王俊彬,李婷苑,陈靖扬,等.临近热带气旋引发粤港澳大湾区臭氧污染的气象成因分析及预报模型构建 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1202-1215.
Wang J B, Li T Y, Chen J Y, et al. Synoptic mechanisms analysis and prediction model development for ozone pollution triggered by approaching tropical cyclones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1202-1215.

临近热带气旋引发粤港澳大湾区臭氧污染的气象成因分析及预报模型构建

王俊彬[1,2],李婷苑[1,2*],陈靖扬[1,2],龚 宇[1,2],沈 劲[3] (1.广东省生态气象中心(珠三角环境气象预报预警中心),广东 广州 510640；2.广东省南岭森林大气环境与碳中和野外科学观测研究站,广东 广州 511443；3.广东省生态环境监测中心,生态环境部区域空气质量监测重点实验室,广东省环境保护大气二次污染研究重点实验室,广东 广州 510308)

摘要：基于 2014~2024 年热带气旋资料、再分析资料和臭氧监测数据,分析了临近热带气旋引发粤港澳大湾区臭氧污染的气象成因,并借助 Spearman 秩相关系数和随机森林回归方法构建了预报模型.结果表明:引发粤港澳大湾区臭氧污染的临近热带气旋主要分布在距离 270~1758km 的范围内,并且在台湾岛和吕宋岛一线的东西两侧呈现明显的强度差异,东侧的气旋强度均在台风级以上,而西侧的气旋强度在热带低压到强台风级之间.临近气旋通过外围高层的下沉气流,导致粤港澳大湾区云量减少,向下短波辐射增强,地面气温偏高,而相对湿度、降水和风速偏低,进而引发臭氧污染. SOM 聚类分析发现,临近热带气旋在粤港澳大湾区会引发西南角污染型、大范围污染型、西部污染型和东北部污染型四种臭氧浓度分布,各种浓度分布与不同地面风场的传输和辐合作用有关.粤港澳大湾区 11 个地市的臭氧浓度与热带气旋的特征(七级风圈半径和临近率)有较好的相关性,此外还与地面气象要素(海陆风向差和海陆经向风速差等)和高空气象要素(200hPa 垂直速度、700hPa 经向风、700hPa 比湿和 925hPa 纬向风等)显著相关.基于热带气旋特征及地面和高空气象要素共 18 个因子构建的预报模型具有较高的泛化性和准确性,模型预报值与实际监测值的平均相关系数达到 0.811,平均均方根误差为 30.2μg/m^3,平均臭氧等级 TS 评分为 0.668.

关键词：热带气旋；粤港澳大湾区；臭氧污染；气象成因；随机森林
中图分类号：X515 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1202-14

Synoptic mechanisms analysis and prediction model development for ozone pollution triggered by approaching tropical cyclones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. WANG Jun-bin[1,2], LI Ting-yuan[1,2*], CHEN Jing-yang[1,2], GONG Yu[1,2], SHEN Jin[3] (1.Guangdong Ecological Meteorological Center, Pearl River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Guangzhou 510640, China；2.Guangdong Provincial Observation and Research Station for Atmospheric Environment and Carbon Neutrality in Nanling Forests, Guangzhou 511443, China；3.Guangdong Environmental Protection Key Laboratory of Secondary Air Pollution Research, Key Laboratory of Regional Air Quality Monitoring of Ministry of Ecology and Environment, Guangdong Ecological Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1202~1215

Abstract：Based on tropical cyclone (TC) data, reanalysis data, and ozone monitoring data from 2014 to 2024, the synoptic mechanism by which approaching tropical cyclones (ATCs) trigger ozone pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area (GBA) was analyzed. A prediction model was developed using Spearman's rank correlation coefficient and the random forest regression method. The results indicated that: ATCs inducing ozone pollution in the GBA were primarily distributed within a range of 270~1758km, and a clear disparity in intensity was observed on the eastern and western sides of the line connecting Taiwan Island and Luzon Island. The ATCs east of the line all reach typhoon intensity or above, while those west range from tropical depression to severe typhoon intensity. Ozone pollution was induced by ATCs through the generation of subsiding airflows in upper levels, which reduces cloud cover over the GBA, increases downward shortwave radiation, elevates surface temperatures, and reduces relative humidity, precipitation and wind speed. Through SOM clustering analysis, four ozone pollution distribution patterns triggered by ATCs in the GBA were identified: the southwestern pollution pattern, the widespread pollution pattern, the western pollution pattern, and the northeastern pollution pattern. These patterns are associated with the transport and convergence effects of different surface wind fields. Ozone concentrations in the 11cities of the GBA were found to correlate well with tropical cyclone

收稿日期：2025-08-22
基金项目：广东省基础与应用基础研究基金项目(2023A1515110536);广东省科技计划项目(2024B1212040006);中国气象局青年创新团队项目(CMA2023QN13);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2023Q37,GRMC2025M09)
* 责任作者, 高级工程师, l-tiny@163.com

characteristics (radius of 7-level wind circle and proximity rate), as well as significant correlations with surface meteorological factors (such as land-sea wind direction difference and land-sea meridional wind speed difference) and upper-air meteorological factors (such as 200 hPa vertical velocity, 700 hPa meridional wind, 700 hPa specific humidity, and 925 hPa zonal wind). The forecasting model constructed based on 18factors, including tropical cyclone characteristics and surface and upper-air meteorological elements, demonstrates high generalizability and accuracy. The average correlation coefficient between the model's forecast values and the actual monitoring values reached 0.811, the average root mean square error was 30.2μg/m^3, and the average TS score for ozone level prediction was 0.668.

Key words: tropical cyclone; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; ozone pollution; synoptic mechanisms; random forest model

近地面的臭氧是一种二次污染物,主要由氮氧化物(NO_x)与挥发性有机物(VOCs)等前体物在太阳辐射下经过一系列光化学反应后生成[1-3].大量的研究指出,近地面臭氧污染的产生不仅与人为活动的排放相关,同时还受气象因素和区域传输的综合影响[4-9].特别是当热带气旋临近陆地时,其外围的下沉气流会带来晴热干燥天气,促进臭氧生成的光化学反应,同时会形成高压均压场,不利于近地面污染物的扩散,最终引发严重的臭氧污染[10-13].部分研究基于多年的热带气旋资料发现,热带气旋的不同移动路径与臭氧污染的发生密切相关[14-16],当热带气旋以东海转向型或近海影响型路径移动时,会导致珠三角区域臭氧浓度的上涨[17].这种关于热带气旋移动路径的分析,本质上是在探究当热带气旋移动到什么位置时最能造成臭氧污染,也有一些研究更加定量化地界定了这种特殊位置.比如 Lam 等[18]发现,当热带气旋的中心位于台湾岛附近时最易导致香港地区臭氧污染事件的发生.花丛等[19]指出,在“三连击”台风影响期间,当台风移动至 34°N 以北时,长三角地区最容易爆发区域性臭氧污染.Hu 等人提出,当热带气旋位于距离珠三角 700~4500km 的范围内时最容易引发珠三角的臭氧污染,在该区间内热带气旋导致臭氧连续超标天数的占比高达 80.7%[20].由此可见,热带气旋的移动路径和相对位置等对臭氧污染有显著影响,前人研究已利用统计方法揭示了其中的经验性规律.但这种归纳总结对未来热带气旋能否引发臭氧污染只能做出大概的判断,对于臭氧污染预报业务和污染防控指导不足.为此,一些研究借助数值模拟[21]和机器学习[22-23]等方法来构建热带气旋影响期间的空气质量预报模型,其中随机森林方法在粤港澳大湾区的污染预测方面具有较好的效果[24].

粤港澳大湾区是由珠三角 9 个地市和香港、澳门两个特别行政区组成的城市群,是我国最具经济活力的地区之一.但在经济快速发展的过程中,由于工业生产和燃料燃烧等人为活动排放的氮氧化物和挥发性有机物等臭氧前体物一直维持在较高水平[25-27].另一方面,粤港澳大湾区地处亚热带季风气候区,毗邻南海,靠近西北太平洋暖池,频繁受到西北太平洋和南海地区生成的热带气旋影响[28-29].因此,粤港澳大湾区是我国六大城市群中最易受临近热带气旋引发臭氧污染的区域.为了提升粤港澳大湾区的臭氧污染治理能力,本文基于大量热带气旋样本,探究了临近热带气旋引发粤港澳大湾区臭氧污染的气象成因.并且借助热带气旋七级风圈半径和大范围环流场的风向风速等变量构建表征热带气旋外围下沉气流和水平传输环流等特征的预报因子,将前人对热带气旋相关特征的经验性归纳转化为具体的指数因子,结合传统的局地气象条件因子,通过随机森林方法构建了围绕粤港澳大湾区 11 个地市的臭氧污染预报模型.

