

中国城市空气质量与土地集约利用的匹配关系及影响因素

杨群叶¹, 梁彦庆^{1,2*}, 黄志英³, 崔立焱⁴, 马万里^{1,2}, 葛京凤^{1,2}

1. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024
2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024
3. 河北地质大学土地科学与空间规划学院, 石家庄 050031
4. 河北省国土空间规划编制研究中心, 石家庄 050056

摘要 从空间匹配角度探究空气质量与土地集约利用的相互作用关系及影响因素,对缓解空气污染、创新城市节约集约用地新模式具有重要意义。利用趋势面、空间自相关、重力模型、空间错位模型、灰色关联度模型等方法对全国290个地级及以上城市空气质量与土地集约利用水平的空间分异规律、空间匹配关系及其驱动因素进行探讨。结果表明:(1)2017年全国城市空气质量在空间上呈现出以冀中南城市群为核心向外逐渐好转的中心—外围结构,集聚特征显著;全国城市土地集约利用水平在空间上呈现出以京津冀、长三角、珠三角城市群为核心向外扩散的多核空间结构,集聚特征亦比较明显。(2)全国城市空气质量与土地集约利用水平在空间上存在不完全协同、匹配现象,负向错位区主要分布在京津冀和长三角城市群,错位强度呈核心—边缘的空间结构,正向错位区分布在东北、西南、西北和南部沿海地区,错位强度呈现出由东南向西北方向递减的空间分布格局;空间错位贡献度具有明显的地域差异性,东部地区尤为突出。(3)全国城市空气质量与土地集约利用两系统总体关联度较强,其中影响空气质量的污染物浓度以及影响土地集约利用的归一化植被指数(NDVI)、建成区绿化率和地均工业废水排放量等因素为造成两系统空间错位差异的主要原因。

关键词 空气质量;土地集约利用;空间匹配;灰色关联度;中国地级及以上城市

收稿日期:2020-09-18;修回日期:2021-01-07

基金项目:河北省教育厅科学技术研究重点项目(ZD2019115);河北师范大学科技类科研重点项目(L052018Z09);国家自然科学基金项目(41471090);河北省自然地理学重点学科项目

作者简介:杨群叶,硕士研究生,研究方向为区域经济与土地利用,电子信箱:15227838391@163.com;梁彦庆(通信作者),副教授,研究方向为资源评价与规划、区域经济与土地利用,电子信箱:liangyanqing@126.com

引用格式:杨群叶,梁彦庆,黄志英,等.中国城市空气质量与土地集约利用的匹配关系及影响因素[J].科技导报,2022,40(7):54-64;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.07.006

改革开放以来,中国城市化率增长较快,2017年已达到 57.96%,预计未来 20~30 年将超过 70%^[1-2]。随着城市“紧凑化”发展,较少的土地资源承载更多的城市要素,土地利用及人类活动越来越集中于狭小的空间,环境问题特别是大气污染问题变得越来越敏感,2017年全国 338 个地级及以上城市中,有 70.7%的城市空气质量超标,大气污染引发的雾霾现象也在多地持续频发,已严重威胁人类身心健康和城市的可持续发展^[3]。城市外延式的扩张通常造成土地的粗放利用,在付出资源和环境沉痛的代价后,人们逐渐意识到集约利用土地资源、构建紧凑城市才是未来中国实现城市可持续发展的必由之路^[4]。因此,在紧凑城市化发展背景下,研究空气质量与土地集约利用的协调关系,对科学优化土地空间布局,实现城市紧凑集约可持续发展具有重要意义。

国内外研究人员对空气质量与土地集约利用进行了大量有益探索。针对空气质量的研究多集中在以下 3 个方面:(1) 不同尺度空气质量时空分布及演化特征。从全国^[5]、区域^[6]、省域^[7]、城市^[8-9]等不同层面分析空气质量的分布特征以及重点污染地区或者重点时间段的空气质量变化规律。(2) 空气质量影响因素。多从气象、社会、经济因素等方面进行探索,其中温度、风速、降水量等气象因素,机动车尾气等社会因素,国内生产总值(GDP)、产业比重等经济因素均对空气污染浓度有显著影响^[10-11]。(3) 空气质量与其他系统的关系及影响机理。包括空气质量与城市化^[12]、经济发展^[13]、旅游业^[14]、土地利用^[15]等的关系及影响机理。现有对城市土地集约利用的研究主要包括:(1) 不同尺度土地集约利用评价的时空分异规律及其影响因素、驱动机制。包括全国^[16]、省域^[17]、城市^[18]尺度的土地集约利用时空分布格局。(2) 土地低碳利用时空格局演化。研究土地集约利用与碳排放^[19]、低碳经济的关系^[20]以及影响土地低碳利用的障碍因素^[21]。(3) 土地集约利用与其他系统的协调关系。探究土地集约利用与经济发展^[22]、城镇化^[23]、生态环境^[24]的协调关系及互作机理。

随着对两者研究的逐步深入,研究人员发现城

市建设用地、公园绿地面积、人口密度等反映城市土地利用情况的相关变量均与空气质量关联紧密^[25-26];在城市扩张中,土地集约利用各要素对大气污染物浓度的影响较大,而大气污染物则对土地集约利用表现出较强的约束力,且随时间发展两者的关系是呈逐步增强态势^[27-28],这为从空间匹配角度分析空气质量与土地集约利用之间的协调关系奠定了基础。综上所述,空气质量与土地集约利用之间存在着复杂的关系,当前少有从市域层面研究空气质量与土地集约利用之间的协调关系。基于以上分析,以全国 290 个地级及以上城市为研究对象,通过选取特征变量构建综合测度指标体系,运用趋势面、空间自相关分析空气质量与土地集约利用水平的空间分异特征,利用重力模型、空间错位模型、灰色关联度模型等对二者的空间匹配关系及影响因素进行探究,旨在为推动城市土地环境协调发展、改善空气质量及探索节约集约用地新机制提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 指标体系与数据来源

