Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2026, 15(6), 1199-1205
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2026.156126

基于多源数据融合的粤北化工园区雷电灾害风险评估

——以翁源县华彩片区为例

廖慧娟[1]，颜　金[2]，邓小良[3]，罗　宇[1]，谭建容[3*]

[1]翁源县突发事件预警信息发布中心，广东　翁源
[2]翁源县气象局，广东　翁源
[3]韶关市气象局，广东　韶关

收稿日期：2026年9月30日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月5日

摘　要

针对粤北化工园区雷电环境复杂、承灾体敏感度高的特点，本文融合30年气象观测数据、10年高精度地闪监测数据及现场精细化土壤电阻率测试数据，构建了基于“致灾因子－孕灾环境－承灾体”耦合作用的区域雷电风险评估模型。以翁源县华彩片区为例，通过层次分析法(AHP)与模糊综合评价法量化风险分量。结果表明，研究区属于雷电高发区(年均地闪密度12.70次/km²·a)，且下垫面土壤电阻率存在显著的空间与垂直分层异质性，最大值达804.6 Ω·m，这种高阻层导致雷电流散流困难，显著抬升了地电位反击风险。综合风险评估值为6.52，等级为IV级(较高风险)，其中地域环境敏感性与危化品属性的风险贡献度最高。本文提出在进行雷电灾害防御时应采取科学、合理的预防措施，避免和减轻雷灾事故的发生。

关键词

化工园区，雷电灾害，地闪密度，土壤异质性，精细化防御，风险评估

Lightning Disaster Risk Assessment of Chemical Industrial Parks in Northern Guangdong Based on Multi-Source Data Fusion

—A Case Study of the Huacai Area, Wengyuan County

Huijuan Liao[1], Jin Yan[2], Xiaoliang Deng[3], Yu Luo[1], Jianrong Tan[3*]

[*]通讯作者。

文章引用: 廖慧娟, 颜金, 邓小良, 罗宇, 谭建容. 基于多源数据融合的粤北化工园区雷电灾害风险评估[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(6): 1199-1205. DOI: 10.12677/ccrl.2026.156126

[1]Wengyuan County Emergency Early Warning Information Release Center, Wengyuan Guangdong
[2]Wengyuan County Meteorological Bureau, Wengyuan Guangdong
[3]Shaoguan Meteorological Bureau, Shaoguan Guangdong

Received: September 30, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 5, 2026

Abstract

In view of the complex lightning environment and the high vulnerability of hazard-bearing bodies in chemical industrial parks in northern Guangdong, this study fuses 30-year meteorological observation data, 10-year high-precision cloud-to-ground (CG) lightning monitoring data, and refined on-site soil resistivity measurements, and constructs a regional lightning risk assessment model based on the coupling of "disaster-inducing factors, disaster-forming environment, and hazard-bearing bodies." Taking the Huacai area of Wengyuan County as a case study, the risk components were quantified using the Analytic Hierarchy Process (AHP) combined with the fuzzy comprehensive evaluation method. The results show that the study area is a region of frequent lightning activity, with an annual average CG flash density of 12.70 flashes·km^{-2}·a^{-1}, and that the underlying soil resistivity exhibits significant spatial and vertical stratification heterogeneity, with a maximum value of 804.6 Ω·m. This high-resistance layer impedes the dissipation of lightning current, thereby markedly elevating the risk of ground potential counterattack (resistive coupling). The comprehensive risk assessment value is 6.52, corresponding to Level IV (relatively high risk), among which regional environmental sensitivity and the hazardous-chemical attributes of the hazard-bearing bodies are the dominant risk contributors. This paper suggests that scientific and reasonable preventive measures should be adopted in lightning disaster defense to avoid and mitigate lightning-induced accidents.

