

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李磊,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响

贺祥^{1,2,3,4,5}, 林振山^{1,3,4,5*}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 凯里学院旅游学院, 贵州 凯里 556011; 3. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 4. 江苏省地理环境演化国家重点实验室培育建设点, 南京 210023; 5. 虚拟地理环境教育部重点实验室(南京师范大学), 南京 210023)

摘要: 对南京市 2013~2015 年 PM_{2.5} 及影响因素的时间变化序列, 运用广义可加模型(GAM)分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响. 结果表明, PM_{2.5} 及影响因素都基本服从正态分布类型, 影响因素间具较强相关性, 其中气温、气压和水汽压间具有显著相关性. PM_{2.5} 浓度变化的单因素 GAM 模型中, 所有影响因素均通过显著性检验, 其中 SO₂、CO、NO₂ 等影响因素的模型拟合度较优, 方程解释度较高; PM_{2.5} 浓度变化的多因素 GAM 模型中 SO₂、CO、NO₂、O₃、平均降雨量(PRE)、平均风速(WIND)和相对湿度(RHU)等影响因素对 PM_{2.5} 浓度变化解释率为 73.9%, 对其变化具有显著性影响; 通过多因素对 PM_{2.5} 浓度变化影响效应的诊断分析, 得到 SO₂、NO₂ 和 WIND 与 PM_{2.5} 浓度变化呈线性关系, CO、O₃、PRE 和 RHU 与 PM_{2.5} 浓度变化呈非线性关系; 在影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化影响的 GAM 模型中, SO₂ 与 CO、PRE、RHU 间交互作用, CO 与 NO₂、O₃、PRE、WIND、RHU 间交互作用, 以及 NO₂ 与 WIND、PRE、RHU 间交互作用, 都在 $P < 0.01$ (或 $P < 0.05$) 水平下显著影响 PM_{2.5} 浓度变化; 大气污染物 SO₂、CO 及 NO₂ 分别与气象等其它因素的交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化产生最主要影响作用; 通过对影响因素交互作用 GAM 模型可视化三维图分析, 定量研究了影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响特征. 结论表明, 运用 GAM 模型, 能够量化分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响, 研究方法具有一定创新性, 对 PM_{2.5} 浓度污染与控制研究具有重要意义.

关键词: GAM 模型; PM_{2.5} 浓度变化; 影响因素; 交互作用; 南京市

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0022-11 DOI: 10.13227/j.hjx.201606061

Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM_{2.5} Concentration Based on GAM Model

HE Xiang^{1,2,3,4,5}, LIN Zhen-shan^{1,3,4,5*}

(1. College of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Institute of Tourism, Kaili University, Kaili 556011, China; 3. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 4. State Key Laboratory Cultivation Base of Geographical Environment Evolution (Jiangsu Province), Nanjing 210023, China; 5. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment (Nanjing Normal University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, the generalized additive model (GAM) was introduced to analyze the interactive effects of the influencing factors on the change of PM_{2.5} concentration during 2013-2015 in Nanjing city. The results showed as follows: PM_{2.5} and its influencing factors appeared to follow normal distribution. There were strong correlations among the influencing factors, especially among the temperature (TEM), pressure (PRS) and water vapor pressure (VAP). For the single influencing factor GAM models of PM_{2.5} concentration, all influencing factors passed the significance test. Moreover, the equation fitting degrees of SO₂, CO, and NO₂ were much higher. In the multiple influencing factors GAM models of PM_{2.5} concentration, the contribution of the SO₂, CO, NO₂, O₃, precipitation (PRE), wind and relative humidity (RHU) to the change of PM_{2.5} concentration was 73.9% with significant impacts on the change of PM_{2.5} concentration. Based on the diagnostic analysis of the effect of multi factors on the change of PM_{2.5} concentration, there were linear relationship between PM_{2.5} and SO₂, NO₂ and wind, and non-linear relationship between PM_{2.5} and CO, O₃, PRE and RHU. The GAM models, which considered the interaction of SO₂ respectively with CO, PRE and RHU, the interaction of CO respectively with NO₂, O₃, PRE, Wind and RHU, and the interaction of NO₂ respectively with Wind, PRE and RHU, all passed the significance test ($P < 0.01$ or $P < 0.05$). The interaction of SO₂, CO and NO₂ respectively with other factors such as meteorological

收稿日期: 2016-06-12; 修订日期: 2016-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470519); 2015 年江苏省高校自然科学研究重大项目(15KJA17002); 江苏省自然科学基金项目(BK20131399); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目; 贵州省科技厅基金项目(黔科合 LH 字[2014]7237); 贵州省教育厅人文社科项目(13GH004); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_1269)

作者简介: 贺祥(1978~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为生态与环境, E-mail: hexiang1997403@163.com

* 通信作者, E-mail: linzhenshan@njnu.edu.cn

factors had the most important influence on the change of PM_{2.5} concentration. At last, through the visualized three-dimensional map of the GAM models considering the interaction of the influencing factors on the PM_{2.5} concentration, the interactive effects of the influencing factors on PM_{2.5} concentration were quantitatively modeled. Our results demonstrated that GAM could be used to quantitatively analyze the interactive effect of the influencing factors on the change of PM_{2.5} concentration. Therefore, the research method is innovative and important for PM_{2.5} pollution and control.

Key words: GAM model; the change of PM_{2.5} concentration; influencing factors; interaction; Nanjing City

国内外学者对 PM_{2.5} 浓度变化展开了大量研究, 主要包括对 PM_{2.5} 污染来源、扩散与传输^[1-3], 污染特征及灰霾等级评价^[4,5], PM_{2.5} 扩散模型及预测^[6,7], PM_{2.5} 对人体健康与环境的影响^[8-10], PM_{2.5} 与空气污染物、气象要素的相关性^[11-13] 等多方面进行研究. 对 PM_{2.5} 影响因素的研究, Querol 等^[14] 对西班牙 PM_{2.5} 时空变化及影响因素进行了探究, 苗蕾等^[15] 对北京市 PM_{2.5} 浓度变化与气象条件的关系进行研究, 李松等^[16] 综合 GIS 对贵阳冬季 PM_{2.5} 污染时空特征及驱动因素进行了分析, 王占山等^[17] 对北京市 35 个监测站 PM_{2.5} 数据分析其时空分布特征及与前体物和大气氧化性的相关性关系进行研究. 同时, 不少学者还运用数学模型方法研究 PM_{2.5} 浓度变化影响因素, Briggs 等^[18]、林巧莺等^[19]、Gelencsér 等^[20] 和吴健生等^[21] 运用土地利用回归模型研究 PM_{2.5} 影响要素及空间分布特征. Christakos 等^[22] 运用贝叶斯最大熵 (BME) 映射方法研究 PM_{2.5} 浓度的影响因素. Miskell 等^[23] 运用密度测量和土地利用回归模型 (LUR) 识别关键控制环境 PM_{2.5} 浓度的驱动因素. 安芳等^[24] 运用多元线性与多元非线性回归分析 PM_{2.5} 浓度与扬尘地表、地表覆盖等因素的相关性. 刘金培等^[25] 运用广义脉冲响应函数和方差分解方法, 探讨大气污染物和气象因素对 PM_{2.5} 的驱动作用. 顾凯华等^[26] 分析了逆温、相对湿度、风向、风速等气象要素对 PM_{2.5} 浓度的驱动影响. 虽然以上学者从 PM_{2.5} 污染源成分、污染物扩散与稀释、气象环境因素, 应用 GIS 软件、土地利用回归、贝叶斯数学模型等多种方法, 分析了 PM_{2.5} 浓度时空变化的影响因素, 但主要是从 PM_{2.5} 浓度变化与影响因素之间的线性相关性进行研究. 目前, 运用非线性模型、方法探讨影响因素对 PM_{2.5} 浓度变化的影响研究成果还非常少, 从影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化影响的研究成果则更少.

