



基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量 统一分配模型

胡四一^{①②}, 王宗志^{①*}, 王银堂^①, 张玲玲^③

① 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;

② 中华人民共和国水利部, 北京 100053;

③ 河海大学公共管理学院, 南京 210098

* E-mail: zzwang@nhri.cn

收稿日期: 2009-08-09; 接受日期: 2009-11-11

国家自然科学基金(批准号: 50909063, 70771035)、水利部公益性行业科研专项经费项目(批准号: 200901044)和教育部人文社会科学基金(批准号: 07JC790015)资助项目

摘要 为落实初始水权分配方案, 实现允许取水量与允许排污量的统一分配, 建立了以初始水权为允许取水量总量控制目标、水量分配仿真模型与纳污能力计算模型相耦合的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型; 针对模型的复杂性, 提出了一套显著提高分配方案可操作性与求解效率的水库群优化调控新技术, 该技术综合了系统仿真、轮库迭代与智能计算方法. 以北江流域为背景, 阐释了模型的建立、求解和应用过程; 绘制了大型水库优化调度图, 获得了流域水资源系统的长期运行策略, 给出了任意年型允许取水量与允许排污量分配方案以及跨行政区断面流量过程, 分析了模型的有效性和分配方案的合理性.

关键词

水资源管理

总量控制

取水排污统一控制

优化调控

综合集成

初始水权分配是发挥市场配置资源基础性作用、提高水资源利用效率和效益的前提^[1,2], 也是节水型社会建设的重要内容^[3]. 在实行流域与区域相结合水资源管理制度的法律框架下, 流域内行政区之间的初始水权分配成为中国水权制度建设的核心^[4]. 自黄河“87分水”方案制定以来^[5], 伴随第二次全国水资源综合规划的开展, 中国陆续在北方的黑河、塔里木河、大凌河、霍林河、海河, 南方的抚河、晋河以及东江等流域, 开展了初始水权分配试点研究^[4]. 为了便于行政区(水权主体)之间利益的协调, 促使分配方案为各方所接受, 初始水权分配往往追求分配对象的“稳定性”, 大多是以多年平均河道外可分配水量作为水权客体(在中国南方通常为水资源可利用量,

在中国北方常为允许耗水量), 选择合理的分配模式而进行的资源宏观配置. 该阶段水权主体所关注的焦点是分配方案的“公平性”, 尚较少关注如下问题^[4]. 1) 初始水权与允许取水量的衔接问题. 在水资源的实际管理中, 人们关注的对象是取水量; 初始水权与取水量在属性上的不一致, 削弱了初始水权分配方案的可操作性. 2) 初始水权稳定性与取水量动态变化的统一问题. 初始水权分配大都未考虑流域来水与区域需水的动态变化, 以及分配方案能否在水利工程中落实等问题. 3) 取水与排污的统一管理问题. 河道外取水量的多少会直接影响区域水环境容量, 因此科学的水资源管理应统一分配允许取水量与允许排污量, 并据此进行统一控制^[6]. 4) 相关研究多集

中在缺水地区, 鲜见针对中国南方丰水带流域水资源开发利用特点的系统研究. 由于水资源天然禀赋以及开发利用程度的差异, 驱动流域初始水权分配的控制因素、分配模式也不相同, 因此亟需针对中国南方流域的水问题特点开展研究.

上述问题既是流域水资源统一调度和科学管理的客观要求^[7], 也是“总量控制”用水管理制度给流域水资源综合管理提出的新课题, 但至今尚未得到较好的解决^[8,9], 这除了受人们认知过程的限制外, 科学的技术方法也是约束问题解决的重要方面^[7,10]. 本文通过建立以初始水权分配方案为流域水量分配优化调控模型的目标函数, 实现了初始水权向区域允许取水量的科学过渡; 通过耦合水量分配仿真模型与水功能区纳污能力计算模型, 实现了区域允许取水量与允许排污量的统一分配; 在此基础上采用系统综合集成技术, 构建了基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型(简称统一分配模型); 针对统一分配模型的复杂性特点, 研制了系统仿真与智能优化相结合求解水资源复杂系统优化调控问题的新技术. 作为实例, 将统一分配模型应用于北江流域, 分析了模型的有效性与分配方案的合理性; 给出了不同年型允许取水量与允许排污量的分配方案, 绘制了大型水库的优化调度图. 为流域年度取水量和排污量控制方案的制定和水资源统一调度奠定了基础.

1 基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型的建立

基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型是一个模型系统, 它包括目标函数与约束条件、水量分配仿真模型、与水量分配仿真模型相耦合的水功能区纳污能力计算模型以及水资源复杂系统优化调控技术等 4 部分.

1.1 目标函数与约束条件识别

1.1.1 目标函数

目标函数如下式所示:

$$\min(a \times b), \quad (1)$$

式中,

$$a = \left(\sum_{k=1}^{N_d} \left\| \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=N_{k-1}+1}^{N_{k-1}+N_k} W^Q(j, i, t) - W^R(k) \right\| \right),$$

$$b = \sigma \left(\frac{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=N_{k-1}+1}^{N_{k-1}+N_k} W^Q(j, i, t) - W^R(k)}{W^R(k)} \right),$$

$$k=1, 2, \dots, N_d;$$

$W^Q(j, i, t) = \eta(j, i, t) W^D(j, i, t)$, $\|\cdot\|$ 为绝对值符号, $\sigma(x)$ 表示向量 x 的均方差; N_d, N_i, N_t 分别为水权主体数目、模拟年数、年内时段数; N_k 为水权主体 k 内的计算单元数目(当 $k=0$ 时, $N_k=0$); $W^R(k)$ 为水权主体 k 初始水权量; $W^D(j, i, t)$, $\eta(j, i, t)$, $W^Q(j, i, t)$ 分别为计算单元 j 在 i 年 t 时段的取水量、非重复利用系数、资源水量. 若计算单元数目 N_j 与决策实体数目 N_d 相同, 则(1)式变为

$$\min \sum_{j=1}^{N_j} \left\| \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^{N_t} W^Q(j, i, t) - W^R(j) \right\| \times \sigma \left(\frac{\frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^{N_t} W^Q(j, i, t) - W^R(j)}{W^R(j)}, j=1, 2, \dots, N_j \right). \quad (2)$$

当 $\eta(j, i, t)$ 确定后, 在(1)式或(2)式中, 只有 $W^Q(j, i, t)$ 是未知量, 可通过水库群调节与水量分配仿真模型联合确定.

