

考虑南水北调供水的济南市水资源供需分析

马海波¹,董增川¹,李 胜¹,袁洪州²

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098 ;2.上海勘测设计研究院,上海 200434)

摘要 :分析济南市的水资源开发利用现状,预测了中长期需水态势,构建了考虑南水北调供水情况下的济南市水资源供需分析数学模型。根据拉格朗日对偶理论,将模型最小化问题转化为其对偶函数最大化问题,利用大系统分解协调理论,将复杂问题分解成为若干个比原问题简单的、规模小的子问题,通过协调各级间关系寻求达到整个大系统的最优化,求得模型的最优解。计算结果表明,采用该模型进行水资源供需分析比较合理。

关键词 :水资源供需分析;南水北调工程;大系统分解协调;济南市

中图分类号 :P333.1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2006)05-0051-04

Water resources demand-supply analysis for Ji 'nan City with consideration of water supply by South-to-North Water Transfer Project/MA Hai-bo¹, DONG Zeng-chuan¹, LI Sheng¹, YUAN Hong-zhou²(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,Hohai University , Nanjing 210098 , China ;2. Shanghai Investigation , Design , and Research Institute , Shanghai 200434 , China)

Abstract :The present situation of water resources development and utilization in Ji 'nan City is analyzed , and the trend of medium-and long-term water demand is forecast. A numerical model considering water supply by the South-to-North Water Transfer Project is established for water resources demand-supply analysis for Ji 'nan City. Based on the Lagrange dual theory and the large-scale system decomposition-coordination theory , the problem of objective function minimization is converted to maximization of the dual function , and a complicated problem is decomposed into several small-scale sub-problems , which are easy to be solved as compared with the original problem. As a result , the optimization of the whole large-scale system is realized by coordination of the relationships between the subsystems , and thus the optimal solution to the model is obtained. Calculated results show that the numerical model is reasonable for water resources demand-supply analysis.

Key words : water resources demand-supply analysis ; South-to-North Water Transfer Project ; large-scale system decomposition-coordination ; Ji 'nan City

济南是资源性缺水城市,其水资源具有总量不足、年际变化大、年内分配不一和地域分布不均等特点。济南素以“泉城”著称,但由于地下水盲目、过度开采,致使泉水自 1975 年春季开始出现断流。因此,水资源紧缺是济南市经济社会发展和生态环境保护的瓶颈。

区域水资源供需平衡分析的目的是揭示区域内水资源供需关系的内在规律和主要矛盾,探讨水资源开发利用的途径与潜力,为水资源合理配置提供科学依据,因此,各个地区考虑自身水资源供需分析的研究成果比较多^[1-4],但考虑大型跨流域调水的区域水资源供需分析的研究较少。济南市为南水北调东线工程进入山东的第一供水区,本文旨在建立一个考虑当地水、黄河水、南水北调水的多水源联合供

水条件下的水资源供需分析数学模型,根据该模型计算的供需分析结果可为济南市构建水资源安全供给体系和制定宏观发展战略提供科学依据。

1 水资源供需分析

1.1 水资源系统概化

由于水资源系统的复杂性,需根据其目的与需要对系统的特性和演变规律做适当的概化。概化是将真实的水资源系统转化为计算机所能识别的网络系统。概化的原则是能够反映水资源分区的水量传递,并有利于揭示供需矛盾,同时也要适应资料状况以便于供需分析计算。根据相似性原理,利用数学公式来描述真实水资源循环中的主要过程,并将这些程序按照真实系统的空间和时间顺序组合成一个

符合真实系统间复杂的相互关系、又能为计算机所识别的网络系统。图 1 为济南市水资源系统概化图 将济南市划分为市五区、长清、平阴、济阳、章丘和商河 6 个水资源分区 将需水部门分为生活用水、工业用水、农业用水、生态用水 4 个部门 ,以月份为计算时段。

