

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0583

王子峻, 李叙勇. 2022. 基于地理探测器的城市要素对街尘累积和磷污染空间分异影响特征分析[J]. 环境科学学报, 42(9): 253-268

WANG Ziqiao, LI Xuyong. 2022. Detecting the influence of urban elements on the spatial stratified heterogeneity of road-deposited sediment build-up and phosphorus pollution through Geodetector[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 42(9): 253-268

# 基于地理探测器的城市要素对街尘累积和磷污染空间分异影响特征分析

王子峻<sup>1,2</sup>, 李叙勇<sup>1,2,\*</sup>

1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京 100085

2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 量化分析城市要素对街尘及其负载磷素空间分异的影响特征可帮助指导大尺度空间城市非点源磷污染管控。本研究结合地理大数据(兴趣点等)与实地采样数据, 利用地理探测器定量探究武汉市汉阳区城市要素对街尘累积量及街尘负载多形态磷素含量空间分异的解释能力。结果表明: ① 街尘累积量及街尘中磷素含量的空间分异程度随街尘粒径和磷形态变化。粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 街尘累积量的空间分异程度相对较高; 铝结合态磷(Al-P)、闭蓄态磷(Oc-P)和有机态磷(Or-P)的空间分异程度整体较高, 而碎屑态磷(De-P)和总磷(TP)的空间分异程度则相对较低; Oc-P和Or-P的空间分异程度随街尘粒径变化不大。② 单因子条件下, 车站类(POI I)、住宅学校类(POI II)和工厂汽修类(POI III)要素对街尘累积量和多种形态磷含量空间分异的解释力较强; 路网(ROAD)主要对粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 街尘中部分磷素含量的空间分异有较强的解释力; 餐饮商场类(POI IV)、娱乐休闲类(POI V)和医院类(POI VI)要素主要对 $>150\ \mu\text{m}$ 街尘中磷素含量的空间分异有明显的解释力; 景点类(POI VII)要素则对街尘累积量和磷素含量空间分异的解释力较弱。③ 城市要素交互往往增强其对街尘累积量和街尘磷素含量空间分异的解释力, 但路网(ROAD)、车站类(POI I)和景点类(POI VII)要素与部分城市要素交互容易对其解释力产生非线性减弱或单因子非线性减弱作用。④ 基于城市要素布局对不同形态磷设置差异化的控制策略有利于街尘磷污染控制。

**关键词:** 街尘; 城市要素; 磷; 地理探测器; 空间分异

文章编号: 0253-2468(2022)09-0253-16

中图分类号: X502

文献标识码: A

## Detecting the influence of urban elements on the spatial stratified heterogeneity of road-deposited sediment build-up and phosphorus pollution through Geodetector

WANG Ziqiao<sup>1,2</sup>, LI Xuyong<sup>1,2,\*</sup>

1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract:** Quantifying the influence of urban elements on the spatial stratified heterogeneity of road-deposited sediment (RDS) and phosphorus attached to it can help control large-scale urban nonpoint source phosphorus pollution. This study combined geospatial big data (points of interest, etc.) and field sampling, using Geodetector to quantitatively determine the impacts of urban elements on spatial stratified heterogeneity (SSH) of RDS build-up load and content of different phosphorus species in RDS in the Hanyang district of Wuhan, China. Results showed that: ① the SSH of RDS and adsorbed phosphorus varied with the particle size of RDS and phosphorus species. RDS with particle size  $<150\ \mu\text{m}$  had the greatest SSH. Aluminum-bound phosphorus (Al-P), occluded phosphorus (Oc-P), and organophosphorus (Or-P) had greater SSH than other phosphorus species. By contrast, detrital apatite phosphorus (De-P) and total phosphorus (TP) had marginal SSH. The SSH of Oc-P and Or-P were less likely to be influenced by RDS particle size. ② Overall, POI I (bus stations, etc.), POI II (dwellings, etc.), and POI III (factories, etc.) showed greater univariable explanatory power over SSH of RDS build-up load and phosphorus content in RDS. Road network (ROAD) showed significant univariable explanatory power over SSH of some phosphorus species in  $<150\ \mu\text{m}$  RDS. Similarly, POI IV (catering, etc.), POI V (sports facilities, etc.), and POI VI (hospitals) showed significant univariable explanatory power over SSH of phosphorus in  $>150\ \mu\text{m}$  RDS. POI VII (sights, etc.) had negligible univariable explanatory power over SSH of RDS build-up load and phosphorus content in RDS. ③ Interactions between urban elements tended to enhance the explanatory power over SSH of RDS and adsorbed phosphorus. However, road network and POI VII occasionally cause univariable weakening or nonlinear weakening of

收稿日期: 2021-11-30

修回日期: 2021-12-21

录用日期: 2021-12-21

基金项目: 国家重点研发计划(No.2019YFB2102900)

作者简介: 王子峻(1997—), 男, E-mail: ZQ.W\_soccer@hotmail.com; \* 责任作者, E-mail: xyli@rcees.ac.cn

the explanatory power over SSH of RDS and adsorbed phosphorus. ④It would be advantageous to customize control strategies for different phosphorus species in RDS according to the spatial distribution of urban elements.

**Keywords:** road-deposited sediment (RDS); urban elements; phosphorus; geodetector; spatial stratified heterogeneity (SSH)

## 1 引言(Introduction)

现今广泛且快速的城市化进程为城市水生态环境保护带来诸多挑战.其中,在地表硬化及人类社会经济活动等因素的作用下日渐凸显的城市非点源污染问题因其强烈的时空变异性给城市水环境保护制造了一定的困难,已成为城市管理者及研究人员关注的重点问题之一(Goonetilleke *et al.*, 2005; Wijesiri *et al.*, 2019; 姜和震等, 2020). 街尘是城市环境中多种非点源污染物的重要载体(常静等, 2007; 赵洪涛等, 2012), 而磷素则是街尘负载的一类重要污染物, 因其对水体富营养化发生的控制性作用而备受关注(Miguntanna *et al.*, 2010; 尚丽民等, 2014). 定量探究街尘累积量和街尘负载磷素含量的空间分异特征及各类因素对此的影响效应, 有利于非点源磷污染关键源区的空间识别, 并可为城市非点源污染控制及水环境保护提供帮助.

现有研究已尝试从路面粗糙度(江倩等, 2017)、道路等级(段丙政, 2014; 余麟等, 2016)、交通量(Wijesiri *et al.*, 2018)、功能区(Bian *et al.*, 2009; Miguntanna *et al.*, 2010; 李如忠等, 2012; 任玉芬等, 2013; 朱兰保等, 2016)、城乡梯度(Zhao *et al.*, 2011)等角度出发讨论街尘累积量或街尘负载磷素含量空间分布的差异性特征, 为在空间上解释街尘累积和街尘负载磷素含量的变化特征提供了多样化的思路及理论参考, 但尚存一定的问题. 一方面, 上述因素或具有极强的时变性且不利于在大尺度空间上量化(如交通量、道路粗糙度等), 或空间边界的定义具有一定的模糊性及主观性(如功能区、城乡梯度), 这限制了上述因素在空间上量化解释街尘及其负载污染物变化特征的效力; 另一方面, 现有围绕这些影响因素的研究多停留在相关分析阶段, 往往只能解释影响因素与街尘污染特征之间的线性关联特征, 难以说明各因素对街尘污染空间分异的解释能力.

从地理相似性的角度来看, 构成城市建成环境且影响人类活动空间分布特征的各类城市要素(如居民楼、商场、车站等)应与人类活动产生的街尘及其负载的污染物存在空间关联的潜力(朱阿兴等, 2020). 同时, 多源地理大数据(如兴趣点等)和空间变量密度估计方法(如核密度估计等)为量化城市要素空间分布提供了便利(薛冰等, 2019). 而近年来新兴的地理探测器可在不依赖线性假设的条件下度量变量的空间分异性及影响因子的解释力(王劲峰等, 2017), 已在城市功能区空间分异成因分析、城市大气污染物排放空间分异驱动因素解析、城市土壤污染物含量空间分异影响因素探测等研究中广泛应用(朱鹤等, 2015; Shi *et al.* 2018; 柏玲等, 2020), 这为在大尺度空间定量解析城市要素对街尘污染空间分异的影响效应提供了方法基础.

基于此, 本研究以水网密布的武汉市中心城区汉阳区为案例研究区, 在实地采样的基础上, 利用兴趣点等地理大数据量化城市要素空间分布, 并借助地理探测器定量分析街尘累积量和街尘负载不同形态磷含量的空间分异特征, 以及城市要素对其空间分异的影响效应和解释能力, 以期为大尺度空间城市非点源污染防治提供帮助, 并为同类研究提供参考.