PM_{2.5} 浓度与空气污染物、气象要素等影响因素构成一个复杂的非线性动力系统, 在时间域中存在多层次的尺度结构和局部变化的特征 (Qian)^[27], 其时间序列也反映了 PM_{2.5} 浓度与影响因素间线性

与非线性相互作用与发展变化过程. Hastie 等^[28] 提出的广义可加模型 (GAM), 是广义线性模型和可加模型的结合形式, 是用一个连接函数来建立反应变量的期望与非参数形式的预测变量之间的关系. 它可应用于响应变量与解释变量之间的关系是非线性和非单调的数据分析^[29]. 本研究运用 GAM 模型, 构建 PM_{2.5} 浓度变化与影响因素构成的非线性模型, 从而深入探讨影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响特征.

1 材料与方法

1.1 研究对象与数据来源

以南京市 PM_{2.5} 浓度、大气污染物及气象因子的时间序列为研究对象, 通过对 2013 年 2 月 ~ 2015 年 6 月间的大气污染物、气象要素等指标对 PM_{2.5} 浓度变化影响作用关系进行研究. 气象资料来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.gov.cn/>), 选取南京市各气象台站日平均统计数据, 主要包括气象要素指标平均降水量 (PRE) (mm)、平均气压 (PRS) (hPa)、平均风速 (WIND) (m·s⁻¹)、平均气温 (TEM) (°C)、平均相对湿度 (RHU) (%) 及平均水汽压 (VAP) (hPa)、日照时数 (SSD) (h) 等指标因子. PM_{2.5} 浓度及空气质量监测指标数据来源于中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>), 包括 PM_{2.5} (μg·m⁻³)、CO (mg·m⁻³)、O₃ (μg·m⁻³)、SO₂ (μg·m⁻³)、NO₂ (μg·m⁻³) 等空气质量监测指标因子, 数据由南京市所有空气质量监测站的平均值计算得到.

1.2 研究方法

广义可加模型 (GAM) 是由数据驱动而非统计分布模型驱动的非参数回归模型, 可对部分解释变量进行线性拟合, 对其他因子进行光滑函数拟合. 模型不需要预先设定参数模型, 模型通过解释变量的平滑函数建立, 能够自动选择合适的多项式.

Stone^[30] 第一次提出了传统可加模型, 其形式为:

$$E(Y/X_1, X_2, X_3, \dots, X_p) = a + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p)$$

式中, a 为截距, $f_i(X_i)$ 中 $i = 1, 2, \dots$ 为平滑函数, 是

针对于每个解释变量的任意单变量函数, 满足 $E\epsilon_i(X_i) = 0$. Hastie 等^[31]将可加模型应用到广义线性模型中, 由此提出了广义可加模型:

$$g(\mu) = a + f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_p(X_p)$$

式中, $\mu = E(Y/X_1, X_2, X_3, \dots, X_p)$, $g(\mu)$ 是连接函数; f_1, f_2, \dots, f_p 是连接解释变量的平滑函数; X_p 为解释变量; $f_p(X_p)$ 是关于 X_p 的非指定类别的非参数函数, 其估计方法有平滑样条法、局部加权回归散点平滑法、薄板平滑样条法, 平滑参数的选择有交叉验证法、广义交叉验证法等. 在该模型中, 响应变量的分布不仅可以是正态分布, 也可以是二项分布、卡方分布等. 在 GAM 模型具体分析过程中, 采用 R 软件 3.3.0 版及 mgcv、DAAG 等软件包, 来源于统计计算的 R 软件工程网 (<https://www.r-project.org/>).

