

空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应 ——以大珠江三角州为例

丁 宇¹, 李贵才¹, 路 旭², 高 梅¹

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院, 沈阳 110168)

摘 要:随着城市化进程的加快,生态空间在区域大气污染改善中的角色越来越重要。本文从区域内部地域构成的空间异质性视角,采用干沉降模型,建立植被对大气污染削减效应与空间特征的表征方式,用以揭示不同次区域中绿地对大气污染削减研究的重点和特色。研究表明,“中”次区域污染削减量明显高于“高”、“低”次区域,然而“中”次区域绿地功能的发挥仍处于污染驱动阶段;“高”、“低”次区域已进入绿地功能驱动阶段,生物多样性、生态结构和景观格局对大气污染削减的影响更加突出。森林下垫面对大珠三角地区SO₂、NO₂、PM₁₀污染物的削减率分别为1.3%、0.7%和4.1%。最后,提出结合资源禀赋和城市发展特征开展绿色空间的功能导向型研究,并探讨了未来研究发展的主要趋势和重点问题。

关 键 词:空气质量;异质性;区域绿地;大珠江三角洲

大气污染是一个区域性的环境污染问题,京津冀、长三角、珠三角等城镇群以氮氧化物、细微粒为特征的区域大气复合污染问题日益突出,并呈蔓延趋势^[1]。空气环境质量与污染源、绿色空间布局规模有密切关系。仅从行政区划的角度考虑单个城市的大气污染防治难以解决大气污染问题。绿色空间污染削减的研究随着城镇化进程的加快和城镇群生态环境问题特别是大气污染的日益严重而受到重视^[2-5]。Nowak等研究发现,美国大部分城市的森林对PM₁₀的削减效应可达到8.0 g·m⁻²^[4]。Escobedo等提出都市区内不同社会经济次区域乔木、灌木、草地对特定空气污染物环境效应是不一样的^[6]。也有研究表明,区域内绿地的生态功能并不是均质性的,因为生物或人为因素如土地利用、土壤、社会经济和人口密度等的空间差异,提出以土地利用、社会经济因素等的合适尺度界定不同的绿地斑块达到认识植被空间异质性的目的^[7-9],绿色空间建设要与所选区域的社会经济条件和资源本身的生态学特性相适应,空间异质性是区域生态保护和污染治理必须要考虑的重要因素。

绿色空间是区域生态环境的主体,是评价区域环境质量的重要指标。通常认为30%~50%的绿化覆盖率才对城镇生态系统具有临界幅度的意义。因此长期以来,森林覆盖率、绿化率作为评价环境

品质的主要指标^[10]。但从生态学的异质性原理和区域大气环境的特征来分析,仅仅强调绿量和比例对空气污染的改善是不够的。区域绿地的功能决定于资源分布的不均衡、经济增长的空间差异所形成的污染源的空间异质化、环境需求的空间异质化。所以,绿色空间的大气污染削减功能同时受到社会经济的空间差异和绿色空间的景观异质性的影响。本文着眼于绿地在空间异质性上对空气污染的削减功能,定量描述不同类型绿色空间的结构差异和产生的功能异质,探讨大珠江三角洲地区绿色空间对大气污染削减功能形成机制与影响因素。

1 研究区情况

大珠江三角洲,简称大珠地区(Greater Pearl River Delta, GPRD),是中国典型的并且发展最为成熟的大都市区之一,包括广东省境内的广州、深圳、东莞、佛山、肇庆、江门、惠州、珠海、中山等9市,以及香港、澳门特别行政区。该地区是由珠江水系带来的泥沙在珠江口河口湾堆积而成的复合型三角洲,西、北、东三面有山岭包围,千米高空常年存在一个逆温层,特有的地理条件不利于污染物的扩散。同时,随着城市化进程的加快,资源与环境问题日益突出,高层建筑增多,机动车保有量增加,多

收稿日期:2010-06; 修订日期:2011-06.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40830747)。

