

# 大气污染物排放量与颗粒物环境空气质量的空间非协同耦合研究 ——以武汉市为例

张金亭<sup>1</sup>, 赵玉丹<sup>1</sup>, 田扬戈<sup>2</sup>, 何青青<sup>3</sup>, 庄艳华<sup>4</sup>, 彭韵羲<sup>1</sup>, 洪松<sup>1, 5, 6\*</sup>

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079;  
3. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430079; 4. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077;  
5. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079; 6. 武汉大学深圳研究院, 深圳 518000)

**摘要:**针对区域大气污染物排放量与空气质量在时空分布上存在不完全协同、匹配的现象, 论文选择SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>、CO和VOCs作为大气污染物指标, 选择气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)表征颗粒物环境空气质量, 以武汉市为例, 综合应用耦合模型和空间错位指数模型研究2类指标之间的空间非协同耦合规律。主要结论如下: ①武汉市大气污染物排放量与颗粒物空气质量具有不同空间分布特征, 大气污染物排放量呈现由城市中心城区向远城区递减的趋势, 其中SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>和VOCs的排放具有明显的中心聚集现象, 而NO<sub>x</sub>和CO聚集现象不显著, 且与道路分布明显相关; AOD分布具有明显的空间差异性, 总体上呈由西北向东南依次递减的趋势。②武汉市大气污染物排放与颗粒物空气质量的空间非协同耦合规律: 越靠近城市中心城区, 空间协同耦合现象越显著, 空间错位现象越弱; 越远离主城区, 空间非协同耦合现象越显著, 空间错位现象越显著; SO<sub>2</sub>排放量与AOD在武汉市远城区的空间错位指数均大于0.7, 且耦合度指数小于0.3, 呈现较强的非协同耦合特征, NO<sub>x</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>的排放量与AOD在武汉中心城区的空间错位指数均小于0.5, 且耦合度指数大于0.5, 协同耦合现象较为显著。③基于时空非协同耦合分析城市大气环境污染治理建议: 针对污染物与AOD空间错位不显著的城市中心城区, 以本地减排治理为主; 针对污染物与AOD空间错位显著的远城区, 应在污染溯源分析的基础上进行区域协调综合治理。

**关键词:**大气污染; 空气质量; 气溶胶光学厚度(AOD); 耦合度; 空间错位指数; 武汉市

环境空气质量不仅与大气污染物的排放有关, 还受到风向、风速、地形、建筑等很多因素的影响, 导致大气污染物排放量与环境空气质量的变化趋势及效应在时间上出现不完全协同、空间上表现出不完全匹配的关系, 称之为“非协同耦合”。例如, 特定时段污染物排放量增多但空气质量并未恶化, 特定区域大气污染物减排量较大, 但其空气质量改善程度却并不明显等现象。这种“非协同耦合”现象普遍存在且与区域大气污染控制措施的有效性

直接相关。目前对该现象基本处于描述分析阶段, 缺乏全面的定量研究(陈林娜, 2013)。

大气气溶胶对全球气候变化和人体健康有重要影响。有机气溶胶是大气气溶胶尤其是小粒径气溶胶的主要组分, 占其组分的20%~70%(Griffiths et al, 2013)。城市大气有机气溶胶前体物来源非常复杂, 天然源主要是天然植物排放(Rogge et al, 1993), 人为源主要有燃煤、机动车、城市的逸散性粉尘和农业活动产生的氨气排放(张小曳,

收稿日期: 2018-06-25; 修订日期: 2018-12-13。

基金项目: 深圳市科技计划项目(JCYJ20150630153917252); 国家自然科学基金项目(41601608)。[Foundation: Shenzhen Science and Technology Project, No. JCYJ20150630153917252; National Natural Science Foundation of China, No. 41601608.]

第一作者简介: 张金亭(1975—), 男, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事土地资源管理、空间统计应用研究。

E-mail: whzjtwh@163.com

\*通信作者简介: 洪松(1973—), 男, 湖北麻城人, 博士, 教授, 博导, 主要从事环境地学研究。E-mail: songhongpku@126.com

引用格式: 张金亭, 赵玉丹, 田扬戈, 等. 2019. 大气污染物排放量与颗粒物环境空气质量的空间非协同耦合研究: 以武汉市为例 [J]. 地理科学进展, 38(4): 612-624. [Zhang J T, Zhao Y D, Tian Y G, et al. 2019. Spatial non-coupling of air pollutant emissions and particulate matter-related air quality: A case study in Wuhan City, China. Progress in Geography, 38(4): 612-624.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2019.04.013

2014)。这4种人为源产生的大气污染物主要有 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和CO等。大气中挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)或半挥发性有机物(semi-volatile organic compounds, SVOCs)是二次有机气溶胶(SOA)的主要前体物(Hatfield et al, 2011)。显然, $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOCs对大气气溶胶的形成有重要影响(李锐等, 2016)。气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)能够反映大气浑浊度(王华等, 2013),能够作为主要指标用于分析气溶胶的时空变化特征,准确反映一定地区范围内的颗粒物空气质量(Paciorek et al, 2008)。

分析空间非协同耦合的方法众多。其中,重心模型和空间错位分析在定量分析产业重心移动以及空间不匹配程度上具有明显优势(Martin, 2010)。空间错位理论最初被用于研究就业岗位与求职者之间存在“空间错位”导致美国黑人高失业率的问题(Kain, 1968; Marsh, 1968; 徐涛等, 2009);之后逐渐被运用到多个学术领域,如旅游学(王美红等, 2009; 丁旭生等, 2011; 李振亭等, 2013)、社会学(Cleguer et al, 2015; Essletzbichler, 2015; Li et al, 2016; 李玉雪, 2017)、地理学(史坤博等, 2015)、环境资源(Polce et al, 2014)等。在大气环境研究中,对城市内部环境的时空异质性关注较少(邹秀萍等, 2009; 张璐等, 2011; 唐婷等, 2012)。大气污染物的排放量与颗粒物空气质量两者有直接的因果联系,在空间上又可以表征为2个相互独立的要素,运用空间错位指数分析两者之间的空间非协同耦合是一个新尝试。

本文选用 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、VOCs为大气污染物指标,以AOD为颗粒物环境空气质量指标,从地理学角度定量分析武汉市13个区2016年大气污染物排放与颗粒物空气质量的空间非协同耦合规律,在此基础上针对性地提出大气环境污染治理对策。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区域

武汉市是中国中部最大的城市,全市面积8494.41 km<sup>2</sup>,其中水域面积为2217.6 km<sup>2</sup>,主城区建成面积约800 km<sup>2</sup>。境内大小湖泊星罗棋布,形成了水系发育、山水交融的复杂地形(武汉市统计局, 2016)。全市共有13个市辖区(图1),包括7个中心城区和6个新城(张孝宇等, 2014)。武汉属于北亚热带季风性湿润气候。目前武汉市重污染天气

较多,可吸入颗粒物和细颗粒物浓度较高(尹珩等, 2014)。虽然武汉市空气质量优良天数从2013年的160 d提升到2016年的237 d,空气质量得到改善(李芬等, 2017);2016年,武汉市 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 等主要污染物排放总量完成省下达任务,空气质量优良天数比例达到64.8%(曾思琪, 2017),但与“十三五”期间要达到的环境目标还有一定差距。

### 1.2 数据来源

本文基础数据主要来源于中国科学院资源环境科学数据中心、武汉市统计信息网、LAADS DAAC和武汉市环境保护科学研究院。主要包括土地和人口栅格数据、区县和道路矢量数据、气溶胶数据产品以及大气污染物排放清单。具体数据及其来源见表1。

## 2 研究方法

### 2.1 数据预处理

(1) 计算武汉市各个区2016年相对于2010年的人口修正系数,利用2010年1 km×1 km的人口空间分布公里网格数据得到2016年1 km×1 km的人口空间分布公里网格数据;

