

杨宇辉,张金强,陈洪滨,等.渤海湾海陆风环流及臭氧特征分析[J].气象研究与应用,2024,45(2):8-15.

YANG Yuhui, ZHANG Jinqiang, CHEN Hongbin, et al. Characteristics analysis of sea-land breeze circulation and ozone in Bohai Bay [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(2): 8-15.

渤海湾海陆风环流及臭氧特征分析

杨宇辉^{1,2}, 张金强^{2,3,1*}, 陈洪滨^{2,3}, 陈红岩², 何文英², 潘继东², 南卫东²

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 10004)

摘要:利用2023年夏季在乐亭县开展的观测实验数据和相关气象数据及环境数据,分析渤海湾地区海陆风环流及其对臭氧污染的影响。结果表明,海陆风环流可以影响臭氧在海陆间输送,可能导致渤海湾上空及沿海地区臭氧污染。HYSPLIT后向轨迹模拟解析共有5条主要气团轨迹影响到实验观测地区,其中有2条偏南方向气团通过短距离输送进入实验地区,对该区域的臭氧污染贡献率高达65%。

关键词:渤海湾;海陆风环流;臭氧污染;地基观测;轨迹模拟

中图分类号: P434

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.2.02

臭氧(O_3)是大气中一种重要的微量气体,虽然臭氧只占大气层的几百万分之一,但它对大气环境和全球气候都至关重要^[1]。臭氧主要分布在10~50 km高度之间的平流层大气中,臭氧极大值出现在20~30 km之间。平流层臭氧主要由太阳光解生成,可以吸收全部UVC和绝大部分UVB紫外辐射,保护地球生命系统^[2]。对流层臭氧是重要的光化学污染物,呈现出显著的区域性特征^[3],高浓度臭氧会对人类健康和生态环境产生影响^[4]。城市近地面臭氧污染主要是大气中的氮氧化物(NO_x)与可挥发性有机化合物(VOCs)等臭氧前体物在阳光照射下通过一系列复杂化学反应生成^[5]。

海陆风(Sea-Land Breeze, SLB)是一种由海陆间热力性质差异所引起的中尺度大气现象^[6]。海陆风环流主要出现在沿海地区,当近地层空气从海洋流向陆地时形成海风,反之,当近地层空气从陆地流向海洋时则形成陆风^[7]。海陆风环流在垂直方向上的闭合主要通过边界层内的湍流混合实现的,白天陆地加热作用导致空气抬升,而海洋上空形成下

沉气流,夜间上述过程则相反。上述垂直和水平方向的环流相互作用,形成一个复杂的三维环流系统。沿海地区的独特气候条件以及海陆风环流结构对大气污染物的输送和扩散具有重要影响^[8]。WU^[9]研究显示海陆风环流可以导致沿海地区污染物累积并加剧空气污染。陈彬和于恩洪^[10]分析1976—1982年气候资料表明,渤海湾西岸全年均可观测到由海陆间气温差引起的海陆风,其中夏季强于冬季,且海风强于陆风。郑冬和阎守政^[11]研究表明海陆风通常发生在晴天,尤其7月最为频繁。ZHAO^[12]分析在宁波监测站所开展为期三日的臭氧浓度观测数据,结果显示长江三角洲地区独特的地理特征使得海陆风环流与沿海低空急流结构共存,其中沿海低空急流导致残留层臭氧下沉,使得夜间地面臭氧浓度异常升高约 $50 \mu g \cdot m^{-3}$ 。何礼等^[13]对上海地区海陆风特征及其对臭氧浓度影响的研究表明,海陆风与海陆温差年变化显著相关,海陆风在3—8月发生频率较高,最大风速出现在15:00左右,臭氧浓度峰值升高约 $16 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 国家自然科学基金重大项目课题“对流层臭氧的探测与监测新技术”(42293321)

第一作者: 杨宇辉(1999-),硕士研究生,主要从事大气探测技术研究。E-mail: 2964107386@qq.com

*通讯作者: 张金强(1981-),研究员,博士生导师,主要从事大气臭氧及环境效应研究。E-mail: zjq@mail.iap.ac.cn

海陆风过程中臭氧浓度变化受多种因素影响, 包括太阳辐射强度、局地环流、前体物浓度等^[14], 海陆风过程臭氧浓度变化相关研究还有待于进一步加强。作者于2023年夏季在渤海湾沿海地区(渤海西岸的河北省乐亭县)开展为期15 d的海陆风及臭氧污染加强观测实验, 本文基于该实验中地基风廓线雷达和臭氧激光雷达连续观测沿海边界层内水平风场和大气臭氧数据进行分析, 旨在捕捉海陆风环流过程及沿海地区臭氧污染分布特征。

