

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草螽不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀峰,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201208251203

柯丽娜,王权明,孙新国,孙才志,周惠成,王方雄. 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价. 生态学报, 2013, 33(6): 1889-1899.

Ke L N, Wang Q M, Sun X G, Sun C Z, Zhou H C, Wang F X. The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1889-1899.

基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价

柯丽娜^{1,2}, 王权明^{3,*}, 孙新国², 孙才志¹, 周惠成², 王方雄¹

(1. 辽宁省自然地理与空间信息科学重点实验室, 大连 116029; 2. 大连理工大学水利工程学院, 大连 116024;

3. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

摘要: 海水环境质量评价可以视为是一个具有确定性的评价指标和评价标准与具有不确定性的评价因子及其含量变化相结合的分析过程, 各评价指标含量具有中介过渡性, 构建了基于可变模糊集合理论的海水环境质量评价方法(简称“VFEM”), 并以莱州湾海水水质为研究对象, 应用提出的可变模糊评价模型对该区域海水水质状况进行评价, 实例应用表明, 该模型通过可变模型参数变化(a, p), 以线性模型与非线性模型相结合, 将最后稳定结果作为海洋水质环境的最后评价结果, 从而确定水质评价等级, 评价结果更为可信, 同时该模型通过级别特征值精确区分各水质采样点的水质优劣, 对各水质采样点的水质级别有更准确的定位, 为海水环境质量综合评价提供了一种合理而适用的方法。

关键词: 可变模糊识别; 海水环境质量; 模型; 莱州湾

The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model

KE Lina^{1,2}, WANG Quanming^{3,*}, SUN Xinguo², SUN Caizhi¹, ZHOU Huicheng², WANG Fangxiong¹

¹ Liaoning Key Laboratory of Physical Geography and Geomatics, Dalian 116029, China

² School of Hydraulic Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

³ National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China

Abstract: With the development of marine economy industries, huge quantity of sewage with only preliminary treatment is disposed into the nearby coastal areas and has deteriorated the water quality of the near coastal region. Seawater quality has received increasing scientific attention. Seawater environment quality evaluation is the process of analyzing combinations of certain evaluation indexes and evaluation criteria with the uncertain valuation factors and changes in their content, which is a complicated and uncertain system with coupled multifactor and multilevel effects. In this paper, the variable fuzzy model method is introduced for the comprehensive evaluation of seawater environment quality, a seawater environment quality assessment model based on multi-objective variable fuzzy set theory (VFEM) was developed. The water quality status of Laizhou Bay of China was quantitatively studied, the results indicated that VFEM is a promising tool for evaluating the seawater quality status, which can perform well and accurately evaluate the comprehensive status of the seawater environment quality through the change of variable model parameters (a, p), combining the linear models and nonlinear models, taking the stable result as the final evaluation of the seawater quality, and determine the level of water quality evaluation. Therefore, the evaluation result is more reliable than other modeled results. In addition, the assessment model of seawater environment quality based on multi-objective variable fuzzy set theory can accurately classify the water quality of the

基金项目: 国家 908 专项(LN-908-02-04); 教育部人文社会科学研究项目(11YJC630202)

收稿日期: 2012-03-25; 修订日期: 2013-01-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qmwang@nmemc.gov.cn

sampling points to rank the water quality grade of every sampling point more precisely. This approach can also provide new concepts and means of improving and perfecting the study of seawater environment quality evaluations.

Key Words: unity of opposite; variable fuzzy recognition; seawater environment quality; model

随着海洋经济产业的迅速发展,沿海各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,许多经济鱼类消失,使海水养殖业遭受巨大损失,海水水质成为人们普遍关注的焦点。自上世纪 50 年代以来,国内外学者对水体环境质量进行了深入的研究,各类水质监测评价方法逐步建立与规范。以文献^[1]为代表的国外学者探讨了水质评价模型的不确定性,文献^[2]介绍了美国水质标准的发展过程,文献^[3]采用主成分分析法借助地理信息系统对海湾地区环境质量进行了评价;文献^[4-6]从空间上对水质进行评价研究,文献^[7-8]从生态系统角度对水质评价进行研究。文献^[9-10]分别对近海水质从颗粒有机碳分布到富营养化等方面进行评价研究,文献^[11-16]等国内学者分别用单因子评价法、BP 人工神经网络、“三元法”、模糊综合、灰色聚类法和基于支持向量机理论等方法对不同区域海水水质进行评价。总体来看,这些模型和方法各有优缺点。单因子评价法^[11]过分强调个别受污染较重因子的影响,使综合评价结果往往过保护;BP 神经网络法^[12]通过训练误差反馈反复修改网络权重,虽然一定程度上避免了评价者的主观影响,但往往导致花费时间多、收敛速度慢,且容易导致产生很多局部最小点;灰色聚类法在权重确定上过度依赖于不同级别的评价标准^[15];主成分分析法^[3,17]本质上是一种排序评价方法,但在特征向量的选取上往往存有争议。海水水质评价可以视为是一个具有确定性的评价指标和评价标准与具有不确定性的评价因子及其含量变化相结合的分析过程,各评价指标含量具有中介过渡性,属于模糊概念,传统的大多数水质评价方法往往将评价标准或参照标准处理成点的形式存在一定的不足,目前,在实践工作中,模糊综合评价法的应用日益广泛,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^[18]。但模糊综合评判法^[14,19-22]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。因此,为了科学地对海水水质进行评价,本文提出了基于可变模糊集合理论^[23-25]的海水水质评价方法(以下简称“VFEM”),该方法通过变化模型及其参数,能够合理地确定样本指标对各级指标标准区间的相对隶属度和相对隶属函数,有效地解决环境评价中边界模糊及监测误差对评价结果的影响问题^[19]。本文将以莱州湾海水水质为研究对象,应用提出的 VFEM 模型对该区域海水水质状况进行评价,合理确定海水水质评价样本的水质等级,提高样本等级评价的可信度,为海水环境质量综合评价提供了一种合理而适用的方法。

