

区域水资源调度—分配迭代优化模型

朱成涛¹, 梁忠民², 张文明²

(1. 二滩水电开发有限责任公司流域水情中心, 四川 成都 610021; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要 在对水资源系统组成和结构分析的基础上, 运用大系统优化理论建立了区域水资源系统多目标优化配置数学模型, 包括水源优化调度、水量优化分配和调度—分配迭代 3 个子模型。水源优化调度模型的求解采用轮库迭代方法和动态规划方法, 水量优化分配模型的求解采用大系统分解—协调中的 D-W 分解原理。对江苏省连云港市区水资源优化配置问题进行了研究, 建立并求解了优化配置模型, 结果表明, 该市各区在 2020 规划水平年工业、农业、生活和环境部门都将出现不同程度的缺水情况。

关键词 水资源调度; 大系统; 多目标; 优化配置; 迭代优化; 连云港市

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)05-0032-05

Iterative optimization allocation model for regional water resources

Zhu Cheng-tao¹, Liang Zhong-min², Zhang Wen-ming²

(1. Ertan Hydropower Development Company Ltd., Chengdu 610021, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract On the basis of analyzing the composition and structure of a water resources system, a multi-objective optimal allocation model was established for regional water resources systems by applying large-scale system optimization theory. The model contains three components: the water source optimal operation model, the water quantity optimal allocation model, and the iterative operation-allocation model. The solution of the water source optimal operation model can be obtained using the iterative method of alternating reservoirs and the dynamic programming approach. The water quantity optimal allocation model is solved with the DW decomposition method of large-scale decomposition coordination theory. As an example, the optimal allocation of water resources in the Lianyungang urban district was investigated. An optimal allocation model was set up and the allocation results were obtained. The results indicate that water shortage will occur to different degrees in industry, agriculture, the domestic water supply and the natural environment by the year 2020.

Key words water resources optimal operation; large-scale systems; multiple objectives; optimal allocation; iterative optimization; Lianyungang

合理开发利用水资源、实现水资源的优化配置, 是我国实施水资源可持续发展战略的根本保障^[1]。水资源优化配置是多目标决策的大系统问题^[2], 需要应用大系统理论的思想进行分析研究。传统的水资源配置存在对环境保护重视不够、重视缺水地区的水资源优化配置而忽视水资源充足地区的用水效率提高、突出水资源的分配效率而忽视行业内部用水合理性等问题。在水资源严重短缺的今天, 必须重视水资源优化配置研究, 协调好资源、社会、经济

和环境的动态关系, 从而实现区域经济的发展和水资源的可持续利用^[3]。本文以大系统优化理论、多目标优化技术为手段, 对水资源系统的组成、层次和结构进行分析, 在此基础上, 针对区域水资源优化配置问题建立了合理可行的优化配置数学模型。

1 模型概述

在水资源配置方案分析和计算时, 常规方法是在水库调度规则、分水比、水源工程运行方式、供水

用水优先顺序等确定的条件下进行模拟计算的,而优化方法则是根据系统的实际需要,设计一定的目标函数,使目标函数值达到最大(或最小),即系统达到最佳状态时得到水资源优化配置方案。在水资源系统分析中,数学模型起着十分重要的作用。水资源系统的数学模型一般包括目标函数和约束条件两部分,需要根据区域水资源的实际情况,对系统中的各个因素及其之间关系、逻辑结构做出数学描述,并确定需要求解的未知变量,即决策变量。对于不同的系统,不同的水资源问题,由于自然条件和社会经济条件的不同,数学模型是不同的。本文将整个水资源优化配置模型分成3个子模型:水源优化调度模型、水量优化分配模型和调度-分配迭代模型。水源优化调度模型的功能是通过水源工程的调蓄作用将来水过程进行调节使之与需水过程相匹配,从而确定整个区域的可供水量;水量优化分配模型的功能是在供不应求的情况下充分考虑城市经济发展、人民生活、粮食安全和生态环境等要求,以最合理的方式对水资源进行分配;调度-分配迭代模型采用循环迭代的方法将水源优化调度模型和水量优化分配模型有机联系起来,从而实现调度-分配同步优化目标。

