

东江流域水资源承载能力评价

王好芳 龚 实 郭 乐

(山东大学土建与水利学院 , 山东 济南 250061)

摘要 根据东江流域水资源系统与社会经济系统、生态环境系统之间的相互影响与作用 , 建立东江流域水资源承载能力评价体系 , 运用模糊综合评判法对东江流域水资源承载能力进行评价。评价结果表明 , 东江流域水资源承载能力呈现中上游高、下游低的分布趋势。

关键词 水资源承载能力 ; 模糊综合评价 ; 东江流域

中图分类号 X159 **文献标识码** : A **文章编号** : 1004-693X(2009)01-0040-04

Evaluation of water resources carrying capacity in the Dongjiang River Basin

WANG Hao-fang , DOU Shi , GUO Le

(School of Civil Engineering , Shandong University , Jinan 250061 , China)

Abstract : Based on the interaction among water resources systems , social and economic systems , and ecological environmental systems , an evaluation system of water resources carrying capacity in the Dongjiang River Basin has been established. The fuzzy comprehensive assessment method was used to calculate the carrying capacity. The results show that the water resources carrying capacity is higher in the middle and upper reaches and lower in the lower reaches.

Key words : water resources carrying capacity ; fuzzy comprehensive assessment ; the Dongjiang River Basin

东江是珠江三大水系之一 , 发源于江西省寻乌县桎髻钵 , 流经龙川、河源、紫金、博罗、惠阳到东莞市石龙 , 分南北两个水道注入狮子洋 , 经虎门出海。干流全长 562 km , 流域面积 3.41 万 km² , 其中广东省境内 3.06 万 km² , 江西省境内 0.35 万 km²。本文内容只涉及东江流域广东境内的水资源承载能力评价。东江流域多年平均水资源总量 280 亿 m³ , 其中 4~9 月的径流量约为 224 亿 m³ , 10 月至次年 3 月的径流量约为 56 亿 m³。东江流域水资源量丰富 , 但其降水及径流年内分配不均 , 并且年际变化大。空间上东江流域中上游水资源量相当丰富 , 且人口密度较小、经济欠发达 , 而下游人口非常密集 , 水资源量相对较小 , 经济非常发达。目前 , 东江水系的龙岗河、坪山河和淡水河、观澜河等河流的水质污染较严重 , 东江东莞河段及其支流的污染在迅速加重。因此 , 其时空分布不均、水污染趋势加剧、水质性缺水的威胁十分严重 , 严重制约流域社会经济发展和生态环境的

改善。为了促进水资源与社会经济和生态环境的协调发展 , 必须对其水资源承载能力进行合理评价。

水资源承载能力是水资源系统对社会经济系统和生态系统的支撑能力 , 其大小是受水资源系统、社会经济系统和生态系统中各因素的共同影响。因此 , 评价水资源承载能力要从水资源系统、社会经济系统和生态系统中找到其主要影响因素 , 进而分析评价。根据东江流域水资源系统、社会经济系统和生态系统相互支撑与约束作用 , 建立一套东江流域水资源承载能力评价指标体系 , 运用模糊综合评判法对评价东江流域水资源承载能力 , 为东江流域水资源可持续开发利用提供决策依据。

1 模糊综合评判法

模糊综合评判的一般原理^[1] : 根据评价目标建立评价指标 , 确定评价指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_i\}$, 评价等级集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_j\}$, 并确定各指标权重

W 将评价指标用隶属函数表示 ,建立模糊关系矩阵 R 则综合评判结果

$$B = W \cdot R =$$
$$(w_1, w_2, \dots, w_m) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} =$$
$$(b_1, b_2, \dots, b_n)$$

式中 $0 \leq w_i \leq 1$ 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$; $b_j = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij}$, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$; r_{ij} 是评判因素对应于各评价等级的隶属度。

2 评价指标和权重确定

2.1 评价指标

水资源承载能力的大小是由水资源系统、社会经济系统和生态系统共同决定的 ,并且是一个动态的过程。因此 ,要根据各系统之间的相互作用选择影响水资源承载能力的主要指标。从水资源系统本身来说 ,水资源可利用量的多少是水资源系统支撑社会经济及生态系统健康持续发展的基础。水资源可利用量越大 ,对社会经济系统和生态系统的支撑能力就越大 ,反之 ,则越小。因此 ,在水资源系统中选取水资源可利用量 ,作为水资源承载能力的主要影响因素。从水资源系统与社会经济系统的相互作用来看 ,社会经济系统中工农业生产及城镇居民生活用水状况、废污水处理率及水资源重复利用率等因素 ,影响水资源开发利用程度及水资源系统对社会经济系统的支撑力度。因此 ,在社会经济系统中选取万元 GDP 耗水量、人均生活用水量、废污水处理率及水资源重复利用率等指标 ,作为影响水资源承载能力的主要影响因素。从水资源系统与生态环境系统相互作用分析 ,保证生态环境用水 ,既改善生态环境又涵养水源。因此 ,用生态环境用水率来反映生态系统对水资源系统及其承载能力影响。根据东江流域水资源特点、社会发展水平及国民经济结构等特点 ,参考相关文献^[2-8] ,选取水资源可利用量、万元 GDP 耗水量等 6 个主要指标构成水资源承载能力评价指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_6\}$ 。各评价指标含义如下 :

