

文章编号:0559-9350(2018)12-1451-09

## 水资源综合模拟与调配模型 WAS(I): 模型原理与构建

桑学锋, 王浩, 王建华, 赵勇, 周祖昊

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

**摘要:** 针对自然-社会水资源系统的复杂互馈机制科学问题, 以及水资源管理应用需求, 将水文学数值模拟和水资源适应性调配相结合, 研究构建了概念性半分布式水资源综合模拟与调配模型 WAS; 提出了模型架构、单元划分、动态互馈模拟、计算公式和运行策略等 WAS 模型原理及方法, 为自然-社会水资源复杂系统的模拟与科学调配提供支撑。

**关键词:** 水资源; 模拟与调配; 概念性; 半分布式; 模型

**中图分类号:** TV213

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20180507

### 1 研究背景

随着人类取用水规模的不断扩大, 经济社会与区域水资源形成了相互影响、相互制约、互动关联的关系<sup>[1-3]</sup>。以黄河流域为例(根据《黄河流域水资源综合规划》2009年), 正常年天然河川径流量 534.8 亿 m<sup>3</sup>, 可利用量 327.9 亿 m<sup>3</sup>, 生态及入海水量 206.9 亿 m<sup>3</sup>, 现状流域地表水用水量约 370 亿 m<sup>3</sup>, 但入水量没有减少。从水量平衡上, 表明了水资源开发利用过程中从河流取水的同时, 也有相当部分退排水进入到河道, 存在大量水重复利用现象; 从内在机理上, 显示出水资源系统一次性水资源和回归水等二次性水资源存在一个联动、互馈的关系, 河道流量受天然来水和用水户取排水的联合作用, 同时下游取水与上游用排水之间存在动态响应。如何开展水资源动态变化下综合模拟与调配, 研究自然-社会水资源系统的互馈关系, 是水资源精细化管理的新挑战。

为科学应对这一挑战, 从水资源系统的供需双侧及二者互馈联动出发, 迫切需要回答以下 2 个重要问题: (1) 如何开展水循环的综合模拟, 包括自然产汇流过程和经济社会用耗排过程模拟, 实现水资源综合分析, 更精准定量人类活动影响下的河道流量变化。(2) 如何实现自然水循环与社会水循环过程的动态链接和互馈影响分析, 实现水资源动态变化下的水资源适应性开发利用, 实现水资源、经济社会和生态环境的协调发展。

目前, 国内外学者在水资源系统模拟与调控方面开展了大量研究, 并针对某些水文特点开发出许多模型, 如新安江模型、SIMHYD、MIKE、TOPMODEL、ROWAS、VIC、WACM 和 WROOM 等<sup>[4-12]</sup>, 在水资源系统模拟和配置模型方法方面, 多采用水循环模型中加入取水过程、水循环模型与配置模型耦合(把配置模型的结果输入水循环模型, 即单向传输)等方式, 这种方法在很多区域取得较好的效果, 但在人类社会强烈活动的区域效果则不太好, 由于水资源配置过程中不能实时响应水资源量动态变化影响, 难以反映很多地区高强度人类活动用水下的自然-社会水资源互馈及精细调控研

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401306, 2016YFC0401407); 国家自然科学基金项目(51679253); 国家杰出青年科学基金项目(51625904)

作者简介: 桑学锋(1978-), 男, 山东邹城人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水文与水资源、水环境综合调控研究。

E-mail: sangxf@iwhr.com

通讯作者: 王建华(1972-), 男, 江西上饶人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事流域水循环、水资源和节水型社会建设等研究。E-mail: wjh@iwhr.com

究，因此，在自然-社会水循环过程的实时联动互馈模拟或者一体化模拟方面需要进一步研究。针对复杂水资源系统特点，本文在二元水循环理论和水资源配置理论基础上，建立水资源综合模拟与调配一体化模型(Water Allocation and Simulation Model, WAS)，为定量有效解决上述2个问题提供新的方法。

## 2 WAS模型架构

WAS模型主要由产流模拟模块、河道汇流模块、再生水模拟模块和水资源调配模块等4大部分组成，其中产流模拟模块、河道汇流模块和再生水模拟模块共同组成自然-社会水循环的基础，用于区域水资源数量计算和组成分析；水资源调配模块主要进行水资源供需平衡和分质供水计算，用来实现水资源开发利用过程的均衡，并反馈到对应的水循环模拟过程。

WAS模型工作机制：(1)产流模拟模块。主要计算每个时段的降水产流量，并同时根据汇流面积计算水库等供水工程的来水量；(2)河道汇流模块。主要计算每个时段单元本身的产流量、单元上游河道的流入量、外调水工程流入量、单元本身的污水退水量；(3)再生水模拟模块。主要计算再生水的产生量及利用量、污水的河道退水量；(4)水资源调配模块。则根据水库特征和来水过程、再生水量、河道水量和引排水工程特征及单元行业用水特征，进行水资源配置，而行业用水过程和用排水过程，又实时反馈给再生水模拟模块，进而反馈给河道汇流模块，从而影响整个水资源系统的循环过程以及下游用水单元的配置过程。

