

基于可变模糊集理论的珠江三角洲 水资源可再生性评价*

谭圣林¹, 周月英², 梁剑喜^{2,3}, 卓文珊², 卢巧慧², 刘祖发²

- (1. 北京大学 城市人居环境科学与技术实验室, 广东 深圳 518055;
2. 中山大学 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 中山市水务局, 广东 中山 528403)

摘要: 水资源可再生性决定了水资源可持续利用潜力。为评估珠江三角洲日益严峻的水资源压力, 建立了多层次多指标的珠江三角洲水资源可再生性评价指标体系, 构建可变模糊评价模型, 对其水资源可再生性进行评价。结果表明该区域9个城市2012年的水资源可再生性均属II级, 尤以深圳和肇庆最强, 东莞和佛山最弱。其中, 中山市的水资源可再生性主要由其社会可再生性决定, 在2001-2012年间先减弱后增强。对中山及其它城市而言, 加强社会水循环能力是增强水资源可再生性的关键。对比不同方法的评价结果发现, 灰关联方法与模糊综合评价的结果基本相同。可变模糊评价级别一般较前两者低一个等级, 其对隶属度的计算更加精细, 评价结果偏于保守。遗传投影寻踪方法在样本指标差异极大时易产生不合理结果, 不适于珠江三角洲城市间水资源可再生性评价。此外, 在全国标准基础上考虑珠江三角洲的水循环特点建立了“偏严格”评价标准。在该标准下, 珠江三角洲各市的水资源可再生性均为III级。从严评价结果有利于促进该区域水资源可再生能力建设。

关键词: 水资源; 水资源可再生性评价; 可变模糊集; 珠江三角洲

中图分类号: TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2014) 05-0126-08

Water Resources Renewability Assessment for Pearl River Delta Based on Variable Fuzzy Sets Theory

TAN Shenglin¹, ZHOU Yueying², LIANG Jianxi^{2,3}, ZHUO Wenshan², LU Qiaohui², LIU Zufu²

- (1. Key Laboratory for Urban Habitat Environment Science and Technology,
School of Environment and Energy, Peking University, Shenzhen 518055, China;
2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High
Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Zhongshan Water Resources Bureau, Zhongshan 528403, China)

Abstract: Water resources renewability (WRR) determines water resources sustainability. Facing the increasing serious water resources pressure over the Pearl River Delta (PRD), this paper, constructed a multi-hierarchy and multi-index WRR assessment system and developed an assessment model based on variable fuzzy sets theory, by which the WRR level of PRD was assessed. The results show that the WRR levels of nine cities in the PRD all belong to level II, with Shenzhen and Zhaoqing being the strongest while Foshan and Dongguan being the weakest. Particularly, the WRR levels of Zhongshan, one of the nine cities, are determined by its social WRR levels and go down first then up from 2001 to 2012. The assessment results of different methods show that Grey Relation Analysis and Fuzzy Comprehensive Evalu-

* 收稿日期: 2014-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51379223)

作者简介: 谭圣林 (1991年生), 男; 研究方向: 生态水文; 通讯作者: 刘祖发; E-mail: eeslzf@mail.sysu.edu.cn

ation have almost the same results. Variable Fuzzy Evaluation gives results with one level lower than those of the above two methods, since it calculates membership grades more finely and inclines to give lower level assessment. Genetic Projection Pursuit Method produces unreasonable results when sample data vary tremendously, thus making it not applicable for assessment of WRR levels of the nine cities in the PRD. In addition, a stricter standard system was constructed based on national data and data of the PRD. Under that system, the WRR levels of nine cities of the PRD were all assessed as level III. The stricter assessment results are likely to promote measures to increase WRR of the PRD.

Key words: water resources; water resources renewability assessment; variable fuzzy sets theory; Pearl River Delta.

