

基于可变模糊集理论的水资源开发利用程度综合评价

王蒙^{1,2}, 孙楠³, 王凯燕⁴

(1. 西安理工大学, 陕西省西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048;
2. 山西省水利建设开发中心, 山西 太原 030002; 3. 山西省水利水电科学研究院, 山西 太原 030002;
4. 上海蓝泰信息咨询有限公司, 上海 201508)

摘要: 基于水资源开发利用程度, 针对南通市沿海 5 县、区社会经济的发展对水资源需求与供给量的矛盾问题, 利用可变模糊集理论和层次分析法, 从水资源、社会、经济和生态四方面选定 16 个指标, 构建了 4 层水资源开发利用程度综合评价指标体系, 对研究区水资源开发利用程度现状进行分析评价研究。研究表明, 当地水资源的支撑能力处于中等偏低, 水资源满足发展的供需能力有逐渐变差的趋势; 地区水资源开发利用充分, 压力有超载的趋势, 如果不尽快采取相应的措施, 研究区的水资源将会出现供需紧张的现象。

关键词: 可变模糊集理论; 相对比例函数; 层次分析法

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0852(2016)06-0035-07

1 前言

建立水资源利用程度综合评价体系, 可以客观的评估河流的开发利用现状, 对加强河流的可持续管理和发展以及维护区域流域生态环境建设都具有重要的意义。江苏省南通市的沿海地区具有优良的深水岸线和丰富的土地后备资源, 当地虽然水资源相对比较丰富, 但是存在时空上分布不均匀的现象, 特别是近年来随着南通沿海 5 县区经济发展, 工矿企业不断增加, 产生了地表水资源利用效率低下、工业废排水及城镇生活污水排放量增加、农业面源污染严重等问题, 导致水环境发生了极大变化, 河流水污染情况严重, 水环境质量下降, 社会经济的发展对水资源的需求与供给量的矛盾愈发突出。长此以往, 当地水资源将难以满足人口的迅速增长与经济的高速有序发展。因此, 急需对当地水资源开发利用现状进行评估, 不断提高开发利用水资源的效率和改善水生态环境质量, 进一步保障南通市沿海地区社会经济的高效可持续发展所需要的水资源。

水资源开发利用程度综合评价的方法较多, 以往的研究者利用遗传投影寻踪插值模型、多目标决策—

理想区间法、最佳逼近模型与径向基函数神经网络模型、灰色聚类法等方法对水资源开发利用程度进行了综合评价^[1-3]。由于水资源开发利用程度问题具有复杂性与不确定性, 且兼有自然和社会的复合特性, 致使对其的评价都是可变模糊的概念^[4], 但是对它产生影响的各个评价指标却是可以确定的, 也就是说水资源开发利用程度评价本质上是可变模糊与清晰的混合, 因此运用可变集模糊识别模型进行评价相较其他方法更加适用。本文基于可变模糊集理论的多层综合评价模型, 对南通市沿海地区的水资源开发利用程度进行现状评价, 从水资源、经济、社会、生态四个方面反映了南通市沿海地区水资源的开发利用程度, 为南通市沿海地区的可持续发展计划的制定提供理论参考。

2 水资源开发利用程度评价体系建立

水资源开发利用程度现状评价主要是通过构建与开发利用水资源相关的指标体系, 并建立数学模型将指标综合在一起, 以此来定量评估研究区的水资源开发利用现状所处的级别状态, 为地区的水资源高效可持续利用提供一定的科学依据和决策支持^[5-6]。

水资源开发利用程度指标体系是各类影响水资源的具有相互关系的指标集合,这些指标可以衡量水资源的高效、持续利用水平,对水资源利用程度的评价结果有直接的影响,因此,该指标体系是否完整全面是评价水资源开发利用程度的一个首要前提^[7-8]。水资源开发利用程度指标体系的建立是基于水资源-生态-经济-社会 and 可持续高效发展理论的,因此在构建指标体系时应该遵循以下原则:①可持续发展原则:阐释可持续发展的内涵,明显突出水资源满足社会可持续发展的目标;②可量化性原则:所选指标应该可以量化,以便衡量那些影响水资源的因素对水资源的影响程度;③科学性原则:指标体系应具有一定的科学基础,且能够合理显示出地区水资源与开发利用的关系、主要存在的问题及可能的发展趋势,此外,指标的选取及计算也要有相应的科学支撑;④独立性原则:构建指标体系时,可能会存在一些信息的交叉情况,应选择具有一定的代表性和相对较强独立性的指标;⑤动态性原则:水资源在质量、数量、空间上有着动态变化的特性,应选择能体现水资源动态变化的指标;⑥层次性原则:水资源开发程度现状分析系统包括水资源、经济开发利用、社会发展及环境子系统,而每一个系统都对应多个指标,但最终系统的利用程度状态是用一个指标来描述,因此,选择的指标体系应有层次性且目标明确,易于掌握;⑦导向性原则:应选择能够反映水、人、自然环境之间相互作用的指标,以便决策者调整水资源管理政策时有针对性^[9]。

