暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于GIS空间分析的广西多要素气象观测站网布局评估

王玮 莫祖斯 黎勋 梁振清 吕善行

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

WANG Wei，MO Zusi，LI Xun，LIANG Zhenqing，LYU Shanxing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-114

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

基于不同测站布局的闪电定位误差分析

Analysis of lightning localization errors based on different station layouts

暴雨灾害. 2024, 43(6): 741-748 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-216

基于GIS的咸宁市枇杷气象灾害危险性评价

Risk assessment of meteorological disasters of loquat planting in Xianning of Hubei based on GIS

暴雨灾害. 2023, 42(1): 105-112 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-202

江西省气象-水文-雷达小时雨量信息融合试验结果分析

Analysis of fusion test results on hourly precipitation from meteorological and hydrological stations and radar

暴雨灾害. 2020, 39(3): 276-284 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.008

基于GIS的安徽省雷电致灾危险性评估与区划

Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS

暴雨灾害. 2024, 43(6): 733-740 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-186

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

暴雨过程致灾危险性评估方法研究——以孝感市“8·12”暴雨过程为例

Research of rainstorm event disaster hazard assessment method-A case study of "8·12" rainstorm event in Xiaogan City

暴雨灾害. 2023, 42(6): 724-730 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-068

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王玮,莫祖斯,黎勋,等.2026.基于 GIS 空间分析的广西多要素气象观测站网布局评估[J].暴雨灾害,45(2):277−286. WANG Wei, MO Zusi, LI Xun, et al. 2026. Assessment of multi-element meteorological observation network layout based on GIS spatial analysis in Guangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,45(2):277−286 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−114

基于 GIS 空间分析的广西多要素气象观测站网布局评估

王玮, 莫祖斯, 黎勋, 梁振清, 吕善行

(广西壮族自治区气象技术装备中心, 南宁 530022)

摘　要: 气象观测数据是做好精准预报预警和防灾减灾工作的基础, 气象观测站网科学评估对优化气象站网布局具有重要意义。本文利用地面多要素观测站、天气雷达站信息, 基于 GIS 泰森多边形法、滚动需求评估原则及天气雷达组网覆盖评估算法, 对 2015 年和 2025 年广西地面观测站网的站点控制面积、水平分辨率和网格覆盖率以及天气雷达组网覆盖能力进行评估。结果表明: (1) 2025 年广西地面观测站点的控制面积和与最邻近站点的平均站间距较 2015 年明显减小, 各观测要素水平分辨率均能够达到世界气象组织观测系统能力分析和审查工具 (Observing Systems Capability Analysis and Review Tool, OSCAR) 门限值指标, 而距离突破值指标仍有较大差距。(2) 使用 OSCAR 高分辨率数值预报门限值指标对广西地面观测站网进行网格分割时, 站点分布已覆盖大部分网格地区, 在大城市及沿海地区站点分布较为密集; 而使用突破值指标进行网格分割时, 仍存在较多空白区。(3) 2025 年广西天气雷达等射束拼图组网在 0.5 km、1 km、2 km 高度的覆盖率较 2015 年显著提升, 分别达 36.90%、80.64%、96.88%, 受复杂地形影响, 0.5 km 高度仍存在较多盲区, 桂南覆盖优于桂北, 2 km 高度北纬 23°以南基本实现全覆盖, 雷达组网在桂南定量降水估测中可靠性较高。但桂林、百色、河池等桂北地区仍存在部分探测空白, 高海拔区域仍需优化布局以提升监测能力。评估结果能有效识别广西气象监测盲区, 可为广西优化站网布局、填补雷达探测空白及提升区域防灾减灾决策能力提供技术支撑。

关键词: 多要素气象观测站; GIS; 站网密度; 雷达覆盖; 滚动需求评估; 广西

中图法分类号: P411　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−114

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

WANG Wei, MO Zusi, LI Xun, LIANG Zhenqing, LYU Shanxing

(*Guangxi Meteorological Technology Equipment Center*, *Nanning* 530022)

Abstract: Meteorological observation data provides the basis for accurate forecasting and disaster prevention, where the evaluation methods of meteorological observation networks layout are essential for optimizing their spatial layout. Using ground multi-element observation stations and weather radar station information, based on GIS Thiessen polygon method, rolling demand assessment principle, and weather radar network coverage evaluation algorithm, to evaluate the station control area, horizontal resolution, grid coverage, and weather radar network coverage capability of Guangxi's ground observation station network in 2015 and 2025.The result are as follows. (1) In 2025, both the control area of surface observation stations in Guangxi and their average spacing to the nearest neighboring station showed a significant decrease compared to 2015. The horizontal resolution of all observed meteorological elements meets the corresponding threshold values set by the World Meteorological Organization's Observing Systems Capability Analysis and Review Tool (OSCAR), though a considerable gap remains from achieving its breakthrough targets. (2) Applying the WMO OSCAR high-resolution numerical forecast threshold criteria for grid-based assessment of Guangxi's surface observation network, station distribution demonstrates adequate coverage across most grid cells, with particularly dense clustering in metropolitan and coastal zones. However, significant spatial gaps persist when evaluated against the more stringent OSCAR breakthrough targets. (3) The coverage rate of Guangxi's weather radar mosaic network at 0.5 km, 1 km and 2 km altitude levels demonstrated marked enhancement in 2025 compared to 2015 levels, reaching 36.90%, 80.64%, and 96.88% respectively. Due to the influence of complex terrain, there are still many blind spots at a height of 0.5 km. The coverage in southern Guangxi is better than that in northern, and full coverage is basically achieved at a height of 2 km south of

收稿日期: 2025−06−18; **定稿日期**: 2025−11−07

资助项目: 广西气象科研计划项目 (桂气科 2024M08, 桂气科 2023QN05, 桂气科 2024QN10); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069126)

第一作者: 王玮, 主要从事大气探测应用技术研究。E-mail: 2585349534@qq.com

通信作者: 莫祖斯, 主要从事大气遥感与大气探测研究。E-mail: 1296529121@qq.com

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

latitude 23°N. Therefore, the reliability of radar networking in quantitative precipitation estimation in southern Guangxi is relatively high. However, there are still some detection gaps in northern Guangxi regions such as Guilin, Baise, and Hechi, and the layout of high-altitude areas still needs to be optimized to enhance monitoring capabilities. The evaluation results effectively identified blind spots in meteorological monitoring in Guangxi, providing key support for optimizing station network layout, filling radar detection gaps, and enhancing regional disaster prevention and mitigation decision-making capabilities.

