

# 中国东部及邻近海域暖季降水系统的 闪电、雷达反射率和微波特征<sup>\*1</sup>

袁 铁<sup>1,2</sup> 郄秀书<sup>3</sup>  
YUAN Tie<sup>1,2</sup> QIE Xiushu<sup>3</sup>

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. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州, 730000
3. 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(LAGEO), 北京, 100029

1. *Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*
3. *Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2008-11-03 收稿, 2009-04-10 改回.

**Yuan Tie, Qie Xiushu. 2010. Characteristics of the lightning activity, radar reflectivity and microwave brightness temperature of warm season precipitation systems over the eastern China and adjacent seas as observed by TRMM satellite. Acta Meteorologica Sinica, 68(5):652-665**

**Abstract** The spacial distribution and diurnal variation as well as the characteristics of the lightning activity, radar echo height and microwave brightness temperature of precipitation systems over the eastern China and adjacent seas have been investigated by using the data from the precipitation radar (PR), lightning imaging sensor (LIS), and passive microwave imaging (TMI) onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite for the eight warm seasons of 1998–2005, and the relationship between the lightning activity and radar echo height, and between the microwave brightness temperature and ice precipitation content are analyzed quantitatively. The precipitation systems are classified as systems without ice scattering (NoIces), systems with ice scattering (IcePSs) and systems with an MCS (McsPSs). The results show that NoIces account for more than 85% of the population, IcePSs for about 10%, and McsPSs for about 1.5% over both of the regions. There is an obvious diurnal variation of precipitation systems over the eastern Chinese mainland, and the diurnal change amplitude over the East China Sea is small. 93% and 97% of the precipitation systems over the eastern Chinese mainland and the East China Sea, respectively, have no lightning record and the probability of lightning occurrence over the former is higher than that over the latter. McsPSs not only have the highest flash rate, but also contribute more than half of the total lightning. With the enhancement of precipitation system intensity, the maximum height of 20 dBz significantly increases and the minimum polarization corrected temperatures (PCTs) at 85 GHz and 37 GHz gradually decrease. For the same value of maximum height of 20 dBz or minimum PCTs at 85 GHz, the probability of lightning occurrence of precipitation systems over the eastern Chinese mainland is higher than that over the East China Sea. The relationship between the flash rate and the minimum PCTs at 85 GHz is better than that between the flash rate and the maximum height of 20 dBz, and compared with relation between the two former, the correlation between the flash rate and the ice precipitation content within the layer of 7–11 km has a greater improvement. Further study

\* 资助课题: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-206)、国家杰出青年科学基金项目(40325013)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(IAP07310)。

作者简介: 袁铁, 主要从事大气电学与卫星遥感的研究。E-mail: tyuan@lzu.edu.cn

indicates that there is a good dependence between the flash rate and the ice precipitation content within the 7–11 km on cell scales with the correlation coefficient higher than 0.7 over both of the regions.

**Key words** Precipitation systems, Lightning flash, Radar reflectivity, Ice precipitation content, Microwave brightness temperature

**摘 要** 利用热带测雨卫星的测雨雷达、闪电成像仪和微波辐射计 8 个暖季的轨道观测资料,研究了我国东部及邻近海域不同类型降水系统的地理分布规律和日变化特征及其闪电活动、雷达回波顶高和微波亮温的特征,并进一步分析了闪电与雷达回波顶高、微波亮温和冰相降水含量之间的关系。结果表明,两个地区的降水系统绝大部分都是无冰散射系统(占 85%以上),非中尺度冰散射系统占 10%左右,中尺度冰散射系统仅占约 1.5%。我国大陆东部降水系统的日变化特征明显,而东海地区日变化幅度很小。我国大陆东部和东海地区分别约有 93%和 97%的降水系统没有闪电记录,并且前者闪电发生概率高于后者。中尺度冰散射雷暴不但闪电频数最高,而且贡献了总闪电的一半以上。随着降水类型强度的增强,20 dBz 最大高度明显增高,最小 85 GHz 和 37 GHz 极化修正亮温则逐渐降低。对于同样的 20 dBz 最大高度和最小 85 GHz 极化修正亮温,我国大陆东部降水系统发生闪电的概率均高于东海地区。降水系统尺度上的闪电频数与最小 85 GHz 极化修正亮温的关系在稳定性和相关性方面要好于其与 20 dBz 最大高度的关系,而闪电频数与 7—11 km 的总冰相降水含量之间的相关性又比其与最小 85 GHz 极化修正亮温有了较大的提高。进一步研究表明,单体尺度上的闪电频数和 7—11 km 总冰相降水含量之间也表现出了非常密切的关系,在两个研究地区的相关系数都超过了 0.7。

**关键词** 降水系统, 闪电, 雷达反射率, 冰相降水, 微波亮温

**中图法分类号** P407.7 P427.3

## 1 引言

我国东部地处东亚季风区,对流活动频繁,各种灾害性降水系统(如冰雹、飑线、梅雨锋暴雨等)常常会给人们生产生活带来巨大的影响和损失。而大多数的降水系统空间尺度较小,发生发展迅速,常规的地面观测手段很难对其进行有效探测。深入认识降水系统的动力和微物理特征是改善降水量估计精度、提高强对流天气预警预报水平的重要基础,但受到观测限制,目前国内相关研究中数值模拟工作较多,实际观测资料的分析还不是很多(刘黎平等, 2004)。

美国和日本于 1997 年底发射的热带测雨卫星(TRMM)携带有降水雷达(PR)、微波成像仪(TMI)和闪电成像仪(LIS)等多个仪器,能够同时获得降水系统(35°S—35°N)的三维雷达反射率、降水率、微波亮温、闪电活动等信息。迄今为止,TRMM 卫星已经工作超过 10 年,积累了大量的全球热带和亚热带地区降水系统特征探测资料,并为国内外学者所广泛使用。基于 TRMM PR 探测资料,许多学者分析了不同地区、不同季节降水的水平和垂直分布特征(Hirose, et al, 2005; Houze, et al, 2007; 傅云飞等, 2008)。与美国国防气象卫星的专用微波传感器(SSM/I)相比, TMI 的空间分辨率更高,相关的降水反演算法和资料的应用方面也有较

多研究(李万彪等, 2001; Zhao, et al, 2001; Wen, et al, 2003)。LIS 能够以较高的探测效率对总闪电活动(包括地闪和云闪)进行记录,从而大大促进了人们对全球不同区域的闪电活动气候特征的认识(Qie, et al, 2003; 袁铁等, 2004; Ma, et al, 2005)。

不过,受到工作原理和探测方式的限制,单一仪器的探测总会存在着相应的不足,而 TRMM 卫星的多传感器在对地探测时可以相互补充,能够对降水系统特征的内部结构和强度等方面提供更加全面的信息。另一方面,由于其观测资料中不但有表征降水系统的动力和微物理特征的参量,还有闪电活动的观测,也给人们提供了一个研究雷暴云起电机制的机会。基于 PR 近地面雷达反射率和 TMI 85 GHz 极化修正亮温, Nesbitt 等(2000)开发了一个降水系统识别算法(后被大量使用),并利用 3 个月的 TRMM 资料分析了两个热带陆地地区和两个海洋地区降水系统的雷达反射率、冰散射信号和闪电特征。Cecil 等(2005)则利用 TRMM 3 年(1998—2000 年)的资料分析了全球热带和亚热带地区降水系统的闪电频数、对流强度(最小微波亮温、最大雷达反射率)和体积降水量等特征,研究了闪电频数与其他对流强度表征参量之间的关系。最近,基于 TRMM 的多传感器探测资料,地中海(Katsanos, et al, 2007)和西北太平洋(Kodama, et al, 2007; Park, et al, 2007)等一些局部地区的降水系统闪电活动和

微物理特征也被进一步的详细分析。与国外相比, 中国在 TRMM 的多传感器资料的综合分析利用研究方面还相对较少(Yuan, et al, 2008), 已有的工作主要还限于个例的分析研究(郑媛媛等, 2004; 曹自强等, 2005; 傅云飞等, 2007; Feng, et al, 2007)。

为了发挥 TRMM 卫星多传感器的同步探测优势, 深入认识中国东部及邻近海域降水系统的特征, 本文将利用 8 a 的 TRMM 卫星 PR、TMI、和 LIS 的轨道观测资料, 首先给出中国东部及邻近海域不同类型降水系统的时空分布规律, 然后具体分析降水系统的闪电活动、20 dBz 最大高度和微波亮温的特征, 并进一步研究闪电活动与不同对流强度参量(20 dBz 最大高度、微波亮温)和冰相降水含量之间的关系。

