

虚拟水影响下区域水资源承载力评价

高玉琴¹,李媛媛¹,高见²,杜承霖³,张鸣⁴,武娟⁴

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 江苏省农村水利科技发展中心,江苏 南京 210029;
3. 广东省水利水电科学研究院,广东 广州 510635; 4. 高淳区水资源管理中心,江苏 南京 211300)

摘要:针对当前我国水资源短缺问题,结合虚拟水概念及其特性,构建了水资源量、虚拟水、生态环境和社会经济4个维度的区域水资源承载力评价指标体系,利用变权法确定指标权重,建立了评价虚拟水影响下水资源承载力的改进物元可拓模型,并应用于粤港澳大湾区9市水资源承载力评价。评价结果表明,深圳水资源超载,广州、佛山为临界超载,其他地市为弱可承载或可承载,模型评价结果可为区域水资源优化配置提供参考。

关键词:虚拟水;水资源承载力;改进物元可拓模型;变权法

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)05-0022-06

Evaluation of regional water resources carrying capacity under influence of virtual water//GAO Yuqin¹, LI Yuanyuan¹, GAO Jian², DU Chenglin³, ZHANG Ming⁴, WU Juan⁴ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Rural Water Conservancy Science and Technology Development Center, Nanjing 210029, China; 3. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 4. Gaochun District Water Resources Management Center, Nanjing 211300, China)

Abstract: Aiming at the problem of water resources shortage in China, the evaluation index system of regional water resources carrying capacity was constructed in the four dimensions of water resources, virtual water, ecological environment and social economy, in which the new concepts and characteristics of virtual water were combined. Variable weight method was used to determine the weight of evaluation index. The improved matter-element extension model of water resources carrying capacity under the influence of virtual water was constructed and applied to 9 cities in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. The results show that the water resources are overloaded in Shenzhen, critically overloaded in Guangzhou and Foshan, and weakly bearable or bearable in other cities. The model evaluation results can provide reference for regional water resources optimal allocation.

Key words: virtual water; water resources carrying capacity; improved matter-element extension model; variable weight method

“水太少不够用”和“水太脏用不了”是当前中国在处理用水问题中亟需解决的矛盾点。我国水资源总量位居世界前列,但由于人口众多,人均水资源占有量排名靠后,缺水问题愈发凸显。2019年下半年,长江中下游地区多省发生较为严重的夏秋冬连旱,给群众生活和农业生产造成较大影响^[1]。据预测,2050年我国人口将达16.23亿,根据当前用水和经济发展趋势,若不合理利用水资源,届时年需水量恐超过可利用淡水资源量,可用水资源将逐步被消耗殆尽^[2-3]。

对于用水紧张问题,按照传统思路,人们通常习惯从实体水资源角度出发寻求解决方案,但往往会受到地理和气候等客观因素的限制,而虚拟水作为一种“无形”的水资源,寄存于生产和运输产品的过程中,

通过贸易的手段引导高耗水产品流入本地市场,从而可以避免在生产中大量消耗水资源,这一举措为用水紧张问题提供了新的应对策略。因此,将虚拟水与水资源承载力相结合进行研究,能更真实地反映区域水资源利用情况与实际水资源承载力水平,从而对产业结构调整、城市化规模调控等问题提供科学指导,保障国家水资源能够被安全与合理地利用。

1 评价理论基础

1.1 虚拟水概念及特征

当商品从一个地区转移至另一地区时,携带着生产该产品所消耗的水资源一同流动,这种伴随着商品进行流动的“看不见的水资源”称作虚拟水,虚拟水的

提出,使得从富水地区进口水密集型产品成为缓解用水紧张地区水资源短缺的有力措施^[4]。随后各学者将虚拟水的研究领域从农产品拓展到全领域商品中,与商品一样,虚拟水有“进口量”和“出口量”,求得某产品虚拟水的进出口量差值即可衡量一个地区某项产品所蕴含的虚拟水量或虚拟水平衡状况。基于上述概念,虚拟水的主要特征有:①贸易性。虚拟水的产生和流动只有依托于商品或者服务的贸易才能进行。②非实在性。虚拟水以非实在的形式凝结于产品与服务之中,属于不可见的水资源。③便利性。相较于实体水,虚拟水随着各种产品从富水地区向贫水地区转移,运输调度的难度与成本大大降低。