## 2 研究区与研究方法(Study area and methods)

### 2.1 研究区

汉阳区位于武汉市中心地带(约 $30^{\circ}29' \sim 30^{\circ}36'N$ ,  $114^{\circ}07' \sim 114^{\circ}17'E$ ), 东临长江, 北靠汉江, 辖区面积 $111.54 \text{ km}^2$ . 该区地处亚热带季风气候区, 雨水丰沛, 降水主要集中于5—8月, 多年平均降水量为 $1301.2 \text{ mm}$ (黄迎春等, 2021). 汉阳区是武汉市域范围内典型的高度城市化区域, 区内集中了丰富且多样的典型城市要素(如居民楼、商场、医院、工业园区等), 并在空间上形成了特定的聚集与散布格局. 同时, 汉阳区内发育有月湖、墨水湖、龙阳湖等多个大型水体, 其水质在集中的人类活动与丰富的降水条件下易受非点源污染影响. 研究表明, 汉阳区内主要湖泊水体水质普遍不佳(部分劣于V类), 湖水磷素浓度普遍偏高(聂丽娟等, 2020).

### 2.2 地理数据获取及核密度估计

本研究利用近年来广泛用于城市功能性区域空间边界识别的兴趣点及路网数据的核密度值来量化

各类城市要素在空间上的分布情况.兴趣点及路网数据分别获取自高德开放平台和 OpenStreetMap 网站.对获取的数据先进行重复点位和停业点位剔除及拓扑修正等预处理,然后进行重分类.为更好地量化分析不同类别城市要素对街尘污染特征的空间影响,对于兴趣点,不局限于传统的城市功能性点位分类模式,而是综合考虑其社会经济属性,对人群与不同类型车辆等的吸引特征,以及对街尘累积的可能扰动与街尘污染物的贡献潜力等因素,将其重新划分为7类(Yang *et al.*, 2016;国家统计局等,2017;高枫等,2019;Shi *et al.*, 2020;崔树强等,2020; Alhazzani *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2021);对于路网数据,参考《城市综合交通体系规划标准》将原始数据重新划分为快速路、主干路、次干路和支路(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018)(表1).重分类后的兴趣点及路网分别代表8类典型城市要素.

表1 兴趣点与路网数据重分类

Table 1 Reclassification of points of interest and road network

数据类别	大类代码	子类	要素个数
兴趣点	POI I	公交车站和长途汽车站	352
	POI II	住宅区、学校和地铁站	1369
	POI III	工厂、汽车养护/装饰、洗车场、汽车维修、摩托车维修、加油站和建筑工地	776
	POI IV	餐饮服务、超级市场、综合市场、商场、特色商业街和宾馆酒店	4074
	POI V	运动场馆和娱乐场所	707
	POI VI	综合医院和专科医院	139
	POI VII	风景名胜和公园广场	77
路网	ROAD	快速路、主干路、次干路、支路	2404

注:对于兴趣点,要素个数指点要素个数;对于路网,要素个数指线要素(路段)个数.

对8类城市要素计算其核密度值以代表其空间分布态势.核密度估计是一种广泛用于量化表征空间数据分布态势的数学方法,其计算公式见式(1)(许泽宁等,2016;Xu *et al.*, 2019;丁彦文等,2020).

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\pi h^2} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中, $f(x)$ 为点 $x$ 处的核密度值, $h$ 为带宽, $K$ 为核函数, $n$ 为以点 $x$ 为中心且带宽 $h$ 为半径的圆域内所包含的要素个数.

核密度估计的关键是确定合适的带宽.根据以往研究经验,对兴趣点,可以街区平均距离为参考,然后利用 $k$ 个最近邻点距离法确定其核密度估计的最适带宽(丁彦文等,2020).对于路网,考虑到主路为构成路网的主要骨架,本文以主干路路段平均长度为路网核密度估计的最适带宽.同时,为代表不同路段的平均交通流量特征,基于各级道路设计时速与车道数,为其赋予权重(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018),具体见式(2).计算得到的各要素核密度估计最适带宽与各级道路权重详见表2.

$$w_m = \frac{L_m \times S_m}{L_{\text{快速路}} \times S_{\text{快速路}}} \quad (2)$$

式中, $w_m$ 为第 $m$ 级道路权重, $m$ 为快速路、主干路、次干路或支路; $L_m$ 为第 $m$ 级道路车道数,快速路和主干路取6,次干路取3,支路取2; $S_m$ 为第 $m$ 级道路设计时速,快速路取 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,主干路取 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,次干路取 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,支路取 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

### 2.3 样品采集与实验室分析

城市要素的变化特征通常在街区尺度体现.为使采集的样品能较好地反映城市要素分布情况的影响同时保证充足的有效样本量,参考研究区街区平均距离及主干路路段平均长度,对城市要素相对

表2 兴趣点与路网核密度估计参数

Table 2 Parameters of kernel density estimation of points of interest and road network

大类代码	子类	最适带宽/m	权重
POI I		248.89	
POI II		299.00	
POI III		302.75	
POI IV	-	294.72	-
POI V		300.86	
POI VI		238.12	
POI VII		420.25	
ROAD	快速路		1
	主干路	1302.38	0.625
	次干路		0.250
	支路		0.083

聚集或分散的区域分别采用边长为 1 km 或 2 km 的正方形网格进行空间分区. 结合实地踏勘情况, 在每个采样网格区域内的道路上设置一个代表性采样点(部分网格因实际道路情况限制未设采样点), 同时保证各采样点之间的距离与采样网格的边长相当, 最终在研究区内共设置 63 个街尘采样点(图 1).

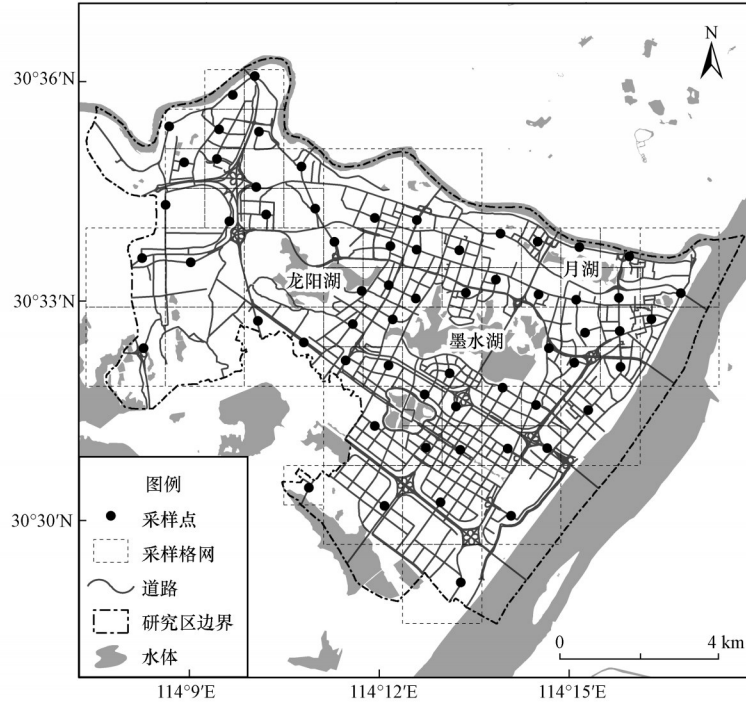


图 1 研究区及采样点

Fig.1 Study area and sampling sites

在 2020 年 11 月至少连续 7 d 无雨期后晴朗无风的时段采集街尘样品, 采样期间天气及清扫等条件基本一致. 在预设的采样点附近道路上约 3~6 m<sup>2</sup> 的范围内使用吸尘器、笤帚和簸箕等工具采集街尘, 记录采样时间与采样面积等信息, 并将样品收集到塑料自封袋中.

所有街尘样品先置于阴凉通风处干燥约 1 周, 然后进行粒径筛分与磷素含量测定. 筛分时先筛去粒径 >2000 μm 的落叶、烟蒂、玻璃碎屑等杂物(江倩等, 2017), 然后将剩余样品筛分为 <63、63~150、150~450、450~2000 μm 共 4 个粒径段并分别称重. 对筛分好的街尘样品, 参考朱广伟等(2003)及李如忠等(2012)提出的固态样品多形态磷连续提取方法, 测定各粒径段街尘中交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)、钙结合态磷(Ca-P)、碎屑态磷(De-P)、有机态磷(Or-P)和总磷(TP)含量.

#### 2.4 地理探测器分析

地理探测器是一种用于度量空间变量空间分异程度及其影响因素解释力与影响效应的非参数统计方法(王劲峰等, 2017). 本研究利用地理探测器中因子探测工具输出的  $q$  值度量街尘累积量和街尘负载磷素含量的空间分异程度及各城市要素的单因子解释力, 具体见式(3).

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中,  $N$  和  $N_h$  分别为全域和第  $h$  层内样本数量,  $h = 1, 2, \dots, L$ ;  $\sigma^2$  和  $\sigma_h^2$  分别为全域总方差和第  $h$  层的层内方差.  $q$  的取值范围为 0~1,  $q$  值越大表示响应变量的空间分异性越强或解释变量的解释力越强(王劲峰等, 2017).

此外, 本研究还利用地理探测器中的交互探测工具识别不同城市要素间的交互作用及其对街尘累积量与街尘负载磷素含量空间分异的双因子解释力. 交互探测工具通过比较两因子交互后计算得到的  $q$  值与其单因子条件下计算得到的  $q$  值间的大小关系, 将因子交互作用划分为非线性增强、独立、双因子增强、单因子非线性减弱和非线性减弱 5 类(王劲峰等, 2017)(表 3).

