

多目标约束下区域水资源优化配置研究

张玲玲, 高亮

(河海大学 公共管理学院 水管理研究所, 南京 210098)

摘要: 随着社会经济的快速发展,用水需求增加与水资源短缺、水资源污染之间的矛盾日益尖锐,使得水资源已经成为制约区域社会经济发展的瓶颈。文章在综合考虑经济、社会、生态等因素的基础上,建立区域多目标水资源优化配置模型,实现从传统的单目标约束向多目标约束转变的新研究思路。在多目标约束下以济宁市为研究对象,通过建立模型和对优化配置结果的分析,诊断出济宁市农业和工业存在严重缺水情况,超过全市平均缺水率的城市有市中区、任城区、曲阜市、邹城市、泗水县和嘉祥县。研究结论将为区域水资源优化配置、落实最严格水资源管理制度提供决策依据。

关键词: 水资源优化配置; 多目标; 多水源; 多用户

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0016-04

Study on optimal allocation of regional water resources under constraint of multi-objective

ZHANG Lingling, GAO Liang

(Water Management Institute, School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the rapid development of social economy, the conflict between the increase of water demand and shortage, pollution of water resources has become increasingly acute, which make water resources become a bottleneck of regional social and economic development. This paper established a model of regional multi-objective optimal allocation of water resources based on the comprehensive consideration of factors such as economy, society and ecology, which realized a research idea of change from the traditional single objective constraint to multi-objective constraints. Taking Jingling city as a research subject under multi-objective constraints, through the establishment of model and the analysis of results, the paper got the result that agriculture and industry are faced with serious water shortage situation. Renchen, Shizhong, Qufu, Zoucheng, Sishui, Jiexiang all exceed the average rate of water shortage in Jining. The result can provide decision basis for allocation of regional water resources and the most strict system of water resources management.

Key words: water resources distribution; multi-objective; multi-water sources; multi-user

1 研究背景

进入21世纪以来,随着我国社会经济的持续高速发展以及人口数量的剧增,国民经济用水总量严重超出水资源的承载力,粗放式经济发展方式导致用水效率低下、污水超标排放,水环境污染日益严重。为合理解决水量短缺和水环境污染问题,在新的治水形势下进行水资源优化配置势在必行。水资源配置将水资源循环转化与人工用水的供、用和排水过程联

系成一个互相适应的整体,实现对区域内用水部门、用水目标之间水量和水环境容量的合理配置^[1]。

目前国内外学者对区域水资源优化配置开展了一系列研究,通过线性规划、动态规划以及大系统理论等优化理论和模拟模型^[2-4],对区域水资源进行优化配置,缓解了区域用水紧张和用水短缺等问题。但是大多数研究重心仍集中于以经济效益最大化的单目标研究^[5],导致在追求经济快速发展的同时,忽略了社会效益和环境效益,不利于社会经济可持续发展。

收稿日期:2014-03-17; 修回日期:2014-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51109055、51279223);江苏省社会科学基金项目(11GLA001);水利部公益性行业科研专项经费项目(201301003、201201022、201001074)

作者简介:张玲玲(1979-),女,山东潍坊人,博士,副教授,主要从事水利经济与资源环境管理方面的研究。

通讯作者:高亮(1989-),男,江苏镇江人,硕士研究生,主要从事水利经济与资源环境管理方面的研究。

鉴于此,本文引入多目标约束,在追求经济增长的同时,加入社会效益和环境效益,以实现综合效益最大化。在经济、社会和生态3个效益目标的约束下,以济宁市为研究对象,构建济宁市多目标水资源优化配置模型。根据数据可获得性,对济宁市现状年(2009)进行水资源优化配置,对水资源优化配置结果进行供需平衡分析,诊断出缺水行业和缺水城市,针对区域的特殊性分析缺水原因,并在最严格水资源管理制度的视角下,提出对策建议,为未来规划年的有效配置乃至落实最严格水资源管理制度提供借鉴。

