

海洋浮游植物丰度的空间插值优化

林 琳^{1,2} 李纯厚^{1,*} 戴 明¹ 蔡文贵¹ 林 钦¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300 2. 上海水产大学, 上海 200090)

摘要 在探索性空间数据分析 (Exploratory spatial data analysis) 和数据转化的基础上, 利用反距离加权 (Inverse distance weighting, IDW)、径向基函数 (Radial basis functions, RBF)、普通克里格 (Ordinary Kriging, OK) 3 种插值方法, 对 2003 年 8 月获得的珠江口浮游植物丰度数据进行插值运算, 并对插值准确度进行交叉验证。结果显示, 珠江口浮游植物丰度数据具有离散性大、存在极大和极小值、呈正偏分布等特点。而对数转化能大大减小数据的离散性和不对称性, 有效消除插值结果图中各类插值噪音。交叉验证显示, 插值精确度 OK 最高, RBF 次之, IDW 最低。观察插值结果等值面图, 发现 3 种方法均能较客观地模拟出浮游植物丰度的总体分布趋势, 在对局部趋势的模拟上, OK 的表现最好。综合评定, OK 为最适合珠江口浮游植物丰度数据的插值方法。半变异模型的选择对 OK 的插值结果影响不明显。在四种半变异模型中, 圆形模型的拟合效果最好。

关键词 空间插值 浮游植物丰度 优化

文章编号: 1000-0933 (2007) 07-2880-09 中图分类号: Q178.53 文献标识码: A

Optimization of the spatial interpolation for marine phytoplankton abundance

LIN Lin^{1,2}, LI Chun-Hou^{1,*}, DAI Ming¹, CAI Wen-Gui¹, LIN Qin¹

1 South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China

2 Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (7): 2880 ~ 2888.

Abstract: To understand the spatial interpolation optimization laws of marine phytoplankton abundance, we compared three different methods of spatial interpolation: (1) inverse distance weighting (IDW), (2) radial basis functions (RBF) and (3) Ordinary Kriging (OK), using the recorded phytoplankton abundance in the Zhujiang Estuary, China, in August 2003. Firstly, exploratory spatial data analysis was used to gain a deeper understanding of the recorded phytoplankton abundance. Then the phytoplankton abundance was log-transformed. Lastly, we generated interpolation surfaces of phytoplankton biomass using the three interpolation methods. The results indicate that the phytoplankton abundance data is characterized by high dispersion, with a few outliers, and a positively skewed distribution. The log-transformation reduces the variances and skewed distribution, and effectively removes various interpolation noises in the interpolation surfaces. The accuracy of the OK is the highest, followed by the RBF, and then the IDW. The interpolation surfaces reveal that all of the three methods correctly show general trends of the phytoplankton abundance by using a series of optimization techniques. But the contours generated by the IDW always bend around the global outliers with excessively great curvature and sometimes even form closed small loops, which maybe cause some interference in identifying the general trends. The contours generated by the

基金项目 国家科技部科研院所社会公益研究专项资助项目 (2001DIA10014); 广东省重大科技兴海资助项目 (A200099E01)

收稿日期 2006-07-19; 修订日期 2007-05-16

作者简介 林琳 (1981~) 男, 山东日照人, 硕士生, 主要从事水生生物学研究. E-mail: lonelydancer1981@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scslch@163.com

Foundation item The project was financially supported by the Research Institutions' Special Welfare Research Grant from the Ministry of Science and Technology, China (No. 2001DIA10014); Key Marine Technological Construction Project of Guangdong Province (No. A200099E01)

Received date 2006-07-19; **Accepted date** 2007-05-16

Biography LIN Lin, Master candidate, mainly engaged in aquatic biology. E-mail: lonelydancer1981@163.com

RBF are excessively smooth. However, it represents the general trends clearly, although many local trends are lost. The contours generated by the OK are considered the best, as the method can represent both general and local trends accurately. Thus, the OK method is more efficient than RBF and IDW in terms of accuracy and surface representation. The four semi-variance models of the OK do not affect the interpolation results, with the circular model having the best fit to the data.