1.2 虚拟水量化方法

某种产品的虚拟水量往往通过计算生产地在生产过程中消耗的水资源量,或是消费地生产该产品所将消耗的水资源量来确定。为保证数据的一致性,本文均从消费地角度出发,以消费地生产所消耗的水资源量作为计算依据来量化虚拟水。虚拟水量化计算主要考虑农、畜产品虚拟水以及工业虚拟水量的计算。

农、畜产品虚拟水选取粮食(稻谷、大豆)、经济作物(糖蔗、烟叶、花生、木薯)、大型牲畜(猪肉、牛肉)等生活中的主要消费产品进行估算。量化农产品虚拟水时用单位面积农作物耗水量与其单位面积产量的比值来表示该种农作物单位质量所含的虚拟水量。因家畜消耗的水资源量由饮用水、饲料生长用水、环境清洁用水、畜产品加工用水组成^[5],所以一般采用 Chapagain 等^[6-7]提出的生产树量化方法计算畜产品虚拟水。

工业虚拟水量从 2 个角度计算,一是研究区域内生产各规模以上主要工业产品所消耗的水资源量,即工业生产虚拟水;二是研究区域内人类消费活动中对工业产品及其原材料消耗时用掉的水资源量,即消费虚拟水,它又可细分为生活工业品消费用水和总工业原料消费用水。

2 评价指标体系

2.1 评价指标体系构建

对区域水资源承载力进行评价时,应对社会经济系统、自然水循环系统、生态环境系统三者协调情况进行客观准确的描述与周全的考虑^[8-9],因此需要构建一个合理的评价指标体系对其进行反映。虚拟水将生产过程、消费品数量与水资源承载力之间建立了关联,将虚拟水对水资源产生影响的相关因素作为指标,纳入水资源承载力评价指标体系,能够对区域水资源的承载力水平和利用情况进行更加全面

的了解和剖析。按照科学性、层次性、整体性、可操作性、可比性、定性定量结合的原则^[10],从社会经济、自然水循环、生态环境三者组成的复合系统角度出发,探求分析内在联系,综合考虑各影响因素与虚拟水发展状况,构建水资源量、虚拟水、生态环境和社会经济 4 个维度的区域水资源承载力评价指标体系^[11-12],通过 Delphi 法初选、主成分分析法优选得到的评价指标体系如图 1 所示,筛选后的体系能够通过合理性检验。

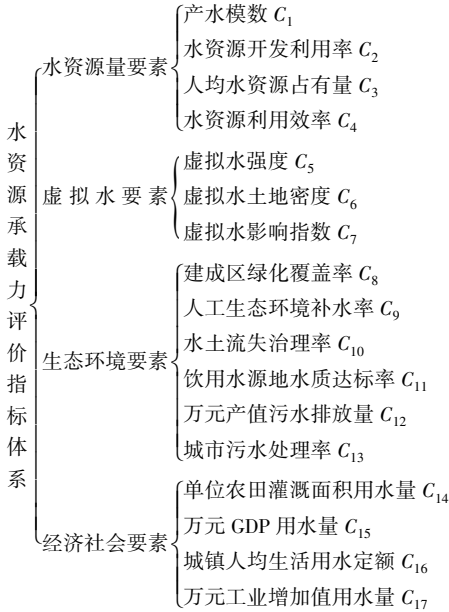


图 1 水资源承载力评价指标体系

2.2 评价标准

根据区域水资源承载力的特点,综合分析前人研究成果,并通过对研究区域的社会发展程度与水资源承载力本身进行分析,最终确定水资源承载力评价指标体系对应不同等级(可承载、弱可承载、临界、超载和严重超载)的划分标准(表 1)^[13-15]。其中,V 级为可承载状态,表示研究区域水资源量较为充足,开发潜力大,水资源承载力水平高;Ⅳ级为弱可承载状态,表示研究区域水资源量基本能够满足自然水的循环、社会经济使用以及生态系统的正常运作,已进行了一定程度上的开发,水资源承载力水平较好,是一种过渡级别,进一步的开发或保护措施都会影响其向着临近等级变化;Ⅲ级为临界承载状态,表示研究区域的水资源处于供需平衡的临界状态,其开发水平已趋于饱和,水资源承载力水平一般;Ⅱ级为超载状态,表示研究区域水资源量较为紧缺,水资源系统被过度开发,处于不稳定状态,需要及时制定相关政策与方案进行改善;Ⅰ级为严重超载状态,表示研究区域的水资源已面临十分恶劣的境况,由于过度的开发利用,水资源系统已遭到严重破坏。

