

文章编号: 1008-2786-(2020)4-495-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000528

祁连山区风速和风向时空变化特征

付建新¹, 曹广超^{2,3*}, 郭文炯¹

(1. 太原师范学院 城镇与区域发展研究所, 山西 晋中 030619; 2. 青海师范大学 青海省自然地理与环境过程
重点实验室, 西宁 810008; 3. 青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室, 西宁 810008)

摘 要: 分析山地的风速和风向, 对认识山地地区的气候变化和合理利用风力资源具有重要的意义。本文基于祁连山区 11 个气象站点的平均风速、最大风速和最大风速的风向数据, 利用多种数学方法和 ArcGIS 空间分析法对风速和风向的时空变化分布规律作了探讨。结果表明: (1) 祁连山区春季的平均风速和最大风速是年内风速变化的峰值区, 其中中段和东段的最大风速出现在冬季。 (2) 全区的平均风速和最大风速年变化整体均呈下降趋势, 下降率分别为 -0.07 和 $-1.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。 (3) 1970—1979 年风力资源最丰富; 年际和季节 (冬季除外) 平均风速的突变均发生在 1993 年, 东段和中段的平均风速均在 1990—1999 年发生突变, 全区和各个区段平均风速的周期均为 22a。 (4) 祁连山区平均风速自西向东呈递减趋势。 (5) 最大风速的风向以西南风为主, 而东段则以偏东南风为主。

关键词: 平均风速; 最大风速的风向; 时空变化; 祁连山区

中图分类号: P942

文献标志码: A

在全球变暖的背景下, 风速变化是气候变化研究的重要内容之一^[1], 是潜在蒸散发变化的主要影响因素之一^[2], 在大气运动中作为基本要素来描述, 通常作为表征气候形成与变化的重要因素之一^[3]。由于全球变暖, 高低纬、冬夏和昼夜之间温差变小, 使得局地海陆和山谷之间风速变小, 同时风速变化对全球气候变化也产生影响^[4]。分析祁连山区风速, 对认识该区的气候变化规律、有效应对自然灾害和气候变化有重要的理论意义。

当前雾霾等环境污染问题日益严重, 常规能源开采以及在使用过程中的危害已经普遍显现, 而新

能源的开发与利用是解决这些危害的最佳途径之一, 尤其新能源发电替代减排是碳减排最为重要的形式之一^[5-6]。安全、无污染等是风能资源的优点, 风能资源是我国今后重点发展的清洁能源之一^[7]。风速和风向变化特征研究是风能资源评估、开发利用和风速预报^[8]的重要环节, 故对风速和风向的变化特征进行探析具有现实意义。

中国及其大部分地区平均风速均表现为减小趋势^[9-12]。目前有关祁连山地区风速、风向的实证研究方兴未艾, 主要关注的是局部地区风速的变化特征及其对生产生活的影响, 比如: 祁连山东北缘的最

收稿日期 (Received date): 2018-09-23; 改回日期 (Accepted date): 2020-05-11

基金项目 (Foundation item): 国家重点研发计划项目 (2017YFC0404304); 青海省科学技术厅自然基金项目 (2018-ZJ-903); 祁连山国家公园青海研究中心开放项目 (GKQ2019-01)。[National Key Research and Development Program of China (2017YFC0404304); Natural Science Foundation of Qinghai Province of China (2018-ZJ-903); Open Project of Qilian Mountain National Park Research Center (Qinghai) (GKQ2019-01)]

作者简介 (Biography): 付建新 (1980-), 男, 山西大同人, 讲师, 博士, 主要研究方向: 土地利用与区域发展。[FU Jianxin (1980-), male, born in Datong, Shanxi province, lecturer, Ph. D., research on land use and regional development] E-mail: fujx@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 曹广超 (1971-), 男, 山东苍山人, 教授, 主要研究方向: 青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用。[Cao Guangchao (1971-), male, born in Cangshan, Shandong province, professor, Ph. D. supervisor, research on environmental change and application of geographic information system in the Tibet Plateau] E-mail: caoguangchao@126.com

大风速呈明显减少趋势,且具备典型风险特征^[13]。祁连山老虎沟四季风向表现为偏南风^[14]。风速作为重要的气候要素之一,其变化对草地生产力影响也极大^[15]。也有学者对祁连山地形云与垂直风的关系进行了探析^[16]。总之,前人对于祁连山区风速和风向的研究多为局部区域,关于最大风速的风向研究较少,故对祁连山区各区段平均风速、最大风速和最大风速的风向时空变化进行探究,进而揭示该区风速和风向的变化规律,为该区域风能资源的开发提供一定的参考依据。

1 研究区概况

祁连山是我国地形第一和第二阶梯分界线(图1;94°E~104°E和36°N~39°N)^[17-18]。东西跨度约850 km,南北宽约200~300 km。区域内部气候变化大,年均温为0.6℃,年均降水量为400~700 mm,降水呈东多西少的分布格局。祁连山区河流分布广泛,主要依靠冰川融水补给,水系特征为放射状,主要河流为湟水、大通河、黑河、疏勒河、北大河、党河等。由于复杂的地形地貌,祁连山垂直地带性发育明显。

2 数据来源与研究方法

平均风速、最大风速和最大风速的风向数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),对缺

失的数据进行了线性回归插补,并对数据的准确性进行验证,验证发现数据原始序列和均值的相关系数 >0.796 ,说明数据适合本文研究。根据已有的研究成果^[19-21],结合祁连山实际情况和研究需要,将研究区进行区段划分^[22-23],东段包括乌鞘岭、西宁和门源,中段包括野牛沟、恰不恰、茶卡、刚察和祁连,西段包括大柴旦和德令哈。本文分别采用M-K突变检验法^[24-25]和matlab小波分析法^[26]分析平均风速的突变规律和周期变化,分别使用ArcGIS12.0和Origin9.1对平均风速的空间分布和最大风速的风向制图,使用SPSS17.0软件对数据的时间序列变化进行0.05、0.01和0.001置信水平的显著性检验。

3 风速时间变化

3.1 风速年内变化

由图2可知,祁连山区平均风速和最大风速的变化规律既有相似性也有差异性。相似性表现为,二者全区和西段春季风速均是年内的峰值区,分别为全区(3.06和14.04 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和西段(2.62和10.81 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),该结论和前人的研究成果一致^[27],不同点表现为,中段和东段春季的平均风速依然是年内峰值区,分别为3.12、3.23 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,春季平均风速是年内最大值,主要和春季冷暖空气频繁影响有关,而中段和东段年内最大风速的峰值区却均在冬季,分别为12.94和9.66 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,主要因为祁连

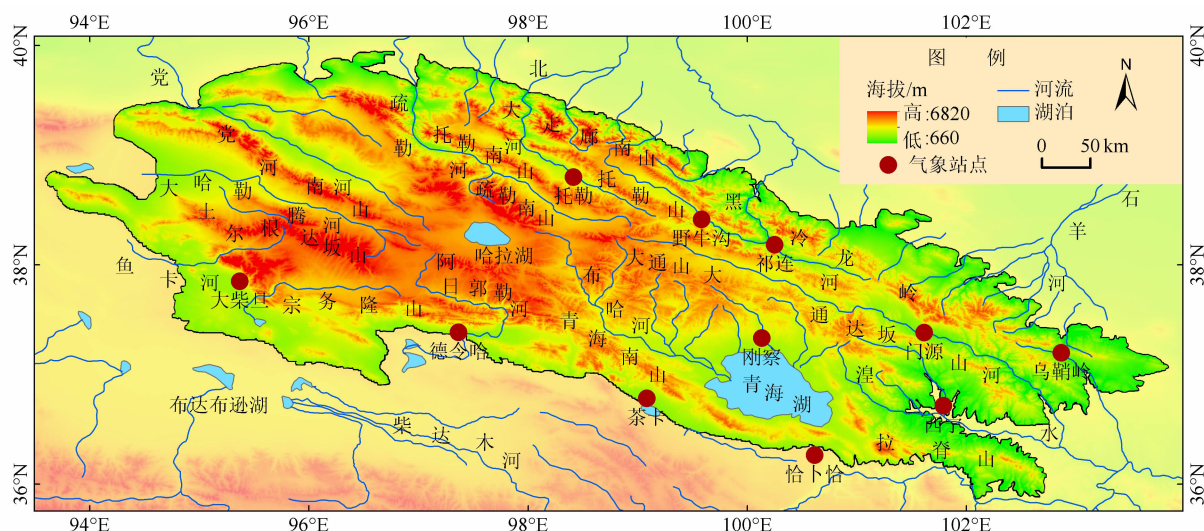


图1 祁连山 DEM 和气象站点分布图

Fig.1 DEM and meteorological stations in the Qilian Mountains, China

山地势由西北向东南倾斜,中东段受到强冷空气的影响较西段大,故中东段的最大风速发生在冬季。各区段平均风速的低值区除了东段在秋季以外,其余均在冬季,而各区段最大风速的低值区均在夏季,全区最大风速的低值区在秋季。

