沈阳地区大气 CO_2 浓度的区域输送影响与排放源解析

战苹晔[1,2] 张志刚[3] 刘宁微[1*] 夏玲君[4] 贾庆宇[1] 李荣平[1] 刘灏彤[5]

1.中国气象局沈阳大气环境研究所，沈阳，110166

2 辽宁省鞍山市气象局，鞍山，114004

3.中国气象局预报与网络司，北京，100081

4.江西省生态气象中心，南昌，330096

5.无锡学院大气与遥感学院，无锡，214105

摘 要：基于 2023 年 6 月至 2024 年 5 月沈阳城市生态站大气 CO_2 浓度高精度在线观测数据，利用 REBS 算法筛分出区域本底数据和污染数据，利用地面风场数据和 MeteoInfo 数据分析软件分析了区域输送对沈阳地区大气 CO_2 浓度的影响，并根据碳守恒原理估算了化石燃料燃烧排放和生态系统排放/吸收对 CO_2 浓度的贡献。结果表明：沈阳城市生态站 CO_2 平均浓度为 477.2×10^{-6}，CO_2 本底和污染平均浓度分别为 474.9×10^{-6} 和 519.4×10^{-6}；影响沈阳的高浓度 CO_2 气团在春季、夏季来自西南方向，冬季来自西北、西南方向；沈阳地区全年大气 CO_2 潜在排放源区主要分布在辽宁和吉林大部、黑龙江南部、内蒙古东部、京津冀地区、山东半岛和黄渤海地区；相比其他季节，秋、冬季化石燃料燃烧排放对沈阳大气 CO_2 浓度贡献较大。

10.7519/j.issn.1000-0526.2025.070802

关键词： CO_2；浓度筛分；区域输送；潜在排放源分布；碳排放量化估算

Regional Transport Influence and Emission Source Analysis of Atmospheric CO_2 Concentration in Shenyang Region

ZHAN Shenye[1,2] ZHANG Zhigang[3] LIU Ningwei[1*] XIA Lingjun[4] JIA Qingyu[1] LI Rongping[1] LIU Haotong[5]

1 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

2 Anshan Meteorological Office of Liaoning Province, Anshan 114004

3 CMA Forecasting and Networking Department, Beijing 100081

4 Jiangxi Ecological Meteorology Center, Nanchang 330096

5 College of Atmospheric Sciences and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105

Abstract: Based on high-precision online atmospheric CO_2 concentration measurements from the Shenyang Urban Ecosystem Station from June 2023 to May 2024, the REBS（Robust extraction of baseline signal）algorithm is employed to separate regional background and pollution data. The influence of regional transport on atmospheric CO_2 concentrations in Shenyang is analyzed using surface wind field data and MeteoInfo statistical software. The contributions of fossil fuel combustion emissions and ecosystem emissions/absorption

收稿日期：2024-12-25；修回日期：

基金项目：1.中国气象局沈阳大气环境研究所辽宁省农业气象灾害重点实验室联合开放基金重点项目（2024SYIAEKFZD05）；2.中国气象局阿克达拉大气本底野外科学试验基地开放基金（AKDL202409）；3.中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室开放基金（2024G-1）；4.辽宁省气象局人才计划项目（RC202505）；5.辽宁省气象局指导计划项目（ZD202244）

作者简介：战苹晔，主要从事应用气象研究，E-mail: zhanshenye89@163.com.

通讯作者：刘宁微，主要从事环境气候变化研究，E-mail:liunw@iaesy.cn.

to CO_2 concentration are estimated according to carbon conservation principles. The results show that the average CO_2 concentration at Shenyang Urban Ecosystem Station is 477.2 $\times 10^{-6}$, with background and pollution concentrations averaged to be 474.9 $\times 10^{-6}$ and 519.4 $\times 10^{-6}$, respectively. High-concentration CO_2 air masses affecting Shenyang originate from the southwest in spring and summer, and from northwest and southwest in winter. The potential CO_2 emission source regions throughout the year are mainly distributed in most parts of Liaoning and Jilin provinces, southern Heilongjiang, eastern Inner Mongolia, Beijing-Tianjin-Hebei region, Shandong Peninsula, and the Yellow Sea and Bohai Sea areas. Compared to fossil fuel combustion emission in other seasons, the fossil fuel combustion emission contributes more significantly to the atmospheric CO_2 concentration in Shenyang during autumn and winter.

Key words: CO_2, REBS concentration screening, regional transport, distribution of potential emission sources, quantitative estimation of carbon emission

引言

大气二氧化碳（CO_2）作为最重要的温室气体，其碳循环过程和源/汇收支状况是认识和减缓全球气候变化的基础，也是当前温室气体相关研究的核心与热点（Piao et al，2009）。自工业革命以来，大气CO_2浓度的不断增长与化石燃料燃烧、水泥生产及土地使用转变等人为活动排放密切相关（Arneth et al，2017；Fernández-Martínez et al，2019）。大气CO_2在大气圈、海洋、陆地生态圈这三个碳库中不断进行交换（碳循环），人为活动排放、陆地生态圈源/汇、海洋源/汇以及大气输送等因素均会影响碳循环过程（陶波等，2001；周广胜等，2004；Xia et al，2014；Holden et al，2018；Keller et al，2018；周芳成等，2024），导致大气CO_2浓度在全球范围内分布极不均匀。为了深入理解碳循环过程并揭示其气候反馈，非常有必要对不同地区大气CO_2变化特征进行长期观测，在区域和全球范围内弄清大气CO_2的收支状况，研究其时空变化、长期趋势以及源/汇分布特征 （Emmert et al，2012；Cheng et al，2017）。

中国气象局自 20 世纪 90 年代在青海瓦里关山顶建立了第一个内陆高原型全球大气本底站，随后陆续在北京上甸子、浙江临安、黑龙江龙凤山等地相继建立区域大气本底站开展大气 CO_2 等温室气体的观测（Pu et al，2014；Fang et al，2016；2022；张林等，2021；张勇等，2022）。各省市也陆续开展本底站观测研究，探讨本地区大气温室气体浓度的变化特征、影响因子及源汇分析（Zhang et al，2020；韦芬芬等，2020）。Ruckstuhl et al（2012）对温室气体本底数据进行筛分方法研究；胡智伟等（2024）利用长三角地区背景站点佐证了与北半球大多数站点相似 CO_2 浓度时空变化特征；叶思晴等（2024）探索了气象因子、远距离输送和潜在源区对苏州市 CO_2 和 CH_4 浓度的影响；Xia et al（2020）基于观测数据进行区域大气 CO_2 的潜在源汇分析，发现源自长江三角洲途径安徽和江西的大气携带了污染气团，导致江西景德镇 CO_2 浓度的增加。

