Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2021, 10(4), 309-324
Published Online July 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2021.104037

中国区域近地面风速与地表能量变化关系研究

刘毛毛[1]，王卓军[2]

[1]亳州市气象局，安徽 亳州
[2]成都信息工程大学大气科学学院，四川 成都
Email: 502850808@qq.com

收稿日期：2021年6月5日；录用日期：2021年7月3日；发布日期：2021年7月12日

摘　要

近地面风作为可直接利用的风能来源，研究其时空演变特征对风能的开发和利用有着非常重要的意义，而地表能量传输的空间分布和时间变化特征对陆地表面风速有重要影响，两者之间有着很大的联系。如果能够找出其关联的特点，对研究近地面风速和能量传输过程都具有意义。本文对1979~2018年中国区域内的近地面风和2005~2012中国区域高分辨率能量水分循环资料同化数据集进行了分析，研究表明：全年与四季的近地面风速有着明显的空间分布差异特征，且风速等级差异很大，以软风为主。轻风和微风所控制的区域存在较强的季节变化。全年与四季的近地面风速年际变化明显，都表现出先减少后增加的趋势，但总体呈显著的减少趋势。全年和春、夏、秋三季平均近地面风速在20世纪80年代以来减弱是一种突变现象，冬季平均近地面风速无突变点。中国区域的森林下垫面地表能量传输较强，森林和草地下垫面的能量传输主要以潜热通量贡献最大，而沙漠下垫面则主要通过感热通量贡献。

关键词

中国区域，近地面风速，潜热通量，感热通量，地表能量

Study on the Relationship between Near-Surface Wind Speed and Surface Energy Variation in China

Maomao Liu[1], Zhuojun Wang[2]

[1]Bozhou Meteorological Bureau of Anhui, Bozhou Anhui
[2]School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan
Email: 502850808@qq.com

文章引用：刘毛毛，王卓军．中国区域近地面风速与地表能量变化关系研究[J]．气候变化研究快报，2021，10(4): 309-324. DOI: 10.12677/ccrl.2021.104037

Received: Jun. 5th, 2021; accepted: Jul. 3rd, 2021; published: Jul. 12th, 2021

Abstract

Near-surface wind is a directly usable source of wind energy, and the study of its temporal and spatial evolution characteristics is of great significance to the development and utilization of wind energy, while the spatial distribution and temporal variation characteristics of surface energy transmission have an important impact on land surface wind speed. There is a great connection between them. If you can find out its associated characteristics, it will be meaningful for studying near-surface wind speed and energy transmission process. This paper analyzes the near-surface wind in China from 1979 to 2018 and the high-resolution energy and water cycle data assimilation data set in China from 2005 to 2012. The research shows that there is a significant difference in spatial distribution of near-surface wind speeds throughout the year and in the four seasons. And the wind speed levels vary greatly, with soft winds dominating. There are strong seasonal changes in the areas controlled by light and breeze. The inter-annual variation of surface wind speed throughout the year and in the four seasons is obvious, all showing a trend of first decreasing and then increasing, but overall there is a significant decreasing trend. The weakening of the average near-surface wind speed throughout the year and spring, summer, and autumn since the 1980s is a sudden change. There is no sudden change in the average near-surface wind speed in winter. The surface energy transmission of the underlying forest surface in China is strong. The energy transmission of the underlying surface of the forest and grass is mainly contributed by latent heat flux, while the underlying surface of the desert mainly contributes through sensible heat flux.

Keywords

China Area, Near-Surface Wind Speed, Latent Heat Flux, Sensible Heat Flux, Surface Energy

1. 前言

1.1. 研究意义

自从20世纪以来，随着人口剧烈增长，工业化进程加速，排放大量二氧化碳等多种温室气体，在全球范围内形成了以气候变暖为主要变现形式的重大变化，对全球的生态环境和经济发展带来了巨大的影响[1]。在全球变暖的大背景下，气温升高，冰川萎缩，海平面上升，水汽循环特征发生改变，极端天气和气候事件越来越频繁发生[2]。近地面风速作为对环境和气候变化的重要影响因素，对表征天气和气候的形成与变化有着重要的意义，与近地面蒸发、降水、雾和霾等天气现象以及沙尘暴事件有着非常密切的关系[3] [4]。此外，随着全球经济一体化，世界经济迅速发展，对煤炭、天然气、石油等不可再生能源的需求日益增加，导致能源供应紧张以及二氧化碳、甲烷等温室气体和气溶胶的排放量与日俱增[5] [6]。风能作为一种可再生的清洁能源，既能缓解世界能源供应的紧张关系又能同时达到保护环境的目的，在新能源开发利用与能源体系转型变革过程中占据着重要的地位，并且已经成为世界上增长最快的重要能源模式之一[7]。中国地域广阔，对风能资源的开发与利用有着巨大的潜力。据统计，到2018年为止，风

能已经成为我国主要的电力来源之一。在低碳清洁、碳中和的发展大趋势下，我国能源发展正处于能源体系转型的变革时期，对风能的开发与利用必将是清洁能源的发展的重点。近地面风作为可直接利用的风能来源，对风能的开发和利用有着非常重要的意义。因此，对中国区域近地面风速的研究很有必要[8]。

而风速的研究离不开能量的变化。地表能量特征的研究主要是基于 GRDFLX 地表热通量(W/m^2)，HFX 地表感热通量(W/m^2)，LH 地表潜热通量(W/m^2)。而地表能量特征的特征研究往往和陆面过程有着紧密的联系。陆面过程研究以描述地面——大气间物质和能量交换为主要目标。因为涉及全球和区域环境与气候变化等问题, 陆面过程研究受到科技界的普遍关注[9]。

陆面过程是连接近地层大气圈、水圈、生物圈和土壤圈之间关系的纽带，也是它们之间进行物质和能量交换的桥梁以及发生相互作用的必然环节，以地表能量平衡为主的地——气能量交换过程是陆面过程研究的主要内容，它直接关系到陆面(土壤)温度的形成和变化。而土壤温度作为陆面过程中的重要物理特征，是研究陆——气作用的重要参数[10]，地表温度受到能量收支的改变会发生一系列变化。有关陆面——大气间的能量通量研究不仅是大气科学，还包括生态学，环境学，水文学等重要学科的研究内容。地表的能量通量是陆面与大气能量交换的重要内容[11]，以边界层的湍流运动进行传输，通过 Ekman 抽吸作用，使得自由大气与近地层存在着千丝万缕的物质和能量来往，进而也影响了地表温度，水分和植被生长等问题。

1.2. 国内外研究现状

随着世界各国对风能和气候变化的日益关注，越来越多的科学家也将目光集中在研究中国近地表风速的变化上面来[12]。

关于中国近地面风速的区域变化也有很显著的差异。王毅荣等[13]利用 1970 年到 2004 年期间河西走廊绿洲气象站和高山站的地面风观测资料研究发现，绿洲气象站的平均地面风速存在明显的减小趋势，而地形较为复杂的高山站风速部分表现为显著的增加趋势。荣艳淑等[14]发现，我国华北地区的平均风速的变化在空间分布上有明显的差异，在华北平原的西北方和东南方的多年平均风速较大，而华北平原的东北方和西南方多年平均风速相对较小。钟海玲等[15]对我国北方地区近 30 年的地面风速和沙尘暴之间进行的分析研究表明，我国的地面风速与沙尘暴的变化有着显著的正相关。Zha 等[16]通过对中国近地面风速的研究发现，近 30 年来中国地面风速长期处于下降趋势，其中我国华东地区的平均风速以每十年 0.13 m/s 的速度降低。刑丽珠等[17]利用 1960~2018 年我国内蒙古以及邻近区域 85 个气象站的逐日地面风资料，研究了内蒙古近 58 年来的地面风速的时空变化特征，结果表明内蒙古地区绝大多数站点地面风速都呈现出下降趋势，同时风速也具有很明显的区域性特征。

