

孔锋, 孙 劭, 王 鹏. 1961–2018 年中国风速均值和极端值的时空演变特征[J]. 灾害学, 2021, 36(2): 89–96. [KONG Feng, SUN Shao and WANG Peng. Temporal and spatial evolution characteristics of mean and extreme wind speed in China during 1961–2018[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(2): 89–96. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.016.]

1961–2018 年中国风速均值和极端值的 时空演变特征^{*}

孔 锋^{1,2}, 孙 劭³, 王 鹏⁴

(1. 中国农业大学 人文与发展学院, 北京 100083; 2. 清华大学 应急管理研究基地, 北京 100084;
3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 4. 新疆维吾尔自治区党校, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 基于 1961–2018 年中国 545 个气象观测站点的日值平均风速、最大风速和极大风速数据, 采用多种数理统计方法, 从气候态特征、长期变化趋势、年际波动特征和 1990 年前后的差异特征诊断气候变暖背景下近 58 年来中国风速均值和极端值的时空演变特征。结果表明: ①1961–2018 年中国平均风速具有南低、北高的空间分异特征, 而最大风速和极大风速则呈现东南低、西北高的空间分异特征, 且两者的空间相关系数达 0.71 ($n = 15\ 642$), 通过了 0.01 显著性水平的检验。平均风速、最大风速和极大风速在 1991–2018 年相比 1961–1990 年整体以偏小为主。②中国平均风速、最大风速和极大风速年代距平从 1960 年代至 2010 年代逐渐由正距平为主演变为负距平为主, 且 1960、1970 和 1980 年代以正距平为主, 而 1990、2000 和 2010 年代以负距平为主。③1961–2018 年中国平均风速、最大风速和极大风速均以减少趋势为主, 并具有区域性和次区域性特征, 其中后两者的空间相关系数达 0.75 ($n = 15\ 642$), 通过了 0.01 显著性水平的检验。最大风速和极大风速在 1990 年前后的趋势差异具有较高的空间一致性。④1961–2018 年中国平均风速在西部地区波动相对较大, 最大风速和极大风速的波动特征具有空间相似性, 空间相关系数达 0.57 ($n = 15\ 642$), 通过了 0.01 显著性水平的检验。平均风速、最大风速和极大风速在 1991–2018 年相比 1961–1990 年波动偏大的地区明显多于偏小的地区。

关键词: 平均风速; 最大风速; 极大风速; 时空格局; 变化趋势; 波动特征; 气候变化

中图分类号: P425; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)02–0089–08

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.02.016

气候变化已成为影响全球和区域社会经济可持续发展的因素之一^[1–2]。当前全球气候变化系统研究中对温度和降水的关注较多, 而对风速的关注相对较少^[3–5]。大风既是重要的气候资源, 也是常见的城市气象灾害之一^[6]。在城市社会经济发展中, 大风对高层建筑、电力设施、交通运输等各行业生产和人民生活的影响及破坏趋于频繁^[7]。城市中间距极小或位于街道两旁的高层建筑物之间, 往往会使风速增大, 形成“狭管效应”, 建筑物越高, 风速越大^[8]。同时建筑物的阻挡会改变风向和风速, 加之城市热岛效应影响, 甚至引发涡旋^[9]。建筑物的附属设施在设计安装时对风力影响和危害估计不足, 大风袭击时会受损、折断、刮倒或坠落伤人, 造成生命和财产损失^[10]。

近 100 年来全球平均地面气温升高了约 0.74℃, 而全球及不同区域的近地表平均风速整体趋于减小, 尤其是在中纬度地区。与温度所呈现出的连续性分布不同, 风速因具有一定的瞬时性, 其概率分布呈现出一定的偏态分布, 即拖尾现象, 因此, 风速变化具有区域性和次区域性及不同时间

上的差异特征, 且平均风速的变化并不能指示极端风速的变化^[11–12]。全球中纬度和热带地区年均风速下降的平均速率为 $-0.014\text{ m}/(\text{s} \cdot \text{a})$, 南北纬大于 70°的高纬度地区风速呈增大趋势^[13]。全球过去几十年的极端风速如日最大风速和日极大风速的变化趋势并不是很明确, 尚未取得一致性的结论, 这主要是因为极端风速对仪器老化等非自然因素的影响更为敏感, 且未经过均一化订正的原始数据误差相比平均风速较大^[13]。例如, 极端风速在西班牙和葡萄牙、荷兰、智利等地呈现减少趋势, 但在美国、日本、南非等地呈现增加趋势^[9, 14–15]。此外, 有研究指出全球海洋表面的风速也呈现出一定的增加趋势, 这些结果给全球风速的变化带来了较大的不确定性^[13]。最新的研究发现陆地平均风速在经过一段时间的快速下降后, 在最近 10 年左右呈现出逐渐稳定或略微增加的趋势。对中国而言, 20 世纪最后 30 年中国年均风速下降了 28%, 且强风区风速降幅大于弱风区^[14]。近年来的研究表明, 中国东北、华北、西北、西南、青藏高原、华中、东南等地区的风速

^{*} 收稿日期: 2020–07–13 修回日期: 2020–11–09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1510202; 2018YFC1509003); 国家自然科学基金项目(41701103; 41775078; 41801064)

第一作者简介: 孔锋(1986–), 男, 汉族, 山西临汾人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化风险与自然灾害研究。

E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

通讯作者: 孙劭(1989–), 男, 汉族, 北京人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化诊断及区划研究。E-mail: sunshao@cma.gov.cn