Key Words: spatial interpolation; phytoplankton abundance; optimization

空间插值是一项基本的空间分析技术,在海洋生态学领域应用极为广泛,从基础的海洋生态因子等值线和等值面图的绘制,到建立在插值平面基础上的生态因子时空变化分析^[1]、环境综合评价^[2]、生态系统动力学模型等等。目前已经成为海洋生态学研究不可或缺的工具之一,但它也是海洋生态学研究的薄弱环节之一。在众多的研究中,并不重视进行插值方法的筛选和插值参数的优化。使用不合适的方法或参数,会造成严重的插值噪音,使变化趋势难以辨识,甚至会产生扭曲的变化趋势,误导推理和判断,产生错误的决策结果^[3]。

插值方法的筛选、条件的优化已经成为空间插值技术在各领域应用研究的热点,在气象^[4]、土壤^[5]、遥感^[6]等领域都有广泛报道,但在海洋生态学领域研究甚少。王立华^[7]曾对海洋渔业环境因子(温度、盐度、磷酸盐、硝酸盐)插值方法的筛选进行了研究。而针对海洋浮游生物数据的插值优化研究还未见有报道。为探索海洋浮游生物数据插值优化的基本方案和规律,本研究选择 2003 年在珠江口获得的浮游植物丰度数据,在探索性空间数据分析和数据转化的基础上,分别使用 3 种插值方法对丰度数据进行插值,最后对各项优化措施的效果进行了验证,对方法进行了比较。

1 材料与方法

1.1 数据来源和样品处理

采用 2003 年 8 月,在珠江口 22°11' ~ 22°40' N、113°37' ~ 113°52' E 海域获得的调查资料。调查站位设置见图 1。浮游植物样品的采集和室内处理均按照《海洋监测规范》^[8]执行。使用小型浮游生物网(网口直径 37 cm,网目孔径 0.076 mm)由底层至表层垂直拖网 1 次,在显微镜下鉴定浮游植物的种类组成,测定浮游植物的丰度(单位: 10^4 cell/m^3)。

1.2 软件选择

选用美国环境系统研究所(ESRI)的 ArcGIS 8.3 作为插值分析平台。选用 SPSS 12.0 作为数据统计分析的工具。

1.3 GIS 数据库的构建

使用中国地图出版社出版的 1:100 万中国基础地理信息图作为底图。使用 ArcGIS 建立个人地理信息数据库(Personal geodatabase),将数字化底图和浮游植物丰度数据导入数据库。个人地理信息数据库将空间数据库和属性数据库合二为一,并与 Microsoft Office Access 具有良好的兼容性,大大方便了数据的维护、提取和分析结果的存储。

1.4 探索性空间数据分析和数据转化

探索性空间数据分析是在创建插值表面前,利用 ArcGIS Geostatistical Analyst 模块提供的一系列工具,对

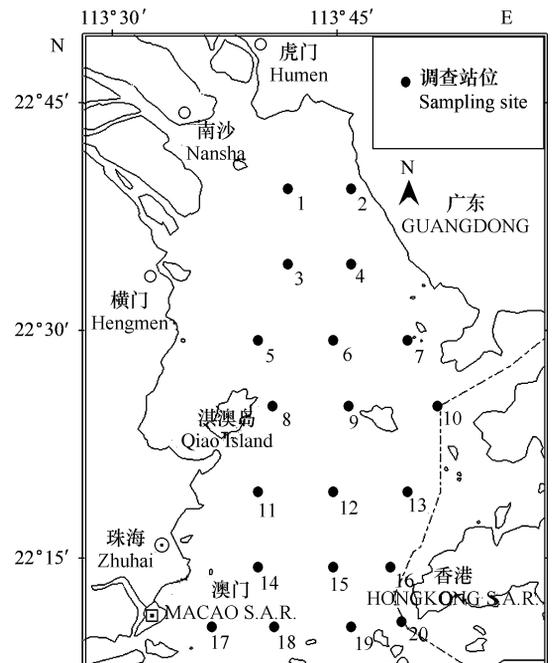


图 1 珠江口海域调查站位示意图

Fig. 1 Sampling stations in the Zhujiang Estuary

原始数据的性质、分布特点等进行深入、详尽统计分析的过程。ArcGIS Geostatistical Analyst 模块提供的大多数探索性空间数据分析工具,在 SPSS 或其他统计分析软件和地理信息系统软件中都有包含。

1.4.1 数据分布特征分析

使用频数分析得到频数直方图和一系列统计量(平均值、变异系数、偏度系数、峰度系数等),可对数据分布趋势进行了解^[9]。

1.4.2 寻找全局和局部离群值

识别离群值具有极为重要的意义。如果是现象的真实异常值,则该值可能就是研究和理解这一现象最为关键的值。如果离群值是数据测量或输入错误造成的,则一定要在插值前改正或删除,否则就可能引起多方面的有害影响^[10]。

