

文章编号:0559-9350(2014)07-0757-10

流域/区域水量水质联合配置研究 I: 理论方法

张守平^{1,2}, 魏传江^{1,2}, 王浩^{1,2}, 侯丽娜³, 周翔南^{1,2}, 毕彦杰^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对当前水资源配置对水质因素考虑不足等问题, 进行了流域/区域水量水质联合配置研究。阐述水量水质联合配置理论基础, 构建供需平衡、耗水平衡和基于水资源优化配置的水质模拟系统, 提出基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型, 分析分质供水的实现方式以及不同模块之间的耦合关系。基于改进“三次平衡”思想, 提出水量水质联合配置方案设置、识别缺水类型和污染物总量控制分配的决策思路。本研究可为水量水质联合配置提供理论基础和方法指导。

关键词: 水量水质; 配置; 三次平衡; 总量分配; 缺水类型识别

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.07.001

1 研究背景

我国水资源配置研究起步较晚, 发展较快, 先后经历就水论水^[1], 基于宏观经济的区域水资源优化配置^[2-4], 面向生态的水资源优化配置^[5-7], 广义水资源配置^[8-10]和基于ET的水资源配置^[11-13]等过程。上述研究均偏重于水量配置。当前我国水资源短缺与水污染并存, 水环境恶化进一步加剧水资源短缺, 以水量配置为核心的水资源配置已难以适应, 需研究水量水质联合配置方法。

20世纪90年代, 由于水污染加剧, 国外开始在水资源配置中注重水质约束和水环境保护, 如分质供水优化分析^[14], 针对水质目标的水量水质和发电效能集成分析^[15], 针对水量水质的水资源调度^[16], 水污染处理费用和水资源供给费用均衡问题分析^[17], 并将水量水质系统作为一个综合系统进行管理^[18-19]。国内研究则根据我国缺水和水环境污染的严峻形势进行了基于ET控制、“双总量”控制的水量水质联合配置和调度相关研究, 如针对生态经济效益的水质水量统一优化配置方案生成模型^[20], 基于水资源合理配置的河流“双总量”控制技术框架^[21], 城市原水系统水质水量控制耦合模型^[22], 以及统一协调水环境承载能力和水资源承载能力的水量水质联合调控模型^[23]。针对“真实”节水系列概念, 周祖昊等^[24]探讨了基于广义ET的水资源与水环境综合规划的理念。桑学锋等^[25-26]运用这一理念在海河流域进行了实例应用。

在水量水质相结合的水资源管理、分配或调度中, 优化方法与模拟方法的交互运用受到重视。如在地下水资源管理中, 计算智能优化方法和地下水数值模拟方法的结合^[27-28]; 水量水质相结合的水资源管理中, 将优化方法和模拟进行综合运用可求得最优条件下的情景模拟等^[29-30]。水资源配置方案的效率和公平共同决定水资源配置方案的可行性, 并建议从众多决策者的角度对配置方案进行可行性评价^[31]。

收稿日期: 2013-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179203, 51379215); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201-006);

“自然-社会”二元水循环耦合规律研究-以渭河流域为例(50939006); 中央分成水资源费项目(1261530110043)

作者简介: 张守平(1984-), 男, 四川万源人, 博士生, 主要从事二元水循环及伴生过程模拟研究。

E-mail: zsp19840625@163.com

通讯作者: 魏传江(1962-), 男, 山东泰安人, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wei1962@bbn.cn

上述研究在分质供水、水量水质统一调度与管理、水资源费与水污染治理费用关系、双总量控制、水资源配置优化方法和模拟方法相结合等方面进行了探索。而文献[24-26]基于广义ET控制,从资源、生态、环境、社会与经济各方面对区域水资源与水环境进行量化管理,适用于高强度人类活动区域,并未对一般流域或区域的狭义水资源水量水质联合配置、水功能区纳污能力的变化、污染物总量控制和分配等方面进行具体深入分析。基于此,本文阐述了水量水质联合配置的理论基础,构建了水量水质联合配置模型;提出不同类型的缺水识别方法和基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型;基于改进的“三次平衡”思想提出水量水质联合配置方案设置及分析思路;运用优化和模拟相结合的方法,寻求包括分质供水、双总量控制分配等的水量水质联合配置格局,实现水资源可持续开发利用。

2 理论基础

2.1 概念和内涵 流域/区域水量水质联合配置为:在流域或区域范围内,以“天然-人工”二元水循环及伴生过程为基础,以水资源系统和水环境系统的相互影响机制为约束,以公平、效率和可持续发展为原则,按照自然规律和社会经济规律,通过工程和非工程措施合理抑制需求、保障有效供给,协调社会经济和生态环境用水比例,对有限的水资源和水环境资源在不同区域和部门间分配,实现社会经济和生态环境可持续发展。因此,水量水质联合配置应综合考虑水量、水质和水生态等因素,在合理分配生态用水和社会经济耗水比例的基础上,进行用水和排污总量控制,提高用水效率,实现有限的水资源和水环境资源的合理分配。

