

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘峰, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)
《环境科学》征订启事 (547)	
《环境科学》征稿简则 (828)	
信息 (581, 933, 952)	

珠三角地区利用 $\text{PM}_{2.5}$ 反演气溶胶数浓度谱方法

李菲^{1,2}, 谭浩波³, 邓雪娇², 邹宇², 刘礼^{1,2}, 蔡明甫¹, 张芷言², 周声圳¹

(1. 中山大学大气科学学院, 广州 510275; 2. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510640; 3. 广东省生态气象中心, 广州 510640)

摘要: 大气气溶胶数浓度谱分布(PNSD)对于大气辐射和光学计算至关重要, 利用目前普遍观测的气溶胶质量浓度($\text{PM}_{2.5}$)来反演计算 PNSD, 能有效补充 PNSD 观测的不足, 对于需要 PNSD 信息的研究工作如大气能见度计算等有重要的实用价值. 本文利用 2014 年 11 月~2015 年 1 月在广州城市站进行同期连续观测的干气溶胶粒子的 $\text{PM}_{2.5}$ 、PNSD 数据进行客观分析, 建立了一种使用 $\text{PM}_{2.5}$ 反演 PNSD 的方法, 并评估了该方法的适用性. 结果表明该反演算法具有较好地适用性和稳定性, 对于积聚模态的 PNSD 反演效果较好, 但对于 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度的反演结果差异较大. 该反演方法将为珠三角地区的大气能见度计算和应用提供有利的依据和支撑.

关键词: 气溶胶质量浓度; 气溶胶数浓度谱分布; 气溶胶体积分数谱分布; 能见度; 珠三角

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0525-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807033

A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by $\text{PM}_{2.5}$ Mass Concentration in PRD

LI Fei^{1,2}, TAN Hao-bo³, DENG Xue-jiao², ZOU Yu², LIU Li^{1,2}, CAI Ming-fu¹, ZHANG Zhi-yan², ZHOU Sheng-zhen¹

(1. School of Atmospheric Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Ecological Meteorological Center, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The aerosol particle number size distribution (PNSD) is of great importance in calculating atmospheric radiation and optics. It can effectively supplement the inadequate observation of PNSD using the widely known aerosol mass concentration ($\text{PM}_{2.5}$) measurement to invert PNSD. It would be valuable for research that needs PNSD data, like atmospheric visibility calculation. This paper created a PNSD inversed method based on the statistics and parameterization of the dry aerosol $\text{PM}_{2.5}$ and PNSD dataset from the Guangzhou urban site's simultaneous measurements from November 2014 to January 2015. The inversed results appeared good in the accumulation mode, whereas more differences showed with higher $\text{PM}_{2.5}$ loading. The applicability and stability of this method makes it preferable. It would provide advanced technical support for the visibility calculation and application in PRD.

Key words: aerosol mass concentration; aerosol particle number size distribution; aerosol particle volume size distribution; visibility; Pearl River Delta

大气气溶胶能够通过散射和吸收地气系统的能量来直接影响太阳辐射; 尤其是可以活化作为云凝结核的大气气溶胶数浓度, 能够影响云滴的数浓度、云的光学特性和生命期, 从而间接影响地气系统的辐射平衡^[1~14]. 作为大气气溶胶的基本特征, 大气气溶胶数浓度谱分布 PNSD (particle number size distribution) 对于研究气溶胶对云和辐射的影响具有重要作用^[15~18]. 此外, PNSD 对于人体健康, 特别是心血管和肺部的疾病有明显的相关^[19~20], 而且根据已有研究表明, 气溶胶数谱分布特征的影响更甚于质量谱分布特征^[21, 22].

近年来, PNSD 被越来越多地作为基本参数用于大气辐射和光学计算, 比如气候变化模式的反馈机制、大气化学传输模式等模式^[23, 24]中. 其中, PNSD 在 MIE (基于 Mie 散射原理) 模式中被用于计算消光系数进而得到大气能见度^[25~27]. PNSD 对于

大气能见度计算至关重要, MIE 模式通过假设气溶胶未被活化的情况下, 利用干气溶胶粒径谱分布、环境相对湿度、气溶胶吸湿增长函数等数据集计算得到气溶胶消光系数, 进而计算大气能见度. 然而对于能见度影响显著的粒径范围 (小于 $2.5 \mu\text{m}$) PNSD 观测获取, 需要多种基于不同原理的仪器同步观测才能得到, 观测手段昂贵, 不利于业务化的应用. 但是如果能够使用较容易得到的测量参数来替代 PNSD, 将能有效补充 PNSD 观测的不足, 对于需要 PNSD 信息的研究工作比如大气能见度的计算

收稿日期: 2018-07-04; 修订日期: 2018-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC02020000); 广东省自然科学基金项目(2014A030313788); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41405133); 广东省科技计划重点项目(2010A030200012); 广东省气象局科技创新团队计划项目(2011103)

作者简介: 李菲(1981~), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: lifei@gmcc.gov.cn

更有重要价值. PM (干气溶胶) 的质量浓度测量在 PRD (珠江三角洲地区) 较为普遍, 可以基于 $PM_{2.5}$ 质量浓度 (空气动力学粒径小于等于 $2.5 \mu m$ 的气溶胶质量浓度) 观测来评估气溶胶数浓度和消光系数并得到更加广泛的运用. 尽管如此, 忽略气溶胶粒径谱分布型的变化, 同样的质量浓度也可能会在消光系数的计算中引入不确定性^[23]. 而且 PM 的布网多类型仪器的观测情况, 其测值与粒径谱分布的关系也有待进一步的分析和确定, 为了量化气溶胶粒径谱分布型的不确定性程度以及其与气溶胶质量浓度的关系, 亟需对历史性的气溶胶粒径谱分布情况和 PM 结合进行统计分析.

