

陈思蓉, 朱伟军, 周兵. 中国雷暴气候分布特征及变化趋势 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (5): 703-710.

中国雷暴气候分布特征及变化趋势

陈思蓉^{1,2}, 朱伟军², 周兵³

(1. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学 遥感学院, 江苏 南京 210044; 3. 中国气象局 国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 利用 1951—2005 年雷暴和冰雹观测资料, 统计出中国 743 个站点的雷暴以及冰雹发生日数。统计结果表明, 中国雷暴和冰雹等强对流天气发生的概率分布具有明显的地理和日变化差异, 日间与夜间强对流天气分布变化很大。中国雷暴发生频繁的区域共有 5 个, 分别是青藏高原东部、云南中南部、四川境内、华南两广地区及新疆西部, 各区域雷暴日数存在不同的年际变化特征。全国雷暴日数除青藏高原地区略有上升外, 总体呈下降趋势。冰雹发生频繁的区域主要在青藏高原祁连山地区, 天山地区和华北北部为冰雹活动的次频繁中心。冰雹日的年际变化也因区域不同而有所区别。由中国雷暴日数的 REOF 分析可以看出, 华南、长江流域等地区都存在独立的异常时空分布, 与特定的大尺度环流密切相关。

关键词: 强对流天气; 雷暴; 冰雹; 合成分析; REOF 分析

中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097 (2009) 05-0703-08

Climate Characteristic and Variation Tendency of Thunderstorm in China

CHEN Si-rong^{1,2}, ZHU Wei-jun², ZHOU Bing³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NU IST, Nanjing 210044, China;
2. School of Remote Sensing, NU IST, Nanjing 210044, China;
3. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the observations from 1951 to 2005, the occurring days of thunderstorm and hail at 743 stations in China are examined. Results show that the occurring probability distributions of thunderstorm and hail in China have obvious differences of geographic location and daily variation. Distribution of severe convection weather changes obviously during the day and night. The thunderstorm occurs frequently in five regions of China, namely eastern Qinghai-Xizang Plateau, middle and south of Yunnan, Sichuan, South China and west of Xinjiang, where there exists different interannual variations for the thunderstorm days of different regions. Except slight increasing in Qinghai-Tibet Plateau, the thunderstorm days present decreasing tendency in the other areas of China. The hail occurs frequently in the Qinghai-Xizang Plateau and Qilian Mountains, secondly in Tianshan Mountains and northern part of North China. The interannual variation of hail days is also different in different regions. REOF analysis results show that the thunderstorm days anomalies exist independent temporal and spatial distributions in South China, the Yangtze River Basin and so on, which are closely related to the specific large-scale circulation.

Key words: severe convection weather; thunderstorm; hail; composite analysis; REOF analysis

收稿日期: 2008-01-02; 改回日期: 2008-04-23

基金项目: 灾害天气国家重点实验室资助项目 (2007LASW07); 中国气象局推广项目 (CMATG2006M02); 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY(QX) 200706026)

作者简介: 陈思蓉 (1982—), 女, 广西桂林人, 硕士, 研究方向为短期气候预报及灾害性天气, chensirong@sohu.com.

0 引言

强对流天气常与突发性暴雨、冰雹和雷雨大风等剧烈天气现象相联系,给国民经济建设和人民生命财产带来重大损失。雷暴和冰雹是常见的强对流天气,对其天气气候特征进行统计和分析,有助于了解这些强对流天气发生的气候规律,也有助于进一步探讨强对流天气的发生发展机制,为提高强对流天气潜势预报提供有效支持。

国内外很早就开始关注雷暴等强对流天气的特征,指出强对流天气的难以预测性及不同的环流形势会出现不同的强对流天气特征^[1-2]。张家诚^[3]对中国雷暴、冰雹的地理分布、季节变化、初终日等做了概括。张敏锋等^[4]使用中国 104 个台站 30 a 雷暴资料,分析了中国雷暴天气气候特征,指出大部分地区雷暴频数在波动中减少。影响强对流天气的因素很多,地形、热力条件和大气环流等都会对雷暴和冰雹的发生有影响。不同的地区,影响因子也不同,要更好地揭示强对流发生的机理,就必须对不同区域的强对流事件分别考虑。Changnon 等^[5]将大于 20 a 的雷暴事件划分为 6 种类型及 12 个不同地域。国内很多文献分析了中国不同地区雷暴^[6-11]、冰雹^[12-14]天气气候特征,表明不同地区雷暴和冰雹有着不同的年际变化特征和周期性。因此,对中国雷暴等强对流天气发生异常区域进行气候特征及变化趋势的研究,能更好地为中国强对流的预报、防御及进一步分析强对流成因以及与大尺度环流的关系打好基础。

