ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第6期
2015年6月15日

目 次

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析 …… 徐彬,张泽锋,李艳伟,秦鑫,缪青,沈艳(1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响 …… 于兴娜,马佳,朱彬,王红磊,严殊祺,夏航(1919)
南京北郊冬季霾天 $PM_{2.5}$ 水溶性离子的污染特征与消光作用研究 …… 周瑶瑶,马嫣,郑军,崔芬萍,王荔(1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系 …… 李梦,唐贵谦,黄俊,刘子锐,安俊琳,王跃思(1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 …… 莫梓伟,牛贺,陆思华,邵敏,勾斌(1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析 …… 朱兆洲,李军,王志如(1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征 …… 薛亦峰,闫静,田贺忠,熊程程,李敬东,吴晓清,王玮,朱家昕(1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征 …… 胡月琪,马召辉,冯亚君,王琛,陈圆圆,何明(1966)
燃煤电厂湿烟囱降雨成因分析 …… 欧阳丽华,庄烨,刘科伟,陈振宇,顾鹏(1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究 …… 谭增强,牛国平,陈晓文,安振(1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露 …… 李岫雯,曾辉,倪宏刚(1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳 …… 黄柯,刘刚,周丽敏,李久海,徐慧,吴丹,洪蕾,陈惠雨,杨伟宗(1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 …… 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松(2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率:波长和催化剂的影响 …… 方雪慧,赵洁,舒莉,高永,叶招莲(2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析 …… 刘洋洋,沈芳,李秀珍(2019)
深圳近岸海域全氟化合物的污染特征 …… 刘宝林,张鸿,谢刘伟,刘国卿,王艳萍,王鑫璇,李静,董炜华(2028)
杭州西湖"香灰土"沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义 …… 李静,朱广伟,朱梦圆,龚志军,许海,杨桂军(2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价 …… 黄莹,李永霞,高甫威,徐民民,孙博,王宁,杨健(2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应 …… 万由鹏,尹魁浩,彭盛华(2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系 …… 张磊,蔚建军,付莉,周川,Douglas G. Haffner(2061)
藻华聚集的环境效应:对漂浮植物水葫芦光合作用的影响 …… 包先明,顾东祥,吴婷婷,石祖良,刘国锋,韩士群,周庆(2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究 …… 李超,王丹,杨金燕,王燕,丁士明(2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征 …… 肖时珍,蓝家程,袁道先,王云,杨龙,敖向红(2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义 …… 李广,章新平,张立峰,王跃峰,邓晓军,杨柳,雷超桂(2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征 …… 张小娟,宋维峰,吴锦奎,王卓娟(2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 …… 黄俊杰,沈庆然,李田(2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究 …… 丁春生,马海龙,傅洋平,赵世督,李东兵(2116)
三维花状结构 α-FeOOH 协同 H_2O_2 可见光催化降解双氯芬酸钠 …… 许俊鸽,李云琴,黄华山,苑宝玲,崔浩杰,付明来(2122)
UV/H_2O_2 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素 …… 冯欣欣,杜尔登,郭迎庆,李华杰,刘翔,周方(2129)
钯掺 TiO_2 光催化降解全氟辛酸 …… 刘晴,喻泽斌,张睿涵,李明洁,陈颖,王莉,匡瑜,张搏,朱有慧(2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7 …… 吴朋,吴军,高士祥,孙成,蒋正方(2147)
纳米 Fe_3O_4/ CeO_2-H_2O_2 非均相类 Fenton 体系对3,4-二氯三氟甲苯的降解 …… 孙正男,杨琦,纪冬丽,郑琳(2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe^0 及降解水中 TCE 的研究 …… 樊文井,成岳,余淑贞,范小丰(2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究 …… 祁文智,王凡,王辉,施钦,逄磊,卞兆勇(2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制 …… 肖少丹,刘露,姜理英,陈建孟(2175)
锆-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性 …… 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,王虹(2185)
聚(丙烯酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附 …… 张娈娈,廖运文,高和军,王忠志,帅超(2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径 …… 杨敏,李亚明,魏源送,吕鑑,郁达伟,刘吉宝,樊耀波(2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究 …… 孙衍卿,孙震,张景来(2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征 …… 张海芹,王翻翻,李月寒,陈重军,沈耀良(2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素 …… 贾瑞来,魏源送,刘吉宝(2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究 …… 雍佳君,成小英(2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析 …… 王润芳,王琴,张红,齐崚(2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应 …… 王佳楠,石妍云,郑力燕,王喆,蔡章,刘杰(2245)
Shewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化 …… 司友斌,孙林,王卉(2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响 …… 马微,鲍艳宇(2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响 …… 禄兴丽,廖允成(2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化 …… 李晓燕,张舒婷(2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染特征 …… 李彬,吴山,梁金明,梁文立,陈桂贤,李拥军,杨国义(2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟 …… 张云惠,刘伟健,程芳芳,熊冠男,杨笑寒,王歆,陶澍,邢宝山,刘文新(2292)
生物炭输入对土壤本体有机碳矿化的影响 …… 陈威,胡学玉,陆海楠(2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用 …… 曾炜铨,宋波,袁立竹,黄宇妃,伏凤艳(2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制 …… 曾燕君,周志军,赵秋香(2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价 …… 杨阳,蔡怡敏,白艳莹,陈卫平,杨秀超(2320)
《环境科学》征订启事(1965) 《环境科学》征稿简则(2115) 信息(1925, 2076, 2084, 2146)

京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系

李梦[1,2,3],唐贵谦[2*],黄俊[3],刘子锐[2],安俊琳[1],王跃思[1,2]

(1. 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,中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室,南京 210044; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029; 3. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室,北京 100094)

摘要: 大气混合层高度(MLH)是影响大气扩散的主要因子之一,其对大气质量评估和污染物的存储量及分布起着重要作用. 本实验利用云高仪对 2014 年污染严重的 2 月京津冀区域 4 个站点(北京、天津、石家庄和秦皇岛)MLH 进行了同步连续观测,分析了其各自及其区域总体变化特性. 结果表明,秦皇岛 MLH 月均值最高,达到 865 m ± 268 m; 石家庄最低,为 568 m ± 207 m; 北京和天津介于这两城市之间,分别为 818 m ± 319 m 和 834 m ± 334 m; 结合气象数据分析发现,辐射和风速是影响混合层高度的主要因素; 对 4 个站点颗粒物浓度与混合层高度的关系研究表明,混合层低于 800 m,4 个站点细颗粒物浓度均会超过国家二级标准(GB 3095-2012, 75 μg·m^{-3}),观测期间北京、天津、石家庄和秦皇岛这 4 个站点混合层高度低于 800 m 天数所占比例分别为 50%、43%、80% 和 36%. 石家庄虽然近地层污染物浓度较高,但是大气混合层以内污染物负荷并不高,不利的大气垂直扩散条件是石家庄近地面长时间高浓度污染的主要原因. 研究结果对于认知京津冀区域污染分布现状具有重要意义,并可为区域内污染源合理分布提供科学参考.

