资源科学
第35卷 第8期 2013年8月 2013,35(8):1584-1592
Resources Science
Vol.35, No.8 Aug., 2013

文章编号:1007-7588(2013)08-1584-09

基于多目标规划的城市水资源应急管理模型研究

李翠梅[1,2],吴健荣[2],王建华[1],王 浩[1],陆艳晨[2]
(1. 中国水利水电科学研究院水资源所,北京 100043;2. 苏州科技学院,苏州 215011)

摘 要:分析了应急状态下,因水资源短缺而造成的经济效益和社会效益损失,构建了经济效益和社会效益测算模型,并以两者耦合的综合效益为目标函数,建立了应急水资源配置模型。分别采用效益分摊系数法、扣除非水成本法、投入产出分析法分析了水资源经济效益系数,指出在城市水资源应急配置中应采用效益分摊系数法更为准确;采用三标度判断矩阵计算了苏州市供水优先次序,以2007年苏州市居民生活及造纸、食品、冶金、电子信息、化工和纺织六大主要行业供、需水量为依据,验证了以综合效益最大为目标函数的应急水资源管理模型,计算了2007年苏州市不同应急状态下各类效益损失情况,其中Ⅱ级状态下经济效益、综合效益损失分别为:29.2亿元和38.35亿元。计算结果表明:与2007年无锡爆发的蓝藻事件产生的经济、社会效益损失相近,模型具有较高的准确性。并以此为基础,进一步推算了2015年、2020年、2025年苏州不同应急状态下因水资源短缺而造成的经济、社会及综合效益损失,并给出了相应的水资源应急配置方案。

关键词:水资源;应急管理;模型;经济效益;综合效益;多目标规划;苏州

1 引言

城市水资源应急管理是指水资源非常规突发事件爆发后,城市水资源配置、供应、管理处于应急状态之下,而在这个特定状态下,不仅要保障社会稳定、有序的生活、生产,还要将有限可用的水资源进行科学、合理、高效配置,尽可能最大程度地满足各类企事业单位生产、运行的需求。从非常规应急事件发生到结束,不同类型的应急事件影响时间不同,短则1~2天,长则1~2周甚至更长,影响人数往往数以万计,甚至几十万上百万人口,产生的经济损失通常以亿元来计,少则数亿,多则上百亿。如何在应急状态下,既能保障居民生活用水,维护社会安定,又能将有限的水资源进行合理配置,令其产生的社会综合效益最大,提高应急状态下水资源配置综合效益应成为当前应急状态下水资源管理的核心内容。

不论城市还是农村,千家万户、各行各业都需要用水,即都是水资源配置的对象。相同的水量在不同行业所产生的经济、社会效益是不同的,不同行业所需要的水资源支撑量也是不一样的。因此,用水类型的多元性,用水效益的多样性从本质上决定了水资源配置目标的多重性。正常状态下,水资源对人类生活、生产的支撑作用不易引起人们的重视,原因在于国家从战略高度上为居民生活、社会生产等各类用水提供了"取-输-净-配-排"等基础设施的建设,随着城市化进程的加快,越来越多的居民与企事业单位用水的普及率与舒适性不断得到提高,即用水的数量与质量在正常状态下越来越高。高质量的供水服务是我国实现基本现代化的重要支撑条件之一,但是高质量的供水服务在保障人们优质、顺利用水的同时容易造成人们对水资源对社会重要支撑作用认识的忽略。这个支撑作用只有在突发事件影响下,城市水资源配置受到影响,人们的生活、社会生产因缺水而造成巨大损失时才能突显出来。但是由于突发事件本身具有不可预测性、概率小的特点,水资源应急管理模型理论研究尚未受到足够的重视。随着我国城市化进程、城乡一体化快速发展,全球气候变化加剧,极

收稿日期:2013-04-10;修订日期:2013-06-17
基金项目:国家自然科学基金项目(编号:51109153);苏州市科技局科技支撑计划社会发展项目(编号:SS201129)。
作者简介:李翠梅,女,安徽定远人,博士后,副教授,硕士生导师,研究方向为城市水资源与给水排水工程设计与运行最优化。
E-mail:cuimeili@163.com

