

ERA5 和 ERA5-Land 地面风速资料在中国陆地区域的适用性对比初步研究

杨劲¹ 张双益² 王海龙¹ 牛凤国¹ 李东辉³ 袁宗涛⁴

1 华能河池清洁能源有限责任公司, 广西省河池市 547110

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京市 100029

3 华能新能源股份有限公司, 北京市 100036

4 北京中电恒泰电力工程咨询有限公司, 北京市 100071

摘要 近年来, 再分析资料开始被应用于风能资源评估工作中。本文利用全国 40 个地面台站的观测资料对 ERA5 及 ERA5-Land 两种不同空间分辨率的再分析资料开展了地面风速误差评估研究, 结果表明: ERA5 和 ERA5-Land 资料多年平均风速偏差的平均值分别为 0.08 m s^{-1} 、 -0.06 m s^{-1} , 偏差的最大值分别为 0.46 m s^{-1} 、 -0.19 m s^{-1} , 相对偏差的平均值为 4.4%、-2.0%, 相对偏差的最大值分别为 33.0%、-10.1%; 月平均风速线性拟合方程的斜率分别为 0.93、0.97, 截距分别为 0.29 m s^{-1} 、 0.02 m s^{-1} , 相关系数分别为 0.98、0.99; 月平均风速均方根误差的平均值分别为 0.17 m s^{-1} 、 0.14 m s^{-1} , 均方根误差的最大值分别为 0.49 m s^{-1} 、 0.22 m s^{-1} , 相对均方根误差的平均值为 7.4%、5.7%, 相对均方根误差的最大值分别为 35.2%、13.3%。ERA5-Land 高分辨率资料地面风速误差相对较低, 有利于提高风能资源评估的准确性。

关键词 ERA5 ERA5-Land 再分析资料 风速 中国

文章编号 中图分类号 P425.4 文献标识码 A

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2023.22106

Preliminarily comparative Study on the Applicability of ERA5 and ERA5-Land Surface Wind Speed Data over China's Land Region

YANG Jin¹, ZHANG Shuangyi², WANG Hailong¹, NIU Fengguo¹, LI Donghui³, YUAN Zongtao⁴

1 Huaneng Hechi Clean Energy Co., Ltd., Hechi 547110

2 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Huaneng Renewables Co., Ltd., Beijing 100036

4 Beijing Zhongdian Hengtai Power Engineering Consulting Co., Ltd., Beijing 100071

Abstract In recent years, reanalysis data are more and more used in wind energy resource assessment. In this paper, the observation data from 40 ground stations in China are used to evaluate the ground wind speed error of ERA5 and ERA5-Land reanalysis data with different resolutions. The results show that the mean Bias Error (BE) of multi-year mean wind speed of ERA5 and ERA5-Land data is 0.08 m s^{-1} and -0.06 m s^{-1} respectively, the maximum BE is 0.46 m s^{-1} and -0.19 m s^{-1} respectively, the Relative Bias Error (RBE) is 4.4% and -2.0%, and the maximum RBE is 33.0% and -10.1% respectively; The slope of the linear fitting equation of monthly mean wind speed is 0.93 and 0.97 respectively, the intercept is 0.29 m s^{-1} and 0.02 m s^{-1} respectively, and the

收稿日期 2022-9-6; 定稿日期 2023-4-1

作者简介 杨劲, 男, 1976 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事风能、太阳能资源评估技术研究。E-mail: DHYJ6699@163.com

通信作者 张双益, 男, 1984 年出生, 博士, 正高级工程师, 主要从事边界层气象、气候变化研究。E-mail: zhangshuangyi@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国华能集团公司总部科技项目 HNKJ18-H33

Funded by The Headquarter Scientific Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (Grant HNKJ18-H33)

correlation coefficient is 0.98 and 0.99 respectively; The mean Root Mean Square Error (RMSE) of monthly mean wind speed is 0.17 m s^{-1} and 0.14 m s^{-1} respectively, the maximum RMSE is 0.49 m s^{-1} and 0.22 m s^{-1} respectively, the Relative Root Mean Square Error (RRMSE) is 7.4% and 5.7%, and the maximum RRMSE is 35.2% and 13.3% respectively. The error of ground wind speed of ERA5-Land high-resolution data is relatively low, which is conducive to improving the accuracy of wind energy resource assessment.

Keywords ERA5, ERA5-Land, reanalysis data, wind speed, China

1 引言

2020年9月,国家主席习近平在第75届联合国大会上提出了2030年前实现碳排放达峰、努力争取2060年前实现“碳中和”的愿景。电力行业是我国碳排放的大户,在总量中的占比接近40%。大规模开发利用风能、太阳能等清洁能源,是实现电力行业脱碳的重要路径。

我国的风能资源储量极其丰富,陆地区域80m高度上的技术开发总量约为32亿千瓦(朱蓉等,2021)。近年来,我国的风能产业发展迅速,截止2021年底,并网风电的规模达到3.28亿千瓦。风能行业的快速发展为节能减排、改善环境和应对气候变化做出了重要贡献(丁一汇等,2020)。

风能属于气候资源的一种,风能资源的状况是影响风电场选址、规划和风能开发利用的重要因素(陈欣等,2011)。由于地面风速自身的波动性和变化性,导致风力发电的出力具有间歇性、随机性和不可控性等特点,大规模风电并网对电力系统的安全稳定运行提出了严峻挑战(靳晶新等,2017)。除了风速、风向等基本要素之外,湍流、风切变、阵风等现象,降雨、凝冻、雷暴等各类天气也会对风力发电机组的实际出力产生重要影响(Emeis,2014;张双益和胡非,2017a),这些复杂因素也对风能资源评估工作提出了现实和严峻的挑战。