离群值包括全局离群值和局部离群值两类。全局离群值是指相比于整个数据集,极大和极小的值。局部离群值是指不超出整个数据集的分布范围,但与周围的价值相比会有显著不同的值。寻找离群值的方法很多,如频数分布直方图或半变异函数云图(Semivariogram cloud)等^[9,10]。本研究寻找全局离群值使用频数分布直方图,局部离群值使用冯罗诺多边形图(Voronoi polygons)(聚类法)。

1.4.3 数据转化

如果数据值的变化范围过大或存在离群值,就会降低空间插值的精度^[11]。另外,很多插值和统计分析方法要求数据集符合正态分布^[9]。根据探索性空间数据分析得到的数据性质,选择合适的转化方法,上述两个问题都可以得到比较圆满的解决。使用转化数据完成空间插值后,需要对插值结果进行反向转化,以恢复数据的生态学内涵。

1.5 插值方法

选择在海洋生态学领域最常使用的3种插值方法:反距离加权插值法、径向基函数插值法、普通克里格插值法,分别对珠江口浮游植物丰度数据集进行空间插值的参数优化和插值运算。方法基本原理和运算公式参见相关文献^[7,11]。

1.6 方法比较

使用交叉验证分析确定不同插值方法的精确度。对于每一种插值法,交叉验证分析重复从已知数据集中删除一个采样点的过程,用剩下的采样点估算被删除点的数值,并计算误差均值(MEAN)和误差均方根(Root-Mean-Square, RMS)。一般来说,各种插值方法的误差均值绝对值和误差均方根总体最小者,具有较好的插值效果,尤其是 RMS 越小越好^[12]。

2 结果

2.1 探索性空间数据分析

对数据集进行频数分析,结果见表1和图2。可见此数据集离散程度很高,数据值之间差异大,存在极大值和极小值,数据呈正偏分布。这也是海洋浮游生物丰度数据的典型特征^[13]。

表1 珠江口浮游植物丰度原始数据与3种转化数据的描述性统计量

Table 1 Statistics of original data and transformed data of phytoplankton abundance in the Zhujiang Estuary

项目 Item	平均值 Mean	中值 Median	变异系数 C. V.	偏斜度 Skewness	峰度 Kurtosis
原始数据的描述性统计量 Statistics of original data	233.70	29.00	306.59	4.29	18.80
对数转化数据的描述性统计量 Statistics of log-transformed data	1.64	1.46	42.07	1.06	1.58
平方根转化数据的描述性统计量 Statistics of square-root-transformed data	9.55	5.39	128.27	3.37	12.75
0-1转化数据的描述性统计量 Statistics of 0-1-transformed data	0.07	0.01	314.29	4.29	18.80

2.2 寻找全局和局部离群值

由图 2 可发现两个数值极大的全局离群值,对照站位分布图(图 1),发现其分别出现在研究区域上部的 1、2 号站。种群生物量数据显示,1 号站淡水种颗粒直链藻 (*Melosira granulata*) 丰度极大,占群落总丰度的 90.92%。而 2 号站广布种中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 数量极大,占群落总数的 66.61%。由于这两个站位单个优势种的爆发性增殖,造成了上述两离群值的出现。

用聚类法生成浮游植物丰度数据的冯罗诺多边形图(图 3)。冯罗诺多边形图由一系列围绕着采样点的多边形组成,在多边形内的任一点与此多边形内采样点的距离比其他采样点都近^[9]。在用聚类法生成冯罗诺多边形图时,所有的多边形被分成 5 类,与所有紧邻多边形的类别均不同的多边形被怀疑为局部离群值。图 3 中颜色最浅的多边形对应的采样点值被识别为局部离群值,出现在深圳附近海域的 7 号站。

对所有的离群值进行了复查,未发现检测和记录错误,说明这些数值对本研究具更高的价值,应该重点分析。

2.3 数据转化

频数分析的结果表明,此数据集数据间差异大,且呈正偏分布,对获得精确的插值结果极为不利,应该进行数据转化。分别使用自然对数转化、平方根转化、0~1 转化 3 种方法对原始数据进行转化。

其中 0~1 转化的运算公式为:

$$Y_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式中, x_i 为原始数值, x_{\min} 为原始数据集中的最小值, x_{\max} 为原始数据集中的最大值, Y_i 为转化后数值。