2 水资源调度-分配迭代优化模型

2.1 水源优化调度模型

假设整个研究区由 M 个分区组成,根据水源特性,可将供水水源分为全区共用水源和单分区水源两类,全区共用水源可以向任意分区供水,而单分区水源只向本分区供水,形成的概化供水网络如图 1 所示。供水系统的数学描述如下:

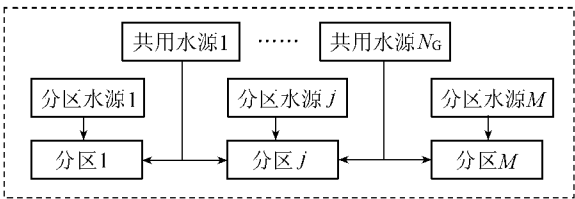


图 1 水源优化调度模型供水网络

2.1.1 目标函数

以各时段全区总缺水率的平方和最小为目标函数,即:

$$\min \sum_{t=1}^T [(\sum_{j=1}^M S_{j,t} - \sum_{i=1}^N Q_{i,t}) / \sum_{j=1}^M S_{j,t}]^2 \quad (1)$$

式中: $S_{j,t}$ 为第 j 分区第 t 时段需水量; $Q_{i,t}$ 为第 i 水源第 t 时段供水量。水源优化调度以 1a 为调节期,并划分为 T 个时段,分区总数为 M ,水源总数为 N 。

2.1.2 约束条件

a. 各供水水源水量平衡和关联约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + U_{i,t} + X_{i,t} - P_{i,t} - Q_{i,t} \quad (2)$$

$$X_{i,t} = \sum_{k=1}^N c_{i,k} Z_{i,k,t} \quad (3)$$

式中: $V_{i,t+1}$ 为第 i 水源在第 t 时段末的滞蓄水量; $V_{i,t}$ 为第 i 水源在第 t 时段初的滞蓄水量; $U_{i,t}$ 为第 i 水源在第 t 时段的区间来水量; $X_{i,t}$ 为其他水源在第 t 时段对第 i 水源的输入水量; $P_{i,t}$ 为第 i 水源在第 t 时段对其他水源的输出水量; $Q_{i,t}$ 为第 i 水源在第 t 时段的对外供水量; $c_{i,k}$ 为各水源之间的线性耦合系数; $Z_{i,k,t}$ 为第 k 水源在第 t 时段向第 i 水源输入的水量。

b. 另外还有供水总量上下限约束、单分区水源供水上限约束、各水源供水(输水)能力约束、各水源有效蓄水量约束、渠道或管道输水方向约束等。

2.2 水量优化分配模型

经过水源优化调度模型优化后的单分区水源水量直接供给所属的分区,而全区共用水源的水量分配则要考虑各分区的缺水情况和供水效益。水量优化分配模型运用大系统分级递阶控制思想,建立 4 层优化分配模型,第 1 层以单用户(作物)的供水效益函数和最优分配过程为基础,求解用户(作物)非充分供水条件下各阶段的供水过程;第 2 层为求解多用户(作物)之间水量最优配置,以工业(农业)净效益最大为目标函数;第 3 层为各分区协调层,求解工业、农业、生活和环境 4 个用水部门水量最优配置,以分区各部门综合效益最大为目标函数;第 4 层为全区协调层,求解水量在各分区之间的最优配置,以全区综合效益最大为目标函数^[4]。水量优化分配模型系统结构见图 2。

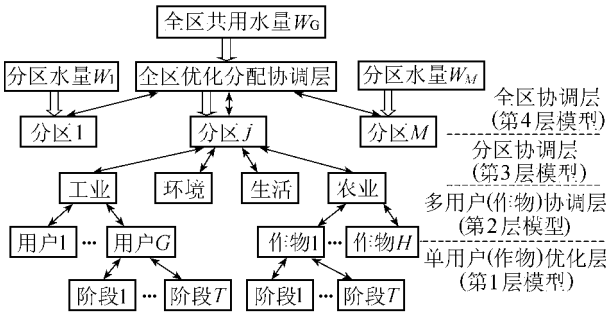


图 2 水量优化分配模型系统结构

2.2.1 各分区之间水量最优分配模型(第 4 层模型)

