

近10年天津近岸海域水环境质量 可视化分析与评价研究

李明昌

(交通运输部天津水运工程科学研究所 水路交通环境保护技术实验室, 天津 塘沽 300456)

摘要: 将信息可视化平行坐标方法与水环境质量分析相结合,以海水水质指标分级标准,提高水质指标总体水平与所属等级表达的直观性;首次建立了海洋水环境质量可视化分析的平行坐标方法;结合云理论和集对分析方法两者的优点,建立了具体的水环境质量评价方法与系统的评价步骤,该方法不仅具有集对分析方法简洁、易操作和高精度等优点;同时云理论的应用使得评价指标隶属于等级的随机性和模糊性得以充分体现。文中采用平行坐标和云理论与集对分析相耦合的评价方法,研究并分析了近10 a天津近岸海域水环境质量状况。结果表明:天津近岸海域水环境质量较差,氮磷富营养化现象较为严重;基于平行坐标的环境可视化分析方法具有简洁、直观等优点;云理论与集对分析相耦合的评价方法集合了两者的优点,可以准确可靠地应用于水环境质量评价。

关键词: 水环境; 平行坐标; 云理论; 集对分析; 可视化; 水环境评价

中图分类号: X502; X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0035-06

Visualization analysis and assessment of water environmental quality near shore district of Tianjin in recent ten years

LI Mingchang

(Laboratory of Environmental Protection in Water Transport Engineering, Tianjin Research Institute
of Water Transport Engineering, Tanggu 300456, China)

Abstract: Combining the parallel coordinate method of information visualization with the marine environmental quality visualization analysis, taking sea water quality index as class standard and the improvement of water quality index and the intuitive characteristic of index level, the paper first all established the parallel coordinate method of visualization analysis for the marine environmental quality. It set up the detailed and systematic assessment method and procedure for water environmental quality by combining set pair analysis method with cloud theory. The method has not only the advantages of concision, easy-operation and high precision of set pair analysis method but the randomness and ambiguity of assessment indexes' membership can be reflected in the assessment procedure by using cloud theory. This paper used the combination of parallel coordinate, the coupled assessment method of cloud theory and set pair analysis, and applied to analyze and evaluate the water environmental quality near the shore of Tianjin district in recent ten years. The result showed that the water environmental quality is poor and the eutrophication phenomenon is serious by nitrogen and phosphate near the shore district of Tianjin. The visualization analysis method with parallel coordinate has some advantages of concision and perceptual intuition. The method collected the advantages of two methods and can be applied to water environmental quality assessment accurately and reliably.

Key words: water environment; parallel coordinate; cloud theory; set pair analysis; visualization; assessment of water environment

收稿日期: 2015-01-21; 修回日期: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209110); 天津市科技兴海项目(KJXH2011-17); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS130215、KJFZJJ2011-01)

作者简介: 李明昌(1977-), 男, 辽宁大连人, 博士, 副研究员, 主要从事海洋环境水力学研究。

1 研究背景

近年来随着沿海地区的发展,特别是港口航道工程的大量建设,我国河口和近岸海域的污染形势十分严峻,日益严重的环境问题已经成为影响区域可持续发展的一个重要制约因素。海域水环境质量分析与评价能够及时掌握海域特征污染因子及其影响程度和海域综合污染水平,为区域环境监督、管理与决策提供科学依据,因而受到了国内外学者的广泛关注,建立了单项或综合指数法、模糊综合评价法^[1]、灰色聚类法^[2]、物元模型分析法^[3]、投影寻踪法^[4]、神经网络法^[5]、集对分析法^[6]等多种评价方法,取得了大量的研究成果,但这些方法本身都存在一定的缺陷^[7]。

