

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源 梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)

北京大气 PM_{2.5} 与惰性 SiO₂ 的生物毒性比较 刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)

APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析 高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)

2000 ~ 2014 年北京市 SO₂ 时空分布及一次污染过程分析 程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)

利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因 周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)

长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟 张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)

珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征 刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)

春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成 李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)

洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究 庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)

大辽河主要污染源营养盐输入特征 马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)

三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析 张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)

不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究 李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)

周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联 王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)

华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例 孔晓乐, 王仕琴, 赵焱, 袁瑞强 (4051)

某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征 崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)

乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征 贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)

青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征 梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)

多环芳烃在岩溶地下河表层沉积物-水相的分配 蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)

降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析 江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)

重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力 任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)

三峡水库消落带植物汞的分布特征 梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)

物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响 王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)

超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果 魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)

载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7 王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)

TiO₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析 陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)

单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究 张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)

间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)

单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究 杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)

水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)

氨氮对 AOB 抑制的形态及规律 崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)

厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水 张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)

同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征 冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)

HCO₃⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响 李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)

活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响 徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)

温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响 谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙酉, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)

污染场地修复技术筛选方法及应用 白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)

基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析 杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)

大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价 张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)

缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响 李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)

不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响 兰木岭, 高明 (4252)

生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征 杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)

不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)

组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究 朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文毅, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)

水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)

大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估 王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)

覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构 邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)

阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能 梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)

应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的萘和苯并芘 李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)

《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)

珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征

刘建¹, 吴兑^{1,2,3*}, 范绍佳¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 暨南大学大气环境安全与污染控制研究所, 广州 510632; 3. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

摘要: 基于2014年4月~2015年3月珠江三角洲(珠三角)56个环境监测子站以及9个城市的逐时PM_{2.5}浓度数据,对珠三角地区的颗粒物污染进行了系统聚类分析和相关性分析. 结果表明,珠三角地区PM_{2.5}的区域污染可分为3种类区,一为东莞、广州、佛山以及江门(I型);二为中山、珠海、深圳、惠州(II型);三为肇庆单独为一类(III型). 其在一年中所出现的天数分别为47、7和128 d. I型污染时,除珠海、深圳和惠州外,其他城市的PM_{2.5}浓度普遍较高;II型污染时,整个珠三角地区的PM_{2.5}浓度均要高于50.0 μg·m⁻³;III型污染时,PM_{2.5}浓度较高的区域主要集中在肇庆、广州以及佛山地区. 同时利用珠三角地区4台主要的风廓线雷达数据研究3种污染类型所对应的垂直风场特征发现: I型与III型污染状况所对应的风廓线相似,低层受东南风控制,高层为西南风,III型的风速大于I型风速,而II型污染时的风速明显大于其他两种类型,其低层几乎均受偏北风影响,而高层则受偏西风的影响. II型污染所对应的边界层中低层的风向变化很小,而其他两类则有一定的变化. 同时II型的通风量要明显大于其他两种类型,其中I型的通风量最小. 珠三角受偏北风作用时,整个珠三角的PM_{2.5}浓度较高;当盛行东南风时,I、II区的PM_{2.5}浓度相对较低,而III区的污染相对较重.

关键词: 聚类分析; 区域分布; 风廓线; 局地循环指数; 通风量

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-3989-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.007

Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta

LIU Jian¹, WU Dui^{1,2,3*}, FAN Shao-jia¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Institute of Atmospheric Environmental Safety and Pollution Control, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 3. Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorology Administration, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Based on the data of hourly PM_{2.5} concentration of 56 environmental monitoring stations and 9 cities over the Pearl River Delta (PRD) region, the distributions of PM_{2.5} pollution in PRD region were analyzed by systematic cluster analysis and correlational analysis. It was found that the regional pollution could be divided into 3 types. The first type was the pollution occurred in Dongguan, Guangzhou, Foshan and Jiangmen (I type), and the second type was the pollution occurred in Zhongshan, Zhuhai, Shenzhen and Huizhou (II type), while the last type was the pollution only occurred in Zhaoqing (III type). During the study period, they occurred 47, 7 and 128 days, respectively. During events of pollution type I, except Zhuhai, Shenzhen and Huizhou, the PM_{2.5} concentrations of other cities were generally high, while the PM_{2.5} concentration in whole PRD region was over 50.0 μg·m⁻³ during events of pollution type II. The regions with higher PM_{2.5} concentration was mainly concentrated in Zhaoqing, Guangzhou and Foshan during events of pollution type III. The wind data from 4 wind profile radars located in PRD region was used to study the characteristics of vertical wind field of these 3 pollution types. It was found that the wind profiles of type I and III were similar that low layer and high layer were controlled by the southeast wind and the southwest wind, respectively. For type II, the low layer and high layer were influenced by northerly wind and westerly wind, respectively. Compared with other types, the wind speed and ventilation index of type II were much higher, and the variation of wind direction at lower-middle-layer was much smaller. When PRD region was influenced by northerly winds, the PM_{2.5} concentration in the entire PRD region was higher. When PRD region was controlled by southeast wind, the PM_{2.5} concentrations of I and II areas were relatively lower, while the pollution in III area was relatively heavier.

Key words: cluster analysis; regional distribution; wind profile; recirculation factor; ventilation index

随着城市化进程的不断加快,城市的规模也日趋庞大,逐渐形成了范围广、人口多、工业集中的大型城市群. 珠三角城市群作为我国城市化程度最高、经济发展最快的城市群之一,其在经历快速的经济发展的同时,也面临着严重的大气污染. 其中以高浓度颗粒物造成的区域性灰霾天气已经是珠三角

地区空气污染的主要形式^[1-3]. 灰霾天气是指相对

收稿日期: 2015-05-13; 修订日期: 2015-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275017, 41475004); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406031); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB403403)

作者简介: 刘建(1989~),男,博士研究生,主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: liujian_904@foxmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wuduizg@qq.com

湿度低于 90%,且能见度低于 10 km 的低能见度事件^[4]. 研究发现,珠三角地区的灰霾天气主要由高浓度的细粒子造成,严重影响公众的身体健康、生产生活以及交通运输等^[5-8].

