

## 风险评估

## 我国沿海地区市售贝类腹泻性贝类毒素污染及膳食暴露的空间分析

贺娇<sup>1</sup>, 孙金芳<sup>1</sup>, 杨欣<sup>2</sup>, 周萍萍<sup>2</sup>, 张磊<sup>2</sup>, 李建文<sup>2</sup>, 余小金<sup>1</sup>, 曹佩<sup>2</sup>

(1. 东南大学公共卫生学院流行病与卫生统计学系, 江苏南京 210009;

2. 国家食品安全风险评估中心, 北京 100022)

**摘要:**目的 分析我国沿海地区市售双壳贝类中腹泻性贝类毒素(DSP)污染水平及膳食暴露的空间分布及空间集聚性特征,为早期预警和防控策略提供科学依据。方法 基于经典替代法与逆正态填补法对DSP未检出值进行填补并计算膳食暴露;基于省级空间尺度,对我国沿海地区DSP污染及膳食暴露进行全局以及局部空间自相关分析。结果 2016—2021年我国10个沿海省(自治区、直辖市)6355份贝类样品中DSP检出率为6.34%,主要为虾夷扇贝毒素(YTX)(5.41%),主要污染区域为福建、广西、河北、广东等地。全局自相关分析显示,蛤毒素组污染水平全局Moran's  $I=0.55(P=0.02)$ ,YTX组暴露全局Moran's  $I=0.27(P=0.01)$ ,呈空间集聚性分布;局部自相关分析显示,DSP污染水平主要存在两个高-高集聚区,位于辽宁和山东;DSP暴露水平主要在河北、广西和辽宁呈高-低集聚特征。结论 我国沿海地区DSP污染与膳食暴露存在地区差异,且在局部呈现一定的区域化特征,建议相关政府机构根据DSP污染与膳食暴露空间分布特征制定区域化精准监测与膳食干预措施,保障贝类食用安全。

**关键词:**腹泻性贝类毒素;空间分析;膳食暴露

中图分类号:R155

文献标识码:A

文章编号:1004-8456(2023)08-1166-08

DOI:10.13590/j.cjfh.2023.08.006

**Spatial analysis of diarrhetic shellfish poison contamination and dietary exposure of commercially available shellfish in coastal areas of China**HE Jiao<sup>1</sup>, SUN Jinfang<sup>1</sup>, YANG Xin<sup>2</sup>, ZHOU Pingping<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>2</sup>, LI Jianwen<sup>2</sup>,  
YU Xiaojin<sup>1</sup>, CAO Pei<sup>2</sup>

(1. Department of Epidemiology and Biostatistics, School of Public Health, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210009, China; 2. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China)

**Abstract: Objective** This study aimed to provide evidence for early warning, prevention, and monitoring strategies relating to the spatial distribution and clustering characteristics of diarrhetic shellfish poison (DSP) contamination and dietary exposure of commercially available shellfish in coastal areas in China. **Methods** Classical substitution and the inverse normal imputation method were used to indicate undetected DSP values and calculate dietary exposure. Based on the provincial spatial scale, the global and local spatial autocorrelation analyses of food contamination and exposure in the DSP in coastal China were explored. **Results** From 2016 to 2021, a total of 6355 shellfish samples were collected from 10 coastal provinces in China. The detection rate of DSP was 6.34%. Yessotoxins (YTX) reported the highest detection rate at 5.41%. The main contaminated areas include Fujian, Guangxi, Hebei, and Guangdong. The global Moran's  $I$  value of contamination of pectenotoxins was 0.55 ( $P = 0.02$ ) and of YTX was 0.27 ( $P = 0.01$ ), this demonstrated a spatial clustering effect on the contamination and dietary exposure of DSP. Local spatial autocorrelation analysis showed that two high-high clustering were detected in Liaoning and Shandong for DSP contamination. For dietary exposure to DSP, there was a high-low clustering phenomenon in Hebei, Guangxi, and Liaoning. **Conclusion** There are regional differences in DSP contamination and dietary exposure in coastal China, demonstrating localized regionalization. To

收稿日期:2022-11-01

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1606500);国家自然科学基金面上项目(81573159)

作者简介:贺娇 女 在读研究生 研究方向为流行病与卫生统计 E-mail:jiaoh\_2022@163.com

通信作者:余小金 女 副教授 研究方向为流行病与卫生统计 E-mail:xiaojinyu@seu.edu.cn

曹佩 女 副研究员 研究方向为食品安全风险评估 E-mail:caopei@cfsa.net.cn

余小金和曹佩为共同通信作者

improve shellfish food safety, government agencies should formulate regionalized precision monitoring and dietary interventions based on the spatial distribution of DSP contamination and dietary exposure.