(2) 将从NASA LAADS web上下载的MODIS产品数据利用暗像元法和深蓝算法进行反演得到2016年武汉市AOD的日均值数据,并将日均值数据处理得到AOD的季度数据和年均数据;

(3) 将反演得到的3 km×3 km分辨率的AOD转化为1 km×1 km分辨率的AOD。

### 2.2 大气污染源清单空间分配方法

#### (1) 分配原则

大气污染物的排放源有多种,且不同种类大气污染物的排放源所占比例也有差别,因此最佳的空间分配方法是根据各种排放来源的相关权重因素分配至一定大小的格网上,再按照排放比例进行叠加显示(刘蕊等, 2013; 周亚端, 2016)。根据武汉市各类排放源的空间特征(刘春蕾等, 2017),建立分配原则如表2所示。

#### (2) 土地利用分类分配因子

提取武汉市2016年土地利用分类中的耕地、草地、建筑用地和工业用地,并计算每种土地利用类型的分配因子,图2为武汉市2016年土地利用分类图。各个格网上的土地利用分配因子为:

$$\text{Lucc}_i = \frac{1}{\text{Sum}_i} \quad (1)$$

表1 数据来源  
Tab.1 Data sources

年份	数据名称	数据来源	来源网址
2015	武汉市1 km×1 km土地利用栅格数据集	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
2010	武汉市1 km×1 km人口空间分布公里网格数据	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
2016	武汉市道路矢量图	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
2016	武汉市区县界矢量图	中国科学院资源环境科学数据中心	http://www.resdc.cn
2010	武汉市各区人口数据	武汉市统计信息网	http://www.whjtj.gov.cn
2016	武汉市各区人口数据	武汉市统计信息网	http://www.whjtj.gov.cn
2016	武汉市大气污染源排放清单	武汉市环境保护科学研究院	
2016	气溶胶数据产品MOD04_3K	LAADS DAAC	https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov
2015	中国省级行政边界数据	中国资源与环境数据云平台	http://www.resdc.cn/Default.aspx
2015	中国市级行政边界数据	中国资源与环境数据云平台	http://www.resdc.cn/Default.aspx

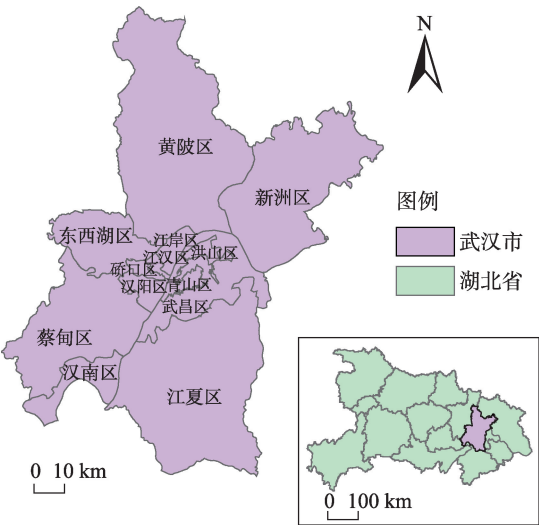


图1 武汉市地理位置及其行政区划  
Fig.1 Location and administrative division of the research area—Wuhan City

表2 大气污染物排放源的分配原则  
Tab.2 Attribution of emission sources of air pollutants to different land-use types

排放源	行业/部门	分配参数
固定燃烧源	电厂、其他工业	工业用地
工艺过程源	钢铁、水泥、石油化工	工业用地
建筑扬尘源	建筑	建筑用地
生物质燃烧	生物质锅炉、生物质开放燃烧	耕地和草地
堆场扬尘	建筑	建筑用地
土壤扬尘	建筑	建筑用地
道路移动源	交通	路网信息
道路扬尘源	交通	路网信息
溶剂使用	沥青铺路、表面涂层	人口密度分布
废弃物处理	污水、固体废弃物、烟气脱硝	人口密度分布
餐饮	餐饮	人口密度分布

式中： $Lucc_i$  为第  $i$  种土地利用类型的分配因子； $Sum_i$  为第  $i$  种土地利用类型的总格网数。

(3) 道路长度、交通流量标准化及道路交通分配因子

机动车是城市中重要的排放源之一,合理的空间分配方法有助于识别城市机动车污染排放源强的空间分布规律。然而由于机动车的可移动性和繁杂的行驶工况,相比于其他排放源,其空间分配过程需要考虑的参数也较为复杂(叶斯琪等, 2013)。本文使用的是基于交通流量与道路网的机动车污染排放“标准道路长度”空间分配的新方法。该方法采用实际道路网作为分配基底,避免了其他分配参数方法将机动车污染排放分配到路网之外的偏差,同时采用标准长度转换体系来解决不同类型等级道路之间由于交通流量和车队组成不同而引起的污染排放量的差异。标准道路长度分

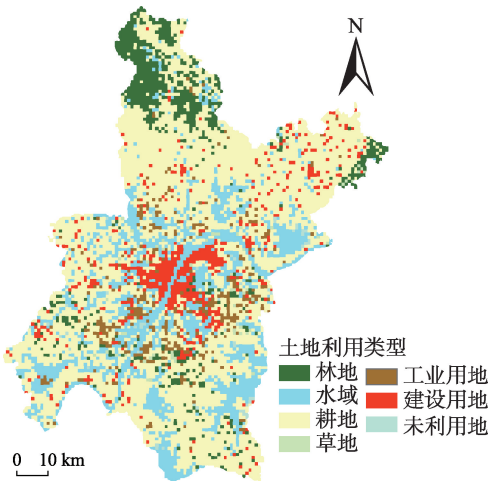


图2 武汉市土地利用分类(2016年)  
Fig.2 Land use classification of Wuhan City, 2016



配方法的主要过程与一般线源和面源的空间方法一致,只是在空间特征识别和空间分配因子建立中采用的计算方法与其他排放源存在差异。

为了减少同一等级道路的车流量存在的差异性,需要根据城市交通流量的分布特征划分不同的路段单元。本文将大路分成4个等级(表3),快速路(环城高速和高速路)、主干路(省道)、次干路(县道)、支路(市区道路)。每一级道路上的车流量不同,产生的污染情况也存在很大差异。武汉市各区道路类型车流量参照前人研究成果(黄宇等, 2016)。其转换标准车流量的计算方法如下:

$$W_i = \frac{NTF_i}{NTF} \quad (2)$$

这里以支路的车流量为标准,为  $NTF$ ,  $W_i$  为  $i$  道路类型以支路车流量为标准的车流量,  $NTF_i$  为  $i$  道路类型的车流量。

$$road_k = \frac{L_{i,k} \times W_i}{\sum_{i=1}^4 L_{i,k} \times W_i} \quad (3)$$

式中:  $road_k$  为第  $k$  个格网上的道路分配因子,  $L_{i,k}$  为  $i$  道路类型在第  $k$  个格网中的长度。

武汉市路网分配因子如图3a所示,可以明显看出主干路和快速路上的路网分配因子相对较大。

#### (4) 人口密度分配因子

基于武汉市统计年鉴获取武汉市2010年和2016年各区人口数,计算得到2016年相对于2010年各区的人口修正系数。

$$\eta = \frac{pop_{2016}}{pop_{2010}} \quad (4)$$

武汉市2010年1 km×1 km人口空间分布公里网格数据属性表中的人口密度乘以  $\eta$  可以得到武汉市2016年1 km×1 km人口空间分布公里网格数据。

$$pop_k = \frac{GRIDCODE_k}{GRIDCODE_{总}} \quad (5)$$

式中:  $pop_k$  为1 km×1 km格网上第  $k$  个格网的人口密度分配因子;  $GRIDCODE_k$  为第  $k$  个格网的人口密度值;  $GRIDCODE_{总}$  为武汉市的总人口密度值。图3b为武汉市2016年人口密度分配因子图。

