

杭州城市空气污染物空间分布及其影响因子的定量分析

王伟武¹, 陈 超²

(1. 浙江大学城市规划工程与信息技术研究所, 杭州 310058; 2. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310018)

摘要:以乡镇、街道为基本空间统计单元, 基于地统计方法、GIS 和遥感技术绘制和计算了杭州城市人口密度、道路面积比例、建设用地比重、NDVI 和地表温度的空间图层, 并应用 GIS 空间数据相关分析和空间叠加方法, 定量评价了 SO₂、NO₂、O₃ 的空间分布与城市人口密度、建设用地比重、道路用地比例、地表温度等影响因子的空间相关程度和总体污染水平的分布特征。结果表明: NO_x 的空间分布受道路比例、地表温度、城镇建设用地、人口密度的影响程度最大, SO₂ 次之, O₃ 最小。SO₂ 受工业用地分布影响较大, O₃ 为二次污染物, 其空间分布受其他因素影响相对较小。杭州市室外空气的总体污染程度, 主要集中在上城、下城、拱墅, 江干区次之, 西湖区污染程度较轻。城市空气污染物浓度空间分布及受其他因素影响程度的定量分析可以为不同城市地域有针对性地制定合理的空气污染减缓对策提供科学依据。

关键词: 克里格插值; 空间相关性; 城市空气污染; 影响因子; 杭州

文章编号: 1000-0585(2008)02-0241-10

地统计学作为一种空间分析方法, 主要用来研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性, 或空间相关和依赖性的现象。城市中普遍存在着一种现象, 即空间或时间上距离越近的实物, 其相互作用越强, 距离越远则相互作用越弱。地统计学方法可以为揭示这种空间变异规律, 解释各种变异因子在空间变异过程中的影响作用提供一种十分有效的定量分析手段。在自然科学领域, 该方法已经广泛应用到林业资源调查、农作物保护、土壤环境分析、生态评价等方面, 在模拟自然环境因素因子如水文、温度、地质、地貌、土壤、光照等的空间分布特征方面显示了应用优势^[1~8]。在城市研究方面, 也开始应用到城市人口、城市房价等方面的探索和分析^[9~11]。

城市空气污染物主要在人为生产、生活和交通等活动过程中产生的, 快速的城市化过程直接导致了城市空气污染物排放量的不断增多。空气污染程度不仅取决于空气中污染物的类型、来源, 还与各种污染物的形成条件密切相关, 另外, 污染物还具有形成时间的不确定性、滞后性、模糊性、潜伏性等特点。因此, 在城市不同区域, 城市空气污染物浓度水平的空间分布往往具有高度的空间异质性, 并且与城市下垫面特征与城市空气污染物来源等因素相关, 影响因素和过程极为复杂。地统计学在城市空气污染空间分布方面的研究同样存在优势, 即可以通过点状的有效监测数据插值模拟获得空气中污染物的面上分布数

收稿日期: 2007-09-11; 修订日期: 2007-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40201021); 浙江省自然科学基金资助项目 (M403040); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 探索导向类资助项目 (2007AA12Z239763)

作者简介: 王伟武 (1972-), 男, 浙江永康人, 博士, 副教授。主要从事环境遥感与规划信息技术应用等方面研究。E-mail: weiwuwang@zju.edu.cn

据, 以揭示城市空气污染物的空间分布特征。

近 20 余年来, 遥感和 GIS 技术的发展日新月异, 特别是栅格数字模拟技术已成为分析城市人口以及社会经济等要素空间分布特征的有效手段^[9~11]。因此, 整合地统计方法、GIS 和遥感技术, 不仅可以定量分析城市空气中各种环境污染物的空间分布特征, 并且可以定量地揭示城市空气的综合污染程度和受各主要相关因子的影响程度。本文尝试将地统计学中普通克里格方法模拟杭州城市空气污染物的空间分布特征, 并借助遥感和 GIS 技术建立影响空气污染各个因子分布的空间数据, 利用空间相关分析和叠加方法定量分析杭州典型城市区域空气污染物及与其影响因子的空间相关性, 从而揭示不同城市地域不同因子对空气污染物浓度的影响程度, 以便更有效地制定城市空气污染的减缓对策, 为有效地控制不同城市地域空气污染物总量提供科学依据。

1 研究区概况

杭州市地处东南沿海长江三角洲南翼, 杭州湾西端和钱塘江下游, 是浙江省政治、经济、科教和文化中心, 是国务院确定的全国重点风景旅游城市 and 历史文化名城, 也是中国十大最适合居住城市之一。气候属于亚热带季风区, 年平均气温为 16.2℃。年最高气温达到 42℃。研究区范围包括杭州市上城区、下城区、拱墅区、西湖区、江干区、滨江区 (不包括余杭区和萧山区), 合计 30 个街道、24 个乡镇, 总面积 683km² (图 1)。