http://www.resci.cn
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

端和突发事件越来越呈现频繁的趋势,水资源应急管理模型研究成为解决我国面临的水资源管理重要问题之一。

国外对水资源应急管理进行了大量的研究。Michael J. Kuby等研究了大坝的多目标优化模型[1];Nigel W.T. Quinn等研究了应急状态下环境响应系统[2];C.C. Dorea研究了应急状态下水处理混凝剂的选择和使用[3];Wang Jing等以三峡工程为例研究了特大型水利水电工程的应急管理体系[4];Avirup Sen Gupta等基于历史气候变化规律分析,结合可持续发展的观点,探索性分析了美国缅因州干旱风险与评估,并以此为依据提出水资源管理政策建议[5];Rachelle M. Willis等研究家庭终端用水量变化对环境和节约用水的量化影响[6];Jochen E. Schubert等建立了城市洪水淹没模型[7];Siew-Leng Loo分析了应急状态下水资源供给的技术和标准选择[8];P. Fraternali等研究了如何利用广泛的人力资源和社会计算:即社会调查与计算,例如网络问卷调查等。更有效地利用信息和通信技术提高水资源管理系统基础性数据的获得[9];Christina Cook等基于狭义与广义水管理提出了一个新的水安全评价的概念[10];Srijana Dawadi等评估了不断变化气候条件和人口增加的情况下,水资源需求侧管理[11]。

20世纪90年代以后,随着可持续发展理论的深入发展,单一追求经济效益最大化的目标函数已逐渐不能适用,因此社会效益、环境效益最大化被纳入水资源优化配置的目标函数之中,使得水资源优化配置更合理化,更符合国家提倡的可持续发展政策。1992年刘恒等运用三级递阶结构模型解决了京津唐地区的供水配置问题[12]。1994年沈佩君等建立了大系统分解协调模型,解决了枣庄市多水源的联合优化调度问题[13]。1998年邱林等以综合效益最优为目标函数,建立了区域灌溉优化配置模型,并应用于宁陵县多水源优化中[14]。2002年吴泉源等以水资源综合效益最大为目标建立配置模型,解决了龙口市水资源优化调度问题[15]。2008年甘志国等分析了北京市水资源利用现状,提出了基于规则控制的水资源配置模拟模型[16]。2009年吕一兵等以社会综合效益最大和各用水单位效益最优为目标函数,建立了双层规划的水资源优化配置模型[17]。2011年刘德地等以经济效益和谐度、社会效益和谐度、环境效益和谐度为三大目标建立水资源优化配置模型,采用混沌和声搜索算法对其求解,并成功应用于北三河流域[18]。

城市应急供水配置是建立在水资源优化配置的基础上,考虑在不同的应急状态下,运用工程措施与优化手段,对居民生活用水和工业用水进行科学合理的分配,遵循高效、公平和可持续发展的原则,优先保证居民生活用水的基本需求,其次满足重要企事业单位的供水,力求实现有限水资源的经济与社会的综合效益最大,从而提高应急状态下水资源利用的合理性和科学性。

2 应急供水配置模型的建立

水资源的优化配置可从开发和利用两个角度深入,即适度开发、合理利用,应急供水优化配置是从水资源的使用角度探讨水资源的合理配置,对环境、生态、工业、农业、生活等不同用水需求保证重点、区别对待。城市应急供水配置模型研究对象是城市居民生活用水以及不同行业的工业用水,其目标是通过优化供水技术对城市居民生活用水以及不同行业的工业用水进行合理分配,从而使社会综合效益达到最高[19-21]。

2.1 目标函数

应急供水配置模型是一个多目标决策问题,社会综合效益可以分解为社会效益和经济效益两个部分,因此其目标函数可表示为:

$$G=\max F\left\{f_1(x),\ f_2(x)\right\} \tag{1}$$

式中 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 分别表示经济效益和社会效益函数;行向量 $x=(x_i)$ 为决策向量或用水向量;x_i 为不同行业的用水量。

2.1.1 经济效益测算模型　本文以供水产生的净效益来表示经济效益,则城市应急供水优化配置模型的经济效益目标函数表示如下:

$$\max f_1(x)=\max\ (B-C)\,x^T \tag{2}$$

式中 x 为决策向量或用水向量;$B=(B_i)$ 为不同行业的单位供水效益系数向量;$C=(C_i)$ 为不同行业的单位供水成本系数向量;T 为不同水平年。

2.1.2 社会效益测算模型　大量文献资料显示,社会效益难以直接衡量,通常采用地区缺水量、粮食

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
http://www.resci.cn

产量等作为衡量社会效益的指标之一。如2008年大连理工大学的黄旭以缺水总量最小为目标函数，建立了大连市的水资源合理配置模型，并求解出2010年大连市水资源配置的多组优化方案[22]。2006年陈南祥、李跃鹏等人以粮食产量与期望产量的差值最小作为目标函数，建立了基于遗传算法的多目标优化模型，并得到成功应用[23]。

