

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.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系及其分布特征

王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴*, 张碧辉

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 利用相对湿度、能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度观测数据, 针对不同相对湿度下, 建立了消光系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度之间线性关系, 并分析了相关关系的全国分布特征。结果表明, 我国中东部大部分地区在一定相对湿度区间内均可建立线性相关关系, 而且相关性较好, 相对湿度 40% ~ 90% 区间内的平均相关系数高于 0.75, 其中北京相关系数高达 0.9。北京、长三角和四川等地的 $\text{PM}_{2.5}$ 单位质量消光效率在同等相对湿度下明显大于其他地区。不同地区湿度对能见度影响程度不同, 北京等地在相对湿度大于 90% 时相对湿度对能见度作用大于 $\text{PM}_{2.5}$, 而广州在相对湿度大于 80% 时相对湿度的作用明显增强。利用能见度反算北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度可知, 1980 ~ 1996 年, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际变化不大, 受采暖方式影响冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著较高; 1997 ~ 2009 年呈现缓慢下降趋势; 2010 ~ 2012 年呈现上升趋势。1980 年以来, 全国的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈上升的趋势, 尤其是华北地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度始终高于全国其他地区。

关键词: 能见度; 消光系数; $\text{PM}_{2.5}$; 线性关系; 相对湿度

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-2985-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812071

Relationship Between Atmospheric Visibility and $\text{PM}_{2.5}$ Concentrations and Distributions

WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, RAO Xiao-qin*, ZHANG Bi-hui

(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Monitoring data were used to analyze the relationships among relative humidity (RH), visibility, and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations. A strong, linear relationship expression between the extinction coefficient and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations at different relative humidities is proposed. The mean correlation coefficient at RH 40% - 90% was higher than 0.75 for most of Central and Eastern China, and reached 0.9 in Beijing. Comparatively, the extinction efficiency of $\text{PM}_{2.5}$ was much larger in Beijing, the Yangzi River Delta Region, and Sichuan than in other regions. However, the influence of RH on visibility varied from region to region. In Beijing, RH dominated the decrease in visibility when RH > 90%, while in Guangzhou, this was the case when RH > 80%. From 1980 to 1996, the annual variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations was not significant in Beijing and the $\text{PM}_{2.5}$ concentrations were significantly higher than in the 2000s because of the dominant mode of heating. From 1997 to 2009, $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing showed a slow downward trend, and from 2010 to 2012, showed an upward trend. Since 1980, $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in the entire country have been rising. $\text{PM}_{2.5}$ concentrations have always been higher in North China than in other parts of the country.

Key words: visibility; extinction coefficient; $\text{PM}_{2.5}$; linear relation expression; relative humidity

能见度是指视力正常的人, 在当时天气条件下, 能够从天空背景中看到和辨认的目标物的最大水平距离^[1]。大气中气体和气溶胶对光的散射和吸收作用是导致大气能见度下降的主要原因。在气溶胶浓度高于几个 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的情况下, 气溶胶对光的散射和吸收作用远大于气体分子的瑞利散射作用^[2]。因此, 气溶胶粒子, 尤其 $\text{PM}_{2.5}$ 是影响能见度的主要因素。

影响能见度的气溶胶粒子的主要特征包括: 质量浓度、吸湿特性、化学组分、粒径谱分布、黑碳及其混合状态、颗粒物形状等因素。美国 IMPROVE 项目通过长时间的观测, 建立了利用气溶胶组分消光效率、质量浓度、光学吸湿增长因子 $f(\text{RH})$ 来计算消光系数的方案, 该方案对能见度的估算有较好的效果^[3]。国内也有研究利用 IMPROVE 项目建立的计算方法, 建立国内部分城市能见度与气溶胶组

分及其吸湿增长因子之间的关系^[4~8]。一些研究利用气溶胶数浓度和相对湿度 (RH) 构建的气溶胶消光参数方案, 与实测值对比结果较好^[9, 10]。由于 $\text{PM}_{2.5}$ 组分观测较少, 一些学者尝试利用 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度构建能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系。宋宇等^[11]在不同季节下建立不同的回归方程, 利用 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度估算大气能见度。Zhang 等^[12]对不同湿度区间下分别建立 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与能见度的回归方程, 发现当 RH < 80% 时有很好的相关性。樊高峰等^[13]利用小时观测资料对浙江 3 个城市的相对湿度、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 利用非线性拟合的方式构建了大气能见度统计模

收稿日期: 2018-12-07; 修订日期: 2019-02-22

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0104); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0203301)

作者简介: 王继康 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为空气质量模拟与预报, E-mail: wjk_1990@126.com

* 通信作者, E-mail: raoxq@cma.gov.cn

型,模型可以较好地估算能见度.利用相似的方法不同学者建立了不同地区的能见度与相对湿度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的非线性拟合模型,均取得较好的结果^[14, 15].

能见度的长期变化趋势,一定程度上可以反映污染程度的长期变化趋势^[16].关于我国能见度变化趋势的研究有很多^[17~22],也有一些研究关注低能见度天气的变化^[17, 21].Wu 等^[19]指出中国大陆中部和南部的霾天气都有不同程度的增加,而经济较为落后的东北、内蒙古和西北地区东部等地霾天气减少.Chen 等^[21]指出我国低能见度天气的增加不仅仅与颗粒物浓度增加有关,而且大气环流形势也越来越有利于低能见度天气的形成.Han 等^[22]分析我国霾天气的变化,认为近几年污染物排放的增加对能见度的影响大于气象条件变化对能见度的影响.

利用相对湿度、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和能见度的非线性拟合方案,虽然可以很好地构建能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的关系,但是在不同的地区存在不同形式.本文利用气象观测数据和生态环境部监测数据,在不同相对湿度下,对消光系数和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度建立线性关系,统一全国范围内能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度关系的表达形式.并利用建立的关系能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的历史变化进行反算,以分析 $\text{PM}_{2.5}$ 的历史变化趋势及分布特征.

