全球变暖背景下中国近地表无风日数的时空演变特征(1961—2018年)*

孔 锋[1,2**], 张钢锋[3]

(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.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:基于1961—2018年中国545个气象观测站点的日值风速数据,采用多种数理统计方法,从气候态特征、年代距平、变化趋势和波动特征4个方面,分析近58 a来中国近地表无风日数的时空演变特征.结果表明:(1)在气候态特征上,1961—2018年中国近地表无风日数具有东南低、西北高的空间分异特征,且具有次区域分异特征,随时间变化不大.(2)在年代距平上,中国近地表无风日数正距平值在1961—2000年不断增加,负距平值在2001—2010年不断增加,且正距平值和负距平值分别在1991—2000和2011—2018年达到最大.(3)在变化趋势上,从时序变化来看,1961—2018年中国近地表无风日数先增加后减少;从空间分布来看,中国近地表无风日数1961—1990年以增加趋势为主,1991—2018年在多数地区以减少趋势为主,且这2个时段的中国近地表无风日数变化趋势变小.(4)在波动特征上,从时序变化来看,中国近地表无风日数的变异系数在2002—2018年快速增加,无风日数及其变异系数分别在2000和2015年发生了突变;从空间分布来看,1961—1990年中国近地表无风日数波动特征整体偏小,1991—2018年中国近地表无风日数波动特征具有南低、北高的空间分异特征,且这2个时段的中国近地表无风日数波动差异特征变大.

关键词:无风日数;区域差异;年代距平;Mann-Kendall突变检测;变化趋势;波动特征
中图分类号:P425;X43 **DOI**:10.19789/j.1004-9398.2021.04.009

0 引 言

以全球变暖为表征的气候变化已成为全球可持续发展的重要挑战之一[1-3].气候变化系统研究中,多关注气温和降水变化,已有的风速变化研究中,也多关注大风和平均风速的变化[4-9],而对无风日数的研究相对较少.近年来,中国多地的雾霾天气频发,除了人类排放污染物增多之外,风速减小也是影响雾霾天数的重要因素之一[10-13].

自20世纪60年代以来,全球许多地区的日平均风速均呈减少趋势[5,14],但在最近10 a全球近地表平均风速不再减弱或出现缓慢增加趋势[11].全球近地表平均风速下降最显著的地区是中纬度地区,而高纬度地区,尤其是南北纬70°以上的地区的风速在逐渐增强[11].在南半球的澳大利亚地区,近地表平均风速在春季和夏季增强,而在秋季和冬季逐渐减弱,同时高山站的风速,无论年平均风速还是季节平均风速都在增加[5].在中国,随着海陆温差在时空上的不均匀减少和城市化进程等多种影响,多数地区的近地表平均风速总体上呈现减少趋势,每10 a风速减少0.10~0.22 m/s,部分地区甚至达到了0.29 m/s[5,15].其中,变暖最为明显的40°N以北地区的平均风速、大风日数减少最多,而西南地区由于变暖程度较弱,其平均风速减少较小[11].中国风速的下降速率具有时段分异特征,在1990年下降速率明显变小;同时也呈现季节性的差异特征,春季下降最大,冬季次之,秋季再次之,夏季最小[11,14-15].气候变化是多要素、多过程和多属性的综合系统变化,在本质上包含了气候态变化、趋势性变化和波动性变化,根据以上3个方面变化,史培军

收稿日期:2020-04-21
* 国家重点研发计划项目(2018YFC1509003,2019YFC1510202);国家自然科学基金项目(41801064,41701103,41775078);北京市社科基金研究基地项目(19JDGLA008);中亚大气科学研究基金项目(CAAS201804)
** 通信作者:kongfeng0824@foxmail.com

等[14]开展了我国风速变化区划研究,表明中国多数地区的平均风速呈减少趋势;王楠等[15]证实1979—2014年中国大风日数在多数地区也呈减少趋势.在此背景下,中国无风日数如何变化,目前尚未有系统研究.

本文统计545个气象站点的日值风速数据,从气候态特征、年代距平、变化趋势和波动特征4个方面,分析1961—2018年中国无风日数的时空演变特征.望本研究有助于科学认识增暖背景下的中国近地表的风速系统变化特征.

1 数据和方法

1.1 数据来源

采用的日值平均风速数据来自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)》,该数据集按照《地面气象观测规范》[16]的要求进行观测,包含2 482个气象观测站点,数据空间分布范围为73°40′~135°05′E,4°00′~53°31′N.该数据集经过"国家、省级、台站"三级质量控制,纠正了大量的错误数据,并对数字化遗漏数据进行了补录,使得数据质量和完整性得到明显提升,数据的实有率普遍>98.0%,正确率均接近100%.由于中国多数站点在1960年后建站,因此,本文的研究时间自1961年1月1日—2018年12月31日.参考已有研究中的数据预处理方法[14,17],在本研究中,首先对观测数据进行校验,如果缺测率或错误率≥0.5%,则剔除该站点;如果缺测率和错误率<0.5%,则采用临近站点数值或前后年份数值进行插补,最后选择545个气象观测站点(图1).地图底图数据来自全国地理信息资源目录服务系统(http://www.webmap.cn),审图号为GS(2016)2923.

