第3卷 第3期
1992年9月

水 科 学 进 展
ADVANCES IN WATER SCIENCE

Vol. 3, No. 3
Sept., 1992

# 京津唐水资源规划决策支持系统研究

翁文斌　　蔡喜明

(清华大学水利系　北京 100084)

**提要**　京津唐地区水资源规划是一个影响这一地区工农业发展和人民生活的多目标、大时空跨度的复杂问题。采用系统论的观点对这一问题进行了分析，并采用原型方法建立了京津唐水资源规划决策支持系统。系统由交互式对话子系统、数据库、模型库、方法库和知识库组成。模型库中装有系统动力学和多目标优化等模型；方法库中装有密切值法和两两比较法等，用于方案的排序；知识库中存贮着用于决策支持的知识。重点介绍京津唐水资源决策支持系统的逻辑和结构。

**关键词**　水资源规划　决策支持系统　多目标决策　专家系统　系统动力学

## 1 前　言

京津唐水资源系统包括地面水库群、地下水、污水资源化和海水利用等多种供水途径，及城市生活、工业用水、分区农业用水等不同需水部门，是一个涉及北京市、天津市及河北省的唐山市、秦皇岛市、廊坊市的复杂大系统。全区面积5.5万 $km^2$，水资源开发利用合理与否，直接关系到该地区人民生活、工农业发展、环境生态改善等多方面的效益。京津唐地区水资源开发利用中存在的突出问题有：① 水资源不足，制约了该地区的经济发展；② 城乡用水增长过快，供需矛盾突出；③ 城市用水量激增，占用了农业灌溉用水，城乡用水矛盾日益尖锐；④ 水资源开发利用程度较高，开源节流难度较大；⑤ 地下水严重超采，污水排放量大，水环境问题日趋严重；⑥ 资金不足，制约了水资源开发利用的进展；⑦ 相邻区域间争水矛盾尖锐。

因此，京津唐地区的水资源系统规划应在科学的方案评价标准和决策体系基础上，从多方面统一协调该系统存在的各种矛盾，使系统的综合效益达到最佳状态。本文结合京津唐地区水资源开发利用规划决策的要求，研制了一套带有专家知识库的、采用人机交互式的京津唐水资源决策支持软件系统，用于处理多目标，多判断的宏观决策问题。该系统的工作方式不是代替决策者作出决策，而是以决策者为中心，作为决策者进行决策的有效手段和辅助工具。

## 2 决策支持系统的基本结构[1,2]

京津唐水资源决策支持系统的结构组成包括：①基础模型库及其管理系统。它收集和汇

本文于1991年5月30日收到，1991年11月11日收到修改稿。

纳了有关课题所开发的基础模型，例如水库群优化调度模型，多站径流生成模型，水资源系统联合调度模拟模型等。这些模型通过其管理系统可实现各模型间的联接或数据通讯；② 宏观决策模型及其管理系统。在本系统中装有由DIDASS (Dynamic Interactive Decision Analysis Support System) 软件系统建立的动态交互式多目标决策分析模型，和由PD (Professional Dynamo Plus) 软件系统建立的系统动力学宏观决策分析模型。通过其管理系统使其与基础模型库和知识库联接和通讯；③ 知识库及生成系统。在支持系统中装入事务处理专家系统 GURU，建立了知识库及其生成系统，使用推理机实现决策推理，并通过用户接口向决策者报告分析结果和进行信息反馈；④ 报告生成及文件管理系统。系统中装有微机图像处理软件包和汉字库，可以方便地与数据文件接口，灵活地进行各种系统统计图表和图形显示，而且还可以根据用户的需要变动游标，发出彩色闪烁信号和音响信号。

