

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素

高元官^{1,2}, 张凯^{2*}, 王体健³, 陈志明⁴, 耿红¹, 孟凡²

(1. 山西大学环境科学研究所, 太原 030006; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 南京大学大气科学学院, 南京 210093; 4. 广西壮族自治区环境保护科学研究所, 南宁 530022)

摘要: 为了解我国北部湾区域大气环境特征和可能的跨界输送, 于2015年3~4月在涠洲岛开展了对大气颗粒物浓度水平和粒径分布特征的外场观测研究, 并结合气象因子和后向轨迹探讨了颗粒物浓度变化原因和来源. 结果表明涠洲岛大气PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀质量浓度分别为(21 ± 12)、(35 ± 19)、(43 ± 20) μg·m⁻³. PM₁、PM_{1-2.5}和PM_{2.5-10}质量浓度分别占PM₁₀的50%、32%、18%. 0.5~1、1~2.5和2.5~20 μm 粒径段颗粒物数浓度分别占总数浓度的93.5%、6.1%和0.4%. 颗粒物数浓度与能见度和气压呈弱负相关. 后向轨迹模拟分析发现, 来自涠洲岛西南方向东南亚一带的气团影响频率最高(45.9%), 0.5~1 μm、1~2.5 μm 数浓度和PM_{2.5}浓度最低但NO浓度最高; 其次为来自正东方向气团(34.1%), SO₂浓度最低但O₃浓度最高; 来自正南方向的气团(12.5%)NO₂、NO_x、O₃和CO浓度最低; 来自东北方向的大陆气团影响频率最低(7.4%), 但颗粒物数浓度、质量浓度和气体污染物浓度(除O₃和NO)最高. 涠洲岛大气细颗粒物和气态污染物主要受大陆和东南亚地区输送影响, 来自大陆方向的输送以工业污染为主, 来自东南亚方向的输送以港口船舶及航运污染为主.

关键词: 粒径分布; 数浓度; 后向轨迹; 聚类分析; 涠洲岛

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1753-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201609104

Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province

GAO Yuan-guan^{1,2}, ZHANG Kai^{2*}, WANG Ti-jian³, CHEN Zhi-ming⁴, GENG Hong¹, MENG Fan²

(1. Institute of Environmental Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 4. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning 530022, China)

Abstract: To investigate the characteristics of atmospheric environment and possible cross-boundary transports in the north of South China Sea, field experiments were carried out on Weizhou Island from March to April, 2015. The concentration and particle size distributions of atmospheric particulate matters were measured, and the concentration characteristics and the source of particulate matters were analyzed in combination with meteorological factors and back trajectory analysis. The results showed that: the PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were (21 ± 12) μg·m⁻³, (35 ± 19) μg·m⁻³, (43 ± 20) μg·m⁻³, respectively. The mass concentrations of PM₁, PM_{1-2.5} and PM_{2.5-10} accounted for 50%, 32%, 18% of PM₁₀ mass concentrations, respectively. Besides, the number concentrations of particulate matters with particle sizes of 0.5-1 μm, 1-2.5 μm and 2.5-20 μm accounted for 93.5%, 6.1% and 0.4% of the total number concentration, respectively. The particle number concentration was negatively correlated with visibility and air pressure. Backward trajectory analysis showed that air masses from southwest direction accounted for the highest frequency effect (45.9%), in this case, particulate matters with particle sizes of 0.5-1 μm, 1-2.5 μm and 2.5 μm had the minimum number concentration and NO had the highest concentration. Air masses from the east direction accounted for 34.1% of the frequency effect with the minimum SO₂ concentration and the highest O₃ concentration. The concentrations of NO₂, NO_x, O₃ and CO were the minimum when air masses came from the south direction which accounted for 12.5% of the frequency effect. Air masses from the northeast had the lowest frequency effect (7.4%), but had the maximum particle number concentration, mass concentration and the concentration of gaseous pollutants except O₃ and NO. Atmospheric fine particles and gaseous pollutants on Weizhou island were affected by transport from Chinese mainland and Southeast Asia. Pollutants from Chinese mainland were mainly from industrial sources, while pollutants from Southeast Asia were mainly from the shipping business inside and outside ports.

