

· 传染病早期探测与自动预警 ·

传染病暴发探测时间模型和时空模型的应用效果比较

李中杰 廖一兰 赖圣杰 张洪龙 叶楚楚 赵丹 金连梅 马家奇
兰亚佳 王劲峰 杨维中

【摘要】 目的 比较国家传染病自动预警系统(预警系统)中时间模型与时空模型在传染病暴发探测中的应用效果。方法 采用预警信号数、灵敏度、错误预警率和暴发探测时间等指标,分析比较 2009 年 12 月 6 日至 2010 年 12 月 5 日预警系统在 20 个省的 221 个试点县(区)采用时间模型和时空模型进行暴发探测的效果。结果 时间模型和时空模型灵敏度相同(均为 98.15%),但时空模型较时间模型减少了 59.86%(15 702 条)的预警信号,时空模型的错误预警率(0.73%)低于时间模型(1.79%),时空模型的暴发探测时间(0 d)也短于时间模型(1 d)。结论 预警系统中的时空模型较时间模型具有更好的暴发探测效果。

【关键词】 传染病; 暴发探测; 时间模型; 时空模型

Comparison on the performance of both temporal and temporal-spatial models for outbreak detection through China Infectious Diseases Automated-alert and Response System (CIDARS)

LI Zhong-jie¹, LIAO Yi-lan², LAI Sheng-jie¹, ZHANG Hong-long¹, YE Chu-chu¹, ZHAO Dan¹, JIN Lian-mei¹, MA Jia-qi¹, LAN Ya-jia³, WANG Jin-feng², YANG Wei-zhong¹. 1 Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China; 2 Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences; 3 West China School of Public Health, Sichuan University
Corresponding authors: YANG Wei-zhong, Email: yangwz@chinacdc.cn; WANG Jin-feng, Email: wangjf@Lreis.ac.cn

This work was supported by grants from the National Science and Technology Support Projects for the "Eleven Five-Year Plan" of China (No. 2006BAK01A13, 2008BAI56B02), the China-WHO Regular Budget Cooperation Project (No. WPCNH0801617, WPCNH1002405) and the National Science and Technology Key Projects (No. 2009ZX10004-201).

【Abstract】 Objective To analyze the pilot results of both temporal and temporal-spatial models in outbreaks detection in China Infectious Diseases Automated-alert and Response System (CIDARS) to further improve the system. **Methods** The amount of signal, sensitivity, false alarm rate and time to detection regarding these two models of CIDARS, were analyzed from December 6, 2009 to December 5, 2010 in 221 pilot counties of 20 provinces. **Results** The sensitivity of these two models was equal (both 98.15%). However, when comparing to the temporal model, the temporal-spatial model had a 59.86% reduction on the signals (15 702) while the false alarm rate of the temporal-spatial model (0.73%) was lower than the temporal model (1.79%), and the time to detection of the temporal-spatial model (0 day) was also 1 day shorter than the temporal model. **Conclusion** Comparing to the temporal model, the temporal-spatial model of CIDARS seemed to be better performed on outbreak detection.

【Key words】 Infectious disease; Outbreak detection; Temporal model; Temporal-spatial model

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2011.05.003

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划(2006BAK01A13, 2008BAI56B02); 中国-世界卫生组织合作项目(WPCNH0801617, WPCNH1002405); 国家科技重大专项(2009ZX10004-201)

作者单位:102206 北京, 中国疾病预防控制中心(李中杰、赖圣杰、张洪龙、叶楚楚、赵丹、金连梅、马家奇、杨维中); 中国科学院地理科学与资源研究所(廖一兰、王劲峰); 四川大学华西公共卫生学院(兰亚佳)