依据研究区的特点并从指标的实际物理意义出发,分析指标之间的关系,并根据专家的意见对指标筛选,最终选定 16 个指标,如图 1 所示。图 1 是本文用于评价研究区水资源开发利用程度的评价指标体系,包括目标层、准则层、系统状态层、指标(属性)层。

(1)目标层。目标层是衡量是否合理开发利用水资源及水资源能否支撑地区社会与经济的有序发展及生态的良性循环发展的综合指标,由水资源利用程度状态系数的级别特征值来表示,即开发利用潜力系数。

(2)准则层。支撑力系数:包含系统状态层中的水资源子系统;压力系数包含社会、经济、生态,主要反映出社会、经济和生态给水资源开发利用程度带来的压力,即这三个系统的有序发展对于水资源的需求及它们在发展循环过程中对水资源所产生的压力。

(3)系统状态层。将对开发利用水资源有影响的因素分解成水资源子系统、社会子系统、经济子系统与生

态子系统四个子系统,把它们作为实体-关联模型里的实体进行研究。

(4)指标(属性)层。按照研究区的特点和各个子系统对开发利用程度的影响选取指标。

对于水资源子系统,主要是用水量和供水水平两个方面来评判水资源的状况。因此选用人均水资源量、产水模数、人均供水量、地下水供水比例、供水模数、水资源开发率六个指标来评价水资源的现状。

对于社会子系统,主要是按人口及城市化方面对水资源产生的压力来选取的,主要选取了人口密度、人均耕地、城市化率三个指标,是对水资源的开发利用程度的一个间接反映。

对于经济子系统,主要是从经济的整体发展水平和用水效率及用水效益方面来选取的,主要选取了人均 GDP、单方水 GDP、万元 GDP 用水量、农田灌溉水有效利用系数、万元工业增加值用水量五个指标来反映水资源的综合利用情况及经济发展过程中的节水程度。

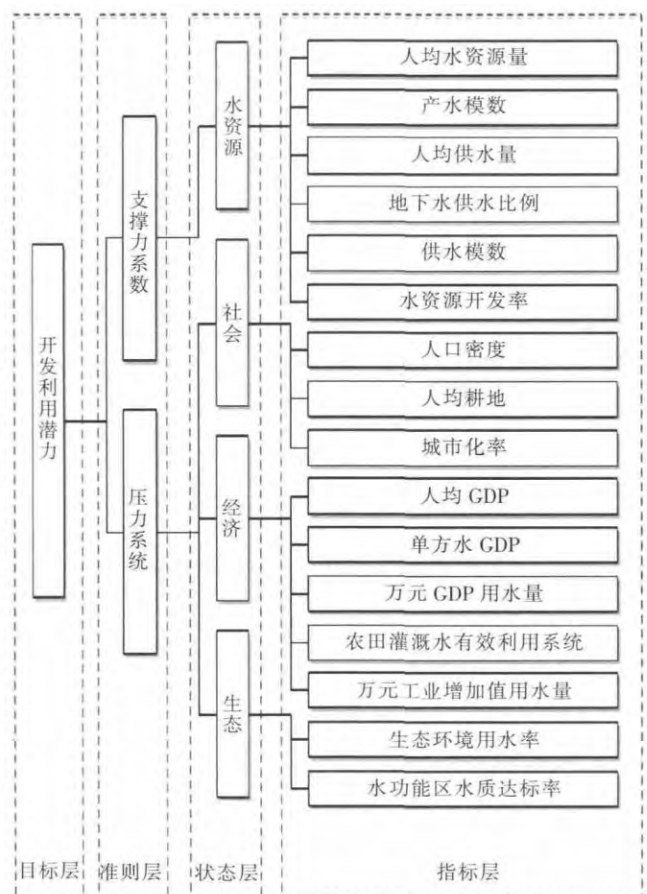


图 1 水资源评价指标体系

Fig.1 The water resources security indicator system

3 基于可变模糊集理论的水资源开发程度评价模型建立

3.1 可变模糊集理论

可变模糊集理论的主要内容包括对立模糊集、相对差异函数、相对比例函数、模糊可变集合与相对隶属函数等^[10-11]。本文在建立模型过程中主要是用相对比例函数模型求得相对隶属度进行评价,推出相对比例函数模型的表达如下所示:

设模糊可变集合 A 中的一个吸引域为 $X_0=[a, b]$,同时, $X=[c, d]$ 为包含 $X_0(X_0 \subset X)$ 的某个边界范围区间(排斥域)。如图2所示。

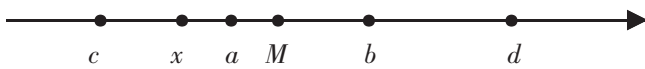


图2 点 x, M 与区间 X_0, X 的位置关系图

Fig.2 The position relationship between points x, M and region X_0, X

假设点 M 是区间 $[a, b]$ 中 $E_A(u)=0$ 的某一个点值,但区间 $[a, b]$ 的中点并不一定是点 M 。取区间 X 上任意一点 x ,如果 x 位于点 M 的左侧区间,那么它所对应的相对比例函数模型为:

$$\begin{cases} E_A(u) = \left(\frac{M-x}{M+x-2a}\right)^\gamma, & x \in [a, M] \\ E_A(u) = \left(\frac{c+x-2a}{c-x}\right)^\gamma, & x \in [c, a] \end{cases} \quad (1)$$

如果 x 位于点 M 的右侧区间,则其所对应的相对比例函数模型为:

$$\begin{cases} E_A(u) = \left(\frac{M-x}{M+x-2b}\right)^\gamma, & x \in [M, b] \\ E_A(u) = \left(\frac{d+x-2b}{d-x}\right)^\gamma, & x \in [b, d] \end{cases} \quad (2)$$

当 x 在区间 $[c, d]$ 之外时,

$$E_A(u) = \infty \quad (3)$$

式(1)和(2)的 γ 是一个非负指数,一般取 $\gamma=1$,也就是说该模型是一个线性函数。按照相对比例函数定义中的描述,式(1)和(2)是满足其所定义的内容的:当 $x=a, x=b$ 时, $E_A(u)=1$;当 $x=M$ 时, $E_A(u)=0$;当 $x=c, x=d$ 时, $E_A(u)=\infty$ 。

由对立模糊集理论中所描述的相对隶属度的特性,即由 $\mu_A(u) + \mu_{A^c}(u) = 1$ 和式(1)可以得到:

$$\mu_{A^c}(u) = 1 / (1 + E_A(u)) \quad (4)$$

3.2 层次分析法

采用层次分析法来确定各个指标的权重。层次分析法是将定性与定量研究结合在一起,用于解决一些具有多目标性的复杂问题,主要是利用决策者的经验来分析判断各指标之间的相对重要程度,以此对各指标的权数进行合理地确定,并通过权数对各方案的优劣次序进行比较,在一些难以用定量方法解决的课题中可以有效地应用^[12-14]。其特点在于通过深入分析复杂的多目标问题的本质特征、影响因素等,用较少的定量信息来数量化这些决策的思维过程,从而为多目标且无结构特性的一些复杂的决策问题提供相对简便的决策方法,可以避免同时给大量指标赋权时带来混乱与失误,大大提升了赋权的准确率与简捷性^[15]。

3.3 基于可变模糊集建立水资源开发程度评价模型

步骤 1:水资源开发利用程度评价体系建设,选择出 m 个评价指标。

步骤 2:利用三标度层次分析法^[12-15]确定评价指标的权重。

步骤 3:建立评价等级标准 $\{s_{kj} | k=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m\}$,对应的评价样本记为 $\{x_j | j=1, 2, \dots, m\}$,其中, s_{kj} 为对于指标 j 、等级 k 的评价标准限值, n 为划分等级的数目。