3.2 风速年际变化

由图3可知,1960—2017年平均风速整体呈降低趋势,这与青藏高原平均风速变化趋势基本一致^[28],下降率为 $-0.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,从分区段来看,下降趋势由大到小依次为西段、东段和中段,下降率分别为 -0.15 、 -0.09 和 $-0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。1980—2017年最大风速下降较快,下降率达 $-1.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,下降趋势由大到小依次为中段、西段和东段,下降率分别为 -1.74 、 -1.38 和 $-1.33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。全区和各区段平均风速和最大风速均通过了显著性检验。

3.3 平均风速的年代际变化

1960—2017年祁连山区不同年代平均风速均值(图4)呈明显的年代际变化,1970—1979年全区和各个区段平均风速最大,风力资源最丰富,1990—1999年全区和东段的平均风速最小,2010—2017年中段和西段的平均风速最小。从变化来看,1960—1979年风速整体上呈上升趋势,之后不同区段变化

有所差异,1990—2017年全区和东段有所上升,西段逐渐下降,1990—1999年中段出现一个次高峰。1960—1999年平均风速的变化态势和黑河流域平均风速的变化趋势基本一致^[29]。

3.4 平均风速的季节突变检验

平均风速季节突变如图5,春季(图5a),平均风速突变开始于1993年,从2000年开始低于 -1.96 ,表明从2000年下降趋势变得愈加显著,2000—2017年为突变时间区域;夏季(图5b),平均风速突变开始的年份也为1993年,自1986年以来出现明显下降趋势,1999年之后下降趋势变得更加明显,1999—2017年为突变时间区域;秋季(图5c)和冬季(图5d)突变开始的年份分别为1993年和1987年,发生突变的时间区域分别为1999—2017年和1997—2017年。从年际来看(图5e),平均风速突变开始的年份为1993年,平均风速从1986年开始出现明显下降趋势,从1998年下降趋势变得更加明显,突变时间区域为1998—2017年。平均风速年际和季节(冬季除外)变化的突变年份均发生在1993年,此结论和青海省平均风速突变的结论相似^[30]。

祁连山各区段平均风速突变时间存在异同点,东段多年和季节发生突变时间均出现在1990—

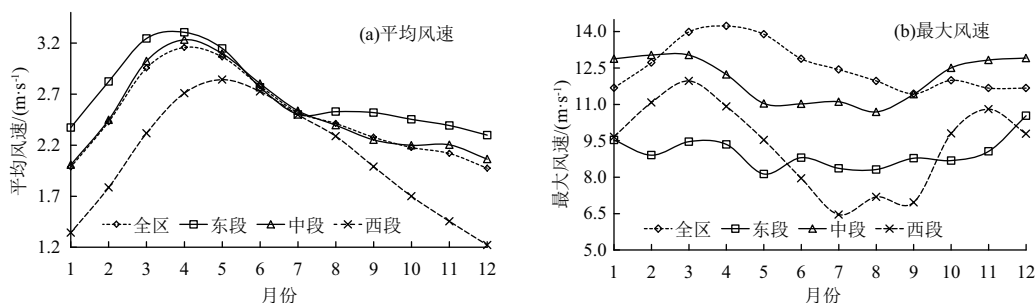


图2 祁连山各区段风速年内变化

Fig. 2 Changes of wind speed throughout the year in various sections of the Qilian Mountains

