

# 空间插值方法在锦州湾海水富营养化评价中的应用

吴翠晴<sup>1</sup>, 李楠<sup>1</sup>, 王亚涛<sup>1</sup>, 马启敏<sup>2</sup>

(1. 国家海洋标准计量中心, 天津 300112; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 青岛 266100)

**摘要:** 采用空间插值和营养指数方程相结合的方法, 对锦州湾海域海水富营养化状态进行评价。选择反距离权重(IDW)、径向基函数(RBF)和普通克里金(OK)三种插值方法及相应的关键参数, 对2009年8月份锦州湾附近表层海水的高锰酸盐指数(COD)、无机氮(DIN)和无机磷(DIP)指标进行空间插值, 通过交叉验证筛选出精度最高的插值方法。结果表明: (1) 从插值精度上看, 除了RBF法的薄盘样条(TPS)函数精度较低外, 其余方法精度差别不显著; (2) 从等值线图对空间变化趋势的表现效果上来看, OK法效果较好。最后利用OK法所得的插值结果评价锦州湾海水的富营养化状态, 得出营养指数 $E \geq 1$ 的海域面积占调查海域的2.4%, 与传统的评价方法相比, 所给出的富营养化空间分布图可直观、准确地反映该海域的富营养化状况, 为海水水质评价工作提供了新思路。

**关键词:** 空间插值; 海水富营养化; 克里金插值法; 锦州湾

中图分类号: X824

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0116-04

## Application of spatial interpolation method to sea water eutrophication evaluation in Jinzhou bay

WU Cuiqing<sup>1</sup>, LI Nan<sup>1</sup>, WANG Yatao<sup>1</sup>, MA Qimin<sup>2</sup>

(1. National Center of Ocean Standards and Metrology, Tianjin 300112, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The sea water eutrophication evaluation as carried out by combining spatial interpolation and nutrition index equation. Three different methods of spatial interpolation such as inverse distance weight, radial basis function, and ordinary kriging method and relevant key parameters were compared, using the data of chemical oxygen demand, dissolved inorganic nitrogen and phosphorus of the Jinzhou bay, in August 2009. At the same time, the accuracy of interpolation was verified by cross-validation and the best interpolation method was decided. The results showed that (1) the accuracy of the RBF-TPS is the lowest, while the else have no significant difference. (2) But from the equivalent effect of interpolation surface contours maps, OK method performs better here. At last, OK-EXP method was selected to evaluate eutrophication status, and the result showed that 2.4 percent of the investigate area had met the eutrophication level, which the E index exceeded one. Also, the interpolation map could reflect the situation of the eutrophication status correctly and intuitively compared with the traditional eutrophication evaluation method. Thus, it provided a guideline for the practical application of the sea water quality evaluation.

**Key words:** spatial interpolation; eutrophication of sea water; Kriging method; Jinzhou bay

空间插值方法利用离散样本数据来预测未知空间的数据值, 实现了空间数据的连续化, 从而能为管理和决策提供科学依据。空间插值方法在气象、降雨、土壤<sup>[1-3]</sup>等研究领域的应用已有广泛报道, 主要关注的热点有: 不同插值方法插值准确性的比较<sup>[1-6]</sup>; 相同的插值方法参数的优化<sup>[3]</sup>; 对传统插值技术的改进<sup>[6-8]</sup>等。其中反距离权重(IDW)、普通

克里金(OK)、径向基函数(RBF)是应用最为普遍且效果相对理想的插值技术。在海洋科学领域我国已经有学者开始进行空间插值研究: 张伟等在地统计学和GIS支持下, 采用上述三种方法对大亚湾海域底栖生物生物量数据进行空间插值方法研究, 结果显示插值精确度 $OK > RBF > IDW$ <sup>[9]</sup>; 张博等采用地统计方法、GIS和潜在生态危害指数法相结合的方法

收稿日期: 2012-07-18; 修回日期: 2012-08-05

基金项目: 国家908专项“我国近海海洋综合调查与评价”专项: 锦州湾海域调查与研究(908-02-02-03)

