

灰色聚类法在胶州湾富营养化评价中的应用

夏 斌¹ 陈碧鹃^{1*} 辛福言¹ 林文革¹ 谢 骏² 王广军² 王海英²

(¹农业部海洋渔业资源可持续利用重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室

中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(²中国水产科学研究院珠江水产研究所, 广州 510380)

摘 要 参照国家海水水质标准(GB3097-1997)和海水的富营养化特点,选取活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、溶解无机氮(DIN)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)和叶绿素 a(Chl-a)为评价指标,将富营养化程度分为 3 个级别,利用灰类白化权函数描述海水富营养化的等级界限,确定各指标在灰类中的聚类权及聚类系数,确定各聚类对象的等级,在此基础上建立海水富营养化综合评价模型。以胶州湾为研究对象,对 2009 年 5 月和 8 月的监测数据进行分析,结果表明,胶州湾东部海域已达到富营养化,西部和北部海域处于中度营养水平,湾中和湾口附近海域处于贫营养水平,这与沿岸河流、工农业废水、生活污水和养殖废水的排放、湾内海水与外海水的交换速率以及水域水深条件密切相关。灰色聚类法评价的胶州湾水域的富营养化状态与真实情况接近,因此,利用灰色聚类法评价海水富营养化是一种快速、简便、客观的方法。

关键词 灰色聚类法 胶州湾 富营养化 评价

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2011)05-0114-07

Application of the grey clustering method to assessing the eutrophication in Jiaozhou Bay

XIA Bin¹ CHEN Bi-juan^{1*} XIN Fu-yan¹ LIN Wen-ge¹
XIE Jun² WANG Guang-jun² WANG Hai-ying²

(¹Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Shandong Provincial Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

(²Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510380)

ABSTRACT Marine environment is a grey system. Applying the grey clustering method to assessing the eutrophication of marine environment is to establish a comparatively perfect model for marine environment evaluation and give a sound assessment for the quality of marine environment, thus, providing evidence for marine environment management. Referring to Chinese Seawater Quality Standard (GB3097-1997) and the characteristics of seawater eutrophication, selecting $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, DIN, DO, COD and Chl-a as evaluation indexes, and classifying seawater eu-

山东省自然科学基金(ZR2010CQ023)、国家 863 计划项目(2007AA10Z239)、国家海洋局海洋溢油鉴别与损害评估技术重点实验室开放基金(201111)和中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费专项基金(2010-ts-01)共同资助

* 通讯作者。E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85836341

收稿日期: 2011-01-07; 接受日期: 2011-06-07

作者简介: 夏 斌(1981-), 男, 助理研究员, 主要从事海洋生态环境和数值模拟研究。E-mail: xiabin@ysfri.ac.cn, Tel: (0532)85836341

trophication into three levels, then using the whitenization weight function to describe its grading sideling and determine the clustering weights, coefficients and their grades of the corresponding indices in the grey system, a comprehensive evaluation model was established. Taking Jiaozhou Bay as the subject, through the analysis of the data in Jiaozhou Bay in May and August of 2009, the result showed that the eastern Jiaozhou Bay was in the state of eutrophication, the western and northern water was in the state of medium-level nutrient, and the center and mouth of the bay was oligotrophic. The state of water quality was closely related to the river runoff, industrial and agricultural discharge, domestic sewage, aquaculture wastewater, water exchange rate and the water depth. The eutrophication state evaluated by the grey clustering method can reflect the real situation of Jiaozhou Bay, indicating that the assessment of seawater eutrophication by the grey clustering method is feasible.

