

基于多源遥感资料的哥伦比亚及北部海域风能资源评估

郑江珊 黄刚 汪亚 刘渊培 刘何稚 黄俊杰

Wind Resource Assessment of Colombian and Its Northern Marine Areas Based on Multisource Remote Sensing Data

ZHENG Jiangshan HUANG Gang WANG Ya LIU Yuanpei LIU Hezhi HUANG Junjie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25009>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

大气再分析资料在中国近海的风资源特征和适用性分析

Wind Resource Characteristics and Applicability of Atmospheric Reanalysis Data in Offshore China

气候与环境研究. 2023, 28(5): 483 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22050>

多源陆地生态系统净碳交换资料在低纬高原地区的对比分析

Comparative Analysis of Net Ecosystem Exchange Data of Multi-Source Terrestrial Ecosystems in Low Latitude Plateau Region

气候与环境研究. 2025, 30(3): 335 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.24014>

基于风热环境评估的平顶山城市通风廊道构建

Construction of Urban Ventilation Corridors in the Pingdingshan City Based on Wind- and Thermal-Environment Assessments

气候与环境研究. 2024, 29(5): 629 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23084>

多源融合降水实况分析产品在海河流域的适用性评估

Assessing the Applicability of National Multisource Precipitation Analysis Product in the Haihe River Basin

气候与环境研究. 2024, 29(1): 25 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22140>

可见彩虹评估概念模型构建及全国范围内彩虹资源时空分布特征分析

Construction of a Visible Rainbow Assessment Conceptual Model and Analysis of Rainbow Resource Spatio-temporal Distribution in China

气候与环境研究. 2022, 27(5): 619 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2022.21012>

ERA5和ERA5-Land地面风速资料在中国陆地地区的适用性对比初步研究

Preliminary Comparative Study on the Applicability of ERA5 and ERA5-Land Ground Wind Speed Data over China's Land Region

气候与环境研究. 2024, 29(1): 36 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22106>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



郑江珊, 黄刚, 汪亚, 等. 2026. 基于多源遥感资料的哥伦比亚及北部海域风能资源评估 [J]. 气候与环境研究, 31(1): 112–122. ZHENG Jiangshan, HUANG Gang, WANG Ya, et al. 2026. Wind Resource Assessment of Colombian and Its Northern Marine Areas Based on Multisource Remote Sensing Data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 31 (1): 112–122. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25009

基于多源遥感资料的哥伦比亚及北部海域 风能资源评估

郑江珊¹ 黄刚² 汪亚² 刘渊培² 刘何稚³ 黄俊杰¹

1 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200030

2 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 100029

3 三峡国际能源投资集团有限公司, 北京 100029

摘要 对比多源遥感数据, 主要采用跨校准多平台 (Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP) 数据, 结合高级散射计 (Advanced Scatterometer, ASCAT) 和 WindSat 等数据, 在区域和点位多尺度上对哥伦比亚及北部海域风能资源进行系统评估。研究首先通过多源数据对比分析验证了 CCMP 数据在风速和风功率密度方面的准确性, 发现其在海上风速观测中与再分析数据分布基本一致, 但在具体量级上存在一定差异。随后, 基于平均风速的时间、空间分布特征分析, 发现哥伦比亚北部近海区域呈现风速增大的趋势, 并且在小风年期间风速仍然处于较大的水平 (>10 m/s), 说明该区域为稳定大风速区。进一步, 通过选取重点关注点位 (A、B 和 C), 对适宜风电开发的关键区域在点位尺度上进行风能资源评估。分析表明, C 点因其较高的风速、风功率密度和稳定的风向分布, 适合大规模风电场建设; A 点和 B 点则适合建设中型风电项目, 具有较好的经济效益和技术可行性。研究结果为哥伦比亚风能资源的合理开发和利用提供了科学依据, 具有重要的实际意义。

关键词 风资源评估 多源资料 卫星遥感 哥伦比亚

文章编号 1006-9585(2026)01-0112-11

中图分类号 P414.9

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25009

Wind Resource Assessment of Colombian and Its Northern Marine Areas Based on Multisource Remote Sensing Data

ZHENG Jiangshan¹, HUANG Gang², WANG Ya², LIU Yuanpei², LIU Hezhi³, and HUANG Junjie¹

1 Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200030

2 State Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 China Three Gorges International Corporation, Beijing 100029

Abstract Various sources of remote sensing data, primarily utilizing cross-calibrated multiplatform (CCMP) data, supplemented by advanced scatterometer (ASCAT) and WindSat data, are compared to systematically evaluate wind energy resources in Colombia and its northern maritime regions at regional and point scales. Initially, the accuracy of CCMP data for wind speed and wind power density is validated through comparative analysis with multiple datasets,

收稿日期 2025-01-10; 网络预出版日期 2025-07-11

作者简介 郑江珊, 女, 博士, 工程师, 主要从事风资源模拟与评估、气候变化研究。E-mail: zjsmh007@126.com

通讯作者 黄刚, 男, 博士, 研究员, 主要从事海气相互作用和人工智能交叉方向研究。E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国三峡哥伦比亚控股有限公司科研项目 CTGL-2022-CO-SA-039

Funded by CTG Colombia Holding S.A.S. (Grant CTGL-2022-CO-SA-039)

revealing that CCMP offshore wind speed distributions are largely consistent with the reanalysis data, despite some discrepancies in magnitude. Subsequently, based on the analysis of the spatiotemporal distribution characteristics of wind speed, the nearshore area of northern Colombia exhibits an increasing trend in wind speed, maintaining relatively high levels (>10 m/s) even during low-wind years, indicating this region as a consistently high-wind-speed zone. Furthermore, by selecting key focal points (A, B, and C), the wind energy resources in critical areas that are suitable for wind power development are assessed at the point scale. The analysis indicates that point C is optimal for large-scale wind farm construction because of its high wind speed, wind power density, and stable wind direction distribution, whereas points A and B are suitable for medium-sized wind power projects and demonstrate favorable economic benefits and technical feasibility. The results of this study offer a scientific foundation for the rational development and utilization of wind energy resources in Colombia, carrying significant practical importance.

