

王雪娟, 化乐彦, 王炳浩, 等. 高建筑物雷电光谱校正对通道温度反演的影响. 应用气象学报, 2024, 35(4): 493-501.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240409

高建筑物雷电光谱校正对通道温度反演的影响

王雪娟¹⁾²⁾ 化乐彦¹⁾ 王炳浩¹⁾ 许伟群²⁾ 吕伟涛^{2)*}
陈绿文³⁾ 武斌²⁾ 齐奇²⁾ 马颖²⁾ 杨静⁴⁾

¹⁾(南京信息工程大学应急管理学院, 南京 210044)

²⁾(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室/中国气象局雷电重点开放实验室, 北京 100081)

³⁾(中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

⁴⁾(中国科学院大气物理研究所/中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

摘 要

雷电光谱强度因受到大气衰减特性、光栅响应特性以及相机光电响应特性等影响,导致光谱定量分析中通道温度的反演存在误差。以 1 次高建筑物雷电回击光谱为例,考虑相机和光栅的仪器响应对其进行校正,对比校正前后的光谱结构和谱线强度,并基于多谱线法利用 1 次电离的氮离子(NII)和中性氧原子(OI)谱线反演通道温度,分析光谱校正对通道温度反演的影响。结果显示:光谱校正后离子和中性原子谱线强度均明显增强,尤其可见光区域的连续谱强度明显增强,导致其谱线结构变化显著,而近红外区域的谱线结构变化不显著。利用校正后可见光区域的 NII 谱线和近红外区域的 OI 谱线反演通道温度时,线性拟合的决定系数均增大,反演准确度均得到提升。NII 和 OI 谱线反演的通道温度平均值相比校正前分别降低 4660 K 和上升 1540 K,且由 OI 谱线反演的通道温度低于由 NII 谱线反演的温度,说明它们分别对应雷电放电通道径向的不同区域。

关键词: 高建筑物雷电; 光谱校正; 多谱线法; 温度

引 言

雷电是一种在短时间内产生大电流且伴随强烈发光的大气现象,是造成国民经济损失和人员伤亡的原因之一,也是天气预报的重点和难点^[1-2]。雷电放电过程中强大的电流会将通道加热至上万开尔文,使之成为等离子体通道。光谱观测是获得雷电等离子体通道内部原子与分子过程的重要方式。雷电光谱强度会受到大气衰减特性、光栅响应特性以及相机光电响应特性等影响。光谱强度是反映闪电通道能量特性的关键参数,对其估计的准确性会影响温度计算的可靠性。温度是描述雷电放电通道物理特性的基本参数,它与通道内的其他参量密不可

分,利用光谱准确计算通道内部等离子体温度是深入了解其放电过程的动力和物理过程的基础,研究雷电放电通道的温度对于森林防火等领域也有一定参考价值。

Pickering^[3]和 Fox^[4]使用光谱观测普通云地闪电(为了与击中高建筑物的闪电加以区分,本文定义击中地面或低矮物体的云地闪电为普通云地闪电)放电通道,并对谱线和光谱结构进行分辨。在定性分析雷电光谱基础上,研究人员逐渐定量分析雷电放电通道的光谱。Prueitt^[5]和 Orville^[6]选取 1 次电离的氮离子(NII)谱线利用二谱线法计算了普通云地闪电放电通道的温度。Walker 等^[7]选取 NII 谱线利用二谱线法计算了人工触发型闪电通道的峰值温度。Chuang^[8]通过对比二谱线法和标准温度

2024-03-05 收到, 2024-04-15 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(42005065), 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2023LASW-B01), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2021Z011), 中国科学院中层大气和全球环境探测重点实验室(LAGEO)开放课题(LAGEO-2019-07)

* 通信作者, 邮箱: wtlyu@cma.gov.cn

法,提出选择谱线的一些原则。由于二谱线法要求选择的两条谱线能级差尽可能大,因此进一步推出多谱线法。多谱线法可以选取同一元素的原子或离子的多条谱线用于计算。欧阳玉花等^[9]利用相同电离度的离子谱线,将利用二谱线法和多谱线法计算的普通云地闪电通道温度进行对比,发现多谱线法结果更佳。穆亚利^[10]选取中性氧原子(OI)谱线利用多谱线法计算普通云地闪电通道温度,并分析其时间演化及径向分布特征。Cen 等^[11]选取 NII 谱线利用多谱线法计算普通云地闪电回击通道的峰值温度并讨论温度与电流作用积分的相关性。Liu 等^[12]选取同一元素不同电离度的离子和中性原子谱线利用多谱线法计算 7 个普通云地闪电回击通道的平均温度。王雪娟等^[13]利用多谱线法计算普通云地闪电连续电流阶段的电流核心通道温度和外围电晕通道温度。

近年光电技术快速发展,高速摄像系统被广泛应用于雷电物理过程的光学观测和研究^[14-15]。然而摄像机直接拍摄的光谱强度是雷电发出的实际光强经过不同因素衰减后的强度,且光谱传输过程中不同波长的光谱会有不同程度衰减,该现象可对利用光谱诊断雷电放电通道温度造成影响。选择谱线计算雷电放电通道温度时,如果所选的谱线波段较窄,波长差较小,仪器响应相差不大,一般无需考虑仪器响应;但如果所选的谱线波段较宽,波长差较大,则需要考虑仪器响应^[16]。Wan 等^[17]考虑仪器响应和大气吸收后对普通云地闪电光谱进行了校正,发现利用回击初始阶段校正的离子谱线计算的通道温度值可超过 40000 K,较未校正的结果偏高约 10000 K。相对于自然闪电观测的时空随机性,人工触发闪电^[18-19]和高建筑物闪电^[20]的观测具有一定优势。目前对于高建筑物闪电的光谱观测还较少,针对观测仪器响应对高建筑物雷电光谱及其通道温度诊断的影响也鲜见报道。