KEY WORDS The grey clustering method Jiaozhou Bay Eutrophication Assessment

关于海水富营养化程度的评价,众多学者提出了各种各样的评价方法,如综合营养状态指数法(金相灿等 1990)、Justic 指数(Justic 1991)、模糊数学法(姚云等 2004;彭云辉等 1991)、邹景忠指数(邹景忠等 1983)、神经网络法(姚云等 2008)等。但是到目前为止,尚没有统一的关于海水富营养化评价的方法。海水富营养化评价中所使用的监测数据是在有限时间及空间内获得的,即所提供的信息是灰色的。因此,如何将所得到的灰色数据信息合理、准确地白化,是海水富营养化评价是否合理的前提。灰色聚类法是建立在模糊数学基础上的新理论,对信息的利用更充分,是水质评价方法中一种简便客观而又可靠的方法,已广泛用于湖泊水库的富营养化评价(谢骏 1997;朱庆锋等 2004;胡丽慧等 2008;吴祥庆等 2010)以及水环境质量评价(平仙隐等 2006;王旭晨等 2006;孙维萍等 2009;黎小正等 2010)。

胶州湾是国家生态网络海洋生态系统野外研究站,是一个半封闭的受人类活动影响频繁和剧烈的复合海洋生态系统。近年来,随着沿江经济的快速发展,人口的剧增,城市生活污水和工农业废水的大量排放,胶州湾已不同程度地受到营养盐、重金属和有机物的污染,渔业水域生态环境质量日趋恶化。掌握胶州湾的富营养化状况及变化趋势,对于保持胶州湾生态系统的健康发展有着重要意义。

1 材料和方法

灰色白化权函数聚类法是将 n 个聚类对象对 m 个不同聚类指标所拥有的白化值(d_{ij})按 s 个不同灰类进行归纳整理,从而判断聚类对象是属于哪一类的灰色统计(邓聚龙 2005)。

1.1 确定聚类指标和灰类

根据海水调查结果和富营养化标准选择灰色聚类指标,此次研究选用 5 个指标,即:活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、溶解无机氮(DIN)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)和叶绿素 a(Chl-a)作为评价海水富营养化程度的聚类指标。

1.2 数据的无量纲化处理

在水体富营养化评价中,由于各评价指标的量纲各不相同,划分等级大小也不同,需进行无量纲化处理,以便具有可比性。本研究采用的是均值法对指标的实测值 d_{ij} 和指标评价标准的灰类值 b_{kj} 进行无量纲化,计算公式如下:

$$x_{ij} = \frac{d_{ij}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}}, y_{kj} = \frac{b_{kj}}{\frac{1}{s} \sum_{s=1}^s b_{kj}} \quad (1)$$

1.3 确定白化函数

灰类白化函数对聚类结果有至关重要的影响。在本研究中各聚类灰数的阈值 y_{ij} 是由各聚类指标的标准确定的,从而避免了经验主义估计计算所产生的误差甚至错误。白化函数对于白化数是独立的,白化函数常用三角形白化函数和线性函数来表示。本研究采用的第 i 个聚类对象的污染指标 j 的白化函数可用下列线性函数来表示。

(1) 对于观测值越大,水质越差的指标 x_{ij} (COD、DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、Chl-a),当 $k = 1$,即属于贫营养(I级)的白化函数为:

$$f_j^1(x_{ij}) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_{ij} \leq y_{1j} \\ \frac{y_{2j} - x_{ij}}{y_{2j} - y_{1j}} & y_{1j} < x_{ij} < y_{2j} \\ 0 & x_{ij} > y_{2j} \end{cases} \quad (2)$$

$k = 2$,即属于中度营养(II级)的白化函数:

$$f_j^1(x_{ij}) = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{1j} \text{ 或 } x_{ij} \geq y_{3j} \\ \frac{x_{ij} - y_{1j}}{y_{2j} - y_{1j}} & y_{1j} < x_{ij} \leq y_{2j} \\ \frac{y_{3j} - x_{ij}}{y_{3j} - y_{2j}} & y_{2j} < x_{ij} \leq y_{3j} \end{cases} \quad (3)$$