关于近地面风速变化原因方面的研究，国内外专家学者也取得了很多有意义的研究成果。一些研究将近地面风速的减弱和大规模环流减弱、厄尔尼诺－南方涛动以及气候变化联系联系到一起。美国科学家 Enloe 等[18]将近地面风速的变化同厄尔尼诺－南方涛动现象联系起来，对 ENSO 暖相位和冷相位期间美国阵风强度的变化进行研究，确定了 ENSO 与美国连续性阵风之间的关系。Sušelj 等[19]通过对近地面风速与环流模式之间关系的研究表明近地面风速的减弱是由于大尺度环流减弱所导致的。

不仅是对风的研究，对于能量的观测也在不断推进。自 20 世纪 80 年代在黑河流域开展国内第一个大型陆面过程观测试验(HEIFE)以来，我国已先后开展了西北河西走廊干旱区(NWCALIEX) [20] [21] [22]、淮河流域(HUPEX) [23]、西南云贵地区(JICA) [24]、青藏高原(TIPEX) [25]、内蒙古草原(IMGRASS) [26]等具有典型自然生态性代表区域的重大陆面过程试验[10]。西北河西走廊干旱区(NWCALIEX)陆面过程试验主要研究干旱与半干旱之间的相互作用，更加全面认识干旱区陆面过程特征。对我国干旱，土地荒漠化，沙尘暴，水资源短缺和生态退化等西北地区典型生态问题做出分析[20]。淮河流域(HUPEX)陆面

过程试验经过两年的外场观测，获得了高时空分辨率的气象水文资料，这也是第一次国内外在东亚半湿润季风区开展的气象与水文联合试验。得到了淮河流域的能量平衡和水分平衡图像，进行了区域气候模式与水文模型的耦合研究，研究出了新的陆面过程模式，并且还研制了区域资料同化系统以及四维同化资料数据集[23]。青藏高原(TIPEX)选取典型的区域研究发现了适当的云天条件可以观察到极大的辐射能量，并且青藏高原地表反照率变化通过影响热源，热汇，这种源汇带来的季节性和区域性的变化会进一步影响下游季节尺度变化[25]。以上国内重大陆面过程试验都较好地揭示了地表能量平衡变化特征。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况

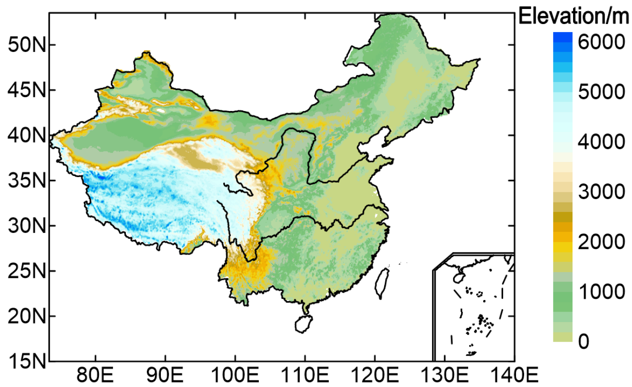

Figure 1. Topographic Map of China
图 1. 中国地形图

中国是一个地域辽阔、多山多水的国家，整个地势西高东低，以有着世界“第三极”之称的青藏高原为最，自西部向东部地势逐渐降低，呈现出阶梯样式分布，经常以“三大阶梯”来形容我国的地形轮廓。如图 1 所示，在全国面积占比中，高原大约占比 26%左右，包括有位于我国华北的黄土高原、西北的内蒙古高原以及西南的青藏高原和云贵高原。山地大约占比 33.3%左右，主要位于我国的第二阶梯。丘陵和平原大约占比 22%左右，主要位于我国海拔较低的地区如东北、华中、华东和华南等地。盆地大约占比 18.8%左右，包括有位于我国西北新疆的准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地以及我国西南四川的四川盆地。

2.2. 资料概括

本文所采用的风速资料为中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)中 1979~2018 年的近地面风速月分辨率数据。

CMFD 资料是利用 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料和卫星遥感数据、GEWEX-SRB 辐射资料、TRMM 卫星观测的降水资料为背景场并结合中国气象局各气象台站的观测资料制作而成。已去除非物理范围的值，采用 ANU-Spline 统计插值，精度介于和卫星遥感数据之间，优于国际上已有再分析数据的精度[27]。

地表能量资料来源于中国区域高分辨率能量水分循环资料同化数据集。

该数据集发布的数据产品时间段为：2005 年 1 月 1 日 00:00:00 至 2012 年 12 月 31 日 18:00:00 (世界时)，间隔三小时一次结果输出，共 23,360 时次。

范围：经度 70.46˚E~135.53˚E，纬度 18.27˚N~53.56˚N；

分辨率：空间水平网格分辨率 1˚ × 1˚；

垂直分层：19 层气压层(Grads 格式)或 35 层 eta 层(NETCDF 格式)；

气象要素：详见表 1。

Table 1. Meteorological elements and units of China's regional high-resolution energy and water cycle data assimilation data set

表 1. 中国区域高分辨率能量水分循环资料同化数据集气象要素及单位

缩写	参数名称	缩写 xie 写	参数名称
LU_INDEX	下垫面土地利用类型	Q2	地面 2 米处比湿(kg/kg)
T2	地面 2 米处温度(K)	PSFC	地表气压(Pa)
U10	10 米处 U 风速分量(m/s)	V10	10 米处 V 风速分量(m/s)
TSLB	土壤温度(K)	SMOIS	土壤湿度(%)
IVGTYP	主导植被类型	ISLTYP	主导土壤类型
VEGFRA	植被覆盖度	GRDFLX	地表热通量(W/m^2)
LAI	叶面积指数(area/area)	HGT	地形高度(m)
TSK	地表温度(K)	RAINC	累积积云降水(mm)
RAINSH	累积浅积云降水(mm)	RAINNC	网格尺度累积降水(mm)
SWDOWN	向下短波辐射通量(W/m^2)	GLW	向下长波辐射通量(W/m^2)
XLAT	纬度	XLONG	经度
ALBEDO	反照率	LFMASS	叶片生物量(g/m^2)
CHB	裸地的热交换系数	PBLH	边界层高度(m)
HFX	地表感热通量(W/m^2)	LH	地表潜热通量(W/m^2)
rh2	2 米处相对湿度(%)	ws10	10 米处水平风速矢量(m/s)
wd10	10 米处水平风向矢量(˚)		

2.3. 研究方法

2.3.1. 回归分析方法

利用地面风速数据和时间，确定两者之间的相关关系，并建立一个相关性较好的一元线性回归方程：$y = ax + b$。其中 y 为因变量，x 为自变量，a 为回归系数，b 为参数。根据最小二乘法可以计算得到 a，再根据 x 和 y 的值以及 a 计算得到 b，从而得到完整的一元线性回归方程，方程得出后，还要经过显著性检验和误差计算。

2.3.2. t 检验

本文用 t 检验方法对降水量、降水日数、降水强度的变化趋势与年均降水量的相关系数进行显著性检验，t 检验也叫 student test，是一种在统计分析中常用的检验方法。其公式为：

