

朱克云, 孙照渤, 张琪, 等. 2012. 西藏地区雷暴与大气热源关系研究 [J]. 大气科学, 36 (6): 1093–1100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11141. Zhu Keyun, Sun Zhaobo, Zhang Qi, et al. 2012. Relationships between thunderstorms and atmospheric heat source in Tibet [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (6): 1093–1100.

西藏地区雷暴与大气热源关系研究

朱克云^{1,2} 孙照渤¹ 张琪³ 任景轩²

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, 南京 210044

2 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

3 四川省气象台, 成都 610071

摘 要 利用 1979~2008 年 NCEP/NCAR 全球再分析月平均资料和雷暴记录资料, 运用相关分析和合成分析等方法分别对西藏地区大气热源和雷暴日数的关系以及热源强弱不同时期雷暴日数变化特征进行了分析。结果表明, 大气热源与雷暴日数存在着明显的正相关关系, 月相关系数高达 0.86。在雷暴高发区的那曲东部、拉萨、日喀则中部、山南地区东北部和林芝地区西北部, 相关系数均超过了 0.4。进一步分析表明, 当大气热源强值年时, 整个日喀则地区、拉萨地区、山南地区、那曲中西部和东部地区以及昌都地区中西部, 雷暴日数是偏多的。当大气热源偏弱时, 雷暴日数在日喀则中部地区减少最为明显, 其次在日喀则南木林县东北部和林芝西北部地区。

关键词 西藏 大气热源 雷暴

文章编号 1006-9895(2012)06-1093-08

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11141

Relationships between Thunderstorms and Atmospheric Heat Source in Tibet

ZHU Keyun^{1,2}, SUN Zhaobo¹, ZHANG Qi³, and REN Jingxuan²

1 Key Laboratory of Meteorological Disasters of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

3 Meteorological Observatory, Sichuan Province, Chengdu 610071

Abstract Based on global NCEP/NCAR reanalysis data and thunderstorm data from 1979 to 2008, the relationships between the atmospheric heat source and the number of thunderstorm days are analyzed, as well as the variations in the number of thunderstorm days with different heat source intensities. The results indicate that the intensity of the atmospheric heat source is positively correlated with the number of thunderstorm days, with correlation coefficients as high as 0.86. Further, the correlation coefficients exceed 0.4 in eastern Nagqu, Lhasa, central Shigatse, northeastern Shannan, and northwestern Nyingchi, where thunderstorms are the most dominant activity. Further analysis shows that more thunderstorm days than the average occur in Shigatse, Lhasa, Shannan, most parts of Nagqu, and the midwestern region of Qamdo when the atmospheric heat source is stronger. In contrast, in years with a weaker heat source, the number of thunderstorm days is reduced in central Shigatse, Namling, and northwestern Nyingchi.

收稿日期 2011-08-10, 2012-06-02 收修定稿

基金项目 国家自然科学基金资助项目 41175048

作者简介 朱克云, 女, 1956 年生, 教授, 主要从事资料变分同化及高原气象的研究。E-mail: zhuky@cuit.edu.cn

Key words Tibet, Atmospheric heat source, Thunderstorm

1 引言

作为世界上面积最大、海拔最高、地形最为复杂的高原，青藏高原的天气气候有着较为独特之处，其典型特点为高原上的对流云和中尺度对流系统（MCSs）十分活跃，它们是高原上产生强降水和强对流天气的主要系统。Flohn（1957）的研究表明，由于高原东南部地区的巨大积雨云烟囱效应，致使高原上每十万平方公里就有 20~50 个发展很好的积雨云，这同样表明夏季青藏高原局地对流活动非常频繁。任景轩等（2011）的研究指出，西藏地区夏季雷暴活动频繁，存在着三个雷暴活动高发中心，且以午后短时热力性雷暴为主。张翠华等（2005）对那曲地区夏季雷暴天气的研究表明，在那曲地区雷暴主要是受地形的影响，并在地形的热力和动力作用下形成，但强度不大。郅秀书等（2004）指出，夏季季风期间，高原闪电活动与地表热力学参量密切相关，尤其是与地表 Bowen 比和感热通量存在着较好的正相关关系，相关系数分别达到了 0.7 和 0.6。

