

# 基于指数雨胞雨衰模型的微波链路雨强反演方法

杨涛<sup>1,2,3,4</sup>, 沈玉芳<sup>1,2</sup>, 陈渝青<sup>1,2</sup>, 叶文杰<sup>1,2</sup>, 陈曦<sup>3</sup>, 张玉松<sup>5</sup>, 涂杰<sup>5</sup>, 史晓薇<sup>5</sup>

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098;  
3. 河海大学水科学研究院, 江苏南京 210098; 4. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏南京 210098;  
5. 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443000)

**摘要:** 为了提高微波链路雨强反演的准确性, 基于指数雨胞雨衰模型提出了一种新的微波链路雨强反演方法, 并利用瑞典哥德堡市 21 条微波链路和距链路 2 km 范围内 8 个雨量站的实测数据, 将指数雨胞雨衰模型与传统幂律模型和 ITU-R P. 530-16 雨衰模型进行了雨强反演对比。结果表明: 指数雨胞雨衰模型在雨强反演方面表现优异, 决定系数和纳什效率系数均为 0.78, 平均绝对误差为 0.39 mm/h, 均方根误差为 0.68 mm/h; 与幂律模型相比, 指数雨胞雨衰模型在准确度和稳定性方面有显著提升, 与 ITU-R P. 530-16 雨衰模型相比也有所改进, 特别是在短链路和中小雨的雨强反演中表现出明显的优势, 对于进一步提升微波链路雨强反演精度和改善降水监测效果具有重要价值。

**关键词:** 微波雨衰; 指数雨胞雨衰模型; 微波链路; 雨强反演; 哥德堡市

中图分类号: P412.13

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2024)05-0011-07

**A microwave link rain intensity inversion method based on exponential rain cell rain attenuation model//YANG Tao<sup>1,2,3,4</sup>, SHEN Yufang<sup>1,2</sup>, CHEN Yuqing<sup>1,2</sup>, YE Wenjie<sup>1,2</sup>, CHEN Xi<sup>3</sup>, ZHANG Yusong<sup>5</sup>, TU Jie<sup>5</sup>, SHI Xiaowei<sup>5</sup>**  
(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Institute of Water Science and Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 4. *Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 5. *China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China*)

**Abstract:** A new microwave link rain intensity inversion method was proposed based on the exponential rain cell rain attenuation model to improve the accuracy of rain intensity inversion. Using measured data from 21 microwave links and 8 rainfall stations within 2 km from the links in Gothenburg, Sweden, rain intensity inversion results of the exponential rain cell rain attenuation model were compared with those of the traditional power-law model and ITU-R P. 530-16 rain attenuation model. The results show that the exponential rain cell rain attenuation model performed excellently in rain intensity inversion, with both the determination coefficient and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient being 0.78, the mean absolute error being 0.39mm/h, and the root-mean-square error being 0.68 mm/h. The exponential rain cell rain attenuation model has a significant improvement in accuracy and stability compared to the power-law model, and also has an improvement compared to the ITU-R P. 530-16 rain attenuation model, especially in rain intensity inversion of short links and small to medium rainfalls. It is also demonstrated that the exponential rain cell rain attenuation model is valuable for further enhancing the accuracy of microwave link rain intensity inversion and improving the effectiveness of precipitation monitoring.

**Key words:** microwave rain attenuation; exponential rain cell rain attenuation model; microwave links; rain intensity inversion; Gothenburg

近年来,在气候变化与人类活动共同作用下,突发性强降雨事件频发,降雨局地变异性增强<sup>[1-3]</sup>,极端降雨事件往往会诱发洪涝、滑坡等自然灾害,严重威胁人民生命财产安全<sup>[4-5]</sup>。雨量计、气象卫星、天气雷达等传统测雨技术为防洪减灾提供了关键数

据,但由于观测频次、覆盖范围、空间分辨率和精度等方面的局限,难以准确捕捉局地突发性暴雨事件<sup>[6-9]</sup>。无线微波测雨技术利用微波信号在近地大气传播过程中的衰减信息来监测降雨过程,能够捕捉复杂地形条件下局地降水信息,具有时空分辨率

基金项目:国家自然科学基金项目(51879068);国家重点研发计划项目(2018YFC0407906)