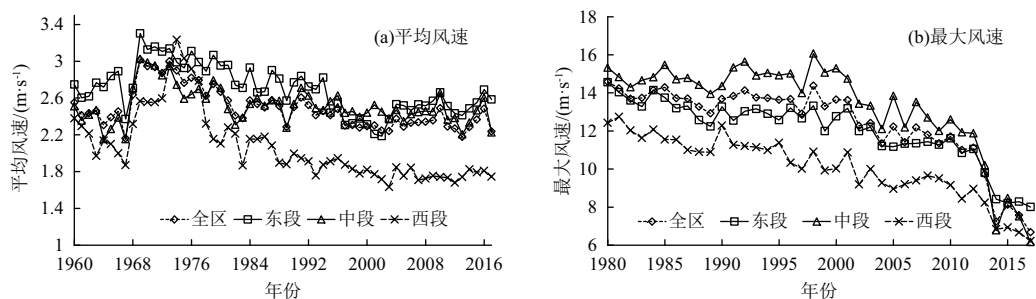


图3 祁连山风速年际变化

Fig. 3 Annual variation of wind speed in the Qilian Mountains

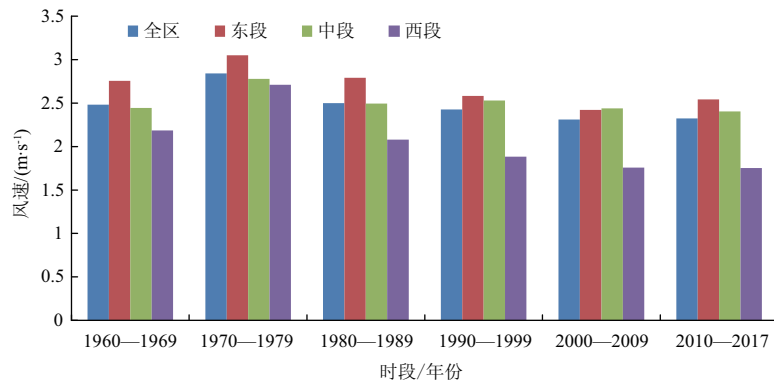


图4 祁连山平均风速年代际变化

Fig. 4 Interdecadal variation of average wind speed in the Qilian Mountains

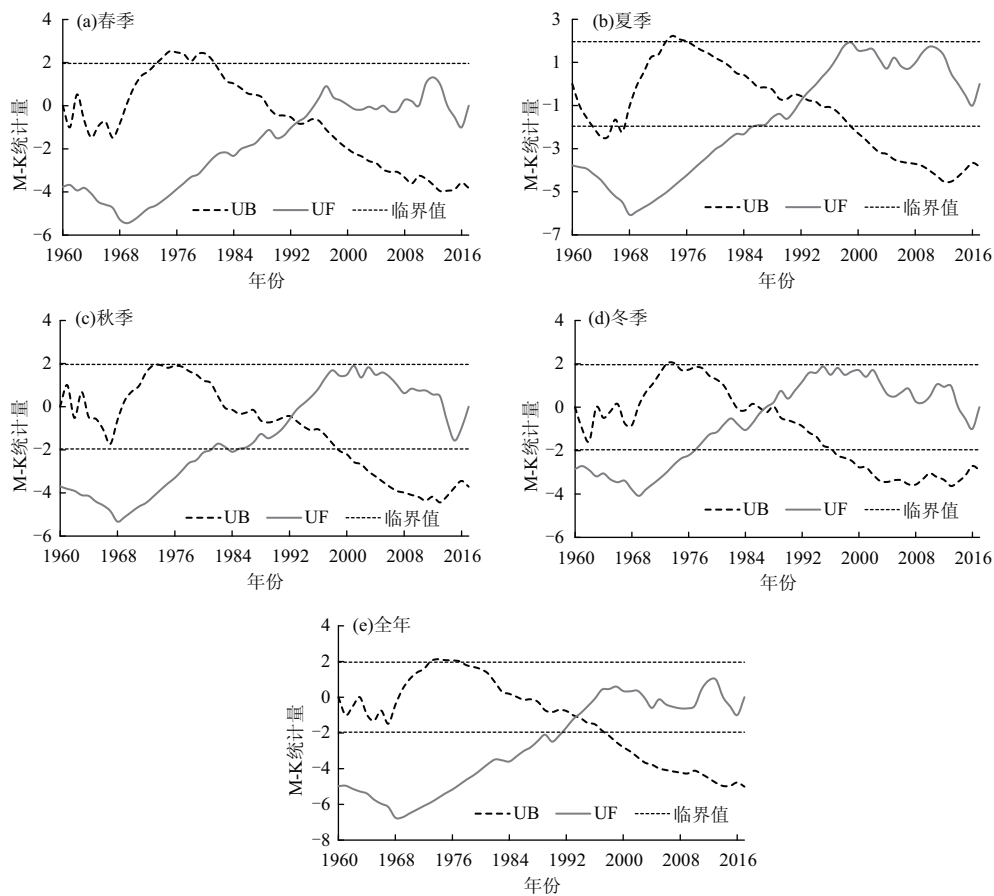


图5 祁连山平均风速季节突变检验

Fig. 5 Seasonal abrupt change of average wind speed in the Qilian Mountains

1999 年前后;中段多年和夏季发生突变的时间均发生在 2001 年,分别自 2011 年和 2010 年下降趋势变得更加明显,突变时间区域分别为 2011—2017 年和 2010—2017 年,其余季节均未发生突变;西段的秋季和冬季发生突变的年份均为 1988 年,显著下降的时间和突变时间区域相似。东段季节突变开始时间和全国基本一致^[31]。

3.5 平均风速的周期变化

不同区段年平均风速在不同时间尺度上的周期振荡存在异同(图 6)。相同点:均存在 20 ~ 25 a 的周期振荡现象。不同点:全区和西段在 20 ~ 25a 时间尺度上周期振荡现象最明显,中段次之,东段不明显。小波系数模值等值线图(图 7)表明,时间尺度 20 ~ 25a 上全区和各区段平均风速均存在能量密度

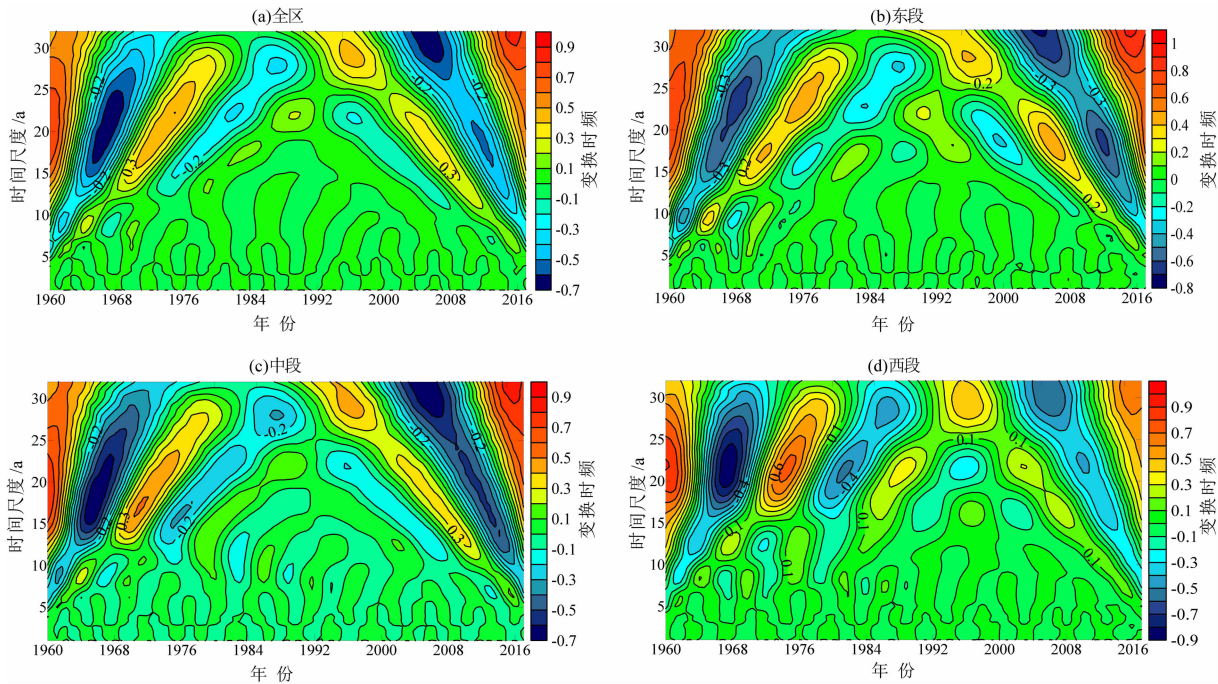


图 6 祁连山平均风速 Morlet 小波系数实部等值线图

Fig. 6 Isograms of real part of Morlet wavelet coefficient of average wind speed in the Qilian Mountains

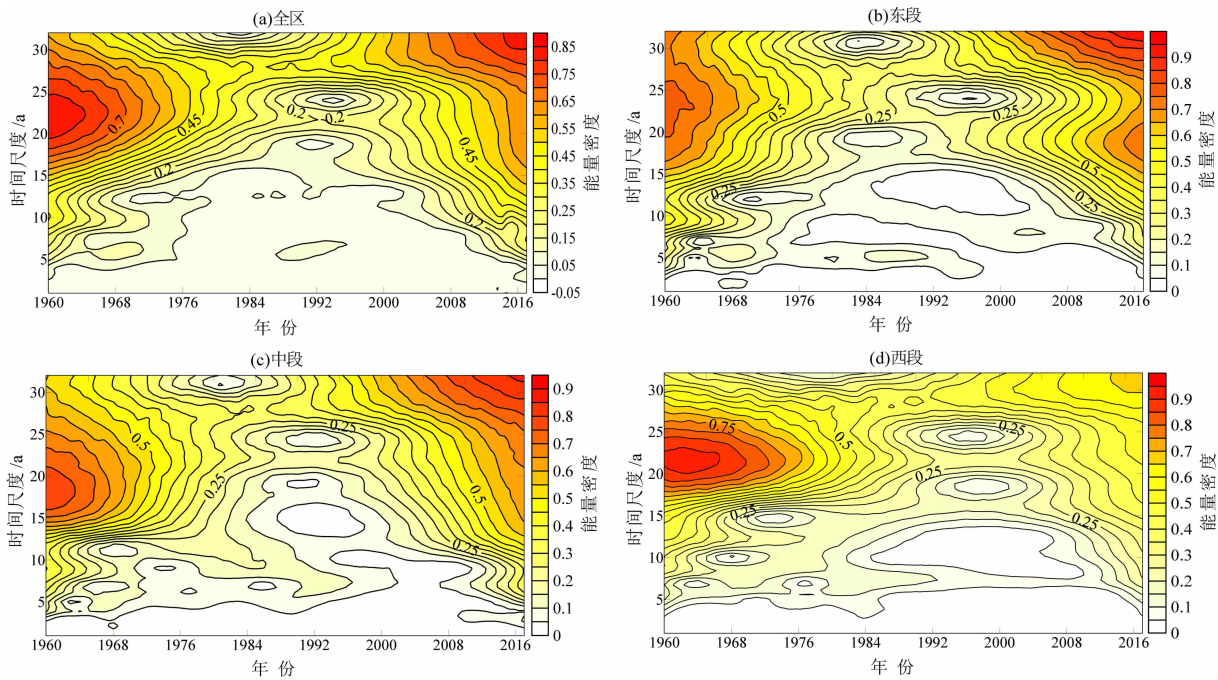


图 7 祁连山平均风速 Morlet 小波系数模值等值线图

Fig. 7 Isograms of modulus of Morley wavelet coefficient of average wind speed in the Qilian Mountains

