

# 基于面到面泊松克里格方法的手足口病发病率空间分布降尺度研究

王佳欣 胡茂桂 于石成 肖革新

100101 北京,中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室(王佳欣、胡茂桂); 100049 北京,中国科学院大学(王佳欣); 102206 北京,中国疾病预防控制中心(于石成); 100022 北京,国家食品安全风险评估中心(肖革新)

通信作者:胡茂桂, Email: humg@lreis.ac.cn; 肖革新, Email: biocomputer@126.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.09.012

**【摘要】 目的** 运用面到面泊松克里格降尺度方法,对山东省2010年区(县)手足口病发病率进行降尺度插值,探究手足口病在乡镇尺度上的空间分布模式,为卫生部门更精准的制定防控措施和分配医疗资源提供参考依据。**方法** 收集2010年山东省108个区(县)的手足口病发病数,采用面到面泊松克里格方法进行降尺度插值,运用地理信息系统(GIS)对插值结果进行空间可视化,将区(县)发病率降尺度插值到乡镇发病率,得到乡镇发病率空间分布。**结果** 降尺度插值时,拟合的点尺度半方差方程的自相关距离(变程)为20.38 km,变程范围内发病率具有空间自相关性。区(县)手足口病发病率估计值和实际值散点图拟合函数为 $y=1.053 1x$ ,  $R^2=0.99$ ,不同尺度之间发病率保持一致。**结论** 手足口病发病率在20.38 km范围内具有一定的空间自相关性。在某一地区暴发手足口病时,有关部门可重点针对暴发区20.38 km范围内的地区进行重点监控,着重分配治疗药物等医疗资源。面到面泊松克里格降尺度方法能够被有效地应用于手足口病的空间制图中,为公共健康发病率高分辨率制图提供了一种新的方法。

**【关键词】** 面到面泊松克里格; 手足口病; 空间分布; 降尺度; 变差函数

**基金项目:**国家自然科学基金(41301425, 41531179); 北京市科技创新基地培育与发展工程专项(Z161100005016110)

## Downscaling research of spatial distribution of incidence of hand foot and mouth disease based on area-to-area Poisson Kriging method

Wang Jiaxin, Hu Maogui, Yu Shicheng, Xiao Gexin  
Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China (Wang JX, Hu MG); University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China (Wang JX); Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 102206, China (Yu SC); China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China (Xiao GX)

Corresponding authors: Hu Maogui, Email: humg@lreis.ac.cn; Xiao Gexin, Email: biocomputer@126.com

**【Abstract】 Objective** To understand the spatial distribution of incidence of hand foot and mouth disease (HFMD) at scale of township and provide evidence for the better prevention and control of HFMD and allocation of medical resources. **Methods** The incidence data of HFMD in 108 counties (district) in Shandong province in 2010 were collected. Downscaling interpolation was conducted by using area-to-area Poisson Kriging method. The interpolation results were visualized by using geographic information system (GIS). The county (district) incidence was interpolated into township incidence to get the distribution of spatial distribution of incidence of township. **Results** In the downscaling interpolation, the range of the fitting semi-variance equation was 20.38 km. Within the range, the incidence had correlation with each other. The fitting function of scatter diagram of estimated and actual incidence of HFMD at country level was  $y=1.053 1x$ ,  $R^2=0.99$ . The incidences at different scale were consistent. **Conclusions** The incidence of HFMD had spatial autocorrelation within 20.38 km. When HFMD occurs in one place, it is necessary to strengthen the surveillance and allocation of medical resource in the surrounding area within 20.38 km. Area to area Poisson Kriging method based downscaling research can be used in spatial visualization of HFMD incidence.

