

基于 GIS 和大气数值模拟技术评估兰州市 PM₁₀ 的人群暴露水平

孙兆彬^{1,2}, 安兴琴^{2*}, 陶 燕³, 侯 青² (1.北京市气象台, 北京 100089; 2.中国气象科学研究院大气成分研究所, 北京 100081; 3.兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用 2001 年 1 月 1 日~31 日兰州市城区 PM₁₀ 月均观测浓度和 CMAQ 空气质量模式模拟出的 PM₁₀ 月均浓度, 基于 GIS 平台, 将污染物浓度与人口的空间分布图层相叠加, 并采用 PM₁₀ 人口加权算法, 定量评估了兰州市居民的颗粒物暴露水平, 并对应用这 2 套数据的评估结果进行了对比。结果表明, 与使用观测数据相比, 模拟的 PM₁₀ 浓度空间梯度较大, 模拟结果更加细致地展示了 PM₁₀ 浓度在兰州城区的分布, 同时 PM₁₀ 浓度的最小值和最大值跨度也较大。对比人口加权前后 PM₁₀ 浓度发现: 人口加权后, 从城区人口的空间分布来讲, 兰州市有较多的人口分布在污染较重的地区。

关键词: 兰州; PM₁₀; 数值模拟; 暴露水平

中图分类号: X503.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)10-1753-05

Assessment on population exposure levels of PM₁₀ in Lanzhou based on GIS and atmospheric numerical simulation technology. SUN Zhao-bin^{1,2}, AN Xing-qin^{2*}, TAO Yan³, HOU Qing² (1.Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089, China; 2.Institute for Atmospheric Composition Research, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3.College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China). *China Environmental Science*, 2012,32(10): 1753~1757

Abstract: The pollutant concentration layer and population spatial distribution layer in January 2001 were overlaid, based on monthly average PM₁₀ concentrations from measurements and CMAQ simulations. Then population exposure levels were calculated by the population-weighted PM₁₀ concentrations. Assessment results from these two different sets of data were also comparatively analyzed. The simulated PM₁₀ concentration gradient is larger than the observed one. The simulation provides more detailed spatial distribution of PM₁₀ concentrations as well as larger intervals between maxima and minima. Taking the factor of population weights into account, there are more people living in more polluted areas based on simulated PM₁₀ concentrations.

Key words: Lanzhou; PM₁₀; numerical simulation; exposure levels

据世界卫生组织估计,全世界范围城市空气污染造成每年约 80 万人死亡,寿命损失年减少约为 460 万^[1]。研究表明,颗粒物,尤其细颗粒物是对人体危害最大的一类污染物^[2]。

一个城市的大气污染浓度的空间分布是不均匀的,目前的流行病学研究中,人体污染物暴露水平的估计主要基于监测点的污染物浓度平均值,人口数据也是主要应用所研究城市的人口总数进行计算,忽视了污染物和人口在空间分布的非均一性和其本身固有的随时间变化的特点。Hoek 等^[3]研究发现,污染物空间分布均一的假设将使得暴露水平的估计产生误差,尤其是对

于有重要的局地污染源的污染物,此种误差将更大。城市内污染物的暴露水平的差异可能比城市间的污染物暴露水平差异还要大^[4]。解决此问题的方法之一,就是将研究区域内污染物检测站点的数据进行空间差值,从而得到污染物浓度的连续平面。人口数据不采用研究区域内的人口总数作为暴露人口,而是将人口模式空间数据或经过

收稿日期: 2012-01-06

基金项目: 国家“973”项目(2011CB403404);国家自然科学基金资助项目(41005087,41075102,40875086);北京市气象局业务研发专项(BMOYWYF2012001)

* 责任作者, 研究员, anxq@cams.cma.gov.cn

调查研究得到的人口空间数据进行插值,得到人口密度的连续平面.最后将污染物浓度与人口数据相叠加,求得人口加权浓度,进行人口暴露评估,这样在格点内不同数量的人口就暴露在大气污染物不同浓度下.此外还可以应用数值模式对大气污染物模拟结果代替站点差值来进行评估.近年来,空气质量模式不断发展,具有较高的时空分辨率,能够模拟出不同时段不同区域大气污染物分布状况^[5-10],因此在评估工作中,可以利用高分辨率空气质量模式,同时利用地面监测站点的数据进行资料同化,使得模拟结果更加准确,精细地评估不同区域污染物人体暴露水平.