>0.20 贯穿整个研究时段的现象,故此时间尺度上的周期震荡现象最为明显,其中东、中、西段和全区的能量密度最大值范围分别为 >0.75、>0.75、>0.90和>0.80。通过小波方差(图 8)可以确定全区、东段、中段和西段的第一主周期均为 22 a。

4 风速空间分布变化

4.1 年际空间分布变化

由图 9 可知,祁连山东段、中段和西段平均风速分

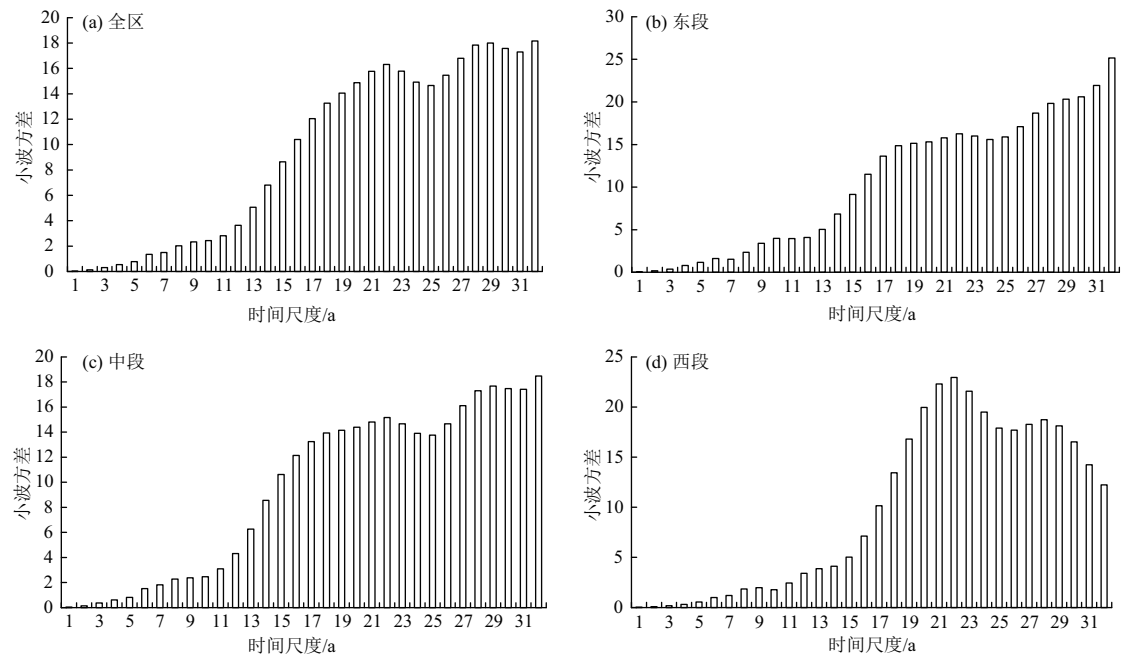


图 8 祁连山平均风速小波方差

Fig. 8 Wavelet variance of average wind speed in the Qilian Mountains

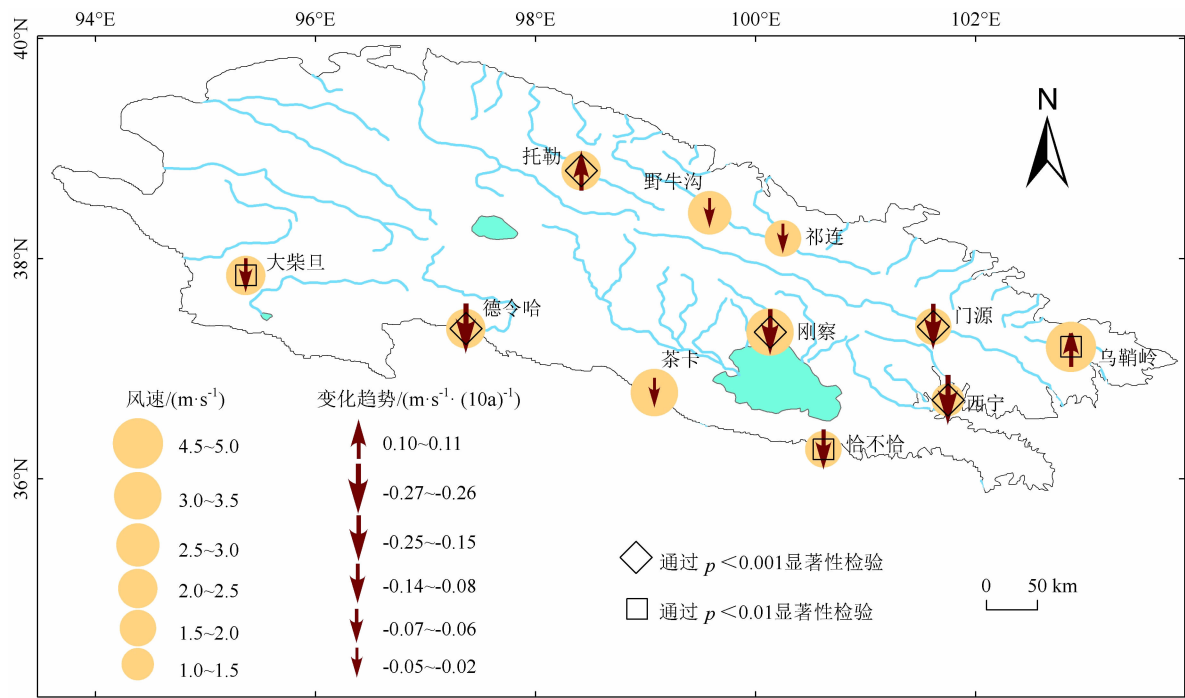


图 9 祁连山平均风速空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of average wind speed in Qilian Mountains

别为 2.70、2.52 和 2.07 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明平均风速自东向西呈递减趋势。乌鞘岭和西宁是全区平均风速最大和最小的站点,分别为 4.95 和 1.47 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。83.33% 气象站点平均风速呈下降态势,其中西宁站点的平均风速降低趋势最大,为 $-0.28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

