

## 石河子地区水资源时空合理配置模型研究

任政<sup>1</sup>, 郑旭荣<sup>1</sup>, 罗明<sup>2</sup>

(1. 新疆兵团绿洲生态农业重点实验室, 新疆石河子 832000; 2. 石河子玛管处西岸二站, 新疆石河子 832000)

**摘要:**对公共水资源在多个分区之间进行分配, 坚持可持续利用和基本用水安全的规则下, 从经济学的角度利用统计资料计算经济作物用水边际效益, 提出基于水资源利用边际效益的空间分配模型和灌溉制度最优的时段配置模型, 利用大系统递阶协调理论, 计算石河子地区水资源时空配置结果。

**关键词:**石河子地区; 递阶协调; 空间配置; 时段配置

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2007)05-0174-04

## Study on Water Resources Spatial-Temporal Rational Allocation in Shihezi Region

REN Zheng<sup>1</sup>, ZHENG Xu-rong<sup>1</sup>, LUO Ming<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology Agricultural of Xinjiang, Bingtuan, Shihezi, Xinjiang 832000, China;

2. The Second Point of West Bank of Mansi River Management Service, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

**Abstract:** The author stick to the rule of sustainable use and basically used water quantity safety to public water resources allocation among some sections. From the perspective of economics statistics, the author calculated marginal revenues between crop putout and its water quantity, putting forward spatial allocation on basis of marginal benefit equilibrium and different temporal allocation grounding on optimizing of irrigation rule. Taking Shihezi region as an example, allocation results attained according to big band system coordination theory.

**Key words:** Shihezi region; coordination; spatial allocation; temporal allocation

### 1 引言

当今全球性水资源短缺危机严重威胁人类的生存安全, 特别是区域性的水资源短缺越来越严重地制约着社会进步、经济发展和人们生存环境的改善。对于干旱地区而言, 水资源是有限的, 具有稀缺性, 其中时空水资源利用具有竞争性。由此决定了区域水资源必须优化配置, 以使其发挥最大的经济、社会、环境效益, 保证区域经济社会的可持续发展。

国内外关于区域水资源配置模型较多。空间配置层面上有: 线性规划模型<sup>[1]</sup>、非线性规划模型<sup>[2]</sup>、模拟模型<sup>[3]</sup>、基于交互式的会商模型<sup>[4]</sup>、基于边际效益的水资源空间配置原则<sup>[5]</sup>、大系统分解协调的多目标层次结构模型<sup>[6]</sup>等; 时间配置层面上根据用水部门的特性、效益和水量之间的关系, 建立水资源时段调亏配置模型<sup>[7]</sup>。然而, 由于区域来水和用水的随机性, 很难准确的预测二者间的动态配置过程, 就目前建模而言, 有些模型适用范围不广, 对资料数量大, 概念不够明确。基于此, 本文根据石河子地区大规模的农业用水比较单一, 通过各灌区间年度用水效益差异和不同时段用水效益关系, 尝试建立有限供水条件下水库和田间配水整合的时空合理配置模型。

### 2 模型原理

干旱区域水资源分配, 是通过水资源配置系统完成的。水源配置系统是人为水事活动的主题, 通过河流、水库、渠系(或管网)和用户完成的, 是涉及自然、社会诸多过程交织的一个统一体, 它沟通了自然的水资源系统与社会经济系统之间的联系, 是水资源优化配置研究的关键环节。

将干旱区水资源系统从空间结构上看成研究区域、分区子系统、分区用户系统的一个具有三层谱系结构的大系统, 研究区域作为水资源系统的第三层, 分区子系统作为水资源系统的第二层, 分区用户系统作为水资源系统的第一层。模型第一层根据水资源特点和用户性质, 建立各用户的用水次序及其用水量; 第二层根据分区一个完整的用水周期建立水分效益函数模型; 第三层根据各分区的效益函数, 建立基于研究区的最优配置模型。模型运行时, 首先根据第一层各用户性质建立系统用水安全运行规则, 确定可能的缺水对象和范围, 将信息反馈给第二层; 第二层根据第一层信息, 生产不同水量下的效益函数, 并传递到第一层; 第三层根据河道来水、水利工程条件, 综合各分区的信息, 进行研究区域的水资源时空合理配置。

