

陈小婷,李培荣,冯典,等. 陕西省风的时空分布及 ERA5 风资料检验评估[J]. 陕西气象,2023(3):23-30.

文章编号:1006-4354(2023)03-0023-08

陕西省风的时空分布及 ERA5 风资料检验评估

陈小婷^{1,2},李培荣²,冯典²,王丹³

(1. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

2. 陕西省气象台,西安 710014;3. 陕西省气象服务中心,西安 710014)

摘要:利用 2017—2019 年陕西省 99 个地面气象观测站资料分析近地面风场的时空分布特征,并对 ERA5 再分析资料 10 m 风速产品进行质量评估。结果显示:年平均风速陕北、关中北部及东部、商洛较大,汉江河谷及关中平原西部风速较小;大多数站点春季风速最大,秋季风速最小,4 月风速最大,10 月风速最小,8 月风速存在次高点;白天风速明显大于夜间,最大风速一般出现在 14—16 时,最小风速多出现在 20—21 时前后和日出前后;夏季最大风速出现时间较其他季节提早 2 h 左右,前半夜风速明显大于后半夜。大部分站点有接近相反的两个主导风向,风速随季节有明显变化,陕北主导风向存在明显的季节变化。ERA5 再分析资料 10 m 风速产品和自动气象站观测相比能够反映风场最基本的时空分布特征,风力日较差和标准差较站点观测偏小,连续性、均匀化特征明显;最大风速以及白天风速开始增大的时间较站点观测偏晚 1 h 左右;ERA5 10 m 风速产品在陕北地区偏大,关中、陕南地区偏小,关中地区相对误差和均方根误差小,相关系数高,代表性优于陕北和陕南地区。

关键词:10 m 风;时空分布特征;ERA5 再分析资料;检验评估

中图分类号:P425

文献标识码:A

风是表征大气运动的动力学变量,温度和湿度都因大气的运动而改变,在数值模式的初值中,风起决定性作用,它会引起温湿场的迅速变化,因此风在四大基本气象要素中具有特殊的地位^[1]。研究风的分布特征及变化规律对风能利用、大气污染评价、风的精细化预报、数值模式初始场的改进等多方面有重要意义。近年来,不少学者针对风场时空分布特征^[2-6]、风的预报及检验订正^[7-11]等开展相关研究。高质量的气象数据是分析气象要素演变、天气气候特征的重要基础,现有的常规气象观测资料受地域、时间和观测仪器限制,具有一定的时空不连续性。因此,通过数据同化技术将各种来源的观测资料和数值模式结果相结合得到的高时空分辨率的历史再分析资料在天气、气

候多领域研究中发挥着重要作用。由于不同再分析资料选用的数值模式、观测资料 and 同化方法不同,数据信度存在一定差异,且同一数据集在不同区域的适用性也有较大差异^[12-13],在利用上述资料开展研究前有必要对数据适用性进行了解评估。

陕西省地域狭长、地势南北高、中间低,有高原、山地、平原和盆地等多种地形,受复杂地形影响,各地风的特征各有不同。相关学者针对不同领域开展了风的相关研究^[14-18]。白爱娟等^[16]聚焦特殊地形下灾害性大风天气,分析了华山景区大风天气不同时间尺度的变化特征及大风形成机制;王丹等^[17]对中国气象局陆面数据同化业务系统的 10 m 风产品在陕西地区的适用性进行了检验评估。本文选取 2017—2019 年陕西近地面风

收稿日期:2022-02-09

作者简介:陈小婷(1984—),女,汉族,陕西宝鸡人,硕士,高工,从事灾害性天气机理及客观预报方法研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2020K-1);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-248);陕西省重点研发计划(2023-YBSF-235)

(安装在地面上的风向风速仪测得的 10 m 风向、风速)作为研究对象,以 11 个市(区)气象站作为代表,对风速、风向进行统计分析,研究其季节变化、日变化及空间分布特征,并对目前公认度较高的 ERA5 再分析资料^[19] 10 m 风速数据在陕西的适用性进行评估,为进一步开展风的精细化预报、探索风的客观订正方法奠定基础。