京津唐地区水资源规划决策支持系统的总体结构见图 1

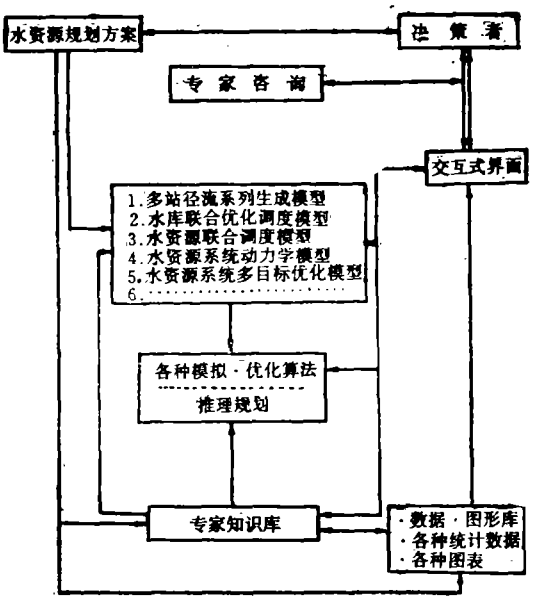


图 1　京津唐水资源规划决策支持系统结构

Fig. 1. Structure of water resources decision support system of the Jing-Jin-Tang district

## 3　规划方案的宏观模拟与优化体系

系统动力学模型和多目标决策分析模型分别从宏观动态平衡和多目标优化两个不同角度对备选方案进行分析和相互检验，为具有专家知识的方案评价系统提供了可行的、优选的方案集及有关信息。下面分别介绍这两类模型的建立。

### 3.1　京津唐水资源系统多目标决策分析模型[3]

#### 3.1.1　模型的结构体系

在京津唐水资源系统中，北京、天津、唐山、秦皇岛、廊坊各市是一个相对独立的水资源管理体系，但在水资源开发利用上又存在相互联系和相互制约的关系。因此，分两级建立多目标决策分析模型。第一级为北京、天津、唐山、秦皇岛、廊坊等五个子区的决策分析模型。第二级为京津唐地区总体评价模型。这两级模型均采用多目标线性优化模型，其数据文件为MPS格式文件，在两级之间通过直接信息通讯和反馈，对各子区模型进行协调。同时，各子区模型也可直接向具有专家知识的评价系统提供信息。

#### 3.1.2　子区决策模型

(1) 决策变量　子区模型决策变量包括：① 工业产值变量($V_{ij}$)。按行业划分为电力、冶

金、石化、机械、食品、纺织、煤炭、建材、轻工等部门。② 农业有效灌溉面积($A_{ij}$)。分别考虑大田、水稻、蔬菜、果林等供水面积。另外还考虑渔业和乡镇企业用水量等变量。③ 生活及环境用水变量($P_i$)。即各行政区城市人口、县镇及卫星城人口、农业人口等变量。还有城市河湖用水量、农村畜牧饮水量等。

(2) 目标方程 各子模型的目标方程式基本相同，有下列4个目标方程：

① 工业总产值最大

$$\max(TIV_i) = \sum_{j=1}^{n} V_{ij} \qquad i = 1,2,\cdots,5$$

式中 $i$ 为行政区编号，分别代表北京、天津、唐山、秦皇岛、廊坊；$j$ 为工业部门数。

② 农业总有效灌溉面积最大

$$\max(TIA_i) = \sum_{j=1} A_{ij} \qquad j = 1,2,\cdots,n$$

式中 $j$ 为农业供水作物种类数。

③ 污水排放量最小

$$\min(TPW_i) = \sum_{j=1}^{n_1} b_{ij}^1 V_{ij} + \sum_{j=1}^{n_2} b_{ij}^2 P_i - \sum_{k=1}^{m} QS_{ik}$$

④ 总投资最小

$$\min(TIN_i) = \sum_{k=1}^{m_1} C_{ik}^1 QS_{ik} + \sum_{j=1}^{m_2} C_{ij}^2 QR_{ij} + \sum_{j=1}^{n} C_{ij}^3 QY_{ij}$$

式中 $b_{ij}^1$、$b_{ij}^2$ 为城市工业各部门及生活排污率；$C_{ik}^1$、$C_{ij}^2$、$C_{ij}^3$ 为污水回用，节水及开源措施的单方水投资；$QS_{ik}$、$QR_{ij}$、$QY_{ij}$ 为污水回用量、节水量和开源工程供水量；$P_i$ 为人口数量。

