



广西铁路轨温时空演变特征及其受气象要素的影响研究

郭晓薇 周悦 谭忠川 曾鹏 伍华丽 黄琰

Spatiotemporal evolutions of rail temperature on Guangxi railways and the influence of meteorological elements

GUO Xiaowei, ZHOU Yue, TAN Zhongchuan, ZENG Peng, WU Huali, HUANG Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2026-117>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

京津冀极端降水时空分布特征及其对城市排水压力的影响

The spatiotemporal distribution characteristics of extreme precipitation in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the main flood season and its impact on urban drainage pressure

暴雨灾害. 2025, 44(3): 322–331 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-228>

2024年2月湖北省一次大范围冻雨过程的宏微观特征及形成机制初探

Study on the macro and micro characteristics of a large-scale freezing rain weather event in Hubei Province

暴雨灾害. 2024, 43(4): 458–468 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-131>

防辐射罩区域自动气象站气温观测偏差分析及其订正方法

Analysis and correction method of temperature observation deviation in the radiation shield of regional automatic meteorological stations

暴雨灾害. 2025, 44(1): 112–122 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-061>

三种插值方法对区域自动气象站日气温缺测数据插补的适用性研究

Applicability of three interpolation methods in estimating daily temperature with missing data from regional automatic weather station

暴雨灾害. 2023, 42(1): 97–104 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-183>

云南省盐津县暴雨及短时强降水特征分析

Analysis of the characteristics of torrential rain and short-duration heavy rainfall in Yanjin County, Yunnan Province

暴雨灾害. 2026, 45(1): 58–67 <https://doi.org/10.12406/byzh.2024-181>

基于GIS空间分析的广西多要素气象观测站网布局评估

Assessment of multi-element meteorological observation network layout based on GIS spatial analysis in Guangxi

暴雨灾害. 2026, 45(2): 277–286 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-114>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

郭晓薇,周悦,谭忠川,等. 2026. 广西铁路轨温时空演变特征及其受气象要素的影响研究[J]. 暴雨灾害, 45(4):543–553. GUO Xiaowei, ZHOU Yue, TAN Zhongchuan, et al. 2026. Spatiotemporal evolutions of rail temperature on Guangxi railways and the influence of meteorological elements [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(4):543–553 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2026–117

广西铁路轨温时空演变特征及其受气象要素的影响研究

郭晓薇¹, 周悦², 谭忠川³, 曾鹏¹, 伍华丽¹, 黄琰³

(1. 广西壮族自治区防雷中心, 南宁 530022; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所 全国暴雨研究中心/中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205; 3. 中国铁路南宁局集团有限公司, 南宁 530029)

摘 要: 钢轨温度 (以下简称轨温) 是反映轨道热致变形的核心物理量, 其受气温、太阳短波辐射等气象要素影响显著, 极端轨温导致的轨道异常变形严重影响火车的安全运行。利用 2022 年 3 月—2025 年 2 月南宁铁路局 313 个轨温站的观测数据, 结合国家级气象观测站观测资料及 ERA5 再分析短波辐射数据, 分析了轨温的时空分布特征, 并探讨了气温、太阳短波辐射等气象要素对极端轨温的可能影响。结果表明: 广西轨温呈西北低、东南高的空间格局, 最高轨温分布在 49.8~71.1 °C, 最低轨温主要集中在 -7.6~6.9 °C, 东北部地区表现出极端最高轨温和最低轨温并存的特征。时间上, 轨温呈单峰型月际变化, 峰值出现在 7 月, 而谷值则出现在 1 月或 12 月, 日最高轨温峰值主要出现在午后 14:00—16:00 (北京时)。轨温与气温在各季节均高度相关, 但夏季受太阳强辐射影响差异最大, 而冬季两者数值分布最一致。不同天气条件下, 晴天太阳短波辐射导致轨温峰值显著高于气温, 而在雨天两者峰值最为接近。此外, 太阳短波辐射增强会显著抬升轨温, 当辐射强度超过 750 W·m⁻² 时, 轨温对气温波动的敏感性降低。研究结果可为极端气温条件下的铁路运行安全及轨温预报提供理论支撑。

关键词: 钢轨温度; 时空分布; 气温; 短波辐射

中图分类号: P49

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2026–117

Spatiotemporal evolutions of rail temperature on Guangxi railways and the influence of meteorological elements

GUO Xiaowei¹, ZHOU Yue², TAN Zhongchuan³, ZENG Peng¹, WU Huali¹, HUANG Yan³

(1. *Guangxi Zhuang Autonomous Region Lightning Protection Center, Nanning 530022*; 2. *Heavy Rainfall Research Center of China/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205*; 3. *China Railway Nanning Bureau Group Co., Ltd., Nanning 530029*)

Abstract: Rail temperature is a key physical variable governing thermally induced deformation of railway tracks, and it is strongly affected by meteorological elements including air temperature and solar radiation. Abnormal track deformation caused by extreme rail temperatures poses a serious threat to railway operational safety. Based on the observation data collected from 313 rail temperature stations of Nanning Railway Bureau from March 2022 to February 2025, as well as observational datasets from national meteorological stations and shortwave radiation products derived from ERA5 reanalysis, this study analyzes the spatiotemporal characteristics of rail temperature and explores the influences of air temperature, solar shortwave radiation and other factors on extreme rail temperature. The results are as follows. The rail temperature in Guangxi exhibits a distinct spatial pattern, with lower values in the northwest and higher values in the southeast. The maximum rail temperature ranges from 49.8 °C to 71.1 °C, while the minimum rail temperature ranges from -7.6 °C and 6.9 °C. Northeastern Guangxi experiences both extreme maximum and minimum rail temperatures. Temporally, rail temperature displays a unimodal annual cycle, peaking in July and reaching the minimum in January or December. The daily maximum

收稿日期: 2026-05-07; 定稿日期: 2026-06-03

资助项目: 广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069132); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB23026152)

第一作者: 郭晓薇, 主要从事新型气象服务技术与应用研究。E-mail: 23525908571@qq.com

通信作者: 周悦, 主要从事交通气象灾害形成机理和致灾评估研究。E-mail: zhouyue8510@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

rail temperature typically occurs during 14:00-16:00 BT. Rail temperature is highly correlated with air temperature across all seasons. Intense solar radiation leads to the most obvious difference between rail temperature and air temperature in summer, and the two temperature are generally consistent in winter. Solar shortwave radiation on sunny days makes the peak rail temperature much higher than the peak air temperature, and the two peaks are the closest on rainy days. When radiation intensity exceeds $750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, increase of solar shortwave radiation can substantially elevate rail temperature, and the sensitivity of rail temperature to air temperature decreases. These findings provide a scientific basis for rail temperature forecasting and for ensuring railway operational safety under extreme meteorological conditions.

Key words: rail temperature; spatiotemporal distribution; air temperature; shortwave radiation

引 言

截至目前,我国铁路营业里程已达 $1.62 \times 10^5 \text{ km}$, 其中高速铁路里程 $0.48 \times 10^5 \text{ km}$, 高速铁路与大部分普速铁路正线均已广泛采用无缝钢轨。无缝钢轨是将 50~200 m 长的标准钢轨焊接为数公里长的单根轨条,具有行车平顺、噪声与振动小的优势,可显著降低传统有缝轨道的冲击与轮轨撞击噪声,适配高速列车的运行需求(卢耀荣, 2004)。但由于焊接消除了伸缩轨缝,无缝钢轨长期暴露在高温或低温环境中极易产生过量热胀冷缩变形,进而引发胀轨跑道,严重时可能诱发列车脱轨,造成重大人员伤亡与财产损失(刘大玲和黄小钢, 2019; 刘端阳等, 2026)。

钢轨温度(下文简称轨温)是直接反映轨道热致形变的核心物理量,其变化受行车密度、气温、太阳辐射、风速等多种因素共同影响,其中,极端气象条件会严重影响铁路的安全运行(李亚飞等, 2025; 张丹, 2025; 张娣等, 2025)。已有研究表明,日均气温偏高与太阳辐射偏强均会导致轨道的整体温度升高(Yang et al., 2017),而气温与太阳辐射协同作用决定了无砟轨道板的温度场分布,气温变化对钢轨内部温度梯度具有显著影响(刘学毅等, 2017)。Ou 和 Li (2014) 研究了不同季节轨温的分布特征,发现气温是影响钢轨内部温度分布的主要因素之一,且夏季轨温梯度最大(赵坪锐等, 2016)。可见,气象条件会显著影响钢轨表面和内部温度的分布,部分学者基于气象要素构建了轨温估算的统计模型和热力学模型,取得了较好的效果(Hong et al., 2019; 刘昊旻等, 2019)。然而,现有研究中更多关注的是室内试验或单点轨温观测,对大范围、长时间、自然环境下的轨温演变特征及其气象驱动机制的分析仍较为薄弱。