考虑到 2001 年以来中国城市行政区划的变动情况,某些地级市数据缺失较多,本文以 2017 年行政区划为基准进行数据归并,保留了 290 个地级及以上城市为研究对象(不含港澳台,以下统称“城市”)。多数研究人员在研究生态环境与土地集约利用的关系时,选用重要污染物排放量来表征环境污染状况,然而环境污染具有非完全本地原生性特点,仅选取污染物排放量不能够全面地表征地区的空气污染问题。根据空气污染的扩散效应,污染物的排放不仅会造成本地区空气污染,也会造成邻近地区空气质量下降,在构建空气质量水平评价指标体系时从重要污染物排放量和污染物浓度 2 个角度考虑,能够涵盖空气质量的众多要素,以更全面衡量空气质量水平状况^[29-30](表 1)。

土地承载着城市生产、生活、生态多维空间职能,支撑着城市经济社会可持续发展,在综合考虑土地利用特点、经济发展状况以及生态环境可持续

性的基础上,构建社会—经济—生态等三大准则层 15 个指标层的土地集约利用评价指标体系,其中社会要素体现对土地的利用情况,经济要素是决定

城市土地集约利用水平的主导因素,生态要素则是其重要限制因素^[31-32](表 2)。

表 1 城市空气质量评价指标体系及权重

目标层	准则层	指标层	单位	权重
空气质量水平	污染物浓度	X_1 PM _{2.5}	μg/m ³	0.1041
		X_2 PM ₁₀	μg/m ³	0.1103
		X_3 SO ₂	μg/m ³	0.1394
		X_4 NO ₂	μg/m ³	0.1203
		X_5 O ₃	μg/m ³	0.1030
		X_6 CO	μg/m ³	0.0931
	污染物排放量	X_7 人均工业 SO ₂ 排放量	t/人	0.1664
		X_8 人均工业烟尘排放量	t/人	0.1634

表 2 城市土地集约利用评价指标体系及权重

目标层	准则层	指标层	指标含义	权重
土地集约利用水平	社会集约程度	Y_1 人口密度	年末常住人口/土地面积(人/km ²)	0.0581
		Y_2 二三产业从业人口比重	二三产业从业人口/年末常住人口(%)	0.1116
		Y_3 人均道路面积	城市道路面积/市辖区人口(km ² /人)	0.0849
		Y_4 人均城市建设用地面积	城市建设用地面积/市辖区人口(km ² /人)	0.0699
		Y_5 地均邮电业务量	邮电业务总量/土地面积(万元/km ²)	0.0453
		Y_6 地均医院数量	医院数量/土地面积(所/km ²)	0.0958
	经济集约程度	Y_7 地均固定资产投资	固定资产投资/土地面积(万元/km ²)	0.0701
		Y_8 地均财政支出	财政支出/土地面积(万元/km ²)	0.0443
		Y_9 地均科技支出	科技支出/土地面积(万元/km ²)	0.0413
		Y_{10} 地均社会消费品零售额	社会消费品零售额/土地面积(万元/km ²)	0.0570
		Y_{11} 地均财政收入	财政收入/土地面积(万元/km ²)	0.0473
		Y_{12} 人均地区生产总值	地区生产总值/年末常住人口(万元/人)	0.0374
	生态集约程度	Y_{13} 地均工业废水排放量	工业废水排放量/土地面积(万 t/km ²)	0.0579
		Y_{14} 建成区绿化率	绿化面积/建成区面积(%)	0.0627
		Y_{15} 植被 NDVI	反映区域内植被覆盖程度(%)	0.1164

大气污染物浓度数据和植被 NDVI 来自中国科学院资源与环境中心,其他数据主要来源于 2018 年《中国城市统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》。为消除各指标量纲不同且各指标对系统存在的差异,在测算过程中采用极差标准化方法对数据进行处理。参考任彩凤、王钊等的研究成果^[32-33],为减少人为因素对权重的影响,采用均方差决策法确定各指标的权重(表 1、表 2),运用多因素综合评价法测算得到全国城市空气质量和土地集约利用水平。

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关

空间自相关反映某区域内观测数据间的相关性,包括全局空间自相关和局部空间自相关^[34]。运用 GeoDa 软件基于邻接 Queen 空间权重矩阵,利用空间自相关揭示空气质量与土地集约利用的空间集聚特征,探索其空间分布规律。全局空间自相关公式为

$$\text{Moran}'s I = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (F_i - \bar{F})(F_j - \bar{F})}{S^2 \left(\sum_i \sum_j w_{ij} \right)} \quad (1)$$

局部空间自相关公式为

$$\text{Moran's } I = \frac{(F_i - \bar{F}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (F_j - \bar{F})}{S^2} \quad (2)$$

式中, F_i 和 F_j 分别为城市 i 和城市 j 的土地集约利用水平; $(F_i - \bar{F})$ 为第 i 个城市平均值的偏差; W_{ij} 为基于空间 k 邻接关系建立的空间权重矩阵; S^2 为方差。

1.2.2 重力模型

重力模型表示在区域空间某点能够维持各个方向上的力量均衡^[35-36]。利用该模型计算空气质量与土地集约利用重心的空间位置用以解释两者在空间上的协同发展状态,公式如下:

$$A_c = \frac{\sum_{i=1}^m C_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^m C_i}; B_c = \frac{\sum_{i=1}^m C_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^m C_i} \quad (3)$$

式中, A_c 、 B_c 为全国城市空气质量重心的纬度和经度; A_i 、 B_i 为 i 市行政中心的纬度和经度, C_i 表示城市 i 的空气质量, 同理可计算出全国城市土地集约利用重心 (A_F , B_F)。

