

河西走廊石羊河流域民勤县水资源优化配置研究

李晓洋,成自勇,张 芮,张云亮,周继莹

(甘肃农业大学工学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 将民勤县的用水部门分为农业、工业、生活、生态四个方面。运用德菲尔结合变异系数法分别得出各部门的综合效益系数为:0.238、0.280、0.209、0.272;代入线性规划目标方程得到三个典型年的不同部门的最优配置方案为(亿 m^3):枯水年:农业 2.222、工业 0.1616、生活 0.082、生态 1.5677;平水年:农业 2.223、工业 0.1616、生活 0.082、生态 1.8390;丰水年:农业 2.223、工业 0.1616、生活 0.082、生态 1.8394。采用熵变原理验证该方案的可行性。结果表明:生态水量占总水量的 38.87%~42.72%,远高于现行配置方案的 18.92%。将 2010 与 2020 年的数据代入计算得熵值分别为 3.62、3.49,呈减小趋势,说明方案可行。

关键词: 水资源优化配置;变异系数法;线性规划;民勤县

中图分类号: S273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)03-0217-05

Study of optimal allocation of water resource in Minqin County of Shiyang River Basin

LI Xiao-yang, CHENG Zi-yong*, ZHANG Rui, ZHANG Yun-liang, ZHOU Ji-ying

(School of Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: There are four sectors in Minqin County that respectively control and manage the use and allocation of water resources in agriculture, industry, urban and rural resident's daily life, and ecology. Using Defei Er combined with variation coefficient to calculate comprehensive benefit coefficient of these four sectors. The calculated values for these four sectors were 0.238, 0.280, 0.209, and 0.280, respectively. Applied them into linear programming equations for optimal allocation scheme, the results showed that optimal allocation scheme for different departments at three typical levels were (10^8 m^3): dry year: agriculture: 2.222, industry: 0.1616, residents daily life: 0.082, ecology: 1.5677; average year: agriculture: 2.223, industry: 0.1616, residents daily life: 0.082, ecology: 1.8390; wet year: agriculture: 2.223, industry: 0.1616, residents daily life: 0.082, ecology: 1.8394. The Entropy Change Principle was utilized to evaluate the feasibility of these allocation schemes. The results showed that ecological water accounted for 38.87%~42.72% of total water, far more than 18.92% of current allocation scheme. The calculated entropy values of 2010 and 2020 years were 3.62 and 3.49, showing a decrease trend, which indicated the scheme was proved feasible.

Keywords: water resource optimal allocation; variation coefficient; linear analysis; Minqin County

流域水资源优化配置是指针对水的稀缺性和水资源利用所引发的问题,人们重新审视水资源的利用模式。1960 年科罗拉多的几所大学对计划蓄水量的估算及满足蓄水量途径的研讨首次体现了水资源优化配置的思想。随后有麻省理工大学研制的阿根廷 Rio Colorado 流域的水资源管理模型、荷兰学者 Romijn E, Taminga M 建立的 Elderlandt Doenthe 水资源配置多目标模型^[1]。20 世纪 80 年代后期,“新疆

水资源及其承载能力和开发战略对策”课题组首次涉及到水资源分析方法^[2],随后贺北方^[3]建立了区域可供水资源优化分配的大系统逐级优化模型,吴泽宁^[4]、聂相田^[5]、辛玉生^[6]相继提出了区域水资源配置的多目标宏观决策分析方法。由于水资源系统涉及经济、社会、技术和生态环境的各方面,是复杂的巨系统,是可持续发展战略实施的关键,因此对水资源配置提出了更高的要求,水资源优化配置也不

收稿日期:2013-02-27

基金项目:甘肃省教育厅研究生导师项目(0902-02)

作者简介:李晓洋(1988—),女(汉族),甘肃兰州人,在读硕士,研究方向为生态水利、水资源规划利用。E-mail: lixiaoyanglee@126.com。

* 通信作者:成自勇(1956—),男(汉族),甘肃秦安人,教授,博导,研究方向为生态水利、水土保持与荒漠化防治。E-mail: chengzy@gsau.edu.cn。