1 数据和方法

ERA5 资料是欧洲中期天气预报中心(ECM-WF)利用先进的建模和数据同化系统,将大量历史观测数据结合到全球估算中,对 1979 年 1 月至今的全球气候进行的第五代大气再分析数据,提供许多大气、陆地表面和海洋状态参数的逐小时数据。本文所用资料包括:2017—2019 年陕西省 99 个国家气象观测站逐小时观测 2 分钟平均风向、风速数据;对应时段 ERA5 逐小时 10 m u 、 v 风场数据,空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

选取 11 市(区)站,代表全省不同区域,分析不同站点平均风速的季节、月和日变化特征,利用风速风向频率玫瑰图分析不同站点风向、风速频率分布特征。将 ERA5 再分析格点 u 、 v 风场插值到全省 99 个站点并计算全风速,分析 ERA5 再分析资料对陕西近地面平均风速分布特征、时空演变特征的表征能力,通过平均误差、均方根误差、相关系数等统计指标分析再分析资料与气象观测数据的偏差特征。

2 风速的时空分布特征

近地面风速变化除受气象条件影响,还与本地地形地貌有密切关系,因此风速的空间分布特征在一定规律之上具有较强的局地变化特征,本文仅利用全省 11 市(区)站作为代表,分区域讨论风速的空间分布特征及时间演变规律。

2.1 风速的季节变化特征

从 2017—2019 年年平均风速及季节平均风速分布图(图 1)可看出,陕西 11 个代表站年平均风速在 $1.06 \sim 2.76$ m/s 之间,风速排名前三的站点依次为榆林、铜川和西安站,风速较小的是汉中和宝鸡站。11 个代表站的风速情况反映了陕北、关中北部及东部、商洛风力较大,而位于汉江河谷的汉中、安康站,关中平原西部的宝鸡、杨凌站风

速较小的特征。四季之中最大风速一般出现在春季(汉中、安康站最大风速出现在夏季)。陕北春季风速最大,其余季节风速相当;铜川和商洛春季、冬季风速较大;其余站点均表现为春季、夏季风速较大。四季之中秋季平均风速最小,可能因为秋季是冷空气大风和对流性大风最少的时段。

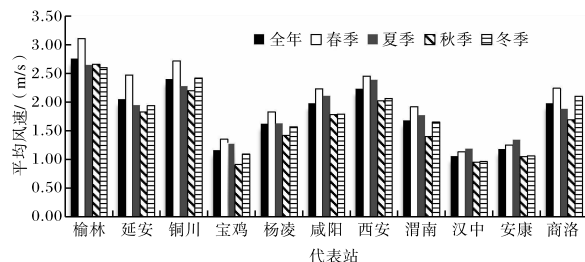


图 1 2017—2019 年陕西 11 个代表站年平均及季节平均风速

2.2 风速的月变化特征

月平均风速演变图(图 2)显示,4 月平均风速最大,随后逐渐减小,一般在 9、10 月达到最小值,11 月开始逐渐增大。11 市(区)平均风速 4 月最大为 2.14 m/s,10 月最小为 1.64 m/s。除榆林、延安、铜川、渭南之外,其余站点 8 月风速有一定增大,形成继 4 月之后的一个次高点。风速在 8 月有所增大的特点与前文季节变化中,风速大值主要出现在春、夏季的特征一致。

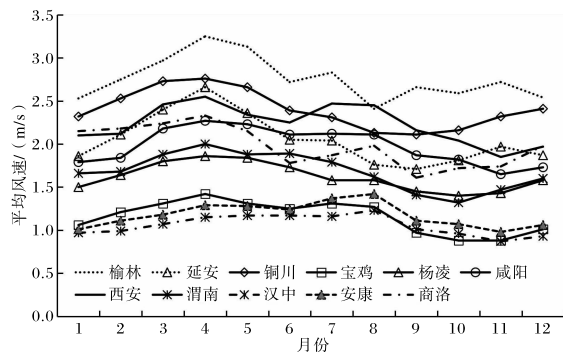


图 2 2017—2019 年陕西 11 个代表站月平均风速变化图

2.3 风速的日变化特征

从图 3 可看出,11 个市(区)风速日变化的典型特征为:白天风速明显大于夜间,最大风速一般出现在 14—16 时之间,之后风速逐渐减小,20 时至次日 08 时之间风速变化较为平稳,最小风速

