

全国低风速气象特征分析

郭梦婷 蔡旭晖[†] 宋宇

北京大学环境科学与工程学院环境科学系, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871;

[†] 通信作者, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

摘要 利用 1985—2014 年 NCDC 数据库 345 个地面站的气象资料, 统计全国低风速条件的日变化、月际变化、年际变化和持续性等基本特征, 分析低风速频率空间分布的规律和季节变化。选取哈尔滨、乌鲁木齐、北京和成都 4 个代表城市, 分析不同地区低风速条件的特征和年际变化情况。结果表明: 1) 30 年间, 全国低风速频率约为 40%, 其中哈尔滨低至 25%, 成都高达 60%; 2) 低风速出现频率表现为夜间高、白天低的特征; 3) 全国从 9 月至次年 1 月, 低风速状况出现频繁, 之后不断减少, 春季 4 月达到最低, 哈尔滨秋季的低风速频率最高, 其他 3 个代表城市皆是秋冬季的低风速频率最高; 4) 全国持续 3 个小时(及以上)的低风速状况出现概率为 36%, 其中成都地区的低风速持续性高, 持续 12 小时(及以上)的概率达到 20%; 5) 全国低风速频率的总体空间分布是南方高北方低, 内陆高沿海低, 分布的范围和频率随季节变化; 6) 哈尔滨的低风速频率有明显增加趋势, 其他 3 个代表城市的长期变化趋势不明显。

关键词 中国; 低风速; 气候平均特征

中图分类号 X16

Characteristics of Low Wind-Speed Meteorology in China

GUO Mengting, CAI Xuhui[†], SONG Yu

Department of Environmental Sciences, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, State Joint Key Lab of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100871; [†] Corresponding author, E-mail: xhcai@pku.edu.cn

Abstract Based on the surface data of NCDC (National Climatic Data Center), the wind data of 345 stations during 1985 to 2014 are chosen, the characteristics of low wind-speed meteorology and the distribution of low wind-speed's mean percentage in China are analyzed. Harbin, Urumqi, Beijing and Chengdu are chosen from 345 stations as representative cities, and the characteristics and annual variabilities of low wind-speed's percentage are studied. The results show that: 1) The probability of occurrence of low wind-speed is about 40% in China during recent 30 years, as for the four representative cities, Harbin is the lowest (25%), Chengdu is the highest (60%); 2) Time-of-day occurrence: during the period of midnight and early morning, the probability of occurrence of low wind-speed is high; 3) Monthly occurrence: from September or October to next year January, the probability of low wind-speed maintains at a high level, the lowest probability happens in April; 4) Persistence, 36% low wind-speed condition can last at least 3 hours in China, in the four cities, 20% low wind-speed condition can lasts at least 12 hours in Chengdu; 5) Distribution, the probability of low wind-speed is high in the South and the inland, while it is low in the North and the coastal; 6) Annual variabilities, Harbin has increasing trend, while other three stations's long-term trend is not obvious.

Key words China; low wind speed(LWS); climatological characteristics

风速是气象学的基本参量之一,对大气环境过程有重要意义^[1]。风速直接影响大气污染物的扩散稀释能力^[2-3]。低风速气象条件下,大气扩散能力弱,往往导致污染物的高浓度累积,形成重污染^[4]。因此,加强对低风速气象条件的研究十分必要。

我国对作为基本气象参量的地面风的气候特性已有丰富的研究成果^[5]。近年来,研究者从气候与环境变化等角度对风速特性开展了新的探讨。王遵娅等^[6]研究全国范围 1951—2000 年平均风速的变化趋势,发现几乎全部地区的风速都有减小趋势,冬、春季和西北地区西部最明显。江滢等^[7]分区研究我国 1956—2004 年平均风速变化趋势,并讨论其变化原因,认为平均风速的减小主要是由日平均风速 ≥ 3 m/s 的日数减少造成的。张爱英等^[1]研究我国 1980—2006 年高空平均风速的年变化和季节变化趋势,认为大尺度大气环流变化、观测环境变化和城市化是平均风速减弱的影响因素。同时,研究的目标也开始由全国转向区域范围,针对我国东北^[8]、西北^[9]、广东^[10]等区域深入探讨风速的长期变化情况。