Key words: size distribution; number concentration; backward trajectory; cluster analysis; Weizhou Island

收稿日期: 2016-09-13; 修订日期: 2016-12-01

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201309016); 国家自然科学基金项目(41205093); 山西省第六批海外百人计划项目; 山西省回国留学人员科研项目(2013-012); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139203)

作者简介: 高元官(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: 1542138008@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangkai@cras.org.cn

大气颗粒物的粒径分布特征及其组分是了解颗粒物对气候、大气能见度和人体健康影响的重要信息^[1-4],同时会影响颗粒物在大气中的滞留时间、传输距离及理化特性等,在评估大气颗粒物对人类、气候、生态等方面的影响有重要意义^[5-7].国内对大气颗粒物数浓度、粒径分布及组分的研究主要集中在经济发达地区^[8-14].张涛等^[8]研究发现广州大气颗粒物数浓度与大气能见度、相对湿度、风速呈负相关关系,与PM_{2.5}质量浓度、温度呈正相关关系.段菁春等^[13]观测了北京市冬季远郊区、交通道路和生活区的大气细颗粒物数浓度,发现颗粒物数浓度在远郊区与长距离迁移、村庄生活排放以及附近铁路机车排放有关,交通道路主要与机动车排放污染有关,在生活区与机动车排放和燃煤排放有关.Hussein等^[15]在芬兰赫尔辛基的研究发现,颗粒物数浓度与环境温度及风速之间具有很好的相关性.远离大城市群的岛上站点和高山背景站点对研究大气颗粒物背景浓度水平有重要作用,越来越多的人开始关注对背景地区颗粒物组分及数浓度、粒径谱特征的研究,如王爱平等^[16]对黄山光明顶夏季颗粒物数浓度特征和潜在影响源区进行了研究.学者们对福建武夷山、广东南岭、湖北神农架、山西庞泉沟和吉林长白山等大气背景站点不同粒径的颗粒物组分特征进行了研究^[17-23].由于多方面条件的限制,在远离大陆城市群影响的海岛上选址做背景站点研究较少^[24],对海岛背景站点大气细颗粒物全面综合研究较少.

本研究选择北部湾中部的北海涠洲岛(20°54'~21°10'N,109°00'~109°15'E)作为观测研究地点.涠洲岛面积24.74 km²,岛上无工业排放源,是理想的大气背景研究地点.通过对涠洲岛大气颗粒物粒径谱、质量浓度、与气象因素和气团来源的关系进行综合分析,了解海上背景点颗粒物来源在多种因素综合作用下的变化规律,并评估东南亚国家对北部湾地区大气颗粒物的输送影响,以期“一带一路”战略带动下地区环境质量评价与环境污染趋势预测做参考.

1 材料与方 法

1.1 实验地点和时间

实验地点位于广西省北海市涠洲岛西南端滴水丹屏村一幢五层建筑楼顶(21°02'N,109°06'E,图1),实验点周边270°为海洋.仪器设备距地面15

m,进气口距房顶2 m,以避免人为干扰.实验时间为2015年3月15日00:00到4月2日00:00.

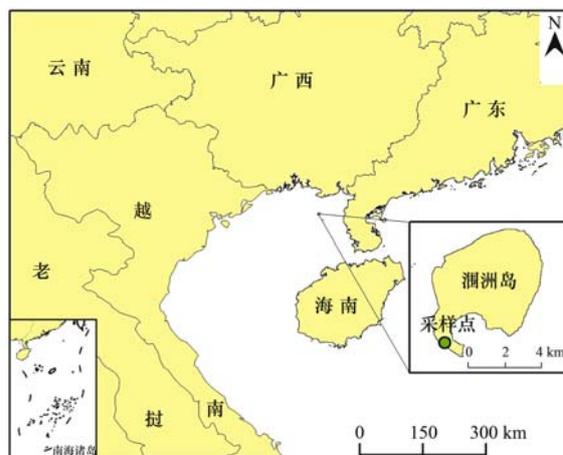


图1 涠洲岛采样点位置示意图

Fig. 1 Location of sampling site on Weizhou Island

1.2 仪器与方法

实验利用美国TSI公司生产的APS-3321型空气动力学粒径谱仪连续在线测量大气颗粒物数浓度谱分布,测量粒径为0.5~20.0 μm,其原理见文献[25],同时还对大气中颗粒物质量浓度和气态污染物(NO_x、SO₂、CO、O₃)浓度进行了同步观测.气态污染的监测采用美国Thermo Fisher公司的大气环境设备,包括42i化学发光NO₂⁻-NO₂-NO_x分析仪、43i脉冲荧光SO₂分析仪、48i气体滤光相关法CO分析仪和49i紫外发光分析O₃仪,大气颗粒物(PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀)监测仪器为美国Thermo Fisher公司的5030和FH62C14,原理都是β射线法.所有监测设备在实验开始前均经过校正.气象数据来自于北海市气象局涠洲岛站.