1 材料与方法

1.1 观测仪器

本文用于分析气溶胶粒径谱和质量浓度特征及其关系的观测数据, 主要来自于德国 GRIMM 公司出产的 GRIMM180 (单颗粒激光法气溶胶质量浓度监测仪), 美国 BGI 公司出产的 PQ200 (半自动膜采样仪器), 美国 TSI 公司出产的 SMPS 3936 (电迁移率粒径扫描法气溶胶粒径谱测量系统, $10 \sim 500 nm$) 和 APS 3321 (空气动力学法气溶胶粒径谱测量系统, $0.5 \sim 10 \mu m$) 在观测站点监测的资料.

由于以上观测仪器大多为利用抽气泵将环境空气采集至放置在室内的仪器主机中进行检测, 而观测站点位于华南高温高湿地区, 观测室内通过空调控制温度. 样气从室外进入室内温湿变化较大, 目前的观测手段暂时无法很好地保证样气进样过程中的温湿度不变, 所以该观测期间, 除 PQ200 将采样膜做恒温恒湿处理外, 其它各仪器在样气进入室内后均使用除湿管进行干燥, 以保证观测结果对环境空气的代表性和多仪器间的可比性. 所以本文中的分析讨论均只针对环境空气中的干气溶胶.

1.2 观测地点简述

本文观测数据来自广州番禺大气成分野外科学试验基地 ($113^{\circ}21'E$, $23^{\circ}00'N$), 该基地包括成分站和实验室: 番禺大气成分站 2005 年底建成并投入试运行, 可在一定程度上代表珠江三角洲城市群环境大气平均状况. 该观测站为钢平台上放置的方舱, 舱顶仪器进气口海拔约 $150 m$, 在距离该观测站约 $50 m$ 处.

1.3 资料处理方法

(1) PNSD 处理方法

由于目前仪器测量原理的限制, $0.01 \sim 2.5 \mu m$ 的 PNSD 无法由一台仪器完全测量. 本文中该粒径段的 PNSD, 通过联合 TSI 的 SMPS 3936 和 APS

3321 获取. 其中, 使用 SMPS 测量斯托克斯粒径为 $10 \sim 500 nm$ 的气溶胶数谱; 使用 APS 获取斯托克斯粒径为 $0.5 \sim 2.5 \mu m$ 的气溶胶数谱, 由于 APS 测量的是空气动力学等效粒径为 $0.5 \sim 10 \mu m$ 的气溶胶数谱, 所以通过假设气溶胶密度为 $1.7 \mu g \cdot m^{-3}$ ^[9], 先将空气动力学等效粒径转换为斯托克斯粒径, 再选取对应粒径的气溶胶数谱. 同步数谱数据分辨率为 $5 min$, 观测期间有效数据为 10 470 次, 有效采集效率高于 85% .

(2) $PM_{2.5}$ 处理订正

GRIMM180 仪器采用单粒子散射光学法自动测量 $PM_{10}/PM_{2.5}/PM_1$ 的质量浓度, 数据分辨率为 $5 min$, 观测期间有效数据 8 632 次, 有效采集效率高于 70% . PQ200 仪器采用 Impactor 的切割头, 通过控制采样泵每日自动膜采样后称重获取 $PM_{2.5}$. 由于观测原理的差异, 本文基于称重结果对 GRIMM180 的原始小时值进行订正.

(3) PNSD 拟合方法

本文通过分解模态后以对数正态分布模型 [式 (1)] 来拟合出 PNSD 和大气气溶胶体积分数谱 PVSD (particle volume size distribution), 并从中得到拟合的参数范围.

$$\frac{dC}{d \lg D} = \frac{C}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\lg D - \lg D_g)^2}{2(\lg \sigma_g)^2} \right] \quad (1)$$

式中, C 为对数正态分布的总数浓度 $N (\mu m \cdot cm^{-3})$ 或对数正态分布的总体积分数 $V (\mu m^3 \cdot cm^{-3})$, D 为气溶胶干粒径 (μm), D_g 为对数正态分布的几何平均粒径 (μm), σ_g 为对数正态分布的几何标准差.

