

# 渤海水质监测站位优化研究

兰冬东, 李 冕, 许 妍, 鲍晨光, 于春艳, 梁 斌, 马明辉

(国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 以 2000 年-2010 年无机氮、活性磷酸盐和化学需氧量这三个主要污染因子趋势性监测数据为基础, 采用水质空间稳定性评价、监测站位时空重要性评价以及站位网络优化设计等技术方法, 对渤海 2010 年原有的海洋环境趋势性水质监测站位进行优化调整, 为渤海海域水质的时空变化趋势评价, 提供更为有效、客观的支撑。

**关键词:** 海水质量监测; 站位评价; 站位优化; 渤海

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2016)04-0088-06

doi: 10.11759/hyxx20150608001

环渤海地区是我国快速发展的重要经济集聚区和基础产业分布区之一, 为我国经济社会的发展提供了重要的支撑作用。随着经济的快速发展, 渤海面临的压力也在持续增大, 近年来, 渤海海域污染严重, 污染范围逐渐扩大且出现新的污染区域。1974 年我国在渤海首次开展海水水质监测, 当年渤海全域水质符合一类海水水质标准, 2010 年渤海一类水质水域面积仅占渤海总面积的 45%, 劣四类水域面积占渤海总面积的比例高达 18%。近年来, 渤海海域水质污染范围逐渐扩大, 为准确评价渤海水质现状及变化趋势, 在 20 世纪 70 年代初期和 90 年代末期两次海洋污染基线调查的基础上, 渤海水质监测站位也在不断调整和增加, 到 2010 年水质监测站位已经达到 151 个。渤海现有水质监测站位网络是否合理, 在监测经费投入一定的情况下, 如何设计优化监测站位网络使得监测评价结果更准确, 成为海洋环境监测设计的重要课题。目前针对海水水质站位优化的研究尚属空白, 本研究对渤海水质监测站位的科学合理优化, 能够为渤海海域水质的时空变化趋势评价提供有力支撑。

## 1 研究方法

### 1.1 IDW 空间插值

IDW 空间插值方法能够合理地展示海域水质的空间变化趋势和主要热点区域, 尤其是在出现极高值和低值的区域, 已被广泛应用到空间要素分析<sup>[1-4]</sup>、降雨量预测<sup>[5-6]</sup>、污染物预测<sup>[7-9]</sup>等诸多领域, 以及海洋水质污染评价与预测方面<sup>[10-12]</sup>, 模型为:

$$Z^*(B) = \sum_{i=1}^n Z(x_i) \lambda_i \quad (1)$$

式中,  $Z^*(B)$  为待插值点的值,  $Z(x_i)$  为插值结点的实测值,  $\lambda_i$  为插值结点  $x_i$  所占的权重, 其中  $\lambda_i$  的计算方法为:

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^k} / \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k} \quad (2)$$

式中,  $d_i$  为估值点与已知点间的距离,  $k$  为正数。

### 1.2 水质稳定性评价

单要素水质稳定性评价是对每一栅格统计各类水质出现的次数, 出现次数最高的即为最可能出现的水质等级, 水质稳定概率  $P_i$  为第  $i$  类水质出现的次数除以总的统计次数, 即:

$$P_i = \frac{\max \{N_i\}_{i=1}^5}{\sum_{i=1}^5 N_i} \quad (3)$$

其中,  $N_i$  为水质等级  $i$  类出现的次数。

综合水质稳定性评价是先分别统计各污染要素最可能出现的水质等级及相应概率, 然后取污染等级最高的概率作为水质综合稳定的概率, 若污染等

收稿日期: 2015-06-08; 修回日期: 2015-10-25

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(41306098); 海洋公益性行业科研专项项目(201305023); 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金(201312)

[Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No.41306098); Public science and technology research funds projects of ocean (No.201305023); The Key Laboratory for Ecological Environment in Coastal Areas, State Oceanic Administration(No.201312)]