随着区域性污染日益严重,近些年,有越来越多关于区域性大气污染的研究. 其中康娜等^[9]利用聚类分析等研究发现在典型污染时段我国主要的污染区域和 86 个城市可以划分为 7 个区域,并分析了造成区域性污染的天气型原因;高会旺等^[10]利用我国 73 个城市近 5 年的空气污染指数(API)数据研究得到 73 个城市可分为 6 个类群;而段玉森等^[11]利用 EOF 分析发现我国 47 个主要城市的空气污染却可分为 10 个区域. 在珠三角地区,徐伟嘉等^[12,13]利用地统计学方法研究了珠三角地区 $PM_{2.5}$ 的时空变异特性;有研究者发现珠三角霾天气具有区域性特征,且其与区域内静小风有关^[14-17];范绍佳等^[18]研究提出珠三角地区边界层概念模型指出在偏北干冷空气、偏南暖湿气流以及珠三角上空的下沉气流共同作用下,在珠三角地区易形成区域性污染;王淑兰等^[19]利用 CALPUFF 模拟系统模拟发现珠三角城市间空气污染具有相互贡献与输送;此外还有大量有关台风等大型天气系统和海陆风等局地环流对珠三角区域污染的影响^[20-24]. 但是以往的研究大部分集中于分析地面气象场对区域污染的形成作用,且污染地区主要集中于广州以及周边城市,研究较少涉及整个珠三角地区以及垂直风场在不同范围的区域性污染形成过程中的作用. 而珠三角作为我国风廓线雷达分布最密集的地区之一,其为研究珠三角地区区域污染的垂直风场结构提供基础,且风廓线雷达在研究区域污染过程中已有大量应用^[25-29].

因此,本研究利用珠三角地区的高时间、高空间分辨率的 $PM_{2.5}$ 浓度数据以及主要的风廓线雷达数据,分析探讨了珠三角区域污染的分布以及其所对应的垂直风场特征.

1 材料与方法

本研究利用 2014 年 4 月~2015 年 3 月珠三角地区 56 个环境监测子站以及 9 个主要城市的逐时 $PM_{2.5}$ 的污染数据,采用系统聚类分析方法以及相关分析方法,分析得到珠三角地区 $PM_{2.5}$ 污染的区域分型,再结合珠三角区域内 4 台主要风廓线雷达的水平风速风向数据,分析出现不同类型区域污染时的垂直风场特征,包括局地环流指数(R 指数)的垂直变化、边界层通风量(VI)等. 珠三角地区主要的环

境监测子站和风廓线雷达如图 1 所示,其中从化、增城的风廓线可代表珠三角内陆地区的垂直风场结构,而珠海与深圳的风廓线可反映出珠江口东西岸沿海地区的垂直风场特征.

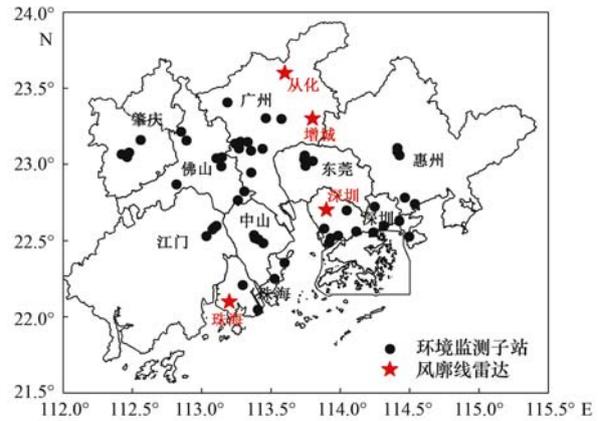


图 1 珠三角地区环境监测站点与主要风廓线雷达示意

Fig. 1 Map showing the environmental monitoring stations and main wind profile radars in PRD region

风场的局地环流指数(recirculation factor)能有效地表征风场的静稳性与输送过程的稳定性. 根据 Levy 等^[30]的研究, R 指数的计算公式如式(1)~(3)所示.

$$L = T \left[\left(\sum_{i=0}^{i=23} u_i \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{i=23} v_i \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$S = T \sum_{i=0}^{i=23} (u_i^2 + v_i^2)^{1/2} \quad (2)$$

$$R = 1 - L/S \quad (3)$$

式中, L 为风场的矢量累计输送距离; S 为风场的标量累计输送距离; T 为时间间隔,本研究使用逐时数据,故 $T = 1$; i 为时刻; R 为局地环流指数. R 越接近于 0 表明风向越稳定,通风性较好; R 越接近于 1 表明风向越不稳定,通风性较差.

边界层通风量(ventilation index, VI)是指边界层内累计的风速大小,其能表征风场对污染物的输送扩散能力^[25]. 其计算公式如式(4)所示.

$$VI = \sum_{i=1}^{i=\max} (h_i - h_{i-1}) \times V_i \quad (4)$$

式中, i 为该时刻风廓线数据中垂直高度从低到高第 i 个数据; h_i 为第 i 个数据对应的垂直高度($h_0 = 0$); V_i 为第 i 个数据对应的风速. 参考吴蒙等^[25]的研究,本研究设定的边界层高度为 2 000 m.

2 结果与分析

2.1 区域污染分类及特征

根据珠三角 9 个城市的逐时 $PM_{2.5}$ 浓度数据,采

用系统聚类方法研究发现,珠三角地区 $PM_{2.5}$ 的区域污染可分为 3 种类区,一为东莞、广州、佛山以及江门;二为中山、珠海、深圳、惠州;三为肇庆单独为一类.再根据表 1 所示的珠三角地区主要城市 $PM_{2.5}$ 污染的皮尔逊相关系数也可以发现,东莞、广州、佛山以及江门之间 $PM_{2.5}$ 污染的相关性较高,普遍高

于 0.8 或者接近于 0.8,同时中山、珠海、深圳以及惠州之间的相关性也较高,其中中山与珠海、深圳的相关性高达 0.88 和 0.85,而深圳与惠州的相关系数也较高,为 0.84.与其他城市不同,肇庆与珠三角地区其他城市的相关性均不高,这也说明肇庆的 $PM_{2.5}$ 污染具有其独特的污染特征.

表 1 珠三角地区 9 个城市 $PM_{2.5}$ 污染的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficients of $PM_{2.5}$ concentrations among 9 cities in PRD region

	东莞	广州	佛山	中山	江门	珠海	深圳	惠州	肇庆
东莞	1.00								
广州	0.86**	1.00							
佛山	0.85**	0.85**	1.00						
中山	0.77**	0.63**	0.73**	1.00					
江门	0.78**	0.70**	0.86**	0.82**	1.00				
珠海	0.74**	0.58**	0.69**	0.88**	0.79**	1.00			
深圳	0.79**	0.64**	0.69**	0.85**	0.75**	0.90**	1.00		
惠州	0.81**	0.73**	0.71**	0.74**	0.70**	0.74**	0.84**	1.00	
肇庆	0.64**	0.67**	0.74**	0.52**	0.64**	0.49**	0.54**	0.54**	1.0

1) $N=7949$, ** 表示在 0.01 水平上显著相关

为了进一步研究珠三角地区不同污染分布时的污染特征,本次研究中定义当东莞、广州、佛山以及江门的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度高于同日期珠三角地区 $PM_{2.5}$ 的区域平均浓度时,该时日出现第一类污染型(I型),该区域简称为 I 区;而当中山、珠海、深圳以及惠州的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度高于同日期珠三角地区 $PM_{2.5}$ 的区域平均浓度时,该时日出现第二类污染型(II型),该区域简称为 II 区;最后,当肇庆地区的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度为整个珠三角同日期的最高值时,该时日出现第三类污染型(III型),该区域简称为 III 区.统计发现,于 2014 年 4 月至 2015 年 3 月里,出现 I 类污染状况的天数为 47 d, II 类污染状况的天数仅有 7 d,而出现 III 类污染状况的天数却高达 128 d,这说明肇庆地区的 $PM_{2.5}$ 污染在珠三角区域内处于较为严重的状态,同时沿海地区的空气质量全年较好.