1 资料和方法

1.1 资料来源

雷暴与冰雹的站点资料来自中国国家气象信息中心,共有 743 站,资料长度为 1951—2005 年(1956 年以后资料较完整),其中冰雹资料只选取了其中 705 站的数据,并对资料进行了质量控制。

采用 NCEP/NCAR 全球 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 再分析逐月平均网格资料,时间范围的选取与雷暴和冰雹的站点资料相同。

1.2 资料处理

计算雷暴(冰雹)发生的总日数,分别统计出日间发生雷暴(冰雹)的日数和夜间发生日数,并算出雷暴(冰雹)发生的气候态概率及雷暴(冰雹)日的均方根误差。早期的资料因夜间无人值守而不完整,为了使结果更准确,在计算日间和夜间发生概率

时,只选取了 1976—2005 年 30 a 的资料进行计算。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{y=1}^n (x_y - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{y=1}^n (x_y - \bar{x})^2 \sum_{y=1}^n (y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: r_{xy} 表示雷暴(冰雹)的气候趋势系数; n 为年数; x_y 是第 y 年雷暴(冰雹)日数。年雷暴(冰雹)日数的趋势定量变化可用一次线性方程表示,即

$$x_y = a_0 + a_1 y, \quad y = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中: $10 \cdot a_1$ 为气候倾向率^[17]。选取 673 个站大于 25 a 的资料,用公式(1)、(2)计算全国雷暴(冰雹)的气候倾向率,考察全国雷暴(冰雹)总体的时间变化趋势。雷暴时空分布的特征是基于 REOF 分析^[15-16]来实现的。

用 NCEP/NCAR 资料,选取了 6 月的雷暴日高值和低值年进行统计合成分析。考察雷暴等强对流天气正、负异常时环流形势、风场及温度场的异常,并求出雷暴日与不稳定能量 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ 以及垂直风切变 $\frac{\partial v}{\partial p}$ 的相关,初步探讨影响雷暴发生的动力场和热力场特征。

2 结果与分析

2.1 雷暴发生概率的空间分布

雷暴活动存在很强的季节性和日变化特征。一般来说,一年之中,冬季最少,夏季最多;一天之中,白天多,夜间少^[11]。由中国夏季雷暴发生概率的空间分布(图 1a)可以看到,青藏高原中东部、川西高原、云南、贵州南部、广西、广东、江西东南、福建等地夏季雷暴发生概率都在 30% 以上,是雷暴发生频繁的地区。其中,川西高原、云南南部、广西南部、广东西部和海南夏季雷暴发生概率达 40%,云南南部、两广南部和海南存在大于 50% 的最高值区。另外,新疆西部小部分地区夏季雷暴发生概率达 30%,也是雷暴较容易发生的区域。

青藏高原中东部、四川西部、云南、湖南中南部、广西东南、广东、江西、福建等地均是雷暴日变率的大值区(图 1b),雷暴日变率大于 10 d,其中最大值位于西藏东部的高原地区,雷暴日变率大于 15 d,该地区是中国雷暴变化最显著的区域,导致这种异常的原因必然与大尺度环流的异常活动有关,将在另文中加以探讨。

从日变化特征来看,不同地区在日间和夜间发生雷暴的概率也存在很大差异。由日间和夜间雷暴

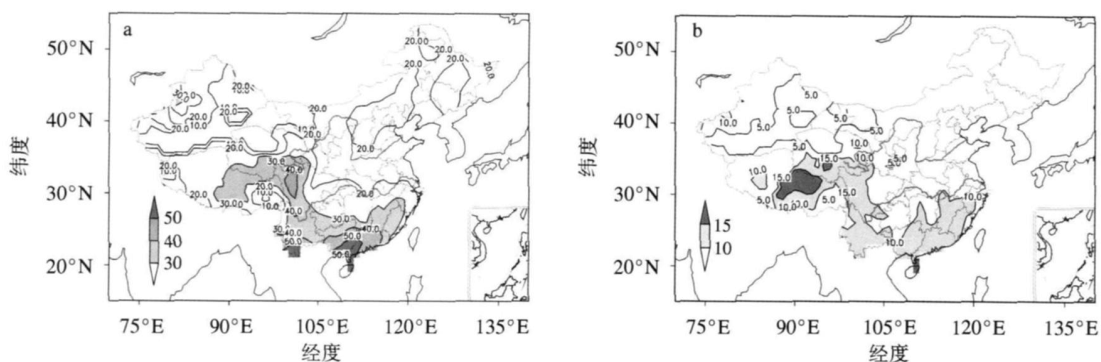


图 1 中国雷暴发生概率 (a; 阴影表示雷暴发生概率较大区域; 单位: %) 与雷暴日均方根误差 (b; 阴影表示雷暴发生变率较大区域; 单位: d)

Fig 1 (a) Thunderstorm occurring probability (%) and (b) root mean square error(d) of thunderstorm days in China (Shadings indicate that the probability and root mean square error are large)