广西壮族自治区(以下简称为广西)地处亚热带季风气候区,夏季高温高湿、日照强烈、昼夜温差大,而冬季偶发低温雨雪冰冻天气,气候极端性突出。南部沿海地区(如南宁、钦州等地)夏季高温持续时间长,最高气温更高,而西部和北部山区(如桂林、河池等地)冬季低温与昼夜温差特征更显著(陈燕丽

等, 2022)。根据广西国家级气象观测站(以下简称气象站)观测与第六次耦合模式比对计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)数据的统计,1961—2022 年广西高温热浪日数、强度和最长持续时间整体呈增多增强趋势,预计 21 世纪末上述指标将分别增加 1.2~5.0 倍、2.5~4.3 倍和 2.0~6.8 倍,其中北海增幅最显著,河池增幅相对平缓(李韵, 2025)。目前,关于广西地区极端气温的统计特征与铁路轨温的原位观测相结合的研究甚少,为此,本文采用 2022 年 3 月—2025 年 2 月南宁铁路局管辖广西境内轨温站的观测数据,结合气象站气温、降水、云量、短波辐射的观测资料,以及 ERA5 再分析逐小时下行短波辐射格点数据,分析了定时轨温、最高轨温和最低轨温的时空分布特征,探讨了轨温峰值与谷值的时序规律,并与气温的演变特征进行相关性分析,最后评估了晴天、多云和雨天条件下太阳短波辐射对最高轨温的影响,以期气象与铁路部门保障极端气象条件下铁路运行安全提供支撑,为提升我国重点区域轨温预报业务能力提供理论依据。

1 资料与方法

本文采用的轨温站数据为经过质量控制和数据到站率筛选的 2022 年 3 月—2025 年 2 月南宁铁路局 313 个轨温站逐小时观测数据。钢轨的轨温测量示意图如图 1a 所示,可获取钢轨 A 面和 B 面的逐小时定时温度、最高温度和最低温度。为下文中统一轨温特征分析和对比的标准,分别采用 A、B 面定时温度的平均值(即定时轨温)、最高温度的最大值(即最高轨温)和最低温度的最小值(即最低轨温)作为轨温分析的 3 个特征量。轨温站的空间分布如图 1b 所示,其中存在少数归属于南宁铁路局的轨温站分布于广西比邻的贵州、湖南和广东地区。

为保证与轨温环境的空间一致性,优先选用距离轨温站最近的气象站数据,而当最近气象站数据缺失时,采用次近气象站替代,最终从广西区气象数据中心获取同时间段广西、贵州、湖南和广东地区 75 个气象站的逐小时气温、降水和云量观测资料。

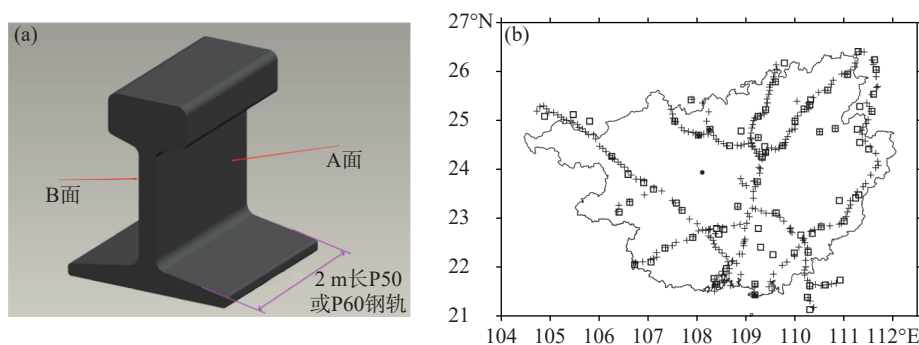


图1 广西铁路轨温站轨温测量示意图(a)以及轨温站(十字)、临近气象站(方框)和辐射站(圆点)空间分布(b)

Fig. 1 The (a) schematic diagram of rail temperature measurement and (b) spatial distribution of rail temperature stations (crosses), nearby meteorological stations (squares) and radiation stations (dots) in Guangxi

轨温站和气象站的空间分布如图1b所示。

同时,为分析太阳短波辐射对轨温的影响特征,采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA5再分析下行短波辐射数据,空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率1 h。采用2022—2025年广西环江(59031)、北海(59644)、河池(59023)和都安(59037)4个辐射站约22 000个小时的逐小时短波辐射观测值,构建其与格点辐射数据的线性关系,进而实现对格点辐射数据的订正。辐射站的空间分布如图1b所示。

为对比不同天气条件下轨温演变及其与气温的相关特征,考虑无云遮挡、明显有云遮挡和有云遮挡且有降水影响的3种情景,将天气条件划分为晴天、多云、雨天3类(岳岩裕等, 2026; Zhou et al., 2026),即(1)晴天:小时云量<10%且降水量=0 mm;(2)多云:小时云量>40%且降水量=0 mm;(3)雨天:小时降水量>0 mm。3类天气条件下的样本量依次为9 325 h、6 847 h、1 763 h。

2 广西铁路轨温的空间分布特征

定时轨温能够反映轨温的整体空间格局,而最高和最低轨温则体现了极端情景下轨温的分布。图2给出2022年3月—2025年2月广西铁路轨温的空间

分布特征,可见定时轨温整体呈西北低、东南高的分布特征(图2a),贵州和广西交界处兴义、南丹等地的定时轨温约为19~20℃,而广东茂名、湛江一带的定时轨温达27~28℃,南北差值接近8℃。同时,24°N以南超过89%的轨温站定时轨温高于25℃,而24°N以北的轨温站定时轨温则主要集中在22~24℃,定时轨温的地域差异显著。进一步探讨轨温极端值的分布特征(图2b、c)可知,全区最高轨温主要集中在49.8~71.1℃,其中广西浮石出现最高轨温的最大值,而贵州龙广则出现最高轨温的最小值,与定时轨温的分布不同,最高轨温超过60℃的轨温站主要集中在广西东北部,其余温度区间的空间规律性较弱。值得注意的是,最低轨温主要集中在-7.6~6.9℃,北部轨温站最低轨温普遍低于0℃,而南部轨温站最低轨温则高于0℃,其中最低轨温小于-6℃的极端情况主要发生在广西东北部全州县与湖南交界的区域。总体而言,广西东北部地区尽管定时轨温适中,但其最高轨温和最低轨温均表现出极端性,高轨温下钢轨延伸和低轨温下钢轨收缩的风险并存(翟峰和孙国钧, 2012; 赵丽华等, 2025),是铁路轨温重点关注的区域。

为揭示广西铁路极端轨温的统计特征,将各轨

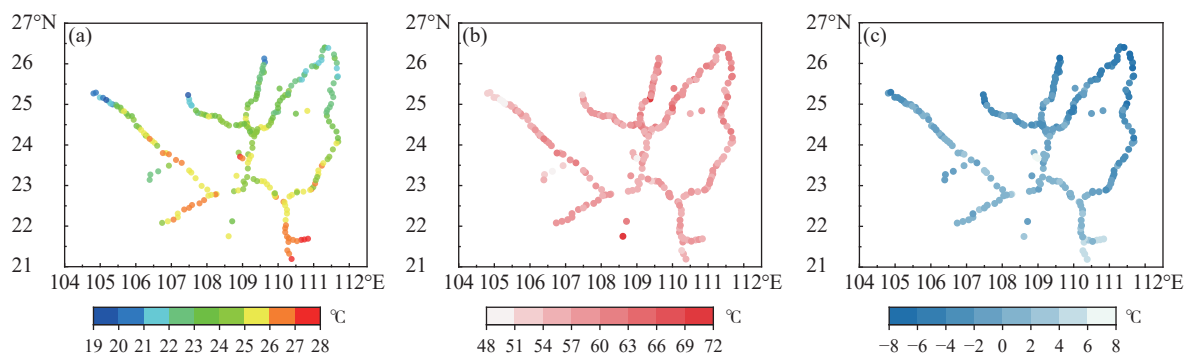


图2 2022年3月—2025年2月广西铁路轨温站定时轨温(a)、最高轨温(b)和最低轨温(c)空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of (a) average fixed-time, (b) maximum and (c) minimum rail temperatures at rail temperature stations in Guangxi from March 2022 to February 2025

