

# 大同市水资源承载能力分析

王忠静<sup>1</sup>, 廖四辉<sup>1</sup>, 武晓峰<sup>1</sup>, 赵建世<sup>1</sup>, 甘泓<sup>2</sup>

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084;  
2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

**摘要:**根据水资源承载能力内涵, 提出水资源承载能力定义, 构造了水资源承载能力双指针计算模型, 提出了超载度及宽松度概念。对山西省大同市的水资源现状承载状态分析表明, 大同市已处于轻度超载状态, 超载度为 1.08~1.15; 在未来水平年, 若大同市在本地(永定河流域)水资源基础上仍采用常规发展模式, 水资源超载程度将加剧。最后讨论了提高大同市水资源承载能力的途径。

**关键词:**水资源承载能力; 模型; 超载度; 大同市

中图分类号: TV213 文献标识码:A 文章编号: 1672-1683(2007)03-0047-04

## Water Resources Carrying Capacity in Datong City

WANG Zhong-jing<sup>1</sup>, LIAO Si-hui<sup>1</sup>, WU Xiao-feng<sup>1</sup>, ZHAO Jian-shi<sup>1</sup>, GAN Hong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** According to the connotation of the water resources carrying capacity (WRCC), the paper gives the definition of the water resources carrying capacity and constructs the dual indices calculation model of the water resources carrying capacity, proposes the concept of the surcharge degree and the flexible degree of WRCC. Analyzing the WRCC of Datong shows that its water resources carrying condition is mildly beyond its carrying capacity, and the surcharge degree is 1.08~1.15. The city's future WRCC indicates that if Datong still uses conventional development pattern on the local water resources, its water resources carrying condition will be worse. Finally, the paper discuss how to improve the city's WRCC.

**Keywords:** Water resources carrying capacity; Model; Surcharge Degree; Datong

水是人类生存和社会生产所必需的和不可替代的自然资源。一个流域或区域的水资源在一定时期内,能够供养的人口和维系的生态环境是有限的,即它的承载能力是有限的。水资源承载能力要求人类社会和经济发展应以适当的模式保持在一定规模内,超过这个规模,将对生态环境造成破坏,反过来会影响人类社会的发展<sup>[1-2]</sup>。因此,研究水资源承载能力,寻求提高水资源承载能力的措施,对于保证经济社会的可持续发展是十分必要的。

## 1 水资源承载能力定义

目前众多的水资源承载能力定义<sup>[3-6]</sup>,源自对水资源承载能力的不同理解。本文认为,水资源承载能力有两个对立统一的要素:承载主体和承载客体<sup>[7]</sup>。承载主体是循环的、可更新和不可替代的水;承载客体是有高度能动性的人。复杂主体和客体组合决定了水资源承载能力属于最复杂的承载能力

问题之一,它源于可持续发展,用于可持续发展。根据水资源承载能力内涵及其研究目地,这里定义其为:“一个流域或地区的水资源承载能力,是指在可以预见的时期内,利用本地水资源及其他资源和智力、技术等条件,在保证符合其社会文化准则的物质生活水平条件下,所能持续供养的人口数量。”本定义中,人口和社会经济规模是水资源的承载能力的两个重要的指标,并且该定义包含了如下信息:(1)界定了水资源承载能力分析的空间尺度,应以流域(或地区)为基本单元。在这个流域中,水资源通过天然(或人工)循环和更新的纽带,将区域内需要水资源支撑的社会经济系统和生态环境系统联系起来,反映了水资源承载能力的大系统特性;(2)界定了水资源承载能力分析的时间尺度,应在人类科学技术可预测的时期内,盲目空想和只顾眼前都是不可取的,反映了水资源承载能力的动态性和阶段相对极限性;(3)界定了水资源承载能力分析应在相对封闭的系统中进行,即强调本地区水资源的支

收稿日期: 2007-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(90302007)(50609010); 国家重点基础研究发展计划 973 计划(2006CB403401)

