

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

中国东部冷锋推进中的 $\text{PM}_{2.5}$ 三维结构变化特征

牟南南, 朱彬*, 卢文

(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 国家综合气象观测专项试验外场, 南京 210044)

摘要: 利用观测资料和中尺度天气-化学模式(WRF-Chem)对一次冷锋南下天气过程导致的我国东部大范围空气污染开展研究, 强调了冷锋过境前后的边界层结构及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 三维结构和变化的影响。观测发现, 地面重污染区域位于冷锋前部均压场或等压线稀疏区域, 在冷锋由北向南快速移动过程中, 途经各站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值伴随锋前而至。WRF-Chem 模式可以较好地模拟中国东部地面和高空气象要素以及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化。模拟结果表明, 处于该移动冷锋天气系统相同位置的沿途各站点的边界层结构以及 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直廓线表现出相似的特征。即: 当冷锋开始入侵时, 锋前污染物从地面被抬升到高空, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的增加和高空风速的增大导致高空 $\text{PM}_{2.5}$ 通量增大, 且 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区随着高度升高向暖气团一侧倾斜。夜间冷锋过境引发边界层内对流性不稳定增加, 边界层高度可达 1 km 以上, 打破了边界层昼夜演变特征。本研究表明, 垂直观测和精细模拟的结合可以有效地解释天气过程对空气污染的输送、分布和演变的影响, 并为区域空气污染归因和治理提供精确指导。

关键词: 数值模拟; 空气污染; 边界层结构; 气象要素; $\text{PM}_{2.5}$ 三维结构

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0085-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103116

Three-dimensional Structure Variation of $\text{PM}_{2.5}$ During Cold Front Advance in Eastern China

MOU Nan-nan, ZHU Bin*, LU Wen

(Outfield of National Comprehensive Meteorological Observation Special Experiment, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Based on observational data and the WRF-Chem model, this study analyzed the large-scale air pollution in eastern China, which was caused by the weather process of a cold front moving southward, emphasizing the vertical structure of the boundary layer and the influence on the three-dimensional structure of $\text{PM}_{2.5}$. Our observations revealed that the heavy pollution near the surface was located at sparse or equal isobar in front of the cold front. During the process of the weather system moving in, the timing of the maximum $\text{PM}_{2.5}$ concentration at each station from north to south was delayed. The results show that the WRF-Chem model can better capture the spatial and temporal variations of surface and upper air meteorological elements and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations over eastern China. The simulation results show that the boundary layer structure and the vertical profile of $\text{PM}_{2.5}$ at the same location of the mobile weather system showed similar characteristics. When the invasion takes place in a cold front, the pollutants in front of the cold front are rapidly lifted from the ground to a high altitude. The growth in $\text{PM}_{2.5}$ concentration and the increasing wind speed at high altitudes lead to the upward trend in $\text{PM}_{2.5}$ flux. As the altitude increases, the high-value area of $\text{PM}_{2.5}$ concentration tilts towards the warm air mass. The transit of the cold front at night led to more unstable convection within the boundary layer; the height of the boundary layer increased from north to south, reaching over 1 km, breaking the rules characteristic of the diurnal evolution of the boundary layer. The results indicate that the combination of vertical observations and elaborate simulation can effectively explain the impact of synoptic processes on the transport, distribution, and evolution of air pollution and provide precise pollution-control directives.

Key words: numerical simulation; air pollution; boundary layer structure; meteorological elements; three-dimensional structure of $\text{PM}_{2.5}$

近年来,气溶胶及其前体物的排放加剧了中国的空气污染。特别是在人口密度高且工业化进程快的地区,空气动力直径 $< 2.5 \mu\text{m}$ 的气溶胶细粒子($\text{PM}_{2.5}$)是我国主要的大气污染物^[1, 2]。高浓度的颗粒物加剧了雾-霾事件的发生^[3], 不仅对城市环境、交通安全造成显著影响,也会引起肺炎、支气管炎和心血管等疾病,严重威胁人类健康^[4~6]。2013 年以来由于大气污染防治行动计划的实施,颗粒物浓度持续下降^[7],但颗粒物污染事件仍然频发,尤其是在秋冬季。

有研究表明,大气扩散和传输使大气污染物重新分布,而天气系统对于大气扩散和传输条件有重要影响,它提供了区域空气污染变化的主要驱动力^[8]。局地大气污染物的积聚、清除以及长距离传

输^[9],在不同天气形势下有显著的差异^[10]。一般来说,近地面稳定的反气旋环流有利于空气污染的形,而气旋系统相对不会造成严重的空气污染^[11]。冬季由于有西伯利亚冷高压活跃并南下,冷锋可作为污染物的载体把北方上游的污染物传输至下游使下游地区空气质量恶化^[12]。在一定的天气形势下,气温、风速及风向等气象要素水平和垂直分布的不同直接影响着大气边界层的垂直结构以及气溶胶的水平分布特征。有研究发现,地面高相对湿度、低风速和稳定层结大气抑制了大气污染物的迁

收稿日期: 2021-03-12; 修订日期: 2021-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(92044302, 42021004)

作者简介: 牟南南(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染与大气环境, E-mail: nanman_nm@163.com