缺水量不大的情况下对居民生活、工业生产不会造成太大的损失，可以通过节水等其他措施缓解缺水的现状，但是缺水达到一定程度时，就会严重影响居民生活、工业生产等社会活动。我国人均水资源短缺，已严重影响我国部分地区的生活及生产。因此将缺水量最少作为衡量社会效益的一项指标，具有其合理性和必要性。本文将缺水量最少作为社会效益最优的表征之一，数学表达式为：

$$\min f_{21}(x)=\min\sum\varphi_i\cdot B_i\cdot(D_i-x_i) \quad (3)$$

式中 x_i 为不同行业的工业用水量；D_i 为不同行业的需水量；B_i 为不同行业的单位供水效益系数；φ_i 表示不同行业的供水优先次序。

社会效益目标要求水资源利用要与经济发展相协调，与人民生活水平相一致，因此本文以实际用水量与需水量的协调度值来表示，其值越接近1表明水资源利用与经济发展和人民生活水平越协调，即社会效益越高。

协调度函数[24,25]可表示为：

$$\max f_{22}(x)=\exp[-(x_i-D_i)^2/S^2] \quad (4)$$

式中 x_i 为不同行业的工业用水量；D_i 为不同行业的需水量；S^2 为两者的方差。

通过协调度函数可以反映实际值与协调值的接近程度，直观评价系统的协调发展情况。

将两者结合取其综合值来表征社会效益目标函数，城市应急供水优化配置模型的社会效益目标函数表示为：

$$\min f_2(x)=f_{21}(x)/f_{22}(x) \quad (5)$$

2.2 约束条件

2.2.1 水资源可利用量约束

$$\sum x_i\leqslant W_g \quad (6)$$

式中 x_i 为不同用户的用水量；W_g 为城市可供水量。

2.2.2 各用水户用水量约束

(1)最低用水量限制：

$$x_{id}\geqslant x_{id\min} \quad (7)$$

$$x_{in}\geqslant x_{in\min} \quad (8)$$

式中 $x_{id\min}$、$x_{in\min}$ 分别为应急供水状态下居民用水和各行业用水的最低用水量。

(2)最高用水量限制：

$$x_{id}\leqslant x_{id\max} \quad (9)$$

$$x_{in}\leqslant x_{in\max} \quad (10)$$

式中 $x_{id\max}$、$x_{in\max}$ 分别为居民用水和各行业用水的最高用水量。

2.2.3 变量非负约束

$$x_i\geqslant 0 \quad (11)$$

2.3 参数计算

2.3.1 单位供水效益系数　单位供水效益系数计算方法有多种，通常可用万元产值用水量的倒数来表示，这是最为简单但是比较粗糙的一种估计手段。本文将通过投入产出分析法[26]、残值法[27]、扣除非水成本法[28]和效益分摊系数法[29,30]等4种方法来分析水资源经济效益系数。结果见表1。

由表1可见，扣除非水成本法和投入产出分析法计算的结果不稳定，跳跃性较大，特别是当水资源对工业产值的贡献远远小于资本和其他生产要素对产值的贡献时，如电子信息行业，其水资源效益系数分别高达1 205.53元/m³和3 364.93元/m³，数据明显不合群，原因与其计算原理密不可分，扣除非水成本法和投入产出分析法这两种处理方法将所有非水生产要素成本的投入产生的贡献值都归因于水资源生产要素成本的投入，造成的结果是对于利润高、用水量少的高效用水行业计算结果远远

表1 苏州市六大行业水资源效益系数

Table 1 Water resource efficiency coefficient of six major industry in Suzhou City (元/m³)

行业名称	效益分摊系数法	扣除非水成本法	投入产出分析法
造纸行业	31.30	60.70	103.10
食品行业	30.70	35.00	81.94
冶金行业	39.70	47.07	268.37
电子信息行业	51.00	1 205.53	3 364.93
化工行业	47.00	27.75	97.14
纺织行业	34.00	51.10	61.38

http://www.resci.net
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大于实际值。与其相比,效益分摊系数法则克服了这种弊端,通过效益分摊系数,将水生产要素的贡献按投入(或成本)比例从所有生产要素对产值的贡献中分离出来,行业的水资源经济效益系数不仅取决于行业的工业产值,又取决于水生产要素对行业产值的重要程度,从而使得计算结果更具可靠性、稳定性和合理性。