1　材料与方法

1.1　数据来源

本研究采用的数据为 2014~2024 年热带气旋监测资料、粤港澳大湾区臭氧浓度监测资料和再分析资料.其中热带气旋监测资料采用美国国家海洋和大气管理局的国家气候数据中心与世界气象数据中心收集整理的第四代最佳气旋路径数据集 IBTrACS(https://www.ncei.noaa.gov/),时间分辨率为 6h,使用的变量包括热带气旋中心经纬度、中心最低气压、中心最大风速和七级风圈半径.粤港澳大湾区臭氧浓度监测资料来源于中国环境监测总站(https://air.cnemc.cn:18007/)、澳门环境保护署(https://www.dspa.gov.mo/)和香港环境保护署(https://cd.epic.epd.gov.hk/).再分析资料选用欧洲中期数值预

报中心第五代大气再分析数据集 ERA5(https://cds.climate.copernicus.eu/),水平网格分辨率为 0.25°×0.25°,垂直方向有 37 层(1~1000hPa),使用的变量包括:位势高度、水平风速、垂直风速、温度、相对湿度、比湿、涡度、散度、11:00~17:00 时累积降水量、总云量和向下短波辐射.

1.2 研究方法

1.2.1 自组织神经网络算法 为了探究临近热带气旋对粤港澳大湾区臭氧污染落区分布的影响机制,分析其引发臭氧污染的气象成因,本文采用自组织特征映射网络 SOM 对区域臭氧浓度进行聚类分析,识别出最常见的几类污染型及其对应的气象场特征.SOM 方法是赫尔辛基理工大学的 Kohonen 受人脑细胞的自组织性启发所提出的无监督学习方法[30],能通过竞争学习和近邻关系函数自动聚集相似的输入数据到输出空间的近邻区域,实现自组织神经特征映射网络的模式分类功能.该算法不需要预先标记的训练数据,能够直接从数据中自动发现潜在的模式、结构和关系,被大量应用于天气和气候的分型研究[31-33],并且已被证明在珠三角地区的相关气象研究中具有较好的适用性[34].本文中使用的 SOM 网络只包含两层(输入层和输出层),邻域函数采用高斯函数,学习率设为 0.1,迭代至收敛后量化误差为 0.35.

1.2.2 Spearman 秩相关系数 为了从大量气象要素和热带气旋指数中提取出与臭氧浓度变化显著相关的因子,获取构建预报模型所需的关键预报因子,本文借助 Spearman 秩相关系数来进行筛选.Spearman 秩相关系数是对传统 Pearson 相关系数进行优化后形成的一种无参数的等级相关系数,可以减少极端异常值带来的影响,因此与传统相关性分析方法相比具有更好的抗干扰性,已被普遍应用于分析气象要素和大气污染物之间的相关性[35-37].

1.2.3 随机森林回归 为了构建基于多种预报因子的臭氧浓度变化预报模型,本文采用了随机森林回归方法(RFR).该方法利用 bootsrap 重抽样方法从原始样本中抽取多个样本,对每个样本进行决策树建模,分别训练后组成随机森林,最后由森林中所有决策树取均值进行回归预测.通过构建多个决策树再求平均的方式,随机森林回归能有效地处理过拟合问题,因此具有较好的模型泛化性.与传统的多元线性回归相比,该方法基于对特征空间的递归划分提升了对复杂非线性关系的建模能力,因此被大量应用于具有强非线性特征的天气预测和空气污染预测等领域[38-41].

1.2.4 模型检验评估方法 通过设置不同 random_state 的方式以 7:3 的比例随机划分训练集和测试集 3 次,计算测试集中 3 次不同划分结果的平均值以得到模型的平均预报性能.并且参考《环境空气质量数值预报技术规范》[42]和空气质量预报性能检验方法[43-44],采用模型预报值与实际监测值的相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和臭氧等级 TS 评分来对随机森林回归模型的预报性能进行检验评估.其中臭氧等级 TS 评分由模型预报臭氧浓度等级与实际臭氧浓度等级完全一致的次数与模型预报总次数的比值来表示,能够用来反映模型对各个臭氧浓度等级(优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染)预报的准确性.

2 结果与讨论

2.1 临近热带气旋的筛选与划分

为筛选出能直接影响粤港澳大湾区臭氧浓度的热带气旋,本研究参考中国气象局现行业务规范[45],以我国台风 48h 警戒线作为判别依据,将 2014~2024 年间所有中心点经度在警戒线范围内且纬度在 15~30°N 区间内的热带气旋均视为粤港澳大湾区的临近热带气旋.在临近热带气旋中,进一步划分出与粤港澳大湾区任一地市或特别行政区出现臭氧日最大 8h 滑动平均浓度(O_3_8h)达轻度污染标准及以上同时发生的热带气旋,将这些气旋定义为引发粤港澳大湾区臭氧污染的临近热带气旋(以下简称致污气旋).从图 1(a)可以看到,致污气旋主要分布在粤港澳大湾区的东面,大部分位于南海北部和西北太平洋西部,也有一小部分是登陆气旋,位于福建省和台湾省等陆地范围内.从气旋的强度来看,致污气旋在台湾岛和吕宋岛一线的东西两侧有明显的强度差异:台湾岛和吕宋岛一线西侧的致污气旋强度总体偏弱,大部分都在热带低压级(TD)到强热带风暴级(STS)之间,较少有能达到台风级(TY)或以上强度的;而台湾岛和吕宋岛一线东侧的致污气旋强度则明显偏强,全部都在台风到超强台风级(SuperTY)之间,没有热带低压至强热带风暴级.

从图 1(b)可以更直观地看到致污气旋的强度与其中心点到粤港澳大湾区几何中心点距离的关系.具体来看,致污气旋主要分布在距离粤港澳大湾区 270~1758km 的范围内.距离最近的致污气旋为热带风暴级,中心最低气压 990hPa,而距离最远的致污气旋为超强台风级,中心最低气压为 925hPa.另一方面,致污气旋的这种强度随距离的变化关系并不是线性的,而是存在明显的突变区,其突变的界线大致在距离粤港澳大湾区 800~900km 的范围内.远于该界线时,致污气旋的中心最低气压基本都在 970hPa 以下,说明远距离条件下只有强度较强的气旋才能引发臭氧污染.而近于该界线时各种强度等级的热带气旋都有可能导致污染,但主要是热带风暴到强热带风暴级.

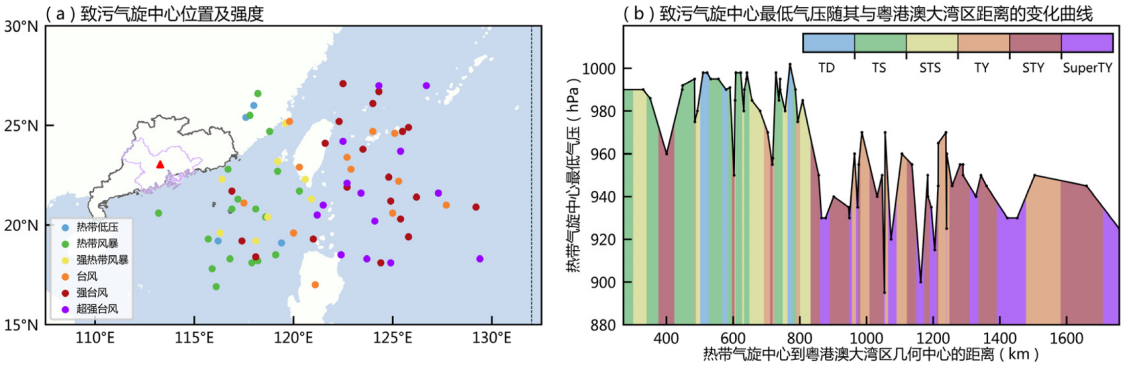


图 1　引发粤港澳大湾区臭氧污染的临近热带气旋的分布及强度

Fig.1　Distribution and intensity of approaching tropical cyclones triggering ozone pollution in the GBA

图(a)中黑色轮廓表示广东省,紫色轮廓表示粤港澳大湾区,红色三角形表示粤港澳大湾区的几何中心点(113.286°E,23.044°N),黑色虚线为我国台风 48h 警戒线(132°E);审图号:GS(2020)4814

在图 1(a)的基础上,引入各致污气旋的七级风圈,并对各风圈范围的重叠区域取用热带气旋等级最低的个例,全部叠加后可以绘制出图 2(a)所示的致污气旋关键区.将 2014~2024 年所有中心点位于该关键区内,且强度大于等于对应填色强度的其它临近气旋筛选出来,即可划分出未引发粤港澳大湾区臭氧污染的临近热带气旋(以下简称非致污气旋),其强度和分布如图 2(b)所示.对比图 1(a)和图 2(b)可以发现,近 11 年内致污气旋(76 个)和非致污气旋(73 个)的数量相近,且中心强度和位置也比较类似.由此可见,虽然热带气旋的位置和强度与臭氧污染的产生有一定的联系,但却并不是决定性的因素,在致污气旋关键区中只有 50.67%的临近热带气旋引发了粤港澳大湾区的臭氧污染.因此在构建预报模型之前,除了要考虑热带气旋本身的特征外,还应结合粤港澳大湾区局地的气象要素,对预报模型的自变量进行选取.