水量水质联合配置主要包括以下内涵:①从流域或区域整体协调社会经济与生态环境合适的用水比例,控制耗水,维持水资源可持续利用;②实现基于分质供水的用水总量控制和水资源合理配置,从流域或区域整体控制水资源利用量,并进行水资源的合理分配,水资源利用公平和效率兼顾;③实现基于水资源配置的污染物排放、水质模拟和以水功能区为载体的排污总量控制,并进行水功能区纳污能力的合理分配,污染物排放公平和效率兼顾;④水量水质联合配置始终关注水资源配置对水环境污染的影响,以及水环境污染对水资源配置的制约的相互关系,并以水资源系统和水环境系统的相互影响机制为约束。

水量水质联合配置调控机制包括:具有二元结构及伴生过程特征水平衡机制,以可持续利用为基础的生态机制,以公平为核心的社会机制,以社会净福利最大和边际成本替代为准则的经济机制,水资源配置和水环境污染相互制约的环境机制。水量水质联合配置以可持续发展,需水总量控制与定额管理相结合,合理安排各行业用水,总量控制和多水源联合调配等为原则。

2.2 调控目标 水量水质联合配置是一个多层次、多目标、多决策者和多阶段的风险决策问题。为实现配置目标,需在众多指标中选择主要指标,以衡量水量水质联合配置方案的优劣。各指标应体现社会经济、生态环境和水资源系统的协调发展程度,能描述和表征各个系统的状况和趋势。

(1)水资源系统调控指标。水量水质联合配置在水资源可持续利用的前提下进行水量和水质调配,保持水资源分区合适的生态用水比例,控制国民经济耗水比例在一定的范围内,是水资源系统主要量化指标。该指标用生态环境用水比例的阈值或区间值表示。生态用水比例的具体公式为^[32]:

$$E_{ew} = W_{enc} / (W + I_w + DI_w - DO_w) \quad (1)$$

$$E_u = 1 - E_{ew} \quad (2)$$

式中: E_u 为生态用水比例; E_{ew} 为经济耗水比例; W_{enc} 为经济耗水量; W 为当地产水量; I_w 为入境水量; DI_w 为调入水量; DO_w 为调出水量。

(2)生态环境调控指标。生态环境调控的主要指标包括:各水平年生态用水比例应保持在水资源可持续利用确定的范围内;优先满足河道最小生态基流和重要的湖泊湿地用水;城镇废污水的排放率和处理率;污染物总量控制与分配情况;水功能区水质达标率;水质型缺水率。在“从严”的角度下,合理的水量水质联合配置格局需满足水功能区纳污能力满足纳污需求,水功能区水质达标,且

社会经济的水质型缺水率基本为0。

(3)社会经济调控指标。社会调控的主要指标包括：满足人畜饮水安全的需求；区域内的缺水程度大体接近；谁污染谁治理，入河污染物负荷实行总量控制。经济调控指标体现在水资源利用和水污染治理的高效性。水资源利用调控指标主要通过目标函数来实现，如净效益最大调度原则、损失水量最小调度原则、供水水源优先序等。水污染治理调控是在公平性原则的基础上，经济发达地区应承担较多的水污染治理责任。

(4)各子系统调控指标综合协调。社会经济系统、生态环境系统和水资源系统相互影响相互制约，任何子系统调控指标的变化均会影响其他子系统的运行结果。社会经济耗水与生态环境用水此消彼长，社会经济的需水、耗水增加导致生态环境的用水减小。水资源具有水量和水质双重特性，随着社会经济用水增加、水污染加剧，水质问题凸显，社会经济与生态环境提出了质与量双重要求。生态环境健康保障是社会经济可持续发展的基础，水作为最活跃的环境因子，将两者联系为一体。当生态环境用水比例小于某个阈值，生态环境系统会遭到毁坏，导致可用的水资源量减少，反过来会制约社会经济的发展。

因此，稳定社会经济、生态环境与水资源的动态平衡是流域/区域水量水质联合配置的首要目标。水量水质联合配置从数量上保证社会经济与生态环境合理的用水比例，维持水资源可持续利用，同时减少污染负荷，改善水质，从水量水质两方面协调水资源系统与社会经济系统、生态环境系统的动态依存关系，综合利用有限的水资源。

3 水量水质联合配置模型

3.1 水量水质联合配置模型系统框架 水量水质联合配置涉及水资源系统、社会经济系统和生态环境系统。水量水质联合配置系统网络图是对三大系统的简化和抽象，以节点、水传输系统构成的网状图形反映三大系统间的关系，是构建水量水质联合配置模型的基础^[32]。在配置系统概化时，增加河道水功能区断面和对应的水质目标，为水量水质联合调配奠定基础。在河流传输系统中增加生态基流和控制节点的目标下泄流量，满足河道生态环境等要求。基于宏观经济将社会经济需水和人工生态环境需水控制在合理的范围内。模型重点分析河川径流、浅层地下水、污水处理回用水等水源，以运筹学为基础进行多水源联合调配。

因此，水量水质联合配置系统将水资源系统分解为天然和人工侧支循环两大系统，以计算单元为核心构成水资源供需平衡分析系统，以水资源分区为核心构成水资源耗水平衡分析系统，以河流系统为核心构成基于水资源优化配置水质模拟系统，以平原区浅层地下水为核心构成地下水数值模

