

柯丽娜, 张一民, 韩旭, 等. 基于 GIS 建模的海水环境质量可变模糊识别评价[J]. 地理科学, 2017, 37(8): 1251-1258. [Ke Lina, Zhang Yimin, Han Xu et al. Variable Fuzzy Recognition Model of Seawater Environmental Quality Based on GIS Modeling Technique. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1251-1258.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.08.016

基于 GIS 建模的海水环境质量可变模糊识别评价

柯丽娜^{1,2}, 张一民¹, 韩旭¹, 王辉^{1,2}, 王权明³, 王利^{1,2}

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 辽宁 大连 116029; 2. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029; 3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要: 基于对立统一与质量互变定理的可变模糊评价方法引入海水水质综合评价, 构建基于对立统一与质量互变定理的海洋环境质量可变模糊评价模型, 首先分析可变模糊评价方法的原理和方法, 然后结合 GIS 栅格数据在表达空间信息方面具有的独特优势, 以栅格数据为基础, 利用地理信息系统空间叠置分析、地理信息系统空间建模等计算, 建立基于多源栅格数据的海水环境可变模糊综合评价模型, 得到莱州湾 2004~2010 年海水环境空间分布图。实践证明, 该模型应用于海水水质综合评价是完全可行的, 为海洋环境领域的多目标综合评价与决策提供了新的思路与方法。

关键词: 可变模糊识别模型; 海水环境质量评价; GIS

中图分类号: P748

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2017)08-1251-08

随着海洋经济产业的迅速发展, 沿海城市对海洋开发利用的程度越来越高, 各种港口泊位、人工岛、防波堤和围填海等涉海、用海工程建设项目越来越多, 排入海中的污染物逐年增加, 营养化趋势日益加剧, 赤潮频繁发生, 使海水养殖业遭受巨大损失, 海水水质已成为人们普遍关注的焦点^[1]。自 20 世纪 50 年代以来, 国内外学者对海洋环境质量进行了深入的研究, 相继提出了单项指数法^[2]、模糊综合评判法^[3,4]、灰色聚类法^[5]、物元分析法^[6]、BP 神经网络法^[7]和支持向量机^[8]等评价方法, 在实际海洋工作中, 模糊综合评价法是应用较多的一种评价方法, 它解决了经典数学模型中只能以“非此即彼”来描述确定性问题的局限, 采用“亦此亦彼”的模糊集合理论来描述非确定性问题, 有效地解决了环境评价中表现出的边界模糊的过渡性质问题^[9,10], 但模糊综合评判法在评价过程中存在一定的不确定性, 且模型难以自我调整与自我验证。实质上海水水质评价是一个具有确定性评价指标和评价标准与具有不确定性评价因子及其含量变化相结合的分析过程, 是一个多因素多水平

耦合作用的复杂分析过程^[11]。陈守煜教授创立的可变模糊评价方法^[12~14]能够将确定性与不确定性作为一个系统进行综合考虑, 并予以辩证分析和数学处理, 能较好地解决包括多目标、非线性、高维数以及包容模糊、灰色等常见不确定的具体问题, 为多指标多级别综合评价提供了新的思路与方法, 在水资源可持续利用、土地承载力评价等方面有所应用^[13~16]。本文将这种方法引入到海水水质综合评价中, 构建基于对立统一与质量互变定理的海水水质可变模糊评价模型, 并结合 GIS 栅格数据在空间信息表达方面适于建立各种复杂数学模型的优势, 以 GIS 多源栅格数据为基础, 对莱州湾 2004~2010 年海水水质状况进行定量评价研究, 验证其应用于水质评价的准确性和可靠性, 以期海水环境质量评价提供一种新的方法和思路。

1 模型与方法

1.1 对立统一与质量互变定理的可变模糊集定理简介

设论域 U 中任意元素 u 的对立模糊概念(事

收稿日期: 2016-09-02; 修订日期: 2017-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(41501594, 41771159)和中国博士后科学基金面上基金(2014M561248)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China(41501594, 41771159), China's Post-doctoral Science Fund(2014M561248).]

作者简介: 柯丽娜(1978-), 副教授, 博士, 主要研究方向为海洋资源开发与利用、遥感及地理信息系统应用研究。E-mail: kekesun-ny@163.com

物、现象)或对立的基本模糊属性以 \underline{A} 与 \underline{A}^c 表示。在连续统区间 $[1,0]$ (对 \underline{A})与 $[0,1]$ (对 \underline{A}^c)的任一点上,对立基本模糊属性的相对隶属度分别为 $\mu_{\underline{A}}(u)$ 、 $\mu_{\underline{A}^c}(u)$,左端点 P_l : $\mu_{\underline{A}}(u)=1$, $\mu_{\underline{A}^c}(u)=0$;右端点 P_r : $\mu_{\underline{A}}(u)=0$, $\mu_{\underline{A}^c}(u)=1$ 。且

$$\mu_{\underline{A}}(u) + \mu_{\underline{A}^c}(u) = 1 \quad (1)$$

式中: $0 \leq \mu_{\underline{A}}(u) \leq 1, 0 \leq \mu_{\underline{A}^c}(u) \leq 1$ 。

