赖 静,谢民生,王亚强,等.青藏高原大气黑碳时空特征及 MERRA-2 和 TAP 数据集验证 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1238-1246.
Lai J, Xie M S, Wang Y Q, et al. Spatiotemporal characteristics of black carbon over the Tibetan Plateau and validation of MERRA-2 and TAP datasets [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1238-1246.

青藏高原大气黑碳时空特征及 MERRA-2 和 TAP 数据集验证

赖 静[1],谢民生[1],王亚强[2],康世昌[3,4],陈鹏飞[3],万 欣[5],丛志远[1*] (1.西藏大学生态环境学院,青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室,西藏 拉萨 850000；2.中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室,北京 100081；3.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000；4.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,四川 成都 610213；5.中国科学院青藏高原研究所,青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室,北京 100101)

摘要：为评估 MERRA-2 和 TAP 数据集在高原的适用性,基于珠峰、纳木错和瓦里关三站地面观测数据,验证两数据集大气黑碳(BC)的准确性.观测数据显示,纳木错站年均大气 BC 浓度最低(0.04μg/m^3),珠峰(0.26μg/m^3)和瓦里关较高(0.28μg/m^3),呈现明显的冬春高、夏季低的季节模式.MERRA-2 能较好捕捉大气 BC 季节和趋势特征;TAP 在高原存在系统性高估,部分年份误差高达 4 倍,准确性低于 MERRA-2.2021 年 3 月南亚黑碳跨境输送事件中,MERRA-2 再现能力较好,为明确南亚大气污染物向青藏高原跨境传输提供了直接科学证据.

关键词：黑碳；青藏高原；MERRA-2；TAP；地面验证
中图分类号：X513 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1238-09

Spatiotemporal characteristics of black carbon over the Tibetan Plateau and validation of MERRA-2 and TAP datasets. LAI Jing[1], XIE Min-sheng[1], WANG Ya-qiang[2], KANG Shi-chang[3,4], CHEN Peng-fei[3], WAN Xin[5], CONG Zhi-yuan[1*] (1.Key Laboratory of Biodiversity and Environment on the Qinghai-Tibetan Plateau, Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Xizang University, Lhasa 850000, China；2.State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China；3.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China；4.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610213, China；5.State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources, Institute of Tibetan Plateau Research Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1238~1246

Abstract：To evaluate the applicability of the MERRA-2 and TAP datasets over the Plateau, ground-based observations from the Qomolangma, Nam Co, and Waliguan stations were utilized to validate the accuracy of atmospheric black carbon (BC) in both datasets. Results showed that Nam Co had the lowest annual mean BC concentration (0.04μg/m³), while Qomolangma (0.26μg/m^3) and Waliguan (0.28μg/m^3) recorded higher levels. All stations exhibited a clear seasonal cycle, with higher concentrations in winter and spring and lower values in summer. MERRA-2 effectively reproduced the seasonal and temporal variations of BC, whereas TAP displayed a systematic overestimation across the Plateau, with annual deviations reaching up to four times in some years, indicating lower accuracy. During the March 2021 transboundary BC transport event from South Asia, MERRA-2 showed good capability in capturing the process, providing direct scientific evidence for cross-border pollutant transmission to the Plateau.

Key words：black carbon；Tibetan Plateau；MERRA-2；TAP；ground validation

黑碳是由含碳物质不完全燃烧产生的强吸光性气溶胶颗粒,是 $PM_{2.5}$ 的重要组成成分,主要来源于化石燃料和生物质燃烧[1].作为最强的吸光性气溶胶之一,黑碳不仅显著影响全球地表辐射平衡[2-3],还对人类健康构成严重威胁.在全球黑碳研究中,高海拔地区尤为特殊和重要.青藏高原被誉为地球“第三极”,不仅是我国生态安全的重要屏障,也是环境变化响应最敏感、生态系统最脆弱的地区之一[4].其独特的自然地理条件和生态系统,使其成为大气圈、水圈、冰冻圈、生物圈和人类圈多圈层耦合最显著的区域之一.近年来,在全球变暖和干旱叠加背景下,火险天气与极端火灾更加频繁[5-6],由此产生的野火烟羽可携带黑碳,并通过大气环流实现长距离跨区域输送[7].在此背景下,青藏高原受周边输送的影响,

收稿日期：2025-08-11
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42377103,42375104);中国科学院青年创新促进会资助项目(CAS2023076)
* 责任作者, 教授, czy@utibet.edu.cn

黑碳浓度水平逐步上升,显著影响该区域辐射收支和平衡状态,进而影响冰冻圈变化[7].然而,受复杂地形和恶劣观测条件限制,该区域地面观测站点数量稀少且观测周期有限,导致黑碳浓度的时空分布特征、辐射效应以及主控因素仍存在较大的不确定性[8].

地面观测系统、卫星遥感和数值模拟是研究大气黑碳气溶胶的主要方法[3].地面观测虽能够提供精准的原位数据,但受限于观测站点的空间代表性及人工操作等因素,难以实现黑碳浓度在空间上的全面覆盖和时间序列上的长期监测[9].近年来,为弥补地面观测数据的不足,MERRA-2(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2)等再分析数据产品被广泛应用于大气污染物的空间估算与过程模拟研究中[10],再分析数据能够在较大的空间尺度和长时间序列中提供较为完整的黑碳浓度信息[11],为解决上述问题提供了可能性.研究发现,MERRA-2 可较好的模拟北极、阿拉斯加及高纬度地区的大气黑碳浓度分布[12],但其在青藏高原地区的表现尚缺乏系统评估.研究指出[13-14],当前我国对黑碳模拟性能的验证工作主要集中于城市、平原及沿海地区,但青藏高原尤其是中西部地区的模拟偏差问题被严重低估.近年来发展的 TAP 数据集(中国大气成分近实时追踪数据集, Tracking Air Pollution in China)因其高分辨率特性及多源遥感融合与地面观测数据的融合优势,已成为国内黑碳浓度研究的重要数据源[15].基于 TAP 框架构建的长时序、高分辨率黑碳数据集已被广泛用于区域黑碳模式及趋势评估[16],但在青藏高原尚未有尝试.