Keywords Wind resource assessment, Multisource data, Satellite remote sensing, Colombia

1 引言

全球气候变化问题日益严峻，已经成为国际社会亟需解决的重大环境挑战之一。气候变化带来的极端天气事件频发、海平面上升以及生态系统的破坏，迫使各国政府和科研机构加快应对步伐。在此背景下，减少温室气体排放和发展可再生能源成为各国政策制定和实施的重点方向 ([https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/\[2025-07-11\]](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/[2025-07-11])) (Meinshausen et al., 2022)。作为一种清洁、可再生且资源丰富的能源形式，风能因其显著的环境效益和经济潜力，在全球能源转型过程中扮演着不可或缺的角色 (Tanaka et al., 2022)。

哥伦比亚位于南美洲西北部，北临加勒比海，西濒太平洋，境内安第斯山脉纵贯南北，拥有从海平面到 5710 m 海拔的复杂地形。这种地理多样性和复杂地形导致该地区的复杂气候环境，区域差异明显，年际变率较大 (Mejía-Parada et al., 2024)。哥伦比亚北部海域风能资源状况较好，多区域年平均风速超过 10 m/s，部分区域旱季风速可达 17.5 m/s (Bastidas-Salamanca and Rueda-Bayona, 2021)，是理想的风力发电区域。根据 2022 年发布的《哥伦比亚海上风电路线图报告》 ([https://www.minenergia.gov.co/documents/6115/VF_Colombia_Offshore_Wind_Roadmap_Final.pdf\[2025-07-11\]](https://www.minenergia.gov.co/documents/6115/VF_Colombia_Offshore_Wind_Roadmap_Final.pdf[2025-07-11]))，哥伦比亚在加勒比沿海地区的海上风电装机潜力高达 109 GW (理论值)。如果考虑到环境、社会和技术等限制性因素，该地区实际可开发的海上风电潜力仍高达 50 GW 左右 ([https://www.minenergia.gov.co/documents/6115/VF_Colombia_Offshore_Wind_Roadmap_Final.pdf\[2025-07-11\]](https://www.minenergia.gov.co/documents/6115/VF_Colombia_Offshore_Wind_Roadmap_Final.pdf[2025-07-11]))。目前，哥伦比亚仅有两座已建成的陆上风电场，但哥伦比亚政府计划提

高非常规可再生能源 (风能、太阳能等) 占比，2050 年该比例将超过 40%。因此，哥伦比亚风力开发潜力巨大。然而，风能资源在空间和时间上的高度不均匀性，使得科学准确的风资源评估成为风电场选址和设计的基础性工作 (Torralba et al., 2017; Miao et al., 2020)。风资源的空间分布受地形、气候条件以及海陆界面的影响显著，不同地区的风速和风向具有明显的差异性。同时，风能资源的时间变化性也较大，季节性和日变化特征明显。这种复杂的空间—时间分布特性要求风资源评估方法具备高精度和高分辨率，以确保风电场的高效运行和经济效益的最大化 (Olauson, 2018; Miao et al., 2020)。

目前，风资源评估主要依赖于地面站点数据和再分析数据 (Xu et al., 2006; Jiang et al., 2010; Lin et al., 2013; Torralba et al., 2017; Zhang R H et al., 2019; Zhang Z T et al., 2019; Miao et al., 2020)。地面站点数据由于其观测的直接性和准确性，被广泛应用于风资源的短期和局地评估。然而，针对海上风能资源的评估，由于缺乏足够的观测站点，导致风速数据的获取和分析面临诸多挑战。此外，现有的再分析数据虽然覆盖范围广，但由于观测站点的稀疏性，其对海上风速的表征能力有限，常常存在一定的偏差和不确定性 (Miao et al., 2020)。这些问题在一定程度上制约了海上风电场的科学选址和设计，亟需通过新的技术手段加以解决。近年来，遥感技术的快速发展为大范围、长期、连续的风资源监测提供了新的技术手段和数据支持。遥感技术通过卫星、雷达等平台获取的大量风速数据，不仅覆盖范围广泛，而且具有较高的时间、空间分辨率，能够有效弥补地面观测站点的不足 (Zheng et al., 2012; Buchanan et al., 2018)。其中，多源遥感数

据, 尤其是跨校准多平台 (Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP) 数据, 因其在时间和空间分辨率上的优势, 成为风资源评估的重要数据源 (齐浩等, 2023)。CCMP 数据通过整合多种遥感平台的数据, 提供了更加全面和准确的海面风场信息, 极大地提升了风资源评估的精度和可靠性。

然而, 目前对于多源遥感资料在海面风速上的评估工作仍然较少, 针对这一问题, 本文以哥伦比亚及北部海域为例, 以 CCMP 数据为主要数据源, 结合 ASCAT (Advanced Scatterometer) 和 WindSat 数据, 对海上风资源进行系统分析, 通过多源数据对比、平均风速时空分布特征分析和重点区域风况分析, 全面评估哥伦比亚及北部海域的风能资源。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究采用了 3 种主要的遥感数据源, 即跨校准多平台 (Cross-Calibrated Multi-Platform, CCMP) (<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/ccmp-cross-calibrated-multi-platform-wind-vector-analysis> [2025-07-11])、高级散射计 (Advanced Scatterometer, ASCAT) 以及 WindSat。

CCMP 风场是以欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的再分析和业务资料为背景场, 采用变分方法同化 SeaWind、TMI、AMSR-E、SSM/I 等多种卫星探测海洋表面风资料和传统的船舶、浮标观测资料后获得的规则格点资料, 观测时间范围为 1993 年 1 月 2 日至 2023 年 12 月 31 日。ASCAT 是 C 波段微波散射计, 主要用于测量海面风速、风向, 也可用于研究极地冰、土壤水分和植被, 仅覆盖海洋表面; 共 3 个卫星搭载 ASCAT 散射计, 分别为 MetOp-A 卫星 (观测时间范围为 2007 年 3 月 1 日至 2021 年 11 月 8 日)、MetOp-B 卫星 (观测时间范围为 2012 年 12 月 13 日至 2023 年 12 月 31 日) 和 MetOp-C 卫星 (观测时间范围为 2019 年 7 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日)。WindSat 是测极辐射仪, 主要用于全球海面风场的测量, 此外还可测量海面温度、冰雪、水蒸气、云液态水和降雨率, 仅覆盖海洋表面, 观测时间范围为 2003 年 2 月 5 日至 2020 年 10 月 19 日。

这三种遥感数据源均具有 0.25° (纬度) \times 0.25° (经度) 的水平空间分辨率, 均覆盖哥伦比

亚北部海域, 能够提供丰富的风场信息。但 ASCAT 与 WindSat 数据仅有海洋表面数据, 未覆盖陆地。具体而言, ASCAT 和 WindSat 的数据时间分辨率为 12 h, 即每日提供两个时次的风速观测数据, 而 CCMP 数据的时间分辨率更高, 为 6 h, 每日提供 4 个时次的风速观测数据, 具备更高的时间精度。这种高时间分辨率的数据有助于捕捉风速的细微变化, 提高风资源评估的准确性。此外, 为了验证遥感数据的准确性和可靠性, 还使用了 ERA5 (Olauson, 2018; Hersbach et al., 2020) 再分析数据作为参考, ERA5 由欧洲中期天气预报中心提供, 具有高空间、时间分辨率, 是当前气象再分析数据中应用广泛且权威的数据源之一。

2.2 数据预处理

收集到的 ASCAT、CCMP 和 WindSat 风场数据经过空间和时间上的对齐处理, 确保不同数据源的时空一致性。由于 CCMP 数据具有更高的时间分辨率和较好的数据质量, 本文以 CCMP 数据为主要分析对象。

风功率密度 (wind power density) 蕴含风速、风速分布和空气密度的影响, 是风能资源评估的一项重要指标。风功率密度是指与风向垂直的单位面积中风所具有的功率, 平均风功率密度 D_{WP} (单位: W/m^2) 的表达式为

$$D_{WP} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\rho v_i^3), \quad (1)$$

