

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.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚	(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣	(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰	(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚	(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余	(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉	(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰	(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊	(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀	(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰	(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲	(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣	(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰	(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超	(1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任	(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰	(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌	(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新	(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬	(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫	(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高	(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠	(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民	(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中	(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳	(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪	(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安	(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生	(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏	(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳	(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华	(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲	(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓	(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe) 可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永	(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞	(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政	(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖	(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕	(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂	(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟	(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚	(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启	(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹	(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良	(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳	(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand	(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔	(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪	(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波	(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋	(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹	(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣	(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥	(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青	(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏	(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)	信息(1663, 1796, 1833)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估

赵秀娟¹, 李梓铭², 徐敬¹

(1. 北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089)

摘要: 为了选择适合京津冀地区能见度预报的参数化方案, 为霾的预报提供更准确的能见度预报产品. 根据实际应用需求, 改进了基于气溶胶体积浓度建立的 Chen 等能见度参数化方案(S1), 并利用 2017 年 2 月快速更新多尺度分析和预报系统-化学子系统(RMAPS-CHEM v1.0)的预报结果, 对比评估了该方案与基于 PM_{2.5}浓度建立的参数化方案(S2)和 Mie 散射计算方案(S3)在京津冀地区的预报效果. 结果表明:①模式系统对京津冀地区的 PM_{2.5}浓度预报总体较好, 预报值与观测值非常接近, 二者的相关系数在大部分地区可达 0.8 以上, 小时相对湿度的预报值与观测值相关在 0.78 以上, 平均误差低于 3.91%. ②三套方案计算的能见度都能较好地预报出 2017 年 2 月京津冀地区能见度的时间演变趋势, 且在大部分时间三者计算的能见度都非常接近. 总体上 S1 计算的能见度最低, S3 计算的能见度最高, S2 居中. 在京津冀大部分地区, S1 的均方根误差和归一化平均绝对误差最低, S3 的最高, S2 居中且在北京地区表现最佳. ③能见度大于 10 km 时三套方案计算结果都偏低, 其中 S3 的平均误差和均方根误差最低, 能见度低于 10 km 时, 特别是对出现频率较高的 1~5 km 低能见度的预报, S1 方案的平均误差、均方根误差和归一化平均绝对误差都是最低的, 更适合京津冀地区霾天气能见度的预报应用.

关键词: 霾; 能见度; 参数化方案; 数值预报; 预报检验

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1688-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808244

Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days

ZHAO Xiu-juan¹, LI Zi-ming², XU Jing¹

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China)

Abstract: In order to select a visibility parameterization scheme that can be applied well to the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region and provide better forecasting, a modified parameterization of visibility based on the aerosol volume concentration and RH is developed in this study. This upgraded parameterization scheme (S1) and other schemes based on PM_{2.5} and RH (S2) and Mie theory (S3) are evaluated using forecast data from Rapid refresh Multi-scale Analysis & Prediction System-CHEM (RMAPS-CHEM v1.0). A performance test using data from February 2017 showed that: ① The concentration of PM_{2.5} is forecast well in the BTH region. The correlation coefficients of the observed and forecast daily average PM_{2.5} in most areas are higher than 0.8, and the forecasted values are close to those observed. The mean errors (ME) are -7.54, -0.46, and -11.0 μg·m⁻³ for the forecast domain, south and north of Hebei province, and 12.04, 2.02, and -13.31 μg·m⁻³ for the cities of Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang, respectively. The correlation coefficients for the forecast and observed hourly relative humidity in the three typical cities are above 0.78, and the mean errors are lower than 3.91%. ② All three parameterization schemes predict the time evaluation of visibility in the BTH region during February 2017 well. In general, the visibility predicted with S1 is the lowest, while that of S3 is the highest; the predictions of S2 are intermediate. In most areas of the BTH region, S1 has the minimum root mean squared error (RMSE) and normalized mean error (NME) between the observed and forecast visibility, while S3 has the maximum RMSE and NME. The error of S2 is between that of S1 and S3, but it shows the best performance in the Beijing area. ③ When the observed visibility is higher than 10 km, the predicted visibilities of the three schemes are all lower than the observed visibility, and S3 has the lowest mean error (ME) and RMSE. S1 has the lowest MB, RMSE, and NME when the visibility is lower than 10 km, especially for visibilities of 1 km to 5 km, which occurred more frequently during heavy haze episodes. The comparison of the results indicated that S1 is best for application to haze forecasting in the BTH region.

Key words: haze; visibility; parameterization scheme; numerical forecast; performance test

大气能见度是表征大气透明度的一个重要指标. 在空气比较清洁的地区, 地面水平能见度主要与雾有关, 还与其他天气因素例如降水和降雪等有关, 但在重污染地区, 由于气溶胶细粒子浓度水平较高, 造成霾天气频发, 其对能见度降低有明显作用. 霾污染目前在我国比较严重, 特别是东部污染较重的城市群地区重度霾事件频发^[1~4], 导致能见度大范围降低, 对交通、生活及人们的生命财产造

成损失. 因此, 大气能见度的相关研究受到大气、环境领域乃至社会的广泛关注, 能见度的预报也成

收稿日期: 2018-08-30; 修订日期: 2018-10-19

基金项目: 北京自然科学基金项目(8161004); 北京市科技计划项目(Z181100005418014); 北京市气象局科技项目(BMBKJ201703005); 国家自然科学基金项目(41505110)

作者简介: 赵秀娟(1977~), 女, 博士, 正研级高工, 主要研究方向为大气环境与空气质量数值模拟, E-mail: xjzhao@ium.cn

为霾天气预报以及相关环境气象预报服务的重要基础之一。

大气能见度的预报方法主要有统计预报和数值预报两类。统计预报一般是通过分析霾天气出现时温度、湿度、风速、压强等气象要素以及气象诊断量和大气能见度的相关关系,建立大气能见度的统计预报方程^[5-9]。数值预报主要是利用包括物理过程也包括化学过程(二次转化)的大气化学模式开展气溶胶颗粒物的预报,从而预报霾及其对能见度的影响^[10-14],适合我国霾天气较频繁的地区。