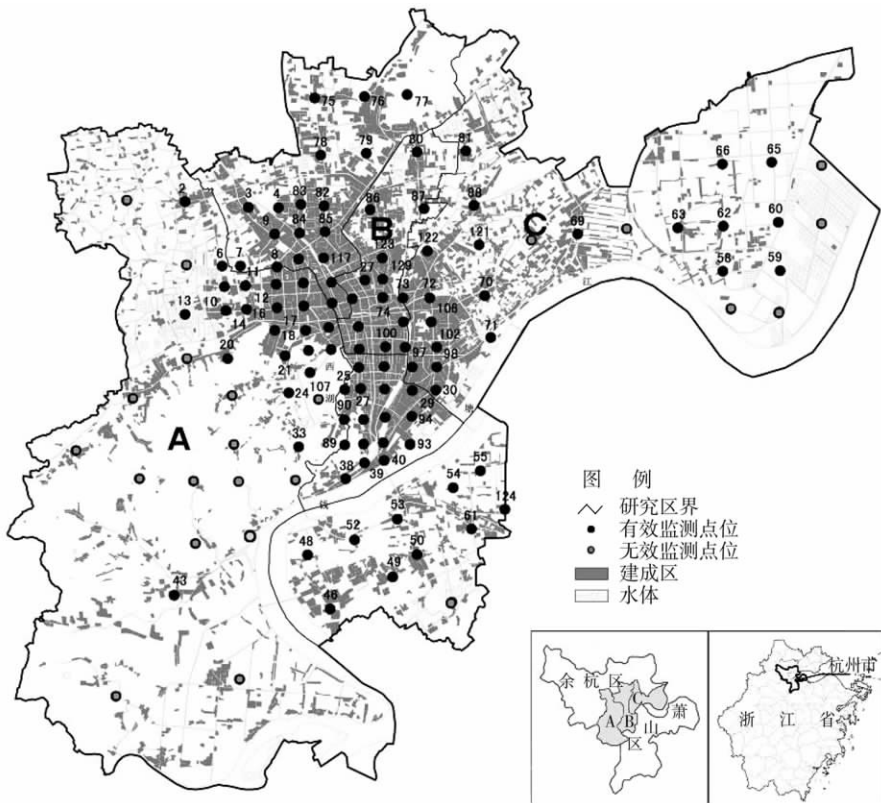


图 1 研究区与采样点位示意

Fig. 1 Map of the study area and sampling sites

2 数据来源与分析

2.1 数据来源

本研究采用的资料主要包括：杭州市 2000 年第五次人口普查资料，杭州市各区行政区划图（1:25000），以及 2000 年 7 月 15 日 Landsat/TM 数据。考虑到杭州四季分明和夏季高温的气候特征，我们选取了夏季的 Landsat/TM 数据，同时通过 Landsat/TM 数据还能较精确地（120m×120m）反映以街道或乡镇为统计单元的城市绿色环境和热环境的空间分布特征。采用网格划分方法布置监测点。中心城建成区南侧人口密集地带为 1.1km×1.1km、城区外围所有区域均为 2.2km×2.2 km 的网格划分方案。共设 128 个测点（1993 年已设 23 个测点），其中西湖风景区及外围为 15 个测点，滨江区为 11 个测点，下沙开发区为 13 个测点，中心城建成区为 89 个测点（图 1）。

根据杭州市现有的 5 个空气质量自动采样点的历年监测结果，杭州空气中 NO₂、SO₂、O₃ 等三项污染指标均呈现明显的冬高夏低、春秋介于其间的季节性变化规律^[11]。另外，空气监测需要选择二个或二个以上有代表性的季节。网格采样时间适宜在夏末秋初和冬末春初两个季节交替时期，此时的气象条件以冬夏特征为主，同时部分具备春秋多变的气象特征，能在很大程度上反映杭州市全年各个季节的总体污染分布状况。实际采样时间分别在 2000 年 8 月 14~29 日和 2001 年 2 月 8~23 日，其中 SO₂、NO₂ 为 15 天，O₃ 为 7 天。采样管最长允许采样时间：O₃ 为 7 天，NO₂ 为 15 天，SO₂ 为 30 天，样品采集以后送瑞士有相关认证资格的实验室分析，保证了监测数据的准确性^[12]。

2.2 影响因子选择

城市空气中的 SO₂、NO₂、O₃ 浓度受人有的生产、生活和交通的不同程度的影响。本研究选择城市人口密度、城市主干道密度、建设用地比重、工业用地分布和地表温度的空间分布作为城市空气中的 SO₂、NO₂、O₃ 浓度的影响因子。

