

文章编号: 1000-0615(2001)01-74-05

浙江北部沿海富营养化的评价与分析

章守宇¹, 杨红¹, 焦俊鹏¹, 邵君波²

(1. 上海水产大学海洋学院, 上海 200090;

2. 舟山市海洋生态环境监测站, 浙江 舟山 316004)

摘要: 运用模糊集合论中的权距离概念结合隶属度的模糊评价方法, 以化学耗氧量、总无机氮、活性磷酸盐和生物学参数叶绿素 a 为指标, 对浙江北部沿海的富营养化状况进行了评价。评价过程中的重要性权向量通过改进的层次分析法来确定, 并对评价指标重要性比较矩阵进行了不同的调整和对比分析, 评价结果以隶属法和累加法两种方式给出。结果表明, 浙江北部沿海约 76.6% 的调查海域处于中营养和中富营养状态之间, 低于和高于此状态的约分别占 16.6% 和 6.7%; 评价指标重要度的不同排列会对最终评价结果产生影响; 累加法的评价结果比隶属法更接近接近实际; 富营养化程度高低与赤潮发生的相关性尚需要进一步研究。

关键词: 富营养化; 评价; 浙江北部沿海; 赤潮

中图分类号: 913 文献标识码: A

Assessment of eutrophication in the north of Zhejiang coast

ZHANG Shou-yu¹, YANG Hong¹, JIAO Jun-peng¹, SHAO Jun-bo²

(1. Ocean College, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China;

2. Zhoushan Marine Ecological Environmental Monitoring Station, Zhoushan 316004, China)

Abstract: Depend on the indices of COD, T-N, PO₄-P and chlorophyll-a, the eutrophication in the north of Zhejiang coast was assessed by the method that associated with weighing distance and subordinative degrees of fuzzy set theory. In the course of the assessment, the significance-weighting vector was determined by the modified hierarchy analyzing method and the significance-compared matrix of the assessment indices was adjusted. The assessment results were given in two ways of subordinative and accumulative methods. The results showed that the area with middle and middle-high eutrophication were 76.6% of the researched area, while the area with lower and higher than that being 16.6% and 6.7% respectively. The different arranges of assessment indices influenced the final assessment results, and the accumulative method was of higher exactitude than the subordinative method for describing status of eutrophication. The further research needs to be carried out on the relativity between eutrophication and algae bloom.

Key words: eutrophication; assessment; the north of Zhejiang coast; algae bloom

海水的富营养化是诱发赤潮的最基本原因, 及时而准确地对海水富营养化程度作出评价对于监测赤潮的发生至关重要。海水富营养化的评价通常运用模糊数学原理, 采用隶属度矩阵与权重矩阵复合相乘的方法来得到最终结果^[1,2], 但由于评价过程中取最大值或最小值的矩阵复合运算容易丢失有价值的中间信息, 而使最后结果均化, 影响评价的客观性。另外, 隶属度矩阵和权重矩阵虽然考虑

收稿日期: 1999-03-28

资助项目: 国家教委资助项目 (1999-363)

第一作者: 章守宇 (1961) 男, 浙江长兴人, 博士, 主要研究方向为海洋环境工程, E-mail: szhang@shfu.edu.cn

了各样本间的重要性, 但却忽略了各指标间的差异性及其对评价结果的影响。本文运用模糊集合论中的权距离概念结合隶属度的模糊评价方法^[3], 并在此基础上考虑各项评价指标重要性比较矩阵的不同排列, 以浙江北部沿海海域为例, 试对其富营养化状况进行评价, 评价区域及样本分布(调查站位)见图 1。

1 富营养化模糊评价模式

对于评价海域 n 个样本 m 项指标, 有指标矩阵 $|x_{ji}|$, $j = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n$ 。假设富营养化标准由 c 个等级组成, 则其标准指标矩阵为 $|z_{jk}|$, $k = 1, 2, \dots, c$ 。考虑海水富营养化所属标准的模糊性, 由线性内插法得到实测指标隶属度矩阵 $|r_{ji}|$ 和标准指标隶属度矩阵 $|s_{jk}|$, 其元素表达式分别为,

$$r_{ji} = \frac{(x_{ji} - z_{j1})}{(z_{jc} - z_{j1})} \quad (1)$$

$$s_{jk} = \frac{(z_{jk} - z_{j1})}{(z_{jc} - z_{j1})} \quad (2)$$

评价指标的权重通常采用因子贡献率方法, 即

$$q_{ji} = \frac{x_{ji}}{\frac{1}{c} \sum_{k=1}^c z_{jk}} \quad (3)$$

并由此得到超标权重矩阵 $|q_{ji}|$, 其物理意义为指标实测值超过标准平均值的程度。

考虑各指标在海水富营养化评价时的重要性并不相同, 引入了如下指标重要性权向量 $\{w'_j\}$ 。

(1) 构建指标重要性比较矩阵 $|a_{jl}|$, $l = 1, 2, \dots, m$, 当第 j 项指标重要性大于第 l 项时, $a_{jl} = 2$, 小于时, $a_{jl} = 0$, 等于时, $a_{jl} = 1$ 。