表1 水资源承载力评价指标等级划分

评价等级	$C_1/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	$C_2/\%$	$C_3/(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$	$C_4/\%$	$C_5/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	$C_6/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	C_7	$C_8/\%$	$C_9/\%$
I级(严重超载)	[0,15]	[60,100]	[0,500]	[0,10]	[300, +∞)	[165, +∞)	[2.0, +∞)	[0,10]	[0,1)
II级(超载)	[15,20]	[40,60]	[500,1000]	[10,25]	[180,300]	[130,165]	[1.5,2.0)	[10,20]	[1,2)
III级(临界)	[20,35]	[25,40]	[1000,1700]	[25,40]	[80,180]	[95,130]	[1.0,1.5)	[20,30]	[2,3)
IV级(弱可承载)	[35,60]	[10,25]	[1700,2200]	[40,60]	[40,80]	[60,95]	[0.5,1.0)	[30,40]	[3,5)
V级(可承载)	[60, +∞)	[0,10]	[2200, +∞)	[60,100]	[0,40]	[0,60]	[0,0.5)	[40,100]	[5,100]

评价等级	$C_{10}/\%$	$C_{11}/\%$	$C_{12}/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	$C_{13}/\%$	$C_{14}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$C_{15}/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$	$C_{16}/(\text{L}(\text{d} \cdot \text{人})^{-1})$	$C_{17}/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$
I级(严重超载)	[0,3]	[0,60]	[55, +∞)	[0,10]	[130, +∞)	[220, +∞)	[280, +∞)	[200, +∞)
II级(超载)	[3,5]	[60,70]	[40,55]	[10,30]	[85,130]	[140,220]	[250,280]	[110,200]
III级(临界)	[5,8]	[70,80]	[25,40]	[30,50]	[60,85]	[60,140]	[220,250]	[50,110]
IV级(弱可承载)	[8,11]	[80,90]	[10,25]	[50,70]	[55,60]	[24,60]	[190,220]	[15,50]
V级(可承载)	[11,100]	[90,100]	[0,10]	[70,100]	[0,55]	[0,24]	[0,190]	[0,15]

3 改进物元可拓模型

物元可拓法是一种广泛应用于水资源承载力评价领域的多指标决策方法^[16-17]。然而传统物元可拓模型在反映评价等级时只考虑隶属度向量中的最大分量,忽略了除去最大分量以外的部分,针对这一缺点,选用择近原则替代,并引入贴近度代替关联度来反映评价等级;针对其利用常权法确定指标权重难以表现指标数值水平分布发生的变化这一缺陷,利用变权法作为替代。

3.1 待评价物元、经典域、节域的建立

利用物元三元素,即事物名称 N 、特征 C 及量化的数值 X 来描述研究对象,通过有序一元物元 $R=(N,C,X)$ 的形式来表现。所研究的事物对象若具有多种特征,则可以称为 n 维物元:

$$R=(N,C,X)=\begin{bmatrix} N & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N 代表物,用来表示不同系统中的研究对象; C 代表特征,用来表示研究对象的特征以及研究对象间的作用关系; X 代表实数量值,用来表示研究对象关于特征所具有的数量范围; C_n 表示所研究事物对象 N 的第 n 个特征; X_n 指所研究事物对象 N 关于某个特征 C_n 所表示的实数量值。

用关系元 R_j 来表示评价体系中某个评价等级 $N_j(j=1,2,\cdots,m)$ 的取值范围,即经典域:

$$R_j=(N_j,C,X_j)=\begin{bmatrix} N_j & C_1 & X_{j1} \\ & C_2 & X_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{jn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_j & C_1 & [a_{j1},b_{j1}] \\ & C_2 & [a_{j2},b_{j2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{jn},b_{jn}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: C_j 为水资源承载力等级 N_j 所具有的特征,即相应评价状况等级的特征; $X_j=[a_{ji},b_{ji}]$ 表示评价等级

N_j 关于 C_j 所划分的取值范围,其中 $[a_{ji},b_{ji}](i=1,2,\cdots,n)$ 即为经典域。

用关系元 R_p 来表示指标特征值取值范围所构成的矩阵,即节域:

$$R_p=(N_p,C,X_p)=\begin{bmatrix} N_p & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} N_p & C_1 & [a_{p1},b_{p1}] \\ & C_2 & [a_{p2},b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{pn},b_{pn}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $X_{pi}=[a_{pi},b_{pi}](i=1,2,\cdots,n)$ 为 N_p 关于 C 的取值范围,其中 N_p 为评价等级的全体, $X_j \in X_p$ 。

