

Climatic Characteristics and Weather Classification of Haze Days over Hainan Island in Recent 33 Years

Chuanbo Fu^{1,2,3}, Li Dan¹, Jiaxiang Tang^{2,3}, Xiaobin Lin^{2,3}

¹Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Hainan Meteorological Observatory, Haikou Hainan

³Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou Hainan

Email: hnfuchuanbo@163.com, danli@tea.ac.cn

Received: Aug. 24th, 2018; accepted: Aug. 30th, 2018; published: Sep. 6th, 2018

Abstract

Based on the ground observation data of 18 meteorological stations from 1981 to 2013, combined with "Weather Forecast Technical Manual of Hainan Province", we analyzed the temporal and spatial variations of haze days in Hainan Island and classified the weather patterns. The results showed that: 1) The spatial distribution of annual mean haze days revealed that the values in northern part of Hainan island are higher than those in southern part. The maximum values appeared in Tunchang and Danzhou located at the northern foot of the Wuzhishan Mountain. 2) The value of annual mean haze days shows a significant increase trend over Hainan island in the past 33 years; the regression coefficient is $0.355 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$; trend coefficient is 0.355 which has passed 98% significance test. 3) Haze days in Hainan island have an obvious seasonal variation; high value is mainly appeared in winter, followed by autumn and spring, and summer is the lowest. 4) The weather pattern of cold air impact is the main type resulted in haze pollution in Hainan Island, accounting for 73.2% of all haze days. The second is subtropical high pressure (or ridge), accounting for 20.4% of all haze days.

Keywords

Haze, Climatic Characteristics, Weather Pattern, Hainan

近33年海南岛霾污染的气候特征及天气型分类

符传博^{1,2,3}, 丹利¹, 唐家翔^{2,3}, 林晓斌^{2,3}

¹中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京

²海南省气象台, 海南 海口

³海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口

Email: hnfuchuanbo@163.com, danli@tea.ac.cn

收稿日期: 2018年8月24日; 录用日期: 2018年8月30日; 发布日期: 2018年9月6日

摘要

利用1981~2013年海南岛18个市县气象台站的地面常规观测资料, 分析了霾日数的时空变化特征, 并结合《海南省天气预报技术手册》对霾日数进行天气型分类, 结果发现: 1) 年平均霾日数空间分布呈现为北半部高于南半部的分布特征, 最大值出现在五指山山脉北麓的屯昌和儋州。2) 霾日数近33年来主要呈现明显的上升趋势, 其回归系数为 $0.355 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 趋势系数为0.355, 达到98%的显著性检验。3) 海南岛霾日数分布有明显的季节变化特征, 高值主要出现在冬季, 其次是秋季和春季, 而夏季霾日数最低。4) 冷空气类的天气型是海南岛出现霾污染的主要影响天气类型, 占所有霾污染天数的73.2%, 其次为副热带高压(或脊)内部, 占有天数的20.4%。

关键词

霾, 气候特征, 天气型, 海南

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

近些年来, 随着经济的发展和城市化进程的加快, 全国各地霾污染事件频繁发生[1], 这不仅对交通、旅游等行业造成不利影响, 更引起人们对身体健康的忧虑[2]。全国各级政府根据当地的实际情况, 纷纷制定了各种大气污染防治条例或空气清洁计划等。我国学者从21世纪初开始系统的研究霾污染问题[3], 从霾的观测识别[4] [5]、时空分布[6] [7]、气候特征[8]、成因分析[9] [10]以及数值模拟[11] [12]、气溶胶特性[13] [14]等方面做了大量的工作。其中关于我国霾污染的长期变化方面结果较为一致, 即我国大部分地区霾现象呈现较快的上升趋势, 并伴随着大气能见度的下降。尤以经济较为发达的区域更为明显[15]。

霾的组成和形成与雾有着本质的区别, 其定义是指大量细微的干颗粒物等均匀地悬浮在近地面空气中, 使得地面水平能见度小于10 km, 并造成空气普遍浑浊的天气现象[16]。其形成原因除了与气溶胶漂浮物的增加有密切关系以外, 风场、水汽、温度以及降水等大气环流条件的变化也是霾天气演变的重要条件之一[17]。海南岛地处于南海北部, 与广东省和广西壮族自治区毗邻, 属于热带岛屿季风性气候[18]。海南省是我国旅游大省之一, 空气质量优良, 城市空气质量排名在全国城市中经常名列前茅。海口市是海南省的省会城市, 北面隔琼州海峡与雷州半岛相望。随着海南省经济的快速发展和城市建设的加快, 特别是近年来国际旅游岛的建设, 海口市城市大气环境问题也逐渐突出[19] [20] [21], 海南省政府也高度重视海口市的大气环境问题。本文主要利用海南地区18个气象站点1981~2013年地面水平能见度、相对湿度、日降水量、天气现象等常规气象观测数据, 分析了霾日数的时空变化特征, 并结合《海南省天气预报技术手册》对海南岛霾日数进行天气型分类, 以期全面了解海南岛霾污染现状以及有利于霾天气发生