* 通信作者, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

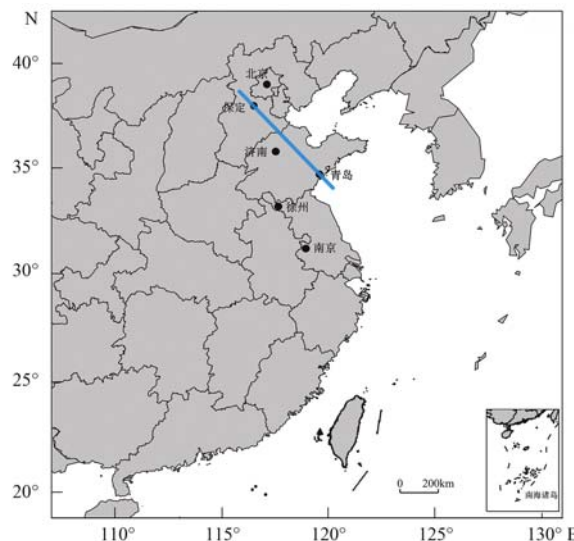
移和扩散,强逆温层和较低的混合层高度有助于污染物累积^[13~15].气溶胶的直接效应使边界层低层减温和高层增温,从而大气层结更稳定,进而使得边界层的高度更低和边界层内的湍流扰动更弱,这造成了对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度聚积的正反馈^[16,17].目前我国已开展了一些应用不同空气质量模型对大气污染物区域传输的研究,蒋永成^[18]通过 WRF-Chem 模式对海西区 2013 年 1 月霾污染过程进行模拟研究,阐明了大气污染物的区域输送对低污染源区空气质量的影响很大;Yu 等^[19]的研究使用 FLEXPART-WRF 模式对长江中游地区强北风、无逆温即大气层结不稳定条件下的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件进行模拟,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 的区域输送对重度污染 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献率超过 65%.杨旭等^[20]结合无人机探空和数值模拟对天津一次重污染事件研究,发现区域污染物的输送高度主要在边界层顶部和逆温层以上的大风速层处,且输送和边界层反馈作用对雾-霾天气的影响是相互的^[21].

前人主要针对近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 污染以及区域输送开展了很多观测和模拟分析研究,但对垂直方向 $\text{PM}_{2.5}$ 和边界层结构相结合的分析研究还较少.对空气污染事件中,天气形势移动和变化下的 $\text{PM}_{2.5}$ 的三维结构和演化还了解甚少.本文利用 WRF-Chem 模式针对 2019 年 1 月 14~15 日我国东部受冷空气影响发生的一次大范围 $\text{PM}_{2.5}$ 污染事件开展模拟研究,结合同期在南京开展的一次边界层气象-大气污染的垂直观测数据,分析冷锋移动的天气形势下,边界层结构的变化及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度三维分布和变化的影响,以期为区域空气污染成因和评估提供科学指导.

1 模式设置与验证

本次研究采用中尺度天气-化学模式(WRF-Chem)3.4 版本,模拟前用 MICAPS 气象观测资料对气象场进行了同化,同化采用的方法为牛顿张弛逼近法(nudging),它在预报方程中额外增加一个松弛项,表示预报与观测值之差,从而使模拟值向观测值逼近,使用 MICAPS 地面数据作为数据源,同化的变量包括温度、比湿和 UV 风速^[22,23],其中气象场使用 ECMWF $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料.模拟区域包括中国中东部和周边的海洋(图 1),中心经纬度为 119.0°E 、 31.5°N ,包含 99×99 个网格,水平分辨率为 27 km.模式层顶设置为 50 hPa 高度处,自地表到模式层顶共分 38 层,2 km 以下约为 12 层.模式的模拟时间为 2019 年 1 月 1 日 00:00 至 1 月 23 日 00:00(北京时间),将模拟前 48 h 设置为 spin-up 的时间.边界层方案使用 Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE^[24]方案,该方案用边界层和自由大气中的湍流

参数化过程代替 Mellor-Yamada 的 2.5 阶湍流闭合模型.排放源使用清华大学提供的 MEIC (2016) 源清单 (<http://www.meicmodel.org/>),分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,使用全球化学模式 MOZART-4^[25]提供化学初始条件以及化学边界条件,生物质源则使用 MEGAN 模式在线生成^[26].本次模拟中其他参数化方案如表 1 所示.