从(1)式或(2)式可以看出, 目标函数的含义为流域内行政区多年平均取水量对应的资源水量与初始水权的偏差和与其偏差的方差之积的最小化, 它体现了流域水资源优化调控对象与初始水权的衔接关系, 体现了初始水权对区域取水的“总量控制”作用.

1.1.2 约束条件

i) 水库库容约束

$$V_{\text{DOWN}m}(t) \leq V_m(t) \leq V_{\text{UP}m}(t), \quad (3)$$

式中, $V_{\text{DOWN}m}(t)$, $V_{\text{UP}m}(t)$, $V_m(t)$ 分别为 m 水库 t 时段允许下限库容(一般为死库容)、上限库容(汛期为汛限水位对应库容、非汛期为兴利库容)、 m 水库 t 时段库容(决策变量).

ii) 水库供水能力约束

$$W_{\text{SKGS}m}(i, t) \leq W_{\text{SKGSNL}m}(t), \quad (4)$$

式中, $W_{\text{SKGS}m}(i, t)$ 为河道外从 m 水库 i 年 t 时段的取水量 (10^4 m^3), $W_{\text{SKGSNL}m}(t)$ 为 m 水库 t 时段供水能力.

iii) 水库水量平衡约束

$$V_m(t+1) = V_m(t) + W_{INm}(t) - W_{OUTm}(t), \quad (5)$$

式中, $V_m(t+1)$, $V_m(t)$, $W_{INm}(t)$ 和 $W_{OUTm}(t)$ 分别为 m 水库 t 时段末、初的库容, 时段 t 入库、出库水量。

iv) 河道内用水约束

除河道内生态环境用水外, 河道内生产用水, 例如航运、发电等, 与河道外用水是可以协调的。因此, 这里只把河道内生态环境用水作为硬约束:

$$Q_{HDI}(i, t) \geq Q_{EEI}(t), \quad (6)$$

式中, $Q_{HDI}(i, t)$, $Q_{EEI}(t)$ 分别为 l 控制断面 i 年内 t 时段流量、 t 时段生态环境需水量。

v) 河道引水能力约束

$$W_{HDGS}(i, j, t) \leq W_{YTNL}(j, t), \quad (7)$$

式中 $W_{HDGS}(i, j, t)$, $W_{YTNL}(j, t)$ 分别为 j 计算单元 i 年 t 时段的河道取水量、 j 计算单元 t 时段的引提能力。

vi) 变量非负约束

模型物理背景表明所有变量非负。

1.2 流域水量分配仿真模型建立

流域水量分配仿真模型是基于系统仿真原理^[5], 通过建立蓄、供、输、耗、排等水循环过程的状态转移方程, 再现天然水资源系统功能和运行过程的模拟分析工具。它包括水资源系统网络结构、水量分配仿真规则以及模型参数率定等。

1.2.1 流域水资源系统结构描述

中国南方流域水资源系统具有水系复杂, 水库、湖泊、池塘、洼淀等蓄水工程密集, 大型水库调蓄能力不足等特点, 这给水量分配仿真模型的建立提出了挑战: 如何在水文资料与水资源系统的真实程度之间得以兼顾和权衡? 本文提出了虚拟水库、虚拟水库入流与虚拟区间入流的概念及相应结构描述方法。所谓“虚拟水库”是指, 在流域水资源系统概化中, 将距离相邻且功能相近的小型水库合并而成的“大”水库; 相应的水库入流、河道区间入流也随着合并, 合并的水库入流称为“虚拟水库入流”、区间入流称为“虚拟区间入流”。在水库合并过程中要注意与水功能区划相结合, 切不能把隶属于不同功能区的水库进行合并, 否则将影响水功能区纳污能力计算模型

的嵌套。

考虑到资料的可获得性和系统仿真的实际需求, 并兼顾水功能区划特征, 以县级行政区套水功能区为基本计算单元, 结合水系的具体特性对流域水资源系统进行概化。概化后的流域水资源系统变成由节点和线段等元件连接而成的网络。其中, 节点包括水库、虚拟水库、控制断面、取水点、排水点等; 线段是指连接这些节点的河道。建立网络结构中所有元件的状态转移方程(水量平衡方程), 并根据水力联系将其连接起来, 便构成了整个仿真模型的“状态转移”方程。

i) 水库水量平衡方程

$$V_i(t+1) = V_i(t) + W_{INi}(t) - W_{OUTi}(t), \quad (8)$$

式中, $W_{OUTi}(t) = \sum_j W_{Di,j}(t) + W_{OUT_RDI}(t) + W_{LOSSi}(t)$, $W_{INi}(t) = W_{OUTi-1}(t) + P_{WSi}(t)$; $V_i(t)$, $V_i(t+1)$, $W_{INi}(t)$, $W_{OUTi}(t)$ 分别为 i 水库 t 时段初、末库容, i 水库平均入库与平均出库水量; $W_{Di,j}(t)$, $W_{OUT_RDI}(t)$, $W_{LOSSi}(t)$, $P_{WSi}(t)$ 分别为 j 用户从水库 i 的时段平均取水量、弃水、蒸发渗漏损失、库区降雨径流或区间入流。

