

# 福建省城市水资源承载力综合评价研究

李庆贺<sup>1</sup>, 伍博炜<sup>1</sup>, 杨珺丽<sup>1</sup>, 李淼<sup>2</sup>

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 池州学院, 安徽 池州 247000)

**摘要:** 从水资源系统、社会经济系统和生态环境系统3个方面着手,构建福建省城市水资源承载力评价指标体系,并利用模糊综合评价模型对福建省城市水资源承载力进行综合评价。结果表明:福建省城市水资源开发利用已具有相当规模,城市水资源的供给需求是有一定保障的,城市水资源仍具有一定的开发利用潜力;分区城市中,厦门市与漳州市城市水资源状况较为紧张,厦门市未来城市水资源形式不容乐观。研究结果可为福建省城市水资源管理提供参考。

**关键词:** 水资源; 城市水资源承载力; 模糊综合评价; 熵权法; 福建省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0147-05

## Comprehensive evaluation on urban water resources carrying capacity in Fujian Province

LI Qinghe<sup>1</sup>, WU Bowei<sup>1</sup>, YANG Junli<sup>1</sup>, LI Miao<sup>2</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Chizhou University, Chizhou 247000, China)

**Abstract:** Based on the three systems of water resources, social economic and ecological environment, this paper set up the evaluation index system of carrying capacity of urban water resources in Fujian Province and comprehensively evaluated the carrying capacity of urban water resources in the area by using fuzzy comprehensive evaluation model. The results show that the development and utilization of urban water resources in Fujian Province has a considerable scale. The supply and demand of urban water resources has certain security and the development and utilization of urban water resources still has certain potential. In addition, the conditions of urban water resources in Xiamen and Zhangzhou are more severe and the future situation of urban water resources in Xiamen will not be optimistic. The research results can provide references for the urban water resources management in Fujian Province.

**Key words:** water resources; urban water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; entropy weight method; Fujian Province

随着社会经济的发展、人口的增长以及城市化进程的不断推进,人类对水的需求量不断增加,城市水资源供需矛盾日益突出,水资源短缺已成为制约城市可持续发展的重要原因。目前,对于城市水资源承载力的概念还没有形成统一的认识,不同的学者有不同的理解和表述。本文将城市水资源承载力定义为:在城市发展的某一历史时期,以可持续发展为原则,以维护城市良好生态环境为目标,在现有经济、技术和社会发展水平下,该城市市辖区的可利用水资源对当地经济社会发展的最大支撑能力。

水资源承载力的研究一直是热点问题之一。国际上,水资源承载力的研究大多纳入可持续发展理

论中,Harris等<sup>[1]</sup>从供水的角度对城市水资源承载力展开研究,并将其纳入城市发展规划当中;Rijsberman等<sup>[2]</sup>将水资源承载力作为城市水资源安全保障的衡量标准;Varis等<sup>[3]</sup>初步比较了长江流域的社会经济现状和水环境承载能力。在国内,水资源承载力的研究领域主要集中在区域水资源承载力、流域水资源承载力以及城市水资源承载力这些方面,并取得了较大进展。许有鹏<sup>[4]</sup>以新疆和田河流域为例,应用模糊综合评判方法建立分析评价模型,重点探讨了我国西北干旱区水资源承载能力综合评价的方法;朱一中等<sup>[5-6]</sup>以水循环模拟研究为切入点,建立水资源承载力综合评价指标体系,进行不同

收稿日期:2014-05-06; 修回日期:2014-06-14

基金项目:国家基础科学人才培养基金项目(J1210067);国家自然科学基金项目(41171147)

作者简介:李庆贺(1989-),男,安徽亳州人,硕士研究生,从事城市与区域规划研究。

发展背景下生态用水和水资源承载力的量化研究;夏军等<sup>[7]</sup>探讨了城市化地区水资源承载力的内涵和特性,采用目标综合分析多级灰关联评价相结合的方法,建立起城市化地区水资源承载力模型;赵军凯等<sup>[8]</sup>利用灰色系统理论、模糊集理论和最大熵原理相结合的熵模型对开封市未来预测年份水资源承载力进行评价。目前,国内研究主要开展的区域是水资源短缺的干旱半干旱地区或城市,对南方地区、尤其是南方城市化地区水资源承载力研究相对较少,且当前城市化地区水资源承载力的研究还没有形成完善的量化理论与方法体系<sup>[7-10]</sup>。基于此,本文利用模糊综合评价模型,研究位于中国南方地区的福建省城市水资源承载力状况,以期为该地区城市水资源承载能力的评价提供借鉴。