a. 水资源可利用量 :扣除河道内生态环境用水及水资源总量中部分不能或难以控制的水量后 ,人

- 类可利用的最大水量。
- b. 万元 GDP 耗水量 :总用水量除以 GDP 产值。
 - c. 人均生活用水量 :城镇居民每人每日水资源使用量。
 - d. 水资源重复利用率 :回用水占工业用水量的比例。
 - e. 废污水处理率 :废污水处理量与排放量的比值。
 - f. 生态环境用水率 :生态环境用水量与总用水量的比值。

2.2 权重确定

利用 AHP 法^[9]确定各评价指标的权重

$$W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6) =$$
$$(0.25, 0.22, 0.13, 0.15, 0.14, 0.11)$$

3 确定隶属函数

由上述指标可知 ,不同的指标有不同的评价标准 ,难以用同一标准进行评价。因此 ,首先将评价指标分级 ,引入隶属函数 u_{vi} ,将各指标用隶属函数表达 ,然后进行综合评判。

3.1 评价指标分级

把上述 6 个评价因素划分为 V_1 、 V_2 和 V_3 3 个等级。 V_1 表示承载能力较强 ,水资源开发利用程度较低 ; V_3 表示承载能力较弱 ,水资源开发利用程度较高 ,进一步开发将导致生态环境破坏乃至恶化 ,易发生水资源短缺 ,制约社会经济的发展 ; V_2 则介于 V_1 、 V_3 之间 ,表示流域水资源承载能力有一定的潜力 ,有一定的开发利用程度 ,水资源的供给需求在一定程度上能满足流域内的社会经济发展。东江流域各评价指标等级划分原则是根据各区域实际指标值 ,参考国内经济发达地区各指标的实际值以及发达国家各指标的平均水平状况而划分 ,各指标的分级值见表 1。为了定量地反映各等级水资源承载能力情况 ,对评判集等级用 1 分制数量化 : $a_1 = 0.95$, $a_2 = 0.5$, $a_3 = 0.05$ 。数值越高 ,水资源承载能力也就越大^[8]。

3.2 确定隶属函数

评价指标集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_6\}$,对应着评价集 $V = \{V_1, V_2, V_3\}$,而评判矩阵 R 中 r_{ij} 可以通过评价指标的实际数值对照各指标的分级来分析计算。文献^[5-8]一般采用线性函数计算隶属函数 ,并取中

表 1 综合评价指标的分级值

评价指标	水资源可利用量/亿 m ³	万元 GDP 水资源用量/m ³	人均生活用水量/(L·d ⁻¹)	水资源重复利用率/%	废污水处理率/%	生态环境用水率/%	评分值 a_j
V_1	> 60	< 50	< 200	> 40	> 90	> 5	0.95
V_2	40 ~ 60	50 ~ 290	200 ~ 300	20 ~ 40	90 ~ 60	5 ~ 1	0.50
V_3	< 40	> 290	> 300	< 20	< 60	< 1	0.05

间级中点处的隶属度为 1 ,两侧临界点的隶属度为 0.5 ,并使临界点处隶属度平滑过渡。 k_1 为 V_1 和 V_2 的临界值 , k_3 为 V_2 和 V_3 的临界值 , k_2 为等级区间中点值 , $k_2=(k_1 + k_3)/2$ 。例如 ,指标水资源可利用量的参数 $k_1 = 60$, $k_3 = 40$, $k_2 = 50$ 。

对于评价指标 u_i 各评价级相对隶属度函数的计算公式为

$$\mu_{v1} = \begin{cases} 0.5 \left(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i} \right) & u_i < k_1 \\ 0.5 \left(1 - \frac{u_i - k_1}{k_2 - k_1} \right) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0 & u_i \geq k_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{v2} = \begin{cases} 0.5 \left(1 - \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i} \right) & u_i < k_1 \\ 0.5 \left(1 + \frac{u_i - k_1}{k_2 - k_1} \right) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0.5 \left(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_2} \right) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0.5 \left(1 - \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i} \right) & u_i \geq k_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{v3} = \begin{cases} 0.5 \left(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i} \right) & u_i \geq k_3 \\ 0.5 \left(1 - \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3} \right) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0 & u_i < k_2 \end{cases} \quad (3)$$