1 资料与方法

1.1 数据及处理

2023年7月27日至8月10日, 在渤海湾地区的河北省乐亭县(经度119.13°E, 纬度39.32°N, 以下简称“地面站”)使用地基臭氧激光雷达和风廓线雷达开展为期十五天的大气臭氧和风场加强观测实验。其中, 臭氧激光雷达基于激光差分吸收原理设计, 用于测量边界层2 km高度范围内的臭氧浓度垂直分布^[15-16]。在测量过程中, 臭氧激光雷达可能受到云层、降水以及信号干扰等多种因素的影响, 本文对臭氧激光雷达观测进行相应数据质控。风廓线雷达可以提供边界层内径向风速(水平、竖直方向)和风切变数据, 垂直空间分辨率为50 m, 时间分辨率为2 min, 最大探测距离约3 km^[17]。此外, 本文在开展上述观测数据分析的基础上, 进一步使用国家环境监测中心(China National Environmental Monitoring Centre; CNEMC)数据、地面站臭氧通量观测数据、星载大气红外探测器(Atmospheric Infrared Sounder; AIRS)数据以及第五代欧洲中期天气预报中心大气再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5; ERA5)进行辅助分析。其中, CNEMC提供逐小时地面臭氧数据, 乐亭地面站布设的臭氧通量系统观测三个高度(1.5 m、4.2 m、6.5 m)臭氧浓度值。AIRS提供全球温度、水汽、臭氧分布数据, 本文使用AIRS观测近地面臭氧浓度。ERA5再分析资料为全球气候第五代大气再分析数据集, 是结合模式与观测数据形成的一个全球数据集, 提供大气、陆地和海洋气候变量, 本文使用ERA5再分析资料水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的垂直风、水平风和臭氧混合比等逐小时数据^[18]。

1.2 海陆风判定方法

海陆风形成受海陆温差、太阳辐射和地面气压梯度等多气象要素共同影响^[19], 不同地区由于纬度

位置、地形地貌以及海岸线走向差异, 会导致海陆风的判定标准存在着一定的差异。本文在调研结合国内外不同地区识别海陆风相关研究基础上^[20-22], 设定渤海湾地区海陆风判据如下:

(1) 海陆风时段

海风时段: 13:00—20:00, 要求海风至少持续出现4 h;

陆风时段: 01:00—08:00, 要求陆风至少持续出现4 h。

(2) 风向差值判别

在北京时间02:00与14:00两个时刻之间风向差值的绝对值需在 $90^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 范围内。

1.3 后向轨迹模拟

利用HYSPLIT后向轨迹模型对乐亭地区进行每6 h一次、持续7 d的不同高度气团后向轨迹模拟。该模型可计算简单的气团轨迹以及复杂传输、扩散、化学转化和沉积^[23]。为了更加清晰地辨别乐亭地区气流来向及其对臭氧的贡献, 本文采用HYSPLIT模型聚类分析方法按照最近原则对后向轨迹模拟进行组合归类。该聚类分析采用逐步聚合的方法, 通过连续对比归并具有相似路径特征的轨迹, 旨在识别气团的主要移动趋势。初始时, 系统将每一条轨迹都划分为单独的群组。随着算法的迭代, 相似的轨迹被不断识别并聚合成更大规模的群组, 直至所有相似轨迹汇聚成一个群体, 反映出整个模拟区域内气团运动的一致性。在每次迭代过程中, 系统会评估总空间方差(TSV)来衡量群组内部轨迹的空间分布一致性。随着聚类进程的深入, TSV变动幅度将逐步降低, 表明轨迹间的相似度在提升。聚类工作在TSV的下降达到一个设定的临界值时终止, 此时表明继续合并轨迹不会显著提升群体内同质性, 即聚类结果达到最优。上述HYSPLIT聚类分析能够有效地揭示气团的主要来源和路径, 有助于理解污染物的长距离传输和区域臭氧污染。

2 结果与分析

2.1 臭氧浓度变化

图1(a)显示地面站与三个国家环境监测中心(CNEMC)站点之间的地理布局和相对距离。其中, 丰润区政府站和小山站被归类为内陆监测站点, 小山站具体位于丰润区政府站的东南方, 两者之间的直线距离为11.6 km。冀东职工油田医院站和地面

