

# 康平县水资源配置大系统多目标模型

尼庆伟<sup>1</sup>, 杨凤林<sup>\*1</sup>, 吴文业<sup>2</sup>, 李宇斌<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 环境与生命学院, 辽宁 大连 116024;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004;

3. 辽宁省环境科学研究院, 辽宁 沈阳 110031)

**摘要:** 以康平县为例, 根据该区域水资源开发利用现状及远景规划目标, 以系统工程的思想为指导, 运用大系统多目标规划理论, 建立了半干旱内陆湿地的经济发展和生态系统保护的水资源优化配置的大系统多目标模型. 通过调整和优化产业结构, 减少耗水量大的单位, 合理分配水资源, 大力发展水资源利用率高、综合效益好的产业, 以实现半干旱内陆湿地区域经济的可持续发展. 从经济、社会和生态效益相结合角度为半干旱内陆湿地区域水资源的合理分配提供了依据, 提出了优化的宏观远景规划方案, 对构建半干旱内陆湿地区域经济可持续发展和水资源协调利用的框架模式具有一定指导意义.

**关键词:** 水资源; 优化配置; 大系统; 多目标规划; 康平县

**中图分类号:** TV21      **文献标志码:** A

## 0 引言

康平县是国家生态建设示范县和国家绿色食品基地建设县<sup>[1]</sup>, 位于沈阳市北部, 辽河流域河套中游的西部. 地理位置处于东经  $122^{\circ}45' \sim 123^{\circ}37'$ 、北纬  $42^{\circ}31' \sim 43^{\circ}02'$ . 地区总面积  $2\,175\text{ km}^2$ . 多年平均降水量  $542.39\text{ mm}$ , 年际变化很大, 多年平均蒸发量  $1\,857.2\text{ mm}$ ,  $4 \sim 6$  月份蒸发量约占全年的  $50\%$ , 属于半干旱地区. 辽宁省最大的天然内陆湿地——卧龙湖湿地自然保护区就位于康平县境内. 湿地总面积  $11\,200\text{ ha}$ , 水域面积  $5\,400\text{ ha}$ , 年生态服务功能总价值约为  $4.03 \times 10^8$  元人民币, 是沈阳北部抵御科尔沁沙地沙尘南侵的天然屏障. 康平县水资源总量为  $25\,200 \times 10^4\text{ m}^3$ , 可利用水资源为  $17\,100 \times 10^4\text{ m}^3$ , 人均水资源量为  $767\text{ m}^3$ , 属于水资源贫乏地区. 水资源总量的不足及不合理用水方式, 使水资源成为制约整个地区经济大系统可持续发展的关键因素, 湿地生态系统安全也因此受到严重威胁,  $2002 \sim 2004$  年出现较严重退化现象. 解决这一问题的一

个有效方法是运用大系统多目标规划原理, 优化区域水资源的配置, 实现区域经济与生态效益的最大化. 半干旱内陆湿地的区域发展规划是结合区域特点, 合理调整产业结构, 合理分配水资源, 使一个时期内区域经济效益高, 水资源消耗不超过规定限度, 同时保证区域经济与生态系统的可持续发展, 是一个具有多目标、多阶段的动态规划问题. 大系统规划问题的研究始于 20 世纪 60 年代, Dantzig 等<sup>[2,3]</sup> 提出了大系统规划模型的分解方法, Ho 等<sup>[4,5]</sup> 对算法进行了改进, 完善了该算法. 冯英俊等<sup>[6]</sup> 提出了大系统多目标模型的串式调优法, 张杰等<sup>[7]</sup> 采用此方法研究了大庆油田开发规划问题. 本文在参考相关研究的基础上, 以系统工程的思想为指导, 从经济、生态和社会效益相结合角度来衡量区域水资源的合理开发利用, 以康平县为例, 将该区域发展看做一个大系统, 各类用水单位看做子系统, 以水资源的使用为约束条件, 结合区域远景规划目标构建半干旱内陆湿地水资源缺乏地区区域发展的多目标优化模型, 提出合理的水资源利用与经济可持续发展的规划方案.

收稿日期: 2007-05-12; 修回日期: 2009-02-26.

基金项目: 教育部高校科技创新工程培育基金资助项目(重大项目 705011).

作者简介: 尼庆伟(1974-), 男, 博士; 杨凤林\*(1944-), 男, 教授, 博士生导师.