如图 2(a)所示,就 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度而言,整个珠三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度几乎都低于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;珠江口东岸的 $PM_{2.5}$ 低于珠江口西岸,其中深圳、惠州地区的 $PM_{2.5}$ 普遍低于 $35.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;且珠三角内陆地区的 $PM_{2.5}$ 浓度要明显高于沿海地区.图 2(b)、2(c)以及 2(d)分别为 I、II、III 型污染状况时整个珠三角地区的 $PM_{2.5}$ 污染分布.如图 2 所示,当出现 I 型污染状况时,整个珠三角珠海、深圳以及惠州的 $PM_{2.5}$ 浓度要明显低于其他城市,其他城市的 $PM_{2.5}$ 浓度普遍较高;而出现 II 型污染状况时,整个

珠三角地区的 $PM_{2.5}$ 浓度较高,几乎均高于 $50.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中沿海地区的浓度最高,这说明当出现 II 型污染是珠三角空气质量最差的时期.对于 III 型污染状况时, $PM_{2.5}$ 浓度较高的区域主要集中在肇庆、广州以及佛山地区,这也说明当肇庆出现珠三角地区最严重污染时,广佛地区的污染也较重;相反以深圳、惠州为代表的珠江口东岸地区以及江门地区的 $PM_{2.5}$ 浓度较低.

不同污染分布时的主要城市 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化如图 3 所示.城市间的 $PM_{2.5}$ 浓度水平不同,与图 2 分析结果相似.对于年平均和 I 型污染,全天 9 个城市的污染水平可以分为两部分,分别为珠三角内陆城市和东南沿海城市[图 3(a)];至于 II 型污染,不同城市 $PM_{2.5}$ 浓度于 15:00 前有较明显的差距,而后污染水平接近;III 型污染整个珠三角污染水平则可划分 3 个层次,分别为 I 区、II 区以及 III 区.不同污染类型所对应的 $PM_{2.5}$ 日变化总体相似,即 $PM_{2.5}$ 夜间的浓度较高,而上午 $PM_{2.5}$ 浓度有上升趋势,而午后浓度明显下降.

2.2 垂直风廓线

为了细化研究不同污染类型所对应的垂直风场特征,利用珠三角地区 4 台主要风廓线雷达的水平风向风速数据,分析研究了当出现不同区域污染所对应的 24 h 逐时风廓线特征.如图 4~6 所示,为 3 种不同污染类型总体平均的风廓线图.