1 模型与方法

1.1 可变模糊集定理简介

20 世纪 90 年代,陈守煜^[23]在札德模糊集合的基础上提出相对隶属度概念,建立工程模糊集。设论域 U 中任意元素 u 的对立模糊概念(事物、现象)或对立的基本模糊属性以 $\tilde{A}$ 与 $\tilde{A}^c$ 表示。在连续统区间 $[1,0]$ (对 $\tilde{A}$) 与 $[0,1]$ (对 $\tilde{A}^c$) 的任一点上,对立基本模糊属性的相对隶属度分别为 $\mu_{\tilde{A}}(u)$ 、 $\mu_{\tilde{A}^c}(u)$,且:

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

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

令:

$$\tilde{A} = \{u, \mu_{\tilde{A}}(u), \mu_{\tilde{A}^c}(u) \mid u \in U\} \quad (2)$$

$\tilde{A}$ 称为 u 的对立模糊集。左端点: $P_l: \mu_{\tilde{A}}(u) = 1, \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 0$; 右端点 $P_r: \mu_{\tilde{A}}(u) = 0, \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 1$ (图 1 所示)。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:

$$\mu_{\tilde{A}}(u) = \mu_{\tilde{A}^c}(u) = 0.5 \quad (3)$$

P_m 为对立统一矛盾性质的转化点,则在 $P_1 \rightarrow P_m$ 区间: $\mu_A(u) > \mu_{Ac}(u)$; 在 $P_m \rightarrow P_r$ 区间, $\mu_A(u) < \mu_{Ac}(u)$ 。

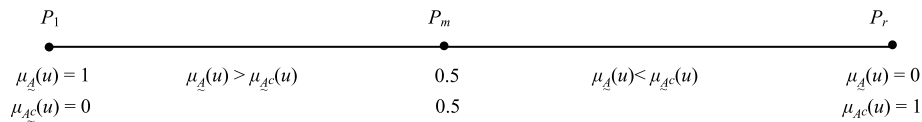


图1 对立模糊集 A 示意图

Fig.1 Schematic diagram of opposite fuzzy sets

1.2 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价方法(VFEM)

根据可变模糊集的概念和可变模糊识别模型^[23]的原理,结合海水水质评价标准建立基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价方法。

1.2.1 指标数据规格化处理

参考《中华人民共和国海水水质标准》(GB 3097—1997),将海水水质分为五类: I 类海水、II 类海水、III 类海水、IV 类海水、劣IV类海水,第 I、II、III、IV 类海水分别为 GB3097—1997 中的前四类海水,超过IV类的定为劣IV类海水,各水质评价指标标准浓度或物理特征见《中华人民共和国海水水质标准》(GB 3097—1997)。

设有待识别的 n 个海水水质评价样本集,依据 m 个海水水质指标 i (根据研究区海域污染现状从《中华人民共和国海水水质标准》(GB 3097—1997)选择主要评价因子)的特征值,按 h ($h=1,2,\dots,5$) 个级别的指标标准对评价样本进行识别,其指标特征值与指标标准值分别为 X 和 Y 。对指标进行规格化处理:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{i5} (\text{递增型}), x_{ij} \leq y_{i5} (\text{递减型}) \\ \frac{y_{i5} - x_{ij}}{y_{i5} - y_{i1}} & \text{递增型或递减型} \\ 1 & x_{ij} \geq y_{i5} (\text{递增型}), x_{ij} \leq y_{i5} (\text{递减型}) \end{cases} \quad (4)$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{i5} = y_{ih} \\ \frac{y_{i5} - y_{ij}}{y_{i5} - y_{i1}} & \text{递增型或递减型} \\ 1 & y_{i1} = y_{ih} \end{cases} \quad (5)$$

式中, r_{ij} 为海水水质评价样本 j 指标 i 特征值对评价级别的相对隶属度; y_{i1}, y_{ih}, y_{i5} 分别为指标 i 的 1 级、 h 级、5 级海水水质标准特征值; s_{ih} 为级别 h 指标 i 标准特征值 y_{ih} 的规格化数。

1.2.2 对象 u 对级别 h 的综合相对隶属度

设 n 个海水水质评价样本集依据 m 个指标、 h ($h=1,2,\dots,5$) 个级别的海水水质等级标准模式的特征值矩阵 (r_{ij}) 进行识别,得到评价对象指标 i 的特征值对各个级别 h 的指标相对隶属度矩阵为:

$$U = (u_{hj}) \quad h=1,2,\dots,5; j=1,2,\dots,n \quad (6)$$

满足条件

$$\sum_{h=1}^5 u_{hj} = 1, 0 \leq u_{hj} \leq 1, \sum_{j=1}^n u_{hj} > 0 \quad (7)$$

为求解最优模糊矩阵。构造目标函数为:全体对象对于各标准模式间的加权广义距离平方和最小,即:

$$\min\{F(u_{hj})\} = \sum_{j=1}^n \min\left\{\sum_{h=1}^5 u_{hj}^2 \left[\sum_{i=1}^m (w_{ij} |r_{ij} - s_{ih}|)^p\right]^{\frac{\alpha}{p}}\right\} \quad (8)$$

构造拉格朗日函数,最终求得样本对于 h 级评价标准的最优相对隶属度模糊识别理论模型为:

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ \frac{1}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^p}{\sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ik})]^p} \right\}^{\frac{\alpha}{p}}} & a_j \leq h \leq b_j, d_{hj} \neq 0 \\ 1 & d_{hj} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, h 为级别, $h=1, 2, \dots, 5$; a_j 为决策 j 的级别下限值; b_j 为决策 j 的级别上限值; d_{hj} 为决策 j 与级别 h 之间差异的广义权距离; 其余符号同前。

通常情况下, α 和 p 可有以下 4 种搭配:

$\alpha = 1, p = 1$; $\alpha = 1, p = 2$; $\alpha = 2, p = 1$; $\alpha = 2, p = 2$

(1) $\alpha = 1, p = 1$

$$u_{hj} = (d_{hj} \cdot z_j)^{-1} \quad (10)$$

其中

$$d_{hj} = \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})] z_j = \sum_{h=a_j}^{b_j} (d_{hj})^{-1} \quad (11)$$

(2) $\alpha = 1, p = 2$

$$d_{hj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

u_{hj} 、 z_j 同式(10)、(11)。

(3) $\alpha = 2, p = 1$

$$d_{hj} = \left\{ \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})] \right\}^2 \quad (13)$$

(4) $\alpha = 2, p = 2$

$$d_{hj} = \sum_{i=1}^m [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^2 \quad (14)$$

其中, $\alpha=1, p=1$, 式(11)表现为线性相关; $\alpha=1, p=2, \alpha=2, p=1, \alpha=2, p=2$, 式(12)、(13)、(14)表现为非线性相关, 其中式(14)为式(12)的二次函数, 因此其收敛或夸张的作用更为剧烈, 表现为强非线性相关。具体在实际工作中, 根据评价对象的特点, 选择合适的评价模型: 当评价对象间表现为弱非线性时, 采用公式(11); 表现为一般线性相关时, 采用公式(12)或公式(13); 表现为强线性相关时, 采用公式(14); 当非线性程度难以确定时, 采用公式(11)、(12)、(13)、(14)的平均值。

1.2.3 级别特征值计算

在模糊概念分级条件下, 用最大隶属原则对级别归属进行识别, 容易导致最后评价结果的错判, 应用文献^[26]提出的级别特征值公式, 充分表达 h 与 u_{hj} 分布列的整体特征, 利用级别变量 h 隶属于各等级的相对隶属度信息, 作为可变模糊集理论判断、识别、决策的准则。

$$H(u) = \sum_{h=1}^5 u_{hj}(u_0) h \quad (15)$$

再根据 $H(u)$ 值最终判定海水水质综合评价级别, 类别判断准则见表 1。

2 VFEM 方法验证

参照《中华人民共和国海水水质标准》(GB 3097—1997), 这里仅列出 COD(化学耗氧量)、DO(溶解氧)、无机氮、活性磷酸盐、油类 5 个项目的水质指标标准值(表 2)

根据表 2, 用如下方法随机生成由 54 个样本点组成的评价标准样本系列。

表 1 海水水质级别判断准则							
Table 1 The judgment criteria regarding the level of seawater environment quality							
H 值	(0.75,1.25]	(1.25,1.5]	(1.5,1.75]	(1.75,2.25]	(2.25,2.5]	(2.5,2.75]	(2.75,3.25]
等级 Rank	I 类	I 与 II 类间, 偏 I 类	I 与 II 类间, 偏 II 类	II 类	II 与 III 类间, 偏 II 类	II 与 III 类间, 偏 III 类	III 类
H 值	(3.25,3.5]	(3.5,3.75]	(3.75,4.25]	(4.25,4.5]	(4.5,4.75]	(4.75,5]	
等级 Rank	III 与 IV 类间, 偏 III 类	III 与 IV 类间, 偏 IV 类	IV 类	IV 与劣 IV 类间, 偏 IV 类	IV 与劣 IV 类间, 偏劣 IV 类	劣 IV 类	

表 2 海水水质评价指标标准值					
Table 2 The standard values of the seawater quality evaluation index					
评价指标 Evaluation index	指标标准值 Standard values/(mg/L)				
	I 类	II 类	III 类	IV 类	劣 IV 类
COD 化学耗氧量 $x_1 \leq$	2	3	4	5	>5
溶解氧 DO $x_2 >$	6	5	4	3	≤ 3
无机氮 Inorganic nitrogen $x_3 \leq$	0.2	0.3	0.4	0.5	>0.5
活性磷酸盐 Reactive phosphate (以 P 计) $x_4 \leq$	0.015	0.030	0.030	0.045	>0.045
石油类 Oils $x_9 \leq$	0.05	0.05	0.30	0.50	>0.50

- (1) 5 个海水水质等级 I 类、II 类、III 类、IV 类和劣 IV 类海水分别对应水质标准等级值 1、2、3、4 和 5 级。
- (2) 构造各等级各指标水质标准变化区间:对劣 IV 类海水,取各指标右端点值为其左端点值的 2 倍,各指标标准值变化区间为:化学耗氧量(5,10]、无机氮(0.5,1]、活性磷酸盐(0.045,0.09]、石油类(0.5,1]、溶解氧[0,3];对 I 类海水,各指标标准值变化区间为:化学耗氧量[0,2]、溶解氧[6,9)、无机氮为(0,0.2]、活性磷酸盐为(0,0.015]、石油类(0,0.05];II 类、III 类、IV 类海水分别取其对应水质标准等级值与前一级别指标标准值之间的变化区间,这样所有水质标准都有一个变化区间。
- (3) 利用均匀随机数在各水质指标等级变化区间范围内随机产生 10 个水质指标值。
- (4) 为充分反映水质评价标准表中各指标的边界值的意义,取各指标的边界值各两次,水质等级值取与该边界值有关的两个水质等级值的算数平均值,如表 3 所示
- (5) 为了便于跟前人所作研究结果进行比较,此处各指标的权重取等权重,即均为 0.2,利用所建立的 VFEM 模型计算结果列入表 3。