**Key words:** Diarrhetic shellfish poison; spatial analysis; dietary exposure

近年来,国内贝类海产品中中毒事件频繁发生,直接影响消费者的健康和生命安全,成为需要关注的食品安全问题之一。我国主要以腹泻性贝类毒素(Diarrhetic shellfish poison, DSP)和麻痹性贝类毒素(Paralytic shellfish poison, PSP)危害最为广泛和严重<sup>[1-2]</sup>。其中 DSP 是一类脂溶性物质,早期研究发现冈田软海绵酸(Okadaic acid, OA)及其衍生物鳍藻毒素(Dinophysis toxin, DTX)、蛤毒素(Pectenotoxins, PTX)、原多甲藻酸毒素(Azaspic acids, AZA)和虾夷扇贝毒素(Yessotoxins, YTX)导致中毒的症状有呕吐和腹泻,故将其都归为腹泻性毒素。然而将上述毒素单独分离后发现 YTX、PTX 和 AZA 中毒无腹泻作用,我国《食品安全国家标准 贝类中腹泻性贝类毒素的测定》(GB 5009.212—2016)中 DSP 仅包括 OA 和 DTX1、DTX2。为与前期研究保持一致,本研究将 YTX、PTX 和 AZA 仍然归为 DSP 类,但因 AZA 检出率较低,本研究仅对 OA、YTX 和 PTX 进一步分析。

自 2016 年,我国食品安全风险监测对沿海省份的水产品开展了 DSP 的连续监测,根据风险监测和现有文献研究显示,每年夏、秋季,在我国沿海城市发生的食物中毒事件中,有 40% 是由 DSP 引起的<sup>[3]</sup>。此外,中国沿海部分贝类样品中 DSP 污染较严重,分布范围较广,涉及我国多海域<sup>[4-7]</sup>。由于近年来因食用贝类导致消费者中毒的事件频发,水产品中 DSP 污染和急性暴露水平受到我国食品安全评估部门的高度重视<sup>[8]</sup>。

空间统计学是以非结构化的空间数据和结构化的定量数据分析空间格局与聚集关系,可用于描述空间变化规律,进而揭示潜在因果关系。空间分析用于膳食暴露评估可有效补充分析维度,直观呈现污染状况及膳食暴露分布水平<sup>[9]</sup>。国外曾有学者研究了阿根廷 PSP 的空间分布<sup>[10]</sup>,探索了大西洋北部和沿海水域贝类的时空分布情况<sup>[11]</sup>。我国虽然已开展了海产品中贝类毒素的食品安全风险监测工作,但是目前缺乏系统深入的基于空间分布与聚集性分析的风险评估研究。国内曾有研究<sup>[12]</sup>对 PSP 污染进行了空间分析,且仅局限于广东省深圳市。本研究基于我国沿海 10 个省(自治区、直辖市)市售贝类中 DSP 连续 6 年的风险监测数据及贝类消费水平,在探究 DSP 污染空间分布的同时开展了较为系统的基于空间分析的风险评估,弥补了该领域相关研究的不足,且对极端数据进行了多种填补,

基于更多的数据为我国制定贝类毒素监测管理措施和膳食消费干预策略提供依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据来源

DSP 污染数据来自我国 2016—2021 年全国食品安全风险监测项目,监测的样品覆盖我国福建、广东、广西、海南、河北、江苏、辽宁、山东、上海、浙江 10 个省(自治区、直辖市),样品主要来自市场流通环节和餐饮环节,包括带子(152 份)、蛤类(624 份)、牡蛎(1 821 份)、扇贝(1 518 份)、贻贝(1 670 份)、蛭类(339 份)以及蚶类(231 份),共计 6 355 份样品。上述监测样品涵盖我国沿海地区当地居民食用的主要双壳贝类产品,样本具有较好的代表性。

贝类消费数据来自国家食品安全风险评估中心 2018—2020 年中国居民食物消费状况调查。通过非连续 3 d 24 h 膳食回顾法<sup>[13]</sup>,调查 3 岁及以上人群共计 55 669 人。其中贝类食用者共计 3 200 人,年龄范围为 3~92 岁。因海南省缺少消费量,基于海南省与广东省毗邻,假设两地消费情况相似,海南省的贝类消费量按广东省的消费量计。

### 1.2 数据预处理

#### 1.2.1 DSP 污染数据处理

对于未检出数据的处理采用世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐<sup>[14]</sup>的经典替代法,即采用 0 和检出限(Limit of detection, LOD)替代未检出值和逆正态填补法进行填补<sup>[15]</sup>。逆正态填补法:采用逆正态转换思维,根据已有数据的位次估计经验概率,获得对应标准正态变量,并基于正态变量与观察值的回归方程对未检出数值进行精细填补。基于 WHO/FAO 食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)和欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)推荐的毒性当量因子(Toxicity equivalence factor, TEF)<sup>[16-17]</sup>对 DSP 监测数据进行毒素当量转换。详见表 1。

#### 1.2.2 膳食暴露计算

采用点评估模型对我国沿海地区 DSP 进行急性膳食暴露风险评估,计算我国沿海 10 个省(自治区、直辖市)贝类消费人群的日 DSP 暴露量,计算公式为:

表1 DSP的毒性当量因子(TEF)

Table 1 Toxicity equivalence factor (TEF) for DSP

贝类毒素	毒素组	毒素	JECFA 推荐 TEF	ARfD
DSP	OA 组	OA	1.0	0.3
		DTX1	1.0	
		DTX2	0.5	
	YTX 组	YTX	1.0*	25
		Homo YTX	1.0*	
	PTX 组	PTX2	1.0	0.8
	AZA 组	AZA2	0.7	0.2

