

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石油工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽珺,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征及其与 PM_{10} 关系的时空变异特征

杨文涛^{1,2}, 姚诗琪^{3*}, 邓敏⁴, 王艳军^{1,2}

(1. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湘潭 411201; 3. 香港中文大学地理资源管理学系, 香港 999077; 4. 中南大学地理科学与信息物理学院地理信息系, 长沙 410083)

摘要: $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征及其与其它污染物的相关关系是 $\text{PM}_{2.5}$ 时空统计分析的主要研究内容。然而, 现有的方法直接从监测站点的角度对时空分布特征进行分析, 难以有效地揭示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的聚集分布特征; 同时, 常用的地理加权回归在对 $\text{PM}_{2.5}$ 与其它污染物间关系进行建模的过程中, 缺乏同时考虑时间异质性与空间异质性, 从而不能准确地描述依赖关系的时空变异特征。为此, 首先借助于空间聚类分析技术, 对北京市 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的聚集结构进行探测, 在此基础上, 通过聚集结构来分析 $\text{PM}_{2.5}$ 季节性时空分布特征。然后, 利用地理时空加权回归对北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 季节平均浓度间关系进行建模, 依据回归结果分析 $\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10} 间关系的时空变异特征。实验结果表明, 春夏季节 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度及空间变异程度均低于秋冬季节, 各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均表现为北部浓度低、南部浓度高的空间分布特征; 地理时空加权回归具有更好的拟合效果, 由回归系数进一步可发现, 春夏季 $\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10} 相关性低于秋冬季 $\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10} 相关性; 各季节均表现为西北部 $\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10} 的相关性高于东南部 $\text{PM}_{2.5}$ - PM_{10} 的相关性。

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 时空分布; 空间聚类分析; 模糊 C 均值聚类 (FCM); 地理时空加权回归

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0684-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703222

Spatio-temporal Distribution Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in Beijing

YANG Wen-tao^{1,2}, YAO Shi-qi^{3*}, DENG Min⁴, WANG Yan-jun^{1,2}

(1. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. National-local Joint Engineering Laboratory of Geo-spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Geographic Resource Management Department, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 4. Department of Geo-informatics, School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Spatio-temporal distribution of $\text{PM}_{2.5}$ and variations in the relationship between $\text{PM}_{2.5}$ and other pollutants are the main components of $\text{PM}_{2.5}$ spatio-temporal statistical analysis. Existing methods directly analyze spatio-temporal distribution based on monitoring data; thus, it is difficult to effectively reveal the aggregation structure of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations. Geographically weighted regression, commonly used to model the relationships between $\text{PM}_{2.5}$ and other pollutants, cannot accurately describe the spatio-temporal variability of dependency. In this study, the clustering structure of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing was identified using the spatial clustering algorithm and the seasonal distribution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ were analyzed based on the clustering results. The relationship between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} was modeled by geographically and temporally weighted regression and the spatio-temporal variability of dependency was analyzed according to the regression results. The results showed that $\text{PM}_{2.5}$ pollution levels and spatial variability were lower in spring and summer than those in autumn and winter and the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in each season was characterized by low spatial distribution in the north and high spatial distribution in the south. Geographically and temporally weighted regression showed better performance; the correlations between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in spring and summer are weaker than those in autumn and winter and the correlation between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in the northwest is stronger than that in the southeast in each season.

Key words: $\text{PM}_{2.5}$; spatio-temporal distribution; spatial clustering analysis; fuzzy-c-means (FCM) clustering; geographically temporally weighted regression

近年来, 我国大气污染的形势空前严峻, 以颗粒物为首要污染物的区域性污染事件频发。其中,

收稿日期: 2017-03-26; 修订日期: 2017-10-26

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601426); 空间信息智能感知与服务深圳市重点实验开放基金项目(2015C11508)

作者简介: 杨文涛(1988~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为地理时空数据分析与挖掘理论与方法, E-mail: yangwentao8868@126.com

* 通信作者, E-mail: shiqi_yao@outlook.com

细颗粒物 PM_{2.5} 不仅能显著地降低大气的能见度,同时对人体呼吸系统与心血管系统造成严重损害,受到了公众与政府的普遍关注^[1]. 为了有效地开展 PM_{2.5} 综合防治工作,推动空气质量持续改善,需要对 PM_{2.5} 进行精准化的监测与分析^[2,3]. PM_{2.5} 时空分布特征及时空相关特征研究是精准化监测与分析中的主要内容之一,时空分布特征主要是对 PM_{2.5} 浓度在不同时间与空间位置上的差异性进行表达,而时空相关特征用于描述 PM_{2.5} 与其它地理环境要素间具有时空依赖的相关关系.

