

中国东部近地面风速与气温气候特征研究

朱家瑾

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都
Email: zhujiajincuit@126.com

收稿日期: 2021年7月14日; 录用日期: 2021年8月24日; 发布日期: 2021年8月31日

摘要

基于1951~2014年中国地面台站逐日观测资料, 利用线性倾向估计、M-K突变检验和EOF分解等方法对我国东部(105°E以东)近地面风速和气温的气候特征进行了分析。结果表明: 1) 年平均和四季风速在空间上表现出北高南低、沿海大内陆小的特征, 而气温表现出南暖北冷的特征。2) 年平均、春、夏、秋和冬季风速均为减弱趋势, 每10a下降0.13 m/s、0.15 m/s、0.09 m/s、0.12 m/s和0.15 m/s, 而气温则每10a上升0.21°C、0.27°C、0.13°C、0.19°C和2.70°C。3) 近地面风速和气温在20世纪90年代发生了突变, 突变前中国东部北(南)方大部分区域风速呈增长(减弱)趋势, 突变后则相反; 而突变前气温减弱区域主要位于南方, 突变后出现减弱趋势的区域仅出现在中国东北。EOF分解第一模态显示突变前后中国东部近地面风速和温度的空间特征保持一致, 但突变前风速(温度)偏大(低), 突变后风速(温度)偏小(高); EOF分解第二模态显示突变前后风速和温度的空间特征差异显著, 但时间转折与突变点不对应一致。

关键词

中国东部, 近地面风速, 气温, M-K突变, EOF分解

Research on Climate Characteristics between Near-Ground Wind Speed and Temperature in Eastern China

Jiajin Zhu

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: zhujiajincuit@126.com

Received: Jul. 14th, 2021; accepted: Aug. 24th, 2021; published: Aug. 31st, 2021

文章引用: 朱家瑾. 中国东部近地面风速与气温气候特征研究[J]. 自然科学, 2021, 9(5): 626-637.
DOI: 10.12677/ojns.2021.95068

Abstract

Based on daily observation data of China meteorological stations from 1951~2014, this paper analyzed the climate characteristics of near-ground wind speed and temperature in eastern China (east of 105°E) and the characters before and after mutations by linear tendency, M-K test and Empirical Orthogonal function. The results indicate that: 1) The average annual and four seasons wind speed show the characteristics of large in the north and the coastal area, but small in the south inland, and the temperature is warm in south but cold in the north. 2) In time series, the year, spring, summer, autumn and winter winds decreased 0.13 m/s, 0.15 m/s, 0.09 m/s, 0.12 m/s and 0.15 m/s per 10a and 0.21°C, 0.27°C, 0.13°C, 0.19°C and 2.70°C per 10a. 3) The near-ground wind speed and temperature changed abruptly in the 1990s, with the wind speed increasing (weakening) in most of the northern (southern) areas of eastern China before the abrupt change, and the opposite after the abrupt change; while the weakening areas of temperature before the abrupt change were mainly located in the south, and the weakening areas after the abrupt change were only found in northeastern China. EOF first mode shows the consistent spatial characteristics of the near-ground wind speed and temperature in eastern China before and after the mutation, but the pre-mutation wind speed (temperature) is large (low), and the post-mutation wind speed (temperature) is low (high); EOF second mode shows significant spatial differences in wind speed and temperature before and after the mutation, but the time transition does not correspond with the mutation point.

Keywords

Eastern China, Near-Ground Wind Speed, Temperature, Mann-Kendall Test, EOF Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为当今世界的热点问题,气候变化对人类社会的发展和生产生活产生了重要影响。在全球变暖背景下,中国东部地区(本文指 105°E 以东)的气候经历了明显的变化,主要体现为气温显著上升。陈少勇等[1]分析了 1961~2006 年中国东部年平均气温对气候变暖的响应,指出中国东部(100°E 以东)年平均气温自南向北降低,平均经向递减率约 1°C/纬度,近 46 年增温率 0.24°C/10a。崔林丽等[2]得出长江三角洲气温呈显著增加趋势,冬春季增温率较高,而夏季最低,并进一步指出城市化率平均最低气温的增温率及贡献率最大。高空温度对地面农业生产等社会生活有重要影响,因此谢潇等[3]利用中国 137 个探空站分析了中国东部上层温度变化特征,指出空间上温度变化幅度存在季节差异(东北变化幅度大,东南变化幅度小),垂直向上对流层中下层比其上部降温幅度小。

作为表征气候变化和气候形成的重要因素,许多学者也对近地面风速的变化进行了研究。任国玉等[4]分析了中国近地面主要气候要素的时空演变,指出平均风速等呈显著下降趋势。刘志邦等[5]指出盖州市年内风速月变化呈双峰型,四季中春季风速最大,夏季风速最小;四季风速均呈弱减小趋势,尤其春季风速减小倾向率最大。风速减少虽然体现在中国大部分区域,但空间差异明显。内蒙古、黑龙江等北方地区以及东南沿海等风速较大地区的风速显著减小,而西南、华南地区的风速降幅却明显低于全国平均水平,尤其是四川盆地以及长江中下游地区[6] [7] [8] [9]。在国外, Pirazzoli 等[10]通过研究 1951~2000

年意大利的年平均风速变化,发现意大利风速在 20 世纪 70 年代之前为上升期,之后风速开始下降;McVicar 等[11]研究则发现 1975~2006 年以来澳大利亚的年平均风速下降趋势达到 0.009 m/s;Wan 等[12]也注意到加拿大西部和南部的风速呈现明显下降趋势;Kousari 等[13]发现在伊朗局部地区风速下降显著,但却在研究区整体风速呈上升趋势。上述研究表明全球风速基本表现出逐年减小的趋势,但在不同区域和不同季节有一定差异。

上述有关气温或风速气候特征的研究总是单独开展的,而风是气压梯度力作用下的气流运动,温度变化必然会导致气压梯度的变化,进而导致风速特征的改变,因此很有必要同时关注风速与温度的变化特征。此外,通过站点实测资料重点关注中国东部地区近地面风速和气温气候特征的研究较少,本研究能弥补相关研究空白。而中国最发达的北京、上海、广州、深圳等大都会都位于中国东部,温度风速等气象要素的变化对该区域人口活动和经济运行都有重要影响,开展相关研究具有现实意义。与此同时,这也对进一步了解中国东部大尺度风场与地面气温等气象要素变化的内部联系,从整体上认识区域气候变化的特征和机理,以及为大气污染防治和风能资源开发工作提供一定依据。