$k = 3$,即属于富营养(III级)的白化函数:

$$f_j^3(x_{ij}) = \begin{cases} 0 & x_{ij} \leq y_{2j} \\ \frac{x_{ij} - y_{2j}}{y_{3j} - y_{2j}} & y_{2j} < x_{ij} < y_{3j} \\ 1 & x_{ij} > y_{3j} \end{cases} \quad (4)$$

(1) 对于观测值越大,水质越好的指标 x_{ij} (DO),当 $k = 1$ 属于贫营养(I级)的白化函数变为:

$$f_j^1(x_{ij}) = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq y_{1j} \\ \frac{y_{2j} - x_{ij}}{y_{2j} - y_{1j}} & y_{1j} > x_{ij} > y_{2j} \\ 0 & x_{ij} \leq y_{2j} \end{cases} \quad (5)$$

其他等级的白化函数依次类推。

1.4 确定各指标在各类别中的聚类权

聚类权 η_{kj} 的确定方法有:(1)单纯阈值法,(2)阈值样本法,(3)专家经验法,(4)样本平均差值法(党国辉等 1993)。由于污染因子阈值 y_{kj} 越大,毒性越小,其相对权重就越小(兰文辉等 1995),本研究采用单纯阈值法中的取倒数法。该法每个指标对于不同的级别都有不同的聚类权,避免了用一个固定基准划分营养级别的不合理之处。公式为:

$$\eta_{kj} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{y_{kj}}} \quad (6)$$

1.5 确定聚类系数 σ_j^k

公式为:

$$\sigma_j^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \eta_{kj} \quad (7)$$

聚类系数是通过灰类白化函数生成得到,它反映了聚类样本对灰类的关联程度。

1.6 构造聚类向量 σ_i 确定各聚类对象的等级

$\sigma_i = \{\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^k\}$ 根据各等级中最大聚类系数, 确定聚类对象等级, 哪一级聚类系数最大即 $\sigma_i^k = \max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\}$, 则该对象 i 就属于哪一级(灰类 k)。

2 结果与分析

2.1 水质监测样本和分级标准值

以胶州湾水质为研究对象, 对其水体进行富营养化评价, 为其综合治理及可持续发展研究提供依据。胶州湾的调查站点如图 1 所示, 调查时间为 2009 年 5 月和 8 月。调查项目包括: 溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、硝酸盐(NO_3^- -N)、亚硝酸盐(NO_2^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)、活性磷酸盐(PO_4^{3-} -P)和叶绿素 a(Chl-a)。采样层次为表层。样品的采集和现场处理及分析方法均按照《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)中所规定的方法进行。

水质监测数据 d_{ij} 为 2009 年 5 月和 8 月监测的平均值, 如表 1 所示。以国家海水水质标准(GB3097-1997)为主, 参照姚云等(2004)提出的胶州湾评价标准, 将富营养化程度划分为 3 个级别, 即贫营养(I级)、中度营养(II级)、富营养(III级), 如表 2 所示。采用公式(1)均值化法, 对表 1 和表 2 中的数据进行无量纲化处理, 处理后结果分别见表 3 和表 4。