由于自然-社会水资源系统传输或者联系通道的关键是取水过程和退水过程，因此，WAS模型的运算特点主要为：(1)在单元内部，每一个时段的单元产汇流及河道来水过程下，伴随着社会的取水和退水过程，而退水过程则又影响下一个时段的单元来水过程(单元内部来水过程=产流过程+人工退排水过程)(2)在单元之间，每个单元的水资源循环过程包括单元内部来水过程和上游单元退水过程；(3)在前面两步基础上，考虑社会取用水工程和单元行业需水特点，进行水资源配置，单元行业的配置用水过程后，则又转化为社会退排水量，进入河道汇流循环过程。通过上述方法，就实现了水资源系统单元的水资源动态的、联动的、互馈的模拟和配置。模型结构见图1。

WAS模型是以自然-社会二元水循环理论为基础，模型架构描述了自然-社会水资源系统的一体化过程，通过本架构可以实现自然-社会水资源系统的输入输出以及二者之间的动态互馈关系，也可

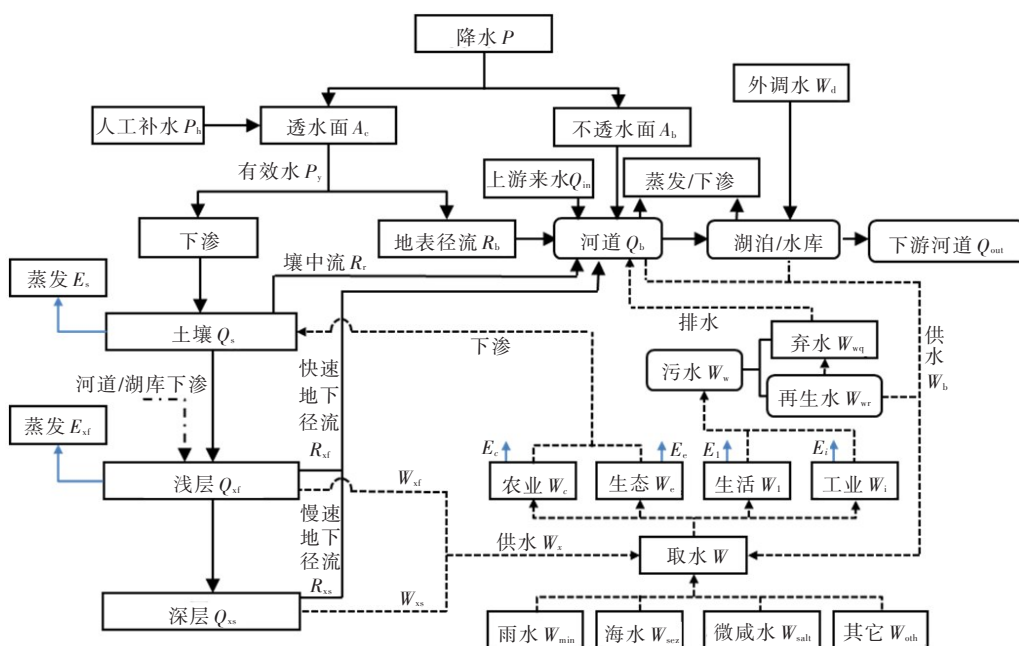


图1 WAS模型结构框架

以描述区域整个水资源系统的降水、地表水、土壤水、地下水、蒸腾发以及供水、用水、耗水、排水的过程及通量。另外，如果从整个区域水系统耗水平衡的角度，还可以进行基于耗水控制的水资源调控与管理研究。

### 3 WAS单元划分原理

单元作为水资源系统的重要基本组成，其划分方法对于水资源系统模拟和调控具有直接影响，单元划分方法是水资源系统调控模型的架构、模拟以及搜索、统计、分析等功能优劣的关键。目前水文模型单元多以DEM数字高程模型提取响应的子流域或者格网单元，并叠加土壤类型和土地利用类型进一步划分水文响应单元等进行水文计算<sup>[8-10]</sup>，这对于流域或河道径流模拟是适合的；但自然-社会二元水资源系统特点和现实水资源管理中多以行政分区为主体的方式，上述方法难以界定各行政区水资源情况与各行政边界水文变化情况，另外，传统水文模型单元有可能会出现一个单元横跨若干个行政区现象，传统水资源调控模型单元较大，也有可能会出现一个单元包含若干个水文流域的现象，单纯的水文模型子流域单元划分方法在应对水资源精细化模拟和调控方面，体现出明显的不足或者不方便应用。

本文针对水资源流域管理和行政管理需求和特点，在综合水文单元和水资源管理行政单元基础上，提出一种水资源系统“基本单元-计算单元-水文单元”三级单元划分方法，见图2。具体来说，通过水资源分区叠加行政分区形成基本单元，通过DEM数字高程在基本单元基础上进行加密细化形成计算单元，通过土壤类型和融合作物分布的土地利用形成水文单元，根据这种三级单元划分方法既能体现传统水文模拟模型单元划分特点，也能满足水资源流域管理和行政管理相结合的需求。