因此,本文以发生于广州塔上的高建筑物 1 次雷电回击光谱为例,考虑摄谱仪仪器响应对可见光区域和近红外区域的光谱的影响,对校正前后光谱结构和强度差异,并分析其对高建筑物雷电放电通道温度诊断结果的影响。

1 试验装置

本试验在广州高建筑物雷电观测站(TOLOG)

进行,使用的观测仪器是 1 台高速无狭缝摄谱仪,记录系统是 1 台高速摄像机(Photron FASTCAM Mini AX),分光系统是 1 个每毫米 600 线的平面透射光栅,感光度为 100000。高速摄像机的光谱响应范围为 400~1000 nm,镜头焦距为 20 mm。以每秒 14400 帧的速度拍摄黑白照片,曝光时间为 69 μ s,图像分辨率为 895 \times 512 像元,每个像元大小为 20 μ m \times 20 μ m。

2 理论方法

2.1 基本理论假设

雷电放电过程的大电流可在极短时间内达到几十千安^[21],形成高温等离子体通道^[22]。对雷电等离子体光谱定量分析基于 3 个理论假设:①闪电产生的光辐射在等离子体中传播时不会被等离子体自身吸收或自身吸收可以忽略。②闪电通道满足局部热力学平衡。③闪电通道在相对窄的横截面上温度分布相对均匀。以上假设已由文献^[23-25]证实。

2.2 多谱线法

基于以上基本假设,本文分别选取波长为 444.7、463.0 nm 和 500.5 nm 的 NII 谱线和波长为 777.4、794.7 nm 和 844.6 nm 的 OI 谱线,通过以下多谱线法计算雷电通道温度^[9,26]:

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = -\frac{1}{kT}E + c. \quad (1)$$

式(1)中: I 为谱线相对强度(量纲为 1), λ 为谱线波长(单位:nm), A 为跃迁几率(单位: s^{-1}), E 为跃迁谱线的激发能(单位:eV), g 为跃迁谱线的统计权重, T 为温度(单位:K), k 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$), c 为常数。

3 光谱校正及通道温度反演

与普通云地闪电相比,高建筑物雷电发生的位置相对可预测,发生概率较高,因此高建筑物为雷电研究提供了良好平台^[27]。本研究利用无狭缝摄谱仪在 TOLOG 进行高建筑物雷电光谱观测,得到高建筑物雷电回击放电通道的光谱。TOLOG 自 2009 年建立,目前已形成包括 6 个观测点的闪电光学观测站网,实现了对广州珠江新城地区高建筑物闪电事件的综合观测^[28-29],本研究的光谱观测位于主观测点。

图 1 为 1 次雷电回击过程初始时刻经过反色的原始光谱图片,该闪电发生在广州最高的建筑物广州塔塔顶。广州塔高度为 600 m,测站距离广州塔

3.3 km。图 1 左侧为闪电的零级光谱(即闪电原通道),右侧为一级光谱。

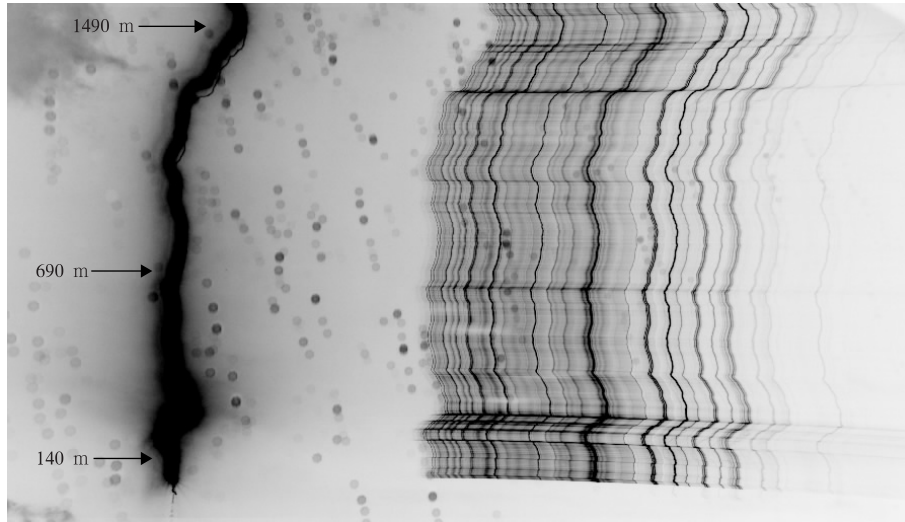


图 1 1 次高建筑物雷电回击过程经过反色的原始光谱图

Fig. 1 Original spectrogram of a high structure lightning return stroke after inversion

3.1 高建筑物雷电光谱的校正

以广州塔塔顶为闪电通道底部(0 m 高度),将通道高度分别为 140、690 m 和 1490 m 处的一级原始光谱转化为相应的谱线图(图 1),并对观测的谱线强度进行光谱校正。由于摄像机 CMOS 图像传感器对不同波长光的感光灵敏度不同,同时光经过光栅分光后,在较宽的光谱范围内,对不同波长光的衍射效率不同,因此将相机响应和光栅响应合称为总仪器响应。具体校正过程:将实际观测的光谱消除背景噪声,光谱强度减去背景值,并除以每个对应波长的总仪器响应因子,得到的光谱强度即为校正后的谱线强度。由于缺少能准确确定大气透射系数所必需的精确气象能见度资料,因此本文的光谱校正未考虑大气衰减。摄像机和光栅的响应曲线如图 2 所示。由图 2 可见,响应因子在 640 nm 处最高,波长增加或减少均逐渐降低,光栅响应曲线在 450 nm 处降到最低后又随波长的减小再次增加。总仪器响应曲线的最低值约为最高值的三分之一。这表明光谱校正对光谱结构影响显著。

