

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.06.013

面向沈北地区供水安全的水资源配置方案

杨丽丽,谢新民,叶 勇

(中国水利水电科学研究院水资源研究所,北京 100038)

摘要 :为保障沈阳市供水安全,改善沈阳市水景观、修复已遭破坏的水生态与水环境,彻底解决或缓解沈阳市的严重缺水矛盾,加快沈阳老工业基地的调整、改造和发展步伐,提出面向沈北地区供水安全的水资源配置方案。根据未来不同水平年 6 种情形的需水方案,对沈北地区规划供水工程进行置换和组合,衍生出不同的水资源配置方案,通过对各配置方案的缺水率、总投资以及综合效益进行分析,给出推荐方案,相应的工程规模为推荐工程规模,为沈北地区近远期的工程布局 and 分步实施提供科学依据。

关键词 :供水安全;水资源配置;供水方案;缺水率;水环境;沈阳市

中图分类号 :TV213.9 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2010)06-0057-05

Study on schemes of water resources allocation oriented to water supply security in Shenbei area

YANG Li-li, XIE Xin-min, YE Yong

(Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract :In order to ensure water supply safety, improve the water landscape, restore the water ecology and water environment, relieve or thoroughly solve the serious water shortage, and promote the adjustment, transformation, and development of old industrial bases, water resources allocation schemes oriented to water supply security in the Shenbei area are presented. According to the water demands of six water resources allocation projects for different target years, the different allocation schemes were established by replacing and combining the water supply projects in the Shenbei area. In consideration of the rate of water shortage, total investment, and comprehensive benefits, a combined scheme and the project scale are provided. The scientific foundation is provided for the short-term or long-term project layout and step-by-step implementation in the Shenbei area.

Key words : water supply security; water resources allocation; allocation schemes; water shortage rate; water environment; Shenbei area

面向供水安全的水资源配置方案研究是人们对水资源和水环境进行重新分配和布局,以完备的管理体制、运行机制和法制体系为保障,以保障水安全,包括供水安全、粮食安全和水生态环境安全,以水安全保障社会经济的可持续发展为目的,结合社会经济结构的调整,通过水资源的合理配置,实现水资源的高效利用和社会经济的快速发展,通过修复受损水环境,使得人与自然和谐相处。它体现了人类发展的现代理念,对解决重大水资源短缺和水环

境污染等问题具有重大意义^[1-8]。

沈北地区人均水资源量为 1 110 m³,单位水资源量为 6 705 m³/hm²,分别为全省的 1.4 倍和 82%,分别为全国平均值的 50%和 31%^[9]。随着沈北地区工业化、城镇化和产业化的快速发展,沈北地区水资源短缺问题将更加严峻,且主要表现为工程型缺水,局部地区同时还存在着资源型缺水的困扰。各种供水工程的单位供水量投资各不相同。一般来说,节水工程投资最小,污水回用工程和当地水资源开发工程次

基金项目：“十一五”国家科技支撑计划(2007BAB28B02)、国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-010)

作者简介：杨丽丽(1982—),女,山东单县人,博士后,从事水资源规划与配置研究。E-mail: yanglili0323@163.com

之外流域调水工程投资最大^[10-11]。沈北地区当地水资源进一步开发利用的潜力很有限,其中地下水开发利用程度已相当高,局部区域已经出现超采问题,总体开发利用潜力不大。因此,未来解决沈北地区的缺水问题,除了大力发展节水型社会外,尚需调整产业结构和加大污水处理及再生利用、水源置换及充分发挥石佛寺水库地表水与地下水联合调控能力等综合措施加以解决。图1为水资源配置方案程序框图。

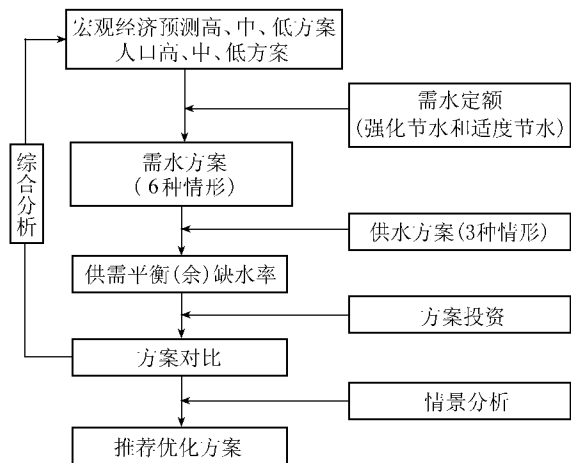


图1 供水工程配置方案程序框图

1 配置方案设置

1.1 需水方案

综合考虑当地社会经济发展与节水水平组合,确定6种情景的需水方案,见表1。

表1 需水方案组成

方案	行业发展情况	节水情况	
		适度节水	强化节水
高方案	高增长	方案V	方案VI
中方案	适度增长	方案I	方案II
低方案	低增长	方案III	方案IV