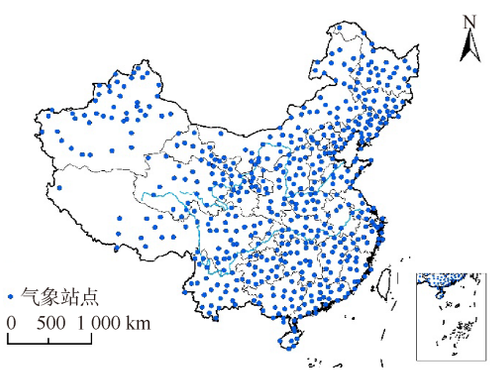


图1 中国气象站点分布

1.2 计算方法

根据《风力等级》(GB/T 28591—2012),将风速划分为12个等级(强度),其中无风定义为平均风速<0.20 m/s.若某日平均风速<0.20 m/s,则称之为无风日.首先统计分析1961—2018年及不同时段中国近地表气候态的年均无风日数及年代距平变化,然后从变化趋势和波动特征方面分析近地表无风日数时空演变特征,并对比1990年前、后(1961—1990和1991—2008年)2个时段无风日数的气候态特征、变化趋势和波动特征的差异特征,本文采用1991—2018年数据减去1961—1990年数据进行分析.采用的数理统计方法包括反距离权重插值(inverse distance weighted,IDW)[4]、图谱对比[10]、Mann-Kendall(M-K)突变检验[18]、年代距平[18]、空间相关[10]、线性趋势[14]和变异系数[13]等.年代距平分6个时段,分别为1961—1970、1971—1980、1981—1990、1991—2000、2001—2010和2011—2018年.采用变异系数诊断近地表无风日数的波动特征,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特征.变异系数可以消除数据单位和平均值不同对2个或多个资料变异程度比较的影响[18].变异系数越小(大),表明近地表无风日数的年际变异越小(大),即波动程度越小(大).

2 结果与分析

2.1 气候态特征

从气候态空间分布来看,1961—2018年中国近地表年均无风日数整体具有东北低、西南高的空间分异特征,如图2(a).其中,年均无风日数≤5 d的地区从东北沿内蒙古和华北连绵至西北中部和江南北部地区,呈现出"人"字形空间分布特征.华南沿海地区近地表的年均无风日数也多数≤5 d,而毗邻的华南内陆地区则多数为>5~25 d.年均无风日数较大的地区主要分布在包括四川东部、重庆、陕西秦岭以南地区、湖北西部、湖南西北、贵州东部在内的华西地区、云南西南部、新疆中西部和东北部等地,且上述地区的年均无风日数多数>40 d.1961—1990和1991—2018年中国近地表年均无风日数空间分布与1961—2018年并无较大差异,仅是在次区域的局地细节分布上具有差异,空间相关系数分别为0.66和0.63(n=15 642),均通过了0.01显著性水平的检验,如图2(b)和(c),表明不同时段中