注:\*YTX组的毒素当量因子参照EFSA推荐的值

$$EXP = \frac{F \times C}{1000 \times BW} \quad (1)$$

其中,  $EXP$  为各省(自治区、直辖市)贝类消费者每天每千克体质量 DSP 的暴露量(OA 组:  $\mu\text{g OA eq. / kg} \cdot \text{BW}$ , PTX 组:  $\mu\text{g PTX2 eq. / kg} \cdot \text{BW}$ , YTX 组:  $\mu\text{g YTX eq. / kg} \cdot \text{BW}$ );  $F$  为各省(自治区、直辖市)贝类消费量的 P97.5 消费量(g/d);  $C$  为各省 DSP 最大污染浓度(OA 组:  $\mu\text{g OA eq. / kg}$ , PTX 组:  $\mu\text{g PTX2 eq. / kg}$ , YTX 组:  $\mu\text{g YTX eq. / kg}$ );  $BW$  为消费人群平均体质量(kg)。

参考 JECFA 推荐的急性参考剂量(Acute reference dose, ARfD)<sup>[16]</sup>(表 1), 根据计算得到的  $EXP$ , 计算急性膳食暴露风险指数  $\%ARfD$ , 用来对急性膳食暴露进行评估。计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$\%ARfD = \frac{EXP}{ARfD} \times 100\% \quad (2)$$

当  $\%ARfD \leq 1$  时, 说明该地区人群急性膳食暴露水平处在安全状态, 不会对健康造成风险。反之说明该地区人群急性膳食暴露水平处在不安全状态, 需采取相应措施。

### 1.2.3 空间分析数据库建立

以全国省界电子地图作为空间数据库<sup>[19]</sup>, 利用

ArcGIS 10.2 软件(Esri 公司)以省(自治区、直辖市)编号为匹配变量将其与 DSP 污染以及膳食暴露数据分别匹配, 分别生成含各省(自治区、直辖市)DSP 污染与膳食暴露数据的空间分析数据库。

### 1.3 统计学分析

以省级行政单元为基本区域单位对我国沿海地区 DSP 污染与膳食暴露水平进行全局与局部空间自相关分析, 计算全局与局部 Moran's  $I$  指数, 并进行  $Z$  检验。当 Moran's  $I > 0$  表示正相关, Moran's  $I < 0$  表示负相关<sup>[20]</sup>。全局自相关描述 DSP 污染与暴露在某个空间的整体分布状况, 局部自相关能检验空间每个单元对于整个研究范围其空间自相关是否具有统计学意义且判断污染与暴露在空间呈现的“高-高”“低-低”“低-高”和“高-低”分布与集聚区。其中“低-高”聚集表示某区域为低值, 其周围邻近区域为高值; “高-低”聚集表示某区域为高值, 其周围邻近区域为低值。本研究全局空间自相关分析采用王后邻接(Queen contiguity)法<sup>[21]</sup>创建空间权重矩阵。

数据预处理与膳食暴露评估采用 SAS 9.4 软件(SAS 软件公司)进行, 地理数据库构建及全局和局部空间自相关分析采用 ArcGIS 10.2 和 GeoDa 1.18 软件(Luc Anselin 博士和其团队开发)。

## 2 结果

### 2.1 沿海省份市售贝类中 DSP 污染情况分析

2016—2021 年监测了中国沿海 10 个省(自治区、直辖市)共计 6 355 份样品, DSP 检出有 403 份, 总检出率为 6.34%。其中 OA 组、PTX 组均在河北检出率最高(4.44%、0.53%), YTX 组在海南检出率最高(12.33%)。各地区 3 种填补方法下的 DSP 平均含量详见表 2。

表2 不同填补方法下我国沿海地区贝类 DSP 污染情况分析

Table 2 DSP contamination in coastal areas of China under different imputation methods

地区	方法	OA 组( $\mu\text{g OA eq. / kg}$ )			PTX 组( $\mu\text{g PTX2 eq. / kg}$ )			YTX 组( $\mu\text{g YTX eq. / kg}$ )		
		份数	检出率/%	平均含量	份数	检出率/%	平均含量	份数	检出率/%	平均含量
福建	0	611	1.64	1.26	519	0.00	0.00	519	9.83	9.65
	逆正态			22.58			0.40			14.21
	LOD			24.94			14.37			62.40
广东	0	652	0.00	0.00	490	0.00	0.00	652	8.44	14.93
	逆正态			22.27			1.42			24.05
	LOD			24.92			16.00			63.98
广西	0	612	1.31	0.23	522	0.19	0.03	612	2.78	2.75
	逆正态			18.44			0.43			6.13
	LOD			39.87			17.35			63.86
海南	0	600	0.50	0.94	510	0.00	0.00	600	12.33	10.31
	逆正态			22.33			0.49			13.51
	LOD			35.79			15.88			65.37
河北	0	676	4.44	0.80	571	0.53	0.12	676	3.85	1.64
	逆正态			22.06			0.39			3.94
	LOD			38.10			18.30			48.78

续表 2

地区	方法	OA组(μg OA eq./kg)			PTX组(μg PTX2 eq./kg)			YTX组(μg YTX eq./kg)		
		份数	检出率/%	平均含量	份数	检出率/%	平均含量	份数	检出率/%	平均含量
江苏	0	615	0.00	0.00	543	0.18	0.07	615	0.16	0.09
	逆正态			21.27			0.39			2.93
	LOD			25.00			15.89			59.36
辽宁	0	602	0.00	0.00	510	0.00	0.00	602	0.17	0.10
	逆正态			21.29			0.35			3.14
	LOD			26.50			18.53			64.43
山东	0	633	0.00	0.00	543	0.18	0.05	633	0.00	0.00
	逆正态			21.29			0.39			2.90
	LOD			29.41			15.94			58.04
上海	0	684	0.73	0.14	534	0.19	0.03	684	5.99	5.91
	逆正态			21.69			0.72			11.94
	LOD			30.55			15.92			70.50
浙江	0	670	1.04	0.14	540	0.37	0.05	670	10.90	7.79
	逆正态			21.47			0.41			10.46
	LOD			25.78			13.48			56.25