不同的垂直风场结构对应不同的污染物输送过

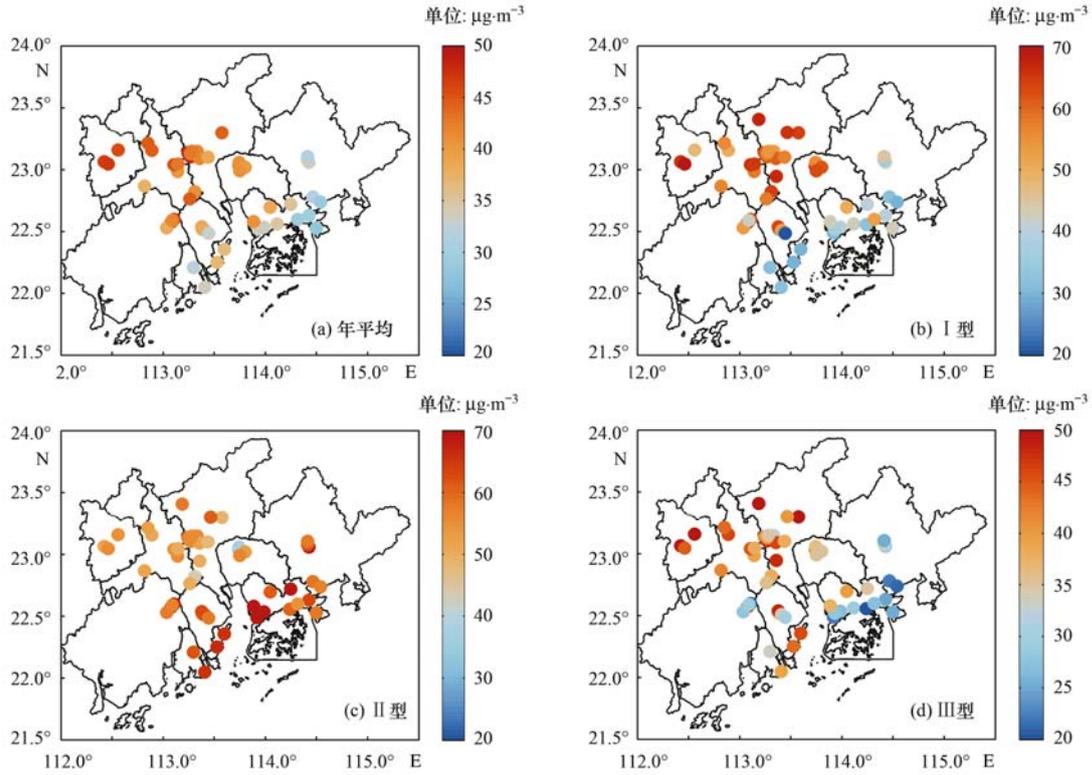


图2 珠三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度分布

Fig. 2 Distributions of $PM_{2.5}$ in PRD region

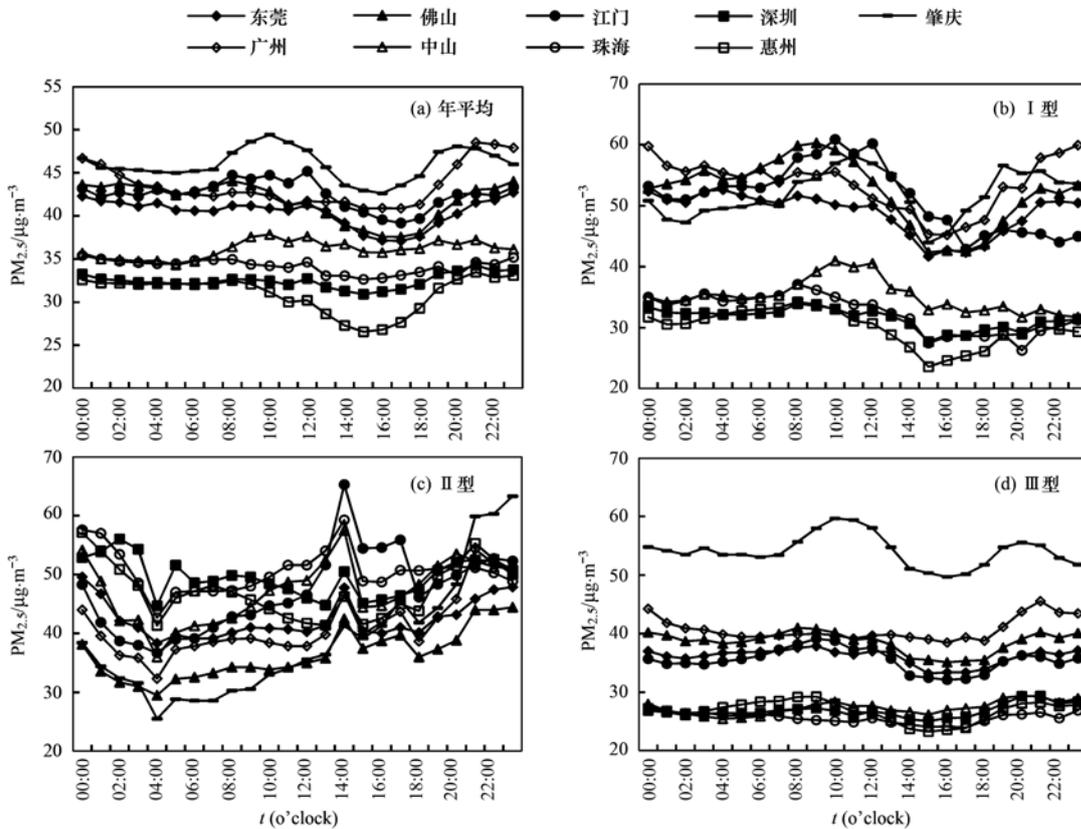


图3 9个主要城市 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of $PM_{2.5}$ concentrations in 9 main cities

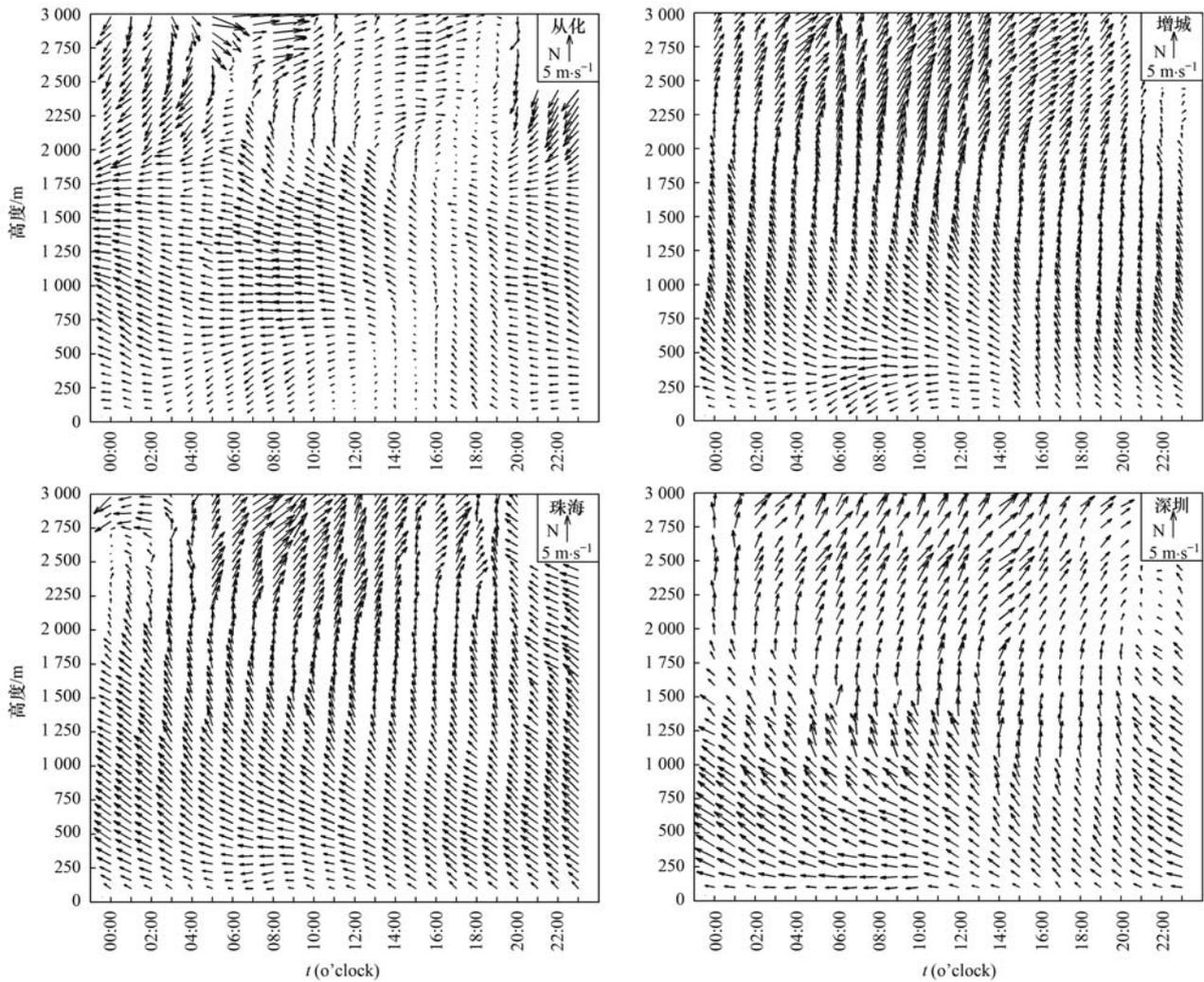


图4 珠三角地区 I 型污染时风廓线

Fig. 4 Wind profiles during the pollution type I occurred in PRD region

程. 图4为当珠三角处于I型污染状况时, 珠三角地区主要风廓线雷达的24 h逐时风廓线. 从中可知, 从化底层以偏东风(东南风)为主, 白天高层有明显的风向切变, 由东南风顺时针转变为西南风, 且切变位置也有明显的变化. 中午时切变位置最高可达2000 m以上, 而至下午风向切变的位置主要位于1750 m左右. 从化边界层中层出现风速极大层, 主要出现在750~1750 m, 且主要出现在凌晨至上午时段. 而午后至凌晨, 边界层整层的风速均要比上午时的风速小. 与从化风廓线相似, 增城的风廓线底层也是以偏东风位置, 在垂直方向上表现出风向切变, 且上午主要切变出现的位置高于下午, 不同的是增城风廓线中层出现小风层, 底层的偏东风以及高层的东南风的风速均较大. 不同于内陆风廓线, 沿海地区受海陆风作用明显, 其(珠海、深圳)风廓线特征也不同, 表现出底层的风速大于高层, 且底层的风速

也要大于内陆地区底层的风速. 相似的是其风向也表现出明显的垂直切变, 也为东南风顺时针转变为西南风, 且主要的切变位置也具有明显的日变化, 上午较高, 下午较低.