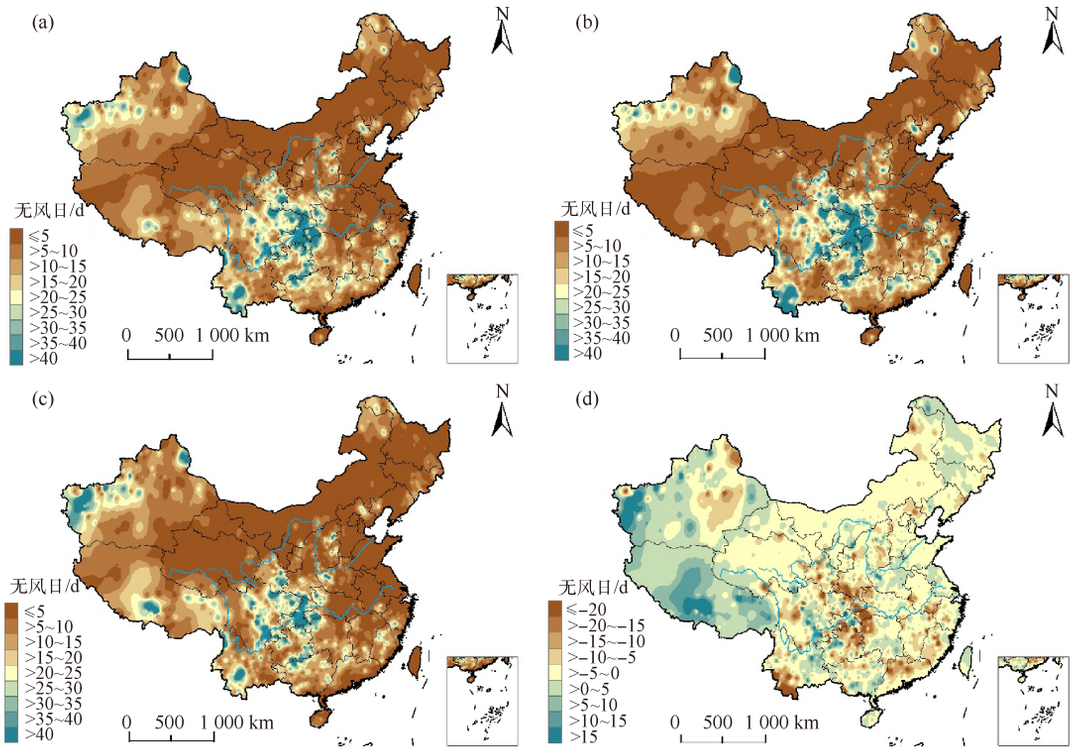


图2　中国近地表年均无风日数的空间分异特征

(a)1961—2018年;(b)1961—1990年;(c)1991—2018年;(d)1990年前、后2个时段差异

国近地表无风日数气候态空间分布特征具有相似性.1990年后,中国城市化进入快速发展阶段,人类活动深度和广度加剧,各类排放和土地利用发生较大变化,且全球气候变暖也进入快速增暖期[4,14]. 1990年前、后2个阶段中国近地表年均无风日数差异,结果如图2(d)所示.1990年后,相比之前年均无风日数偏大的地区主要集中分布在西藏、新疆西部和东部等地区,而偏小幅度较大的地区主要集中在云南西南部、陕西南部、重庆、湖南西北、湖北西南和广东北部等地区,且多数偏小幅度>10 d. 全国其他地区主要以偏小为主,且多数偏小幅度<5 d.

2.2　年代距平

距平主要是用来确定某个时段的数据,相对于该数据的某个长期平均值(如30或50 a平均值)是偏高还是偏低,即距平是某一系列数值中的某一个数值与平均值的差,分正距平和负距平. 整体来看:1961—2000年中国近地表无风日数偏多,主要以正距平为主,且随着年代发展,正距平的范围和数值逐渐增加,至1991—2000年正距平值发展至顶峰;2001—2010年中国近地表无风日数正距平值减小,2011—2018年全国无风日数距平则以负距平为主(图3). 具体可知:1961—1970年中国近地表无风日数距平具有东高、西低的空间分异特征,其中在新疆、西藏、四川东部、重庆和河南西部等地区主要以负距平为主,且部分地区的负距平值>20 d;除此之外,全国其他地区主要以正距平为主,且幅度较小,大多数值≤5 d,如图3(a)所示.1971—1980年全国近地表无风日数负距平范围在西部地区进一步减少,尤其是新疆中东部地区由负距平演变为正距平,如图3(b)所示。1981—1990年全国绝大多数地区近地表无风日数距平主要以正距平为主,尤其是新疆北部和中部、华西东部地区的正距平值(>15 d)较大,如图3(c)所示. 2001—2010年中国近地表无风日数距平在全国以正距平为主,且具有西高、东低的空间分异特征,其中华西、新疆西、西藏中东部和华南北部等地区的正距平值较大(>15 d);东北、华北、华中和华东地区的正距平值较小,大多≤5 d,如图3(d).所示 2001—2010年中国近地表无风日数距平具有西高、东西的空间分异特征,在西部沿边地区主要以正距平为主,尤其是新疆西部和西藏地区正距平分布较为集中,华南地区、华西东部等地区主要以负距平为主,且负距平值>10 d. 全国其他地区的正、负距平值相对较小,大多≤5 d,如图3(e)

所示.2011—2018年中国近地表无风日数距平整体演变为以负距平为主,尤其是华西、新疆、西南和华南等地区的负距平值较大,>20 d;其他地区的负距平值相对较小,大多≤5 d,如图3(f)所示.总体来看,中国近地表无风日数年代距平先增加,后减少,表现出明显的年代分段演变特征,且具有区域和次区域空间分异特征.

2.3　变化趋势

从长期变化趋势来看,在时序上,1961—2018年中国近地表年均无风日数为1~16 d,且具有分段变化特征.其中1961—2002年中国无风日数整体以增加趋势为主,趋势值为1 d/10 a,通过了0.01显著性水平的检验,而2003—2018年中国无风日数则呈快速减少趋势,趋势值为-9 d/10 a,通过了0.01显著性水平的检验,如图4所示.在空间上,1961—2018年中国多数地区的近地表无风日数呈减少趋势,其中新疆东北部、华西、云南西南部、华南和华东南部等地的减少速率>4 d/10 a;呈增加趋势的地区主要分布在新疆西部和西藏地区,其中新疆西部和西藏中南部的增加速率较快,>3 d/10 a,如图5(a)所示.1961—1990年时段中国多数地区近地表无风日数呈现出增加趋势,且多数地区的无风日数增加速率>3 d/10 a.其中:华西、云南及长江以南地区近地表无风日数呈现出增减镶嵌的次区域分异特征,且增减速率都较快,大都>3 d/10 a,这些地区地形起伏较大;新疆和西藏是近地表无风日数呈增加