其中, n 为在设定时段内的记录数; ρ 为空气密度 (单位: kg/m^3), 这里取标准大气海平面空气密度为 $1.225 kg/m^3$; v_i 为第 i 个记录的风速 (单位: m/s)。平均风功率密度的计算应是设定时段内逐小时风功率密度的平均值, 不可用年 (或月) 平均风速计算年 (或月) 平均风功率密度。

为了评估不同风场数据源的年际差异, 本文计算各风场数据不同年份之间的标准差 (standard deviation), 计算公式如下:

$$SD_w = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (v_j - \bar{v})^2}, \quad (2)$$

其中, SD_w 为标准差, N 为观测样本量, v_j 为计算时段内每次风速观测值, \bar{v} 为计算时段内风速均值。

2.3 风速高度转换

遥感数据源 ASCAT、CCMP 和 WindSat 均提供 10 m 高度的风场数据。然而, 当前常用的海上

风电场的轮毂高度通常在 100 m 左右，与观测数据的高度存在显著差异。因此，为了准确评估风能资源，需要将 10 m 高度的风速数据转换至 100 m 高度。根据《风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范》(GB/T 37523-2019) (国家市场监督管理总局和中国国家标准化委员会, 2019)，采用风切变指数法将所有数据源 10 m 高度的风场数据统一推算至 100 m 高度。不同高度风速的变化可用如下公式进行计算：

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^\alpha, \quad (3)$$

其中， α 为风切变指数， z_1 为已知高度 (单位：m)， z_2 为变化后风速所在高度 (单位：m)， v_1 为高度 z_1 处的风速 (单位：m/s)， v_2 为高度 z_2 处的风速 (单位：m/s)。此处风切变指数 α 取 1/7 (0.1429) 作为近似值 (Akinsanola et al., 2021)。

3 结果与讨论

3.1 多源数据对比分析

图 1 展示了 ERA5、CCMP、ASCAT 和 WindSat 在 100 m 高度上的多年平均风速及其标准差分布。多套数据在整体分布上相似度较高，其中，ASCAT 与 WindSat 数据仅有海洋表面数据，未覆盖陆地。

从 ERA5 数据结果来看，研究区域内的气候态风速存在显著的空间差异，表明哥伦比亚陆地及其近海风资源分布高度不均匀。整体而言，哥伦比亚陆地上的风速较低，尤其是在安第斯山脉附近区域 (图 1 中黄色方框) 风速较小。而哥伦比亚北部海域则表现出较高的风速，特别是巴兰基亚 (Barranquilla) 北部海域 (图 1 中黑色方框) 和瓜希拉半岛 (La Guajira Peninsula) 北部海域 (图 1 中红色圆圈) 的气候态风速超过 10 m/s，成为风速

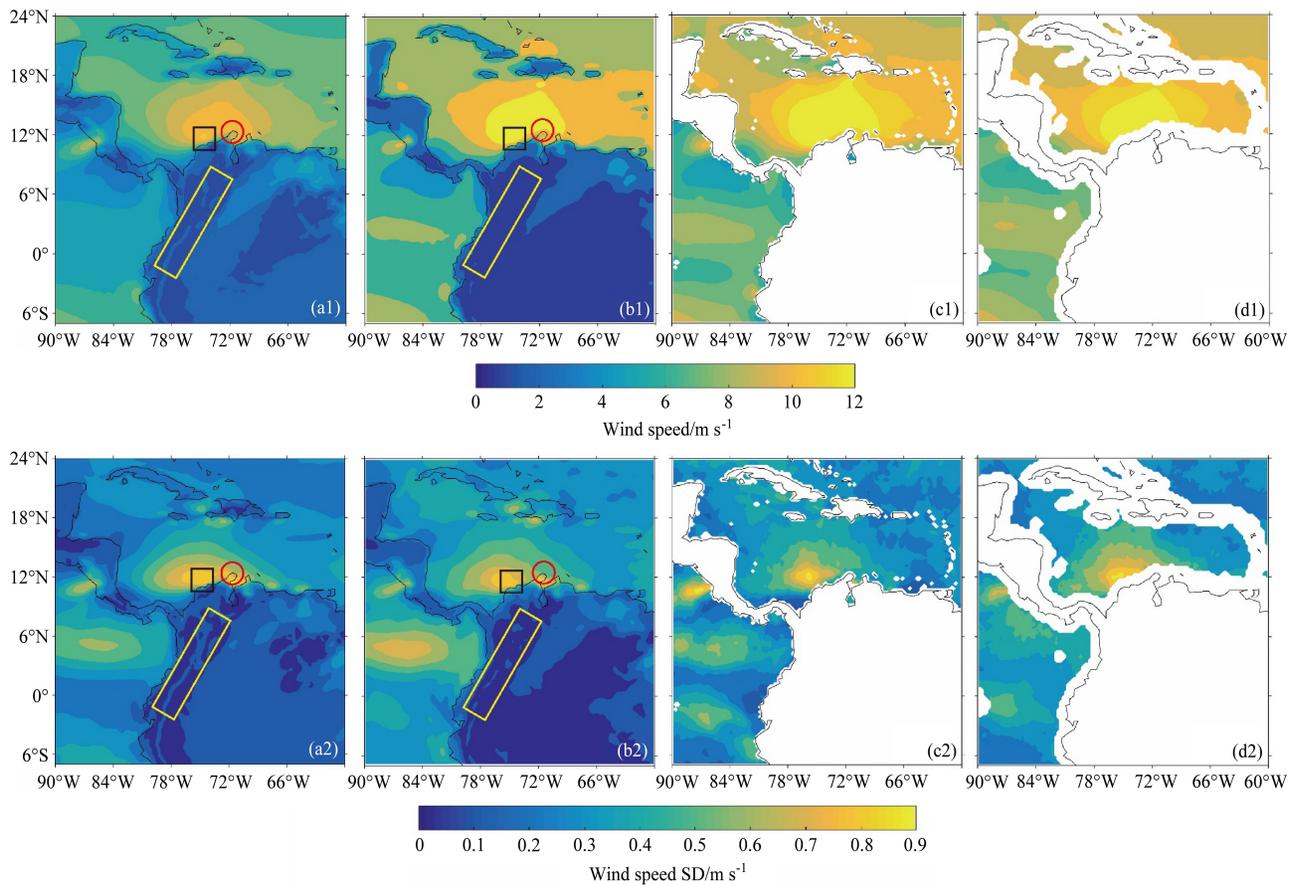


图 1 (a1、a2) ERA5、(b1、b2) CCMP、(c1、c2) ASCAT 和 (d1、d2) WindSat 数据 100 m 高度多年平均风速 (上排) 与标准差 (下排) 分布。黑色方框为巴兰基亚北部海域，红色圆圈为瓜希拉半岛北部海域，黄色方框为安第斯山脉附近区域。

Fig. 1 Multiple-year average wind speed at 100 m height (upper row) and the corresponding standard deviation (lower row) from (a1, a2) ERA5, (b1, b2) CCMP, (c1, c2) ASCAT, and (d1, d2) WindSat data. The black square represents the northern sea area of Barranquilla, the red circle represents the northern sea area of La Guajira Peninsula, and the yellow square represents the area near the Andes Mountains.