基于上述背景,本研究利用青藏高原 3 个典型地面观测站点(珠峰站、纳木错站和瓦里关站)的黑碳浓度观测数据,评估 MERRA-2 再分析数据集和 TAP 数据集在青藏高原复杂地形下大气黑碳浓度模拟的准确性和适用性;通过分析地面观测与数据集的相关性、误差特征及趋势一致性,揭示二者在高原地区的表现差异,并结合特定污染事件案例,探讨数据集在环境监测中的应用潜力,为高原黑碳研究提供科学依据.

1　材料与方法

1.1　研究区域与地面观测

选取珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站(简称珠峰站,28°21′N,86°56′E,海拔 4276m),纳木错多圈层综合观测研究站(简称纳木错站,30°46.44′N, 90°59.31′E,海拔 4730m),瓦里关全球大气本底站(简称瓦里关站,36°17′N,100°54′E,海拔 3816m)为主要地面观测站点.

珠峰站位于西藏自治区日喀则市定日县,属于喜马拉雅北翼高寒草原区气候;纳木错站位于西藏自治区拉萨市当雄县,属于典型的羌塘高寒草原区气候;瓦里关站位于青海省海南藏族自治州共和县,属于黄河-湟水谷地草原区气候.3 个站点代表了青藏高原不同气候条件下的大气环境特征[17-19],其地理位置如图 1 所示.

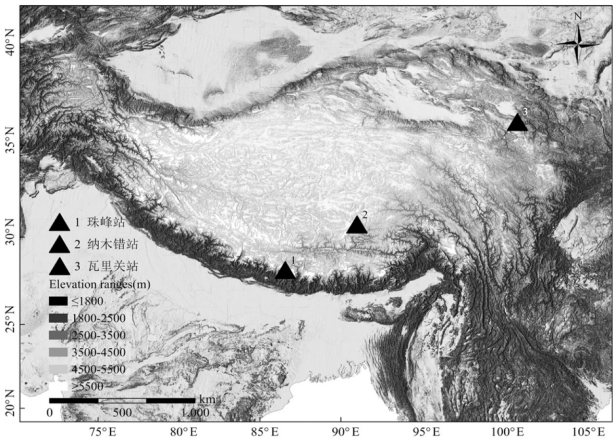


图 1　青藏高原典型观测站点地理位置

Fig.1　Geographical locations of representative observation stations on the Tibetan Plateau

使用珠峰站(2015~2022 年)、纳木错站(2015~2021 年)和瓦里关站(2015~2022 年)期间的黑碳观测原始数据,时间分辨率为 1min.3 站点均采用美国玛基科技公司(Magee Scientific Co,USA)生产的 AE33 型黑碳仪进行监测,采样配置为 TSP,该仪器可在 7 个波段(370,470,520,590,660,880 和 950nm)同步测量黑碳浓度[20].其中,880nm 波段黑碳的吸光特性最为显著,而棕碳和沙土等其他吸光性气溶胶的干扰较小,通常被作为黑碳监测的标准波段[21].本研究采用 880nm 波段的测量结果作为黑碳浓度代表值,经预处理生成日均浓度数据,单位统一为 μg/m³.大气黑碳的典型粒径为细粒径(约 0.15~0.3μm),绝大部分分布于 $PM_{2.5}$ 乃至 PM_1 中,粗粒径贡献可忽略[22].TSP 进样虽允许更大颗粒进入,但实际测量的黑碳浓度

与细颗粒模式高度重合,对于再分析产品的比较结果影响不显著[23].为确保数据质量,预处理时剔除了异常值(如负值或为 0),最终获得有效黑碳日值数据分别为:珠峰站 2266 个,纳木错站 1716 个,瓦里关站 2705 个.

1.2 MERRA-2 再分析数据集和 TAP 数据集

MERRA-2 是美国国家航空航天局(NASA)全球建模同化办公室(GMAO)基于戈达德地球观测系统模型(GEOS-5)和大气数据同化系统生成的再分析数据集[24],该数据集融合多种观测数据,覆盖全球范围,提供 0.5°×0.625°的空间分辨率和从地表至约 80km 的 72 个垂直层,可从 NASA Earthdata 平台(https://earthdata.nasa.gov)获取 1h、3h 和月平均等多种时间分辨率的数据.本研究使用 MERRA-2 提供的每小时气溶胶产品(tavg1_2d_aer_Nx),并结合地面观测站点的经纬度信息,采用双线性插值[13]方法获取对应位置的日均大气黑碳浓度数据.

TAP 是由清华大学联合北京大学、中国气象科学研究院等多家单位共同构建的中国大气成分近实时监测数据产品[25-26].该数据集通过多源信息融合系统,结合地面观测数据、卫星遥感与空气质量模型模拟结果,采用机器学习生成方法生成高分辨率(10km×10km)的大气成分浓度数据.数据可从 TAP 数据平台(http://tapdata.org.cn/)获取,提供日、月和年尺度的产品.本研究提取与三个地面站点对应的 TAP 日均黑碳浓度数据用于分析.

1.3 MERRA-2 和 TAP 大气黑碳准确性验证方法

为了获取尽可能接近地面实测位置的大气黑碳浓度数据,采用双线性插值法(bilinear interpolation),将 MERRA-2 和 TAP 数据集的网格数据空间映射到珠峰站、纳木错站和瓦里关站的具体经纬度位置.该方法需确定每个站点所属网格的 4 个邻近点以实现空间插值.在插值过程中,需确保原始 NetCDF 文件中包含完整的时间、空间和变量信息,且目标站点应处于数据网格内部以减少边界效应带来的不确定性.

