DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2012.01.005

基于集对分析的黄河三角洲东营市水资源承载力评价

张 欣[1,2],陈华伟[1,2],仕玉治[1,2],刘海娇[1,2],范明元[1,2]

(1.山东省水利科学研究院,山东 济南 250013;2.山东省水资源与水环境重点实验室,山东 济南 250013)

摘要 在深入分析研究区水资源开发利用现状的基础上,建立了由 25 个指标组成的黄河三角洲水资源承载力评价指标体系和分级标准。利用集对分析理论,通过采用三标度层次分析法赋权,构建了基于三标度层次分析法的集对分析模型,并运用该模型对黄河三角洲水资源承载力进行评价。结果表明:研究区水资源承载力处于较低的水平,继续开发的潜力较小。针对评价结果,提出了提高水资源承载力的建议。

关键词:水资源承载力;集对分析;三标度法;黄河三角洲

中图分类号:X26 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2012)01-0017-05

Evaluation of water resources carrying capacity of Dongying City in Yellow River Delta based on set pair analysis

ZHANG Xin[1,2], CHEN Hua-wei[1,2], SHI Yu-zhi[1,2], LIU Hai-jiao[1,2], FAN Ming-yuan[1,2]

(1. *Water Resources Research Institute of Shandong Province*, *Jinan* 250013, *China*;
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment*, *Jinan* 250013, *China*)

Abstract: An assessment index system consisting of 25 indicators and the grading criteria for evaluating the water resources carrying capacity in the Yellow River Delta were established based on analysis of the development and utilization of water resources in the area. According to the set pair analysis theory, the three-demarcation analytic hierarchy process method was adopted to establish the set pair analysis model, which was used to evaluate the water resources carrying capacity in the Yellow River Delta. The results show that the study area has poor water resources carrying capacity and little potential for further development. Based on this evaluation, some suggestions were proposed for improvement of the water resources carrying capacity in the study area.

Key words: water resources carrying capacity; set pair analysis; three-demarcation method; Yellow River Delta

水资源是决定一个地区社会经济发展规模以及能否实现可持续发展的关键因素之一,进行水资源承载力评价,度量区域水资源承载状态如何,对于制定有效的水资源调控规划和保护措施、实现经济与环境协调发展具有重要的现实意义。我国学者自 20 世纪 80 年代就开始对水资源承载力进行研究,但至今对水资源承载力没有一个通用的定义。这些定义可归纳为两种观点:①水资源承载力是在一定区域、一定物质生活水平下,水资源能持续供给当代和后代人需求的规模和能力[1];②水资源承载力是在某一历史发展阶段,以可预见的技术、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,在水资源得到合理的开发利用下,该地区人口增长与经济发展的最大容量[2]。

目前常用的水资源承载力评价方法有很多,如背景分析法、多目标分析法、系统动力学方法、模糊综合评判法、主成分分析法等,这些方法各有特点,但在具体分析过程中都存在一定的局限性。如背景分析法多局限于静态的历史背景,割裂了资源、社会、环境之间的联系[3];主成分分析法由于主成分是单纯原始变量的线性组合,很难分析其具体含义,不利于水资源承载力的理解和控制[4]。鉴于此,笔者

基金资助:水利部公益性行业专项(200801026);山东省水资源与水环境重点实验室开放基金(WRISD0901)

作者简介:张欣(1981—),女,工程师,主要从事水资源、水环境方面研究。E-mail:zhangxin1338@yahoo.com.cn

在建立研究区水资源承载力评价指标体系和分级标准的基础上，引入集对分析理论，建立基于三标度层次分析法的水资源承载力集对分析评价模型，通过计算联系度对黄河三角洲水资源承载力进行评价。