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma_x}{\sqrt{n-1}}} \tag{1}$$

(1)式中，$\bar{X}$ 表示样本的平均值，μ 表示总体的平均值，n 表示样本总数。

2.3.3. M-K 突变检验法

MK 检验是一种基于秩的非参数检验方法，是用来统计评估变量随时间是否呈单调上升或下降趋势的趋势检验方法。经过许多科学家的完善以及改进，最终才形成用于检验序列突变的 M-K 突变检验方法。

其计算方法如下：

对于具有 n 个样本量的时间序列 X，构造一个秩序列：

$$s_k = \sum_{i=1}^{k} r_i,\ k = 1,2,3,\cdots,n \tag{2}$$

(2)式中：

$$r_i = \begin{cases} +1, & (x_i > x_j) \\ 0, & (x_i \le x_j) \end{cases} \quad j = 1,2,3,\cdots,i \tag{3}$$

可见，秩序列 S_k 是第 i 刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下，定义统计变量。

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{Var(s_k)}},\ k = 1,2,3,\cdots,n \tag{4}$$

(4)式中 $UF_1 = 0$，$E(s_k)$，$Var(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差，在 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 相互独立，且有相同连续分布时，它们可由下式算出：

$$\begin{cases} E(s_k) = \dfrac{k(k+1)}{4} \\ Var(s_k) = \dfrac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \tag{5}$$

UF_k 为标准正态分布，它是按时间序列 x 的顺序 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 计算出的统计量序列，在给定的显著性水平 α 之下，查正态分布表，若 $|UF_i| > UF_{\alpha/2}$，则表明该序列存在显著的趋势变化。

对时间序列 x 进行逆序 $x_n, x_{n-1}, \cdots, x_1$，再重复上述过程，同时使 $UB_k = -UF_k$，$k = n, n-1, \cdots, 1$，$UB_1 = 0$。

M-K 突变检验方法的优点在于不仅计算过程简便，而且可以明显的确定出突变发生的时间以及突变的区域。因此，本文采用 M-K 突变检测方法进行突变检验。

2.3.4. 对能量数据的基本处理

1) 各个要素在各个网格点的日平均值计算：

$$\overline{A_{(X,Y,i)}} = \frac{1}{8} \sum_{n=1+8(i-1)}^{8i} A_{(x,y,n)}, (i = 1,2,3,\cdots,365) \tag{6}$$

2) 选定区域的区域中各个要素日平均值计算：

$$\overline{\overline{A_i}} = \frac{1}{8} \sum_{n=1+8(i-1)}^{8i} \overline{A_n}, (i = 1,2,3,\cdots,365) \tag{7}$$

3. 研究结果

3.1. 中国区域风速的空间分布特征

Table 2. Beaufort wind rating
表 2. 蒲福风力等级

风级	名称	风速(m/s)
0	无风	0.0~0.2
1	软风	0.3~1.5
2	轻风	1.6~3.3

Continued

3	微风	3.4~5.4
4	和风	5.5~7.9
5	劲风	8.0~10.7
6	强风	10.8~13.8
7	疾风	13.9~17.1
8	大风	17.2~20.7
9	烈风	20.8~24.4
10	狂风	24.5~28.4
11	暴风	28.5~32.6
12	台风	>32.7

如表 2 蒲福风力等级所示，本文按照中华人民共和国国家标准《风力等级》(GB/T28591-2012)，将风速划分为 12 个等级(强度)，对不同强度风速的空间分布进行分析。

3.1.1. 年平均风速的空间分布

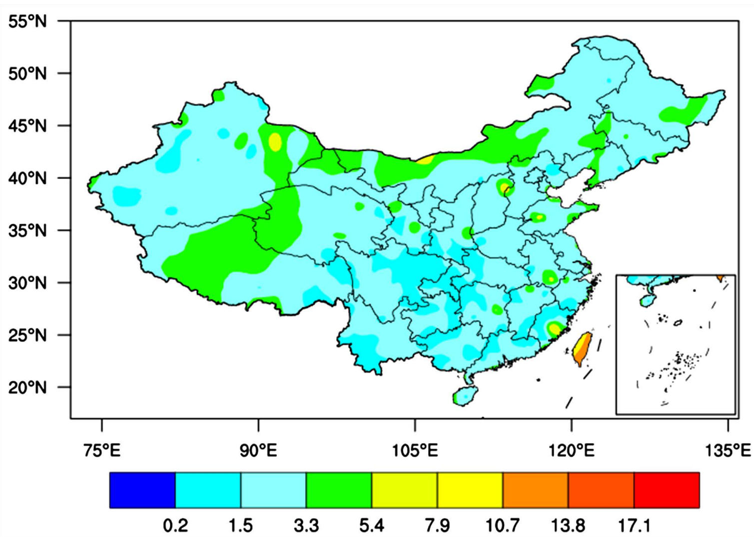

Figure 2. The spatial distribution map of annual average wind speeds of different intensities (m/s) near the ground in China (1979~2018)
图 2.中国年平均近地面不同强度风速(m/s)的空间分布图(1979~2018 年)

图 2 为中国近地面 1979~2018 年多年平均不同强度风速的空间分布图，从气候分布特征来看，1979~2018 年多年平均的近地面风速有着明显的空间分布差异特征，且风速等级差异很大，最小的近地面风速在 1.5 m/s 以下，最大的近地面风速可以达到 10.7 m/s 以上。从全国范围来看，多年平均近地面风速为 1 级软风的区域主要分布在我国新疆的部分地区、西藏东部地区、云南西南部地区、四川东部及邻近区域、重庆、湖北西部地区以及贵州与湖南、广西交界区域和福建的大部分区域。中国大部分区域的多年平均近地面风速都在 2 级轻风范围内，所占的面积比例最大。多年平均近地面风速为 3 级微风的区域主要分布在我国新疆东部地区、青海西部地区、西藏中部地区、甘肃西北部、内蒙古中部偏北的大部分区域以及我国东北的部分地区，除此之外在我国的其他地区也有很多零散的局地微风分布。多年平均近地面风速在 4 级和风的地区较少，分布也较为零散，主要在新疆哈密的西部侧、内蒙古巴彦淖尔西北

部靠近边界线的区域、山西五台山附近区域、山西平阴县附近区域、安徽黄山附近区域以及福建中部偏东南区域。多年平均近地面风速在 5 级劲风的地区分布较为集中，集中在我国台湾的西北侧。多年平均的近地面风速的大值区出现在我国台湾东南侧，其中近地面风速的最大值可达到 12.4 m/s，达到了强风的级别。

