

中国陆域近地层风能资源的气候变异和下垫面人为改变的影响

李艳^{*}, 王元^{*}, 储惠芸, 汤剑平

南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093;

南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044;

江苏省气象局, 南京 210093

^{*} 联系人, E-mail: yuanasm@netra.nju.edu.cn

2008-01-30 收稿, 2008-06-19 接受

教育部博士点基金(批准号: 20050284035)、江苏省自然科学基金重点项目(批准号: BK2006730, BK2005081)、中国气象局气候变化专项项目(批准号: CCSF2007-41)和江苏省气象灾害重点实验室项目(批准号: KLME050205)资助

摘要 研究在全球变暖的气候背景下, 我国近地层风能蕴藏的气候变化以及下垫面人为改变对其气候变化的影响, 将有助于我国风电发展的长期规划和风能资源的合理开发. 利用代表性较好的全国 600 多个地面站的 40 a 的常规风速观测资料, 以及 NCEP/NCAR 1960~1999 年的 10 m 高程的 40 a 的再分析资料, 根据 Kalnay 和 Cai 在诊断和估算下垫面人为改变对地面气温变化贡献的研究方法, 通过分析比较由地面器测观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料风能密度十年变化趋势之差异, 提出了由于下垫面的人为改变所引起的我国陆域风能蕴藏长期变化的量级估计. 分析结果表明: 近 40 a 来, 我国年平均风速序列保持整体上减弱的气候变化趋势, 并且逐年降低的现象在中国陆域普遍存在; 由于下垫面人为改变的影响, 导致了我国近地层风能密度以减弱的十年变化趋势为主, 并且使得我国区域平均的风能密度的十年变化趋势值达 $-3.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$, 接近人为因素与自然因素共同影响引起的风能密度的十年减弱趋势值 ($-4.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$).

关键词

风能

气候变异

下垫面人为改变

风力发电是目前技术最为成熟、最具有大规模开发和商业化发展前景的利用方式, 在积极发展可再生能源的政策背景下, 我国的风电产业及风电场的评价分析研究正蓬勃开展起来. Pryor 与 Barthelmie^[1], 以及 Pryor 等人^[2]分别研究了欧洲地区近地层风能资源的气候变化趋势, 以及气候变化对风能资源的影响, 论证了风能资源随气候变化而变化的自然规律. 王遵娅等人^[3]、Zuo 等人^[4]和任国玉等人^[5]分别统计了我国区域平均风速的气候变化趋势, 一致得出我国近地层年平均风速存在显著减弱的气候变化趋势. 王艳姣等人^[6]、李振朝等人^[7]和刘晋秀等人^[8], 分别对青海、河西绿洲, 以及黄河三角洲地区进行了近地层平均风速的气候变化分析, 也发现了我国近地层平

均风速呈现逐年减弱的气候变化规律. 李艳等人^[9]在分析我国风能资源气候变化的时空分布特征时, 分析出我国大部分地区的近地层风能蕴藏也是逐年减弱的. 但是, 到目前为止, 分析我国风能蕴藏气候变化的具体原因的研究仍然较少.

IPCC 第 3 次会议指出, 近 50 a 来气候变化主要是由人类活动造成的^[10], 而温室气体排放的增多与土地使用的改变是人类活动影响气候变化的两个最主要因子. Pielke^[11], Feddema 等人^[12]以及 Zhao 和 Zeng^[13]均认为, 陆面使用情况对气候变化的影响非常显著, 大量相关研究^[14~16]也表明, 下垫面的改变对我国区域尺度气候变化的影响是不容忽视的. 事实上, 影响近地层风能蕴藏最为直接与关键的因素是

下垫面的人为改变。从全球气候变化的角度看,由于社会经济的高速发展,全球范围内的城市化进程加剧、农田开垦、植被破坏等人为因素使土地利用发生了显著变化。我国自 20 世纪 50 年代以来,随着国民经济的持续发展,土地利用/覆盖也发生了明显变化^[17]。以中国为例,定量的估计下垫面人为改变对我国近地层风能蕴藏气候变化的影响,无论是研究气候变化本身,还是规划我国的风能蕴藏都是十分必要和重要的。