Keywords

Chemical Industrial Park, Lightning Disaster, CG Flash Density, Soil Heterogeneity, Refined Lightning Protection, Risk Assessment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

化工园区作为高危产业集聚区，其海量危险化学品储存与高度依赖自动化控制系统的特征，致使雷电灾害不仅限于物理损毁，更易诱发火灾、爆炸及次生环境污染等链式灾害效应[1]。长期以来，雷电防御工作多侧重于工程防护，而对于复杂下垫面条件下雷电灾害风险分布研究工作相对滞后。翁源县华彩片区地处粤北多雷暴地带，兼具地势空旷与土壤结构异质性显著等特征，防雷安全形势严峻。

对于雷电灾害风险评估的研究，国内外专家学者从雷电机理、雷电活动特征、风险区划与评估等方面进行了卓有成效的研究，如刘三梅等对广东省雷电风险区划研究；黄扬东等对揭阳市“一城两园”雷电灾害风险区划研究[2]-[4]。以往关于雷电灾害风险评估的研究多基于雷暴日资料或理想化的均质土壤模型，难以刻画复杂下垫面条件下雷电活动与地质环境的非线性耦合机制。本研究融合长序列闪电定位数据与现场多层土壤电阻率原位实测数据，旨在弥补现有评估方法在微观地域环境效应表征上的不足，为复杂地形下化工园区的防雷安全治理提供定量化、精细化的科学依据。

2. 资料与方法

本研究依托多源数据融合策略构建评估数据基础。在致灾因子数据获取方面，选取翁源国家基本气象观测站 1984~2013 年共 30 年雷暴日序列，以表征长期气候演变背景；依托广东省闪电定位系统(LLS) 2016~2025 年地闪监测数据，提取地闪密度等核心参数，反演高分辨率雷电活动时空演化图谱。在孕灾环境参数探测方面，采用 MI2088 接地电阻测试仪，布设极间距 1~10 m 的变极距法探测剖面，以厘清园区土壤电阻率的垂直分层结构，为精细化接地工程设计提供参数。

基于上述多源数据，本文以“致灾因子–孕灾环境–承灾体”互馈耦合机制为理论框架，构建了区域雷电风险评估模型。相较于传统经验判定，本研究引入层次分析法(AHP)与模糊综合评价法，对各项风险分量进行科学量化赋权与分级，实现了雷电风险等级的定量化评估。

3. 结果与分析

3.1. 评估模型构建

遵循《雷电灾害风险评估技术规范》(QX/T85-2018) [5]，采用层次分析法构建“雷电风险–地域风险–承灾体风险”递阶层次结构模型。通过两两比较构造判断矩阵，计算各指标权重向量并进行一致性检验(CR < 0.1) [6] [7]。基于模糊数学原理，确定各评价指标的隶属度函数，进而计算区域雷电灾害风险综合评价指数 g 值：

$$g = R1 + 3 \times R2 + 5 \times R3 + 7 \times R4 + 9 \times R5 \tag{1}$$

式中，$R1$~$R5$ 分别为目标与危险等级 I~V 的隶属度。依据 g 值将风险划分为 I (低风险，[0, 2))、II (较低风险，[2, 4))、III (中等风险，[4, 6))、IV (较高风险，[6, 8))、V (高风险，[8, 10])五个等级。

3.2. 风险分量估算与分析

3.2.1. 雷电风险分析

根据翁源县 1984~2013 年雷暴日数资料统计(图 1)可知，研究区年均雷暴日高达 79 d，年际波动剧烈，其中 2011 年出现极端峰值 111 d，显示出该区域雷暴活动的强年际震荡特征。通过添加线性趋势线分析发现，30 年间雷暴日数呈现极微弱的上升趋势，但其决定系数 R^2 仅为 0.032，表明该趋势线的拟合优度极低，雷暴日数的长期变化并不存在显著的线性增长趋势(未通过显著性检验)，其波动主要受气候系统内部变率等非线性因素主导。总体而言，该区域雷电活动频繁，属于强雷区。

