

孟青,樊鹏磊,郑栋,等. 青藏高原那曲地区地闪与雷达参量关系. 应用气象学报,2018,29(5):524-533.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180502

青藏高原那曲地区地闪与雷达参量关系

孟青^{1)*} 樊鹏磊¹⁾ 郑栋¹⁾ 张义军²⁾ 姚雯¹⁾

¹⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/雷电物理和防护工程实验室,北京 100081)

²⁾(复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院,上海 200438)

摘 要

基于 2014—2015 年 5—9 月西藏那曲地区多普勒天气雷达数据,结合地闪观测数据,识别雷暴单体样本,统计分析了地闪位置附近的雷达回波分布特征,并研究了高原雷暴的雷达参量与地闪频次的相关关系。结果表明:那曲地区地闪发生位置附近的雷达最大反射率因子呈正态分布,峰值分布区间集中于 34~41 dBZ。发生地闪位置附近的 20 dBZ 回波顶主要集中于 11~15 km 高度,30 dBZ 回波顶高分布的峰值区间则为 8.5~12 km。分析表明:表征局地雷暴对流发展强度的雷达参量与地闪频次之间一对一的相关关系较差,但相关性随地闪频次增加而增强。基于雷达参量分段统计得到的对应分段平均地闪频次与雷达参量之间表现出较强相关关系,体现了宏观上闪电活动强度与雷暴发展强度之间的正向关系。其中,基于原始数值进行区间划分的强回波(组合反射率因子不小于 30 dBZ)面积与平均地闪频次的线性相关系数达 0.75,基于对数数值区间划分的 7~11 km 累积可降冰含量的对数值和地闪频次的线性相关系数达 0.95。文中对比了多个雷达参量和地闪频次线性拟合与幂函数拟合结果,整体上幂函数拟合略好于线性拟合。

关键词: 青藏高原;地闪;雷达参量;相关关系

引 言

青藏高原(以下简称高原)地处我国西南部,占我国陆地面积的四分之一,平均海拔在 4500 m 以上,有“世界屋脊”之称。夏季高原是一个高耸的热源,高原太阳辐射可以超过太阳常数,强烈的感热加热为对流活动提供了充分的热力条件,使夏季高原对流活动十分活跃^[1]。研究表明:位于高原腹地的那曲地区具备良好的激发中尺度积云对流的条件,该地区对流和降水的出现频次都是高原腹地的大值区^[2-4]。也有一些学者利用卫星闪电资料发现在高原腹地闪电活动的高发区位于那曲地区及附近^[5-6]。闪电作为强对流的产物,与雷暴的微物理和动力条件密切相关。闪电探测网具有覆盖面广、受地形影响小、实时性强的特点^[7],可在强对流天气监测预警中发挥独特作用^[8]。研究高原闪电和雷暴对流参量

的相关关系,不仅有利于认识高原闪电的形成机制,而且有助于利用闪电表征高原雷暴和对流特征,在高原对流监测预警中发挥作用。

雷达反射率因子的大小与雷暴云的动力及微物理特征关系密切,国内外学者在闪电活动与雷达参量的相关关系方面已经开展了很多工作。研究发现,闪电容易发生在雷达反射率因子大值区域及附近,且与混合相态区域中一定强度的雷达回波面积或体积具有较好的相关性^[9-12]。一些研究指出,对流单体的雷达最大反射率因子的垂直廓线(VPRR,定义为不同高度上的雷达回波最大值)可以很好地指示单体的闪电频数和对流发展强度^[13-15]。星载和地基的雷达与闪电观测表明:在全球尺度^[16]、区域尺度^[17]和单体尺度上^[18],闪电频数和冰相粒子含量之间均存在较好的正相关。国内的一些研究也得到了相似的结论,Zheng 等^[19]分析了上海和武汉地区的 34 次雷暴,发现在一定的垂直积分阈值条件下闪

2018-06-14 收到,2018-07-18 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金项目(91537209,41675005),中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2016Z002)

* 邮箱: mengqing@cma.gov.cn

电活动与云内冰相物含量有显著的相关关系;袁铁等^[20]研究了中国东部及邻近海域不同类型降水系统的时空特征关系,发现降水系统的闪电频数与7~11 km 高度区间的总冰相粒子含量之间的关系表现比较稳定。Wang 等^[21]利用雷达反演的风场数据,发现地闪频数不仅和可降冰含量有良好的相关性,还与一定阈值条件下上升气流区的体积存在很强的正相关关系。此外,很多研究也表明闪电活动与雷电反演的降水量之间有正相关关系^[22-24]。

高原雷暴和对流具有出现频繁、生命史短、移动迅速等特点,关于高原闪电活动和雷达参量关系的研究目前还很少。由于高原雷暴的独特性,研究高原地区闪电活动和雷达参量之间的关系是必要的。本文利用2014—2015年5—9月西藏那曲地区的多普勒天气雷达资料和地闪资料,研究那曲地区地闪活动对应的雷达参量特征,分析地闪频次和雷达参量之间的相关关系。该研究有助于深化对高原雷暴以及闪电活动特征和机理的认识,为高原强对流天气的监测、预警提供理论参考。

1 数据和他方法

1.1 地闪数据

本文使用的地闪数据来自高原地闪定位系统(CGLLS),是中国国家电网公司建设的全国地闪探测网的一部分,在那曲地区具有良好的站网分布和较高的探测效率^[25]。该定位系统采用磁定向和时间到达差结合的方法对地闪回击过程进行定位^[26],数据产品主要包括地闪回击的时间、经纬度、闪电极性、电流强度等信息。

本文主要使用该系统2014—2015年的地闪回击定位数据。参照之前的方法,CGLLS回击数据中电流小于10 kA的正极性回击记录被剔除,以避免其为云闪的误判^[27]。将CGLLS探测到的回击通过聚类方法归为闪电,归闪的标准是相邻回击事件的时间间隔小于0.5 s,空间距离小于10 km^[28]。对于有多次回击的地闪,使用首次回击的时间、位置作为该地闪的时间和位置。