风能资源评估指的是根据历史的观测数据和长期气候统计,来评估某一区域可开发利用风能的潜力。传统的技术手段主要是依靠地面气象站的长期观测资料,结合设立测风塔的短期观测资料来开展风能资源测量与评估(张双益和胡非,2017b),其缺点是费时费力、成本较高,并且不适用于全球性或区域性的大范围评估。近年来,国内外发展出了利用再分析资料、数值模拟等先进技术手段(李泽椿等,2007;Al-Yahyai et al.,2010;Rose and Apt,

2015)开展风能资源评估的方法,具有覆盖面积大、空间范围广等优点,可有效弥补地面台站和测风塔单点观测的不足。目前美国NCEP/NCAR、MERRA、CFSR,欧洲ERA、日本JRA等(冯双磊等,2009;张双益等,2014;张双益等,2017;Torralba et al.,2017)再分析资料已被成功应用于风能资源评估当中。全球各大机构也陆续开展了风能资源数值模拟研究,包括美国Ture Wind公司风能资源评估系统MesoMap、加拿大气象局风能资源数值模拟系统WEST等,中国气象局在WEST系统的基础上开发出了我国风能资源模拟评估系统WERAS,制作出了我国1km分辨率的风能资源图谱(朱蓉等,2010),丹麦科技大学利用中尺度数值模式WRF和Wasp软件结合,制作出了250m分辨率的风能资源图谱(Tammelín et al.,2020)等。

但是值得注意的是,无论是再分析数据还是数值模拟制作的风能资源数据集,均需要大量实际测风数据对其进行误差评估和校验(Zhang and Wang,2020),然后才能应用到风能资源评估工作当中。已有研究表明,在亚洲区域,美国MERRA-2、CFSR和欧洲ERA-Interim再分析资料的地面风速值均显著高于观测值,而日本的JRA-55再分析资料则在除了中国中西部地区外的表现要优于其他再分析资料(Miao et al.,2020;苗昊泽予,2020)。刘汉武等(2016)指出,再分析数据难以模拟出中国和区域风速呈显著减小的变化趋势、大小风年景以及季节变化特征等。

ERA5是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Fore-casts,ECMWF)发布的第五代再分析资料(Hoffmann et al.,2019),国内外相关研究表明,ERA5地面风场资料具有较高的质量和可靠性(Rivas and Stoffelen,2019;Ramon et al.,2019;Ulazia et al.,2019),在风

能资源评估的应用效果优于 MERRA2 等其他再分析资料(Olauson, 2018)。刘鸿波等(2021)利用中国地区地面台站的资料对 ERA5 资料进行了评估,发现 ERA5 资料在空间分布、气候特征方面与台站观测具有较高的一致性,但风速大小相对于台站的观测偏高。ERA5-Land 是在 ERA5 资料的基础上对陆地区域进行重新模拟而得到的再分析数据集,并且具有更高的空间分辨率。目前公开文献尚未见 ERA5-Land 地面风速资料在中国区域的误差评估及适用性等相关研究。

本文首次开展 ERA5 和 ERA5-Land 地面风速资料在中国陆地区域的适用性对比初步研究,利用全国 40 个地面台站的观测资料对上述两种不同分辨率的再分析资料开展了地面风速误差评估研究。成果对于科学利用高分辨率资料、减小地面风速的误差、提高风能资源评估结果的准确性等具有重要意义和实用价值,有助于促进我国风能开发利用工作,加快电力行业脱碳和清洁转型。

2 资料及方法

2.1 ERA5 资料简介

ERA5 提供了全球尺度上的大气、陆地和海洋大量数据,将大量历史观测数据如气象台站、高空探测、雷达和卫星数据等,融合到先进的数据同化和模式系统中,用以估计更为准确的大气状况。ERA5 的空间分辨率为 0.25° 经纬度(约 25 km),时间分辨率为 1 h,时间范围是 1979 年至今。ERA5-Land 是在 ERA5 的基础上对陆地区域进行重新模拟而成的再分析数据集,将模型数据与世界各地的观测数据进行结合,利用物理定律得到全球范围内完整和一致的数据集,提供了一套高质量的再分析数据集。ERA5-Land 相较于 ERA5 具有更高的空间分辨率,为经纬度 0.1° (约 9 km),时间分辨率为 1 h,时间范围是 1981 年至今。

本文选取 ERA5 和 ERA5-Land 资料地面 10m 高度逐月风速,时间长度为 2011~2020 年共 10 年。图 1 给出了 ERA5 资料 2011~2020 年平均风速分布图,可以看到全球各区域多年平均风速主要集中在 $0\sim 12\text{ m s}^{-1}$ 范围,且总体上海面风速较大,而陆面风速较小。ERA5-Land 资料风速分布情况与图 1 类似,但没有海面区域数据,仅有陆面区域数据。

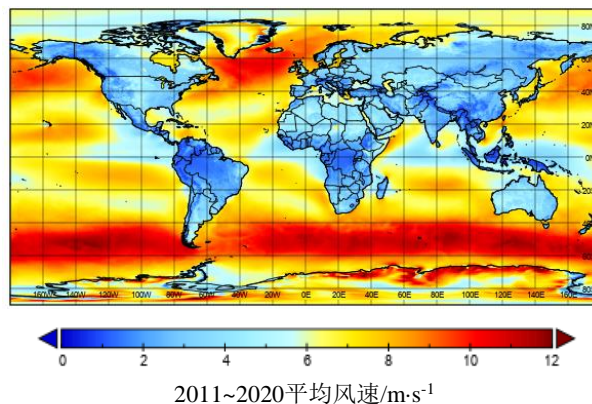


图 1 ERA5 资料 2011~2020 年平均风速分布图

Fig.1 Distribution map of ERA5 data's mean annual mean wind speeds for 2011~2020

2.2 台站资料简介

评估 ERA5 和 ERA5-Land 资料地面风速误差,本文收集了全国 40 个台站的地面风速观测资料,观测对应高度为 10m,资料来源为中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn/>)。所采用资料的时间段为 2011~2020 年,时间分辨率为逐月。所选资料均经过气象部门的质量控制,所选台站均符合 WMO 全球观测系统规范和中国气象局观测技术规范,所选时间段内无缺测,且台站周边人为建筑影响较小。图 2 给出了台站的地理位置分布,表 1 为台站基本信息表,可见,台站基本覆盖了全国陆地各个代表性区域,本文将 ERA5 和 ERA5-Land 再分析资料插值到台站的坐标位置上,便于进行对比,插值方法采用双线性插值法。

