

周雪松,杨成芳,孙兴池. 基于卫星识别的渤海海效应事件基本特征分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 26-37.
ZHOU Xuesong, YANG Chengfang, SUN Xingchi. Analysis of basic characteristics of ocean-effect events in the Bohai Sea based on satellite identification[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(1): 26-37. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.003. (in Chinese)

基于卫星识别的渤海海效应事件基本特征分析

周雪松^{1,3}, 杨成芳², 孙兴池²

(1. 山东省气象信息中心, 山东 济南 250031; 2. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 3. 南京大学大气科学系, 江苏 南京 210093)

摘要: 针对渤海区域冬季较为常见的海效应事件, 利用 2000—2012 年的 GMS5、GOES9 和 MTSAT 等卫星遥感数据及 NCEP FNL 再分析数据、海面温度 SST、地面降水观测数据等资料, 系统研究了渤海海效应事件的季节变化和日变化特征。研究结果表明: 渤海海效应事件一般持续时间不长, 但在 11 月—次年 1 月, 有持续时间较长的个例, 这段时间也是发生次数最多的时期; 海效应事件的发生有较明显的日变化特征, 清晨和上午出现的频次明显大于下午和前半夜, 且不同季节也不尽相同; 海效应事件中有约一半会造成山东半岛降水, 其中在冬半年主要造成降雪, 但个别情况下也有可能形成降雨; 另外, 造成海效应事件的天气学环境指标也具有很强的季节变化特征, 其中 850 hPa 温度、海面温度、地面 2 m 温度和比湿均有较明显的月变化, 而风速、海面和 850 hPa 温差则相对稳定, 季节变化不大。这些研究结果将进一步加深对渤海海效应事件的认识, 为预报思路凝练和研究的开展提供参考和借鉴。

关键词: 海效应事件; 季节变化; 日变化; 预报指标

中图分类号: P407; P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)01-0026-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.01.003

Analysis of basic characteristics of ocean-effect events in the Bohai Sea based on satellite identification

ZHOU Xuesong^{1,3}, YANG Chengfang², SUN Xingchi²

(1. Shandong Meteorological Information Center, Jinan 250031, China; 2. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 3. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Ocean-effect events take place frequently in winter in the Bohai Sea region. Based on the satellite data of GMS5, GOES9 and MTSAT, NCEP FNL reanalysis data, SST, and observed surface precipitation data from 2000 to 2012, the seasonal and diurnal variation characteristics of the ocean-effect events in the Bohai Sea are systematically studied. The results are listed as below. 1) The ocean-effect events in the Bohai Sea generally do not last for a long time. The cases of long duration happen from November to next January, and this period sees the most events. 2) The occurrence of ocean-effect events has obvious diurnal variation characteristics. The probability of occurrence in the morning is obviously greater than that in the afternoon and the early night, and the probability is not the same in different seasons. 3) About half of the ocean-effect events cause precipitation in the Shandong Peninsula, mainly snow in winter and rainfall in some cases. 4) In addition, the environmental indicators causing ocean-effect events also have strong monthly variation characteristics. The monthly variations of temperature at

收稿日期: 2018-11-12; 修订日期: 2019-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475038)

作者简介: 周雪松, 男, 正高级工程师, 主要从事天气预报、气象服务和气象信息技术研究工作, cedarzhou2005@163.com。

850 hPa, sea surface temperature, temperature at 2 m, and specific humidity are obvious, while the wind speed and the temperature difference between sea surface and 850 hPa are relatively constant and have little seasonal change. These results will further deepen the understanding of ocean-effect events in the Bohai Sea and provide reference for forecasting and profound research.

Key words ocean-effect events; seasonal variation; diurnal variation; forecast indicator

引言

在冬半年的中高纬度地区,当冷空气经过暖水面,由于水面与大气的能量和水汽交换,会产生大量的低云,形成降雪或降雨,对日常生活造成影响。另一方面,即使没有形成降水,这类天气形势造成的大量低云也可能给航空安全等带来较大影响。因此,全面研究这类现象至关重要。这一现象与冷空气影响有直接的关系,多年来在山东半岛由此现象造成的降雪称之为冷流降雪。在全球中高纬度的很多地方都有类似现象,最主要的区域包括美国的五大湖地区^[1]、大盐湖地区^[2]、纽约州手指湖地区^[3]以及尚普兰湖^[4]等,加拿大的魁北克等^[5],日本的西海岸^[6],韩国的西南海岸^[7]以及土耳其^[8]等,根据所处位置的不同分别称为湖效应或海效应降雪、降水等。中国也是海效应事件影响较多的区域之一,主要在山东半岛北部^[9]、辽东半岛^[10]、以及江苏、上海和浙江北部等^[11]的沿海地区,并做了大量的个例分析和预报指标等研究。其中,以山东半岛的威海、烟台最为集中。在本研究中,将由于海效应机制造成的降雨、降雪和未造成降水但形成低云的事件统称为海效应事件。

尽管我国对雪的研究仍然以陆上降雪为主^[12-15],但是针对海效应事件,特别是海效应降雪,国内学者专家也进行了大量深入的研究,杨成芳等^[16]总结认为对降雪的产生机制、大尺度环流背景及多尺度相互作用、影响因素和空间形态分类等方面开展研究比较集中,均表明海(湖)效应降雪过程存在多尺度相互作用,海(湖)气温差、热力不稳定、风向风速、地形、云物理过程等是其关键影响因素,这些因素也进一步影响其空间分布形态。近年来,数值模拟和多普勒雷达资料成为主要研究手段之一^[6-7]。

但是,常规观测资料时空分辨率往往不足,而且一些海效应事件发生后并没有影响到陆地,这给海效应事件更全面、深入的机理研究带来困难,特别是由于海上观测资料不多,观测不连续,造成相关预报指标统计特征、季节变化和日变化研究难度

较大,且不同区域海效应事件统计特征差异也需要进一步研究。在我国,对海效应事件来说,个例研究较多,气候统计方面研究较少,尽管李刚等^[17]通过降雪个例统计了烟台站各月海效应强降雪天气 850 hPa 温度指标,推进了预报技术的提高,但是更详细的分析研究进展相对较慢。另一方面,国外 CARPENTER^[18]在研究美国大盐湖附近的降雪时,认为湖效应具有明显的日变化,常发生在夜间和凌晨前后,而 KRISTOVICH et al.^[1]通过对冷锋、槽、气旋进行分析,发现并没有明显的日变化特征。同时, NIZIOL et al.^[19]也发现陆地观测到的海效应降雪只是海效应事件影响到陆地时的一类而已,还有很多海效应事件仅仅在海上,这同样需要应有的重视和深入研究。本文通过气象卫星数据等一些非常规资料,较详细地研究了渤海及渤海海峡附近(图 1a)海效应事件的季节和日变化规律,以期能够为渤海海效应降水预报提供更多的借鉴和参考。

1 资料与方法

本文所用资料主要为 2010—2012 年静止气象卫星 GMS5、GOES9、MTSAT 观测到的红外云图资料,还使用了 NCEP FNL 的再分析资料(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>),以及 NOAA 的海面温度(SST)资料(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds277.7/>)和山东省半岛地区的地面降水观测资料(来源于山东省气象信息中心)等。

1.1 使用的数据

由于资料完整性和卫星生命周期等原因,其中 2000 年 9 月 1 日—2003 年 4 月 30 日使用的是 GMS5 卫星数据,2003 年 9 月 1 日—2005 年 4 月 30 日使用的是 GOES9 卫星数据(该时间段是为填补西太和东亚卫星观测空白而临时西移时段),2005 年 9 月 1 日—2012 年 3 月 31 日使用的是 MTSAT 卫星数据。这些数据时间分辨率为 1 h,覆盖范围包含整个东亚地区,均为 JPG 图片,主要用于海效应事件的个例识别。数据来源于日本高知大学(Kochi University, <http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>)。

