

基于 WRMM 模型的水资源配置及方案优选研究

李承红, 姜卉芳, 何英, 穆振侠

(新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 研究克拉玛依市水资源配置方案优选。通过建立 2005 年克拉玛依市水资源配置模型, 选取 13 个方案对克拉玛依市水资源进行模拟; 在充分考虑社会、经济、环境、资源利用等因素的基础上, 构建了水资源配置方案评价指标体系, 利用层次分析法, 分析各个指标的权重, 并对 2005 年克拉玛依市水资源配置方案进行优选。结果表明: WRMM 模型适用于克拉玛依市水资源的配置, 层次分析法优选结果符合克拉玛依市水资源配置执行方案。

关键词: 水资源管理模型; 层次分析法; 水资源配置; 克拉玛依市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)03-0032-07

Allocation of water resources and scheme optimization based on WRMM model

LI Chenghong, JIANG Huifang, HE Ying, MU Zhenxia

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The paper studied the optimization of water resources allocation scheme in Karamay. Through establishing the model of water resources allocation of Karamay in 2005, it selected 13 programs to simulate water resources in Karamay; based on full consideration of society, economy, environment, resource utilization, the paper built the evaluation index system of water resources allocation scheme. by use of the analytic hierarchy process (AHP), it analyzed the weight each index and optimized water resources allocation scheme of Karamay in 2005. The results showed that the WRMM model is applicable to the allocation of water resources in Karamay, the results optimized by analytical hierarchy process is in line with the implementation program of water resources allocation in Karamay.

Key words: water resource management model; analytic hierarchy process (AHP); water resources allocation; Karamay

水资源的充分利用严重影响自然系统、经济系统和社会系统的协调发展, 克拉玛依市地处沙漠西部, 常年干旱少雨, 水资源严重制约着地区各行各业的发展, 合理的进行水资源配置, 可以有效地缓解社会、经济、环境以及资源之间的矛盾。

水资源优化配置方法主要分优化方法和模拟方法, 其中优化方法的发展从线性规划、动态规划到如今的遗传算法^[1]和神经网络^[2]不断发展, 配置目标函数也从单目标演变为多目标优化模型, 在各个地区的水资源配置中应用比例不断增加^[1,3]。另外模拟模型中 WRMM 模型运用广泛, 在塔里木河流域、

黄河流域、乌鲁木齐、阿克苏、玛纳斯流域等都有应用, 并且模型运行结果理想, 符合当地的水资源配置要求^[4-8]。Bennett 等^[9]在阿尔伯塔省南部灌区赤字的情况下, 建立农田灌溉需水系统 (IDM), 作为 WRMM 模型中的灌溉模块, 得到灌溉供水价值, 再结合农场财务和影像模型 (FFIRM), 通过提高灌溉水的效率, 负面影响的风险得到遏制。Islam 等^[10]在南萨斯喀彻温省流域, 建立了土壤、生物圈、大气圈 MISBA 模型、灌区需水 IDM 模型、水资源管理 WRMM 模型相互作用的模型, 来评估南萨斯喀彻温省流域的水资源未来的发展。本文将 WRMM 模型

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2016-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51209181、51469034); 新疆农业大学水利工程博士后经费资助项目; 新疆自治区地方公派出国留学成组配套项目 (XJDF201307); 新疆水文学及水资源重点学科基金项目 (xjswszydsk20101202)

作者简介: 李承红 (1988-), 女, 新疆库尔勒人, 硕士, 研究方向: 水文学及水资源。

通讯作者: 何英 (1982-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 研究方向: 水文学及水资源。

