

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 耶海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性

王振, 余益军, 徐圃青, 李艳萍, 夏京, 殷磊

(常州市环境监测中心, 常州 213001)

摘要: 运用统计方法研究常州市区 2013~2014 年 6 个国控点六项基本污染物(SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10}) 月平均浓度变化, 结果表明, 除 O_3 外, 其它五项污染物月平均浓度夏季较低冬季较高。颗粒物与风速之间的关系为 $PM_{2.5}$ 浓度随风速的升高一直降低, PM_{10} 随风速的升高浓度先降低后升高。采用快速聚类分析(k -means)并运用 SWV 和 DIV 指数对六项基本污染物进行分类, 得到 4 个样本分类。与依据颗粒物化学成分或粒径谱对 PM 进行源解析方法不同, 本研究更多是从 $PM_{2.5}$ 与其它污染物相关关系以及污染程度等角度按照欧式距离进行分类。不同类中 $PM_{2.5}$ 来源明显不同, 类 1 中 $PM_{2.5}$ 与化石燃料燃烧排放密切相关, 类 2 与 O_3 密切相关, 类 3 与城市不完全燃烧排放、区域灰霾污染密切相关, 类 4 可以归类于城市“背景”类。快速聚类分析结果也表明常州市区 $PM_{2.5}$ 有着复杂的来源。

关键词: 常州市区; 六项基本污染物; 统计特性; 快速聚类分析; $PM_{2.5}$ 分类

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3723-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.10.007

Statistical Characteristics of Urban Changzhou $PM_{2.5}$ Based on k -means Analysis

WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, LI Yan-ping, XIA Jing, YIN Lei

(Changzhou Environmental Monitoring Center, Changzhou 213001, China)

Abstract: Statistical analysis methods was utilized to investigate the variations of monthly average concentrations of the six basic pollutants (SO_2 , NO_2 , CO , O_3 , $PM_{2.5}$ and PM_{10}) of six national standard monitoring sites from 2013 to 2014 in urban Changzhou. The results showed that, except for O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations were all high in winter and low in summer. The relationship between particulate matter and wind speed showed, with increasing wind speed, the concentration of $PM_{2.5}$ reduced. However, the concentration variations of PM_{10} were complicated and when wind speed increased, its concentration started to go down and then elevated. Fast-cluster analysis (k -means) and the index of SWV & DIV were used to classify the six basic pollutants into four clusters, and then the relationship between gaseous pollutants and $PM_{2.5}$ in each cluster was emphatically discussed by statistical analysis method. Four clusters were assigned to fossil fuel combustion emissions (cluster1), O_3 and secondary aerosols (cluster2), incomplete combustion emissions and regional haze (cluster3), urban city “background” (cluster4). Incomplete combustion cluster accounted for the smallest percentage of urban Changzhou and city “background” was cluster of urban Changzhou with the largest contribution. k -means analysis results also showed that $PM_{2.5}$ had complex sources in urban Changzhou.

Key words: urban Changzhou; six basic pollutants; statistical characteristics; fast-cluster analysis; $PM_{2.5}$ classification

细颗粒物($PM_{2.5}$)对人体健康的影响使它成为对流层内重要的污染物之一^[1~3]。由于其复杂的来源和较长的大气停留时间以及较易形成区域污染等原因,使得其成为评价空气质量的重要指标^[4~6]。近十年来,巨大的化石燃料消耗量使中国许多区域正在遭受 $PM_{2.5}$ 污染的困扰,尤其是经济高速发展中的长江三角洲地区^[7,8]。为了探究 $PM_{2.5}$ 污染的成因,长期的监测与研究已经在长江三角洲等^[9~12]地开展。 $PM_{2.5}$ 的来源通常采用受体模型^[13,14]方法,但受体模型更多的是从源贡献、源廓线解析 $PM_{2.5}$,而没有考虑 $PM_{2.5}$ 与其它污染物的统计特性以及之间的相互关系。因此,为了解 $PM_{2.5}$ 与其它基本污染物(SO_2 、 NO_2 、 CO 和 O_3 等)统计特性以及之间的相互关系,需要将 $PM_{2.5}$ 时间序列浓度进行分类。

将长期监测得到的污染物数据分类通常需要复

杂的分析方法,而聚类分析^[15,16](cluster analysis, CA)能够满足于此。聚类的目的是把分类对象依照一定的规则分类。聚类的结果要求^[17,18]: ① 同类内的对象有很大的相似性; ② 不同类之间的对象有很大的相异性。聚类分析可以从统计的角度探究污染物的来源并且研究同类源的性质与演化,是一种已经应用于实际中的分类方法^[19,20]。