45.45% 和 27.27% 的气象站点分别通过了 $p < 0.001$ 和 $p < 0.01$ 显著性检验。

4.2 季节空间分布变化

由图 10 可知,春季平均风速最大,冬季最小。从分区段看,风速由大到小依次为东段、中段和西

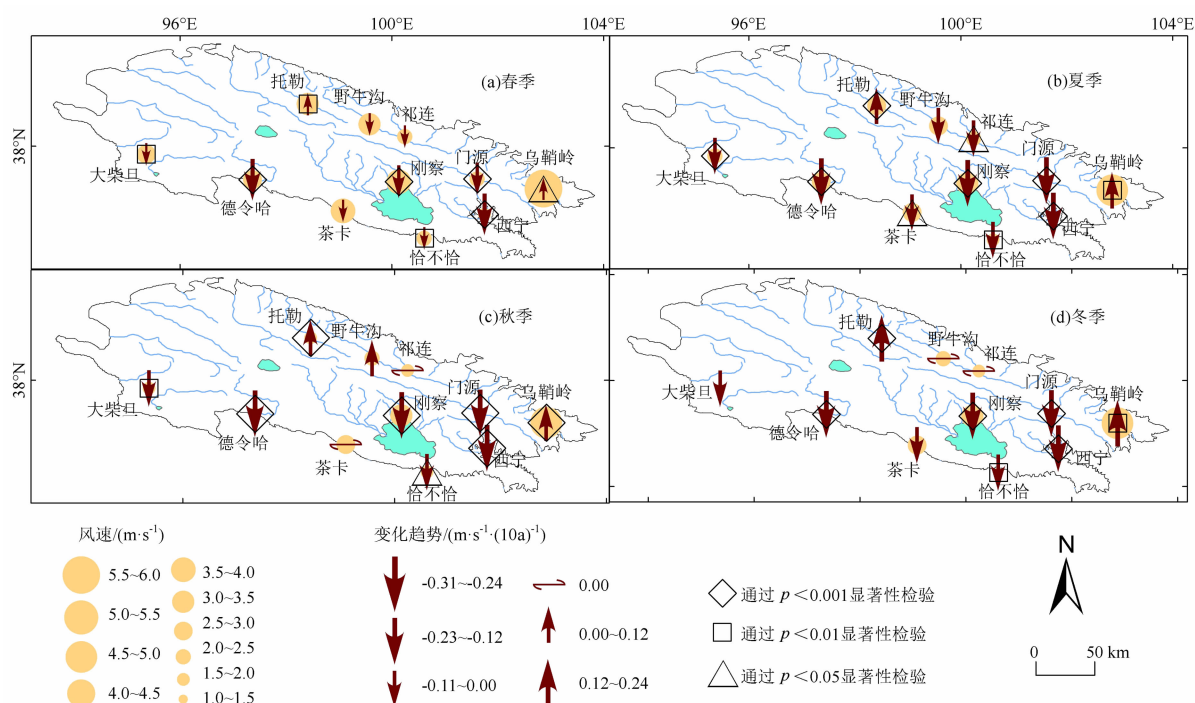


图 10 祁连山平均风速季节空间分布

Fig. 10 Seasonal spatial distribution of average wind speed in the Qilian Mountains

段,说明风速呈现由东向西递减的趋势。四季平均风速最大的气象站点为乌鞘岭站,春季、夏季、秋季和冬季平均风速依次为 5.63 、 4.72 、 4.67 和 $4.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;风速最小的气象站点为西宁站,春、夏、秋和冬平均风速依次为 1.90 、 1.46 、 1.27 和 $1.26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从变化趋势看,四季平均风速以下降趋势为主,春季、夏季、秋季和冬季平均风速为下降趋势的站点比例依次为 81.82% 、 81.82% 、 54.55% 和 63.64% ,其中西宁站和德令哈站下降均较快。除了秋季以外,其余季节平均风速呈正增长的站点均为乌鞘岭和托勒。平均风速无变化的站点为秋季的茶卡、祁连和冬季的祁连、野牛沟。春季、夏季、秋季和冬季通过显著性检验的站点数量占所有站点的比重分别为 72.73% 、 90.91% 、 72.73% 、 63.64% ,其中通过了 $p < 0.001$ 、 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 的站点数量分别是 6 个、2 个和 2 个。

4.3 年代际空间分布变化

由图 11 分析可得,除了 2000—2009 年,其余时期祁连山平均风速由大到小依次为东段、中段和西段,其变化主要受地势和东南季风的影响。1960—1969 年、2000—2009 年和 2010—2017 年以上升趋势为主,上升率均值分别为 0.51 、 0.17 和 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$,尤

其 1960—1969 年上升最快。1970—1979 年、1980—1989 年和 1990—1999 年以下降趋势为主,下降率分别为 -0.42 、 -0.44 和 $-0.49 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。各年代通过显著性检验的站点数量占研究区的比例分别是 36.36% 、 36.36% 、 54.55% 、 63.64% 、 45.45% 和 9.09% 。

5 最大风速的风向变化

年内(图 12a)最大风速的风向存在 S、SSW、SW 和 WSW 四种风向,SW 和 SSW 的百分比频率均为 33.33% ,故以西南风和南西南风为主;4 月最大风速为 $14.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,是年内最大风速的极值。年际最大风速的风向(图 12b)存在 SW、SSW、WSW 和 S 四种风向,其百分比频率分别为 57.89% 、 28.94% 、 10.53% 和 2.63% ,说明以西南风为主,平均最大风速分别为 12.96 、 12.54 、 11.19 和 $10.48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年际最大风速以 $13 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为主,其中 SW 风向的最大风速为 $9.53 \sim 14.75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,占比为 40.91% 。

由图 13 可知,春季最大风速的风向百分比频率由大到小依次为 SW、SSW、WSW、W 和 S,分别为 31.58% 、 28.95% 、 26.32% 、 7.89% 和 5.26% ,说明

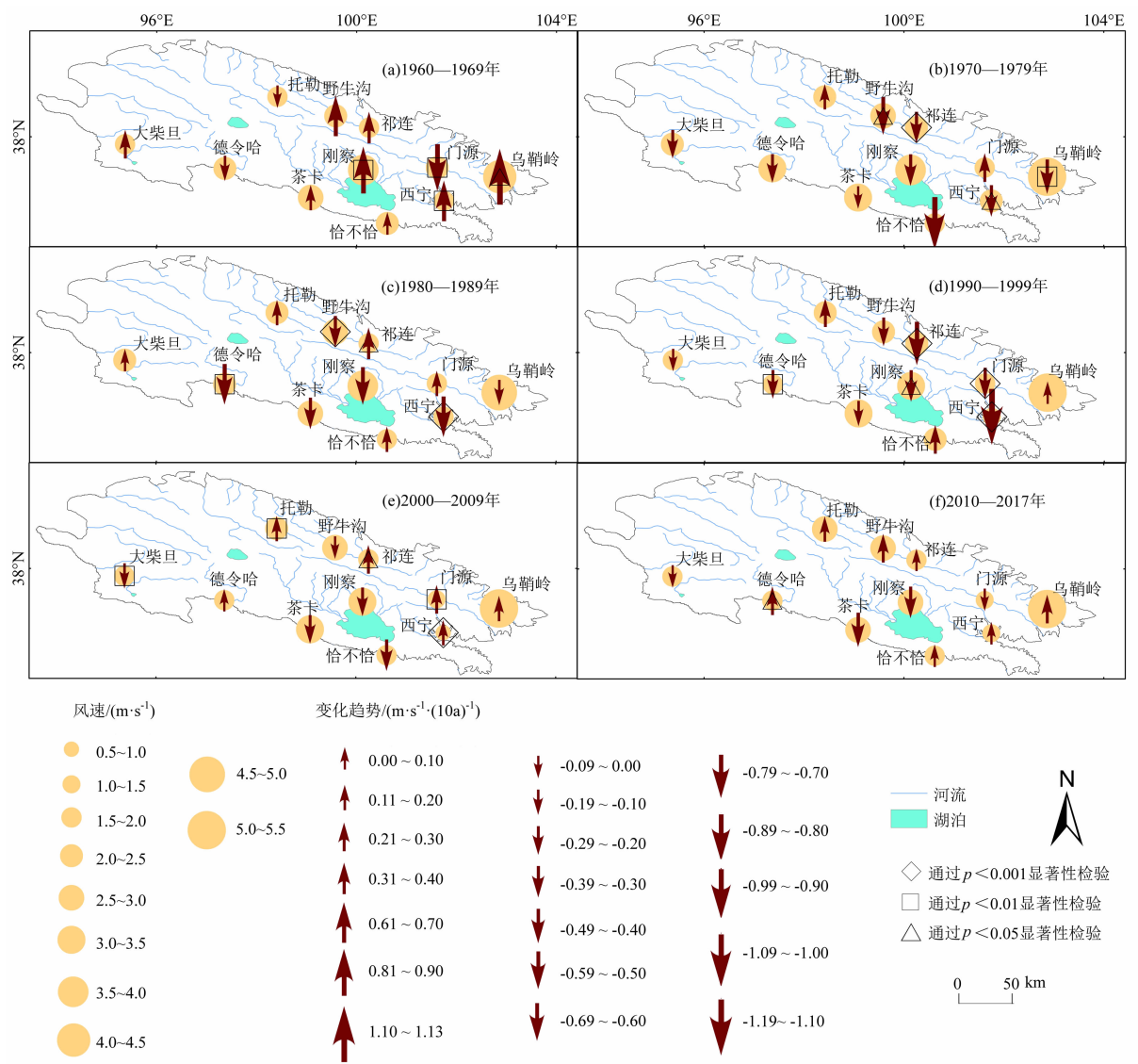


图 11 祁连山年代际平均风速空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of interdecadal average wind speed in the Qilian Mountains

