

廊坊市区域现状水资源承载力分析^{*}

赵国华¹, 翟国静², 何平³, 苏永军², 畅金元³, 郭慧娟²

(1. 廊坊市供水总公司, 河北 廊坊 065000; 2. 河北工程技术高等专科学校 水利工程系, 河北 沧州 061001;
3. 河北省廊坊水文水资源勘测局, 河北 廊坊 065000)

摘 要:从水资源承载力的定义出发,在现有研究成果的基础上建立了区域水资源承载力评价多目标优化模型,并给出了简化条件下的简便解法。采用文中所给出的水资源承载力评价模型,按现状生活水平和小康型生活水平两种情况进行了廊坊市区域现状水资源承载力计算。计算结果表明,就现状生活水平和经济结构而言,廊坊市社会经济发展规模明显超出了水资源的承载能力,提高用水功效,特别是提高农业用水功效,以及调整经济结构是提高水资源承载力的有效途径。

关键词:水资源; 现状承载力; 最大人口; 配水系数; 用水功效系数; 经济结构

中图分类号:X331

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)01-0245-05

Analysis of Current Regional Water Resources Carrying Capacity in Langfang City

ZHAO Guo-hua¹, ZHAI Guo-jing², HE Ping³, SU Yong-jun², CHANG Jin-yuan³, GUO Hui-juan²

(1. Langfang Water Supply Corporation, Langfang, Hebei 065000, China; 2. Department of Hydraulic Engineering, Hebei Engineering and Technical College, Cangzhou, Hebei 061001, China; 3. Hydrologic and Water Resource Survey Bureau, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: In the paper, starting from the definition of water resources carrying capacity, a multi-objective optimization model is established for estimating regional water resource carrying capacity based on current results of regional water resource carrying capacity and the handy solution of the multi-object optimization model is given with predigested conditions. Applying the multi-object optimization model given in this paper, the current regional water resources carrying capacity in Langfang are estimated with current standard of living and xiaokang standard of living. The results of estimation show that the scale of society economy in Langfang exceeded local water resources carrying capacity and advancing water-utilizing efficiency, especially in agriculture, and adjusting economic construction are effective ways of advancing regional water resources carrying capacity.

Key words: water resources; current carrying capacity; maximum population; water-distributing coefficient; water-utilizing efficacy coefficient; economic construction

我国是水资源贫乏的国家之一,随着人口的快速增长和社会经济的快速发展,水资源短缺和水环境恶化等问题日趋严重,水资源短缺已成为制约我国经济和社会可持续发展的瓶颈。要解决水资源可持续利用以支撑社会经济的可持续发展问题,就要深刻分析当地水资源能够承载的人口与经济发展规模,包括经济结构、生态建设等。对一个流域或地区来

说,只有对当地的水资源量能够满足人畜、工农业、生态用水的承载能力进行正确的分析,才能对水资源的可持续开发利用做出科学的决策。

1 水资源承载力的定义及内涵

水资源承载力是承载力概念与水资源领域的自然结合,是随着水问题的日益突出由我国学者在 20

* 收稿日期:2008-05-21

基金项目:河北省建设厅科技研究项目(项目编号:2007-258)

作者简介:赵国华(1968-),男,河北廊坊人,工程师,主要研究方向为水资源与给排水。E-mail:zhaoguohua-1968@163.com

通信作者:翟国静(1962-),男(汉),河北丰南人,教授,主要从事水文与水资源方面的研究。E-mail:zhaigj62@126.com

世纪 80 年代末提出来的^[1-2],在吸收了国外承载力研究成果的基础上,水资源承载力的研究在我国得到了独立发展,取得了丰富的成果^[1-3]。但是对于水资源承载力的认识还不统一,尚未取得公认的定义。水资源承载力的研究在基本概念体系上经历了由传统水利向资源水利,再由资源水利向可持续发展理念转变的过程^[4],目前较为公认的定义为:在某一具体的历史发展阶段下,以可以预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,经过优化配置,水资源对该地区社会经济可持续发展的最大支撑能力^[3]。

2 区域水资源承载力计算的数学模型

研究水资源承载力应用的数学模型主要有两种:一种是应用系统动力学的模型进行仿真预测^[5-6],可以根据输入的不同策略进行仿真,得到不同策略下水资源承载力的预测结果;另一种是建立多目标规划模型,应用资源优化配置的理论,考虑水资源、水环境、经济社会发展的各种约束条件,追求经济效益最大,对于环境的影响最小,研究不同策略下的水资源所能承载的经济、人口规模^[7-10]。