插值后的结果被处理为日均浓度数据,并与对应站点的地面观测数据逐日对比,评价 MERRA-2 再分析数据集和 TAP 数据集的表现.采用以下统计指标进行评估:

(1)皮尔逊相关系数(R),评估 MERRA-2 再分析数据集、TAP 数据集与地面观测数据序列变化趋势的一致性,R 值越接近 1 表示一致性越高;(2)均方根误差(RMSE),评价 MERRA-2 和 TAP 数据集相对于地面观测数据的幅度和偏差;(3)相对误差(RE),用于判断数据集的系统性高估或者低估;(4)利用 MERRA-2 和 TAP 数据与实测值的两倍因子百分比(FAC2)[27],见式(1),即数据集落在地面观测数据 0.5~2 倍范围内的比例,FAC2 值越接近 1,说明数据集与实际观测数据的吻合度较好.当 FAC2>0.5 时通常被认为精度较好.

$$\mathrm{FAC2}=\frac{n_0}{n},\ 0.5\leqslant\frac{\mathrm{BC_p}}{\mathrm{BC_o}}\leqslant 2 \tag{1}$$

式中:n_0 为满足 BC_p 与 BC_o 的比值位于 0.5~2 之间的有效日值个数;n 为地面黑碳浓度观测值与对应数据集大气黑碳浓度数据匹配的总数量;BC_p 为 MERRA-2 再分析数据集或 TAP 数据集的大气黑碳浓度数据,μg/m^3;BC_o 为地面观测站点的黑碳浓度数据,μg/m^3.

2 结果与讨论

2.1 青藏高原地面黑碳浓度水平与时空差异

基于地面观测结果(图 2),从空间差异来看,位于高原腹地的纳木错站年均地面黑碳浓度最低,仅为(0.04±0.04)μg/m^3,而位于南部的珠峰站和东北缘的瓦里关站,年均浓度分别为(0.26±0.30)μg/m^3 和(0.28±0.19)μg/m^3,显著高于纳木错站.3 站点的黑碳浓度均呈现出明显的季节性变化特征,整体表现为春季和冬季浓度较高,夏季浓度下降显著.其中,珠峰站黑碳浓度波动幅度较大,个别月份浓度超过 0.7μg/m^3(1~5 月和 12 月);纳木错站在冬春季(1~3 月和 11~12 月)略有上升,夏季(7~8 月)降至全年最低,月均浓度仅为 0.02~0.03μg/m^3,呈现出典型的夏季清洁期特征;瓦里关站则表现出相对平稳的季节变化,冬春季浓度稳定在 0.4~0.6μg/m^3 之间,夏季降至约 0.2μg/m^3.

为评估青藏高原黑碳浓度的相对水平,将 3 个站点的地面观测结果与极地背景区、南亚污染区以及中国东部城市站点进行对比.结果显示,青藏高原观测值整体高于北极 Ny-Ålesund 站的冬春季背景水平(0.01~0.04μg/m^3)[28],但显著低于南亚污染区(3~5μg/m^3,极端污染时期可达 10μg/m^3)[29]以

及中国东部城市站点(如北京,2013 年年均浓度为 2.23μg/ m^3,2020 年降至 0.84μg/m^3)[30-31],这一相对浓度特征反映出青藏高原大气黑碳浓度的背景区属性.不同站点间仍表现出显著差异,其中纳木错站远离人类活动区,表现出大陆背景站点特征;而珠峰站和瓦里关站则更易受到区域输送和气象条件的调控[32-33],受人为影响较为显著.青藏高原大气黑碳浓度具有明显的空间特征,外源输入是影响因素之一.

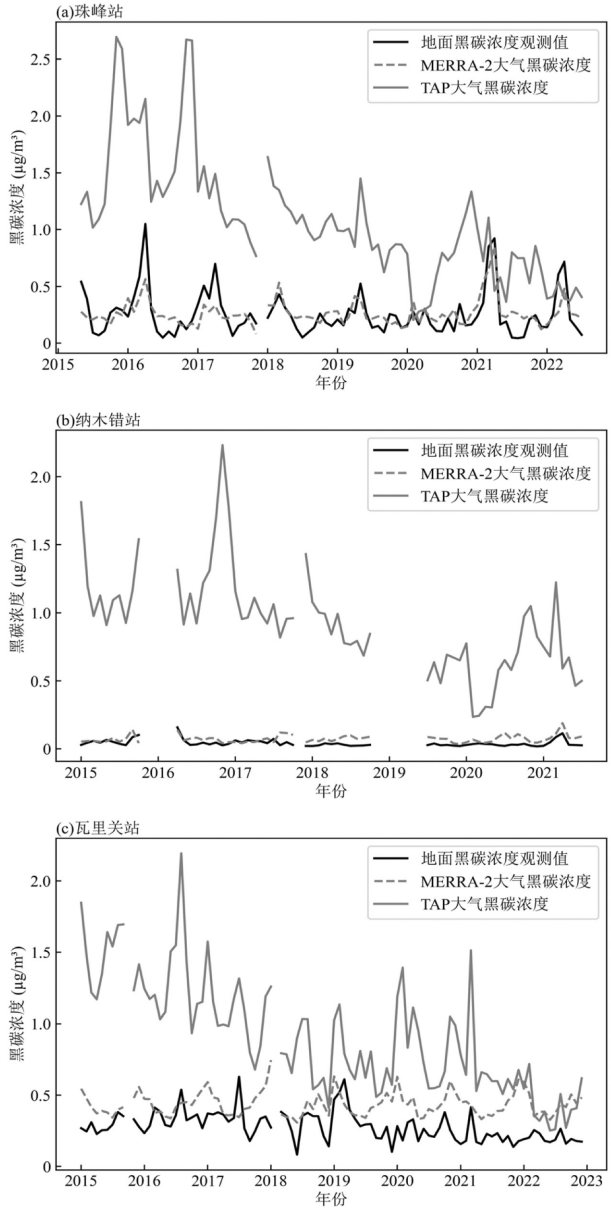


图 2　地面观测站点与 MERRA-2、TAP 数据的黑碳浓度时间序列对比

Fig.2　Time series of black carbon concentrations from ground-based observations compared with MERRA-2 and TAP data