人口密度反映一个城市人口的聚集程度。人口密度越高，人为的生产、生活或商业行为越频繁，人为排放的 SO₂、NO₂ 等空气污染物也随着增加。人均空间资源占有率越低，会使城市中有限的环境容量超过承载力要求而导致环境恶化，适当的人口密度对城市污染物排放的降解十分重要。工业企业是城市 SO₂ 和 NO₂ 的主要排放源。在空气污染物排放条件较差的情况下，城市工业用地是城市空气中 SO₂ 和 NO₂ 浓度集聚的主要场所。近几年，城市空气污染呈现出以 SO₂ 为主的工业型污染向以 NO_x 为主的生活性污染转变的总体特征。随着城市人均机动车数量的增加，车流密度增加和交通拥堵成为城市空气中 NO_x 产生的主要原因。因此，城市主干道密度越大，NO_x 的排放量势必越大。在城市的街道峡谷效应的影响下，城市空气中的 NO_x 不易扩散。可见，城市交通干道密度直接影响城市空气中的 NO_x 浓度。

城市空气温度是影响城市空气中污染物存在形态的主要因素。NO_x、SO₂ 在空气中的存在形态和城市酸雨的形成与空气温度直接相关。O₃ 是二次污染物，是由 NO₂ 和烃类在光照下形成的，同时它作为一种氧化剂，能与空气中 NO₂ 等还原性物质发生反应。夏季光照条件好于冬季，而污染物浓度低于冬季，因此，夏季的 O₃ 浓度自然就高；城市中心区污染较重，导致 O₃ 浓度相对较低。地表温度主要受土地利用/覆盖状况影响，在空间分布上，城市地表温度可以选为影响空气中 NO_x 和 O₃ 浓度的间接因子。

NDVI（归一化植被指数）是最常用的植被指数，它能反映城市地区的高期望的绿色

环境质量特征。NDVI 与绿量、绿色面积等植被参数高度相关；NDVI 的季节性变化和绿量的季节性变化密切相关^[13]。NDVI 在高、低精度下都是衡量植被覆盖率的敏感尺度，因此它也是影响城市空气污染浓度的重要指标。通常情况下，城市绿色植物具有吸收空气中 NO_x 和 SO_2 污染物和放出 O_2 的作用，因而 NDVI 越大， NO_x 和 SO_2 浓度越低， O_3 浓度越高。

3 污染物及其影响因子的空间数据建立

3.1 空间数据预处理

首先在研究区内建立空气质量监测点和以街道或乡镇为基本统计单元的图形数据和属性数据，并与 Landsat/TM 数据一起进行投影设置、图像配准等预处理，为使各污染物及其影响因子地理数据具有空间属性并能方便地进行空间分析与运算。

3.2 污染物浓度分布空间数据

即各有效监测点位的空气污染物浓度属性数据和空间坐标（采用杭州坐标系）。首先利用 mapinfo 软件形成包含 SO_2 、 NO_2 、 O_3 监测数据的文件，转换为 shp 格式存储。在 ARCGIS 软件的 geostatistics 分析模块中，导入 shp 格式文件，建立分析数据。然后用软件中 kriging 插值分析功能分别对各测点 SO_2 、 NO_2 、 O_3 三项污染指标进行半方差分析、空间变异函数分析，获取并分析 SO_2 、 NO_2 、 O_3 的空间分布图，最后以栅格数据格式存储。 SO_2 、 NO_2 、 O_3 的原始数据进行 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 正态分布检验的概率 (P_{k-s}) 符合 kriging 插值要求。获取的 kriging 分析结果见图版 1 图 2A、2B 和 2C。

3.3 影响因子空间数据

杭州城市人口密度空间数据，首先以街道或乡镇建立矢量空间数据，直接经过格栅化后获取（图版 2 图 2D）。城市道路面积密度、建设用地比重和地表温度的空间数据利用遥感图像解译和 GIS 空间分析技术直接从 Landsat/TM 数据和地图数据中获取。

3.3.1 建设用地比重 建设用地比重是影响空气中污染物浓度高低的主要负面因素，一般包括工商业用地、居住用地和交通用地。通过分析研究区的土地利用/覆盖状况，可以获取各个统计单元的建设用地比重。首先应用 Landsat/TM 数据，运用图像监督分类法，将研究区域分成 6 种土地利用/覆盖类型，即（1）水体，（2）林地，（3）工商业用地，（4）交通用地，（5）农用地，（6）居住区。然后，对 6 种土地利用/覆盖类型进行“重新分类”，把工商业用地、交通用地标记为“1”，其他用地标记为“0”。然后依据乡镇、街道行政界线的划分，用“提取”命令获得标记为“1”的每一区块的总单元数，从而确定建设用地比重（图版 1 图 2E）。

3.3.2 城市道路面积比例 首先在 mapinfo 中对杭州 1:250000 地图进行坐标配准，利用矢量化方法建立空间数据，然后叠加乡镇或街道矢量数据，转变为 Coverage 矢量图层后，在 ARCGIS 软件中进行 cleaning, building 处理。获得每个乡镇或街道内的城市主干道矢量图，然后通过空间运算获得各单元的城市道路面积比例（图版 1 图 2F）。