Key words: multi-element meteorological observation station; GIS; station network density; radar coverage; rolling demand assessment; Guangxi

引　言

气象观测数据作为气象预报和服务的基础支撑，其系统性、连续性的观测能力不仅为精准预报预警提供科学依据，更是筑牢气象防灾减灾第一道防线的关键保障。在实际气象业务中，建立科学的观测站网评估体系，涵盖站点控制面积、水平分辨率、网格覆盖率和天气雷达覆盖率等关键指标，对于优化观测站网布局和建设规划具有重要的指导意义。

目前，国内外学者针对区域性观测站网的评估与优化开展了多方面研究。在评估方法的选用上，结构函数被广泛应用于分析气象要素的空间插值精度与站间距之间的关系。赵瑞霞等 (2007) 基于该方法研究了北京东南部低海拔地区日平均气温和水汽压的内插精度，为低海拔地区气象站网优化提供了科学依据；张玉洁等 (2024) 亦采用结构函数结合滚动需求评估方法，对山东省地面气象观测站网的水平分辨率进行了分析，提出了最优布设方案和站间距建议。此外，概率统计方法也被引入到站网规划中，孙大利等 (2015) 尝试将独立同分布中心极限定理应用于雨量站网设计，但该方法需长期数据以验证其精度。近年来，GIS 与多源数据融合分析已成为观测站网评估与优化的主流方法。吴薇等 (2023) 从水平间距、垂直分布、风险区划及站点控制范围等多个维度，基于 GIS 空间分析与多源气象数据，系统评估了四川省地面雨量站的布局合理性。同样运用 GIS 与多源信息融合的思路，朱浩等 (2024) 结合历史灾情数据与地理空间分析方法，对安徽省雷电灾害进行了精细化区划评估，从而为雷电监测站点的科学选址提供了重要技术支撑。在地面气象站网方面，研究多聚焦于气温、风向、风速、降水等要素的空间代表性和内插精度，而在天气雷达评估中，则更重视地形遮挡和组网覆盖能力。朱丹等 (2018) 结合地形高度资料对全国 208 部新一代天气雷达组网覆盖能力进行了评估，结果表明全国雷达站整体覆盖情况较好。李明凤等 (2018) 利用 SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission 3-arc-second) 高分辨率地形对广东省天气雷达组网拼图覆盖层数进行了评估，深化了对复杂地形下雷达观测能力的认识。综上所述，现有研究虽已为地面要素评估提供了成熟方法，然而面向区域气象观测站网的科学设计，亟需构建基于多要素融合 (雷达、地面多要素观测等) 的综合评估指标体系，以提升气象观测体系的科学性和服务效能。

广西壮族自治区作为我国热带-亚热带过渡带的关键区域，是多种高影响气象灾害的频发区，容易受到暴雨洪涝、热带气旋、雷暴大风、冰雹等多种灾害性天气的影响 (莫建飞等, 2017; 廖胜石等, 2022)，防灾减灾工作面临严峻挑战。为应对这一需求，自 2015 年全面推进气象现代化以来，广西依托气象雷达工程、气象站网工程、气象监测预警补短板工程等，陆续进行了地面自动观测设备以及新一代天气雷达的建设，填补了地面观测站网以及雷达观测站网的盲区 (谭龙, 2020)，综合立体观测能力得到明显提高 (王建凯等, 2022)。目前针对广西气象观测站网监测能力的系统性评估研究仍属空白，亟需建立科学的评估体系以支撑综合立体观测网建设，提升预报服务效能。本文基于 GIS 空间分析工具，结合高精度数字地形数据，采用泰森多边形、网格覆盖率计算、天气雷达覆盖率计算等分析方法对广西观测站网 2015 年、2025 年两个年份的雨量、温、湿、气压、风等要素地面自动气象站以及 S/X 波段天气雷达站布局状况开展全面评估，旨在为观测站网优化提供科学依据。

1　研究区、资料与方法介绍

1.1　研究区概况

广西地势西北高东南低，西北部属云贵高原边缘，海拔较高 (部分山峰超过 2 000 m)，如图 1 所示，东南部逐渐过渡为丘陵和平原，沿海地区地势低平，山地和丘陵约占全区总面积 75%，平原和台地占约 25% (广西壮族自治区人民政府, 2017; 广西壮族自治区统计局等, 2023)。其地形的复杂性直接影响了站网的设计和建设，进而影响探测范围和效率。

1.2　资料介绍

本文使用的资料为：(1) 站点信息数据，包括广西国家级及省级常规气象观测站与天气雷达站点的经纬度、拔海高度等地理位置信息，时间段为 2015 年 1 月 1 日—12 月 31 日，2025 年 1 月 1 日—6 月 30

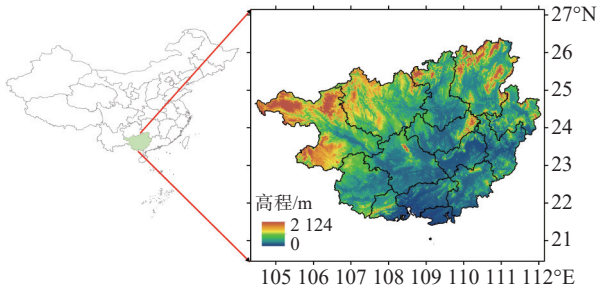


图 1 广西海拔高度 (填色) 分布

Fig. 1 Distribution of terrain altitude (shaded) in Guangxi province

日; (2) 广西数字高程模型 (DEM) 数据: 水平分辨率为 3″ (约 90 m)、高程精度为±16 m、平面精度为±20 m 的 SRTM3 数据, 并采用王曙东等 (2011) 的计算方法进行遮挡分析, 高程资料来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn/)。

截至 2025 年 6 月, 广西已建成常规气象观测站 3 155 个, 较 2015 年增加 718 个; 天气雷达由 2015 年的 10 部 S 波段天气雷达发展为 2025 年的 11 部 S 波段与 9 部 X 波段天气雷达共同组网, 综合气象观测能力显著增强。

1.3 研究方法

本文对 2015、2025 年广西地面气象观测站网的站点控制面积、水平分辨率和网格覆盖率以及天气雷达组网覆盖能力进行对比分析时, 利用 GIS 泰森多边形法、滚动需求评估原则及天气雷达组网覆盖评估算法评估广西地面气象观测站网布局的能力提升情况及存在的不足。

1.3.1 GIS 泰森多边形法

受地形影响, 广西的地面气象观测站点分布较为复杂, 气象观测网格的划分可能会忽略气象站位置的差异, 但泰森多边形则是围绕气象站构建的, 能够更好地反映站点的实际空间代表性 (朱求安等, 2005; 钟利华等, 2018)。基于 GIS 的泰森多边形法是一种基于离散点的空间剖分方法, 将空间平面内所有相邻的离散点连接成三角形, 这些三角形的垂直平分线形成的多边形即为泰森多边形 (孙晨等, 2022)。本文基于 GIS 利用泰森多边形法, 结合广西行政区划边界底图, 计算每个站点的控制面积, 并对站点控制范围的空间分布特征进行分析。

1.3.2 滚动需求评估原则

依据世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 滚动需求评估 (Rolling Review of Requirements) 原则, 对广西现有站点进行科学评估, 指出当前站网与需求的差距, 为站网优化提供依据。水平分辨率公式如下

$$C = \sqrt{1000 \times S/N} \tag{1}$$

其中, C 表示水平分辨率, S 表示区域面积, N 表示观测站点数量。基于世界气象组织提出的观测系统能力分析和审查工具 (Observing Systems Capability Analysis and Review Tool, OSCAR) 应用领域需求, 对全广西及各地市各类观测要素的水平分辨率进行分析, 揭示其空间分布特征及差异性, 分析其是否能够达到 OSCAR 短临预报、高分辨率数值预报及气候监测的目标值、突破值和门限值指标, 以及实际观测站网与指标要求之间存在的差距 (许小峰, 2022)。其中门限值代表的是数据在某一应用领域可用的最低要求值, 目标值是极为理想的指标值, 超过这一值不会带来更多改进, 突破值则介于门限值和目标值之间, 达到这一数值能够对某一领域的应用产生显著变化。