3.2 变权法确定评价指标权重

变权法可以反映权向量随着各指标数值水平分布的变化情况,从而增加各指标权重的可靠性^[18]。设 $Y=(y_1,y_2,\cdots,y_n)$ 为因素状态向量, $W=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$ 为因素常权向量, $S(Y)=(S_1(Y),S_2(Y),\cdots,S_n(Y))$ 为状态变权向量,则变权向量 $W'=(w'_1,w'_2,\cdots,w'_n)$ 可用 W 和 $S(Y)$ 的归一化 Hadamard 乘积表示,即

$$w'_i=\frac{w_iS_i(Y)}{\sum_{k=1}^nw_kS_k(Y)} \quad (4)$$

其中

$$S_i(Y)=e^{\alpha(y_i-\bar{y})}$$

式中 α 为均衡参数,反映决策人对指标的均衡要求。

当 $\alpha>0,\alpha=0,\alpha<0$ 时,模型分别为 n 维激励型、常权型、 n 维惩罚型,常权分量 $w_k(k=1,2,\cdots,n)$ 取相同值以保证赋值客观。利用各评价指标的实测值与节域区间来表示状态变权向量,指标权重为

$$w'_i=\frac{e^{\alpha(d_{imax}-d_{imin})}}{\sum_{i=1}^ne^{\alpha(d_{imax}-d_{imin})}} \quad (5)$$

其中 $d_{imax}=\max(|X_i-a_{N_i}|,|b_{N_i}-X_i|)$

$d_{imin} = \min(|X_i - a_{N_i}|, |b_{N_i} - X_i|)$

式中: X_i 为所研究事物 N 关于某个特征 C_i 的实数量值; a_{N_i} 、 b_{N_i} 分别为特征 C_i 取值范围内的最小值、最大值。

3.3 贴近度计算

传统物元可拓模型通过计算指标与评价对象之间的关联度反映评价等级,忽略了隶属度向量中除去最大分量以外的部分,从而使最终评价结果不够合理周全。张晓平^[19]选用择近原则作为替代方法,提出贴近度的概念,待评价物元对于指标各评价等级的贴近度为

$$V_j(\boldsymbol{R}) = 1 - \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=1}^n D_j(X_i) \omega'_i \quad (6)$$

其中 $D_j(X_i) = \left| X_i - \frac{a_{ij} + b_{ij}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij})$

式中: $D_j(X_i)$ 为待评价物元与经典域的距离; ω'_i 为评价指标的权重; a_{ij} 、 b_{ij} 分别为经典域取值范围内的最小值、最大值; n 为评价指标的个数。

3.4 等级评价

根据 $V'_j(\boldsymbol{R}) = \max[V_j(\boldsymbol{R})]$ 可知,待评价物元属于 j' 等级,以此来判断待评价物元偏向临近评价等级的距离程度。令:

$$\bar{V}_j(\boldsymbol{R}) = \frac{V_j(\boldsymbol{R}) - \min(V_j(\boldsymbol{R}))}{\max(V_j(\boldsymbol{R})) - \min(V_j(\boldsymbol{R}))} \quad (7)$$

得到

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{V}_j(\boldsymbol{R})}{\sum_{j=1}^m \bar{V}_j(\boldsymbol{R})} \quad (8)$$

式中 j^* 为待评价物元 $\boldsymbol{R}$ 的等级变量特征值。

4 实例应用

4.1 研究区概况及数据来源

研究区位于广东省东、西、北三江下游区域,包括粤港澳大湾区 9 市,涵盖东、西、北三江和珠江三

角洲诸河共 4 大水系,河网密布,相互贯通,各支流经虎跳门、磨刀门等八大口门后汇入中国南海。研究区为亚热带海洋季风气候,雨热同期,年均降雨量为 1 600~2 300 mm,4—9 月为汛期,夏季高温多雨,冬季温暖宜人;水资源总量 3 742 亿 m^3 ,承接东、西、北三江过境水量合计 2 941 亿 m^3 。虽然降雨量较为充沛,但在社会发展与经济建设过程中,累积了大量用水超标问题,使得该区域水资源脆弱性处于较高水平,因此开展粤港澳大湾区 9 市水资源承载力评价对于指导地区合理高效配置水资源具有重要意义。研究数据来源于《广东省用水定额》《广东省统计年鉴》及粤港澳大湾区 9 地市的《统计年鉴》。研究区地理位置如图 2 所示。