表 3 海水水质等级的标准值和 VFEM 模型的计算值的对比结果							
Table 3 Comparison of the seawater quality standard values with the values calculated by the VFEM model							
序号 No.	水质指标 Seawater index					水质等级 The level value	
	化学耗氧量 COD /(mg/L)	溶解氧 DO /(mg/L)	无机氮 Inorganic nitrogen /(mg/L)	活性磷酸盐 Reactive phosphate /(mg/L)	石油类 Oils /(mg/L)	标准值 Standard	VFEM 模型计算值 Calculated
1	0.235	8.276	0.082	0.004	0.012	1.000	1.04
2	1.589	9.923	0.025	0.006	0.015	1.000	1.08
3	0.692	7.123	0.033	0.011	0.021	1.000	1.19
4	1.542	10.052	0.061	0.006	0.016	1.000	1.08
5	1.697	8.610	0.106	0.002	0.015	1.000	1.11
6	0.074	7.585	0.038	0.012	0.017	1.000	1.15
7	0.896	11.279	0.055	0.011	0.020	1.000	1.09
8	0.135	8.169	0.069	0.007	0.011	1.000	1.04
9	1.344	6.895	0.107	0.008	0.015	1.000	1.16
10	1.458	9.368	0.038	0.013	0.021	1.000	1.18
11	2.000	6.000	0.200	0.015	0.025	1.500	1.73

续表

序号 No.	水质指标 Seawater index					水质等级 The level value	
	化学耗氧量 COD /(mg/L)	溶解氧 DO /(mg/L)	无机氮 Inorganic nitrogen /(mg/L)	活性磷酸盐 Reactive phosphate /(mg/L)	石油类 Oils /(mg/L)	标准值 Standard	VFEM 模型计算值 Calculated
12	2.494	5.458	0.261	0.021	0.029	2.000	2.01
13	2.125	5.425	0.277	0.016	0.036	2.000	1.98
14	2.398	5.197	0.206	0.018	0.042	2.000	1.99
15	2.058	5.021	0.286	0.019	0.032	2.000	2.06
16	2.992	5.001	0.219	0.019	0.048	2.000	2.14
17	2.488	5.006	0.234	0.021	0.028	2.000	2.05
18	2.566	5.411	0.279	0.017	0.028	2.000	1.98
19	2.459	5.946	0.260	0.018	0.032	2.000	1.96
20	2.559	5.234	0.272	0.020	0.041	2.000	2.10
21	2.486	5.117	0.265	0.019	0.045	2.000	2.09
22	3.000	5.000	0.300	0.0225	0.050	2.500	2.39
23	3.255	4.223	0.382	0.028	0.261	3.000	3.12
24	3.356	4.156	0.344	0.025	0.135	3.000	2.97
25	3.427	4.272	0.325	0.023	0.113	3.000	2.85
26	3.338	4.722	0.355	0.025	0.186	3.000	2.94
27	3.647	4.661	0.315	0.029	0.145	3.000	2.95
28	3.598	4.978	0.375	0.027	0.242	3.000	3.01
29	3.458	4.255	0.376	0.024	0.281	3.000	3.09
30	3.397	4.233	0.356	0.029	0.136	3.000	3.02
31	3.525	4.115	0.330	0.027	0.248	3.000	3.08
32	3.255	4.983	0.362	0.026	0.274	3.000	2.97
33	4.000	4.000	0.400	0.030	0.300	3.500	3.47
34	4.856	3.222	0.424	0.031	0.458	4.000	3.92
35	4.159	3.156	0.458	0.037	0.422	4.000	3.97
36	4.256	3.948	0.455	0.042	0.354	4.000	3.89
37	4.128	3.447	0.475	0.043	0.359	4.000	3.96
38	4.239	3.250	0.440	0.033	0.378	4.000	3.90
39	4.215	3.019	0.435	0.034	0.344	4.000	3.90
40	4.961	3.965	0.412	0.043	0.444	4.000	3.93
41	4.057	3.948	0.472	0.032	0.425	4.000	3.79
42	4.265	3.224	0.495	0.044	0.483	4.000	4.05
43	4.158	3.216	0.417	0.038	0.458	4.000	3.94
44	5.000	3.000	0.500	0.045	0.500	4.500	4.15
45	5.127	2.447	0.591	0.085	0.856	5.000	4.67
46	6.001	2.137	0.631	0.065	0.555	5.000	4.68
47	7.463	1.068	0.999	0.069	0.681	5.000	4.97
48	5.938	0.543	0.552	0.065	0.752	5.000	4.79
49	9.730	0.003	0.584	0.081	0.842	5.000	4.90
50	5.112	2.105	0.723	0.061	0.852	5.000	4.76
51	5.031	1.016	0.610	0.056	0.687	5.000	4.66
52	9.230	1.930	0.556	0.081	0.568	5.000	4.77
53	8.142	2.003	0.671	0.065	0.823	5.000	4.92
54	5.220	0.010	0.803	0.081	0.945	5.000	4.85

表4给出了该样本系列标准等级值与VFEM模型计算出的海水水质等级之间的对比分析结果,VFEM模型相比其他方法更为准确、收敛性较好,具有令人满意的精度,尤其在 $\alpha=2, p=1$ 时,VFEM模型精度最高,更

适合于多指标、多级别、非线性海水环境质量综合评价。

表 4 海水水质评价标准等级值与各评价方法计算等级值的对比分析

Table 4 Comparison between the evaluation level values by VFEM with those of other models