发生概率空间分布 (图 2) 可见, 高原东部、四川西部、云南南部、广西东北部、广东、福建西部的雷暴发生概率在日间较大, 大于 30%, 其中, 云南南部、两广南部和雷州半岛大于 40%, 是日间雷暴的高发区。而夜间的情况较日间变化较大, 雷暴发生概率明显减少, 大值区位于四川南部、云南南部的小部分地区以及广西西南部, 概率值达 20%, 其中广西南部小部分地区达 30%。这种差异产生的原因, 一个是中国热带和副热带地区雷暴发生主要是因为日间太阳辐射强, 对流活动旺盛导致, 而夜间对流活动减弱, 雷暴发生概率自然减少, 其部分原因还与夜间雷暴记录的观测缺失有关。

2.2 冰雹发生概率的空间分布

由冰雹发生概率的空间分布 (图 3a) 可见, 青藏高原、青海中南部、四川西北部、甘肃中南部地区是中国冰雹的高发区, 发生概率达 4%, 其中高值区位于西藏东部的高原地区, 概率大于 12%。此外, 新疆的西部小部分地区也是冰雹发生较多的地区, 发

生概率达 4%。另外, 内蒙古、河北北部以及大小兴安岭、长白山区也是中国冰雹发生概率较大地区, 其中华北北部的发生概率值达 2%。由此可见, 冰雹的发生多集中在高原、山区, 地形对其发生影响很大。

由冰雹日的均方根误差分布 (图 3b) 可见, 青藏高原不但是冰雹发生的高概率区, 而且该地区冰雹日均方根误差也很大, 有一个大于 12 d 的高值区, 其他大值区与冰雹发生概率分布一致, 主要分布在西藏中西部、青海中南部、四川西北部、甘肃中部地区, 均方根误差达 8 d, 新疆西部、河北北部、内蒙古北部地区均方根误差也大于 2 d, 说明冰雹天气发生受很多条件的影响, 即使在相同的地区, 其发生的强度和频率也会有较大的变化, 这也是冰雹、雷暴等强对流天气难预报的原因之一。

由冰雹发生概率的日间分布 (图 4a) 可发现, 日间青藏高原中东部是冰雹主要发生区, 概率大于 12%, 另一个次频繁区在新疆西部小部分地区以及

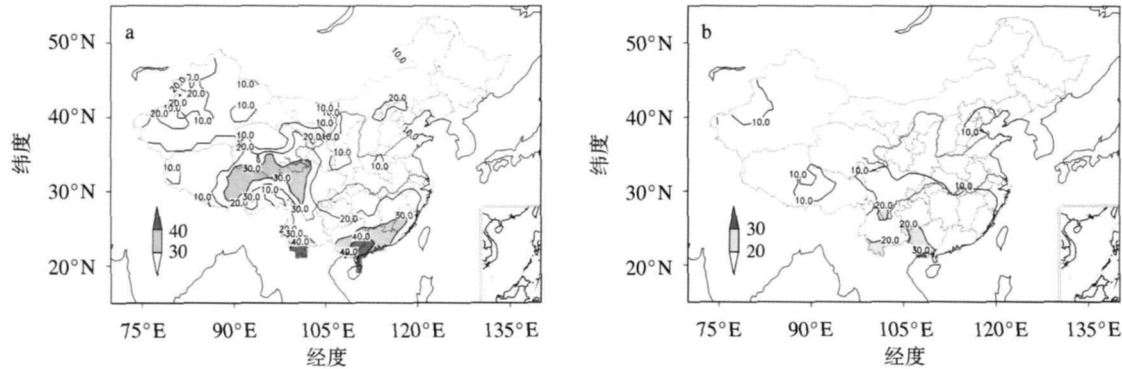


图 2 日间 (a) 和夜间 (b) 雷暴发生的概率 (阴影表示概率大值区; 单位: %)

Fig 2 Thunderstorm occurring probability (%) in (a) daytime and (b) nighttime (Shaded areas indicate the large probability)