对于评价因素 u_1 、 u_4 、 u_5 、 u_6 相对隶属度函数的计算公式只需将式(1)~(3)右端 u_i 区间号“ $\leq$ ”改为“ $\geq$ ” ,而将“ $<$ ”改为“ $>$ ”后采用同样的计算式即可。

通过上述公式可以求算出各评判因素对应于各个等级的隶属度 r_{ij} ,其中 $r_{i1} = \mu_{v1}(u_i)$, $r_{i2} = \mu_{v2}(u_i)$, $r_{i3} = \mu_{v3}(u_i)$, $i = 1 \ 2 \ \dots \ 6$ 。

4 东江流域水资源承载能力综合评价与分析

4.1 评价指标资料统计

为了便于数据的收集 ,按照行政分区将东江流域分成河源区、惠州区、东莞区、深圳区、广州区。各分区的水资源承载能力的评价指标如表 2。

表 2 各分区水资源承载能力评价指标值

分区	水资源 可利用量/ 亿 m^3	万元 GDP 水资源 耗量/ m^3	人均生活 用水量/ ($L \cdot d^{-1}$)	水资源重复 利用率/%	废污水 处理率/%	生态环境 用水率/%
河源	97	1074	203	8	60	0.6
惠州	67	316	137	20	66	0.9
东莞	12	180	251	10	65	2.4
深圳	13	54	241	42	80	0.9
广州	41	263	279	25	85	10.1

注 水资源可利用量是根据其定义计算得到的 ,其他数据来源于 2004 年广东省水资源公报。

4.2 水资源承载能力综合评价

根据每个分区的各评判因素的指标特征 ,按公式

分别计算统计出每个评判因素对各个等级的相对隶属度 r_{ij} ,从而求出各分区整个综合评判矩阵 R 的值 :

$$R_{\text{河源}} = \begin{bmatrix} 0.89 & 0.11 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0.93 \\ 0.47 & 0.53 & 0 \\ 0 & 0.23 & 0.77 \\ 0 & 0.50 & 0.50 \\ 0 & 0.42 & 0.58 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{惠州}} = \begin{bmatrix} 0.71 & 0.29 & 0 \\ 0 & 0.41 & 0.59 \\ 0.78 & 0.22 & 0 \\ 0 & 0.50 & 0.50 \\ 0 & 0.70 & 0.30 \\ 0 & 0.48 & 0.52 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{东莞}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.13 & 0.87 \\ 0 & 0.96 & 0.04 \\ 0 & 0.99 & 0.01 \\ 0 & 0.25 & 0.75 \\ 0 & 0.67 & 0.33 \\ 0 & 0.65 & 0.35 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{深圳}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.14 & 0.86 \\ 0.48 & 0.52 & 0 \\ 0.09 & 0.91 & 0 \\ 0.58 & 0.42 & 0 \\ 0.17 & 0.83 & 0 \\ 0 & 0.48 & 0.52 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{广州}} = \begin{bmatrix} 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0 & 0.61 & 0.39 \\ 0 & 0.71 & 0.29 \\ 0 & 0.75 & 0.25 \\ 0.33 & 0.67 & 0 \\ 0 & 0.53 & 0.47 \end{bmatrix}$$

由上述 W 和 R 的矩阵数据 ,即可求得各个分区的水资源承载能力最终的评判结果矩阵 B 。同时求得各分区的水资源承载能力的综合评分值 A ,见表 3。

表 3 东江流域各分区水资源承载能力综合的评价结果

分区	V_1	V_2	V_3	综合评分值 A
河源	0.29	0.26	0.45	0.43
惠州	0.28	0.42	0.30	0.49
东莞	0	0.58	0.42	0.31
深圳	0.23	0.50	0.27	0.48
广州	0.05	0.63	0.32	0.38

4.3 评价结果分析

由表 3 可看出 ,河源、惠州两分区水资源承载能力综合评分值都接近 0.5 ,并且其水资源可利用量

较大,而其他指标都有可提高空间,因此,这两个分区水资源承载能力的潜力较大。而虽然深圳区综合评分值也接近 0.5,但其水资源可利用量较小,并且其他指标的利用效率已较高,因此,深圳区水资源承载能力已相对较小。