ii) 河段水量平衡方程

$$\begin{aligned} R_{WINK}(t) + P_{WSK}(t) + \sum_j W_{DRWj,k}(t) \\ = R_{WOUTk}(t) + \sum_{jj} R_{WDk,jj}(t) + R_{WLOSSk}(t), \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $R_{WINK}(t) = W_{OUT_RDI,k}(t) + R_{WOUTk-1}(t)$, $W_{DRWj,k}(t) = \eta_j \sum_i W_{Di,j}(t) + \eta_{jj} \sum_k R_{WDk,jj}(t)$, $R_{WINK}(t)$, $P_{WSK}(t)$, $W_{DRWj,k}(t)$, $R_{WOUTk}(t)$, $R_{WDk,jj}(t)$ 和 $R_{WLOSSk}(t)$ 分别为 k 河段 t 时段平均入流量、区间入流、用水户 j 的排水量、河段出流量、用户 j 从河段 k 的取水量、河道蒸发渗漏损失; $W_{OUT_RDI,k}(t)$, $R_{WOUTk-1}(t)$ 分别为水库 i 的弃水、上一河段出流量, η_j 为用户 j 的回归水系数, 即为排水量与取水量之比。

iii) 出境控制断面水量平衡方程

$$W_{CELL_OUTn}(t) = R_{WOUTn,K}(t), \quad (10)$$

式中 $W_{CELL_OUTn}(t)$ 为计算单元 n 的出境流量, $R_{WOUTn,K}(t)$ 为计算单元 n 最后计算河段 K 的出流量。

iv) 需水节点即用水节点的水量平衡方程式

$$\sum_i W_{Di,j}(t) + \sum_k R_{WDk,j}(t) = \sum_k W_{DRWj,k}(t) + C_{Wj}(t), \quad (11)$$

式中, $C_{wj}(t)$ 为用户 j 时段 t 的平均耗水量, 其他符号意义同上.

1.2.2 流域水量分配仿真模型运行规则制订

流域水量分配仿真规则是规定水向何处流、用水户如何取水的一组判断准则, 它需根据水量分配原则和流域用水现状进行具体制订. 本文根据中国南方流域的水资源特点和开发利用现状, 确定了水量分配的原则: i) 在保障河道内生态环境用水安全的前提下, 合理分配河道外用水; ii) 水库功能发电服从供水, 电调服从水调. 根据上述原则, 确定了水源供水和用户取水的优先顺序: i) 水源地供水的先后顺序为: 水库弃水—>河道—>水库放水; ii) 用户取水的优先顺序为: 基本用水(生活与河道外生态环境用水之和)—>生产用水(一产、二产和三产用水之和).

依据水量分配原则以及水源供水和用户取水的优先顺序, 制订了流域水量分配的具体规则.

规则 1. 以需水量作为系统初始缺水量, 首先用水库来水充蓄水库, 判断是否库满并有弃水产生, 如有弃水则计算弃水量并运行规则 2; 否则运行规则 3:

规则 2. 计算水库弃水量、缺水量、水库供水能力三者最小值, 并以此作为水库的第一部分供水量, 此时缺水量为原缺水量减去水库供水量; 如果缺水量大于零, 运行规则 3, 否则结束程序.

规则 3. 计算河道引提水能力、缺水量二者最小值, 并以此作为河道供水量, 此时缺水量为原缺水量减去河道供水量; 如果缺水量大于零, 运行规则 4, 否则结束程序.

规则 4. 计算水库可供水量、缺水量、水库供水能力三者最小值, 以此作为水库第二部分供水量; 判断系统是否缺水.

1.2.3 流域水量分配仿真模型参数率定

水量分配仿真模型中存在基本用水回归水系数 $\eta_i (i=1, 2, \dots, N)$ 、生产用水回归水系数 $\mu_i (i=1, 2, \dots, N)$ (N 为计算单元数目)、计算单元之间的分水系数 β_i 等待定参数.

i) 率定模型的建立

采用具有逐月实测来水和用水资料的年份, 以控制断面实测流量与模型计算流量偏差平方和最小为目标函数, 按照从上游到下游, 逐单元率定模型参

数; 对于没有控制断面的计算单元, 要与下游有水文控制站的计算单元合在一起进行率定.

ii) 优化方法的选择

由率定模型建立过程可知, 自上而下建立的目标函数因其控制的计算单元数目不同, 致使率定模型所需优化的变量数目存在倍数上的差异, 这要求优化方法具有对变量数目自适应、计算精度和求解效率较高等处理复杂问题的优点. 故本文选择模拟生物进化原理的串并联复合结构格雷码加速遗传算法 (SS-GAGA)^[11] 作为参数率定的优化方法.

1.3 水功能区纳污能力计算模型

水体污染成分众多, 穷尽所有的水质指标进行纳污能力计算既无可能也没必要. 识别出流域代表性污染物, 并据此建立水功能区纳污能力计算模型具有现实意义. 流域代表性污染物是指能反映流域污染现状特性和变化情势的水质指标^[8]. 本文采用对应分析和模糊聚类相耦合的智能识别模型 (Correspondence factor analysis based on fuzzy C-means clustering, CFA-FCM)^[8,12] 对流域代表性污染进行识别. CFA-FCM 能同时获取最佳聚类数目、聚类中心以及样本和变量载荷点隶属各聚类中心的隶属度. CFA-FCM 借助对应因子分析的解释原理, 根据最佳聚类数目下的样本载荷点与变量载荷点聚集情况, 可直观确定流域代表性污染物.

(i) 水功能区纳污能力计算模型

设水功能区由 N 个河段组成, 假定区域所有污染物在河段中间以点源形式集中排污, 如图 1 所示.

图 1 中, 河段 i 的首断面流量为 $Q_{i-1}(\text{m}^3/\text{s})$, $q_i (i=1, 2, \dots, N)$ 为入河的总排污量 (g/s); $C_i^* (i=1, 2, \dots, N)$ 为末断面污染物控制浓度; 河段 i 的长度为 $L_i(\text{m})$.