**【Key words】** Area-to-area Poisson Kriging; Hand foot and mouth disease; Spatial distribution; Downscaling; Variogram

**Fund programs:** National Natural Science Foundation of China (41301425, 41531179); Project of Cultivation and Development for Science and Technology Innovation Base of Beijing (Z161100005016110)

手足口病是以发热和手、足、口腔等部位的皮疹或疱疹为主要特征,由多种肠道病毒引起的常见传染病<sup>[1]</sup>,其中以肠道病毒 71 型和柯萨奇病毒 A16 型感染最为多见。多发于≤5 岁儿童,尤其是≤3 岁儿童<sup>[2]</sup>。从 20 世纪 70 年代开始,手足口病在世界各地约 20 个国家已有记载暴发<sup>[3]</sup>。近年来,中国手足口病疫情呈现发病强度高、高峰持续时间长、疫情分布广泛等特点<sup>[4]</sup>;2008 年 3 月安徽省阜阳市发生大规模肠道病毒 71 型手足口病暴发疫情,出现较多重症和死亡病例,引起国内外广泛关注。同年 5 月 2 日卫生部将手足口病纳入国家丙类法定传染病报告和管理<sup>[5]</sup>,手足口病的报告病例剧增。2009 年中国手足口病患者数达到 1 155 525 例,其中包括 13 810 例严重病例和 353 例死亡病例<sup>[6]</sup>。手足口病已经使其成为备受关注的公共卫生问题。

研究表明,手足口病存在明显的空间异质性和空间结构性,探讨手足口病的时空流行病学特征对于追踪时空流行暴发点和制定区域化防控措施均具有重要的理论与现实意义<sup>[7]</sup>。目前对于手足口病的空间分析主要集中在省或者县行政尺度上<sup>[8-9]</sup>,但在实际工作中负责手足口病防控工作的业务单位一般是市级或县级 CDC,仅了解手足口病在县与县之间的时空流行动态是不够的。还需进一步阐明其在更小的空间尺度上(如街道、乡镇甚至任意空间网格)时空流行动态特征,以便在新一轮手足口病暴发时,市级或县级 CDC 及时锁定高发区域,制定相应的防控措施。本研究运用空间地理统计学方法,对山东省 2010 年区(县)手足口病发病率进行降尺度插值,得到乡镇手足口病发病率,以探究手足口病在乡镇尺度上的空间分布模式,为各级 CDC 制定防控措施和分配医疗资源提供参考依据。

### 资料与方法

1. 数据与处理:数据来源于中国疾病预防控制中心信息系统,收集 2010 年山东省各乡镇每月的手足口病发病数,统计山东省 108 个区(县)的 2010 年手足口病发病数,将发病数与 2010 年山东省人口数据相结合,根据公式(1)计算出山东省区(县)手足口病发病率。

$$\text{发病率} = \frac{\text{发病数}}{\text{总人口数}} \times 100\ 000 \quad (1)$$

2. 方法与实现:本文用到的是地理统计中降尺度插值的面到面泊松克里格方法,该方法在降尺度插值时考虑了地理单元内部的不均匀性,即区(县)

和乡镇的内部异质性(包括行政区形状、面积、人口数量及分布的不均匀性),将区(县)发病率降尺度插值到乡镇发病率。

(1) 乡镇发病率估计:待估计的乡镇  $v_\alpha$  的发病率是已获取的区(县)发病率  $z(v_\alpha)$  的线性加和<sup>[10]</sup>:

$$r_{PK}(v_\alpha) = \sum_{i=1}^K \lambda_i(v_\alpha)z(v_i) \quad (2)$$

其中,  $\lambda_i(v_\alpha)$  是估计  $v_\alpha$  处发病风险时区(县)发病率  $z(v_i)$  作用的权重。

(2) 发病率权重:Goovaerts 指出在进行半方差求解和克里格插值时,需要考虑地理单元的异质性,权重  $\lambda_i(v_\alpha)$  为克里格方程组的解<sup>[10]</sup>:

$$\sum_{j=1}^K \lambda_j(v_\alpha) \left[ C_R(v_i, v_\alpha) + \delta_{ij} \frac{m^*}{n(v_\alpha)} \right] + \mu(v_\alpha) = C_R(v_i, v_\alpha) \quad i=1, \dots, K \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^K \lambda_j(v_\alpha) = 1$$