现有研究大多直接从各监测站点分析时空分布特征^[3,4],然而这种方式难以识别 PM_{2.5} 浓度变化区域聚集特征,虽然部分学者采用行政区划或者监测站点类型对 PM_{2.5} 浓度数据进行聚合操作^[5,6],进而描述局部区域 PM_{2.5} 浓度的时空分布特征,但是考虑到同一行政区划或同类监测站点在不同位置上 PM_{2.5} 浓度可能存在差异,因此这种处理方式的合理性存在疑问. 相关系数或比值法能够量化 PM_{2.5} 与其它要素相关程度^[7],但是难以有效地揭示变量间的依赖关系,虽然回归分析可对变量间的依赖关系进行建模,但是土地利用回归不能处理空间异质性^[8-10],地理加权回归虽然顾及了变量间关系在空间上的异质性^[11-13],但在实际应用中,这种依赖关系不仅随空间位置发生变化,同时可能随时间发生改变. 因此,顾及时空异质性的回归分析模型更有助于揭示 PM_{2.5} 浓度与其它要素间的时空依赖关系.

为此,本文以北京市为研究区域,首先采用地理空间聚类技术对北京市的 PM_{2.5} 浓度的聚集模式进行识别,从而探测北京市 PM_{2.5} 浓度的时空分布特征;然后从时空异质性的角度出发,借助于地理时空加权回归模型来分析 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度之间的时空依赖关系,通过深入地了解北京市 PM_{2.5} 污染特点,以期为大气的防治提供有价值参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究数据简介

本文所用的数据集为北京市环保局公布的北京市 35 个空气质量监测数据,监测站点分布如图 1 所示. 研究过程中主要采用 PM_{2.5} 以及 PM₁₀ 的浓度数据,数据的时间跨度为 2014 年 3 月至 2015 年 2 月,时间粒度为小时. 对于数据中缺失值,采用时序线性插值的方法进行处理,即:

$$X_n = X_i + (n - i) \times (X_j - X_i) / (j - i) \\ (i < n < j)$$

式中, X_n 为第 n 个时刻的缺失值, X_i 与 X_j 分别为缺失前后(时刻 i 与 j) 的浓度值.

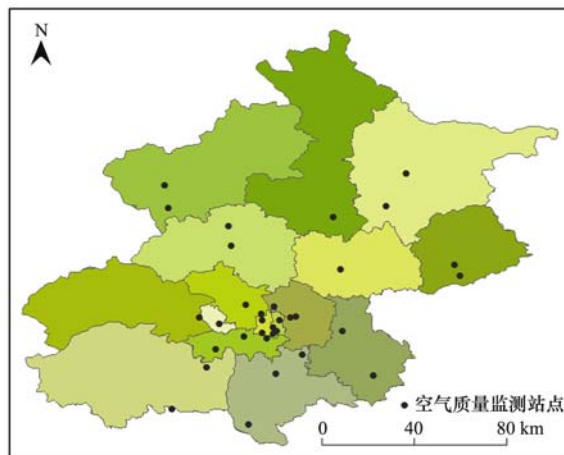


图 1 北京市空气质量监测站点分布

Fig. 1 Distribution map of air quality monitors in Beijing

1.2 研究方法

(1) 模糊 C 均值聚类

模糊 C 均值聚类(fuzzy-c-means, FCM)是建立一种对样本数据隶属度的不确定性分类描述^[14,15], FCM 算法是通过优化目标函数的方式得到最终的聚类结果. Chn 等^[16]采用 FCM 对台湾地区的 PM_{2.5} 的时空分布特征进行分析,已证实该方法能够较好探测 PM_{2.5} 浓度的时空分异模式,因此,本文采用该方法对北京地区的 PM_{2.5} 浓度时空分布特征进行分析.

