

# 基于可持续发展的金昌市水资源优化配置研究

侯慧敏<sup>1</sup>, 王鹏全<sup>1</sup>, 张永明<sup>1,2</sup>, 赵廷红<sup>1</sup>, 吴元梅<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省水利厅, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 为了实现水资源的可持续发展, 结合 WEAP 的预测决策功能模拟计算水资源配置方案, 利用大系统分层模糊优化理论提出了水资源配置方案的评价模型。研究根据金昌市水资源利用现状, 设计了 3 种水资源配置方案, 并综合考虑水资源开发利用的可持续性、协调性和公平性, 以可持续发展系数最大作为目标函数进行方案的评价择优。结果表明: 调整产业结构、压缩灌溉面积、规划外调水源和推行高新节水技术是金昌市实现水资源可持续发展切实可行的措施。

**关键词:** 可持续发展; 优化配置; 评价指标体系; 大系统分层模糊优化理论; 金昌市

**中图分类号:** TV213.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-643X(2014)06-0179-05

## Study on optimal allocation of water resources in Jinchang based on sustainable development

HOU Huimin<sup>1</sup>, WANG Pengquan<sup>1</sup>, ZHANG Yongming<sup>1,2</sup>, ZHAO Tinghong<sup>1</sup>, WU Yuanmei<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Dynamic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Water Conservancy Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In order to achieve sustainable development of water resources, the paper combined prediction and decision function of WEAP to simulate and set up the scheme of water allocation and used large-scale systems hierarchical and fuzzy optimization theory to propose a model of evaluating water resources allocation scheme. The paper designed three kinds of water allocation program according to the status of water resources utilization of Jinchang, and took the maximum coefficients of sustainable development as the objective function to choose and evaluate the best solution by comprehensively considering the sustainability, coordination and fairness of water resources development. The results showed that adjusting industrial structure, reducing watered field, programming exotic water and implementing water-saving technology are the feasible measures for Jinchang city to achieve sustainable development of water resources.

**Key words:** sustainable development; optimal allocation; evaluation index system; large-scale systems hierarchical and fuzzy optimization theory; Jinchang city

## 1 研究背景

生态危机和水资源短缺是人类社会经济发展面临的巨大挑战。联合国曾发出警告, 除非各国政府采取有力措施, 否则到 2025 年, 世界上将有近三分之一的人口无法获得安全的饮用水<sup>[1]</sup>。在中国西北内陆干旱区, 由于水资源禀赋不足和人类的不合理开发利用, 沙漠入侵、湖泊萎缩等与水资源有关的

生态问题日益严重, 水量供需矛盾突出, 水危机成了人类面临的最为严峻的现实问题之一。科学审视可持续发展与水资源优化配置的关系是促进生态环境良性循环、保证水资源可持续发展的重要途径<sup>[2]</sup>。

## 2 研究区概况

甘肃省石羊河流域金昌市位于东经 101°04'35" ~ 102°43'40", 北纬 37°47'10" ~ 39°00'30", 自然条件

收稿日期: 2014-05-22; 修回日期: 2014-09-17

基金项目: 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-2013)

作者简介: 侯慧敏(1979-), 男, 山西长治人, 硕士, 讲师, 从事旱区水资源高效配置、水权制度建设、水环境与水资源管理等方面的研究。

通讯作者: 王鹏全(1989-), 男, 甘肃静宁人, 硕士研究生, 主要从事水资源优化配置、水资源规划管理和水环境保护等方面研究。

严酷,多年平均降水量 113 mm,年均蒸发量是降水量的 18 倍,是全国重点缺水区域,也是中国西部地区自然生态环境比较脆弱的地区。金昌市水资源总量 5.215 亿  $m^3$ ,2010 年水资源总供水量 6.426 亿  $m^3$ ,为本地区水资源总量的 123.2%,农业用水比例 80.2%,用水效率偏低。现状年全市人口约 46.41 万人,耕地面积约 7.97 万  $hm^2$ 。

### 3 水资源优化配置模型的建立

#### 3.1 模型框架

建立水资源可持续发展分层指标体系,以 WEAP 软件模拟不同的水资源配置方案,计算指标层特征值。利用水资源评价指标体系将可持续发展系数最大作为目标函数,该函数分别由发展系数函数、协调系数函数与公平系数函数 3 个子函数构成,以目标函数在其定义域中的最大值所对应的方案作为最优方案。水资源优化配置模型框架如图 1 所示。