图 3 为回击通道不同高度处校正前后光谱的谱线强度及其连续谱强度,计算所需的多条 NII 和 OI 谱线均得到清晰辨认且已在图中标出,校正前后整个闪电光谱范围内谱线组成基本相同。由图 3 可见,

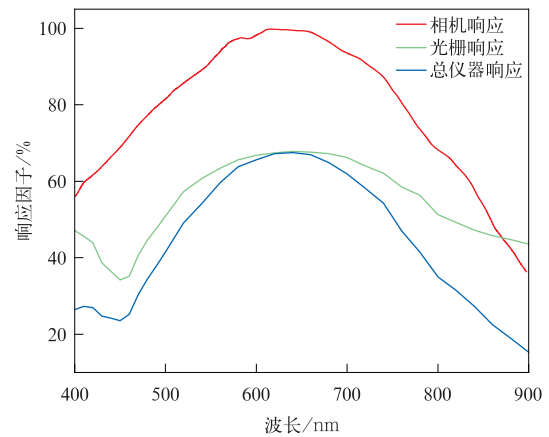


图 2 相机与光栅的响应因子曲线

Fig. 2 Factor curves of camera and grating response

在可见光区域(400~700 nm),谱线主要为激发能较高的 NII 谱线(激发能为 20~30 eV);在近红外区域(700~1000 nm),谱线主要为激发能较低的中性氮原子(NI)和 OI 谱线(激发能为 10~14 eV)。

由图 3 还可看到,雷电辐射光谱是由连续谱和叠加在连续谱上的线状谱组成。对比较正前后的光谱可知,无论是可见光区域的离子谱线还是近红外区域的中性原子谱线,校正后每条谱线的强度均明显增强,特别是在可见光区域,除原本几乎接近阈值快消失的 NII 谱线在校正后明显可辨外,区域中连

续谱强度也显著增强。这与普通云地闪电光谱仪器校正后的结果区别明显,Wan 等^[17]对普通云地闪电的光谱进行仪器响应校正,结果显示离子谱线强度和中性原子谱线强度明显增强,但可见光区域的连续谱辐射强度变化并不明显。在近红外区域,图 3 中 OI 谱线强度明显增强,但校正前后的连续谱强度变化不大,与普通云地闪电近红外区域光谱仪器

校正结果一致。这反映了高建筑物雷电与普通云地闪电放电受电流波反射影响的差异。此外,图 3 校正前后不同波长的谱线相对强度也发生了变化:在 140 m 和 1490 m 高度处,校正前谱线 NII 463.0 nm 的强度大于谱线 NII 444.7 nm 的强度,而校正后谱线 NII 463.0 nm 的强度明显低于谱线 NII 444.7 nm 的强度。该变化会影响后续放电通道温度的计算。

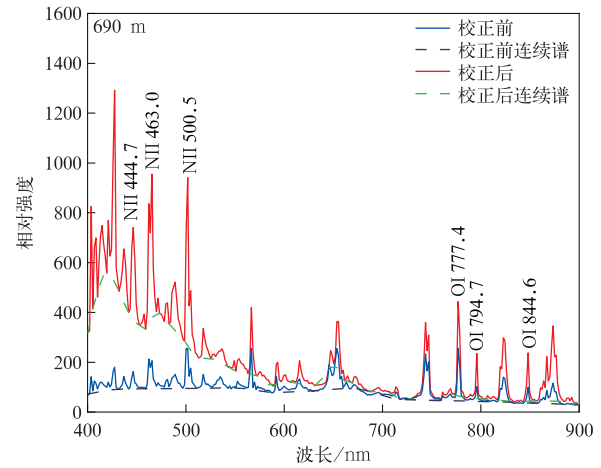
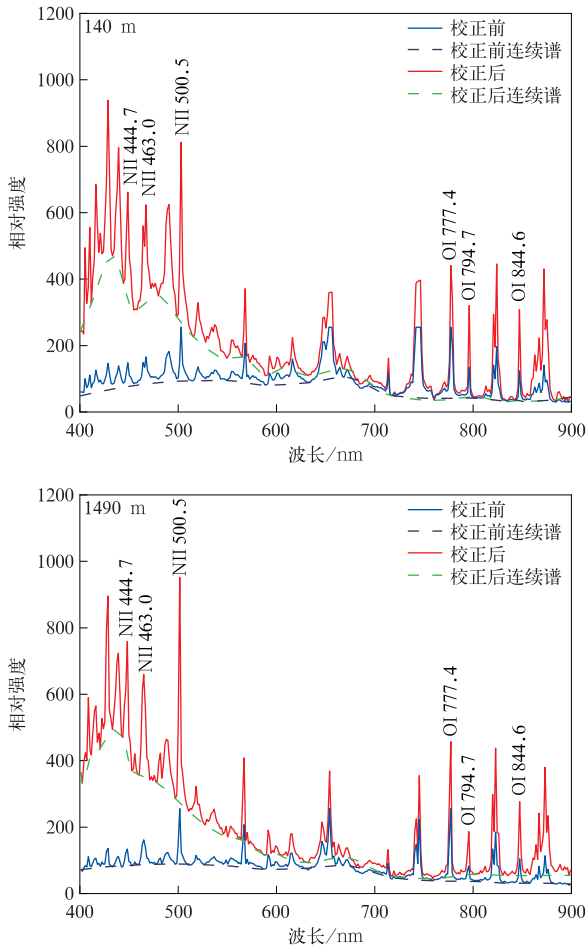