表3 武汉市各区道路类型车流量

Tab.3 Traffic flow of various road types in Wuhan City

类型	快速路	主干路	次干路	支路
车流量/(辆/h)	3853	3102	1435	318

## 2.3 AOD反演与PM<sub>2.5</sub>遥感估算方法

将3 km分辨率的中分辨率成像光谱仪(MODIS)暗目标AOD数据与10 km分辨率的MODIS深蓝AOD数据进行融合,得到3 km AOD数据集。利用该数据集,建立基于内点算法(IPA)的优化参数取值的改进时空加权回归模型(GTWR),利用相对湿度(RH)、温度、风速、气压、边界层高度(PBL)、土地利用分类(LUCC)、数字高程、植被覆盖度(NDVI)等参数对AOD进行修正得到PM<sub>2.5</sub>数据(He et al, 2018)。

## 2.4 时空耦合模型

耦合是一个物理学概念,指2个及以上系统或运动形式通过各种相互作用而彼此影响的现象(刘耀彬等, 2005)。从协同学的角度看,系统由无序走向有序的关键在于系统内部序参量之间的协同作用,它左右着系统相变的特征与规律,耦合度正是对这种协同作用的度量(马丽等, 2012)。

由于本文研究的是大气污染物排放源和气溶胶光学厚度2个子系统构成的时空耦合模型,并借鉴物理学中的容量耦合概念及其容量耦合系数模型(张竟竟等, 2007),推广得到适用于本文研究的时空耦合度模型:

$$C = \frac{U_1 \times U_2 \times \dots \times U_i}{\left( \frac{U_1 + U_2 + \dots + U_i}{2} \right)^2} \quad (6)$$

式中:  $C$  为耦合度;  $U_i$  为各个子系统的综合功效。耦合度的大小由各个子系统  $U_i$  的大小决定;  $U_i$  均为归一化后的数值。

将耦合指数分为[0,0.3]、(0.3,0.5]、(0.5,0.8]、(0.8,1.0] 4个等级,分别对应耦合效果极弱、较弱、较强、极强。

## 2.5 空间错位指数模型

本文借鉴城市地理学研究成果(Lau, 2011),构建大气污染物排放与颗粒物空气质量之间的空间错位指数模型,研究其空间分布的非协同耦合规律(李名升等, 2013)。

$$SMI = \frac{1}{2p} \times \left( \left| \frac{A_1}{A} p - p_1 \right| + \left| \frac{A_2}{A} p - p_2 \right| + \dots + \left| \frac{A_i}{A} p - p_i \right| \right) \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2p} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i}{A} p - p_i \right|$$

式中:  $SMI$  为空间错位指数;  $p$  为全市(区)某种污染物排放总量(单位为t);  $n$  为区(区内格网)的个数;  $p_i$  为  $i$  区(格网)污染物排放总量(单位为t);  $A$  为全市(该区)AOD;  $A_i$  为  $i$  区(格网)AOD。SMI 值越大说



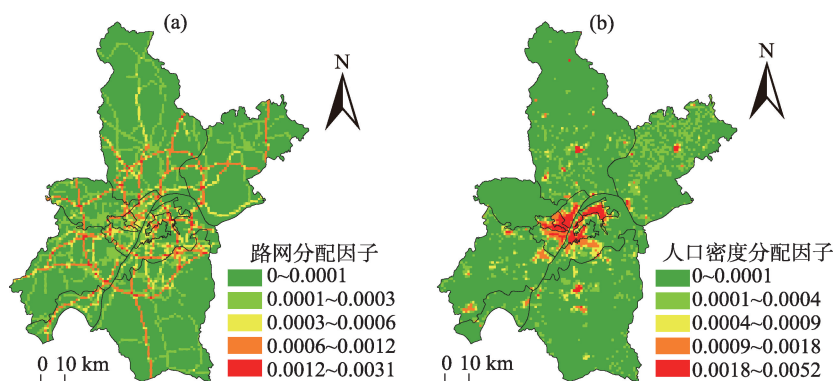


图3 武汉市污染物分配因子标准(2016年)

Fig.3 Standards for pollutant allocation factor of Wuhan City, 2016

明非协同耦合现象越显著, SMI 值越小说明协同耦合现象越显著。SMI 大于0.7说明空间错位现象较为显著; SMI 小于0.5说明空间错位现象相对较弱。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 大气污染物排放的时空分布特征

武汉市5种大气污染物排放量的空间分布见图4。由图可知,5种大气污染物排放的空间分布特征总体上相同,均呈现从城市中心城区向远城区依次递减的规律。 $\text{SO}_2$ 、VOCs有明显的中心聚集现象,即污染物排放量较多的区域主要分布在城市中心

城区的少数集中地块,这与中心城区人口聚集、各种人类活动集中有关。城市中心城区的 $\text{NO}_x$ 排放量略大于远城区,但没有明显聚集现象。从大气污染物排放总量上看,CO的排放总量明显大于其他4种大气污染物,且CO和 $\text{NO}_x$ 与道路分布明显相关,这与机动车尾气排放有关。

#### 3.2 AOD时空分布特征

##### (1) AOD季节分布特征

由图5可知,AOD空间分布特征,春季和冬季相近,夏季和秋季相近;同时4个季节AOD空间分布又存在差异,春季和冬季的年AOD总体上高于夏季和秋季,这说明武汉市春冬季的颗粒物空气

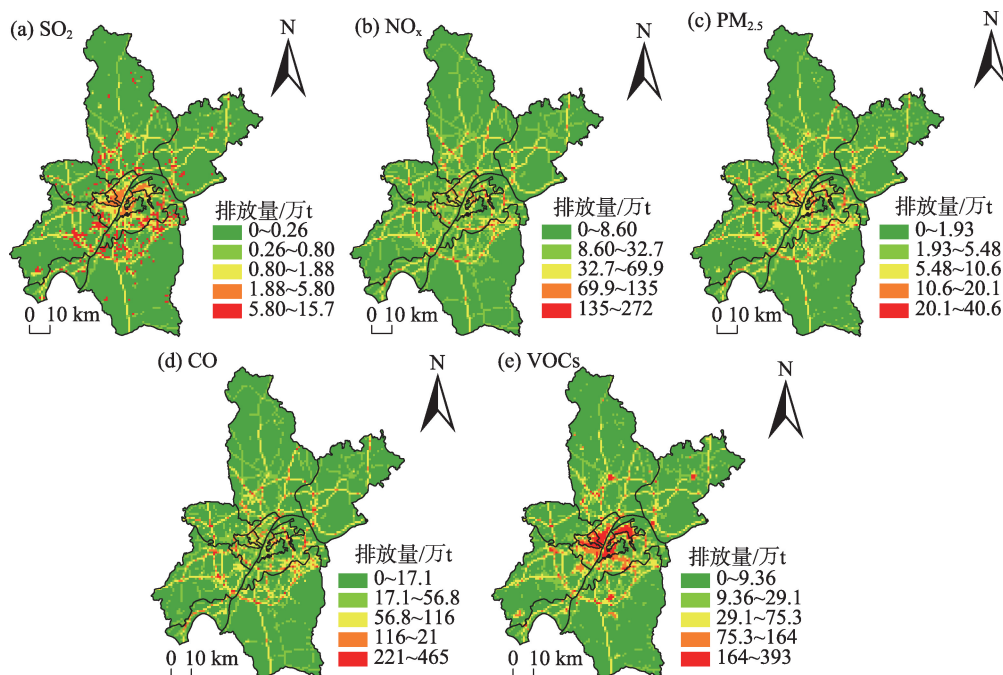


图4 武汉市大气污染物年均排放量(2016年)