在连续统区间左、右端点 P_l 与 P_r 之间必存在确定的中介点 P_m ,该点的对立模糊概念(事物、现象)或对立基本模糊属性的相对隶属度相等^[12]:

$$\mu_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}^c}(u) = 0.5 \quad (2)$$

P_m 为对立统一矛盾性质的转化点,则在 $P_l \rightarrow P_m$ 区间: $\mu_{\underline{A}}(u) > \mu_{\underline{A}^c}(u)$;在 $P_m \rightarrow P_r$ 区间, $\mu_{\underline{A}}(u) < \mu_{\underline{A}^c}(u)$,变点,即 $\mu_{\underline{A}}(u) = \mu_{\underline{A}^c}(u) = 0.5$ (图1)。

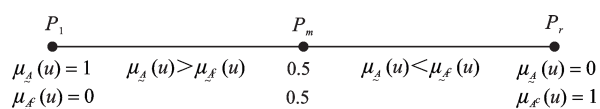


图1 对立模糊集示意图

Fig.1 Schematic diagram of opposite fuzzy sets

1.2 基于可变模糊集定理的海水水质模糊评价模型

在可变模糊集理论的基础上^[12~14],海水水质依据 m 个指标,按 c 个级别进行识别,其最终结果以级别特征值形式 h ($h=1,2,3,\dots,c$)表示,则建立的海水水质样本特征值矩阵与指标标准特征值矩阵分别为:

$$X = (x_{ij}) \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

$$Y = (y_{ij}) \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,3,\dots,c \quad (4)$$

为统一指标样本特征值、指标标准特征值矩阵的量纲,需对其进行规格化处理,处理公式为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} < y_{ic} \text{ (越小越优型指标) 或 } x_{ij} > y_{ic} \text{ (越大越优型指标)} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{il} - y_{ic}}, & y_{il} > x_{ij} > y_{ic} \text{ 或 } y_{il} < x_{ij} < y_{ic} \\ 1, & x_{ij} < y_{il} \text{ (越小越优型指标) 或 } x_{ij} > y_{il} \text{ (越大越优型指标)} \end{cases} \quad (5)$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0, & y_{ih} < y_{ic} \text{ (越小越优型指标) 或 } y_{ih} > y_{ic} \text{ (越大越优型指标)} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{il} - y_{ic}}, & y_{il} > y_{ih} > y_{ic} \text{ 或 } y_{il} < y_{ih} < y_{ic} \\ 1, & y_{ih} \geq y_{il} \text{ (越大越优型指标) 或 } y_{ih} < y_{il} \text{ (越小越优型指标)} \end{cases} \quad (6)$$

式中: r_{ij} 为样本 j 指标 i 特征值对于模糊概念 \underline{A} 的相对隶属度,即规格化指数; y_{il}, y_{ic}, y_{ih} 为指标 i 的1级、 c 级、 h 级的标准特征值; s_{ih} 为指标 i 对于级别 h 的标准特征值 y_{ih} 的规格化指数。

利用可变模糊识别公式(7):

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & 1 \leq h < a_j \text{ 或 } c \geq h > b_j \\ \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_i | r_{ij} - s_{ih}|]^p}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \sum_{i=1}^m [w_i | r_{ij} - s_{ik}|]^p} \right\}^{\frac{\alpha}{p}-1}, & a_j < h < b_j \end{cases} \quad (7)$$

式中: a_j 为决策 j 的级别下限值; b_j 为决策 j 的级别上限值。 $\alpha=1$ 或 $2, p=1$ 或 $2, w_i$ 为各项指标的权重。 α 与 p 的不同和组合针对不同的情况,当评价对象间表现为弱非线性时,采用组合 $\alpha=1, p=1$;表现为一般线性相关时,采用组合 $\alpha=1, p=2$ 或组合 $\alpha=2, p=1$;表现为强线性相关时,采用公式 $\alpha=2, p=2$;当非线性程度难以确定时,采用4个组合的平均值。

则建立的海水水质样本集对评价标准的最优相对隶属度矩阵为:

$$U = (u_{hj}), h=1,2,3,\dots,c; j=1,2,3,\dots,n \quad (8)$$

再根据文献[12~14]提出的级别特征值模型,求出待评价样本集的级别特征值:

$$H = (1, 2, \dots, c) \times U_{hj} \quad (9)$$

2 基于GIS栅格数据的可变模糊综合评价模型

GIS作为一种交互式的、可视化的决策支持工具,以地理空间信息为基础,方便建立各种复杂数学模型,能够提供对各种自然社会现象及其系统过程的模拟,及多种空间的、动态的地理信息的表达。