1 材料与方法

本文选用中国气象局 843 个国家基本站能见度观测数据,2013~2014 年气象站点能见度观测由人工观测逐步转换为自动观测,2015 年之后全部为自动观测.自动能见度观测采用前向散射能见度仪,观测波长在 11 μm .观测能见度取正点前 15 min 内的最小 10 min 中平均能见度,测量精度为 m.2000~2014 年的人工观测数据为逐 3 h 观测,1980~1999 年人工观测数据为逐 6 h 观测.人工观测能见度为正点之前观测时刻的能见度,能见度在 5 km 以上为 km 精度,低于 5 km 时为 0.1 km.由于观测原理和取值时刻不同,人工观测能见度与自动观测能见度之间存在一定的差异,尤其是在存在污染的天气时自动观测能见度低于人工观测能见度^[23, 24].由于观测中没有消光系数的观测,本文通过 Koschmieder 公式[式(1)]利用能见度推算消光系数^[25].

$$\text{MOR} = \frac{-\ln(\varepsilon)}{\sigma} \quad (1)$$

式中, MOR 为气象光学视程(m), ε 为对比阈值,

σ 为消光系数(m^{-1}).柯西密德^[1]提出人眼视觉阈值与仪器观测不同,人眼视觉阈值 $\varepsilon = 0.02$,仪器观测阈值 $\varepsilon = 0.05$.

$\text{PM}_{2.5}$ 观测数据选用中国环境监测总站观测的部分城市站点平均值,大部分站点有 2013 年以来的逐小时观测值.北京大兴站点观测数据来自于北京环境保护监测中心.为了探究 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与能见度的关系,本文中剔除存在降水、沙尘等影响能见度的天气观测的时次,以排除降雨、降雪和沙尘等天气对视程的影响.

2 结果与讨论

2.1 典型城市能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性分析

参考美国 IMPROVE 项目的研究结果,消光系数与细颗粒物的组分之间的关系为^[3, 26]:

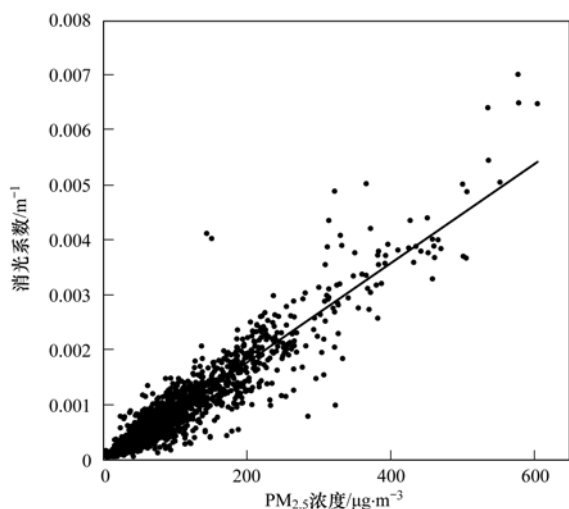
$$\begin{aligned} \delta_{\text{ext}} = & 2.2 f_s(\text{RH}) S_s + 4.8 f_L(\text{RH}) S_L + \\ & 2.4 f_s(\text{RH}) N_s + 5.1 f_L(\text{RH}) N_L + 2.8 O_s + \\ & 6.1 O_L + [\text{FS}] + 0.6[\text{CM}] + 10[\text{EC}] + \\ & 1.7 f_{\text{ss}}(\text{RH})[\text{SS}] + \delta_{\text{RS}} + 0.33[\text{NO}_2] \quad (2) \end{aligned}$$

式中, δ_{ext} 为消光系数(m^{-1}), RH 为相对湿度(%), $f_L(\text{RH})$ 和 $f_s[\text{RH}]$ 分别为大、小粒径下组分的光学吸湿增长因子, $f_{\text{ss}}(\text{RH})$ 为海盐粒子的湿度修正因子, S_s 、 N_s 、 O_s 分别为小粒径 $\text{PM}_{2.5}$ 中的硫酸铵、硝酸铵、有机气溶胶的质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), S_L 、 N_L 、 O_L 为大粒径 $\text{PM}_{2.5}$ 中的硫酸铵、硝酸铵、有机气溶胶的质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), EC 为吸光性含碳物质的质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), FS 和 CM 为土壤粒子和粗粒子的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), SS 为海盐粒子质量浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 上述物质组成 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度. δ_{RS} 为气体的瑞利散射产生的消光系数(m^{-1}), NO_2 单位为体积分数(10^{-9}).由于缺乏 $\text{PM}_{2.5}$ 组分的观测, 本文将 IMPROVE 计算方法简化如下:

$$\delta_{\text{ext}} = a(\text{RH})[\text{PM}_{2.5}] + b_0 \quad (3)$$

式中, $a(\text{RH})$ 为不同相对湿度下 $\text{PM}_{2.5}$ 产生的消光效率($\text{m}^2\cdot\mu\text{g}^{-1}$), 其包括干物质的消光效率和光学吸湿增长因子, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, b_0 为瑞利散射和气体吸光产生的消光系数(m^{-1}).

本文取 2016~2017 年北京观象台有效能见度观测数据利用式(1)计算消光系数,取北京大兴观测站同期观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据,参照简化后的 IMPROVE 公式建立相关关系.图 1 为相对湿度在 75%~80% 区间内的消光系数和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布.散点图表明两者之间存在很好的线性关系,相关系数 R^2 可达 0.87,可以使用式(3)对 $\text{PM}_{2.5}$ 和消光系数建立线性关系.



图中的观测值对应的相对湿度在 75% ~ 80% 之间

图 1 北京观象台消光系数与大兴观测站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度散点图

Fig. 1 Relationship between $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Daxing and extinction coefficient at the Beijing observatory

图 2 为对不同相对湿度下消光系数和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行线性拟合统计得出的相关系数 (R^2) 和消光效率 [$a(\text{RH})$] 的分布. 从相关系数的分布可以看出: 在相对湿度 20% ~ 90% 范围内, 能见度与消光系数的相关性始终在 0.9 上下波动, 相关系数与利用其他非线性拟合方法得出的相关系数相当^[8, 27]; 在相对湿度大于 90% 的情况下, 相关系数迅速下降. 这说明在相对湿度大于 90% 的情况下, 能见度的主要影响因素不是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度而是湿度. 这与 Chen 等^[9] 利用在武清观测的气溶胶体积浓度和消光系数的拟合结果一致, 当 $\text{RH} > 90\%$ 时, 消光系数的增加主要由于湿度的增加, 而当 $\text{RH} < 90\%$ 时, 消光系数主要由气溶胶气体浓度决定. 从消光效率 [$a(\text{RH})$] 的分布可以看出, 随着相对湿度的增大, 单位质量 $\text{PM}_{2.5}$ 的消光效率呈增加的趋势. 其中在 RH 为 40% 和 80% 左右时消光效率分别为 $6 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 和 $1.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \mu\text{g}^{-1}$, 即 RH 为 80% 时的消光效率是 RH 为 40% 时的 2.1 倍, 与相关研究中吸湿增长因子的取值范围相当^[28-30]. 当相对湿度大于 90% 的情况下, 由于 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与消光系数相关性较差, 消光效率变化较大, 消光效率没有参考意义.