对转化后的数据分别进行频数分析,汇总频数分析得到的各项描述性统计量,结果见表 1。可见,对数转化最大程度地降低了变异系数、偏斜度、峰度以及平均值与中值间的差异,使转后的数据离散程度最低、最接近正态分布,所以选择对数转化作为本研究空间插值的数据转化方法。

2.4 插值结果和方法比较

分别使用 3 种方法,对珠江口浮游植物丰度的原始数据和对数转化数据进行插值参数优化和插值运算,之后计算误差均值和误差均方根,结果见图 4 和表 2。

表 2 使用不同插值法得到的误差均值和误差均方根

Table 2 MEAN and RMS calculated by different interpolation methods

插值方法 Interpolation method	误差均值 MEAN		误差均方根 RMS	
	原始数据 Original data	转化数据 Transformed data	原始数据 Original data	转化数据 Transformed data
反距离加权 IDW	-53.06	-177.22	699.70	690.33
径向基函数 RBF	-41.49	-101.96	707.40	670.88
普通克里格 OK	-41.58	-25.34	703.90	225.80

2.4.1 数据转化对插值结果的影响

如表 2,在进行数据转化后, IDW 和 RBF 的误差均值绝对值有所上升,而误差均方根有所下降,无法明确

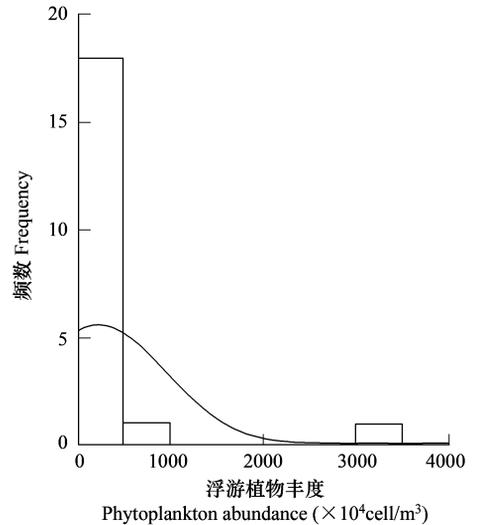


图 2 珠江口浮游植物丰度数据频数分析直方图

Fig. 2 Frequency of the phytoplankton abundance in the Zhujiang Estuary

判定转化对这两种方法插值精度的影响,但从插值结果等值线图来看(图4),转化基本消除了由于极大、极小值以及数据离散性大而引起的小等值线圈、尖锐的等值线锯齿、缺刻等插值噪音,使浮游植物丰度的平面分布趋势更明晰易辨;就OK来说,转化使误差均值绝对值和误差均方根分别下降了39.06%和69.92%(表2),显著提升了插值精度。OK的插值图在转化前后表现出较大的差异(图4)。根据珠江口海洋生态学知识并对照其它两法的插值结果图,可以判定,数据转化后的插值图更加客观、准确,而使用原始数据获得的插值图,其等值线出现了错误扭曲和位移,特别在研究区域中部的低值区。

2.4.2 不同插值方法的比较

以转化后数据的插值结果作为不同方法比较的依据。

由表2可见,3种方法得到的误差均值绝对值和误差均方根的大小顺序均为OK < RBF < IDW,说明3种方法对珠江口浮游植物丰度数据的插值精确度,OK最高,RBF次之,IDW最低。

从不同方法得到的插值平面来看(图4),三者较大空间尺度上对浮游植物丰度空间分布趋势的模拟基本一致,均为东岸高于西岸,最高值区位于虎门附近海域,最低值区出现在研究区域的中部和西南部珠海附近海域。虎门附近海域浮游植物数量较高,这是由于虎门口为强潮流、弱径流水道,由于潮流的顶托,使藻体和藻类光合作用所需的营养物质均能较长时间的在真光层停留。西岸的数量较东岸偏低,可能是西滩的高浊度对光线的限制造成对浮游植物成长的不利影响^[4,15]。

从较小的空间尺度观察插值平面(图4),发现IDW生成的等值线往往会围绕丰度值极大或极小的采样点发生大曲率的弯曲,甚至闭合形成小等值线圈,说明IDW对极端值敏感,耐抗性(Resistance)低,这会对总体趋势的表现产生较大干扰。IDW的低耐抗性是由其原理和算法所决定的。IDW基于“相近相似原理”,距离待预测点越近的采样点获得的权重越大,对插值结果的影响也越大,并且IDW算法产生的平面,最大值、最小值只会出现在采样点处^[10];RBF产生的等值线比其他两法都要平滑,有利于对总体趋势的表现,但使表面总曲率最小的计算原则^[10],忽略了大量对较小空间尺度变化趋势的表现。只有OK,既具有高耐抗性,又能在等值线的平滑度与精确度之间达到较好的平衡,对总体趋势与局部趋势都有良好的表现。