1.2 需水预测

需水预测涉及经济、社会以及生态环境的各个方面 ,具有一定的复杂性和不确定性。根据研究区历史用水情况 ,以我国经济发展战略的总目标为指导 ,考虑将来区域经济的发展、生活水平的提高、节水型社会的建立、用水管理的不断完善 ,建立济南市需水预测模型 ,预测规划水平年的需水情况 ,为水资源供需平衡分析模型提供必要的基础数据。

a. 工业需水预测。从济南市工业用水资料分析 ,万元产值工业用水量随着年产值的增长不断下降 ,工业用水的重复利用率随着工业产值的增长而不断提高 ,这说明工业用水量与工业用水的重复利用率紧密相关。分行业提高重复利用率^[5]是预测未来不同水平年工业需水的一种比较成熟的方法 ,在理论和实践上都有优越性。将济南市工业需水分为城镇工业需水和乡村工业需水 ,城镇工业需水再分为一般工业、火电工业两种类型分别进行预测。

b. 农业需水预测。采用不同方法进行农业需水预测 ,预测值相差较大。各种预测方法中农业用

地综合用水量指标法较为合理。根据土地利用情况的不同 ,将农业用地分为水田、旱田、菜地、林业用地、牧业用地和渔业用地。这些土地的用水指标差别显著 ,将其区分开并按照各自的用水指标进行需水预测。

c. 生活需水预测。生活需水在一定的范围内 ,其增长速度是比较有规律的 ,用趋势外延和简单相关法推求未来生活需水量。

d. 生态需水(指河道内生态需水)预测。对于济南市而言 ,生态需水分河道外生态需水和河道内生态需水 ,其中 ,河道外生态需水包括在农业需水和城镇生活需水计算中 ,因此这里只考虑河道内的生态需水。河道内生态需水的计算方法很多 ,大体分为 4 类 :历史流量法、水力定额法、栖息地定额法和整体分析法。本文采用国内河流生态需水常用计算方法——枯年天然径流估算法 ,以最枯年天然径流进行估算 ,将河流年最小月均流量的多年平均值作为河道的基本生态环境需水量。

1.3 供需分析数学模型

1.3.1 目标函数

目标函数表示模型系统的目标要求。水资源供需分析计算的目标是通过科学合理分配有限的水资源数量 ,缓解水资源短缺引起的用水竞争问题 ,为了更好地满足济南市生活、工农业生产以及生态环境的用水需求 ,设定模型目标为 6 个研究分区各个