本文的后向轨迹聚类分析使用TrajStat软件^[26],该软件对气团轨迹计算利用了NOAA的HYSPLIT模式计算模块^[27],气象数据选用全球数据同化系统(global data assimilation system, GDAS)数据库中的相关资料,计算到达涠洲岛气团的后向轨迹.频率为1 h,每次的起始时间为每个整点(北京时间),后推时间为48 h,起始高度为500 m,计算得到后向轨迹图.同时利用聚类分析模块对后向轨迹进行聚类分析判断气团的主要来源方向和途经区域.聚类方法是根据气团的移动速度和方向对大量轨迹进行分组,得到不同的轨迹输送组来估计污染物的潜在源区^[28].分类的原则是组内各轨迹之间差异极小,而组间的差异极大^[29].

2 结果与讨论

2.1 颗粒物数浓度和质量浓度特征

为了方便大气颗粒物数浓度与在线质量浓度 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 比较, 将 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 的颗粒物分为 $0.5 \sim 1.0$ 、 $1.0 \sim 2.5$ 和 $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 这 3 个粒径段. 观测期间 $0.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 粒径段颗粒物总数浓度平均值 $251.1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$. 其中 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 粒径段颗粒物数浓度平均值 $234.7 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 占总数浓度 93.5% ; $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 粒径段颗粒物数浓度平均值 $15.4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 占总数浓度 6.1% ; $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 粒径段颗粒物数浓度平均值 $1.0 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 占总数浓度 0.4% . 可见涠洲岛颗粒物数浓度主要集中在粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下的粒子(表 1). 这一研究结果与王爱平

等^[16]对黄山光明顶气溶胶数浓度研究结果接近, 赵素平等^[30]对兰州夏秋季颗粒物数浓度的研究和张涛等^[31]对广州春季研究也有类似的结果(表 2). PM_{10} 质量浓度平均值 $21 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 PM_{10} 总质量浓度的 49% ; $PM_{1 \sim 2.5}$ 质量浓度平均值 $14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 PM_{10} 的 32% ; $PM_{2.5 \sim 10}$ 质量浓度平均值 $8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占 PM_{10} 的 19% . $PM_{2.5}$ 质量浓度占 PM_{10} 质量浓度的 82% , 与其它背景站点比较发现, 此比值与武夷山较为接近, 高于长白山、庞泉沟、神农架、南岭等地(表 3). 国内外多个城市和地区研究表明 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度比在 $0.5 \sim 0.7$, 郊区比值高于城市^[32], 涠洲岛 $PM_{2.5}$ 质量浓度在 PM_{10} 中占比高于其它城市和地区研究结果, 这是因为 $PM_{2.5}$ 比 PM_{10} 在大气中滞留时间更长, 输送距离更远.

表 1 不同粒径范围小时平均颗粒物数浓度统计值

Table 1 Statistics values of hourly particle number concentration in different size ranges

粒径范围/ μm	平均值 $/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	标准差 $/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	最大值 $/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$	最小值 $/\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$
0.5 ~ 1	234.7	155.3	817.1	3.8
1 ~ 2.5	15.4	10.28	64	0.6
2.5 ~ 20	1.0	0.85	4.4	0.0
0.5 ~ 20	251.1	164.1	882.3	7.2

表 2 不同粒径颗粒物数浓度占比与其它地区比较/%

Table 2 Comparison of number concentration ratios of different diameter particles with those in other regions/%

项目	0.5 ~ 1 μm	1 ~ 2.5 μm	2.5 ~ 20 μm	文献
黄山夏季	94.9	4.8	0.3	[16]
兰州夏秋季	91.2	7.4	1.4	[30]
广州春季	92.0	7.3	0.7	[31]
涠洲岛春季	93.5	6.1	0.4	本研究

表 3 不同背景地区颗粒物质量浓度比较

Table 3 Comparison of particle mass concentration in different background regions

项目	本研究	武夷山	长白山	庞泉沟	神农架	南岭
$PM_{10}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	43	23	27	91	78	20
$PM_{2.5}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	35	18	17	30	31	13
$PM_{2.5}/PM_{10}/\%$	81.4	78.3	63.0	33.3	40.0	62
文献	本研究	[20]	[19]	[19]	[19]	[19]

2.2 气象因子对颗粒物数浓度影响

春季(3~4月)北部湾受海洋季风影响, 以西南风为主, 是判断东南亚地区对我国北部湾地区是否有输送影响的有利时机, 所以实验观测时间选择在3月中旬到4月初. 对采样期间平均风速、平均气压、平均能见度、平均温度等气象数据(表 4)和后向轨迹资料统计分析后发现, 采样期间的气象条件与北部湾春季的气象特征基本相同, 能够代表涠洲岛春季气候特征.