评价方法 Evaluation model	误差绝对值(级)落在下列区间的百分比 The absolute error (grade) occurring in each range/%						均绝对差/级 Average absolute difference	平均相对 误差/% Average relative error
	[0,0.1]	[0, 0.2]	[0, 0.3]	[0, 0.4]	[0, 0.5]	[0, 0.6]		
BP 神经网络 BP neural network ^[12]	36.41	67.81	78.89	89.46	92.12	100	0.31	9.18
模糊综合评判 Fuzzy comprehensive evaluation ^[14]	35.67	69.79	83.67	91.27	95.19	100	0.26	6.51
集对分析 Set pair analysis ^[18]	45.67	71.56	88.38	94.12	98.29	100	0.18	3.74
可变模糊 评价法	$a=1, p=1$ 38.89	79.63 72.22	94.44 88.89	100 96.30	100	100	0.13 0.15	3.07 3.71
Fuzzy recognition	$a=2, p=1$ 81.48	90.74	96.30	98.15	100	100	0.06	1.30
	$a=2, p=2$ 70.37	88.89	94.44	98.15	100	100	0.09	1.87

3 实例应用

3.1 莱州湾概况

莱州湾位于渤海南部,是渤海三大海湾之一,西起黄河口,东至龙口市岬姆岛,宽 96km,海岸线长 319.06km,面积 6966km²,沿岸有黄河、小清河等 10 余条河流入海,是黄、渤海多种经济鱼虾类的主要产卵场、孵幼场和索饵场^[27]。莱州湾海域每年接受陆源污水大约 2 亿多吨,占山东省沿岸污水排放量的 11% 左右,受纳海上污染物质大约 10 万多吨,大部分水域无机氮浓度劣于四类海水水质标准,局部海域活性磷酸盐浓度劣于第四类海水水质标准,水体中富营养化严重,已经影响了该海域初级生产力及渔业生产力的提高,给莱州湾生态环境和生物群落造成严重危害^[28]。

3.2 材料与方法

本文利用了莱州湾 2010 年 8 月的 20 个监测点的水质监测数据(监测点位置见图 2),监测项目有水温、盐度、pH、溶解氧、COD、营养盐、重金属、叶绿素 a 等,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。

3.3 评价指标与分级标准

结合莱州湾海水污染现状^[27-28],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),超过Ⅳ类的定为劣Ⅳ类海水。

3.4 莱州湾海水水质综合评价

莱州湾海水水质评价样本集数据 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} 1.57210 & 6.33110 & 0.48385 & 0.01027 & 0.07410 \\ 2.40941 & 5.77574 & 0.75243 & 0.00755 & 0.08520 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1.62615 & 7.24533 & 0.03539 & 0.00258 & 0.04881 \\ 1.40875 & 7.31602 & 0.02669 & 0.00707 & 0.07937 \end{bmatrix}$$

参照海水水质标准(GB 3097—1997)及莱州湾海水水质的实际情况^[27-28],确定莱州湾海水水质综合评价指标标准值矩阵 Y 为:

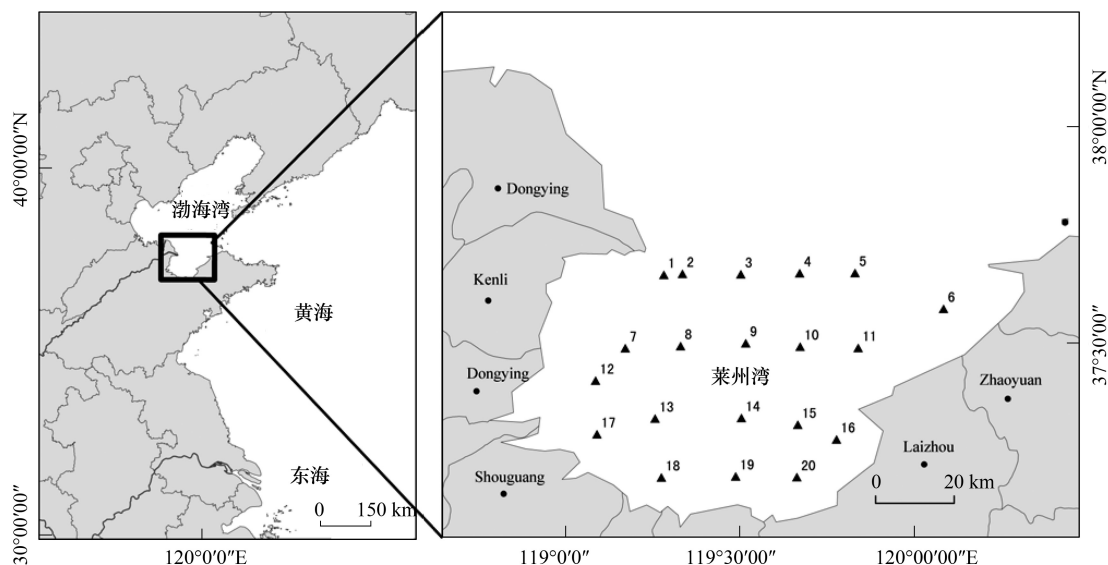


图2 莱州湾位置及监测站位

Fig. 2 The location map of monitoring points in Laizhou Bay

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 2.25 & 3.5 & 4.75 & 6 \\ 7.70479 & 5.75 & 4.5 & 3.25 & 0 \\ 0 & 0.225 & 0.35 & 0.475 & 0.82029 \\ 0 & 0.016875 & 0.02625 & 0.04125 & 0.06 \\ 0 & 0.03125 & 0.175 & 0.45 & 0.7 \end{bmatrix}$$