作者简介:杨涛(1974—),男,教授,博士,主要从事水文多要素监测和预报研究。E-mail:tao.yang@hhu.edu.cn

通信作者:沈玉芳(2000—),女,硕士研究生,主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。E-mail:221301010083@hhu.edu.cn

高、建设成本低等优点,开辟了降雨监测的新途径<sup>[10-11]</sup>。中国大部分城市中已构建了比较完善的微波通信基站,且在南昌、南京和江阴等地已建立相关应用研究示范区,无线微波测雨技术展现出巨大的研究及应用潜力。

Messer 等<sup>[12]</sup>2006 年首次提出微波测雨技术,将通信行业的雨衰模型反向求解,实现了雨衰到雨强的转化。从描述降雨空间分布的随机性与不均匀性出发,可采用等效路径长度法<sup>[13]</sup>、路径平均降雨率法<sup>[14]</sup>和雨胞法<sup>[15]</sup>建立雨衰模型。等效路径长度法假设降雨在微波传输路径上均匀分布<sup>[16]</sup>;路径平均降雨率法通过整个路径的平均降雨强度估算雨衰,简化了降雨的空间变异性<sup>[17]</sup>。与两者不同的是,雨胞法考虑了降雨的空间不均匀性,能够更准确地预测路径上不同位置的雨衰情况<sup>[15]</sup>。目前,幂律模型在微波链路雨强反演中使用最为广泛<sup>[18]</sup>,该模型属于路径平均降雨率法,公式简单且有明确的物理意义,但经常出现对雨强的显著高估问题,严重影响了微波链路雨强反演的准确性。为解决雨强高估问题,陈渝青等<sup>[19]</sup>采用 ITU-R P. 530-16 雨衰模型<sup>[20]</sup>进行雨强反演,发现其在短距离链路上的反演效果优于传统幂律模型。然而,该模型基于柱状雨胞构建,认为雨胞内任意一点的雨强均相等,这往往与实际降雨情况不符。2018 年,卢昌胜等<sup>[21]</sup>提出了基于指数雨胞分布的雨衰模型,该模型更符合真实的雨胞分布,且在物理基础和精度上均有所提高。由此推断,采用指数雨胞雨衰模型进行雨强反演或能成为微波链路精确测雨的有效方法。为此,本文提出了基于指数雨胞雨衰模型的微波链路雨强反演方法,利用瑞典哥德堡市 21 条微波链路实测数据进行雨强反演并与幂律模型、ITU-R P. 530-16 雨衰模型反演结果进行对比分析,以验证指数雨胞雨衰模型的优越性。

## 1 研究方法

### 1.1 指数雨胞

指数雨胞是雨强在微波传输路径上服从指数分布的雨胞,历史观测结果表明真实雨胞分布与指数雨胞模型有较好的一致性<sup>[22]</sup>。如图 1 所示,假设电波传播路径上存在一个指数雨胞,雨胞中降雨率分布可表示为

$$R = R_{\max} \exp(-b|l - L_D|) \quad (1)$$

其中  $R_{\max} = R_0 \exp(bL_D)$   
式中: $R$  为  $l$  处的降雨率; $R_{\max}$  为雨胞中最大降雨率; $L_D$  为  $R_{\max}$  出现的位置; $b$  为降雨率空间分布的指数变化率; $R_0$  为观测点的降雨率; $d$  为微波链路的

传输长度。

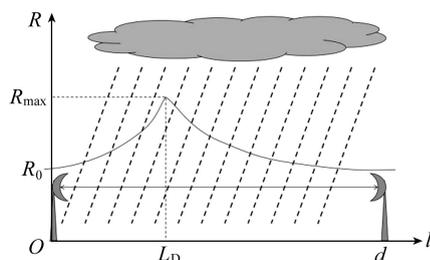


图 1 地面视距链路中指数雨胞分布  
Fig. 1 Distribution of exponential rain cells in ground line-of-sight links