作者简介: 王忠静(1963-), 男, 清华大学教授、博士生导师, 主要从事水资源规划与管理方面的研究。

撑能力,同时要考虑与其它资源的匹配。外流域调入的水资源以及其它资源,是研究对象系统边界的扩大;(4)明确提出了水资源承载能力还受社会、文化、风俗、生活水平等多因素影响,确定了水资源承载能力的多样性;(5)界定了研究水资源承载能力的目的,是分析水资源在其它资源配合下,一个区域可持续供养的人口数量。而这些人口应生活在符合当地的社会文化准则的物质生活水平条件的基础上。

## 2 水资源承载能力双指针计算模型

### 2.1 模型构架

水资源承载能力的核心是一个地区的水资源在其他资源的配合下,可持续供养的该地区(或流域)人口数量。因此,水资源承载能力计算公式可以有两个基本判断:第一,水资源承载能力的量纲应为人(Capita);第二,水资源承载能力的计算因子至少要包含承载能力的主体和客体。不难判定,水资源承载能力的资源约束即承载主体为水资源,且应是考虑生态环境可持续维系需水后的剩余水资源,脱离了可持续发展,不存在水资源承载能力命题;水资源承载能力的客体为人对水资源的消耗,且应为符合经济、技术及生产力水平和社会、文化及宗教等习惯的水资源消耗。

基于上述分析,本文构造水资源承载能力双指针分析模型,即某一流域或区域的水资源承载能力为:

$$C_w = \frac{W_n}{q_p(t)} \quad (1)$$

式中: $C_w$ —水资源承载能力( $\text{ca}\cdot\text{人}$ ); $W_n$ —经济社会水资源可利用量( $\text{m}^3$ ),为当地水资源总量扣除生态环境适宜可持续需水量后的剩余水量; $q_p(t)$ —经济社会人均全员耗水量( $\text{m}^3/\text{ca}$ ),即总经济社会耗水量与总人口之比,代表着一定经济结构和技术水平下水资源效率,隐含着经济水平。

上式的模型中,经济生活水资源可利用量,反映了一个流域或区域的水资源禀赋条件、生态环境保护目标和水资源开发利用状况,包含了水资源承载主体特性、承载客体水平和承载主客体的相互作用关系;经济社会人均全员耗水量,反映一个流域和地区的水资源开发利用水平、水资源生产力水平和受水资源禀赋的制约因素,同时隐含着相应条件下的流域人口总量、经济总量和人均生活水平,因此 $C_w$ 包含了承载人口数量和这些人口的生活水平。上式中, $q_p(t)$ 是随时间变化的量,代表不同年的水资源耗用和生产力水平,因此 $C_w$ 也是一个随时间变化的量。

### 2.2 模型计算

**2.2.1 经济社会水资源可利用量  $W_n$**  经济社会水资源可利用量  $W_n$ ,为人类经济社会活动对生态环境产生不可持续的破坏影响下的最大水资源可利用量,可用下式计算:

$$W_n = W - W_0 + W_b \quad (2)$$

式中: $W$ —当地水资源总量,包括地表径流和不重复的地下水水量; $W_0$ —生态环境可持续发展的需水量,包括本地的生态环境需水和下游流域的生态需水,包含了河道内生态需水和河道外生态需水,在一定条件下,可与最小生态需水量相当; $W_b$ —外流域调入的真实水量,包括从过境水中取得实际水权

的水资源量。由于外流域调入的水量本身不直接承担着对调入地的生态支撑任务,故可全部用于经济社会消耗。

当地水资源总量  $W$  和外流域调入水量  $W_b$  的计算即是通常水资源评价中的水资源总量和调入水量。生态环境可持续维系需水量  $W_0$  的计算相对复杂,目前尚无统一标准,暂可参照最小生态需水量进行。若水资源承载能力研究评价区有相应生态需水量研究计算成果,可直接引用。若研究评价区没有相应成果,本模型综合了国内外生态环境需水量研究成果,建议采用如下计算方法:

$$W_0 = \alpha W \quad (3)$$

$\alpha$ —生态需水系数,与气候带及其生态环境生态类型和生态功能有关。一般讲,越湿润地区由于其生态多样性复杂,河道内需水较大,生态需水系数也较大;越干旱地区其生态多样性相对简单,河道也多为季节河,生态需水系数相对较小。参照中国工程院关于中国西北干旱内陆河地区的社会经济耗水以不超过总水资源 50%的研究成果<sup>[8]</sup>,以及借鉴国外湿润半湿润地区的生态需水量研究成果,本文内差后提出建议生态需水系数参考表 1。