的天气形势，为进一步开展海南省大气污染物监测预警、业务开发和科研等工作提供参考。

2. 资料及分析方法

2.1. 资料

本文所用的地面观测资料来源于海南省气象局信息中心，其中包括逐日 4 次地面水平能见度、日平均的相对湿度、日降水量和天气现象等常规气象观测资料，且均经过了海南省气象局信息中心资料室质量检验。资料年限为 1981 年 1 月至 2014 年 2 月，站点选取为海南岛 18 个市县地面观测站，站点分布如图 1 所示。由于 1980 年以前的地面水平能见度的气象业务观测以等级的形式记录，而 1980 年以后能见度观测为具体的距离数值，考虑到资料的连续性，本文只选用 1981 年之后的观测数据进行处理分析。

2.2. 分析方法

目前国内外利用地面水平能见度资料，同时辅助上相对湿度阈值来区分雾日和霾日的方法已经被广泛应用于讨论雾霾天气的研究中[22] [23] [24]。本文使用霾日均值法来区分霾日和雾日[25]。即对每日观测的 4 次能见度值及对应时次的相对湿度分别作日平均，当所得日平均能见度小于 10 km，且日平均相对湿度小于 90%，并排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等的影响，则定义为一个霾日。这样既可把雾中被误报的霾分离出来，又可把霾中被误报的雾分离出去[25]。此外，为了了解海南岛霾日数的长期趋势变化，本文还计算了气象要素的时间序列与自然数序列之间的相关系数[26]，称为气候趋势系数，并进行统计检验。在对海南岛霾日数的长期变化进行讨论时，还用到了回归分析、11 年二项式滑动平均、相关分析等统计方法[27]。

3. 结果分析

3.1. 海南岛霾日数的空间分布

图 2 给出了海南岛 1981~2013 年年平均霾日数及各个年代霾日数分布。从图 2a 中可以清楚地看出，岛上年平均霾日数表现为北半部高于南半部的分布特征，超过 10 d 的站点有两个，分别为屯昌(13.9 d)和儋州(11.6 d)，均位于五指山山脉的北麓。田贺忠等[28]的研究表明，地形条件对大气污染物的累积也起到很重要的作用，特别是辐合风场的频繁发生，加上不利于扩散的地形条件，能导致大气污染物在某一地区不断聚集，从而造成霾污染。而屯昌和儋州的霾污染是否与地形有关，这还有待于进一步研究。此外，霾日数比较大的市县还有同样位于五指山山北麓的白沙(9.2 d)和定安(8.6 d)，以及海口、保亭、临高和东方等地，另外三亚和澄迈近 33 年没有观测到霾现象，大气污染较轻。

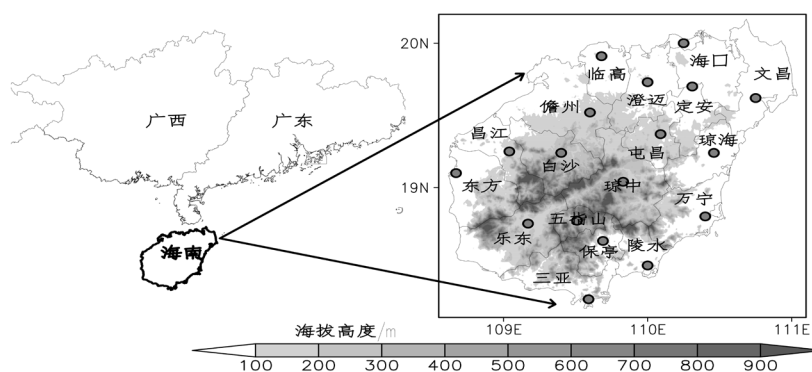


Figure 1. The geographical location, topography and distribution of 18 weather stations in Hainan Island
图 1. 海南岛地理位置、地形和 18 个市县分布示意图