1.2 供水工程组合方案

根据沈北地区水资源条件、水源地位置和供水状况,在规划设计石佛寺供水系统组合方案时,考虑城市供水水源与当地农业存在较激烈的争水现状,原则上将不再新增地下水开采规模。解决未来沈北地区发展用水需求问题,主要采取水源置换和规划修建石佛寺水库给水工程等措施。

1.2.1 水源置换工程规划

水源置换工程主要是将现有的五水厂、六水厂和七水厂给市区的供水量由大伙房输水工程予以替代,置换出的供水量改供沈北地区(包括新城子区、农业高新区和于洪区马三家—平罗镇)。其中五水厂置换出的供水量主要改供于洪区马三家—平罗镇和增加给农业高新区的供水规模,满足其新增用水

需求;六水厂置换出的供水量主要用于增加供给农业高新区和新城子区,满足其未来的新增用水需求;七水厂置换出的供水量主要用于增加供给新城子区,用以满足其未来的新增用水需求。

1.2.2 石佛寺水库复合式布井规划

根据石佛寺水库库区及其附近水文地质条件,并考虑地表水与地下水联合优化调控的优势,提出采用常规的线状组合布井与现代的辐射井布设相结合的复合式布井开采新模式,给出具体的规划布井方案。

在石佛寺水库库区规划布井方案时,在考虑减少或消除水库蓄水浸没问题时,还需要考虑避免过量开采所导致的地下水水位大幅度下降而影响农业灌溉及农村饮水问题。规划方案在辽河左右岸距离防洪大堤500m左右区域内布设抽水井群且集中布设在明沈公路以西库区内。从数值模拟预测结果得知,当水库地下水总开采量小于30万 m^3/d 时,通过布设常规水源井即可保证供水量,又可消除浸没问题;当水库地下水总开采量大于30万 m^3/d 时,应当考虑复合式布井。

根据库区及其附近地貌和水文地质条件,辐射井布设在辽河两岸,具体为:辽河右岸,从团山子至南山陈平靠近低山丘陵区采用集中布设河底型辐射井,从坝区前至团山子以及拦马河口至莲花台采用集中布设河岸河底型辐射井;辽河左岸采用集中布设河岸河底型辐射井。

由于石佛寺库区地势东高西低,所以辐射井布设时,优先考虑布设于库区以西。这样就构成了常规的线状组合布井与现代的辐射井布设相结合的复合式布井开采新模式。

1.2.3 石佛寺水库给水工程规划

石佛寺水库给水工程规划分为2个系统:①由石佛寺水库(采用地表水与地下水联合调控及复合式布井开采新模式供水,下同)向西采用DN1200输水管道(约18km)将石佛寺水库水量送到石佛寺水厂——六水厂,利用六水厂剩余处理能力与现有水源共同经净化处理后利用原有输配水管道供水,简称石佛寺西线工程;②将石佛寺水库水量输送到新城子区附近新建的两座净水厂(简称石佛寺一期水厂和二期水厂),石佛寺一期水厂采用DN1200输水管道(约30km)负责向农业高新区供水,以满足农高区城市和工业用水需求,石佛寺二期水厂负责向沈北新区供水,以满足沈北新区城市和工业用水需求,简称石佛寺东线工程。

根据未来沈北地区不同的用水需求、何时置换与如何组合,可以衍生出不同的规划组合方案。

1.2.4 供水方案设置

根据现有供水水源置换与否,拟定3种供水情形。

情形1 2010年开始置换水源。2010年起,沈北地区现有水源不再供给沈阳市区,只供沈北地区;2010年开始,五水厂增供“于洪区马—平镇”。

情形2 2020年开始置换水源。2020年起,沈北地区现有水源不再供给沈阳市区,只供沈北地区;2010年开始,五水厂增供“于洪区马—平镇”。

情形3:未来不置换水源。沈北地区现有水源继续供给沈阳市区,并维持现有的供水规模;2010年开始,五水厂增供“于洪区马—平镇”。

从目前大伙房输水工程二期工程进展及沈阳市配套工程难度、投资强度和前期工作情况看,2010年沈阳市受水区全部实现工程对接和供水的可能性不大。考虑到水源置换的“情形3”实际上成立的可能性也很小,从城市供水安全的角度,供水“情形2”,即2020年起沈北地区现有水源不再供给沈阳市区、只供沈北地区是比较现实的。