也存在不同程度的减少趋势^[15-21]。中国风速的下降速率具有时段分异特征^[22-24]，其在 1990 年发生了转折，即 1990 年后的下降速率明显变小^[25]；同时也呈现季节性的差异特征，春季下降最大，秋季次之，秋季再次之，夏季最小^[26]。已有研究认为伴随城市化进程的快速发展，土地利用已成为影响区域风速变化的重要因子^[29-30]。城市地区的风速一般小于农村地区风速，且城市化进程会加剧风速降低，受土地利用的影响，城市化率每增加 10%，风速下降 0.11 m/s^[31]，同时风速受高程影响较大^[20,22]。现有中国风速研究中多关注日平均风速的趋势性变化特征，而从多属性变化研究较少，对极端风速的研究较少。

本文基于 1961–2018 年中国平均风速、最大风速和极大风速数据，从气候分布特征、年代距平变化、趋势性变化和波动性变化方面诊断中国不同类型风速的时空演变特征，以期对增暖背景下中国区域的风速变化与地区差异有一个全面认识。研究结果一方面可为风能资源开发规划提供参考，另一方面也可为区域风灾防范提供可能的支撑。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文采用的 1961–2018 年的中国风速数据来自于中国气象局国家气象信息中心的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》，该数据集包括 2 482 个气象观测站点，其中风速指标包括平均风速、最大风速和极大风速三项，其中最大风速是给定时段内的 10 min 平均风速的最大值，极大风速是指给定时段内的瞬时风速的最大值，因此，最大风速是个平均值，极大风速是个瞬时值。该数据集制作过程中经过了严格的“台站—省级—国家级”三级质量控制，各要素项数据质量良好，实有率普遍在 99% 以上，数据的正确率均接近 100%，数据的空间覆盖范围为：73°40′~135°05′E，4°00′~53°31′N。鉴于中国多数气象观测站点建站时间在 1960 年之前，因此，本文研究时段从 1961 年开始。在站点选取上，本文对年值数据进行校验，对于错误数据和缺测数据采用临近站点数值进行插补。如一个站点的插补率小于 0.5%，则保留该站点，否则剔除该站点，最终得到 545 个站点数据如图 1 所示。

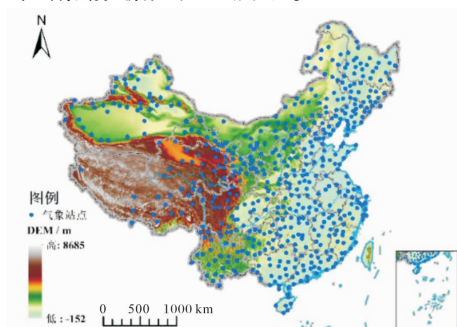


图 1 中国数字高程和气象站点分布
(审图号: GS(2016)2923 号, 下同)

1.2 计算方法

本文采用图谱对比、距平分析、线性趋势、变异系数、空间相关等多种统计方法^[17]，从气候态特征、距平演变、线性趋势和波动特征多个方面诊断 1961–2018 年中国不同类型风速的时空演变特征。首先计算中国 545 个站点的平均风速、最大风速和极大风速的年均值来反映不同类型风速的气候态特征。其次，采用距平分析方法诊断不同类型风速在不同年代的时空演变特征。再其次，基于最小二乘法原理计算不同类型风速的变化趋势。最后，采用变异系数的方法计算不同类型风速的波动特征。在此基础上，本文进一步对比了 1990 年前后时段中国不同类型风速的多属性演变特征。本文基于上述站点计算结果采用反距离权重(IDW)进行空间插值。上述变化趋势和波动特征的具体计算方法如下：

对于样本量为 n 的不同类型风速序列 y_j ，用 t_j 表示所对应的时刻，建立 y_j 与 t_j 之间的一元线性回归方程：

$$\hat{y}_j = a + bt_j. \quad (1)$$

式中： a 为方程的回归常数， b 为回归系数。利用最小二乘法可求出和。

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{j=1}^n y_j t_j - \frac{1}{n} (\sum_{j=1}^n y_j) (\sum_{j=1}^n t_j)}{\sum_{j=1}^n t_j^2 - \frac{1}{n} (\sum_{j=1}^n t_j)^2}, \\ a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j - b \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j. \end{cases} \quad (2)$$

式中：回归系数 b 的符号表示不同类型风速的线性趋势。 $b > 0$ 表明随时间增加 y 呈增加趋势，即上升趋势， $b < 0$ 表示随时间增加 y 呈减少趋势，即下降趋势。 b 的大小反映上升或下降的速率，即表示上升或下降的倾向程度^[22]。

本文采用变异系数诊断不同类型风速的波动特征。变异系数是衡量一组数据变异程度的统计量，是标准差与平均值的比值，可以用于衡量数据的波动性。其计算公式为

$$v = \frac{S}{|\bar{x}|}. \quad (3)$$

式中： S 为标准差， $|\bar{x}|$ 为平均值。变异系数可以消除单位和平均值不同对两个或多个资料变异程度比较的影响。在本文中，变异系数越小，表明风速的年际变异越小，即波动程度越小；反之，变异系数越大，表明风速的年际变异越大，即波动程度越大。本文采用空间相关度量不同风速空间分布的相似性，如果某一变量的值随着另一变量测定距离的缩小而变得更相似，则这两个变量呈空间正相关；反之，则为空间负相关。本文将 1961–1970、1971–1980、1981–1990、1991–2000、2001–2010、2011–2018 年分别称之为 1960、1970、1980、1990、2000 和 2010 年代。