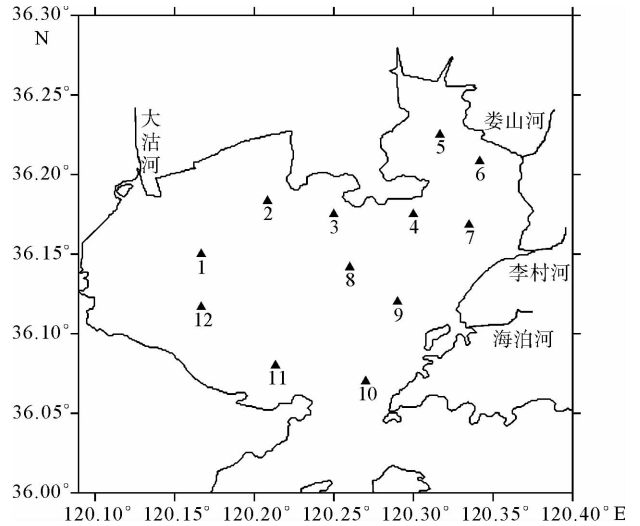


图 1 胶州湾调查站点

Fig. 1 Sampling stations in Jiaozhou Bay

表 1 胶州湾海水富营养化监测数据

Table 1 The monitoring data of seawater eutrophication in Jiaozhou Bay

聚类对象 Clustering object (站点 Station)	聚类指标 Clustering index				
	DO(mg/L)	COD(mg/L)	Chl-a(mg/m ³)	DIN(mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)
1	6.760	1.055	3.285	0.373	0.035
2	6.905	0.995	1.535	0.358	0.031
3	5.830	1.175	4.740	0.389	0.028
4	5.895	1.395	7.685	0.551	0.054
5	5.540	1.920	13.945	0.541	0.098
6	5.620	1.655	8.570	0.571	0.093
7	5.720	1.295	7.790	0.609	0.048
8	6.080	1.005	1.885	0.288	0.017
9	5.840	1.415	5.390	0.447	0.036
10	6.545	0.915	1.575	0.295	0.014
11	6.530	0.920	1.315	0.318	0.024
12	6.060	1.030	2.190	0.492	0.042

2.2 确定各评价指标对各灰类的聚类权

采用公式(6)计算权重, 各灰类中各评价指标的聚类权计算结果见表 5。

2.3 确定各评价对象对各灰类的聚类系数

将表 3 和表 4 的数据代入(2)~(5)式,得到各聚类样本对各灰类的关联值。将表 5 所得的灰类的关联程度值代入公式(7)得到聚类系数及聚类结果(表 6)。

表 2 胶州湾海水富营养化评价标准
Table 2 The evaluation standard of seawater eutrophication in Jiaozhou Bay

营养级 Nutrient level	DO(mg/L)	COD(mg/L)	Chl-a(mg/m ³)	DIN(mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P(mg/L)
贫营养(Ⅰ级)Oligotrophication	6	1	1	0.2	0.015
中度营养(Ⅱ级)Medium-eutrophication	5	2	3	0.3	0.030
富营养(Ⅲ级)Eutrophication	4	3	5	0.4	0.045

表 3 胶州湾无量纲化处理的水质富营养化监测数据(x_{ij})
Table 3 No dimension treatment of the monitoring data of seawater eutrophication in Jiaozhou Bay

聚类对象 Clustering object (站点 Station)	聚类指标 Clustering index				
	DO	COD	Chl-a	DIN	PO ₄ ³⁻ -P
1	1.097	0.906	0.872	0.868	0.603
2	1.120	0.846	0.567	0.822	0.534
3	0.948	0.978	1.221	0.876	0.534
4	0.958	1.164	1.953	1.272	1.026
5	0.901	1.608	2.431	1.287	3.497
6	0.914	1.381	1.527	1.333	3.304
7	0.930	1.077	1.504	1.420	0.895
8	0.988	0.847	0.507	0.614	0.395
9	0.950	1.166	1.363	1.027	0.682
10	1.062	0.772	0.496	0.655	0.316
11	1.060	0.784	0.304	0.708	0.465
12	0.985	0.906	0.881	1.221	0.661

表 4 胶州湾海水富营养化分级标准无量纲化后的灰类值(y_{kj})
Table 4 The grey-clustering values after no dimension of seawater eutrophication grading standard in Jiaozhou Bay

营养级 Nutrient level	DO	COD	Chl-a	DIN	PO ₄ ³⁻ -P
贫营养(Ⅰ级)Oligotrophication	1.200	0.500	0.333	0.667	0.500
中度营养(Ⅱ级)Medium-eutrophication	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
富营养(Ⅲ级)Eutrophication	0.800	1.500	1.667	1.333	1.500

表 5 评价指标对应不同评价等级的聚类权(η_{kj})
Table 5 The clustering weights of evaluation indexes in corresponding grey classification