1.2.3 空间错位指数及贡献度

土地集约利用的核心在于实现土地集约节约利用与生态环境的协调发展,而不是一味地追求更高的量化发展目标,利用空间错位模型可反映空气质量与土地集约利用的空间分布相似性进而揭示两者的空间匹配状态^[37],公式如下:

$$SMI_i = \frac{1}{F} \left[\left(\frac{C_i}{C} \right) F - F_i \right] \times 100 \quad (4)$$

$$R_i = \left[\frac{|SMI_i|}{\sum_{i=1}^m |SMI_i|} \right] \times 100 \quad (5)$$

式中, SMI_i 为 i 市的空间错位指数,指数值越大则空间错位程度越高,反之则越低; C 为城市空气质量, F 为城市土地集约利用水平, R_i 为错位贡献度,值越大表示贡献度越大。

1.2.4 灰色关联度模型

灰色关联度模型用于体现空气质量与土地集约利用两系统及各指标与系统之间的关联程度。参照文献[38]、[39]的研究成果将关联度分为低关联(0,0.3]、中等关联(0.3,0.5]、较高关联(0.5,0.7]、高关联(0.7,1] 4种类型,关联系数越接近1,关联性越

大,公式如下:

$$H_{ns}(t) = \frac{\min_n \min_s |X_n(t) - Y_s(t)| + \alpha \max_n \max_s |X_n(t) - Y_s(t)|}{|X_n(t) - Y_s(t)| + \alpha \max_n \max_s |X_n(t) - Y_s(t)|} \quad (6)$$

$$h_{ns} = \frac{1}{k} \sum_{ns=1}^k H_{ns}(t); d_n = \frac{1}{l} \sum_{n=1}^l h_{ns}(t); d_s = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m h_{ns}(t) \quad (7)$$

式中, $H_{ns}(t)$ 为全国城市 t 年第 n 个空气质量指标与第 s 个土地集约利用指标间的关联系数, $X_n(t)$ 、 $Y_s(t)$ 分别为全国城市 t 时刻空气质量与土地集约指标的标准化值; α 为分辨系数,一般取 $\alpha=0.5$; k 为样本数据; h_{ns} 为平均关联度; d_n 为空气质量的第 n 个指标与土地集约利用系统的平均关联度; d_s 为土地集约利用系统第 s 指标与空气质量系统的平均关联度; l 、 m 分别为空气质量与土地集约利用两系统的指标数。

2 结果与分析

2.1 城市空气质量与土地集约利用的空间特征

2.1.1 城市空气质量空间分异特征

由趋势面(图1)分析发现,全国城市空气质量在东西、南北方向均呈现出由两侧向中间递减的U型趋势,“中部塌陷式”结构特征明显,其中排名前10的城市依次是三亚市0.9669、伊春市0.9248、海口市0.9000、黑河市0.8949、丽江市0.8780、普洱市0.8709、呼伦贝尔市0.8616、安顺市0.8404、临沧市0.8265、鹤岗市0.8207,排名后10的城市依次是安阳市0.2931、淄博市0.2851、咸阳市0.2817、保定市0.2446、石家庄市0.2384、唐山市0.2365、晋城市0.2331、临汾市0.2314、邯郸市0.2198、邢台市0.1975。由图2可知,全国城市空气质量空间分布差异显著,呈现出以冀中南城市群为核心向外逐渐扩散的“中心—外围”结构。空间自相关检验结果显示,全局 Moran's I 指数为0.772且 z 值高于1.96并通过1%水平的显著性检验,表明全国城市空气质量分布整体上存在空间依赖性,聚集状态显著。

为进一步分析各城市空气质量的空间异质性,

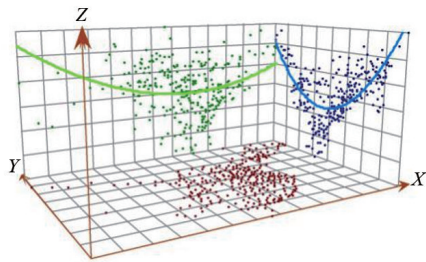


图1 城市空气质量趋势面

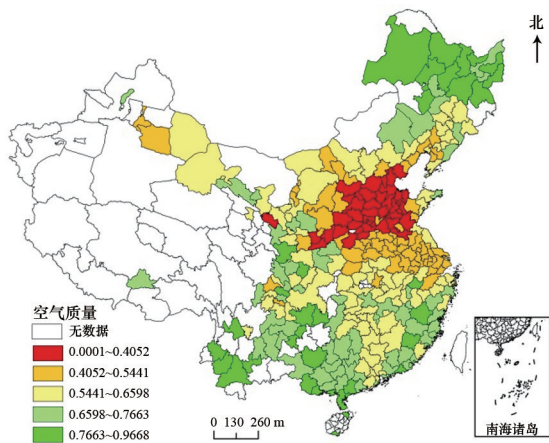


图2 城市空气质量空间分布特征

采用LISA聚集图考察其局部聚集情况。由图3可以看出,全国城市空气质量以HH(高高)集聚和LL(低低)集聚为主,所包含城市数量分别为58个和62个。HH(高高)集聚区分布在东北、西南和南部沿海地区,主要包括海峡西岸、北部湾、滇中、黔中等城市群,其中东北地区城市森林覆盖率高、水资源丰富有利于污染物沉降,空气质量良好;西南地区城市多种地形交错分布,易形成局部强对流,有利于污染物的扩散,加之植被类型丰富、覆盖率高,维持了较好的空气状态;沿海城市受海陆环流影响形成海陆间空气输送的良性循环,在一定程度上稀释了污染物浓度,有利于大气污染物转移,空气质量良好。LL(低低)集聚区分布在华北平原和黄土高原地区,主要包括京津冀、鲁西北、晋中、中原城市群,该类区域城市气候干燥、水土固定率较低、冬季取暖燃煤量大,细小颗粒物在空气中滞留时间长、导致空气污染高于其他地区。HL(高低)集聚区仅有内蒙古自治区的鄂尔多斯市,无LH(低高)集聚区。