(2) 计算各指标的重要程度排序指数 $e_j = \sum_{l=1}^m a_{jl}$ 。

(3) 构建判断矩阵 $|b_{jl}|$, 当 $e_j > e_l$ 时, $b_{jl} = e_j - e_l$; $e_j = e_l$ 时, $b_{jl} = 1$; $e_j < e_l$ 时, $b_{jl} = \frac{1}{(e_j - e_l)}$ 。

(4) 归一化处理 $|b_{jl}|$ 的最大本征值 λ_{max} 向量, 得到指标重要性权向量 $\{w'_j\}$ 。

综合考虑超标权重和指标重要性, 对 $|q_{ji}|$ 和 $\{w'_j\}$ 进行复合运算得到指标的综合权重矩阵, 即

$$|w_j| = |q_{ji}| * \{w'_j\} \quad (4)$$

假设样本 i 以隶属度 y_{ki} 隶属于第 k 级富营养化标准, 则有样本隶属度矩阵 $|y_{ki}|$, 并满足下列条件,

$$\left. \begin{aligned} \sum_{k=1}^c y_{ki} - 1 &= 0 & \forall i \\ \sum_{i=1}^n y_{ki} &> 0 & \forall k \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

样本 i 与第 k 级富营养化标准之间的差异以加权广义距离表示, 即

$$D(\bar{r}_i, \bar{s}_k) = y_{ki} \left\{ \sum_{j=1}^m (w_{ji} |r_{ji} - s_{jk}|)^p \right\}^{1/p} \quad (6)$$

式中 p 为距离参数, 通常取 1 或 2。由加权广义距离的平方和与等式约束(5)式构成 Lagrange 函数, 并取其对于 y_{ki} 和 Lagrange 乘数的偏导数为零, 推解得到

$$y_{ki} = \left\{ \frac{\sum_{d=1}^c (M_d^{2/p})}{M_k^{2/p}} \right\} \quad (7)$$

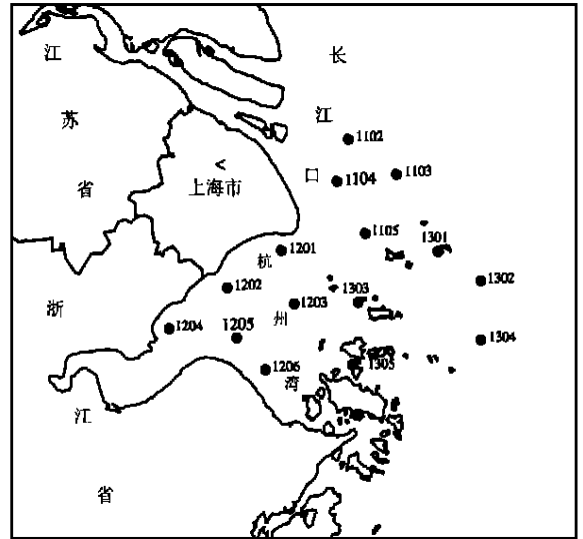


图 1 调查海域及站位

Fig. 1 The sketch map of the region and sampling positions of the present study

(7) 式为样本 i 对第 k 级富营养化的最优隶属度, 即海水富营养化评价的基本模型, 式中 M_k 和 M_d 可由下式计算得到。

$$\left. \begin{aligned} M_k &= \sum_{j=1}^m (w_{ji} | r_{ji} - s_{jk} |)^p \\ M_d &= \sum_{j=1}^m (w_{ji} | r_{ji} - s_{jd} |)^p \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2 评价指标、标准及重要性

富营养化是指水域内生物营养成分(如氮、磷等)的积累过程, 而反映水域富营养化进程的评价, 一般是利用水域中营养元素的易氧化物质的存在量作为指标。近海海区富营养化的主要原因是城市废水的大量排放及农用肥料的流失。考虑到水域中氮、磷等营养盐多以其氧化态形式存在, 以及赤潮形成发展过程中的叶绿素相关作用, 本文选用化学耗氧量(COD)、总无机氮(T-N)、活性磷酸盐(PO_4-P)和生物学参数叶绿素 a ($Chl-a$) 作为海水富营养化程度的评价指标。