3.1.2. 四季平均风速的空间分布

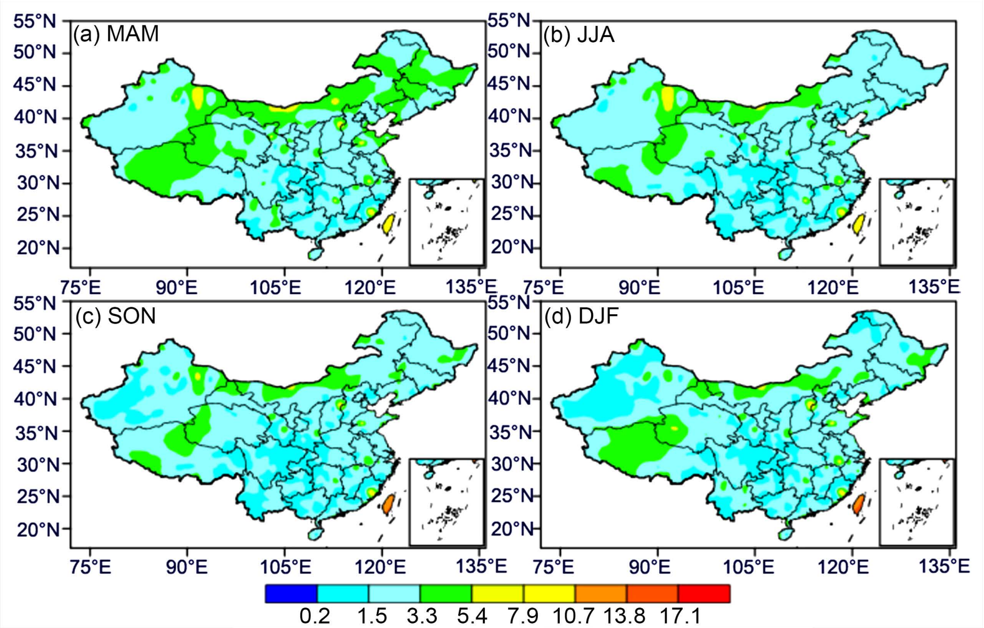

Figure 3. The spatial distribution map of the average wind speeds of different intensities (m/s) near the ground in four seasons in China (1979~2018). (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter
图 3. 中国四季平均近地面不同强度风速(m/s)的空间分布图(1979~2018 年)。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

图 3 为中国四季近地面 1979~2018 年多年平均不同强度风速的空间分布图，如图 3(a)所示，中国春季近地面不同强度风速分布与年平均近地面风速分布型基本一致，但也存在一些细微的差别。我国春季 1 级软风分布情况与年平均大致相同，但面积相对有所减小。春季 2 级轻风与年平均类似，占据中国的大部分区域。春季的 3 级微风相比年平均来说影响范围明显扩大，内蒙古以及我国东北基本都表现为 3 级微风，我国西北地区的 3 级风影响范围也明显扩大。同时，我国春季的 4 级和风的影响范围也略微增加，并在内蒙古的苏尼特右旗附近、甘肃威武附近以及湖南衡阳东侧新增三个和风区。但是我国台湾春季的近地面风速总体有所减小，整个台湾春季受到 5 级劲风的控制。如图 3(b)所示，相比而言，我国秋季近地面风速整体偏小，1 级软风和 2 级轻风所影响的区域明显扩大，而 3 级微风和四级和风所影响的区域整体明显减小，但是也有例外，新疆地区的和风区域明显扩大，并在其中心出现一块 5 级劲风区。与春季类似，我国台湾夏季近地面风速为受到 5 级劲风的控制。如图 3(c)所示，我国秋季近地面风速整体偏低，1 级软风区相对夏季范围更大，尤其是新疆西部出现大片的软风区，近地面风速整体偏低。1 级软风和 2 级轻风所影响的区域相比夏季进一步扩大，而 3 级微风和四级和风所影响的区域也进一步减小。但是我国台湾却整体表现为一个 6 级强风区，近地面风速相对春季和夏季有着明显的增强。如图 3(d)所示，我国冬季 1 级软风和 2 级轻风所影响的区域占据了绝大部分区域，3 级微风主要集中在西藏和内蒙古以及青海西南部，并且在青海西南部出现了一个和风区。山西的和风区明显偏强，并在其中心区域出

现一个劲风区，其余地区的和风区都明显偏小。我国台湾地区近地面风速在冬季达到最强，在台湾东南部甚至达到 7 级疾风。

3.2. 中国区域风速的时间变化特征

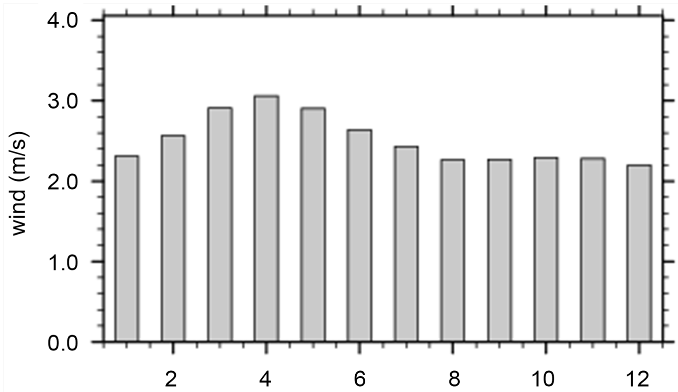

Figure 4. Monthly average wind speed near the surface of China from 1979 to 2018 (m/s)
图 4. 1979~2018 年中国区域内近地面风速逐月平均风速(m/s)

从 1979~2018 年中国区域内近地面风速逐月平均风速图(图 4)中可以看到，中国区域近地面风速年内变化呈单峰型，即只有一个最大值，最大值出现在每年的 4 月份，最大值为 3.06 $m \cdot s^{-1}$，最小值为 2.19 $m \cdot s^{-1}$，出现在 12 月份。在 8 月份之前，月际变化起伏较大。8 月份之后，月际变化起伏较小。

3.2.1. 年平均风速的时间变化

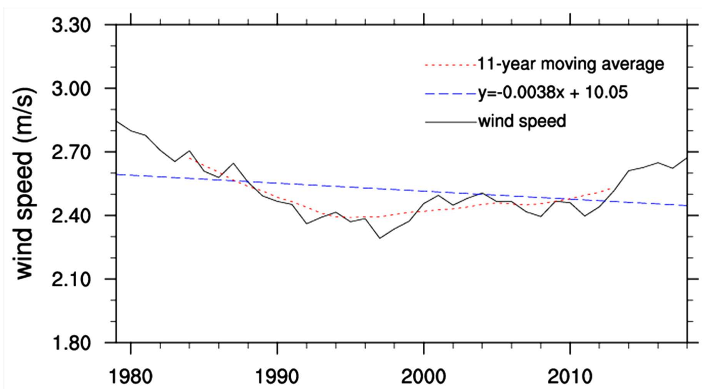

Figure 5. The change trend of China's regional annual average near-surface wind speed from 1979 to 2018
图 5. 1979~2018 年中国区域年平均近地面风速的变化趋势

中国区域内 1979~2018 年平均近地面风速的结果显示(图 5)，中国区域内的近地面风速年际变化明显，区域年平均近地面风速为 2.52 m/s，年均近地面风速的最大值出现在 1979 年，近地面风速值达到 2.84 m/s，年均近地面风速的最小值出现在 1997 年，近地面风速可达到 2.29 m/s。在 1979~2018 年间，整个中国区域内的近地面风速呈显著的减小趋势，年均近地面风速的变化率为 0.0038 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$，而且通过了 95%的显著性检验($p = 0.04$)。由 11 年滑动平均曲线发现中国近地面风速整体上经历了一个先减小后增加的趋势 1979~1994 年中国近地面风速呈现处一个减小的趋势，1995~2018 年又表现出缓慢增加的趋势。