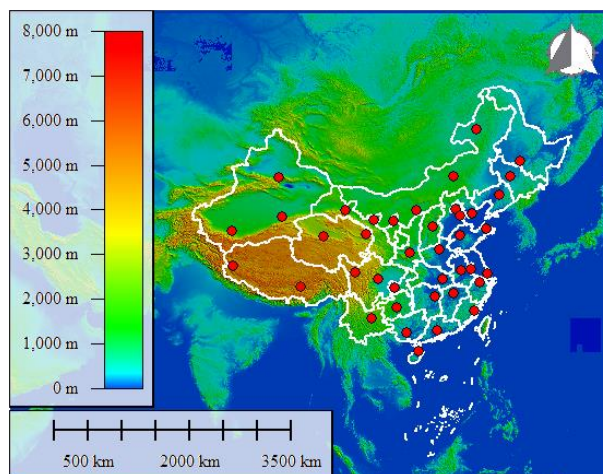


图 2 台站地理位置分布图

Fig.2 Geographical distribution map of observation stations

表 1 台站基本信息表

Fig.1 Key information of observation stations

序号	名称	纬度/°	经度/°	海拔/m
1	海拉尔	49.22	119.75	612.5
2	哈尔滨	45.75	126.77	143.1
3	乌鲁木齐	43.78	87.62	918.7
4	若羌	39.03	88.17	889.3
5	和田	37.13	79.93	1374.7
6	酒泉	39.77	98.48	1478.2
7	民勤	38.63	103.08	1368.5
8	格尔木	36.42	94.90	2809.2
9	西宁	36.72	101.75	2295.2
10	东胜	39.83	109.98	1459.1
11	银川	38.48	106.22	1112.7
12	太原	37.78	112.55	779.5
13	锡林浩特	43.95	116.07	990.8
14	长春	43.91	125.22	238.5
15	沈阳	41.73	123.45	45.2
16	北京	39.93	116.28	54.7
17	天津	39.08	117.07	3.8
18	乐亭	39.42	118.91	12.1
19	福山	37.49	121.25	33.9
20	济南	36.68	116.98	57.8
21	狮泉河	32.51	80.08	4279.3
22	拉萨	29.67	91.13	3650.1
23	甘孜	31.62	100.01	3394.2
24	温江	30.75	103.87	540.6
25	昆明	25.02	102.68	1896.8
26	泾河	34.43	108.97	410.1
27	郑州	34.72	113.65	111.3
28	武汉	30.62	114.13	27.1
29	重庆	29.51	106.48	351
30	长沙	28.22	112.92	65.5
31	贵阳	26.58	106.72	1074.3
32	南京	32.01	118.81	12.5
33	合肥	31.87	117.23	36.5
34	宝山	31.41	121.48	8.2
35	杭州	30.23	120.17	43.2
36	南昌	28.61	115.92	45.7
37	福州	26.08	119.28	85.4
38	广州	23.17	113.33	4.2
39	南宁	22.82	108.35	73.7
40	海口	20.03	110.35	18.1

2.3 方法介绍

利用收集到的台站观测资料对 ERA5 和 ERA5-Land 资料地面风速开展误差评估, 所采用的指标如下:

(1) 偏差 (Bias Error, BE) 和相对偏差 (Relative Bias Error, RBE), 具体公式如下:

$$BE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V'_i - V_i) \quad (1)$$

$$RBE = \frac{BE}{\bar{V}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: V_i , V'_i ——分别为第 i 个记录的台站资料和 ERA5 (ERA5-Land) 资料地面风速; N ——统计周期内的记录总数; \bar{V} ——统计周期内的台站资料地面风速平均值。

(2) 采用线性拟合方法, 计算出拟合方程的相关参数, 以及相关系数 R , 具体公式如下:

$$V' = aV + b \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})(V'_i - \bar{V}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \sum_{i=1}^N (V'_i - \bar{V}')^2}} \quad (4)$$

式中: V , V' ——分别为台站资料和 ERA5 (ERA5-Land) 资料地面风速; a , b ——分别为线性拟合方程参数的斜率和截距, 采用最小二乘法计算 a 和 b ; \bar{V}' ——统计周期内的 ERA5 (ERA5-Land) 资料地面风速平均值。

(3) 均方根误差 (Rooted Mean Square Error, $RMSE$) 和相对均方根误差 (Relative Rooted Mean Square Error, $RRMSE$), 具体公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V'_i - V_i)^2} \quad (5)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{V}} \times 100\% \quad (6)$$

若台站资料和 ERA5 (ERA5-Land) 资料地面风速之间的偏差 BE 和相对偏差 RBE 越小; 线性拟合方程斜率 a 越接近 1, 截距 b 越接近 0, 相关系数 R 越接近 1; 均方根误差 $RMSE$ 和相对均方根误差 $RRMSE$ 越小, 则表示 ERA5 (ERA5-Land) 资料的可靠性越高, 风能资源评估结果的准确性也