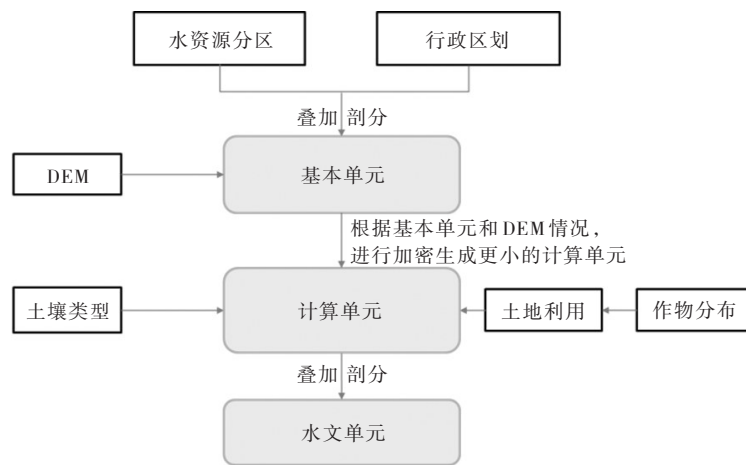


图2 水资源系统单元划分方法

### 4 WAS模型动态反馈模拟方法

水资源系统是一个变化的复合体，水资源的利用涉及供水、用水、排水和生活、工业、农业、环境及生态等多个方面，在空间上涉及上下游和左右岸，它们之间相互影响、互相反馈，除天然来水的复杂性外，人类供水、排水(退水)的当前变化极大扰动下一阶段径流利用的数量和质量，整个区域水循环体现出明显的“自然-社会”二元特征，在社会经济用、排水作用下，河道径流表现为由原来的一次径流资源转化为一次径流与退排水二次利用的复合径流。目前，大多采用“实测—分离—耦合—建模—调控”的建模方法开展水循环研究<sup>[11]</sup>。

本文在以往研究基础上，在动态反馈实现方式上提出一种“实测—分离—聚合—建模—调控”的水循环时序动态反馈模拟方法(图3)，即在典型水循环四水转化模拟模型基础上，考虑经济社会用水、排水及再生水回用过程模拟，实现社会侧支水循环实时映射到时段自然水系统过程，实时模拟

来水变化对用水变化、用水变化对下一阶段径流及供水变化的实时响应，从而实现水资源综合动态互馈变化。本方法实现社会取用水和自然水循环的实时互动，与常规水资源系统模型构建相比，区别在于“耦合”与“聚合”，耦合是松散的、外部关联的，聚合是紧密的、内部关联的，耦合关注的是某一模型和其他模型之间的关联性，聚合关注的是一个模块内部各成分之间相关联程度，本文采用水循环模拟与水资源配置聚合变成一个时序模拟模块的两个成分，进而实现二元水循环过程时段内高内聚模拟和时序过程的动态模拟。

“实测—分离—聚合—建模—调控”水资源系统模拟方法中“聚合”体现在两个方面，即：(1)单个时段单元内部水资源模拟和配置过程的聚合，由 WAS 模型框架图 1 中体现，(2)在水资源系统中的各时段之间的“聚合”，主要体现在水资源循环和配置过程上一时段与下一时段的关联影响和实时互动上，由图 3 体现。

时序模拟动态反馈模拟算法如下：(1)构建水循环模拟时段数据集  $T=\{T1, T2, \dots, Tn\}$ ；(2)对时段数据集  $T1$  进行水循环模拟，得到各供水节点的径流来水量；(3)根据供水节点来水信息及工程信息，结合基于 Huffman 树水资源供水-用户系统的水网架构，进行水资源配置；(4)根据步骤 3 得到各供水节点的剩余水量以及各单元的退水量，加入第 2 时段  $T2$  作为其运算启动条件；(5)重复(2)—(4)步骤，进行循环互动计算，得到整个时段  $T$  的水循环动态变化模拟和水资源实时配置。

