

## 风险监测

## 深圳市海域麻痹性贝类毒素时空分析

王舟<sup>1</sup>, 肖士燕<sup>2</sup>, 黄薇<sup>1</sup>, 潘柳波<sup>1</sup>, 万劼<sup>3</sup>, 郭清芳<sup>4</sup>, 李思果<sup>1</sup>, 罗贤如<sup>1</sup>, 杨淋清<sup>1</sup>, 肖革新<sup>5</sup>

(1. 深圳市疾病预防控制中心, 广东 深圳 518055; 2. 北京工业大学应用数理学院, 北京 100124;  
3. 中科软科技股份有限公司, 北京 100190; 4. 中山大学公共卫生学院, 广东 广州 510080;  
5. 国家食品安全风险评估中心, 北京 100022)

**摘要:**目的 掌握广东省深圳市海域麻痹性贝类毒素时空分布特征, 确定重点污染海域, 为实现早期预警提供科学依据。方法 通过对2015年深圳市海域3个监测点(斜吓湾、东涌和珍珠岛)的麻痹性贝类毒素含量监测数据进行径向基函数插值分析和时空扫描分析, 掌握监测点周围的麻痹性贝类毒素含量的大体分布状况和时空聚集区域。结果 由径向基函数插值结果可知, 斜吓湾海域麻痹性贝类毒素含量相对较高, 东涌和珍珠岛海域含量相对较低, 而且斜吓湾、东涌和珍珠岛海域的麻痹性贝类毒素含量分布特点存在明显差异; 时空扫描发现麻痹性贝类毒素在时间和空间上存在明显聚集性。2015年1~6月斜吓湾海域是最可能聚集海域( $LLR = 7.72$ ,  $RR = 5.59$ ,  $P = 0.00083 < 0.001$ )。结论 通过径向基函数插值和时空扫描分析方法可以获得麻痹性贝类毒素空间分布规律以及时空聚集特征。

**关键词:** 径向基函数插值; 时空扫描; 麻痹性贝类毒素; 空间分布; 食品安全; ArcGIS; SaTScan 软件

**中图分类号:** R155 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8456(2017)01-0089-04

**DOI:** 10.13590/j.cjfh.2017.01.020

**Spatial-temporal scan statistic on the paralytic shellfish poison in Shenzhen**WANG Zhou<sup>1</sup>, XIAO Shi-yan<sup>2</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, PAN Liu-bo<sup>1</sup>, WAN Jie<sup>3</sup>, GUO Qing-fang<sup>4</sup>,  
LI Si-guo<sup>1</sup>, LUO Xian-ru<sup>1</sup>, YANG Lin-qing<sup>1</sup>, XIAO Ge-xin<sup>5</sup>

(1. Shenzhen Center for Disease Control and Prevention, Guangdong Shenzhen 518055, China;  
2. Beijing University of Technology College of Applied Sciences, Beijing 100124, China; 3. Sinosoft  
Company Limited, Beijing 100190, China; 4. School of Public Health, Sun Yat-Sen University, Guangdong  
Guangzhou 510080, China; 5. National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

**Abstract: Objective** To explore the temporal-spatial distribution characteristics of the paralytic shellfish poison in Shenzhen City, in order to determine the key areas of pollution and provide the basis for early alert. **Methods** The paralytic shellfish poison monitor data from three monitoring sites in Shenzhen (Xiexia Bay, Dongyong and Pearl Island) in 2015 were analyzed using the radial basis function interpolation and spatial-temporal scan, and the general distribution and spatial-temporal clustering characteristics were preliminarily explored. **Results** According to radial basis function interpolation, the content of paralytic shellfish poison in Xiexia Bay was relatively high compared to Dongyong and Pearl Island. There were obvious differences in the distribution characteristics of the paralytic shellfish poison in Xiexia Bay, Dongyong and Pearl Island. Spatial-temporal scan presented space-time aggregation, from January 2015 to June 2015, the Xiexia Bay was most likely to be a aggregation region ( $LLR = 7.72$ ,  $RR = 5.59$ ,  $P = 0.00083 < 0.001$ ). **Conclusion** The spatial distribution regularity and spatial-temporal clustering characteristics of the paralytic shellfish poison could be obtained by the methods of radial basis function interpolation and spatial-temporal scan.