2 结果与分析

2.1 不同类型风速气候态时空分异特征

从不同类型风速的气候分布特征来看，1961–

2018 年中国平均风速整体呈现出南低、北高的空间分异特征。其中东北、内蒙古、黄土高原北部、新疆东部和北部、青藏高原中西部等地区的平均风速较大, 大都超过了 2.5 m/s (图 2a), 局部地区最大超过了 3.4 m/s 。新疆中西部、青藏高原东部、黄土高原南部、西南、长江中下游以南、华北、东北等地区的平均风速较小, 大都低于 2.2 m/s , 局部地区最小低于了 1.3 m/s 。在东部地区中, 黄淮东部和江淮东部的平均风速也相对较大, 也都超过了 2.5 m/s 。1961–2018 年中国最大风速和极大风速的气候分布特征具有较高的一致性, 两者的空间相关系数为 $0.71 (n = 15\ 642)$, 通过了 0.01 显著性水平的检验。两者整体呈现出东南和西北分异特征, 具体表现为东南和新疆中西部低、东北和内蒙古及青藏高原高的空间分异特征 (图 2b, 图 2c)。其中新疆西部、华北和黄河中下游以南多数地区的最大风速和极大风速较小, 大都低于 5.6 m/s 。青藏高原中北部和内蒙古北部等地区的最大风速和极大风速最大, 超过了 7.2 m/s 。整体来看, 中国不同类型风速在高海拔和高纬度地区相对较大。其中青藏高原和内蒙古地区是中国平均风速、最大风速和极大风速分布较大的地区。新疆中西部和黄河中下游以南地区则是三者分布较小的地区。

1990 年后全球气候变化进入快速发展期, 气候变暖速率明显增加, 全球气候中的多个子系统和要素发生明显变化, 例如 ENSO 系统和海气循环系统^[27]。同时, 1990 年后中国城市化进程也进入快速发展期, 人类活动的深度和广度得到了明显的提升, 土地利用变化程度剧烈, 尤其是不透水层增加显著, 城市群快速崛起, 这都导致区域气

候不可避免的受到影响^[28]。本文研究时段在 1990 年前后时间大致相等, 具有可比性。因此, 为了诊断 1990 年前后中国不同风速气候分布的差异特征, 本文采用 1991–2018 年中国不同风速减去 1961–1990 年中国相同类别风速, 结果如图 3 所示。整体来看, 对平均风速、最大风速和极大风速而言, 三者 1991–2018 年的风速大小明显低于 1961–1990 年。其中平均风速在西北、内蒙古、东北、黄淮、江淮地区明显偏低, 偏低幅度多数超过了 0.3 m/s (图 3a)。平均风速偏高的地区仅分布在西藏中部和东部等地区。最大风速和极大风速在 1990 年前后的差异特征具有一致性, 两者的空间相关系数为 $0.74 (n = 15\ 642)$, 通过了 0.01 显著性水平的检验。1991–2018 年的最大风速和极大风速相比 1961–1990 年而言, 均在东北、华北、新疆中部和西部、东南地区偏小, 尤其是东南地区的偏小幅度多数超过了 0.8 m/s (图 3c, 图 3d)。最大风速和极大风速偏大的地区较多分布在青藏高原中部、新疆东部和内蒙古中西部等地。整体来看, 中国绝大多数地区的不同类型平均风速在 1990 年前后时段的明显减小与全球气候变暖背景下的全球平均风速减小相一致, 风速偏大的地区均分布在青藏高原中部等局地地区。在中国东部地区除自然气候因素外, 以快速城市化为表征的剧烈人类活动改变了下垫面的粗糙度, 其在一定程度上减小了区域风速特征。