李中杰、廖一兰同为第一作者

通信作者:杨维中, Email: yangwz@chinacdc.cn; 王劲峰, Email: wangjf@Lreis.ac.cn

建立和完善传染病暴发早期探测预警技术,及时发现传染病发生、发展的异常动态,及时发出警报,有利于相关部门及可能受事件影响的人群及时采取科学措施,以预防和减少危害^[1]。2004年中国疾病预防控制中心基于全国法定报告传染病建立了移动百分位数法预警模型(时间模型)^[2,3],并在此基础上开发了国家传染病自动预警系统(预警系统),该系统于2008年4月21日在全国投入试运行^[2-4]。为进一步探讨空间模型在传染病暴发探测中的作用,弥补单纯时间探测方法在空间准确性可能存在的不足,中国疾病预防控制中心在时间模型的基础上,利用报告病例的现住址乡镇编码等空间信息^[5],采用空间扫描统计量的方法^[6],探索建立了时间-空间聚集性探测预警模型(时空模型)。经过方法测试与完善,时空模型于2009年12月6日在全国20个省221个县(区)开展了试点运行研究^[7]。本研究对试点地区18种传染病的时间模型和时空模型运行结果分析和比较,以探讨改进后时空模型的应用效果。

资料与方法

1. 资料来源:本研究数据来源于2009年12月6

日至2010年12月5日我国20个省221个县(区)“疾病监测信息报告管理系统”(大疫情系统)报告的甲型肝炎等18种传染病(表1)个案数据、“突发公共卫生事件报告管理信息系统”(突发网)报告的暴发事件和“自动预警系统”时间模型与时空模型的预警信号和响应处理结果。

2. 预警模型:

(1)时间模型:预警系统中的时间模型采用移动百分位数法,对常见急性传染病的报告数据进行每日探测(图1)。该方法是以县(区)为空间范围,若当前观察周期的病例数(C)大于历史同期基线数据的第50百分位数(P_{50})时,预警系统将发出预警信号,其中当前观察周期为最近7d,历史同期指过去3年每年对应于当前观察周期的7d,以及前后各摆动2个7d,即历史同期基线数据由15个数据块组成^[2,3,8]。

为减少重复预警信号,时间模型的运算结果要同时满足2个条件才发出预警:① $C > 2$ 例(对于流行性乙型脑炎、流行性脑脊髓膜炎和麻疹3种疾病)或 $C > 3$ 例(对于上述3种之外的15种疾病);②当前日期C值大于前一日C值或当前日期C值在历史基线中的百分位数大于前一日(图1)。

表1 2009年12月6日至2010年12月5日预警系统中时间模型与时空模型在全国221个试点县(区)的预警结果

病种	时间模型			时空模型			
	预警信号数	疑似事件信号数	疑似事件信号比例(%)	预警信号数	疑似事件信号数	疑似事件信号比例(%)	信号减少比例(%)
I类疾病							
流行性出血热	124	0	0	107	0	0	13.71
流行性乙型脑炎	57	0	0	47	1	2.13	17.54
疟疾	38	3	7.89	33	4	12.12	13.16
流行性脑脊髓膜炎	23	0	0	20	0	0	13.04
登革热	13	5	38.46	12	4	33.33	7.69
流行性和地方性斑疹伤寒	2	0	0	2	0	0	0
钩端螺旋体病	1	0	0	1	0	0	0
计	258	8	3.10	222	9	4.05	13.95
II类疾病							
其他感染性腹泻	7 568	12	0.16	4 310	11	0.26	43.05
流行性腮腺炎	6 153	36	0.59	2 411	48	1.99	60.82
丙型肝炎	3 557	0	0	952	0	0	73.24
麻疹	2 383	25	1.05	614	22	3.58	74.23
流行性感冒	1 471	12	0.82	683	11	1.61	53.57
风疹	1 464	26	1.78	633	38	6.00	56.76
猩红热	1 000	3	0.30	128	2	1.56	87.20
急性出血性结膜炎	845	21	2.49	362	43	11.88	57.16
戊型肝炎	635	0	0	52	0	0	91.81
甲型肝炎	505	1	0.20	111	1	0.90	78.02
伤寒和副伤寒	394	1	0.25	53	0	0	86.55
计	25 975	137	0.53	10 309	176	1.71	60.31
合计	26 233	145	0.55	10 531	185	1.76	59.86