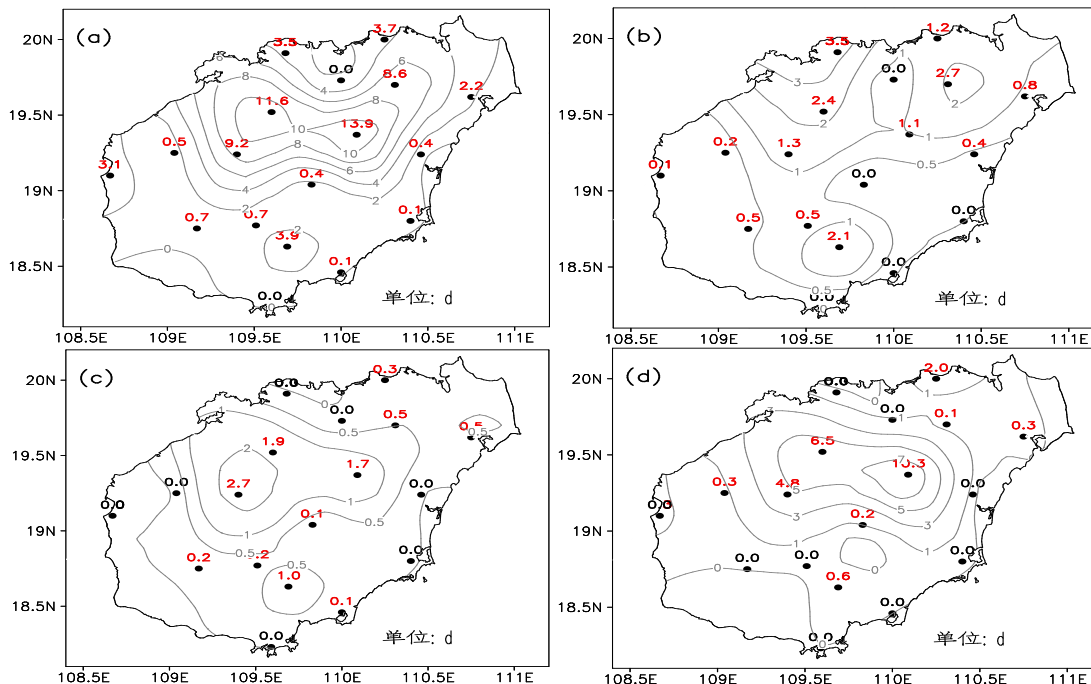


Figure 2. The distribution of annually mean haze days during 1981-2013 over Hainan island. (a: for 1981-2013; b: for 1981-1990; c: for 1991-2000; d: for 2001-2010)

图 2. 海南岛近 33 年年平均霾日数及各年代霾日数分布。(a: 1981~2013 年; b: 1981~1990 年; c: 1991~2000 年; d: 2001~2010 年)

图 2b, 图 2c 和图 2d 分别给出了 1981~1990 年, 1991~2000 年和 2001~2010 年三个年代平均的霾日数空间分布。图中表明, 20 世纪 80 年代海南岛上霾污染较轻, 空间分布上也呈现为北半部高于南半部的特征。霾日数除了临高以外, 其余都在 3 d 以下, 其中海口也仅为 1.2 d。20 世纪 90 年代岛上霾污染呈减小的变化趋势, 最大值出现在白沙, 仅为 2.7 d, 儋州和屯昌分别为 1.9 d 和 1.7 d, 其他市县均在 1 d 以下, 霾污染在这一时段并不严重。2000 年以后岛上霾污染有明显的增长趋势, 最大值出现在屯昌, 为 10.3 d, 儋州和白沙也分别有 6.5 d 和 4.8 d 的霾日数分布, 海口为 2.0 d, 其余市县在 1 d 以下。年代际变化的分析表明, 海南岛的霾污染近 33 年并不是呈持续的上升趋势, 而是先减少后上升, 其成因可能与本地污染物排放和外源输送的气象条件变化有关[17]。

3.2. 海南岛霾日数的年际变化

图 3 为海南岛和海口市 1981~2013 年年平均霾日数的年际变化。图中清楚表明, 海南岛霾日数在过去 33 年来主要呈现明显的上升趋势, 其回归系数为 $0.355 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 趋势系数为 0.355 (表 1), 达到 98% 的显著性检验, 霾日数上升较为显著。最大值出现在 2008 年, 为 3.34 d。随后霾日数虽略有下降, 但仍多于多年平均值。从年代际变化特征来看, 海南岛 80 年代霾日数维持在 1 d 附近, 90 年代有所下降, 仅为 0.5 d 左右, 随后显著的上升, 在 2000 年以后可达 1.5 d 以上。海口市霾日数的年际变化与海南岛的基本一致, 也表现为 20 世纪 80 年代偏多, 90 年代下降, 2000 年之后显著上升的演变特征。其回归系数为 $0.23 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 趋势系数为 0.146, 通过了 80% 的显著性检验。海口市年平均霾日数最大值也出现在 2008 年, 为 7 d。33 年中有 15 年未观测到霾天气, 而有 9 年霾日数在 2 d 及其以上, 其余年份霾日数只有 1 d。

3.3. 海南岛霾日数的季节变化特征

图 4 为海南岛多年平均的四季霾日数空间分布。图中表明, 海南岛霾日数分布有明显的季节变化

Table 1. Statistics of annual mean haze days over Hainan island and Haikou City
表 1. 海南岛和海口市年平均霾日数的统计分析

地区	平均值/d	均方差/d	气候趋势系数	回归系数/d·(10 a) ⁻¹	显著性检验/%
海南岛	1.054	0.853	0.409	0.355	98
海口市	1.121	1.552	0.146	0.230	80