兰州市特殊的盆地特征,造成河谷城市内气流通不畅,年静风频率达 60%左右,尤其冬季高达 74%以上,年均风速只有 0.76m/s^[11].静风、逆温及大气层结稳定造成兰州市的大气污染非常严重.大气污染物不但不会对人体健康造成损害^[12-15],而且存在着季节变化^[16],同时由此带来的经济损失也不容忽视^[17].本文应用 PM_{10} 站点插值浓度和数值模拟浓度评估兰州 PM_{10} 对人体健康的影响,并对 2 种评估方法得出的结论进行了比较.

1 研究方法

1.1 基于 GIS 技术和数值模式评估 PM_{10} 对人体健康的影响

1.1.1 监测站点分布 兰州 2001 年总悬浮颗粒物的数据由中国科学院-甘肃省科技合作项目提供,为 7 个测站的逐日的 TSP(总悬浮颗粒物)浓度资料.7 个空气质量监测站点均匀的分布在兰州城区,如图 1 所示.兰州城区包括西固区、城关区、安宁区和七里河区.由于这个项目没有对 PM_{10} 浓度进行直接监测,所以根据 Dockery 等^[18]的研究成果 $\text{PM}_{10} = \text{TSP} \times 0.55$ 来计算 PM_{10} 的浓度.

1.1.2 人口加权暴露浓度计算 基于 GIS 技术,首先计算将 7 个空气质量监测站获得的逐日的 PM_{10} 浓度数据的月平均浓度,然后空间插值,空间分辨率为 1km×1km.为了与大气可吸入颗粒物的空间分辨率相匹配,人口数据也用相同的方法插值为 1km×1km,利用 GIS 技术的空间信息分析功能,将插值后的人口图层与 PM_{10} 图层相叠加,

来分析不同 PM_{10} 浓度区间下的人口暴露水平.所用人口数据来自于美国哥伦比亚大学,国际地球科学信息网中心(<http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>).兰州城区的 4 个区都有很高的人口密度.由于特殊的自然地理条件,兰州的人口分布在一个狭窄的带状空间内,城关区的人口分布相对集中,其次为安宁区、七里河区、西固区.人口密度在 800~2200 人/km² 区间内共有 30 个网格,这些网格主要位于城关区的东部;人口密度大于 3700 人/km² 的网格主要分布在城关区的西部和安宁区,共有 213 个网格,站总网格数的 45%;在西固区和七里河区人口密度具有较大的空间梯度,人口密度从西南向东北逐渐递减,城关区的人口密度从东部向西部逐渐递减.本文计算了人口加权暴露水平(PWEL).

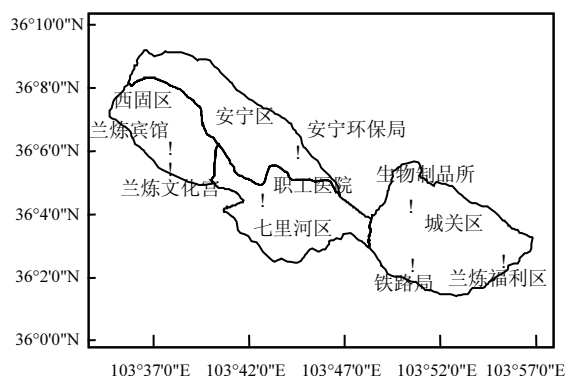


图 1 兰州城区大气总悬浮颗粒物监测站点分布

Fig.1 Total suspended particles (TSP) monitoring stations in Lanzhou urban areas

人口加权暴露浓度算法: $\text{PWEL} = \sum (P_i \times C_i) / P_i$. P_i 为该网格内的人口数, C_i 为该网格内大气污染物的浓度,分辨率为 1km×1km.