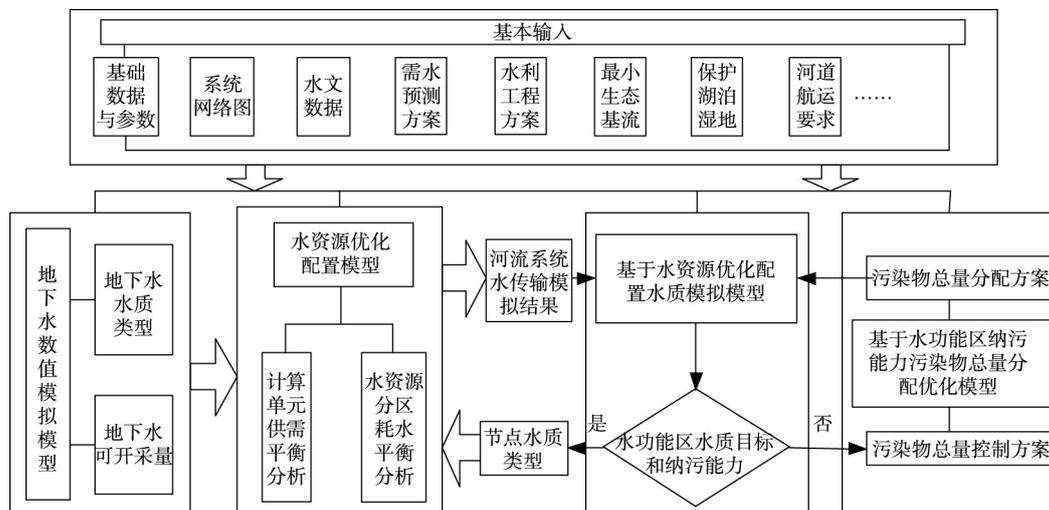


图1 水量水质联合配置模型框架示意图

拟系统，以水功能区为核心构成污染物总量分配模型系统，如图1所示。

3.2 水资源优化配置模型

3.2.1 供需平衡分析系统 供需平衡分析系统是水量水质联合配置模型的组成部分。供需平衡分析基于计算分区及相应的节点、水传输系统。供需平衡分析系统采用线性规划方法，根据水量平衡原理建立系统网络图中各个控制节点、水库、计算单元等的平衡方程和约束方程，在目标函数最值情况下，求解决策向量的最优值。模型如下：

$$\max \left\{ \sum_{l \in A} w_l q_l - \sum_{i \in Z} \sum_{u \in U} w_{ui} m_{ui} \right\} \quad (3)$$

水库平衡：

$$\sum_{l \in I_i} q_l - \sum_{k \in O_i} q_k = \Delta V_i \quad i \in R \quad (4)$$

库容约束：

$$Vl_i \leq V_i \leq Vup_i \quad i \in R \quad (5)$$

节点水量平衡：

$$\sum_{l \in I_i} q_l - \sum_{k \in O_i} q_k = 0 \quad i \in N \quad (6)$$

河渠道过流能力约束：

$$l_i \leq q_l \leq up_l \quad l \in A \quad (7)$$

供需平衡：

$$wd_{ui} - \left(\sum_{l \in I_i} q_{l2u} + g_{2u} \right) = wd_{ui} - S_{ui} = m_{ui} \quad i \in Z \quad u \in U \quad (8)$$

计算分区水量平衡：

$$\sum_{u \in U} S_{ui} - \sum_{k \in O_i} q_k = E_i \quad i \in Z \quad (9)$$

地水平衡：

$$GW_{end} = GW_s + Q_s + Q_{ci} - \sum_{u \in U} g_{2u} - Q_{et} - Q_{co} \quad (10)$$

式中： N 为节点的集合； R 为水库集合； Z 为计算分区集合； A 为所有节点、水库和计算分区之间的连线构成的集合； U 为用水行业； O_i 为节点(水库、计算分区)下游连线集合； I_i 为节点(水库、计算分区)上游连线集合； w_{ui} 为*i*计算分区u行业权重； m_{ui} 为*i*计算分区u行业的缺水量； V_i 为*i*水库时段内的蓄水量； ΔV_i 为*i*水库时段蓄变量； E_i 蒸发渗漏或耗水量； q_l 为连线*l*的水量； l_i 和 up_l 为连线*l*供水能力的上下限； Vup_i 和 Vl_i 为*i*水库库容上下限； q_{l2u} 为渠道向u行业供水量； g_{2u} 为u行业的地下水供水量； S_{ui} 为*i*计算分区u行业的供水量； wd_{ui} 为*i*计算分区u行业的需水量； GW_{end} 和 GW_s 分别为地下水时段初、末蓄水量； Q_s 为入渗补给量，包括降雨入渗和灌溉入渗量； Q_{ci} 为地下径流侧入量； Q_{et} 为蒸发蒸腾量； Q_{co} 为地下径流侧出量。以上所有参数和变量除 ΔV_i 外均大于等于0。

分质供水是水量水质联合配置的重要内容。本文在传统供需平衡分析基础上增加分质供水约束方程。在供需平衡分析时，利用水质模型和地下水数值模型传递的河流控制节点的水质类型、地下水水质类型、地下水可开采量上限等信息，进行分质供水，并限制地下水超采。根据文献[33]，I—III类水可供各行业，IV类水可供工业、农业、生态环境等，V类水只能用于农业、生态环境等。确定分质供水约束方程如下。

$$\sum_{l \in I_i} \sum_{u \in U} \sum_{wq_l \notin wq_u} q_{l2u} + \sum_{u \in U} \sum_{wq_g \notin wq_u} g_{2u} = 0 \quad i \in Z \quad (11)$$