青藏高原的特殊地形使得高原的加热直接作用于对流层中层大气，与周围大气形成了明显的热力差异，因此高原大气热源受到了普遍重视，同时也取得许多重要成果。黄荣辉等（1985）对高原大气热源与大气环流的关系进行了研究，指出高原热源异常会引起北半球中高纬度大气环流异常。当热源偏强时，南亚高压与鄂霍次克海上空的高压也偏强，从而引起我国异常的天气。（赵平和陈隆勋，2000, 2001；Zhao and Chen, 2000, 2001）在研究了 35 年青藏高原热状况气候特征及年际和年代际变率的基础之上，分析了冬、夏高原热源与大气环流、亚洲季风降水和太平洋热带海—气相互作用的关系。赵勇和钱永甫（2007）指出，青藏高原东部地表温度对 7 月江淮地区的降水有着较好的指示意义，尤其是高原东部及其以北地区的大尺度热力差异可以作为江淮地区夏季降水的一个预报因子。赵声蓉等（2003）通过诊断分析与数值试验方法证实了高原上潜热加热异常引起青藏高压、西太平洋副热带高压、亚洲季风以及欧亚中高纬地区环流的变化，进而影响到华北地区的降水。此外，很多学者也做了高原热源与长江中下游地区夏季降水、西南地区东部旱涝的关系，并得到了很多有意义的结论

（柏晶瑜等，2003；李永华等，2011）。

关于高原热源的研究虽然取得了很多成果，尤其是热源与降水的关系研究，但高原天气本身也与大气热源有关，尤其是西藏地区短时热力性雷暴，而目前这方面的研究还较少。因此，本文根据西藏地区雷暴特征，探讨高原大气热源与雷暴的关系有着重要意义，可以为西藏地区雷暴预警及防雷减灾提供一定的依据。

2 资料与方法

由于 ECMWF 资料的连续性可能存在的问题（Yanai and Tomita, 1998），以及由 ECMWF 资料与 NCEP 资料计算的热源在大陆地区差异较小（蓝光东等，2005），因此本文计算大气热源强度采用 NCEP/NCAR 全球再分析月平均资料，从 1979 年 1 月到 2008 年 12 月，共 360 个月。资料包括水平纬向风 u 、经向风 v 、温度 T 、比湿 q 、地面气压 p_s 、位势高度 h 和垂直速度 ω ，水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，垂直层次为 17 层（1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa、200 hPa、150 hPa、100 hPa、70 hPa、50 hPa、30 hPa、20 hPa、10 hPa）。雷暴资料为同时段西藏地区 38 个观测站点（图 1）的雷暴记录资料。

对于大气热源（汇）的计算，已有很多学者（赵声蓉等，2003；巩远发等，2007）对其做了详细介绍。本文主要采用 Yanai 等（1973）提出的倒算法计算。由热力学方程可得

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right], \quad (1)$$

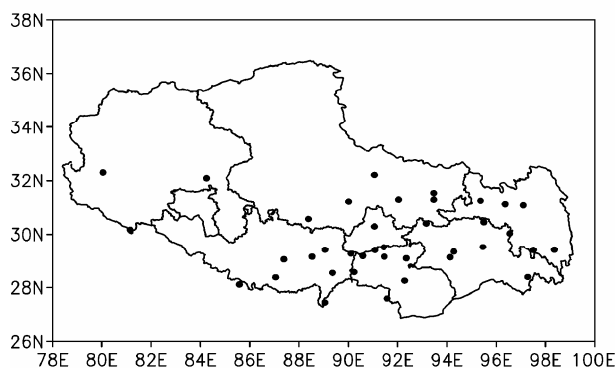


图 1 西藏地区 38 个观测站点分布

Fig. 1 The distribution of 38 stations in Tibet region

并用质量权重对整层大气积分得

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} Q_1 dp = \frac{c_p}{g} \int_{p_t}^{p_s} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] dp,$$

(2)

式中, T 为温度, ω 为 p 坐标系的垂直速度, $\mathbf{V}$ 为水平风矢量, $k=R/c_p$, R 和 c_p 分别为干空气气体常数和定压比热, p_s 为地面气压, p_t 为大气顶气压, 本文取 $p_t=100$ hPa. Q_1 为单位质量大气中的热量源汇, $\langle Q_1 \rangle$ 为整层大气中单位面积气柱内 Q_1 的垂直积分. 当 $\langle Q_1 \rangle$ 为正值时, 表示大气柱中总体是非绝

热加热, 称之为热源; 当 $\langle Q_1 \rangle$ 为负值时, 表示非绝热冷却, 称之为热汇.

3 大气热源的季节变化特征

图 2 是不同季节大气热源空间分布图. 就整体而言, 夏季和冬季的大气热源差异最为明显. 从图中可以看出, 夏季和冬季, 大气热源有着明显的差异. 从春季大气热源分布可以看出, 孟加拉湾东部以及西太平洋地区都是热源区, 同时在我国东部沿海地区也存在着一个明显的热源区. 此外, 印度洋地区为一明显的大气热汇区. 夏季北半球, 大气热