## 1 大系统多目标规划模型的基本原理

大系统多目标规划是数学规划的一种方法,也是运筹学的一个分支,它可以解决如何最大限度地发挥现有资源等问题,为某一地区或部门提供优化决策方案.其模型一般形式为

$$\begin{aligned} & \max \mid \min F(x) \\ & x^j \in X \subset R^n \\ & F(x) = \begin{pmatrix} F_1 & F_2 & \cdots & F_m \\ F_1 & & & \\ & F_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & F_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^1 \\ x^2 \\ x^3 \\ \vdots \\ x^m \end{pmatrix} \end{aligned}$$

其中  $m$  为子系统的个数,  $X$  为决策空间或可行性域.  $F_j(x^j)$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ) 为第  $j$  个子系统目标函数,  $F_j(x^j) = (f_1^j(x^j) \quad f_2^j(x^j) \quad \cdots \quad f_m^j(x^j))$ , 模型中  $m$  个子系统构成全局系统.

## 2 目标函数的确定

康平县的区域规划以系统的观点为指导,依靠科技进步,优化产业结构,合理分配水资源,提高用水效率,实现区域、社会和生态系统和谐发展.这一决策的目标有如下3个.

### (1) 工农业总产值

根据康平县工业落后、农业产值低、水资源缺乏、土地资源丰富,同时面临土地沙化威胁的实际,通过调整产业结构和科技进步,保证今后经济的平稳、可持续增长.立足农业,发展特色经济.

### (2) 生态效益

通过合理分配水资源,保证湿地生态需水量,控制牲畜数量保证区域草场和林地生态系统的安全,实现生态系统服务价值的最大化.

### (3) 水资源使用量

区域发展在以提高经济、社会和生态效益为中心的同时,提高水资源利用效率,严格控制水资源过度使用的问题,在经济增长的同时,水资源使用量要最小化.

## 3 决策变量的确定

通过分析康平地区的用水状况,本文把该区的用水集中分为工业、农业、城镇生活、农村生活、牲畜用水、生态用水6个用户.共选择13个决策变量,分别为  $x_1$ :污水回用量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $x_2$ :森林覆盖面积, ha;  $x_3$ :草地面积, ha;  $x_4$ :湿地面积, ha;

$x_5$ :城镇人口数量,  $10^4$  人;  $x_6$ :农村人口数量,  $10^4$  人;  $x_7$ :大牲畜数量,  $10^4$  头;  $x_8$ :工业产值,  $10^8$  元;  $x_9$ :淡水养殖面积, ha;  $x_{10}$ :水田面积, ha;  $x_{11}$ :旱地灌溉面积, ha;  $x_{12}$ :菜地灌溉面积, ha;  $x_{13}$ :生态用水量,  $10^4 \text{ m}^3$ .

## 4 约束条件与目标分析

根据康平县水资源的特点和多目标规划的要求,以追求最大的经济、社会和生态效益为目标,对康平县“2020”远景规划作以下目标约束限定.

### (1) 污水回用量 $x_1$

康平县污水生产大户主要是康平铝厂、纺织厂、鑫火铸造公司、东福金属表面处理中心,年产污水量达  $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,目前污水处理率为40%,回用率为零.计划到2020年,全县年污水排放量将达  $3\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,处理率达80%,污水利用率达50%.

### (2) 森林覆盖面积 $x_2$

区域现有林地面积  $6.5 \times 10^4$  ha,森林覆盖率29.7%.目前,康平县每年都按计划完成国家退耕还林、还草的任务,计划到2020年,区域林地面积达到  $7.8 \times 10^4$  ha,森林覆盖率达35.8%.

### (3) 草地面积 $x_3$

康平县是国家绿色食品建设县,有天然草地  $2.1 \times 10^4$  ha 和宜林荒地  $2.3 \times 10^4$  ha,计划到2020年,全区草地面积达到  $4.1 \times 10^4$  ha.

### (4) 湿地面积 $x_4$

康平县是辽宁省最大的天然内陆湿地卧龙湖所在地,2000年统计湿地面积11 200 ha,2005年湿地面积约为5 400 ha.目前政府已采取有效措施保护湿地的生态安全,在维持现有湿地面积的同时,逐年进行恢复,计划到2020年湿地面积保持在8 000 ha左右.

### (5) 城镇人口数量 $x_5$

全县现有城镇人口  $7.9 \times 10^4$  人,人口增长率按0.384%(2005)计算,到2020年,城镇人口不超过  $8.5 \times 10^4$  人.

### (6) 农村人口数量 $x_6$

全县现有农村人口  $27 \times 10^4$  人,人口增长率按0.384%计算,到2020年,全县农村人口不超过  $29 \times 10^4$  人.