选取 5 个典型城市的能见度与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度参照式(3)拟合消光系数和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的线性关系. 其中武汉、南京均是选取与气象站相近的 $\text{PM}_{2.5}$ 观测站点进行对比, 由于哈尔滨、广州没有与气象站位置相近的观测站点, 故使用城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的小时平均值进行对比. 从不同相对湿度下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与消光系数的相关系数的分布[图 3(a)]来看, 在

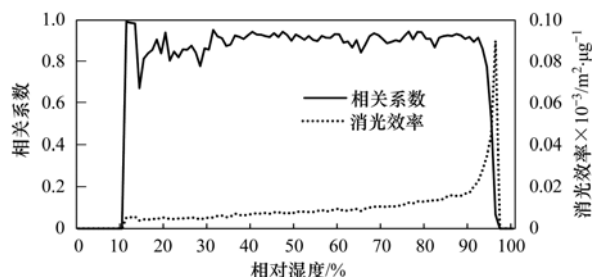


图 2 不同相对湿度下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与消光系数的相关系数和消光效率分布

Fig. 2 Extinction efficiency and the correlation coefficient between $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and extinction coefficients at different RH

相对湿度为 40% ~ 90% 的区间内, 南京和武汉的相关系数相当, 在 0.8 上下, 略低于北京的相关系数; 在相对湿度大于 90% 的情况下相关系数迅速下降. 广州的相关系数在 40% ~ 80% 的区间内在 0.75 上下, 低于武汉和南京的相关系数, 陈义珍等^[27] 对北京和广州的能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关性分析结果同样表明, 广州的相关系数低于北京的相关系数. 广州的相关系数在相对湿度大于 80% 的情况下就开始出现下降, 表明广州能见度更易受相对湿度变化的影响. 长春的相关系数为五个城市中最低, 除了相对湿度在 90% 左右的情况下, 相关系数达到 0.8 之外, 其他相对湿度范围内相关系数均在 0.4 左右.

图 4 为北京、长春和广州的不同月份下 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与消光系数分布的散点图, 以分析不同地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与消光系数相关性出现差异的原因. 从北京的分布来看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现明显的季节差异, 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和消光系数均显著高于夏季, 但是不同季节下的消光效率基本一致. 从长春的分布来看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与消光系数在不同的季节的分布存在差异, 单位 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下冬季消光效率明显低于其他季节. 广州的季节分布介于两地之间. 金艺娜^[31] 对长春市 EC 浓度分析指出, 长春市 EC 浓度存在较大的季节变化, 最高的为春季 ($12.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 最低的为冬季 ($1.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度比例分别为 12% 和 6%. 而根据 Lai 等^[32] 和 Xia 等^[33] 对广州郊区和市区 $\text{PM}_{2.5}$ 组分分析, 广州 EC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 比例的季节变化在 3% 之内; 黄玉虎等^[34] 对 2013 ~ 2014 年北京 $\text{PM}_{2.5}$ 组分分析, 北京 EC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 比例各季节都比较稳定 (5% 左右). 根据 IMPROVE 公式, 吸光性的含碳物质对消光系数影响较大, 因此 EC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例季节变化较大是导致长春地区消光效率季节变化较大的原因之一, 而北京季节变化相对较小. 广州 EC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 比例季节变化高于北京, 是导致广州相关系数低于北京的

原因之一.

从 5 个典型城市的单位 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的消光效率 $[a(\text{RH})]$ 的分布 [图 3(b)] 来看, 北京的消光效率最大, 南京次之, 武汉和广州消光效率相差较小. 由于本文中单位质量浓度的消光效率同时包含吸湿性增长因子和 $\text{PM}_{2.5}$ 组分信息, 根据 IMPROVE 公式, 造成各地在相同湿度下消光效率不同的原因主要由于各地的 $\text{PM}_{2.5}$ 组分及浓度水平不同. Tao

等^[35] 对全国各地的 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分进行回顾, 指出北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于南京和广州. 而北京高 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的情况下存在较高的无机盐组分^[36] 是造成北京在各个相对湿度情况下消光效率较高的原因之一. 一些研究也指出, IMPROVE 公式中吸湿增长因子对我国的不同地区存在一定偏差^[7, 37], 因此各地吸湿性增长因子的不同也是导致各地消光效率不同的另一个原因.