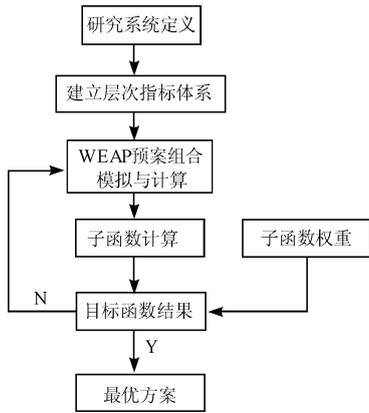


图 1 金昌市水资源优化配置模型框架

#### 3.2 模型构建

3.2.1 目标函数 水资源的优化配置是多目标的系统问题,利用大系统层次分析模糊优选理论,采用权重赋值将多目标问题单一化。本研究以可持续发展系数最大作为目标函数,其函数形式为:

$$\max S(x) = \sum_{i=1}^3 \omega_i S_i(x) \quad (1)$$

式中:  $S(x)$  为可持续系数;  $S_i(x)$  为子函数,其中  $S_1(x)$  为发展系数,  $S_2(x)$  为协调系数,  $S_3(x)$  为公平系数;  $\omega_i$  分别为各子函数的权重,  $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ 。

#### 3.2.2 约束条件

(1) 取水许可约束:各区域在任意时间尺度内的总取水量不超过区域取水许可总量,即

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Q_{jt} \leq Q_{pe} \quad (2)$$

式中:  $Q_{jt}$  为第  $j$  个区域  $t$  时段的取水量;  $Q_{pe}$  为区域取水许可总量。

(2) 生态需水约束:各区域的生态需水量不小于区域最小生态需水量,即

$$\sum_{j=1}^J DE_j \geq DE_{\min} \quad (3)$$

式中:  $DE_j$  为第  $j$  个区域的生态需水量;  $DE_{\min}$  为区域最小生态流量,采用 Montana 法计算<sup>[3]</sup>。

(3) 种植面积约束:各区域的总种植面积不超过可灌溉总面积,即

$$\sum_{j=1}^J A_j \leq A \quad (4)$$

式中:  $A_j$  为第  $j$  个区域的种植面积;  $A$  为流域可灌溉总面积。

(4) 其他约束:用水部门水量平衡约束,供水工程过流能力约束,地下水开采用量约束,社会经济指标约束,变量非负约束等。

## 4 金昌市水资源优化配置

### 4.1 金昌市水资源配置

4.1.1 方案组合制定 根据金昌市水资源利用现状和治理规划<sup>[4]</sup>,水资源优化配置的措施有:①调整农业内部种植结构;②调整产业结构,压减农业种植面积;③规划增加外调水源,提高污水回用能力;④高 GDP 增长;⑤推广节水技术,提高公民节水意识。通过定性分析淘汰劣势方案,本次研究的水资源配置方案组合集见表 1。

表 1 金昌市水资源配置方案组合集

方案组合	水资源优化配置措施				
	①	②	③	④	⑤
A	Y	N	N	N	Y
B	N	Y	N	Y	Y
C	N	Y	Y	N	Y

注:Y 表示采纳该措施,N 表示放弃该措施。

4.1.2 水资源配置结果 研究通过 WEAP 规划软件的需求端管理模拟表 1 中的方案组合集。结合金昌市行政区划,建立水资源系统概化网络。概化网络的供水点包括 3 个地下水单元和 3 个水库;用水点包括 5 个灌区的农业和生态需求点、2 个生活需求点、1 个工业需求点。根据水资源供给特点通过水力传输关系将各节点连接起来,构成金昌市水资源概化网络节点系统<sup>[5-6]</sup>。金昌市水资源 WEAP 概化网络见图 2。

以 2010 年为现状基准年,2020 年为近期规划

水平年,2030年为远景规划水平年,通过预案管理运行计算,得到不同方案组合集下的金昌市水资源配置结果见表2。

### 4.2 方案评价与优选

4.2.1 评价指标体系构建 本研究建立基于区域可持续发展的评价指标体系<sup>[7-9]</sup>,利用大系统分层模糊优化理论,对水资源配置方案的合理性进行评价,获得最优方案。金昌市水资源可持续发展评价指标体系包括:目标层、准则层、指标层、分指标层和方案层。其结构如图3所示。