图 3 回击通道不同高度处校正前后光谱的谱线强度及其连续谱强度

Fig. 3 Spectrograms before and after correction at different channel height, and corresponding continuous spectrum

3.2 高建筑物雷电光谱校正对通道温度反演的影响

由图 2 可知,在可见光区域 450~500 nm 与近红外区域 750~850 nm 处的总仪器响应曲线斜率较高,对应区域较短波长与较长波长的谱线间总仪器响应因子相差接近 1 倍,因此总仪器响应对诊断通道温度可能会产生较大影响。在谱线辨认和光谱结构特征分析的基础上考虑减小连续谱对线状谱取值的影响,扣除对应谱线位置的连续谱强度,采用多谱线法,分别利用校正前后的 NII 谱线和 OI 谱线计算雷电回击通道的温度,分析总仪器响应对高建筑物雷电回击通道温度诊断的影响。本文选取的谱线分别为可见光区域的 NII 444.7、463.0、500.5 nm

谱线和近红外区域的 OI 777.4、794.7、844.6 nm 谱线,其中 OI 777.4 nm 谱线是实现星载闪电探测和定位系统的首选谱线^[30]。根据玻尔兹曼图原理,利用式(1)进行线性拟合,并通过斜率可求得通道的温度。在拟合过程中,决定系数(R^2)可以很好地反映拟合程度和计算结果的准确度。

图 4 和图 5 为不同情况下(不考虑仪器响应、仅考虑相机响应和考虑总仪器响应),光谱强度减去连续谱强度之后分别利用 NII 和 OI 谱线拟合的玻尔兹曼图。由于试验观测的记录系统为高速相机,因此本文未包括仅考虑光栅响应的情况。为了更直观地展示光谱校正对温度计算的影响,表 1 列出相应

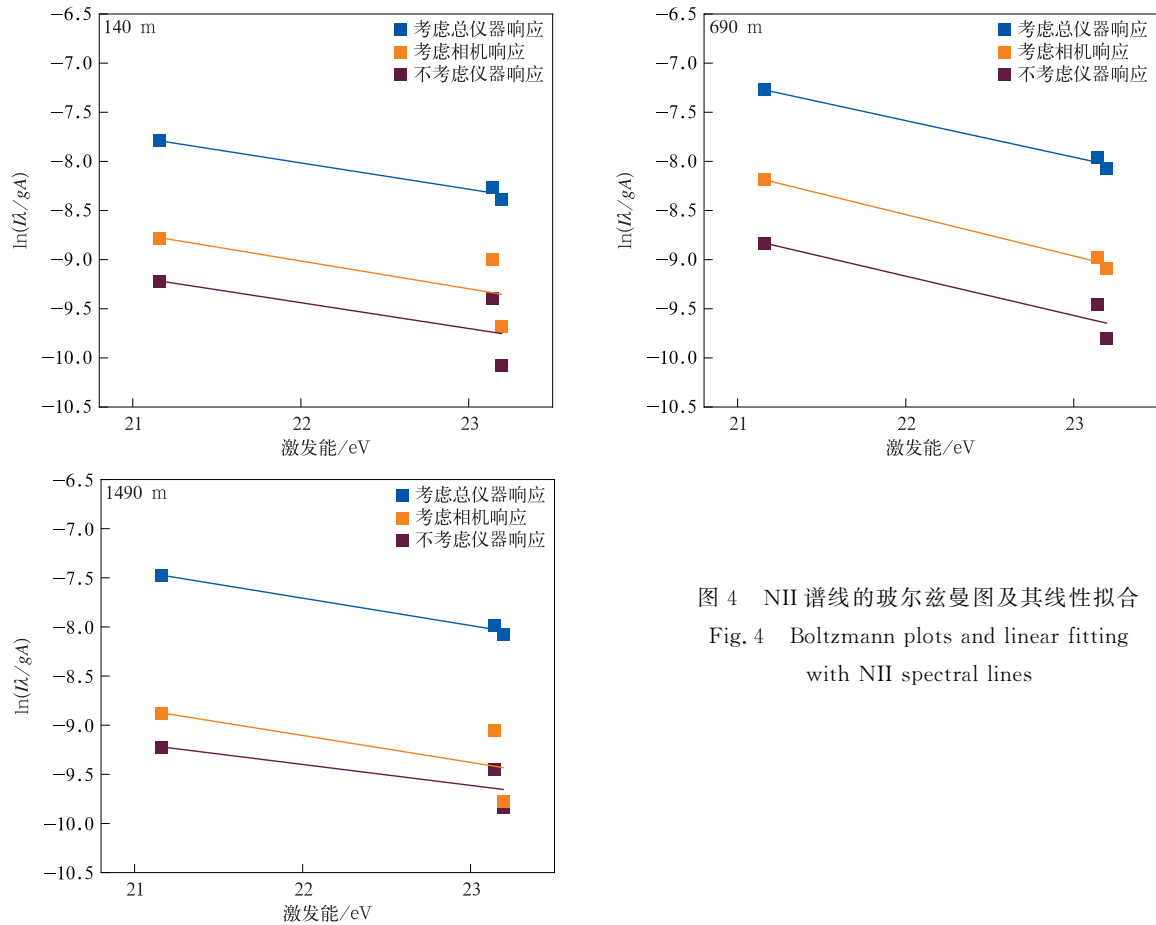


图 4 NII 谱线的玻尔兹曼图及其线性拟合
Fig. 4 Boltzmann plots and linear fitting with NII spectral lines