值得注意的是,当前多数研究仅把地面风作为一个整体进行讨论。一些研究更关心平均风速情况,另一些研究则更关心高风速的情况,如风能研究。国内外针对低风速条件的研究主要集中在基本气象特征^[4,11-15]、模型模拟^[16-18]和风险评估^[19]等方面。Deaves 等^[13]对英国部分地区的低风速气象的出现频率、日变化和持续性等特征进行了分析。Gadian 等^[12]对低风速风向的持续性进行了深入的探讨。Oettl 等^[17]探讨了使用拉格朗日模型模拟低风速的大气扩散时新的模拟参数方法。朱好等^[16]使用 CALPUFF 模式模拟了湖南中部丘陵河谷地区的低风速气象条件下的大气扩散,并发现需要对模式的土地利用类型和对应的地表参数、近地层湍流速度参数化方案进行修正,才能得到较好的模拟结果。Lines 等^[19]对在量化风险分析中考虑低风速情况提出六点建议。总体而言,对低风速条件的研究相对薄弱,对我国低风速气象条件的气候学统计特征缺乏系统的分析,这在一定程度上也影响我们对大气环境过程的认识。

本文根据长期气象数据,系统分析最近 30 年(1985—2014 年)全国低风速条件的基本特征,并讨论不同代表性地区的差异。所获得的具有气候学统计意义的结果,可为我国大气污染问题的研究提供参考。

1 资料和方法

1.1 气象资料

本文利用 NCDC 数据库的气象资料,对全国低风速气象特征进行统计分析。NCDC 气象资料是美国国家气候数据中心(National Climatic Data Center, NCDC)和美国联邦气候综合系统(Federal Climate Complex, FCC)共同开发的全球地面气象数据库,最早的数据可追溯到 1900 年。

选取我国范围内的测站,对测站的数据质量进行抽查检验^[20-22],并剔除资料长度不够的站点,最终获得 345 个 NCDC 地面站。资料覆盖的时间范围是 1985—2014 年,共 30 年。数据为每 3 小时一次,一天 8 个时次(对应北京时间 02:00, 05:00, 08:00, 11:00, 14:00, 17:00, 20:00 和 23:00)。每个地面站的 30 年有效观测数据时次都大于 90%。本文统计分析选取的测站分布情况见图 1。

通过 NCDC 资料与常规地面气象站资料的对比分析,进行数据的质量控制。首先,综合考虑地形和距离,将 NCDC 地面站与常规地面观测站进行匹配;然后,使用皮尔森相关系数(COR)、偏差因子(FB)和标准化方差(NMSE),对筛选出的自动气象站和对应的常规气象站相同时刻的数据进行对比分析。结果显示,NCDC 的气象数据

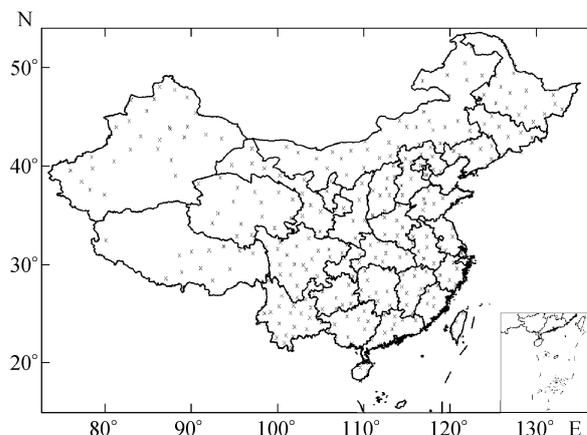


图 1 345 个 NCDC 资料的观测站分布情况
Fig.1 Distribution of 345 NCDC's land-based stations

与常规地面气象站资料之间具有良好的相关度和互洽性。

1.2 低风速标准

目前,国内外研究者对于低风速气象条件还没有统一的定义。Smith^[4]使用3个标准对低风速气象进行定义:1)水平风速接近或小于水平湍流速度的均方根;2)风速仪不能准确测量风速;3)相对于地形的影响,地转风的影响很小。然而,这3种定义在实际应用中都有一定困难。因此,研究者们往往根据实际情况选定一个固定的风速值作为判定低风速气象状况的标准。例如:Lines等^[23]借鉴大多数定量风险评价时使用的最低值,选取小于2 m/s作为低风速状态的标准;Gadian等^[12]认为2 m/s的风速在空气污染扩散和建筑物的自然通风研究中是重要数值;朱好等^[16]综合考虑地转风和近地层10 m高度的风速,定义低风速条件为10 m高度的风速小于2 m/s;唐敬等^[11]以风速小于1.5 m/s来定义低风速条件,大致对应风力分级中的1级风。