作者简介: 兰冬东(1984-), 女, 辽宁大连人, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋环境评价研究, E-mail: ddlan@nmemc.org.cn; 李冕, 通信作者, 助理研究员, 主要从事海洋环境评价研究 E-mail: mli@nmemc.org.cn

级相同, 则取概率值较大的。水质发生概率大于 75% 为稳定区域, 50%~75% 为变化区域, 0~50% 为变化剧烈区域。

### 1.3 站位时空重要性评价方法

#### 1.3.1 历史重要性站位筛选

海洋环境监测站位的连续性对评价海洋环境变化趋势十分重要, 因此可作为确定站位重要性的标准。以 2010 年渤海水质趋势性监测站位为基础站位, 筛选自 2000 年以来的监测站位, 通过相近站位的空间比对, 确定监测年限不低于 9 年的、具有历史延续性的时间重要站位。再对距离过近的站位进行筛选, 0.1 度范围内只保留一个站位作为历史重要性站位。

#### 1.3.2 站位贡献率评价

综合水质站位贡献率为站位各分指标贡献率的和。设  $X_1$  是站位集  $X$  的一个子集, 则  $X_1$  在  $X$  中的贡献率计算公式为:

$X_1$  的贡献率 =  $X$  的水质评价 -  $X/X_1$  的水质评价, 其中  $X/X_1 = \{x | x \in X \text{ \& } x \notin X_1\}$ , “-”表示水质评价的差异性, 即不同水质等级的栅格数量。

#### 1.3.3 站位综合评价

设监测站位总数为  $n$  个, 历史重要性站位数为  $m$ 。

(1)  $n$  个监测站位的数据水质评价结果作为原始结果, 记录各类水质的栅格数量及空间位置, 站位贡献率计算均以此为基础。

(2) 对  $n-m$  中的每一站位, 计算其贡献率, 按升序排序, 去除贡献率最小的站位, 记录各站位对应的贡献率。

(3) 对剩下的  $n-m-1$  个站位中的首站位, 重新计算贡献率并升序排序, 若顺序不变, 则去除, 若改变, 则按排序后重新计算首站位贡献率;

(4) 剩下的  $n-m-2$  个站位按步骤三依次循环。

### 1.4 站位重新优化布设方法

三角剖分已经被广泛应用到物理, 计算机等领域<sup>[13-17]</sup>, 考虑到海洋环境的特殊性, 本文采用的是改进的 Delaunay 三角剖分进行站位布设, 即加入跨岛判断, 如果两个站位之间的连线经过某一大岛屿或陆地, 则认为该两站位之间无关系, 删除同时以它们俩为顶点的三角面。

增加的站位主要布设在污染变化剧烈的 A 区域以及污染变化的 B 区域, 清洁稳定的 C 区域不增加站位。先对站位进行 Delaunay 三角剖分, 记录所得三角形的边长, 找出经过 A 区且边长最长的边。如

图 1 所示, 若该边为某两个三角形的公共边, 则新加站位为这两个三角形四个顶点的加权(公式 4), 若该边不是公共边, 则新加站位为该边中点。每新增一个站位则重新进行一次 Delaunay 三角剖分。若新增站位落在 C 区, 则重新寻找次长边进行站位添加, 如此循环。B 区域站位增加同 A 区域站位增加过程。