温站的最高轨温和最低轨温从小到大进行排列,取 10%~90% 共 9 个分位数的最高轨温和最低轨温进行统计分析。图 3a 给出 2022 年 3 月—2025 年 2 月广西铁路轨温站不同分位数最高轨温阈值和最低轨温阈值变化,可见不论是最高轨温还是最低轨温,其值

均在 80%~90% 分位段的变化最为明显,分别跃升了 6.8 °C 和 7.3 °C,其次为在 10%~20% 分位段的变化。为量化广西铁路出现极端轨温的数值大小,分别选取最高轨温 90% 分位数和最低轨温 10% 分位数,作为极端最高轨温和极端最低轨温的阈值。

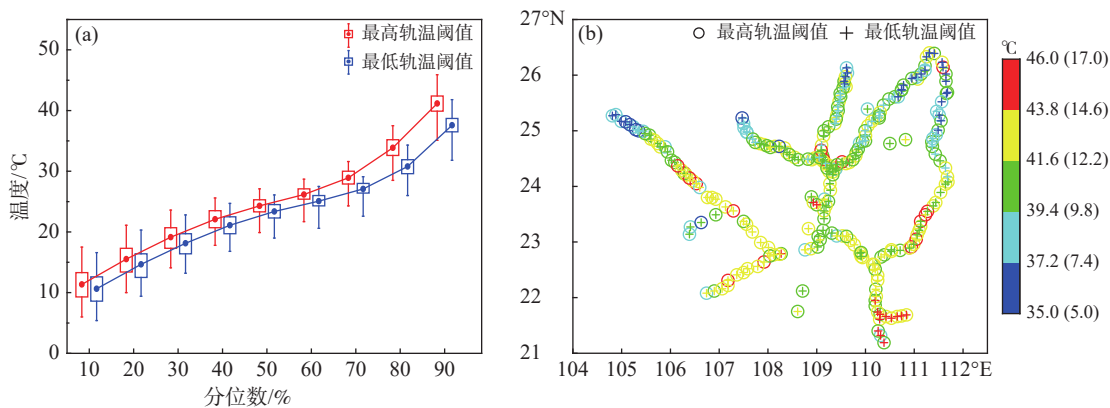


图 3 2022 年 3 月—2025 年 2 月广西铁路轨温站不同分位数最高轨温阈值和最低轨温阈值变化 (a) 及其 90% 分位数最高轨温阈值和 10% 分位数最低轨温阈值的空间分布 (b)

Fig. 3 Evolution of (a) threshold values for maximum and minimum rail temperatures at different percentiles, and (b) spatial distribution of the 90th-percentile maximum rail temperature and 10th-percentile minimum rail temperature at rail temperature stations in Guangxi from March 2022 to February 2025

图 3b 给出广西各轨温站极端轨温阈值空间分布,从极端最高轨温阈值来看,广西南部极端最高轨温阈值主要集中在 40.0~43.8 °C,而北部的极端最高轨温阈值略低,主要在 36.0~42.0 °C,且东北部的极端最高轨温阈值与南部相对接近。与最高轨温的分布不同,极端最高轨温阈值主要集中在广西中部地区,超过 10 个轨温站出现 44.0 °C 以上的极端最高轨温阈值。结合极端最低轨温阈值来看,其分布的规律性更明显,北部轨温站的极端最低轨温阈值主要集中在 5.0~7.4 °C,而靠近广东地区的极端最低轨温阈值则为 14.6~17.0 °C,且超过 36% 轨温站的极端最低轨温阈值集中在 9.8~12.2 °C。将最高轨温和最低轨温的阈值相结合,可见广西东北部既存在部分轨温站的极端最高轨温阈值超 41.6 °C,甚至达 44.0 °C 以上,又存在大量轨温站的极端最低轨温阈值低于 7.4 °C,最高轨温和最低轨温极端值的多次出现使该地区铁路受极端轨温影响的风险最大。

3 广西铁路轨温时间变化特征

图 4 给出 2022 年 3 月—2025 年 2 月广西铁路轨温站定时轨温、最高轨温和最低轨温的逐月变化,可见轨温逐月变化呈单峰型分布特征,这与康维新等 (2019)、张娣等 (2022) 的研究结论一致。轨温峰值出现在 7 月,谷值则出现在 1 月或 12 月,由于采用所有轨温站的逐小时平均值,因此定时温度、最高轨

温和最低轨温的变化趋势基本一致,且数值较接近,其中 7—10 月最高轨温和最低轨温差值较大,为 1.0 °C 左右,1—2 月的差值较小,为 0.5 °C 左右。进一步对比轨温数值大小可知,最高轨温的月均峰值接近或超过 34.0 °C,而谷值则为 13.0~14.0 °C,且由于轨温受到人工运维和自然环境的共同影响,3 a 同期月均轨温波动幅度达 0.1~4.0 °C。

上文给出广西铁路轨温随时间变化的平均特征,而其随时间变化的极端特征能更好反映其关键的致灾时段。图 5 给出广西铁路轨温站不同季节最高轨温峰值出现时刻、最高轨温峰时比例(轨温站出现最高轨温峰值的时刻占所有观测时间的比例)和最高轨温峰值的分布,可见 14:00 (北京时,下同)、15:00 和 16:00 是最高轨温峰值最易出现的时刻,这与张鹏飞等 (2025) 的研究结论一致;但受自然和人为因素的影响,各轨温站最高轨温峰时比例基本未超过 50%,主要集中在 20%~45%,其中夏季的比例分布更加集中,而秋、冬季则相对分散。进一步分析可知,春、夏季超过 80% 的轨温站最高轨温峰时比例小于 30%,各轨温站最高轨温峰时比例差异更加显著(图 5a、b),而秋、冬季均有 2 个轨温站最高轨温峰时比例超过 50%,且这两个季节的平均最高轨温峰时比例也接近 36%,远高于春、夏季的 28.6% 和 27.6%,秋、冬季最高轨温峰值出现时刻的分布规律性更强(图 5c、d)。

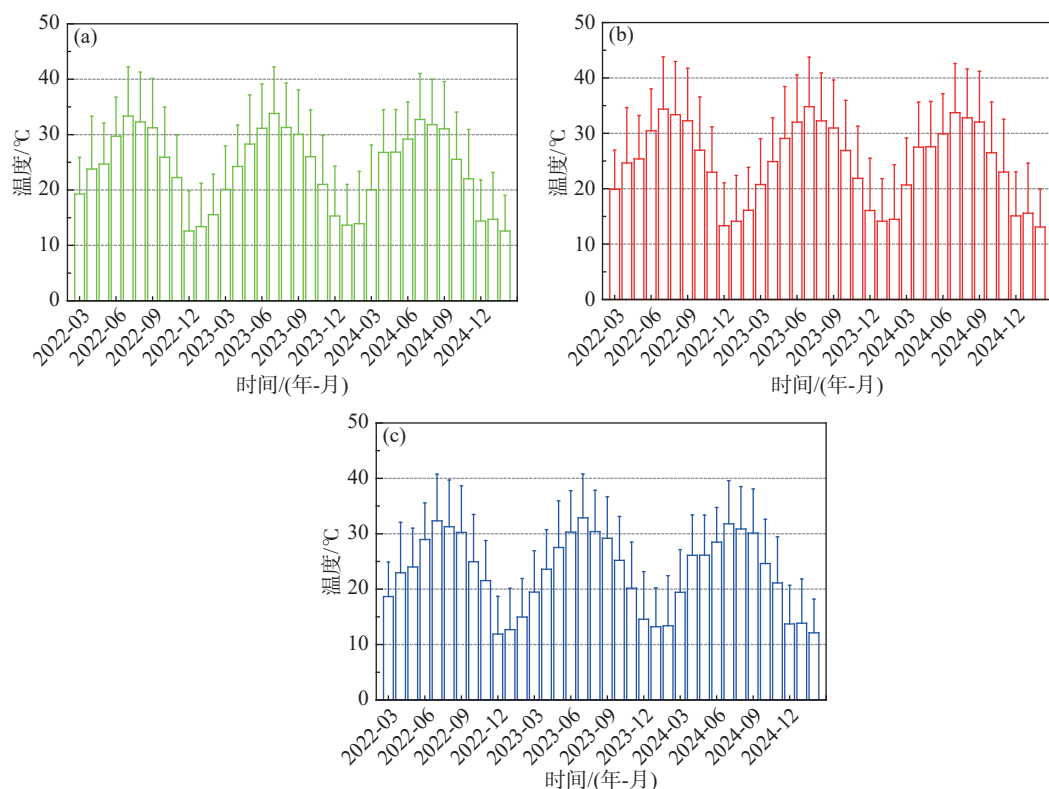


图 4 2022 年 3 月—2025 年 2 月广西铁路轨温站定时轨温 (a)、最高轨温 (b) 和最低轨温 (c) 的月变化 (向上误差棒为样本标准差)