运用到克拉玛依市的水资源配置中,为克拉玛依市水资源配置提供新方法、新技术。

目前水资源方案评价的研究方法较多,比如模糊识别^[11]、概率神经网络^[12]、投影寻踪^[13]、集对分析^[14]等方法,其中由于层次分析法计算简单、方法有效而成为讨论水资源配置的各因素权重最常见的方法之一。陈文艳等^[11]以海河流域为例进行水资源配置方案评价,模糊识别模型,最初的考虑多指标多系统的择优方法。采用王为人等^[15]将层次分析法(AHP)运用到对生活、农业、产业、生态四类不同性质用水的权重的测算,使得流域水权分配具有了可操作性。易丽萍^[16]通过层次分析法对新疆阿克苏地区的水资源开发利用现状各因子进行评价分析,各个因子的权重排序对阿克苏的水资源发展提供了借鉴和参考。符传君^[17]通过改进的层次分析法,充分考虑经济、社会、环境等因素,共建立了6个指标,对海南省水资源配置方案提出优选建议。通过建立目标层、准则层和指标层多层次,多系统的评价出绝对的最佳方案,进行反复配置,得到满意的答案^[18]。本文建立的克拉玛依市水资源方案评价体系包含4个准则层9个指标层的指标,通过层次分析法优选水资源配置方案。

1 研究区概况

克拉玛依市是一个由石油基地发展起来的城市,地理坐标:东经 84°44′~86°01′,北纬 44°07′~46°08′,下辖克拉玛依、独山子、白碱滩、乌尔禾 4 个行政区。克拉玛依市座落在准噶尔盆地西北边缘的断裂带上,整个市域地势呈西北高,东南低,为典型的大陆性气候,干燥少雨,年均降水量为 109 mm,多集中在 5-8 月,年蒸发量平均在 2958 mm(Φ20 cm 蒸发皿)。

克拉玛依市经济的显著特点是大工业、小农业,农牧副业为石油工业服务,在水资源配置中,工业供水的保证也就显得尤为重要。2005 年克拉玛依市的 3 种产业结构比例为 0.42: 88.68: 10.90,第二产业在克拉玛依市产业结构中的比重最高,第二产业也是克拉玛依市发展的主要产业。在 2005 年克拉玛依市三产业的 GDP 比例 0.38: 84.13: 15.49,第二产业在 GDP 中的比重远远高于其他产业,是克拉玛依市经济发展的重心。

2 克拉玛依市水资源配置

本文采用 WRMM 模型构建克拉玛依市水资源

优化配置模型,克拉玛依市水资源优化配置模型包括 WRMM 模型、概化系统图、供水数据和需水数据,其中 WRMM 模型和概化系统图是克拉玛依市水资源优化配置模型的重点,也是模型运行的重要保证。

2.1 WRMM 模型

WRMM(Water Resource Management Model)是由加拿大阿尔伯特省水资源专家开发研制的水资源管理模型,在加拿大 Alberta 省和 Saskatchewan 省已经使用了 20 多年。它是一个水平衡模型,在大尺度流域水资源管理方案分析中作用效果明显。自 1999 年,由“塔里木河流域水资源管理模型”引入塔里木河流域,模型模拟了塔里木河流水资源的时空分布,并且评估了不同水资源分配策略对塔里木河的影响^[4]。随后 WRMM 模型不断发展,何英又将“三次平衡”的思想与 WRMM 模型相结合,并为乌鲁木齐水资源配置提供推荐方案^[19]。随后,何英等^[20]克服了 WRMM 模型中地下水源与地表水源之间的转换问题。姚安琪等^[21]将 WRMM 模型中罚值系统进行定量分析,并应用于单一水源的流域,解决了分水政策和罚值之间的关系。WRMM 的不断发展,说明 WRMM 模型在水资源配置中的具有独特的优势。