本研究运用聚类分析中的快速聚类(k -means)方法解析常州市区六项基本污染物,结合常州市区一些气象因素(风速、湿度、温度等)探讨 $PM_{2.5}$ 与其它基本污染物的统计特性,从而研究 $PM_{2.5}$ 的分类。

收稿日期: 2016-02-20; 修订日期: 2016-05-19

基金项目: 常州市科学技术局科研基金项目(CJ20140034)

作者简介: 王振(1987~),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为大气环境监测, E-mail: wangzhen_log@163.com

1 材料与方法

1.1 观测地点

分析数据来自常州市区的 6 个国控空气监测站(见图 1),分别为市监测中心空气站(天宁区)、武进区监测站(武进区)、潞城小学空气站(武进区)、城建学校空气站(钟楼区)、安家空气站(新北区)和常工院(新北区). 以上述 6 个国控空气监测点的六项基本污染物数据为代表,研究常州市区的六项基本污染物的统计特性以及 $PM_{2.5}$ 与其它基本污染物的统计关系. 数据时间跨度两年,从 2013-01-01 ~ 2014-12-31. 常州市区环境空气六项基本污染物(SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10})的数据和气象资料(风速、湿度和温度等)数据来源于各个空气站的直接监测,通过加权平均以代表常州市区的六项基本污染物和气象条件.



图 1 常州市 6 个国控点空气站点位示意

Fig. 1 Six national standard monitoring sites in Changzhou City

由于污染物日平均浓度时间分辨率较低(相比小时浓度),这会造成污染物之间的相互关系因平均而被隐藏. 因此,为了便于聚类后探讨常州市区 $PM_{2.5}$ 与其它基本污染物之间的统计特性,本研究采用六项基本污染物的小时样本数据. 除去缺失值以及无效值,共 17 489 个有效样本数据为研究对象进行分析.

1.2 聚类分析

以聚类分析解析 $PM_{2.5}$ 分类,应首先确定最佳聚类数目. $DIV^{[21]}$ (dunnindexvalue) 和 $SWV^{[22]}$ (silhouette widthvalue) 是基于上述要求评价最佳聚类数目的两个非线性指标, DIV 和 SWV 的值越大,表示此数目下的聚类效果越好. 因此可以利用这两

个指标确定最佳聚类数目.

由于环境空气基本污染物数据量大(两年数据)维度高(六项基本污染物),传统的聚类方法(层次聚类)已不能直接构建类簇^[17,18]. 为了获得六项基本污染物聚类结果,需要对六项基本污染物数据进行降维. 这是因为高维数据和大型数据库中的数据分布较低维空间中的数据分布要稀疏,导致样品数据间的距离几乎相等而不能得到收敛解的现象. 因此,如果不对 6 项基本污染物数据降维就会造成无法基于距离来构建收敛类簇^[21,22]. 本研究采用绝对主因子^[17,18,23] (absolute principal component scores, APCS) 方法降维以提取出公共因子计算因子得分,然后利用公共因子绝对得分采用欧几里得距离进行快速聚类分析^[17,18].

