

朱润鹏, 袁铁, 李万莉, 等. 2013. 基于卫星观测资料的全球闪电活动特征研究 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 639–650, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12017. Zhu Rupeng, Yuan Tie, Li Wanli, et al. 2013. Characteristics of global lightning activities based on satellite observations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 639–650.

基于卫星观测资料的全球闪电活动特征研究

朱润鹏^{1, 2, 3} 袁铁¹ 李万莉² 纳根文³

1 兰州大学大气科学学院半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

3 68310 部队测绘气象室, 西安 710600

摘要 利用卫星携带的闪电探测系统所获取的 11 年 (1995 年 5 月至 2006 年 4 月) 闪电资料, 对全球闪电活动特征进行了详细分析。结果表明: 全球闪电频数约为 46.2 fl s^{-1} (fl 为 flash 简写, 表征闪电发生的次数), 在 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 闪电数占全球闪电总数的 78.1%, 陆地和海洋的闪电密度之比为 9.64:1。近海海域面积占海洋面积的近 3 成, 但闪电数占海洋闪电总数的近 7 成, 远海海域闪电的密度很小。陆地和近海海域闪电活动随季节变化呈现出单峰特征, 峰值出现在 7 月。中高纬度大陆东部近海海域闪电频数大于西部, 赤道附近区域相反, 大陆西部近海海域闪电频数大于东部。闪电活动随海拔高度的变化呈两峰三谷的特征, 两峰分别出现在海拔 $100 \sim 2400 \text{ m}$ 和 $3300 \sim 4600 \text{ m}$, 3 个低谷分别出现在海拔 100 m 以下、 $2400 \sim 3300 \text{ m}$ 和 4600 m 以上, 这是在地理位置和海拔高度的影响下, 各种因素综合作用的结果。

关键词 闪电活动 海陆分布 季节变化 海拔高度

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0639-12

中图分类号 P427.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12017

Characteristics of Global Lightning Activities Based on Satellite Observations

ZHU Runpeng^{1, 2, 3}, YUAN Tie¹, LI Wanli², and NA Genwen³

1 Key Laboratory of Semi-Arid Climate Change, Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environmental Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 No.68310 Meteorological Office, PLA, Xi'an 710600

Abstract The characteristics of global lightning activities are investigated by using the lightning data recorded by the Optical Transient Detector (OTD) and the Lightning Imaging Sensor (LIS) during 1995–2006. Results indicate that approximately 46.2 fl s^{-1} (fl denotes flash and numbers the times lightnings happen) lightning flashes including intra-cloud and cloud-to-ground types occur worldwide and that nearly 78.1% of global lightning flashes occur in the region of $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$. Moreover, the lightning density ratio of land to ocean is approximated at 9.64:1. Although offshore areas account for nearly 30% of all oceans, lightning flashes over these areas account for nearly 70% of the total lightning flashes over all oceans; the lightning density over open sea is very low. Furthermore, monthly variations in lightning activities over both land and offshore areas clearly show a characteristic single peak with the maximum appearing in July. The lightning density over offshore areas on the east coast of content is larger than that on the west coast in middle- and high-latitude regions, while the reverse is true over equatorial areas. Variation in lightning density with altitude is

收稿日期 2012-02-03 收到, 2012-07-14 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40905008、40930949, 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 lzujbky-2010-11, 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 XDA04072400

作者简介 朱润鹏, 男, 1985 年出生, 硕士研究生, 研究方向为雷电与强对流灾害性天气。E-mail: history.lzu@163.com

通讯作者 袁铁, E-mail: yuantie@gmail.com

represented by two peaks and three valleys with the former appearing at 100–2400 m and 3300–4600 m, and the latter appearing below 100 m, at 2400–3300 m, and above 4600 m. These features are caused by the combined action of various factors influenced by terrain and geographic location.

Keywords Lightning activity, Land-ocean distribution, Seasonal change, Altitude

1 引言

闪电作为自然大气中一种强烈放电现象，常常给人类的生命财产带来巨大的危害，但对维持地球和电离层之间全球电路平衡、全球水物质重新分配、 NO_x 的生成等都起着十分重要的作用（Markson and Muir, 1980; Williams and Heckman, 1993; Price, 2000; Bond et al., 2002; 周筠珺和郄秀书, 2002; 郦秀书等, 2003a, 2003b）。近几十年来，闪电探测技术，特别是星载闪电探测技术的发展，在很大程度上提高了人们对全球闪电活动规律和区域分布差异的认识。

全球闪电频数是描述全球闪电活动特征的一个基本气候参数，也是很多大气模式的重要输入参数（Levy et al., 1996），Williams (1992) 和 Reeve and Toumi (1999) 甚至认为可将闪电频数作为全球气候变化的敏感指示器和温度计。多年来，很多学者使用不同的手段和方法，对这个参数进行了估算，得出的结果不尽一致。Brooks (1925) 使用雷暴日资料，估计全球在任一时刻存在 1800 个雷暴，从而得到全球闪电频数为 100 fl s^{-1} (fl 为 flash 简写，表征闪电发生的次数) 的结果。Heckman et al. (1998) 通过舒曼共振方法得到的结果是 22 fl s^{-1} 。卫星闪电探测技术的出现给人们提供了以往地面观测难以涉及区域的闪电观测资料，从而对这个参数有了更准确的估计（Sparrow and Ney, 1971; Christian and Latham, 1998）。Mackerras et al. (1998) 通过特定地区卫星资料和地基资料的对比，计算得到闪电频数为 65 fl s^{-1} 。Orville and Henderson (1986) 利用美国国防气象卫星计划 (DMSP) 的观测资料分析了午夜时分全球闪电分布，并发现全球陆地—海洋闪电发生比例在 2.2~4.2 之间。Kotaki and Katoh (1983) 利用电离层探测卫星 (ISS_b) 资料估计全球闪电频数是 63 fl s^{-1} 。基于 5 a 的光学瞬变探测器 (Optical Transient Detector, OTD) 闪电资料，Christian et al. (2003) 对全球闪电活动特征进行了详细分析，发现全球闪电频数为 $45 \pm 5 \text{ fl s}^{-1}$ ，大约 78% 的全球闪电发生在南北纬 30° 之间，陆地和海洋的平均闪电密度比大约是 10:1，最频繁的闪电活动发生在卢旺达地区，闪电密度最大可达 80 fl a^{-1}

km^{-2} 。考虑到 OTD 的探测效率 (50%~66%) 并不是很高，而且仅有 5 a 的统计结果，因此仍需进一步积累观测资料对全球闪电频数及分布特征进行研究。