表 1 不同气候区生态需水系数  $\alpha$  参考

气候分区	干旱区	半干旱区	半湿润区	湿润区
生态需水系数 $\alpha$	0.45~0.55	0.55~0.65	0.65~0.75	0.75~0.85

**2.2.2 人均全员耗水量  $q_p(t)$  的计算** 人均全员耗水量  $q_p(t)$  是一个与社会经济和生产力水平密切相关的量,是一个随时间发展而变化的量。根据时间断面,可分为现状人均全员耗水量和未来人均全员耗水量,均可用下式计算:

$$q_p(t) = \frac{W_n(t)}{P(t)} \quad (4)$$

式中: $W_n(t)$ — $t$  时刻流域(或区域)社会经济总耗水量; $P(t)$ —该时刻对应的人口总量。

现状条件下的人均全员耗水量  $q_p(t)$  容易计算,可通过现时的总耗水量和现时人口的调查统计值直接得到,或可参照全国水资源规划大纲或评价导则进行;对未来规划条件下的人均全员耗水量计算则较为复杂,可采取多种途径进行。

第一条途径,利用全国水资源规划附表成果,用上式直接求出未来规划水平年的  $q_p(t)$  值。对其合理性和实现途径不进行校核分析;第二条途径,采用宏观经济水资源模型分析计算,得到未来规划水平年的  $q_p(t)$  值,以及相应的经济规模总量和人均生活水平,同时也可描述出实现规划水平的人均全员耗水量水平的经济社会途径;第三条途径:根据水资源承载能力研究是为规划服务的特点,预测和设置各种水资源开发利用及社会经济发展基本情景,计算不同的水资源开发利用策略下的人均全员耗水量,同时也可描述出实现该情景的水资源开发利用模式。本文研究采用第三条途径进行大同市未来水平年的人均全员耗水量的计算。

### 2.3 超载度与宽松度

进一步根据计算模型,还可衍生出两个直观评价水资源承载状态和承载潜力的指标:水资源超载度  $P_w$  和宽松度  $R_w$ 。

水资源超载度,用于表述超载流域的水资源超载状态,按下式计算:

$$P_w = \frac{q_p(t) \cdot P(t)}{W_n} \quad (5)$$

式中各变量意义同前。水资源超载度的实质,是人均实际全员耗水量与人均经济社会水资源可利用量之比,当  $P_w < 1$  时,不超载,且值越小则承载潜力越大,此时可用水资源宽松度描述;当  $P_w > 1$  时,说明流域已处于超载状态,且值越大则超载越严重。

水资源宽松度,用于表述不超载流域的水资源承载潜力现状,按下式计算:

$$R_w = \frac{W_n}{q_p(t) \cdot P(t)} \quad (6)$$

式中各变量意义同前。水资源宽松度的实质,是人均经济社会水资源可利用量与人均实际全员耗水量之比,当  $R_w > 1$  时,不超载,且值越大则承载潜力越大;当  $R_w < 1$  时,说明流域已处于超载状态,且值越小,超载越严重,此时可用水资源超载度描述。

水资源超载度和水资源宽松度互为倒数,联合描述流域的水资源承载状态和承载潜力。

### 3 大同市水资源承载能力

#### 3.1 大同市概况

大同市位于山西省北部内外长城之间,地处黄土高原东北边缘地段,总面积 14 097 km<sup>2</sup>,属温带大陆性季风气候,年平均气温 6.5°C,年均降雨量在 400 mm 左右,年蒸发量为 1 055.9 mm,干旱指数 2.5,属干旱半干旱地区。大同市地跨海河、黄河两大流域,以海河流域为主,约占全市总面积的 99.43%。属海河流域大清河水系的流域面积占全市总面积的 21.05%,属于永定河水系的流域面积占全市面积的 78.38%。在永定河水系的支流桑干河的流域面积占总面积的 60.14%,支流洋河的流域面积占总面积的 18.24%。