## 1 研究区概况

福建地处我国东南沿海,北连浙江、南邻广东、西接江西、东隔台湾海峡与台湾省相望,地理坐标北纬 $23^{\circ}33' - 28^{\circ}19'$ ,东经 $115^{\circ}50' - 120^{\circ}43'$ ,东西宽约540 km,南北长约550 km。全省共9个地级市(福州、厦门、莆田、三明、泉州、漳州、南平、龙岩、宁德)。福建省属于典型的亚热带海洋性季风气候,夏季高温多雨,大部分地区雨量充沛,水资源较丰富,但时空分布不均,在时间上,降雨主要集中在4-9月份,水资源较丰富;在空间上,水资源分布恰好与地区经济、人口分布相反,西部山区水资源丰富,东部沿海地区较贫乏。以位于福建省东南部的厦门市为例,该市为东南沿海重要的中心城市,经济社会发展水平较高,但水资源十分匮乏,其城市供水主要依靠跨地区引水,水资源短缺已成为厦门市经济社会发展的制约因素。2012年,福建全省城镇人口为2234万人,城镇化水平已达到59.6%,全年工业总产值32379.94亿元,工业用水量为75.73亿 $m^3$ 。近年来,由于水环境逐渐受到污染、水资源时空分布不均等原因,致使可用水量大大减少,同时,经济社会的快速发展以及人口的膨胀,使得对水资源的需求大大增加,福建省水资源压力逐渐增大,水资源状况引起人们的重视。

## 2 指标体系及评价标准

### 2.1 指标体系

评价指标体系的选取是城市水资源承载能力综合评价中的一个关键问题。城市水资源承载力的评价涉及生态环境以及社会经济系统的方方面面,因

此,所选指标要能够全面、综合地反映研究区实际情况。针对中国南方地区水资源状况,结合城市水资源特点,并综合考虑数据的可获得性、可靠性以及充分性,文章构建适于福建省城市水资源承载力综合评价的指标体系(见表1)。指标体系涵盖的水资源系统、社会经济系统以及生态环境系统,依次对应水供给、水需求(水消耗)与水维护3个方面。水资源系统,即从水资源自身角度分析,在该系统下选取人均水资源数量、全年供水总量等方面的指标;社会经济系统,即在特定科学技术水平、生产力水平前提下的城市发展情况,在该系统下主要选取与人口以及经济用水效益等方面相关指标;生态环境系统,即水资源与城市经济发展的协调程度,生态环境一方面对城市水资源承载力起支撑作用,另一方面又对其产生压力,在该系统下选取与城市绿化以及污水排放与处理等密切相关的指标。

表1 福建省城市水资源承载力评价指标体系

准则层	指标层	类型	计算方法
水资源系统	人均水资源量	正	多年平均水资源总量/总人口数
	水资源开发利用度	逆	除生态环境用水外的平均用水量/平均当地水资源量
	全年供水总量	逆	统计数据
	年底供水综合生产能力	正	统计数据
社会经济系统	城市人口密度	逆	统计数据
	万元工业增加值用水量	逆	工业用水量/工业增加值
	万元GDP用水量	逆	总用水量/GDP总量
生态环境系统	城镇居民人均日生活用水量	逆	统计数据
	建成区绿化覆盖率	正	统计数据
	城市污水处理率	正	统计数据
	工业废水排放量	逆	统计数据
	生态环境用水量	正	统计数据

本文基础数据来源于《福建省统计年鉴》(2013)以及《福建省水资源公报》(2012),部分数据经计算整理所得。见表2。

### 2.2 评价标准及意义

城市水资源承载力评价标准的确定应面向可持续发展,有利于城市水资源的开发利用与保护,且具有可操作性。根据福建省具体情况,借鉴其他相关学者研究成果<sup>[4,8,11-14]</sup>,结合专家意见,确定福建省城市水资源承载力的3级评价标准 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ (表3),且 $V_1$ 级优于 $V_2$ 级, $V_2$ 级优于 $V_3$ 级。 $V_1$ 级表示承载能力较强,城市水资源具有较大的承载潜力,城市水资源利用程度、发展规模都较小,此时城市水资源的需求是有保障的,其供给情况较为乐观; $V_3$ 级表