2.2　MERRA-2 大气黑碳浓度数据在青藏高原的准确性验证

基于 3 站点的黑碳有效日值数据,评估 MERRA-2 在青藏高原的适用性(图 3).结果显示(表 1),所有站点的 MERRA-2 数据与地面观测数据均呈正相关,且相关性均达显著水平(P<0.01).但拟合效果存在明显空间差异,其中珠峰站的拟合效果最佳(R=0.55)(图 3(a)),纳木错站次之(R=0.39)(图 3(b)),瓦里关站相关性最低(R=0.27) (图 3(c)).珠峰站因邻近南亚污染输送通道,黑碳污染特征显著,叠加 MERRA-2 在区域传输过程中的模拟优势,使其拟合效果优于纳木错站和瓦里关站.3 个站点的回归斜率均小于 1,说明 MERRA-2 在再现黑碳浓度动态变化方面存在系统性偏差,尤以瓦里关站的偏差最为显著(斜率仅为 0.21).3 个站点的 FAC2 指标为 0.53~0.58,均超过 0.5 的精度判据,说明再分析数据与实测数据在数量级上基本一致.

表 1　不同站点 MERRA-2 与 TAP 数据集中黑碳浓度模拟性能的统计指标比较

Table 1　Statistical evaluation of BC simulation performance of MERRA-2 and TAP datasets at different sites

站点	数据集	相关系数(R)	RMSE (μg/m³)	相对误差 (%)	FAC2	总体评价
珠峰站	MERRA-2	0.55	0.25	4.2	0.53	较好
	TAP	0.13	1.07	323.7	0.15	较差
纳木错站	MERRA-2	0.39	0.06	78.8	0.53	中等
	TAP	0.16	1.00	2151.0	0.01	差
瓦里关站	MERRA-2	0.27	0.26	54.0	0.58	中等
	TAP	0.40	0.81	221.3	0.23	中等

从年际尺度来看,MERRA-2 能较好呈现黑碳浓度的长周期变化趋势,捕捉冬春季高、夏季低的季节波动(图 2),尤其在 2016 年、2018 年和 2021 年,与实测浓度变化趋势一致性较高,表现出较强的时间协同性.图 3(d)表明,在 2020~2022 年 MERRA-2 存在明显的高估.总体而言,MERRA-2 能较好反映青藏高原黑碳的长期趋势变化,但在具体浓度水平上仍存在一定偏差.从季节尺度看,春季拟合最优(R=0.66),秋冬季系统高估明显,夏季相关性较好(R=0.60),但因观测值低导致相对误差被放大.其中,又以 3 月(R=0.63)和 4 月(R=0.70)拟合最佳,10 月最低(R=0.42).

其他区域的评估同样揭示了 MERRA-2 的特征,

以中国全国为例,多源观测对比表明 MERRA-2 与地面观测整体呈中等相关(R=0.46),长期均值接近实测但存在显著南北差异[16];南亚平原多站点分析则显示,MERRA-2 在高浓度阶段的再现能力受排放清单不确定性影响较大,且存在明显的季节性差异,但对长期趋势和时序变化的刻画较为稳定[34].

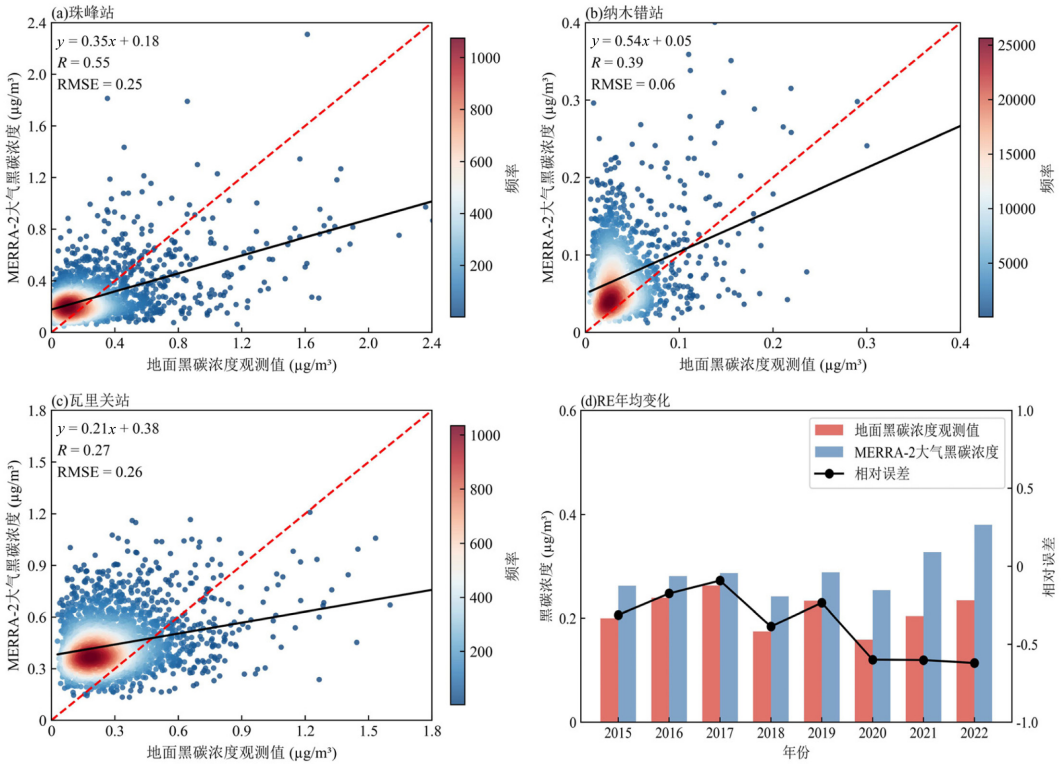


图 3 青藏高原区域 MERRA-2 黑碳浓度数据的准确性验证

Fig.3 Accuracy assessment of MERRA-2black carbon data over the Tibetan Plateau

上述季节性偏差与区域差异可能主要来源于青藏高原复杂地形和高海拔气象影响模型的再现能力,以及数据同化系统中地面观测的稀缺性限制模型约束效果等多重因素的制约.研究表明[35],MERRA-2 在地形起伏剧烈的区域对近地面黑碳浓度的模拟能力受限,主要由于其空间分辨率不足以有效捕捉局地排放或地形起伏带来的浓度差异.因此,针对青藏高原等地形复杂地区,建议结合地面观测开展偏差订正与多源融合,可在一定程度上提升 MERRA-2 数据的区域适配性和结果解读能力.