## 2 资料和分析方法

### 2.1 TRMM 卫星及其资料简介

TRMM 卫星于 1997 年 12 月升空, 轨道倾角为  $35^\circ$  (即探测范围仅限于南北纬  $35^\circ$  以内), 载有降水雷达(PR)、微波成像仪(TMI)、闪电成像仪(LIS)、可见光与红外扫描仪(VIRS)及云和地球辐射平衡系统(CERES)5 个探测器, 主要任务是监测热带、亚热带地区的降水结构、降水率及降水分布情况, 为理解全球气候变化的机制和监测环境变化提供数据积累。TRMM 卫星是一颗非太阳同步极轨卫星, 初始工作轨道高度为 350 km, 绕地球观测一周耗时约 90 min, 一天可以完成 16 条轨道观测。为延长工作寿命, 2001 年 8 月 TRMM 卫星轨道升高到 403 km, 各种探测器的空间分辨率略有增大(如 PR 空间分辨率从 4.3 km 变为 5 km), 目前该卫星仍正常运行, 并有望工作至 2012 年。本文使用的 TRMM 资料包括 PR 2A25 产品中的三维雷达反射率、TMI 1B11 产品中的 85 和 37 GHz 的微波亮温、LIS 的闪电(flash)产品, 具体分析时段为 1998—2005 年的 8 个暖季(本文指 3—10 月)。关于 PR 和 TMI 的产品信息可参考文献(傅云飞等, 2003), LIS 资料的详细信息可参考文献(Qie, et al, 2003), 在此不再赘述。

由于本文研究区域中包含了陆地和海洋, 为了消除海陆边界和陆地表面不均一带来的微波亮温不连续现象, 这里分别使用了 Spencer 等(1989)和 Cecil 等(2002)定义的 85 和 37 GHz 极化修正亮温来

描述降水系统的冰散射信号。极化修正亮温的计算公式为:

$$T_{PC85} = 1.82T_{85v} - 0.82T_{85h}$$

$$T_{PC37} = 2.20T_{37v} - 1.20T_{37h}$$

其中  $T_{85v}$  与  $T_{85h}$  分别代表 85 GHz 的垂直和水平极化亮温,  $T_{37v}$  与  $T_{37h}$  分别代表 37 GHz 的垂直和水平极化亮温。

### 2.2 降水系统识别算法

本文采用了 Nesbitt 等(2000)提出的算法来实现将 TRMM 原始轨道资料转化为降水系统级别资料。Nesbitt 等(2000)利用 PR 的近地面雷达反射率和 TMI 的 85 GHz 极化修正亮温( $T_{PC85}$ ), 将降水系统分成 3 类, 即: 无冰散射降水系统(NoIces)、非中尺度冰散射系统(IcePSs)和中尺度冰散射系统(McsPSs), 具体定义见表 1。其中无冰散射降水系统指那些没有显著冰散射信号(也可能有但因为探测器分辨率的原因而无法观测到)的系统, 一般对应于暖云、弱对流或消亡阶段的对流。非中尺度冰散射系统指有显著的冰散射信号但是又不能满足中尺度冰散射系统标准的系统, 其尺度范围很大, 一般对应于中等强度的对流。中尺度冰散射系统则不但要求有显著冰散射信号的连续区域超过  $2000 \text{ km}^2$ , 而且还要求深对流区(即  $T_{PC85} \leq 225 \text{ K}$  面积至少要达到  $185 \text{ km}^2$ )的存在, 对应于最强烈的对流系统, 通常伴有大量的降水和频繁的闪电活动。

表 1 Nesbitt 等(2000)对降水系统的分类标准

Table 1 Criteria used to classify precipitation systems by Nesbitt et al. (2000)

类型	定义
NoIces	4 个以上(即面积 $\geq 75 \text{ km}^2$ )的连续 PR 像素近地表反射率因子 $\geq 20 \text{ dBz}$ , 没有像素包含 $T_{PC85} \leq 250 \text{ K}$
IcePSs	4 个以上(即面积 $\geq 75 \text{ km}^2$ )的连续 PR 像素近地表反射率因子 $\geq 20 \text{ dBz}$ , 至少有一个像素包含 $T_{PC85} \leq 250 \text{ K}$ , 但不满足 McsPSs
McsPSs	108 个以上(即面积 $\geq 2000 \text{ km}^2$ )的连续数据 $T_{PC85} \leq 250 \text{ K}$ , 10 个以上(即面积 $\geq 185 \text{ km}^2$ )的数据包含 $T_{PC85} \leq 225 \text{ K}$

### 2.3 冰相降水含量的计算

虽然 TMI 的 2A12 产品中给出了云模式反演的冰相降水含量(包括云冰和降水性冰), 但考虑到反演过程使用了 TMI 全部 9 个通道的亮温值, 其中包括分辨率低的通道亮温(如 10 GHz 的分辨率是  $63 \text{ km} \times 37 \text{ km}$ ), 这使得资料的实际分辨率要低于

产品中的分辨率(约 5 km),而且其准确性还有待进一步的检验。考虑到 PR 的分辨率较高,并且没有 TMI 观测中的扫描不连续现象,因此本文选择了 Carey 等(2000)提出的方法由雷达反射率因子计算混合相区域的冰相降水含量,即

$$M = 1000\pi\rho_i N_0^{3/7} \left( \frac{5.28 \times 10^{-18}}{720} Z \right)^{4/7}$$

其中  $Z$  为雷达反射率因子,单位是  $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ,  $\rho_i = 917 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,  $N_0 = 4 \times 10^6 \text{ m}^{-4}$ ,  $M$  是冰相降水含量,单位是  $\text{g}/\text{m}^3$ 。需要说明的是, Carey 等(2000)使用的是  $Z_{\text{H}}^{\text{ice}}$ (即冰相粒子对雷达水平极化反射率因子的贡献)而不是  $Z$ ,此处笼统地用  $Z$  代替  $Z_{\text{H}}^{\text{ice}}$ ,可能会带来冰相粒子估算的偏高,但我们这里并不是对冰相降水含量做精确计算,而是用来进行其与闪电活动的分析。该计算方法最初虽然是针对热带对流系统提出来的,但后来陆续被许多研究人员(Petersen, et al, 2001; 2005; Gauthier, et al, 2006)用于分析全球、区域和单体闪电与冰相降水含量之间的关系,可以认为其计算结果能够反映冰相降水含量的变化趋势。

### 3 结 果

#### 3.1 降水系统的时空分布特征

考虑到陆地和海洋的差异,这里选择中国大陆

东部( $21^\circ\text{--}38^\circ\text{N}$ ,  $105^\circ\text{--}120^\circ\text{E}$ )和东海地区( $25^\circ\text{--}35^\circ\text{N}$ ,  $123^\circ\text{--}130^\circ\text{E}$ )分别进行讨论,表 2 给出了 TRMM 卫星观测到的两个地区 8 个暖季降水系统的统计结果。从表 2 中可以看到,中国大陆东部的降水系统绝大部分属于无冰散射系统(占 85.3%),非中尺度冰散射系统占 14.2%,而中尺度冰散射系统仅占 1.5%。东海地区总降水系统中无冰散射系统的比例略高于中国大陆东部(占 89.4%),而非中尺度冰散射系统的比例则小于中国大陆东部(占 9%),中尺度冰散射系统的比例则基本相同(1.6%),这样的比例与南海季风爆发后(Yuan, et al, 2008)和全球热带地区的平均结果(Nesbitt, et al, 2000)接近。中国大陆东部 3 种类型系统的平均降水强度均大于东海地区,其中非中尺度冰散射系统贡献了最大的降水量,在两个地区都超过 40%,而中尺度冰散射系统虽然在数量上最少,但是也贡献了约 1/3 的总降水,无冰散射系统虽然数量上最大,但是仅贡献了 1/5 左右的总降水。在闪电活动方面,两个地区的中尺度冰散射系统均贡献了一半以上的总闪电,并且闪电发生概率也是 3 种系统中最高的(超过了 50%),而无冰散射系统仅贡献了约 1% 的总闪电,并且闪电发生概率也非常低(低于 1%)。此外,还可看到,东海地区降水系统的闪电发生概率普遍远低于中国大陆东部。

表 2 中国大陆东部与东海地区降水系统特征统计结果

Table 2 The statistical results of the precipitation systems over the eastern Chinese mainland and the East China Sea

	中国大陆东部			东海地区		
	NoIces	IcePSs	McsPSs	NoIces	IcePSs	McsPSs
系统数量	99114	15344	1727	32123	3220	575
占总数量百分数	85.3%	14.2%	1.5%	89.4%	9.0%	1.6%
平均降水强度(mm/h)	1.89	4.77	5.64	1.69	3.76	5.42
占总降水百分数	22.2%	45.1%	32.7%	18.9%	42.9%	38.3%
闪电数	901	32220	41657	49	2071	6382
占总闪电百分数	1.2%	43.1%	55.7%	0.8%	31.8%	67.4%
闪电发生概率	0.699%	38.5%	79.8%	0.128%	15.8%	54.1%

图 1 给出了中国大陆东部和东海地区 3 种降水系统的空间分布情况,这里选择了  $1^\circ \times 1^\circ$  作为基准网格来绘制等值线。需要指出的是,这里并未对 TRMM 卫星注视时间进行订正。TRMM 卫星在高纬地区的注视时间要比低纬长得多,特别是在南北纬  $35^\circ$  附近,而对本文的其他地区注视时间则相差不多。从图中可以看到,中国大陆东部长江以南,无冰散射