2.2 不同类型风速的年代距平时空演变特征

为了诊断中国不同类型风速在不同年代的演变特征, 本文采用不同类型的年代风速均值减去 1961–2018 年同类别风速均值, 结果如图 4、图 5 所示。

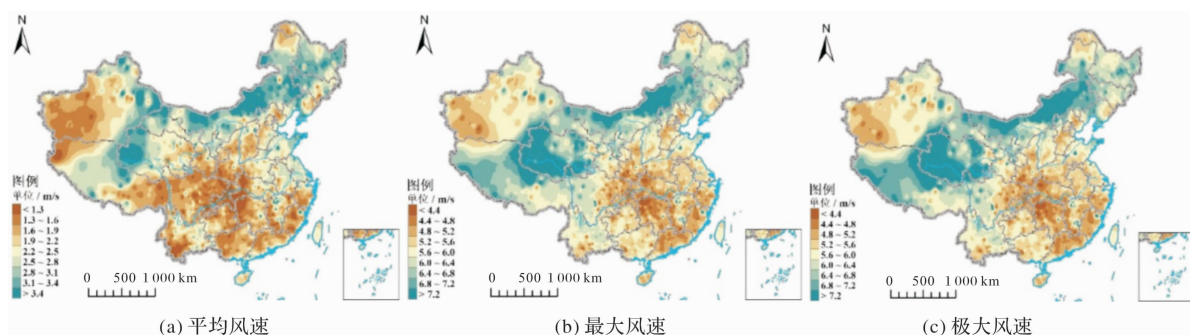


图2 中国不同类型风速的空间分异格局

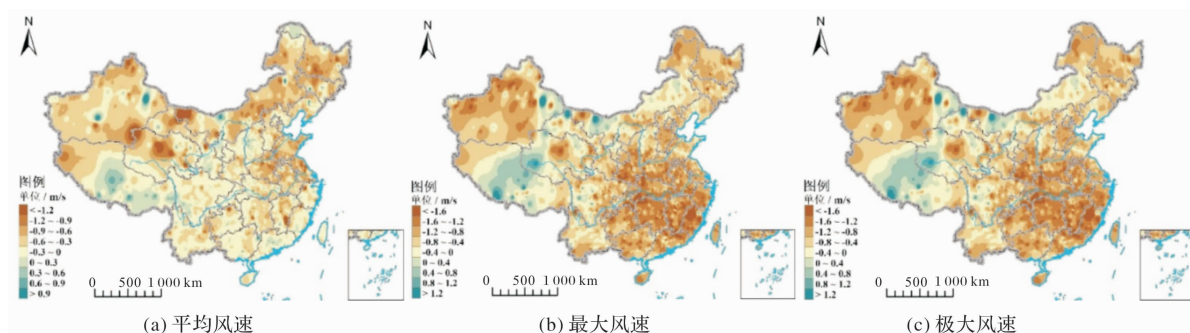


图3 中国不同类型风速在 1990 年前后的时空差异特征

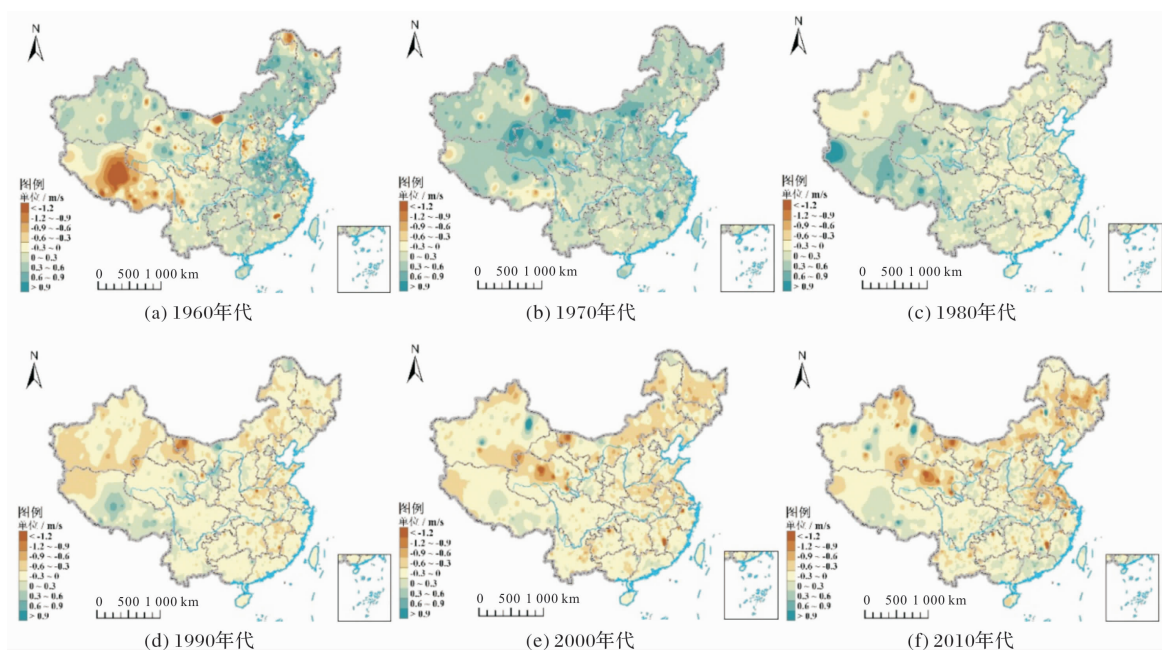


图4 中国平均风速年代距平的时空格局

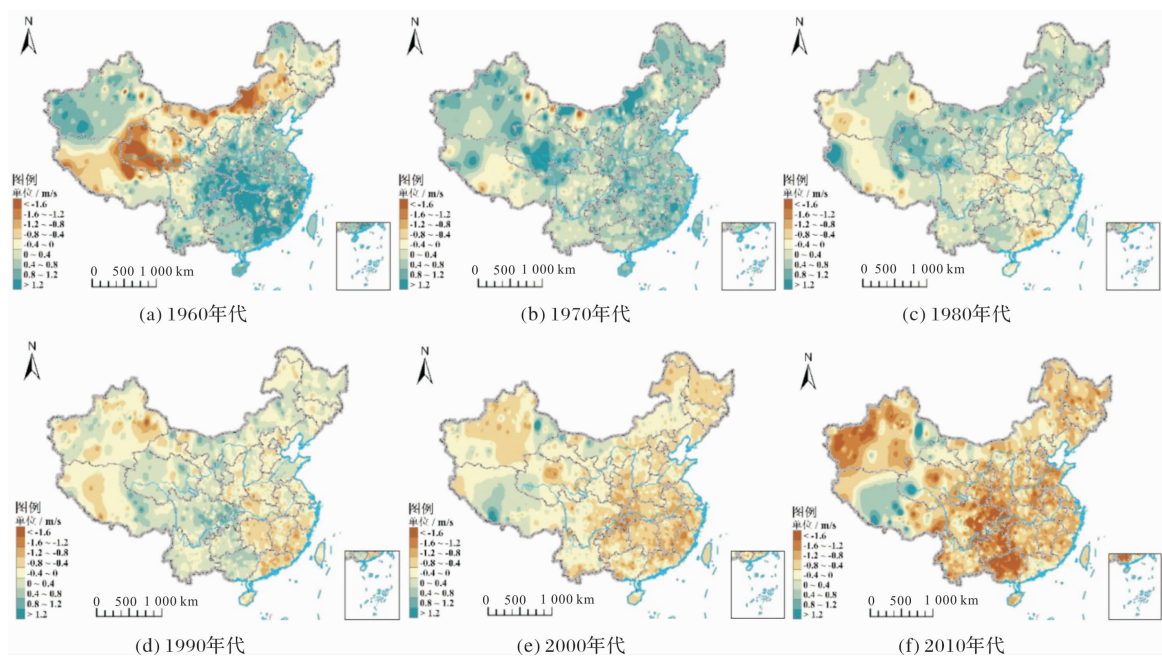


图5 中国最大风速年代距平的时空分异特征

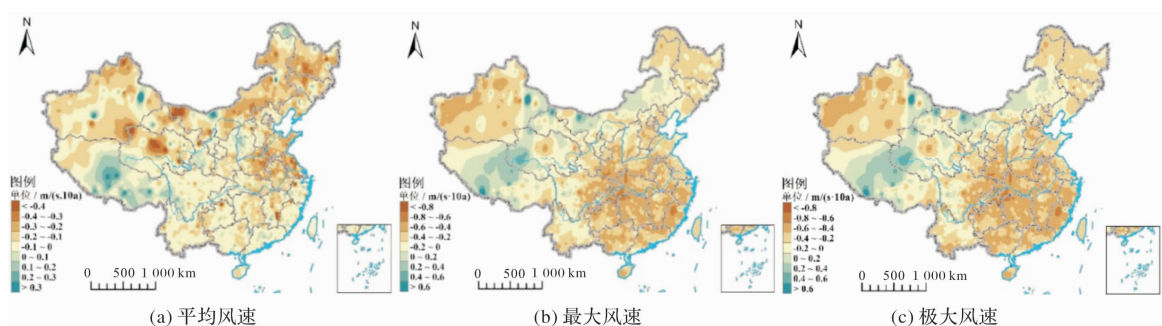


图6 中国不同类型风速变化趋势的空间分异特征

从平均风速年代距平演变来看, 中国平均风速在 1960、1970 和 1980 年代以正距平为主(图 4a, 图 4b, 图 4c), 表明这 3 个年代的平均风速相比整个研究时段偏大, 尤其是 1970 年代偏大幅度最大。值得注意的是, 1960 年代的平均风速在西藏、山西西南部等地区明显偏小。1990、2000 和 2010 年代的平均风速主要以负距平为主(图 4d, 图 4e, 图 4f), 表明这 3 个年代的平均风速相比整个研究时段偏小, 尤其是 2000 年代偏小幅度最大。值得注意的是, 1990 年代的西藏地区、2010 年代的华南地区等地的平均风速呈正距平, 表明这些时段和地区的平均风速相对偏大。从最大风速来看, 中国最大风速在 1960、1970 和 1980 年代以正距平为主(图 5a, 图 5b, 图 5c), 表明这 3 个年代的最大风速大于整个研究时段, 尤其是 1970 年代偏大幅度最大。1960 年代东南地区、新疆等地区呈现正距平, 而内蒙古和青藏高原等地则呈现负距平。1990 年代中国最大风速发生急剧变化, 最大风速的正负距平均有较多分布(图 5d), 其中新疆和西藏西部、除山东以外的华北、华中、华东和华南东部等地区的最大风速以负距平为主; 西南、西藏东部、广西、山东、内蒙古、东北等地最大风速以正距平为主。2000 和 2010 年代的最大风速主要以负距平为主(图 5e, 图 5f), 其中 2000 年代的东北、新疆和东南地区, 2010 年代的新疆、内蒙古、东北、西南和东南地区的负距平较大。中国极大风速的年代距平与最大风速的年代距平呈现出一致的时空演变特征。综上可知, 全球气候变暖和快速城市化背景下, 中国不同类型风速距平随年代发展逐渐由以正距平为主, 演变为以负距平为主, 且距平差异幅度呈现出年代差异性特征。

2.3 不同类型风速变化趋势的时空分异特征