(3) 约束条件 各子模型的约束包括供水约束，城市生活、环境需水量约束，工业产值约束，农业灌溉面积约束，地表水、地下水供水量约束，节水量约束，污水回用水量约束及开源工程供水量约束等。

### 3.1.3 总体评价模型

总体评价模型是离散的多目标评价模型。它以子模型的结果为基础对备选方案进行优劣评价。经过研究分析，共拟定了13个目标评价准则：工业总产值($TIV$)，农业有效灌溉面积($TIA$)，地方经济均衡发展程度($BDL$)，综合单方水投资($IPM$)，资金筹措难易程度($DGF$)，缺水程度($GBS$)，节水程度($QRE$)，地下水超采程度($EQU$)，水质好坏($QUW$)，污水总量($TQP$)，对邻近地区发展的影响($ETA$)，对能源利用的影响($ETE$)，未来发展可能性($PDF$)。这些准则有些是定量的，有些是定性的，需要对定性准则进行定量化，从而建立评价准则矩阵，如表1。

子模型和总体评价模型均可采用以PC-DIDASS为主控模块的系统进行求解。PCDIDASS的求解是使用参考点法[4]，即先定义多维空间中的参考点，然后寻找与参考点最"近"的点，该点相应的目标值即为最优解。

表1 方案评价准则矩阵表

**Table 1. Evaluation criteria matrix table of alternatives**

| 准则 | 单位 | P | 方案编号 | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *TIA* | 万hm² | 75% | 136.2 | 163.7 | 127.5 | 162.8 | 148.5 | 158.9 | 152.1 | 136.6 | 154.7 | 151.0 |
| | | 95% | 97.7 | 141.7 | 101.9 | 140.3 | 118.9 | 124.3 | 123.2 | 92.9 | 121.7 | 114.5 |
| *TIV* | 万元 | 75% | 1966.5 | 1988.0 | 2014.0 | 2019.0 | 1944.0 | 2064.7 | 1944.0 | 1999.0 | 2064.0 | 2064.0 |
| | | 95% | 1421.0 | 2009.6 | 1954.0 | 2012.0 | 1512.0 | 2071.0 | 1555.0 | 1923.0 | 2075.0 | 2061.0 |
| *BDL* | | 75% | 0.279 | 0.09 | 0.239 | 0.179 | 0.225 | 0.178 | 0.213 | 0.211 | 0.220 | 0.238 |
| | | 95% | 0.375 | 0.240 | 0.330 | 0.250 | 0.403 | 0.265 | 0.423 | 0.249 | 0.287 | 0.354 |
| *IPM* | 元/m³ | | 0.943 | 1.197 | 1.185 | 1.140 | 0.940 | 1.228 | 0.951 | 1.397 | 1.256 | 1.250 |
| *DGP* | | | 6.7 | 4.2 | 4.5 | 3.6 | 5.7 | 4.1 | 6.0 | 4.8 | 4.5 | 4.7 |
| *GBS* | 亿m³ | 75% | −9.90 | 1.76 | −6.84 | 1.87 | −2.61 | 1.26 | −2.49 | −9.36 | 3.99 | −1.05 |
| | | 95% | −32.0 | −11.3 | −30.1 | −8.08 | −22.1 | −20.1 | −23.8 | −32.55 | −17.8 | −21.7 |
| *QRE* | 亿m³ | | 43.56 | 43.56 | 34.64 | 42.45 | 40.62 | 42.44 | 41.69 | 35.63 | 42.66 | 34.64 |
| *EQU* | 亿m³ | | 0.0 | 1.50 | 1.0 | 3.5 | 2.0 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 1.5 | 1.55 |
| *QUW* | | | 71 | 80 | 79 | 78 | 70 | 80 | 71 | 81 | 82 | 80 |
| *TQP* | 亿m³ | 75% | 14.05 | 14.57 | 12.14 | 11.55 | 5.52 | 15.11 | 10.54 | 15.40 | 14.97 | 11.04 |
| | | 95% | 12.79 | 13.67 | 10.23 | 11.99 | 3.18 | 14.21 | 8.570 | 14.94 | 15.07 | 11.84 |
| *ETA* | 亿m³ | | 11.9 | 23.8 | 28.3 | 20.1 | 11.99 | 30.1 | 11.9 | 28.3 | 30.1 | 30.1 |
| *ETE* | | | 1.0 | 0.90 | 0.90 | 0.85 | 0.90 | 0.90 | 0.85 | 0.95 | 0.86 | 0.80 |
| *PDF* | | | 0.50 | 1.00 | 0.90 | 0.99 | 0.78 | 0.92 | 0.70 | 0.85 | 0.90 | 0.92 |