式中,  $\delta_{ij}=1, i=j; \delta_{ij}=0, i \neq j; m^*$  为地理单元基于人口权重的发病率均值;  $C_R(v_i, v_\alpha) = Cov\{Z(v_i), Z(v_j)\}$  为面到面之间的协方差。

(3) 发病率之间的协方差:面到面协方差  $C_R(v_i, v_\alpha) = Cov\{Z(v_i), Z(v_j)\}$  是由面  $v_i, v_j$  离散化后有限点尺度协方差  $C(h)$  的均值估计<sup>[10]</sup>

$$C_R(v_i, v_j) = \frac{1}{\sum_{s=1}^{P_i} \sum_{s'=1}^{P_j} \omega_{ss'}} \sum_{s=1}^{P_i} \sum_{s'=1}^{P_j} \omega_{ss'} C(u_s, u_{s'}) \quad (4)$$

式中,  $P_i, P_j$  是两个面  $v_i$  和  $v_j$  各自离散化点的数量;权重  $\omega_{ss'}$  是反映离散化点的质心  $u_s$  和  $u_{s'}$  代表的网格内人口规模:

$$\omega_{ss'} = n(u_s) \times n(u_{s'})$$

$$\sum_{s=1}^{P_i} n(u_s) = n(v_i) \quad \sum_{s'=1}^{P_j} n(u_{s'}) = n(v_j) \quad (5)$$

根据协方差与半方差之间的关系:  $\gamma_R(h) = C_R(0) - C_R(h)$ , Monestiez 等<sup>[11-12]</sup> 估计发病率半方差的公式为:

$$\gamma_R(h) = \frac{1}{2 \sum_{\alpha=1}^{N(h)} \frac{n(u_\alpha)n(u_\alpha+h)}{n(u_\alpha) + n(u_\alpha+h)}} \sum_{\alpha=1}^{N(h)} \left\{ \frac{n(u_\alpha)n(u_\alpha+h)}{n(u_\alpha) + n(u_\alpha+h)} [z(u_\alpha) - z(u_\alpha+h)]^2 - m^* \right\} \quad (6)$$

由于乡镇的发病率未知,因此无法直接求得半方差  $\gamma_R(h) = C_R(0) - C_R(h)$  的值,需要对区(县)发病率数据拟合得到经验半方差函数,通过正则化派生出点尺度半方差<sup>[13-14]</sup>,即去卷积过程。

## 结果

1. 手足口病发病率空间分布:运用地理信息系统(GIS)将公式(1)计算的山东省各区(县)和乡镇的发病率进行空间可视化,得到发病率的空间分布(图1)。

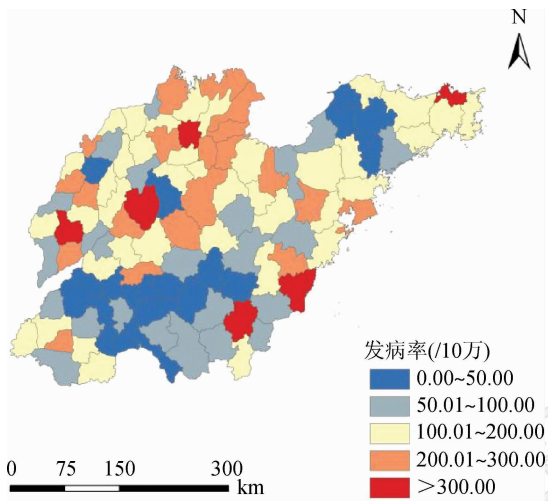


图1 2010年山东省区(县)手足口病发病率

从图1可见,有6个区(县)的手足口病发病率>300/10万,城区是手足口病的高发区(分别为日照市、聊城市、临沂市、济南市、滨州市和威海市),分布在山东省东南部和西北部,中部无高发区出现。山东省地形总体是中部山地突起,西南、西北低洼平坦,东部缓丘起伏,这与手足口病发病率的高低分布呈现一定的对应关系,即平原地区手足口病的发病率高于山区(图2)。因此,手足口病的发病率与地形、人口密度关系密切,平原地区、人口数量大、人口密度高、流动性强,便于疾病生长和传播。

