

太原市水资源合理配置研究

李 力,沈 冰

(西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】探讨太原市水资源的合理配置方案,使有限的水资源得到合理利用,促进经济与社会的可持续发展。【方法】以区域经济发展与环境保护相协调为目标,建立水资源多目标优化配置模型,并利用大系统分解协调方法,针对不同水平年(2010,2020,2030 年),进行太原市水资源优化配置研究。【结果】在现有供水工程、常规节水方案条件下,太原市水资源供需矛盾日益加剧,在 50%和 75%水文年份,太原市缺水率分别由 2010 年的不足 1%和 7.7%均上升为 2030 年的 35%以上;采用高节水方案时,在 50%和 75%水文年份,到 2030 年太原市缺水率为 26%~31%。【结论】要深度解决太原市缺水问题,应实行开源节流与污染治理并举的措施,在进一步加大节水力度的基础上,增大污水处理回用和引黄力度。

【关键词】 水资源配置;多目标优化;太原市

【中图分类号】 S273;TV211

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2008)02-0199-06

Study on rational allocation of water resources in Taiyuan City

LI Li, SHEN Bing

(College of Water Resource and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract:【Objective】This research is to explore rational allocation scheme of water resources in Taiyuan City to use limited water resources rationally and to promote sustainable development of economy and society.【Method】The multi-objective optimal allocation model of water resources is established by taking the economic development and water environment protection in corresponding area as the objective in this paper. Based on this, aiming at different standard years (2010, 2020 and 2030), the optimal allocation of the water resources in Taiyuan City are analyzed by using large-scale system decomposition-coordination method.【Result】The supply and demand contradiction will intensify increasingly under condition of existing water supply engineering and general water-saving scheme. The water shortage ratio in the whole city will rise from inadequacy 1% and 7.7% (2010) to more than 35% (2030) in 50% or 75% hydrological year; As adopting high water-saving scheme, the water shortage ratio in the whole city will be 26% to 31% in 50% or 75% hydrological year.【Conclusion】To solve the problem of water shortage fundamentally, the measures including broadening sources of income and reducing expenditure and dealing with sewage must be taken simultaneously. Based on increasing water-saving force further, the sewage treatment of various industrial economic departments and diversion from Yellow River must be stressed.

Key words: allocation of water resources; multi-objective optimization; Taiyuan City

太原市是山西省的省会,是我国北方重要的能源煤炭基地,也是水资源极为匮乏的城市之一。太

* [收稿日期] 2007-09-29

[基金项目] 山西省科技攻关项目(2007031069)

[作者简介] 李 力(1960—),男,山西万荣人,工程师,在读博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: lil2007@sohu.com

原市人均水资源占有量仅为 172 m^3 , 不到山西省人均占有量的一半, 为全国平均水平的 $1/13$, 属于严重缺水地区^[1]。目前, 太原市水资源的特点及面临的问题有: (1) 地表水水资源时空分布不均, 全市地表水的开发利用以汾河干流为主; (2) 地下水超采严重, 导致地下水水质污染及地面沉降加剧, 全市 1985~2005 年累计超采量 18.4 亿 m^3 , 其中城区累计超采量约为 14 亿 m^3 , 清除为 3.3 亿 m^3 ^[2]; (3) 水资源供需矛盾突出, 必须合理调用引黄水源; (4) 污水处理工程闲置, 中水资源利用不合理; (5) 地表水污染问题突出。“水”问题已成为太原市经济和社会可持续发展的重要制约因素, 如何使有限的水资源实现合理配置, 以水资源的可持续利用支撑经济社会的可持续发展, 已成为一个亟待解决的问题。