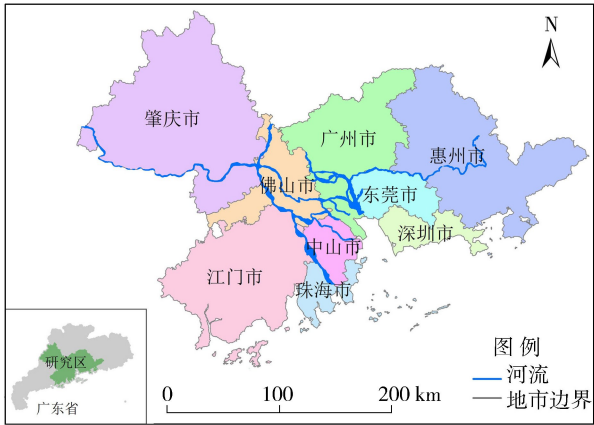


图2 研究区地理位置示意图

4.2 虚拟水量化计算

4.2.1 主要农、畜产品虚拟水计算

选择消费地生产时所消耗的水资源量作为计算依据量化虚拟水,综合 2019 年粤港澳大湾区 9 市的主要农、畜产品总量和单位农、畜产品虚拟水含量,计算可得农、畜产品虚拟水总含量(表 2)。2019 年广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆主要农、畜产品虚拟水总量分别为 29.085 亿 m^3 、0.854 亿 m^3 、12.451 亿 m^3 、39.860 亿 m^3 、23.850 亿 m^3 、3.181 亿 m^3 、18.292 亿 m^3 、45.395 亿 m^3 和 63.498 亿 m^3 。

表2 2019年粤港澳大湾区9市主要农、畜产品虚拟水总量

产品种类	虚拟水总量/亿 m^3								
	广州	深圳	珠海	佛山	惠州	东莞	中山	江门	肇庆
稻谷	1.170	0.073	0.260	0.353	5.049	0.032	0.088	9.576	11.561
大豆	0.038		0.002	0.006	0.069	0.005	0.032	0.119	0.124
糖蔗	0.001				0.114		0.001	0.272	0.015
烟叶									0.094
花生	0.244	0.009	0.017	0.045	0.869	0.003	0.002	0.535	1.353
木薯	0.011	0.003	0.001	0.032	0.017		0.001	0.617	3.231
水果	2.956	0.166	0.449	0.203	4.034	0.257	0.438	1.751	8.328
绿叶菜	7.321	0.298	0.269	1.608	6.003	0.789	0.636	3.085	5.339
水产品	16.175	0.145	10.905	34.615	4.420	2.065	16.935	23.930	25.330
猪肉	1.169	0.159	0.548	2.997	3.275	0.030	0.159	5.509	8.125

4.2.2 主要工业产品虚拟水计算

由于工业产品种类繁多,数据收集存在一定难度,因此主要分析常见规模以上工业产品,计算中考考虑单一产品用水量占规模以上产品用水量的比例和各区域规模以上工业产品用水量占总产品用水量的比重。研究区工业生产虚拟水用量、工业消费虚拟水用量以及净进口虚拟水量见表3。

表3 2019年粤港澳大湾区9市工业虚拟水总用水量
单位:亿 m³

城市	工业生产 虚拟水 用水量	工业消费虚拟水用水量			净进口 虚拟水 用水量
		生活工业 虚拟水	工业原料 虚拟水	工业消费 合计	
广州	22.66	4.91	4406.13	4411.04	4388.35
深圳	5.05	5.50	0.25	5.74	0.66
珠海	1.27	2.14	1.14	3.26	2.03
佛山	7.56	3.95	21.94	25.87	18.33
惠州	5.35	1.24	37.21	38.45	33.08
东莞	9.35	3.64	649.82	653.44	644.07
中山	6.36	0.92	11.15	12.06	5.67
江门	4.77	1.21	3.56	4.77	-0.006
肇庆	3.38	0.67	0.69	1.34	-2.01
合计	65.75	24.18	5131.89	5155.97	5090.17