计算得到的温度以及对应的 R^2 。

由图 4 和表 1 可知,利用 NII 谱线诊断高建筑物雷电放电通道温度时,不考虑仪器响应的温度范围为 31600~54500 K。Prueitt^[5]利用 NII 谱线计算出普通云地闪电回击温度为 24000~28000 K, Orville^[6]根据 NII 谱线计算的普通云地闪电回击通道最高温度为 36000 K, Walker 等^[7]利用 NII 648.2 nm 和 661.0 nm 谱线计算的人工触发闪电回击通道峰值温度为 43000 K。Kieu 等^[31-32]利用相同的光谱线计算的类闪电等离子体通道的最高温度约为 32000 K。对比发现,不考虑仪器响应计算的高建筑物雷电回击通道的温度较不考虑仪器响应计算的普通云地闪电和人工触发闪电的回击通道温度偏高。由表 1 可见,考虑仪器响应校正后利用 NII 谱线诊断得到的温度降低,仅考虑相机响应时,诊断得到的温度最低。考虑相机和光栅的仪器响应后的回击通道温度为 31180~43410 K,较不考虑仪器响应的温度平均低 4660 K。同时,考虑相机和光栅的仪器响应后,NII 谱线性拟合 R^2 增大, R^2 最小达为 0.968。由图 3 可见,校正后,可见光范围内的 NII

谱线和连续谱强度均明显增强。与校正前相比,校正后更容易分辨连续谱和线状谱,减小连续谱对线状谱强度取值的影响。因此,光谱校正后 NII 谱线拟合效果明显改善, R^2 明显增大,计算结果更准确。

利用 OI 谱线诊断高建筑物雷电回击通道温度时,不考虑仪器响应的温度为 14370~19440 K,考虑总仪器响应后的通道温度为 16240~19600 K。这与已有研究的结果类似,例如 Wan 等^[17]利用 OI 多条谱线计算普通云地闪电考虑仪器和大气衰减前后的回击通道的温度分别为 17000~20000 K 和 20000~22000 K。Bogges 等^[33]利用 OI 777/715 nm 谱线未考虑仪器响应分析得到的普通云地闪电在回击通道底部的温度约为 18000 K。Orville 等^[34]使用 OI 777.4/794.7 nm 和 OI 844.7/794.7 nm 计算的云地闪电回击通道温度范围为 13000~17000 K。Weidman 等^[35]基于谱线 NI 868.0/1011.3 nm 计算得到的人工触发闪电回击通道的温度约为 16000 K。由表 1 可见,光谱校正后的温度比不考虑仪器响应的温度高,考虑相机和光栅响应的温度比不考虑仪器响应的温度平均偏高 1540 K。表 1 中 OI 谱线拟

合的 R^2 均大于 0.910,且考虑因素越多,OI 谱线拟合的 R^2 越高。由图 3 可见,相比于可见光区域,在近红外区域光谱校正前后连续谱辐射本身相对较弱,连续谱对线状谱线强度取值产生的影响较小,所