水资源合理配置的实质是提高水资源配置效率^[3], 一方面是提高水的分配效率, 合理解决各部门和各行业(包括环境和生态用水)之间的竞争用水问题; 另一方面则是提高水的利用效率, 促进各部门或各行业内部高效用水。近年来, 区域水资源的合理配置研究在全世界范围内得到了高度关注^[4-16], 研究成果多以多目标和大系统优化技术为主要研究手段^[10-16], 在可供水量和需水量确定的条件下, 建立区域有限水资源量在各分区和用水部门间的优化配置模型, 求解模型以获得水量优化配置方案。但由于各地水资源量及其合理配置受诸多自然因素和人为因素的影响, 因此现有研究成果在应用中存在一定的局限性。山西省的水资源极为缺乏, 而水资源配置方面的研究尚处于空白。为此, 本研究以多目标规划模型为基础, 建立了太原市有限水资源量在各分区和各用水部门间的配置模型, 在可供水量和需水量确定的条件下, 采用大系统分解协调方法, 进行求解得到了水量合理配置方案, 对太原市水资源可持续利用和经济社会的可持续发展有一定的现实意义。

1 水资源配置模型

1.1 水资源系统的组成

太原市的水资源系统由水源、贮水、输水、用水等 4 个子系统构成。水源子系统主要包括区域地表水和地下水以及外区域调水。太原市地表水来自黄河流域汾河水系和海河流域滹沱河水系; 地下水来源包括一般山丘区裂隙水、西山岩溶水、东山岩溶水以及平原区孔隙水; 外区域调水主要是指引黄河水。太原市贮水子系统由水库和蓄水库组成。2004 年

太原市有水库 2 座, 即汾河一库和汾河二库; 有蓄水库 4 个, 主要是晋阳湖、清泉东湖、清泉西湖和太钢调节池。输水子系统主要包括各种引水、提水、水井等水利工程。2004 年太原市有引水工程 7 处, 主要用于农业灌溉和工业供水; 跨流域调水工程 1 座, 即黄河水源呼延水厂, 主要用于城市生活供水和工业供水; 截止到 2004 年太原市有提水工程 335 处, 其中有大型机电灌站 7 处, 主要用于农业灌溉; 全市水井总数为 4 651 眼, 主要用于城市生活供水、工业供水、农业灌溉用水和农村生活用水。用水子系统包括太原市 10 个行政区的工业、农业、第三产业以及生活、生态用水。

1.2 多目标规划模型

按照供水优先顺序和水量调度优先顺序两大原则, 结合太原市自身水资源开发利用特点和社会经济发展情况, 尤其是在考虑晋祠和兰村两大泉域保护规划的基础上, 制定了 I、II、III 不同级别共 6 个目标的目标函数。

1.2.1 模型水资源配置目标 (1) I 优先级目标。①保证城市和农村居民的生活用水; ②据兰村泉域保护规划要求, 维持兰村泉域可开采量。

(2) II 优先级目标。①适度预留生态用水; ②依据晋祠泉域保护规划, 实现晋祠泉域地下水的逐年压采目标, 为晋祠泉复流创造条件。

(3) III 优先级目标。①非传统水源的利用量(F)最大, 其模型形式为:

$$F_1 = \max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T S_{kijt}, k=3. \quad (1)$$

式中: F_1 为非传统水源的利用量, 万 m^3 ; i 为计算单元, 个; I 为计算单元总数; j 为用水部门类别, 个; J 为用水部门总数; t 为计算时段, 月; T 为计算时段总数; S_{kijt} 为非传统水源对第 i 个计算单元中第 j 类用水部门在第 t 时段的供水量, 万 m^3 ; k 为水源类别。

②因太原市缺水严重, 因此供水破坏采用“宽浅式”的破坏方式。据此, 目标函数的表述形式为:

$$F_2 = \min \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \left[\frac{\sum_{i=1}^I D_{ij} - \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K S_{ijk}}{\sum_{i=1}^I D_{ij}} - \frac{D_{ij} - \sum_{k=1}^K S_{ijk}}{D_{ij}} \right]^2. \quad (2)$$