$$Y = 0.7 \times (X_1 + X_3) + 0.3 \times (X_2 + X_4) \quad (4)$$

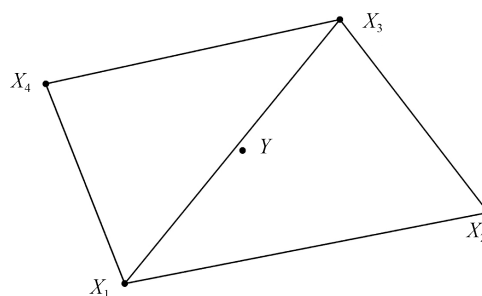


图 1 四顶点加权图

Fig. 1 Four-vertex weighted graph

## 2 结果与讨论

### 2.1 渤海水质污染与稳定性

对 2000 年-2010 年渤海水质趋势性监测数据进行分析整理, 选取无机氮、活性磷酸盐和化学需氧量三个渤海区域主要的污染因子进行评价, 采用表、中、底三层的平均值, 地图取  $(0.01 \text{ 度})^2$  为一栅格数据, 采用 IDW 空间插值方法, 得到历年渤海海域水质状况的空间分布。如图 2 所示, 近年来渤海水质污染成加重趋势, 无机氮污染增长趋势明显, 污染范围持续扩大。如图 3 所示, 渤海中部一直稳定在一类水质, 无机氮污染主要围绕辽东湾, 渤海湾和莱州湾变动。活性磷酸盐污染主要在辽东湾区域变动, 莱州湾基本稳定在一类水质, 渤海湾水质等级和污染区域均变动较大。渤海区域 COD 基本稳定在一类水质, 仅辽东湾上部、莱州湾西部等区域会出现变动, 在某些年份会出现污染。站位布设和监测应重点关注污染严重和污染变化剧烈区域。

### 2.2 站位时空重要性评价结果

根据渤海 2000 年-2010 年的监测数据, 选定连续 9 年的监测站位作为站位重要性的选择标准, 结果表明连续 9 年以上的站位为 77 个。再对 77 个站位中距离过近(小于 0.1 度)的站位进一步筛选, 最终确定 59 个站位具有历史延续性。