第 4 层模型的作用是将水源优化调度的水量在各个分区之间进行最优分配,并将配置方案传送到第 3 层,同时接受第 3 层反馈的信息进行协调优化,优化的目标是使全区的综合效益达到最大。

a. 目标函数。以全区综合效益最大为目标函数,即

$$\max \sum_{j=1}^M F_j(Q_j) \quad (4)$$

式中: Q_j 为第 j 分区的分配水量与单分区水量聚合后的水量; $F_j(Q_j)$ 为第 j 分区的水量综合效益函数。

b. 约束条件包括全区共用水源水量分配平衡约束、各分区需水量上下限约束、全区共用水源到各分区渠道或管道输水能力限制等。

2.2.2 分区各部门之间水量最优分配模型(第3层模型)

分区各部门之间水量最优分配是一个多目标优化问题^[5], 采用最优权重法来解决该多目标问题, 以分区工业、农业、生活和环境4类用水部门的综合效益最大为目标。

a. 目标函数为

$$\max F_j(Q_j) = \max [\omega_{jg} f_{jg}(Q_{jg}) + \omega_{ja} f_{ja}(Q_{ja}) + \omega_{js} f_{js}(Q_{js}) + \omega_{jh} f_{jh}(Q_{jh})] Q_j \quad (5)$$

式中: Q_{jg} 、 Q_{ja} 、 Q_{js} 、 Q_{jh} 分别为分配给第 j 分区工业、农业、生活和环境部门的水量; $f_{jg}(Q_{jg})$ 、 $f_{ja}(Q_{ja})$ 、 $f_{js}(Q_{js})$ 、 $f_{jh}(Q_{jh})$ 分别为第 j 分区工业、农业、生活和环境部门的供水效益; ω_{jg} 、 ω_{ja} 、 ω_{js} 、 ω_{jh} 分别为第 j 分区工业、农业、生活和环境部门的效益权重系数。权重系数的求取可以采用层次分析法, 基本做法是将评价指标两两比较, 一个指标相对另一个指标的重要性采用1~9数值表示(数值越大指标越重要), 得到判断矩阵, 然后根据公式(6)计算各指标的权重系数^[6]。

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (6)$$

式中: ω_i 是 i 指标的权重系数; a_{ij} 为指标 i 与指标 j 的重要性之比。

b. 约束条件包括分区水量分配的平衡约束、各部门需水量上下限约束、各部门供水破坏等级约束等。

2.2.3 多用户(作物)之间水量最优分配模型(第2层模型)

第2层模型针对的是各分区工业和农业部门内的水量优化分配问题, 工业各用户和农业各作物的用水效益需要由第1层模型计算得出。

a. 目标函数。各分区工业和农业部门内的水量优化配置的目标分别是工业总产值最大和农业总产量最大, 即

$$\max f_{jg}(Q_{jg}) = \max \sum_{g=1}^G f_{jg}(Q_{jg}) \quad (7)$$

$$\max f_{ja}(Q_{ja}) = \max \sum_{h=1}^H f_{ja}(Q_{ja}) \quad (8)$$

式中: Q_{jg} 为第 j 分区分配给工业部门第 g 用户的水量; Q_{ja} 为第 j 分区分配给农业部门第 h 农作物的水量; $f_{jg}(Q_{jg})$ 为第 j 分区工业部门第 g 用户的用水效益; $f_{ja}(Q_{ja})$ 为第 j 分区农业部门第 h 农作物的用水效益; G 为工业用户个数, H 为农作物种类数目。

b. 约束条件包括各部门水量分配的平衡约束、各用户(作物)需水量上下限约束等。

2.2.4 单用户(作物)阶段水量最优分配模型(第1层模型)

单用户(作物)阶段水量最优分配实际是一个非常复杂的问题。工业用户供水效益采用效益与水量(各阶段供水量之和)的线性函数, 工业用户阶段分配采用典型需水过程, 而农业作物供水效益和各阶段最优水量分配计算采用作物水分生产函数 Jensen 模型^[7]。

a. 单用户的用水效益为

$$f_{jg}(Q_{jg}) = \alpha_{jg} Q_{jg} \quad (9)$$

式中: α_{jg} 为第 j 分区第 g 工业用户的供水效益系数。

b. 农作物供水效益为

$$f_{ja}(Q_{ja}) = b_{ja} y'_{ja} \prod_{t=1}^T (Q_{ja,t} / Q'_{ja,t})^{\lambda_t} \quad (10)$$