以线性拟合度均较高。考虑总仪器响应后,谱线强度更接近在光源处的强度,因此校正后线性拟合效果更佳, R^2 达到 0.999。

由表 1 也可见,尽管光谱观测时间分辨率在微

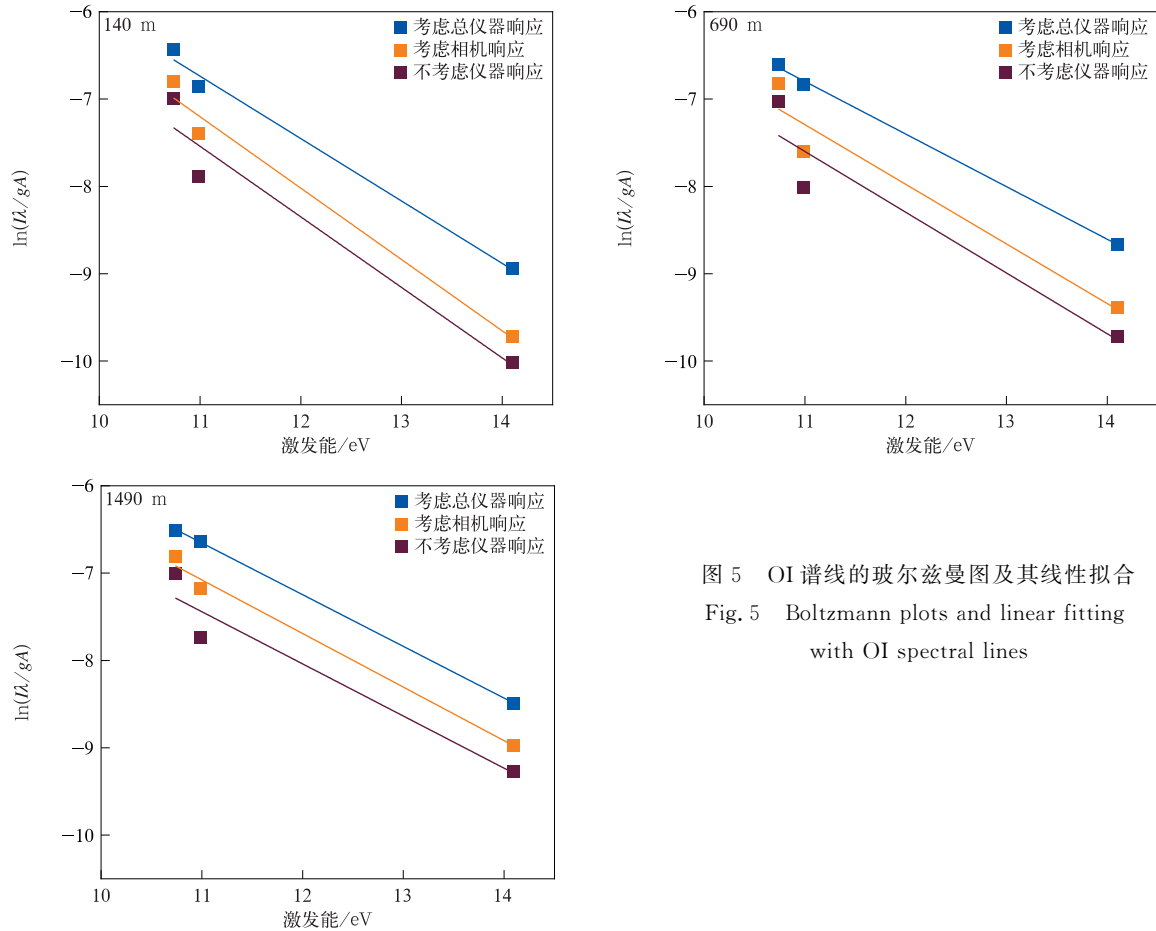


图 5 OI 谱线的玻尔兹曼图及其线性拟合
Fig. 5 Boltzmann plots and linear fitting with OI spectral lines

表 1 不同情况下利用 NII 和 OI 谱线计算的通道温度及其对应的拟合决定系数

Table 1 Lightning discharge channel temperature and corresponding determination coefficients with NII and OI lines under different conditions

通道高度/m	相机响应校正	光栅响应校正	NII 谱线计算的温度/K	NII 谱线拟合决定系数	OI 谱线计算的温度/K	OI 谱线拟合决定系数
140	否	否	44140	0.451	14370	0.950
140	是	否	41070	0.484	14200	0.984
140	是	是	41670	0.984	16240	0.991
690	否	否	31600	0.955	16680	0.910
690	是	否	27570	0.991	16990	0.948
690	是	是	31180	0.989	19270	0.999
1490	否	否	54500	0.630	19440	0.938
1490	是	否	42370	0.450	18910	0.991
1490	是	是	43410	0.968	19600	0.999

秒尺度,在通道相同高度利用 OI 谱线诊断得到的雷电通道温度明显低于利用 NII 谱线得到的温度。Kieu 等^[31]利用类似闪电放电的高速亚微秒时间尺

度光谱观测,在实验室类闪电等离子体通道中发现利用中性谱线计算的温度和电子密度也略低于同时用离子谱线计算得到的温度和电子密度,且中性谱

线比离子谱线的跟踪时间更长,因为中性谱线的持续时间更长。这说明闪电光谱中离子辐射和中性辐射来自不同位置。离子辐射主要从通道的较热区域发射,中性辐射从较冷区域发射。雷电电流核心通道能量沿径向的传输是外围通道发光的主要原因,因此核心通道温度高于外围通道温度^[36]。这进一步验证了 Wang 等^[37]利用闪电光谱与电场的相关性分析得到 NII 辐射主要来自中间的电流核心通道,NI 和 OI 辐射主要来自周围的电晕层通道的结论。

4 结 论

本研究通过考虑总仪器响应对高建筑物雷电回击放电通道光谱进行光谱校正,对比分析校正前后的光谱结构及强度,在考虑连续谱的影响下,选取可见光区域的 1 次电离的氮离子(NII)和近红外区域的中性氧原子(OI)谱线利用多谱线法计算通道温度,对比分析光谱校正对高建筑物雷电放电通道温度计算的影响,得到以下结论:

1) 考虑总仪器响应校正高建筑物雷电光谱,发现可见光区域的谱线结构变化较近红外区域的谱线结构变化更显著。这与击中地面或低矮物体的普通云地闪电光谱可见光区域总仪器响应校正后的结果不同,反映了高建筑物雷电与普通云地闪电放电受电流波在不同介质之间界面反射的影响的差异。

2) 光谱校正后,利用可见光区域的 NII 谱线和近红外区域的 OI 谱线反演通道温度的拟合决定系数均增大,准确度得到提升。计算高建筑物雷电回击通道温度时,考虑相机和光栅的响应因子进行光谱校正会导致 NII 和 OI 多谱线法诊断的温度分别平均降低 4660 K 和上升 1540 K。

3) 由 OI 谱线计算的通道温度低于由 NII 谱线计算的通道温度,说明二者分别对应雷电放电通道径向截面的不同区域。

综上所述,仪器响应是影响光谱诊断的重要因素,考虑总仪器响应校正高建筑物雷电光谱显示光谱结构明显发生变化,尤其是可见光区域的连续谱明显增强。这意味着在利用可见光区域的离子谱线进行闪电通道温度诊断时,必须考虑连续谱的影响。减去连续谱强度后,温度的拟合效果提升,结果更准确。在近红外区域,光谱校正后中性原子谱线的强度明显增强,此区域连续谱的影响较小,温度的线性

拟合效果更佳。由于缺少准确确定大气透射系数所必需的精确气象能见度资料,因此本文的光谱校正未考虑大气衰减,仅考虑相机和光栅响应。后续将进一步开展高建筑物雷电光辐射在传播过程中大气的吸收和散射作用的研究。