1.2 那曲雷达

西藏那曲多普勒天气雷达(31.48°N,92.06°E,图1)型号为CINRAD/CD,建于2007年,海拔高度为4526 m,2012年进入业务运行。那曲雷达的位置及周围地形如图1所示,雷达位于那曲县城,其周

围地势较为开阔。雷达的探测波长为5 cm,采用360°全方位扫描,方位角间距为1°,包括从0.5°~19.5°共9个仰角。

本文使用2014—2015年5—9月的雷达数据,采用王红艳等^[29]开发的雷达处理软件对雷达基数据进行质量控制。质量控制后的雷达反射率因子通过插值处理为笛卡尔坐标系下的固定高度数据(CAPPI数据),具体算法参照了肖艳姣等^[30]介绍的方法。插值后的雷达数据的水平分辨率格点为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,垂直分辨率格点在17 km(海拔高度,下同)以下低层为0.5 km,17 km以上则为1 km。最终形成2年每6 min 1次的雷达反射率因子数据集。

1.3 雷暴单体识别方法

利用笛卡尔坐标系下的组合反射率因子,标记出大于20 dBZ的格点,若相邻的连续格点超过5个(指相邻8个方向连续,即包围1个格点的8个格点有任何一个满足反射率因子大于20 dBZ的条件,则认为两个格点连续),则将其提取出来,以组合反射率因子连续区域的周长为边界,截取了从回波底到回波顶范围内所有回波格点作为降水云样本,记录其时间、位置、面积、回波顶高等信息。根据降水云单体的格点簇位置,作出与格点簇具有相同标准二阶中心距的椭圆,将其称为匹配椭圆,该椭圆可以较好地指示降水云单体的质心位置和形状等信息,如图2所示。如果在降水云单体的体扫时间段内,在该单体的格点内或者在该单体的匹配椭圆内探测到闪电,它们被认为是在该单体内发生的闪电。将发生闪电的降水云样本挑选出来作为雷暴样本。考虑到C波段雷达的有效探测范围,为确保数据的可靠性,仅选取质心在距离那曲雷达100 km范围(图1灰色圆圈)内的雷暴样本进行统计分析。由于单站雷达在其上方存在观测盲区,因此,排除最大反射率因子所在位置距雷达站小于30 km(图1红色虚线圆圈内)的样本。最终,研究时段内共挑选5626个雷暴样本。

1.4 相关参量的说明和计算

本文在闪电活动与雷达参量的相关关系分析中使用了部分表征雷暴发展程度的雷达参量,见表1。需要注意的是,由于高原雷暴整体强度较弱,选取了30 dBZ作为强回波的阈值。即选取每个雷暴中不小于30 dBZ的回波区域,对相关参量进行计算,满足上述条件的样本量为4719。

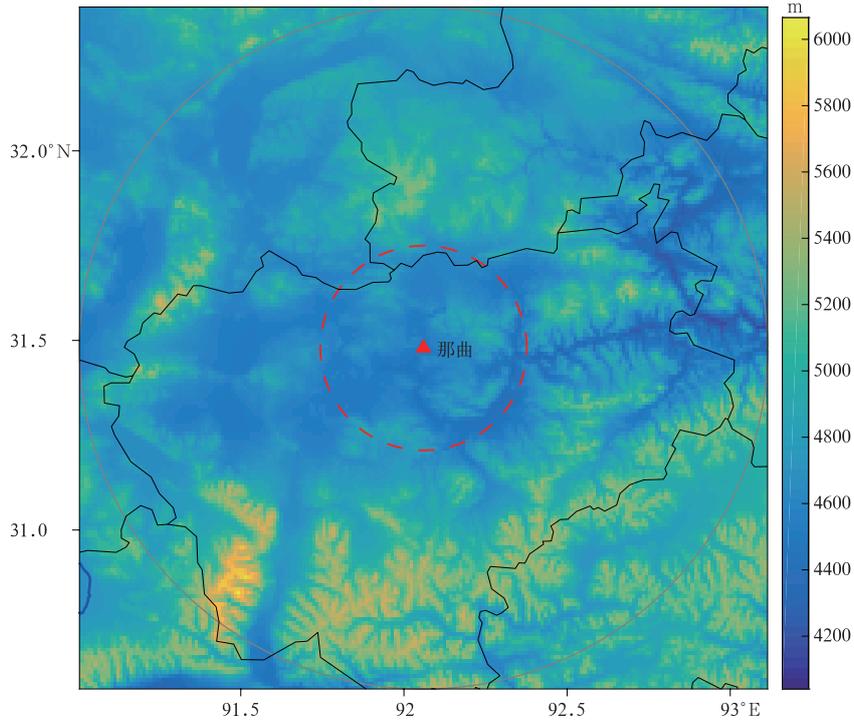


图 1 那曲多普勒天气雷达位置及周边地形
(红色虚线圆圈和灰色实线圆圈分别表示以那曲雷达为中心的 30 km 和 100 km 范围)

Fig. 1 Topographic map centered at Naqu Doppler weather radar
(red dashed circle and gray solid circle label 30 km and 100 km radii of the center of Naqu radar, respectively)

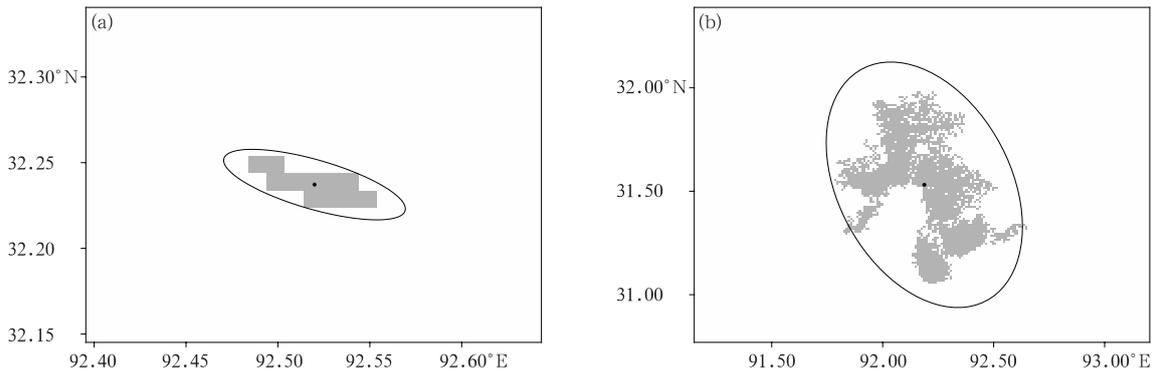


图 2 降水云单体及其匹配椭圆的相对位置示意图(灰色方块代表降水云单体的格点簇,黑色圆点代表降水云单体和匹配椭圆的质心位置,黑色实线为匹配椭圆的轮廓)