3.3.3 地表温度 由 TM 数据波段 6 ($10.3\sim 12.5\mu\text{m}$) 记录了地表的发射热红外光，某种程度上是影响生活舒适度的重要物理指标。城市地表温度受土地利用或覆盖状况影响，是衡量温室效应的重要尺度^[14, 15]。利用 Malaret 等提出的 Landsat-5/TM 数据二次衰减模型^[16]，把 DC 值转化成温度值，公式如下： $T(K) = 209.831 + 0.834DC - 0.001330DC^2$ ，式中 DC 值介于 0 和 255 之间， $T(K)$ 是开氏温度。该公式适用于计算所有像元 Landsat/TM 波段 6 数据，计算过程使用了 ERDAS 软件的空间运算功能，最后把绝对温度减去

273.15K 转化成摄氏温度。由于受大气影响,从 Landsat/TM 热红外波段中获得的反演温度要比真实的地表温度略高些,但不影响本研究分析精度。利用 ERDAS 软件 GIS 分析的 Zonal Attributes 功能获取各统计单元地表温度的平均值(图版 1 图 2G)。

3.3.4 NDVI NDVI 的计算公式为: $NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$, 式中 $TM4$ 、 $TM3$ 分别为 Landsat/TM 遥感图像的第四(近红外)和第三(红)波段亮度值。该值介于 $-1 \sim +1$ 之间。由图 2H 可知,杭州市区原始的 NDVI 值介于 -0.75 与 0.65 之间。建成区(图像中的黑色调)的 NDVI 值为负值,绿色植被(图像中的亮色调)的 NDVI 值为正值。利用 ERDAS 软件中 GIS 分析的 Zonal Attributes 功能获取各统计单元(街道或乡镇) NDVI 的平均值(图版 1 图 2H)。

4 污染物空间分布及其影响因子分析

4.1 污染物浓度空间分布特征

通过对照分析三种污染物监测数据和图版 1 图 2A、2B 和 2C,可以说明污染物浓度空间分布特征。 NO_2 的浓度范围为 $33.4 \sim 67.5 \mu g/m^3$, 浓度最高的监测点位于下城区官巷口附近,浓度最低的监测点位于江干区下沙开发区最东面监测点。与 SO_2 、 O_3 相比, NO_2 浓度分布特征最为明显,层次更为清晰,浓度最高的区域形成近似圆形中心,大致范围为:东到秋涛北路、江城路,南到河坊街、望江路,西到南山路、环城西路,北到文晖路;在这个高浓度区域内,浓度最高点位于艮山门附近,在武林门和官巷口有两个次高点。另外,在北部大关路一带也存在一个浓度次高点。这种浓度分布特征充分显示了机动车的废气排放和城区污染物的扩散条件较差对 NO_2 浓度分布的影响。杭州市中心城区建筑物密集,高楼多,道路狭小,人口密度高,机动车流量大,造成 NO_2 排放量比城市外围区域多,并且无法及时扩散,致使其浓度偏高。 SO_2 的浓度范围为 $28.0 \sim 83.5 \mu g/m^3$, 浓度最高的监测点位于杭州管道煤气厂、农药厂附近,浓度最低的监测点位于临近钱塘江的城皇山附近。 SO_2 城市中心区污染最重,北部工业区次之,外围农林山区相对较轻。 SO_2 的浓度分布比 NO_2 更加复杂,显示出与局部污染源排放更为相关的分布特征。城市中心区和城北工业区 SO_2 浓度明显比其他地区高,为 SO_2 污染最重的区域,最高点分别出现在杭州市管道煤气厂、农药厂附近;城市中心 SO_2 重污染区,其范围基本与 NO_2 最重污染区重叠,向外扩展, SO_2 浓度逐渐降低。 SO_2 排放以机动车和燃料废气为主,燃料排放主要集中在城北工业区和滨江区,而机动车废气则主要集中在城区中心人口密集区。 O_3 的浓度范围为 $30.7 \sim 84.3 \mu g/m^3$, 浓度最高的监测点位于江干区沙开发区东北面,浓度最低的监测点位于古荡附近。 O_3 呈外围区域高、城市中心低的浓度分布特征。从图形总体分析, O_3 浓度分布特征为城市中心区域浓度最低、向外围区域浓度逐渐增高,与 NO_2 和 SO_2 浓度分布几乎相反。 SO_2 和 NO_2 污染还存在明显的局部污染现象。从地域分布看,三种污染物污染程度依次为中心城区、城市工业区和滨江区,西湖周边及西部山区污染浓度相对较低, O_3 浓度与 SO_2 和 NO_2 相反。另外,城市的地形如西湖、钱塘江、山区,形成“三面云山一面城”格局对污染物分布有一定的影响。地形改变了污染源的分布状况和污染物的扩散条件,使得污染物的浓度分布形成相对低浓度区和高浓度区。从杭州主城区发展趋势看,杭州已经在主城区的基础上,主要通过向城市边缘发展的形式来扩大城市用地。市中心区的中心向北部工业区转移,同时开发建设了江北的下沙投资区,城西的高新技术开发区和之江旅游风景区等。