大同市是山西省能源重化工基地之一。2000 年国内生产

总值 170.2 亿元,2000 年人口 300.31 万人,其中城镇人口 137.09 万人。近年来随着经济社会的迅速发展,城镇化建设步伐的加快,人民生活水平的提高,水资源需求量不断增大。水资源总量不足、时空分布不均、水质污染和水环境恶化等问题越来越突出,已成为当地社会经济可持续发展的重要制约因素。研究大同市水资源承载能力,对于制定大同市水资源的可持续利用、保障社会经济的可持续发展有重要的现实意义。

#### 3.2 大同市现状水资源承载状态

根据大同市水资源开发利用现状调查评价结果,大同市 2000 年总供水量 43 556 万 m<sup>3</sup>,其中地表水工程供水 13 083 万 m<sup>3</sup>,占供水总量的 30.0%;地下水工程供水 30 473 万 m<sup>3</sup>,占供水总量的 70.0%。地下水供水比重大,超采严重,引起区域地下水位大幅度下降,产生一系列生态环境问题。2000 年全市地下水超采区面积达 349 km<sup>2</sup>,地下水超采量为 9 376 万 m<sup>3</sup>。与此同时,大同市工矿企业“三废”及城市生活污水排放量逐年增加,2000 年为 9 128 万 m<sup>3</sup>,废水排放量的 95%未经处理直接排入河道、农田、流入水库或渗入地下,成为河水、泉水以及城市附近地下水污染的主要原因。在煤矿开采范围内,由于地下水水位下降,引起井泉水位下降,甚至井水干涸,导致了生态环境的严重恶化。上述数据可定性判断,大同市水资源从水量水质上都属超载状态。

大同市干旱指数为 2.5,半干旱区半湿润,取生态需水系数为 0.65,根据各流域分区的水资源量算出各分区的经济可用水资源量。通过对 2000 年总耗水量和现时人口的调查统计,根据水资源承载能力双指针计算模型,计算得到在现状生活水平和用水水平下,各分区所能够承载的人口。其中,水资源量分别采用了大同市水文局根据全国水资源综合规划大纲评价结果和清华大学采用分布式水文模型评价的结果(另文介绍)。由计算结果可以看出,无论是采用哪一个水资源评价成果,大同市主要人口聚集和主要经济活动区的桑干河区都已经处于超载状态,与之前的判断一致。而人口少,水资源量相对丰富的洋河区和大清河区仍然有承载的空间。

表 2 大同市分区现状水资源承载能力(采用大同市水文局计算的水资源量)

流域分区	水资源量 /万 m <sup>3</sup>	社会经济可用水量 /万 m <sup>3</sup>	现状人口 /万人	人均水资源量 /m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	耗水量 /m <sup>3</sup>	人均耗水量 /m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	宽松度	超载度	适宜承载人口 /万人
桑干河	61478	21517	233.75	92	23154	99	0.93	1.08	217.23
洋 河	21 964	7 687	45.04	171	5 737	127	1.34	0.75	60.35
大清河	20 940	7 329	21.02	349	1 413	67	5.19	0.19	109.03
其 他	325	114	0.5	228	11	22	10.34	0.10	5.17
合 计	104 707	36 647	300.31	122	30 314	101	1.21	0.83	363.05

表 3 大同市分区现状水资源承载能力(采用清华大学计算的水资源量)