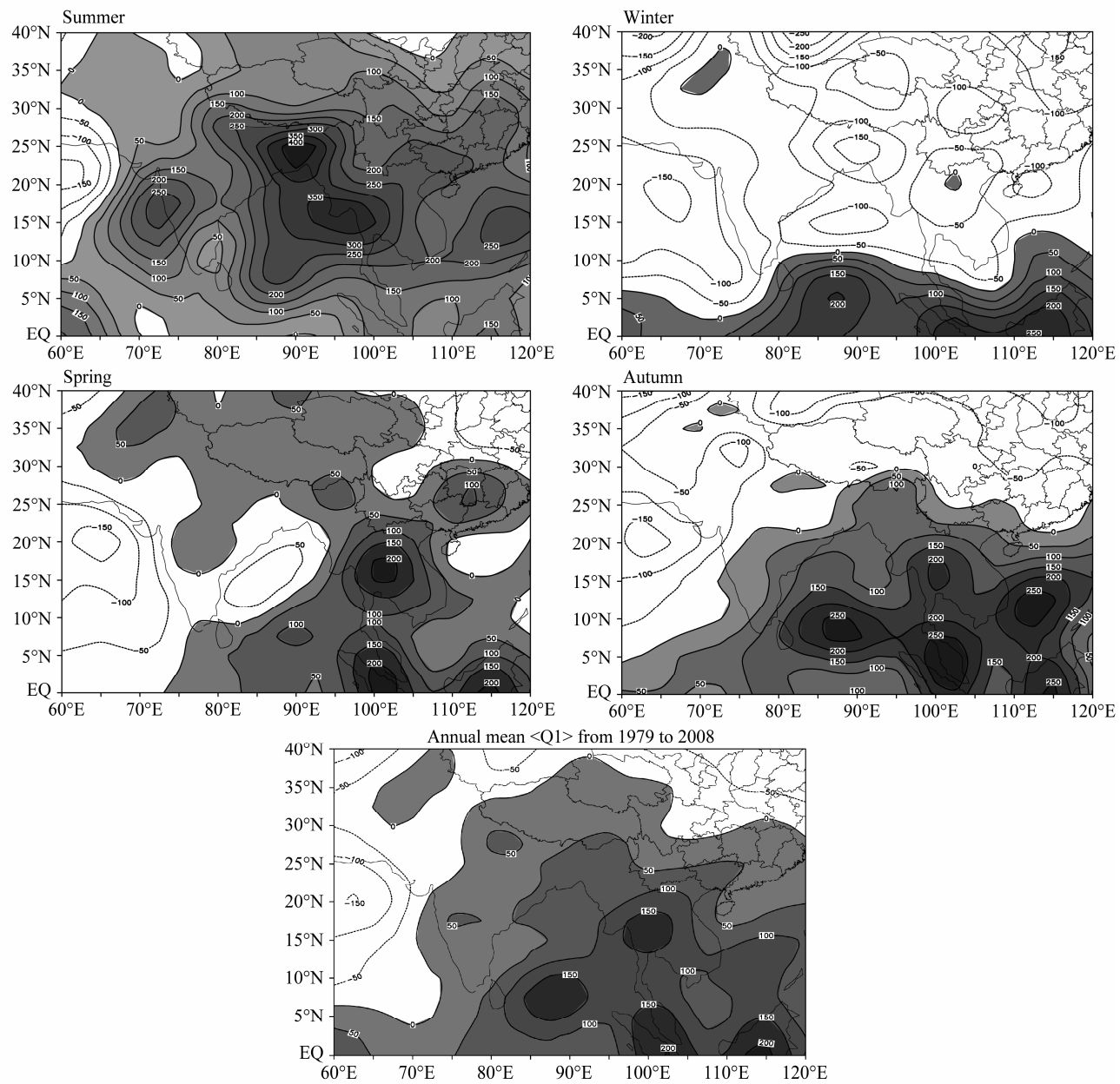


图 2 不同季节和年平均大气热源空间分布 (单位: W m^{-2})
Fig. 2 The distribution of atmospheric heat source (W m^{-2}) for different seasons and annual mean

源在 20°N 附近存在着一大值带, 其中大气热源强中心位于青藏高原南侧、孟加拉湾地区北部的孟加拉国, 达 400 W m^{-2} 以上, 次中心在越南的仰光地区, 强度也达到了 350 W m^{-2} 以上。此外, 阿拉伯海东部的帕纳吉地区和我国南海的热源强度也达到了 250 W m^{-2} 以上。

在秋季, 大气热源中心明显南移且强度开始减弱, 强中心主要位于 10°N 以南地区。与夏季大气热源分布相比, 孟加拉湾附近的热源强度减弱程度最为明显。而在冬季北半球的 $60^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 地区, 除在 $0^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 的大部地区为大气热源区外, 其它绝大部分地区均为大气热汇区。其中, 大气热源区主要位于赤道附近的苏门答腊岛、加里曼丹岛, 强度达 200 W m^{-2} 以上, 甚至在 250 W m^{-2} 以上, 而 $\langle Q_1 \rangle$ 的负值区即大气热汇区随纬度变化明显, 强中心在我国新疆及其北部地区。同时孟加拉国也是明显的大气热汇区, 局地强度超过了 -150 W m^{-2} , 与夏季的强热源形成了鲜明对比。