参 考 文 献

- [1] 闫琳城,张文娟,张义军,等. 南海雷暴大风时空分布及闪电和对流活动特征. 应用气象学报,2023,34(4):503-512.
Yan L C,Zhang W J,Zhang Y J,et al. Temporal and spatial distribution of thunderstorms and strong winds with characteristics of lightning and convective activities in the South China Sea. *J Appl Meteor Sci*,2023,34(4):503-512.
- [2] 李莹,王国复. 气象灾害风险管理系统设计与应用. 应用气象学报,2022,33(5):628-640.
Li Y,Wang G F. Design and implementation of Meteorological Disaster Risk Management System. *J Appl Meteor Sci*,2022,33(5):628-640.
- [3] Pickering E C. Spectrum of lightning. *Astron Nachr*,1901,157:207.
- [4] Fox P. The spectrum of lightning. *Astrophys J*,1903,18:294-297.
- [5] Prueitt M L. The excitation temperature of lightning. *J Geophys Res*,1963,68(3):803-811.
- [6] Orville R E. A high-speed time-resolved spectroscopic study of the lightning return stroke:Part II. A quantitative analysis. *J Atmos Sci*,1968,25(5):839-851.
- [7] Walker T D,Christian H J. Triggered lightning spectroscopy: 2. A quantitative analysis. *J Geophys Res Atmos*,2019,124(7):3930-3942.
- [8] Chuang H. Uncertainties in the measurement of helium plasma temperature by the relative intensity method. *Appl Opt*,1965,4(12):1589-1592.
- [9] 欧阳玉花,袁萍,贾向东. 用多谱线法计算闪电通道等离子体温度. 西北师范大学学报(自然科学版),2006,42(3):49-53.
Ouyang Y H,Yuan P,Jia X D. Multiple-line method used to calculate lightning channel temperature. *J Northwest Norm Univ Nat Sci*,2006,42(3):49-53.
- [10] 穆亚利. 闪电回击通道温度的时间演化及径向分布特征. 兰州:西北师范大学,2016.
Mu Y L. Temperature Distribution and Evolution Characteristic in Lightning Return Stroke Channel. Lanzhou: Northwest Normal University,2016.
- [11] Cen J Y,Yuan P,Qu H Y,et al. Analysis on the spectra and synchronous radiated electric field observation of cloud-to-ground lightning discharge plasma. *Phys Plasmas*,2011,18(11). DOI:10.1063/1.3541837.
- [12] Liu G R,Yuan P,An T T,et al. Using Saha-Boltzmann plot to diagnose lightning return stroke channel temperature. *J Geophys Res Atmos*,2019,124(8):4689-4698.

- [13] 王雪娟,许伟群,化乐彦,等. 闪电连续电流的光谱分析及通道温度特性研究. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(7): 2069-2075. Wang X J, Xu W Q, Hua L Y, et al. Spectral analysis and study on the channel temperature of lightning continuing current process. *Spectrosc Spectr Anal*, 2022, 42(7): 2069-2075.
- [14] 关雨依,吕伟涛,齐奇,等. 一次上行闪电中先导二维和三维发展特征的差异. *应用气象学报*, 2023, 34(5): 598-607. Guan Y N, Lü W T, Qi Q, et al. Difference between 2D and 3D development characteristics of an upward lightning leader. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 598-607.
- [15] 武斌,吕伟涛,齐奇,等. 双向先导正端突然延展现象的高速摄像观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 146-155. Wu B, Lü W T, Qi Q, et al. High-speed video observations on abrupt elongations of the positive end of bidirectional leader. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 146-155.
- [16] Hegazy H. Oxygen spectral lines for diagnostics of atmospheric laser-induced plasmas. *Appl Phys B*, 2010, 98(2): 601-606.
- [17] Wan R, Yuan P, An T, et al. Effects of atmospheric attenuation on the lightning spectrum. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(22). DOI:10. 1029/2021JD035387.
- [18] 许伟群,吕伟涛,齐奇,等. 一次触发闪电金属汽化通道的亮度与电流特征. *应用气象学报*, 2023, 34(6): 739-748. Xu W Q, Lü W T, Qi Q, et al. Luminosity and current characteristics of metal-vaporized channel of an artificially triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 739-748.
- [19] 张悦,吕伟涛,陈绿文,等. 基于人工引雷的粤港澳闪电定位系统性能评估. *应用气象学报*, 2022, 33(3): 329-340. Zhang Y, Lü W T, Chen L W, et al. Evaluation of GHMLLS performance characteristics based on observations of artificially triggered lightning. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 329-340.
- [20] 王雪娟,王海通,化乐彦,等. 广州塔闪电光谱特性分析. *光学学报*, 2023, 43(12): 343-353. Wang X J, Wang H T, Hua L Y, et al. Analysis on lightning spectral characteristics of Canton Tower. *Acta Opt Sinica*, 2023, 43(12): 343-353.
- [21] Qie X S, Jiang R B, Wang C X, et al. Simultaneously measured current, luminosity, and electric field pulses in a rocket-triggered lightning flash. *J Geophys Res*, 2011, 116(D10). DOI: 10. 1029/2010JD015331.
- [22] 王雪娟,袁萍,岑建勇,等. 依据光谱研究闪电放电通道的半径及能量传输特性. *物理学报*, 2013, 62(10): 486-493. Wang X J, Yuan P, Cen J Y, et al. Study on the radius and energy transmission properties of lightning discharge channel by the spectra. *Acta Phys Sinica*, 2013, 62(10): 486-493.
- [23] Uman M, Orville R. The opacity of lightning. *J Geophys Res*, 1965, 70: 5491-5497.
- [24] Uman M A. Determination of lightning temperature. *J Geophys Res*, 1969, 74(4): 949-957.
- [25] Wang X J, Wang H T, Lyu W T, et al. First experimental verification of opacity for the lightning near-infrared spectrum. *Geophys Res Lett*, 2022, 49(13). DOI:10. 1029/2022GL098883.
- [26] 邱德仁. 原子光谱分析. 上海: 复旦大学出版社, 2002. Qiu D R. Atomic Spectral Analysis. Shanghai: Fudan Press, 2002.
- [27] 吴姗姗,吕伟涛,齐奇,等. 基于光学资料的广州塔附近下行地闪特征. *应用气象学报*, 2019, 30(2): 203-210. Wu S S, Lü W T, Qi Q, et al. Characteristics of downward cloud-to-ground lightning flashes around Canton Tower based on optical observations. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 203-210.
- [28] 吕伟涛,陈绿文,马颖,等. 广州高建筑物雷电观测与研究10年进展. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 129-145. Lü W T, Chen L, Ma Y, et al. Advances of observation and study on tall-object lightning in Guangzhou over the last decade. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 129-145.
- [29] 齐奇,吕伟涛,武斌,等. 广州两座高建筑物上闪击距离的二维光学观测. *应用气象学报*, 2020, 31(2): 156-164. Qi Q, Lü W T, Wu B, et al. Two-dimensional optical observation of striking distance of lightning flashes to two buildings in Guangzhou. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(2): 156-164.
- [30] Zhao J C, Yuan P, Cen J Y, et al. Characteristics and applications of near-infrared emissions from lightning. *J Appl Phys*, 2013, 114(16). DOI:10. 1063/1. 4827182.
- [31] Kieu N, Gordillo-Vázquez F J, Passas M, et al. Submicrosecond spectroscopy of lightning-like discharges: Exploring new time regimes. *Geophys Res Lett*, 2020, 47(15). DOI: 10. 1029/2020GL088755.
- [32] Kieu N, Gordillo-Vázquez F J, Passas M, et al. High-speed spectroscopy of lightning-like discharges: Evidence of molecular optical emissions. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(11). DOI:10. 1029/2021JD035016.
- [33] Boggs L D, Liu N Y, Nag A, et al. Vertical temperature profile of natural lightning return strokes derived from optical spectra. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126(8). DOI:10. 1029/2020JD034438.
- [34] Orville R E, Henderson R W. Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880 nm. *J Atmos Sci*, 1984, 41(21): 3180-3187.
- [35] Weidman C, Boye A, Crowell L. Lightning spectra in the 850- to 1400-nm near-infrared region. *J Geophys Res*, 1989, 94(D11): 13249-13257.
- [36] 王雪娟,许伟群,王海通,等. 闪电M分量光谱特征及通道温度和电子密度特性. *物理学报*, 2021, 70(9): 423-431. Wang X J, Xu W Q, Wang H T, et al. Spectral features, temperature and electron density properties of lightning M-component. *Acta Phys Sinica*, 2021, 70(9): 423-431.
- [37] Wang X J, Yuan P, Cen J Y, et al. Correlation between the spectral features and electric field changes for natural lightning return stroke followed by continuing current with M-components. *J Geophys Res Atmos*, 2016, 121(14): 8615-8624.