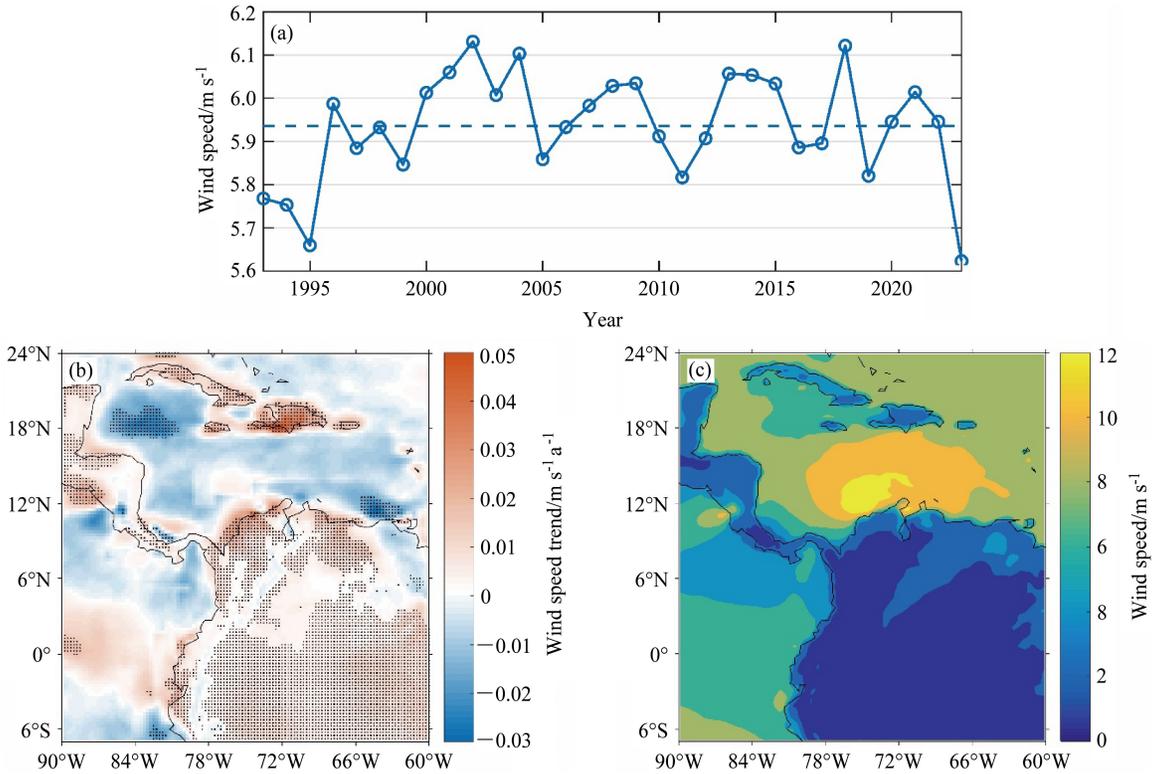


图2 CCMP数据100 m高度 (a) 1993~2023年平均风速年变化(虚线表示多年风速平均值)及其 (b) 变化趋势的空间分布(黑点表示风速的变化趋势显著, $p < 0.05$), (c) 2023年平均风速空间分布。

Fig. 2 (a) Annual variation of average wind speed during 1993–2023 (dashed line denotes the multi-year average wind speed) and (b) the spatial distribution of its trend (black dots indicate areas where wind speed change trends are statistically significant, $p < 0.05$), (c) the spatial distribution of 2023 average wind speed at the height of 100 m from CCMP data.

大值区。

从CCMP数据来看, 风速的空间分布与ERA5数据基本一致, 同样表现出陆上风速较小、海上风速较大的特征。具体而言, 陆地低风速区和近海高风速区的分布与ERA5数据高度吻合。然而, 在风速的整体量级上, 两者存在一定差异。例如, 在海上风速大值区, ERA5数据的风速约为10 m/s, 而CCMP数据则显示该区域风速超过12 m/s。在海面风速分布上, ASCAT与WindSat展示出与CCMP较为一致的特征, 即哥伦比亚北部海域风速较高; 但ASCAT与WindSat在风速的整体量级上相对于CCMP偏大。

在风速变化特征方面, CCMP和ERA5数据的风速变率空间分布基本一致。低风速变率区主要集中在陆地的大地形和山脉附近, 而高风速变率区则主要分布在巴兰基亚北部海域。值得注意的是, 风速变率的大值区与气候态风速大值区存在一定差异, 整体分布更偏向西部。这表明尽管巴兰基亚北部海域风速较大, 但不同年份间风速差异较大, 风

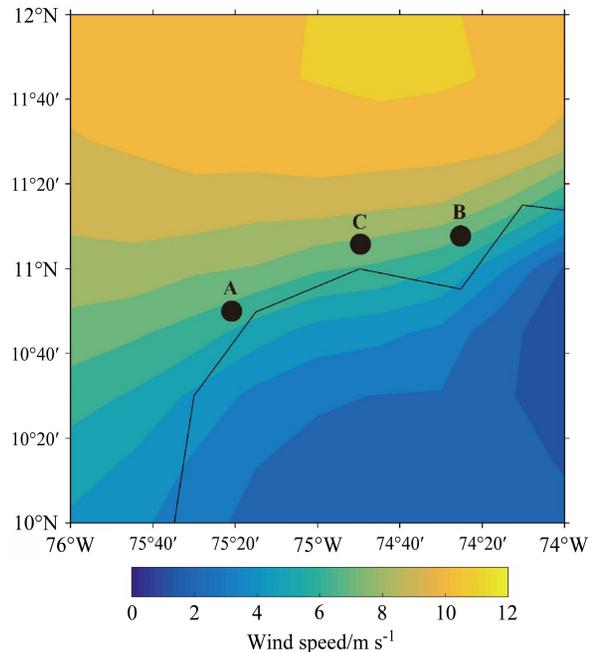


图3 重点关注区域位置示意 (CCMP数据集1993~2023年平均风速)。

Fig. 3 Illustration of the location of the key focus area (average wind speed during 1993–2023 from CCMP data).