另外，全球不同区域的闪电活动差异及其影响因子研究也受到了很多学者的关注。Qie et al. (2003) 和 郦秀书等 (2003b, 2004) 利用闪电成像探测器 (Lightning Imaging Sensor, LIS) 资料对全球典型区域闪电活动和青藏高原上闪电活动进行了研究，结果表明，在不同的地区闪电频数和闪电光辐射能有明显的不同，青藏高原由于地形特殊的热力和动力作用，闪电活动呈现出一定的特殊性。Toumi and Qie (2004) 发现青藏高原春季闪电活动受地面热力参量的调制，鲍恩比和感热通量促进了对流有效位能向对流活动的有效转化。Boccippio et al. (2000) 研究了热带地区海陆闪电活动的差异，指出差异产生的原因是海陆风暴发生的频率或密度不同，而不是由于每个风暴中闪电频数的不同。马明等 (2004)、袁铁和郄秀书 (2004) 分别对我国闪电活动时空分布特征进行了研究，揭示了闪电密度平均值随纬度和海陆距离呈规律性的变化，与年平均降水量的变化趋势相一致，并且中国的闪电活动空间上可以大体分成与太平洋海岸平行的 4 条带状区域：近海区域、中部区域、西部区域和西部边境区域。孙溦 (2011) 对比了北京城区和郊区雷暴的气候特征及其变化情况，发现两个地区年平均雷暴日有着截然相反的变化趋势。McCollum et al. (2000) 研究了赤道附近非洲和亚马逊河地区的闪电活动，分析了两者之间的差异。熊亚军等 (2005) 研究了南美洲闪电分布特征，发现了南美洲闪电活动呈现出中间多、东西两边少的带状分布结构。此外，袁铁和郄秀书 (2010)、刘东霞等 (2010) 通过个例研究，分别对我国华南、华北地区的闪电活动的特征和影响因子进行了深入分析。

地理地形是区域气候形成的重要影响因子之一，特别是随着海拔高度的变化，地表入射辐射、大气的温度、气压和湿度等气象要素的变化很大，进而也会对闪电活动的分布产生影响。目前，已经有一些学者研究了闪电活动和地形之间的关系，如 Dissing and Verbyla (2003) 研究了阿拉斯

加地区闪电活动和地形之间的关系,发现闪电密度最大出现在海拔1100~1200 m之间。Schulz and Diendorfer(1999)研究在奥地利的闪电活动特征时发现在海拔500~2000 m之间,闪电密度随海拔高度的增加不断增大。但DeCaria and Babij(2003)在研究美国宾夕法尼亚地区的闪电活动和地形之间的关系时,并没有发现这种现象。马明等(2004)的研究也表明中国陆地不同地理环境下闪电活动密度高值带与中尺度地形之间存在着对应的关系。目前这方面已有的研究还主要限于局部区域,而在全球尺度上闪电活动和海拔高度之间关系如何还很少有人分析。

本文基于11年(1995年5月至2006年4月)的星载闪电观测资料,对全球闪电活动的气候特征进行了详细分析,重点揭示闪电活动与海陆分布、季节变化以及海拔高度之间的关系,研究结果将有助于我们深入了解全球闪电分布特征以及地理地形特征对闪电活动的影响。

2 资料介绍

本文使用的卫星资料来自NASA装载在两颗气象卫星上的近红外闪电探测系统,即装载在微实验室卫星(Mictolab-1)上的光学瞬变探测器(OTD)和装载在热带降水测量任务卫星(TRMM)上的闪电成像探测器(LIS)所积累的11 a闪电资料,这两个探测器均能昼夜连续观测地球上发生的总闪电(云闪和地闪)。

OTD在1995年4月升空,是全球第一台能够昼夜连续进行闪电探测的空基仪器,其轨道高度为740 km,轨道倾角是70°,可以探测到全球75°S~75°N范围的闪电活动,轨道的周期是100 min,每天围绕地球可以转14周余40 min,在任一时刻均可探测地球上1300 km×1300 km区域内的闪电活动,空间分辨率为10 km,时间分辨率是2 ms,探测效率为50%~66%,能够对孤立雷暴或雷暴系统连续观测大约4 min。

LIS于1997年11月升空,它的轨道高度为350 km,轨道倾角是35°,能对35°S~35°N范围的闪电活动进行观测,在地球上的视野为600 km×600 km,空间分辨率为3~6 km,可监测一个孤立雷暴或雷暴系统中的闪电活动大约90 s。为延长卫星工作寿命,2001年8月TRMM卫星轨道升高至403

km,这导致了卫星上携带的各种探测器空间分辨率略有降低。

虽然OTD与LIS两种资料在空间分辨率和观测范围等方面存在差异,但是LIS/OTD小组的科学家将两个产品进行了相互校验和融合,最后形成了一个描述全球闪电活动的气候资料产品。该资料的最新版本为2.2版,时间跨度达11 a(1995年5月至2006年4月),有高[0.5°(纬度)×0.5°(经度)]和低[2.5°(纬度)×2.5°(经度)]两种分辨率,从时间上可以分为3段:OTD单独观测时期(1995年5月至1997年11月),OTD与LIS共同观测时期(1997年12月至2000年4月),LIS单独观测时期(2000年5月至2006年4月)。在资料处理过程中,不但考虑了仪器探测效率的时空变化,而且还对传感器的注视时间进行了订正,一定程度上降低了由于探测效率和注视时间有限而带来的不确定性。本文使用了该资料中的高分辨率逐日闪电资料(High Resolution Annual Climatology,简称HRAC)和高分辨率闪电资料(High Resolution Full Climatology,简称HRFC)两种。

为了分析闪电活动与海陆分布、海拔高度之间的关系,本文还使用了来自国际卫星陆地表面气候学项目(International Satellite Land-Surface Climatology Project, ISLSCP)的海陆和海拔高度资料用于分析闪电活动与海陆分布和海拔高度之间的关系,海陆资料空间分辨率是0.5°(纬度)×0.5°(经度),海拔高度资料分辨率是1°(纬度)×1°(经度),海拔高度间隔取50 m。

3 分析结果

3.1 全球闪电活动分布概述

本文将海洋分为近海和远海海域两部分,定义距离陆地500 km内的海洋为近海海域,500 km以外的海洋为远海海域。从图1可以看到,陆地闪电活动是全球闪电活动的主要组成部分,占全球闪电总数的79.2%。陆地闪电密度远大于海洋,两者比例约为9.64:1。闪电密度在热带地区最大,随纬度增加而减小。近海海域平均闪电密度小于陆地,大于远海海域。大陆西部近海海域闪电活动和大陆东部有显著差异,15°N~50°N、15°S~15°N和15°S~50°S 3个范围内的大陆东、西部近海海域闪电频数之比分别为1:2.7、1:0.5和1:10。图1与Christian et

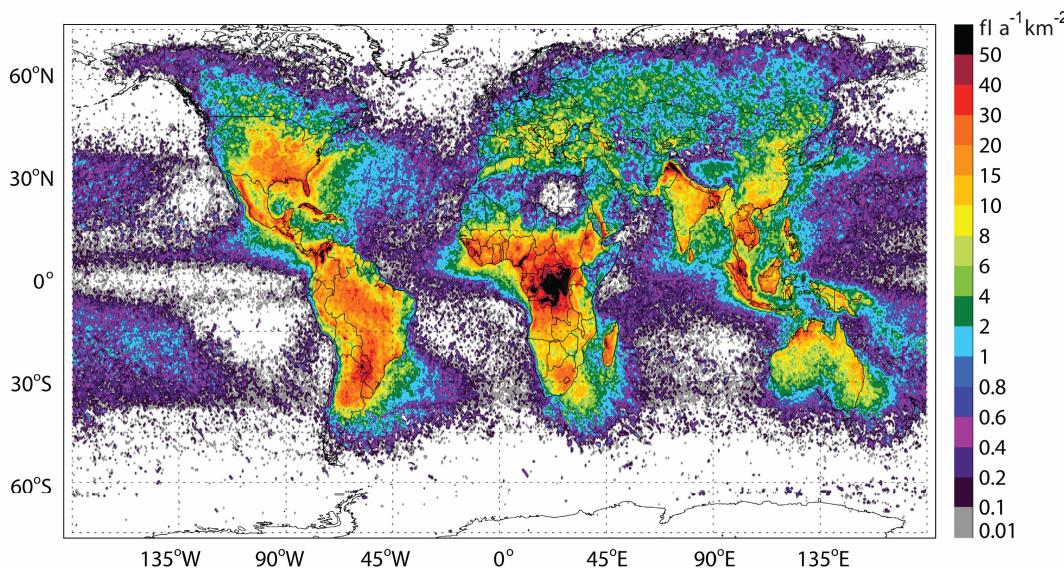


图 1 利用 HRFC 资料得到的全球闪电活动分布

Fig. 1 The spatial distribution of global lightning activities from High Resolution Full Climatology (HRFC) data

al. (2003) 利用 5 a OTD 资料得到的全球闪电活动分布图十分相似, 其中的闪电密度峰值地区与郄秀书等 (2003a) 研究全球闪电分布特征所选的非洲刚果盆地、美国佛罗里达和喜马拉雅山南麓等地区也是一致的。