2.1.1 WRMM 模型结构 WRMM 模型包括 3 个模块,分别是输入模块、仿真模块、输出模块。WRMM 模型仿真结构图,见图 1。

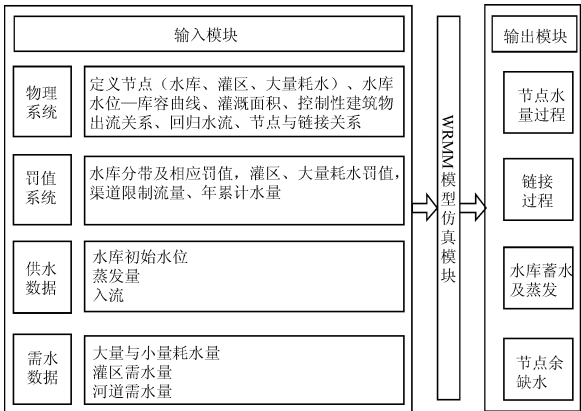


图 1 WRMM 模型仿真结构图

2.1.2 费用最小原理 WRMM(Water Resource Management Model)以用 Out-of-Kilter algorithm 方法求解最优解。

WRMM 模型仿真程序分为 4 个部分,分别是流网组织、流网解、组件数学关系和模型运行,其中流网组织又分为内网和外网,外网是指用户对水资源

系统特征和地理关系描述,即流网概化图,如图 2 所示;内网指的是程序根据外网形成的计算网络关系,如图 3 所示。

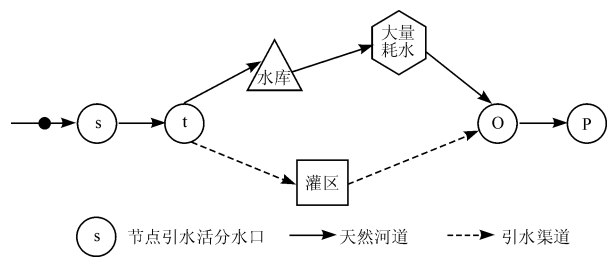


图 2 某流域网络概化图

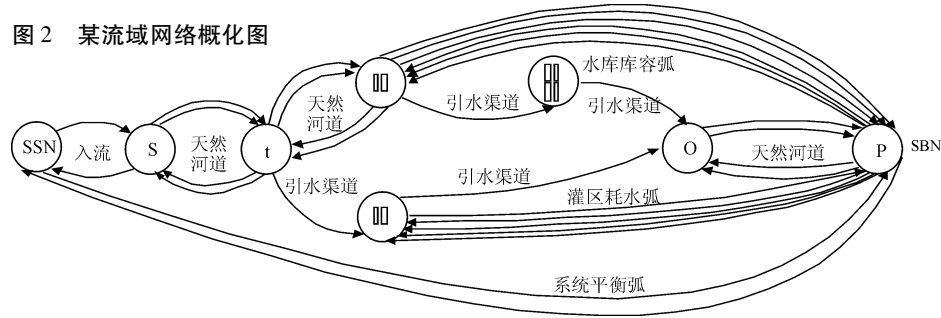


图 3 模型内网示意图

目标函数:费用最小流量

$$\sum_{(i,j)} C_{i,j} \cdot X_{i,j} \quad (i,j) \in A \tag{1}$$
$$\sum_i (X_{i,j} - X_{j,i}) = 0 \quad i \in N \tag{2}$$

约束条件:

$$X_{i,j} \geq L_{i,j} \quad (i,j) \in A \tag{3}$$
$$X_{ij} \leq K_{i,j} \quad (i,j) \in A$$

式中: $C_{i,j}$ 为弧 (i,j) 上单位水流的虚拟成本; $X_{i,j}$ 为弧 (i,j) 上通过的流量; (i,j) 为节点 i 到节点 j 的弧; A 为流网中所有弧的集合; N 为流网中所有节点的集合; $L_{i,j}$ 为弧 (i,j) 上通过的最小流量; $K_{i,j}$ 为弧 (i,j) 上通过的最大流量; $C_{i,j}$ 为弧 (i,j) 上单位水流的虚拟成本。

沿着内网如图 3 所示的弧,根据目标函数和约束条件通过 Out - of - Kilter (OKA) 线性技术求得一个满足费用最小流量的结果。

2.2 克拉玛依市水资源系统图

系统概化就是以点线概念描述全系统,对整个系统作模式化处理,便于模拟框架的建立和对应数据处理。通过系统概化可以得到设定规模下系统需要处理的各类单元、工程、节点等元素,以及描述这些元素特性的参数和资料。