2.1 区域水资源承载力模型的理论分析

区域水资源承载力的承载体是区域水资源,即可供区域开发利用的各种形式、各种质地的水资源,其承载对象是区域所有与水相关联的人类活动和生态环境,包括生活方面、工农业生产、商业、娱乐景观及生态环境用水等。区域水资源承载力主要由三方面因素决定:区域水资源赋存状况、区域水资源的开发利用能力和区域用水结构用水水平^[8-9]。

区域水资源赋存状况,一般指可供区域利用的水资源潜力 W_t :

$$W_t = (W_{t1}, W_{t2}, \dots, W_{tm}) \quad (1)$$

式中: W_{ti} ($i = 1, 2, \dots, n$) ——水资源元素,表示 t 时期(年份)区域中第 i 种水资源的总量; n ——区域中水资源种类总数。

区域水资源的开发利用能力,反映了区域的水资源开发利用水平,取决于区域内的水利工程状况以及管理水平等。区域水资源的开发利用能力可用开发利用率来 α_t 表示:

$$\alpha_t = (\alpha_{t1}, \alpha_{t2}, \dots, \alpha_{tm}) \quad (2)$$

式中: α_{ti} ($i = 1, 2, \dots, n$) ——水资源开发利用度因子,表示 t 时期区域对第 i 种水资源的最大可开发利用程度, $0 \leq \alpha_{ti} \leq 1.0$,受区域的社会、经济、生态环境状况及生产力、科技水平等因素制约。

区域用水结构和用水水平包括两方面,一是经

济社会中水资源在各个用水对象间的分配,二是各个用水对象对所分配的水资源量的利用率和水资源的功效。

用水结构可用配水系数来表示:

$$k_t = \begin{bmatrix} k_{t11} & k_{t12} & \dots & k_{t1m} \\ k_{t21} & k_{t22} & \dots & k_{t2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{tm1} & k_{tm2} & \dots & k_{tmn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: k_t —— t 时期的配水系数矩阵,代表区域的某种(k)配水方案;矩阵元素 k_{tij} ——配系数,表示第 i 种水资源分配给第 j 用水对象的比例, $0 \leq k_{tij} \leq 1.0$, $\sum_{j=1}^m k_{tij} = 1.0$ 。

用水水平可用功效系数表示:

$$U_{Wt} = \begin{bmatrix} U_{Wt11} & U_{Wt12} & \dots & U_{Wt1m} \\ U_{Wt21} & U_{Wt22} & \dots & U_{Wt2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{Wtn1} & U_{Wtn2} & \dots & U_{Wtnm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: U_{Wt} —— t 时期区域水资源的功效矩阵; U_{Wtij} ——水资源的功效因子,表示单位第 i 种水资源量对第 j 个用水对象的最大支持能力:对生活用水,即为人均生活用水定额的倒数(人/ m^3);对工农业生产即为单方水的产值(元/ m^3)。若某种水资源对某用水对象不能支持,则 $U_{Wtij} = 0$ 。正如水资源承载定义所述,功效系数是水资源对社会经济发展的最大支撑能力,故当进行未来某一水平年的水资源承载力分析时, U_{Wtij} 应为充分考虑科技发展水平和节水措施基础上的单位水资源量对区域各用水对象的最大支持能力,或支持潜力,故它一般应大于等于现状实际的单位水资源量的支持能力。

考虑到区域的水资源潜力和区域水资源开发能力,则可确定出区域水资源可供水量:

$$W_{St} = (W_{St1}, W_{St2}, \dots, W_{Stn}) \quad (5)$$

其中, $W_{Sti} = W_{ti} \alpha_{ti}$ 。各用水对象所分配到的各种水资源量为

$$W_{bt}^k = \begin{bmatrix} W_{bt11}^k & W_{bt12}^k & \dots & W_{bt1m}^k \\ W_{bt21}^k & W_{bt22}^k & \dots & W_{bt2m}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{bnt1}^k & W_{bnt2}^k & \dots & W_{bntn}^k \end{bmatrix}$$

$$W_{bt}^k = (W_{bt1}^k, W_{bt2}^k, \dots, W_{bntn}^k) \quad (6)$$

其中 $W_{btij}^k = W_{Sti} k_{tij}^k$, $W_{btj}^k = \sum_{i=1}^n W_{btij}^k$, ($j = 1, 2, \dots, m$)。则各种水资源对各用水对象的支撑能力为:

$$Z_{Wt}^k = (Z_{Wt1}^k, Z_{Wt2}^k, \dots, Z_{Wtm}^k) \quad (7)$$

其中 $Z_{wtij}^k = \sum_{i=1}^n W_{wtij}^k U_{wtij}$ 。

一般地,对于某一水平年而言,区域的水资源潜力(总量)、开发利用水平以及各个用水对象的水资源的功效是相对不变的,因此,水资源对于社会经济的支撑能力随配水方案 k 的不同而变化,即不同的配水方案的支撑能力不同。因为不同用水对象的水资源的功效系数是不同的。则区域水资源承载能力 C_{wt} 可表示为:

$$C_{wt} = \text{Opt}\{Z_{wtij}^k\}$$

(8)