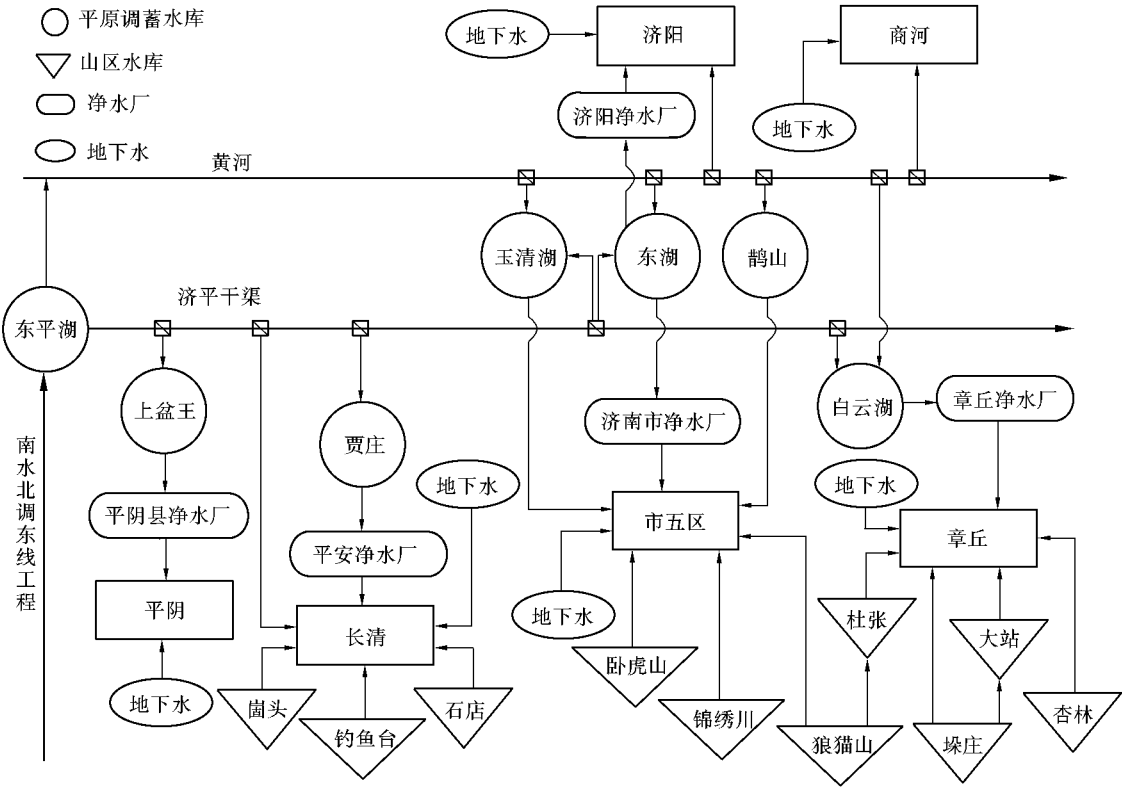


图 1 济南市水资源系统概化图

时段缺水率最小,且各个时段缺水率尽可能均匀。
模型形式为

$$\min \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \alpha_{nj} \left[(D_{njt} - \sum_{i=1}^I Q_{ijn}) / D_{njt} \right]^2 \quad (1)$$

式中: α_{nj} 为第 n 分区第 j 用水部门相对其他用水部门优先得到水资源供给的重要程度系数; D_{njt} 为规划水平年第 n 分区第 j 用水部门第 t 时段的需水量; Q_{ijn} 为规划水平年第 i 水源对第 n 分区第 j 用水部门第 t 时段的供水量; N 为分区总数; J 为用水部门总数; T 为总时段数; I 为水源总数。

1.3.2 约束条件

a. 供水量约束。考虑资源节约和有效利用原则,供给各分区的水量不应多于其需水量。

$$\sum_{i=1}^I Q_{ijn} \leq D_{njt} \quad (2)$$

b. 供水能力约束。各分区的输水河道及泵站都有各自的供水能力,各水源对各分区的供水量不应大于其最大输水能力。

$$Q_{ijn} \leq Q_{maxijn} \quad (3)$$

式中: Q_{maxijn} 表示第 i 水源对第 n 分区第 j 用水部门的最大输水能力。

c. 水源可行域约束。对于特定水源,其供水应满足调节计算的约束域。

$$Q_{ijn} \in S_i \quad (4)$$

式中: S_i 为规划水平年内第 i 个供水水源调节计算的约束域。

d. 决策变量非负约束。

$$Q_{ijn} \geq 0 \quad (5)$$

1.3.3 模型求解

解非线性约束最优化问题的一个基本方法是把原来的非线性约束优化问题化为一个或一系列的子问题,这些子问题或是无约束优化问题,或是线性约束优化问题^[6],从而得到原来问题的解。常见的非线性约束优化方法有罚函数法、障碍函数法等。由于以上目标函数的非线性特征以及耦合约束条件的存在,这些方法都具有一定的局限性,但考虑到模型的目标函数和约束条件具有相加可分特性,采用大系统理论中的非线性系统的对偶分解协调方法——目标协调法^[7]求解。

取其中第 n 个子系统来阐明其变量之间的关系。第 n 个子系统的类型如图 2 所示。图中: W_{nt} 为第 n 子系统第 t 时段当地的水资源量; Y_{nt} 为第 n 子系统第 t 时段的引水量; X_{nt} 为其他子系统对第 n 子系统第 t 时段提供的输入水量; Q_{njt} 为第 n 子系统第 j 用水部门第 t 时段供水量; Z_{nt} 为第 n 子系统第 t 时段的输出水量,对其他子系统提供输入作用。

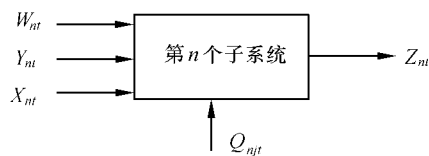


图 2 第 n 个子系统描述

由此,对于给定的系统输入向量,子系统完全可用式(6)进行描述:

$$Z_{nt} = H_{nt}(W_{nt}, Y_{nt}, X_{nt}, Q_{njt}) \quad (6)$$

假定式(6)满足线性关系。

子系统之间的关联为

$$\sum_{n=1}^N Y_{nt} = Y_t \quad X_{nt} = \sum_{m=1}^N C_{nm} Z_{mt} \quad (7)$$

式中: Y_t 为整个系统的总引水量; C_{nm} 是互联矩阵 C 的分量,表示子系统之间存在的线性耦合。

根据拉格朗日对偶理论,将关联约束带入目标函数,得到以下拉格朗日函数:

$$L = \sum_{n=1}^N f_n(Q_{njt}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \mu_{nt}(Z_{nt} - H_{nt}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{nt} \cdot (X_{nt} - \sum_{m=1}^N C_{nm} Z_{mt}) + \sum_{t=1}^T \sigma_t (\sum_{n=1}^N Y_{nt} - Y_t) \quad (8)$$