关于海水的富营养化程度, 因为目前我国尚无规定的评价标准, 所以本文以《中华人民共和国海水水质标准 GB3097-1997》和相关水域富营养指数评价标准为基础制定了浙江北部沿海富营养化评价标准, 按富营养化程度的逐渐增大依次分成 6 级, 分别为贫营养、贫中营养、中营养、中富营养、富营养和极富营养。各评价指标中, COD 和 T-N 主要以上述两标准之平均值为基本再作适当调整; PO_4-P 标准值结合浙江北部沿海受长江和钱

表 1 海水富营养化程度的评价标准(单位: $mg L^{-1}$)

Tab. 1 The assessment criteria of the seawater eutrophication level

	贫营养 (I)	贫中营养 (II)	中营养 (III)	中富营养 (IV)	富营养 (V)	极富营养 (VI)
COD	0.625	1.250	2.000	3.000	4.500	7.000
T-N	0.087	0.251	0.635	1.216	2.143	3.268
PO_4-P	0.004	0.010	0.021	0.035	0.054	0.073
$Chl-a$	0.100	0.272	0.739	2.009	5.460	14.841

塘江径流影响, 赤潮发生为磷限制之特点, 进行了适度调低并逐级按增大方向拉大其与 T-N 的比例; $Chl-a$ 则考虑其生物性特点, 以指数递增的量级确定, 具体各指标的标准值见表 1。

指标重要性比较矩阵按两种排列顺序分别给出, 第一种排列以浮游植物的直接营养盐总无机氮、活性磷酸盐为重要级, 即 $[T-N] = [PO_4-P] > [Chl-a] = [COD]$, 第二种排列则考虑赤潮发生的叶绿素相关性及其浙江北部沿海磷限制特点, 设叶绿素 a 和活性磷酸盐为重要级, 即 $[Chl-a] = [PO_4-P] > [T-N] = [COD]$ 。

3 结果及讨论

应用本评价模式(1)~(8)式并按指标重要性的两种排列顺序分别对浙江北部沿海水域富营养化程度进行了计算, 其结果如表 2, 表中最终等级项的累加法 and 隶属法分别表示某站位对各级评价标准的比例值之和与最大隶属度。比如站位 1102 第一种排列, 由累加法计算的最终等级为 $2.9 \times 1 + 4.6 \times 2 + 19.7 \times 3 + 69.0 \times 4 + 2.7 \times 5 + 0.7 \times 6 = 3.7$, 而按隶属度法则因最大值为 69.0% 确定, 故选择 IV 级。

表 2 所列各站位的最终级别显示, 浙江北部沿海的富营养化程度绝大部分在 III-IV 级即中营养和中富营养状态之间, 约占调查海域的 76.7%, 小于 II 级即贫中营养和大于 IV 级即富营养状态的分别占 16.6% 和 6.7%。

从隶属法的最终结果来看, 评价指标重要性比较矩阵的二种排列对整个海域评价结果产生的影响较小, 发生变化的仅局限于 1103 和 1104 这两个站点。由于减少 T-N 和增加 $Chl-a$ 的重要度使得上述两个站位富营养化程度的评价结果降低了一个等级, 因此, 通过改变指标重要性比较矩阵的排列进行多次评价, 就有可能正确把握住该海域富营养化程度各评价指标的重要度次序。如何设立指标重要度在量级上的差别并建立与评价标准的平衡关系尚需作更深入的探讨。

与隶属法相比, 累加法因为避免了非此即彼的硬性归类, 所以能比较合理地反映海水富营养化程

度的实际状况。如第一种指标重要度排列的计算结果中, 1104 站位由于其富营养化程度对应于各评价标准的最大值为 40.8%, 所以“不幸”落入 V 级即富营养等级。而事实上该站位对应于 IV 级标准的比例也达到了 40.4%, 仅比 V 级比例值小 0.4%, 显然按累加法评价的 4.3 级更接近于实际些。

表 2 T- N 和 PO₄- P 及 Chl-a 和 PO₄- P 为重要级时的计算结果

Tab. 2 The results calculated when T- N and PO₄- P or Chl-a and PO₄- P being significant indices