对比图2(b)可以发现, 以东莞、广州、佛山为代表的珠三角内陆地区在受边界层中低层的东南风作用下, 其 $PM_{2.5}$ 浓度要显著高于沿海地区. 边界层内东南风能够有效地将沿海地区的污染物输送至珠三角内陆地区, 导致该区域内的 $PM_{2.5}$ 浓度较高.

当珠三角地区出现II型污染时, 珠三角地区的风廓线与I型污染有明显不同. 珠三角处于I型时珠三角中低层的主导风向为东南风, 而处于II型污染时, 珠三角中低层的主导风向为偏北风, 其中从化、珠海底层出现明显的北风. 这种边界层内风向的转变可能是污染型变化的重要原因. 除了风向的变化, II型所对应的风廓线的风速也要明显大于I

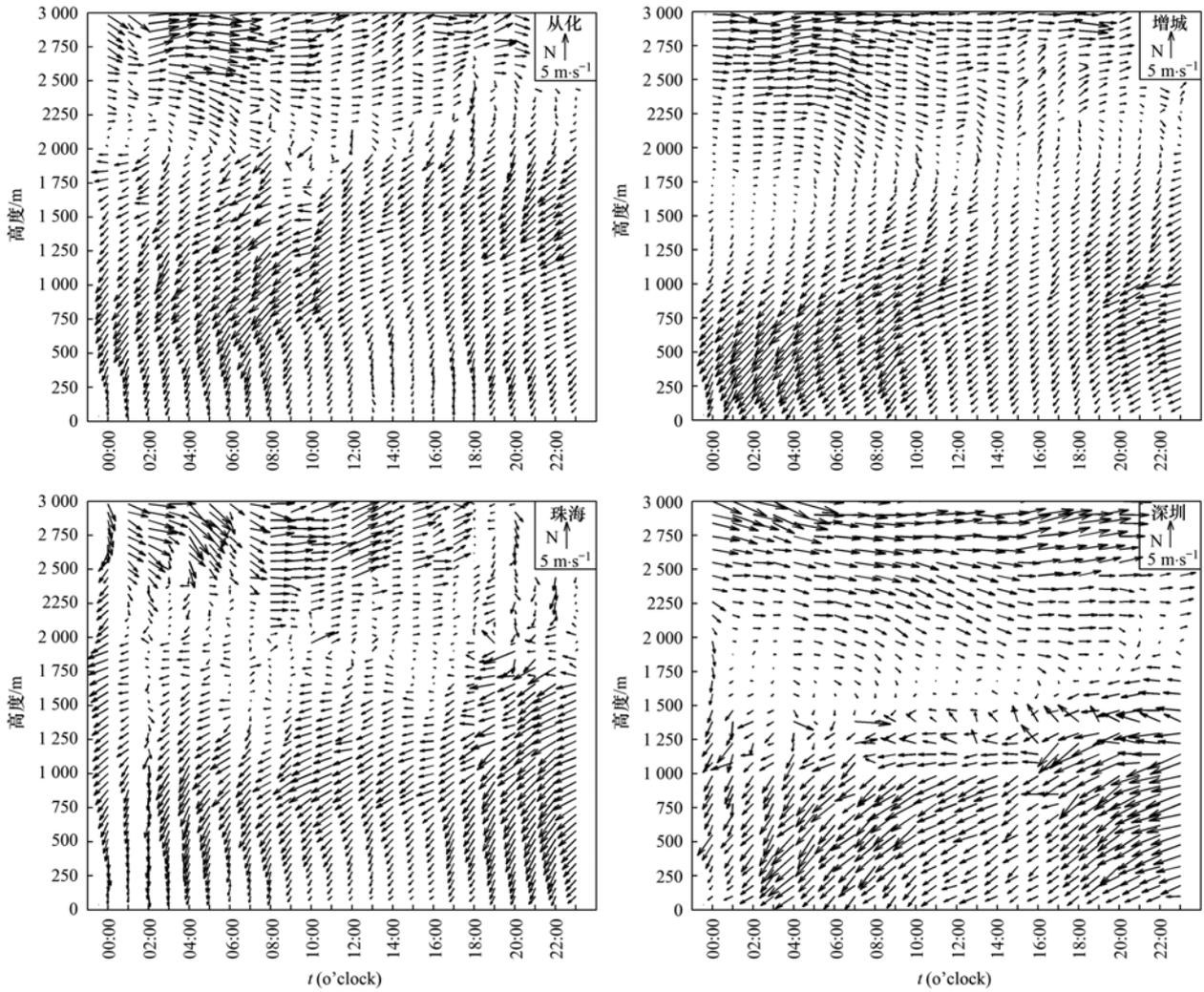


图5 珠三角地区II型污染时的风廓线

Fig. 5 Wind profiles during the pollution type II occurred in PRD region

型所对应的风速。

如图5所示,所有风廓线均有显著的风向切变,均表现为底层到中层时的顺时针切变,后中层到高层的逆时针切变.先有偏北风顺时针转变为东北风,随后在逆时针切变为偏西风.从化和增城风廓线作为珠三角内地地区风廓线,其也有所不同,其中从化的风廓线划分为四层,分别为最底层的风速较小的偏北风,中低层风速较大的东北风,中高层风速较小的东北风或者西北风以及高层风速较大的偏西风.从化风廓线底层偏北风的高度也有明显的日变化,15:00时底层偏北风的高度达到最大值.而增城的风廓线可分为3层,首先是较大风速,主导风为东北风的边界层底层,高度约为0~1000m,中午和夜间的高度较高;再次为风速较小的中层,高度约为1000~1750m;高层则受风速较大的偏西风控制.相同的是从化和增城的风廓线均表现出中午与夜间

的风速要大于下午的风速.珠海的风廓线与从化的相似,也可分为4层,分别为较小偏北风控制的最底层,中低层、中高层以及高层,其中中高层为东北风转偏西风的过渡层结,风速较小.作为代表沿海地区风场结构的深圳风廓线也有其特点,其低层盛行偏东风,以东北风为主,全天高度几乎不变,都维持在1500m左右,小风层也较明显,高度为1500~2000m,而高层则受风速较大的偏西风控制.