### 1.2 指数雨胞雨衰模型

指数雨胞雨衰模型将沿微波传播路径的雨强分布视为符合指数雨胞分布,其形式为

$$A_p = k(r_p R_p)^\alpha L \quad (2)$$

式中: $A_p$ 、 $r_p$ 、 $R_p$  分别为对应于时间概率  $p$  的雨衰减、降雨率调整因子和降雨率; $k$ 、 $\alpha$  为与频率、仰角、极化角有关的参数,可根据文献<sup>[18]</sup>确定; $L$  为路径长度。

根据 ITU-R (International Telecommunication Union-Radiocommunication Sector) 地面视距链路雨衰减数据库数据<sup>[23]</sup>,降雨率调整因子随降雨率和路径长度的增大而减小,随时间概率的增大而增大,得到降雨率调整因子:

$$r_p = a_1 R_p^{a_2 + a_3/L} \left( 1 + \frac{a_4 p^{a_5}}{1 + a_6 L} \right) \quad (3)$$

式中  $a_1 \sim a_6$  为系数。

利用跨世代异物种重组大变异算法,结合模拟退火算法<sup>[24]</sup>以及 ITU-R 地面视距链路雨衰减数据库数据<sup>[23]</sup>对系数  $a_1 \sim a_6$  进行优化、回归,得到均方根误差最小时对应的参数<sup>[21]</sup>。由此获得地面视距链路雨衰减预测模型中的降雨率调整因子计算公式:

$$r_p = 0.059 R_p^{-0.12 + 0.22/L} \left( 1 + \frac{32.9 p^{0.12}}{1 + 0.017L} \right) \quad (4)$$

对式(2)进行反向求解,由路径实际雨衰减  $A_p$  得出对应的时间概率  $p$  和反演雨强  $R_p$ 。

### 1.3 评价指标

本文将每条链路的反演雨强与最邻近雨量站实测雨强进行比较,选取决定系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NSE)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)作为评价模型反演效果的指标。决定系数取值范围为 $[0, 1]$ ,越接近 1,表示模型对数据拟合效果越好;NSE 取值范围为 $(-\infty, 1]$ ,越接近 1,表示模型质量和可信度越高<sup>[25]</sup>;MAE 与 RMSE 越小,表示模型的预测越准确。

## 2 实例验证

### 2.1 研究区概况与数据资料

#### 2.1.1 研究区概况

选择瑞典哥德堡市作为应用研究区。哥德堡市(57°42'N、11°58'E)位于瑞典西海岸卡特加特海峡,面积为722 km<sup>2</sup>。作为瑞典的第二大城市及最大港口,哥德堡市拥有广泛且先进的通信基础设施,大量使用微波链路进行数据传输,为微波测雨技术的应用提供了极大便利。哥德堡市属海洋性气候,降水频繁,为微波测雨研究积累了丰富的监测数据。

#### 2.1.2 数据资料

本文采用的数据资料来自瑞典爱立信公司(Ericsson)和哥德堡市当地雨量站,共选取了哥德堡市21条商用无线微波链路及距链路2 km范围内的8个雨量站,链路和雨量站分布如图2所示。链路包括10条短距离链路(0~1 km)、6条中长距离链路(1~2 km)和5条长距离链路(>2 km),工作频率为28~40 GHz,采样间隔为10 s。雨量站中有5个站(Jarn、Torp、Bergsj、Chalm、Barl)测量精度为0.1 mm,3个站(Drakeg、Lbom、Askim)测量精度为0.2 mm,数据采样时间间隔为1 min。雨量站实测降雨过程如图3所示,研究时段为2015-06-01T00:00:00至2015-08-31T23:59:00,降雨日数较多,其中两次降雨过程的雨峰雨强超过10 mm/h。为了验证指数雨胞雨衰模型在不同雨强条件下的反演效果,选取期