2.2 急性膳食暴露评估

根据各地区贝类消费量和 DSP 急性膳食暴露估计,结果显示,OA 组在 3 种填补方法下均在海南暴露水平最高,PTX 组在 0 和逆正态填补下在山东暴露水平最高,LOD 填补下在辽宁暴露水平最高。YTX 组在 3 种填补方法下均在广东暴露水平最高。OA 组在福建、海南、河北的%ARfD>1;LOD 填补下,除以上地区外,OA 组在广西和辽宁的%ARfD>1。

PTX 组和 YTX 组在 3 种填补方法下%ARfD 均<1。见表 3。

2.3 全局和局部空间自相关分析

2.3.1 DSP 平均污染与膳食暴露水平全局自相关分析

全局空间自相关分析结果显示,在 0.05 显著水平下,PTX 组在 LOD 填补下污染水平存在显著空间正相关,YTX 组在 0 填补下急性膳食暴露存在显

表 3 不同填补方法下中国沿海地区 DSP 急性膳食暴露评估

Table 3 Assessment of DSP acute dietary exposure under different imputation methods in coastal areas of China

地区	方法	消费量/(g/d)	OA组			PTX组			YTX组		
			最大污染	暴露量	%ARfD	最大污染	暴露量	%ARfD	最大污染	暴露量	%ARfD
福建	0	220	151.70	0.57	1.91	0.00	0.00	0.00	263.50	0.99	0.04
	逆正态	220	257.86	0.97	3.24	1.73	0.01	0.01	314.13	1.18	0.05
	LOD	220	155.20	0.58	1.95	20.00	0.08	0.09	270.00	1.02	0.04
广东	0	250	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1 106.00	4.74	0.19
	逆正态	250	36.76	0.16	0.52	13.25	0.06	0.07	1 699.00	7.28	0.29
	LOD	250	30.00	0.13	0.43	20.00	0.09	0.11	1 126.00	4.82	0.19
广西	0	250	29.70	0.13	0.42	17.20	0.07	0.09	392.00	1.68	0.07
	逆正态	250	51.99	0.22	0.74	16.90	0.07	0.09	445.79	1.91	0.08
	LOD	250	80.00	0.34	1.14	30.00	0.13	0.16	412.00	1.76	0.07
海南	0	250	248.00	1.06	3.54	0.00	0.00	0.00	212.00	0.91	0.04
	逆正态	250	339.41	1.45	4.84	2.17	0.01	0.01	241.91	1.04	0.04
	LOD	250	300.00	1.28	4.28	20.00	0.09	0.11	232.00	0.99	0.04
河北	0	200	88.00	0.30	1.00	24.00	0.08	0.10	94.00	0.32	0.01
	逆正态	200	115.06	0.39	1.31	23.44	0.08	0.10	92.85	0.32	0.01
	LOD	200	98.00	0.34	1.12	24.00	0.08	0.10	114.00	0.39	0.02
江苏	0	200	0.00	0.00	0.00	37.90	0.13	0.16	54.60	0.19	0.01
	逆正态	200	21.87	0.07	0.25	41.41	0.14	0.18	45.34	0.16	0.01
	LOD	200	25.00	0.09	0.29	37.90	0.13	0.16	94.60	0.32	0.01
辽宁	0	650	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.60	0.65	0.03
	逆正态	650	21.76	0.24	0.81	1.28	0.01	0.02	52.08	0.58	0.02
	LOD	650	50.00	0.56	1.86	50.00	0.56	0.70	150.00	1.67	0.07
山东	0	300	0.00	0.00	0.00	28.40	0.15	0.18	0.00	0.00	0.00
	逆正态	300	22.38	0.12	0.38	28.53	0.15	0.18	20.43	0.11	0.00
	LOD	300	56.00	0.29	0.96	28.40	0.15	0.18	60.00	0.31	0.01
上海	0	250	23.60	0.10	0.34	15.20	0.07	0.08	259.00	1.11	0.04
	逆正态	250	47.49	0.20	0.68	15.71	0.07	0.08	924.56	3.96	0.16
	LOD	250	50.00	0.21	0.71	20.00	0.09	0.11	319.00	1.37	0.05
浙江	0	300	17.00	0.09	0.29	13.00	0.07	0.08	264.00	1.36	0.05
	逆正态	300	39.26	0.20	0.67	14.75	0.08	0.09	346.32	1.78	0.07
	LOD	300	37.50	0.19	0.64	20.00	0.10	0.13	284.00	1.46	0.06

显著空间正相关。结果见表4。

表4 3种填补方法下中国沿海地区DSP平均污染及膳食暴露全局空间自相关分析

Table 4 Global spatial autocorrelation analysis of DSP average contamination and dietary exposure under three imputation methods in coastal areas of China

毒素组	填补方法	污染水平	急性膳食暴露
		Moran's I 值	Moran's I 值
OA	0	-0.373 3	-0.360 9
	逆正态填补	-0.253 7	-0.147 5
PTX	LOD	-0.267 7	-0.124 5
	0	-0.156 4	0.313 8
	逆正态填补	-0.208 8	0.262 3
YTX	LOD	0.554 1*	-0.139 1
	0	0.347 0	0.274 5*
	逆正态填补	0.270 1	0.040 3
	LOD	-0.193 5	0.137 8