4.2 影响因子的定量识别与评价

空间相关分析可以更深入揭示污染物浓度与其影响因子的空间相关特征,即利用 GIS 技术分析污染物浓度与影响因子之间的空间相关性,获取杭州城市空气中的 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度分布与影响因子的空间相关程度,从而识别出在不同城市区域各种污染物浓度的主要影响因子。

本研究首先对每个影响因子的数据图层(即 6 个城区)归一化处理,即应用 $\eta = (\eta - \eta_{\min}) / (\eta_{\max} - \eta_{\min})$ 计算得到。结合杭州城市的地理特点,把研究区分为 A、B、C 三个分区(图 1),A 区为体现生态特征的西湖区,B 区是以建成区为特征的上城、下城、滨江、拱墅四个行政区,C 区为江干区和下沙经济开发区。在 ERDAS 软件中相关分析获取三个分区中 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度分布与各因子空间数据之间的相关矩阵(表 1)表明, SO_2 和 NO_2 浓度的空间分布与影响因子的空间分布之间均呈现较强的正相关性,而 O_3 与影响因子的空间分布之间则呈明显的负相关性,表明地表温度、城镇建设用地比例、人口密度、道路比例是 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度分布的重要影响因子。

表 1 杭州市空气污染物浓度分布与各因子的相关矩阵

Tab. 1 Distribution of air pollutant concentrations and correlation matrix with their impact factors

		NO_2	SO_2	O_3	人口密度	道路比例	建设用地比例	地表温度	NDVI
A 区 (西湖区)	NO_2	1.0000							
	SO_2	0.4786	1.0000						
	O_3	-0.3217	-0.3070	1.0000					
	人口密度	0.5934	0.6167	-0.2129	1.0000				
	道路比例	0.2210	0.4199	-0.3456	0.5691	1.0000			
	建设用地比例	0.5098	0.4376	0.0011	0.8368	0.4921	1.0000		
	地表温度	0.3692	0.3172	-0.2460	0.7402	0.6679	0.8300	1.0000	
NDVI	-0.7726	-0.5074	0.3265	-0.7040	-0.2596	-0.6151	-0.4318	1.0000	
B 区 (上城、下城、 拱墅、滨江四区)	NO_2	1.0000							
	SO_2	0.2909	1.0000						
	O_3	-0.8298	0.0283	1.0000					
	人口密度	0.8204	0.4407	-0.5591	1.0000				
	道路比例	0.7102	0.5835	-0.4269	0.8660	1.0000			
	建设用地比例	0.6912	0.6019	-0.4606	0.7784	0.6825	1.0000		
	地表温度	0.5126	0.8416	-0.2050	0.7130	0.7785	0.8358	1.0000	
NDVI	-0.8126	-0.2955	0.6162	-0.8108	-0.7270	-0.7819	-0.5783	1.0000	
C 区 (江干区)	NO_2	1.0000							
	SO_2	0.8332	1.0000						
	O_3	-0.8595	-0.6199	1.0000					
	人口密度	0.7195	0.7161	-0.5602	1.0000				
	道路比例	0.8695	0.8366	-0.7424	0.9124	1.0000			
	建设用地比例	0.7478	0.7759	-0.6106	0.7108	0.8318	1.0000		
	地表温度	0.5472	0.5597	-0.6305	0.5486	0.6594	0.8053	1.0000	
NDVI	-0.7535	-0.6695	0.4439	-0.6811	-0.7547	-0.5647	-0.1152	1.0000	

在西湖区, NO_2 和 SO_2 的分布除与人口密度的分布相关性超过 0.5 外, 与其他因子的相关性都低于 0.5, 在主城区 NO_2 与道路比例、地表温度、城镇建设用地、人口密度的相

关性都超过 0.5, 而与 NDVI 则都呈较强的负相关关系, 而且比 SO_2 与影响因子的空间相关性普遍要大。除西湖区的道路比例与 O_3 浓度基本没相关性外, 三个区的 O_3 的空间分布与地表温度、城镇建设用地、人口密度、道路用地比例均呈负相关特征, 但相关性均小于 0.5, 相关性在 C 区表现为最明显, B 区次之, A 区最小, 说明 O_3 除受上述因素的影响外, 还与工业用地在杭州的分布有极大的关联性, 杭州的工业用地主要分布在城北和下沙区块, 这一点从 SO_2 的空间分布 (图版 1 图 2B) 可以看出。 O_3 是二次污染物, 是由 NO_2 和烃类在光照下形成, 同时它是一种氧化剂, 能与空气中的一氧化氮类还原性物质发生反应。因此, 受上述影响因子的影响程度势必要比 SO_2 和 NO_2 小。总之, NO_x 的空间分布受道路比例、地表温度、城镇建设用地、人口密度的影响程度最大, SO_2 次之, O_3 最小。