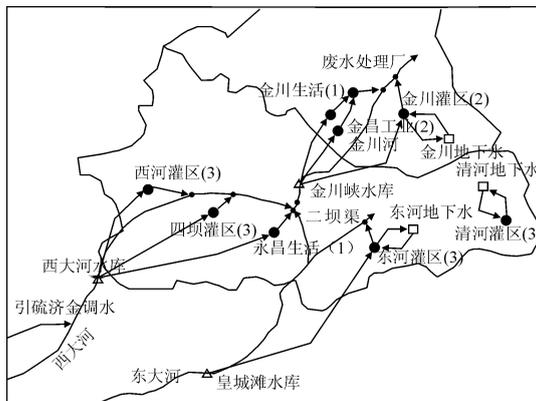


图2 金昌市水资源系统 WEAP 概化网络图

表2 不同方案组合集下金昌市水资源配置结果

方案	水平年	人口 /万人	灌溉面积 /hm <sup>2</sup>	GDP 总值 /亿元	生活用水量/万 m <sup>3</sup>	生态用水量/万 m <sup>3</sup>	工业用水量/万 m <sup>3</sup>	农业用水量/万 m <sup>3</sup>	总供水量/万 m <sup>3</sup>	水资源总量/万 m <sup>3</sup>
方案 A	2010	46.41	79650	189.78	2077	1360	11766	49055	64258	52150
	2020	48.54	79650	373.32	2727	1658	15989	47218	67592	52150
	2030	50.76	79650	734.38	3592	2021	26438	43630	75681	52150
方案 B	2010	46.41	79650	189.78	2077	1360	11766	49055	64258	52150
	2020	48.54	72600	492.24	2727	1658	23627	42565	70577	52150
	2030	50.76	66000	1276.74	3592	2021	40856	34620	81089	52150
方案 C	2010	46.41	79650	189.78	2077	1360	11766	49055	64258	52150
	2020	48.54	72600	373.32	2727	1658	15989	42565	62939	57365
	2030	50.76	66000	734.38	3592	2021	26438	34620	66671	68365

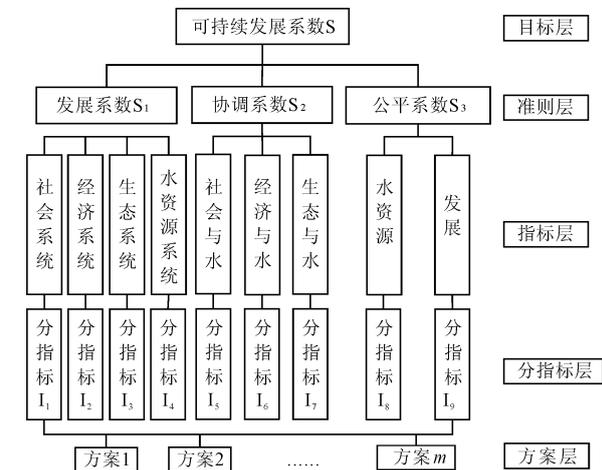


图3 评价指标体系多层模型结构图

4.2.2 可持续发展系数的计算 区域水资源可持续发展系数既反映社会、经济、生态环境子系统及水资源系统本身发展目标的实现,又体现社会、经济、生态环境子系统与水资源子系统协调发展以及各分区水资源使用及发展的公平性。利用评价指标体系分别计算区域发展系数、协调系数和公平系数,然后通过

加权求和即可得到区域水资源可持续发展系数。

(1)发展系数的计算。分指标层发展系数采用如下计算方法<sup>[10]</sup>:

对于正相关指标:

$$r_1(k, m) = \left( \frac{r(k, m)}{r(k, m)^*} \right)^{\frac{1}{N}}$$

对于负相关指标:

$$r_1(k, m) = \left( \frac{r(k, m)^*}{r_1(k, m)} \right)^{\frac{1}{N}}$$

式中: $k$ 为依次取1,2,3,4代表发展系数准则层下的四个子系统; $m$ 为第 $k$ 个子系统下第 $m$ 个分指标; $r(k, m)^*$ 为规划水平年第 $k$ 个子系统的第 $m$ 个分指标值; $r(k, m)$ 为现状水平年第 $k$ 个子系统的第 $m$ 个分指标值; $N$ 为现状水平年与规划水平年之间的年数。区域发展系数可按(5)式计算:

$$S_1(x) = \sum_{k=1}^4 \sum_{m=1}^M \lambda_1(k, m) r_1(k, m) \quad (5)$$

式中: $\lambda_1(k, m)$ 为第 $k$ 个子系统、第 $m$ 个分指标相对于指标层的权重。

(2) 协调系数计算。取各子系统各部门的供水量与需水量之比表征区域需水与供水之间的协调性。协调性作为模糊概念,用其隶属函数 $\mu_A$ 表示协调程度:

$$r_2(k, m) = \mu_A[r'_2(k, m)] \quad (6)$$

式中:  $r'_2(k, m) = \frac{S_u(k, m)}{D_e(k, m)}$ ,  $S_u(k, m)$  为第  $k$  个协调指标、第  $m$  个用水部门的供水量;  $D_e(k, m)$  为第  $k$  个协调指标、第  $m$  个用水部门的需水量。