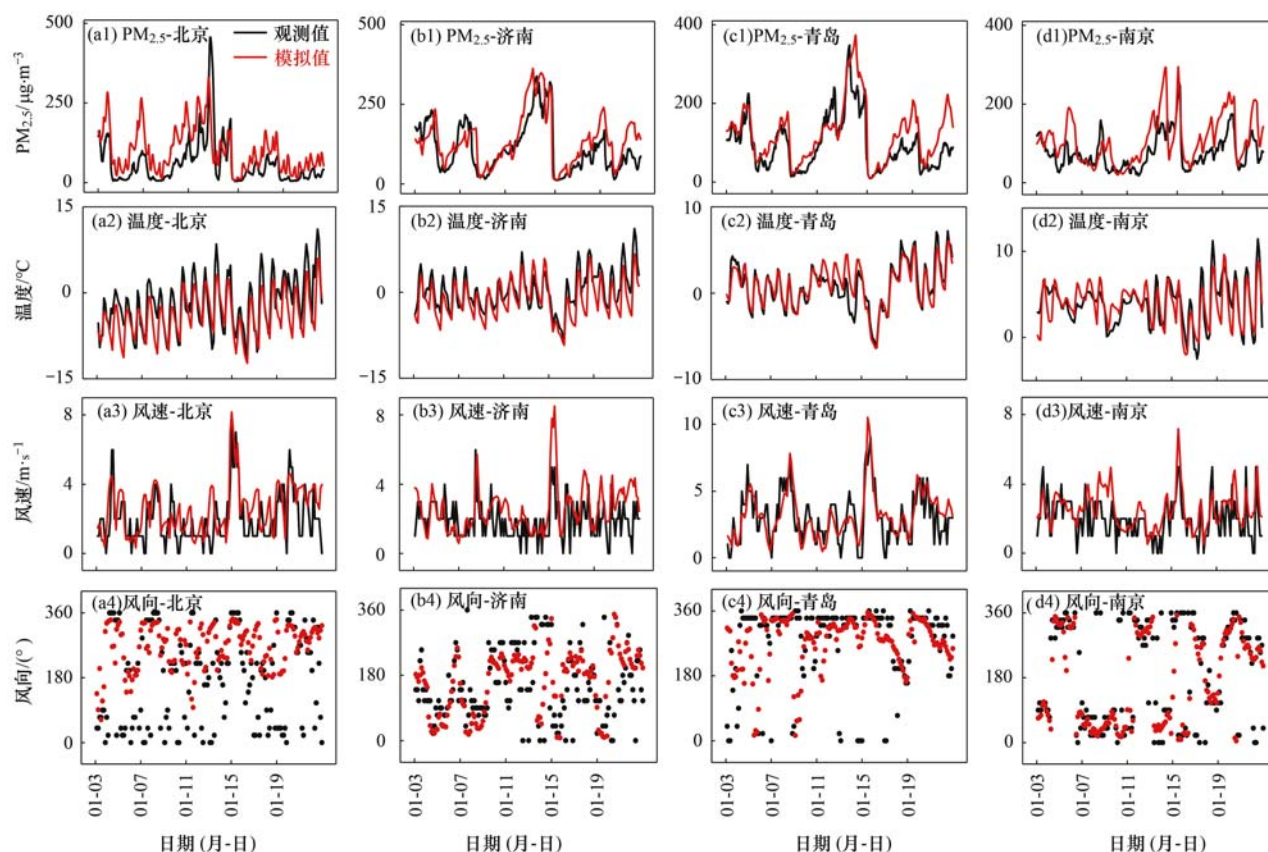
北京、济南、青岛和南京为模式评估所选站点;
蓝色实线表示后续论述的垂直界面方向

图 1 WRF-Chem 模式模拟区域
Fig. 1 WRF-Chem Model domains

表 1 WRF-Chem 模式参数设置
Table 1 Model parameter setting

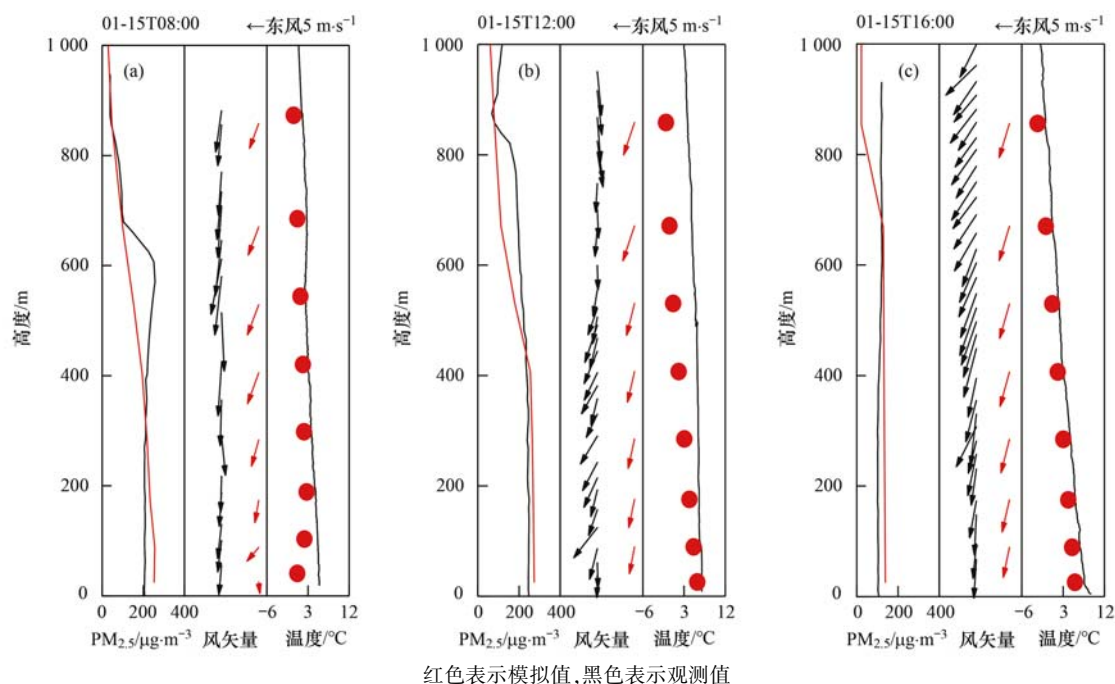
物理过程	参数化方案
微物理过程	Lin
长/短波辐射	RRTMG
陆面过程	Noah Land Surface Model
积云对流	Grell-Devenyi ensemble scheme
干沉降过程	Wesley
光解率	Fast-J

为了检验模式对 $\text{PM}_{2.5}$ 和气象要素的模拟性能,将模拟区域内 4 个代表站点(北京、济南、青岛和南京)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、温度、风速和风向的模拟以及观测结果进行了对比,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测值为中国环保部提供的逐小时数据,地面气象要素观测值来自 MICAPS 提供的 3 h 一次地面全要素填图数据.图 2 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度以及各个气象要素模拟值与观测值的时间序列对比.2019 年 1 月 12~26 日,在南京市浦口区设置观测点(32.2°N , 118.7°E)开展外场地面和边界层气象与大气污染垂直观测实验.图 3 为 1 月 15 日南京 $\text{PM}_{2.5}$ 污染期间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、风矢量和温度垂直分布的观测和模拟对比.可以看出该模型再现了模拟时间段内各气象要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的数值大小和变化特征,其中所有站点温度模拟得

图2 观测和模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及气象要素的时间序列Fig. 2 Time series of observed and simulated $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and meteorological elements

最好, 尽管这期间风速变化较为剧烈, 但总体上模拟的结果能有效地再现风速的日变化特征, 大部分时期风向的观测值和模拟值也有较好的一致性. 4 个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的观测值与模拟值的一致性较好, 模

拟值略偏高. 垂直方向上(图3), 1月15日白天南京发生污染期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和温度的模拟值和观测值的变化趋势相似, 可以有效再现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度以及气象要素垂直方向的变化特征.