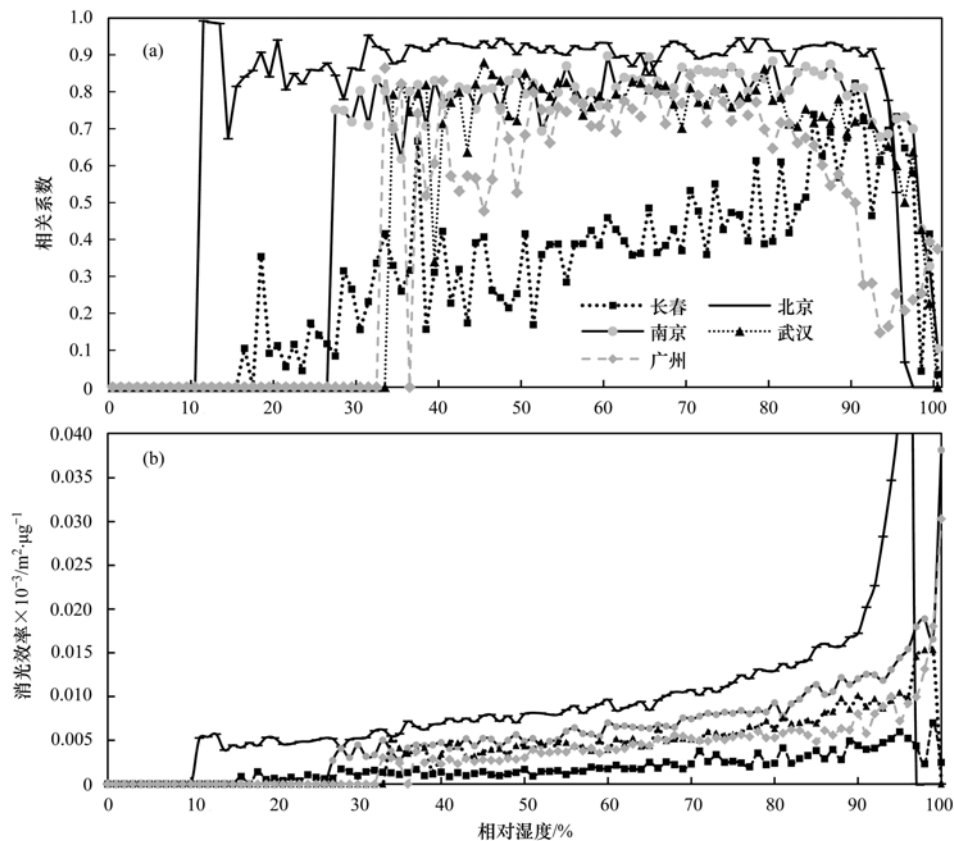


图 3 典型城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与消光系数在不同湿度下的相关系数和消光效率分布

Fig. 3 Extinction efficiency and correlation coefficient between $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and extinction coefficients at different RH in five typical cities

2.2 能见度和 $\text{PM}_{2.5}$ 相关性分布特征

图 3 可以看出, 在 40% ~ 90% 的相对湿度下, 有些城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与消光系数的相关系数均较高. 因此, 本文利用全国范围内的城市小时平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和消光系数按照式 (3) 进行拟合, 选取 40% ~ 90% 相对湿度下的相关系数和消光效率 $[a(\text{RH})]$ 平均值进行分析, 见图 5.

从相关系数 R^2 的分布来看, 我国中东部大部分地区的相关性均较高, 尤其是大气污染问题较为严重的京津冀、汾渭平原、长三角和四川盆地等地区, R^2 超过 0.75. 珠三角地区整体情况与广州类似, 相关系数整体低于京津冀等地, R^2 在 0.7 左右. 由 2.1 节分析结果表明, 东北地区中部 $\text{PM}_{2.5}$ 组分存在较大的季节变化, 导致相关系数较低. 甘肃

等西北地区可能是受沙尘影响, 导致其相关系数较低. 总体来看, 我国大部分地区的能见度能和 $\text{PM}_{2.5}$ 建立起较好地线性关系.

从消光效率 $[a(\text{RH})]$ 的分布来看, 消光效率呈现明显的区域性分布, 各区域之间存在较大差异. 总体来看, 长三角地区和四川的消光效率大于其他地区, 珠三角地区的消光效率小于其他地区. 造成区域性差异的主要原因可能有两个, 一是 $\text{PM}_{2.5}$ 组分呈现出区域性差异, 尤其是在低能见度天气下颗粒物化学组分的差异; 二是能见度观测的方法存在差异. 根据 IMPROVE 公式, 在相对湿度较高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度大于 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的情况下, 二次无机盐粒子的消光效率超过 EC 和有机质成为主要的消光物质. Li 等^[36] 分析表明, 北京冬季霾天气过程

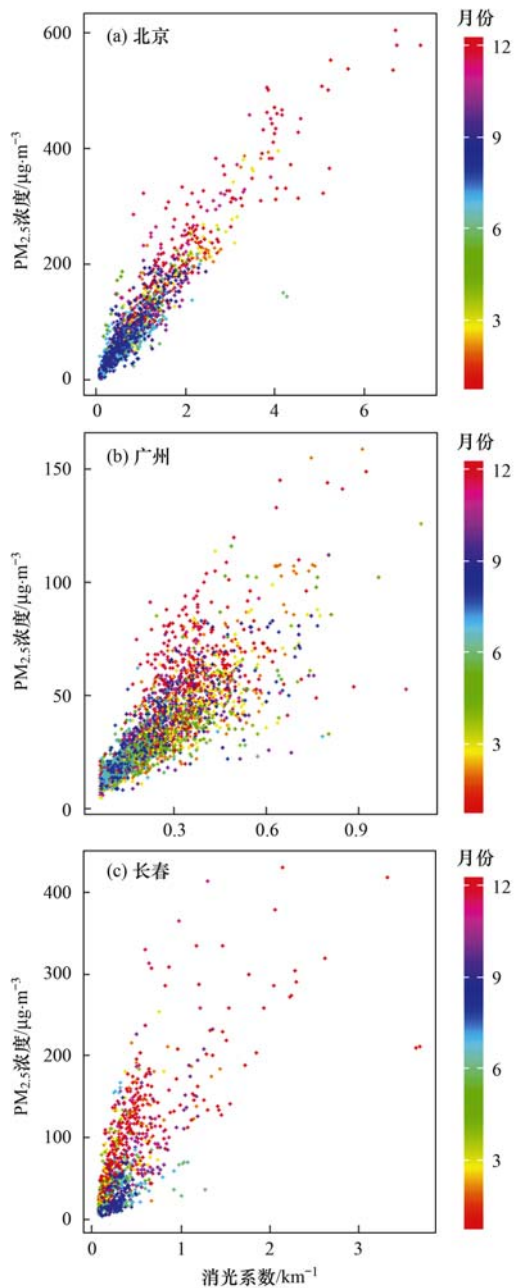


图4 北京、广州、长春在相对湿度为75%~80%区间内PM_{2.5}与消光系数的分布特征

Fig. 4 PM_{2.5} concentrations and extinction coefficients at RH ranging from 75%~80% in Beijing, Guangzhou, and Changchun

中PM_{2.5}中二次无机盐占比达53%；陈源等^[38]对成都的观测表明,在静稳天气下PM_{2.5}中二次无机盐占比为40%；于超等^[39]对南京观测表明,霾天气下PM_{2.5}中二次无机盐占比为59%；而Xia等^[33]的观测表明,广州冬季污染期间PM_{2.5}中二次无机盐占比为30%。珠三角地区PM_{2.5}浓度较低,且在污染期间无机盐组分低于长三角地区和四川,导致造成珠三角地区消光效率较低。从各个区域内的分布来看,相邻城市间的差异较小,这就为没有PM_{2.5}观测的站点利用能见度观测反演PM_{2.5}浓度提供了参