站则被定义为沿海监测站点,地面站位于冀东职工油田医院站偏东方向,两者相距 77.2 km。图 1(b) 为三个 CNEMC 站点观测臭氧浓度,显示渤海湾地区的地表臭氧浓度日变化呈现出单峰和单谷的特点,其中谷值出现在上午 07:00 左右,峰值出现在下午 17:00 左右,该臭氧日变化特征应该由臭氧前体物浓度、光化学反应强度和大气扩散条件等共同作用导致。图 1(c) 展示乐亭地面站在 7 月 30 日至 8 月 10 日期间三个不同高度处测量的臭氧浓度值。前面两天乐亭地区遭遇降雨天气,湿沉降作用和云层遮挡太阳辐射使得地面臭氧浓度偏低,平均水平保持在 30 至 40 ppbv 范围内。8 月 2 日天气放晴,臭氧浓度在日间迅速攀升,超过 120 ppbv;夜间臭氧浓度有所下降,但仍然保持在 60 ~ 80 ppbv 较高水平。

为了认识臭氧污染水平范围的相关性,本文对比分析不同站点的日均臭氧浓度(如图 2 所示)。可以看出,不同地区的臭氧浓度相关性存在差异,其中两个内陆站点的臭氧浓度变化一致性较高(相关系数 $R=0.81$;图 2(a)),表明内陆地区的臭氧污染水平具有一定的空间一致性。相比之下,沿海站点与内陆站点臭氧浓度相关性较低(相关系数 $R=0.71$;图 2(b));两个沿海站点的臭氧浓度相关性则最低(相关系数 $R=0.62$;图 2(c)),这可能与海岸局地环流及其气象条件的复杂性有关^[24]。

图 3 所示为 8 月 1 日至 8 月 4 日 2 km 高度范围内臭氧浓度分布图。观测显示日出后臭氧浓度急剧攀升,并在午后达到高峰。其中 8 月 2 日 12:00 左

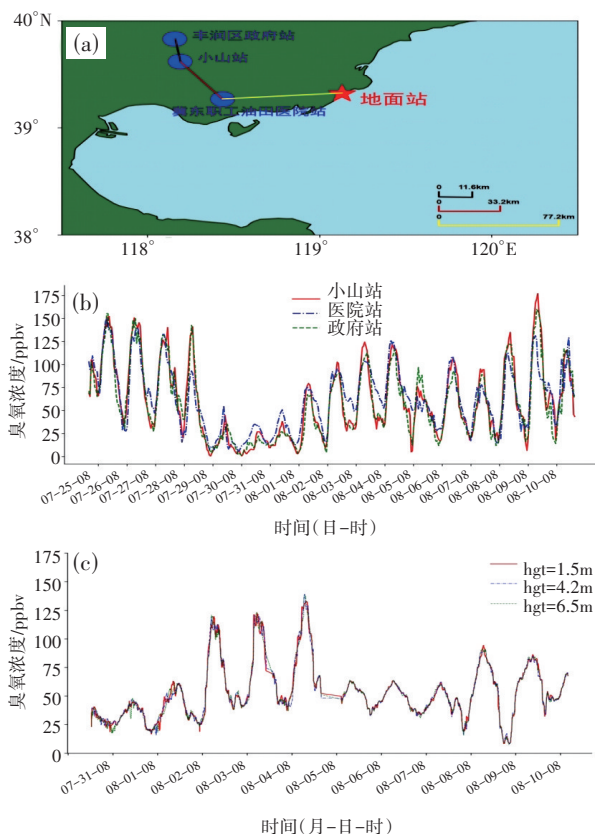


图 1 (a)图为 CNEMC 站点与乐亭实验地面站分布位置示意图(黑线代表丰润区政府站与小山站之间距离,红线代表小山站与冀东职工油田医院站距离,黄线代表冀东职工油田医院站与地面站距离);(b)图为 CNEMC 站点臭氧浓度值(红线代表小山站,蓝线代表冀东油田职工医院站,绿线代表丰润区政府站);(c)图为地面站不同高度臭氧浓度监测值(红线代表 1.5m 高度,蓝线代表 4.2m 高度,绿线代表 6.5m 高度)