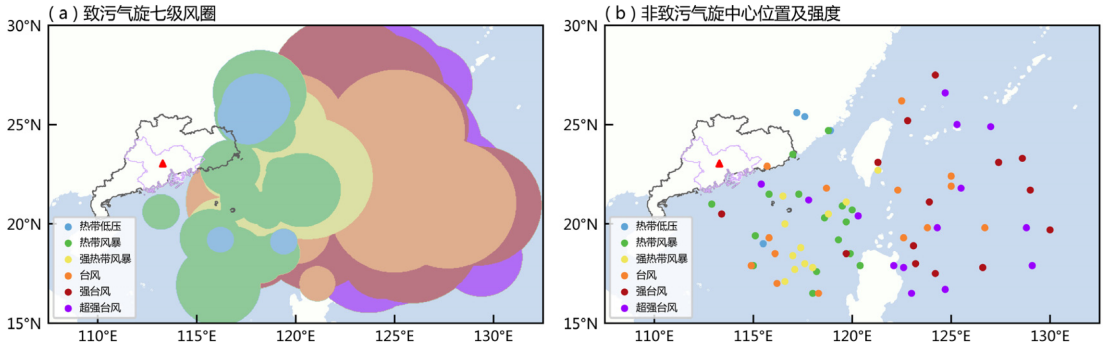


图 2　(a)致污气旋七级风圈范围及(b)非致污气旋的分布和强度

Fig.2　(a) The seven-level wind circle range of tropical cyclones inducing ozone pollution and (b) the distribution and intensity of tropical cyclones unrelated to ozone pollution

审图号:GS(2020)4814

2.2　临近热带气旋引发臭氧污染的气象成因分析

2.2.1　致污与非致污气旋气象条件对比分析　从图 3

可以看到,致污气旋在 200hPa 广东省东南方向的海域激发出强上升气流,而在广东省陆地区域则对应形成了大片的强下沉气流,其中粤港澳大湾区和粤西东部的下沉气流最为强烈(图 3(a)).从 500hPa 来看,致污气旋在海洋区域的上升气流更强,但在陆地区域的下沉气流明显变弱,其中粤西东部呈现弱上升气流,而粤港澳大湾区保持较弱的下沉气流(图 3(c)).从这种高层和中层的配置可以看出,致污气旋是基于“自上而下”的方式影响粤港澳大湾区,通过驱动高层逐渐向下传递的外围下沉气流来引发臭氧污染.另一方面,非致污气旋对应的平均 500hPa 垂直速度明显比致污气旋大,并且从海域向陆地区域扩展,覆盖了几乎整个广东省区域,形成了大范围的上升气流(图 3(d)).而在 200hPa,非致污气旋的平均上升气流较中层明显减弱,但在广东省区域依旧呈现为上升区(图 3(b)).由此可见在非致污气旋的情况下,气旋的外围下沉气流未影响到陆地区域,在粤港澳大湾区产生了“自下而上”的垂直上升气流,因此不利于臭氧污染的产生.

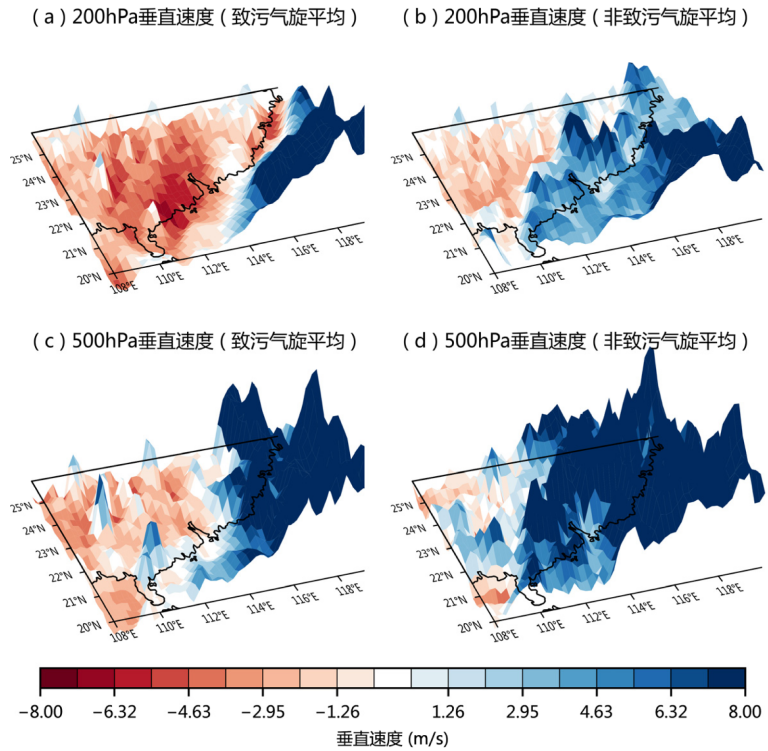


图 3 致污气旋(左列)与非致污气旋(右列)平均垂直速度场

Fig.3 The average of vertical velocity over pollution-inducing cyclones (left panel) and non-pollution-inducing cyclones (right panel)

为方便绘图,垂直速度的单位转化为 m/s,并且放大 1000 倍

从图 4(a)和(c)可以看到,在致污气旋激发的下沉气流的作用下,广东省大部地区的总云量均较少,其中粤港澳大湾区总云量基本都在 0.4~0.55 之间.云量的减少使得大量的太阳短波辐射得以向下传输至近地面,其中接收太阳辐射最强的区域在粤西东部和粤港澳大湾区(平均值达 2600kJ/m^2 以上),与图 3(a)中的下沉气流的最大值区相一致.更强烈的太阳辐射有利于促进臭氧生成的光化学反应,因此致污气旋能够直接通过下沉气流影响臭氧污染的形成.而从图 4(b)和(d)中可以看到,非致污气旋对应的上升气流使得广东省大部地区的总云量偏多,其中粤港澳大湾区总云量高达 0.7 以上,因此对应的太阳短波向下辐射量也明显比致污气旋弱,粤港澳大湾区接收到的太阳辐射量在 2100kJ/m^2 以下,臭氧生成条件明显偏差,因而没有引发臭氧污染.

进一步地,致污气旋通过外围下沉增温和辐射增强等效应,直接影响粤港澳大湾区地面气象要素.从地面气象要素平均值的对比来看(图 5),致污气旋对应的平均气温为 32.95℃,较非致污气旋(28.50℃)偏高 13.51%;平均相对湿度为 58.04%,比非致污气

旋(66.18%)偏少 12.30%;平均风速为 2.57m/s,比非致污气旋(3.83m/s)偏小 32.90%;平均降水量为 0.63mm,比非致污气旋(2.83mm)偏少 77.74%.可见,在致污气旋下沉气流的影响下,粤港澳大湾区气温偏高和相对湿度偏低,有利于臭氧的生成.而风速偏小和降水偏少说明污染物的扩散条件和湿清除条件均较差,有利于生成的臭氧在粤港澳大湾区内持续积累,综合作用下导致了臭氧污染的发生.

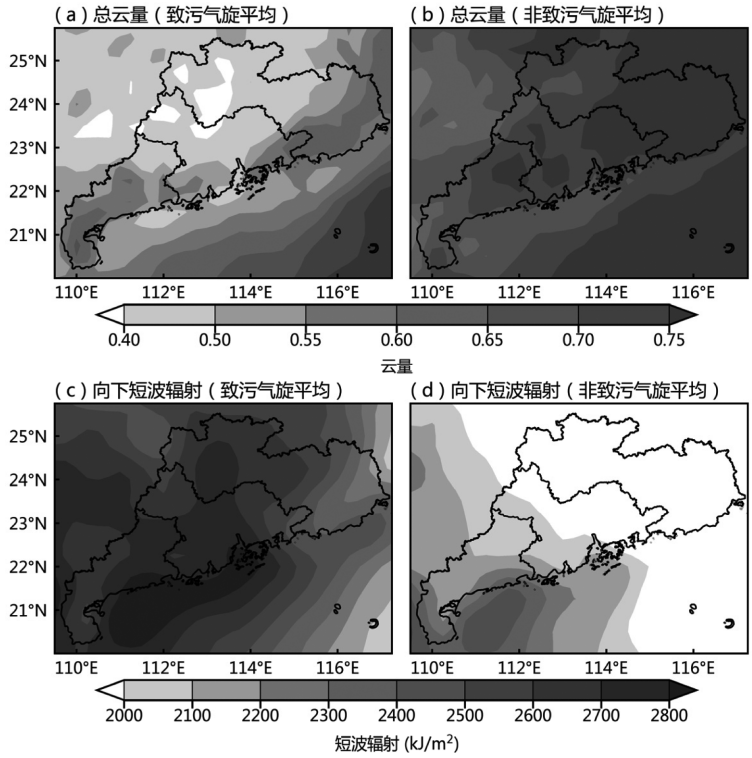


图 4　致污气旋(左列)与非致污气旋(右列)平均总云量和向下短波辐射

Fig.4　The average of total cloud cover and downward shortwave radiation over pollution-inducing cyclones (left panel) and non-pollution-inducing cyclones (right panel)

此外,从图 5 中还可以注意到,致污气旋和非致污气旋所对应的粤港澳大湾区平均气象要素中均有一些与平均值差异较大的特殊个例,甚至有一些个例呈现出相反的特征.比如图中三角形标示的非致污气旋个例(图 5(b)),其对应的粤港澳大湾区平均相对湿度是所有致污和非致污气旋中最低的,仅为 30.04%,降水量也几乎为 0mm,呈现出典型的致污气旋特征.但与此同时,该个例对应的气温仅为 26.98℃,低于致污和非致污气旋的平均值,且风速高达 5.70m/s,显著高于非致污气旋的平均值.无降水、低湿度等有利于臭氧污染的条件配合低气温、高风速等不利于臭氧污染的条件,综合作用下该气旋个例未引发臭氧污染.因此,对于临近热带气旋引发臭氧污染的判别不能基于少量的几个气象要素,需要结合多种不同气象因子来综合考虑.