1.3.3 网格覆盖率

在面向短临预报和高水平分辨率数值预报领域, OSCAR 对气压、气温、湿度、风要素需求的门限值为 20 km, 突破值为 5 km; 对降水需求的门限值为 10 km, 突破值为 2 km (李俊等, 2020)。

观测要素网格覆盖率, 是指对特定区域进行网格划分后, 具有某观测要素的网格数占总网格数的比例。计算公式为

$$P = n/N \tag{2}$$

其中, P 为网格覆盖率, n 为要素覆盖的网格数, N 为总网格数。

结合 OSCAR 对于不同观测要素的分辨率突破值和门限值的要求, 对广西全区内单降水量要素以及多要素 (降水量、气温、风向、风速、气压、相对湿度, 按先后顺序取四到六个要素) 站点分别进行网格覆盖率计算。

1.3.4 天气雷达覆盖率

雷达遮蔽角是指以雷达馈源中心点 (雷达抛物面中心焦点) 和该点所在水平面为基准, 在一定探测范围内受障碍物遮蔽所形成的垂直张角。等射束高度图是基于标准大气折射条件假设下, 以雷达有效探测范围内各个方位的最大遮蔽角为基准, 波束中心轴线能够到达某一规定高度的最大探测距离的连线图, 该图直接反映测站四周地物阻挡对雷达探测的影响, 计算公式参考邓志等 (1999), 采用等效地球半径计算电磁波束高度和水平距离。

图 2 显示的是基于等效地球半径的雷达波束路径传播示意图, 其中 R_e 为地球等效半径, 雷达天线馈源 A 的经度、纬度、海拔高度分别为 λ_r, ϕ_r, h_r, 遮挡物 B 的经纬度、海拔高度分别为 λ, ϕ, h, L_s 为馈源

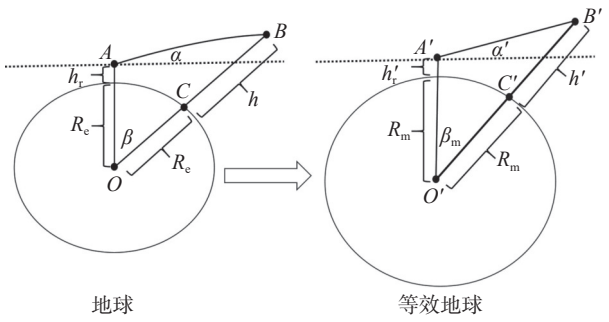


图 2 基于等效地球半径的雷达波束路径传播示意图

Fig. 2 Schematic diagram of radar beam path propagation based on equivalent Earth radius

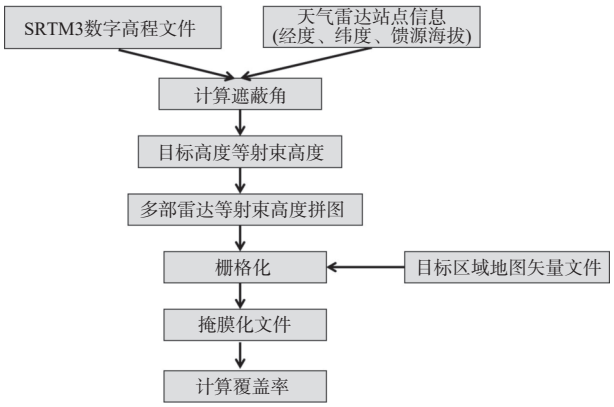


图 3 天气雷达组网覆盖评估算法设计流程图

Fig. 3 Design flowchart of weather radar network coverage evaluation algorithm

A 到遮挡物 B 的传播距离，其中地心角β、球面距离L_s、遮挡方位角θ、遮挡仰角α等计算公式参考杨洪平等 (2009) 的论文，最大探测距离计算方法如下

$$r = \sqrt{17000 \times (H - h_r) + (8500\sin\alpha)^2} - 8500\sin\alpha \quad (3)$$

其中，H 为观测高度，r 为指定观测高度下的最大探测距离。

业务上常用等射束高度图组网拼图评价区域天气雷达覆盖程度，本文关于雷达覆盖率的主要计算流程如图 3 所示：(1) 基于高精度数字地形 (SRTM3) 和雷达站点信息计算得到每一部雷达 360 个方位的遮蔽仰角后，计算不同观测高度的最大探测距离 r，将极坐标系下的天气雷达等射束高度图转换为地理经纬度坐标系，并构建多边形要素，同时生成矢量文件 (Shapefile)，利用栅格化工具 (Rasterization) 将生成的多边形矢量文件转换为网格栅格图像；(2) 进行多部天气雷达等射束高度拼图 (李明凤等, 2018)；(3) 基于 GIS 空间分析工具，利用广西行政区划矢量边界 (目标区域 shp 文件) 对栅格进行掩膜裁剪，即可得到目标区域天气雷达等射束组网覆盖图；(4) 采用栅格代数运算 (Raster Algebra) 方法，将雷达有效覆盖地形栅格与研究区数字栅格进行空间比率计算，即可得到目标区域的覆盖率 (连晨方等, 2024)。

2 结果与分析

2.1 站点控制面积

图 4 是 2015 年和 2025 年广西观测站点控制面积的泰森多边形分割结果，2025 年平均站点控制面积为 76.31 km^2，比 2015 年降低了 22.57 km^2。除去海上站点，广西的观测站点控制面积在 1.66~325.65 km^2 之间，控制面积大于 150 km^2 的站点共有 200 个，主要集中在桂林市及柳州市的北部山区、贺州市及广西西南部十万大山地区。共有 301 个站点的控制面积小于 30 km^2，主要集中在南宁、柳州、桂林、玉林等人口密集型城市的市区以及元宝山等山脉。与 2015 年 (图 4a) 相比，在桂东北、河池西部及桂西南的站点控制面积较大的地区，通过站点建设，站点的数据代表性明显提高，针对南宁、柳州等大城市进行观测站点加密建设后，大城市的观测站点变得更为集中，对于元宝山、十万大山、河池西部等山区加密布设了观测站点，用于暴雨监测及梯度观测。

图 5 反映的是对广西气象观测站点泰森多边形分割后的站点控制面积大小分布 (图 5a) 以及与邻近站点的距离分布 (图 5b)，从中看出，2025 年广西的站点控制面积的中位数是 67.39 km^2，主要集中在