2 结果与讨论

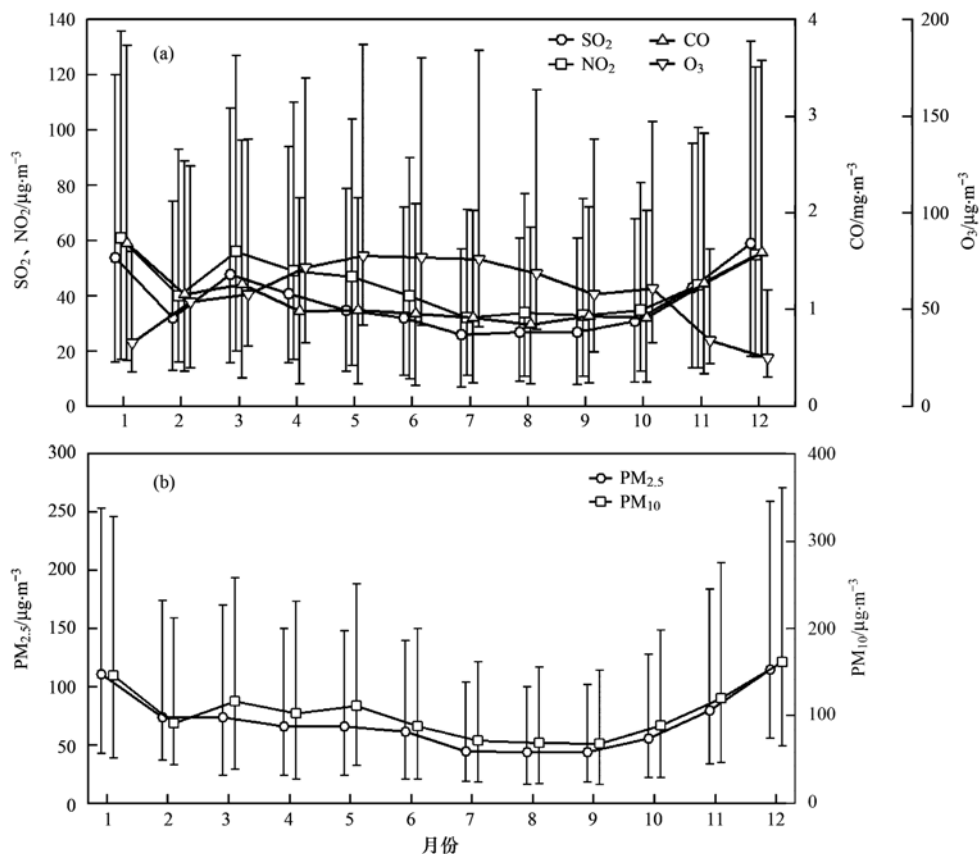
2.1 气态污染物、颗粒污染物数据的总体情况

2013-01 ~ 2014-12 常州市区四项气体污染物月均值如图 2(a) 所示. SO_2 、 NO_2 和 CO 的月均值变化趋势基本相同,月均值分布为:夏季和早秋浓度较低,冬季和早春浓度较大,这与其他城市的研究结果一致^[7,24]. 冬季温度较低,垂直混合扩散较差,容易导致污染物积累,另外,有研究表明^[25,26],在气温较低的季节,机动车启动时排放物的量比气温高时高. 因此引起 SO_2 、 NO_2 和 CO 浓度冬季高的原因之一可能是由于气态污染物排放量不同. 2 月的 SO_2 、 NO_2 和 CO 月平均浓度值相比于 1、3 月均出现显著性的转折,可能是因为春节放假期间污染物排放量较少. O_3 的浓度值在夏季和早秋浓度较高,冬季浓度较低,其浓度月均值变化趋势相对平缓,这与其他地区的 O_3 月变化趋势相一致^[7,27]. O_3 夏季、早秋浓度较高的原因与光化学过程有关,太阳辐射强度越大,温度越高,光化学反应越剧烈^[7,27].

由图 2(b) 可以看出, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的月平均浓度变化趋势与 SO_2 、 NO_2 和 CO 相似,夏季较低冬季较高,并且与其他城市的研究结果一致^[7]. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 月平均浓度值相比于 1、3 月也出现显著性的转折,原因可能与同期的 SO_2 、 NO_2 和 CO 相类似.

2.2 六项基本污染物的聚类分析

APCS 分析中的主因子提取采用主成分方法,因子载荷旋转采用极大方差旋转. 2013 ~ 2014 年度六项基本污染物的 APCS 分析结果如表 1 所示. 当选取因子的个数为 3 时所对应的特征值累计方差贡献率为 90.89% > 85.00%,符合主成分提取方法的



上边界为 75 % 浓度数据,下边界为 25 % 浓度数据

图 2 六项基本污染物的月均值浓度变化

Fig. 2 Monthly variation of average concentrations of six basic pollutants

表 1 2013 ~ 2014 年六项基本污染物 APCS 载荷分析¹⁾

Table 1 APCS loadings result for six basic pollutants in 2013-2014

污染物	因子 1 载荷	因子 2 载荷	因子 3 载荷	拟合 R^2
SO ₂		0.87		0.90
NO ₂		0.76		0.84
PM ₁₀	0.89			0.93
CO	0.77			0.85
O ₃			0.98	0.98
PM _{2.5}	0.92			0.95
累计贡献/%	42.65	72.04	90.89	

1) 表中仅显示因子载荷 > 0.5 的值

要求^[19~21]. 3 个绝对主因子得分与六项基本污染物浓度进行多元线性拟合所得的相关系数 $R^2 > 0.8$, 这表明采用 APCS 降维获得的因子得分中保留了六项基本污染物的绝大部分信息^[19], 满足替换六项污染物和进行后续 k -means 分析的要求.