作者简介: 吴翠晴(1985-), 女, 山东曲阜人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为海洋经济与管理。

法,对江苏省某养殖区沉积物中重金属进行了综合定量污染评价研究,结果正确、直观地反映了沉积物重金属的污染状况<sup>[10]</sup>;林琳等对珠江口浮游植物丰度数据进行插值运算,插值精确度  $OK > RBF > IDW$ ,其中  $OK$  法的圆形函数的拟合效果最好<sup>[11]</sup>。本文利用  $IDW$ 、 $RBF$  和  $OK$  插值方法,对锦州湾附近海域海水的高锰酸盐指数( $COD$ )、无机氮( $DIN$ )和无机磷( $DIP$ )浓度指标进行空间插值并对插值结果进行交叉验证,筛选出最优的插值方法和参数,进而对该海域水体富营养化进行评价,以期为锦州湾水环境管理提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据资料

锦州湾(120°55′~121°14′E,40°42′~40°52′N)位于葫芦岛市东、锦州市西南,是渤海北部的一个浅水海湾,面积约为 151.5 km<sup>2</sup>,周边主要有五里河、茨山河、连山河等季节性河流注入<sup>[12]</sup>。随着锦州湾周边经济的快速发展和港口航运的繁荣,除关注较多的重金属污染问题外,锦州湾水体的富营养化问题也逐渐显现<sup>[13]</sup>。

以 2009 年 8 月锦州湾海水水质监测数据为评价数据集,包括 20 个站位的坐标(见图 1,近岸由于填海活动未能采集样品)、 $COD$ 、 $DIN$  和  $DIP$  数据。

1.2 空间数据探索分析和数据转化

大多数插值方法(如克里金法)要求数据符合正态分布,对不符合正态分布的数据进行转化,使转化后的数据符合正态分布,能显著提高插值精度<sup>[9]</sup>。最常用的检验方法是正态  $QQ$  图和  $K-S$  检验<sup>[3]</sup>。如果数据接近一条直线,或在 95% 置信水平下  $K-S$  检验  $p > 0.05$ ,表明样本总体符合正态分布。

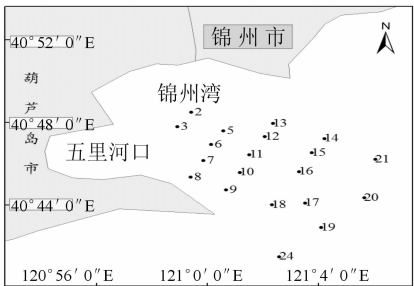


图 1 锦州湾地理位置和站位坐标示意图

1.3 空间插值方法和参数选择

空间插值方法的基本原理是彼此距离越近的点越具有较高的相关性和相似度<sup>[3]</sup>。 $IDW$ 、 $RBF$  和  $OK$  三种插值方法基本原理和运算公式参见相关文献[3,14]。

每种插值方法内部都涉及诸多参数,本文选择如下关键参数进行对比研究: $IDW$  法的幂指数——软件优化值; $OK$  法的变异函数——指数( $EXP$ )、球面( $SPH$ )和高斯( $GS$ )三种模型; $RBF$  法的基函数——反转多重二次曲面( $IMQ$ )、张力样条( $ST$ )和薄盘样条( $TPS$ );其余参数的设置采用默认值。

1.4 插值方法比较验证

利用交叉验证(Cross - Validation)结果评价插值误差大小<sup>[4]</sup>,选取相对平均误差( $MRE$ )及均方根误差( $RMSE$ )作为检验的标准。公式如下:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{z_{oi} - z_{ei}}{z_{oi}} \right|$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{oi} - z_{ei})^2}$$

式中: $z_{oi}$ 、 $z_{ei}$ 分别为指标的第  $i$  个观测值和预测值, $n$  为样本数。一般来说,各种插值方法的  $MRE$  和  $RMSE$  均较小者,具有较好的插值效果。