2.3 TAP 大气黑碳浓度数据在青藏高原的准确性验证

图 4、表 1 表明,TAP 数据与 3 个站点的观测值均显著呈正相关(P<0.01),其中瓦里关站拟合效果最佳(R=0.40)(图 4(c)),纳木错站次之(R=0.16)(图 4(b)),珠峰站相关性最低(R=0.13)(图 4(a)).瓦里关站的回归斜率最接近 1:1 线,说明 TAP 数据集在该站点与观测值的浓度变化趋势较为一致.可能得益于该站点本身污染背景和气象条件稳定,有助于提升遥感反演与模式同化的准确性.已有相关研究表明,在污染背景稳定、局地干扰小的条件下的高空间代表性站点,遥感模拟数据与地面实测结果的一致性较高,从而提升了区域适用性与模拟精度[36-37].

为进一步评估 TAP 数据在青藏高原的长期浓度模拟表现,图 2 显示,TAP 数据在多个年份,尤其在 2015~2018 年间,存在系统性高估问题.多个时间段的估值远超出地面观测与 MERRA-2 结果.图 4(d)进一步对比了 TAP 年均浓度与地面观测均值及其相对误差(RE),发现在 2015~2022 年间,TAP 对高原地区黑碳浓度存在明显的系统性偏高,部分年份误差值高达 4 倍(如 2015~2017 年),表明 TAP 在高原复杂地形区域的适用性仍需进一步优化.从季节尺度看,四季相关性整体偏弱,但春季相对偏差稍小,冬季拟合最佳(R=0.31),秋季最低(R=0.07),均表现为系统

性高估.其中,又以 2 月(R=0.39)和 8 月(R=0.35)拟合较好.相比之下,MERRA-2 能较好地呈现季节性变化模式,能在多个年份(如 2016 年、2018 年和 2021 年)捕捉浓度趋势,更为接近地面观测结果.

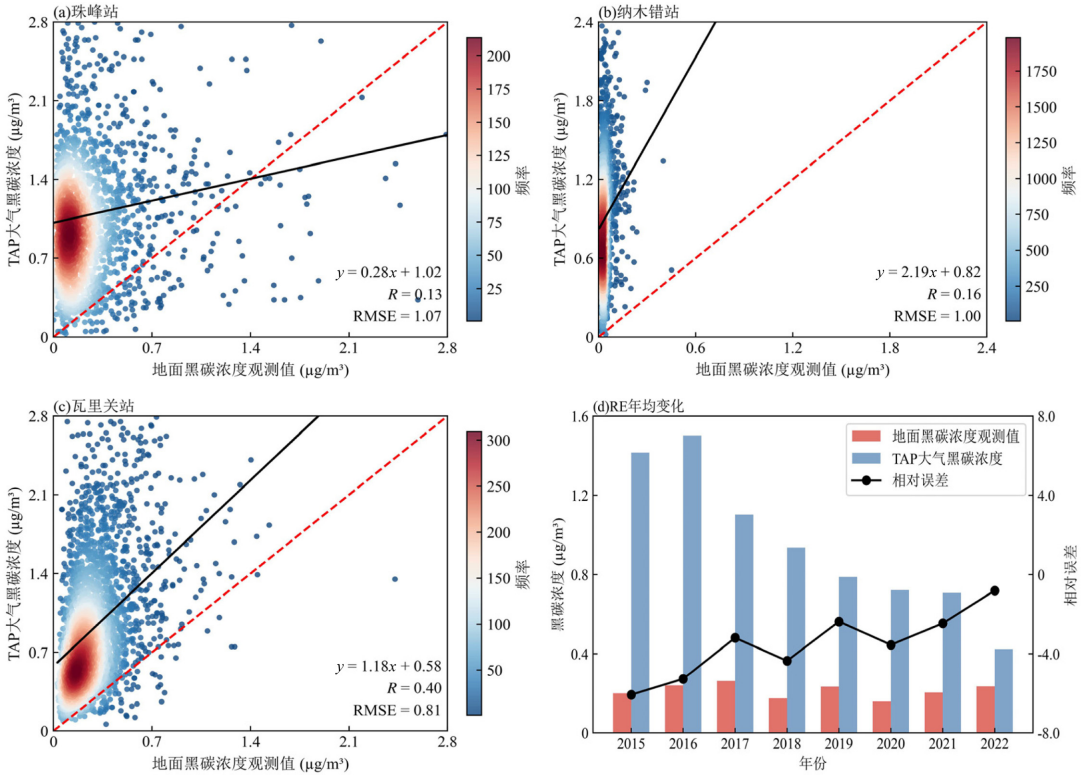


图 4　青藏高原区域 TAP 黑碳浓度数据的准确性验证

Fig.4　Accuracy assessment of TAP black carbon data over the Tibetan Plateau

尽管 TAP 在部分站点显现一定的趋势一致性,其在高原整体适用性仍存在显著局限.此外,TAP 在中国其他区域的评估结果同样呈现区域差异,西北地区表现最优而华北地区精度最差[16].与 MERRA-2 不同,TAP 依赖遥感反演与机器学习模型,对训练样本的空间代表性和输入遥感因子的物理相关性高度敏感.已有研究表明,站点稀疏和复杂地形对区域代表性和模型误差具有显著影响[38];同时,遥感敏感区域的同化方法在高原环境中的适用性亦存在挑战[39].青藏高原复杂地形和观测稀疏共同限制了模型泛化能力,导致该区域,估算误差放大.因此,在高原地区应用 TAP 数据时建议引入地形指数等高原敏感因子,以提高模型对局地差异的识别能力,改善区域估算误差和空间拟合表现.