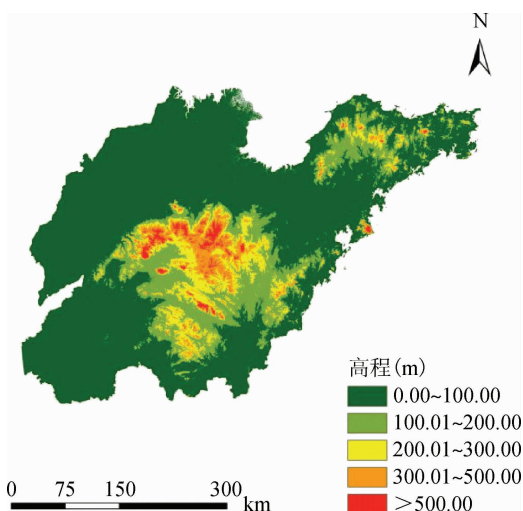


图2 山东省高程图(海拔高低)

2. 乡镇尺度变差函数:根据乡镇尺度变差函数求解原理,应用R语言编写迭代程序,得出去卷积过程拟合曲线(图3)。

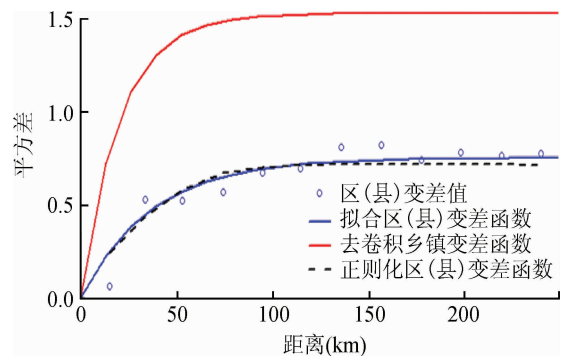


图3 去卷积过程拟合曲线

区(县)尺度和乡镇尺度变差函数各参数见表1。变差函数所用模型为高斯模型(Exp),其中,区(县)尺度变差函数的自相关距离(变程)为36.83 km,基台值为0.75;乡镇尺度变差函数的自相关距离(变程)为20.38 km,基台值为1.53。在变程范围内,手足口病之间空间上具有相关性,大于变程范围,空间上不相关。

表1 区(县)尺度和乡镇尺度变差函数

项目	模型	基台值	变程(km)
区(县)尺度	Exp	0.75	36.83
乡镇尺度	Exp	1.53	20.38

从变程值可以看出,区(县)之间的空间相关距离约为36.38 km,而乡镇之间的空间相关距离约为20.38 km。对108个区(县)和1 655个乡镇的行政范围跨度进行统计,如表2所示,区(县)行政范围跨度≤36.83 km的只有16个,在区(县)中的构成比仅为14.81%;而>36.83 km的有92个,构成比为85.19%;大部分区(县)的行政范围大于相关性距离,这表明手足口病跨区(县)传播能力较弱;乡镇行政范围跨度≤20.38 km的有1 595个,在乡镇中构成比为96.37%;而>20.38 km的只有60个,仅占3.63%;大部分乡镇的行政范围小于相关性距离,这表明手足口病的发病在乡镇具有较强的空间聚集性,传播能力较强。

表2 区(县)和乡镇行政范围跨度及构成比

行政单元	跨度(km)	个数	构成比(%)
区(县)	>36.83	92	85.19
	≤36.83	16	14.81
乡镇	>20.38	60	3.63
	≤20.38	1 595	96.37

3. 发病率空间分布估计:得到变差函数后,根据公式(2),将区(县)手足口病发病率降尺度插值得到乡镇手足口病发病率;将乡镇尺度估计的发病率按照人口加权至区(县)尺度,得到区(县)手足口病发病率估计值。见图4。