对于样本集 $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\} \subset R^n$, FCM 方法的平方误差准则 $J_m(U, u)$ 可表示为:

$$J_m(U, v) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ij})^m (d_{ij})^2 \quad (1)$$

式中, $U = \{U_{ij}\}$ 为模糊隶属度函数; U_{ij} 表示第 j 个数据对应于第 i 类的隶属度; $v = \{v_i\}$ 为聚类中心的集合; d_{ij} 表示第 j 个样本 y_i 到第 i 个聚类中心的距离; c 为聚类的类别数($1 < c < n$); m 为模糊加权指数,通常设置为 2. 集合 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 是 n 个待聚类的像素集合,目标是通过迭代优化算法来使得目标函数 J_m 最小.

(2) 地理时空加权回归模型

地理加权回归模型(geographically weighted regression, GWR)是为了处理空间异质问题而对全局多元线性回归模型进行的拓展^[17,18],将数据的地理坐标嵌入到模型之中,建立空间位置变系数的回归模型. GWR 通过位置点 i 和其它观测点之间的空

间距离生成权重矩阵,从而得到位置点 i 上模型的参数值.然而这一方法忽视了依赖关系可能存在的时间异质性,即时空变量间的关系同时随空间与时间位置的不同而发生改变^[19].为此,Huang 等^[20]提出了顾及时空异质性的地理时空加权回归模型 (geographically temporally weighted regression, GTWR). GTWR 模型的表达式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, y_i 与 x_{ik} 分别表示回归模型的因变量与自变量; $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 与 $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 分别为时空位置 (u_i, v_i, t_i) 上回归模型的常数项与系数项; ε_i 是回归模型的随机误差项.回归系数的估计模型为:

$$\hat{\beta} = [X^T W(u_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i, t_i) Y \quad (3)$$

式中,权重 $W(u_i, v_i, t_i) = \text{diag}(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in})$,观测样本的数目为 n .在权重矩阵中,对角线元素 α_{ij} ($1 \leq j \leq n$) 为时空位置 i 与 j 间的时空距离函数.为了平衡时间和空间对预测点的影响,即考虑时间和空间的尺度效应的差异,GTWR 采用一种三维的椭圆坐标系来定义时空距离,进而确定时空权重矩阵.假定空间距离为 d^S 与时间距离为 d^T ,则时空距离可定义为:

$$d^{ST} = d^S \otimes d^T \quad (4)$$

式中, $\otimes$ 可以表示为不同的运算符.若 $\otimes$ 表示为“+”,时空距离 d^{ST} 则可以表示为 d^S 和 d^T 的线性结合,即:

$$d^{ST} = \lambda d^T + \mu d^T \quad (5)$$

$$d_{ij}^{ST} = \lambda [(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \mu (t_i - t_j)^2 \quad (6)$$

式中, λ 和 μ 分别为度量时间和空间的平衡指数,该指数是用于测度在空间和时间尺度系统中的距离.通过欧氏距离和高斯函数来构建距离模型.设 τ 为 μ/λ 的比例,同时 $\lambda \neq 0$,则有:

$$\frac{d_{ij}^{ST}}{\lambda} = [(u_i - u_j)^2 + (v_i - v_j)^2] + \tau (t_i - t_j)^2 \quad (7)$$

通常设定 $\lambda = 1$ 来减少参数的数目,并通过交叉验证优化参数 μ 的取值.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空分布特征分析

首先,采用 FCM 聚类方法探测北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节性的时空分布特征.其中,类间距离依据 Ward 方法,而类内距离采用欧氏距离.为了识别最

优簇的数目,通过优化目标函数来确定类内的加权均方误差以及类间的划分度,即计算不同聚类数目对应 FCM 的目标函数值,依据函数的收敛性来选择最终的聚类结果.各季节不同聚类数目对应的 FCM 目标函数变化曲线如图 2 所示.