断面临新的挑战。

近 50 年以来,石羊河流域中下游地区水资源使用模式往往过分顾及生产用水,强调经济用水所带来的经济价值,忽视了水的生态功能和生态价值,出现过度开采地下水的现象,导致区域地下水位严重下降、植被严重退化、水土平衡严重失调、沙漠化趋势加剧,严重威胁绿洲的生态安全,也对区域和相邻地区的生态安全造成重大影响。本文针对石羊河流域用水现状,从生态用水的角度出发进行民勤县水资源优化合理配置,旨在保证生态效益的前提下实现该区经济、社会和生态的持续稳定发展。

1 研究区概况

民勤县位于甘肃省河西走廊东部,石羊河流域下游,其东北被腾格里沙漠包围,西北有巴丹吉林沙漠环绕,中部由石羊河冲积成狭长而不平坦的绿洲带,是我国典型的荒漠绿洲之一^[7]。全县面积约 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中沙漠、戈壁占 82%,中、低山区占 5%,湖盆盐碱地占 4%,绿洲农田仅占全县总面积的 9%。民勤县多年平均降雨量为 110 mm 左右,年内降水极不均匀,7~9 月降水量最多占全年的 66%,多年平均蒸发量为 1 775.6 mm (E601 蒸发皿)。多年平均气温为 7.8℃,极端最高气温 41℃,最低气温 -27.3℃,平均气温日较差 15.2℃。民勤县地处温带干旱荒漠气候区,夏热冬寒,气候干旱,降水量稀少,蒸发量大,风大且频繁,干燥度大于 4,为全国最干旱地区之一。民勤县基本无地表径流产生,仅有的地表水资源是由南部凉州区的灌溉余水、下泄洪水和部分泉水汇入石羊河进入红崖山水库的水量。根据《石羊河流域重点治理规划》中地表水的调水资料,预测 2020 年枯水年总的地表水来水量为 30 948.12 万 m^3 ,平水年为 33 955.81 万 m^3 ,枯水年为 33 961.43 万 m^3 ,允许开采地下水为 12 000 万 m^3 ,预留水量为 2 648 万 m^3 。民勤县土地完全沙漠化无法耕种的面积达 866.67 hm^2 ,另外还有近 5 333.33 hm^2 土地产生了不同程度的沙化,尽管这些土地尚可利用,而且部分已得到利用,但沙漠化趋势和危害依然存在。

2 研究方法

确定目标函数方程,运用德菲尔结合变异系数法计算函数方程式中未知项的综合效益系数,其中客观综合效益系数的计算采用变异系数法;主观综合效益系数的计算采用专家打分法。然后将客观综合效益系数主观综合效益系数相加归一化后得到实

际组合综合效益系数。线性规划后得到满足条件的目标函数的最优解,根据熵变原理,对水资源系统演变方向进行判别,从而对配置方案进行可行性评价。

2.1 净效益系数的确定

2.1.1 农业用水净效益系数 采用系数分摊法计算,计算公式如下:

$$b_1 = \frac{\Delta y_j \cdot p_j \cdot \epsilon_i}{M_j} \quad (1)$$

式中, b_1 为第 j 种作物某一水文年的灌溉增产效益系数(元· m^{-3}); Δy_j 为第 j 种作物单位面积平均增产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ϵ_i 为灌溉效益分摊系数,取 0.6; p_j 为第 j 种作物单价(元· kg^{-1}); M_j 为第 j 种作物的灌溉定额($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.1.2 工业用水净效益系数 同样采用系数分摊法计算:

$$b_2 = \frac{10000}{D_j} \cdot g_j \cdot f_j \quad (2)$$

式中, b_2 为第 j 用户用水净效益系数(元· m^{-3}); D_j 为第 j 用户万元产值综合用水定额($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$); g_j 为第 j 用户净效益分摊给用水部门的比例系数; f_j 为第 j 用户净效益与产值的比例系数。