研究所使用的 SST 数据是由 NOAA 的 NCDC

使用最优插值获得的海面温度产品。数据空间分辨率为 0.25° , 时间分辨率为 1 d。由两类数据组成, 一类数据使用了 AVHRR 红外波段卫星反演的 SST 信息 (简称 AVHRR-SST), 另一类则使用 AVHRR 和 EOS 卫星上的 AMSR 反演 SST 数据 (简称 AMSR-SST)。其中 AVHRR 数据时间范围为 2000 年 1 月 1 日—2012 年 6 月 31 日, AVHRR 和 AMSR 产品为 2003 年 1 月 1 日—2010 年 12 月 31 日。所有这些数据产品都使用了船舶、浮标等观测数据, 同时经过大幅度偏差调整^[20], 因为使用 AMSR 后, 这一星载微波仪器可以穿过绝大多数云层而测量海面温度, 使这一观测数据近乎在所有天

气条件下都可用, 数据质量有了较明显的提高。

因单纯使用 AVHRR 的 SST 数据具有更长的时间跨度, 故在研究中使用了该数据。同时, 初步比较了两类资料在本研究关键区烟台北部近海区 ($121.5^\circ\sim 122.5^\circ\text{E}$, $37.5^\circ\sim 38^\circ\text{N}$) 的差别, 进行了分季节的比较分析。研究发现两者平均总体差别较小, 其中夏半年误差很小, 基本在 0.1°C 以内; 即使在差别比较大的冬半年, 平均误差也在 0.2°C 以内 (图 1)。因此, 本次研究中使用长时间序列的 AVHRR 数据集可以有较好的代表性, 能够满足天气预报等指标研究的需要。

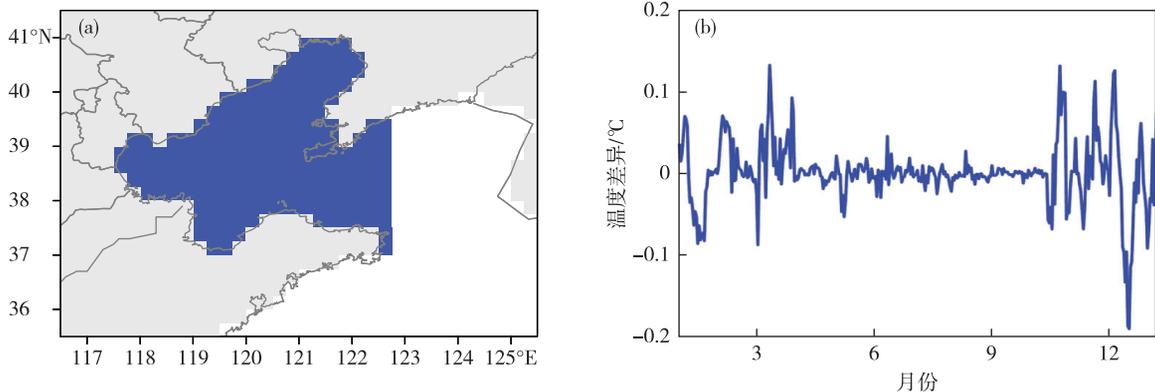


图 1 海效应事件分析范围(a)和烟台北部近海区域 AVHRR-SST 和 AMSR-SST 的差异季节变化(b;单位: $^\circ\text{C}$)

Fig.1 Analysis range of ocean-effect events (a) and seasonal variation of difference between AVHRR-SST and AMSR-SST in the offshore areas of northern Yantai (b; units: $^\circ\text{C}$)

研究中, 为分析海效应事件的降水类型和天气学环境指标, 还使用了 NCEP FNL 再分析资料和山东站点降水量和降水类型资料。袁松等^[21]研究表明, 探空资料和 NCEP 资料中温度、相对湿度、水平风场等气象要素的绝对差值随地点、高度和季节变化较小, 于是使用更高分辨率的 NCEP 再分析资料对海效应事件发生时的指标物理量进行诊断分析, 有效弥补常规探空资料时空分辨率不足。另外, 降水资料包括山东省 123 个站点, 该数据来自于山东省气象信息中心, 所有数据经过人工审核, 具有较高的可信度。

1.2 海效应事件判别方法

在海效应暴雪研究中, 杨成芳等^[14]、周淑玲等^[9]都给出了一定的规则。例如 500 hPa 以下需要有一致的偏北风, 降水仅发生在半岛地区等。但是仍存在一些不足, 易于跟西风槽过程等其他类型的降水相混淆, 另外发生在海上的海效应事件无法捕捉到。因此, 使用了 HOLROYD^[22]、KRISTOVICH

and STEVE^[23] 研究时考虑的一些规则。在 KRISTOVICH and STEVE^[23] 的研究中, 其中一个规则是根据卫星云图覆盖湖面的面积和位置进行判别, 如当云全部覆盖湖面以及其他区域则识别为常规天气系统造成的; 如云带起源于湖面, 且与上风方湖边界有一定距离, 则初步认定与湖效应有关。但是, KRISTOVICH and STEVE^[23] 开展研究时, 主要使用了白天的可见光图像, 而将红外云图作为辅助, 其分析重点是云形分类, 且仅使用了白天的卫星云图, 由于无法进行夜间观测, 统计有一定的局限性。

在渤海海面 and 渤海海峡, 地面观测资料很少; 同时, 由于雷达最低仰角的限制, 烟台多普勒雷达对海效应事件的监测在范围上也较为有限。根据 KRISTOVICH and STEVE^[23] 对此类事件的研究结果, 与常规天气过程相比较来说具有独特的云系特征。本文主要研究海效应事件的月季变化和日变化, 而不详细讨论其云带分类, 因此, 使用了红外云

图。从前期国外针对此类天气的卫星研究和个例分析来看,使用静止卫星红外云图可以较好地识别出此类天气过程。该研究中,借鉴了 HOLROYD^[22]、KRISTOVICH and STEVE^[23] 研究湖效应事件中的方法,使用静止卫星红外云图特征作为判别主要依据,从山东 2005 年 12 月 17 日静止卫星红外云图(图 2a)和高分辨率极轨可见光云图(图 2b)典型海效应事件个例分析来看,该方法也具有较好的效果。据此可以建立对这一类事件的判别标准,主要包括以下几个方面:

1) 在静止卫星的红外通道图像上,颜色为浅灰色(本研究使用的 IR 云图尽管使用了不同卫星的资料,但是经过了统一处理,经统计对比,在海效应

事件出现较多的冬季,色阶和亮温具有比较稳定的对应关系)。

2) 能够清晰地分辨出海效应事件中特有的云街特征(图 2b 中蓝框区域)。

3) 此类云系与系统性云系相对独立。此时山东半岛内陆一般受西北气流控制,为晴好天气,无云系覆盖。

4) 云系分布在渤海、黄海和山东半岛,且在上风方与海陆边界有一定距离的清晰边界,即存在 CFP(无云区,图 2b 中红框区域)。

5) 符合海效应事件冷平流天气形势特征,即对流层低层以西北气流为主。

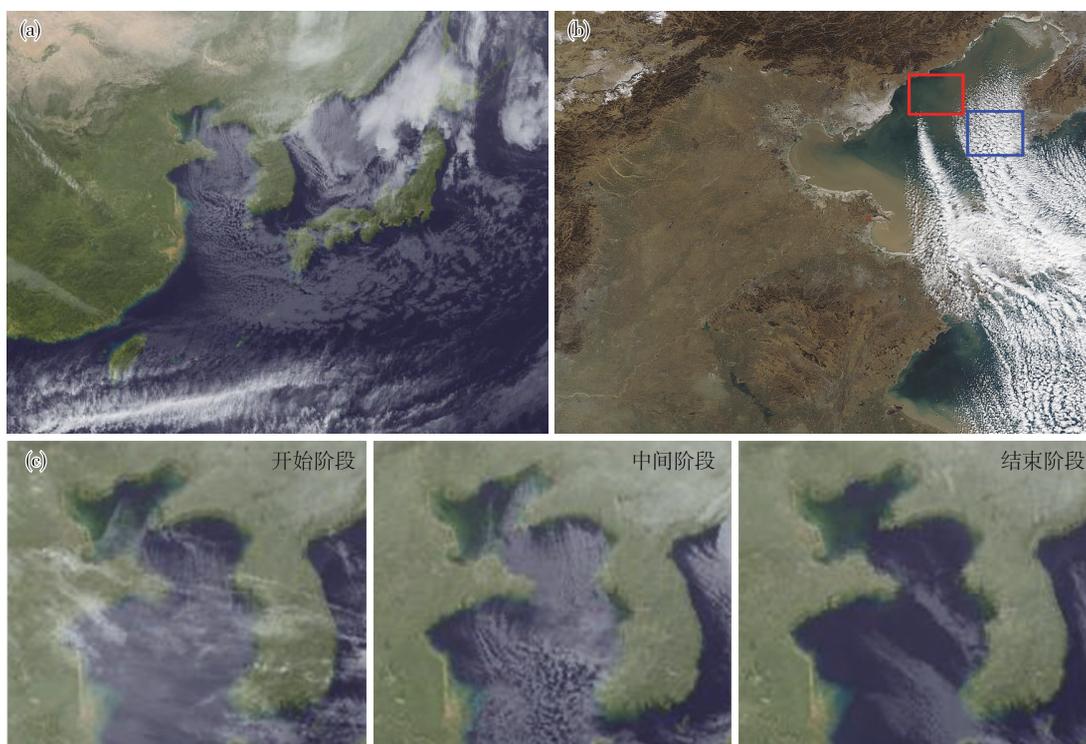


图 2 海效应事件过程典型时间 MTSAT 卫星红外(a)、Terra 卫星可见光(b)和过程红外(c;开始、中间和结束阶段)云图
Fig.2 MTSAT infrared cloud imagery (a), Terra satellite visible cloud imagery(b), and infrared cloud imagery of the process (c; the start, middle, and end phase) of a typical ocean-effect event

在整个海效应事件判别过程中,使用上述判别标准首先判断云区;接下来,判断在上风方向离岸的水面有无云区(CFP,图 2b 红框区域),如果云系与陆地相接,不存在无云区,则可判定为非海效应事件,否则可能为海效应事件;然后,判断云系是否存在海效应事件具有的云街等特征(图 2b 蓝框区域);此后,进行事件的开始和结束时间判别,海效应事件定于上述特征能够可辨识的时间开始,定于相关云系最终移出渤海海峡或消失时间结束

(图 2c);最后,结合天气图中冷平流天气形势特征,判定是否为海效应事件个例。

1.3 其他一些研究方法

根据海效应事件判别规则,通过对 12 a 的卫星云图进行个例识别,判断海效应事件的开始和结束时间,并对海效应事件的月变化、日变化进行分析。另外,结合地面观测资料,分析了海效应事件中影响到山东半岛沿岸并造成降水事件的气候特征。还使用再分析资料和 SST 等资料详细分析了海效应

事件发生的天气学背景条件及季节变化特征。

相关研究^[24]也表明,降水过程的天气学环境因素比较复杂,预报指标并不是唯一值,其随天气形势、季节变化等有较大差异。因此,本研究中使用概率密度和箱形图(box plot)等工具对相关指标从概率或统计学角度进行分析,以期更加客观和细致反映海效应事件的气候学统计规律。

2 海效应事件发生规律分析

为更好地深入分析渤海海效应事件的发生发展规律以及造成的影响,本文对海效应事件的持续时间、发生频次、季节差异、日变化和造成的降水特点进行了分析研究,初步总结了渤海海效应事件的基本规律。

2.1 海效应事件持续时间及频次特征

通过对渤海和渤海海峡的海效应事件的判别和统计,2000年9月1日—2012年3月31日12个冷季(研究时间为每年9月一次年3月)里,共发生了269个海效应事件。统计时,对海效应事件严格按照判别标准进行统计。判别统计时间精确到小时。

2.1.1 持续时间特征

由海效应事件持续时间的频次概率分布(图3a)可以看出,海效应事件持续时间最长的达9 d

(224 h),发生在2005年12月10—19日;最小的仅为4 h,平均持续约1.5 d(约35.3 h),主要持续时间在24 h左右(其中统计的中位数为24 h)。持续时间在24 h以下的海效应事件发生次数达129次,占47.6%,持续2~3 d的过程也较多,分别为80次和34次,持续时间在4 d、5 d的过程则明显减少,共20次;超过6 d的过程仅6次,占2.2%。这表明,海效应事件作为寒潮或大范围冷空气相伴随的天气,时间尺度并没有特别长,基本上还是发生在一次冷空气活动急剧降温阶段之中。也有连续的冷空气影响造成的海效应事件,但是较少。尽管这一类事件较少,由于持续时间较长,往往造成很大影响。

2.1.2 季节特征

分析海效应事件的逐月持续时间及发生频次(图3b)发现,渤海海效应事件从9月到次年的3月均可发生。从持续时间上看,11月、12月和1月持续时间较长,其中最长的12月,平均达到47 h,接近2 d时间。另外,从12月海效应事件持续时间分布来看,其持续时间的中位数仅为36 h,远小于其平均值47 h,表明12月的海效应事件持续时间总体不太长,仅有极端几次过程持续时间非常长,最长达224 h,这也与上面的分析相一致。而在秋季和春季持续时间一般都较短,平均持续时间在1 d以内。这表明持续时间也有很强的季节性变化。

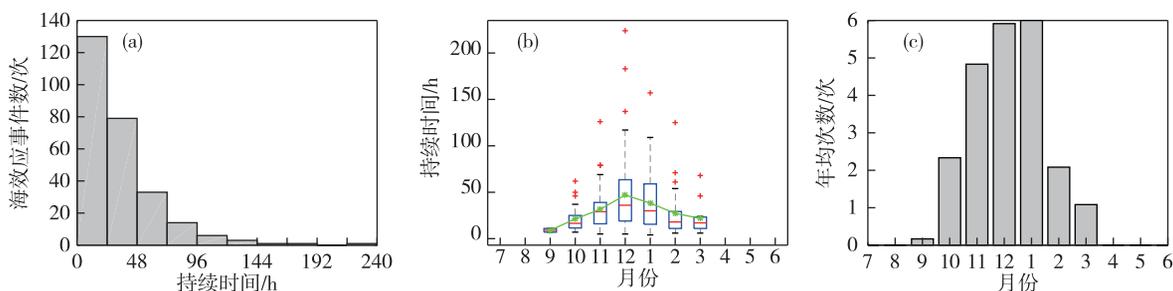


图3 海效应事件持续时间频次分布(a)、各月持续时间箱形图(b;绿线为平均值)和平均发生频次(c)

Fig.3 Frequency distribution of duration (a), box plot of monthly duration (b; green line shows the average value), and monthly mean frequency (c) of ocean-effect events