分析表3可知,研究区工业消费用水为5155.97亿 m³,工业净进口水量为5090.17亿 m³,工业生产虚拟水总量合计约为65.75亿 m³,其中广州市和东莞市对工业虚拟水的进口较为依赖。在工业消费用水结构中,工业原料虚拟用水是其主要组成部分,主要是因为研究区在扩大其经济发展规模的过程中,需要消耗大量的原材料用于工业生产,以带动第二、三产业经济的快速发展。生活工业虚拟水对工业消费虚拟水的影响程度受到生产结构的影响。当研究区域人口数量上升,客观上相应的食物需求量会增加,从而促进食品饮料业的发展,此时以农产品作为工业原材料的消耗量会增大,工业消费虚拟水量增大的同时,生活工业虚拟水在工业消费虚拟水中所占的比例因此上升,此时工业消费虚拟水量与研究区域的人口数量和消费意愿强度呈正相关性。这对当地水资源承载力造成了巨大的压力,通过对这类水密集型的农业原材料或工业加工品采取进口贸易的手段,增加虚拟水净进口量,可以缓解当地用水压力,从而间接提高水资源承载力。

4.2.3 水资源承载力的评价结果及分析

应用改进物元可拓模型对2019年粤港澳大湾区9市的区域水资源承载力进行计算评价。根据变权法计算得到各指标权重, C₁ ~ C₁₇ 的权重分别为0.056、0.073、0.091、0.055、0.085、0.067、0.054、0.057、0.044、0.042、0.049、0.064、0.061、0.052、0.048、0.056、0.046。各评价指标的贴近度函数值

与等级变量特征值见表4。

表4 等级贴近度和等级变量特征值

城市	等级贴近度					等级 变量 特征值
	I级	II级	III级	IV级	V级	
广州	0.9974	0.9989	0.9991	0.9982	0.9977	3.8217
深圳	0.9985	0.9989	0.9981	0.9976	0.9979	3.4331
珠海	0.9977	0.9985	0.9990	0.9995	0.9988	3.6466
佛山	0.9974	0.9987	0.9992	0.9990	0.9986	3.8921
惠州	0.9983	0.9979	0.9981	0.9992	0.9995	4.0157
东莞	0.9981	0.9982	0.9989	0.9994	0.9990	3.7421
中山	0.9981	0.9984	0.9992	0.9997	0.9988	3.4988
江门	0.9984	0.9982	0.9992	0.9989	0.9995	3.2695
肇庆	0.9971	0.9984	0.9985	0.9991	0.9996	3.8326

各市等级贴近度的最大值对应的评价等级即为各市水资源承载力等级,广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆的水资源承载力等级分别为临界、超载、弱可承载、临界、可承载、弱可承载、弱可承载、可承载、可承载。

深圳水资源承载力为II级,处于超载状态,主要是人均水资源占有量过低、水资源开发利用率高导致的,这与深圳城镇化水平高、人口密度大有关;佛山和广州水资源承载力为III级临界承载。这些地区社会人口、经济发展过快,影响其水资源承载力评价结果的主要指标为人均水资源占有量、水资源开发利用率,相较于水资源量要素指标,虚拟水要素指标对这些地区的水资源承载力影响较弱。未来应在提高水资源利用效率、保护水环境、改善城区水质等方面采取合理的措施,以保证经济-环境-水资源的可持续协调发展。

东莞水资源承载力为IV级弱可承载,影响东莞水资源承载力的主要因素为人均水资源占有量、水资源开发利用率,因其人口密度、经济发展水平低于深圳、广州等城市,故水资源承载力水平略高;中山水资源承载力为IV级弱可承载,除受人均水资源占有量、水资源开发利用率影响外,虚拟水土地密度也是降低其水资源承载力的主要原因,这是由于中山工业用水集中于服装业和造纸业,出口较多,故工业虚拟水流出较多;珠海水资源承载力为IV级弱可承载,其中人均水资源占有量、水资源开发利用率对珠海水资源承载力影响较大。这些地区目前能够基本保证区域内人口、经济、环境、资源的协调发展,水资源开发利用程度中等。

肇庆、惠州、江门水资源承载力为V级可承载,其中人工生态环境补水率都处于超载等级,但因该项指标权重较轻,故对水资源承载力影响不大。区域内人口、经济、环境、资源的协调发展,水资源开发利用程度较小,潜力较大,具有较强的承载能力,能够较好地满足社会发展的需求,但工、农业及居民生活

用水效率低下,耗水率高,导致水资源未得到充分利用,建议采取科学的技术管理手段,调整经济结构与产业布局,对水资源配置与利用进行优化,从而提高水资源的利用效率,增强区域水资源承载力的水平。

