

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九继, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用

蔡子颖^{1,2}, 韩素芹², 张敏¹, 姚青¹, 刘敬乐²

(1. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 2. 天津市环境气象中心, 天津 300074)

摘要: 基于 255 m 气象塔风、温和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据获取天津地区大气稳定度特征, 利用中尺度大气化学模式构建垂直扩散指数 β 和 φ , 开展天津地区污染天气预报中垂直扩散分析方法的研究, 以期提高天津地区重污染天气预报预警准确率. 结果表明, 综合运用大气稳定度、基于边界层平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度比值构建的垂直扩散指数 β , 基于数值模式 chemdiag 功能(以 CO 为示踪物)构建的垂直扩散指数 φ , 可以在污染天气预报中较好的进行大气污染物垂直扩散能力分析. 当 07:00~08:00 和 18:00~20:00 大气稳定度为 D 及以上时, 相比大气稳定为 C 及以下时, 出现重污染天气的概率成 10 倍的增加; 使用垂直扩散指数 β 和风速双重指标判断重污染天气, 比单一的风速指标判断准确率提升 67%; 垂直扩散指数 φ 与近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关系数达到 0.8, 当垂直扩散指数 φ 小于 0.52 时, 重污染天气概率 75%, 可识别 59% 的重污染天气.

关键词: 污染天气分析; 垂直扩散指标; 大气稳定度; 天津; 数值模拟

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2548-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201708233

Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin

CAI Zi-ying^{1,2}, HAN Su-qin², ZHANG Min¹, YAO Qing¹, LIU Jing-le²

(1. Tianjin Meteorological Institute, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Environmental Meteorological Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: Based on temperature and wind speed data from the 255 meter tall meteorological tower, the characteristics of atmospheric stability were analyzed in Tianjin, with the vertical diffusion index β and φ constructed by atmospheric chemical models. This provided information to use the vertical dispersion analysis method to forecast pollution from weather data. The results show that the comprehensive use of atmospheric stability and the vertical diffusion index can provide a better pollution forecast. When the atmospheric stability was D from 07:00-08:00 and 18:00-20:00, compared to when atmospheric stability was C, the probability of heavy pollution weather increased by 10 times. If the vertical diffusion index β and wind speed index were used to forecast heavy pollution, the accuracy rate was 67% higher than when using the single wind speed index. The coefficient between vertical diffusion index φ and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration was 0.8. When the vertical diffusion index φ was less than 0.52, the probability of heavy pollution was 75%, identifying 59% of heavy pollution events.

Key words: pollution weather analysis; vertical diffusion index; atmospheric stability; Tianjin; numerical simulation

近年来大气环境问题已严重影响到人民群众的健康^[1,2], 受到各级政府和气象部门的高度关注, 党中央、国务院及地方政府把改善空气质量、控制空气污染作为重要任务. 为减轻重污染天气影响, 确保重污染天气应急高效有序进行, 消减污染峰值, 降低污染频次, 保障公众健康, 国务院和各地政府积极推动重污染天气预报预警工作开展, 比如天津市政府要求市环保局和气象局联合组织开展本市重污染天气监测预警和会商工作. 基于上述的现实需求, 重污染天气预报预警成为气象部门重要业务之一. 污染天气预报可分为潜势预报^[3]、主观天气分析预报^[4]、统计预报^[5]和数值预报^[6~10]等, 无论哪一种预报都需要从排放源、水平扩散、垂直扩散和化学反应等 4 个方面去考虑大气污染物的变化规律, 其中垂直扩散条件分析是污染天气预报的重要

一环, 如果大气垂直扩散条件较好, 即时水平风场较弱, 也不易产生污染, 但当大气垂直扩散条件较差时, 水平扩散条件些许转差都有可能重污染天气出现. 如研究者对 2013 年 1 月雾、霾天气成因分析时均认为逆温频繁地出现是其重要的气象原因^[11~13]. 对大气垂直扩散能力, 监测方法包括气溶胶激光雷达^[14]、气象塔^[15]、系留气艇^[16]、涡动相关^[17]等, 最常用指标为混合层厚度^[18~22]、大气稳定度^[23,24]、理查森数^[25]、温度层结^[26,27]和湍流

收稿日期: 2017-08-29; 修订日期: 2017-11-29

基金项目: 国际科技合作项目(2015DFA20870-02); 国家自然科学基金项目(41771242); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2016-005); 环境保护公益性行业科研专项(201409001); 国家科技支撑计划项目(2014BAC16B04, 2014BAC23B01)

作者简介: 蔡子颖(1984~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理与大气环境, E-mail: 120078030@163.com

动能等,其中大气稳定度是对热力湍流和机械湍流的一个综合表征,由于其计算便捷、意义明确,其指标经常在污染天气分析中用作参考,如杨静等^[28]的研究显示乌鲁木齐 F 类稳定度的出现频率与 API 相关系数 0.80,是一个比较好的空气污染潜势预报因子;国家气象中心静稳指数指标计算时,认为理查森数大于 0.25 时,大气处于稳定层结,指标权重为 2,污染气象条件趋向于不利于污染物扩散.天津位于渤海岸西侧,2016 年全年 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $69\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,在全国参与排名的 74 城市中位列 58 位,全年轻度及以上污染天气 140 d,其中重污染天气 29 d,空气质量预报和重污染天气预警是其《大气污染防治行动计划》执行的重要环节之一.目前天津市气象局和天津市环境保护局每日保持 4 次会商,联合制作空气质量预报并加强重污染天气预警.本文一方面以城市边界层观测站 255 m 气象塔风速、温度廓线和净辐射数据为依托,获取天津地区大气稳定的分布特征,并在此基础上讨论污染天气预报中大气稳定度资料运用方法;另一方面以 255 m 气象塔实测的塔层高度 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据为基础,提出大气垂直扩散指数 β 的概念,依托大气化学数值模式构建天津地区大气垂直扩散指数 β 数据集,讨论污染天气预报中垂直扩散指数 β 的运用方法;此外还发挥大气化学数值模式 WRF/Chem 新近开发的 chemdiag 功能优势,以 CO 为示踪物,建立大气垂直扩散指数 φ ,分析污染天气预报中垂直扩散指数 φ 的运用方法.最终通过大气稳定度、垂直扩散指数 β 和垂直扩散指数 φ ,系统性开展污染天气预报中垂直扩散条件的分析,通过提升天津重污染天气垂直扩散指标分析能力,提升天津地区重污染天气预报预警水平.