注:其他感染性腹泻指除霍乱、细菌性和阿米巴性痢疾、伤寒和副伤寒以外的感染性腹泻病;疑似事件信号比例指疑似事件信号占该病种全部预警信号的百分比;信号减少比例指时空模型较时间模型减少的预警信号百分比

注: I 类疾病指流行性出血热、流行性乙型脑炎、疟疾、流行性脑脊髓膜炎、登革热、流行性和地方性斑疹伤寒、钩端螺旋体病; II 类疾病指其他感染性腹泻、流行性腮腺炎、丙型肝炎、麻疹、流行性感冒、风疹、猩红热、急性出血性结膜炎、戊型肝炎、甲型肝炎、伤寒和副伤寒

图 1 预警系统中时间模型与时空模型预警技术路线示意图

(2) 时空模型: 将移动百分位数法与空间探测方法组合, 先采用前者探测全县(区)当前病例数在时间上是否存在异常变化, 再利用后者在全县(区)范围内寻找可能的病例聚集区域(图 1)。其中, 空间探测模型是根据 Kulldorff 空间扫描统计量的原理^[6,9], 建立的传染病空间聚集性探测方法, 该方法利用病例的现住址地区编码, 以县(区)为探测范围, 乡(镇、街道)为搜索单元, 计算覆盖 1 个或多个乡镇(上限 6 个)的搜索圆的空间扫描统计量, 采用 Monte-Carlo 检验方法^[6,9], 筛选出统计学上病例存在空间聚集性的搜索圆, 并向该县(区)发出预警信号。时空模型根据传染病发病水平的不同, 将 18 种传染病分为以下两类, 分别采取不同的技术路线进行运算: ① I 类疾病: 指病例数较少、发病水平较低的传染病, 包括流行性脑脊髓膜炎、流行性乙型脑炎等 7 种传染病(表 1)。对于 I 类疾病, 若 $C \geq P_{80}$, 则直接发出预警; 若 $P_{50} \leq C < P_{80}$, 再进行空间探测, 若存在空间聚集性, 则发出预警。② II 类疾病: 指病例数较多、发病水平较高的常见传染病, 包括甲型肝炎、流行性腮腺炎等 11 种传染病(表 1)。对于 II 类疾病, 若 $C \geq P_{50}$, 则直接进行空间探测, 若存在空间聚集性, 则发出预警。

为减少重复预警信号, 时空模型的运算结果在同时满足 2 个条件后才发出预警: ① $C > 2$ 例(对于流行性乙型脑炎、流行性脑脊髓膜炎和麻疹 3 种疾病)或 $C > 3$ 例(对于上述 3 种之外的 15 种疾病); ② 当前

日期 C 值大于前三日每日 C 值且当前日期 C 值在历史基线中的百分位数大于或等于前一日的百分位数, 或当前日期探测到存在空间聚集性的乡镇数或病例数大于前一日。

3. 预警信号响应: 预警系统的时间模型和时空模型在试点地区的信号响应流程分为预警信号的发送、预警信号初步核实和现场调查确认 3 个步骤^[2-4]。预警信号以手机短信的方式自动发送给县级疾病预防控制机构负责疫情分析的人员, 当地收到预警信号后将通过数据分析或电话联系报告单位等方式进行初步核实, 若初步核实判定为疑似事件后, 将进一步开展现场调查, 以确认是否为真正的暴发。基层疾病预防控制机构对预警信号的初步核实与现场调查结果将通过预警系统进行报告。