关键词:京津冀污染源; 云高仪; 气象参数; 细颗粒物浓度; 大气污染负荷

中图分类号: X169; X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)06-1935-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.06.004

Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution

LI Meng[1,2,3], TANG Gui-qian[2*], HUANG Jun[3], LIU Zi-rui[2], AN Jun-lin[1], WANG Yue-si[1,2]

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Atmospheric mixing layer height (MLH) is one of the main factors affecting the atmospheric diffusion and plays an important role in air quality assessment and distribution of the pollutants. Based on the ceilometers data, this paper has made synchronous observation on MLH in Beijing-Tianjin-Hebei region (Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Qinhuangdao) in heavy polluted February 2014 and analyzed the respective overall change and its regional features. Results show that in February 2014, the average of mixing layer height in Qinhuangdao is the highest, up to 865 ± 268 m, and in Shijiazhuang is the lowest (568 ± 207 m), Beijing's and Tianjin's are in between, 818 ± 319 m and 834 ± 334 m respectively; Combined with the meteorological data, we find that radiation and wind speed are main factors of the mixing layer height; The relationship between the particle concentration and mixing layer height in four sites suggests that mixing layer is less than 800m, concentration of fine particulate matter in four sites will exceed the national standard (GB 3095-2012, 75 μg·m^{-3}). During the period of observation, the proportion of days that mixing layer is less than 800m in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Qinhuangdao are 50%, 43%, 80% and 50% respectively. Shijiazhuang though nearly formation contaminant concentration is high, within the atmospheric mixed layer pollutant load is not high. Unfavorable atmospheric diffusion conditions are the main causes of heavy pollution in Shijiazhuang for a long time. The results of the study are of great significance for cognitive Beijing-Tianjin-Hebei area pollution distribution, and can provide a scientific reference for reasonable distribution of regional pollution sources.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei area pollution sources; ceilometer; meteorological parameters; fine particulate matter concentration; atmospheric pollution load

混合层为湍流特征不连续界面以下湍流较为充分发展的大气层[1],湍流特征不连续界面的高度就是混合层高度(MLH). 大气混合层高度(MLH)是影响大气扩散的主要因子之一,其对大气质量评估

收稿日期: 2014-10-28; **修订日期**: 2015-01-28
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05020000, XDA05100100);国家自然科学基金项目(41230642)
作者简介: 李梦(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气物理与大气环境,E-mail:LiMeng@dq.cern.ac.cn
* 通讯联系人,E-mail:tgq@dq.cern.ac.cn

和污染物的存储量及分布起着重要作用.

自 80 年代以来,很多研究者利用经验参数化方法(比如 Nozaki 方法[2]、干绝热法[3]、Richardson 数法)或模式模拟混合层高度的变化特性. Gareía 等[4]利用 HYSPIT 模型计算出来的大气 MLH 模型来验证实验数据的可靠性; 黄柏良[5]分析了长沙市 MLH 及其对应地面常规气象参数的关系,用多元线性回归的方法得出简单可靠的大气 MLH 预测数学模型. 虽然通过气象参数廓线可以加算 MLH,但是探空数据获取困难,大部分站点都是一天两次的观测数据,无法获取一天 24 h 混合层变化特征. 有研究者仅通过近地面气象参数虽然可以获取每天的混合层高度,但由于计算误差大,部分研究者开始使用地面遥测仪器(主要使用无线探空仪、多普勒气象雷达、风谱雷达、激光雷达)测量混合层内气象和化学物质的垂直分布[6~8].

Bossioli 等[9]分析了从声雷达和云高仪得到的混合层高度与不同的大气边界层参数化模拟方案的关系,研究表明对于模式中的大气边界层方案,都可以从低空急流的高度推断混合层高度,而且与观测到的结果一致. Stefan 等[10]已经验证声雷达可以探测出高山河谷深处形成的一些的持续逆温. 在遥感探测仪器中,激光雷达探测边界层的可行性已被大量实验验证了,激光雷达也开始应用于城市边界层探测[11,12]. Sicard 等[13]用常规的后向散射激光雷达在巴塞罗那(西班牙)进行了观测研究,结果表明沿海地形的影响和巴塞罗那的气候决定了边界层动力学的复杂性和激光雷达的高非均质性. 云高仪是近年来产生的专门用来研究云层信息的激光雷达,使用云高仪的气溶胶后向散射廓线图来推断 MLH 是一种较为理想的方法. Emeis 等[14]用云高仪和声雷达两种不同的遥感探测仪器在不同季节和不同站点进行了观测,对比发现云高仪对混合层观测有较高的可靠性. 云高仪是近年来产生的专门用来研究云层信息的激光雷达,上述学者研究表明使用云高仪的气溶胶后向散射廓线图来推断 MLH 是一种较为理想的方法.

由于探空数据每天仅有两次观测,为获取每天 24 h 连续混合层变化特征、分析大气污染物与混合层高度变化的关系,针对一年中污染最为严重的冬季 2 月,利用云高仪数据分析了京津冀地区 4 个站点(北京、天津、石家庄和秦皇岛)MLH 变化特性. 本研究结合气象数据和细颗粒物观测数据,分析了 4 个站点混合层高度变化的原因,计算了不同站点大气污染物存储量,说明了 MLH 与细颗粒物浓度的关系.

1 材料与方法

1.1 站点设置

京津冀区域夏季盛行偏南风,冬季盛行西北风,京津冀东南部区域为华北平原,西部为太行山山脉,北部为燕山山脉. 为了研究京津冀地区的污染,围绕北京分别在北京的东部、东南部和西南部区域设置 3 个站点,分别是秦皇岛、天津和石家庄. 4 个站点最大限度地覆盖了京津冀的平原区域. 其中,北京为太行山和燕山交界的山前站点,具体地址为北京市北土城西路中国科学院大气物理所铁塔分部,天津为东南沿海站点,具体地址为天津市气象局铁塔院,秦皇岛为东部沿海站点,具体地址为秦皇岛市中国环境管理干部学院,石家庄为西南部太行山山前站点,具体地址为石家庄市河北经济学院,具体的站点分布见图 1.