1 材料与方法

1.1 监测数据和大气稳定度计算

监测数据分为 3 个部分,其中大气化学模式检验数据来自天津市环境监测中心发布的 27 个站逐小时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度监测数据,时间为 2015 年 10 月~2017 年 2 月;天津城区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化为天津环境监测中心 6 个城区站的平均值,时间为 2015 年 10 月~2017 年 2 月;城区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度垂直监测数据为天津城市边界层观测站 (39.04°N , 117.12°E)255 m 气象塔地面、40、120 和 220 m 平台监测逐小时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,观测仪器热电 RP1400,时间为 2010 年的 1、5、7 和 10 月;大气

稳定度计算方法分为两种,一是 ΔT 与风速 (v) 组合法,数据来自天津城市边界层观测站 (39.04°N , 117.12°E)255 m 气象塔气象梯度观测系统,具体计算方法见表 1,其中 A 为强不稳定, B 为不稳定, C 为弱不稳定, D 为中性, E 为较稳定, F 为稳定(下同),时间为 2015 年 10 月~2017 年 2 月;二是净辐射法,数据来自天津城市边界层观测站四分量辐射观测系统,仪器为荷兰 Kippzonen 公司的 CNR1,具体方法见表 2.

表 1 ΔT 和 v 组合法确定稳定度的分类标准

Table 1 Calculating stability classification by ΔT and v	
$v(40\text{ m})/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta T(100\sim30\text{ m 的百米温差})$
0.0~0.9	$A\leqslant-1.13<B\leqslant-1.03<C\leqslant-0.91<D\leqslant-0.37<E\leqslant0.78<F$
1.0~1.9	$A\leqslant-1.18<B\leqslant-1.05<C\leqslant-0.91<D\leqslant-0.22<E\leqslant1.12<F$
2.0~2.9	$A\leqslant-1.39<B\leqslant-1.18<C\leqslant-0.97<D\leqslant-0.16<E\leqslant1.25<F$
3.0~3.9	$A\leqslant-1.61<B\leqslant-1.33<C\leqslant-1.00<D\leqslant-0.10<E\leqslant1.32<F$
4.0~4.9	$A\leqslant-1.82<B\leqslant-1.48<C\leqslant-1.04<D\leqslant-0.04<E\leqslant1.39<F$
5.0~5.9	$B\leqslant-1.62<C\leqslant-1.08<D\leqslant0.02<E\leqslant1.46<F$
6.0~6.9	$B\leqslant-1.77<C\leqslant-1.16<D\leqslant0.08<E$
7.0~7.9	$C\leqslant-1.25<D$
8.0~8.9	$C\leqslant-1.40<D$
$\geqslant10$	D

表 2 净辐射法确定稳定度的分类标准

Table 2 Calculating stability classification by net radiation						
地面风速	净辐射/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$					
	>580	$200\sim580$	$145\sim200$	$-20\sim145$	$-20\sim-40$	<-40
<2	A	B	B	D	E	F
$2\sim2.9$	B	B	C	D	E	F
$3\sim4.9$	B	C	C	D	D	E
$5\sim5.9$	C	D	D	D	D	D
$\geqslant6$	D	D	D	D	D	D

1.2 模式设置

为获取天津地区混合层内 $\text{PM}_{2.5}$ 积分浓度与近地面浓度的比值,采用 WRF/Chem 模拟 2015 年 10 月~2017 年 2 月天津地区逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度.模式版本采用 WRF/Chem3.5.1,气相化学过程采用 CBMZ 机制,气溶胶过程采用 MOSAIC 模型,主要物理过程设置如下:积云对流方案采用 Grell-3D,微物理过程采用 WSM5,长波辐射方案和短波辐射方案均采用 RRTMG,边界层方案分别使用 YSU 方案,模式水平分辨率 15 km,水平网格 121×121 ,中心经纬度为 39°N , 117°E ,垂直方向分为 41 层.模式的人为排放源清单使用清华大学 MEIC

2012^[29~31], 分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 在天津地区使用 27 个空气质量监测站实况数据和相关排放源统计信息进行时空的细化, 气象初始场和背景场均使用 NECP 的 FNL 全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 数据. 模拟时间段 $\text{PM}_{2.5}$ 均值 $72.57 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 实况均值 $76.90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 相关系数 0.81, 相对误差 29.1%, 大气化学模式模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 趋势与实况基本一致(图 1), 数值接近.