从图 2 中也可以看出, 西藏地区年平均大气热源强度在 $0\sim 50\text{ W m}^{-2}$ 之间, 但从春季到冬季存在着一个明显的北进、南撤的过程, 且强度也发生着变化。相对周边同海拔高度的大气而言, 西藏地区夏季为强大气热源区, 而在冬季为热汇区。春季和秋季则为大气热源性质转化季节, 同时也是冬夏大气环流的转换季节。以上分析结果与巩远发等 (2007) 所得结果是比较一致的。

4 西藏地区大气热源与雷暴的相关性

为了了解西藏地区大气热源与雷暴的关系, 本文分析了大气热源与雷暴日数的相关性。考虑到西藏地区气象站点分布以及雷暴的空间分布 (任景轩等, 2011), 本文将 ($27.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$) 区域的平均大气热源值定义为西藏地区的大气热源强度。

4.1 西藏地区大气热源与雷暴的时间相关性

图 3 是西藏地区大气热源与月雷暴日数的时间序列。从图中可以看出大气热源与雷暴日数之间存在着较好的对应关系。在夏季, 高原大气热源强度偏强, 此季节的雷暴日数也相对较多, 尤其是在 2005 年以前, 这种对应关系最为明显。而在冬季, 高原大气热源强度为冷源, 此时雷暴日数也偏少, 甚至接近于 0 d。通过计算相关系数可知, 二者的相关系数达到了 0.86, 通过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验。

本文也计算了雷暴多发季节 (5~9 月) 大气热源与雷暴日数的相关系数。除 8 月外, 其它月份相关系数均超过了 0.34, 尤其是 5 月、7 月和 9 月相关系数分别达到了 0.42、0.44 和 0.42, 三者都通过了 95% 的信度检验。8 月相关系数偏低, 这可能与在此期间雷暴性质有关, 因为伴随高原雨季的开始, 系统性雷暴逐渐增多, 短时热力性雷暴开始减少。但综合以上分析可以看出, 西藏地区大气热源与雷暴日数关系较好, 在一定程度上影响着雷暴的

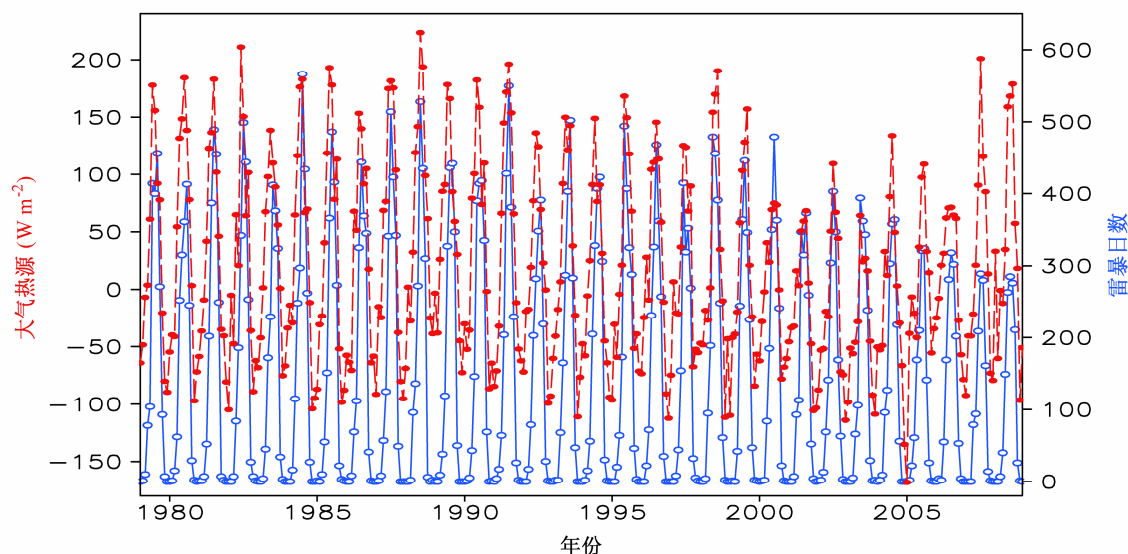


图 3 1979 年 1 月~2008 年 12 月西藏地区大气热源强度与雷暴日数时间序列。实心虚线: 大气热源; 空心实线: 雷暴日数

Fig. 3 Atmospheric heat source (dashed line) and thunderstorms days (solid line) in Tibet from Jan 1979 to Dec 2008