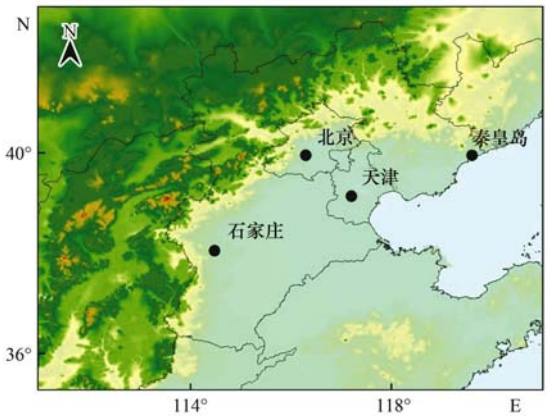

图 1 京津冀区域站点分布示意

Fig. 1 Site map of the Beijing-Tianjin-Hebei region

1.2 仪器介绍

本实验采用 Vaisala 增强型单镜头云高仪 CL31 和 CL51 仪器,这两种仪器采用了脉冲二极管激光 LIDAR(激光探测和测距)技术来测定大气颗粒物的后向散射廓线和云高,CL31 和 CL51 的主要观测参量见表 1 和表 2.

表 1 CL31 仪器的主要参数

Table 1 Main parameters of the ceilometer CL31

性能	参数
量程	7.6 km
报告周期	2 ~ 120s
报告精度	5 m/10 ft.
峰值功率	310 W
波长	910 mm

表 2　CL51 仪器的主要参数

Table 2　Main parameters of the ceilometer CL51

性能	参数
量程	13 km
报告周期	6 ~ 120 s
报告精度	10 m/33 ft.
峰值功率	310 W
波长	910 mm

1.3　混合层高度计算方法

由于颗粒物寿命较长，有几天甚至几十天，因此大气混合层内颗粒物浓度分布相对气态污染物更为均一，而混合层内与自由大气的颗粒物浓度则差别很大. 通过分析大气颗粒物的后向散射廓线，后向散射变化产生突变的位置即为大气混合层层顶. 本研究利用梯度法[15,16]来确定混合层高度，也就是选择气溶胶后向散射系数廓线图中负梯度值（$-\mathrm{d}\beta/\mathrm{d}x$）最大的地方为混合层顶，但容易受到数据自身噪声和气溶胶层结构的干扰，因此，需要选择时间或空间的一段连续区域进行平均，对平均后的廓线图进行垂直平滑处理并采用了改善的梯度法[17]来应对恶劣天气（如下雨、云和霾天），即使如此，梯度法仍然存在一定缺陷，特别是在中性大气层结状况下，混合层高度的反算不准确. 根据气象探空廓线来判断大气层结状况，本文剔除了中性大气层结状况下错误数据.

1.4　气象及细颗粒物浓度数据

为了研究气象参数对大气 MLH 的影响，本文分析了 2014 年 2 月温度、湿度、风速和日照时数 4 个气象参量与 MLH 的关系，气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网（http://cdc.cma.gov.cn/）.

为了探讨细颗粒浓度与 MLH 的关系，本文选择与云高仪同时布设的 4 个站点的细颗粒物数据与 MLH 进行了比对分析.，4 个站点细颗粒物质量浓度数据隶属于中国科学院战略性先导科技专项（XDB05020000，XDA05100100）项目的数据. 细颗粒物 $PM_{2.5}$ 使用环境颗粒物监测仪测量（美国热电公司 TEOM Series 1400a）[18]. 采样口距地面高度为 17 m，污染物采样频率为 5 min，可存储5 000 000条记录.

2　结果与分析

2.1　站点一致性

为了获取京津冀区域 MLH 变化的特征，在京津冀的平原区域以最大跨度布设了 4 个站点，如图 1，秦皇岛在最东边，石家庄在最西边，与北京和天津构成了一个近似菱形的平原区域. 通过分析 2014 年 2 月 4 个站点日均值的时间变化序列可以看出，4 个站点 MLH 的日均值均在 100 ~ 1 900 m之间. MLH 最高和最低分别出现在 2 月 5 日和 2 月 1 日的天津站，最高值和最低值分别为1 802 m和 143 m. 4 个站点大部分日均值在 400 ~ 1 200 m之间，占总样本数的 61.04%（图 2）.

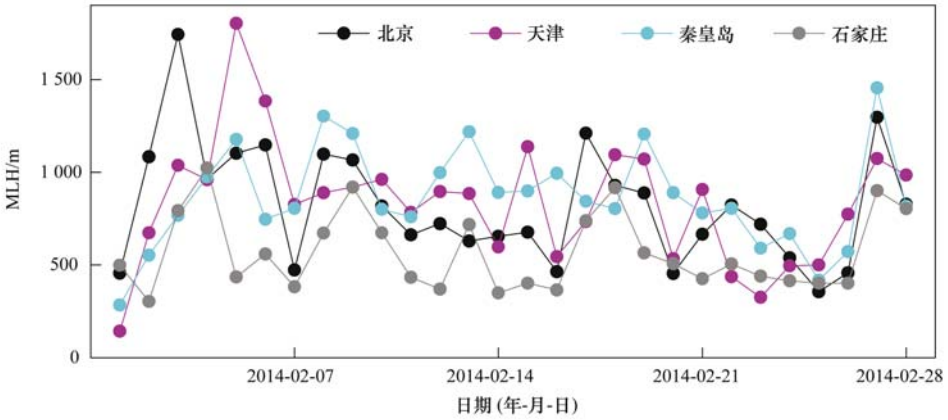

图 2　2014 年 2 月北京、天津、石家庄和秦皇岛 MLH 日均值时间序列

Fig. 2　Time sequence diagram of the MLH in Beijing, Shijiazhuang, Tianjin and Qinhuangdao in February 2014

由于 4 个站点地理位置上跨度较大，为了比较 4 个站点 MLH 变化的一致性，对 4 个站点混合层高度的日均值进行了相关性分析（表 3）. 从表 3 中可以看出，两个山前站点北京和石家庄相关系数较高，达到 0.57；两个海滨站点天津和秦皇岛相关系数也较高，达到 0.54；另外，由于北京和天津地理位置较近，也存在中度相关，相关系数为 0.53. 由此可以看出，虽然由于地理原因，个别站点之间存在中度相关，但 4 个站点之间的相关性均不高，这就说明 4 个站点混合层变化均有典型局地特征，能较好地涵盖京津冀平原区域 MLH 的整体变化.