隶属度函数选择为:

$$\mu_A = \begin{cases} 1.0 & r'_2(k, m) \geq r'_2(k, m)^* \\ \exp\left[-\left(\frac{r'_2(k, m) - r'_2(k, m)^*}{\sigma(k, m)}\right)^2\right] & \\ r'_2(k, m) < r'_2(k, m)^* & \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r'_2(k, m)^*$  是反映供需比的理想值,这里取 1.0;  $\sigma(k, m)$  反映隶属度函数的离散程度,这里对于生活用水取  $\sigma = 1/5$ ,工业用水  $\sigma = 1/4$ ,生态及农业用水  $\sigma = 1/3$ 。

区域协调系数可按(8)式计算:

$$S_2(x) = \sum_{k=1}^3 \sum_{m=1}^M \lambda_2(k, m) r_2(k, m) \quad (8)$$

式中:  $\lambda_2(k, m)$  指第  $k$  个协调指标、第  $m$  个分指标相对于指标层的权重。

(3) 公平系数计算。根据评价指标体系,公平准则层由反映水资源使用公平程度的指标和发展公平程度的指标组成。前者为分区实际出境水量与国家规定出境水量之比;后者为分区发展系数与整个流域发展系数之比。

公平系数与协调系数同样是一个模糊概念,用其隶属函数 $\mu_B$ 表示公平程度,隶属度函数的形式与(7)式一致,这里取  $r'_3(j, k)^* = 1.0$ ,  $\sigma(j, 1) = 1/2$ ,  $\sigma(j, 2) = 1/3$ 。

由于公平指标层下只有一个分指标,因此区域公平系数可按式(9)计算:

$$S_3(x) = \sum_{k=1}^2 \lambda_3(j, k) r_3(j, k) \\ = \sum_{k=1}^2 \lambda_3(j, k) \mu_B[r'_3(j, k)] \quad (9)$$

(4) 可持续发展系数的计算。按照(10)式对发展系数、协调系数和公平系数进行加权求和得到可持续发展系数,可持续发展系数越大,说明区域水资源可持续发展程度越高。

$$S(x) = \sum_{i=1}^3 \omega_i S_i(x) \quad (10)$$

(5) 指标权重的确定<sup>[11]</sup>。利用层次分析法建立判断矩阵  $A(a_{ij})_{n \times n}$ , 矩阵元素的取值见表 3, 重要程度相反者取标值的倒数, 即矩阵元素满足  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 。在相邻等级之间可用 2、4、6、8 或其倒数折中量化, 各指标的权重采用(11)式计算。

$$\lambda_i = \sum_i a_{ij} / \sum_j \sum_i a_{ij} \quad (11)$$

表 3 判断矩阵标值

指标比较	相同重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要
标值	1	3	5	7	9

4.2.3 方案择优与分析 由于篇幅限制,研究以 2020 年的金昌市水资源配置结果进行方案优选。采用层次分析赋权重法得到子函数权重判断矩阵  $A = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 5 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$ , 求得权重向量  $\omega = (0.643, 0.229, 0.128)$ 。根据(5)~(11)式计算得到各方案目标函数的结果如表 4。

表 4 2020 年不同方案组合集的评价计算结果

方案	发展系数	协调系数	公平系数	可持续发展
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	系数 $S_4$
方案 A	1.0139	0.9952	0.9986	1.0077
方案 B	1.0170	0.9989	0.9989	1.0105
方案 C	1.0183	1.0000	0.9998	1.0117

由表 4 计算结果易见,方案 C 的各项系数均大于前两种方案,故 C 方案是可持续发展程度最高的方案。该方案发展系数最大,说明在此方案下不仅社会经济得到发展,生态环境也得以恢复改善;协调系数为 1.0,说明各用水部门与水资源系统之间达到协调,不存在缺水问题;公平系数也趋于 1.0,说明在此方案下区域上下游用水基本公平,下游用水户对水资源的调配作用日趋明显。