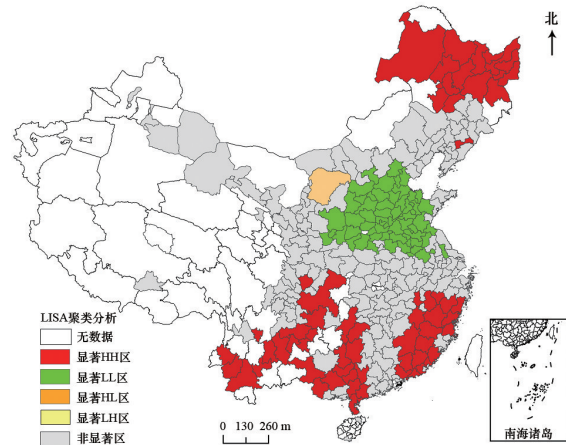


图3 城市空气质量LISA集聚图

2.1.2 土地集约利用空间分异特征

通过对趋势面(图4)分析发现,全国城市土地集约利用水平从东向西呈递减趋势,西部地区低于其他地区;从北向南以上升趋势为主,南方地区多数城市土地集约利用得分较高。排名前10的城市依次是深圳市0.7366、上海市0.4860、北京市0.4407、成都市0.4402、珠海市0.4308、海口市0.4230、东莞市0.4103、厦门市0.4046、南京市0.4007、广州市0.3819,排名后10的城市依次是哈密市0.1971、吐鲁番市0.1914、庆阳市0.1863、中卫市0.1846、吴忠市0.1813、定西市0.1784、白银市0.1689、巴彦淖尔市0.1655、武威市0.1434、酒泉市0.1334。由图5可知,全国城市土地集约利用水平地域性特征明显,在空间上呈现出以京津冀、长三角、珠三角为核心向外扩散的多核结构特征。空间自相关检验结果显示,全局Moran's I 指数为0.377, z 值高于1.96并通过1%水平的显著性检验,表明全国城市土地集约利用水平分布整体上存在空间依赖性,聚集状态明显。

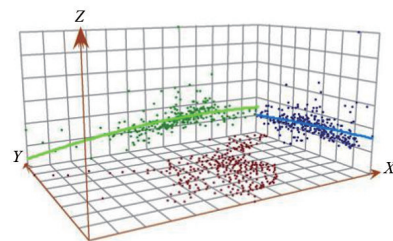


图4 城市土地集约利用趋势面

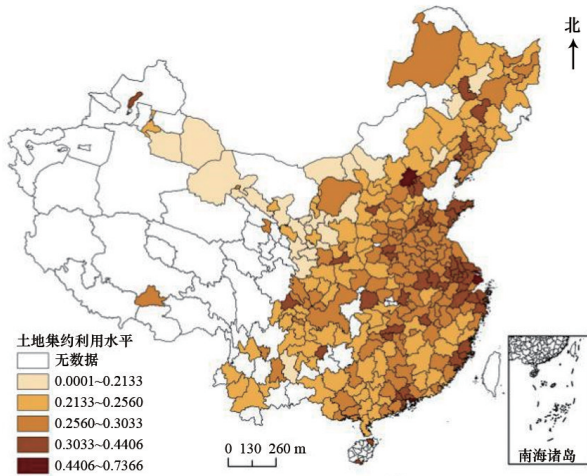


图5 城市土地集约利用水平空间分布特征

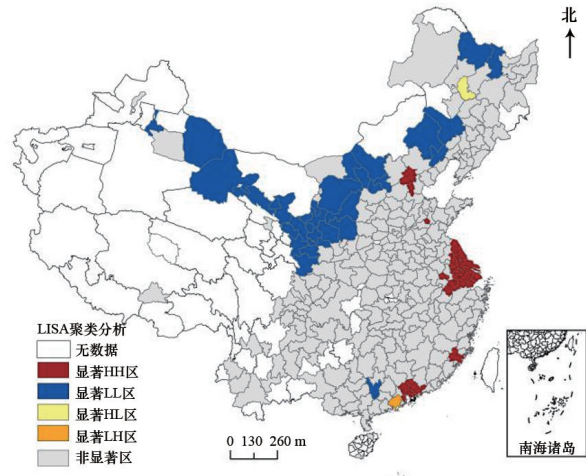


图6 城市土地集约利用水平LISA集聚图

为进一步研究各城市土地集约利用水平的局部集聚特征,同样利用局部空间自相关绘制LISA集聚图进行分析。由图6可知,全国城市土地集约利用水平的HH(高高)集聚区分布在北部沿海、东部沿海和南部沿海地区,主要包括京冀、长三角、珠三角等地的23个城市,这些城市土地各方面投入水平较高,基础设施比较完善,社会和经济集约度较高,其中深圳市、上海市、北京市的土地集约利用水平远高于其他城市,作为多核中心引领全国稳步发展。深圳市作为国际化都市和全国性经济中心,实力雄厚,土地集约利用水平最高。上海市和北京市两大城市现代化程度高,生产型服务业发达,是人口、资本、信息技术等要素集聚地,由于本地企业大多处于产业价值链的中高端,企业之间关联效应明显,容易获得规模经济,加之城市结构布局较为合理,集约值均高于0.4400。LL(低低)集聚区主要分布在西北和黄河中下游北部地区,包括呼包鄂榆、宁夏沿黄、兰西城市群等31个城市,这些城市土地的经济投入产出水平较低,城市基础设施建设相对不足,大部分城市人口增长速度低于城市建设用地扩展速度,但城市后备土地资源较多,生态环境质量相对较好,土地开发潜力大。HL(高低)集聚区和LH(低高)集聚区分别位于黑龙江省大庆市和广东省江门市。

2.2 中国城市空气质量与土地集约利用的空间匹配关系

空气质量的重心位于32.41°N, 113.63°E,土地集约利用水平的重心位于32.63°N, 114.12°E,就两者所属地域单元来讲,空气质量与土地集约利用水平的重心分别落入河南省南阳市和驻马店市,存在一定偏离,即两者在空间上存在不完全协同、匹配现象。