营养级 Nutrient level	DO	COD	Chl-a	DIN	PO ₄ ³⁻ -P
贫营养(Ⅰ级)Oligotrophication	0.089	0.214	0.322	0.161	0.214
中度营养(Ⅱ级)Medium-eutrophication	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
富营养(Ⅲ级)Eutrophication	0.318	0.170	0.153	0.191	0.170

表 6 聚类系数及评价结果
Table 6 Clustering coefficient and evaluation result

聚类对象 Clustering object (站位 Station)	贫营养(I级) Oligotrophication	中度营养(II级) Medium-eutrophication	富营养(III级) Eutrophication	评价结果 Evaluation result
1	0.164	0.614	0.351	
2	0.346	0.433	0.359	中度营养(II级)
3	0.093	0.565	0.393	Medium-eutrophication
4	0.030	0.577	0.326	
5	0.131	0.274	0.427	富营养(III级)
6	0.126	0.266	0.391	Eutrophication
7	0.030	0.495	0.477	中度营养(II级)
8	0.476	0.390	0.318	Medium-eutrophication
9	0.021	0.527	0.543	贫营养(I级)
10	0.491	0.335	0.339	Oligotrophication
11	0.460	0.359	0.338	富营养(III级)
12	0.103	0.624	0.420	Eutrophication
				中度营养(II级)
				Medium-eutrophication

3 讨论

根据最大隶属度原则,即监测站位的富营养化等级为其最大聚类系数所对应的灰类。基于灰色聚类法评价胶州湾调查站位富营养化等级的评价结果如表 6 所示。胶州湾 8、10、11 号站 I 级灰类的聚类系数最大,表明这 3 个站位水域处于贫营养水平,这主要是由于 8 号站位于湾中央,10 和 11 号站位于湾口附近,水交换能力较强。位于胶州湾西部和北部区域的 1、2、3、4、7、12 号站 II 级灰类的聚类系数最大,表明这个区域水体处于中度营养水平。虽然这些区域水体处于贫营养和 中度营养水平,但是这些站位的 III 级灰类的聚类系数较大,均大于 0.300,与 II 级和 I 级灰类的聚类系数相差较小,这表明该区域具有潜在富营养化风险,需引起足够的重视。位于胶州湾东部区域的 5、6、9 号站 III 级灰类的聚类系数最大,表明该区域处于富营养化水平。5、6、9 号站位于 娄山河、李村河和海泊河入海口处,这些河流汇集了 大量富含磷和氨的生活污水。此外,9 号站位及其附近海域是大型海藻——海带的主要养殖区,每年在海带生长阶段将会在该海域施放大量的肥料,所以该处营养盐非常丰富。综上所述,胶州湾东部海域已达到富营养化,西部和北部海域处于中度营养水平,湾中和湾口附近海域处于贫营养水平,这与沿岸河流、工农业废水、生活污水和养殖废水的排放、湾内海水与外海水的交换速率以及水域水深条件密切相关。

姚云等(2004)利用模糊综合评价模型对胶州湾的富营养化进行了评价,首先根据相应的隶属函数计算胶州湾不同站位不同因子(DO、COD、Chl-a、DIN 和 PO₄-P)对各级营养标准的隶属度,然后计算出各个因子的权重,最后用矩阵代数乘法运算计算出各站位 3 个营养级对应的隶属度对海水的营养状况进行综合评价。姚云等(2008)利用人工神经网络法对胶州湾富营养化进行了评价,首先选择营养标准进行样本分配,然后选择合适的网络拓扑结构,分别使用增加冲量项的算法和 LM 算法对海水的营养状况进行综合评价。这两种方法选择的评价因子和营养标准与本研究是一致的,最后评价的结果是胶州湾东部海水属于富营养化,与本研究采用灰色聚类法的评价结果是一致的。这表明用灰色聚类法评价海水的富营养化是可行的,能够较好地反映胶州湾富营养化的真实水平。