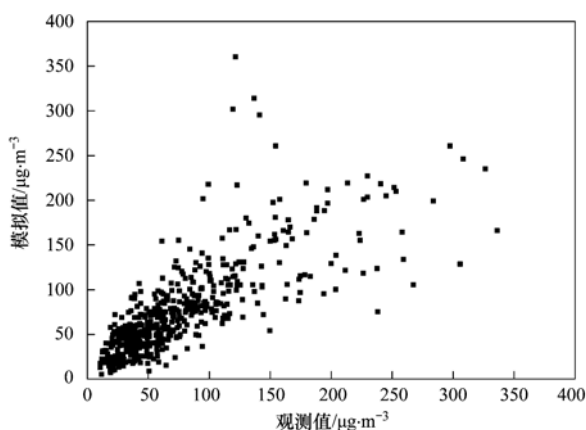


图 1 2015 年 10 月~2017 年 2 月天津地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度模拟值与观测值对比

Fig. 1 Comparison between simulated and observed data for $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Tianjin from October 2015 to February 2017

2 结果与讨论

2.1 天津地区大气稳定度分布以及与 $\text{PM}_{2.5}$ 关系

基于 255 m 气象塔观测数据采用 ΔT 和 v 组合法计算天津大气稳定度. 图 2 显示 2016 年天津地区大气强不稳定层结占比 9.5%, 不稳定层结占比 10.0%, 弱不稳定层结占比 21.3%, 中性层结占比 44.9%, 较稳定层结占比 12.1%, 稳定层结占比 2.3%. 其中稳定层结发生概率(E 和 F)呈现单峰结构, 4~8 月为全年谷值, 10 月到次年 3 月稳定层结概率明显增加. 2015 年 10 月~2016 年 2 月大气稳定层结发生概率 17.6%, 2016 年 10 月~2017 年 2 月略有增加为 18.0%, 相比 2016 年全年均值多 34%, 是 4~8 月平均值的 1.2 倍, 秋冬季稳定大气频率出现, 导致上述时间段大气污染垂直扩散能力下降明显, 雾、霾和重污染天气发生频率增多. 大气稳定度划分方法很多, 常见的有帕斯奎尔分类法(《环境影响评价技术导则》推荐的便是这类方法), 此外还有温度递减率法、风向涨落法、 ΔT 和 v 组合法、风速比与风速廓线法和 Smith 诺模图等. 图 1 显示为 ΔT 和 v 组合法计算结果, 其相对于帕斯奎尔分类法, 或者更精确一点的净辐射法, 由于采用

实测的垂直温差, 对热力湍流反映更为准确, 从原理上方法具有一定优势, 但其数据计算依赖气象塔观测, 获取较为困难, 所以在文献[32]中推荐修正的帕斯奎尔分类法. 帕斯奎尔分类法最大的优势是数据获取便捷, 核心是通过云和太阳高度角反映到达地面的辐射情况, 从而对热力湍流进行准确描述, 结合风速反映的机械湍流状况, 综合机械湍流和热力湍流共同反映大气稳定度. 从原理上有两个缺点, 一是地面太阳辐射状况并不能完全反映热力湍流状况, 所以 ΔT 和 v 组合法计算结果比帕斯奎尔分类法更有优势; 二是云和太阳高度角组合表征的地面辐射状况与实测相比有一定误差, 比如除了云以外, 气溶胶对到达地面太阳辐射也有显著影响, 所以净辐射法从原理上虽然与帕斯奎尔分类法类似, 但其计算结果还是略有优势. 基于天津城区边界层观测站地面逐小时长波和短波辐射数据, 根据净辐射法辨识天津城区大气稳定度分布, 与 ΔT 和 v 组合法得到的大气稳定度相关系数为 0.68, 但由于其划分标准不同, 其分布特征存在显著的差异. 净辐射法显示 2016 年天津地区大气处于强不稳定状态时占 0.24%, 处于不稳定状态占 13.6%, 处于弱不稳定状态占 8.8%, 处于中性状态占 31.3%, 处于较稳定状态占 14.6%, 处于稳定状态占 31.4%, 两种分布差异主要在于 A 和 F 的判断, 从数据显示夜间用净辐射法仍然不能区分不同天气热力湍流的差异, 大部分时刻被归为了稳定层结, 实际有部分时刻大气应处于弱不稳定、中性和较稳定层结; 白天对于强不稳定的状态, 净辐射法 $580 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的划分标准可能过于严格. 比较而言可以做出两个推论, 一是对于天津地区 ΔT 和 v 组合法无论从原理还从实际分布上均更为合理, 对大气稳定层结区分度更强. 二是由于方法不同, 大气稳定度的划分有较大的差异, 在研究中关于大气稳定度建模和预报产品的方法必须统一. 本文中关于大气稳定度的划分均基于 ΔT 和 v 组合法.

2015 年 10 月~2017 年 2 月天津地区监测数据显示(表 3), 大气稳定度与全天 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度关系在不同时刻有不同关系. 一般而言, 夜间 18:00~次日 07:00, 大气稳定度为 E 及以上时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度会显著地高于平均状态, 白天 08:00~16:00, 大气稳定度为 D 及以上时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度会显著地高于平均状态. 污染天气分析时 21:00~次日 02:00, 大气稳定度为 E 及以上时, 04:00~09:00 和 16:00~20:00 大气稳定度为 D 及以上时

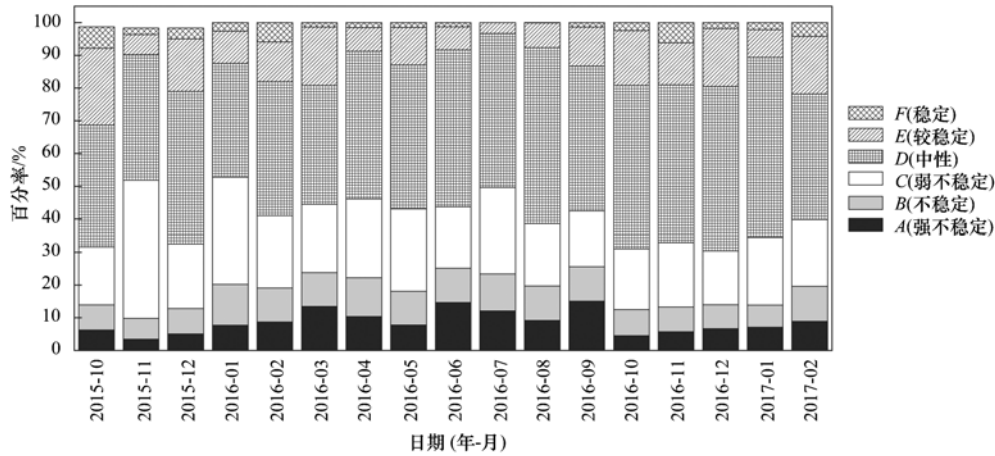


图 2 2015 年 10 月 ~ 2017 年 2 月天津地区大气稳定度分布特征

Fig. 2 Distribution of atmospheric stability in Tianjin from October 2015 to February 2017