考值。但是,北京的消光效率明显高于京津冀地区的其他城市,说明北京的PM_{2.5}组分与其他城市存在明显的差异。Zhao等^[40]也指出北京市区PM_{2.5}的消光效率大于郊区的消光效率。对比天津和北京污染期间的化学组分来看,天津污染期间二次无机盐组分占比为37%^[41],低于北京污染期间的水平。

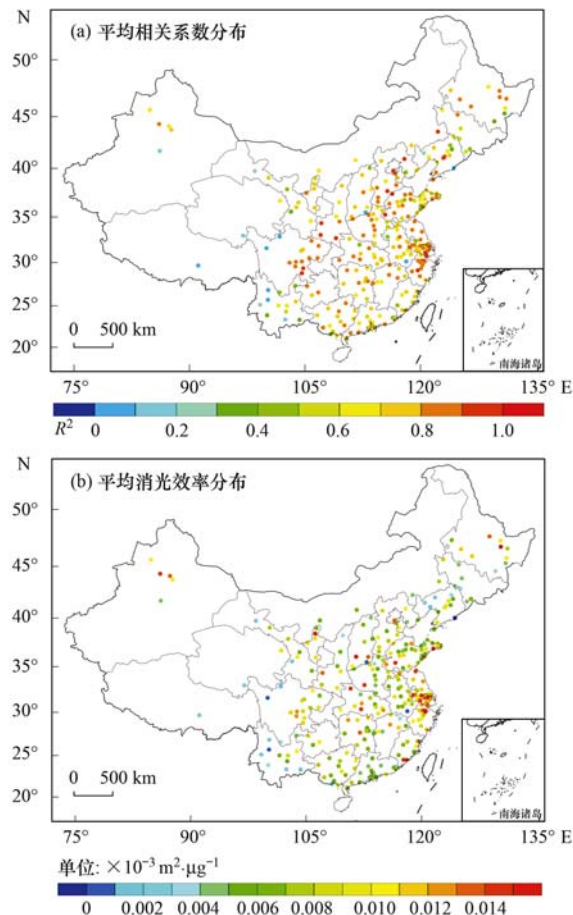


图5 PM_{2.5}质量浓度与消光系数在相对湿度为40%~90%下平均相关系数和消光效率分布

Fig. 5 Distribution of the mean the extinction efficiency and the correlation coefficient between PM_{2.5} concentration and extinction coefficients at RH 40%~90%

2.3 1980年以来PM_{2.5}变化趋势

本文按照式(3)建立的关系,利用2014~2015年北京观象台的能见度观测数据反算PM_{2.5}浓度,并与大兴观测站的PM_{2.5}观测进行对比[图6(a)].对比结果表明,利用能见度反算的PM_{2.5}数据与观测的PM_{2.5}浓度相关系数R²达到0.83,散点图基本分布在y=x附近,平均值分别为117.5 μg·m⁻³和114.8 μg·m⁻³,存在略微的高估。说明本文建立的关系可以适用于其他时间。由于2013年的能见度观测仍然为人工观测,人工观测与自动观测存在一定差异,所以导致利用式(3)建立的关系来反算的2013年PM_{2.5}浓度值低于观测浓度值。为使反算和观测的PM_{2.5}数据平均值一致,本文采

用 $\delta_{\text{自动}} = 2 \times \delta_{\text{人工}}$ 的关系来替代消光系数, 反算和观测 $\text{PM}_{2.5}$ 的对比结果如图 6(b). 两者相关系数为 0.46, 低于自动观测, $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度平均值分别

为 $135.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $142.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 存在低估. 但是总体来看, 仍然可以利用人工观测下能见度反算 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度.

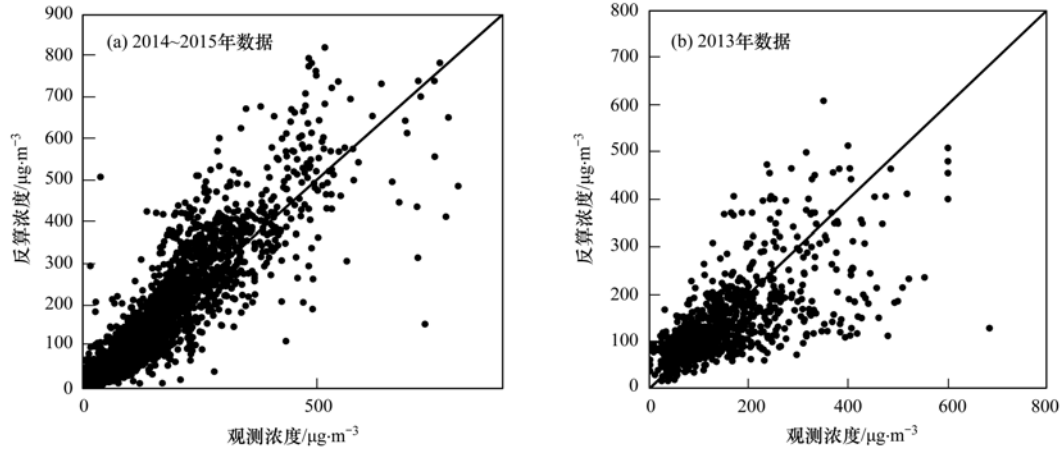


图 6 $\text{PM}_{2.5}$ 观测数据与利用能见度观测反算 $\text{PM}_{2.5}$ 数据对比

Fig. 6 Comparison of observed $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and the calculated $\text{PM}_{2.5}$ concentrations based on visibility

本文利用 1980 年以来的能见度观测数据对 $\text{PM}_{2.5}$ 数据进行反算, 见图 7. 从年均值的分布来看, 1980 ~ 1996 年, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际变化不大, 1997 ~ 2009 年呈现缓慢下降趋势, 2010 ~ 2012 年呈现上升趋势. 2005 年之后的变化趋势与苗蕾等^[42] 利用北京城区宝联观测站的分析结果类似, 但是浓度值低于王浩等^[43] 利用中国环科院观测站观测值. 由于本文没有将 90% 以上相对湿度值计算在内, 没有对沙尘天气的影响考虑在内, 另外不同观测站位置和观测仪器也会导致观测值存在差异, 所以本文反算的浓度与其他观测浓度存在差异. 此外, 北京观测站在 1997 年自西三环迁至大兴郊区, 会导致 1997 年之后数据低于搬迁之前的数据. 从逐月的浓度分布来看, 20 世纪 80 年代 1 月和 12 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度明显高于其他月份, 同时也显著高于 2000 年以来冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度, 体现了不同供暖方式对空气质量的影响.