作者简介:丁宇(1984-),女,硕士研究生,主要从事城市与区域规划。E-mail: dingyu1369@gmail.com

种污染物在时空上重叠,以氮氧化物和可吸入颗粒物构成的区域复合空气污染问题亟待解决。目前环境政策以跨界污染联防联控为重点,基于生态保育与污染控制并重的原则规划珠三角区域绿色廊道。但是都市区的空间管理以均质单元为前提,对于都市经济区内部的地域构成和资源结构还不清楚,急需寻求科学的方法,分析空间异质性与区域绿地的大气污染削减效应之间的联系,以此有针对性地加强空间管理和空间调控。

2 数据与研究方法

2.1 空间异质性计算模式构建

空间异质性是地理学研究的核心内容之一。资源禀赋和社会经济行为的空间差异对绿色空间的规模布局 and 生态功能有重要影响^[4,6]。李嘉图的比较优势理论、佩鲁的增长极理论和弗里德曼“核心-边缘”式经济空间结构^[11]意味着经济增长空间结构差异性导致了资源配置异质,在一定程度上反映环境需求和环境治理能力,可采用GDP、人口统计、人均收入等指标来衡量^[12]。景观生态学的空间异质性有助于维系景观功能的稳定性,在一定程度上反映了土地持续利用的保护性和生态系统稳定性目标,可采用反映景观异质性的坡度、景观破碎度、景观分维度、景观聚集度等指标来衡量^[13]。

(1) 社会经济差异性程度采用国内生产总值(*GDP*)、人均可支配收入(*PSR*)、人口密度(*PD*)、城市面积(*AREA*)4个指标^[4,6,12]进行表征。

(2) 景观异质性程度采用坡度(*SLO*)、景观破碎度指数(*FN*)、景观分维指数(*LSN*)和聚集度指数(*AI*)4个指标进行表征。

本文采用因子分析,空间异质性 Y 采用分类变量的形式,模型表达式如下:

$$Y = x_1 GDP + x_2 PSR + x_3 PD + x_4 AREA + x_5 SLO + x_6 FN + x_7 LSN + x_8 AI \quad (1)$$

2.2 干沉降模型

绿色空间对大气污染的削减量通常以干沉降通量、叶面积和降雨变量进行计算。

$$A = F \times S \times P \quad (2)$$

式中: A 是污染物削减量; F 是干沉积通量; S 为叶表面积; P 为无降雨天气。

(1) 叶片是植物发挥生态功能的主要器官,因此叶表面积是定量城市绿色空间服务功能大小的

一个关键量。叶表面积指阳光直射时叶片垂直投影的总面积。区域尺度叶面积可采用叶面积指数计算,反映生物量状况。

$$LAI = LAR / TAR \quad (3)$$

式中: LAR 是叶表面积; TAR 是植被占地面积; LAI 是叶面积指数。

LAI 受叶面积大小、叶表面特性、树冠结构、复层结构、叶片密度、树龄、分布和其他因子的影响。 LAI 可通过图像运算可实现对遥感影像的归一化植被指数(NDVI)进行反演,得到观测时段的 LAI 的宏观分布情况^[14-15]。

(2) 干沉降通量采用干沉降模型,以干沉积速率 V_d 和干沉降通量 F_d 来描述污染沉积过程。沉积速率 V_d 反映了干沉积过程清除污染物能力的大小,而沉积通量 F_d 则表征清除污染物的多少^[4]。

$$F = V_d \times C \quad (4)$$

$$V_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (5)$$

式中: F 是干沉积通量; V_d 是干沉积速率; C 是大气污染物浓度; R_a 、 R_b 和 R_c 分别代表空气动力学阻力、片流层阻力和冠层阻力。 R_a 、 R_b 相对于 R_c 很小,对于区域尺度分析可以忽略不计。 R_c 与气孔阻力、叶肉阻力和表皮阻力相关,可参数化 R_c ,直接计算 V_d 。