### 3.2 京津唐水资源系统动力学模型

本模型从宏观的角度模拟京津唐水资源系统依时序的变化，从而认识方案在系统动态变化过程中水资源供需平衡状况及节水率、污水回用率、工农业产值增长率、投资增长率等指标的变化趋势，即观察系统的稳定性和可靠性，并以此判断方案中存在的问题。

#### 3.2.1 模型结构体系

模型以行政区划分为5个一级子系统，即北京、天津、唐山、秦皇岛和廊坊市现有水资源系统。一级子系统之间以新开发水源所分配的供水量或分配比例进行联接，如图2所示。

每个一级子系统系统又分为水源开发、城市用水、工业用水、农业用水和污水处理等5个二级子系统。

#### 3.2.2 系统反馈机制的确定

京津唐地区水资源总体不平衡是系统的核心问题，从供需两方面着手，尽可能使其在总体上达到平衡是系统动力学模型的基本设计思想。图3为一级子系统的因果关系，其中节水压

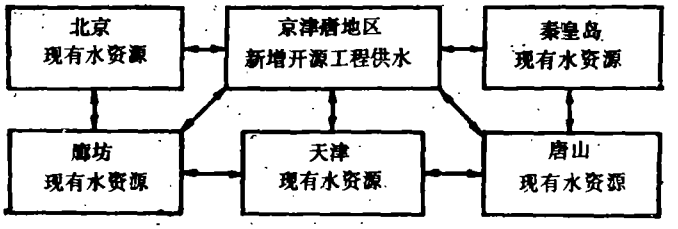


图 2 各一级子系统之间的联系

Fig. 2. Connection among different stage sub-system

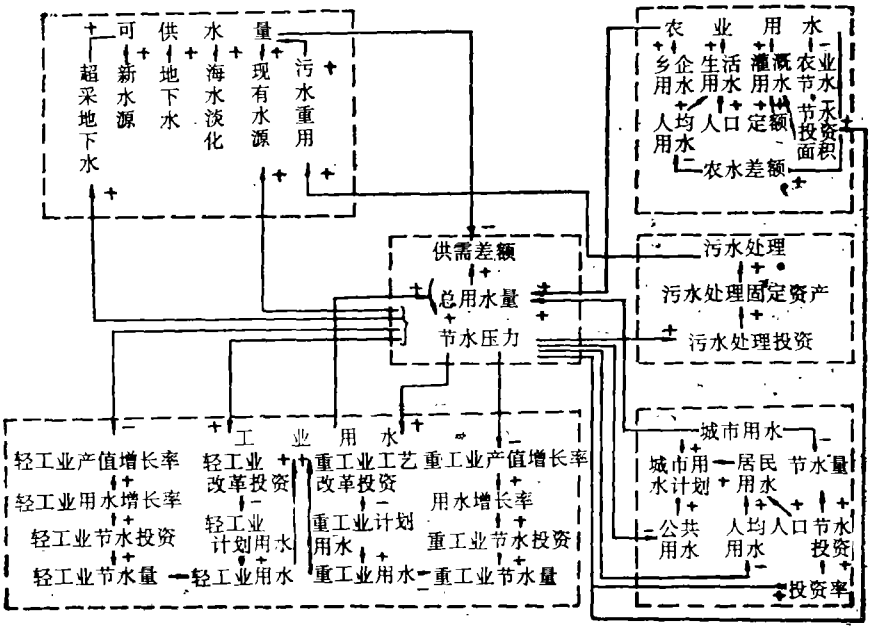


图 3 一级子系统总体因果关系图

Fig. 3. Overall Causal diagram of first stage sub-system

力是二级子系统之间的联接变量，每个一级子系统都有这种大致相近的反馈机制。将一级子系统用分配水量或分水比例联结起来就成为京津唐地区水资源系统动力学总体模型。该模型用 DYNAMO 语言来描述，共有1000多个变量和1000多个方程。输入初始变量及参数值，模型即可在 PD软件系统支持下进行运算求解。

## 4 京津唐水资源规划辅助决策支持系统

本系统是利用国际上流行的集成化事务处理专家系统(GURU)开发工具[5]建立起来的，其基本结构如图 4 所示

### 4.1 具有专家知识的方案评价系统[6,7]

方案评价系统是向用户提出建议的一个辅助模块，它给决策者提供最终的推荐方案序列和有关方案评语及"忠告"。决策者与系统之间可通过交互系统进行人机对话，从而更新方案的评价结果，直到决策者满意为止。

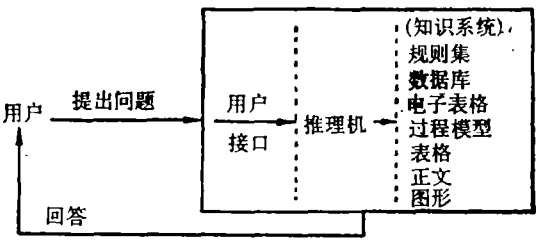


图 4　GURU结构
Fig. 4. GURU structure