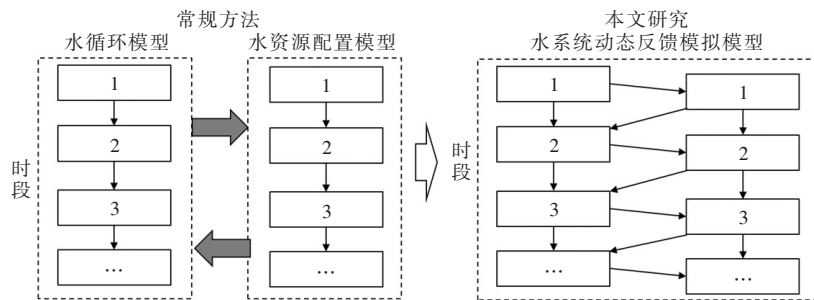


图 3 WAS 模型时序模拟动态反馈模拟方法

## 5 模型主要计算原理

**5.1 地表产流过程** 降水产流一般包括蓄满产流和超渗产流两种方式，蓄满产流一般在地下水较高、包气带较薄的湿润地区，超渗产流一般在地下水位较高、包气带较厚的干旱半干旱地区<sup>[13]</sup>。考虑区域不同的降雨时段以及不同的下垫面存在不同的径流形成方式，本文采用具有蓄满产流和超渗产流的综合产流方式，即降水强度大于入渗强度时产生地表超渗径流，下渗水量填充土壤层蓄水容量，土壤蓄满后按照蓄满产流方式产生地表蓄满径流，土壤水产生壤中流和地下径流。同时，考虑人工灌溉等补水措施也会产生径流，本文在计算有效降水中加入灌溉水量进行产流计算。

根据下垫面情况，将单元面积分成透水面积和不透水面积，不透水面积上的降雨扣除蒸发损失后直接产生地表径流，透水面积上产流采用综合产流方法，在 SMAR 模型<sup>[8]</sup>计算方法上进行调整，计算公式如下：

$$R_{b,t} = R_{bz,t} + R_{bc,t}; R_{bz,t} = P_{y,t} \times A_{z,t}; R_{bc,t} = R_{bef,t} + R_{bcx,t} \quad (1)$$

$$R_{bef,t} = \begin{cases} P_{y,t} \times A_c - F_s, & P_{y,t} \times A_c > F_s \\ 0, & P_{y,t} \times A_c \leq F_s \end{cases} \quad (2)$$

$$R_{bcx,t} = \begin{cases} R_{bcl,t} - Q', & R_{bcl,t} > Q' \\ 0, & R_{bcl,t} \leq Q' \end{cases} \quad (3)$$

$$R_{bcl,t} = P_{y,t} \times A_c - R_{bef,t} \quad (4)$$

$$Q'_t = Q_{sm} - Q_{t-1}; P_{y,t} = P_t + P_{h,t} - K_{es} \times E_{m,t} \quad (5)$$

式中： $R_{b,t}$  为地表径流( $m^3$ )； $R_{bz,t}$  为不透水面积  $A_z$  ( $m^2$ )产生的径流( $m^3$ )； $R_{bc,t}$  为透水面积  $A_c$  产生的径流( $m^3$ )； $R_{bef,t}$  为透水面积  $A_c$  产生的超渗径流( $m^3$ )； $R_{bcx,t}$  为透水面积  $A_c$  产生的蓄满径流( $m^3$ )；

$R_{bcl, t}$  为透水面积  $A_c$  产生的超渗径流后的剩余量( $m^3$ );  $P_{y, t}$  为有效水量(mm);  $P_t$  为降水量(mm);  $P_{h, t}$  为人工补水量(mm);  $E_{m, t}$  为水面蒸发量(mm), 根据彭曼公式或者蒸发皿观测数据计算;  $K_{es}$  为考虑区域植被、地形等截留填注因素的蒸散发折算系数;  $Q_{sm}$  为土壤的最大蓄水容量( $m^3$ );  $Q_{t-1}$  为土壤时段初实际含水量( $m^3$ );  $Q'_t$  为土壤时段可蓄滞的水量( $m^3$ );  $F_s$  为土壤最大下渗能力( $m^3$ );  $t$  为计算时段。

**5.2 壤中流过程** 土壤含水量的变化是影响降雨径流的主要因素, 本文将土壤水变化分成壤中流  $R_{s, t}$ 、土壤水储量  $Q'_t$ 、土壤对地下水补给量  $R_{sx, t}$  和土壤蒸发量  $E_{s, t}$  等4个部分, 计算公式如下:

$$R_{s, t} = Q_t \times \alpha_{ss, t} \quad (6)$$

$$R_{sx, t} = Q_t \times \alpha_{sx, t} \quad (7)$$

$$Q'_t = \begin{cases} Q_{bcl, t}, & Q_{bcl, t} \leq Q'_t \\ Q'_t, & Q_{bcl, t} > Q'_t \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_t = Q_t^0 + Q'_t \quad (9)$$

式中:  $Q_t$  为时段末土壤含水量( $m^3$ );  $Q_t^0$  为时段初土壤含水量( $m^3$ );  $\alpha_{ss, t}$  为时段土壤壤中流的出流系数;  $\alpha_{sx, t}$  为时段土壤对浅层地下水的补给系数。

**5.3 地下径流过程** 采用线性水库来模拟地下径流, 设置浅层水库和深层水库两层, 分别进行快速径流  $R_{xf, t}$  和慢速径流  $R_{xs, t}$  计算, 公式如下:

$$R_{xf, t} = \alpha_{xk, t} \times Q_{xk, t} \quad (10)$$

$$R_{xs, t} = \alpha_{xm, t} \times Q_{xm, t} \quad (11)$$

$$Q_{xk, t} = Q_{xk}^0 + R_{sx} + Q_{r, t} + Q_{k, t} - Q_{xkt, t} \quad (12)$$

$$Q_{xm, t} = Q_{xm, t}^0 + Q_{xk, t} \times \beta + Q_{r, t} + Q_{k, t} - Q_{xmt, t} \quad (13)$$