水资源可再生性是指水资源通过天然作用或人工经营能为人类所反复利用的特性^[1]。水资源的可再生性强弱由水资源可再生能力表征,包括自然可再生能力和社会可再生能力^[2]。前者是指通过水资源自然循环,水资源得到不断补充的能力,包括自然循环过程中量的补充与质的自净能力;后者是指通过优化调整水资源社会循环,使水资源得到再生的能力,包括通过工程技术手段的水资源再生和资源化以及水资源的重复利用。

水资源可再生性评价是当前水资源研究的重要方向之一。沈珍瑶等^[3]最先建立了黄河流域水资源可再生性评价指标体系,并对流域内9个行政分区和19个流域二级分区的水资源可再生性进行了评价。随后,包括多目标决策理想区间法^[4]、模糊物元模型^[5]、遗传投影寻踪法^[6]、对立统一定理^[7]、可变模糊集理论^[8]、集对分析方法^[9]、信息熵^[10]、云模型^[11]等多种方法被引入黄河流域的水资源可再生性评价中。严登华等^[12]和彭慧等^[13]还分别研究了东北地区 and 北方沿海地区的水资源可再生性。

以往对北方地区的水资源可再生性研究较多,但对以珠江三角洲为核心的南方沿海地区的研究较为缺乏。珠江三角洲是中国南方的经济轴心,区域人口、经济的高速发展对水资源形成了巨大压力。一方面,咸潮上溯、水污染加剧、水资源时空分布不均且利用率低等导致该区域水资源自然可再生能力不强^[14-15];另一方面,该区域积极开展节水建设、污水处理和海水利用,提高了水资源的社会可再生能力。在此背景下,本文基于珠江三角洲水资源的自然和社会特性,建立了多层次多指标的水资源可再生性综合评价指标体系,针对指标标准为区间数的特点,基于可变模糊集理论^[16]构建了水资

源可再生性可变模糊评价模型,以探明该区域的水资源可再生性状态。同时,分析了不同评价方法在珠江三角洲水资源可再生性评价中的适用性,并建立了一种“偏严格”评价标准,为合理评价珠江三角洲水资源可再生性提供参考。

1 珠江三角洲水资源可再生性评价指标体系

1.1 指标体系的构建

根据珠江三角洲水资源自然循环和社会循环的特点,遵循科学性、系统性、层次性、代表性、可操作性、独立性、区域特殊性、动态性等原则^[13,17],并参考前人成果^[3],构建了多层次多指标的珠江三角洲水资源可再生性评价指标体系(图1)。在自然可再生性分目标层中,选取水文地理特性和生态环境特性两方面的8个指标,主要考虑降雨、产汇流、下垫面和水质等影响水资源自然循环和可利用性的因素。其中,针对珠江三角洲易受咸潮影响的情况,加入了咸潮影响时长指标。在社会可再生性分目标层中,选取需水指标、用水特性和经济社会发展水平等方面的15个指标,主要考虑用水效率、废污水排放与处理、水资源开发利用特性和经济社会发展水平等影响水资源社会循环的因素。其中,针对珠江三角洲这一沿海发达区域在非传统水源(中水、雨水、海水淡化)利用、海水直接利用和环境保护投入上的特殊性,加入了非传统水源占总供水量比例、海水直接利用量和环境保护投资指数等指标。总体而言,该指标体系层次分明,涵盖了影响珠江三角洲资源可再生性的主要自然性因素与社会性因素,可用于合理评价该区域的水资源可再生性。

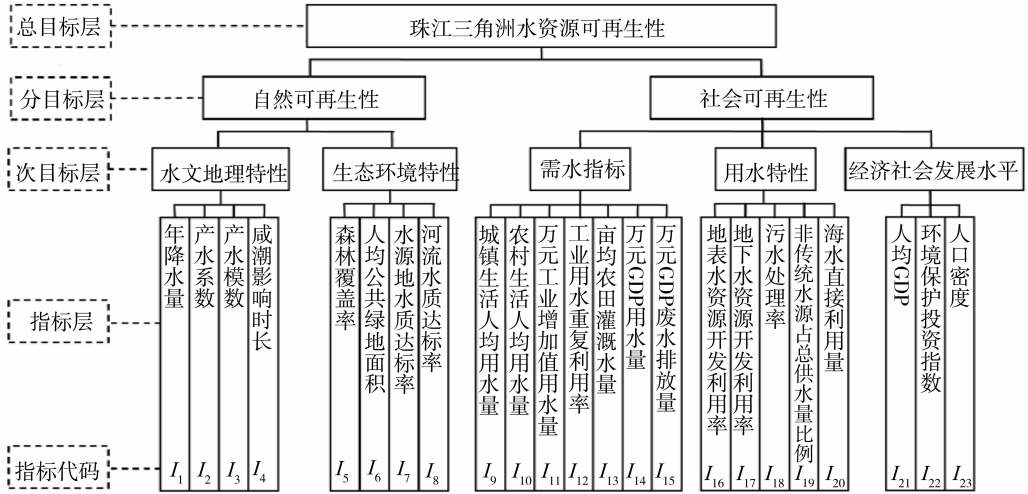


图 1 珠江三角洲水资源可再生性评价指标体系结构图

Fig. 1 The structure of water resources renewability assessment system for Pearl River Delta