方案评价系统具有数据管理、规则集管理、方案评价和查询评价过程的功能。知识库的形成是评价系统的核心。专家知识以规则集的形式存贮在GURU的知识库中。多目标方案集是多维空间中的一个子空间，理想方案是多维空间中的一个点，方案排序实际上是将子空间中各点按与理想点间的距离远近进行排序。在知识库中，这些思想是以IF…THEN…的形式存贮的。GURU的推理机自动查询规则集，触发相应的规则，最终给出方案的排序结果。此外，我们还可将某些专家知识提出来，以便在方案评价过程中能象人类专家一样，对某些方案给出忠告，并修正方案中的一些错误，这些知识也是以规则集的形式存贮的。

方案评价采用适合于多方案多准则选优的密切值法[7]，其计算步骤如下。

(1) 建立多目标多准则矩阵：

$$A=[a_{ij}]_{m\times n}$$

式中 $a_{ij}$ 为方案 $A_i(i=1,2,\cdots,n)$ 在目标 $S_j(j=1,2,\cdots,m)$ 下的取值。

(2) 将决策矩阵规范化，建立规范化决策矩阵：

$$R=[r_{ij}]_{m\times n}$$

$$r_{ij}=a_{ij}\sqrt{\sum_{i=1}^{m}a_{ij}^2}$$

当 $S_j$ 为负向指标时，$r_{ij}$ 也为负向指标。

(3) 选取非劣方案，排除劣方案。

(4) 求方案集的"最优点"与"最劣点"。

令

$$r_j^+=\max_{1\le i\le m}\{r_{ij}\}\qquad(j=1,2,\cdots n)$$

$$r_j^-=\min_{1\le i\le m}\{r_{ij}\}\qquad(j=1,2,\cdots,n)$$

则

最优点 $A^+=(r_1^+,r_2^+,\cdots,r_n^+)$

最劣点 $A^-=(r_1^-,r_2^-,\cdots,r_n^-)$

(5) 求各方案的密切值：

$$C_i=\frac{d_i^-}{d^+}-\frac{d_i^-}{d^-}\qquad(i=1,2,\cdots,m)$$

式中欧氏距离按下式求得：

$$d_i^+ = \left[\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^2 (r_{ij} - r_i^+)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d_i^- = \left[\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^2 (r_{ij} - r_i^-)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d^+ = \min_{1 \le i \le m} \{d_i^+\}$$