(a)2014 年 5 月 4 日 16:06(北京时,下同)雷达观测,(b)2014 年 6 月 20 日 18:06 雷达观测

Fig. 2 Schematic diagram of precipitation clouds and their matching ellipses
(space-continuous gray grid boxes represent identified precipitation clouds, black dots represent centroid positions of precipitation clouds and their matching ellipses, and black solid lines are contours of the matching ellipses) (a)radar volume scan at 1606 BT 4 May 2014,(b)radar volume scan at 1806 BT 20 Jun 2014

表 1 中, $A, H_{ET}, V_{00}, V_{10}$ 是与雷暴尺度和形态有关的特征值, $R_{max}, M_{VIL_{max}}, M_{PI_{max}}$ 是与雷暴在当

前时刻的局部最大发展强度相关的特征值, $M_{VIL}, M_{PI}, R_{s0}, R_{s10}$ 则同时包含了雷暴的尺度形态信息和

表 1 雷达参量列表

Table 1 Radar echo parameters

参量名	参量描述
A	强回波面积*
H_{ET}	30 dBZ 回波顶高
V_0	0℃层以上强回波体积**
V_{10}	-10℃层以上强回波体积**
R_{max}	最大雷达反射率因子
M_{VIL_max}	最大垂直累积液态水含量(格点数值)
M_{PI_max}	最大 7~11 km 可降冰垂直积分含量(格点数值)
M_{VIL}	垂直累积液态水含量***
M_{PI}	7~11 km 累积可降冰含量***
R_{s0}	0℃层以上所有强回波反射率因子之和
R_{s10}	-10℃层以上所有强回波反射率因子之和

注: * 表示强回波均以组合反射率因子 30 dBZ 为阈值; ** 表示 0℃层和 -10℃层高度为研究时间段内的平均海拔高度,分别为 5.9 km 和 7.2 km; *** 表示累积值均基于强回波范围计算,即组合反射率因子不小于 30 dBZ 的范围。

雷达回波强弱的信息。

由 $M-Z$ 关系式

$$M_{VIL} = 3.44 \times 10^{-6} Z^{\frac{4}{7}}, \quad (1)$$

式(1)中, M_{VIL} 为单位体积内的液态降水含量总质量, Z 为雷达反射率因子(单位: $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)。对于本文用的三维格点雷达数据,最终的计算公式为

$$M_{VIL} = 3.44 \times 10^{-6} \sum_{i=1}^{n-1} [(Z_i + Z_{i+1})]^{\frac{4}{7}} \Delta h_i, \quad (2)$$

式(2)中, Z_i 表示第 i 层高度上的反射率因子, Δh_i 为第 i 层与第 $(i+1)$ 层之间的高度差, n 为三维格点雷达数据的层数。

参量中的可降冰含量利用 Carey 等^[31]提出的计算公式:

$$M_{PI} = 1000 \pi \rho_i N_0^{\frac{3}{7}} \left(\frac{5.28 \times 10^{-18}}{720} \right)^{\frac{4}{7}}, \quad (3)$$

式(3)中, M_{PI} 为单位体积内的可降冰含量, $\rho_i = 917 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $N_0 = 4 \times 10^6 \cdot \text{m}^{-4}$ 。该公式适用于计算海拔 7~11 km 高度的可降冰含量。