2.1 GIS栅格数据生成

文中GIS栅格数据生成及可变模糊识别模型是在ArcGIS 10.2平台上借助于地统计分析模块、Model Builder模块及栅格计算器工具实现的^[17~21]。利用ArcGIS地统计分析模块,首先考察水质采样点指标数据的空间分布,对其指标数

据进行对数变换、幂变换及反正弦变换等使指标数据成正态分布,并根据海水水质采样点间距离及其半方差情况确定合理的步长,进一步对水质采样数据进行分组,计算各组样本点的平均距离及平均半方差,按照最小二乘法拟合求取其最佳半方差理论模型,进一步计算水质预测点的最佳估计值,并采用交叉验证法检验所拟合模型的合理性及预测的精度,最后得到经过插值后的海水水质评价指标集栅格数据 $\{X_1, \dots, X_m\}$ 。

2.2 基于GIS栅格的可变模糊综合评价模型

利用 ArcGIS 的 Model Builder 模块及栅格计算器进行级别特征值的计算,为避免最优相对隶属度矩阵计算时数学公式太过复杂,容易引入计算误差,在这里引入变量 f_{hj} 、 d_{hj} 、 d_{sum} ,公式为:

$$f_{hj} = \sum_{i=1}^5 \left[w_i |r_{ij} - s_{ih}| \right]^p, h=1,2,3,4,5, j=1 \quad (10)$$

$$d_{hj} = f_{hj}^{\frac{1}{p}}, h=1,2,3,4,5, j=1 \quad (11)$$

$$d_{sum} = \sum_{k=a_j}^{b_j} d_{hj}^{-\alpha} \quad (12)$$

则可变模糊识别模型公式(7)可转化为:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0, & h_{ij} < a_j \text{ 或 } h_{ij} > b_j \\ (d_{hj}^{\alpha} \times d_{sum})^{-1}, & d_{hj} \neq 0, a_j < h_{ij} < b_j \\ 1, & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

在 Model Builder 中建立可变模糊识别模型的具体流程图见图2。

3 实例分析

3.1 研究区概况

莱州湾位于渤海南部,山东半岛西北部,36°

25'N~37°47'N, 118°17'E~120°44'E, 黄河、小清河、潍河和虞河等众多河流汇入湾内,是渤海三大海湾之一,西起黄河口,东至龙口市岬姆岛,宽96 km,海岸线长319.06 km,面积6 966 km²,水深在20 m以内,沿海水深不足10 m,滩涂长,水交换差。莱州湾入海径流丰富,营养盐充足,是传统的多种鱼、虾、蟹的产卵场和索饵地,因此这里一直是中国北方重要的海产品捕捞地。但随着沿岸经济开发力度的加大、注入莱州湾河流污染物浓度的增加以及沿岸地区污染物的排放,莱州湾的污染状况,特别是河口及近岸区域的水质污染日益严重^[22-25]。

3.2 评价指标及其标准确定

结合莱州湾海水污染现状^[22-25],同时与国家海洋公报评价相结合,这里选择主要评价因子: COD(化学耗氧量)、DO(溶解氧)、无机氮、活性磷酸盐、油类5个项目,水质标准采用《中华人民共和国海水水质标准》(GB 3097-1997),具体评价标准参见表1。

由表1可得到5×5阶海水评价指标标准特征值矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 6 & 5 & 4 & 3 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.5 \\ 0 & 0.15 & 0.03 & 0.03 & 0.45 \\ 0 & 0.05 & 0.3 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix} = y_{ih} \quad (14)$$

利用公式(6)可以得到海水评价指标标准特征值相对于级别 h 的指标标准特征值隶属度矩阵 S :

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0.863 & 0.67 & 0.5 & 0 \\ 1 & 0.6 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 1 & 0.67 & 0.33 & 0.33 & 0 \\ 1 & 0.9 & 0.4 & 0 & 0 \end{bmatrix} = s_{ih} \quad (15)$$

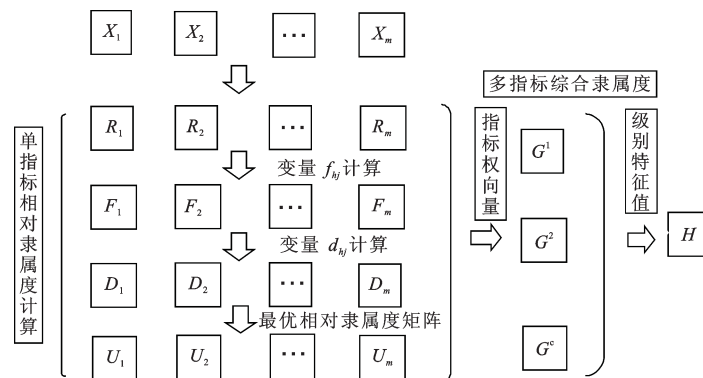


图2 GIS多源栅格数据的可变模糊识别模型

Fig.2 Variable fuzzy recognition model based on GIS multi-source raster data

表1 海水水质评价指标标准值(mg/L)