如图6所示,III型污染时的风廓线与I型污染时的风廓线相似,底层均表现为东南风,而高层则转变为西南风;从化风廓线于中层出现风速极大层,而增城、珠海以及深圳的风廓线则在低层和高层的风速较大.但是值得注意的是,相比于I型污染状况所对应的风廓线风速,III型污染状况所对应的风速普遍更高.

再对比图2(b)与图2(d),可以发现较小风速

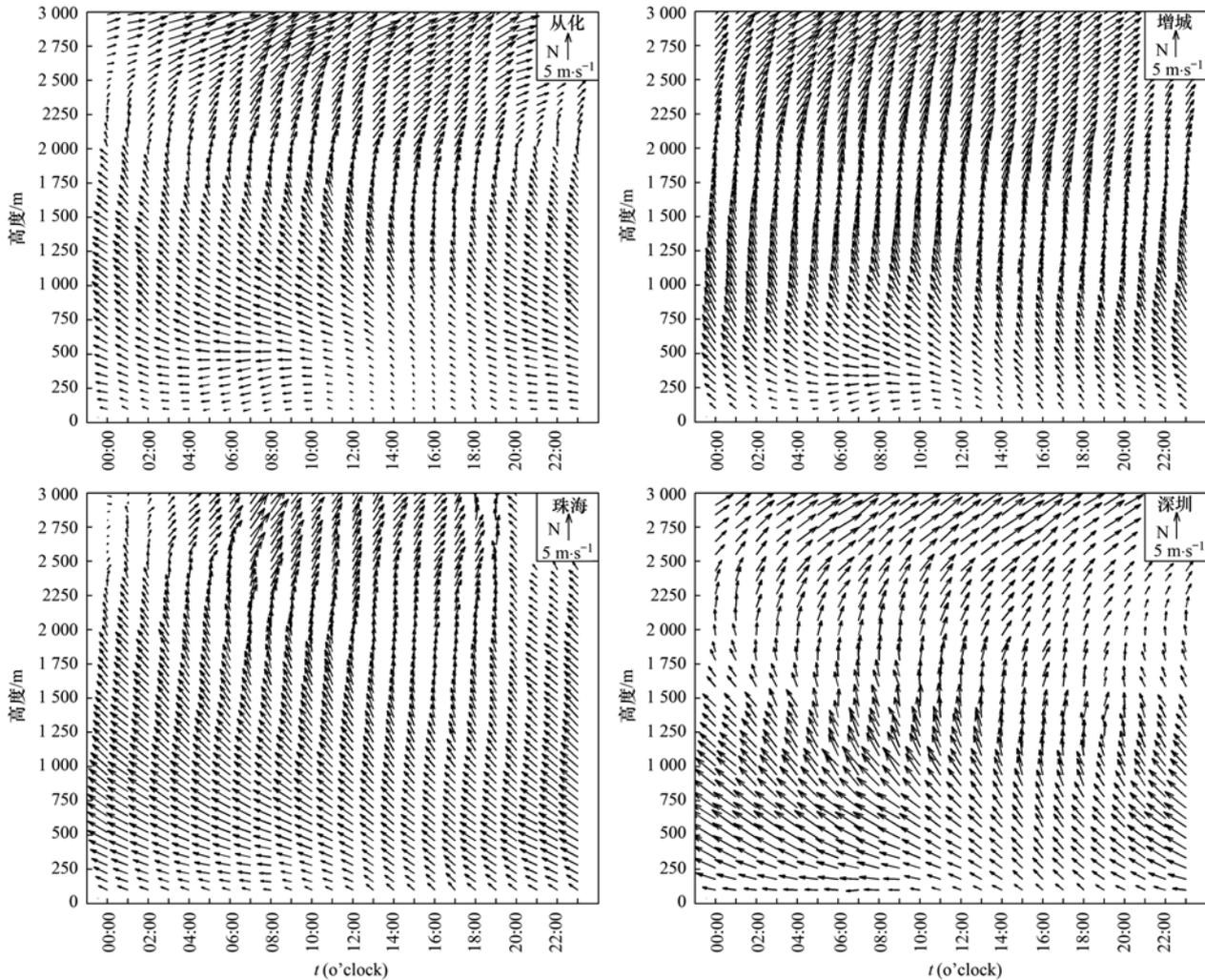


图 6 珠三角地区为Ⅲ型污染时的风廓线

Fig. 6 Wind profiles during the pollution type III occurred in PRD region

东南风作用下,整个珠三角内陆地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均较高,即其也伴随着高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 在肇庆地区出现,而在较大风速东南风作用下,风场对珠三角沿海地区污染物的清除过程明显,Ⅲ型污染对应的东南沿海地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显低于 I 型污染所对应的浓度,同时Ⅲ型污染对应珠三角内陆地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也明显更低.这说明虽然东南风能够将污染物输送至肇庆等珠三角内陆城市,但是当风速较大时,其清除作用也较大,这与张人文等^[15]研究指出的区域内风速的大小与区域污染是否形成有密切关系的结论一致.

值得注意的是,3种污染状况对应的风廓线均出现午后的风速明显低于其他时刻,而对比图3发现午后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的快速下降可能与较弱的区域输送和午后强湍流有关.

2.3 R 指数垂直变化

风场的局地循环指数(R 指数)能够有效地表征风场的静稳程度以及风场输送过程的稳定性,结

合风速也可以较好地反映出风场的输送能力.为了更精确地研究不同污染状况时的垂直风场特征,本研究利用风廓线雷达数据,给出珠三角地区 R 指数随高度的变化情况,如图7所示.

如图7所示,发现Ⅱ型污染状况所对应的 R 指数的垂直变化情况与其他两种污染类型相比具有明显的不同.在1250 m高度下,Ⅱ型污染时4个地区的 R 指数均低于0.5,其中在1000 m高度下, R 指数的大小接近于0;1250 m高度以上,随着高度的增加, R 指数也有一个快速增长的过程,其约在2000 m高度处达到最大值,其中珠海地区的 R 指数在2000 m的值接近于1.0;后再随着高度的增加快速减小.总体表现出1250 m高度以下以及2500 m高度以上 R 指数相对较小,而1250~2500 m过渡阶段 R 指数相对较大.Ⅰ型污染状况与Ⅲ型污染状况所对应的 R 指数垂直分布具有很大的相似性,其都在垂直方向表现出一定的稳定性,随高度的变化