1.2 评价标准的建立

评价标准依其采用的数据基准不同而存在差异。采用区域性数据和全国数据可分别建立区域标

准和全国标准。鉴于区域标准仅具有相对意义^[3]，此处采用全国标准，具体参考相关标准^[18-20]和文献^[3,13]最终确定，结果见表 1。

表 1 珠江三角洲水资源可再生性评价标准值 (全国标准)

Table 1 Standard values of the Pearl River Delta water resources renewability assessment (based on national data)

代码	I(极强)	II(较强)	III(中等)	IV(较弱)	V(极弱)
I_1/mm	>1500	1000 ~ 1500	500 ~ 1000	100 ~ 500	< 100
I_2	>0.50	0.40 ~ 0.50	0.30 ~ 0.40	0.20 ~ 0.30	<0.20
I_3	>85	45 ~ 85	20 ~ 45	5 ~ 20	<5
$I_4/\text{月}$	<1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	>4
$I_5/\%$	>60	40 ~ 60	20 ~ 40	10 ~ 20	<10
$I_6/(\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1})$	>12	9 ~ 12	7 ~ 9	5 ~ 7	<5
$I_7/\%$	>90	85 ~ 90	80 ~ 85	75 ~ 80	<75
$I_8/\%$	>90	80 ~ 90	70 ~ 80	60 ~ 70	<60
$I_9/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	<300	300 ~ 400	400 ~ 500	500 ~ 600	>600
$I_{10}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	<100	100 ~ 150	150 ~ 200	200 ~ 250	>250
I_{11}/m^3	<15	15 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 300	>300
$I_{12}/\%$	>90	70 ~ 90	50 ~ 70	30 ~ 50	<30
I_{13}/m^3	<200	200 ~ 400	400 ~ 600	600 ~ 800	>800
I_{14}/m^3	<100	100 ~ 200	200 ~ 300	300 ~ 400	>400
$I_{15}/(\text{m}^3 \cdot 10^{-4} \text{元}^{-1})$	<50	50 ~ 100	100 ~ 200	200 ~ 400	>400
$I_{16}/\%$	<10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	>60
$I_{17}/\%$	<5	5 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	>40
$I_{18}/\%$	>80	60 ~ 80	40 ~ 60	20 ~ 40	<20
$I_{19}/\%$	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
$I_{20}/(10^4 \text{m}^3)$	>20	10 ~ 20	5 ~ 10	2 ~ 5	<2
$I_{21}/(10^4 \text{元})$	>6.40	2.40 ~ 6.40	1.28 ~ 2.40	0.80 ~ 1.28	<0.80
$I_{22}/\%$	>1.70	1.20 ~ 1.70	0.70 ~ 1.20	0.20 ~ 0.70	<0.20
$I_{23}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	<100	100 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 600	>600

2 珠江三角洲水资源可再生性 可变模糊评价模型

2.1 可变模糊集评价模型^[8]

可变模糊集评价方法能够很好地解决评价指标标准为区间形式的评价识别问题，并且选取多组模型参数进行计算，提高了结果的可靠性。其主要步骤如下：

1) 根据标准值和评价区域的实际情况，确定可变集合的吸引域矩阵 $I_{ab} = ([a_{ih}, b_{ih}])$ 和范围域矩阵 $I_{cd} = ([a_{ih}, b_{ih}])$ ；