表 1 给出了闪电活动在不同区域的分布特征。可以看出, 近海海域面积占海洋面积的 26.6%, 却贡献了 68.8% 的海洋闪电; 近海海域与远海海域闪电密度比为 6.08:1, 在海洋闪电中占有重要的地位。海洋、近海海域、远海海域和陆地闪电密度之比为 1:2.58:0.42:9.64。全球、陆地、海洋、近海海域和远海海域闪电频数分别为 46.2 fl s^{-1} 、 36.6 fl s^{-1} 、 9.6 fl s^{-1} 、 6.6 fl s^{-1} 和 3.0 fl s^{-1} 。其中全球闪电频数 (46.2 fl s^{-1}) 和 Christian et al. (2003) 用 5 a OTD 资料得到的结果 ($45 \pm 5 \text{ fl s}^{-1}$) 基本一致, 本文在 OTD 观测资料的基础上加入了 9 a LIS 观测资料, 结果应更接近于真实情况。

表 1 不同区域闪电活动的空间分布及百分比

Table 1 The spatial distribution and ratio of lightning activities in different regions

	面积占		闪电	闪电总数	闪电	
	面积	全球百				
(km ²)	分比	(fl a ⁻¹ km ⁻²)	(fl a ⁻¹)	占全球百	(fl s ⁻¹)	
全球	4.93×10^8	100%	2.96	1.46×10^9	100%	46.2
陆地	1.39×10^8	28.26%	8.29	1.15×10^9	78.8%	36.6
海洋	3.54×10^8	71.74%	0.86	3.04×10^8	20.8%	9.6
近海	9.42×10^7	19.11%	2.22	2.09×10^8	14.3%	6.6
远海	2.59×10^8	52.63%	0.37	9.46×10^7	6.5%	3.0

从图 2 可以看出, 几个区域的闪电活动都呈现出明显的纬度变化, 全球闪电活动主要集中在热带地区。闪电活动随纬度变化呈现三级台阶状特征。在 $4^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{N}$ 的范围内有一个明显的峰值, 向南北两极迅速减少 (南半球递减率约为每度 $0.34 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$, 北半球递减率约为每度 $0.50 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$), 在 $(15^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}, 11^\circ\text{S} \sim 29^\circ\text{S})$ 为比较平稳的第二阶, 向南北两极则又是迅速减少 (南半球递减率约为 $0.16 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ degree}^{-1}$, 北半球递减率约为 $0.10 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2} \text{ degree}^{-1}$)。全球、陆地闪电活动随着经度的变化呈现出 4 个峰值, 分别在 57.25°W 、 27.25°E 、 101.75°E 、 142.75°E 及附近区域, 分别对应着美洲大陆、非洲大陆、欧亚大陆和澳洲大陆。

表 2 进一步给出了不同纬度区间内闪电活动的定量分析。在 $5^\circ\text{S} \sim 5^\circ\text{N}$ 、 $10^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{N}$ 、 $20^\circ\text{S} \sim 20^\circ\text{N}$ 和 $30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$ 区域的闪电数分别占全球闪电总数的 18.7%、35.8%、58.7% 和 78.1%, 尤其是 $30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$ 区域的闪电数占全球闪电总数的 78.1%, 是闪电活动集中的地方。

3.2 近海海域闪电活动特征

图 3 给出了由 HRFC 资料和 ISLSCP 的海陆资料得到的近海海域闪电活动分布特征。可以看到, 近海海域闪电活动随纬度变化有 7 个峰值, 分别在 32.75°S 、 3.75°S 、 4.25°N 、 9.75°N 、 21.25°N 、 28.75°N 和 36.25°N 附近。虽然近海海域闪电活动主要集中在热带地区, 但峰值并不出现在赤道上, 而在 $2.5^\circ\text{N} \sim 13.5^\circ\text{N}$ 之间; 在 $8^\circ\text{S} \sim 32^\circ\text{S}$ 之间有一个低谷