式中: μ_{nt} , λ_{nt} , σ_t 均为拉格朗日乘子(分别为矩阵 μ^T , λ^T , σ^T 的分量); $f_n(Q_{njt}) = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \alpha_{nj} \left(\frac{D_{njt} - Q_{njt}}{D_{njt}} \right)^2$

是第 n 个子系统的目标函数,与其他子系统相对独立。选取 λ_{nt} 和 σ_t 作为协调变量,把关联输入变量当作独立的寻优变量来处理。当给定 λ_{nt} 和 σ_t 后,以上拉格朗日函数中的关联项 $\lambda_{nt} X_{nt}$ 和耦合项 $\sigma_t Y_{nt}$ 就可归到子系统的拉格朗日函数 L_n 中,在数学上作如下处理:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{nt} \sum_{m=1}^N C_{nm} Z_{mt} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{mt} C_{mn} Z_{nt} \quad (9)$$

从而在子系统间对 $\lambda_{nt} \sum_{m=1}^N C_{nm} Z_{mt}$ 项进行重新分配。经上述处理后拉格朗日函数可写为

$$L = \sum_{n=1}^N [f_n(Q_{njt}) + \sum_{t=1}^T \mu_{nt}(Z_{nt} - T_{nt}) + \sum_{t=1}^T \lambda_{nt} X_{nt} - \sum_{m=1}^N \sum_{t=1}^T \lambda_{mt} C_{mn} Z_{nt} + \sum_{t=1}^T \sigma_t Y_{nt}] - \sum_{t=1}^T \sigma_t Y_t = \sum_{n=1}^N L_n(W_{nt}, Y_{nt}, X_{nt}, Q_{njt}, \mu_{nt}, \lambda_{nt}, \sigma_t) - \sum_{t=1}^T \sigma_t Y_t \quad (10)$$

L 函数具有“可分离”的形式,在第一级上各子问题用拉格朗日函数 L_n 来定义,同第 n 个子问题有关:

$$\begin{cases} \min [f_n(Q_{njt}) + \lambda_{nt} \sum_{t=1}^T X_{nt} - \sum_{m=1}^N \lambda_{mt} \sum_{t=1}^T C_{nm} Z_{mt} + \sum_{t=1}^T \sigma_t Y_{nt}] \\ \text{s.t. } Z_{nt} = H_{nt}(W_{nt}, Y_{nt}, X_{nt}, Q_{njt}) \\ Q_{njt} \in S_n^* \end{cases} \quad (11)$$

式中 S_n^* 为第 n 个分区中供水应满足的约束域。

经分解后优化问题在第一级可分解为 N 个独立子问题。子问题用逐段滑动寻优方法求解。

根据拉格朗日函数的性质,问题的最优解相应于拉格朗日函数的鞍点,原问题是极小化问题,也就是求拉格朗日对偶函数的极大值问题。所以第二级的任务是 $\max L = L(\lambda, \sigma)$ 。

由此,问题转化成了一个无约束非线性规划问题,可采用梯度法进行求解。其协调算法的迭代公式为

$$\lambda_{nt}^{(k+1)} = \lambda_{nt}^{(k)} + \rho_k \left(\frac{\partial L}{\partial \lambda_{nt}} \right)^{(k)} \quad (n = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T) \quad (12)$$

$$\sigma_t^{(k+1)} = \sigma_t^{(k)} + \gamma_k \left(\frac{\partial L}{\partial \sigma_t} \right)^{(k)} \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (13)$$

式中 ρ_k ($\rho_k > 0$) 和 γ_k ($\gamma_k > 0$) 为迭代步长, $k = 0, 1, 2, \dots$ 为迭代次数。

由于 $\frac{\partial L}{\partial \lambda_{nt}} = X_{nt} - \sum_{m=1}^N C_{nm} Z_{mt}$, $\frac{\partial L}{\partial \sigma_t} = \sum_{n=1}^N Y_{nt} - Y_t$, 因此每次修正:

表 1 2003 年水资源供需计算结果

分 区	$P = 50\%$			$P = 75\%$			$P = 95\%$		
	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%
平 阴	1.45	1.29	11	1.64	1.27	22	1.64	1.21	26
长 清	2.06	2.00	3	2.37	1.93	19	2.37	1.81	23
市五区	7.08	7.08	0	7.63	6.50	15	7.63	5.72	25
济 阳	3.15	3.15	0	3.64	3.10	15	3.64	2.72	25
章 丘	3.80	3.80	0	4.37	3.73	15	4.37	3.55	19
商 河	2.61	2.61	0	3.03	2.59	15	3.03	2.27	25
合 计	20.15	19.94	1	22.68	19.11	16	22.68	17.29	24

表 2 2010 年水资源供需计算结果

分 区	$P = 50\%$			$P = 75\%$			$P = 95\%$		
	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%
平 阴	1.63	1.56	4	1.80	1.62	10	1.80	1.48	18
长 清	2.33	2.23	4	2.60	2.33	10	2.60	2.14	18
市五区	8.28	7.94	4	8.76	7.85	10	8.76	7.21	18
济 阳	3.18	3.05	4	3.61	3.24	10	3.61	2.97	18
章 丘	4.25	4.07	4	4.75	4.26	10	4.75	3.91	18
商 河	2.76	2.65	4	3.14	2.81	10	3.14	2.58	18
合 计	22.42	21.49	4	24.66	22.11	10	24.66	20.29	18

表 3 2030 年水资源供需计算结果

分 区	$P = 50\%$			$P = 75\%$			$P = 95\%$		
	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%	需水/亿 m^3	供水/亿 m^3	缺水率/%
平 阴	2.52	2.11	16	2.69	2.25	16	2.69	2.08	22
长 清	2.67	2.24	16	2.93	2.46	16	2.93	2.28	22
市五区	10.80	9.06	16	11.26	9.45	16	11.26	8.73	22
济 阳	3.39	2.84	16	3.80	3.18	16	3.80	2.94	22
章 丘	4.23	3.73	12	4.72	3.96	16	4.72	3.66	22
商 河	3.00	2.51	16	3.36	2.81	16	3.36	2.60	22
合 计	26.60	22.50	15	28.76	24.11	16	28.76	22.29	22

(下转第 58 页)

$$\Delta \lambda_{nt}^{(k)} = \lambda_{nt}^{(k+1)} - \lambda_{nt}^{(k)} = \rho_k \left(X_{nt} - \sum_{m=1}^N C_{nm} Z_{mt} \right) \quad (14)$$

$$\Delta \sigma_t^{(m)} = \sigma_t^{(m+1)} - \sigma_t^{(m)} = \gamma_m \left(\sum_{j=1}^J Y_{jt} - Y_t \right) \quad (15)$$

逐次迭代,直至得到满意解。

2 供需分析成果

规划水平年不同保证率的供需计算结果见表 1~3。2003 年无南水北调水供水,除平阴和长清 2 个子系统外,其他 4 个子系统因有引黄河水耦合变量连接,通过协调使 4 个子系统缺水率相对较小且均匀。2010 年和 2030 年在考虑南水北调水、黄河水、当地水联合供水的条件下,通过模型协调和优化,各个子系统的缺水率基本相等,其中,长江水供水量采用《21 世纪初期山东省水资源可持续利用总体规划》中建议对济南市的分配水量(在 50%、75%、95% 保证率情况下 2010 年水平年调江水量分别为 1 亿 m^3 、3 亿 m^3 、3 亿 m^3 , 2030 年水平年分别为 2 亿 m^3 、5 亿 m^3 、5 亿 m^3)。在模型计算过程中,由于章丘子系统当地水资源较其他子系统丰沛,部分规划年份

行的仿真试验,得出结论:在被控对象数学模型不够精确、参数发生变化或发生负荷扰动时,高精度模糊控制器的动态特性好、鲁棒性强,综合性能优于其他两种控制器。

参考文献:

[1] 沈祖诒.水轮机调节[M].北京:水利水电出版社,1998.
[2] 田勇,沈祖诒.变论域模糊控制器及其应用研究[J].现代制造工程,2005(4):98-100.
[3] 李洪兴.Fuzzy控制的本质与一类高精度Fuzzy控制器的设计[J].控制理论与应用,1997,14(6):868-872.
[4] WANG Li-xin.Fuzzy systems are universal approximator[C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems, France, Nice, 1992:1163-1170.