从变化趋势来看, 1961–2018 年中国不同类型风速整体以减少趋势为主(图 6)。其中平均风速的减少趋势幅度在西北、内蒙古、东北、黄淮和江淮地区较大(图 6a), 在西南和华南地区较小。西藏中部和东部地区的平均风速则呈现出不同幅度的增加趋势。1961–2018 年中国最大风速在新疆中部和西部、东北、华北及其以南的东南地区均呈减少趋势(图 6b), 尤其是东南地区的减少趋势幅度较大。最大风速呈增加趋势的地区主要集中在青藏高原中部、新疆东部、内蒙古中部和西部地区。中国极大风速在 1961–2018 年的趋势变化特征的空间分异格局与最大风速的趋势变化特征具有一致性(图 6c), 两者的空间相关系数为 $0.75(n=15\ 642)$, 通过了 0.01 显著性水平的检验。对比来看, 1961–2018 年中国平均风速在高纬度地区和两淮地区减少趋势最大, 而最大风速和极大风速则是在东南地区减少趋势最大。具有一致性的是三种类型风速均在西藏中部地区呈现增加趋势。中国不同类型风速整体上的减少趋势

特征与气候变暖大背景下的全球风速减小特征相一致, 并表现出区域性和次区域性的趋势性差异特征。

为了诊断 1990 年前后中国不同类型风速变化趋势的差异特征, 本文采用 1991–2018 年中国不同类型风速的变化趋势减去 1961–1990 年相同类别风速的变化趋势, 结果如图 7 所示。从平均风速来看, 整体来看中国多数地区的平均风速趋势在 1991–2018 年明显大于 1961–1990 年, 青藏高原等地区则恰好相反。具体来看, 青藏高原及毗邻的东麓地区、甘肃南部、宁夏及其相邻的内蒙古地区、山西西南部、河北南部、黑龙江中部和北部等地区的趋势在 1990 年之后相比之前相对偏小(图 7a), 而中国东南地区、新疆和内蒙古的多数地区的趋势在 1990 年之后相比之前则相对偏大。1991–2018 年中国最大风速相比 1961–1990 年而言, 在东北、内蒙古、新疆中西部及东南部、青藏高原中部和东部、西藏西北、西南地区、广西、山东等地呈偏少趋势(图 7b), 且多数地区的偏少幅度较大, 超过了 $0.8\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$, 上述趋势偏小的地区在地理空间上相对连续, 且连绵成为“人”字型分布态势。最大风速趋势偏大的地区则主要分布在新疆东部及西南部、西藏西北部至中南部、华北以南至华南沿海–华中及其以东的广大东部等地区, 且多数地区的趋势偏大幅度超过了 $0.6\text{ m}/(\text{s} \cdot 10\text{a})$ 。中国极大风速在 1990 年前后的趋势差异特征与最大风速的趋势差异特征具有一致性(图 7c), 两者的空间相关系数为 $0.71(n=15\ 642)$, 通过了 0.01 显著性水平的检验。