站号	各标准等级所占比例 (%)						最终等级		各标准等级所占比例 (%)						最终等级	
	I	II	III	IV	V	VI	累加法	隶属法	I	II	III	IV	V	VI	累加法	隶属法
1102	2.9	4.6	19.7	69.0	2.7	0.7	3.7	IV	5.1	8.1	33.3	48.3	3.9	1.0	3.4	IV
1103	3.9	6.5	37.6	48.3	2.8	0.7	3.5	IV	4.5	8.0	49.3	34.3	2.8	0.7	3.3	III
1104	2.9	3.8	7.8	40.4	40.8	4.0	4.3	V	3.7	4.8	9.9	44.6	32.4	4.3	4.1	IV
1105	4.1	7.3	57.9	27.6	2.2	0.6	3.2	III	4.6	8.5	64.8	19.2	2.1	0.6	3.1	III
1201	2.7	4.2	16.4	72.8	2.9	0.7	3.7	IV	2.7	4.4	11.8	73.6	6.1	1.1	3.8	IV
1202	1.8	2.5	6.2	82.5	5.8	1.0	3.9	IV	3.1	4.3	10.6	71.8	8.3	1.6	3.8	IV
1203	3.5	5.2	18.2	68.4	3.6	0.8	3.7	IV	5.4	8.3	28.7	51.7	4.5	1.1	3.5	IV
1204	1.5	2.2	5.4	83.8	5.9	0.9	3.9	IV	2.9	4.0	9.9	72.8	8.6	1.6	3.9	IV
1205	0.5	0.7	2.1	95.3	1.0	0.2	4.0	IV	2.6	3.8	11.0	76.4	4.8	1.0	3.8	IV
1206	2.3	3.4	10.0	78.6	4.4	0.9	3.8	IV	4.5	6.5	13.1	46.3	25.4	3.9	3.9	IV
1301	5.4	14.9	74.9	3.5	0.7	0.2	2.8	III	11.2	30.1	51.3	5.4	1.2	0.4	2.6	III
1302	5.4	12.4	75.7	5.1	0.8	0.2	2.8	III	9.6	22.3	59.6	6.5	1.3	0.4	2.7	III
1303	0.4	1.0	97.5	0.8	0.1	0.0	3.0	III	1.2	2.9	92.2	3.0	0.4	0.1	3.0	III
1304	1.8	3.8	90.6	3.0	0.4	0.1	3.0	III	5.4	11.2	74.5	7.1	1.2	0.4	2.9	III
1305	2.5	5.0	83.2	7.8	0.9	0.2	3.0	III	2.6	5.6	80.0	10.1	1.1	0.3	3.0	III

图 2 是以各站位的累加法为基础的浙江北部沿海富营养化程度的水平分布, 图 3 是各个评价指标在表层的等值线分布图。图 2 显示, 等值线值在浙江北部沿岸海域由外海及近岸而递增, 并在杭州湾钱塘江口北岸和长江口南岸南区排污口附近出现较高程度的富营养化, 这个结果与事实是相符合的。