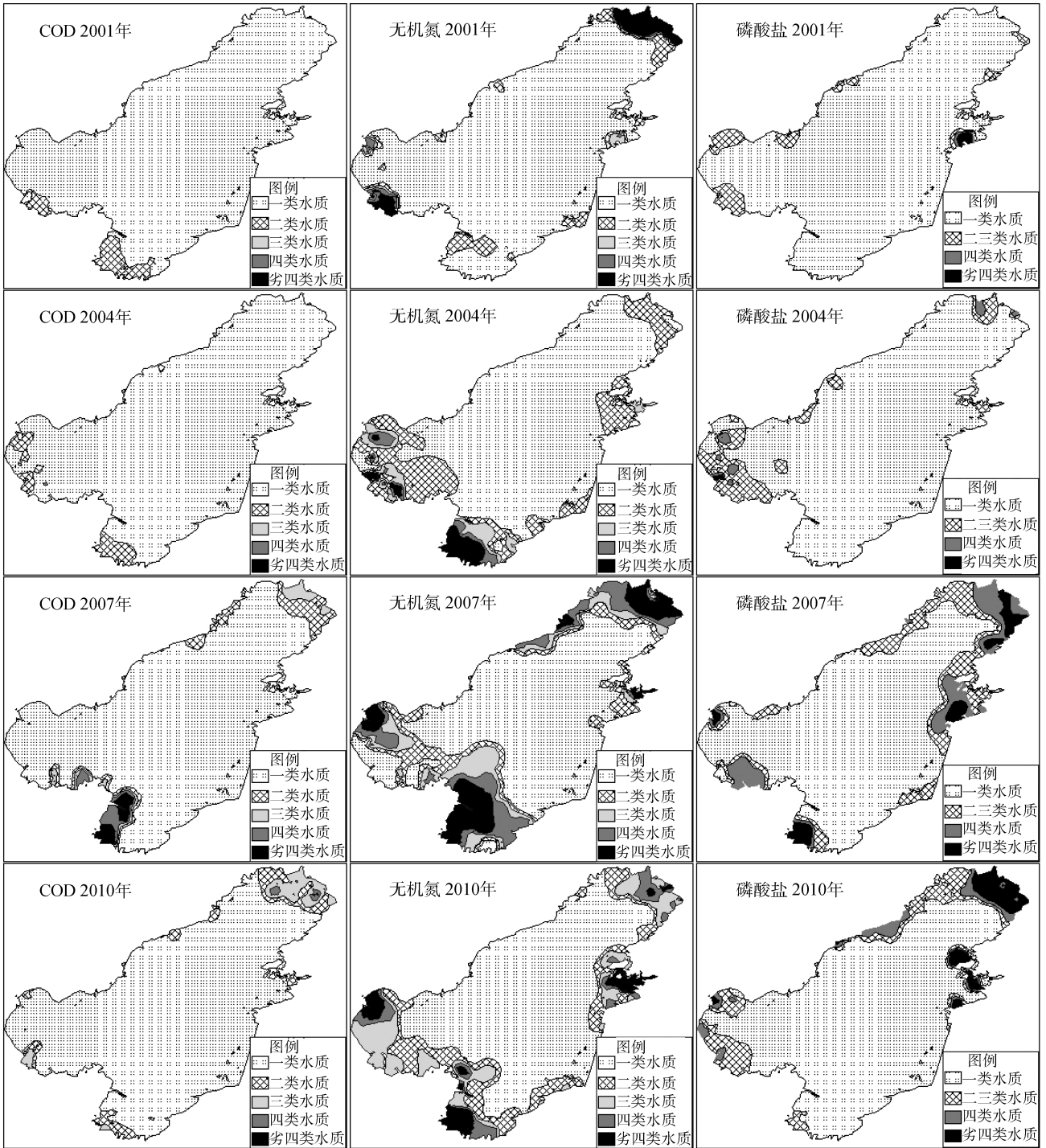


图2 渤海主要污染物浓度分布图(mg/L)

Fig. 2 Concentration distribution of main pollutants in the Bohai Sea(mg/L)

采用站位重要性评价方法评价 92 个站位在影响渤海环境质量的主要指标无机氮、活性磷酸盐和 COD 中的重要性, 最终得出 92 个站位对水质等级变化影响的排序, 根据这三项指标评价的最大值来确定站位最终的空间重要性。选择水质类别改变大于或等于 2% 的站位在水质空间评价中具有重要作用,

评估结果表明历史延续重要性评估确定的 59 个以外的 92 个站位中, 有 61 个站位对渤海水质空间评价具有重要作用(图 4)。2010 年渤海 151 个监测站位的评估结果如图 5 所示, 其中 59 个站位具有历史延续性, 61 个站位对渤海水质空间评价具有重要作用, 其他站位为 31 个。