根据沈北地区开源与节流并重的水资源总体调控思路,分析和确定在节水、产业结构调整以及污水处理回用等措施下,未来主要采取水源置换和修建石佛寺水库给水工程等解决沈北地区发展用水需求问题。因此,石佛寺供水系统工程规划包括水源置换工程规划、石佛寺水库复合式布井规划和石佛寺水库给水工程规划等。

2 水资源优化调控模型

水资源优化调控是指通过工程和非工程措施,调节水资源的天然时空分布和用水结构;开源与节流并举,开发与保护并重,眼前利益与长远利益兼顾,利用系统理论、决策理论和计算机技术,统一分配当地地表水、地下水、回用水、外调水及非常规水;注重兴利与除弊的结合,协调好各地区和各部门之间的矛盾,尽可能地提高区域整体和用水效率,促进水资源的可持续利用和区域的可持续发展。

2.1 目标函数

本模型采用系统缺水总量最少作为优化调控的目标,尽可能满足社会、经济、生态环境等方面的用水需求。经济方面主要是工业、建筑业与第三产业供水、农业用水等;生态环境方面主要是河道内生态环境水量需求、河流外生态环境及水景观用水需求等,以及地下水超采限制等;社会方面,主要是考虑满足城镇生活和农村人畜用水需求。

模型目标函数:

$$\min W = \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M k_m W_k(t, n, m) \quad (1)$$

式中: W 为系统缺水总量; k_m 为第 m 个用水行业的权重; $W_k(t, n, m)$ 为 t 时段、第 n 个计算单元的第 m 个行业的缺水量。

2.2 约束条件

2.2.1 水库库容平衡方程

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + \sum C_{1,u_{1,i}} I_{t,u_{1,i}} + \sum C_{2,u_{1,i}} A_{t,u_{1,i}} + \sum C_{3,u_{2,i}} O_{t,u_{1,i}} + \sum C_{2,u_{1,i}} A_{t,u_{1,i}} + \sum C_{3,u_{2,i}} O_{t,u_{2,i}} - \sum I_{t,d_{1,i}} + A_{t,d_{1,i}} - \sum O_{t,d_{1,i}} - (P_i + S_i)(V_{i,t-1} + V_{i,t})/2 \quad (2)$$

式中: $V_{i,t}$ 为第 i 个水库、 t 时段的蓄水量; $u_{1,i}$ 、 $d_{1,i}$ 分别为第 i 个水库上游和下游地表水河流渠道, $u_{2,i}$ 、 $d_{2,i}$ 分别为第 i 个水库上游和下游弃水及污水排放河流渠道; $I_{t,d_{1,i}}$ 、 $A_{t,u_{1,i}}$ 、 $O_{t,u_{1,i}}$ 分别为 t 时段、第 i 个水库上游引水渠道、河道和排水渠道的入库水量, C_1 、 C_2 、 C_3 为对应的渠道输水有效系数; $I_{t,d_{1,i}}$ 、 $A_{t,d_{1,i}}$ 、 $O_{t,d_{2,i}}$ 分别为 t 时段、第 i 个水库下游引水渠道、河道和排水渠道的出库水量; P_i 和 S_i 分别为第 i 个水库的蒸发和渗漏系数。

2.2.2 计算单元水量平衡方程

$$\sum D_{j,m,t} = \sum (\sum G_{1,t,s_{j,m}} Q_{1,t,s_{j,m}} + \sum G_{1,t,d_{j,m}} Q_{1,t,d_{j,m}} + \sum G_{2,t,j,m} Q_{2,t,j,m} + \sum Z_{j,m,t}) \quad (3)$$

式中: $D_{j,m,t}$ 为 j 单元、 m 行业、 t 时段的需水量; $s_{j,m}$ 、 $d_{j,m}$ 分别为上游供给单元 j 的 m 行业的地表水供水渠道和外调水供水渠道; $Q_{1,t,d_{j,m}}$ 与 $Q_{2,t,j,m}$ 分别为 t 时段地表水和地下水供给单元 j 的 m 行业水量, G_1 与 G_2 分别为地表水和地下水供水有效利用系数; $Z_{j,m,t}$ 为 t 时段、单元 j 的 m 行业缺水量。