2.2.2　致污气旋对臭氧浓度分布的影响　上述致污气旋和非致污气旋的对比分析讨论了气旋对臭氧生成和积累的气象成因,接下来本研究采用 SOM 聚类分析,探讨致污气旋对粤港澳大湾区臭氧浓度分布的影响.从图 6 可以看到,致污气旋引发的粤港澳大湾区臭氧浓度分布形态可以分为四大类,每一类按出现频次高低排序(各类出现次数的占比分别为 32.43%、28.38%、20.27%和 18.92%).在出现次数最多的第一类情况下(图 6(a)),粤港澳大湾区西南角(江门、中山和珠海市)臭氧平均浓度超过轻度污染阈值,而其他城市的臭氧浓度在良到轻度污染之间,因此将该类浓度分布定义为“西南角污染型”.在第二类平均臭氧浓度分布中(图 6(b)),除了肇庆、澳门和惠州臭氧平均浓度接近轻度污染阈值外,其余城市臭氧平均浓度均超过 160μg/m^3,特别是中山市的臭氧平均浓度(227μg/m^3)还超过了中度污染阈值,这种大多数地市都出现污染的情况可定义为“大范围

污染型”.在第三类分布中(图 6(c)),只有粤港澳大湾区西部的江门、中山、佛山和肇庆臭氧平均浓度达到或接近轻度污染阈值,中部的城市臭氧平均浓度低于 140μg/m^3,而偏东侧的惠州、香港和澳门臭氧平均浓度则低于 100μg/m^3,因此定义为“西部污染型”.最后一类分布中(图 6(d)),粤港澳大湾区东北部的佛山、广州、东莞和惠州臭氧平均浓度均超过轻度污染阈值,其中东莞市接近中度污染阈值,而南部的香港和澳门臭氧平均浓度低于 100μg/m^3,故可以定义为“东北部污染型”.

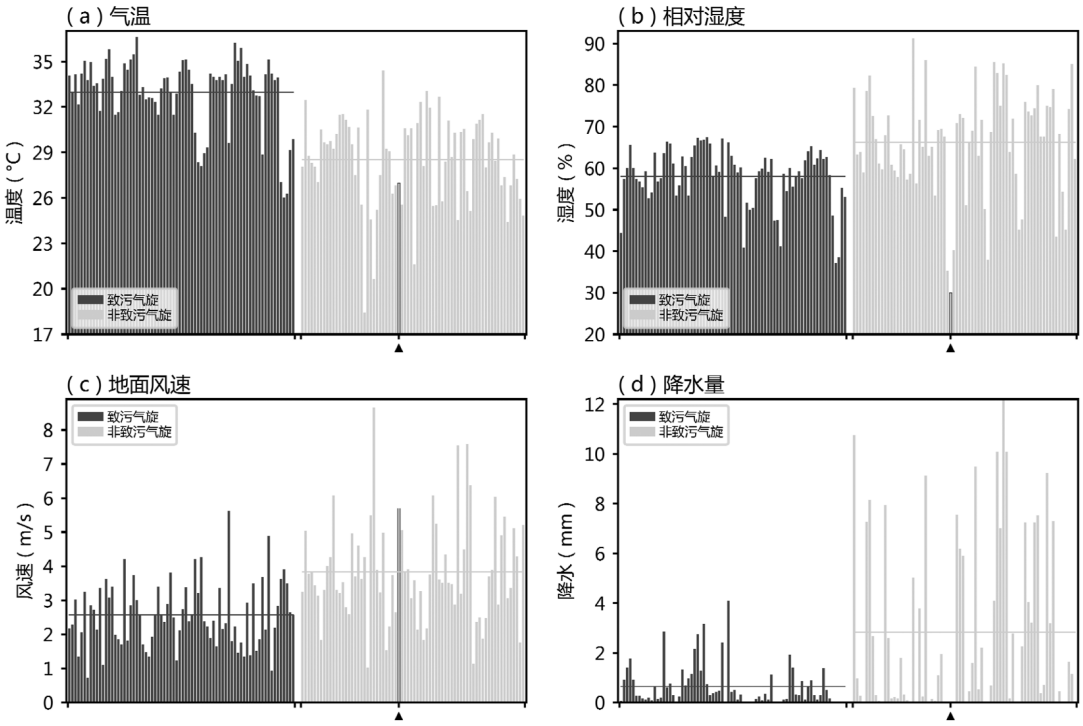


图 5 致污气旋(深灰色)与非致污气旋(浅灰色)的粤港澳大湾区平均地面气象要素对比

Fig.5 Comparison of averaged surface meteorological variables between pollution-inducing cyclones (dark grey) and non-pollution-inducing cyclones (light grey) in the GBA

图中横线表示平均值

针对上述四种臭氧浓度分布型,绘制其对应的地面风场,如图 7 所示.从图 7 中可以看到,每种类型下粤港澳大湾区的地面风场都相差较大,这主要是由致污气旋在陆地区域形成不同气压梯度所强迫出来的环流场,会直接影响区域内污染物的传输和堆积.具体来看,图 7(a)中整个广东省和南海北部均为偏北风,在偏北风的作用下,污染物向粤港澳大湾区南部传输,因此出现了臭氧浓度自北向南逐渐递增的情况(图 6(a)).此外粤港澳大湾区中部的广州和佛山等地平均风速达 3.5m/s 以上,到了西南角则降至 3.0~3.5m/s,出现了风速辐合,有利于臭氧的堆积.而东部的深圳和香港等地没有出现风速辐合,因此臭氧污染分布最终呈现为西南角污染型.在图 7(b)中,粤港澳大湾区内为偏西北风,而南部的近海区域为偏西南风,与陆地的偏西北风形成风向辐合,不利于污染物向海区扩散,因此最终导致整个粤港澳大湾区出现大范围的臭氧污染.这种导致大范围污染的风场类型是在广东省以东近海向北移动热带气旋的典型外围环流场,已经被很多研究所讨论过[21,46].而从图(7(c))可以看到,粤港澳大湾区内为偏东北风,有利于污染物向西部地区传输,因此使得臭氧污染呈现出西部污染型分布.其次,在粤港澳大湾区的西南部有东北风和偏东风的风向辐合,因此导致图 6(c)中江门市对应的臭氧浓度最高,接近中度污染阈值.在图(7(d))中,粤港澳大湾区呈现偏西风,而南部近海为偏西南风,两股气流在粤港澳大湾区东北部辐合,因此导致臭氧污染呈现为东北部污染型.

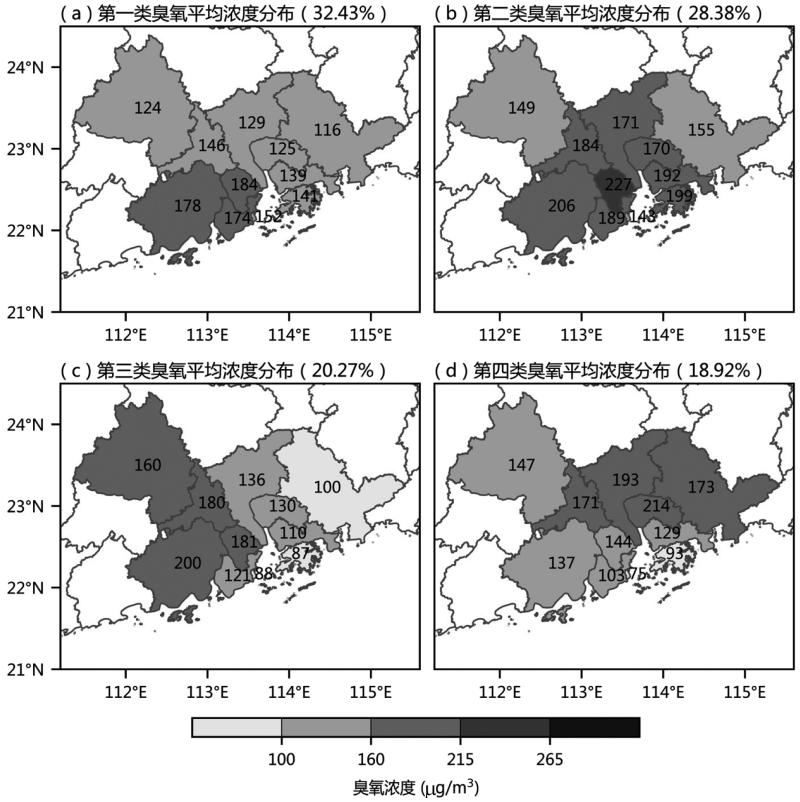


图 6　致污气旋导致粤港澳大湾区臭氧浓度分布的 SOM 聚类分析结果

Fig.6　SOM clustering results of ozone concentration distribution triggered by pollution-inducing cyclones in the GBA