为确定5项评价指标权重向量,采用考虑权重折衷系数的权重确定方法^[29],以专家确定的主权重 $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 对客观权重进行修正,即 $w = [(1 - \alpha)q_i + \alpha p_i]$, α 为权重折衷系数, $0 \leq \alpha \leq 1$ 。 $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ 为主权重,满足 $\sum_{i=1}^m p_i = 1$, $p_i \geq 0$,应用文献^[29]提出的指标重要性排序一致性定理及其语气算子与相对隶属度关系表确定; $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$, 为客观向量,满足 $\sum_{i=1}^m q_i = 1$, $0 \leq q_i \leq 1$,由样本的属性值求出,采用文献^[30]提出的改进的熵权法确定,则根据文献^[29]由 u_{hj} , α , q 构成模糊循环迭代模型,给定初始 $u_{hj} = 0$, $\alpha = 0.5$, $\varepsilon = 10^{-3}$ 经过循环迭代计算,从而得到权重折衷系数 $\alpha = 0.39$,由此得到实际的综合权重 W 为:

$$W_{(\text{COD}, \text{DO}, \text{无机氮}, \text{活性磷酸盐}, \text{油类})} = (0.1705, 0.1387, 0.2558, 0.2278, 0.2071)$$

采用公式(9)计算莱州湾海水水质评价对象 x 对级别 h 的综合相对隶属度向量。这里选 $\alpha = 1$, $p = 1$, x_1 对级别 h 的综合相对隶属度归一化向量为

$$u_0^h = (0.1483, 0.1482, 0.2273, 0.1511, 0.1736)$$

应用公式(15)计算海水水质评价样本 x_i 当 $\alpha = 1$, $p = 1$ 时的级别特征值为 $H(u) = 2.40$,同理可得, x_i ($i = 2, 3, \dots, 20$) 当 $a = 1$, $p = 1$; $a = 1$, $p = 2$; $a = 2$, $p = 1$; $a = 2$, $p = 2$ 时的级别特征值,见表5(表5中的评价等级采用 $a = 2$, $p = 1$ 时的计算结果)。

从表5可以看出,运用VFEM对莱州湾海水水质进行评价,与模糊综合评价方法结果基本一致,可变模糊评价方法随着 a 与 p 模型参数的变化,4种模型水质采样点水质级别基本稳定在一个较小的级别范围,最后将最可靠结果作为采样点的评价等级,评价结果较为可信,仅2号点与6号点两个采样点的评价等级与模糊综合评价方法略有出入,现就2号点、6号点、20号点的评价结果进行分析。

对于2号采样点,VFEM方法评价为Ⅱ类与Ⅲ类之间偏Ⅱ类,而模糊综合评价结果为Ⅲ类海水。分析2号采样点各指标含量分布情况,其COD监测值为2.4094mg/L,为超过Ⅰ类标准,处于Ⅱ类标准范围之内;溶解氧为5.7757mg/L,为Ⅰ类海水范围之内;无机氮为0.7524mg/L,超过Ⅳ类海水标准范围,为劣Ⅳ类海水;活

性磷酸盐为 0.00755mg/L,为处于 I 类海水标准范围之内;石油类为 0.0852mg/L,为处于 III 类海水水质标准范围之内, COD、DO、无机氮、活性磷酸盐、石油类对水质综合级别的影响权重分别为 (0.1705、0.1387、0.2558、0.2278、0.2071),模糊综合评价方法根据各水质级别的隶属度 (0、0.4577、0.4857、0.0566、0),确定其综合等级为 III 类海水,而 VFEM 模型当 $\alpha=2, \rho=1$ 时确定其综合平均级别特征值为 2.29,相比较 VFEM 模型更符合 2 号点的实际情况,同理,6 号点、20 号点的情况与 2 号点情况相类似,因此表 5 中海水水质级别特征值评价结果能够反映莱州湾采样点海水水质污染轻重的实际情况,评价结果比较可信。

表 5 莱州湾海水水质综合评价结果

Table 5 The comprehensive evaluation results of seawater environment quality in Laizhou Bay

点号 NO.	VFEM						模糊综合评价	
	$\alpha=1$ $\rho=1$	$\alpha=1$ $\rho=2$	$\alpha=2$ $\rho=1$	$\alpha=2$ $\rho=2$	稳定范围 Stability range	平均值 Average	评价等级 Assessment grade	Fuzzy comprehensive evaluation
1	2.40	2.60	2.24	2.66	2.24—2.66	2.47	II 类	II 类
2	2.69	2.90	2.29	2.82	2.29—2.90	2.67	II 与 III 类间偏 II 类	III 类
3	1.61	1.67	1.54	1.51	1.51—1.67	1.58	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
4	1.49	1.56	1.40	1.43	1.40—1.56	1.47	I 与 II 类间偏 I 类	I 类
5	1.53	1.54	1.52	1.50	1.50—1.54	1.52	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
6	1.53	1.61	1.41	1.43	1.41—1.61	1.50	I 与 II 类间偏 I 类	II 类
7	2.37	2.59	2.17	2.53	2.17—2.59	2.42	II 类	II 类
8	2.45	2.65	2.23	2.63	2.23—2.65	2.49	II 类	II 类
9	1.73	1.82	1.62	1.66	1.62—1.82	1.71	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
10	1.63	1.65	1.64	1.58	1.58—1.65	1.62	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
11	1.58	1.62	1.54	1.50	1.50—1.62	1.56	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
12	3.13	3.19	3.23	3.49	3.13—3.49	3.26	III 类	III 类
13	2.16	2.26	2.02	2.09	2.02—2.26	2.13	II 类	II 类
14	1.61	1.62	1.64	1.57	1.57—1.64	1.61	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
15	1.56	1.60	1.53	1.52	1.52—1.60	1.55	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
16	1.43	1.46	1.32	1.35	1.32—1.46	1.39	I 与 II 类间偏 I 类	I 类
17	2.38	2.34	2.48	2.39	2.34—2.48	2.40	II 与 III 类间偏 II 类	II 类
18	1.69	1.70	1.73	1.69	1.69—1.73	1.70	I 与 II 类间偏 II 类	II 类
19	1.46	1.51	1.35	1.37	1.35—1.51	1.42	I 与 II 类间偏 I 类	I 类
20	1.54	1.63	1.36	1.40	1.36—1.63	1.48	I 与 II 类间偏 I 类	II 类