本文选取观测期的前段 2014 年 11 月 22 日 ~ 12 月 23 日期间的实测 PNSD 分布的原始分辨率数据进行拟合; PNSD 数据可分为三或四模态分析, 但通过评估发现, 拟合时使用三模态 ($10 \sim 30 nm$, 模态 1; $30 \sim 130 nm$, 模态 2; $0.13 \sim 2.5 \mu m$, 模态 3) 比四模态的优度 R^2 较高 (如图 1). R^2 为 1 减去样本回归平方和在样本总平方和中所占的比率, 可用来衡量拟合结果的优度. 从图 1 中可看到三模态的 R^2 大多高于四模态的结果, 更加接近 1, 说明三模态拟合方法的拟合优度较高. 因此本文的拟合特征的分析与讨论内容中对于 PNSD 将基于分解为三模态拟合的结果, 对于 PVSD 基于单模态拟合的结果.

1.4 利用 $PM_{2.5}$ 质量浓度反演 PNSD 算法

本文通过拟合统计观测期前段 (统计段) 数据的特征参数, 尝试建立由 $PM_{2.5}$ 计算得到 PNSD 的算法, 并使用观测器后段 (评估段) 资料进行试算 $PNSD_{inv}$ (反演数谱结果) 后, 与同期的观测 PNSD

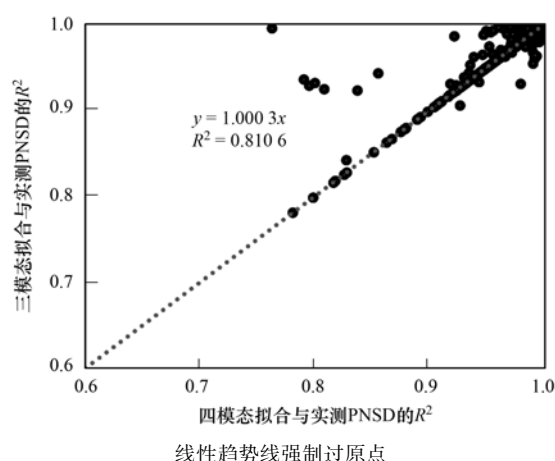


图1 三模态、四模态分解拟合方法与实测 PNSD 计算得 R^2 的对比分析

Fig. 1 Comparison between R^2 calculated from observation values with 3-mode and 4-mode fitting values

_obs 对比进行初步验证评估。

本文的反演 PNSD 算法主要参照马桶^[19]的方法, 通过使用符合正态分布的单模态[式(2)]来拟合并计算气溶胶体积分数(PVSD), 再利用[式(3)]反演计算 PNSD。

$$\frac{dV}{d\lg D} = \frac{V}{\sqrt{2\pi} \lg \sigma_g} \exp \left[-\frac{(\lg D - \lg D_g)^2}{2(\lg \sigma_g)^2} \right] \quad (2)$$

式中, 涉及 3 个参数: 气溶胶总体积分数 V 、几何平均粒径 D_g 和几何标准差 σ_g 均需要确定设置方案。通过初步的尝试 3 个参数设置为一定的变化范围, 进行反演计算。但通过分析发现用于 PVSD 计算的 3 个参数均设置为一定的变化范围, 结果离散度相当大且与观测值相关性很差。所以为提高 PVSD 的计算与观测值的相关性, 在参数设置方案里尽量减少数值变化的参数数量很有必要。通过对实测资料的统计, 本文采用图 2 的反演计算流程, 通过 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度确定参数方案中的参数之一 V , 再通过 $\text{PM}_{2.5}$ 数谱浓度统计特征给出其余 2 个参数的选取范围, 具体结果将在结果与讨论部分详细说明。

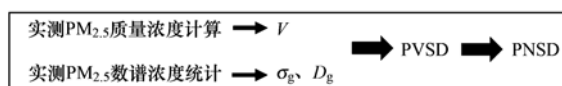


图2 反演计算气溶胶数浓度谱的流程

Fig. 2 Flow diagram of the PNSD inversion

2 结果与讨论

2.1 通过观测样本的统计特征选取参数 D_g 、 σ_g 的范围

为建立 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PNSD 的关系, 本文首先统计分析观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化特征。结果表明, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度此期间在 $1.0 \sim 205.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内变

化, 最高值出现在 12 月 31 日, 平均值为 $(59.4 \pm 28.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 从频数图来看(图 3), 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $30 \sim 80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 出现频率超过 70%, 其中 $40 \sim 60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 出现的频率相对较高, 频率达 34.7%。 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下和 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上出现的频率分别为 9.6% 和 18.2%。以上统计结果显示本文 PNSD 计算方法对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 分布范围特征, 并且出现频率较高的 $\text{PM}_{2.5}$ 样本, 对于建立 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PNSD 的关系代表性将比较高, 反之将较低。

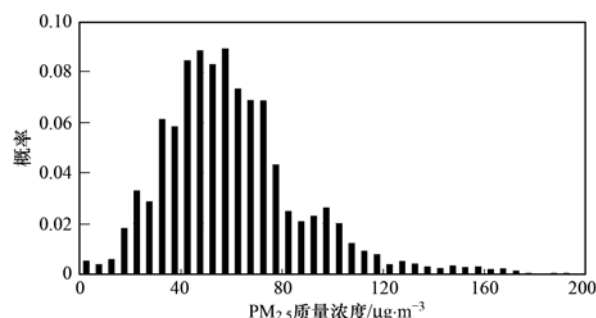


图3 观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度频率分布

Fig. 3 Probability distribution of the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration during the observation period

