doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.06.010

辽东湾沉积物石油类 GIS 空间插值研究

胡超魁[1],李 爱[1,2],李 楠[1],张 雪[3],付韵涵[4],王召会[1*]

(1.辽宁省海洋水产科学研究院,辽宁 大连 116023; 2.国家海洋局海域管理技术重点实验室,辽宁 大连 116023;
3.辽宁省自然资源事务服务中心,辽宁 沈阳 110001; 4.大连海事大学,辽宁 大连 116000)

摘 要:为了客观准确地反映辽东湾海域沉积物中石油类含量的空间分布特征,文中基于 GIS 的地统计分析模块,对 2015 年辽东湾海域沉积物石油类调查数据进行探索性数据分析,分别运用反距离权重法、普通克里金法、规则样条函数法和张力样条函数法进行空间插值,采用交叉检验方法对插值精度进行了评估。结果表明:插值精度张力样条函数法>规则样条函数法>反距离权重法>普通克里金法,整体上 4 种插值方法均能客观地模拟出沉积物石油类含量的空间分布趋势。在局部区域,张力样条函数法插值预测结果更接近真实测量值。辽东湾海域沉积物石油类宜采用张力样条函数法进行空间插值。

关键词:空间插值;沉积物;石油类;GIS

中图分类号:P76 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-2029(2019)06-0062-06

辽东湾位于渤海北部, 是重要的鱼虾产卵场、索饵场和洄游通道,素有“辽东湾渔场”的美誉,是我国北方的重要渔业水域和增殖放流的重点区域[1]。近年来,陆源入海、溢油事故、船舶航运与捕捞等给辽东湾造成不同程度的污染[2]。由于石油类中的多环芳烃具有致癌、致畸和致突变性质[3],一直以来备受关注。海水受海流、光照、气候等影响较大[4],仅能反映瞬时石油类含量状况,而海底沉积物处于缺氧环境,且不易受到阳光的直接照射,理化性质相对稳定,更能真实地反映石油类含量状况。海洋沉积物样品采集的技术要求严格, 样品获取难度大,调查数据获取量相对较少,以往一般采用单因子指数法对采样站位的沉积物石油类含量状况进行简单评价[5],无法准确地反映沉积物石油类含量的空间分布状况。

空间插值可以根据已知地理空间数据预测未知地理空间数据,从而反映样本的空间分布特征[6]。国内研究人员关于空间插值方法的研究成果颇丰,例如,门晓晔等[7]采用三维空间插值软件 EVS-Pro 建立污染插值模型,对华北某污染场地总石油烃分布特征进行分析;王召会[8]等采用 GIS 软件的克里金插值法对辽东湾海水石油类未测点进行预测,分析了辽东湾海水石油类空间分布特征;丁杰等[9]研究表明在琼州海峡区域,泛克里金插值法中的有理二次方程式模型对表层大潮流速拟合效果最优;段志鹏等[10]研究表明,普通克里金插值法更适合描述雷州半岛近海沉积物痕量元素的空间分布特征。而关于辽东湾沉积物石油类的空间插值方法的研究则较少。本研究利用辽东湾 38 个站位的沉积物石油类数据进行空间插值方法研究,探讨不同插值方法所反映的辽东湾海洋沉积物石油类空间分布特征状况,对辽东湾沉积环境研究及治理具有十分重要的指导作用。

收稿日期:2019-05-15
基金项目:国家海洋局海域管理技术重点实验室开放基金资助项目(201710);辽宁省重点研发计划资助项目(2018228004);辽宁省海洋与渔业科研资助项目(201828,201824)
作者简介:胡超魁(1986-),男,硕士,助理研究员,主要从事海洋调查与测绘技术与研究工作。E-mail:hkyhck@163.com
通讯作者:王召会(1981-),男,硕士,副研究员,主要从事海洋环境相关技术研究工作。E-mail:king3708@163.com