2.3.2 *供水优先次序* 供水优先次序可以采用层次分析法进行计算,对苏州市六大行业及居民生活用水进行分析计算,本文采用三标度的判断矩阵[31],并将已建的判断矩阵改造成拟优传递矩阵,使之既满足一致性要求,又减少计算量。结果见表2。

由表2可以看出,居民生活用水的排序值为0.627,已大于50%,可见正常或非正常供水情况下,居民生活用水都应优先供应,其次依次是造纸行业、食品行业、冶金行业、电子信息行业、化工行业、纺织行业。

3 苏州市应急供水配置模型的求解

3.1 以2007年苏州市的应急供水为依据验证模型可行性

以苏州市2007年居民生活、造纸行业、食品行业、冶金行业、电子信息行业、化工行业和纺织行业需水量为依据,以苏州市的综合效益最大化为目标函数,建立苏州市应急供水优化配置模型,对2007年苏州市不同应急状态下的供水分配进行优化配置,配置结果及相应的目标函数值见表3和表4。

从各用水单位的配水量来看,随着应急级别的提高,居民生活用水量占总用水量的比重不断增加,而各用水量占总用水量的比重不断降低,见表5,表明应急级别越高,城市供水应首先满足居民生活用水,其次满足工业用水与其它用水。各行业中

表2 苏州市供水优先次序权重

Table 2 Water usage priority in Suzhou City

用水类型	排序结果
居民生活用水	0.627
造纸行业用水	0.142
食品行业用水	0.094
冶金行业用水	0.060
电子信息行业用水	0.038
化工行业用水	0.024
纺织行业用水	0.016

电子信息行业的用水量所占比重最小,在不同应急状态下,只需基本保证其最低用水量,对城市的综合效益影响不大,也即若将该行业的多余的水量分配给其余行业,产生的综合效益更大。造纸行业和食品行业用水量占总用水量的比重最高,但是产生的经济效益也最大,因此提高城市综合效益的有效途径之一,即大力提倡高耗水行业的节水技术,尽可能的降低此类行业的用水量,将多余的用水量供应给其它用水户,使之产生更大的经济、社会效益。

从目标函数值来看,随着应急级别的上升,水量供应不足,产生的经济效益不断降低,由于缺水造成的经济损失增多,从而协调度也随之不断下降,反之,随着应急等级下降,水量供应逐渐增加,从而产生的经济效益增加,缺水导致的经济损失下

表4 2007年多目标优化配置目标值

Table 4 Multi-objective optimization target in 2007 (万元)

应急状态	目标f_1	目标f_{21}	目标f_{22}	目标f_2
Ⅰ级	47 171.70	35 885.94	0.07	509 257.09
Ⅱ级	110 764.25	29 161.56	0.32	91 040.59
Ⅲ级	278 667.87	8 038.97	0.33	24 360.52
Ⅳ级	388 437.88	515.52	0.57	904.42
Ⅴ级	397 792.75	126.84	0.99	127.37

表3 2007年采用fgoalattain优化函数求解结果

Table 3 Results by using the Fgoalattain optimization function in 2007 (万m^3)

水平年	应急状态	造纸行业	食品行业	冶金行业	电子信 息行业	化工行业	纺织行业	居民生活	总计
2007	Ⅰ级	1 099	1 007	217	11	334	495	15 058	18 221
	Ⅱ级	1 922	1 762	379	20	584	867	17 241	22 775
	Ⅲ级	5 493	3 274	542	28	834	1 238	15 921	27 330
	Ⅳ级	5 493	5 034	1 084	56	1 629	1 610	16 980	31 886
	Ⅴ级	5 493	5 034	1 084	50	1 668	2 265	20 846	36 440

注:1. fgoalattain优化函数是matlab工具箱中求解多目标规划的一个常用函数,是实现多目标规划较好的算法之一。

2. 应急状态从Ⅴ级到Ⅰ级,逐级上升,Ⅰ级是最严重的状态。应急状态划分依据详细内容见作者相关文献。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net http://www.resci.cn

表5 2007年不同应急状态下各用水户的用水量占总用水量的比重

Table 5 The water usage proportion of the total water consumption under different emergency state in 2007（%）