本文选取小于2 m/s作为低风速状态的标准,出于以下考虑:1)风速小于2 m/s时,烟羽的运行轨迹变得不确定^[24];2)2 m/s可以视为进行低风速条件下示踪物实验的风速下限值^[25];3)大多数研究人员选取该标准^[12,16,19,25]。由于NCDC资料中风速的分辨率为1 m/s,因此,本文统计的低风速状态仅为资料中0和1 m/s的风速。

1.3 统计分析方法

本研究统计的低风速特征包括低风速累积频率,低风速频率日变化、月际变化,以及低风速的持续性。风速累积频率,即地面站30年小于任一风速的累积频率;低风速频率日变化,即30年中每天同一时段(02:00, 05:00, 08:00, 11:00, 14:00, 17:00, 20:00和23:00)低风速总时次占该时段总有效记录数的比例;低风速频率月际变化,即30年中每个月的低风速时次占该月份总有效记录时次的比例;低风速的持续性,用低风速持续时间的累积频率加以考察。

对所有345个站点的统计结果,用空间插值方法获得30年平均的全国低风速频率空间分布,并讨论其季节变化。另外,为了进行低风速特征的区域性讨论,进一步选取哈尔滨、乌鲁木齐、北京和

成都(对应站号为50953, 51463, 54511和56294)4个具有地理和区域代表性的重点城市作为代表性站点,讨论低风速条件的地区差异,并进行年际变化特征统计,分析各代表性站点30年低风速频率的变化趋势。

2 统计结果

2.1 风速累积频率

1985—2014年全国风速累积频率曲线见图2。由于本文定义小于2 m/s为低风速(即0和1 m/s的风速),因此,图2中1 m/s对应的风速累积频率即为低风速频率,可见最近30年全国平均低风速频率约为40%。4个代表城市的低风速频率有一定的差异:哈尔滨最低,约为25%;成都最高,接近60%;乌鲁木齐和北京的低风速频率都略低于全国平均水平,约为30%。

从图2还可看出,全国的风速大部分情况下(约95%概率)小于6 m/s。哈尔滨、乌鲁木齐和北京与全国情况十分相似,而成都位于成都平原北部,四周山地围绕,地形环境较为封闭^[26],大部分情况下(约95%概率)的风速小于3 m/s。

2.2 日变化特征

图3反映1985—2014年低风速频率的日变化情况。从全国范围来看,日变化规律如下:凌晨至清晨时段,低风速频率维持在较高水平;白天时段(从08:00开始),低风速频率随着时间不断减小,在14:00左右达到最小值;傍晚和入夜后,低风速频率持续增加。

4个代表城市的日变化情况与全国的情况相似。其中,成都地区的日变化最为显著,其低风速

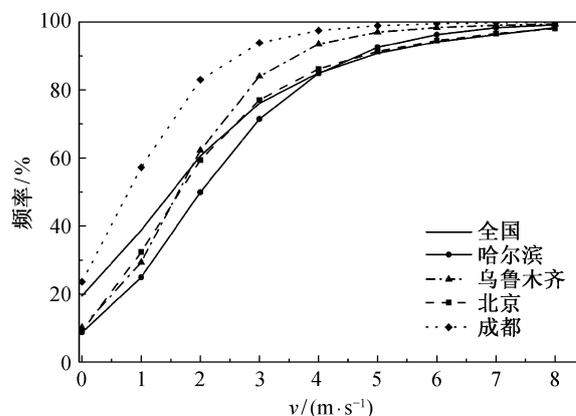


图2 风速累积频率分布

Fig. 2 Cumulative percentage of wind speed

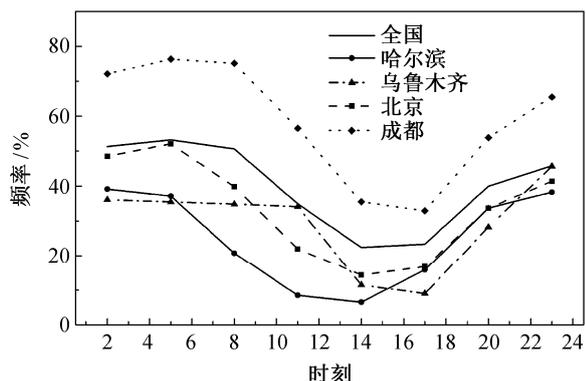


图 3 低风速出现频率的日变化
Fig. 3 Time-of-day frequency of low wind-speed

频率的最大值出现在 05:00, 可达 76%; 最小值出现在 17:00 时, 仅为 32% 左右。哈尔滨和北京地区, 由于所处位置偏东, 低风速频率开始下降的时间点相较于全国略有提前(从 05:00 开始)。乌鲁木齐由于所处地理位置偏西, 日出时间较晚, 低风速频率开始下降的时间点则有所滞后(从 11:00 开始)。