越高。反之，亦然。

3 多年平均风速的评估

图 3 给出了全国 40 个地面台站与 ERA5 和 ERA5-Land 资料 2011~2020 年多年平均风速对比图。利用公式 (1) 计算出 ERA5 和 ERA5-Land 与 40 个台站资料多年平均风速偏差 BE 的平均值分别为 0.08 m s^{-1} 、 -0.06 m s^{-1} ，最大值分别为 0.46 m s^{-1} (台站 3, 乌鲁木齐)、 -0.19 m s^{-1} (台站 17, 天

津)。然后利用公式(2)计算出 ERA5 和 ERA5-Land 与台站资料多年平均风速相对偏差 RBE 的平均值为 4.4%、-2.0%，最大值分别为 33.0% (台站 9, 西宁)、-10.1% (台站 9, 西宁)。总体上，ERA5 地面风速资料相对于台站观测偏高，而 ERA5-Land 地面风速资料则相对偏低；且 ERA5-Land 与台站多年平均风速的偏差平均值和最大值相对于 ERA5 与台站的偏差均有明显的降低。

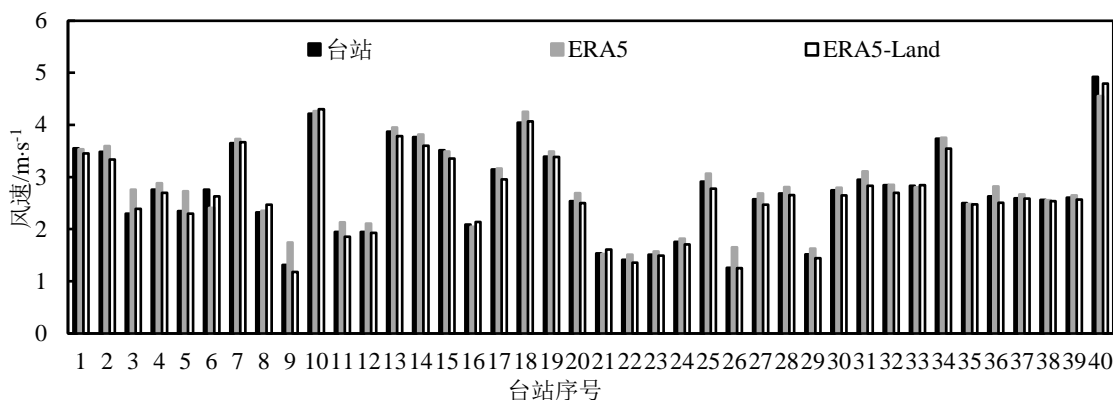


图 3 全国 40 个地面台站与 ERA5 和 ERA5-Land 资料 2011~2020 年多年平均风速对比图

Fig.3 Comparisons of 2011~2020 multiyear mean wind speeds from 40 observation stations around China, ERA5 and ERA5-Land

4 年平均风速的评估

将 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与全国 40 个地面台站资料 2011~2020 年的各年平均风速进行对比，如图 4 所示。利用公式 (3) 计算出 ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料年平均风速的线性拟合方程斜率 a 分别为 0.92、0.98，截距 b 分别为

0.30 m s^{-1} 、 0.01 m s^{-1} 。利用公式 (4) 计算出 ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料线性拟合相关系数 R 分别为 0.98、0.99。表明 ERA5-Land 与台站资料年平均风速之间的线性程度要高于 ERA5 资料，即 ERA5-Land 与台站资料的一致性优于 ERA5 资料。

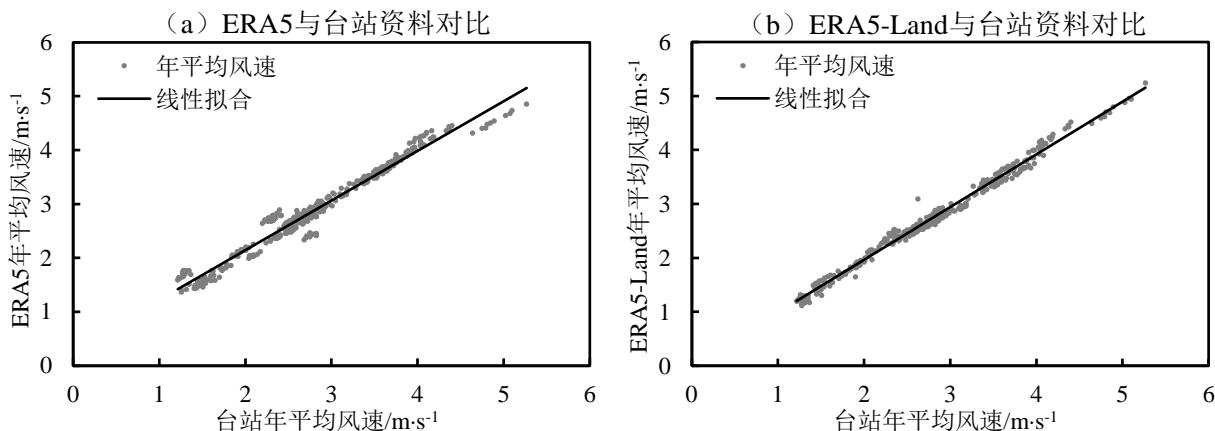


图 4 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与台站资料 2011~2020 年的各年平均风速散点和线性拟合图

Fig.4 Scatter plot and linear fit of 2011~2020 yearly mean wind speeds from ERA5 and ERA5-Land versus observation stations

图 5 为 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与台站资料的年平均风速均方根误差 $RMSE$ 和相对均方

根误差 $RMSE$ 对比图。可以看到一部分台站 ERA5-Land 均方根误差小于 ERA5，一部分台站则相反。利用公式 (5) 计算出 ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料年平均风速均方根误差的平均值分别为 0.13 m s^{-1} 、 0.09 m s^{-1} ，最大值为 0.46 m s^{-1} （台站 3，乌鲁木齐）、 0.20 m s^{-1} （台站 35，杭州）。