收稿日期: 2006-08-11

基金项目: 兵团绿洲生态农业重点实验室开放课题(200507)

作者简介: 任政(1975-), 男, 硕士, 讲师, 从事区域水资源合理分配研究。

## 2.1 第三层配置模型

水资源系统的第三层处于系统的顶层,是统筹整个系统合理配置的关键,通过拥有的水资源和其他两层传递的效益信息,完成整个区域对各分区空间配置,是一个线性规划模型,即模型一:

$$\max E(w) = E_1(w^1) + E_2(w^2) + \dots + E_n(w^n) \quad (1)$$

$$s. t. 1. \quad w^1 + w^2 + \dots + w^n = w \quad (2)$$

$$w \leq W$$

$$W_{i,\min} \leq w^i \leq W_{i,\max} \quad i = 1, \dots, n$$

式中: $w$ ——区域水资源的一个完整用水周期的空间配置决策变量,是 $n$ 维向量; $E_i(w^i)$ ——第 $i$ 分区分配水量 $w^i$ 的效益函数,其中 $w^i$ ——决策变量; $W$ ——区域拥有的可分配水资源量; $W_{i,\max}$ ——第 $i$ 分区水资源需求量,是 $w^i$ 的上边界; $W_{i,\min}$ ——第 $i$ 分区水资源最低保证水量,是 $w^i$ 的下边界。

## 2.2 第二层配置模型

水资源系统的第二层为系统的中间层,它传输各用户的用水信息并反馈给第一层,分析在缺水条件下,根据各用户各时段用水效益对整个用水周期的贡献,建立合理的调亏配置模型,即模型二:

$$\max E_i(w^i) = E_i(w_1^i, w_2^i, \dots, w_m^i; w^i) \quad (3)$$

$$s. t. 2. \quad w_1^i + w_2^i + \dots + w_m^i = w^i \quad (4)$$

$$q_i \leq Q_i$$

$$W_{i,\min} \leq w_t^i \leq W_{i,\max} \quad t = 1, \dots, m$$

式中: $w^i$ ——第 $i$ 分区各时段配置决策变量,是 $m$ 维向量; $w_t^i$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段分配水量,是决策变量; $q_i, Q_i$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段的配水流量和渠系最大输配能力; $W_{i,\max}$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段水资源需求量,对灌溉作物是指时段的作物最大腾发量,是 $w_t^i$ 的上边界; $W_{i,\min}$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段水资源最低保证水量,是 $w_t^i$ 的下边界。

## 2.3 第一层配置模型

水资源系统的第二层为系统的底层,它是水资源到达的最低环节,也是水资源耗费的终点。由于水资源作为生命资源,具有不可替代的作用,不同用户对水资源的利用效益是不同的,因此不同用户的水资源配置必须满足一定规则,即用户的配置次序及其初始配水量,即可以概化为模型三:

$$\max E_i(w_{i,j}^t) = E_i(w_{i,1}^t, w_{i,2}^t, \dots, w_{i,k}^t; \phi) \quad (5)$$

$$s. t. 3. \quad w_{i,1}^t + w_{i,2}^t + \dots + w_{i,k}^t \leq w_{i,j}^t \quad (9)$$

$$W_{i,\min} \leq w_{i,j}^t \leq W_{i,j,\max} \quad j = 1, \dots, k$$

式中: $w_{i,j}^t$ ——第 $i$ 分区第 $j$ 用户的决策变量,是 $k$ 维向量,它由水资源系统安全运行规则,实现用户之间的公平用水,代表各分区的用水结构集合; $w_{i,j}^t$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段第 $j$ 用户的决策变量; $W_{i,j,\max}$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段第 $j$ 用户的水资源需求量,是 $w_{i,j}^t$ 的上边界; $W_{i,j,\min}$ ——第 $i$ 分区 $t$ 时段第 $j$ 用户水资源需求的最低保证水量,是 $w_{i,j}^t$ 的下边界。