步骤 4:建立多层综合评价模型。综合评价各个单元的分层如图3所示。

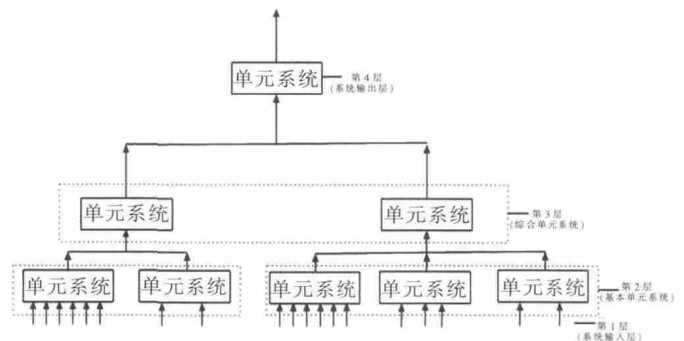


图3 综合评价单元系统分层图

Fig.3 Hierarchical graph of the integrated evaluation unit system

(1)第二层所对应的输入与输出数据

计算第一层单元中各个指标的相对隶属度,作为第二层各个单元的输入,同时用层次分析法计算各个指标的权重,应用可变模糊识别模型对第二层系统中各个单元的综合相对隶属度进行计算,即第二层的输

出。具体计算步骤如下:设研究区共有 n 个样本(分区或评价区域),样本 $j=1,2,3,\dots,n$ 。用 k 表示第二层各单元系统, $k=1,2,\dots,e$ 。单元 k 包含有 m 个指标,即指标 $i=1,2,\dots,m$,则样本 j 中单元系统 k 所对应的指标向量用式(5)表示:

$$x_j=(x_{1j},x_{2j},x_{3j},\dots,x_{mj})^T=(x_{ij}) \quad (5)$$

式中: x_{ij} 为样本 j 中指标 i 的值。

参照划定的指标的评价标准值及区域的实际情况来划分指标所对应的吸引(为主)域矩阵 I_{ab} ,同时确定范围域矩阵 I_{cd} :

$$I_{ab}=(a_{ih},b_{ih}) \quad (6)$$

$$I_{cd}=(c_{ih},d_{ih}) \quad (7)$$

式中: h 为级别, $h=1,2,3,\dots,c$ 。

根据可变集合中 c 个级别的具体情况来推出吸引(为主)域 $[a_{ih},b_{ih}]$ 中对应相对比例度 $E_A(u)=0$ 的点值 M_{ih} 的矩阵

$$M=(M_{ih}) \quad (8)$$

选用相对比例函数模型,依据式(1)、式(2)与式(3)来计算指标的相对比例度,再根据式(4)计算 h 级下的指标 i 所对应的相对隶属度 $\mu(x_{ij})_h$,依次可以得到 h 级下各个指标所对应的相对隶属度向量 $[\mu_h]=(\mu(x_{ij})_h)$,即第一层的各个指标的输出生,利用层次分析法确定第二层单元系统 k 对应指标的权重值,与各个指标的相对隶属度一起利用可变模糊识别模型式(9)计算出这些指标所对应的第二层的某个单元,也就是第二层的输入。可变模糊识别模型的公式如下:

$${}_j\mu'_h=1 \left/ 1 + \left[\frac{\sum_{i=1}^m [\omega_i(1-\mu_A(x_{ij})_h)]^p}{\sum_{i=1}^m (\omega_i\mu_A(x_{ij})_h)^p} \right]^{\alpha/p} \right. \quad (9)$$

式中: ${}_j\mu'_h$ 为综合相对隶属度(没有进行归一化计算); j 为评价区域个数; i 为指标个数; h 为等级; α 为模糊优化准则参数; p 为距离参数; ω_i 为指标的权重; m 为指标数。

参数 α 和 p 通常可以取为:

$$\begin{cases} \alpha=1 \\ p=1 \end{cases}; \begin{cases} \alpha=1 \\ p=2 \end{cases}; \begin{cases} \alpha=2 \\ p=1 \end{cases}; \begin{cases} \alpha=2 \\ p=2 \end{cases}$$

(2) 三层以上单元系统的输入与输出

按照第二层单元系统所对应的输入数据和第一层输出数据的步骤,对三层以上的各个单元系统进行计

算。但要注意不同层次上的各个单元系统所包含的单元系统会有所不同,输入也会有所不同,如第 h 层哪个单元系统支配第 $(h-1)$ 层的哪几个单元系统,则输入数据就是第 $(h-1)$ 层这几个单元系统的输出。依次演算得到的最高一层 h 的输出结果就是综合相对隶属度 ${}_j\mu'_h$ 。