1.5 富营养化评价方法

评价方法采用地理信息系统所得的空间插值图,结合冈市友利 1972 年提出的营养指数方程<sup>[15]</sup>进行栅格计算:

$$E = \frac{C(COD) \times C(DIN) \times C(DIP) \times 10^6}{4500}$$

$E$  为营养指数, $E \geq 1$  表示水域已经呈现富营养化的特征; $C(COD)$ 、 $C(DIN)$  和  $C(DIP)$  分别为化学耗氧量浓度、溶解态无机氮浓度和溶解态无机磷浓度,mg/L。

2 结果与讨论

2.1 数据统计和正态分布检验

利用 SPSS 软件对  $COD$ 、 $DIP$ 、 $DIN$  数据进行分析可得:锦州湾海域  $COD$  浓度在 0.73 ~ 3.05 mg/L 之间,平均值 1.17 mg/L; $DIN$  浓度在 0.141 ~ 0.343 mg/L,平均值 0.222 mg/L; $DIP$  浓度 0.009 ~ 0.019 mg/L,平均值 0.014 mg/L。利用  $K-S$  检验得出  $DIN$  和  $DIP$  数据符合正态分布,而  $COD$  数据经过对数( $\log$ )转换后服从正态分布。

2.2 插值结果与分析

根据交叉验证结果计算不同插值方法的  $MRE$  及  $RMSE$  值见表 1。

从表 1 可以看出:无论是  $MRE$  还是  $RMSE$ ,三个指标的  $RBF-TPS$  函数插值结果精度最低, $OK-EXP$  和  $RBF-IMQ$  精度较高,其余参数之间差别不显著。

表 1 不同插值方法对海水水质指标的交叉验证结果

| 方法      | MRE   |        |       | RMSE  |         |       |
|---------|-------|--------|-------|-------|---------|-------|
|         | COD   | DIP    | DIN   | COD   | DIP     | DIN   |
| IDW     | 0.215 | 0.1458 | 0.200 | 0.493 | 0.00230 | 0.052 |
| OK-EXP  | 0.204 | 0.1441 | 0.191 | 0.470 | 0.00229 | 0.051 |
| OK-SPH  | 0.210 | 0.1446 | 0.187 | 0.473 | 0.00231 | 0.050 |
| OK-GS   | 0.216 | 0.1445 | 0.207 | 0.478 | 0.00233 | 0.049 |
| RBF-IMQ | 0.185 | 0.1454 | 0.204 | 0.471 | 0.00225 | 0.052 |
| RBF-ST  | 0.228 | 0.1470 | 0.196 | 0.525 | 0.00228 | 0.054 |
| RBF-TPS | 0.238 | 0.1894 | 0.285 | 0.530 | 0.00298 | 0.086 |

根据 RMSE 结果,选取各个指标中精度最高的插值方法比较如下:①COD 精度:OK-EXP>RBF-IMQ>IDW;②DIP 精度:RBF-IMQ>OK-EXP>IDW;③DIN 精度:OK-GS>RBF-IMQ>IDW。从插值结果可以看出,对于三个水质指标,IDW 插值精度最低,RBF-IMQ 插值精度较高,而 OK 插值

法最为稳健。  
插值等值线图如图 2,从图中可以看出,IDW 法对极端值很敏感,生成的等值线图往往出现“牛眼”现象<sup>[12]</sup>,因此会对总体趋势的表现产生较大干扰,同时由于采样点较少,故其精度较低;RBF 法是使用函数逼近曲面的一种方法,当样本量较丰富、表面很平滑时,插值精度较高<sup>[2]</sup>,该法对 COD 和 DIP 的插值结果预测较为理想;OK 法利用半方差函数来反映插值对象的空间自相关性,该法的插值精度较高,既克服了 IDW 法的“牛眼”现象,又能在等值线的平滑度与精确度之间达到较好的平衡<sup>[11]</sup>,是较为稳健和耐抗性较高的插值方法,研究表明<sup>[9,11,14]</sup>OK 法在海洋科学领域有较好的应用前景,它充分利用了样本的空间自相关性,有效避免了系统误差的出现,因此本文选择 OK-EXP 所得的插值图作为富营养化评价的资料。