为实现因子探测和交互探测分析,需先对街尘样品测试数据(点数据)与城市要素核密度值(面数据)进行空间尺度的匹配.以采样点为中心做半径为 500 m 的圆形缓冲区(半圆大致包含 1~2 个街区范围),并去除与水体重合的部分,计算缓冲区内各类城市要素核密度的平均值,以此代表采样点周围各类城市要素的平均密度水平.因子探测与交互探测分析采用 Song 等(2020)提出的最优参数地理探测器方法完成.

表 3 两因子交互作用

Table 3 Interactions of two variables

定义	交互作用
$q(Y X1 \cap X2) > q(Y X1) + q(Y X2)$	非线性增强
$q(Y X1 \cap X2) = q(Y X1) + q(Y X2)$	独立
$q(Y X1 \cap X2) > \max(q(Y X1), q(Y X2))$	双因子增强
$\min(q(Y X1), q(Y X2)) < q(Y X1 \cap X2) < \max(q(Y X1), q(Y X2))$	单因子非线性减弱
$q(Y X1 \cap X2) < \min(q(Y X1), q(Y X2))$	非线性减弱

### 3 结果与讨论(Results and discussion)

#### 3.1 汉阳城市要素空间分布

由图 2 可以看出,汉阳区 8 类城市要素空间分布特征各异,但其核密度值大体都以龙阳湖和墨水湖之间的区域为过渡边界呈现出东西差异.具体而言,龙阳湖以东及墨水湖周边地区,路网(ROAD)、车站类(POI I)、住宅学校类(POI II)、餐饮商场类(POI IV)、娱乐休闲类(POI V)和医院类(POI VI)要素核密度值

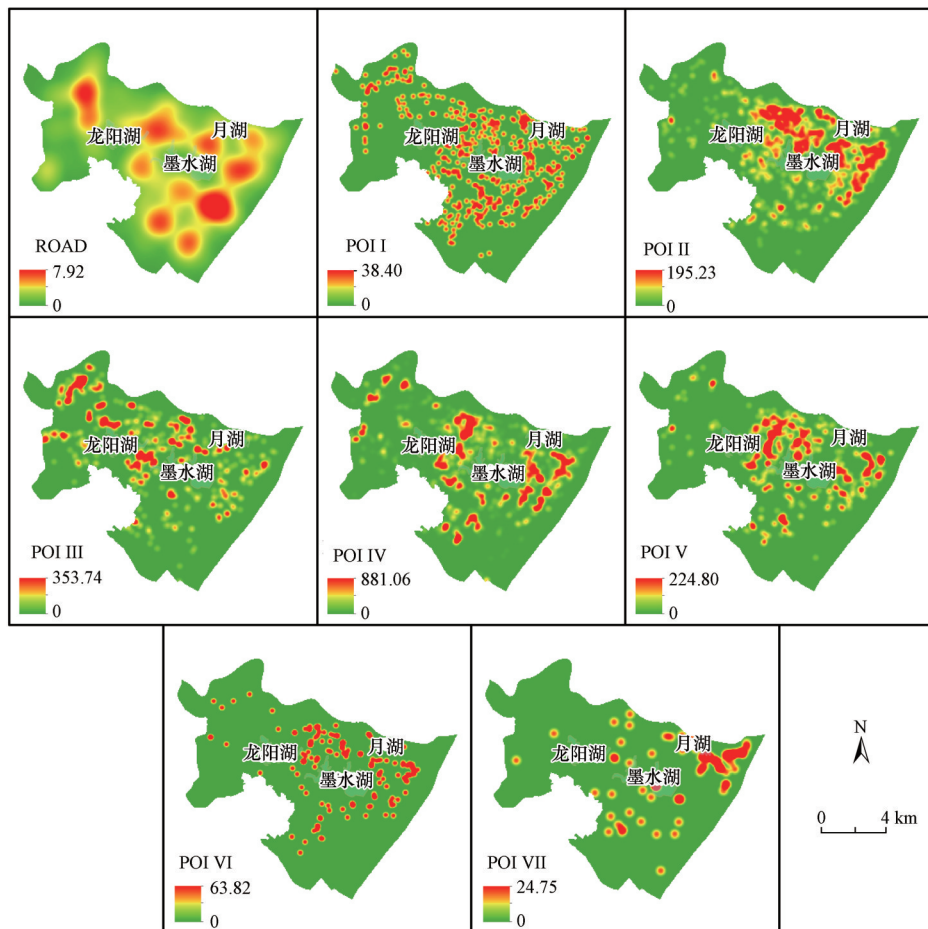


图 2 汉阳 8 类城市要素空间分布

Fig.2 Spatial distribution of eight types of urban elements in Hanyang

相对其余区域普遍更高,反映了区内商业、住宅、医疗、文教、公共交通等相关社会生活基础设施在该区域聚集的特征.工厂汽修类(POI III)要素核密度的高值区主要集中在龙阳湖周边及汉阳区西北角附近,而这一区域也正是汉阳区工业园区集中分布的区域.景点类(POI VII)要素核密度值则在月湖以东的区域形成一片高值区,这与实际汉阳区内古琴台等著名景点的分布区域一致.此外,住宅学校类(POI II)、餐饮商场类(POI IV)、娱乐休闲类(POI V)和医院类(POI VI)要素的空间分布还在一定程度上表现出南北分异特征.这些城市要素核密度值在墨水湖以北的区域相对较高,而在墨水湖以南的区域则相对较低,说明墨水湖周边及以北的区域应是汉阳区居民社会生活相关活动的集中地带.

### 3.2 汉阳街尘累积量与磷含量空间分异特征

由表4可知,汉阳地区街尘累积量和街尘负载各形态磷素含量均表现出明显的空间分异特征,但其空间分异程度因街尘粒径及磷形态的差异而有所不同.由 $q$ 值可以看出,街尘累积量的空间分异程度在粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 时更高,而粒径 $>450\ \mu\text{m}$ 时其空间分异程度则明显降低.粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $63\sim 150\ \mu\text{m}$ 街尘累积量对应的 $q$ 值分别为0.938和0.948,而粒径为 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 街尘累积量对应的 $q$ 值则为0.889,明显小于前两者. Ex-P的空间分异程度随街尘粒径增大表现出先增大后减小的特点.街尘粒径为 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 时, Ex-P的 $q$ 值 $\leq 0.9$ ,而其余两组粒径中 Ex-P的 $q$ 值则接近0.95.但街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $>450\ \mu\text{m}$ 时, Ex-P的空间分布具有相对更明显的局部变异. Ex-P含量最大值与中值之间的差值在街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $>450\ \mu\text{m}$ 时均 $>150\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而这一差值在其余街尘粒径段中仅在 $50\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右.在各粒径段中, Al-P的空间分异程度均较 Fe-P稍高,二者空间分异程度的差异在街尘粒径为 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 时达到最大,其 $q$ 值之差为0.054.不过,二者空间分异程度均在街尘粒径为 $63\sim 150\ \mu\text{m}$ 时达到最高,其 $q$ 值分别为0.983和0.953.

表4 汉阳各粒径街尘累积量及各形态磷含量空间分异特征

Table 4 Characteristics spatial variation of RDS build-up load and content of different phosphorus species in RDS in Hanyang

粒径/ $\mu\text{m}$	指标	最大值	最小值	中值	$q$ 值	粒径/ $\mu\text{m}$	指标	最大值	最小值	中值	$q$ 值
<63	$M$	36.48	0.05	1.22	0.938***	150~450	$M$	59.6	0.1	1.61	0.917***
	Ex-P	243.37	24.22	54.61	0.876***		Ex-P	100.79	16.37	44.36	0.951***
	Al-P	10.79	0	0	0.959***		Al-P	17.72	0	0	0.952***
	Fe-P	89.4	14.12	33.37	0.924***		Fe-P	48.12	5.64	25.88	0.937***
	Oc-P	5.65	0	0	0.978***		Oc-P	2.77	0	0	0.983***
	Ca-P	120.13	12.81	47.12	0.942***		Ca-P	113.14	14.13	47.13	0.924***
	De-P	1932.01	103.76	222.65	0.574***		De-P	359.8	52.28	123.43	0.904***
	Or-P	8.19	0	0.2	0.976***		Or-P	13.81	0	2.65	0.974***
	TP	2027.55	224.09	364.2	0.774***		TP	449.87	151.35	251.49	0.895***
63~150	$M$	43.93	0.08	0.95	0.948***	450~2000	$M$	39.37	0.06	0.92	0.889***
	Ex-P	101.01	17.06	48.48	0.944***		Ex-P	230.3	19.31	48.32	0.900***
	Al-P	7.06	0	0	0.983***		Al-P	6.7	0	0	0.969***
	Fe-P	63.4	8.61	27.43	0.953***		Fe-P	104.65	0	23.4	0.915***
	Oc-P	5.65	0	0	0.976***		Oc-P	4.75	0	0	0.980***
	Ca-P	106.93	11.49	39.21	0.914***		Ca-P	330.96	2.24	40.65	0.956***
	De-P	2031.02	115.64	229.04	0.571***		De-P	365.05	24.55	112.62	0.944***
	Or-P	20.99	0	0	0.952***		Or-P	16.78	0	1.67	0.953***
	TP	2101.22	244.44	361.8	0.566***		TP	705.51	114.69	243.79	0.933***

注: $M$ 代表单位面积街尘累积量,单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ;磷素含量单位为 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;\*\*\*表示 $p$ 值小于0.01.