为了解气象因素对不同粒径段颗粒物数浓度的影响, 本文对不同粒径段和气象因素的时间变化趋势及相关性进行了分析. $0.5 \sim 1.0$ 、 $1.0 \sim 2.5$ 和 $2.5 \sim 20 \mu\text{m}$ 这 3 个粒径段颗粒物数浓度和气象因素随时间变化分析表明, 不同粒径段颗粒物的时间变化趋势并不相同(图 2), 粒径越小的颗粒物数浓度随时间变化波动越大, 反之, 粒径越大的颗粒物随时间变化波动越小, 这与不同粒径段颗粒物的物理特征和化学组成有关. 对 3 月 31 日降雨前后颗粒物

数浓度变化分析可知,雨后的3月31日能见度达到最大而颗粒物浓度降到最低,说明降雨对颗粒物清除作用明显.对比风速矢量图和颗粒物数浓度变化,发现持续的东北风可以导致颗粒物数浓度的升高,例如3月21~26日的污染过程即持续东北风结果,东北风

会使大气中颗粒物浓度不断累积并出现极大值,相反东南风对涠洲岛颗粒物有清除作用.2.5~20 μm 粒径段的颗粒物在4月1日有较大的波动与本地生活垃圾、树叶和枯枝的焚烧排放有关.

对大气颗粒物数浓度与气象因素的Pearson相

表4 春季和采样期间气象平均气象因素

Table 4 Meteorological factors in spring as well as during the sampling period

时期	平均风速/m·s ⁻¹	平均气压/kPa	平均露点/℃	平均能见度/km	平均温度/℃
春季(3~4月)	3.26	101.37	19.39	5.68	21.29
实验期间	3.21	101.53	19.6	5.37	21.97

关性进行分析表明(表5):能见度与0.5~1 μm 和1~2.5 μm 粒径段的颗粒物数浓度有负相关关系,这与2.5 μm 以下的颗粒物数浓度大且对光的反射吸收能力强有关^[33,34].气压与粒径段0.5~1、1~2.5、2.5~20 μm 的颗粒物数浓度都具有一定的负相关性(表5),但由图2可知,整个观测期间海平面气压变化幅度很小,颗粒物数浓度变化主要与气压场和流场有关.风速与颗粒物数浓度无明显相关性,这是因为虽然来自污染源的气流会把污染源大气颗粒物带来,但来自干净海洋的气流会稀释当地大气颗粒物.不同粒径段颗粒物与相对湿度和温度的相关性不同,且相关性较弱,说明温度和相对湿度不是影响当地颗粒物浓度的主要气象因素.总之,颗粒物数浓度与气象因素的相关性较弱,这是因为涠洲岛大气颗粒物浓度较低且主要来源于其它城市

和地区大气污染源的远距离传输.不同来源的大气颗粒物理化特征不同,在传输过程中的大气化学转化不同,对气象因素的响应不同.

2.3 后向轨迹聚类分析

利用TrajStat后向轨迹模式,计算到达涠洲岛气团的后向轨迹,并对轨迹进行聚类分析^[27-29],时间分辨率为小时.聚类轨迹分别为西南、正南、正东、东北这4个方向,图3中依次对应A、B、C、D这4条粗线.来自西南方向气团对涠洲岛的影响频率最高占45.9%,其次是正东方向占34.1%、再次为正南方向占12.5%,来自东北方向气团频率最低占7.4%.轨迹聚类的同时也对每条轨迹对应的CO、NO、NO₂、NO_x、PM_{2.5}、SO₂、O₃以及粒径段0.5~1.0、1.0~2.5、2.5~20 μm 的颗粒物数浓度的小时平均值进行聚类(表6、表7).