与持续时间相对应,渤海海效应事件同世界上其他类似的海或湖效应事件一致,均发生在冷季。其中,出现次数最多的是1月,平均每年达6次;其次是12月,达5.9次(图3c)。每年海效应事件出现总时间最长在12月,平均达11.6 d(278.3 h)。这与海效应事件产生的机理有关,由于海洋大的热容量,12月相对于次年1月有更高的海面温度,更大海气温差,也更容易持续较长时间。1月尽管也很高,但仅有9.6 d(229.3 h)。在其他月份,海效应

事件发生次数较少,从9月至次年3月都有可能发生,其中9月只形成了海效应云带,而未形成降雨。

2.2 海效应事件日变化特征

海效应事件一般发生在对流层低层,受下垫面影响很大。渤海又处于山东半岛和辽东半岛环抱之中,特殊的地理位置是否会造成渤海海效应事件有着与世界上其他地方不一样的日变化特征,需要进行深入研究。通过分析发现,渤海海效应事件也具有明显的日变化特征。2000—2012年的海效应

事件的统计分析表明,渤海海效应事件的日变化特征明显,在后半夜和上午出现的概率明显大于下午到前半夜。海效应事件出现频次一般在后半夜开始增多并一直持续,到上午 11 时左右达到最多。随后,海效应出现频次开始递减,一直到夜间 21 时左右达到最小(图 4a)。这与日本若狭湾附近冬季降雪的日变化总体上是一致的,统计发现该地区冬季降水强度最大出现在凌晨到上午前后^[25]。这一变化规律表明,渤海海效应事件具有很强的日变化特征,这很大程度上与太阳辐射对边界层的结构和环

流的影响有关。

另外,研究发现各月的日变化特征不尽相同。从出现最大频次的时间分布来看,9 月、10 月、11 月都集中出现在上午 10—11 时(图 4b-d);而 12 月最大频次出现两个峰值,一个在日出时间,即 06 时前后,另外一个在上午 10 时左右(图 4e);而 1 月、2 月、3 月最大频次出现时间明显提前,通常出现在太阳初升时的 05—07 时(图 4f-h)。但是,海效应事件日变化季节差异的原因还需要今后进一步深入研究。

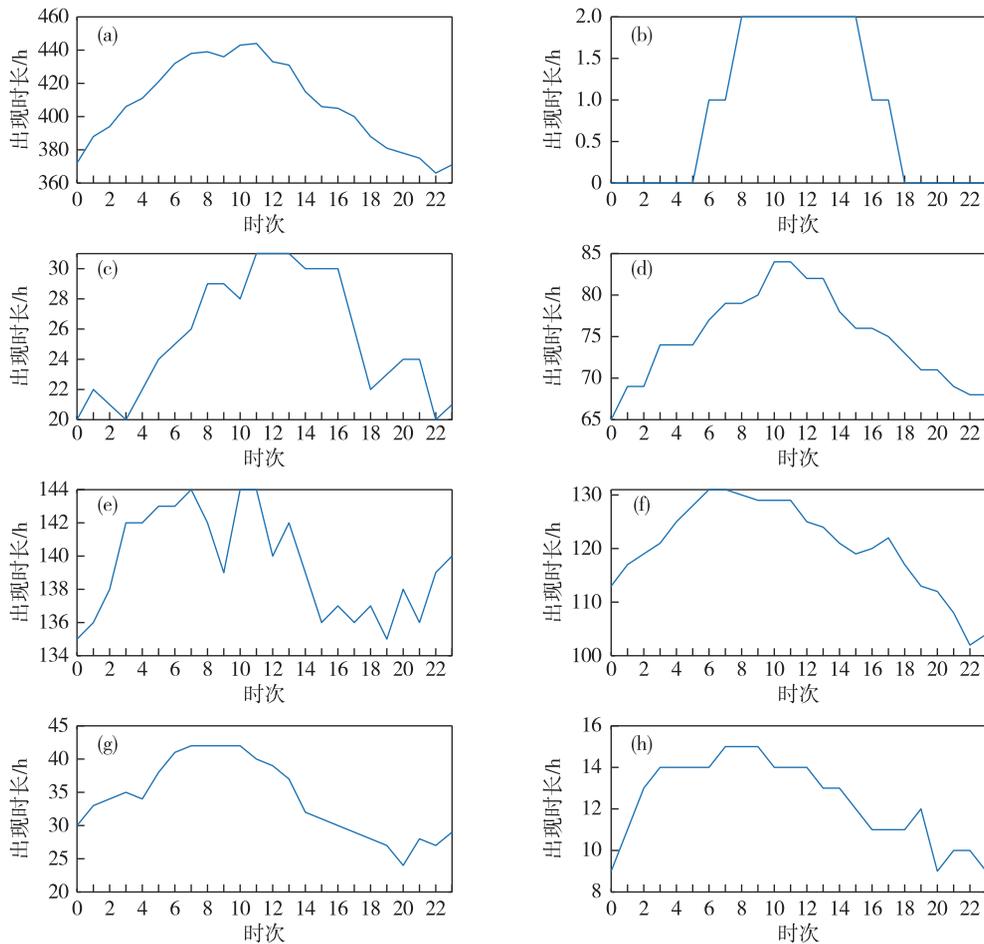


图 4 海效应事件日变化特征(a.合计,b.9月,c.10月,d.11月,e.12月,f.1月,g.2月,h.3月)

Fig.4 Diurnal variation characteristics of ocean-effect events (a. total, b. September, c. October, d. November, e. December, f. January, g. February, h. March)

2.3 降水特征分析

结合前面的判识和统计分析,基于山东省 123 个气象观测站降水资料,在这 12 年中查找到共有 135 个影响到山东半岛的海效应降水天气过程个例,在所有 269 个海效应事件中占了一半。

统计表明,渤海海效应事件造成的年平均降水量并不大,且区域差别非常明显。最多的是烟台的

牟平区和威海的文登区,每年平均都达到 28.8 mm;其次是烟台和威海市区分别为 28 mm 和 26.8 mm;其他区域顺次减少,位于半岛南部的青岛仅 0.4 mm(图 5a)。这与海效应事件的形成机理有很大关系,也与山东半岛丘陵地形有较强联系^[26]。

与世界上一些地区有相似的情况,海效应事件除了主要造成降雪以外,在气温较高的季节,同样

可以产生海效应降雨^[27]。图5b显示,海效应降雨出现在10月、11月、12月和3月,1月和2月没有海效应事件造成的降雨;其中,以11月产生海效应降雨为最多。这与海效应事件发生时环境温度较

高有关。9月只形成云,没有造成雨雪,这可能是受环流背景影响,此时冷空气比较弱,海气温差小,不足以产生降水。

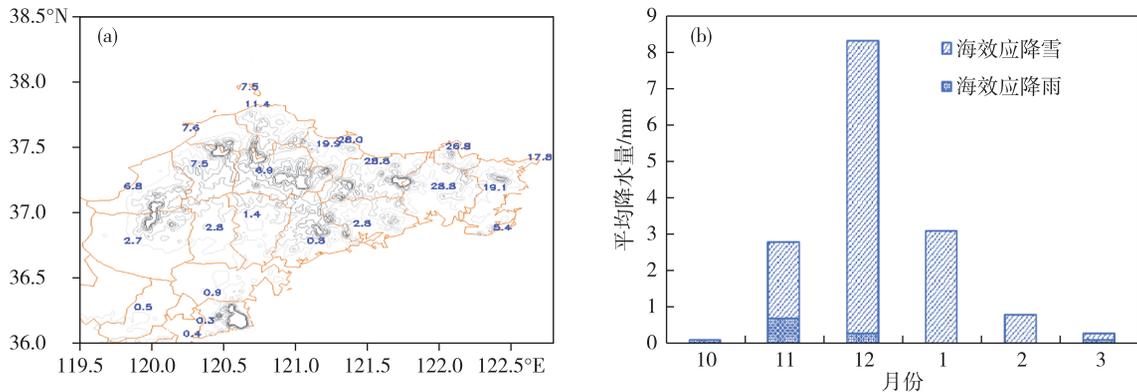


图5 年平均海效应降水量(a;单位:mm)、分月平均降雪和降雨量(b;单位:mm)