Oc-P和Or-P的空间分异程度相对其余几种形态磷要高,且其随粒径变化的幅度不大. Oc-P和Or-P的 $q$ 值在各粒径段均超过0.95,且各粒径段之间其 $q$ 值的差值最大分别为0.006和0.024.相较于其余两个粒径段,街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 时 Ca-P的空间分异程度更高.特别是街尘粒径为 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 时, Ca-P的 $q$ 值和其含量的最大值与中值之间的差距均在各粒径段中最大,表明该粒径段 Ca-P空间分异程度达到最大. De-P和TP的空间分异程度相对其余几种形态磷要明显低.特别是街尘粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 时, De-P和TP的空间

分异程度较低,其 $q$ 值普遍 $<0.6$ 。街尘粒径 $>150\ \mu\text{m}$ 时,De-P和TP的空间分异程度明显升高,二者的 $q$ 值基本 $>0.9$ 。不过,街尘粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 时,De-P和TP的空间分布存在更为强烈的局部变化。街尘粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 时,De-P和TP含量的最大值与中值的差值均 $>1500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,而街尘粒径 $>150\ \mu\text{m}$ 时,De-P和TP含量的最大值与中值之间的差值均在 $500\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之内。

### 3.3 城市要素对街尘累积和磷污染空间分异的解释能力

**3.3.1 单因子解释力** 以街尘累积量和街尘中各形态磷含量为响应变量,各类城市要素核密度值为解释变量,计算得到的 $q$ 值可以表示各城市要素对上述响应变量的单因子解释力(表5)。可以看出,仅车站类(POI I)要素对各粒径段街尘累积量的空间分异有相对较强且较显著的单因子解释力,其 $q$ 值为 $0.185\sim 0.220$ ( $p<0.05$ ),并随街尘粒径增大而略有增大。其余城市要素对街尘累积量空间分异的单因子解释力较弱,其 $q$ 值基本都 $<0.1$ 。城市要素对粒径为 $63\sim 150$ 和 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 的街尘中Ex-P含量空间分异的单因子解释力较其对另两组粒径街尘中Ex-P含量空间分异的单因子解释力更强,前者计算得到的 $q$ 值为 $0.049\sim 0.233$ ,而后者计算的 $q$ 值为 $0.027\sim 0.164$ 。在8类城市要素中,车站类(POI I)要素对粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 的街尘中Ex-P含量空间分异的单因子解释力最强( $q$ 值最大),住宅学校类(POI II)要素对粒径为 $63\sim 450\ \mu\text{m}$ 的街尘中Ex-P含量空间分异的单因子解释力最强,而娱乐休闲类(POI V)要素则对粒径为 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 的街尘中Ex-P含量空间分异的单因子解释力最强。

总体而言,城市要素对粒径 $<150\ \mu\text{m}$ 街尘中Al-P含量空间分异的单因子解释力较粒径 $>150\ \mu\text{m}$ 街尘中Al-P含量空间分异的单因子解释力更强,其 $q$ 值分别为 $0.061\sim 0.320$ 和 $0.057\sim 0.257$ 。相较于其余几类城市要素,路网(ROAD)、车站类(POI I)和工厂汽修类(POI III)要素对Al-P含量空间分异的单因子解释力更强且更显著,这3类城市要素的 $q$ 值在各粒径段基本都排在前3位。

各类城市要素对Fe-P含量空间分异的单因子解释力在街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $>450\ \mu\text{m}$ 时相对更强,其 $q$ 值为 $0.038\sim 0.343$ ,而对其余粒径段街尘中Fe-P含量,各类城市要素计算得到的 $q$ 值为 $0.039\sim 0.201$ ,明显小于前者。工厂汽修类(POI III)要素对各粒径段Fe-P含量空间分异均具有较强且较显著的单因子解释力,其 $q$ 值为 $0.166\sim 0.232$ ,且 $p$ 值基本 $<0.05$ 。此外,车站类(POI I)要素对粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 和 $>450\ \mu\text{m}$ 街尘中Fe-P含量空间分异的单因子解释力较强( $q$ 值为 $0.296\sim 0.343$ , $p<0.01$ );住宅学校类(POI II)要素对街尘粒径为 $63\sim 150\ \mu\text{m}$ 和 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 街尘中Fe-P含量空间分异的单因子解释力较强( $q$ 值为 $0.159\sim 0.265$ , $p<0.05$ ),而餐饮商场类(POI IV)要素对粒径为 $450\sim 2000\ \mu\text{m}$ 的街尘中Fe-P含量的空间分异也有相对较强的单因子解释力,其 $q$ 值为 $0.174$ ( $p<0.05$ )。

相对而言,城市要素对粒径为 $63\sim 150\ \mu\text{m}$ 的街尘中Oc-P含量空间分异的单因子解释力更强,其 $q$ 值为 $0.054\sim 0.339$ 。其中,路网(ROAD)和工厂汽修类(POI III)要素的单因子解释力相对更强且更显著,其 $q$ 值分别为 $0.339$ ( $p<0.01$ )和 $0.177$ ( $p<0.05$ ),排在所有城市要素 $q$ 值的前两位。

对于Ca-P,城市要素对其空间分异的单因子解释力大体随粒径增大而增强。其中,车站类(POI I)、住宅学校类(POI II)、餐饮商场类(POI IV)、娱乐休闲类(POI V)和医院类(POI VI)要素的单因子解释力相对更强且更显著。这5类城市要素 $q$ 值的最大值分别为 $0.216$ 、 $0.247$ 、 $0.188$ 、 $0.193$ 和 $0.385$ ,而其余几类城市要素 $q$ 值最大值则为 $0.137$ 。

城市要素对Or-P空间分异的单因子解释力则大体随街尘粒径增大而降低。各类城市要素对粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 的街尘中Or-P含量空间分异的单因子解释力最强,其 $q$ 值为 $0.064\sim 0.292$ ,而对其余粒径段街尘中Or-P含量,各类城市要素计算得到的 $q$ 值则为 $0.024\sim 0.217$ ,明显小于前者。总体而言,住宅学校类(POI II)、餐饮商场类(POI IV)和娱乐休闲类(POI V)要素对Or-P空间分异的单因子解释力较强,其 $q$ 值分别为 $0.159\sim 0.217$ 、 $0.088\sim 0.154$ 和 $0.098\sim 0.221$ 。路网(ROAD)只有在街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 时对Or-P的空间分异有较强且显著的单因子解释力,其 $q$ 值为 $0.292$ ( $p<0.01$ )。

城市要素对De-P空间分异的单因子解释力普遍较弱,其 $q$ 值为 $0.008\sim 0.152$ ,且 $p$ 值均 $>0.1$ 。不过,城市要素对De-P空间分异的解释力大体有随街尘粒径增大而增强的趋势。街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ 时,城市要素 $q$ 值为 $0.015\sim 0.099$ ,而当街尘粒径 $>450\ \mu\text{m}$ 时,城市要素 $q$ 值则为 $0.051\sim 0.15$ 。

城市要素对 TP 空间分异的解释力大体也随粒径增大而增强. 街尘粒径 <450  $\mu\text{m}$  时, 城市要素  $q$  值为 0.014~0.104; 而街尘粒径 >450  $\mu\text{m}$  时, 城市要素  $q$  值明显增大, 其范围为 0.048~0.319. 街尘粒径 >450  $\mu\text{m}$  时, 娱乐休闲类 (POI V) 和医院类 (POI VI) 要素对 TP 空间分异的单因子解释力较强且显著, 其  $q$  值分别为 0.206 和 0.319 ( $p < 0.05$ ). 值得注意的是, 景点类 (POI VII) 要素对街尘累积量和磷素含量空间分异的单因子解释力普遍较其余几类城市要素弱. 对各粒径段街尘累积量及磷素含量, 景点类 (POI VII) 要素  $q$  值为 0.008~0.128, 且其  $p$  值均 >0.1.