假设污水量与河道流量相比可以忽略, 反演污染物浓度场一维控制方程^[13,14] 得到河段 i 的纳污能力

$$q_i = \left(C_i^* - C_{i-1}^* e^{-\frac{KL_i}{u_i}} \right) e^{\frac{KL_i}{2u_i}} Q_{i-1}, \quad (12)$$

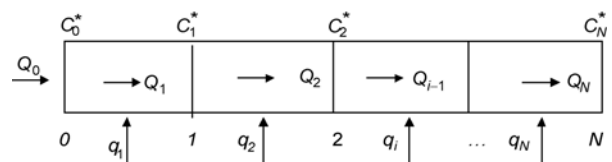


图 1 河流纳污能力计算示意图

式中, u_i 为流量 Q_i 下河道断面平均流速(m/s). 将 $q_i(i=1, 2, \dots, N)$ 累加起来, 即为整个河道的纳污能力. 当河段较长时, 河段首尾流量可能相差较大, 从而影响河段纳污能力的计算精度, 为此对(12)式进行修正, 得到河段 i 的纳污能力计算公式为:

$$q_i = \left(C_i^* - C_{i-1} e^{-\frac{KL_i}{u_i}} \right) e^{\frac{KL_i}{2u_i}} \left(\frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} \right). \quad (13)$$

(ii) 纳污能力计算模型参数确定

从(13)式可以看出, 纳污能力计算模型中存在 6 个参数, 具体确定如下.

a) 综合衰减系数 K . K 的确定通常有两种途径^[8], 一是分析借用已有的研究成果, 二是实测法.

b) 水功能区目标浓度值 C_i^* . 水功能区划分的目的在于不同的水域执行不同的地表水环境质量等级标准, 本文以水功能区对应的水质标准等级的上限值作为其目标浓度值.

c) 污染物浓度本底值 C_0 . C_0 的确定是一件复杂的事情, 目前尚未达成共识^[14], 但从(13)式可以看出, 该值的选择只对计算边界河段的纳污能力有影响, 因此本文选择边界断面的现状污染物浓度值与相应水功能区水质标准对应污染物浓度的较小者作为 C_0 .

d) 河段初断面流量 Q_{i-1} . 河段既是用水户的取水水源又是污水排放场所, 同时也会有区间入流汇入, Q_{i-1} 要根据水量分配仿真模型计算单元与水功能区的耦合关系具体确定, 是取水与排污统一分配模型建立的关键之一.

e) 河段流速 u_i . 首先建立流量-流速关系曲线, 然后通过流量在该曲线上查找流速 u_i , 这也是水量分配仿真模型与水功能区纳污能力计算模型的耦合原理之一.

f) 河段长度 L_i . 河段长度 L_i 的确定要兼顾水功能区的整体性, 以及与水量分配仿真模型计算单元的匹配关系. 体现了流域水量分配仿真模型与水功能区纳污能力计算模型的耦合关系.

1.4 水量分配仿真模型与水域纳污能力计算模型耦合原则

通常, 水域纳污能力是指在设定的水文条件下, 例如以 90%保证率最枯月平均流量或近 10 年最枯月平均流量作为设计流量计算得到的稳定值^[13], 其优点在于纳污能力相对稳定, 便于分配和监督管理; 但是不能反映水文条件的动态变化以及与用水和排水的制

约关系.

为此本文建立与来水、用水和排水完全融合的水功能区纳污能力计算模型, 其中, 水量分配仿真模型与水功能区纳污能力计算模型的耦合关系是问题的关键, 其耦合原则如下: 1) 对于多个水功能分区完全处于水量分配仿真模型一个基本计算单元的, 按照不同水功能区的集水面积分配水量, 换算成相应水功能区的流量, 然后查询该控制站或几个控制点组合的流量与流速关系曲线, 计算纳污能力; 2) 对于水功能分区跨越不同计算单元的, 首先计算处于不同计算单元的水功能区的长度, 然后按照集水面积比分配水量, 将水量换算成相应控制断面(水文站)的流量后, 查询流量与流速关系, 计算纳污能力.

1.5 基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型工作原理

(1)~(7)式组成了一个以水库群为调节手段的大系统复杂优化问题, 单纯利用优化方法即使能求出最优解, 也会因解的脆弱性, 导致在实际应用价值上的争议^[15]. 本文采用系统仿真与优化技术相结合的途径进行求解. 仿真技术的引入, 既能保证水量分配方案的可行性, 也能消除部分约束条件, 降低优化问题的难度. 从水量分配仿真模型规则的制订过程可以看出, 约束条件(2), (3), (5), (6)已经隐含在规则中予以满足了. 因此, 在优化过程中只需再满足约束条件(1)和(4)即可. 约束条件(1)是 m 水库的优化空间, 在决策变量(可视为水库“调度图”)生成时要首先予以满足, 故只剩下约束条件(4)了. 这样, 基于初始水权的水资源优化调控就演变成河道内用水与河道外用水满足程度之间的权衡问题.

尽管如此, 由于水库数目较多, 水库群的优化调控仍然非常复杂, 这里采用轮库迭代与并行遗传算法从宏观与微观两个层面进行优化求解. 在宏观层面, 采用轮库迭代技术按照水流方向自上而下轮流迭代逐个水库, 在对某水库进行优化时, 其他水库的“调度图”保持不变; 在微观层面, 利用遗传算法的并行计算功能, 将流域内所有待优化水库的“调度图”合并成一个染色体, 当某水库被优化时, 不同染色体间的算子(选择、交叉与变异)操作, 只能在该水库对应的“染色体段”间进行, 不能跨段活动. 实践表明, 这种分层次的优化技术, 由于发挥了各自的优势, 使得求解效率和计算精度大为提高.

上述介绍了统一分配模型各组成部分的建立过程和求解算法, 其工作关系如图 2 所示, 具体包括如下 3 个模块.

1) 数据输入模块

模型的输入资料包括: 初始水权分配方案; 水库入流、区间入流等径流还原长系列资料; 不同需水情景(包括不同水平年、不同节水措施等)下计算单元需水系列(生活需水, 河道外生态环境需水, 一产、二产和三产需水); 主要控制断面流量~流速关系曲线、生态环境需水过程线、河道内需水过程线; 水库有关资料: 特征库容、特征水位、供水能力过程等; 与水环境容量计算相关数据: 水功能区河段长度、综合衰减系数、水环境容量背景值等.