目前,对于霾天水平能见度的参数化方案主要是如何考虑气溶胶的吸湿增长效应,通用的方法分为两类,一类是通过考虑气溶胶各化学组分吸湿增长计算消光系数的方案,代表性工作如美国的 IMPROVE 方程,考虑的是 $\text{PM}_{2.5}$ 各化学组分质量浓度与气溶胶消光系数之间的定量关系^[15-17];另外一类是建立气溶胶消光系数与粒径分布之间的定量关系,Chen 等^[18]的方案就属于此类工作,该工作通过观测得到的粒度谱、不同模态气溶胶的吸湿增长因子、环境消光系数等,结合 Mie 散射理论,在分析影响气溶胶消光能力主要因素的基础上,建立了消光系数与气溶胶体积浓度与相对湿度的定量关系模型。国内采用 IMPROVE 方程进行能见度诊断计算的化学模式有通用多尺度空气质量模式 CMAQ^[11]、中国气象科学研究院研发的大气化学模式 GRAPEA_CUACE^[12]、区域大气环境模式系统 RegAEMS^[13],模拟评估的结果普遍表明对于较低能见度(能见度低于 5 km),模式系统预报值往往偏高。胡俊等^[19]依据 Mie 理论和大气分子的消光特性,提出了一种改进的能见度参数化方案,并采用 WRF-Chem 模式的模拟结果,对比评估了该方案与 IMPROVE 方案、Chen 等^[18]方案在南京地区的预报效果。结果表明 IMPROVE 方案模拟能见度整体偏高,Chen 等方案模拟的大气能见度略低,在低能见度时间段模拟较好,在能见度 < 1 km 范围内,模拟效果优于其他两种方案。本地化改进的方案模拟的能见度相比效果最佳,但是在能见度 < 5 km 时模拟依然偏高。已有的研究工作表明,虽然不同的研究采用的大气化学模式和能见度参数化方案不同,但是面临的普遍问题是对于低能见度模拟偏高。这一方面是因为大部分化学模式目前对雾-霾期间的气溶胶浓度模拟偏低,同时对雾-霾期间的高相对湿度模拟偏干共同造成的^[12,13]。另一方面,高湿条件下气溶胶吸湿增长因子的不确定性增大也是原因之一^[20-22]。此外,气溶胶物理化学特性的时空不均匀性,也使得基于观测得到的参数化方案

适用性受限,胡俊等的研究结果也从一定程度上印证了这一点^[19]。

笔者建立北京区域环境气象数值预报系统时采用的是 Chen 等^[18]在天津武清建立的参数化方案,对北京地区能见度的预报检验结果表明,该方案对秋冬季低能见度过程预报较好,部分能见度低于 2 km 的过程模式预报偏高^[23]。随着近期能见度参数化新研究成果的不断报道,本研究希望可以对更多的方案,确定如何在相同的模拟能力条件下,优选最适合京津冀地区能见度预报的参数化方案,以期对霾天气的预报预警提供更准确的能见度预报产品。

1 材料与方法

1.1 能见度参数化方案介绍

参考已有研究成果和笔者在北京及周边地区预报检验的情况,本研究未采用 IMPROVE 方案开展能见度的对比。一是考虑到已有研究工作包括在京津冀、南京地区和珠三角地区的应用都表明该方案对低能见度预报明显偏高。另外,该方案用到了颗粒物中多种气溶胶化学组分浓度,但目前大气化学模式普遍对气溶胶化学组分模拟不够准确(笔者也曾检验过典型污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 各化学组分的模拟效果)。相比而言,表征气溶胶总量的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的模拟要优于各气溶胶化学组分分量的模拟效果。因此,在本研究中重点考虑了基于 PM 总量建立的参数化方案开展对比分析。考虑到参数化方案的适用性,本研究选择了在京津冀地区开展实验建立的参数化方案进行对比,同时也将基于 Mie 散射的计算方案考虑在内,共 3 个方案。

1.1.1 改进的 CHEN 能见度参数化方案

Chen 等^[18]利用 Hachi 外场观测实验数据,考虑气溶胶体积浓度和相对湿度建立了气溶胶消光系数的参数化方案,计算公式如下:

$$K_{\text{ex}} = k \times V^a \times (1 - \text{RH})^{-b \cdot \text{RH}} \quad (1)$$

$$V_{\text{is}} = \frac{3}{K_{\text{ex}}} \quad (2)$$

式中, K_{ex} 为气溶胶消光系数, Mm^{-1} , V 为 $\text{PM}_{1.0}$ 以下的干气溶胶体积浓度, $\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, RH 为相对湿度, %, V_{is} 为能见度, km, k 为平均体积消光系数, $\text{Mm}^{-1} \cdot (\mu\text{m}^3 \cdot \text{cm}^{-3})^{-1}$, 其与 a 、 b 均为拟合参数, 分别为 9.08、0.944 和 0.475^[18]。Chen 等^[18]的研究指出,在 RH 低于 90% 时气溶胶的消光系数主要受气溶胶体积浓度的影响,当 $\text{RH} > 90\%$ 时,相对湿度就起主导作用了。因此,该方案在 $\text{RH} > 90\%$ 时计算结果偏差有所增大。由于实际观测 $\text{PM}_{1.0}$ 较少,很难对模式预报的 $\text{PM}_{1.0}$ 进行检验,同时业务

预报长期检验结果表明,模式对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的预报能力整体表现较好^[23],因此,在采用该方案进行能见度预报时,针对实际应用需求对其进行了改进.利用本研究在北京市昌平区气象局获得的 $\text{PM}_{1.0}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度同期观测结果进行了拟合,将 $\text{PM}_{1.0}$ 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中所占比例确定为 0.88 (图 1),进而利用模式预报的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行能见度的计算.此外,该方案在拟合时并未对相对湿度设定上限,在应用过程中存在对夏季高湿度地区 (RH 接近或等于 100%) 能见度预报过低的现象,通过典型过程分析,将 RH 限定在 98% 以下.为了方便分析对比,文中将此改进后的方案记为方案 1 (S1).