2. 研究数据和方法

2.1. 研究数据

本文所用数据为 1951~2014 年中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0),其中风速(2 m)和温度日值为逐日 4 次定时(02:00、08:00、14:00 和 20:00)观测数据统计日平均值。综合考虑地形因素和气象站点分布,本文的研究区域为中国东部,该区域由北向南主要包括中国东北,蒙古高原东部,黄河中下游,长江中下游和两广地区(图 1)。进行分析时使用 Gressman 插值方法将站点观测数据在(17°~55°N, 105°~137°E)范围内插值成 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的网格点。

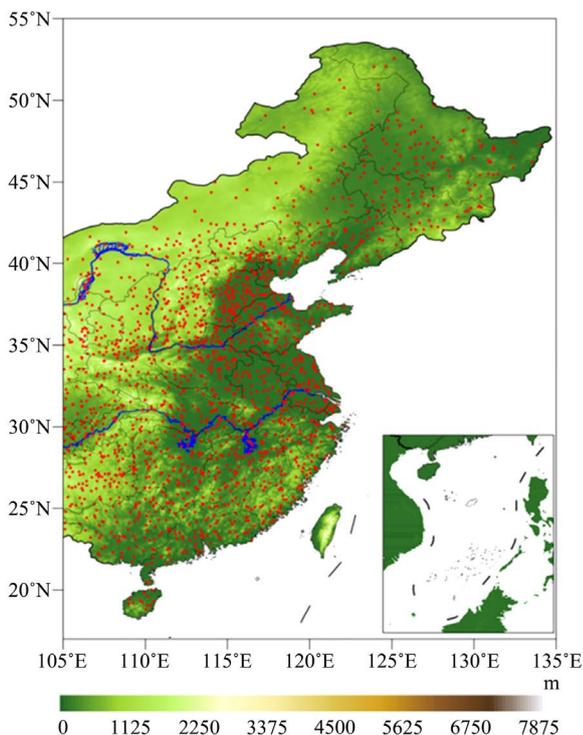


Figure 1. The terrain and stations of eastern China
图 1. 中国东部地形和站点

2.2. 研究方法

2.2.1. 季节划分

本文主要通过研究中国东部近地面风速和温度的年季特征和变化来反映两者的关系，四季按标准气象业务划分时段：以 3~5 月为春季，6~8 月为夏季，9~11 月为秋季，12 月至翌年 1、2 月为冬季。

2.2.2. 线性趋势法

通过求解月平均，进而求解得到年平均和各个季节平均时间序列，进一步采用线性趋势法对时间序列进行分析，根据时间序列所反映出来的趋势便可预测未来的变化。假设 $Y = At + b$ 的 Y 为平均风速(或温度)，当 $A > 0$ 时，说明平均风速(或温度)呈上升趋势；当 $A < 0$ ，呈下降趋势。

2.2.3. M-K 突变检验

M-K 突变检验是一种非参数统计检验方法，其不受少数异常值的干扰，具有检验范围宽、定量化程度高等优点，是目前突变性检验方法中理论基础较强且应用较多的一种[14]。假设给定显著水平 $\alpha = 0.05$ ，那么置信水平区间为 $(-1.96, +1.96)$ ，通过构造正反序列 UA_k 和 UB_k ，将两者和 ± 1.96 两条直线均绘制在同一张图上。分析绘出的曲线图，若 UA_k 的值大于 0，则表明序列呈上升趋势，小于 0 则表示呈下降趋势，当他们位于临界置信区间内时表明上升或下降趋势显著。当 UA_k 和 UB_k 两条曲线出现交点，那么交点所对应的时间便是突变时间，如果交点介于临界线之间，则说是显著性突变。

2.2.4. EOF 分解

对 1961~2014 年中国东部气温和近地面风速进行 EOF 分解[15]，提取数据的时空变化特征，并取方差贡献较大的前两模态详细研究其空间分布和时间系数，进而指出中国东部近地面风速和温度在时间上的转折性和突变前后空间上的变化特征。

3. 风速和温度的气候态

从年均和各个季节的气候态(图 2)可以看出，中国东部风速整体上表现出北方高、南方低，沿海大、内陆小的分布特征，其中风速最大区域位于内蒙古高原的 113°E 附近，风速最小的区域位于重庆、湖北和湖南三省的交界处。而季节对比呈现出春季风速大，夏季最弱的特征。年均风速较大的区域位于内蒙古高原、中国东北、辽宁半岛、山东半岛和靠近海洋的部分小范围区域，其中最大年均风速达到 4.58 m/s；而四川盆地及周边区域和珠江流域年均风速较小，其值仅约 0.95 m/s。春季风速比年均和其他季节都更大，如果以 3.5 m/s 作为判断较大风速的标准，可以发现较大风速的范围更大，几乎整个内蒙古高原、中国东北和环渤海沿岸都是风速大值区，其中最大值约 5.26 m/s。风速较小的区域仍主要是四川盆地及周边和广西、广东、江西和福建等南方省份远离海洋的区域，春季风速最小值约为 1.05 m/s。夏季中国东北的风速低于 3.5 m/s，说明夏季较其他季节都偏小，但内蒙古高原依旧风速最大，最大风速约 4.24 m/s，但最小风速也有 0.97 m/s，说明虽然夏季风速空间差异小。秋冬季风速的高值区和低值区空间特征与夏季类似，但中国东北、环渤海周边部分区域风速大于 3.5 m/s；而风速低于 1.5 m/s 的区域范围也更大。

中国东部年和各个季节的气温气候态(图 3)表现出南暖北冷的空间特征，即气温随着纬度增大降低，最低温度 50°N 以北，最高温度在海南岛。季节上夏季温度高冬季温度低。年均最低气温低于 -4.15℃，最高达 24℃以上。春季最低气温只有 -1.92℃，最高达 25.70℃以上。夏季中国东部区域温度较其他季节有显著升高，最低气温也上升到 15.40℃，最高达 28.36℃以上。秋季气温的南北差距更大，最低气温只有 -4.12℃，但最高达 25.15℃以上。冬季中国东部区域温度明显比其他季节更低，虽然最高气温有 20.40℃，但最低达到了 -27.11℃。

