

采用三次样条函数拟合蚊媒密度概率分布及其风险评估*

曾四清^{1△} 邓 惠² 段金花² 陈宗晶² 芦瑞鹏² 刘礼平^{2△} 吴 军²

【摘要】目的 研究登革热蚊媒 MOI 风险的概率分布,为更加科学精准开展 MOI 风险评估提供新方法。**方法** 采用三次样条函数、累积概率分布和 Python 语言编程对广州市 2016—2019 年各月 MOI 监测数据进行拟合分析。**结果** 本研究绘制了广州市 1—12 月的 MOI 风险评估概率分布表和分布图。1—12 月各月累积概率小于 0.01 和 0.05 的 MOI 临界值分别在 7.54~60.12、5.02~34.10 之间。该临界值均在 1 月最低,其次是 12 月和 2 月;均在 6 月份最高,其次是 5 月和 7 月。1—12 月各月 MOI 风险等级为传播、暴发和流行的概率分别在 5.07%~66.60%、0.25%~36.19%、0.00%~16.80% 之间。传播、暴发和流行的风险概率最低值均出现在 1 月,其次均在 2 月;最高值分别出现在 7 月、7 月和 6 月,其次是 6 月、6 月和 5 月。**结论** 广州市各月的 MOI 风险概率分布具有显著的季节性消长规律和特征,在开展登革热蚊媒监测评估与控制工作中值得重视。三次样条函数和累积概率分布拟合法为开展 MOI 风险评估提供了新的分析方法。

【关键词】 诱蚊诱卵指数 风险评估 三次样条函数 概率分布

【中图分类号】 R184.31 **【文献标识码】** A **DOI** 10.11783/j.issn.1002-3674.2024.03.017

Fitting Probability Distribution of Aedes Vector Density with Cubic Spline Function and its Risk Assessment

Zeng Siqing, Deng Hui, Duan Jinhua, et al (Guangdong Provincial Institute of Public Health, Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention(511430), Guangzhou)

【Abstract】Objective To study the probability distribution of Mosquito ovitrap Index (MOI) risk of dengue Aedes vector, so as to provide a new method for more scientific and accurate MOI risk assessment. **Methods** Cubic spline function, cumulative probability distribution and python language programming were used to fit and analyze the MOI surveillance data of Guangzhou from 2016 to 2019 years. **Results** The probability distribution table and distribution figure of MOI risk assessment in Guangzhou from January to December were developed. From January to December, the MOI critical values were 7.54~60.12 and 5.05~34.10 with a cumulative probability less than 0.01 or 0.05 respectively. The critical value was the lowest in January, followed by December and February. The highest was in June, followed by May and July. From January to December, the probabilities of MOI risk grade of transmission, outbreak and epidemic were 5.07%~66.60%, 0.25%~36.19% and 0.00%~16.80% respectively. The lowest risk probability of transmission, outbreak and epidemic occurred in January, followed by February respectively. The highest risk probability values appeared in July, July and June, followed by June, June and May respectively. **Conclusion** The probability distribution of MOI risk in each month in Guangzhou had significant seasonal growth and decline laws and characteristics, which were worthy of attention in the monitoring, evaluation and control of dengue Aedes vector. It provided a new analysis method for MOI risk assessment fitting based on cubic spline functions and cumulative probability distribution.

【Key words】 MOI; Risk assessment; Cubic spline functions; Probability distribution

登革热是我国重点防控的蚊媒传染病。诱蚊诱卵指数(mosquito ovitrap index, MOI)是评价蚊媒密度和登革热流行风险强度的重要指标,即当 MOI<5 时为控制登革热传播阈值,≥5 有登革热传播(散发)风险,≥10 有暴发风险,≥20 有流行风险^[1-3]。虽然该法简单易行,但仅能进行风险等级定性评估,未能有效反映出 MOI 风险概率的大小及其在地区间或季节间的分布差异。