东莞和广州两分区水资源承载能力综合评分值都在 0.4 以下,表明这两个分区的水资源的开发利用程度已较高,其水资源承载能力已相对较小。

5 结 语

由于东江流域水资源在时间和空间上的分布都非常不均匀,80% 以上水资源分布在汛期,空间上东江流域中上游水资源量相当丰富,且人口密度较小、经济欠发达,而下游人口非常密集,经济发达,水资源量相对较小,再加上经济发展带来的严重水污染,使水资源承载能力越来越小。以上诸多原因造成了整个东江流域水资源承载能力呈现中上游高下游低的分布趋势。为此,为了保证流域的可持续发展,建议调整流域中下游区域(东莞区、深圳区和广州区)经济产业结构,进行水资源合理配置,并加强废水的处理力度,提高水资源重复利用率。

(上接第 30 页)

参考文献：

[1] SINGH O V ,LABANA S ,PANDEY G ,et al. Phytoremediation : an overview of metallic ion decontamination from soil[J]. Applied Microbiology and Biotechnology 2003 61 :405-412.

[2] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京 :科学出版社 ,1996.

[3] STEELE J H. The structure of marine ecosystems[M]. Cambridge M A :Harvard University Press ,1974.

[4] WRIGHT P ,MASON C F. Spatial and seasonal variation in heavy metals in the sediments and biota of two adjacent estuaries ,the orwell and the stour ,in eastern England[J]. The Science of the Total Environment ,1999 226 :139-156.

[5] SOTO D ,JARA F. Using natural ecosystem services to diminish salmon-farming footprints in Southern Chile[C]//BERT T M. Ecological and genetic implications of aquaculture activities. Netherlands :Springer ,2007 :459-475.

[6] 黄宏 ,郝亚娟 ,王晓栋 ,等. 淮河沉积物中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 环境污染与防治 ,2004 ,26(3) :207-208 231.

[7] 刘爱菊 ,孔繁翔. 底泥疏浚对五里湖沉积物生物毒性的

参考文献：

[1] 张跃 ,邹寿平 ,宿芬. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京 :煤炭工业出版社 ,1992.

[2] 王煜 ,杨立彬 ,张新海 ,等. 西北地区水资源承载能力研究[J]. 水科学进展 2001 ,13(4) :523-529.

[3] 李娟 ,纪昌明. 水资源承载能力理论探析与研究发展趋势[J]. 人民长江 2004 ,35(10) :41-45.

[4] 姚治君 ,王建华 ,江东 ,等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展 2002 ,13(1) :111-115.

[5] 黎清霞. 南方经济发达城市水资源承载能力评价指标探讨[J]. 中山大学学报 2005 44(S) :340-342.

[6] 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 33(3) :1-14.

[7] 陈洋波 ,陈俊合 ,李长兴 ,等. 基于 DPSIR 模型的深圳市水资源承载能力评价指标体系[J]. 水利学报 ,2004(7) :98-103.

[8] 秦莉云 ,金忠青. 淮河流域水资源承载能力的评价分析[J]. 水文 2001 21(3) :14-17.

[9] 王好芳 ,董增川. 区域水资源可持续开发评价的层次分析法[J]. 水力发电 2002(7) :12-14.

(收稿日期 2007-05-08 编辑 :傅伟群)

影响[J]. 环境污染与防治 2006 28(12) :881-883.

[8] 黄奕龙 ,王仰麟 ,岳隽. 深圳市河流沉积物重金属污染特征及评价[J]. 环境污染与防治 2005 27(9) :711-715.

[9] 乔胜英 ,蒋敬业 ,向武 ,等. 武汉市湖泊中重金属污染状况[J]. 水资源保护 2007 23(1) :45-48.

[10] 成新. 太湖流域重金属污染亟待重视[J]. 水资源保护 2002 ,18(4) :39-41.

[11] 崔慧敏. 拒马河悬浮沉积物对重金属的吸附—解吸研究[J]. 水资源保护 2000 ,16(1) :25-28.

[12] 李朝方 ,赖炳秀. 深圳市河道淤泥污染程度分析[J]. 中国农村水利水电 2006(9) :47-50.

[13] TOMLINSON D L ,WILSON J G ,HARRIS C R ,et al. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. Helgoländer Meeresunters ,1980 33 :566-575.

[14] FÖSTNER U ,WITTMANN G T W. Metal pollution in the aquatic environment[M]. 2nd Edition. Berlin :Springer-Verlag ,1981 :133-135.

[15] LONG E R ,MORGAN L G. The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the national status and trends program[R]. Seattle :NOAA ,1990.

(收稿日期 2008-05-30 编辑 :傅伟群)