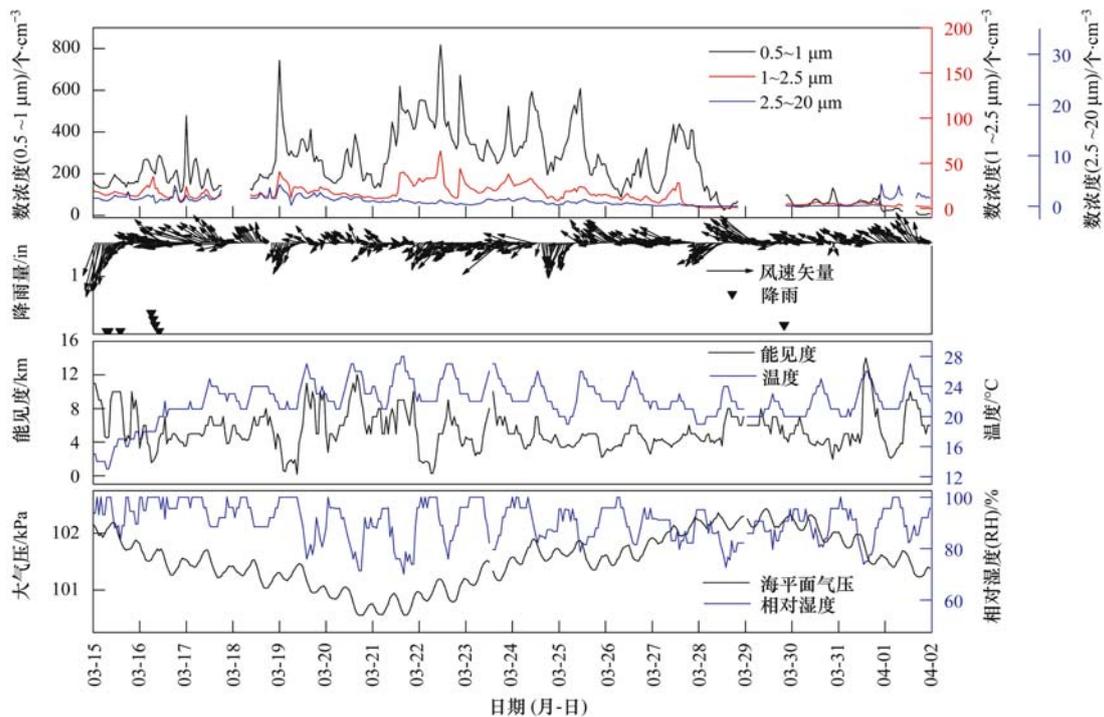


图2 气象因素、粒子数浓度的变化曲线

Fig. 2 Changing curves of meteorological factors and particle's number concentration

表 5 颗粒物数浓度与气象因子的 Pearson 相关性分析¹⁾

Table 5 Pearson Correlation analysis between particle's number concentration and meteorological factors

粒径/ μm	项目	能见度	相对湿度	风速	温度	海平面气压
0.5 ~ 1.0	相关系数 r	-0.175 **	0.018	0.052	0.221 **	-0.377 **
	显著性 Sig.	0.001	0.728	0.307	0.000	0.000
1.0 ~ 2.5	相关系数 r	-0.157 **	0.117 *	0.099	0.128 *	-0.404 **
	显著性 Sig.	0.002	0.021	0.051	0.012	0.000
2.5 ~ 20	相关系数 r	0.097	0.174 **	-0.019	-0.310	-0.396 **
	显著性 Sig.	0.055	0.001	0.713	0.547	0.000

1) ** 表示相关性在 0.01 水平上显著(双尾); * 表示相关性在 0.05 水平上显著(双尾)

表 6 不同聚类方向下不同粒径段颗粒物平均数浓度统计/ $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ Table 6 Statistics of particle's average concentration in different size ranges in different directions/ $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$

轨迹方向 (轨迹数目)	0.5 ~ 1.0 μm		1.0 ~ 2.5 μm		2.5 ~ 20 μm	
	平均数	标准差	平均数	标准差	平均数	标准差
西南(160)	157.9	119.1	12.6	8.2	1.4	1.0
正东(142)	295.4	157.4	17.7	12.5	0.6	0.5
正南(46)	226.2	111.3	14.4	5.7	1.2	0.5
东北(32)	384.9	122.2	20.4	7.8	0.7	0.3

表 7 不同聚类方向下大气污染物平均浓度统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 7 Statistics of Atmospheric pollutant's average concentration in different directions/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