2.2.3 节点平衡方程

$$F_{k,t} + \sum Y_{1,u_{1,k}} N_{1,t,u_{1,k}} + \sum Y_{2,u_{1,k}} N_{2,t,u_{1,k}} + \sum Y_{3,u_{2,k}} N_{3,t,u_{2,k}} - \sum \sum M_{1,t,d_{1,k,m}} - \sum M_{2,t,d_{2,k}} = 0 \quad (4)$$

式中: $F_{k,t}$ 为 t 时段、 k 个节点以上的天然汇流; $u_{1,k}$ 、 $d_{1,k}$ 分别为第 k 个节点上、下游地表水河流渠道, $u_{2,k}$ 、 $d_{2,k}$ 分别为第 k 个节点上、下游弃水及污水排放河流渠道; N_1 、 N_2 和 N_3 分别为节点上游引水渠道、河道、排水渠道的汇入节点水量, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 为对应的渠道输水有效系数; M_1 为 t 时段节点 k 供给相应单元的 m 行业的水量、 M_2 为 t 时段节点 k 的下泄水量。

非零约束、上下限约束等边界条件约束在文中略去。

3 配置结果与方案分析

对上述水资源优化调控所建立的模型,采用通用代数建模系统(GAMS)进行优化求解。GAMS是一种面向应用的构造模型的高级计算机语言,它巧妙地融合了关系数据库技术与数学规划理论,使得原本相互关联的数学模型与数据彼此独立,从而为用户在模型、算法和数据之间提供了一个便捷接口。由上述所描述的约束条件及目标函数的形式可知,区域水资源优化调控模型的求解是一个线性规划问题,宜采用GAMS软件包进行编程及求解。

3.1 基于水资源承载能力的供需平衡分析

通过对各种组合方案的长系列计算,得出“情形2”下不同组合方案、不同水平年、不同保证率的水资源配置结果。其中主要计算结果1结果2,见表4表5。

3.2 配置方案对比和分析

对节水投资、污水处理厂及配套管网投资和供水工程投资分别进行了估算,从而确定“情形2”下石佛寺供水系统不同调控方案工程累计静态投资。具体结果见表6。

从表6中看出,水资源调控方案I虽然其工程总投资比方案III和方案IV偏大,分别为2.66亿元、3.45亿元,但方案III和方案IV经济社会发展速度较低,与该区实施跨越式发展和沈北新区的发展定位不相符,尤其是方案IV为强化节水方案,单位用水定额过于偏低,节水强度过大,而单位节水强度过大不利于当地的经济的发展。同时,考虑到我国选择走可持续发展之路,中央全力抑制经济过热发展的态势,提倡协调、全面和可持续发展的理念,因此方案V和

方案VI存在较高的发展风险,发展速度较高容易引起经济过热问题,对长远发展不利。

通过综合对比和分析,同时参考不同水平年供水城镇缺水率,建议将“情形2”下方案I为推荐方案,相应的工程规模为推荐工程规模。

3.3 水资源配置的推荐方案结果

3.3.1 规划工程设计规模

沈北地区规划工程主要包括石佛寺水库水源工程、石佛寺一、二期水厂和输水管网(原水、净水)等。其中推荐调控方案的水源工程及配套水厂设计规模见表7。

3.3.2 规划工程实施方案

a. 2010年前建成石佛寺西线一期工程,设计输水规模为6万t/d;实现石佛寺东线一期工程输水工程设计规模30万t/d,石佛寺一期和二期水厂设计规模分别为4万t/d、26万t/d;完成五水厂增供“于洪区马—平镇”一期输水工程,设计输水规模0.25万t/d;建成城市污水处理厂一期及其配套工程,设计规模5万t/d。

b. 2020年前完成沈北地区现有水源置换、不再供给沈阳市区而只供沈北地区;建成石佛寺西线二期工程,新增设计输水规模4万t/d;完成五水厂增供“于洪区马—平镇”二期输水工程,新增设计输水规模1万t/d;建成城市污水处理厂二期及其配套工程,新增设计规模15万t/d。

c. 2030年前建成石佛寺东线二期工程,新增设计输水规模为26万t/d;完成五水厂增供“于洪区马—平镇”三期输水工程,新增设计输水规模1.25万t/d;建成城市污水处理厂三期及其配套工程,新增