2.3 月际变化特征

1985—2014 年, 低风速频率存在一定的月际变化趋势, 如图 4 所示。从全国范围来看, 从 9 月至次年 1 月, 低风速状态出现频繁, 之后频率不断降低, 春季 4 月出现最少。可见, 我国在秋冬季节, 低风速频率偏高, 大气输送扩散能力偏弱。

北京和成都地区的月际变化规律与全国较为相似, 皆是秋冬季节低风速频率较高。不同之处是, 北京地区在 10—12 月期间低风速频率略有下降, 而成都地区每个月的低风速频率都是全国的近两

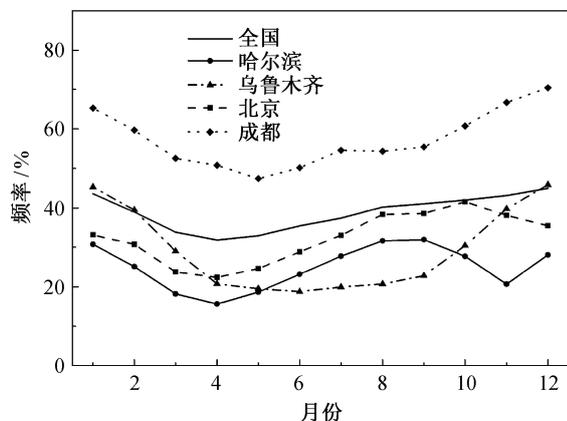


图 4 低风速出现频率的月际变化
Fig. 4 Monthly frequency of low wind-speed

倍。哈尔滨地区的低风速高值仅出现在秋季, 9—11 月低风速频率有一定幅度的下降。乌鲁木齐低风速频率的月际变化比其他地区更显著, 从 2 月份开始骤降, 在 4—8 月保持低值, 约为 20%; 之后逐渐增加, 12 月到次年 1 月的低风速频率最高, 约为 45%。这正好与乌鲁木齐地区冬季严重的空气污染情况^[27]相对应。

2.4 低风速持续性

1985—2014 年, 不同时长低风速持续事件出现的概率见图 5。从全国范围来看, 持续 3 个小时(及以上)的低风速状况出现概率约为 36%, 持续 24 小时的低风速状况出现概率接近 5%。

哈尔滨、北京和乌鲁木齐三地的低风速持续性状况相似, 都低于全国平均水平。其中, 北京最低, 哈尔滨居中, 乌鲁木齐相对较高。成都地区的低风速有着高于全国平均水平的持续性, 其低风速状况持续 3 小时(及以上)的概率达到 50%, 有约 20% 的低风速事件可持续 12 小时以上, 可见成都地区约有 1/5 的日子可以维持半天在低风速状况下。

3 全国低风速条件的空间分布

3.1 平均状况

全国的低风速频率分布情况如图 6 所示。其中, 南海的海面部分主要以海南岛和台湾岛的观测点数据作为依据, 虽然站点分布较少, 但因海面开阔, 环境条件均一, 观测的空间代表性范围较大, 结果有较大可信度。

由图 6 可知, 西南至华中的大部分地区低风速频率较高, 在 50% 以上, 高于全国平均水平, 西南部分地区(如云南南部)甚至大于 70%; 华北沿海地

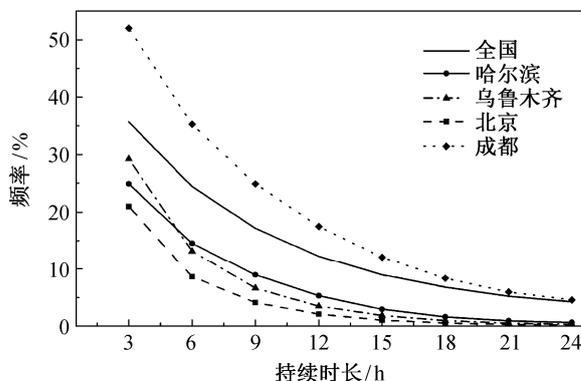


图 5 不同时长低风速持续事件出现的概率
Fig. 5 Percentage of low wind-speed sustained for different time period