5 结 论

a. 采用改进物元可拓模型构建水资源承载力评价模型,结合虚拟水新概念及其特性,对粤港澳大湾区9市水资源承载力进行了综合评价。评价结果表明,深圳水资源超载,广州、佛山为临界超载,其他地市为弱可承载或可承载。

b. 改进物元可拓模型适用于虚拟水影响下水资源承载力评价,粤港澳大湾区9市的应用结果,表明该模型应用于虚拟水影响下水资源承载力评价有较好的推广价值。

c. 深圳、佛山、广州应加强水资源管理,保护水环境,改善城区水质,严格落实最严格水资源管理制度,加强用水过程监管;肇庆、惠州、江门应采取科学的技术管理手段,调整经济结构与产业布局,对水资源配置与利用进行优化。

参考文献:

[1] 孙洪泉,杨晓静,张泽天. 2019 年下半年长江中下游旱情分析及未来趋势预判[J]. 中国防汛抗旱,2020,30 (2) : 18-20. (SUN Hongquan, YANG Xiaojing, ZHANG Zetian. Drought analysis and future trend prediction of the middle and lower reaches of the Yangtze River in the second half of 2019 [J]. China Flood & Drought Management,2020,30(2):18-20. (in Chinese))

[2] 刘善建. 21 世纪中叶我国人均用水量[J]. 中国水利, 1997 (5) : 42. (LIU Shanjian. Per capital water consumption in China in the middle of the 21st century [J]. China Water Resources, 1997 (5) : 42. (in Chinese))

[3] 沈福新,耿雷华,曹霞莉,等. 中国水资源长期需求展望 [J]. 水科学进展,2005,16(4):552-555. (SHEN Fuxin, GENG Leihua, CAO Xiali, et al. Prospects for the long-term water resources demand in China [J]. Advances in Water Science,2005,16(4):552-555. (in Chinese))

[4] 刘宝勤,封志明,姚治君. 虚拟水研究的理论、方法及其主要进展 [J]. 资源科学,2006 (1) : 120-127. (LIU Baoqin, FENG Zhiming, YAO Zhijun. Theory, method and main progress of virtual water research [J]. Resources Science,2006(1):120-127. (in Chinese))

[5] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change, 2004, 15 (1) :45-56.

[6] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products [M]. Delft: UNESCO-IHE, 2003.

[7] 薛小杰,惠泱河,黄强,等. 城市水资源承载力及其实证研究[J]. 西北农业大学学报,2000(6):135-139. (XUE Xiaojie, HUI Yanghe, HUANG Qiang, et al. Research on city water resources capacity and its practical example [J]. Journal of Northwest Agricultural University, 2000 (6) :135-139. (in Chinese))

[8] 张宏亮,何波. 从承载力的属性分析承载力研究的理论基础 [J]. 中国国土资源经济,2013, 26 (8) : 57-60. (ZHANG Hongliang, HE Bo. Analysis of theoretical basis of the bearing capacity study from the properties of the bearing capacity [J]. Natural Resource Economics of China,2013,26(8):57-60. (in Chinese))

[9] 徐翔宇,酆建强,金菊良,等. 基于风险矩阵的多要素水资源承载力综合评价方法[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (1) : 1-9. (XU Xiangyu, LI Jianqiang, JIN Juliang, et al. Comprehensive evaluation method of multi-factor water resources carrying capacity based on risk matrix [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (1) : 1-9. (in Chinese))

[10] 姜秋香,付强,王子龙. 三江平原水资源承载力评价及区域差异 [J]. 农业工程学报,2011, 27 (9) : 184-190. (JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong. Evaluation and regional differences of water resources carrying capacity in Sanjiang plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27 (9) : 184-190. (in Chinese))

[11] 张毅. 基于改进的熵权法在合肥市水资源承载力综合评价中的应用 [D]. 合肥:安徽建筑大学,2020.

[12] 刘雅玲,罗雅谦,张文静,等. 基于压力—状态—响应模型的城市水资源承载力评价指标体系构建研究[J]. 环境污染与防治,2016, 38 (5) : 100-104. (LIU Yaling, LUO Yaqian, ZHANG Wenjing, et al. Research on evaluation index system of city water resources carrying capacity based on pressure state response model [J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38 (5) : 100-104. (in Chinese))

[13] WEI J, WEI Y, WESTERN A. Evolution of the societal value of water resources for economic development versus environmental sustainability in Australia from 1843 to 2011 [J]. Global Environmental Change, 2017, 42:82-92.