式中: F_2 为供水破坏几率; D_{ij} 为表示第 i 个计算单元第 j 类用水部门的需水量, 万 m^3 ; S_{ijk} 为第 k 类水源对第 i 个计算单元第 j 类用水部门的供水量, 万 m^3 ; 其他符号意义同前。

1.2.2 模型的约束条件 结合太原市实际情况, 多

目标规划模型的约束条件为:

(1)资源约束条件。外调水量与其供水量之间的平衡关系,可表示为:

$$Q_{k\ t}=\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^JS_{k\ ij\ t},k=4。(3)$$

式中: $Q_{k\ t}$ 为第 k 类水源在第 t 时段的可供水量,万 m^3 。

区域地表水可供水量对其供水量的制约关系,有:

$$\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^JS_{k\ ij\ t}\leq Q_{k\ t},k=1;(4)$$

区域地下水可开采量对其供水量的制约关系,有:

$$\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^JS_{k\ ij\ t}\leq Q_{k\ t},k=2;(5)$$

非传统水源可供水量对其供水量的制约关系,有:

$$\sum_{i=1}^I\sum_{j=1}^JS_{k\ ij\ t}\leq Q_{k\ t},k=3。(6)$$

(2)输水能力约束条件。主要是指各提水、引水等工程的输水能力限制,如古交管道输水能力最高为 10 万 m^3/d ,呼延水厂一期引黄能力为 40 万 m^3/d ,二期建成后为 80 万 m^3/d 。

(3)需水约束条件。水源供给各计算单元各个用水部门的供水量不应超过其需水量,即

$$\sum_{k=1}^KS_{k\ ij\ t}\leq D_{ij\ t}。(7)$$

式中: $D_{ij\ t}$ 为第 i 个计算单元第 j 类用水部门在第 t 时段的需水量,万 m^3 。

(4)变量约束条件。变量非负约束:

$$D_{ij\ t}\geq 0,S_{k\ ij\ t}\geq 0,Q_{k\ t}\geq 0,\forall i,j,k,t。(8)$$

(5)水库约束条件。主要指库容约束和水量平衡约束。

2 模型的求解

2.1 模型求解的思路

求解多目标规划模型时,首先将第 1~5 个目标转化为约束条件,从而将多目标规划模型转化为单目标规划。对于第 6 个目标函数,由于太原市水资源系统是一个多水源、多用户系统,且需要满足近、远期不同用户及不同供水保证率的要求,结构比较复杂,影响因素和决策变量很多,因此采用大系统分解协调方法进行求解。其思路为:按照分解协调思想,将全市整个水资源系统分成既相互独立、又相互联系的若干供水区(称为计算单元),各供水区按照不同的用水部门继续划分成更小的供水单元,并分

别建立相应的子模型,用这些子模型在不同层次比较真实地描绘整个系统的某一局部,解决决策分析中的某一个或几个问题;然后将这些子系统按实际系统在空间上和时间上的耦合关系组织起来,再逐层协调,实现太原市整个水资源系统的优化。将不同用水部门子系统作为模型的第一层,将按照行政区划分分的计算单元作为模型的中间层,即为第二层,将整个太原市的水资源系统作为模型的第三层。

2.2 模型的求解

以太原市行政区划为计算单元,包括娄烦(Ⅰ)、古交(Ⅱ)、阳曲(Ⅲ)、城区(Ⅳ)、清徐县(Ⅴ)等 5 个计算单元。

计算单元子系统主要用来解决不同用水部门间的水配置问题。主要遵循供水优先顺序和水量调度优先顺序两大原则,优先保证城乡生活用水,合理分配工业和农业用水,适度预留生态用水。即首先用地表水(包括引黄水)对各计算单元的生活、生态、工业和农业等用水进行分配,然后充分考虑处理污水等非传统水源的合理利用,在各计算单元进行二次配水,最后由地下水源进行补偿调度。