1　材料和方法

1.1　数据来源

2015 年 6 月和 8 月在辽东湾布设 38 个调查站位(图 1),采用抓斗式采泥器采集表层沉积物,取中央未受干扰的表层 0~5 cm 泥样, 沉积物样品的采集、贮存和运输方法均严格依照《海洋监测规范》(GB 17378.3-2007)的要求进行[11]。沉积物样品自然风干后挑除杂物,研磨后过 160 目筛,测定方法严格按照《海洋监测规范》(GB 17378.5-2007)中所规定的紫外分光光度法进行 [12]。选用上海元析 UV-6100 型紫外分光光度计测定沉积物中石油类含量,油标准由国家海洋环境监测中心提供(浓度为 1 000 mg/L),测量结果为沉积物干样中石油类的含量(质量分数:10^{-6})。取 2 次沉积物样品中石油类含量的平均值进行数据处理。

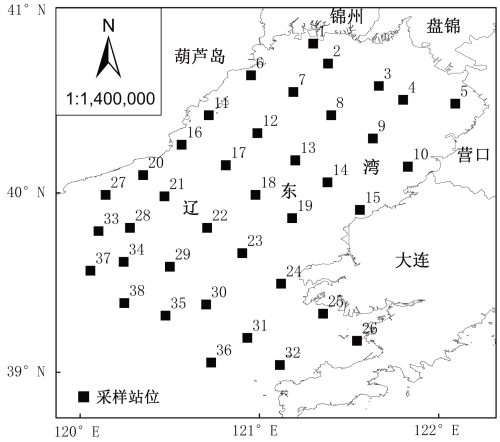


图 1　调查站位分布

1.2　分析方法

采用 Arcgis10.0 软件中的直方图、正态 QQ 图、趋势分析、Voronoi 图、半变异函数和协方差云等分析工具,对数据属性、数据分布状态、全局和局部异常值、整体变化趋势、空间自相关性等情况进行分析统计,优化插值模型的方法和参数,选用不同的插值方法来生成辽东湾海洋沉积物石油类预测表面,确定能够客观准确地反映辽东湾沉积物石油类空间分布特征的插值方法[13]。

1.3　空间插值方法

采用 Arcgis10.0 软件中的反距离权重法、普通克里金法、规则样条函数法和张力样条函数法进行空间插值[14-17],并利用交叉检验方法对插值精度进行评估,对不同空间插值优缺点进行分析比较。

2　结　果

2.1　数据分析统计

2.1.1　频数分布　经统计,沉积物石油类含量最小值为 8.9×10^{-6},最大值为 468.3×10^{-6};均值为 129.4×10^{-6},标准差为 112.1×10^{-6}。图 2 显示,数据分成 10 个级别的范围,该数据为单峰,频数最高值出现在 $(55\sim101)\times10^{-6}$ 范围内,并且随着均值含量升高而频数逐渐降低,该数据不属于正态分布。图 3 显示,经指数变换, 沉积物石油类含量非常接近于一条直线,主要偏离发生在低值区域,因此该数据经转换后符合正态分布。

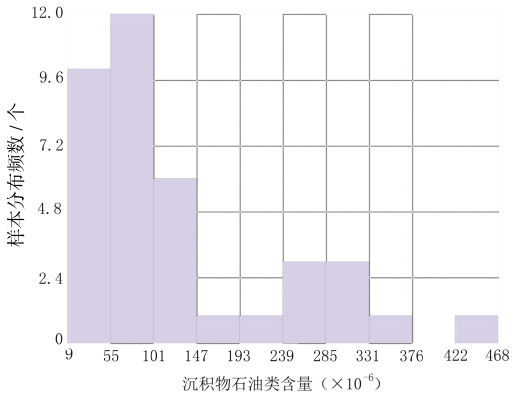


图 2　样本频数分布

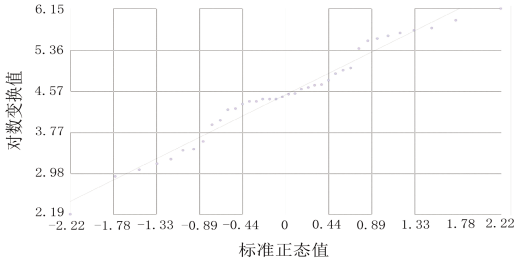


图 3　经对数变换后正态 QQ

2.1.2　离散程度　采用聚类法生成沉积物石油类含量 Voronoi 图。图 4 显示,沉积物石油类任意单元值与其周围单元至少某一值相近,即调查数据无离群值,因此均可参与插值方法筛选。

