、当前与长远、全局与局部，在社会经济发展与生态环境保护两类目标间进行权衡，如关于生态环境保护目标和社会经济发展目标的确定，力争使长期发展的社会净福利达到最大；(2) 经济行为层次。在经济层次上的水资源整体配置行为主要表现为对水资源需求侧与供给侧同时进行调控，使社会经济发展与资源环境的承载能力相互适应。适应经济规律作用，依据边际成本替代准则，进行生产力布局调整、产业结构调整、水价格调整、分行业节水等措施，抑制需求过度增长并提高水资源利用效率；(3) 在工程建设与调度管理层次。在工程建设层次上的水资源整体配置行为突出表现为调动各种手段改善水资源的时空分布和水环境质量以满足发展需求；由于水资源开发利用中存在的市场失效现象与外部性不经济性，因此管理行为重点在于通过水资源统一管理和总量控制使开发利用过程中的各种不经济性内部化。

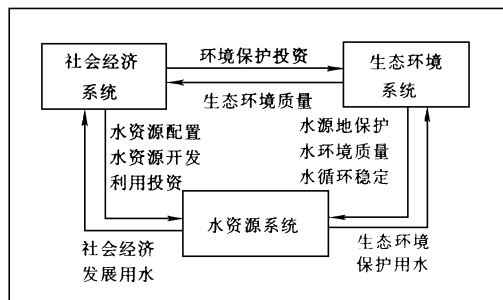


图1 流域系统结构与关系

1.2.2 以流域水循环演变作为规划的科学基础 流域水循环构成了社会经济发展的资源条件，是生态环境的控制性要素，也要解决一切水问题的科学基础。人类活动从循环路径、循环特性和循环动力机制3方面明显地改变了流域水循环过程。温室气体的大量排放引起了降水量变化和酸雨产生；土地利用和城市化使得流域地表水的产汇流特性和地下水的补给排泄特性发生很大改变。各种开发利用活动改变了江河湖泊关系和地下水埋深，并形成了由开发、利用、消耗、排泄等环节构成的人工侧支水循环^[3]（图2）。

由于流域水循环过程的演变，在对历史不同时期、不同发展阶段进行水资源动态评价时，必须将流域水文特性的改变与同期下垫面改变联系起来；在进行水资源开发利用评价时需要将生产力的不同发展阶段与开发利用方式的变化联系起来；在进行生态环境评价时必须将流域水循环改变与伴随水循

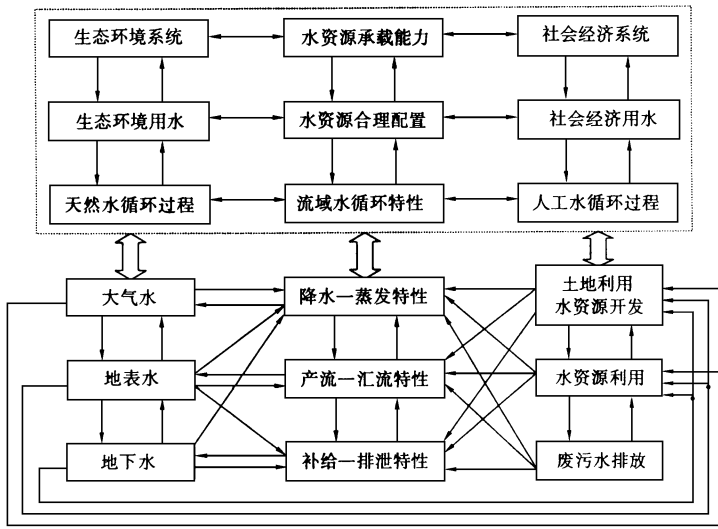


图2 流域水循环的二元结构与水资源规划的相互关系

环变化的水—沙、水—盐、水—化学、水—生态过程变化联系起来。以流域水循环为基础，进行水量—水质—生态环境三位一体的动态评价。流域水循环的结构与水资源规划的相互关系如图所示（图2）。

1.2.3 市场条件下的水资源供需分析模式 市场条件下的水资源供需分析模式，既不是单纯的以供定需，也不是单一的以需定供，而是根据社会净福利最大和边际成本替代两个准则确定合理的供需平衡水平。在宏观经济层次，由于抑制水资源需求和增加水资源供给都需要付出代价，因此二者间的平衡水平应以更大范围内的全社会总代价最小为准则。在微观经济层次，由于不同水平上抑制需求和不同水平上增加供给的边际成本都会发生变化，因此二者的平衡应以边际成本相等为准则。