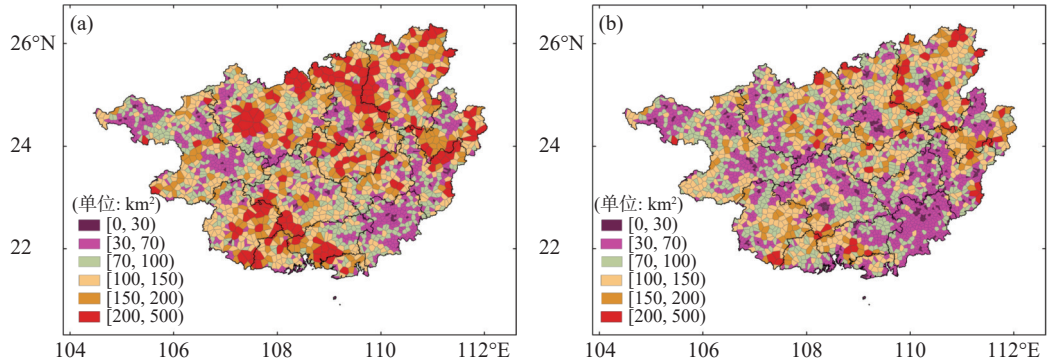


图 4 2015 年 (a) 和 2025 年 (b) 广西气象观测站点控制面积泰森多边形分割图

Fig. 4 Tyson polygon segmentation map of Guangxi meteorological observation station control area in (a) 2015 and (b) 2025

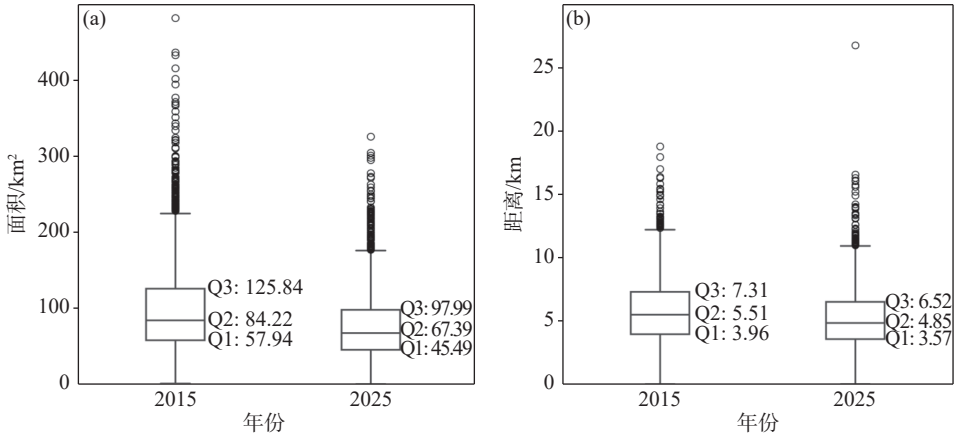


图 5 2015 年和 2025 年广西气象站泰森多边形分割后站点控制面积 (a) 以及与邻近站点的距离 (b) 的箱线图 (Q1、Q2、Q3 分别代表 25% 分位数、中位数、75% 分位数)

Fig. 5 Box-plot of (a) station control area and (b) distance from adjacent stations after Tyson polygon segmentation of Guangxi meteorological stations in 2015 and 2025 (The Q1, Q2, Q3 represent the 25th percentile, median, and 75th percentile, respectively)

45.49~97.99 km^2 之间, 与邻近站点距离的中位数是 4.85 km, 主要集中在 3.57~6.52 km 之间, 相比 2015 年, 站点控制面积和与邻近站点的距离, 中位数和方差都出现了明显缩小, 站点的代表性变得更高。

2.2 水平分辨率

表 1 为 2015 年和 2025 年广西不同气象要素观测站点的数量及水平分辨率对比情况。从表可见, 2025 年, 广西地面观测站网各常规要素的水平分辨率从小到大依次为降水量、气温和风向风速、气压、相对湿度, 水平分辨率比 2015 年有了较明显的提高, 其中, 气压和相对湿度的水平分辨率相较于 2015 年提升了 10 km 以上。同时拥有降水量、气温、风向、风速四要素的站点占比达到了 65%, 比 2015 年提升了 35%。

表 1 2015 年和 2025 年广西不同要素地面气象观测站数及水平分辨率对比

Table 1 Comparison of the number and horizontal resolution of ground meteorological observation stations with different elements in Guangxi between 2015 and 2025

要素	2015年		2025年	
	站数	水平分辨率/km	站数	水平分辨率/km
气温	1 093	14.74	2 048	10.77
相对湿度	298	28.24	1 640	12.04
气压	332	26.75	1 647	12.01
风向风速	741	17.91	2 048	10.77
降水量	2 437	9.87	3 155	8.68

图 6 为广西各地市观测站点水平分辨率分布情况。整体来看, 2025 年玉林市、贵港市、南宁市与其他市相比, 站点的水平分辨率较小, 贵港市、北海市、柳州市的水平分辨率与 2015 年相比缩小最多, 而桂林市、来宾市和崇左市的水平分辨率则较大。

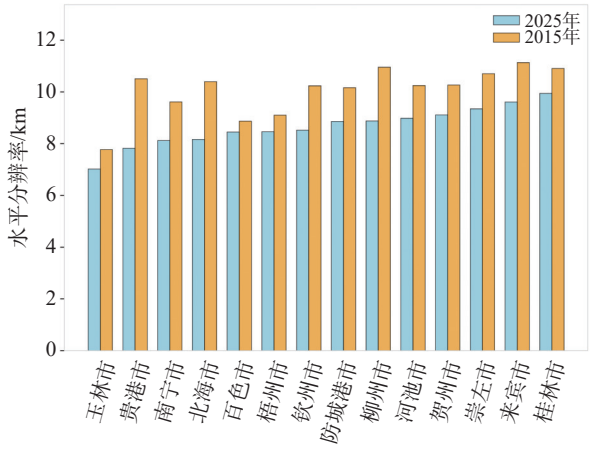


图 6 2015 年和 2025 年广西各市观测站点水平分辨率比较

Fig. 6 Comparison of horizontal resolution distribution of observation stations in various cities of Guangxi in 2015 and 2025

表 2 为广西 2025 年各地市不同要素的观测水平分辨率情况, 玉林市的降水观测水平分辨率全区最小, 北海市的气温及风向风速观测的水平分辨率全区最小, 防城港市的气压和相对湿度观测的水平分辨率全区最小。桂林市的降水观测水平分辨率全区最大, 贺州市的气温、风向风速、气压、相对湿度观测的水平分辨率全区最大。

综上所述, 2025 年广西各地市观测站网水平分辨率分布较为均匀, 其中玉林、北海、贵港、柳州的站网分布更为密集, 贺州、桂林、来宾的站网分布较为稀疏。

图 7 为 2015 年和 2025 年广西地面气象观测站点不同观测要素的水平分辨率与 OSCAR 不同应用领域的指标 (门限值、突破值、目标值) 之间的关系, 从中看出, 2025 年广西观测站网气温 (图 7a)、风向风

表 2 2025 年广西各地市不同观测要素的水平分辨率

Table 2 Horizontal resolution of different observation elements in various cities of Guangxi in 2025