(3) 评价样本 j 所处的级别

按照(1)到(2)求出在各个级别下样本 j 所对应的综合相对隶属度,因为 $h=1,2,3,\dots,c$,还要经过 $(c-1)$ 次的计算,才能计算出各个级别 $1,2,\dots,(h-1),(h+1),\dots$ 下样本 j 所对应的综合相对隶属度,最后得出各个级别下样本 j 所对应的综合相对隶属度组成的向量

$${}_j\mu'=({}_j\mu'_1,{}_j\mu'_2,\dots,{}_j\mu'_c)^T=({}_j\mu'_h) \quad (10)$$

式中: ${}_j\mu'_h$ 是没有进行归一化计算的综合相对隶属度。 ${}_j\mu'_h$ 归一化可得出所求的用于计算的综合相对隶属度向量

$${}_j\mu=({}_j\mu_1,{}_j\mu_2,\dots,{}_j\mu_c)^T=({}_j\mu_h) \quad (11)$$

式中: ${}_j\mu_h={}_j\mu'_h / \sum_{h=1}^c {}_j\mu'_h$

(4) 级别特征值

笔者根据级别特征值对样本进行评判,如式(12)所示。

$$H=(1,2,\dots,c)*U \quad (12)$$

式中: c 为分级数; U 为归一化的综合相对隶属度构成的矩阵; H 为样本的级别值。

根据公式(12)对样本的等级进行计算评价,得出样本 j 所处的等级。

(5) 评价所有样本所处的级别

当含有多个样本 $j=1,2,\dots,n$ 时,按照步骤(1)~(3)计算出各个样本所处的级别。

4 应用实例

应用上述基于可变模糊集的水资源开发利用程度综合评价模型对南通市沿海地区进行水资源利用程度评价。南通市沿海地区包括海安、如东、通州、海门、启东沿海五县(市)的 23 个乡镇,是江苏省沿海地区的重要组成部分,具有优良的深水岸线和丰富的土地后备资源,区域的面积 2 509.7km²、人口总数近 200 万、地

区生产总值近 700 亿元。在南通市沿海地区根据指标体系和研究区特点构建四层可变模糊综合评价模型。首先对所构建的指标体系进行分层, 多层单元系统的具体分层如图 4 所示。

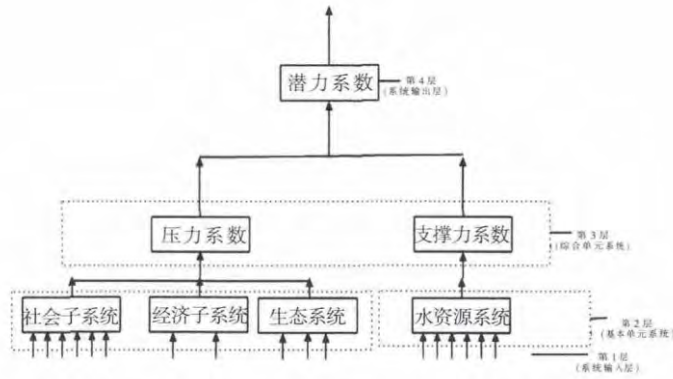


图 4 四层可变模糊综合评价模型的单元系统分层
Fig.4 The unit system stratification of 4-levels variable fuzzy comprehensive appraisal models

各个指标的权重值依据层次分析法来确定。接下来以第二层中水资源子系统所包含的第一层中的 6 个单项指标所对应的权重的计算过程为例进行简要介绍。首先根据标度法, 按照专家经验和地区特性对第一层的 6 个指标两两进行标度。标度结果如表 1 所示。

表 1 标度结果的判断矩阵
Table1 The judgment matrix of scale result

| | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 |
|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| D1 | 1 | 1/3 | 1/2 | 1/2 | 1/3 | 1/4 |
| D2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1/2 |
| D3 | 2 | 1/2 | 1 | 1/2 | 3 | 1/4 |
| D4 | 2 | 1/2 | 2 | 1 | 1/3 | 1/3 |
| D5 | 3 | 1 | 1/3 | 2 | 1 | 1/2 |
| D6 | 4 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 |