2010年山东省手足口病区(县)发病率估计值-实际值散点图(图5)。发病率估计值和实际值满足线性方程  $y=1.053 1x, R^2=0.99$ ,不同尺度之间发病率保持一致。通过区(县)手足口病发病率插值得到的乡镇手足口病发病率,对各区(县)内手足口病发病率空间分布的差异性给出估计,当乡镇发病率实际值缺失时,可用降尺度插值的方法获得更高分辨率的发病率空间分布。

### 讨 论

手足口病发病率的逐年增长使其成为备受关注的公共健康问题。面面泊松克里格降尺度方法能够被有效地应用于手足口病的空间制图中,为公共健康发病率高分辨率制图提供了一种新的方法。泊松分布需要假设发生时间之间的独立性,手足口病是发生于低龄儿童的传染性疾病,而低龄儿童的空间活动范围相对较小,通常在一公里至数公里范围之内,在乡镇尺度上可近似保证各乡镇之间发病独立性。本文方法在计算时需要先对乡镇、区(县)面域进行格网离散化处理,其分辨率为  $\geq 1$  km 以增加格网之间的独立性。本文研究的面到面泊松克里格降尺度插值方法对于疾病的空间分布研究具有良好效果,可应用到多种疾病插值中<sup>[10,13,15]</sup>。在降尺度的

研究中,一些学者将研究的地理单元(如区/县)由它们的质心所替代,假设所有的地理单元都有相同的形状和大小<sup>[16-19]</sup>。这种假设没有考虑地理单元内部的差异性,增加了估计的误差。泊松克里格方法在求解权重的方程中考虑了地区人口的差异,将人口的分布融合到疾病的空间分布中,更具有社会意义。本研究力求抓住乡镇发病率潜在的空间模式,能在乡镇尺度上应对手足口病的暴发提供参考。

综上所述,本研究通过考虑人口空间分布,利用地理统计中克里格插值方法将区(县)手足口病发病率降尺度插值到乡镇发病率,主要结论为:①手足口病的发病率与地形有关,平原地区发病率高于山区;与人口密度和流动性有关,城区是手足口病高发区;②手足口病发病率具有区域化变量的规律,区(县)之间的手足口病自相关距离为 36.83 km;乡镇之间手足口病自相关距离为 20.38 km;距离越近,发病率越接近,超过一定范围则不相关。因此,在某一乡镇暴发手足口病时,有关部门可重点针对暴发区 20.38 km 范围内的地区进行重点监控,着重分配治疗药物等医疗资源;③降尺度泊松克里格插值可有效估计疾病发病率,可以在保持区(县)手足口病发病率一致性的前提下,考虑乡镇人口分布的差异进行降尺度插值。使得政府及 CDC 可以把握到手足口病发病率在乡镇级别上的空间分布模式,按照手足口病发病率的大小对各乡镇采取不同程度的防控措施。