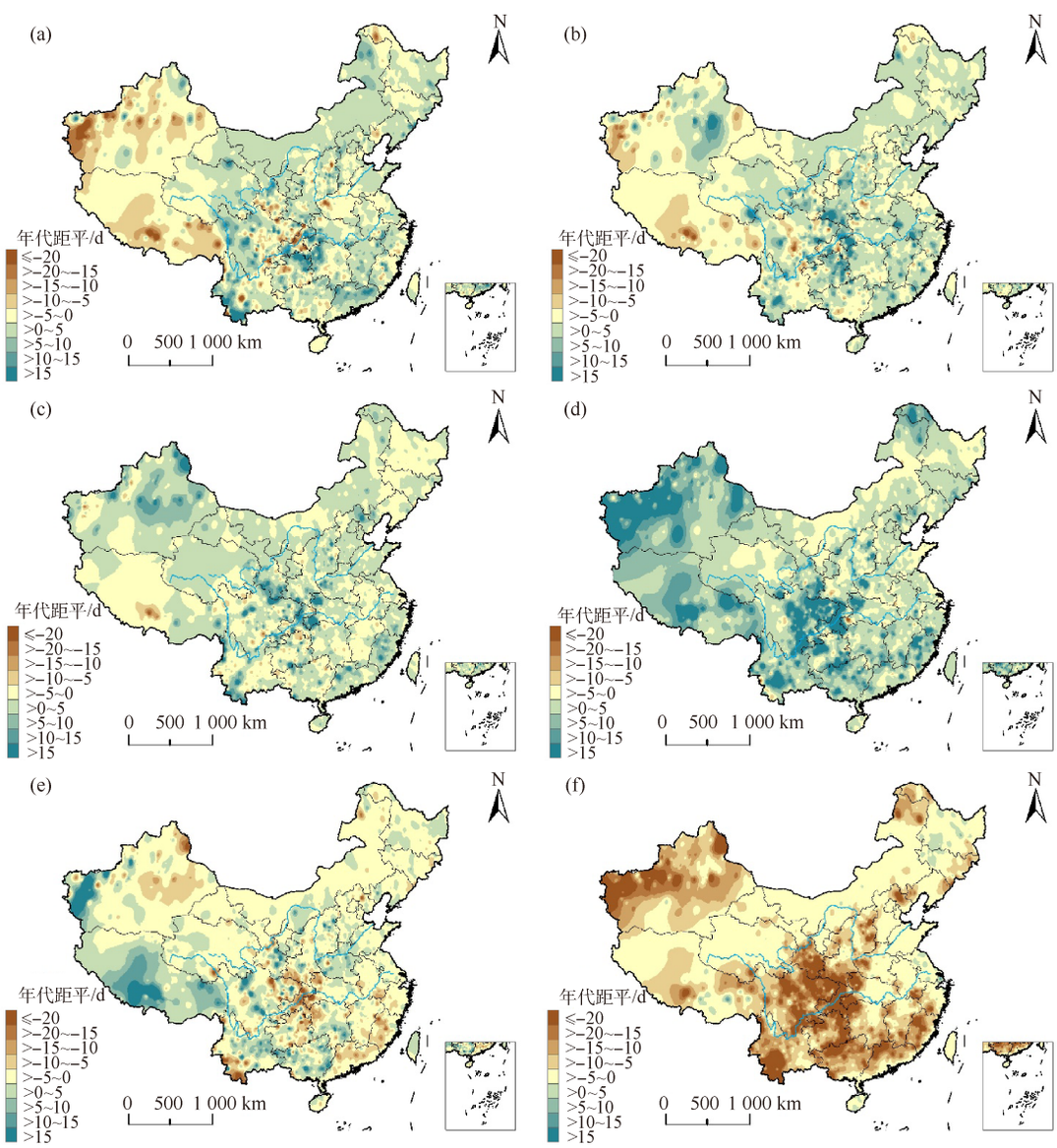


图3　中国近地表年均无风日数的年代距平空间演变特征

(a)1961—1970年;(b)1971—1980年;(c)1981—1990年;(d)1991—2000年;(e)2001—2010年;(f)2011—2018年

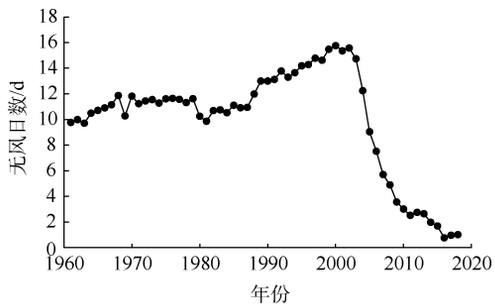


图4　中国近地表年均无风日数的时序变化趋势

的集中分布区,其中新疆大部和西藏东部的增加速率>3 d/10 a;内蒙古东北部近地表无风日数呈减少趋势,而毗邻东北地区则呈增加趋势;华北南部和两淮地区以增加趋势为主,但增加速率都较慢,如图5(b)所示.相比1961—1990年而言,1991—2018年中国近地表无风日数整体呈现减少趋势,尤其是新疆、西藏、甘肃、四川、云南及长江中下游以南地区、黄土高原东部、东北北部和东南部等地的减少速率较快(>4 d/10 a);减少速率较慢的地区主要集中在东北中部、华北北部、两淮地区、内蒙古大部和青海北部等地,如图5(c)所示.1990年前、后2个时段中国近地表无风日数变化速率的差值分布与1990年后较为相似,结果如图5(d)所示,这主要是1991—2018年中国近地表无风日数减少速率较快导致的.