利用与北京同样的方法对 1980 年以来的全国范围内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行了反算, 图 8 为 1980 ~ 1989、1990 ~ 1999 和 2000 ~ 2009 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布情况. 整体来看, 全国的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈上升的趋势. 京津冀地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在全国范围内始终处于较高的水平, 尤其是河北南部地区在 1990 ~ 1999 年时段内年平均浓度超过 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 2000 年之后京津冀部分地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有下降, 但是京津冀周边地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现明显地上升, 尤其是山西和河南北部地区. 长三角地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也一直呈上升趋势, 长三角沿海一带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于长三角内陆地区, 但是整体浓度低于京津冀地

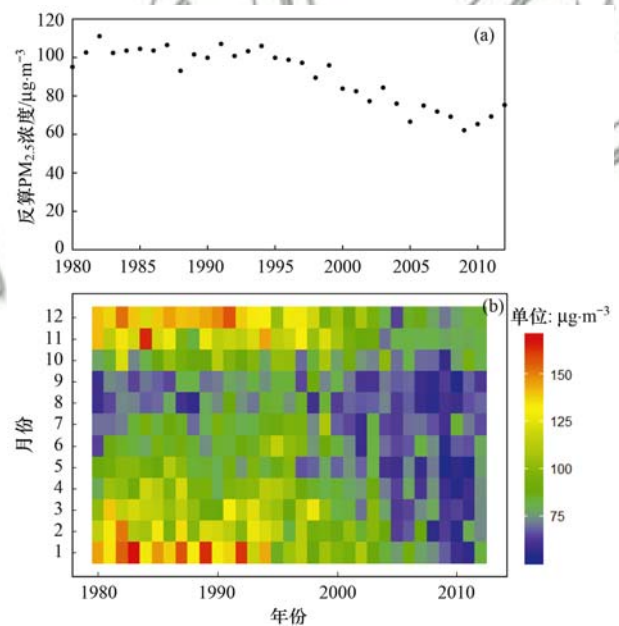


图 7 1980 ~ 2010 年北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的年均值和月均值分布

Fig. 7 Annual and monthly mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in Beijing from 1980 to 2010

区, 其中安徽中部在 2000 年之后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著上升. 珠三角地区同样 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现上升趋势, 尤其是在 2000 年之后的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度是 1980 ~ 1989 年平均浓度的两倍以上.

由于部分气象站存在迁站的问题, 所以数据的时间连续性受站点位置变化的影响较大. 由于能见度观测方式存在差异, 而且各地人工观测与自动观测的关系有待进一步验证, 会对结果造成一定的误差. 相对湿度观测方式的变化也会造成 $\text{PM}_{2.5}$ 反算结果存在不确定性.

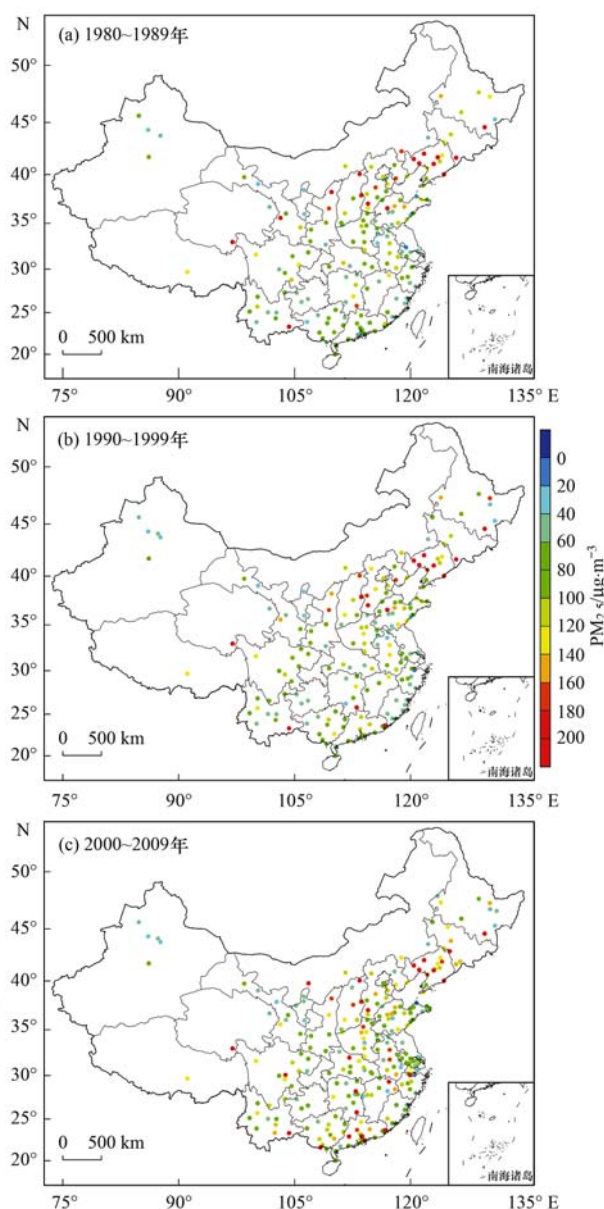


图8 不同时间段内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布

Fig. 8 Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration over China during different periods

3 结论

(1)在我国中东部大部分地区,可以对消光系数和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度在不同相对湿度下分别建立线性关系,在相对湿度 40% ~ 90% 之间的平均相关系数均大于 0.75.

(2)由于 $\text{PM}_{2.5}$ 组分和能见度观测存在区域之间的差异,北京、长三角和四川的 $\text{PM}_{2.5}$ 单位质量浓度在同样相对湿度下的消光效率大于其他地区.

(3)北京地区能见度与消光系数在相对湿度 20% ~ 90% 范围内的相关系数在 0.9 左右,相对湿度大于 90% 时相关系数明显下降,呈现雾的特征.广州能见度与消光系数的相关性在相对湿度大于 80% 的情况下就开始下降.不同地区湿度对能见度

影响程度不同.