2) 根据实际评价分级情况确定吸引域中相对隶属度为 1 的点值矩阵 $M = (M_{ih})$ ；

3) 根据公式 (1) - (2) 计算样本 j 指标 i 对于 h 级的差异度 $D_A(x_{ij})_h$ ，再利用公式 (3) 计算得到相对隶属度矩阵 $[U_h] = (\mu_A(x_{ij})_h)$ 。其中， β 为大于 0 的指数，通常可取线性函数 $\beta=1$ 。

$$\begin{cases} D_A(u) = \left(\frac{x-a}{M-a}\right)^\beta; x \in [a, m] \\ D_A(u) = \left(\frac{x-a}{c-a}\right)^\beta; x \in [c, a] \\ D_A(u) = \left(\frac{x-b}{M-b}\right)^\beta; x \in [M, b] \\ D_A(u) = \left(\frac{x-b}{d-b}\right)^\beta; x \in [b, d] \end{cases} \quad (1)$$

$$D_A(u) = -1; x \notin (c, d) \quad (2)$$

$$\mu_A(u) = \frac{1 + D_A(u)}{2} \quad (3)$$

4) 根据 (4) 式计算得到非归一化的综合相对隶属度矩阵 $U' = ({}_j u'_h)$ 。式中： α 为模型优化准则参数， w_i 为指标权重， m 为识别指标数， p 为距离参数， $p=1$ 为海明距离， $p=2$ 为欧氏距离。

$${}_j \mu'_h = \left[1 + \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i (1 - \mu_A(x_{ij})_h)^p]^{a/p}}{\sum_{i=1}^m (w_i \mu_A(x_{ij})_h)^p} \right\}^{a/p} \right]^{-1} \quad (4)$$

5) 根据式 (5) 得到归一化的综合相对隶属度矩阵 $U = ({}_j \mu_k)$ 。根据式 (6) 计算级别特征值 H ，再根据级别评定标准 (表 2) 确定最终的评价等级。

$${}_j u_h = {}_j u'_h / \sum_{h=1}^c {}_j u'_h \quad (5)$$

$$H = (1, 2 \cdots c) \cdot U \quad (6)$$

若单独就水资源自然可再生性或社会可再生性分目标层内的指标进行评价，则可得到研究区域水资源自然可再生性或社会可再生性等级。

表 2 可变模糊评价级别评定标准

Table 2 Assessment standard values based on variable fuzzy sets theory

等级	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
H 的取值范围	<1.5	[1.5, 2.5)	[2.5, 3.5)	[3.5, 4.5)	≥4.5
水资源可再生性	强	较强	中等	较弱	弱

2.2 指标权重的确定

指标权重的确定方法很多，此处采用主成分赋权法^[19]。它利用相对简明易行的数学方法，考虑指标内部间的相互影响来挖掘蕴含的关系与信息，主要步骤如下：

1) 将各样本特征值进行标准化处理，以消除量纲或区域差异；

2) 建立标准化样本集的相关系数矩阵；

3) 由相关系数矩阵的特征向量 $U = (U_{kj})$ 和特征值 $\lambda = (\lambda_k)$ 得到主成分模型 (式 (8) - (9))。其中， k 个主成分， C_k 为第 k 个主成分的方差相对贡献率；

$$F_k = \sum_{j=1}^n U_{kj} Z_j, k = 1, 2 \cdots, n \quad (8)$$

$$C_k = \lambda_k / \sum_{k=1}^n \lambda_k \quad (9)$$

4) 由式 (10) 计算各变量的权重系数 β_j ，归一化得各指标的权重 $w = (w_j)$

$$\beta_j = \sum_{k=1}^n (|U_{kj}| \cdot C_k) \quad (10)$$

$$w_j = \beta_j / \sum_{j=1}^n \beta_j \quad (11)$$

3 结果与分析

本文收集了 2012 年珠江三角洲 9 个城市的相关数据，其它年份的数据较难统一收集。同时，获

取了 2001 - 2012 年中山市的相关数据。据此, 从横纵两个维度对 2012 年珠江三角洲及中山市近 12 年的水资源可再生性进行可变模糊评价, 以探明该区域的水资源可再生性状态及其时空差异。由于仅获得了中山市和珠海市的咸潮影响时长数据, 为统一比较起见, 实际评价未考虑该指标。