作为中国典型老工业基地和重要粮食生产基地，辽宁省“碳达峰”目标的实现对于保障粮食安全、实现绿色低碳发展和减污降碳协同增效等方面都具有重要意义。然而，目前对于沈阳乃至辽宁地区大气CO_2浓度变化影响机制的相关研究并不多见，尤其对碳收支的定量化估算还缺乏科学合理的技术方法，因此亟待开展相关领域研究。本文以沈阳为研究对象，基于大气CO_2浓度数据筛分出本底和污染数据，利用本底数据评估大气CO_2浓度变化特征；利用后向轨迹模型进行统计聚类分析，探讨不同季节来自不同区域的远距离输送对沈阳CO_2浓度的影响；进一步基于潜在来源贡献算法，研究沈阳大气CO_2潜在排放源区分布变化特征；基于以上结果，对比分析不同季节区域碳排放源燃烧效率，并量化评估沈阳陆地生态系统碳收支和人为源碳排放的动态变化。研究成果可为辽宁地区“自上而下”的温室效应评估、气

候变化监测以及归因分析提供科学依据，为辽宁省科学实施碳管理提供技术支撑和理论参考。

1. 资料和方法

1.1 研究区概况

沈阳属温带大陆性气候，四季分明，供暖期为每年 11 月至次年 3 月。沈阳城市生态站建于东北区域气象中心楼顶（海拔 60m），温室气体采样口位于楼顶高塔之上，采样装置位于一个无人值守实验室内，除了不定时维护仪器外，站点受人为观测活动影响较小。该站长期测量 CO_2、CO、CH_4 等微量气体浓度，站点周边 10km 范围内无重要的 CO_2 排放源。

1.2 观测仪器与数据处理

本文出现的所有大气 CO_2 浓度数据为 CO_2 气体摩尔分数。

2020 年开始，沈阳城市生态站开展大气 CO_2 等气体高精度小时浓度数据的连续自动监测，采用 LI-7500DS 型大气 CO_2 在线观测系统及自动气象观测仪。为了保证数据精确度，结合台站值班记录，人工过滤测量过程中的异常值（造成因标气不稳定、停机维护等仪器故障），小时平均浓度数据为 CO_2 的 5min 平均浓度汇总数据。本研究利用 2023 年 6 月至 2024 年 5 月大气 CO_2 浓度逐小时数据，其中 6-8 月、9-11 月、12-2 月、3-5 月分别代表夏季、秋季、冬季、春季。基于稳健局部回归（REBS）方法，利用局部近似回归原理，将逐小时 CO_2 浓度数据筛分为本底和非本底（未受局地污染的和混合均匀的）数据（Ruckstuhl et al，2012）；REBS 算法是目前本底与非本底数据筛分中使用最广泛的方法（胡智伟等，2024；叶思晴等，2024；陈昆等，2023；Xia et al，2020），可在统计软件 R 中的 IDPmisc 库中获取。

为研究区域大气输送对观测点大气 CO_2 浓度变化的影响，利用 MeteoInfo（3.8.5 版） 软件集成的混合单粒子拉格朗日积分轨迹分布模型（HYSPLIT），结合空间分辨率为 1°×1°的全球数据同化系统 GDAS 再分析数据（ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1），以沈阳城市生态站（41°73′N、123°42′E）为起点，模型高度设为 500m，逐月计算每日 00、08、14、20 时（北京时，下同）到达沈阳城市生态站观测期内气团的 72 h 后向轨迹（Hsu et al，2003；Rousseau et al，2004；Fang et al，2016），并采用欧几里得距离法将不同类型的气团轨迹进行聚类分析。

利用广泛使用的潜在源贡献函数（PSCF）方法计算大气 CO_2 的空间源分布。该方法可计算气团到达观测站点前在特定区域停留时间的概率密度函数，进而解析潜在排放源区贡献概率分布特征（张韵启等，2021）。PSCF 函数定义为经过研究区域的气团到达观测点对应的某要素值超过设定阈值的条件概率。将研究区域划分为若干网格，则 PSCF 函数的计算公式为：

$$PSCF_{ij} = M_{ij} / N_{ij} \quad (1)$$

式中，N_{ij} 为经过网络点（i, j）的后向轨迹总数目；M_{ij} 为经过该格点的高浓度气团（阈值浓度为平滑拟合后的季节本底平均浓度）轨迹的数目（Hsu et al，2003；Polissar et al，1999）。为了减小 N_{ij} 对计算结果的影响（Zeng and Hopke，1989），引入权重系数 W_{ij}（Polissar et al，1999；Zeng and Hopke，1989；

庞宇婷等，2023；Jiang et al，2023），降低了计算结果的不确定性。

$$WPSCF_{ij} = W_{ij} \times PSCF_{ij} \quad (2)$$

本研究中的 W_{ij} 设置为：

$$W_{ij} = \begin{cases} 1，N_{ij} > 60 \\ 0.7，20 < N_{ij} \leq 60 \\ 0.42，10 < N_{ij} \leq 20 \\ 0.05，N_{ij} \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

2. 结果与分析

2.1 大气 CO_2 浓度时间序列变化趋势

图 1 显示了 2023 年 6 月至 2024 年 5 月沈阳城市生态站 CO_2 本底浓度经平滑拟合后的逐月变化。在 8365 条有效数据中，7269 条（约 86.9%）归类为本底浓度数据，剩余约 13.1%的观测数据归类为非本底（污染）浓度数据；CO_2 的平均浓度为 477.2×10^{-6}，本底浓度和污染浓度平均值分别为 474.9×10^{-6} 和 519.4×10^{-6}，对比其他区域本底站，黑龙江龙凤山站 CO_2 本底浓度为 $424.9\pm 0.6\times10^{-6}$，沈阳站较之分别高 55.6×10^{-6}、50.0×10^{-6}（栾天等，2014；中国气象局，2023）；对比其他城市站数据，杭州站应用 REBS 筛分方法后，约 86%的数据被归类为本地数据，与本研究结论类似（陈啸鸣等，2024），杭州站 2022 年 CO_2 本底浓度为 $434.5\pm11.6\times10^{-6}$、污染浓度为 $447.8\pm15.8\times10^{-6}$，沈阳站较之分别高 40.4×10^{-6}、71.6×10^{-6}。CO_2 浓度季节变化显著，冬季高，夏季低。6-9 月，大气 CO_2 浓度维持在较低水平，最低值（438.0×10^{-6}）出现在 8 月，之后浓度逐渐升高，1 月达到最高值（513.4×10^{-6}），全年月平均振幅为 75.4×10^{-6}。CO_2 的季节变化主要受陆地生物圈的影响，夏季由于太阳辐射强，植被覆盖程度大，光合作用效率高，导致这一时间大气 CO_2 浓度低。冬季容易出现逆温现象，大气垂直扩散弱，大气中 CO_2 难以扩散，且用于供暖的生物质和化石燃料燃烧会贡献大量的 CO_2，导致冬季大气 CO_2 浓度偏高（Nevison et al，2008）。