发生。

此外，本文还分析了 1979~2008 年不同季节三个代表站大气热源与月雷暴日数的散点相关分布（图 4）。从图中可看出，散点分布比较集中，均在拟合线附近，且月雷暴日数与大气热源呈明显的正相关关系。通过计算相关系数可知，5 月份申扎站的二者相关系数为 0.40，7 月份班戈站与 9 月份泽当站的二者相关系数分别为 0.60 和 0.57，均通过了 $\alpha=0.001$ 的信度检验。以上分析较好的验证了西藏地区不同季节大气热源与月雷暴日数较好的相关关系。

4.2 西藏地区大气热源与雷暴的空间相关性

为进一步了解西藏不同地区大气热源与雷暴的相关性，本文分析了高原大气热源与雷暴的空间相关关系。图 5 是西藏地区大气热源与雷暴日数空间相关系数分布图，图中阴影区为通过 95%信度检

验区，虚线为虚拟插值。从图 5a 中可以看出，除在高原西北部及高原东部的局地地区外，高原大气热源与雷暴日数基本上呈正相关关系，尤其是在那曲东部、拉萨、日喀则中部、山南地区东北部和林芝地区西北部的相关系数均超过了 0.4，而这些地区正是西藏雷暴的高发区（任景轩等，2011）。在高原西北部及高原东部的局地地区，大气热源与雷暴日数的负相关关系主要是由于此地区站点稀少引起的虚拟插值结果引起。

图 5b 为夏季 7 月大气热源与雷暴日数的相关系数分布图。从图中可以看出，西藏全区大气热源与雷暴均呈明显的正相关关系，尤其是在那曲中东部地区以及拉萨中部以北地区，二者的正相关系数均超过了 0.6，并通过了 99%的信度检验。以上分析可以说明，高原大气热源与雷暴日数存在着密切关系，这些都与高原闪电的研究结论（袁铁和鄯秀

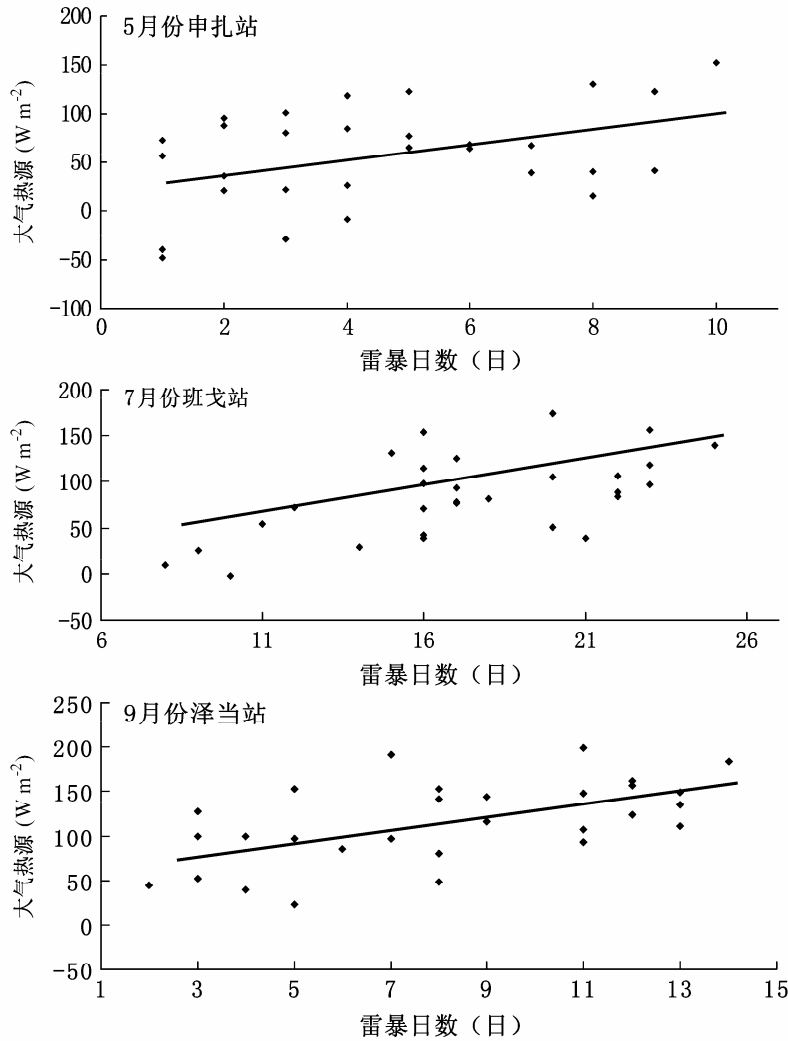


图 4 1979~2008 年三个代表站大气热源与月雷暴日数的散点相关分布图
Fig. 4 Atmospheric heat source and thunderstorms days at three typical stations from 1979 to 2008