根据疫情严重程度及媒介伊蚊分布状况分类,广东省是国家划定的 6 个 I 类省份(自治区)(广东、云

南、广西、海南、福建和浙江)中最严重的地区,近年常有登革热暴发^[1-2]。2014 年广东省发生了大规模暴发,发生病例 4.5 万余例^[4]。其中,广州达 38026 例,占 84.15%;2011—2019 年广州市合计报告登革热病例 43802 例,占全省的 78.48%^[5]。因此,以广州市为研究区域在珠三角地区最具有典型性和代表性,同时,研究结果对于广东省其他地区,华南地区和 6 个 I 类省份都具有参考价值。本文采用三次样条和概率分布拟合 MOI 曲线,研究广州市各月 MOI 风险概率分布的规律和特征,生成 MOI 风险概率分布表和分布图,为开展 MOI 风险评估提供新的方法。

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2020YFC1200102)

1. 广东省疾病预防控制中心广东省公共卫生研究院(511430)

2. 广东省疾病预防控制中心

△通信作者:刘礼平, E-mail: 811618343@qq.com;曾四清, E-mail: sqzeng04@qq.com

材料与方法

1. 数据来源

本研究数据来源于“广东省全民健康信息管理平

台病媒生物监测系统”(下简称“病媒监测系统”)中广州市 2016—2019 年各月的 MOI 监测数据。该病媒监测系统记录的 MOI 监测点频次为 18323。根据监测工作方案,并经箱线图分析提示异常点后,除去其中记录不完善,以及诱蚊诱卵器布放数小于 10 和大于 110 的监测数据。实际纳入分析的监测数据为 14226 个,利用率为 77.64%。

2. 方法

(1) 诱蚊诱卵指数 MOI 计算及风险等级划分标准

$MOI = (\text{阳性诱蚊诱卵器数} / \text{有效诱蚊诱卵器数}) \times 100$ 。

其中,阳性诱蚊诱卵器数包括卵阳性数、成蚊阳性数、卵及成蚊均有的阳性诱蚊诱卵器数;有效诱蚊诱卵器数是指经连续布放 4 天,第 4 天检查回收时保持布放时的正常状态(没有倾倒、翻转、水漫或干涸等)可以判断是否阳性的诱蚊诱卵器数^[1]。MOI 风险等级的划分标准为:MOI < 5,为控制登革热传播阈值,≥ 5 有登革热传播(散发)风险,≥ 10 有暴发风险,≥ 20 有流行风险^[1-3]。

(2) 各月数据合并

从 MOI 定义及计算方法可知,MOI 阳性率以及不同风险等级的发生率均服从二项分布。同时,因 MOI 受季节因素、气候变化、地理生境、灭蚊干预措施、监测工作质量等因素影响^[2-3],各年各月的 MOI 值存在明显差异和波动性。因此,为保证拟合概率分布结果的针对性、代表性和稳定性,根据二项分布的可加性,本文将 4 年间各月的 MOI 监测值按月各自合并在一起进行拟合分析。

(3) 累积概率分布函数构建和分布曲线绘制

将各月的 N 个 MOI 值从小到大排序,第 i 个值的累积概率 P_i 计算公式为 $P_i = i / (N + 1)$ ^[6-7]。以 MOI 值为纵坐标,以累积概率为横坐标,绘制 MOI 累积概率分布曲线。MOI 拟合值的累积概率表达的是不同月份监测得到的 MOI 值达到和超过某阈值的可能性,即风险概率。据此,对监测值进行风险评估。

(4) 采用三次样条函数拟合 MOI 曲线计算分位数

2016—2019 年合计,各月 MOI 监测值的 K-S 法正态性检验 K 值在 0.50~0.80 之间, P 值均 < 0.01。表明各月的 MOI 值均呈偏态分布,不宜直接采用正态概率分布进行拟合,故采用不限分布类型的三次样条函数进行拟合^[8-9]。

三次样条函数拟合 MOI 分位数计算函数 $f(x)$ 的表达式为: $f(x) = d_k(x-t_k)^3 + c_k(x-t_k)^2 + b_k(x-t_k) + a_k$,