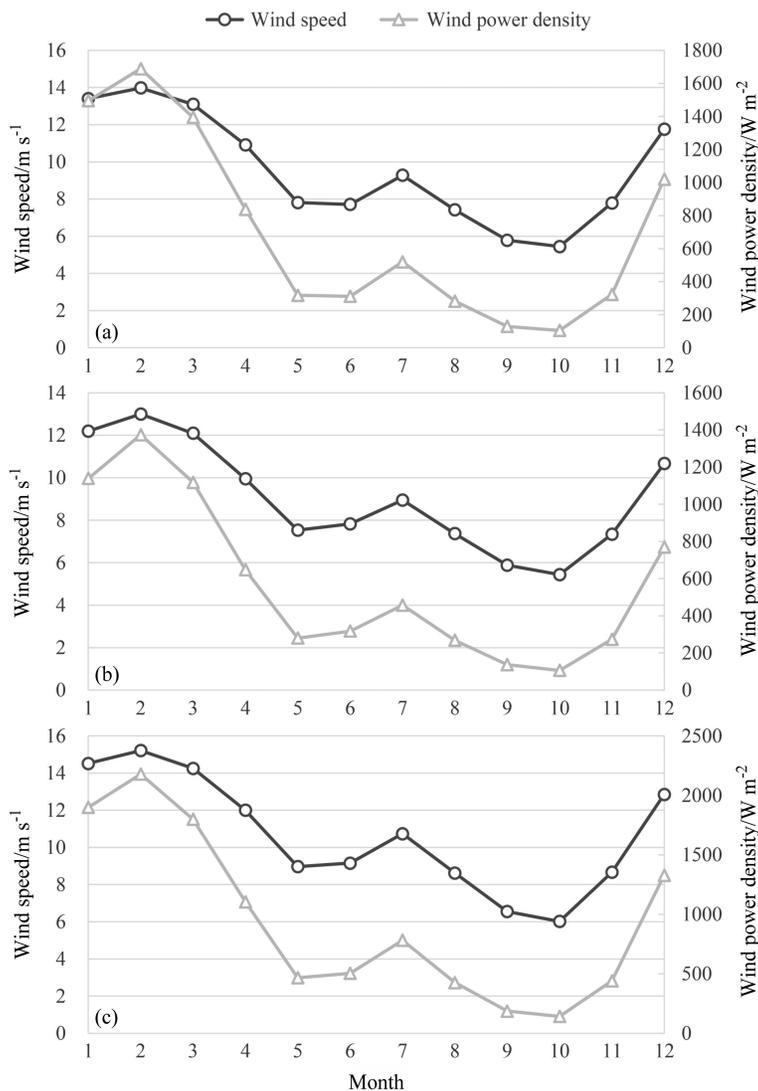


图4 重点区域 (a) A点、(b) B点、(c) C点 100 m 高度 1993~2023 年平均风速、风功率密度年变化。

Fig. 4 Average wind speed and wind power density at the height of 100 m during 1993–2023 from CCMP data for key points (a) A, (b) B, and (c) C.

资源的不稳定性较高。相比之下，偏东海域的气候态风速更大，且风速变化程度较巴兰基亚北部海域小，显示出较高的风资源稳定性。ASCAT与WindSat在海面上的风速变率空间分布与CCMP基本一致，在巴兰基亚北部海域存在明显的风速变率大值区。

从整体风资源评估的角度来看，瓜希拉半岛北部海域（图1中红色圆圈）不仅风速较大，而且风速的年际差异较巴兰基亚小，更适宜部署风电设备。这一区域的风能资源丰富且稳定，为风电开发提供了良好的条件。

需要特别指出的是，ERA5数据是基于模式融合得到的再分析数据，并非直接观测数据。由于海上观测数据的缺乏，ERA5数据在海上风速的准确

性相对较低。而CCMP数据结合了多种遥感平台、浮标观测以及模型计算结果，已有研究表明（肖晶晶等, 2017; 齐浩等, 2023），在海上风速观测方面，CCMP数据更接近实际浮标观测数据，因而其可信度高于ERA5数据。此外，相较于ASCAT与WindSat数据仅覆盖海洋表面，CCMP还覆盖了陆上区域，可提供更多信息。因此，后续的分析工作将主要基于CCMP数据展开，以确保风资源评估的准确性和可靠性。

3.2 平均风速时空分布特征

图2a展示了CCMP数据在研究区域内的平均风速年变化，可以发现近31年该区域平均风速无明显增大或减小的趋势。其中，2002年、2004年和2018年均为大风年，整个区域的年平均风速超

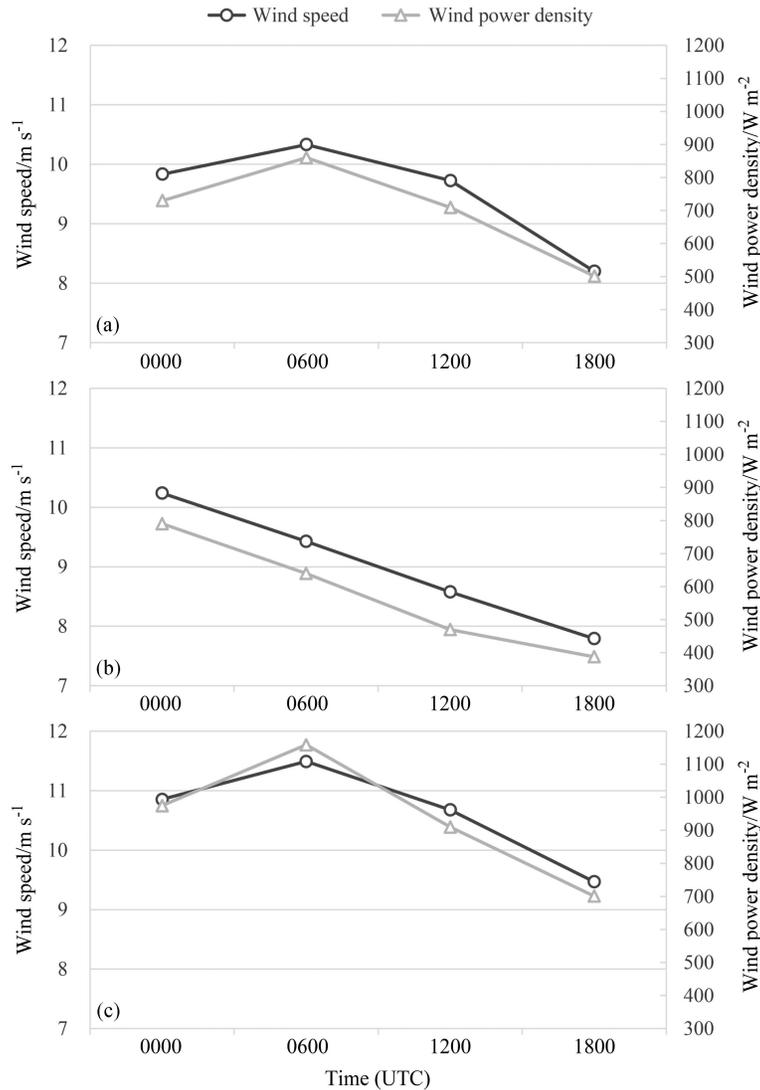


图5 同图4, 但为日变化。

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for diurnal variations.

