

考虑生态影响的缺水城市水资源优化调度模型

付 青¹, 吴险峰²

(1. 中国环境科学研究院水环境研究所, 北京 100012; 2. 国家环境保护总局污染控制司, 北京 100035)

摘要 :考虑生态与环境影响, 将生态效益和社会效益量化, 与经济效益一同构成水资源调度的目标, 建立了多水源、多用户的缺水城市水资源优化调度模型。与一般的水资源调度模型相比, 该模型更能实现水资源的可持续利用, 促进社会经济的可持续发展, 有利于城市生态与环境的改善。模型在北方缺水城市——山东省枣庄市得到了应用。

关键词 :生态; 城市供水; 水资源; 优化调度

中图分类号 :TV213.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2007)03-0017-03

Optimal operation model based on ecological effect for water shortage cities

FU Qing¹, WU Xian-feng²

(1. Institute of Water Environment Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Department of Pollution Control, State Environmental Protection Administration, Beijing 100035, China)

Abstract :Based on the effect of ecology and environment, an optimal water resources operation model for multi-sources and multi-users were established, which took the ecological benefits, the social benefits and the economic benefits together as the objects for water shortage cities. This model is more capable for sustainable utilization of water resources, sustainable development of social economy, and improvement of urban ecology and environment. The model was applied in Zaozhuang City of Shandong Province, a water shortage city in North China.

Key words :ecology; urban water supply; water resources; optimal operation

为缓解城市供水的压力, 多数城市供水水源已由单一水源向多水源转变, 形成了地下水、地表水、跨区域调水、污水处理回用水源等混合供水格局, 随之产生了多水源的协调利用问题和其他一些生态与环境问题。近些年来, 系统分析理论在水资源的联合调度中的研究和应用取得了很大的进展, 决策论、存储论、灰色理论、模糊论等方法也得到了越来越多的应用^[1]。但这些研究, 以区域的整体经济效益最优、供水量最大、缺水损失最小等作为决策目标, 将生态与环境问题作为约束条件处理, 对区域特别是城市各种水源的协调利用关系、节水、污水回用和开源的关系及区域经济发展与生态环境的关系等方面重视不够。本文提出一种综合考虑生态与环境、社会、经济效益的多水源、多用户的水资源优化调度模型。

1 考虑生态影响的水资源调度模型

从两方面考虑生态影响: 一是供水对城市生态环境的改善, 二是不因开采水资源对生态环境造成不利影响。因此, 在调度模型中, 充分考虑城市生态环境用水量, 将它作为一个单独的用水户, 严格控制地下水的超量开采, 防止地面沉降和水环境恶化, 在地下水允许开采量范围内尽可能地少用地下水; 优先利用处理回用水, 最大限度的发挥污水处理厂作用, 改善水环境, 协调各水源的关系, 统一调度分配, 优水优用, 改变已经形成的传统供水格局。

采用主成分分析法^[2]对生态效益和社会效益进行量化。对含有地下水、当地地表水、处理回用水、跨区域调水等多种水源, 生活、城市生态与环境、工业等多种用户的城市供水系统, 建立优化调度模型。

目标函数：

a. 经济效益。对工业、农业供水可以产生直接的经济效益，

$$f_1(x) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^m b_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

式中： b_{ij} 为*i*水源向*j*用户(工业、农业)的供水效益系数，元/ m^3 ，因水源的供水成本不同而有差异； x_{ij} 为*i*水源向*j*用户的供水量； f_1 为经济效益。

b. 生态效益。在城市供水中，生态环境的影响因子主要有城市园林绿化等生态环境需水量、污水处理率、地下水的水位等。从生态角度出发，总是希望生态环境需水量满足程度尽可能的大，污水处理率尽可能的高，地下水开采量尽可能的少。在污水处理设施一定的情况下，目前处理回用水的利用程度与污水处理率密切相关，将3个影响因子均设计为正效应，生态效益

$$f_2(x) = w_1 \left(\sum_{i=1}^m x_{ik} / c_k \right) + w_2 \left(\sum_{j=1}^n x_{rj} / e_r \right) + w_3 \left(e_d - \sum_{j=1}^n x_{dj} \right) / e_d \quad (2)$$