**Key words:** Radial basis function interpolation; spatial-temporal scan; paralytic shellfish poison; spatial distribution; food safety; ArcGIS; SaTScan software

收稿日期: 2016-10-25

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20150402102135493)

作者简介: 王舟 女 副主任医师 研究方向为营养与食品卫生

E-mail: 147573499@qq.com

通信作者: 肖革新 男 副研究员 研究方向为空间流行病学

E-mail: xiaogexin@cfsa.net.cn

近年来,海洋环境污染日益严重,赤潮发生的频率和规模不断增加,“赤潮藻”产生的贝类毒素给海洋渔业、人类健康带来的影响日趋严重。人类通常摄入因食用滤食浮游生物(含有毒微藻类)后产生麻痹性贝类毒素(paralytic shellfish poison, PSP)的贝类水产品而引起麻痹性贝类中毒。研究表明,

全球每年因 PSP 而引发的中毒事件约为 2 000 起, 死亡率达到 15%, 人类摄入超过一定限量 PSP 时, 其病死率达 100%<sup>[1]</sup>。麻痹性贝类毒素中毒已经成为重要的公共卫生问题, 得到了全世界的关注。PSP 是我国海洋赤潮毒素中最常见的毒素之一, 约占藻毒素引起中毒事件的 87%<sup>[2]</sup>。近几年来, 我国沿海赤潮发生明显增多, 同时, 因食用染毒的贝类而引起消费者中毒甚至死亡的事件亦明显增加。

现有的麻痹性贝类毒素监测数据的分析研究仅局限于描述性统计分析, 缺乏系统的、深入的空间分布及聚集性分析。为此应用空间统计方法开展麻痹性贝类毒素时空分布的研究, 能弥补该领域相关研究的不足。本研究以 2015 年在深圳斜吓湾、东涌和珍珠岛海域监测的麻痹性贝类毒素含量数据为例进行分析, 以期望为类似的研究提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

数据来源于 2015 年深圳海域 3 个监测点(斜吓湾、东涌和珍珠岛)的麻痹性贝类毒素含量监测数据。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 径向基函数插值

在区域研究过程中, 要获得区域内每个点的数据是非常困难的。一般情况下只采集研究区域内具有代表性的监测数据, 这些数据以离散点的形式存在。然而, 在实际应用中却经常需要估计某些未采集点的值, 此时就需要将已知样本点的值按照一定方法扩散开来, 给其他的点赋予一个合理的预测值, 即为插值<sup>[3]</sup>。

插值的假定条件是空间上分布的现象具有空间相关性, 即距离较近的现象间趋向于拥有相似的特征。距离样本点较近的点的值比距离样本点较远的点的值更接近样本点的值<sup>[3]</sup>。

径向基函数插值公式为:

$$s(x) = \sum_{k=1}^N w_k \phi_k(r_{ik}) \quad (1)$$

其中,  $N$  为采样点个数,  $w_k$  为  $k$  个样本点的权重系数,  $\phi_k(r_{ik})$  为基函数,  $r_{ik}$  为点  $x_i$  到点  $x_k$  的欧氏距离,  $r_{ik} = \|x_i - x_k\|$ <sup>[4]</sup>。基函数的公式为:

$$\phi(r) = e^{-cr^2} \quad (2)$$

其中,  $r$  为自变量,  $c$  为常数。

求解插值模型时, 首先构造基函数矩阵:

$$\Phi_{N \times N} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{N1} & \cdots & \phi_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中  $\phi_{ij} = \phi(r_{ij})$ , 权重向量  $W$  可用(4)式求得:

$$W = Y\Phi^{-1} \quad (4)$$

求解出  $W$  后, 可用(1)式估计未知点的值<sup>[5]</sup>。

#### 1.2.2 时空扫描

时空扫描分析是一种探索事件在时间、空间, 乃至时空上是否存在聚集性, 评估事件是否异常增高, 检验事件发生在时空是否随机分布的研究方法<sup>[6]</sup>。本文利用 SaTScan 9.0 软件进行时空扫描分析。