过了 6.1 m/s; 1995 年和 2023 年为小风年, 整个区域的年平均风速均在 5.7 m/s 以下。

图 2b 展示了 1993~2023 年平均风速变化趋势, 可以明显看出陆地区域和巴兰基亚北部近海区域多呈风速增大的趋势, 部分地区增大趋势显著 ($p < 0.05$), 但风速增大的程度不高, 大部分在每年增加 0.01~0.03 m/s 之间。在哥伦比亚北部的加勒比远海海域和安第斯山脉附近区域则呈现风速降低的趋势, 大部分区域的趋势不显著。

上述分析可知 2023 年为近年来典型的小风年, 画出 2023 年平均风速的空间分布 (图 2c), 与多年平均风速的空间分布 (图 1b) 进行对比, 发现在陆地区域, 2023 年风速与多年平均风速的分布情况基本一致, 风速均较小, 在 0~4 m/s 之间; 而

在哥伦比亚北部的加勒比海域, 10 m/s 以上的高风速区域明显缩小, 尤其是瓜希拉半岛北部海域风速显著降低。但在巴兰基亚北部海域, 风速仍然处于较大的水平, 说明该区域为较为稳定的高风速区。加勒比海域在 2023 年为小风年的原因主要与 El Niño 现象有关。2023 年 5 月赤道中东太平洋进入 El Niño 状态, 峰值出现在 2023 年 12 月。El Niño 现象会导致热带太平洋地区的对流活动增强, 影响北半球急流的位置和强度, 使得加勒比海域上空的风切变增强, 进而破坏热带气旋的结构, 降低其形成和发展的概率 (Monerie et al., 2025)。此外, El Niño 现象会减弱东太平洋和加勒比海域的东北信风, 信风是热带地区重要的低层风系, 其减弱会导致海洋表面的风速降低 (Builes-Jaramillo et al.,

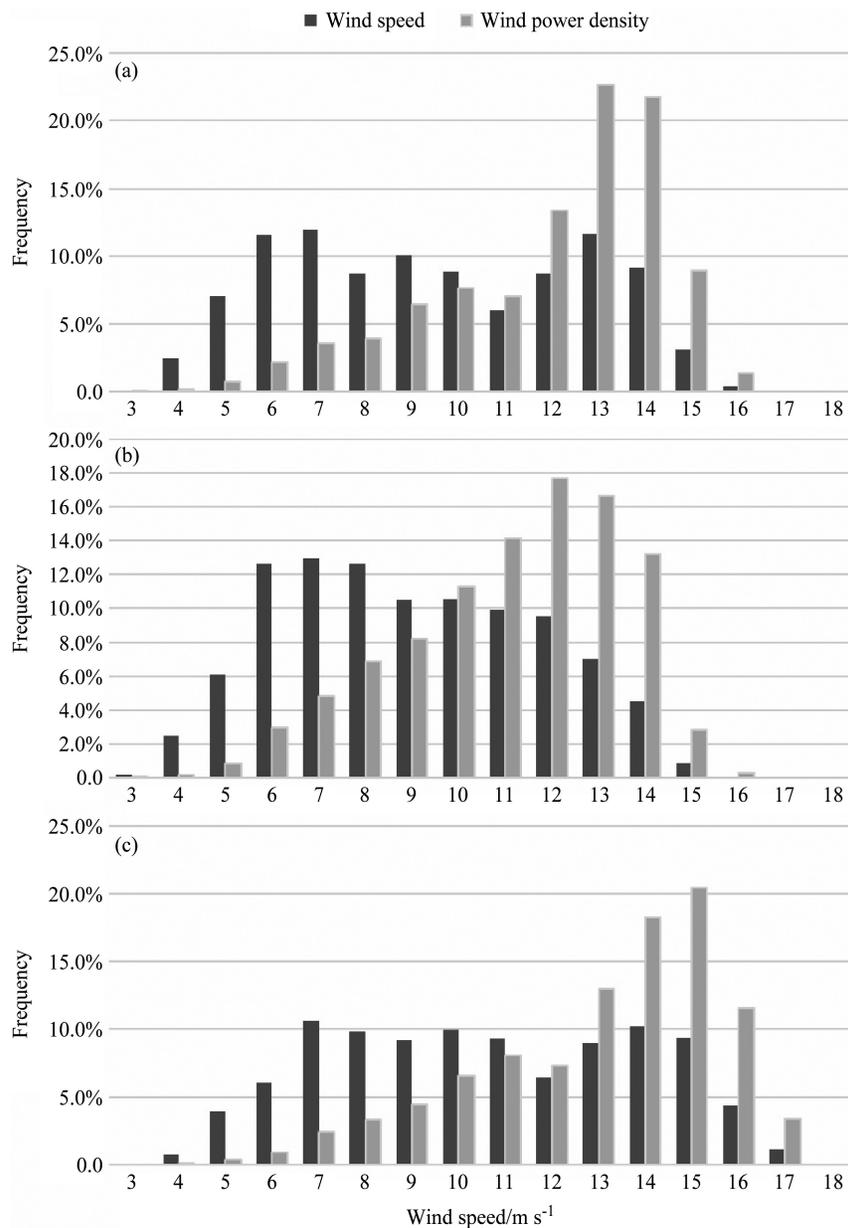


图6 重点区域 (a) A点、(b) B点、(c) C点 100 m 高度 1993~2023 年全年风速和风电功率密度频率分布直方图。

Fig. 6 Histograms of wind speed frequency distributions and wind power density frequency distributions at 100 m height all the year round at key points (a) A, (b) B, and (c) C during 1993–2023.

2023)。

3.3 重点区域风况分析

根据世界银行发布的“哥伦比亚海上风电技术潜力”地图，该国主要的海上风电开发潜力集中在加勒比沿岸海域，即巴兰基亚、谢纳加 (Ciénaga)、圣玛尔塔 (Santa Marta)、里奥阿查 (Riohacha) 及瓜希拉半岛的北部海域。考虑到开发成本，前期规划阶段适宜选择离岸近、风速高、地质条件平稳的区域进行开发。结合 3.2 章节内容，综合选取 3 个重点关注点位 A (Vientos Alisios,

Galeon y Bitacora)、B (Goleta y Bergantín) 和 C (AEG) 在点位尺度上进行重点区域风况分析。这三个重点关注点位均位于“哥伦比亚海上风电技术潜力”图中的开发潜力区域，其位置如图 3 中所示，分别位于喀他赫纳 (Cartagena)、谢纳加、巴兰基亚的北部海域 (10.8°N~11.2°N, 74.4°W~75.4°W)，离岸距离在 1~15 km 之间。主要采用 CCMP 数据集 1993~2023 年共 31 年的平均风场数据，分析 3 个重点关注区域中心点的全年平均风资源多尺度变化。