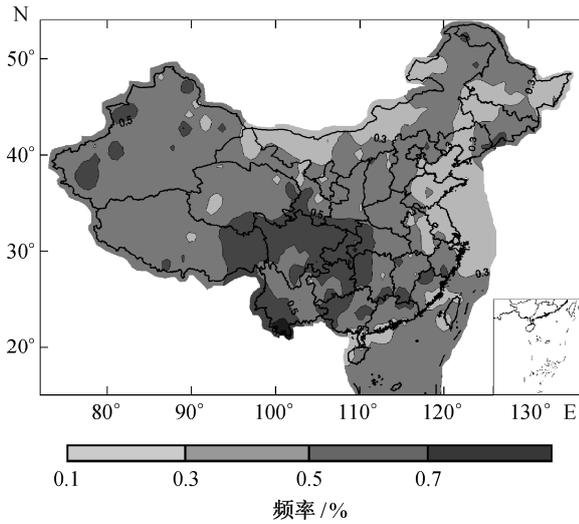


图 6 中国 1985—2014 年平均低风速频率分布

Fig. 6 Distribution of low wind-speed's mean percentage from 1985 to 2014 in China

区、东北中部地区和内蒙古大部分地区低风速频率最低,一般小于 30%;其余大部分地区居中,低风速频率在 30%~50%之间。我们注意到,新疆西部和北部、华南内陆丘陵地带以及东北长白山和大兴安岭等部分地区有一些零散的低风速频率高值区(大于 50%),可能与局地地形因素有关。

总体来讲,我国低风速频率南方高北方低,内陆高沿海低,与我国平均风速北大南小、沿海大内陆小的特点^[28]相对应。

3.2 季节变化

对测站的低风速频率进行季节平均,得到全国春季(3 至 5 月)、夏季(6 至 8 月)、秋季(9 至 11 月)和冬季(12 至次年 2 月)的分布特征,如图 7 所示。