方向	SO ₂	NO	NO ₂	NO _x	O ₃	CO	PM _{2.5}
西南	4.8	2.7	10.1	13.7	62.1	600	26.9
正东	4.1	1.2	9.7	11.7	92.1	800	42.9
正南	4.3	1.7	7.4	10.1	56.4	700	27.7
东北	7.0	1.2	13.8	15.5	68.6	1200	47.6
平均	4.6	1.9	9.9	12.6	72.9	800	34.9

0.5 ~ 1.0 μm 和 1.0 ~ 2.5 μm 粒径段颗粒物数浓度在东北方气团影响下最大, 分别是 384.9 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 20.4 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$; SO₂、CO、NO₂、NO_x、PM_{2.5} 质量浓度也最高, 分别为 7.0、1200、13.8、15.5、47.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 这表明虽然来自涠洲岛东北方向大陆一带的气团影响时间短, 但是带来了较多的大气污染物. 正东方向气团影响下 0.5 ~ 1.0 μm 和 1.0 ~ 2.5 μm 粒径段的颗粒物数浓度分别是 295.4 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 17.7 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$; PM_{2.5} 质量浓度为 42.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅次于东北方向气团的影响; O₃ 浓度为 92.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是 4 个聚类方向中最高, O₃ 来源主要受 VOCs/NO_x 控制^[34], 正东方向的气流由于靠近大陆, 陆地上生成的 O₃ 传输到海洋上后, 由于没有 NO 的滴定效应, O₃ 基本不被消耗, 所以浓度较高. 来自于大陆方向的东北气团 O₃ 浓度低于正东方向, 这是因为大陆气团中还原性大气污染物如 NO 消耗了 O₃. 正南方向气团影响下 0.5 ~ 1.0 μm 和 1.0 ~ 2.5 μm 粒径段的颗粒物数浓度分别是 226.2 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 14.4 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$; PM_{2.5} 质量浓度为 27.7

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; O₃、NO₂、NO_x 浓度达最低, 分别为 56.42、7.41、10.07 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 表明正南方向气团对涠洲岛污染物有清除作用. 西南方向气团作用时间最长, 0.5 ~ 1.0 μm 和 1.0 ~ 2.5 μm 粒径段的颗粒物数浓度是 157.87 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 12.62 $\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$; SO₂ 浓度达 4.76 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 仅次于东北方向影响下的 SO₂ 浓度值; NO₂、NO_x 浓度分别为 10.11 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、13.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; NO 浓度 (2.72 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 为 4 个聚类方向中最高的. 西南方向气团影响下有最高的 NO 和次高的 NO_x. 分析发现, 西南方向气团轨迹扫过的区域包括越南第二大港口岬港和平顺海上石油平台. 岬港口是越南连接南北的重要枢纽, 与北部海防港和南部胡志明港的通航量相当^[35,36]. 另外, 越南第三大港海防港距离采样点只有 200 km. 船舶进出港时因船舶柴油机的频繁加减速导致发动机过热, 此工况下热力型 NO 生成量加大, 使其比海上巡航时的工况下较多的 NO 排放^[37]. 因此推测越南沿海港口排放以及海上航行船只排放是 NO 和 NO_x 的重要贡献源, 是导致西南气团影响下 NO 浓度最高的

一个重要原因。

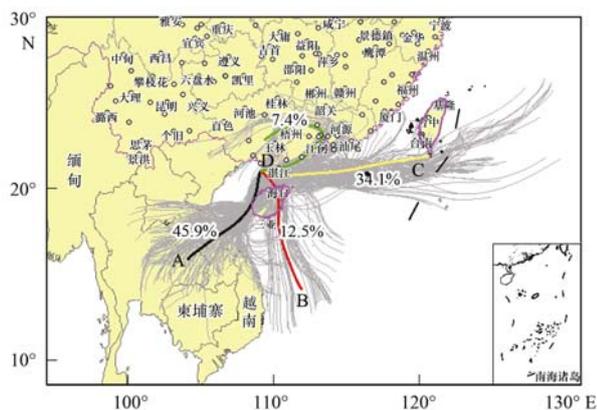


图3 后向轨迹聚类

Fig. 3 Trajectory simulation of the clustering analysis

3 结论

(1) 涠洲岛春季大气细颗粒物数浓度主要集中在粒径 $1 \mu\text{m}$ 以下的粒子, 占总数浓度的 90% 以上. PM_1 质量浓度占 PM_{10} 总质量浓度的 50%, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度占 PM_{10} 的 82%, 当地大气颗粒物主要来源于远距离传输.