子系统的主要目标是平衡协调各个用水部门间的供水量,在供水总量不足的情况下,使缺水量的分布比较均匀,其模型形式可表述为:

$$F_3=\min \sum_{j=1}^J\alpha_j(\frac{D_j-\sum_{k=1}^KS_{jk}}{D_j})。 (9)$$

式中: F_3 为缺水率,%; D_j 为第 j 类用水部门的需水量,万 m^3 ; S_{jk} 为第 j 类用水部门的供水量,万 m^3 ; α_j 为第 j 类用水部门相对其他用水部门优先得到供水水源的重要程度系数,%。

目标函数主要受到各计算单元分配得到可供水量的约束,即:

$$S_k\leq Q_k,\sum_{k=1}^KS_{jk}\leq D_j。(10)$$

式中: S_k 为某计算单元第 k 类水源的供水量,万 m^3 ; Q_k 为某计算单元第 k 类水源的可供水量,万 m^3 。

在求解过程中,各用水部门的重要程度系数(α_j)以配水规则矩阵的形式给出(表 1)。其目的是在缺水情况下,按照各目标的优先顺序配置目标用水满足权重;同时在某一轮配水结束时,根据该轮各目标实际配水对需水的满足程度,评判该轮配水方案的破坏等级,并确定是否需要修改权重及重新配水。

表 1 配水规则矩阵

Table 1 Matrix of water delivery regulation

破坏等级 Destruction grade	生活用水 Domestic water	工业用水 Industrial water	农业用水 Agricultural water	备注 Remark
1	1	1	1	供水保证 Water delivery guarantee
2	1	0.9~0.95	0.8~0.9	轻度破坏 Gentleness abruption
3	0.95~0.98	0.85~0.9	0.4~0.8	中度破坏 Moderate abruption
4	≤0.95	≤0.85	≤0.4	重度破坏 Gravity abruption

2.3 水资源配置方案

利用所建立的目标规划模型及分解协调方法，对太原市不同规划水平年(2010,2020,2030 年)不同水文年份 $P(50\%,75\%)$ 的供水量进行优化配置计算,需水量采用已有研究成果,采用文献[17]中的常规节水方案(方案 a)和高节水方案(方案 b)的分析计算结果。供水量分两种情况:一是立足于现状供水工程和水资源开发模式下的可供水量(方案 c);二是供水规划着眼于现有工程的改造以及污水处理厂的潜力挖掘,包括引黄一期工程、主城区和古交市的污水处理工程、古交市的工矿供水管道,各郊区雨水集蓄和小水库的清淤加固等,以及适时建设新的水源工程,主要是引黄二期工程和各规划待建中的污水处理厂。供水量为上述大力实施开源、节水措施及深度挖掘非传统水源利用潜力等水资源开发模式下的可供水量(方案 d)。共形成 6 种水资源配置方案。

- 方案一:需水方案 a,供水方案 c, $P=50\%$;
- 方案二:需水方案 a,供水方案 c, $P=75\%$;
- 方案三:需水方案 b,供水方案 c, $P=50\%$;
- 方案四:需水方案 b,供水方案 c, $P=75\%$;
- 方案五:需水方案 a,供水方案 d, $P=50\%$;
- 方案六:需水方案 a,供水方案 d, $P=75\%$ 。

3 结果与分析

3.1 不同水平年太原市水资源供需的计算结果

在方案一到方案六条件下,不同水平年太原市水资源供需的计算结果见表 2。由表 2 可知,在现有供水工程、常规节水方案条件下,即方案一和方案二的条件下,太原市水资源供需矛盾日益加剧。随着需水量的增加,城区(Ⅳ)和清徐县(Ⅴ)的缺水量急剧上升,到了 2030 水平年,在 50%和 75%水文年份,太原市缺水率均在 35%以上,其中城区缺水率在 38%~40%,清徐县缺水率为 19%~32%;不同地区间相比,阳曲(Ⅲ)缺水程度最大,缺水率在 2010 水平年为 30%左右,到 2030 水平年其缺水率将超过 50%。采用高节水方案时,即在方案三和方案四的条件下,由于工业需水量增加减缓,缺水程度得到一定程度的缓解,在 50%和 75%水文年份,太原市缺水率为 26%~31%。由此可见,要解决太原市水资源供需矛盾日益突出的问题,增大污水处理回用和引黄力度,是今后供水工作的重点。