《气象》待刊

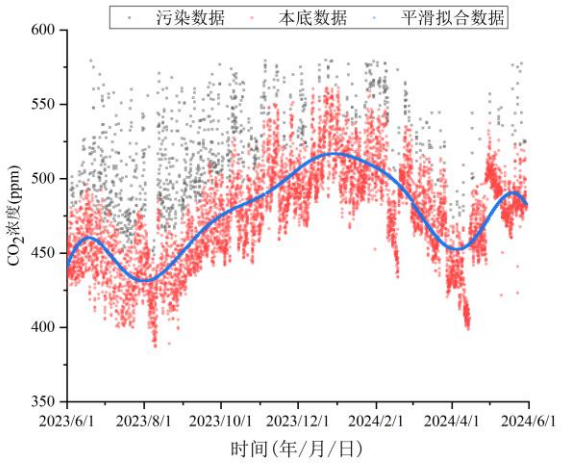

图 1 2023 -2024 年沈阳 CO_2 小时平均浓度变化

Fig.1 Hourly variation of average CO_2 concentration at Shenyang Urban Ecological Station from June 2023 to May 2024

2.2 大气 CO_2 浓度日变化特征

沈阳城市生态站大气 CO_2 浓度日变化的季节分布如图 2 所示，可以看出，各季节 CO_2 浓度呈现明显的日变化规律，且具有季节性差异。沈阳地区 CO_2 浓度日变化总体呈现清晨至上午高，午后至傍晚低的特征。这是由于从傍晚开始植物光合作用减弱，对 CO_2 吸收减少；人类活动也逐渐减少，人为排放 CO_2 浓度逐渐减少；且夜间边界层湍流活动较弱，大气层结稳定，CO_2 浓度逐渐累计升高。日出后，植物光合作用逐渐增强，吸收 CO_2；白天大气层结不稳定，大气水平和垂直运动增强，有利于 CO_2 的扩散与稀释，使得 CO_2 浓度逐渐降低（黄晓娴，2015）。CO_2 浓度日最大值在冬季最高，达到 522.4×10^{-6}，春季最低，仅为 486.9×10^{-6}；日最小值也在冬季最高，为 501.5×10^{-6}，夏季最低，仅为 430.3×10^{-6}。夏季、秋季、冬季、春季 CO_2 浓度日变化幅度分别为 60.3×10^{-6}、44.4×10^{-6}、20.9×10^{-6}、22.8×10^{-6}。

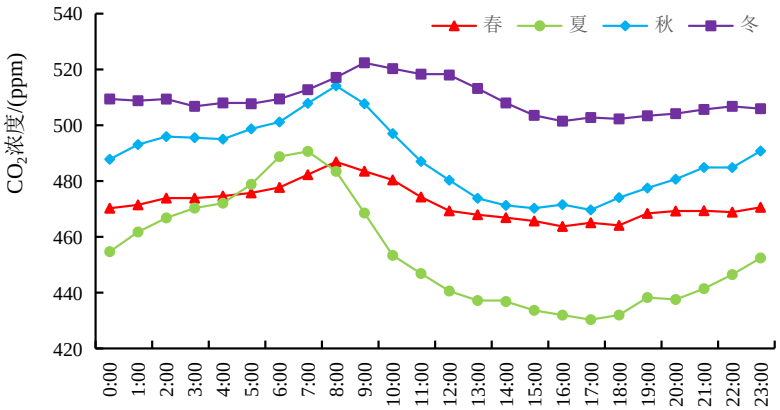

图 2 2023 年-2024 年沈阳不同季节 CO_2 浓度日变化

Fig.2 Daily variation of seasonal CO_2 concentration at Shenyang Urban Ecological Station from June 2023 to May 2024

气象学报

2.4 地面风场影响

低层风向、风速的变化直接影响 CO_2 浓度的分布与聚散（田莉等，2020），本研究基于筛分后的大气 CO_2 逐小时本底浓度数据与风向、风速数据，研究不同季节近地面风场对沈阳城市生态站 CO_2 变化的影响（图 3）。如图所示，春季、夏季、秋季沈阳地区盛行西南风，风速平均为 2.7m•s^{-1}；冬季盛行偏北风，风速平均为 2.9m•s^{-1}。春、夏沈阳城市生态站西南风向对应较高的大气 CO_2 浓度，秋季 CO_2 高浓度区较为分散，但整体上西南风向 CO_2 高于其他风向，表明春、夏、秋来自西南方向的辽宁渤海湾、营口等沿海地区，夏季辽宁大连、黄海海域，秋季渤海湾、大连地区的输送会给沈阳带来高浓度 CO_2。不同于春、夏和秋季，冬季西北、西南方向对应较高的 CO_2 浓度，在风速为 4~5m•s^{-1} 左右的 NW-W 方向上，污染浓度最高，这可能是由于冬季受西北风影响，西北方向受蒙古西伯利亚高压控制，以下沉气流为主，易发生逆温，污染物不易扩散，且供暖期间生物质燃烧和煤炭燃烧的大气扩散也会导致大量 CO_2 在近地层聚集。