2.2 混合层高度的频率分布

为了了解 4 个站点 MLH 变化特征,对 MLH 出现的频率进行了统计. 从图 3 中可以看出,北京 MLH 主要分布在 200 ~ 800 m,其中 MLH 为 600 ~ 800 m 时的出现次数最多,高于 2.4 km 处也有混合层分布; 天津 MLH 分布频率最高出现在 400 ~ 600 m; 石家庄 MLH 主要集中在 200 ~ 600 m,在 400 ~ 600 m MLH 个数占总数的 35.67%,为最高,在其它高度层的分布则较少; 秦皇岛 MLH 主要分布在 400 ~ 1 200 m,在 400 ~ 600 m MLH 的个数最多,总体上 MLH 在这段高度内的分布相对均匀.

表 3 北京、天津、秦皇岛和石家庄每两站之间 MLH 的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of MLH between every two stations in Beijing, Tianjin, Qinhuangdao and Shijiazhuang

	北京	天津	秦皇岛	石家庄
北京	—	0.53	0.39	0.57
天津	0.53	—	0.54	0.32
秦皇岛	0.39	0.54	—	0.43
石家庄	0.57	0.31	0.43	—

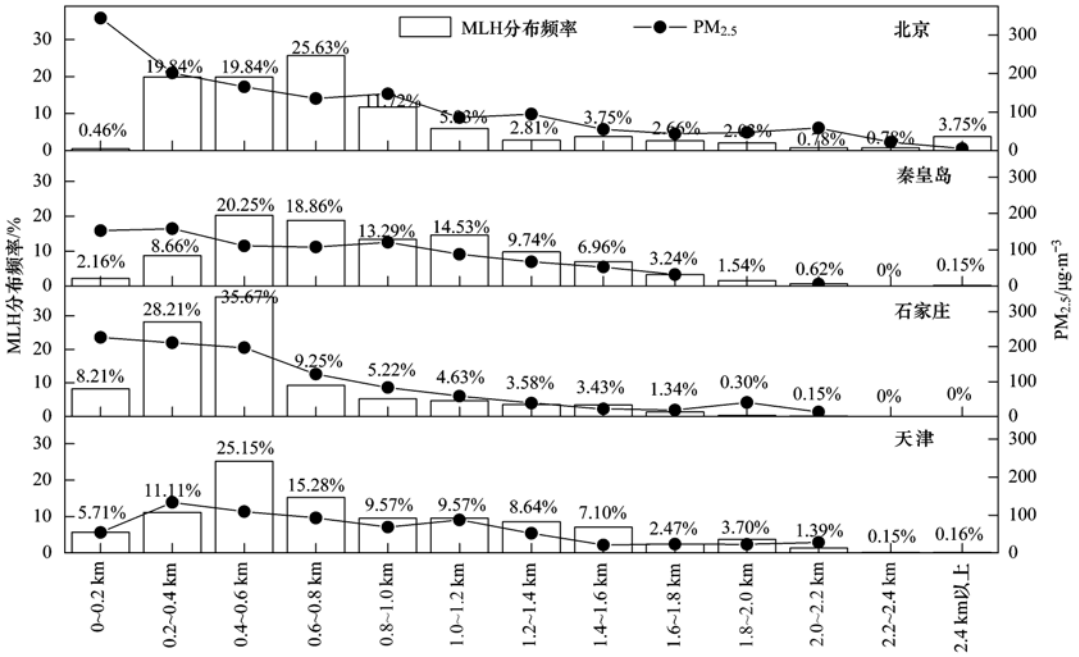

图 3 2014 年 2 月北京、天津、石家庄和秦皇岛的 MLH 统计分布

Fig. 3 MLH statistical distribution in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Qinhuangdao in February 2014

综合来看,天津和秦皇岛两个海滨站点混合层频率分布特征相似,北京和石家庄两个山前站点则各有不同. 北京 MLH 的高值出现最为频繁,石家庄站高值则几乎没有,大部分 MLH 出现在 600 m 以下. 也就是说,北京有较多的天气适宜于对流扩散,而石家庄这种易于对流扩散的天气则较少.

2.3 混合层高度变化特征

为了分析 4 个站点混合层高度的空间差异,计算了 4 个站点 MLH 月均值. 从表 4 中可以看出,秦皇岛 MLH 最高,达到 865 m,石家庄最低,仅为 568 m,天津和北京 MLH 稍低于秦皇岛,分别为 834 m 和 818 m. 从各个站点的日均值标准偏差来看,天津 2 月混合层高度变化起伏最大,达到 334 m,北京次之,变化起伏为 319 m,石家庄 MLH 变化起伏最小,只有 207 m; 秦皇岛变化起伏也在 300 m 以下,为 268 m. 由此看来,秦皇岛、北京和天津 MLH 都介于 800 m 和 900 m 之间,只有石家庄与其它 3 个站 MLH 值差别很大,与北京、天津和秦皇岛分别低了 30%、32% 和 34%,并且 MLH 变化起伏也最小,说明了石家庄的混合层较稳定并且对流扩散能力较弱.

表 4 2014 年 2 月北京、石家庄、天津和秦皇岛的 MLH 月平均值

Table 4 Monthly average of MLH in Beijing, Shijiazhuang, Tianjin and Qinhuangdao in February 2014

站点	北京	天津	石家庄	秦皇岛
MLH 月均值/m	818 ± 319	834 ± 334	568 ± 207	865 ± 268

为了研究京津冀区域的 MLH 的 24 h 变化特征，本文计算了 4 个站的 MLH 小时均值，图 4 显示了北京、天津、石家庄和秦皇岛观测到的 MLH 24 h 变化规律. 4 个站 MLH 均呈现单峰型日变化特征. MLH 在夜晚或清晨最低，随着太阳辐射的增强，MLH 从 10:00 开始逐渐升高，在午后达到最高值. 午后随着辐射的减弱，MLH 逐渐下降，至夜间 20:00 左右 MLH 下降到相对稳定状态. 由此可看出，4 个站在日照较少的 20:00 到第二天 09:00 之间 MLH 变化较小，09:00 后，MLH 随辐射的增强和减弱经历先升高后下降的过程. 北京、天津、石家庄和秦皇岛这 4 个站点最低值分别为 538、636、349 和 707 m；最高值分别为1 254、1 145、864 和1 136 m，相对应 4 个站点的日较差分别为 715、509、514 和 429 m. 天津和秦皇岛因海洋热力的影响，夜间 MLH 下降幅度较小，日较差较小，日较差均低于 600 m；北京则由于城市面积大，路面和建筑硬化程度高，辐射升温和降温都较强，从而导致日较差最高，超过了 600 m. 不容忽视的是，石家庄 MLH 日较差不足 500 m，且全天 MLH 均低于其他 3 个站，再一次说明了石家庄地区对流扩散能力较弱.