应急状态	造纸行业	食品行业	冶金行业	电子信息行业	化工行业	纺织行业	居民生活
Ⅰ级	6.03	5.53	1.19	0.06	1.83	2.72	82.64
Ⅱ级	8.44	7.74	1.66	0.09	2.56	3.81	75.70
Ⅲ级	20.10	11.98	1.98	0.10	3.05	4.53	58.25
Ⅳ级	17.23	15.79	3.40	0.18	5.11	5.05	53.25
Ⅴ级	15.07	13.81	2.97	0.14	4.58	6.22	57.21

降,协调度也随着不断地上升。

从综合效益损失值来看(表6),Ⅰ级应急状态下,苏州市直接经济损失达到35.6亿元,社会效益损失为50.9亿元,综合效益损失达到86.53亿元,其中社会效益损失占了综合效益损失的一半以上,说明当发生Ⅰ级应急供水时,对社会造成的影响已不仅仅是直接的经济损失,还包括50%以上的社会效益损失。随着应急等级的加大(从Ⅴ级到Ⅰ级),经济效益的损失占综合效益损失的比重逐渐降低,社会效益损失所占比重明显增加,表明在极端供水情况下,社会效益损失占主要地位。

根据调查数据,1990年太湖蓝藻爆发,导致无锡停水半个月,造成直接经济损失超过2亿元(折算成2007年价格水平为38.4亿元);2007年太湖蓝藻再次爆发,停水4天,影响200多万无锡市民正常生活,造成直接经济损失超过30亿元。无锡市两次蓝藻爆发导致的供水突发事件,其应急状态均达到了Ⅰ级应急等级,造成的直接经济损失与模型计算结果相差不大,考虑到苏州市的经济发展水平略高于无锡市,从而直接经济损失高于无锡市的经济损失,属合理化范畴,因此该模型适用于苏州市及其周边地区的应急供水配置。

3.2 预测不同规划年的应急供水

文章首先以2007为年基准水平年研究和验证了模型,然后在此基础上进行了不同年的预测。通过对2007年苏州市居民用水和六大支柱产业的模拟配置结果,验证了苏州市应急供水配置模型对于不同应急状态下苏州市供水配置具有一定的可行性。运用该模型预测苏州市2015年、2020年和2025年的城市应急供水情况,配置结果及配置的目标函数值见表7、表8。

从各用水户的配水量来看,2015年、2020年和2025年的居民生活用水量占总用水量的比重总体与2007年的趋势一致,见表9。Ⅰ级应急状态下供水以居民生活为主,其比重最高;电子信息行业的供水量仍然是众多行业中最少的,属于低耗水行业;造纸行业和食品行业的比重较2007年有所上升,对城市的整个综合效益会产生一定的影响,因此发展这两个行业时应强调节水的重要性;其次,用水比重由大及小依次为纺织行业、化工行业、冶金行业。

从各分目标函数值来看,不同规划水平年下,随着应急等级的增加,经济效益降低,缺水量增加,而协调度也在下降,3种规划水平年呈现的总趋势是一致的。在应急状态下,虽然在应急等级增加的情况下,不断提高居民生活用水的比重,但由于应急等级高时,其总供水偏低,因此造成了缺水量的增加,协调度的降低,又因为应急等级增高时,为满

表6 2007年不同应急状态下的综合效益损失值

Table 6 The overall efficiency loss value caused by water shortage under different emergency state in 2007

（万元,%）

应急状态	经济效益损失值	社会效益损失值	综合效益损失值	经济效益比重	社会效益比重
Ⅰ级	356 061	509 257	865 318	41.15	58.85
Ⅱ级	292 469	91 041	383 509	76.26	23.73
Ⅲ级	124 565	24 361	148 926	83.64	16.36
Ⅳ级	14 795	904	15 700	94.24	5.60
Ⅴ级	5 440	127	5 568	97.70	2.23

注:经济效益损失值=常态下的经济效益-应急状态下的经济效益

http://www.resci.net
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

足居民生活用水的要求,降低了工业用水量,从而使其产生的经济效益也随着降低。在这种情况下,首先要提高居民以及企业节水意识,加强水资源的重复使用率;其次应不断开发新的、可行性较强的节水技术,并将之推广;再采用水资源优化配置技术,对水资源进行合理配置,使其发挥最大的经济、社会效益。

从综合效益损失值来看(表10),2015年、2020年和2025年4个水平年时,Ⅰ级应急状态下的综合效益损失值分别为99.81亿元、391.55亿元和908.59亿元,不同规划水平年的经济效益损失值、社会效益损失值均随着应急等级的增加而增加,从而导致