1 研究区概况

黄河三角洲位于渤海南部的黄河入海口沿岸地区，在环渤海地区发展中具有重要的战略地位。东营市作为黄河三角洲的中心城市，资源优势明显，开发潜力巨大。但由于受自然条件限制，当地水资源十分匮乏，水资源紧缺已严重制约社会经济的持续稳定发展，故本文水资源承载力研究区定为东营市。

东营市北临渤海湾，东靠莱州湾，西与滨州市毗邻，南与淄博市和潍坊市接壤。南北最大纵距 123 km，东西最大横距 74 km，总面积 7 923 km^2。辖广饶、利津、垦利三县和东营、河口两区。

东营市属暖温带半湿润半干旱大陆性气候区，多年平均气温 12.8℃，多年平均降雨量 554.5 mm，多年平均当地水资源为 61 596 万 m^3。黄河水为研究区主要的客水资源，但近年来黄河来水呈逐年减少趋势，且年内分配不均。

2 基于三标度层次分析法的水资源承载力集对分析评价模型

2.1 集对分析的原理

集对分析法（set pair analysis，以下简称 SPA）由我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种处理不确定问题的系统分析方法[5]，目前已经应用到现代科学管理、人工智能、信息工程和气象等很多领域。其核心思想是对不确定性系统中的两个有关联的集合构造为集对，对集对的某特性做同一性、差异性、对立性分析，然后建立集对的同异反联系度，即给定集合 A 和 B，并构成集对 $H(A,B)$，建立两个集合的联系度表达式：

$$\mu_{(A,B)} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j = a + bi + cj \quad (1)$$

式中：μ 为联系度，N 为特征总数，S 为集对中两个集合共有的特性个数，F 为两个集合既不共同也不相互对立的特性个数，P 为集对中对立特征的个数。S/N 为集合 A 和 B 的同一度，简记为 a，F/N 为差异度，简记为 b，P/N 为对立度，简记为 c。i 为差异度系数，$i \in [0,1]$，有时仅起差异标记作用，j 为对立度系数，其值为 -1，有时起对立标记作用。

2.2 基于三标度层次分析法的集对分析评价模型[6-7]

基于三标度层次分析法的集对分析模型进行水资源承载力评价的步骤如下。

a. 联系度的确定。假定有 N 个评价指标，其中有 S 个评价指标优于标准，P 个评价指标劣于标准，F 个指标介于优劣之间。根据公式(1)可以计算出样本的联系度 μ_m，初步得到承载力情况。不同地区的水资源承载能力即使处于同一级别，也会因评价指标数值的差异而有所不同，因此，对于分级标准还要做同一、差异、对立的集对分析。

水资源承载力评价指标一般包括越大越优型指标和越小越优型指标。

越大越优型指标联系度计算公式为：

$$\mu_{mn} = \begin{cases} 1 + 0i + 0j & x \in [0, S_1] \\ \dfrac{S_2 - x}{S_2 - S_1} + \dfrac{x - S_1}{S_2 - S_1}i + 0j & x \in [S_1, S_2] \\ 0 + \dfrac{S_3 - x}{S_3 - S_2}i + \dfrac{x - S_2}{S_3 - S_2}j & x \in [S_2, S_3] \\ 0 + 0i + 1j & x \in [S_3, \infty] \end{cases} \quad (2)$$

越小越优型指标联系度计算公式为：

$$\mu_{mn} = \begin{cases} 1 + 0i + 0j & x \in [0, \infty] \\ \dfrac{S_2 - x}{S_2 - S_1} + \dfrac{x - S_1}{S_2 - S_1}i + 0j & x \in [S_2, S_1] \\ 0 + \dfrac{S_3 - x}{S_3 - S_2}i + \dfrac{x - S_2}{S_3 - S_2}j & x \in [S_3, S_2] \\ 0 + 0i + 1j & x \in [0, S_3] \end{cases} \quad (3)$$