大多出现在 20—21 时前后和 05—07 时之间,08 时左右风速开始加强。由于白天日出后,地面受太阳辐射加热,增温明显,湍流加强,高层风向下层输送动能,风速增大,特别是午后地面温度最高,动能输送量大,出现一天中风速最大值;日落,地面辐射冷却,大气趋于稳定,风速逐渐减小,日出前后气温最低,大气层结稳定,出现风速最小值。铜川、杨凌、咸阳最小风速出现在 20 时前后,西安站最小风速出现在 00 时前后,其余站点的最小风速均在日出前。铜川站比较特殊,06 时前后风速逐渐减小,09—10 时达到较低值,随后开始增大,其风速开始增大的时间比其他站点晚 2 h 左右,20 时前后风速降至最低点,之后风速增大的幅度也较其他站点更明显。

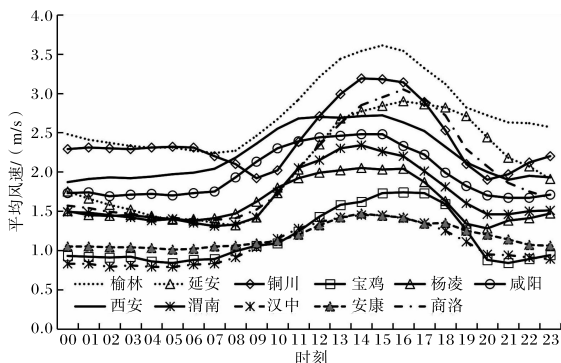


图3 2017—2019年陕西11个代表站不同时刻平均风速

不同季节风速日变化特征(图略),同样表现为白天风速显著大于夜间,最大风速、最小风速出现的时段更发散。春季最大风速特征最接近年平均风速,出现在 13—17 时,15 时最多;夏季出现在 10—18 时,16 时最多;秋季出现在 12—17 时,14 时最多;冬季出现在 13—18 时,14 时最多。相较而言,夏季最大风速出现的时间较其他季节提早 2 h 左右,风速较大的时段比其他季节更长,反映出夏季日照充足,地面气温升高,湍流扰动增强对风速的重要影响。最小风速夏季主要出现在 03—07 时,前半夜风速大于后半夜;其他季节日落前后风速变化平稳,最小风速出现时段较为分散,多出现在 20—21 时前后和日出前后。从风速日较差看,延安和商洛地区日较差比较大,渭南、汉中、安康夏季日较差最大,其余地区春季日较差最大。

3 风向及风速频率分布特征

下文将风向分为 16 个方位,风速根据蒲福风级进行划分,对 11 市(区)年平均及四季的风向、风速频率分布特征进行分析。

3.1 年平均分布特征

11 市(区)风速频率分布(图 4)显示,各站点以 1 级和 2 级风为主,其中榆林、铜川、咸阳、西安、渭南 2 级风出现频率最高,其余站点 1 级风出现频率最高。宝鸡的静风频率最高,达到 12.6%,渭南、汉中、商洛的静风频率也较高,在 5%~10% 之间;静风频率最低的是榆林站(0.41%),铜川静风频率也很低(1.29%)。