我国春季低风速频率普遍较低,与我国春季平均风速较大^[28]有关。华北和东北的大部分地区低

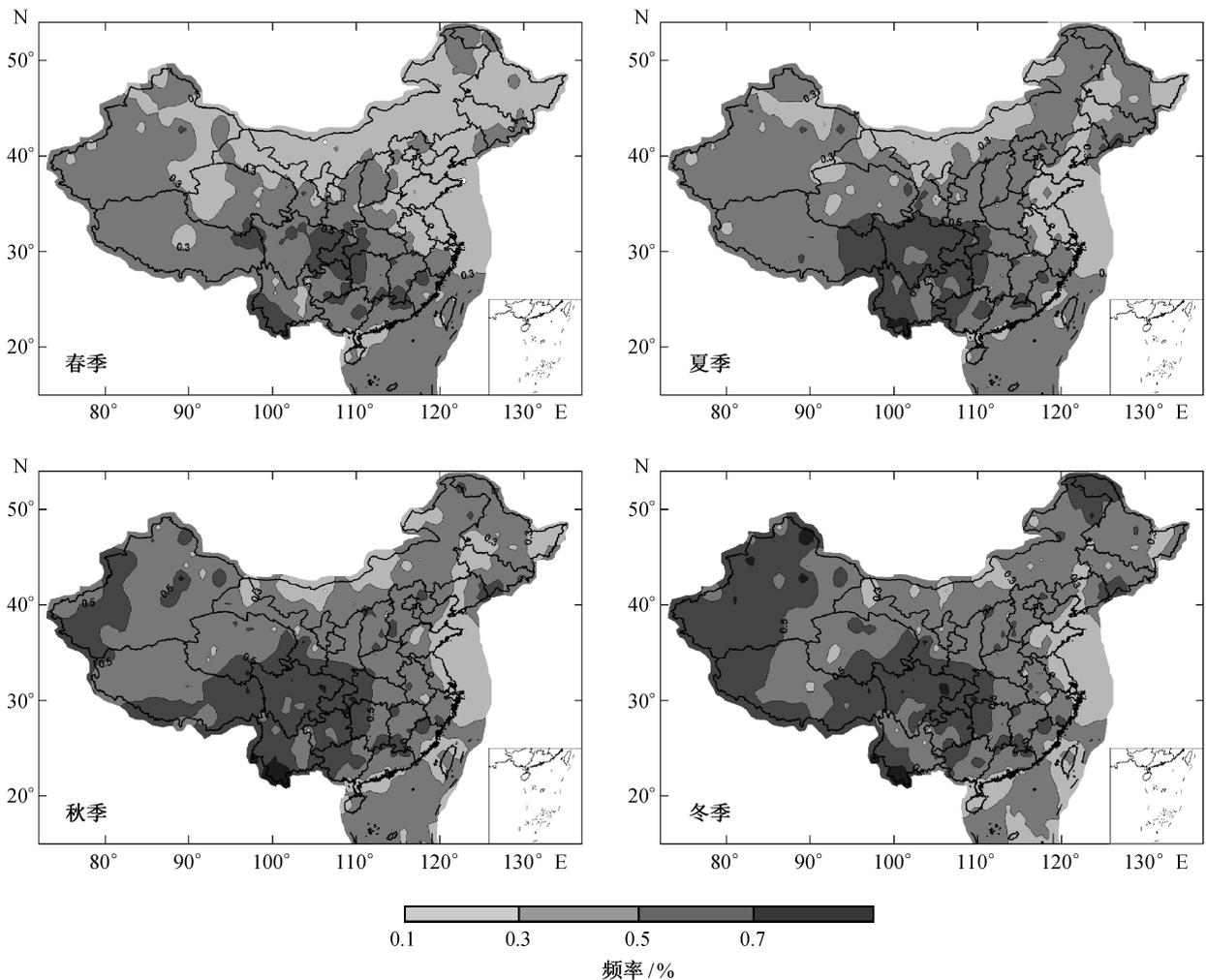


图 7 中国 1985—2014 年季节平均低风速频率分布

Fig. 7 Distribution of low wind-speed's seasonal mean percentage from 1985 to 2014 in China

风速频率在 10%~30% 之间,西北和南方大部分地区 30%~50% 之间,低风速频率高值区(50%~70%)出现在重庆、四川东部和云南西南部。夏季,全国大部分地区的低风速频率在 30%~50% 之间;东部沿海和内蒙古地区低风速频率最低,在 10%~30% 之间;低风速频率高值(50%~70%)的集中区域与春季相似,范围略有增加。秋季,我国整体上低风速频率有所上升,频率在 50%~70% 之间的区域增大,涵盖西南和华中的大部分地区;在云南的西南部,低风速频率高达 70% 以上。冬季的低风速频率分布情况与秋季相似,不同之处是,在西北西区的低风速频率增加,在 50%~70% 之间。

从季节变化方面来看,我国秋冬季的低风速频率较高,与低风速的月变化规律相吻合。其中,西北西区低风速频率的季节变化最为明显,全年风速值变化较大,春夏季的大气流动性比秋冬季好。这与西北西区冬季风速最小(与春季相差近 1 m/s)的情况^[28]相吻合。其余地区低风速频率的季节变化较小,四川、重庆和云南西南部地区全年处于高频率的低风速状态,大气流动性差;东部沿海地区全年低风速频率都较小,总体风速较大,大气输送扩散能力强。

4 代表城市年际变化特征

从低风速频率的空间分布情况可以看出,全国不同地区的低风速状况有很大差异。进一步分析 4 个代表城市的年际变化特征,结果见图 8。

可以看出,1985—2013 年,哈尔滨的低风速频率有明显的增加趋势,近 30 年约增加 20%。乌鲁木齐的低风速频率在 1985—1999 年间涨落不定,2003 年后无明显变化,2000 年前后的一场变化可能与该气象站在此期间的迁址有关^[29]。成都的低风速频率在 1999 年后似乎略有减小,其他时期则只有小的年际波动。

北京地区低风速频率变化较大,在 1988—1991 年和 2004—2005 年两个时段低风速频率似乎有异常增大和减小的现象(前一时段可能与台站迁址有关,后一时段原因不明),其他时段的年际变化相对平缓。低风速频率 30 年间整体上呈现略为下降的趋势。

图 8 同时给出各测站的年平均风速。可以看出,平均风速与低风速频率的年际变化有很好的对应关系(反相关)。年平均风速的降低趋势对应低风速频

率的增高趋势,反之亦然。这在哈尔滨站最为明显,其他站则反映在年际变化过程中。

5 结论

本文对最近 30 年(1985—2014 年)全国 345 个测站小于 2 m/s 的低风速出现情况进行统计分析,结果如下。

1) 30 年间,全国平均低风速出现频率约为 40%。东北、西北、华北和四川盆地 4 个代表城市的低风速频率有明显的差异,其中,哈尔滨最低,约为 25%;成都最高,达到 60%;乌鲁木齐和北京地区约为 30%。