由表 2 还可知,方案五、方案六均能满足不同水文年份太原市未来的供需水要求,水资源供需达到平衡。

表 2 不同水平年太原市水资源供需的计算结果

Table 2 Supply demand analysis of water resources of Taiyuan city in different standard year

万 m³

编号 Code	分区 Zoning	年份 Year								
		2010			2020			2030		
		需水量 Water demand	供水量 Water supply	缺水量 Water deficit	需水量 Water demand	供水量 Water supply	缺水量 Water deficit	需水量 Water demand	供水量 Water supply	缺水量 Water deficit
方案一 Scheme one	I	1 743	1 743	0	2 212	1 779	433	2 594	1 779	815
	Ⅱ	5 890	5 716	174	7 386	5 716	1 670	8 818	5 716	3 102
	Ⅲ	1 832	1 306	526	2 446	1 306	1 140	2 889	1 306	1 583
	Ⅳ	51 759	51 759	0	66 251	52 887	13 364	85 589	53 300	32 289
	Ⅴ	13 934	13 934	0	14 140	13 150	990	16 690	13 531	3 159
	I ~ V	75 158	74 458	700	92 435	74 838	17 597	116 580	75 632	40 948
方案二 Scheme two	I	1 812	1 779	33	2 285	1 779	506	2 673	1 779	894
	Ⅱ	5 995	5 716	279	7 490	5 716	1 774	8 927	5 716	3 211
	Ⅲ	2 046	1 306	740	2 650	1 306	1 344	3 098	1 306	1 792
	Ⅳ	53 730	52 169	1 572	67 640	52 112	15 528	87 026	52 167	34 859
	Ⅴ	16 225	2 648	3 577	16 105	12 705	3 400	18 682	12 650	6 032
	I ~ V	79 808	73 607	6 201	96 170	73 618	22 552	120 406	73 618	46 788

续表 2 Continued of table 2

编号 Code	分区 Zoning	年份 Year								
		2010			2020			2030		
		需水量 Water demand	供水量 Water supply	缺水量 Water deficit	需水量 Water demand	供水量 Water supply	缺水量 Water deficit	需水量 Water demand	供水量 Water supply	缺水量 Water deficit
方案三 Scheme three	I	1 743	1 743	0	1 988	1 749	239	2 285	1 779	506
	II	5 890	5 716	174	7 006	5 716	1 290	8 142	5 716	2 426
	III	1 832	1 306	526	2 334	1 306	1 028	2 679	1 306	1 373
	IV	50 193	50 193	0	60 922	52 817	8 105	74 003	53 300	20 703
	V	13 934	13 934	0	13 522	13 150	372	15 477	13 531	1 946
	I ~ V	73 592	72 892	700	85 771	74 738	11 033	102 585	75 632	26 953
方案四 Scheme four	I	1 812	1 779	33	2 061	1 776	285	2 364	1 779	585
	II	5 995	5 716	279	7 110	5 716	1 394	8 251	5 716	2 535
	III	2 046	1 306	740	2 538	1 306	1 232	2 888	1 306	1 582
	IV	53 730	52 169	1 572	62 311	52 112	10 199	75 440	52 167	23 273
	V	16 225	12 648	3 577	15 487	12 705	2 782	17 469	12 650	4 819
	I ~ V	78 342	72 041	6 201	89 506	73 615	15 891	106 411	73 618	32 793
方案五 Scheme five	I	1 743	1 743	0	2 212	2 212	0	2 594	2 594	0
	II	5 890	5 890	0	7 386	7 386	0	8 818	8 818	0
	III	1 832	1 832	0	2 446	2 446	0	2 889	2 889	0
	IV	51 759	51 759	0	66 251	66 251	0	85 589	85 589	0
	V	13 934	13 934	0	14 140	14 140	0	16 690	16 690	0
	I ~ V	75 158	75 158	0	92 435	92 435	0	116 580	116 580	0
方案六 Scheme six	I	1 812	1 812	0	2 285	2 285	0	2 673	2 673	0
	II	5 995	5 995	0	7 490	7 490	0	8 927	8 927	0
	III	2 046	2 046	0	2 650	2 650	0	3 098	3 098	0
	IV	53 730	53 730	0	67 640	67 640	0	87 026	87 026	0
	V	16 225	16 225	0	16 105	16 105	0	18 682	18 682	0
	I ~ V	79 808	79 808	0	96 170	96 170	0	120 406	120 406	0