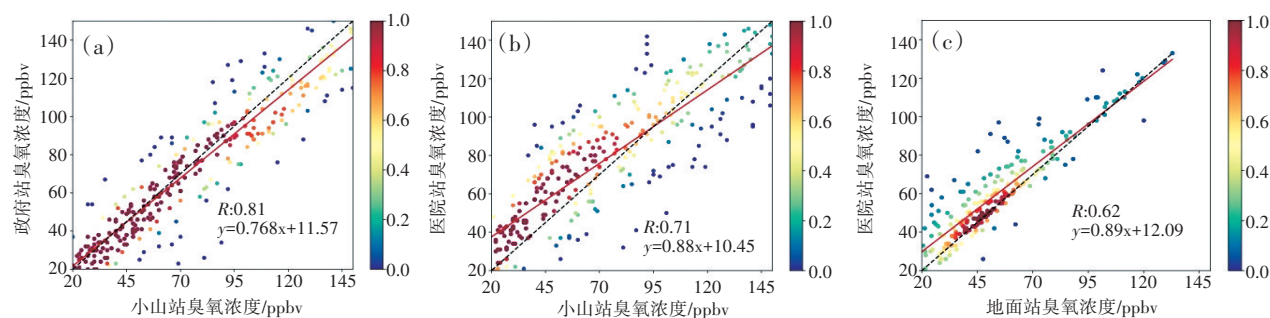


图 2 不同站点之间观测臭氧浓度相关性拟合(颜色条代表数据散点密度,数值越大表示数据越密;图中标注了站点之间的相关系数(R)和线性回归方程)

右近地面 0.5 km 高度内臭氧浓度值达到 150 ppbv 以上,这一峰值可能与强烈的太阳辐射引起的臭氧光化学反应相关,此后近地层臭氧浓度开始逐步降低;夜间近地面臭氧浓度降至约 90 ppbv。整体来

说,臭氧激光雷达测量的臭氧垂直分布结构呈现出明显的日变化特征。

图 4 所示为 2023 年 6 月至 8 月 AIRS 卫星观测我国中南部地区臭氧浓度结果及其在三个月间的平均

水平分布图。可以看出,6月至8月我国中南部地区臭氧浓度呈现显著的上升趋势,其中8月部分沿海地区

的臭氧体积混合比超过 $6 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。三个月内的平均臭氧浓度空间分布与7月较为相似。