式中, $t_k \leq x \leq t_{k+1}$, k 为节点数, $k = 0, 1, \dots, n$; t_k 时残差平方和为 $\sum (y_i - f(x_i))^2$ 。函数 $f(x)$ 的惩罚平方和为: $S(f) = \sum (y_i - f(x_i))^2 + s \int_a^b (f''(x))^2 dx$,其中, y_i 为观测值, $f(x_i)$ 为拟合值, i 为观测值个数。采用惩罚最小二乘估计法求解函数 $f(x)$ ^[8-10]。

(5) 光滑参数选择及拟合优度评价

光滑度参数 s 是选择 $f(x)$ 节点数的正平滑因子。本研究设定 $s > 0$,进行数据拟合,满足 $\sum_{i=1}^n (w_i (y_i - f(x_i)))^2 \leq s$ 。 s 值分别取默认值或筛选值进行拟合,比较二者的拟合优度,最终选择满足基本光滑性前提下拟合优度较好者作为拟合结果。

采用默认 s 值时, $s = \text{len}(w)$, W_i 为各观测值的权重,如果 $1/W_i$ 是 y_i 的标准偏差的估计值,则采用默认 s 值进行拟合较为理想^[11]。

采用筛选 s 值时,则按照以下原则进行筛选:① $s > 1$,以满足曲线拟合的基本光滑性;② MOI 拟合值由小到大单向递增(或由大到小递减,或局部相等),保证其与观测值的大小排序吻合;③ $f(x)$ 的拟合优度评价指标加权残差(residual)平方和(R^2)、均方误差(mean squared error, MSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、绝对误差最大值(max absolute error, MaxAE)等^[11-12]尽可能较小,以满足较好的拟合优度。

(6) 数据处理

采用 Excel 建立 MOI 数据库,采用 Python 语言编程进行数据分析^[11]。

结 果

2016—2019 年纳入分析的 MOI 数据合计 14226 个,各年分别为 1675、2147、3951、6453,各占 11.77%、15.09%、27.77%、45.36%;1-12 月纳入分析的数据分别为 689、756、1036、1273、1294、1260、1406、1344、1185、1325、1364、1294,各占 4.84%、5.31%、7.28%、8.95%、9.10%、8.86%、9.88%、9.45%、8.33%、9.31%、9.59%、9.10%。

1. 默认 s 值和筛选 s 值时的拟合效果

当 s 分别采用默认值或筛选值进行 $f(x)$ 拟合时,各月 MOI 曲线拟合优度结果见表 1。当 s 采用筛选值时,拟合度更优。因此,本文以筛选值为光滑参数进行 MOI 的三次样条函数拟合研究。

2. 各月 MOI 拟合值的累积概率分布

各月 MOI 值拟合样条函数得到的累积概率分布结果见表 2 和图 1。结果表示各月 MOI 监测值超过该 MOI 拟合值(临界值)的累积概率 P 。

表 1 广州市 1-12 月 MOI 值拟合样条函数时的光滑参数选择及其拟合优度

评价指标	月份											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
<i>N</i>	689	756	1036	1273	1294	1260	1406	1344	1185	1325	1364	1294
<i>S</i> *	11	13	25	61	64	185	158	107	135	226	129	39
<i>S</i> **	140	412	686	1273	1294	1260	1406	1343	1185	1325	1364	759
<i>Knots</i> *	12	12	15	17	36	23	20	23	19	12	19	20
<i>Knots</i> **	2	2	2	6	5	5	6	8	6	7	12	2
<i>R</i> ² *	11.00	13.00	25.00	61.01	63.98	185.07	158.00	106.96	134.98	225.83	129.00	39.02
<i>R</i> ² **	140.78	412.88	686.29	1273.03	1293.99	1260.81	1406.40	1343.84	1185.10	1325.26	1363.84	759.62
<i>MSE</i> *	0.016	0.017	0.024	0.048	0.049	0.147	0.112	0.080	0.114	0.170	0.094	0.030
<i>MSE</i> **	0.204	0.546	0.662	1.000	1.000	1.001	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.587
<i>MAE</i> *	0.046	0.040	0.060	0.119	0.150	0.236	0.218	0.197	0.223	0.276	0.195	0.082
<i>MAE</i> **	0.322	0.545	0.435	0.549	0.655	0.624	0.582	0.462	0.525	0.523	0.340	0.351
<i>MaxAE</i> *	1.260	1.130	2.310	1.770	1.910	3.720	3.240	1.880	2.020	4.060	4.230	2.150
<i>MaxAE</i> **	3.140	5.850	12.720	12.030	9.170	13.830	21.810	28.510	20.180	16.980	21.010	19.970