时空扫描统计首先定义一系列以空间距离为半径, 时间间隔为高的圆柱形时空扫描窗口, 将研究区域划分为若干个扫描窗口。然后, 针对每个扫描窗口, 在泊松分布假设前提下, 计算理论事件数, 公式为:

$$u_z = \left(\frac{m_z}{m_c}\right)n_c \quad (5)$$

其中  $u_z$  表示随机假设下时空窗口  $Z$  中的理论事件数;  $m_z$  表示时空窗口  $Z$  中的总案例数;  $m_c$  表示研究区域内的总案例数;  $n_c$  表示研究时空范围内的总事件数。进而, 根据窗口内外的理论与实际事件数构造对数似然比(LLR)统计量来描述窗口内事件异常聚集的程度, 公式为:

$$LLR = \frac{L_z}{L_0} = \frac{\left(\frac{n_z}{u_z}\right)^{n_z} \left(\frac{n_c - n_z}{u_c - u_z}\right)^{n_c - n_z}}{\left(\frac{n_c}{u_c}\right)^{n_c}} \quad (6)$$

其中  $n_z$  表示时空窗口  $Z$  中的是事件数,  $n_c$  是研究区域总事件数,  $u_z$  是时空窗口  $Z$  中的理论事件数,  $u_c$  是研究区域总的理论事件数,  $u_c = \sum u_z$ <sup>[7]</sup>。LLR 是单调递减的,  $P$  值是根据蒙特卡罗假设检验得出。当 LLR 取最大值且  $P < 0.05$  时, 可以认为该区域存在聚集特征<sup>[8]</sup>。

假设麻痹性贝类毒素在时间和空间均呈泊松分布, 取检测值的 3/4 分位数(2.41  $\mu\text{g}/100\text{g}$ )作为标准, 高于标准的个数作为事件数, 监测总次数作为总案例数。故本研究中研究区域总案例数  $m_c = 92$ , 总事件数  $n_c = 25$ 。

## 2 结果

### 2.1 径向基函数插值

图 1~4 中 NA、XX 和 DP 分别代表东涌、斜吓湾和珍珠岛, 颜色代表麻痹性贝类毒素的含量, 颜色越深, 麻痹性贝类毒素的含量越高。浅色区域表明麻痹性贝类毒素的含量较低, 深色区域表明麻痹性贝类毒素的含量较高。由浅色逐渐变为深色表明麻痹性贝类毒素的含量逐渐增高。随着距离监测点越远的区域对 2015 年第一季度深圳海域麻痹

性贝类毒素含量进行径向基函数插值分析(图1)。结果表明斜吓湾海域麻痹性贝类毒素的含量相对较高,而东涌和珍珠岛海域的含量相对较低,并且东涌和珍珠岛海域麻痹性贝类毒素含量的分布特征相似,而与斜吓湾海域的分布特征有明显差异。第二季度(图2)与第四季度(图4)的结果与第一季度相同,而与第三季度(图3)的结果略有差异。第三季度斜吓湾海域麻痹性贝类毒素的含量相对较高,而东涌和珍珠岛海域的含量相对较低,但是东涌和珍珠岛海域麻痹性贝类毒素含量的分布特征不再呈现相似性。

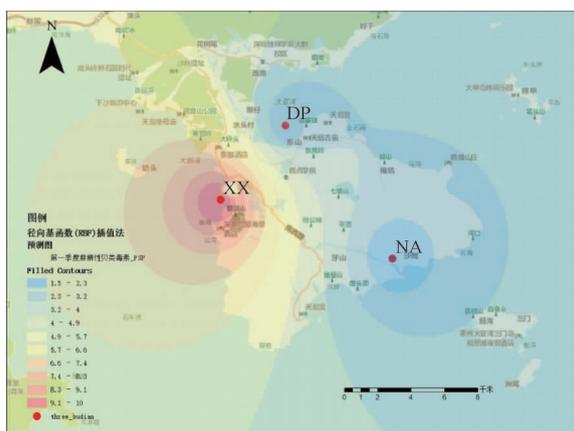


图1 2015年第一季度径向基函数插值结果展示图  
Figure 1 Radial basis function interpolation results in the first quarter of 2015

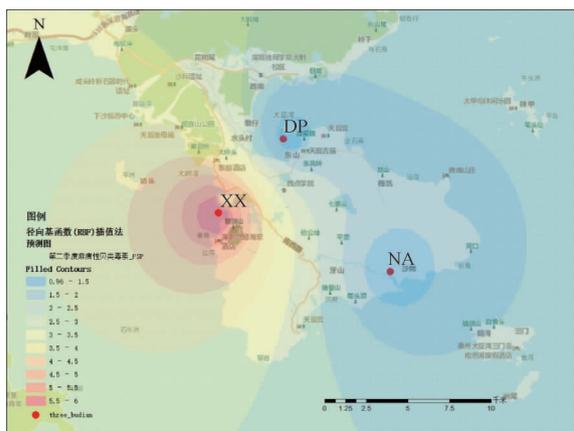


图2 2015年第二季度径向基函数插值结果展示图  
Figure 2 Radial basis function interpolation results in the second quarter of 2015