2.3 数据来源

本文采用《广东省城市统计年鉴2006》数据研究社会经济空间异质性。资源空间异质性以2005年6月10日的Landsat ETM影像(分辨率30 m)为基础分析图件,参照土地利用现状图(2005年),应用ENVI对遥感数据进行解译处理,应用景观分析软件FRAGSTATS计算各市及港澳的各项景观格局指标,最终获取景观破碎度、景观分维数和景观聚集度指标值;利用文献中鼎湖山典型植被野外实测的 LAI 值,建立遥感影像反演的NDVI与 LAI 回归统计模型,获得研究区的 LAI 。植被结构数据(包括植被覆盖率、受保护区面积、物种丰富度指数)采用珠三角环境管理委员会提供的各市统计数据^[16]。干沉积速率 V_d 国外展开大量研究,如Nowak等计算了美国各地森林、草地和水体下垫面大气污染物的干沉积速率^[4]。国内相关研究还较少,张艳等利用中国科学院红壤生态试验站微气象站实测的梯度资料和干沉积模型,计算了中国农田和森林下垫面大气污染物的干沉积速率^[17]。

本研究借鉴 Nowak 等^[4]和张艳等^[17]计算的森林、农田、草地、水体下垫面大气污染物的干沉积速率,运用干沉积模型公式(4)计算干沉积通量。空气污染物浓度采用粤港珠江三角洲区域空气监测网络监测报告(2006)提供的空气质量数据,由分布于大珠地区内的 16 个空气质量监测站提供的准确的空气质量数据,同时以国内二级《国家环境空气质量标准》、《香港空气指素指标》为达标参照^[18-19]。

3 计算结果

3.1 空间异质性分区

运用 SPSS 因子分析空间异质性参数,原始数据均顺利通过数据检验,然后进行因子值计算,将多个影响因子合并成 2 个虚拟因子:经济规模因子 z_1 和景观结构因子 z_2 。计算出综合因子 Z ,它是以各主因子的贡献率为权数进行线性加权求和计算而成,表示综合空间异质性系数。然后,对计算出的各因子得分进行排序,可以比较各地异质性差异(表 1)。

经济规模因子 z_1 分为 3 个次区域:①高社会经济次区域:澳门、香港、深圳、东莞;②中社会经济次区域:中山、珠海、佛山、广州;③低社会经济次区域:肇庆、惠州、江门。

景观结构因子 z_2 分为 3 个次区域:①高景观异质性次区域:广州、肇庆、香港、江门、惠州;②中景观异质性次区域:深圳、澳门、东莞、佛山;③低景观异质性次区域:中山、珠海。

综合因子 Z 分成 3 个次区域:①高空间异质性:香港、澳门;②中空间异质性:深圳、广州、东莞、肇庆、惠州、江门、佛山;③低空间异质性:中山、珠海(图 1)。各次区域社会经济特征如表 2 所示。

3.2 植被结构参数

由于大珠地区受 LAI 实测数据限制,将 1995 年大珠地区遥感数据解译的 NDVI 图像与 1995 年鼎湖山典型植被野外实测的 LAI 值^[20]建立统计分析模型。然后用式(6),以大珠地区 2005 年 Landsat ETM 影像(分辨率 30 m)为基础分析图件计算 2005 年的 LAI(图 2)。叶面积指数范围为 3.69~16.70,“中”次区域外围山体 LAI 值最高,“高”“低”次区域绿地 LAI 值较高,水体最低。

$$LAI = \exp(NDVI - 0.36)/0.09 \quad (6)$$

由于受 LAI 实测样本数量和研究区环境的限

制,适用任何地区的模型并不存在。参考美国研究,采用森林覆盖率、叶面积指数、物种丰富度指数和受保护区域面积比重等指标综合反映各次区域的植被结构,以提高信息的准确性和参考价值。表 3 中森林覆盖率、受保护区面积和生物丰富度指数来自珠三角环境管理委员会对各地的统计数据^[16],通过归一化加权平均值的处理得到不同次区域的绿地结构指标。

表 1 2005 年大珠江三角洲空间异质性排名
Tab.1 Ranking order of spatial heterogeneity of the districts in GPRD, 2005

地区	Z_1	排名	Z_2	排名	Z	总排名
香港	1.52	2	0.81	3	7.35	1
澳门	1.98	1	-0.43	7	6.14	2
深圳	0.57	3	0.38	6	3.04	3
东莞	0.15	4	-0.12	8	0.09	5
中山	0.02	5	-1.67	10	-5.23	10
广州	-0.53	7	0.96	1	1.35	4
珠海	-0.44	6	-2.02	11	-7.77	11
佛山	-5.00	7	-0.24	9	-2.33	9
惠州	-0.85	9	0.51	5	-1.05	7
肇庆	-0.80	9	0.82	2	0.02	6
江门	-1.13	11	0.63	4	-1.58	8