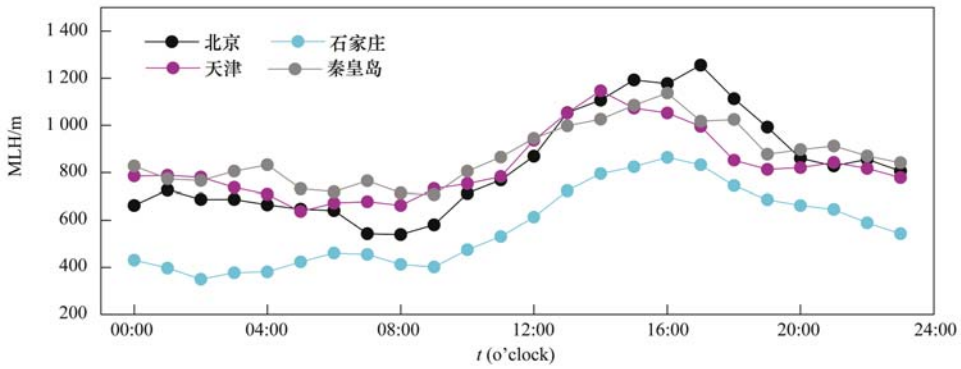

图 4　2014 年 2 月北京、天津、秦皇岛和石家庄的 MLH 统计日变化

Fig. 4　Statistical daily variation of MLH in Beijing, Tianjin, Qinhuangdao and Shijiazhuang in February 2014

3　讨论

3.1　混合层高度变化特征差异的原因

综合现有文献发现，现有测试大气 MLH 的方法均是先通过使用适当设备得出气象参数廓线图(绝大部分是温度、湿度或风速等值)，然后分析这些气象参数在垂直方向的高度变化规律，最后用一定的客观方法间接估算出大气 MLH[19~22]，因此大气 MLH 与常规地面气象参数存在一定的相关性. 国外大量研究文献也表明，白天的大气 MLH 主要受热浮升力影响，而晚上的大气 MLH 主要受机械力影响[23]. 白天太阳辐射增强、温度升高，大气热浮升力增大，有利于大气 MLH 的发展和上升，同时相对湿度减小能增大热浮升力，也有利于 MLH 的增大. 根据辐射平衡，白天热浮升力与感热和潜热通量直接相关[24]. 晚上辐射通量为负值，大气 MLH 主要受机械力影响，机械力引起的动量通量与摩擦风速直接相关. 由于感热、潜热通量和摩擦风速的数据难以获取，而温度、湿度和日照时数在一定程度上与感热和潜热通量相关，风速与摩擦风速相关性较强，因此采用与感热、潜热通量和摩擦风速有关的气象参量(温度、湿度、风速和日照时数)对混合层变化特征进行解释.

为了确定影响大气 MLH 的主要气象参数，将 4 个站点的气象数据进行比较. 从表 5 中可以看出，北京、天津、石家庄和秦皇岛这 4 个站点日照时数月平均值分别为 3.85、4.11、0.91 和 5.59 h，风速月平均值分别为 1.98、2.46、0.96 和 1.72 $m \cdot s^{-1}$，温度平均值分别为 −0.42、0、0.5 和 −2.78℃，湿度月平均值分别是 54.79%、62.32%、63.89% 和 63.54%. 将 MLH 与气象参数进行比较分析发现，4 个站 MLH 月平均值明显受日照时数和风速的影响，每个站日照时数能一定程度上地反映各地的太阳辐射情况，受日照时间越长，太阳辐射导致热浮升力越大，MLH 则也升得越高，秦皇岛受日照时间最长，MLH 最高，天津次之，石家庄日照时数最短，MLH 也最低. 再加上夜晚时间受风速影响，石家庄受到太阳辐射和风速的限制，MLH 平均值很低，而因为风速较大的原因，天津和北京 MLH 平均值稍低于秦皇岛.

而 MLH 24 h 变化规律明显受到日照时长及强度的影响，虽然日落在晚上六七点左右，但是日落后太阳辐射量并没有立即停止，而是逐渐减少，因此 MLH 没有在日落后就进入稳定状态，而是日落后几

个小时才进入稳定状态,进入稳定状态后一直基本保持不变,直至第二天早上 10:00 左右开始新一轮循环. 综上所述,辐射和风速是 4 个站点 MLH 差异的主要因素.

表 5 2014 年 2 月北京、石家庄、天津和秦皇岛气象参数的平均值

Table 5 Average of meteorological parameters in Beijing, Shijiazhuang, Tianjin and Qinhuangdao in February 2014

项目	北京	天津	石家庄	秦皇岛
温度/℃	-0.42 ±3.08	0.00 ±3.51	0.50 ±3.18	-2.78 ±3.37
风速/m·s^{-1}	1.98 ±0.86	2.46 ±1.10	0.96 ±0.25	1.72 ±0.53
日照时数/h	3.85 ±3.88	4.11 ±3.54	0.91 ±2.39	5.59 ±3.81
湿度/%	54.79 ±20.33	62.32 ±17.28	63.89 ±12.77	63.54 ±16.32

3.2 混合层高度对大气细颗粒物浓度的影响

3.2.1 大气细颗粒物浓度与混合层高度的关系

为了研究细颗粒污染物浓度随 MLH 的变化,本文对不同 MLH 的 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化进行了分析. 图 3 能够粗略地反映细颗粒污染物浓度随 MLH 升高而下降的趋势:当石家庄 MLH 低于 600 m,污染物浓度会从 121.54 μg·m^{-3} 骤然升高到 197.33 μg·m^{-3}; 北京 MLH 低于1 000 m,污染物浓度会从 85.14 μg·m^{-3}骤然升高到 147.37 μg·m^{-3}; 而秦皇岛和天津两个靠海的城市污染物浓度变化趋势不明显.