2.1.3 生活用水净效益系数 其值很难用数值进行定量描述,为便于综合评价,本研究采用生活用水效益按供水工程的理论价格进行估算。计算公式为:

$$b_3 = p_j - c_j \quad (3)$$

式中, b_3 为城镇或农村生活用水效益系数(元· m^{-3}); p_j 为城镇或农村生活用水理论价格(元· m^{-3}); c_j 为城镇或农村生活用水供水成本(元· m^{-3})。

2.1.4 生态环境用水净效益系数 用自然生态系统为人类社会提供服务的价值量,减去人类通过污染治理和生态建设等各种形式为维护自然生态系统平衡所需的资本投入量,然后除以生态环境最小用水量,作为生态环境用水净效益系数^[2]。不考虑环境突发事件。计算公式如下:

$$b_4 = \frac{V - C}{w_{\min}} \cdot \beta \quad (4)$$

式中, b_4 为城镇或农村生活用水供水成本(元· m^{-3}); V 指生态系统服务功能价值; C 为维持自然生态平衡的投入资本; $w_{\min}$ 生态环境最小用水量; β 为分摊系数。

将实际数据分别代入相应的公式中计算得农业、工业、生活用水净效益系数分别为 $b_1 = 0.28 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $b_1 = 0.32 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $b_3 = 0.42 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。生态

用水净效益系数的计算结果与农业用水净效益相近,略低。根据当地的生态状况,水资源严重缺乏,蒸发量大,生态系统受损,并且生态效益随时空的变换在不断的变化,所以暂取 $b_4 = 0.27 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。分摊系数取 $0.6^{[8]}$ 。

2.2 综合效益系数的确定

设有 n 个样本 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 对于样本 j 有 m 个评价指标 $x_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})^T$, 使原始数据构成如下矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

设 x_j 为第 j 个指标, $j = 1, 2, \dots, n$; $x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}$ 为 m 个方案关于该指标的实际值, 如果是效益型指标, 采用公式(6) 对其进行标准化处理:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}} \quad (6)$$

如果是成本型指标, 可采用公式(7) 对其进行标准化处理^[9]:

$$r_{ij} = \frac{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}} \quad (7)$$

得到标准化矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

采用德菲尔和变异系数法相结合计算综合效益系数, 即客观综合效益系数采用变异系数法, 主观综合效益系数采用专家打分法, 最终的综合效益系数等于两者之和归一化后的结果。此法不但考虑了决策者对各指标的主观偏好, 而且考虑了决策数据所提供的差异性信息, 是一种较为合理的研究方法, 把在研究过程中有些不能定量描述的动态指标, 给出较为切合实际的描述, 客观、主观意见相结合, 较为具有实际意义和说服力。

(1) 由变异系数法可得到客观综合效益系数 $\omega_1^{(2)}, \omega_2^{(2)}, \dots, \omega_n^{(2)}$, 这组综合效益系数可由公式(8) 求得

$$\omega_j^{(2)} = \frac{S_{y_j}}{y_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}, S_{y_j} = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中, $\omega_j^{(2)}$ 为变异系数法计算的综合效益系数; $\bar{y}_j$ 为样本均值; S_{y_j} 为样本标准差。

(2) 由专家打分法得到主观综合效益系数: 由德菲尔方法^[4] 得到主观综合效益系数为 $\omega_1^{(1)}, \omega_2^{(1)}, \dots, \omega_n^{(1)}$ 。

设组合综合效益系数为 $\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_n$, 则组合综合效益系数为客观和主观综合效益系数之和, 由(10) 式计算:

$$\omega'_j = \omega_j^{(1)} + \omega_j^{(2)}, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

将得到的组合综合效益系数进行归一化处理, 最终得到所需的组合综合效益系数 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 。将该组合综合效益系数代入设定的优化配置模型中。

2.3 优化配置模型

水资源优化配置模型: 以各项综合效益之和最大化为目标函数, 在限制条件的约束下, 使得各用水部门的用水量乘以相对应的综合效益系数之和最大, 求得此时的最优解向量 $(q_i, i = 1, 2, \dots, n, n > 0)$, 即为最优解。

$$\max E = \sum_i \omega_i q_i = \omega_1 q_1 + \omega_2 q_2 + \omega_3 q_3 + \omega_4 q_4 \quad (11)$$