(4)对北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 反算可知,1980 ~ 1996 年,北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年际变化不大,受采暖影响冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著较高,1997 ~ 2009 年呈现缓慢下降趋势,2010 ~ 2012 年呈现上升趋势.

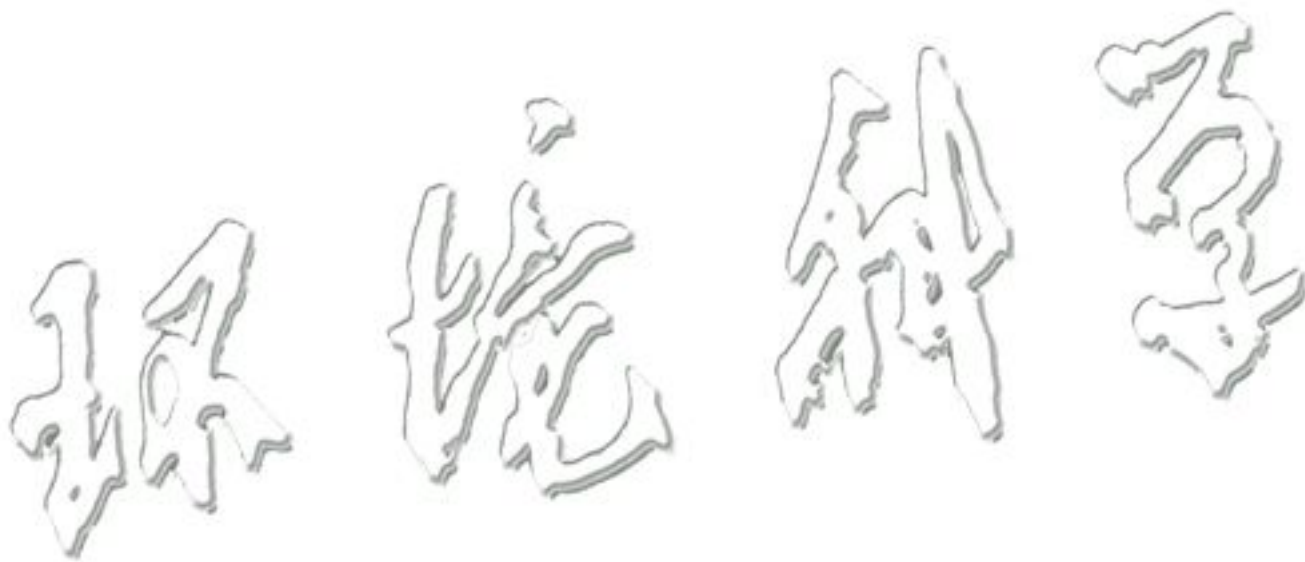
(5)1980 年以来,全国的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈上升的趋势,尤其是华北地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度始终高于全国其他地区.

参考文献:

- [1] GB/T 35223-2017, 地面气象观测规范 气象能见度[S].
GB/T 35223-2017, Specifications for surface meteorological observation-Meteorological visibility[S].
- [2] 陈静, 赵春生. 大气低能见度的影响因子分析及计算方法综述[J]. 气象科技进展, 2014, 4(4): 44-51.
Chen J, Zhao C. A review of influence factors and calculation of atmospheric low visibility [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2014, 4(4): 44-51.
- [3] Hand J L, Copeland S A, Day D E, *et al.* Spatial and seasonal patterns and temporal variability of haze and its constituents in the united states report V: June 2011[EB/OL]. <http://vista.cira.colostate.edu/Improve/improve-reports/>, 2016-08-12.
- [4] Li X H, He K B, Li C C, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ mass, chemical composition, and light extinction before and during the 2008 Beijing Olympics [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(21): 12158-12167.
- [5] Wang H B, Shi G M, Mi T, *et al.* Aerosol optical properties and chemical composition apportionment in Sichuan Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, 577: 245-257.
- [6] Lin Y F, Huang K, Zhuang G S, *et al.* A multi-year evolution of aerosol chemistry impacting visibility and haze formation over an Eastern Asia megacity, Shanghai[J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 76-86.
- [7] 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献[J]. 环境科学, 2017, 38(7): 2656-2666.
Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of $\text{PM}_{2.5}$ in Hangzhou[J]. Environmental Science, 2017, 38(7): 2656-2666.
- [8] 边海, 韩素芹, 张裕芬, 等. 天津市大气能见度与颗粒物污染的关系[J]. 中国环境科学, 2012, 32(3): 406-410.
Bian H, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Relationship between atmospheric visibility and particulate matter pollution in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2012, 32(3): 406-410.
- [9] 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.
- [10] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津冬季相对湿度对气溶胶浓度谱分布和大气能见度的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(3): 596-603.
Yao Q, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Effects of relative humidity on the aerosol size distribution and visibility in the winter in Tianjin [J]. China Environmental Science, 2014, 34(3): 596-603.
- [11] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系[J]. 环境科学学报, 2003, 23(4): 468-471.
Song Y, Tang X Y, Fang C, *et al.* Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing[J]. Acta

