文章编号:1671-8860(2013)03-0334-05　　**文献标志码**:A

高分辨率人口空气污染暴露 GIS 空间区划研究

邹　滨[1]　彭　芬[1]　焦利民[2]　翁　敏[2]

(1　中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室，地球科学与信息物理学院，长沙市麓山南路 932 号，410083)
(2　武汉大学资源与环境科学学院，武汉市珞喻路 129 号，430079)

摘　要:集成大气污染扩散模型、GIS 空间分析及人口动态制图模型(PDMM)实现了高空间分辨率空气污染浓度和人口空间分布模拟，通过构建人口空气污染暴露相对风险评价模型实现了人口空气污染暴露程度的空间格局划分。研究结果显示，空气污染浓度与人口空气污染暴露相对风险评价模型两种方法生成的人口空气污染暴露评估结果差异较大。研究结果揭示，前者在区域人口空气污染暴露评估中存在缺陷的同时(如无人居住的 SO_2 高浓度区被误判为人口 SO_2 污染暴露高风险区)，也肯定了基于后者得到的人口空气污染暴露空间区划结果在区域空气污染暴露风险调控政策制定过程中的重要理论意义与实践价值。

关键词:空气污染;人口暴露;风险评估;空间分析
中图法分类号:P208

研究表明，空气污染可直接或通过破坏工农业等方式对人体健康造成间接影响[1]。空气污染浓度作为目前普遍使用的空气污染暴露强度表征方法，并不能真正实现测度(如无人居住的高空气污染浓度区往往不存在人口空气污染暴露风险)，对此，文献[2-5]进行了相关的研究。然而，上述研究仍存在以下缺陷:① 空气污染数据多来源于有限、离散空气质量观测站点，生成的趋势面空间精度低;② 人口空间分布采用某一行政级别空间单元的平均人口密度表征，与实际情况不符;③评估结果仅可以反映空间单元中各网格(空间尺度)暴露强度的绝对值大小，而无法区分该网格在整个空间单元中的重要性。近年来，大气污染扩散模拟和 GIS 空间插值的发展弥补了空气质量观测揭示区域内部空气污染浓度微观变化的缺陷[6]。人口动态制图模型(population dynamic mapping model，PDMM)为高精度人口空间分布格局的生成提供了理论与技术支撑[7]。本文在运用大气污染扩散模拟、PDMM、GIS 技术提高空气污染浓度趋势面和人口空间分布格局精度的基础上，构建了人口空气污染暴露相对风险评价模型，开展高分辨率人口空气污染暴露空间区划研究。

1　研究区域与方法

1.1　研究区概况

本文选取美国 Texas 州 Tarrant 县(工业和交通较发达)作为实验区，全县共有街区 1 033 个，面积 2 324 km^2。2000 年，Dallas-Fort Worth 地区冬季天空的能见度与 SO_2 污染相关[7]，因此，本文以 SO_2 为对象开展人口空气污染暴露空间区划实证分析。

1.2　研究方法

如图 1 所示，本文主要涉及大气污染扩散模拟、GIS 空间插值、人口空间分布模拟以及人口空气污染暴露评估建模 4 个子过程。

1.2.1　空气污染扩散模拟

AERMOD (American meteorological society/ environmental protection agency regulatory model) 模型是 US EPA 推荐和中国环境保护部规定的环境影响评估大气污染扩散模拟模式，主要用于复合排放源(点源、线源、面源和体源)及空气污染浓度预测[8]。SO_2 年均浓度的模拟过程参见文献[9]。模拟过程中的 SO_2 排放数据来源于

收稿日期:2012-12-12。
项目来源:国家自然科学基金资助项目(41201384);湖南省自然科学基金资助项目 (12JJ3034);国家测绘地理信息局重点实验室研究基金联合资助项目(GCWD201104)。