## 3 模型求解

根据区域水资源时空优化配置的建模思路,将以上3个模型串起来,则是一个 $m \times n \times k$ 维的线性规划模型,模型维数相当高,若按照常规的方法求解,必然带来高阶的维数灾,

使求解无法完成。本文采用大系统递阶协调理论,将各个模型看成为一个独立的结构,首先从系统的底层出发,根据各分区各用户特点及各分区的用水效益、用水制度等历史资料,制定用户的配置规则和模拟用水效益函数,并将信息传递到系统的顶层;其次通过进入系统的水源条件,从系统的顶层出发,对各分区进行一个用水周期的空间配置、不同时段的时间配置和用户之间的配置;最后根据系统的输配水条件,对配置的结果进行修正。

根据以上理论,区域水资源时空合理配置模型求解过程如下:

### 3.1 确定水资源系统安全运行规则

根据各分区用水对象,拟定水量分配的顺序,优先保障生活用水、生态环境用水、粮食作物用水,其次为工业用水和经济作物用水;拟定水质分配原则,生活用水和工业用水首先由地下水满足,作物用水优先由地表水源满足,生态环境用水由剩余的其他水源满足;拟定初始分配水量原则,基本生活用水满足和城市工商业用水满足,地下水不足部分由地表水满足,其次通过全系统的输配水工程满足生态环境基本用水和粮食作物用水,经济作物用水该时刻不分配水量。

### 3.2 经济作物的最优用水制度

描述各时段之间用水的关系,一般是用水制度表示。所谓用水制度,是指各时段各用户的用水量,它是一个连续过程,是一个关于时段、用户和用水量的三维空间向量。按照水资源系统目标识别原则和水资源系统运行规则,竞争性用水制度主要体现在经济作物灌溉制度。

经济作物灌溉制度是一个用水过程,不是惟一的,是受人为控制而发生变化,灌溉制度的优劣体现在灌溉过程对产量的影响,不同的灌溉过程有不同的作物产量,Jensen模型能够描述这一过程,即:

$$\max \frac{Y_a}{Y_M} = \prod_{i=1}^m \left[ \left( \frac{ET_a}{ET_M} \right)^{\lambda_i} \right] \quad (7)$$

式中: $Y_a$ ——经济作物实际产量; $Y_M$ ——充分灌溉条件下最大产量; $t$ ——作物生长阶段; $\lambda_i$ ——作物第 $t$ 阶段对缺水的敏感性指标; $ET_a$ ——作物的实际耗水量; $ET_M$ ——作物的最大蒸发蒸腾量; $m$ ——划分的作物生育阶段数。

### 3.3 边际效益

边际效益是经济学中常用的一个概念,是指在其他输入元素不变的条件下,增加某一单位元素输入所带来的产值增量。对水资源配置系统而言,则是指在其它情况不变的条件下,增加一单位水量,给生产带来产值的增加量。用公式来表示,则有:

$$MR = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \quad (8)$$

式中: $MR$ ——边际效益; $\Delta Y$ ——产值的变化量; $\Delta X$ ——投入要素的变化量。水作为要素投入,可以发现,随着用水量的增加,水的边际效益是递减的,边际效益曲线是一条向右下方倾斜的曲线。在计算水的边际效益时,一个重要的前提是要将其它变化了的要素加以还原到不变以前的状态上。

### 3.4 模拟经济作物用水量与边际效益函数

对各子分区经济作物进行标准化处理,即把不同经济

作物转化为标准经济作物,将历来实施给经济作物的各种输入元素(除水量)还原到同一水平,分析不同水量供给条件下的经济作物产出,利用 Excel 软件模拟二者的关系模型,建立经济作物用水边际效益函数,并将剩余的各分区私有水源作为该函数的初值,求解初始边际效益值。