- Scientiae Circumstantiae, 2003, **23**(4): 468-471.
- [12] Zhang Q, Quan J N, Tie X X, *et al.* Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 578-584.
- [13] 樊高峰, 马浩, 张小伟, 等. 相对湿度和 PM_{2.5} 浓度对大气能见度的影响研究: 基于小时资料的多站对比分析[J]. *气象学报*, 2016, **74**(6): 959-973.
- Fan G F, Ma H, Zhang X W, *et al.* Impacts of relative humidity and PM_{2.5} concentration on atmospheric visibility: A comparative study of hourly observations of multiple stations [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2016, **74**(6): 959-973.
- [14] 张浩, 石春娥, 吴必文, 等. 合肥市能见度与相对湿度、PM_{2.5} 质量浓度的定量关系[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(6): 1001-1008.
- Zhang H, Shi C E, Wu B W, *et al.* Quantified relationships among the visibility, relative humidity and PM_{2.5} mass concentration in Hefei city [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(6): 1001-1008.
- [15] 白永清, 祁海霞, 刘琳, 等. 武汉大气能见度与 PM_{2.5} 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. *气象学报*, 2016, **74**(2): 189-199.
- Bai Y Q, Qi H X, Liu L, *et al.* Study on the nonlinear relationship among the visibility, PM_{2.5} concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2016, **74**(2): 189-199.
- [16] Han L J, Zhou W Q, Li W F, *et al.* Fine particulate (PM_{2.5}) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973-2013[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23604.
- [17] 陈静, 吴兑, 刘敬汉. 广州地区低能见度事件变化特征分析[J]. *热带气象学报*, 2010, **26**(2): 156-164.
- Chen J, Wu D, Liu Q H. Study of the variation trends of low visibility events in Guangzhou [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, **26**(2): 156-164.
- [18] Che H Z, Zhang X Y, Li Y, *et al.* Horizontal visibility trends in China 1981-2005[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(24): 124706.
- [19] Wu J, Fu C B, Zhang L Y, *et al.* Trends of visibility on sunny days in China in the recent 50 years [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 339-346.
- [20] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951-2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. *气象学报*, 2010, **68**(5): 680-688.
- Wu D, Wu X J, Li F, *et al.* Temporal and spatial variation of haze during 1951- 2005 in Chinese mainland [J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2010, **68**(5): 680-688.
- [21] Chen H P, Wang H J. Haze days in North China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(12): 5895-5909.
- [22] Han R, Wang S X, Shen W H, *et al.* Spatial and temporal variation of haze in China from 1961 to 2012 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **46**: 134-146.
- [23] 张静, 张志坚, 廖菲, 等. 广州站能见度数据质量评估及其参数化研究[J]. *热带气象学报*, 2017, **33**(6): 985-991.
- Zhang J, Zhang Z J, Liao F, *et al.* Study on evaluation and parameterization of visibility measuring meters in Guangzhou[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2017, **33**(6): 985-991.
- [24] 吴世美, 吴有恒. 人工与自动大气能见度观测的对比分析[J]. *贵州气象*, 2016, **40**(4): 81-85.
- Wu S M, Wu Y H. Contrast study on the observation of artificial and automatic measurements of the atmospheric visibility [J]. *Journal of Guizhou Meteorology*, 2016, **40**(4): 81-85.
- [25] Steinfeld J I. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [J]. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 1998, **40**(7): 26.
- [26] Pitchford M, Malm W, Schichtel B, *et al.* Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(11): 1326-1336.
- [27] 陈义珍, 赵丹, 柴发合, 等. 广州市与北京市大气能见度与颗粒物质量浓度的关系[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(7): 967-971.
- Chen Y Z, Zhao D, Chai F H, *et al.* Correlation between the atmospheric visibility and aerosol fine particle concentrations in Guangzhou and Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(7): 967-971.
- [28] Malm W C, Day D E. Estimates of aerosol species scattering characteristics as a function of relative humidity[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(16): 2845-2860.
- [29] 陶金花, 王子峰, 徐谦, 等. 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究[J]. *遥感学报*, 2015, **19**(1): 12-24.
- Tao J H, Wang Z F, Xu Q, *et al.* Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, **19**(1): 12-24.
- [30] 马佳, 于兴娜, 安俊琳, 等. 南京北郊冬季春季大气能见度影响因子贡献研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 41-50.
- Ma J, Yu X N, An J L, *et al.* Contributions of factors that influenced the visibility in north suburb of Nanjing in winter and spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 41-50.
- [31] 金艺娜. 长春市大气细颗粒物中碳组分分布特征及其来源研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. 35-46.
- Jin Y N. Study on distribution characteristics and source for carbon fraction in fine particulate matter in Changchun [D]. Changchun: Jilin University, 2015. 35-46.
- [32] Lai S C, Zhao Y, Ding A J, *et al.* Characterization of PM_{2.5} and the major chemical components during a 1-year campaign in rural Guangzhou, Southern China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **167**: 208-215.
- [33] Xia Y J, Tao J, Zhang L M, *et al.* Impact of size distributions of major chemical components in fine particles on light extinction in urban Guangzhou[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **587-588**: 240-247.
- [34] 黄玉虎, 李媚, 曲松, 等. 北京城区 PM_{2.5} 不同组分构成特征及其对大气消光系数的贡献[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(8): 1193-1199.
- Huang Y H, Li M, Qu S, *et al.* Characteristics of different components of PM_{2.5} and contribution to ambient light extinction coefficient in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(8): 1193-1199.
- [35] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* A review of current knowledge concerning PM_{2.5} chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(15): 9485-9518.
- [36] Li X R, Jiang L, Bai Y, *et al.* Wintertime aerosol chemistry in Beijing during haze period: Significant contribution from secondary formation and biomass burning emission [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **218**: 25-33.
- [37] Wang X M, Ding X, Fu X X, *et al.* Aerosol scattering coefficients and major chemical compositions of fine particles observed at a rural site in the central Pearl River Delta, south China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 72-77.

- [38] 陈源, 谢绍东, 罗彬. 成都市大气细颗粒物组成和污染特征分析 (2012-2013 年) [J]. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- Chen Y, Xie S D, Luo B. Composition and pollution characteristics of fine particles in Chengdu from 2012 to 2013 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(3): 1021-1031.
- [39] 于超, 于兴娜, 赵天良, 等. 南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用 [J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 972-979.
- Yu C, Yu X N, Zhao T L, *et al.* Important effect of secondary inorganic salt extinction on visibility impairment in the northern suburb of Nanjing [J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 972-979.
- [40] Zhao X J, Zhang X L, Pu W W, *et al.* Scattering properties of the atmospheric aerosol in Beijing, China [J]. Atmospheric Research, 2011, **101**(3): 799-808.
- [41] 元洁, 刘保双, 程渊, 等. 2017 年 1 月天津市区 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征及高时间分辨率来源解析研究 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- Yuan J, Liu B S, Cheng Y, *et al.* Study on characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and chemical components and source apportionment of high temporal resolution in January 2017 in Tianjin urban area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1090-1101.
- [42] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春, 等. 北京 2005-2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的演变特征 [J]. 气象, 2016, **42**(8): 954-961.
- Miao L, Liao X N, Wang Y C, *et al.* Evolution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Beijing during 2005-2014 [J]. Meteorological Monthly, 2016, **42**(8): 954-961.
- [43] 王浩, 高健, 李慧, 等. 2007-2014 年北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化特征 [J]. 环境科学研究, 2016, **29**(6): 783-790.
- Wang H, Gao J, Li H, *et al.* Variation of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Beijing area during 2007-2014 [J]. Research Environmental Sciences, 2016, **29**(6): 783-790.



CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)