利用公式 (6) 计算出 ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料年平均风速相对均方根误差的平均值分别为 5.9%、3.7%，最大值为 33.2%（台站 9，西宁）、10.3%（台站 9，西宁）。总体上，ERA5-Land 与台站资料年平均风速均方根误差的平均值和最大值相对于 ERA5 资料具有明显的降低。

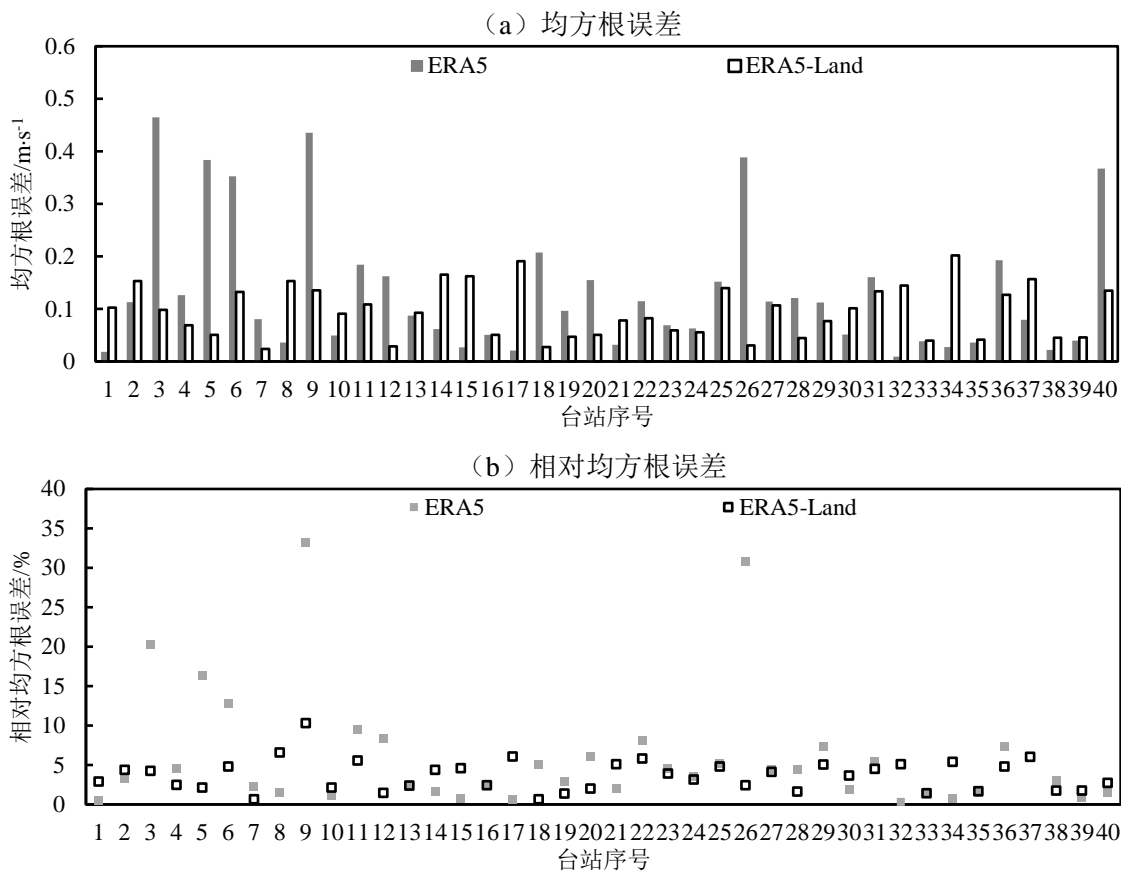


图 5 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与台站资料的年平均风速均方根误差和相对均方根误差对比图

Fig.5 $RMSE$ and $RRMSE$ of yearly mean wind speeds from ERA5 and ERA5-Land versus observation stations

5 月平均风速的评估

将 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与全国 40 个地面台站资料 2011~2020 年的各月平均风速进行对比,如图 6 所示。同样计算出 ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料月平均风速的线性拟合方程斜率

a 分别为 0.93、0.97, 截距 b 分别为 0.29 m s^{-1} 、 0.02 m s^{-1} 。计算出 ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料线性拟合相关系数 R 分别为 0.98、0.99。总体上, ERA5-Land 与台站资料月平均风速之间的一致性相对于 ERA5 资料具有明显的提高。