Fig.4 Average annual emissions of atmospheric pollutants in Wuhan City, 2016

质量比夏季和秋季差,主要原因在于:① 冬季取暖能源消耗增加。冬季气温低,多燃烧能源取暖,尤其是分户壁挂式燃气采暖产生大量的大气污染物;② 气温特点导致污染物聚集。冬季气温低,尤其是夜间辐射降温明显,近地面的大气温度低于上层的大气温度,造成大区层结稳定,空气无法上下对流,污染物难以扩散;③ 机动车燃料燃烧不完全,冬季气温降低导致机动车发动机工作循环的气体压力与温度不高,混合气体燃烧速度减速,引起不完全燃烧。机动车燃料不完全燃烧产生的污染物会有CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、固体颗粒等,导致CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>等大气污染物排放量增加。

(2) AOD空间分布特征

从空间分布来看:武汉市年均AOD的分布具有明显的空间分布特征,除黄陂区西北部AOD较低和江夏区东南部AOD较高外,在总体上呈现出从西北向东南依次递减的趋势。

年AOD与春季和冬季AOD分布一致,均符合从西北到东南递减的总体规律;而夏季和秋季AOD(除黄陂区西北部AOD较低)则表现出西北区域>东南区域>中心城区的总体规律。这可能与东南片区有东湖高新热电厂、武昌电厂、青山电厂、武汉钢铁等诸多热源点有关,围绕这些热源点进行管网建设,供热比较方便,可以实现集中供暖;而西北片区热源点不足,多使用空调、壁挂式燃气等方式取暖,由此产生的大气污染物排放较多,气溶胶光学厚度较大;中心城区生产工厂和热源点相对于远城区较少,所以AOD相对较低。

3.3 大气污染物排放量与AOD耦合规律

(1) 年尺度耦合规律

由图6可知,不同的大气污染物排放与AOD的非协同耦合既有相似之处,又存在差异:① 相同之处。5种大气污染物排放与AOD的耦合值介于[0,0.3]之间的占50%以上,说明整体耦合效果较差,空间非协同耦合现象较为显著(表4)。耦合值在[0,0.3]的区域大都位于武汉市周边,城市中心城区耦合度明显大于远城区,说明远城区大气污染物排放与AOD的空间非协同耦合现象较为显著,这可能与远城区较为空旷而受到风的作用力比较大有关,大气污染物在风的作用下容易扩散到其他区域。② 不同之处。NO<sub>x</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>的整体耦合效果较好,城市中心城区的耦合值0.8以上占比较多。SO<sub>2</sub>排放与AOD的整体耦合效果最差,有95.62%的区域耦合值小于0.5,说明SO<sub>2</sub>排放与AOD总体上的

非协同耦合最为显著。VOCs排放与AOD的非协同耦合分布图表现为:黄陂区西北部和江夏区东南部的耦合效果明显比其他区域差,说明非协同耦合效果较为显著。这与VOCs自身特性有关,可能是由于VOCs的相对分子质量较大,不易在风等外力作用下扩散。

(2) 季节尺度耦合规律

由图7可知:春季和秋季耦合效果强于夏季和冬季,这与夏季和冬季风速较大有关。一年四季武汉市中心城区的耦合效果较好,说明其空间非协同耦合现象不显著;而远城区的耦合效果相对较差,说明其空间非协同耦合现象比较显著。周边也有部分区域的耦合效果较好,但所占比例相对于整个区域较小,对远城区的总趋势没有太大影响。

3.4 大气污染物排放与AOD空间错位指数

(1) 年尺度空间错位指数

由图8可知,不同区域的不同大气污染物排放与AOD的空间错位指数不尽相同,但呈现相同的总体趋势:城市远城区>城市中心城区。城市中心城区的空间错位指数大多在0.5以下,说明空间错位现象不明显;远城区的空间错位指数均在0.6以上,说明空间错位现象相对较明显。各种污染物与AOD的空间错位指数在硚口区、江汉区、汉阳区均相对其他区较小,这可能是因为城区中心城区建筑物较多且高,空气流动不畅通,大气污染物不易扩散。从不同污染物种类来看,错位度的差别与污染物自身的稳定性与移动性等都有关系。例如SO<sub>2</sub>整体上的空间错位指数较大,这可能与易溶于水的特性相关,SO<sub>2</sub>溶于水会导致空气中SO<sub>2</sub>减少,进而导致空间错位现象更加明显。

(2) 季节尺度空间错位指数

从图9可以看出,4个季节的污染物空间错位指数规律较为相似,基本重合,即没有表现出明显的季节差异。污染物不同时空错位指数不同,SO<sub>2</sub>与AOD的空间错位指数明显大于其他4种污染

表4 大气污染物年排放与AOD耦合的等级比例  
Tab.4 Ratio of annual emissions of atmospheric pollutants to AOD coupling (%)

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	CO	VOCs
[0,0.3]	93.00	63.99	64.58	71.09	58.40
(0.3,0.5]	2.62	13.88	12.10	12.42	16.99
(0.5,0.8]	0.91	10.60	9.08	10.18	11.62
(0.8,1.0]	3.46	11.53	14.25	6.31	12.98

物。各种污染物在硚口区 and 黄陂区的空间错位指数相对较大,东西湖区、汉南区和江夏区次之。

### 3.5 讨论

#### (1) 耦合模型和空间错位指数的一致性

空间错位指数模型与耦合模型得出的结论一致,2个模型可以相互验证。即大气污染物排放与AOD空间非协同耦合现象在城市中心城区不显著,但在城市远城区较为显著。说明城市中心城区大

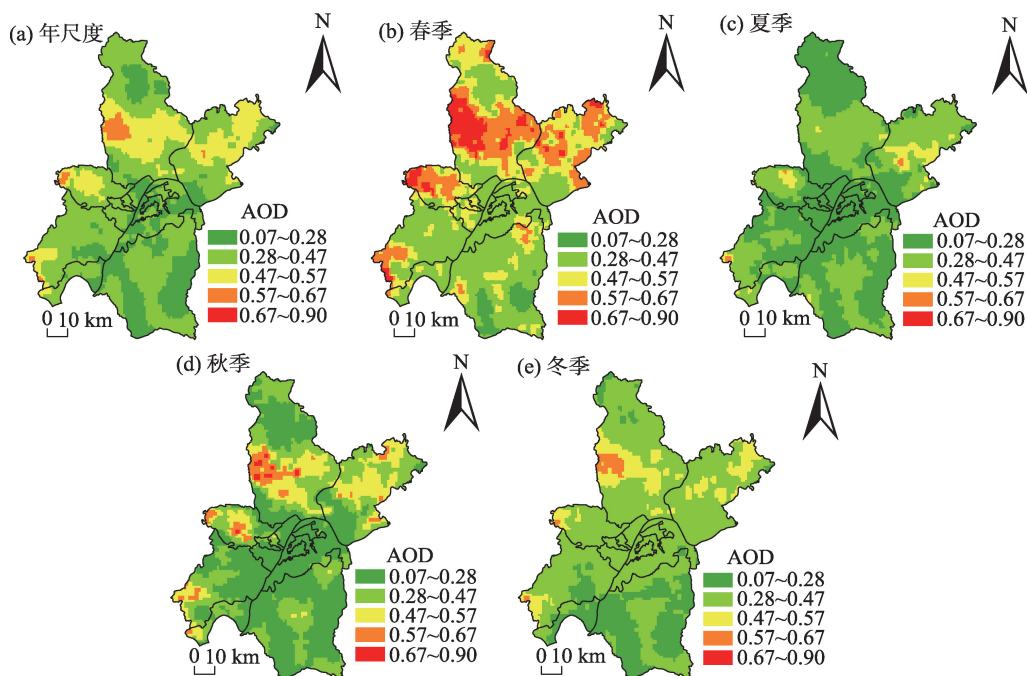


图5 武汉市AOD年均和分季节空间分布(2016年)