Fig.5 Annual mean ocean-effect precipitation (a; units: mm), monthly mean snowfall and rainfall (b; units: mm)

3 海效应事件的环境背景特征分析

海效应事件都发生在比较特定的环境下,一般为冷空气过境后,冷空气流经暖水面在边界层和对流层低层产生的浅对流。为更加准确认识海效应事件发生的天气学环境条件,应用NCEP FNL再分析资料、海面温度等数据进行了统计分析,并使用统计学方法对海效应发生时的动力场、热力场和水汽环境进行了研究。同时,还对这些环境的季节变化规律进行了分析。为从统计学角度更好地分析海效应事件的气候背景,避免单个例或个别区域造成的影响,使用了烟台北部近海区域作为分析区域(121.5°~122.5°E,37.5°~38.0°N),对相关要素值进行了区域平均。

3.1 动力场特征

因为海效应事件需要冷空气从暖洋面流过,因此风是其必须的条件之一。从大量的历史个例统计来看,渤海海效应事件发生时的850 hPa风速太大或太小都不容易造成海效应事件。而以850 hPa风速在11~12 m·s⁻¹时最容易发生。一般情况下海效应发生时风速在7~16 m·s⁻¹,占总数的87.4%(图6a)。相对于850 hPa风速,地面10 m风速则相对较小。海效应事件发生时,地面10 m风速一般在3~10 m·s⁻¹,占总数的84.9%。而6~7 m·s⁻¹时最容易发生海效应事件(图6b)。因此,预报海效应降雪风速指标需要有一个恰当的范围。本研究与前人研究结论比较契合。风速的增大有助于增强来自暖海表面湍流通量、热量、水汽的输

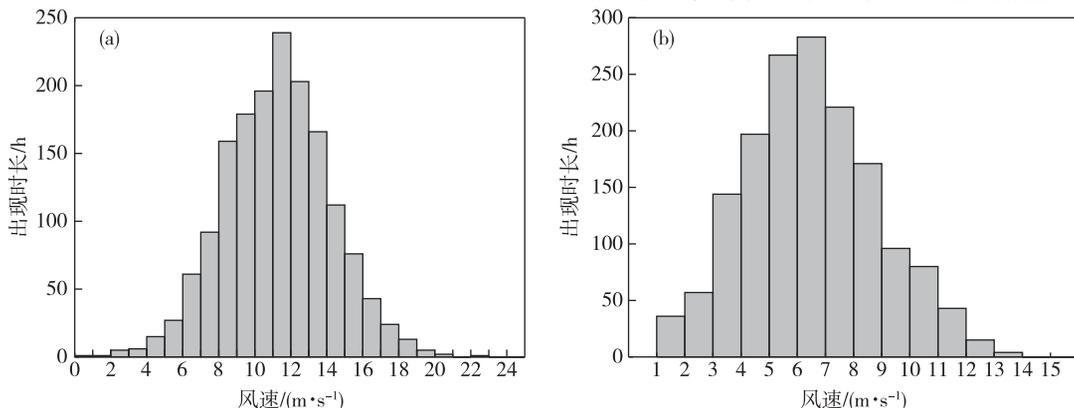


图6 海效应事件中850 hPa风速分布(a;单位:m·s⁻¹)和地面10 m风速分布(b;单位:m·s⁻¹)

Fig.6 Distribution of wind speed at 850 hPa (a; units: m·s⁻¹) and wind speed at 10 m (b; units: m·s⁻¹) in ocean-effect events

送和通过边界层的垂直混合。杨成芳研究也发现适度的风有利于产生辐合^[27],使得垂直速度和最大降水率增强。但是,在强风速下,风速的增大将缩短驻留的时间,这样会减少来自水表面热量和水汽改变大气的机会。

研究分析表明,当海效应事件发生时,环境风基本上都为北风,这时一般都伴有冷平流。但不同层次风向也有所不同,地面风风向较为发散,主要以西北风(约占 78.2%)为主,其中以 300°~360°为最多,占 65.1%;也有极少一部分情况下风力较弱时为弱偏西风(约占 8.7%)和东北风(约占 12.4%),所占的比例相对较少(图 7a)。

而当海效应事件发生时,850 hPa 的风向比地面更加集中,基本都为西北风,约占 94%;其中 300°~330°最多,占 54.3%(图 7b)。另一方面,850 hPa 的主导风向比地面主导更偏西北,这也表明对流层低层有冷平流存在,因为低层较强的温度梯度造成的热成风使水平风发生随高度的逆转。

对边界层大气的垂直切变分析,发现 850 hPa 与地面之间风速切变的方向有很大的变化,但基本在±60°之间,并没有明显的切变方向集中区域(图 8a)。切变风速差基本在 4~8 m·s⁻¹,约占总数的 72.1%(图 8b)。

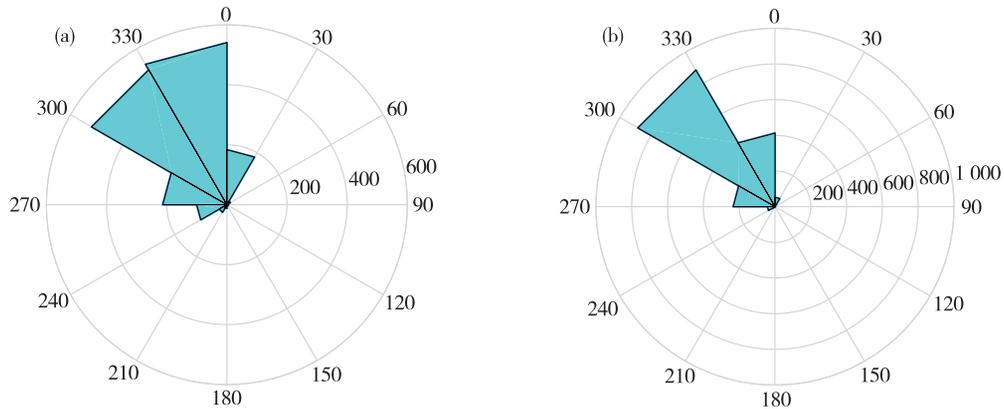


图 7 海效应事件发生时地面 10 m(a)和 850 hPa(b)风向出现频次
Fig.7 Occurrence frequency of wind direction at 10 m (a) and 850 hPa (b) in ocean-effect events

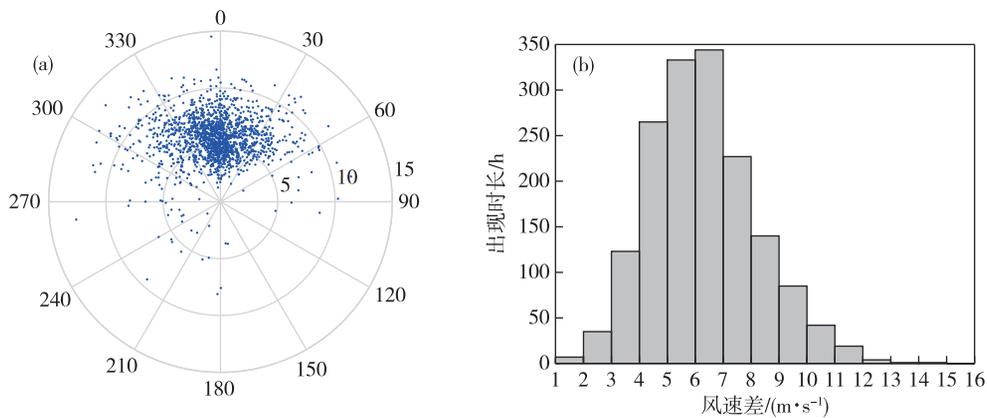


图 8 海效应事件发生时 850 hPa 和地面的风切变方向(a;单位:°)和切变风速差(b;单位:m·s⁻¹)
Fig.8 Wind shear direction (a; units: °) and shear wind speed difference (b; units: units:m·s⁻¹) at 850 hPa and surface in ocean-effect events