综上所述,在采取一系列插值优化措施后,3种插值方法均能在较大空间尺度上,比较客观地模拟出浮游植物丰度的空间分布趋势,在较小空间尺度上,OK对局部趋势的模拟最为准确和合理。结合交叉验证的结果,综合评定,OK是最适合珠江口浮游植物丰度数据的插值方法。

2.4.3 半变异模型的选择对OK插值结果的影响

在进行OK法插值时,分别使用在海洋生态学领域最常用的4种半变异模型(圆形、球形、指数、高斯)对浮游植物丰度数据的半变异函数图进行拟合,并对插值结果进行交叉验证,结果显示(表3)4种模型的拟合精度相似,误差均值绝对值和误差均方根的差异都不大,其中以圆形模型的拟合精度最高。说明半变异模型

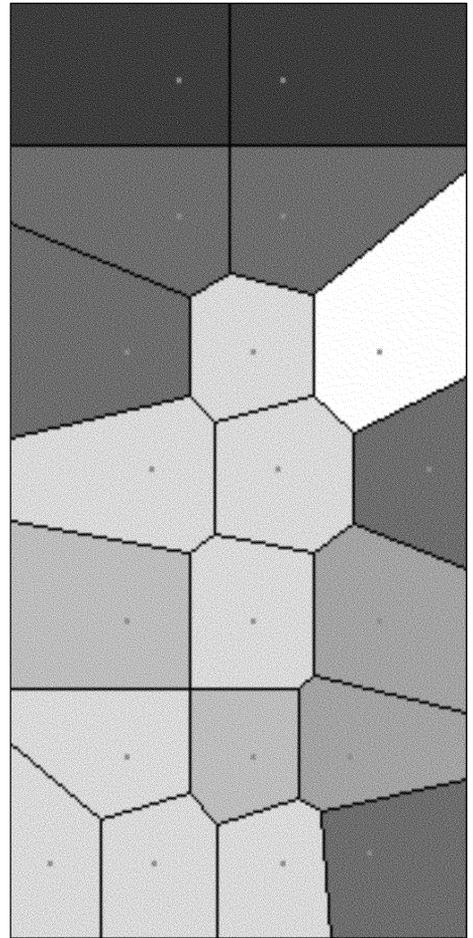


图3 聚类法生成的珠江口浮游植物丰度数据冯罗诺多边形
Fig. 3 Voronoi polygons of phytoplankton abundance in the Zhujiang Estuary (cluster method)

接彩图 4

的选择对插值结果的影响不明显。

3 讨论

3.1 对海洋生态数据进行插值优化的必要性

由于海洋生态系统的极端复杂性、异质性和特殊性^[6],使每一个海洋生态因子都受到多个尺度多种因素的影响,其取值是多种作用相互耦合的结果。另外,海洋考察,布站成本高昂,样本量往往不充分,这些都使得海洋生态数据常常出现离散性高,不对称性强等特点,给海洋生态因子的精确插值带来很大困难。这也彰显出探索性空间数据分析等一系列插值优化措施的重要性和必要性。以本研究中表现最好的 OK 为例,如果未进行插值优化,直接使用原始数据、软件默认参数设置,则插值结果的 RMS 高达 715.70,比优化后的 RMS 225.80,升高了 216.96%,已经超过了 RBF 法的 670.88 和 IDW 法的 690.33,在插值精度上没有了任何优势(表 2)。

3.2 地理统计法在海洋生态因子插值领域的优越性

本研究中,OK 无论是插值精度,还是对浮游植物丰度空间分布趋势的表现,均优于其它两法。王文华^[7]通过对海洋渔业环境因子插值方法的筛选也认为,克里格算法更能准确地反映渔业环境要素时空分布的特点和变化趋势,可见克里格插值法在海洋生态因子插值领域具有较广泛的优越性。