2) 模型计算模块

i) “需水方案”产生. 选择需水情景并以此为基础在其周围($\pm 10\%$)随机变动, 生成新的需水系列. 这是本模型与常规水资源配置方法具有显著区别的一个方面, 即不是完全按照需水预测结果作为水资源配置逼近的目标.

ii) 用“轮库法”优化水库群. 利用遗传算法的并行计算功能, 将每个水库的“调度图”分别设置等长的“染色体段”, 按照给定规则将所有“染色体段”串联起来, 构成一条完整的染色体. 假设一个水库对应“染色体段”的长度为 G_{NUM} , 则一条完整染色体的长度为 $m \times G_{NUM}$. 染色体在进行选择、杂交、变异等操作时, 只能对相应染色体段进行, 不能跨段操作; 水库之间采用轮库方法. 对于任意一条“染色体”要运行以下步骤:

iii) 运行水量分配仿真模型. 由统一分配模型的建立过程知, 统一分配模型在接受需水系列、径流

还原系列、水库基本参数, 以及 ii) 提供的水库调度图后, 即可给出各计算单元各时段不同用户取水量等系列数据. 与此同时, 运行步骤 iv).

iv) 运行水功能区纳污能力计算模型. 统一分配模型中水功能区纳污能力计算模型与水量分配仿真模型是完全耦合的, 只要取水、排水活动发生变化, 纳污能力也随之发生变化. 另外, 流域代表性污染物智能识别模型是“离线”工作的.

v) 以满足给定精度阈值或遗传算法运行一定次数, 作为此轮计算的终止条件, 记录对应适应度值最大的运行结果. 如果满足精度要求, 运行模块 3), 结束总程序; 否则, 返回模块 2), 重复上述过程.

3) 结果输出模块

从运行结果中, 选择适应度值最大者, 输出其分配结果, 主要包括: 不同年份计算单元允许取水过程、允许排污过程、水库优化调度图、主要控制断面流量过程等.

2 实例分析

北江是中国珠江水系的一级子流域, 水量相对丰富, 但水环境资源已日趋稀缺, 工程调控能力低, 具有中国南方流域水资源开发利用的典型特点. 北江流域多年平均地表水资源量和水资源可利用量分别为 $521 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $144 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2005 年河道外用水 $60 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2030 年河道外需水 $80 \times 10^8 \text{ m}^3$; 北江流域面积 $46\,710 \text{ km}^2$, 地跨广东、湖南、江西和广西四省, 其中, 99.8% 的流域面积位于湖南和广东两省境内. 湖南的郴州、广东的韶关、清远、佛山、广州和肇庆等 6 个地级市占流域总面积的 99% 以上. 区域分布见图 3.

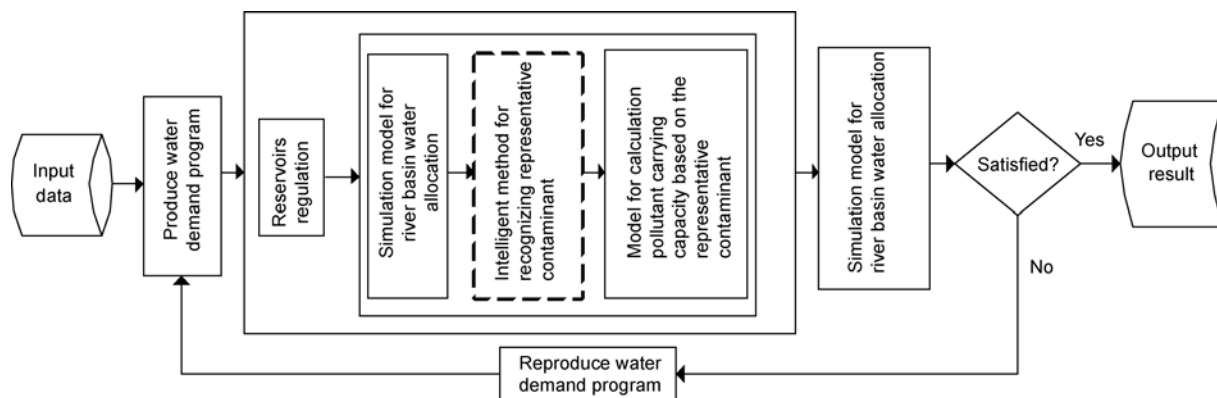


图 2 基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型框架



图3 北江流域行政区划简图

近几年,随着经济社会的高速发展,流域河道外用水量和入河排污量增加趋势明显,枯水年份季节性缺水现象突出.作为珠江水系的组成部分,北江还担负着三角洲地区秋冬季节的压咸任务.因此,制定北江流域初始水权分配方案,并以此为总量控制目标进行水资源统一调度意义重大且任务紧迫.文献[8]以水资源可利用量的一部分 $70\times 10^8\text{ m}^3$ 作为水权客体、以地级行政区水权主体开展了初始水权分配研究,分配方案如表1所示.本文将表1给出的初始水权分配方案作为统一分配模型的允许取水量总量控制目标进行流域允许取水量与允许排污量的统一分配研究.

笔者以1997年北江流域的一次全面监测水质数

表1 北江流域初始水权分配方案^[8](单位: 10^8 m^3)

郴州	韶关	清远	佛山	广州	肇庆
6.204	25.008	24.048	1.005	1.932	11.803

据(包括 COD_{Mn} , DO, Cr, Hg, Cd 和挥发酚等6项指标)为背景,利用 CFA-FCM 识别出了北江流域的代表性污染物为 COD_{Mn} (详见文献[8]).本文以此作为水功能区纳污能力计算的指标.