Fig.5 Annual and seasonal spatial distribution of AOD in Wuhan City, 2016

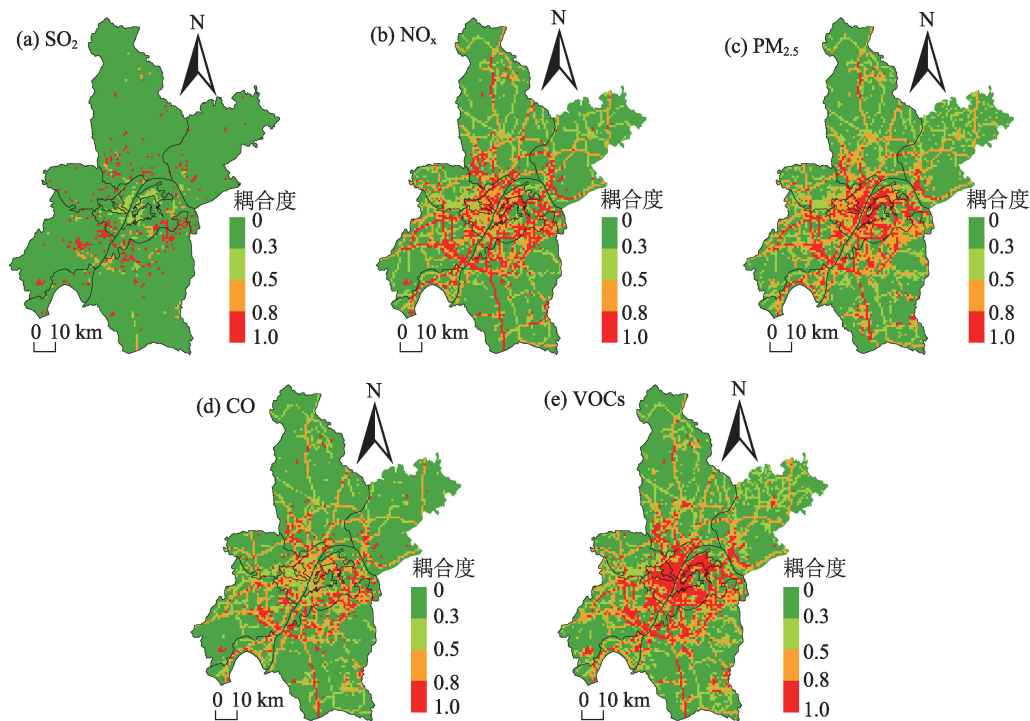


图6 武汉市AOD与不同大气污染物排放量年度耦合分布(2016年)

Fig.6 Annual spatial coupling distribution of AOD and air pollutant emission in Wuhan City, 2016



气污染物排放与空气质量表现出明显的同方向变化趋势,而远城区则同方向变化趋势不明显(表5)。这意味着在城市中心城区,应以本地治理为主,要严格控制大气污染排放总量;在空间错位显著的远

城区,应在进一步污染溯源分析的基础上,针对性制定综合污染治理措施。

(2) 使用AOD与遥感PM<sub>2.5</sub>浓度数据的差异  
本文采用AOD表征颗粒物空气质量,AOD是

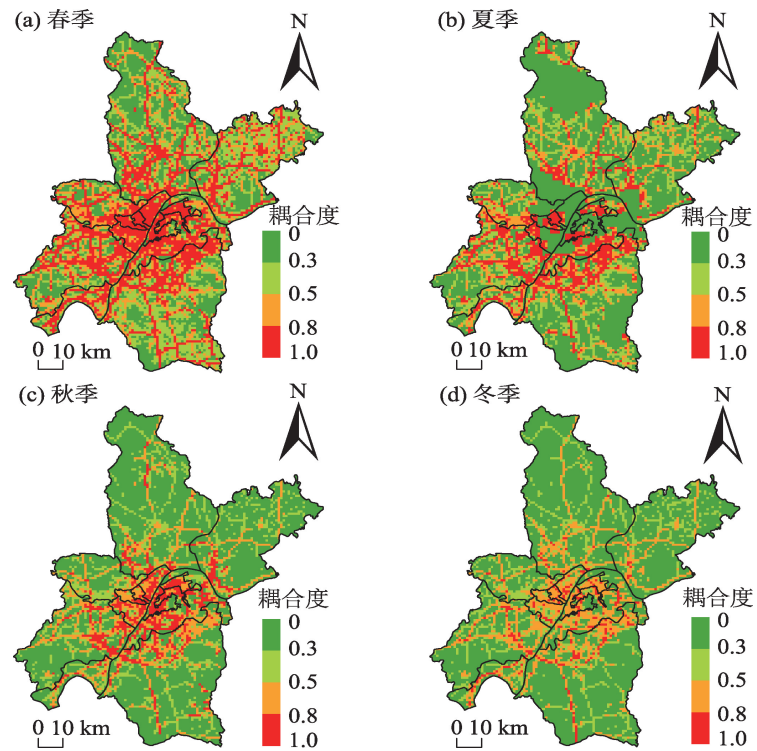


图7 武汉市AOD与PM<sub>2.5</sub>分季节耦合分布(2016年)

Fig.7 Seasonal spatial coupling distribution of AOD and PM<sub>2.5</sub> in Wuhan City, 2016

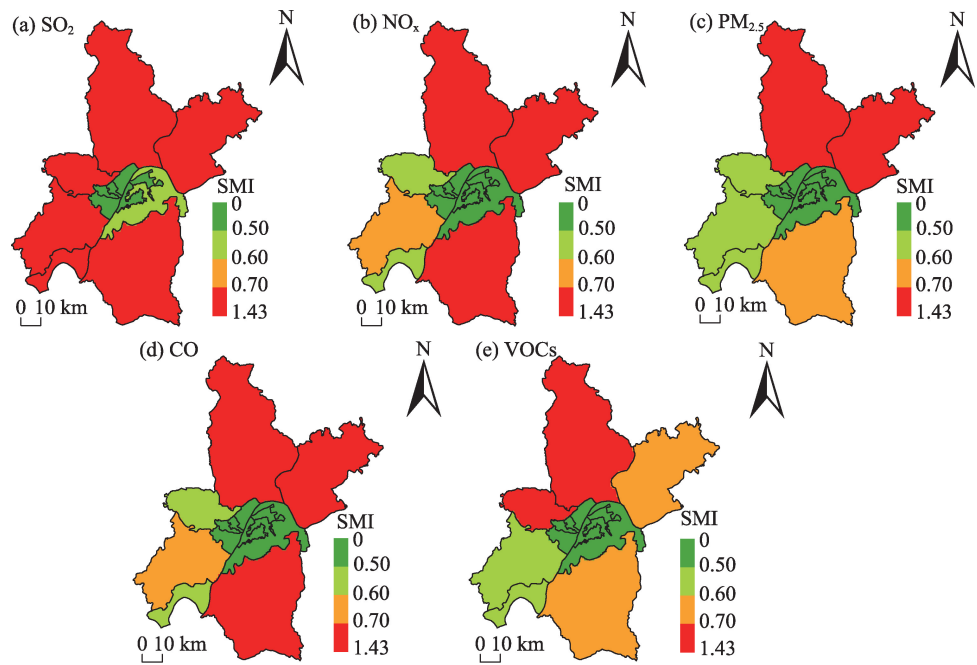


图8 武汉市大气污染排放量与年均AOD空间错位指数分布(2016年)

Fig.8 Distribution of spatial dislocation index of air pollutant emissions and annual average AOD in Wuhan City, 2016