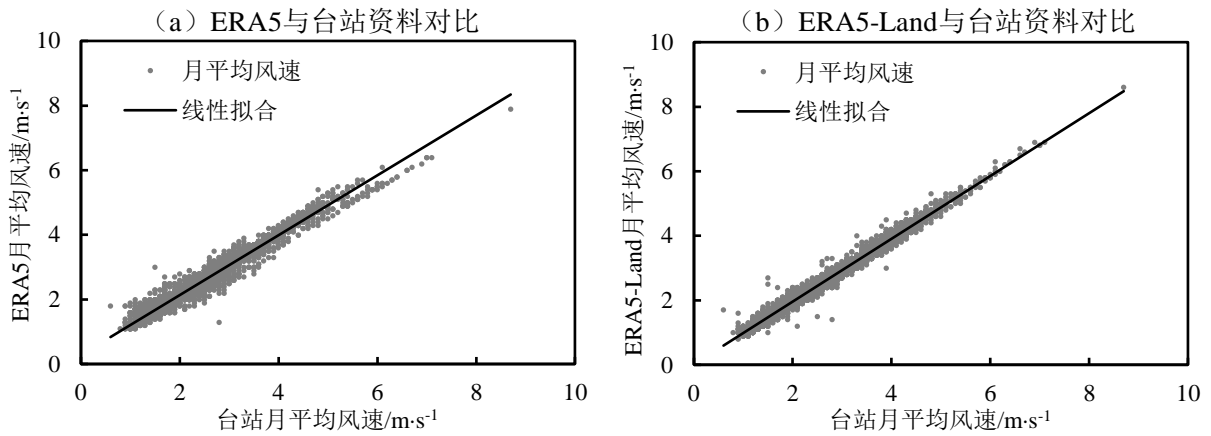
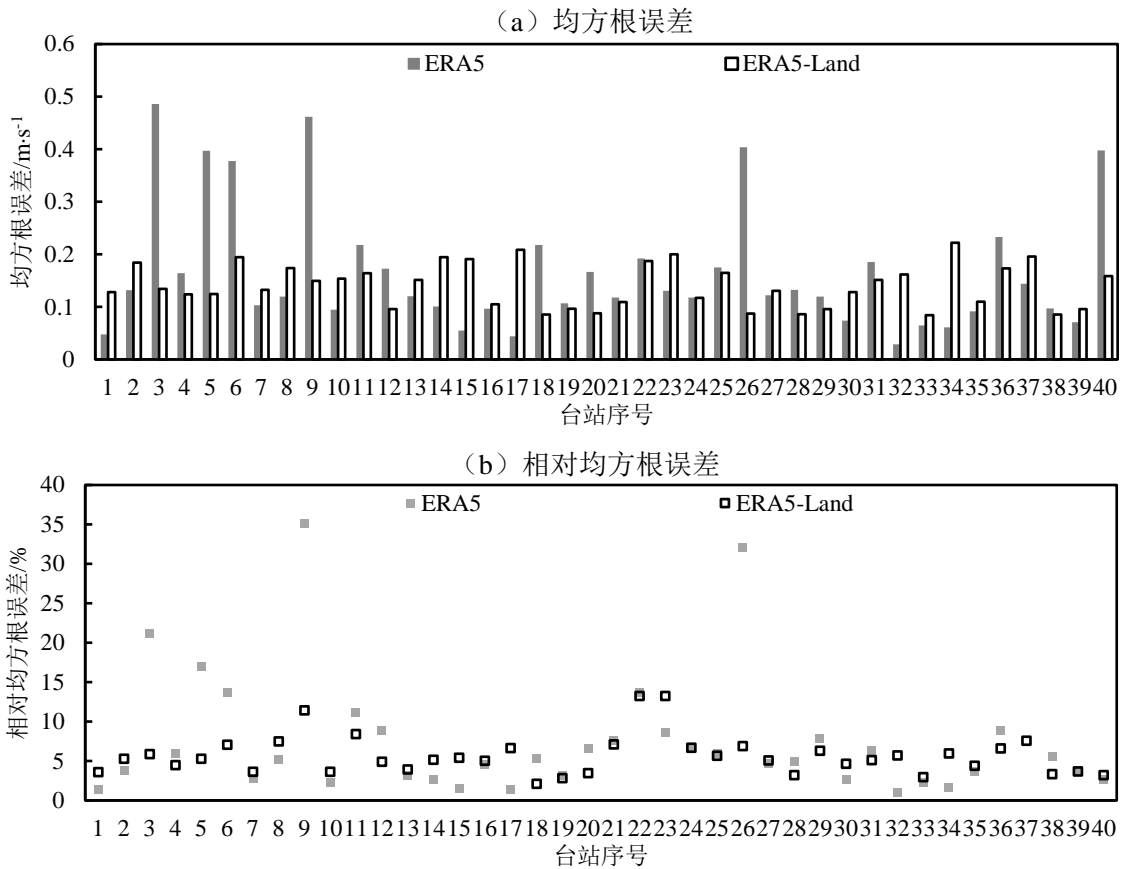


图 6 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与台站资料 2011~2020 年的各月平均风速散点和线性拟合图

Fig.6 Scatter plot and linear fit of 2011~2020 monthly mean wind speeds from ERA5 and ERA5-Land versus observation stations

图 7 为 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与台站资料的月平均风速均方根误差 $RMSE$ 和相对均方根误差 $RRMSE$ 对比图。与图 5 类似，ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料月平均风速均方根误差的平均值分别为 0.17 m s^{-1} 、 0.14 m s^{-1} ，最大值为 0.49 m s^{-1} （台站 3，乌鲁木齐）、 0.22 m s^{-1} （台

站 34，宝山）。ERA5 和 ERA5-Land 资料与台站资料年平均风速相对均方根误差的平均值分别为 7.4%、5.7%，最大值为 35.2%（台站 9，西宁）、13.3%（台站 23，甘孜）。总体上，ERA5-Land 与台站资料月平均风速的均方根误差平均值和最大值相对于 ERA5 资料均有明显的降低。



(a) 均方根误差

(b) 相对均方根误差

图 7 ERA5 和 ERA5-Land 资料分别与台站资料的月平均风速均方根误差和相对均方根误差对比图

Fig.7 RMSE and RRMSE of monthly mean wind speeds from ERA5 and ERA5-Land versus observation stations

6 讨论分析

由上述结果,总体上 ERA5 与台站资料地面风速误差较大,而 ERA5-Land 资料的误差相对较低。进一步对其原因进行讨论分析,以台站 9 西宁为例,ERA5 与西宁站月平均风速的均方根误差达到 0.46 m s^{-1} ,相对均方根误差达到 35.2%,为全国 40 个站点中地面风速误差最大的站点之一。图 8 给出了西宁站的周边地形海拔高度分布图与风向频率玫瑰图。如图 8(a)所示,西宁站周边地形十分特殊,四周山脉丘陵起伏,平均海拔约 2260 m,群山环绕,形成十字谷地形,东、西、南、北分布 4 条河谷川地,西宁市中心位于湟水河与南北川支流的汇合处。西宁站周边的地面风场状况由于地形而产生较大的影响,风能资源的时空分布具有较高