根据空间错位指数值,结合自然断点分级法,将全国城市划分为6类区域(图7):负向高错位区(-0.5127≤SMI<-0.1846)、负向中错位区(-0.1846<

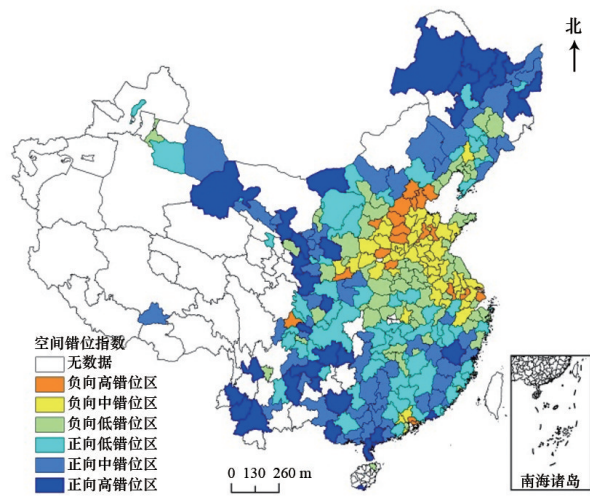


图7 城市空气质量与土地集约利用空间错位指数

$SMI < -0.0917$)、负向低错位区 ($-0.0917 \leq SMI < 0$)、正向低错位区 ($0 \leq SMI < 0.0652$)、正向中错位区 ($0.0652 \leq SMI < 0.1397$) 和正向高错位区 ($0.1397 \leq SMI < 0.2247$)。从空间错位方向和错位强度看,负向错位区主要分布在京津冀和长三角城市群,错位强度呈现出以北京市、上海市为中心较显著的局域型“核心—边缘”空间结构,在一定范围内呈现出从中心向外围递减的规律,其特征为土地集约利用水平较高,空气质量发展则相对滞后。该区域多紧凑发展型城市,基础设施较完善,土地经济投入和产出水平较高,在经济发展和城市化进程中随着建成区面积的不断扩大,人口密度增加,生产生活垃圾排放量大,机动车数量的激增排放出大量的氮氧化物,对空气造成污染,制约了该地区土地集约利用水平的进一步提升。正向错位区主要分布在东北、西南、西北和南部沿海地区,错位强度呈现出较显著的低—中—高错位区自东南向西北方向依次递减的梯度空间分布格局,空气质量发展状况优于土地集约利用发展状况。东北、西南、西北地区城市因产业集聚效应较差、科技创新能力相对缺乏、对外资的吸引力度较小导致社会经济基础薄弱,土地集约利用水平相对较低。南部沿海地区城市气候湿润温暖,海陆风的循环作用加速污染物扩散,空气中污染物浓度低,该区域在强调经济发展的同时注重生活品质的提升并利用现代科学技术加强对空气质量的保护。中部地区则呈现出非常明显的正、负低错位交汇现象,长江流域地区的湖北省、湖南省和江西省比较典型,表明这些地区的空气质量与土地集约利用水平较为协调,空间错位现象不显著。

根据错位贡献度(图8)分析可知,东部地区的京津冀、长三角、珠三角城市群,西部宁夏沿黄、黔中、滇中城市群错位贡献度较高,而长江中游地区空间错位贡献较低。其中,错位贡献度最大的是深圳市,达到1.8226%,其次是上海市、成都市、北京市、西安市等,贡献度均在1%以上,最低的是江门市,贡献度仅0.0055%。另外,从省际角度看(图9),错位贡献较大的省份中,广东省最高为8.7070%,其次是山东省、黑龙江省、河北省、江苏省、河南省、甘肃省、广西壮族自治区、四川省、山西

省等均高于4.6218%,这10个省错位贡献度合计高达60.6564%,其他绝大部分省份总体贡献度偏低。由此可见,全国空气质量与土地集约利用水平的空间错位现象主要是由少数省份的空间不协调不匹配造成的。

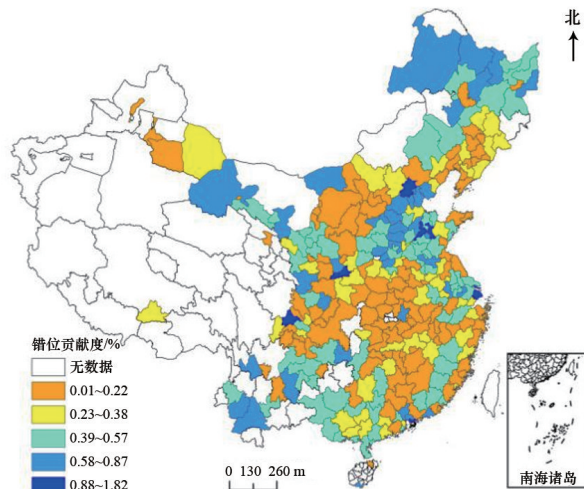


图8 全国城市空气质量与土地集约利用错位贡献度

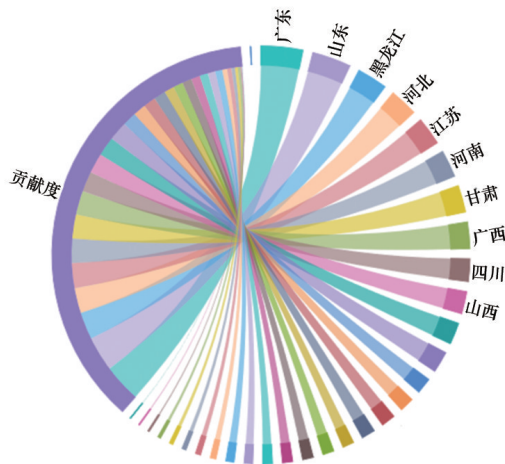


图9 省际空气质量与土地集约利用错位贡献度

2.3 中国城市空气质量与土地集约利用匹配的影响因素分析

由表3可知,空气质量与土地集约利用水平各指标的关联度处在中等关联和高等关联之间(0.3699~0.9716),以中等关联为主的指标占总指标数量的51.67%,较高关联和高等关联指标占比分别为35.00%和13.33%,说明空气质量与土地集约利用水平关联密切,彼此之间存在相互影响、相互制约的关系。