2002 年美国空气污染排放数据库(http://www.epa.gov/ttn/chief/net/2002-inventory.html)。

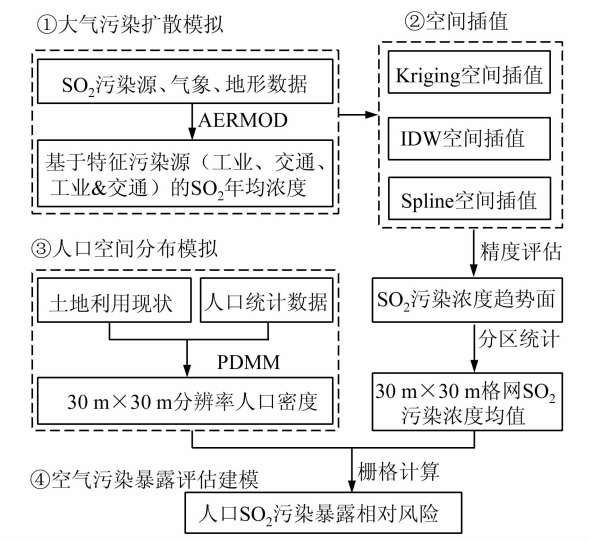

图 1　研究技术路线图

Fig. 1　Flow Chart of the Study

1.2.2　空间插值

AERMOD 模拟结果是离散的空气污染浓度点数据,空间插值方法的选择会影响趋势面生成的精度[10]。鉴于研究区 SO_2 观测数据有限的特殊情况,针对克里格(Kriging)、反权距离(IDW)、样条曲线(Spline)三种常见的空间插值方法设计了基于抽样数据(抽样点分布均匀,且顾及极端浓度值,数量为 60)的插值精度交叉验证方案,采用表 1 中的统计度量参数评价,确定了适合于研究区空气污染浓度模拟结果的空间插值方法 IDW,生成了空间分辨率为 30 m×30 m 的 SO_2 年均污染趋势面。

表 1　空间插值方法可靠性统计评价结果

Tab. 1　Statistical Evaluation Results of the Reliability of Spatial Interpolation Methods

统计度量参数	插值方法		
	Kriging	IDW	Spline
抽样数目(N)	60	60	60
均方根误差(RMSE)	0.259	0.257	0.552
平均绝对误差(MAE)	0.127	0.123	0.283
平均绝对误差百分比/%	36.48	38.05	152.87
最大绝对误差(MaxAE)	1.172	1.121	2.391
标准差(SD)	0.592	0.585	1.391
F 值	0.150	0.030	0.802
显著性(P=0.01)	0.903	0.959	0.372

1.2.3　人口空间分布模拟

针对基于行政空间单元平均人口密度方法生成的人口空间分布格局与空间单元内部人口空间分布实况差异较大的缺陷(如无人居住的水体往往被错误地分配一定数量的人口),本文采用组合土地利用/覆被数据与 PDMM 的方法开展高精度人口空间分布模拟,包括土地利用/覆被再分类和基于 PDMM 的人口空间位置分配两个子过程。前者是指依据人口载负能力将土地利用/覆被数据分为 4 种基本城市用地类型[11]:高度城市化区、低度城市化区、非城市区和无人区。后者指运用土地利用/覆被再分类结果重新获取精细空间单元人口密度的过程。PDMM 的基本原理是基于面内插方法将一组地理源尺度数据转换成一组基于辅助信息的目标区数据,具体计算过程参见文献[12]。

1.2.4　人口空气污染暴露评估建模

如前所述,传统人口空气污染暴露评估模型 EPC(E(暴露量)=P(人口密度)×C(污染物浓度))可以在一定程度上量化空间单元内的人口空气污染暴露强度[2],但 EPC 在区域空气污染健康危害风险防治方面有一定的缺陷,如无法直接区分某空间子单元内人口空气污染暴露相对于空间单元整体的严重程度。为此,本研究构建了人口空气污染暴露相对风险评价模型:

$$R_{ij} = \mathrm{pop}_{udc} \times C_{ij} / \left(\sum_{i=1}^{n} \mathrm{pop}_{udc} \times C_{ij} / n \right)$$

式中,i 是格网编号;j 是空气污染源特征类型(如工业污染源);R_{ij} 表示 j 类污染源贡献下格网 i 的人口空气污染暴露相对风险;pop_{udc} 是空间单元 d 中城市用地类型 u 单个格网的人口数量;C_{ij} 是 j 类污染源作用下格网 i 的污染浓度值;n 是空间单元 c 包含的总格网数。