式中:  $\alpha_{xk, t}$  为时段浅层地下径流系数;  $\alpha_{xm, t}$  为时段深层地下径流系数;  $\beta$  为浅层补给深层水的系数;  $Q_{xk, t}$  为时段浅层地下水库蓄水量( $m^3$ );  $Q_{xk}^0$  为时段浅层地下水库时段初蓄水量( $m^3$ );  $Q_{xm, t}$  为时段深层地下水库蓄水量( $m^3$ );  $Q_{xm}^0$  为时段深层地下水库时段初蓄水量( $m^3$ );  $Q_{xkt, t}$  为时段浅层人工取水量( $m^3$ );  $Q_{xmt, t}$  为时段深层人工取水量( $m^3$ );  $Q_{r, t}$ 、 $Q_{k, t}$  分别为时段河道、湖库的下渗补给量( $m^3$ )。

**5.4 蒸散发过程** 下垫面蒸散发包括植被截留、土壤蒸发、浅水蒸发以及人工耗水部分, 其中截留水全部蒸发, 土壤水蒸发是土壤湿度和植物最大散发量的函数, 本文结合 SIMHYD<sup>[5]</sup>模型土壤蒸发计算方法, 加入考虑下垫面植被蒸发调节系数进行计算。

(1)土壤水蒸发。

$$E_{s, t} = \min \left\{ \sqrt{\frac{10Q_t}{Q_m}} \times K_{el}, E_{m, t} \right\} \quad (14)$$

式中:  $E_{s, t}$  为时段土壤水蒸发量(mm);  $Q_t$  为时段土壤含水量( $m^3$ );  $Q_m$  为土壤的最大蓄水容量( $m^3$ );  $K_{el}$  为考虑单元植被的蒸发调节系数;  $E_{m, t}$  为时段最大蒸发能力(mm)。

(2)浅层水蒸发。当蒸发能力  $E_{m, t} - E_{s, t}$  还有剩余时, 开始浅层水蒸发, 计算公式如下:

$$E_{xf, t} = \min \left\{ \frac{10Q_t}{Q_{m, t}} \times k_{ek}, E_{m, t} - E_{s, t} \right\} \quad (15)$$

式中:  $E_{xf, t}$  为时段浅层水蒸发量(mm);  $k_{ek}$  为浅层水蒸发调节系数。

(3)人工耗水。人工耗水包括农村和城市耗水两部分。农村耗水包括农村居民和农业耗水, 农村居民用水一般认为全部消耗, 农业耗水根据灌溉水量加入土壤水循环, 按照土壤蒸散发计算方法。城市耗水包括城市居民、工业和城市生态耗水, 其中城市生态用水量认为全部消耗, 城市居民和工

业耗水按照用水耗水系数进行计算。

$$\begin{cases} E_{l,t} = W_{l,t} \times E_{lc} \\ E_{i,t} = W_{i,t} \times E_{ic} \\ E_{e,t} = W_{e,t} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $E_{l,t}$ 、 $E_{i,t}$ 、 $E_{e,t}$ 分别为时段居民生活、工业和生态耗水量( $m^3$ )； $W_{l,t}$ 、 $W_{i,t}$ 、 $W_{e,t}$ 分别为时段居民生活、工业和生态用水量( $m^3$ )； $E_{lc}$ 、 $E_{ic}$ 分别为居民生活、工业耗水系数。

**5.5 河道汇流过程** 考虑本文水资源系统模拟与调配的目标和时段性，为简化计算，地面汇流采用通用SCS模型<sup>[14]</sup>线性水库计算方法。

(1) 地表汇流计算公式如下：

$$Q_{b,t+1} = d_1 \times R_{b,t} + d_2 \times Q_{b,t} \quad (17)$$

$$R_{b,t+1} = R_{b,t+1} + (1 - d_1) \times R_{b,t} \quad (18)$$

$$d_1 = \frac{\Delta t}{K_b + 0.5\Delta t}; \quad d_2 = \frac{K_b - 0.5\Delta t}{K_b + 0.5\Delta t} \quad (19)$$

式中： $d_1$ 、 $d_2$ 为汇流系数； $\Delta t$ 为计算时段长； $K_b$ 为地表径流调蓄系数； $R_{b,t}$ 为时段地表产流量( $m^3$ )。

(2) 子流域总径流计算如下：

$$Q_t = Q_{b,t} + R_{xf,t} + R_{xs,t} \quad (20)$$

**5.6 河道水量平衡** 降雨经过产流和汇流过程进入河道，然后沿着上游河道流入下游河道，流向湖泊水库或大海，由于人类取用排水过程的加入，河道水量平衡计算公式如下：

$$Q_{h,t} = Q_{h,t-1} + Q_{hc,t} + Q_{h,t,in} - W_{hb,t} - E_{h,t} - S_{h,t} + W_{hwq,t} \quad (21)$$