地市	降水		气温		风向风速		气压		相对湿度	
	站数	水平分辨率/km	站数	水平分辨率/km	站数	水平分辨率/km	站数	水平分辨率/km	站数	水平分辨率/km
百色	507	8.45	270	11.58	270	11.58	251	12.01	249	12.06
北海	60	8.16	60	8.16	60	8.16	45	9.43	42	9.76
崇左	198	9.35	128	11.63	128	11.63	115	12.27	115	12.27
防城港	79	8.86	77	8.97	77	8.97	72	9.28	68	9.55
贵港	173	7.83	113	9.69	113	9.69	83	11.30	83	11.30
桂林	279	9.95	224	11.10	224	11.10	165	12.93	164	12.97
河池	415	8.98	249	11.60	249	11.60	209	12.66	208	12.69
贺州	142	9.12	87	11.65	87	11.65	64	13.58	64	13.58
来宾	145	9.61	111	10.99	111	10.99	76	13.28	75	13.37
柳州	236	8.88	203	9.57	203	9.57	171	10.43	170	10.46
南宁	335	8.12	193	10.70	193	10.70	142	12.48	142	12.48
钦州	150	8.52	107	10.09	107	10.09	85	11.32	85	11.32
梧州	176	8.46	93	11.64	93	11.64	79	12.63	79	12.63
玉林	260	7.02	133	9.81	133	9.81	90	11.93	88	12.06

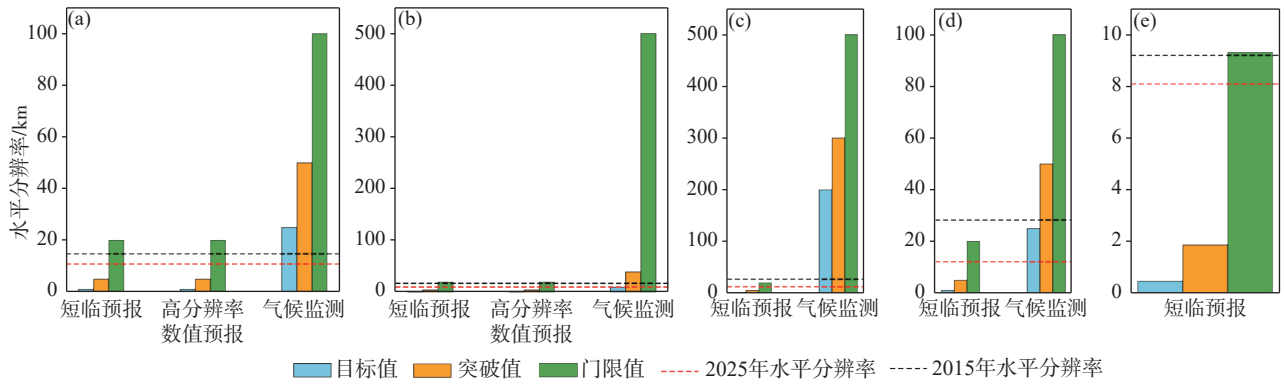


图 7 2015 年和 2025 年气温 (a)、风向风速 (b)、气压 (c)、相对湿度 (d)、降水量 (e) 水平分辨率与 OSCAR 指标分布图

Fig. 7 Distribution map of horizontal resolution and OSCAR index for (a) temperature, (b) wind direction and speed, (c) air pressure, (d) relative humidity, (e) precipitation in 2015 and 2025

速 (图 7b)、气压 (图 7c)、相对湿度 (图 7d) 及降水量 (图 7e) 观测的分辨率水平均达到了高分辨率数值预报门限值指标和气候监测突破值指标，气温和风向风速观测的水平达到了短临预报的门限值。与 2015 年相比，除降水量外，其余观测要素相较于 OSCAR 的指标都有了明显提升。综上所述，2025 年广西地面各观测要素均能够达到 OSCAR 各门限值指标，而距离短临预报和高分辨率数值预报的突破值仍然有较大的差距。

2.3 网格覆盖率

将不同要素数的站点进行网格覆盖率计算，由于高分辨率数值预报对于降水量的指标要求比其他常规要素更高，根据 OSCAR 高分辨率数值预报的门限值和突破值指标，单降水量要素站点选择 10 km 和 2 km 的网格，四、五和六要素的站点选择 20 km 和 5 km 的网格，2025 年高分辨率数值预报门限值指标网格覆盖情况如图 8 所示，突破值指标网格覆盖情况如图 9 所示。

根据门限值指标，2025 年 10 km 网格内，单要素站点 (图 8a) 的覆盖率为 74%，空白网格主要集中在桂林北部、河池东部、贺州南部及十万大山地区；20 km 网格内，四要素 (图 8b)、五要素 (图 8c)、六要素 (图 8d) 的站点网格覆盖率分别为 90%、88%、88%，空白网格主要集中在桂林北部地区。根据突破值指标，2 km 网格内，单要素站点 (图 9a) 的覆盖率为 6%；5 km 网格内，四要素 (图 9b)、五要素 (图 9c)、六要素 (图 9d) 的站点网格覆盖率分别为 21%、17%、17%。各要素覆盖率较高的地区都主要集中在南宁、柳州、桂林市区，以及沿海地区和元宝山地区。

综上所述，2025 年使用 OSCAR 高分辨率数值预报门限值指标对广西的地面观测站网进行网格分割时，站点的分布已覆盖大部分网格地区，在大城市及

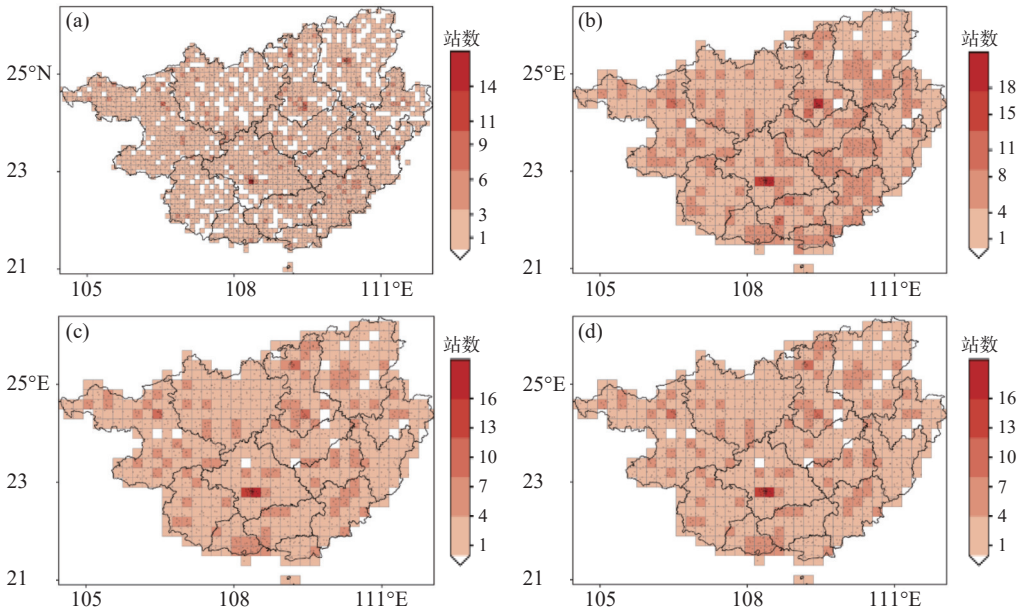


图 8 2025 年高分辨率数值预报门限值指标单降水量站 10 km×10 km (a)、四要素站 20 km×20 km (b)、五要素站 20 km×20 km (c)、六要素站 20 km×20 km (d) 网格区域观测站数

Fig. 8 Station numbers of high resolution numerical forecast threshold indicators area for (a) single precipitation stations of 10 km × 10 km, (b) four element stations of 20 km × 20 km, (c) five element stations of 20 km × 20 km, (d) six element stations of 20 km × 20 km in 2025