2　结果分析

2.1　SO_2 年均浓度空间分布格局

图 2 是 Tarrant 县 2000 年基于特征污染源的 SO_2 年均浓度趋势面。如图 2(a)所示,工业污染源导致的 SO_2 高浓度区主要分布在该县东南部角落,其他大部分区域 SO_2 浓度均较低(小于0.30 $\mu g/m^3$)。相对而言,图 2(b)表明交通污染源所造成的同期 SO_2 浓度较高,且空间分布格局更为复杂,高浓度区主要分布在高速公路周围和城市主干道交叉口。图 2(c)与图 2(a)、2(b)的对比表明,工业与交通复合污染源(以下简称复合污染源)作用下的 SO_2 高浓度区主要集聚在该县中心城区(0.50～1.00 $\mu g/m^3$,1.00～1.50 $\mu g/m^3$)和东南部角落(0.50～1.00 $\mu g/m^3$,1.00～1.50 $\mu g/m^3$),与交通污染源作用下的同期 SO_2 浓度空间分布特征极为相似,但与工业污染源相比呈现出

明显差异。

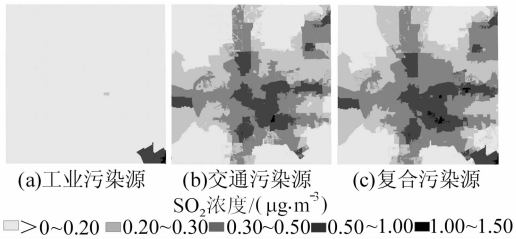

图2 特征污染源输入下Tarrant县2000年SO_2年均模拟浓度

Fig. 2 Source-Specific Simulated Annual SO_2 Concentration for Tarrant County in 2000

2.2 人口空间分布格局

图3为Tarrant县2000年街区尺度平均人口密度图和30 m × 30 m格网分辨率人口密度图。图3(a)和3(b)的对比表明,基于PDMM的人口空间分布模拟方法获得了相对于街区尺度更为精细的人口空间分布格局,在县南部、西北部和东北部边界地区十分明显。

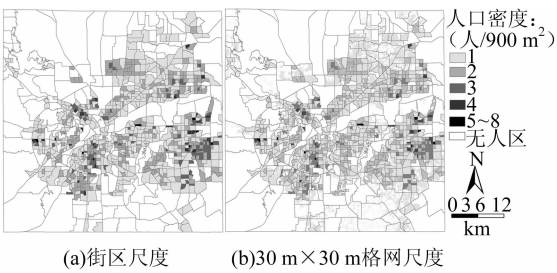

图3 不同空间尺度下Tarrant县2000年人口密度空间格局

Fig. 3 Spatial Pattern of Population Density Under Different Scales for Tarrant County in 2000

2.3 人口SO_2污染暴露相对风险空间分布格局

图4是Tarrant县2000年基于特征污染源的人口SO_2污染暴露相对风险评估结果。图中格网的相对风险值小于、等于或大于1.00分别表示格网人口SO_2污染暴露相对低于、等于或高于全县平均水平。图4(a)表明,工业污染源引起的人口SO_2污染暴露相对风险空间分布特征明显,高暴露风险区主要集聚在东南部角落(风险值:6.00~17.00)和中心城区(风险值:2.50~6.00, 6.00~17.00)。相对图4(a)而言,图4(b)表明交通污染源作用下的同期人口SO_2污染暴露相对风险空间分布均匀,高暴露风险区主要分布在州际高速和城市主干道周围(风险值:1.00~2.50,2.50~6.0,仅极个别道路交叉口呈现出极端暴露风险(风险值:6.00~17.00)。图4(c)与图4(a)、4(b)的对比表明,复合污染源作用下的人口SO_2污染暴露相对风险空间分布格局与同期交通污染源作用下的基本一致(风险值:1.00~2.50,2.50~6.0主要集中在中心城区),但与同期工业污染源作用下的呈现出明显的差异,极端暴露风险区(风险值:6.00~17.00)范围缩减。

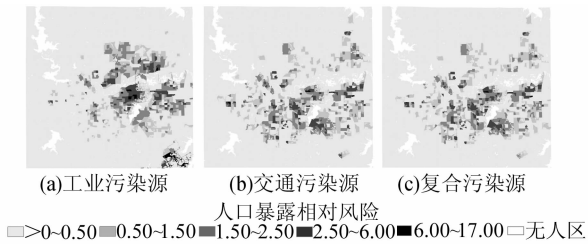

图4 特征污染源输入下Tarrant县2000年人口SO_2污染暴露相对风险

Fig. 4 Source-Specific Population Relative Risks for Exposure to SO_2 Pollution for Tarrant County in 2000