3.5 第三层模型求解

将各分区的边际效益函数及其初始值输入第三层,遵循边际效益递减规律,公共水资源首先配置初始边际效益值最高的分区,当出现与下一个分区初始边际值相等时,两个子分区同时配置水资源,以此类推,当边际效益值均为零时,全系统的总效益达到最大。

4 石河子地区水资源时空合理配置研究

石河子地区总面积为 7 680.97 km<sup>2</sup>,人口约 60 万人,耕地面积 20 万 hm<sup>2</sup>,经济作物以棉花为主,粮食作物以小麦、玉米为主,棉花种植面积达 85% 以上,是天山北坡经济带的中心区域和新疆的主要棉生产基地。该地区处于亚欧大陆腹地,干旱少雨,多年平均降水量在 200 mm 以下,蒸发量在 1 500 mm 以上,供需水矛盾突出。作为研究算例,本文运用上述理论方法,对石河子地区 2010 年水资源空间优化配置进行了研究计算。

4.1 研究区分区

石河子地区由 19 个农牧团场组成,根据地理位置及渠系关系,将研究区分为 5 个子系统,即下野地(X)、莫索湾(M)、石河子(S)、金沟河(J)、安集海(A)灌区 5 个灌区,对应分区的生活、工业、生态环境用水纳入相应的子系统分配。

4.2 经济作物水分生产函数及边际效益函数<sup>[8]</sup>

经济学中常将生产过程看成为一个“黑盒子”,从一端投入而从另一端产出,一定的生产技术确定了一定的投入产出关系。固定资产作为资金要素投入中最重要部分,流动资产以一定的比例与之相配合。在对原始数据进行科学的标准化和统一折算后,以固定资产、劳动力、水量为投入要素,将原始数据绘制在以横坐标为经济作物灌溉水量,纵坐标为对应的边际产量的二维坐标轴中(图 1)。

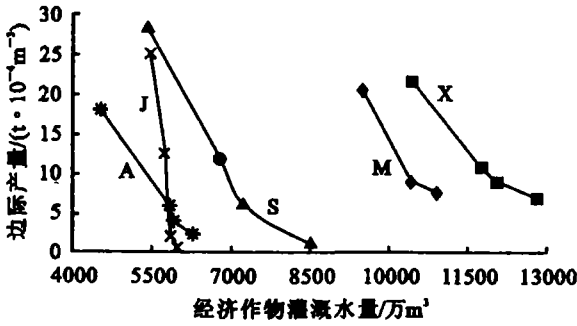


图 1 子系统经济作物用水边际效益拟合曲线

4.3 基于边际效益均衡的水资源空间优化配置

在获得以上模型及其参数后,优化配置需要确定子系统的初始边际效益。假设曲线符合二次函数,确定的参数将作为计算经济作物边际效益的输入参数,子系统计算结果见表 1。

根据子系统可能私有水源作为模型的输入参数,计算子系统的初始边际效益,剩余水资源情况及当地水资源边际效

益见表 2。

表 1 经济作物用水边际效益回归参数

| 参数                 | 下野地     | 莫索湾     | 石河子     | 金沟河     | 安集海     |
|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $a_i$              | 2E-06   | 6E-06   | 2E-06   | 8E-06   | 1E-06   |
| $b_i$              | -0.0545 | -0.1341 | -0.0398 | -0.1426 | -0.0233 |
| $c_i$              | 364.79  | 742.08  | 178.74  | 564.32  | 96.93   |
| $R^2$ for $y=f(w)$ | 0.9991  | 0.9933  | 0.9944  | 0.9315  | 0.9904  |

表 2 的计算结果中安集海灌区初始边际效益值远远小于其他灌区,表明当地私有水资源量较大,实际情况也是如此。根据表 2 子系统经济作物初始边际效益的大小,如果拟定公共水源在子系统之间的分配,则首先应供给莫索湾灌区,随着用水量增加,边际效益递减,当达到与下野地灌区初始边际效益相等时,则进行下野地灌区和莫索湾灌区共同配置水资源,以此类推,从而确定公共水源在空间配置时启动的顺序和数量,见表 3。