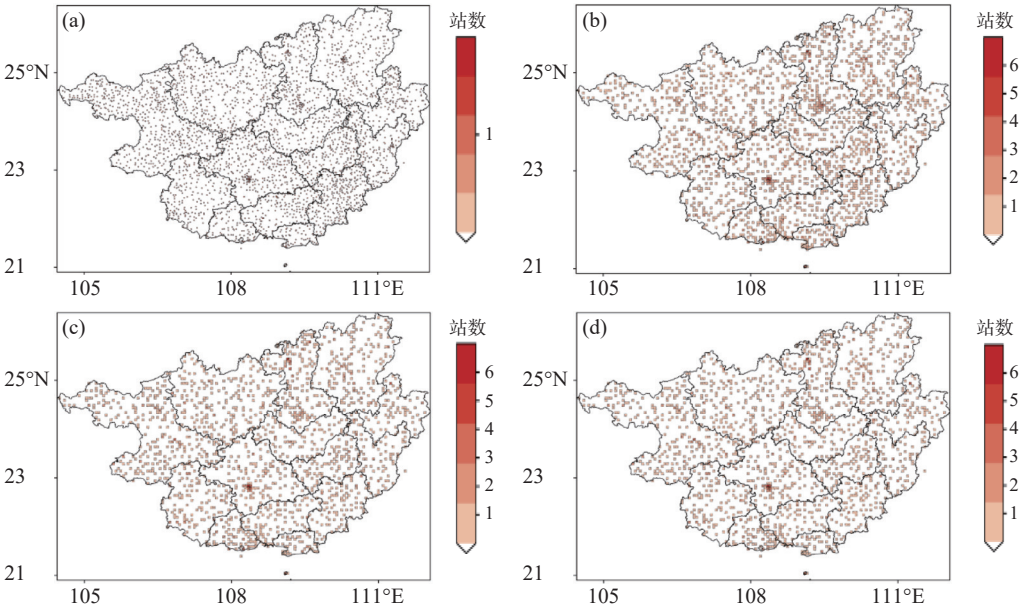


图 9 2025 年高分辨率数值预报突破值指标单降水量站 2 km×2 km (a)、四要素站 5 km×5 km (b)、五要素站 5 km×5 km (c)、六要素站 5 km×5 km (d) 网格区域观测站数

Fig. 9 Station number of high resolution numerical forecast breakthrough indicators area for (a) single precipitation stations of 2 km × 2 km, (b) four element stations of 5 km × 5 km, (c) five element stations of 5 km × 5 km, (d) six element stations of 5 km × 5 km in 2025

沿海地区站点分布较为密集; 而使用突破值指标进行网格分割时, 仍然存在较多空白区。

为评估自动站网建设对降水监测能力的影响, 基于 2025 年 6 月 22 日 08 时 (北京时, 下同) 广西全区域降水观测数据, 分别采用 2015 年和 2025 年建成的自动气象站网小时降水量, 进行了反距离权重空间插值分析。结果表明 (图 10), 站网密度显著提升后, 对降水空间分布特征的刻画能力明显增强, 特别是在红色框线标注区域, 2025 年 (图 10b) 的插值结果相比较于 2015 年 (图 10a), 局地降水梯度和细微结构的解析度得到显著改善。

2.4 天气雷达覆盖率

根据图 3 所示的算法流程对 2015、2025 年广西天气雷达覆盖能力进行计算, 以业务上基于馈源以

上高度的雷达覆盖评估方法 (连晨方等, 2024) 为参考, 利用多部雷达栅格化后的等射束高度图组网拼接, 并对每个格点进行雷达覆盖重叠数目统计, 本文用覆盖层数表示, 选取实际业务中较为关注的对流层中下层离地高度 (如 0.5、1、2 km) 评估广西雷达组网的覆盖能力。广西 2025 年天气雷达组网在馈源 0.5 km、1 km、2 km 以上高度的覆盖率分别为 36.90%、80.64%、96.88%, 2015 年分别为 18.05%、

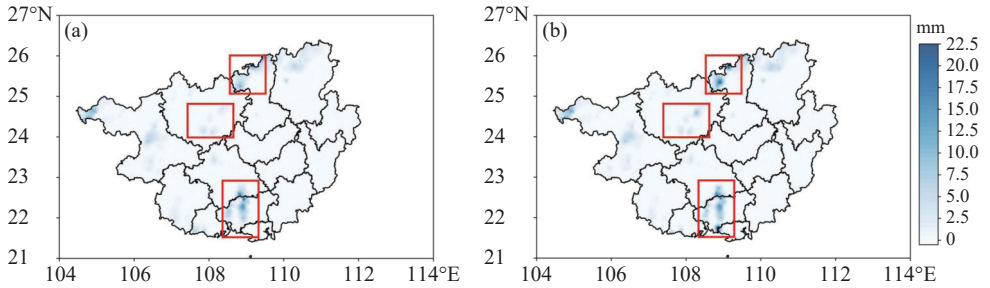


图 10 基于 2015 年 (a) 和 2025 年 (b) 观测站网插值的 2025 年 6 月 22 日 08 时小时降雨量对比
(红框表示降水刻画能力显著增强区域)

Fig. 10 Comparison of rainfall at 08:00 on June 22, 2025 based on interpolation results of observation station networks in (a) 2015 and (b) 2025 (The red box indicates the area where precipitation characterization ability is significantly enhanced)