4. 评价指标: 本研究对试点地区时间模型和时空模型对 I 类和 II 类疾病的预警信号数进行分析, 采用试点地区在突发网报告的病例数 3 例及以上且在大疫情系统中有相关病例的传染病暴发事件作为评价标准, 计算时间模型和时空模型的灵敏度、错误预警率和暴发探测时间等指标, 以比较两个模型的效果^[10]。本研究选定暴发首次报告病例日期为暴发开始时间, 末次报告病例日期为暴发结束时间, 二者之间为暴发持续时间^[11-13]。在此期间, 预警模型发出 1 个及以上信号, 即认为探测到暴发。灵敏度是指探测到的暴发占全部暴发事件的百分比。暴发探

测时间是指暴发开始至预警模型首次发出预警信号的时间间隔,本研究采用暴发探测时间的中位数来比较两种模型的探测及时性。错误预警率指未发生疾病暴发期间,预警模型发出预警信号天数占未发生暴发天数的百分比;本研究首先计算各县(区)未发生暴发期间的预警信号天数与未发生暴发天数,然后再将各县(区)的预警信号天数之和作为分子,将各县(区)未发生暴发天数之和作为分母,以计算整个试点地区某种或多种疾病的错误预警率^[11-13]。

5. 统计学分析:采用R软件整理数据^[14],编写评价指标计算程序。采用SPSS 13.0 统计软件,对时间模型和时空模型的疑似事件信号比例、错误预警率进行2个相关样本的Wilcoxon符号秩和检验。

结 果

1. 预警信号数:20个省221个试点县(区)的18种传染病在2009年12月6日至2010年12月5日期间,时间模型共发出26 233条预警信号,平均每县(区)每周发出2.3条信号,其中145条预警信号被判断为与疑似事件相关,占全部预警信号的0.55%(表

1);时空模型共发出10 531条预警信号,平均每县(区)每周发出0.9条信号,其中有185条疑似事件信号,占全部预警信号1.76%。时空模型较时间模型减少了59.86%(15 702条)预警信号。

对于7种I类疾病,时空模型共发出预警信号222条,比时间模型(258条)减少13.95%;时空模型疑似事件信号比例为4.05%(9条),略高于时间模型的3.10%(8条)。对于11种II类疾病,时空模型共发出预警信号10 309条,比时间模型(26 233条)减少60.31%;时空模型疑似事件信号比例为1.71%(176条),高于时间模型疑似事件信号比例0.53%(137条),二者的差异有统计学意义($Z=-2.429, P<0.05$)。

2. 暴发探测的准确性和及时性:2009年12月6日至2010年12月5日,试点地区报告的传染病暴发事件共54起(表2),涉及8种传染病,其中时间模型和时空模型均探测到其中的53起,灵敏度均为98.15%(表2),各有1起登革热事件未探测到。总体上,时空模型的错误预警率(0.73%)低于时间模型(1.79%),时空模型的暴发探测平均时间(0 d)短于时间模型(1 d)。相对时间模型,采用时空模型的18