表3 中国地级及以上城市空气质量与土地集约利用水平关联矩阵

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X
Y_1	0.5209	0.4822	0.4371	0.4779	0.5321	0.5198	0.4042	0.3958	0.4712
Y_2	0.6378	0.6066	0.5376	0.6041	0.6532	0.6418	0.4894	0.4802	0.5813
Y_3	0.6783	0.6288	0.5340	0.6098	0.7156	0.6896	0.4705	0.4583	0.5981
Y_4	0.5460	0.5142	0.4617	0.5133	0.5918	0.5905	0.4250	0.4157	0.5073
Y_5	0.4729	0.4454	0.4135	0.4463	0.5100	0.4959	0.3847	0.3766	0.4432
Y_6	0.5570	0.5649	0.4920	0.5523	0.5581	0.5777	0.4462	0.4369	0.5231
Y_7	0.5262	0.4918	0.4400	0.4873	0.5405	0.5443	0.4070	0.3985	0.4795
Y_8	0.4854	0.4542	0.4193	0.4534	0.5044	0.4872	0.3900	0.3818	0.4470
Y_9	0.4679	0.4416	0.4110	0.4425	0.5025	0.4824	0.3828	0.3747	0.4382
Y_{10}	0.5069	0.4693	0.4286	0.4660	0.5178	0.5024	0.3980	0.3898	0.4599
Y_{11}	0.4922	0.4575	0.4212	0.4557	0.4992	0.4834	0.3920	0.3839	0.4481
Y_{12}	0.4578	0.4355	0.4067	0.4374	0.4826	0.4765	0.3781	0.3699	0.4306
Y_{13}	0.6457	0.6467	0.8658	0.7149	0.5774	0.5453	0.9681	0.9716	0.7419
Y_{14}	0.8677	0.8704	0.7030	0.8717	0.8405	0.8183	0.6004	0.5827	0.7693
Y_{15}	0.6976	0.7437	0.9062	0.7958	0.6645	0.6852	0.8662	0.8340	0.7742
Y	0.5707	0.5502	0.5252	0.5552	0.5793	0.5694	0.4935	0.4834	0.5409

2.3.1 空气质量对土地集约利用水平的影响

空气质量各指标对土地集约利用水平的影响不容忽视,关联度在0.4834~0.5793,其中 $\text{NO}_2(X_5)$ 、 $\text{PM}_{2.5}(X_1)$ 、 $\text{O}_3(X_6)$ 、 $\text{CO}(X_4)$ 、 $\text{PM}_{10}(X_2)$ 、 $\text{SO}_2(X_3)$ 与土地集约利用水平的关联度均高于0.5,表现出较强的关联性,人均工业 SO_2 排放量(X_7)、人均工业烟尘排放量(X_8)与土地集约利用水平也有一定的关联。污染物的排放量是决定大气污染程度最基本的因素,污染物浓度升高会影响人类呼吸系统、降低机体免疫力,因此工业、生活废气,汽车尾气大量排放将严重影响人类活动密集度和经济发展水平,降低土地利用效益,而良好的空气质量可为土地利用提供较好的空间环境载体,潜移默化地改变生产生活方式,实现土地利用在保证“质”集约的同时提升“量”集约。

2.3.2 土地集约利用对空气质量的影响

土地集约利用各指标对空气质量的影响程度也有一定的差异,关联度在0.4306~0.7742。植被NDVI(Y_{15})、建成区绿化率(Y_{14})、地均工业废水排放量(Y_{13})与空气质量高度关联,成为影响空气质量的重要因素,其中植被NDVI与空气质量的关联度最高,表明植被NDVI对空气质量有直接提升作用,因此城市可从增加城市绿化率、减少工业废水

排放量等方面入手,吸收有害气体、增加空气湿度、降低污染物浓度,提高空气质量,实现土地节约集约利用与生态环境的协调发展。在社会指标中人均道路用地面积(Y_3)、二三产业从业人口比重(Y_2)、地均医院数量(Y_6)、人均城市建设用地面积(Y_4)均与空气质量表现出较高的关联性。由此可以看出,在城市化进程中,城市建设用地扩张,人口大量涌入,生产生活排放出的污染物对空气质量的影响显著。人口密度(Y_1)、地均邮电业务量(Y_5)、地均固定资产投资(Y_7)、地均社会消费品零售额(Y_{10})、均财政收入(Y_{11})、地均财政支出(Y_8)、地均科研支出(Y_9)、人均地区生产总值(Y_{12})等指标与空气质量均处于中度关联状态。从中可以看出,随着经济发展水平的日益提高,人们开始追求更高的生活质量,环保意识增强,投入更多的资金、技术、人力、物力到空气质量的建设和维护中,不断以精细认知、高效治理、科学监督的体系促进生态环境的健康发展。

总体来说,空气质量系统与土地集约利用系统之间存在着紧密联系,关联度为0.5409,处于较高关联状态。空气质量的改善对土地集约利用水平实现从“量”到“质”的飞跃具有推动作用,同时空气质量对土地盲目集约利用又有一定的约束作用;土

地集约利用水平的提升,对经济发展方式转变、土地利用结构优化、生态环境的维护注入源源不断的动力,最终对空气质量发展起到调节作用,但土地盲目集约利用会对空气质量的发展有一定的胁迫作用,促进两者的协调发展能在经济快速发展的同时实现土地的社会、经济、生态效益最大化,使人与自然和谐共生。