表7 苏州六大行业不同应急状态下水资源配置预测

Table 7 Water allocation results for Six Industries in Suzhou city under different emergency state (万 m^3)

水平年	应急状态	造纸行业	食品行业	冶金行业	电子信息行业	化工行业	纺织行业	居民生活	总计
2015	Ⅰ级	1 880	1 723	371	19	571	848	25 771	31 183
	Ⅱ级	6 263	3 096	649	33	999	1 483	26 455	38 978
	Ⅲ级	9 085	4 339	927	48	1 428	2 119	24 930	42 876
	Ⅳ级	9 400	5 616	1 206	96	2 855	4 238	23 363	46 774
	Ⅴ级	9 400	8 082	1 855	96	2 855	4 237	28 045	54 570
2020	Ⅰ级	2 769	2 538	546	28	841	1 249	32 219	40 190
	Ⅱ级	4 846	4 442	956	49	1 472	2 185	34 982	48 932
	Ⅲ级	6 923	6 346	1 366	70	2 103	3 121	37 486	57 415
	Ⅳ级	10 466	8 250	1 776	92	2 734	4 058	47 266	74 642
	Ⅴ级	13 847	12 692	2 732	113	3 449	6 026	47 266	86 125
2025	Ⅰ级	10 280	5 236	1 006	52	1 549	2 299	38 781	59 203
	Ⅱ级	20 397	7 478	3 406	91	3 561	6 636	43 006	84 575
	Ⅲ级	20 397	13 409	2 568	115	3 407	5 058	48 079	93 033
	Ⅳ级	20 397	18 696	3 591	207	4 337	6 437	56 283	109 948
	Ⅴ级	20 397	18 696	4 024	207	5 576	8 276	61 230	118 406

表8 不同应急状态下基于多目标规划的苏州六大行业水资源优化配置目标函数值

Table 8 Multi-objective optimization target of Six Industries in Suzhou city under different emergency state(万元)

水平年	应急状态	目标f_1	目标f_{21}	目标f_{22}	目标f_2
2015	Ⅰ级	80 690.76	61 421.97	0.16	374 793.37
	Ⅱ级	280 014.43	36 461.53	0.27	91 967.59
	Ⅲ级	441 356.90	18 810.66	0.38	49 933.67
	Ⅳ级	626 223.13	10 205.45	0.40	37 402.61
	Ⅴ级	701 423.20	1 543.69	0.85	1 825.27
2020	Ⅰ级	136 627.98	90 478.25	0.03	3 015 941.67
	Ⅱ级	305 468.22	73 513.98	0.12	602 573.61
	Ⅲ级	475 111.36	56 549.72	0.31	182 418.45
	Ⅳ级	661 169.88	33 067.18	0.87	38 131.82
	Ⅴ级	996 299.24	1 026.27	0.98	1 028.68
2025	Ⅰ级	468 070.00	80 289.00	0.01	8 028 900.00
	Ⅱ级	1087 289.00	38 432.00	0.04	960 800.00
	Ⅲ级	1150 122.00	24 298.00	0.15	164 656.53
	Ⅳ级	1389 932.00	4 626.00	0.59	7 828.86
	Ⅴ级	1498 134.00	1 197.00	0.84	1 431.58

http://www.resci.cn
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表9 不同应急状态下各用水户的用水量配置百分数

Table 9 The percentage of water users in water configuration under different emergency state (%)

水平年	应急状态	造纸行业	食品行业	冶金行业	电子信息行业	化工行业	纺织行业	居民生活
2015	Ⅰ级	6.03	5.53	1.19	0.06	1.83	2.72	82.64
	Ⅱ级	16.07	7.94	1.67	0.08	2.56	3.80	67.87
	Ⅲ级	21.19	10.12	2.16	0.11	3.33	4.94	58.14
	Ⅳ级	20.10	12.01	2.58	0.21	6.10	9.06	49.95
	Ⅴ级	17.23	14.81	3.40	0.18	5.23	7.76	51.39
2020	Ⅰ级	6.89	6.32	1.36	0.07	2.09	3.11	80.17
	Ⅱ级	9.90	9.08	1.95	0.10	3.01	4.47	71.49
	Ⅲ级	12.06	11.05	2.38	0.12	3.66	5.44	65.29
	Ⅳ级	14.02	11.05	2.38	0.12	3.66	5.44	63.32
	Ⅴ级	16.08	14.74	3.17	0.13	4.00	7.00	54.88
2025	Ⅰ级	17.36	8.84	1.70	0.09	2.62	3.88	65.51
	Ⅱ级	24.12	8.84	4.03	0.11	4.21	7.85	50.85
	Ⅲ级	21.92	14.41	2.76	0.12	3.66	5.44	51.68
	Ⅳ级	18.55	17.00	3.27	0.19	3.94	5.85	51.19
	Ⅴ级	17.23	15.79	3.40	0.17	4.71	6.99	51.71