$$d^- = \max_{1 \le i \le m} \{d_i^-\}$$

(6) 取 $C_i^m = \min_{1 \le i \le m} \{C_i\}$，则方案中 $A_i$ 为"最满意方案"，同时可以得到一个按满意程度，即 $C_i$ 由小到大的方案序列。

目标 $S_j$ 在上表的基础上作了个别调整，增加了环境用水、总投资、综合单方水成本等指标，共有十四项。

在评价过程中，"最优点"与"最劣点"的选择，也可由专家直接给出。如果需要查询评价进程，则专家系统可以给出每一步的依据，提供被触发的具体规则和规则的动作，从而可以进一步改进规则集，以便能更逼真地模拟人的思维。

### 4.2 具有专家知识的咨询系统[8]

本系统是一个面向现场专家的人机交互式方案评价系统，它具有综合评价、评价结果记忆、评价结果查询、系统维护等功能。咨询过程中，由专家现场指定备选方案集，并根据自己的想法现场拟定准则集。为了消除专家意见受到个人偏好和行政意见的影响，系统采用了准则和方案随机抽取的"两两比值法"[9]，其基本步骤如下：

(1) 建立方案集和方案评价指标体系。

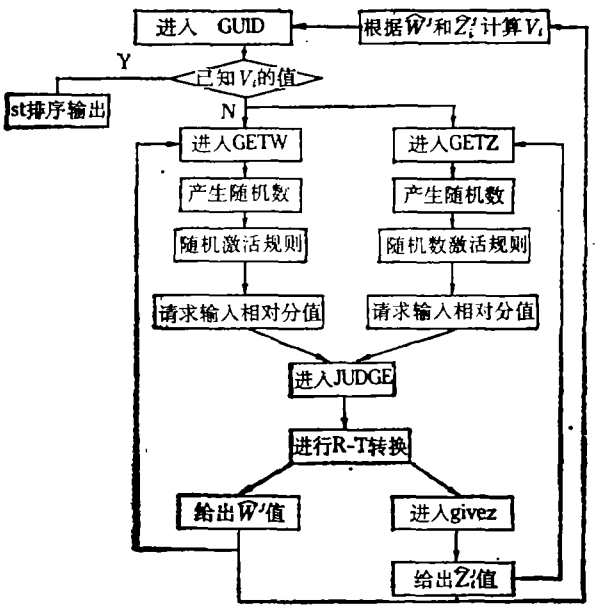


图5 咨询系统运行过程

Fig. 5. Operation process of the consulting system

(2) 由现场专家给定所有备选方案对每一个指标因素的相对价值比值，构成方案比值表。

(3) 由现场专家给定所有指标因素在实现总目标时的相对价值比值，构成目标因素比值表。

(4) 经过矩阵转换及相对比值转换等，综合给出方案的评定价值 $V_i$。

咨询系统运行过程参见图5。系统首先发出命令启动主模块 guid，接着由推理查询机能够激活的规则集并将其激活，然后进入执行 getw 和 getz 模块，并分别从这两个模块中随机抽取两项指标或两个方案，由现场专家输入它们的相对分值。当所有的指标都两两比较后，进入 JUDGE，在其中进行 R-T 转换，计算出每个目

标因素的平均相对价值$\hat{W}^j$。相似地，当所有方案在确定目标 $j$ 下均两两比较完毕后，便可计算出所有方案相对于目标 $j$ 的平均相对值$\hat{Z}_i^j$，从而完成方案 $i$ 的最终评定 $V_i$ 的计算。最后进入主模块 GUID，根据 $V_i$ 值的大小进行方案排序，由 ST 排序模块输出。