3 结论

1) 全国城市空气质量由东向西、由南向北均呈现出由两侧向中间递减的U型趋势,“中部塌陷式”结构特征明显;城市空气质量呈现出以冀中南城市群为核心向外逐渐扩散的中心—外围结构,空间集聚状态显著,HH集聚的城市主要分布在东北、西南和南部沿海地区,主要包括海峡西岸、北部湾、滇中、黔中等城市群,LL集聚的城市则主要位于华北平原和黄土高原地区,主要包括京津冀、鲁西北、晋中、中原城市群。

2) 全国城市土地集约利用水平呈由东向西、由南向北递减的趋势,西部地区得分最低;城市土地集约利用水平呈现出以京津冀、长三角、珠三角为核心向外扩散的多核结构,空间集聚特征明显,HH集聚区主要分布在北部沿海、东部沿海和南部沿海地区,包括京冀、长三角、珠三角城市群,LL集聚的城市则主要位于西北和黄河中下游北部地区,主要包括呼包鄂榆、宁夏沿黄、兰西城市群。

3) 全国城市空气质量与土地集约利用水平的发展重心在空间上存在分离现象;负向错位区主要分布在京津冀、长三角城市群,错位强度呈现出较显著的以北京、上海为中心形成局域型“核心—边缘”空间结构,正向错位区主要分布在东北地区、西南、西北地区 and 东南沿海地区,错位强度呈现出较显著的低错位区—中错位区—高错位区由东南向西北方向递减的梯度分布格局。从全国城市角度看,京津冀、长三角、珠三角城市群,宁夏沿黄、黔中、滇中城市群错位贡献度较高,而长江中游地区空间错位贡献较低。从省际角度看,空间错位现象主要是由少数省份空气质量与土地集约利用水平

的空间不匹配造成的。

4) 全国城市空气质量与土地集约利用水平之间存在着紧密的联系,两系统的总体关联度较强,各指标间的关联程度均位于中等关联及以上水平,NO₂、PM_{2.5}、O₃、CO、PM₁₀、SO₂等污染物浓度指标与土地集约利用水平表现出较强的关联性,关联度均高于0.5;植被NDVI、建成区绿化率、地均工业废水排放量与空气质量高度关联,对空气质量的驱动作用明显。

中国当前正处于城镇化快速发展阶段,推进城市健康可持续发展需要统筹协调好城市空气质量和土地集约利用的关系,节约集约利用土地、提高土地综合承载力,积极应对人均土地资源消耗惯性增加带来的环境挑战。基于空间自相关模型探讨了两者的空间分异特征,引入空间错位模型和灰色关联度模型测度两者的空间匹配关系及影响因素,对促进土地高效集约利用,适应生态环境的客观要求,积极推动空气质量与土地集约利用水平的协调发展具有重要的实践意义。

空气质量与土地集约利用是一个长期动态过程,未来应考虑长时间序列数据,深入城市内部,探究两者之间更细尺度的关联机制。此外,随着海量新兴数据的不断涌现,结合多源数据,进一步深入理解空气质量的季节性、空气质量与土地集约利用水平对尺度依赖性以及两者之间复杂的非线性关系等问题将是下一步研究的重点和方向。

参考文献(References)

- [1] 陈蓉, 王美凤. 经济发展不平衡、人口迁移与人口老龄化区域差异——基于全国287个地级市的研究[J]. 人口学刊, 2018, 40(3): 71-81.
- [2] Xu L T, Chen S S, Xu Y, et al. Impacts of land-use change on habitat quality during 1985-2015 in the Taihu Lake Basin[J]. Sustainability, 2019, 11(13): 3513.
- [3] 冯国强, 李菁, 武卓尔, 等. 道路交通拥堵与城市雾霾污染的关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(3): 93-99.
- [4] 梁照凤, 陈文波, 郑蕉. 南昌市中心城区土地集约利用水平对主要大气污染物的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1705-1714.