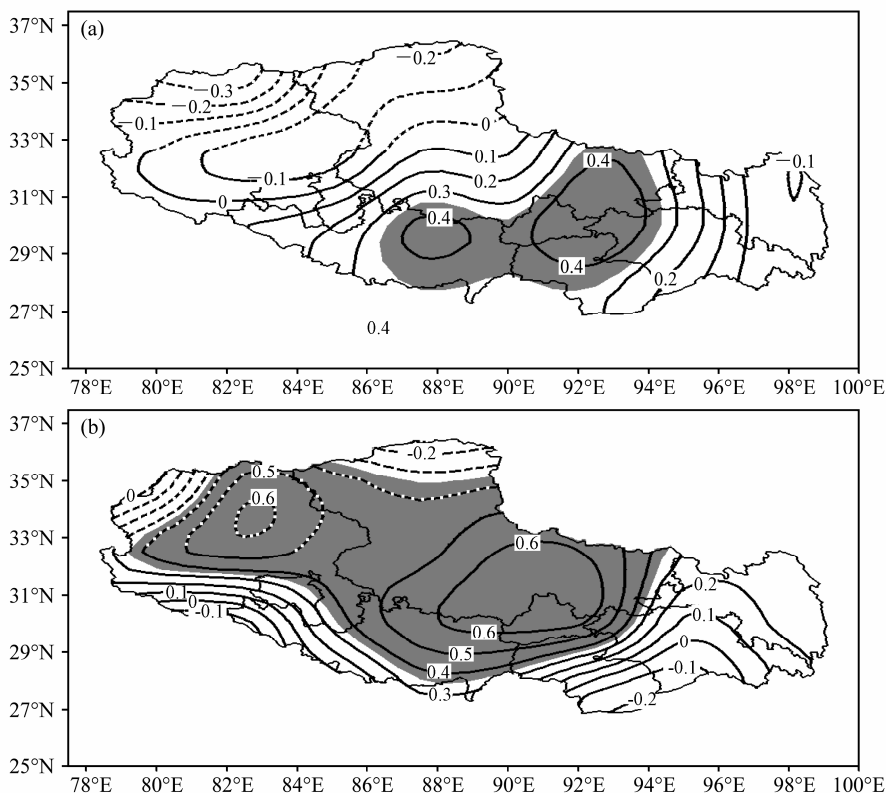


图5 西藏地区大气热源与雷暴日数空间相关系数（阴影区为通过了95%信度检验区）：(a) 年平均；(b) 7月

Fig. 5 The distribution of correlation coefficients between atmospheric heat source and thunderstorms days: (a) Annual mean; (b) Jul. Shading regions indicate 95% confidence level

书, 2005; Qie et al., 2003) 比较一致。

5 西藏地区大气热源强弱不同时期雷暴的变化特征

为进一步分析西藏地区大气热源对雷暴的影响, 本文还分析了热源强弱不同时期雷暴的空间变化特征。

本文选取 ($27.5^{\circ}\text{N}\sim 32.5^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$) 区域的平均大气热源值为参考, 并定义区域平均大气热源强度值大于 35 W m^{-2} 的年份为西藏地区大气热源强值年, 小于 -5 W m^{-2} 的年份为西藏地区大气热源弱值年。根据这些参考值, 本文在选取西藏地区大气热源强、弱值年份的基础上, 分析了其强弱不同年西藏雷暴日数的变化。

图6是西藏地区大气热源强弱不同年的雷暴距平合成图。从图6a可以看出, 当大气热源偏强时, 整个日喀则地区、拉萨地区、山南地区、那曲中西部和东部地区以及昌都地区中西部, 雷暴日数较多年平均偏多, 其中日喀则地区雷暴日数偏多明显。

偏多中心位于日喀则市的南木林县及萨嘎东北部地区, 分别比常年偏多14 d和12 d, 次中心位于那曲地区的那曲县和聂荣县附近, 偏多日数达到了10 d。此外, 乃东、贡嘎、达孜一带, 雷暴日数也较常年偏多6 d以上。但在林芝大部地区、昌都地区东部以及阿里地区大部, 雷暴日数是有微弱偏少趋势的。就总体而言, 热源强年, 雷暴日数也是总体偏多的。

图6b是大气热源弱值年的雷暴日数距平分布图。从图中可以看出, 当大气热源偏弱时, 雷暴日数的变化形式与热源偏强时是基本一致的, 但其在总体上是偏少的。其中日喀则大部、山南地区东北部、林芝地区西部以及那曲地区东部, 雷暴日数减少比较明显, 达到了6 d以上, 尤其是在日喀则中部地区雷暴日数减少最为明显, 达到了18 d。其次在日喀则南木林县东北部和林芝西北部地区, 雷暴日数也较多年平均雷暴日数偏少12 d。