表 2 经济作物初始水资源量及初始边际效益值

| 子系统  | 下野地     | 莫索湾     | 石河子     | 金沟河     | 安集海     |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| 初始水资源量/<br>10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>          | 3056.42 | 4641.32 | 2315.06 | 3186.31 | 5204.57 |
| 初始边际效益/<br>(t · 10 <sup>-4</sup> m <sup>-3</sup> ) | 216.90  | 248.93  | 97.32   | 191.17  | 2.75    |

表 3 启动分水的数量和顺序

|     | 莫索湾      | 下野地      | 金沟河     | 石河子    | 安集海 | 10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup><br>边际效益 |
|-----|----------|----------|---------|--------|-----|--|
| 下野地 | 422.314  |          |         |        |     | 216.90                                 |
| 金沟河 | 361.344  | 627.153  |         |        |     | 191.17                                 |
| 石河子 | 1576.227 | 2736.887 | 1137.34 |        |     | 97.32                                  |
| 均衡点 | 2526.615 | 4414.46  | 1422.26 | 3870.5 | **  | 9.07                                   |

\*\* : 对应灌区不能分配公共水源。

表 3 表明,当公共水源量为  $W \in [0, 422.314]$ , 仅莫索湾灌区分水; 当  $W \in [22.314, 1410.811]$ , 莫索湾灌区和下野地灌区共同分水; 以此类推。表 1 和表 2 表明, 要保证各个灌区都分配到公共水源, 当且仅当均衡边际效益不大于各灌区中最小的初始边际效益值时, 安集海灌区才能分配到水源。

4.4 基于灌溉制度优化的水资源时间配置

根据石河子地区农业结构特点,经济作物中棉花占 90% 以上,在原始数据处理过程中,将其他一些作物(如葡萄、蟠桃、苹果等)均折算为棉花,将整个生长期主要划分为现蕾、开花、挂铃、吐絮 4 个阶段,即  $t=1, 2, 3, 4$ 。利用 121 团<sup>[9]</sup>和石河子试验田的棉花灌溉实验研究的  $\lambda t$  值,子系统时段配置见表 4。

表 4 子系统经济作物时段配置量

| 阶段  | 1       | 2       | 3       | 4       |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| 下野地 | 2673.63 | 3456.80 | 3456.80 | 1247.69 |
| 莫索湾 | 2401.96 | 3002.47 | 3002.47 | 1120.92 |
| 石河子 | 1193.43 | 2217.6  | 2217.6  | 556.93  |
| 金沟河 | 1385.39 | 1857    | 1857    | 357.56  |
| 安集海 | 1520.89 | 1841.84 | 1841.84 | 0       |

4.5 石河子地区水资源时空优化配置结果

根据水资源系统安全运行规则,首先满足子系统生活用水、粮食作物用水和效益高的工业用水,不单独进行生态环境用水配置;其次由公共和私有的剩余水源依据以上理论对经济作物进行时空优化配置,其配置结果见表 5。

表 5 石河子地区水资源经济作物时空配置 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>

| 阶段  |     | 1       | 2       | 3       | 4       |
|-----|-----|---------|---------|---------|---------|
| 下野地 | 地表水 | 789.21  | 4030.64 | 4938.29 | 1354.01 |
|     | 地下水 | 2121.19 | 635.35  | 0       | 299.88  |
| 莫索湾 | 地表水 | 488.80  | 1326.14 | 4228.83 | 838.62  |
|     | 地下水 | 2054.91 | 2060.91 | 0       | 525.50  |
| 石河子 | 地表水 | 352.42  | 1162.04 | 2843.08 | 604.64  |
|     | 地下水 | 918.54  | 1311.21 | 0       | 85.31   |
| 金沟河 | 地表水 | 236.09  | 271.32  | 2411.69 | 29.78   |
|     | 地下水 | 1203.60 | 1648.08 | 0       | 334.63  |
| 安集海 | 地表水 | 0       | 0       | 0       | 0       |
|     | 地下水 | 1520.89 | 1841.84 | 1841.84 | 0       |