平行坐标概念由法国数学家 Ocane 于 1885 年提出,其后由二维逐步发展为多维情况^[8]。平行坐标是信息可视化的一种重要技术^[9],克服了传统的笛卡尔直角坐标系容易耗尽空间、无法表达三维以上数据的难题,现已在多元数据分析^[10]、可视化数据挖掘^[11]与最优化^[12]等多个研究领域得到了应用。集对分析理论^[13]能够有效处理确定与不确定性相集合的高维非线性系统的评价问题,符合水环境评价的复杂不确定性特点,该方法已经在数学、经济、资源、管理与环境等多个领域得到了广泛的应用。正如其他评价方法,集对分析方法也忽略了评价指标隶属于等级的随机性和模糊性。而云模型^[14]是在概率与模糊数学的理论基础之上,通过特定算法所形成的定性概念与定量数值之间的不确定性转换模型,该模型反映了随机性和模糊性之间的关联,构成了定性和定量间的相互映射,现已应用于系统评测、算法改进、决策支持、智能控制、数据挖掘、知识发现和网络安全等多个方面^[15]。

本文将信息可视化平行坐标方法与水环境质量分析相结合,通过海水水质标准中各指标分级标准的引入,建立了海洋水环境质量可视化分析的平行坐标方法,直观的表述各水质指标的总体水平与所属等级;结合云理论和集对分析方法两者的优点,建立了具体的水环境质量评价方法与系统的评价步骤,该方法不仅具有集对分析方法简洁、易操作和高精度等优点;同时云理论的应用使得评价指标隶属于等级的随机性和模糊性得以充分体现。文中采用平行坐标和云理论与集对分析相耦合的评价方法,研究并分析了近 10 a 天津近岸海域水环境质量状况,验证了上述方法的有效性。

2 基于平行坐标的可视化分析方法

2.1 平行坐标理论

平行坐标^[9]突破了欧式空间只能表示三维数据的局限,通过二维表达实现了高维数据的可视化,其基本思想是将 n 维数据属性空间通过 n 条等距离的平行轴影射到二维平面上,平行轴中每一条轴线代表一个属性维,其取值范围则为对应属性的最小值和最大值。因此,最后每一个数据集合依照其属性取值均表达为一条跨越 n 条平行轴的折线段。

2.2 方法及具体步骤

将 m 组 n 维数据($F_i |_{i=1,2,\dots,m} = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i, \dots, x_n^i) |_{i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n}$)采用平行坐标的方法予以表达,其具体实施步骤如下:

Step 1. n 维数据最大值和最小值的选取:分别选出 m 组 n 维数据矩阵即各列(维)的最大值和最小值($(x_{j,\max}, x_{j,\min}) |_{j=1,2,\dots,n}$)。

Step 2. n 维数据间的统一化:在 n 组最大值和最小值($(x_{j,\max}, x_{j,\min}) |_{j=1,2,\dots,n}$)中,选取其中的某一组值($(x_{k,\max}, x_{k,\min}) |_{k=1,2,\dots,n}$ (一般取最大者),并对该组最大值和最小值进行空间延拓,得($x_{k,\max} + a, x_{k,\min} - b$),其中 a 和 b 为正数,以($x_{k,\max} + a, x_{k,\min} - b$)为标准,将 m 组 n 维数据($F_i |_{i=1,2,\dots,m} = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_j^i, \dots, x_n^i) |_{i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n}$)进行统一化处理(使所有取值处于较为接近的取值空间范围内),获得新的 m 组 n 维数据。

Step 3. 平行坐标图绘制:通过统一化处理后,可保证新的 m 组 n 维数据处于较为接近的取值范围,即可采用绘图工具绘制平行坐标图。

Step 4. n 维平行坐标轴两端点值反向回归:将平行坐标图中 n 维数据的最大值和最小值按下式(1)和(2)计算,获得平行坐标图中 n 维数据最大值和最小值的标示值。

$$\bar{x}_{j,\max} = x'_{j,\max} [x_{j,\max} / (x_{k,\max} + a)] |_{j=1,2,\dots,n} \quad (1)$$

$$\bar{x}_{j,\min} = x'_{j,\min} [x_{j,\min} / (x_{k,\min} - b)] |_{j=1,2,\dots,n} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_{j,\max}$ 和 $\bar{x}_{j,\min}$ 为 n 维数据最大值和最小值在平行坐标图中的标示值; $x'_{j,\max}$ 和 $x'_{j,\min}$ 为 n 维数据统一化处理所得最大值和最小值。