为进一步建立 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PNSD 的关系, 本文对 $\text{PM}_{2.5}$ 的数浓度分布 PNSD、体积分分数分布 PVSD 的变化特征也进行统计分析。鉴于图 1 对比结果, 本文对于 PNSD 统一使用 3 个模态描述, 主要分为成核模态 ($10 \sim 30 \text{ nm}$, N_{Nuc})、爱根核模态 ($30 \sim 130 \text{ nm}$, N_{Ait}) 和积聚模态 ($0.13 \sim 2.5 \mu\text{m}$, N_{Acc}), 各模态粒子数浓度之和为总粒子数浓度 ($0.01 \sim 2.5 \mu\text{m}$, N_{tot})。PVSD 使用单模态, 根据观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的数浓度结果, 使用[式(3)]计算:

$$\frac{dV}{d\lg D_p} = \frac{dN}{d\lg D_p} \times \frac{\pi}{6} D_p^3 \quad (3)$$

式中, D_p 为数浓度谱测量仪器在 $0.01 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 之间扫描的斯托克斯粒径, N 为对应 D_p 的数浓度。从表 1 和表 2 可看到观测期间 PNSD 和 PVSD 的统计结果, 图 4 展示了观测期内气溶胶各模态粒子数浓度随时间变化情况, 积聚模态数浓度的峰值出现时间与 $\text{PM}_{2.5}$ 高浓度值的相对一致, 主要因为这两个模态对应粒径较大, 假设密度稳定的情况下, 其数浓度的变化和增加对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的变化和增加贡献较多; 而成核模态和爱根核模态数浓度的变化, 尤其是峰值出现的时间, 则出现在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的峰值出现时间之前, 这与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度从低到高的积累前期, 可能出现新粒子生成事件而体现的成核模态和爱根核模态数浓度的剧增有关。

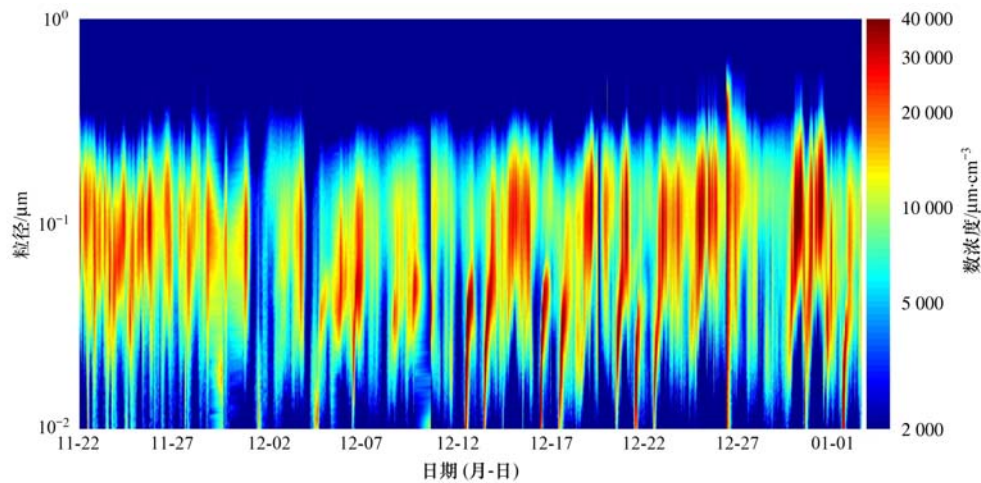


图 4 观测期间气溶胶数浓度分布特征

Fig. 4 Characteristic pattern of PNSD during the observation period

表 1 气溶胶数浓度特征统计/ $\mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-3}$

Table 1 Characteristic statistics of PNSD/ $\mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-3}$

模态	最小值	最大值	平均值	中值	方差
成核模态	59.0	4.7E+6	3.3E+3	2.0E+3	5.5E+4
爱根核模态	702.8	1.6E+6	8.0E+3	7.3E+3	1.9E+4
积聚模态	23.5	2.2E+6	3.6E+3	2.8E+3	2.6E+4
$\leq 2.5\ \mu\text{m}$	23.5	8.7E+6	1.5E+4	1.4E+4	1.0E+5

表 2 气溶胶体积分数特征统计/ $\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$

Table 2 Characteristic statistics of PVSD/ $\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$

粒径范围	最小值	最大值	平均值	中值	方差
$\leq 2.5\ \mu\text{m}$	0.9	3.9E+4	37.9	28.5	452.7

通过正态分布的模型来拟合统计段期间的实测 PNSD 和 PVSD,可以得到 PNSD 和 PVSD 分布的拟合参数特征,为评估段的反演计算参数方案提供重要的参考依据.对统计段期间的实测 PNSD 和 PVSD 原始分辨率数据进行拟合如图 5;得到拟合参数统计结果包括正态分布的总数浓度 N ($\mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-3}$)、几何中值粒径 D_g (μm) 和几何标准差 σ_g ,如表 3 和表 4.