表 5 不同城市要素对各粒径街尘累积量及各形态磷含量空间分异的单因子解释力

Table 5 Univariable explanatory power of urban elements over the spatial stratified heterogeneity of RDS build-up load and content of different phosphorus species in RDS

粒径/ $\mu\text{m}$	响应变量	解释力( $q$ 值)							
		ROAD	POI I	POI II	POI III	POI IV	POI V	POI VI	POI VII
<63	$M$	0.059	0.185**	0.089	0.089	0.043	0.069	0.114	0.056
	Ex-P	0.103	0.164*	0.136	0.106	0.081	0.088	0.027	0.072
	Al-P	0.200*	0.156*	0.105	0.320**	0.071	0.120	0.112	0.072
	Fe-P	0.079	0.343***	0.159	0.166**	0.100	0.134	0.273	0.076
	Oc-P	0.091	0.056	0.140	0.152	0.052	0.101	0.117	0.072
	Ca-P	0.070	0.143*	0.170	0.117*	0.181	0.156	0.179	0.074
	De-P	0.066	0.069	0.066	0.079	0.099	0.043	0.035	0.015
	Or-P	0.292***	0.129	0.203***	0.102	0.117*	0.221**	0.145*	0.064
	TP	0.079	0.076	0.046	0.088	0.071	0.023	0.026	0.030
63~150	$M$	0.083	0.192**	0.087	0.088	0.044	0.077	0.101	0.066
	Ex-P	0.174*	0.114	0.206**	0.155*	0.096	0.126	0.126	0.093
	Al-P	0.124	0.222**	0.131*	0.118	0.076	0.154*	0.061	0.098
	Fe-P	0.102	0.098	0.159**	0.166*	0.102	0.107	0.189	0.039
	Oc-P	0.339***	0.094	0.094	0.177**	0.058	0.054	0.114	0.056
	Ca-P	0.064	0.144	0.169**	0.081	0.182	0.172**	0.123	0.030
	De-P	0.065	0.067	0.071	0.061	0.093	0.046	0.030	0.008
	Or-P	0.068	0.038	0.198*	0.024	0.088	0.140	0.170	0.128
	TP	0.069	0.075	0.070	0.063	0.085	0.043	0.020	0.014
150~450	$M$	0.073	0.192**	0.084	0.085	0.054	0.074	0.092	0.044
	Ex-P	0.048	0.062	0.148*	0.105	0.115	0.088	0.050	0.058
	Al-P	0.217**	0.236***	0.072	0.107	0.065	0.067	0.057	0.069
	Fe-P	0.105	0.100	0.201	0.198**	0.103	0.113	0.150	0.066
	Oc-P	0.093	0.180*	0.093	0.132	0.086	0.067	0.112	0.089
	Ca-P	0.078	0.207*	0.247***	0.130*	0.154**	0.213	0.285	0.100
	De-P	0.039	0.085	0.077	0.039	0.152	0.026	0.068	0.036
	Or-P	0.129	0.078	0.217**	0.128	0.154*	0.144**	0.039	0.083
	TP	0.050	0.104	0.077	0.070	0.100	0.071	0.094	0.020
450~2000	$M$	0.078	0.220**	0.089	0.053	0.110	0.075	0.043	0.025
	Ex-P	0.109	0.129	0.131	0.066	0.141	0.233*	0.151	0.049
	Al-P	0.092	0.106*	0.067	0.257**	0.099	0.057	0.080	0.065
	Fe-P	0.114*	0.296***	0.265**	0.232**	0.174**	0.174	0.158	0.038
	Oc-P	0.073	0.092	0.049	0.092	0.076	0.063	0.128	0.113
	Ca-P	0.137	0.216**	0.125	0.124	0.188**	0.193	0.385***	0.053
	De-P	0.090	0.062	0.136*	0.103	0.150	0.119	0.122	0.051
	Or-P	0.098	0.059	0.159	0.088	0.149*	0.098	0.024	0.052
	TP	0.170*	0.175*	0.152	0.142	0.176	0.206**	0.319**	0.048

注:  $M$  代表单位面积街尘累积量; \*\*\*表示  $p$  值小于 0.01, \*\*表示  $p$  值小于 0.05, \*表示  $p$  值小于 0.1.



**3.3.2 交互作用及双因子解释力** 城市要素间的空间交互会造成其对街尘累积量或街尘中磷素含量空间分异的解释力发生正向或负向的变化.具体来说,对于粒径<450 μm的街尘累积量,两城市要素间的交互作用效果相近(图3).车站类(POI I)和医院类(POI VI)要素交互均对其解释力产生非线性增强作用,并且二者交互后对粒径<450 μm的街尘累积量空间分异的双因子解释力均最强.景点类(POI VII)要素与车站类(POI I)或医院类(POI VI)要素交互均产生单因子非线性减弱作用,并且医院类(POI VI)和景点类(POI VII)要素交互后对粒径<450 μm的各粒径段街尘累积量空间分异的双因子解释力均最弱.街尘粒径>450 μm,车站类(POI I)要素与娱乐休闲类(POI V)或景点类(POI VII)要素交互产生单因子非线性减弱作用,其余要素交互则均产生双因子增强或非线性增强作用(图3).对于450~2000 μm街尘累积量的空间分异,路网(ROAD)与餐饮商场类(POI IV)要素交互后的双因子解释力最强( $q=0.402$ ),而娱乐休闲类(POI V)与景点类(POI VII)要素交互后的双因子解释力最弱( $q=0.090$ ).

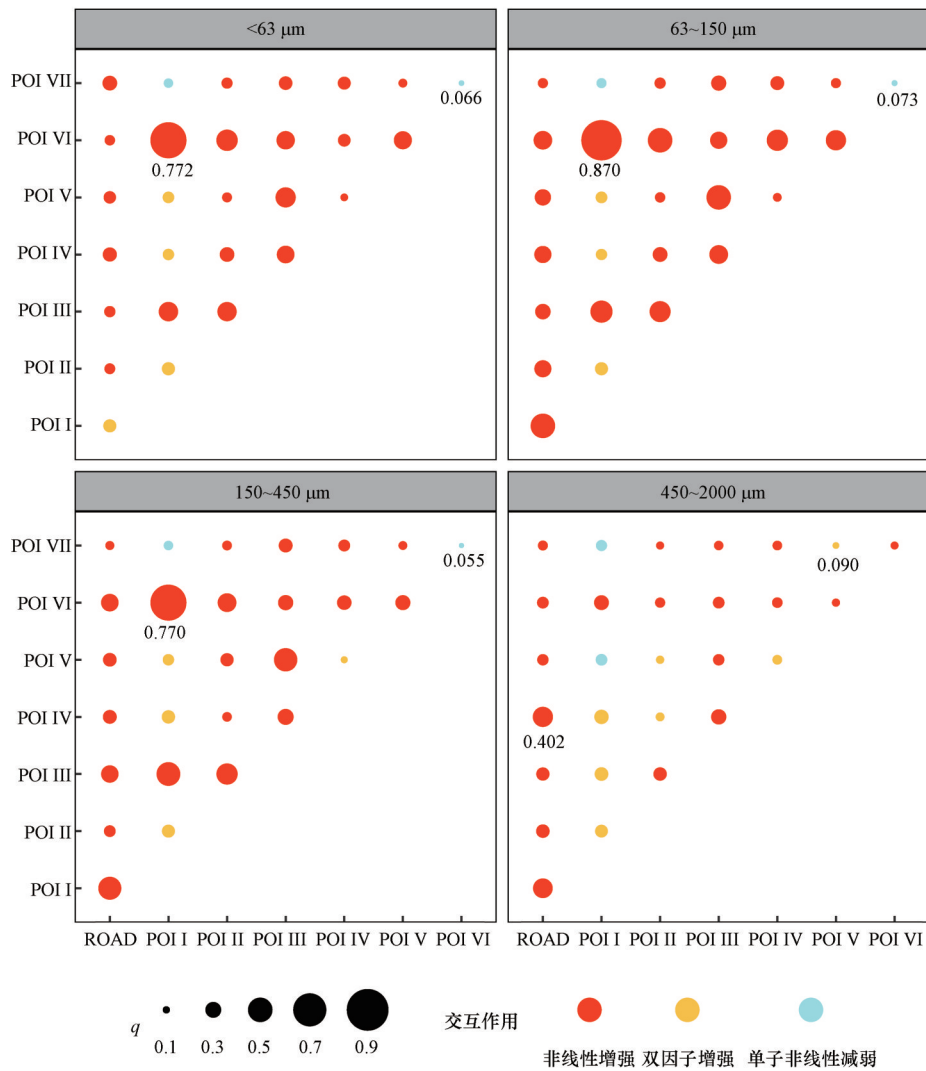


图3 城市要素交互作用及其对街尘累积量空间分异的双因子解释力

Fig.3 Interactive effect of urban elements and its bivariable explanatory power over the spatial stratified heterogeneity of RDS build-up load

对不同形态磷的空间分异,各类城市要素间的交互作用及其双因子解释力随街尘粒径变化而有所差异(图4~7).对于Ex-P,街尘粒径>150 μm时城市要素交互只产生双因子增强或非线性增强作用.对粒径<150 μm街尘中Ex-P含量的空间分异,路网(ROAD)与其余城市要素交互更易对其解释力产生单因子非线性减弱作用.相对而言,城市要素交互后对粒径>450 μm的街尘中Ex-P含量空间分异的双因子解释力普遍更强,

特别是娱乐休闲类(POI V)和景点类(POI VII)要素,二者交互后  $q$  值为 0.720,明显高于其余粒径段二者交互后的  $q$  值.