式中：S_1、S_2、S_3 分别为评价指标的门限值，x 为各评价区水资源承载力状况的实际值，m 为第 m 个评价区水资源承载力样本，n 为评价指标。

b. 权重的确定。确定各评价指标权重时采用三标度层次分析法。三标度层次分析法避免采用九标度法构造判断矩阵，不仅降低了判断难度，使专家易于接受和操作，而且可以保证易于得到具有足够一致性的判断矩阵。

三标度层次分析法依据评价指标的重要性进行两两比较，构造判断矩阵 $\boldsymbol{A} = (a_{ij})_{n \times m}$，

$$a_{ij} = \begin{cases} \dfrac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1 & r_i \geqslant r_j \\ \left[\dfrac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}}(b_m - 1) + 1\right]^{-1} & r_i < r_j \end{cases} \quad (4)$$

式中：$r_i = \sum_{j=1}^{n} d_{ij}$，$d_{ij}$ 为 i 元素与 j 元素的重要性比较值，$r_{\max} = \max\{r_i\}$，$r_{\min} = \min\{r_i\}$，$i = 1,2,\cdots,n$，找出 $r_{\max}$ 和 $r_{\min}$ 所对应的 2 个基点比较要素，参照九标度判断值得到基点比较标度 b_m。

采用拟优传递矩阵的概念对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 变换为

A^*，计算矩阵 A^* 的最大特征值 λ_{max} 及其对应的特征向量 $\omega = (\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_n)$，对 ω 进行归一化处理后，即为对应元素的权重值，如公式(5)所示。

$$\omega'_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^{n} \omega_i} \qquad i = 1, 2, \cdots, n \tag{5}$$

c. 建立集对分析水资源承载力评价模型。

$$\mu'_m = \mu_m \sum_{i=1}^{n} \omega'_i \mu_{mn} \tag{6}$$

对 μ'_m 中同一、差异、对立各分量进行归一化即可得到平均联系度 $\overline{\mu'_m}$，比较 $\overline{\mu'_m}$ 中 a、b、c 的相对大小可以判断出评价对象所属等级。若 $\max[a, b, c] = b$，则判断为Ⅱ级；若 $\max[a, b, c] = a$，且 $a + b \geqslant 0.7$，则判断为Ⅰ级，否则判断为Ⅱ级；若 $\max[a, b, c] = c$，且 $b + c \geqslant 0.7$，则判断为Ⅲ级，否则判断为Ⅱ级。

3 黄河三角洲水资源承载力评价

3.1 黄河三角洲水资源承载力评价指标体系[8]

综合考虑自然、经济社会和生态环境等水资源承载能力影响因素，建立黄河三角洲水资源承载力评价指标体系。该体系由三个层次构成，分别为目标层、准则层和指标层。目标层(A)表达的是水资源承载力；准则层(B)包括5个方面指标：水资源及其开发利用状况、社会经济发展状况、生活用水情况、生产用水情况和生态环境状况；指标层(C)包括25个指标。各评价指标分为正向指标(越大越优)、逆向指标(越小越优)和适度指标(优于标准的按越小越优、劣于标准的按越大越优)三类(表1)。表1中，C_1 为人均水资源量，多年平均当地水资源量/总人口；C_2 为单位土地面积水资源量，多年平均当地水资源量/总土地面积；C_3 为客水利用量占总供水量的比率，客水供水量/实际供水量；C_4 为供水模数，供水量/土地面积；C_5 为缺水率，(75%保证率下可供水量 - 75%保证率下的需水量)/75%保证率下的需水量；C_6 为水资源开发利用率，(实际供水量 - 调入水量 - 再生水等其他供水量)/多年平均当地水资源量；C_7 为人口密度，人口总数/土地面积；C_8 为人口自然增长率，年内净增人口数/年平均人口数；C_9 为城镇化率，城镇人口数/总人口数；C_{10} 为人均GDP，GDP总量/总人口数；C_{11} 为GDP增长率，本年度GDP增长额/上年度GDP总量；C_{12} 为第一产业比例，第一产业GDP/GDP总量；C_{13} 为城镇居民生活用水定额，城镇生活用水量/城镇人口数；C_{14} 为农村居民生活用水定额，农村生活用水量/农村人口数；C_{15} 为城镇生活污水处理率，城镇生活污水达标排放量/城镇生活污水排放量；C_{16} 为农村饮水安全人口比例，农村饮水安全达标人口/农村人口数；C_{17} 为单方水总产值，GDP总量/总用水量；C_{18} 为万元工业增加值用水量，工业用水量/万元工业增加值；C_{19} 为工业用水重复利用率，工业重复利用的水量/工业用水量；C_{20} 为农田灌溉用水定额，农田灌溉用水量/有效灌溉面积；C_{21} 为有效灌溉率，有效灌溉面积/耕地面