根据 PNSD 的拟合结果(如图 5),90% 以上的

R^2 不低于 0.98.从表 3 和表 4 可以看到 PNSD 的拟合结果统计值,模态 1、2、3 中,对数正态分布的 N 、 D_g 和 σ_g 变化范围均是模态 3 的最大,而 N 和 σ_g 的均值则是模态 2 最大,说明模态 2 的参数在拟合结果中变化最显著.根据 PVSD 的拟合结果(如图 5), R^2 均值为 0.90,结合表 4 和图 6 中可以看到, PVSD 拟合对数正态分布单模态的 V 均值为 $30.2\ \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, $15\sim 40\ \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 出现频率较高; D_g 均值在 $320\ \text{nm}$,频率出现较高的范围在 $0.24\sim 0.34\ \mu\text{m}$, σ_g 在 $1.0\sim 3.8$ 范围内变化,其中 $1.6\sim 2.2$ 出现频率最高,均值为 2.0.这些参数范围将为更好反演计算 PNSD 和 PVSD 提供相应数值的参考设置范围.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度计算确定参数 V

从统计段的资料统计来看,实测的 $\text{PM}_{2.5}$ 与拟合的气溶胶总体积分数 $V_{2.5\text{fit}}$ 有较好地线性关系.图 7 是样本量为 8752 组的 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $V_{2.5\text{fit}}$ 的数据,二者的散点图线性相关达 0.90,做过原点的拟合线性方程[式(4)].

$$y = 2.033x \tag{4}$$

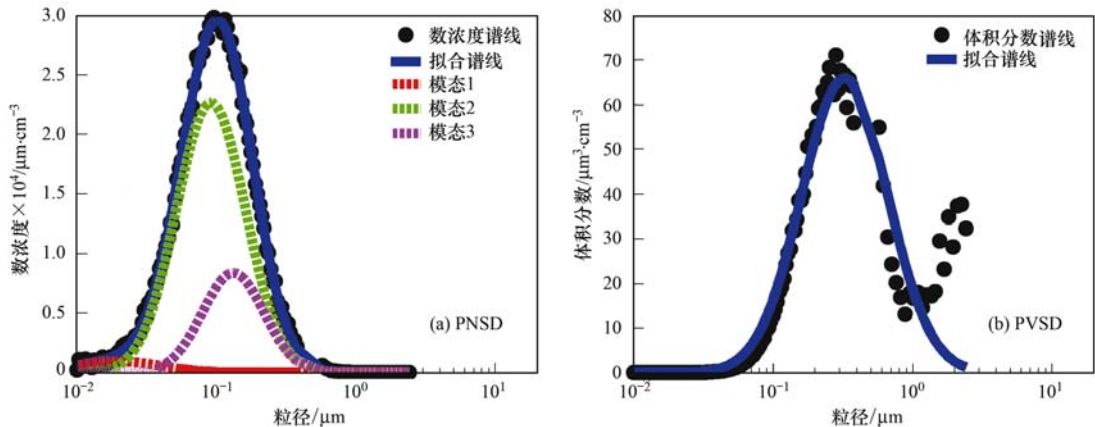


图 5 PNSD 和 PVSD 的原始数据拟合示例

Fig. 5 PNSD and PVSD fitting samples with raw data

表 3 气溶胶数浓度拟合结果(三模态)统计

参数	$N/\mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-3}$			$D_g/\mu\text{m}$			σ_g		
	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
模态 1	2.2E-14	3.0E+3	5.8E+4	0.0	0.0	0.0	1.0	1.7	2.0
模态 2	1.2E-6	6.8E+3	4.0E+4	0.0	0.0	0.1	1.1	1.7	6.3
模态 3	900.0	3.7E+3	1.0E+4	0.1	0.1	0.4	1.1	1.6	6.3

表 4 气溶胶体积分数拟合结果统计

参数	$V/\mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	$D_g/\mu\text{m}$	σ_g
最小值	0.8	0.2	1.0
平均值	30.2	0.3	2.0
最大值	148.8	0.7	3.8

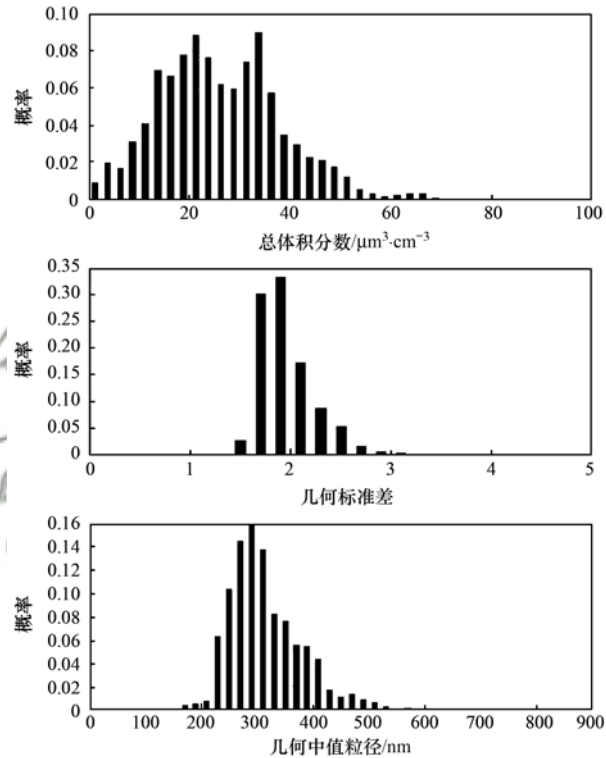


图 6 气溶胶体积谱分布拟合结果(总体积分数、几何标准差、几何中值粒径)概率分布

Fig. 6 Probability distribution of the PVSD fitting results(V , σ_g , and D_g)