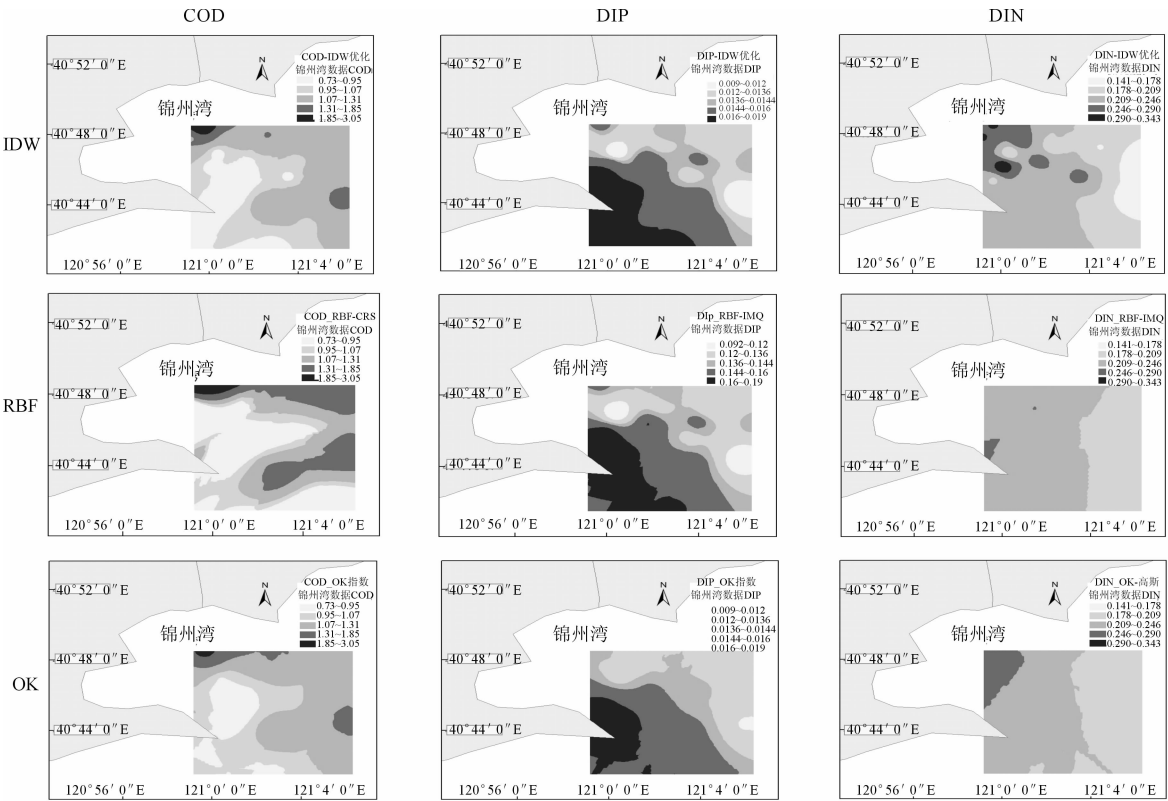


图 2 不同水质指标-插值方法相应的最优插值图

2.3 富营养化评价

综上所述,选择 OK-EXP 法所得到的 COD、DIP、DIN 插值结果对锦州湾海水的富营养化情况进行评价。利用 GIS 软件中的栅格计算工具,根据 1.5 节的营养指数方程,计算得到 E 指数的空间分

布图如图 3 所示。  
由图 3 知,调查海域 E 指数范围为 0.60~1.85,西北角的蓝色部分为 E≥1,即已经达到或超过富营养化的海区,面积占调查海域(图 3 中的方形区域)总面积的 2.4%,而直接利用营养指数法计

算各个站位的  $E$  值得到  $E \geq 1$  的站点 3 个, 站位超标率高达 15%, 本研究评价结果明显小于传统的计算方法, 低了 12.6%, 方法较为合理; 同时较传统方法更直观, 从图中可看出, 接近或超过富营养化状态的海域位于锦州湾近岸海域, 即河口区、锦州港和葫芦岛沿岸, 有关部门应加强对河流和沿岸排污的监管和治理。