水量约束:

$$\begin{aligned} d_{1\min} &\leq q_1 \leq d_{1\max} \\ S.T. \quad d_{2\min} &\leq q_2 \leq d_{2\max} \\ d_{3\min} &\leq q_3 \leq d_{3\max} \\ d_{4\min} &\leq q_4 \leq d_{4\max} \end{aligned} \quad (12)$$

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \leq \sum_{j=1}^n Q_j, q_1, q_2, q_3, q_4 \geq 0 \quad (13)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为农业、工业、生活、生态环境用水的综合效益系数; q_1, q_2, q_3, q_4 分别为农业、工业、生活、生态环境的配水量; $d_{i\min}, d_{i\max} (i = 1, 2, 3, 4)$ 分别为农业、工业、生活、生态环境需水量的下

限和上限; $\sum_{j=1}^n Q_j$ 为来水总量。

$$\text{非负约束: } q_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

2.4 水资源配置合理性评价模型

上述水资源配置方案只给出用水部门的配置方案, 但不能对该配置方案的合理性进行评价。只有整个系统合理有序稳定地演变, 才能取得整体功能的可持续发展。根据熵变原理, 对水资源配置方案的演变方向进行判别, 进而对配置方案的合理性进行评价^[10]。系统的演变方向通常用熵变关系判别^[11-19]。水资源系统它符合耗散结构的要求, 遵从耗散结构

的演变规律,由此可以利用耗散结构中熵变与系统有序性的关系,对水资源系统的演变方向进行判别。

根据熵的定义,可将水资源系统的熵定义为:

$$S(t) = k_b \lg \frac{1}{PW(t) / [WPO(t)(1 + i_s)^t]} \tag{15}$$

式中, $S(t)$ 为第 t 年水资源系统的熵; k_b 为波尔兹曼常数; $WPO(t)$ 为第 t 年的水资源利用潜力(m^3); $PW(t)$ 为第 t 年的水资源净效益(万元); i_s 为折现率。

式(15)定量描述了水资源系统的熵值、水资源利用潜力和水资源净效益之间的关系。当 $S(t) > S(t + 1)$ 时,系统熵为减少趋势,说明系统处于良性循环状态;当 $S(t) < S(t + 1)$ 时,系统熵为增加趋势,水资源配置不合理;当 $S(t) = S(t + 1)$ 时,表明系统熵在一定时间段内无变化,说明系统在此时段内为稳定状态,水资源配置趋于合理^[6]。

3 民勤县水资源优化配置

利用上述方法对民勤县进行水资源优化配置及评价。综合考虑该地区的协调发展,选取能代表经济、社会、生态三方面的因子综合评价:净效益系数代表经济指标,供水成本代表社会指标,水利用系数代表生态指标。

(1) 客观综合效益系数的计算:

根据表 1 中的数据建立矩阵,因为是效益型指标,所以采用公式(6)进行标准化。标准化后得到矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 0.055 & 0.313 & 1.000 & 0.000 \\ 0.461 & 0.000 & 0.143 & 1.000 \\ 0.999 & 0.000 & 0.084 & 1.000 \end{bmatrix}$$

采用变异系数法计算结果见表 1。

表 1 各用水部门定量指标数值

Table 1 The quantitative index value of water department

用水指标 Water Index	农业 Agriculture q_1	工业 Industry q_2	生活 Life q_3	生态 Ecology q_4
净效益系数(元·m ⁻³) Net benefit coefficient	0.280	0.32	0.420	0.270
水利用系数 Water utilization coefficient	0.610	0.45	0.500	0.780
供水成本(元) The cost of water supply	0.308	3.46	3.195	0.306

注:表中水利用系数、用水定额参考 2007 年甘肃省水利厅制定的“2010—2020 年石羊河流域重点治理规划”。

Note: The water utilization coefficient and irrigation quota in the table reference “Shiyang River Basin Management Plan for 2010—2020” by Gansu Provincial Water Resources Department in 2007.