图3 南京观测和模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、风矢量和温度的垂直分布Fig. 3 Vertical distribution of observed and simulated $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration, wind, and temperature

为了进一步验证模拟效果,运用 Pearson 相关系数(R)、一致性指数(IOA)、总偏差(GE)、平均分数偏差(MFB)、平均分数误差(MFE)和均方根误差(RMSE)这几个统计特征量对模拟结果的准确性进行验证(表 2). 风向的 IOA 指数(IOA_{wdir}),是按照 Kwok 等^[27]的研究方法,根据风的矢量特性单独计算的. 所用统计量公式如下:

$$R = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sqrt{D(x)} \cdot \sqrt{D(y)}} \tag{1}$$

$$\text{IOA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|M_i - \bar{M}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \tag{2}$$

$$\text{GE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i| \tag{3}$$

$$\text{MFB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(M_i - O_i)}{(O_i - M_i/2)} \tag{4}$$

$$\text{MFE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|M_i - O_i|}{(O_i - M_i/2)} \tag{5}$$

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

式中, M_i 为模式模拟值, O_i 为观测值.

所有评估站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 、温度和湿度的相关系数均大于 0.67,并达到显著性水平($\alpha = 0.01$). $\text{PM}_{2.5}$ 、温度、风速、风向和湿度的一致性指数分别大于 0.7、0.83、0.61、0.78 和 0.7,各参数的相关性和一致性指数都较高. 4 个站点 $\text{PM}_{2.5}$ 的 MFB 范围为 0.2 ~ 0.6, MFE 在 0.26 ~ 0.65 之间,它们都符合 Boylan 等^[28]的研究提出的标准:当 MFB 在 ± 0.6 以内, MFE 在 0.75 以下时,模型性能良好. 所有站点的风速的 RMSE 均符合阈值(≤ 2.0),虽然风向的相关系数较低,但 IOA 均在 0.78 以上,说明风速、风向的模拟值和观测值在变化趋势上有较好吻合. 其中温度的模拟效果最好,4 个站点温度的 R 和 IOA 均大于 0.79,除北京站外其它 3 个站点的 GE

都符合标准阈值(≤ 2.0). 整体上认为本次模拟效果良好,其中温度、湿度的模拟效果优于风速风向,本次模拟结果可以较好地重现我国东部地区地面气象要素和 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布特征.

表 2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和气象要素(温度、风速、风向和湿度)的统计检验结果

Table 2 Statistical test results of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and meteorological elements (temperature, wind speed, wind direction, and humidity)					
变量	统计特征量	北京	济南	青岛	南京
$\text{PM}_{2.5}$	R	0.67	0.80	0.85	0.71
	IOA	0.70	0.87	0.88	0.71
	MFB	0.60	0.20	0.23	0.24
	MFE	0.65	0.29	0.26	0.33
温度	R	0.81	0.86	0.88	0.79
	IOA	0.83	0.87	0.94	0.88
	GE	2.68	1.89	0.88	1.3
	RMSE	3.35	2.27	1.24	1.61
风速	R	0.58	0.51	0.78	0.59
	IOA	0.72	0.61	0.87	0.69
	GE	1.14	1.05	0.97	0.88
	RMSE	1.46	1.38	1.23	1.13
风向	R	0.19	0.48	0.16	0.57
	IOA	0.78	0.87	0.88	0.93
	RMSE	155.96	92.44	119.53	122.21
湿度	R	0.67	0.83	0.78	0.85
	IOA	0.7	0.88	0.85	0.88
	MFB	0.24	0.1	0.02	-0.04
	MFE	0.31	0.17	0.11	0.08

2 结果与讨论

2.1 天气形势与空气污染概况

取 2019 年 1 月 9 ~ 17 日时间段内的北京、保定、济南、青岛、徐州和南京这 6 个站点(图 1)根据经纬度由北向南作 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和风矢量的时空分布,由图 4 可见,1 月 11 ~ 14 日我国华北地区出现 $\text{PM}_{2.5}$ 持续区域性重度污染;1 月 14 日 17:00 至 1 月 16 日 02:00, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区随时间自北向南快速推移,且高值区对应强偏北风, $\text{PM}_{2.5}$ 峰值浓度均大于 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,污染强度为重度-严重污染. 由北到南浓度峰值滞后时间约为 33 h,表现出这股强烈