下垫面的人为改变主要体现在城市化与农业活动两个方面^[18],因为下垫面的人为改变与温室效应对地球大气的作用结果均是使地表增温,所以从气候变化中分离出下垫面人为改变的作用比较困难^[19]。Oleson 等人^[20]与 Bounoua 等人^[21]利用统计分析与数值模拟,研究了地表使用变化对区域气候变化的作用,但是研究也只是从定性的角度出发,没有给出定量的作用结果。彭珍和胡非^[22]研究发现,城市化所带来的土地利用的改变使城区近地层平均风速存在逐年递减的气候变化趋势。很多科学家^[23-26]通过对比分析城市/市郊气象站与其周边农村气象站的观测资料的方法,定量分析出了城市化进程对区域气候的作用。然而,城市化的影响并没有包含下垫面人为改变的另外一个重要的影响因子,即能够大范围改变地表覆盖状态的诸如农田开垦、农田灌溉、森林砍伐等农业活动的影响。Kalnay 和 Cai^[27]通过对比分析 NCEP/NCAR^[28,29]再分析温度资料与地面气象站的观测温度资料,定量研究了城市化与其他陆面改变对地表增温的作用,为定量研究下垫面人为改变对气候变化的影响提出了有效的方法。随后, Zhou 等人^[30]、Lim 等人^[31]、Frauenfeld 等人^[32]也采用了类似的研究方法,定量分析了下垫面人为改变对气候变化的作用,得到了一系列有意义的结果。Kalnay 和 Cai^[27]认为:由于 NCEP/NCAR 再分析数据库中的地表温度、10 m 高程风场资料等要素是根据大气的垂直结构特点计算得到的,并没有包括相应的地面观测要素(如地面气压、温度、湿度、风等)的信息和资料融合,因此 NCEP/NCAR 再分析数据对局地由于地表覆盖变化引起的气候变化反映的较少;鉴于此,可以通过比较地面站观测地表温度资料(包含了气候变化的自然和人类影响因子)与 NCEP/NCAR 再分析地表温度资料(包含了气候变化的自然影响因子,以及人类活动中温室气体排放增多的影响)计算的气候变化

趋势值的差异,利用两者之差来估算城市化与其他陆面改变对区域地表增温的作用。

同样,在 NCEP/NCAR 再分析近地层风场资料中,也不包含下垫面人为改变的相关影响信息,因此, Kalnay 和 Cai^[27]的研究思路同样可以运用到定量研究城市化与其他陆面使用变化对中国大陆近地层风能蕴藏作用的研究中。刘小宁^[33]通过对我国地面气象站观测风速的均一性检验,发现我国年平均风速质量基本可靠,施晓晖等人^[34]分析了 NCEP/NCAR 再分析风速对中国区域的可信度,发现 NCEP/NCAR 再分析风速距平具有一定的可信度,为 Kalnay 和 Cai^[27]的研究方法的实施提供了资源保障。本文首先分析了我国近地层风能资源的气候变异特点,然后利用 NCEP/NCAR 再分析数据在 10 m 高程的风场资料与我国陆域气象站的地面风观测资料,采用 Kalnay 和 Cai^[27]的研究方法,试图定量估计出下垫面人为改变对于我国陆域近地层风能蕴藏的影响。

1 资料与方法

1.1 资料

我国地面气候资料的非均一性问题主要体现在观测时次的系统变化、地面自动气象站的布设、观测仪器变更、缺测、台站迁移等因素上。考虑到以下两方面原因:(1)地面自动气象站由于观测手段和现行常规地面基本站、基准站存在比较大的差异,因此没有考虑到研究序列中去;(2)在观测时次系统变化和统计方法的变化方面,在 1960 年以前,观测时制、观测时次和统计方法和 1960 年以后有很大的差异,1960 年以后地面气象要素观测序列按照气象站/气候站分类就都统一采用北京标准时制下的 4 次/3 次观测,尽管 1980 年后按照基准站(24 次观测)、基本站(4 次观测)和一般站(3 次观测)分类,但从 1960 年直至迄今却保持了相对统一的时制、统计方法和整编技术。所以,本研究采用了 1960~1999 年共 40 a 代表性较好的、缺测数据较少的中国地面基本站、基准站共 604 多个整编后的风速序列,资料来源于中国气象局国家气象信息中心资料室。观测资料的处理如下:(1)1960~1999 年时期,地面风要素观测仪器最重要的变更是在 60 年代由风压板测风仪改为 70 年代及以后的 EL 或 EN 型电接风向风速仪,因此在下文的分析中,在不破坏资料序列的完整性的前提下,对于发生在 60~70 年代时间段中可能存在突变的真实性,需要特

别的关注, 并将 60 年代前后作为相互独立的时段进行讨论; (2) 我国陆域上的城市化和土地利用等下垫面人为改变因素对于地面气象观测场站的影响十分显著和普遍, 但本文研究希望地面气象要素观测, 特别是风观测序列能够充分代表并凸显出下垫面人为改变的因素, 正是由于这种考虑, 在 604 个地面站风观测资料中, 没有进行任何基于城市化和土地利用等影响因素而剔除或分离风观测资料序列。