空间插值方法可以分为两类:确定性方法(Deterministic methods)和地理统计方法(Geostatistical methods)^[8]。确定性方法是使用数学函数进行插值,以研究区域内部的相似性(如 IDW),或以平滑度为基础(如 RBF),由已知样点来创建预测表面的插值方法。普通克里格法是地理统计插值方法家族中的一员。地理统计方法是利用已知样点的统计属性,在半变异函数理论分析基础上,对区域化变量的取值实现无偏最优估计的一种方法。在使用这类方法进行插值时,不仅考虑了待预测点与邻近样点数据间的空间距离关系,还考虑了各参与预测的样点间的位置关系,充分利用了各样点数据的空间分布结构特征,使其估计结果比 IDW、RBF 等传统方法更精确,更有效避免了系统误差的出现。地理统计方法的这种优越性对于常常出现样本不充分、布站未经优化等问题的海洋生态因子数据的空间插值来说尤为重要。

浮游生物丰度数据来自随机抽样,数据本身为随机统计量,而地理统计插值方法是以地统计学为基础的,最适于这类带有很强随机成分的现象或最适于统计特征的估计。

3.3 珠江口浮游植物丰度的空间自相关分析

空间自相关理论是地理统计插值法进行预测的理论基础,所谓空间自相关(Spatial autocorrelation)是指在一定区域单元上,某种地理现象或某一属性值与临近区域单元上同一现象或属性值的相关性。它是衡量空间变量的变异对邻近区域相同变量的变异依赖程度的空间统计方法^[9,17]。

使用圆型模型拟合珠江口浮游植物丰度的半变异函数云图,得到的基底值(Nugget)为 0.00745,基台值(Sill)为 0.57675,最大相关距离(Range)为 8199.31m。在地统计学中,从结构性因素的角度来看,基底值与基台值的比例可以表明空间相关程度。在土壤养分领域,该比例小于 0.25,说明系统具有强烈的空间相关性^[8]。在海洋生态学领域没有提出相关的标准,但珠江口浮游植物丰度数据的比值为 0.013,远小于 0.25,可以说明其存在强烈的空间自相关性,其取值受到邻近区域丰度数值的强烈影响,存在明显的空间结构关系。这说明在海洋生态系统中,特殊的水环境使物质、能量、信息的扩散逆阻较小、交流更为通畅,使生态因子更易受到周围环境的作用和影响。

3.4 海洋生态数据插值方法的选择

插值方法的选择要根据具体的研究目的进行。如果目的仅在于对研究区域内几个粗略划分的亚区进行

表 3 4 种半变异模型的插值结果比较

Table 3 Interpolation result comparison of four semi-variance models

半变异模型 Semi-variance model	误差均值 MEAN	误差均方根 RMS
圆形模型 Circular	-25.34	225.80
球形模型 Spherical	-25.44	226.80
指数模型 Exponential	-25.50	228.40
高斯模型 Gaussian	-26.10	229.80

比较,如本研究中珠江口的东岸与西岸,或对最高值和最低值的区域进行大致定位,则此时较小尺度的空间变异可以被忽略,只需把握住整体特征和全局趋势。以实施一系列插值优化措施为前提,本研究选用的3种方法均可符合要求。虽然OK的插值结果在各方面均优于其它两法,但使用OK插值,步骤繁多,参数设置要求较高,耗时耗力,在研究目的许可的情况下,简单、灵活的IDW、RBF也是合适的选择。如果需要利用插值结果进行更细致、更高级的空间分析,如图形叠加、构建生态系统模型等,则必须选择插值精度最高、对小空间尺度表现最好的插值方法,因为误差会发生上行传递和放大,造成更深远的影响^[5]。