注: * 光滑参数 *s* 采用筛选值, ** 光滑参数 *s* 采用默认值

表 2 广州市 1-12 月 MOI 拟合值的累积概率分布表

累积概率	MOI 拟合值											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
0.01	7.54	10.23	13.53	36.50	53.20	60.12	48.63	41.06	40.39	26.94	20.17	10.09
0.02	6.05	8.73	10.14	27.22	47.52	50.55	42.56	32.56	30.19	20.93	15.91	10.01
0.03	5.65	7.59	9.61	21.81	39.69	43.47	38.49	29.36	25.67	19.03	14.53	8.04
0.04	5.38	6.48	9.15	18.84	34.95	37.79	34.27	28.00	23.43	17.56	12.61	6.79
0.05	5.02	5.48	8.31	17.36	30.85	34.10	31.72	25.84	21.86	15.99	10.83	6.14
0.06	4.66	4.72	7.48	16.62	29.63	32.05	30.09	23.51	20.73	14.53	10.37	5.69
0.07	4.39	4.35	6.79	15.89	27.77	30.17	28.67	21.87	19.83	13.37	10.28	5.50
0.08	4.22	4.25	6.24	14.98	25.77	28.19	27.21	20.96	19.05	12.51	10.14	5.30
0.09	4.09	4.12	5.82	13.96	24.85	26.54	25.66	20.38	18.37	11.85	9.95	5.09
0.10	3.97	3.70	5.49	12.92	23.39	25.62	24.01	19.71	17.75	11.29	9.72	4.88
0.11	3.81	3.05	5.24	11.95	21.51	25.15	22.39	18.87	17.17	10.81	9.46	4.70
0.12	3.56	2.45	5.02	11.12	20.43	24.41	21.04	17.98	16.59	10.43	9.16	4.55
0.13	3.17	2.16	4.83	10.51	20.13	22.73	20.20	17.16	15.99	10.17	8.85	4.44
0.14	2.70	2.16	4.63	10.16	19.98	20.84	19.82	16.46	15.35	10.01	8.53	4.38
0.15	2.28	2.04	4.44	9.98	19.24	20.40	19.59	15.84	14.70	9.94	8.20	4.33
0.16	2.07	1.38	4.26	9.93	18.22	20.38	19.16	15.30	14.05	9.91	7.86	4.29
0.17	2.06	0.41	4.10	9.93	17.33	19.86	18.44	14.80	13.43	9.90	7.54	4.23
0.18	1.98	0	3.95	9.93	16.62	19.04	17.59	14.31	12.85	9.89	7.22	4.13
0.19	1.53	0	3.82	9.85	16.10	18.21	16.84	13.80	12.32	9.83	6.92	3.96
0.20	0.71	0	3.69	9.66	15.77	17.54	16.30	13.28	11.87	9.71	6.64	3.73
*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
0.80	0	0	0	0	0	2.32	2.91	0	0	0	0	0
0.81	0	0	0	0	0	1.40	2.28	0	0	0	0	0
0.82	0	0	0	0	0	0.28	1.47	0	0	0	0	0
0.83	0	0	0	0	0	0	0.61	0	0	0	0	0
0.84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#	#
0.99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注: * 因篇幅限制,表中省略了各月累积概率在 0.21 至 0.79 之间的 MOI 拟合值,# 各月累积概率在 0.85 至 0.98 之间的 MOI 拟合值均为 0,表中也省略。