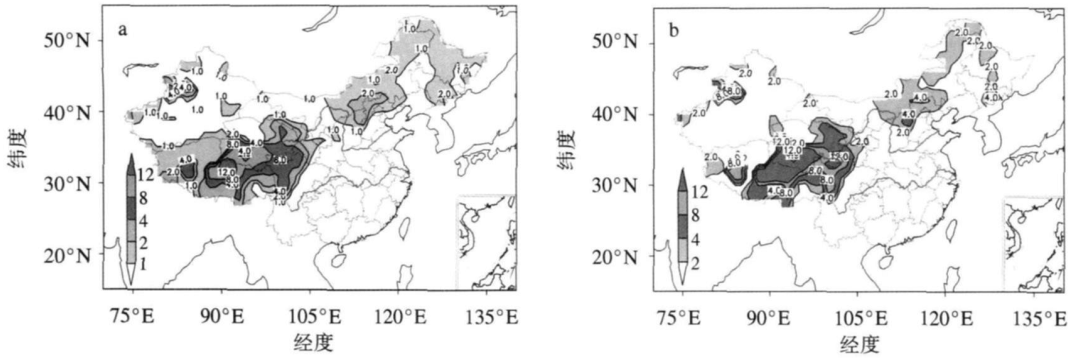


图 3 中国冰雹发生概率 (a: 阴影表示冰雹发生概率较大区域; 单位: %) 与冰雹日均方根误差 (b: 阴影表示冰雹发生变率较大区域; 单位: d)

Fig 3 (a) Hail occurring probability (%) and (b) root mean square error(d) of hail days in China (Shaded areas indicate that the probability and root mean square error are large)

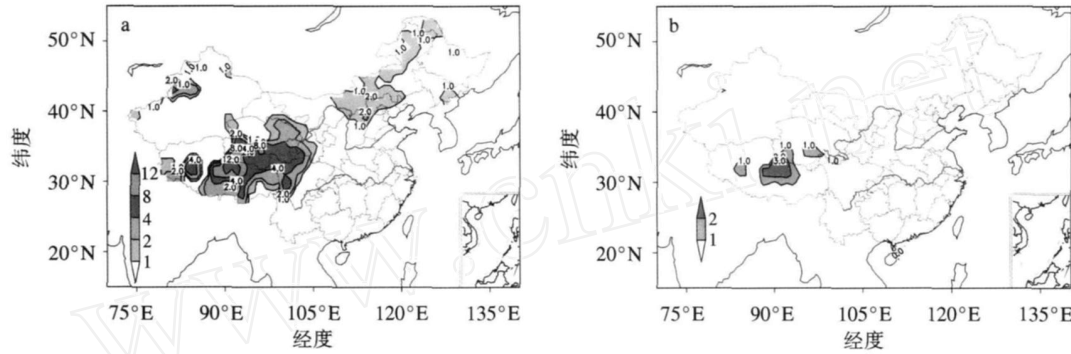


图 4 日间 (a) 和夜间 (b) 冰雹发生的概率 (阴影表示概率大值区; 单位: %)

Fig 4 Hail occurring probability (%) in (a) daytime and (b) nighttime (Shaded areas indicate the large probability)

华北和大小兴安岭地区。夜间冰雹发生的概率急剧减少, 只有高原地区存在一个概率大于 3% 的地区 (图 4b)。

2.3 雹暴的年际变化特征

利用全国大于 25 a 的雷暴、冰雹日数资料计算得到了雷暴、冰雹日的气候倾向率分布 (图 5)。由图 5 可见, 雷暴日数除了在西藏中部、青海中部呈较明显的增加趋势外, 其他各地基本呈递减趋势, 尤其在青海东南部、云南西部和东部、广西大部、广东西部等地区明显减少; 冰雹日数在西藏中部地区增加趋势明显, 在西藏南部及青海西南部、内蒙中部地区呈现递减趋势。

影响强对流天气发生的因子很多, 不同地区、不同环流条件下, 雷暴和冰雹天气发生的情况也不一样。对雷暴和冰雹发生高概率的区域及变率大的区域进行单独分析, 以考察其中的变化趋势。

对雷暴而言, 本文关注华南地区 (108 ~ 112 °E, 20 ~ 24 °N)、云南中南部 (98 ~ 103 °E, 21 ~ 26 °N)、

四川西部 (98 ~ 102 °E, 29 ~ 34 °N)、青藏高原东部 (86 ~ 96 °E, 28 ~ 35 °N) 和京津冀地区 (114 ~ 117 °E, 38 ~ 41 °N) 共 5 个区域。由 5 个区域的雷暴日年际变化 (图 6a-e) 可见, 华南地区、云南南部和四川西部的雷暴日有减少趋势, 但这些减少趋势并不都是线性的。华南地区的雷暴日在 1979 年有一个突然减少的阶段, 具有明显的年代际变化特征 (图 6a)。云南南部、四川西部的雷暴日有线性减少趋势 (图 6b, c), 但夜间变化不大 (图略)。青藏高原的雷暴日存在明显的 9 a 周期的年际变化特征 (图 6d), 但这一特征在夜间表现得并不明显。京津冀地区的雷暴日在 20 世纪 90 年代以前是逐渐减少的, 90 年代以后又有逐渐上升的趋势 (图 6e), 这可能与城市化进程加快、城市热岛效应影响有关^[9-11]。

对冰雹而言, 划分了青藏高原 (86 ~ 96 °E, 28 ~ 35 °N)、川西高原 (98 ~ 103 °E, 30 ~ 34 °N) 和华北地区 (112 ~ 117 °E, 39 ~ 43 °N) 共 3 个区域 (图略)。青藏高原地区的冰雹年际变化不大; 川西高原的冰雹