图4 城市要素交互作用及其对<63 μm街尘中各形态磷含量空间分异的双因子解释力

Fig.4 Interactive effect of urban elements and its bivariable explanatory power over the spatial stratified heterogeneity of content of different phosphorus species in <63 μm RDS

对于 Al-P,城市要素交互在街尘粒径>450 μm时只产生非线性增强作用.工厂汽修类(POI III)要素与其余城市要素交互后对 Al-P空间分异的双因子解释力普遍较强.特别是街尘粒径<450 μm时,工厂汽修类(POI III)要素与娱乐休闲类(POI V)要素交互后的双因子解释力在各粒径段中均最强.街尘粒径<63 μm,车站类(POI I)要素与除医院类(POI VI)要素外的其余城市要素交互均造成其对 Fe-P空间分异的解释力发生单因子非线性减弱现象.此外,路网(ROAD)与景点类(POI VII)要素交互造成其对<63 μm街尘中 Fe-P含量

空间分异的解释力非线性减弱,同时二者的双因子解释力最弱,其 $q$ 值为0.053.对于Oc-P,除路网(ROAD)与景点类(POI VII)要素外,其余要素交互均只产生双因子增强或非线性增强作用.当街尘粒径 $<150 \mu\text{m}$ 时,城市要素间交互后对Oc-P空间分异的双因子解释力相对街尘粒径 $>150 \mu\text{m}$ 时更强,前者 $q$ 值为0.096~0.652,后者 $q$ 值为0.098~0.462.



图5 城市要素交互作用及其对63~150 μm街尘中各形态磷含量空间分异的双因子解释力

Fig.5 Interactive effect of urban elements and its bivariable explanatory power over the spatial stratified heterogeneity of content of different phosphorus species in 63~150 μm RDS

城市要素交互对其解释Ca-P和De-P空间分异的能力只产生非线性增强或双因子增强作用,并且交互后城市要素双因子解释力大体随街尘粒径增大而增强.对于Ca-P,路网(ROAD)与其余城市要素交互对其解释力易产生非线性增强作用,而餐饮商场类(POI IV)要素与车站类(POI I)要素、路网(ROAD)与医院类(POI VI)要素交互分别在街尘粒径为 $<63 \mu\text{m}$ 、 $63\sim150 \mu\text{m}$ 和 $450\sim2000 \mu\text{m}$ 时产生最强的双因子解释力,其 $q$ 值分

别为0.457、0.410和0.795.对粒径<150 μm街尘中De-P含量的空间分异,均是工厂汽修类(POI III)与餐饮商场类(POI IV)要素交互后的双因子解释力最强,而娱乐休闲类(POI V)与景点类(POI VII)要素交互后的双因子解释力最弱.

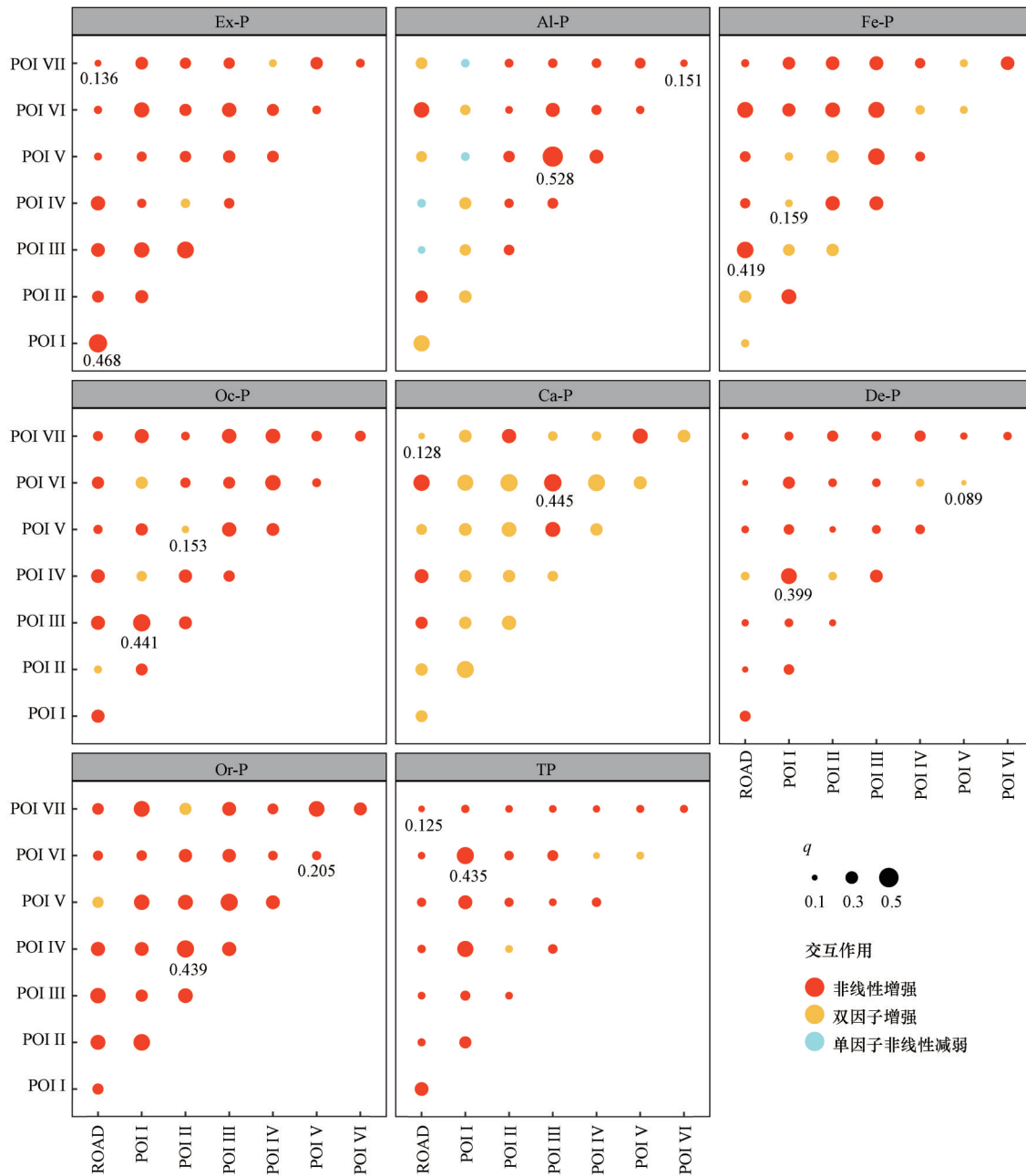


图6 城市要素交互作用及其对150~450 μm街尘中各形态磷含量空间分异的双因子解释力

Fig.6 Interactive effect of urban elements and its bivariable explanatory power over the spatial stratified heterogeneity of content of different phosphorus species in 150~450 μm RDS

城市要素间的交互对其解释粒径63~150 μm和粒径150~450 μm街尘中Or-P含量空间分异的能力均只产生非线性增强或双因子增强作用.其中,餐饮商场类(POI IV)和景点类(POI VII)要素交互后的双因子解释力最强,其q值为0.538.街尘粒径为150~450 μm和450~2000 μm时,娱乐休闲类(POI V)要素和医院类(POI VI)要素交互后对Or-P空间分异的解释力均最弱.相对而言,城市要素对粒径450~2000 μm街尘中Or-P含量空间分异的双因子解释力明显弱于对其余几组粒径段街尘中Or-P含量空间分异的双因子解释力,

其  $q$  值在街尘粒径为  $450\sim 2000\ \mu\text{m}$  时为  $0.090\sim 0.327$ ,而在街尘粒径  $<450\ \mu\text{m}$  时为  $0.124\sim 0.538$ .