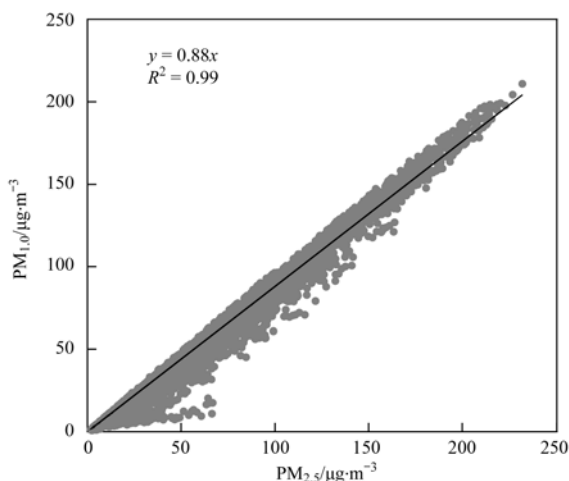


图 1 $\text{PM}_{1.0}$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的线性拟合关系

Fig. 1 Linear fitting between $\text{PM}_{1.0}$ and $\text{PM}_{2.5}$

1.1.2 基于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的能见度参数化方案

陈一娜等^[20]在北京地区开展了气溶胶光学特征参数及大气能见度的连续观测,并利用观测结果对已发表的气溶胶光散射吸湿增长因子拟合方案进行了对比,系统分析了大气消光特征和影响大气消光能力的关键因子,研究结果表明气溶胶散射作用占环境总消光作用的 94% 以上,在夏秋季,相对湿度可以使气溶胶的散射能力提升 70% ~ 80%. 利用观测数据建立了包含 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度和相对湿度两个因子的气溶胶消光参数化模型[式(3)],给出了不同季节以及全年的回归方程系数^[17].

$$K_{\text{ex}} = a \times M^b \times (1 - \text{RH})^{-c \cdot \text{RH}/100} \quad (3)$$

式中, M 为 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 由于本文对能见度方案的对比分析集中在冬季,因此系数 a 、 b 和 c 采用了其冬季的回归结果,分别为 3.339、1.027 和 0.324,在此方案中 RH 最高限值为 99%. 本方案记为方案 2 (S2).

1.1.3 Mie 散射计算方案

本研究拟采用北京区域环境气象数值预报系统

(BREMPs) 预报的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度作为方案 S1 和 S2 的输入进行分析. 该系统是以 WRF-Chem 模式为主积分模式,其本身考虑了气溶胶辐射参数的计算,采用的是 Mie 散射理论,利用模式模拟的 4 个谱段的气溶胶数浓度、气溶胶化学组分和气溶胶含水量计算得到 550nm 处的气溶胶消光系数,计算结果由模式直接输出,理论上代表的是比较精确的结果,也作为方案之一进行对比,记为方案 3 (S3).

1.2 模式系统介绍

2016 年笔者对已经建立的北京区域环境气象数值预报系统进行了全面介绍和检验^[23]. BREMPs 以 WRF-Chemv3.3.1 为主积分模式^[24],由北京地区快速更新循环同化预报系统 (BJ-RUC) 提供气象背景场,区域设置为单层,覆盖华北大部. 基于检验结果的分析,近两年对模式系统进行了优化改进,并成为北京市气象局快速更新多尺度分析和预报系统的化学子系统 RMAPS-CHEMv1.0.

该系统采用双重嵌套模拟设置 (图 2),外层水平分辨率 9 km,覆盖范围包括内蒙东部、陕西、山西、山东、河南北部、河北、天津、辽宁及北京等地;内层水平分辨率 3 km,覆盖京津冀区域. 模式采用 Lambert 地图投影方式,中心点经纬度为 39.5°N, 114.8°E;外层经、纬向格点数分别为 223 和 202,内层依次为 232 和 253;模式层顶为 50 hPa,垂直方向分为 38 层,1500 m 以下取 17 层. 系统选用的主要物理、化学过程方案设置参见文献 [23]. 在新系统中将华北地区城市下垫面数据集进行更新,利用基于 2009 年 Landsat-TM 高分辨率卫星资料形成了新的京津冀地区城市地表分类,取代了原来模式采用的 1992 ~ 1993 年的 USGS 24 类地表分类数据,并考虑了城市地表过程的影响,因此在原来的物理方案中增加了 UCM 的城市冠层方案. 气象背景场由快速更新多尺度分析和预报系统-短期预报子系统 (RMAPS-STv1.0) 提供,该系统在原来 BJ-RUC 的基础上进行了改进,应用了国际上先进的热启动循环技术,实现了天气雷达三维数字化拼图资料同化,在国内率先实现从地基 GPS 总水汽反演同化到地基 GPS 信号总延迟资料直接同化的过渡,去除了因基于地面观测计算 GPS 总水汽所产生的误差,有效改善了模式对水汽和相对湿度的预报能力.

排放源清单数据采用清华大学创建的 MEIC 清单 (<http://www.meimodel.org/>),该清单包含 5 个排放部门 (电力、工业、民用、交通、农业),代表年份为 2012 年,水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间

分辨率为月。

1.3 观测数据及检验方法

本研究重点关注覆盖京津冀地区的 D02 区域。PM_{2.5} 浓度观测数据取自全国城市空气质量实时监测数据平台 (<http://106.37.208.233:20035/>) 近 1500 个站点的小时数据, 通过筛选, D02 区域为 237 个, 筛选依据为“逐日有效小时均值数据超过 75% 可参与日均值计算; 逐月有效日均值数据超过 75% 可参与月均值计算”。考虑该模式系统重点预报服务于京津冀地区, 以及该区域内污染源强分布存在极大空间不均匀性, 在检验过程中还划分了河北南部 (HB_S)、河北北部 (HB_N)、北京城市 (BJ)、天津城市 (TJ) 以及石家庄城市 (SJZ) 这 5 个重点区域 (图 2)。用于能见度预报效果检验的数据为全国地面站监测资料, D02 区域覆盖有效数据站点总计 448 个。

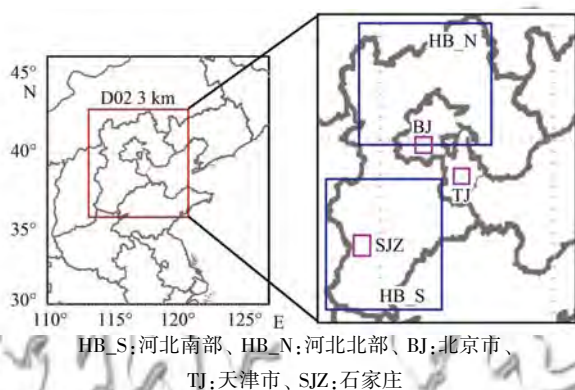


图 2 模式预报及检验区域

Fig. 2 Forecast regions and areas defined for the performance test

PM_{2.5} 和能见度的预报结果检验采用实时监测站点的观测数据, 检验步骤如下: 首先, 根据各监测站点的经纬度信息, 通过双线性插值方法将模式网格预报结果插值至观测站点, 生成模式预报和观测位置相匹配的数据集; 然后, 依照上述重点区域的划分 (图 2), 选取各区域覆盖的观测站点进行统计分析, 评估模式对于不同区域范围预报的准确性。参与评估的统计量选用相关系数、平均误差、均方根误差和归一化平均绝对误差。