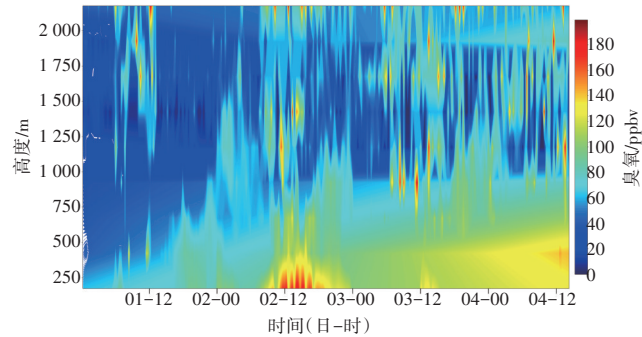


图3 地基臭氧激光雷达观测8月1—4日2 km高度内臭氧浓度分布

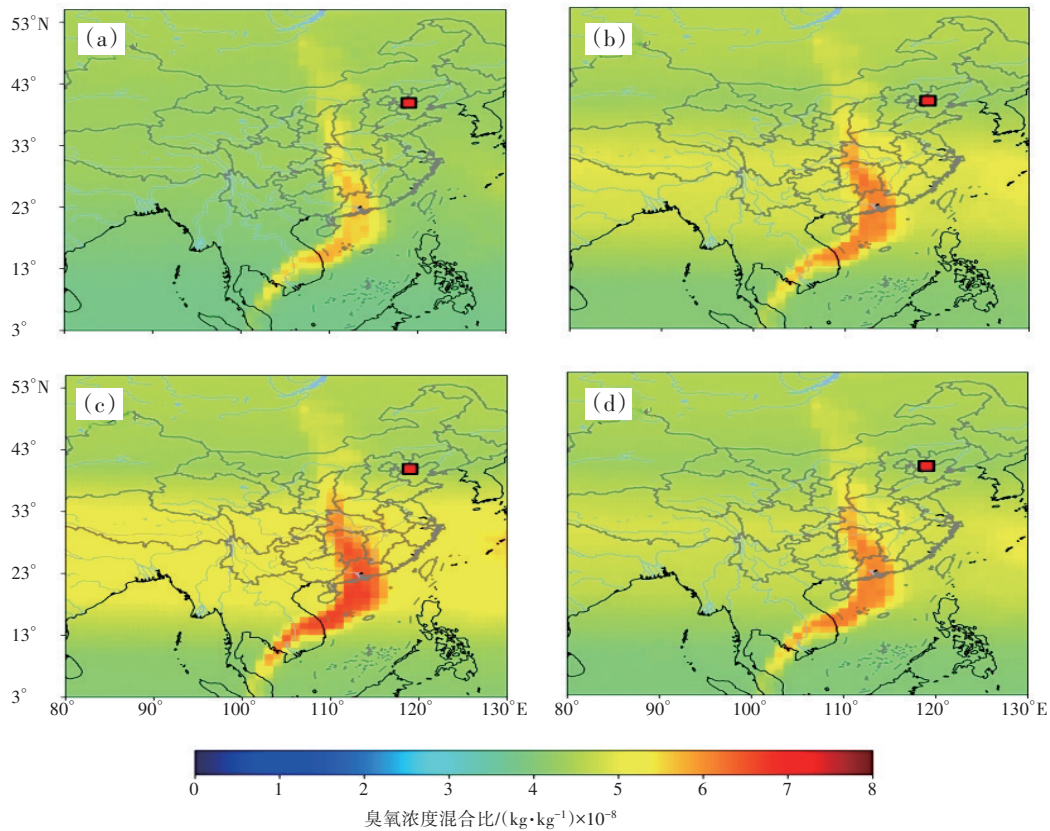


图4 2023年6、7、8月AIRS卫星观测1 000 hPa高度层大气臭氧浓度空间分布(红色方块为地面站位置)
(a)6月;(b)7月;(c)8月;(d)6—8月平均值

图5为8月1日至8月7日期间乐亭地区1 000 hPa高度层HYSPLIT模型后向轨迹模拟聚类结果,共解析出5条主要气团轨迹影响到观测地区。其中,有2条偏南方向气团通过短距离输送进入乐亭地区,对该地区的臭氧污染贡献率高达65%。这一轨迹模拟结果与AIRS卫星观测到的高浓度臭氧空间分布特征(图4)相吻合,即中南部地区的高浓度

臭氧可随着气团移动进入乐亭地区,不仅导致该地区臭氧浓度的上升,也可能增加乐亭地区的臭氧前体物浓度。另外,有2条气团轨迹来自东北方向,通过长距离输送进入实验站点区域,对站点臭氧污染的贡献率达到30%;最后1条气团轨迹来自西北方向,通过短距离输送对站点区域的臭氧污染贡献率为5%。

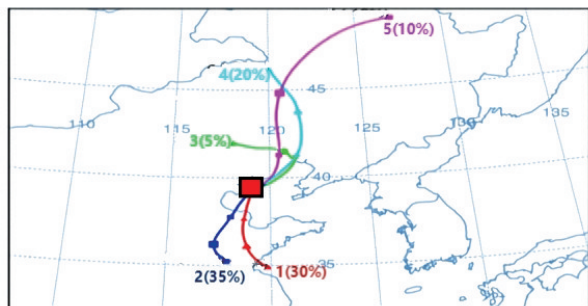


图5 HYSPLIT模型后向轨迹模拟1 000 hPa高度层气团聚类分析(数字1,2,3,4,5表示气团轨迹序数,括号中的百分数是各气团对实验地区臭氧污染的贡献率,红色方块为地面站位置)

2.2 海陆风过程

图6(a)为2023年8月2日至8月3日期间地基风廓线雷达观测乐亭地区水平风速和风向变化特征。可以看出,从8月2日08:00时起,风廓线雷达观测显示乐亭实验站点以东南风为主,此时近地层为海风(Sea Breeze; SB);在8月2日18:00左右,近地面层风向发生变化,由东南风转变为西北风,开始形成陆风(Land Breeze; LB)。整体来看,夜间时段内近地层陆风风速高于日间海风风速,尤其在8月3日00:00左右近地面陆风风速 $>16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。西北风向一直持续至8月3日08:00,此后由陆风转化为海风。上述时段内风向转换被判为海陆风环流的交替现象。图6(b)为海陆风过程中垂直风演变,体现由海陆温差引起的气流垂直运动特性。在8月2日08:00—18:00海风时段内,地面站观测到空气加