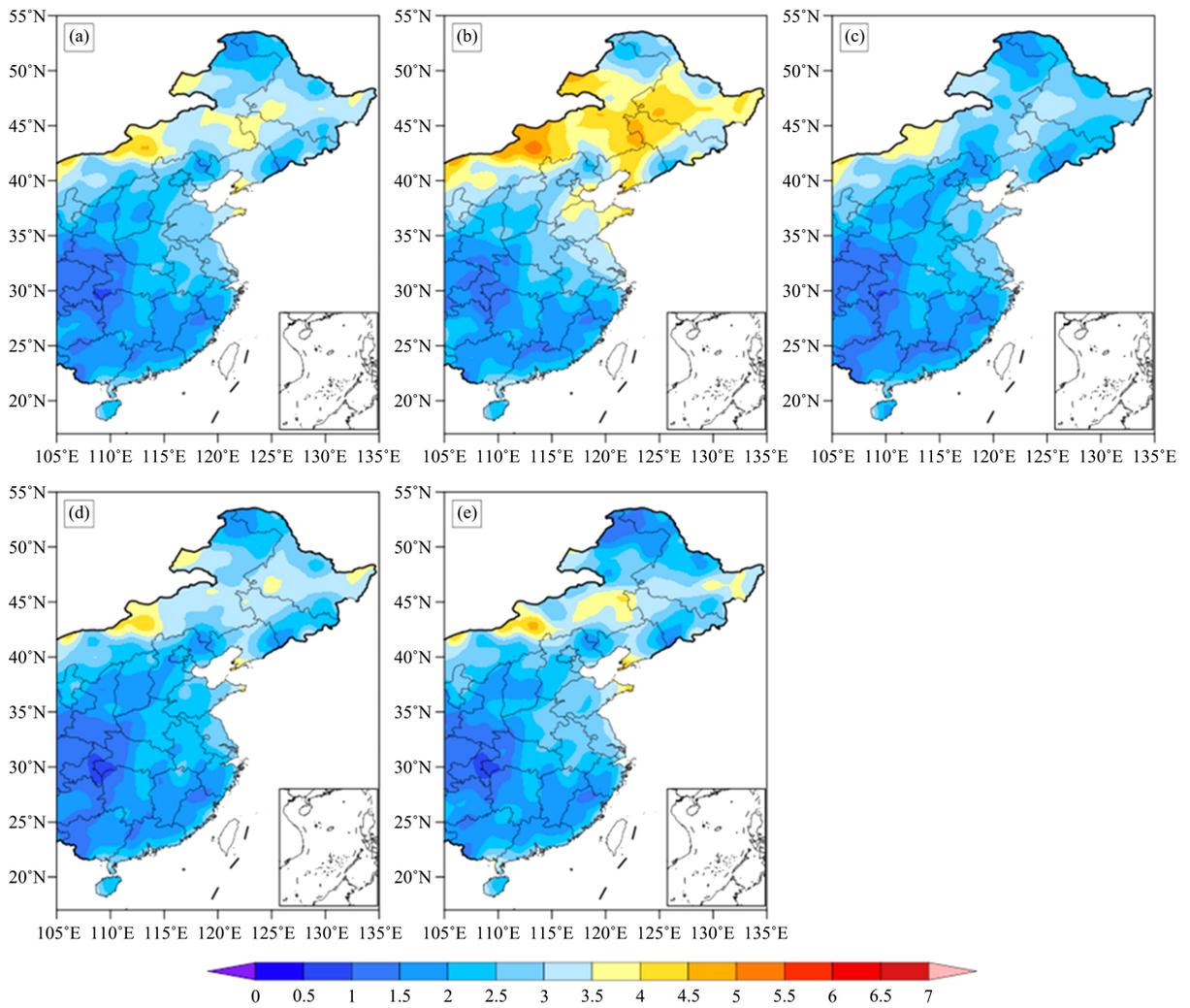
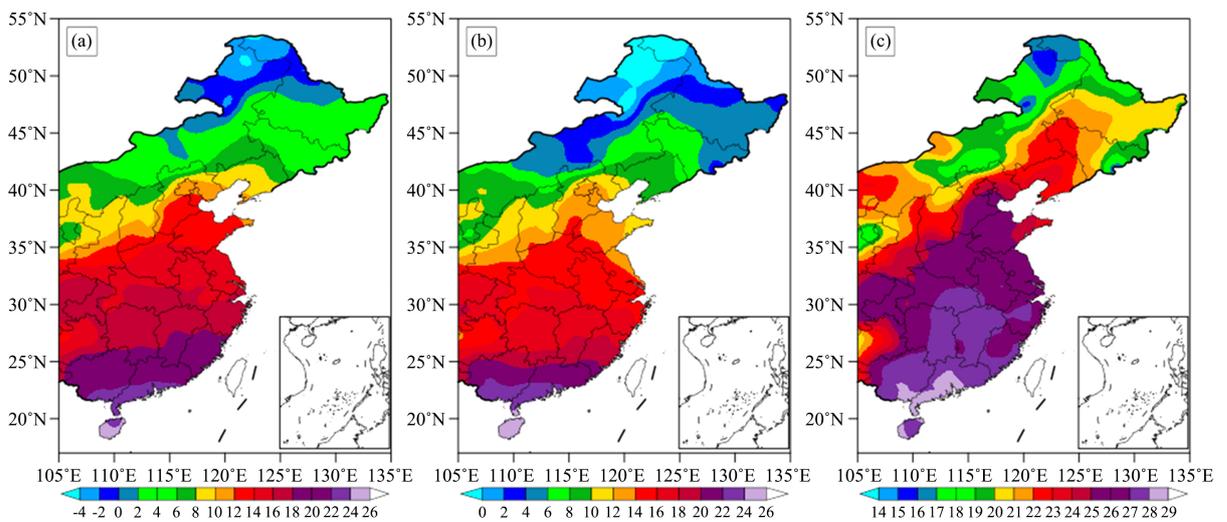


Figure 2. Climate characteristics of wind speed (m/s) over eastern China ((a)-(e) represents annual, spring, summer, autumn and winter respectively)

图 2. 中国东部风速(m/s)气候态特征((a)~(e)分别代表年均、春、夏、秋和冬季)