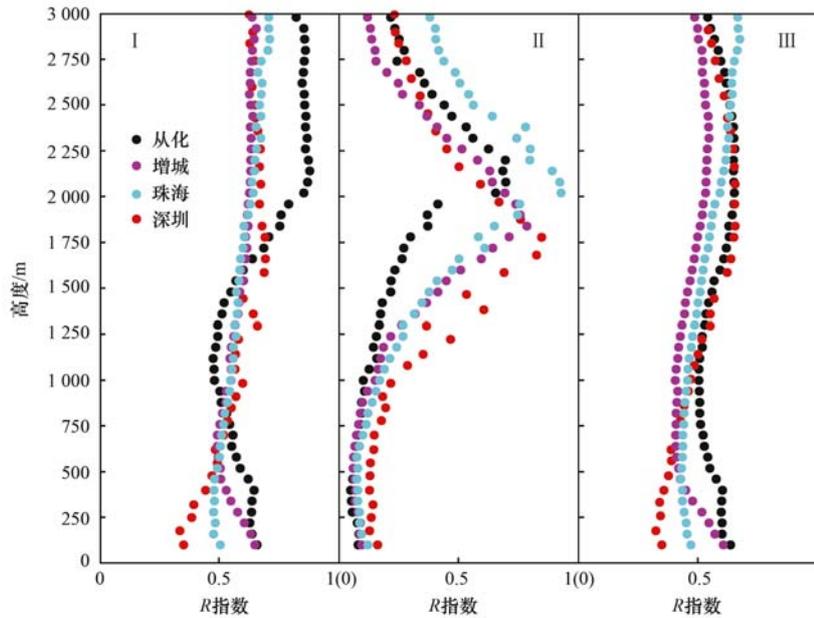


图7 珠三角地区三类不同污染状况时 R 指数的垂直变化

Fig. 7 Vertical variations of Recirculation Factors of these three pollution types in PRD region

不是很明显,均在 0.5 左右波动.值得注意的是,相对其他地区的 R 指数,珠海地区在 I 型污染状况时的 R 指数在高度 2 000 m 以上数值较大.

较小的 R 指数表明风向较稳定,即风场的输送过程变化较小;相反较大的 R 指数表明风向变化较大,风场的输送过程也有较大变化.有研究指出区域污染 R 指数与能见度和区域污染事件的形成有显著相关^[25,28,31].结合图 7 可知,当珠三角地区出现 II 型污染状况时,整个珠三角中低层和高层的风向较为稳定,而中高层的风向变化较大;当珠三角地区出现 I、III 型污染状况时,珠三角地区的风向具有一定的变化,整个边界层具有相似的变化.

2.4 边界层通风量

边界层通风量的大小能较好表征边界层内风场对污染物的输送作用的强弱.表 2 为不同污染状况所对应的珠三角地区各地小时平均的边界层通风量.从中可知,总体而言 II 型污染状况所对应的边界层通风量大于 III 型污染状况,均大于 $7\ 000\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; I 型污染状况对应的通风量最小,几乎都低于 $5\ 000\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.而就地区而言,珠海地区的边界层通风量最大,最大可达 $9\ 104.7\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (II 型),从化地区的通风量最小,最低值为 $3\ 254.5\ \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (I 型).

由表 2 可说明,当珠三角地区出现 II 型污染状况时,珠三角边界层内风场对污染物具有最强的输送作用;而 I 型污染状况对应的珠三角地区边界层内风场的输送作用相对有限.

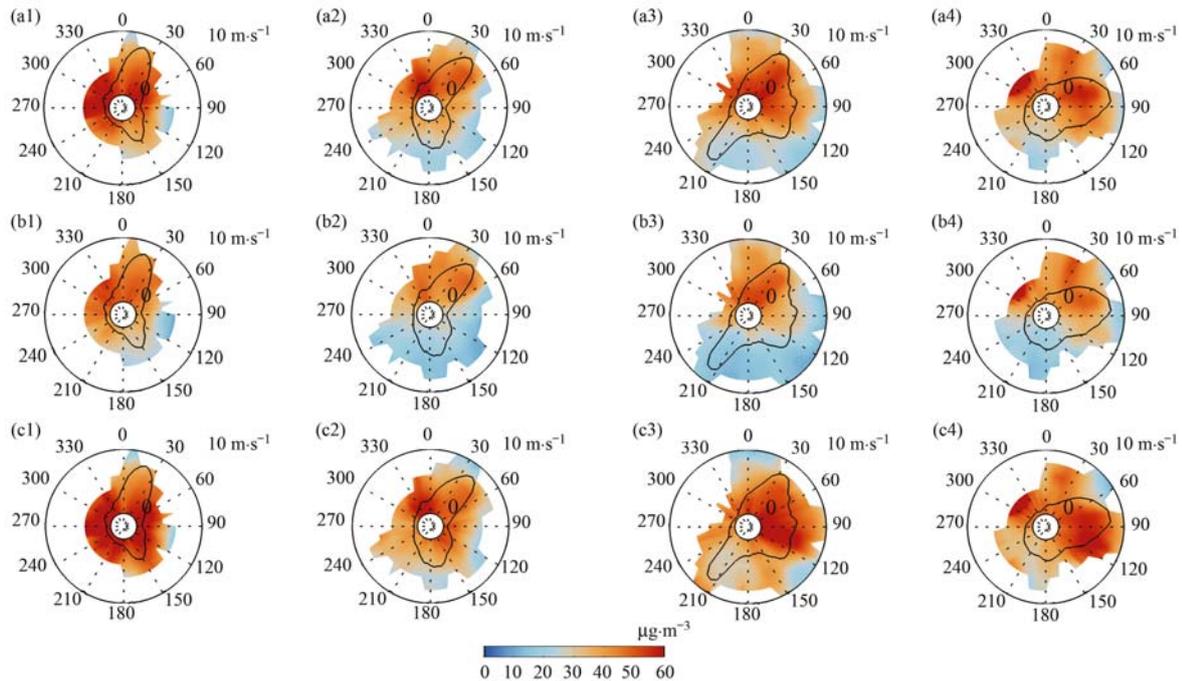
表 2 珠三角不同污染状况下各点的小时平均通风量/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Table 2 Hourly average Ventilation Index of the three pollution types in PRD region/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

项目	从化	增城	珠海	深圳
I 型	3 254.5	4 377.2	5 129.8	4 790.1
II 型	8 897.2	8 602.6	9 104.7	7 191.8
III 型	4 404.9	6 060.2	6 671.2	5 992.3

以往的研究^[25]仅考虑污染日与非污染日时通风量的大小,未考虑不同风向对区域污染形成的影响.本次研究结合珠三角地区的风向、风向变化情况以及通风量大小,对比图 2 中各污染类型中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布,可以发现当珠三角受较大的偏北风作用,且风向变化不大时,整个珠三角易形成较高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布;而受东南风作用时,东南沿海地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相比于珠三角内陆地区要明显更低;同时当东南风风速较大时,珠三角边界层通风量较大,整个珠三角地区的污染物浓度要小于东南风较小时,此时在肇庆地区易形成整个珠三角地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的峰值.