热导致的上升气流;在8月2日18:00陆风形成初期,地面站观测到明显冷空气导致的下沉气流,其中8月2日20:00时在700~1 500 m高度内垂直风速约 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,下沉气流强度较大。而在8月3日08:00海风出现后,地面站再次观测到空气加热导致的上升气流,其中14:00时在1 000 m以上高度气流上升速度约 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

通过将风场数据与臭氧分布叠加分析有助于了解海陆风环流对臭氧输送的潜在影响,图7为8月2日08:00至8月3日08:00渤海湾地区1 000 hPa高度层每八个小时的AIRS臭氧混合比与ERA5水平风矢量水平分布情况,在8月2日08:00(图7(a))为海风形成阶段,渤海湾地区高浓度臭氧随海风向乐亭地区输送;下午16:00时(图7(b)),由于日间海风的持续盛行,上述臭氧输送现象更为显著,导致渤海湾上空臭氧进一步向乐亭周边地区输送,使得沿海陆地区域臭氧浓度随之上升,而渤海湾部分区域臭氧浓度则有所下降。从18:00时开始乐亭地区海风转换为陆风(图6(a)),在8月3日00:00时(图7(c)),由于夜间陆风盛行使得乐亭地区的臭氧随陆风逐渐向海洋输送,乐亭地区臭氧浓度下降,而渤海湾臭氧浓度有所上升。8月3日8:00(图7(d)),陆风转为海风,海面上臭氧开始再次向乐亭地区输送。上述初步定性分析显示渤海湾地区海陆风循环影响臭氧污染在海陆间输送,从而可能导致渤海湾上空及沿海地区的臭氧污染^[25]。

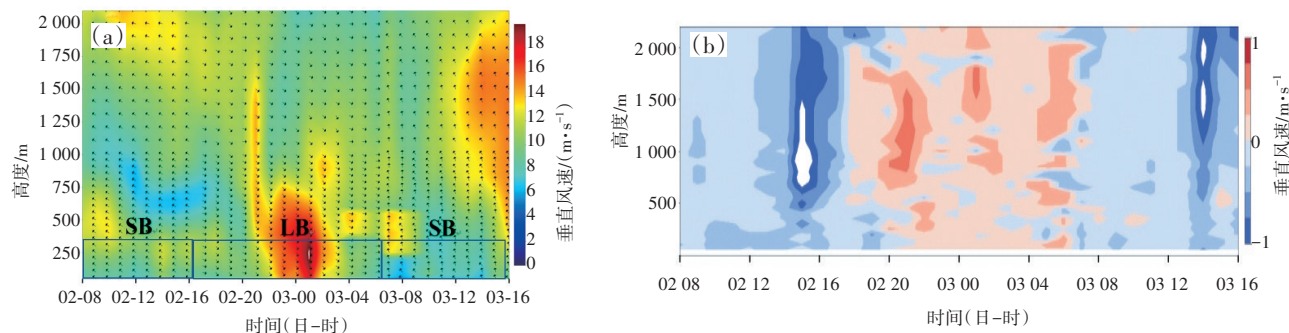


图6 (a)图为地基风廓线雷达观测8月2—3日水平风场演变;(b)图为地基风廓线雷达观测垂直风速(正值表示下沉气流,负值表示上升气流)

3 结论与讨论

为了认识渤海湾地区海陆风环流及臭氧污染特征,本文作者于2023年夏季在河北省唐山市乐亭

县开展了地基观测实验。实验期间在2023年8月2日至3日观测到海陆风过程,其中陆风于8月2日下午18时开始形成,随后于翌日上午08时转为海风,该个例时段内夜间陆风风速整体高于日间海风风