为了进一步研究细颗粒污染物浓度随 MLH 的变化,本文将 4 个站 MLH 日均值数据和 $PM_{2.5}$ 质量浓度的日均值数据进行曲线拟合. 从图 5 中可以看出,4 个站 MLH 与细颗粒物质量浓度大致呈指数型分布. 北京和石家庄两个山前站点 MLH 和细颗粒物浓度之间的相关系数分别为 -0.81 和 -0.75,且两个站的相关系数都通过了 0.01 的显著性检验,说明北京和石家庄地区的细颗粒物浓度和混合层高度高度负相关,细颗粒物浓度随 MLH 升高而下降,且 MLH 越高,下降的速率越小. 秦皇岛和天津 MLH 与细颗粒物浓度之间的相关系数则相对较低,仅为 -0.57 和 -0.48,且两个站的相关系数都通过了 0.05 的显著性检验,说明这两个站点 MLH 与细颗粒物质量浓度呈中度负相关. 产生这一现象的主要原因是,秦皇岛和天津属于海滨城市,由于受下午到晚间海风的影响,在热力强制的作用下,接近地面的空气层将逐渐发展为混合层,形成热内混合层. 由于热内混合层内湍流旺盛,烟云极易在混合层内扩展,形成熏烟型,因此 MLH 与细颗粒物浓度的相关性降低. 根据国家发布的 $PM_{2.5}$ 空气质量标准(GB 3095-2012),$PM_{2.5}$ 的日均浓度大于 75 μg·m^{-3},该地区大气细颗粒物质量浓度超过国家标准. 如果以日均值 75 μg·m^{-3}为依据,在北京、天津、石家庄和秦皇岛地区,当 MLH 低于 783、813、739 和 788m 时,$PM_{2.5}$ 的浓度将大于 75 μg·m^{-3},将这 4 个站的 MLH 称为各自站点的 MLH 阈值. 而北京、天津、石家庄和秦皇岛观测期间 MLH 分别有 50%、43%、80% 和 36% 的时间低于各自站的 MLH 阈值,也说明了观测期间北京、天津、石家庄和秦皇岛这 4 个地区可能分别有 50%、43%、80% 和 36% 的时间是属于 $PM_{2.5}$ 二级或以上污染时段.

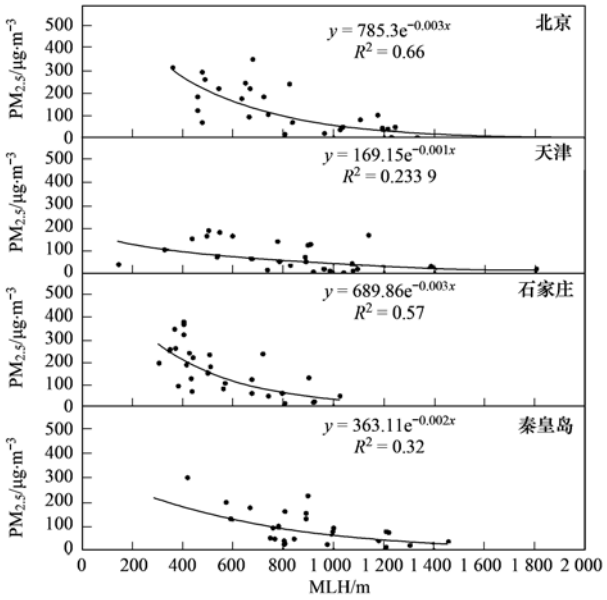

图 5 北京、石家庄、天津和秦皇岛 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 MLH 的对比

Fig. 5 Scatterplot comparison between concentration of $PM_{2.5}$ and MLH in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Qinhuangdao

3.2.2 混合层内大气细颗粒物污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)

为了分析污染物变化的原因,He 等[25]得出结论均为 MLH 与排放源影响了污染物浓度的变化. 为了排除 MLH 对颗粒物浓度的影响,假设混合层内垂直方向上 PM 质量浓度均一不变,将质量浓度乘以 MLH 代表大气细颗粒物的污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH),从而剥离 MLH 变化对质量浓度的影响[26](表 6 和图 6). 从表 6 可以看出,北京、天津、石家

庄和秦皇岛这 4 个站点 $PM_{2.5}$ 质量浓度月平均值分别是 132.26、80.01、172.31 和 102.32 $\mu g \cdot m^{-3}$；混合层内细颗粒物污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）分别是 85.74、55.28、75.26 和 76.70 $mg \cdot m^{-2}$. 也就是说，虽然石家庄近地面颗粒物浓度最高，但是混合层内细颗粒物的污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）并不是最高，仅为 75.3 $mg \cdot m^{-2}$；北京混合层内细颗粒物污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）最高，达到 85.7 $mg \cdot m^{-2}$；天津的细颗粒物污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）最低，仅为 55.3 $mg \cdot m^{-2}$. 由此来看，石家庄不利的垂直扩散条件是导致其近地层细颗粒物浓度较高的主要原因.

表 6　2014 年 2 月北京、天津、石家庄和秦皇岛 $PM_{2.5}$ 平均质量浓度和平均污染负荷

Table 6　$PM_{2.5}$ average mass concentrations and average pollution loads in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Qinhuangdao in February 2014

项目	北京	天津	石家庄	秦皇岛
$PM_{2.5} \times MLH / mg \cdot m^{-2}$	85.74	55.28	75.26	76.70
$PM_{2.5} / \mu g \cdot m^{-3}$	132.26 ± 104.41	80.01 ± 62.10	172.31 ± 113.10	102.32 ± 72.56

为了获取不同排放源的贡献，对细颗粒物污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）的日变化进行了分析（图 6）. 从图 6 中可以看出，天津的污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）曲线整体较低，在经历了夜晚时间下降过程后，污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）开始升高，在白天 08:00 ~ 20:00的时间段，除了 17:00 ~ 18:00 时间有个低谷，其它时候的污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）维持在 55.6 $mg \cdot m^{-2}$以上，说明天津晚上时间排放不多，白天则有两个时间段的高峰期. 结合 $PM_{2.5}$ 24 h 质量浓度变化曲线，可以看到在 09:00 ~ 10:00（$PM_{2.5}$ 94.84 $\mu g \cdot m^{-3}$）和 21:00（$PM_{2.5}$ 92.06 $\mu g \cdot m^{-3}$）有两个小高峰，09:00 ~ 10:00 和 21:00 这两个时间点正是上班和下班的高峰期，说明天津本地受机动排放源的影响较高. 石家庄虽然 $PM_{2.5}$ 质量浓度最高，但是大气垂直方向上的污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）并不高，石家庄 24 h 污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）变化显示，在夜晚到清晨的时间段污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）不高，在从上午到傍晚的时间段，污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）曲线先在 14:00 经历了一个高峰期，后在 20:00 经历了另一个小高峰期. 结合 $PM_{2.5}$ 24 h 的质量浓度变化曲线可以看出，石家庄中午达到最高峰（215.01 $\mu g \cdot m^{-3}$），在 21:00 左右有一个小高峰（171.70 $\mu g \cdot m^{-3}$），说明石家庄可能受固定排放源的影响较高且排放的污染物二次生成量也高. 北京的污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）在 04:00 ~ 12:00 时间段经历了先下降后上升的过程，而其它时间段包括夜晚时间污染负荷（$PM_{2.5} \times MLH$）大致维持在 81.8 $mg \cdot m^{-2}$. 结合 $PM_{2.5}$ 24 h 质量浓度变化曲线看出，北京数据