式中： wq_l 、 wq_g 分别为渠道和地下水水质类型； wq_u 为用水行业要求的水质类型集合。生活用水水质集合为小于3的实数域，工业用水水质集合为小于4的实数域，其余行业类推。所有供水变量非负，当式(11)等于0，必要求每个变量均为0。式(11)表明当渠道或地下水水质不满足用水行业水质要求时，其供水量为0，完成分质供水。

根据研究区近 5 ~ 10 年的供用水数据进行各计算分区的供需平衡分析。地表水和地下水供水量参照各计算分区近 5 ~ 10 年的开采量, 分析确定各计算分区缺水量。在不发生地下水位持续下降的计算分区, 地下水是采补平衡的, 通过调整降水入渗数据、潜水蒸发系数等相关参数使地下水系统达到平衡。在发生地下水位持续下降的计算分区, 应综合确定各相关参数, 使模拟地下水位与观测值相符。

3.2.2 耗水平衡分析系统 流域分区的耗水平衡可概括为当地产水量、入境水量、调入水量、耗水量、调出量和出境水量之间的动态平衡^[34]。如式(12)所示:

$$W_{bf} + W_{in} + D_{in} - W_{enc} - W_{elc} - R - D_{ou} = W_{\delta} \quad (12)$$

$$W_{elc} = W_{elcm} + W_{selc} + W_{gelc} \quad (13)$$

式中: W_{elc} 为生态耗水总量, 包括人工生态和天然生态; D_{in} 为外流域调入水量; D_{ou} 为调出水量; W_{in} 包括地表水入境水量和地下水入境水量; R 为流域出口年径流量, 包括地表水出境水量和地下水侧向排出量; W_{elcm} 为人类用水过程中的生态耗水量; W_{selc} 为河道内生态耗水量; W_{gelc} 为潜水蒸发量。

根据水资源开发利用评价的供用耗排等成果确定各水资源分区生活耗水率、工业及三产耗水率、农业耗水率和经济耗水率, 调整相关参数计算各水资源分区各行业耗水率与评价值相符, 得到经济耗水量。根据湖泊湿地统计数据、补水来源变化等, 确定近几年的湖泊耗水量。

由于社会经济的发展, 社会经济耗水量不断增加, 河道的下泄流量越来越小, 特别是改革开放以来, 社会经济活动对河道径流量的影响不断加大。所以以近 5 ~ 10 年的水文测站的实测径流和天然径流量为依据, 在社会经济耗水量计算成果基础上计算流域分区内的生态耗水, 进而确定流域主要控制断面的下泄水量。在不发生区域性地下水位持续下降的地区, 水资源分区的多年平均蓄水变量趋于零。由于不确定因素和各种误差, 应将蓄水变量控制在一定的均衡差内。若不满足, 则进行调整。在地下水超采区域, 应综合确定流域分区内的蓄水变量。因为河道径流情况对水质模拟影响较大, 在耗水平衡分析过程中还需对水质观测断面的径流模拟过程与实测径流进行对比, 进行参数率定。

水量水质联合配置涉及蒸发消耗、水资源开发利用和工农业生产等一系列复杂因素。模拟计算时, 各因素之间相互影响, 只要一个影响因素没有考虑好都会对配置结果产生影响。而对具有上下游传输关系的流域分区之间, 各种误差会通过流量传输从上游地区向下游地区逐渐累积, 从而对配置格局产生影响。耗水平衡分析系统运用流域分区的水量平衡关系, 以流域控制断面以径流实测数据为主要控制依据, 控制各种误差从上游地区向下游地区逐渐累积, 使水资源配置模拟计算尽量反映流域水资源实际情况。

3.3 基于水资源优化配置水质模拟系统 水质模拟模型系统建立在水量水质联合配置系统网络图基础上, 控制节点、河流系统组成的水功能区、排水系统、计算单元内的点源和非点源污染物排放等构成了模型系统的模拟计算框架, 也是建立水质模型的依据。模拟计算过程、河流与湖库水质模拟、水功能区达标评价等是模型系统的主要内容。水质模型框架参见图 2。

水质模拟模型系统以水资源优化配置模拟结果作为计算依据。河流控制节点水传输长系列输出结果是河流水质模拟分析计算的已知水量过程, 计算单元排水连线及其排水过程是污染物负荷排放通道和污水排放过程。水质模拟计算过程为: 以“三生”用水和降水估算计算分区各时段点源和非点源污染物负荷量、入河量; 以计算分区为污染物负荷源、排水连线与简化的入河排污口位置为污染物排放通道、用水户排水过程为废污水过程, 进入河段或控制节点; 根据拟定的控制节点计算次序和已知的各河段水量过程, 利用河流和湖库水质模型、污染物混合模型、水质评价模型等, 可得到水功能区各控制断面不同污染物负荷总量、浓度、水质类型等长系列模拟计算结果; 比较水质模拟结果与水功能区水质目标和各水功能区纳污能量与纳污能力, 以此作为制定截污减排措施的依据。

3.4 基于水功能区纳污能力的污染物总量分配模型 在水量水质联合配置过程中, 需要将水功能区进行概化, 分 3 种情况: (1) 将不同水功能区概化合并为一个简化的水功能区; (2) 将某一水功能区分为几个小的河段进行分析; (3) 不作调整。