### (7) 大牲畜数量 $x_7$

全县现有大牲畜  $49 \times 10^4$  头(其中牛  $17.9 \times 10^4$  头,羊  $31.1 \times 10^4$  头).按照合理的承载力较好

草原3头(羊)/ha单位计算,目前仅可承载大牲畜 $6.3 \times 10^4$ 个羊单位,属于严重超负荷放牧.到2020年草场面积将扩大到 $4.1 \times 10^4$  ha,为了保护草原生态,防止草场退化,建议到2020年,康平县大牲畜发展不超过 $11 \times 10^4$ 个羊单位为宜.

#### (8)工业产值 $x_8$

康平县2005年工业总产值 $32.7 \times 10^8$ 元,工业万元产值耗水量约为 $55 \text{ m}^3$ .2020年工业总产值将达到 $210 \times 10^8$ 元,万元产值用水定额达到 $40 \text{ m}^3$ .

#### (9)淡水养殖面积 $x_9$

现有淡水养殖面积8000 ha,到2020年淡水养殖面积控制在6000 ha左右.淡水养殖按1552 kg/ha、4.2元/kg计算.

#### (10)水田面积 $x_{10}$

全县现有水田41725 ha,耗水量较大,产值较低,每公顷约耗水 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,为合理配置水资源,计划到2020年将水田面积控制在24000 ha.

#### (11)旱地灌溉面积 $x_{11}$

康平县旱地农作物中,主要以玉米为主,另外还种植高粱、谷子、小麦、水稻、甜菜和豆类等农作物.面积现已达56980 ha,为增加农业产值,提高农民收入并且实现国家退耕还林、还草,保护生态的任务,在削减水田的同时,适当扩大旱地面积,种植高经济作物.计划到2020年全县旱地达到62000 ha.

#### (12)菜地灌溉面积 $x_{12}$

现有菜地灌溉面积8032 ha,随着城乡市场的扩大,到2020年,全县菜地灌溉面积将稳定在8500 ha.

#### (13)生态用水量 $x_{13}$

康平县有辽宁省最大的天然内陆湿地,从卧龙湖湿地自然保护区1975年至2005年的统计数字来看,最小生态需水量要维持在 $3000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,才能保证其正常的生态功能的发挥.规划到2020年,湿地生态用水维持在 $4000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右.

## 5 决策方案分析

### (1)变量参数的确定

根据康平县“2020”年远景规划目标,本着首先满足生活用水,其次是农业和生态用水,兼顾工业用水的原则,确定用水参数值(见表1).

表1 康平县2020年大系统多目标规划方案参数值

Tab. 1 Parameters value of large-scale system multi-objective programming of Kangping County in 2020

项目	参数值
污水回用率/%	50
森林用地效益/(元·ha <sup>-1</sup> )	6 606.2
牧业用地效益/(元·ha <sup>-1</sup> )	2 146.1
城镇生活用水定额/(L·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	200
农村生活用水定额/(L·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	70
牲畜用水定额/(L·头 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	50
工业万元产值耗水量/(m <sup>3</sup> ·10 <sup>-4</sup> 元 <sup>-1</sup> )	45
淡水养殖/(kg·ha <sup>-1</sup> )	2 750
水田灌溉/(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	7 500
旱地/(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	2 300
菜地/(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	4 000
生态用水/(m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	10 000
林地生态效益/(元·ha <sup>-1</sup> ) <sup>[8]</sup>	2 014.2
草场生态效益/(元·ha <sup>-1</sup> ) <sup>[8]</sup>	3 507.6
湿地生态效益/(元·ha <sup>-1</sup> ) <sup>[9]</sup>	13 333

### (2)康平县区域发展多目标优化模型的建立

为了实现区域水资源的优化配置,在相应决策变量及目标约束下,本文采取“以供定需”的原则,即在已知某一区域供水总量的情况下合理分配使用水资源,使之达到最优配置.建立了如下康平县区域发展大系统多目标规划模型.

#### 工农业总产值目标函数:

$$\max F_1(\mathbf{x}^1) = 6\,606.2x_2 + 2\,146.1x_3 + x_8 + 2\,750 \times 3.6x_9 + 6\,000 \times 1.5x_{10} + 2\,100 \times 2.9x_{11} + 30\,000 \times 0.9x_{12}$$

$$\text{s. t. } \max F_1(\mathbf{x}^1) \geq 210(\times 10^8 \text{ 元, 康平县 2020 年远景规划值})(\text{第三优先级})$$

#### 生态效益函数:

$$\max F_2(\mathbf{x}^2) = 2\,014.2x_2 + 3\,507.3x_3 + 13\,333x_4$$

$$\text{s. t. } \max F_2(\mathbf{x}^2) \geq 3.03(\times 10^8 \text{ 元})(\text{第二优先级})$$