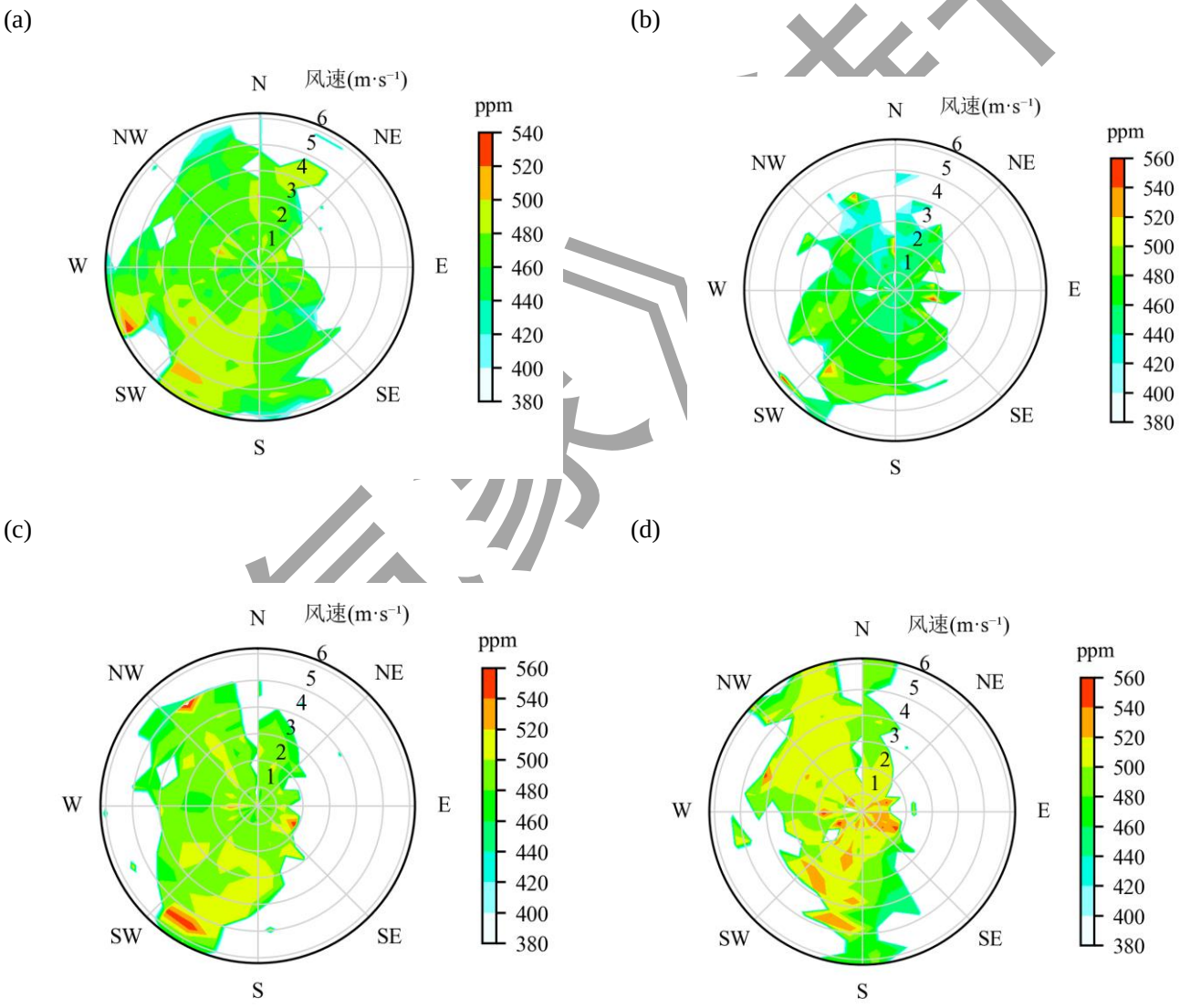

图 3 2023 年-2024 年沈阳风向、风速与 CO_2 浓度的季节变化

（a）春季，（b）夏季，（c）秋季，（d）冬季

Fig.3 Seasonal variation of wind direction, wind speed, and CO_2 concentration at Shenyang Urban Ecological Station from June 2023 to May 2024

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d)winter

2.5 远距离输送影响

在 HYSPLIT 模式模拟结果中，轨迹较短表示气团移动速度慢、风速小，轨迹较长表示气团移动速度快、风速大（杨健儿，2011；庄晓翠等，2022；张晓茹等，2024）。如图 4 和表 1 所示，春季输送轨迹主要有 5 类：①途径俄罗斯、内蒙古东部的轨迹 3 占比 32.87%，属于长距离（大于 1500km）气流，移动速度快。②途经黄海、山东半岛的轨迹 5 占比 24.72%，属于短距离（小于 1000km）气流，移动速度缓慢；③途经蒙古国、内蒙古、渤海湾的轨迹 2，占比 19.66%，属于中等距离（1000~1500km）气流，移动速度中等；④途径俄罗斯南部、蒙古国、内蒙古的轨迹 1，占比 14.61%，属于长距离气流，移动速度快；⑤途径俄罗斯东部、黑龙江、吉林的轨迹 4 占比 8.15%，属于中等距离气流，移动速度中等；春季，通过计算每条气流轨迹所对应的 CO_2 质量浓度，将轨迹对应的 CO_2 质量浓度从高到低排序为：轨迹 2>轨迹 4>轨迹 3>轨迹 5>轨迹 1，在各轨迹簇中，轨迹 2 和 4 携带的 CO_2 平均浓度远高于其他轨迹，说明沈阳春季 CO_2 浓度主要受西北和东北陆地中等距离气团输送的影响。轨迹 2 和轨迹 3 的气流占比为 52.53%，轨迹浓度高于平均值，由此可以说明春季来自西北方向境外地区的气流对沈阳 CO_2 质量浓度的影响较大。

夏季输送轨迹主要有 4 类: ①途径山东半岛、黄海的轨迹 1，占比 36.26%，属于短距离气流，移动速度慢；②途径黑龙江中部、吉林的轨迹 2，占比 35.44%，属于短距离气流，移动速度慢；③途径朝鲜海峡、黄海的轨迹 4，占比 18.68%，属于短距离气流，移动速度慢。④途径贝加尔湖、蒙古国、内蒙古东部的轨迹 3，占比 9.62%，属于长距离气流，移动速度快。其中，轨迹 1、4 的 CO_2 平均浓度远高于其他轨迹，其原因是轨迹 1、4 均源于海上，运行速度慢，除了黄海岸的天然湿地会释放 CO_2 以外，还可能受到航海船舶排放的温室气体影响（孟琪和赵鲁华，2024），表明沈阳夏季 CO_2 浓度主要受海上短距离气团输送的影响。

秋季输送轨迹主要有 3 类: ①途径内蒙、河北和辽宁交界处、渤海湾的轨迹 3，占比 39.17%，属于短距离气流，移动速度慢；②途经俄罗斯南部、蒙古国东部、内蒙古东部的轨迹 2，占比 35.83%，属于长距离气流，移动速度快； ③途经俄罗斯东南部、内蒙古东北部的轨迹 1，占比 25%，属于中等距离气流，移动速度中等。其中，轨迹 1 的 CO_2 平均浓度最高，其次是轨迹 3，表明沈阳秋季 CO_2 浓度主要受北方陆地中等距离及海上短距离气团输送的影响。

冬季输送轨迹主要有 5 类：①途径俄罗斯东南部、内蒙古东北部的轨迹 2，占比 37.78%，属于中等距离气流，移动速度中等；②途经俄罗斯南部、蒙古国东北部、内蒙古东北部的轨迹 1，占比 21.94%，

《气象》待刊

属于长距离气流，移动速度快；③途径蒙古国与俄罗斯交界处、内蒙古东部的轨迹 5，占比 18.33%，属于长距离气流），移动速度快；④途径京津冀地区、渤海湾的轨迹 4，占比 11.67%，属于短距离气流，移动速度慢；⑤途经俄罗斯南部、蒙古国东北部、内蒙古东部的轨迹 3，占比 10.28%，属于长距离气流，移动速度快。在各轨迹簇中，轨迹 2 携带的 CO_2 平均浓度明显高于其他轨迹，说明沈阳冬季 CO_2 浓度主要受北方陆地中等距离气团输送的影响较大。