式中, y 为 $\text{PM}_{2.5}$, x 为 $V_{2.5\text{fit}}$. 说明 $\text{PM}_{2.5}$ 在 $0 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内, 与 $V_{2.5\text{fit}}$ 有较好的线性相关, 所以本文 PNSD 反演算法的参数之一气溶胶总体积分数 V , 可尝试利用式(4)通过 $\text{PM}_{2.5}$ 计算得到对应确认值.

需要说明的是, 对于参数 V 的反演计算方法, 如果能够使用经典称重法原理测量 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度将更加精确合理. 而本文的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度资料是由 GRIMM180 仪器观测所得, 该仪器原理是基于光学测量数谱后再计算得到质量浓度. 本文使用该资料主要考虑原因如下: ①考虑光学测量数谱原理的

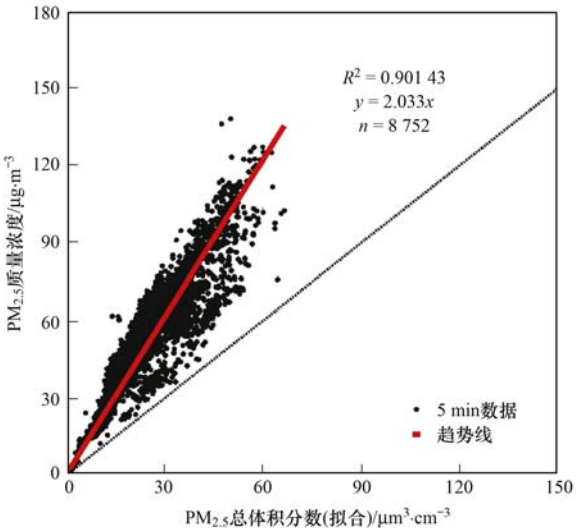


图 7 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与总体积分数(拟合)的相关

Fig. 7 Correlation between the $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and fitting V

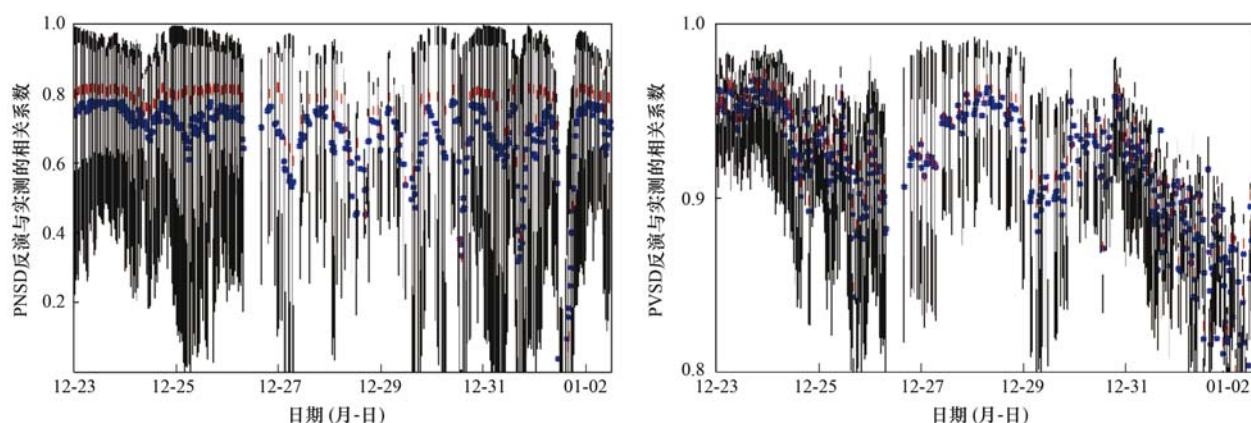
局限性主要是在对质量浓度影响较小的细粒子范围; ②对比该仪器和经典称重法测量原理的仪器结果^[24], 并且使用同期称重的膜采样结果进行数据订正已尽量减小该仪器测量原理所带来的影响. ③本文重点在于给出一种利用质量浓度的反演算法, 该仪器在国内各观测站点使用广泛, 对于本文所述反演算法有很好的推广性和适用性.

2.3 反演计算效果讨论

根据以上的 3 个参数的选择方案, 通过评估段每个观测时次的 $\text{PM}_{2.5}$, 得到 44 套组合参数方案计算的 44 组结果 PVSD_{inv} 和 PNSD_{inv} (如图 8).