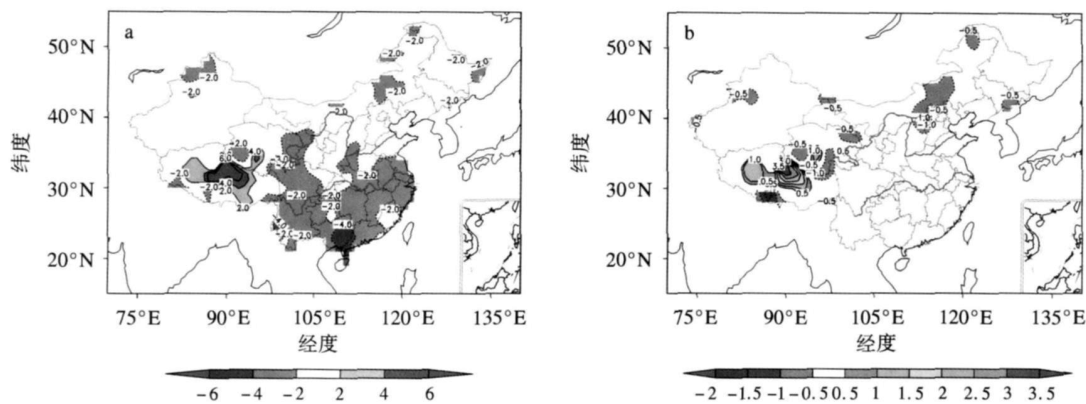


图 5 中国雷暴日 (a)和冰雹日 (b)的气候倾向率 (阴影为趋势变化明显区域;单位: d/(10 a))
Fig 5 Climate trend rate(d/(10 a)) of (a) thunderstorm days and (b) hail days in China (Shaded areas indicate that the trend rates significantly change)

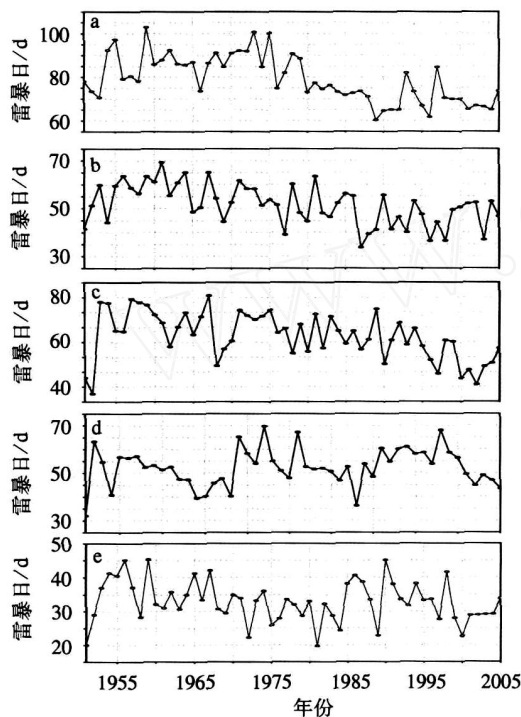


图 6 华南地区 (a)、云南中南部 (b)、川西高原 (c)、青藏高原 (d)和河北京津地区 (e)雷暴日的年际变化
Fig 6 Interannual variations of thunderstorm days in (a) South China, (b) middle and south of Yunnan, (c) West Sichuan Plateau, (d) Qinghai-Xizang Plateau and (e) Hebei-Beijing-Tianjin area

日在 20 世纪 80 年代以前逐渐增多,80 年代之后又开始减小,在进入 21 世纪时又开始略微增加;华北地区冰雹日呈逐年递减趋势,但主要是日间冰雹日减少、夜间冰雹日变化不大。

2.4 区域雷暴日的异常环流特征

雷暴日存在年际变化特征,为了更好地与环流

建立联系,选取雷暴发生较多的华南地区的 6 月雷暴日的年际变化来考察雷暴发生高、低值年的环流特征。由华南地区 6 月雷暴日的年际变化 (图略) 可知,雷暴日数量在 20 世纪 80 年代以后有明显减少的趋势。分别选取 6 个正、负异常年,进行环流合成分析。

由雷暴日正异常年时 500 hPa 高度异常场 (图 7a) 可见,中国大部分地区都是负值区,在蒙古西侧靠近新疆的地方有一个大的负中心,表示正异常年该地区 500 hPa 位势高度偏低;中国黑龙江以北、贝加尔湖以东则是大片的正值区。雷暴日负异常年时 (图 7b),在巴尔喀什湖以北是一个很大的正值区,中国北方、新疆、青海、甘肃、内蒙及黑龙江地区都是负值区,但负值很小,中国南方大部分地区是正值区,在黄海有一个大于 10 gpm 的正值中心。从正负异常年差值分布 (图 7c) 来看,雷暴正异常年副热带高压减弱,中高纬阻塞高压增强,中国大部分地区 500 hPa 位势高度偏低。