平均误差 (ME) 定义为:

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$$

均方根误差 (RMSE) 定义为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

归一化平均绝对误差 (NME) 定义为:

$$NME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{O_i}$$

式中, O_i 和 P_i 分别为 PM_{2.5} 或者能见度某时刻在检验站点上的观测值与预报值。ME 可以表征模式预报的总体偏差情况, 正值代表预报偏高, 负值则代表预报偏低。RMSE 和 NME 都表征了预报值相对观测值的偏离程度, 其值越小, 表明模式预报精度越高。

2 结果与讨论

2017 年 2 月京津冀地区发生两次区域性霾天气过程, 分别是 2 月 1~4 日和 2 月 11~15 日。两次过程中, PM_{2.5} 最高日均浓度在北京地区达到了 313 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 228 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在石家庄地区分别达到了 350 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 435 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。北京、天津和石家庄地区大部分时间小时能见度低于 3 km, 其中第一次过程在北京和石家庄均出现了 1 km 以下的严重低能见度时段, 第二次过程仅石家庄地区出现了小时能见度低于 1 km 的情况。本文利用 RMAPS-CHEM v1.0 系统 2017 年 2 月的预报结果进行分析与评估。模式预报的 PM_{2.5} 浓度和 RH 统一用于 S1 和 S2 的能见度计算, 并与模式采用 Mie 散射方案预报的结果进行对比。为了保证污染过程的连续性, 评估和检验时段从 1 月 29 日开始, 并对两次霾过程进行了小时能见度的对比分析。

2.1 模式验证

在进行能见度参数化方案评估之前, 首先对模式预报的 PM_{2.5} 浓度和相对湿度进行检验。图 3 为 2017 年 1 月 29 日~2 月 28 日 D02 区域及重点地区和城市 PM_{2.5} 浓度观测与 24 h 预报结果的逐日变化。从中可以看出, RMAPS-CHEM v1.0 系统能较准确地预报出京津冀地区 PM_{2.5} 的变化趋势和范围。PM_{2.5} 日均浓度的预报值与观测值之间的相关系数在 D02 区域和河北北部最高, 分别为 0.9 和 0.93, 其次是河北南部的 0.87, 石家庄市的 0.82 和北京市的 0.81, 天津市相对最低为 0.66。模式对 D02 区域、河北南部及北部预报结果与实况都比较接近, 预报的平均误差分别为 -7.54、-0.46 和 -11.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。对重点城市的预报, 北京市在 2 月 9 日前预报偏差较明显, 之后预报与实况非常接近。石家庄市预报总体偏低, 对天津市预报在第一个过程偏高, 而第二个过程偏低明显。三市的平均误差分别为 12.04、2.02 和 -13.31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。总体而言, 模式对第二个过程 PM_{2.5} 浓度峰值预报偏低, 而对第一个霾过程的结束时间预报偏早。

相对湿度的检验, 选择了北京、天津和石家庄作为京津冀的代表城市进行分析。图 4 给出了 3 个城市相对湿度预报结果与观测实况的逐时变化, 模式对能见度计算的关键气象要素相对湿度的预报表

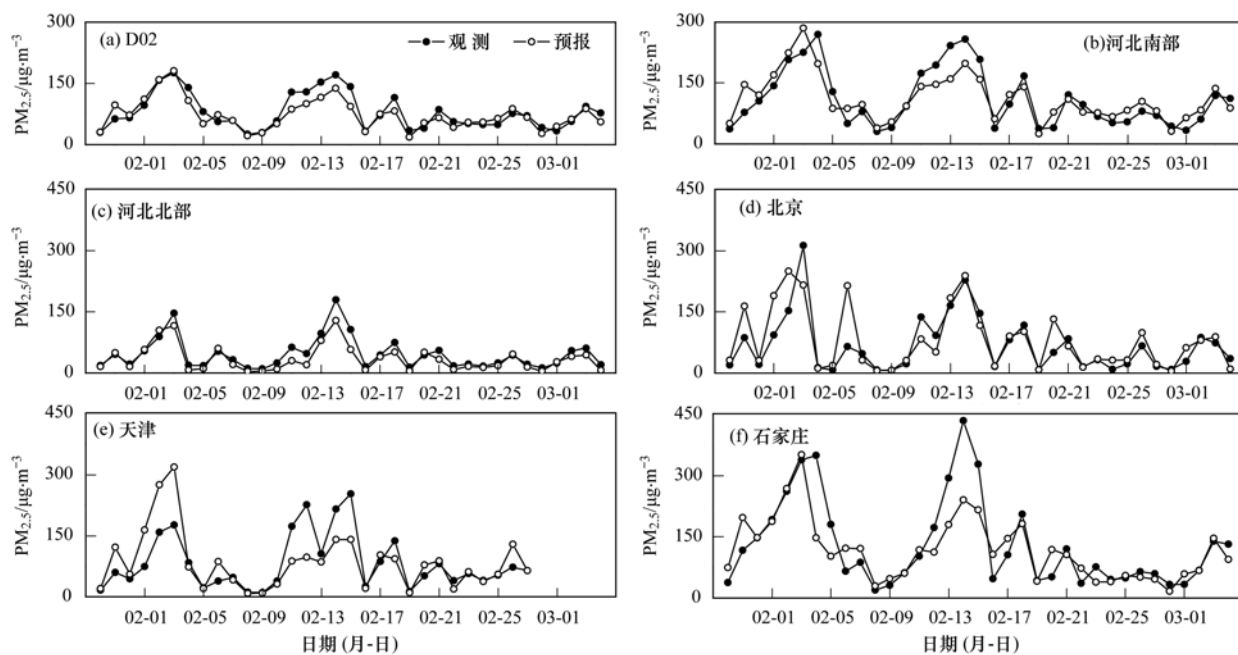


图3 2017年2月PM_{2.5}质量浓度观测资料与预报结果的逐日变化

Fig. 3 Comparison between the observed and forecast daily mean PM_{2.5} concentrations in different areas during February 2017