为了和常规地面观测资料进行平行分析, 以便诊断出下垫面人为改变对于风能资源的影响, 本文采用 1960~1999 年(由于 NCEP/NCAR 再分析资料中所采用的观测仪器系统同样在 20 世纪 60 年代之前和之后存在很大的差异, 导致 60 年代以前的资料代表性较差^[28,29], 所以我们将研究时段定为 1960~1999 年共 40 a) 的 NCEP/NCAR 再分析数据集的 10 m 高程水平东西方向风分量(u_{10})和南北方向风分量(v_{10})的逐日(00, 06, 12, 18 UTC 的 4 时次的平均)资料, 其水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 经纬网格。另外, 考虑到 NCEP/NCAR 同化系统在 1979 年以后, 资料的观测手段发生了重大改变(尤其是融合了卫星观测资料^[28,29]), 所以我们将 1960~1979 年(在此 20 a 中, 没有考虑卫星观测资料的同化)与 1980~1999 年(20 a 有卫星观测资料的同化)作为相互独立的两个时段分别讨论。另外在 NCEP/NCAR 分析系统中, 由于空间分辨率的离散化影响, 对于真实地形的表达存在较大的误差^[29], 尤其是在地形陡峭的区域误差就更大。因此在研究下垫面人为改变的作用时, 进行平行分析的常规地面观测序列仅采用 604 个地面站中海拔高度低于 500 m 的共 315 个地面站进行对比分析。

1.2 计算方法

在对全国平均风速时间序列分析时, 采用了一元线性回归、分段线性拟合、5 点平滑、以及趋势系数的分析方法。在分段线性拟合时, 根据复相关系数最小原理和虚拟变量的分段回归模型^[9], 对研究时段内要素的时间序列进行自动分割并逐段计算线性变化速率(即每 10 a 要素的线性变化趋势), 由此客观反映出要素的时间变化特点和时段内的气候变化趋势。平均风速的时间序列的平滑处理采用了 Salstein 等人^[35]建议的 5 点平滑器的方法:

$$\hat{x}(t) = 1/2[x(t-2) + 3x(t-1) + 4x(t) + 3x(t+1) + x(t+2)],$$

式中 $t, x, \hat{x}$ 分别为时间, 平滑前、后的要素值, 和常规

的 5 点滑动平均方法相比较, Salstein 的五点平滑器能够较好地保持原有序列的位相(图略)。气候要素趋势系数实际上为逐年的气候要素值(如风速)与年份序列数的相关系数, 趋势系数为正(负)时, 表示气候要素在所统计的时间内有线性增加(减少)的趋势。

在研究下垫面的人为改变对近地层风能蕴藏的影响时, 选用十年变化趋势来表征变量的气候变化趋势, 以此对比分析地面气象站器测风场计算的风能密度与 NCEP/NCAR 再分析资料中 10 m 高风速计算的风能密度的气候变化趋势之差异。计算十年变化趋势具体的计算步骤如下: 首先, 利用地面站风速观测资料、NCEP/NCAR 再分析风速资料, 分别计算中国区域内海拔高度低于 500 m 的(共 315 个)地面站的逐个地面站、NCEP/NCAR 再分析资料的逐个经纬格点上的 1960~1999 年的逐月(共 480 个月)的平均风能密度。进一步地, 为了消除 NCEP/NCAR 再分析资料与地面气象站的器测风场资料的年循环和地理位置等的影响, 我们在原时间序列上去除了逐月的年平均循环周期, 从而得到了 40 a 逐月(共 480 个月)的地面气象站器测与 NCEP/NCAR 再分析的 10 m 高平均风能密度距平的时间序列。再者, 将中国陆域划分为水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 的经纬网格, 计算每个经纬网格内包含的海拔高度低于 500 m 的地面气象站的个数(共 315 个), 在包含地面气象站的个数大于零的经纬网格内, 分别计算各经纬网格的地面气象站器测风能密度距平的逐月时间序列。最后, 按照上文中十年变化趋势的计算方法, 分别计算了各经纬网格的器测风能密度、NCEP/NCAR 再分析资料的风能密度的十年变化趋势值, 以及每个网格上由于下垫面人为改变引起的风能密度的十年变化趋势值(器测风能密度的十年变化趋势值与 NCEP/NCAR 再分析资料的十年变化趋势值之差)。

2 近地层地面观测风速的变异

2.1 全国平均风速的年际、年代际变异特点

由于不同网格内观测站的个数与空间分布相对不均匀, 不同纬度的网格面积大小亦不相同等原因的出现, 在重建全国平均风速时间序列时, 采用了 Jones 等人^[36]提出的计算区域平均气候时间序列的方法。先将中国整个区域按经纬度划分为若干个网格, 为了方便与 NCEP/NCAR 再分析资料的空间分辨率相一致, 这里的网格分辨率定义为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ (图 1)。

然后把每个网格里的所有地面站在 1960~1999 年共 40 a 内逐日的风速观测数据作算术平均, 得到各网格在 1960~1999 年的逐年平均值. 最后应用面积加权法计算所有网格的平均值, 获得全国平均的 1960~1999 年共 40 a 的逐年平均风速时间序列.