2 结果分析

2.1 地闪位置附近的雷达参量特征

利用挑选出的 5626 次雷暴样本,通过找出雷暴中每个地闪位置半径 5 km 范围内所有格点上相关雷达参量的最大值,统计它们的分布情况。

由图 3 可知,地闪位置附近最大反射率因子基

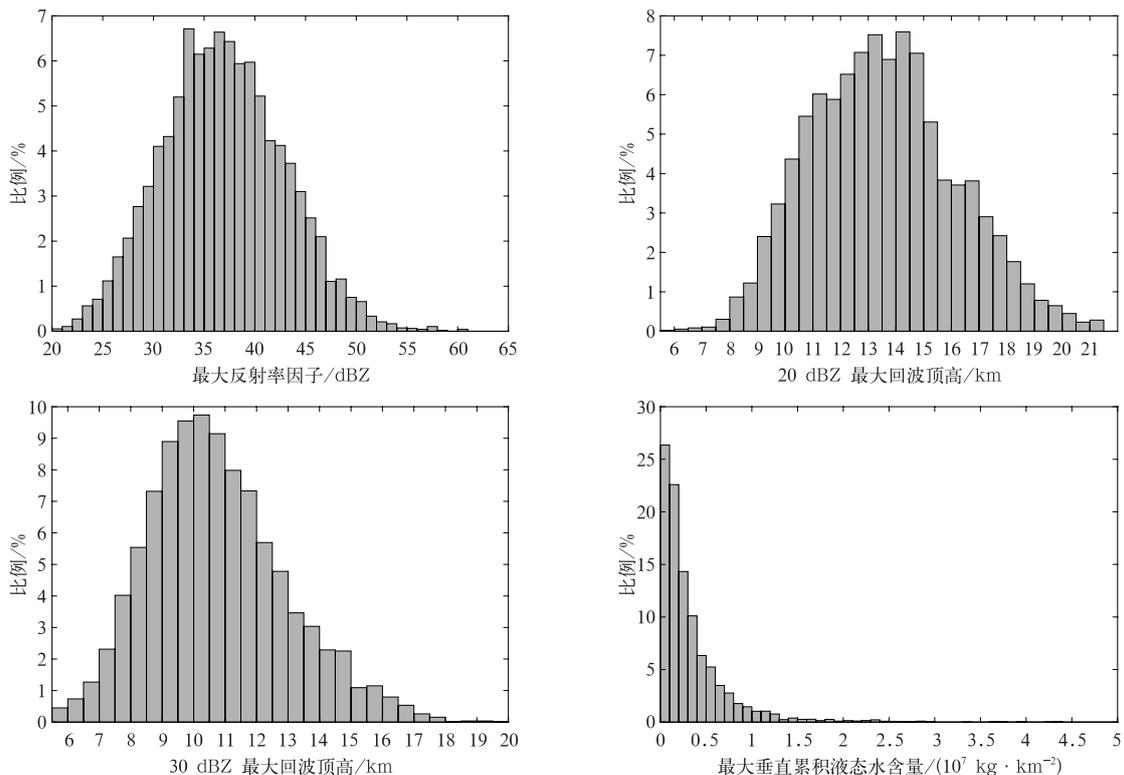
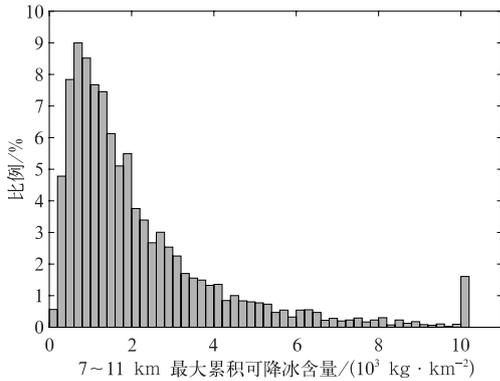


图 3 地闪发生位置 5 km 范围内相关雷达参量最大值分布特征

Fig. 3 Maximum radar parameters in the region within 5 km of cloud-to-ground flash location



续图 3

本呈正态分布,最大样本集中于 34~41 dBZ,这一区间明显小于韩雷等^[32]针对京津地区对流风暴分析得到的最大样本集中区间 45~52 dBZ。高原雷暴中有 36.7% 的地闪附近的最大雷达反射率因子小于 35 dBZ。这与前人研究^[33-35]指出高原雷暴对流强度较弱一致。发生地闪附近最大 20 dBZ 回波顶高集中在 11~15 km(海拔高度,下同),该区间的回波顶高超过了总样本量的一半。30 dBZ 回波顶高的峰值区间则为 8.5~12 km,在该区间内占比为 60.0%。

由图 3 中地闪发生位置半径 5 km 范围内最大垂直累积液态含水量和最大 7~11 km 累积可降水含量的分布情况可知,两者均呈现对数正态分布的特点,峰值出现在小值区,具有较长的下降段。最大垂直累积液态水含量小于 $10^6 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 的样本约占总样本的 25%,且集中于 $2.5 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 以下。7~11 km 累积可降水含量的峰值为 $700 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$,且分布较离散,有超过 1% 的可降水含量高于 $10000 \text{ kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 。

2.2 闪电频次与雷达参量相关分析

根据选取的 4719 个 6 min 雷达体扫雷暴云样本(存在大于 30 dBZ 回波样本),统计了地闪频次和各个雷达参量一一对应时的相关系数,统计结果见表 2。由表 2 可知,各个雷达参量和地闪频次的相关系数整体上看并不显著。其中的原因可能包括:①雷暴样本相互之间的差异性较大。高原雷暴主要受局地热力条件、地形等因素影响,不同雷暴的动力、微物理过程和电过程差别可能较大。②高原雷暴整体偏弱。雷暴在动力、微物理条件达到一定程度时才发生闪电活动。理论上,如果对流和微物理过程越强,那么与闪电活动存在直接关系的那部分动力、微物理条件在关于整个雷暴的参数统计中所占的成分就更大,此时可以期待雷达参量和闪电活

动之间有更好的关系;反之,关系则可能较差。由表 2 可知,随着地闪发生次数的增加(即雷暴动力和微物理过程增强),闪电频次和雷达参量之间的相关性呈现增强趋势。而分析中,63% 的样本对应 6 min 雷达体扫时段内只探测到 1 次地闪,这可能对相关系数统计造成不利影响。③地闪数据的局限性。地闪数据通常只占总闪数据的较少部分,且其发生条件与云闪并不完全相同。通常认为总闪电活动与雷暴的动力、微物理关系更为密切。对于地闪而言,如果对流很弱且雷暴电过程较弱,则地闪较少;但对流很强的情况下也可能造成地闪频次的减少,这可能是由于强对流抬升电荷区高度使得地闪难以发生^[36],或者强对流使电荷区变得破碎,异种极性小电荷区交错分布使云内难以形成高电势,不利于地闪发生^[37-38]。所以单独使用地闪数据也会降低相关性。

表 2 地闪频次与雷达参量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between cloud-to-ground flash frequency and radar parameters

参量	所有雷暴 (样本量:4719)	发生 2 次及以上 地闪的雷暴 (样本量:1724)	发生 5 次及以上 地闪的雷暴 (样本量:267)
A	0.38	0.39	0.50
H_{ET}	0.20	0.18	0.24
V_0	0.33	0.34	0.47
V_{10}	0.29	0.30	0.43
R_{max}	0.24	0.25	0.38
$M_{VIL_{max}}$	0.24	0.26	0.42
$M_{PL_{max}}$	0.25	0.29	0.43
M_{VIL}	0.34	0.36	0.48
M_{PI}	0.32	0.34	0.46
R_{s0}	0.32	0.34	0.47
R_{s10}	0.29	0.30	0.43