3.2.2. 四季平均风速的时间变化

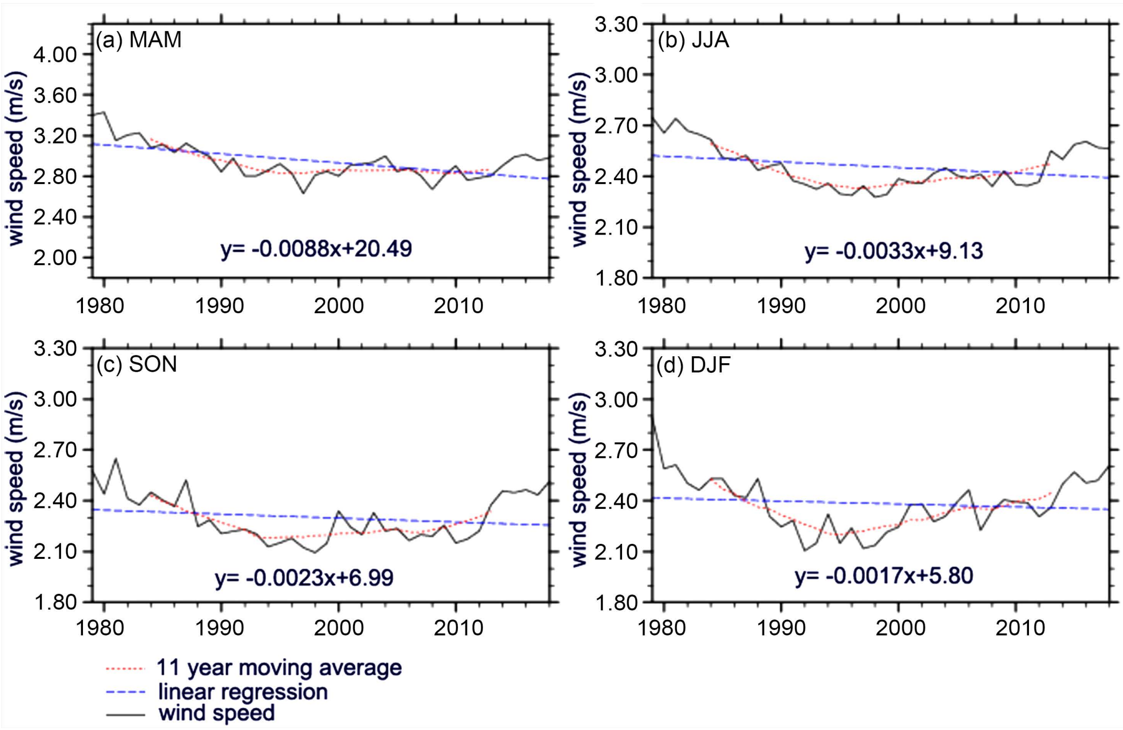

Figure 6. Variation trend of the four-season average near-surface wind speed in China from 1979 to 2018. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter

图 6. 1979~2018 年中国区域四季平均近地面风速的变化趋势。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

从图 6 可以看出，近地面风速分别为 2.95 m/s、2.45 m/s、2.30 m/s、2.38 m/s，四季的最大近地面风速分别出现在 1980 年、1981 年、1981 年、1979 年，均出现在 1980 年左右，且近地面风速的最大值分别为 3.43 m/s、2.75 m/s、2.66 m/s、2.87 m/s、四季的最小近地面风速分别出现在 1997 年、1998 年、1998 年、1992 年，冬季近地面最小风速出现的时间较其他季节略有偏差，近地面风速的最小值分别为 2.74 m/s、2.27 m/s、2.08 m/s、2.11 m/s。从 11 年滑动平均曲线可以看出，四季近地面风速与年均近地面风速的变化基本一致，都表现出先减少后增加的趋势，不同的是春季与冬季的近地面风速在 1979~1995 年表现为减小趋势，1996~2018 年表现为增加趋势，与年近地面风速变化一致。夏季近地面风速在 1979~1997 年表现为减小趋势，在 1998~2018 年表现为增加趋势，转折点出现的年份较春季略微偏晚。秋季近地面风速在 1979~1993 年表现为减小趋势，在 1994~2018 年表现为增加趋势，转折点出现的年份较为偏早。

3.3. 平均风速的突变特征

为了分析 1979~2018 年近 40 年中国区域内近地面风速变化趋势和突变发生的时间，本节通过曼－肯德尔突变检验法，对中国近地面风速的突变情况进行研究。分别绘制处 UF (红色实线)以及 UB (蓝色虚线)曲线图(UB、UF 的计算的详细方法请看第二节)。如果 UF_k 和 UB_k 的值大于 0，则表明近地面风速呈现处增加的趋势，小于 0 则表示呈现处减小的趋势。当他们超过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平临界值，则表明增加或者减小的趋势显著。超过显著性水平临界值的范围为近地面风速突变发生的时间区域。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点，而且交点出现在两条显著性水平临界线以内，则该交点所对应的时间为突变发生的时间。

3.3.1. 年平均风速突变

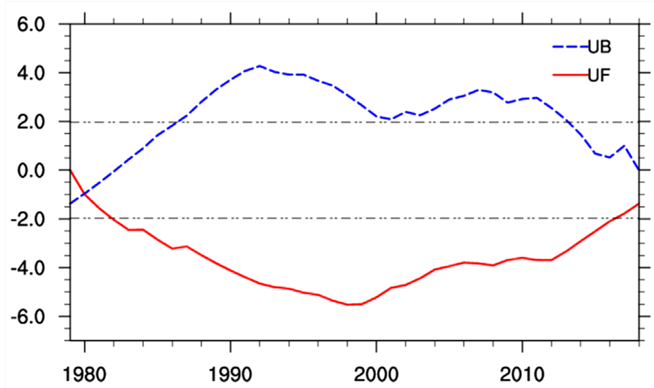

Figure 7. M-K statistical curve of annual average near-surface wind speed in China from 1979 to 2018 (The gray dashed line is the critical value of the significance level of $\alpha = 0.05$)
图 7. 1979~2018 年中国区域年平均近地面风速 M-K 统计量曲线(灰色虚线为 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平临界值)

从 1979~2018 年中国区域内近地面风速 M-K 统计量曲线图(图 7)可以看到，由 UF 曲线可见，自 1979 年开始，中国近地面风速有一明显的减小趋势。20 世纪 80 年代至 21 世纪 10 年代这种近地面风速的减小趋势大大超过了显著性水平 0.05 临界线，甚至超过 0.01 显著性水平($u_{0.01} = 2.56$)，这表明近地面风速的减小趋势是十分显著的。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置，可以确定中国的平均近地面风速在 20 世纪 80 年代以来减弱是一种突变现象，具体是从 1980 年开始的。

3.3.2. 四季平均风速突变

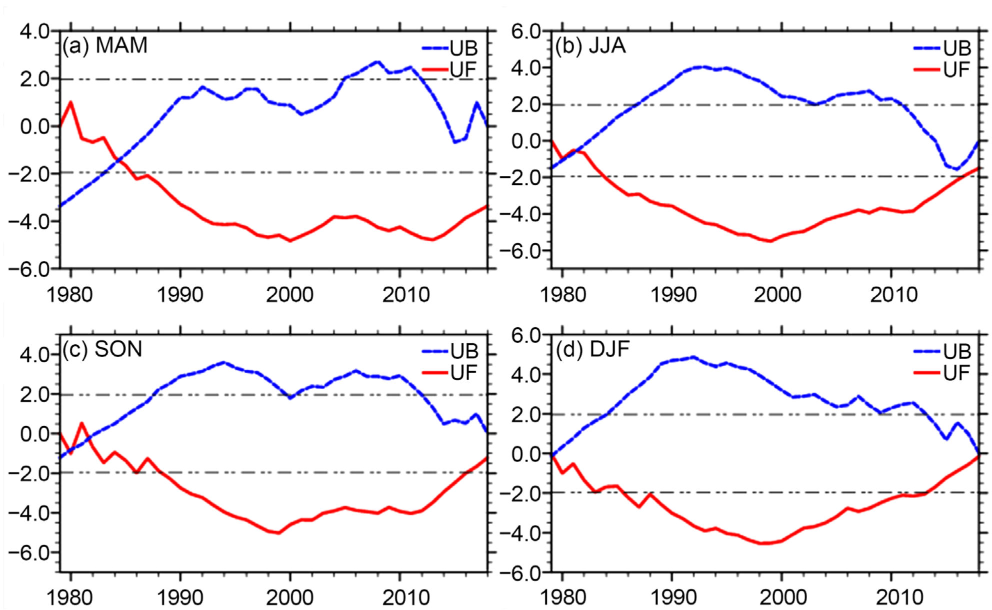

Figure 8. M-K statistical curve of the four-season average near-surface wind speed in China from 1979 to 2018. (a) Spring; (b) Summer; (c) Autumn; (d) Winter
图 8. 1979~2018 年中国区域四季平均近地面风速 M-K 统计量曲线。(a) 春季；(b) 夏季；(c) 秋季；(d) 冬季