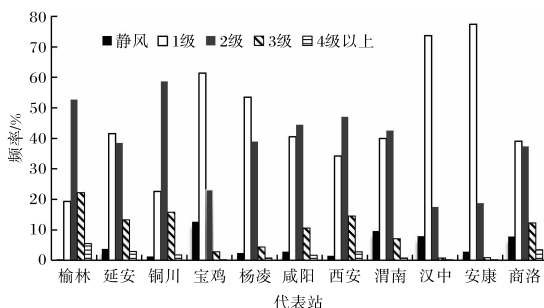


图4 2017—2019年陕西11个代表站不同等级风速频率图

分析各站点的年平均风向风速频率玫瑰图(图 5),因安康和汉中站分布接近,咸阳和西安站分布接近,略去安康、咸阳站,分别以汉中和西安站为代表。从图 5 可以看出,榆林、商洛、宝鸡的主导风向为西北风和东南风,频率最小风向为东北风、西南风。三市的风速频率差别明显:榆林 2 级风频率最高(52.7%),其次为 3 级风(22.2%);商洛 1 级风和 2 级风为主,两者的频率分别为 39% 和 37%;宝鸡风力最小,主要以静风和 1 级风为主,共占比 74%。汉中、安康风向主要集中在 0~180°之间,主导风向以偏东风为主,偏西风频率较低,两站静风和 1 级风的频率均达 80% 左右。渭南和杨凌主导风向不显著,多个方向的风频率相当,渭南东南偏东风和西北风频率较小,杨凌偏南风 and 东北偏北风频率较小,两地其余方向风的频率为 10%~18%。其余市(区)均以东北、西南风为主,西北、东南风频率最小,其中铜川东北风占绝对优势。以上分析显示,近地面风向受