注:\* $P < 0.05$

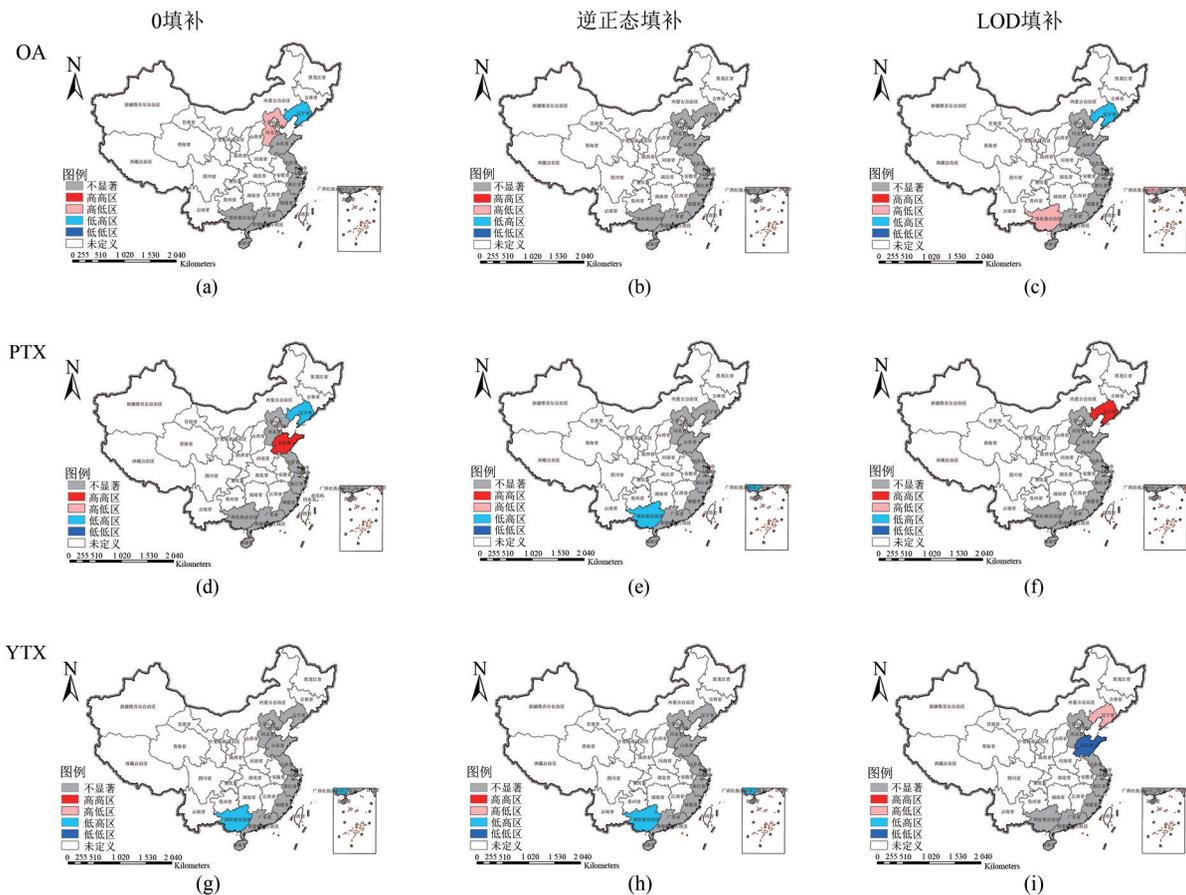
### 2.3.2 DSP平均污染与膳食暴露局部空间自相关分析

从图1和图2可以看出,尽管部分毒素组平均污染与膳食暴露全局自相关指标是非显著的,但在一些地区呈现出局部自相关性(局部 Moran's I 指数均通过了显著性检验,  $P < 0.05$ )。不同毒素组的

集聚区不同,不同填补方法下集聚区也存在差异。0填补下:OA组污染与暴露均在河北呈高-低集聚,在辽宁呈低-高集聚;PTX组污染水平在山东呈高-高集聚,在辽宁呈低-高集聚;YTX组污染水平在广西呈低-高集聚,无明显暴露集聚区。逆正态填补下:OA组暴露在辽宁呈低-高集聚;PTX污染水平在广西呈低-高集聚,无暴露集聚区;YTX组污染与暴露均在广西呈低-高集聚。LOD填补下:OA组污染与暴露均在广西呈现高-低集聚;PTX组污染水平的高-高集聚区出现在辽宁,而PTX组暴露水平在辽宁呈高-低集聚;YTX组污染水平在辽宁呈现高-低集聚,在山东省呈“低-低”集聚,无暴露集聚区。