2.4　波动特征

本文基于变异系数来诊断中国近地表无风日数的波动特征(图6)所示.从时序变化来看,1961—2002年中国年均无风日数波动特征较为稳定,变异系数大都稳定在1.85左右;而2003—2018年中国年均无风日数波动特征呈快速增加态势,表明这一时段中国不同站点之间的年均无风日数差异逐渐增大.为了解1961—2018年中国近地表年均无风日数及其波动性的时序突变特征,本文采用M-K突变检测方法进行分析,结果如图7所示.根据M-K突变检验的原理,分别取±1.96和±2.56作为为临界曲线的M-K检验值,即0.05和0.10显著性水平的置信区间.如果2个统计量曲线UF和UB有交点,且落在±1.96或±2.56临界曲线之间,则表示年均无风日数序列发生了突变,且通过了0.05或0.10显著性水平的检验.由图7(a)可知,中国近地表年均无风日数在2015年发生了突变,且通过了0.05显著性水平的检验;中国近地表年均无风日数波动特征在2000年发生了突变,但未通过0.10显著性水平的检验,如图7(b)所示.在空间上,1961—2018年中国近地

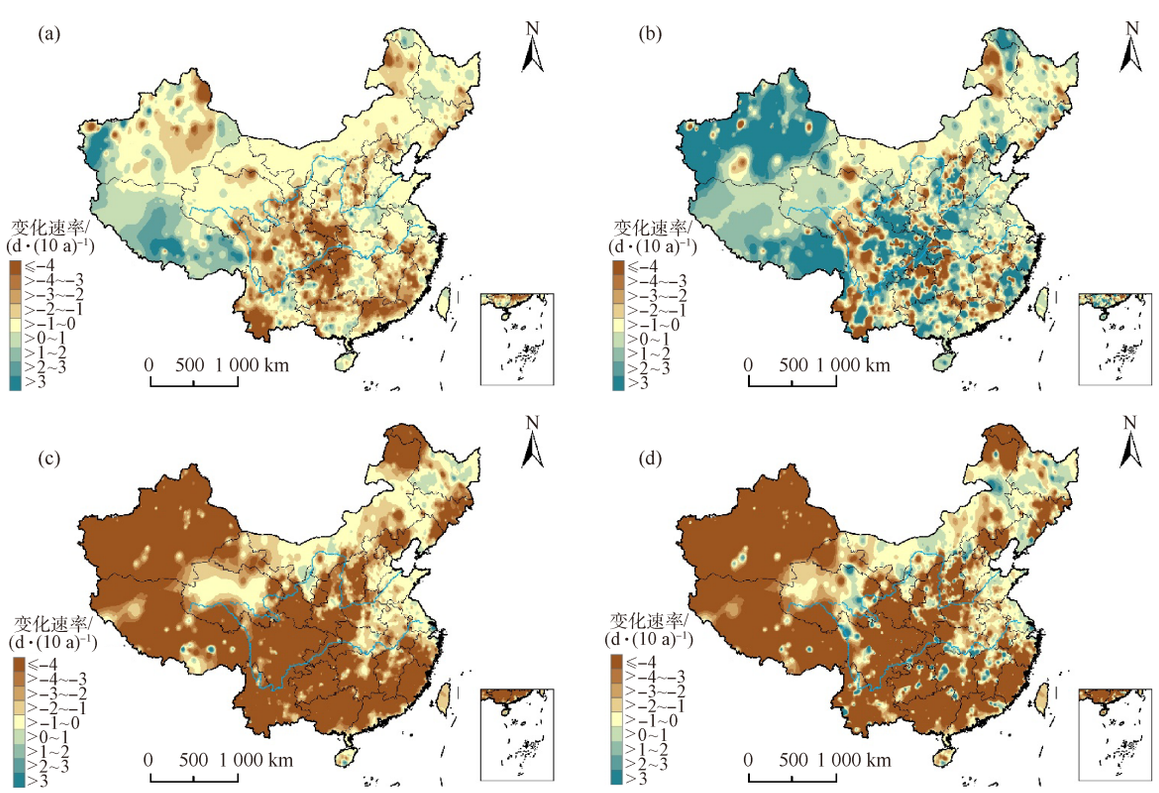


图5　中国近地表无风日数变化趋势的时空演变特征

(a)1961—2018年;(b)1961—1990年;(c)1991—2018年;(d)1990年前、后2个时段差异

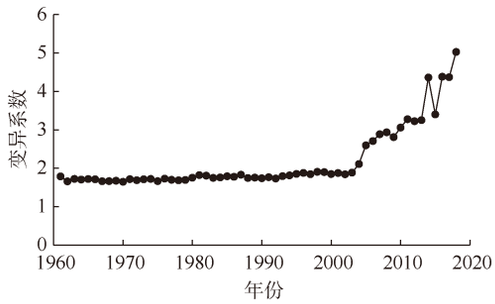
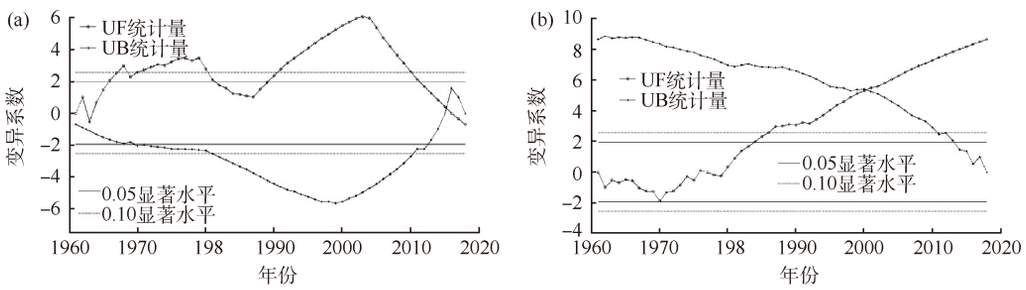


图6　中国近地表年均无风日数变异系数的时序变化趋势

表无风日数的波动特征呈现出南低、北高的空间分异，其中华西、西南、长江中下游以南地区、新疆西部等地是波动较小的集中分布区，表明这些地区无风日数相对稳定，变异性较小；波动较大的地区则主要集中在东北和内蒙古毗邻地区、环渤海地区、华东北部沿海地区、西北中部等地，如图8(a)所示. 1961—1990年中国近地表无风日数波动特征整体偏小，尤其是华西、西南、长江中下游以南地区、新疆、西藏、黄土高原、华北和内蒙古东部、东北东部等地的波动较小；波动较大的地区主要分布在新疆东部、青海中部和江苏等地，如图8(b)所示. 1991—2018年中国近地表无风日数波动特征整体呈现出南低、北高的空间分异，其中两淮地区、内蒙古中北部、东北和内蒙古毗邻地区、西北东部和中部及华南沿海地区等地波动较大；波动较小的地区则主要分布在新疆西部、西藏东部、华西、西南、江南和华



注：UF和UR为MK突变检验的2个统计量曲线.