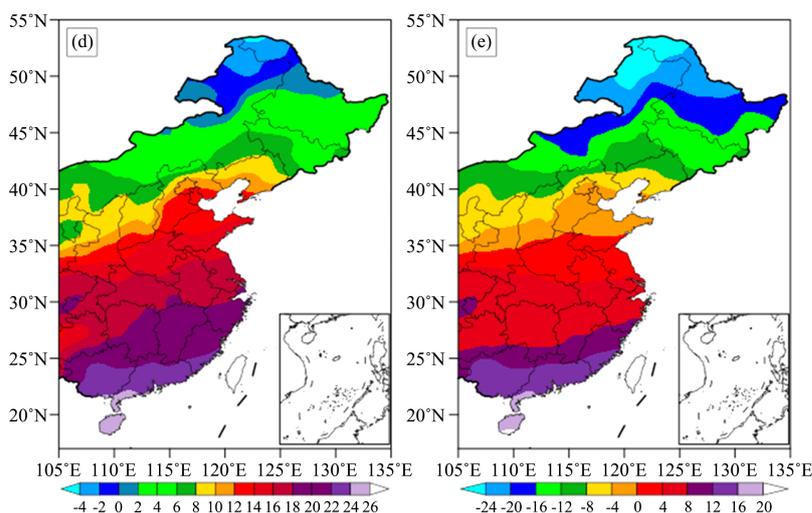


Figure 3. Same as Figure 2, but for temperature ($^{\circ}\text{C}$)

图3. 与图2一样, 但为气温($^{\circ}\text{C}$)

4. 风速和温度的时间序列

中国东部地区平均风速(图4(a))呈下降趋势, 每10a减少0.13 m/s, 多年平均风速为2.42 m/s, 其中最大风速出现在1970年, 达2.90 m/s, 最小出现在2014年, 仅为2.02 m/s。风速具有明显年代际变化特征, 60年代以前, 近地面风速呈快速上升趋势, 这可能是由于该时期站点资料缺乏造成的。60年代至70年代中期, 近地面风速变化较为平稳, 70年代后期至今, 风速逐年下降。风速也具有明显季节差异, 春季风速最大, 可达2.83 m/s, 夏季风速最小, 仅为2.24 m/s, 秋、冬季风速分别为2.27 m/s和2.34 m/s。与年平均风速相似, 各季节平均风速也具有明显的年代际变化特征。由图4(b)~(e)可知, 春季平均风速在1951~2014年间呈先上升再下降的变化趋势, 总体依旧为下降趋势, 每10a下降0.15 m/s。在1951~1960年中, 春季平均风速快速上升, 随后十年上升趋势放缓, 开始波动上升, 于1971年达到春季近地面平均风速的最大值, 此后春季平均风速开始波动下降, 其最小值出现在2014年, 波动范围为2.22~3.45 m/s。夏季平均风速下降趋势较为缓慢, 每10a仅降低0.09 m/s, 与春季平均风速不同的是, 夏季平均风速进入60年代后, 变化趋势较为平缓, 但仍然在1971年到达最大值, 80年代后, 夏季平均风速也开始波动下降, 在2014年得到最小值, 其波动范围为1.88~2.80 m/s。秋季平均风速变化趋势和春季相似, 近地面风速先波动上升至70年代中期, 随后开始逐年下降。冬季平均风速具有明显阶段性, 以1980年为界, 1951~1980年间冬季平均风速为2.62 m/s, 1981~2014年期间冬季平均风速仅为2.08 m/s。

由图5(a)可知, 中国东部地区在1951~2014年间年平均气温呈波动变化, 但总体呈现出上升趋势, 64年间年平均气温约为11.16 $^{\circ}\text{C}$, 2007年年平均气温最高, 高达12.43 $^{\circ}\text{C}$, 1956年年平均气温最低, 仅为10.06 $^{\circ}\text{C}$ 。年均气温变化的一元线性回归方程 $y = 0.021x - 31.1$, 其中相关系数通过了显著性水平 $\alpha = 0.05$ 的可信度检验, 表明每10a东部地区年平均气温上升0.21 $^{\circ}\text{C}$ 。由图5(b)~(e)可知, 东部地区在1951~2014年这64年间的春、夏、秋、冬四季平均季节气温分别为11.82 $^{\circ}\text{C}$ 、23.55 $^{\circ}\text{C}$ 、11.90 $^{\circ}\text{C}$ 和-2.65 $^{\circ}\text{C}$ 。由四个季节的平均气温变化曲线可知各季节平均温度同样为波动上升, 这也为东部地区的年平均气温上升提供了符合逻辑的验证。经过统计分析, 春、夏、秋、冬的平均气温序列均通过了显著性水平检验, 四个季节的平均气温变化趋势均为正数, 分别为0.27 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、0.13 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、0.19 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和2.70 $^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 由此发现, 冬季的升温率最大, 表明在年平均气温上升趋势中冬季是气温增长趋势的主要贡献者。

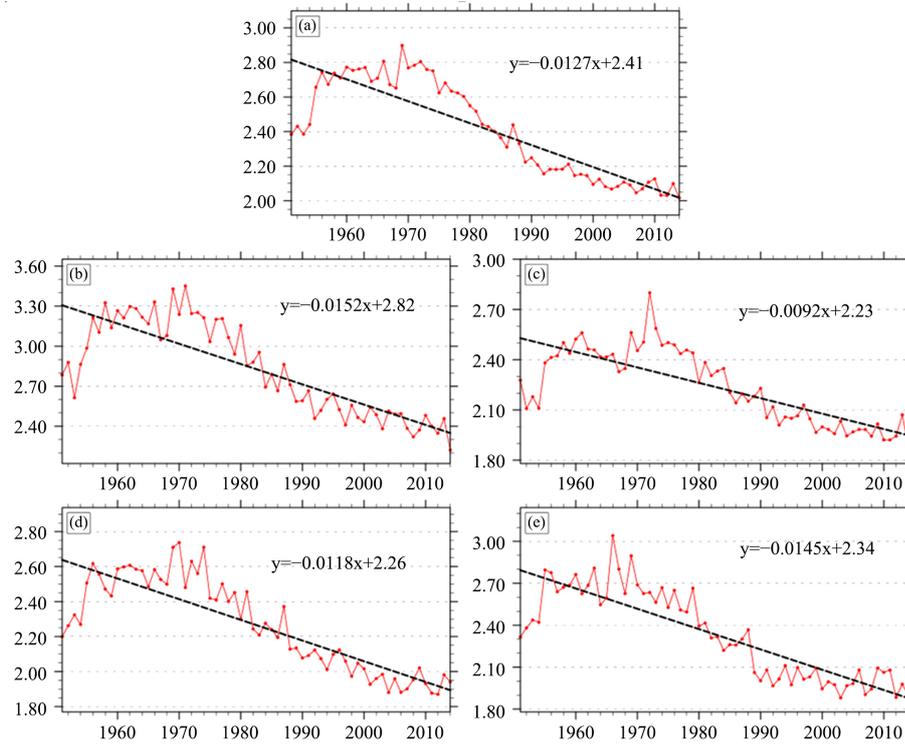


Figure 4. Time series and trend characteristics of near ground wind speed (m/s) in eastern China ((a)-(e) for annual, spring, summer, autumn, and winter)