示承载能力较弱,说明城市水资源承载能力已接近其饱和值,易发生水资源短缺,制约城市社会经济的发展,进一步开发潜力较小; $V_2$  级则介于以上两者

之间,表明城市水资源开发利用已具有相当规模,城市水资源的供给需求是有一定保障的,城市水资源仍具有一定的开发利用潜力。

表 2 福建省城市水资源承载力评价指标数值

指标层	福州	厦门	莆田	三明	泉州	漳州	南平	龙岩	宁德	全省
A	1715	352	1370	11731	1250	2414	15733	8206	6374	4013
B	30.86	46.52	29.91	8.70	31.24	17.20	6.66	10.47	8.46	13.24
C	30165.87	35729.41	8515.52	6988.54	13786.48	4562.50	2578.00	6902.00	1274.00	16258.66
D	156.68	121.80	38.90	74.90	55.30	32.50	16.50	20.80	13.00	80.11
E	2455	10325	2287	1051	2172	4619	1262	1657	2255	2388
F	168	13	52	125	58	60	258	123	99	88
G	99	21	96	191	68	101	278	170	142	103
H	241.11	150.12	134.68	226.33	142.61	181.43	193.17	170.10	123.48	178.37
I	40.60	41.80	46.00	41.10	42.20	41.40	44.90	42.20	41.30	42.00
J	84.70	90.70	84.40	84.00	87.10	88.90	84.00	89.90	86.90	85.60
K	5332.67	26947.88	2262.22	15074.01	20534.98	23400.06	7426.48	3729.23	1586.98	11813.25
L	1.09	0.08	0.58	0.08	0.96	0.06	0.20	0.02	0.03	0.34

注:表中字母 A-L 依次代表的指标为:人均水资源量、水资源开发利用率、全年供水总量、年底供水综合生产能力、城市人口密度、万元工业增加值用水量、万元 GDP 用水量、城镇居民人均日生活用水量、建成区绿化覆盖率、城市污水处理率、工业废水排放量、生态环境用水量。

表 3 福建省城市水资源承载力评价标准

目标层	准则层	指标层	$V_1$	$V_2$	$V_3$
水资源系统	水资源系统	人均水资源量	>9000	9000~2000	<2000
		水资源开发利用率	<10	10~40	>40
		全年供水总量	<2000	2000~30000	>30000
		年底供水综合生产能力	>160	160~30	<30
社会经济系统	社会经济系统	城市人口密度	<1000	1000~5000	>5000
		万元工业增加值用水量	<50	50~170	>170
		万元 GDP 用水量	<60	60~200	>200
		城镇居民人均日生活用水量	<100	100~240	>240
生态环境系统	生态环境系统	建成区绿化覆盖率	>50	50~30	<30
		城市污水处理率	>92	92~72	<72
		工业废水排放量	<2000	2000~10000	>10000
		生态环境用水量	>0.6	0.6~0.1	<0.1

### 3 研究方法

目前对城市水资源承载力的研究中,研究者大多采用主成分分析法、RBF 神经网络模型、系统动力学方法、多目标和多决策法等。由于城市水资源承载力的影响因素众多,各因素之间关系错综复杂,因此,准确评价城市水资源承载力的关键在于科学合理地确定评价指标体系中各因素的相对重要性以及评价分级的方法。本文拟选取熵权法确定评价指标体系的权重,选取模糊综合评价法对福建省城市水资源承载力进行综合研究。熵以整体的观念去度量水资源承载力变量所包含的不确定性,精度较高、

客观性较强。模糊综合评价法,是一种以模糊推理为主的定性定量相结合、精确与非精确相统一的分析评价方法。它能在对各个因素进行单因素评价的基础上,通过综合评判矩阵对其承载能力做出综合评价。

#### 3.1 模糊综合评价模型

模糊综合评价模型<sup>[4,13]</sup>原理为:设给定两个有限论域  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  和  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ ,其中  $U$  代表综合评价的因素所组成的集合, $V$  代表评语所组成的集合,则模糊综合评价为下列模糊变换:

$$B = A \cdot R \tag{1}$$

式中: $A$  为  $U$  上的模糊子集,而评判结果  $B$  则为  $V$  上的模糊子集,并且可以表示为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_m), 0 \leq a_i \leq 1; B = (b_1, b_2, \dots, b_n), 0 \leq b_j \leq 1$ 。其中, $a_i$  为  $U_i$  对  $A$  的隶属度,它表示单因素  $U_i$  评定等级的能力,而  $b_j$  则为等级  $V_j$  对综合评定所得模糊子集  $B$  的隶属度,它表示综合评判的结果。评价矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: $r_{ij}$  表示  $U_i$  的评价对等级  $V_j$  的隶属度,因而矩阵  $R$  中的第  $i$  行  $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ ,即为对第  $i$  个