系统的数量除了广东和广西北部及南部略高之外,其他地区基本呈均匀分布。在长江以北地区,无冰散射系统的数量呈先减小再增加的趋势,在重庆和湖北沿长江地区有一高值区。如前所述,  $35^\circ\text{N}$  附近的数量增加应与 TRMM 注视时间变长有关。非中尺度冰散射系统在中国大陆东部数量最大区域是华南地区,其次是长江与黄河之间(高值区在陕西和河南)及呈西

南—东北走向的江西吉安至浙江杭州带状地区。中尺度冰散射系统的数量在中国大陆东部也有3个高值区,即广西和广东沿海地区、呈西南—东北走向的江西吉安至浙江杭州的带状地区以及黄淮地区。东海地区的无冰散射系统与同纬度的中国大陆东部数量相似,非中尺度冰散射系统的数量则仅约为中国大陆东部的一半,中尺度冰散射系统数量远小于中国大陆东部,3种系统的高值区均是琉球群岛、朝鲜半岛

南部和日本九州岛附近海域。在朝鲜半岛南部和日本九州岛附近海域,降水系统频繁可能与局地海陆锋环流有关。最近,郑永光等(2008)利用静止卫星红外亮温资料发现,广西、广东、长江中下游地区、江西、福建、浙江以及琉球群岛附近海域是中国及周边地区的一条中尺度对流系统活跃带。虽然本文降水系统的定义与郑永光等(2008)不同,但结果仍然体现了这一对流活跃带的存在。

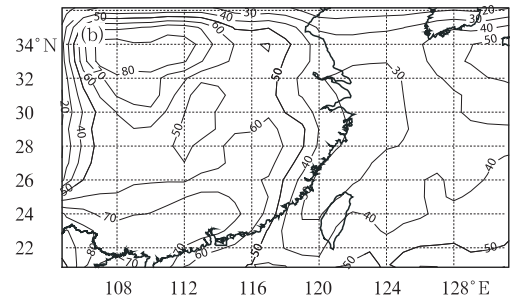
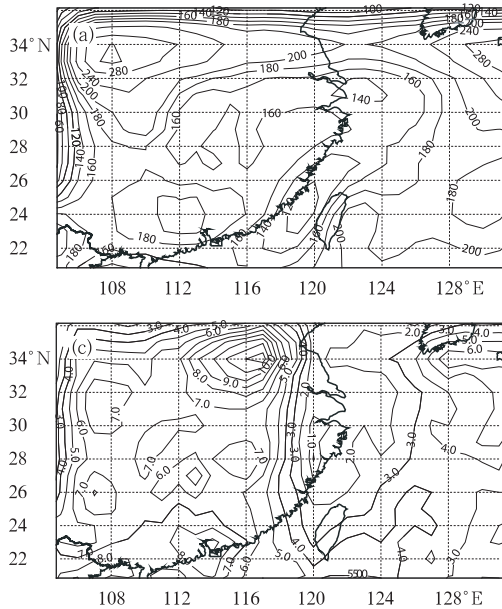


图1 中国大陆东部和东海地区降水系统的空间分布特征

(a. 无冰散射系统, b. 非中尺度冰散射系统, c. 中尺度冰散射系统)

Fig. 1 Spacial distribution of the precipitation systems over the eastern Chinese mainland and the East China Sea (a. NoIces, b. IcePSs, c. McsPSs)

从中国大陆东部与东海地区3种降水系统的日变化(图2)可以看到,在中国大陆东部和东海地区的降水系统呈现出明显不同的规律,即中国大陆东

部的日变化幅度较大,而东海地区日变化幅度则很小。在中国大陆东部,无冰散射系统和非中尺度冰散射系统在14—18时(地方时,下同)发生频繁,

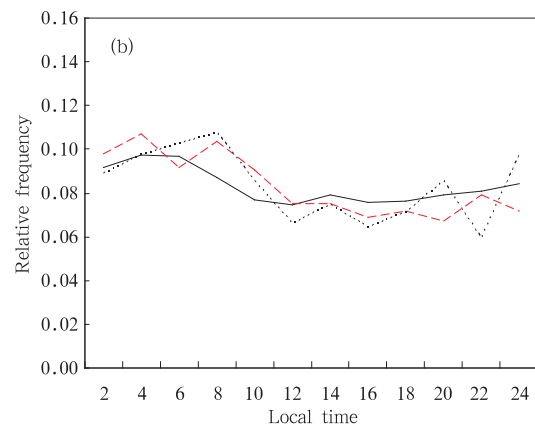
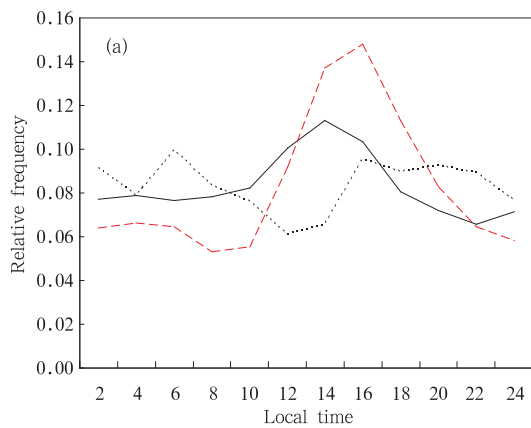


图2 中国大陆东部(a)与东海地区(b)降水系统的日变化

(实线、虚线和点线分别为无冰散射系统、非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统)

Fig. 2 Diurnal variation of the precipitation systems over the eastern Chinese mainland (a) and the East China Sea (b)

(Solid, dashed and dotted line represent NoIces, IcePSs and McsPSs, respectively)

其中无冰散射系统在 14 时最频繁,而非中尺度冰散射系统在 16 时最频繁(落后前者 2 h),这一时间段内的降水系统主要是陆面受太阳辐射加热和局地不稳定条件形成的局地对流系统。郑永光等(2008)利用静止卫星红外亮温的研究也发现,中国大陆东部的中尺度对流系统大约在 17 时最活跃。中尺度冰散射系统在 16 时一直到第 2 天 06 时均有发生,06 时之后开始减弱,12 时最低,然后又开始增加。马禹等(1997)的研究表明,中国的  $M\alpha CS$  生命史有两种类型,一类是午后发生,傍晚成熟,午夜消散,另一类是上半夜形成,凌晨最大,然后消散。中尺度冰散射系统对应着最强的对流系统,与  $M\alpha CS$  的定义接近,因此,二者的日变化特征也呈现出一定的相似性。在东海地区,3 种降水系统日变化幅度均较小,不过仍可看到 3 种降水系统在午夜至早晨 08 时均非常活跃,约 12 时最弱,这不但与 Nesbitt 等(2000)、Hall 等(1999)对热带西北太平洋地区的研究结果相似,而且也与袁铁等(2004)发现的东海和黄海经常在凌晨出现日最大闪电密度一致。

### 3.2 降水系统的闪电活动特征

由于闪电的发生与上升气流速度密切相关,对流活动越强,闪电越频繁,因此,闪电频数常常被作

为衡量对流活动强弱的一个指标。从中国中部地区不同降水类型的闪电频数累积概率密度分布规律(图 3)可以看到,中国大陆东部和东海地区未观测到闪电的降水系统均占系统总数的绝大多数,两地分别约有 93%、97% 的降水系统没有闪电记录。考虑到 LIS 的探测效率和注视时间问题,导致有些低闪电率的雷暴(观测到闪电的降水系统,下同)和注视时间内刚好没有发生闪电的雷暴都有可能被误认为非雷暴系统,因此实际的雷暴发生频数应该要高于前面的比例。而基于 TRMM 卫星的观测,Cecil 等(2005)发现,全球热带和亚热带地区约有 97.6% 的降水系统没有闪电记录,并通过对闪电频数的概率密度函数外推认为,全球热带和亚热带地区应该有 10% 的降水系统有闪电发生。此外,从图中还可发现,不同类型降水系统的闪电发生概率差别非常大,其中,中尺度冰散射系统发生概率最高,非中尺度冰散射系统次之,无冰散射系统闪电发生概率最低。而对于同一类型的系统,东海地区的闪电发生概率要大大低于中国东部大陆。例如,中国大陆东部的非中尺度冰散射系统和非中尺度冰散射系统闪电发生概率分别约为 40% 和 80%,而东海地区仅为 10.5% 和 50%。