表1 黄河三角洲水资源承载力评价指标体系

准则层		水资源及其开发利用状况(B_1)						社会经济发展状况(B_2)					
指标层		C_1/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	C_2/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	C_3/%	C_4/(万 $m^3 \cdot km^{-2}$)	C_5/%	C_6/%	C_7/($人 \cdot km^{-2}$)	C_8/%	C_9/%	C_{10}/(万元·$人^{-1}$)	C_{11}/%	C_{12}/%
指标类型		正向	正向	逆向	逆向	逆向	适度	逆向	逆向	逆向	逆向	逆向	逆向
评价指标值	东营区	116	615	100	11.3	0	0	536	0.45	89.2	3.8	17.0	5.1
	河口区	358	360	100	4.9	39.1	0	100	0.33	88.1	6.6	17.2	6.4
	垦利县	300	300	99	9.1	1.4	0.1	100	0.39	28.7	10.0	17.3	6.2
	利津县	218	510	100	12.9	7.5	0	232	0.30	22.1	4.8	17.2	14.4
	广饶县	677	2955	24	28.7	32.1	74.2	436	0.46	20.0	9.3	17.0	6.8
评价标准	Ⅰ较强	> 1700	> 4500	< 10	< 10	< 5	< 10	< 25	< 0.8	< 40	< 0.8	< 4	< 12
	Ⅱ中等	500 ~ 1700	2000 ~ 4500	10 ~ 30	10 ~ 60	5 ~ 10	10 ~ 40	25 ~ 100	0.8 ~ 1.6	40 ~ 60	0.8 ~ 2.4	4 ~ 6	12 ~ 15
	Ⅲ较弱	< 500	< 2000	> 30	> 60	> 10	> 40	> 100	> 1.6	> 60	> 2.4	> 6	> 15

准则层		生活用水情况(B_3)				生产用水情况(B_4)						生态环境状况(B_5)		
指标层		C_{13}/(L·$人^{-1}$·d^{-1})	C_{14}/($m^3 \cdot 人^{-1}$)	C_{15}/%	C_{16}/%	C_{17}/(元·m^{-3})	C_{18}/(m^3·万元$^{-1}$)	C_{19}/%	C_{20}/(m^3·亩$^{-1}$)①	C_{21}/%	C_{22}/%	C_{23}/%	C_{24}/(m^3·万元$^{-1}$)	C_{25}/%
指标类型		逆向	逆向	正向	正向	正向	逆向	正向	逆向	逆向	逆向	逆向	逆向	逆向
评价指标值	东营区	101	71	65	70	179	28	82	227	65	43	5.7	3	94
	河口区	96	66	50	70	137	22	46	212	48	57	1.9	5	99
	垦利县	100	70	50	60	133	21	37	250	53	50	0.5	4	98
	利津县	95	65	50	60	72	44	35	176	73	52	7	6	76
	广饶县	101	70	55	67	141	16	45	257	96	69	5.2	17	66
评价标准	Ⅰ较强	< 180	< 70	> 70	> 75	> 100	< 50	> 80	< 400	< 20	< 60	< 2	< 10	< 5
	Ⅱ中等	180 ~ 210	70 ~ 90	50 ~ 70	60 ~ 75	60 ~ 100	50 ~ 100	60 ~ 80	400 ~ 550	20 ~ 50	60 ~ 70	2 ~ 5	10 ~ 30	5 ~ 10
	Ⅲ较弱	> 210	> 90	< 50	< 60	< 60	> 100	< 60	> 550	> 50	> 70	> 5	> 30	> 10