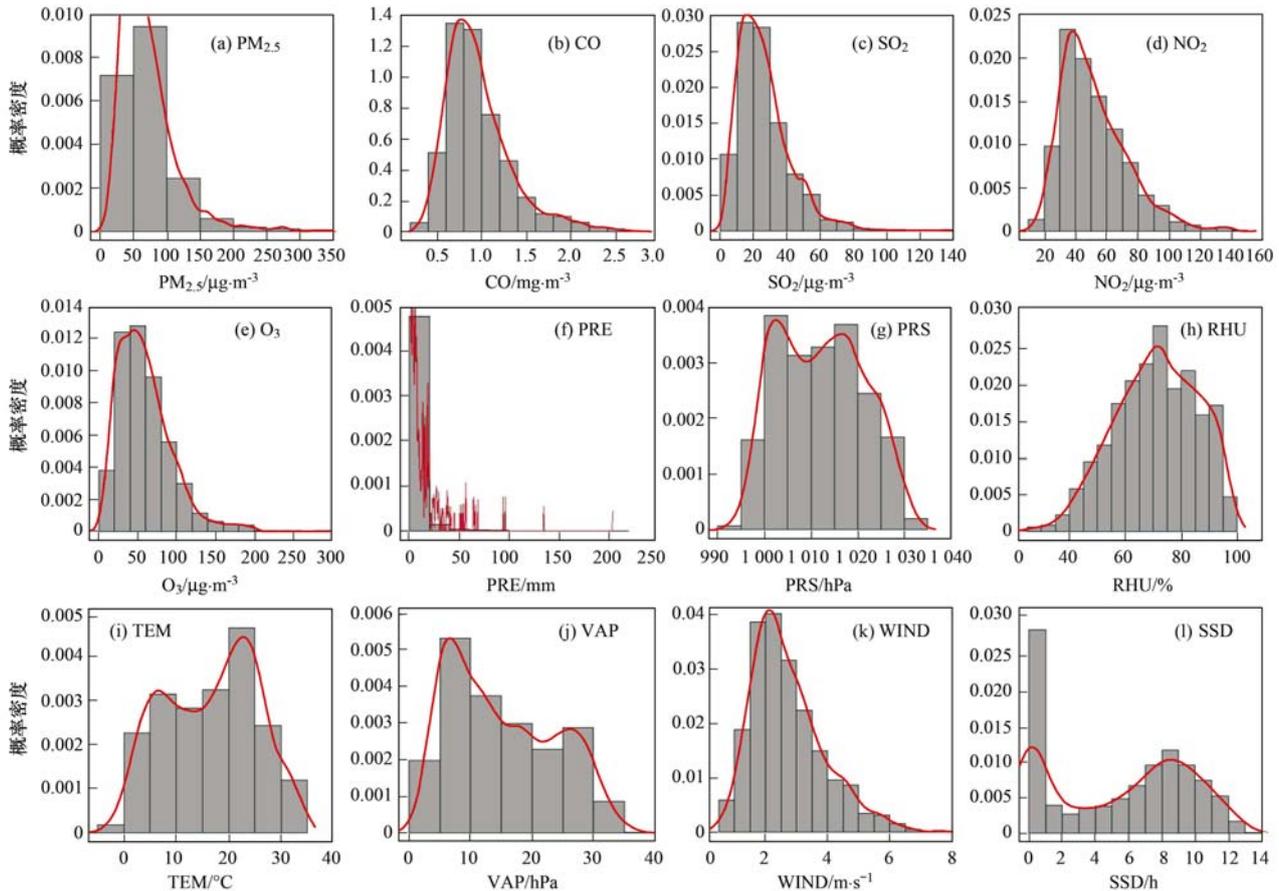
2 结果与分析

2.1 解释变量预分析

以 $PM_{2.5}$ 浓度变化作为响应变量, 首先对 $PM_{2.5}$

浓度变化绘制频率直方图及密度分布曲线 (图 1), 根据其分布形态, 初步设定 $PM_{2.5}$ 浓度变化是正态分布类型, 同时对解释变量 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 PRE 、 PRS 、 O_3 、 $WIND$ 、 TEM 、 VAP 、 RHU 、 SSD 绘制频率直方图及密度分布曲线 (图 1), 从图 1 中可清晰了解到它们也基本符合正态分布类型, 并可分析出每个解释变量的浓度值分布范围及变化趋势特征, 其中 $WIND$ 、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 SO_2 、 PRE 等解释变量的浓度值分布趋势与 $PM_{2.5}$ 的分布基本一致, 其余指标则与 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势的一致性较小. 因此, 采用恒等联系函数作为连接函数, 将解释变量通过线性组合的方式来联接服从正态分布的响应变量. 图 1 中, 横轴表示各解释变量实际监测数值, 纵轴表示各变量的频率除以组距得到的概率密度, 频率分布直方图中所有矩形面积之和为 1, 密度分布曲线与 x 轴之间的面积为 1.

多重共线性是指线性回归模型中的解释变量之间存在高度相关关系而使模型估计失真或难以准确估计. 解释变量之间可能存在的共线性, 可利用两



图中柱状表示影响因素的频率, 曲线为影响因素的密度曲线

图 1 影响因素的频率分布直方图与密度分布曲线

Fig. 1 Frequency histogram and density curve of influencing factors

个解释变量间 Pearson 相关系数来判别两者的相关性程度,如果解释变量间相关系数较大,则两个解释变量之间通常存在严重共线性关系,在模型构建时通常只选取其中一个变量作为解释变量. 由 Pearson 相关系数(表 1)可知,VAP 与 TEM 的相关系数 0.914,VAP 与 PRS 的相关系数 0.855,在 $P <$

0.01 水平下显著相关. 所有驱动因素中,VAP 与 TEM 的相关性最高,这与水汽压大小与蒸发速率有密切关系,而蒸发速率在水分供应一定的条件下,主要受温度控制的实际情况吻合. 因此,可用气温指标代表水汽压指标,从而达到在构建多变量曲线模型时减小解释变量的共线性问题.

表 1 影响因素间 Pearson 相关系数¹⁾

Table 1 Pearson correlation coefficient among influencing factors

	SO ₂	CO	NO ₂	O ₃	PRE	PRS	WIND	TEM	VAP	RHU	SSD
SO ₂	1	0.589**	0.709**	-0.053	-0.249**	0.330**	-0.131**	-0.309**	-0.450**	-0.550**	0.297**
CO	0.589**	1	0.625**	-0.176**	-0.093**	0.210**	-0.303**	-0.296**	-0.290**	-0.053	-0.046
NO ₂	0.709**	0.625**	1	-0.222**	-0.164**	0.349**	-0.389**	-0.304**	-0.442**	-0.367**	0.152**
O ₃	-0.053	-0.176**	-0.222**	1	-0.048	-0.327**	0.185**	0.341**	0.170**	-0.215**	0.314**
PRE	-0.249**	-0.093**	-0.164**	-0.048	1	-0.218**	0.082*	0.077*	0.197**	0.365**	-0.325**
PRS	0.330**	0.210**	0.349**	-0.327**	-0.218**	1	-0.074*	-0.882**	-0.855**	-0.255**	-0.009
WIND	-0.131**	-0.303**	-0.389**	0.185**	0.082*	-0.074*	1	0.029	0.014	0.030	-0.094**
TEM	-0.309**	-0.296**	-0.304**	0.341**	0.077*	-0.882**	0.029	1	0.914**	0.122**	0.188**
VAP	-0.450**	-0.290**	-0.442**	0.170**	0.197**	-0.855**	0.014	0.914**	1	0.428**	-0.058
RHU	-0.550**	-0.053	-0.367**	-0.215**	0.365**	-0.255**	0.030	0.122**	0.428**	1	-0.690**
SSD	0.297**	-0.046	0.152**	0.314**	-0.325**	-0.009	-0.094**	0.188**	-0.058	-0.690**	1

1) ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

2.2 PM_{2.5}与单影响因素的 GAM 模型分析

根据变量预分析的结果,将 SO₂、CO、NO₂、O₃、PRE、PRS、WIND、TEM、RHU、SSD 共 10 个影响因素作为解释变量,每次选择 1 个影响因素作为解释变量,PM_{2.5}作为响应变量,采用样条平滑函数分别构建模型,并分析每个解释变量对响应变量的影响显著性及模型的拟合优度(表 2). 结果表明:所有影响因素均在 $P < 0.01$ 水平下对 PM_{2.5} 浓度变化影响显著,表明各影响因素单独作为 PM_{2.5} 浓度变化解释变量具有统计学意义;SO₂、CO、NO₂ 对

PM_{2.5} 浓度变化影响的模型解释率较高(34.9% ~ 64.3%),调整判定系数较大(0.346 ~ 0.639),表明这 3 个影响因素与 PM_{2.5} 浓度变化构建模型方程的拟合度较优;其它影响因素对 PM_{2.5} 浓度变化的解释率较低(4.36% ~ 11.8%),调整判定系数值也较低(0.042 ~ 0.11),表明它们单独对 PM_{2.5} 浓度变化影响的模型拟合优度较差,模型对 PM_{2.5} 浓度变化的解释能力也较差. 虽然有部分影响因素独立构建对 PM_{2.5} 影响的模型方程拟合度较差,解释率较低,但它们均通过显著性检验,均具有统计学意义.

表 2 PM_{2.5} 浓度与单影响因素的 GAM 模型假设检验结果¹⁾Table 2 GAM model hypothesis test results between PM_{2.5} concentration and single influencing factors

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	F	P	方差解释率 /%	调整判定系数 (R ²)
SO ₂	4.583	5.657	82.47	<2E-16**	34.9	0.346
CO	8.581	8.951	174.8	<2E-16**	64.3	0.639
NO ₂	2.726	3.453	169.9	<2E-16**	40.2	0.400
O ₃	4.522	5.59	9.054	5.69E-09**	5.99	0.055
PRE	4.176	5.067	12.08	2E-11**	6.85	0.064
PRS	7.768	8.614	10.9	3.34E-15**	10	0.092
WIND	1	1	39.98	4E-10**	4.36	0.043
TEM	7.876	8.677	13.15	<2E-16**	11.8	0.110
RHU	5.268	6.385	6.437	8.79E-07**	4.8	0.042
SSD	2.793	3.45	15.93	6.96E-11**	6.46	0.062

1) ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的

当自由度值为 1 时,函数为线性方程,表明影响因素与响应变量 $PM_{2.5}$ 间具有某种线性关系;当自由度大于 1,表示函数是非线性曲线方程,影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度变化间具有某种非线性关系,且值越大,非线性关系越显著. 结果表明,WIND(自由度值为 1)与 $PM_{2.5}$ 浓度变化具有显著的线性关系; NO_2 、SSD 与 $PM_{2.5}$ 间也具有一定的非线性关系(自由度值在 2 左右),其它解释变量则与 $PM_{2.5}$ 间具有非常显著的非线性关系. 本研究结果表明, $PM_{2.5}$ 浓度变化影响因素中,除了平均风速,其它指标均与 $PM_{2.5}$ 浓度变化表现出一定的非线性关系,所以 $PM_{2.5}$ 浓度变化是受

多因素驱动影响的复杂非线性时间变化序列. 因此,采用 GAM 模型可以较好分析影响因素(解释变量)与 $PM_{2.5}$ 浓度(响应变量)间的非线性关系.