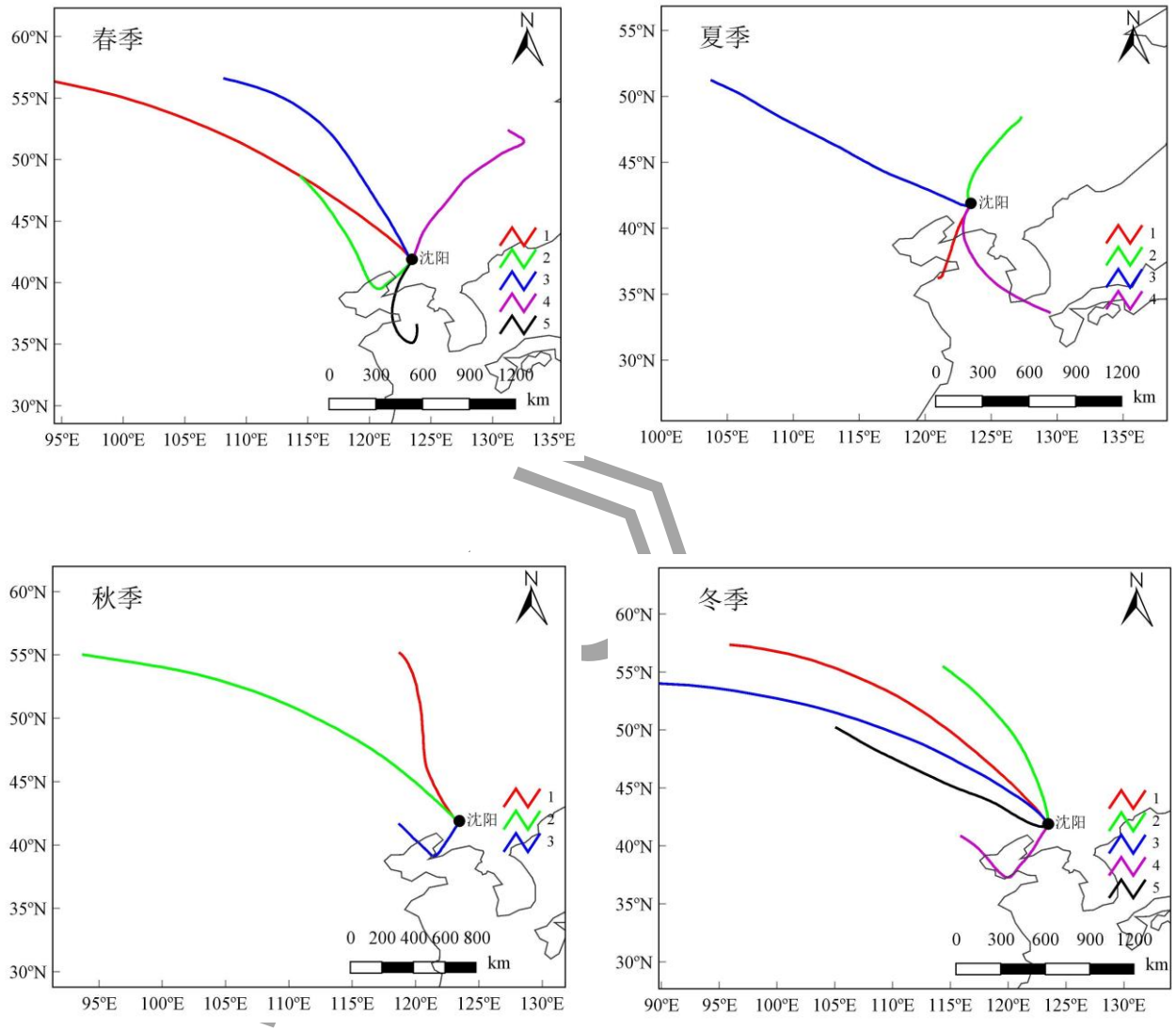

图 4 2023-2024 年沈阳大气 CO_2 72 h 后向轨迹聚类分布的季节变化

（a）春季，（b）夏季，（c）秋季，（d）冬季

Fig.4 Seasonal variation of 72 h backward trajectory cluster distribution of atmospheric CO_2 in Shenyang from June 2023 to May 2024

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d)winter

表 1 2023-2024 年沈阳城市生态站 CO_2 轨迹聚类的季节变化

Table 1 Seasonal variation of CO_2 trajectory clusters at Shenyang Urban Ecological Station from June 2023 to May 2024

季节	轨迹簇类别	轨迹数量	占比/%	CO_2 聚类平均浓度/$\times10^{-6}$	各季节 CO_2 平均浓度/$\times10^{-6}$
春季	1	52	14.61	459.1±26.1	473.6±28.5
	2	70	19.66	483.5±23.6	
	3	117	32.87	475.9±23.8	
	4	29	8.15	481.4±27.3	
	5	88	24.72	468.7±35.4	
夏季	1	132	36.26	464.9±34.4	457.0±33.9
	2	129	35.44	446.8±32.3	
	3	35	9.62	446.6±30.4	
	4	68	18.68	465.3±31.3	
秋季	1	90	25.00	494.4±29.5	490.4±32.2
	2	129	35.83	488.2±32.5	
	3	141	39.17	490.7±33.5	
冬季	1	79	21.94	506.7±25.1	509.6±27.5
	2	136	37.78	518.2±23.7	
	3	37	10.28	496.2±18.5	
	4	42	11.67	502.9±36.1	
	5	66	18.33	507.0±31.3	

2.6 潜在排放源区分析

图 5 所示为沈阳城市生态站大气 CO_2 潜在排放源区季节分布，WPSCF 值大小代表排放源分布的权重，WPSCF 值越大，代表该区域为 CO_2 潜在排放源区的概率越大。由图 5 可以看出，大气 CO_2 的潜在排放源贡献概率高（WPSCF 值≥0.6） 的区域面积由大至小依次为：夏季、春季、秋季、冬季。春季，大气 CO_2 的潜在排放源区主要分布在吉林大部、黑龙江吉林交界处、内蒙古东部、京津冀地区、山东半岛及渤海湾。夏季，潜在排放源区主要分布在辽宁中西部、渤海湾以及黄海海域，说明夏季 CO_2 来源主要是沈阳周边地区的人为活动排放及海洋输送，夏季黄渤海地区水温较高会降低 CO_2 在水中的溶解度，同时盐度升高会进一步降低 CO_2 溶解度，从而使 CO_2 从水中逸出（薛亮和张龙军，2011）。秋季大气 CO_2 的潜在排放源区主要分布在俄罗斯、蒙古国与我国内蒙古交界带、内蒙古东部，朝鲜西部、黑龙江西南部，北京南部、山东西部、安徽北部等地区；冬季 CO_2 潜在源区分布比较集中，主要分布在内蒙古与辽宁交界区域东南部、辽宁中西部、河北与辽宁交界区域、辽宁东部等地。总体而言，沈阳地区大气 CO_2 四季潜在排放源区主要分布在辽宁大部、吉林大部、黑龙江南部、内蒙东部、京津冀地区、山东半岛和黄渤海地区，部分潜在排放源区分布在朝鲜西部、山东西部、安徽北部等地的部分城市。