2.4 不同类型风速波动特征的时空分异特征

本文采用变异系数来表征波动特征, 即采用 1961–2018 年中国不同类型风速的变异系数来揭示不同类型风速的平均年际变率。波动特征越大, 表明风速的变异性越强, 也即不稳定性越强, 其给防灾减灾和资源规划利用所带来的不确定性和挑战也越大。从波动特征来看, 1961–2018 年中国平均风速的波动特征较大的地区主要分布在新疆南部、西藏、青海东部地区; 华北中部和南部至长江中下游一带的波动特征的次区域性较大; 除此之外, 全国其它地区的平均风速的波动特征则较小(图 8a)。从最大风速来看, 1961–2018 年中国最大风速波动特征较大的地区主要集中在新疆东部的哈密、川陕鄂渝湘贵等地区, 全国其它地区波动则相对较大, 尤其是东北、华北、西北、云南等地(图 8b)。极大风速在 1961–2018 年的波动特征则在黄河中下游以南地区及其以北的川陕鄂交界地区波动较大, 而东北、华北和西北东部的波动特征相对较小(图 8c)。整体来看, 1961–2018 年中国最大风速波动特征与极大风速波动特征的空间分异特征具有相似性, 两者的空间相关系数为 $0.57(n=15\ 642)$, 通过了 0.01 显著性水平的检验。