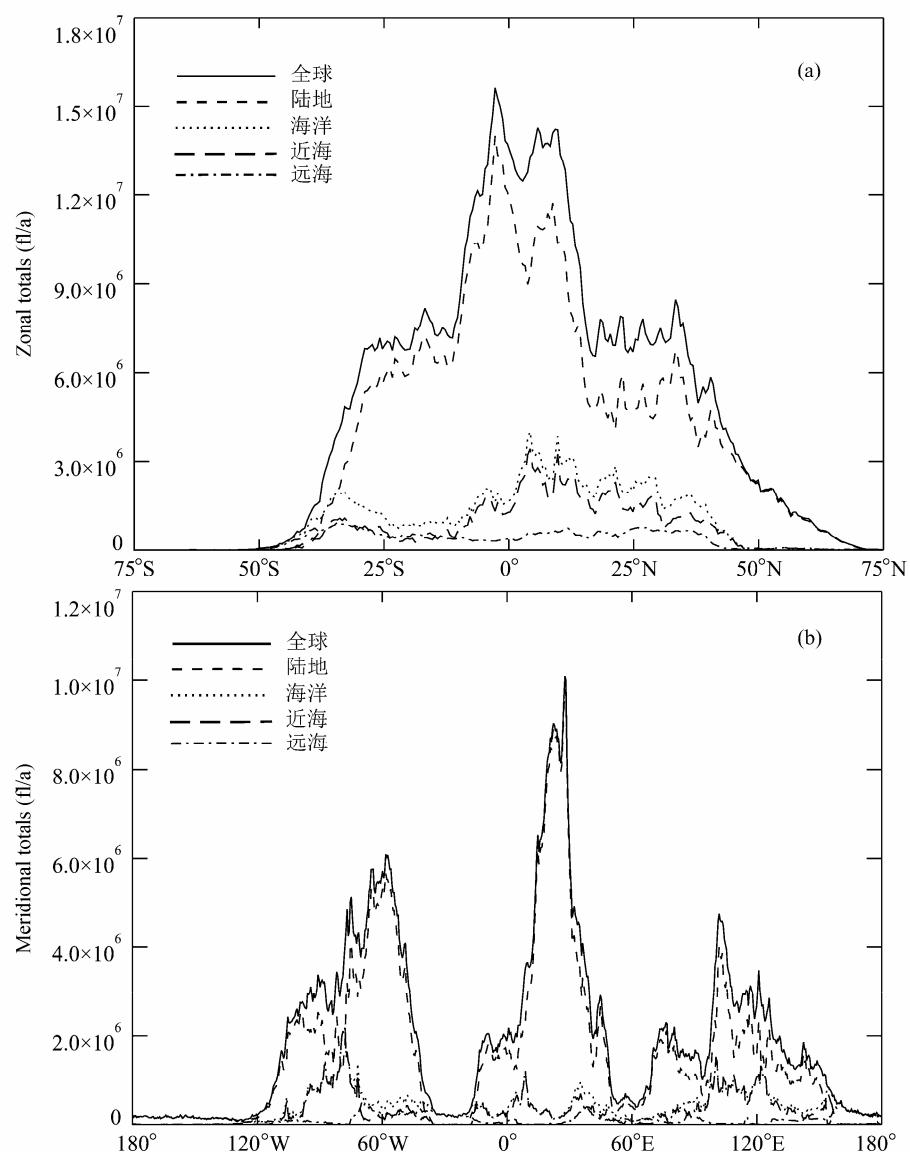


图 2 由 HRFC 资料和 ISLSCP 中的海陆资料得到的全球、陆地、海洋以及近海、远海海域闪电活动随 (a) 纬度和 (b) 经度的分布

Fig. 2 The distributions of lightning activities with (a) latitude and (b) longitude in the region of the whole world, land–ocean area, and open sea based on HRFC data and land–ocean data from ISLSCP

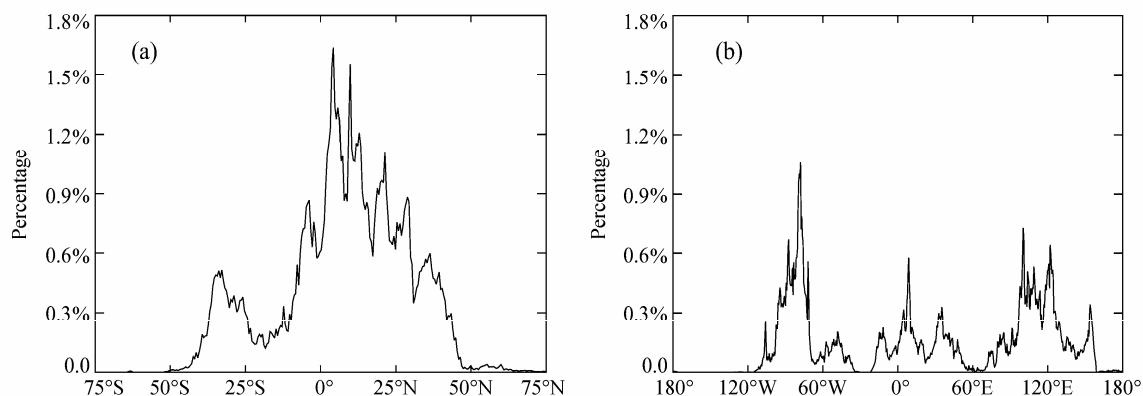


图 3 近海海域闪电占闪电总数的百分比随 (a) 经度和 (b) 纬度的分布

Fig. 3 The ratios of the lightning activities in offshore area with (a) longitude and (b) latitude

区。 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 区域的近海闪电数占近海闪电总数的 78.5%。北半球近海闪电数占近海闪电总数的 71.4%，闪电活动强于南半球。从闪电活动随经度变化的特征可看出，近海海域闪电活动峰值所在的经度，总是出现在大陆闪电峰值（图 2b）所在经度的一侧或两侧。第一个峰值在 77.75°W 处，位于北美洲东岸和南美洲西岸， 8.75°E 和 32.25°E 两个峰值位于非洲大陆的两侧， 100.25°E 和 121.75°E 两个峰值在亚洲中南半岛西侧及亚洲大陆东侧， 153.75°E 峰值位于澳洲大陆西侧。这些结果表明，近海海域的闪电分布特征与大陆的闪电活动密切相关，是大陆闪电活动在海洋上的延伸。

表 2 不同纬度带的闪电活动分布

Table 2 The distributions of lightning activities in different latitudinal zones

	闪电总数 (10^7 fl a^{-1})				闪电密度 ($\text{fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$)			
	全球	陆地	近海	远海	全球	陆地	远海	近海
$5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$	27.2	22.6	3.79	0.766	6.13	22.40	0.29	3.17
$10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$	70.6	58.0	9.93	2.73	5.89	21.00	0.32	3.33
$20^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$	85.4	69.7	11.9	3.78	4.91	16.89	0.33	2.93
$30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$	113	91.0	16.4	6.12	4.46	13.85	0.36	3.10

在 $15^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{N}$ ，大陆西部近海海域闪电频数大于东部，在 10°N 附近有异常（如图 4 所示）；在 $20^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{S}$ 和 $20^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ ，大陆东部近海海域闪电频数大于西部，在 $36^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 有异常。 10°N 附近的异常区内有印度半岛东部的孟加拉湾，该地区水汽充足，并处于世界上最大的季风区内，有利于雷暴系统的生成，从而产生较多的海洋闪电。 $36^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 的异常区包括地中海北部区域，该地

区海陆交错，水汽充沛，也有利于雷暴系统的生成。东部近海海域闪电活动两个峰值在 30°N 和 33°S 附近，大小分别为 $9.5 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$ （亚欧大陆和北美大陆东岸）和 $8.5 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$ （南美洲、非洲和澳洲东岸），西部近海海域闪电活动主峰在 4°N 左右出现，为 $10.4 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$ （非洲和美洲大陆的西岸），次峰在 40°N 附近出现，为 $3.9 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$ （欧亚大陆西岸）。

由表 3 可以看到， $15^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{N}$ 大陆西部近海海域闪电频数大于东部； $15^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 和 $15^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{S}$ 大陆东部近海海域闪电频数大于西部。Christian et al. (2003)认为，北大西洋和西太平洋显著的闪电活动与这两个地区经常有冷空气移向温暖的洋面形成的层结不稳定有关。目前对大陆东西部近海海域闪电活动差异的形成原因还不是很清楚，不过可能与干冷空气移向暖湿洋面以及一部分陆地雷暴向海洋的移动有关，具体成因还有待进一步研究。

表 3 大陆西部、东部近海海域闪电活动对比

Table 3 The comparison of lightning activities in the offshore area of different regions

	大陆西部		大陆东部	
	总数 (fl a^{-1})	频数 (fl s^{-1})	总数 (fl a^{-1})	频数 (fl s^{-1})
$75^{\circ}\text{S} \sim 75^{\circ}\text{N}$	8.94×10^7	2.84	1.20×10^8	3.80
$50^{\circ}\text{N} \sim 75^{\circ}\text{N}$	8.51×10^5	0.03	7.76×10^5	0.02
$15^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$	2.06×10^7	0.65	5.61×10^7	1.78
$15^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{N}$	6.51×10^7	2.06	3.42×10^7	1.08
$15^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{S}$	2.82×10^6	0.09	2.84×10^7	0.90
$50^{\circ}\text{S} \sim 75^{\circ}\text{S}$	4.60×10^4	0.001	6.45×10^4	0.002