图 4. 中国东部近地面风速的时间序列(m/s)和趋势特征((a)~(e)代表年均、春、夏、秋和冬季)

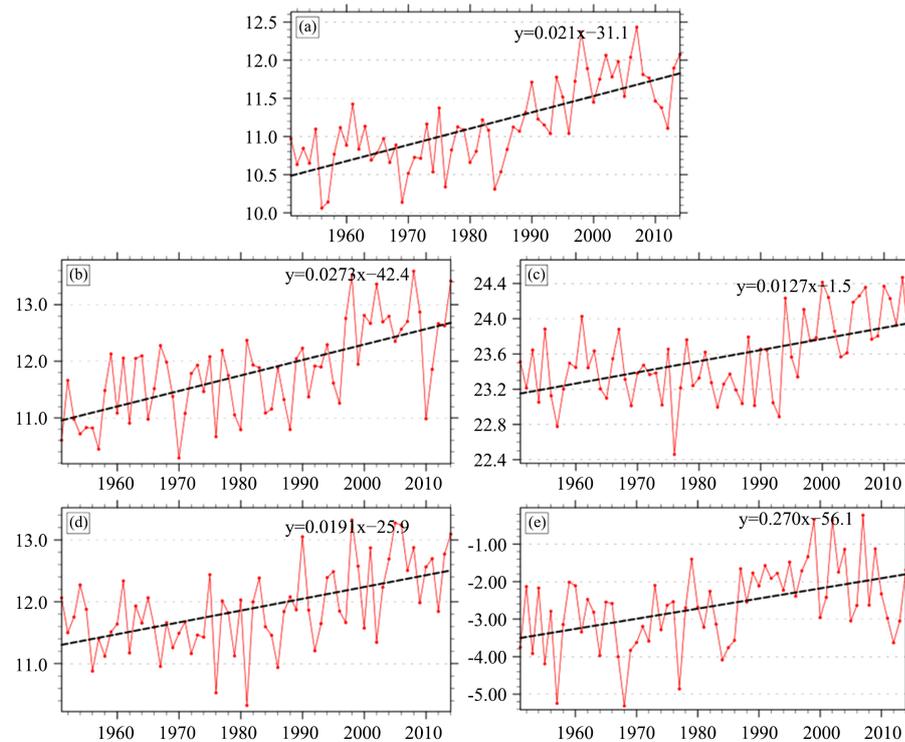


Figure 5. Same as Figure 4, but for temperature (°C)

图 5. 与图 4 一样，但为气温(°C)

5. 风速和温度的突变特征

5.1. M-K 突变分析

从 3.2 的分析表明中国东部年季变化具有一致性，因此接下来的分析将以年均为例进行。从 M-K 突变检验(图 6(a))可知，年均风速在 1975 年之前出现过几次波动，在 1975 年之后开始出现平稳降低。UA_k 与 UB_k 两条线相交于 1989 年，但交点不在±1.96 (显著水平 = 0.05)的显著区内，但可以确定中国东部的风速是存在突变的，且突变年份约发生在 1989 年。而突变点未位于显著性范围内的原因可能是风速在 90 年代的突变属于趋势突变，而 M-K 突变主要用于检测均值突变。中国东部年均气温在 1985 年以前出现多次波动，在之后表现出平稳上升趋势。而 UA_k 与 UB_k 两条线相交于 1990 年，且交点位于±1.96 (显著水平 = 0.05)的显著区间内，说明中国东部的的气温存在显著突变，突变年份发生在 1989 年。

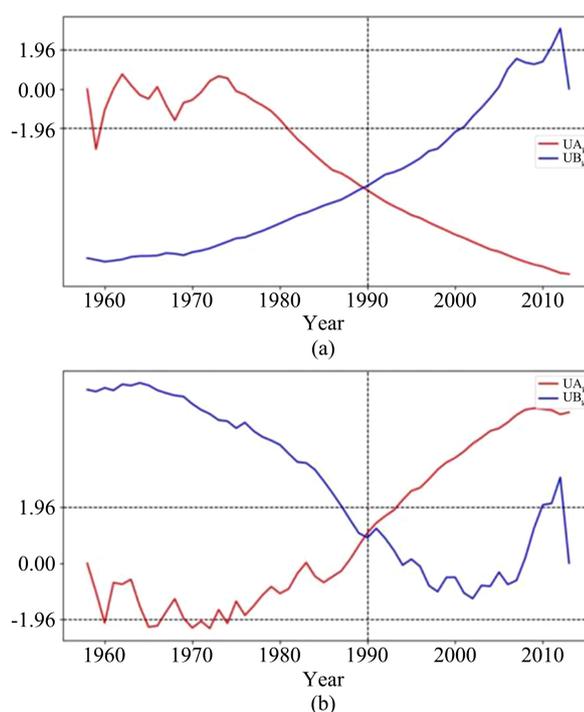


Figure 6. The M-K mutation of average annual near-ground wind speed (a) and temperature (b) in eastern China

图 6. 中国东部年均近地面风速 (a) 和气温 (b) M-K 突变

5.2. 突变前后时间趋势

图 7 给出了突变前后风速变化趋势的空间分布，突变前风速气候倾向率最小为-0.57 m/s，最大为 0.96 m/s。中国东部大部分区域呈减弱趋势，主要位于内蒙古东北和黑龙江的交界区域、东北平原、华北平原至长江中下游、福建沿海和雷州半岛和海南地区。而呈增长趋势的少部分地区主要包括内蒙古高原的中东部和部分零星散状区域。突变后，中国东部风速气候倾向率最小为-0.62 m/s，最大为 0.62 m/s。中国东部呈减弱趋势的区域主要位于中国东北、内蒙古和江淮中下游；除了突变前呈减弱趋势的长江以南地区风速呈增长趋势外，还存在一条沿着河南、山西、河北以及内蒙古四省交界的带状区域。