2.1.3　空间趋势　空间趋势图中,Y 轴方向为正北,X 轴方向为正东,Z 轴表示沉积物石油类含量。图 5 显示,XZ 平面上数据投影点的二次多项式拟合曲线呈“U”型,表明沉积物石油类含量在东西方向上两端低中间高,YZ 平面上数据投影点的拟合曲线呈直线,表明沉积物石油类含量呈由北向南递增的线性变化趋势。

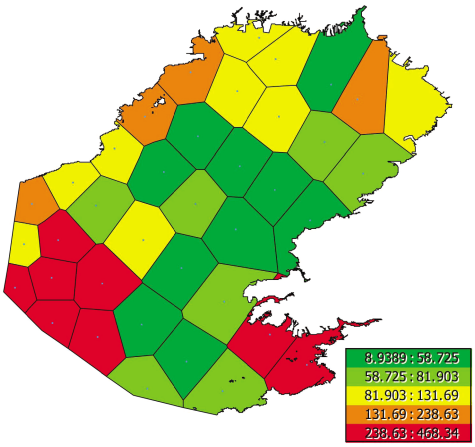


图 4 沉积物石油类 Voronoi 图

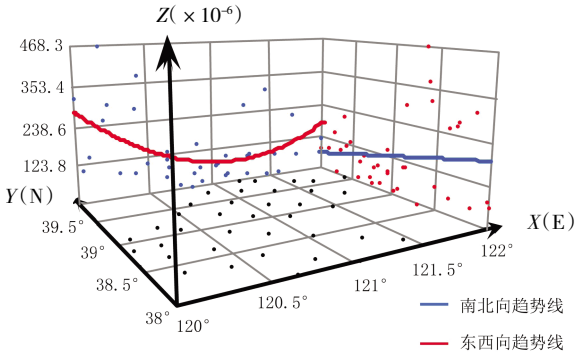


图 5 沉积物石油类趋势分析图

2.1.4 空间数据相关性 只有数据具备空间相关的条件,才有必要进行空间插值,因此,利用半变异函数工具检验空间自相关性和方向变化。其中,半变异函数云中,横坐标表示任意两点之间的实际空间距离,纵坐标表示两点的半变异函数值。分析结果显示,沉积物石油类含量半变异函数值随着各点对之间距离的增大,点对的半变异函数值也随之增大。此外,如图 6~图 7 所示,半变异函数表面在 60°和 130°方向上存在明显的方向性影响,具有各向异性,其中 60°方向上变异程度最强。