重污染天气出现的概率会显著增加，尤其在早晨和傍晚，大气层结转化过程中，如果 07:00 和 08:00 大气稳定度为 *D* 时，出现重污染概率为 30% 和 37%，但如果大气由稳定层结转化为弱不稳定层结较快，即 07:00 和 08:00 大气稳定度为 *C* 时，出现重污染天气的概率仅为 2% 和 7%，18:00 ~ 20:00 的情况与早晨类似，具体见表 4。由此表明，在预报中可以通过早晨和傍晚大气稳定度的分析，对重污染天气是否发生进行有效预测。

表 3 不同时刻大气稳定度对应的 $PM_{2.5}$ 均值/ $\mu g \cdot m^{-3}$
Table 3 Average value of $PM_{2.5}$ mass concentration at different times and levels of atmospheric stability/ $\mu g \cdot m^{-3}$

时刻	A	B	C	D	E	F
00:00		35	65	67	103	111
01:00			68	66	100	117
02:00			52	67	101	109
03:00	45		63	65	102	119
04:00		15	70	68	96	111
05:00	34		66	66	105	92
06:00	78	44	54	68	109	109
07:00	43	45	52	80	130	105
08:00	54	50	59	107	142	92
09:00	53	66	68	122	238	95
10:00	71	69	77	114	217	
11:00	74	75	78	97	140	
12:00	78	78	75	97	101	
13:00	71	82	75	117	173	
14:00	66	75	84	94	101	245
15:00	64	67	78	114	140	147
16:00	59	62	68	105	89	245
17:00	50	57	62	89	138	
18:00	119	64	61	78	124	
19:00	186	84	66	76	92	167
20:00		34	83	73	93	115
21:00	20	76	72	92	109	
22:00		97	71	73	86	117

表 4 不同时刻大气稳定度对应的重污染天气出现概率/%
Table 4 Frequency of heavy pollution at different times and levels of atmospheric stability/%

时间	A	B	C	D	E	F
00:00		0	3	8	21	23
01:00	0		3	8	19	25
02:00	0		3	8	19	25
03:00	0	1	1	24	23	7
04:00	0	0	3	26	22	6
05:00	0		3	21	28	4
06:00	0	0	2	22	26	6
07:00	0	0	2	30	21	7
08:00	1	1	7	37	10	0
09:00	2	2	16	31	4	0
10:00	9	11	19	13	3	
11:00	12	13	19	10	1	
12:00	16	15	17	8	0	
13:00	13	19	16	7	1	
14:00	9	18	21	7	0	1
15:00	4	8	27	15	1	1
16:00	3	5	12	34	1	1
17:00	1	2	10	38	5	0
18:00	1	1	7	33	34	
19:00	1	1	5	37	10	2
20:00		0	5	32	15	4
21:00	0		9	9	18	31
22:00		0	3	9	15	25

2.2 天津地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度垂直分布特征

以天津城区南部气象塔地面、40、120 和 220 m 监测的 $PM_{2.5}$ 质量浓度为研究样本，对数据进行严格的质量控制，选取 1、5、7 和 10 月的数据分别代表冬、春、夏、秋天津塔层 $PM_{2.5}$ 的垂直分布。由图 3 可知，由于不同季节大气垂直扩散能力的差异， $PM_{2.5}$ 质量浓度塔层垂直分布存在明显的季节差异。冬季（1 月）40 ~ 220 m 的平均衰减为每百米 28.7%，而秋季仅为 8.7%，春季在塔层高度 $PM_{2.5}$