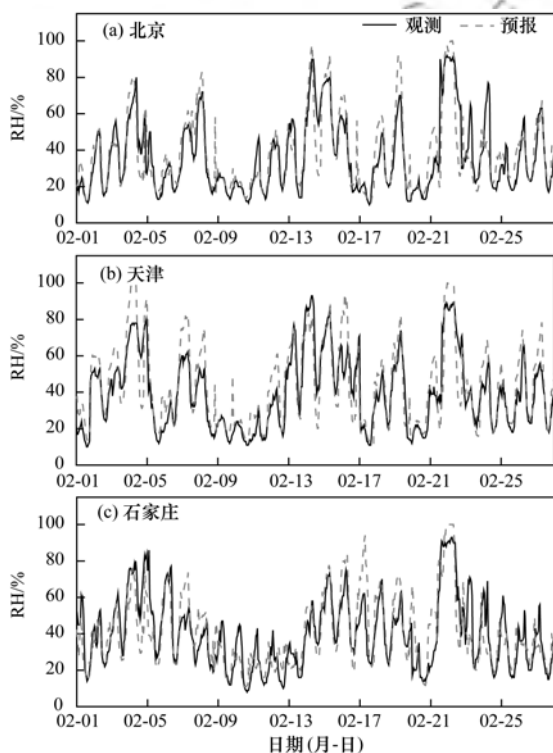


图4 2017年2月典型城市相对湿度观测资料与预报结果的逐时变化

Fig. 4 Comparison between the observed and forecast hourly relative humidity values in the typical cities during February 2017

现很好,北京、天津和石家庄预报与实况相对湿度的相关系数分别为0.85、0.86和0.78。相对湿度的日变化和霾过程中相对湿度的逐日演变趋势,在模式预报中均有很好的体现。整体上,模式对相对湿度的预报稍有偏高,北京、天津和石家庄预报的平均误差都为正值,分别为1.45%、3.91%和

0.06%,均方根误差分别为11.23%、12.24%和12.63%。北京相比在3个城市中预报效果最好,相关系数较高,误差最低,特别是两次霾过程预报与实况非常接近。对天津预报整体偏高,特别是在第一个霾过程中最明显。对石家庄在低相对湿度时段预报有所偏低,整体上是偏高的趋势,对两次霾期间相对湿度的预报与实况比较吻合,第一次过程预报略有偏低。

2.2 能见度参数化方案预报效果评估

图5给出了三套方案计算的能见度与观测实况的逐日变化。三套方案计算的能见度均能较好地预报出2017年2月京津冀地区能见度的时间演变趋势,从不同区域和城市预报能见度与观测值之间的相关统计来看,相关系数均可达到0.87以上,特别是D02区域、河北北部和北京市达到了0.92以上(表1)。对比来看,S3的相关系数在三套方案中相对最高,其次是S2和S1。总体上S1计算的能见度是最低的,而S3计算的能见度是最高的。从平均误差来看,三套方案除了在北京和天津预报偏低以外,在整个D02区域、河北南部、河北北部和石家庄市都是偏高的,在这些预报偏高的地区,S1的均方根误差和归一化平均绝对误差最低,S3的最高,S2居中。但对于北京和天津,则表现不尽相同,在北京地区S2方案计算的能见度的预报平均误差、均方根误差和归一化平均绝对误差都是最低的,这可能是因为该方案本身就是在北京城区通过观测实验数据拟合建立的,其更适用于北京地区的能见度计算,而在天津地区三套方案的预报结果在统计参

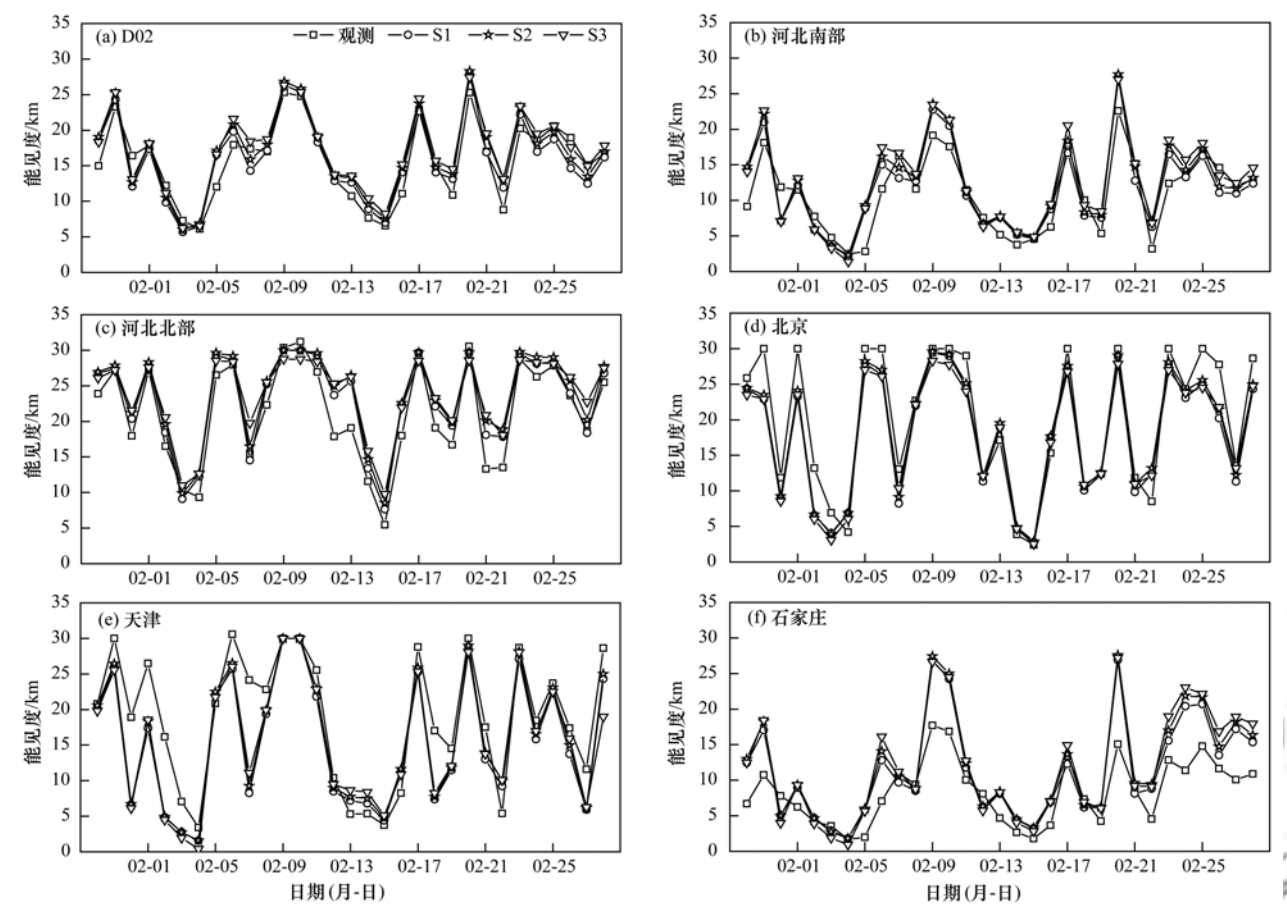


图 5 2017 年 2 月能见度观测与方案 S1 ~ S3 预报结果的逐日变化

Fig. 5 Comparison between the observed and forecast daily visibility calculated with S1-S3