注:表中数据为四舍五入后保留两位小数的相关系数,所有相关系数均达到 0.001 显著性水平。

2.3 地闪频次和雷达参量的区间拟合关系

针对 2.2 节中分析的原因,为尽量减少样本差异性造成的影响,从宏观角度认识闪电活动与雷暴的雷达观测参量之间的关系,对雷达参量进行分段,统计不同分段区间内地闪频次的平均态,再分析平均地闪频次与雷达参量之间的关系。具体要求如下:结合各雷达参量的取值范围,将每个雷达参量等分为 25 个区间,部分参数存在极大值情况不予考虑。挑选出对应雷达参量值出现在各个区间的雷暴样本,且每个区间至少需要有 3 个及以上的雷暴样本才会计入统计。在进行相关分析时,采用对应区间所有样本的平均地闪频次和该区间雷达参量的中值。对于分布具有对数正态分布特点雷达参量

$(M_{VIL_max}, M_{PI_max}, M_{VIL}, M_{PI})$, 先将它们取对数处理, 再根据对数数值进行区间等分, 并按照上述方法进行相关和拟合计算。

图 4 给出了经过上述方法处理后的部分雷达参量与地闪频次的散点分布, 并分别进行散点的线性

拟合及幂函数拟合。

从线性相关系数看, 图 4 中除 V_0, V_{10} 和 R_{s0} 达到 0.01 显著性水平外, 其余相关系数均达到 0.001 显著性水平。所有线性相关的相关系数整体上较 2.2 节有显著提升, 表明宏观上闪电活动频次与雷

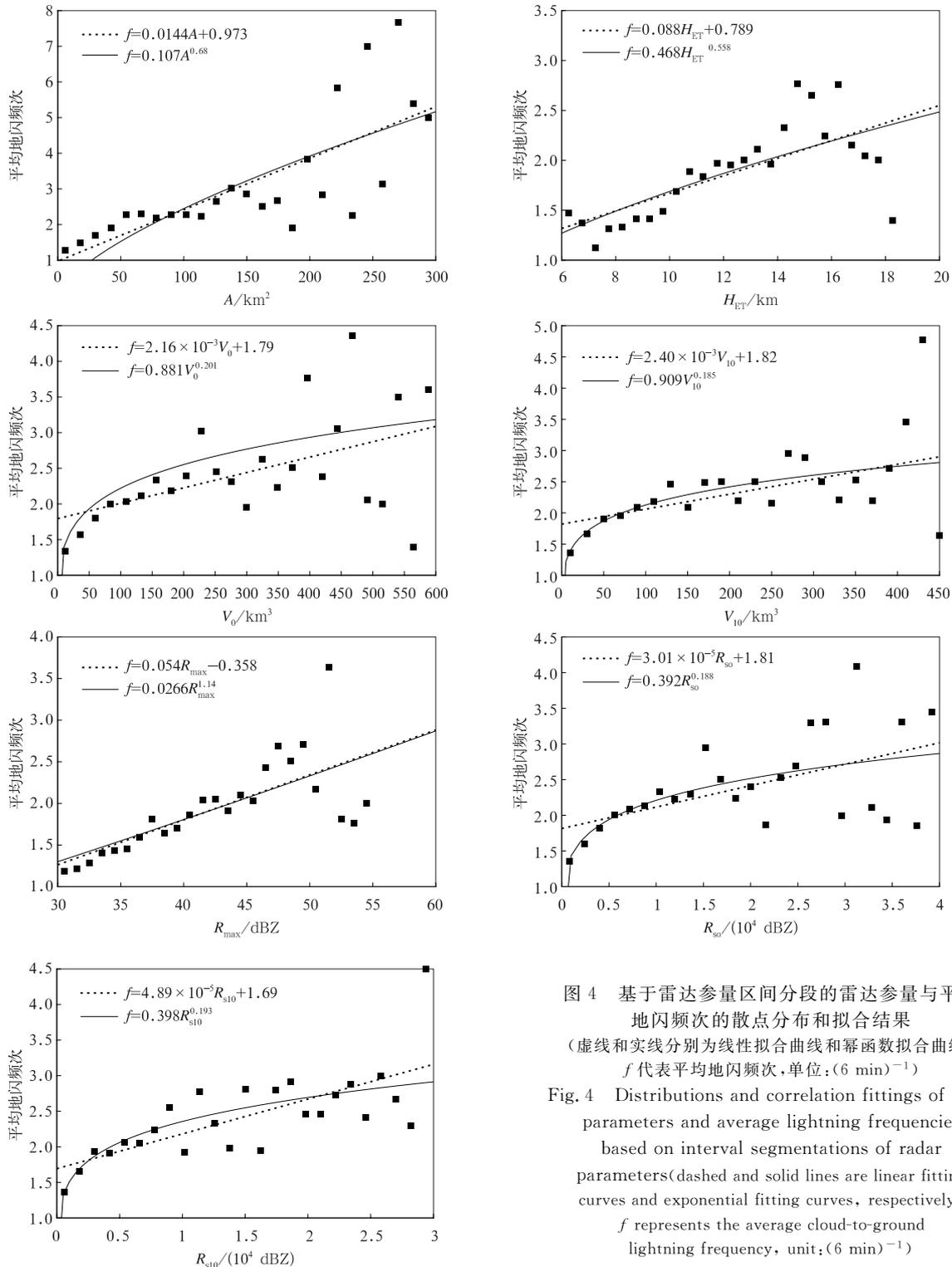


图 4 基于雷达参量区间分段的雷达参量与平均地闪频次的散点分布和拟合结果 (虚线和实线分别为线性拟合曲线和幂函数拟合曲线, f 代表平均地闪频次, 单位: $(6 \text{ min})^{-1}$)
Fig. 4 Distributions and correlation fittings of radar parameters and average lightning frequencies based on interval segmentations of radar parameters(dashed and solid lines are linear fitting curves and exponential fitting curves, respectively; f represents the average cloud-to-ground lightning frequency, unit: $(6 \text{ min})^{-1}$)

暴发展强度之间的确具有正向对应关系。雷达强回波面积(A)与地闪频次的线性相关性最好,相关系数达到0.75,其次是 R_{max} 和 R_{s10} 。 V_0 与地闪频次的相关性相对较差,仅为0.51。