如图 8 所示 1979~2018 年中国区域四季近地面风速 M-K 统计量曲线，由图 8(a)的 UF 曲线可见，自 1982 年开始，中国春季近地面风速有明显的减小趋势。从 1985~2018 年这种春季近地面风速的减小趋势是十分显著的，通过了 95%甚至 99%的显著性检验。根据春季 UF 和 UB 曲线交点的位置，可以确定春季的平均近地面风速自 20 世纪 80 年代以来的减弱是一种突变现象，具体是从 1984 年开始的。同样，由图 8(b)的 UF 曲线可见，自 1979 年开始，中国夏季近地面风速有同样的减小趋势。从 1984~2016 年这种春季近地面风速的减小趋势是十分显著的，通过了 95%甚至 99%的显著性检验。根据夏季 UF 和 UB 曲线交点的位置，可以确定夏季的平均近地面风速自 20 世纪 80 年代以来的减弱是一种突变现象，具体的突变年份为 1981 年。由图 8(c)的 UF 曲线可见，自 1982 年开始，中国秋季近地面风速有明显的减小趋势。从 1988~2016 年这种秋季近地面风速的减小趋势开始变得显著，通过了 95%甚至 99%的显著性检验。根据秋季 UF 和 UB 曲线交点的位置，可以确定秋季的平均近地面风速的减弱也是突变现象，具体的突变年份为 1981 年。同样，由图 8(d)可知，自 1979 年开始，中国冬季近地面风速开始呈现减小趋势。从 1986~2013 年冬季近地面风速的减小趋势是十分显著的，且通过了显著性检验。但是中国冬季近地面风速不存在突变点，突变现象不明显。

3.4. 中国区域风速变化的空间分布

3.4.1. 年平均风速变化的空间分布

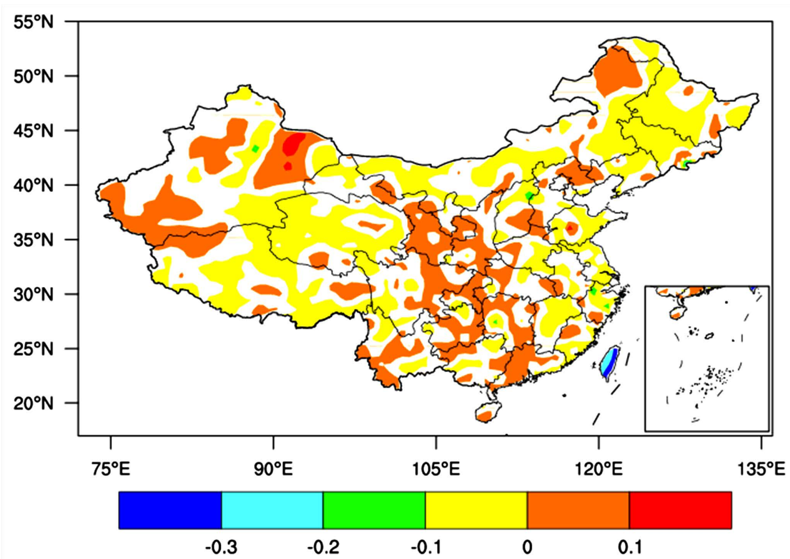

Figure 9. China's regional average annual near-surface wind speed trend ($m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$) change distribution in 1979~2018
图 9. 1979~2018 年中国区域年平均近地面风速趋势($m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$)变化分布

图 9 给出 1979~2018 年中国区域年平均近地面风速趋势变化分布的情况，图中空白区域表示没有通过显著性检验，填色区域表示通过了 95%及以上的显著性检验。从中国年平均近地面风速的趋势系数分布来看，中国年平均近地面风速趋势系数的变化范围在−0.34 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 到 0.15 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 之间，近地面风速趋势系数相差很大，存在很明显的区域差异。近地面风速趋势系数小于−0.3 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 的区域集中在我国台湾的东南沿海一带。近地面风速的趋势系数介于−0.3 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 和−0.2 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 之间的区域集中在我国台湾西北侧沿海一带，近地面风速趋势的大值均集中在我国台湾，且呈现显著的减小趋势。近地面风速的趋势系数介于−0.2 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 和−0.1 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$ 之间的区域分布较为零散且区域较小，主要分布在我国新疆、

山西、吉林、重庆、湖南、浙江境内。近地面风速趋势系数在−0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$和0 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的区域分布较为广泛，主要集中在我国东北三省、华北的内蒙古、西北的青海、西南的西藏、华东五省、华中的江西以及华南福建等地。近地面风速趋势系数在0 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$和0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的区域分布面积较大，主要集中在内蒙古东北部、新疆、甘肃、陕西、四川、重庆、湖南、湖北、云南、贵州、广东等地。近地面风速的趋势系数大于0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$的区域分布较为零散且区域较小，主要分布在新疆东北部和山东境内。

3.4.2. 四季平均风速变化的空间分布

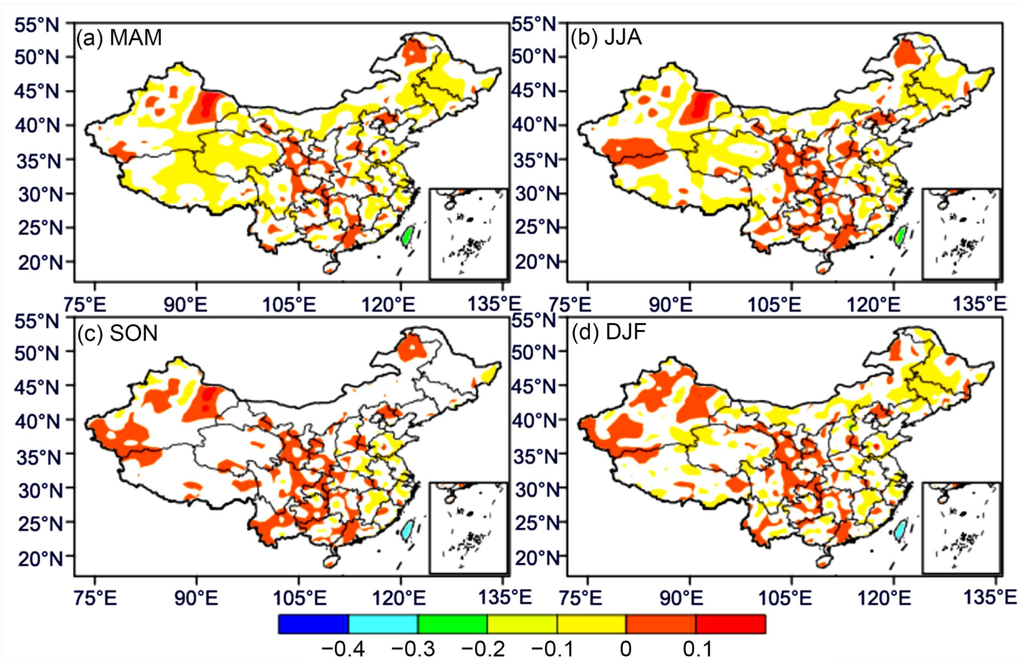

Figure 10. China’s four-season average near-surface wind speed trend ($m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$) change distribution in 1979~2018