2 多目标水资源优化配置模型

2.1 目标函数

区域水资源优化配置模型作为对现实系统的模拟,需要从全局出发,在多目标的约束下,进行统筹优化。随着区域经济、社会发展、生态保护与水资源联系日益紧密,围绕“经济-社会-生态-水资源”系统,建立以经济效益、社会效益和环境效益为目标的多目标水资源优化配置子模型。

2.2.1 经济效益目标 以区域供水带来的直接经济效益作为经济目标的表达,即用供水效益与成本之差的最大值来表示经济效益目标函数^[6-7]。

$$\max f_1(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[\sum_{i=1}^{I(k)} (b_{ij}^k - c_{ij}^k) x_{ij}^k \alpha_i^k + \sum_{c=1}^C (b_{cj}^k - c_{cj}^k) x_{cj}^k \alpha_c^k \right] \beta_j^k \omega_k \quad (1)$$

式中: x_{ij}^k 为独立水源 i 向 k 子区 j 用户的供水量, 万 m^3 ; x_{cj}^k 为公共水源 c 向 k 子区 j 用户的供水量; b_{ij}^k 为独立水源 i 向 k 子区 j 用户的单位供水效益系数, $\text{元}/\text{m}^3$; b_{cj}^k 为公共水源 c 向 k 子区 j 用户的单位供水效益系数, $\text{元}/\text{m}^3$; c_{ij}^k 为独立水源 i 向 k 子区 j 用户供水的费用系数, $\text{元}/\text{m}^3$; c_{cj}^k 为公共水源 c 向 k 子区 j 用户供水的费用系数, $\text{元}/\text{m}^3$; α_i^k 为 k 子区独立水源 i 的供水次序系数; β_j^k 为 k 子区 j 用户用水公平系数; ω_k 为 k 子区的权重系数。

2.2.2 社会效益目标 由于社会效益不容易度量,而区域缺水量的大小或缺水程度会直接影响到社会的发展和稳定,故以区域缺水量的大小或缺水程度刻画社会效益目标。

$$\min f_2(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[D_j^k - \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^C x_{cj}^k \right) \right] \quad (2)$$

式中: D_j^k 为 k 子区 j 用户的需水量, 万 m^3 。

2.2.3 环境效益目标 区域用水的同时必定造成排污,以可代表区域代表性污染成份的排污量的最

小值(例如 COD)描述环境效益目标。

$$\min f_3(x) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} \left[0.01 d_j^k p_j^k \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^C x_{cj}^k \right) \right] \quad (3)$$

式中: d_j^k 为 k 子区 j 用户单位废水排放量中 COD 的含量, mg/L ; p_j^k 为 k 子区 j 用户的污水排放系数。

2.2 约束条件

2.2.1 可供水量约束 不同水源供给计算分区各用水户的总水量不应多于其可供水量,即

$$\text{公共水源: } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} x_{cj}^k \leq w_c \quad (4)$$

$$\text{独立水源: } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} x_{ij}^k \leq w_i^k \quad (5)$$

式中: w_c 为公共水源 c 的可供水量; w_i^k 为 k 子区水源 i 的可供水量, 万 m^3 。

2.2.2 部门用水量约束 各水源提供给各分区各用户的水量不低于该部门的最低用水量,即

$$D_{j\min}^k \leq \sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^C x_{cj}^k \leq D_{j\max}^k \quad (6)$$

式中: $D_{j\min}^k$ 为 k 子区 j 用户的最小需水量, 万 m^3 ; $D_{j\max}^k$ 为子区 k 用 j 户的最大需水量, 万 m^3 。

2.2.3 排水系统水质约束 污染物需要达标排放并且排放总量不能超过总排放量。

$$\text{达标排放: } C_{rj}^k \leq C_0^r \quad (7)$$

式中: C_{rj}^k 为 k 子区 j 用户的污染物 r 的浓度; C_0^r 为污染物 r 的达标排放规定的浓度。

$$\text{总量控制: } \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{J(k)} 0.01 d_j^k p_j^k \left(\sum_{i=1}^{I(k)} x_{ij}^k + \sum_{c=1}^C x_{cj}^k \right) \leq W_0 \quad (8)$$