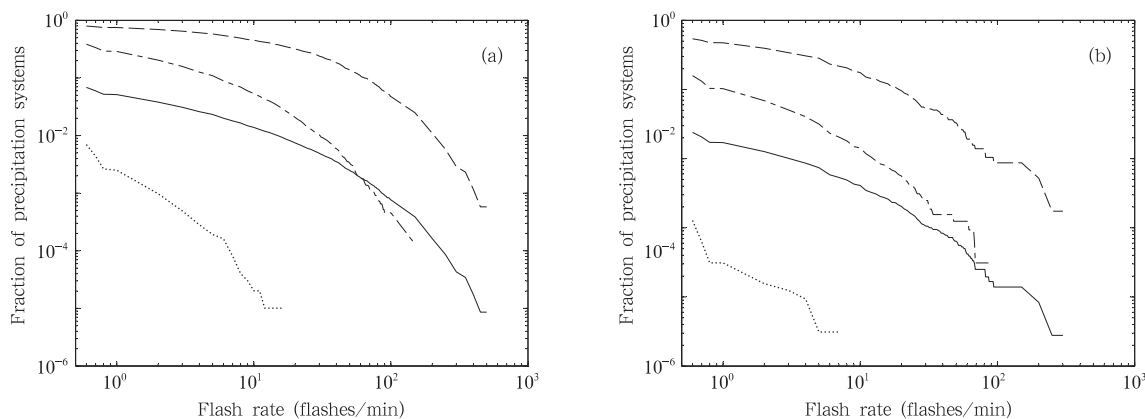


图 3 中国大陆东部(a)与东海地区(b)降水系统闪电频数累积概率密度分布

(实线、虚线、点线和点画线分别代表全部系统、无冰散射系统、非中尺度冰散射系统和非中尺度冰散射系统)

Fig. 3 Cumulative probability density functions of the flash rate of precipitation systems over the eastern Chinese mainland (a) and the East China Sea (b)

(Solid, dashed, dotted and dash-dot line represent all systems, Noices, IcePSs and McsPSs, respectively)

LIS 对闪电频数的最低探测值是 0.7 flashes/min(即 90 s 内仅观测到一个闪电),而最高可超过 1000 flashes/min(Cecil, et al, 2005)。在 8 年暖季

内,LIS 在中国东部地区观测到的降水系统最大闪电频数达到了 580 flashes/min,不过这一数值受到了 PR 分辨率的限制(本文降水系统的定义限定在 PR

轨道范围内),实际的闪电频数还要更高。从中国大陆东部与东海地区雷暴系统的闪电累积概率密度分布(图4)可以发现,两个地区的无冰散射雷暴系统闪电频数都非常低,基本都在 10 flashes/min 以下,而约有 10%非中尺度冰散射雷暴系统闪电频数能达到 10 flashes/min。相比前面两种系统,两个地区的中尺度冰散射雷暴系统的闪电频数均较高,中国大陆东部有 60%的概率能达到 10 flashes/min,

东海地区亦有 30%以上的概率能达到 10 flashes/min。总体上,东海地区的雷暴闪电频数分布略低于中国大陆东部,但高于全球海洋的平均水平(Cecil, et al, 2005)。这与东海所处的地理位置有关,夏季不但经常有雷暴系统由中国大陆东部移入东海,而且琉球海域又是中尺度对流系统的活跃区域(郑永光等, 2008),从而导致这里的雷暴闪电频数比其他海域要高。

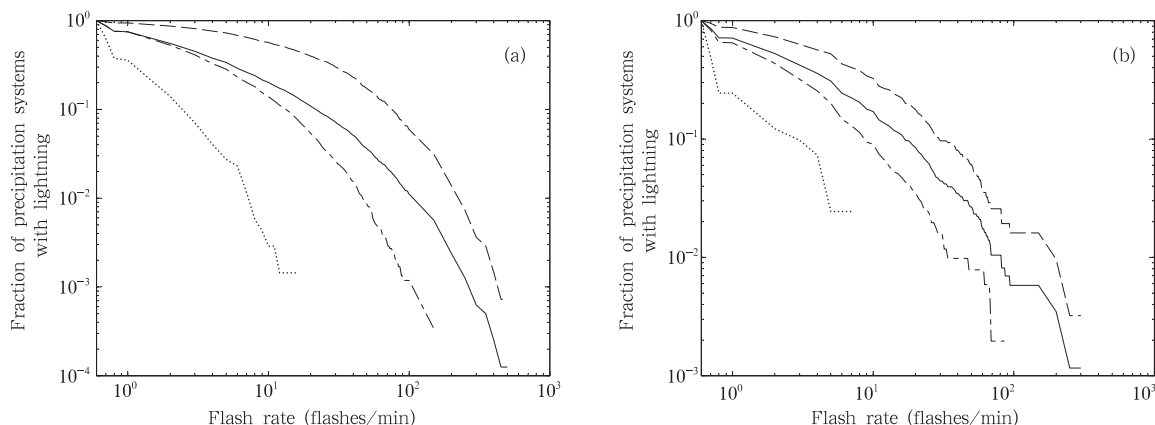


图4 中国大陆东部(a)与东海地区(b)雷暴系统闪电累积概率密度分布  
(实线、虚线、点线和点画线分别代表全部系统、无冰散射系统、非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统)  
Fig. 4 Cumulative probability density functions of the flash rate of thunderstorms over the eastern Chinese mainland (a) and the East China Sea (b)  
(Solid, dashed, dotted and dash-dot line represent all systems, Noices, IcePSs and McsPSs, respectively)

### 3.3 降水系统的 20 dBz 最大高度特征

某一强度(如 20、30 dBz 等)回波最大高度与云顶高度一样不但是表征对流发展强度的常用参量,而且在闪电预警预报和参数化工作中常被作为预报因子使用。PR 探测到的最小回波强度约为 17 dBz,为稳妥起见这里选用 20 dBz 最大高度作为雷暴高度的度量。图 5 给出了中国大陆东部和东海地区不同类型降水系统 20 dBz 最大高度的累积概率密度分布以及闪电发生概率密度。从中可以看到,随着降水类型强度的增强(从无冰散射系统到中尺度冰散射系统),20 dBz 最大高度明显增高。例如,80%以上的无冰散射系统 20 dBz 最大高度在 5 km 以上,80%以上的非中尺度冰散射系统 20 dBz 最大高度超过 8 km,而 80%以上的中尺度冰散射系统 20 dBz 最大高度则超过了 10 km。

分析图 5 中的闪电发生概率密度分布曲线可以看到,对于同样的 20 dBz 最大高度,中国大陆东部降水系统发生闪电的概率要明显高于东海地区。例

如,20 dBz 最大高度同样为 14 km 的中尺度冰散射系统,中国大陆东部和东海地区的降水系统发生闪电的概率分别约为 92%和 77%。虽然东海地区的中尺度冰散射系统 20 dBz 最大高度一般要高于中国大陆东部,但是发生闪电的概率却远远低于后者(另外两种系统也是如此),这与已有的研究结果一致(Williams, et al, 1992; Rutledge, et al, 1992; Zipsper, 1994)。另外,由图 5 还可发现,中国大陆东部和东海地区的非中尺度冰散射系统 20 dBz 最大高度分别达到 10.2 与 13 km 时有一半的系统会发生闪电,而中尺度冰散射系统的 20 dBz 最大高度在达到 9 和 11.7 km 时会有 50%的概率发生闪电。这里的结果表明,当利用雷暴高度参量来预报闪电时,不同地区(如海洋和陆地)、不同类型的降水系统的阈值存在着较大的差异。

Ushio 等(2001)曾利用 TRMM 卫星的 LIS 和 PR 同步资料对 Williams(1985)提出的闪电频数与雷暴顶高的 5 次方定律(即  $f = kH^5$ , 其中  $f$  为闪电

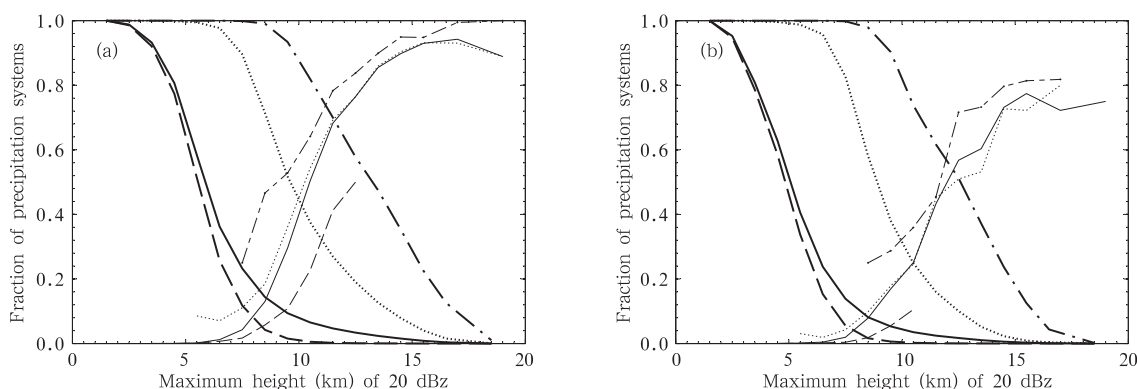


图5 中国大陆东部(a)与东海地区(b)20 dBz 最大高度累积概率密度(粗线)分布以及闪电发生概率密度(细线)分布

(实线、虚线、点线和点画线分别代表全部系统、无冰散射系统、非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统)

Fig.5 Cumulative probability density functions (thick lines) of the maximum height of 20 dBz and the probability density function (thin lines) of the occurrence of lightning over the eastern Chinese mainland (a) and the East China Sea (b)

(Solid, dashed, dotted and dash-dot line represent all systems, Noices, IcePSs and McsPSs, respectively)