表10 不同水平年在不同应急状态下的经济、社会效益损失

Table 10 Economic, social losses under different emergency state

(万元)

水平年	应急状态	经济效益损失	社会效益损失	综合效益损失
2015	Ⅰ级	623 303	374 793	998 097
	Ⅱ级	423 980	91 968	515 947
	Ⅲ级	262 637	49 934	312 571
	Ⅳ级	77 771	37 403	115 173
	Ⅴ级	2 571	1 825	4 396
2020	Ⅰ级	899 541	3 015 942	3 915 483
	Ⅱ级	730 701	602 574	1 333 274
	Ⅲ级	561 058	182 418	743 476
	Ⅳ级	374 999	38 132	413 131
	Ⅴ级	39 870	1 029	40 898
2025	Ⅰ级	1 057 020	8 028 900	9 085 920
	Ⅱ级	437 801	960 800	1 398 601
	Ⅲ级	374 968	164 657	539 625
	Ⅳ级	135 158	7 829	142 987
	Ⅴ级	26 956	1 432	28 388

综合效益损失值也不断增加，而社会效益损失值占综合效益损失值的比重则不断上升，甚至在Ⅰ级应急状态时，社会效益损失值的比重超过50%，占了主要地位。

在强调水资源优化配置降低供水突发事件造成损失的同时，应倡导“开源与节流”：①增加可供水量，在突发事件发生时能及时调用可用水资源；②将节水技术推广到企业、居民生活中，增加水资源的重复使用率，从而更好的实现水资源的合理利用与配置。

4 结论

极端和突发事件频繁是中国面临的水资源问题之一，要解决或缓解这一严重问题必须做好水资源应急风险管理。本文以城市综合效益最优为目标函数，构建了城市应急供水配置模型，通过社会效益和经济效益两个函数来表征综合效益，并分别给出了测算函数模型。以苏州市为例，采用苏州市2007年城市应急供水数据对模型进行了验证，结果表明，所构建的模型可用于苏州及其周边地区。以此为基础，预测苏州2015年、2020年、2025年5种应急状况下，社会效益、经济效益及综合效益损失，并给出了相应的水资源配置方案。从预测结果可以看出，未来10~20年期间，居民生活用水量逐步趋于稳定，社会水资源总需求量则不断增加，单位水资源量对社会、经济发展的支撑作用越来越明显，社会、经济发展对水资源的依赖程度在不断加大，一旦缺水造成的社会、经济损失呈明显上升趋势。

http://www.resci.net
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献(References):

[1] Kuby, M.J., Faqan W F, Revelle C S, et al. A multiobjective optimization model for dam removal: An example trading off salmon passage with hydropower and water storage in the Willamette basin[J]. *Advances in Water Resources*, 2005, 28(8): 845-855.

[2] Quinn, Nigel. W.T., Jacobs, et al. Design and implementation of an emergency environmental response system to protect migrating salmon in the lower San Joaquin River, California[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(4): 416-422.

[3] Dorea, C.C. Coagulant - based emergency water treatment[J]. *Desalination*, 2009, 248(1 - 3): 83-90.

[4] Jing, W., Z. Xiazhong. The study on emergency management system of supergiant water resources and hydropower projects[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11: 1142-1146.

[5] Sen Gupta, A., S. Jain, J. Kim. Past climate, future perspective: An exploratory analysis using climate proxies and drought risk assessment to inform water resources management and policy in Maine, USA[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 941-947.

[6] Willis, R.M., Stewart R A, Panuwatwanich K, et al. Quantifying the influence of environmental and water conservation attitudes on household end use water consumption[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(8): 1996-2009.

[7] Schubert, J.E., B.F. Sanders. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency[J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 41: 49-64.

[8] Loo, S., Fane A G, Krantz W B, et al. Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria[J]. *Water Research*, 2012, 46(10): 3125-3151.

[9] Fraternali, P., Castelletti A, Soncini S R, et al. Putting humans in the loop: Social computing for water resources management[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 37: 68-77.