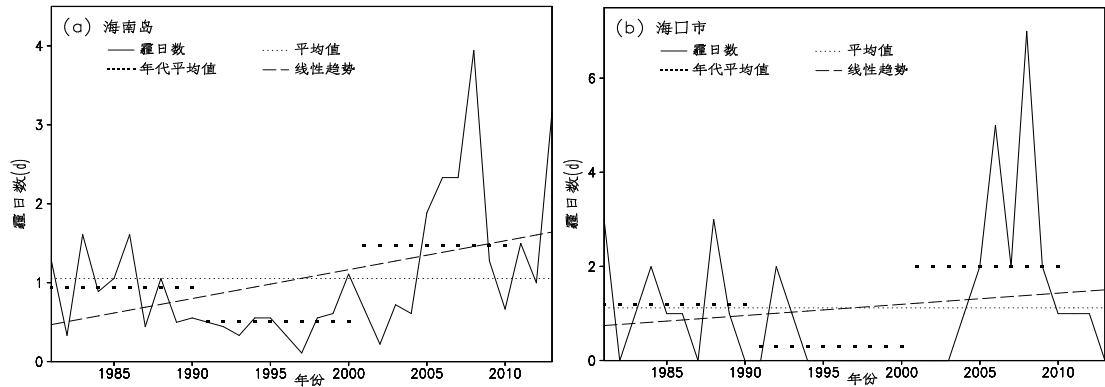


Figure 3. Annual variation of average haze days in Hainan island. (a) and Haikou City; (b) during 1981-2013
图 3. 海南岛。(a) 和海口市; (b) 1981~2013 年年平均霾日数年际变化

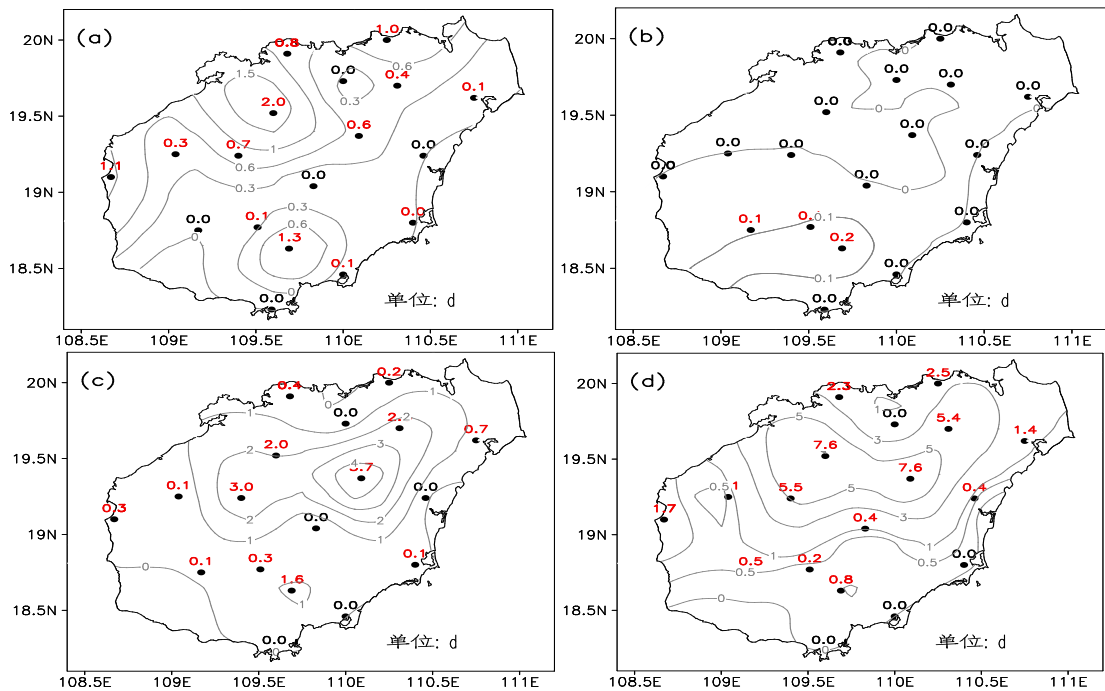


Figure 4. The spatial distribution of haze days in four seasons over Hainan Island. (a: for spring; b: for summer; c: for autumn; d: for winter)

图 4. 海南岛四季霾日数空间分布。(a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季)

特征, 高值主要出现在冬季, 其次是秋季和春季, 而夏季霾日数明显偏低, 全岛基本没有霾污染, 近 33 年只有保亭有 2 d 观测到霾, 乐东和五指山有 1 d。春季、秋季和冬季海南岛霾污染与年平均(图 2a)基本一致, 大值区主要出现在五指山以北地区, 而南半部地区霾污染偏小。海南岛霾污染的这种季节变化特征与我国其他区域类似[24], 海南岛冬季霾日数大大超过夏季, 说明霾污染在海南岛是典型的冬季污染事