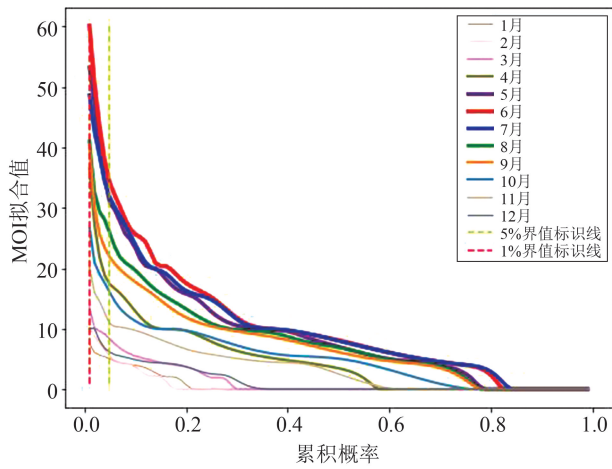


图1 广州市1-12月MOI拟合值累积概率分布图

3. 各月 MOI 风险等级的概率分布

各月 MOI 风险等级频率和概率分析结果见表 3、图 2。图 2 显示,1-12 月 MOI 风险等级频率和概率分布曲线均呈“钟型”。

讨论

此前 MOI 风险评估研究主要是描述不同地区不同月份 MOI 值的季节消长节律,也有描述 MOI 风险等级及其所占比例等^[2,13],但尚未见对 MOI 风险概率分布规律进行专题研究的报道。

本研究揭示了广州市各月 MOI 及其风险等级的概率分布规律和特征,为优化完善 MOI 监测评估方案提供了科学依据。结果表明,广州市各月 MOI 及其风

表3 广州市1~12月MOI风险等级发生频率及其拟合概率(%)

月份	MOI 风险等级							
	控制 (MOI<5)		传播 (MOI≥5)		暴发 (MOI≥10)		流行 (MOI≥20)	
	频率	概率	频率	概率	频率	概率	频率	概率
1	93.61	94.93	6.39	5.07	0.58	0.25	0.00	0.00
2	93.65	94.42	6.35	5.58	1.85	1.11	0.00	0.00
3	86.39	87.86	13.61	12.14	3.76	2.11	0.19	0.26
4	59.47	61.83	40.53	38.17	20.58	14.89	4.01	3.53
5	35.86	39.93	64.14	60.07	40.19	34.94	14.68	13.96
6	30.56	33.73	69.44	66.27	41.75	35.94	18.02	16.80
7	30.37	33.40	69.63	66.60	42.39	36.19	15.43	13.43
8	36.98	40.37	63.02	59.63	36.01	28.68	10.86	9.61
9	39.66	42.94	60.34	57.06	32.91	27.19	8.44	6.80
10	49.43	49.48	50.57	50.52	21.43	14.15	3.32	2.39
11	64.08	69.23	35.92	30.77	11.66	8.79	1.32	1.03
12	87.87	90.55	12.13	9.45	2.40	2.00	0.08	0.12

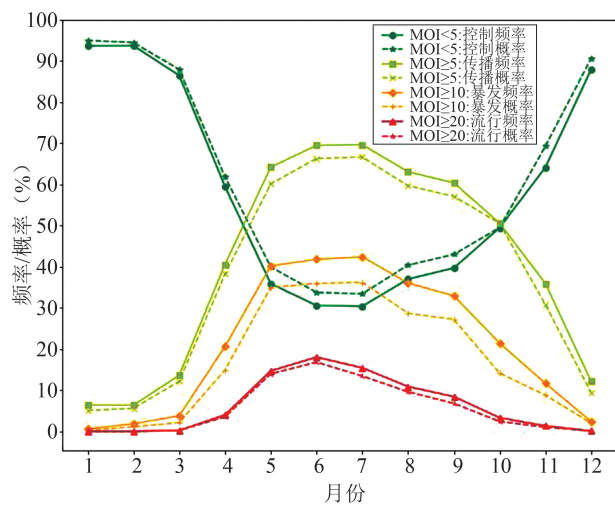


图2 广州市1-12月MOI风险等级发生频率与其拟合概率曲线比较图

险等级的概率分布具有显著的季节消长规律和特征:累积概率小于0.01和0.05,属于小概率事件的MOI临界值均在6月份最高,在1月最低;MOI风险等级为传播、暴发和流行的概率在7月或6月最高,均在1月