[10] Cook, C., K. Bakker. Water security: Debating an emerging paradigm[J]. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 94-102.

[11] Dawadi, S., S. Ahmad. Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 261-275.

[12] 刘恒,宋克强,乔翠芳. 大系统水资源模拟模型及其在京津唐供水规划中的应用[J]. 海河水利,1992,3(1):23-29.

[13] 沈佩君,张威升. 多种水资源的联合优化调度[J]. 水利学报,1994,22(5):1-8.

[14] 邱林,马建琴. 区域灌溉水资源优化分配模型及其应用[J]. 人民黄河,1998,14(9):15-18.

[15] 吴泉源,孟凡海. 龙口市水资源优化调度系统的设计与应用研究[J]. 地理科学,2002,33(5):626-630.

[16] 葛文波,王蓉. 线性规划在三峡-葛洲坝梯级枢纽优化调度中的应用[J]. 中国电力教育,2009,34(9):250-254.

[17] 甘治国,蒋云钟,鲁帆,等. 北京市水资源配置模拟模型研究[J]. 水利学报,2008,39(1):91-95.

[18] 刘德地,王高旭,陈晓宏,等. 基于混沌和声搜索算法的水资源优化配置[J]. 系统工程理论与实践,2011,31(7):1378-1386.

[19] 张吉辉,李健,唐燕. 中国水资源与经济发展要素的时空匹配分析[J]. 资源科学,2012,34(8):1546-1555.

[20] 裴源生,张金萍. 广义水资源合理配置总控结构研究[J]. 资源科学,2006,28(4):166-171.

[21] 张雪飞,程水源,郭秀锐,等. 多目标优化方法在区域水资源优化配置中的应用[J]. 安全与环境学报,2006,6(4):73-77.

[22] 赵永,王劲峰,蔡焕杰. 水资源问题的可计算一般均衡模型研究综述[J]. 水科学进展,2008,19(5):756-762.

[23] 唐德善,陆海曙. 塔里木河下游输水优化配置模型研究[J],水科学进展,2009,20(3):443-447.

[24] 肖志娟,解建仓,孔珂,等. 应急调水效益补偿的博弈分析[J]. 水科学进展,2005,16(6):817-821.

[25] 黄旭. 大连市水资源合理配置及其方案综合评价研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.

[26] 陈南祥,李跃鹏,徐晨光. 基于多目标遗传算法的水资源优化配置[J]. 水利学报,2006,37(3):308-313.

[27] 姚水萍. 富阳市投入产出模型和水资源优化配置模型[D]. 杭州:浙江大学,2006.

[28] 黄曼丽,张健,丁大发,等. 基于遗传算法的区域水资源优化配置研究[J]. 人民长江,2008,39(6):29-32.

[29] 汪党献,王浩,倪红珍,等. 国民经济行业用水特性分析与评价[J]. 水利学报,2005,36(2):167-173.

[30] 甘泓,汪林,倪红珍,等. 水经济价值计算方法评价研究[J]. 水利学报,2008,39(11):1160-1166.

[31] 李良县,甘泓,汪林,等. 水资源经济价值计算与分析[J]. 自然资源学报,2008,23(3):494-499.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
http://www.resci.cn

An Emergency Management Model Based on Multi-objective Planning for Urban Water Resources

LI Cuimei[1,2], WU Jianrong[2], WANG Jianhua[1], WANG Hao[1], LU Yancheng[2]

(*1. Depart. of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydroppwer Research, Beijing* 100043, *China*;
2. Depart. Of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, *China*)

Abstract: Here, we explore how to improve the overall efficiency of water allocation while protecting domestic water. Using Suzhou as a case study we validate our model of comprehensive benefits for the emergency management of water resources by calculating all kinds of effective losses from a state of emergency in 2007. The economic efficiency and the overall efficiency of loss are 2.92 billion CNY and 3.84 billion CNY under the second emergency state, which is very close to the 2007 outbreak of blue-green algae in Wuxi. We then calculated the economic losses, social benefits losses and the overall efficiency losses caused by water shortages in Suzhou under different emergency states in 2015, 2020 and 2025. The results indicate that during the next 10~20 years, domestic water will gradually stabilize, total demand of water resources will increase, and water resources will play a more obvious supporting role in social and economic development. Thus, social and economic development in dependent on water resources and this will only increase, meaning the social and economic loss from water shortages will also increase.

Key words: Water resources; Emergency management; Model; Economic benefits; Comprehensive benefits; Multi-objective planning

http://www.resci.net
© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net