志谢 感谢中国科学院资源环境科学数据中心提供人口空间分布公里格网数据  
利益冲突 无

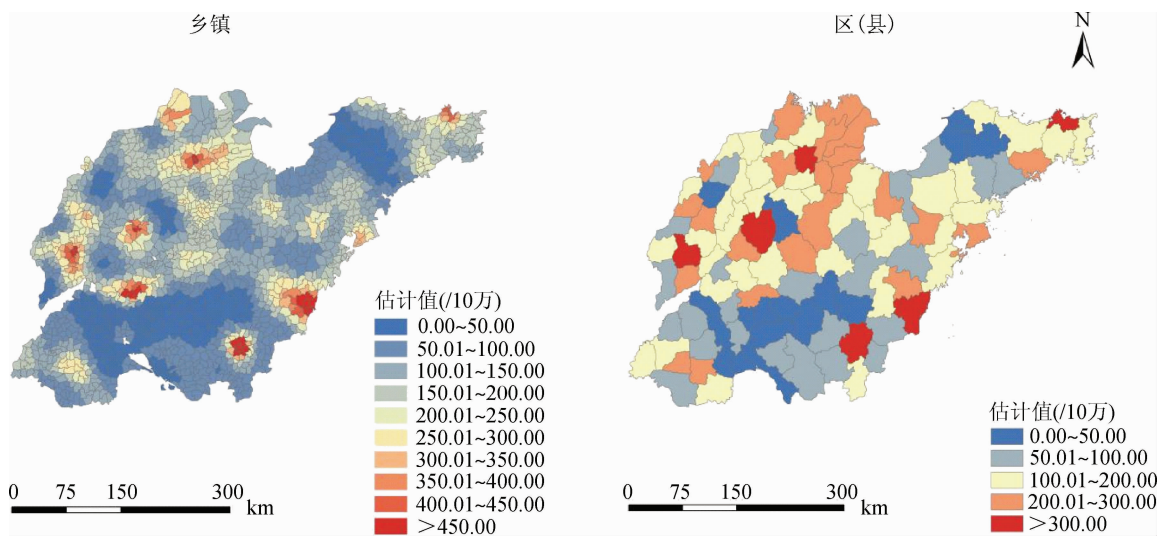


图4 2010年山东省手足口病发病率估计值

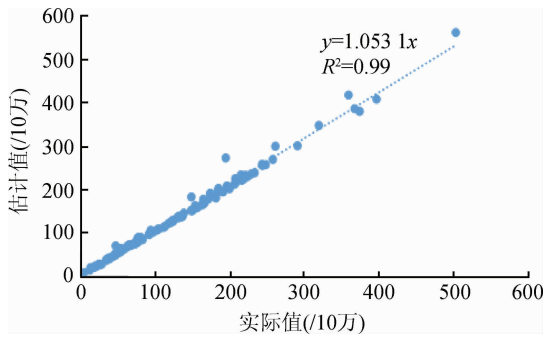


图5 2010年山东省手足口病区(县)发病率估计值-实际值散点图

参 考 文 献

[1] 杨芳,于石成,张菊英,等. 2008—2011年我国大陆地区重症手足口病流行特征分析[J]. 疾病监测, 2013, 28(11): 888-893. DOI: 10.3784/j.issn.1003-9961.2013.11.006.  
Yang F, Yu SC, Zhang JY, et al. Epidemiology of severe hand foot and mouth disease in the mainland of China, 2008-2011[J]. Dis Surveill, 2013, 28(11): 888-893. DOI: 10.3784/j.issn.1003-9961.2013.11.006.

[2] 张进,史永林,吴家兵,等. 安徽省2008—2012年手足口病流行病学及病原学特征分析[J]. 中华疾病控制杂志, 2014, 18(6): 497-500.  
Zhang J, Shi YL, Wu JB, et al. Epidemiology and etiology of hand-foot-mouth disease in Anhui province, 2008-2012[J]. Chin J Dis Control Prev, 2014, 18(6): 497-500.

[3] 沙爱龙,刘颖. 手足口病的研究概况[J]. 生命科学仪器, 2007, 5(11): 13-16. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7929.2007.11.003.  
Sha AL, Liu Y. The general research situation of Hand foot mouth disease[J]. Life Sci Instrum, 2007, 5(11): 13-16. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7929.2007.11.003.

[4] 胡跃华,肖革新,郭莹,等. 2008—2011年中国大陆手足口病流行特征分析[J]. 中华疾病控制杂志, 2014, 18(8): 693-697, 747.  
Hu YH, Xiao GX, Guo Y, et al. The epidemic features of the hand, foot, and mouth disease during 2008-2011 in China[J]. Chin J Dis Control Prev, 2014, 18(8): 693-697, 747.

[5] 靳妍,张静,孙军玲,等. 2011年中国大陆手足口病流行特征分析[J]. 疾病监测, 2012, 27(9): 676-679. DOI: 10.3784/j.issn.1003-9961.2012.09.003.  
Jin Y, Zhang J, Sun JL, et al. Epidemiology of hand, foot and mouth disease in mainland of China, 2011[J]. Dis Surveill, 2012, 27(9): 676-679. DOI: 10.3784/j.issn.1003-9961.2012.09.003.