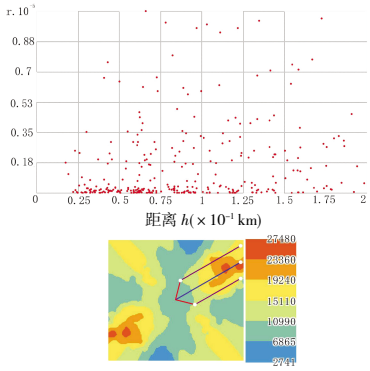


图 6 60°方向半变异云图

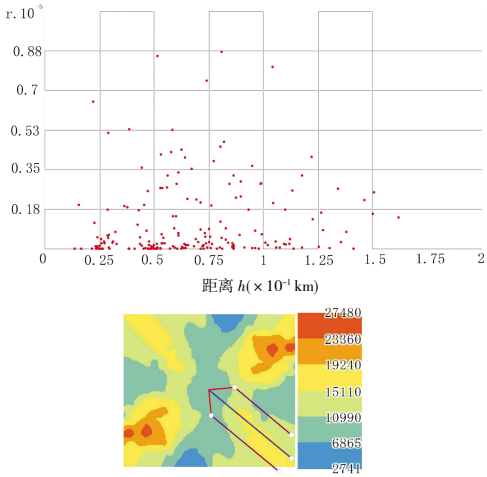


图 7 130°方向半变异云图

2.2 不同空间插值方法结果

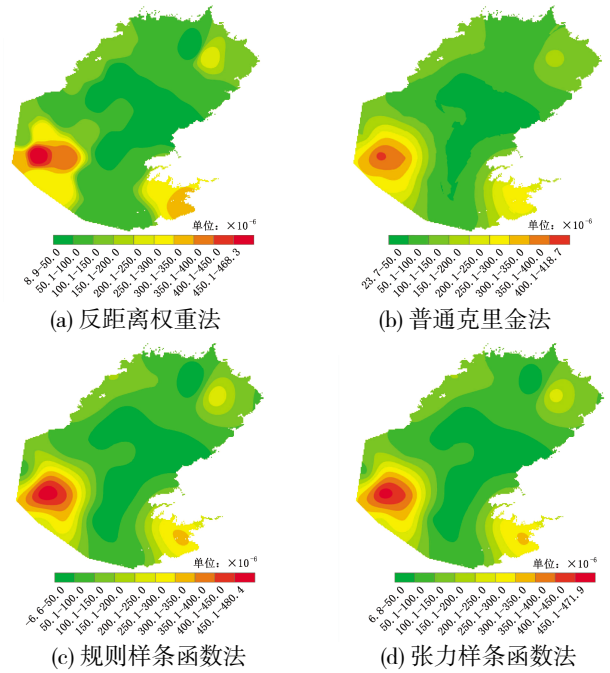
沉积物石油类含量数据经指数变换后为正态分布、无离群值,具有一阶线性趋势效应,由上述特征可知,数据整体具有自相关性。采用反距离权重法、普通克里金法、规则样条函数法和张力样条函数法等插值方法对辽东湾沉积物石油类进行空间插值,其中使用克里金法插值时要移除一阶趋势,模型类型采用球面模型。

采用 4 种不同插值方法对 2015 年辽东湾海域沉积物石油类含量数据进行空间插值,插值结果如图 8 所示。其中,反距离权重法所生成的预测表面最小值为 8.9×10^{-6},最大值为 468.3×10^{-6};均值为 117.4×10^{-6},标准差为 95.2×10^{-6};普通克里金法所生成的预测表面最小值为 23.7×10^{-6},最大值为 418.7×10^{-6};均值为 116.7×10^{-6},标准差为 82.4×10^{-6};规则样条函数法所生成的预测表面最小值为 -6.6×10^{-6},最大值为 480.4×10^{-6};均值为 117.1×10^{-6},标准差为 85.8×10^{-6};张力样条函数法所生成的预测表面最小值为 6.8×10^{-6},最大值为 471.9×10^{-6};均值为 117.0×10^{-6},标准差为 93.0×10^{-6}。

3 讨 论

3.1 不同空间插值精度验证

采用交叉验证法对 4 种空间插值方法的插值精度进行验证,通过分别在已知测量数据中删除一个实测数据,用剩余的测量数据进行空间插值,计算出被删除数据的预测值,最终统计出预测值与实测值之间的误差均值绝对值(*MEAN*)和误差均方根(*RMS*)。表 1 为经参数优化后 4 种插值方法的误差



(a) 反距离权重法　(b) 普通克里金法

(c) 规则样条函数法　(d) 张力样条函数法

图 8　不同插值方法生成的预测表面

均值绝对值(*MEAN*)和误差均方根(*RMS*),以及达到最小误差均值和均方根的核心参数值。由表可知,4 种方法得到的误差均值绝对值(*MEAN*)的大小顺序为:反距离权重法>普通克里金法>张力样条函数法>规则样条函数法;误差均方根的大小顺序为:普通克里金法>反距离权重法>规则样条函数法>张力样条函数法,根据误差均方根优先于误差均值绝对值的原则,插值精度张力样条函数法>规则样条函数法>反距离权重法>普通克里金法,张力样条函数法是精确度最高的插值方法。

表 1　插值方法的误差绝对值均值和误差均方根

插值方法	核心参数	误差均值绝对值(*MEAN*)($\times10^{-6}$)	误差均方根(*RMS*)($\times10^{-6}$)
反距离权重法	P=4.36	2.91	78.97
普通克里金法	球面模型 块金 0.12	0.82	79.97
规则样条函数法	核参数=16.39	0.10	77.14
张力样条函数法	核参数=9.21	0.19	76.68