本地地形影响明显:位于关中平原西部的杨凌、宝鸡和位于汉江河谷的汉中、安康风向接近准东西向;杨凌靠近秦岭,受山脉阻挡,偏南风频率最

小;渭南受东南方向的山脉影响,东南偏东风的频率最小。大部分站点有接近相反的两个主导风向。

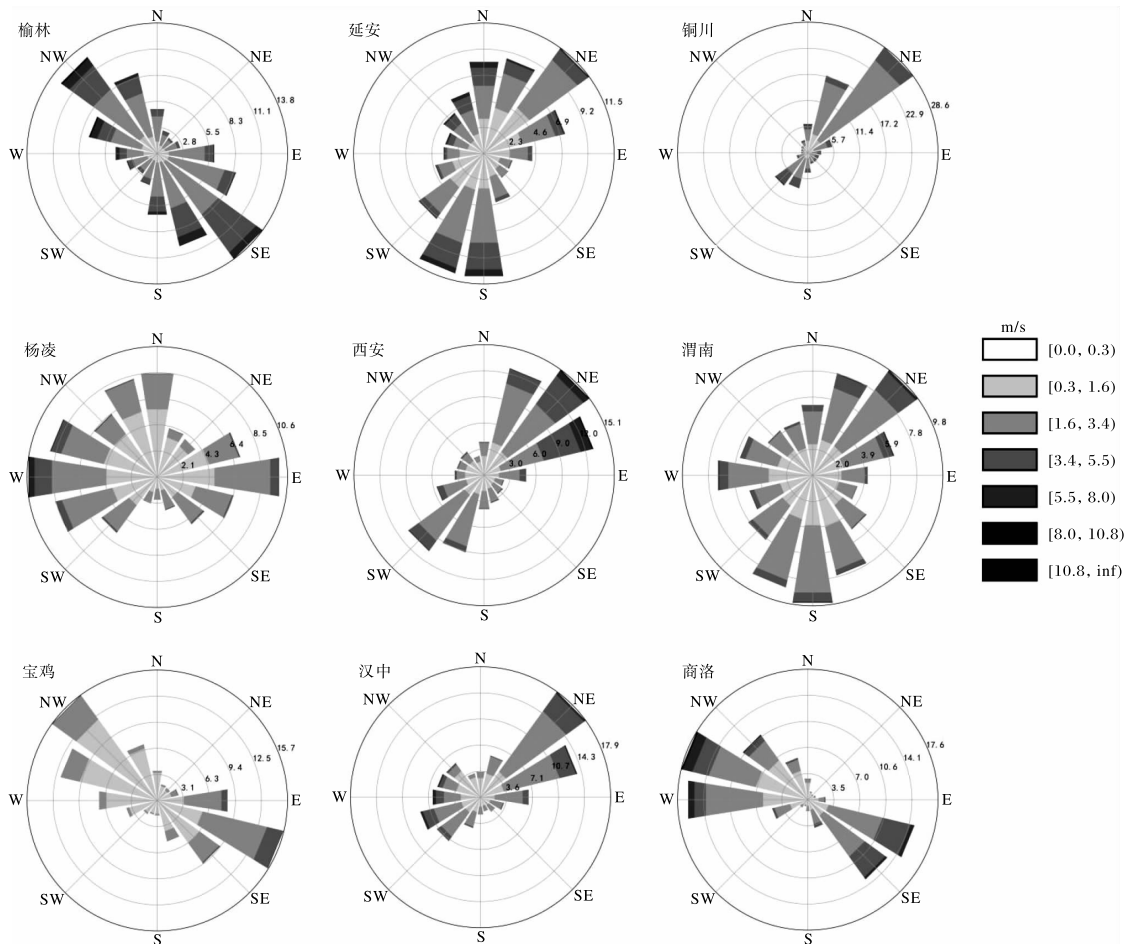


图5 2017—2019年陕西不同市(区)风向风速频率玫瑰图

3.2 风向、风速频率的季节分布特征

春季风向频率分布特征和全年平均特征接近,大多数站点静风和1级风的频率减小,4级和5级以上风的频率增加,表征了春季风速增强的特征。夏季,随着夏季风发展,陕北地区主导风向有显著变化,榆林东南风、延安南偏西风频率增加,偏北风的频率显著减小(图6a、图6c);其余站点风向变化不大,大部站点静风和3级以上风的频率减小,2级风频率增加。秋季主导风向和年平均接近,大部分站点偏西风频率开始增加,静风和1级风的频率明显增多,和夏季相比,陕北地区西北风频率明显增多。冬季偏北风频率进一步增加,偏南风显著减少,1级风频率增加,3级以上风

的频率减小,陕北出现和夏季截然相反的分布形态(图6b、图6d)。铜川较为特殊,四季均以东北风为主导风向,且占绝对优势,东北风频率37%~42%;东北偏东、西南偏南风次之;其余风向频率很小。以上分析显示,陕北站点主导风向有明显的季节变化,关中、陕南站点主导风向的季节变化不明显。可能原因是黄土高原地形相对开阔,地形落差小,风场表现出了明显的季风特征,而关中、陕南站点多位于平原、河道谷底,周围山脉多,地形起伏大,风场更多地表现为受地形影响的定常风向。大部分站点风速随季节变化有明显变化,汉中、安康、宝鸡常年风力较小,三者1级以下风力频率依次为82%、80%、74%。

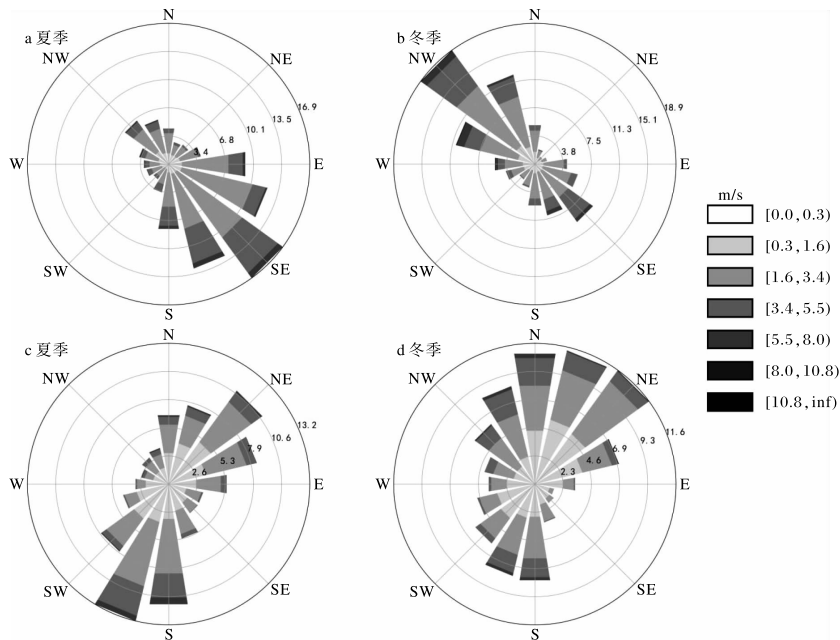


图6 2017—2019年榆林(a、b)、延安(c、d)风向风速频率分布图

4 ERA5 再分析资料适用性评估

4.1 近地面平均风速特征

将 ERA5 再分析资料双线性插值到陕西 99 个观测站,利用 2017—2019 年观测站和 ERA5 逐小时资料,计算年平均风速,分析 ERA5 再分析资料对年平均风速空间分布特征的表征能力。从图 7a 可以看出,观测站 10 m 高度年平均风速秦岭以北地区明显大于秦岭以南地区,风速的局地性强,空间分布图上奇异点多。榆林、关中北部、商洛是风速大值区,最大值为华山站 4.1 m/s