3.2 热力场特征

对于海效应事件,除了风的因素外,海气温差是最为关键的因素。研究表明,渤海海效应事件主要发生在 850 hPa 和海面温度差在 14~24 °C 的时候,约占 84.2%,其中又以 16~18 °C 最为集中,其平

均值为 18.4 °C。这比美国大湖 13 °C 的温差偏大。由于相对于我国渤海,美国大湖地区海拔相对较高,从而造成 850 hPa 和地面之间的高度差较小(图 9a)。

海气温差主要取决于两个方面,其中 850 hPa

温度主要在 $-15 \sim -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 9b), 其平均值为 $-11.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。海面温度主要在 $2 \sim 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 9c), 其平

均值为 $7.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而地面 2 m 温度则为 $-4 \sim -2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 较海温明显偏低。

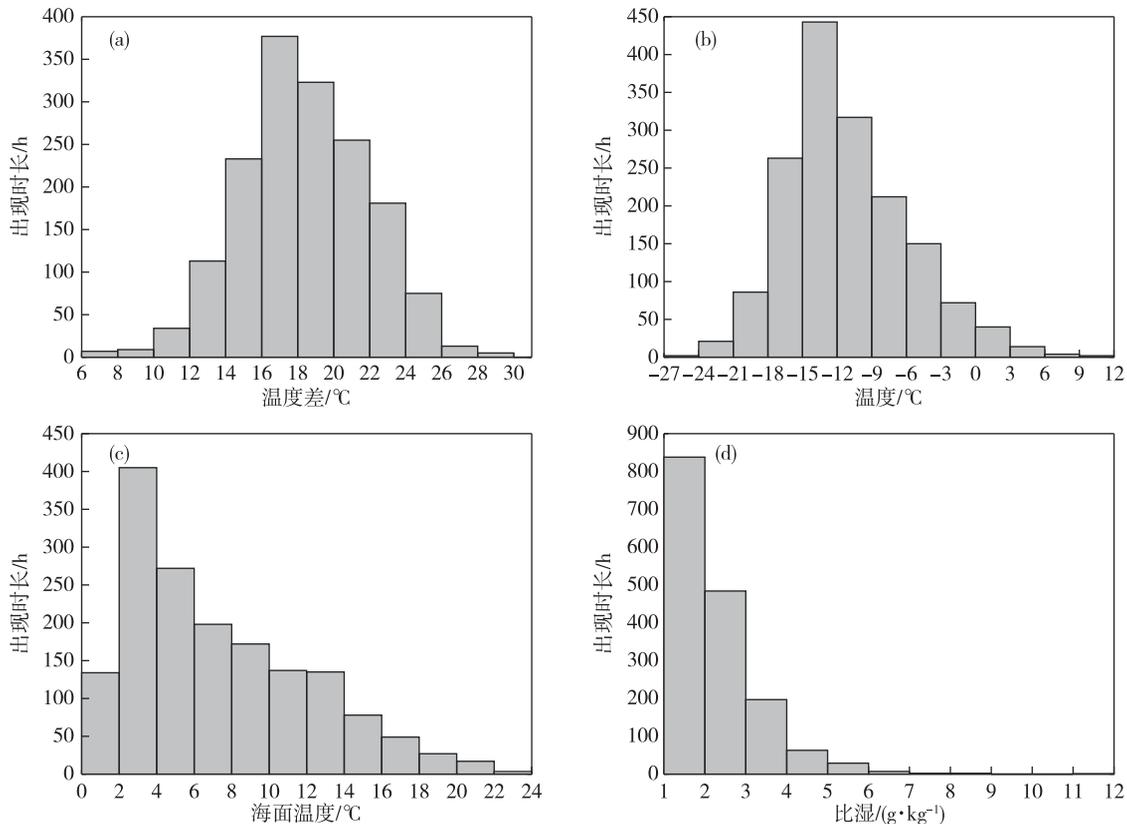


图9 海效应事件发生时海气温差(a;海面与850 hPa温度差,单位: $^{\circ}\text{C}$)、850 hPa温度(b;单位: $^{\circ}\text{C}$)、海面温度(c;单位: $^{\circ}\text{C}$)、地面2 m比湿(d;单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)分布

Fig.9 Distribution of air-sea temperature difference (a; SST minus temperature at 850 hPa; units: $^{\circ}\text{C}$), temperature (b; units: $^{\circ}\text{C}$) at 850 hPa, SST (c; units: $^{\circ}\text{C}$), and specific humidity (d; units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 2 m in ocean-effect events

3.3 水汽特征

湿度也是海效应事件发生的重要因素。海效应事件发生时,一般环境比湿比较小,其中81.5%的2 m比湿都小于 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;而平均比湿为 $2.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 9d)。海效应事件的个例分析表明,由于海效应事件的局地性较强,海效应事件中,比湿的分布有很大的差异性。

4 天气学要素的季节变化特征

为更好地理解海效应事件发生时的天气学背景,本文在研究天气学因子统计学特征的基础上,深入研究分析了其季节变化规律,以便能够更好地把握海效应事件在不同月份的预报指标阈值。

4.1 温度、湿度的季节变化

对海效应事件的环境因子统计分析发现,与海效应事件对应的大气环境因子也具有明显的季节变化特征。首先,850 hPa温度从9月的 $9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (中位

数,下同)开始,逐月下降,至每年的2月最低,为 $-15.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右;3月略有回升(图 10a)。同时,海面温度也有同样的变化趋势,但是降低幅度较850 hPa幅度略小(图 10b)。这造成850 hPa与海温的差异逐月变大,最大在12月,达 $19.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,而1—3月,有比较明显的降低(图 10c),这时海温也有比较明显的降低。相对于海温,地面2 m温度也有较明显的季节变化,并且比海温更低,在1月、2月达到最低,约 $-4.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 10d)。比湿同样存在明显的季节性变化,从9月开始,2 m比湿显著下降,2月达到最低,为 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 10e)。

这些因素的季节变化都与不同季节海效应事件发生时环境因子的变化紧密相关。在冷季前期,由于海面温度较高,此时,仅仅需要850 hPa温度有限降低就在边界层低层造成浅对流,形成海效应事件。但是,随着季节转换和海面温度降低,在850 hPa需要更低的温度才能形成海效应事件。