图10. 1979~2018年中国区域四季平均近地面风速趋势($m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$)变化分布

图10给出1979~2018年中国区域四季平均近地面风速趋势变化分布的情况，图中填色区域表示通过了95%及以上的显著性检验。春、夏、秋、冬四季平均近地面风速趋势系数的最小值分别为−0.30 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、−0.30 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、−0.40 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、−0.41 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$，趋势系数最大值分别为0.17 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、0.19 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、0.15 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$、0.17 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$。春季，在通过显著性检验的地区平均近地面风速以减小为主。春季近地面风速减小趋势最大出现在我国台湾，趋势系数介于−0.3~−0.2 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间。近地面风速趋势系数在−0.2~−0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的地区与年平均近地面风速分布基本一致。近地面风速趋势系数在−0.1~0 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的地区主要集中在我国西北、东北以及华东一带。近地面风速趋势系数在0~0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的地区主要集中在我国新疆、内蒙古东北部、华中、川渝、广东、湖南等地。近地面风速趋势系数大于0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$的地区在新疆东北部和山东境内。夏季近地面风速减小趋势最大出现在我国台湾，趋势系数介于−0.3~−0.2 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间。近地面风速趋势系数在−0.2~−0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的地区零星的分布在我国新疆、重庆、湖南、福建境内。近地面风速趋势系数在−0.1~0 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的地区主要集中在我国西北、内蒙古、东北以及华东一带。近地面风速趋势系数在0~0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$之间的地区主要集中在我国新疆、内蒙古东北部、甘肃、陕西、川渝、云贵、广东、湖南等地。近地面风速趋势系数大于0.1 $m\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$的地区较少，主要在新疆东北部和山东局部地区。秋季，在通过显著性检验的地区平均近地面风速以增加为主，近地面风速

减小趋势最大出现在我国台湾，趋势系数介于−0.4~−0.3 m·s^{-1}·a^{-1}之间。近地面风速趋势系数在−0.3~−0.2 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区出现在吉林。近地面风速趋势系数在−0.2~−0.1 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区与年平均近地面风速分布基本一致。近地面风速趋势系数在−0.1~0 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区主要集中在我国新疆西北部和东部沿海区域。近地面风速趋势系数在0~0.1 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区较多，主要集中在我国西北、西南、华中、两广以及华北部分地区。近地面风速趋势系数在0.1 m·s^{-1}·a^{-1}以上的地区仍在新疆东北部和山东境内。冬季，近地面风速减小趋势最大出现在我国台湾，趋势系数介于−0.4~−0.3 m·s^{-1}·a^{-1}之间，甚至在台湾南部出现了趋势系数小于−0.4 m·s^{-1}·a^{-1}的地方。近地面风速趋势系数在−0.3~−0.2 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区出现在吉林和山西两地。近地面风速趋势系数在−0.2~−0.1 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区与年平均近地面风速分布基本一致。近地面风速趋势系数在−0.1~0 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区主要集中在我国青海、西藏、内蒙古、东北、河南、山东、浙江、江西等地。近地面风速趋势系数在0~0.1 m·s^{-1}·a^{-1}之间的地区主要集中在我国新疆、甘肃、陕西、川渝、云贵和广东等地。只有在山东局部地区的近地面风速趋势系数达到了0.1 m·s^{-1}·a^{-1}以上。

3.5. 地表能量在不同地貌的月平均变化趋势

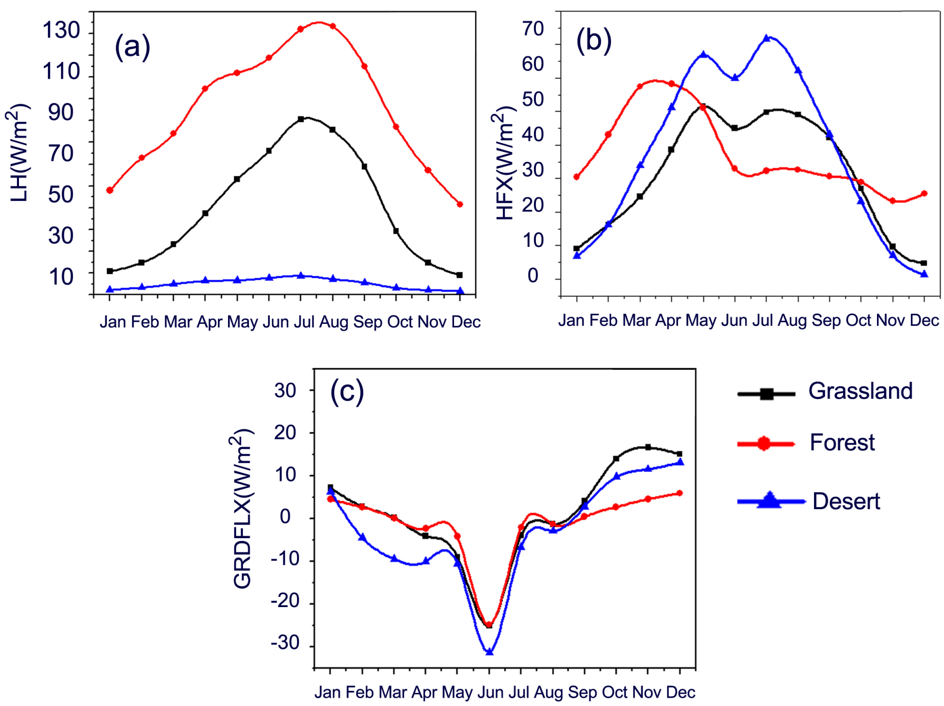

Figure 11. Three kinds of landform surface fluxes average monthly comparison. (a) LH; (b) HFX; (c) GRDFLX

图11. 三种地貌地表通量月平均比较。(a) LH；(b) HFX；(c) GRDFLX

图11为我国三种主要下垫面地貌的地表通量月变化特征。图11(a)中比较了我国三种类下垫面类型：草原，森林，沙漠的地表潜热通量的月平均变化。从图中可以看出，地表潜热通量(LH)值在森林 > 草原 > 沙漠。由于潜热通量的大小取决于地表接受辐射能和蒸发耗热的热交换量，在高纬度地区比低纬度地区接收的太阳辐射更少，由于本论文所研究的森林区域在23˚N~26˚N，草原区域在32˚N~35˚N，沙漠区域在36˚N~38˚N；森林区域相比较而言位于低纬度，沙漠位于高纬度地区。草原，森林区域的植被覆盖大于沙漠沙漠，反照率更低，接收到的辐射能也更多。而且由于植被存在，能够有效储蓄水分，减小水分蒸发，导致了森林 > 草原 > 沙漠。森林地貌和草原地貌的月变化趋势大致相同，在7~8月份达到最大