各雷达参量与地闪频次的散点分布也都各有差异。主要描述雷暴尺度的3个参量 A, V_0, V_{10} 均在参量的低值范围表现出良好的正相关关系,但在高值范围的相关性相对较差。回波顶高 H_{ET} 与地闪频次的散点分布则显示出在强回波顶高16 km以下,各区间的平均强回波顶高和平均地闪频次有着明显的线性相关关系,而从16 km开始向上,散点分布多偏离拟合曲线,且地闪频次明显减少。强回波顶高表征了雷暴的对流强度,所以这可能与2.2节分析中提到的在强对流条件下,地闪频次可能降低的现象和原因有关。对于 R_{max}, R_{s0}, R_{s10} 这些包含了雷

达回波强弱信息的参量,它们与地闪频次的分布也有着较为稳定的正相关关系,其中 R_{max} 和 R_{s10} 线性相关的特征较为明显,相关系数分别为0.72和0.71。此外, R_{s10} 与平均地闪频次的相关关系明显优于 R_{s0} ,这是由于高原雷暴的云底高度接近于零度层,雷暴云中混合相态区域位置较高,而混合相态区域内霰粒子和冰晶的碰撞作用与雷暴云的起电直接相关。图4给出的雷达参量中,除了 A, R_{max} 和 R_{s10} 的线性拟合的相关系数大于幂函数拟合,其他的参量均是幂函数拟合要优于线性拟合。

对于 $M_{VIL_{max}}, M_{VIL}, M_{PL_{max}}, M_{PI}$ 4个雷达参量,先将各个参量取对数,基于对数值等分区间,统计对应区间内雷暴样本对应的上述参数值的对数中值与平均闪电频次的相关性,得到的结果如图5所示。除最大垂直积分液态含水量 $M_{VIL_{max}}$ 外,其他3个参量

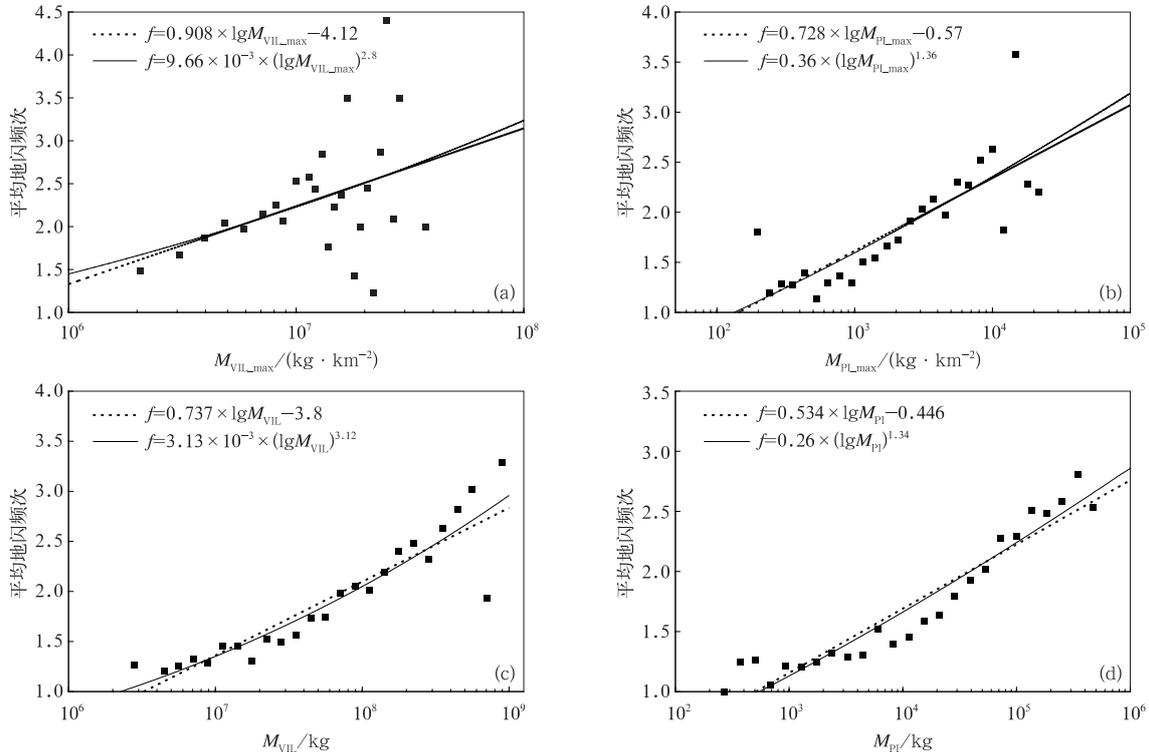


图5 同图4,但为相关雷达参量取对数后与地闪频次的区间分段拟合 (a)最大垂直积分液态含水量 $M_{VIL_{max}}$, (b)最大垂直积分可降水含量 $M_{PL_{max}}$, (c)强回波(不小于30 dBZ)区域累积液态含水量 M_{VIL} , (d)强回波区域累积可降水含量 M_{PI}

Fig. 5 The same as in Fig. 4, but interval segmentations and correlation fittings are based on logarithms of radar parameters (a) the maximum grid value of vertical integrated liquid water content $M_{VIL_{max}}$, (b) the maximum precipitation ice content $M_{PL_{max}}$ at 7–11 km, (c) the accumulated vertical integrated liquid water content M_{VIL} in areas no less than 30 dBZ, (d) the accumulated vertical integrated precipitation ice content M_{PI} at 7–11 km in areas no less than 30 dBZ

的线性相关系数均达到 0.001 显著性水平, M_{VIL_max} 与平均地闪频次的相关性最差, 相关系数仅为 0.41。平均地闪频次与累积参量 M_{VIL} 和 M_{PI} (对应雷达回波不小于 30 dBZ 区域) 的对数值有着很好的线性相关关系, 相关系数分别达到了 0.91 和 0.95, 说明闪电活动强弱和云内水成物粒子累积含量之间具有较为紧密的联系。