3.2　不同空间插值优缺点比较

从整体上观察发现,4 种插值方法得到的空间插值预测表面的高值区均出现在辽东湾东北部、东南部以及西南部等海域,低值区出现在辽东湾北部和中部海域。4 种插值方法所反映的辽东湾沉积物石油类的总体空间分布趋势基本一致。

从局部空间观察发现,由于反距离权重法属于精确性插值模型,预测表面的最大值和最小值只出现在已知的测量点,生成的等值线往往会围绕沉积物石油类最大值或最小值的采样点发生非常大幅度的弯曲,甚至闭合形成貌似“牛眼”的等值线圈;普通克里金法生成的预测表面平滑,效果最好,但由于普通克里金法属于非精确性插值,在整体和局部均对极大值和极小值进行了平衡,导致预测表面的极值受到影响,预测表面在测量点位置与真实值不一致;规则样条函数法生成的预测表面虽然形成变化趋势,但是存在受极值点影响而生成超出实际测量值取值范围的现象。其中,沉积物石油类极小值为-6.6×10^{-6},预测表面形态严重失真;张力样条函数法通过对局部范围内的预测值进行平滑处理,生成的预测表面能够在局部形成较为平滑的表面,插值结果更接近测量点真实值取值范围。

3.3　辽东湾沉积物石油类空间分布特征分析

图 8 中张力样条函数法生成的辽东湾沉积物石油类含量预测表面显示:辽东湾沉积物石油类含量整体呈现近岸含量较高、中部含量较低的趋势,在辽东湾东北部、东南部和西南部海域分别出现高值区域。其中,辽东湾东北部海域出现沉积物石油类含量高值区,分析其原因主要与大辽河、辽河入海携带的陆源石油类污染物有关[8]。在河口区入海的陆源石油类污染物不断被海水中悬浮泥沙吸附沉淀,逐渐积累,沉积物石油类含量较高;辽东湾西南部海域出现的沉积物石油类含量高值区位于辽东湾海上油气开采平台聚集区南部,可能与海上油气开采过程中存在石油源的污染有关。同时,由于石油类溶解度较低,极易被海水中颗粒态吸附而沉降在底层沉积物中[18],受到海流作用而分布于海上油气开采平台聚集区及其周边;辽东湾东南部海域出现的沉积物石油类含量高值区位于普兰店湾。由于普兰店湾内有多个陆源入海排污口分布,并且湾内水交换能力较差[19],造成石油类污染物不易向外扩散,最终形成高值区。综上所述,张力样条函数法插值预测结果能够客观准确地反映出辽东湾沉积物石油类空间分布特征。

4　结 论

(1) 从整体上观察发现,4 种插值方法所生成的辽东湾沉积物石油类含量的预测表面的空间分布趋势基本一致。从局部空间观察发现,张力样条

函数法插值预测结果更接近真实测量值，能够客观准确地反映出辽东湾沉积物石油类含量的空间分布特征。

（2）采用交叉验证法对 4 种空间插值方法的插值精度进行验证。结果表明，4 种方法得到的误差均值绝对值（*MEAN*）的大小顺序为：反距离权重法>普通克里金法>张力样条函数法>规则样条函数法；误差均方根（*RMS*）的大小顺序为：普通克里金法>反距离权重法>规则样条函数法>张力样条函数法。根据误差均方根优先于误差均值绝对值的原则，对于辽东湾沉积物石油类宜采用张力样条函数法进行空间插值。

（3）针对不同区域和不同指标，没有绝对最佳的插值方法。影响插值结果的因素很多，模型参数的选择、采样点的分布和数量等都会影响到最后的插值结果。在运用空间插值方法时，要得到理想的空间插值效果，除了要考虑空间插值中的预测值和误差估计值，还要综合考虑预测表面的平滑程度、空间插值速度，对实测数据样本进行充分分析，反复试验比较，以选择最优的方法。