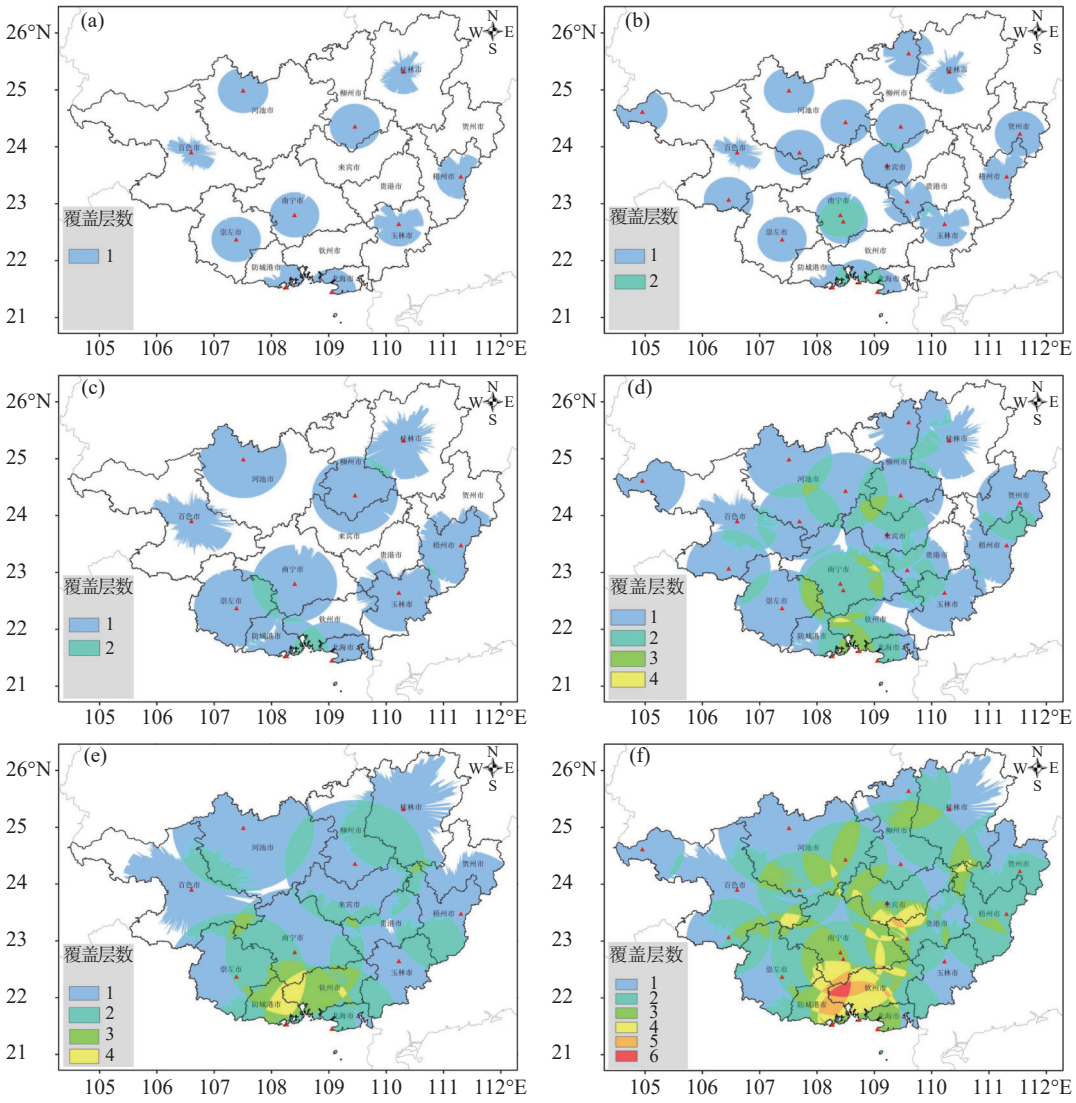


图 11 广西天气雷达 2015 (a, c, e) 和 2025 (b, d, f) 年馈源以上 0.5 km (a, b)、1 km (c, d)、2 km (e, f) 等射束高度组网拼图覆盖层数分布

Fig. 11 Distribution of coverage layers in the mosaic of beam heights of (a, b) 0.5 km, (c, d) 1 km, and (e, f) 2 km above the feed source of Guangxi weather radar in (a, c, e) 2015 and (b, d, f) 2025

50.05%、88.12%。2025 年广西天气雷达观测覆盖率得到显著提升。由馈源以上高度等射束高度组网拼图覆盖层数分布情况 (图 11) 可知: 在 0.5 km 高度 (图 11a、b) 时, 广西天气雷达覆盖存在大量盲区, 低空覆盖程度较弱, 相对于 2015 年 (图 11a), 2025 年 (图 11b) 主要提升在桂北区域 (百色、河池、桂林等市); 1 km 高度 (图 11c、d) 时, 2025 年 (图 11d) 整体覆盖率提升了 30%, 南宁、钦州、北海、防城港区域雷达覆盖层数基本在 1 层以上, 但在桂林、百色地区仍存在大片盲区, 部分地区甚至没有雷达覆盖; 2 km 高度 (图 11e、f) 的情况显示, 北纬 23°以南的区域实现了全覆盖, 尤其南宁、钦州、北海、防城港区域基本存在 2 层以上的雷达覆盖, 在桂林东北部、百色北部仍存在一些空白区域, 主要原因是百色、河池、桂林一带山区较多, 遮挡环境较为复杂。总体表明, 广西现有雷达网覆盖依然存在不少盲区, 地形海拔高的区域较为明显, 桂南区域雷达覆盖情况相对较好。

3 结果与讨论

本文利用广西地面气象观测站及雷达气象站网、DEM 及空间地理信息等数据, 采用 GIS 泰森多边形法、观测系统能力分析和审查工具 (OSCAR) 指标及天气雷达组网覆盖评估算法, 通过计算站点控制面积、不同要素观测的水平分辨率、网格覆盖情况以及天气雷达组网对地覆盖率, 评估了自 2015 年以来全面推进气象现代化建设 10 a (2015—2025) 以来的广西多要素气象观测站网覆盖能力, 主要得到了以下结论:

(1) 与 2015 年相比, 2025 年广西地面观测站点的控制面积和与最邻近站点的平均站间距明显减小, 站点的数据空间代表性明显提高, 大城市的观测站点更为集中。各观测要素中, 气压和相对湿度的水平分辨率提升最大。各地市中玉林、北海、贵港、柳州的站网分布更为密集, 贺州、桂林、来宾的站网分布较为稀疏。各观测要素的水平分辨率均能够达到 OSCAR 的门限值指标, 而距离短临预报和高分辨率数值预报的突破值指标仍有较大差距。

(2) 对于站点的网格分布情况, 使用高分辨率数值预报门限值指标对广西的地面观测站网进行网格分割时, 广西的地面观测站网分布已覆盖大部分网格地区, 尤其在大城市及沿海地区站点分布较为密集; 而使用突破值指标进行网格分割时, 地面观测站网仍然存在较多的空白区。

(3) 2025 年广西天气雷达等射束组网拼图在馈源以上 0.5 km、1 km、2 km 高度的覆盖率分别提升至 36.90%、80.64%、96.88%, 较 2015 年 (18.05%、50.05%、88.12%) 显著改善, 尤其在桂北 (百色、河池、桂林) 低空探测能力增强。然而, 0.5 km 高度仍存在大量盲区, 低空覆盖较弱; 1 km 高度下桂南 (南宁、钦州、北海等) 覆盖达 1 层以上, 但桂林、百色部分区域仍无覆盖; 2 km 高度北纬 23°以南实现全覆盖, 桂南多区域达 2 层以上覆盖, 而桂林东北部、百色北部因地形遮挡仍有空白。总体而言, 广西雷达网在桂南地区覆盖较好, 适用于定量降水估测, 而地形复杂的山区雷达探测受限。

本文首次系统评估了广西气象观测站网布局现状, 填补了该领域研究空白。研究聚焦观测空白区填补效果, 但存在以下局限: 1) 对于站网布局的合理性优化还需要更多结合预报服务需求和灾害天气影响区域分析; 2) 仅评估常规要素和天气雷达, 评估的精细化程度仍然有比较大的提升空间。未来需对单降水量的站点进行升级, 增加站点的观测要素, 并根据预报及气象服务需求, 在大城市、公路航道枢纽及重大工程区域继续加密建设多观测要素的气象观测站点。同时, 应对服役时间较长的设备进行定期评估, 随时掌握全区气象设备自动化观测能力情况。

参考文献 (References):

邓志,刘文文,黄美金.1999.雷达等射束高度图制作方法[J].气象,25(11): 47−49. Deng Z, Liu W W, Huang M J. 1999. Radar constant-altitude plan position indicator mapping method [J]. Meteorology,25(11): 47−49 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.1999.11.011