通过反演计算 PNSD_{inv} 和 PVSD_{inv} 与观测结果的比对分析, 从图 8 中可看到 44 套参数方案反算与观测的一致性和相关系数的情况. 结果表明总体来说, 反演计算的结果与实测的一致性较好, 相对来说, PVSD 的反演结果与实测有较高的相关性, 但也存在部分差异较大, 说明该反演计算方法存在一定的适用性.

为进一步讨论其适用性, 笔者通过两个指标: ①求同时次的反演计算与观测结果相关系数, ②统计 PNSD 各模态总数浓度反演计算与观测结果的比例, 来评估反演计算结果和分析差异产生的可能原因. 如图 8, 可看到每个时次 44 套参数组合反演计算与观测结果(C_{io})的相关系数, 分别从 PNSD、



蓝点为平均值, 红点为中值, 黑上下限为 5% 和 95% 的百分位数, 灰上下限为 25% 和 75% 的百分位数

图 8 PNSD 和 PVSD 反演计算与实测的相关系数分析

Fig. 8 Analysis of the correlation index between the inversed and measured PNSD and PVSD data

PVSD 每时次 44 个相关系数的最高值 ($C_{\max}$) 统计来看, PNSD 的 $C_{\max}$ 置信区间除在缺测前后两个时次(2014 年 12 月 26 日 07:55 和 2015 年 1 月 1 日 11:20)为 0.87 和 0.96, 其余均高于 0.99, 说明 PNSD 的 $C_{\max}$ 大部分通过显著性检验; 总体来说, PNSD 的 $C_{\max}$ 数值较高且波动较小, 高于 0.8 的样本约为总样本量的 70%, 反演计算结果基本较观测结果偏低. 此外, PVSD 的 $C_{\max}$ 大部分高于 0.9, 且变化范围不大. 根据本文 PNSD 的反演算法的流程, PNSD 的 $C_{\max}$ 大小基于 PVSD 的计算, 所以 PVSD 的 $C_{\max}$ 稳定且维持在较高水平对 PNSD 的 $C_{\max}$ 为有利的影响, 同时表明利用 $PM_{2.5}$ 质量浓度来确定每个时次唯一 V 值的方法适用性较好, 能反演出与实测较一致的 PNSD 分布特征, 但在绝对数值上还存在一定的差异.

对 PNSD 各模态总数浓度反演计算与实测的比例计算结果表明: 平均来说, 总粒子数浓度反演计算比观测结果高 22.1%; 成核模态反演计算为观测结果的 73.4%; 爱根核模态反演计算比观测结果高 46.3%, 而对于消光影响较显著的积聚模态, 反演计算比观测结果相当, 达 99.9%. 进一步分析发现气溶胶数浓度谱型分布特征与统计的平均分布特征差异较大的时候, 反算与观测结果的相关性则较差, 这可能与统计样本量不足导致 $PM_{2.5}$ 质量浓度高值适用性较差, 统计的气溶胶体积分数谱型没有做归一化而产生的差异等方面的原因相关. 根据统计结果表明, 参数方案中效果较好的 σ_g 为 1.8 和 2.0 占比超过 50%, D_g 为 0.34、0.31 和 0.32 μm 占比较高. 因此在参数方案的适用中可考虑以上参数的搭配以提高反算结果的计算效果.

由于工作内容和文章讨论的重点等原因, 本文尚未将反演计算的 PNSD 结果不确定性程度对 MIE 模式计算中可能产生的影响做讨论分析, 根据本文

中的讨论分析, 认为相关的计算评估有待进一步地探讨研究.

3 结论

(1) 尝试通过干气溶胶粒子 $PM_{2.5}$ 质量浓度、 σ_g 、 D_g , 建立使用 $PM_{2.5}$ 的质量浓度反演计算气溶胶数浓度谱分布 PNSD 的方法.

(2) 通过对比反演计算和实测结果的相关性程度表明: 总体来说, 本文讨论的反演方法对珠三角气溶胶 PNSD 的计算具有一定的适用性和稳定性, 利用 $PM_{2.5}$ 质量浓度来确定每个时次唯一 V 值的方法适用性较好, 但在绝对值上仍存在一定差异; 产生差异的原因, 可能与统计样本量不足导致 $PM_{2.5}$ 质量浓度高值适用性较差, 统计的气溶胶体积分数谱型没有做归一化而产生的差异等方面的原因相关.

(3) 对 PNSD 各模态总数浓度反演计算与观测结果的比例计算结果表明: 平均来说, 总粒子数浓度、成核模态、爱根核模态、积聚模态分别为 122.1%、73.4%、146.3%、99.9%; 对于消光影响较显著的积聚模态, 反演计算比观测结果相当.

(4) 根据统计结果表明, 参数方案中效果较好的是 σ_g 为 1.8 和 2.0 占比超过 50%, D_g 为 0.34、0.31 和 0.32 μm 占比较高. 因此在参数方案的适用中可考虑以上参数的搭配以提高反算结果的计算效果.

(5) 根据本文中的讨论分析, 认为 $PM_{2.5}$ 质量浓度如果使用经典称重法原理测量结果将更加精确合理; 此外, 关于反演计算的 PNSD 结果不确定性程度对 MIE 模式计算中可能产生的影响评估有待进一步地探讨研究.