2.4　MERRA-2 对青藏高原黑碳跨境传输事件的再现能力评估

基于地面观测数据发现,2021 年 3 月 28~31 日期间,青藏高原珠峰站和纳木错站的黑碳浓度显著高于日常背景水平(图 5).从时间序列分析可见,珠峰站地面观测黑碳浓度在该期间达到了 3.20μg/m^3,约为其年均浓度(0.26±0.30)μg/m^3 的 12 倍;而纳木错站在该期间记录到的黑碳浓度超过 0.30μg/m^3,约为其年均浓度(0.04±0.04)μg/m^3 的 7.5 倍.值得注意的是,纳木错站的浓度峰值较珠峰站滞后约 1~2d,表明污染物可能经历了跨区域输送.

为进一步评估 MERRA-2 在特殊事件期间对黑碳浓度变化的捕捉能力,结合 MERRA-2 黑碳浓度数据和 ERA5 风场数据的空间分析(图 6),3 月 28 日,印度东北部和孟加拉国地区出现显著的黑碳浓度高值区,浓度水平明显高于周边区域,在西南风场引导下,污染气团自源区呈带状向东北推进.至 3 月 29 日,高浓度黑碳气团受风场影响沿喜马拉雅山脉东段北移,高浓度边缘区域开始影响珠峰站南部地区.到 3 月 30~31 日,随着风场辐合增强和地形抬升作用叠加,污染物进一步向青藏高原腹地输送,影响范围扩展至纳木错站所在区域.

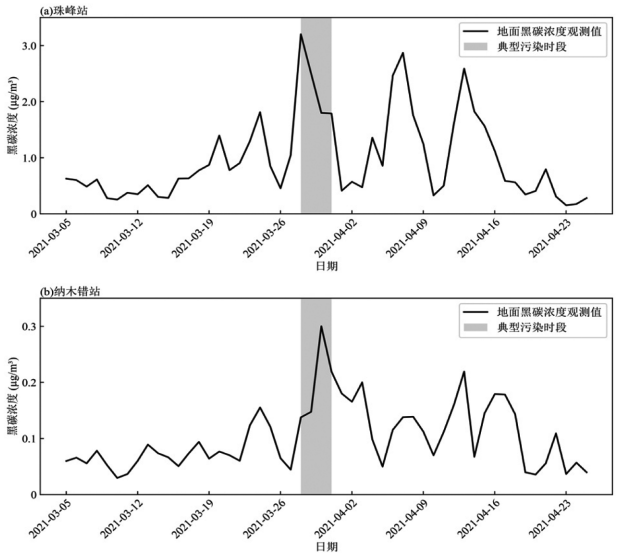


图 5 珠峰站和纳木错站地面观测黑碳浓度日值(2021 年 3 月 28~31 日)

Fig.5 Daily observed BC concentrations at Nam Co and Qomolangma stations(28 to 31 March 2021)

此次事件 MERRA-2 的时空演变特征与地面观测站点记录的浓度峰值时间序列高度吻合,其中,珠峰站因地理位置更靠近喜马拉雅山脉南坡,率先受到南亚污染输送影响;纳木错站位于青藏高原腹地,受影响时间相对滞后.两站点直线距离约 540km,反映出大气污染物具有时间延迟特征.

此外,从图 6 中可以看出,尽管珠峰站位于喜马拉雅山脉北坡,但在该典型污染事件期间,其浓度与南亚毗邻区域的浓度已十分接近.关于此次事件的成因,相关研究指出 2021 年春季南亚地区发生了大规模的生物质燃烧事件,其中尼泊尔的森林火灾频次显著高于过去 10a 平均水平[40],印度同期的森林火灾警报也达到了往年同期的 2 倍[41],这一系列极端火灾事件导致该区域大气污染物排放急剧增加.已有研究也表明,春季东南亚和南亚地区火点频繁,生物质燃烧排放剧烈,成为青藏高原和我国西南地区吸收性气溶胶的重要输送源[42-43].

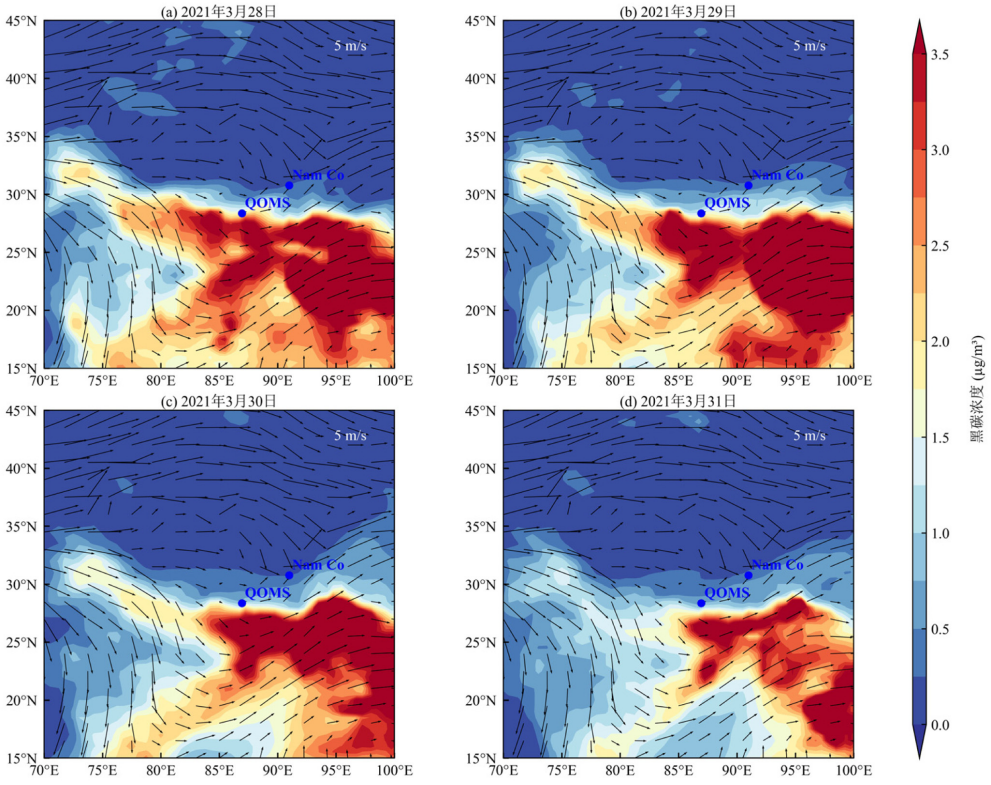


图 6 南亚黑碳向青藏高原输送过程(2021 年 3 月 28~31 日)