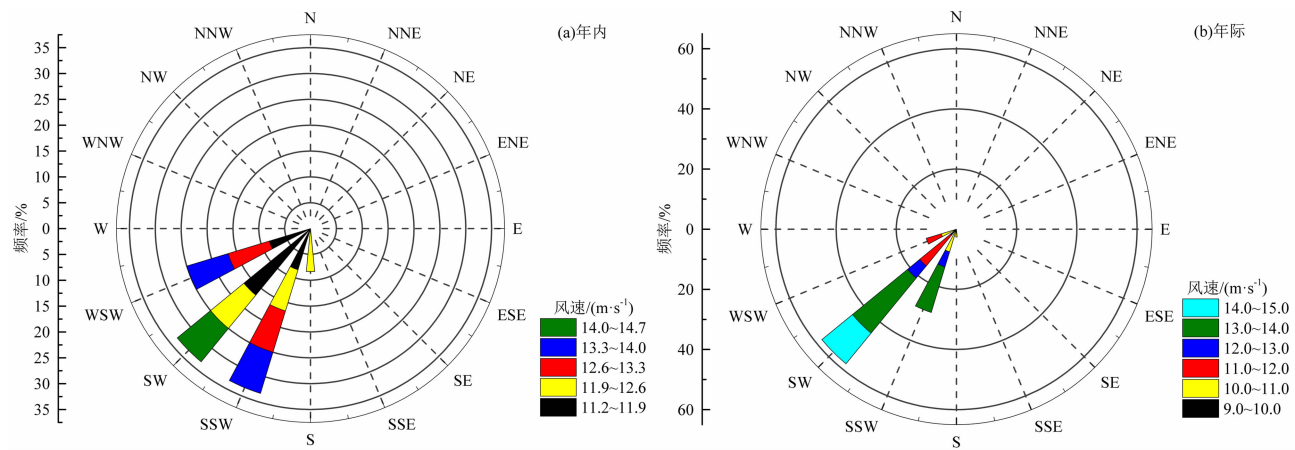


图 12 祁连山年内和年际最大风速和风向变化

Fig. 12 Annual and interannual variation of maximum wind speed and direction in the Qilian Mountains

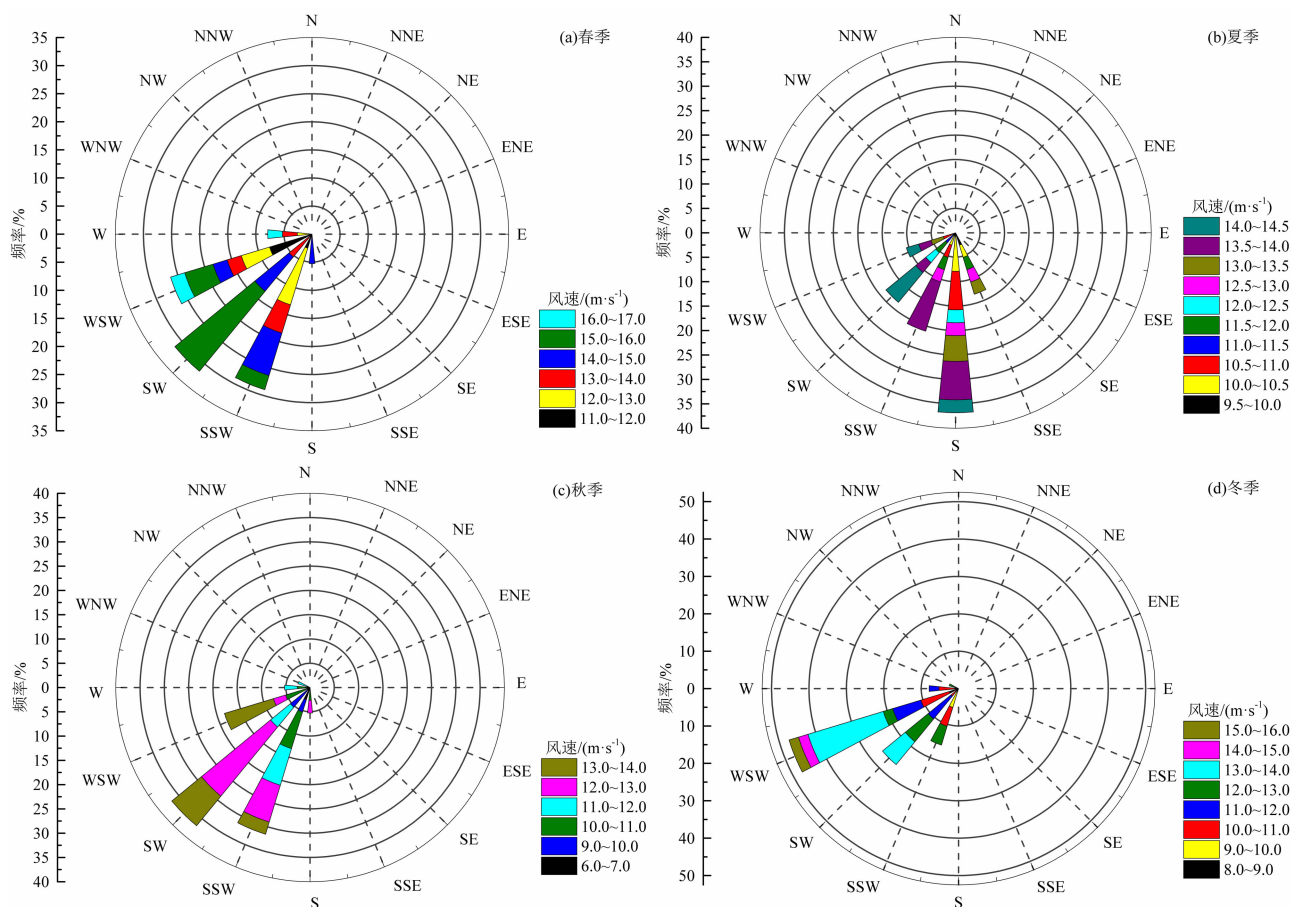


图 13 祁连山季节最大风速和风向变化

Fig. 13 Season variation of maximum wind speed and direction in the Qilian Mountains

春季以西南风为主,其中西南风的平均最大风速为 $14.99 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,春季年际最大风速以 $15 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为主。夏季最大风速的主导风向为南风,百分比频率为 36.84%,最大风速为 $10.09 \sim 14.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。秋季最大风速的风向以 SW 和 SSW 为主,百分比频率分别为 36.84% 和 31.58%,平均最大风速分别为 12.17 和 $11.06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,秋季最大风速以 $12 \sim 13 \text{ m/s}$ 为主,占比为 31.58%。冬季最大风速的主导风向为西西南风 (WSW),百分比频率为 47.37%,其中最大风速为 $13 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,占比为 28.95%。

通过分析可知,年际最大风速的风向以西南风为主,而内部差异性也较为明显,东段的西宁和西段的德令哈最大风速的风向以 SE 为主,东段的乌鞘岭以 S 和 ESE 为主,中段的托勒和野牛沟分别以 W 和 WNW 为主,其余站点均以 SW、WSW 或 SSW 为主(图 14)。东段以 SE 为主,主要受来自太平洋的东南季风影响,中西段以 SW 或 W 为主,主要受到