参考文献：

[1] 刘修泽,王召会,董婧,等.辽东湾 6 月鱼类的种类组成及空间分布[J].海洋渔业,2017,39(5):508–517.
[2] 张玉凤,宋永刚,宋伦,等.辽东湾海水颗粒相中多环芳烃分布与来源分析[J].水产科学,2018,37(6):793–799.
[3] 关丽,蔺翠翠,郑怀东,等.中华绒螯蟹中石油烃风险评估[J].水产科学,2018,37(6):812–817.
[4] 吴亚楠, 董胜, 高俊国,等. 海庙港溢油扩散数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(2):177–184.
[5] 崔党群.生物统计学[M].北京：中国科学技术出版社，1994.
[6] 黄杏元,马劲松,汤勤.地理信息系统概论[M].北京:高等教育出版社,2001.
[7] 门晓晔,杨宗政,刘肖,等.基于三维空间插值技术的某场地中总石油烃污染分布确定[J].安全与环境学报,2017,17(2):713–718.
[8] 王召会，吴金浩，胡超魁，等. 辽东湾水体中石油类的时空分布特征和污染状况[J]. 渔业科学进展，2016，37(3):20–27.
[9] 丁杰,汪小勇,王海峰,等.基于 GIS 的琼州海峡潮流空间插值模型比较研究[J].海洋技术学报,2016,35(4):74–80.
[10] 段志鹏,林进清,利锋,等.基于 GIS 的近海沉积物痕量元素空间分布特征插值方法选择[J].海洋环境科学,2014,33(2):262–268.
[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局，中国国家标准化管理委员会.GB 17378.3–2007. 海洋监测规范（样品采集、贮存与运输）[S].北京：海洋出版社，2007.
[12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局，中国国家标准化管理委员会.GB 17378.5–2007. 海洋监测规范（沉积物分析）[S].北京：海洋出版社，2007.
[13] 张海平,周星星,代文.空间插值方法的适用性分析初探[J].地理与地理信息科学,2017,33(6):14–18.
[14] 张子昕,周强波.空间插值算法在 GIS 中的应用[J].测绘与空间地理信息,2015,38(2):103–107.
[15] 林勇军,彭云飞,胡炜,等.基于空间插值的城市基准地价更新应用研究[J].地理空间信息,2019,17(2):75–78.
[16] 王彬彬,石丽红,卢月明, 等.一种顾及高程的时空反距离加权插值方法[J].测绘与空间地理信息,2018,41(10):82–85.
[17] 段平.三维空间场各向异性径向基函数空间插值模型研究[J].测绘学报,2018,47(12):1696.
[18] 张玉凤,吴金浩,宋永刚, 等. 辽东湾海水中 PAHs 分布与来源特征及风险评估[J].环境科学研究,2017,30(6):892–901.
[19] 邢传玺,刘永青,史文奇, 等.普兰店湾水交换能力及排污布局合理性分析[J].海洋环境科学,2018,37(6):914–921.

Study on GIS Spatial Interpolation of Petroleum Hydrocarbon in Sediments from the Liaodong Bay

HU Chao-kui[1], LI Ai[1,2], LI Nan[1], ZHANG Xue[3], FU Yun-han[4], WANG Zhao-hui[1]

1. *Liaoning Marine and Fisheries Science Research Institute, Dalian* 116023, *Liaoning Province, China*;
2. *Key Laboratory of Sea-Area Management Technology, State Oceanic Administration, Dalian* 116023, *Liaoning Province, China*;
3. *Natural Resources Service Center of Liaoning Province, Shenyang* 110001, *Liaoning Province, China*;
4. *Dalian Maritime University , Dalian* 116023, *Liaoning Province, China*

Abstract: In order to objectively and accurately reflect the spatial distribution characteristics of petroleum hydrocarbon in sediments from the Liaodong Bay, exploratory data analysis was conducted on the survey data of petroleum hydrocarbon in sediments from the Liaodong Bay of the Bohai Sea in 2015 based on the geostatistical analysis module of GIS. Four interpolation methods, including inverse distance weighting, ordinary kriging, regularize spline and tension spline, were applied to the spatial interpolation, of which the accuracy was evaluated by cross-checking method. The results indicated that the interpolation accuracies of the four methods were as follows: tension spline >regularize spline >inverse distance weighting >ordinary kriging. The spatial distribution trend of petroleum hydrocarbon in sediments can be all simulated by the four interpolation methods objectively, in which the tension spline method showed the closest results to real measurements in the local areas. So the tension spline method is the most suitable interpolation method for the data analysis of petroleum hydrocarbon in sediments from the Liaodong Bay.

Key words: spatial interpolation; sediment; oil; geographic information system (GIS)