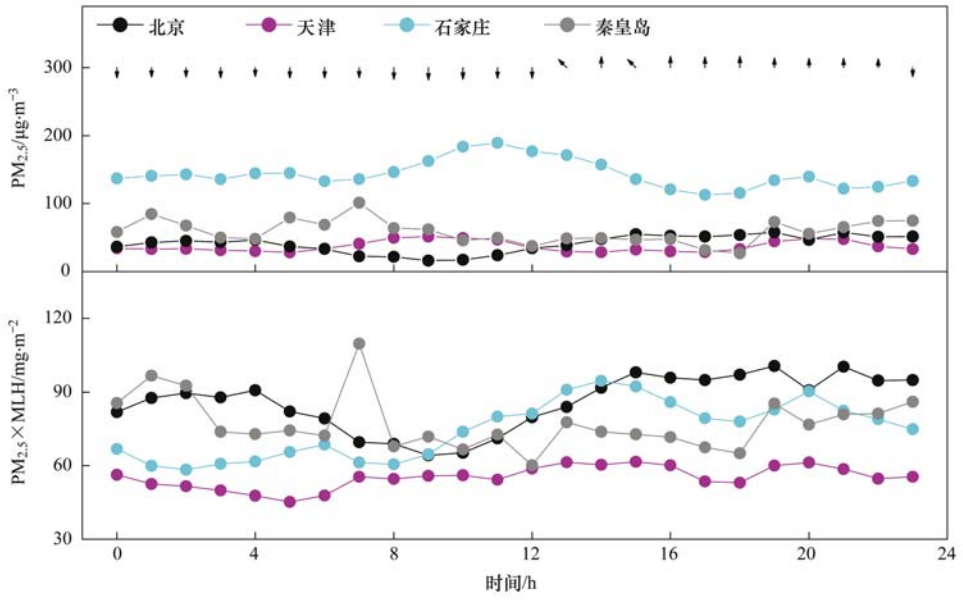

图 6　2014 年 2 月北京、天津、石家庄和秦皇岛的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与大气垂直方向的污染负荷的统计日变化及北京 24 h 风矢量图

Fig. 6　Statistical daily variation of $PM_{2.5}$ average mass concentrations and pollution loads of the atmospheric vertical direction in Beijing, Tianjin, Shijiazhuang and Qinhuangdao in February 2014 and 24 hours wind vector diagram of Beijing

24 h 变化大致很平稳,没有剧烈变化,说明晚上的高污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)可能是因为柴油车夜间进入北京地区,而白天 15:00 ~ 19:00 的高污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)可能是因为这段时间南风将污染物输送到北京,下午的风向的变化可以佐证(图 6). 由此来看,虽然石家庄本地污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)不高,但漂浮在混合层以上的颗粒物随着南风输送到北京,对北京地区下午细颗粒物的浓度有相当贡献. 秦皇岛的 $PM_{2.5}$ 污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)表明秦皇岛的污染情况也相当严重,从清晨到中午污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)不高,到了下午污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)开始升高,在 17:00 ~ 18:00 经历了一个低谷期后一直维持在 88.3 $mg \cdot m^{-2}$ 以上,说明了秦皇岛下午的高污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)是因为海风热力强制作用,将近地面的空气层发展为混合层,从而造成污染物的熏烟型污染.

结合 $PM_{2.5}$ 数据发现,4 个站点中,虽然石家庄近地面细颗粒物浓度最高,但是混合层内的污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)并不是最高,高架源对源区 $PM_{2.5}$ 贡献不显著,但其对下风向区域的输送极为显著. 北京白天受华北平原南部区域输送显著影响,夜晚受进出北京的柴油车影响,从而造成北京污染物负荷($PM_{2.5}$ × MLH)最高. 秦皇岛下午到傍晚时间刮海风,极易造成熏烟型污染,从而导致秦皇岛污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)升高. 天津的污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)曲线在 09:00 ~ 10:00 和 21:00 有两个小高峰,说明天津受本地机动排放源的影响较高.

4 结论

(1)2014 年 2 月,秦皇岛 MLH 平均值最高,达到 865 m ± 268 m; 石家庄最低,仅为 568 m ± 207 m; 北京和天津介于这两个城市之间,分别为 818 m ± 319 m 和 834 m ± 334 m. 石家庄大气 MLH 比北京、天津和秦皇岛分别低了 30%、32% 和 34%; 4 个站点 MLH 的变化均有典型局地特征,并无显著性相关,4 个站点观测能较好地涵盖京津冀的平原区域 MLH 的整体变化.

(2)京津冀 MLH 的变化除了受辐射和温度的显著影响外,与大气细颗粒物浓度呈高度负相关. 秦皇岛和天津 MLH 分别低于 788 m 和 813 m 时,细颗粒物浓度将超过 75 $\mu g \cdot m^{-3}$; 北京和石家庄细颗粒物浓度超过 75 $\mu g \cdot m^{-3}$ 时对应的 MLH 分别为 783 m 和 739 m. 本观测期,MLH 在 800 m 以下时,北京、天津、石家庄和秦皇岛分别有 50%、43%、80% 和 36% 的时间是属于 $PM_{2.5}$ 二级或是以上污染时段.

(3)观测研究时段,石家庄近地面细颗粒物浓度最高,但其混合层内的污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)并不是最高,高架源对源区 $PM_{2.5}$ 贡献不显著,但其对下风向区域输送极为显著; 北京白天受华北平原南部区域输送显著影响,夜晚受进出北京的柴油车影响,造成北京颗粒物污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)最高; 秦皇岛下午到傍晚时间刮海风,极易造成熏烟型污染,从而导致秦皇岛污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)升高; 天津的污染负荷($PM_{2.5}$ × MLH)曲线在 09:00 ~ 10:00 和 21:00 有两个小高峰,说明了天津受本地机动排放源的影响较高.

参考文献:

[1] Stull R B. 边界层气象学导论[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 3-20.

[2] Nozaki K Y. Mixing depth model vsing hourly surface observations[R]. USAF Environmental Technical Applications Center, 1973, Reprot7053.

[3] Holzworth G C. Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States[J]. Journal of Applied Meteorology, 1967, **6**(6): 1039-1044.

[4] Gareía M A, Sánchez M L, Torre B D, *et al*. Characterisation of the mixing height temporal evolution by means of a laser dial system in an urban area-intercomparison results with a model application[J]. Annales Geophysicae, 2007, **25**: 2119-2124.

[5] 黄柏良. 城市通风及其影响城市热岛效应与空气质量研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011. 70-74.

[6] 苑克娥, 张世国, 胡顺星, 等., 对流层低层臭氧的差分吸收激光雷达测量[J]. 强激光与粒子束, 2013, **25**(3): 553-556.

[7] 于海利, 胡顺星, 苑克娥, 等. 合肥上空大气二氧化碳 Raman 激光雷达探测研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(7): 812-817.