2.3 多影响因素 GAM 模型分析与多重共线性诊断

将单因素分析中有统计意义和经过显著性检验的 SO_2 、CO、 NO_2 、PRE、PRS、 O_3 、WIND、TEM、RHU、SSD 等影响因素作为解释变量,将 $PM_{2.5}$ 作为响应变量,进行多影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度间的 GAM 模型构建拟合,模型同样采用恒等联系函数作为连接函数,平滑回归项采用样条平滑函数估计,模型拟合结果如表 3.

表 3 $PM_{2.5}$ 浓度与多影响因素的 GAM 模型假设检验结果¹⁾

Table 3 GAM model hypothesis test results between $PM_{2.5}$ concentration and multi influencing factors

指标	SO_2	CO	NO_2	O_3	PRE	PRS	TEM	RHU	WIND	SSD
估计自由度	1.526	8.702	2.675	5.521	5.863	6.236	6.669	1.975	1.408	1.685
参考自由度	1.909	8.972	3.419	6.688	6.916	7.416	7.813	2.533	1.718	2.084
F	10.248	50.021	23.195	11.235	7.251	2.111	2.069	26.855	3.638	3.48
P	0.0003**	<2E-16**	1.68E-15**	4.93E-13**	2.26E-08**	0.0619	0.0589	3.00E-13**	0.0247*	0.0527

1) ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的; * 表示在 0.05 水平下变量是显著的

多因素分析表明,PRS、TEM 和 SSD 的 P 值均大于 0.05,未通过在 0.05 水平下显著性检验,WIND 在 $P < 0.05$ 水平下显著影响 $PM_{2.5}$ 浓度变化,其余驱动因素在 $P < 0.01$ 水平下显著影响 $PM_{2.5}$ 浓度变化. 模型调整判定系数 0.743,方差解释率 75.5%,表明模型拟合程度较高,通过显著性检验的 7 个影响因素对 $PM_{2.5}$ 浓度变化解释率较高. 因此,可以确定 SO_2 、CO、 NO_2 、 O_3 、PRE、RHU 和 WIND 对 $PM_{2.5}$ 变化有显著影响关系.

单独因素分析有统计学意义的变量,如 PRS、TEM、SSD 等在进行多因素分析时,没有通过显著性检验,没有统计学意义,很可能是因为各因素间还

存在共曲线问题(上述相关性分析可知气压、气温和日照时长的相关性较为显著). 多重共线性使参数估计值的方差增大,如果方差膨胀因子(VIF)值越大,说明共线性越强. 通过多重共线性诊断,可以区分造成多重共线性的主要解释变量(表 4). 结果表明,平均气压与气温两个因素的共线性较为显著. 因此,PRS 与 TEM 的多重共线性可能是造成它们与 $PM_{2.5}$ 浓度构建模型时无法通过统计学意义检验的原因之一. 在综合考虑统计学意义与多重共线性后,删除 PRS、TEM、SSD 这 3 个因素后,重新拟合模型(表 5). 模型调整判定系数 0.73,解释率 73.9%,表明模型拟合程度较高,解释变量对 $PM_{2.5}$

表 4 影响因素多重共线性检验结果

Table 4 Results of multiple co-curve test of influencing factors

指标	SO_2	CO	NO_2	O_3	PRE	PRS	WIND	TEM	RHU	SSD
容差	0.31	0.43	0.34	0.72	0.80	0.17	0.75	0.17	0.32	0.41
VIF	3.26	2.33	2.94	1.38	1.26	5.94	1.34	5.99	3.15	2.42

表 5 $PM_{2.5}$ 浓度与多影响因素的 GAM 模型假设检验结果¹⁾

Table 5 GAM model hypothesis test results of $PM_{2.5}$ concentration and multi influencing factors

指标	SO_2	CO	NO_2	O_3	PRE	RHU	WIND	截距项	值
估计自由度	1.696	8.679	2.812	6.413	5.775	3.214	1	估计值	70.7864
参考自由度	2.169	8.969	3.579	7.575	6.832	4.071	1	标准误差	0.7475
F	11.469	54.727	24.398	7.121	5.947	27.851	6.898	t	94.7
P	6.71E-06**	<2E-16**	<2E-16**	8.59E-09**	1.20E-06**	<2E-16**	0.0088**	P	<2E-16**

1) ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的

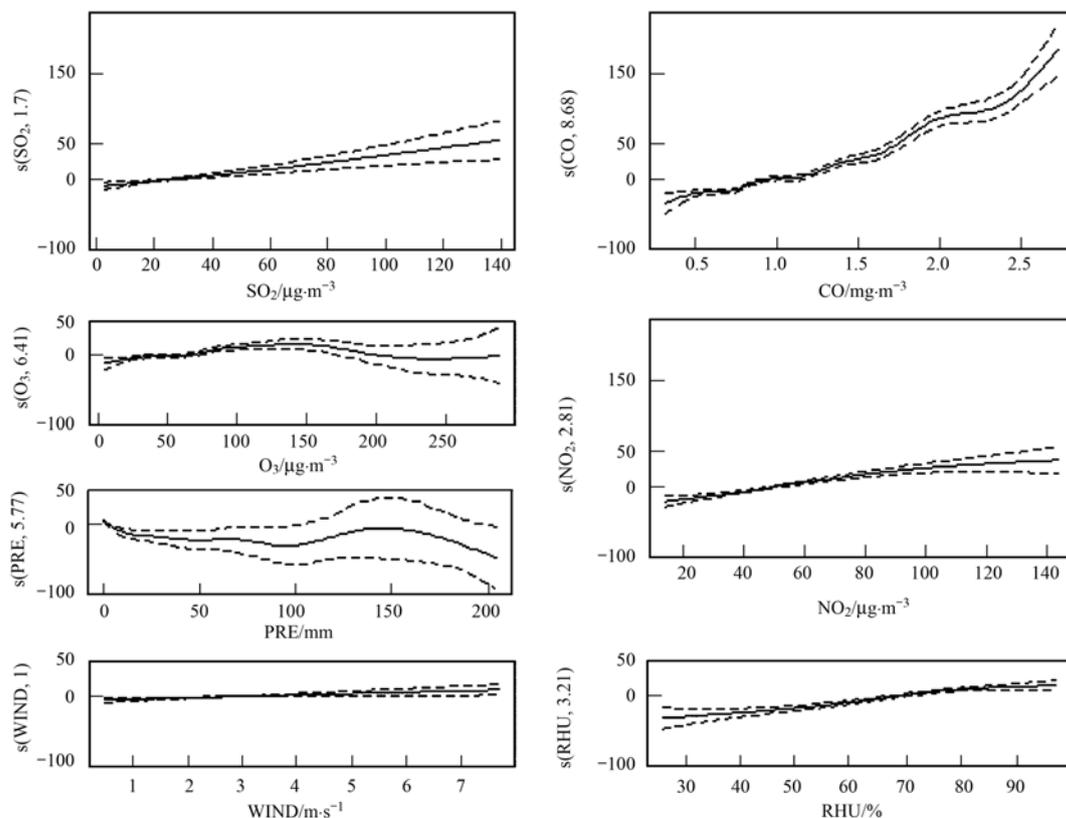
浓度变化解释率也较高;模型方程中截距项与所有解释变量均通显著性检验,7个影响因素均在 $P < 0.01$ 水平下显著影响 PM_{2.5} 浓度变化. 研究结果表明,SO₂、CO、NO₂、PRE、O₃、WIND、RHU 对 PM_{2.5} 浓度变化影响具有统计学意义,与 PM_{2.5} 浓度变化间具有显著线性或非线性关系.