件。四季中霾日数最多的站点为屯昌和儋州，冬季霾日数均达到 7.6 d/a，其次是白沙和定安，分别为 5.5 d/a 和 5.4 d/a，海口为 2.5 d/a。结合霾天气形成的特点可知，海南岛霾污染的这种季节特征有自然气象条件与人为排放两方面的原因。冬季地面常受高压控制，天气形势稳定，有利于大气污染物的累积，另外冬季由于气温偏低，燃煤供暖等人为活动使得排放源增强，大气污染物浓度上升加快，同时在有利的气象条件共同作用下，导致了冬季海南岛地区霾日数明显增大，另外偏北的冬季风有利于北方污染物向海南地区输送；而夏季是海南岛主要的降水季节，降水的清除作用有利于大气污染物浓度降低，另外偏南的夏季风加强污染物粒子的扩散，致使夏季海南岛霾日数显著降低。对比各个季节霾日数分布，可以发现春季(4a)岛上西北部霾日数有所增大，这是否与春季青藏高原东部冷空气向东南部扩散，致使我国西南地区的污染物输送至海南岛西北部？这还有待于进一步研究。

图 5 分别给出了海南岛 4 季霾日数的年际变化。从图中可以发现，春季、秋季和冬季霾日数的年代际变化特征与年平均霾日数(图 2a)基本一致。即表现为霾日数在 20 世纪 80 世纪偏高，90 年代有所下降，2000 年之后上升显著的特征。春季，海南岛霾日数整体偏低，近 33 年均均在 1 d 以下，最大值出现在 1983 年(0.83 d)，随后基本维持在 0.2 d 以下，直到 2008 年才出现第二个峰值，为 0.67 d。夏季海南岛基本没有霾天气，近 33 年只有 1992 年、2000 年和 2003 年观测到霾天气，而且霾日数非常小，只为 0.1 d 及其以下。秋季和冬季是海南岛霾污染相对较重的两个季节，其回归系数分别为 $0.162 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.202 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ，趋势系数为 0.515 和 0.36，分别通过了 99.8% 和 90% 的信度检验。就平均值(表 2)而言，4 季霾日数从大到小排列为：冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季。

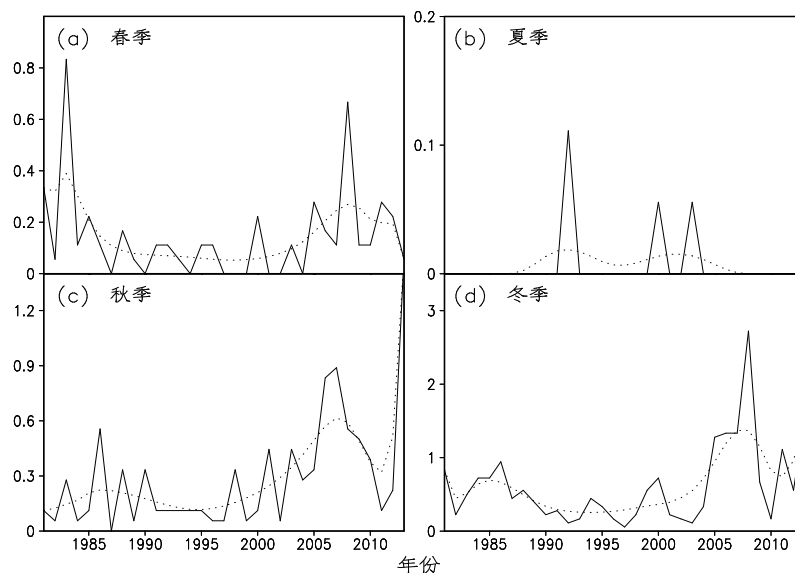


Figure 5. Seasonal variation of haze days over Hainan Island during 1981-2013

图 5. 海南岛四季 1981~2013 年霾日数年际变化

Table 2. Statistics of seasonal mean haze days over Hainan island

表 2. 海南岛四季霾日数的统计分析

	平均值/d	均方差/d	趋势系数	回归系数/ $\text{d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	显著性检验/%
春季	0.143	0.180	-0.044	-0.008	不显著
夏季	0.007	0.023	-0.008	-0.001	不显著
秋季	0.291	0.308	0.515	0.162	99.8
冬季	0.613	0.550	0.360	0.202	90

3.4. 海南岛霾日天气型分类

大气污染物排放强度和气象条件对污染物的稀释扩散能力是霾污染发生的两个主要影响因素[29]。在同等气象条件下，大气污染物排放强度越低，则霾天气发生可能性就越小，霾污染强度越低；反之大气污染物排放强度越大，霾天气发生可能性就越高，同时霾污染的强度越强。而大气污染物排放强度较为稳定的条件下，不同的天气形势对大气污染物的扩散能力也不同，从而最终影响着霾天气发生的强度和频次。因此，气象条件对霾污染的形成起着至关重要的作用。2013年海南省气象局编著了《海南省天气预报技术手册》[30]，将影响海南岛的天气系统进行了分型，本小节主要对近33年海南岛出现的霾日与不同天气型之间进行统计分析，为今后开展霾污染的预报预测提供初步的科学依据。