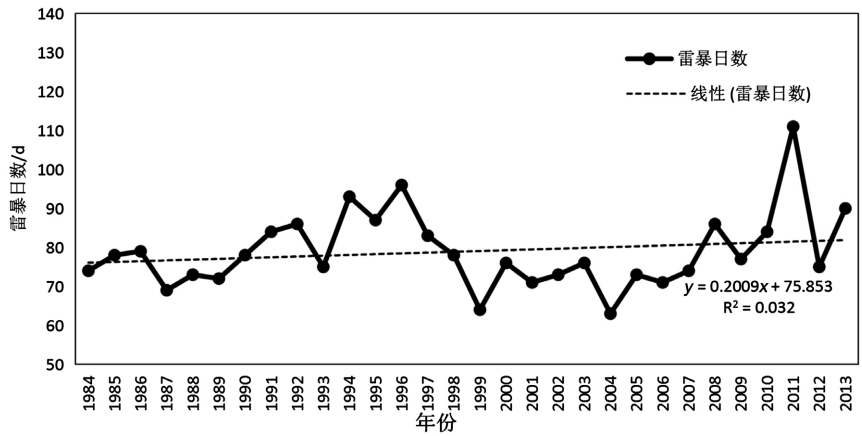


Figure 1. Interannual variation of thunderstorm days at Wengyuan Station during 1984~2013
图 1. 1984~2013 年翁源气象观测站雷暴日年际变化图

由 2016~2025 年广东省闪电定位系统(LLS)监测数据分析(图 2)，翁源地区地闪时变化规律性较强，午后至傍晚(14:00~20:00)雷电多发，峰值时段为 16:00。在雷电活动特征分析时是重要参数，且极大值时段对雷电灾害防御工作具有重要指导意义。

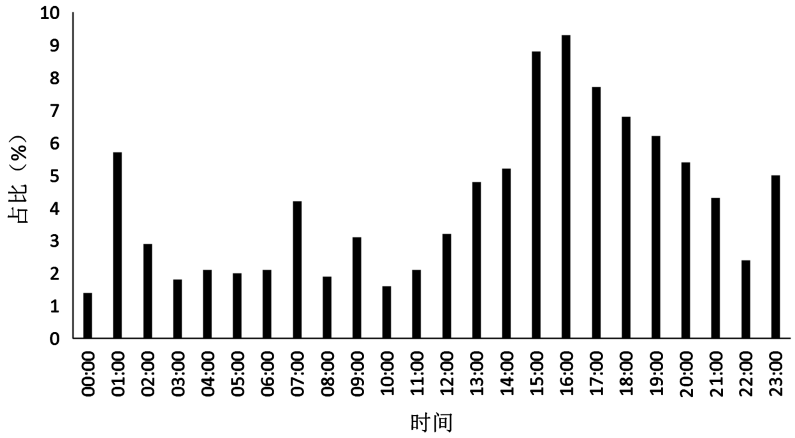


Figure 2. Diurnal variation of CG flashes observed by the Guangdong LLS at Wengyuan during 2016~2025
图 2. 2016~2025 年广东省闪电定位系统(LLS)监测数据(翁源)地闪时变化

地闪密度直接体现了该地区雷电分布情况，值越大遭受雷击的可能性越大，存在的雷电风险就越大。华彩片区 2016~2025 年地闪密度空间分布情况(图 3)，该区平均地闪密度高达 12.70 次/(km²·a)，属于强雷击区域。地闪并非均匀分布，存在局部易击点，这与空旷地势下的尖端放电效应密切相关。