为了表征杭州市室外空气污染程度的整体特征, 参照环境空气质量标准 (GB3095-1996), 将三种污染物浓度进行归一化处理 (Normalize), 然后用空间叠加 (Overlay) 获取杭州空气污染物浓度的整体分布状况。图 3 为杭州市 NO_2 、 SO_2 、 O_3 浓度归一化处理后的叠加图, 表明污染程度严重区主要集中在上城、下城、拱墅 (B 区), 江干区次之 (C 区), 西湖区污染程度较轻 (A 区)。

依据上述不同城市地域主要影响因子的空间分布特征, 可以制定有针对性的空气污染缓减措施。例如, 类似上城、下城、拱墅的大城市中心区域往往是空气污染物浓度最高的区域。对于 SO_2 的缓减, 特别是对于城市北部的拱墅区域, 依托杭州城市房地产的开发在城北的逐渐推进, 加快企业向城市以外地区搬迁, 以切断 SO_2 的主要源头。加强对现有燃煤企业 SO_2 的排放处理, 通过增加技术投入来提高 SO_2 处理能力, 通过加强 SO_2 的排放控制管理来减少排放量。对于 NO_x 浓度的缓减, 在上城、下城的城镇建设用地比例、道路比例均不能减少时, 可以通过控制城区人口密度和机动车数量来达到缓减目的。同时, 主城区必须加快地下交通和地面公交建设, 实行缓减和适度控制主城区地面车流的交通管理等策略, 减少地面交通流的 NO_x 排放。另外, 目前植被分布的不均匀状况也是主城区污染严重的主要原因, 历年数据表明目前杭州建成区绿化覆盖率约 40%, 如果不计算杭州西湖风景区, 植被覆盖率则不到 20%, 可见分布极其不均匀, 因此, 应该加快风景区之外的主城区绿化建设。

依据上述不同城市地域主要影响因子的空间分布特征, 可以制定有针对性的空气污染缓减措施。例如, 类似上城、下城、拱墅的大城市中心区域往往是空气污染物浓度最高的区域。对于 SO_2 的缓减, 特别是对于城市北部的拱墅区域, 依托杭州城市房地产的开发在城北的逐渐推进, 加快企业向城市以外地区搬迁, 以切断 SO_2 的主要源头。加强对现有燃煤企业 SO_2 的排放处理, 通过增加技术投入来提高 SO_2 处理能力, 通过加强 SO_2 的排放控制管理来减少排放量。对于 NO_x 浓度的缓减, 在上城、下城的城镇建设用地比例、道路比例均不能减少时, 可以通过控制城区人口密度和机动车数量来达到缓减目的。同时, 主城区必须加快地下交通和地面公交建设, 实行缓减和适度控制主城区地面车流的交通管理等策略, 减少地面交通流的 NO_x 排放。另外, 目前植被分布的不均匀状况也是主城区污染严重的主要原因, 历年数据表明目前杭州建成区绿化覆盖率约 40%, 如果不计算杭州西湖风景区, 植被覆盖率则不到 20%, 可见分布极其不均匀, 因此, 应该加快风景区之外的主城区绿化建设。

5 结论与讨论

结合上述研究, 可以得出以下结论:

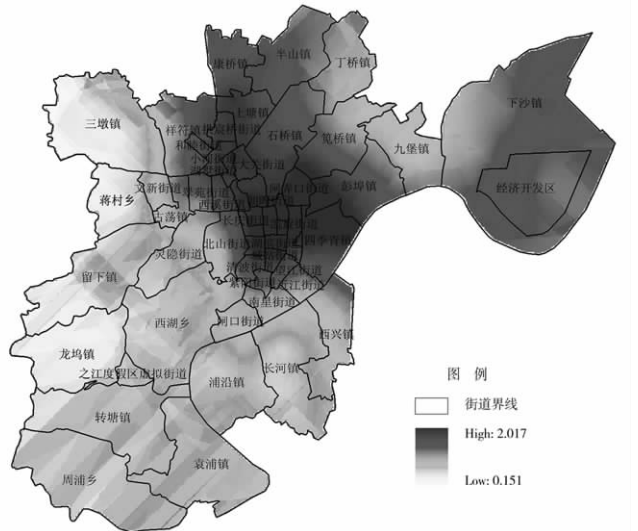


图 3 杭州市 NO_2 、 SO_2 、 O_3 浓度归一化处理后的叠加图

Fig. 3 Overlay of the normalized concentration NO_2 , SO_2 and O_3 in Hangzhou

(1) 整合克里格插值、地理图层相关分析与叠加方法分析不同城市区域的空气污染程度及其主要影响因子的空间分布特征, 识别出主要影响因子, 在城市尺度上更为直观地揭示了城市空气污染水平与受其他影响因子影响的程度的空间分布差异性与相关性, 从而为城市空气质量功能分区及制图以及总量控制预测提供了定量依据。