式中: W_0 为允许的 COD 排放总量, t 。

2.2.4 变量非负约束 各个分区的任何用水户的用水量不为负数,所能提供的水量能满足每个用水户的需要,即

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad (9)$$

3 实例分析

3.1 研究对象概况

济宁市供水水源包括当地地表水、地下水、跨流域调水(引黄水和引汶水)、污水处理回用水。其中,跨流域调水仅供给梁山县;污水处理回用水分别供给兖州市、邹城市和鱼台县;各水资源计算分区的当地地表水和地下水为单分区水源。用水部门有城镇生活、农村生活、农业、工业、城镇公共用水和生态环境用水。

综合考虑济宁市的地形、地貌、统计资料的搜集以及方案实施的可行性,将济宁市划分为12个水资源计算分区:市中区、任城区、汶上县、兖州市、曲阜

市、邹城市、泗水县、梁山县、嘉祥县、金乡县、鱼台县、微山县。

3.2 参数确定

3.2.1 供水次序系数、用水公平系数

(1)用水公平系数。在水量有限的情况下,最先满足生活饮用水,然后统筹安排生产和生态用水,由此拟定各用水部门用水的先后次序为城镇生活、农村生活、城镇公共用水、生态、工业、农业^[8-9]。根据下式可计算得到用水公平系数:城镇生活为0.286,农村生活为0.238,城镇公共用水为0.19,生态为0.143,工业为0.095,农业为0.048。

$$\alpha_i^k = \frac{1 + n_{\max}^k - n_i^k}{\sum_{i=1}^n (1 + n_{\max}^k - n_i^k)} \quad (10)$$

式中: n_i^k 为 k 子区 i 水源供水次序的序号; n_{\max}^k 为 k 子区水源供水序号的最大值。

(2)供水次序系数。供水次序系数反映的是分区内各水源相对于其他水源供水的优先程度,根据各水源的调节能力,依据上式确定济宁市水源的供水次序为:地表水为0.4,地下水为0.3,跨流域调水为0.2,污水处理回用水为0.1。

3.2.2 用水效益系数、供水费用系数

(1)用水效益系数。工业用水的效益系数,可根据万元产值需水量的倒数确定;农业用水效益系数,由灌溉后产生的效益与水利分摊系数确定;生活用水系数一般难以有明确的数值,为使其在计算过程中的供应量得到保证,一般效益系数赋予较大值。环境用水与生活用水关系紧密,一般环境用水效益系数的取值可参考生活用水的效益系数。

(2)供水费用系数。供水费用系数的确定是依据水费收费标准。目前居民生活用水价格,工业用

水价格,环境用水费用参照生活用水费用系数,农业用水费用系数为额定。对于有资料的水源工程,根据资料计算确定;缺乏资料时,可参考临近地区类同水源工程。

3.2.3 用户需水量上下限

(1)生活需水量上下限。城镇生活用水和农村生活用水,属于保障性用水,任何时候都应优先满足,所以需水量上限都取其规划水平年的需水量。

(2)生态环境需水量上下限。济宁市水环境形势不容乐观,需要维护和改善,环境用水跟生活用水的上下限一样取其需水量。

(3)工业需水量上下限。工业需水量上限取其规划年需水量,下限取其需水量的0.8倍。

(4)农业需水量上下限。工业需水量上限取其规划年需水量,下限取其需水量的0.7倍。

(5)城镇公共用水量上下限。城镇公共用水量上限取其规划年需水量,下限取其需水量的0.8倍^[10-11]。

3.3 计算结果与分析

依据《2009年济宁市水资源公报》和《济宁市水资源总体规划报告》,以现状年水平年(2009年)的水资源优化配置为例进行计算分析,确定相关参数,并带入上述模型中。

通过对现状年(2009年)的水资源供需平衡分析,全市需水量为276628.6万 m^3 ,总供水量为253698万 m^3 ,总缺水量22930.6万 m^3 ,全市平均缺水率为8.2%,属于缺水状况。存在缺水的行业主要集中在农业和工业。超过全市平均缺水率的城市有市中区、任城区、曲阜市、邹城市、泗水县和嘉祥县。