2012 年, 珠江三角洲各城市的水资源可再生性、自然可再生性和社会可再生性的级别特征值和对应级别如表 3 所示。从级别来看, 各城市的水资源可再生性均属 II 级, 表明珠江三角洲的水资源可再生性总体较强。进一步对比级别特征值可知, 水资源可再生性最强的两个城市是深圳和肇庆, 最弱的两个城市是东莞和佛山。深圳在各项用水效率、非传统水源利用、人均 GDP 和环境保护投资指数等社会水循环指标方面均明显优于其它城市, 其水资源社会可再生性最强。加之深圳自身水资源条件较好, 自然可再生性居于前列, 促使其水资源可再生性位居第一。肇庆则以其良好的降雨和产汇流条件、高森林覆盖率和优良水质成为水资源自然

可再生性最强的城市。尽管水资源社会可再生性偏弱, 肇庆整体的水资源可再生性仅次于深圳。2012 年东莞降雨偏少, 加上水污染严重, 其水资源自然可再生性最弱, 并导致其整体的水资源可再生性倒数第一。佛山的产水系数和森林覆盖率均明显低于其它城市, 水资源自然可再生性较弱。加之水资源社会可再生性亦较弱, 佛山整体的水资源可再生性仅稍强于东莞。中山和广州的自然水资源条件均较好, 但社会可再生性均为 III 级, 导致中山的水资源可再生性倒数第三, 而广州的水资源可再生性次于深圳和肇庆。其它城市的水资源自然和社会可再生性均位于中间水平。在此, 建议中山、广州、东莞和佛山等城市通过节水建设、用水效率提高、非传统水源利用等社会水循环措施提高水资源社会可再生性。其中, 东莞和佛山还可通过植树造林、扩大绿地、改善水质等措施提高水资源自然可再生性。2001 - 2012 年中山市的水资源可再生性如图 2 所示。

表 3 珠江三角洲各城市水资源可再生性

Table 3 The water resources renewability of nine cities in the Pearl River Delta

城市	水资源可再生性		水资源自然可再生性		水资源社会可再生性	
	级别特征值	级别	级别特征值	级别	级别特征值	级别
广州	2.156	II	1.486	I	2.585	III
深圳	1.949	II	1.763	II	2.068	II
珠海	2.271	II	2.013	II	2.428	II
佛山	2.350	II	2.266	II	2.484	II
江门	2.210	II	2.188	II	2.240	II
肇庆	2.044	II	1.304	I	2.461	II
惠州	2.204	II	1.893	II	2.368	II
东莞	2.485	II	2.519	III	2.460	II
中山	2.272	II	1.752	II	2.630	III

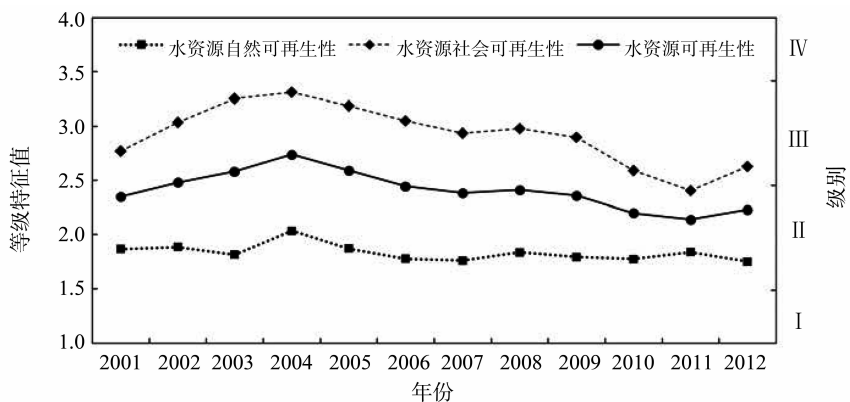


图 2 2001 - 2012 年中山市水资源可再生性水平

Fig. 2 The water resources renewability level of Zhongshan city from 2001 to 2012

从级别来看, 2002 - 2005 年中山市的水资源可再生性属于 III 级, 其余年份均属 II 级。由级别特征值可知, 中山市水资源自然可再生性除 2004 年偏弱外, 其余年份均较为接近; 水资源社会可再生性在 2001 - 2004 年间逐年减弱, 后呈现逐渐增强的趋势。中山市的水资源可再生性与其社会可再生性变化规律相似, 在 2004 年后呈现逐渐增强的趋势。可见, 中山市水资源可再生性强弱主要由社会可再生性决定, 该市水资源可再生性逐渐增强主要缘于各项用水效率、污水处理率和人均 GDP 的逐渐提高, 以及海水的初步利用。由于珠江三角洲的自然性因素短时期内相对稳定, 对中山及其余城市而言, 提高用水效率、加强污水处理、扩大非传统水源利用和提升 GDP 是增强水资源可再生性的关键。