① 1 亩 = 1/15 hm^2。

积；C_{22}为用水结构指数，第一产业用水量/总用水量；C_{23}为生态环境用水率，目前生态环境用水量/多年平均水资源量为；C_{24}为万元 GDP 废污水排放量，废污水排放量/GDP 总量；C_{25}为咸水区面积率，咸水区面积/土地面积。

3.2 黄河三角洲水资源承载力评价指标分级标准

为了描述水资源承载力状态，将评价指标对水资源承载力的影响程度划分为 3 个等级。Ⅰ级表示水资源承载能力较强，开发利用潜力较大；Ⅱ级表示水资源承载力中等，水资源仍有进一步开发的潜力；Ⅲ级表示水资源承载力较差，开发利用已经接近饱和(表 1)。

3.3 评价结果及分析

以黄河三角洲水资源承载力评价指标体系各指标的评价标准值作为集对分析联系度表达式中的同一度、差异度和对立度的取值依据，利用式(1)计算各评价区域的联系度。

$$\mu_1 = \frac{10}{25} + \frac{4}{25}i + \frac{11}{25}j = 0.40 + 0.16i + 0.44j$$

$$\mu_2 = \frac{11}{25} + \frac{3}{25}i + \frac{11}{25}j = 0.44 + 0.12i + 0.44j$$

$$\mu_3 = \frac{12}{25} + \frac{3}{25}i + \frac{10}{25}j = 0.48 + 0.12i + 0.4j$$

$$\mu_4 = \frac{8}{25} + \frac{6}{25}i + \frac{11}{25}j = 0.32 + 0.24i + 0.44j$$

$$\mu_5 = \frac{7}{25} + \frac{9}{25}i + \frac{9}{25}j = 0.28 + 0.36i + 0.36j$$

比较 5 个评价区域的联系度，承载力相对较强的是垦利县，其次是东营区和河口区，相对较弱的是利津县和广饶县。为进一步分析评价指标的数值与指标分级标准之间的关系，需要继续对各评价区域做同一、差异、对立的集对分析。

以东营区为例，由式(2)、(3)可计算出 25 项评价因子相对于分级标准的联系度，$\mu_{C_1} = 0 + 0i + 1j$，…，$\mu_{C_{24}} = 1 + 0i + 0j$，$\mu_{C_{25}} = 0 + 0i + 1j$。根据公式(4)～(5)计算出各评价指标的权重，见表 2。

表 2 各评价指标权重

指标	权重	指标	权重	指标	权重
C_1	0.2202	C_{10}	0.0399	C_{19}	0.0030
C_2	0.1186	C_{11}	0.0127	C_{20}	0.0450
C_3	0.0081	C_{12}	0.0127	C_{21}	0.0450
C_4	0.0213	C_{13}	0.0556	C_{22}	0.0030
C_5	0.0606	C_{14}	0.0556	C_{23}	0.0312
C_6	0.0213	C_{15}	0.0243	C_{24}	0.0199
C_7	0.0790	C_{16}	0.0145	C_{25}	0.0488
C_8	0.0028	C_{17}	0.0092		
C_9	0.0028	C_{18}	0.0450		