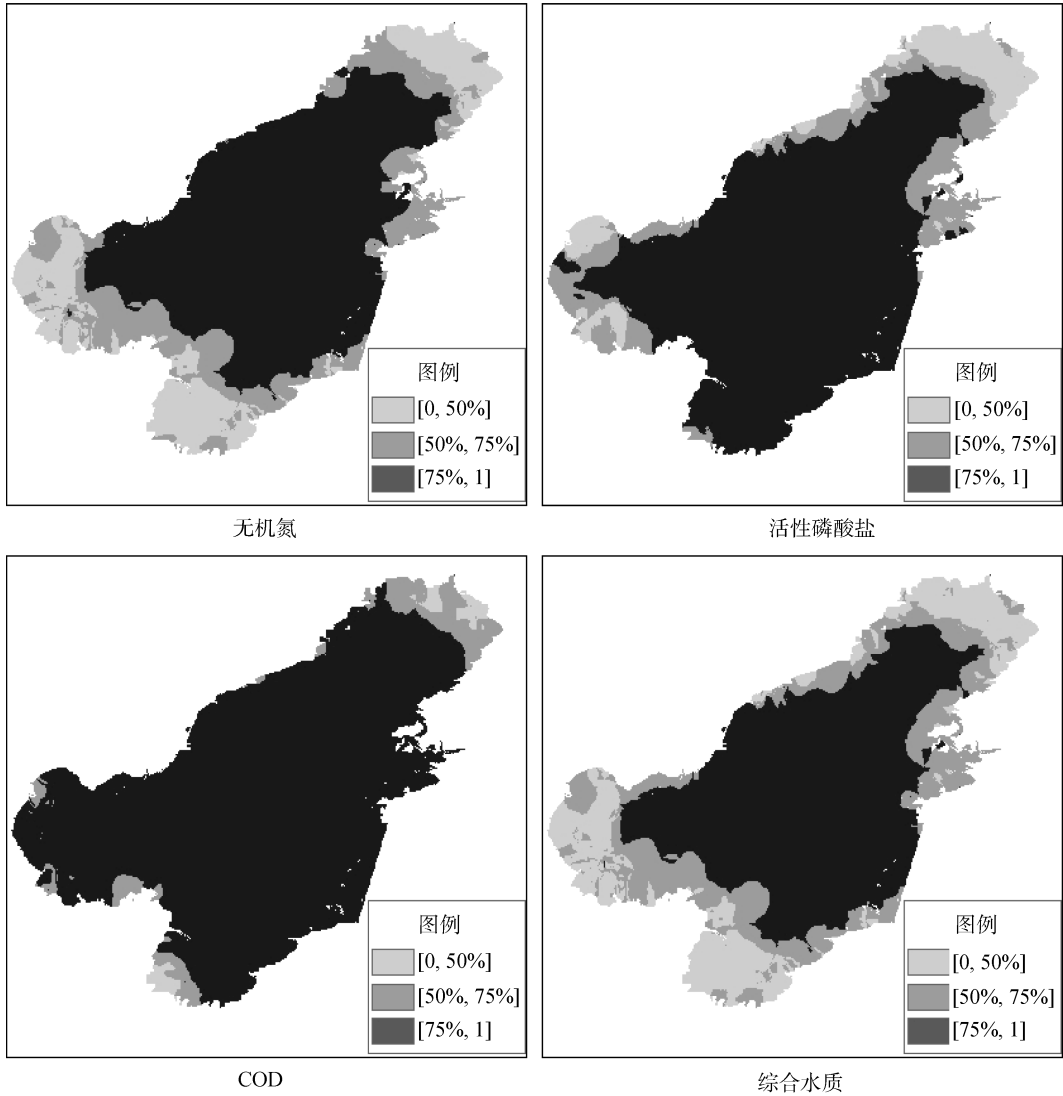


图 3 2000 年-2010 年渤海水质稳定性分布图

Fig. 3 Stability distribution of water environment in the Bohai Sea from 2000 to 2010

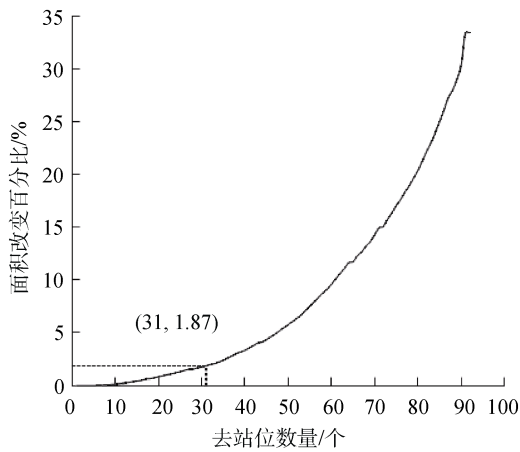


图 4 去除站位数量与评价结果改变的关系

Fig. 4 Relationship between number of stations removed and changes in evaluation results