图 8 给出了突变前后气温时间趋势的空间分布，突变前中国东部气温气候倾向率最小为-0.84℃，最大为 0.83℃。中国东部长江以北大部分地区气温呈增大趋势，其中陕西和陕西交界处、内蒙古大部和中

国东北地区是增大趋势大值区。而呈降低趋势的地区主要位于(105°E~115°E, 22°N~35°N)、浙江、上海全境、福建江西大部、安徽江苏南部和北方部分块状区域,且多数地区减弱趋势量级弱,越往北减弱量级越大。突变后,中国东部气温气候倾向率最小为-0.54℃,最大为0.96℃。除了中国东北和雷州半岛与海南南部地区外,中国东部气温变化都呈增大趋势,其中江浙交界区、重庆湖北交界区和内蒙古部分地区是增大趋势相对较大的区域。

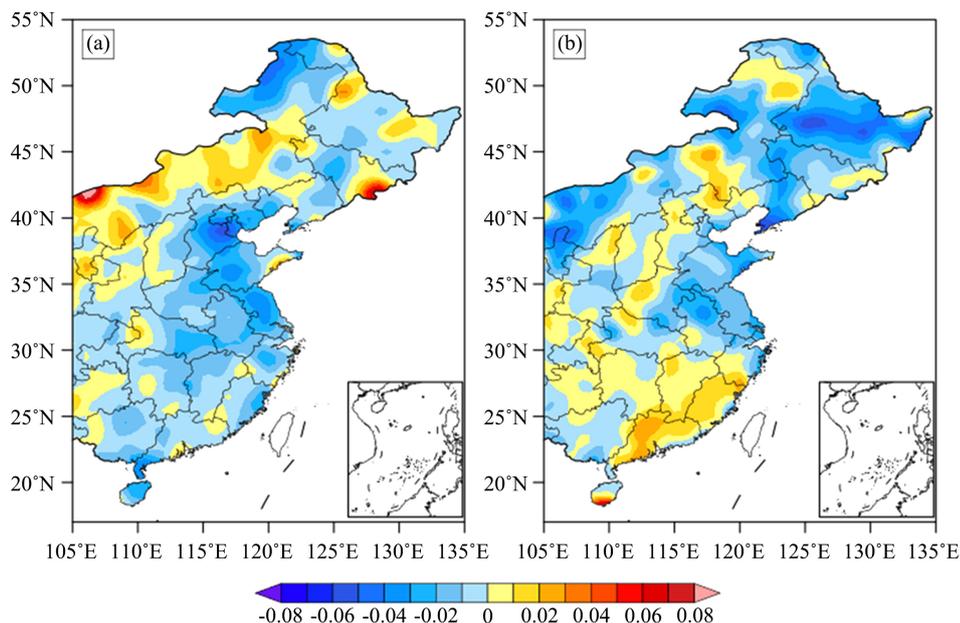


Figure 7. Near ground wind speed trends in eastern China during (a) 1951-1989 and (b) 1990-2014
图7. 1951~1989年突变前(a)和1990~2014年突变后(b)中国东部近地面风速变化趋势

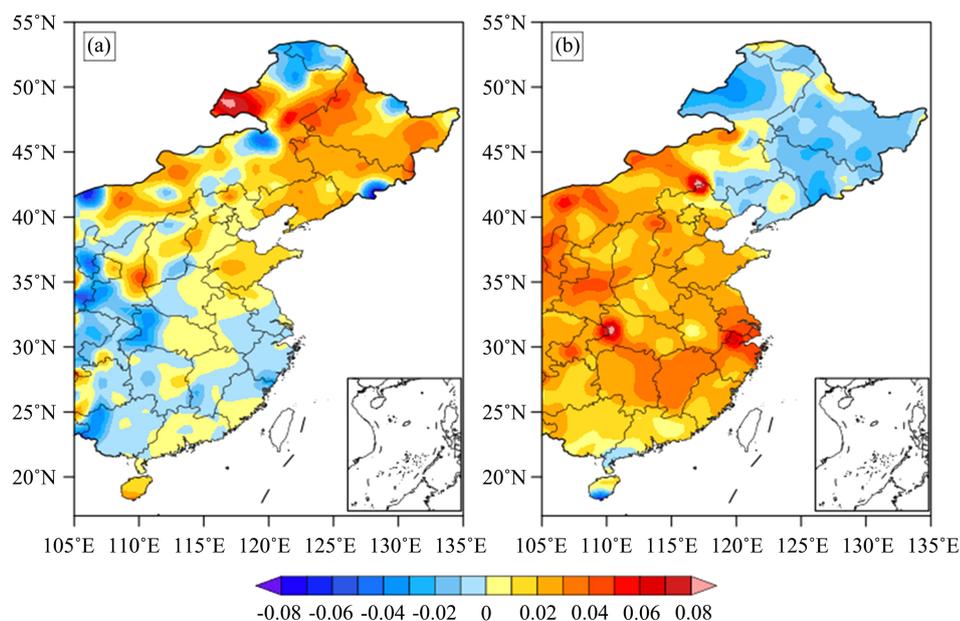


Figure 8. Temperature trends in eastern China during (a) 1951-1989 and (b) 1990-2014
图8. 1951~1989年突变前(a)和1990~2014年突变后(b)中国东部气温趋势

5.3. 突变前后空间变化

由于 EOF 分解能够把三维风速场和气温场分解为空间函数部分和时间函数部分, 通过 EOF 分解既可以反映时间变化, 也可以讨论突变前后的空间特征。这里只给出了 EOF 分解的前两模态(风速累计方差超过 78%, 气温累计方差超过 76%)。图 9 为中国东部风速 EOF 分解前二主分量的空间特征和时间系数。第一模态(图 9(a))展示了风速全区一致空间特征, 结合时间系数(图 9(b))发现 1987 年附近出现了一次转折, 即 90 年代之前中国东部近地面风速 EOF1 的时间系数总体为正, 在 1970 年达到最大, 时间系数变化整体表现出减弱趋势, 说明这一时期我国风速普遍偏大, 但一直呈现减小的趋势。90 年代后, 时间系数全为负, 这表明在这一时期我国风速普遍偏小, 且减弱趋势持续。即突变前后中国风速的空间特征没有大的变化, 但风速量级减弱了。第二模态(图 9(c))展示了华北、长江流域的风速与其他地区呈相反的变化特征。结合时间序列(图 10(d)), 在 1971 年以前, 中国东部风速的时间系数普遍为负, 表明在 1971 年以前, 我国华北、长江流域的风速整体偏大, 而其他地区风速偏小; 在 1971 年以后, 我国华北、长江流域的风速偏小, 而其他地区的风速偏大。该模态下风速在 70 年代也发生了转折, 转折前后空间模态发生了改变。