表2 2009年12月6日至2010年12月5日预警系统中时间模型与时空模型在全国221个试点县(区)的暴发探测效果

病 种	暴发事件数 ^a	时间模型				时空模型			
		探测暴发数 ^b	灵敏度 (%)	错误预警率 (%)	暴发探测时间(d)	探测暴发数 ^b	灵敏度 (%)	错误预警率 (%)	暴发探测时间(d)
I类疾病									
登革热	4	3	75.00	0.01	0.0	3	75.00	0.01	0.0
疟疾	1	1	100.00	0.04	1.0	1	100.00	0.03	1.0
流行性出血热	1	1	100.00	0.15	0.0	1	100.00	0.13	0.0
流行性和地方性斑疹伤寒	0	0	-	0.00	-	0	-	0.00	-
钩端螺旋体病	0	0	-	0.00	-	0	-	0.00	-
流行性脑脊髓膜炎	0	0	-	0.03	-	0	-	0.02	-
流行性乙型脑炎	0	0	-	0.07	-	0	-	0.06	-
计	6	5	83.33	0.04	1.0	5	83.33	0.04	0.0
II类疾病									
急性出血性结膜炎	19	19	100.00	1.13	0.0	19	100.00	0.68	0.0
风疹	15	15	100.00	1.79	2.0	15	100.00	0.73	1.0
流行性腮腺炎	10	10	100.00	7.57	3.0	10	100.00	2.91	1.5
流行性感冒	3	3	100.00	1.81	0.0	3	100.00	0.81	0.0
甲型肝炎	1	1	100.00	0.61	5.0	1	100.00	0.11	5.0
其他感染性腹泻	0	0	-	9.37	-	0	-	5.25	-
丙型肝炎	0	0	-	4.40	-	0	-	1.18	-
麻疹	0	0	-	2.95	-	0	-	0.76	-
伤寒和副伤寒	0	0	-	0.49	-	0	-	0.06	-
戊型肝炎	0	0	-	0.79	-	0	-	0.06	-
猩红热	0	0	-	1.24	-	0	-	0.16	-
计	48	48	100.00	2.91	1.5	48	100.00	1.17	0.0
合 计	54	53	98.15	1.79	1.0	53	98.15	0.73	0.0

注:^a突发网报告的暴发事件数;^b预警系统通过时间模型或时空模型探测到的暴发事件数

种疾病错误预警率均降低,暴发探测时间亦均缩短。

对于7种I类疾病,时间模型和时空模型的灵敏度均为83.33%,错误预警率均为0.04%。时空模型的暴发探测平均时间为0 d,短于时间模型的1 d。对于11种II类疾病,两种方法的灵敏度均为100%,时空模型的错误预警率为1.17%,显著低于时间模型的错误预警率2.91% ($Z=-2.934, P<0.01$),其中戊型肝炎、伤寒和副伤寒、猩红热、甲型肝炎的错误预警率下降比例较大。时空模型的暴发探测时间为0 d,短于时间模型的1.5 d,其中对风疹和流行性腮腺炎探测及时性的提高较为明显。

讨 论

预警系统在全国20个省221个县(区)的试点研究结果显示,时空模型较时间模型具有更好的暴发探测效果,在确保灵敏度不降低的前提下,极大地减少了预警信号数量、降低了错误预警率,并提高了暴发探测的及时性,为预警方法的改进完善提供了重要依据。

自20世纪90年代Kulldorff提出空间扫描统计量的方法以来^[9,15],传染病发病的空间聚集性探测方法研究成为传染病暴发早期预警技术研究的新兴领域,世界各国越来越多的监测预警系统采用传染病空间聚集性探测方法^[16,17]。目前,我国法定报告传染病的信息包含了患者个案数据中现住址,其地理位置可定位到乡、镇或街道,这为基于较小空间范围的空间聚集性探测模型提供了数据基础。预警系统采用的时空模型在时间模型的基础上,进一步采用了空间扫描统计量方法,以乡镇为基本单元,每日对报告病例数进行空间扫描,能够及时探测到部分乡镇地区出现病例异常增加的空间聚集区域。因此,能够在空间维度更加准确地发现暴发事件。此外,预警系统采用的时空模型,根据不同传染病的特点和发病水平,分两类疾病采用了不同的预警技术路线。对于I类疾病,其发病水平较低,通常暴发规模较小,当 $C \geq P_{50}$ 时,提示出现发病异常的可能性较高,因此时空模型不再进行空间探测直接发出预警;而当 $P_{50} \leq C < P_{80}$ 时,时空模型通过空间探测,进一步分析病例的空间聚集性,提高探测的准确性。对于病例数较多、发病水平较高的II类疾病,当 $C \geq P_{50}$ 时,时空模型对病例进行空间聚集性探测,可发挥空间扫描统计量的优势,对具有空间聚集性的病例发出预警,极大地避免错误预警信号的数量。因此,本研究建立的时空模型根据传染病发病水平的高低,