表4 水资源调控方案计算结果Ⅰ(情形2,多年平均)

方案号	2010年							2020年							2030年						
	需水量/万 m ³			供水量/万 m ³			缺水率/%	需水量/万 m ³			供水量/万 m ³			缺水率/%	需水量/万 m ³			供水量/万 m ³			缺水率/%
	城镇	农村	合计	城镇	农村	合计		城镇	农村	合计	城镇	农村	合计		城镇	农村	合计	城镇	农村	合计	
方案I	11232	27426	38658	38506	152	0.39	19944	23450	43394	43394	0	0	30084	20646	50730	50730	0	0			
方案II	10368	26573	36941	36801	140	0.38	16188	22726	38914	38914	0	0	25596	20031	45627	45627	0	0			
方案III	10296	27717	38013	37781	232	0.61	16404	24207	40611	40598	13	0.03	21120	22020	43140	43140	0	0			
方案IV	9492	26847	36339	36127	212	0.58	13308	23453	36761	36750	11	0.03	17976	21386	39362	39362	0	0			
方案V	12888	26185	39073	39011	62	0.16	26412	21099	47511	47511	0	0	44424	17807	62231	62099	132	0.21			
方案VI	11892	25353	37245	37187	58	0.16	21684	20463	42147	42147	0	0	37980	17270	55250	55166	84	0.15			

表5 水资源调控方案计算结果Ⅱ(情形2,P=95%)

方案号	2010年							2020年							2030年						
	需水量/万 m ³			供水量/万 m ³			缺水率/%	需水量/万 m ³			供水量/万 m ³			缺水率/%	需水量/万 m ³			供水量/万 m ³			缺水率/%
	城镇	农村	合计	城镇	农村	合计		城镇	农村	合计	城镇	农村	合计		城镇	农村	合计	城镇	农村	合计	
方案I	11232	32351	43583	43058	525	1.2	19944	27553	47497	47497	0	0	30084	24239	54323	54323	0	0			
方案II	10368	31295	41663	41177	486	1.17	16188	26713	42901	42901	0	0	25596	23543	49139	49139	0	0			
方案III	10296	32744	43040	42345	695	1.61	16404	28529	44933	44887	46	0.10	21120	25973	47093	47093	0	0			
方案IV	9492	31670	41162	40510	652	1.58	13308	27646	40954	40924	30	0.07	17976	25248	43224	43224	0	0			
方案V	12888	30837	43725	43503	222	0.51	26412	24691	51103	51103	0	0	44424	20776	65200	65068	132	0.2			
方案VI	11892	29811	41703	41494	209	0.5	21684	23949	45633	45633	0	0	37980	20170	58150	58066	84	0.14			

表 6 不同调控方案的工程累计静态投资估算结果 亿元

方案号	节水投资	污水处理 厂及配套 管网投资	供水工程			合计	污水处 理厂运 行费
			石佛寺 西线工程	石佛寺 东线工程	水源置换 工程		
方案 I	0.92	2.65	0.71	4.92	0.26	9.46	0.83
方案 II	1.94	2.15	0.71	3.98	0.19	8.97	0.70
方案 III	0.85	1.67	0.71	3.42	0.15	6.80	0.58
方案 IV	1.79	1.32	0.71	2.00	0.19	6.01	0.49
方案 V	1.02	4.29	0.71	6.91	0.29	13.22	1.24
方案 VI	2.16	3.57	0.71	6.20	0.26	12.90	1.06

表 7 推荐调控方案的规划工程设计规模 万 m³/d

年份	石佛寺水库 给水工程		石佛寺自来水厂		五水厂增供 “于洪区马— 平镇”输水工程	新建 污水 处理厂
	西线	东线	一期	二期		
2010	6	30	4	26	0.25	5
2020	10	30	4	26	1.25	20
2030	10	56	10	46	2.50	35