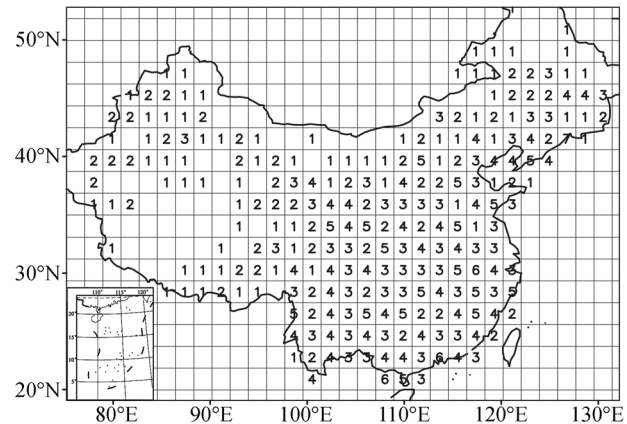


图 1 每个经纬网格内的地面气象观测站个数
网格分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$, 地面测站总数达 604 个

图 2 给出了 604 个地面测站平均逐年风速的年份、年代际变化趋势图, 由图 2 发现, 年平均风速的最大值出现在 1969 年, 为 $2.74 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值出现在 1999 年, 为 $2.18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 40 a 来我国平均风速为 $2.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 1982 年之前逐年风速均在均值之上, 1982 年之后, 年平均风速均在均值之下. 从一元线性回归趋势线(灰色直线)看出, 我国陆域 40 a 年平均风速是呈明显减低趋势, 1960~1999 年间线性变化速率为 $-0.12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$. 进一步分析 5 点平滑曲线(红色点虚线), 发现我国陆域逐年平均风速出现了 2 个峰值以及 2 个低谷, 峰值分别出现在 1970 年前后和 1995 年前后, 低谷分别出现在 1966 和 1991 年前后. 由于 20 世纪 60 年代所使用测风仪器在 70 年代及以后发生了重要的变更, 因此, 出现在 1970 年前后的风速增大的突变, 不能排除观测仪器变更的影响. 在忽略 1970 年前后的风速突变点后, 在整个 60 年代年平均风速是逐年减弱的; 同样, 在 70 年代以后的年平均风速

序列上仍然保持整体上减弱的趋势.

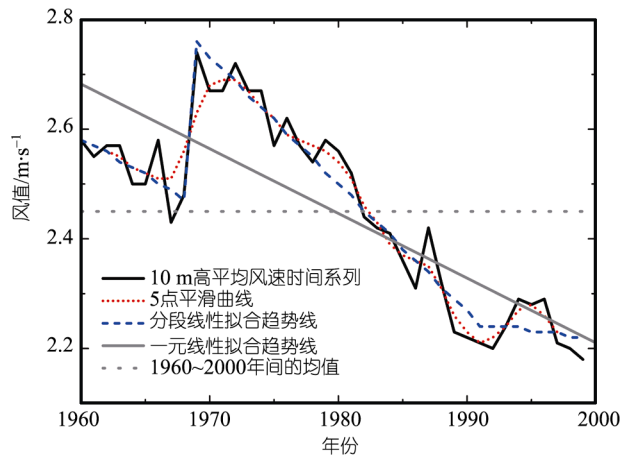


图 2 根据器测观测统计的中国陆域年平均风速时间演变
604 个测站, 均通过 0.01 显著性检验

进一步根据复相关系数最小原理和虚拟变量的分段回归模型对风速时间序列进行断点客观分析和分段线性拟合(图 2 中蓝色线虚线), 结果表明平均风速在 40 a 来的变化可分成 4 个时间段, 断点分别在 1968, 1969, 1991 年; 4 个时间段的线性趋势变化速率分列于表 1. 由表 1, 除了在 1968~1969 年平均风速出现明显的增长外, 其他时段均为减弱趋势: 1960~1968 年减弱速率为 $-0.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$; 1969~1991 年呈现显著的持续下降趋势, 为 $-0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$; 而 90 年代平均风速主要在较小的范围内上下波动, 减弱速率仅为 $-0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$. 由此, 断点客观分析和分段线性拟合的结果同样表明, 在忽略 1968~1969 年的风速增强突变点后, 年平均风速序列上仍然保持整体上减弱的趋势, 并在 1969~1991 年间下降趋势最强.

2.2 全国平均风速的空间变异特征

为研究我国大陆各地面观测站年平均风速的气候变化趋势的空间变异特征, 本文根据各站、逐年的平均风速序列 U_{ij} , ($i = 1, 2, \dots, 40$; $j = 1, 2, \dots, 186$; i 代表年代, j 代表站点数, 分别计算了各站 1960~1999 年共