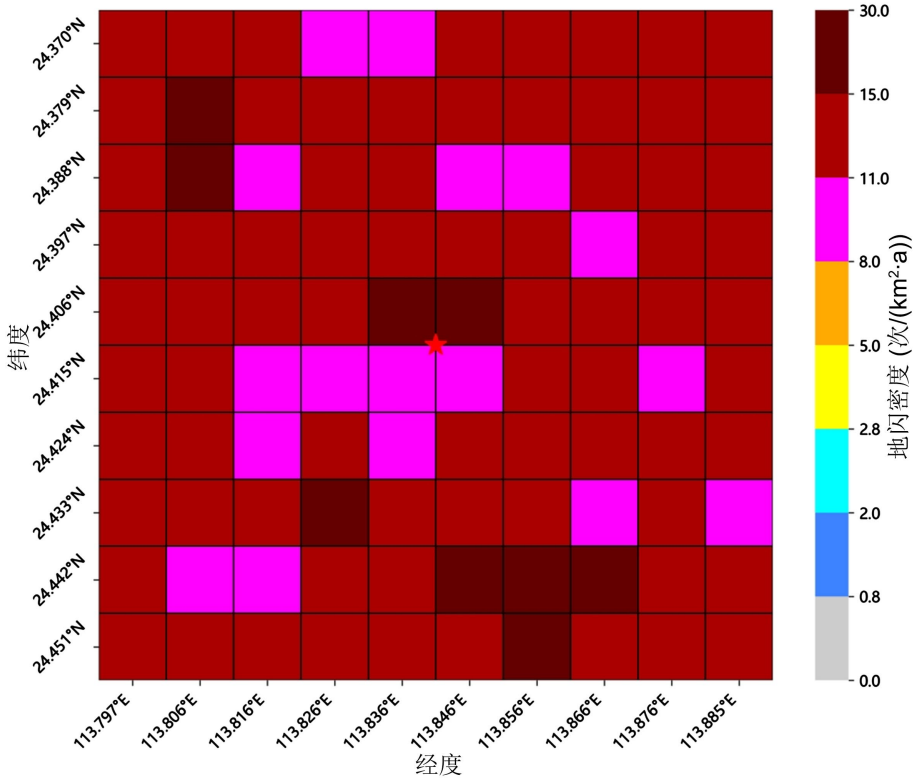


Figure 3. Spatial distribution of CG flash density in the Huacai area
图 3. 华彩片区地闪密度空间分布示意图

3.2.2. 地域环境风险分析

土壤电阻率直接决定雷电流的泄散效率，是评估地电位反击风险的关键。2026 年 3 月，根据现场条件在华彩片区选取 4 个测点，并以区块布置的方式进行内部复核，测量前三天及作业期间均为晴天，现场测试数据(图 4)反映了工程地质条件和表层土壤湿润度的真实情况，最终引入 1.5 的季节系数对各测点进行修正。修正后的平均土壤电阻率为 343.9 Ω·m，但各测点数据呈现出显著的空间异质性。

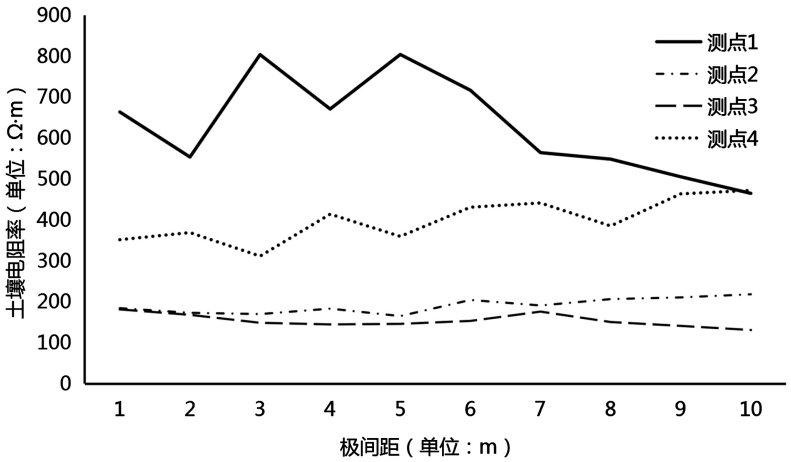


Figure 4. Soil resistivity at each measuring point in the Huacai area (unit: Ω·m)
图 4. 华彩片区各测点土壤电阻率分布图(单位：Ω·m)

测点 1 与测点 4 的电阻值随极间距增大变化剧烈，浅层电阻率显著高于深层，揭示了该区域存在明显的“高阻盖层”结构。这种上高下低的土壤结构不利于雷电流向深层迅速扩散，容易在浅层接地体周围产生高电位梯度。特别是测点 4 电阻率最大值达 804.6 Ω·m，属于极难散流区域，若该区域布置有关键储罐或精密电子设备，其风险水平将远高于园区平均水平。