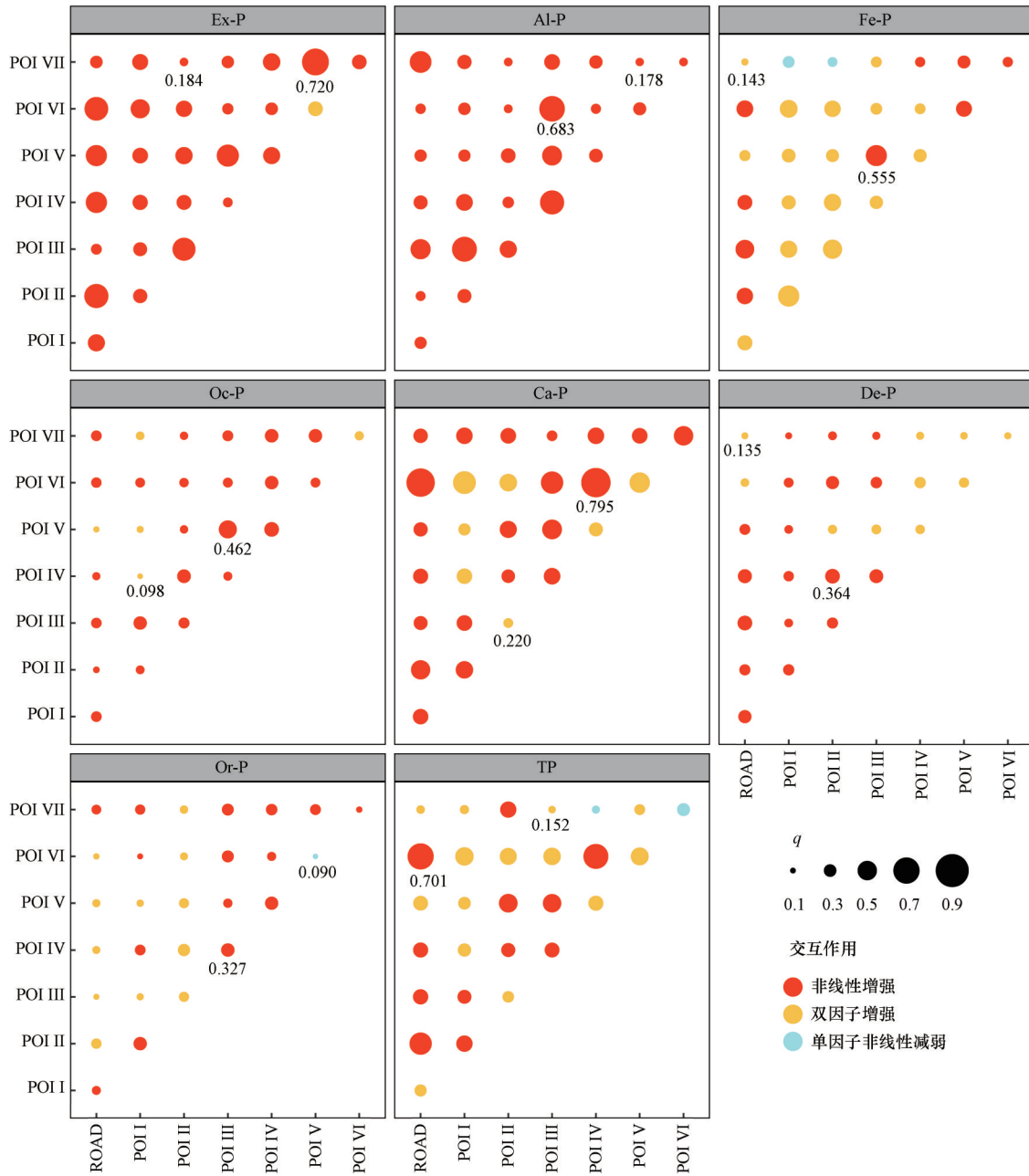


图7 城市要素交互作用及其对  $450\sim 2000\ \mu\text{m}$  街尘中各形态磷含量空间分异的双因子解释力

Fig.7 Interactive effect of urban elements and its bivariable explanatory power over the spatial stratified heterogeneity of content of different phosphorus species in  $450\sim 2000\ \mu\text{m}$  RDS

对于 TP,当街尘粒径  $<450\ \mu\text{m}$  时,城市要素交互只产生双因子增强或非线性增强作用;当街尘粒径  $>450\ \mu\text{m}$  时,景点类(POI VII)要素与餐饮商场类(POI IV)或医院类(POI VI)要素交互会产生单因子非线性减弱作用.街尘粒径  $<63\ \mu\text{m}$  和介于  $63\sim 150\ \mu\text{m}$  时,均是工厂汽修类(POI III)与餐饮商场类(POI IV)要素交互后对 TP 空间分异的双因子解释力最强,而娱乐休闲类(POI V)和景点类(POI VII)要素交互后对 TP 空间分异的双因子解释力最弱.整体而言,城市要素对粒径  $>450\ \mu\text{m}$  街尘中 TP 含量空间分异的双因子解释力普遍强于其对粒径  $<450\ \mu\text{m}$  街尘中 TP 含量空间分异的双因子解释力.

### 3.4 讨论

从本质上来看,不同城市要素应是通过影响人群、车辆、特定社会经济活动等的空间聚散特征影响区域内街尘及其负载磷素的输入输出特征,进而表现出对街尘累积量及街尘负载磷素含量空间分异不同程度的解释特征(Sartor *et al.*, 1972; Charlesworth *et al.*, 2011; Wijesiri *et al.*, 2019).例如,车站类(POI I)要素周边相较于其他区域往往有更频繁的大型车辆及行人聚集.大型车辆的频繁启停及候车人员遗洒的垃圾碎屑等可能产生一定量的街尘,同时又对已累积的街尘产生一定的扰动,从而使车站类(POI I)要素表现出对街尘累积量空间分异较为明显的单因子解释力(表5).Ex-P和Or-P可能部分来源于食物碎屑或宠物排泄物等(Kalmykova *et al.*, 2012; 李如忠等, 2012),因而诸如住宅学校类(POI II)、餐饮商场类(POI IV)及娱乐休闲类(POI V)要素均对其空间分异表现出较为明显的单因子解释力(表5).另外,街尘中部分Or-P可能还来源于交通工具构件及燃料中的添加剂(He, 2019; Indris *et al.*, 2020),故而路网(ROAD)对 $<63 \mu\text{m}$ 街尘中Or-P含量的空间分异也有较强的单因子解释力(表5).城市中路面和交通工具构件的磨损及工业相关的废弃物等可能是街尘中部分Al-P和Fe-P的来源(Wählin *et al.*, 2006; 刘春华等, 2007).路网(ROAD)、车站类(POI I)及工厂汽修类(POI III)要素对二者空间分异相对较强的单因子解释力也在一定程度上印证了这一点(表5).车站类(POI I)、住宅学校类(POI II)和餐饮商场类(POI IV)要素对Ca-P空间分异相对较强的单因子解释力可能说明食物碎屑、交通活动相关的颗粒物及建筑材料碎屑等是街尘中Ca-P的潜在贡献源.而城市要素对De-P空间分异相对较弱的单因子解释力则表明街尘中De-P的多源性或是土壤相关自然源的主导性.同时,街尘中不同形态磷含量空间分异特征所能被城市要素解释的程度可能在一定程度上反映了自然源及人类活动源对街尘中不同形态磷素的贡献比例,进而使街尘中不同形态磷含量因城市要素的空间变化特征而表现出差异化的空间分异强度.De-P相较于其余几种形态磷更弱的空间分异性可能与此有关.此外,部分城市要素可能因其在空间上分布的有限性或区域性而对街尘累积量或街尘负载磷素含量空间分异特征的单因子解释力较弱.但是,当其与另外的城市要素共同作为解释因子时,其可能对影响街尘及磷素输入输出的特定人类活动的空间分布产生更强的决定能力,从而表现出对街尘累积量或街尘负载磷素含量空间分异特征更显著的解释力.景点类(POI VII)要素对街尘中各类磷素含量的空间分异未表现出显著的单因子解释力(表5),但其与餐饮商场类(POI IV)或娱乐休闲类(POI V)要素交互后对Ex-P和Or-P的空间分异产生了较强的双因子解释力(图5、7),这可能说明景点类(POI VII)要素对街尘中部分磷素空间分异的决定特征往往在考虑其他城市要素空间分布时才能凸显.

从实际污染控制的角度来看,以城市要素空间布局对街尘污染空间分异的解释特征为切入点可能具有一些特定的优势.当前新兴城市水管理理念越发追求水质水量管理需与人居环境可持续相协调(Nguyen *et al.*, 2019),这说明将引起城市水体水质问题诱因之一的非点源污染的控制问题与城市规划协同考虑可能更符合发展的趋势.考虑到多种城市要素交互对街尘及其负载磷素空间分异具有较为明显的解释力,如能在规划城市要素空间布局的同时考虑其对街尘与其负载污染物的空间影响效应在不同区域布置针对性的控制措施,则可能有利于协调城市发展与非点源污染防控之间的矛盾,提升城市发展的可持续性.不过值得注意的是,在气象等因素的影响下,城市要素对街尘累积及街尘负载磷素含量空间分异的决定特征可能会表现出一定的季节性及区域性变化(Wijesiri *et al.*, 2016; Niu *et al.*, 2019).本研究尚未能对这一方面做详细的探讨,后续研究可能需要在相关方面做更进一步的探究以丰富本研究得到的初步结果,从而更好地为实际街尘污染控制服务.

## 4 结论(Conclusions)

1) 汉阳街尘累积量和街尘负载磷素含量的空间分异程度随街尘粒径与磷形态而异.街尘累积量的空间分异程度大体随粒径增大而降低且在粒径 $<150 \mu\text{m}$ 时相对更高.Al-P、Oc-P和Or-P的空间分异在各粒径段普遍较强.Ex-P、Fe-P和Ca-P的空间分异程度均随粒径有相对明显的变化,但Ex-P和Fe-P的空间分异在街尘粒径介于 $63\sim 450 \mu\text{m}$ 时相对更强,而Ca-P的空间分异则在街尘粒径 $<63 \mu\text{m}$ 和 $>450 \mu\text{m}$ 时相对更强.De-P和TP的空间分异则在街尘粒径 $<150 \mu\text{m}$ 时普遍较弱.