由雷暴日高低值年的 850 hPa 风场差值分布 (图 8a) 可以看到,低纬地区在正异常年时,南海地区有一个反气旋风场,孟加拉湾有一支偏南气流,这两只气流在中国华南地区汇合,造成华南地区西南风增强。此外,25°N、65°~75°E 也有一支加强的偏西气流。中高纬蒙古地区有一个气旋性环流,表明这一地区有一个加强的槽。

由雷暴日高低值年的 θ_{se} 差值分布 (图 8b) 可见,中国青藏高原、青海、甘肃中部、四川西部、云南西部、广东、福建南部均为 θ_{se} 差值的负值区,高值中心位于西藏与青海交界处。此外,山西、河北、山东北部地区、辽宁、吉林北部一带也是一个小的负值

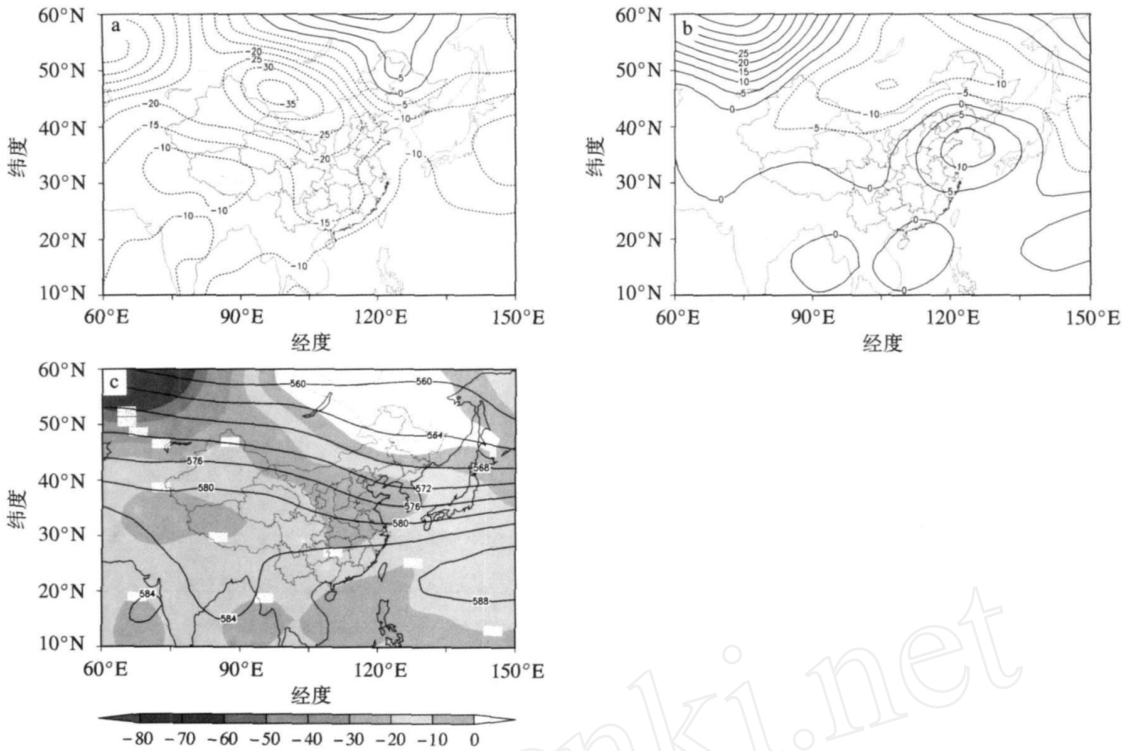


图 7 华南地区 6 月雷暴日高值年 (a; 单位: gpm)、低值年 (b; 单位: gpm) 的 500 hPa 位势高度异常场及其差值分布 (c; 阴影区表示差值, 单位: gpm; 等值线为气候平均值, 单位: dagpm)

Fig 7 Composite 500 hPa geopotential height anomalies (gpm) in (a) the strong and (b) weak thunderstorm years in South China in June, and (c) their differences (shadings; gpm) (isoline denotes the climatological mean by units of dagpm in Fig 7c)