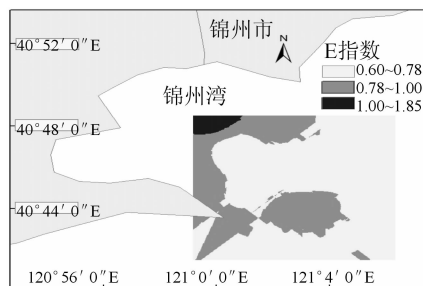


图3  $E$  指数空间分布图

田金等人利用 1999–2006 年的夏季 (6–8 月) 的调查数据对锦州湾进行富营养化评价, 得出 2000 年以后锦州湾海域  $E$  值基本维持在 2 以内,  $E$  值均值为 0.82, 富营养化程度较低<sup>[16]</sup>。本文的  $E$  指数评价结果与其相近, 能较好的反映该海域的水质状况, 丰富了该海域的水质调查资料。

### 3 结 语

选择 IDW、RBF 和 OK 三种插值方法及对应参数, 对海水的 COD、DIP 和 DIN 指标进行空间插值, 通过交叉验证筛选出最优的插值方法, 并结合营养指数方程对锦州湾海水富营养化状态进行了评价。结果表明:

(1) 不同的空间插值技术对海水水质因子插值精度有一定区别, OK 法和 RBF 的 IMQ 函数插值精度较高。

(2) 基于 OK 法较高的插值精度和合理的插值等值线图, 本文初步尝试利用 OK-EXP 法所得的插值结果评价锦州湾附近海域富营养化状态。评价结果表明: 在河口和近岸海域已经出现了富营养化区域, 面积占调查海域的 2.4%, 评价方法考虑了水质指标的空间变异性, 在保证评价精度的基础上, 评价结果可直观的反映富营养化的空间分布情况和规律, 为 GIS 和空间插值技术在海水水质污染评价中的实际运用提供了一种思路, 在今后的研究中需要进一步研究和完善。

### 参考文献:

- [1] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 10–14.
- [2] 李 飞, 孙 勇, 郑佳佳. 安徽省降水量空间插值研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 183–186.
- [3] Xie Yunfeng, Chen Tongbin, et al. Spatial distribution of soil heavy metal pollution estimated by different interpolation methods: Accuracy and uncertainty analysis [J]. Chemosphere, 2011, 82: 468–476.
- [4] Li Jin, Andrew D Heap. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors [J]. Ecological Informatics, 2011, 6: 228–241.
- [5] Piazza A Di, Conti F Lo, Noto L V, et al. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, (13): 396–408.
- [6] 郭 婧, 柳小妮, 任正超. 基于 GIS 模块的气象数据空间插值方法新改进[J]. 草原与草坪, 2011, 31(4): 41–45, 50.
- [7] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素空间插值方法优化[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 357–364.
- [8] George Y Lu, David W Wong. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique [J]. Computers & Geosciences, 2008, (34): 1044–1055.
- [9] 张 伟, 李纯厚, 贾晓平, 等. 底栖生物生物量空间插值方法研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(3): 351–356.
- [10] 张 博, 郑青松, 赵耕毛, 等. 基于 GIS 和地统计学的滩涂增养殖区沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 376–379.
- [11] 林 琳, 李纯厚, 戴 明, 等. 海洋浮游植物丰度的空间插值优化[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2880–2888.
- [12] 李泽利. 锦州湾沉积物典型有机物组成及来源研究 [M]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [13] 国家海洋局. 2009 年中国海洋环境质量公报 [Z]. 2010.
- [14] 董月娥, 刘显博, 张新海, 等. 基于 GIS 的海洋光学调查数据空间插值方法研究[J]. 海洋技术, 2009, 28(2): 111–114.
- [15] 邹景忠, 黄丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. 海洋环境科学, 1983, 2(2): 41–54.
- [16] 田 金, 宋伦, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域营养状况与趋势评价[J]. 海洋通报, 2007, 26(6): 113–118.