在进行聚类之前, 首先根据 DIV 和 SWV 统计量确定最佳聚类个数, 然后再利用 k -means 方法以确定的最佳聚类数对六项基本污染物进行聚类. 从图 3 中可以看出, DIV 和 SWV 指数分别在聚类个数为 4、7 和 10 时出现了跃迁. 根据聚类分析要求的

类型越少越好^[19,20]以及 DIV 和 SWV 指数值越大越

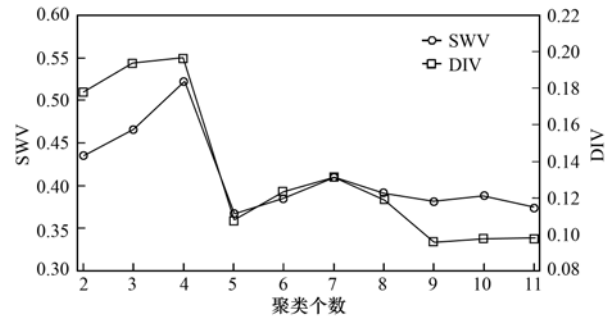


图 3 SWV、DIV 与聚类个数的关系

Fig. 3 SWV and DIV versus number of cluster

好两个原则可以看出,将常州市区环境空气六项基本污染数据聚为4类是比较合理的.

各个类中六项基本污染物浓度、气象参数的平均值和标准偏差如表2所示.

通过表2可以看出,类1中SO₂、NO₂与其它类

中的SO₂、NO₂相比浓度最高;类2中O₃与其它类中的O₃相比浓度最高;类3中PM₁₀、PM_{2.5}和CO与其它类中的PM₁₀、PM_{2.5}和CO相比浓度最高,类4中六项基本污染物与其它类的同类项相比浓度都较低.

表2 各类中的污染物以及气象数据统计信息

项目	类1		类2		类3		类4	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
SO ₂ /μg·m ⁻³	67	21	33	12	50	21	28	10
NO ₂ /μg·m ⁻³	70	21	32	13	62	23	36	14
PM ₁₀ /μg·m ⁻³	141	50	101	42	229	80	72	33
CO/mg·m ⁻³	1.497	0.445	0.905	0.282	2.050	0.652	0.938	0.312
O ₃ /μg·m ⁻³	37	26	133	39	28	23	44	23
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	95	39	60	27	171	65	49	25
风速/m·s ⁻¹	1.3	0.5	1.8	0.7	1.1	0.6	1.6	0.7
RH/%	54.2	14.5	45.1	12.1	67.2	13.7	68.1	15.1
T/℃	12.8	7.8	25.5	7.6	11.0	7.3	17.6	8.8

4类占全部样本的比例分布和其在各月样本量中所占的比例分别如图4所示.从中可以看出:类1占全部样本的19.8%,类中样本量夏季期间分布比例较小;类2占全部样本的18.5%,类中样本量

春末和夏季分布比例较大;类3占全部样本的7.7%,4个类中比例最低,类中样本主要分布在深秋和冬季;而类4为54.0%,所占比例在4个类中最大,类中样本分布在各个月份都占有较高的比例.

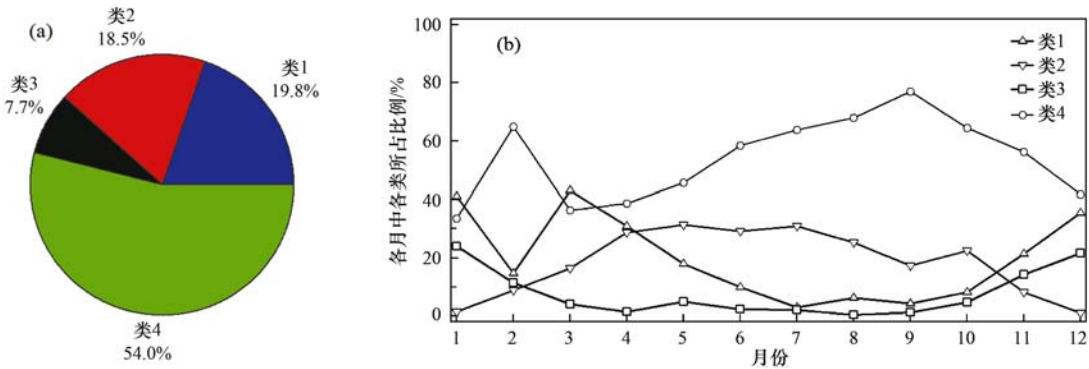


图4 4类所占样本量的百分比以及在月样本量中所占的比例
Fig. 4 Proportion of four clusters and proportion of various clusters in the 12 months