流域分区	水资源量 /万 m <sup>3</sup>	可用水资源量 /万 m <sup>3</sup>	人口 /万人	人均水资源量 /m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	耗水量 /m <sup>3</sup>	人均耗水量 /m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	宽松度	超载度	承载人口 /万人
桑干河	57 637	20 173	233.75	86	23 154	99	0.87	1.15	203.65
洋 河	25 741	9 009	45.04	200	5 737	127	1.57	0.64	70.73
大清河	20 940	7 329	21.02	349	1 413	67	5.19	0.19	109.03
其 他	325	114	0.5	228	11	22	10.34	0.10	5.17
合 计	104 643	36 625	300.31	122	30 314	101	1.21	0.83	362.83

#### 3.3 大同市未来水平年水资源承载能力

现状大同市人口主要分布在永定河山区,占全市总人口

的 92.3%,国民生产总值为 166.87 亿元,占整个大同市国民经济的 98.05%,工业总产值比例则达到 99.04%。考虑到大

同市的人口、经济及水资源分布情况,本次研究只计算大同市位于永定河流域内部的区域部分,对在大清河流域及其他流域则不纳入本研究范围。在具体计算时,近似假定大同市永定河流域耗用了整个大同市国民经济发展的用水,而其他区域则只考虑基本的生活用水。由此预测未来水平年大同市(永定河区)的水资源承载能力。

以2000年基准数据为起点,按照大同市的国民经济和社会发展规划,采用趋势预测和情景预测设置了高、中、低三套方案,其中2010年参考大同市“十一五”规划指标只给出一套方案。预测的指标包括人口、城镇化率、GDP、三产结构、分行业工业增加值、耕地面积、灌溉面积、大小牲畜数量等。

根据大同市历史水资源生产力发展及2000年实际用水水平,参照国内外的水资源利用效率,分析了大同市今后政策、技术及文化等方面对节水的影响,拟定了高、中、低三个节水方案下的用水定额。根据可能情景组合情况,重点设计了4种组合情景并与常规方案比较,由此预测出未来水平年的耗水量。根据水资源承载能力计算模型计算得到未来水平年大同市的水资源承载能力。

表4 大同市(永定河区)未来水平年水资源承载能力

方案	水平年	预测人口/万人	人均经济水资源量/m <sup>3</sup>	总耗水量/万m <sup>3</sup>	人均耗水/(m <sup>3</sup> /人)	水资源宽裕度	承载人口/万人	生活水平/GDP/万元
22	2010	298.52	98	34978	117	0.83	1.20	249.12 2.09
	2020	318.50	92	44142	139	0.66	1.51	210.61 4.22
	2030	338.13	86	48310	143	0.60	1.66	204.30 7.12
11	2010	298.52	98	40543	136	0.72	1.39	214.93 2.09
	2020	318.50	92	45291	142	0.64	1.55	205.27 3.85
	2030	338.13	86	49059	145	0.59	1.68	201.18 5.90
12	2010	298.52	98	34978	117	0.83	1.20	249.12 2.09
	2020	318.50	92	43186	136	0.68	1.48	215.28 3.85
	2030	338.13	86	45209	134	0.65	1.55	218.32 5.90
00	2010	298.52	98	43333	145	0.67	1.48	201.09 2.09
	2020	318.50	92	49025	154	0.60	1.68	189.64 3.50
	2030	338.13	86	50990	151	0.57	1.75	193.57 4.88
01	2010	298.52	98	40543	136	0.72	1.39	214.93 2.09
	2020	318.50	92	43407	136	0.67	1.49	214.18 3.50
	2030	338.13	86	45955	136	0.64	1.57	214.78 4.88

注:组合情景采用2位编码方式描述;第1位表示经济发展速度水平,第2位表示节水力度,“22”表示高经济发展水平、高等节水力度下的耗水方案;“11”表示中经济发展水平中等节水力度下的耗水方案;“12”表示中经济水平高等节水力度下的耗水方案;“00”表示低经济水平低等节水力度下的耗水方案;“01”表示低经济水平中等节水力度下的耗水方案。

从表4可以看出:按照大同市的经济发展规划和未来节水政策,在中等经济规模下,仅依靠大同市本地(永定河区)的水资源量,未来大同将处于水资源超载状态,经济社会的发展,人口的增加将挤占生态环境用水,为此,为了保持大同市的可持续发展,建议考虑外调水资源。