频数,  $H$  为雷暴顶高)进行了检验,其雷暴是按照 LIS 产品中组成 area 的 event 所照亮的区域来定义的。area 的定义相当于对流系统中的雷暴单体(实际上一个大降水系统经常会包含多个雷暴单体),此处我们将以降水系统为单位对他们的结果进行检验,具体方法仍然与 Williams(1985)的相同,即先求出 20 dBz 最大高度在每 1 km 间隔内的闪电频数平均值,然后利用非线性最小二乘法求出拟合系数。由于无冰散射系统 20 dBz 最大高度通常非常低,闪电发生概率也很低,因此这里仅就另外两种系统进

行研究,得到闪电频数与 20 dBz 最大高度的关系(图 6 和 7)。从图中可以看到,在中国大陆东部,非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统的闪电频数与 20 dBz 回波最大高度关系比较稳定,基本呈 4 次方关系,而东海地区的斜率虽存在一定的变化,但变化范围也并不是很大,分别为 4.27 和 6.64。这里的结果表明,闪电频数与雷暴高度参量之间的关系并不是稳定不变的,存在地区和雷暴类型的差异,因此在利用雷暴的高度参量进行闪电参数化工作时应考虑这一变化。

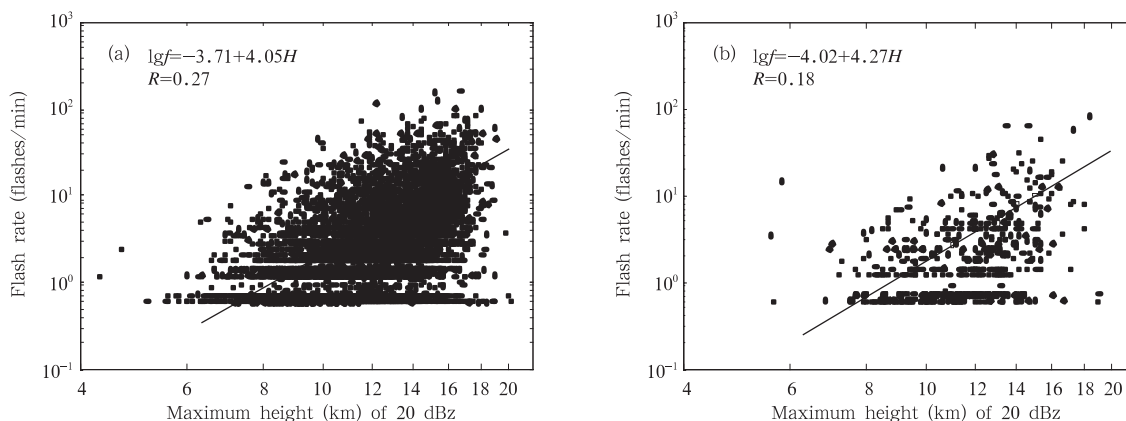


图6 中国大陆东部(a)与东海地区(b)非中尺度冰散射系统 20 dBz 最大高度与闪电频数的关系(直线为拟合曲线)

Fig.6 Flash rate vs. the maximum height of 20 dBz for the IcePSs over the eastern Chinese mainland (a) and the East China Sea (b) (solid line shows the least square fitting to the squares)



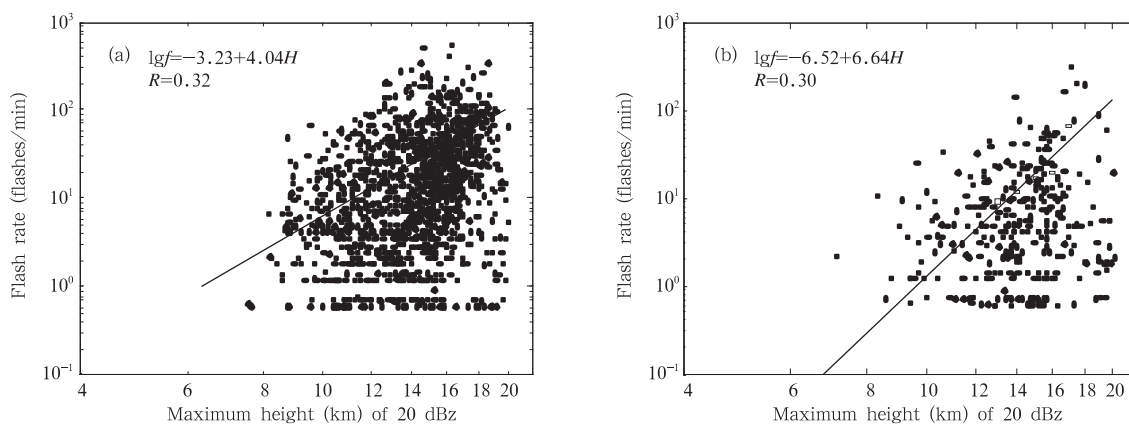


图7 同图6, 但为中尺度冰散射系统

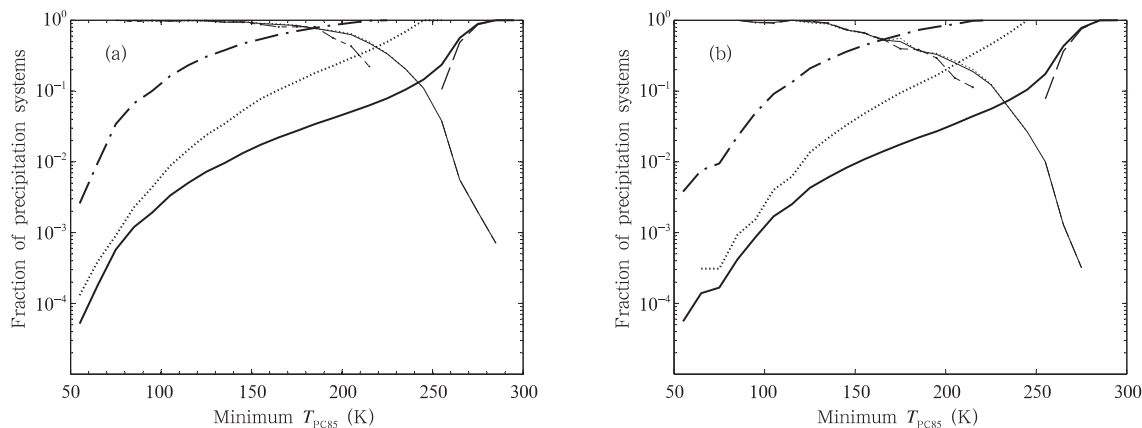
Fig. 7 As in Fig. 6 but for the McsPSs

从图6和7中还可以看到, 20 dBz最大高度与闪电频数的相关系数都非常低, 中尺度冰散射系统要稍高于非中尺度冰散射系统, 但也都都在0.32以下(可以通过99.999%的信度检验)。虽然闪电频数和雷暴高度都是表征对流垂直发展强度的特征参量, 但是二者之间的低相关系数表明他们在描述对流动力和微物理过程方面可能还存在较大的差异, 海洋对流就是明显的例子。海洋上的对流通常云顶高度非常高, 但是闪电活动却非常少(Zipser, 1994)。由此可见, 利用雷暴高度来预报闪电频数还存在很大的不足, 需要进一步的深入研究。

### 3.4 降水系统的微波亮温特征

在85和37 GHz通道, 微波亮温的降低主要来

自融化层以上的冰相降水尺度粒子对微波信号的散射, 其中85 GHz的微波信号大小主要取决于相对小的冰相粒子(直径0.5 mm左右)含量, 而37 GHz因为波长相对较大, 其信号主要与更大尺度(直径几个毫米, 如软雹、冻雨滴等)冰相粒子的散射有关。冰相粒子是非感应起电机的主要荷电体, 而且人们也经常用微波亮温来识别深对流区, 把它作为对流强度的一个表征参量。图8给出了中国大陆东部和东海地区降水系统的最小 $T_{PC85}$ 累积概率密度分布以及闪电发生概率密度分布。从中可以看到, 随着降水类型强度的增强, 最小 $T_{PC85}$ 逐渐降低(亮温愈低, 对流愈强)。另一方面, 中国大陆东部最小 $T_{PC85}$ 累积概率密度曲线和闪电发生概率密度曲线

图8 同图5, 但为最小 $T_{PC85}$ (粗线)Fig. 8 As in Fig. 5 but for the minimum  $T_{PC85}$  (thick line)

均在东海地区之上,这表明降水系统强度和闪电发生概率均是前者高于后者。类似前面用 20 dBz 最大高度推断降水系统是否发生闪电一样,这里也可以给出闪电发生概率为 50% 时的最小  $T_{PC85}$  阈值。中国大陆东部和东海地区的非中尺度冰散射系统的对应阈值分别为 215 和 177 K,而中尺度冰散射系统对应的阈值则分别是 201 和 169 K。此外,对于给定的最小  $T_{PC85}$ ,可以看到,东海地区降水系统发生闪电的概率要小于中国大陆东部,说明具有同样冰散射信号强度的降水系统,后者发生闪电的概率要更大,这与 Toracinta 等(2001)对全球热带地区中尺度对流系统的研究结果类似,他们认为,可能是陆地和海洋对流中的冰相微物理过程不同所致。不同类型降水系统的 37 GHz 最小极化修正亮温