2.4 PM_{2.5} 浓度变化受多因素影响效应诊断与模型检验

2.4.1 影响因素对 PM_{2.5} 浓度变化作用效应诊断

通过对多影响因素(解释变量)与 PM_{2.5} 响应变量间建立 GAM 模型,获得解释变量的平滑回归函数,并得到影响因素对 PM_{2.5} 浓度影响效应图(如图 2),图 2 中虚线表示拟合可加函数的逐点标准差,即可信区间的上、下限;实线代表 PM_{2.5} 浓度的平滑拟合曲线. 横坐标表示各解释变量的实测值,纵坐标表示解释变量对 PM_{2.5} 浓度的平滑拟合值. 纵坐标括号数值代表估计自由度值. 结果表明,SO₂ 与 PM_{2.5} 间的相关性表现为线性关系,随着 SO₂ 浓度递增时,PM_{2.5} 浓度也单调递增. CO 与 PM_{2.5} 浓度变

化表现为非线性关系,在小于约 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 区内,随着 CO 浓度增加,PM_{2.5} 浓度呈递增趋势;当 CO 浓度大于 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,PM_{2.5} 浓度呈快速波动增加特征. NO₂ 浓度与 PM_{2.5} 浓度间的相关性也呈现一定线性关系,NO₂ 浓度递增时,PM_{2.5} 浓度也单调递增. O₃ 与 PM_{2.5} 浓度变化表现为非线性关系,当 O₃ 浓度小于约 $150 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,PM_{2.5} 浓度表现为单调递增;当 O₃ 浓度大于 $150 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,呈缓慢降低趋势,并在 $200 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右保持平稳. 降雨与 PM_{2.5} 浓度变化表现为复杂非线性关系,但整体表现是随着降雨量增加,PM_{2.5} 浓度呈降低趋势. 相对湿度也与 PM_{2.5} 浓度变化表现为非线性关系,在相对湿度小于 50% 时,PM_{2.5} 浓度变化很缓慢增加,当相对湿度在 50% ~ 80% 之间,PM_{2.5} 浓度呈增加趋势,随相对湿度继续增加,PM_{2.5} 浓度表现为降低趋势. 平均风速与 PM_{2.5} 浓度表现出线性关系,表现出随风速增加,PM_{2.5} 浓度没有明显降低变化的特征. 这是由于南京市全年平均风速在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,该风速对地表 PM_{2.5} 及其污染源的



纵轴表示平滑函数值,括号中数字表示估计自由度,虚线表示可信区间上下限,实线表示 PM_{2.5} 浓度的平滑拟合曲线,横坐标表示解释变量的实测值

图 2 影响因素对 PM_{2.5} 浓度变化的影响效应

Fig. 2 Effect of influencing factors on the variation of PM_{2.5} concentration

稀释与扩散能力非常弱,但却有利于大气污染物之间的混合.

2.4.2 模型交叉检验

在通过模型假设检验及多曲线共线性分析后得到的解释变量 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 O_3 、PRE、RHU、WIN 等 7 个因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 构建得到 GAM 模型的拟合优度较好,影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的解释率较高. 同时,为了避免过拟合现象,采用 10 折交叉验证法对其建立的 GAM 模型的进行验证. 在给定

GAM 建模数据中,拿出 9 份数据进行建模型,留 1 份数据用刚建立的模型进行预报,并求部分样本的预报误差,记录它们的平方加和. 过程一直进行,直到所有的样本都被预报了一次而且仅被预报一次. 交叉验证方法可有效判别、克服构建的 GAM 过拟合问题,验证结果如表 6 与图 3. 对其分析可知,7 个解释变量均通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验,10 折平均的均方值为 569,预测值与实测值的差值较小. 结果说明,GAM 模型的拟合效果较好,准确度较高.

表 6 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化 GAM 模型的 10 折交叉验证

Table 6 The 10-fold cross-validation of GAM for $\text{PM}_{2.5}$ concentration variation

指标	SO_2	CO	NO_2	O_3	PRE	RHU	WIN
数据集	1	1	1	1	1	1	1
平方和	548 156	482 848	17 659	11 765	8 017	40 112	5 903
F	982.4	865.4	31.6	21.1	14.4	71.9	10.6
$P(>F)$	$<2\text{E}-16^{**}$	$<2\text{E}-16^{**}$	$2.50\text{E}-08^{**}$	$5.00\text{E}-06^{**}$	0.0002^{**}	$<2\text{e}-16^{**}$	0.0012^{**}

1) ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的

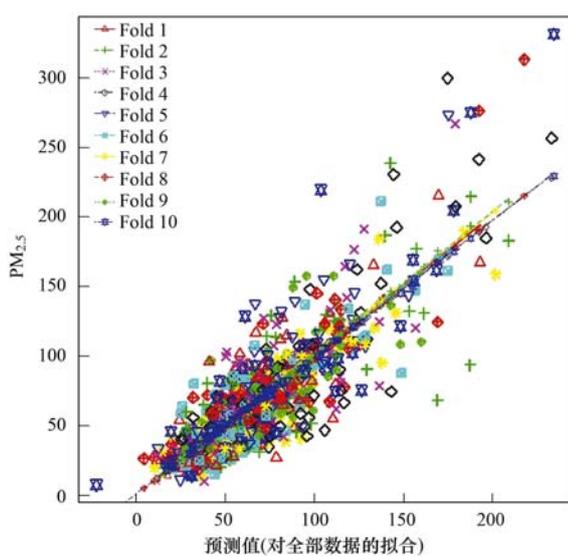


图 3 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 10 折交叉验证的预测值

Fig. 3 Predictive values of 10-fold cross-validation of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

2.5 影响因素交互作用对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化受多种影响因素的共同影响,各解释变量之间交互作用对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化会产生强烈影响效应. 通过将解释变量进行交互构建 GAM 模型,然后分析它们对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响,有利于全面、深入地认识影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响作用. 通过对影响因素两两之间交互构建 GAM 建模,分析可知(表 7),仅 SO_2 -WIN 与 O_3 -PRE 交叉项的估计自由度接近于 1,说明多数交叉项与

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化有显著的非线性关系;模型调整判定系数 0.785,解释率 82.1%,表明模型拟合程度较高,交互作用影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化解释率较高;模型方程中 SO_2 - CO 、 SO_2 -PRE、 SO_2 -RHU、 CO - NO_2 、 CO - O_3 、 CO -PRE、 CO -RHU、 CO -WIND、 NO_2 -WIND、 NO_2 -PRE、PRE-RHU 等 11 交互解释变量项均通过显著性检验,表明它们对在 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$ 水平显著影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化. 结果表明,多数交叉项是以空气污染物 CO 、 SO_2 、 NO_2 与气象要素间的交互作用,这也与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化主要受到空气污染物与气象要素的交互作用过程影响的特征吻合.