(2) 颗粒物数浓度与气象因素相关性较弱. 涠洲岛大气颗粒物浓度较低且主要来自外部传输, 不同来源的大气颗粒物对气象因素的响应不同.

(3) 涠洲岛主要受 4 个方向气团影响, 分别是西南方向(45.9%)、正东方向(34.1%)、正南方向(12.5%)和东北方向(7.4%). 来自东北方向大陆的气团污染较为严重, 大气污染物主要来自工业源排放; 来自正东方向的气团主要是 O_3 污染; 来自西南方向气团的 NO 明显高于其它方向气团, 大气污染物主要来自港口和航行船只排放; 来自正南方向的气团较为干净, 对大气污染物有清除作用.

致谢: 感谢中国环境科学研究院张玮琦、苏布达、党鸿雁、唐伟、王继康、杨欣, 南京大学李时政、袁成, 广西壮族自治区环境保护科学研究院莫招育、梁桂云和毛敬英等在实验过程中给予的帮助.

参考文献:

[1] Harrison R M, Shi J P, Jones M R. Continuous measurements of aerosol physical properties in the urban atmosphere [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(7): 1037-1047.

[2] Harrison R M, Yin J X. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **249**(1-3): 85-101.

[3] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, *et al.* Aerosols, climate, and the hydrological cycle [J]. *Science*, 2001, **294**(5549): 2119-2124.

[4] Hand J L, Kreidenweis S M, Sherman D E, *et al.* Aerosol size

distributions and visibility estimates during the Big Bend regional aerosol and visibility observational (BRAVO) study [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(32): 5043-5055.

- [5] Boucher O, Anderson T L. General circulation model assessment of the sensitivity of direct climate forcing by anthropogenic sulfate aerosols to aerosol size and chemistry [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D12): 26117-26134.
- [6] Peters A, Wichmann H E, Tuch T, *et al.* Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1997, **155**(4): 1376-1383.
- [7] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. New York: Wiley, 1998.
- [8] 张涛, 陶俊, 王伯光, 等. 2008 年 1 月广州颗粒物数浓度污染特征 [J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(2): 31-34.
Zhang T, Tao J, Wang B G, *et al.* Study on the pollution characteristics of particle number density in Guangzhou during January 2008 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(2): 31-34.
- [9] 黄祖照, 王杰, 刘建国, 等. 广州城区大气细颗粒物粒谱分布特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(7): 1177-1181.
Huang Z Z, Wang J, Liu J G, *et al.* The analysis of the characterization of fine particle size distribution in urban area of Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1177-1181.
- [10] 郎风玲, 闫伟奇, 张泉, 等. 北京大气颗粒物数浓度粒径分布特征及与气象条件的相关性 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(7): 1153-1159.
Lang F L, Yan W Q, Zhang Q, *et al.* Size distribution of atmospheric particle number in Beijing and association with meteorological conditions [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(7): 1153-1159.
- [11] 翟晴飞, 金莲姬, 林振毅, 等. 石家庄春季大气气溶胶数浓度和谱的观测特征 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(6): 886-891.
Zhai Q F, Jin L J, Lin Z Y, *et al.* Observational characteristic of aerosol number concentration and size distribution at Shijiazhuang in spring season [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(6): 886-891.
- [12] 熊秋林, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区 2007 ~ 2012 年细颗粒物数浓度时空演化 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2123-2130.
Xiong Q L, Zhao W J, Gong Z N, *et al.* Spatial-temporal evolution of fine particles concentration in Beijing City during 2007 ~ 2012 [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(12): 2123-2130.
- [13] 段青春, 李兴华, 谭吉华, 等. 北京冬季大气颗粒物数浓度的粒径分布特征及来源 [J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1134-1140.
Duan J C, Li X H, Tan J H, *et al.* Size distribution and source apportionment of atmospheric particle number concentration in winter in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1134-1140.
- [14] 徐小牧, 赵桂玲, 伦小秀. 北京市夏季不同功能区气溶胶数浓度特征 [J]. *环境化学*, 2015, **34**(2): 388-389.
Xu X M, Zhao G L, Lun X X. Characteristics of aerosol number