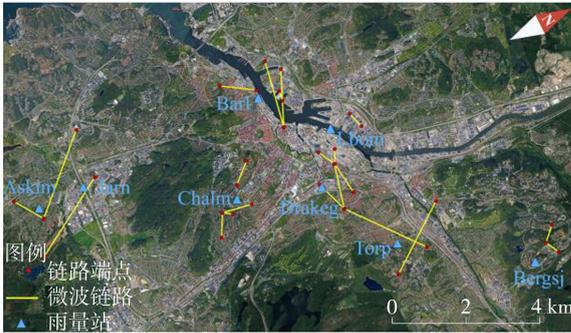


图2 链路和雨量站分布

Fig. 2 Distribution of links and rainfall stations

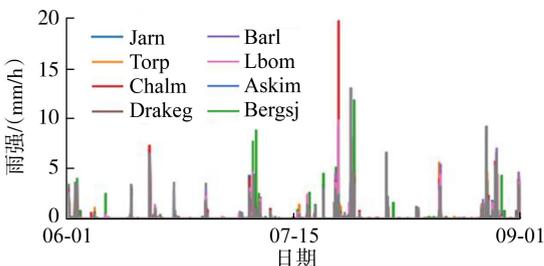


图3 2015年6月1日至8月31日各雨量站降雨过程

Fig. 3 Rainfall processes at rainfall stations from Jun. 1 to Aug. 31, 2015

间11个降雨过程,雨强范围为0~20 mm/h。

#### 2.1.3 数据预处理

在反演雨强之前,采取3个步骤对原始微波衰减数据进行预处理,分别为判别干湿期、扣除微波信号基础衰减、扣除湿天线衰减,将原始微波衰减信号转换为降雨衰减。

a. 采用辅助数据法进行干湿期判别。在几种传统监测手段中,雨量站具有最准确的地面监测数据,通过参考与链路最近的雨量站实测资料,可以有效指导链路数据的干湿期判别。考虑到当地雨量站采用翻斗式雨量计,数据记录有延迟性,定义湿期为从雨量站监测到降雨开始时刻之前15 min起,直至降雨结束时刻之后5 min。对于反演模型研究,需要尽可能保证微波数据中的雨衰不被杂波干扰,尽管已存在很多自动判别方法,但这些方法不能完全保证判别精度,因此基于实际降雨数据判别干湿期更为合理。

b. 通过划分干期和湿期进行基础衰减的实时估计<sup>[26]</sup>。假设在整个降雨期间,大气环境与降雨发生前一致,因此基础衰减通常由降雨发生前一段时间的干期衰减确定。据此文中的基础衰减由降雨开始时刻前10 d内干期微波信号衰减值的中位数确定。

c. 湿天线衰减采用Schleiss等<sup>[27]</sup>提出的动态湿天线衰模型确定。该模型依据天线湿润过程中微波衰减的统计变化规律构建了3个关键特征:①设定一个最大衰减 $W_{\max}$ ,代表天线完全湿润时的衰减;②自降雨开始,湿天线衰减从0开始以指数规律增长至 $W_{\max}$ 后达到稳定水平;③降雨停止后,湿天线衰减以指数规律减少到0。本文 $W_{\max}$ 值设为2.3 dB,润湿时间(即WAA达到其最大值的95%所需的时间)设为15 min。

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 模型性能比较

将指数雨胞雨衰模型与传统幂律模型<sup>[18]</sup>和ITU-R P. 530-16雨衰模型<sup>[20]</sup>进行雨强反演对比,21条链路中11场降雨雨强的反演结果比较如图4所示。由图4可见,指数雨胞雨衰模型的雨强反演效果总体优于幂律模型和ITU-R P. 530-16雨衰模型。指数雨胞雨衰模型与幂律模型相比有显著提升,相较于ITU-R P. 530-16雨衰模型也有所改进。具体来说,在11场降雨雨强反演中,指数雨胞雨衰模型反演结果的 $R^2$ 和NSE的中位数均最高,而ITU-R P. 530-16雨衰模型略低于指数雨胞雨衰模型,幂律模型最低。同样,指数雨胞雨衰模型反演结果的MAE和RMSE的中位数均最低,ITU-R P. 530-16雨衰模型略高于指数雨胞雨衰模型,幂律模型最高。在反演稳定性上,指数雨胞雨衰模型较其他两