Table 1 The standard values of the seawater quality evaluation index (mg/L)

评价指标	指标标准值				
	第一类	第二类	第三类	第四类	劣四类
化学耗氧量 $x_1 \leq$	2	3	4	5	>5
溶解氧 $x_2 >$	6	5	4	3	≤ 3
无机氮 $x_3 \leq$	0.2	0.3	0.4	0.5	>0.5
活性磷酸盐(以P计) $x_4 \leq$	0.015	0.030	0.030	0.045	>0.045
石油类 $x_5 \leq$	0.05	0.05	0.30	0.50	>0.50

3.3 基于GIS多源栅格的莱州湾海水环境可变模糊识别模型实现

本文利用了莱州湾 2004~2010 年 7~9 月的 20 个监测点的水质监测数据(监测点位置见图 3), 所有样品均按《海洋监测规范》规定的方法采集、处理、保存、运输和分析。由 3.2 节可知海水环境评价指标为 $i=5$ [COD、DO、无机氮、活性磷酸盐、油类 5 个指标], 根据莱州湾海水水质监测数据的空间分布情况, 以及文献[20,21]的研究结果, 本文采用普通克里金插值法进行水质指标的空间插值, 得到评价指标栅格图像 $X=\{grid_1, grid_2, \dots, grid_i\}$, 再利用公式(5)对栅格图像进行可变模糊栅格计算, 确定其单指标隶属函数, 栅格的属性数就是其单指标隶属度值, 则所有栅格图像按照可变模糊识别模型构成 j 个隶属函数的栅格图像, 即 $grid_i$ 将生成 $grid_{i1}, grid_{i2}, \dots, grid_{ij}$, 本例中 $j=1$ ($h=1, 2, 3, 3, 5$ 级)。再结合 ArcGIS 空间叠置分析、ModelBuilder、矢量栅格转换、栅格计算等功能建立基于多源栅格数据的海水环境可变模糊综合评价模型, 则评价对象对级别 h 的综合相对隶属度为:

$$v_h(u) = \begin{bmatrix} w_1 \cdot G_1^1 & w_2 \cdot G_2^1 & \dots & w_m \cdot G_m^1 \\ w_1 \cdot G_1^2 & w_2 \cdot G_2^2 & \dots & w_m \cdot G_m^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 \cdot G_1^c & w_2 \cdot G_2^c & \dots & w_m \cdot G_m^c \end{bmatrix}^p$$

$$= \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m (w_i G_i^1)^p \\ \sum_{i=1}^m (w_i G_i^2)^p \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m (w_i G_i^c)^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1(G^1) \\ v_2(G^2) \\ \dots \\ v_c(G^c) \end{bmatrix} \quad (16)$$

这里需要说明的是, 由于 GIS 平台中的栅格叠置分析功能不能直接实现数据矩阵与图像矩阵

之间的合成运算^[27-29], 因此需要按照可变模糊识别模型公式对公式展开进行栅格叠置分析运算(图 2), 分别求得 $a=1, p=1; a=1, p=2; a=2, p=1; a=2, p=2$ 这 4 种情况下的级别特征值向量栅格矩阵, 再对其进行叠加求取平均值栅格向量矩阵, 从而得到莱州湾 2004~2010 年海水水质级别特征空间分布(图 3)。

文中 5 个指标的权重见参考文献[12~14], 运用经验知识经考虑后, 确定各指标重要性的排序度依次为: 化学耗氧量、无机氮、溶解氧、石油类、活性磷酸盐, 同时认为溶解氧和化学耗氧一样重要, 与无机氮和石油类处于略为重要, 与活性磷酸盐相比处于较为重要, 从而得到经归一化处理的各指标权向量为: $w=(0.26, 0.26, 0.17, 0.14, 0.1)$ 。

ArcGIS 栅格计算器计算各变量的具体语法为: 指标相对隶属度矩阵 R 的计算语法为:

$Con(" \% x_i \% ">y_{is}, 0, Con(" \% x_i \% "<y_{i1}, 1, (" \% x_i \% "-y_{is})/(y_{i1}-y_{is})))$, 其中 $i=1, 2, 3, 4, 5$ 。

变量 f_{hj} 的计算语法为:

$Power(0.26*Abs(" \% r_{11} \% "-s_{1h})+0.26*Abs(" \% r_{21} \% "-s_{2h})+0.17*Abs(" \% r_{31} \% "-s_{3h})+0.14*Abs(" \% r_{41} \% "-s_{4h})+0.17*Abs(" \% r_{51} \% "-s_{5h}), p)$

变量 d_{hj} 的计算语法为:

$Power(" \% f_{hj} \% ", 1/p)$, 其中 $h=1, 2, 3, 4, 5$ 。

变量 d_{sum} 的计算语法为:

$Power(" \% d_{11} \% ", -\alpha)+Power(" \% d_{21} \% ", -\alpha)+Power(" \% d_{31} \% ", -\alpha)+Power(" \% d_{41} \% ", -\alpha)+Power(" \% d_{51} \% ", -\alpha)$, 其中 $\alpha=1$ 或 2。

最优相对隶属度矩阵 u_{hj} 的计算语法为:

$Con(" \% d_{hj} \% " == 0, 1, Power(Power(" \% d_{hj} \% ", \alpha) * " \% d_{sum} \% ", -1))$

级别特征值 H 的计算语法为:

$1*" \% u_{11} \% "+2*" \% u_{21} \% "+3*" \% u_{31} \% "+4*" \% u_{41} \% "+5*" \% u_{51} \% "$

上式中 $Power$ 函数为计算数据的 n 次方, Abs 函数为计算函数的绝对值, Con 函数为判断函数, 具体的语法规则为 $Con(<condition>, <true_expression>, <false_expression>)$ 。

连续多年的监测结果表明, 莱州湾水体水质整体较差, 评价综合等级值在 1.60~3.32 之间, 各年份水质综合等级呈现由西部及西南部向东北方向递减, 并呈扇型逐渐向外扩散的趋势; 另一方面, 在莱州湾口中部海域有一小范围的高值区, 水质

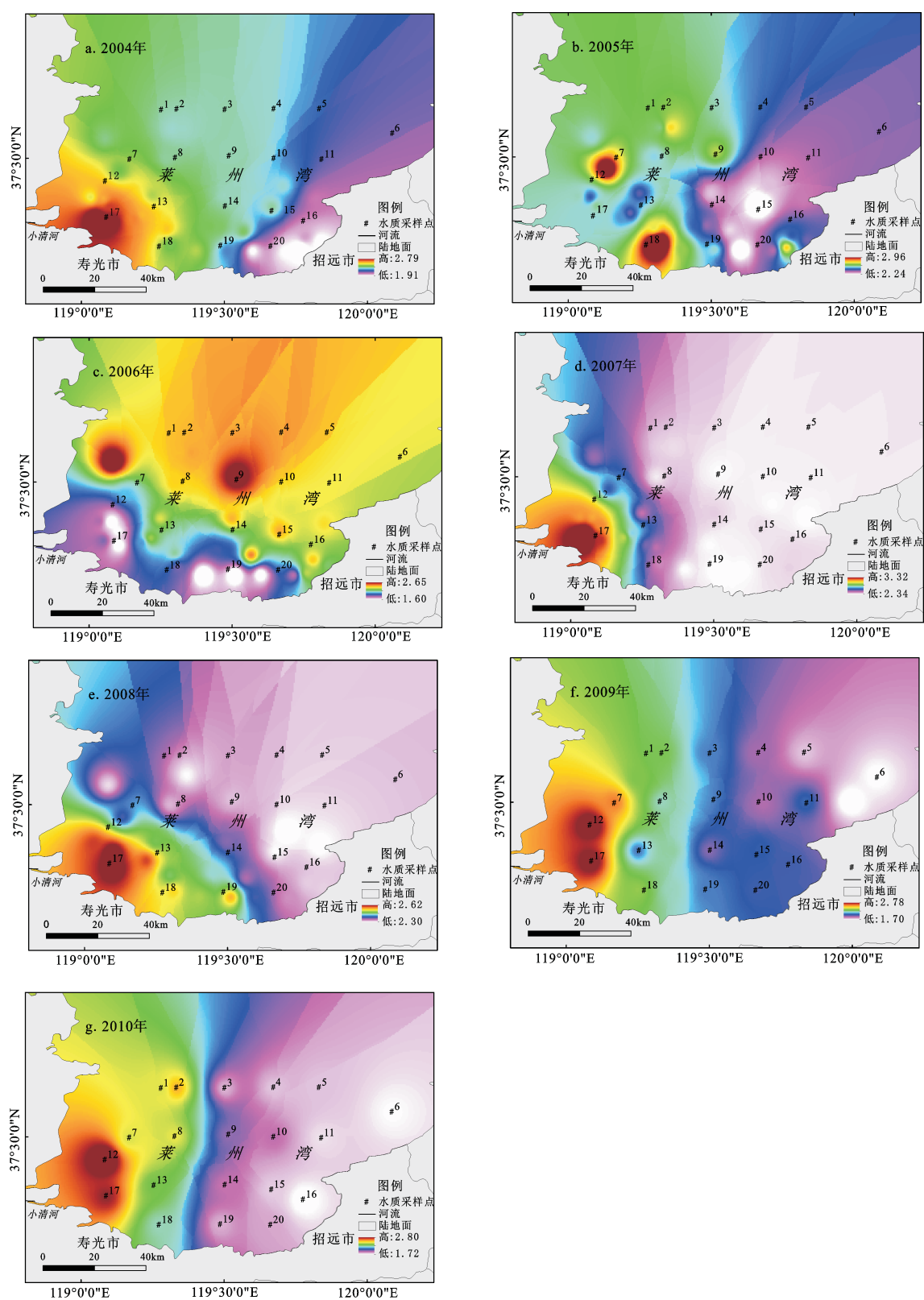


图3 2004~2010年莱州湾海水水质等级空间分布

Fig.3 The spatial distribution of seawater environmental quality in Laizhou Bay from 2004 to 2010