来自印度洋的西南季风以及西风带的影响。最大风速的最大值和最小值的站点分别是乌鞘岭和德令哈,其值分别为 $18 \sim 19$ 和 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西宁站点的最大风速为 $3 \sim 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对较小,和其城市化水平有一定关系。

6 结论

(1) 祁连山区平均风速和最大风速的变化规律既存在相同点也有差异性,全区平均风速和最大风速年内变化的峰值均出现在春季,分别为 3.06 和 $14.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而中段和东段的最大风速出现在冬季,分别为 12.94 和 $9.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 祁连山区的平均风速和最大风速年变化整体上均呈下降趋势,下降率分别为 -0.07 和 $-1.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。1970—1979 年是祁连山区风力资源最丰富的时段。平均风速的年际、春季、夏季和秋季变化的突变时间均为 1993 年。全区

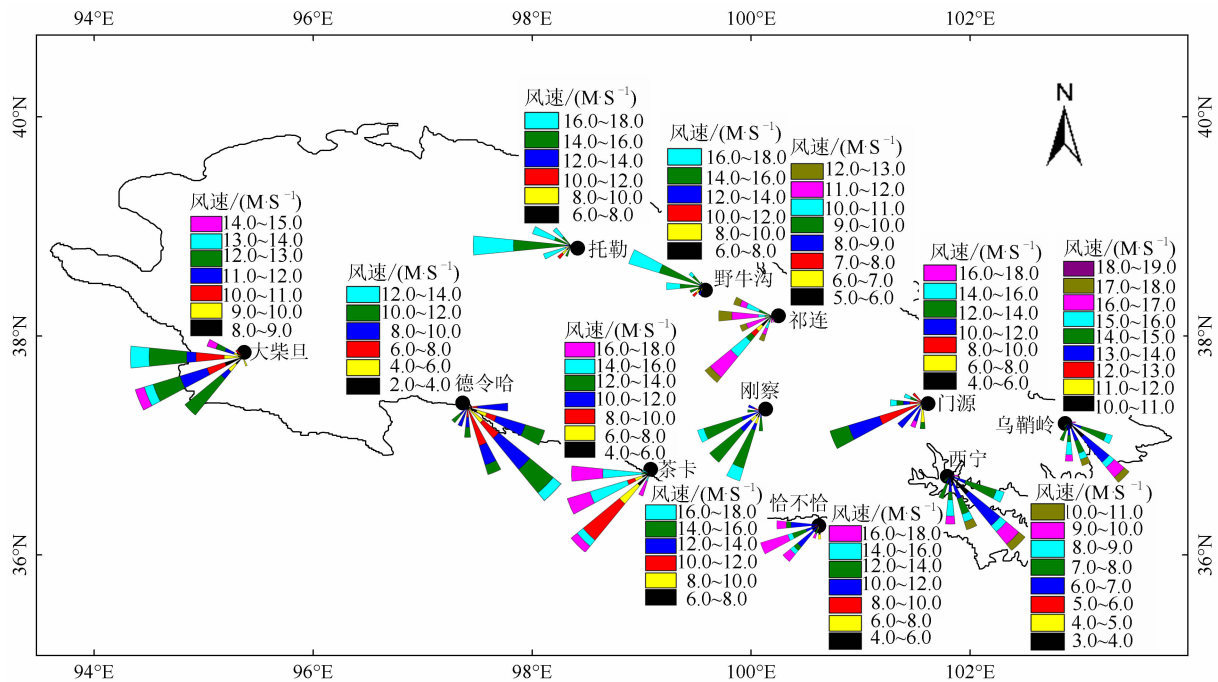


图 14 祁连山年际最大风速和风向空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of annual variation of maximum wind speed and direction in the Qilian Mountains

和各区段的平均风速周期均为 22 a。

(3) 祁连山区年际和季节平均风速变化趋势均呈自西向东递减的趋势, 空间分布表现为东西下降快、中间下降慢的格局。

(4) 祁连山区年内和年际最大风速的风向以偏西南风为主, 春季、夏季、秋季、冬季的主导风分别为 SW、S、SW 和 SSW、WSW, 全区风向以 SW 为主, 而东段以 SE 为主。

参考文献 (References)

- [1] 丁一汇, 李霄, 李巧萍. 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, 2020, **31**(1): 1–12. [DING Yihui, LI Xiao, LI Qiaoping. Advances of surface wind speed changes over China under global warming [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, **31**(1): 1–12]
- [2] 郭小娇, 龚晓萍, 石建省, 等. 典型岩溶区潜在蒸散发变化及其影响因素[J]. 地质学报, 2019, **93**(12): 3269–3281. [GUO Xiaojiao, GONG Xiaoping, DAN Jiansheng, et al. The temporal variations of potential evapotranspiration and influence factors for a typical karst area [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, **93**(12): 3269–3281]
- [3] 张晓龙, 沈冰, 黄领梅. 基于 ITPCAS 再分析资料中国近地面风速时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2020, **37**(1): 1–9. [ZHANG Xiaolong, SHEN Bing, HUANG Lingmei. Spatiotemporal variation of near surface wind speed over China based on ITPCAS reanalyzed dataset [J]. Arid Zone Research, 2020, **37**(1): 1–9]
- [4] 道然·加帕依, 车罡. 新疆东部地区风速的年代际变化及其成因[J]. 干旱气象, 2008, **26**(3): 14–21. [DAORAN Japayi, CHE Gang. Inter-decadal variation characteristics of wind speed in East Xinjiang [J]. Arid Meteorology, 2008, **26**(3): 14–21]
- [5] PRYOR S C, BARTHELMIE R J, RILEY E S. Historical evolution of wind climates in the USA [J]. Journal of Physics. Conference Series, 2007, **75**: 12065–12073.
- [6] 牟初夫, 王礼茂, 屈秋实, 等. 主要新能源发电替代减排的研究综述[J]. 资源科学, 2017, **39**(12): 2323–2334. [MOU Chufu, WANG Limao, QU Qiushi, et al. Review of emission reduction research on major new energy Generation [J]. Resources Science, 2017, **39**(12): 2323–2334]
- [7] 郑崇伟. 21 世纪海上丝绸之路: 风能资源详查[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, **39**(1): 16–22. [ZHENG Chongwei. Wind energy evaluation of the 21 st Century Maritime Silk Road [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, **39**(1): 16–22]
- [8] 石岚, 徐丽娜, 郝玉珠. 基于风速高相关分区的风电场风速预报订正[J]. 应用气象学报, 2016, **27**(4): 506–512. [DAN Lan, XU Li'na, HAO Yuzhu. The correction of forecast wind speed in a wind farm based on partitioning of the high correlation of wind speed [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2016, **27**(4): 506–512]
- [9] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, **63**(6): 942–956. [REN Guoyu, GUO Jun, XU Mingzhi, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, **63**(6): 942–956]