Fig.6 Black carbon transport from South Asia to the Tibetan Plateau(28 to 31 March 2021)

针对青藏高原黑碳跨境传输事件,MERRA-2 再分析数据不仅准确捕捉了南亚源区的高浓度中心,还成功再现了污染物向北输送的空间路径和时间序列,空间分布与地面观测浓度峰值高度吻合,提供了清晰的由点到面的污染扩散过程.相较于传统的 HYSPLIT 单点气团轨迹分析,MERRA-2 结合气象再分析系统,具备更强的区域动态再现能力,为明确南亚大气污染物向青藏高原的跨境传输提供了强

有力的直接科学证据.更重要的是,通过再分析数据的验证与应用,进一步发挥了青藏高原稀缺连续观测数据的科学价值,突破地面台站在空间代表性方面的局限,实现了由离散点位向区域尺度污染过程识别的延展,有力支撑了黑碳跨境传输事件的识别和演变过程的解析.

3　结论

3.1　青藏高原 3 个典型站点(珠峰站、纳木错站和瓦里关站)黑碳浓度水平存在明显差异,呈现由高原边缘向腹地递减的空间特征,并表现出冬春高、夏季低的季节变化趋势,反映出外源输入和气象因子对区域黑碳水平的重要影响.

3.2　通过与地面观测结果对比,MERRA-2 在黑碳浓度变化趋势捕捉方面具有较高一致性,整体适用性较好;TAP 虽具有分辨率优势,但整体精度低于 MERRA-2,存在一定估算误差,需结合区域特征进一步优化.

3.3　以 2021 年 3 月南亚跨境污染事件为案例,结合 MERRA-2 黑碳浓度和 ERA5 风场数据,成功再现了大气污染物由源区北移、沿山地上升并向青藏高原输送的时空演变过程,验证了 MERRA-2 对大气污染物输送路径的模拟能力.

参考文献：

[1] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(11):5380-5552.

[2] Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E, et al. Reduction of tropical cloudiness by soot [J]. Science, 2000,288(5468):1042-1047.

[3] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. Nature Geoscience, 2008,1(4):221-227.

[4] Kang S, Zhang Q, Qian Y, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: Current progress and future prospects [J]. National Science Review, 2019,6(4):796-809.

[5] Richardson D, Black A S, Irving D, et al. Global increase in wildfire potential from compound fire weather and drought [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2022,5(1):23.

[6] Jones M W, Abatzoglou J T, Veraverbeke S, et al. Global and regional trends and drivers of fire under climate change [J]. Reviews of Geophysics, 2022,60(3):e2020RG000726.

[7] Deng H, Ji Z, Kang S, et al. Sustained dominance of South Asia's black carbon pollution impacting the Tibetan Plateau in the 21st century [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2024,7(1):313.

[8] Kang S, Zhang Y, Chen P, et al. Black carbon and organic carbon dataset over the Third Pole [J]. Earth System Science Data, 2022,14(2):683-707.

[9] 蔡园青,徐学哲,周家成,等.黑碳仪测量气溶胶吸收系数的校正算法和影响因素研究进展 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):4026-4035.
Cai Y Q, Xu X Z, Zhou J C, et al. Research progress of correction algorithm and influence factors for aerosol absorption coefficient from aethalometer measurement. [J]. China Environmental Science, 2021,41(9):4026-4035.

[10] 王悦颖,陈丽娟,安兴琴,等.基于 MERRA-2 资料的 $PM_{2.5}$ 主要组分污染特征及与气象条件的相关性分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2128-2137.
Wang Y Y, Chen L J, An X Q, et al. Analyzing pollution characteristics of major components of $PM_{2.5}$ and their correlation with meteorological conditions based on MERRA-2 data [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2128-2137.

[11] Rienecker M M, Suarez M J, Gelaro R, et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications [J]. Journal of Climate, 2011,24(14):3624-3648.

[12] Zamora L M, Kahn R A, Evangeliou N, et al. Comparisons between the distributions of dust and combustion aerosols in MERRA-2, FLEXPART, and CALIPSO and implications for deposition freezing over wintertime Siberia [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, 22(18):12269-12285.

[13] Li W, Wang Y, Yi Z, et al. Evaluation of MERRA-2and CAMS reanalysis for black carbon aerosol in China [J]. Environmental Pollution, 2024,343:123182.

[14] 范学花,陈洪滨,夏祥鳌.中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. 大气科学, 2013,27(2):477-498.
Fan X, Chen H, Xia X. 2013. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013,27(2):477-498.

[15] Geng G, Xiao Q, Liu S, et al. Tracking air pollution in China: Near real-time $PM_{2.5}$ retrievals from multisource data fusion [J]. Environmental Science & Technology, 2021,55(17):12106-12115.

[16] 张佳怡,张　瑞,张艺玟,等.2000~2020 年 MERRA-2 和 TAP 大气黑碳数据在我国的精度分析和适用性评估 [J]. 环境科学研究, 2025, 38(3):569-578.
Zhang J Y, Zhang R, Zhang Y W, et al. Accuracy analysis and applicability assessment of MERRA-2and TAP atmospheric black carbon data over China from 2000 to 2020 [J]. Research of Environmental Sciences, 2025,38(3):569-578.