Fig. 4 Monthly variations of (a) fixed-time, (b) maximum and (c) minimum rail temperatures at rail temperature stations in Guangxi from March 2022 to February 2025 (Vertical upper error bars denote the standard deviation of temperatures)

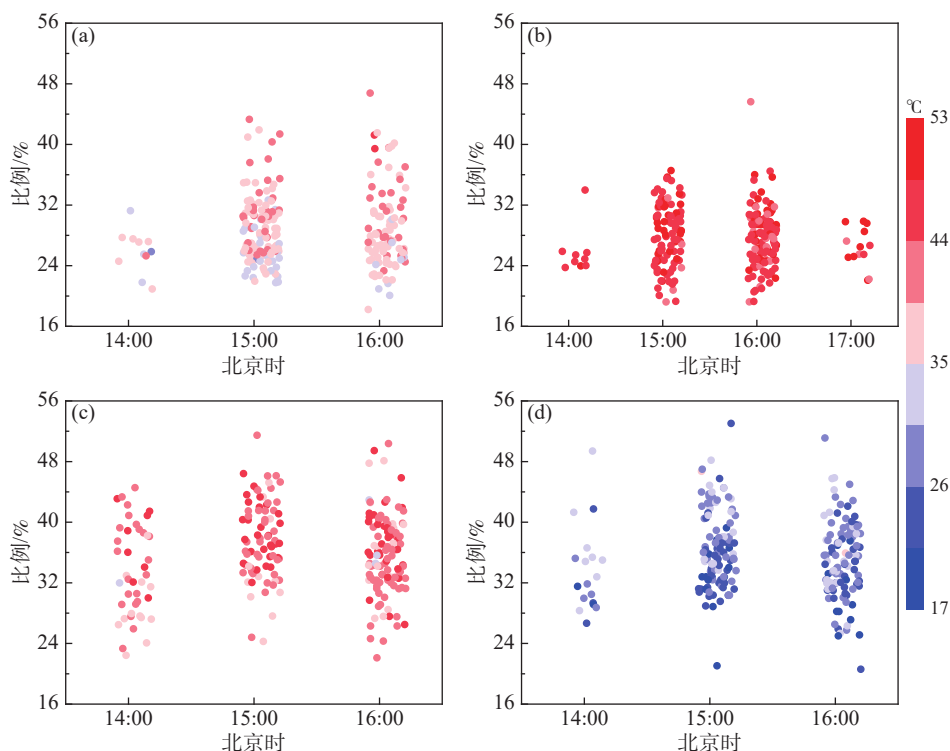


图 5 2022 年 3 月—2025 年 2 月广西铁路轨温站春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c)、冬季 (d) 最高轨温峰值出现时刻、最高轨温峰时比例和最高轨温峰值 (填色) 的分布 (圆点代表轨温站 14:00、15:00、16:00 和 17:00 整点的数值)

Fig. 5 Spatial distribution of the occurrence time, temporal proportion and magnitude (shaded) of daily maximum rail temperature peaks in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter at rail temperature stations in Guangxi from March 2022 to February 2025 (Dots represent the values at 14:00 BT, 15:00 BT, 16:00 BT, and 17:00 BT whole hours of the rail temperature station)

从最高轨温峰值的大小分布来看,夏季最高轨温的峰值主要分布在 40.5~53.0 °C,总体为四个季节中最高,且和最高轨温峰时比例分布不同,超 80% 以上轨温站最高轨温峰值大于 45.0 °C,表现为集中性特征,且 14 个轨温站最高轨温峰值大于 50.0 °C (图 5b); 冬季最高轨温的峰值主要分布在 17.8~36.8 °C,总体为四个季节中最低,且各轨温站最高轨温峰值分布最分散 (图 5d); 而春、秋季的最高轨温峰值分布较接近,主要集中在 30.0~48.0 °C,但秋季的最高轨温峰值略高于春季且更分散 (图 5a、c)。

进一步分析最高轨温峰值出现的时刻可知,最高轨温峰值在 15:00 和 16:00 最为频发,出现站次接近 90%,其中夏、秋季 16:00 最易出现最高轨温峰值,但夏季存在 17 个轨温站在 17:00 出现峰值的频次最高 (图 5b、c),而春季 15:00 出现最高轨温峰值的站次多于 16:00 (图 5a),15:00 和 16:00 在冬季出现峰值的站次则基本一致 (图 5d)。

4 广西铁路轨温与气温的相关性

气象要素是影响轨温的关键环境因子,而气温则是驱动轨温变化最直接的气象要素,且无论是轨

温评估预报的物理模型或者统计模型,气温均是影响权重最大的因子之一 (欧祖敏等, 2014; Zhong et al., 2018; 周锐等, 2023), 因此探讨轨温与气温之间的相关性尤为重要。考虑到四季气温的差异性,图 6 给出广西各轨温站轨温与气温分季节的一元线性回归拟合线的斜率、截距和相关系数分布,可见不同轨温站轨温与气温均表现出较好的相关性,相关系数集中在 0.84~0.96,且不同季节相关系数均值为 0.90 左右 (图 6a—d), 存在少量轨温站的相关系数显著偏大 (接近 0.96) 或偏小 (接近 0.84), 这一特征在冬季最为明显 (图 6d)。不同季节拟合线参数的差异显著,其中夏季的斜率相对最小,平均值为 0.35, 主要分布在 0.27~0.49, 冬季的斜率相对最大,平均值为 0.61, 主要分布在 0.40~0.85; 而夏季的截距显著偏大,平均值为 16.72, 主要分布在 12.0~20.5, 冬季的截距则显著偏小,平均值仅为 4.03, 主要分布在 0.4~9.4, 表现出与斜率相反分布特征 (图 6b、d)。

斜率越接近 1 且截距越接近 0 时,两组数据的分布就更一致,从不同季节轨温与气温拟合线的斜率和截距来看,冬季具有最接近 1 的斜率和最小的截距,轨温与气温的分布特征最一致,轨温受气温的变

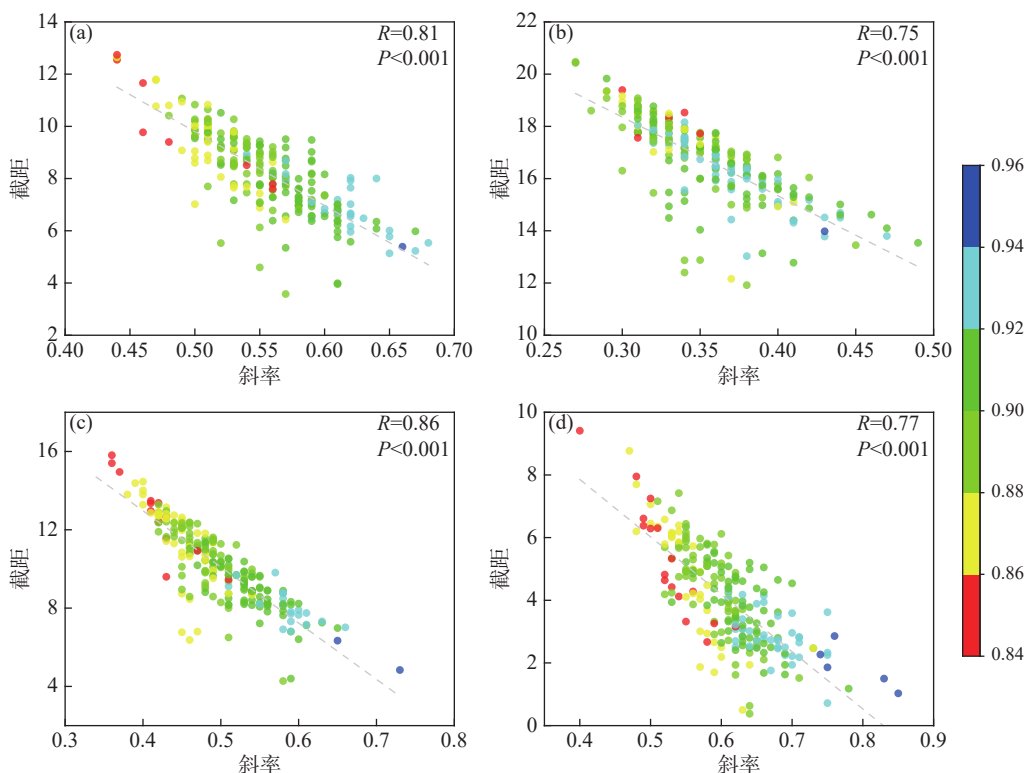


图 6 2022 年 3 月—2025 年 2 月广西铁路轨温站春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c)、冬季 (d) 轨温与气温拟合线的斜率、截距和相关系数 (填色) 的分布 (R 为拟合线斜率和截距的相关系数, p 为显著性检验水平)