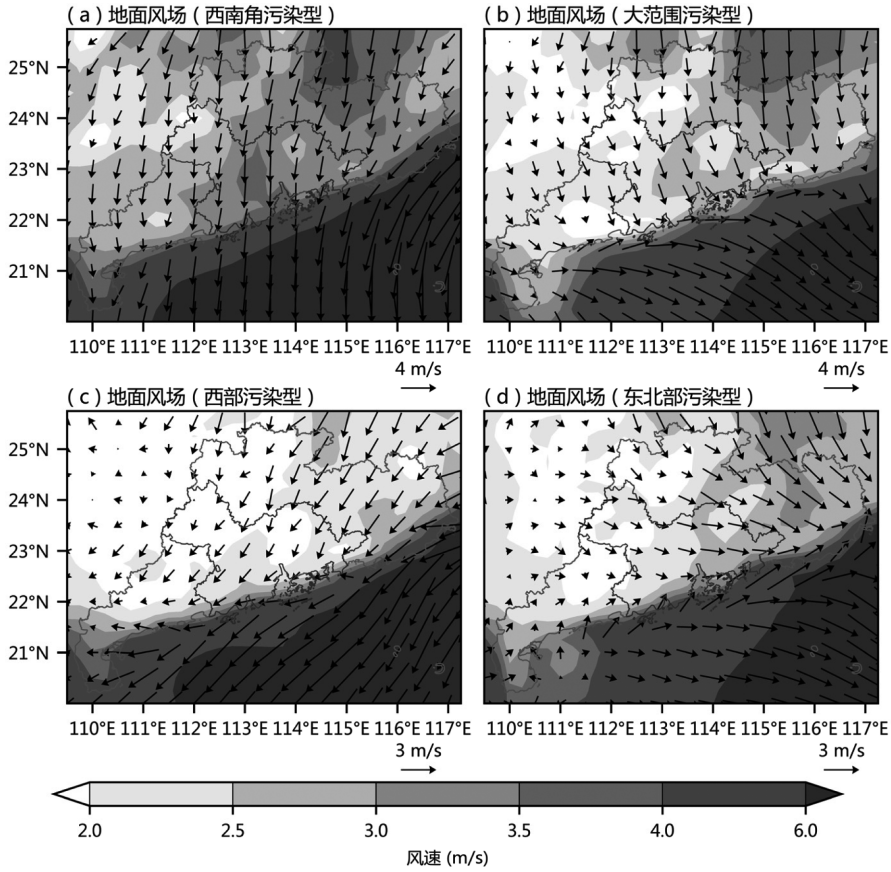


图 7　4 种污染型对应的平均地面风场

Fig.7　Averaged surface wind fields corresponding to four ozone pollution types

2.3 临近热带气旋引发臭氧污染的预报模型构建

2.3.1 预报因子选取 为了进一步分析临近热带气旋与粤港澳大湾区臭氧浓度的关系,提取出关键的预报因子,本研究将 2014~2024 年所有致污气旋和非致污气旋两套样本合并,使用合并后的样本分别计算不同气象因子与粤港澳大湾区 11 地市臭氧浓度的 Spearman 秩相关系数.从表 1 左列可以看到,表征热带气旋强度的中心最大风速和中心最低气压与 11 地市臭氧浓度的相关系数都很低,且均未通过显著性检验.尽管图 1 中对致污气旋的分析已经发现,热带气旋的强度和位置对臭氧污染的形成有一定的作用,但结合图 2 非致污气旋的结果来看,这种作用存在很大的不确定性,许多以类似强度出现在类似位置的临近气旋都未引发臭氧污染.因此,直接通过热带气旋本身的强度和位置来预报臭氧污染并不能得到好的预报结果.但另一方面,热带气旋的七级风圈半径与大部分地市的臭氧浓度均呈现出显著的正相关.热带气旋的风圈半径与其本身强度之间的关系是非线性的[47],半径的大小不能直接反映强度高低,但可以表征气旋的势力范围,侧面体现出热带气旋外围下沉气流的范围大小,因此能够与臭氧浓度相关联,可作为一个较好的预报因子.在此基础上,定义热带气旋的临近率指数=七级风圈半径/气旋中心到粤港澳大湾区的距离,该指数能更加体现气旋外围下沉区域的相对大小,反映下沉区域对粤港澳大湾区的影响程度,也可以作为一个关键的预报因子.从表 1 可以看到,热带气旋的临近率也能与 11 地市的臭氧浓度有较好的相关性,并且有 7 个地市的相关性较单独与七级风圈半径的相关性有所提升.因此,在热带气旋因子中将选取七级风圈半径和临近率两个要素作为预报因子进行后续的预报模型构建.

表 1 粤港澳大湾区 11 个城市臭氧浓度与气象因子的 Spearman 秩相关系数

Table 1 Spearman rank correlations between ozone concentrations and meteorological factors across 11cities within the GBA

城市	热带气旋因子					传输因子				
	中心最大风速	中心最低气压	中心距离	七级风圈半径	临近率	陆地风向	海洋风向	海陆风向差	海陆风速差	海陆经向风速差
广州	−0.02	0.00	0.07	0.22*	0.22*	0.23*	0.09	0.54*	0.18*	−0.26*
深圳	0.06	−0.07	0.10	0.30*	0.27*	0.26*	0.14	0.45*	0.17*	−0.27*
珠海	0.01	−0.02	−0.01	0.21*	0.23*	0.30*	0.20*	0.28*	0.16	−0.02
佛山	−0.02	0.00	0.05	0.19*	0.20*	0.25*	0.08	0.52*	0.16	−0.21*
惠州	0.04	−0.05	0.14	0.31*	0.22*	0.24*	0.09	0.52*	0.18*	−0.29*
东莞	0.03	−0.05	0.16	0.27*	0.18*	0.21*	0.07	0.50*	0.16	−0.29*
中山	0.02	−0.04	0.04	0.21*	0.25*	0.32*	0.17*	0.46*	0.14	−0.22*
江门	0.01	−0.03	0.04	0.17*	0.18*	0.31*	0.14	0.38*	0.10	−0.04
肇庆	−0.01	−0.01	0.02	0.16	0.19*	0.11	−0.07	0.43*	0.01	−0.09
香港	0.06	−0.07	0.03	0.26*	0.29*	0.27*	0.21*	0.37*	0.16	−0.18*
澳门	−0.01	0.00	−0.09	0.06	0.16	0.21*	0.15	0.16	0.11	0.00

注:*表示通过95%置信度水平的显著性检验.

此外,基于图 7 的结果,粤港澳大湾区及临近海域的大范围风场会对臭氧污染的分布产生显著的影响,陆地和海洋风场的传输作用及局地风向的辐合作用均会直接影响不同地市的臭氧浓度.为了量化这种风场特征,在导致污染最严重的大范围污染型气旋对应的平均风场基础上(图 8(a)),将近岸海域风向在 247.5°~292.5°之间的偏西风范围定义为海洋关键区域,如图 8(b)中红色网格所示.与之相对的,将北部的粤港澳大湾区定义为陆地关键区域,如图 8(b)中蓝色网格所示.基于海洋和陆地关键区域内的平均风速和风向,可以定义出 5 种传输因子,其与各地市臭氧浓度间的相关系数如表 1 右列所示.从表中可以看到,陆地区域的平均风向对除肇庆市外的其余所有地市的臭氧浓度均有显著的影响,而海洋区域的平均风向则只与沿海的城市(深圳、珠海、中山、江门、香港和澳门)有较好的相关性.值得注意的是,若采用陆地风向减去海洋风向的方式来衡量海陆的风向辐合特征,得出的指数能与臭氧浓度呈现出更高的相关性,海陆风向差指数与广州、佛山、惠州和东莞的臭氧浓度相关性均达到了 0.5 及以上.而以陆地经向风速减去海

洋经向风速来衡量的海陆风速辐合特征也与超过半数的城市呈现出显著的负相关.