《气象》待刊

潜在源区分析结果与后向轨迹聚类结果比较吻合，反映出不同季节区域输送或周边城市人为排放对沈阳地区大气 CO_2 季节性影响特征。

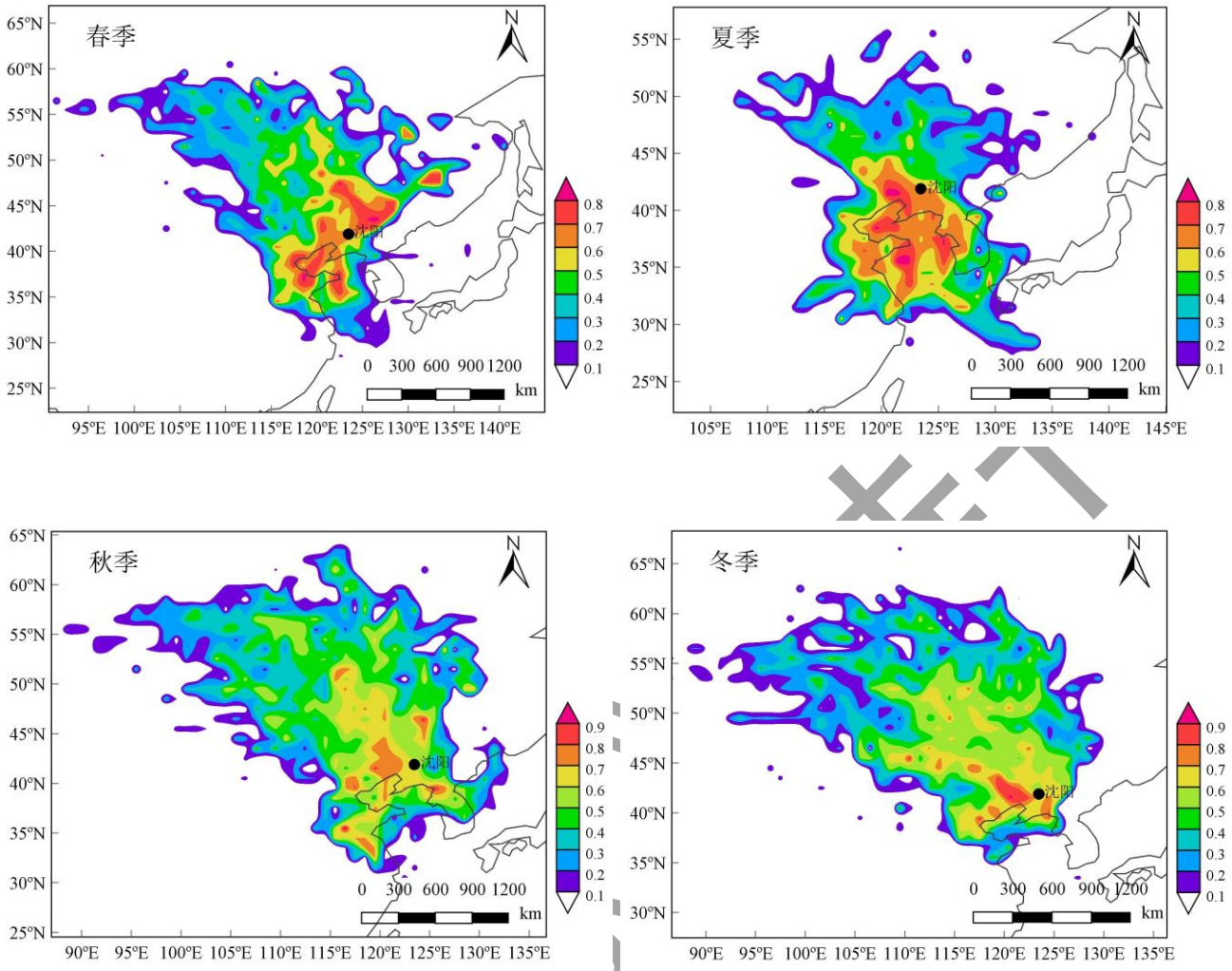

图 5 2023-2024 年沈阳地区大气 CO_2 的 WPSCF 的季节变化

（a）春季，（b）夏季，（c）秋季，（d）冬季

Fig.5 Seasonal variation of WPSCF for atmospheric CO_2 in Shenyang region from June 2023 to May 2024

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

2.7 化石燃料燃烧与生态系统对大气 CO_2 浓度的贡献

大气 CO_2 浓度组成主要包括：化石燃料燃烧排放、生态系统排放/吸收以及本底值（胡诚等，2022），CO 排放主要来自不充分燃烧（张芳，2011）。因此研究分析 CO_2 和 CO 的排放源可以明确人为排放和生物活动对大气中 CO_2 浓度的贡献程度（孙天乐等，2022）。张韵启等（2021）在对 2018-2019 年赣州站大气 CO_2 和 CO 燃烧排放研究中，根据碳守恒原理将两者逐小时观测浓度与相应时刻经过计算得到的赣州站背景浓度差值记为两者的抬升浓度，以冬季的化石燃料燃烧贡献比值代表全年数值，量化估算出化石燃料燃烧排放和生态系统排放/吸收产生的 CO_2。

本研究基于以上方法对沈阳地区大气 CO_2 进行了相应估算，将 2023-2024 沈阳地区大气 CO_2 和 CO 逐小时观测浓度与相应时刻经过计算得到的背景浓度差值记为两者的抬升浓度（△CO_2 和△CO），将逐小时△CO_2/△CO 的比值（r）作为化石燃料燃烧贡献比，并以冬季的 r 平均值（139.71）代表全年数值（不考虑夏季 CO 汇的影响），与 CO 实测浓度相乘，估算出化石燃料燃烧排放的 CO_2 浓度；将 CO_2 实测浓度减去化石燃料燃烧排放的 CO_2 浓度，再与本底 CO_2 浓度的差值记为生态系统产生的 CO_2 浓度。沈阳冬季△CO_2 和△CO 的有效样本数为 306，相关系数为 0.43，通过置信度为 0.01 的显著性检验。表 2 显示，化石燃料燃烧排放产生的 CO_2 浓度范围在 91.94~131.78×10^{-6} 之间，秋、冬季化石燃料燃烧排放浓度较春、夏季高，这是由于 CO_2 和 CO 在秋、冬季的主要来源为化石燃料或生物质燃烧以及北方城市供暖（夏玲君等，2016）。生态系统收支方面，夏、秋季为负值，主要表现为对 CO_2 的吸收效应；冬、春季为正值，以排放 CO_2 为主。这是由于夏、秋季植物生长茂盛，光合作用强，导致生态系统的碳吸收能力较强，冬、春季则恰恰相反（张芳，2011）。

表 2 2023-2024 年沈阳城市生态站 CO_2 化石燃料燃烧排放与生态系统收支浓度

Table 2 The CO_2 concentration from fossil fuel combustion emission and ecosystem carbon budget at Shenyang Urban Ecological Station from June 2023 to May 2024

季节	生态系统收支/×10^{-6}	化石燃料燃烧排放/×10^{-6}
春季	16.74	91.94
夏季	-53.41	108.18
秋季	-46.9	123.7
冬季	31.44	131.78

3. 结论与讨论

（1）沈阳城市生态站各季节 CO_2 浓度日变化均表现为清晨至上午高，午后至傍晚低的特征，CO_2 浓度日振幅夏季最大、春季最小。CO_2 浓度日最大值、最小值均在冬季相对最高，分别为 522.4×10^{-6}、501.5×10^{-6}，其本底浓度季节变化呈现出冬季高、夏季低的特征，与四季 CO_2 浓度日变化结果（冬季 CO_2 浓度高，夏季 CO_2 浓度低）基本一致，最低值出现在 8 月，1 月达到最高值。