3.4.1. 海南岛天气型简介

海南岛天气系统过程可以分为4大类，分别为冷空气类、低压槽类、副热带高压(或脊)内部和热带系统，冷空气类又分为偏东下和偏西下冷空气过程，有冷锋过境、静止锋和锋消三类；低压槽类主要有南海季风槽和西南低压槽(SWT)，南海季风槽根据槽线位置的不同又可分为南海低压槽(ST1)、华南沿海槽(ST2)和越南低压槽(YT)三类；副热带高压(或脊)内部有副热带高压(G1)和变暖高压脊(G2)两类，更为具体的介绍请参看《海南省天气预报技术手册》[30](表3)。

3.4.2. 海南岛不同天气型霾日特征

统计发现，近33年海南岛共有500天出现了霾。表4进一步给出了这500个霾日的影响天气型分类。从表中可以发现，冷空气类的天气型是海南岛出现霾污染的主要影响天气形势，共有366天，占有天数的73.2%。其次是副热带高压(或脊)内部，共有102天，占有天数的20.4%，其中主要是变暖高压脊

Table 3. Classification of weather patterns in Hainan island

表 3. 海南岛天气系统过程分类

冷空气类			低压槽类			副热带高压(或脊)内部			热带系统 TC
冷空气偏东下		冷空气偏西下	南海季风槽			西南低压槽 SWT	副热带高压 G1	变暖高压脊 G2	
冷锋过境 EF	静止锋 EQ	锋消 ES	冷锋过境 WF	静止锋 WQ	锋消 WS	南海低压槽 ST1	华南沿海槽 ST2	越南低压槽 YT	

Table 4. Statistics of 500 weather patterns of haze days in Hainan island during recent 33 years (Units: d)

表 4. 近 33 年海南地区 500 个霾日影响天气型统计(单位: d)

冷空气类	冷空气偏东下	冷锋过境 EF	69 (13.8%)		
		静止锋 EQ	26 (5.2%)	172 (34.4%)	
		锋消 ES	77 (15.4%)		
	冷空气偏西下	冷锋过境 WF	71 (14.2%)		366 (73.2%)
		静止锋 WQ	33 (6.6%)	194 (38.8%)	
		锋消 WS	90 (18%)		
低压槽类	南海季风槽	南海低压槽 ST1	6 (1.2%)		
		华南沿海槽 ST2	1 (0.2%)	8 (1.6%)	
	越南低压槽 YT	1 (0.2%)		23 (4.6%)	
	西南低压槽 SWT			15 (3%)	
副热带高压(或脊)内部	副热带高压 G1		6 (1.2%)		
	变暖高压脊 G2		96 (19.2%)	102 (20.4%)	
热带系统 TC			9 (1.8%)		

天气型(G2), 为 96 天(19.2%)。第三类是低压槽类, 共有 23 天, 占有天数的 4.6%; 排在最后一类的是热带系统(TC), 共有 9 天, 占有天数的 1.8%。海南地区霾日的四大类天气型从大到小排列分别为: 冷空气类、副热带高压(或脊)内部、低压槽类和热带系统。这也说明, 海南岛霾日的出现与冷空气南下有利于大气污染物的外源输送有关。

图 6 给出了 7 小类海南岛天气型的霾日数统计。结果与上一小节的分析一致。冷空气类的天气型是海南地区出现霾污染的主要天气型, 其中冷空气偏西下天气型最高, 为 194 天(38.8%), 冷空气偏东下天气型为 172 天(34.4%), 根据海南岛天气型的分类标准[30]可知, 冷空气偏东或者偏西下, 主要看重庆和汉口的变带来决定, 而符传博等[21]的分析表明, 冷空气对海口市大气污染物浓度变化的影响, 主要体现在低层风向和风速上, 而与气压关系不大, 因此冷空气偏东下与冷空气偏西下天气型之间霾日的天数相差不大。其次是变暖高压脊类, 从划分标准可知, 变暖高压脊类主要是大陆的地面冷高压东移出海, 海南地区位于变性高压的西南侧, 低层盛行偏东风或东到东北风, 这一类海南地区霾日偏多可能与我国东南沿海的污染物输送至海南岛有关。冷空气偏西下、冷空气偏东下和变暖高压脊三类天气型加起来为 462 天, 占有天数的 92.4%。而西南低压槽、热带系统、南海季风槽和副热带高压天气型中海南岛出现霾污染非常少, 四类天气型加起来为 38 天, 只占有天数的 7.6%。出现霾污染的 7 小类天气型从大到小的排列为: 冷空气偏西下 > 冷空气偏东下 > 变暖高压脊 > 西南低压槽 > 热带系统 > 南海季风槽 > 副热带高压。