Spectral Correction Impacts of Lightning from Tall Buildings on Channel Temperature Inversion

Wang Xuejuan¹⁾²⁾ Hua Leyan¹⁾ Wang Binghao¹⁾ Xu Weiqun²⁾ Lü Weitao²⁾
Chen Lüwen³⁾ Wu Bin²⁾ Qi Qi²⁾ Ma Ying²⁾ Yang Jing⁴⁾

¹⁾ (School of Emergency Management, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

²⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather & CMA Key Laboratory of Lightning,
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080)

⁴⁾ (Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO) Institute of
Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

During the lightning spectral observation, the spectral intensity is significantly reduced due to instrumental factors and other factors. The spectral intensity attenuation significantly affects the accuracy of temperature calculations. Temperature, as a fundamental parameter, is inextricably linked to other parameters within the lightning discharge channel, and accurate determination of the plasma temperature is crucial for gaining insights into the dynamic and physical processes of the discharge. Up to now, there have been no detailed and definitive reports on the influence of instrumental response on tall building lightning spectroscopy and temperature diagnostics.

Based on the spectral analysis of a lightning return stroke channel spectrum, the spectral is corrected by accounting for the instrumental response. Then, the spectral structure and line intensities before and after correction are compared and analyzed. Nitrogen ionized (NII) lines in the visible region and neutral oxygen (OI) lines in the near-infrared region are selected for temperature calculations using the multi-line method. The influence of spectral correction on the temperature analysis of the tall building lightning return stroke channel is investigated. Results show that after correction, the intensity of spectral lines is significantly enhanced. In particular, the spectral line structure in the visible region changes significantly, while the spectral line structure in the near-infrared region changes little. The continuum radiation in the visible region of the corrected tall building lightning spectrum is significantly enhanced, which is different from the results of natural cloud-to-ground lightning spectra after considering the instrumental response correction. Due to the significant enhancement of the continuum radiation intensity in the visible region resulting from the spectral correction, the continuum radiation intensity should be subtracted when using NII lines in the visible region to calculate the tall building lightning temperature. In this case, the coefficient of fitted line and the calculation accuracy increases, while the average temperature decreases by 4660 K compared to that before correction. Conversely, since the original continuum radiation intensity of tall building lightning spectra in the near-infrared region is relatively low, the spectral correction has little effect on the continuum spectrum intensity. Therefore, after spectral correction, when using OI lines in the near-infrared region to calculate the temperature, the determination coefficient of the linear fitting increases, resulting in improved fitting performance and an increase of 1540 K in the average temperature.

Key words: tall building lightning; spectral correction; multiple line method; temperature