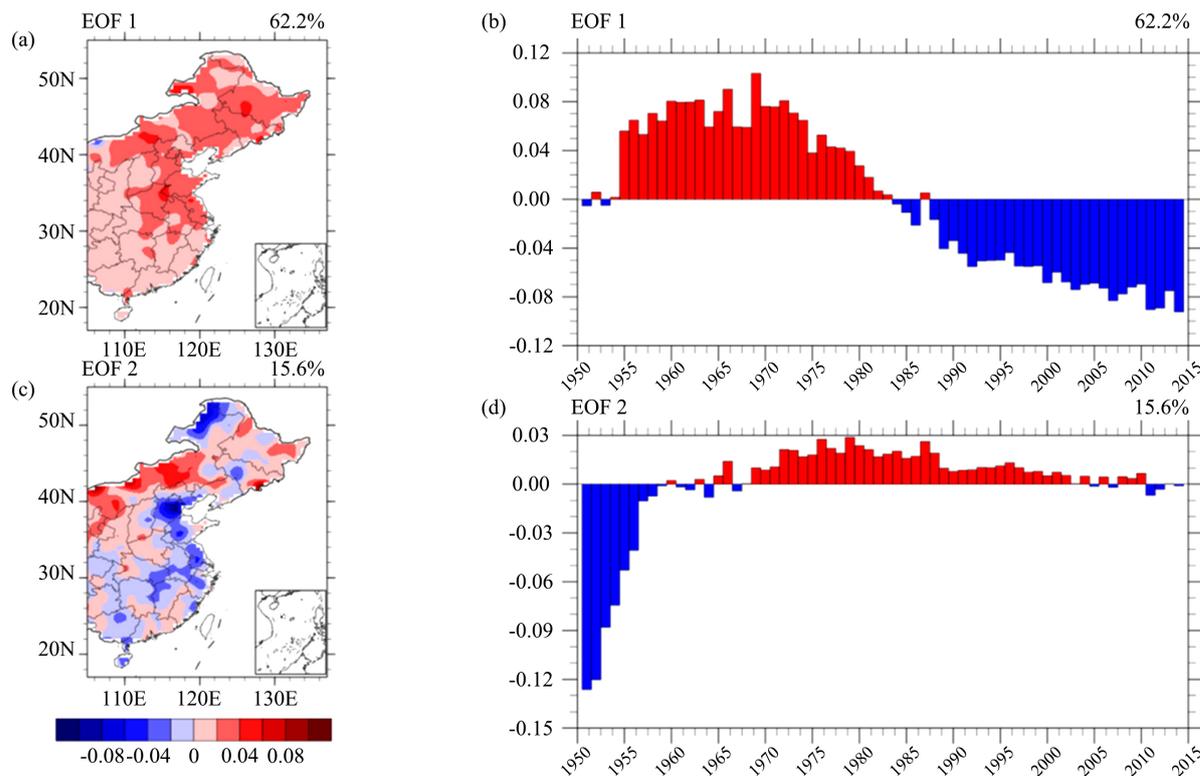


Figure 9. The spatial characteristic (a) and the corresponding time series (b) of wind speed of EOF1 and EOF2 ((c), (d))
图 9. 风速 EOF 分解第 1 主分量(EOF1)的空间特征(a)和相应的时间序列(b); ((c), (d))为 EOF2

图 10 给出了中国东部气温的 EOF 分解结果, 气温 EOF1 (图 10(a))也表现出全国一致型变化。结合图 10(b), 在 1951~1988 年间, 中国东部地区气温 EOF1 的时间系数总体为负, 只在 1962 年、1976 年和 1982 年为小范围的正值, 表明在这时期我国东部地区气温普遍较低。在 1988~2014 年期间, 我国东部气温 EOF1 的时间系数为正, 表明这时期我国气温偏高。由图 10(c)可看出, 中国东部气温呈现出南北振荡

型变化,即 40°N 以北的东北地区和其他地区气温变化呈现出相反的变化特征。当东北地区气温偏冷时,华北、华中和华南地区气温则偏高;当东北地区气温偏暖时,其他地区气温偏低。结合图 10(d),南北震荡型变化特征具有明显的年代际振荡特征,在 1951~1979 年期间,我国东部气温 EOF2 的时间系数为不规律的正负相间,这表明在此时期我国东部地区气温出现冷暖交叉出现的现象;在 1980~1997 年期间,气温 EOF2 的时间系数为负,这表明在这一时期我国东北地区的气温总体偏高;在 1998~2014 年期间,我国东部地区气温 EOF2 的时间系数总体为正,这表明在这一时期东北地区气温偏低,此时华北、华中和华南地区气温偏高。