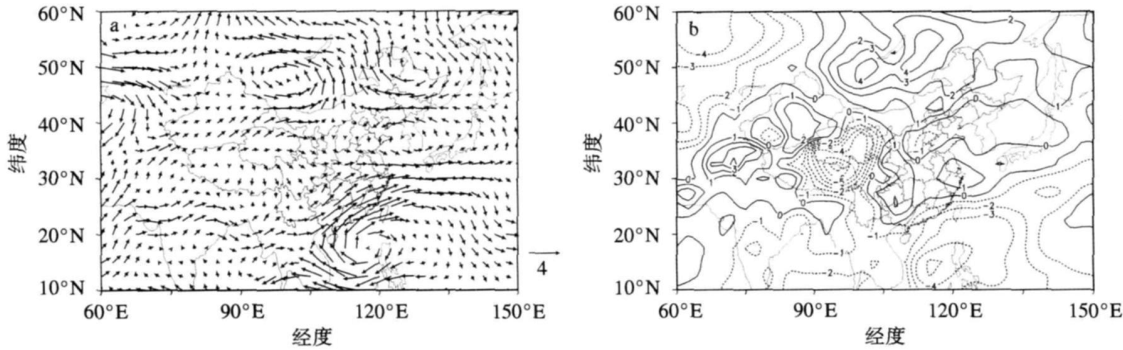


图 8 华南地区 6 月雷暴日高低值年 850 hPa 风场 (a; 单位: m/s)、 θ_{se} 场 (b; 单位: K) 的差值分布

Fig 8 Differences of (a) 850 hPa wind (m/s) and (b) θ_{se} (K) fields between the strong and weak thunderstorm years in South China in June

区。中国其他地区则为 θ_{se} 差值的正值区, 正值区数值较小且没有很大的正值中心。

强对流天气的发生需要有不稳定能量释放, θ_{se} 的垂直分布反映了大气的对流不稳定性, 华南地区位于对流不稳定的区域, 即 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$ (图略)。由华南地区 6 月雷暴日与不稳定能量的相关分布 (图 9a)

可以看到, 相关较大地区在贝加尔湖西南至中国内蒙古中部、西北及西南东部地区, 该区域与冷空气入侵中国的中路所经范围一致, 表明华南地区雷暴发生受南下冷空气的影响, 冷空气南下侵入易造成较强的系统性上升运动, 导致雷暴天气发生。

由华南地区 6 月雷暴日与风垂直切变 $\left[\frac{\partial v}{\partial p} \right]$ 的相关矢量分布 (图 9b) 可以看出, 通过 99% 信度检

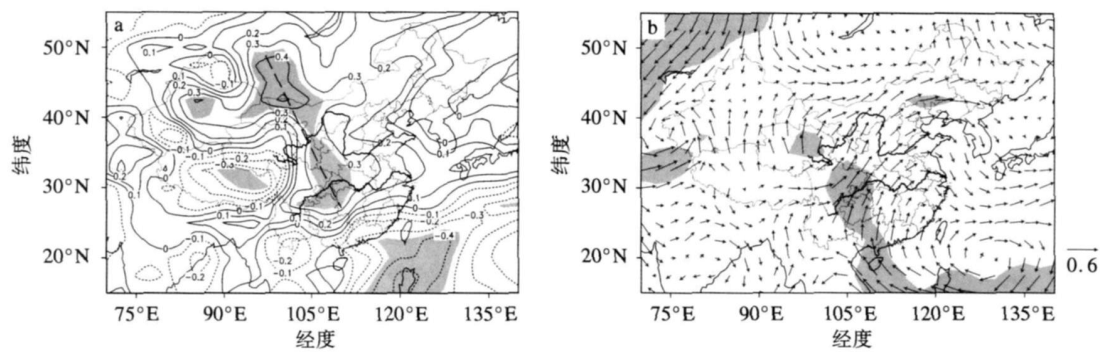


图 9 华南地区 6 月雷暴日与不稳定能量 (a)、850 ~ 500 hPa 垂直风切变 (b) 的相关分布 (阴影区表示通过 0.01 的显著性水平检验)

Fig 9 Correlation coefficients between thunderstorm days in South China in June and (a) the instability energy and (b) the vertical wind shear from 850 to 500 hPa (Shaded areas passing t -test at 0.01 significance level)

验的区域位于南海及西南地区东部,且以与经向风切变的相关为主,表明华南地区雷暴与经圈环流存在联系。

2.5 中国雷暴的空间异常分布及其时间演变特征

对全国雷暴日进行 REOF 分析得到的前 12 个旋转载荷向量场共解释了总方差的 61.84%。12 个向量场中有几个相对独立的异常型。华南地区是雷暴的一个多发区,从 REOF 的第二荷载向量场 (图 10a) 看,华南地区是一个独立的异常型。由其空间异常型的时间系数 (图 10b) 可以看到,华南地区的雷暴日数呈逐年减少趋势,且有 10 a 左右的年际变化。长江流域也是一个相对独立的异常型 (图略),该区域是雷暴持续时间最长、受到系统性环流影响显著的区域;其时间系数在 20 世纪 90 年代以前呈下降趋势,90 年代以后有逐渐回升趋势。此外,河北地区、东北地区、云南、新疆地区都存在相对独立的异常型,分别与不同的大尺度环流型相关联。