城镇生活需水量和农村生活需水量的总和是21231万 m^3 ,生活用水供水量为21231万 m^3 ,达到

表1 2009年济宁市水资源优化配置结果

万 m^3

行政分区	城镇		农村		农业				工业				城镇		生态				总计		
	生活	生活	生活	生活	地表	地下	外调	回用	小计	地表	地下	外调	回用	小计	公用	地表	地下	外调		回用	小计
	地下水	地下水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水	水		水	水
市中区	1064	589	6920	0	0	0	0	6920	3174	1104	0	0	4278	4036	0	1057	0	0	1057	17944	
任城区	683	857	5130	3163	0	0	0	8293	0	3533	0	0	3533	3533	0	223	0	0	223	17122	
微山县	616	1521	14096	5809	0	0	0	19905	0	2058	0	0	2058	2058	0	225	0	0	225	26383	
鱼台县	340	680	28735	4831	0	390	0	33956	0	370	0	0	370	370	20	0	0	0	20	35736	
金乡县	310	1700	14000	4171	0	0	0	18171	0	710	0	0	710	710	0	110	0	0	110	21711	
嘉祥县	346	1187	5288	8748	0	0	0	14036	0	939	0	0	939	939	0	130	0	0	130	17577	
汶上县	270	1518	3170	8182	0	0	0	11352	0	547	0	0	547	547	0	67	0	0	67	14301	
泗水县	400	980	2527	310	0	0	0	2837	980	0	0	0	980	980	0	20	0	0	20	6197	
梁山县	374	1349	0	16549	10351	0	0	26900	0	427	0	0	427	427	0	35	0	0	35	29512	
曲阜市	439	735	2897	7474	0	0	0	10371	0	1077	0	0	1077	1077	0	190	0	0	190	13889	
兖州市	686	1069	130	18774	0	0	0	18904	0	991	0	1078	2069	2069	0	158	0	0	158	24955	
邹城市	1400	2118	3566	9335	0	476	0	13377	0	5563	0	0	5563	5563	0	350	0	0	350	28371	
全市	6928	14303	86459	87346	10351	866	0	185022	4154	17319	0	0	107822551	22309	20	2565	0	0	2585	253698	

表2 2009年济宁市水资源供需表

万 m³, %

行政 分区	需水量							供水量							缺水量			合计	缺水率
	城镇 生活	农村 生活	农业	工业	城市 公共	生态	合计	城镇 生活	农村 生活	农业	工业	城市 公共	生态	合计	农业	工业			
市中区	1064	589	10646.8	4508.18	4036	1057	21900.98	1064	589	6920	4278	4036	1057	17944	3726.8	230.18	3956.98	18.0	
任城区	683	857	12024.12	3533.4	3533	223	20853.52	683	857	8293	3533	3533	223	17122	3731.12	0.4	3731.52	17.8	
汶上县	270	1518	11765.59	547	547	67	14714.59	270	1518	11352	547	547	67	14301	413.59	0	413.59	2.80	
兖州市	686	1069	20721.06	2069	2069	158	26772.06	686	1069	18904	2069	2069	158	24955	1817.06	0	1817.06	6.70	
曲阜市	439	735	11714.76	1077	1077	190	15232.76	439	735	10371	1077	1077	190	13889	1343.76	0	1343.76	8.80	
邹城市	1400	2118	18710	5563	5563	350	33704	1400	2118	13377	5563	5563	350	28371	5333	0	5333	15.8	
泗水县	400	980	3680	980	980	20	7040	400	980	2837	980	980	20	6197	843	0	843	11.9	
梁山县	374	1349	28630.9	427	427	35	31243	374	1349	26900	427	427	35	29512	1730.9	0.1	1731	5.50	
嘉祥县	346	1187	15735	939	939	130	19276	346	1187	14036	939	939	130	17577	1699	0	1699	8.80	
金乡县	310	1700	18171	710	710	110	21711	310	1700	18171	710	710	110	21711	0	0	0	0	
鱼台县	340	680	34185.69	370	370	20	35965.69	340	680	33956	370	370	20	35736	229.69	0	229.69	0.60	
微山县	616	1521	21736.98	2058.02	2058	225	28215	616	1521	19905	2058	2058	225	26383	1831.98	0.02	1832	6.40	
全市	6928	14303	207721.9	22781.70	22309	2585	276628.6	6928	14303	185022	22551	22309	2585	253698	22930.6	230.7	22930.60	8.20	