2.2.1 类1

类1中SO₂和NO₂与其它类的同类污染物相比具有较高的均值浓度.在类1中,PM_{2.5}与SO₂相关性与其它类相比较好(如图5),其相关系数R²=0.414. SO₂一般来源于含硫燃料的燃烧,类1中PM_{2.5}与SO₂较好的相关性可以说明二者来源相同,也说明类1中SO₂对PM_{2.5}有影响.但在全部样本中PM_{2.5}与SO₂相关性较差,而且类2、3和4中PM_{2.5}与SO₂的相关性较差.这是因为聚类分析是将同性质的类的数据聚集到一起的分析方法,常州市区监测期间以及类2、3和4样本中的PM_{2.5}除含硫燃料燃烧排放的贡献外还有其它形式的贡献源

(在后面将讨论其它类中PM_{2.5}的贡献源),各个时间扩散条件不同,因此除类1之外,整个样本以及其它类中PM_{2.5}与SO₂的相关性不明显.类1中PM_{2.5}与NO₂的相关性较差,相关系数R²=0.279.有研究表明^[28],城市大气中的NO_x(NO和NO₂)约2/3来自汽车等流动源的排放,燃烧产生的主要是NO,大气中NO₂主要来自NO的转化.这可能是类1中PM_{2.5}与NO₂没有较好的相关性的原因.NO₂的光解反应是大气中O₃生成的引发反应^[27,29],但在类1中,尽管NO₂的浓度较高,但其并没有导致较高浓度的O₃生成.可能的原因之一是类1样本集中出现在温度较低、相对湿度较大(RH>80%)的季节,

太阳辐射和光化学反应较弱^[7,27], 导致了类 1 中的 NO₂ 和 O₃ 呈现出一定的负相关, 这也与其他的 research 结果^[27] 相一致. 类 1 与常州市区化石燃料燃烧排放相关, 占全部样本量的 19.8% [图 4(a)], 此类中的 PM_{2.5} 受燃料燃烧排放影响较大.

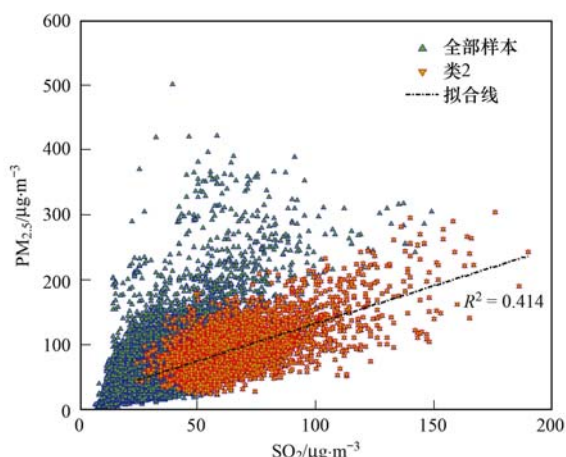


图 5 类 1 中 SO₂ 与 PM_{2.5} 的统计关系

Fig. 5 Information of SO₂ versus PM_{2.5} in cluster 1

2.2.2 类 2

类 2 中的 O₃ 与其它类中的 O₃ 相比均值浓度最高. 类 2 中样本分布在高温低湿、阳光辐射较强的夏季 [表 2、图 4(b)]. 而常州市区夏季经常出现高压天气系统, 气象条件表现为强日照、低湿度 (RH ≤ 50%) 和高温 (T ≥ 25℃), 此时的气象条件有利于高浓度 O₃ 现象的发生^[28,29]. 通过图 6 可以看出, 在较高的气温下 (30℃ 以上), 随着 O₃ 浓度 (O₃ ≥ 125 μg·m⁻³) 的升高, PM_{2.5} 的浓度也逐渐升高, 这表明类 2 中的 O₃ 对 PM_{2.5} 有贡献. 较高气温条件下, 太阳辐射较强, 进而促进大气中的 O₃ 与其它气态污染物、颗粒态污染物发生光化学反应形成二次气溶胶^[29]. 这也表明了, 在夏秋季节, 较高的气温、太阳