## 2.2 径向基函数插值误差分析

采用径向基函数插值的方法解决了监测数据点之间的空白,这是对当前监测数据的有力补充。表1中的误差结果显示径向基函数插值的准确度不高,这主要是监测点过少导致的。由于目前深圳仅限于这3个监测点,所以利用径向基函数插值的方法对空白区域进行补充也是一种解决现有问题的方法。

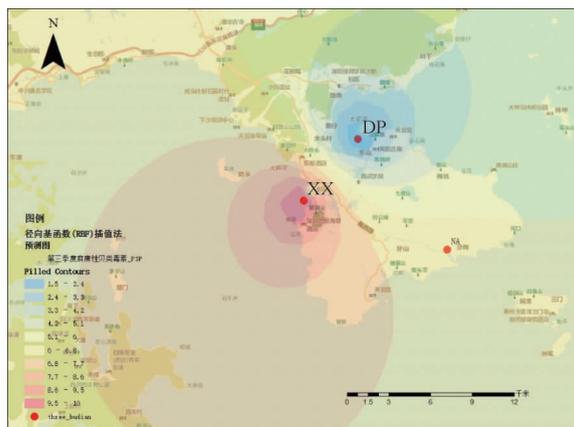


图3 2015年第三季度径向基函数插值结果展示图  
Figure 3 Radial basis function interpolation results in the third quarter of 2015

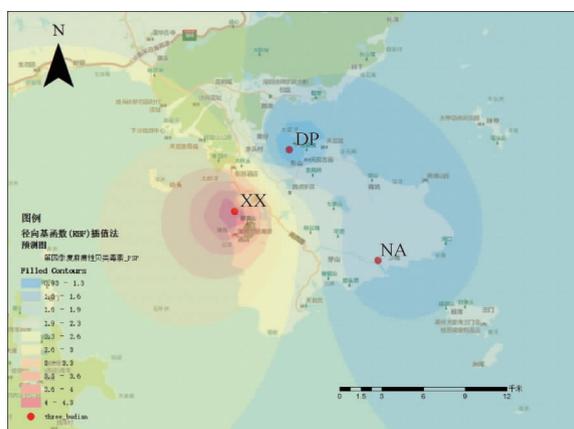


图4 2015年第四季度径向基函数插值结果展示图  
Figure 4 Radial basis function interpolation results in the fourth quarter of 2015

表1 2015年深圳海域麻痹性贝类毒素径向基函数插值误差分析结果

Table 1 Radial basis function interpolation error of paralytic shellfish poison in 2015 in Shenzhen

季度	东涌	斜吓湾	珍珠岛
第一季度	4.55	-7.89	4.22
第二季度	2.56	-4.86	2.78
第三季度	-0.77	-7.13	7.42
第四季度	1.47	-3.33	2.12

## 2.3 空间扫描

对2015年广东省深圳市海域麻痹性贝类毒素监测数据进行单纯空间扫描<sup>[9]</sup>分析,发现斜吓湾是最可能聚集海域,该海域麻痹性贝类毒素含量异常增高,较其他海域呈聚集现象, $LLR = 19.38$ ,危险比( $RR$ ) =  $15.87$ ,  $P < 0.001$ ,差异具有统计学意义。对2015年广东省深圳市海域麻痹性贝类毒素监测数据进行时空扫描分析,结果显示,麻痹性贝类毒素在空间上存在明显聚集性。发现在2015年1~6月斜吓湾海域是最可能聚集海域,  $LLR = 7.72$ ,  $RR = 5.59$ ,  $P = 0.00083$   $< 0.001$ ,聚集性差异有统计学意义,表明该海域麻

痹性贝类毒素含量异常增多,呈聚集分布。该结果与单纯空间扫描结果一致(表2)。

表2 2015年深圳海域麻痹性贝类毒素时空扫描分析结果  
Table 2 Spatial-temporal scan of paralytic shellfish poison in 2015 in Shenzhen