因素  $U_i$  的单因素评价结果。评价计算中  $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$  代表了各因素对综合评价的重要性的权重系数,因此,满足  $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ ,同时模糊变换也退化为普通矩阵计算,即:

$$b_j = \min \left\{ 1, \sum_{i=1}^n a_i \cdot r_{ij} \right\} \quad (3)$$

模糊综合评价方法的关键是隶属度函数的确定,本次计算借鉴许有鹏<sup>[4]</sup>、高彦春<sup>[13]</sup>等提出的隶属度函数构造方法,消除等级之间的跳跃现象,使函数在等级间平滑过渡。

为了更好地反映各等级城市水资源承载力情况,对  $V_1 \sim V_3$  3个等级进行 0 ~ 1 区间的评分  $a_1 = 0.95, a_2 = 0.5, a_3 = 0.05$ 。这样便可以定量反映各等级因素对承载能力的影响程度,数值越高对城市水资源承载能力的贡献就越高,评分值也越高,也即城市水资源承载力越大。综合评价取上述计算所得到的  $a_j$  和  $b_j$  值进行计算,其计算公式为:

$$a = \sum_{j=1}^3 b_j^k a_j / \sum_{j=1}^3 b_j^k \quad (4)$$

式中:  $a$  是城市水资源承载力综合评分;  $b_j$  是各等级的隶属度;  $a_j$  是各等级的评分,该式是为了突出占优势等级的作用,而利用各等级隶属度  $b_j$  的  $k$  次幂为权重进行加权平均来计算,本次  $k$  值取 1。

### 3.2 指标权重的确定

熵权法具体操作步骤如下:

(1) 对样本数据进行极差标准化处理,公式如下:

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (5)$$

$$\text{逆向指标: } x'_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (6)$$

式中:  $x_{ij}$  为指标初始值;  $x'_{ij}$  为标准化处理后的值;  $\max(x_{ij})$ 、 $\min(x_{ij})$  为相应指标初始最大值、最小值。

(2) 计算指标的熵值。公式为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}),$$

$$k > 0, k = 1/\ln(n), e_j \geq 0 \quad (7)$$

$$p_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij} \quad (8)$$

式中:  $p_{ij}$  为第  $j$  个指标在第  $i$  个系统中的比重;  $x'_{ij}$  为第  $i$  个系统中第  $j$  项指标的数据值;  $\sum_{i=1}^n x'_{ij}$  为第  $j$  项指标的所有系统数据之和。

(3) 熵权确定。设第  $j$  个评价指标的熵权为  $A_j$ ,

其计算公式为:

$$A_j = (1 - e_j) / (n - \sum_{j=1}^n e_j) \quad (9)$$

由此计算出的熵权即为该指标的权重。

## 4 福建省城市水资源承载力综合评价

通过熵权法获得各评价因素的权重为  $A = (0.130, 0.046, 0.048, 0.128, 0.031, 0.038, 0.041, 0.055, 0.110, 0.131, 0.062, 0.179)$ ,根据福建省以及各分区城市的评价指标特征,按照隶属度计算公式,计算出每个评价因素对应各个等级的相对隶属度  $r_{ij}$ ,从而求出整个综合评价矩阵  $R$  的值。根据上述  $A$  和  $R$  矩阵数值,即可求得城市水资源承载力的最终评价结果矩阵  $B$ ,如对福州市城市水资源承载力的综合评价计算为:

$$B = A \cdot R$$

$$= (0.130, 0.046, 0.048, 0.128, 0.031, 0.038, 0.041, 0.055, 0.110, 0.131, 0.062, 0.179) \cdot$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.46 & 0.54 \\ 0 & 0.80 & 0.20 \\ 0 & 0.49 & 0.51 \\ 0.47 & 0.53 & 0 \\ 0.14 & 0.86 & 0 \\ 0 & 0.52 & 0.48 \\ 0.22 & 0.78 & 0 \\ 0 & 0.49 & 0.51 \\ 0.03 & 0.97 & 0 \\ 0.14 & 0.86 & 0 \\ 0.08 & 0.92 & 0 \\ 0.83 & 0.17 & 0 \end{pmatrix} = (0.249, 0.600, 0.150)$$

其综合评分值为:

$$a = \sum_{j=1}^3 b_j^k \cdot a_j / \sum_{j=1}^3 b_j^k$$

$$= (a_1, a_2, a_3) (b_1, b_2, b_3)^T$$

$$= (0.95, 0.50, 0.05) (0.249, 0.600, 0.150)^T$$

$$= 0.544$$

上式中,  $k$  值取 1。

按同样的计算方法即可求得福建省及其他各城市水资源承载力综合评价结果  $B$  的数值(见表 4),根据  $B$  中各数值即可推出福建省城市水资源承载力综合评分值。