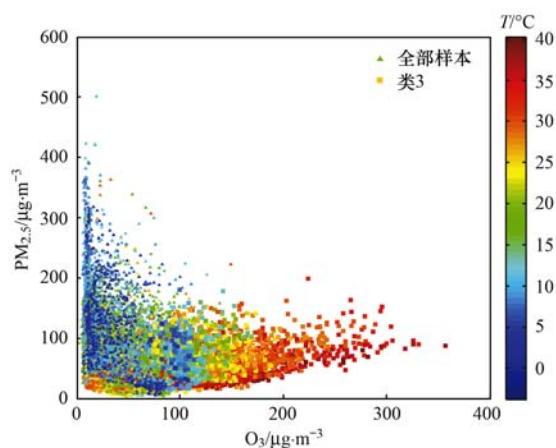


图 6 类 2 中 O₃ 与 PM_{2.5} 的统计关系

Fig. 6 Information of O₃ versus PM_{2.5} in cluster 2

辐射不仅会造成 O₃ 浓度的升高, 而且也会促进二次气溶胶的生成, 进而影响 PM_{2.5} 浓度. 显然, 此时 O₃ 成为大气中 PM_{2.5} 的二次贡献源. 因此, 对于这个时期的 PM_{2.5} 不仅要控制其直接来源, 更加要注意大气二次反应来源. 常州市区的气象条件以及工业、交通排放的挥发性有机物等原因共同促进了 O₃ 的浓度积聚, 进而通过大气二次反应影响 PM_{2.5} 浓度. 因此类 2 与常州市区高浓度的 O₃、二次气溶胶类相关. 类 2 占全部数据的 18.5% [图 4(a)], 此类中 PM_{2.5} 受 O₃ 等大气化学反应影响较大.

2.2.3 类 3

类 3 占全部样本的 7.7% [图 4(a)], 在 4 类中所占比例最低, 且样本分布主要在气温较低的冬季. 常州市区 PM_{2.5}、PM₁₀ 与风速的关系表现如图 7 所示, 对于 PM_{2.5}, 随着风速的增加其浓度是逐渐降低的; 而对于 PM₁₀, 当风速小于 3 m·s⁻¹, 其浓度随着风速的增加逐渐降低, 但当风速大于 3 m·s⁻¹ 时, PM₁₀ 浓度随着风速的增加逐渐增加. 类 3 中 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 CO 均值浓度较高, 风速均值较低, 且风频主要集中在 0.1 ~ 1.5 m·s⁻¹. 另外, 类 3 中风速大于 2 m·s⁻¹ 的次数出现较低, 这说明在类 3 中大气扩散条件较差, 易造成大气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度积累. 有研究表明^[30], 较小风速时高浓度的 PM_{2.5} 受本地源影响较大, 结合图 7 说明类 3 中引起 PM_{2.5} 浓度较高的原因可能由当地源造成. 由图 8 可知, 类 3 中在 07:00 ~ 15:00 之间的 PM_{2.5} 浓度并没有因为边界层的升高而显著降低, 而且 PM_{2.5} 与 CO 的日平均浓度 06:00 后变化趋势相似 (二者日变化浓度曲线相似余弦为 0.998 1 ≈ 1), 这表明类 3 中 PM_{2.5} 来源可能与 CO 相关. 类 3 中 PM_{2.5} 与 CO 的相关系数 R² = 0.462, 4 类中最大, 同其它类相比表明类 3 中 PM_{2.5} 受 CO 排放影响较大. 城市中 CO 主要来源于废弃物的焚烧、化石燃料和民用燃料的不完全燃烧使用. 因此, 常州市区不完全燃烧排放引起了 PM_{2.5} 浓

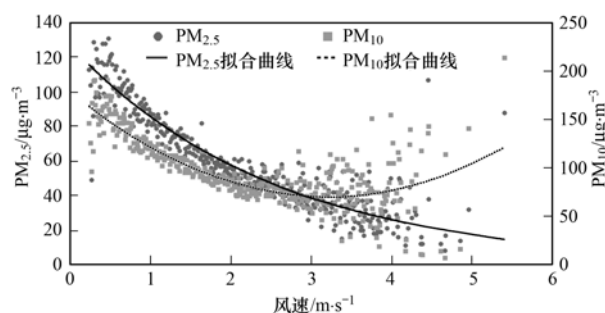


图 7 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度与风速的关系

Fig. 7 Information of PM_{2.5} and PM₁₀ versus wind speed

度的上升,这与其他的 research 结果相类似^[31,32]. 另外,类3中相对湿度较大,风速较小,而且 $PM_{2.5}$ 大于 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ 、 PM_{10} 大于 $200 \mu g \cdot m^{-3}$ 的情况绝大多数出现在类3中,这可能与区域灰霾污染有关. 由此表明类3中的 $PM_{2.5}$ 受不完全燃烧排放和区域灰霾污染影响较大.