在供需分析模式协调过程中，以边际成本替代性作为抑制需求或增加供给的基本判据，进行供需综合平衡（图3）。当转移大耗水产业至水资源丰富地区的边际成本更低时，则进行生产力布局调整；当实施跨流域调水至本地区的边际成本更低时，则进行跨流域调水。若由于投资约束而暂时不能实施具有最小边际成本的供水项目时，近期按以供定需模式进行规划方案的编制，同时说明以供定需模式对区域发展制约所引起的当地社会、经济、环境损失。

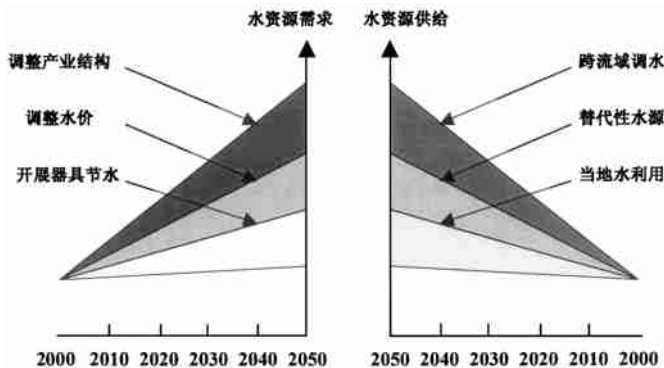


图3 水资源供需平衡的协调模式

1.2.4 以水资源合理配置为中心的总体规划模型体系 在实施流域水资源总体规划行为时，必须坚持水资源合理优化配置为中心。根据流域系统结构的分析，流域水资源总体规划模型体系由3个主要模型组成：水资源合理配置多目标决策模型、宏观经济模型、水资源系统模型（包括对生态环境的子系统模型）。其具体结构、反馈协调机制和约束条件如图（图4）。总体模型负责规划方案辅助生成与优选，其余各模型与流域复合系统的3个子系统相对应，负责备选规划方案在某一方面的模拟。通过总体模型与子系统模型的信息反馈，实现优化与模拟的结合，解决合理配置中的风险问题。

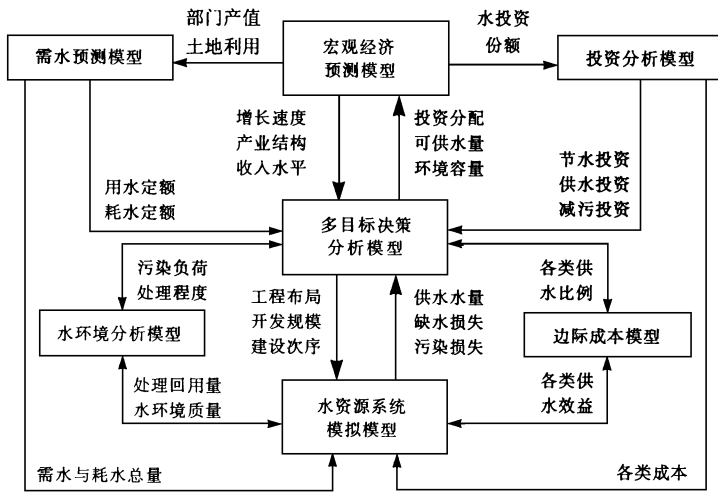


图4 流域水资源规划的模型体系

子系统模型中，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—调出关系和年度之间的积累—消费关系。水资源系统模拟模型描述伴随水循环演变的水—沙、水—盐、水—化学、水—生态过程，以及天然水循环和人工循环此消彼长的相互作用机制和“四水”转化关系。3个主要模型之间、以及各个辅助模型之间均进行动态反馈。

2 流域水资源规划的方法论

2.1 水资源合理配置的多层次多目标群决策方法

流域水资源规划的编制过程是一个协商谈判的过程。谈判的基础是一组具有代表性的方案。依靠模型体系，每次生成5~7个备选方案供各个决策者进行选择。选择后，得到具有最高共识度的方案，作为下一轮谈判的基础。如此反复进行，直到最终规划方案。