式中: $f_{ja}(Q_{ja})$ 为第 j 分区第 h 种农作物的供水效益(即换算为区域主农产品的产量); b_{ja} 为第 j 分区第 h 种农作物的供水效益系数; Q_{ja} 为第 j 分区第 h 种农作物的总供水量; $Q_{ja,t}$ 为第 j 分区第 h 种农作物第 t 阶段的供水量; $Q'_{ja,t}$ 为第 j 分区第 h 种农作物第 t 阶段的最充分供水量; y'_{ja} 为第 j 分区第 h 种农作物的最高产量; λ_t 为第 t 阶段作物产量敏感性指数。

2.3 调度-分配迭代模型

优化调度模型是根据需水过程对来水过程进行调度, 从而得到可供水量 W 和供水量过程 $Q_1, Q_2, \dots, Q_T$, 优化分配模型是根据全区综合效益最优的原则对区域的可供水量 W 进行优化分配, 并最终得到最优分配水量过程 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ (将所有单用户和作物的最优分配水量过程叠加, 再与生活、环境用水过程进行综合就可以得到全区的最优分配水量过程)。仔细分析可知, 优化分配所得到的最优分配水量过程 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 与优化调度后的供水量过程 $Q_1, Q_2, \dots, Q_T$ 实际并不一致, 但所相加的总量都为可供水量 W 。原因在于水源工程的优化调度所考虑的是全区的需水过程, 全区需水过程由各分区各行业的需水过程叠加而成, 其权重系数全部为

1 而优化分配所得到的最优分配过程考虑了各分区各行业的用水效益,各分区各行业分配水量与其需水量比例系数不再全部相等。从公平高效的角度来讲,最优分配水量过程 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 更有实际意义。因此有必要对水源工程调度能否满足最优分配水量过程 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 提出疑问,这便是分配-调度迭代模型建立的宗旨所在。

整个调度-分配迭代模型应该分为两个部分:第一部分为分配结果调度可行性检验,它是为了检验水源工程优化调度能否满足优化分配结果 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 。具体步骤是将 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 作为需水量过程重新输入水源优化调度模型中进行优化计算,优化结果为 $Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_T$ 。假如 $Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_T$ 与 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 相差很小,则可认为水源工程优化调度能够满足优化分配结果 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$,否则将 $Q'_1, Q'_2, \dots, Q'_T$ 换算成可供水量 W' 输入水量优化分配模型重新计算,这样循环迭代,直至检验通过为止。第二部分是优化调度剩余能力检验,实际当第一部分第一次检验就通过时,还存在另外一种可能情况,就是水源工程优化调度对于 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 存在剩余供水能力(这种情况一般较少,说明优化调度存在弃水可以利用),这时应该将 $Q_1^*, Q_2^*, \dots, Q_T^*$ 进行小幅放大后重新输入水源优化调度模型进行计算,假如优化后的可供水量 W'' 与原可供水量 W 之间存在差别较大,说明水源工程调度存在剩余供水能力,这时需要将新的可供水量 W'' 输入水量优化分配模型迭代计算,假如差别很小则检验通过,模型优化结束。

3 模型求解

水源优化调度模型求解是一个水库群优化调度问题,为了克服维数灾困难,本文采用水库调度中常用的轮库迭代方法,该方法是一种易于理解的降阶算法。轮库迭代方法在求解时始终保持目标函数不变,对各个水源进行轮流优化调度,并反复迭代,直至各个水源的最终调度结果达到模型目标要求。单个水源优化调度采用动态规划(DP)方法。该方法在求解时是先逆向计算各时段各水库状态到时段末的最优策略,然后正向推求时段初到时段末的最优调度过程线,从而使单个水源的调度结果达到模型目标要求^[8]。水源优化调度模型优化计算的最后结果应该包括各水源的可供水量 W 和供水量过程 $Q_1, Q_2, \dots, Q_T$ 。