的不均匀性。根据青海地区气象站记录,当地主导风向为西北风,次主风向为东南风。由于受地形影响,西宁站西北方向环绕山脉严重阻挡了西北方向气流,而东南部河谷则对气流的影响较小,导致图 8(b)西宁站风向玫瑰图中表现出主风向与河谷走向一致,主要集中在 SE(东南)、ESE(东东南)方向。由于 ERA5 资料的空间分辨率为 0.25° (约 25 km)相对较高,而 ERA5-Land 资料的分辨率为 0.1° (约 9 km)则相对较高,更加有利于适应西宁站周边复杂地形条件下风能资源的时空分布高度不均匀特性,从而表现出地面风速误差相对较低。地面风速误差较大的其他台站情况与西宁站类似,周边多处于复杂地形条件,高分辨率资料具有更好的适应性,有利于提高风能资源评估的准确性。

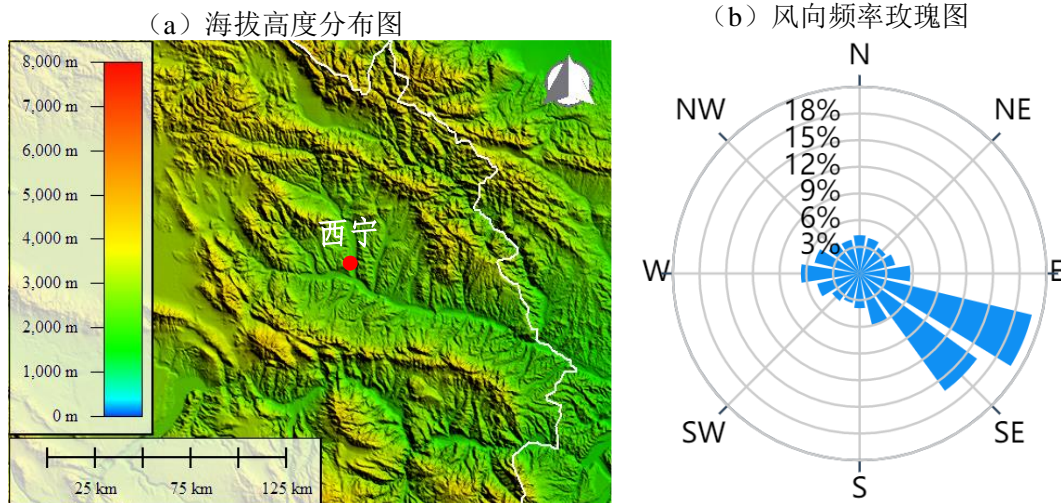


图 8 西宁站周边地形海拔高度分布图与风向频率玫瑰图

Fig.8 Topography altitude distributions and wind direction frequency rose around Xining station

7 结论

利用全国 40 个地面台站的观测资料对 ERA5 及 ERA5-Land 两种不同分辨率的再分析资料开展了地面风速误差评估研究,结果发现:

(1) ERA5 和 ERA5-Land 资料多年平均风速偏差的平均值分别为 0.08 m s^{-1} 、 -0.06 m s^{-1} ,最大值分别为 0.46 m s^{-1} 、 -0.19 m s^{-1} ,相对偏差的平均值为 4.4%、-2.0%,最大值分别为 33.0%、-10.1%;

(2) ERA5 和 ERA5-Land 资料月平均风速线

性拟合方程斜率分别为 0.93、0.97,截距分别为 0.29 m s^{-1} 、 0.02 m s^{-1} ,相关系数分别为 0.98、0.99;

(3) ERA5 和 ERA5-Land 资料月平均风速均方根误差的平均值分别为 0.17 m s^{-1} 、 0.14 m s^{-1} ,最大值分别为 0.49 m s^{-1} 、 0.22 m s^{-1} ,相对均方根误差的平均值为 7.4%、5.7%,最大值分别为 35.2%、13.3%。

可见,ERA5-Land 高分辨率资料地面风速误差相对较低,有利于提高风能资源评估的准确性。最后需要指出的是,目前基本均为国外高分辨

率再分析资料在我国的风能资源评估中进行应用。由于中国区域的地形复杂且近地层风速空间差异显著,再分析资料受预报系统和模式系统性偏差等限制,易导致地面风速的气候分布和演变趋势出现较大的偏差。未来建议开展台站、探空、卫星、雷达和再分析资料的多源融合先进技术和方法研究,自主研发我国的高分辨率地表风速数据集,进一步提高风能资源评估结果的准确性,服务于我国的风能开发利用工作和电力行业的脱碳清洁转型,加快实现 30-60 “双碳”目标。

参考文献 (References)