3.2.3. 承灾体风险分析

华彩片区作为化工涂料基地，其脆弱性具有典型的“链式”特征，结合现场勘查表明，雷电电磁脉冲(LEMP)是导致控制系统瘫痪的主要原因。根据规模、重要程度及功能用途等五个分级标准，脆弱性分析显示，该区域涉及大量易燃易爆化学品，遭受直击雷时后果极其严重，其影响程度指标隶属度被判定为 IV 级；同时，DCS、GDS 等电子系统耐压水平低，对 SPD 的防护性能要求极高。

3.3. 风险分量与综合评价结果

通过 AHP 计算，一级指标权重分配为：雷电风险(0.20)、地域风险(0.40)、承灾体风险(0.40)。权重分配表明，在化工园区中单纯的自然雷电活动并非决定风险的唯一因素。华彩片区一级指标风险贡献分析(表 1)显示，地域环境(土壤、地形)与承灾体(危化品、弱电设备)的叠加效应才是风险的主控因子。

Table 1. Risk contribution of first-level indicators in the Huacai area
表 1. 华彩片区一级指标风险贡献分析

一级指标	风险隶属度向量(I~V)	风险分量值 G	权重	风险等级	贡献度分析
雷电风险	[0.0723, 0.4378, 0.0800, 0.3958, 0.0142]	4.6835	0.20	IV	中等风险，雷击密度较高
地域风险	[0.0000, 0.3013, 0.0676, 0.0756, 0.5556]	6.77	0.40	IV	高风险，周边空旷、土壤分层影响大

续表

承灾体风险	[0.0000, 0.1867, 0.1490, 0.1399, 0.5245]	7.00	0.40	IV	高风险，危化品特性及电子系统易损性显著

注：风险分量值 G 为各一级指标单独计算结果。

1) 地域风险分量分析。得分为 6.77 (IV 级)，是拉高综合风险的主因之一。主要是由测点 4 等高阻区域及空旷地形导致的高接闪概率。

2) 承灾体风险分量分析。得分为 7.00 (IV 级)，危化品本身的易爆属性与电子系统的易损性形成了高风险叠加。

根据实测数据与隶属度函数，采用加权综合法计算，华彩片区综合风险隶属度向量为：

$$R = [0.0120, 0.2763, 0.1036, 0.1557, 0.4524]$$

综合风险值 $g = 6.5202$。

根据风险等级判定标准，风险等级为 IV 级(较高风险)，属于不可容许风险，必须采取强制措施降低风险。

4. 防御对策与建议

通过以上分析可以看出，翁源县华彩片区雷电风险处于较高风险区(IV 级)，是雷电灾害防御的重点区域。致灾因子方面，该区域属于强雷击区，且午后至傍晚为高发时段；孕灾环境方面，土壤电阻率垂直分层显著，存在高阻盖层，增加了地电位反击风险；承灾体方面，危化品属性与电子系统易损性叠加，风险贡献度高。针对评估揭示的“承灾体脆弱性高、地域环境敏感”等薄弱环节，应采取科学、合理的预防措施。

1) 基于土壤分层的差异化降阻设计。针对测点 1 和 4 等高阻及分层区域，摒弃传统的单一浅埋接地模式，建议采用“深井接地 + 外引延伸 + 降阻剂”的组合技术。对于存在高阻盖层的区域，利用深井接地极穿透高阻层，接触低阻土壤层，有效降低接地电阻；同时，在储罐区设置环形均压网，均衡雷电流入地时的地电位分布，防止因电位差导致的设备间反击。

2) 构建电子系统“多级 + 屏蔽”协同防护体系。在总配电柜设置一级防护，需安装 I 类试验 SPD (limp ≥ 15 kA)，电压保护水平(Up)应≤2.5 kV，最大持续运行电压(Uc)通常建议选择 385 V (适用于 TN-S380V 系统)或更高，用于泄放直击雷或高强度感应雷产生的大能量浪涌。在消防控制室、PLC 机房等核心节点，设置二级与三级精细防护，依据设备耐压水平，配合安装 II 级、III 级 SPD，并将残压限制在设备可承受范围内。加强路径阻断，严格控制线路敷设方式，所有进出控制室的信号线、电源线必须全程穿金属管屏蔽埋地，且金属管两端需做等电位接地，从物理空间上截断 LEMP 的侵入通道。