3.2 不同水平年太原市水资源供需平衡时的供水构成

由表 3 可以看出,在 75%水文年份,2010,2020 和 2030 年 3 个水平年地表水的供水比例依次为 17%,15%和 12%;在 50%水文年份,3 个水平年地表水的供水比例依次为 23%,20%和 16%,说明地表水的供水比例呈下降趋势。在 75%和 50%水文年份,中水回用供水比例分别从 2010 年的 22%和

17%均逐步上升到 2030 水平年的 26%,超过总供水量的 1/4。引黄水供水比例更是迅速上升,在 75%和 50%水文年份,分别从 2010 年的 18%和 15%上升到 2030 年的 31%和 27%。2010 年地下水供水量仍占主导地位,在 75%和 50%水文年份,供水比例均超过 40%,随后逐渐下降,到 2030 年,其供水比例均为 31%。

表 3 不同水平年太原市水资源供需平衡时的供水构成

Table 3 Supply water constitute under the supply and demand balance of water resources in different standard year of Taiyuan City

水文年份 Hydrological year	水平年 Standard year	供水构成 Supply water constitute					
		一库水 The first reservoir water	二库水 The second reservoir water	其余地表水 Other surface water	中水回用 Sewage treatment	引黄水 Diversion from yellow river	地下水 Ground water
75%	2010	10	3	4	22	18	43
	2020	9	2	4	27	31	27
	2030	7	2	3	26	31	31
50%	2010	12	4	7	17	15	45
	2020	10	4	6	27	25	28
	2030	8	3	5	26	27	31

4 结 论

根据上述分析,在现有供水工程和水资源开发

模式下,各方案不同水文年份各水平年均有不同程度的缺水,因此开源节流与污染治理是太原市水资源合理配置以满足社会与经济可持续发展的关键措

施。就太原市地表水和地下水资源而言,地表水可供水量的增长空间较小,与此同时,已经建成的污水处理工程以及引黄工程的利用水平却较低。从污水处理后的中水回用和引黄水量来看,可供水量的增长空间较大,因此,要深度解决太原市缺水问题,应在进一步加大节水力度的基础上,着眼于现有工程的改造和污水处理厂的潜力挖掘,增大污水处理后的中水回用和引黄力度,以满足太原市不同规划水平年(2010,2020 和 2030 年)国民经济各部门的需水要求。

[参考文献]

[1] 太原市水务局. 太原市水资源综合规划报告[R]. 太原:太原市水务局,2006.
Taiyuan Water Business Bureau. Comprehensive planning report on water resources in Taiyuan city [R]. Taiyuan: Taiyuan Water Business Bureau, 2006. (in Chinese)

[2] 薛凤海, 武桂梅, 李砚阁, 等. 太原市地下水合理利用与调控[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.
Xue F H, Wu G M, Li Y G, et al. Rational utilization and regulation of ground water in Taiyuan City [M]. Zhengzhou: Huanghe Water Conservancy Press, 2000. (in Chinese)