[8] 范广强, 胡顺星, 谢军, 等. 合肥地区夏季臭氧、温度、水汽、气溶胶、二氧化碳测量与对比分析[J]. 大气与环境光学学报, 2009, **4**(1): 22-29.

[9] Bossioli E, Tombrou M, Dandou A, *et al*. The Role of Planetary Boundary-Layer Parameterizations in the Air Quality of an Urban Area with Complex Topography [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2009, **131**(1): 53-72(20).

[10] Stefan E, Carsten J, Christoph M, *et al*. Multiple atmospheric layering and mixing-layer height in the Inn valley observed by remote sensing[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2007, **16**(4): 415-424(10).

[11] Mok T M, Rudowicz C Z. A lidar study of the atmospheric entrainment zone and mixed layer over Hong Kong [J]. Atmospheric Research, 2004, **69**(3): 147-163.

[12] Sohi S, Lopez-Capel E, Krull E, *et al*. Biochar, climate change and soil: A review to guide future research[J]. Csiro Land and Water Science Report, 2009, **5**(9): 17-31.

[13] Sicard M, Pérez C, Rocadenbosch F. *et al*. Mixed-layer depth determination in the barcelona coastal area from regular lidar measurements: methods, results and limitations[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, **119**(1): 135-157.

[14] Emeis S, Schäfer K, Münkel C, *et al*. Evaluation of the interpretation of ceilometer data with RASS and radiosonde data [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2012, **143**(1): 25-35.

[15] Münkel C, Eresmaa N, Räsänen J, *et al*. Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, **124**(1): 117-128.

[16] Zhang W C, Zhang Y, Lv Y, *et al*. Observation of atmospheric boundary layer height by ground-based LiDAR during haze days [J]. Journal of Remote Sensing, 2013, **17**(4): 981-992.

[17] Christoph M, Roininen R, Automatic monitoring of boundary layer structures and depth with ceilometers using a novel robust algorithm. [EB/OL]. http://www. isars2010. uvsq. fr/images/stories/PosterExtAbstracts/P_BLS06_Muenkel. pdf.

[18] Charron A, Harrison R M, Moorcroft S, *et al*. Quantitative interpretation of divergence between PM_{10} and $PM_{2.5}$. mass measurement by TEOM and gravimetric (Partisol) instruments [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(3): 415-423.

[19] Dandou A, Tombrou M, Schäfer K, *et al*. A comparison between modelled and measured mixing-layer height over Munich [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2009, **131**(3): 425-440.

[20] Seibert P, Beyrich F, Gryning S E, *et al*. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(7): 1001-1027.

[21] Joffre S M, Kangas M, Heikinheimo M, *et al*. Variability of the stable and unstable atmospheric boundary-layer height and its scales over a Boreal Forest [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, **99**(3): 429-450.

[22] McGregor G R, Bamzelis D. Synoptic typing and its application to the investigation of weather air pollution relationships, Birmingham, United Kingdom [J]. Theoretical and Applied Climatology, 1995, **51**(4): 223-236.

[23] Khan S M, Simpson R W. Modelling mixing height from routinely measured surface and upper air meteorological data. [J]. Environmental Modeling and Assessment, 1997, **2**(3): 191-200.

[24] Endo S, Shinoda T, Tanaka H, *et al*. Characteristics of vertical circulation in the convective boundary layer over the Huaihe River Basin in China in the early summer of 2004 [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, **47**(11): 2911-2928.

[25] He G X, Yu C W F, Lu C, *et al*. The influence of synoptic pattern and atmospheric boundary layer on PM_{10} and urban heat island[J]. Indoor and Built Environment, 2013, **22**(5): 796-807.

[26] Guinot B, Cachier H, Sciare J, *et al*. Beijing aerosol: Atmospheric interactions and new trends [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**(D14): D14314.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 6

Jun. 15, 2015

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring ····· XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, *et al.* (1911)

Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing ····· YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, *et al.* (1919)

Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ··· ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, *et al.* (1926)

Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution ····· LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, *et al.* (1935)

Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China ····· MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, *et al.* (1944)

Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China ····· ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)

Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China ····· XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, *et al.* (1959)

Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing ····· HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, *et al.* (1966)

Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant ····· OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, *et al.* (1975)

Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve ····· TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, *et al.* (1983)

Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation ····· LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)

Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke ····· HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, *et al.* (1998)

Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing ····· WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, *et al.* (2005)

Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst ····· FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, *et al.* (2010)

Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary ····· LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)

Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen ····· LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, *et al.* (2028)

Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China ····· LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, *et al.* (2038)

Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River ····· HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, *et al.* (2046)

Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir ····· WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)

Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir ····· ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, *et al.* (2061)

Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis ····· BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, *et al.* (2070)

In Situ High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu ····· LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, *et al.* (2077)

Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province ····· XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, *et al.* (2085)

Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle ····· LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, *et al.* (2094)

Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace ····· ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, *et al.* (2102)

Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments ····· HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)

Performance Study of Bromochloracetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction ····· DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, *et al.* (2116)

Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α-FeOOH Synergized with H_2O_2 Under Visible Light Irradiation ····· XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, *et al.* (2122)

Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H_2O_2 Process: Kinetics and Factors ····· FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, *et al.* (2129)

Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO_2 Photocatalyst ····· LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, *et al.* (2138)

Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp ····· WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, *et al.* (2147)

Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe_3O_4/CeO_2-H_2O_2 Heterogeneous Fenton-Like Systems ····· SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, *et al.* (2154)

Preparation of Coated CMC-Fe^0 Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water ····· FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, *et al.* (2161)

Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode ····· QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, *et al.* (2168)

Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite ····· XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, *et al.* (2175)

Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon ····· ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2185)

Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly(AM-co-DVB) ····· ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, *et al.* (2195)

Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant ····· YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, *et al.* (2203)

Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water ····· SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)

Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor ····· ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, *et al.* (2216)

Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H_2O_2-OH Process ····· JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)

Enrichment and Characterization of A Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment ····· YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)

Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics ····· WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, *et al.* (2239)

Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four *Bacillus* Strains ····· WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, *et al.* (2245)

Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by *Shewanella oneidensis* MR-1 ····· SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)

Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice ····· MA Wei, BAO Yan-yu (2259)

Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field ····· LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)

Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City ····· LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)

Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China ····· LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, *et al.* (2283)

Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an *In-vitro* Gastrointestinal Model ····· ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, *et al.* (2292)

Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon ····· CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)

Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi ····· ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, *et al.* (2306)

Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils ····· ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)

Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake ····· YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, *et al.* (2320)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环 境 科 学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2015 年 6 月 15 日　第 36 卷　第 6 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 6　Jun. 15, 2015

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行