表 1 不同能见度参数化方案预报结果与观测值统计对比

Table 1 Test statistics for the forecast and observed daily mean visibilities calculated with the different schemes							
项目	方案	检验区域					
		D02	河北南部	河北北部	北京	天津	石家庄
相关系数	S1	0.92	0.89	0.96	0.96	0.87	0.88
	S2	0.93	0.90	0.95	0.96	0.87	0.89
	S3	0.95	0.91	0.95	0.96	0.88	0.89
平均误差/km	S1	0.17	0.70	1.77	-2.01	-3.15	2.96
	S2	0.99	1.38	2.53	-1.55	-2.65	3.58
	S3	1.44	1.76	2.46	-2.09	-2.72	3.70
均方根误差/km	S1	2.19	2.78	2.67	3.48	5.47	4.66
	S2	2.32	3.03	3.32	3.16	5.19	5.24
	S3	2.31	3.14	3.55	3.45	5.16	5.54
归一化平均绝对误差	S1	0.13	0.29	0.13	0.18	0.27	0.49
	S2	0.14	0.31	0.17	0.17	0.27	0.54
	S3	0.15	0.34	0.19	0.16	0.29	0.57

数上均没有表现出明显优势,这可能与模式在此期间对天津市的气溶胶含量和相对湿度预报的偏差较大有关. S2 在北京的最优表现也说明,经验的参数化方案是具有一定的地区适用性的. 从整个区域的统计角度来看, S1 方案具有一定的优势. 原因在于,从整个京津冀区域而言,模式预报的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体偏低,造成不同的能见度参数化方案计算结果偏高,而在相同的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度水平下

S1 方案计算的能见度最低,这在一定程度上弥补了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度预报偏低的不足. 对京津冀地区而言,不同的模式预报或者模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体偏低,特别是严重霾或者重污染期间偏低更加明显^[12,25,26],因此,相比而言 S1 更适合应用于京津冀地区目前的能见度预报.

为了进一步对比三套方案的性能,本文将两次典型霾过程的小时能见度预报情况进行了分析(图

6). 对比来看, 模式对第一个霾过程的预报要优于第二个次过程, 在第一个过程中三套方案的计算结果差别很小, 能见度在 10 km 以上的时候, S1 方案计算的能见度最低, S3 最高. 在北京和石家庄预报与实况比较接近, 但在天津市预报明显偏低, 这是该过程中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和相对湿度在天津市均预报偏高造成的. 第二个过程观测的能见度具有明显的日变化特征, 且 2 月 13 日夜间在北京市出现了能见

度的突然好转, 天气形势相比第一个过程更加不稳定, 总体上三套方案都较好地预报出了这次霾过程中能见度的时间演变趋势, 但是由于 $\text{PM}_{2.5}$ 在这次过程中总体预报偏低, 因此能见度的预报整体是偏高的, 在这种情况下, 计算能见度最低的 S1 方案与实况更加接近, S2 与 S1 差别不明显, S3 在某些时段明显则高于前两套方案, 这种差异在天津表现最明显.