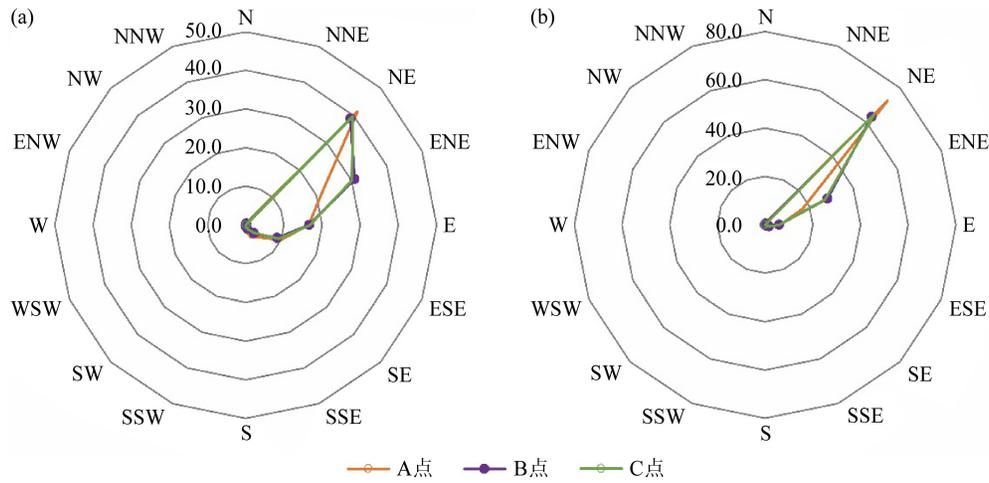


图7 重点区域 A 点、B 点、C 点 10 m 高度 1993~2023 年 (a) 风向频率、(b) 风能频率玫瑰图。

Fig. 7 Wind rose diagrams of (a) wind direction frequency and (b) wind energy frequency at 10 m height for the key points A, B, and C during 1993–2023.

3 个重点关注区域中心点 100 m 高度处平均风速和风功率密度年变化如图 4 所示。由图 4 可见，C 点的年平均风速和风功率密度最高，分别达到 10.63 m/s 和 938.61 W/m²，依据《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》(NBT 31147–2018) (<https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F256F5BB19E05397BE0A0AB44A>[2025-07-11]) 中的风功率密度等级划分标准，该点位处所建风电场的风功率密度等级可达到 6 级，被认为是并网风力发电效果很好的风电场。其次，A 点和 B 点处的风资源也相对较好，年平均风速分别为 9.53 m/s、9.02 m/s，对应的年平均风功率密度分别为 702.04 W/m²、573.88 W/m²，风功率密度等级分别达到了 5 级和 4 级，均适宜开发风力资源。

风速与风功率密度的变化具有明显的季节差异(图 4)。3 个重点关注区域中心点均在冬季(1~3 月)，即当地旱季，达到最大风速与最大风功率密度；在秋季(9~10 月)，即当地多雨季，风速与风功率密度均为全年最小值。哥伦比亚的气候种类多样，A 点、B 点和 C 点靠近哥伦比亚北部近海地区，均属于热带草原气候(tropical savanna climate)，全年温度和湿度保持在较高水平。但由于受热带辐合带和东北信风的多重影响，其降水和风速变化具有明显的季节性，表现为雨季(5~11 月)，东北信风减弱，热带辐合带向北移动并盘踞当地上空，造成降水增多，风速降低；在旱季(12 月至次年 4 月)，东北信风增强，热带辐合带向南移动，造成降水减少，风速增大(Schneider

et al., 2014)。

CCMP 数据的时间分辨率为 6 h，每日 4 个时段，分别在 00:00(协调世界时，下同)、06:00、12:00 和 18:00，因此日变化以 6 h 为间隔。3 个重点区域中心点 100 m 高度平均风速和风功率密度日变化如图 5 所示。A 点与 C 点日最大风速、最大风功率密度均出现在 06:00，而 B 点则出现在 00:00；3 个点位的日最小风速、最小风功率密度均出现在 18:00。这说明 3 个重点关注区域中心点在凌晨与上午风速最大，而在下午与晚上风速渐小。

3 个重点区域中心点在 1993~2023 年期间 100 m 高度全年风速和风功率密度频率分布直方图见图 6。结果显示，A 点、B 点和 C 点的风速及风功率密度频率在 3~17 m/s 之间出现的频率均占 100%。但相较于 B 点，A 点与 C 点更集中于偏大的风速段。例如，在大于 10 m/s 风速段，A 点和 C 点的风功率密度频率占比均超过 80%(分别为 82.87% 和 88.5%)，而 B 点仅为 76.1%。

3 个重点区域中心点 10 m 高度风向频率及风能频率玫瑰图见图 7。结果显示 A 点、B 点和 C 点的主风向均集中在东北(NE)方向与东北东(ENE)方向，分别占 63%、69.7% 和 69.7% 的比例。而 3 个区域的主风能方向则更为集中，仅东北(NE)方向就分别占 72.4%、63.2% 和 64.7% 的比例。这可能与该区域主要受东北信风的影响有关。主风向与主风能集中可优化风电场布局，增加捕获风能的效率，同时降低尾流效应的影响，进而提高整个风电场的发电效率(谢寻晗等, 2023)。

本研究存在一定的局限性。首先，风切变指数 α 取值为 1/7，缺乏实测数据支持，可能导致风速推算的误差。未来研究应结合更多高度的实测风速数据，优化风切变指数的取值。其次，尽管遥感数据具备广覆盖和高频次的优势，但受天气、地形等因素影响较大，数据质量仍需进一步提升。此外，由于数据的限制，目前哥伦比亚地区的观测站点较少，且由于地缘原因难以获取，因此本文主要基于目前可获取的再分析数据、卫星数据等多套数据进行综合分析。本文使用的多套数据得到一致性较高的结果，部分说明了论文结果的可靠性，但是，考虑到赤道附近、海洋区域同化观测较少，同时卫星数据存在一定误差，再分析和卫星数据可能存在一定的偏差，因此，未来需结合观测的站点数据、船测数据、海洋浮标数据和测风塔等数据对上述结果进一步比对分析，尤其是针对海上区域，得到更加可靠的结论。

4 结论

本研究基于多源遥感资料，从区域尺度（哥伦比亚及北部海域）和点位尺度（3 个重点关注点位）对哥伦比亚风能资源进行了系统评估，主要包括多源数据对比分析、风速时空分布特征分析和重点区域风资源分析。研究结果如下：

第一，通过对 ASCAT、CCMP 和 WindSat 三种遥感数据的比对分析，发现 CCMP 数据在风速和功率密度方面与 ERA5 再分析数据具有较高的一致性，尤其在海上风速观测方面表现优异。CCMP 数据展示了哥伦比亚陆地及其近海风资源分布的显著不均匀性，陆地风速普遍较低，尤其在安第斯山脉附近区域，而北部海域如巴兰基亚和瓜希拉半岛北部海域风速较高，达到或超过 10 m/s。相比之下，ERA5 数据在海上风速的大值区较低，低估了实际风速，这表明 CCMP 数据在海上风资源评估中更为可靠。

第二，基于平均风速的时间、空间分布特征分析，发现哥伦比亚陆地地区和加勒比海域在近 31 年的风速变化趋势不一致，但哥伦比亚北部近海区域仍呈现风速增大的趋势。2023 年为近年来典型的小风年，主要表现在加勒比海域和瓜希拉半岛北部海域的风速明显低于平均状态，但巴兰基亚北部海域的风速仍然处于较大的水平 (> 10 m/s)，说