式中： $Q_{h,t}$ 为时段河道 $h$ 水量( $m^3$ )； $Q_{h,t-1}$ 为上一时段末河道 $h$ 蓄水量( $m^3$ )； $Q_{hc,t}$ 为时段子流域河道 $h$ 区域产水量( $m^3$ )； $Q_{h,t,in}$ 为时段河道上游来水量( $m^3$ )； $W_{hb,t}$ 为时段河道 $h$ 人工取水量( $m^3$ )； $E_{h,t}$ 、 $S_{h,t}$ 分别为时段河道 $h$ 的蒸发、渗漏损失量( $m^3$ )； $W_{hwq,t}$ 为时段人工污水入河量( $m^3$ )。

**5.7 湖库水量平衡** 湖泊/水库作为陆地径流的调蓄节点，同时也是经济社会重要的供水节点，水库水量平衡计算公式如下：

$$Q_{k,t} = Q_{k,t-1} + Q_{kc,t} + Q_{k,t,in} + Q_{kd,t} - W_{kb,t} - E_{k,t} - S_{k,t} - W_{uq,t} \quad (22)$$

式中： $Q_{k,t}$ 为时段湖库 $k$ 水量( $m^3$ )； $Q_{k,t-1}$ 为上一时段末湖库 $k$ 蓄水量( $m^3$ )； $Q_{kc,t}$ 为时段湖库 $k$ 区域产水量( $m^3$ )； $Q_{k,t,in}$ 为时段湖库 $k$ 上游河道来水量( $m^3$ )； $Q_{kd,t}$ 为时段湖库 $k$ 的调入水量( $m^3$ )； $W_{kb,t}$ 为时段湖库 $k$ 的人工取水量( $m^3$ )； $E_{k,t}$ 、 $S_{k,t}$ 分别为时段湖库 $k$ 的蒸发、渗漏损失量( $m^3$ )； $W_{uq,t}$ 为时段湖库 $k$ 下泄水量( $m^3$ )。

**5.8 地下水水量平衡** 将地下水作为地下水库进行水量平衡计算，计算公式如下：

$$\begin{cases} Q_{xf,t} = Q_{xf,t-1} + R_{sx,t} - W_{xf,t} - E_{xf,t} - R_{fs,t} - R_{xf,t} \\ Q_{xs,t} = Q_{xs,t-1} + R_{sx,t} - W_{xs,t} - E_{xs,t} - R_{xs,t} \end{cases} \quad (23)$$

式中： $Q_{xf,t}$ 、 $Q_{xs,t}$ 分别为时段浅层和深层地下水蓄水量( $m^3$ )； $Q_{xf,t-1}$ 、 $Q_{xs,t-1}$ 分别为浅层和深层地下水上一时段的蓄水量( $m^3$ )； $R_{sx,t}$ 为时段土壤水对地下水补给量( $m^3$ )； $R_{fs,t}$ 为浅层补充深层地下水水量( $m^3$ )； $W_{xf,t}$ 、 $W_{xs,t}$ 分别为时段浅层和深层地下水人工开采量( $m^3$ )； $E_{xf,t}$ 、 $E_{xs,t}$ 分别为时段浅层和深层地下水蒸发量( $m^3$ )； $R_{xf,t}$ 、 $R_{xs,t}$ 分别为时段浅层和深层地下水径流量( $m^3$ )。

**5.9 单元水量平衡** 单元水量平衡计算方式如下：

$$W_{u,t} = W_{uhb,t} + W_{ukb,t} + W_{uxf,t} + W_{uxs,t} + W_{urew,t} + W_{usea,t} + W_{urain,t} + W_{uoth,t} \quad (24)$$

式中： $W_{u,t}$ 为时段单元用户 $u$ 的供水量( $m^3$ )； $W_{uhb,t}$ 为时段单元河道供水量( $m^3$ )； $W_{ukb,t}$ 为时段湖库

供水量( $m^3$ );  $W_{uxf, t}$  为时段浅层地下供水量( $m^3$ );  $W_{uxs, t}$  为时段深层地下供水量( $m^3$ );  $W_{urew, t}$  为时段再生水供水量( $m^3$ );  $W_{usea, t}$  为时段海水淡化供水量( $m^3$ );  $W_{urain, t}$  为时段雨水供水量( $m^3$ );  $W_{uoth, t}$  为时段其它非常规水供水量( $m^3$ )。

**5.10 再生水过程** 污水资源化也称为污水再生回用,是指将城市污水经过集中净化处理后,达到一定的水质标准的再生水作为水资源加以利用。

$$W_{wr, t} = \min \{ W_{w, t} \times K_{rewq} \times K_{rewd}, F_{rew} \} \quad (25)$$

$$W_{w, t} = W_{wl, t} + W_{wi, t}; \quad W_{wl, t} = W_{l, t} \times (1 - E_{lc}); \quad W_{wi, t} = W_{i, t} \times (1 - E_{ic}) \quad (26)$$