表 1 全国陆域器测地面 10 m 高平均风速的年代际变化趋势

断点客观确定	1968 年	1969 年	1991 年	
年代划分	1960~1968 年	1968~1969 年 ^{a)}	1969~1991 年	1991~1999 年
线性趋势($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$)	-0.13	2.80	-0.23	-0.03

a) 有别于其他 3 个时间段, 在 1968~1969 年间, 表现为风速增强的趋势, 但在此时间段, 风观测仪器发生重要变更

40 a 的年变化趋势系数. 分析中国大陆 604 个观测站在 1960~1999 年共 40 a 年平均风速的变化趋势的空间特征, 可以发现, 即使包含平均风速在 1968~1969 年的突变, 我国年平均风速逐年降低的现象在中国陆域也是普遍存在的. 年平均风速变化趋势表现出显著增强的地面站个数为 122 个, 占总数的 20%, 剩下 80% 的地面站的年平均风速是显著减弱的. 从年平均风速变化趋势系数的空间分布(图 3)来看, 全区主要以减弱趋势为主, 尤其在新疆、内蒙北部和我国沿海地区等重要的风能储量丰富地区表现出了比较一致的减弱趋势, 其他地区虽存在少数呈现增强趋势的地面站, 但主导趋势仍然是减弱的.

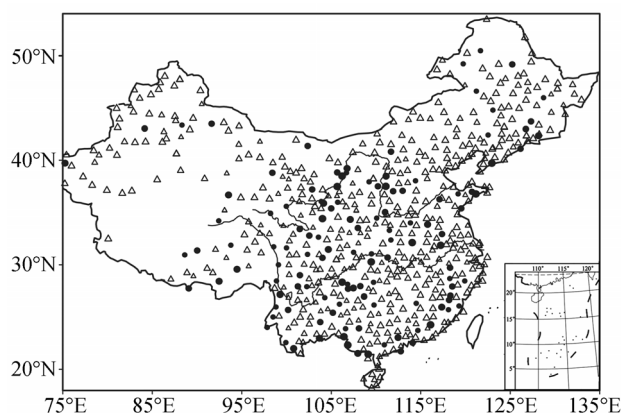


图 3 根据器测观测统计的 1960~1999 年年平均风速变化趋势系数空间分布

604 个测站; Δ 表示下降趋势, $\bullet$ 表示上升趋势, 用三角和圆符号的大小表示变化幅度的强弱

2.3 代表站近地层平均风速的气候变化

分别选取庐山站与沱沱河站、成山头站、怀来站作为偏远高山地区、乡村地区的代表站, 分析受人类活动影响较少的地区的近地层风速的变化特征. 庐山站地面气象站是江西省内最高的气象观测站, 海拔为 1165 m, 到目前为止, 庐山的常住人口只有 5000 人左右. 沱沱河气象站海拔 4534 m, 是世界上海拔最高的气象观测基本站, 周围居住人口较少. 成山头气象站位于胶东半岛最东端的渤海之滨, 受人类活动影响较小. 怀来气象站位于河北省张家口市, 根据台站所在居民点内固定人口在 1×10^5 以下为乡村站的依据^[37], 将其定义为乡村代表站.

图 4 给出了庐山站与沱沱河站、成山头站, 以及怀来站的观测年平均风速时间序列. 从图上我们可以清楚的分析出, 自 1970~2000 年来, 庐山站与沱沱

河站近地层年平均风速呈现出显著的线性减少趋势, 70 年代初平均风速最强, 而后逐渐减弱, 在 80 年代末与 90 年代初, 平均风速出现突变增强的阶段, 而后又持续以减弱为主. 由于高山站、乡村站的近地层风速序列受城市化的影响较小, 所以以上各气象站的近地层平均风速的气候减弱趋势受局地城市化的影响较小. 因此认为, 近地层平均风速逐年减弱的气候变化特点并非城市化的唯一作用结果, 气候自然变化与人类活动引起的温室气体排放的增多与农业活动的影响均是不可忽视的. 换句话说, 在自然气候变化与人类活动(包括温室气体排放的增多与下垫面的人为改变两个方面)的共同作用下, 我国近地层平均风能蕴藏出现了逐年减弱的气候变化特点. 那么, 在众多的影响因子中, 定量估计下垫面人为改变对近地层风能蕴藏气候变化的作用就显得十分必要.