( $T_{PC37}$ )变化情况如图 10 所示,结果与  $T_{PC85}$  类似。虽然与 85 GHz 相比空间分辨率低一些,并容易受地面的影响,但考虑到 37 GHz 对大冰相粒子的存在更加敏感,因此在研究闪电与微波信号之间的关系时仍是一个重要的参量。

同前面类似,我们这里也对闪电频数与最小  $T_{PC85}$  的关系进行了计算,方法仍然同 Williams (1985),结果见图 10 和 11。从图中可以看到,两个地区的闪电频数与最小  $T_{PC85}$  的关系在稳定性方面要好于前面的闪电频数与 20 dBz 最大高度,表现为斜率变化很小,而且两个地区也很接近(即约为 3 次方),其中中国大陆东部的关系仍然非常稳定。另外,与 20dBz 最大高度相比,最小  $T_{PC85}$  和闪电频数的相关性要更好一些,二者在中尺度冰散射系统中

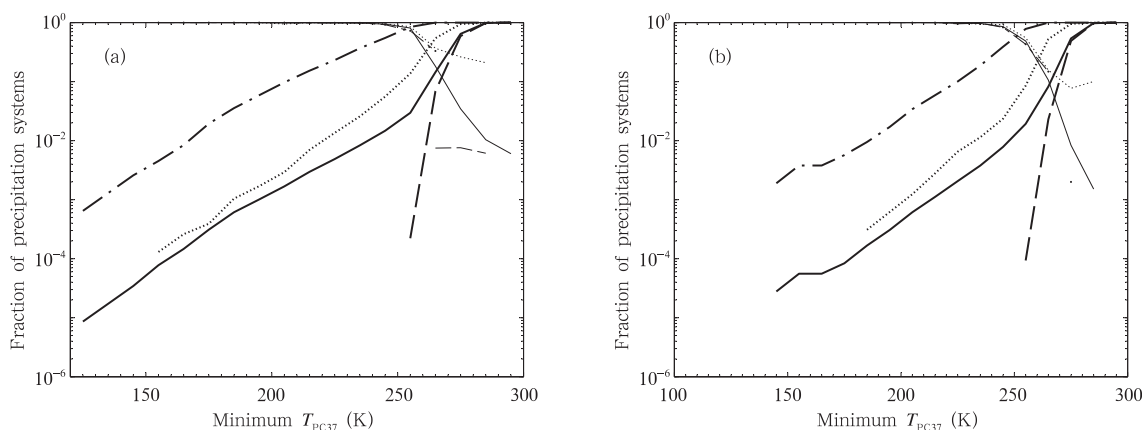


图 9 同图 5, 但为最小  $T_{PC37}$  (粗线)

Fig. 9 As in Fig. 5 but for the minimum  $T_{PC37}$  (thick line)

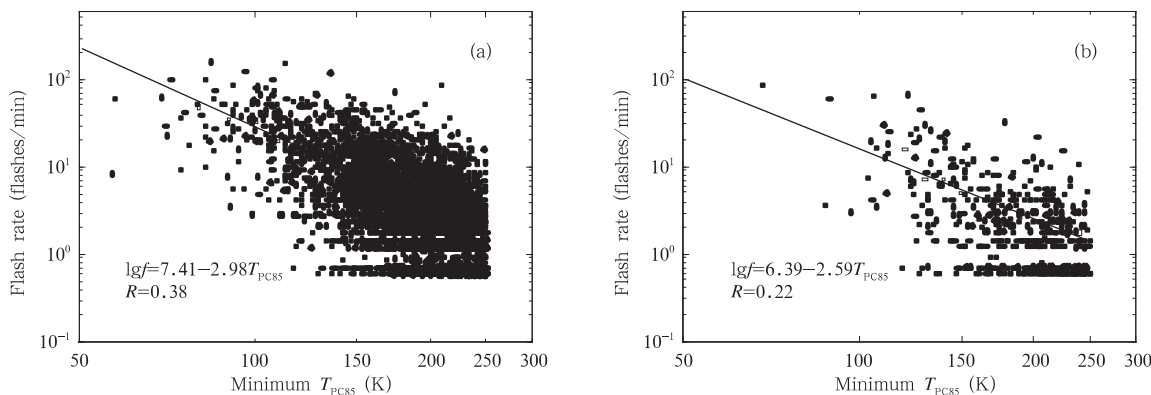


图 10 同图 6, 但为最小  $T_{PC85}$  与闪电频数的关系

Fig. 10 As in Fig. 6 but vs. the minimum  $T_{PC85}$

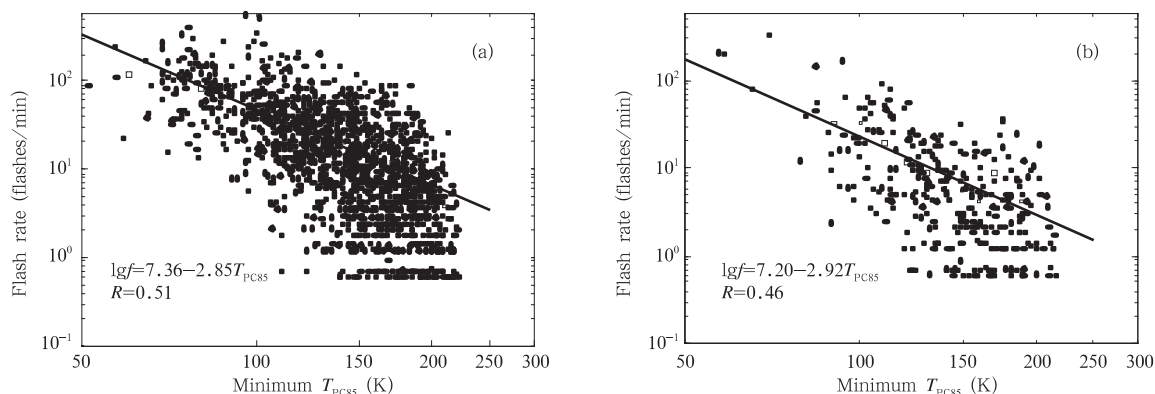


图 11 同图 10, 但为中尺度冰散射系统最小  $T_{PC85}$  与闪电频数的关系

Fig. 11 As in Fig. 10 but for McsPSs

的相关系数都超过了 0.4 (通过了 99.999% 的信度检验)。85 GHz 微波信号反映了冻结层以上冰相降水粒子的含量, 而冰相粒子又是非感应起电机中的重要因子, 所以应该是最小  $T_{PC85}$  和闪电频数在微物理过程上的联系导致了这里相关系数的提高。需要说明的是, 虽然最小  $T_{PC85}$  和闪电频数的相关性有所提高, 但相关系数仍然不是很高。

### 3.5 闪电频数与冰相降水含量之间的关系

大量的研究表明, 冰相粒子是雷暴云起电过程非常重要的参量, 而最近的星载和地基观测结果进一步证实了在全球 (Petersen, et al, 2005)、区域 (Gauthier, et al, 2006) 和雷暴单体 (Deierling, et al, 2005) 等不同尺度上闪电与冰相降水含量的关系都非常紧密。但是 Petersen 等 (2005) 和 Gauthier 等 (2006) 在研究全球和美国休斯顿地区的闪电频数与冰相降水含量的关系均是采用将研究区域网格化的

方法来进行统计分析, 并且对雷暴单体尺度方面的研究也还限于美国地区, 其他地区的雷暴单体中闪电频数与冰相降水含量的关系如何? 在降水系统的尺度上二者关系又怎样? 还有待进一步的研究。接下来我们将利用 TRMM 卫星的观测资料来进一步研究中国大陆东部和东海地区在降水尺度和雷暴单体尺度上闪电频数与冰相降水含量之间的关系。

前面的分析已经表明无冰散射系统中闪电发生概率非常低, 并且没有显著的冰散射信号, 所以这里仅对非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统进行分析。同 Petersen 等 (2005) 和 Gauthier 等 (2006) 类似, 我们这里也选择 7–11 km (位于混合相区域) 高度区间的冰相降水含量来进行分析, 具体结果见图 12 和 13。可以发现, 这里的斜率存在着明显的变化, 即中尺度冰散射系统的斜率要大大低于非中尺度冰散射系统, 东海地区的斜率要低于东