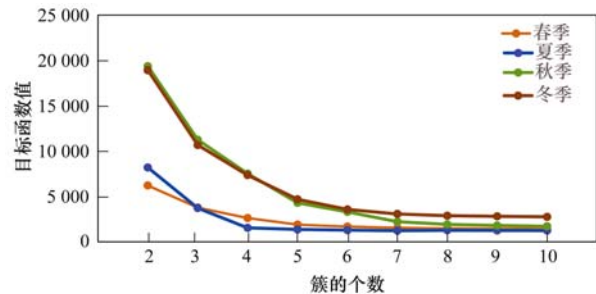


图 2 各季节 FCM 目标函数变化曲线

Fig. 2 Change curve of FCM objective function in each season

由图 2 可以发现,不同季节的目标函数值变化曲线大致相似,随着簇的数目增加,目标函数值均是先单调递减,而当数目增加到某个值时,目标函数值趋于稳定.通常将此时聚类结果作为最终的划分结果,与之对应簇的数目则选为最优聚类数.以春季为例,簇的个数从 2 增加到 5 的过程中,目标函数值显著降低,随后的目标函数曲线趋于平稳,因此,春季的最优聚类数目选为 5,该数目对应的聚类结果作为春季最终聚类结果.同理,可以确定其它季节聚类的最优数目.春、夏、秋、冬这 4 个季节最终聚类数目分别为 5、4、7、7.此外,目标函数值是样本点到簇类中心位置的平均距离,其大小可以表示簇间的分异程度高低.4 个季节中聚类结果的函数目标值次序分别为:冬季 (3061) > 秋季 (2210) > 春季 (1671) > 夏季 (1530),由目标函数值的大小可知,冬季的空间分异程度最高而夏季的分异程度最低,即冬季的 $\text{PM}_{2.5}$ 区域性分异程度显著高于夏季的 $\text{PM}_{2.5}$ 区域性分异程度.

在 FCM 聚类中,簇中心值是对簇平均浓度水平的表征.由图 3 可知,各季节最大的簇中心值依次为 96.45、75.41、141.23、178.17 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,中心值较大的簇出现在秋季与冬季,这就意味着春夏季细颗粒物污染程度低于秋冬季.其原因可能是:夏季不稳定的气象条件易于细颗粒物的扩散与沉降,同时,已有研究证实,植被覆盖率与 $\text{PM}_{2.5}$ 具有极强的相关性, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受植被的影响,植被覆盖率的增加使得春季与夏季浓度值相对较低^[21].而在秋冬季节,秸秆焚烧和燃煤取暖均使得悬浮细颗粒物浓度呈现迅速攀升的趋势,静稳的气象状况更加

不利于污染物浓度的降低。各季节最小的簇中心值依次为 57.99、57.61、77.34、54.44 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，由此可计算各季节中簇中心值的极差分别 38.46、17.80、63.89、123.73 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。簇中心值的极差在秋冬季明显大于春夏季，同时春夏季的聚类结果中包含 5 个左右的簇，而秋冬季节则划分为 7 个簇，综合表明春夏季节的细颗粒物浓度的变异低于秋冬季节。其原因可能是：春夏季节不稳定的气象条件弱化了区域地理因素对局部地区的环境污染影

响，使得春夏季节的分异较弱，而秋冬季节的天气状况一般具有静稳特征，同时细颗粒物浓度受区域地形影响更明显，北京的西部和北部为山脉，东南部为平原，呈现为典型的“簸箕”状地形，细颗粒物在偏南风或偏东风的输送作用下易在山前的平原地区汇聚，造成市区污染物累积而浓度升高，而在偏北风的输送作用下市区的细颗粒物容易扩散出去而浓度降低，从而形成显著地时空分异特征。