由以上分析可见, 高原大气热源与雷暴日数之间总体呈正相关关系。当热源偏强时, 雷暴日数是

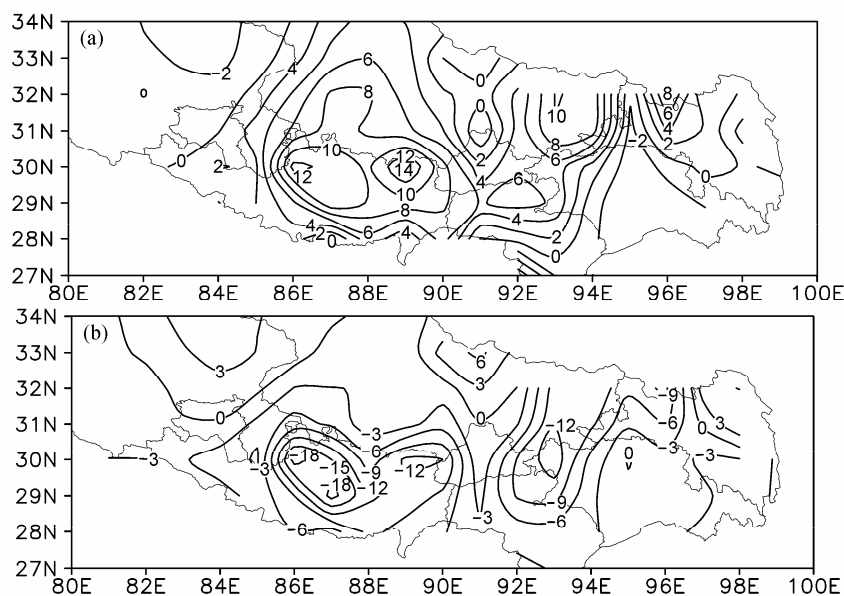


图6 高原大气热源强 (a)、弱 (b) 不同年的雷暴日数距平合成图

Fig. 6 Composites of thunderstorm days anomalies in years with (a) strong and (b) weak atmospheric heat source

偏多的,而当大气热源偏弱时,雷暴日数是减少的。这主要是因为当高原热源异常时,高原低涡和南亚高压(高原高压)强度和位置发生变化,致使垂直大气环流发生变化,加之底层偏南暖湿气流的辐合上升,进而影响着雷暴的发生。但高原的特殊地形地貌使得地面加热效应和水汽含量存在着明显的地区差异(吴国雄等,1997;吴国雄和刘屹岷,2000),因而高原大气热源对雷暴的影响也存在着地区差异。

6 结论和讨论

利用NCEP/NCAR全球再分析月平均资料和西藏地区38个常规观测站的30年雷暴资料,运用相关分析和合成分析等方法分别对西藏地区大气热源和雷暴的关系进行了分析,得到如下结论:

(1) 大气热源有着明显的季节分布特征。相对周边同海拔高度的大气而言,西藏地区夏季为强大大气热源区,而在冬季为热汇区,春季和秋季为大气热源性质转化季节。

(2) 相关分析表明,西藏地区大气热源与雷暴日数有着较好的时间相关关系,相关系数高达0.86。此外,5月、7月和9月相关系数分别达到了0.42、0.44和0.42,这也说明了大气热源在一定程度上影响着雷暴的发生。

(3) 空间分析表明,高原大气热源与雷暴日数

有着明显的正相关关系。在雷暴高发区的那曲东部、拉萨、日喀则中部、山南地区东北部和林芝地区西北部,二者的年平均相关系数均超过了0.4。7月,那曲中东部地区以及拉萨中部以北地区,二者的正相关系数均超过了0.6。

(4) 大气热源强弱不同年,雷暴的变化特征是十分明显的。当大气热源强值年时,整个日喀则地区、拉萨地区、山南地区、那曲中西部和东部地区以及昌都地区中西部,雷暴日数是偏多的。偏多中心位于日喀则市的南木林县及萨嘎东北部地区,次中心位于那曲地区的那曲县和聂荣县附近。当大气热源偏弱时,雷暴日数在日喀则中部地区雷暴日数减少最为明显,其次是在日喀则南木林县东北部和林芝西北部地区。

本文应用统计方法分析得到西藏雷暴日数对大气热源异常有着明显的正响应,进一步的动力学机制研究以及相关数值模拟,是下一步工作的研究内容。

参考文献 (References)

- 柏晶瑜,徐祥德,周玉淑,等. 2003. 春季青藏高原感热异常对长江中下游夏季降水影响的初步研究[J]. 应用气象学报, 14 (3): 363–368. Bai Jingyu, Xu Xiangde, Zhou Yushu, et al. 2003. Preliminary research on inhomogeneous distribution of Tibetan Plateau sensible heat fluxes in spring [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorological (in Chinese), 14 (3): 363–368.
- Flohn H. 1968. Contributions to a meteorology of the Tibetan Highlands [D].