表 2 大珠江三角洲各次区域的社会经济特征比较

Tab.2 Socioeconomic differences of the subregions in GPRD

空间异质性	城市面积/km ²	人均可支配收入/元	单位面积 GDP/(万元/km ²)	城市密度/(人/km ²)	总人口/(万人)
高	1131	336883	13.75	25041	730
中	51255	19117	0.30	1528	4216
低	3488	18813	0.43	1096	385

数据来源: 广东省统计局《广东省城市统计年鉴 2006》, 中国统计出版社, 2006。

表 3 大珠江三角洲各次区域的绿地结构

Tab.3 Forest structure index of the subregions in GPRD

空间异质性	森林覆盖率/%	LAI 均值	生物丰富度指数	受保护区面积/%
高	29.67	6.79~13.8	35.94	39.72
中	41.95	3.69~16.7	28.16~85.73	65.62
低	26.37	6.58~13.29	48.62	13.25

数据来源: 森林覆盖率、生物丰富度指数、受保护区面积数据来自《珠江三角洲环境保护规划》^[16]。LAI 由 1995 年 ETM 影像运用公式(6)计算得到。

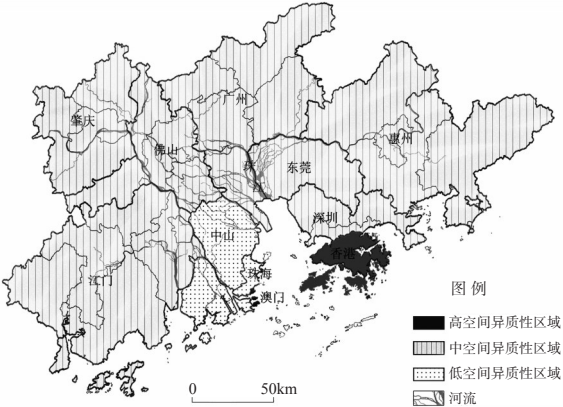


图 1 大珠江三角洲空间异质性次区域分布

Fig.1 Heterogeneity in GPRD, including three subregions

3.3 干沉降通量

结合环境监测数据^[19],采用干沉降通量模型(4)计算出大珠江三角洲各次区域的森林、农田、草地、水体分别对 SO₂、NO₂和 PM₁₀削减的干沉降通量(表4-6)。

3.4 大气污染削减效果

借鉴 Escobedo 提出的森林冠层对大气污染物削减的效果评价^[21]:

$$E = R / (R + A) \tag{7}$$

式中: *E* 表示森林对大气污染的削减率(%); *A* 表示大气污染排放量(kg); *R* 表示干沉降模型中计算的干沉积量(kg)。

由于缺少香港、澳门地区2005年大气污染物的排放量数据,因此,本文仅以珠三角地区,即中、低次区域的森林冠层对大气污染物削减为例,估算森林对各种大气污染物的削减效果(表7)。结果表明,2005年珠三角地区森林对SO₂、NO₂、PM₁₀污染物的削减率分别为1.3%、0.7%和4.1%。

4 结果分析

结果表明,绿色空间对空气污染物的削减存在一定空间差异。除了森林对NO₂削减的干

沉降通量,其他下垫面对各种大气污染物的削减量“中”次区域明显高于“高”、“低”次区域;“高”、“低”次区域差别不大。

“中”次区域是绿地规模最高、大气污染物浓度

表4 2005年各次区域绿色空间对SO₂削减的干沉降通量

Tab.4 Annual SO₂ pollution removal totals in the three subregions of GPRD, 2005

空间异质性	森林削减率	农田削减率	草地削减率	水体削减率
高	0.011	0.010	0.016	0.029
中	0.067	0.064	0.102	0.179
低	0.013	0.013	0.020	0.036