水量优化分配模型求解是一个复杂大系统优化问题,但由于 2、3、4 层目标函数均为线性,求解该模

型可采用大系统分解-协调中的 D-W 分解原理^[9-10]。具体思路是根据各分区的缺水量,将优化调度后的全区(第 4 层)共用总水量预估分配到各分区中,在各分区(第 3 层)分配水量与单分区水量聚合得分区总水量,再预估分配到各部门,然后由各部门(第 2 层)将水量分配到各用户和作物,各用户和作物(第 1 层)可直接根据用水效益函数和作物水分生产函数,进行阶段优化并计算用水效益值反馈到第 2 层,第 2 层可根据第 1 层用水效益情况重新分配水量,如此反复优化可达到第 2 层最优;第 2 层优化效益值反馈到第 3 层,第 3 层可根据用水效益情况重新分配水量,这样反复优化可达到第 3 层最优;第 3 层优化效益值反馈到第 4 层,第 4 层可根据用水效益情况重新分配水量,如此反复优化可达到全区最优。

4 实例研究

4.1 研究区域及水资源概况

实例研究区位于江苏省东北部连云港市,沂沭泗水系最下游,其中,城区供水严重依赖于江淮调水,是典型的水源型缺水城市,水资源缺乏制约了经济发展^[11]。将研究区划分为 3 个分区,即东海农业区、新海地区 and 连云地区。东海农业区是位于东海县境内的蔷薇河和淮沭新河灌溉的农业区。连云港市城区形态为一市双城式布局,即由新海地区和连云地区组成,新海地区包括新浦区、海州区和云台山地区,连云地区包括连云区、经济技术开发区、盐 I 区和盐 II 区。研究区域概化如图 3 所示(图中蔷薇河是连云港市目前最主要的供水水源,分区水源包括各分区内的塘坝蓄水、雨水资源、污水回用等可利用水资源)。

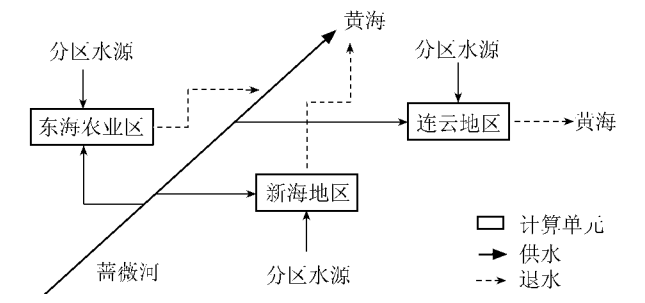


图 3 研究区水资源系统概化

4.2 模型计算参数

a. 分区时段数目。由图 3 可知,研究区水资源优化配置模型中水资源分区为 3 个,供水水源为 4 个(其中全区公共水资源 1 个,各分区均有 1 个单分区水源),时段 12 个,用水部门为 4 个(即工业、农业、生活和环境部门)。

b. 多目标权重系数。运用层次分析法计算多目标权重 ,层次分析法判断矩阵采用专家评判方法得到 ,如表 1 所示。由公式 (6) 计算得 4 个行业部门的权重系数分别为 : $\omega_g = 0.16$, $\omega_n = 0.09$, $\omega_s = 0.47$, $\omega_h = 0.28$ 。

表 1 层次分析法判别矩阵

部门	工业	农业	生活	环境
工业	1	2	1/3	1/2
农业	1/2	1	1/5	1/3
生活	3	5	1	2
环境	2	3	1/2	1

c. 用户(作物)供水效益系数。供水效益系数包括工业各用户的供水效益系数和农业各农作物的供水效益系数。工业各用户供水效益系数采用线性回归分析方法(回归方程过原点)对各用户多年产值和用水量数据分析得到 ,部分主要企业供水效益系数如表 2 所示。农作物供水效益系数需要考虑降雨频率的问题 ,因为降雨频率不同时作物的灌溉定额不同 ,应根据各农作物不同降雨频率(50%、75%、95%)灌溉定额和灌溉达到定额时作物产量计算出供水效益系数 ,如表 3 所示。

表 2 研究区主要工业用水户供水效益系数

用户名称	所属分区	供水效益系数/(元·m ⁻³)
发电企业	连云地区	922.5
化工厂	新海地区	146.9
塑料公司	新海地区	143.3
啤酒公司	新海地区	37.4
碱厂	连云地区	16.9

表 3 研究区主要农作物供水效益系数

作物名称	保证率/%	供水效益系数/(kg·m ⁻³)
水稻	50	1.55
	75	1.46
	95	1.26
小麦	50	4.12
	75	2.75
	95	1.65
其他作物	50	3.53
	75	2.35
	95	1.76