3 基于云理论与集对分析的耦合评价方法

3.1 云理论

不确定性是客观世界绝大多数事物和现象的基

本属性之一,用概念的方法把握量的不确定性更具有普遍意义。

云模型^[14]正是通过期望、熵和超熵3个数字特征来反映客观世界中概念的随机性和模糊性,实现定性概念与定量数值之间的不确定性转换。

3.2 集对分析原理

集对分析原理^[13]首先是将不确定性系统中的两个集合(A和B)构造为相互关联的集对H(A,B),则该集对具有同一、差异和对立的特性,组成同异反联系度矩阵,表示集合A与B相联系的优劣程度,如式(3):

μ_{A~B} = \frac{s}{n} + \frac{f}{n}l + \frac{p}{n}k \tag{3}

式中:s为同一性个数;f为差异性个数;p为对立性个数;n为集合A和B的特性个数;l为差异不确定系数;k为对立系数。l和k起标记作用。s/n, f/n, p/n, 分别为集合A和B某一特性的同一度、差异度和对立度。

3.3 耦合评价方法及具体步骤

Step1 构建集对:集对评价是将n个评价样本集合A_i(x_i; i = 1, 2, \dots, n) 和对应的K级指标标准B_j(j = 1, 2, \dots, K) 构成相互联系的集对H(A_i, B_j), 则集对H(A_i, B_j) 的联系度为:

μ_i = μ_{A_i~B_j} = a_i + b_{i,1}l_1 + b_{i,2}l_2 + \dots + b_{i,K-2}l_{K-2} + c_i k \tag{4}

式中:a_i为评价指标x_i与一级标准的同一度;b_{i,1}为评价指标x_i与二级标准的差异度;b_{i,2}为评价指标

x_i与三级标准的差异度;b_{i,K-2}为评价指标x_i与K-1级标准的差异度;c_i为评价指标x_i与K级标准的对立度。

Step 2 评价指标标准集构建:

对于具有n个评价指标(i = 1, 2, \dots, n), k个指标等级(j = 1, 2, \dots, K) 的综合评价体系,分别设定指标上、下限为x_{ij}^s, x_{ij}^x |_{i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,K}, 并组成指标标准集矩阵,如式(5)。

\begin{bmatrix} (x_{11}^s, x_{11}^x) (x_{12}^s, x_{12}^x) \cdots (x_{1j}^s, x_{1j}^x) \cdots (x_{1K}^s, x_{1K}^x) \\ (x_{21}^s, x_{21}^x) (x_{22}^s, x_{22}^x) \cdots (x_{2j}^s, x_{2j}^x) \cdots (x_{2K}^s, x_{2K}^x) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ (x_{i1}^s, x_{i1}^x) (x_{i2}^s, x_{i2}^x) \cdots (x_{ij}^s, x_{ij}^x) \cdots (x_{iK}^s, x_{iK}^x) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ (x_{n1}^s, x_{n1}^x) (x_{n2}^s, x_{n2}^x) \cdots (x_{nj}^s, x_{nj}^x) \cdots (x_{nK}^s, x_{nK}^x) \end{bmatrix} \tag{5}

Step 3 指标标准集期望、熵和超熵的确定:

根据式(6)、(7)和(8), 计算指标标准集的数学期望、熵和超熵^[16]。

Ex_{ij} = \frac{1}{2}(x_{ij}^s + x_{ij}^x) \tag{6}

En_{ij} = \frac{x_{ij}^s - x_{ij}^x}{2.355} \tag{7}

He_{ij} = \frac{1}{n} \tag{8}

(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k)

Step 4 构建级别概念集:

将计算获得的每一组期望、熵和超熵集合,构成级别概念集矩阵,如式(9)所示。

\begin{bmatrix} (Ex_{11}, En_{11}, He_{11}) (Ex_{12}, En_{12}, He_{12}) \cdots (Ex_{1K}, En_{1K}, He_{1K}) \\ (Ex_{21}, En_{21}, He_{21}) (Ex_{22}, En_{22}, He_{22}) \cdots (Ex_{2K}, En_{2K}, He_{2K}) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ (Ex_{n1}, En_{n1}, He_{n1}) (Ex_{n2}, En_{n2}, He_{n2}) \cdots (Ex_{nK}, En_{nK}, He_{nK}) \end{bmatrix} \tag{9}

Step 5 隶属度矩阵归一化计算:

针对评价指标集合y_i |_{i=1,2,\dots,n}, 按式(10) 计算其初步指标隶属度,其中En'_{ij}按式(11) 计算, r为(0,1) 的随机数;并按式(12) 对不同指标的初步隶属度进行归一化计算,最终构成隶属度矩阵,即a_i, b_{i,1}, \dots, b_{i,K-2}, c_i, 如式(13)。

r'_{ij} = \exp\left[-\frac{(y_i - Ex_{ij})^2}{2(En'_{ij})^2}\right] \tag{10}

En'_{ij} = rHe_{ij} + En_{ij} \tag{11}

r_{ij} = \frac{r'_{ij}}{\sum_{i=1}^K r'_{ij}} \tag{12}

= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1K} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2K} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nK} \end{bmatrix} \tag{13}

(i = 1, 2, \dots, n \quad j = 1, 2, \dots, k)

Step 6 评价等级计算:

根据式(14)和(15) 计算评价指标的评价等级。

$$b_j = \sum_{i=1}^n (\omega_i r_{ij}) \tag{14}$$

式中： b_j 表示评价指标对于第 j 个评价等级的联系程度； ω_i 为指标权重，文中采用可以体现指标地域差异的客观法确定各指标权重^[6]； J 为评价等级。

$$J = (\sum_{j=1}^K j b_j) (\sum_{j=1}^K b_j) \tag{15}$$

Step 7 评价等级判定：采用“择近原则”，以海明贴适度^[17]进行最终等级的判定。

4 实例分析

4.1 天津近岸海域概况

天津地处华北平原的东北部，北依燕山，东临渤海，地理坐标位于北纬 38°33′57″~40°14′57″与东经 116°42′05″~118°03′31″之间，全市辖区面积 11 919.7 km²。天津海岸线南起岐口，北至涧河口，全长 153 km，海域面积约 3 000 km²。随着环渤海经济的快速发展，近年来渤海湾已成为全国近岸海域环境污染较为严重的海湾之一。天津海域地处渤海湾顶、九河下梢，承接来自北京、河北等省市十几亿 t 的工业废水和生活污水，污染状况不容乐观，近几年的《海洋环境质量公报》显示：无机氮和活性磷酸盐污染较重，未达到清洁海域水质标准的面积高达 88.3%，存在不同程度的富营养化现象，海域沉积物受到一定程度的污染，质量状况一般。因此详细研究、分析并掌握天津近岸海域环境状况，对于指导海域环境管理极具现实意义。

4.2 基于平行坐标的天津近岸海域水环境质量可视化分析

文中采用平行坐标的可视化方法，按照上述平行坐标绘制方法步骤，建立近 10 a 年天津近岸海域

环境指标平行坐标如图 1 所示，同时本文也将海水水质标准中各指标分级标准作为基础数据，连同指标实测数据，共同建立平行坐标，其优点在于可以直观的体现各指标所属海水水质等级。

图 1 是 2004–2013 年近 10 a 天津近岸海域环境指标平行坐标图，其中 SS 为悬浮物，COD 为化学需氧量，IN 为无机氮，IP 为无机磷，Pe 为石油类，Pb 为重金属铅，Zn 为重金属锌，Chl 为叶绿素，Pa 为浮游植物总量，Zd 为浮游动物多样性指数。图中绿色点划线代表一级水质标准，蓝色虚线代表二级水质标准，黄色虚线代表三级水质标准，红色实线代表四级水质标准。

从图 1 中可以直观的展示出各指标所属的主要水质等级：无机氮和磷酸盐为本研究海域主要超标指标，近 10 a 多数站位超过四类水质标准；石油类总体较好，除 2006 年某一站位超过三类水质标准外，其余均满足一、二类水质标准；重金属铅和锌均未超过三类水质标准；悬浮物除 2010 年部分超过三类水质标准外，其余均满足一、二类水质标准；COD 除 2010 和 2012 年极少数超过四类标准外，其余均满足三类水质标准；叶绿素在 2005、2006、2012 和 2013 年出现超过四类水质标准的现象；浮游植物总量较高，在 2005、2006、2007、2008、2009、2012 和 2013 年均出现超过四类水质标准的现象；浮游动物多样性总体较差。