Fig. 6 Spatial distribution of slope, intercept, and correlation coefficient (shaded) of fitting lines between fixed-time rail temperature and air temperature in (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter at rail temperature stations in Guangxi from March 2022 to February 2025 (R represents the correlation coefficient of the fitting line slope and intercept, p represents the significance test level)

化影响较大(图 6d); 而夏季则表现出相反的拟合特征(图 6b), 受夏季更复杂的天气条件和太阳短波辐射影响, 轨温与气温的分布特征差异最大(闫斌, 2016; 刘学毅等, 2017), 轨温受温度变化的影响相对较弱, 且轨温稳定高于气温一定的数值, 此时太阳短波辐射等要素对轨温变化的影响更突出。

为更好地揭示极端情景下轨温与气温的相关性, 图 7 给出晴天、多云和雨天不同时刻差值下轨温与气温日峰值差值及其日数占比、日谷值差值及其日数占比, 可见不论哪种天气条件下, 轨温和气温的日峰值和谷值出现时刻均相对一致(闫斌等, 2016), 两者差值为 0 的日数在晴天接近 50%, 而在多云和雨天则超过 30%。对于轨温和气温的日峰值而言, 晴天较强的太阳短波辐射使轨温峰值早于气温峰值的日数占比超过 40%, 而多云和雨天轨温峰值晚于

气温峰值的日数则更多(图 7a、c、e)。而轨温和气温的日谷值分布则不同, 晴天、多云和雨天均表现出一致性的分布特征, 轨温谷值晚于气温谷值的日数更多, 占比为 40% 左右(图 7b、d、f)。这是因为在无太阳短波辐射的影响下, 地面长波辐射的加热作用使得铁轨在夜间降温速度减慢, 谷值出现时间更晚(张鹏飞等, 2025; 杨荣山等, 2015)。

进一步讨论轨温和气温日峰值差值、日谷值差值的大小可知, 轨温峰值高于气温峰值的日数占比超过 95%, 轨温和气温峰值的差值在同一天气条件下的分布较为一致(图 7a、c、e), 晴天、多云和雨天的峰值差值平均分别为 13.6 °C、8.6 °C 和 1.4 °C, 分布区间则分别为 -5.6~26.6 °C、-4.4~23.6 °C 和 -3.0~14.7 °C, 晴天强烈的太阳短波辐射使得轨温峰值显著高于气温, 最大差值达 26.6 °C, 超过 75% 的差值

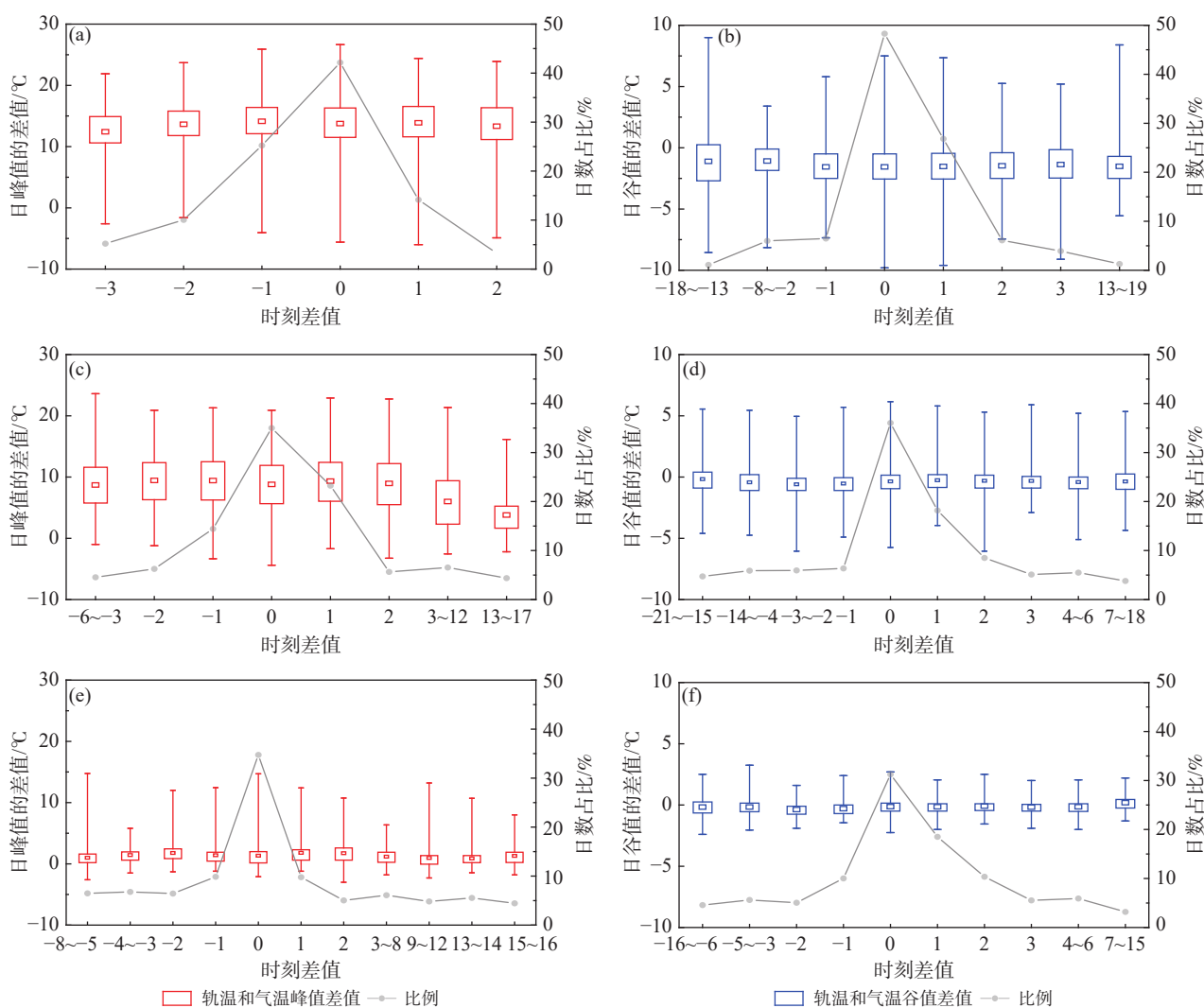


图 7 广西晴天 (a, b)、多云 (c, d) 和雨天 (e, f) 不同时刻差值下轨温与气温日峰值差值及其日数占比 (a, c, e)、日谷值差值及其日数占比 (b, d, f) 箱线图

Fig. 7 Boxplot magnitude and corresponding day proportion of (a, c, e) daily peak deviations and (b, d, f) daily trough deviations between rail temperature and air temperature under (a, b) sunny, (c, d) cloudy and (e, f) rainy weather conditions in Guangxi

大于 10°C , 而雨天两者的峰值相对接近 (戴公连等, 2018)。轨温和气温的谷值差值则表现出不一样的分布特征, 晴天、多云和雨天的谷值差值较为平均地分布在 0°C 左右, 且分布范围表现出逐渐减小的特征, 平均值分别为 -1.1°C 、 -0.3°C 和 -0.2°C , 分布区间则分别为 $-9.8\sim 9.0^{\circ}\text{C}$ 、 $-6.0\sim 6.1^{\circ}\text{C}$ 和 $-2.4\sim 3.3^{\circ}\text{C}$ (图 7b、d、f)。