对通过显著性检验、具有统计学意义的驱动因素交互模型进行可视化绘图(图 4),可分析响应变量 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在不同自变量维度的同时变化特征. 由图 4(a)可知,当 SO_2 浓度较低时,随着 CO 浓度增加, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度快速增加;当 SO_2 浓度较高, CO 浓度较低时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值较高;随着 SO_2 与 CO 浓度值均增加时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值也呈增加趋势特征. 由图 4(b)可知,在降雨量较小时,随着 SO_2 浓度增加, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈增加趋势,但随着降雨量增加, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈波动降低特征;当降雨量达约 120 mm 后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈快速降低特征,这与 SO_2 具有较强溶解于水汽能力的特征一致^[32]. 由图 4(c)可知,当 SO_2 浓度较低时,随着相对湿度的增加, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度基本没有变化,当相对湿度较小时,随着 SO_2 浓度增加,

表 7 影响因素交互作用与 PM_{2.5} 浓度的 GAM 模型假设检验结果¹⁾Table 7 GAM hypothesis test results between PM_{2.5} concentration and interaction of influencing factors

交叉项	SO ₂ -CO	SO ₂ -NO ₂	SO ₂ -O ₃	SO ₂ -PRE	SO ₂ -RHU	SO ₂ -WIND	CO-NO ₂
估计自由度	14.148	5.97	5.352	14.06	8.241	2.013	7.227
参考自由度	14.785	7.338	6.821	14.582	9.558	2.439	8.785
<i>F</i>	8.188	1.622	2.01	11.419	4.972	0.919	2.272
<i>P</i>	<2E-16 **	0.0949	0.0788	<2E-16 **	7.80E-07 **	0.3496	0.0178 *
交叉项	CO-O ₃	CO-PRE	CO-RHU	CO-WIND	NO ₂ -O ₃	NO ₂ -PRE	NO ₂ -RHU
估计自由度	7.865	6.083	9.156	10.712	3.424	4.968	5.851
参考自由度	9.359	7.213	10.773	12.225	3.781	6.114	7.548
<i>F</i>	4.392	9.923	2.131	6.421	2.859	2.666	0.86
<i>P</i>	8.34E-06 **	5.09E-12 **	0.0181 *	5.91E-11 **	0.0706	0.0306 *	0.573
交叉项	NO ₂ -WIND	O ₃ -PRE	O ₃ -RHU	O ₃ -WIND	PRE-RHU	PRE-WIND	RHU-WIND
估计自由度	6.998	1.605	4.62	3.98	3.915	11.046	10.746
参考自由度	8.21	1.986	5.783	3.998	3.981	12.121	12.409
<i>F</i>	2.576	0.303	1.729	1.929	38.771	2.20	2.082
<i>P</i>	0.0079 **	0.7174	0.1051	0.0964	<2E-16 **	0.0508	0.0693

1) ** 表示在 0.01 水平下变量是显著的; * 表示在 0.05 水平下变量是显著的

PM_{2.5} 浓度快速增加; 当 SO₂ 浓度值一定时, 相对湿度增加, PM_{2.5} 浓度仅有略微增加, 并没有造成显著变化影响, 结果表明, 相对湿度与 SO₂ 的交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化影响较弱. 由图 4(d) 可知, 当 NO₂ 浓度较低时, 随着 CO 浓度增加, PM_{2.5} 浓度快速增加, 当 CO 浓度较低时, 随着 NO₂ 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈缓慢增加; 随着 CO 与 NO₂ 浓度的增加、交互作用, PM_{2.5} 浓度呈增加趋势. 由图 4(e) 可知, 当 CO 浓度较低时, 随着 O₃ 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈波动小幅度增加; 当 O₃ 浓度较低时, 随着 CO 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈快速增加特征; 随着 CO 与 O₃ 浓度增大、交互作用, PM_{2.5} 浓度呈快速波动增大. 由图 4(f) 可知, 当 CO 浓度较低时, 随着降雨量增加, PM_{2.5} 浓度呈波动降低趋势; 当降雨量较小时, 随着 CO 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈波动快速增加; 当降雨量与 CO 浓度增加时, PM_{2.5} 浓度呈波动降低变化, 当降雨量达 150 mm 后, PM_{2.5} 浓度呈明显降低趋势. 由图 4(g) 可知, 当 CO 浓度值较低时, 随着相对湿度增加, PM_{2.5} 浓度变化较小; 当相对湿度值较低时, 随着 CO 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈快速增加趋势; 随着 CO 浓度与相对湿度值增加、交互作用, PM_{2.5} 浓度呈增加趋势, 特别是 CO 浓度大于约 2 mg·m⁻³, RHU 大于 50% 后, PM_{2.5} 浓度增加幅度更大. 由图 4(h) 可知, 当 CO 浓度较低时, 随着平均风速的增加, PM_{2.5} 呈降低特征; 当平均风速较低时, 随 CO 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈快速增加; 当风速与 CO 浓度增加、交

互作用, PM_{2.5} 浓度呈波动增加特征, 结果说明风速不仅能使大气污染物稀释的扩散, 从而使大气污染物浓度降低, 在较低风速时也对污染物间的混合作用有显著影响, 并造成 PM_{2.5} 浓度增加, 这也与刘大锰等^[33] 研究结论一致. 由图 4(i) 可知, 当 NO₂ 浓度较低时, 随着降雨量增加, PM_{2.5} 浓度呈波动降低特征, 且降雨量值越大, PM_{2.5} 浓度降低幅度越大; 当降雨量很小时, 随着 NO₂ 浓度增加, PM_{2.5} 浓度呈波动增加趋势; 当 NO₂ 浓度与降雨量增加、交互作用, PM_{2.5} 浓度则呈波动降低趋势特征, 特别是降雨量达约 150mm 后, PM_{2.5} 浓度呈快速降低趋势. 由图 4(j) 可知, 随着 NO₂ 浓度与平均风速的增加, PM_{2.5} 浓度呈快速增加趋势, 这表明当风速较低时, 风速对 NO₂ 污染物的扩散与混合作用更加显著, 更加有利于 NO₂ 通过二次化学反应形成 PM_{2.5} 污染物质. 由图 4(k) 可知, 由于相对湿度与降雨具有显著正相关性, 当降雨量与相对湿度值均增加时, 表明此时降雨量远大于蒸发, 空气湿度较大, PM_{2.5} 浓度呈波动降低趋势, 且在降雨量达约 120 mm 后, PM_{2.5} 浓度呈快速降低趋势.