4.3 基于云理论与集对分析的天津近岸海域水环境质量耦合评价

本文采用云理论与集对分析相耦合的评价方法，按照上述方法步骤，以海水水质标准^[18]为评价依据，评价近 10 a 天津近岸海域水环境质量，结果如表 1 所示。

表 1 近十年天津近岸海域水环境质量耦合评价结果

年份	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
水质等级	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ

表 1 是 2004–2013 年近 10 a 天津近岸海域水环境质量耦合评价结果，由评价结果可知：近 10 a 天津近岸海域水环境质量总体较差，仅 2004 和 2010 年达到Ⅱ级水质评价标准，其余年份均为Ⅲ级；近年来，随着涉海工程建设的放缓，水环境质量有所改善，但不明显；水质氮磷富营养化现象较为严重。其主要原因在于：

- (1)天津近岸海域多年来氮磷含量一直处于超标状态，因此本底值较高，加之自身较弱的水交换能力致使污染物质较难输移至外海；
- (2)生态环境不断恶化，生物量大大减少；
- (3)径流氮磷的排入；
- (4)天津港区、黄骅港区和曹妃甸港区工程建设使得本就较弱的水交换能力更为恶化等。

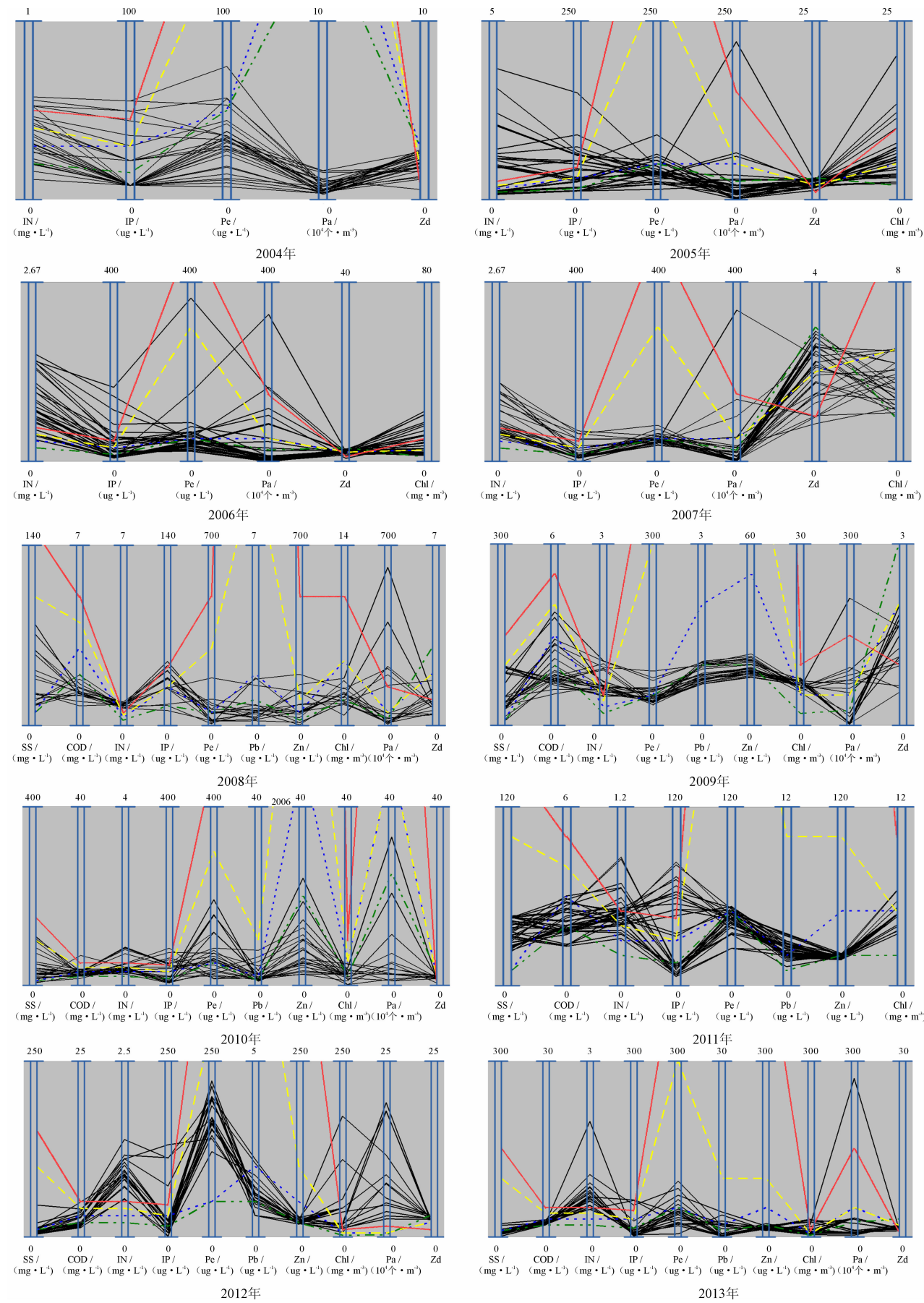


图 1 2004 – 2013 年天津近岸海域环境指标平行坐标图

5 结 语

本文建立基于平行坐标的海洋水环境质量可视化分析方法,研究分析了近 10 a 天津近岸海域水环境质量,通过海水水质标准中各指标分级标准的引入,可直观的表达各水质指标的总体水平与所属等级;建立了将云理论与集对分析方法有机结合,以形成云滴的钟形函数作为联系度函数的评价方法与步骤,科学分析并评价了近 10 a 天津近岸海域水环境质量,验证了上述方法的有效性:基于平行坐标的水环境可视化分析方法,可简洁、直观地展示出区域环境指标所属标准等级;耦合评价方法结合了集对分析方法和云理论简洁、易操作、高精度和随机性、模糊性的双重优点,保证评价结果合理可靠,可以为区域环境管理提供可信的依据。

参考文献:

- [1] 阎 骏,王毓钟. 水体质量评价与富营养化评价中的模糊数学方法[J]. 系统工程理论与实践,1990,10(4):66-71.
- [2] 陈南祥,王 恩. 基于灰色关联分析法的区域水污染度评价[J]. 华北水利水电学院学报,2007,28(1):85-87.
- [3] 张龙云,曹升乐. 物元可拓法在黄河水质评价中的改进及其应用[J]. 山东大学学报(工学版),2007,37(6):91-94.
- [4] 刘 政,朱国宇,张先起,等. 水环境质量评价的投影寻踪模型及其应用[J]. 四川环境,2007,26(5):48-50+69.
- [5] 曹春松,张淑芳,田 丽,等. 基于 RBF 人工神经网络的水质评价[J]. 兵工自动化,2008,27(4):32-33+38.