因此,调整产业结构,压减农业种植面积;增加外调水源,提高污水回用能力;推广节水技术,提高公民节水意识是金昌市实现水资源可持续发展切实可行的模式。

在方案 C 下,2020 和 2030 年金昌市用水总量分别是 6.29 亿和 6.67 亿  $m^3$ ,分别是本地区水资源总量的 109.7% 和 97.5%,较现状年的 123.2% 明显降低;各行业用水结构分别见图 4 和图 5,农业用水总量“一头沉”的现象明显削弱,实现了水资源向低消耗、高产出的行业转移。

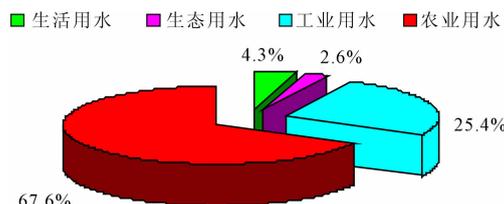


图4 2020年金昌市用水结构

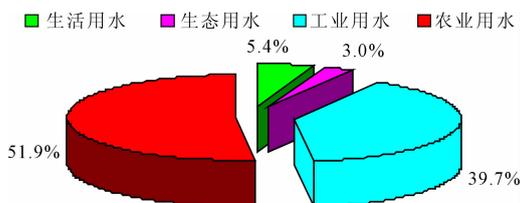


图5 2030年金昌市用水结构

## 5 结 语

基于水资源可持续发展理念,结合 WEAP 的预测决策功能模拟计算了金昌市水资源配置方案,利用大系统分层模糊优化理论提出了水资源配置方案的评价模型。从发展程度、协调程度和公平程度全面考虑区域水资源的配置,采用水资源可持续发展系数最大的方案 C 作为金昌市水资源配置的最优方案。在该方案下,金昌市水资源承载能力逐年增强,用水结构得以改善,区域的发展程度、用水协调程度和公平程度日趋见长。研究构建的水资源优化配置模型具有良好的合理性与可行性,对石羊河流域乃至其他区域的水资源优化配置研究和水资源可

持续发展程度的评估具有借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 郑亚新. 面向 21 世纪的特德哥尔摩水会议[J]. 资源科学, 1994, 16(5): 78-79+7.
- [2] 李丽琴, 谢新民, 韩剑桥, 等. 面向可持续发展的水资源优化配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(1): 15-18+22.
- [3] 徐志侠, 陈敏建, 董增川. 河流生态需水计算方法评述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(1): 5-9.
- [4] 甘肃省水利厅, 甘肃省发展和改革委员会. 石羊河重点治理规划[R]. 2007.
- [5] 胡立堂, 王忠静, Robin Wardlaw, 等. 改进的 WEAP 模型在水资源管理中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 173-179.
- [6] 宋瑞勇, 刘青勇, 徐征和, 等. 基于 WEAP 模型的龙口市水资源优化配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(4): 30-33+40.
- [7] 邓洁, 贺康宁. 基于生态需水的威海市水资源配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 40-43.
- [8] 李飞, 贾屏, 张运鑫, 等. 区域水资源可持续利用评价指标体系及评价方法研究[J]. 水利科技与经济, 2007, 13(11): 826-828.
- [9] 宋松柏, 蔡焕杰. 区域水资源可持续利用的 Bossel 指标体系及评价方法[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 68-74.
- [10] 张丽. 水资源承载能力与生态需水量理论及应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
- [11] 马建琴, 张振伟. 农业水资源优化配置模糊集分析决策模型研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.

(上接第 178 页)

(3) 采用 LA 新型分散剂不但降低了浆液的漏斗粘度, 增强浆液可灌性, 而且可以延长浆液的初凝时间, 也就是延长浆液的可操作时间。

## 参考文献:

- [1] 张贵金, 许毓才, 陈安重, 等. 一种适合松软地层高效控制灌浆的新工法-自下而上, 浆体封闭, 高压脉动灌浆[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 38-41.
- [2] 刘孔凡, 焦莉莉. 普通水泥稳定浆液的研究[J]. 水利水电技术, 1998, 29(12): 48-50.
- [3] 饶香兰. 稳定水泥浆的研究与应用[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 2-4.
- [4] 边明昌. 抗硫酸盐水泥使用中应当注意的问题[J]. 交通

世界(建养机械), 2009(1): 98.

- [5] 刘伟区, 罗广建. 羟丙基甲基纤维素作为水泥添加剂研究(四)[J]. 广州化学, 1995(2): 30-35.
- [6] 陈建奎. 混凝土外加剂原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
- [7] Hekal E E, Kishar E, Mostafa H. Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(9): 1421-1427.
- [8] Chindaprasirt P, Kanchanda P, Sathonsaowaphak A, et al. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1356-1361.