4 讨 论

4.1 不同方法的评价结果对比

将遗传投影寻踪方法^[6]、改进的灰关联方法^[21]以及模糊综合评价法等应用于珠江三角洲水资源可再生性评价^[3,6,8,18]。结果表明(表 4), 对珠江三角洲各市 2012 年的水资源可再生性而言, 可变模糊评价级别均比灰关联评价级别低一个等级; 除江门和惠州外, 模糊综合评价与灰关联评价结果相同; 遗传投影寻踪与其它方法的评价结果差异较大, 该方法下各市的评价级别差异也较大。同样地, 对 2001 - 2012 年中山市水资源可再生性进行多方法评价。可变模糊评价下, 2002 - 2005 年中山市水资源可再生性为 III 级, 其余年份均为 II 级。模糊综合评价与灰关联评价结果完全相同。两者除 2001 年外, 各年份评价级别均比可变模糊

评价级别高一个等级。遗传投影寻踪与可变模糊评价结果较为接近, 两者对 2002 年及 2006 - 2011 年的评价结果相同, 其余年份评价结果相差一个等级。

从方法原理上看, 灰关联方法计算关联度时仅考虑了样本指标与特定级别标准值的差异, 而模糊综合评价在计算隶属度时还考虑了相应级别两侧的标准区间。可变模糊评价在此基础上引入范围和隶属度为 1 的点值矩阵, 隶属度计算更加精细, 对珠江三角洲水资源可再生性评价结果偏于保守。总体而言, 三种方法均可用于珠江三角洲的水资源可再生性评价。遗传投影寻踪方法通过投影变换以最大程度地反映数据差异和挖掘数据信息。该方法单纯从样本数据出发, 不存在固定的权重, 其结果易受数据特性的影响。在珠江三角洲的水资源可再生性评价中, 由于部分指标的城市间差异极大, 造成相应指标的权重偏大, 导致不合理的评价结果。例如, 2012 年各市人口密度差异极大, 深圳的人口密度甚至达肇庆的 20 倍, 导致人口密度指标的权重过大, 使得人口密度较大的深圳、佛山和东莞的水资源可再生性均被评为 V 级。在中山市的评价中, 由于样本间指标差异相对不大, 遗传投影寻踪与其它方法的评价结果相对接近。因此, 遗传投影寻踪方法不适用于珠江三角洲城市间水资源可再生性评价。

4.2 评价标准对结果的影响

评价标准是一切评价工作的基础。虽然采用全国标准可避免区域标准的相对性, 从而获得珠江三角洲在全国基准下的水资源可再生性水平, 但国家标准中的部分指标分级标准并不能合理区分珠江三角洲水资源可再生性水平。例如, 珠江三角洲多年平均降雨量约为 1 800 mm, 高于国家标准中的 I 级下限 (1 500 mm)。但是, 该区域 80% 左右的降水集中在汛期, 且径流迅速入海, 不利于再生利用, 即使年降雨量超过 1 500 mm 也不意味着该指标达到了最优等级。再如, 2012 年珠江三角洲各市镇生活人均用水量均小于全国标准的 I 级上限 (300 L/d)。但该区域人口高度集中, 生活用水需求大, 即使城镇生活人均用水量低于 300 L/d 也不意味着该指标达到了最优等级。为此, 本文建立一种基于全国数据和珠江三角洲数据的“偏严格”标准。具体而言, 针对珠江三角洲各市的数据, 采用 5 级平均分布法确定各指标分级标准, 并与国家标准比较, 按“偏严格”标准二选一, 即对越大越优型指标取大值, 对越小越优型指标取小值, 结果见表 5。

表 4 不同方法下珠江三角洲各市 2012 年水资源可再生性
Table 4 The water resources renewability of nine cities in Pearl River Delta under different methods