- [6] 李明昌,张光玉,司 琦,等. 区域综合承载力的多子系统非线性集对耦合评价[J]. 北京理工大学学报,2010,31

(12):1479-1484.

- [7] 李嘉竹,刘贤赵. 不确定性理论集对分析在海水水质富营养化评价中的应用[J]. 数学的实践与认识,2009,39(1):84-88.
- [8] Inselberg A. The plane with parallel coordinates [J]. The Visual Computer, 1985, 1 (2): 69-91.
- [9] 徐永红,高 直,金海龙,等. 平行坐标原理与研究现状综述[J]. 燕山大学学报,2008,32(5):389-392.
- [10] Wegman E J. Hyperdimensional data analysis using parallel coordinates[J]. Journal of the American Statistical Association, 1990, 85 (411): 664-675.
- [11] Robert M E. The parallel coordinate plot in action: design and use for geographic visualization [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2003, 43 (4): 605-619.
- [12] Ye Hong, Lin Zhiping. Speed-up simulated annealing by parallel coordinates [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 173 (1): 59-71.
- [13] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [14] 李德毅,杜 鹆. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [15] 付 斌,李道国,王慕快. 云模型研究的回顾与展望[J]. 计算机应用研究,2011,28(2):420-426.
- [16] 曹玉升,陈晓楠,张伟,等. 云综合评判模型在区域水资源承载力评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(4):17-20.
- [17] 吴士力. 通俗模糊数学与程序设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [18] 国家环境保护局. GB 3097-1997 海水水质标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,1997.