[6] Hu MG, Li ZJ, Wang JF, et al. Determinants of the incidence of hand, foot and mouth disease in China using geographically weighted regression models[J]. PLoS One, 2012, 7(6): e38978. DOI: 10.1371/journal.pone.0038978.

[7] 张冰冰. 小空间尺度上手足口病时空流行病学研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.  
Zhang BB. Spatial-temporal epidemiology of HFMD on a smaller scale[D]. Ji'nan: Shandong University, 2013.

[8] 肖革新,胡跃华,马家奇,等. 中国2008—2011年手足口病空间

聚集性及变化趋势研究[J]. 中华流行病学杂志, 2012, 33(8): 808-812. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.08.012.

Xiao GX, Hu YH, Ma JQ, et al. Spatial clustering and changing trend of hand-foot-mouth disease during 2008-2011 in China[J]. Chin J Epidemiol, 2012, 33(8): 808-812. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2012.08.012.

[9] Deng T, Huang Y, Yu SC, et al. Spatial-temporal clusters and risk factors of hand, foot, and mouth disease at the district level in Guangdong province, China [J]. PLoS One, 2013, 8(2): e56943. DOI: 10.1371/journal.pone.0056943.

[10] Goovaerts P. Geostatistical analysis of disease data: visualization and propagation of spatial uncertainty in cancer mortality risk using Poisson Kriging and p-field simulation [J]. Int J Health Geogr, 2006, 5(1): 7. DOI: 10.1186/1476-072X-5-7.

[11] Monestiez P, Dubroca L, Bonnin E, et al. Comparison of model based geostatistical methods in ecology: application to fin whale spatial distribution in northwestern Mediterranean Sea [M]// Leuangthong O, Deutsch CV. Geostatistics Banff 2004. Quantitative Geology and Geostatistics. Dordrecht: Springer, 2005: 777-786. DOI: 10.1007/978-1-4020-3610-1\_81.

[12] Monestiez P, Dubroca L, Bonnin E, et al. Geostatistical modelling of spatial distribution of *Balaenoptera physalus* in the Northwestern Mediterranean Sea from sparse count data and heterogeneous observation efforts [J]. Ecol Modell, 2006, 193(3/4): 615-628. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2005.08.042.

[13] Goovaerts P. Kriging and semivariogram deconvolution in the presence of irregular geographical units [J]. Math Geosci, 2008, 40(1): 101-128. DOI: 10.1007/s11004-007-9129-1.

[14] 梁永忠,葛咏,王江浩. 基于地理统计学的尺度下推方法综述 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(1): 1-7. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.01.0001.  
Liang YZ, Ge Y, Wang JH. Review of Geostatistical-based Downscaling [J]. Remote Sensing Technology & Application, 2015, 30(1): 1-7. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.01.0001.

[15] Goovaerts P. Geostatistical analysis of disease data: accounting for spatial support and population density in the isopleth mapping of cancer mortality risk using area-to-point Poisson Kriging [J]. Int J Health Geogr, 2006, 5(1): 52. DOI: 10.1186/1476-072X-5-52.

[16] Cressie N. Statistics for spatial data [M]. New York: Wiley, 1993.

[17] Oliver MA, Webster R, Lajaunie C, et al. Binomial cokriging for estimating and mapping the risk of childhood cancer [J]. Ima J Math Appl Med Biol, 1998, 15(3): 279-297. DOI: https://doi.org/10.1093/imammb/15.3.279.

[18] Christakos G, Lai JJ. A study of the breast cancer dynamics in North Carolina. [J]. Soc Sci Med, 1997, 45(10): 1503-1517. DOI: 10.1016/S0277-9536(97)00080-4.

[19] Christakos G, Serre ML. Spatiotemporal analysis of environmental exposure-health effect associations [J]. J Expo Anal Environ Epidemiol, 2000, 10(2): 168. DOI: 10.1038/sj.jea.7500077.

(收稿日期: 2016-12-08)

(本文编辑: 斗智)