根据式(6)计算出东营区的平均联系度：$\mu'_1 = 0.138 + 0.005i + 0.276j$，通过归一化可得东营区的最终平均联系度：$\overline{\mu'_1} = 0.329 + 0.011i + 0.660j$。同理，可以得到其他 4 个区域的平均联系度：$\overline{\mu'_2} = 0.299 + 0.004i + 0.697j$；$\overline{\mu'_3} = 0.408 + 0i + 0.592j$；$\overline{\mu'_4} = 0.201 + 0.044i + 0.755j$；$\overline{\mu'_5} = 0.198 + 0.227i + 0.575j$。

根据最终的平均联系度得到各评价区域的水资源承载力等级。评价结果如下：东营区Ⅱ级，河口区Ⅲ级，垦利县Ⅱ级，利津县Ⅲ级，广饶县Ⅲ级，水资源承载力分区见图 1。

由图 1 可看出，东营区和垦利县水资源承载力属于中等，河口区、利津县和广饶县水资源承载力较弱，整体上研究区水资源承载力处于较低的水平，在现有的条件下水资源继续开发的潜力相对较小，水资源供需矛盾非常突出。

从实例分析看，研究区水资源承载力整体水平较低，这是因为研究区特有的水资源状况造成的。受自然条件限制，东营市当地水资源十分匮乏，当地地表水资源可利用量少，且仅能用于农业灌溉和河道生态用水，供水主要依靠黄河水，由于地处黄河最下游，季节性缺水问题仍然十分突出。东营市地下淡水资源也非常有限，可供开采的地下水资源主要集中在广饶县小清河以南的少部分区域，面积约占东营市面积的 10%，小清河以北的大部分区域，由于矿化度太高，地下水难以利用。在小清河以南的井灌区，由于 1975 年以后多年干旱，致使地下水资源局部超采严重，尤其是部分相对富水区，工农、城乡竞相开采，井的密度、深度不断加大，地下水位大幅度下降，形成了地下水超采漏斗区。近几年地下水位下降趋势已得到有效遏制，但是要恢复到合理的地下水位，仍需加大治理、管理工作力度。

针对研究区的水资源承载力现状，水资源开发利用应以可持续发展为基础，大力实行最严格的水资源管理制度，全面推进节水型社会建设，提高水资源的利用效率和效益；增加外调水量，积极拓展非常规水资源利用，增加“开源”途径；调整用水结构，实现水资源的合理配置；做好城市水资源综合规划，合理确定城市发展规模；做好农村供水工作，保障农村饮用安全；加强水污染治理，防止水环境恶化；不断提高水资源承载能力，以更好地保证研究区社会经济的可持续发展。

4 结 语

a. 确定了研究区水资源承载力影响因素，构建了由 25 个指标组成的水资源承载力评价指标体系，该指标体系能够较为准确的反映研究区的水资源承载力状况，为了描述水资源承载力状态，按较强、中等、较弱三个级别划分，拟定了25个评价指标的分