注 :所有作物产量均按照价格比换算成主农产品水稻产量。

4.3 计算成果及分析

根据江苏省关于连云港市区供水水源规划 ,将

表 4 研究区 2020 年 95% 保证率水资源优化配置成果

分 区	工业			农业			生活			环境			合计		
	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量	需水量	供水量	缺水量
东海农业区	203	181	22	64915	46090	18825	1879	1841	38	121	115	6	67118	48227	18891
新海地区	73900	65771	8129	8655	6145	2510	6801	6665	136	1250	1188	62	90606	79769	10837
连云地区	116000	103240	12760	710	504	206	6280	6154	126	655	622	33	123645	110520	13125
全 区	190103	169192	20911	74280	52739	21541	14960	14661	299	2026	1925	101	281369	238517	42852

增加外调水引水流量 ,并对蔷薇河进行清淤等综合整治以提高其调蓄能力 ,因此本文进行可供水量计算是针对供水水源规划逐步实施后的供水能力。采用前述水资源优化配置模型参数 ,对研究区不同规划水平年(2010 年、2020 年)不同设计保证率(50%、75%、95%)的需水进行了优化配置计算。表 4 为研究区 2020 年 95% 保证率水资源优化配置成果。

2020 规划水平年中 ,95% 保证率下 ,工业、农业、生活和环境部门供水都将出现不同程度的缺水 ,4 个部门缺水率分别为 11%、29%、2% 和 5% ,3 个分区缺水率依次为 28%、12% 和 10.6%。从各用水部门之间的配置情况分析 ,由于模型中不同用水部门权重系数及供水上下限约束条件的作用 ,不同规划水平年不同设计保证率下的生活用水和环境用水将得到优先满足 ,在枯水年 ,农业用水将首先受到影响 ,到特枯年 ,农业和工业部门都会有不同程度的缺水。从各水资源分区之间的配置情况分析 ,到枯水年和特枯年 ,各分区都将出现不同程度的缺水 ,其中东海农业区缺水最为严重 ,而连云地区缺水最少 ,这主要是因为东海农业区农业部门需水所占比重最大 ,而连云地区农业部门需水比重最小。模型计算过程中虽然考虑到 2020 年供水水源规划可供水量在现有基础上有所增加 ,但较之需水增幅仍然较小 ,所以在枯水年该市应该考虑开辟其他水源对缺水进行补充。

5 结 语

对水资源系统的组成、层次和结构进行了分析 ,并以大系统优化理论、多目标优化技术为手段 ,针对区域水资源优化配置问题建立了合理可行的优化配置数学模型。整个水资源优化配置模型分为水源优化调度、水量优化分配和调度-分配迭代 3 个子模型。水源优化调度模型求解采用轮库迭代方法和动态规划方法 ,水量优化分配模型求解采用大系统分解-协调中的 D-W 分解原理。在实例应用中 ,分析了江苏省连云港市区水资源现状 ,根据研究区实际情况对水资源系统进行了概化并建立了优化配置模型 ,对模型求解并给出了配置结果 ,从而验证了模型及其求解方法的可行性。