参 考 文 献

- 王旭晨,王丽卿,彭自然. 2006. 灰色聚类法评价淀山湖水质状况. 上海水产大学学报,15(4):497~502
- 兰文辉. 1995. 灰色聚类分析法在大气环境评价中的应用及与其它方法的比较. 干旱环境监测,9(3):147~150
- 平仙隐,沈新强. 2006. 灰色聚类法在海水水质评价中的应用. 海洋渔业,28(4):326~330
- 邓聚龙. 2005. 灰色系统基本方法. 武汉:华中科技大学出版社
- 朱庆锋,廖秀丽,陈新庚,张淑娟. 2004. 用灰色聚类法对荔枝湾湖水水质富营养化程度的评价. 中国环境监测,20(2):47~50
- 孙维萍,于培松,潘建明. 2009. 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,31(1):79~84
- 吴祥庆,黎小正,秦振发,杨姝丽,庞燕飞,兰柳春. 2010. 灰色聚类法在西津水库水体富营养化评价中的应用. 安徽农业科学,38(22):11 926~11 928
- 金相灿,刘鸿亮. 1990. 中国湖泊富营养化. 北京:中国环境科学出版社,163~216
- 邹景忠,董丽萍,秦保平. 1983. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学,2(2):41~55
- 胡丽慧,潘安,李铁松,李成柱,王佑汉. 2008. 灰色聚类法在升钟水库水体富营养化评价中的应用. 农业环境科学学报,27(6):2 407~2 412
- 姚云,沈志良. 2004. 胶州湾海水富营养化水平评价. 海洋科学,28(6):14~17
- 姚云,郑世清,沈志良. 2008. 利用人工神经网络模型评价胶州湾水域富营养化水平. 海洋环境科学,27(1):10~12
- 党国辉,孙翔. 1993. 关于灰色聚类分析计算的研究. 开封:河南大学出版社,103~107
- 彭云辉,王肇鼎. 1991. 珠江河口富营养化水平评价. 海洋环境科学,10(3):7~13
- 谢骏. 1997. 灰色系统理论在我国湖泊富营养化程度评价中的应用. 水利渔业,16:9~12
- 黎小正,吴祥庆,秦振发,庞燕飞,杨姝丽,兰柳春. 2010. 应用灰色聚类法评价广西左江佛耳丽蚌自然保护区水质. 水生态学杂志,3(6):52~55
- Justic, D. 1991. A simple oxygen index for trophic state description. Marine Pollution Bulletin,22(4):201~204

《海洋水产研究》期刊已于 2009 年 1 月起更名为《渔业科学进展》

各有关单位、各位读者:

经国家新闻出版署 2008 年 11 月 13 日(新出报刊[2008]1324 号文)和山东省新闻出版局 2008 年 12 月 11 日(鲁新出批字[2008]325 号文)批准,从 2009 年 1 月起,《海洋水产研究》期刊更名为《渔业科学进展》(英文名:Progress in Fishery Sciences),ISSN 1000-7075,国内统一刊号:CN 37-1466/S,国内邮发代号:24-153,国外发行代号:4578Q。刊期仍为双月刊。

更名后,本刊栏目包括研究论文、研究综述和研究简报等,内容涵盖各类水域渔业科学研究最新成果,涉及与渔业科技有关的各学科门类的研究进展。本刊主要报道渔业生物学、渔业海洋学、水产增养殖学、水产种质资源与遗传育种、水生野生生物保护、渔业生物病害及其防治、渔业生态环境保护、渔业设施与捕捞技术、渔业装备制造技术、水产品综合利用与质量安全等领域的新发现、新技术和新成果。希望各位领导、各位专家,一如既往地关心和支持我们的工作,踊跃为《渔业科学进展》刊物投稿。

祝愿各位领导、各位专家工作顺利、万事如意!

《渔业科学进展》编辑部

2011 年 10 月 20 日