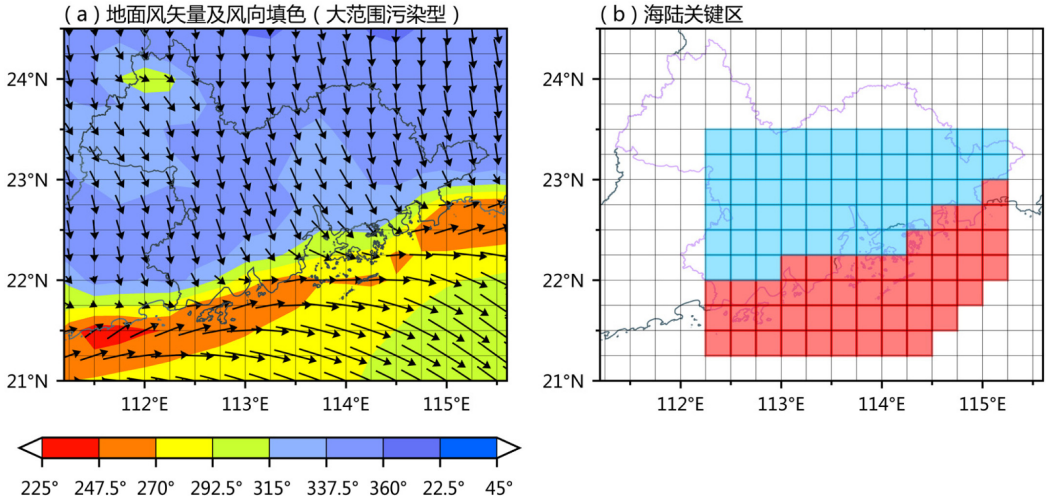


图 8　(a)大范围污染型气旋平均地面风场及(b)海陆关键区

Fig.8　(a) The average of surface wind fields corresponding to extensive pollution-inducing cyclones and (b) key land-sea regions

图(b)中蓝色网格表示陆地关键区,红色网格表示海洋关键区

除表 1 中的热带气旋因子和大范围传输因子外,本研究还引入粤港澳大湾区内各地市的局地气象因子进行预测.从图 9 中的空气质量监测站分布可以看出,大部分的监测站点都设立在人口密集的城市区,而非均匀地分布在各地市的行政区划内.为了使选取的局地气象因子能更与监测站所测得的臭氧浓度相对应,基于 ERA5 资料的网格线,对每个地市选用能覆盖大部分监测站点的 1~3 个网格来作为其关键区,每个地市以不同颜色的网格标示,得到图 9 中的 11 种填色网格.

在图 9 的基础上,分别计算各个地市关键区内不同高度的平均风、温、湿、压、降水量、位势高度、比湿、涡度和散度等气象要素与臭氧浓度的 Spearman 秩相关系数,以提取相关性较好的局地气象要素作为预报因子.已有的研究指出,近地面臭氧浓度的变化不仅与地面气象要素显著相关[48-50],而且也受高空不同气压层气象要素的影响[51-52].本研究也发现地面气象要素中的风速、温度、相对湿度和累积降水量与臭氧浓度有很高的相关性,但高空气象要素的相关性则因天气形势背景的不同而与前人的研究结果有所差异.表 2 给出了在有临近热带气旋的背景下各气压层中与臭氧浓度相关性最高的几个气象因子,可以看到 200hPa 垂直速度、500hPa 位势高度、700hPa 经向风(V 风)、700hPa 比湿、850hPa 涡度、925hPa 纬向风(U 风)和 925hPa 散度的相关性较好,其中 700hPa 和 925hPa 的相关性最好.200hPa 垂直速度与热带气旋外围的下沉气流相对应(图 3(a)),容易带来有利于臭氧生成的高温晴热天气;700hPa V 风和比湿可能通过影响云量分布,进一步调节辐射条件,影响臭氧生成的光化学反应;而 850hPa 与 925hPa 等低层因子则可能影响了近地面臭氧的垂直扩散和水平传输等过程.

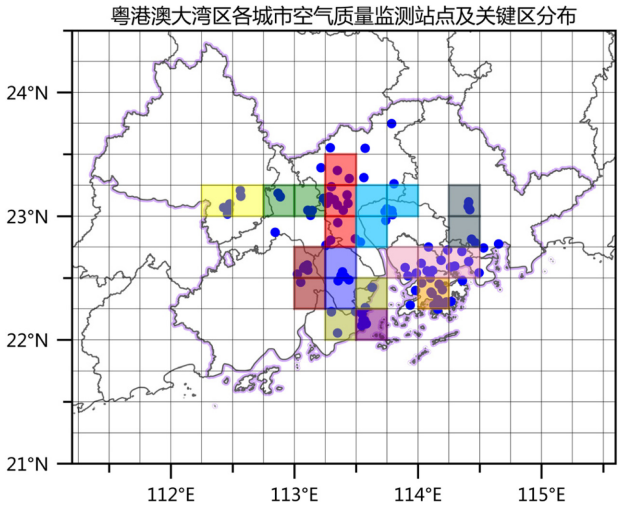


图 9　粤港澳大湾区 11 个城市的空气质量监测站点分布(散点)及对应的关键区(11 种不同颜色填色块)

Fig.9　Distribution of air quality monitoring stations (scatter) and the corresponding key area (color-filled blocks) for the 11cities in the GBA

表 2 粤港澳大湾区 11 个城市臭氧浓度与局地高空气象因子的 Spearman 秩相关系数

Table 2 Spearman rank correlations between ozone concentrations and local high-altitude meteorological factors across 11cities within the GBA

城市	200hPa 垂直速度	500hPa 位势高度	700hPa V 风	700hPa 比湿	850hPa 涡度	925hPa U 风	925hPa 散度
广州	−0.28*	0.10	−0.31*	−0.43*	−0.23*	0.52*	0.20*
深圳	−0.16*	0.10	−0.54*	−0.41*	−0.09	0.41*	0.28*
珠海	−0.22*	0.18*	−0.56*	−0.41*	−0.25*	0.15	0.12
佛山	−0.30*	0.16*	−0.29*	−0.42*	−0.29*	0.38*	0.24*
惠州	−0.24*	0.08	−0.41*	−0.36*	−0.02	0.50*	0.20*
东莞	−0.27*	0.07	−0.28*	−0.34*	−0.30*	0.50*	0.37*
中山	−0.32*	0.13	−0.47*	−0.35*	−0.37*	0.25*	0.17*
江门	−0.34*	0.21*	−0.38*	−0.36*	−0.33*	0.07	0.04
肇庆	−0.30*	0.23*	−0.16*	−0.42*	−0.11	0.23*	0.20*
香港	−0.07	0.09	−0.56*	−0.34*	0.00	0.29*	0.29*
澳门	−0.11	0.08	−0.51*	−0.22*	0.00	0.13	0.01

注:*表示通过95%置信度水平的显著性检验.

2.3.2 模型构建及预报性能评估 选用表 1 和表 2 中显著性最强的 14 个预报因子(未采用热带气旋中心最大风速、最低气压和中心距离 3 个因子)和 4 个相关性最高的地面气象因子(风速、气温、相对湿度和降水量)输入随机森林回归预测模型,对粤港澳大湾区 11 地市分别构建临近热带气旋引发臭氧污染的预报模型.并且基于 GridSearchCV 网格搜索和十折交叉验证方法分别对 11 个模型进行参数调优,最终合并构建出整个粤港澳大湾区的臭氧预报模型.

从表 3 中可以看到,11 个地市臭氧浓度预报值与实际监测值均有较高的相关性,其中 9 个地市的平均相关系数 R 均达到 0.8 以上,这说明该模型的预报值能够较好地反映出各临近气旋样本间臭氧浓度的实际变化趋势,对未来臭氧浓度的变化走向具有较好的预报效果.另一方面,11 个模型在 3 次随机划分中的 RMSE 均相差不大,其中最好的模型是惠州市的模型,RMSE 偏差值为 0.48μg/m^3,而最差的模型是澳门市的模型,但 RMSE 偏差值也仅为 12.33μg/m^3.这说明各个地市的模型均有很好的泛化性,能够在未知的新数据上保持一致的预报效果.从具体的 RMSE 值来看,广州、珠海、佛山、惠州和肇庆的平均RMSE值均在30μg/m^{3}以内,说明这几个地市的模型能够较准确地预报出臭氧浓度值,有较好的预报效果.而结果稍差一些的江门、中山和澳门的平均RMSE值也都在40μg/m^{3}以内,与实际监测值相差不太大.最后,从臭氧等级 TS 评分来看,广州、珠海、惠州、肇庆和澳门的平均分值均在 0.7 及以上,说明模型在这些地市能够很好地预报出臭氧的浓度等级.而 TS 评分较差的地市为江门和中山,这与 RMSE 的结果相一致.