表5 2005年各次区域绿色空间对NO₂削减的干沉降通量

Tab.5 Annual NO₂ pollution removal totals in the three subregions of GPRD, 2005

空间异质性	森林削减率	农田削减率	草地削减率	水体削减率
高	0.010	0.008	0.008	0.001
中	0.036	0.028	0.030	0.002
低	0.094	0.007	0.008	0.001

表6 2005年各次区域绿色空间对PM₁₀削减的干沉降通量

Tab.6 Annual PM₁₀ pollution removal totals in the three subregions of GPRD, 2005

空间异质性	森林削减率	农田削减率	草地削减率	水体削减率
高	0.045	0.042	0.041	0.044
中	0.228	0.213	0.208	0.223
低	0.048	0.045	0.044	0.047

表4-6的数据来源:根据公式(4)计算获得。其中污染物浓度数据来自粤港珠江三角洲区域空气监测网络提供的监测数据^[18]。干沉积速率来自参考文献[4]和[17]。

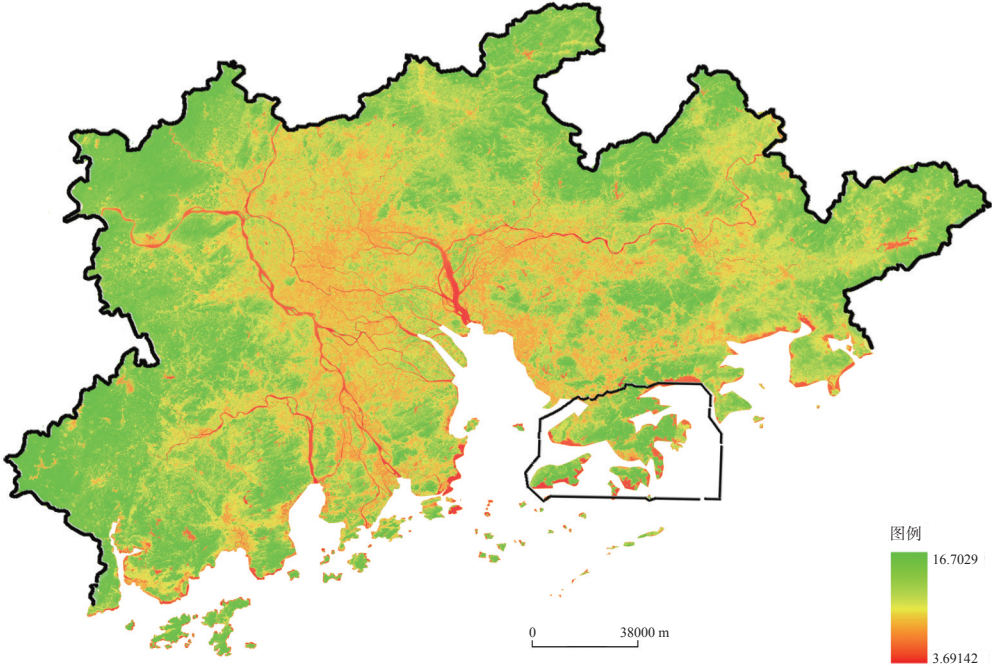


图2 大珠江三角洲2005年LAI分布

Fig.2 Modeling distribution of LAI in the GPRD in 2005

表 7 2005 年珠三角各次区域森林对空气污染物的削减率

Tab.7 Annual air pollution removal rate by forest in the three subregions of PRD, 2005

空间 异质性	SO ₂			NO ₂			PM ₁₀		
	R/万 t	A/万 t	E/%	R/万 t	A/万 t	E/%	R/万 t	A/万 t	E/%
中	0.28	33.7	0.8	0.13	37.2	0.3	1.01	26.0	3.7
低	0.03	6.00	0.5	0.02	4.60	0.4	0.01	2.50	0.4
珠三角地区	0.31	39.7	1.3	0.15	41.8	0.7	1.02	28.5	4.1