控制断面流量-流速关系是水功能区纳污能力计算的重要内容,利用历史实测水文数据建立起北江流域所有水文站的流量~流速关系(共22个水文站点),其中部分水文站的流量~流速关系曲线如图4所示.从点子分布看,这些水文站点的流量~流速关系良好.

2.1 模型计算结果

2.1.1 水库群联合优化调度图

北江流域有小(二)型以上水库1050座,总库容 $65\times 10^8\text{ m}^3$,其中大型水库8座、库容 $44\times 10^8\text{ m}^3$,中型水库50余座、库容 $15\times 10^8\text{ m}^3$ ^[8].本文将所有中型水库概化为12座虚拟水库,加上8座大型水库,共20座水库参与联合调节.限于篇幅,现只给出南水、飞来峡、潭岭和锦江4座大型水库的优化调度图,如图5所示.

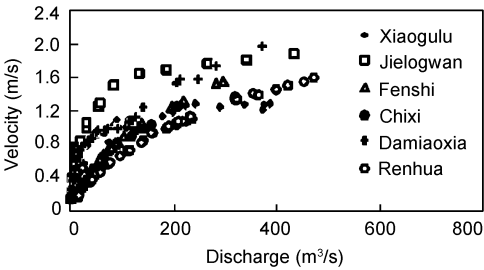


图4 部分水文站的流量~流速关系

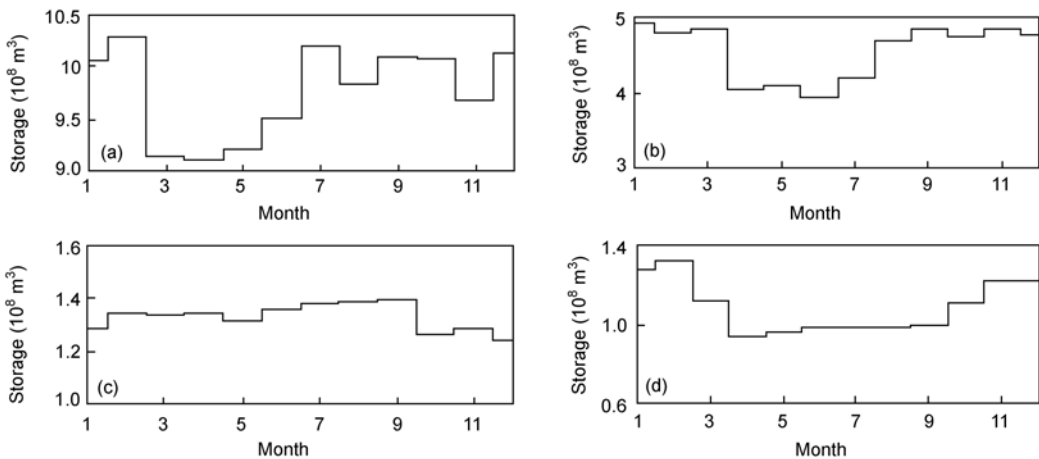


图5 优化调度图

(a) 南水水库; (b) 飞来峡水库; (c) 潭岭水库; (d) 锦江水库

从图5可看出, 前3个水库多年平均意义下非汛期在高水位运行, 反映了北江流域水量相对丰富的特点.

2.1.2 允许取水量与允许排污量分配方案

统一分配模型能给出任意年型的允许取水量与允许排污量统一分配方案. 经计算, 北江流域多年平均允许取水量和允许排污量(COD_{Mn})分别为 70.032×10⁸ m³, 22.245×10⁴ t. 这里的允许排污量为相应纳污能力的 90%, 另外 10%用以应对突发污染事件.

枯水年份水资源系统的运行状况对丰水带流域意义重大. 表 2 是北江流域特枯年份(*p*=95%)允许取水与允许排污量分配方案, 从表 2 可以看出全流域允许取水量 80.218×10⁸ m³、相应允许排污量(COD_{Mn})为 16.140×10⁴ t.

2.1.3 跨境断面流量过程

模型能给出跨境及关键控制断面的流量过程, 这对流域水资源系统的实际管理具有重要的参考价值. 表 3 是特枯水年(*p*=95%)流域内重要控制站及跨境断面的流量过程.

对比分析同一水文控制站的模型计算、河道内生态环境需水和河道内需水过程, 发现通过水库群的联合优化调度, 即使在特枯年份, 也能满足河道内生态环境需水的要求, 如图 6(限于篇幅, 未将所有水文站的相应结果列出). 但是, 存在某些时段模型计算流量低于河道内需水的情形, 且随着来水频率的增加这种不满足程度也越来越严峻.

表 2 特枯年允许取水与允许排污量分配结果(单位: 允许取水量, 10⁴ m³; 允许排污量, t)

月份	郴州		韶关		清远		佛山		广州		肇庆	
	允许取水量	允许排污量	允许取水量	允许排污量	允许取水量	允许排污量	允许取水量	允许排污量	允许取水量	允许排污量	允许取水量	允许排污量
1	5565.2	791.5	25618.2	3061.2	22247.2	2621.1	1080.4	277.7	2374.8	774.4	13348.6	1236.6
2	4511.3	1577.3	18424.5	3218.1	17251.3	2859.2	702.5	361.6	1921.2	988.0	11670.9	402.9
3	4039.6	1123.9	16997.8	5423.1	16679.6	4571.4	724.8	604.4	1372.6	1590.7	7015.9	1657.6
4	4386.6	2466.2	17134.1	7140.6	16086.0	6436.0	707.5	1002.0	1312.7	2428.6	10031.8	1481.8
5	6494.5	1748.9	24231.0	5165.9	24860.6	6775.5	1021.7	912.9	1724.5	2265.0	13007.5	3824.5
6	5124.4	1442.1	18575.1	5072.6	19842.7	7681.2	1404.9	1044.1	1879.7	2509.3	8642.3	3378.8
7	9024.0	615.5	30320.7	4437.9	32466.6	5252.7	597.9	651.7	1191.0	1699.8	12280.4	3237.7
8	7443.0	615.0	26000.1	4584.1	28719.9	5275.8	785.3	657.0	1422.5	1712.0	10791.1	2309.3
9	10780.7	861.7	35892.1	6630.4	35757.9	3801.2	1506.1	498.7	2094.6	1334.6	17874.7	827.5
10	7578.3	706.7	30630.0	4027.7	28223.6	3545.6	1474.2	494.3	2204.4	1327.8	13264.6	520.5
11	3525.2	399.0	13913.1	2812.7	15252.5	2054.4	641.9	208.1	1454.1	586.1	6975.3	423.0
12	5073.4	397.6	21534.2	2412.5	21968.7	1877.0	989.9	175.5	2255.5	496.7	12255.7	619.6
合计	73546	12745	279271	53987	279356	52751	11637	6888	21208	17713	137159	19920