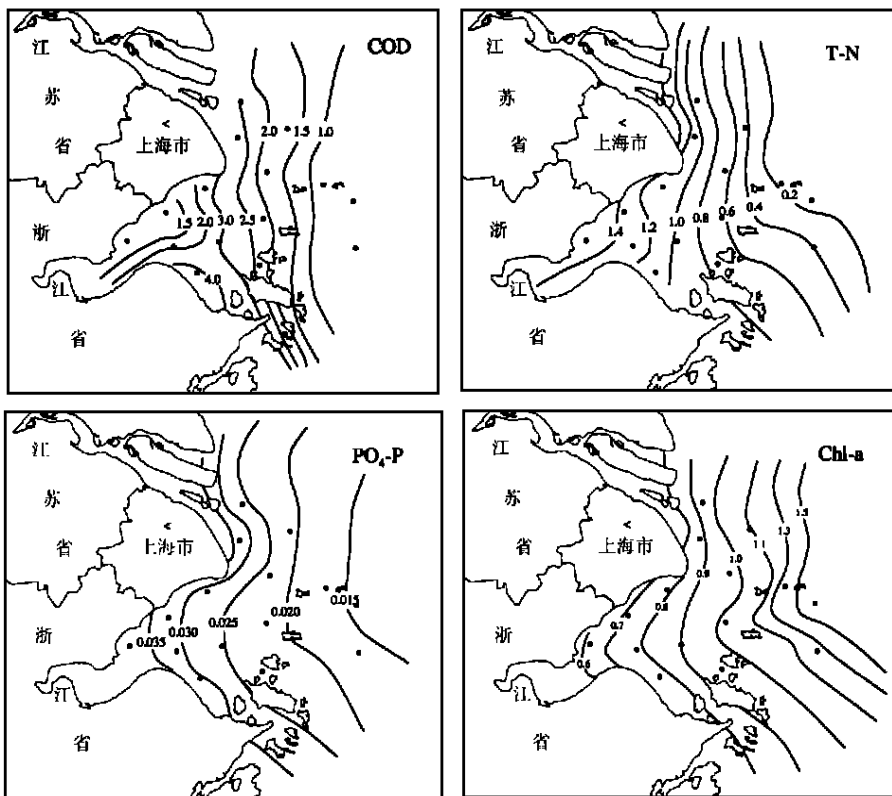


图 2 评价指标 COD、T- N、PO₄- P 和 Chl-a 的表层分布

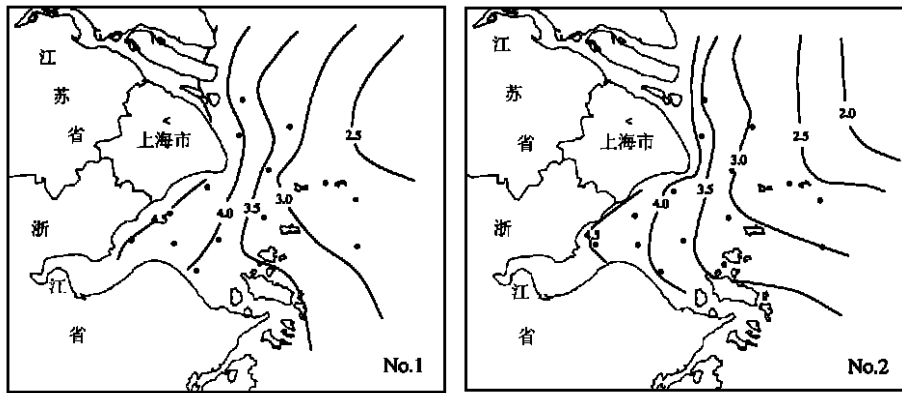


图3 富营养化程度的等值线分布

Fig. 3 The isolines of eutrophication level in the north of Zhejiang coast

与隶属法不同的是,累加法通过改变评价指标重要性比较矩阵的排列次序会对近岸区域的评价结果产生一定影响,如4级等值线的分布在近河口处相差得较大。另外,与图3相比较还可以知道,图2富营养化等级的两种水平分布分别与图3的COD、T-N和 PO_4-P 、Chl-a分布大致相对应,即近岸区域表层这些指标分布趋势的差异,可以通过调整指标重要性比较矩阵的排列在累加法的最终评价结果中表现出来。

通常赤潮发生与海水富营养化程度呈某种正相关,但近年来浙江北部沿海几次大的赤潮并非发生在富营养化程度最高的河口附近,而是在外海侧约 $122.5^\circ E$ 的附近海域,这很可能是因为浙江北部沿海河口域受长江、钱塘江等径流量大和河口域水浅、潮流强的影响而形成高悬浮物浓度及透明度低这一特点,使得赤潮生物不能快速繁殖的缘故。本文基于这种认识对评价指标的重要度作了不同的调整和对比,即在第二种排列中提高了叶绿素的相对重要性,就海水富营养化程度的高低与初级生产力及至赤潮发生的相关性进行了初步的判断比较,但尚未形成明确的结论,仍需作进一步探讨。

4 结论

运用模糊集合论中的权距离概念结合隶属度的模糊评价方法,以化学耗氧量、总无机氮、活性磷酸盐和生物学参数叶绿素a为指标,对浙江北部沿海的富营养化状况进行了如下评价。

(1) 浙江北部沿海约76.6%的调查海域处于中营养和中富营养状态之间,低于和高于此状态的约分别占16.6%和6.7%。

(2) 浙江北部沿海富营养化程度由外海及近岸而递增,并在杭州湾钱塘江口北岸和长江口南岸南区排污口附近出现较高值,该结论与事实相符。

(3) 应用本模式评价海水的富营养化,与隶属法相比,累加法更能比较合理地反映海水富营养化程度的实际状况。

(4) 指标重要性比较矩阵的不同排列会对最终评价结果产生影响。

(5) 海水富营养化程度高低与赤潮发生的相关性尚需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 容跃,金键.用模糊集理论计算水环境综合评价指数[J].环境科学,1982,3(2):69~72.
- [2] 王化泉,赵丽云.海洋环境质量评价探讨—模糊集理论的应用[J].热带海洋,1985,4(2):44~51.
- [3] 熊德琪,陈守煜.海水富营养化模糊评价理论模式[J].海洋环境科学,1993,12(3):104~110.