数据来源: A 来自参考文献[16], R 是表 4-6 计算后的数据, E 由公式(7)计算后获得。

最高的地区。这一次区域内绿色空间和水体下垫面对于 SO₂ 的削减量是“高”、“低”次区域的 5~7 倍; 对 NO₂ 的削减量分别是“高”、“低”次区域的 3~4 倍; 对 PM₁₀ 的削减量是高、低次区域的 3~4 倍。这一方面由于“中”次区域占研究区面积的 92%, 森林覆盖率和受保护面积比重最高, 对污染扩散起到“结构控制”作用, 尤其对可吸入颗粒物污染削减效果最为显著(如表 6 和表 7)。同时, 广州、肇庆、江门、惠州的景观异质性和生物丰富度指数较高, 构成大珠地区污染扩散重要的生态屏障。另一方面, “中”次区域是单位面积产出效率较低的区域, 佛山、广州、肇庆、惠州、江门的 socioeconomic 差异性普遍偏低, 企业分布趋于分散, 催生经济发展的外部效应问题突出, 形成以广佛肇为中心的空气污染区^[21-22], 并由此向周围扩散, 影响区域大气质量^[16,18]。因此, “中”次区域仍处于污染驱动阶段, 即绿色空间对大气污染物的削减受污染物浓度影响显著。

“高”、“低”次区域干沉积通量相近。“高”次区域景观异质性、森林覆盖率和叶面积指数均明显高于“低”社会经济次区域。同时, 该次区域 socioeconomic 差异性最高, 单位面积产出效率和城市密度最高, 是大珠的核心区域, 促进了产业空间集聚和紧凑城市的形成, 也使规模经济外部效应得到更大程度的优化。因此, 该次区域属于生态规模驱动型, 即绿量越高、景观异质性越高, 越有利于空气污染净化。但是“高”次区域的生物丰富度指数最低, 表明群落结构不尽合理, 降低了绿地的生态功能。

“低”次区域珠三角几何中心位置, 与“中”次区域相比, 森林覆盖率和受保护面积比重最低, 绿地规模不足限制了对可吸入颗粒物污染的吸收。表 7 显示“低”次区域对 PM₁₀ 的削减率仅达 0.4%。但是, “低”次区域人口压力小, socioeconomic 差异性较高, 城市集聚程度高。景观异质性低, 绿色空间分布呈均质性; 生物丰富度最高, 叶面积指数较高。说明绿地规模虽低, 却具有生物多样性和生态结构的优势, 有效削减氮氧化物大气污染(表 5、表 7)。因此,

该次区域对大气污染削减不受规模限制, 属于生态结构驱动型, 生态结构的连续性和生态功能的整体性有助于污染削减效应的发挥。

5 结论与讨论

本文在区分社会经济空间差异性与景观异质性的基础上, 对空间异质性进行了定量测算, 通过干沉积通量模型对影响绿色空间削减空气污染的因素进行了分析。总体上, 大珠地区 65% 的城市人口拥有约 30% 的森林覆盖率, 其他绿色景观占 16%。珠江三角洲地区森林下垫面对 SO₂、NO₂、PM₁₀ 污染物的削减率分别为 1.3%、0.7% 和 4.1%。

从绿地的生态功能发挥角度, 不同次区域叶面积对大气污染削减效益有较大差异。由于叶面积绿量是进行生态效益定量的基础^[14], 在植物削减污染效应中, 叶面积绿量与森林覆盖率、保护区面积规模等宏观衡量生物量指标呈正相关关系, 它们在很大程度上决定了对可吸入颗粒物污染削减功能的大小^[23-26], 且森林对可吸入颗粒物的削减能力最强, 农田和草地稍弱。因此, 从提高绿地规模(包括森林覆盖率、受保护区面积等)、改善绿地结构(包括乔灌木垂直结构、配置方式、生物多样性)的角度提高叶面积绿量能够有效削减 PM₁₀ 污染。其次, 景观格局即利用景观格局指数分析生态系统水平结构、异质性、连通性等特征与大气污染削减的相关关系^[9,27-29], 同样在本研究中得到验证。“高”、“低”次区域虽然绿量规模低, 但是具有不同特征的景观结构优势, 对削减空气污染发挥重要作用。