图7　中国近地表年均无风日数的M-K突变检验

(a)无风日数；(b)无风日数波动特征

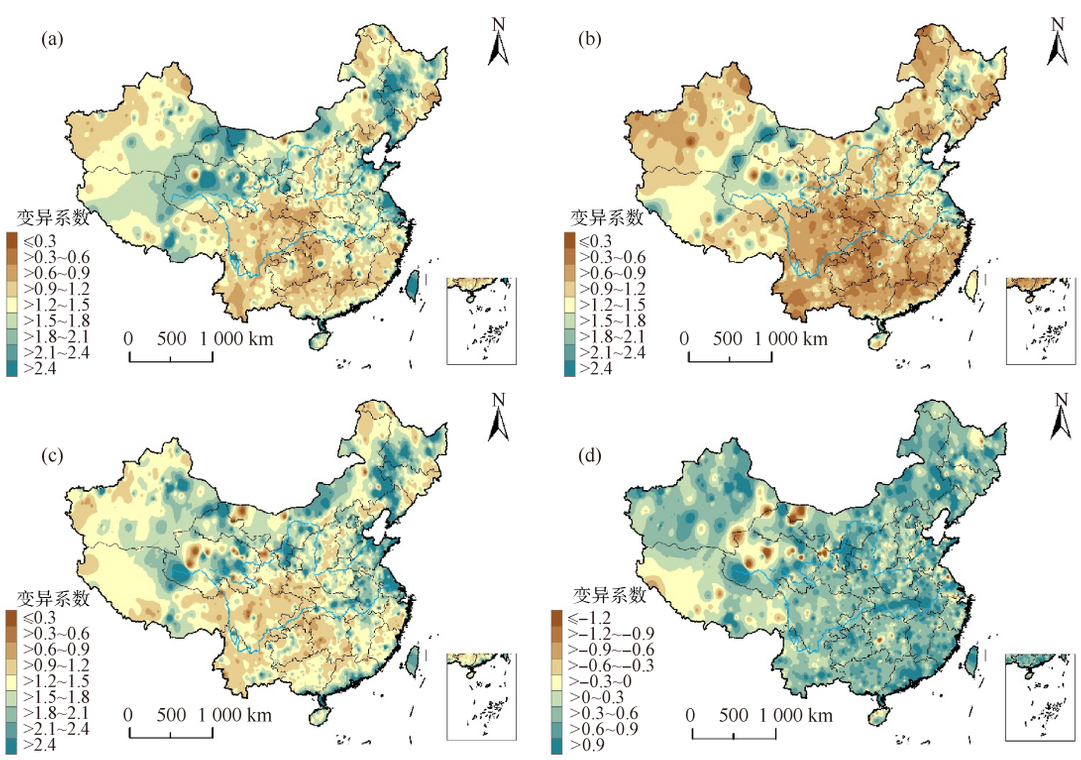


图8　中国近地表无风日数波动特征的空间分异特征

(a)1961—2018年；(b)1961—1990年；(c)1991—2018年；(d)1990年前、后2个时段差异

南北部等地,如图8(c)所示.1990年前、后2个时段中国近地表无风日数波动特征的差异特征,结果如图8(d)所示.1990年前、后中国近地表无风日数波动差异特征整体变大为主,表明1991—2018年中国近地表无风日数的波动性大,变异增大;全国仅个别地区的波动偏小,主要分布在青海西北、内蒙古西北、西藏西南等地.整体来看,中国近地表无风日数在1991—2018年明显增加,且具有次区域分异特征.

3　讨　论

中国气象站点东密西疏,尤其是青藏高原西部和新疆西部地区站点较少[4],加之地形起伏较大,通过反距离权重插值,分析这些地区近地表无风日数时空演变特征,会造成某种不确定性.可针对中国西部地区的观测数据单独进行插值,而不是与东部站点同时插值,这可在一定程度上降低因地形起伏带来的影响,但值得注意的是,这种方法也会因不同时插值造成一定的插值系统性的差异,需要采用多种方法校对.未来仍有待于采用站点分布密集的观测数据或分布均匀的格点数据依进一步分析.本研究表明,中国无风日数时间序列在2000年左右开始快速增加,这可能是多种因素综合作用的结果.由于风速变化具有较强的局地性,全球变暖背景下气象站点受附近城市化进程影响[11],尤其是2000年后中国快速城市化的影响逐渐开始显现,影响到了气象观测的规定前提标准.已有研究表明,中国地区风速明显受到土地利用的影响,城市化率每增加10.0%,风速下降0.11 m/s[11].此外,中国约50.0%的站点经过了多次迁站[14],这造成观测数据不均一.尤其是对<0.20 m/s的无风日数来说,迁站前后站点周边环境差异较大,迁站后站点周边地区空旷,观测仪器更迭,会对本来就较小的风力等级观测产生一定程度的影响.