对第一层中的这 6 个指标的相对权重进行计算, 归一化, 并对其进行一致性检验, 得到它们的权重值向量 ω 为(0.06, 0.19, 0.14, 0.12, 0.16, 0.33)。同理, 可求得其他各层的各个指标权重值, 各权重值如表 2 所示。

由表 2 可以看出: (1) 经济所占的权重值最大(0.59), 经济开发过程中对水资源的影响比较大, 应在努力发展地区经济的时候, 合理开发利用该地区的水资源, 避免在经济发展中因浪费、污染等对水资源乃至社会、生态产生严重影响; (2) 水资源子系统中, 产水模

表 2 综合评价指标体系及权重
Table2 The comprehensive evaluation index system and weight factor

| 第 3 层 | 权重 | 第 2 层 | 权重 | 第 1 层 | 权重 | | |
|-------|------|-------|------|-------------|------|-----------|------|
| 支撑力系数 | 0.71 | 水资源 | 1 | 人均水资源量 | 0.06 | | |
| | | | | 产水模数 | 0.19 | | |
| | | | | 人均供水量 | 0.14 | | |
| | | | | 地下水供水比例 | 0.12 | | |
| | | | | 供水模数 | 0.16 | | |
| | | | | 水资源开发率 | 0.33 | | |
| 压力系数 | 0.29 | 社会 | 0.25 | 人口密度 | 0.32 | | |
| | | | | 城市化率 | 0.12 | | |
| | | | | 人均耕地 | 0.56 | | |
| | | | | 人均 GDP | 0.11 | | |
| | | | | 单方水 GDP | 0.40 | | |
| | | | | 万元 GDP 用水量 | 0.05 | | |
| | | 经济 | 0.59 | 农田灌溉水有效利用系数 | 0.27 | | |
| | | | | 万元工业增加值用水量 | 0.17 | | |
| | | | | 生态环境用水率 | 0.33 | | |
| | | | | 生态 | 0.16 | 水功能区水质达标率 | 0.67 |

数和水资源开发率所占比重比较大, 南通市是个河网密布的地区, 在水资源开发中应注意节水 and 供水管网的铺设; (3) 社会子系统中, 人均耕地所占比重较大(0.56), 在水资源开发利用中, 应推广农业节水灌溉和注意面源污染的影响; (4) 生态子系统中, 水功能区水质达标率所占比重值相对比较大(0.67), 这与南通市水质型缺水的现状有关。

为了更好地反映研究区的水资源开发利用程度现状, 根据模型计算成果, 本文分别以支撑力系数、压力系数、利用潜力系数三个方面的级别特征值做柱状图及空间分布图来对比 (其中不同的级别特征值分别用数字 1、2、3、4、5 来表示。数字越小, 级别越高, 支撑力越大, 压力就越小, 开发利用潜力越大, 开发利用程度越小)。如图 5~图 8 所示。