- [10] 王楠,游庆龙,刘菊菊. 1979—2014年中国地面风速的长期变化趋势[J]. 自然资源学报, 2019, **34**(7): 1531—1542. [WANG Nan, YOU Qinglong, LIU Jujun. The long-term trend of surface wind speed in China from 1979 to 2014 [J]. Journal of Natural Resources, 2019, **34**(7): 1531—1542]
- [11] 李悦佳,贺新光,卢希安,等. 1960—2015年长江流域风速的时空变化特征[J]. 热带地理, 2018, **38**(5): 660—667. [LI Yuejia, HE Xinguan, LU Xi'an, et al. Spatio-temporal variability of wind speed in the Yangtze River Basin during 1960—2015 [J]. Tropical Geography, 2018, **38**(5): 660—667]
- [12] 韩柳,王静璞,王光镇,等. 中国北方风蚀区风速变化时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(5): 963—971. [HAN Liu, WANG Jingpu, WANG Guangzhen, et al. Spatial and temporal characteristics of average wind speed in the wind erosion region of northern China [J]. Arid Land Geography, 2018, **41**(5): 963—971]
- [13] 郭小芹,丁文魁,钱莉,等. 祁连山东北缘最大风速气候特征[J]. 干旱区地理, 2015, **38**(3): 446—453. [GUO Xiaoqin, DING Wenkui, QIAN Li, et al. Climate characteristics of the maximum wind speed in northeastern margin of Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2015, **38**(3): 446—453]
- [14] 杜文涛,秦翔,孙维君,等. 祁连山老虎沟冰川积累区风速、风向变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 29—36. [DU Wentao, QIN Xiang, SUN Weijun, et al. Wind characteristics in accumulation area of the Laohugou glacier No. 12, Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(1): 29—36]
- [15] 罗永忠,郭小芹,刘绪珍. 1961年气候变化对祁连山草地生产力影响评价[J]. 山地学报, 2017, **35**(4): 437—443. [LUO Yongzhong, GUO Xiaoqin, LIU Xuzhen. Impact of climate change on grassland productivity of Qilian mountains in 1961—2013 [J]. Mountain Research, 2017, **35**(4): 437—443]
- [16] 周万福,肖宏斌,孙安平,等. 祁连地形云与垂直风的关系[J]. 山地学报, 2012, **30**(6): 641—647. [ZHOU Wanfu, XIAO Hongbin, SUN Anping, et al. The relation between orographic cloud and vertical wind in Qilian [J]. Mountain Research, 2012, **30**(6): 641—647]
- [17] 王海军,张勃,靳晓华,等. 基于GIS的祁连山区气温和降水的时空变化分析[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(6): 1196—1202. [WANG Haijun, ZHANG Bo, JIN Xiaohua, et al. Spatio-temporal variations analysis of air temperature and precipitation in Qilian Mountainous region based on GIS [J]. Journal of Desert Research, 2009, **29**(6): 1196—1202]
- [18] 付建新,曹广超,李玲琴,等. 1960—2014年祁连山中东段及其附近地区气温时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, **35**(3): 549—561. [FU Jianxin, CAO Guangchao, LI Lingqin, et al. Spatiotemporal variation of air temperature in the middle and eastern parts of the Qilian Mountains and the nearby regions during the period of 1960—2014 [J]. Arid Zone Research, 2018, **35**(3): 549—561]
- [19] 戴声佩,张勃,王海军,等. 1999—2007年祁连山区植被指数时空变化[J]. 干旱区研究, 2010, **27**(4): 585—591. [DAI Shengpei, ZHANG Bo, WANG Haijun, et al. Spatiotemporal variation of vegetation NDVI in the Qilian Mountains during the period from 1999 to 2007 [J]. Arid Zone Research, 2010, **27**(4): 585—591]
- [20] 武正丽,贾文雄,刘亚荣,等. 近10a来祁连山植被覆盖变化研究[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(1): 80—87. [WU Zhengli, JIA Wenxiong, LIU Yarong, et al. Change of vegetation coverage in the Qilian mountains in recent 10 years [J]. Arid Zone Research, 2014, **31**(1): 80—87]
- [21] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报, 2008, **63**(3): 257—269. [JIA Wenxiong, HE Yuanqing, LI Zongsheng, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. Region [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(3): 257—269]
- [22] 付建新,曹广超,李玲琴,等. 1960—2014年祁连山日照时数时空变化特征[J]. 山地学报, 2018, **36**(5): 709—721. [FU Jianxin, CAO Guangchao, LI Lingqin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of sunlight hours in the Qilian mountain, China from 1960 to 2014 [J]. Mountain Research, 2018, **36**(5): 709—721]
- [23] 张忠孝. 青海地理[M]. 西宁:青海人民出版社, 2004: 13—19. [ZHANG Zhongxiao. Geography in Qinghai [M]. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2004: 13—19]
- [24] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, **16**(4): 482—493. [FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. scientia Atmospherica Sinica, 1992, **16**(4): 482—493]
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版. 北京:气象出版社, 2007: 69—72. [WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and forecasting technology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological, 2007: 69—72]
- [26] 魏凤英,朱福康,谢宇. 在“98.7”武汉强暴雨过程中不同尺度波动的作用及其相干性[J]. 高原气象, 2005, **24**(1): 49—55. [WEI Fengying, ZHU Fukang, XIE Yu. The effect of multi-scale waves in torrential rain process in Wuhan in July 1998 and its coherence [J]. Plateau Meteorology, 2005, **24**(1): 49—55]
- [27] 黄小燕,张明军,王圣杰,等. 西北地区近50年日照时数和风速变化特征[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(5): 825—835. [HUANG Xiaoyan, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Characteristics of variation in sunshine duration and wind speed in the last 50 years in northwest China [J]. Journal of Natural Resources, 2011, **26**(5): 825—835]
- [28] 徐丽娇,胡泽勇,赵亚楠,等. 1961—2010年青藏高原气候变化特征分析[J]. 高原气象, 2019, **38**(5): 911—919. [XU Lijiao, HU Zeyong, ZHAO Ya'nan, et al. Climate change characteristics in Qinghai-Tibetan plateau during 1961—2010 [J]. Plateau

- Meteorology, 2019, **38**(5): 911–919]
- [29] 何旭强, 张勃, 赵一飞, 等. 黑河流域 1960—2009 年平均风速时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(4): 242–247. [HE Xuqiang, ZHANG Bo, ZHAO Yifei, et al. Temporal and spatial characteristics of average wind speed changes in Heihe river basin from 1960 to 2009 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, **33**(4): 242–247]
- [30] 张占峰, 张焕平, 马小萍. 柴达木盆地平均风速与大风日数的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(10): 90–94. [ZHANG Zhanfeng, ZHANG Huanping, MA Xiaoping. Change features of average wind speed and strong wind days in Chaidamu Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, **28**(10): 90–94]
- [31] 熊敏. 近 30 年中国地面风速分区及气候特征[J]. 高原气象, 2015, **34**(1): 39–49. [XIONG Minquan. Climate regionalization and characteristics of surface winds over China in recent 30 years [J]. Plateau Meteorology, 2015, **34**(1): 39–49]

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Average Wind Speed and Direction in the Qilian Mountains, China

FU Jianxin¹, CAO Guangchao^{2,3*}, GUO Wenjiong¹

(1. Institute of Urban and Regional Development, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China;

2. Key Laboratory of Qinghai Province Physical Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University, Xining 810008, China;

3. Ministry of Education Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and Ecological Conservation, Xining 810008, China)

Abstract: Research on wind speed and direction in mountainous areas play an important role in understanding climate change and utilizing wind resources rationally. Based on the records of average wind speed, maximum wind speed and direction collected at 11 meteorological stations in the Qilian Mountains, spatial and temporal distribution of wind speed and direction was analyzed by using multiple mathematical and ArcGIS spatial analysis methods. Main conclusions were as follows. First, average and maximum wind speed in spring were the highest in a year, and the wind speed in the middle and east segments reached maximum in winter. Second, inter-annual variability of average and maximum wind speed presented a downward trend with a variation rate of -0.07 and $-1.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10\text{a})^{-1}$. Third, wind resources were the most abundant from 1970 to 1979; The annual and seasonal (excepted winter) average wind speed changed abruptly in 1993, abrupt changes in the average wind speed was most pronounced in the eastern and middle sections from 1990 to 1999; The circle of the average wind speed was 22a in the entire study area and its sections. forth, average wind speed showed a decreasing trend from west to east in the research area. Lastly, wind direction of maximum wind speed was dominated by southwest wind and it was dominated by southeast wind at the eastern segment.

Key words: mean wind speed; maximum wind speed and direction; temporal and spatial changes; the Qilian Mountains