较差,并向四周逐渐递减分布,在空间分布图上表现为明显的突起,究其原因,主要为该区域有机物矿化分解再生使部分采样点活性磷酸盐含量较高,从而导致个别采样点水质综合等级较高。

实践证明,将可变模糊评价模型方法与GIS建模方法结合起来,应用到海水水质评价中是完全可行的,该方法以各指标生成的栅格数据作为基本研究对象,借助于GIS栅格叠置分析、空间建模功能,实现了可变模糊评价数学模型分析评价复杂模糊的自然现象及系统过程的可能性,克服了可变模糊评价数学模型仅应用于评价分析属性数据方面的不足,实现了评价结果的GIS可视化表达,且该模型不需要进行复杂的编程,容易实现、修改,为可变模糊模型应用到类似的综合评价与决策领域提供了新的思路与方法,扩展了可变模糊模型在类似的多目标、多指标评价领域应用的广度和深度。

4 结论与讨论

4.1 结论

可变模糊评价数学模型已经在环境、土地资源、地质灾害等众多领域得到广泛的应用,但目前该理论方法还仅限于借助常规的数学工具,作为评价单元的属性数据,且无法直接给出评价结果的可视化表达。本文将可变模糊评价模型与GIS建模方法结合起来,建立基于GIS建模的海水环境质量可变模糊评价方法,该方法模型以多指标栅格数据为基本研究对象,确定空间中各指标数据相对于各等级级别的隶属函数,从而将隶属函数的概念扩展到二维平面上,实现了水质评价结果的可视化表达,该方法既容易构建又容易修改,而且不需要进行复杂的编程,为解决类似的多指标、多源栅格数据的可变模糊评价与决策提供了新的思路与方法。

4.2 讨论

1) 可变模糊识别模型目前还很少和空间数据结合起来,实现对复杂模糊的现象及系统的模拟及表达,本文建立的基于GIS建模的可变模糊综合评价模型,有望拓宽可变模糊模型在相关的多指标、多级别宏观评价领域应用的广度和深度,可以推广到相关的区域生态环境质量、水资源可持续利用、土地承载力评价、水环境评价、灾害风险评价等领域的评价及结果的表达。

2) 基于GIS建模的可变模糊识别模型以栅格为基本研究对象,其计算结果的精度表达与栅格单元的大小有明显关系:栅格单元过大,则分析结果精确度降低;单元过小,则会产生大量冗余数据、计算速度降低,因此在应用过程中应根据实际情况确定合理的栅格单元大小。

3) 基于GIS建模的海水环境质量可变模糊识别评价模型,从隶属度的计算到隶属层的形成都较大限度地避免了人为因素的介入,但是应该指出,对于可变模糊评价模型来说,权重设置的合理性仍然是决定评价结果可靠性的一个重要因素,如何更合理地进行可变模糊综合评价模型权重的设置以及根据级别特征值进行海水水质级别的划分是可变模糊评价模型应用于海水水质评价应用需要进一步完善的部分。

参考文献(References):

- [1] 孙才志, 于广华, 王泽宇, 等. 环渤海地区海域承载力测度与时空分异分析[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 513-521. [Sun Cai-zhi, Yu Guanghua, Wang Zeyu et al. Marine carrying capacity assessment and spatio-temporal analysis in the Bohai Sea Ring Area. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(5): 513-521.]
- [2] Noan Fierer, Jennifer L. morse, Sean T. berthrong et al. Environmental controls on the landscape-scale biogeography of stream bacterial communities[J]. *Ecology*, 2007, 88(9): 2162-2173.
- [3] Li Tao, Cai Shuming, Yang Handong et al. Fuzzy comprehensive-quantifying assessment in analysis of water quality: a case study in Lake Honghu, China[J]. *Environmental Engineering Science*, 2009, 26(2): 451-458.
- [4] 章斌, 宋献方. 运用数理统计和模糊数学评价秦皇岛洋戴河平原的海水入侵程度[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 342-348. [Zhang Bin, Song Xianfang. Seawater intrusion degree evaluation based on mathematical statistics and fuzzy mathematics in Qinhuangdao Yangdai River Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 342-348.]
- [5] 赵彦飞, 邹志红, 晓静. 改进的灰色相似关联度模型在水质评价中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(12): 154-159. [Zhao Yanfei, Zou Zhihong, Xiao Jing. Improved gray correlation similar model in water quality assessment. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015, 45(12): 154-159.]
- [6] 安岩, 邹志红. 基于改进物元分析和对应分析的水质评价研究[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(13): 160-166. [An Yan, Zou Zhihong. Study on modified water quality assessment based on matter element and correspondence analysis. *Mathematics in Practice and Theory*, 2014, 44(13): 160-166.]
- [7] Wu J, Guo Z H, Lu H Y et al. A case study on a hybrid wind speed forecasting method using BP neural network. *Knowledge-Based Systems*, 2011, 24, 1048-1056.