由矩阵 R 中的数据计算得:

$$\omega_1^{(2)} = \frac{S_{y_1}}{y_1}, S_{y_1} = 0.3866, S_{y_2} = 0.1475, S_{y_3} = 0.4186, S_{y_4} = 0.4714; \overline{y_1} = 0.5053, \overline{y_2} = 0.1043, \overline{y_3} = 0.4090, \overline{y_4} = 0.6667$$

$$\omega_1^{(2)} = 0.196, \omega_2^{(2)} = 0.362, \omega_3^{(2)} = 0.262, \omega_4^{(2)} = 0.181 \text{ (见表 2)}$$

(2) 主观综合效益系数的计算结果(见表 2)。

(3) 组合综合效益系数: $\omega'_j = \omega_j^{(1)} + \omega_j^{(2)}, \omega'_1 = 0.476, \omega'_2 = 0.560, \omega'_3 = 0.419, \omega'_4 = 0.545$

将其归一化后的结果即为综合效益系数: $\omega_1 = 0.238, \omega_2 = 0.280, \omega_3 = 0.209, \omega_4 = 0.272$ (见表 2)。

表 2 德菲尔方法计算综合效益系数结果

Table 2 The comprehensive efficiency coefficient by using Defei Er calculation

计算指标 Calculating indicators	农业 Agriculture	工业 Industry	生活 Life	生态 Ecology
专家打分 Expert scoring	0.281	0.199	0.157	0.364
变异系数法计算 The coefficient of variation method results	0.196	0.362	0.262	0.181
综合效益系数 The comprehensive efficiency coefficient	0.238	0.280	0.209	0.272

表 3 各个用水部门用水上、下限

Table 3 Water floor and water cap of water department

指标 Index	农业 Agriculture	工业 Industry	生活 Life	生态 Ecology
用水下限(10 ⁸ m ³) Water consumption minimum	2.23	0.09	0.05	0.54
用水上限(10 ⁸ m ³) Water consumption maximum	4.15	0.16	0.08	3.39

注:(1) 农业灌溉定额和灌溉面积参考甘肃省水利厅、武威市水利管理局联合制定的“2010—2020 年甘肃省民勤县红崖山灌区续建配套与节水改造规划报告”;(2) 生态用水上、下限参考 2007 年甘肃省水利厅制定的“2010—2020 年石羊河流域重点治理规划”。

Note: (1) The data of agriculture irrigation quota and irrigation area reference “The Regulation of Mating Planning for Constantly Construction and Rebuilding Planning for Water-saving in Hongya mountain, Minqin County, Gansu Province for 2010—2020, which was formulated by Gansu Provincial Water Resources Department and Wuwei Water Resources Authority in 2008; (2) The upper and lower limits of ecological water in the table reference “Shiyang River Basin Management Plan for 2010—2020, which was formulated by Gansu Provincial Water Resources Department in 2007.

将表 2 数据代入目标函数中:

$$\max E = \sum_i \omega_i q_i = 0.238 q_1 + 0.280 q_2 + 0.209 q_3 +$$

0.272 q_4

依据民勤县不同典型年可用水量、各部门用水上、下限的水量作为约束条件。

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \leq 43052.25(\text{平水年})$$
$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \leq 40329.31(\text{枯水年})$$
$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \leq 43056.09(\text{丰水年})$$

经线性规划求解得到各个典型年农业、工业、生活、生态所得到的最优分配水量,结果见表(4)。

代入评价模型中, $k_b = 1.3806515 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{k}^{-1}$, 2010 年水资源利用潜力为外调水增加值和农业、工业、生活用水部门所采用节水设施后结余的水量,参考《石羊河流域重点治理规划》、《武威市行业用水规范》计算得 $1.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2020 年水资源利用潜力只包括通过节水技术和设施的水量,估算为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。代入公式(15)计算得到 2010 年到 2020 年水资源系统熵分别为 3.62 和 3.49,呈减小趋势,说明在该配置方案下,水资源配置总体合理,具有可持续性。