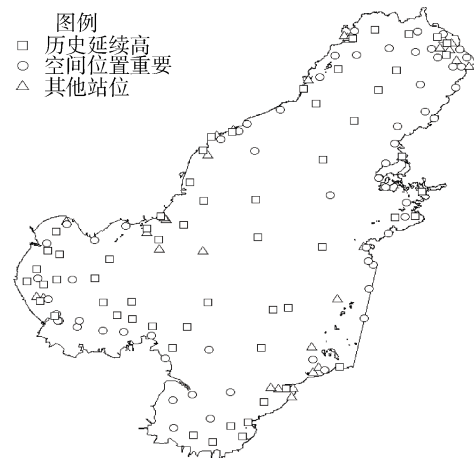


图 5 2010 年渤海海域监测站位的评估结果

Fig. 5 Evaluation results from monitoring stations in the Bohai Sea in 2010

### 2.3 渤海站位重新优化布设结果

2010 年渤海趋势性监测站位优化布设的结果如图 6 所示, 保持原有 151 个站位总数不变, 调整的 31 个站位在污染变化剧烈和较大的 A 区和 B 区, 数量分配分别为 9 个和 22 个, 主要分布在辽东湾、渤海湾和莱州湾及其周边海域, 这些区域污染面积和污染区域一直处于不稳定状态, 是监测需要重点关注的区域, 清洁稳定的渤海中部没有增设站位。

### 2.4 站位优化的效益分析

站位优化的效益主要体现在经济效益和监测的

精确度上。站位监测的经济投入主要与出海天数及监测站位数量有关, 站位优化前后监测海域的范围及站位数量均无变化, 所以站位监测的经济投入不变。监测效果体现在水质评价的结果上, 水质评价采用的是 IDW 插值方法, 插值误差与水质变化率及站位布设疏密程度相关, 水质变化率越低, 站位布设越密, 则插值误差越小。站位优化后, 水质污染严重和污染变化剧烈的区域整体站位增多且布设更加均匀, 有效的避免了该区域出现较大空白而使插值误差过大, 从而使得监测结果的精确度更佳。

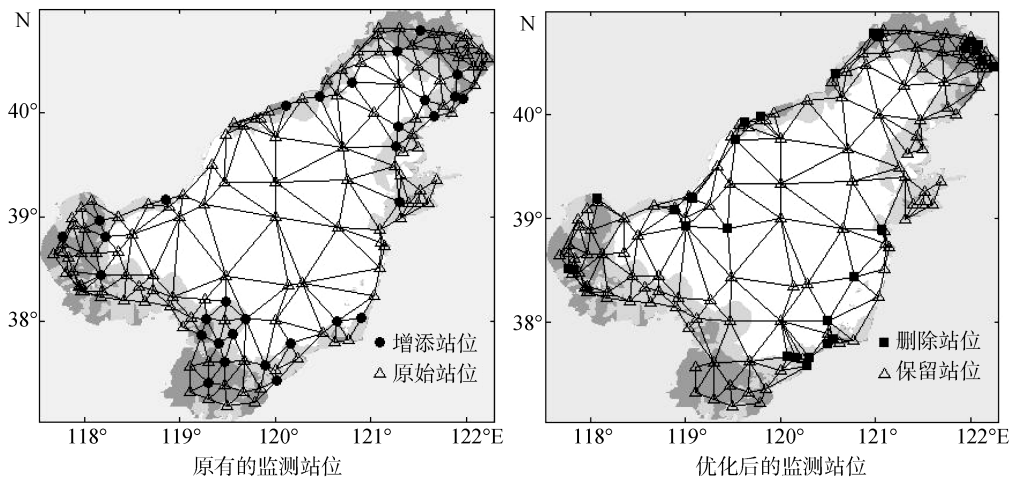


图 6 渤海站位优化结果

Fig. 6 Optimization results from Bohai Sea monitoring station

## 3 结论

以 2000 年-2012 年夏季无机氮、活性磷酸盐和化学需氧量这三个主要污染因子趋势性监测数据为基础, 采用水质空间稳定性评价、监测站位时空重要性评价以及站位优化布设等方法, 对渤海 2010 年趋势性水质监测站位进行优化布设。在保持原有 151 个站位总数不变的情况下, 将距离过近或者位于清洁稳定区的 31 个站位重新布设在污染变化较大的区域, 重新布设的站位主要分布在辽东湾、渤海湾和莱州湾及其周边海域, 这些区域污染面积和污染区域一直处于不稳定状态。在监测经费投入不变的情况下, 这些区域增加站位能够为更准确、更客观地监测海洋环境质量提供保障和基础, 为渤海海域水质的时空变化趋势评价, 提供更为有效的支撑。

参考文献:

[1] Jonathan A G, Carlos R, Erin L H, et al. Least cost dis-

tance analysis for spatial interpolation[J]. Computers & Geosciences, 2011, 37(2): 272-276.