3.3 闪电活动的季节变化特征

图 5 为由 HRAC 资料得到的全球、陆地、近海

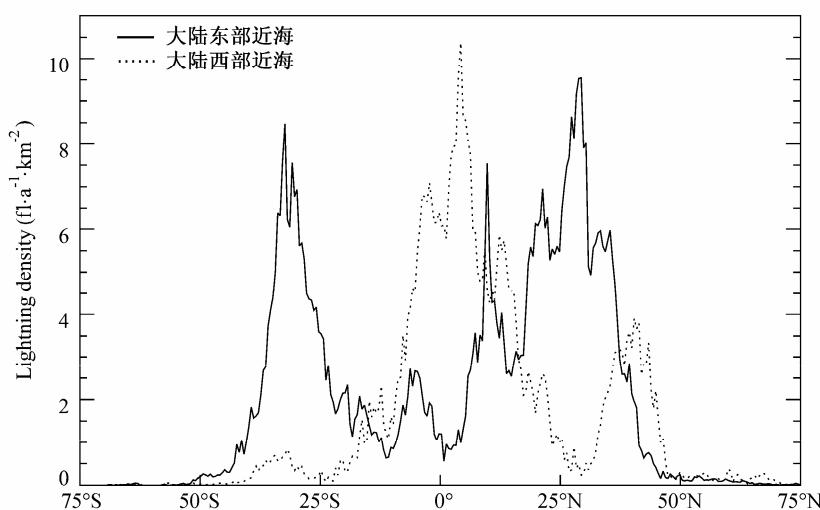


图 4 由 HRFC 资料得到的不同纬度范围大陆东、西部近海海域闪电活动的比较

Fig. 4 The comparison of lightning activities between the offshore areas on the east and the west of continent in different latitude based on the HRFC data

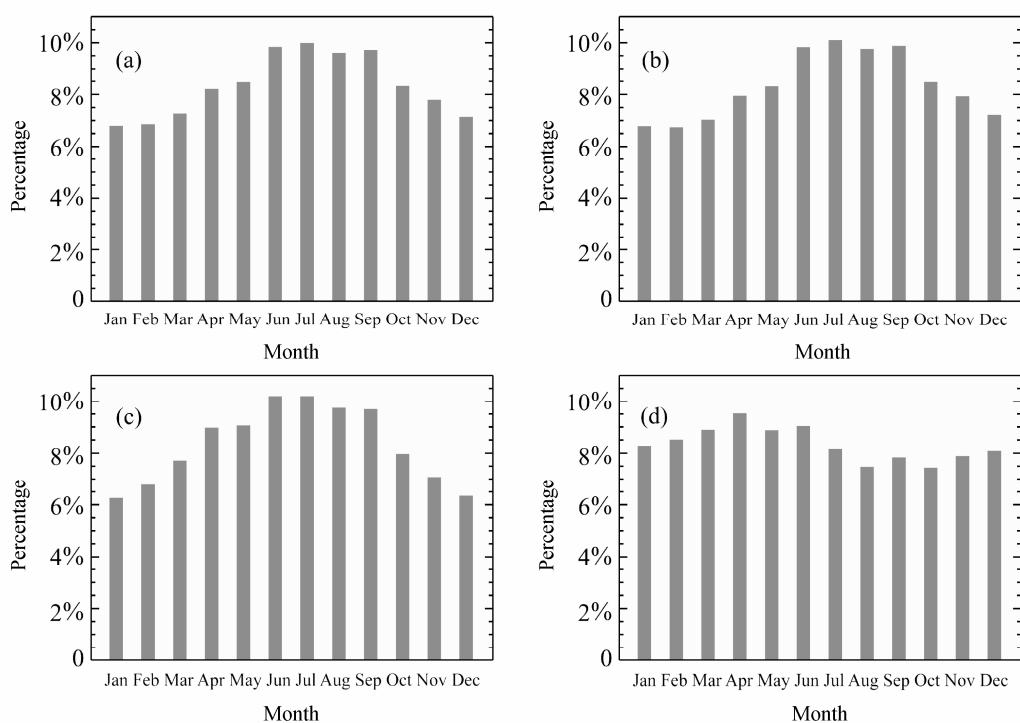


图 5 (a) 全球、(b) 陆地、(c) 近海海域、(d) 远海海域闪电占闪电总数的百分比的季节变化

Fig. 5 The seasonal variations of the percentages in the total lightning activities in (a) the whole world, (b) land, (c) offshore area, and (d) open sea

和远海海域闪电活动季节变化特征（每月闪电数相对于全年闪电数的百分比，下同）。从图中可以看出，全球和陆地闪电活动呈现单峰特征，在7月达到最大，全球闪电频数可以达到 55.7 fl s^{-1} ，陆地可以达到 43.6 fl s^{-1} ；近海海域闪电活动在7月也出现一个 9.1 fl s^{-1} 的峰值。近海海域和陆地闪电活动的相关系数为0.910（通过0.01的显著性检验），和远海闪电活动相关系数小且没有通过检验，可见近海海域闪电活动季节变化受到大陆影响较大，受远海海域的影响较小。远海海域闪电活动在4月有一个较弱的峰值（ 3.47 fl s^{-1} ），在全球和陆地闪电活动较为频繁的8、9、10月，远海闪电出现了一个低谷。

图6和图7进一步给出了南、北半球闪电活动季节变化特征。可以看到，除北半球远海海域外，其他区域的闪电活动都呈现单峰的分布特征。南半球闪电活动在12月达到峰值，闪电频数达到 29.8 fl s^{-1} ，在7月出现最小值（ 8.5 fl s^{-1} ），春季闪电活动强于秋季（南半球的季节）。北半球闪电活动峰值出现在7月，闪电频数达到 47.2 fl s^{-1} ，1月的闪电频数最小（ 8.6 fl s^{-1} ），春季闪电活动强于秋季（北半球的季节）。南半球近海海域闪电活动峰值出现在1月，闪电频数为 3.3 fl s^{-1} ，最小值出现

在7月，闪电频数为 1.2 fl s^{-1} 。北半球近海海域闪电活动峰值出现在7月，闪电频数为 7.9 fl s^{-1} ，最小值出现在1月，闪电频数为 2.3 fl s^{-1} 。近海海域闪电活动峰值出现的时间与陆地基本相同，但数值较小。南半球远海海域闪电活动的变化可分成上半年和下半年两段，上半年强于下半年，总体分布均匀。北半球远海海域闪电活动的变化比南半球更为平缓。

3.4 海拔高度对闪电活动的影响

图8为由HRFC资料和ISLSCP的海拔高度资料得到的全球闪电活动随着海拔高度的分布特征。从图中可以看到，全球闪电活动随海拔高度呈两峰三谷分布特征，两峰区分别位于海拔 $100\sim2400 \text{ m}$ 和 $3300\sim4600 \text{ m}$ ，峰值分别在 $400\sim700 \text{ m}$ 和 $3600\sim3800 \text{ m}$ 。第一个峰区面积占探测面积的23.6%，闪电占全球总数的67.4%，闪电密度峰值为 $10.8 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$ ，刚果盆地、巴拉那河流域和博茨瓦纳南部等全球闪电极值地区的海拔高度均在这个范围内，全球闪电活动频繁的地区如非洲大陆中部、亚欧大陆南部、澳洲大陆北部和美洲大陆大部分地区都在这个海拔高度范围内。第二个峰区面积占探测面积的0.45%，闪电占全球总数的0.55%，