- [5] Peng J, Chen S, Lü H, et al. Spatiotemporal patterns of remotely sensed PM_{2.5} concentration in China from 1999 to 2011[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 1109-121.
- [6] 郭一鸣, 蔺雪芹, 边宇. 中国城市群空气质量时空演化特征及其影响因素[J]. *生态经济*, 2019, 35(11): 167-175.
- [7] 马静, 周创文, Gwilym Pryce. 环境公正视角下空气质量和死亡人数的空间分析及关系研究——以河北省为例[J]. *人文地理*, 2019, 34(6): 45-52.
- [8] 姜磊, 周海峰, 柏玲, 等. 中国城市空气质量指数(AQI)的动态变化特征[J]. *经济地理*, 2018, 38(9): 87-95.
- [9] Guo H, Wang Y, Zhang H, et al. Characterization of criteria air pollutants in Beijing during 2014-2015[J]. *Environmental Research*, 2017, 154: 334-344.
- [10] 姜磊, 周海峰, 柏玲, 等. 空气质量指数(AQI)的社会经济影响因素分析——基于指数衰减效应视角[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1): 390-398.
- [11] Lin X Q, Wang D. Spatiotemporal evolution of urban air quality and socioeconomic driving forces in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(11): 1533-1549.
- [12] 姜磊, 周海峰, 柏玲, 等. 基于空间计量模型的中国城市化发展与城市空气质量关系[J]. *热带地理*, 2019, 39(3): 461-471.
- [13] 方叶林, 程雪兰, 王芳. 空气质量与旅游经济的时空关系及影响机理[J]. *经济管理*, 2020, 42(1): 140-154.
- [14] 迟妍妍, 张惠远, 饶胜, 等. 珠江三角洲土地利用变化对特征大气污染物扩散的影响[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(10): 1682-1687.
- [15] 吕洁华, 孙喆, 张滨. 新型城镇化与生态环境协调发展及关键因素判别[J]. *生态经济*, 2020, 36(6): 83-88.
- [16] 彭冲, 肖皓, 韩峰. 2003—2012年中国城市土地集约利用的空间集聚演化及分异特征研究[J]. *中国土地科学*, 2014, 28(12): 24-31.
- [17] 杨忍, 王洋, 徐茜, 等. 中国城市土地利用集约水平空间特征及其优化战略决策解析[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(10): 53-58.
- [18] Jia Y Y, Lei G Y. Evaluation of intensive construction land use in the emerging city based on PSR-entropy model[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2018, 108(4): 1-7.
- [19] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素[J]. *地理学报*, 2019, 74(6): 1131-1148.
- [20] 王群, 王万茂, 金雯. 中国城市土地集约利用研究中的新观点和新方法: 综述与展望[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(5): 95-100.
- [21] 王秀, 姚玲玲, 李阳, 等. 新型城镇化与土地集约利用耦合协调性及其时空分异——以黑龙江省12个地级市为例[J]. *经济地理*, 2017, 37(5): 173-180.
- [22] 仇振宇, 朱记伟, 解建仓, 等. 西安市土地利用效益与城镇化耦合协调关系[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4): 308-316.
- [23] 雷金睿, 陈宗铸, 吴庭天, 等. 海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2366-2377.
- [24] Jing J S, Jing F G, Xiao M F, et al. Study on the relationship between PM_{2.5} concentration and intensive land use in Hebei Province based on a spatial regression model[J]. *Creative Commons Attribution License*, 2020, 9(18): 306-313.
- [25] 梁照凤, 陈文波, 郑蕉, 等. 南昌市中心城区主要大气污染物分布模拟及土地利用对其影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 1005-1014.
- [26] 朱庆莹, 陈银蓉, 胡伟艳, 等. 中国土地集约利用与区域生态效率耦合协调度时空格局[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4): 234-243.
- [27] 于凯阳, 黄志炯, 史博文, 等. 珠三角空气质量模拟关键不确定性来源识别[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(8): 2952-2961.
- [28] 胡书玲, 余斌, 卓蓉蓉, 等. 中国陆域地表人类活动与自然环境的空间关系研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(12): 3935-3943.
- [29] 闫涛, 张晓平, 陈浩, 等. 2001-2016年中国地级以上城市经济的区域差异演变[J]. *经济地理*, 2019, 39(12): 11-20.
- [30] 姜磊, 周海峰, 何世雄, 等. 雾霾背景下的城市化与空气质量协调发展的空间分析——以中国283个城市为例[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 306-313.
- [31] 徐启渝, 王鹏, 舒旺, 等. 土地利用结构与空间格局对袁河水质的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(7): 2611-2620.
- [32] 任彩凤, 程艳妹, 郑欣, 等. 基于均方差决策法的淮北市生态承载力评价[J]. *生态科学*, 2019, 38(5): 168-177.
- [33] 王钊, 李涛, 杨山. 中国省际入境旅游集散优势度与旅游经济效率的空间关系[J]. *地理研究*, 2020, 39(4): 892-906.
- [34] 刘晓阳, 黄晓东, 丁志伟. 长江经济带县域信息化水平的空间差异及影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1263-1275.
- [35] 赵睿, 焦利民, 许刚, 等. 城市空间增长与人口密度变化之间的关联关系[J]. *地理学报*, 2020, 75(4): 695-

- 707.
- [36] 吴连霞, 赵媛, 马定国, 等. 江西省人口与经济发展时空耦合研究[J]. 地理科学, 2015, 35(6): 742-748.
- [37] 曾通刚, 赵媛. 中国老龄事业发展水平时空演化及其与经济发展水平的空间匹配[J]. 地理研究, 2019, 38(6): 1497-1511.
- [38] 史晨怡, 周春山, 余波. 援藏与西藏自治区城镇化的耦合协调分析[J]. 世界地理研究, 2018, 27(3): 42-54.
- [39] 张芷若, 谷国锋. 中国科技金融与区域经济发展的耦合关系研究[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 751-759.

Matching relationship and influencing factors between urban air quality and land intensive use in Chinese cities

YANG Qunye¹, LIANG Yanqing^{1,2*}, HUANG Zhiying³, CUI Liye⁴, MA Wanli^{1,2}, GE Jingfeng^{1,2}

1. College of Resource and Environmental Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China
2. Lab of Environmental Change and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024, China
3. College of Land Science and Spatial Planning, Hebei University of Geosciences, Shijiazhuang 050031, China
4. National Territory Spatial Planning Research Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050056, China

Abstract It is of great significance to study the interaction between air quality and land intensive use and the influencing factors from the point of view of space matching. This paper uses trend surface, spatial autocorrelation, gravity model, spatial dislocation model, grey correlation model and other methods to analyze the spatial differentiation law, spatial matching relationship and driving factors of air quality and land intensive use level in 290 cities across China. The results are as follows 1) In 2017, the air quality in cities across the country showed a central-peripheral structure with the central and southern Hebei urban agglomeration as the core and gradually improved outward, being an obvious agglomeration characteristic; the level of intensive use of urban land across the country presented a multi-core spatial structure with the Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta, and Pearl River Delta urban agglomerations being the cores, and their agglomeration characteristics were also obvious. 2) The air quality and the level of intensive land use in cities across the country were not spatially coordinated and matched, and the negative dislocation areas were mainly distributed in the Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River Delta urban agglomerations, and the dislocation intensity presented a core-periphery spatial structure, the positive dislocation areas were distributed in the northeast, southwest, northwest and southern coastal areas, and the dislocation intensity presented a spatial distribution pattern decreasing from southeast to northwest; contributions of spatial dislocation had obvious regional differences, especially in the eastern region. (3) The overall correlation between the indicators of national urban air quality and land intensive use was strong, in which the concentration of pollutants that affect air quality, the vegetation NDVI that affects the intensive use of land, the greening rate of built-up areas, and the land factors such as the average discharge of industrial wastewater were the main reasons for the spatial dislocation of the two systems.

Keywords air quality; land intensive use; spatial matching; gray correlation; cities at prefecture level and above in China ●



(责任编辑 傅雪)