本研究结果表明, 通过两两影响因素交互作用的 GAM 模型能够有效定量分析响应变量 PM_{2.5} 浓度变化特征. PM_{2.5} 浓度变化是受多因素同时综合影响作用, 因此在以后工作为还可进一步研究、构建 3 个及以上影响因素间的交互模型, 分析解释变量对响应变量 PM_{2.5} 浓度变化的影响过程与特征.

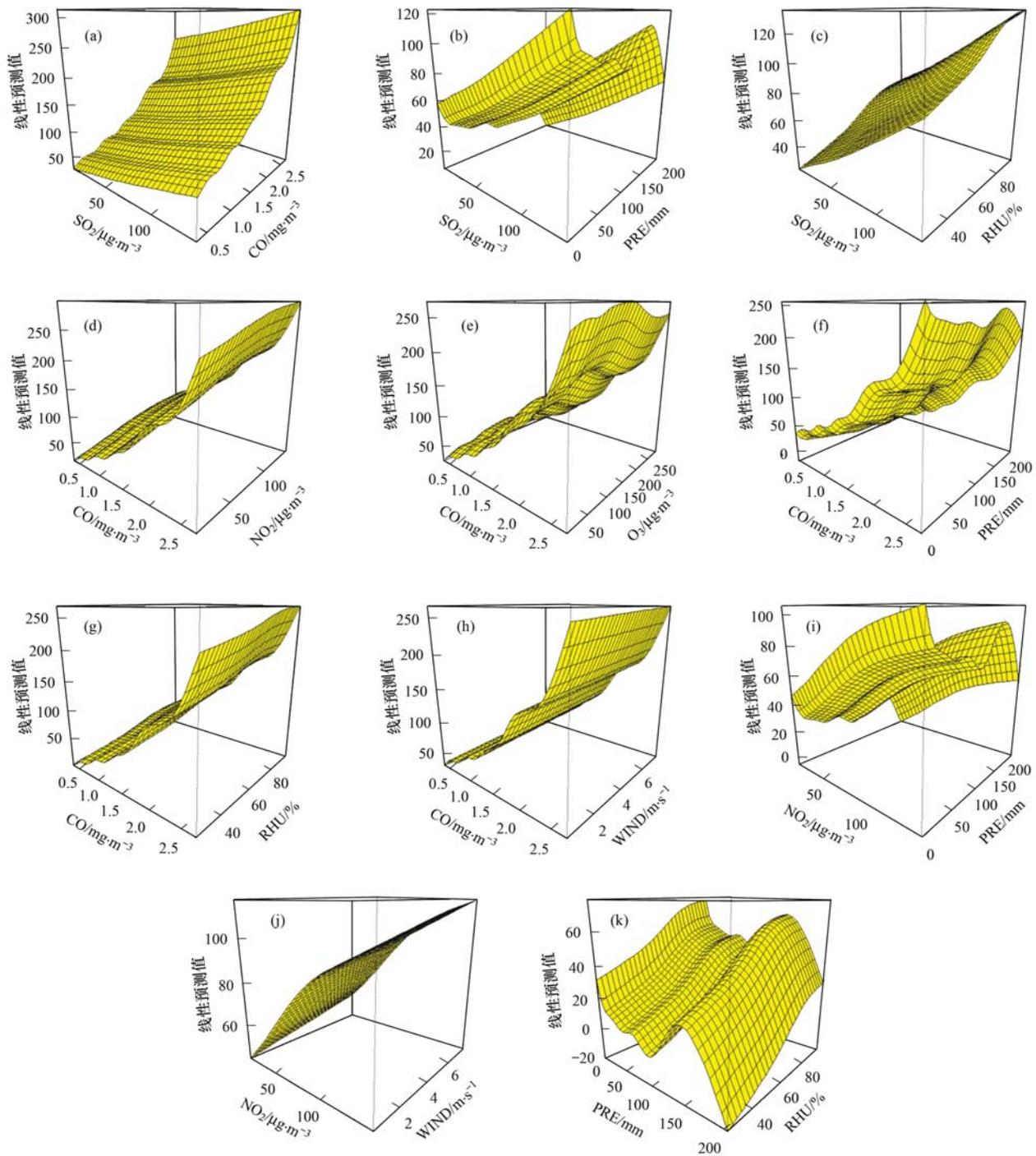


图4 驱动因素对 $PM_{2.5}$ 浓度变化影响的三维效应图

Fig. 4 Three-dimensional effect graph of driving factors on the variation of $PM_{2.5}$ concentration

3 结论

(1) 对 $PM_{2.5}$ 浓度及影响因素时间序列数据分析, 它们都基本服从正态分布类型; 各影响因素间均具较强相关性, 其中气温、气压和水汽压间具有显著相关性, 为降低多重共线性影响, 删除 VAP 指标。

(2) 运用 GAM 模型, 对每个影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度间进行拟合, 均通过显著性检验, 其中 SO_2 、CO、 NO_2 等影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度变化构建模型方程的拟合度最优, 模型解释率较高。将所有影响因素作为解释变量, $PM_{2.5}$ 为响应变量构建综合模型, 气压、气温及日照时数未通过 $P < 0.05$ 水平下显著性检验; WIND 在 $P < 0.05$ 水平下显著影响 $PM_{2.5}$

浓度变化,其余影响因素在 $P < 0.01$ 水平下显著影响 PM_{2.5} 浓度变化. 删除 VAP、PRS、TEM 和 SSD 因素后的 GAM 模型调整判定系数 0.73, 方差解释率 73.9%, 表明模型拟合程度较高, SO₂、CO、NO₂、PRE、O₃、WIND、RHU 等影响因素构成的模型对 PM_{2.5} 浓度变化解释率较高, 对 PM_{2.5} 变化有显著影响关系.

(3) 对 GAM 综合模型中各因素对 PM_{2.5} 浓度变化影响效应的诊断分析得到, SO₂、NO₂ 及 WIND 等影响因素均与 PM_{2.5} 浓度变化基本呈线性关系, 其中 SO₂ 与 NO₂ 表现为单调递增关系; 虽然 WIND 与 PM_{2.5} 浓度也表现出线性关系, 但随着风速增加 PM_{2.5} 浓度变化不明显, 这与南京市全年平均风速属于轻微风级密切相关. CO、O₃、PRE 和 RHU 对 PM_{2.5} 浓度变化影响均是呈显著非线性. 通过 10 折交叉验证, 7 个解释变量也均通过了 $P < 0.01$ 的显著性检验, 预测值与实测值的差值较小, 结果说明 GAM 模型的拟合效果较好, 准确度较高.

(4) 通过 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度影响, 得到模型方程的调整判定系数 0.785, 解释率 82.1%, 模型拟合程度较优, 影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化解释率较高. 其中 SO₂ 与 CO、PRE、RHU 的交互作用, CO 与 NO₂、O₃、PRE、RHU、WIND 的交互作用, 以及 NO₂ 与 WIND、PRE、RHU 交互作用, 都在 $P < 0.01$ (或 $P < 0.05$) 水平下显著影响 PM_{2.5} 浓度变化. 结果表明, PM_{2.5} 浓度变化的主要污染物来源 SO₂、CO 及 NO₂, 它们分别与气象要素等其它因素交互作用, 对 PM_{2.5} 浓度变化产生最主要、复杂的非线性影响. 因此, 通过影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化构建 GAM 模型, 可定量预测、分析影响因素间的交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响特征.