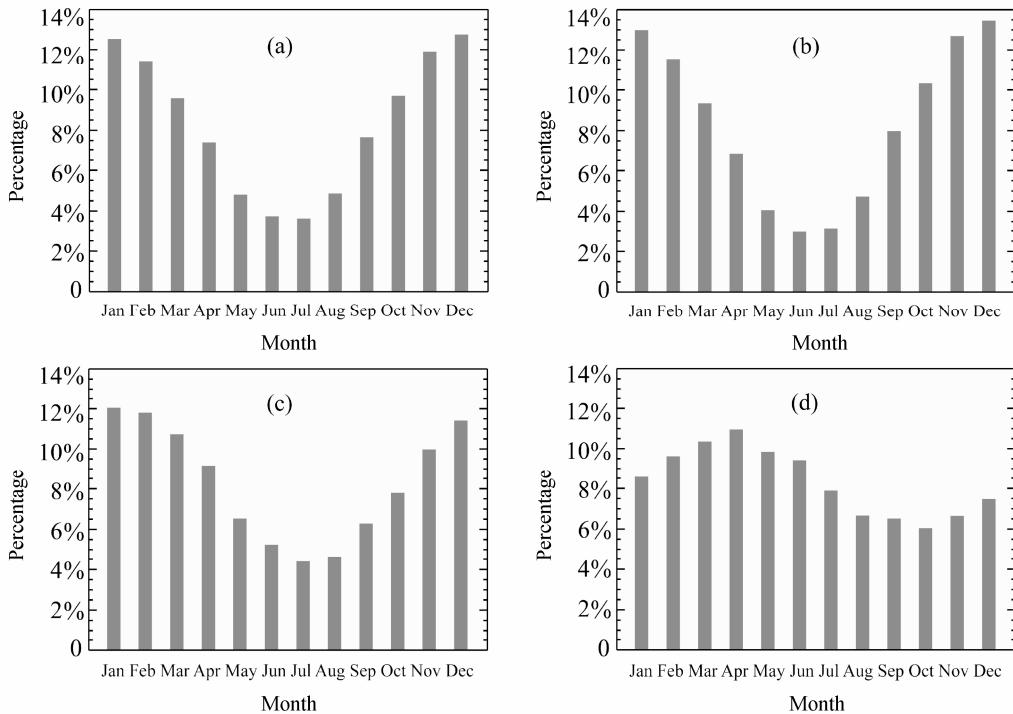


图 6 南半球 (a) 总体、(b) 陆地、(c) 近海海域、(d) 远海海域闪电占闪电总数的百分比的季节变化

Fig. 6 The seasonal variations of the percentages in the total lightning activities in the (a) overall, (b) land, (c) offshore area, and (d) open sea of the Southern Hemisphere

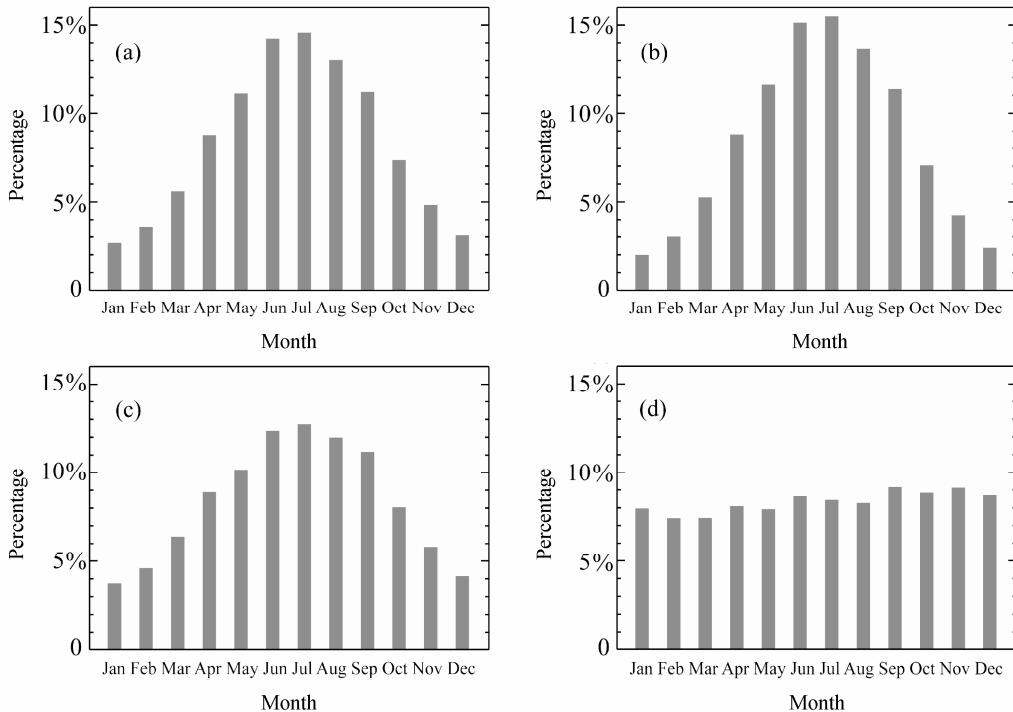


图 7 同图 6, 但为北半球

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the Northern Hemisphere

闪电密度峰值为 $5.5 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$, 主要集中在南美洲安第斯山脉中段、我国新疆维吾尔自治区与哈萨克斯坦交界地区和青藏高原中东部地区。安第斯山

脉阻挡了来自太平洋的水汽, 迫使其爬升, 有利于强对流的发生, 天山山脉和帕米尔高原同样阻挡了西风带引导的西风, 西风抬升产生对流, 而青藏高

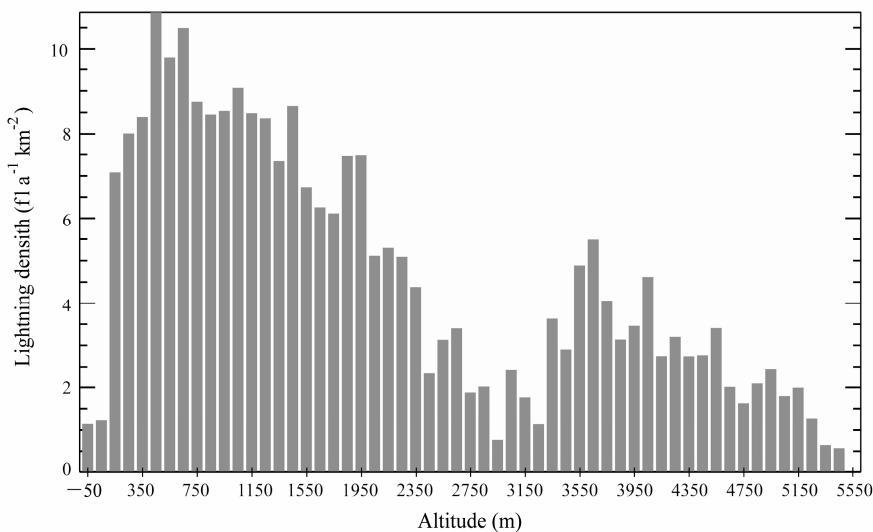


图 8 全球闪电活动在不同海拔高度上的分布

Fig. 8 The distribution of global lightning activities at different altitudes

原东部地区较多的闪电活动与其特殊的地形特征和热力作用密切相关(郄秀书等, 2004)。第一个低谷区出现在海拔 100 m 以下, 面积占探测面积的 74.9%, 闪电数占全球总数的 31.2%, 平均闪电密度为 $1.2 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$, 主要包括海洋和低海拔高度的陆地。第二个谷区出现在海拔 2400~3300 m, 面积占探测面积的 0.61%, 闪电占全球总数的 0.80%, 闪电密度最小为 $0.77 \text{ fl a}^{-1} \text{ km}^{-2}$, 主要包括南极洲的部分地区、北美洲中部落基山脉东侧、南美洲中部安第斯山脉东侧、青藏高原西部和格陵兰岛中部等。美洲的低值区是由于地处山脉的背风坡, 下沉气流增温减湿, 不得利于对流的发生, 而格陵兰岛因空气寒冷干燥, 也很少出现对流天气。第三个谷区出现在 4600 m 以上, 主要包括一些山脉主峰。