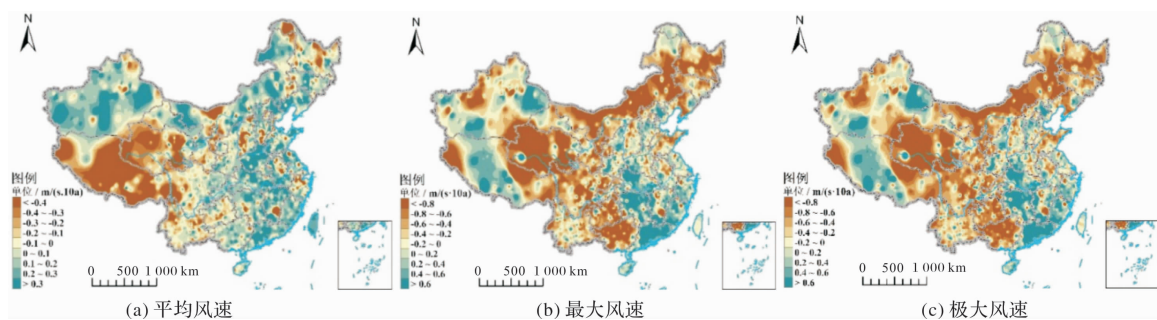


图7 中国不同类型风速变化趋势在1990年前后的时空差异特征

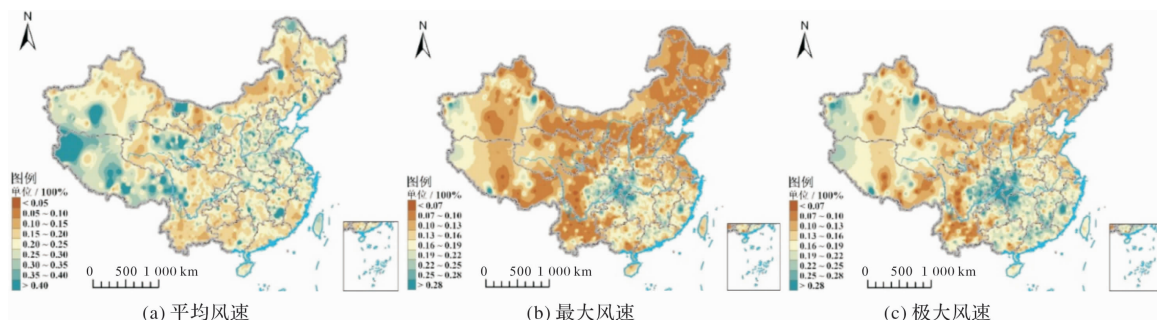


图8 中国不同类型风速波动特征的空间分异特征

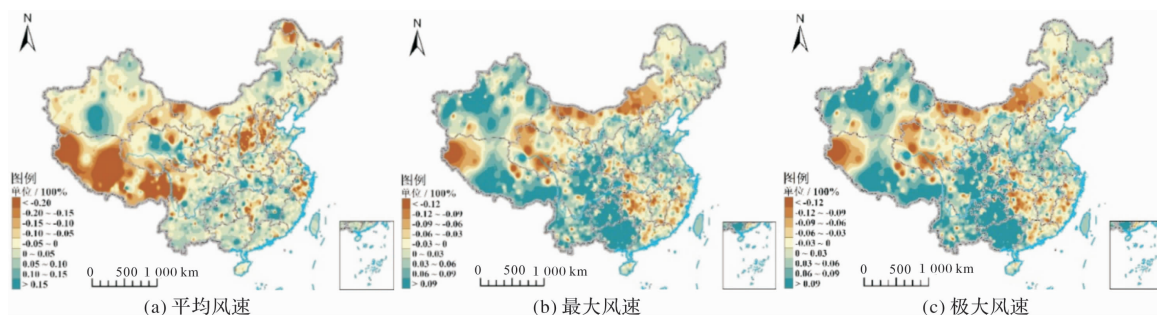


图9 中国不同类型风速波动特征在1990年前后的时空差异特征

为了诊断1990年前后中国不同类型风速波动特征的差异性,本文采用1991–2018年中国不同类型风速波动特征减去1961–1990年中国同类别风速的波动特征,结果如图9所示。从平均风速来看,1991–2018年中国平均风速波动特征相比1961–1990年偏小的地区主要集中西藏、华北、新疆东部、甘肃北部、内蒙古西部、浙江等地,这表明1990年之后上述地区平均风速的年际变异趋于减小(图9a)。1991–2018年中国东北中部、内蒙古东部、青海中部、新疆南部、长江中下游以南地区等地平均风速的波动特征相比1961–1990年偏大,表明上述地区平均风速的年际变异在1990年之后趋于增大。从最大风速来看,1991–2018年中国最大风速波动特征相比1961–1990年偏小的地区主要集中内蒙古、青海、西藏西部和湘赣浙闽粤等地区,而偏大的地区则主要集中在广西、西南地区、西藏中部和东部、新疆、东北、华北南部、两淮地区(图9b)。中国极大风速波动特征在1990年前后的差异分布与最大风速波动特征在1990年前后的差异分布具有一致性,两者的空间相关系数为0.66($n=15642$),通过了0.01显著性水平的检验。整体来看,中国不同类

型风速波动特征在1990年前后增大的地区多于减小的地区,尤其是最大风速和极大风速,且波动增减的分布具有区域性和次区域性分异特征。

3 结论和讨论

3.1 结论

(1)在气候分布上,1961–2018年中国平均风速呈南低、北高的空间分异特征,最大风速和极大风速则呈东南低、西北高的空间分异特征,且两者分局具有一致性,空间相关系数达0.71($n=15642$),通过了0.01显著性水平的检验。三种类别风速在青藏高原和内蒙古地区普遍较大,而在新疆中西部和黄河中下游以南地区较小。1990年前后的差异特征表明中国三种类别风速气候态特征在快速城市化和全球变暖背景下均以减小为主,仅在西藏地区有增加。

(2)在年代距平上,中国三类风速距平均逐年代发展逐渐由以正距平为主演变为以负距平为主,且具有年代差异特征。其中1960、1970和1980年代三类风速相比整个研究时段偏大,以正距平为

主, 而 1990、2000 和 2010 年代则偏小, 以负距平为主。

(3) 在变化趋势上, 1961–2018 年中国三类风速主要以减少趋势为主, 与气候变暖背景下的全球风速减小具有一致性, 并表现出区域性和次区域性特征。最大风速和极大风速的趋势空间分布具有较高的相似性, 空间相关系数达 0.75 ($n = 15\ 642$), 通过了 0.01 显著性水平的检验。在 1990 年前后趋势差异上, 最大风速和极大风速具有一致性, 空间相关系数为 0.71 ($n = 15\ 642$), 通过了 0.01 显著性水平的检验。

(4) 在波动特征上, 1961–2018 年中国平均风速在新疆南部、西藏、青海东部地区波动较大。最大风速与极大风速波动特征具有相似性, 空间相关系数达 0.57 ($n = 15\ 642$), 通过了 0.01 显著性水平的检验, 两者波动大的地区主要分布在川陕鄂渝湘贵等地区。三类风速在 1990 年前后波动增大的地区多于减小的地区, 尤其是最大风速和极大风速波动增加地区较多, 且分布具有区域性和次区域性特征。

3.2 讨论

本文诊断了近 58 年来中国平均风速、最大风速和极大风速的时空演变特征, 这对于系统了解全球气候变暖背景下中国区域风速系统的响应变化具有重要作用。中国气象站点分布东多西少, 且分布极不均匀, 尤其是青藏高原西部更少^[17], 同时气象站点可能受到城市化进程的潜在影响^[23–26], 这在一定程度上导致了本文结果的不确定性。但本文研究发现中国多数地区不同类型风速均趋于减小, 尤其是在东南沿海城市化水平较高的地区, 这与已有研究中的结论相一致^[13,15,20]。目前关于风速变化的解释原因主要是: ①观测仪器的更换或老化、站点迁移等引起的观测数据的不均一性, 导致观测数据中平均风速呈增加趋势^[27]。②全球变暖后, 大尺度大气环流发生变化, 尤其是纬向环流的减弱引起了平均风速的减小趋势。例如北大西洋涛动、东亚冬季风和夏季风的减弱会引起平均风速减弱。同时高纬度地区受气候变化影响, 其变暖速率较快, 减小了不同纬度之间的气压梯度力, 从而导致了风速的减小^[28]。③快速城市化引起地面的粗糙度增加, 对风速具有明显的削弱作用^[20]。尤其是受城市化影响程度越深的地区, 其风速的下降趋势越明显。地面粗糙度的改变可以揭示 25%~60% 风速的减小趋势。不同研究中由于研究时段和使用数据的差异, 导致风速的趋势值存在差异^[28]。未来仍有待于通过分布均匀和密集的长时间序列的站点或格点数据进一步验证中国风速系统的时空演变特征。人类活动和全球气候变暖对平均风速、最大风速和极大风速的影响具有时空差异性, 潜在的原因在于人类活动和全球气候变暖的强度及速率具有时空差异性^[26]。当前风速减小的原因仍在进一步的探讨中, 但在城市中人类活动尤其是城市化进程中的大量高楼大厦的出现可能导致了平均风速的减少, 但同时高楼大厦间的增加了瞬时大风。因此,

风速变化具有区域性和次区域性特征, 未来亟需通过统计诊断和模式模拟来厘定自然因素和人为因素对风速变化的贡献率。

参考文献:

- [1] IPCC AR5. Intergovernmental panel on climate change 2013 fifth assessment report (AR5) [R]. London: Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- [2] IPCC SREX. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [R]. London: Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2012.
- [3] YU L, ZHONG S, BIAN X, et al. Temporal and spatial variability of wind resources in the United States as derived from the climate forecast system reanalysis [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28 (3): 1166–1183.
- [4] YU F, YAN H, QIHAO Z, et al. Temporal and spatial characteristics of offshore wind resources [J]. *Journal of Tsinghua University*, 2016, 65(5): 522–529.
- [5] HAN S, ZHANG H, ZHENG Y, et al. A global study of temporal and spatial variation of SWH and wind speed and their correlation [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 48–54.
- [6] WHICKER J J, BRESHEARS D D, WASIOLEK P T, et al. Temporal and spatial variation of episodic wind erosion in unburned and burned semiarid shrubland. [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(2): 599–612.
- [7] CUTTER S L, FINCH C F. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105 (7): 2301–2306.
- [8] ZHAO S, ZHOU D, ZHU C, et al. Spatial and temporal dimensions of urban expansion in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(16): 9600–9609.
- [9] KUMAR D, MISHRA V, GANGULY R. Evaluating wind extremes in CMIP5 climate models [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 45(2): 441–453.
- [10] TANG X, LV X, OUYANG Y, et al. Spatial and temporal variations of extreme climate events in Xinjiang, China during 1961–2010 [J]. *American Journal of Climate Change*, 2016, 5(3): 360–372.
- [11] 孔锋, 薛澜, 乔枫雪, 等. 新时代我国综合气象防灾减灾的综述与展望 [J]. *首都师范大学学报 (自然科学版)*, 2019, 40(4): 67–72.
- [12] 孔锋, 吕丽莉, 王一飞. 透视中国综合防灾减灾的主要进展及其挑战和战略对策 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(1): 42–51.
- [13] 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.
- [14] 蒙良莉, 莫建飞, 钟仕全, 等. 广西风速资源时空分布特征分析 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(21): 71–78.
- [15] 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.
- [16] 胡毅鸿, 龚道溢, 毛睿, 等. 中国北方农牧交错带春季风速的年际变化与冬季海温的关系 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(5): 709–717.
- [17] 孔锋, 杨萍, 王品, 等. 中国灾害性对流天气日数的时空变化特征 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(11): 2518–2528.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 王鹏涛. 西北地区干旱灾害时空统计规律与风险管理研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [21] 曹永强, 郭明, 刘思然, 等. 近 55 a 辽宁省风速时空变化特征分析 [J]. *干旱区地理*, 2018, 41(1): 1–8.

- [22] 孔锋, 李颖, 王一飞, 等. 1961–2016 年中国近地表大风日数时空分异特征研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(31): 188–196.
- [23] 师玮, 周俊菊, 胡子瑛, 等. 甘肃省陇东地区近 55 年风速时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3594–3601.
- [24] 孔锋, 王一飞, 方佳毅, 等. 1957–2015 年中国低能见度日数时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1203–1213.
- [25] 孔锋, 代光烁, 李曼, 等. 中国不同历时霾日数时空变化特征及其与城镇化和风速的关联性研究(1961–2015)[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 63–70, 95.
- [26] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165–174.
- [27] 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.
- [28] 张钢锋. 中国北方风速变化过程、机理以及对环境影响的评价研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2020.
- [29] LIU L, HU F. Long-term correlations and extreme wind speed estimations[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(10): 1121–1128.
- [30] AZORIN M C, DUNN R C, MEARS P B, et al. Surface winds in State of the climate in 2018[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019(100), 43–45.
- [31] AZORIN M C, REHMAN S, GUIJARRO J A, et al. Recent trends in wind speed across Saudi Arabia, 1978–2013: a break in the stilling[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(1): 966–984.

Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Mean and Extreme Wind Speed in China During 1961–2018

KONG Feng^{1,2}, SUN Shao³ and WANG Peng⁴

- (1. College of Humanities and Development Studies, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
2. Center for Crisis Management Research, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. National Climate Center, Beijing 100081, China; 4. Party School of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on the daily average wind speed, maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed data of 545 meteorological observation stations in China from 1961 to 2018, the temporal and spatial evolution characteristics of mean and extreme wind speed in China in the past 58 years under the background of climate warming are diagnosed by using a variety of mathematical statistical methods from the characteristics of climate state, long-term change trend, interannual fluctuation and differences before and after 1990. The results show that: (1) China's average wind speed has the spatial differentiation characteristics of low in the south and high in the north from 1961 to 2018, while the maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed have the spatial differentiation characteristics of low in the southeast and high in the northwest, and their spatial correlation coefficient is 0.71 ($n = 15\ 642$), passing the test of 0.01 significance level. The average wind speed, maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed in 1991–2018 are smaller than those in 1961–1990. (2) The decadal anomaly of average wind speed, maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed in China gradually change from positive anomaly to negative anomaly from 1960s to 2010s, and in 1960s, 1970s and 1980s, positive anomaly was dominant, while in 1990s, 2000 and 2010, negative anomaly was dominant. (3) China's average wind speed, maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed are mainly decreasing, with regional and sub regional characteristics from 1961 to 2018. The spatial correlation coefficient of the latter two is 0.75 ($n = 15\ 642$), passing the test of 0.01 significance level. The trend difference between the maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed before and after 1990 has a high spatial consistency. (3) The average wind speed in China fluctuated relatively large in the western region from 1961 to 2018. The fluctuation characteristics of the maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed have spatial similarity, and the spatial correlation coefficient reaches 0.57 ($n = 15\ 642$), passing the test of 0.01 significance level. The fluctuation of average wind speed, maximum 10-minute average wind speed and instantaneous maximum wind speed is more in the area with large fluctuation during 1991–2018 than in the area with smaller fluctuation during 1961–1990.

Key words: average wind speed; maximum 10-minute average wind speed; maximum instantaneous wind speed; spatiotemporal pattern; change trend; fluctuation characteristics; climate change