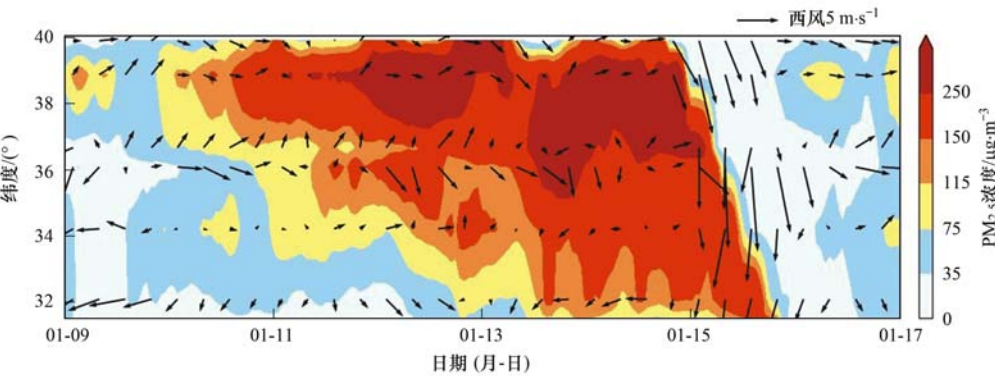


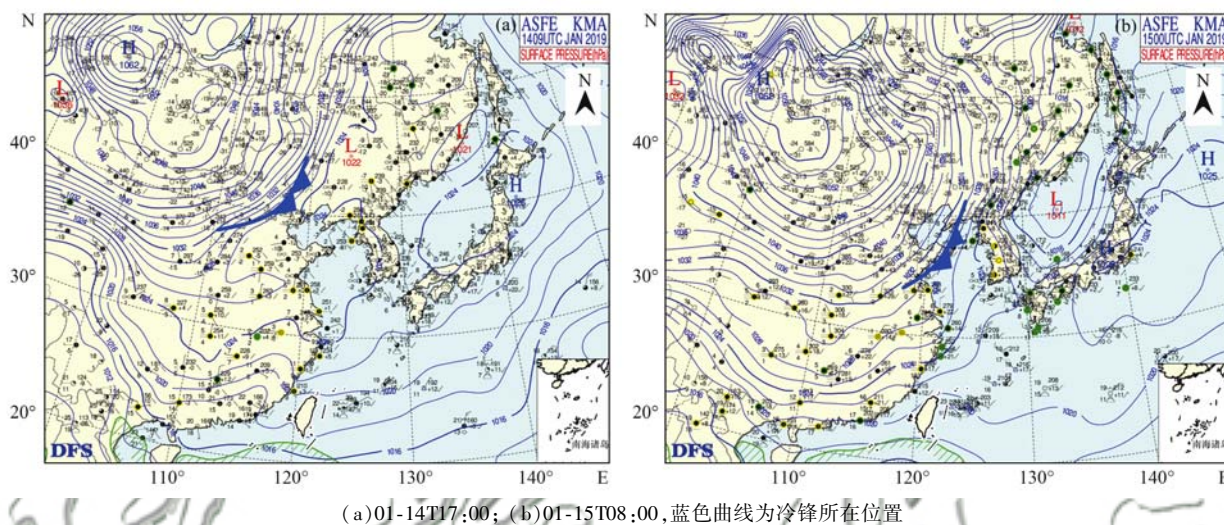
图 4 1 月 9 ~ 17 日 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和风矢量的时空变化

Fig. 4 Temporal and spatial variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and wind vectors from January 9 to 17

的偏北气流将污染气团从华北地区快速吹向长三角地区的形态; 之后, 随着强冷空气不断南下, $\text{PM}_{2.5}$ 由北向南得到了有效地清除。

结合地面天气[图 5(a)]和模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度水平分布[图 6(b)~6(d)], 1月14日17:00 高压中心位于蒙新高地上, 高压前部的冷锋刚刚到达华北平原北部, 华北北部地面等压线密集; 而华北中南部地区受高压底部前部的均压场控制, 地面等压线稀疏, 地面风速较小, 大气扩散能力较差。此时河北南

部和山东西部的空气污染较为严重, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高超过 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此后高压中心增强, 在高空槽后西北气流的引导下向东南方向移动, 伴随冷空气东移南下, 冷锋进一步向南推移; 1月15日08:00[图 5(b)], 河北南部和山东大部受锋后偏北大风影响, 大气扩散条件转好, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著降低, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 高值区随冷空气由北向南移动。冷锋主体入海后冷锋残留继续将污染物向南推移, 直至1月16日02:00, 污染带被输送至长江中游地区。



(a) 01-14T17:00; (b) 01-15T08:00, 蓝色曲线为冷锋所在位置

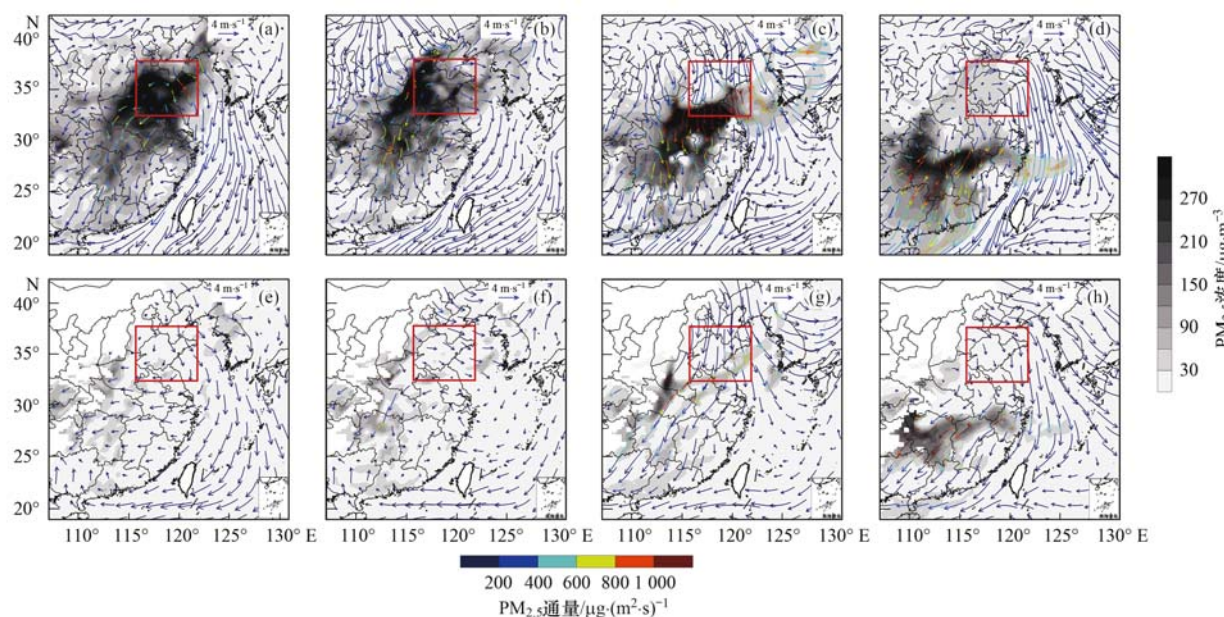
图 5 冷锋过境时地面天气形势

Fig. 5 Surface weather patterns as the cold front passes through

2.2 天气系统移动中边界层结构的变化及其对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布的影响

为了研究冷锋前后的 $\text{PM}_{2.5}$ 在地面和高空分布

特征, 将地面和 1 km 高度处的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布以及 $\text{PM}_{2.5}$ 通量进行对比研究。由图 6(a) 和 6(e) 可见, 1月13日23:00 的静稳污染时华北大部地区地面污



(a)~(d) 地面, (e)~(h) 1 km 高度; (a) 和 (e) 01-13T23:00, (b) 和 (f) 01-14T17:00, (c) 和 (g) 01-15T08:00, (d) 和 (h) 01-16T02:00; 箭头: 风矢量; 红框: 华北地区; 箭头颜色: $\text{PM}_{2.5}$ 通量