致谢: 感谢吴兑教授在早期对于本文研究涉及的观测站网建立和仪器调研选型过程中给予的指导和贡献!

参考文献:

- [1] Chylek P, Coakley Jr J A. Aerosols and climate[J]. Science, 1974, **183**(4120): 75-77.
- [2] Twomey S. Pollution and the planetary albedo[J]. Atmospheric Environment, 1974, **8**(12): 1251-1256.
- [3] Albrecht B A. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness[J]. Science, 1989, **245**(4923): 1227-1230.
- [4] Rosenfeld D. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall[J]. Geophysical Research Letters, 1999, **26**(20): 3105-3108.
- [5] Rosenfeld D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution[J]. Science, 2000, **287**(5459): 1793-1796.
- [6] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, *et al.* Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. Science, 1992, **255**(5043): 423-430.
- [7] Burton I. Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability report of IPCC working group II: McCarthy J J, Canziani O F, Leary N A, *et al.* (Eds.), Cambridge University Press, 2001, p. 1032, hardback 0-521-80768-9, US\$130.00, paperback 0-521-015000-6, US\$49.95 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, **117**(1-2): 123-124.
- [8] Zhao C S, Tie X X, Lin Y P. A possible positive feedback of reduction of precipitation and increase in aerosols over eastern central China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**(11): L11814.
- [9] McMurry P H, Wang X, Park K, *et al.* The relationship between mass and mobility for atmospheric particles: a new technique for measuring particle density[J]. Aerosol Science and Technology, 2002, **36**(2): 227-238.
- [10] Deng H, Tan H B, Li F, *et al.* Impact of relative humidity on visibility degradation during a haze event: a case study[J]. Science of the Total Environment, 2016, **569-570**: 1149-1158.
- [11] Liu L, Tan H B, Fan S J, *et al.* Influence of aerosol hygroscopicity and mixing state on aerosol optical properties in the Pearl River Delta region, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **627**: 1560-1571.
- [12] 高元官, 张凯, 王体健, 等. 广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1753-1759.
- Gao Y G, Zhang K, Wang T J, *et al.* Concentration characteristics and influencing factors of atmospheric particulate matters in spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1753-1759.
- [13] 常炉予, 许建明, 周广强, 等. 上海典型持续性 $\text{PM}_{2.5}$ 重度污染的数值模拟[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 825-833.
- Chang L Y, Xu J M, Zhou G Q, *et al.* A numerical study of typical heavy air pollution episode of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 825-833.
- [14] 于兴娜, 马佳, 朱彬, 等. 南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1919-1925.
- Yu X N, Ma J, Zhu B, *et al.* Effects of relative humidity and aerosol physicochemical properties on atmospheric visibility in Northern Suburb of Nanjing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1919-1925.
- [15] Rose D, Nowak A, Achtert P, *et al.* Cloud condensation nuclei in polluted air and biomass burning smoke near the mega-city Guangzhou, China - Part 1: size-resolved measurements and implications for the modeling of aerosol particle hygroscopicity and CCN activity[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(7): 3365-3383.
- [16] Wang Z B, Hu M, Yue D L, *et al.* New particle formation in the presence of a strong biomass burning episode at a downwind rural site in PRD, China[J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2013, **65**(1): 19965.
- [17] Yue D L, Hu M, Wang Z B, *et al.* Comparison of particle number size distributions and new particle formation between the urban and rural sites in the PRD region, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **76**: 181-188.
- [18] Liu S, Hu M, Wu Z J, *et al.* Aerosol number size distribution and new particle formation at a rural/coastal site in Pearl River Delta (PRD) of China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6275-6283.
- [19] Oberdörster G, Celein R M, Ferin J, *et al.* Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles[J]. Inhalation Toxicology, 1995, **7**(1): 111-124.
- [20] 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.
- [21] 吴志军, 胡敏, 岳珂利, 等. 重污染和新粒子生成过程中城市大气颗粒物数谱分布演变过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(8): 1192-1199.
- Wu Z J, Hu M, Yue D L, *et al.* Evolution of particle number size distribution in an urban atmosphere during episodes of heavy pollution and new particle formation[J]. Science China Earth Sciences, 2011, **54**(11): 1772.
- [22] 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.
- [23] Vignati E, Wilson J, Stier P. M7: an efficient size-resolved aerosol microphysics module for large-scale aerosol transport models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, **109**(D22): D22202.
- [24] Schladitz A, Merkel M, Bastian S, *et al.* A concept of an automated function control for ambient aerosol measurements using mobility particle size spectrometers[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, **7**(4): 1065-1073.
- [25] 程雅芳, 张远航, 胡敏. 珠江三角洲大气气溶胶辐射特性: 基于观测的模型方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [26] Ma N, Zhao C S, Müller T, *et al.* A new method to determine the mixing state of light absorbing carbonaceous using the measured aerosol optical properties and number size distributions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(5): 2381-2397.
- [27] Chen J, Zhao C S, Ma N, *et al.* A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(11): 4935-4950.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)