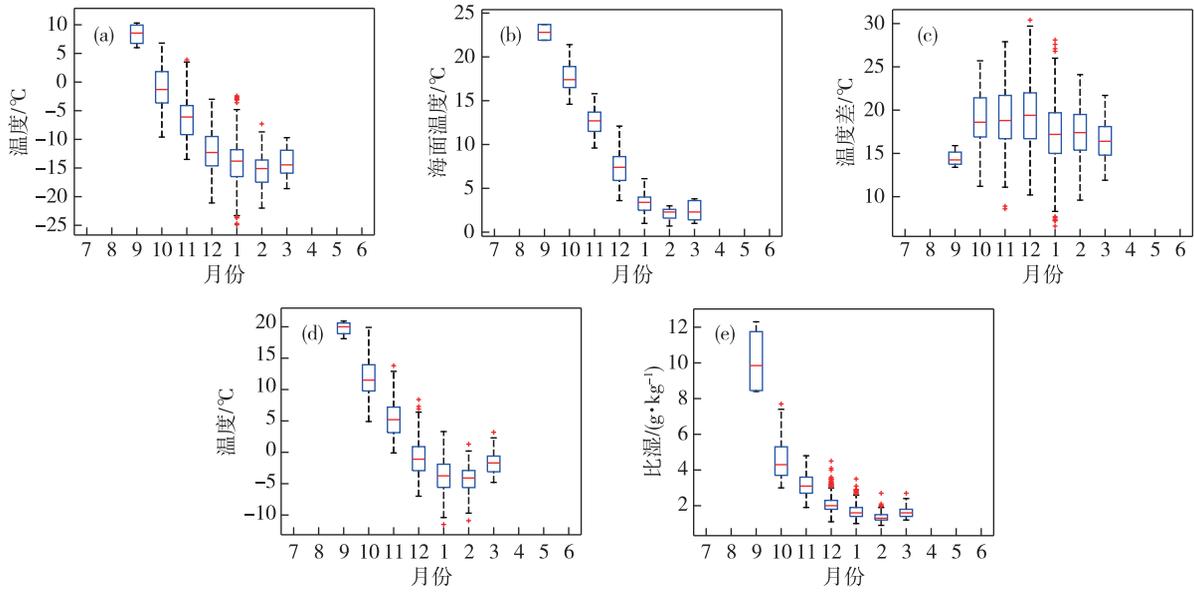


图 10 海效应事件发生时 850 hPa 温度 (a; 单位: $^{\circ}\text{C}$)、海面温度 (b; 单位: $^{\circ}\text{C}$)、海气温差 (c; 海面与 850 hPa 温度差, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、地面 2 m 温度 (d; 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 2 m 比湿 (e; 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 月变化

Fig.10 Monthly variation of temperature (a; units: $^{\circ}\text{C}$), SST (b; units: $^{\circ}\text{C}$), air-sea temperature difference (c; SST minus temperature at 850 hPa; units: $^{\circ}\text{C}$), temperature (d; units: $^{\circ}\text{C}$) at 2 m, and specific humidity (e; units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 2 m in ocean-effect events

4.2 风切变季节性特征

对于海效应事件来说,相对于温度等环境因素明显的季节性变化,风速和风切变的季节性差异不是特别明显。但是,也有一定的季节性变化。这主要表现在 850 hPa 风速有缓慢的增大趋势(图 11a),而地面风速有逐渐减小的趋势(图 11b)。这造成 850 hPa 和地面风切变偏差有增大的趋势(图 11c)。研究认为,这可能是引起海效应事件时,动力场和热力场配合的结果。当动力场较强时,一般的热力条件就可能触发海效应事件;与此相对应的,在热力条件较强时,不需要太强的风速即可以造成海效应事件的发生。

另外,对于海效应事件发生时风向的统计分

析,发现 850 hPa 风向各月差异不大,大部分月份风向均为西北风(即 $300^{\circ} \sim 330^{\circ}$),只有 9 月以西北偏北的 $330^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 为主(图 12a),也意味着 9 月的海效应事件更需要较明显冷空气配合。而地面则风向更偏北,在 $330^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 之间,只有 2 月、3 月为西北风(图 12b)。因此,850 hPa 和地面之间的风切变的方向基本为北风或西北偏北为主,只有 9 月风切变方向以西北为主。

5 结论与讨论

通过对 12 a 渤海海效应事件进行统计分析研究,发现了海效应事件的一些季节和日变化规律,同时分析了造成海效应事件的天气学背景因子的

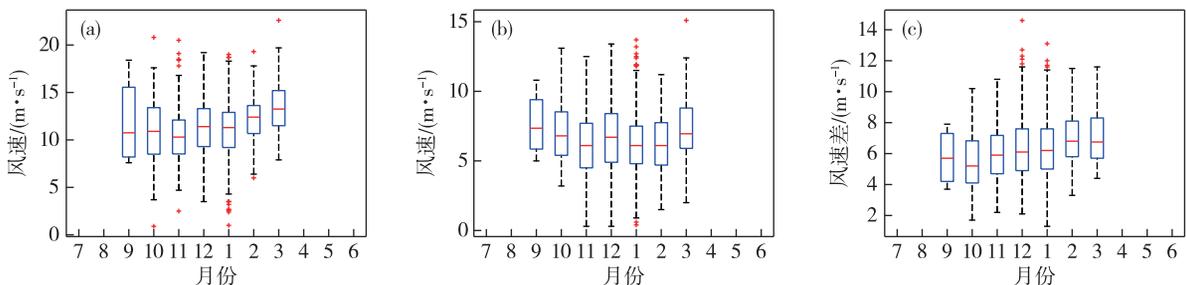


图 11 海效应事件中 850 hPa 风速 (a; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、地面风速 (b; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和切变风速差 (c; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 月变化

Fig.11 Monthly variation of wind speed (a; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850 hPa, wind speed (b; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at surface, and shear wind speed difference (c; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in ocean-effect events