（2）春、夏沈阳城市生态站西南风向对应较高的大气 CO_2 浓度，秋季 CO_2 高浓度区较为分散，但整体上西南风向 CO_2 高于其他风向，表明春、夏、秋来自西南方向的辽宁南部沿海区域输送会给沈阳带来高浓度 CO_2；冬季高浓度 CO_2 主要分布在西北、西南方向，最大抬升来自于西北风向，这可能是由于冬季受蒙古西伯利亚高压控制，以下沉气流为主，易发生逆温，污染物不易扩散，同时伴随供暖期间生物质燃烧和煤炭燃烧导致大量 CO_2 浓度较高。

（3）春季沈阳大气 CO_2 浓度气团主要受北方陆地中等距离气团输送的影响，夏季主要受海上中短距离气团输送的影响，秋季北方陆地中等距离及海上短距离气团输送均对其有较大影响，冬季则主要受北方陆地中等距离气团输送的影响；沈阳地区大气 CO_2 潜在排放源区主要分布在辽宁大部、吉林大部、黑龙江南部、内蒙古东部、京津冀地区、山东半岛和黄渤海地区，部分潜在排放源区分布在朝鲜西部、

《气象》待刊

山东西部、安徽北部等地的部分城市。

（4）沈阳冬季△CO_2和△CO表现出较强的相关性，大气CO_2在秋冬季化石燃料燃烧排放贡献较春夏季高，表明化石燃料和生物质燃烧的人为排放活动对寒冷季节CO_2浓度变化的影响显著高于其他季节。这与秋冬季CO_2和CO在冬季的主要来源为化石燃料或生物质的燃烧以及北方城市供暖有关。

参考文献

陈昆，余焰文，夏玲君，等, 2023. 基于多站对比的南昌地区大气CO_2浓度变化特征分析[J]. 环境科学学报, 43(3): 293-302. Chen K, Yu Y W, Xia L J, et al, 2023. An inter-comparison study on the variations of atmospheric CO_2 mole fractions observed at multiple stations in Nanchang City[J]. Acta Sci Circumst, 43(3): 293-302 (in Chinese).

陈啸鸣，刘硕，臧昆鹏，等, 2024. 新冠疫情期间杭州市CO_2浓度变化及成因分析[J]. 中国环境科学, 44(7): 3563-3572. Chen X M, Liu S, Zang K P, et al, 2024. Changes and causes of CO_2 concentration in Hangzhou during COVID-19[J]. China Environ Sci, 44(7): 3563-3572 (in Chinese).

胡诚，艾昕悦，侯波，等, 2022. 2020 年新冠疫情前后南昌市大气CO_2浓度变化及影响因子分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 14(1): 40-49. Hu C, Ai X Y, Hou B, et al, 2022. Atmospheric CO_2 concentration and its influence factors during 2020 COVID-19 pandemic in Nanchang[J]. J Nanjing Univ Inform Sci Technol (Nat Sci Ed), 14(1): 40-49 (in Chinese).

胡智伟，刘硕，臧昆鹏，等, 2024. 长三角地区背景大气CO_2浓度变化特征[J]. 环境科学学报, 44(6): 236-248. Hu Z W, Liu S, Zang K P, et al, 2024. Characterization of background atmospheric CO_2 mole fractions in Yangtze River Delta, China[J]. Acta Sci Circumst, 44(6): 236-248 (in Chinese).

黄晓娴, 2015. 城市二氧化碳特征及区域非均匀分布对气候的影响[D]. 南京：南京大学. Huang X X, 2015. Characteristics of atmospheric carbon dioxide in urban area and the influence of the regionally inhomogeneously distribution on climate[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).

栾天，周凌晞，方双喜，等, 2014. 龙凤山本底站大气CO_2数据筛分及浓度特征研究[J]. 环境科学, 35(8): 2864-2870. Luan T, Zhou L X, Fang S X, et al, 2014. Atmospheric CO_2 data filtering method and characteristics of the molar fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China[J]. Environ Sci, 35(8): 2864-2870 (in Chinese).

孟琪，赵鲁华, 2024. 基于大气污染物排放清单的港口污染物减排潜力分析——以青岛港大港港区为例[J]. 环保科技, 30(2): 33-39. Meng Q, Zhao L H, 2024. Port pollutant emission reduction potential based on air pollutant emission inventory: a case study of Dagang Port Area in Qingdao Port[J]. Environ Prot Technol, 30(2): 33-39 (in Chinese).

庞宇婷，徐宏辉，单萌，等, 2023. 长江三角洲地区CO_2浓度本底特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 43(2): 340-353. Pang Y T, Xu H H, Shan M, et al, 2023. Background characteristics and source analysis of CO_2 concentration in the Yangtze River Delta[J]. Acta Sci Circumst, 43(2): 340-353 (in Chinese).

孙天乐，何冬一，林晓玉，等, 2022. 深圳市不同区域大气CO_2变化特征与来源分析[J]. 中国环境科学, 42(12): 5497-5505. Sun T L, He D Y, Lin X Y, et al, 2022. The characterization and source analysis of atmospheric CO_2 in different areas of Shenzhen[J]. China Environ Sci, 42(12): 5497-5505 (in Chinese).

陶波，葛全胜，李克让，等, 2001. 陆地生态系统碳循环研究进展[J]. 地理研究, 20(5): 564-575. Tao B, Ge Q S, Li K R, et al, 2001. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem[J]. Geogr Res, 20(5): 564-575 (in Chinese).

田莉，李得勤，王扬锋，等, 2020. 两次秸秆焚烧导致辽宁重污染过程的气象条件对比分析[J]. 气象, 46(6): 873-849. Tian L, Li D Q, Wang Y F, et al, 2020. Comparative analysis on meteorological condition for two serious pollution events in Liaoning province caused by crop residue burning[J]. Meteor Mon, 46(6): 837-849 (in Chinese).

韦芬芬，林惠娟，曹舒娅，等, 2020. 苏南地区CO_2本底浓度及源汇特征[J]. 中国环境科学, 40(3): 975-982. Wei F F, Lin H J, Cao S Y, et al, 2020. A study on background concentration and source-sink characteristics of CO_2 in south of Jiangsu[J]. China Environ Sci, 40(3): 975-982 (in Chinese).

夏玲君，周凌晞，刘立新，等, 2016. 北京上甸子站大气CO_2及$\delta^{13}C(CO_2)$本底变化[J]. 环境科学, 37(4): 1248-1255. Xia L J, Zhou L X, Liu L X, et al, 2016. Monitoring atmospheric CO_2 and $\delta^{13}C(CO_2)$ background levels at Shangdianzi Station in Beijing, China[J]. Environ Sci, 37(4): 1248-1255 (in Chinese).

薛亮，张龙军, 2011. 北黄海夏季pCO_2分布及海-气CO_2通量[J]. 中国海洋大学学报, 41(12): 22-29. Xue L, Zhang L J, 2011. Surface pCO_2 and air-sea CO_2 flux in the Northern Yellow Sea during summer[J]. Periodical Ocean Univ China, 41(12): 22-29 (in Chinese).

杨健儿, 2011. 上海市近地表大气颗粒物污染特征及来源分析研究[D]. 上海：华东师范大学. Yang J E, 2011. Study on pollution feature of TSP on the surface of earth and the TSP source judgement—a case of Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University (in Chinese).