5 太阳短波辐射对轨温的影响规律

太阳短波辐射是驱动轨温变化和极值形成的核心环境因子, 辐射站精度高但站点稀疏, 难以覆盖广西全域密集的轨温站, 但高精度的观测值可有效订正 ERA5 再分析的格点辐射数据 (张俊兵等, 2021), 提升其在全域轨温站的适用性。天气条件会直接影响到达地面的太阳短波辐射的分布, 图 8 给出广西晴天、多云和雨天环江、北海、河池和都安 4 个辐射站太阳短波辐射的观测值与临近格点短波辐射值的相关性特征, 可见三种天气条件下, 晴天太阳短波辐射观测值和格点值相关性最好, 两者相关系数为 0.71, 且散点较均匀的分布在拟合线的周围 (图 8a); 多云和雨天则存在大量的散点聚集在观测值小于 $200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的低值区, 其中雨天太阳短波辐射观测值

和格点值的相关系数最低, 仅有 0.47, 需要谨慎使用二者的相关关系 (图 8b、c)。从数值大小的分布来看, 太阳短波辐射观测值在不同天气条件下主要分布在 $0\sim 1\,200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的范围内, 其中晴天观测值的分布更均匀, 而多云和雨天尽管也存在 $1\,200\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右的最大值, 但是大部分散点仍集中在低值区; 而对于短波辐射的格点值而言, 晴天、多云和雨天的格点值分别主要分布在 $0\sim 1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $0\sim 900\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0\sim 800\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的范围内, 其最大值呈现逐渐减小的特征。

从拟合结果来看, 当晴天、多云和雨天的太阳短波辐射观测值分别小于 $476.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $416.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $303.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, 格点值要大于观测值, 而大于这一数值则表现出相反的特征 (图 8a—c)。太阳强短波辐射对铁轨的加热作用是导致轨温异常偏高的重要原因 (万章博等, 2015), 这表明当地面受到太阳强短波辐射影响时, 应用格点短波辐射数据会低估太阳短波辐射的大小, 进而导致轨温的估算偏低。

因为太阳短波辐射是导致轨温和气温分布差异的重要因素, 也是致使极端轨温出现的关键原因 (刘学毅等, 2017; 朱颖等, 2024), 因此选取极端轨温出现最为频繁的田丁、糯垌、山底岭和河里 4 个轨温站,

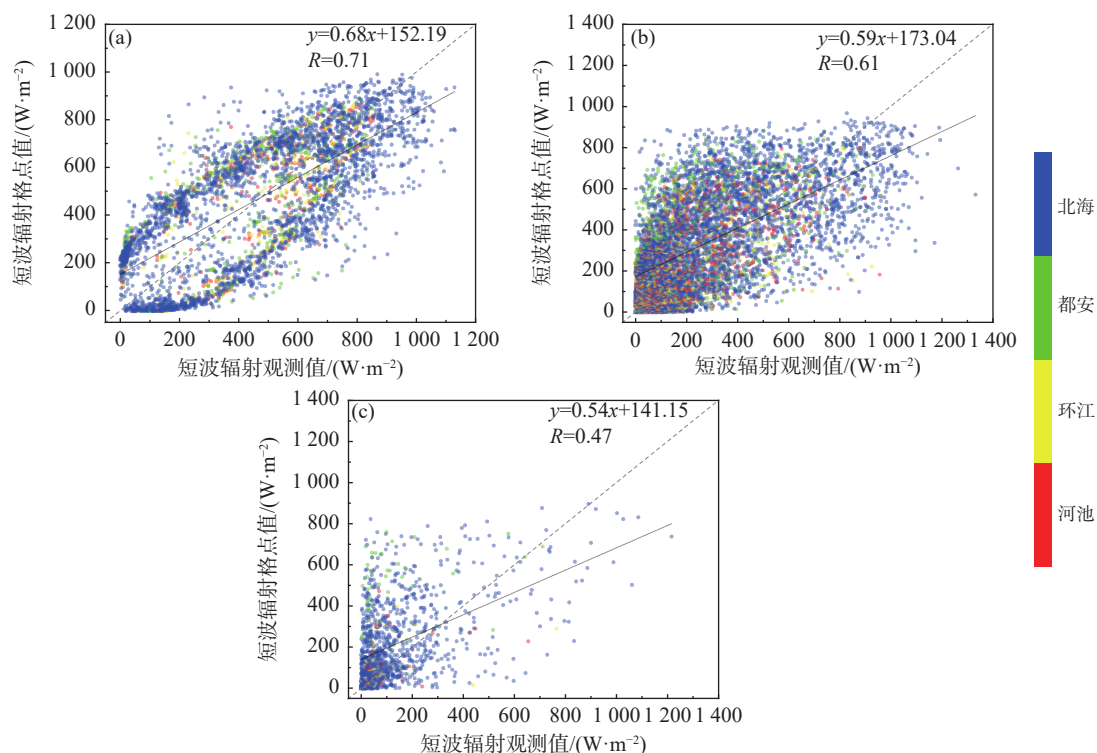


图 8 广西晴天 (a)、多云 (b) 和雨天 (c) 4 个辐射站太阳短波辐射观测值和 ERA5 再分析格点值的散点图 (虚线表示格点值和观测值相等的 $y=x$ 线, 实线表示拟合线, R 表示观测值和格点值的相关系数)

Fig. 8 Scatter plots of observed solar shortwave radiation and ERA5 reanalysis grid values at four radiation stations in Guangxi under (a) sunny, (b) cloudy and (c) rainy weather conditions (The dashed line represents the $y=x$ line where the grid values and observed values are equal, and the solid line represents the fitted line, R represents the correlation coefficient between observed values and grid values)

利用经过观测值和格点值相关关系订正后的短波辐射数据,探讨2022年3月—2025年2月不同短波辐射强度下轨温和气温的分布规律。图9给出晴天、多云和雨天不同短波辐射强度下4个轨温站最高轨温和气温的相关特征,分析可知,最高轨温和气温总体呈现较好的正相关关系,其中晴天和多云条件下相关性最好,相关系数总体大于0.8(图9a、b),而降水的出现使此时的相关性最差,尤其是短波辐射强

度超过 $750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的时段(图9c)。短波辐射强度较小时,可能是由于降水的影响较大,相同气温和短波辐射强度下,雨天的最高轨温显著小于晴天和多云;而短波辐射强度较大时,说明可能受到短历时或弱降水的影响,相同气温和短波辐射强度下,雨天的最高轨温与晴天、多云时接近。这种差异性的影响特征是导致雨天最高轨温与气温相关性较差的主要原因(潘勋等,2020)。