图4和图2的对比还表明,基于SO_2浓度生成的人口SO_2污染暴露空间分区结果与采用人口空气污染暴露相对风险评价模型获取的结果之间的差异较大。图2(c)所示的复合污染源作用下的人口空气污染高暴露区(浓度:0.50~1.00 μg/m^3)高度积聚在中心城区和东南部角落,但图4(c)中的高暴露风险区(风险值:2.50~6.0)在全县范围内分布均匀,未呈现出明显的空间积聚特征。

2.4 人口SO_2污染暴露风险空间区划差异识别

§2.2与§2.3表明,受人口空间分布不均的影响,空气污染浓度与人口空气污染暴露相对风险评价模型生成的区域人口空气污染暴露空间区划结果可能存在明显差异。对此,本研究选取人口SO_2污染暴露10%高风险区(即格网SO_2浓度值和相对风险值分别从高到低排在前10%的地区)进一步分析了此差异,结果如图5和表2所示。

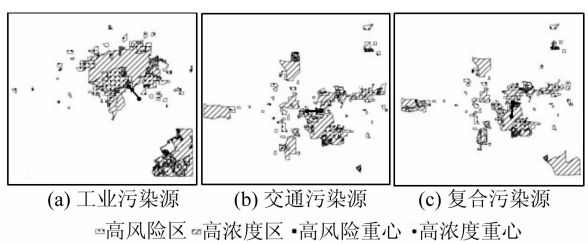

图5 特征污染源输入下Tarrant县2000年人口SO_2污染暴露高风险区和SO_2高浓度区空间格局比较

Fig. 5 Comparison of Source-Specific Spatial Patterns Between Zones with High Population Exposure to SO_2 and Those with High SO_2 Concentration for Tarrant County in 2000

图5和表2表明,空气污染浓度与人口空气

污染暴露相对风险评价模型两种方法生成的人口 SO_2 污染暴露 10%高风险区在面积大小、空间位置、几何重心等方面都存在明显差异。如在各类污染源作用下,上述两种方法所获取的人口 SO_2 污染暴露 10%高风险区面积相对差异均大于 50%,重心点间的距离也均偏移在 3 km 以上。

表 2　人口 SO_2 污染暴露 10%高风险区统计测度

Tab. 2　Statistic Measures of Top 10 Percent Area of Population Exposure to SO_2 Produced

污染源类型	基于空气污染浓度方法		基于人口空气污染暴露相对风险评价模型方法		面积变化率/%	重心间距/km
	高风险区面积 S_a/km^2	所占研究区面积比率/%	高风险区面积 S_b/km^2	所占研究区面积比率/%		
点污染源	217.28	9.35	84.91	3.65	60.92	3.72
线污染源	155.00	6.67	67.01	2.88	56.77	3.61
点 & 线污染源	184.58	7.94	65.40	2.81	64.57	3.92

注:面积变化率 $= |(S_b - S_a)/S_a| \times 100\%$ 。

3　结　语

本研究构建了人口空气污染暴露相对风险评价模型,并开展了模型在人口空气污染暴露空间区划中的实证研究。结果表明:① 大气污染扩散模拟模型、GIS 空间分析、PDMM 技术以及人口空气污染暴露相对风险评价模型集成方案可以在精细空间尺度较好地实现人口空气污染暴露风险空间区划;② 与空气污染浓度测度方法相比,人口空气污染污染暴露相对风险评价模型在准确揭示人口空气污染暴露潜在健康风险的同时,还可以直观测度各空间格网在空间单元整体人口空气污染暴露中的贡献大小;③ 开展基于特征污染源的人口空气污染暴露评估有利于直接探明空间格网中人口空气污染暴露的主导因素,辅助制定面向污染源的空气污染防控政策。与以往研究相比,本文在提高人口空气污染暴露评估空间分辨率的同时,还克服了传统人口空气污染暴露均值模型无法直接区分单一空间格网人口空气污染暴露相对整体风险大小的缺陷。本研究未深入探讨空间区划分级标准改变可能造成的评估结果的不确定性等问题,这有待进一步深入研究。

参　考　文　献

[1] 阚海东,陈秉衡. 我国部分城市大气污染对健康影响的研究 10 年回顾[J]. 中华预防医学杂志, 2002, 36(1): 59-61

[2] Kousa A, Oglesby L, Koistinen K, et al. Exposure Chain of Urban Air $PM_{2.5}$ Associations Between Ambient Fixed Site, Residential Outdoor, Indoor, Workplace and Personal Exposures in Four European Cities in the EXPOLIS2 Study[J]. Atmospheric Environment , 2002, 36: 3 031-3 039