#### 水资源使用量函数:

$$\min F_3(\mathbf{x}^3) = 0.5x_1 + 365 \times 200x_5 + 365 \times 70x_6 + 365 \times 50x_7 + 40x_8 + 7\,500x_{10} + 2\,300x_{11} + 4\,000x_{12} + 10\,000x_{13}$$

$$\text{s. t. } \max F_3(\mathbf{x}^3) \leq 16\,000(\times 10^4 \text{ m}^3, \text{ 规划可供水量})(\text{第一优先级})$$

$$\text{其中 } 0 \leq x_1, 65\,000 \leq x_2 \leq 78\,000, 21\,000 \leq x_3 \leq 41\,000, 5\,400 \leq x_4 \leq 8\,000, 7.9 \leq x_5 \leq 8.5,$$

$$27 \leq x_6 \leq 29, 0 \leq x_7 \leq 11, 32.7 \leq x_8, 0 \leq x_9 \leq 6\ 000, 0 \leq x_{10} \leq 24\ 000, 56\ 980 \leq x_{11}, 8\ 500 \leq x_{12}, 3\ 000 \leq x_{13}.$$

将上述多目标规划优化模型进行计算,根据计算结果调整决策变量的目标值,得出3种备选方案,如表2所示。

表2 康平县2020年水资源优化配置与区域经济协调发展方案

Tab.2 Project of water optimal allocation and regional economy harmonious development of Kangping County in 2020

变量	名称	现状年(2005)	第一方案	第二方案	第三方案
$x_1$	污水回用量/ $10^4 \text{ m}^3$	—	180	300	300
$x_2$	森林覆盖面积/ha	65 000	70 000	75 000	78 000
$x_3$	草地面积/ha	21 000	31 000	38 000	41 000
$x_4$	湿地面积/ha	5 400	8 000	8 000	6 000
$x_5$	城镇人口/ $10^4$ 人	7.9	8.5	8.5	8.5
$x_6$	农村人口/ $10^4$ 人	27	29	29	29
$x_7$	牲畜数量(羊)/ $10^4$ 头	31.1	9	11	12
$x_8$	工业产值/ $10^8$ 元	32.7	180	210	210
$x_9$	淡水养殖面积/ha	8 000	6 000	6 000	6 000
$x_{10}$	水田面积/ha	41 725	30 000	24 000	30 000
$x_{11}$	旱地灌溉面积/ha	56 980	60 000	62 000	60 000
$x_{12}$	菜地灌溉面积/ha	8 032	8 000	8 500	8 000
$x_{13}$	生态用水量/ $10^4 \text{ m}^3$	3 000	3 000	4 000	3 000
工农业总产值/ $10^8$ 元		57.6	212.3	235	240.3
总用水量/ $10^4 \text{ m}^3$		14 280	15 075	16 275	18 250

从表2可以看出,在康平县国民经济发展过程中,有3种远景规划方案。

第一方案:发展一定的林地和草地面积,林地面积达到 $7 \times 10^4$  ha,其中经济林面积达到6 000 ha,草地面积达到 $3.1 \times 10^4$  ha,适当缩小水田面积。工业产值达到 $180 \times 10^8$ 元;淡水养殖业控制在6 000 ha以内。目前旱地56 980 ha,旱地作物中主要是玉米,耗地多,经济效益不高,所以到2020年计划增加高经济作物如大豆、药材等。人口限制在 $38 \times 10^4$ 人以内,牲畜控制在 $9 \times 10^4$ 个羊单位,菜地灌溉面积稳定在8 000 ha。第一方案届时工农渔林牧总产值将达到 $212.3 \times 10^8$ 元,总需水量为 $15\ 075 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,污水回用量达 $180 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

第二方案:积极发展林地和草地面积,林地面积达到 $7.5 \times 10^4$  ha,其中经济林面积达到10 000 ha。增加环境治理投入,加强农灌设施的配套,旱地面积达到62 000 ha,菜地面积达到8 500 ha。发展特色工业及地方乡镇企业,搞活城乡市场,活跃经济,届时工业产值将达到 $210 \times 10^8$ 元。控制淡水养殖投入,增加生态保护投入,满足卧龙湖湿地最小生态需水量要求,确保其基本生态服务功能的发挥,促进社会、经济的和谐发展。第二方案工农渔林牧总产值将达到 $235 \times 10^8$ 元,需水量为 $16\ 275 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,污水回用量达 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