由于流域水资源规划涉及到中央、地方多个决策层次，部门、地区多个决策主体，属于群决策问题；涉及到近期、远期多个决策时段，是多时段决策；具有社会经济和生态环境方面的多个决策目标，是典型的多目标决策问题；还涉及水资源自然、社会、经济、生态等内在属性，以及水文、工程、水量、水质、投资等多类约束条件，是一个高度复杂的多阶段、多层次、多目标、多决策主体的风险决策问题。为使决策过程定量化和增加透明度，每次生成的备选方案具有良好的信息结构，能够满足规划要求（图5）。

备选方案均是多目标意义下的非劣解，其生成过程就是在多个非劣方案点的解空间寻求理想点的过程。在具体操作过程中，需要通过引入发展模式度量指标体系，降低不同层次之间发展指标的不协调性，见图6。通过引入规划方案对不同地区发展影响程度的度量指标体系，协调代表不同地区多个决策主体之间的利弊得失关系；通过总体规划模型系统的优化与模拟，降低方案选择中的水文风险；通过专家定性判断与计算机定量计算相结合的方式，处理方案选择中涉及到的不确定性问题。按上述方式，保证规划方案具有较好的内部协调性和外部适应性。

2.2 兼顾需要与可能的规划方案设置策略

在进行流域水资源规划时，实践中遇到的一个最主要的问题就是需要和可能间的差距问题。为处理好需要与可能的关系，设置两组规划方案，一为基本方案，一为平衡方案（图7）。两组方案的区别是，基本方案从可能性出发，投资较小，从而其洪水风险、水资源短缺风险和生态环境退化风险相对较大；而平衡方案的投资强度较大，在水资源的保护、节约、治理等方面的力度更大，可基本满足发展需求。

在实践中，基本方案具有较高的风险，但对投资的需求较小，从而其实现的可能性较大。以供水为例，在中等干旱条件（ $P=75\%$ ）下其供需可以不平衡，甚至有较大缺口，其要求投资少，缺水损