[3] 伏晴艳, 阚海东. 城市大气污染健康危险度评价的方法[J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(6): 414-416

[4] Zou B, Wilson J G, Zhan F B, et al. Spatially Differentiated and Source-Specific Population Exposure to Ambient Urban Air Pollution[J]. Atmospheric Environment , 2009, 43: 3 981-3 988

[5] 徐丙立,林珲,朱军,等. 面向珠三角空气污染模拟的虚拟地理环境系统研究[J]. 武汉大学学报・信息科学版,2009, 34(6): 636-640

[6] Sleeter R, Gould M. Geographic Information System Software to Remodel Population Data Using Dasymetric Mapping Methods[M]. Reston, Virginia: US Geological Survey, 2007

[7] McDade C, Tombach I, Seigneur C, et al. Study of the Relationship of Distant SO_2 Emissions to Dallas-Fort Worth Winter Haze[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, 50: 826-834

[8] 江磊,黄国忠,丁峰,等. 美国 AERMOD 模型与中国大气导则推荐模型点源比较[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 44-51

[9] Zou B, Zhan F B, Wilson J G, et al. Performance of AERMOD at Different Time Scales[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18:612-623

[10] 胡海,游涟,胡鹏,等. 数字高程模型内插方法的分析和选择[J]. 武汉大学学报・信息科学版,2011, 36(1): 82-85

[11] Alberto G, Larry C. Using Dasymetric Mapping to Identify Communities at Risk from Hazardous Waste Generation in San Antonio, Texas[J]. Urban Geography , 2010, 31(5): 623-64

[12] Mennis J. Generating Surface Models of Population Using Dasymetric Mapping[J]. The Professional Geographer, 2003, 55(1): 31-42

第一作者简介:邹滨,副教授,博士,研究方向为 GIS 时空建模和环境暴露风险评估。

E-mail:kyzoubin@yahoo.com.cn

GIS Aided Spatial Zoning of High-Resolution Population Exposure to Air Pollution

ZOU Bin[1] *PENG Fen*[1] *JIAO Limin*[2] *WENG Min*[2]

(1 Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-physics, Central South University, 932 South Lushan Road, Changsha 410083, China)

(2 School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: Through integrating atmospheric dispersion model, GIS spatial analysis and population dasymetric mapping model (PDMM), we firstly conducted high-resolution simulations of air pollution concentration and population spatial distribution. Then, a model for assessing population relative risks of air pollution exposure (MAPRRAPE) was proposed and implemented for spatial zoning of population exposure to SO_2 at various levels by taking Tarrant County as a case. The results show that the population exposure to SO_2 for Tarrant County in 2000 detected by air pollution concentration method obviously differs from those produced by MAPRRAPE. While the results disclose the defect of the air pollution concentration based population exposure, it thereby conversely confirms the significance of MAPRRAPE in decision making for preventing and controlling regional air pollution exposure.

Key words: air pollution; population exposure; risk assessment; spatial analysis

About the first author: ZOU Bin, associate professor, Ph. D, majors in GIS spatial-temporal modeling, environment exposure risk assessment.

E-mail: kyzoubin@yahoo.com.cn

(上接第310页)

A Heuristic Algorithm for Large Scale Vehicle Routing Problem

TU Wei[1,2] *LI Qingquan*[3,1,2] *FANG Zhixiang*[1,2]

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Engineering Research Center for Spatial-temporal Data Smart Acquisition and Application, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(3 Shenzhen Key Laboratory of Spatial-temporal Smart Sensing and Services, 3688 Nanhai Avenue, Shenzhen 518060, China)

Abstract: A heuristic algorithm integrating simulated annealing and Voronoi long edge guided optimization is proposed for large scale vehicle routing problem. The simulated annealing strategy is employed to accept some bad neighborhood solutions in local search. Voronoi long edge guides to improve the unreasonable local structure in routes. A large scale vehicle routing benchmark instances is designed to test the proposed algorithm. The results show that the proposed algorithm can provide high quality solution in a short time.

Key words: logistic; vehicle routing problem; simulated annealing; local search; Voronoi

About the first author: TU Wei, Ph. D candidate, majors in the logistic optimization and spatial-temporal data analysis.

E-mail: tuweiwhu@gmail.com