- concentration in different functional areas of Beijing city in summer[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(2): 388-389.
- [15] Hussein T, Karppinen A, Kukkonen J, *et al.* Meteorological dependence of size-fractionated number concentrations of urban aerosol particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(8): 1427-1440.
- [16] 王爱平, 朱彬, 银燕, 等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 852-861.
Wang A P, Zhu B, Yin Y, *et al.* Aerosol number concentration properties and potential sources areas transporting to the top of mountain Huangshan in summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 852-861.
- [17] 苏彬彬, 张智胜, 陶俊, 等. 春季华东高山背景区域 PM_{2.5} 和 PM_{2.5-10} 中水溶性无机离子特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1195-1201.
Su B B, Zhang Z S, Tao J, *et al.* Characteristics of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} and PM_{2.5-10} in mountain background region of East China in spring [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1195-1201.
- [18] 马志强, 徐敬, 张小玲, 等. 北京 PM_{2.5} 背景值定值方法及其变化特征研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 7-12.
Ma Z Q, Xu J, Zhang X L, *et al.* Definition and characteristics of PM_{2.5} background concentration in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 7-12.
- [19] 张霖琳, 刀谓, 王超, 等. 我国四个大气背景点颗粒物浓度及其元素分布特征[J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 70-76.
Zhang L L, Dao X, Wang C, *et al.* Characterization of air particulate matters and elements in four national background locations, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(1): 70-76.
- [20] 苏彬彬, 许樛洋, 张若宇, 等. 区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2871-2877.
Su B B, Xu J Y, Zhang R Y, *et al.* Influence of atmospheric transport on air pollutant levels at a mountain background site of East China[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2871-2877.
- [21] Pope C A, Burnett R T, Thurston G D, *et al.* Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathway of disease[J]. *Circulation*, 2004, **109**(1): 71-77.
- [22] Sokolik I N, Winker D M, Bergametti G, *et al.* Introduction to special section: outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**(D16): 18015-18027.
- [23] 苏彬彬, 刘心东, 陶俊. 华东区域高山背景点 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 背景值及污染特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 455-461.
Su B B, Liu X D, Tao J. Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in mountain background region of east China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 455-461.
- [24] Whitby K T. The physical characteristics of sulfur aerosols[J]. *Atmospheric Environment*, 1978, **12**(1-3): 135-159.
- [25] 刘子锐, 孙扬, 李亮, 等. 2008 奥运和后奥运时段北京大气颗粒物质量浓度和数浓度比对研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 913-923.
Liu Z R, Sun Y, Li L, *et al.* Particle mass concentrations and size distribution during and after the Beijing Olympic Games[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 913-923.
- [26] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [27] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT-4 modelling system for trajectories, dispersion, and deposition[J]. *Australian Meteorological Magazine*, 1998, **47**: 295-308.
- [28] 石春娥, 翟武全, 杨军, 等. 长江三角洲地区四省会城市 PM₁₀ 污染特征[J]. *高原气象*, 2008, **27**(2): 408-414.
Shi C E, Zhai W Q, Yang J, *et al.* Characteristics of PM₁₀ pollution at four provincial cities in Yangtze River Delta district [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(2): 408-414.
- [29] Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-Method and applications [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(14): 2575-2581.
- [30] 赵素平, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 687-693.
Zhao S P, Yu Y, Chen J B, *et al.* Size distribution properties of atmospheric aerosol particles during summer and autumn in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 687-693.
- [31] 张涛, 陶俊, 王伯光, 等. 广州市春季大气颗粒物的粒径分布及能见度研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2010, **27**(3): 331-337.
Zhang T, Tao J, Wang B G, *et al.* Research on size distribution of particles and its impact on visibility in urban Guangzhou during spring [J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, **27**(3): 331-337.
- [32] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京夏末秋初大气细粒子中水溶性盐连续在线观测研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(3): 459-465.
Zhang K, Wang Y S, Wen T X, *et al.* On-line analysis the water-soluble chemical of PM_{2.5} in late summer and early autumn in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(3): 459-465.
- [33] Wang Y S, Yao L, Wang L L, *et al.* Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 14-25.
- [34] 吕子峰, 郝吉明, 段菁春, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. *环境科学*, 2009, **30**(4): 969-975.
Lv Z F, Hao J M, Duan J C, *et al.* Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summertime[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(4): 969-975.
- [35] 阮氏明月. 中国区域发展政策及其对越南区域发展的影响和借鉴[D]. 上海: 华东师范大学, 2014. 111-118.
- [36] 李小波. 越南海洋经济的发展及其对南海政策的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2014. 49-59.
- [37] 尹航, 丁焰, 葛蕴珊, 等. 内河船舶柴油机的实际排放特征[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(5): 470-476.
Yin H, Ding Y, Ge Y S, *et al.* Emissions characteristics of diesel engines for inland waterway vessels in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(5): 470-476.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)