[5] BUCKLEY J J. Sugeno type controllers are universal fuzzy controllers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1993, 53: 299-303.
[6] 李洪兴.模糊控制的插值机理[J].中国科学: E 辑, 1998, 28(3): 259-267.
[7] ZENG Xue-jin, SINGH M G. Approximation theory of fuzzy systems SISO case[J]. IEEE Trans Fuzzy Systems, 1994, 2(2): 162-176.
[8] TIAN Yong, SHEN Zu-yi. Study of contraction-expansion factor on the variable universe adaptive fuzzy controller[C]//YAO Hong-kang, Computational Intelligence and Industrial Applications, 西安:世界图书出版公司, 2004: 390-394.
[9] 高新陵, 周锐, 朱碧田. 寻孔模糊控制器研究与开发[J]. 河海大学学报:自然科学版, 1999, 27(4): 30-34.

(收稿日期: 2005-10-21 编辑: 骆超)

(上接第 44 页)分布在两端拱座、右岸 F18 断层以及右岸下游岸坡。

由以上成果可以看出:①左岸主要层间错动带滑动的可能性要大一些。②结构面 sh5 左岸有大范围 $K_f \leq 1.3$ 的区域,因此,该结构面的稳定性应引起重视。③结构面 C3 在右岸有大范围 $K_f < 1.3$ 的区域,右坝肩下游靠近临空面附近还存在 $K_f < 1.0$ 的区域,表明该区域可能会出现局部性破坏。但从结构面产状来看,右岸为逆向坡,对保持岩体稳定有利。其次,为了保证下游岸坡安全,可以采取表面性保护措施。④结构面 sh7 上的点安全系数基本上都大于 1.3,稳定性较好。

4 结 语

本文通过对白鹤滩大坝系统的应力、变形、屈服的数值分析,得到以下几点认识:①坝基内的结构面有屈服现象。其中陡倾角结构面中以 F17 屈服最为严重,而缓倾角结构面则是 sh5 和 C3 最为严重。②采用强度储备法,得到白鹤滩拱坝强度储备安全度

在 3.0~3.5 之间,采用水位超载法时,得到水头超载安全度为 1.5~1.6,而采用水密度超载法时,水密度超载安全度为 2.0~2.3,综合的整体安全度是有一定保障的。③结构面 sh5 左岸有大范围区域点安全系数 $K_f \leq 1.3$,该结构面的稳定性应引起重视。结构面 C3 在右岸有大范围区域点安全系数 $K_f \leq 1.3$,右坝肩下游靠近临空面附近还存在 $K_f < 1.0$ 的区域,表明该区域可能会出现局部性破坏。但从结构面产状来看,右岸为逆向坡,对保持岩体稳定有利。本文分析所得成果可为设计施工提供有益的参考。

参考文献:

[1] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2000:314-323.
[2] 山田嘉昭.非线性有限元法基础[M].钱仁耕,乔端,译.北京:清华大学出版社,1988:102-121.
[3] 任青文.岩体平衡分析方法的研究进展[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增刊2):1303-1309.
[4] 陈火红. MSC. Marc/Mentat 2003 基础与应用实例[M].北京:科学出版社,2004:158-166.

(收稿日期: 2005-10-13 编辑: 骆超)

(上接第 54 页)的缺水率较其他子系统小。根据对计算结果的分析表明模型的供需分析结果比较合理。

3 结 语

南水北调工程是实现我国水资源优化配置的战略举措。本文在考虑南水北调东线供水条件下,根据大系统分解协调理论建立以区域供水系统缺水率最小为目标的水资源供需分析数学模型,将其运用于济南市水资源供需分析研究中,计算结果表明了模型的合理性和可用性,为多水源联合供水地区的水资源供需分析计算提供了新的参考。

参考文献:

[1] 周祖光.海南省水资源供需分析[J].水利经济,2005,23

(3):47-49.
[2] 吴伟,张剑峰.沈阳市水资源供需分析及可持续利用战略研究[J].水资源保护,2004(3):40-42.
[3] 陈守真,余爱珍.福建省水资源供需分析与对策研究[J].福建师范大学学报:自然科学版,1997,13(4):107-112.
[4] 张会言,王煜,张新海,等.西北地区水资源供需分析和配置方案[J].人民黄河,2002,24(6):17-19.
[5] 黄永基,马滇珍.区域水资源供需分析方法[M].南京:河海大学出版社,1990:43-63.
[6] 朱道立.大系统优化理论和应用[M].上海:上海交通大学出版社,1988.
[7] 冯尚友.水资源系统工程[M].武汉:湖北省科学技术出版社,1991:35-40.

(收稿日期: 2005-11-08 编辑: 骆超)