聚集类别	时间	聚集地区	实际事件数	理论事件数	LLR值	RR值	P值
1	2015年1~6月	斜吓湾海域	11	4	7.72	5.59	0.000 83
2	2015年7~12月	珍珠岛海域	0	6	7.03	0.00	0.001 90

### 3 讨论

麻痹性贝类毒素监测数据具有空间地理的属性,采用空间统计方法能够有效利用该属性获得麻痹性贝类毒素的时空分布特征<sup>[10]</sup>。径向基函数插值模型求解可以归结为求解线性方程组的问题,因此求解运算量较小,而且不同于常见的经验风险最小化模型,径向基函数插值以结构风险最小化为目标,避免过度拟合,并且在样本量较小的情况下能呈现较好的效果,已经成功应用到流行病学<sup>[11]</sup>、空气质量数值预报<sup>[12]</sup>等领域。插值结果表明斜吓湾海域麻痹性贝类毒素含量相对较高,东涌和珍珠岛海域含量较低。为进一步探索麻痹性贝类毒素的时空交互效应,采用时空扫描方法,该方法具有很高的灵敏度和特异度,已经成功应用于传染病的早期预警<sup>[13]</sup>。本研究从时间、空间的维度探索麻痹性贝类毒素的聚集性,发现斜吓湾海域是最可能聚集海域,聚集时间为2015年1~6月。时空扫描分析方法弥补了单纯流行病学研究比较的不足,也避免了人为对高发区域进行判断,较常规分析更具有说服力。

本研究仍然存在一定的局限性,目前的研究是基于2015年3个监测点样本进行的估算,时间跨度仅为1年,监测点偏少,故本研究旨在探讨利用少量的监测数据对空白区域麻痹性贝类毒素的含量进行大体估算的方法。要提高估算的精度需要增加监测点的数量,开展持续的监测。海洋洋流对麻痹

性贝类毒素污染存在较大影响,而监测数据却没有涉及气象等相关因素,这可能导致不确定性,为了进一步探索麻痹性贝类毒素污染的成因,建议增加相关因素的监测和分析。为以后开展针对性的预防控制措施,提供科学参考依据,同时为推动贝类养殖环境的改善,提供重要的参考与借鉴。

(志谢 对本研究给予帮助和支持的詹秀慧、豆晶晶、姜桥等)

### 参考文献

- [1] 刘智勇,计融.麻痹性贝类毒素研究进展(综述)[J].中国热带医学,2006,6(2):340-344.
- [2] 江天久,尹伊伟,骆育敏,等.广东大亚湾和大鹏湾麻痹性贝类毒素研究[J].中国环境科学,2000,20(4):341-344.
- [3] 牟乃夏. ArcGIS 10 地理信息系统教程[M].北京:测绘出版社,2012:514.
- [4] 朱雄峰,罗文彩,魏月兴,等.基于结构风险最小化的径向基函数插值[J].弹箭与制导学报,2011,31(5):169-173.
- [5] 魏月兴.径向基函数插值近似方法理论与应用研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
- [6] Kulldorff M. A spatial scan statistic [J]. Communications in Statistics-Theory and Methods,1997,26(6):1481-1496.
- [7] 唐建波,邓敏,刘启亮.时空事件聚类分析方法研究[J].地理信息世界,2013,20(1):38-45.
- [8] WANG X L, ZENG D, Seale H, et al. Comparing early outbreak detection algorithms based on their optimized parameter values [J]. Journal of Biomedical Informatics,2010,43(1):97-103.
- [9] Kellmann R, Mihali T K, Jeon Y J, et al. Biosynthetic intermediate analysis and functional homology reveal a saxitoxin gene cluster in cyanobacteria[J]. Applied & Environmental Microbiology,2008,74(13):4044-4053.
- [10] 肖革新,肖辉.基于空间统计的食品安全研究现状与展望[J].中国食品卫生杂志,2016,28(4):409-414.
- [11] 李建涛,黄飞,陈伟,等.空间插值技术在流行病学中的应用[J].中国防痨杂志,2012,34(12):760-763.
- [12] 谭业浩.基于径向基函数插值的环境空气质量数据可视化研究[D].济南:山东大学,2009.
- [13] 殷菲,李晓松,冯子健,等.前瞻性时空扫描统计量在传染病早期预警中的应用[J].中华预防医学杂志,2007,41(增刊):155-158.

欢迎投稿《中国食品卫生杂志》网址:www.zgspws.com