### 3 讨论

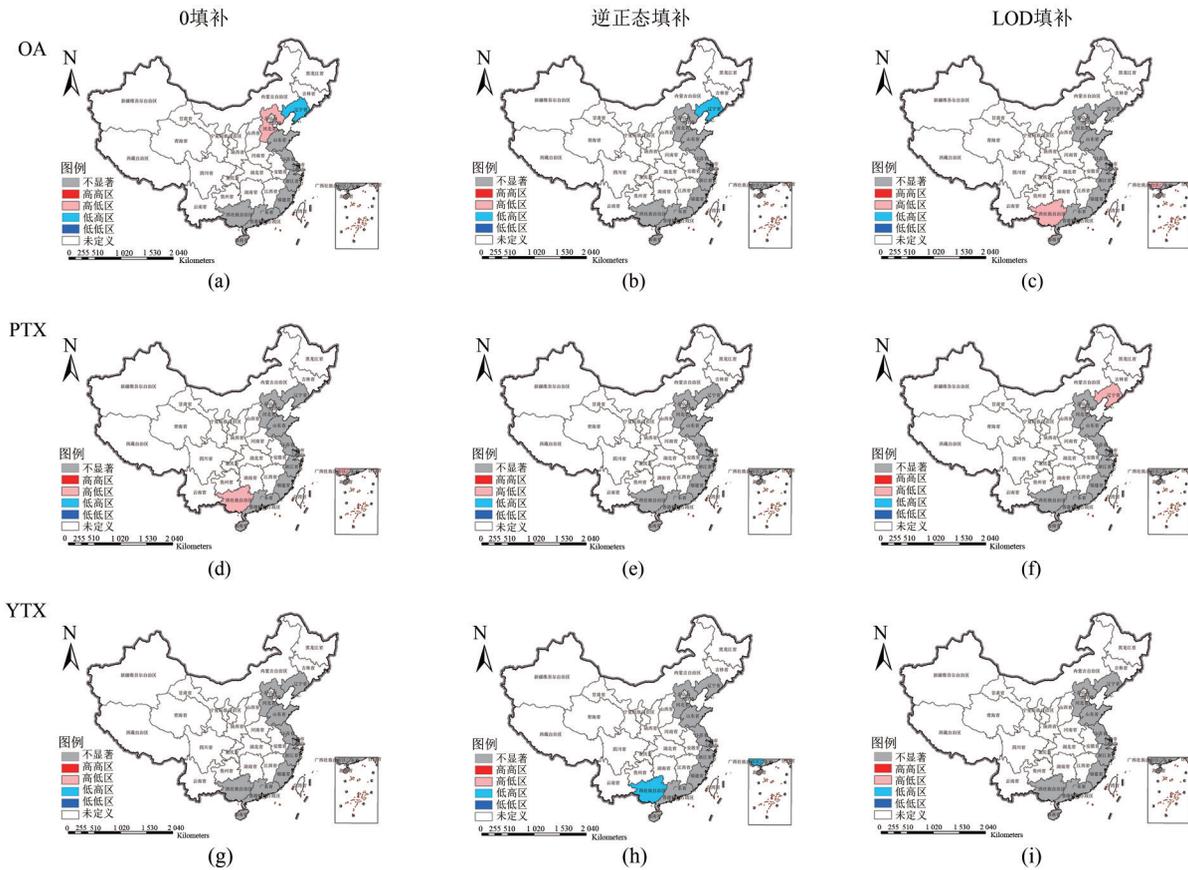
本研究基于2016—2021年我国沿海10个省(自治区、直辖市)市售贝类中DSP风险监测数据,借助ArcGIS和Geoda初步探索了我国沿海地区市售贝类中DSP污染与膳食暴露水平的空间分布与集聚性特征。为充分探讨因数据变异导致的不确定性,在经典替代法的基础上,结合逆正态填补法



注:该图底图来自标准地图服务官网(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>),审图号为GS(2023)2767号

图1 3种填补方法下我国沿海地区DSP(OA、PTX、YTX)平均污染水平LISA集聚图(不同颜色代表不同集聚特征,  $P < 0.05$ )

Figure 1 LISA aggregation of DSP (OA, PTX, YTX) pollution averages under the three imputation methods for coastal cities in China (Different colors represent different clustering characteristics,  $P < 0.05$ )



注:该图底图来自标准地图服务官网(<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>),审图号为GS(2023)2767号

图2 3种填补方法下我国沿海地区DSP(OA、PTX、YTX)膳食暴露LISA集聚图(不同颜色代表不同集聚特征,  $P < 0.05$ )

Figure 2 LISA aggregation of DSP (OA, PTX, YTX) dietary exposure under the three imputation methods for coastal cities in China (Different colors represent different clustering characteristics,  $P < 0.05$ )

对缺失数据进行填补,描述了不同填补方法下贝类中DSP污染与消费者膳食暴露量的分布情况与空间集聚性特征。风险监测样品主要采集的是沿海地区的市售环节,经调研,沿海地区的水产品大部分产于本地,来源于外地的较少,风险监测的情况能够代表本地的污染情况。此外,贝类毒素风险监测数据具有空间地理的属性,采用空间统计分析可有效利用该数据维度,在一定程度上揭示了DSP的污染与膳食暴露水平的空间分布特征,为我国制定适合不同毒素、不同地区特征的食品安全管理措施和区域公共卫生干预策略提供依据。

未检出值的填补在暴露评估中是一个很重要的问题,为此我们探索了不同填补方法对DSP污染与暴露的影响。结果显示,我国DSP平均污染水平和暴露量在3种填补方法下结果略有差异。由于未检出率较高,因此不同填补方法对污染平均水平影响较大;尝试探索的3种填补方法中,基于逆正态填补的平均污染水平较其他两种相对折中,更符合实际。由于急性暴露评估采用高分位值,因此填补方法影响较小。但在膳食暴露的概率评估中对污染和暴露的随机抽样仍需要考虑不同填补策略