对于水资源配置区域规模大的研究过程中, 对每个水功能区进行详细分析不可行, 需要将不同水功能区进行合并简化。原则上只要保证概化后的纳污能力不变即可。对每个水功能区进行分析需

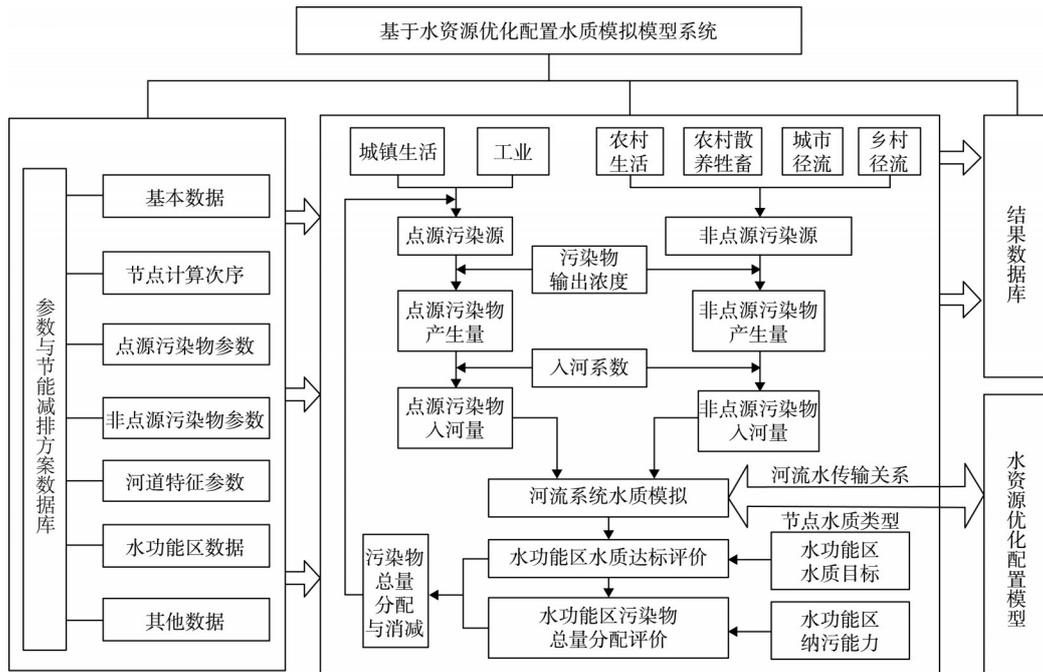


图2 基于水资源优化配置水质模拟模型框架示意图

要在总的规划完成后根据情况进行细化研究。对于没有进行调整概化的水功能区直接进行纳污量和水质达标分析。

对水功能区进行分段处理的情况中，需要对每个河段的纳污能力和纳污量进行分析判断，以实现污染物总量控制与分配。如图3所示，设某水功能区被划分为 n 段，设河段 i 长度为 L_i ，下界浓度为 C_i ，污染物纳污量为 W_i ，流量为 Q_i ，设计平均流速为 u_i ，污染物降解系数为 K_i ，第 n 河段下界浓度 C_n 为 C_s ，则有：

$$C_i = C_{i-1} \exp(-K_i L_i / u_i) + W_i / Q_i \exp(-K_i L_i / 2u_i) \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (14)$$

$$C_s = C_{n-1} \exp(-K_n L_n / u_n) + W_n / Q_n \exp(-K_n L_n / 2u_n) \quad (15)$$

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n \quad (16)$$

此方程组共 2_{n-1} 个未知量和 $n+1$ 个方程，有无穷多解。但可以考虑公平性和效率性，通过建立单目标或多目标函数，进行优化求解。其目标函数可表示为：

$$Z = f(C_1, C_2, \dots, C_{n-1}, W_1, W_2, \dots, W_n) \quad (17)$$

根据文献[35]，约束方程的流量 Q_i 、流速 u_i 均根据设计水文条件而定，降解系数 K_i 通过实验或参数率定确定，河长 L_i 为水功能区划分时确定，所以模型约束方程为线性方程。目标函数根据情况确定。当目标函数为也为线性函数时，则

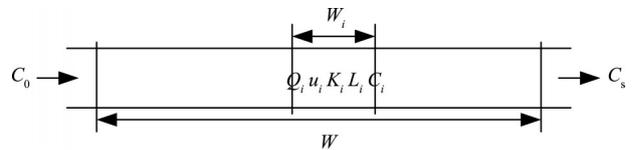


图3 水功能区划分为 n 段的一维河段概化图

模型为线性规划。当目标函数为凸函数求极小值或凹函数求极大值时，则模型为凸规划，目标函数的局部极值即为全局最优值。除此以外，模型为一般非线性规划。

3.5 模块耦合关系及决策方法 水量水质联合配置属于半结构化的多层次、多目标、多决策者的决策问题。对此类问题的求解方法大体分为两类：(1)优化方法；(2)模拟方法。优化方法和模拟方法各有优缺点。本次研究采用优化与模拟相结合的方法。供需平衡分析和污染物总量分配采用优化方法，并运用 GAMS 软件包进行求解；耗水平衡分析、水质模拟和地下水模拟则采用模拟分析。

社会经济的供水、用水、耗水和排水分析，城镇生态和农村生态的用水消耗计算，水库和河道的渗漏蒸发模拟是耗水平衡分析的主要内容。以河道水文断面资料为基准，调整河道、水库及渠道