最低;1月出现传播、暴发、流行的风险概率分别接近或达到小概率事件(表2、表3)。这些规律和特征是现行的MOI风险评估标准方法无法揭示的^[1-3]。它能为优化MOI监测评估方案提供科学依据,使MOI监测评估资源投入更有针对性,更加科学精准和高效。例如,本研究发现广州市1、2月份MOI≥5(有“传播”风险)的可能性极低($P<0.06$),接近小概率事件($P<0.05$),可以认为广州市在这两月开展大规模MOI监测的必要性不大,应主要针对重点环境类型开展监测,对此在制定本地MOI监测方案时应充分考虑这些情况。如果1、2月不需要开展高覆盖率MOI监测,则可节约部分卫生资源投入。

登革热流行病学研究发现,2016—2019年广州市登革热病例发病时间高峰期主要集中在8-11月,均在10月达到峰值^[4]。可见,同MOI概率分布的季节性消长规律相比,登革热的发病高峰期有一定的滞后性。因此,综合考虑MOI概率分布、伊蚊的自然生长期(约为1~2周)和生存期(一般1~3月)、登革热的

潜伏期(3~14 天)以及疫情高峰期,广州的群众性社区灭蚊行动应该在每年的 4-5 月开展,并持续至 11 月。及时动态清理积水,消除孳生地,将 MOI 风险控制在较低水平,从而降低登革热疫情风险,防止出现疫情高峰。

研究表明,应用三次样条函数和概率分布拟合法可以建立 MOI 风险评估新方法,具有新的功能和应用价值。通过本研究建立的方法,可以针对不同地区、不同时期的 MOI 监测数据进行动态拟合分析,从而动态生成类似于表 2、图 1 和表 3、图 2 的分析结果,作为本地不同时期使用的 MOI 风险评估界值表和界值图,可用于科学评估 MOI 及其风险等级概率大小。它既可用于某次 MOI 监测数据的量化评估,也可用于不同地区、不同时期 MOI 监测数据的横向或纵向比较动态评估。例如,假设 3 月份广州市的某个监测点监测到的 MOI 值为 10.5,根据表 2 进行评估,该值在 3 月份出现的概率在 0.01~0.02 之间;同时,根据表 3 进行评估,3 月份出现 MOI 大于 10 的概率只有 2.11% (0.0211)。二者评估均认为该值在 3 月份出现的概率均小于 0.05,是小概率事件,属于非常态,对此监测评估结果就要高度重视。要及时进行监测数据质量核查,认真核实监测数据的准确性。如果监测结果真实可靠,就要及时采取非常规的灭蚊等应急处置措施。

现行的 MOI 风险评估标准方法只是将 MOI 值的大小与风险等级之间建立联系,按此方法进行评估,相同大小的 MOI 值在不同地区、不同月份的评估结果意义是相同的。但是,本研究建立的新方法是将 MOI 值的大小和风险等级与发生的可能性(概率)之间建立联系,同时评估 MOI 值的大小、风险等级及其发生概率。按照该评估方法,相同大小的 MOI 值在不同地区、不同月份的风险等级虽然相同,但其发生概率却不一样,评估结果及其意义就不同。因此,应当引起重视的程度和采取的干预措施就不一样。例如,根据表 2 进行评估,MOI 值为 10.5 在 4 月份出现的概率在 0.13~0.14 之间;根据表 3 进行评估,在 4 月份出现 MOI 值大于 10 的概率为 14.89% (0.1489)。二者均评估认为该值在 4 月份出现的概率均大于 0.05,不是小概率事件,属于常态。显然,与前面 3 月份评估的结果不一样。可见,同样大小的 MOI 值,在不同月份出现时的评估结果和意义是不一样的,应当区别对待。因此,本研究形成了 MOI 风险评估新方法,所研制的各月 MOI 累积概率分布表和 MOI 风险等级概率图,能直接用于指导相关工作。与现行的 MOI 风险评估标准方法相比,具有不同的应用价值,能更好地为登革热的科学防控、精准施策提供新的研究方法和科学参考。