表 3 粤港澳大湾区 11 个城市随机森林回归预测模型的预报性能

Table 3 Predictive performance of the random forest regression model for the 11 cities in the GBA

城市	评价指数	随机划分训练集和测试集			平均值
		random_state=1	random_state=2	random_state=3	
广州	R	0.901	0.866	0.865	0.877
	RMSE	18.73	23.28	22.80	21.60
	TS	0.633	0.700	0.767	0.700
深圳	R	0.774	0.898	0.827	0.833
	RMSE	29.39	29.52	31.65	30.19
	TS	0.600	0.667	0.733	0.667
珠海	R	0.760	0.860	0.803	0.808
	RMSE	30.19	26.61	28.67	28.49
	TS	0.733	0.700	0.700	0.711
佛山	R	0.858	0.871	0.841	0.857
	RMSE	24.82	25.31	28.36	26.16
	TS	0.667	0.633	0.567	0.622
惠州	R	0.863	0.815	0.826	0.835
	RMSE	27.27	27.39	26.91	27.19
	TS	0.800	0.700	0.700	0.733
东莞	R	0.892	0.755	0.797	0.815
	RMSE	24.34	35.41	35.26	31.67
	TS	0.833	0.600	0.600	0.678
中山	R	0.892	0.846	0.808	0.849
	RMSE	32.29	32.83	39.10	34.74
	TS	0.567	0.500	0.467	0.511
江门	R	0.882	0.824	0.830	0.845
	RMSE	33.89	34.51	31.84	33.41
	TS	0.600	0.567	0.667	0.611
肇庆	R	0.748	0.768	0.698	0.738
	RMSE	28.57	27.31	27.48	27.79
	TS	0.600	0.733	0.833	0.722
香港	R	0.901	0.802	0.804	0.836
	RMSE	31.19	31.66	30.50	31.12
	TS	0.700	0.700	0.600	0.667
澳门	R	0.684	0.611	0.577	0.624
	RMSE	33.80	39.64	46.13	39.86
	TS	0.800	0.667	0.700	0.722
粤港澳大湾区平均值	R	0.832	0.811	0.789	0.811
	RMSE	28.59	30.32	31.70	30.20
	TS	0.685	0.652	0.667	0.668

从整个粤港澳大湾区平均值来看,平均 R 达到

0.811,平均RMSE为30.2μg/m^3,平均TS评分为0.668,其预报效果优于传统多元线性回归模型(R: 0.74, RMSE: 34.98μg/m^3,TS: 0.61),也优于传统空气质量数值预报模式[53].可见该模型能够较准确地预报出粤港澳大湾区内各地市的臭氧浓度水平,提示出可能出现臭氧污染的地市.

3　结论

3.1　引发粤港澳大湾区臭氧污染的临近热带气旋主要分布在距离270~1758km之间的范围内,并且在台湾岛和吕宋岛一线的东西两侧呈现明显的强度差异,东侧的致污气旋强度均在台风级以上,而西侧的致污气旋强度在热带低压到强台风级之间.但热带气旋的强度和位置并非导致臭氧污染的充分条件,在致污气旋关键区内仅 50.67%的临近热带气旋引发了臭氧污染.

3.2　致污气旋通过外围下沉气流,特别是自200hPa向下的下沉气流,导致粤港澳大湾区云量减少,向下短波辐射增强,地面气温偏高,而相对湿度、降水和风速偏低.上述气象条件通过促进臭氧生成的光化学反应以及抑制臭氧的扩散和湿清除引发臭氧污染.

3.3　针对臭氧污染分布的 SOM 聚类分析发现,临近热带气旋易在粤港澳大湾区引发四种不同臭氧浓度分布,包括西南角污染型(32.43%)、大范围污染型(28.38%)、西部污染型(20.27%)和东北部污染型(18.92%).

3.4　Spearman 秩相关分析发现,粤港澳大湾区 11个地市的臭氧浓度与热带气旋的强度和距离相关性较弱,但与热带气旋的特征(七级风圈半径和临近率)有较好的相关性.此外还与地面气象要素(风速、温度、相对湿度、累积降水量、气温、海陆风向差和海陆经向风速差等)和高空气象要素(200hPa垂直速度、500hPa 位势高度、700hPa 经向风、700hPa比湿、850hPa涡度、925hPa纬向风和925hPa散度)显著相关.

3.5　基于18个预报因子构建的臭氧预报模型具有较好的泛化性,并且对臭氧浓度和等级的预报具有较高的准确性.11 个地市模型的预报值与实际监测值平均 R 有 9 个地市高于 0.8,平均 RMSE 有 10 个地市低于35μg/m^3,平均TS评分有10个地市高于0.6.整个粤港澳大湾区平均的 R、RMSE 和 TS 分别为0.811、30.2μg/m^3 和 0.668.

参考文献：

[1] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000,34(12−14):2063−2101.

[2] Tan Z F, Lu K D, Dong H B, et al. Explicit diagnosis of the local ozone production rate and the ozone−NOx−VOC sensitivities [J]. Science Bulletin, 2018,63(16):1067−1076.

[3] 尉晴晴,杨威强,裴成磊,等.珠三角夏秋转换季臭氧污染成因及前体物减排策略分析 [J]. 环境科学, 2024,45(10):5695−5705.
Yu Q Q, Yang W Q, Pei C L, et al. Analysis of ozone pollution and precursor control strategies in the Pearl River Delta during summer and autumn transition season [J]. Environmental Science, 2024,45(10):5695−5705.

[4] 薛　鑫,陈　镇,邬双双,等.气象条件对珠三角秋季地表臭氧年变化及趋势的影响 [J]. 环境科学, 2024,45(7).
Xue X, Chen Z, Wu S S, et al. Meteorological influences on annual variation and trend of autumn surface ozone in the Pearl River Delta [J]. Environmental Science, 2024,45(7).

[5] 栗泽苑,杨雷峰,华道柱,等.2013~2018 年中国近地面臭氧浓度空间分布特征及其与气象因子的关系 [J]. 环境科学研究, 2021,34(9):2094−2104.
Li Z Y, Yang L F, Hua D Z, et al. Spatial pattern of surface ozone and its relationship with meteorological variables in China during 2013~2018 [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(9):2094−2104.

[6] 李婷苑,汤　静,沈　劲,等.基于广义相加模型的广东省典型城市臭氧浓度气象影响因素分析 [J]. 环境科学, 2025,46(2):746−754.
Li T Y, Tang J, Shen J, et al. Impact of meteorological factors on ozone concentration in four typical cities of Guangdong based on Generalized Additive Model [J]. Environmental Science, 2025,46(2):746−754.

[7] 李婷苑,陈靖扬,龚　宇,等.2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 [J]. 环境科学, 2023,44(7):3695−3704.
Li T Y, Chen J Y, Gong Y, et al. Meteorological formation mechanisms and potential sources of an ozone pollution process in winter of 2022 in Guangdong province [J]. Environmental Science, 2023,44(7):3695−3704.

[8] 李婷苑,陈靖扬,翁佳烽,等.广东省臭氧污染天气型及其变化特征 [J]. 中国环境科学, 2022,42(5):2015−2024.
Li T Y, Chen J Y, Weng J F, et al. Ozone pollution synoptic patterns and their variation characteristics in Guangdong province [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2015−2024.

[9] Li T Y, Wu N G, Chen J Y, et al. Vertical exchange and cross−regional transport of lower−tropospheric ozone over Hong Kong [J]. Atmosoheric Research, 2023,292:106877.

[10] Wang J H, Wang P, Tian C F, et al. Consecutive northward super typhoons induced extreme ozone pollution events in Eastern China [J]. Climate and Atmospheric Science, 2024,7:244.

[11] Ouyang S S, Deng T, Liu R, et al. Impact of a subtropical high and a typhoon on a severe ozone pollution episode in the Pearl River Delta,

China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022,22(16):10751−10767.

[12] Deng T, Wang T, Wang S, et al. Impact of typhoon periphery on high ozone and high aerosol pollution in the Pearl River Delta region [J]. Science of the Total Environment, 2019,668:617−630.

[13] 沈 劲,李婷苑,廖 彤,等.广东省夏秋季臭氧污染与台风的关系分析 [J]. 环境科学学报, 2023,43(1):152−160.
Shen J, Li T Y, Liao T, et al. Analysis on the relationship between ozone pollution and typhoons in summer and autumn in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(1):152−160.

[14] 符传博,丹 利,佟金鹤,等.热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 [J]. 环境科学, 2023,44(6):3089−3097.
Fu C B, Dan L, Tong J H, et al. Effects of tropical cyclones on ozone pollution in Hainan island [J]. Environmental Science, 2023,44(6):3089−3097.

[15] Ding H, Kong L B, You Y C, et al. Effects of tropical cyclones with different tracks on ozone pollution over the Pearl River Delta region [J]. Atmosoheric Research, 2023,286:106680.

[16] 张宇烽,杨俊俊,陈婷婷,等.西北太平洋台风路径对汕头市秋季臭氧污染的影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):6538−6548.
Zhang Y F, Yang J J, Chen T T, et al. Influence of typhoon track in northwest Pacific on ozone pollution in autumn in Shantou City [J]. China Environmental Science. 2024,44(12):6538−6548.

[17] 赵 伟,吕梦瑶,卢 清,等.热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 [J]. 环境科学, 2022,43(6):2957−2965.
Zhao W, Lu M Y, Lu Q, et al. Effects of tropical cyclones on ozone pollution in the Pearl River Delta in autumn [J]. Environmental Science, 2022,43(6):2957−2965.

[18] Lam Y F, Cheung H M, Ying C C. Impact of tropical cyclone track change on regional air quality [J]. Science of the Total Environment, 2018,610−611:1347−1355.

[19] 花 丛,尤 媛,王 靖,等.2020 年“三连击”台风对我国东部地区 O_3 污染的影响分析 [J]. 环境科学, 2024,45(1):71−80.
Hua C, You Y, Wang Q, et al. Analysis of O_3 pollution affected by a succession of three landfall typhoons in 2020 in Eastern China [J]. Environmental Science, 2024,45(1):71−80.