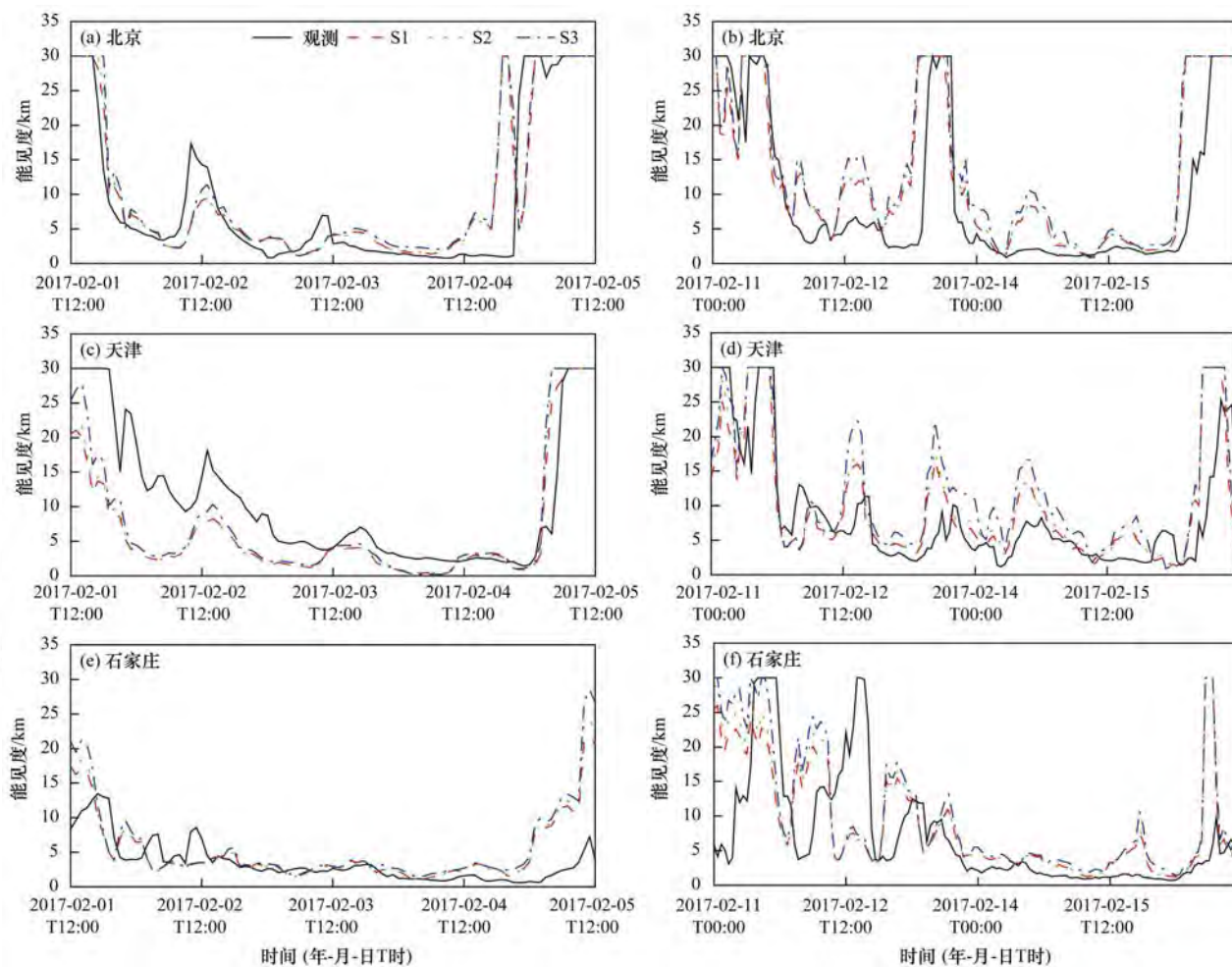


图 6 两次霾过程中能见度观测与方案 S1 ~ S3 预报结果的逐时变化

Fig. 6 Hourly variations in the observed and forecast visibility calculated using S1-S3 during two haze events

为了进一步量化分析三套参数化方案对能见度的预报性能, 本文将上述两个严重霾过程期间 3 个城市的逐小时能见度观测和预报结果进行分级统计. 按照观测能见度分为 4 级, 分别为: 能见度 ≥ 10 km, $5 \text{ km} \leq \text{能见度} < 10 \text{ km}$, $1 \text{ km} \leq \text{能见度} < 5 \text{ km}$, 能见度 $< 1 \text{ km}$. 每级样本量分别为 184、127、376 和 33 个, 两个过程中能见度有近一半的时间是在 1 ~ 5 km 的范围内, 1 km 以下的低能见度出现较少. 图 7 给出了三套方案预报能见度的分级统计结果. 平均误差的结果显示, 三套方案预报的能见度在 10 km 以上都是预报偏低的, 由于 S1 计算能见度相对是最低的, 所以平均误差最大. 10 km 以下, 则三

套方案整体预报都是偏高的, 其中 S1 的偏差最小, 在 1.5 ~ 2.2 km 之间, 而 S3 的偏差最大, 在 2.1 ~ 3.9 km 之间, S2 稍高于 S1, 在 1.6 ~ 2.6 km 之间. 均一化平均标准偏差的结果显示随着能见度的降低, 预报结果的标准偏差越大, 3 个方案相比在不同的能见度等级中均是 S1 偏差最低, 其次是 S2 和 S3. 在能见度出现时间最长的 1 ~ 5 km 范围内, S1 ~ S3 的归一化平均绝对误差分别为 1.1、1.2 和 1.5, S1 的预报偏差约为观测值的 1 倍左右, 而 S3 则是 1.5 倍左右. 能见度低于 1 km 时三套方案预报的归一化平均绝对误差在 2.0 ~ 2.7 之间, 是观测的 2 ~ 3 倍, 相对而言预报效果是最差的, 这与模

式在霾最严重时段对 $PM_{2.5}$ 浓度预报偏低直接相关。从均方根误差来看, 随着能见度降低误差整体都在降低。与平均误差类似, 在 10 km 以上, S3 误差最低, S1 误差最大, 但能见度低于 10 km 的各个级别上 S1 方案的误差都是最低的。在能见度 1~5 km 范围内, 三套方案的均方根误差分别是 4.9、5.2 和 5.8 km。逐小时的能见度预报统计结果总体上来看, S1 误差和偏差最低, 性能最优, 其次是 S2 和 S3, 特别是霾预报服务最关心的低能见度(5 km 以下)的预报, S1 方案表现相对更佳。

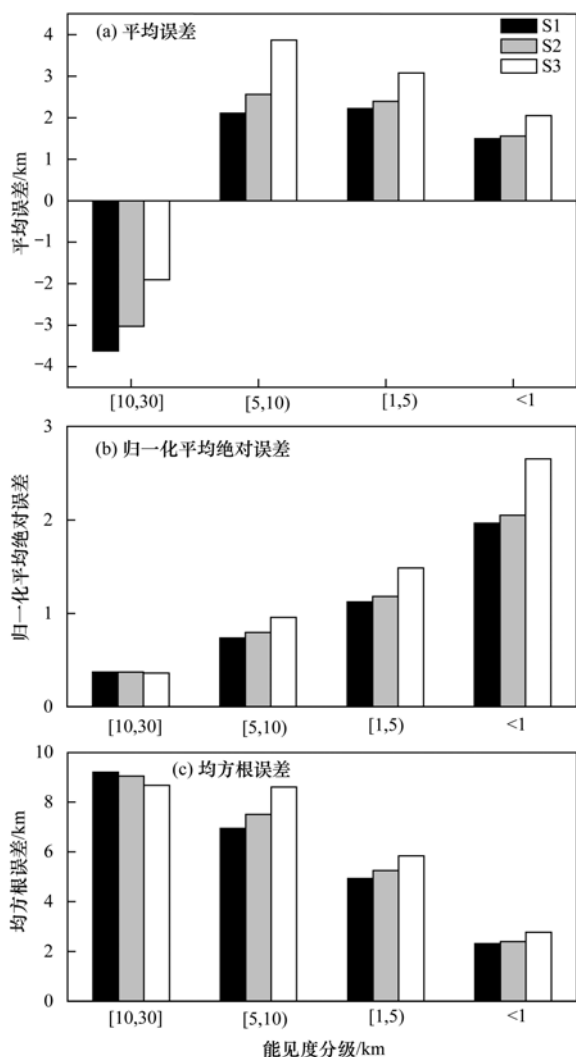


图7 三套参数化方案在不同能见度等级预报结果的平均误差、归一化平均绝对误差和均方根误差

Fig. 7 Test statistics for the forecast and observed hourly visibilities at different visibility levels: ME, NME, and RMSE

3 结论

(1) 模式系统对京津冀地区和重点城市的 $PM_{2.5}$ 浓度预报总体较好, 预报值与观测值的相关系数在大部分地区高于 0.8。两个重度霾天气过程中, 总体上模式对第二个过程 $PM_{2.5}$ 浓度峰值预报偏低, 对第一个霾过程的结束时间预报偏早。模式