分析表 5 中模糊综合评价法与 VFEM 结果出现偏差的原因,模糊综合评价法依据最大隶属度原则进行水质等级的判定与分区,这样在过渡水质的级别归属问题上(如 2 号点,对各水质级别的隶属度分别为 (0、0.4577、0.4857、0.0566、0),势必会丢失大量有用信息,直接影响评价与分区的客观性,导致最后结果的错判。另外,模糊综合评判法按照海水水质分级标准进行隶属度的求取,小于某一阈值的评价因子往往被定为一个级别,这样常常导致同一级别范围内水质的优劣差异体现不出来,而 VFEM 模型以级别特征值评价结果反映海水水质污染轻重的实际情况,级别特征值即是各采样点水质等级的精确描述,能够精确区分各水质采样点水质情况的优劣,对水质采样点的水质级别有更准确的定位。

4 结论与讨论

本文提出了基于可变模糊集理论的海水水质评价模型方法,该模型通过可变模型参数变化 (α, ρ),将线性模型与非线性模型相结合,以最稳定级别特征值作为海洋水质环境的最后评价结果,从而区分各水质采样点的水质优劣,确定水质评价等级,评价结果相对于 BP 神经网络模型、模糊综合评判模型、集对分析模型等方法更为准确可信,更适合于多指标、多级别、非线性的海水环境质量综合评价。

对于可变模糊评价模型,权重设置的合理性是决定评价结果可靠性的一个重要因素,本文采用考虑权重

折衷系数的权重确定方法将主观权重与客观权重相结合,为权重的设置提供了一个参考,未来在实际海洋环境评价中如何更加合理地进行指标权重的设置,以及根据级别特征值进行海水水质级别的划分是多目标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。各种不同的水质评价方法有着不同的侧重点,如果能够合理地设置评价模型各影响因素的权重,可变模糊评价模型不失为一个较好的多目标辅助决策模型,可在其它系统评价中推广应用。

References:

- [1] Beck M B. Water quality modeling: A review of the analysis of uncertainty, *Water Resources Research*, 1987, 23 (8) , 1393-1442.
- [2] R. C. Russo. Development of marine water quality criteria for the USA, *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 45 : 84-91.
- [3] Bhabesh C. Sarkar, Bashab N. Mahanta, Kalyan Saikia, Pradip R. Paul, Gurdeep Singh, Geo-environmental quality assessment in Jharia coalfield, India, using multivariate statistics and geographic information system, *Environmental Geology*, 2007, 51 : 1177-1196.
- [4] Zhou F, Guo H C, Liu Y, Hao Z J. Identification and spatial patterns of coastal water pollution sources based on GIS and chemometric approach. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19 : 805-810.
- [5] Homa Razmkhah, Ahmad Abrishamchi, Ayoob Torkian. Evaluation of spatial and temporal variation in water quality by pattern recognition techniques: A case study on Jajrood River (Tehran, Iran), *Journal of Environmental Management*, 2010, 91 : 852-860.
- [6] Zhao G J, Gao J F, Tian P, Tian K, Ni G H. Spatial-temporal characteristics of surface water quality in the Taihu Basin, China, *Environmental Earth Science*, 2011, 64 : 809-819.
- [7] Bernard Parinet, Antoine Lhote, Bernard Legube. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management—application to a tropical lake system, *Ecological Modelling*, 2004, 178 : 295-311.
- [8] Mohamad Ali Fulazzaky. Water Quality Evaluation System to Assess the Brantas River Water, *Water Resource Manage*, 2009, 23 : 3019-3033.
- [9] Wang B D, Sun X, Wei Q S, Xie L P. A new method for assessment of eutrophication status in estuarine and coastal waters off china and its application, *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34 (4) : 61-66.
- [10] Liu Q X, Huang X P, Zhang X, Zhang L, Ye F. Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (14) : 4403-4412.
- [11] Liu Y, Ji L, Guo J G, Qu L, Yang L, Ding L. Space-time Changing trends analysis of the water quality and eutrophication of Yantai nearby seas. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28 (2) : 18-22.
- [12] Li X, Liu C F, Zhu X H, Xie X. Integrated assessment of sea water quality based on BP artificial neural network. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29 (2) : 225-230.
- [13] Wu B, Song J M, Li X G, Yuan H M, Li N. Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 32 (14) : 4566-4574.
- [14] Zheng L, Cui W I, Jia Y G. 2007. Evaluation on seawater quality by fuzzy comprehensive evaluation method in Qingdao dumping area. *Marine Environmental Science*, 26 : 38-41.
- [15] Sun W P, Yu P S, Pan J M. Assessment of dissolved trace metals in nearshore area of Changjiang Estuary and Hangzhou Bay with gray cluster method. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31 (1) : 79-84.
- [16] Wang H L, Wang C J, Li S P. Eutrophication Evaluation of Seawater Based on Support Vector Machine. *Ocean Technology*, 2005, 24 (1) : 48-51.
- [17] Kazem Nosrati · Miet Van Den Eeckhaut, Assessment of groundwater quality using multivariate statistical techniques in Hashtgerd Plain, Iran, *Environmental Earth Science*, 2012, 65 : 331-344.
- [18] Li F X, Chen W. The set pair analysis method for seawater eutrophication assessment. *Marine Environmental Science*, 2003, 22 (2) : 72-74.
- [19] Chang, N. B, Chen, H. W, Ning, S. K. Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach, *Journal of Environmental Management*, 2001, 63 : 293-305.
- [20] Shiow M L, Shang L L, Ching Y H. Application of two-stage fuzzy set theory to river quality evaluation in Taiwan, *Water Research* 2003, 37 : 1406-1416.
- [21] Yilmaz Icaga. Fuzzy evaluation of water quality classification, *Ecological Indicators*, 2007, 7 : 710-718.
- [22] Wang D, Singh V P, Zhu Y. Hybrid fuzzy and optimal modeling for water quality evaluation, *Water Resource Research*, 2007, 43, W05415.
- [23] Chen S Y. Theory and model of engineering variable fuzzy set —Mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources. *Journal of Dalian University of Technology*, 2005, 45 (2) : 308-312.