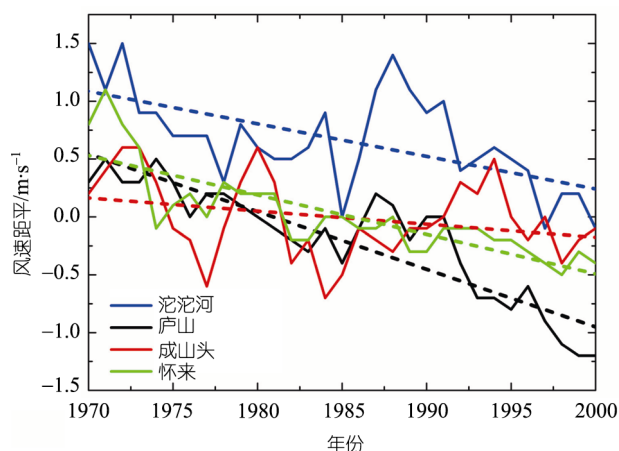


图 4 不同气象站逐年平均风速演变

实线为 1960~2000 年间的器测观测 10 m 高平均风速时间系列, 虚线表示一元线性拟合趋势线

3 下垫面人为改变对风能长期变化的影响

风能是气流具有的动能, 而风能密度就是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能, 是评价一个地区风能潜力的最方便和最有价值的量. 由逐日风速计算风能密度的公式是: $E = 1/2 \rho U^3$, U 是水平风速, ρ 是空气密度, 由于本文的研究重点是刻画风能密度随时间的演变趋势, 而空气密度随时间的变化相对较小, 所以本文假设空气密度为常数, 取 $\rho = 1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 那么, 相应的风能密度的计算公式成为: $E = 1/2 U^3$.

3.1 下垫面人为改变作用的定量统计分析

在参加讨论的共 315 个地面气象站中, 地面气象

站的平均风能密度的十年变化趋势值存在 253 个负值, 62 个正值, 十年变化趋势为减弱的地面气象站个数占总数 80.3%。把 315 个地面气象站分配到水平分辨率为 $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$ 的经纬网格上, 在包含地面气象站的个数大于零的共 113 个经纬网格内, 有 98 个网格的平均风能密度的十年变化趋势为负值, 占总数的 86.7%。这意味着地面气象站的平均风能密度的十年变化趋势以减弱为主。NCEP/NCAR 再分析资料在对应的经纬网格内, 63 个网格的十年变化趋势为负值, 占总数的 55.8%, 即 NCEP/NCAR 再分析资料也是以减弱的十年变化趋势为主导变化趋势。

分析全国陆域平均的风能密度的十年变化趋势, 地面气象站的全国陆域平均十年变化趋势为 $-4.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$, NCEP/NCAR 再分析资料的十年变化趋势为 $-0.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$, 可见, 虽然气象站的器测风场与 NCEP/NCAR 再分析风场计算出的平均风能密度都是以减弱为主要的十年变化趋势, 但气象站的风能密度的十年减弱趋势比 NCEP/NCAR 再分析资料的减弱趋势要明显得多。这说明无论是自然因素与人为因素的共同影响, 还是自然气候变化与温室效应的共同作用, 均会使我国区域的风能密度减弱, 但量级上相差较大。

3.2 下垫面人为改变作用的空间分布特征

在地面气象站的平均风能密度的十年变化趋势的分布图(图 5(a))上, 不难看出: 我国大部分地区的近地层风能蕴藏都是逐年减弱的, 并且在风能资源比较丰富的地区, 如新疆、东部沿海等地区的减弱趋势非常明显, 胶东半岛东部地区的减弱幅度甚至达到了 $-30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$ 以下; 风能密度的十年变化趋势表现出增强趋势的区域主要分布在东北、内陆、及南部沿海个别地区。在 NCEP/NCAR 再分析的风能密度的十年变化趋势的分布图上(图 5(b)), 风能密度的十年变化趋势也是以减弱为主, 主要表现在山东及其以北的地区, 山东以南部分地区有弱的增强趋势。以上分析表明, 无论是自然因素与人为因素的共同作用, 还是自然因素与温室效应的共同影响, 在山东及其以北的地区, 平均风能密度呈现出显著减弱的十年变化趋势, 但在山东以南的地区, 自然因素与人为因素的共同作用使风能的十年变化趋势以减弱为主, 自然因素与温室效应的共同影响结果却表现为以增强为主。