的影响。

我国沿海地区DSP污染与膳食暴露的分布区域存在差异。DSP分布范围广,在我国多海域均有检出,渤海、南海和东海的检出率相对黄海较高,这与曾玲等<sup>[22]</sup>的研究结果基本一致。主要污染区域分布在广东、河北、福建、广西等地。黄翔等<sup>[23-24]</sup>对我国东海和南海DSP的研究也指出广东和广西的DSP污染较严重,且有研究指出河北、福建沿岸是贝类产品的防范重点区域<sup>[25]</sup>,这些均与本研究结果一致。其原因可能与不同海域贝类毒素谱、含量与季节变化以及不同海域DSP优势藻种的差异等因素有关<sup>[26]</sup>。本研究中膳食暴露水平较高的地区是海南、山东和广东,膳食暴露水平的差异取决于该地区DSP的最高污染水平,同时也与当地的贝类消费习惯有关。辽宁省的贝类消费水平虽然高,但污染水平相对较低,膳食暴露风险较低。这提示我们在判断膳食暴露风险时,需综合考虑两方面因素,依据区域特点、贝类消费情况,合理制定监测和暴露评估方案。

我国沿海地区DSP污染与膳食暴露水平具有一定的区域化特征,以空间交错分布为主,全局自

相关主要源于部分地区的局部自相关。尽管 DSP 一些毒素组全局自相关指标是非显著的,但是在一些地区呈现出局部的自相关性,高污染或高暴露地区的周围有低污染或低暴露地区,低污染或低暴露省份的周围有高污染或高暴露地区。水产批发市场应当对高污染与高暴露地区的贝类 DSP 重点监测和管理,以保障海产贝类的食用安全。

本次研究中由于资料和数据等方面的原因,存在以下不确定性:首先,DSP 的污染水平易受温度、地理条件、赤潮发生情况等因素影响,这些因素发生变化时,双壳贝类中 DSP 含量也会随之变化,从而也会导致膳食暴露量的变化;其次,风险监测中的样品来自本地市场流通和餐饮环节,大部分样品均产自本地,但实际也存在其他来源如进口以及自行捕捞等;第三,本次暴露评估中未考虑烹调加工因素对双壳贝类中 DSP 的影响,可能使 DSP 的暴露结果存在一定程度上的高估;最后,因污染数据未检出值比例较大,可有效利用的数据点有限。因此,在应用本研究的结果时必须考虑到这些不确定因素可能带来的影响。今后还需要更丰富的数据提供更为全面的污染及暴露的描述。

## 参考文献

- [ 1 ] 岳立达,雷苏文.贝类毒素食物中毒研究综述[J].中国公共卫生管理,2021,37(5):689-691.  
YUE L D, LEI S W. Research review of shellfish toxin food poisoning [J]. Chinese Journal of Public Health Management, 2021, 37(5): 689-691.
- [ 2 ] 张锦宏,李海杰,蔡茂荣,等.漳州市2018—2019年沿海海域贝类样品毒素监测结果分析[J].海峡预防医学杂志,2020,26(3):12-14,76.  
ZHANG J H, LI H J, CAI M R, et al. Analysis on toxin monitoring result of shellfish samples in coastal waters in Zhangzhou City, 2018-2019 [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2020, 26(3): 12-14, 76.
- [ 3 ] 陈巧莉,杨兵,洪晴悦,等.海洋生物毒素的分类、毒害作用机制及检测技术研究进展[J].食品科学,2021,42(5):321-331.  
CHEN Q L, YANG B, HONG Q Y, et al. Recent progress in the classification and toxic mechanism of marine biotoxins and technologies for their detection [J]. Food Science, 2021, 42(5): 321-331.
- [ 4 ] 宋新成,周德山,尹华斌,等.海州湾近海海域海水中贝类毒素的检测与季节变化[J].淮海工学院学报(自然科学版),2016,25(3):83-87.  
SONG X C, ZHOU D S, YIN H B, et al. Determination and Seasonal Changes of Shellfish Toxins in Coastal Seawater of Hai zhou Bay [J]. Journal of Huai hai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016, 25(3): 83-87.
- [ 5 ] LIU L, WEI N, GOU Y X, et al. Seasonal variability of *Protoceratium reticulatum* and yessotoxins in Japanese scallop *Patinopecten yessoensis* in northern Yellow Sea of China [J]. *Toxicon: Official Journal of the International Society on Toxinology*, 2017, 139: 31-40.
- [ 6 ] JIANG T, LIU L, LI Y, et al. Occurrence of marine algal toxins in oyster and phytoplankton samples in Daya Bay, South China Sea [J]. *Chemosphere*, 2017, 183: 80-88.
- [ 7 ] 纪莹,胡杨,宋甲亮,等.春季中国沿海主要养殖贝类中脂溶性贝毒的组分分析和地域特征[J].中国渔业质量与标准,2018,8(4):15-24.  
JI Y, HU Y, SONG J L, et al. Characteristics of components and regional distribution of lipophilic shellfish toxins in bivalves cultured along the Chinese Coast in spring [J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2018, 8(4): 15-24.
- [ 8 ] 崔佳佳,曹佩,孙嘉逸,等.环渤海地区常见贝类消费状况调查[J].中国食物与营养,2021,27(1):40-44.  
CUI J J, CAO P, SUN J Y, et al. Investigation on Consumption Status of Shellfish in Areas Around Bohai Sea [J]. *Food and Nutrition in China*, 2021, 27(1): 40-44.
- [ 9 ] PALTSEVA A, Cheng Z Q, DEEB M, et al. Accumulation of arsenic and lead in garden-grown vegetables: Factors and mitigation strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 273-283.
- [ 10 ] GOYA A B, TARNOVIUS S, HATFIELD R G, et al. Paralytic shellfish toxins and associated toxin profiles in bivalve mollusc shellfish from Argentina [J]. *Harmful Algae*, 2020, 99: 101910.
- [ 11 ] ADAMS N G, TILLMANN U, TRAINER V L. Temporal and spatial distribution of Azadinium species in the inland and coastal waters of the Pacific northwest in 2014 to 2018 [J]. *Harmful Algae*, 2020, 98: 101874.
- [ 12 ] 王舟,肖士燕,黄薇,等.深圳市海域麻痹性贝类毒素时空分析[J].中国食品卫生杂志,2017,29(1):89-92.  
WANG Z, XIAO S Y, HUANG W, et al. Spatial-temporal scan statistic on the paralytic shellfish poison in Shenzhen [J]. *China Journal of Food Hygiene*, 2017, 29(1): 89-92.
- [ 13 ] 邵焯林,应晓玲,吴飞妍,等.24 h膳食回顾法:方法、应用与发展[J].中国食物与营养,2022,28(10):58-62.  
SHAO Y L, YING X L, WU F Y, et al. The 24 h dietary review method: methodology, application and development [J]. *Food and Nutrition in China*, 2022, 28(10): 58-62.
- [ 14 ] 王绪卿,吴永宁,陈君石.食品污染监测低水平数据处理问题[J].中华预防医学杂志,2002,36(4):278-279.  
WANG X Q, WU Y N, CHEN J S. Low level data handling issues for food contamination monitoring [J]. *Chinese Journal of Preventive Medicine*, 2002, 36(4): 278-279.
- [ 15 ] 余小金,刘沛,闵捷,等.次序统计量回归及其在食品暴露评估未检出值估计中的应用[J].卫生研究,2009,38(1):89-91.  
YU X J, LIU P, MIN J, et al. Regression on order statistics and its application in estimating nondetects for food exposure assessment [J]. *Journal of Hygiene Research*, 2009, 38(1): 89-91.
- [ 16 ] JECFA. Toxicity equivalence factors for marine bio toxins associated with bivalve molluscs. 2016.
- [ 17 ] EFSA. Marine biotoxins in shellfish-Yessotoxin group-Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food chain [J]. *The*