节点图是系统概化的具体表现。节点图以概化形成的点、线元素为支撑,通过对概化后水资源系统各类主要相关元素依据其功能和对水源运动的影响

流网内的元件定义了所有元件都达到理想需水或者理想过水状态,再定义供水的理想水平或者理想状态低于或者高于运行情况,整个水资源系统都按照这个操作策略通过罚值的设定对不同用户进行优先级的供水。罚值是指从节点 i 到节点 j 的虚拟成本,弧费用是指弧上的流量与虚拟成本的乘积,流网总费用是指每一条水流链接弧上弧费用的总和。每一个流网上都会有很多个流网费用组合,取其费用最小最为最终优化结果。

进行分解,描述出以人工侧支供用耗排循环为主线、结合天然地表水资源量运动过程的水量转化过程。

根据克拉玛依市水资源系统特点和现状、规划的水利工程情况、用水户分布与特点以及水资源配置的要求等,将流域水资源系统中各类物理元素(重要水利工程、计算单元、河渠道交汇点等)作为节点,各节点间通过概化的各类线段连接,体现概化后的各类水力关系,概化克拉玛依市水资源系统图,克拉玛依市水资源系统图,见图 4。

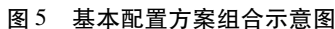
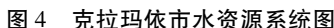
2.3 水资源配置方案集

供水数据中,以基准年 2005 年的供水数据为方案集的下限,将供水预测的高方案和强化节水的方案结合为方案集的上限,形成供水方案集。

需水数据中,注意农业和灌溉的灌溉定额以及节水以后灌溉水利用系数,工业用水和生活用水的定额等基本节水和强化节水的情况,形成需水方案集。

供水方案集、需水方案集和运行措施方案集,组合成三维的资源配置方案组合集。其中,供水方案包括各类开源措施的组合如地表水工程建设方案、地下水开采利用方式、污水处理再利用等。需水方案为不同需水预测所确定的需水,节水方案体现在不同的需水方案中。运行管理措施为不同的决策方式的体现,如工程调度方式,不同用户间的用水优先级,不同水源利用顺序,对生态环境保护与其他供水之间的协调处理等。

最后得到水资源配置模型计算的基本方案集,基本配置方案组合示意图,见图5。本次计算共计13个配置方案。



济效益、生态效益和资源效益为准则层。社会效益充分考虑区域缺水量、工业供水保证率和农业供水保证率;经济效益中考虑单方水工业产出、工业增长率,克拉玛依市是以工业发展为主要经济支柱,应充分考虑工业在经济效益中的作用;生态效益,针对克拉玛依市的特殊情况,主要考虑艾里克湖的供水保证率,以此作为生态效益的评价准则;资源效益,主要考虑中水回用量、工业用水利用系数和农业农水利用系数。选取 9 个指标作为指标层,构建克拉玛依市水资源评价方案体系,见图 6。

```

graph TD
    A[克拉玛依市水资源优化配置方案评价] --> B1[B1 社会效益]
    A --> B2[B2 经济效益]
    A --> B3[B3 生态效益]
    A --> B4[B4 资源效益]
    B1 --> C1[区域缺水量 C1]
    B1 --> C2[工业供水保证率 C2]
    B1 --> C3[农业供水保证率 C3]
    B2 --> C4[单方水工业产出 C4]
    B2 --> C5[工业增长率 C5]
    B3 --> C6[生态供水办证率 C6]
    B4 --> C7[污水回用量 C7]
    B4 --> C8[工业用水利用系数 C8]
    B4 --> C9[农业用水利用系数 C9]
  
```

图6 克拉玛依市水资源评价方案体系示意图

克拉玛依市水资源配置方案评价体系共分为 3 层,即为目标层、准则层、和指标层,其社会效益、经

4 基于层次分析法的水资源配置方案集优选

4.1 层次分析法^[24-26]