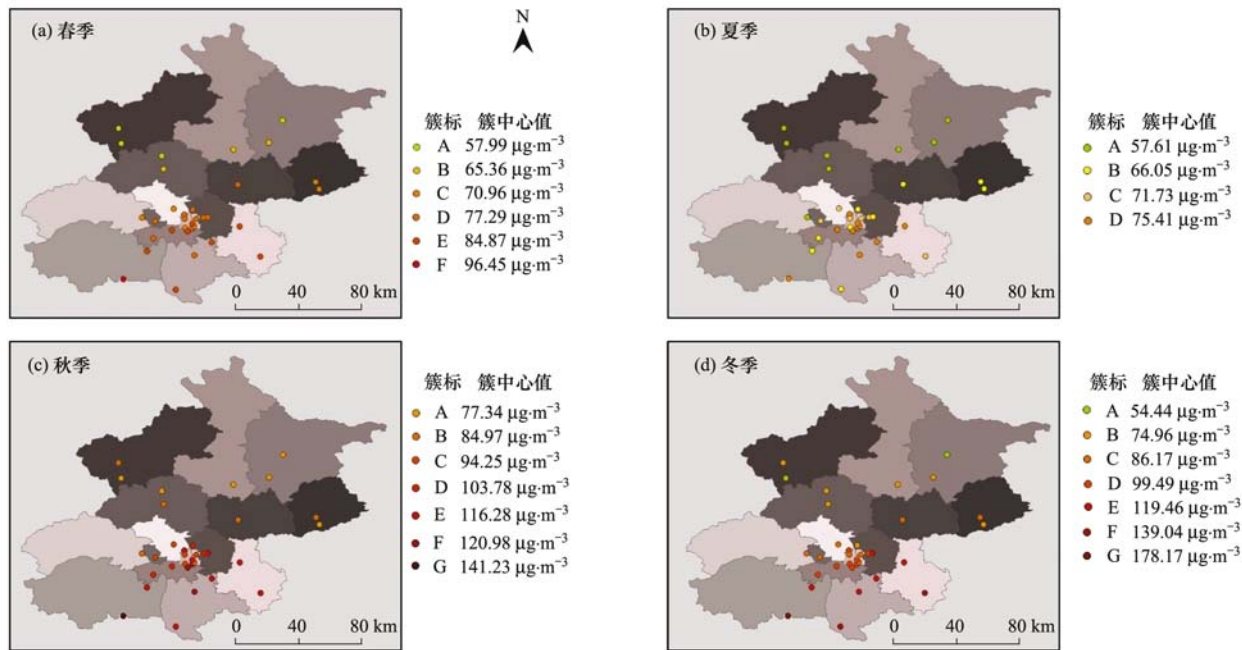


图3 各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 模糊 C 均值聚类结果
Fig. 3 FCM clustering results of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in each season

此外，各季节中浓度较高的簇主要位于北京市的南部，而浓度较低的簇则出现在北京市的北部地区。因而，各季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布较为相似，大多情况下表现为北部浓度低、南部浓度高的特征，且呈现阶梯性变化趋势，即浓度由北向南部逐渐降低，相邻的簇间浓度降低的量大致相同。空间分布的差异与北京市城市功能区规划有直接关系，北部延庆县、怀柔区、密云县等构成的生态涵养发展区，其污染程度最小；首都功能核心区(海淀区)与城市功能拓展区(东城区、西城区等)污染程度相似，处于中间水平；南部丰台区、房山区、大兴区等构成的城市发展新区，其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高。此外，北京市的南部存在较多传统的城市工业，区域间污染物的传输也是导致 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布结构的差异原因之一。现有污染源解析研究对此已进行了论证，如李璇等^[22]发现 2013 年 1 月北京市

$\text{PM}_{2.5}$ 区域污染物排放河北与天津贡献分别为 26% 与 4%，并且污染主要出现在北京城六区与南部地区；李云婷等^[23]分析了 2013 年北京市不同方位 $\text{PM}_{2.5}$ 的背景值，结果表明周边区域对北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 背景浓度空间分布影响显著。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 间关系的时空变异特征分析

采用 GTWR 模型对 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 间关系的时空变异特征进行分析。为了对 GTWR 模型的有效性进行评价，分别选取普通最小二乘法(OLS)、地理加权回归(GWR)进行对比。在 GWR 与 GTWR 中，该函数均选为高斯函数，带宽选择则采用交叉验证的方法。表 1 列出了这 3 种模型在不同季节回归决定系数 R^2 的取值。不难发现，OLS 模型中 PM_{10} 仅能确定 $\text{PM}_{2.5}$ 大约 50% 的变异，GWR 中 PM_{10} 可以解释 $\text{PM}_{2.5}$ 大约 89% 变异，而考虑到时空异质性的 GTWR 模型可以解释 $\text{PM}_{2.5}$ 近 95% 的变异。因此，

GTWR 比 GWR 与 OLS 具有更好的拟合效果,从而证明了 GTWR 比仅考虑空间异质性的 GWR 以及全局的 OLS 更有效.