(绘图时华山站用华县、华阴、潼关 3 站的平均值代替,以避免过强的局地极值出现),次大值为府谷站 2.8 m/s。风速最小值为商洛的商南站 0.8 m/s,汉中、安康是风速较小的地区。再分析资料(图 7b)风速分布明显比观测站资料连续平滑,没有特别明显的局地特征,可以反映出平均风速秦岭以北大于秦岭以南,陕南地区商洛风速最大,关中北部、东部风速大于西部的基本特征。再分析资料榆林风速明显偏大,汉中风速明显偏小。最大值为定边 3.6 m/s,最小值为城固 0.9 m/s。

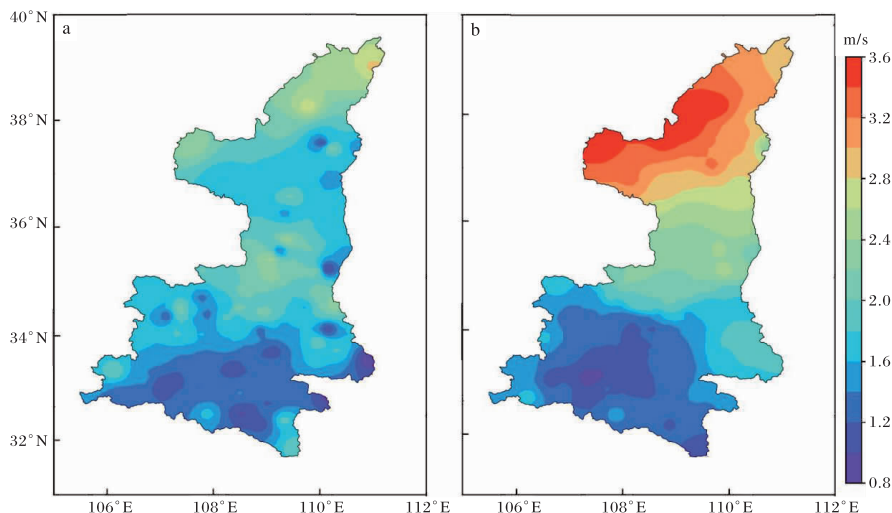


图7 2017—2019年陕西自动气象站观测(a)和ERA5再分析资料(b)年平均风速空间分布图(审图号为GS(2019)1719号)

以 11 个市(区)为代表,对站点观测资料和 ERA5 再分析资料 2017—2019 年逐小时数据序列的最大值、最小值、平均值和标准差分别进行对比,分析两组数据的基本特征,检验再分析资料对风速极值、均值及离散度的表征能力。从表 1 可以看出:再分析资料的最大值比观测站数据小,尤其是咸阳、商洛、西安、杨凌,大都偏小 40%左右;

最小值两者相当;平均值陕北地区明显偏大,关中和商洛以偏小为主,榆林偏大 0.8 m/s,商洛偏小 0.2 m/s,其余地区两者相当;标准差榆林、铜川、安康的再分析资料比观测大,榆林偏大 0.3 m/s,其余地区 ERA5 的标准差比实况小,其中商洛偏小 0.5 m/s,说明再分析资料数据均一化程度更高。

表 1 2017—2019 年陕西 11 个市(区)自动气象站观测和 ERA5 再分析资料统计量对比 单位:m/s

代表站	最大值		最小值		平均值		标准差	
	观测	ERA5	观测	ERA5	观测	ERA5	观测	ERA5
榆林	14.1	13.3	0.00	0.01	2.8	3.6	1.5	1.8
延安	13.3	11.1	0.00	0.04	2.1	2.6	1.4	1.3
铜川	12.0	10.4	0.00	0.01	2.4	2.2	1.2	1.2
宝鸡	6.8	5.6	0.00	0.01	1.2	1.3	0.9	0.7
杨凌	10.4	6.0	0.00	0.01	1.6	1.2	1.0	0.8
咸阳	13.1	7.7	0.00	0.00	2.0	1.6	1.2	1.0
西安	12.3	7.8	0.00	0.00	2.2	1.8	1.4	1.1
渭南	9.9	7.1	0.00	0.02	1.7	1.6	1.1	0.8
汉中	7.8	5.5	0.00	0.01	1.1	1.1	0.7	0.6
安康	8.4	7.3	0.00	0.01	1.2	1.3	0.6	0.8
商洛	12.5	7.8	0.00	0.01	2.0	1.8	1.5	1.0