对小时相对湿度的预报与观测相关可以达到 0.78 以上, 平均误差在 0.06%~3.91% 以内, 整体上预报稍有偏高。

(2) 三套方案计算的能见度都能较好地预报出 2017 年 2 月京津冀地区能见度的时间演变趋势, 从不同区域和城市预报能见度与观测值之间的相关统计来看, 都可以达到 0.87 以上。总体上 S1 计算的能见度和误差均最低, S3 的最高, S2 居中。其中 S2 方案在北京地区表现最佳。从整个区域的统计角度来看, S1 方案具有一定的优势。

(3) 两次典型霾过程中小时能见度预报结果分析显示, 三套方案计算的能见度大部分时间都非常接近, 能见度大于 10 km 时三套方案计算结果都偏低, 其中 S3 的平均误差和均方根误差都是最低的。能见度低于 10 km 时, 特别是对出现较多的 1~5 km 低能见度的预报, S1 方案的误差最低, 更适合京津冀区域霾天能见度的预报应用。

参考文献:

- [1] 吴兑. 灰霾天气的形成与演化[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 157-161.
Wu D. Formation and evolution of haze weather [J]. Environmental Science, 2011, 34(3): 157-161.
- [2] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, et al. Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. Atmospheric Research, 2011, 101(3): 711-718.
- [3] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960~2013 年我国霾污染的时空变化[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3237-3248.
Fu C B, Tang J X, Dan L, et al. Temporal and spatial variation of haze pollution over China from 1960 to 2013 [J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3237-3248.
- [4] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(15): 8205-8214.
- [5] 吴波, 胡邦辉, 王学忠, 等. 基于近似支持向量机的能见度释用预报研究[J]. 热带气象学报, 2017, 33(1): 104-110.
Wu B, Hu B H, Wang X Z, et al. Visibility forecast based on proximal support vector machine [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(1): 104-110.
- [6] 张恒德, 咸云浩, 谢永华, 等. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波的霾预报技术[J]. 计算机应用, 2017, 37(11): 3311-3316.
Zhang H D, Xian Y H, Xie Y H, et al. Haze forecast based on time series analysis and Kalman filtering [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(11): 3311-3316.
- [7] 李沛, 王式功, 尚可政, 等. 基于神经网络逐级分类建模的北京地区能见度预报[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, 48(3): 52-57.
Li P, Wang S G, Shang K Z, et al. Visibility forecast in Beijing through artificial neural network based on hierarchical classification method[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(3): 52-57.
- [8] 张自银, 赵秀娟, 熊亚军, 等. 基于动态统计预报方法的京津冀雾霾中期预报试验[J]. 应用气象学报, 2018, 29(1): 57-69.
Zhang Z Y, Zhao X J, Xiong Y J, et al. The fog/haze medium-

- range forecast experiments based on dynamic statistic method [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2018, **29**(1): 57-69.
- [9] 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 Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(2): 189-199.
- [10] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, Mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, **38**(4): 385-404.
- [11] 邓涛, 邓雪娇, 吴兑, 等. 珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估[J]. *气象科技进展*, 2012, **2**(6): 38-44.
- Deng T, Deng X J, Wu D, *et al.* Study on Numerical forecast model of haze over Pearl River Delta region and routine business assessment [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, **2**(6): 38-44.
- [12] 侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究[J]. *大气科学*, 2017, **41**(6): 1177-1190.
- Hou M L, Wang H, Zhao T L, *et al.* A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei of China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(6): 1177-1190.
- [13] Wang T J, Jiang F, Deng J J, *et al.* Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **58**: 70-83.
- [14] 周斌斌, 蒋乐, 杜钧. 航空气象要素以及基于数值模式的低能见度和雾的预报[J]. *气象科技进展*, 2016, **6**(2): 29-41.
- Zhou B B, Jiang L, Du J. Aviation weather and model-based operational forecasts of low visibility and fog[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, **6**(2): 29-41.
- [15] Malm W C, Day D E, Carrico C, *et al.* Intercomparison and closure calculations using measurements of aerosol species and optical properties during the Yosemite aerosol characterization study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(D14): D14302, doi: 10.1029/2004JD005494.
- [16] Malm W C, Hand J L. An examination of the physical and optical properties of aerosols collected in the IMPROVE program [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(16): 3407-3427.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 胡俊, 赵天良, 张泽锋, 等. 霾污染环境大气能见度参数化方案的改进[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(11): 1680-1688.
- Hu J, Zhao T L, Zhang Z F, *et al.* Upgraded atmospheric visibility parameterization scheme for haze pollution environment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(11): 1680-1688.
- [20] 陈一娜, 赵普生, 何迪, 等. 北京地区大气消光特征及参数化研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3582-3589.
- Chen Y N, Zhao P S, He D, *et al.* Characteristics and parameterization for atmospheric extinction coefficient in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3582-3589.
- [21] 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.
- [22] Wang Y, Wu Z J, Ma N, *et al.* Statistical analysis and parameterization of the hygroscopic growth of the sub-micrometer urban background aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **175**: 184-191.
- [23] 赵秀娟, 徐敬, 张自银, 等. 北京区域环境气象数值预报系统及 $PM_{2.5}$ 预报检验[J]. *应用气象学报*, 2016, **27**(2): 160-172.
- Zhao X J, Xu J, Zhang Z Y, *et al.* Beijing regional environmental meteorology prediction system and its performance test of $PM_{2.5}$ concentration[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2016, **27**(2): 160-172.
- [24] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(37): 6957-6975.
- [25] 程兴宏, 刁志刚, 胡江凯, 等. 基于 CMAQ 模式和自适应偏最小二乘回归法的中国地区 $PM_{2.5}$ 浓度动力-统计预报方法研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2771-2782.
- Cheng X H, Diao Z G, Hu J K, *et al.* Dynamical-statistical forecasting of $PM_{2.5}$ concentration based on CMAQ model and adapting partial least square regression method in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2771-2782.
- [26] 王哲, 王自发, 李杰, 等. 气象—化学双向耦合模式(WRF-NAQPMS)研制及其在京津冀秋季重霾模拟中的应用[J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 153-163.
- Wang Z, Wang Z F, Li J, *et al.* Development of a meteorology-chemistry two-way coupled numerical model (WRF-NAQPMS) and its application in a severe autumn haze simulation over the Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2014, **19**(2): 153-163.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)