该研究数据来源于“病媒监测系统”,该系统于 2015 年开始按新监测方案使用。尽管广州市 MOI 监

测工作基础较好,但数据质量和有效利用率仍有待进一步提高。如果基于更高质量、更长时间、更多地区和更好利用的监测数据开展研究,将得到更加科学适用的 MOI 概率分布特征和风险评估研究结果。同时,也有利于深入开展 MOI 概率分布的时间周期性、地区异质性及其与季节性分布规律的关系研究,为各地更有针对性地开展防蚊灭蚊、预防登革热工作提供科学参考。

当然,三次样条函数拟合也有局限性,比较适用于渐变的属性,只适合于大样本资料,只能对区间内的数据进行内插值拟合,要防止欠拟合或过拟合^[9,14]。因此,采用三次样条函数和概率分布拟合法进行 MOI 风险评估研究中,如何确定最适宜的大样本量、筛选最优光滑参数,如何适度平衡光滑度和拟合优度等问题均有待深入研究。

参 考 文 献

- [1] 广东省卫生和计划生育委员会办公室,广东省爱国卫生运动委员会办公室.广东省登革热防控专业技术指南(2015 年版),粤卫办[2015]20 号.
- [2] 刘小波,吴海霞,郭玉红,等. 2019 年全国媒介伊蚊监测报告. 中国媒介生物学及控制杂志, 2020, 31(4): 401-406.
- [3] 刘小波,郭玉红,吴海霞,等. 2015-2017 年我国媒介伊蚊幼蚊监测结果分析. 中国媒介生物学及控制杂志, 2018, 29(4): 325-330.
- [4] 张萌,邓爱萍,李剑森,等. 2012-2017 年广东省登革热疫情流行特点与趋势. 中国病毒病杂志, 2018, 8(4): 282-287.
- [5] 刘媛媛,刘远,罗雷,等. 2011-2019 年广州市登革热流行病学特征分析. 现代预防医学, 2021, 48(11): 1925-1929.
- [6] 廖伟,冯承莲,刘大庆,等. 基于累积概率分布法评估典型水环境因子对铜毒性的影响. 环境工程, 2019, 37(11): 25-29.
- [7] Scipy lecture notes:1.6.11.1.Maximum wind speed prediction at the Sprogø station. <http://scipy-lectures.org/intro/summary-exercises/stats-interpolate.html>.
- [8] 尚磊,徐勇勇,侯茹兰,等. 采用三次样条函数拟合体重百分位数曲线. 中国卫生统计, 2001, 18(5): 266-268.
- [9] 朱业玉,宋丽莉,姬兴杰,等. 基于分段三次样条函数逐时气象资料模拟方法研究. 气象与环境学报, 2017, 33(2): 44-52.
- [10] 张希娜,李亚红,郭中凯. 关于三次样条插值的教学研究. 长沙大学学报, 2012, 26(2): 131-132.
- [11] Scipy.interpolate.UnivariateSpline-SciPy v1. 8. 0 Manual. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.UnivariateSpline.html>.
- [12] 曾四清. Joinpoint 回归模型及其在传染病流行趋势分析中的应用. 中国卫生统计, 2019, 36(5): 787-791.
- [13] 梁琳琳,张金宇,李晓宁,等. 2016—2017 年广州市蚊媒应急队与各区疾病预防控制中心白纹伊蚊监测比较分析. 中国媒介生物学及控制杂志, 2019, 30(4): 464-468.
- [14] 李淳,金鼎沸. 基于三次样条插值和 GM(1,1)模型的高速公路路基沉降预测. 公路工程, 2015, 40(2): 221-225.

(责任编辑:张悦)