两套资料 11 个市(区)的风速时间演变特征对比显示(图略),再分析资料可以表征春季风力最大,其余季节风力相当的基本特征;但是对汉中、安康夏季风力最大,关中、商洛春夏风力较大等细节表现欠佳。从 ERA5 日变化特征看,最大风速出现在 15—17 时,最小风速出现在 06—09 时,09 时之后风速增大趋势明显。和观测资料对比可见,再分析资料可以较好地表现白天风力大,夜间风速变化较平稳的特征,白天风速开始加强以及最大风速出现的时间比观测站晚 1 h 左右。再分析资料风力日较差比实况观测小,关中、陕南风速更均一化,日变化特征不同站点间差异小,铜川站和其他站点间的特殊性没有体现出来。

4.2 风速误差分析

根据统计学方法,计算 ERA5 再分析资料与陕西 99 个站点观测数据之间的平均误差、均方根误差、相关系数,结果如图 8 所示。可以看出,

57%的站点相对误差为正值,主要位于陕北,最大子洲 2.19 m/s;43%的站点相对误差为负值,主要位于关中、陕南,最小值镇坪 -0.89 m/s(图 8a)。陕北均方根误差较大,汉中、安康和关中西部均方根误差较小(图 8b)。相关性较好的地区主要分布在陕北和关中北部及东部地区(图 8c)。关中西部、陕南相关系数偏低可能因为地形复杂,风场局地性强,且风力整体较小,变化趋势不显著造成。以上分析表明,与自动气象站观测资料相比,ERA5 资料陕北地区风速偏大,关中、陕南地区偏小,陕北均方根误差较大,陕北、关中北部及东部的相关性比其他地区好。综合而言,关中地区相对误差和均方根误差小,相关系数高,代表性优于陕北和陕南地区。

5 结论

利用 2017—2019 年陕西 99 个地面气象观测站数据对近地面风场的时空分布特征进行分析,

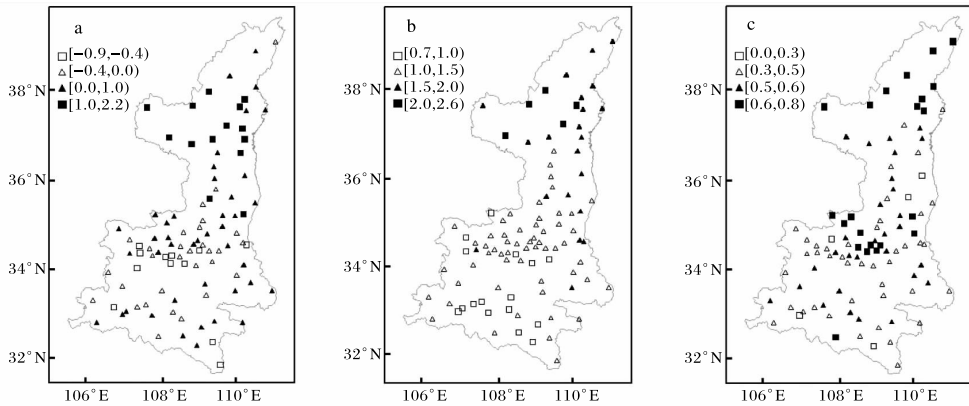


图8 ERA5 再分析资料 10 m 风速平均误差(a,单位为 m/s)、均方根误差(b,单位为 m/s)、相关系数(c)空间分布图(审图号为 GS(2019)1719 号)

同时对 ERA5 再分析资料 10 m 风速产品的质量进行评估,主要结论有以下几点。

(1)年平均风速陕北、关中北部及东部、商洛较大,位于汉江河谷的汉中、安康站及关中平原西部的宝鸡、杨凌站风速较小;秋季平均风速最小,汉中、安康夏季风速最大,其余站点春季风速最大;月平均风速 4 月最大,10 月最小,多站 8 月风速存在次高点。