[3] 何云雅. 天津市水资源合理配置研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
He Y Y. A study on rational distribution of water resources of Tianjin municipality [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. (in Chinese)

[4] 吴泽宁, 索丽生. 水资源优化配置研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 1-5.
Wu Z N, Suo L S. Research progress on water resources optimal allocation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 1-5. (in Chinese)

[5] 王 浩, 陈敏建, 秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
Wang H, Chen M J, Qin D Y. Research on rational allocation of water resources and bearing capacity in North West Area of China [M]. Zhengzhou: Huanghe Water Conservancy Press, 2003. (in Chinese)

[6] 徐瑛丽. 区域水资源配置方案评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
Xu Y L. Evaluation of regional water resources allocation schemes [D]. Nanjing: Hehai University, 2006. (in Chinese)

[7] 陈 勇, 杨改河, 周 伟. 榆林市水资源及其可持续开发利用研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(12): 142-146.
Chen Y, Yang G H, Zhou W. Water resource and sustainable exploitation and utilization in Yulin City [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2006, 34(12): 142-146. (in Chinese)

[8] 徐良芳, 冯国章, 刘俊民. 区域水资源可持续利用及其评价指标体系研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(2): 119-122.
Xu L F, Feng G Z, Liu J M. Sustainable utilization and evaluation index system for regional water resources [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2002, 30(2): 119-122. (in Chinese)

[9] 黄 强, 王增发, 畅建霞, 等. 城市供水水源联合优化调度研究[J]. 水利学报, 1999(5): 57-62.
Huang Q, Wang Z F, Chang J X, et al. Study on joint optimal operation of municipal water supply [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999 (5): 57-62. (in Chinese)

[10] Romijn E, Tamiga M. Multi-objective optimal allocation of water resources [J]. Water Resources Planning and Management, 1982, 108(2): 217-229.

[11] Yeh W W-G. Reservoir management and operations models, a state of the art review [J]. Water Resources Research, 1985 (12): 1797-1818.

[12] 卢华友, 郭元裕, 沈配君, 等. 义乌市水资源系统分解协调决策模型研究[J]. 水利学报, 1997(6): 40-47.
Lu H Y, Guo Y Y, Shen P J, et al. Study on decomposition coordination decision model of the water resources system in Yiwu City [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997 (6): 40-47. (in Chinese)

[13] 王济干. 区域水资源配置及水资源系统的和谐性研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
Wang J G. Regional water resources allocation and harmoniousness analysis on water resources system [D]. Nanjing: Hehai University, 2003. (in Chinese)

[14] 王劲峰, 刘昌明, 于静洁, 等. 区际调水时空优化配置理论模型探讨[J]. 水利学报, 2001(4): 7-14.
Wang J F, Liu C M, Yu J J, et al. Theoretical models for space and temporal distribution of water resources [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(4): 7-14. (in Chinese)

[15] 吴泽宁. 基于生态经济的区域水质水量统一优化配置研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
Wu Z N. Integrated optimal distribution of water quality and quantity in a region based on ecology economy [D]. Nanjing: Hehai University, 2004. (in Chinese)

[16] 王大正, 赵建世, 蒋慕川, 等. 多目标多层次流域需水预测系统开发与应用[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 49-54.
Wang D Z, Zhao J S, Jiang M C, et al. Development and application of the multi-object and multilevel water demand prediction system [J]. Advance in Water Science, 2002, 13(1): 49-54. (in Chinese)

[17] 太原市水务局. 太原市国民经济和社会发展目标与需水预测[R]. 太原: 太原市水务局, 2006.
Taiyuan Water Business Bureau. National economy and society development object and water demand prediction [R]. Taiyuan: Taiyuan Water Business Bureau, 2006. (in Chinese)