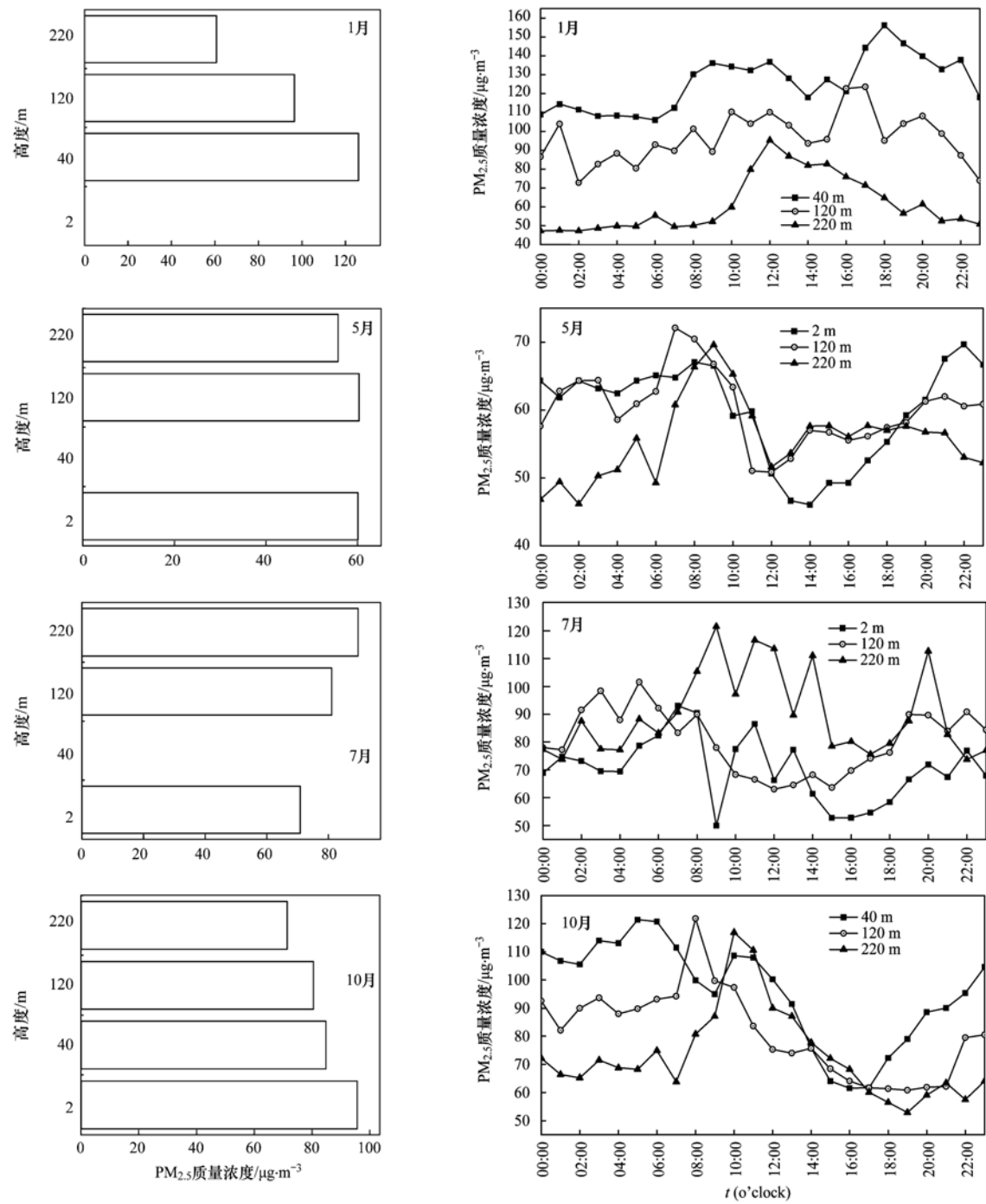


图3 天津地区气象塔不同季节典型月 PM_{2.5} 质量浓度垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of PM_{2.5} mass concentration in different seasons in Tianjin

基本混合均匀,地面与220 m PM_{2.5}质量浓度相差小于每百米3%,夏季由于湍流活动较强,观测站地表为草地(少扬尘和近地面源),且城市和周边地区多一些高架源的影响,白天 PM_{2.5}质量浓度甚至出现反转(220 m > 120 m > 地面),直到入夜以后,随着湍流活动的减弱,上述现象才不明显.对于 PM_{2.5}质量浓度日变化规律,近地面和高空也呈现不同的特征.冬季(1月)近地面呈现明显的早晚高

峰,午后波谷特征,120 m 则表现得比较平缓,220 m 全天的峰值出现在近地面的谷值时间段,夜间(18:00 ~ 07:00)由于热力湍流作用的减弱,其平均浓度为 52 μg·m⁻³,仅为近地面的43%,计算40 ~ 220 m PM_{2.5}平均质量浓度(图4),呈现与近地面 PM_{2.5}质量完全不同的日变化规律,其变化特征与人们生产生活规律更加近似,夜间为全天谷值,从06:00开始到中午前持续增加,午间有小幅回落,

午后到 17:00 一直处于峰值, 17:00 ~ 20:00 缓慢回落, 20:00 以后快速下降, 23:00 ~ 06:00 保持平稳谷值. 由此表明, 近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的早晚高峰与大气垂直能力密切相关, 中午前后近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的减少, 并不意味着大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 含量减少, 仅是大气热力湍流作用加强后将更多的 $\text{PM}_{2.5}$ 从近地面带向城市上空的结果. 计算四季塔层高度平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 冬季均值 $93 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季 $58.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季 $80.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 秋季 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其夏秋季均值基本相当, 但近地面浓度秋季比夏季高出 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 显示垂直扩散能力在决定夏秋季近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度差异中发挥重要主导作用. 而冬季近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量几乎是夏季的 177%, 但 40 ~ 220 m 平均质量浓度冬季仅为夏季的 112%, 由此表明冬季与夏季相比, 雾、霾和重污染天气频发, 除了采暖期排放源增加外, 冬季大气垂直扩散能力的下降应起更为主要的作用.

基于上述分析表明可以用边界层内 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度或者一定高度 $\text{PM}_{2.5}$ 积分浓度与近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度比值描述大气垂直扩散能力, 在非输送型污染过程中当比值较大时, 垂直扩散能力较好, 比值较小时, 垂直扩散能力较差, 基于此构建垂直扩散指数 β , 具体见公式(1):

$$\beta = \text{HPM}/\text{SPM} \quad (1)$$

式中, HPM 为 0 ~ 1 500 m $\text{PM}_{2.5}$ 积分质量浓度, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, SPM 为近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度, 单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

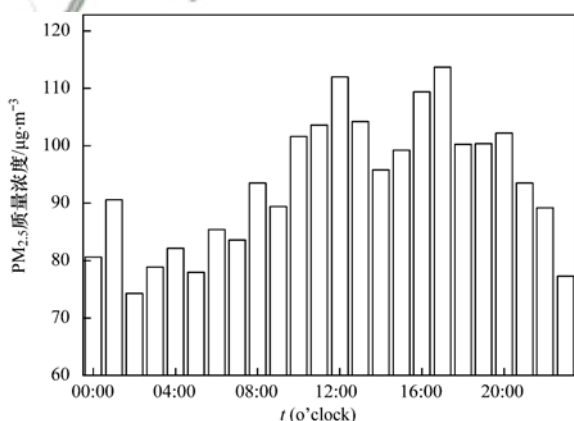


图4 天津地区 2010 年 1 月 40 ~ 220 m 平均 $\text{PM}_{2.5}$

质量浓度日变化

Fig. 4 Daily variation of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration between 40 and 220 meters in Tianjin in January 2010