图 5(c)是地面气象站的器测风场计算的风能密

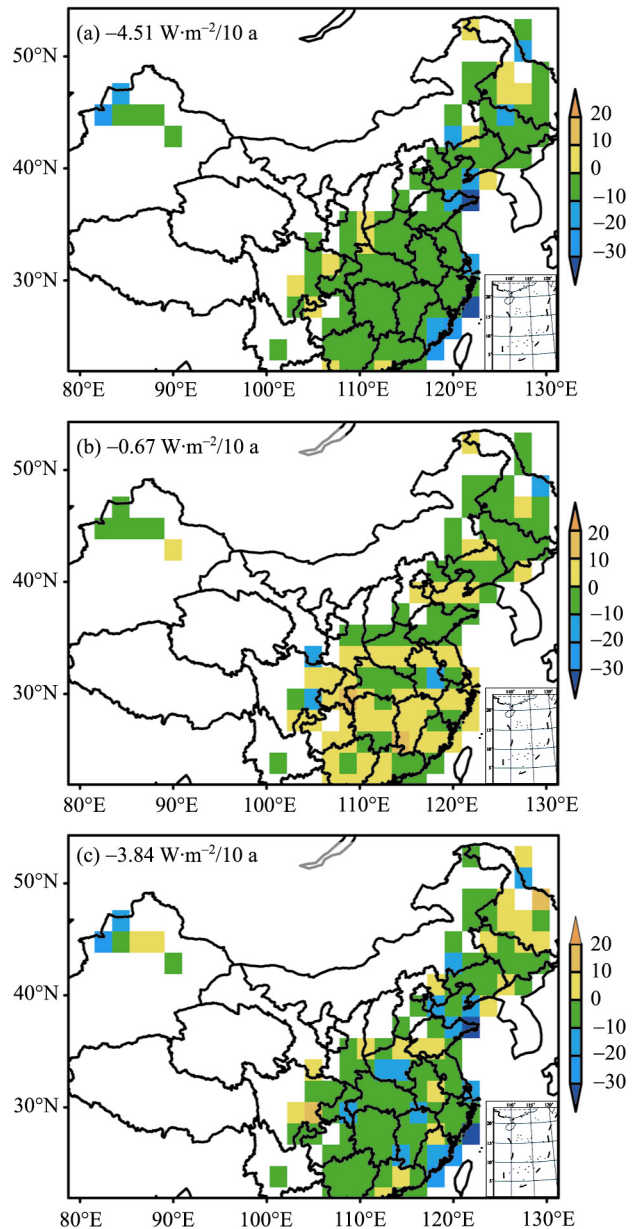


图 5 平均风能密度的十年变化趋势

(a) 器测观测; (b) NCEP/NCAR; (c) 器测观测减 NCEP/NCAR; 阴影为十年变化趋势, 单位为 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$

度的十年变化趋势与 NCEP/NCAR 再分析风场计算的风能密度的十年变化趋势之差, 即人为下垫面改变作用引起的风能密度的十年变化趋势分布。进一步分析图 5(c), 发现风能密度的十年变化趋势也是以减弱趋势为主, 减弱趋势比较明显的地区是东部沿海、渤海湾、以及 $25^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$, $106^{\circ} \sim 118^{\circ} \text{E}$ 的内陆地区, 胶东半岛东部地区的减弱幅度甚至达到了 $-30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$ 以下。人为下垫面改变引起的区域平均

的风能密度的十年变化趋势值相对较大, 为 $-3.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$, 占人为因素与自然因素共同影响引起的风能密度的十年减弱趋势 ($-4.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$) 的 85%, 所以, 由于下垫面人为改变的作用, 如城市化、森林砍伐、农田灌溉等对我国区域风能密度的影响至关重要。

4 结论和讨论

中国近地层平均风能储量的气候变化关系到中国风能产业的长期规划和风能资源的合理开发, 而关于陆面使用变化对近地层风能资源气候变化的影响这一问题的研究, 可以加深对近地层风能储量之气候变化的了解, 分辨不同选择的潜在影响, 为有关政策和战略的制定提供科学基础。本文通过对比分析中国地面气象站的器测风场计算的平均风能密度的十年变化趋势与 NCEP/NCAR 再分析资料 10 m 高程风场计算的平均风能密度的十年变化趋势的差异, 定量估计了人为下垫面的改变对我国风能密度的气候变化的作用, 相关结论如下:

() 根据地面器测记录, 近 40 a 来年平均风速序列整体上保持减弱的变化趋势, 并在 1969~1991 年间下降趋势最强; 年平均风速逐年降低的现象在中国陆域也是普遍存在的, 尤其在新疆、内蒙北部和我国沿海地区等重要风能储量丰富地区表现出了一致的减弱趋势。

() 无论是自然因素与人为因素的共同作用, 还是自然因素与温室效应的共同影响, 我国近地层风能密度均是以减弱的十年变化趋势为主, 在山东及其以北地区的作用结果相似, 而在山东以南地区的作用结果相反。

() 由于陆面使用的改变, 如城市化、森林砍伐、农田灌溉等引起的下垫面的人为改变, 导致了我国近地层风能密度以减弱的十年变化趋势为主, 使得我国区域平均的风能密度的十年变化趋势值达 $-3.84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$, 接近人为因素与自然因素共同影响引起的风能密度的十年减弱趋势值 ($-4.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}/10 \text{ a}$), 因此, 下垫面的人为改变对我国近地层风能密度的影响十分显著。

尽管本文所提出的基于 Kalnay 和 Cai^[27] 的定量估算方法本身也许还存在着一些争议^[38,39], 但本文的研究结果表明, 在我国陆域地区, 利用 NCEP/NCAR 再分析产品与地面器测风速的对比分析至少可以给出下垫面人为改变对区域风能蕴藏气候变化的一个合乎逻辑的定量估计。当然, 研究结果在很大程度上仍取决于 NCEP/NCAR 再分析资料与地面气象站器测资料自身的准确率, 因此本文的研究结果仍存在某些不确定因素, 而这些不确定因素仍有待于今后更为强大的观测手段和更精细的资料积累, 以及更深入的研究。