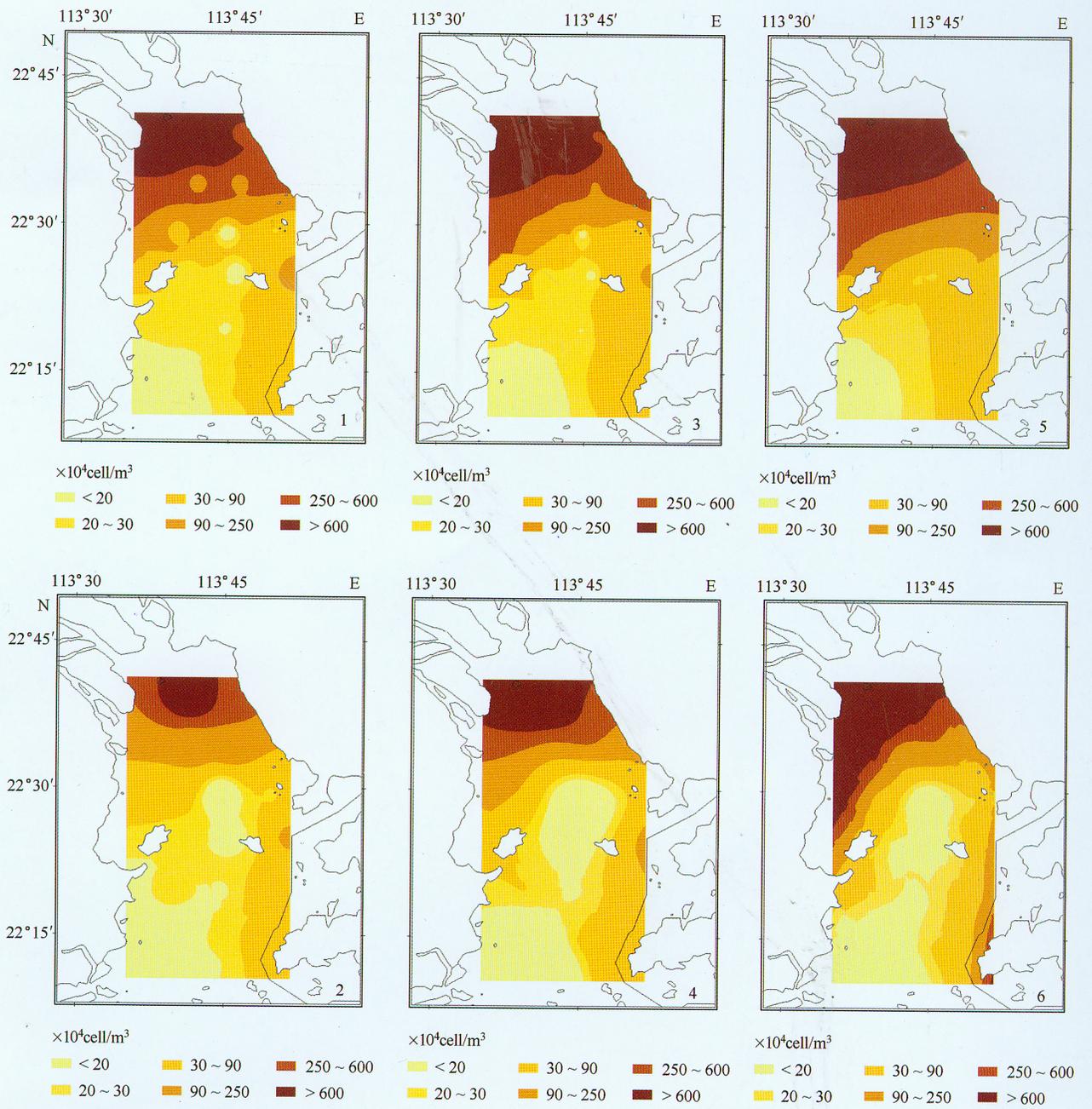
References :

- [1] Cai W G, Jia X P, Li C H. GIS-based analysis of the spatial-temporal variation of phytoplankton in the Western Guangdong Waters. *Acta Ecologica Sinica* 2004 24 (10) 2143—2148.
- [2] Cai W G, Li C H, Lin Q, *et al.* Food organism level and biodiversity in the west Guangdong Sea Area. *Journal of Fishery Sciences of China* 2004 11 (5) 440—446.
- [3] Mitas L, Mitasova H. Spatial interpolation methods in GIS. In Longley P A ed. *Geographical information system, volume 1, principles and technical issues, second edition*. New York: John Wiley & Sons, 1999. 452—461.
- [4] Feng Z M, Yang Y Z, Ding X Q, *et al.* Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources. *Geographical Research*, 2004 23 (3) : 357—364.
- [5] Wang X, Miao X K, Meng Z J, *et al.* Effect on soil nutrition interpolation result of different interpolation styles. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005 36 (6) 826—830.
- [6] Wang X N, Liu P, Xu J D. Comparison of interpolation methods for radar imaging. *Modern Radar* 2001 (4) 59—61.
- [7] Wang L H. Comparison study of interpolation methods for fisher environment factor based on GIS. *Journal of Zhanjiang Ocean University* 2003 23 (6) 30—34.
- [8] State Oceanography Administration. *Marine survey criterion*. Beijing: Oceanography Press, 1991.
- [9] ESRI. *Using ArcGIS Geostatistical analyst*. Redlands: ESRI, 2001.
- [10] Liu X N, Huang F, Wang P, *et al.* Geostatistics analysis. In Liu X N, *et al.* ed. *Principles and methods of GIS spatial analysis*. Beijing: Science Press, 2005. 185—223.
- [11] Zhu H Y, Liu S L, Jia S F. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements. *Geographical Research* 2004 23 (4) 425—432.
- [12] Meng Q X, Liu G B, Yang Q K. Research on spatial interpolation methods of precipitation on Loess Plateau. *J. of Northwest Sci-Tech Unit. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.)* 2006 34 (3) 83—88.
- [13] Wang H L, Feng J F. Regression prediction of red tide. In: Wang H L, *et al.* eds. *Ecological dynamics and prediction of red tide*. Tianjin: Tianjin University Press, 2006. 176—177.
- [14] Fiechez R, Jickells T D, Edmonds H M. Algal bloom in high turbidity: a result of the conflicting consequences of turbulence on nutrient cycling in a shallow water estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1992 35 577—592.
- [15] Andrea E A, Cloern J E. Tropic interaction and direct physical effects control phytoplankton biomass and production in an estuary. *Limnology and Oceanography*, 1992 37 946—955.
- [16] Feng S Z, Li F Q, Li S J. Prolegomenon. In: Feng S Z, *et al.* eds. *Introduction of Marine Science*. Beijing: Higher Education Press, 1999. 5—7.
- [17] Zhou G F, Xu R M. Spatial autocorrelation and spatial pattern. In: Zhou G F, Xu R M eds. *Biologic geostatistics*. Beijing: Science Press, 1998. 12—41.
- [18] Su W, Nie Y M, Hu X, *et al.* Study on spatial variability of soil nutrients in Beima Town of Shandong Province by using Kriging method. *Journal of Anhui Agricultural University* 2004 31 (1) 76—81.