按照现今的趋势分析,大同市的电力行业将快速发展,电力行业耗水量所占的比重非常之大,使得大同市工业耗水量急剧增加。如果调整大同市的产业结构,将发展电力行业的投入去发展其他耗水量低的产业,将大大降低大同市的总耗水量。现设定电力增加值年增长率为2%,而其他工业(煤炭除外)发展速度加快,通过计算,11方案的2010、2020和2030年的耗水总量将降低为3.74亿m<sup>3</sup>、4.03亿m<sup>3</sup>和4.33亿m<sup>3</sup>;12方案将降低为3.51亿m<sup>3</sup>、3.79亿m<sup>3</sup>、4.03亿m<sup>3</sup>。

11和12方案进行产业结构调整后大同市未来水平年水资源承载能力如下表。

表5 大同市产业结构调整后大同市未来水平年水资源承载能力

方案	水平年	预测人口/万人	人均经济水资源量/m <sup>3</sup>	总耗水量/万m <sup>3</sup>	人均全员耗水/(m <sup>3</sup> /人)	水资源宽裕度	承载人口/万人	
11	2010	298.52	98	37354	125	0.78	1.28	224.09
	2020	318.50	92	40268	126	0.72	1.38	215.03
	2030	338.13	86	43260	128	0.67	1.48	211.62
12	2010	298.52	98	35100	118	0.83	1.20	241.85
	2020	318.50	92	37877	119	0.77	1.30	235.19
	2030	338.13	86	40342	119	0.72	1.38	231.99

从上表可以看出,产业结构进行调整后大同市水资源承载能力有所提高,但是大同市有丰富的煤矿资源,有发展电力的得天独厚的优势,发展其他工业,大同市整体经济发展速度和规模可能会受到影响,承载的水平有可能会降低。

## 4 结论

大同市现状(2000年)水资源承载能力总体轻度超载,人口数量最多的桑干河区已经处于超载状态,而人口少,水资源量相对丰富的洋河区和大清河区仍然有承载的空间。

在常规发展状态下,大同市仅依靠本地(永定河区)的水资源和中等节水力度,未来大同市水资源超载状态将趋于严重。在高节水策略和产业结构进行调整后,大同市水资源承载能力会有所提高。

从现实方案来看,提高大同市水资源承载能力的途径:(1)实施高节水,同时注意平衡高节水的投入的增加和经济发展的矛盾;(2)调整产业结构,实现合理的水资源配置,把有限的水资源配置在低耗水、高附加值的产业部门,从而使大同市的全员耗水总量下降,同时平衡大同丰富的煤矿资源,有发展电力的得天独厚的优势与发展其他产业,经济发展速度和规模可能会受到影响的矛盾;(3)强大同市内各流域分区之间的水资源调度,使水资源相对较丰富的大清河区能充分发挥其承载能力;(4)从外流域调水,增加大同市的可用水资源量;(5)加强污水治理,减少废污水排放量,实现污水资源化。

## 参考文献:

- [1] 水利部国际合作与科技司.水资源及水环境承载能力[M].北京:中国水利水电出版社,2002,293-296.
- [2] 李娟,王丽萍,纪昌明.可持续发展观念下的水资源承载能力理论研究与展望[J].科学进步与对策,2004,11.
- [3] 新疆水资源软科学课题组.新疆水资源及其承载力的开发战略对策[J].水利水电技术,1989,6.
- [4] 许有鹏.干旱区水资源承载能力综合评价研究[J].自然资源学报,1993,8.
- [5] 王浩,陈敏建,秦大庸,等.西北地区水资源合理配置与承载能力研究[M].郑州:黄河水利出版社,2003.
- [6] 汪恕诚.水环境承载能力分析与调控[J].水利发展研究,2002,1.
- [7] 王忠静.干旱内陆河区水资源承载能力与可持续利用模式研究[D].北京:清华大学水利水电工程系,1998.
- [8] 刘昌明,王礼先,夏军,等.西北地区生态环境建设区域配置及生态环境需水量研究[R].2004.