图 9 给出了北回归线以北、热带地区和南回归线以南 3 个区域闪电活动随海拔高度的分布特征。从图上可以看出, 闪电活动在 3 个区域均呈现出两峰三谷特征。北回归线以北区域和全球的闪电活动分布特征基本相同, 第二个谷值同样出现在海拔 3000 m 处。热带地区闪电活动分布的两峰三谷特征很明显, 两个峰区出现在海拔 100~2600 m 和 3200~4500 m, 在海拔 3000 m 同样出现第二个谷值。南回归线以南区域闪电活动的两峰三谷特征明显, 两个峰区分别位于海拔 200~2000 m 和 3400~4400 m, 第二个谷区在 2000~3400 m 间, 比全球的第二个谷区范围大。

闪电活动随海拔高度呈现的这种分布特征, 一方面是受局地气候系统的影响。另一方面, 随着海

拔高度的增加, 地表接收太阳入射辐射相对增加, 地气间的热通量交换随之增加, 近地层的大气增温快, 容易出现层结不稳定, 并且随着海拔高度增加, 下垫面往往更加粗糙, 利于对流的发生, 故出现了第一个闪电峰区。大气中水汽含量随海拔高度的增加而迅速减少, 增加到一定的高度以后, 水汽变得很稀少, 即使有对流的发生也不大可能产生雷暴, 故出现了第二个谷区。高原或者山脉等大地形可以产生强大的地形抬升力, 对大气环流的影响十分显著, 可迫使气流绕行、分支或者爬坡越过, 从而对对流活动产生强大的外界强迫, 并且高原地区一般是热源区域, 有利于气流的辐合, 从而导致对流的发生, 故在海拔 3300~4600 m 范围会出现第二个峰值。海拔 4600 m 以上区域主要是一些山峰的峰顶, 空气寒冷干燥, 长年积雪, 陆面温度低, 难以形成对流, 出现了第 3 个谷区。因此, 全球闪电活动随海拔高度变化呈现的这种两峰三谷的特征, 是在地理位置和海拔高度的影响下, 各种因素综合作用造成的。

4 结论

本文利用 OTD 与 LIS 所获取的 11 a 闪电资料对全球闪电活动特征进行了研究, 详细分析了闪电活动与海陆分布、季节变化以及海拔高度之间的关系, 主要研究结果如下:

(1) 全球闪电频数约为 46.2 fl s^{-1} , 在 $30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 的闪电数占到了全球闪电总数的 78.1%, 陆地

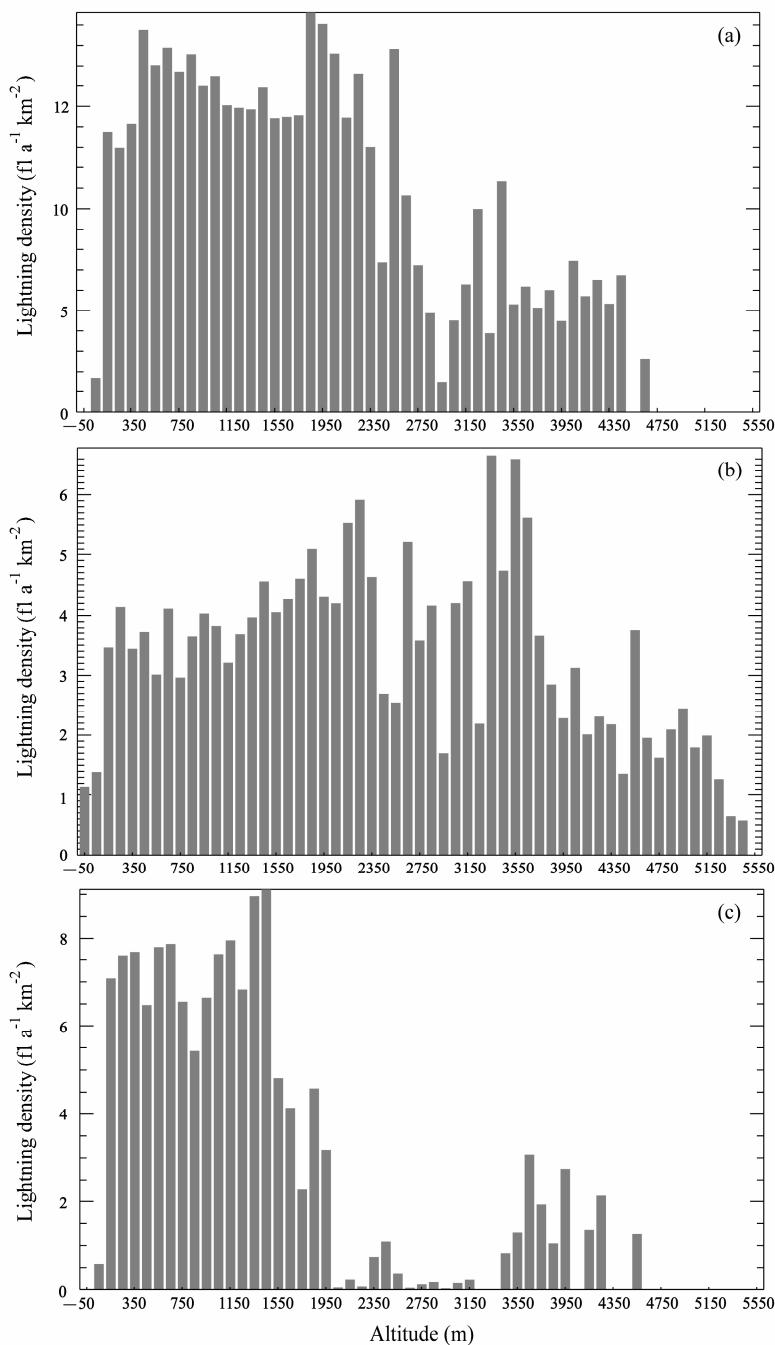


图 9 闪电活动在(a)北回归线以北的区域、(b)热带地区、(c)南回归线以南的区域的分布

Fig. 9 The distributions of lightning activities in (a) the north of the Tropic of Cancer, (b) equatorial regions, and (c) the south of the Tropic of Capricorn

和海洋的闪电密度之比为 9.64:1，这些结论与 Christian et al. (2003) 利用 5 a OTD 资料所得到的结论基本一致，考虑到本文的资料累积时间更长，LIS 探测效率更高，结果应更加接近于实际情况。

(2) 将全球分成陆地、近海海域和远海海域 3 个区域。发现近海海域面积占海洋面积的近 3 成，闪电数却占到了海洋闪电总数的近 7 成，是海洋闪电主要组成部分。近海海域闪电活动主要集中在赤