2.2 区域水资源承载力的计算模型

由式(7)和式(8)可知,区域水资源承载力是由水资源对各个用水对象的支撑能力分量的集成而确定的。由于各个用水对象之间的性质不同,水资源的功效不同,因此各个支撑能力的分量具有不可公度性,这样根据式(7)所得到的水资源对于各个用水对象的支撑能力不具有可比性,不能给人以直观的判断,也不便于进行优化。为了使水资源承载力分量具有可比性,必须对水资源承载力分量进行变换。

实际上,对于一个区域而言,各用水方面的最终目的是为了 满足人的需求,是以人为核心、为主体的,是以人的价值观为出发点来考虑问题的。人的需求是多方面的,假定社会对各方面的人均需求构成一个向量(此需求应与用水对象是一致的):

$$R_t = (R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tm})$$

式中: R_{tj} —— t 时期第 j ($j = 1, 2, \dots, n$) 方面的(理想)人均需求量,它反映了区域生活水平。对于生活用水而言,因为支撑能力即为人口数量,所以 R_k ($1 \leq k \leq m$) 即为(理想)人均生活需水量与生活用水功效系数的乘积。

无论是哪一个用水对象都是为了满足人的需求,其用水的总功效是要满足一定的人口需求,为了更直观地判断一个区域的水资源承载力,可用水资源承载的人口数作为承载力的综合性指标,这与承载力的定义是一致的,不仅直观,而且也便于不同阶段及不同区域间水资源承载力的分析比较。这样区域水资源承载力的求解问题就是在不同的配水方案下承载的最大人口数量的优化问题。故区域水资源承载力的计算模型为

$$\text{OB. } P_{mt} = \max_k \min_j \left(\frac{Z_{wtij}^k}{R_{tj}} \right)$$

$$\text{S. T. } \sum_{j=1}^m W_{wtij}^k \leq 1.0$$

$$0 \leq W_{wtij}^k \leq 1.0$$

式中: P_{mt} —— t 时期区域水资源承载的最大人口数量。通过进一步的分析,可以得出上述模型的等价模型:

$$\text{OB. } P_{mt} = \max_k \min_j \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_{wtij}^k) U_{wtij}}{R_{tj}} \right] \quad (9)$$

$$\text{S. T. } \frac{\sum_{i=1}^n (W_{wtij}^k) U_{wtij}}{P_{tj}^k} \leq R_{tj}, j = 1, 2, \dots, m$$

(10)

$$\sum_{j=1}^m \left(\frac{P_{tj}^k R_{tj}}{U_{wtij}^k} \right) W_{wtij}^k, i = 1, 2, \dots, n$$

(11)

$$\sum_{j=1}^m W_{wtij}^k \leq 1.0$$

(12)

$$0 \leq W_{wtij}^k \leq 1.0$$

(13)

式中: P_{tj}^k —— t 时期相对于第 k 个配水方案对各个用水对象的支撑能力的最小值。

2.3 区域水资源承载力的计算模型求解

由式(9) - (13)构成的水资源承载力计算模型,对于一定区域的某一时 期 t ,在假定 W_{t1}, \dots, W_{tm}, R 已定的情况下, P_{mt} 的求解就是一个以 W_{wtij}^k 为决策变量的线性优化问题。但对于不同区域、不同时期 W_{t1}, \dots, W_{tm}, R 是变动的。当水资源短缺时,要使水资源所支撑的人口最大,就必须使约束条件(10) - (12)取等于号,特别地,当供水不考虑水源种类的影响,即仅考虑水资源总量的分配($i = 1$),且环境用水优先时,可根据式(11)推求出最大支撑人口数量,即:

$$P_{mt} = \frac{W_{st} - W_{et}}{\sum_{j=1}^m U_{wtij}}$$

(14)