值；沙漠地貌的月变化趋势不大，但在夏季还是高于冬季。

图 11(b)中比较了草原，森林，沙漠三种不同地貌的地表感热通量(HFX)的月平均变化。从图中可以看出，草原和沙漠地貌的月变化趋势大致相同，森林地貌的变化有所不同。由于地表感热通量主要是受到风速和地气温差的影响，夏季白天太阳照射，地表升温明显，温差大，特别是沙漠地区温差很大，并且沙漠地区宽阔，风速也更大，导致夏季地表感热通量是沙漠 > 草原 > 森林。而在冬季，太阳辐射在高纬度地区明显不足，低纬度森林接受到更多的日照射，所以在所选取的森林区域感热通量更大。

图 11(c)中比较了草原，森林，沙漠三种不同地貌的地表热通量(GRDFLX)的月平均变化。从图中可以看出，GRDFLX 在森林和草原地区从 4 月到 8 月为负值，沙漠地区在 2 月到 8 月为负值，时间更久。在 6 月份各个地区的 GRDFLX 都为全年最小值。沙漠地区的最小值明显小于草原和森林地区的最小值。在 11 到 12 月份，各个地区都达到 GRDFLX 的最大值，其中草原地区的最大值最大。从值的正负也说明在夏季地表土壤得到能量，在冬季地表土壤失去能量。

4. 结论

1) 中国区域内全年与不同季节的近地面风速有着明显的空间分布差异特征，且风速等级差异很大。不同强度近地面风速的空间分布情况大致相同，以 1 级软风为主。2 级轻风和 3 级微风所控制的区域存在着较强的季节变化。全年与不同季节的近地面风速的最大值区均位于我国台湾，平均近地面风速可达到强风甚至疾风的程度。

2) 1979~2018 年中国区域内全年与四季的近地面风速年际变化明显，全年与四季近地面风速呈减小趋势，但是只有全年和春、夏季通过了显著性检验。全年与四季近地面风速与年均近地面风速的变化基本一致，都表现出先减少后增加的趋势。自 1979 年以来，中国全年和四季近地面风速有明显的减小趋势。中国全年和春、夏、秋三季平均近地面风速在 20 世纪 80 年代以来减弱是一种突变现象，具体的突变年份分别为 1980、1984、1981、1981 年。冬季平均近地面风速无突变点。近地面风速趋势系数相差很大，中国绝大部分区域近地面风速趋势系数集中在−0.1~0.1 $m \cdot s^{-1} \cdot a^{-1}$，存在很明显的区域差异。在通过显著性检验的地区，春季平均近地面风速以减小为主，秋季平均近地面风速以增加为主。

3) 森林地貌和草原地貌的月变化趋势大致相同，地表潜热通量在 7~8 月份达到最大值；沙漠地貌的月变化趋势不大，但在夏季还是高于冬季。由于沙漠地区温差很大，并且沙漠地区宽阔，风速也更大，导致夏季地表感热通量是沙漠 > 草原 > 森林。而在冬季，太阳辐射在高纬度地区明显不足，低纬度森林接受到更多的日照射，所以在所选取的森林区域感热通量更大。地表热通量则是在冬季达到最大值。森林的地表能量相较与其他两种地貌是最大的，森林和草地的地表能量变化主要是通过潜热通量，而沙漠的则是通过感热通量。近地面风速越大，地气之间的能量交换越强烈，而我国西北地区是风速大值区，能量交换强烈。

参考文献

[1] Li, S., Wang, Y. and Li, S.-C. (2009) Spatio-Temporal Patterns of Climatic Change in China in Recent 30 Years. *Geographical Research*, **28**, 1593-1605.

[2] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013(5): 10-18.

[3] Tim, R., McVicar, *et al*. (2012) Global Review and Synthesis of Trends in Observed Terrestrial Near-Surface Wind Speeds: Implications for Evaporation. *Journal of Hydrology*, **416-417**, 182-205. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.024

[4] 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): 4-12.

[5] Andreae, M.O. and Merlet, P. (2001) Emission of Trace Gases and Aerosols from Biomass Burning. *Global Biogeochemical Cycles*, **15**, 955-966. https://doi.org/10.1029/2000GB001382

[6] Burnham, A., Han, J., Clark, C.E., *et al*. (2012) Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Shale Gas, Natural Gas, Coal, and Petroleum. *Environmental Science & Technology*, **46**, 619-627. https://doi.org/10.1021/es201942m

[7] Obama, B. (2017) The Irreversible Momentum of Clean Energy. *Science*, **355**, Article No. aam6284. https://doi.org/10.1126/science.aam6284

[8] 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.

[9] 王润元，刘宏谊，张强，赵鸿，杨兴国，王鹤龄，张凯，杨启国，王胜. 夏季草原与戈壁地表能量分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 642-648.

[10] 闫人华，熊黑钢，张芳. 绿洲-荒漠过渡带陆面温度与地表能量关系分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2012, 51(5): 120-126.

[11] 龚婷婷，雷慧闽，焦阳，杨汉波，杨大文. 黄土高原农牧交错带稀疏自然植被生态系统的地表能量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1625-1633.

[12] Jian W., Zha, J. and Zhao, D. (2017) Evaluating the Effects of Land Use and Cover Change on the Decrease of Surface Wind Speed over China in Recent 30 Years Using a Statistical Downscaling Method. *Climate Dynamics*, **48**, 131-149. https://doi.org/10.1007/s00382-016-3065-z

[13] 王毅荣，张存杰. 河西走廊风速变化及风能资源研究[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1196-1202.

[14] 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.

[15] 钟海玲，高荣，李栋梁. 地面风速的气候特征及其对沙尘暴的影响研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(2): 321-326.

[16] Zha, J.L., Wu, J., Zhao, D., *et al*. (2017) Changes of the Probabilities in Different Ranges of Near-Surface Wind Speed in China during the Period for 1970-2011. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **169**, 156-167. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.07.019

[17] 邢丽珠，张方敏，黄进，等. 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.

[18] Enloe, J., O'Brien, J.J. and Smith, S.R. (2004) ENSO Impacts on Peak Wind Gusts in the United States. *Journal of Climate*, **17**, 1728-1737. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1728:EIOPWG>2.0.CO;2

[19] Suselj, K., Sood, A. and Heinemann, D. (2010) North Sea Near-Surface Wind Climate and Its Relation to the Large-Scale Circulation Patterns. *Theoretical and Applied Climatology*, **99**, 403-419. https://doi.org/10.1007/s00704-009-0149-2

[20] 张强，黄荣辉，王胜，等. 西北干旱区陆－气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(4): 427-441.

[21] 曹晓彦，张强. 西北干旱区荒漠沙漠陆面过程的数值模拟[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 219-225.

[22] 张强，曹晓彦. 敦煌地区荒漠沙漠地表热量和辐射平衡特征[J]. 大气科学, 2003, 27(2): 245-254.

[23] 周小刚，罗云峰. "九五"基金重大项目"淮河流域能量与水分循环试验和研究"介绍与回顾[J]. 中国科学基金, 2004, 18(4): 226-228.

[24] 施晓晖，徐祥德，程兴宏. 2008 年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性"强信号"特征[J]. 气象学报, 2009, 67(3): 478-487.

[25] 徐祥德，陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展[J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 756-772.

[26] 吕达仁，陈佐忠，陈家宜，等. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)综合研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 295-306.

[27] 阳坤，何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018) [Z/OL]. 时空三极环境大数据平台, 2019. https://doi.org/10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file