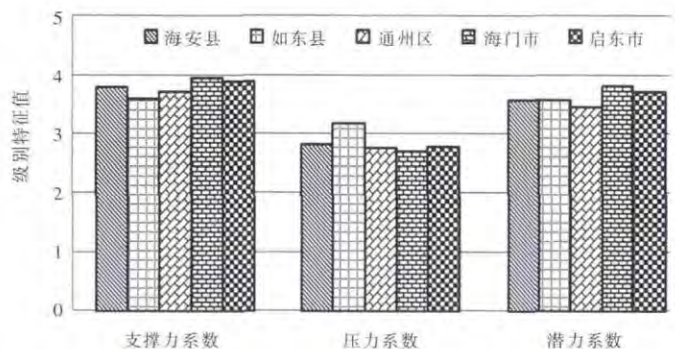


图 5 研究区评价结果对比图
Fig.5 The evaluation result comparison of the research areas



图6 研究区支撑力系数结果图

Fig.6 The distribution of the support force



图7 研究区压力系数结果图

Fig.7 The distribution of the pressure factor

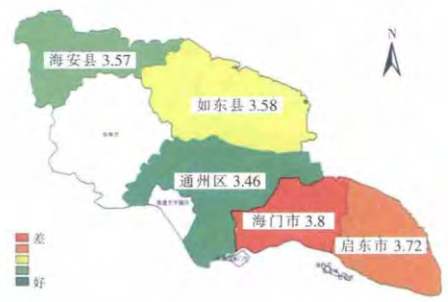


图8 研究区利用潜力系数结果图

Fig.8 The distribution of the potential factor

由图5及图6可以看出,在支撑力方面海门市和启东市最差,支撑力系数为3.94及3.90,其次是海安县和通州区,支撑力系数为3.79及3.71,最后为如东县,支撑力系数3.59。属于中等偏低级别,说明南通市沿海地区水资源的支撑能力处于中等偏低,在一定程度上能够满足该地区内的供给需求,相对有比较大的规模的开发潜力,但该地区的水资源的支撑力系数也在逐渐地接近4级,说明水资源在满足该地区发展方面的供给需求的能力有逐渐变差的趋势,因此,在水资源的开发利用过程中要注意对其进行合理地开发,开源节流,并在此基础上充分地利用海水资源,发挥自身优势,弥补在水资源支撑力上出现的不利情况。

由图5及图7可以看出,在压力系数方面,如东县3.18最大,来自社会、经济、生态方面的压力中等偏高,海安县2.81、启东市2.77、通州区2.78和海门市2.71为中等偏高。说明南通市沿海地区除如东县外对水资源的压力系数在2~3之间,属于中等偏高,即社会、经济、生态方面对水资源的压力处于中等级别,水资源供给该地的发展情况目前相对乐观,但是由于开发利用已经具有一定的规模,压力出现超载的趋势,应注意合理利用,以免水资源可供开发的潜力出现饱和,反过来制约该地区的发展。

由图5及图8可以看出,在利用潜力系数方面,海门市3.8和启东市3.72为中等偏低,其次主要是如东县3.58、海安县3.57、通州区3.46,属于中等。这些显示出由于支撑力方面和压力方面的共同作用,南通市沿海地区的水资源开发利用程度处于3~4级之间,即开发利用整体上已经具有了相当大的规模,虽然仍然具有一定的可供利用潜力,在一定程度上可以满足该地区的现有发展,但是由于水资源的开发利用程度相对比较大,开始出现趋向饱和,需要合理对水资源进行开发利用,否则继续这样发展,可能会出现水资源短缺

的现象,从而对该地区的整体的社会经济的发展产生严重地制约。

5 结论

本文基于可变模糊集理论,对南通市沿海地区水资源开发利用程度进行了综合评价分析,得出主要结论如下:

(1)南通沿海5县市资源的支撑能力处于中等偏低,在一定程度上能够满足该地区内的供给需求,但水资源的支撑力系数在逐渐接近4级,即说明水资源在满足该地区发展方面的供给需求的能力有逐渐变差的趋势。

(2)对水资源的压力系数在2~3之间,属于中等偏高,水资源供给该地的发展相对乐观,开发利用已有一定的规模,压力出现超载的趋势。

(3)由于支撑力和压力对水资源的共同作用,使得研究区的水资源开发利用程度现状等级处于3~4级之间,即研究区对水资源已经有了相当规模程度的开发,该地区的水资源的开发方面虽然仍然具有一定程度的开发潜力,暂时还可以满足该地区的发展,但是由于水资源开发利用的程度相对已经较大,开始出现趋向饱和,如果不尽快采取相应的措施,研究区的水资源将会出现供需紧张的现象。

评价结果从水资源、经济、社会、生态四个方面反映了南通市沿海地区水资源的开发利用程度,可为南通市沿海地区的可持续发展和实施计划的制定提供理论参考。

参考文献:

- [1] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强. 区域水资源开发利用程度综合评价的GPPIM[J]. 自然资源学报, 2003, 18(6): 760-765. (YANG Xiaohua, YANG Zhifeng, LI Jianqiang. A genetic projection pursuit interpolation model for comprehensive assessment of development level of regional water resources [J]. Journal of Natural Resources,