- [8] 张颖,李梅,高倩倩.基于ELMR-SVMR的海水水质预警模型研究[J].大连理工大学学报,2016,56(2):185-192.[Zhang Ying, Li Mei, Gao Qianqian. Research on forewarning model of seawater quality based on ELMR-SVMR. Journal of Dalian University of Technology, 2016, 56(2): 185-192.]
- [9] 刘新颜,曹晓仪,董治宝.基于T-S模糊神经网络模型的榆林市土壤风蚀危险度评价[J].地理科学,2013,33(6):741-747.[Liu Xinyan, Cao Xiaoyi, Dong Zhibao. Soil wind erosion risk assessment in Yulin City using T-S fuzzy neural network model. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(6): 741-747.]
- [10] 舒帮荣,黄琪,刘友兆,等.基于变权的城镇用地扩展生态适宜性空间模糊评价——以江苏省太仓市为例[J].自然资源学报,2012,27(3):402-412.[Shu Bangrong, Huang Qi, Liu Youzhao et al. Spatial fuzzy assessment of ecological suitability for urban land expansion based on variable weights:a case study of Taicang. Journal of Natural Resources, 2012, 27(3): 402-412.]
- [11] 柯丽娜,王权明,孙新国,等.基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价研究[J].生态学报,2013,33(6):1889-1899.[Ke Lina, Wang Quanming, Sun Xinguo et al. The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1889-1899.]
- [12] 陈守煜.可变模糊集理论与模型及其应用[M].大连:大连理工大学出版社,2009.[Chen Shouyu. Theory and model of variable fuzzy Sets and its application. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009.]
- [13] 陈守煜.可变集—可变模糊集的发展及其在水资源系统中的应用[J].数学的实践与认识,2012,42(1):92-101.[Chen Shouyu. Variable sets: the development of variable fuzzy sets and the applications in assessment of water resource. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(1): 92-101.]
- [14] 陈守煜,王子茹.基于对立统一与质量互变定理的水资源系统可变模糊评价新方法[J].水利学报,2011,42(3):253-261.[Chen Shouyu, Wang ziru. Water resource systems'variable fuzzy sets evaluation new method based on the opposites unity and quantity-quality exchange theorem. Shuili Xuebao, 2011, 42(3): 253-261.]
- [15] 郑德凤,臧正,孙才志,等.基于水资源耦合价值的绿色水价模型及其应用——以下辽河平原为例[J].自然资源学报,2014,29(7):1235-1245.[Zheng Defeng, Zang Zheng, Sun Cai-zhi et al. Model of green water price based on coupling values of water resources and its application in lower Liaohe River Plain. Journal of Natural Resources, 2014, 29(7): 1235-1245.]
- [16] 于广华,孙才志.环渤海沿海地区土地承载力时空分异特征[J].生态学报,2015,35(14):4860-4870.[Yu Guanghua, Sun Caizhi. Land carrying capacity spatiotemporal differentiation in the Bohai Sea Coastal Areas. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4860-4870.]
- [17] 李喆,李永树,卓云.一种基于GIS的预报降雨栅格动态生成方法初探[J].地理科学,2014,36(4):757-761.[Li Zhe, Li Yongshu, Zhuo Yun. A grid dynamically generated method and preliminary inquiry for rainfall forecast based on GIS. Scientia Geographica Sinica, 2014, 36(4): 757-761.]
- [18] 白燕,廖顺宝,孙九林.栅格化属性精度损失的评估方法及其尺度效应分析——以四川省1:25万土地覆被数据为例[J].地理学报,2011,66(5):709-717.[Bai Yan, Liao Shunbao, Sun Jiu-lin. Evaluating methods and scale effects of attribute information loss in rasterization:a case study of 1:250 000 land cover data of Sichuan. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 709-717.]
- [19] 蔡青,曾光明,石林,等.基于栅格数据和图论算法的生态廊道识别[J].地理研究,2012,31(8):1523-1534.[Cai Qing, Zeng Guangming, Dan Lin et al. Identifying ecological corridors using shortest path algorithm based on raster data. Geographical Research, 2012, 31(8): 1523-1534.]
- [20] 汤国安,杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M].第2版.北京:科学出版社,2012.[Tang Guoan, Yang Xin. Arc-GIS experimental course for spatial analysis. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.]
- [21] 石志华,刘梦云,常庆瑞,等.基于优化参数的陕西省气温、降水栅格化方法分析[J].自然资源学报,2015,30(7):1141-1152.[Shi Zhihua, Liu Mengyun, Chang Qingrui et al. Comparison of temperature and precipitation rasterization methods based on optimized parameters in Shaanxi Province. Journal of Natural Resources, 2015, 30(7): 1141-1152.]
- [22] 张雪,张龙军,侯中里,等.1980-2008年莱州湾主要污染物的时空变化[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2012,42(11):91-98.[Zhang Xue, Zhang Longjun, Hou Zhongli et al. Spatio-Temporal variability of principal pollutants in laizhou bay from 1980 to 2008. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(11): 91-98.]
- [23] 杨建强,朱永贵,宋文鹏,等.基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价[J].生态学报,2014,34(1):105-114.[Yang Jianqiang, Zhu Yonggui, Song Wenpeng et al. The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(1): 105-114.]
- [24] 李岩,李克强,王修林,等.近海污染物总量控制水质监测体系构建方法——以莱州湾为例[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2015,45(11):69-74.[Li Yan, Li Keqiang, Wang Xiulin et al. Method of construction of water quality monitoring system for pollutants total load control management in coastal area:a case study in laizhou bay. Periodical of Ocean University of China, 2015, 45(11): 69-74.]
- [25] 李广楼,崔毅,陈碧鹃,等.秋季莱州湾及附近水域营养现状与评价[J].海洋环境科学,2007,26(1):45-48.[Li Guanglou, Cui Yi, Chen Bijuan et al. Status and evaluation on nutrients in Laizhou Bay in Autumn. Marine Environment Science, 2007, 26(1): 45-48.]
- [26] 蒋会超,陈海刚,宋秀凯,等.莱州湾金城海域浮游动物群落结构及与环境因子的关系[J].生态学报,2015,35(22):7308-7319.[Jiang Huichao, Chen Haigang, Song Xiukai et al. Zooplankton