[17] Chen X, Kang S, Cong Z, et al. Concentration, temporal variation, and sources of black carbon in the Mt. Everest region retrieved by real-time observation and simulation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018,18(17):12859-12875.

[18] Wang F, Zhang X, Yue X, et al. Black carbon: The concentration and sources study at the Nam Co Lake, the Tibetan Plateau from 2015 to 2016 [J]. Atmosphere, 2020,11(6):624.

[19] Che H, Wang Y, Sun J. Aerosol optical properties at Mt. Waliguan observatory, China [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(33):6004-6009.

[20] 辛治轩,牛大伟,张　楠,等.华北地区南部城市秋冬季黑碳来源解析——基于改进后的黑碳仪模型 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5): 2386-2398.

Xin Z X, Niu D W, Zhang N, et al. Source apportionment of black carbon in autumn and winter in southern cities of North China: Based on the improved black carbon meter model [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2386-2398.

[21] Drinovec L, Močnik G, Zotter P, et al. The “dual-spot” aethalometer: An improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015,8(5):1965-1979.

[22] Liu H, Pan X, Liu D, et al. Mixing characteristics of refractory black carbon aerosols at an urban site in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(9):5771-5785.

[23] Luoma K, Niemi J V, Aurela M, et al. Spatiotemporal variation and trends in equivalent black carbon in the Helsinki metropolitan area in Finland [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021,21(2):1173-1189.

[24] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) [J]. Journal of Climate, 2017,30(14):5419-5454.

[25] Liu S, Geng G, Xiao Q, et al. Tracking daily concentrations of $PM_{2.5}$ chemical composition in China since 2000 [J]. Environmental Science & Technology, 2022,56(22):16517-16527.

[26] Geng G, Zhang Q, Tong D, et al. Chemical composition of ambient $PM_{2.5}$ over China and relationship to precursor emissions during 2005-2012 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017,17(14): 9187-9203.

[27] Chang J C, Hanna S R. Air quality model performance evaluation [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2004,87(1-3):167-196.

[28] Mori T, Kondo Y, Ohata S, et al. Seasonal variation of wet deposition of black carbon at Ny-Ålesund, Svalbard [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021,126(12):e2020JD034110.

[29] Kumar P, Sharma K, Malu A, et al. Measurement report: Intra-annual variability of black/brown carbon and its interrelation with meteorological conditions over Gangtok, Sikkim [J]. Egusphere, 2023, (2023):1-24.

[30] Sun J, Wang Z, Zhou W, et al. Long-term changes in black carbon and aerosol optical properties from 2012 to 2020 in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022,22(1):561-575.

[31] Pant P, Hegde P, Dumka U C, et al. Aerosol characteristics at a high-altitude location in central Himalayas: Optical properties and radiative forcing [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006,111(D17):D17106.

[32] Zhang M, Zhao C, Cong Z, et al. Impact of topography on black carbon transport to the southern Tibetan Plateau during the pre-monsoon season and its climatic implication [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020,20(10):5923-5943.

[33] Pu D, Meng R, Wu H, et al. Black carbon evolution at WMO/GAW station Mt. Waliguan, China and contribution area from 1994 to 2017 [J]. Atmosphere, 2022,13(4):534.

[34] Soni A, Mandariya A K, Rajeev P, et al. Multiple site ground-based evaluation of carbonaceous aerosol mass concentrations retrieved from CAMS and MERRA-2over the Indo-Gangetic Plain [J]. Environmental Science: Atmospheres, 2021,1(7):577-590.

[35] Zhuravleva T B, Artyushina A V, Vinogradova A A, et al. Black carbon in the near-surface atmosphere far away from emission sources: Comparison of measurements and MERRA-2reanalysis data [J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2020,33(6):591-601.

[36] Piersanti A, Vitali L, Righini G, et al. Spatial representativeness of air quality monitoring stations: A grid model based approach [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015,6(6):953-960.

[37] Janjić T, Bormann N, Bocquet M, et al. On the representation error in data assimilation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2018,144(713):1257-1278.

[38] 刘 诚,邓力琛,钱 悦,等.庐山地区黑碳气溶胶变化特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4512-4524.
Liu C, Deng L C, Qian Y, et al. Characteristics and influencing factors of black carbon aerosol in Mountain Lushan [J]. China Environmental Science, 2023,43(9):4512-4524.

[39] He J, Zhang F, Chen X, et al. Development and evaluation of an ensemble-based data assimilation system for regional reanalysis over the Tibetan Plateau and surrounding regions [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019,11(8):2503-2522.

[40] Hamal K, Ghimire S K, Khadka A, et al. Interannual variability of spring fire in southern Nepal [J]. Atmospheric Science Letters, 2022, 23(9):e1096.

[41] Bhattarai N, Dahal S, Thapa S, et al. Forest fire in the Hindu Kush Himalayas: A major challenge for climate action [J]. Journal of Forest and Livelihood, 2022,21(1):14-31.

[42] 周 茹,朱 君.东南亚生物质燃烧输送影响我国西南气溶胶辐射特性研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):1429-1436.
Zhou R, Zhu J. Study on the influence oftransport of biomass burningmaterials from Southeast Asia on aerosol radiation effects in Southwest China [J]. China Environmental Science, 2020,40(4): 1429-1436.

[43] 王新莹,李颖芳,桂 柯,等.我国西南地区吸收性气溶胶时空分布 [J]. 中国环境科学, 2021,41(7):3096-3105.
Wang X, Li Y, Gui K, et al. Spatial and temporal distribution of absorbing aerosol in Southwest China [J]. China Environmental Science, 2021,41(7):3096-3105.

致谢：感谢珠峰站、纳木错站和瓦里关站工作人员在仪器维护和运行保障方面提供的宝贵支持.

作者简介：赖 静(2000-),女,江西赣州人,西藏大学硕士研究生,主要从事大气遥感研究.发表论文 2 篇.13879766970@163.com.