城市	可变模糊评价	遗传投影寻踪	灰关联方法	模糊综合评价
广州	II	IV	I	I
深圳	II	V	I	I
珠海	II	III	I	I
佛山	II	V	I	I
江门	II	II	I	II
肇庆	II	II	I	I
惠州	II	II	I	II
东莞	II	V	I	I
中山	II	III	I	I

表 5 珠江三角洲水资源可再生性“偏严格”评价标准

Table 5 Stricter standard values for water resources renewability assessment in the Pearl River Delta

代码	评价标准值				
	I(极强)	II(较强)	III(中等)	IV(较弱)	V(极弱)
I_1/mm	>2100	1900 ~ 2100	1700 ~ 1900	1500 ~ 1700	<1500
I_2	>0.60	0.56 ~ 0.60	0.53 ~ 0.56	0.47 ~ 0.53	<0.47
I_3	>115	100 ~ 115	87 ~ 100	75 ~ 87	<75
$I_4/\text{月}$	>60	45 ~ 60	33 ~ 45	28 ~ 33	<28
$I_5/\%$	<1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	>4
$I_6/(\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1})$	>16	14 ~ 16	11 ~ 14	9 ~ 11	<9
$I_7/\%$	>90	85 ~ 90	80 ~ 85	75 ~ 80	<75
$I_8/\%$	>90	80 ~ 90	70 ~ 80	60 ~ 70	<60
$I_9/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	<180	180 ~ 190	190 ~ 220	220 ~ 250	>250
$I_{10}/(\text{L} \cdot \text{d}^{-1})$	<100	100 ~ 140	135 ~ 150	150 ~ 170	>170
I_{11}/m^3	<15	15 ~ 50	50 ~ 100	100 ~ 180	>180
$I_{12}/\%$	>90	70 ~ 90	50 ~ 70	30 ~ 50	<30
I_{13}/m^3	<200	200 ~ 400	400 ~ 600	600 ~ 800	>800
I_{14}/m^3	<55	55 ~ 100	100 ~ 170	170 ~ 280	>280
$I_{15}/(\text{m}^3 \cdot 10^{-4} \text{元}^{-1})$	<25	25 ~ 35	35 ~ 50	50 ~ 70	>70
$I_{16}/\%$	<10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	>60
$I_{17}/\%$	<0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4	>0.5
$I_{18}/\%$	>85	70 ~ 85	55 ~ 70	20 ~ 55	<20
$I_{19}/\%$	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5
$I_{20}/(10^4 \text{m}^3)$	>20	10 ~ 20	5 ~ 10	2 ~ 5	<2
$I_{21}/(10^4 \text{元})$	>7.50	5.00 ~ 7.5	3.50 ~ 5.00	2.00 ~ 3.5	<2.00
$I_{22}/\%$	>2.6	2.2 ~ 2.6	2.0 ~ 2.2	0.2 ~ 1.7	<2.0
$I_{23}/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	<100	100 ~ 200	200 ~ 400	400 ~ 600	>600

基于“偏严格”标准的水资源可再生性可变模糊评价结果见表6。在“偏严格”标准下,珠江三角洲各市的水资源可再生性均为III级,较国家标准下低一级。同时,大部分城市的水资源自然可再生性和社会可再生性均较国家标准下的相应级别低一级。其中,佛山的水资源自然可再生性变化较

大,由国家标准下的II级变为IV级。九个城市中,只有深圳的水资源社会可再生性仍保持为II级。总体而言,“偏严格”标准在全国标准基础上考虑了珠江三角洲的水循环特点,对水资源可再生性从严评价,有利于促进该区域的水资源可再生能力建设。

表 6 不同标准下的珠江三角洲水资源可再生性

Table 6 The water resources renewability of nine cities in Pearl River Delta under different standard systems

城市	水资源可再生性		自然可再生性		社会可再生性	
	国家标准	偏严格标准	国家标准	偏严格标准	国家标准	偏严格标准
广州	II	III	I	II	III	III
深圳	II	III	II	III	II	II
珠海	II	III	II	III	II	III
佛山	II	III	II	IV	II	III
江门	II	III	II	II	II	III
肇庆	II	III	I	II	II	III
惠州	II	III	II	II	II	III
东莞	II	III	III	IV	II	III
中山	II	III	II	II	III	III