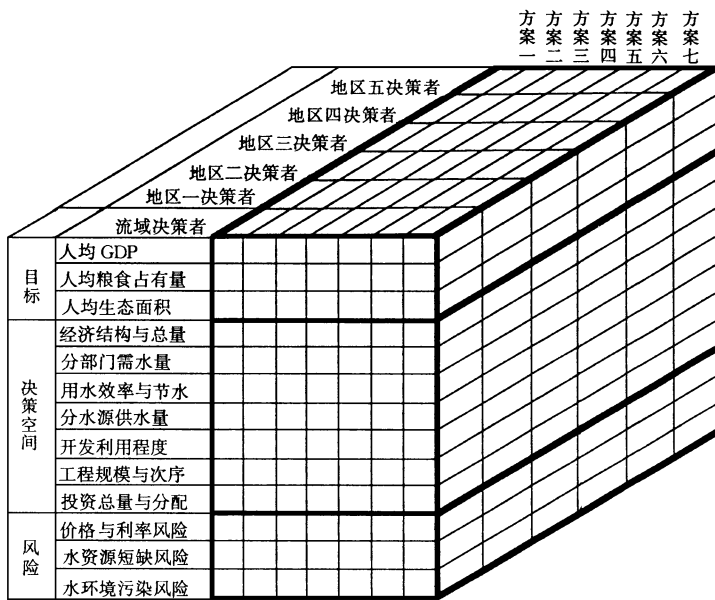


图5 流域水资源规划的决策模式与信息结构

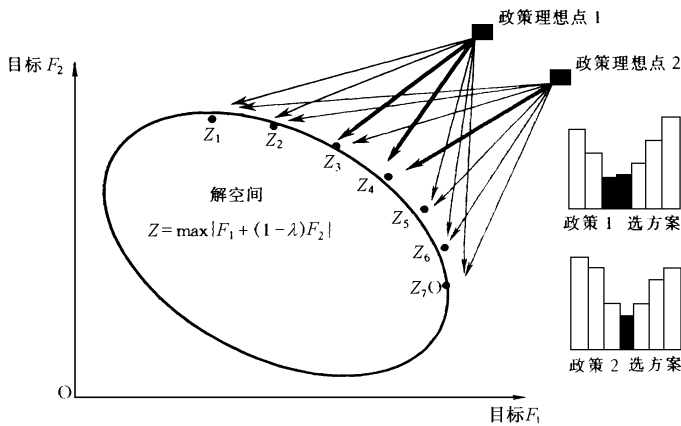


图6 不同层次决策目标之间的协调

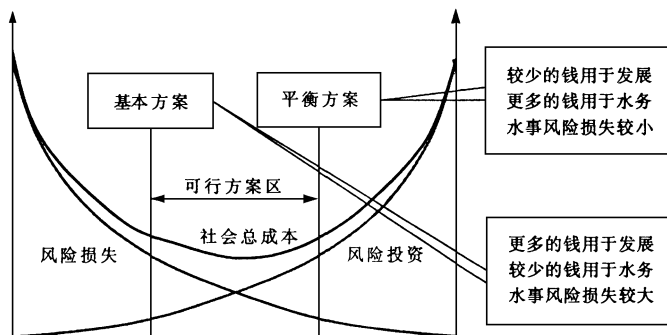


图7 水资源规划基本方案与平衡方案的设置

失大。平衡方案则在基本方案基础上，进一步实现工业节水和农田灌溉节水；年供水量比基本方案有所增加；地表水、地下水、跨流域调水、污水再生利用根据具体情况均不少于基本方案的同类水源供水量。平衡方案中水资源供需基本平衡，节水水平和供水水平均明显提高，缺水导致的国民经济损失大幅度下降，但投资较多。因此真正实施的规划方案必须兼顾需要和可能双重因子，在基本方案和平衡方案区间，向社会总成本最低项逼近。如对于防洪规划过程中，其社会总成本可以用洪灾损失和防洪投入之和来表示，其中洪灾损失可以分为：（1）固定财产损失，包括政府、企业、个人的建筑物及室内财产损失；（2）收入损失；（3）无形损失，包括洪灾对环境的破坏及对洪灾区文化遗产破坏

(Bruce Ellingood, 1993)。而防洪投入包括工程措施投入和非工程措施投入。

洪灾风险、水资源短缺风险和生态环境退化风险都属于纯风险范畴，具有客观性、空间性、动态性、经济性和非经济性等特性。从概念上来说，风险包括不利事件、发生概率和可能产生的后果 3 方面内容，在洪灾、水资源短缺和生态环境中不利事件和产生后果是直观的而且比较易于测算，因此风险评估过程的重点则是发生的概率的确定。值得一提的是由于 3 方面风险概率最主要的影响因子是水文频率，因此都可采用超越概率形式来表达，因此其损失概率分布也为超越概率分布，即损失超过某一定值的概率分布。对于洪灾风险评估常用年期期望值和方差来定量表示洪灾风险的大小，其中洪灾期望值用超越概率分布表示为：

$$E(D) = \int_0^{\infty} d \cdot p(d) dd \tag{1}$$

式中： $E(D)$ 表示损失期望值； $p(d)$ 是洪灾损失 (d) 的概率分布。

实际应用中上式需要写成离散形式：

$$E(D) = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{i+1}) \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \tag{2}$$

式中： $i=1$ 对应洪水灾害损失不为零的最小洪水； P_i 表示损失大于或等于 d_i 的概率。方差用积分表示：

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} [d - E(D)]^2 p(d) dd = E(D^2) - E^2(D) \tag{3}$$

式中 $E(D^2)$ 写成离散形式为：

$$E(D^2) = \sum_{i=1}^n (P_i - P_{i+1}) \cdot \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} \right)^2 \tag{4}$$

除此之外，也可以直接将洪灾风险损失看作随机变量，用数理统计方法分析洪灾风险损失的概率曲线，但这一方法的精度必须有可靠的足够长的资料序列来保证。

参 考 文 献：

- [1] 冯尚友著. 水资源持续利用与管理导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Bruce Ellingood. Assessing Cost of Dam Failure [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 119 (1): 64—82.
- [3] 万庆. 洪水灾害系统与评估 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.

Concept of system and methodology for river basin water resources programming

WANG Hao¹, QIN Da-yong¹, WANG Jian-hua¹

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The concept of system and methodology for river basin water resources programming under the condition of market-oriented economy are illustrated. The basin system is regarded as the objective and the reasonable allocation of water resources is based on the recycling of water resources within the basin. The multi-layer, multi-objective and group decision-making methods are applied. Besides, consideration must be given to both the possibility and demand of development during setting of the programming scheme.

Key words: river basin; water resources; programming; system; methodology