参考文献 :

- [1] 蔡文贵, 贾晓平, 李纯厚. 基于GIS的粤西海域浮游植物的时空变化分析. *生态学报* 2004 24 (10) : 2143~2148.
- [2] 蔡文贵, 李纯厚, 林钦, 等. 粤西海域饵料生物水平及多样性研究. *中国水产科学* 2004 11 (5) : 440~446.

- [4] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素空间插值方法优化. 地理研究, 2004, 23 (3): 357 ~ 364.
- [5] 王秀, 苗孝可, 孟志军, 等. 插值方法对 GIS 土壤养分插值结果的影响. 土壤通报, 2005, 36 (6): 826 ~ 830.
- [6] 王小宁, 刘鹏, 许家栋. 雷达成像中插值算法的比较. 现代雷达, 2001 (4): 59 ~ 61.
- [7] 王立华. 基于 GIS 的渔业环境因子制图算法及其分析比较. 湛江海洋大学学报, 2003, 23 (6): 30 ~ 34.
- [8] 国家海洋局. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [10] 刘湘南, 黄方, 王平, 等. 空间统计学分析. 见: 刘湘南, 等主编. GIS 空间分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005. 185 ~ 223.
- [11] 朱会义, 刘述林, 贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题. 地理研究, 2004, 23 (4): 425 ~ 432.
- [12] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原降水量的空间插值方法研究. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2006, 34 (3): 83 ~ 88.
- [13] 王洪礼, 冯剑丰. 赤潮的回归预测. 见: 王洪礼, 冯剑丰主编. 赤潮生态动力学与预测. 天津: 天津大学出版社, 2006. 176 ~ 177.
- [16] 冯士筜, 李凤岐, 李少菁. 绪论. 见: 冯士筜, 等主编. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999. 5 ~ 7.
- [17] 周国法, 徐汝梅. 空间相关性与空间格局. 见: 周国法, 徐汝梅主编. 生物地理统计学. 北京: 科学出版社, 1998. 12 ~ 41.
- [18] 苏伟, 聂宜民, 胡晓洁, 等. 利用 Kriging 插值方法研究山东龙口北马镇农田土壤养分的空间变异. 安徽农业大学学报, 2004, 31 (1): 76 ~ 81.



1. 用原始数据通过 IDW 法得到的插值图 Interpolation result of original data by IDW
2. 用转化数据通过 IDW 法得到的插值图 Interpolation result of transformed data by IDW
3. 用原始数据通过 RBF 法得到的插值图 Interpolation result of original data by RBF
4. 用转化数据通过 RBF 法得到的插值图 Interpolation result of transformed data by RBF
5. 用原始数据通过 OK 法得到的插值图 Interpolation result of original data by OK
6. 用转化数据通过 OK 法得到的插值图 Interpolation result of transformed data by OK

图4 珠江口浮游植物丰度的插值结果等值面图

Fig. 4 Interpolation result of the phytoplankton abundance in the Zhujiang Estuary