3.4.3. 海南岛霾日与冷空气影响日数

为进一步验证海南岛霾日与冷空气南下造成外源输送加强, 图 7 给出了 1981~2013 年海南岛霾日数与冷空气影响日数的变化关系。其中冷空气影响日数定义为影响天气型为冷空气类, 即为一个冷空气影响日。从图 7a 中可以清楚看出, 近 33 年来冷空气影响日数有下降的趋势, 趋势系数为-0.399, 显著性检验为 98%, 这可能与东亚冬季风的减弱有关[31]。我们进一步计算冷空气影响日数与海南岛霾日数的相关系数发现, 两者有弱的正相关关系, 相关系数为 0.133, 相关性不显著。晏红明等[32]的研究表明, 东亚冬季风的年际变化与 Walker 环流、低纬度对流活动、海洋和大气的热力状况变化等有关, 因此我们对冷空气影响日数和海南岛霾日数做了去趋势处理, 方法为逐年的日数值减去 11 年二项式滑动平均值, 这种方法可以去除强趋势成分对长程相关分析的影响[33]。图 7b 为去趋势处理后的结果, 从图中可以发现, 冷空气影响日数和海南岛霾日数有较好的正相关关系, 进一步计算相关系数为 0.45, 通过了 99% 的信度检验。这也进一步证明, 海南岛霾污染与冷空气南下造成的大气污染物外源输送有密切关系。

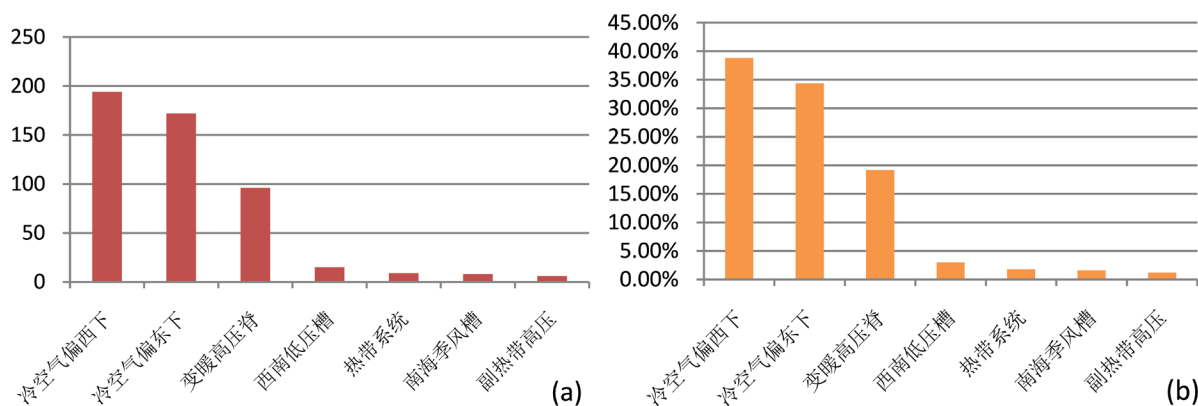


Figure 6. Statistical analysis of 500 weather patterns in Hainan Island in 33 years. (a) for haze days; (b) for the ratio
图 6. 33 年海南岛 500 个霾日天气型统计分析。(a) 为霾日; (b) 为比率

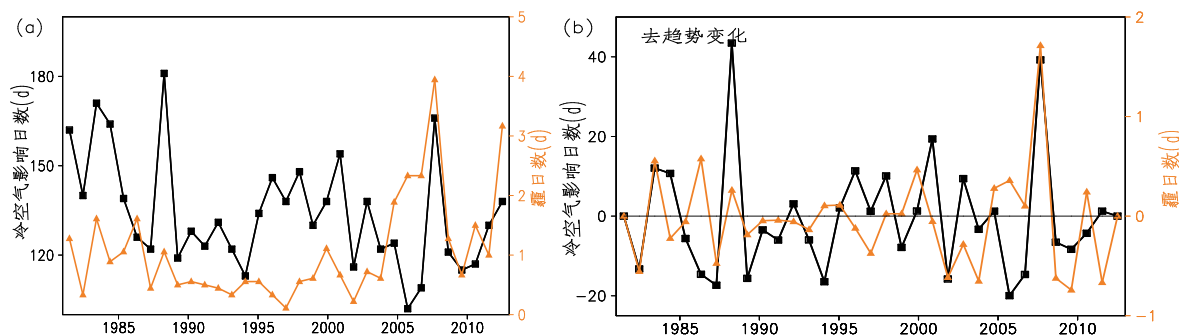


Figure 7. Annual variation of haze days and cold air affected weather patterns in Hainan Island during 1981-2013

图 7. 1981~2013 年海南岛霾日数与冷空气影响日数的变化

4. 结论

本文利用 1981~2013 年海南岛 18 个气象台站的地面观测资料, 分析了霾日数的时空变化特征, 同时结合《海南省天气预报技术手册》对发生霾污染的天数进行天气型分类, 得出以下主要结论:

1) 近 33 年海南岛霾日数空间分布呈现为北半部高于南半部的分布特征, 最大值出现在五指山脉北麓的屯昌和儋州, 分别为 13.9 d 和儋州 11.6 d, 这可能与地形条件有关。

2) 海南岛霾日数在过去 33 年来主要呈现明显的上升趋势, 其回归系数为 $0.355 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 趋势系数为 0.355, 达到 98% 的显著性检验, 最大值出现在 2008 年, 为 3.34 d。年代际变化表现为 20 世纪 80 年代维持在 1 d 附近, 90 年代有所下降, 随后显著的上升, 在 2000 年以后可达 1.5 d 以上。

3) 海南岛霾日数分布有明显的季节变化特征, 高值主要出现在冬季, 其次是秋季和春季, 而夏季霾日数最低。夏季海南岛几乎没有观测到霾污染, 春季、秋季和冬季霾日数的年代际变化特征与年平均霾日数基本一致。

4) 霾天气的出现与气象条件密切相关。普查海南岛近 33 年 500 个霾日天气型发现, 冷空气类的天气型是海南岛出现霾污染的主要影响天气类型, 占有天数的 73.2%, 其中去趋势后霾日数与冷空气影响日数的相关系数为 0.45, 达到 99% 的信度检验。其次为副热带高压(或脊)内部, 占有天数的 20.4%。

基金项目

本文由国家重点研发计划课题(2016YFA0602501); 国家自然科学基金项目(资助号 41630532, 41275093); 中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-059)共同资助。

参考文献

- [1] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
- [2] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [3] 吴兑. 华南气溶胶研究的回顾与展望[J]. 热带气象学报, 2003, 19(S): 145-151.
- [4] 赵普生, 张小玲, 徐晓峰. 利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析[J]. 环境科学学报, 2011, 31(4): 704-708.
- [5] 樊高峰, 任律, 毛裕定. 基于人工与自动观测对比分析的霾日重建[J]. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1254-1261.
- [6] 符传博, 丹利. 重污染下我国中东部地区 1960~2010 年霾日数的时空变化特征[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 219-226.
- [7] 徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异[J]. 科学通报, 2015(60): 1132-1143.
- [8] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. 环境科学, 2014,

- 35(6): 2031-2044.
- [9] 毛敏娟, 刘厚通, 徐宏辉, 等. 多元观测资料融合应用的灰霾天气关键成因研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 806-813.
- [10] 洪也, 杨婷, 王喜全, 等. 辽宁中部城市群灰霾污染的外来影响[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(6): 675-684.
- [11] 高怡, 张美根. 2013年1月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(2): 140-152.
- [12] 侯梦玲, 王宏, 赵天良, 等. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究[J]. 大气科学, 2017, 41(6): 1177-1190.
- [13] 高敏, 仇天雷, 贾瑞志, 等. 北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4415-4421.
- [14] 陈秋方, 孙在, 谢小芳. 杭州灰霾天气超细颗粒物浓度分布特征[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2851-2856.
- [15] 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候特征[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(3): 307-406.
- [16] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 21-27.
- [17] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960-2013年我国霾污染的时空变化[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3237-3248.
- [18] 高素华, 黄增明, 张统钦, 等. 海南岛气候[M]. 北京: 气象出版社, 1988: 1-189.
- [19] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 2013年冬季海口市一次气溶胶粒子污染事件特征及成因解析[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 72-79.
- [20] 符传博, 陈有龙, 丹利, 等. 近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析[J]. 环境科学, 2015, 38(1): 18-24.
- [21] 符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 2014年海口市大气污染物演变特征及典型污染个例分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 2160-2169.
- [22] Schichtel, B.A., Husar, R.B., Falke, S.R., et al. (2001) Haze Trend over the United States, 1980-1995. *Atmospheric Environment*, 35, 5205-5210. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00317-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00317-X)
- [23] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究[J]. 气象学报, 2006, 64(4): 510-517.
- [24] 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951-2005年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 680-688.
- [25] 吴兑. 霾与雾的识别和资料分析处理[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 327-330.
- [26] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近100年来4个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [28] 田贺忠, 王艳, 赵丹, 等. 中国太行山东麓NO_x重污染成因分析[J]. 科学通报, 2011(18): 1464-1469.
- [29] 胡亚旦, 周自江. 中国霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 78-83.
- [30] 海南省气象局. 海南省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 2013: 25-77.
- [31] 邵鹏程, 李栋梁. 东亚冬季风指数的分类和比较[J]. 气象科学, 2012, 32(2): 226-235.
- [32] 晏红明, 周文, 杨辉, 等. 东亚冬季风指数的定义及其年际年代际异常[J]. 大气科学学报, 2009, 32(3): 367-376.
- [33] 郑有飞, 尹继福, 吴荣军. 我国大陆极端高温基于去趋势波动及排列熵法的时空分布特征研究[J]. 热带气象学报, 2012, 28(2): 251-257.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org