在构建优化配置模型时从不同角度考虑了各分

- Geology 2003 44 373-378.
- [8] 卢宗柳,莫江平.新疆阿吾拉勒富铁矿地质特征和矿床成因[J].地质与勘探,2006 42(5) 8-11.
- [9] 韩长江.新疆新源县沙拉穹库铁矿主要地质特征及矿床成因探讨[J].新疆有色金属,2006(3) 2-3.
- [10] 张保平,张玉明.遥感蚀变信息提取方法在西天山班禅沟一带铜、铁矿找矿中的应用[J].矿产与地质,2007 21(1) 90-93.
- [11] 王海涛,高纬,马海军.新疆那拉提成矿带主要成矿类型、控矿地质因素及成矿规律探讨[J].新疆地质,2007 ,25(3) 253-257.
- [12] 邓亚琼.新疆那拉提地区地球化学特征及其找矿前景[J].重庆工学院学报:自然科学版,2007 ,27(3):103-109.
- [13] 伊犁哈萨克自治州人民政府.关于加快伊犁州直矿业开发,推进产业化发展的实施意见[EB/OL].[2005-3-30]. http://law.baidu.com/pages/chinalawinfo/1694/42/72dda570cfb4c14fd30d585963186760_o.html
- [14] 胡汝骥,马虹,姜逢清.中国天山积雪雪崩站区的地理环境[J].干旱区地理,1997 20(2) 25-33.
- [15] 胡汝骥.中国天山自然地理[M].北京:中国环境科学出版社,2004.
- [16] 王云才.巩乃斯河流域游憩景观生态评价及持续利用[J].地理学报,2005 60(4) 645-655.
- [17] 高继军,刘玲花,周怀东.北京地区饮用水重金属污染物浓度分布研究[J].中国给水排水,2006(S1) 436-439.
- [18] GB3838-2002 地表水环境质量标准[S].2002.
- [19] 《新源县县志》编委会.新源县志[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,2006.
- [20] ROBERTSON D J ,TAYLOR K G ,HOON S R. Geochemical and mineral magnetic characterization of urban sediment particulates ,Manchester ,U K[J]. Applied Geochemistry ,2003 ,18 269-282.
- [21] 朱伟,边博,阮爱东.镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J].环境科学,2007 28(7):1584-1589.
- [22] 王学松,秦勇.徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析[J].地球化学,2006 35(1) 88-94.
- [23] ZHOU J ,MA D S ,PAN J Y ,et al. Application of multivariate statistical approach to identify heavy metal sources in sediment and waters :a case study in Yangzhong , China [J]. Environment Geology 2008 54 373-380.
- [24] 李玉,俞志明,宋秀贤.运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J].环境科学,2006 27(1):137-141.
- [25] MANTA D S ,ANGELONE M ,BENANE A ,et al. Heavy metals in urban soils :a case study from the city of Palermo (Sicily) ,Italy [J]. Science Total Environment 2002 300(3):229-243.
- [26] KRZYSZTOF L ,DANUTA W. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir [J]. Chemosphere 2003 51 723-733.

(收稿日期:2008-07-22 编辑:高渭文)

(上接第36页)区各部门各用户用水效益,从理论上说是完整的,但从实际应用的角度看,这种大而全的模型尚存在值得进一步探讨的问题。对于多目标问题的处理本文采用权重法将多目标转化为单目标进行求解,这是一种简化的求解方法,而实际水资源管理工作中,对于农业、工业、生活和环境等部门供水问题的考虑要复杂得多,因此,为了提高优化配置模型在水资源管理和决策中的技术支持作用,有必要根据实际情况对多目标优化方法作深入研究^[12-14]。

参考文献:

- [1] 索丽生.我国可持续发展水资源战略[J].学会,2001(11):15-16.
- [2] 陈禹六.大系统理论及其应用[M].北京:清华大学出版社,1988 :123.
- [3] 孙翠清.区域水资源优化配置的控制论模型[D].南京:河海大学,2005.
- [4] 朱成涛.区域多目标水资源优化配置研究[D].南京:河海大学,2006.
- [5] 钟平安.流域水利系统水资源的多目标优化分配[D].南京:河海大学,1995.
- [6] 邹长国.区域水资源合理配置人机交互系统的研究与应用[D].南京:河海大学,2005.
- [7] 张长江,徐征和.应用大系统递阶模型优化配置区域农业水资源[J].水利学报,2005 36(12):1480-1485.
- [8] 陈乐湘.库群优化调度[M].南京:河海大学出版社,1997 :16-50.
- [9] 袁洪州.区域水资源优化配置的大系统分解协调模型研究[D].南京:河海大学,2005.
- [10] 赵伟.高州水库灌区水资源优化配置研究[D].南京:河海大学,2005.
- [11] 朱成涛,梁忠民,孙宗凤,等.基于Web框架的连云港市水资源管理决策支持系统[J].水利水电科技进展,2005 25(增刊1):153-156.
- [12] 刘健民.水资源规划与管理决策支持系统的发展和应用[J].水科学进展,1995 16(3):255-259.
- [13] 胡铁松,万永华,冯尚友.水资源决策支持系统目前动态及展望[J].水科学进展,1993 14(3):237-241.
- [14] 尤祥瑜,谢新民,孙仕军,等.我国水资源配置模型研究现状与展望[J].中国水利水电科学研究院学报,2004 2(2):131-140.

(收稿日期:2008-06-02 编辑:熊水斌)