表 3 特枯年跨境控制断面模型计算流量过程(单位: m³/s)

月份	坪石	马经寮	翁源	清广	清-肇	石角	四会	出口
	郴州-韶关	韶关-清远	韶关-清远	清远-广州	清远-肇庆	-	清远-佛山	流域出口
1	84.3	190.1	67.1	41.5	12.6	373.6	101.0	516.2
2	273.5	407.8	74.8	60.3	12.8	543.3	23.7	627.5
3	153.5	470.8	180.0	92.0	32.3	828.2	165.1	1085.5
4	453.0	823.1	161.2	159.4	32.4	1434.7	164.0	1758.2
5	267.6	491.3	140.8	140.2	59.2	1261.9	440.9	1843.1
6	220.4	420.3	239.2	166.1	45.9	1495.6	415.8	2077.7
7	43.6	225.4	153.1	99.4	32.8	894.6	365.3	1359.3
8	48.1	305.4	86.9	100.2	30.0	902.1	241.2	1243.6
9	82.5	497.5	82.0	78.1	4.6	703.6	55.4	837.2
10	50.3	537.1	54.9	74.9	24.1	674.2	41.7	790.8
11	30.5	145.9	59.8	31.9	15.1	352.0	29.6	369.4
12	24.2	97.8	50.6	25.9	9.0	302.0	37.6	337.4

2.2 模型合理性分析

运用统一分配模型计算得到的北江流域允许排污量与允许取水量的关系如图 7 所示, 其中横坐标为北江流域天然水资源量相应年型的来水频率, 其值越大表示水资源越稀缺。

从图 7 可以看出, 随着流域来水频率的增大, 河道外允许取水量增多, 但允许排污量减小, 这一方面反映了水量相对丰沛流域水资源分配的特点, 即河道外允许取水量与实际需水量基本吻合, 而允许排污量受到明显的限制, 另一方面表明了计算成果和统一分配模型的合理性。从总体上来看, 随着来水频率的增加, 流域允许取水量呈增加趋势, 允许排污量呈减小趋势, 但是在某些局部也存在异常现象, 原因可能来自三个方面: 1) 流域来水频率(横坐标)是通过石角站 1956~2000 年的天然径流量的计算得来的, 然而不同年份的流域天然来水在空间分布上存在差异; 2) 由计算过程可知, 允许取水量与需水预测结果有直接关系, 需水预测通常是把来水频率分为几段进行计算的, 在同一频率段内, 尽管来水有别, 但需水则视为相同; 3) 可能与模型计算误差有关。

图 8 是初始水权分配方案与多年平均允许取水量的关系, 由图 8 可以看出二者非常接近, 这表明了统一分配模型实现了初始水权分配(水资源宏观分配)与流域水资源优化调控(微观调控)的统一。

图 9 为北江流域石角站特枯水年的流量过程。从图 9 可以看出, 由于在统一分配模型中把生态环境需水过程作为约束条件, 使得即使在枯水月份, 模型计算出的流量过程也能满足生态环境需水要求, 而实际年份的枯水月份流量却低于生态环境需水; 并且, 实际年份发生时的河道外用水量远小于模型中的需水量(需水预测结果), 这说明通过联合优化调控流域内水库群, 实现水库从“以发电为主”到“发电服从供水”功能的转变, 对维护河流生态具有重要的意义。

3 结论

1) 从流域水循环的角度分析了初始水权客体与取水量的关系, 建立了以初始水权为允许取水量总量控制目标的流域水量分配模型目标函数, 实现了初始水权分配与流域水资源优化调控的统一; 建立了基