的蒸发渗漏比例等参数，模拟河道水文过程。耗水平衡分析系统为水质模型提供河道径流信息。耗水平衡分析系统是控制和调配社会经济耗水与生态环境用水比例的基础，是参数率定的基本控制单元，最小水资源分区控制着参数的精度。

地下水数值模拟系统为水资源供需平衡分析系统提供地下水可开采量上限和水质状况。地下水数值模拟模型以 GMS 系统为基础，运用 MODFLOW 模拟计算地下水水位及各计算单元的均衡要素，运用 MT3DMS 模拟地下水水质，限于篇幅文中不再赘述。

耗水平衡分析系统提供的各节点断面的来水过程，水质模型提供各节点的水质情况以及地下水模拟系统提供的地下水可开采量和水质状况是供需平衡分析系统的基本输入。供需平衡系统通过分质供水确定计算分区需水满足情况，并通过排水计算向水质模型提供排污信息。

水质模型以耗水平衡系统提供的河道径流过程和供需平衡系统提供的排污信息为输入，模拟各断面节点的水质类型，计算各水功能区的纳污量。供需平衡分析系统与基于水资源优化配置水质模拟模型系统通过相互迭代确定各节点断面的水质类型，水质模拟系统模拟河段水功能区的水质状况。

根据水质模拟结果和水功能区纳污能力情况，运用基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型提出计算单元污染物消减方案和截污减排措施，通过反复调整，以满足社会经济用水和水功能区的水质目标。

4 决策思路

4.1 三次平衡分析的改进 文献[36]提出的三次平衡配置思想已成为水资源配置过程中最为有效的决策思路。三次平衡分析的思想是：首先以现状供水能力和用水水平预测未来的需求增长，充分暴露各规划水平年的最大可能缺水量，即一次平衡分析；在考虑节水、治污、兴建供水工程和挖潜等措施的情况下，进行二次平衡分析，以定量确定当地水资源承载能力充分挖掘后的缺水量；三次平衡是通过增加外调水，实现本地水和外调水联合配置，实现供需平衡^[37]。

对三次平衡思想加以扩充形成水量水质联合配置的决策思路。水量水质联合配置的基本要求是分质供水。对分质供水和非分质供水方式分别进行三次平衡分析时，可识别出每次平衡的水质型缺水量、水功能区纳污能力和污染物控制总量，为污染物总量控制和分配提供依据。水质型缺水量为分质供水和非分质供水缺水量的差值。不同缺水量如图4所示。

图中 l_g 为因工程供水能力不足，节水水平低下等引起的缺水， l_s 分别为当地水资源不足引起的缺水。 h_1, h_2, h_3 为每次平衡的水质型缺水。因为一次平衡分析的供水量最小，污染物浓度一定时的污染物排放及入河量最小，污染物程度较低，水质型缺水较小， $h_1 \leq h_2$ 且 $h_1 \leq h_3$ 。同理可得 $h_2 \leq h_3$ 。每一次平衡的水质型缺水量不相等， $h_1 \leq h_2 \leq h_3$ 。每次平衡条件下的水功能区纳污能力和污染物控制总量也不同。

多次运用平衡分析思想，还可识别出其他类型的缺水量。一次平衡和二次平衡所识别出的缺水量中，包括因工程供水能力不足引起的工程型缺水量，因节水水平低和产业结构不合理引起的缺水量等。第二次平衡和第三次平衡能识别出资源型缺水量。通过非分质供水和分质供水可识别水质型缺水量。实际工作中，根据情况可能还需识别因工程供水能力不足引起的工程型缺水量或节水水平较低引起的缺水量等。比如工程型缺水识别方法如下：先进行不新建供水工程的供需平衡分析，再进行新建供水工程的供需平衡分析，两次平衡分析的缺水量差值即为工程型缺水量。同理，可识别出因不同因素导致的缺水量，并为相应的解决措施提供依据。