4 结 语

提出基于地表水与地下水联合调控的石佛寺水库集中供水水源复合式布井开采新模式。利用所研制的水资源配置模型和软件系统进行不同组合方案长系列逐月调算,通过对各方案的缺水率、总投资及综合效益进行分析,最后优选出水资源配置推荐方案和规划工程规模。

a. 2010 年、2020 年和 2030 年多年平均条件下全区总供水量分别为 3.85 亿 m³、4.34 亿 m³、5.07 亿 m³; 特枯年份(P = 95%)全区总供水量分别为 4.31 亿 m³、4.75 亿 m³、5.43 亿 m³。

b. 水资源配置工程累计静态总投资为 9.46 亿元(方案 I),其中污水处理厂投资 2.65 亿元、石佛寺西线工程 0.71 亿元、石佛寺东线工程 4.92 亿元、水源置换工程 0.26 亿元。

c. 提出了推荐的石佛寺供水系统地表水与地下水联合优化调控模式和设计供水规模,2030 年石佛寺水库给水工程的设计规模达到 66 万 t,突破了原规划最大供水规模为 20 万 t 的限制。

这些成果不仅对沈北地区未来 25 年时间跨度上安全供水保障工程体系建设产生重大而深远的影响,而且可推动我国地表水与地下水联合优化调控理论研究和生产实践,并提高沈阳市城市安全供水保证程度,使“可持续发展水利”和“民生水利”理念落实到具体行动,进一步丰富了我国在供水系统优化调控和供水风险分析等领域的研究内涵,同时对辽宁省水资源优化配置和高效利用、科学管理具有重要的借鉴和参考、应用价值。

参考文献:

[1] 谢新民,符传君,王彤,等.水系规划理论与实践[M].北

京:黄河水利出版社,2003.

[2] 赵勇,裴源生,王建华.水资源合理配置研究进展[J].水利水电科技进展,2009,29(3):78-84.
 [3] 魏婧,梅亚东,杨娜,等.现代水资源配置研究现状及发展趋势[J].水利水电科技进展,2009,29(4):73-77.
 [4] 吴丹,吴凤平,陈艳萍.水权配置与水资源配置的关系剖析[J].水资源保护,2009,25(6):76-80.
 [5] 蒲志仲.水资源配置市场机制研究[J].水利经济,2008,26(4):9-12.
 [6] 罗利民,谢能刚,仲跃,等.区域水资源合理配置的多目标博弈决策研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):72-76.
 [7] 李少华,董增川,李玉荣.水资源统筹配置综述与展望[J].水利经济,2007,25(2):1-5.
 [8] 康瑛,陈志刚.平原河网地区水资源配置仿真模拟模型研究[J].水资源保护,2007,23(5):31-34.
 [9] 王福林,谢新民,杨丽丽,等.辽河干流控制性枢纽工程供水系统调控模式与供水风险分析[R].沈阳:辽宁省石佛寺水库工程建设管理局,北京:中国水利水电科学研究院,等,2007.
 [10] 许新宜,王浩,甘泓,等.华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M].郑州:黄河水利出版社,1997.
 [11] 粟晓玲,邢大韦.关中地区规划供水工程配置方案研究[J].水利水电科技进展,2000,20(6):6-8.

(收稿日期:2009-10-23 编辑:高渭文)

(上接第 31 页)

[7] 慕金波,侯克复.灰色聚类法在水环境质量评价中的应用[J].环境科学,1991,12(2):86-90.
 [8] 王晓鹏.多元统计分析在河流污染状况综合评价中的应用[J].系统工程理论与实践,2001,21(9):118-123.
 [9] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科技出版社,2000:7-11,24-32.
 [10] 左东启,戴树生,袁汝华,等.水资源评价指标体系研究[J].水科学进展,1996,7(4):367-373.
 [11] 刘毅,贾若祥,侯晓丽.中国区域水资源可持续利用评价及类型划分[J].环境科学,2005,26(1):42-46.
 [12] 李朝霞.区域水资源可持续利用体系研究[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(1):81-85.
 [13] 刘恒,耿雷华,陈晓燕,等.区域水资源可持续利用评价指标体系的建立[J].水科学进展,2003,14(3):265-270.
 [14] 沈晓娟,徐向阳.基于三标度法的区域水资源综合评价[J].水资源保护,2006,22(4):36-39.
 [15] 郦建强,陆桂华,杨晓华,等.区域水资源承载能力综合评价的 GPPIM[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(1):1-4.
 [16] 胡晓雪,杨晓华,郦建强,等.系统健康评价的集对分析模型[J].系统工程理论与实践,2005(5):164-176.
 [17] 赵克勤,宜爱理.集对论:一种新的不确定理论与应用[J].系统工程,1996,14(1):18-23.
 [18] 余国祥.对联系数中的不确定数*i*的研究[J].辽宁师范大学学报:自然科学版,2002,25(4):349-352.

(收稿日期:2009-09-22 编辑:高渭文)