式中:  $W_{wr, t}$  为时段单元再生水产生量( $m^3$ );  $K_{rewq}$ 、 $K_{rewd}$  分别为污水收集系数和污水处理系数;  $F_{rew}$  单元再生水处理能力( $m^3$ );  $W_{w, t}$  为时段单元污水产生量( $m^3$ );  $W_{wl, t}$ 、 $W_{wi, t}$  分别为时段单元生活、工业污水产生量( $m^3$ );  $W_{wl, t}$ 、 $W_{wi, t}$  分别为时段单元生活、工业用水量( $m^3$ );  $E_{lc}$ 、 $E_{ic}$  分别为单元生活、工业耗水系数。

根据再生水产生及回用过程,再生水水量平衡计算公式如下:

$$\begin{cases} W_{bwr, t} = W_{wrl, t} + W_{wri, t} + W_{wrc, t} + W_{wre, t} \\ W_{wq, t} = W_{w, t} - W_{bwr, t} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $W_{bwr, t}$  为时段再生水的利用量( $m^3$ );  $W_{wrl, t}$ 、 $W_{wri, t}$ 、 $W_{wrc, t}$ 、 $W_{wre, t}$  分别为时段再生水给生活、工业、农业和生态的供水量( $m^3$ );  $W_{wq, t}$  为时段单元污水入河量( $m^3$ )。

## 6 WAS模型运行策略

根据 WAS 模型架构和计算原理,主要包括自然水资源的降水产汇流和社会水资源取用耗排等过程。

**6.1 水资源产汇流计算** 水资源产汇流遵循牛顿力学的水文学机理,按照蓄满产流和超渗产流机制进行计算,表现重力能的从高往低、从面向点的方向汇集,具体计算方法见前面计算公式。

**6.2 水资源取用耗排计算** 水资源取用耗排遵循经济社会学机理,按照水资源供需平衡机制进行计算,水资源按照社会能的从低往高、从点向面的方向扩散。水资源供需平衡目标是水资源发散核心策略和驱动力,涉及行业用水安全保障、供水公平以及可持续多目标, WAS 模型在水资源供需目标设计荷载均衡、空间均衡作为目标函数,荷载均衡表现为单元内部行业用水负荷的满足程度,通过行业缺水率最小指标反应,空间均衡表现为各行业不同单元用水公平性,通过行业空间单元缺水率方差指标反应,通过对目标函数的求解,实现水资源的均衡发散。

### 6.2.1 目标函数

(1)荷载均衡目标-缺水率最小

$$\begin{cases} \min L(xt) = \sum_{h=1}^{mh} q_h \cdot SW(X_{ht}) \\ SW(X_{ht}) = \frac{1}{mu} \cdot \sum_{u=1}^{mu} |x_{ht}^u - Sob_{ht}| \\ \text{其中 } 0 \leq x_{ht}^u \leq 1, 0 \leq Sob_{ht} \leq 1 - B_h \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $L(xt)$  为荷载均衡目标;  $SW(X_{ht})$  为供水胁迫函数;  $q_h$  为行业用户惩罚系数;  $x_{ht}^u$  为时段区域单元  $u$  中行业用户  $h$  的缺水率;  $Sob_{ht}$  为时段区域行业用户  $h$  的供水胁迫目标理想值;  $B_h$  为区域行业用户  $h$  的最低用水保证率;  $h$  为区域行业用水户类型;  $mh$  为区域行业用水户类型的最大数目;  $u$  为区域单元;  $mu$  为区域单元最大数目;  $t$  为计算时段。

(2)空间均衡目标-公平性最优:

$$\begin{cases} \min S(xt) = \sum_{h=1}^{mh} q_{ht} \cdot GP(X_{ht}) \\ GP(X_{ht}) = \sqrt{\frac{1}{mu-1} \cdot \sum_{u=1}^{mu} (x_{ht}^u - \bar{x}_{ht})^2} \\ \text{其中 } 0 \leq x_{ht}^u \leq 1, 0 \leq \bar{x}_{ht} \leq 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中： $S(xt)$ 为空间均衡目标； $GP(X_{ht})$ 为公平性函数； $q_{ht}$ 为行业用户惩罚系数； $x_{ht}^u$ 为区域单元 $u$ 中行业用户 $h$ 的缺水率； $\bar{x}_{ht}$ 为区域单元 $u$ 中行业用户 $h$ 的缺水率均值； $h$ 为区域行业用水户类型； $mh$ 为区域行业用水户类型的最大数目； $u$ 为区域单元； $mu$ 为区域单元最大数目； $t$ 为计算时段。