从空间异质性角度, 大气污染削减率因人口密度、产业分布、绿色空间规模、空间分布等空间异质化的表征方式和影响程度的不同而有所差异。“中”次区域占大珠面积的 92%, 至今尚未达到绿化驱动型污染削减效应的水平, 主要受污染物浓度影响; 自然条件、植被特征和能源消费特征也制约着区域绿地削减空气污染功能的发挥。空间异质性低的

城市不应以追求绿化覆盖率为目标,那些绿化规模大、景观异质性低、生物丰富度低、生态结构差的地区也难以形成对空气污染的有效削减。“高”、“低”次区域处于平原地区,是社会经济差异性较高的区域,城市密度反映出两个次区域分别形成集中紧凑型、分散疏松式的布局形态,导致空气污染源分布特征的差异。绿地对污染的削减进入了生态功能驱动阶段,即污染削减与生物丰富度和叶表面积指数密切相关,这些因子或是与乔冠草垂直结构密切相关,或是与空间结构连接性相关,或是生物多样性丰富且保育、管理较好的区域。

空间异质性的形成有其地理资源因素,也有经济的因素,而且经济因素起着越来越重要作用。绿色空间对污染削减效应需要发挥景观异质性机制和产业空间集聚机制,未来在促进绿色空间提升环境品质、促进生态系统稳定性等功能的形成时,应更加重视在社会经济差异性、自然条件差异性、景观格局异质性等不同异质化因素影响下,绿色空间生态功能的差异。此外,绿量并非绿地功能的必要条件^[26],现代社会空间因素对某些地区或行业的限制越来越小,同时,任何城市的空气污染问题都不是单一的、静止的,如果把空气污染物削减功能限定在某一绿地规模上,不仅难以达到理想效果,而且会对叶面积绿量积累产生极大的破坏,削减大气污染的作用就会显著减小。因此,绿色空间不仅要有“量”的控制,更要突出“质”或“结构”的要求。通过空间异质性与绿色空间特征相配合开展功能导向型研究是保证绿色空间发挥生态效益的基础。

由于篇幅所限,本文着重论述空间异质性的判别方法和绿色空间对大气污染削减的总体特征。下一步应该深入挖掘,探讨不同地域类型各自的空间分布规律及相互的空间关系,归纳跨尺度绿色空间对污染削减过程和管理中面临的突出问题。就“中”次区域的地域分布来看,地形差异性,工业沿河、沿主要交通干道分布的特征非常明显,同时反映出空气污染、侵占绿地、破坏生态格局等问题,这些问题有待进一步研究。另外,本文对空间异质性的分析结合多元数理统计方法,尚需结合空间联系判别方法深入分析;干沉积模型中赋指标权重在方法上还没有突破,主观性过强是其一大弱点^[4,6];在影像获取和数据整理方面需要较大的工作量,可操作性方面还存在一些问题。提高评价整体的科学客观性,实现评价方法的重大突破,是绿色空间生态效应评价发展的必然趋势。

参考文献

- [1] 周生贤. 国务院关于大气污染防治工作进展情况报告. 中国新闻网, 2009. <http://www.chinanews.com.cn/gn/news/2009/04-22/1659161.shtml>.
- [2] World Bank. Vehicular air pollution: An overview. World Bank technical paper. The World Bank, Washington, DC. 1997.
- [3] Yang J, McBride J, Zhou J, et al. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forest Urban Green*, 2005, 3(2): 65-78.
- [4] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forest Urban Green*, 2006, 4(3): 115-123.
- [5] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, 9(3): 347-360.
- [6] Escobedo F J, Wager J E, Nowak D J, et al. Analyzing the cost-effectiveness of Santiago de Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Environmental Management*, 2008, 86(1): 148-158.
- [7] Escobedo F J, Nowak D J, Wagner J E, et al. The socio-economics and management of Santiago de Chile's public urban forests. *Urban Forest*, 2006, 4(3): 105-114.
- [8] Heynen N C, Lindsey G. Correlates of urban forest canopy cover: implications for local public works. *Environmental Pollution*, 2003, 11(4): 243-245.
- [9] Pickett S T A, Cadenasso M L, Grove J M, et al. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management*, 2010, 92(3): 331-363.
- [10] 王成, 周金星. 城镇绿地生态功能表现的尺度差异. *东北林业大学学报*, 2002, 30(5): 107-111.
- [11] 杨吾扬, 梁进社. 高等经济地理学. 北京: 北京大学出版社, 2000.
- [12] Escobedo F J. A cost-effective analysis of urban forest management's role in improving air quality in Santiago [D]. New York: State University of New York, 2004.
- [13] 彭建, 王仰麟. 我国沿海滩涂景观生态初步研究. *地理研究*, 2000, 19(3): 249-256.
- [14] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展. *生态学杂志*, 2005, 24(5): 537-541.
- [15] 林文鹏, 赵敏, 张翼飞, 等. 基于 SPOT 遥感影像的城市森林叶面积指数反演. *测绘科学*, 2008, 33(2): 57-60.
- [16] 珠三角环境保护规划编委会. 珠江三角洲环境保护规划. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [17] 张艳, 王体健, 胡正义, 等. 典型大气污染物在不同下垫