2.3 垂直扩散指数 β 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度关系

基于天津大气化学模式计算 2015 年 10 月 ~ 2017 年 2 月天津地区垂直扩散指数 β , 图 5 显示研

究期间天津地区垂直扩散指数 β 均值 0.56, 其中 6 ~ 9 月垂直扩散条件达到全年峰值, 均值为 0.74, 12 月 ~ 次年 2 月为全年谷值, 均值为 0.43; 如果 0 ~ 1 500 m 大气中有相同质量 $\text{PM}_{2.5}$ (类似排放量相等), 冬季近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度是夏季的 168%, 而实际冬季近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度是夏季的 188%, 这与 255 m 气象塔监测显示的冬季近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量是夏季的 177%, 40 ~ 220 m 平均质量浓度冬季为夏季的 112% 有较好对应, 即冬季和夏季近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的巨大的差异, 主要为两个季节垂直扩散条件差异引起, 其相对于排放源或者其它因素的影响, 垂直扩散的贡献占 75%, 在污染分析中需要关注. 统计显示(图 6): 重污染天气时垂直扩散指数 β 主要集中在 0.4 ~ 0.6, 当垂直扩散指数 β 大于 0.8 时, 垂直扩散条件有利于大气污染物扩散, 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 未出现重污染天气; 当垂直扩散指数 β 大于 0.6 而小于等于 0.8 时, 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 出现重污染天气概率

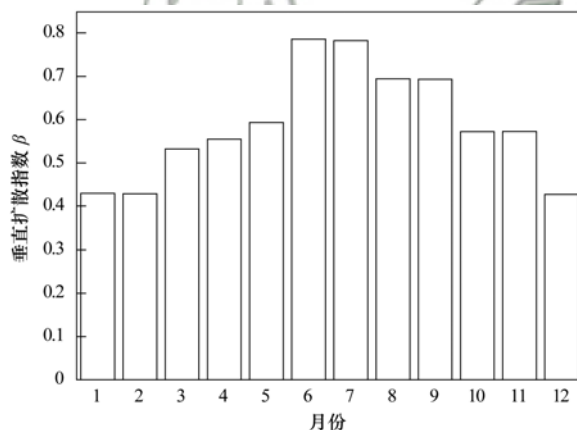


图5 天津地区垂直扩散指数 β 月变化

Fig. 5 Monthly variation of vertical diffusion index β in Tianjin region

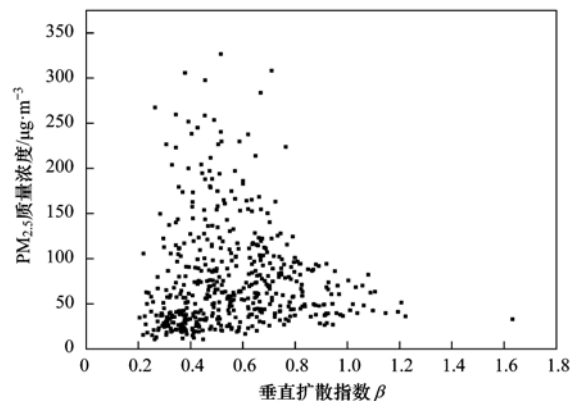


图6 天津地区垂直扩散指数 β 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的关系

Fig. 6 Relationship between vertical diffusion index β and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Tianjin

为 11%，主要出现在过程的开始阶段或者有明显北部污染输送的过程(高压前低压区)；当垂直扩散指数 β 小于 0.4 时，近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度仅为 $63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，重污染天气概率仅为 6.7%，其主要因为此时垂直扩散指数 β 较小的原因为大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 含量较低(一般风速也较大)，从而带入高层的 $\text{PM}_{2.5}$ 减少，导致垂直扩散指数显示较低。而垂直扩散指数 β 小于 0.4 时出现 10 次重污染天气，平均风速 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，是垂直扩散指数小于 0.4 时平均风速的 50%，由此显示，在污染天气分析中当垂直扩散指数 β 小于 0.4，风速接近 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时易出现重污染天气，其余时刻出现重污染天气概率较低；当垂直扩散指数 β 在 0.4 ~ 0.6 时，最易于重污染天气的发生，其出现重污染天气 32 次，重污染天气出现概率为 18%，占有重污染天气的 56%。相比于月变化，近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量的逐日变化不仅与垂直扩散条件有关，也与水平扩散条件密不可分，当垂直扩散指数 β 在 0.4 ~ 0.6 区间，如果水平风速大于 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，虽然垂直扩散条件不利，但水平扩散条件较好，出现重污染概率为 0，平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，当风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，在水平扩散条件和垂直扩散均不利的情况下，重污染天气出现概

率 40%，平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $135 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在污染天气分析使用双重指标(垂直扩散指数 β 和水平风速)判断重污染天气比单独使用水平风速判断重污染天气准确率有明显提高，如设定风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，垂直扩散指数 β 为 0.4 ~ 0.6，或者风速小于 $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，垂直扩散指数 β 为 0.3 ~ 0.4 为易于重污染天气出现的条件，其重污染天气预报准确率可以达到 50%，而如果单纯考虑水平扩散条件，认为水平风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，易于重污染天气出现，由于缺少垂直扩散条件分析，存在大量空报，其准确率仅为 30%。