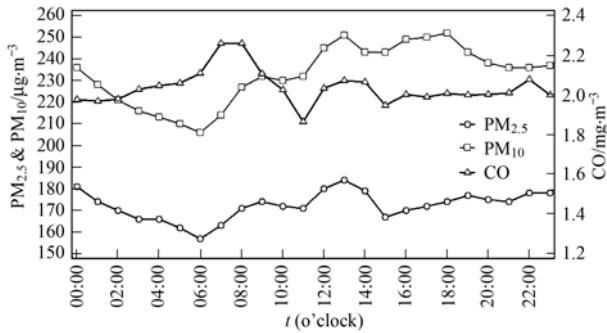


图8 类3中CO与 $PM_{2.5}$ 的日平均变化

Fig. 8 Diurnal average variations of CO and $PM_{2.5}$ in cluster 3

2.2.4 类4

通过图4(b)可以发现类4中样本分布在各个

月份都占有较高的比例,而且类4占全部样本量的54.0%,在四个类中所占比例最大. 通过类4中六项基本污染物的日变化(图9)发现除 O_3 外,其它的五项污染物在06:00后增加,在07:00出现一个早高峰,随后这五项污染物浓度便开始下降. 产生早高峰的原因是常州市区交通排放的影响,随后污染物浓度下降与大气边界层的升高发展有关^[33]. 五项污染物浓度在16:00以后至深夜呈现增加的趋势. 可能与常州市区交通晚高峰排放和随后空气中的污染物“陷入”夜间稳定边界层有关. 对于 O_3 ,其浓度与太阳辐射有关. 显然在12:00~16:00浓度较高. 在06:00时 O_3 浓度降到最低,与大气边界层的升高、夜间 O_3 与空气中其它还原性污染物发生化学反应的消耗有关^[29]. 类4中所对应的扩散条件与其它类相比较好,如表2所示,风速为 $1.6 m \cdot s^{-1}$,温度为 $17.6^\circ C$. 各项污染物浓度日变化遵循扩散规律,并且样本所对应的小时AQI不大于三级. 因此,类4所对应的可能是常州市区的城市“背景”类.

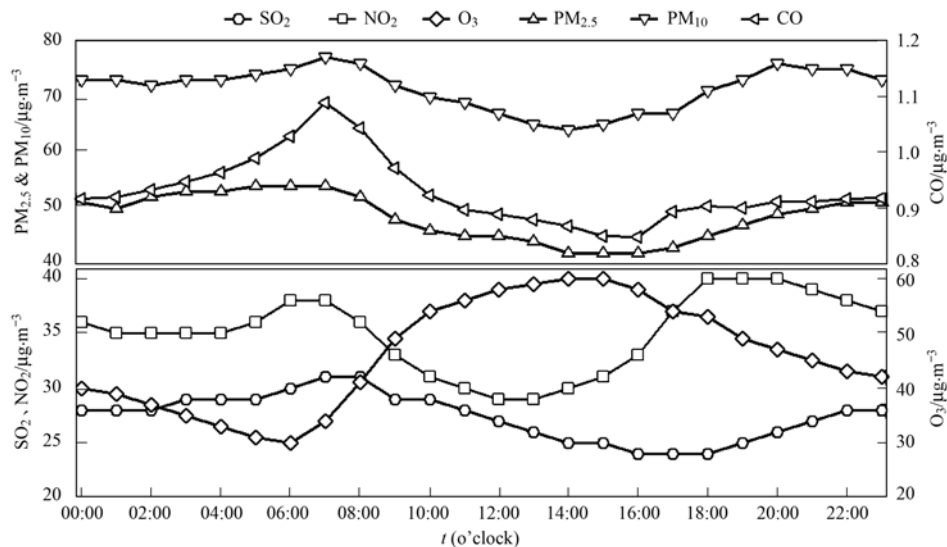


图9 类4中6项基本污染物的日平均变化

Fig. 9 Diurnal average variations of six basic pollutants in cluster 4

3 结论

(1)常州市区六项基本污染物具有分明的月平均变化. 表现为除 O_3 外,其它污染物在气温较低时月平均浓度较高,气温较高时月平均浓度较低;而 O_3 月平均浓度特征相反.

(2)通过DIV、SWV指数确定出常州市区六项基本污染物基于k-means聚类分析的最佳聚类数目,最佳聚类数为4类.

(3)常州市区 $PM_{2.5}$ 的来源复杂,与化石燃料燃烧排放、 O_3 和二次气溶胶的生成、城市无组织不完全燃烧排放和城市“背景”有关. 而且通过聚类分析的结果也显示, $PM_{2.5}$ 的浓度与气象因素关系显著.