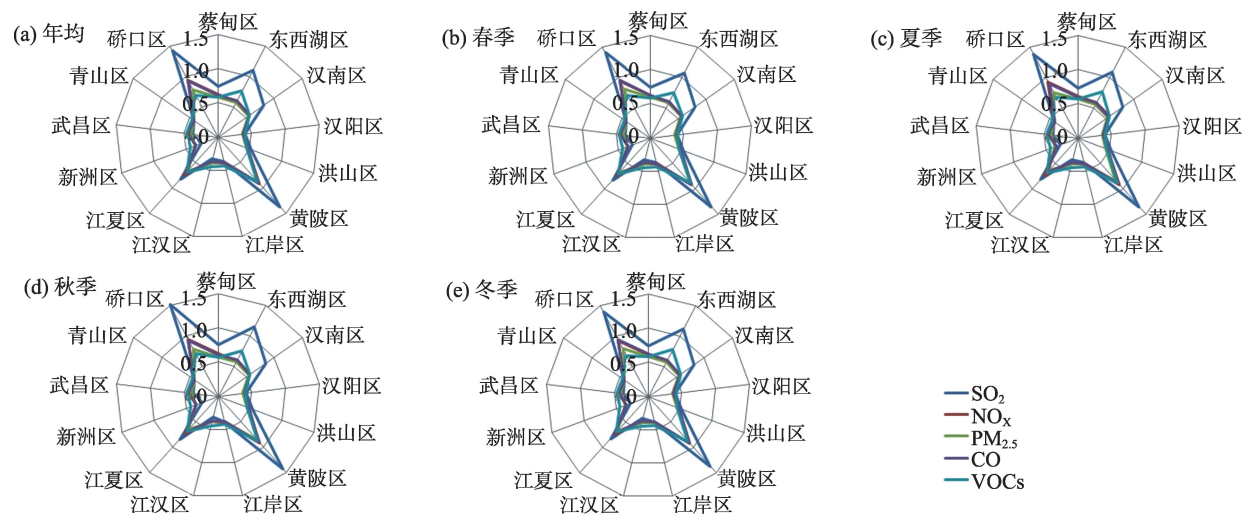


图9 武汉市不同大气污染物排放量与AOD分季节空间错位指数雷达图(2016年)  
Fig.9 Seasonal spatial dislocation index radar map of different air pollutant emissions and AOD  
in Wuhan City, 2016

表5 武汉市大气污染物排放与AOD环境空气  
质量的非协同耦合规律

Tab.5 Spatial non-coupling pattern of air pollutant emissions and aerosol optical depth (AOD) for air quality			
城区位置	大气污染物排放量	AOD	环境空气质量
城市中心城区	多	高	差
城市中心城区	少	低	好
城市远城区	多	相对城市中心城区较低	较好
城市远城区	少	相对城市中心城区较高	较差

垂直方向上较大范围内气溶胶总消光作用的反映,而大气一次污染物排放往往集中在近地面几百米范围内,因此两者在垂直高度上并不完全匹配。污染源排放对边界层内部颗粒物浓度的影响较大,但在边界层以上大气传输作用变得重要,高空颗粒物浓度水平有可能与当地排放源的关系不大。因此,选用AOD作为空气质量指标进行分析存在一定不确定性。为此,利用遥感估算的PM<sub>2.5</sub>浓度,计算其与5种大气污染物排放量的空间耦合度(图10),并与利用AOD计算的结果进行比较。由图10可以看出,PM<sub>2.5</sub>、AOD与污染物排放量的耦合规律总体上

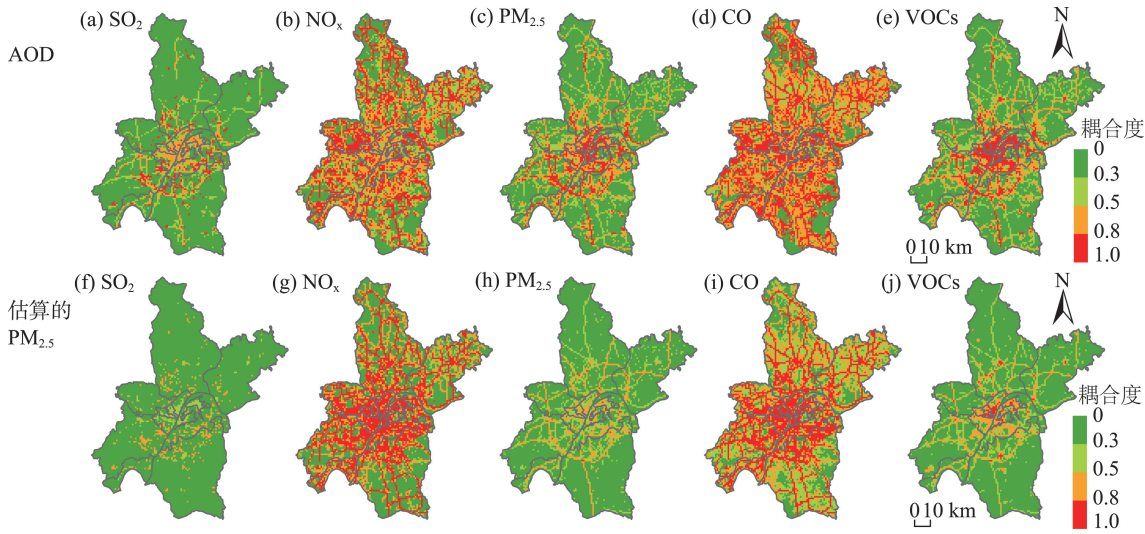


图10 武汉市AOD、PM<sub>2.5</sub>与污染物排放量的空间耦合度(2016年)  
Fig.10 Spatial coupling of AOD, estimated PM<sub>2.5</sub>, and pollutant emissions in Wuhan City, 2016

相近,都是武汉中心城区的协同耦合较强,远城区的非协同耦合效果较强。对于不同的污染物,使用AOD数据与遥感估算的 $PM_{2.5}$ 数据计算耦合度, $NO_x$ 和CO的计算结果差异明显, $SO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 和VOCs的计算结果差异较小。总体上,AOD与污染物排放量的空间耦合度相对更大。说明在研究 $SO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 和VOCs等污染物排放与颗粒物空气质量的非协同耦合时可以用AOD表征颗粒物空气质量。

## 4 结论与建议

本文综合运用耦合模型与空间错位指数模型,研究了武汉市大气污染物排放量与颗粒物环境空气质量之间的空间非协同耦合,为针对性地治理区域与城市大气污染提供科学依据。主要结论如下:

(1) 武汉市大气污染物排放量与AOD的时空分布特征。从大气污染物排放量的分布特征看,5种大气污染物排放量的空间分布趋势总体上相同,均呈现由城市中心城区向远城区递减的规律。 $SO_2$ 、 $PM_{2.5}$ 、VOCs有明显的中心聚集现象, $NO_x$ 和CO没有明显的聚集现象。CO的排放总量明显大于其他4种大气污染物,污染物排放量的季节变化趋势不明显。从AOD的时空分布特征看,除黄陂区西北部AOD较低和江夏区东南部AOD较高外,武汉市年均AOD总体上呈现出从西北向东南依次递减的趋势。春季和冬季的年均AOD总体上高于夏季和秋季。春季和冬季AOD分布与年均AOD分布一样,均表现出从西北向东南递减的空间分布特征,而夏季和秋季,除黄陂区西北部AOD较低以外,均表现出西北区域>东南区域>城市中心城区的总体分布特征。

(2) 武汉市大气污染物排放量与颗粒物空气质量的空间非协同耦合规律。5种大气污染物排放量与AOD空间非协同耦合规律总体上一致,即越靠近城市中心城区,空间协同耦合现象越显著,空间错位现象越弱;越远离主城区的区域,空间非协同耦合现象越显著,空间错位现象越显著。 $NO_x$ 、VOCs、 $PM_{2.5}$ 的排放量与AOD在武汉中心城区的空间错位指数均小于0.5,耦合度指数大于0.5,协同耦合现象较为显著; $SO_2$ 排放量与AOD在武汉市远城区的空间错位指数均大于0.7,耦合度指数小于0.3,呈现较强的非协同耦合特征。各种污染物与AOD的空间错位指数在硚口区、江汉区、汉阳区均相对