对两类疾病分别采用不同的预警技术路线,具有较好的实际应用效果。

对同一起暴发或发病异常升高而重复发出预警信号是实际应用中普遍存在的现象。例如,德国RKI采用AODAs方法对SurvNet监测的法定报告传染病的探测预警同样也存在该现象^[18]。重复预警信号既增加了信号的数量,加大了基层人员对预警信号响应的工作量,因此,预警模型应在剔除无谓的重复预警信号后再发出预警信号。已有研究采取了一些方法以减少重复预警信号。例如,EARS、累积和控制图法(CUSUM)及指数加权移动平均法(EWMA)等对当日产生预警后的数值,归为0、均值或某一项设定的数值,避免在下一日累积或运算时重复发出预警信号^[13,19]。因此,预警系统中的时间模型和时空模型也采用了一定的重复信号剔除规则,以判断是否为重复预警信号和是否需要继续发出预警信号。与时间模型相比,由于时空模型剔除重复预警时,进一步考虑了空间探测结果是否存在重复的情况,使重复预警的剔除效果更加准确,从而提高探测的及时性,降低了错误预警率。由于重复信号的核心问题与难点是如何区分后续发出的信号是否有新的提示意义,而目前时空模型还难以做到完全准确、自动地识别,并实现对每一起事件只发出一条预警信号的理想状态。因此,如何针对疾病发病、发展趋势,制定相应的重复预警剔除方法还需要不断探索。

本研究采用真实的监测数据和暴发数据作为预警方法中运算与探测效果评价的参考标准,尽管真实数据可能受监测质量的影响,无法掌握全部病例数和暴发数,有可能低估预警模型的灵敏度和特异度,但相对于采用模拟数据的方式,真实数据能够较为客观地反映疾病发病与暴发的特征,包括疾病的发病水平、变化趋势、周末效应和公共卫生关注程度等^[12,18]。因此,本研究通过基于真实数据建立的预警算法与最优阈值,更加接近现实工作中疾病暴发探测的需要,相对基于模拟数据建立的方法能够更直接地应用于实际的疾病暴发预警领域中^[12,18]。本研究中部分疾病的真实暴发事件数较少,因此其灵敏度、错误预警率与暴发探测时间的计算结果存在一定局限。此外,本研究时间模型和时空模型均未探测到一起突发网报告的登革热暴发,回顾性分析显示,该起暴发仅涉及3名病例,首例至末例报告时间间隔为2周,由于7 d内报告的 $C < 3$,未满足时间模型和时空模型发出预警信号的条件,从而未探测

到该起暴发。这也提示时空模型在方法设计上的不足。

本研究结果表明,预警系统中的时空模型较时间模型具有更好的暴发探测效果。考虑到时空模型每日如对所有县(区)和乡镇进行空间聚集性分析将带来巨大的运算量,对预警系统的硬件设备性能要求较高,因此,在操作层面将时空模型在全国推广应用,还需对现有硬件设备的运算负荷做进一步测试和评价。

(本研究得到卫生部卫生应急办公室、世界卫生组织驻华代表处、各省疾病预防控制中心的支持,谨志感谢)