- Atmospheric Science Paper 130, Fort Collins: Colorado State University, 120pp.
- 巩远发, 段廷扬, 张菡. 2007. 夏季亚洲大气热源汇的变化特征及其与江淮流域旱涝的关系 [J]. 大气科学, 31 (1): 89–98. Gong Yuanfa, Duan Tingyang, Zhang Han. 2007. Characteristics of the atmospheric heating source/sink over Asia and its relationship with drought/flood in the Yangtze River–Huaihe River valley [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 89–98.
- 黄荣辉. 1985. 夏季青藏高原上空热源异常对北半球大气环流异常的作用 [J]. 气象学报, 43 (2): 208–219. Huang Ronghui. 1985. The influence of the heat source anomaly over Tibetan Plateau on the northern hemispheric circulation anomalies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 43 (2): 208–219.
- 蓝光东, 温之平, 贺海晏. 2005. ERA与NCEP2大气热源的对比分析以及全球大气热源性质变化规律的研究 [J]. 大气科学, 29 (1): 154–163. Lan Guangdong, Wen Zhiping, He Haiyan. 2005. Comparison of the atmospheric heat sources obtained from ERA and those from NCEP2 and study of the variations in the nature of heating over the global atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(1): 154–163.
- 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系 [J]. 大气科学, 35 (3): 422–434. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 422–434.
- Qie Xiushu, Toumi R, Yuan Tie. 2003. Lightning activities on the Tibetan Plateau as observed by the lightning imaging sensor [J]. J. Geophys. Res., 108 (D17): 4511, doi: 10.1029/2002JD003304.
- 郑秀书, 袁铁, 谢毅然, 等. 2004. 青藏高原闪电活动的时空分布特征 [J]. 地球物理学报, 47 (6): 997–1002. Qie Xiushu, Yuan Tie, Xie Yiran, et al. 2004. Spatial and temporal distribution of lightning activities over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 47 (6): 997–1002.
- 任景轩, 朱克云, 张杰, 等. 2011. 近 30 年西藏地区雷暴变化特征 [J]. 气象科技, 39 (3): 289–294. Ren Jingxuan, Zhu Keyun, Zhang Jie, et al. 2011. Characteristics of thunderstorms in recent 30 years in Xizang region [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 39 (3): 289–294.
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I: 热力适应和过流 [J]. 大气科学, 24 (4): 433–446. Wu Guoxiong, Liu Yimin. 2000. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone. Part I: Thermal adaptation and overshooting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (4): 433–446.
- 吴国雄, 李伟平, 郭华, 等. 1997. 青藏高原感热热泵和亚洲夏季风 [C]// 叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 116–126. Wu Guoxiong, Li Weiping, Guo Hua, et al. 1997. The sensible heat driven air pump over the Tibetan Plateau and the Asian summer monsoon [C]// Ye Duzheng. Collected Works for the Commemoration of Professor Zhao Jiuzhang. Beijing: Science Press: 116–126.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. J. Atmos. Sci., 30: 611–627.
- Yanai M, Tomita T. 1998. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis [J]. J. Climate, 11 (3): 463–482.
- 袁铁, 郑秀书. 2005. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析 [J]. 气象学报, 63 (1): 123–127. Yuan Tie, Qie Xiushu. 2005. Seasonal variation of lightning activities and related meteorological factors over the central Qinghai–Xizang Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 123–127.
- 张翠华, 言穆弘, 董万胜, 等. 2005. 青藏高原雷暴天气层结特征分析 [J]. 高原气象, 24 (5): 741–747. Zhang Cuihua, Yan Muhong, Dong Wansheng, et al. 2005. Analyses on atmospheric stratification characteristics of thunderstorms over Qinghai–Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 741–747.
- 赵平, 陈隆勋. 2000. 青藏高原大气热量源汇在海—地—气相互作用准 4 年振荡中的作用 [J]. 科学通报, 45 (15): 1666–1671. Zhao Ping, Chen Longxun. 2000. Effects of an atmospheric heat source over Qinghai–Tibet Plateau on Quasi 4-year oscillation of ocean–atmospheric–land interaction [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (15): 1666–1671.
- Zhao Ping, Chen Longxun. 2000. Study on climatic features of surface turbulent heat exchange coefficients and surface thermal sources over the Qinghai–Xizang Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 14 (1): 13–29.
- 赵平, 陈隆勋. 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系 [J]. 中国科学 (D 辑), 31 (4): 327–332. Zhao Ping, Chen Longxun. 2001. Climate characteristics of Qinghai–Tibet Plateau atmospheric heat source in 35 years and its relation to Chinese precipitation [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 31 (4): 327–332.
- Zhao Ping, Chen Longxun. 2001. Interannual variability of atmospheric heat source/sink over the Qinghai–Xizang (Tibetan) Plateau and its relation to circulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (1): 106–116.
- 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2003. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究 [J]. 大气科学, 27 (5): 881–893. Zhao Shengrong, Song Zhengshan, Ji Liren. 2003. Heating effect of the Tibetan Plateau on rainfall anomalies over North China during rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (5): 881–893.