表 1 不同模型对不同季节数据回归的决定系数
Table 1 Deterministic coefficients of different regression models for different seasonal data

时间	R^2		
	OLS	GWR	GTWR
春季	0.49	0.88	0.95
夏季	0.51	0.87	0.95
秋季	0.48	0.90	0.96
冬季	0.53	0.89	0.97

表 2 列出了 GWR 与 GTWR 两种模型总体诊断结果. 与 GWR 模型的诊断结果相比, GTWR 模型的拟合优度 R^2 从 0.88 增加至 0.96, 赤池信息准则 AICc 从 5872 降低到 5737, 误差平方和也有显著地降低. 因此, 在顾及时空异质性的条件下, GTWR 模型能够更好地描述 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 间的关系, 故采用 GTWR 的回归结果对 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的关系进行分析更为有效.

表 2 GWR 与 GTWR 模型的统计诊断
Table 2 Statistical diagnoses of GWR and GTWR

模型	R^2	AICc	F 统计	P 概率	误差平方和
GWR	0.88	5872	1.87	0.00	37.18
GTWR	0.96	5737	4.26	0.00	19.32

通过 GTWR 分析得到不同季节的 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的回归系数值后, 采用克里金对整个北京地区的回

归系数进行插值. 由于克里金插值需要满足空间平稳性要求, 因此, 采用二次趋势面提取空间非平稳特征后进行插值分析^[24]. 图 4 为北京地区的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 回归系数分布. 回归系数统计上反映了 PM_{10} 浓度对 $PM_{2.5}$ 浓度的边际影响程度, 其本质上能够揭示 PM_{10} 组成成分的结构变化特征. 由于 PM_{10} 中包含了 $PM_{2.5}$, 因而回归系数通常为小于 1 的正数, 当 PM_{10} 结构中 $PM_{2.5}$ 的含量较大时, 此时 PM_{10} 浓度与 $PM_{2.5}$ 浓度的变化相似, 较大的回归系数能够刻画这种关系, 反之, PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的含量较小则对应于较小的回归系数^[16].

以季节为分析尺度, 可以发现回归系数在时空分布上存在一定的差异, 总体上表现两个特征: 第一, 春季和夏季 $PM_{2.5}$ - PM_{10} 相关性低于秋季和冬季 $PM_{2.5}$ - PM_{10} 相关性, 即 PM_{10} 浓度的变化与 $PM_{2.5}$ 浓度的变化在秋冬季具有较高的一致性, 秋冬季节 $PM_{2.5}$ 是 PM_{10} 的主要组成部分; 第二, 北京市西北部 $PM_{2.5}$ - PM_{10} 相关性高于东南部 $PM_{2.5}$ - PM_{10} 相关性, 即通常 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 所占比率在北京市西北部高于东南部. 根据北京区域划分, 北京西北部属于生态涵养区, 该区域内扬尘等大颗粒物会造成 PM_{10} 激升的可能性很小, 同时氧化物的转换在生态涵养区占据一定比例. 相比而言, 在北京南部等区域传输区, 该区域内扬尘、粉尘等大颗粒物会激升 PM_{10} 在该区域内的含量, 同时 $PM_{2.5}$ 并未随之产生较大的浮动, 因此该区域内 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中的占比低于北