同时各个观测站点仪器更替时间不一致,观测规范上由于长时期的发展会有一定的改变,较为敏感的仪器会对低等级风力观测日数较多[5],如20世纪60年代和21世纪初以来的风速观测仪器在精准度和敏感度上存在一定的差异.因此,未来也有必要采用均一化订正后的资料来统计,同时可以考虑将其他低强度风力等级考虑在内综合分析.但就本文目前总结结果来看,其结论与已有结果平均风速的减少具有支撑性和互证性.1991—2000年以来全球气候系统有比较明显的变化,导致全球尺度的海气环流受到相应的影响,厄尔尼诺现象在1991—2000年多次发生,导致了数次全国性的大暴雨事件,比较典型的就是1998年的全国流域性的暴雨洪水事件.全球变暖背景下海陆气压梯度力减小,全球多地的平均风速普遍减小[19],大风日数也呈减少趋势[20].本研究表明,中国近地表无风日数在1961—2018年先增加后减少,表明低强度的风速日数在呈增加趋势.未来仍有待于从多强度等级风速变化特征来诊断中国近地表和不同高度的风速变化特征,这对于科学认识增暖背景下风速系统的变化特征具有重要意义.同时,由于全球气候系统本身是一个开放系统[1,4,19-22],仅统计陆地风速变化具有局限性,未来应从海陆分异视角进行分析.

4　结　论

本文通过分析1961—2018年中国近地表无风日数时空演变特征,主要结论如下:

(1)在气候态分布上,1961—2018年中国近地表年均无风日数具有东北低、西南高的空间分异特征,且具有次区域分异特征,其中华西地区年均无风日数较大(>40 d).1961—1990和1991—2018年中国近地表年均无风日数空间分布与1961—2018年具有相似性,空间相关系数分别为0.66和0.63,均通过了0.01显著性水平的检验.1990年前、后的中国年均无风日数差异在新疆西部和西藏偏大,而在华西东部、华南东部和华东南部偏小.

(2)在年代距平上,中国年均无风日数从1961—2000年正距平值不断增加,而后从2001—2018年逐渐演变为以负距平为主,其中1991—2000年全国正距平值整体最大,2011—2018年全国整体负距平值最大.