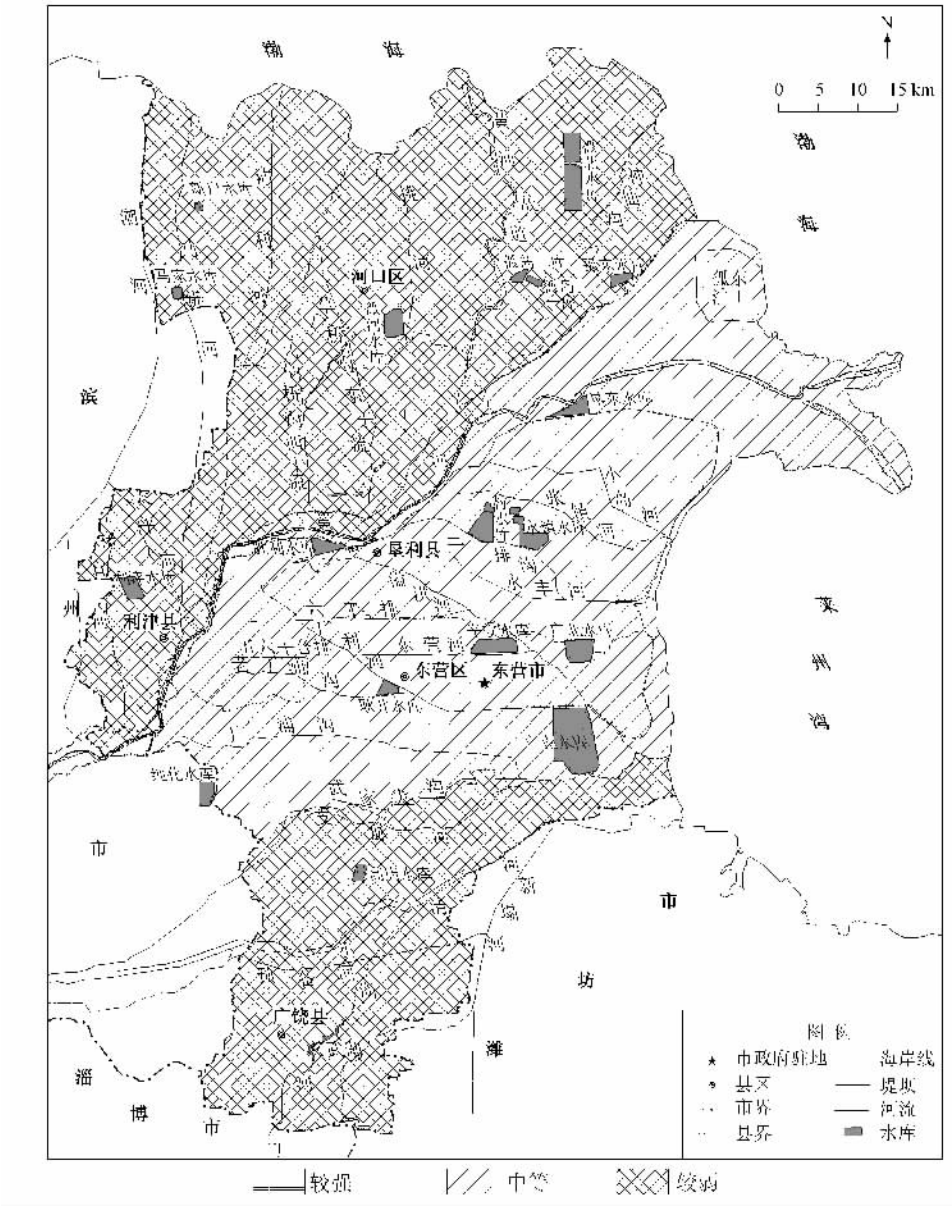

图 1　研究区水资源承载力评价结果分区示意图

级标准，为评价区域水资源承载力状态提供了标准。

b. 利用集对分析理论构建了基于三标度层次分析法的水资源承载力集对分析评价模型，运用三标度法确定各评价指标的权重，通过计算各评价对象对评价标准的联系度，得出了研究区各评价区域的水资源承载力分级结果。该模型计算简便，有效可行，评价结果与客观实际基本符合。针对评价结果，提出了提高水资源承载力，实现水资源可持续利用的建议。

参考文献：

[1] 冯尚友，刘国全. 水资源持续利用的框架[J]. 水科学进展，1997，8(4)：301-307.

[2] 李令跃，甘泓. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展，2000，11(3)：307-313.

[3] 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.

[4] 张丽. 基于生态的流域水资源承载能力研究[D]. 南京：河海大学，2004.

[5] 赵克勤，宣爱理. 集对论：一种新的不确定性理论方法与应用[J]. 系统工程，1996，14(1)：18-23.

[6] 孟宪萌，胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报，2009，40(3)：257-261.

[7] 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.

[8] 胡吉敏. 沿海地区水资源承载力评价研究[D]. 大连：大连理工大学，2008.

（收稿日期：2011-10-15　编辑：高渭文）