2.4 示踪物模拟分析

随着计算机技术发展，大气垂直混合能力的描述即可使用统计指标表达，也可以通过数值模式予以分解计算。中尺度大气化学模式 WRF/Chem 在其 3.8 版本中加入 CO 、 O_3 和 NO_2 垂直混合能力计算功能。相比 O_3 和 NO_2 特征， CO 物理过程占据主导地位，与 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散规律更为近似，可作为示踪物反映大气垂直扩散能力。打开模式的 chemdiag 功能，模拟 2015 年 10 月 ~ 2017 年 2 月近地面由于混合作用使得 CO 下降百分比作为垂直扩散指数 ϕ ，具体计算见公式(2)：

$$\phi = \frac{-(\text{vmix_CO})}{\text{CO} - (\text{vmix_CO}) - (\text{advh_CO}) - (\text{advz_CO}) - (\text{chem_CO})} \quad (2)$$

式中， CO 为 CO 的平均浓度，单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ； vmix_CO 为垂直混合作用使得地面 CO 质量浓度增加量，单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，数值为负时表示降低； advh_CO 为水平输送使得地面 CO 质量浓度增加量，单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ； advz_CO 为对流运动使得地面 CO 质量浓度增加量，单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ； chem_CO 为化学作用使得 CO 质量浓度增加量，单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。公式(2)中的分母表示没有水平输送、垂直混合、对流输送和化学作用时大气 CO 的平均浓度。

由图 7 显示，基于示踪物模拟构建垂直扩散指数 ϕ ，对于 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度预报有极好的指示作用，其与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现幂指数关系，相关系数高达 0.8。当垂直扩散指数 ϕ 大于 0.65 时，平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $49 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，重污染天气概率为 0，其占总样本的 54%。即 54% 的天气通过垂直扩散指数判断气象条件是否有利于大气污染物垂直扩散，就可以排除重污染天气出现的可能；当垂直扩散指数 ϕ 小于 0.52 时，气象条件非常不利于大气污染物垂直扩散，平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $193 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，重污染天气概率 75% (共计 34 d，占研究样本重污染天气

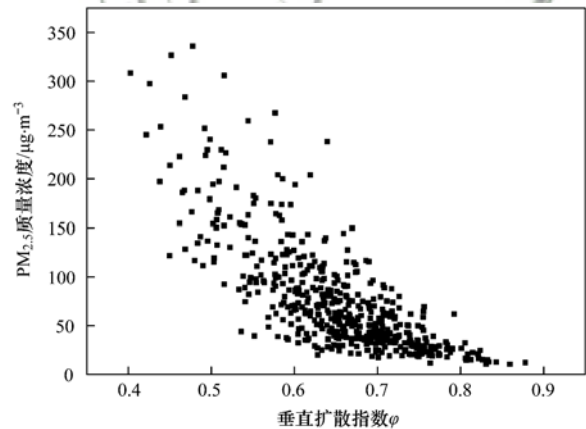


图 7 天津地区垂直扩散指数 ϕ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的关系

Fig. 7 Relationship between vertical diffusion index ϕ and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Tianjin

的 59%)，除 2016 年 1 月 28 日以外，剩余非重污染天气时空气质量也达到中度污染水平。当垂直扩散指数在 0.52 ~ 0.65 之间时，重污染天气的出现由大气水平和垂直扩散条件共同作用， ϕ 值为 0.52 ~ 0.58 时，垂直扩散条件略偏向于不利于污染扩散， ϕ 值为 0.58 ~ 0.65 时，垂直扩散条件略偏向有

利于污染扩散, 其对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别为 $121 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

3 结论

(1) 实际监测数据表明, 夜间 18:00 ~ 次日 07:00 大气稳定度为 E 及以上时, 白天 08:00 ~ 16:00 大气稳定度为 D 及以上时, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度会显著地高于平均值. 重污染天气分析中转折性时间段大气稳定度分析至关重要, 当 07:00 ~ 08:00 和 18:00 ~ 20:00 大气稳定度为 D 时, 相比上述时间大气稳定度为 C 时, 出现重污染天气的概率成 10 倍地增加.

(2) 基于边界层平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度与近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度比值构建垂直扩散指数 β , 通过垂直扩散指数 β 可以有效地进行污染天气垂直扩散能力分析, 使用垂直扩散指数 β 和水平风速作为双重指标判断重污染天气, 比单一的风速指标准确率可升 67%.

(3) 基于大气化学模式 WRF/Chem 的 chemdiag 功能, 以 CO 为示踪物构建垂直扩散指数 φ , 垂直扩散指数 φ 与近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度相关系数达到 0.8, 当垂直扩散指数 φ 小于 0.52 时, 气象条件非常不利于大气污染物垂直扩散, 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度 $193 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 重污染天气概率 75%, 可识别 59% 的重污染天气.

参考文献:

- [1] 郭新彪, 魏红英. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1171-1177.
Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient $\text{PM}_{2.5}$ pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1171-1177.
- [2] 胡彬, 陈瑞, 徐建勋, 等. 雾霾超细颗粒物的健康效应[J]. 科学通报, 2015, **60**(30): 2808-2823.
Hu B, Chen R, Xu J X, et al. Health effects of ambient ultrafine (nano) particles in haze[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, **60**(30): 2808-2823.
- [3] Yang Y Q, Wang J Z, Gong S L, et al. PLAM-a meteorological pollution index for air quality and its applications in fog-haze forecasts in North China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2015, **15**(6): 9077-9106.
- [4] 陈龙, 智协飞, 覃军, 等. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象, 2016, **42**(7): 819-826.
Chen L, Zhi X F, Qin J, et al. Surface atmospheric circulation types of air pollution and its relationship with concentration of air pollutants in Wuhan [J]. Meteorological Monthly, 2016, **42**(7): 819-826.
- [5] 熊亚军, 廖晓农, 李梓铭, 等. KNN 数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用[J]. 气象, 2015, **41**(1): 98-104.
Xiong Y J, Liao X N, Li Z M, et al. Application of KNN data mining algorithm to haze grade forecasting in Beijing [J]. Meteorological Monthly, 2015, **41**(1): 98-104.
- [6] 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.
- [7] 薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 达标约束的大气环境容量模拟[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(10): 2490-2496.
Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by $\text{PM}_{2.5}$ compliance of Chinese cities [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(10): 2490-2496.
- [8] 徐敬, 马志强, 赵秀娟, 等. 边界层方案对华北低层 O_3 垂直分布模拟的影响[J]. 应用气象学报, 2015, **26**(5): 567-577.
Xu J, Ma Z Q, Zhao X J, et al. The effect of different planetary boundary layer schemes on the simulation of near surface O_3 vertical distribution [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, **26**(5): 567-577.
- [9] 王自发, 李杰, 王哲, 等. 2013 年 1 月我国中东部强霾污染的数值模拟和防控对策[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, **44**(1): 3-14.
- [10] 潘锦秀, 朱彬, 晏平仲, 等. 京津冀区域重污染天气过程数值预报评估新方法[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2752-2760.
Pan J X, Zhu B, Yan P Z, et al. An evaluation method for the operational NAQPMS numerical forecast of heavy pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2752-2760.
- [11] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(1): 27-36.
- [12] 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 京津冀大气霾污染及控制策略思考[J]. 中国科学院院刊, 2013, **28**(3): 353-363.
Wang Y S, Yao L, Liu Z R, et al. Formation of haze pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region and their control strategies [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, **28**(3): 353-363.
- [13] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [14] Tang G, Zhu X, Hu B, et al. Impact of emission controls on air quality in Beijing during APEC 2014: lidar ceilometer observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2015, **15**(21): 12667-12680.
- [15] Han S, Zhang Y, Wu J, et al. Evaluation of regional background particulate matter concentration based on vertical distribution characteristics [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2015, **15**(19): 14889-14921.
- [16] Han S Q, Cai Z Y, Zhang Y F, et al. Long-term trends in fog and boundary layer characteristics in Tianjin, China [J].

- Particuology, 2015, **20**: 61-68.
- [17] Han S Q, Hao T Y, Zhang Y F, *et al.* Vertical observation and analysis on rapid formation and evolutionary mechanisms of a prolonged haze episode over central-eastern China[J]. Science of the total environment, 2017, **616-617**: 135-146.
- [18] 葛跃, 王明新, 孙向武, 等. 基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 485-494.
- Ge Y, Wang M X, Sun X W, *et al.* Variation analysis of daily PM_{2.5} concentrations based on boosted regression three: a case study in Changzhou[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 485-494.
- [19] 孙兆彬, 李梓铭, 廖晓农, 等. 北京大气热力和动力结构对污染物输送和扩散条件的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1693-1705.
- Sun Z B, Li Z M, Liao X N, *et al.* Influence of Beijing atmospheric thermal and dynamics structure on pollutants transport and diffusion conditions [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1693-1705.
- [20] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- Li M, Tang G Q, Huang J, *et al.* Characteristics of winter atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and their relationship with the atmospheric pollution [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1935-1943.
- [21] Zhu X W, Tang G Q, Hu B, *et al.* Regional pollution and its formation mechanism over North China Plain: a case study with ceilometer observations and model simulations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, **121**(24): 14574-14588.
- [22] Tang G Q, Zhang J Q, Zhu X W, *et al.* Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2016, **16**(4): 2459-2475.
- [23] 薛亦峰, 周震, 聂滕, 等. 2015 年 12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al.* Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- [24] 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 等. 高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 801-808.
- Liao X N, Sun Z B, Tang Y X, *et al.* Meteorological mechanism for the formation of a serious pollution case in Beijing in the background of northerly flow at upper levels[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 801-808.
- [25] 刘超, 花丛, 张恒德, 等. L 波段探空雷达秒数据在污染天气边界层分析中的应用[J]. 气象, 2017, **43**(5): 591-597.
- Liu C, Hua C, Zhang H D, *et al.* Application of L-band radar sounding data in analyzing polluted weather boundary layer[J]. Meteorological Monthly, 2017, **43**(5): 591-597.
- [26] 颜娇珑, 张武, 单云鹏, 等. 西北东部霾的时空特征与天气特征研究[J]. 高原气象, 2016, **35**(4): 1073-1086.
- Yan J L, Zhang W, Shan Y P, *et al.* Spatio-temporal distribution of aerosol and weather characteristics during haze over the eastern northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2016, **35**(4): 1073-1086.
- [27] 杨洋, 王红磊, 侯雪伟, 等. 石家庄一次持续性霾过程形成原因及气溶胶垂直探空分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(3): 824-832.
- Yang Y, Wang H L, Hou X W, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a long-term haze episode and the vertical distribution of aerosol concentration in Shijiazhuang[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(3): 824-832.
- [28] 杨静, 李霞, 李秦, 等. 乌鲁木齐近 30 a 大气稳定度和混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J]. 干旱区地理, 2011, **34**(5): 747-752.
- Yang J, Li X, Li Q, *et al.* Variation characteristics of atmospheric stability and mixed layer thickness and their relation to air pollution in recent 30 years in Urumqi [J]. Arid Land Geography, 2011, **34**(5): 747-752.
- [29] Zhao H Y, Zhang Q, Davis S J, *et al.* Assessment of China's virtual air pollution transport embodied in trade by a consumption-based emission inventory [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2015, **15**(12): 6815.
- [30] Zheng B, Huo H, Zhang Q, *et al.* High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2014, **14**(18): 9787-9805.
- [31] Li M, Zhang Q, Streets D G, *et al.* Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms [J]. Atmospheric Chemistry and Physics: Discussions, 2013, **13**(12): 32649-32701.
- [32] 国家环境保护总局环境工程评估中心. 环境影响评价技术导则与标准汇编[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005. 1-200.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)