(2)白天风速明显大于夜间,夜间风速变化较为平稳,最大风速一般出现在 14—16 时,最小风速多出现在 20—21 时前后和日出前后。夏季最大风速出现的时间较其他季节提早 2 h 左右,前半夜风速明显大于后半夜。

(3)大部分站点有接近相反的两个主导风向,主导风受地形影响特征明显。陕北主导风向有明显的季节变化,其余地区主导风向的季节变化不大,铜川四季均以东北风为主导风向,且占绝对优势。大部分站点风速随季节变化有明显变化,汉中、安康、宝鸡常年风力较小,1 级以下风力频率达 80%左右。

(4)ERA5 再分析资料连续性、均匀化特征明显,风力日较差和标准差一般比站点观测值小,能够反映最基本的时空分布特征,但是风场局地特征和细节表现欠佳,最大风速以及白天风速开始增大的时间比站点观测晚 1 h 左右。ERA5 资料陕北地区风速偏大,关中、陕南地区偏小,关中地区相对误差和均方根误差小,相关系数高,代表性优于陕北和陕南地区。

参考文献:

- [1] 陶祖钰,范俊红,李开元,等. 谈谈气象要素(压、温、湿、风)的物理意义和预报应用价值[J]. 气象科技进展, 2016, 6(5): 59-64.
- [2] 王静,苗峻峰,冯文. 海南岛沿海近地面风时空分布特征的观测分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2016, 8(43): 226-238.
- [3] 郭海宇,陈华忠,汤翔宇,等. 湖南省风的时空分布特征及大风概念模型研究[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(4): 55-59.
- [4] 程思,陈鹏,苗峻峰. 江苏省 50 a 近地面风速及气温的时空分布特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2013(3): 121-124.
- [5] 孟丹,陈正洪,陈城,等. 基于探空风资料的大气边界层不同高度风速变化研究[J]. 气象, 2019, 45(12): 1756-1761.
- [6] 荣艳淑,梁嘉颖. 华北地区风速变化的分析[J]. 气象科学, 2008, 28(6): 655-658.
- [7] 曾晓青,薛峰,姚莉,等. 针对模式风场的格点预报订正方案对比[J]. 应用气象学报, 2019, 30(1): 49-60.
- [8] 叶希莹,李立,张兰,等. 2019—2020 年非汛期 Grapes_1 km 10 m 风速预报检验评估[J]. 广东气象, 2021, 43(3): 22-24.
- [9] 于鑫,于明洋,蔡景就. ECMWF 细网格 10 m 风产品在南海北部的检验与评估[J]. 广东气象, 2021, 43(5): 36-40.
- [10] 曾晓青,赵声蓉,段云霞,等. 基于 MOS 方法的风向预测方案对比研究[J]. 气象与环境学报, 2013,

- 29(6):140-144.
- [11] 孙全德,焦瑞莉,夏江江,等. 基于机器学习的数值模式天气预报风速订正研究[J]. 气象, 2019,45(3):426-436.
- [12] 叶梦姝. 中国大气再分析资料降水产品在天气和气候中的适用性研究[D]. 兰州:兰州大学, 2018.
- [13] 吕润清,李响. ERA-Interim 和 ERA5 再分析数据在江苏区域的适用性对比研究[J]. 海洋预报, 2021,38(4):27-37.
- [14] 吴素良,程路,胡淑兰,等. 西安及周边区域冬季风场特征的数值模拟分析[J]. 陕西气象, 2021(6):36-42.
- [15] 王丹,高红燕,杨艳超,等. 基于最优训练期的 PP 与 MOS 的风电功率趋势预报对比[J]. 干旱区地理, 2021,44(3):819-829.
- [16] 白爱娟,张永红,吴佳浩,等. 华山景区大风变化特征及偏南大风的天气学研究[J]. 高原气象, 2021,40(5):1154-1163.
- [17] 武维刚,武麦凤,龙亚星. 华山大风的气候特征分析[J]. 陕西气象, 2022(1):41-46.
- [18] 王丹,杨艳超,党超琪,等. CLDAS 10 m 风产品在陕西的质量检验分析[J]. 陕西气象, 2022(1):17-21.
- [19] 刘昕,陈静,朱跃建,等. GRAPES 全球四维变分同化分析场质量的初步诊断分析[J]. 气象科学, 2021,41(6):804-817.