- [24] Chen S Y, Wang Z R. Method of variable fuzzy pattern recognition and it application to surrounding rock stability of water power station underground building. *Shuili Xuebao*, 2011, 42(3):253-261,270.
- [25] Chen S Y. 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.
- [26] Chen S Y, Li Y W. Water quality evaluation based on fuzzy artificial neural network. In: Chen S Y, Li Y W eds. *Advances in Water Science*, 2005. 88-91.
- [27] Xia B, Zhang X L, Cui Y, Chen B J, Chen J F, Guo F, Zhang Y, Huang C L. . Evaluation of the physicochemical environment and nutrition status in Laizhou Bay and adjacent waters in summer. *Progress in Fishery Sciences*, 2009, (3):103-111.
- [28] Sun P X, Wang B, Zhang Z H, Wang Z L, Xia B. Relationship Between Nutrient Distributions and Eutrophication in Seawater of the Laizhou Bay. *Advances in Marine Science*, 2006, 24:329-335.
- [29] Wang B D, Yu Y B, Wang X H, Liu J L. A kind of fuzzy decision-making method for appraisal of regional water resources. *Shuili Xuebao*, 2004, (1):6-12.
- [30] Zhou H C, Zhang G H, Wang G L. Multi-objective decision making approach based on entropy weights for reservoir flood control operation. *Shuili Xuebao*, 2007, 38:100-106.

参考文献:

- [9] 王保栋, 孙霞, 韦钦胜, 谢琳萍. 我国近岸海域富营养化评价新方法及应用, *海洋学报*, 2012, 34(4): 61-66.
- [10] 刘庆霞, 黄小平, 张霞, 张凌, 叶丰. 2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源. *生态学报*, 2012, 32(14):4403-4412.
- [11] 刘艳, 纪灵, 郭建国, 曲琳, 杨琳, 丁琳. 烟台邻近海域水质与富营养化时空变化趋势分析. *海洋通报*, 2009, 28(2): 18-22.
- [12] 李雪, 刘长发, 朱学慧, 谢谢. 基于 BP 神经网络的海水水质综合评价. *海洋通报* 2010, 29(2): 225-230.
- [13] 吴斌, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁. 沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用. *生态学报*, 2012, 32(14): 4566-4574.
- [14] 郑琳, 崔文林, 贾永刚. 青岛海洋倾倒地海水水质模糊综合评价. *海洋环境科学*, 2007, 26(1): 38-41.
- [15] 孙维萍, 于培松, 潘建明. 灰色聚类法评价长江口、杭州湾海域表层海水中的重金属污染程度. *海洋学报*, 2009, 31(1): 79-84.
- [16] 王洪礼, 王长江, 李胜朋. 基于支持向量机理论的海水水质富营养化评价研究. *海洋技术*, 2005, 24(1):48-51.
- [18] 李凡修, 陈武. 海水水质富营养化评价的集对分析方法. *海洋环境科学*, 2003, 22(2): 72-74.
- [23] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型——模糊水文水资源学数学基础. *大连理工大学学报*, 2005, 45(2):308-312.
- [24] 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. *水利学报*, 2011, 42(3): 253-261, 270.
- [25] 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. *数学的实践与认识*, 2012, 42(1): 92-101.
- [26] 陈守煜, 李亚伟. 基于模糊神经网络识别的水质评价模型. *水科学进展*, 2005, 16(1): 88-91.
- [27] 夏斌, 张晓理, 崔毅, 陈碧鹃, 陈聚法, 过锋, 张艳, 黄翠玲. 夏季莱州湾及附近水域理化环境及营养现状评价. *渔业科学进展*, 2009, 30(3): 103-111.
- [28] 孙丕喜, 王波, 张朝晖, 王宗灵, 夏滨. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系. *海洋科学进展*, 2006, 24(3): 329-335.
- [29] 王本德, 于义彬, 王旭华, 刘金禄. 考虑权重折衷系数的模糊识别方法及在水资源评价中的应用. *水利学报*, 2004(1): 6-12.
- [30] 周惠成, 张改红, 王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用. *水利学报*, 2007, 38(1): 100-106.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria* LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus* HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing, China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenze, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus* ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

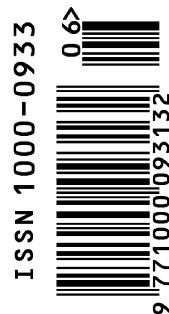
第 33 卷 第 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元