广西壮族自治区人民政府.广西壮族自治区第一次全国地理国情普查公 报[EB/OL]. (2017-10-17)[2025-05-24]. https://dnr.gxzf.gov.cn/zfxxgk/fdzdgknr/tjfx/zhtj/t16118943.shtml

广西壮族自治区统计局,国家统计局广西调查总队.2023.广西统计年鉴2023[M]. 北京: 中国统计出版社. Guangxi Zhuang Autonomous Region Bureau of Statistics and Survey Office of the National Bureau of Statistics in Guangxi,Guangxi Statistical Yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press

李俊,杜钧,许建玉,等.2020.一次特大暴雨过程高分辨率集合预报试验的检验和评估[J].暴雨灾害,39(2):176−184. Li J, Du J, Xu J Y, et al. 2020. The assessment and verification of high-resolution ensemble forecast for a heavy rainstorm [J]. Torrential Rain and Disasters,39(2): 176−184 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2020.02.008

李明凤,闵超,张阿思,等.2018.基于 SRTM 数据的广东新一代天气雷达覆盖研究[J].地球信息科学学报,20(8):1201−1208. Li M F, Min C, Zhang A S, et al. 2018. Analysis of cinrad coverage in Guangdong province based on SRTM data [J]. Journal of Geo-information Science, 20(8):1201−1208 (in Chinese). doi:10.12082/dqxxkx.2018.180121

连晨方,刘德强,张深寿,等. 2024.基于 3 种方法的福建天气雷达探测环境评估与分析[J]. 山地气象学报,48(3): 40-48. Lian C F, Liu D Q, Zhang S S, et al. 2024. Assessing cinrad radar detection environment in Fujian Province by three methods [J]. Journal of Mountain Meteorology. 48(3):40-48 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1003−6598.2024.

03.005

廖胜石,卓健,罗建英,等.2022.广西汛期极端短时强降水特征分析[J].暴雨灾害,41(3):308−314. Liao S S, Zhuo J, Luo J Y, et al. 2022. Analysis of characteristics of the extreme short-time heavy rainfall in Guangxi in rain season [J]. Torrential Rain and Disasters,41(3):308−314 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.03.007

莫建飞,黄思琦,钟仕全,等.2017.基于 GIS 的精细化广西台风灾害承灾体脆弱性评价[J].暴雨灾害,36(2):177−181. MO J F, Huang S Q, Zhong S Q, et al. 2017. GIS-based elaborate evaluation of typhoon disaster vulnerability for the hazard bearing bodies in Guangxi [J]. Torrential Rain and Disasters,36(2):177−181 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2017.02.011

孙晨,汪方,周月华,等.2022. CWRF 模式对长江流域极端降水气候事件的模拟能力评估[J].气候变化研究进展,18(1):44−57. Sun C, Wang F, Zhou Y H, et al. 2022. An assessment on extreme precipitation events in Yangtze River basin as simulated by CWRF regional climate model [J]. Climate Change Research,18(1):44−57 (in Chinese). doi:10.12006/j.issn.1673−1719.2021.132

孙大利,刘晓阳,王久珂,等.2015.雨量站网测量精度的评估[J].气象科技进展,5(5):50−54. Sun D L, Liu X Y, Wang J K, et al. 2015. Research on the measurement precision of the raingauge networks [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,5(5):50−54 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2015.05.006

谭龙.2020.广西综合气象观测网发展历程回顾[J].气象研究与应用,41(4):94−99. Tan L. 2020. Review on the development of Guangxi integrated meteorological observation network [J]. Journal of Meteorological Research and Application,41(4):94−99 (in Chinese). doi:10.19849/j.cnki.CN45−1356/P.2020.4.14

王建凯,陈汝龙,侯威,等.2022.中国地面气象观测业务的发展历程与展望[J].气象科技进展,12(5):10−18. Wang J K, Chen R L, Hou W, et al. 2022. Development and prospect of surface meteorological observations in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,12(5):10−18 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2022.05.003

王曙东,裴翀,郭志梅,等.2011.基于 SRTM 数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估[J].气候与环境研究,16(4):459−468. Wang S D, Pei C, Guo Z M, et al. 2011. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data [J]. Climatic and Environmental Research,16(4):459−468 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2011.04.06

吴薇,黄晓龙,周春花,等.2023.四川省地面雨量站站网现状分析[J].气象科技,51(5):639−647. Wu W, Huang X L, Zhou C H, et al. 2023. Analysis of status of precipitation station networkin sichuan province [J]. Meteorological Science and Technology,51(5):639−647 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671−6345.20220267

许小峰.世界气象组织观测系统的需求与评估[EB/OL]. (2022-04-12)[2025-05-24]. Xu X F. Requirements and evaluation of the World Meteorological Organization observation system. [EB/OL]. (2022-04-12)[2025-05-24]. https://blog.sina.com.cn/s/blog_53046c410102z-njs.html

杨洪平,张沛源,程明虎,等.2009.多普勒天气雷达组网拼图有效数据区域分析[J].应用气象学报,20(1):47−55. Yang H P, Zhang P Y, Cheng M H, et al. 2009. The valid mosaic data region of the CINRAD Network [J]. Journal of Applied Meteorological Science,20(1):47−55 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20090106

张玉洁,于振波,李恒昶,等.2024.山东地面气象观测站网布局评估[J].海洋气象学报,44(3):95−106. Zhang Y J, Yu Z B, Li H C, et al. 2024. Evaluation of surface meteorological observing station networks in Shandong [J]. Journal of Marine Meteorology,44(3):95−106 (in Chinese). doi:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20230728001

赵瑞霞,李伟,王玉彬,等.2007.空间结构函数在北京地区气象观测站网设计中的应用[J].应用气象学报,18(1):94−101. Zhao R X, Li W, Wang Y B, et al. 2007. The Application of spatial structure functions to the design of weather station networks in Beijing Area [J]. Journal of Applied Meteorological Science,18(1):94−101 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20070114

钟利华,李勇,李仲怡,等.2018.近 45 a 西江流域汛期暴雨面雨量时空分布特征[J].暴雨灾害,37(1):24−31. Zhong L H, Li Y, Li Z Y, et al. 2018. The temporal and spatial distribution characteristics of rainstorm areal rainfal over Xijiang river basin in the past 45 years [J]. Torrential Rain and Disasters,37(1):24−31 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.01.004

朱丹,谷军霞,师春香,等.2018.新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J].气象,44(11):1434−1444. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al. 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design [J]. Meteorological Monthly,44(11):1434−1444 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2018.11.006

朱浩,程向阳,田红,等.2024.基于 GIS 的安徽省雷电致灾危险性评估与区划[J].暴雨灾害,43(6):733−740. Zhu H, Cheng X Y, Tian H, et al. 2024. Assessment and zoning of lightning disaster-causing hazards in Anhui Province based on GIS [J]. Torrential Rain and Disasters,43(6):733−740 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−186

朱求安,张万昌,赵登忠. 2005.基于 PRISM 和泰森多边形的地形要素日降水量空间插值研究[J]. 地理科学,25(2): 233-238. Zhu Q A, Zhang W C, Zhao D Z, et al. 2005. Topography-based spatial daily precipitation interpolation by means of PRISM and thiessen polygon analysis [J]. Geographical science,25(2):233-238 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−0690.2005.02.017

(责任编辑 张 文)