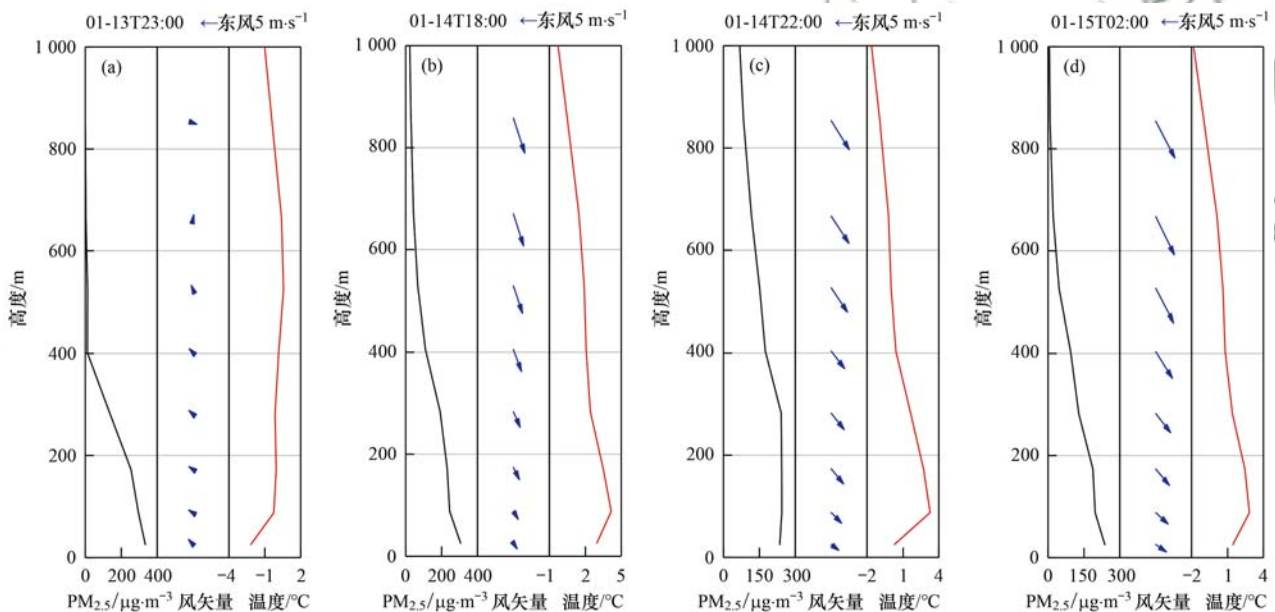
图 6 地面和 1 km 高度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 通量和风矢量分布

Fig. 6 $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations, $\text{PM}_{2.5}$ fluxes, and wind vectors at ground level and a 1 km altitude

染较为严重,地面和 1 km 高度处平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 $209.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $17.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高低空浓度差别很大,这与静稳阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 大部分被压在很低的边界层之下有关. 当冷锋于 1 月 14 日 17:00 刚刚到达华北平原北部边缘时[图 6(b) 和 6(f)], 地面 $\text{PM}_{2.5}$ 尚未受到冷锋的影响,但在 1 km 高度上华北北部开始出现 $\text{PM}_{2.5}$ 高值带,在地面和 1 km 处的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均通量分别为 $406.5 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $230.10 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 随着冷锋继续向南推移, 1 月 15 日 08:00 冷锋到达山东南部, 1 km 高度污染带更加明显[图 6(c) 和 6(g)]. 由于高空风力较强, 高空 $\text{PM}_{2.5}$ 高值带先于地面到达,在地面和 1 km 高度处 $\text{PM}_{2.5}$ 平均通量分别为 $656.26 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 和 $354.36 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 在 1 月 16 日 02:00 冷锋继续将污染物推移到长江中游地区[图 6(d) 和 6(h)],

高空 $\text{PM}_{2.5}$ 通量在锋区进一步加强, 达到 $430.87 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$, 对应的地面通量减小到 $513.98 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$. 随着冷锋向南侵入, 锋面运动将空气污染物从地面快速抬升到高空, 高空风速大于地表从而增加了高空 $\text{PM}_{2.5}$ 通量, 使得高空 $\text{PM}_{2.5}$ 通量逐渐增强^[13].

观测研究发现,在天气系统移动中,位于天气系统相同部位站点的边界层结构具有共同的特征^[29, 30]. 为了更好地判断天气系统途经的各地边界层结构是否发生相似的变化,使用模拟结果分析本次冷空气南下过程中由北至南各站点边界层和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直结构特征. 针对冷锋主体扫过区域,选取保定、济南和青岛这 3 个站点,分析地面锋线到达该三站点之前的温度、风矢量和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的垂直廓线,并与静稳污染时作对比(图 7).



(a) 和 (c) 济南, (b) 保定, (d) 青岛

图 7 静稳和冷锋前各时次温度、风矢量和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度垂直廓线

Fig. 7 Vertical profiles of temperature, wind and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration at each time of static stability and before the cold front

静稳污染时刻的 1 月 13 日 23:00 济南站 200 m 以下和 250 ~ 550 m 高度均有逆温层出现, 1 km 以下风速均小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 整层大气层结稳定, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度升高明显减少. 1 月 14 日 18:00, 保定地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $> 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 为重度污染, 此时保定处于高压底前部的等压线稀疏区域, 在 100 m 以下有贴地逆温存在, 逆温强度 $1.2^\circ\text{C}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$, 400 ~ 530 m 出现弱逆温层, 大气层结很稳定. 对应 100 m ~ 200 m 高度处于同一层结中, 该处 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化不大. 从风矢量来看, 200 m 以下偏西风, 风速 $< 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 200 m 以上开始转为北到西北风. 1 月 14 日 22:00, 济南在 100 m 以下仍有贴地逆温, 强度

$4.8^\circ\text{C}\cdot(100 \text{ m})^{-1}$, 430 m ~ 600 m 温度递减率极小, 近乎中性层结, 整层风都变为西北风, 100 m ~ 300 m 处 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度保持稳定. 1 月 15 日 02:00, 青岛站与济南站温度和风廓线特征相似, $\text{PM}_{2.5}$ 垂直廓线与保定站亦类似.