表 4 即为福建省城市水资源承载能力的综合评价结果,从评价结果可以得出,2012 年福建省城市水资源承载力综合评价值为 0.490。

从全省角度来看,通过比较全省对  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  的隶属度大小,可以得出福建省城市水资源开发利用已具有相当规模,城市水资源的供给需求是有一定保障的,城市水资源仍具有一定的开发利用潜力,再对比  $V_1$  和  $V_3$  的隶属度大小,发现福建省更多的属于  $V_3$ ,这表明福建省城市水资源的开发利用较多地具有饱和阶段的特征,其具有的开发利用潜力相对较小。这就要求该地区各城市在今后发展中,要进一步提高水资源开发利用水平,更加高效、合理的利用水资源,保护水环境,同时,要进一步加强城市水资源的综合管理。

表4 福建省城市水资源承载力综合评价表

	$V_1$	$V_2$	$V_3$	综合评分
福州	0.249	0.600	0.150	0.544
厦门	0.156	0.516	0.327	0.423
莆田	0.220	0.641	0.138	0.536
三明	0.171	0.599	0.229	0.473
泉州	0.245	0.596	0.159	0.539
漳州	0.109	0.597	0.293	0.417
南平	0.212	0.576	0.211	0.500
龙岩	0.182	0.618	0.199	0.492
宁德	0.168	0.641	0.190	0.490
全省	0.072	0.834	0.093	0.490

从各分区城市来看,城市水资源承载能力从大至小依次为:福州、泉州、莆田、南平、龙岩、宁德、三明、厦门、漳州。各城市对  $V_2$  级的隶属度均在 0.5 以上,表明各城市水资源开发利用已具有相当规模,但城市水资源仍具有一定的开发利用潜力。对比各城市对  $V_1$  和  $V_3$  的隶属度大小可以发现,综合评分前 4 的福州、泉州、莆田、南平等城市,  $V_1$  级的值均大于  $V_3$  级,这表明这些城市的情况较为乐观,城市水资源的需求有较大保障,水资源进一步开发利用的潜力也较大。而其余 5 个城市对  $V_3$  级的隶属度均大于对  $V_1$  级的隶属度,这些城市今后的水资源状况将会相对紧张一些,进一步开发利用的潜力相对较小。其中以厦门、漳州两市的城市水资源状况最为紧张,厦门市对  $V_3$  级的隶属度在 0.3 以上,未来城市水资源形式不容乐观,这就要求该城市在今后发展中,进一步加强水资源保护,特别注重节约用水,提高水资源管理利用水平。

## 5 结 语

城市水资源承载能力研究的目的在于提高城市水资源的支撑能力,促进城市的可持续发展。由于

城市水资源承载能力的复杂性,目前对于城市水资源承载能力的研究还有待进一步完善。本研究根据中国南方地区水资源状况,结合城市水资源特点,构建适于福建省城市水资源承载力综合评价的指标体系,利用模糊综合评价模型对其进行综合评价,评价结果与现实情况较为符合。此外,本文在评价指标的选取上还可以进一步完善与提高。

## 参考文献:

- [1] Harris Jonathan M. Carrying capacity in agriculture: globe and regional issue [J]. Ecological Economics, 1999, 129 (3): 443 - 461.
- [2] Rijsberman M A, Van De Ven F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water system [J]. Environment Impact Assessment Review. 2000, 20(3): 333 - 345.
- [3] Varis O, Vakkilainen P. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century [J]. Geomorphology, 2001, 41(2): 93 - 104.
- [4] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229 - 237.
- [5] 朱一中, 夏军, 谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 43 - 48.
- [6] 朱一中, 夏军, 王纲胜. 张掖地区水资源承载力多目标情景决策[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 732 - 740.
- [7] 夏军, 张永勇, 王中根, 等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1482 - 1488.
- [8] 赵军凯, 李九发, 戴志军, 等. 基于熵模型的城市水资源承载力研究——以开封市为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(11): 1944 - 1951.
- [9] 左其亭, 等. 城市水资源承载能力——理论·方法·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [10] 赵新宇, 费良军, 高传昌. 城市水资源承载能力多目标分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(9): 99 - 102 + 107.
- [11] 朱记伟, 解建仓, 黄银兵, 等. 基于熵值和模糊贴近度的区域水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 1 - 5.
- [12] 潘兴瑶, 夏军, 李法虎, 等. 基于 GIS 的北方典型区水资源承载力研究——以北京市通州区为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 664 - 671.
- [13] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997, (8): 73 - 79.
- [14] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 西北内陆干旱区水资源承载力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 151 - 159.