利用风廓线雷达近地层(150 m 以下)的风向风速数据和对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据研究得到 3 个区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度风向风速分布状况.如图 8 所示,当珠三角地区受偏北风作用,尤其是东北风和西北风, I、II 区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高;相反当受东南风作用时, I、II 区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低.对于 III 区的污染风向风速分布状况,其与 I、II 区明显不同,主要



a. I; b. II; c. III; 1. 从化; 2. 增城; 3. 珠海; 4. 深圳

半径方向为风速大小, 范围为 $0 \sim 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 实线为风向频率分布; 色标为 $\text{PM}_{2.5}$ 在该风速风向下的浓度

图 8 I、II、III 污染区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度于从化、增城、珠海和深圳风廓线雷达对应的风向风速分布

Fig. 8 Wind Dependency maps of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in I, II and III areas from Conghua, Zengcheng, Zhuhai and Shenzhen wind profile radar

区别在于当珠三角地区盛行东南风, 尤其当沿海地区的东南风速较大时, III 区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显偏高; 而且在受偏北风作用时, 该区域的污染也较严重。

3 结论

(1) 珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 的区域污染可分为 3 种类区, 一为东莞、广州、佛山以及江门; 二为中山、珠海、深圳、惠州; 三为肇庆单独为一类. 2014 年 4 月~2015 年 3 月中, I、II、III 型污染状况出现的天数分别为 47、7 和 128 d.

(2) 整个珠三角地区年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度几乎都低于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 东岸地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于西岸, 内陆地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度要明显高于沿海地区. I 型污染时, 珠海、深圳和惠州的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度要明显低于其他城市; II 型污染时, 整个珠三角地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均要高于 $50.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; III 型污染时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高的区域主要集中在肇庆、广州以及佛山地区, 相反以深圳、惠州为代表的珠江口东岸地区和江门地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低。

(3) I 型与 III 型污染状况所对应的风廓线相似, 低层受东南风控制, 高层为西南风, III 型的风速要大于 I 型风速. II 型污染状况的风速明显大于其

他两种类型, 其低层几乎均受偏北风影响, 而高层则受偏西风的影响. II 型污染状况所对应的边界层中低层的风向变化很小, 而其他两类则有一定的变化. 同时 II 型的通风量要明显大于其他两种类型, 其中 I 型的通风量最小。

(4) 珠三角受偏北风作用时, 整个珠三角的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高; 当盛行东南风时, I、II 区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低, 而 III 区的污染相对较重。

参考文献:

- [1] 吴兑, 刘敬汉, 梁延刚, 等. 粤港细粒子($\text{PM}_{2.5}$)污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2660-2669.
- [2] 陈欢欢, 吴兑, 谭浩波, 等. 珠江三角洲 2001—2008 年灰霾天气过程特征分析[J]. 热带气象学报, 2010, 26(2): 147-155.
- [3] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
- [4] 吴兑. 再论都市霾与雾的区别[J]. 气象, 2006, 32(4): 9-15.
- [5] 吴兑. 一种新的灾害性天气——灰霾[J]. 环境, 2008, (7): 38-39.
- [6] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-517.
- [7] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China [J].

- Atmospheric Environment, 2009, **43**(14): 2375-2377.
- [8] Wu D, Tie X X, Li C C, *et al.* An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(35): 6568-6577.
- [9] 康娜, 高庆先, 王跃思, 等. 典型时段区域污染过程分析及系统聚类法的应用 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(10): 1120-1127.
- [10] 高会旺, 陈金玲, 陈静. 中国城市空气污染指数的区域分布特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2014, **44**(10): 25-34.
- [11] 段玉森, 魏海萍, 伏晴艳, 等. 中国环保重点城市 API 指数的时空模态区域分异 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 384-391.
- [12] 徐伟嘉, 何芳芳, 李红霞, 等. 珠三角区域 PM_{2.5} 时空变异特征 [J]. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 951-957.
- [13] 徐伟嘉, 钟流举, 何芳芳, 等. 基于变异函数的大气污染物空间分布特征分析 [J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(12): 73-77, 84.
- [14] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究 [J]. 应用气象学报, 2008, **19**(1): 1-9.
- [15] 张人文, 范绍佳. 珠江三角洲风场对空气质量的影响 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2011, **50**(6): 130-134.
- [16] 吴蒙, 范绍佳, 吴兑, 等. 广州地区灰霾与清洁天气变化特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2012, **32**(8): 1409-1415.
- [17] 吴兑, 廖碧婷, 陈慧忠, 等. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展 [J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 248-264.
- [18] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(S1): 4-6.
- [19] 王淑兰, 张远航, 钟流举, 等. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响 [J]. 中国环境科学, 2005, **25**(2): 133-137.
- [20] 陈训来, 冯业荣, 范绍佳, 等. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响 [J]. 大气科学, 2008, **32**(3): 530-542.
- [21] 陈训来, 范绍佳, 李江南, 等. 香港地区空气污染的典型天气背景形势 [J]. 热带气象学报, 2008, **24**(2): 195-199.
- [22] 吴蒙, 范绍佳, 吴兑. 台风过程珠江三角洲边界层特征及其对空气质量的影响 [J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1569-1576.
- [23] 李明华, 范绍佳, 王宝民, 等. 秋季珠江口地区海风对城市群空气污染的影响 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, **47**(4): 114-117, 121.
- [24] Wu M, Wu D, Fan Q, *et al.* Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the pearl river delta in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(21): 10755-10766.
- [25] 吴蒙, 吴兑, 范绍佳. 基于风廓线仪等资料的珠江三角洲污染气象条件研究 [J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 619-626.
- [26] Chandrasekar A, Philbrick C R, Doddridge B, *et al.* A comparison study of RAMS simulations with aircraft, wind profiler, lidar, tethered balloon and RASS data over philadelphia during a 1999 summer episode [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(35): 4973-4984.
- [27] Valdenebro V, Gangoiti G, Albizuri A, *et al.* Build-up and decay of two ozone episodes through northern iberia and southern France-an inter-regional transport analysis [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(8): 1591-1603.
- [28] Pasch A N, Macdonald C P, Gilliam R C, *et al.* Meteorological characteristics associated with PM_{2.5} air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland Multiple Air Pollutants Study [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(39): 7026-7035.
- [29] Park S Y, Lee S H, Lee H W. Assimilation of wind profiler observations and its impact on three-dimensional transport of ozone over the Southeast Korean Peninsula [J]. Atmospheric Environment, 2014, **99**: 660-672.
- [30] Levy I, Dayan U, Mahrer Y. A five-year study of coastal recirculation and its effect on air pollutants over the East Mediterranean Region [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, **113**(D16): D16121.
- [31] 吴蒙, 范绍佳, 吴兑, 等. 广州地区近十年来霾天气近地层流场特征研究 [J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(5): 82-88, 98.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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
欧阳自远 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (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

国内外公开发行人