[20] Hu W Z, Liu R, Chen Z C, et al. Processes conducive to high ozone formation in Pearl River Delta in the presence of Pacific tropical cyclones [J]. Atmospheric Environment, 2023,307(15):119859.

[21] Wei X L, Lam K S, Cao C Y, et al. Dynamics of the typhoon Haitang related high ozone episode over Hong Kong [J]. Advances in Meteorology, 2016,10:1−12.

[22] Younis M W, Saritha, Kallapu B, et al. Exploring the influence of tropical cyclones on regional air quality using multimodal deep learning techniques [J]. Sensors (Basel), 2024,24(21):6983.

[23] Zheng L, Lin R, Wang X, et al. The development and application of machine learning in atmospheric environment studies [J]. Remote Sensing, 2021,13(23):4839.

[24] Chen Y L, Yang Y J, Gao M. Typhoon−associated air quality over the Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area, China: machine−learning−based prediction and assessment [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2023,16(5):1279−1294.

[25] 黄鹤雯,沙青娥,朱曼妮,等.珠三角 2010~2017 年主要工业源 VOCs 排放结构与组分变化 [J]. 中国环境科学, 2020,40(11):4641−4651.
Huang H W, Sha Q E, Zhu M N, et al. Evolution of emission characteristics and species of industrial VOCs emission in Pearl River Delta Region, 2010~2017 [J]. China Environmental Science, 2020,40(11):4641−4651.

[26] 孟博文,李永波,孟 晶,等.我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 [J]. 环境科学, 2021,42(3):1023−1038.
Meng B W, Li Y B, Meng J, et al. Industrial emission characteristics and control countermeasures of VOCs in Chinese rapid economic development areas [J]. Environmental Science, 2021,42(3):1023−1038.

[27] 范绍佳,王海潮,卢 骁,等.20 世纪 90 年代以来粤港澳大湾区臭氧污染研究进展 [J]. 环境科学学报, 2023,43(1):1−18.
Fan S J, Wang H C, Lu X, et al. Progresses on ozone pollution in the Guangdong−Hong Kong−Macao Greater Bay Area since 1990s [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(1):1−18.

[28] Yin J, Yin Z, Xu S Y. Composite risk assessment of typhoon−induced disaster for China's coastal area [J]. Natural Hazards, 2013,69:1423–1434.

[29] Wang Y J, Yin Y Z, Song L C. Risk assessment of typhoon disaster chains in the Guangdong–Hong Kong–Macau Greater Bay Area, China [J]. Frontiers in Earth Science, 2022,10:839733.

[30] Kohonen T. 1995. Self−organizing maps [M]. Heidelberg: Springer Berlin, 1995.

[31] Sheridan S C and Lee C C. The self−organizing map in synoptic climatological research [J]. Progress in Physical Geography, 2011,35:109–119.

[32] Lennard C and Hegerl G. Relating changes in synoptic circulation to the surface rainfall response using self−organising maps [J]. Climate Dynamic, 2015,44:861–879.

[33] Gibson P B, Perkins−Kirkpatrick S E, Uotila P, et al. On the use of self−organizing maps for studying climate extremes [J]. Journal of Geophysical Research, 2017,122:2891–3903.

[34] 洪莹莹,翁佳烽,谭浩波,等.珠江三角洲秋季典型 O_3 污染的气象条件及贡献量化 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):1−10.
Hong Y Y, Weng J F, Tan H B, et al. Meteorological conditions and contribution quantification of typical ozone pollution during autumn in Pearl River Delta [J]. China Environmental Science, 2021,41(1):1−10.

[35] Wang Z S, Lv J A, Tang Y F, et al. Temporospatial variations and Spearman correlation analysis of ozone concentrations to nitrogen dioxide, sulfur dioxide, particulate matters and carbon monoxide in ambient air, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2019,10(4):1203−1210.

[36] Ge Q, Zhang X S, Cai K, et al. Ozone pollution in Chinese cities: spatiotemporal variations and their relationships with meteorological and other pollution factors (2016~2020) [J]. Atmosphere, 2022,13(6):908.

[37] 周永江,姚宜斌,熊永良,等.基于 Spearman 秩相关系数的 PWV 与 $PM_{2.5}$ 相关性研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020,40(3):236−241.
Zhou Y J, Yao Y B, Xiong Y L, et al. Study of correlation between PWV and $PM_{2.5}$ based on spearman rank correlation coefficient [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020,40(3):236−241.

[38] Herman G R and Schumacher R S, Money doesn’t grow on trees, but

forecasts do: Forecasting extreme precipitation with random forests [J]. Monthly Weather Review, 2018,146:1571–1600.

[39] Loken E D, Clark A J, McGovern A, et al. Postprocessing next-day ensemble probabilistic precipitation forecasts using random forests [J]. Weather and Forecasting, 2019,34:2017–2044.

[40] Zhan Y, Luo Y Z, Deng X F, et al. Spatiotemporal prediction of daily ambient ozone levels across China using random forest for human exposure assessment [J]. Environmental Pollution, 2018,233:464–473.

[41] 杨晓彤,康　平,王安怡,等.基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测 [J]. 环境科学, 2024,45(5):2507-2515.
Yang X T, Kang P, Wang A Y, et al. Prediction of ozone pollution in Sichuan basin based on random forest model [J]. Environmental Science, 2024,45(5):2507-2515.

[42] HJ 1130-2020　环境空气质量数值预报技术规范 [S].
HJ 1130-2020　Technical guideline for numerical forecasting of ambient air quality [S].

[43] 张天航,迟茜元,饶晓琴,等.2018 年国家级空气质量主客观预报 TS 评分对比检验 [J]. 环境工程技术学报, 2019,9(3):213-222.
Zhang T H, Chi Q Y, Rao X Q, et al. Verification of national subjective and objective air quality forecast in 2018 by TS score [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019,9(3):213-222.

[44] 符传博,林建兴,唐家翔,等.海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估 [J]. 环境科学, 2024,45(5):2516-2524.
Fu C B, Lin J X, Tang J X, et al. Establishment and effective evaluation of Haikou ozone concentration statistical prediction model [J]. Environmental Science, 2024,45(5):2516-2524.

[45] 中国气象局预报与网络司.预报司关于调整台风编号和定位警戒区的通知(气预函[2014]21 号) [R]. 北京:中国气象局预报与网络司, 2014.
Department of Forecasting and Networking, China Meteorological Administration. Notice on the adjustment of typhoon numbering and the positioning of warning zones [R]. Beijing: Department of Forecasting and Networking, China Meteorological Administration, 2014.

[46] Liu C X, He C, Wang Y M, et al. Characteristics and mechanism of a persistent ozone pollution event in Pearl River Delta induced by typhoon and subtropical high [J]. Atmospheric Environment, 2023,310: 119964.

[47] Wu L G, Tian W, Liu Q Y, et al. Implications of the observed relationship between tropical cyclone size and intensity over the Western North Pacific [J]. Journal of Cliamte, 2015,28(24):9501-9506.

[48] 黄　俊,廖碧婷,吴　兑,等.广州近地面臭氧浓度特征及气象影响分析 [J]. 环境科学学报, 2018,38(1):23-31.
Huang J, Liao B T, Wu D, et al. Guangzhou ground level ozone concentration characteristics and associated meteorological factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(1):23-31.

[49] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等.气象因素和前体物对中国东部 O_3 浓度分布的影响 [J]. 中国环境科学, 2019,39(6):2273-2282.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, et al. Impact of meteorological factors and precursors on spatial distribution of ozone concentration in Eastern China [J]. China Environmental Science, 2019,39(6):2273-2282.

[50] 何　超,慕　航,杨　璐,等.中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素 [J]. 环境科学, 2021,42(9):4168-4179.
He C, Mu H, Yang L, et al. Spatial variation of surface ozoneconcentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. Environmental Science, 2021,42(9):4168-4179.

[51] 陈　辰,洪莹莹,谭浩波,等.佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 [J]. 环境科学, 2022,43(10):4316-4326.
Chen C, Hong Y Y, Tan H B, et al. Establishment and application of Foshan ozone concentration forecast equation [J]. Environmental Science, 2022,43(10):4316-4326.

[52] 王　磊,刘端阳,韩桂荣,等.南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究 [J]. 环境科学学报, 2018,38(4):1285-1296.
Wang L, Liu D Y, Han G R, et al. Study on the relationship between surface ozone concentrations meteorological conditions in Nanjing, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(4):1285-1296.

[53] 李婷苑,吴乃庚,邓雪娇,等.华南区域大气成分数值模式 GRACEs 预报性能评估 [J]. 热带气象学报, 2021,37(2):207-217.
Li T Y, Wu N G, Deng X J, et al. Forecasting performance evaluation of GRACEs in Guangdong Province [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2021,37(2):207-217.

作者简介：王俊彬(1996-),男,广东揭阳人,工程师,博士,主要研究方向为污染气象学、气候学.发表论文 11 篇.wang_junbin@foxmail.com.