参 考 文 献

- [1] Buckeridge DL, Okhmatovskaia A, Tu S, et al. Understanding detection performance in public health surveillance: modeling aberrancy-detection algorithms. *J Am Med Inform Assoc*, 2008, 15(6):760-769.
- [2] Yang WZ, Li ZJ, Lan YJ, et al. A nationwide web-based automated system for outbreak early detection and rapid response in China. *Western Pacific Surveillance and Response Journal*, 2011, 2(1)(2011-03-08)[2011-03-14]. http://www.wpro.who.int/NR/rdonlyres/DB442B92-1C7A-4BCF-A3E5-C1555FF54716/0/201011009_SI_CIDARS_CHN.pdf.
- [3] Yang WZ, Lan YJ, Li ZJ, et al. The application of national outbreak automatic detection and response system, China. *Chin J Epidemiol*, 2010, 31(11):1240-1244. (in Chinese)
杨维中, 兰亚佳, 李中杰, 等. 国家传染病自动预警系统的设计与应用. *中华流行病学杂志*, 2010, 31(11):1240-1244.
- [4] Chinese Center for Disease Control and Prevention. Proposal on pilot operation of China infectious disease automated-alert and response system. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2008. (in Chinese)
中国疾病预防控制中心. 全国传染病自动预警(时间模型)试运行工作方案. 北京:中国疾病预防控制中心, 2008.
- [5] Wang L, Wang Y, Jin S, et al. Emergence and control of infectious diseases in China. *Lancet*, 2008, 372(9649):1598-1605.
- [6] Kulldorff M, Nagarwalla N. Spatial disease clusters: detection and inference. *Stat Med*, 1995, 14(8):799-810.
- [7] Chinese Center for Disease Control and Prevention. Proposal on pilot of China infectious disease automated-alert and response system (temporal-spatial model). Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2008. (in Chinese)
中国疾病预防控制中心. 传染病自动预警(时空模型)试点工
- 作方案. 北京:中国疾病预防控制中心, 2008.
- [8] Yang WZ, Xing HX, Wang HZ, et al. A research on early warning technology of control charts of seven infectious diseases. *Chin J Epidemiol*, 2004, 25(12):1039-1041. (in Chinese)
杨维中, 邢慧娟, 王汉章, 等. 七种传染病控制图法预警技术研究. *中华流行病学杂志*, 2004, 25(12):1039-1041.
- [9] Kulldorff M. A spatial scan statistic. *Commun Statist Theory Meth*, 1997, 26(6):1481-1496.
- [10] Lai SJ, Li ZJ, Jin LM, et al. The overview of evaluating contents and indicators on early warning system of infectious disease outbreak. *Chin J Epidemiol*, 2009, 30(6):637-640. (in Chinese)
赖圣杰, 李中杰, 金连梅, 等. 传染病暴发早期预警系统评价内容及其指标. *中华流行病学杂志*, 2009, 30(6):637-640.
- [11] Wang X, Zeng D, Seale H, et al. Comparing early outbreak detection algorithms based on their optimized parameter values. *J Biomed Inform*, 2010, 43(1):97-103.
- [12] Watkins RE, Eagleson S, Veenendaal B, et al. Applying cusum-based methods for the detection of outbreaks of Ross River virus disease in Western Australia. *BMC Med Inform Decis Mak*, 2008, 8:37.
- [13] Hutwagner L, Browne T, Seeman GM, et al. Comparing aberration detection methods with simulated data. *Emerg Infect Dis*, 2005, 11(2):314-316.
- [14] R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL. 2010. <http://www.R-project.org>.
- [15] Hjalmars U, Kulldorff M, Gustafsson G, et al. Childhood leukaemia in Sweden: using GIS and a spatial scan statistic for cluster detection. *Stat Med*, 1996, 15(7-9):707-715.
- [16] Buckeridge DL, Musen MA, Switzer P, et al. An analytic framework for space-time aberrancy detection in public health surveillance data. *AMIA Annu Symp Proc*, 2003:120-124.
- [17] Buckeridge DL. Outbreak detection through automated surveillance: a review of the determinants of detection. *J Biomed Inform*, 2007, 40(4):370-379.
- [18] Straetemans M, Altmann D, Eckmanns T, et al. Automatic outbreak detection algorithm versus electronic reporting system. *Emerg Infect Dis*, 2008, 14(10):1610-1612.
- [19] Murphy SP, Burkom H. Recombinant temporal aberration detection algorithms for enhanced biosurveillance. *J Am Med Inform Assoc*, 2008, 15(1):77-86.

(收稿日期:2011-01-29)

(本文编辑:张林东)