式中： w_1 、 w_2 、 w_3 分别为生态环境需水量、污水处理率、地下水水位3个影响因子的权重系数； x_{ik} 为各水源供生态环境的水量； x_{rj} 为各部门的污水处理利用量； x_{dj} 为各部门的地下水利用量； c_k 为生态环境需水量； e_r 、 e_d 分别为处理后的回水量和地下水量。

c. 社会效益。社会效益主要体现在生活用水上，效益的大小可从生活用水的保证程度和供水水质反映出来，水质可以通过约束条件保证，社会效益

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^m x_{il} / c_l \quad (3)$$

式中： x_{il} 为各水源供生活的水量； c_l 为生活需水量。

确定模型的目标为总效益最大，同时，水资源可持续利用的原则是经济效益、社会效益和生态效益的协同发展^[3]，因此，将3者分别给以权重 w'_1 、 w'_2 、 w'_3 ，确定在目标函数中的地位，权重可结合城市的具体特点由专家决策给出。 f_1 有量纲， f_2 和 f_3 无量纲，因此将 f_1 除以给定的期望最大经济效益 M ，进行无量纲化。建立优化调度模型：

目标函数

$$\max f = \max (w'_1 f_1(x) / M + w'_2 f_2(x) + w'_3 f_3(x)) \quad (4)$$

约束条件

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq e_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq c_j \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$x_{il} = 0$ ，当*i*为处理回用水源时。

式中： e_i 为各水源的可供水量，可作为确定性的； c_j 为各部门的需水量。

2 算例

以北方缺水城市山东省枣庄市为例。枣庄是工农结合、城乡一体的新兴城市，城市人口30.5万人。全市人均水资源量 $420 m^3$ ，早期城市供水主要依靠地下水。近十几年来，随着工业的发展和城市规模的迅速膨胀，需水量急剧增加，城市缺水矛盾十分突出，直接导致了城区2处地下水源地的长期过量开采，并由此引发了大面积的地面塌陷和水环境恶化等环境地质灾害。为解决城市供水问题，近几年先后兴建了水库、城市供水工程、跨区域调水工程、污水处理回用工程等，形成了多水源的供水格局。但由于缺乏科学和统一调度，还没有充分发挥水资源的潜力。该地区供水水源包括地下水、水库水、外调水和处理回用水4处，主要为生活、工业、农业及城市生态环境用水。供水水源和现状年的各用户需水量情况见表1、表2。

表1 水源及用户基本情况

水源	可供水量/ 万 m^3	用水效益(元· m^{-3})	
		工业	农业
地下水	5268	1.04	0.28
周村水库	2997	1.04	0.33
外调水	2920	0.80	0
回用水	1460	0.59	0

表2 用户需水量 万 m^3

用户	现状年 (2003)		预测年 (2008)		
	现状年 (2003)	预测年 (2008)	现状年 (2003)	预测年 (2008)	
工业	9319	11300	生活	2190	3614
农业	1081	1081	生态环境	1013	1378

根据该地区的缺水状况，权重值 w_1 、 w_2 、 w_3 分别取为0.4、0.4、0.2，即地下水尽量少开采。 w'_1 、 w'_2 、 w'_3 分别取为0.5、0.25、0.25，即考虑社会效益和社会效益的总和与经济效益同等重要。水资源的优化分配结果见表3。

表3 水资源优化分配 万 m^3

水源	现状年(2003)				预测年(2008)			
	工业	农业	生活	生态环境	工业	农业	生活	生态环境
地下水	5268	0	0	0	4574	0	694	0
周村水库	2997	0	0	0	2997	0	0	0
外调水	730	0	2190	0	0	0	2920	0
处理回用水	324	123	0	1013	82	0	0	1378
合计	9319	123	2190	1013	7653	0	3614	1378
缺水量	0	958	0	0	3647	1081	0	0

由表3看出，枣庄城市供水现状年基本达到供

需平衡, 缺水量主要表现在经济效益相对较低的农业用水方面, 通过优化调度, 水资源被充分利用, 生活和生态环境用水都能得到满足。2008 年将出现缺水危机, 在地下水不允许超采的情况下, 总缺水量 4 728 万 m³, 缺水量都表现在工业和农业方面, 这就要求要加强工农业特别是工业的节水工作, 通过节水和调整产业结构减少对水资源的需求。

3 结 语

考虑生态与环境影响, 将生态效益和社会效益量化, 与经济效益一同构成水资源调度模型的目标, 与常规的将生态环境、社会等因素作为约束条件处理的模型相比, 更能体现水资源的可持续利用原则,