4.2 决策思路 决策思路为：问题识别—方案设置—情景计算分析—方案评价推荐，参见图5。

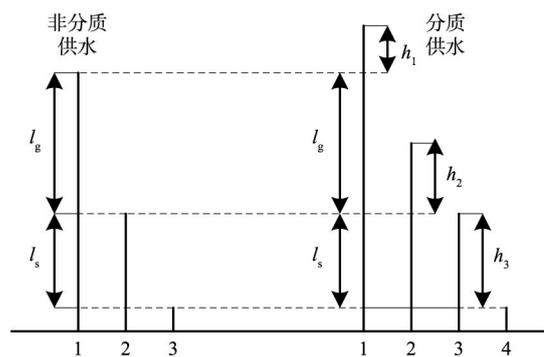


图4 三次平衡不同类型缺水示意图

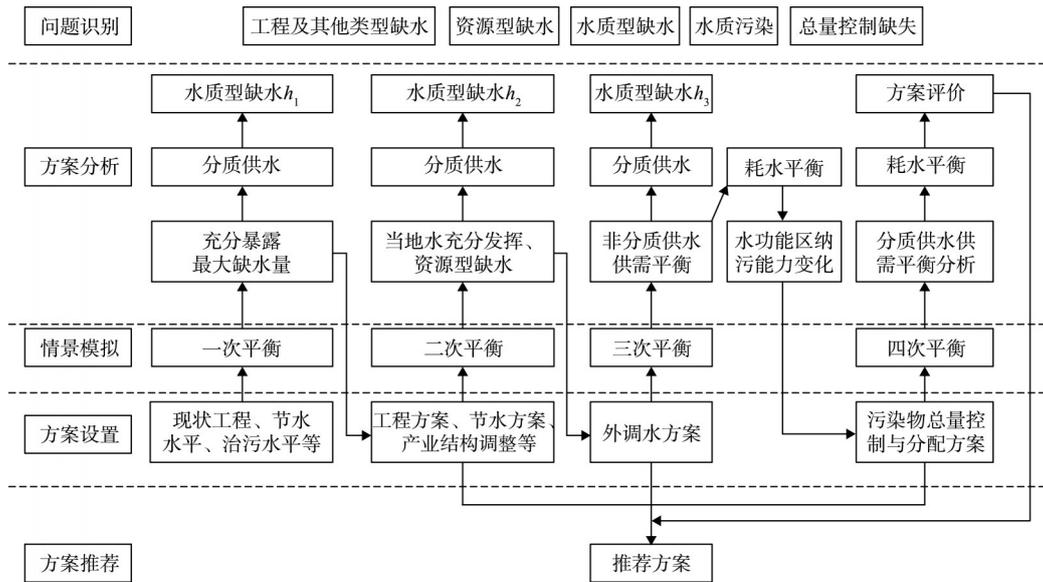


图5 水量水质联合配置决策思路

基准年的问题识别。通过分质供水和非分质供水的供需平衡分析、水质模拟、水质评价和水功能区纳污评价等判断基准年不同类型缺水量、水质污染等一系列问题，为规划年配置方案的设置奠定基础。

以改进三次平衡分析思想为指导，进行方案设置、情景模拟和方案分析评价。首先在现状供水能力，节水水平和治污水平的基础上预测未来需水增长和污染物排放，充分暴露非分质供水情景下最大可能缺水量，并通过水质模拟和分质供水识别水质型缺水 h_1 ，即一次平衡分析。在考虑节水、兴建供水工程和挖潜等措施情况下，进行二次平衡分析，以定量确定非分质供水情况下当地水资源充分挖掘后的缺水量和分质供水情况下水质型缺水 h_2 。通过增加外调水，实现本地水和外调水联合调控，实现非分质供水情况下的供需平衡和分质供水情况下的水质型缺水 h_3 ，即三次平衡分析。通过耗水平衡分析河道径流变化情况和功能区纳污能力变化，以现状治污水平下规划年污染物排放量为依据，拟定污染物总量控制和分配方案，通过进行水质模拟和分质供水实现供需平衡，即第四次平衡。

因为 $h_1 \leq h_2 \leq h_3$ ，说明第三次供需平衡后，才充分暴露出现状治污水平下规划年的污染物排放，水质污染和水质型缺水等情况，所以必须三次平衡以后拟定污染物总量控制和分配方案。在拟定各类方案时，以边际成本替代和社会净福利最大为原则合理减小需水，适当增加供水和提高治污能力。

供需平衡分析后进行耗水平衡分析，可持续利用评价判断拟定的需水方案、工程方案、外调水方案和治污方案是否满足水资源可持续利用原则。若满足则推荐方案，不满足则重新拟定方案。

5 结语

(1) 阐述水量水质联合配置的理论基础，分析水量水质联合配置调控目标。(2) 在传统水资源配置模型基础上构建水量水质联合配置模型系统，包括以水资源分区为核心的耗水平衡分析系统，以计算单元为核心的供需平衡分析系统，以河流系统为核心的基于水资源优化配置水质模拟系统，以平原区浅层地下水为核心的地下水数值模拟系统，以水功能区为核心的污染物总量分配模型系统。(3) 供需平衡分析系统中通过增加水质约束方程实现分质供水。(4) 提出基于水功能区纳污能力的污染物总量分配优化模型，为污染物总量分配提供工具。(5) 分析了水量水质联合配置的决策思路。对三次平衡思想进行了扩充。该方法能够识别出不同类型的缺水量，为解决缺水问题提供依据。该思想贯穿于方案设置—情景分析计算—方案评价推荐的整个过程中。(6) 本研究可为水量水质联合配置提供理论基础和方法指导。

参 考 文 献:

- [1] 王浩. 我国水资源合理配置的现状和未来[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2): 7-14.
- [2] Booker J E, Young R A. Modeling intrastate and interstate markets for Colorado River water resources[J]. Environ. Econ. and Management, 1994, 26(1): 66-87.
- [3] 翁文斌, 蔡喜明, 史慧斌, 等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J]. 水利学报, 1995(2): 1-10.
- [4] 许新宜, 王浩, 甘泓, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [5] Ziemer R R, Lisle T E. River ecology and management: coast ecoregion, lessons from the pacific[M]. Springer Press, 1998: 56-68.
- [6] McKinney D C, Cai X, Rosegrant M W, et al. Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions[N]. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 1999.
- [7] 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[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [8] Noblesse F. The green function in the theory of radiation and diffraction of regular water waves by a body[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1982, 16(2): 137-169.
- [9] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 12-17.
- [10] 裴源生, 赵勇, 张金萍. 广义水资源合理配置研究(I)—理论[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 1-7.
- [11] David C D, Robert M H. Agriculture and Water Conservation in California, with Emphasis on the San Joaquin Valley[M]. Technical report, Department of Land, Air and Water Resources University of California, Davis, October, 1982.
- [12] 蒋云钟, 赵红莉, 甘治国, 等. 基于蒸腾蒸发量指标的水资源合理配置方法[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 720-725.
- [13] 沈振荣, 汪林, 于福亮, 等. 节水新概念—真实节水的研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [14] Afzal Javaid, Noble David H. Optimization model for alternative use of different quality irrigation waters[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118: 218-228.
- [15] Hayes D F, Labadie J W, Saners T G. Enhancing water quality in hydropower system operations[J]. Water Resources Research, 1998, 34(3): 471-483.
- [16] Lofti B, Labadie J W, Fontane D G. Optimal operation of a system of lakes for quality and quantity[M]//TORNO HC. Computer applications in water resources. New york: ASCE, 1989: 693-702.
- [17] Pingry D E, Shaftel T L, Boles K E. Role for decision support systems in water delivery design[J]. Journal of water resources planning and management, 1990, 116(6): 629-644.
- [18] Genius M. Evaluating Consumers' Willingness to pay for improved potable water quality and quantity[J]. Water Resources Management, 2006(11): 1825-1834.
- [19] Vink S, Moran C J. Understanding mine site water and salt dynamics to support integrated water quality and quantity management[J]. Maney Publishing, 2009(5): 185-192.
- [20] 吴泽宁, 索丽生, 曹茜. 基于生态经济学的区域水质水量统一优化配置模型[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(2): 1-6.
- [21] 严登华, 罗翔宇, 王浩, 等. 基于水资源合理配置的河流“双总量”控制研究—以河北省唐山市为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3): 322-328.
- [22] 赵璧奎, 王丽萍, 张验科, 等. 城市原水系统水质水量控制耦合模型研究[J]. 水利学报, 2012, 43(11): 1373-1380.
- [23] 付意成, 魏传江, 王瑞年, 等. 水量水质联合调控模型及其应用[J]. 水电能源科学, 2009, 27(2): 31-35.
- [24] 周祖昊, 王浩, 秦大庸, 等. 基于广义ET的水资源与水环境综合规划研究I: 理论[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1025-1032.
- [25] 桑学锋, 周祖昊, 秦大庸, 等. 基于广义ET的水资源与水环境综合规划研究II: 模型[J]. 水利学报, 2009, 40(10): 1153-1161.

- [26] 桑学锋, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于广义ET的水资源与水环境综合规划研究Ⅲ: 应用[J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1409-1415.
- [27] Ajay Singh. Simulation and optimization modeling for the management of groundwater resources. I: distinct applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140(4). doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000688.
- [28] Ajay Singh. Simulation and optimization modeling for the management of groundwater resources. II: combined applications [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2014, 140(4). doi: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000689.
- [29] Castelletti A, Yajima H, Giuliani M, et al. Planning the optimal operation of a multi-outlet water reservoir with water quality and quantity targets[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(4): 1-45.
- [30] Castelletti A, Antenucci J P, Limosani D, et al. Interactive response surface approaches using computationally intensive models for multi-objective planning of lake water quality remediation[J]. Water Resources Research, 2011, 47, W09534.
- [31] Read L, Madani K, Inanloo B. Optimality versus stability in water resource allocation[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 133: 343-354.
- [32] 魏传江, 韩俊山, 韩素华. 流域/区域水资源全要素优化配置关键技术及示范[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [33] 国家环保总局. GB3838-2002, 地表水环境质量标准[S]. 北京: 国家环保总局, 2002.
- [34] 张守平, 蒲强, 李丽琴, 等. 基于可控蒸散发的狭义水资源配置[J]. 水资源保护, 2012, 28(5): 13-18.
- [35] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T25173-2010 水域纳污能力计算规程[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010.
- [36] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [37] 康爱卿, 魏传江, 谢新民, 等. 水资源全要素配置框架下的三次平衡分析理论研究与应用[J]. 北京: 中国水利水电科学研究院报, 2011, 9(3): 161-167.

Basin/region water quality and quantity allocation I. Theory and method

ZHANG Shou-ping^{1, 2}, WEI Chuan-jiang^{1, 2}, WANG Hao^{1, 2},
 HOU Li-na³, ZHOU Xiang-nan^{1, 2}, BI Yan-jie^{1, 2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Engineering and Technology Research Center of Water Resources and
 Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China

3. Changjiang Institute of Survey Planning Design and research, Wuhan 430010, China)

Abstract: Basin/regional water quantity and quality joint configuration has been studied, because the current water allocation is lack of water quality considerations. In this paper, the authors expound the theoretical basis of water quality and quantity allocation, construct the equation of supply-demand balance and water consumption balance, establish simulation system of water quality based on optimal allocation of water system, put forward the optimal allocation of total pollutants, and analyze the realizing way of dual water supply and the coupling relationship of different models. Based on the improved concept of “three-time balances”, some ideas of decision have been put forward to identify the water shortage types, set the joint allocation plan of water quality and quantity including the pollution control. The outcomes of this study can provide a theoretical basis and method guidance for water quantity and quality joint configuration.

Key words: water quality and quantity; water allocation; three-time balance; total amount distribution; identify water shortage types

(责任编辑: 韩 昆)