层次分析法是根据系统分析和决策分析,将各个因子分为相互联系的有层次的系统,建立有联系的层次模型,再根据构造的判断矩阵,利用求解特征值的方法,确定各因子权重,层次分析法的步骤如下:

- (1)建立因子层子结构,如图 4;
- (2)构造判断矩阵,根据影响大小,构造判断矩阵,判断矩阵标度(K)以及含义见表 1。

表 1 判断矩阵变标度(K) 以及含义

K 值含义				
1	3	5	7	9
	一个要素	一个要素	一个要素	一个要素
两个要素	稍微比另	明显比另	比另一个	比另一个
同等重要	一个要素	一个要素	要素重要	要素极端
	重要	重要	非常多	重要

(3)单排序计算,主要是进行单排序权重计算。

①计算判断矩阵各行元素连乘积,见(1)式:

$$M_i = \prod_{j=1}^i a_{ij}$$

(4)

② 计算 M_i 的 n 次方根,见(2) 式:

$$\overline{W_i} = \sqrt[n]{M_i}$$

(5)

③ 对 $\overline{W_i}$ 进行归一化处理,计算单排序权重值,

见公式(3):

$$W_i = \frac{\overline{W_i}}{\sum_{i=1}^n \overline{W_i}}$$

(6)

(4)一致性检验,若随机一致性比率 $CR < 0.10$,说明判断矩阵满足一致性检验。矩阵随机一致性检验指标 RI 值,见表 2。判断矩阵的计算,见公式(4)。

表 2 矩阵随机一致性指标 RI 值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n \cdot \overline{W_i}}$$

(7)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

(8)

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(9)

通过比较 CR 的大小,调整判断矩阵,使得最终结果满足一致性为止。

4.2 WRMM 模型水资源配置结果

由上述评价指标体系,从 WRMM 模型模拟的 13 个资源配置方案中,选取区域缺水量指标、工业供水保证率指标、农业供水保证率指标、单方水工业产出指标、工业增长率指标、生态供水保证率指标、污水回用量指标、工业用水利用系数指标、农业用水利用系数指标等 9 个指标作为评价指标,克拉玛依市水资源配置方案评价指标,见表 3。

表 3 克拉玛依市水资源配置方案评价指标

准则层 B_i	指标层 C_j	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8	方案 9	方案 10	方案 11	方案 12	方案 13
社会	区域缺水量/ 10^4 m^3	999	823	858	826	496	443	955	823	2051	230	313	230	232
	工业供水保证率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100
	农业供水保证率/%	0	0	0	0	4	7	0	0	11	19	11	19	19
经济	单方水工业产出/(元 $\cdot \text{m}^{-3}$)	364.81	571.57	360.80	571.57	360.80	571.57	360.80	571.57	263.44	431.24	263.44	431.24	263.44
	工业增长率/%	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7
生态	生态供水保证率/%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	67	67	93	74
资源效率	污水回用量/ 10^4 m^3	935	935	935	935	935	935	935	935	935	935	935	935	935
	工业用水利用系数	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
	农业用水利用系数	0.61	0.64	0.63	0.7	0.68	0.7	0.7	0.71	0.68	0.7	0.68	0.7	0.68

每一个方案中需要考虑 9 个因素,那么从 13 个水资源配置方案推荐出方案,比选比较困难。

4.3 评价结果

4.3.1 准则层 B_i 层次分析

(1) 根据评价指标体系,对准则层 B_i 的关系构造判断矩阵,准则层 B_i 的判断矩阵,见表 4。

表 4 准则层 B_i 的判断矩阵

A	B_1	B_2	B_3	B_4
B_1	1	1/3	5	1
B_2	3	1	7	3
B_3	1/5	1/7	1	1/5
B_4	1	1/3	5	1

(2) 计算准则层 B_i 单排序权重值,准则层 B_i 的单排序计算表,见表 5。

表 5 准则层 B_i 的单排序计算表

A	M_i	$\overline{W_i}$	W_i
B_1	1.667	1.136	0.212
B_2	63.000	2.817	0.525
B_3	0.006	0.275	0.051
B_4	1.667	1.136	0.212