2) 全国平均低风速频率的日变化规律是夜间高、白天低。凌晨到清晨时段,低风速频率维持在较高水平(约 50%),从 08:00 开始,随着时间的推移,低风频率不断减小,在 14:00 左右达到最小值(约 30%),傍晚和入夜后持续增加。4 个代表城市的日变化情况与全国平均情况相似,其中成都地区的日变化最为显著。

3) 全国平均低风速频率的月际变化规律如下:从 9 月至次年 1 月,低风速状态出现频繁,在 40% 左右,之后不断降低,最低值出现在春季 4—5 月份,约为 30%。北京和成都的月变化规律与全国较为相似,哈尔滨低风速出现最多的是秋季,乌鲁木齐的冬季低风速频率明显高于全国冬季平均水平。

4) 所有低风速事件中,36% 可以持续 3 小时(及以上)。成都的低风速持续性高,50% 以上的低风速可以持续 3 小时(及以上),约 20% 可持续 12 小时(及以上)。

5) 全国低风速频率的空间分布特征是:西南和华中大部分地区低风速频率较高(高于 50%),云南南部甚至大于 70%,皆高于全国平均水平;华北东部沿海地区、东北中部地区和内蒙古大部分地区低风速频率较低(低于 30%)。全国春季低风速频率普遍较低,高值区(50%~70%)仅出现在重庆、四川东部和云南西南部;夏季,高值区范围略有增加;秋冬季,低风速频率较高,范围较大。

6) 1985—2013 年,全国 4 个代表城市的低风速频率年际变化,只有哈尔滨站有明显的增加趋势,其他三站(乌鲁木齐、北京、成都)去除台站迁址等因素引起的异常变化以外,低风速频率的长期变化趋势并不明显。准确结果有待进一步深入分析。

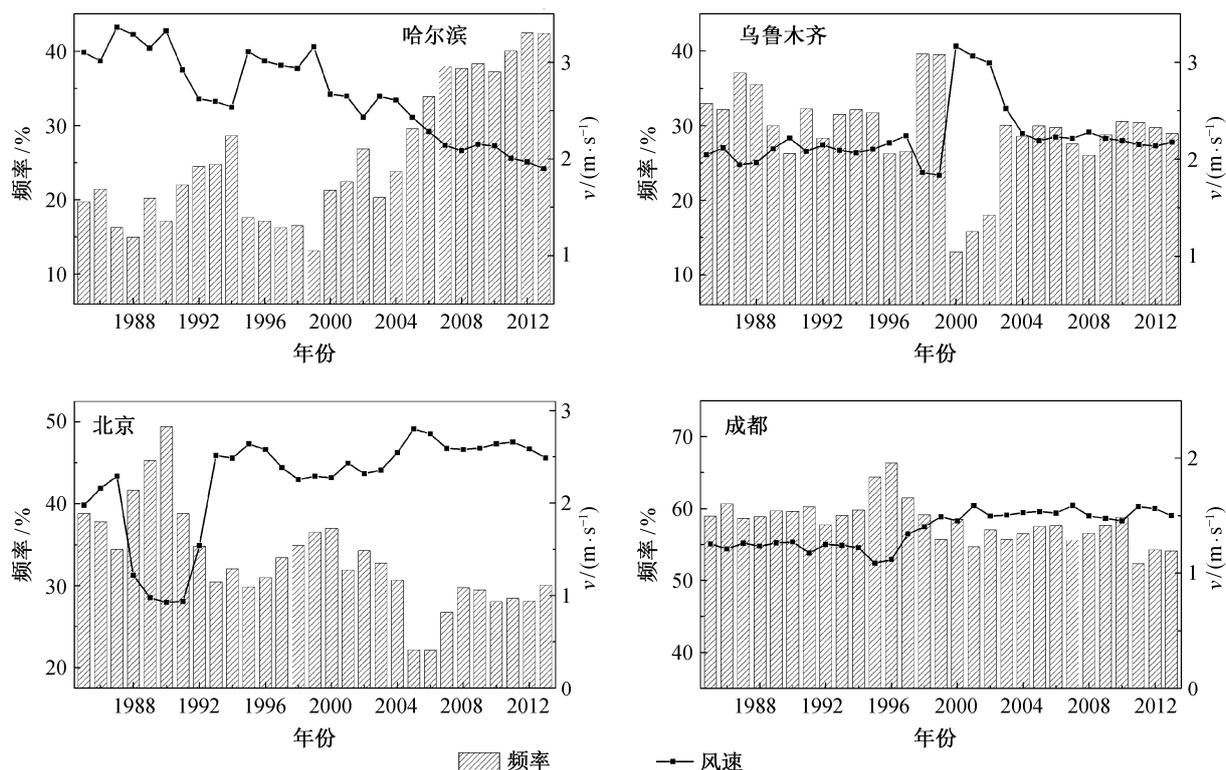


图 8 1985—2013 年年平均风速和低风速频率时间序列

Fig. 8 Time series of annual wind speed and percentage of low wind-speed from 1985 to 2013