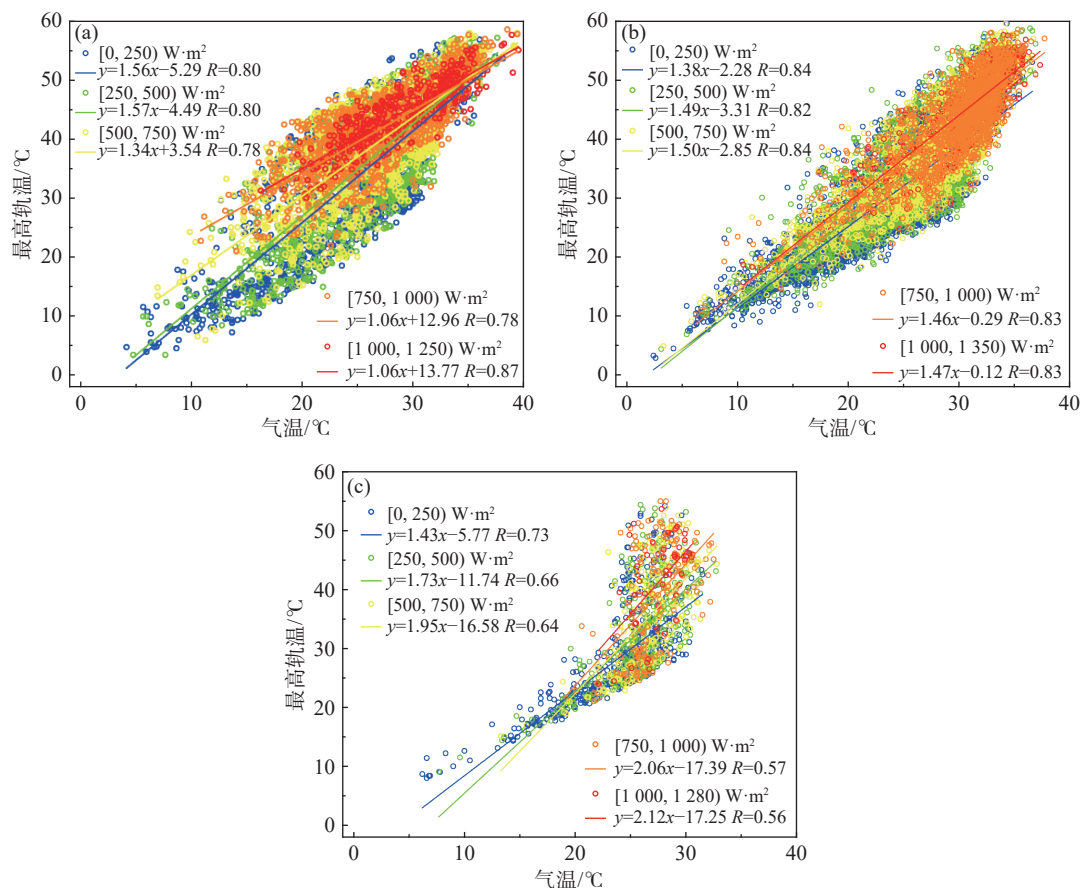


图9 2022年3月—2025年2月广西晴天(a)、多云(b)和雨天(c)不同短波辐射下4个轨温站最高轨温和气温的相关特征
Fig. 9 Correlation characteristics between maximum rail temperature and air temperature under different shortwave radiation intensities at four rail temperature stations in Guangxi under (a) sunny, (b) cloudy and (c) rainy weather conditions from March 2022 to February 2025

晴天时,相同气温下随着短波辐射强度的增强,轨温表现出增大的特征,尤其是当气温较低时,轨温受短波辐射影响的增温作用愈加显著,且短波辐射强度为 $750 \sim 1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和大于 $1\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 区间时,轨温与气温的相关性特征非常接近,这一现象在多云时也表现出类似特征,表明短波辐射强度大于 $750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,其对轨温的加热影响相对一致(图9a)。多云时,轨温随短波辐射增强而升高的规律与晴天类似,但云层具有一定的调节作用,使得不同短波辐射强度下轨温和气温散点拟合线的斜率较接近,不同短波辐射强度下拟合斜率的差值不超过0.12(图9b)。雨天时,受气温、降水和短波辐射的影响,轨温与气

温的相关性最差(图9c),但是值得注意的是,拟合斜率随短波辐射增强而逐步增大,这表明在三种天气条件下,雨天时轨温对气温变化的敏感性最高。

6 结论与讨论

利用2022年3月—2025年2月南宁铁路局313个轨温站的定时轨温、最高轨温和最低轨温观测数据,并结合国家站的气温、降水、云量和短波辐射资料以及ERA5再分析短波辐射数据,对广西铁路轨温的时空演变特征进行了分析,并探讨了气温、太阳短波辐射等气象要素对轨温的影响。得出以下主要结论:

(1) 广西铁路轨温具有显著地域差异,定时轨温

整体呈西北低、东南高的分布特征,全区最高轨温分布在 49.8~71.1℃,而最低轨温主要集中在-7.6~6.9℃,且最高轨温超过 60.0℃和最低轨温小于-6.0℃的轨温站均主要集中在广西东北部,该地区既存在轨温的高值中心,又存在轨温的低值中心,是受极端轨温变化影响风险最大的区域。

(2) 轨温呈单峰型月际变化,全年轨温峰值出现在 7 月,而谷值则出现在 1 月或 12 月。14:00、15:00 和 16:00 是日最高轨温峰值最易出现的时刻,且日最高轨温峰值在春、夏季出现时刻相对分散,而在秋、冬季则更为集中。轨温与气温整体呈显著正相关关系,相关系数集中在 0.84~0.96,冬季轨温与气温的数值分布最为一致,而夏季受强太阳辐射等复杂因素影响,两者差异最大,且轨温稳定高于气温。

(3) 晴天、多云和雨天的轨温与气温日峰值差值平均分别为 13.6℃、8.6℃和 1.4℃,超过 95%日数的轨温峰值要高于气温峰值;而二者日谷值差值平均分别为-1.1℃、-0.3℃和-0.2℃,较平均地分布在 0℃左右。三种天气条件下轨温和气温日峰值、谷值的出现时刻相对一致,两者差值为 0 的日数在晴天接近 50%,而在多云和雨天则超过 30%;晴天轨温峰值早于气温峰值的日数占比超过 40%,多云和雨天轨温峰值晚于气温峰值的日数则更多;晴天、多云和雨天轨温谷值晚于气温谷值的日数占比为 40%左右。

(4) 太阳短波辐射观测值与 ERA5 再分析格点值的相关性受天气条件影响显著,晴天相关性最好,相关系数为 0.71,多云和雨天次之,且散点集中于低值区。此外,当太阳短波辐射较强时,直接使用 ERA5 再分析数据会低估强短波辐射条件下的轨温。晴天与多云时,气温与轨温呈高度正相关(相关系数>0.8),轨温随太阳短波辐射增强而升高,且在太阳强短波辐射(大于 750 W·m⁻²)下,轨温对气温波动的敏感性降低;多云时,不同太阳短波辐射强度下,轨温与气温的拟合斜率最为接近;雨天时,两者相关性最差,但轨温对气温变化的敏感性在三种天气条件中最高。

本文主要分析了广西地区轨温、气温与太阳短波辐射的统计特征,尚未探讨极端轨温背后的物理过程。具体而言,晴天时气温热传导、风速引发的对流换热以及太阳短波辐射直接加热对轨温变化的协同作用,以及雨天时降水间歇或雨后骤晴时潜热蒸发与太阳短波辐射直接加热对极端轨温的影响机制,均有待进一步研究。深入揭示这些物理过程的发生机制,将有助于加深对气象要素影响极端轨温规律的认识。

参考文献 (References):

- 陈燕丽,谢映,张会,等.2022.1961—2019 年广西喀斯特地区极端气候事件时空变化规律[J].*广西林业科学*,51(6):859–865. Chen Y L, Xie Y, Zhang H, et al. 2022. Temporal and spatial variation of extreme climate events in karst areas of Guangxi during 1961–2019 [J]. *Guangxi Forestry Science*,51(6):859–865 (in Chinese). doi:10.19692/j.issn.1006–1126.20220620
- 戴公连,王蒙,梁金宝,等.2018.夏季桥上 CRTS I 型双块式无砟轨道温度梯度研究[J].*北京交通大学学报*,42(1):40–46. Dai G L, Wang M, Liang J B, et al. 2018. Study on temperature gradient of CRTS I twin-block ballastless track on bridge in summer [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*,42(1):40–46 (in Chinese). doi:10.11860/j.issn.1673–0291.2018.01.006
- 翟峰,孙国钧.2012.无缝线路钢轨轨温和钢轨温度力实时监测系统的研制和应用[J].*铁道建筑*,464(10):128–129. Zhai F, Sun G J. 2012. Development and application of real-time monitoring system for rail temperature and temperature force of continuous welded rail [J]. *Railway Engineering*,464(10):128–129 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003–1995.2012.10–38
- 康维新,陈帅,魏春城,等.2019.无砟轨道温度场计算及持续高温天气影响分析[J].*铁道学报*,41(7):127–134. Kang W X, Chen S, Wei C C, et al. 2019. Calculation of temperature field of ballastless track and analysis of continuous high temperature weather influence [J]. *Journal of the China Railway Society*,41(7):127–134 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001–8360.2019.07.016
- 李亚飞,祝传栋,刘邕,等.2025.京津城际铁路沿线雷电活动特征及危险性评估[J].*暴雨灾害*,44(3):332–339. Li Y F, Zhu C D, Liu Y, et al. 2025. Assessment of dangerousness and characteristics on lightning along the Beijing-Tianjin intercity railway [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(3):332–339 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024–016
- 李韵.2025.广西夏季高温热浪及其对人口经济与电力消耗的影响研究[D].南京:南京信息工程大学. Li Y. 2025. Study on summer heat waves in Guangxi and their impacts on population economy and power consumption [D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese)
- 刘大玲,黄小钢.2019.高速铁路无砟轨道系统状态监测及预防性维修[J].*中国机械工程*,30(3):349–353. Liu D L, Huang X G. 2019. Condition monitoring and preventive maintenance of ballastless track system for high-speed railway [J]. *China Mechanical Engineering*,30(3):349–353 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–132X.2019.03.017
- 刘端阳,徐祥德,朱寿鹏,等.2026.中国交通气象观测技术进展和未来展望[J].*气象科学*,46(1):11–23. Liu D Y, Xu X D, Zhu S P, et al. 2026. Progress and future prospects of transportation meteorological observation in China [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*,46(1):11–23 (in Chinese). doi:10.12306/2025jms.0056
- 刘昊旻,路宏遥,何越磊,等.2019.基于优化气象参数的轨道板内部温度试验研究与预测分析[J].*铁道科学与工程学报*,16(5):1120–1128. Liu H M, Lu H Y, He Y L, et al. 2019. Experimental research and prediction analysis of internal temperature of track slab based on optimized meteorological parameters [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,16(5):1120–1128 (in Chinese). doi:10.19713/j.cnki.43–1423/u.2019.05.002
- 刘学毅,李佳莉,康维新,等.2017.无砟轨道温度简便计算及极端天气影响分析[J].*西南交通大学学报*,52(6):1037–1045,1060. Liu X Y, Li J L, Kang W X, et al. 2017. Simple calculation of ballastless track temperature and analysis of extreme weather influence [J]. *Journal of*