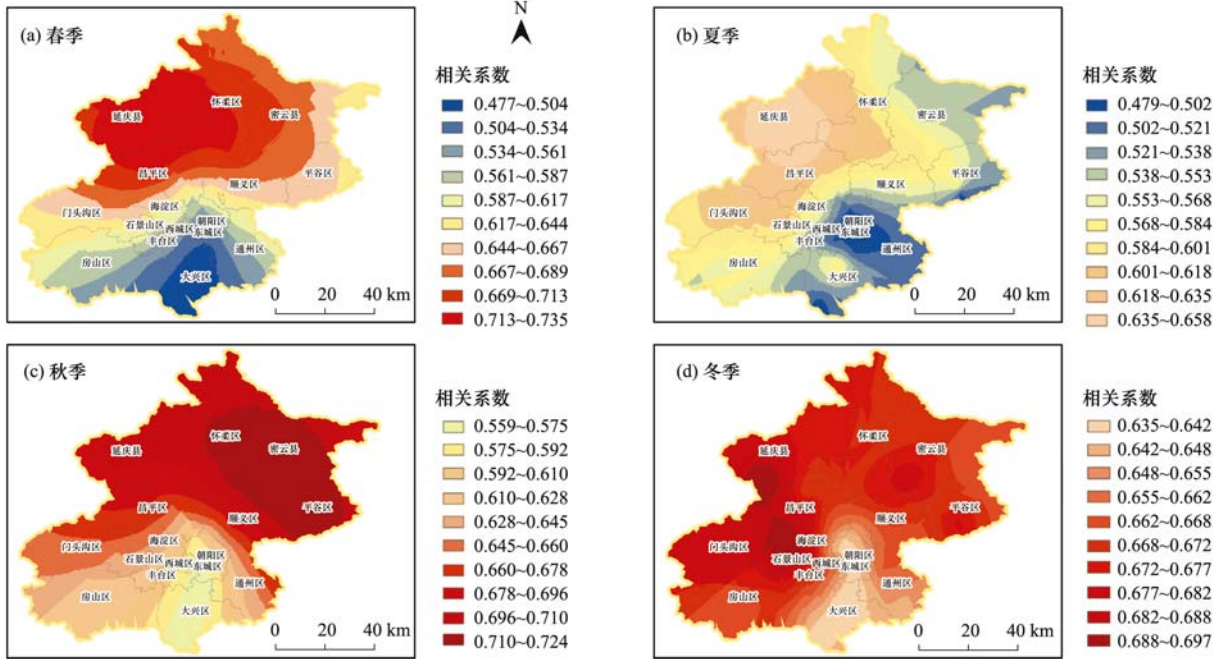


图 4 各季节 $PM_{2.5}$ - PM_{10} 回归系数分布

Fig. 4 Map of $PM_{2.5}$ - PM_{10} regression coefficients in each season

部生态涵养区。

3 结论

(1)模糊 C 均值聚类算法依据“簇内差异性尽可能小,簇间差异性尽可能大”的原则,将 PM_{2.5}浓度数据划分为不同的空间簇,通过对簇内与簇间的统计特征进行分析,能够量化 PM_{2.5}的空间分布特征。

(2)通过模糊 C 均值聚类分析可知,春夏季节 PM_{2.5}污染程度及空间变异程度均低于秋冬季节,各季节 PM_{2.5}浓度均表现为北部浓度低、南部浓度高的空间分布特征。

(3)相比于最小二乘回归与地理加权回归模型,地理时空加权回归模型对 PM_{2.5}-PM₁₀关系的解释能力更强,说明了 PM_{2.5}与 PM₁₀之间不仅仅存在空间异质,同时存在时间异质,即关系随时空位置发生变化。

(4)通过构建地理加权回归模型可以发现,春夏季 PM_{2.5}-PM₁₀相关性低于秋冬季 PM_{2.5}-PM₁₀相关性;各季节均表现为西北部 PM_{2.5}-PM₁₀的相关性高于东南部 PM_{2.5}-PM₁₀的相关性。

参考文献:

- [1] 吴健生,王茜,李嘉诚,等. PM_{2.5}浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang X, Li J C, *et al.* Comparison of models on spatial variation of PM_{2.5} concentration; a case of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [2] 孙艳丽,刘永健,刘承宪. 环境影响评价对环境空气细颗粒物 PM_{2.5}防治作用探析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, **29**(6): 1147-1152.
Sun Y L, Liu Y J, Liu C X. Environmental impact assessment on ambient air fine particulate matter PM_{2.5} role of prevention[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2013, **29**(6): 1147-1152.
- [3] Wu J S, Zhu J, Li W F, *et al.* Estimation of the PM_{2.5} health effects in China during 2000-2011[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(11): 10695-10707.
- [4] 杨复沫,贺克斌,马永亮,等. 北京 PM_{2.5}浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP 的关系[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(6): 506-510.
Yang F M, He K B, Ma Y L, *et al.* Variation characteristics of PM_{2.5} concentration and its relationship with PM₁₀ and TSP in Beijing[J]. China Environmental Science, 2002, **22**(6): 506-510.
- [5] 赵晨曦,王云琦,王玉杰,等. 北京地区冬春 PM_{2.5}和 PM₁₀污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418-427.
Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 418-427.
- [6] 王占山,李云婷,陈添,等. 2013 年北京市 PM_{2.5} 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 110-120.
Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 110-120.
- [7] 刘永林,孙启民,钟明洋,等. 重庆市主城区 PM_{2.5}时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1219-1229.
Liu Y L, Sun Q M, Zhong M Y, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5} in Chongqing urban areas[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1219-1229.
- [8] 焦利民,许刚,赵素丽,等. 武汉 PM_{2.5}时空特征分析[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(9): 70-74.
Jiao L M, Xu G, Zhao S L, *et al.* Analyzing temporal and spatial variability of PM_{2.5} concentration in Wuhan[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38**(9): 70-74.
- [9] Hoek G, Beelen R, de Hoogh K, *et al.* A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(33): 7561-7578.
- [10] Gillespie J, Beverland I J, Hamilton S, *et al.* Development, evaluation, and comparison of land use regression modeling methods to estimate residential exposure to nitrogen dioxide in a cohort study[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(20): 11085-11093.
- [11] Hu X F, Waller L A, Al-Hamdan M Z, *et al.* Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations in the southeastern U. S. using geographically weighted regression[J]. Environmental Research, 2013, **121**: 1-10.
- [12] Song W Z, Jia H F, Huang J F, *et al.* A satellite-based geographically weighted regression model for regional PM_{2.5} estimation over the Pearl River Delta region in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, **154**: 1-7.
- [13] Zhang T H, Liu G, Zhu Z M, *et al.* Real-time estimation of satellite-derived PM_{2.5} based on a semi-physical geographically weighted regression model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, **13**(10): 974.
- [14] Bezdek J C, Ehrlich R, Full W. FCM: the fuzzy c-means clustering algorithm[J]. Computers & Geosciences, 1984, **10**(2-3): 191-203.
- [15] Zhou K L, Yang S L. Exploring the uniform effect of FCM clustering: a data distribution perspective[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, **96**: 76-83.
- [16] Chu H J, Huang B, Lin C Y. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM₁₀-PM_{2.5} relationship[J]. Atmospheric Environment, 2015, **102**: 176-182.
- [17] Fotheringham A S, Brunson C, Charlton M. Geographically weighted regression[M]. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2002.
- [18] Zhang H G, Mei C L. Local least absolute deviation estimation of spatially varying coefficient models: robust geographically weighted regression approaches[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2011, **25**(9): 1467-1489.

- [19] Fotheringham A S, Crespo R, Yao J. Geographical and temporal weighted regression (GTWR) [J]. *Geographical Analysis*, 2015, **47**(4): 431-452.
- [20] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, **24**(3): 383-401.
- [21] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 2013—2014 年北京地区 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究 [J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(1): 103-111.
Wang Y R, Zhang X X, Zhao J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of $PM_{2.5}$ and its relationship with vegetation coverage in Beijing during the period of 2013—2014 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(1): 103-111.
- [22] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
Li X, Nie T, Qi J, *et al.* Regional source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing in January 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [23] 李云婷, 程念亮, 张大伟, 等. 2013 年北京不同方位 $PM_{2.5}$ 背景浓度研究 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4331-4339.
Li Y T, Cheng N L, Zhang D W, *et al.* $PM_{2.5}$ background concentration at different directions in Beijing in 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4331-4339.
- [24] Fouedjio F, Desassis N, Rivoirard J. A generalized convolution model and estimation for non-stationary random functions [J]. *Spatial Statistics*, 2016, **16**: 35-52.



CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/CAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)