1.2 PM_{10} 站点监测数据的外推

利用 ArcMap 中的空间外推功能,空间外推方法采用是克里格插值(Kriging),这是一种基于地统计学的插值方法,给已知的样本点赋权重来计算未知点的预测值,权重不仅建立在已知点和预测点位置间距离的基础上,而且还要依据采样点的位置和采样点的值得到整体空间分布和排列.在样本点稀少,插值要素变化剧烈频繁的情况下克里格插值更具优势^[19].

1.3 PM₁₀ 的大气数值模拟

1.3.1 模式结构 Models-3 模式系统由 3 大部分组成,中尺度气象模式 MM5、排放模式系统 SMOKE 和通用多尺度空气质量模式系统 CMAQ.该模式对各种复杂尺度的物理、化学过程均具有较好的模拟结果,因此更适合研究兰州及周边复杂大气环流背景下污染物的区域传输和相互作用.其中 CMAQ 模块是其核心模块.采用 MM5 中尺度气象模式进行气象场模拟,MM5 气象背景场和边界条件由美国国家环境预测中心 1°×1°再分析资料提供(6h 间隔).气象场模拟结果由气象-化学界面处理器 MCIP 模块向模式提供所需时段的网格化气象资料,然后再输入到化学输送模式 CCTM 中,SMOKE 主要是处理排放源资料数据,将排放数据内插到模式网格点上,并将年排放资料转化为排放源强度.

1.3.2 模式参数设置 模式采用 2 层嵌套,中心点经纬度为 36.06°N、103.8°E,外层模拟区域采用 9km 的网格分辨率,网格点数为 67×58,内层模拟区域采用 3km 的网格分辨率,网格点数 82×70,垂直方向分为 20 层.

1.3.3 排放源清单 排放源清单和气象参数是空气质量模式的 2 类重要的输入数据,准确且及时更新的排放源数据是空气质量模式准确模拟和预报的必不可少的重要参数.众多研究表明,空气质量模式最大的不确定性在于排放源清单的不确定性^[20-21].目前,应用最广泛的 TRACE-P 清单是一个物种相对比较完整的排放清单,它的主要统计数据来自于亚洲国家的燃料消耗和排放情况,INTEX-B2006 排放清单是在 TRACE-P 清单的基础上,在 NASA 的国际化学传输实验-B 阶段(INTEX-B)资助下更新完善的一个新的大气污染源排放清单,INTEX-B2006 清单更新了中国大陆主要的人为排放^[22].本文所使用的排放源清单即为 INTEX-B2006,清单的分辨率为 0.5°×0.5°,并在此基础上更新了兰州当地污染源,城市排放源清单的分辨率为 1km×1km.

2 结果

2.1 站点插值浓度与模拟浓度

从图 2(a)中可以看出,城关区具有较重的大气颗粒物污染,超出了国家空气质量二级标准.王希波等^[23]利用兰州市 2000~2001 年污染源数据分析表明,TSP 年平均浓度的空间差异与社会人文指标存在较高的相关关系.城关区人口密度、绿地面积比例均居各区之首,其年均 TSP 浓度也显著超过其他城区.影响兰州市大气环境质量的污染物中,TSP 是最主要的污染物.

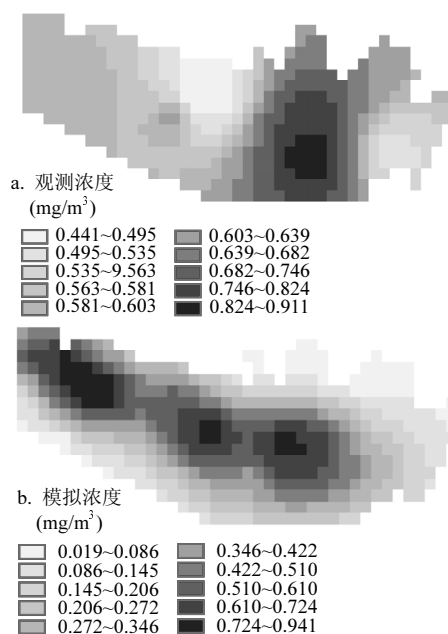


图2 2001年1月兰州PM₁₀观测浓度和模拟浓度分布
Fig.2 PM₁₀ measurement concentration and simulation concentration distribution in the Lanzhou urban areas in January 2000(1km×1km)