- Al-Yahyai S, Charabi Y, Gastli A. 2010. Review of the use of Numerical Weather Prediction (NWP) Models for wind energy assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9): 3192–3198.
- 陈欣, 宋丽莉, 黄浩辉, 等. 2011. 中国典型地区风能资源特性研究[J]. *太阳能学报*, 32(3): 331–337. Chen Xin, Song Lili, Huang Haohui, et al. 2011. Study on characteristics of wind energy resources in two typical areas in China[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica (in Chinese)*, 32(3): 331–337.
- 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 2020. 气候变暖背景下中国地面风速变化研究进展[J]. *应用气象学报*, 31(1): 1–12. Ding Yihui, Li Xiao, Li Qiaoping. 2020. Advances of surface wind speed changes over China under global warming [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 31(1): 1–12.
- Emeis S. 2014. Review: Current issues in wind energy meteorology[J]. *Meteorological Applications*, 21: 803–819.
- 冯双磊, 王伟胜, 刘纯, 等. 2009. NCEP/NCAR 再分析数据在风能资源评估中的应用研究[J]. *资源科学*, 31(07): 1233–1237. Feng Shuanglei, Wang Weisheng, Liu Chun, et al. 2009. The Application of NCEP/NCAR Reanalysis Data to the Assessment of the Wind Resource[J]. *Resources Science (in Chinese)*, 31(07): 1233–1237.
- Hoffmann L, Gunther G, Li D, et al. 2019. From ERA-Interim to ERA5: The considerable impact of ECMWF's next-generation reanalysis on Lagrangian transport simulations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(5): 3097–3214.
- 靳晶新, 叶林, 吴丹曼, 等. 2017. 风能资源评估方法综述[J]. *电力建设*, 38(4): 1–8. Jin Jingxin, Ye Lin, Wu Danman, et al. 2017. Review of wind energy assessment methods[J]. *Electric Power Construction (in Chinese)*, 38(4): 1–8.
- 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 2007. 风能资源评估技术方法研究[J]. *气象学报*, 65(5): 708–717. Li Cunzei, Zhu Rong, He Xiaofeng, et al. 2007. Study on the assessment technology of wind energy resource[J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 65(5): 708–717.
- 刘鸿波, 董理, 严若婧, 等. 2021. ERA5 再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估[J]. *气候与环境研究*, 26(3): 299–311. Liu Hongbo, Dong Li, Yan Ruojing, et al. 2021. Evaluation of near-surface wind speed climatology and long-term trend over China's mainland region based on ERA5 reanalysis [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 26(3): 299–311.
- 刘汉武, 王文本, 江滢, 等. 2016. 再分析数据在风能资源评估中的优势和局限性[J]. *风能*, 12: 58–63. Liu Hanwu, Wang Wenben, Jiang Yin, et al. 2016. Advantages and limitations of reanalysis data in wind energy resource assessment[J]. *Wind Energy (in Chinese)*, 12: 58–63.
- 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.
- 苗昊泽予. 2020. 多套再分析及 CMIP6 模式资料中的北半球地面风速和风功率密度的评估[D]. 成都信息工程大学硕士学位论文, 55pp. Evaluation of Northern Hemisphere surface wind speed and wind power density in multiple reanalysis datasets and CMIP6 model data[D]. M. S. thesis (in Chinese), Chengdu University of Information Technology, 55pp.
- Olauson J. 2018. ERA5: The new champion of wind power modelling? [J]. *Renewable Energy*, 126: 322–331.
- Ramon J L, Lledó V, Torralba, et al. 2019. What global reanalysis best represents near-surface winds? [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(724): 3236–3251.
- Rivas M B, Stoffelen A. 2019. Characterizing ERA-Interim and ERA5 surface wind biases using ASCAT[J]. *Ocean Science*, 15(3): 831–852.
- Rose S, Apt J. 2015. What can reanalysis data tell us about wind power[J]. *Renewable Energy*, 83: 963–969.
- Tammelin B, Vihma T, Atlaskin E, et al. 2013. Production of the finnish wind atlas[J]. *Wind Energy*, 16: 19–35.

-
- 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.
- Ulazia A J, Sáenz G, Ibarra B, et al. 2019. Global estimations of wind energy potential considering seasonal air density changes[J]. *Energy*, 187: 115938.
- 张双益, 胡非. 2017a. 边界层气象对风电机组功率特性的影响研究[J]. *可再生能源*, 35(3): 427–436. Zhang Shuangyi, Hu Fei. 2017a. A study on effects of boundary layer meteorology to wind turbines' power performance [J]. *Renewable Energy Resources(in Chinese)*, 35(3): 427–436.
- 张双益, 胡非. 2017b. GlobeLand30 地表覆盖产品应用于精细化风能资源评估[J]. *资源科学*, 39(1): 125–135. Zhang Shuangyi, Hu Fei. 2017b. Application of GlobeLand30 land cover product in refined wind energy resource assessment[J]. *Resources Science(in Chinese)*, 39(1): 125–135.
- 张双益, 胡非, 王益群, 等. 2017. 利用 CFSR 数据开展海上风电场长年代风能资源评估[J]. *长江流域资源与环境*, 26(11): 77–86. Zhang Shuangyi, Hu Fei, Wang Yiqun, et al. 2017. Application of CFSR data to offshore wind farms' long term wind energy resource assessment[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese)*, 26(11): 77–86.
- 张双益, 王益群, 吕宙安, 等. 2014. 利用 MERRA 数据对测风数据进行代表年订正的研究[J]. *可再生能源*, 32(1): 58–62. Zhang Shuangyi, WANG Yiqun, LV Zhouan, et al. 2014. Correcting error of representative year for wind measurement data using MERRA data[J]. *Renewable Energy Resources (in Chinese)*, 32(1): 58–62.
- Zhang Z T, Wang K C. 2020. Stilling and recovery of the surface wind speed based on observation, reanalysis, and geostrophic wind theory over China from 1960 to 2017 [J]. *Journal of Climate*, 33(10): 3989–4008.
- 朱蓉, 何晓凤, 周荣卫, 等. 2010. 区域风能资源的数值模拟评估方法[J]. *风能*, 6: 50–54. Zhu Rong, He Xiao Feng, Zhou Rong Wei, et al. 2010. The numerical simulation assessment methodology for regional wind energy resources[J]. *Wind Energy(in Chinese)*, 6: 50–54.
- 朱蓉, 王阳, 向洋, 等. 2021. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究[J]. *太阳能学报*, 42(6): 409–418. Zhu Rong, Wang Yang, Xiang Yang, et al. 2021. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica (in Chinese)*, 42(6): 409–418.