3) 建立“监测–预警–响应”闭环管理机制。依托雷电监测预警平台，结合地闪密度高发时段(14:00~20:00)特征，实施动态预警。将防雷装置的检测周期缩短为半年一次，并引入“基于土壤电阻率季节变化的动态接地电阻监测”，确保在旱季等高阻时段防雷有效性依然达标。

5. 结论

现行行业通用标准[5]主要侧重于单体建筑评估，其核心是通过雷击大地密度和等效截收面积计算年预计雷击次数，进而评估组件风险。然而，面对化工园区这类复杂下垫面与高敏感性承载体，该规范方法存在明显局限。相比之下，本研究提出的多源数据融合评估模型在以下三个方面体现出显著优势。

1) 致灾因子精细化拓展。规范中传统方法通常依赖雷暴日推算雷击大地密度，精度有限。本研究融合了长序列的 LLS (闪电定位系统)数据，直接基于高精度的地闪密度构建时空分布图谱。该方式能有效

捕捉午后至傍晚的高发时段及局部易击点，克服了规范中均匀分布假设的缺陷，更真实地反映雷电活动强度。

2) 孕灾环境深度考量。规范在进行地电位反击计算时多假设土壤电阻率均匀，或仅取单一深度值。本研究引入“土壤垂直分层”概念，通过现场变极距测试，揭示了高阻覆盖层对雷电流散流的阻碍效应。模型将“地域风险”权重提升至 0.40，充分顾及了土壤空间异质性引发的局部高危特征，弥补了传统标准对环境差异的低估。

3) 耦合视角与权重适配。规范评估流程偏重线性概率计算，本研究则采用 AHP-模糊综合评价法，构建了“致灾因子－孕灾环境－承灾体”耦合模型。针对化工园区属性，将“承灾体”与“地域环境”权重均设为 0.40，而降低单纯雷电活动权重至 0.20。此分配机制高度契合园区“小概率、高后果”特征，能精准识别由危化品属性与弱电系统易损性叠加而成的高风险区。

本模型的精细化程度高度依赖高密度的闪电定位系统(LLS)数据和详细的现场土壤电阻率测试结果，因此存在一定局限性，对于缺乏闪电定位监测覆盖或勘察预算有限的中小型园区，由于数据获取困难而无法直接套用。然而，对于地处粤北等复杂地形(如高阻土壤、空旷地势)且已覆盖 LLS 网络的化工园区，本模型具有显著优势，可通过多源数据融合技术替代传统的单一雷暴日评估，且在更为复杂场景下，传统的均匀假设评估方法不再适用，必须采取基于精细化勘探的差异化接地设计与多级协同防护策略，才能有效降低雷电灾害风险。

基金项目

韶关市社会发展科技协同创新体系建设项目(P0000876016)。

参考文献

[1] 张健, 郭杰, 钱辉, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的化工园区雷电灾害风险评估[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(2): 43-48.

[2] 黄扬东, 刘三梅, 张漫霞, 等. 揭阳市一城两园雷电灾害风险区划[J]. 广东气象, 2024, 46(1): 76-79.

[3] 刘三梅, 吕海勇, 陈绍东, 等. 广东省雷电风险区划研究[J]. 资源科学, 2014, 36(11): 2337-2344.

[4] 黄思琦, 刘三梅, 庄燕洵, 等. 深圳市雷电灾害致灾性评估特征分析[J]. 广东气象, 2024, 46(2): 58-61.

[5] 中国气象局. QX/T 85-2018 雷电灾害风险评估技术规范[S]. 北京: 气象出版社, 2018.

[6] 肖宇坤, 庄燕洵, 刘三梅, 等. 建筑物群雷电连接过程模拟研究[J]. 广东气象, 2023, 45(3): 91-94.

[7] 唐玫瑰, 殷启元, 李阳斌, 等. 2014-2023 年广东省酒店雷电灾害研究[J]. 广东气象, 2026, 48(2): 87-91, 95.