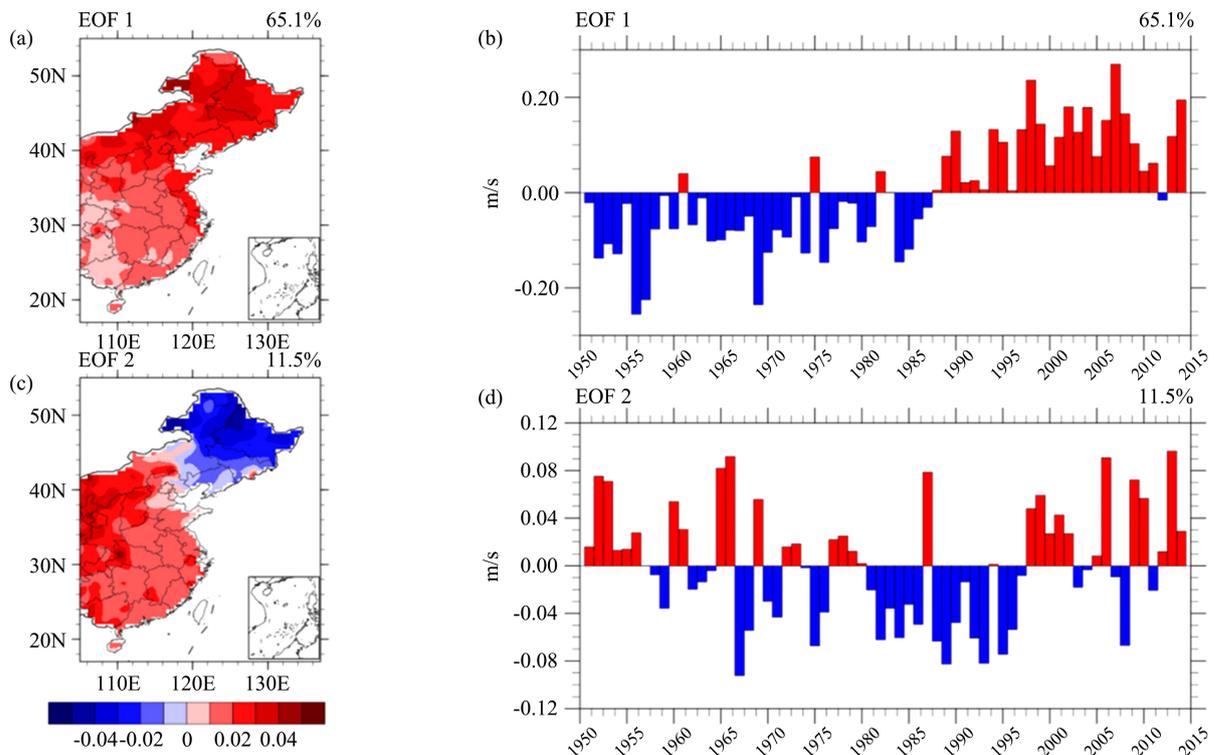


Figure 10. Same as Figure 9, but for Temperature (°C)

图 10. 与图 9 一样, 但为气温(°C)

6. 结论

本文对 1951~2014 年中国东部地区近地面风速和气温的气候特征进行了分析,并重点关注了风速和气温在 20 世纪 90 年代发生的突变和突变前后的时空特征差异。主要结论如下:

1) 中国东部风速北高南低,沿海大、内陆小,最大风速位于内蒙古高原,年均可达 4.58 m/s,而四川盆地东部风速最低,重庆、湖北和湖南三省的交界处仅有 0.95 m/s。气温则南暖北冷,即 50°N 以北温度最低,海南岛温度最高。

2) 1951~2014 年,中国东部年均、春、夏、秋、冬季近地面风速每 10a 分别下降 -0.13 m/s、-0.15 m/s、-0.09 m/s、-0.12 m/s 和 -0.15 m/s。气温每 10a 上升 0.21°C、0.27°C、0.13°C、0.19°C 和 2.70°C,说明冬季是年均气温增长趋势的主要贡献。

3) M-K 突变得出中国东部近地面风速和气温在 1989 年存在突变现象,但风速的突变属于趋势突变,而气温属于均值突变。

4) 突变前(1951~1989年)内蒙古东北和黑龙江的交界区域、东北平原、华北平原至长江中下游、福建沿海和雷州半岛和海南地区等地区风速呈减弱趋势,而气温主要在南方地区呈减弱趋势;突变后(1990~2014年)东北、内蒙古和江淮中下游的风速呈减弱趋势,而气温则只在中国东北呈减弱趋势。

5) EOF 第一模表明中国东部近地面风速和温度在空间上都呈全区一致的特征,但风速(气温)时间序列在 1987 (1989)年出现了一次转折,在突变前风速偏大(温度偏低),突变后偏小(偏高)。而 EOF 第二模态时间转折年份与 M-K 突变点存在差异,但时间转折前后风速和气温在空间上呈现出南北反相的变化。

基金项目

成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019007 和 BKJX2019013)支持。

参考文献

- [1] 陈少勇,王劲松,石圆圆,郭忠祥. 中国东部季风区 1961 年~2006 年年平均气温变化特征[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 462-471.
- [2] 崔林丽,史军,杨引明,李贵才,范文义. 长江三角洲气温变化特征及城市化影响[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 775-786.
- [3] 谢潇,祁莉,何金海. 1980-2009 年中国东部上空温度变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 102-109.
- [4] 任国玉,郭军,徐铭志,初子莹,张莉,邹旭凯,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.
- [5] 刘志邦,安娟,杜志国,徐立松,芦晓彤,刘春明. 1971-2010 年盖州市地面风速变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2015(3): 235-236.
- [6] 邢丽珠,张方敏,黄进,李云鹏. 1961-2018 年内蒙古风速变化及影响因素分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 162-168.
- [7] 邹立尧,国世友,王冀,韩照宇. 1961-2004 年黑龙江省近地层风速变化趋势分析[J]. 气象, 2010, 36(10): 67-71.
- [8] 张志斌,杨莹,张小平,陈志杰. 我国西南地区风速变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 471-481.
- [9] 李艳,耿丹,董新宁,朱焱. 1961-2007 年重庆风速的气候变化特征[J]. 大气科学学报, 2010, 33(3): 336-340.
- [10] Pirazzoli, P.A. and Tomasin, A. (2003) Recent Near-Surface Wind Changes in the Central Mediterranean and Adriatic Areas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, **23**, 963-973. <https://doi.org/10.1002/joc.925>
- [11] Mcvicar, T.R., Niel, T., Ling, T.L., Roderick, M.L., Rayner, D.P., Ricciardulli, L., et al. (2008) Wind Speed Climatology and Trends for Australia, 1975-2006: Capturing the Stilling Phenomenon and Comparison with Near-Surface Reanalysis Output. *Geophysical Research Letters*, **35**, 63-72. <https://doi.org/10.1029/2008GL035627>
- [12] Wan, H., Wang, X.L. and Swail, V.R. (2010) Homogenization and Trend Analysis of Canadian Near-Surface Wind Speeds. *Journal of Climate*, **23**, 1209-1225. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3200.1>
- [13] Kousari, M.R., Ahani, H. and Hakimelahi, H. (2013) An Investigation of Near Surface Wind Speed Trends in Arid and Semiarid Regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, **114**, 153-168. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0811-y>
- [14] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚. 1961-2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2147-2157.
- [15] 史源,陶建峰,龚政,谭亚. 基于 EOF 法的长江口高潮位时空变化特征研究——长时间序列的高潮位 EOF 分析[J]. 海洋通报, 2019, 38(3): 296-303.