供需平衡;农业需水量为 207 721.9 万 m³,供水量为 185 022 万 m³,缺水率为 22 699.9 万 m³,缺水率为 10.9%;工业需水量为 22 781.7 万 m³,供水量为 22 551 万 m³,缺水率为 230.14 万 m³,缺水率为 1.01%;城镇公共用水需水量和生态需水量均达到平衡。

由供需平衡分析可知,工业和农业缺水程度较严重。究其原因,农业灌溉用水较多,灌溉效率低且农田灌溉需水定额较高,导致农业用水量剧增;工业发展迅猛,需水量增加,工业工艺方式落后导致用水浪费;水资源分配过程中,优先满足生活用水,造成工业和农业供水不足,缺水增加。总体而言,随着全市人口增加和社会经济的发展,全市总需水量增加较大,而可供量较小,供需矛盾严重,用水日益紧张。

纵观超过全市平均缺水率的城市市中区、任城区和曲阜市缺水原因是工业增长速度较快但结构优化进程缓慢。高耗水行业数量居多,高新技术产业发展缓慢;工业节水设备和生产工艺更新滞后,工业废水未能有效转化为处理回用水,污水处理能力和用水效率低下。邹城市、泗水县和嘉祥县缺水原因是农业用水增加。农业种植结构主要以水稻、小麦、大麦和玉米等高耗水低收益的作物为主,而蔬菜、瓜类、果树和棉花等低耗水高收益的作物占有比例较小;农业灌溉技术以“漫灌”为主,节水灌溉技术普及较少,农业灌溉效率低,导致农业用水量较大。

4 结 语

本文在改变以往单目标约束下水资源优化配置的基础上,分析和探讨多目标约束下的区域水资源优化配置,以济宁市为研究实例,构建多目标水资源优化配置模型,通过水资源供需平衡分析,为未来规划年缺水行业和缺水城市的用水提出警示和有效指导。当然,为更好的落实最严格水资源管理制度和

促进区域可持续发展,区域应该严格控制用水总量,实施用水许可制度,合理分配水资源;加快工业节水设备和生产工艺的更新速度,优化农业灌溉技术,提高用水效率;严格控制污水排放,提高污水处理技术,建立水质达标体系。

参考文献:

- [1] 李原园. 水资源合理配置在实施最严格水资源管理制度中的基础性作用[J]. 中国水利, 2010, (20): 26-28.
- [2] 姜莉萍, 赵博. 动态规划在水资源配置中的应用[J]. 人民黄河, 2008, 30(5): 47-48.
- [3] 杜长胜, 徐建新, 杜芙蓉等. 大系统多目标理论在引黄灌区水资源配置中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(4): 89-90.
- [4] 辛芳芳, 梁川. 基于模糊多目标线性规划的都江堰灌区水资源合理配置[J]. 中国农村水利水电, 2008(4): 36-38.
- [5] 赵丹丹, 林耿耿, 李蔚, 等. 多目标遗传算法在杭州水资源优化配置中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(Z2): 284-286.
- [6] Sun Zhilin, Xia Shanshan, Xu Dan, et al. Regional water resources optimal allocation model [J]. Journal of Zhejiang university, 2009, 43(2): 344-348.
- [7] 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.
- [8] Singh A, Panda S N. Optimization and Simulation Modeling for Managing the Problems of Water Resources [J]. Water Resources Management, 2013, 27(9): 3421-3431.
- [9] 邓坤, 张璇, 谭炳卿, 等. 多目标规划法在南四湖流域水资源优化配置中的应用[J]. 水科学与工程学报, 2010(5): 11-15.
- [10] Yan Han, Yue Fei Huang, Guang Qian Wang, Imran Maqsood, A Multi-objective Linear Programming Model with Interval Parameters for Water Resources Allocation in Dalian City. [J]. Water Resources Management, 2011, 25(2): 449-463.
- [11] 尹兴. 长沙县水资源优化配置研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.