(4)常州市区 $PM_{2.5}$ 随着风速的增大浓度逐渐降低, PM_{10} 随着风速的升高先下降而后变化复杂,有升高的趋势.

参考文献:

[1] 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区可吸入颗粒物分布与

- 呼吸系统疾病相关分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 237-243.
- [2] 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.
- [3] Brook R D, Rajagopalan S, Pope C A, *et al.* Particulate matter air pollution and cardiovascular disease an update to the scientific statement from the American Heart Association[J]. Circulation, 2010, **121**(21): 2331-2378.
- [4] Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, *et al.* Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6157-6173.
- [5] 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.
- [6] van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application[J]. Environmental Health Perspectives, 2010, **118**(6): 847-855.
- [7] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, *et al.* Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(11): 5813-5830.
- [8] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3119-3127.
- [9] Richter A, Burrows J P, Nüß H, *et al.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. Nature, 2005, **437**(7055): 129-132.
- [10] 杨毅红, 瞿群, 刘随心, 等. 夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2758-2767.
- [11] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, *et al.* Intense atmospheric pollution modifies weather: a case of mixed biomass burning with fossil fuel combustion pollution in eastern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(20): 10545-10554.
- [12] 王振, 马嫣, 郑军, 等. 基于粒径谱分布的南京市大气颗粒物来源解析[J]. 环境化学, 2015, **34**(9): 1619-1626.
- [13] 杨辉, 朱斌, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- [14] van Drooge B L, Grimalt J O. Particle size-resolved source apportionment of primary and secondary organic tracer compounds at urban and rural locations in Spain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(13): 7735-7752.
- [15] Bodenhofer U, Kothmeier A, Hochreiter S. APCluster: an R package for affinity propagation clustering[J]. Bioinformatics, 2011, **27**(17): 2463-2464.
- [16] Brock G, Pihur V, Datta S, *et al.* CValid: an R package for cluster validation[J]. Journal of Statistical Software, 2008, **25**(4): 1-22.
- [17] Tunved P, Ström J, Hansson H C. An investigation of processes controlling the evolution of the boundary layer aerosol size distribution properties at the Swedish background station Aspvreten[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, **4**(11-12): 2581-2592.
- [18] Salimi F, Ristovski Z, Mazaheri M, *et al.* Assessment and application of clustering techniques to atmospheric particle number size distribution for the purpose of source apportionment [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(21): 11883-11892.
- [19] Beddows D C, Dall'Osto M, Harrison R M. Cluster analysis of rural, urban, and curbside atmospheric particle size data[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(13): 4694-4700.
- [20] Wegner T, Hussein T, Hämeri K, *et al.* Properties of aerosol signature size distributions in the urban environment as derived by cluster analysis[J]. Atmospheric Environment, 2012, **61**: 350-360.
- [21] Dunn J C. Well-separated clusters and optimal fuzzy partitions [J]. Journal Cybernetics, 1974, **4**(1): 95-104.
- [22] Rousseeuw P J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1987, **20**: 53-65.
- [23] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- [24] Krotkov N A, McLinden C A, Li C, *et al.* Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(7): 4605-4629.
- [25] Lloyd A C, Cackette T A. Diesel engines: environmental impact and control [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2011, **51**(6): 809-847.
- [26] Cai H, Xie S D. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(39): 8963-8979.
- [27] Fu Y, Tai A P K. Impact of climate and land cover changes on tropospheric ozone air quality and public health in East Asia between 1980 and 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(17): 10093-10106.
- [28] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 58-61.
- [29] Monks P S, Archibald A T, Colette A, *et al.* Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(15): 8889-8973.
- [30] Cheng I, Xu X, Zhang L. Overview of receptor-based source apportionment studies for speciated atmospheric mercury [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(14): 7877-7895.
- [31] Ojha N, Pozzer A, Rauthe-Schöch A R, *et al.* Ozone and carbon monoxide over India during the summer monsoon: regional emissions and transport[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(5): 3013-3032.
- [32] Fujii Y, Iriana W, Oda M, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols emitted from peatland fire in Riau, Sumatra, Indonesia [J]. Atmospheric Environment, 2014, **87**: 164-169.
- [33] Zheng J, Garzón J P, Huertas M E, *et al.* Volatile organic compounds in Tijuana during the Cal-Mex 2010 campaign: measurements and source apportionment [J]. Atmospheric Environment, 2013, **70**: 521-531.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfohalobium</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行