道地区，随着纬度变化有 7 个峰值。远海海域闪电密度小，分布均匀。

(3) 全球、陆地、近海海域闪电活动的季节变化呈现单峰特征，在 7 月达到最强；远海海域闪电活动季节变化不明显。近海海域闪电活动主要是受陆地影响大，受远海影响小。

(4) 在 15°N~50°N 和 15°S~50°S，大陆东部近海闪电频数大于西部，而在 15°S~15°N 区域内

相反, 大陆西部近海闪电频数大于东部。

(5) 闪电密度随海拔高度呈现出两峰三谷的分布特征, 两峰分别出现在海拔 100~2400 m 和 3300~4600 m。3 个低谷分别出现在海拔 100 m 以下、2400~3300 m 和 4600 m 以上区域。海拔 5500 m 以上地区, 没有闪电发生。这种现象是在地理位置和海拔高度的影响下, 各种因素综合作用的结果。

致谢 感谢全球水文资源中心为本文研究工作提供 LIS/OTD 格点资料。

参考文献 (References)

- Boccippio D J, Goodman S J, Heckman S. 2000. Regional differences in tropical lightning distributions [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (12): 2231–2248.
- Bond D W, Steiger S, Zhang R Y, et al. 2002. The importance of NO_x production by lightning in the tropics [J]. *Atmos. Environ.*, 36 (9): 1509–1519.
- Brooks C E P. 1925. The distribution of thunderstorms over the globe [J]. *Geophys. Memo.*, 3 (24): 147–164.
- Christian H J, Latham J. 1998. Satellite measurements of global lightning [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (549): 1771–1773.
- Christian H J, Blakeslee R J, Boccippio D J, et al. 2003. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D1): 4005.
- DeCaria A J, Babij M J. 2003. A map of lightning strike density for southeastern Pennsylvania and correlation with terrain elevation [C]// Proceedings of the Digital Mapping Techniques Workshop. U. S. Geological Survey Open-File Report, 403–471.
- Dissing D, Verbyla D L. 2003. Spatial patterns of lightning strikes in interior Alaska and their relations to elevation and vegetation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 33: 770–782.
- Heckman S J, Williams E R, Boldi R. 1998. Total global lightning inferred from Schumann resonance measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D24): 31775–31779.
- Kotaki M, Katoh C. 1983. The global distribution of thunderstorm activity observed by the Ionospheric Sounding Satellite (ISS-b) [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 45: 843–847.
- Levy II H, Moxim W J, Kasibhatla P S. 1996. A global three-dimensional time-dependent lightning source of tropospheric NO_x [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D17): 22911–22922.
- 刘东霞, 郦秀书, 冯桂力. 2010. 华北一次中尺度对流系统中的闪电活动特征及其与雷暴动力过程的关系研究 [J]. *大气科学*, 34 (1): 95–104.
- Liu Dongxia, Qie Xiushu, Feng Guili. 2010. Evolution characteristics of the lightning and the relation with dynamical structure in a mesoscale convective system over North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 95–104.
- 马明, 陶善昌, 祝友宝, 等. 2004. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 34 (4): 298–306.
- Shanchang, Zhu Youbao, et al. 2005. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions [J]. *Science in China (Ser. D)*, 48 (2): 219–229.
- Mackerras D, Darveniza M, Orville R E, et al. 1998. Global lightning: Total, cloud and ground flash estimates [J]. *J. Geophys. Res.*, 103 (D16): 19791–19809.
- Markson R, Muir M. 1980. Solar wind control of the earth's electrical field [J]. *Science*, 208 (4447): 979–990.
- McCollum J R, Gruber A, Ba M B. 2000. Discrepancy between gauges and satellite estimates of rainfall in equatorial Africa [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (5): 666–679.
- Orville R E, Henderson R W. 1986. Global distribution of midnight lightning: September 1977 to August 1978 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114 (12): 2640–2653.
- Price C. 2000. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapour [J]. *Nature*, 406: 290–293.
- Qie X S, Toumi R, Yuan T. 2003. Lightning activities on the Tibetan Plateau as observed by the lightning imaging sensor [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D17): 4551, doi: 10.1029/2002JD003304.
- 郦秀书, 周筠珺, 袁铁. 2003a. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异 [J]. *地球物理学报*, 46(6): 743–750.
- 郦秀书, Toumi R, Zhou Yunjun, Yuan Tie. 2003a. Global lightning activities and their regional differences observed from the satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 46 (6): 743–750.
- 郦秀书, Toumi R, 周筠珺. 2003b. 青藏高原中部的闪电活动特征及其对对流最大不稳定能量的响应 [J]. *科学通报*, 48 (1): 87–90.
- 郦秀书, Toumi R, Zhou Yunjun. 2003b. Lightning activity on the central Tibetan Plateau and its response to convective available potential energy [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (3): 296–299.
- 郦秀书, 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.
- 郦秀书, 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.
- Reeve N, Toumi R. 1999. Lightning activity as an indicator of climate change [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125 (555): 893–903.
- Schulz W, Diendorfer G. 1999. Lightning characteristics as a function of altitude evaluated from lightning location network data [C]// Proceedings of the International Conference on lightning and Static Electricity. Toulouse, France.
- Sparrow J G, Ney E P. 1971. Lightning observations by satellite [J]. *Nature*, 232: 540–541.
- 孙澈. 2011. 北京城区与郊区雷暴气候特征及其变化对比 [J]. *气候与环境研究*, 16 (5): 649–656.
- Sun Wei. 2011. Comparison analyses of climate characteristics of thunderstorm and its variations between urban and rural areas in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (5): 649–656.
- Toumi R, Qie X S. 2004. Seasonal variation of lightning on the Tibetan Plateau: A spring anomaly? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (4): L04115.
- Williams E R. 1992. The Schumann resonance: A global tropical thermometer [J]. *Science*, 256 (5060): 1184–1187.
- Williams E R, Heckman S J. 1993. The local diurnal variation of cloud

- electrification and the global diurnal variation of negative charge on the Earth [J]. *J. Geophys. Res.*, 98 (D3): 5221–5234.
- 熊亚军, 郭秀书, 郭凤霞, 等. 2005. 南美闪电活动的时空分布特征及其与东太平洋海温的关系 [J]. *高原气象*, 24 (3): 397–403. Xiong Yajun, Qie Xiushu, Guo Fengxia, et al. 2005. Temporal and spatial characteristics of South American lightning activities and their relationship with SST in East Pacific [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (3): 397–403.
- 袁铁, 郭秀书. 2004. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征 [J]. *高原气象*, 23 (4): 488–494. Yuan Tie, Qie Xiushu. 2004. Spatial and temporal distributions of lightning activities in China from satellite observation [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (4): 488–494.
- 袁铁, 郭秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飑线的闪电活动及其与降水结构的关系研究 [J]. *大气科学*, 34 (1): 58–70. Yuan Tie, Qie Xiushu. 2010. TRMM-based study of lightning activity and its relationship with precipitation structure of a squall line in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 58–70.
- 周筠珺, 郭秀书. 2002. 闪电产生 NO_x 机制及中国内陆闪电产生 NO_x 量的估算 [J]. *高原气象*, 21 (5): 501–508. Zhou Yunjun, Qie Xiushu. 2002. Mechanism and estimation of lightning generated NO_x in Chinese inland area [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 21 (5): 501–508.