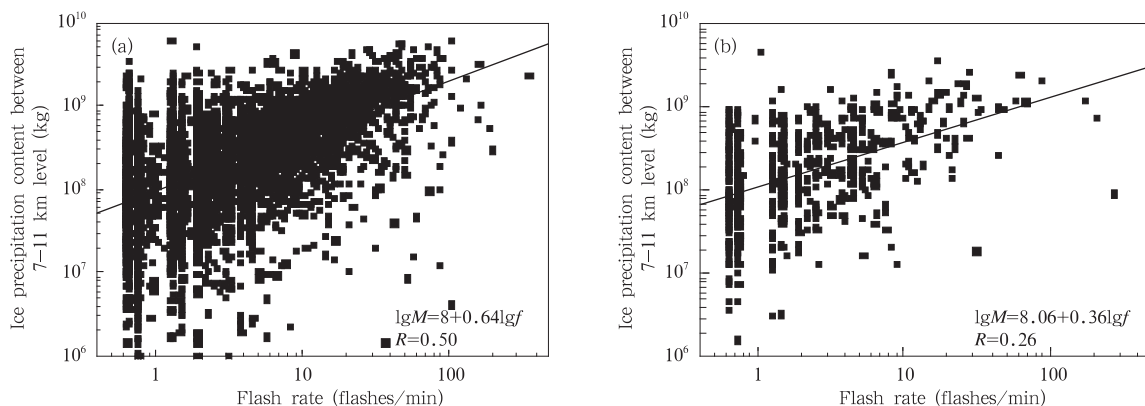


图 12 中国大陆东部 (a) 与东海地区 (b) 非中尺度冰散射系统总冰相降水含量 (7–11 km) 与闪电频数的关系

Fig. 12 Ice precipitation content within the layer of 7–11 km vs. flash rate for the IcePSs over the Chinese mainland (a) and the East China Sea (b)

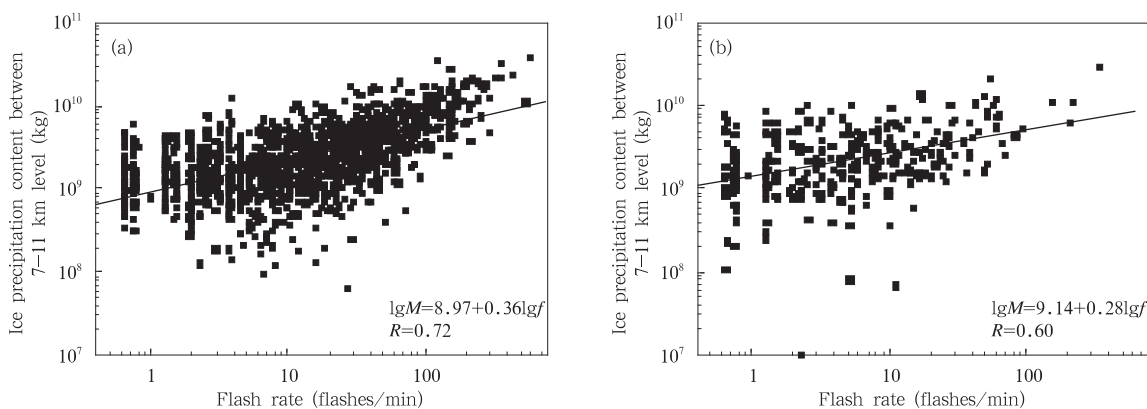


图 13 同图 12, 但为中尺度冰散射系统总冰相降水含量(7—11 km)与闪电频数的关系  
Fig. 13 As in Fig. 12 but for the McsPPS

部地区(约差 0.1),但是两个地区同一类型系统之间的斜率和截距相差不大。与前面的 20 dBz 最大高度和最小  $T_{PC85}$  相比,降水系统的 7—11 km 的总冰相降水含量与闪电频数的相关系数有了较大的提高,除东海地区非中尺度冰散射系统相关系数仍较低(0.26,通过了 99.999%的信度检验)之外,其他的相关系数都超过了 0.5(通过了 99.999%的信度检验),中国大陆东部的中尺度冰散射系统甚至达到了 0.72。Petersen 等(2005)研究表明,冰相降水含量与闪电频数在陆地、沿海和海洋地区存在着相对稳定的关系,我们的结果肯定了这一结论,不过需要注意的是,海洋和陆地之间仍然存在着微弱的差异。

Gauthier 等(2006)曾利用美国的国家闪电定位网络(NLDN)和地面雷达的资料研究了休斯顿地区单体尺度上的闪电频数与冰相降水含量之间的关

系,这里我们将利用 TRMM 卫星的观测资料对雷暴单体尺度上二者的关系进行研究。雷暴的单体识别采用了风暴识别、追踪、分析和预报系统(TITAN;Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting, <http://www.ral.ucar.edu/projects/titan/home>)的双阈值方法。在进行单体识别时,不同的作者对参考高度、反射率因子的选择稍有不同(Zipsper, et al,1994;Toracinta,et al,1996),这里经过多次尝试,最终选择的双阈值分别是 30 与 45 dBz,参考高度为 4.25 km。冰相降水含量的计算仍然选择 7—11 km 高度,结果见图 14。从图中可以看到,在单体尺度上,总冰相降水含量与闪电频数仍然保持着相对稳定的关系,相关系数非常高,中国大陆东部和东海地区分别达到了 0.71 和 0.77(通过了99.999%的信度检验),结果再次肯定

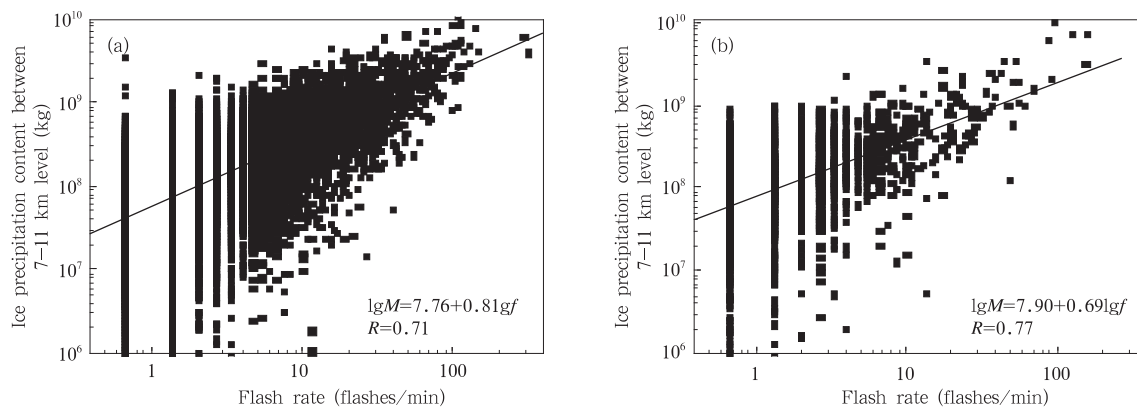


图 14 同图 12, 但为单体尺度上冰相降水含量(7—11 km)与闪电频数的关系  
Fig. 14 As in Fig. 12 but for the 7—11 km content on cell scales

了闪电频数与冰粒子之间存在着非常密切的联系。这里的闪电频数与冰相降水含量在降水尺度和单体尺度上体现出的高相关性以及前面的闪电频数与微波亮温的紧密关系都表明,冰相粒子在雷暴云起电过程中占有着非常重要的地位,从而进一步证实了非感应起电机制的普遍性。

不过,与前面的降水系统尺度上闪电频数和总冰相降水含量的关系类似,东海地区拟合曲线的斜率看上去仍然比中国大陆东部要低一些,这是否预示着海洋和陆地雷暴云中微物理过程存在着一定的差异,或者其他原因所致,尚需要做进一步的研究。最近,袁铁等(2010)的研究表明,飏线这类有着大量对流单体的对流系统,其单体尺度上的闪电频数与冰相降水含量之间的相关系数高达 0.92。图 14 是所有降水系统的综合结果,虽然相关系数较高,但是同 Gauthier 等(2006)的研究结果类似,图中数据点仍然表现得比较离散(特别是低闪电频数系统),因此,导致数据离散的具体原因及不同类型的降水系统在单体尺度上的闪电频数与冰相降水含量之间的关系值得未来进一步加以研究。

#### 4 结 论

利用 TRMM 卫星 PR、LIS 和 TMI 8 个暖季的轨道观测资料,研究了中国大陆东部和东海地区不同类型降水系统的地理分布规律和日变化特征,分析了降水系统的闪电活动、雷达回波顶高和微波亮温的特征以及闪电与回波顶高、微波亮温和冰相降水含量之间的关系,主要结果如下:

(1) 总体上,中国大陆东部与东海地区的降水系统绝大部分都是无冰散射系统(占 85%以上),非中尺度冰散射系统占 10%左右,中尺度冰散射系统仅占约 1.5%。虽然在数量上最小,但是中尺度冰散射系统贡献了约三分之一的总降水和一半以上的总闪电。广西和广东沿海地区、呈西南—东北走向的江西吉安至浙江杭州的带状地区以及黄淮地区是中国大陆东部的中尺度冰散射系统 3 个高值区。东海地区 3 种系统的高值区均是琉球群岛、朝鲜半岛南部和日本九州岛附近海域。中国大陆东部降水系统的日变化特征明显,而东海地区则日变化幅度很小。

(2) 中国大陆东部和东海地区分别约有 93%、97%的降水系统没有闪电记录,前者的非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统闪电发生概率均超过

了后者。两个地区的无冰散射雷暴系统闪电频数基本都在 10 flashes/min 以下,约有 10%的非中尺度冰散射雷暴系统闪电频数能达到 10 flashes/min,中国大陆东部的中尺度冰散射雷暴系统有 60%能达到 10 flashes/min,东海地区的中尺度冰散射雷暴系统则有 30%能达到 10 flashes/min。