(2) 城市作为一种人工—自然综合系统, 城市空气污染的空间分异特征是城市自然条件和社会经济多因素共同作用和影响下形成的, 不仅与城市内部的工业、生活及交通活动等人为因素的空间分布密切相关, 而且受植被覆盖等生态因子影响。城市空气污染现象是在城市化过程中各种生产、生活、交通等复杂行为对城市这一人工—自然系统产生的环境影响。随着城市化和工业化过程的不断推进, 城市人口和规模扩大, 城市人口与建筑物越来越密集, 空气中的污染物种类和数量也越来越多, 病菌的扩散和传播也更容易, 从而对城市居民健康和生命安全造成威胁。

(3) 研究还揭示了不同污染物浓度的主要空间影响因子的空间分异特征, 基于这一研究结果可以从改善不同污染物的主要空间影响因子角度, 为制订有针对性的空气污染减缓对策和提出有效的空气污染防控措施提供科学依据。

(4) 本文只是定量地分析了空气中三种常规污染物的空间分布特征及其主要影响因子。今后的研究, 在监测数据条件允许的条件下, 可以加强空气中其他类型污染物如有机污染物 PAH_s 和 POP_s 的空间分布特征分析。另外, 由于 NO_x、SO₂、O₃ 的网格尺度要求主要与城市工业、生产、交通的空间尺度相关, 本文在城市建成区和非建成区采样点网格分别采用 1.1km×1.1km 和 2.2km×2.2km, 能够基本满足用克里格插值方法模拟污染浓度空间分布的精度要求, 在研究城市内部不同空气污染物浓度分布特征时, 都必须面对尺度效应和适宜尺度的选择问题, 尺度与格局总是紧密联系在一起, 今后的研究还可以利用各向同性半方差函数分析比较城市中不同污染物尺度效应, 合理确定城市不同地域不同污染物的监测布点间距, 从而更全面更深入地揭示城市空气污染的空间分布规律。

参考文献:

- [1] Payn T W, Hill R B, Hock B K. Potential for the use of GIS and spatial analysis techniques as tools for monitoring changes in forest productivity and nutrition: A New Zealand example. *Forest Ecology and Management*, 1999, 122 (1): 187~196.
- [2] 王正军, 程家安, 史舟. 早稻二化螟一代卵块的区域性空间分布格局及动态. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2000, 26(5): 465~473.
- [3] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 313~324.
- [4] 唐涛, 蔡庆华. 地统计学在淡水生态学中的应用. 2000, 12(3): 280~288.
- [5] Zhu H C, Charlet J M, Poffijn A. Radon risk mapping in southern Belgium: An application of geostatistical and GIS techniques. *The Science of the Total Environment*, 2001, 272: 203~210.
- [6] 郭旭东, 傅伯杰, 陈利顶. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征: 变异函数与 Kriging 插值分析. 2000, 55(5): 555~566.
- [7] 王伟军. 用地理信息系统和地统计学估计立地指数. *国外林业*, 1997, 27(1): 35~38, 45.
- [8] 刘付程, 史学正, 于东升. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. *地理研究*, 2004, 23(1): 63~70.
- [9] 杜国明, 张树文, 张有全. 城市人口分布的空间自相关分析: 以沈阳市为例. *地理研究*, 2007, 26(2): 383~390.
- [10] 王霞, 朱道林. 地统计学在都市房价空间分布规律研究中的应用: 以北京市为例. *中国软科学*, 2004, 6: 152~155, 108.
- [11] 王伟武. 杭州城市生活质量的定量研究. *地理学报*, 2005, 60(1): 151~157.

- [12] 杭州市环境监测中心站. 杭州市空气监测点位扩充优选研究. 2001.
- [13] 国家环境保护总局. 环境空气质量手工监测技术规范(HJ/T194-2005). 2005.
- [14] Geol N S, Norman J M. Biospheric models, measurements, and remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 47: 163~188.
- [15] Roth M, Oke T R, Emery W J. Satellite derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10: 1699~1720.
- [16] Malaret E, Bartolucci L A, Lozano D F. Landsat-4 and Landsat-5 thematic mapper data quality analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1985, 51:1407~1416.

A quantitative analysis on spatial distribution of the pollutants in the urban air and their impact factors based on geostatistics and GIS: A case study of Hangzhou city

WANG Wei-wu¹, CHEN Chao²

(1. Institute of Urban Planning Engineering and Information Technology,
Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Hangzhou Environment Monitoring Center Station, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Urban air pollution is produced in the process of all kinds of human activities such as industrial production, living and traffic. Rapid urbanization processes result in the increasing of the kinds and concentration of the pollutants in the air of built-up area. By taking streets and towns as the basic spatial analysis unit, the concentrations of sulfur dioxide, ozone nitrogen dioxide and some factors influencing urban air pollutions in Hangzhou such as population density, percentage of road area, built-up area, surface temperature and NDVI are mapped and computed based on ordinary kriging, GIS and RS in this paper. The relativity between the concentration of three pollutants and their influencing factors are quantitatively evaluated by integrating spatial correlation analysis, and the characteristics are obtained by overlay of the ranked data layers. The results show that in downtown (including Shangcheng, Xiacheng, Gongshu), Xihu and Jianggan, the spatial relativity between three air pollutants and their impact factors have spatial heterogeneity. Among the three pollutions, the spatial distributants of NO₂ is firstly influenced by the distribution of impact factors; SO₂ is secondly, and O₃ is thirdly. The overall degree of air pollution outdoor in Hangzhou is the highest in downtown and the lowest in Xihu. The strong spatial heterogeneity is the main characteristic of the distribution of the air pollutants in the built-up area. The two main aims of the quantitative analysis on spatial distribution of urban air pollutions and their influence from other factors are to provide the scientific basis for establishing pertinently the reasonable countermeasures to mitigate urban air pollution and putting forward the effective measures for the prevention and control of air pollution.