- 面上干沉积速率的动态变化及空间分布. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 591-602.
- [18] 广东省环境保护监测中心. 香港特别行政区环境保护署. 粤港珠江三角洲区域空气监测网络监测报告, 2006. http://www.epd.gov.hk/epd/sc_chi/action_blue_sky/files/PRD_2006_report_sc.pdf, 2007.4.
- [19] 广东省环保局. 广东省环境质量报告. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [20] 任海, 彭少麟. 鼎湖山森林群落的几种叶面积指数测定. 生态学报, 1997, 17(2): 220-223.
- [21] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by urban forest. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 9(39): 102-110.
- [22] 赵勇, 李树人. 大气污染分区与绿化模式研究. 环境科学, 1994, 15(6): 23-27.
- [23] 陈芳, 周志翔, 肖荣波, 等. 城市工业区绿地生态服务功能的计量评价: 以武钢厂区绿地为例. 生态学报, 2006, 26(7): 2230-2235.
- [24] 周志翔, 邵天一, 王鹏程, 等. 武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应. 生态学报, 2002, 22(12): 2036-2040.
- [25] 高金晖. 北京市植物滞尘影响机制及其效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [26] 陈自新, 苏雪痕, 刘少宗, 等. 北京城市园林绿化生态效益的研究. 中国园林, 1998, 14(3): 53-56.
- [27] 邹晓东. 城市绿地系统的空气净化效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [28] 常青, 李双成, 李洪远, 等. 城市绿色空间研究进展与展望. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1640-1646.
- [29] 邵天一, 周志翔, 王鹏程, 等. 宜昌城区绿地景观格局与大气污染的关系. 应用生态学报, 2004, 15(4): 691-696.

Spatial Heterogeneity and Air Pollution Removal by Green Space in Greater Pearl River Delta

DING Yu¹, LI Guicai¹, LU Xu², Gao Mei¹

(1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China;

2. Architecture and Urban Planning College, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: With rapid urbanization, the importance of air pollution removal by regional green space had been widely accepted. Therefore, the concept of spatial heterogeneity and ecological function were applied to regional management and spatial planning. This article took the view of spatial heterogeneity, and analysed the relevant factors and discrimination method. The current study established the correlation between air pollution reduction effect and spatial characteristics, which revealed the impact of spatial heterogeneity on vegetation. The study showed that the relative effects of regional forest cover in reducing air pollutant concentrations in the atmosphere of SO₂, NO₂, and PM₁₀ were 1.3%, 0.7% and 4.1%, respectively, which varied in different sub-regional air quality improvement. Pollutant removal rates in moderate ability subregion was obviously higher than that in high-ability subregion and low-aridity subregion. However the driving force of ecological function in moderate aridity subregion was still at the level of pollution-driven stage, compared with the other two subregions at the levels of green feature-driven stage. Therefore, the effects of biological diversity, ecological structure and landscape pattern on ecological function were more prominent. Finally, some problems were pointed out and function-oriented research was proposed as the main development trend in the future.

Key words: air quality; heterogeneity; regional green space; Greater Pearl River Delta (GPRD)

本文引用格式:

丁宇, 李贵才, 路旭, 等. 空间异质性及绿色空间对大气污染的削减效应: 以大珠江三角洲为例. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1415-1421.