5 结 论

1) 针对珠江三角洲水资源的自然与社会特性, 建立了多层次多指标的水资源可再生性评价指标体系, 构建可变模糊评价模型, 对该区域水资源可再生性进行评价。结果显示, 珠江三角洲九个城市 2012 年的水资源可再生性均为 II 级, 其中自然可再生性位于 I 级和 III 级之间, 社会可再生性多数为 II 级。中山市的水资源可再生性主要由社会可再生性决定, 在 2001 - 2012 年间先减弱后逐渐增强。对中山及其余城市而言, 积极加强社会水循环能力是增强水资源可再生性的关键。

2) 对比不同方法的评价结果, 发现灰关联方法与模糊综合评价的结果基本相同, 可变模糊评价级别一般较前两者低一个等级。三种方法均适用于珠江三角洲的水资源可再生性评价, 但可变模糊模型计算隶属度更为精细, 其评价结果偏于保守。遗传投影寻踪方法在样本指标差异极大时易产生不合理结果, 不适于珠江三角洲城市间水资源可再生性评价。

3) 建立了一种基于全国标准和珠江三角洲数据的“偏严格”标准。在该标准下, 珠江三角洲各市的水资源可再生性均为 III 级, 较国家标准下低一级。采用“偏严格”标准对水资源可再生性从严评价有利于促进该区域的水资源可再生能力建设。

参考文献:

- [1] 杨志峰, 沈珍瑶, 夏星辉, 等. 水资源可再生性基本理论及其在黄河流域的应用[J]. 中国基础科学, 2002(5): 4 - 7.
- [2] 曾维华, 杨志峰, 蒋勇. 水资源可再生能力刍议[J]. 水科学进展, 2001, 12(2): 276 - 279.
- [3] 沈珍瑶, 杨志峰. 黄河流域水资源可再生性评价指标体系与评价方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 188 - 197.
- [4] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶, 等. 水资源可再生能力综合评价的多目标决策理想区间法[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2004, 34: 34 - 41.
- [5] 曾建军, 沈盈佳, 史正涛, 等. 模糊物元模型在流域水资源可再生能力评价中应用[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 319 - 322.
- [6] 杨晓华, 杨志峰, 沈珍瑶等. 水资源可再生能力评价的遗传投影寻踪方法[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 73 - 76.
- [7] 李秋圆, 康艳, 宋松柏. 基于对立统一定理的水资源可再生能力评价模型[J]. 节水灌溉, 2013(9): 43 - 46.
- [8] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4): 431 - 435.
- [9] 潘争伟, 吴开亚, 金菊良, 等. 水资源可再生能力评价的集对分析方法[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 24 - 27.
- [10] 龚艳冰, 房道伟, 张继国. 基于信息熵与 Theil 不等系数的水资源可再生能力综合评价[J]. 水利经济, 2009, 27(3): 9 - 11.
- [11] 贾琦, 段春青, 陈晓楠. 黄河流域水资源可再生能力评价的云模型[J]. 中国人口资源与环境, 2010, 20(9): 48 - 52.
- [12] 严登华, 王浩, 刘权, 等. 中国东北区水资源量天然可再生能力分异及其对土地利用变化的响应[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 94 - 99.
- [13] 彭慧, 周惠成, 李敏等. 北方沿海地区水资源可再生能力的多层次多指标可变模糊评价[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 39 - 45.
- [14] 彭静, 王浩. 珠江三角洲的水文环境变化与经济可持续发展[J]. 水资源保护, 2004, (4): 11 - 14.
- [15] 高卫平, 林炜华. 珠江三角洲水资源问题及可持续利用对策[J]. 水文, 2009, 29(增刊1): 19 - 21.
- [16] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [17] 左其亭, 吴泽宁. 基于风险的黄河流域水资源可再生性评价指标[J]. 人民黄河, 2003, 25(1): 38 - 40.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家发展和改革委员会. 建城[2012] 57号 国家节水型城市考核标准[S]. 2012.
- [19] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 50331 - 2002 城市居民生活用水量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [20] 国家发展和改革委员会, 国家海洋局, 中华人民共和国财政部. 发改环资[2005] 1561号 海水利用专项规划[R]. 2005.
- [21] 沈珍瑶, 谢彤芳. 一种改进的灰关联分析方法及其在水环境质量评价中的应用[J]. 水文, 1997(3): 13 - 15.