3 结论

- (1) 中国强对流天气雷暴和冰雹发生概率的空间分布各有不同。雷暴主要发生在 5 个区域:青藏高原东部、云南中南部、四川境内、华南两广地区及新疆西部。冰雹主要发生在青藏高原祁连山地区、天山地区和华北地区。不同地区雷暴和冰雹日间和夜间概率分布情况有所不同,夜间概率明显减少。
- (2) 不同地区雷暴和冰雹日数的年际变化有所不同且并不都是线性的,日间和夜间的变化也存在差别。
- (3) 雷暴正异常年除东北外,中国大部分地区

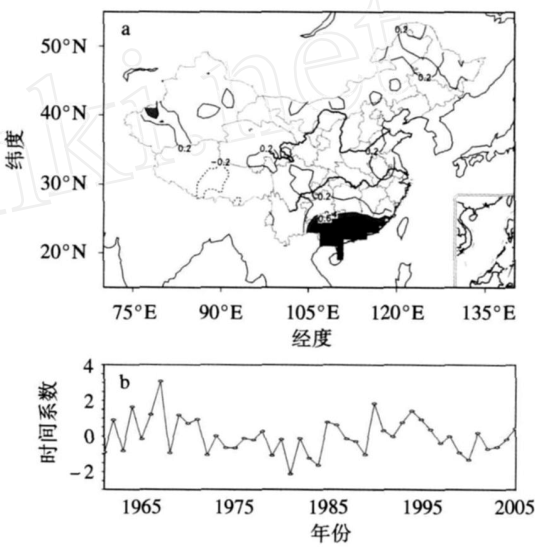


图 10 雷暴日 REOF 分析的第 2 特征向量场 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 10 (a) REOF second eigenvector field of thunderstorm days and (b) its time coefficient

- 气压偏低,中高纬蒙古附近槽加深。低纬西南气流加强影响中国华南地区。北方冷空气的入侵以及经圈环流的异常也是影响华南雷暴发生的一个因子。
- (4) 对雷暴日进行 REOF 分析可以得到中国雷暴空间异常的几个区域,如长江流域、华南地区、云南、新疆西部、华北、东北都存在独立的异常型。各型的时间系数演变趋势能很好地反映出该地区雷暴发生的变化趋势。
- (5) 影响雷暴发生的因子十分复杂,对空间进行分型就是为了考察在不同环流情况、不同地形条件下影响雷暴发生的机理,便于今后更好地开展雷

暴等灾害性天气的预报工作。此外,青藏高原和四川地区的 REOF 异常型并不是很明显,这是今后需要加强研究的问题。

参考文献:

- [1] Rakovec J. Thunderstorms and hail[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1989, 40(4): 179-186.
- [2] Cacciamani C, Battaglia F, Patrino P. A climatological study of thunderstorm activity in the Po Valley[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1995, 50(3/4): 185-203.
- [3] 张家城. 中国气候总论[M]. 北京:气象出版社, 1991: 190-198.
- [4] 张敏锋,冯霞. 我国雷暴天气的气候特征[J]. 热带气象学报, 1998, 14(2): 156-182.
- [5] Changnon S A, Changnon D. Long-term fluctuations in thunderstorm activity in the United States[J]. Climatic Change, 2001, 50(4): 489-503.
- [6] 徐桂玉,杨修群. 我国南方雷暴的气候特征研究[J]. 气象科学, 2001, 21(3): 299-307.
- [7] 李照荣. 西北地区雷暴气候特征[J]. 灾害学, 2005, 20(2): 83-88.
- [8] 张敏锋. 我国北方雷暴的时空分布特征[J]. 高原气象, 2000, 19(3): 278-284.
- [9] 叶殿秀,张强,邹旭恺. 三峡库区雷暴气候变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 37-39.
- [10] 段炼,陈章. 近 42 年成都地区雷暴的气候统计特征[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 59-64.
- [11] 胡艳,端义宏. 上海地区雷暴天气的气候变化及可能影响因素[J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2006, 36(4): 588-594.
- [12] 杨晓霞,张爱华,贺业坤. 连续冰雹天气的物理特征分析[J]. 气象, 2000, 26(4): 50-54.
- [13] 陶云,段旭,杨明珠. 云南冰雹的时空分布特征及其气候成因初探[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(6): 837-842.
- [14] 康凤琴,张强,郭江勇. 中国西北地区冰雹的气候特征[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 83-86.
- [15] 吴洪宝,吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京:气象出版社, 2005: 15-44.
- [16] 吴洪宝,李栋梁,章基嘉. 中国冬季月平均气温异常的旋转 EOF 分析[J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(3): 349-354.

(责任编辑:倪东鸿)