(3)在变化趋势上,1961—2018年中国年均无风日数具有先增加、后减少的分段时序变化特征.在空间上,1961—1990年中国无风日数在多数地区以增加趋势为主,且在西南和华南地区变化趋势呈增减镶嵌格局,全国增加趋势>3 d/10 a的地区主要集中在新疆和青藏高原地区;1991—2018年中国无风日数在多数地区以减少趋势为主,且减少幅度>4 d/10 a.这2个时段中国无风日数变化趋势变小,且多数地区的变小幅度<4 d/10 a;总体来看,1961—2018年中国无风日数在多数地区以减少趋势为主,仅西藏和新疆西部等地区呈

增加趋势,华西、云南西南和华南的减少趋势较大(>4 d/10 a).

(4)在波动特征上,1961—2018年中国年均无风日数变异系数具有先平稳、后增加的时序变化特征,尤其是2002年后增加较大.中国年均无风日数及其变异系数分别在2000和2015年发生了突变,其中前者的未通过0.10显著性水平检验,而后者突变通过了0.05显著性水平的检验.在空间上,1961—1990年中国多数地区的无风日数波动较小;1991—2018年中国无风日数波动特征呈现南方小、北方大的空间分异格局;这2个时段中国无风日数波动特征变大;总体来看1961—2018年中国无风日数波动特征也呈现南方小、北方大的空间分异格局.

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] IPCC SR1.5. Global Warming of 1.5℃:an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5℃ above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways,in the context of strengthening the global response to the threat of climate change,sustainable development,and efforts to eradicate poverty [R]. London:Cambridge University Press,Cambridge,UK,2018.

[4] 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.

[5] 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.

[6] AZORIN-MOLINA C,ASIN J,MCVICAR T R,et al. Evaluating anemometer drift:a statistical approach to correct biases in wind speed measurement[J]. Atmospheric Research,2018,203:175-188.

[7] AZORIN-MOLINA C,DUNN R J H,MEARS C,et al. "state of the climate in 2018"[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2019,100(9):S43-S45.

[8] QIN M A,ZHANG X P,WAN L,et al. Spatial and temporal trends of wind speed on the Loess Plateau during 1957—2009 [J]. Journal of Natural Resources,2012,27(12):2123-2134.

[9] SUN L D,ZHANG C J,ZHAO H Y,et al. Features of climate change in northwest China during 1961—2010[J]. Advances in Climate Change Research,2013,4(1):12-19.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 潘玮,左志燕,肖栋,等.近50年中国霾年代际特征及气象成因[J].应用气象学报,2017,28(3):257-269.

[13] 孔锋,吕丽莉,方建,等.中国空气污染指数时空分布特征及其变化趋势(2001—2015)[J].灾害学,2017,32(2):117-123.

[14] 史培军,张钢锋,孔锋,等.中国1961—2012年风速变化区划[J].气候变化研究进展,2015,11(6):387-394.

[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] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003:1-151.

[17] 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.

[18] 孔锋,吕丽莉,方建,等.中国不同时段气候变暖速率的时空分异研究(1961—2014)[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(4):426-435.

[19] 赵宗慈,罗勇,江滢,等.近50年中国风速减小的可能原因[J].气象科技进展,2016,6(3):106-109.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 张亚妮,胡德勇,于琛,等.气候变化背景下防灾减灾国际经验和我国积极应对策略分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2019,40(1):89-94.

Spatiotemporal evolution characteristics of near surface windless days in China from 1961 to 2018 under the background of global warming

KONG Feng[1,2], ZHANG Gangfeng[3]

(1. College of Humanties and Development Studies, China Agriculturol University, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. Center for Crisis Management Research, Tsinghua University, Beijing 100084; 3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Based on the daily wind speed data of 545 meteorological observation stations in China from 1961 to 2018, using a variety of mathematical statistical methods, the temporal and spatial evolution characteristics of China's windless days in recent 58 years were analysed from four aspects of climate state characteristics, annual anomaly, changing trends and fluctuation characteristics. The results showed that: (1) in terms of climate state characteristics, the windless days were low in the southeast and high in the northwest of China from 1961 to 2018, and had the characteristics of sub regional differentiation and changed little with time. (2) In terms of annual anomaly, the decadal positive anomaly value of windless days increased from 1961 to 2000 in China, while the decadal negative anomaly value of windless days increased from 2001 to 2010. And the decadal positive and negative anomaly value reached the maximum in 1991 to 2000 and 2011 to 2018. (3) In terms of changing trends, the windless days in China increased first and then decreased from 1961 to 2018. In terms of spatial distribution, the trend of windless days in China increased from 1961 to 1990, but mainly decreased in most regions from 1991 to 2018, the trend of windless days in China between these two periods became mainly small. (4) In terms of fluctuation characteristics, the coefficient of variation of the windless days in China increased rapidly from 2002 to 2018. The windless days and its coefficient of variation in China abruptly changed in 2000 and 2015. In terms of spatial distribution, the fluctuation characteristics of China's windless days from 1961 to 1990 were generally small, and the fluctuation characteristics of China's windless days had spatial differentiation characteristics of low in the south and high in the north from 1991 to 2018, the variation of the windless days in China between these two periods became mainly large.

Keywords: windless day; regional difference; annual anomaly; Mann - Kendall mutation detection; change trend; fluctuation characteristics