第三方案:大力发展林地和草地面积,林地面

积达 $7.8 \times 10^4$  ha,经济林面积达11 000 ha,草地面积达 $4.1 \times 10^4$  ha。工业发展与第二方案相同,旱地灌溉面积和水田面积与第一方案相同,淡水养殖面积仍然为6 000 ha左右。人口限制在 $38 \times 10^4$ 人以内,牲畜控制在 $12 \times 10^4$ 个羊单位,生态保护方案与第二方案相同。本方案总产值将达到 $240.3 \times 10^8$ 元,需水总量为 $18\ 250 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,污水回用量达 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

方案分析结果表明,第一方案工农业总产值较小,用水量为 $15\ 075 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,污水回用量为 $180 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;第二方案工业产值较大,总产值达 $235 \times 10^8$ 元,用水量适当,限制在供水能力之内,湿地等生态系统得到有效保护,保证了基本生态功能的发挥和健康发展,而且污水回用量较大;第三方案虽然总产值最大,生态系统发展较好,但是用水量较大,比地下水可开采量 $17\ 100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 还多 $1\ 150 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,是一种超负荷的用水方式。由于第二方案采取了发展经济与资源、生态环境保护同时并重的开发政策,水资源系统在整个开发过程中处于良好的运行状态,在存在较小的缺水压力和生态环境健康发展的情况下,湿地生态用水量得到充分保证,能够获得较大的生态效益和综合效益。因此,本文将第二方案确定为康平县水资源优化利用和区域经济可持续发展的最优方案。

## 6 结 论

运用大系统多目标规划理论,以经济持续发展与水资源协调利用为原则,建立了半干旱内陆湿地区域水资源优化分配的大系统多目标规划模型,以康平县为例确定了区域2020年宏观远景规划方案.模型决策变量选择具有很好的针对性,目标预定科学合理,可操作性强.通过对康平县用水产业结构的优化和调整,从经济、生态和社会效益相结合角度为半干旱地区内陆湿地生态系统与区域可持续发展对水资源合理分配的要求提供了依据,该理论方法的应用对于水资源缺乏的半干旱内陆湿地区域构建经济可持续发展和水资源协调利用的框架模式具有一定指导意义.

## 参 考 文 献:

[1] 康平县水利局. 2006 康平县水资源规划报告[R]. 康平:康平县水利局, 2006

[2] DANTZIG G B, WOLFE P. The decomposition principle for linear programs [J]. **Operations Research**, 1960, **8**(1):101-111

[3] DANTZIG G B, WOLFE P. The decomposition algorithm for linear programs [J]. **Econometrical**, 1961, **29**(4):767-778

[4] HO J K, LOUTE E. An advanced implementation of the Dantzig-Wolfe decomposition algorithm for linear programming [J]. **Mathematical Programming**, 1981, **20**(1):303-326

[5] HO J K, LOUTE E. Computational experience with advanced implementation of decomposition algorithm for linear programming [J]. **Mathematical Programming**, 1983, **27**(3):283-290

[6] 冯英俊,张 杰. 大系统多目标规划及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2004

[7] 张 杰,周学民. 大庆油田开发规划的大系统目标规划模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1999, **31**(4): 11-15

[8] 孙继华,郎奎建. 广义森林生态效益似乎不相关模型的总体估计[J]. 北京林业大学学报, 2004, **26**(3): 19-23

[9] COSTANZA R. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. **Nature**, 1997, **387**: 253-260

## A large-scale system multi-objective programming model for water resources allocation in Kangping County

NI Qing-wei<sup>1</sup>, YANG Feng-lin<sup>\*1</sup>, WU Wen-ye<sup>2</sup>, LI Yu-bin<sup>3</sup>

( 1. School of Environmental and Biological Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;  
2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;  
3. Liaoning Academy of Environmental Science, Shenyang 110031, China )

**Abstract:** Taking Kangping County as a case study, according to the present situation of water resources and future goals, a large-scale system multi-objective programming model is developed for the optimal allocation of water resources in the semiarid inland wetland area in view of system engineering and theory of large-scale system multi-objective programming. To achieve the goal of sustainable economic development of the area, the industrial structures should be readjusted and optimized, and the number of sectors which consume too much water should be reduced, water resources should be allocated reasonably and the industries which consume water with high water availability should be supported preferentially. The suggestion provides an optimized macro-planning to guide regional utilization of water resources and economic growth. It is of great importance to sustainable economic growth and coordinative utilization of water resources for semiarid inland wetland area.

**Key words:** water resources; optimal allocation; large-scale system; multi-objective programming; Kangping County