[14] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考 [J]. 水利水电科技进展, 2017, 37 (3) : 1-6. (ZUO Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37 (3) : 1-6. (in Chinese))

(下转第 77 页)

- dissipation for flood discharge tunnel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45 (8): 56-61. (in Chinese))
- [12] 刘昉,王畅,何军龄. 基于正交设计的扭曲鼻坎体型优化试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 166-175. (LIU Fang, WANG Chang, HE Junling. Experimental study on shape optimization of skew bucket based on orthogonal design [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 166-175. (in Chinese))
- [13] 王晶,邓军,吕利,等. 阵列式燕尾坎水力特性研究[J]. 水力发电学报, 2017, 36(3): 31-37. (WANG Jing, DENG Jun, LYU Li, et al. Hydraulic characteristics of swallow-tailed array flip buckets [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(3): 31-37. (in Chinese))
- [14] 程文磊,杨庆,昌子多. 燕尾型挑坎在李家岩水库溢洪道中的应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(4): 63-69. (CHENG Wenlei, YANG Qing, CHANG Ziduo. Application of leak-floor flip bucket to spillway for Lijiayan Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(4): 63-69. (in Chinese))
- [15] 毛栋平,张法星,钟晓凤,等. 黄登水电站燕尾型挑坎挑流消能适用性试验研究[J]. 水电能源科学, 2016, 34(3): 104-107. (MAO Dongping, ZHANG Faxing, ZHONG Xiaofeng, et al. Applicability test of swallow-tailed flip bucket ski-jump energy dissipation for Huangdeng Hydropower Station [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(3): 104-107. (in Chinese))
- [16] 彭诚. 燕尾+窄缝组合消能工水力特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [17] 谭哲武,王均星. 泄洪洞窄缝燕尾组合挑坎试验研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 40-44. (TAN Zhewu, WANG Junxing. Experimental research on flip bucket combining narrow slit and swallow-tail in flood release tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 40-44. (in Chinese))
- [18] 水利部水利水电规划设计总院. 水工设计手册: 第七卷: 泄流与过坝建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [19] HELLER V, HAGER W H, MINOR H E. Ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(5): 347-355.
- [20] LI N, XU W, ZHOU M, et al. Experimental study on energy dissipation of flood discharge in high arch dams without impact of jets in air [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 8: 927-933.
- [21] CHEN J G, ZHANG J M, XU W L, et al. Numerical simulation of the energy dissipation characteristics in stilling basin of multi-horizontal submerged jets [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5): 732-741.
- [22] 王英奎,廖仁强,韩喜俊,等. 深水垫情况下水垫塘淹没射流特征分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 82-84. (WANG Yingkui, LIAO Renqiang, HAN Xijun, et al. Analysis on characteristics of submerged jet flow in water cushion pool with deep water cushion [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(1): 82-84. (in Chinese))
- [23] STEINER R, HELLER V, HAGER W H. Deflector ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134: 562-571.
- [24] 杨敏,李会平,谯文娟,等. 跌坎消力池脉动压强试验[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 24-29. (YANG Min, LI Huiping, GOU Wenjuan, et al. Experimental study on fluctuating pressure of stilling basin with drop sill [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(2): 24-29. (in Chinese))
- [25] 李春华,李永祥,刘沛清. 水垫塘底板脉动压强量测技术与实验研究[J]. 水利水电技术, 1997, 28(1): 53-57. (LI Chunhua, LI Yongxiang, LIU Peiqing. Pulsation pressure measurement technology and experimental research on the floor of Plunge Pool [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 28(1): 53-57. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-22 编辑: 俞云利)

(上接第 27 页)

- [15] 郑江丽,李兴拼. 基于协调性的区域水资源承载力评估模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 30-35. (ZHENG Jiangli, LI Xingpin. Evaluation model of regional water resources carrying capacity based on coordination [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 30-35. (in Chinese))
- [16] 蔡文. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [17] 陈洋波,李长兴,冯智瑶,等. 深圳市水资源承载能力模糊综合评价[J]. 水力发电, 2004(3): 10-14. (CHEN Yangbo, LI Changxing, FENG Zhiyao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shenzhen [J]. Hydroelectric Power, 2004(3): 10-14. (in Chinese))
- [18] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(VIII): 变权综合原理[J]. 模糊系统与数学, 1995(3): 1-9. (LI Hongxing. Factor spaces and mathematical frame of knowledge representation (VIII)-variable weights analysis [J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 1995(3): 1-9. (in Chinese))
- [19] 张晓平. 基于贴近度的模糊综合评判结果的集化[J]. 山东大学学报(理学版), 2004(2): 25-29. (ZHANG Xiaoping. Centralization of fuzzy comprehensive evaluation results based on closeness [J]. Journal of Shandong University (Natural Science), 2004(2): 25-29. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-09 编辑: 刘晓艳)