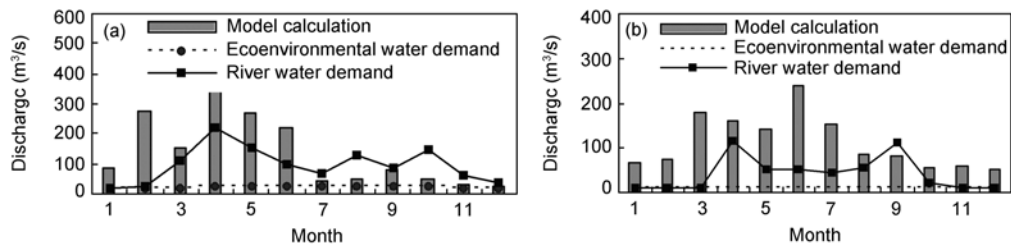


图 6 特枯水年流量过程
(a) 坪石站; (b) 翁源站

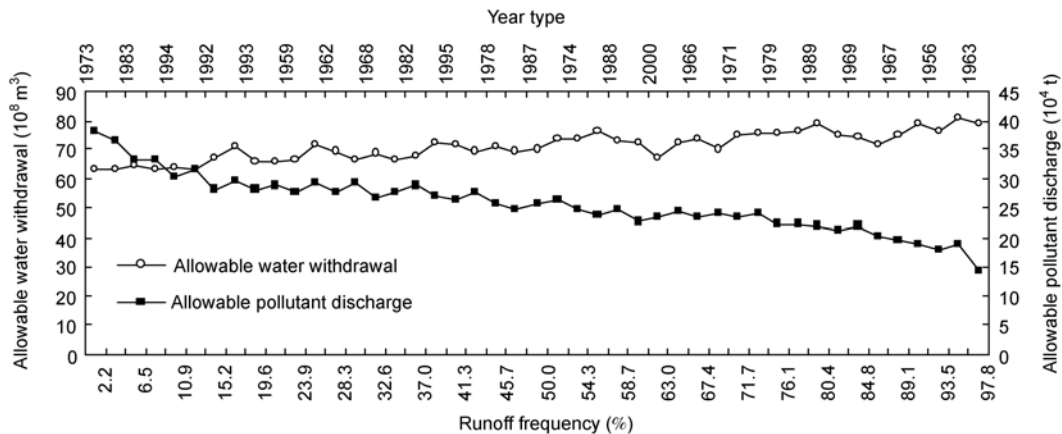


图 7 北江流域允许排污量与允许取水量的关系

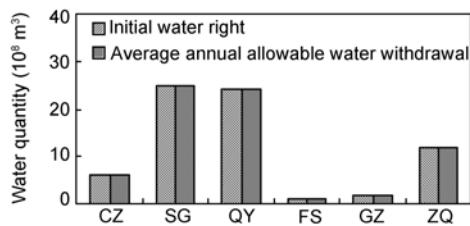


图8 北江流域初始水权与多年平均取水量

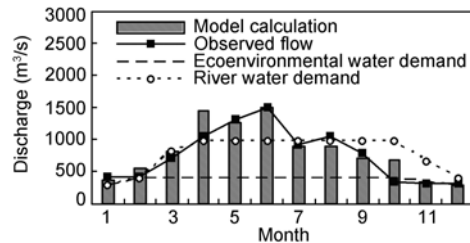


图9 北江流域特枯年石角站流量过程

于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型, 阐释了统一分配模型各组成部分的构建过程与工作关系; 针对统一分配模型的复杂特点, 研建了集系统仿真、智能计算和轮库迭代技术于一体的流域水资源系统优化调控新技术, 其中仿真模型保证了分配方案的可操作性, 轮库迭代与智能计算综合集成的优化方法提高了水库群优化调度模型的求解效率。

2) 将基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配模型应用于北江流域, 得出了一些有意义的认识. i) 由于中国南方流域的水资源可利用量一般都大于目前甚至未来一段时间的河道外用水量,

因此应将水资源可利用量的一部分作为初始水权分配客体, 否则会出现分配方案难以在水利工程中落实的情形, 以至于分配方案流于形式. ii) 与水量相比, 水质是中国南方流域进行初始水权分配的主要驱动因素. iii) 在中国北方, 例如黄河流域, 各行政区的允许取水量随着来水频率的减小而增大, 就是通常所说的“丰增枯减”原则; 而在中国南方那些水资源开发利用程度相对较低的地区, 严格遵守这一原则并不适宜. 这是因为, 现阶段甚至未来一段时间, 大多数年份流域实际取水总量小于与水资源可利用量相适应的允许取水量, 考虑到限制用水对区域经济发展的制约作用, 所以区域允许取水量可在一定范围内随来水频率的增大而适度增加, 换言之, “丰增枯减”原则的遵守存在一个阈值问题. iv) 落实初始水权分配方案, 须对取水量、回归水量以及排污量等水循环要素进行全面监测, 加强跨境控制断面水量水质的实时监测, 对超标取水和超标排污的行政区以“事后算账”的形式进行惩罚。

3) 本文研究旨在为解决基于总量控制的流域允许取水量与允许排污量统一分配问题提供技术框架, 某些具体环节尚需深入研究与完善. 例如, 水量分配仿真规则是以水库功能“发电服从供水”为原则制定的, 没有涉及落实初始水权分配方案对发电、航运等兴利目标的影响评估问题; 在实例研究中, 生态环境需水是直接借用已有成果, 其合理性未做深入分析和论证. 事实上, 这些也是本领域亟需解决的问题。

参考文献

- Diao X S, Terry R. Can a water market avert the “double-whammy” of trade reform and lead to a “win-win” outcome? *J Environ Econ Manage*, 1999, 23(3): 735—746
- Renato G S, Mark W R. Water policy: The role of water rights, institutions and markets. *Water Resour Develop*, 1996, 12(1): 32—45
- 中国科学院可持续发展战略研究组. 2007 中国可持续发展战略报告——水: 治理与创新. 北京: 科学出版社, 2007. 250—270
- 高而坤. 中国水权制度建设. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. 3—9
- 王光谦, 魏加华. 流域水量调控模型与应用. 北京: 科学出版社, 2006. 35—89
- Robert B, Edwyna H. Efficiency gains from water markets: Empirical analysis of water move in Australia. *Agr Water Manage*, 2008, 95: 391—399
- 刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(3): 350—360
- 王宗志. 基于水量水质的流域二维水权初始分配理论及其应用. 博士学位论文. 南京: 南京水利科学研究院, 2008
- Kerachian R, Karamouz M. A stochastic conflict resolution model for water quality management in reservoir-river system. *Adv Water Resour*, 2007, 30: 866—882
- 刘昌明, 杨胜天, 温志群, 等. 分布式生态水文模型 EcoHAT 系统开发及应用. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 39(6): 1112—1121
- Wang Z Z, Zhang L L, Jin J L. Accelerating genetic algorithm based on series-shunt-wound structure. In: *Proceedings of First International Conference on Modeling and Simulation*, August 4—7, 2008, Nanjing, China. 149—154
- 王宗志, 金菊良, 张玲玲. 东湖污染物来源的智能识别方法. *水科学进展*, 2006, 17(5): 714—719
- 水域纳污能力计算规程. 中华人民共和国水利部, SL348-2006. 2006
- 孙培德, 楼菊青. 环境系统模型及数值模拟. 北京: 中国环境科学出版社, 2005. 83—95
- Tu M Y, Hsu N S, Tsai F T C, et al. Optimization of hedging rules for reservoir operations. *J Water Resour Plan Manage*, 2008, 134(1): 3—13