式中: W_{st} ——区域水资源总量; W_{et} ——环境用水量。

3 廊坊市区域水资源现状承载力分析

廊坊市位于华北平原东北部,京津两大城市之间,全市国土面积 6 429 km²,总人口 387.2 万人,耕地 36.8 万 hm²。全市多年平均水资源总量为 8.041 亿 m³,人均水资源量为 208 m³,耕地平均水资源量占有量为 2 115 m³/hm²,均低于全省平均值,人均水资源远低于国际公认的水资源极度紧缺标准 500 m³。文中根据 2000 - 2005 年的统计资料对廊坊市区域水资源现状承载力进行分析。用水对象分为生活用水、农业用水、工业用水、第三产业用水和环境用水,生活水平考虑现状和小康 2 种情况。根据相关资料确定廊坊市区域小康型生活水平指标为:人均生活用水量为 80 L/(人·d),人均 GDP 为 10 000 元^[9]。廊坊市区域水资源可利用总量、现状用水功效系数、人均需求如表 1 - 3 所示。

表 1 水资源可利用总量

亿 m³

年份	地表水 可利用量	浅层地下水可开采量		深层地下水 允许开采量	水资源可利用总量 (不计深层地下水)		水资源可利用总量 (包括深层地下水)	
		矿化度 < 2	矿化度 < 3		矿化度 < 2	矿化度 < 3	矿化度 < 2	矿化度 < 3
		g/L	g/L		g/L	g/L	g/L	g/L
2000	1.9217	2.2311	3.4199	1.1324	4.1528	5.3416	5.2852	6.4740
2001	2.5555	3.3213	4.7417	1.1324	5.8768	7.2972	7.0092	8.4296
2002	2.2425	2.5378	3.8120	1.1324	4.7803	6.0545	5.9127	7.1869
2003	2.7017	3.8251	5.6740	1.1324	6.5268	8.3757	7.6592	9.5081
2004	2.3026	5.1307	6.9322	1.1324	7.4333	9.2348	8.5657	10.3672
2005	2.3040	2.9819	4.5335	1.1324	5.2859	6.8375	6.4183	7.9699

表 2 现状用水功效系数

年份	人口/ 万人	用水量/万 m ³					产值/亿元			用水功效系数/(元·m ⁻³)			
		生活	农业	工业	三产	环境	农业	工业	三产	生活	农业	工业	三产
										U _{w1}	U _{w2}	U _{w3}	U _{w4}
2000	381.4	12241	80817	8954	2906	0	62.95	153.16	90.25	0.031	7.8	171.1	310.6
2001	381.6	9287	82734	10784	2643	4	68.23	166.78	98.05	0.041	8.3	154.7	371.0
2002	384.1	8912	81647	13509	3259	5	70.52	190.36	107.48	0.043	8.6	140.9	329.8
2003	387.2	11212	80758	13239	4348	30	76.87	219.20	118.06	0.035	9.5	165.6	271.5
2004	389.8	12210	76212	14186	1170	923	89.96	250.42	137.04	0.032	11.8	176.5	1171.7
2005	391.6	12312	80436	12413	1226	1123	97.64	299.19	154.09	0.032	12.1	241.0	1256.9

表 3 现状人均需求

年份	现状人均需求				小康人均需求(现状产业结构)			
	生活 R ₁	农业 R ₂ (元/人)	工业 R ₃ (元/人)	三产 R ₄ (元/人)	生活 R ₁	农业 R ₂ (元/人)	工业 R ₃ (元/人)	三产 R ₄ (元/人)
2000	1	1650	4015	2366	0.9099	2055	4999	2946
2001	1	1788	4371	2569	1.1998	2049	5008	2943
2002	1	1836	4956	2798	1.2585	1914	5168	2918
2003	1	1985	5660	3049	1.0085	1856	5293	2851
2004	1	2308	6424	3516	0.9323	1884	5245	2871
2005	1	2494	7641	3935	0.9287	1772	5431	2797

由于环境用水量的功效很难进行定量量度,因此将其作为优先满足的用水对象。将水资源可利用总量(矿化度 < 3 g/L)、环境用水量、用水功效系数、现状人均需求代入式(14),即可推求出廊坊市区域不同需求下的现状水资源承载力(见表 4)。

由表 4 中水资源承载力计算结果可以看出:在现状生活水平下,按照现状生产力发展水平和产业结构,廊坊市 2000 - 2005 年区域现状人口数量均高于水资源所能支撑的最大人口数,人口超标率最大为 62.0%,水资源承载力不足,社会经济的发展规模超过了水资源承载力;在小康型生活水平下,按照现状生产力发展水平和产业结构,廊坊市只有 2000 - 2003 年区域现状人口数量超过水资源所能支撑的最大人口数,人口超标率最大为 95.4%,水资源承载力不足,社会经济的发展规模超过了水资源承载力,而 2004 年和 2005 年的现状人口并未超过水资源所能支撑的最大人口数,甚至 2004 年的人口超标率为 - 16.1%,