较小,耦合度较高。空间错位指数模型与耦合模型得到的结论一致,2个模型能相互验证。

(3) 基于时空非协同耦合分析的城市大气环境污染防治建议。在城市大气环境污染防治工作中,对于大气污染物排放量与环境空气质量耦合度较高、空间错位不显著的城市中心区域,以本地减排与治理为主;对于大气污染物排放量与环境空气质量耦合度较低、空间错位显著的城市边缘区域,应在污染源分析的基础上,进行基于区域协调的环境综合治理。

## 参考文献(References)

- 陈林娜. 2013. 空间错位视角下区域旅游经济差异研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学. [Chen L N. 2013. Study on regional tourism economic disparity from the perspective of spatial dislocation. Qinhuangdao, China: Yanshan University. ]
- 丁旭生, 李永文, 吕可文. 2011. 基于空间错位理论的河南省旅游发展区域差异研究 [J]. 地理与地理信息科学, 27(2): 106-108. [Ding X S, Li Y W, Lv K W. 2011. Study on regional disparity of tourism development in Henan based on spatial dislocation theory. Geography and Geographic Information Science, 27(2): 106-108. ]
- 黄宇, 周君蕊, 邱培培, 等. 2016. 2016年大气污染排放源清单技术报告 [R]. 武汉: 武汉市环境保护局. [Huang Y, Zhou J, Qiu P P, et al. 2016. A technical report on the inventories of air pollution emissions in 2016. Wuhan, China: Wuhan Environmental Protection Bureau. ]
- 焦利民, 许刚, 赵素丽, 等. 2015. 基于LUR的武汉市 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布模拟 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 40(8): 1088-1094. [Jiao L M, Xu G, Zhao S L, et al. 2015. Spatial distribution simulation of  $PM_{2.5}$  concentration in Wuhan based on LUR in 2015. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 40(8): 1088-1094. ]
- 李芬, 黄超智. 2017. 武汉市当前环境空气质量状况与趋势 [J]. 消防界(电子版), (6): 78. [Li F, Huang C Z. 2017. Current situation and trend of environmental air quality in Wuhan. Fire industry (Electronic Edition), (6): 78. ]
- 李名升, 任晓霞, 周磊, 等. 2013. 中国大气 $SO_2$ 污染与排放的空间分离分析 [J]. 环境科学学报, 33(4): 1150-1157. [Li M S, Ren X X, Zhou L, et al. 2013. Spatial separation and analysis of atmospheric  $SO_2$  pollution and emissions in China. Chinese Journal of Environmental Sciences, 33(4): 1150-1157. ]
- 李锐, 李俊伟, 刘之杰, 等. 2016. 卫星遥感研究中国气溶胶光学厚度、 $NO_2$ 和 $SO_2$ 的相关性 [J]. 科学通报, 61(22): 2524-2535. [Li R, Li J W, Liu Z J, et al. 2016. Satellite Re-



- mote sensing study on correlation of aerosol optical thickness,  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  in China. *Chinese Science Bulletin*, 61 (22): 2524-2535. ]
- 李玉雪. 2017. 山东省旅游资源与旅游经济的空间错位研究 [D]. 曲阜: 曲阜师范大学. [Li Y X. 2017. Spatial dislocation of tourism resources and tourism economy in Shandong Province. Qufu, China: Qufu Normal University. ]
- 李振亭, 张晓芳. 2013. 中国入境旅游流流量与流质的空间错位分析 [J]. 资源开发与市场, 29(7): 758-761. [Li Z T, Zhang X F. 2013. An analysis of the spatial dislocation of China's inbound tourism flows and liquidity. *Resource Development and Market*, 29(7): 758-761. ]
- 刘春蕾, 谢放尖, 郑新梅, 等. 2017. 基于"3S"的南京市大气污染源清单网格化空间分配研究 [J]. 环境科学与管理, 42 (10): 42-45. [Liu C L, Xie F J, Zheng X M, et al. 2017. Study on the spatial allocation of Nanjing air pollution source inventory based on "3S". *Environmental Science and Management*, 42(10): 42-45. ]
- 刘蕊, 蔡莞斌, 王珊珊, 等. 2013. 大气污染物空间分配单一权重法的局限: 以福州市2011年大气污染物的空间分配为例 [C]// 中国环境科学学会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第五卷). 北京: 中国环境科学学会. [Liu R, Cai Y, Wang S, et al. 2013. Limitations of the single weighting method of spatial allocation of atmospheric pollutants: Taking the spatial distribution of air pollutants in Fuzhou City in 2011 as an example // China Society for Environmental Sciences. *Proceedings of the 2013 annual conference of the Chinese Academy of Environmental Sciences (Volume 5)*. Beijing, China: China Society for Environmental Sciences. ]
- 刘耀彬, 宋学锋. 2005. 城市化与生态环境的耦合度及其预测模型研究 [J]. 中国矿业大学学报, 34(1): 91-96. [Liu Y B, Song X F. 2005. The coupling degree of urbanization and ecological environment and its forecast model. *Journal of China University of Mining & Technology*, 34(1): 91-96. ]
- 马丽, 金凤君, 刘毅. 2012. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析 [J]. 地理学报, 67(10): 1299-1307. [Ma L, Jin F J, Liu Y. 2012. Analysis of the coupling pattern and industrial structure of China's economy and environmental pollution. *Acta Geographica Sinica*, 67(10): 1299-1307. ]
- 史坤博, 杨永春, 任强, 等. 2015. 基于省会城市的中国体验性网络团购发展的空间格局与空间错位 [J]. 地理科学进展, 34(6): 696-706. [Shi K B, Yang Y C, Ren Q, et al. 2015. Spatial structure and spatial displacement of China's experienced network group purchasing based on provincial capital cities. *Progress in Geography*, 34(6): 696-706. ]
- 唐婷, 李超, 吕坤, 等. 2012. 江苏省区域农业生态环境质量的时空变异分析 [J]. 水土保持学报, 26(3): 272-276. [Tang T, Li C, Lu K, et al. 2012. Spatial-temporal variation of regional agricultural ecological environment quality in Jiangsu Province. *Journal of Soil and Water Conservation*. 26(3): 272-276. ]
- 王华, 郭阳洁, 洪松, 等. 2013. 区域气溶胶光学厚度空间格局特征研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 38(7): 869-874. [Wang H, Guo Y J, Hong S, et al. 2013. Regional aerosol optical thickness spatial pattern characteristics. *Journal of Wuhan University (Information Science Edition)*, 38(7): 869-874. ]
- 王美红, 孙根年, 康国栋. 2009. 中国旅游LR-NS-FA空间错位的组合矩阵分析 [J]. 人文地理, 24(4): 115-119. [Wang M H, Sun G N, Kang G D. 2009. China's tourism LR-NS-FA spatial misalignment combination matrix analysis. *Human Geography*, 24(4): 115-119. ]
- 武汉市统计局. 2016. 武汉市2015年暨“十二五”期间国民经济和社会发展统计公报 [M]. [Wuhan Bureau of Statistics. 2016. *Statistical communique on national economic and social development in 2015 and the Twelfth Five-Year Plan Period in Wuhan*. ]
- 徐涛, 宋金平, 方琳娜, 等. 2009. 北京居住与就业的空间错位研究 [J]. 地理科学, 29(2): 174-180. [Xu T, Song J P, Fang L N, et al. 2009. Study on spatial dislocation of residence and employment in Beijing. *Scientia Geographica Sinica*, 29(2): 174-180. ]
- 叶斯琪, 郑君瑜, 王水胜. 2013. 区域大气排放源清单时间与空间分配方法 [M]. 北京: 科学出版社. [Ye S Q, Zheng J Y, Wang S S. 2013. *Time and space allocation method of regional atmospheric emission source list*. Beijing, China: Science Press. ]
- 尹珩, 王海, 湛德. 2014. 武汉市大气环境质量改善对策研究 [C]// 中国环境科学学会, 四川大学. 2014 中国环境科学学会学术年会(第三章). 北京: 中国环境科学学会. [Yin H, Wang H, Zhan D. 2014. Study on countermeasures for improvement of atmospheric environmental quality in Wuhan // China Society for Environmental Sciences, Sichuan University. 2014 annual conference of the Chinese Academy of Environmental Sciences (Chapter 3). Beijing, China: China Society for Environmental Sciences. ]
- 曾思琪. 2017. 2016年武汉环境质量状况公报: 全市环境质量稳中趋好 [EB/OL]. (2017-07-25) [http://hb.ifeng.com/a/20170725/5849958\\_0.shtml](http://hb.ifeng.com/a/20170725/5849958_0.shtml). [Zeng S Q. 2017. 2016 wuhan environmental quality status bulletin: the city's environmental quality steady and good. [http://hb.ifeng.com/a/20170725/5849958\\_0.shtml](http://hb.ifeng.com/a/20170725/5849958_0.shtml). ]