表 4 水资源优化配置结果
Table 4 The optimized allocation result of water resources

典型年 Typical years	频率/% Frequency	农业/ 10^8 m^3 Agriculture	工业/ 10^8 m^3 Industry	生活/ 10^8 m^3 Life	生态/ 10^8 m^3 Ecology	总效益/ 10^4 万元 Total benefit
枯水年 Dry years	75	2.222	0.1616	0.082	1.5677	1.1316
平水年 Average years	50	2.223	0.1616	0.082	1.8390	1.2071
丰水年 Wet years	25	2.223	0.1616	0.082	1.8394	1.2071

4 结 语

本文应用德菲尔法和变异系数法分析农业、工业、生活、生态用水综合效益系数,该方法结合主观和客观的影响因素,比单纯的公式表达更贴切实际情况;采用线性规划法求得用水部门的水量分配,该法与复杂的数学模型相比,方法简单,具有更强的可操作性和直观性;最后采用熵变原理对水资源系统演变方向进行判别,评价配置方案的合理性;以民勤县为例,针对民勤县当地生态用水矛盾激化的实际情况,在保证生态环境良性循环的前提下协调经济发展,研究提出了不同典型年水资源优化配置方案,生态水量占总水量的 38.87% ~ 42.72%,远高于现行配置方案的 18.92%。熵值分析呈减小趋势,说明该优化配置方案合理可行。经与民勤县现行的水量分配比较(现行农业用水 31 855.60 万 m^3 ,工业用水 2 508.4 万 m^3 ,生活用水 1 274.51 万 m^3 ,林草用水量 8 321.5 万 m^3),采用优化配置模型分析所得的水量分配方案更具有生态效益,符合当地可持续发展的需要。但是为了尽快恢复当地的生态状况,生态用水的比例应该继续增大,解决用水矛盾的主要方法是提高各行业的水利用系数,降低单位用水定额,将富余的水资源投入生态补给中,如此才能保证该地区的可持续繁荣发展。

参 考 文 献:

[1] 吴泽宁,索立生.水资源优化配置研究进展[J].灌溉排水学报,2004,23(2):1-4.
[2] 新疆水资源软科学课题研究组.新疆水资源及其承载能力和开

发战略对策[J].水利水电技术,1989,(6):1-9.
[3] 贺北方.区域可供水资源优化分配的大系统优化模型[J].武汉水利电力学院学报,1988,(5):109-108.
[4] 吴泽宁,蒋水心,贺北方.经济区水资源优化分配的大系统多目标分解协调模型[J].水能技术经济,1989,(1):1-6.
[5] 聂相田,丘林,朱普生,等.水资源可持续利用管理不确定性分析方法及应用[M].郑州:黄河水利出版社,1999.
[6] 辛玉深,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.
[7] 张鑫,蔡焕杰,杨秀英,等.石羊河民勤县需水量与水资源生态重建模式研究[R].西北农林科技大学水利与建筑工程学院,甘肃武威市水利科学研究所,2002.
[8] 张鑫,蔡焕杰,等.区域生态环境需水量与水资源合理配置[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2008.
[9] 谭跃进.定量分析方法[M].北京:中国人民大学出版社,2002.
[10] 王志良,邱林,等.水资源管理多属性决策与风险分析理论方法及应用研究[M].郑州:黄河水利出版社,2007.
[11] 邵东国,贺新春,黄显锋,等.基于净效益最大的水资源优化配置模型与方法[J].中国水利,2005,36(9):1050-1056.
[12] 冯尚友.水资源持续利用与管理导论[M].北京:科学出版社,2000.
[13] 谢新民,张海庆,尹明万.水资源评价及可持续利用规划理论与实践[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
[14] 王浩,王建华,秦大庸.流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J].水科学进展,2004,15(1):123-128.
[15] 徐方军.水资源配置的方法及建立水市场应注意的一些问题[J].水利水电技术,2001,32(8):6-8.
[16] Walmsley JJ. Market forces and management of water for environment[J]. Water SA,1995,21(1):43-50.
[17] 左其享,陈曦.面向可持续发展的水资源规划与管理[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
[18] WECD. Our common future-from one earth to one world[M]. London: Oxford University Press,1987.
[19] 畅建霞,黄强,王义民,等.基于耗散结构理论和灰色关联熵的水资源系统演化方向判别模型研究[J].水利学报,2002,(11):107-112.