2)路网(ROAD)对Al-P、Oc-P和Or-P空间分异的单因子解释力较强。车站类(POI I)要素对街尘累积量、Al-P、Fe-P和Ca-P空间分异的单因子解释力较强。住宅学校类(POI II)要素在街尘粒径 $<450\ \mu\text{m}$ 时对Ex-P、Fe-P、Ca-P和Or-P空间分异的单因子解释力较强,而在街尘粒径 $>450\ \mu\text{m}$ 时仅对Fe-P的空间分异有较明显的单因子解释力。工厂汽修类(POI III)要素对Al-P和Fe-P空间分异的单因子解释力较强。餐饮商场类(POI IV)、娱乐休闲类(POI V)和医院类(POI VI)要素在街尘粒径 $>150\ \mu\text{m}$ 时对街尘磷素含量的空间分异有相对明显的单因子解释力,而景点类(POI VII)要素则对街尘累积量和磷素含量空间分异的单因子解释力整体较弱。

3)城市要素对街尘累积量空间分异的双因子解释力在街尘粒径 $<450\ \mu\text{m}$ 时更强且随粒径变化不明显。街尘粒径 $<63\ \mu\text{m}$ ,城市要素交互后对Al-P和Oc-P空间分异的双因子解释力相对更强;街尘粒径 $>450\ \mu\text{m}$ ,城市要素交互后对Ex-P、Al-P、Ca-P和TP空间分异的双因子解释力相对更强。多数情况下城市要素交互会增强其对街尘累积量和街尘负载磷素含量空间分异的解释力,但路网(ROAD)、车站类(POI I)和景点类(POI VII)要素与部分城市要素交互对其解释力产生非线性减弱或单因子非线性减弱作用。

4)将城市要素布局作为街尘颗粒物及磷污染控制措施空间布置的参考指标,并对不同形态磷采取差异化的控制策略,有利于实现街尘磷污染的高效控制。

#### 参考文献(References):

- Alhazzani M, Alhasoun F, Alawwad Z, *et al.* 2021. Urban attractors: Discovering patterns in regions of attraction in cities[J]. PLoS ONE, 16(4):e0250204
- 柏玲, 罗溢斌, 姜磊, 等. 2020. 中国城市NO<sub>x</sub>排放的时空特征与驱动因素: 基于空间分异视角[J]. 环境科学学报, 40(2):687-696
- Bian B, Zhu W. 2009. Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 31(4):511-520
- 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 2007. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J]. 应用生态学报, 18(5):1155-1160
- Charlesworth S, De Miguel E, Ordóñez A. 2011. A review of the distribution of particulate trace elements in urban terrestrial environments and its application to considerations of risk[J]. Environmental Geochemistry and Health, 33(2):103-123
- Chen E, Ye Z. 2021. Identifying the nonlinear relationship between free-floating bike sharing usage and built environment[J]. Journal of Cleaner Production, 280:124281
- 崔树强, 朱佩娟, 张美芳, 等. 2020. 城市建成环境对共享单车使用空间分布的影响—以长沙市为例[J]. 西南大学学报(自然科学版), 42(6):89-99
- 丁彦文, 许捍卫, 汪成昊. 2020. 融合OSM路网与POI数据的城市功能区识别研究[J]. 地理与地理信息科学, 36(4):57-63
- 段丙政. 2014. 重庆老城区面源污染及街尘清扫措施研究[D]. 武汉:华中农业大学
- 高枫, 李少英, 吴志峰, 等. 2019. 广州市主城区共享单车骑行目的地时空特征与影响因素[J]. 地理研究, 38(12):2859-2872
- Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, *et al.* 2005. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management[J]. Journal of Environmental Management, 74(1):31-42
- 国家统计局, 中国标准化研究院. 2017. GB/T 4754-2017 国民经济行业分类[S]. 北京:中国标准出版社
- He M. 2019. Organophosphate esters in road dust from a suburban area of chongqing, china: Characterization of particle size distribution and human exposure[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 76(4):630-639
- 黄迎春, 崔慧荣, 郭育军, 等. 2021. 2020年武汉市水资源公报[R]. 武汉:武汉市水务局. 2-27
- Indris S N, Rudolph D L, Glass B K, *et al.* 2020. Evaluating phosphorous from vehicular emissions as a potential source of contamination to ground and surface water[J]. Cogent Environmental Science, 6(1):1794702
- 江倩, 谢文霞, 尹澄清, 等. 2017. 城市道路下垫面粗糙度对街尘累积分布与污染特征的影响[J]. 环境科学学报, 37(12):4693-4704
- Kalmykova Y, Harder R, Borgstedt H, *et al.* 2012. Pathways and management of phosphorus in urban areas[J]. Journal of Industrial Ecology, 16(6):928-939
- 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 2012. 合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 33(4):1159-1166
- 刘春华, 岑况. 2007. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源[J]. 环境科学学报, 27(7):1181-1188
- 娄和震, 吴习锦, 郝芳华, 等. 2020. 近三十年中国非点源污染研究现状与未来发展方向探讨[J]. 环境科学学报, 40(5):1535-1549
- Miguntanna N P, Goonetilleke A, Egodowatta P, *et al.* 2010. Understanding nutrient build-up on urban road surfaces[J]. Journal of Environmental Sciences, 22(6):806-812
- Nguyen T T, Ngo H H, Guo W, *et al.* 2019. Implementation of a specific urban water management - Sponge City[J]. Science of the Total Environment, 652:147-162
- 聂丽娟, 田文龙, 管锡东, 等. 2020. 武汉市湖泊表层沉积物磷形态组成特征[J]. 生态与农村环境学报, 36(12):1540-1548
- Niu S, Chen Y, Yu J, *et al.* 2019. Characteristics of particle size distribution and related contaminants of highway-deposited sediment, Maanshan City, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 41(6):2697-2708

- 任玉芬,王效科,欧阳志云,等.2013.北京城区道路沉积物污染特性[J].生态学报,33(8):2365-2371
- Sartor J D, Boyd G B.1972. Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants[R]. R2-72-081. Washington, D. C.: U. S. Environmental Protection Agency.24-65
- 尚丽民,王建龙,张雅君.2014.城市道路沉积物氮、磷溶出特性[J].环境工程学报,8(3):891-896
- Shi P, Xiao Y, Zhan Q.2020.A study on spatial and temporal aggregation patterns of urban population in Wuhan city based on baidu heat map and POI data[J].International Review for Spatial Planning and Sustainable Development,8(3):101-121
- Shi T, Hu Z, Shi Z, *et al.*2018.Geo-detection of factors controlling spatial patterns of heavy metals in urban topsoil using multi-source data[J].Science of the Total Environment,643:451-459
- Song Y, Wang J, Ge Y, *et al.*2020. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J].GIScience & Remote Sensing,57(5):593-610
- 王劲峰,徐成东.2017.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,72(1):116-134
- Wählin P, Berkowicz R, Palmgren F.2006.Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen[J].Atmospheric Environment,40(12):2151-2159
- Wijesiri B, Egodawatta P, McGree J, *et al.*2016.Understanding the uncertainty associated with particle-bound pollutant build-up and wash-off: A critical review[J].Water Research,101:582-596
- Wijesiri B, Goonetilleke A.2019.Urban Water Quality//Jegatheesan V, Goonetilleke A, Van Leeuwen J, *et al.* Urban Stormwater and Flood Management[M]. Cham:Springer.49-68
- Wijesiri B, Liu A, Gunawardana C, *et al.*2018.Influence of urbanisation characteristics on the variability of particle-bound heavy metals build-up: A comparative study between China and Australia[J].Environmental Pollution,242:1067-1077
- Xu H, Zhu J, Wang Z.2019. Exploring the spatial pattern of urban block development based on POI analysis: A case study in Wuhan, China[J]. Sustainability,11(24):6961
- 许泽宁,高晓路.2016.基于电子地图兴趣点的城市建成区边界识别方法[J].地理学报,71(6):928-939
- 薛冰,李京忠,肖骁,等.2019.基于兴趣点(POI)大数据的人地关系研究综述:理论、方法与应用[J].地理与地理信息科学,35(6):51-60
- Yang X, Fang Z, Xu Y, *et al.*2016.Understanding spatiotemporal patterns of human convergence and divergence using mobile phone location data[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information,5(10):177
- 余麟,韩龙,周连宁,等.2016.深圳市城市道路地表污染物分析研究[J].环境科学与管理,41(2):101-104,120
- Zhao H, Li X, Wang X.2011. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution[J].Environmental Science & Technology,45(17):7120-7127
- 赵洪涛,李叙勇,尹澄清.2012.街尘与城市降雨径流污染的关系综述[J].生态学报,32(24):8001-8007
- 中华人民共和国住房和城乡建设部.2018.GB/T 51328-2018 城市综合交通体系规划标准[S].北京:中国建筑工业出版社
- 朱阿兴,闰国年,周成虎,等.2020.地理相似性:地理学的第三定律? [J].地球信息科学学报,22(4):673-679
- 朱广伟,秦伯强.2003.沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J].农业环境科学学报,22(3):349-352
- 朱鹤,刘家明,陶慧,等.2015.北京城市休闲商务区的时空分布特征与成因[J].地理学报,70(8):1215-1228
- 朱兰保,盛蒂,戚晓明,等.2016.蚌埠市初冬季节地表灰尘氮磷形态及空间分布特征[J].安全与环境学报,16(6):342-347