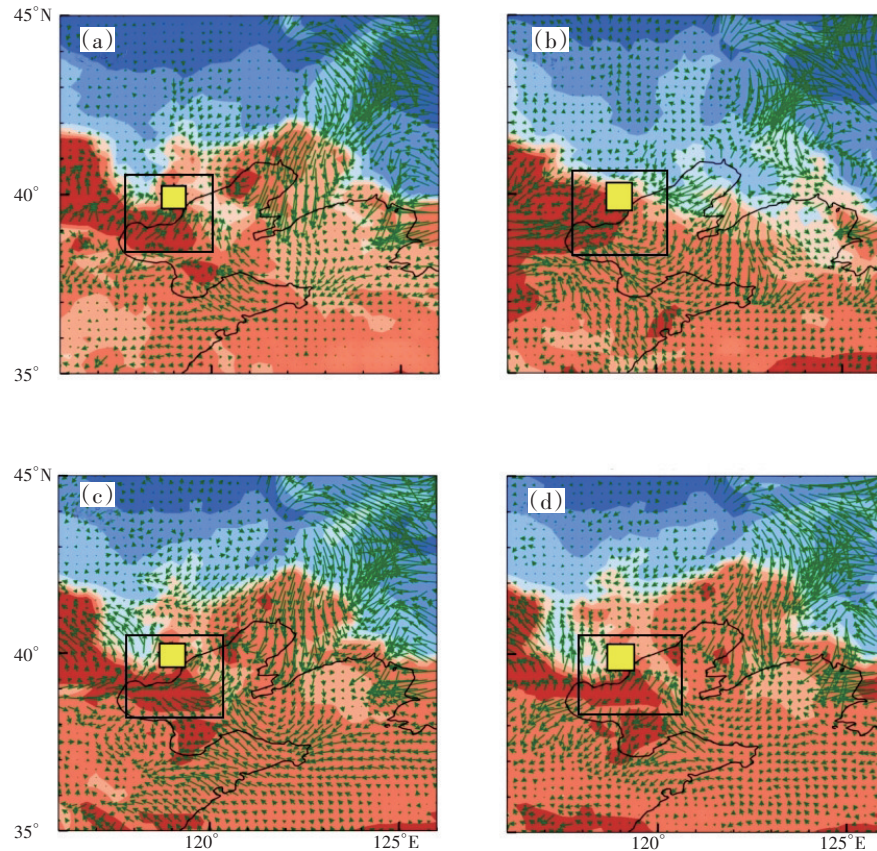


图7 2023年8月2—3日1000 hPa高度层AIRS臭氧浓度空间分布(色标,单位: $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)和ERA5水平风矢量(绿色箭头)(黑色线条为海岸线;黄色方块为地面站位置,黑色方框标注实验站点周边区域臭氧分布受海陆风影响)
(a)8月2日08时;(b)8月2日16时;(c)8月3日00时;(d)8月3日08时

速。初步研究结果显示,日间和夜间的海陆风风向转变使得臭氧污染在渤海湾地区表现出显著的时空变化特征。使用HYSPLIT后向轨迹模型解析出影响乐亭地区臭氧浓度的5条主要气流轨迹,其中来自偏南方向的2条气团轨迹对实验地区臭氧污染的贡献率高达65%,来自东北方向2条气团轨迹造成臭氧污染占比为30%,来自西北方向的1条气团轨迹的臭氧污染贡献率为5%。本文初步定性分析显示海陆风循环能影响臭氧污染在海陆间输送,从而可能导致渤海湾上空及沿海地区的臭氧污染分布特征。但是,鉴于海陆风过程中臭氧浓度变化还同时受太阳辐射强度、臭氧前体物浓度、大尺度大气环流、海陆局地气象条件等多种因素影响,上述海陆风环流影响海陆间臭氧污染分布特征的初步研究结果还有待于进一步结合其他多源观测手段和模式模拟等分析验证。此外,希望后续能在渤海湾地区开展更为长期的实验观测,能以此进一步解

析不同季节和不同气象条件下海陆风环流对臭氧污染的影响。

致谢:本文观测所用地基风廓线雷达、臭氧激光雷达分别由北京爱尔达电子设备有限公司、北京艾沃思科技有限公司提供。

参考文献:

- [1] 单文坡,殷永泉,杜世勇,等. 夏季城市大气 O_3 浓度影响因素及其相关关系[J]. 环境科学, 2006: 1276-1281.
- [2] 赵江伟,聂赛赛,于玉洁,等. 河北南部城市臭氧和VOCs的污染特征及传输贡献[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4775-4784.
- [3] 刘枢,王铎,陈宗娇,等. 辽宁省环渤海地区臭氧污染趋势及时空分布特征[J]. 环境科学与技术, 2018(41): 257-262.
- [4] 窦鑫,张金强,朱彬,等. 香河地基观测臭氧柱总量数据分析及臭氧变化趋势研究[J]. 气候与环境研究, 2019,