比较图 6(b)、6(c) 和 6(d) 和前段分析可见, 当天气系统移动时处于同一天气系统相同位置的站点边界层结构具有相似性, 边界层特征随天气系统的移动而做类似的变化. 与发生静稳污染时相比[图 6(a)], 冷锋移动过程中整层风速较大, 高空为北-西北大风, 贴地逆温层顶至边界层上部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度变化不明显.

2.3 冷锋推进中 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直结构和变化

沿冷锋主体移动方向(保定-青岛)作气象要素(温度、湿度和风矢量)以及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和假相当位温 θ_{se} 的垂直剖面可见(图8), 1月14日17:00由于日落后热力作用减弱使边界层内湍流变弱[图8(b)], 边界层高度仅为130 m, 不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散. 此后由于冷锋开始过境, 冷气团将暖气团抬升. 尽管处于夜间, $\partial\theta_{se}/\partial z$ 却由 >0 转为 <0 [图8(g)], 即对流不稳定性增加, 导致边界层高度由北向南依次得以抬升, 使大气边界层昼夜演变特征基本消失.

1月13日23:00地面为静稳污染时[图8(a)和8(e)], $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在600 m左右可到达 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 温度递减率为 $-3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. 1月14日凌晨保定附近有弱偏南风, 遇太行山脉的阻挡导致气流略微地上升, 使污染物在山前堆积并抬升, 1月14日17:00保定垂直方向 $\text{PM}_{2.5}$ 达到1.3 km高度[图8(b)和8(f)], 远大于边界层200 m高度; 此时冷锋到达华北北部边缘, 低层风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 高空风速较静稳期明显增大, 3 km以下 $\partial\theta_{se}/\partial z > 0$, 绝对稳定的大气层结不利于污染物的扩散. 冷锋继续

南移, 1月14日23:00冷气团控制保定地区[图8(c)和8(g)], 整层风速增大, 水平方向上 θ_{se} 等值线密集(冷平流); 而垂直方向100~1000 m处 $\partial\theta_{se}/\partial z < 0$ 为对流不稳定层结, 边界层高度抬升至1.3 km, 有利于污染物浓度垂直和水平方向的扩散, 保定空气质量好转. 冷锋过境带来冷而干的空气使河北南部相对湿度减小至15%~20%. 此时, 山东大部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 在水平和垂直方向上仍较高, 垂直最高可到达1.7 km左右. 1月15日02:00山东大部受冷气团抬升影响[图8(d)和8(h)], 边界层至1 km以上, 只有山东东部(青岛上空)冷锋还未到达, 边界层还很低($\sim 250 \text{ m}$). 由[图8(a)~6(d)]可见, $\text{PM}_{2.5}$ 随冷锋前部推移, 由于地表摩擦作用, 高层风速大于地面, 导致高空 $\text{PM}_{2.5}$ 传输较近地面快, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随着高度升高向暖气团一侧倾斜. 进一步说明随着冷锋向南入侵, $\text{PM}_{2.5}$ 被向上抬升, 锋面活动能够将空气污染物从地面输送到高空, 导致1 km以上高空 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 $\text{PM}_{2.5}$ 通量增加. 相比于陆地, 由于海水比热容大, 海上边界层高度一直稳定维持在1 km以上.

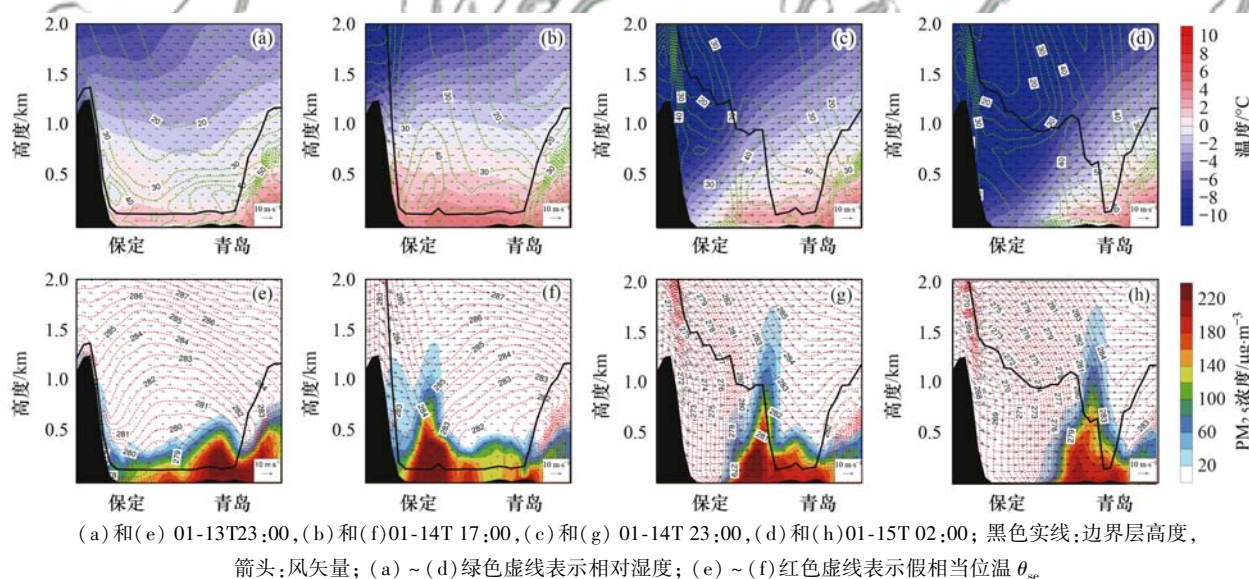


Fig. 8 Vertical cross sections of temperature, relative humidity, $\text{PM}_{2.5}$ concentration, and equivalent temperature

3 结论

(1) 观测发现, 地面重污染区域位于冷锋前部均压场或等压线稀疏区域. 在冷锋由北至南快速移动过程中, 途经各站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值伴随锋前而至. WRF-Chem 模式可以较好地模拟中国东部地面和高空气象要素以及 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化.