明该区域为较为稳定的高风速区。2023 年为小风年的原因主要与 El Niño 现象导致的加勒比海域上空风切变增强、破坏热带气旋结构使其难以发展以及减弱东北信风强度有关。

第三，综合开发成本与资源水平选取 3 个重点关注点位（A、B、C）在点位尺度上进行风况分析，发现 100 m 高度处 C 点的年平均风速和功率密度最高（分别达到 10.63 m/s 和 938.61 W/m²），适合布置大单机容量的风力机组。重点区域的风速与功率密度变化具有明显的季节差异，在冬季（1~3 月）、即当地旱季达到最大，在秋季（9~10 月）、即当地多雨季为最小。此外，重点区域的风速呈现出明显的日周期性特征，在凌晨与上午风速最大，而在下午与晚上风速渐小。主风能方向集中在东北（NE）方向，为风电设备的更优安装方向提供了重要指导，有助于提高风能利用效率。综上分析，C 点因其较高的风速、功率密度和稳定的风向分布，被评估为最具开发潜力的区域，适合大规模风电场建设，单机容量宜选择 16 MW 以上；A 点和 B 点则适合建设中、小型风电项目，具有较好的经济效益和技术可行性。

本研究为哥伦比亚风能资源的合理开发和利用提供了科学依据，具有重要的理论和实际意义。未来的研究应在数据获取、模型优化和综合评估等方面进一步深化，以推动风能资源的高效利用和可持续发展。

参考文献 (References)

- Akinsanola A A, Ogunjobi K O, Abolude A T, et al. 2021. Projected changes in wind speed and wind energy potential over West Africa in CMIP6 models [J]. *Environmental Research Letters*, 16(4): 044033. doi:10.1088/1748-9326/abed7a
- Bastidas-Salamanca M, Rueda-Bayona J G. 2021. Effect of climate variability events over the Colombian Caribbean offshore wind resource [J]. *Water*, 13(22): 3150. doi:10.3390/w13223150
- Buchanan S, Misra V, Bhardwaj A. 2018. Integrated kinetic energy of Atlantic tropical cyclones in a global ocean surface wind analysis [J]. *Int. J. Climatol.*, 38(6): 2651–2661. doi:10.1002/joc.5450
- Builes-Jaramillo A, Valencia J, Salas H D. 2023. The influence of the El Niño–Southern Oscillation phase transitions over the northern South America hydroclimate [J]. *Atmospheric Research*, 290: 106786. doi:10.1016/j.atmosres.2023.106786
- 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 2019. GB/T 37523–2019 风电场气象观测资料审核、插补与订正技术规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 16pp. State Administration for Market

- Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2019. GB/T 37523-2019 Specification for data inspection and correction of wind power plant meteorological observation [S]. Beijing: Standards Press of China, 16pp.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 146(730): 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803
- Jiang Y, Luo Y, Zhao Z C, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956-2004 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 99(3-4): 421-430. doi:10.1007/s00704-009-0152-7
- Lin C G, Yang K, Qin J, et al. 2013. Observed coherent trends of surface and upper-air wind speed over China since 1960 [J]. *J. Climate*, 26(9): 2891-2903. doi:10.1175/JCLI-D-12-00093.1
- Meinshausen M, Lewis J, McGlade C, et al. 2022. Realization of Paris Agreement pledges may limit warming just below 2 °C [J]. *Nature*, 604(7905): 304-309. doi:10.1038/s41586-022-04553-z
- Mejia-Parada C, Mora-Ruiz V, Soto-Paz J, et al. 2024. Microclimate zoning based on double clustering method for humid climates with altitudinal gradient variations: A case study of Colombia [J]. *Atmosphere*, 15(6): 709. doi:10.3390/atmos15060709
- Miao H Z Y, Dong D H, Huang G, et al. 2020. Evaluation of Northern Hemisphere surface wind speed and wind power density in multiple reanalysis datasets [J]. *Energy*, 200: 117382. doi:10.1016/j.energy.2020.117382
- Monerie P A, Feng X B, Hodges K, et al. 2025. High prediction skill of decadal tropical cyclone variability in the North Atlantic and East Pacific in the Met Office Decadal Prediction System DePreSys4 [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 8(1): 32. doi:10.1038/s41612-025-00919-y
- Olauson J. 2018. ERA5: The new champion of wind power modelling? [J]. *Renewable Energy*, 126: 322-331. doi:10.1016/j.renene.2018.03.056
- 齐浩, 马庚雪, 张秀芝. 2023. 卫星遥感合成数据 CCMP 和两种再分析风速数据在中国近海的比较研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 45(5): 17-22. Qi Hao, Ma Gengxue, Zhang Xiuzhi. 2023. A comparative study on offshore CCMP and two reanalyzing wind speed data of China [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese)*, 45(5): 17-22. doi:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2023.05.003
- Schneider T, Bischoff T, Haug G H. 2014. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone [J]. *Nature*, 513(7516): 45-53. doi:10.1038/nature13636
- Tanaka K, Azar C, Boucher O, et al. 2022. Paris Agreement requires substantial, broad, and sustained policy efforts beyond COVID-19 public stimulus packages [J]. *Climatic Change*, 172(1): 1. doi:10.1007/s10584-022-03355-6
- Torralba V, Doblas-Reyes F J, Gonzalez-Reviriego N. 2017. Uncertainty in recent near-surface wind speed trends: A global reanalysis intercomparison [J]. *Environ. Res. Lett.*, 12(11): 114019. doi:10.1088/1748-9326/aa8a58
- 肖晶晶, 李正泉, 郭芬芬, 等. 2017. 基于 CCMP 卫星资料的中国海域风能资源分析 [J]. *海洋预报*, 34(1): 9-18. Xiao Jingjing, Li Zhengquan, Guo Fenfen, et al. 2017. Analysis of China sea wind energy based on CCMP satellite data [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 34(1): 9-18. doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2017.01.002
- 谢寻晗, 赵伟文, 万德成. 2023. 基于遗传算法的风电场布置优化研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 38(2): 303-311. Xie Xunhan, Zhao Weiwen, Wan Decheng. 2023. Wind farm layout optimization based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics (in Chinese)*, 38(2): 303-311. doi:10.16076/j.cnki.cjhd.2023.02.017
- Xu M, Chang C P, Fu C B, et al. 2006. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969-2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 111(D24): D24111. doi:10.1029/2006JD007337
- Zhang R H, Zhang S Y, Luo J L, et al. 2019. Analysis of near-surface wind speed change in China during 1958-2015 [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 137(3-4): 2785-2801. doi:10.1007/s00704-019-02769-0
- Zhang Z T, Wang K C, Chen D L, et al. 2019. Increase in surface friction dominates the observed surface wind speed decline during 1973-2014 in the Northern Hemisphere lands [J]. *J. Climate*, 32(21): 7421-7435. doi:10.1175/JCLI-D-18-0691.1
- Zheng C W, Zhuang H, Li X, et al. 2012. Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea and South China Sea [J]. *Sci. China Technol. Sci.*, 55(1): 163-173. doi:10.1007/s11431-011-4646-z