从图 2(b)中可以看出,兰州城区 PM₁₀ 浓度存在 3 个大值中心,分别位于西固区东北部、安宁区和七里河区交界处、城关区的西部.PM₁₀ 浓度空间梯度较大,更好地说明了 PM₁₀ 污染的分布特点,且 PM₁₀ 浓度的最小值和最大值跨度较大,数值分布合理,基于地理信息系统的插值结果,最小值所在区域范围较小,且均在 0.4mg/m³ 之上.

通过图 2(a)和图 2(b)的对比可知,监测点数据的空间外推,和模型方法得到的空间分布,有明显差异.兰州市 2002 年大气污染源调查资料表明:兰州城区虽然高架源不多,但源强却很大,低架源分布比较分散.从各区情况来看,西固区的点源排

放量最大.兰州市的面源分布比较均匀,其中以城关区的面源最多^[11].根据甘肃省环境信息中心提供的“兰州市大气污染资料数据库”中的污染源分布和年排放量 1km×1km 网格资料,利用 GIS 技术绘制的兰州市城区大气污染源分布可知:兰州市污染源数量多、分布广^[24].所以,兰州市不同污染源类型的分布具有较大的空间差异,加之兰州处于复杂的盆地地形中,这就在一定程度上削弱了监测数据的空间代表性,在没有监测站点区域的大气污染物浓度只能依靠距离较近的监测站点的数据进行外推,加大了评估工作中的不确定性.而本文中在大气污染物模拟工作中所使用的是排放源分辨率为 1km×1km 网格数据,同时应用兰州市当地数据进行更新.因此,模拟结果所反映出的兰州市 PM₁₀ 的空间分布更具代表性.

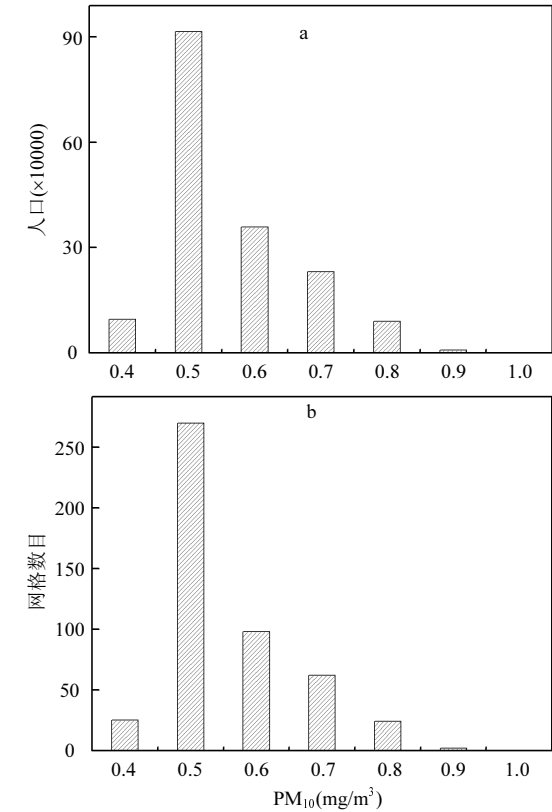


图3 2001年1月兰州人口加权前后 PM₁₀(观测)人体暴露浓度频数分布

Fig.3 Calculation of population weighted measurement concentration before and after frequency distribution in Lanzhou during January of 2001

2.2 站点数据和模拟结果的人群暴露水平

由图 3a 分析可知,兰州城区大部分地区 PM₁₀ 浓度为 0.5~0.8mg/m³,其中 PM₁₀ 浓度区间为 0.5~0.6mg/m³ 的网格数最多,由图 3b 可知,暴露在 PM₁₀ 浓度区间为 0.5~0.6mg/m³ 内的人口也最多.