(3) 随着降水类型强度的增强,20 dBz 的最大高度明显的增高,最小  $T_{PC85}$  则逐渐降低。对于同样的 20 dBz 最大高度和最小  $T_{PC85}$ ,中国大陆东部的系统发生闪电的概率均高于东海地区。前者的闪电频数与 20 dBz 最大高度基本呈 4 次方关系,而东海地区非中尺度冰散射系统和 中尺度冰散射系统分别呈 4.27 次方和 6.64 次方关系。闪电频数与最小  $T_{PC85}$  的关系在稳定性和相关性方面要好于闪电频数与 20 dBz 最大高度,斜率变化很小(约为 3 次方),中国大陆东部的关系仍然非常稳定。

(4) 中尺度冰散射系统的闪电频数与 7—11 km 的总冰相降水含量之间关系的斜率要大大低于非中尺度冰散射系统,而东海地区的斜率要低于中国大陆东部,但是两个地区同种类型系统之间的斜率和截距相差不大。与 20 dBz 最大高度和最小  $T_{PC85}$  相比,闪电频数与 7—11 km 的总冰相降水含量的相关系数有了较大的提高。另外,单体尺度上的闪电频数和总冰相降水含量(7—11 km)之间同样表现出了非常密切的关系,在两个地区相关系数都超过了 0.7,不过海洋上的斜率仍然比陆地要低一些。闪电频数与冰相降水含量和微波亮温的紧密联系表明,冰相粒子在雷暴云起电过程中占有着非常重要的地位,结果进一步肯定了非感应起电机制的普遍性。

**致谢:**感谢审稿专家所提的修改意见。感谢全球水文资源中心为本文提供了 LIS 资料,TRMM 科学数据和信息系统为本文提供了 PR 和 TMI 资料。

#### 参考文献

- 曹治强,李万彪. 2005. 两个中尺度对流系统的降水结构和闪电特征. 气象学报, 63(2): 243-249
- 傅云飞,李宏图,自勇. 2007. TRMM 卫星探测青藏高原谷地的降水云结构个例分析. 高原气象, 26(1): 98-106
- 傅云飞,宇如聪,徐幼平等. 2003. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究. 气象学报, 61(4): 421-435
- 傅云飞,张爱民,刘勇等. 2008. 基于星载测雨雷达探测的亚洲对流和层云降水季尺度特征分析. 气象学报, 66(5): 730-746
- 李万彪,陈勇,朱元竞等. 2001. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水. 气象学报, 59(5): 591-601

- 马禹, 王旭, 陶祖钰. 1997. 中国及其邻近地区中尺度对流系统的普查和时空分布特征. *自然科学进展*, 7(6): 701-706
- 袁铁, 鄒秀书. 2004. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征. *高原气象*, 23(4): 488-494
- 袁铁, 鄒秀书. 2010. 基于 TRMM 卫星对一次华南飚线的闪电活动及其与降水结构的关系研究. *大气科学*, 34(1), 58-70
- 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 2008. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征. *科学通报*, 53(4): 471-481
- 郑媛媛, 傅云飞, 刘勇等. 2004. 热带测雨卫星对淮河一次暴雨降水结构与闪电活动的研究. *气象学报*, 62(6): 790-802
- Carey L D, Rutledge S A. 2000. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: A C-band polarimetric radar study. *Mon Weather Rev*, 128: 2687-2710
- Cecil D J, Goodman S J, Boccippio D J, et al. 2005. Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, radiometric, and lightning characteristics. *Mon Wea Rev*, 133: 543-566
- Cecil D J, Zipser E J, Nesbitt S W. 2002. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands, part I: Quantitative description. *Mon Wea Rev*, 130: 769-784
- Deierling W, Latham J, Petersen W A, et al. 2005. On the relationship of thunderstorm ice hydrometeor characteristics and total lightning measurements. *Atmos Res*, 76: 114-126
- Feng G L, Qie X S, Yuan T, et al. 2007. Lightning activity and precipitation structure of hailstorms. *Science in China Ser. D Earth Sci*, 50(4): 629-639
- Fu Y, Hu G. 2003. Precipitation characteristics in mid-latitude East Asia as observed by TRMM PR and TMI. *J Meteor Soc Japan*, 81: 1353-1369
- Gauthier M L, Petersen W A, Carey L D, et al. 2006. Relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation ice mass: A radar study over Houston. *Geophys Res Lett*, 33, L20803, doi:10.1029/2006GL027244
- Hall T J, Vonder Harr T H. 1999. The diurnal cycle of west Pacific deep convection and its relation to the spatial and temporal variation of tropical MCSs. *J Atmos Sci*, 56: 3401-3415
- Hirose M, Nakamura K. 2005. Spatial and diurnal variation of precipitation systems over Asia observed by the TRMM precipitation radar. *J Geophys Res*, 110, D05106, doi: 10.1029/2004JD004815
- Houze R A, Wilton D C, Smull B F. 2007. Monsoon convection in the Himalayan region as seen by the TRMM Precipitation Radar. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133: 1389-1411
- Katsanos D K, Lagouvardos K, Kotroni V, et al. 2007. The relationship of lightning activity with microwave brightness temperatures and spaceborne radar reflectivity profiles in the central and eastern Mediterranean. *J Appl Meteor Clim*, 46: 1901-1912
- Kodama Y, Okabe H, Tomisaka Y, et al. 2007. Lightning frequency and microphysical properties of precipitating clouds over the Western North Pacific during winter as derived from TRMM multisensor observations. *Mon Wea Rev*, 135(6): 2226-2241
- Liu L P, Ruan Z, Qin D U. 2005. Case studies on mesoscale structures of heavy rainfall system in the Yangtze River generated by Meiyu front. *Sci China Ser. D Earth Sci*, 48(8): 1303-1311
- Ma M, Tao S C, Zhu B Y, et al. 2005. Climatological distribution of lightning density observed by satellites in China and its circumjacent regions. *Sci China Ser. D Earth Sci*, 2005, 48(2): 219-229
- Nesbitt S W, Zipser E J, Cecil D J. 2000. A census of precipitation features in the tropics using TRMM: Radar, ice scattering, and lightning observations. *J Climate*, 13: 4087-4106
- Park M S, Choi Y S, Ho C H, et al. 2007. Regional cloud characteristics over the tropical northwestern Pacific as revealed by Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar and TRMM Microwave Imager. *J Geophys Res*, 112, D05209, doi:10.1029/2006JD007437
- Petersen W A, Christian H J, Rutledge S A. 2005. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning. *Geophys Res Lett*, 32, L14819, doi: 10.1029/2005GL023236
- Petersen W A, Rutledge S A. 2001. Regional variability in tropical convection: observations from TRMM. *J Clim*, 14: 3566-3586
- Qie X S, Toumi R, Yuan T. 2003. Lightning activities on the Tibetan Plateau as observed by the lightning imaging sensor. *J Geophys Res*, 108 (D17), 4551, doi: 10.1029/2002JD003304
- Rutledge S A, Williams E R, Keenan T D. 1992. The down under Doppler and electricity experiment (DUNDEE): Overview and preliminary results. *Bull Amer Meteor Soc*, 73: 3-16
- Spencer R W, Goodman H M, R E Hood. 1989. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal. *J Atmos Oceanic Tech*, 6, 254-273
- Toracinta E R, Mohr K I, Zipser E J, et al. 1996. A comparison of WSR-88D reflectivities, SSM/I brightness temperatures, and lightning for MCSs in Texas. Part 1: Radar reflectivity and lightning. *J Appl Meteor*, 35: 902-918
- Toracinta E R, Zipser E J. 2001. Lightning and SSM/I-icescattering mesoscale convective systems in the global tropics. *J Appl Meteor*, 40: 983-1002
- Ushio T, Heckman S, Boccippio D, et al. 2001. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data. *J Geophys Res*, 106(20): 24089-24095
- Wen J, Su Z, Y Ma. 2003. Determination of land surface temperature and soil moisture from Tropical Rainfall Measuring Mission/Microwave Imager remote sensing data. *J Geophys Res*, 108(D2), 4038, doi:10.1029/2002JD002176
- Williams E R, Rutledge S A, Geotis S G, et al. 1992. A radar and electrical study of tropical hot towers. *J Atmos Sci*, 49: 1386-1395
- Williams E R. 1985. Large-scale charge separation in thunderclouds. *J Geophys Res*, 90: 6013-6025
- Yuan, T, Qie X S. 2008. Study on lightning activity and precipitation characteristics before and after the onset of the South China Sea summer monsoon. *J Geophys Res*, 113, D14101, doi:10.1029/2007JD009382
- Zhao B L, Yao Z Y, Li W B, et al. 2001. Rainfall retrieval and flooding monitoring in China using TRMM Microwave Imager (TMI). *J Meteor Soc Japan*, 79, 301-315
- Zipser E J. 1994. Deep cumulonimbus cloud systems in the tropics with and without lightning. *Mon Wea Rev*, 122: 1837-1851