从散点分布和拟合关系看, 随着雷达参量的增强, 平均地闪频次也均表现出增大的趋势。可以明显看到, 取对数后的 M_{PI} 和 M_{PI_max} 的相关和拟合关系分别明显优于 M_{VIL} 和 M_{VIL_max} 。Gauthier 等^[17] 和袁铁等^[15] 研究分别发现, 在美国休斯敦和中国东部地区可降冰含量与闪电活动关系密切, 这是因为可降冰所主要对应的霰粒子和冰晶聚合体等对起电过程有关键影响^[39]。本文研究结果表明: 在高原地区, M_{PI} 依然可以较好地指示闪电活动的强度, 可降冰粒子在高原雷暴云起电过程中占有重要地位。取对数后的 4 个雷达参量的幂函数拟合均优于线性拟合, 其中 M_{PI} 和 M_{VIL} 的幂函数拟合的相关系数分别达到了 0.96 和 0.92。

3 结 论

本文基于 2014—2015 年 5—9 月那曲地区多普勒天气雷达数据, 结合同时期地闪观测数据, 识别产生闪电的雷暴单体的雷达体扫样本, 统计分析了闪电发生位置附近的雷达参量特征, 研究了那曲地区雷暴的雷达参量与地闪频次的相关关系, 得出了以下结论:

1) 地闪发生位置附近的雷达最大反射率因子呈正态分布特点, 峰值分布在 34~41 dBZ。发生地闪位置附近 20 dBZ 回波顶高主要集中在 11~15 km, 30 dBZ 回波顶高比较集中的区间为 8.5~12 km。地闪发生位置附近垂直积分液态含水量和 7~11 km 累积可降冰含量最大值呈对数正态分布。

2) 基于雷达参量与地闪频次一对一的相关性分析, 发现相关关系较差, 其中相关关系最好的强回波面积与地闪频次的相关系数仅 0.38。另一方面, 雷达参量与地闪频次的相关性随着地闪频次的增加(对应雷暴强度的增强)而增强。

3) 基于雷达参量分段统计得到的对应分段平均地闪频次与雷达参量之间表现出较强相关关系, 体现了宏观上雷暴雷达特征的增强与地闪频次增加

之间的正向对应关系。文中给出了个雷达参量与地闪频次之间的线性和幂函数拟合关系, 幂函数拟合关系好于线性拟合。其中, 强回波面积与平均地闪频次的线性相关性最好, 相关系数分别达到 0.75。

4) 对于雷达参量对数值分段后得到的强回波区(不小于 30 dBZ) 累积液态水含量、7~11 km 累积可降冰含量以及 7~11 km 最大垂直积分可降冰含量与地闪频次均具有较好的关系, 特别是与可降冰相关的参量相关性更好, 其中 7~11 km 累积可降冰含量的对数值与闪电频次的线性相关系数达到 0.95。文中给出了个雷达参量与地闪频次之间的线性和幂函数拟合关系, 幂函数拟合关系好于线性拟合。

参 考 文 献

- [1] 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 756-772.
- [2] 傅云飞, 潘晓, 刘国胜, 等. 基于云亮温和降水回波顶高度分类的夏季青藏高原降水研究. 大气科学, 2016, 40(1): 102-120.
- [3] 徐祥德, 周明煜, 陈家宜, 等. 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图像. 中国科学(地球科学), 2001, 31(5): 428-441.
- [4] 张庆云, 金祖辉, 彭京备. 青藏高原对流时空变化与东亚环流的关系. 大气科学, 2006, 30(5): 802-812.
- [5] 齐鹏程, 郑栋, 张义军, 等. 青藏高原闪电和降水气候特征及时空对应关系. 应用气象学报, 2016, 27(4): 488-497.
- [6] 鄒秀书, 袁铁, 谢毅然, 等. 青藏高原闪电活动的时空分布特征. 地球物理学报, 2004, 47(6): 997-1002.
- [7] 张义军, 孟青, 马明, 等. 闪电探测技术发展和资料应用. 应用气象学报, 2006, 17(5): 611-620.
- [8] 周康辉, 郑永光, 蓝渝. 基于闪电数据的雷暴识别、追踪与外推方法. 2016, 27(2): 173-181.
- [9] Lakken H R, Stansbury E J. Association of lightning flashes with precipitation cores extending to height 7 km. *J Atmos Terres Phys*, 1974, 36(9): 1547-1553.
- [10] Marshall J S, Radhakant S. Radar precipitation maps as lightning indicators. *J Appl Meteor*, 1978, 17(2): 206-212.
- [11] 石玉恒, 张义军, 郑栋, 等. 北京地区雷暴的雷达回波特征与闪电活动的相关关系. 气象, 2012, 38(1): 66-71.
- [12] 郑栋. 闪电活动与降水的相关关系研究. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [13] Xu W, Zipser E J, Liu C. Rainfall characteristics and convective properties of Mei-yu precipitation systems over South China, Taiwan, and the South China Sea. Part I: TRMM Observations. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(12): 4261-4275.
- [14] Zipser E J, Lutz K R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? *Mon Wea Rev*, 1994, 122(8): 1751-