### 6.2.2 约束条件

(1)供水能力约束：即水源供水量应满足水源的可供水资源量约束条件。

$$W_{m,t} \leq Q_{m,t} \quad (30)$$

式中： $W_{m,t}$ 为水源 $m$ 时段 $t$ 的供水量( $m^3$ )； $Q_{m,t}$ 为水源 $m$ 时段 $t$ 的可供水资源量( $m^3$ )。

(2)分质供水约束：即考虑不同用户用水水质要求，水源供水满足分质供水标准约束条件。

$$q_{m,u} \leq \bar{q}_u \quad (31)$$

式中： $W_{m,n}$ 为水源 $m$ 给用户 $u$ 的供水水质； $\bar{q}_u$ 为用户的最低水质标准。

(3)生态流量约束：即河道流量应满足河道生态基流约束条件。

$$Q_{r,t} \leq Q_{rob,t} \quad (32)$$

式中： $Q_{r,t}$ 为河道时段 $t$ 的流量； $Q_{rob,t}$ 为河道时段 $t$ 的最小用水量，即河道生态基流。

## 7 结论

(1)人类活动影响的水资源系统中，水资源系统的单元之间以及水资源系统的时段之间，系统内部上游单元用排水过程影响下游单元水资源变化及用排水过程，整个系统的上一个时段水循环和配置过程影响下一个时段的过程，水资源系统各要素之间具有关联的、动态的和互馈的特点。

(2)通过本文建立的水资源综合模拟与调控WAS模型，可实现复杂水资源系统自然水循环与社会水循环之间的互馈模拟，也可以实现水资源供需双侧联动分析，反应水资源系统的复杂性、动态性和联动性特征。

(3)研究提出的一种水资源系统“基本单元-计算单元-水文单元”三级单元划分方法，既能体现传统水文模拟模型单元划分特点，也能满足水资源流域管理和行政管理相结合的需求。

(4)研究提出的“实测-分离-聚合-建模-调控”水循环时序动态反馈模拟方法，可实现水循环模拟和水资源调配过程的无缝结合，也可以作为二元水循环系统模拟的一种方法。

(5)研究提出的WAS模型架构、计算原理与运行策略等方法，可以实现水资源评价与配置一体化分析，为强人类活动下水资源系统变化分析和精细化管理提供支撑。

WAS模型的应用案例将在下篇中给出。

## 参 考 文 献：

- [ 1 ] 王浩, 秦大庸, 王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002(8): 1-6.
- [ 2 ] ZHOU Y, GUO S, XU C Y, et al. Integrated optimal allocation model for complex adaptive system of water resources management (I): Methodologies [J]. Journal of Hydrology, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.007.
- [ 3 ] CHEN Z, WEI S. Application of system dynamics to water security research[J]. Water Resources Management,



- 2014, 28(2): 287-300.
- [ 4 ] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9.
- [ 5 ] JAKEMAN A J, LITTLEWOOD I G, WHITEHEAD P G. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments[J]. Journal of Hydrology, 1990, 117: 275-300.
- [ 6 ] DHI Water & Environment. MIKE BASIN 2003: A Versatile Decision Support Tool for Integrated Water Resources Management Planning [EB/OL]. <http://www.dhigroup.com/Software/Water Resources/MIKEBA-SIN/References>, 2004.
- [ 7 ] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24(1): 43 - 69.
- [ 8 ] LIANG X, LETTENMAIER D P, WOOD E F, et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99 (D7) : 14415-14428.
- [ 9 ] MISHRA SK, SINGH V P. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number [J]. Hydrological Processes, 2004, 18: 1291-1313.
- [ 10 ] 赵勇, 陆垂裕, 肖伟华. 广义水资源合理配置研究( II )——模型[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 163-170.
- [ 11 ] 雷晓辉, 王旭, 蒋云钟, 等. 通用水资源调配模型 WROOM I : 理论[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 225-231.
- [ 12 ] HOEKEMA D J, SRIDHAR V. A system dynamics model for conjunctive management of water resources in the Snake River Basin[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2013, 49(6): 1327-1350.
- [ 13 ] 张文华, 郭生练. 流域降雨径流理论与方法[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2008.
- [ 14 ] BERGSTRIN S. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model [J]. Nordic Hydrology, 1973 (4): 147-170.

## Water Resources Comprehensive Allocation and Simulation Model (WAS), part I. Theory and development

SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, ZHAO Yong, ZHOU Zuhao

*(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,  
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

**Abstract:** Aiming at the scientific problems of complex mutual feedback mechanism of natural-social water resources system, as well as the application requirements of water management, a conceptual semi-distributed Water Resources Comprehensive Allocation and Simulation Model (WAS) was constructed by combining hydrological numerical simulation and adaptive allocation of water resources. The related theoretical methods such as WAS model framework, unit division, dynamic mutual feedback simulation, calculation principle and operation strategy are proposed to provide support for the simulation and scientific deployment of natural-social water resources composite system.

**Keywords:** water resources; simulation and allocation; conceptual; semi-distributed; model

(责任编辑: 王成丽)