水资源承载力富足,社会经济的发展规模未超过水资源承载力。之所以 2004 年和 2005 年的现状人口并未超过水资源所能支撑的最大人口数,甚至 2004 年的人口超标率为 - 16.1%,水资源的支撑潜力较大,不仅是因为水资源可利用量较大,而且更因为用水功效系数较 2000 - 2003 年具有明显的提高。此外,从水资源分配方案而言,农业用水均占到了 70%以上,其用水功效系数太低,因此实施农业节水措施,对于提高区域水资源承载力具有决定性意义。而从用水功效系数而言,第三产业的用水功效最高,因此调整产业结构,加大第三产业对 GDP 的贡献比例,有利于提高区域水资源承载力。

很显然,区域水资源承载力(最大支撑人口数)是相对于人均需求(生活水平)而言的,相同的水资源条件下,如果人均需求不同,所能支撑的最大人口数是不同的,例如,将小康生活标准人均 GDP 提高到 15 000 元,人口超标率都将超过 20%。

表 4 廊坊市区域现状水资源承载力计算结果

生活 标准	年份	最大人 口/万人	现状人 口/万人	人口超 标率/ %	配水比例/ %			产值/ 万元				人均 GDP/ 元
					生活	农业	工业	三产	农业	工业	三产	
现 状	2000	235.5	381.4	62.0	11.66	77.04	8.54	2.77	38.85	94.54	55.71	8031
	2001	305.1	381.6	25.1	8.81	78.45	10.23	2.51	54.56	133.38	78.39	8728
	2002	257.2	384.1	49.3	8.31	76.07	12.59	3.04	47.23	127.49	71.98	9590
	2003	336.0	387.2	15.3	10.25	73.70	12.08	3.97	66.69	190.16	102.44	10694
	2004	385.8	389.8	1.0	11.77	73.44	13.66	1.13	89.04	247.83	135.64	12248
	2005	289.2	391.6	35.4	11.57	75.61	11.67	1.15	72.12	220.97	113.79	14070
小 康	2000	195.2	381.4	95.4	8.79	79.54	8.81	2.86	40.11	97.58	57.50	10000
	2001	265.2	381.6	43.9	9.18	78.13	10.19	2.50	54.34	132.80	78.04	10000
	2002	242.6	384.1	58.3	9.86	74.78	12.38	2.99	46.43	125.36	70.78	10000
	2003	356.5	387.2	8.6	10.96	73.11	11.99	3.94	66.16	188.67	101.62	10000
	2004	464.8	389.8	- 16.1	13.22	72.23	13.44	1.11	87.57	243.80	133.45	10000
	2005	393.0	391.6	- 0.4	14.61	73.01	11.27	1.11	69.64	213.45	109.93	10000

4 结 语

水资源承载力的研究方法很多,但是采用最大支撑人口数量及相应的经济规模来描述区域水资源承载力更形象直观。通过对现状年份区域水资源承载力的研究,可以从水资源开发利用的角度分析社会经济发展水平及其可持续发展的潜力,通过对社会经济结构和用水水平的分析可以发现区域水资源供需的主要矛盾,为实现水资源的可持续利用以实现社会经济的可持续发展提供科学的依据。

参考文献:

[1] 雷学东,陈丽华,余新晓,等.区域水资源承载力研究现状与发展趋势[J].水资源与水工程学报,2004,15(3):11-14.

[2] 文琦,何彤慧.近10年来我国水资源承载力研究综述[J].水资源保护,2005,21(6):15-18.

[3] 余卫东,闵庆文,李湘阁.水资源承载力研究的进展与展望[J].干旱区研究,2003,120(1):60-64.

[4] 赵国华,翟国静,李晓粤,等.水资源承载力的内涵与理论探析[J].水土保持研究,2007,14(6):347-349.

[5] 吴九红,曾开华.城市水资源承载力的系统动力学研究[J].水利经济,2003,21(3):6-39.

[6] 毛汉英,余丹林.区域承载力定量研究方法探讨[J].地球科学进展,2001,16(4):549-555.

[7] 贾嵘,蒋晓辉,薛惠峰,等.缺水地区水资源承载力模型研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2000,36(2):114-121.

[8] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等.区域水资源承载力研究[J].水科学进展,2003,14(1):109-113.

[9] 刘宏权.河北省现状年水资源承载力研究[D].保定:河北农业大学,2005:14-18.

[10] 郝启亮.基于水资源承载力的青岛市城市规模研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.