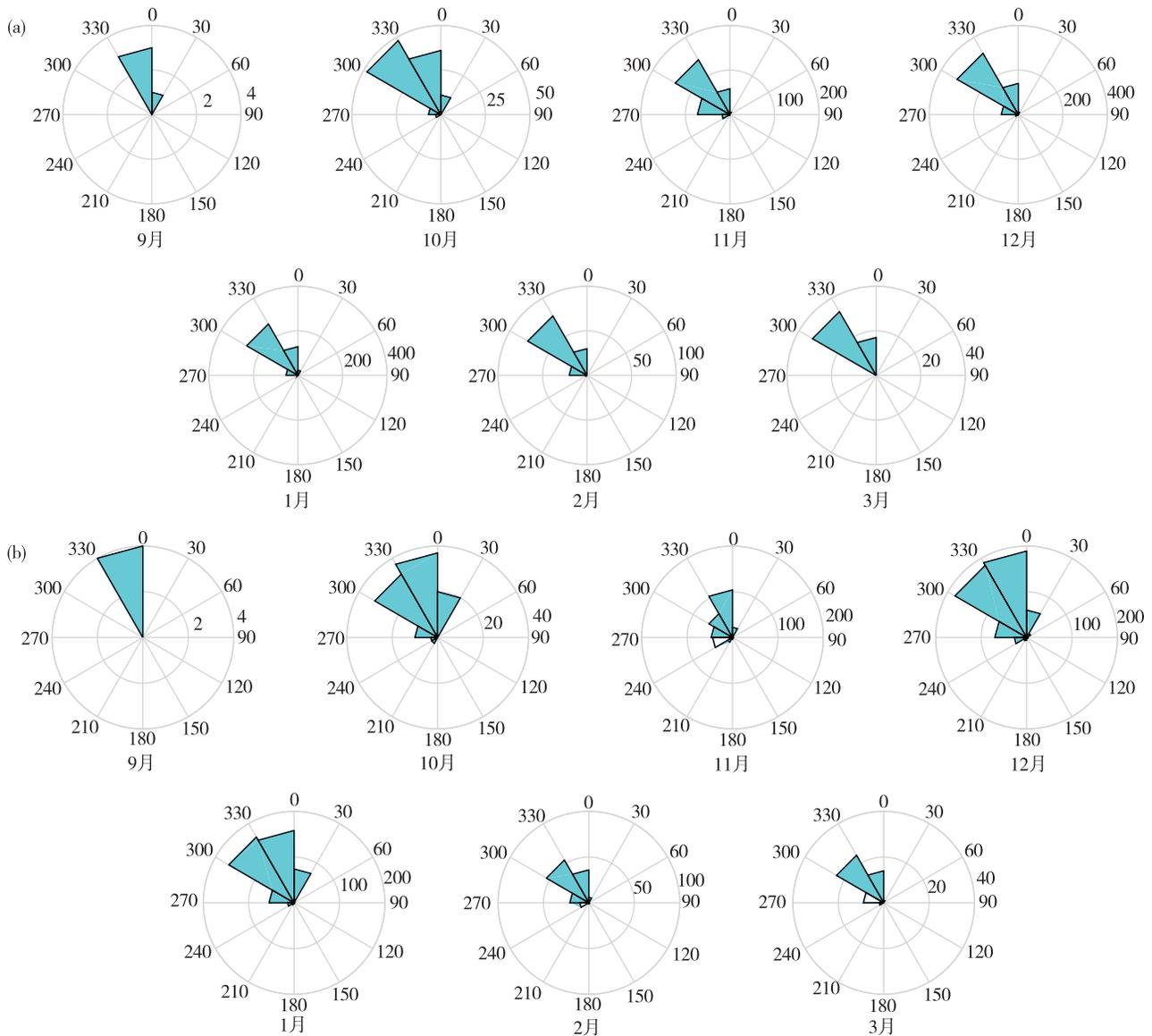


图 12 海效应事件中 850 hPa(a)和地面(b)风向逐月分布

Fig.12 Monthly distribution of wind direction at 850 hPa (a) and surface (b) in ocean-effect events

季节特征,在进一步细化前人研究的基础上,也在我国海效应事件日变化等方面有所发现,得出以下几点重要的结论。

1)渤海海效应事件一般持续时间不长,持续时间在 24 h 以下的海效应事件发生次数最多,占 47.6%。持续时间较长的海效应事件主要集中在 11 月一次年 1 月,这段时间发生次数也是最多的。

2)海效应事件的发生有较明显的日变化特征,清晨和上午出现的频次明显大于下午和前半夜,且随着季节的不同,海效应事件频次最高点出现在一天中不同时刻。

3)海效应事件中约有一半的情况下会造成山东半岛降水,并且具有很强的局地性,空间差异很

大。其中,在冷季海效应事件主要造成降雪,但个别情况下也有可能形成降雨。

4)另外,引起海效应事件的天气学环境因子也具有很强的月变化特征,其中 850 hPa 温度、海面温度、地面 2 m 温度和比湿均有较明显的月变化,而海气温差和风速则相对固定,变化不大。

本研究也说明,针对海效应事件的研究和预报工作,不仅需要进行大量的天气个例深入分析总结,还需进一步考虑和关注海效应事件的季节变化和日变化规律,并着重分析海效应事件发生背后的天气学因子的季节变化规律和机理。本文应用卫星红外云图等新资料对海效应事件规律特征进行了初步的气候学研究,这些结果进一步深化对渤海

海效应事件的认识,为预报思路的凝练和研究提供参考和借鉴。

该研究还比较初步,并且使用卫星红外云图识别的方法,仍有可能造成个例判别不准,且这些误差也可能会对文章的统计结果产生一定影响,今后可使用亮温等更加客观定量的方法研究海效应过程。同时,作者认为基于多部雷达数据拼图的研究将会使对海效应事件的认识更深入,需要进一步开展相关研究。

参考文献:

- [1] KRISTOVICH D A R, YOUNG G S, VERLINDE J, et al. The lake-induced convection experiment and the snowband dynamics project[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81(3):519-542.
- [2] ALCOTT T I, STEENBURGH W J, LAIRD N F. Great Salt Lake-effect precipitation: Observed frequency, characteristics, and associated environmental factors[J]. Wea Forecasting, 2012, 27(4):954-971.
- [3] LAIRD N, SOBASH R, HODAS N. Climatological conditions of lake-effect precipitation events associated with the New York State Finger Lakes[J]. J Appl Meteor Climatol, 2010, 49(5):1052-1062.
- [4] LAIRD N F, DESROCHERS J, PAYER M. Climatology of lake-effect precipitation events over Lake Champlain[J]. J Appl Meteor Climatol, 2009, 48(2):232-250.
- [5] MILRAD S M, GYAKUM J R, ATALLAH E H, et al. A diagnostic examination of the eastern ontario and western Quebec wintertime convection event of 28 January 2010[J]. Wea Forecasting, 2011, 26(3):301-318.
- [6] SHIMIZU N, UCHIDA A. An observational study of organized snow echo over the Japan Sea[J]. J Meteor Soc Japan, 1974, 52(3):289-299.
- [7] LEE S H, RYU C S. Influence of continuous satellite-based SST distribution on heavy snowfall events over the Korean Peninsula [J]. Int J Remote Sens, 2010, 31(11):2853-2883.
- [8] KINDAP T. A severe sea-effect snow episode over the city of Istanbul[J]. Nat Hazards, 2010, 54(3):707-723.
- [9] 周淑玲,朱先德,符长静,等.山东半岛典型冷涡暴雪个例对流云及风场特征的观测与模拟[J].高原气象, 2009,28(4):935-944.
- [10] 张黎红.大连地方性冷流降雪成因分析[J].辽宁气象, 2004(4):12-13.
- [11] 陈雷,戴建华,韩雅萍.上海地区近10年冷流降雪天气诊断分析[J].气象,2012,38(2):182-188.
- [12] 尹承美,于丽娟,高帆.秋末冬初济南两次暴雪过程对比分析[J].海洋气象学报,2013,33(1):11-16.
- [13] 赵海军,张芹,王庆华.2014年鲁南一次暖切变暴雪过程的诊断分析[J].山东气象,2015,35(3):7-12.
- [14] 杨成芳,刘畅,郭俊建,等.山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J].海洋气象学报,2017,37(1):73-83.
- [15] 李洪业,徐旭然.冷流低云降雪成因的分析[J].气象, 1995,21(12):21-24.
- [16] 杨成芳,陶祖钰,李泽椿.海(湖)效应降雪的研究进展[J].海洋通报,2009,28(4):81-88.
- [17] 李刚,党英娜,袁海豹.烟台冷流强降雪天气预报指标统计分析[J].山东气象,2007,27(3):24-36.
- [18] CARPENTER D M. The lake effect of the Great Salt Lake: Overview and forecast problems [J]. Wea Forecasting, 1993, 8(2):181-193.
- [19] NIZIOL T A, SNYDER W R, WALDSTREICHER J S. Winter weather forecasting throughout the Eastern United States. Part IV: Lake effect snow[J]. Wea Forecasting, 1995, 10(1):61-77.
- [20] REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C Y, et al. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. J Climate, 2007, 20(22):5473-5496.
- [21] 袁松,程华,王东勇,等.模式再分析与实际探空资料的对比分析[J].气象科学,2012,32(1):62-67.
- [22] HOLROYD E W III. Lake-effect cloud bands as seen from weather satellites [J]. J Atmos Sci, 1971, 28(7):1165-1170.
- [23] KRISTOVICH D A R, STEVE R A III. A satellite study of cloud-band frequencies over the Great Lakes[J]. J Appl Meteor, 1995, 34(9):2083-2090.
- [24] 周雪松,吴炜,孙兴池.山东暴雨天气学预报指标的统计特征分析[J].气象,2014,40(6):744-753.
- [25] NOH Y J, LIU G S, BALAS N, et al. Diurnal variations of snow precipitation in Wakasa Bay during winter[J]. J Meteor Soc Japan, 2004, 82(4):1117-1128.
- [26] MINER T J, FRITSCH J M. Lake-effect rain events[J]. Mon Wea Rev, 1997, 125(12):3231-3248.
- [27] 杨成芳.渤海海效应暴雪的多尺度研究[D].南京:南京信息工程大学,2010.