(3) 一致性检验,一般来说,判断矩阵的最大特征根稍大于矩阵阶数,而其他特征根接近 0,就认为判断矩阵具有较高的一致性。若随机一致性比率 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.10$,则判断矩阵具有满意的一致性,能说明权重的正确性,准则层 B_i 一致性检验表,见表 6。

表 6 准则层 B_i 一致性检验表

$\lambda_{\max}$	CI	RI	CR
4.073	0.024	0.900	0.027

由表 6 可以知道准则层 B_i 的随机一致性比率 CR 为 0.027,小于 0.10,符合判断矩阵的一致性检验要求。经济效益的权重最大,在方案集优选时应当优先考虑;其次是社会效益;再其次是资源效益;权重最低的是环境效益。

4.3.2 指标层 C_j 层次分析 通过上述相同方法,对克拉玛依市水资源评价体系的指标层 C_j 进行权重分析,由于准则层 B_i 中的经济效益仅含有 2 个指标,因此认为经济效益中两个指标权重相同。克拉玛依市水资源评价体系总排序,见表 7。

指标层 C_j 的总排序的先后顺序是 $C_4 = C_5 > C_8 > C_2 > C_1 > C_6 > C_9 > C_3 > C_7$,即单方水工业产出指标 = 工业增长率指标 > 工业供水保证率指标 > 工业用水利用系数指标 > 区域缺水量指标 > 生态供水保证率指标 > 农业用水利用系数指标 > 农

业供水保证率指标 > 污水回用量指标,符合克拉玛依市的社会发展情况。

表 7 克拉玛依市水资源评价体系总排序表

准则层 B_i		指标层 C_j		指标层 C_j 层总排序
B_1	0.212	C_1	0.258	0.055
		C_2	0.637	0.135
		C_3	0.105	0.022
B_2	0.525	C_4	0.500	0.263
		C_5	0.500	0.263
		C_6	1.000	0.051
B_3	0.051	C_7	0.086	0.018
		C_8	0.672	0.142
		C_9	0.265	0.056

通过指标层 C_j 的总排序可以得出,权重最高的指标层是经济效益中单方水工业产出指标和工业增长率指标,在方案择优时优先考虑工业产出指标和工业增长率指标,当这两个指标要求相同时,依次考虑工业供水保证率指标,工业用水利用系数指标,区域缺水量指标,生态供水保证率指标,农业用水利用系数指标,农业供水保证率指标,污水回用量指标,最终选择出符合克拉玛依市的水资源配置方案。

通过计算,克拉玛依市水资源配置方案选取方案 8 为推荐方案,参考推选方案为方案 2,4,6。

5 结 论

克拉玛依市是新兴的工业化资源型城市,依附于石油,有水才能采油、炼油,有水才有希望,在水资源配置评价中,应首先考虑水资源对于工业的重要性。克拉玛依市水资源优化配置模型的运用以及层次分析法的计算,其结果符合克拉玛依市经济发展的要求,对克拉玛依市发展有一定的指导意义。

通过 WRMM 模型,建立克拉玛依市水资源优化配置模型,缓解了克拉玛依市的用水矛盾,加强了克拉玛依市水资源的管理,对未来克拉玛依市水资源的优化管理提供了理论依据,为克拉玛依市水资源的配置提供了新的研究方法,对其他地区的水资源配置提供借鉴。

充分考虑社会、经济、环境、资源利用等因素的基础上,构建了克拉玛依市水资源配置方案评价指标体系;通过层次分析法的运用,筛选出符合克拉玛依市发展的水资源配置方案,简单快捷,便于水资源方案的应用。但是层次分析法人为因素较高,可以

通过层次分析法作为简单的借鉴,注意人为因素的影响。

随着社会的发展,水资源优化不再以单一目标作为水资源配置的目标函数,WRMM模型是以费用最小流量为目标的模拟模型,在今后的发展中可以与优化模型相结合,这将是今后模型运用和指标优化仍需进一步探讨与完善的地方。在方案优选中获取评价指标体系的数据存在较大困难,评价指标体系尚不完善,需进一步完善多层次多方面的考虑。