叶思晴，陈圆圆，方双喜，等, 2024. 苏州市大气CO_2和CH_4的浓度变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 44(5): 384-398. Ye S Q, Chen Y Y, Fang S X, et al, 2024. Analysis of the variation characteristics and influencing factors of atmospheric CO_2 and CH_4 concentrations in Suzhou, China[J]. Acta Sci Circumst, 44(5): 384-398 (in Chinese).

张芳，2011. 大气CO_2、CH_4和CO浓度资料再分析及源汇研究[D]. 北京：中国气象科学研究院. Zhang F, 2011. Re-analysis and evaluation of atmospheric carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and carbon monoxide (CO) at Mount Waliguan, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Science (in Chinese).

张林，靳孟贵，刘延锋，等, 2021. 中国瓦里关和上甸子大气温室气体浓度变化特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报，46(8): 2984-2998. Zhang

L, Jin M G, Liu Y F, et al, 2021. Concentration variation characteristics of atmospheric greenhouse gases at Waliguan and Shangdianzi in China[J]. Earth Sci——J China Univ Geosci, 46(8): 2984-2998 (in Chinese).

张晓茹,纪晓玲,张亚刚, 等,2025.贺兰山不同区域暴雨过程水汽输送特征[J].气象,51(3):285-297. Zhang X R,Ji X L,Zhang Y G, et al,2025.Water vapor transport characteristics during rainstorms in different regions of Helan Mountains[J].Meteor Mon,51(3):285-297(in Chinese).

张勇, 颜鹏, 靳军莉, 等, 2022. 中国大气本底观测: 减污降碳背景下主要大气成分变化趋势[J]. 气象科技进展, 12(1): 19-25. Zhang Y, Yan P, Jin J L, et al, 2022. Atmospheric background observations in China: trends of major atmospheric components in the background of pollution and carbon reduction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 12(1): 19-25 (in Chinese).

张韵启, 王强, 杨波, 等, 2021. 江西赣州站大气 CO_2 和 CH_4 浓度变化特征研究[J]. 环境科学学报, 41(10): 4247-4255. Zhang Y Q, Wang Q, Yang B, et al, 2021. Study on the characteristics of atmospheric CO_2 and CH_4 concentration variations at Ganzhou Station in Jiangxi[J]. Acta Sci Circumst, 41(10): 4247-4255 (in Chinese).

中国气象局, 2023. 2022 年中国温室气体公报[R]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2023. 2022 China greenhouse gas bulletin[R]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

周芳成,刘少军,田光辉, 等,2024.基于随机森林模型的南海大气 CO2 柱浓度估算模型构建及其检验与应用[J].气象,50(12):1542-1550. Zhou F C,Liu S J,Tian G H, et al, 2024.Construction, test and application of atmospheric CO2 column concentration estimation model over the South China Sea based on random forest model[J].Meteor Mon,50(12):1542-1550 (in Chinese).

周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 等, 2004. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展[J]. 气象学报, 62(5): 692-707. Zhou G S, Wang Y H, Bai L P, et al, 2004. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change[J]. Acta Meteor Sin, 62(5): 692-707 (in Chinese).

庄晓翠, 李博渊, 赵江伟, 等, 2022. 基于 HYSPLIT 模式分析的塔克拉玛干沙漠南缘暴雨水汽特征[J]. 气象, 48(3): 311-323. Zhuang X C, Li B Y, Zhao J W, et al, 2022. Water vapor characteristics of rainstorm in southern Taklimakan desert based on HYSPLIT model analysis[J]. Meteor Mon, 48(3): 311-323 (in Chinese).

Arneth A, Sitch S, Pongratz J, et al, 2017. Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed[J]. Nat Geosci, 10(2): 79-84.

Cheng S Y, An X Q, Zhou L X, et al, 2017. Atmospheric CO_2 at Waliguan station in China: transport climatology, temporal patterns and source-sink region representativeness[J]. Atmos Environ, 159: 107-116.

Emmert J T, Stevens M H, Bernath P F, et al, 2012. Observations of increasing carbon dioxide concentration in Earth's thermosphere[J]. Nat Geosci, 5(12): 868-871.

Fang S X, Tans P P, Dong F, et al, 2016. Characteristics of atmospheric CO_2 and CH_4 at the Shangdianzi regional background station in China[J]. Atmos Environ, 131: 1-8.

Fang S X, Du R G, Qi B, et al, 2022. Variation of carbon dioxide mole fraction at a typical urban area in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmos Res, 265: 105884.

Fernández-Martínez M, Sardans J, Chevallier F, et al, 2019. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO_2 and temperature[J]. Nat Climate Change, 9(1): 73-79.

Holden P B, Edwards N R, Ridgwell A, et al, 2018. Climate–carbon cycle uncertainties and the Paris Agreement[J]. Nat Climate Change, 8(7): 609-613.

Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K, 2003. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago[J]. Atmos Environ, 37(4): 545-562.

Jiang K, Ma Q, Zang K, et al, 2023. Evolution of atmospheric carbon dioxide and methane mole fractions in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmosphere, 14(8): 1295.

Keller D P, Lenton A, Littleton E W, et al, 2018. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle[J]. Curr Climate Change Rep, 4: 250-265.

Nevison C D, Mahowald N M, Doney S C, et al, 2008. Contribution of ocean, fossil fuel, land biosphere, and biomass burning carbon fluxes to seasonal and interannual variability in atmospheric CO_2[J]. J Geophys Res: Biogeosci, 113(G1): G01010.

Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al, 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 458(7241): 1009-1013.

Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al, 1999. The aerosol at Barrow, Alaska: long-term trends and source locations[J]. Atmos Environ, 33(16): 2441-2458.

Pu J J, Xu H H, He J, et al, 2014. Estimation of regional background concentration of CO_2 at Lin'an Station in Yangtze River Delta, China[J]. Atmos Environ, 94: 402-408.

Rousseau D D, Duzer D, Etienne J L, et al, 2004. Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole[J]. J Geophys Res: Atmos, 109(D6): D06116.

Ruckstuhl A F, Henne S, Reimann S, et al, 2012. Robust extraction of baseline signal of atmospheric trace species using local regression[J]. Atmos Meas Tech, 5(11): 2613-2624.

Xia J Y, Chen J Q, Piao S L, et al, 2014. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming[J]. Nat Geosci, 7(3): 173-180.

Xia L J, Zhang G, Liu L X, et al, 2020. Atmospheric CO_2 and CO at Jingdezhen station in central China: understanding the regional transport and combustion efficiency[J]. Atmos Environ, 222: 117104.

Zeng Y, Hopke P K, 1989. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada[J]. Atmos Environ (1967), 23(7): 1499-1509.

Zhang F S, Zhu L Y, Yan S M, et al, 2020. Analysis of the carbon dioxide mole fraction variation and its transmission characteristics in Taiyuan[J]. Atmos Ocean Sci Lett, 13(4): 363-370.

《气象》待刊

《气象》待刊