(上接第 10 页)

积物硫酸盐还原菌含量高于洱海, 这也与阿哈湖沉积物中高浓度的硫酸根离子有关。

阿哈湖和洱海沉积物中硫酸盐还原菌含量的高峰均出现于较浅的深度, 同时当沉积物达到一定深度后硫酸盐还原菌的含量趋于稳定。文献 [11] 表明硫酸盐还原菌是一类具形态多态性的厌氧菌, 可以利用硫酸盐作为电子受体, 并以有机酸、脂肪酸和乙醇作为电子供体, 沉积物硫酸盐还原菌含量空间分布可能与有机碳、有机氮和硫酸根浓度等因素的空间变化有关。

秋季沉积物中硫酸盐还原菌含量较春季高, 特别是秋季洱海沉积物硫酸盐还原菌含量显著高于春季洱海沉积物, 且阿哈湖和洱海秋季沉积物中硫酸盐还原垂直分布较春季广, 表明秋季洱海沉积物更适合硫酸盐还原菌的生长繁殖。这可能是由于大部分硫酸盐还原菌为中温性细菌^[12], 而秋季沉积物温度要高于春季, 同时夏季的大量降水给秋季沉积物带入大量可以供该类微生物利用的有机质。此外, 硫酸盐还原菌属于严格厌氧菌, 而且秋季湖底相对缺氧, 以上诸多因素使秋季更适合硫酸盐还原菌生长繁殖。阿哈湖春秋硫酸还原菌含量变化不明显, 这可能与该湖泊中高浓度的硫酸根离子等理化因素有关。

参考文献:

[1] RUDD J W M, KELLY C A, SCHINDER D W A. Comparison of the acidification efficiencies of by two whole-lake addition experiments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1990, 35(3): 663-679.

促进社会经济的可持续发展, 且可根据各地区具体特点, 分别给出各侧重目标的权重, 很方便地制订出指导城市供水调度的决策方案, 具有很强的可操作性。由于不同地区对生态效益、社会效益等的影响因子有差异, 在它们的量化问题上有待进一步探讨。

参考文献:

[1] 齐学斌, 庞鸿宾, 赵辉, 等. 地表水地下水联合调度研究现状及其发展趋势[J]. *水科学进展*, 1999, 10(1): 39-94.
[2] 胡永宏, 贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 53-72.
[3] 康慕谊. 城市生态学与城市环境[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997: 142-146.

(收稿日期 2005-10-24 编辑 舒建)

[2] KUHL M, JSRGENSEN B B. Microsensor measurements of sulfate reduction and sulfide oxidation in compact microbial communities of aerobic biofilm[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1992, 58: 1164-1174.
[3] EDWARDS E A, WILLS L E, REINHARD M, et al. Anaerobic degradation of toluene and xylene by aquifer microorganisms under sulfate-reducing conditions[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1992, 58: 794-800.
[4] KING J K, KOSTKA J E, FRISCHER M E, et al. Sulfate-reducing bacteria methylate mercury at variable rates in pure culture and in marine sediments[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2000, 66: 2430-2437.
[5] LOVLEY D R, PHILLIPS E J P. Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans*[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1992, 58: 850-856.
[6] 汪福顺, 刘丛强, 梁小兵, 等. 阿哈湖沉积物-水界面硫酸盐还原作用的微生物及其同位素研究[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 20.
[7] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究[J]. *地质地球化学*, 1998, 26(2): 1-8.
[8] 汪雨春, 黄荣贵, 万国江. SWB-1 型便携式湖泊沉积物-界面水取样器的研制[J]. *地质地球化学*, 1998(1): 94-96.
[9] LI Fude, HARRIS B, URRUTIA M M, et al. Reduction of Cr(VI) by a consortium of sulfate-reducing bacteria (SRB III)[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1994, 60: 375-378.
[10] 陈皓文. 海洋硫酸盐还原菌及其活动的经济重要性[J]. *黄渤海海洋*, 1998, 16(4): 64-74.
[11] 马迪根 M T, 马丁克 J M, 帕克 J. 微生物生物学[M]. 杨文博译. 北京: 科学出版社, 2001: 834-838.
[12] 赵宇华, 叶央芳. 硫酸盐还原菌及其影响因子[J]. *环境污染与防治*, 1997, 19(5): 41-43.

(收稿日期 2005-05-08 编辑 舒建)