- 24(2):143–151.
- [5] 赵泽盟. 基于非正态分布假设下的高浓度地表臭氧预报模型的应用[D]. 北京:北京化工大学, 2013.
- [6] 毛卓成, 许建明, 瞿元昊, 等. 上海海陆风分类特征、环流背景及对O₃的影响[J]. 中国环境科学, 2023, 43(3): 1002–1013.
- [7] 刘玉, 蔡秋亮, 佟磊, 等. 海陆风对宁波东南滨海郊区大气臭氧变化特征及预测的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(4): 27–39.
- [8] 王宏, 郑秋萍, 洪有为, 等. 2017年漳州海陆风特征与冬春季污染物浓度关系[J]. 气象与环境学报, 2020, 36(3): 33–40.
- [9] WU M, LUO Y, WU D, et al. Observation on the characteristics of sea-land breezes and its influence to air quality over Pearl River Delta region during dry season [J]. China Environmental Science, 2016, 36(11), 3263–3272.
- [10] 陈彬, 于恩洪. 渤海湾西部海陆风的天气气候特征[J]. 海洋通报, 1989(1): 23–29.
- [11] 郑冬, 阎守政. 东北沿海城市与其他地区臭氧污染异同分析[J]. 绿色科技, 2021, 23(10): 150–153.
- [12] ZHAO D D. Effects of the sea-land breeze on coastal ozone pollution in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2022.
- [13] 何礼, 束炯, 钟方潜, 等. 上海海陆风特征及其对臭氧浓度的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(3): 17–21.
- [14] SULLIVAN J T, RABENHORST S D, DREESSEN J, et al. Lidar observations revealing transport of O₃ in the presence of a nocturnal low-level jet: Regional implications for “next-day” pollution [J]. Atmospheric Environment, 2017.
- [15] 刘海燕, 乔生仲. 激光雷达技术在大气环境监测中的应用[J]. 青海环境, 2018(28): 200–202.
- [16] 钟声, 孙鹏, 吴祺, 等. 臭氧激光雷达技术及应用研究进展[J]. 环境监控与预警, 2023, 15(5): 17–23.
- [17] 郭宇. 风廓线雷达探测大气边界层特性研究[D]. 江苏: 南京信息工程大学, 2020.
- [18] 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清. ERA5再分析数据适用性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 91–99.
- [19] 刘吉敏, 黄泓, 王学忠. 葫芦岛沿岸海陆风特征及其环境效应[J]. 气象与环境科学, 2019(42): 79–85.
- [20] BORNE K, CHEN D, NUNEZ M. A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast [J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 1998, 18(8): 901–914.
- [21] PRTENJAK M T. Main characteristics of sea/land breezes along the eastern coast of the Northern Adriatic [J]. Geofizika, 2003.
- [22] STOHL A, JANES P. A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part I: Method description, validation, and demonstration for the August 2002 flooding in central Europe [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(4): 656–678.
- [23] 钱昱先, 王刚, 孟庆晓, 等. 2019—2022年华北平原典型地区不同污染等级和污染持续时间下的O₃污染规律及来源[J/OL]. 中国环境科学, 1–11[2024-7-12].
- [24] ARMITT R W. Effects of the Large-Scale Flow on Characteristic Features of the Sea Breeze [J]. Journal of Applied Meteorology, 1993, 32(1): 116–125.
- [25] WANG Y L, XUE W B, LEI Y, et al. Model-derived source apportionment and regional transport matrix study of ozone in Jingjinji [J]. China Environment Science, 2017 (37): 3684–3691.

Characteristics analysis of sea–land breeze circulation and ozone in Bohai Bay

YANG Yuhui^{1,2}, ZHANG Jinqiang^{2,3,1*}, CHEN Hongbin^{2,3}, CHEN Hongyan²,
HE Wenying², PAN Jidong², NAN Weidong²

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the data from the observation experiment carried out in Laoting County in the summer of 2023, and the related meteorological and environmental data, the sea–land breeze circulation over Bohai Bay area and its influence on ozone pollution were analyzed. The results showed that the sea–land breeze circulation could affect the transport of ozone between sea and land, which might lead to ozone pollution over Bohai Bay and coastal areas. HYSPLIT backward trajectory simulation indicated a total of five major air mass trajectories affecting the experimental observation area, among which two southerly air masses were transported into the experimental area through a short–distance transportation, contributing up to 65% of ozone pollution in the area.

Key words: Bohai Bay; sea–land breeze circulation; ozone pollution; ground–based observations; trajectory simulation