参考文献:

- [1] 赵恩龙. 基于多目标遗传算法的灌区水资源优化调度研究[D]. 武汉:长江科学院, 2013.
- [2] 刘喜峰. 智能决策在水资源优化配置中的应用研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2012.
- [3] 李晶. 基于人工神经网络的黄河宁夏段水质评价研究[D]. 宁夏:宁夏大学, 2013.
- [4] 姚安琪. 特别枯水年的水资源配置研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2012.
- [5] Ilich N, Long Dejiang, Zhang Hua, 等. 水源管理模型(WRMM)在黄河水资源规划与调度中的应用潜力评估[C]//. 第二届黄河国际论坛, 第二届黄河国际论坛论文集, 郑州, 中国水利部, 2005.
- [6] 布海力且木·阿布都卡地尔, 姜卉芳. WRMM模型在乌鲁木齐河流域水资源管中的应用[J]. 新疆农业大学学报, 2005, 28(1): 77-80.
- [7] 何英. 干旱区典型流域水资源优化配置研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2010.
- [8] 李芳. 基于WRMM模型的玛纳斯河灌区水资源管理模型研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2011.
- [9] Bennett D R, Heikkila R, Riewe R V, et al. Farm economic impacts of water supply deficits for two irrigation expansion scenarios in Alberta [J]. Canadian Water Resources Journal, 2013, 38(3): 210-222.
- [10] Islam Z, Gan T Y. Effects of climate change on the surface water Management of the South Saskatchewan River Basin [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(3): 332-342.
- [11] 陈文艳, 王好芳. 基于模糊识别的流域水资源配置评价[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 29-30+66.
- [12] 崔东文, 郭荣. 基于概率神经网络的文山州水资源配置合理性评价分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(10): 57-62.
- [13] 李岩, 谢春燕, 吴达科, 等. 投影寻踪法在再生水利用风险评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 138-140+75.
- [14] 门宝辉, 梁川, 赵燮京. 评价区域水资源开发利用程度的集对分析法[J]. 南水北调与水利科技, 2003, 1(6): 30-32.
- [15] 王为人, 屠梅曾. 基于层次分析法的流域水资源配置权重测算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(8): 1133-1136.
- [16] 易丽萍, 李俊峰, 范文波. 基于层次分析法的阿克苏地区水资源可持续开发利用评价[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1): 44-48.
- [17] 符传君. 海南省水资源配置决策的层次分析模型研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(3): 212-217.
- [18] 阳眉剑, 秦天玲, 杨志勇, 等. 城市水源配置及其方案评估研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 382-386.
- [19] 何英, 姜卉芳, 耿曙萍. WRMM模型与地下水利用模型耦合研究及其应用[J]. 人民黄河, 2008, 30(12): 78-79.
- [20] 何英, 姜卉芳. 基于WRMM的乌鲁木齐市水资源配置方案分析[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(1): 83-86.
- [21] 姚安琪, 何英, 李绅. 单水源下WRMM模型罚值设置与分水政策关系研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 107-110.
- [22] 王芳, 冯艳芬, 卓莉, 等. 基于改进遗传算法投影寻踪的大城市郊区耕地安全综合评价[J]. 热带地理, 2013, 33(4): 373-380.
- [23] 王勇. 基于改进人工蜂群算法优化投影寻踪的水资源配置方案评价[J]. 水电与新能源, 2014(4): 5-8+12.
- [24] 汪潘义, 许跃辉, 吴娇. 基于层次分析法的安徽省水资源配置研究[J]. 经济问题探索, 2011(6): 185-190.
- [25] 杨杰, 王周, 周作璐. 基于层次分析法的皖西地区水资源配置研究[J]. 皖西学院学报, 2013, 29(2): 20-23.
- [26] 冯绍元. 环境水利学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.