由于每相邻的两次向专家咨询时的方案都是随机抽取的，通过反复几次，一般可消除现场专家在输入评分时可能产生的"时滞"影响。

### 4.3 系统对方案的忠告

在专家系统知识库中，除存有对方案评价方法的知识外，还根据专家经验和有关京津唐地区水资源和经济发展的研究成果，建立了对方案进行定性描述的知识系统，这些知识也是以 IF… THEN… 的形式存贮的。启动 GURU 的咨询规则集后，推理机根据有关信息进行推理，最后逐条提出对方案的忠告。例如，询问某方案2000年北京地区的情况，启动咨询规则集后，可给出如下忠告：

- 工业产值达到目标，工业产值增长率适宜
- 工业重复用水率适宜，工业用水基本满足
- 农业灌溉面积偏小，农业节水有潜力
- 农业用水不够，地下水超采在允许限度内
- 污水处理率偏低

……

专家系统的忠告使决策者对方案有一个更直观的了解。

## 5 结　语

京津唐地区水资源开发利用是一个涉及多部门、多学科的密切结合生产的科研课题。本文虽采用科学的决策方法建立了该地区的水资源规划决策支持系统，对京津唐地区水资源规划工作能起到一定的促进作用，但由于问题的复杂性，许多问题还有待于进一步研究。

## 参 考 文 献


1 王亚芬．决策支持系统．陕西科学技术出版社，1988

2 L DOSSANTOS. A framework for designing adaptive DSS interfaces. DSS5, 1989

3 PP 洛克斯．水资源系统规划与分析．北京：水利电力出版社，1988

4 赵纯均．DIDASS-动态交互式多目标决策分析支持系统．系统工程．1987, 5(4)：1～4

5 Holsapple C W. 事务处理专家系统及其开发的工具——GURU．科海培训中心，1987

6 A BOSMAN. Relation between specific decision support system. DSS3, 1987

7 王登濂．多目标决策方案优选的密切值法．系统工程．1989, 7(1)：20～26

8 BEULENS A J M. The use of expert system technology in DSS. DSS 4, 1988

9 P GRAY. Group decision support systems. DSS3,1987

# A Study on the Decision Support System of the Water Resources Planning in the Jing-Jin-Tang Economic District

Weng Wenbin Cai Ximing

*(Tsinghua University)*

**Abstract:** The water resources planning in the Jing-Jin-Tang (JJT) district is a multi-purpose, large-scale and long-period complex problem which has profound effect on the development of the industry and the agriculture, and the people's life of the district. In this paper,a decision support system (DSS) prototype of JJT water resources planning is established after analysing the problem in a system view. The DSS contains a user interface, a data base system, a model bank, a method bank, and a knowledge base system. In the model bank, there are system dynamic model and multi-purpose planning model, etc. In the method bank, there is a distance comparision method and a one-to-one comparision method, which is used for ranking the schemes. The knowledge base system contains some expert knowledge used for decision support. The logic and construction of the DSS of JJT water resources planning are emphatically stated in this paper.

**Key words:** water resources planning; decision support system; multi-objective decision; expert system; systematic dynamics.

## 欢迎订阅《资源开发与保护》

《资源开发与保护》是以自然资源为主，兼顾社会经济方面的学术性刊物；主要报导水、土、气、生物、矿产、能源、旅游等自然资源和社会经济方面的科学考察、合理开发、治理保护、综合利用的研究成果与经验，以及国土资源的区划与规划等。本刊以宏观性、综合性、实用性和指导性为特点，微观与宏观相结合；尤其注重在资源开发与保护中见效快、周期短、效益高的新经验、新方法、新技术等方面的内容。

本刊为季刊，公开发行，国内统一刊号CN51—1128/N，ISSN1001—3822，代号62—58，每册定价1.50元，全年6.00元，全国各地邮局均可订阅，亦可直接汇款到本刊编辑部购买。编辑部邮政编码及通讯地址：610015 成都市一环路南二段24号 《资源开发与保护》编辑部。

《资源开发与保护》编辑部