5 结论与讨论

5.1 结 论

水资源的时空配置问题已成为制约干旱地区社会经济发展和生态环境保护的重要问题,提高有限水资源的利用效率是促进地区经济发展的重要举措。本文在保证区域水资源可持续发展的前提下,遵从效益最大化原则,运用边际效益递减和作物灌溉制度最优理论,并以石河子地区为例,提出了水资源时空优化配置结果。本文求解水分产量函数是通过统计资料模拟,采用经济学原理,以资源利用效益最优为基础,科学安排不同供水量的价值流向,避免了传统上未考虑效率的按比例分配弊端,在具有较强的实践操作性。

5.2 讨 论

水资源作为生命资源,是经济发展和生态环境不可替代的资源,同时水资源作为自然资源,人人具有公平享用水资

源的权利。由于不同分区之间经济发展差异,水资源空间优化配置从一定程度上打破了这种公平。然而,资源分配的公平,不能理解为量上的平均主义,否则就失去稀缺资源的价值。资源分配的公平<sup>[10]</sup>,是资源分配制度的公平,体现为分配的规则,即分区间公平分配初始水权,科学地设置动态水价,实施水权交易,为水资源效益低的分区提供发展资金。

参考文献:

[1] Smith D V. Systems analysis and irrigation planning [J]. J. Irrig. Div. ,1973,(99):89—107.

[2] Dantzig G B. Linear Programming and Extensions[M]. Princeton University Press,1963.

[3] 沈佩君,等. 引丹灌区优化调度的模型及方法[J]. 水利学报,1991,(3):1—9.

[4] 辛玉琛,张志君. 长春市城市水资源优化管理模型研究[J]. 东北水利水电,2000,(1):15—17.

[5] Dinar A, Mark W, Rosegrant, et al. Water Allocation Mechanisms—Principles and Examples[R]. 1995.

[6] 贺北方,等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J]. 水电能源科学,2002,20(3):10—12.

[7] 丛振涛,周智伟,雷志栋. Jensen 模型水分敏感指数的新定义及其解法[J]. 水科学进展,2002,13(6):11.

[8] 王劲峰,等. 水资源空间分配的边际效益均衡模型[J]. 中国科学(D 辑),2001,31(3):5.

[9] 蔡焕杰,等. 不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2002,30(4):29—32.

[10] 杜杰. “公平”界定与价值选择[J]. 武汉交通科技大学学报,1997,(2):87—89.

(上接第 173 页)

开采;实施分类水价制度,根据不同的水质制定不同的价格标准,优质优价,以促进污、废水资源的进一步开发利用,减少淡水资源的开发利用量。加强对工业废水与生活污水的管理,在严格限制重污染企业的新建与发展的同时,逐步完善工业废水与生活污水的收集与处理系统,制定合理的排放标准,并加大监督、管理的工作力度,实现工业废水与生活污水的达标排放,以保护水环境,努力促进其良性循环。

5 结 语

昌黎县在水资源方面存在着总量短缺、浪费严重、开发利用不合理及水环境恶化问题,已导致了该地区的水资源危机。通过开展昌黎县水资源问题的研究,针对其存在的问题,提出相应的策略,以逐步实现水资源的可持续利用,对促

进昌黎县农业及社会经济的可持续发展有着重要的意义。

参考文献:

[1] 丁春梅. 浙江省水资源可持续利用研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

[2] 张领先,傅泽田,王德成,等. 唐山市沙流河镇水资源供需平衡优化分析[J]. 农业工程学报,2005,21(4):38—41.

[3] 黄万合. 我县地下水资源现状及开发利用对策探讨[A]. 秦皇岛市水利学会. 秦皇岛市水利学会论文集(1996—1998)[C]. 209—201.

[4] 昌黎县林业局. 昌黎县非公有制林业发展情况调查报告[J]. 河北林业科技,2003,(12):44—45.

[5] 韩友志. 辽宁省水资源可持续发展战略的研究[D]. 长春:东北林业大学,2003.