- 1759.
- [15] 袁铁, 鄒秀书. 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. *气象学报*, 2010, 68(5): 652-665.
- [16] Petersen W A, Christian H J, Rutledge S A. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning. *Geophys Res Lett*, 2005, 32(14): 2471-2494.
- [17] Gauthier M L, Petersen W A, Carey L D, et al. Relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation ice mass: A Radar study over Houston. *Geophys Res Lett*, 2006, 33(20): 672-674.
- [18] Deierling W, Latham J, Petersen W A, et al. On the relationship of thunderstorm ice hydrometeor characteristics and total lightning measurements. *Atmos Res*, 2005, 76(1-4): 114-126.
- [19] Zheng D, Meng Q, Zhang Y, et al. Correlation between total lightning activity and precipitation particle characteristics observed from 34 thunderstorms. *Acta Meteor Sinica*, 2010, 24(6): 776-788.
- [20] 袁铁, 鄒秀书. 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*, 2010, 34(1): 58-70.
- [21] Wang C, Zheng D, Zhang Y, et al. Relationship between lightning activity and vertical airflow characteristics in thunderstorms. *Atmos Res*, 2017, 191: 12-19.
- [22] 郑栋, 张义军, 孟青, 等. 北京地区雷暴过程闪电与地面降水的相关关系. *应用气象学报*, 2010, 21(3): 287-297.
- [23] 王婷波, 郑栋, 张义军, 等. 基于大气层结和雷暴演变的闪电和降水关系. *应用气象学报*, 2014, 25(1): 33-41.
- [24] 王婷波, 郑栋, 周康辉, 等. 暴雨和雹暴个例中闪电特征对比. *应用气象学报*, 2017, 28(5): 568-578.
- [25] Fan P, Zheng D, Zhang Y, et al. A performance evaluation of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN) over the Tibetan Plateau. *J Atmos Oceanic Technol*, 2018, 35(4): 927-939.
- [26] Chen M, Wang Y, Gao F, et al. Diurnal variations in convective storm activity over contiguous North China during the warm season based on radar mosaic climatology. *J Geophys Res: Atmos*, 2012, 117(D20), DOI: 10.1029/2012JD018158.
- [27] Cummins K L, Murphy M J, Bardo E A, et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network. *J Geophys Res*, 1998, 103(D8): 9035-9044.
- [28] Zheng D, Zhang Y, Meng Q, et al. Climatological comparison of small- and large-current cloud-to-ground lightning flashes over Southern China. *J Climate*, 2016, 29(8): 2831-2848.
- [29] 王红艳, 刘黎平, 王改利, 等. 多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 214-224.
- [30] 肖艳姣, 刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究. *气象学报*, 2006, 64(5): 647-657.
- [31] Carey L D, Rutledge S A. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: A C-band polarimetric radar study. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(8): 2687-2710.
- [32] 韩雷, 俞小鼎, 郑永光, 等. 京津及邻近地区暖季强对流风暴的气候分布特征. *科学通报*, 2009, 54(11): 1585-1590.
- [33] Qie X, Wu X, Yuan T, et al. Comprehensive pattern of deep convective systems over the Tibetan Plateau-South Asian Monsoon Region based on TRMM data. *J Climate*, 2014, 27(17): 6612-6626.
- [34] Xu W. Precipitation and convective characteristics of summer deep convection over East Asia observed by TRMM. *Mon Wea Rev*, 2013, 141(5): 1577-1592.
- [35] 张翠华, 言穆弘, 董万胜, 等. 青藏高原雷暴天气层结特征分析. *高原气象*, 2005, 24(5): 741-747.
- [36] MacGorman D R, Burgess D W, Mazur V, et al. Lightning rates relative to tornadic storm evolution on 22 May 1981. *J Atmos Sci*, 1989, 46(2): 221-250.
- [37] Wang C, Zheng D, Zhang Y, et al. Relationship between lightning activity and vertical airflow characteristics in thunderstorms. *Atmos Res*, 2016, 191: 12-19.
- [38] Tan Y, Tao S, Liang Z, et al. Numerical study on relationship between lightning types and distribution of space charge and electric potential. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119: 1003-1014.
- [39] 王飞, 董万胜, 张义军, 等. 云内大粒子对闪电活动影响的个例模拟. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 564-570.

Relationships Between Cloud-to-ground Lightning and Radar Parameters at Naqu of the Qinghai-Tibet Plateau

Meng Qing¹⁾ Fan Penglei¹⁾ Zheng Dong¹⁾ Zhang Yijun²⁾ Yao Wen¹⁾

¹⁾ (Laboratory of Lightning Physics and Protection Engineering / State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438)

Abstract

Lightning observation may play a key role in the monitoring of deep convection over the Qinghai-Tibet Plateau, especially considering that the wide-range and real-time observation ability of lightning location system. It is firstly necessary to understand the relationship between lightning activity and deep convection features, which, has been rarely concerned in the Qinghai-Tibet Plateau. Using radar data and cloud-to-ground (CG) lightning data during May–September from 2014 to 2015, correlations between CG lightning and radar parameters of thunderstorms are investigated over Naqu, a county in the middle of the Plateau with relatively strong lightning activity. Continuous spatial regions of radar composite reflectivity above 20 dBZ are identified as storm cells at each 6 min radar volume scan, and “matching ellipses” are used to enclose the scope of cells, and then whether CG lightning flashes fall in ellipses or cells is decided. Cells with lightning and located within 30–100 km of radar center are picked out as thunderstorms. Based on 5626 thunderstorm samples, it is summarized that the maximum radar echo, 20 dBZ echo top and 30 dBZ within 5 km of CG flash location exhibit normal distribution, with their peak values ranging from 34 to 41 dBZ, 11 to 15 km, and 8.5 to 12 km, respectively. Meanwhile, the maximum vertical integrated liquid content and the maximum precipitation ice content vertically integrated at 7–11 km both show logarithmic normal distribution. A total of 4719 thunderstorms that possess no less than 30 dBZ reflectivity (a threshold value for the definition of strong reflectivity) are selected for the correlation analysis. Weak correlations between CG lightning frequency and radar parameters are found while are considered as one-to-one relationships. However, correlations enhance prominently when the CG lightning frequency in the thunderstorm increases. The correlation study based on interval segmentations of radar parameters is then made and strong relationships are found, indicating the macroscopic correspondences of CG lightning frequency to the intensity of thunderstorms. The area of composite reflectivity no less than 30 dBZ show the most outstanding correlation with CG lightning frequency among radar parameters which are segmented linearly, with the correlation coefficient being 0.75. Among radar parameters that are segmented according to their logarithms, the logarithm of precipitation ice content accumulated at 7–11 km and in the area with composite reflectivity no less than 30 dBZ are most prominently correlated with CG lightning frequency, with the correlation coefficient being 0.95. Formulas based on linear fittings and power function fittings are all given, while the power function fittings are a little better according to their corresponding correlation coefficient.

Key words: the Qinghai-Tibet Plateau; cloud-to-ground lightning; radar parameters; correlation