参考文献:

- [1] 李莉, 安静宇, 严茹莎. 基于细颗粒物来源追踪技术的 2013 年 12 月上海市严重污染过程中 PM_{2.5} 的源贡献分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(10): 3543-3553.
- Li L, An J Y, Yan R S. Source contribution analysis of the fine particles in Shanghai during a heavy haze episode in December, 2013 based on the particulate matter source apportionment technology[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3543-3553.
- [2] Gehrig R, Buchmann B. Characterising seasonal variations and spatial distribution of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations based on long-term Swiss monitoring data [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(19): 2571-2580.
- [3] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国 PM_{2.5} 跨区域传输特征数值模拟研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in China[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1361-1368.
- [4] Sawant A A, Na K, Zhu X N, *et al.* Chemical characterization of outdoor PM_{2.5} and gas-phase compounds in Mira Loma, California [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(33): 5517-5528.
- [5] 古金霞. 天津市 PM_{2.5} 污染特征及灰霾等级评价方法研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.
- Gu J X. The contaminative characters of PM_{2.5} and method of haze grade estimation in Tianjin [D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [6] 陈军, 高岩, 张焯培, 等. PM_{2.5} 扩散模型及预测研究 [J]. 数学的实践与认识, 2014, **44**(15): 16-27.
- Chen J, Gao Y, Zhang Y P, *et al.* Study on the diffusion model and forecast of PM_{2.5} pollution [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2014, **44**(15): 16-27.
- [7] 刘杰, 杨鹏, 吕文生, 等. 基于气象因素的 PM_{2.5} 质量浓度预测模型 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2015, **45**(6): 76-83.
- Liu J, Yang P, Lv W S, *et al.* Prediction models of PM_{2.5} mass concentration based on meteorological factors [J]. Journal of Shandong university (Engineering Science), 2015, **45**(6): 76-83.
- [8] Dockery D W, Pope C A, Xu X P, *et al.* An association between air pollution and mortality in six U. S. cities [J]. New England Journal of Medicine, 1993, **329**(24): 1753-1759.
- [9] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 PM_{2.5}、PM₁₀ 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析 [J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1894-1898.
- Yin Y W, Cheng J P, Duan Y S, *et al.* Correlation analysis between the PM_{2.5}, PM₁₀ which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai [J]. Environmental Sciences, 2011, **32**(7): 1894-1898.
- [10] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 PM_{2.5} 持续暴露的健康风险及其损害价值评估 [J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 1-8.
- Xie Y B, Chen J, Li W. An Assessment of PM_{2.5} related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 1-8.
- [11] 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.
- [12] Xie Y Y, Zhao B, Zhang L, *et al.* Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃ [J]. Particulate, 2015, **20**: 141-149.
- [13] Tsai Y I, Kuo S C, Lee W J, *et al.* Long-term visibility trends in one highly urbanized, one highly industrialized, and two rural areas of Taiwan [J]. Science of the Total Environment, 2007, **382**(2-3): 324-341.

- [14] Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, *et al.* Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} around primary particulate anthropogenic emission sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(5): 845-858.
- [15] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春. 基于长时间序列的北京 PM_{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2836-2846.
Miao L, Liao X N, Wang Y C. Diurnal variation of PM_{2.5} mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term date[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2836-2846.
- [16] 李松, 罗绪强. 综合 GIS 的贵阳冬季 PM_{2.5} 污染时空特征及驱动因素分析[J]. *灾害学*, 2014, **29**(4): 63-68.
Li S, Luo X Q. Study on spatiotemporal characteristics of PM_{2.5} pollutant and its driving factors using GIS technology in winter[J]. *Journal of Catastrophology*, 2014, **29**(4): 63-68.
- [17] 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.
- [18] Briggs D J, Collins S, Elliott P, *et al.* A mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, **11**(7): 699-718.
- [19] 林巧莺, 陈永山. 我国城市冬季 PM_{2.5} 空间特征及其人为影响因子[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(4): 460-465.
Lin Q Y, Chen Y S. Spatial variation of PM_{2.5} in cities in winter and anthropogenic influencing factors in China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(4): 460-465.
- [20] Gelencsér A, May B, Simpson D, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} organic aerosol over Europe: primary/secondary, natural/anthropogenic, and fossil/biogenic origin [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D23), doi: 10.1029/2006JD008094.
- [21] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 759-767.
Wu J S, Liao X, Peng J, *et al.* Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 759-767.
- [22] Christakos G, Serre M L. BME analysis of spatiotemporal particulate matter distributions in North Carolina [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(20): 3393-3406.
- [23] Miskell G, Salmond J, Longley I, *et al.* A novel approach in quantifying the effect of urban design features on local-scale air pollution in central urban areas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(15): 9004-9011.
- [24] 安芳, 翟亮, 桑会勇, 等. 基于地理国情数据的 PM_{2.5} 因子多元回归分析[J]. *测绘科学*, 2015, **40**(7): 58-63.
An F, Zhai L, Sang H Y, *et al.* Multiple regression analysis on PM_{2.5} impact factors based on geographic conditions monitoring data[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2015, **40**(7): 58-63.
- [25] 刘金培, 汪官镇, 陈华友, 等. 基于 VAR 模型的 PM_{2.5} 与其影响因素动态关系研究——以西安市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, **30**(5): 78-84.
Liu J P, Wang G Z, Chen H Y, *et al.* Dynamic relationship between PM_{2.5} and its influence factors in Xi'an city based on the VAR model [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30**(5): 78-84.
- [26] 顾凯华, 史红仙, 张帅, 等. 上海崇明岛近三年 PM_{2.5} 浓度变化特征与气象条件的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(12): 2108-2116.
Gu K H, Shi H X, Zhang S, *et al.* Variation characteristics of PM_{2.5} levels and the influence of meteorological conditions on Chongming island in Shanghai[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(12): 2108-2116.
- [27] Qian Z M, He Q C, Lin H M, *et al.* Association of daily cause-specific mortality with ambient particle air pollution in Wuhan, China[J]. *Environmental Research*, 2007, **105**(3): 380-389.
- [28] Hastie T, Tibshirani R. Generalized additive models [J]. *Statistical Science*, 1986, **1**(3): 297-310.
- [29] 贾彬, 王彤, 王琳娜, 等. 广义可加模型共曲线性及其在空气污染问题研究中的应用[J]. *第四军医大学学报*, 2005, **26**(3): 280-283.
Jia B, Wang T, Wang L N, *et al.* Concurvity in generalized additive models in study of air pollution [J]. *Journal of the Fourth Military Medical University*, 2005, **26**(3): 280-283.
- [30] Stone C J. Additive regression and other nonparametric models [J]. *The Annals of Statistics*, 1985, **13**(2): 689-705.
- [31] Hastie T J, Tibshirani R J. Generalized additive models [M]. London: Chapman & Hall, 1990.
- [32] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012~2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 768-773.
Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Correlation, seasonal and temporal variation of water-soluble ions of PM_{2.5} in Beijing during 2012-2013[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 768-773.
- [33] 刘大猛, 黄杰, 高少鹏, 等. 北京市区春季交通源大气颗粒物污染水平及其影响因素[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(2): 228-233.
Liu D M, Huang J, Gao S P, *et al.* The pollution level and influencing factors of atmospheric particulates from traffic in Beijing city during spring[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(2): 228-233.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172