- 张竞竞, 陈正江, 杨德刚. 2007. 城乡协调度评价模型构建及应用 [J]. 干旱区资源与环境, 21(2): 5-11. [Zhang J J, Chen Z J, Yang D G. 2007. Urban-rural coordination evaluation model construction and application. *Arid Area Resources and Environment*, 21(2): 5-11. ]
- 张璐, 杨修群, 汤剑平, 等. 2011. 夏季长三角城市群热岛效应及其对大气边界层结构影响的数值模拟 [J]. 气象科学, 31(4): 431-440. [Zhang L, Yang X Q, Tang J P, et al. 2011. Thermal island effect of the Yangtze River Delta city in summer and its influence on atmospheric boundary layer structure. *Meteorological Science*, 31(4): 431-440. ]
- 张小曳. 2014. 中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征 [J]. 气象学报, 72(6): 1108-1117. [Zhang X Y. 2014. The concentration, composition and source characteristics of atmospheric aerosols in different regions of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(6): 1108-1117. ]
- 张孝宇, 谢新朋, 张安录. 2014. 武汉市耕地非农化的空间非均衡发展及空间扩散路径分析 [J]. 自然资源学报, 29(10): 1649-1659. [Zhang X Y, Xie X P, Zhang A L. 2014. Spatial unbalanced development and spatial diffusion path analysis of cultivated land conversion in Wuhan. *Journal of Natural Resources*, 29(10): 1649-1659. ]
- 周亚端. 2016. 江苏省高精度大气污染物排放清单的建立及空气质量模拟评估 [D]. 南京: 南京大学. [Zhou Y D. 2016. Establishment of Jiangsu Province's high-precision air pollutant emission inventory and air quality simulation assessment. Nanjing, China: Nanjing University. ]
- 邹秀萍, 陈劲锋, 苏利阳, 等. 2009. 京津冀经济增长与环境污染的实证分析 [J]. 生态经济, (8): 40-42. [Zou X P, Chen S F, Su L Y, et al. 2009. An empirical analysis of economic growth and water environment pollution in Beijing, Tianjin and Hebei. *Ecological Economy*, (8): 40-42. ]
- Cleguer C, Grech A, Garrigue C, et al. 2015. Spatial mismatch between marine protected areas and dugongs in New Caledonia [J]. *Biological Conservation*, 184(4): 154-162.
- Essletzbichler J. 2015. The geography of job creation and destruction in the U.S. manufacturing sector, 1967-1997 [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 94(3): 602-619.
- Griffiths D, Lambert P S. 2013. The American occupational marriage structure, 1980 & 2010 [J]. *Procedia: Social and Behavioral Sciences*, 100: 21-39.
- Hatfield M L, Hartz K E H. 2011. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures [J]. *Atmospheric Environment*, 45(13): 2211-2219.
- He Q Q, Bo H. 2018. Satellite-based mapping of daily high-resolution ground PM 2.5 in China via space-time regression modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 206: 72-83.
- Kain J F. 1968. Housing segregation, negro employment, and metropolitan decentralization [J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 82(2): 175-197.
- Lau C Y. 2011. Spatial mismatch and the affordability of public transport for the poor in Singapore's new towns [J]. *Cities*, 28(3): 230-237.
- Li S M, Liu Y. 2016. The jobs-housing relationship and commuting in Guangzhou, China: Hukou and dual structure [J]. *Journal of Transport Geography*, 54: 286-294.
- Marsh R M. 1968. The American occupational structure [M]. New York: Free Press, 1978.
- Martin R W. 2010. Spatial mismatch and the structure of American metropolitan areas, 1970-2000 [J]. *Journal of Regional Science*, 44(3): 467-488.
- Paciorek C J, Liu Y, Morenomacias H, et al. 2008. Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level PM<sub>2.5</sub> [J]. *Environmental Science & Technology*, 42(15): 5800-5806.
- Polce C, Garratt M P, Termansen M, et al. 2014. Climate-driven spatial mismatches between British orchards and their pollinators: Increased risks of pollination deficits [J]. *Global Change Biology*, 20(9): 2815-2828.
- Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, et al. 1993. Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: Roads as sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 27(9): 1892-1904.

## Spatial non-coupling of air pollutant emissions and particulate matter-related air quality: A case study in Wuhan City, China

ZHANG Jinting<sup>1</sup>, ZHAO Yudan<sup>1</sup>, TIAN Yangge<sup>2</sup>, HE Qingqing<sup>3</sup>,

ZHUANG Yanhua<sup>4</sup>, PENG Yunxi<sup>1</sup>, HONG Song<sup>1, 5, 6\*</sup>

(1. School of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. School of Remote Sensing Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430079, China;

4. Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China;

5. Geospatial Information Technology Collaborative Innovation Center, Wuhan 430079, China;

6. Shenzhen Research Institute, Wuhan University, Shenzhen 518000, China )

**Abstract:** As the spatial and temporal distributions of regional air pollutant emissions and air quality do not completely match, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, and VOCs were selected as indicators of air pollutants, and aerosol optical depth (AOD) was selected to characterize the ambient air quality of particulate matters in this study to examine their spatial coupling. Taking Wuhan City as an example, the coupling model and spatial dislocation index model were used to study the spatial non-coupling pattern of the two indices. The main conclusions are as follows: 1) Air pollutant emissions and particulate matter-related air quality in Wuhan City present different spatial distribution characteristics. The emissions of atmospheric pollutants showed a decreasing trend from the central area of the city to the surrounding areas. The emissions of SO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and VOCs presented an obvious central aggregation phenomenon, while NO<sub>x</sub> and CO aggregation was not significant, but was significantly related to the distribution of roads. The distribution of AOD showed clear spatial heterogeneity, and generally decreased from northwest to southeast. 2) The spatial coupling pattern of air pollutant emissions and particulate matter-related air quality in Wuhan City indicates that the closer to the urban center, the more significant the spatial co-occurrence, and the weaker the spatial dislocation was. The farther away from the main urban area, the more significant the spatial non-coupling or dislocation was. The spatial dislocation index value of SO<sub>2</sub> emission and AOD in the surrounding urban areas of Wuhan City was greater than 0.7 and the coupling index value was less than 0.3, showing a strong non-coupling feature. The spatial dislocation index of NO<sub>x</sub>, VOCs, and PM<sub>2.5</sub> emissions and AOD in the central urban area of Wuhan City was less than 0.5 and the coupling index was greater than 0.5, showing a significant coupling phenomenon. 3) The suggestions for urban air pollution control based on the spatiotemporal non-coupling analysis are: for the central urban areas where the spatial dislocation between pollutant discharge and AOD is not significant, local emission reduction is the main method for pollution control. Comprehensive measures should be formulated on the basis of pollution source identification for the surrounding areas with significant spatial dislocation of pollutant discharge and AOD.

**Keywords:** air pollution; air quality; aerosol optical depth (AOD); coupling; spatial dislocation index; Wuhan City