Key words: ordinary kriging; spatial relativity; urban air pollution; impact factor; Hangzhou

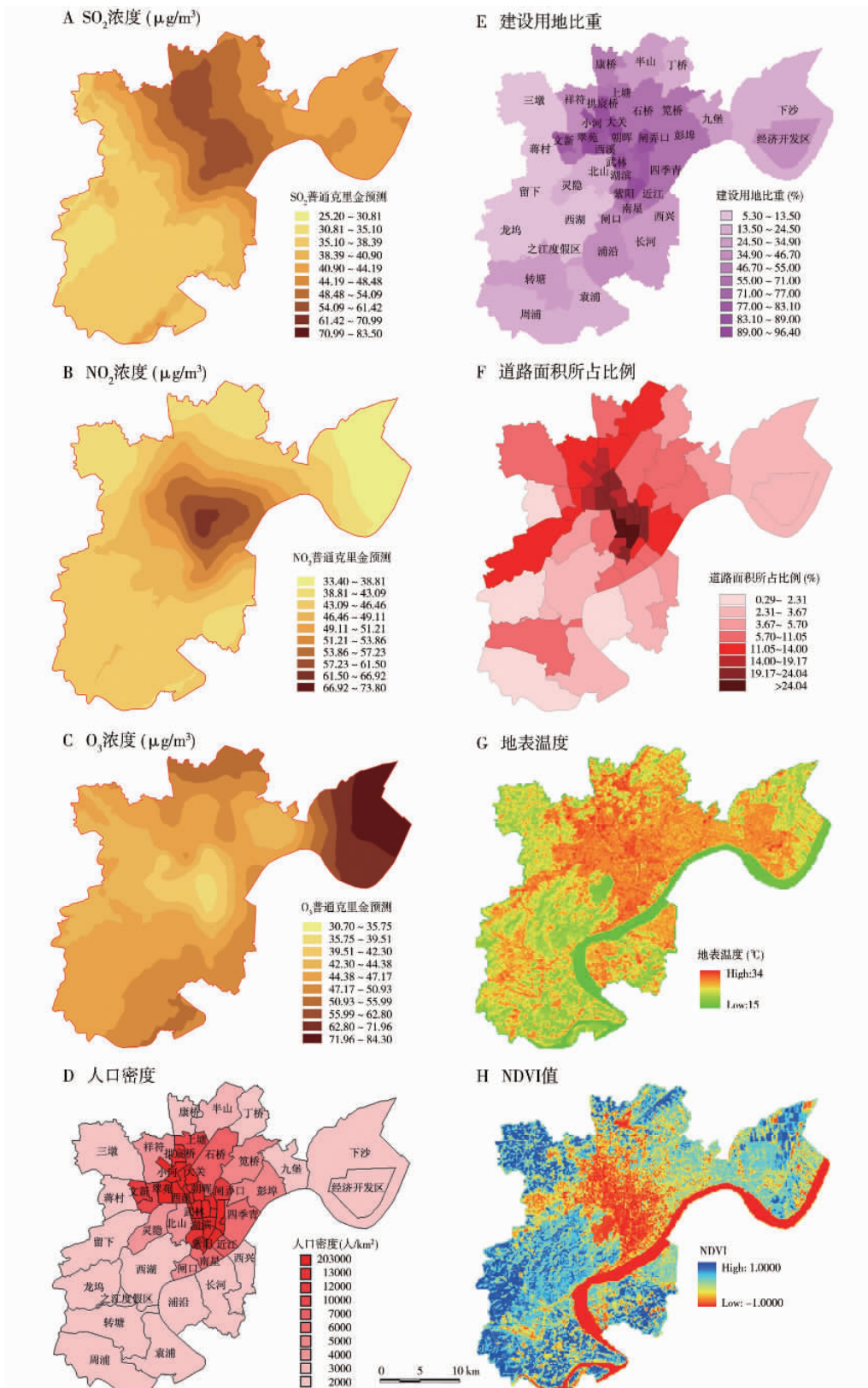


图 2 2000 年杭州市空气污染物及其主要影响因子的空间分布

Fig.2 The spatial distribution of three air pollutants in Hangzhou city and their key impact factors