- community structure in Jincheng area of Lizhou Bay and its relationship with environmental factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7308-7319.]
- [27] 陈萍,王兴玲,陈晓玲.基于栅格的鄱阳湖生态经济区洪灾脆弱性评价[J].地理科学,2012,32(8):958-964.[Chen Ping, Wang Xingling, Chen Xiaoling. Flood vulnerability assessment of Poyang Lake economical ecological zone at raster level. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 958-964.]
- [28] 杨雪,张文忠.基于栅格的区域人居自然和人文环境质量综合评价——以京津冀地区为例[J].地理学报, 2016, 71(12): 2141-2154. [Yang Xue, Zhang Wenzhong. Combining natural and human elements to evaluate regional human settlements quality based on raster data: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(12):2141-2154.]
- [29] 秦承志,呼雪梅.栅格数字地形分析中的尺度问题研究方法[J].地理研究,2014,33(2):270-283.[Qin Chengzhi, Hu Xuemei. Review on scale-related researches in grid-based digital terrain analysis. *Geographical Research*, 2014, 33(2):270-283.]

Variable Fuzzy Recognition Model of Seawater Environmental Quality Based on GIS Modeling Technique

Ke Lina^{1,2}, Zhang Yimin¹, Han Xu¹, Wang Hui^{1,2}, Wang Quanming³, Wang Li^{1,2}

(1. College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China;

2. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University,

Dalian 116029, Liaoning, China; 3. National Marine Environment Monitoring Center,

Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: Fuzzy comprehensive evaluation method is widely used in the comprehensive evaluation of seawater quality. But its model calculation is more complicated, and the model is difficult to self adjustment and self validation. This paper will introduce the unity of opposites and variable quality Exchange Theorem of fuzzy evaluation, and build a variable fuzzy recognition model of seawater environmental quality. Firstly, the principle and method of variable fuzzy evaluation method is analyzed, and then a variable fuzzy comprehensive evaluation model of seawater environment based on multi source raster data is established, based on the unique advantages of GIS raster data, geographic information system spatial overlay analysis, spatial modeling of geographic information system and so on. In the expression of spatial information, the spatial distribution of seawater environment in Laizhou Bay from 2004 to 2010 was obtained. It is proved that the model is feasible in the comprehensive evaluation of seawater quality, and provides a new method for the comprehensive evaluation and decision of multi objective in the field of marine environment. The monitoring results of many years show that the water quality of Laizhou Bay is poor as a whole, the comprehensive evaluation grade value is between 1.60~3.32, the content of dissolved inorganic nitrogen is generally higher, the evaluation grade is decreasing from west and southwest to the northeast, and is fanning out. There is a small range in the central area of the Laizhou Bay estuary, the spatial distribution maps showed obvious protrusions.

Key words: Variable Fuzzy Recognition Model; seawater quality evaluation; GIS