- EFSA Journal, 2008, 907: 1-62.
- [18] 刘沛, 刘元宝, 王灿楠. 膳食暴露评估模型及其构建方法[J]. 中华预防医学杂志, 2007, 41(6): 502-504.
- LIU P, LIU Y B, WANG C N. Dietary exposure assessment models and their construction methods [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2007, 41(6): 502-504.
- [19] 张宁, 李京京. arcgis空间数据库的创建[J]. 建筑工程技术与设计, 2015(33): 1798.
- ZHANG N, LI J J. Creation and application of ArcGIS spatial database[J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2015(33): 1798.
- [20] PFEIFFER D U, ROBINSON T P, STEVENSON M, et al. Spatial Analysis in Epidemiology [M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- [21] 沈绿珠. 空间关联分析及其应用[J]. 统计与决策, 2006(8): 28-30.
- SHEN L Z. Spatial association analysis and its application [J]. Statistics and Decision, 2006(8): 28-30.
- [22] 曾玲, 文菁, 龙超, 等. 中国沿海贝类腹泻性贝毒的特征分析[J]. 水产科学, 2015, 34(3): 188-194.
- ZENG L, WEN J, LONG C, et al. Characteristic analysis of diarrheal shellfish poisoning in coastal shellfish in China [J]. Fisheries Science, 2015, 34(3): 188-194.
- [23] 黄翔, 雷芳, 江天久. 我国东海和南海近岸海域腹泻性贝类毒素污染状况[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2013, 34(1): 101-105.
- HUANG X, LEI F, JIANG T J. The pattern of diarrhetic shellfish poisoning in the coast of the East China Sea and the South China Sea[J]. Journal of Jinan University, 2013, 34(1): 101-105.
- [24] 黄翔, 江天久, 吴霓. 黄海海域贝类腹泻性贝类毒素污染状况研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(2): 178-181.
- HUANG X, JIANG T J, WU N. The pattern of diarrhetic shellfish poisoning in shellfish cultured in the coast of Yellow Sea, China [J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(2): 178-181.
- [25] 翟毓秀, 郭萌萌, 江艳华, 等. 贝类产品质量安全风险分析[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10(4): 1-25.
- ZHAI Y X, GUO M M, JIANG Y H, et al. Quality and safety risk analysis of shellfish products[J]. China Fishery Quality and Standards, 2020, 10(4): 1-25.
- [26] 郑旭颖, 李兆新, 孙晓杰, 等. 渤海海域唐山贝类养殖区腹泻性和麻痹性贝类毒素的监测与风险评估[J]. 渔业科学进展, 2022, 43: 1-12.
- ZHENG X Y, LI Z X, SUN X J, et al. Surveillance and Risk Assessment of Diarrhetic and Paralytic Shellfish Toxins in the Tangshan Shellfish Culture Areas of Bohai Sea, China[J]. Progress in Fishery Sciences, 2022, 43: 1-12.