(2) 模拟结果表明, 处于该移动冷锋天气系统相同位置的沿途各站点的边界层结构以及 $\text{PM}_{2.5}$ 垂直廓线表现出相似的特征, 贴地逆温层顶至边界层

上部的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随高度不明显. 当冷锋开始入侵时, 锋前污染物从地面被抬升到高空, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的增加和高空风速的增大导致高空 $\text{PM}_{2.5}$ 通量增大, 且 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区随着高度升高向暖气团一侧倾斜.

(3) 夜间冷锋过境引发边界层内对流性不稳定增加, 边界层高度由北到南依次得以抬升, 可达1 km以上, 打破了边界层昼夜演变特征.

参考文献:

- [1] Wang J D, Zhao B, Wang S X, *et al.* Particulate matter pollution over China and the effects of control policies [J].

- Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 426-447.
- [2] 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.
- [3] Zhu Q Z, Liu Y Z, Jia R, *et al.* A numerical simulation study on the impact of smoke aerosols from Russian forest fires on the air pollution over Asia [J]. Atmospheric Environment, 2018, **182**: 263-274.
- [4] Gao M, Saide P E, Xin J Y, *et al.* Estimates of health impacts and radiative forcing in winter haze in eastern China through constraints of surface PM_{2.5} predictions [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(4): 2178-2185.
- [5] Ma Y X, Zhao Y X, Yang S X, *et al.* Short-term effects of ambient air pollution on emergency room admissions due to cardiovascular causes in Beijing, China [J]. Environmental Pollution, 2017, **230**: 974-980.
- [6] Ma Y X, Yang S X, Zhou J D, *et al.* Effect of ambient air pollution on emergency room admissions for respiratory diseases in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **191**: 320-327.
- [7] Wei Y, Li J, Wang Z F, *et al.* Trends of surface PM_{2.5} over Beijing-Tianjin-Hebei in 2013-2015 and their causes: emission controls vs. meteorological conditions [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2017, **10**(4): 276-283.
- [8] Chen Z H, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(24): 6078-6087.
- [9] Zhang Y, Ding A J, Mao H T, *et al.* Impact of synoptic weather patterns and inter-decadal climate variability on air quality in the North China Plain during 1980-2013 [J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 119-128.
- [10] Liu Y Z, Wang B, Zhu Q Z, *et al.* Dominant synoptic patterns and their relationships with PM_{2.5} pollution in winter over the Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River delta regions in China [J]. Journal of Meteorological Research, 2019, **33**(4): 765-776.
- [11] Wei P, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Impact of boundary-layer anticyclonic weather system on regional air quality [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(14): 2453-2463.
- [12] Kang H Q, Zhu B, Gao J H, *et al.* Potential impacts of cold frontal passage on air quality over the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(6): 3673-3685.
- [13] Kang H Q, Zhu B, Su J F, *et al.* Analysis of a long-lasting haze episode in Nanjing, China [J]. Atmospheric Research, 2013, **120-121**: 78-87.
- [14] Gao M, Carmichael G R, Wang Y, *et al.* Modeling study of the 2010 regional haze event in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(3): 1673-1691.
- [15] Zhou S D, Peng S L, Wang M, *et al.* The characteristics and contributing factors of air pollution in Nanjing: A case study based on an unmanned aerial vehicle experiment and multiple datasets [J]. Atmosphere, 2018, **9**(9), doi: 10.3390/atmos9090343.
- [16] Wang H, Xue M, Zhang X Y, *et al.* Mesoscale modeling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in Jing-Jin-Ji (China) and its nearby surrounding region-Part 1: Aerosol distributions and meteorological features [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(6): 3257-3275.
- [17] Wang H, Shi G Y, Zhang X Y, *et al.* Mesoscale modelling study of the interactions between aerosols and PBL meteorology during a haze episode in China Jing-Jin-Ji and its near surrounding region-Part 2: Aerosols' radiative feedback effects [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(6): 3277-3287.
- [18] 蒋永成. 海峡西岸地区大气复合污染变化和区域传输特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [19] Yu C, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Heavy air pollution with a unique "non-stagnant" atmospheric boundary layer in the Yangtze River middle basin aggravated by regional transport of PM_{2.5} over China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20**(12): 7217-7230.
- [20] 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 9-18. Yang X, Cai Z Y, Han S Q, *et al.* Heavy pollution episode in Tianjin based on UAV meteorological sounding and numerical model [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 9-18.
- [21] Huang X, Ding A J, Wang Z L, *et al.* Amplified transboundary transport of haze by aerosol-boundary layer interaction in China [J]. Nature Geoscience, 2020, **13**(6): 428-434.
- [22] Liu Y B, Warner T T, Bowers J F, *et al.* The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U. S. army test and evaluation command. Part I: Overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, **47**(4): 1077-1092.
- [23] Stauffer D R, Seaman N L. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data [J]. Monthly weather review, 1990, **118**(6): 1250-1277.
- [24] Janjić Z I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. Monthly weather review, 1994, **122**(5): 927-945.
- [25] Emmons L K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. Geoscientific Model Development, 2010, **3**(1): 43-67.
- [26] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, **6**(11): 3181-3210.
- [27] Kwok R H F, Fung J C H, Lau A K H, *et al.* Numerical study on seasonal variations of gaseous pollutants and particulate matters in Hong Kong and Pearl River Delta Region [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, **115**, doi: 10.1029/2009JD012809.
- [28] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [29] 张晨, 朱彬, 刘晓慧, 等. 一次冷锋过程中我国区域空气污染边界层特征 [J]. 中国环境科学, 2020, **40**(10): 4284-4291. Zhang C, Zhu B, Liu X H, *et al.* Boundary layer characteristics of an air pollution event in China during a cold front [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(10): 4284-4291.
- [30] Xu Y W, Zhu B, Shi S S, *et al.* Two inversion layers and their impacts on PM_{2.5} concentration over the Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2019, **58**(11): 2349-2362.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)