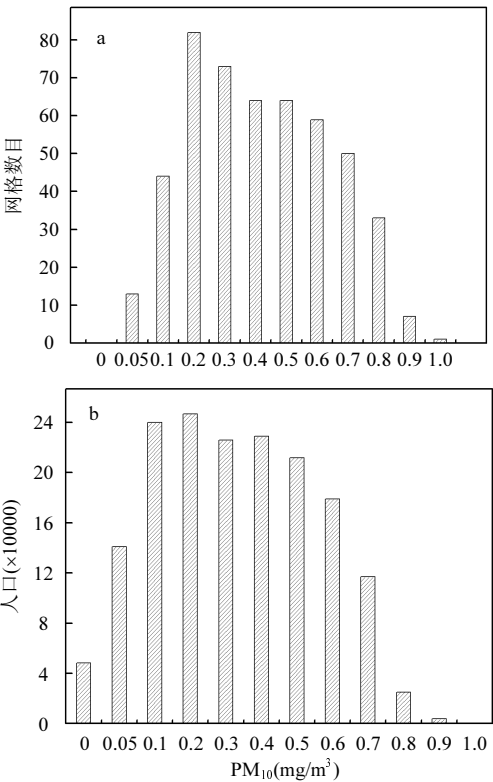


图4 2001年1月兰州人口加权前后 PM₁₀(模拟)人体暴露浓度频数分布

Fig.4 Calculation of population weighted simulation concentration before and after frequency distribution in Lanzhou during January of 2001

图 4a 显示,PM₁₀ 模拟浓度的频数分布更加均匀,而且 PM₁₀ 浓度变化范围比站点浓度的插值结果更大,图 4b 显示,与图 3b 相比,兰州城区人口更均匀地暴露在不同浓度区间的 PM₁₀ 下.插值浓度显示人群 PM₁₀ 暴露浓度区间为 0.4~1mg/m³,模拟浓度显示 PM₁₀ 人群暴露浓度区间为 0~1mg/m³,暴露浓度的上限两者基本相同,但是模拟浓度比站点浓度具有更低的下限,具有更大的 PM₁₀ 浓度的变化区间,实际情况中 PM₁₀ 浓

度会受到排放源所处的位置及排放情况、气象因素、地形等外界复杂因素的影响,分布很不均匀,且站点浓度观测到的大气颗粒物浓度空间代表性有限,所以利用数值模式的模拟结果来进行评估在缺乏监测站点的区域具有一定的优势。

在使用站点资料进行评估时,人口加权暴露浓度计算前,PM₁₀ 的平均浓度为 0.340mg/m³,使用人口加权算法计算后浓度为 0.341mg/m³,变化不大;在使用模拟的 PM₁₀ 浓度作为评估时使用的浓度时,使用人口加权暴露浓度计算前,PM₁₀ 的平均浓度为 0.371mg/m³,加权算法计算后浓度为 0.382mg/m³,上升近 3%。

考虑到人口加权计算前后 PM₁₀ 浓度的对比,就兰州城区人口的空间分布来讲,有较多的人口分布在污染较重的地区。但是,使用模拟结果的 PM₁₀ 浓度进行评估时,加权浓度上升较大,说明污染较严重的地区生活了大量的人口。

3 结论

3.1 与使用观测数据相比,模拟结果 PM₁₀ 浓度空间梯度较大,更加细致地展示了 PM₁₀ 度在兰州城区的分布,同时 PM₁₀ 浓度的最小值和最大值跨度也较大。

3.2 依据 PM₁₀ 模拟浓度,人口加权计算前后 PM₁₀ 浓度的对比发现,就兰州城区人口的空间分布来讲,有较多的人口分布在污染较重的地区。

参考文献:

- [1] World Health Organization. The World Health Report 2002: Reducing Risks, Promoting Healthy Life [R]. Geneva Switzerland, 2002.
- [2] El-Fadel M, Massoud M. Particulate matter in urban areas: health-based economic assessment [J]. Science of the Total Environment, 2000,257:133-146.
- [3] Hoek G, Brunekreef B, Goldbohm S, et al. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study [J]. Lancet, 2002,360(9341):1203-1209.
- [4] Jerrett M, Burnett R T, Renjun Ma, et al. Spatial analysis of air pollution and mortality in Los Angeles [J]. Epidemiology, 2005,16,6:727-736.
- [5] 陈训来,冯业荣,范绍佳,等.离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响 [J]. 大气科学, 2008,32(3):530-542.
- [6] 李莉,陈长虹,黄成,等.长江三角洲地区大气 O₃ 和 PM₁₀ 的区域污染特征模拟 [J]. 环境科学, 2008,29(1):237-245.
- [7] 马锋敏,高庆先,康娜.北京及周边地区一次大气污染过程的数值模拟 [J]. 气象与减灾研究, 2008,31(2):24-28.
- [8] 浦静姣,张艳,余琦,等.上海地区 O₃ 与 NO₂ 时空特征数值模拟个例研究 [J]. 中国环境科学, 2009,29(5):461-468.
- [9] 韩素芹,蔡旭晖,李培彦,等.天津市突发事故条件下大气污染的应急模拟 [J]. 中国环境科学, 2009,29(9):919-923.
- [10] 安俊岭,向伟玲,韩志伟,等.突发性大气污染监测与预报技术集成移动平台 [J]. 中国环境科学, 2011,31(8):1241-1247.
- [11] 汪新,安兴琴.兰州市污染物排放及能源状况分析 [J]. 甘肃科技, 2006,22(10):5-8.
- [12] 肖正辉,邵龙义,张宁.兰州市大气 PM₁₀ 对质粒 DNA 的损伤 [J]. 中国环境科学, 2009,29(6):561-566.
- [13] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东.上海市近地面臭氧污染的健康影响评价 [J]. 中国环境科学, 2010,30(5):603-608.
- [14] 谢鹏,刘晓云,刘兆荣,等.我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究 [J]. 中国环境科学, 2009,29(10):1034-1040.
- [15] 孙兆彬,李栋梁,陶燕,等.兰州市 PM₁₀ 与呼吸系统疾病入院人数的相关分析 [J]. 环境与健康杂志, 2010,27(12):1049-1052.
- [16] 孙兆彬,陶燕,安兴琴,等.不同季节兰州市 PM₁₀ 与呼吸系统疾病入院人数的相关分析 [C]//第 27 届中国气象学会年会气候环境变化与人体健康分会场论文集, 2010.
- [17] 侯青,安兴琴,王自发,等.2002-2009 年兰州 PM₁₀ 人体健康经济损失评估 [J]. 中国环境科学, 2011,31(8):1398-1402.
- [18] Dockery D W, Pope C A. Acute respiratory effects of particulate air pollution [J]. Ann. Rev. Public Health, 1994,15:107-132.
- [19] 汤国安,杨昕.Arcgis 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京:科学出版社, 2006:368-369.
- [20] Bergin M S, Noblet G S, Petini K, et al. Formal uncertainty analysis of a Lagrangian photochemical air pollution model [J]. Environmental Science and Technology, 1999,33:1116-1126.
- [21] Placet M, Mann C O, Gilbert R O, et al. Emissions of ozone precursors from stationary sources:a critical review [J]. Atmospheric Environment, 2000,34:2183-2204.
- [22] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmos. Chem. Phys., 2009,9:5131-5153.
- [23] 王希波,马安青,安兴琴,等.兰州市主要大气污染物浓度季节变化时空特征分析 [J]. 中国环境监测, 2007,23(4):61-65.
- [24] 安兴琴,马安青,王惠林.基于 GIS 的兰州市大气污染空间分析 [J]. 干旱区地理, 2006,29(4):576-581.

作者简介: 孙兆彬(1985-),男,黑龙江黑河人,助理工程师,硕士,主要从事大气污染对人体健康影响的评价和天气预报技术的研究.发表论文 3 篇。