参考文献

- 1 Pryor S C, Barthelmie R J. Long term trends in near surface flow over the Baltic. *Int J Climatol*, 2003, 23: 271—289^[DOI]
- 2 Pryor S C, Barthelmie R J, Kjellström E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: Analyses using a regional climate model. *Clim Dyn*, 2005, 25: 815—835^[DOI]
- 3 王遵亲, 丁一江, 何金海. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2): 228—236
- 4 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 近 40 a 中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系. *科学通报*, 2005, 50(11): 1125—1130
- 5 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63(6): 942—956
- 6 王艳姣, 周晓兰, 倪绍祥, 等. 近 40 a 来青海湖地区的气候变化分析. *南京气象学院学报*, 2003, 26(2): 228—235
- 7 李振朝, 韦志刚, 高荣. 近 50 年河西绿洲地面风的时空变化特征. *高原气象*, 2004, 23(2): 259—263
- 8 刘晋秀, 江崇波, 范学炜. 黄河三角洲近 40 年来气候变化趋势及异常特征. *海洋预报*, 2002, 19(2): 31—35
- 9 李艳, 王元, 汤剑平. 中国近地层风能资源的时空变化特征. *南京大学学报(自然科学)*, 2007, 43(3): 61—72
- 10 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002
- 11 Pielke R A. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310: 1625—1626^[DOI]
- 12 Feddesma J J, Oleson K W, Bonan G B, et al. The importance of land-cover change in simulating future climates. *Science*, 2005, 310: 1674—1678^[DOI]
- 13 Zhao M, Zeng X M. A theoretical analysis on the local climate change induced by the change of landuse. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19(1):

46—63

- 14 Gao X J, Luo Y, Lin W T, et al. Simulation of effects of landuse change on climate in China by a regional climate model. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20(4): 583—592[DOI]
- 15 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟. *气象学报*, 2006, 64(3): 254—270
- 16 张井勇, 董文杰, 符淙斌. 中国北方和蒙古南部植被退化对区域气候的影响. *科学通报*, 2005, 50(1): 53—58
- 17 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(12): 1031—1040
- 18 Pielke R A, Marland G B, Betts R A, et al. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system-relevance to climate change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2002, 360: 1705—1719
- 19 Gallo K P, Owen T W. Satellite-based adjustments for urban heat island temperature bias. *J Appl Meteorol*, 1999, 38: 806—813[DOI]
- 20 Oleson K W, Bonan G B, Levis S, et al. Effects of land use change on North American climate: Impact of surface datasets and model biogeophysics. *Clim Dyn*, 2004, 23: 117—132[DOI]
- 21 Bounoua L, DeFries R, Collatz G J, et al. Effects of land cover conversion on surface climate. *Clim Change*, 2002, 52: 29—64[DOI]
- 22 彭珍, 胡非. 北京城市化进程对边界层风场结构影响的研究. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1608—1615
- 23 初子莹, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响. *气象学报*, 2005, 63(4): 534—540
- 24 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 39—45
- 25 于淑秋, 卞林根, 林学椿. 北京城市热岛“尺度”变化与城市发展. *中国科学D辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊): 97—106
- 26 季崇萍, 刘伟东, 轩春怡. 北京城市化进程对城市热岛的影响研究. *地球物理学报*, 2006, 49(1): 69—77
- 27 Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423: 528—531[DOI]
- 28 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1996, 77(3): 437—471[DOI]
- 29 Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50 year reanalysis: Monthly mean CD-ROM and documentation. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2001, 82: 247—267[DOI]
- 30 Zhou L, Dickinson R E, Tian Y, et al. Evidence for a significant urbanization effect on climate in China. *Proc Nat Acad Sci*, 2004, 101: 9540—9544[DOI]
- 31 Lim Y K, Cai M, Kalnay E, et al. Observational evidence of sensitivity of surface climate changes to land types and urbanization. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(22), L22712[doi]
- 32 Frauenfeld O W, Zhang T, Serreze M C. Climate change and variability using European Center for Medium-Range Weather Forecast analysis (ERA-40) temperatures on the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 2005, 110, D02101[doi]
- 33 刘小宁. 我国 40 年年平均风速的均一性检验. *应用气象学报*, 2000, 11(1): 27—34
- 34 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. NCEP/NCAR 再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析. *气象学报*, 2006, 64(6): 709—722
- 35 Salstein D A, Rosen R D. Earth rotation as a proxy for interannual variability in atmospheric circulation. *J Clim Appl Meteorol*, 1988, 25: 1870—1877[DOI]
- 36 Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations. *Int J Climatol*, 1996, 16(4): 361—377[DOI]
- 37 刘学锋, 于长文, 任国玉. 河北省城市热岛强度变化对区域地表平均气温序列的影响. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 763—770
- 38 Trenberth K E. Rural land-use change and climate. *Nature*, 2004, 427: 213[DOI]
- 39 Vose R S, Karl T R, Easterling D R, et al. Impact of land-use change on climate. *Nature*, 2004, 427: 213—214[DOI]