[2] Wolfram Rühaak. A Java application for quality weighted 3-d interpolation[J]. Computers & Geosciences, 2006, 32(1): 43-51.

[3] Raymond D W, Niall G B, Christopher B J. The use of medium point density LIDAR elevation data to determine plant community types in Baltic coastal wetlands[J]. Ecological Indicators, 2013, 33: 96-104.

[4] Vincent C, Frédéric D, Hocine B. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density[J]. Geomorphology, 2006, 77(1-2): 126-141.

[5] Teegavarapu R S V, Chandramouli V. Improved weighting methods, deterministic and stochastic data-driven models for estimation of missing precipitation records[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312: 191-206.

[6] Michael K, Ida W, Allan R et al. Estimating areal rainfall over Lake Victoria and its basin using ground-based and satellite data[J]. Journal of Hydrology, 2012, 464-465: 401-411.

[7] Louis de Mesnard. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 459-469.

- [8] Richard R, Mark B, Gregory M. Integrating forest biomass and distance from channel to develop an indicator of riparian condition[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 23: 46-55.
- [9] Yunfeng Xie, Tong-bin Chen, Mei Lei, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis[J]. *Chemosphere*, 2011, 82(3): 468-476.
- [10] Dimitra K, Michael K. Categorical mapping of marine eutrophication based on ecological indices[J]. *Science of The Total Environment*, 2000, 255: 113-127.
- [11] Dilip K J, Anup K D, Saravanane N, et al. Sensitivity of GIS-based interpolation techniques in assessing water quality parameters of Port Blair bay, Andaman[J]. *Journal of the Marine Biological Association of India*, 2010, 52(1): 55-61.
- [12] 兰冬东, 李冕, 梁斌等. 渤海水环境无机氮污染风险研究[J]. *海洋科学*, 2013, 37(11):59-64.  
Lan Dongdong, Li Mian, Liang Bin, et al. Study on the pollution risk of inorganic nitrogen in water environment of Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(11): 59-64.
- [13] Chun-Hsien Wu, Kuo-Chuan Lee, Yeh-Ching Chung. A Delaunay Triangulation based method for wireless sensor network deployment[J]. *Computer Communications*, 2007, 30(14-15): 2744-2752.
- [14] Weatherill N P. Delaunay triangulation in computational fluid dynamics[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1992, 24(5-6): 129-150.
- [15] Lertrattanapanich S, Bose N K. High resolution image formation from low resolution frames using Delaunay triangulation[J]. *IEEE Trans Image Process*, 2002, 11(12): 1427-41.
- [16] Gopi M, Krishnan S, Silva C T. Surface Reconstruction based on Lower Dimensional Localized Delaunay Triangulation[J]. *Computer Graphics Forum*, 2000, 19(3): 467-478.
- [17] Sloan S W. A fast algorithm for constructing Delaunay triangulations in the plane[J]. *Advances in engineering software*, 1987, 9(1): 34-55.

## Layout optimization of water quality monitoring stations in the Bohai Sea

LAN Dong-dong, LI Mian, XU Yan, BAO Chen-guang, YU Chun-yan, LIANG Bin, MA Ming-hui

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Received:** Jun. 8, 2015

**Key words:** water quality monitoring; station assessment; station optimization; Bohai Sea

**Abstract:** The trend of water quality monitoring stations in the Bohai Sea was optimized and adjusted using a stability assessment method in relation to the water quality. An assessment of the spatiotemporal importance of monitoring stations and an optimal design method for the stations was determined on the basis of the trend of monitoring data between 2000 and 2010 for three main pollution factors, namely, inorganic nitrogen, active phosphate, and COD. Optimization of the layout of water quality monitoring stations could provide effective and objective support for the assessment of temporal trends in the water quality of the Bohai Sea.

(本文编辑: 康亦兼)