- 2003,18(6):760-765. (in Chinese))
- [2] 杨晓华,杨志峰,沈珍瑶,等. 水资源开发利用程度综合评价的多目标决策-理想区间法 [A]. 第4届流域管理和城市供水国际会议[C]. 2004:109-121. (YANG Xiaohua, YANG Zhifeng, SHEN Zhenyao, et al. Comprehensive evaluation of water resources development and utilization degree of multi-objective decision: the ideal interval method [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Watershed Management and Urban Water Supply[C]. 2004:109-121. (in Chinese))
- [3] 宋松柏,蔡焕杰. 区域水资源可持续利用评价的人工神经网络模型[J]. 农业工程学报, 2004,20(6):89-92.(SONG Songbai, CAI Huanjie. Artificial neural network model for assessing the sustainable utilization of regional water resources [J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(6):89-92. (in Chinese))
- [4] 杨奇勇,李景保,王克林,等. 湖南省水资源开发利用程度综合评价[J]. 水土保持通报, 2007,27(2):150-153.(YANG Qiyong, LI Jingbao, WANG Kelin, et al. Comprehensive evaluation of water resource development on AHP in Hunan Province [J]. Bulletin of Soil And Water Conservation, 2007,27(2):150-153. (in Chinese))
- [5] 朱玉仙, 黄义星, 王丽杰. 水资源可持续开发利用综合评价方法[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002,32(1):55-57.(ZHU Yuxian, HUANG Yixing, WANG Lijie. Synthetically evaluating method of water resources sustainable development and using status [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2002,32(1):55-57. (in Chinese))
- [6] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (CHEN Shouyu. Engineering Fuzzy Set Theory and Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1998. (in Chinese))
- [7] 陈守煜. 工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M].大连:大连理工大学出版社,1998.(CHEN Shouyu. Hydrology Engineering Fuzzy and Water Resources System Analysis Theory and Practice [M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1998. (in Chinese))
- [8] Chen Shouyu. Variable fuzzy sets and its application in comprehensive risk evaluation for flood-control engineering system [J]. Fuzzy Optimization & Decision Making, 2006,5(2):153-162.
- [9] 才庆欣. 南票区水资源状况及开发利用分析[J]. 水利规划与设计, 2014,(9):27-29. (CAI Qingxin. The development and utilization of water resources analysis in Nanpiao [J]. Water Resources Planning and Design, 2014,(9):27-29. (in Chinese))
- [10] 董增川.水资源规划与管理[M].北京: 中国水利水电出版社, 2008. (DONG Zengchuan. Water Resources Programming and Management[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [11] 陈守煜. 水资源系统可变集评价原理与方法[J]. 水利学报, 2013,44(2):134-142.(CHEN Shouyu. Variable sets assessment theory and method of water resource system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013,44(2):134-142. (in Chinese))
- [12] Zhao J, Chen S, Zuo R, et al. Mapping complexity of spatial distribution of faults using fractal and multiracial models: vectoring towards exploration targets[J]. Computers & Geosciences, 2011,37(12):1958-1966.
- [13] 冯耀龙,崔彦朋,田伊池. 基于模糊集理论的区域水安全评价及应用[J]. 中国农村水利水电, 2013,(12):5-8.(FENG Yaolong, CUI Yanpeng, TIAN Yichi, The evaluation and application of the regional water security based on fuzzy set theory[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013,(12):5-8. (in Chinese))
- [14] 陈守煜. 基于可变集的水资源系统可持续发展态势预测原理与方法[J]. 大连理工大学学报, 2013,53(1):108-113. (CHEN Shouyu. Sustainable development trend forecast theory and method of water resources system based on variable sets[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013,53(1):108-113. (in Chinese))
- [15] Li Y, Chen S, Nie X. Fuzzy pattern recognition approach to construction contractor selection[J]. Fuzzy Optimization & Decision Making, 2005,4(2):103-118.

Comprehensive Evaluation of Water Resources Development and Utilization Based on Variable Fuzzy Sets Theory

WANG Meng^{1,2}, SUN Nan³, WANG Kaiyan⁴

(1. State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shanxi Institute of Water Conservancy Construction and Development, Taiyuan 030002, China;

3. Shanxi Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Taiyuan 030002, China;

4. Shanghai Lantai Information Consulting Co., Ltd., Shanghai 201508, China)

Abstract: According to the degree of water resources development and utilization, and contradiction between demand and supply in development of social economy in Nantong, Jiangsu Province, a comprehensive evaluation index system of water resources development and utilization was established with consideration of 4 layer system and 16 indicators in water resources, society, economy and ecology, using the variable fuzzy sets theory and analytic hierarchy process, to analyze the current situation of development and utilization of water resources in the study area. The results show that supporting capacity of the water resources is at medium level or slightly lower, the ability of supply is in a tendency to poor, development and utilization is full and the pressure is bigger. If corresponding measures can not be taken as soon as possible, water resources in the study area will be short for supply.

Key words: variable fuzzy sets theory; relative proportion function; analytic hierarchy process