参考文献

- [1] 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 近 30 年我国高空风速变化趋势分析. 高原气象, 2009, 28(3): 680-687
- [2] 毛恒青. 气象条件对大气污染物扩散的影响. 山东气象, 1991, 11(4): 9-13
- [3] 蒋维楣, 孙鉴泞, 曹文俊. 空气污染气象学教程. 北京: 气象出版社, 2004
- [4] Smith F B. Low wind-speed meteorology. Meteorological Magazine, 1992, 121: 141-151
- [5] 中央气象局. 中华人民共和国气候图集. 北京: 地图出版社, 1979
- [6] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 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
- [7] 江滢, 罗勇, 赵宗慈, 等. 近 50 年中国风速变化及原因分析 // 中国气象学会 2007 年年会气候变化分会场论文集. 广州, 2007: 80-89
- [8] 金巍, 任国玉, 曲岩, 等. 1971—2010 年东北三省平均地面风速变化. 干旱区研究, 2012, 29(4): 648-653
- [9] 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等. 西北地区近 50 年日照时数和风速变化特征. 自然资源学报, 2011, 26(5): 825-835
- [10] 郑运霞, 应明, 李永平. 影响广东省中部沿海热带气旋大风气候特征和重现期分析. 海洋与湖沼, 2014, 45(1): 157-165
- [11] 唐敬, 蔡旭晖, 康凌, 等. 复杂地形低风速气象特征分析. 气象科学, 2011, 31(4): 542-547
- [12] Gadian A, Dewsbury J, Featherstone F, et al. Directional persistence of low wind speed observations. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(12): 1061-1074
- [13] Deaves D M, Lines I G. The nature and frequency of low wind speed conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 73(1): 1-29
- [14] Deaves D M, Lines I G. On the fitting of low mean windspeed data to the Weibull distribution. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 66(3): 169-178
- [15] Anfossi D, Oettl D, Degrazia G, et al. An analysis of sonic anemometer observations in low wind speed conditions. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 114

- (1): 179-203
- [16] 朱好, 蔡旭晖, 张宏升, 等. 内陆丘陵河谷地区小风条件下的大气扩散模拟研究. 环境科学学报, 2011, 31(3): 613-623
- [17] Oettl D, Almbauer R A, Sturm P J. A new method to estimate diffusion in stable, low-wind conditions. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(2): 259-268
- [18] Qian W J, Venkatram A. Performance of steady-state dispersion models under low wind-speed conditions. *Boundary-layer Meteorology*, 2011, 138(3): 475-491
- [19] Lines I G, Daycock J H, Deaves D M. Guidelines for the inclusion of low wind speed conditions into risk assessments. *Journal of Hazardous Materials*, 2001, 83(3): 153-179
- [20] 何启超, 蔡旭晖, 宋宇. 珠江三角洲区域大气扩散和输送特征诊断分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(6): 945-954
- [21] Chang J C, Hanna S R. Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004, 87(1): 167-196
- [22] Righi S, Lucialli P, Pollini E. Statistical and diagnostic evaluation of the ADMS-Urban model compared with an urban air quality monitoring network. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(25): 3850-3857
- [23] Lines I G, Deaves D M, Atkins W S. Practical modelling of gas dispersion in low wind speed conditions, for application in risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 54(3): 201-226
- [24] Pasquill F. *Atmospheric diffusion: the dispersion of windborne material from industrial and other sources*. New York: Halsted Press, 1962
- [25] Sharan M, Rama Krishna T V B P S, Aditi. On the bulk Richardson number and flux-profile relations in an atmospheric surface layer under weak wind stable conditions. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(26): 3681-3691
- [26] 四川年鉴编辑委员会. 四川年鉴. 成都: 四川年鉴社, 1991
- [27] 程念亮, 张艳燕, 孟凡, 等. 乌鲁木齐市冬季典型污染事件气象过程分析. 环境科学研究, 2012, 25(1): 10-17
- [28] 陈练. 气候变暖背景下中国风速(能)变化及其影响因素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013
- [29] 张学文, 张家宝. 新疆气象手册. 北京: 气象出版社, 2006