- Southwest Jiaotong University, 52(6):1037–1045, 1060 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0258-2724.2017.06.001
- 卢耀荣. 2004. 无缝线路研究与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社. Lu Y R. 2004. Research and Application of Continuous Welded Rail [M]. Beijing: China Railway Publishing House (in Chinese)
- 欧祖敏, 孙璐, 程群. 2014. 基于气象资料的无砟轨道温度场计算与分析[J]. 铁道学报, 36(11):106–112. Ou Z M, Sun L, Cheng Q. 2014. Calculation and analysis of temperature field of ballastless track based on meteorological data [J]. Journal of the China Railway Society, 36(11): 106–112 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2014.11.021
- 潘勋, 周小勇, 陈鹰, 等. 2020. CRTSⅢ型无砟轨道冬季温度场特性[J]. 铁道建筑, 60(5):98–101. Pan X, Zhou J M. 2020. Winter temperature field characteristics of CRTSⅢ ballastless track [J]. Railway Engineering, 60(5):98–101 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003-1995.2020.05.23
- 万章博, 杨荣山, 任勃, 等. 2015. 太阳辐射对 CRTS I 型双块式无砟轨道道床板表面温度影响的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 12(1):1–6. Wan Z B, Yang R S, Ren B, et al. 2015. Experimental study on influence of solar radiation on surface temperature of CRTS I twin-block ballastless track slab [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 12(1):1–6 (in Chinese). doi:10.19713/j.cnki.43-1423/u.2015.01.001
- 闫斌, 刘施, 戴公连, 等. 2016. 我国典型地区无砟轨道非线性温度梯度及温度荷载模式[J]. 铁道学报, 38(8):81–86. Yan B, Liu S, Dai G L, et al. 2016. Nonlinear temperature gradient and temperature load mode of ballastless track in typical areas of China [J]. Journal of the China Railway Society, 38(8):81–86 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.08.012
- 杨荣山, 万章博, 刘学毅, 等. 2015. CRTS I 型双块式无砟轨道冬季温度场试验[J]. 西南交通大学学报, 50(3):454–460. Yang R S, Wan Z B, Liu X Y, et al. 2015. Experimental study on winter temperature field of CRTS I twin-block ballastless track [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 50(3):454–460 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0258-2724.2015.03.011
- 岳岩裕, 王寿鑫, 于志国, 等. 2026. 基于大别山高塔通量观测的森林碳交换变化特征及影响因素[J]. 环境科学研究, 39(4):976–984. Yue Y Y, Wang S X, Yu Z G, et al. 2026. Characteristics and influence factors of carbon exchange changes based on high-tower flux observations in the Dabie Mountains [J]. Research of Environmental Sciences, 39(4): 976–984 (in Chinese). doi:10.13198/j.issn.1001-6929.2026.01.09
- 张丹. 2025. 川藏铁路理塘段的气象风险和特征分析[J]. 高原山地气象研究, 45(S2):116–120. Zhang D. 2025. Analysis of meteorological risks and characteristics of the Litang section of the Sichuan-Tibet railway [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 45(S2):116–120 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2025.22.022
- 张娣, 李崑, 张金满, 等. 2025. 朔黄铁路沿线降雨致灾危险性分析[J]. 暴雨灾害, 44(2):255–263. Zhang D, Li W, Zhang J M, et al. 2025. Risk analysis of rainfall-induced disasters along the Shuozhou-Huanghua Railway [J]. Torrential Rain and Disasters, 44(2):255–263 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-151
- 张娣, 张金满, 杨琳哈. 2022. 朔黄铁路不同季节轨温变化特征分析[J]. 绿色科技, 24(16):39–43. Zhang D, Zhang J M, Yang L H. 2022. Analysis on rail temperature variation characteristics in different seasons of Shuohuang Railway [J]. Journal of Green Science and Technology, 24(16):39–43 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-9944.2022.16.011
- 张俊兵, 沈润平, 师春香, 等. 2021. 中国大陆地区 ERA5 下行短波辐射数据适用性评估与对比[J]. 地球信息科学学报, 23(12):2261–2274. Zhang J B, Shen R P, Shi C X, et al. 2021. Applicability evaluation and comparison of ERA5 downward shortwave radiation data in mainland China [J]. Journal of Geo-Information Science, 23(12): 2261–2274 (in Chinese). doi:10.12082/dqxxkx.2021.180357
- 张鹏飞, 刘书语, 江浩宇, 等. 2025. 简支梁桥上 CRTSⅢ型板式无砟轨道温度场与温度应力研究[J]. 北京交通大学学报, 49(5):188–197. Zhang P F, Liu S Y, Jiang H Y, et al. 2025. Temperature field and thermal stress of CRTSⅢ slab ballastless track on simply supported beam bridge [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 49(5):188–197 (in Chinese). doi:10.11860/j.issn.1673-0291.20240142
- 赵丽华, 何花, 胡安泽. 2025. 桥上 CRTS I 型板式无砟轨道温度特性研究[J]. 铁道标准设计, 69(12):60–67. Zhao L H, He H, Hu A Z. 2025. Study on temperature characteristics of CRTS I slab ballastless track on bridge [J]. Railway Standard Design, 69(12):60–67 (in Chinese). doi:10.13238/j.issn.1004-2954.202401200001
- 赵坪锐, 刘学毅, 杨荣山, 等. 2016. 双块式无砟轨道温度荷载取值方法的试验研究[J]. 铁道学报, 38(1):92–97. Zhao P R, Liu X Y, Yang R S, et al. 2016. Experimental study on temperature load determination method of twin-block ballastless track [J]. Journal of the China Railway Society, 38(1):92–97 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.01.015
- 周锐, 袁文豪, 朱星盛, 等. 2023. 不同基础上 CRTS II 型无砟轨道的温度效应分析[J]. 铁道工程学报, 40(1):13–20. Zhou R, Yuan W H, Zhu X S, et al. 2023. Temperature effect analysis of CRTS II ballastless track on different foundations [J]. Journal of Railway Engineering Society, 40(1):13–20 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1006-2106.2023.01.003
- 朱颖, 郭辉, 孙大奇, 等. 2024. 铁路钢桁梁悬索桥日照时空非均匀温度场及其效应精细化分析[J]. 工程力学, 41(12):80–94. Zhu Y, Guo H, Sun D Q, et al. 2024. Spatiotemporal non-uniform temperature field and refined effect analysis of railway steel truss suspension bridge under solar radiation [J]. Engineering Mechanics, 41(12):80–94 (in Chinese). doi:10.6052/j.issn.1000-4750.2022.09.0823
- Hong S U, Kim H U, Lim N H, et al. 2019. A rail-temperature-prediction model considering meteorological conditions and the position of the sun [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 20:337–346. doi:10.1007/s12541-019-00015-1
- Ou Z, Li F. 2014. Analysis and prediction of the temperature field based on in-situ measured temperature for CRTS-II ballastless track [J]. Energy Procedia, 61:1290–1293. doi:10.1016/j.egypro.2014.11.1083
- Yang R S, Li J L, Kang W X, et al. 2017. Temperature characteristics analysis of the ballastless track under continuous hot weather [J]. Journal of Transportation Engineering Part A-Systems, 143: 04017048. doi:10.1061/jtpebs.0000076
- Zhong Y L, Gao L, Zhang Y R. 2018. Effect of daily changing temperature on the curling behavior and interface stress of slab track in construction stage [J]. Construction and Building Materials, 185:638–647. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.224
- Zhou Y, Lyv J J, Gao Z X, et al. 2026. Evolution and correlation characteristics of wire and ice layer temperatures under different weather conditions in southwestern China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 138:12. doi:10.1007/s00703-025-01108-5