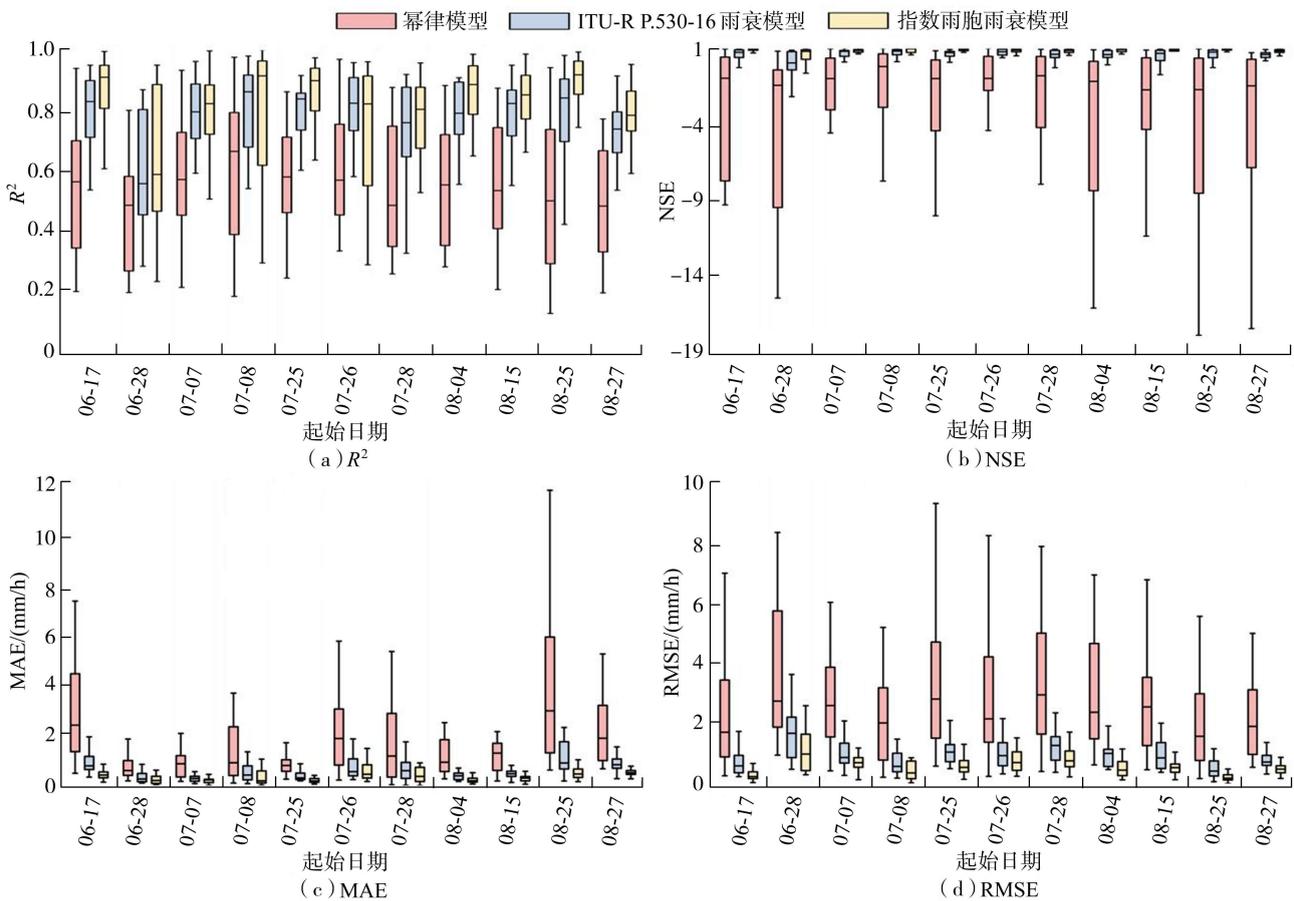


图 4 21 条链路中 11 场降雨雨强的反演结果比较

Fig. 4 Comparison of rain intensity inversion results of 11 rainfall events in 21 links

种模型也有较大提升。指数雨胞雨衰模型雨强反演结果评价指标箱体较短,反演结果的方差较小,数据更集中。这表明在考虑了降雨空间分布随机性与不均匀性,假设微波信号传播路径上降雨率服从指数分布的情况下,指数雨胞雨衰模型反演效果更为准确和稳定。

表 1 进一步表明指数雨胞雨衰模型在各项性能指标上的优势。具体来说,指数雨胞雨衰模型雨强反演结果较幂律模型, $R^2$  提升了 41.8%,NSE 提升了 119.1%,MAE 降低了 78.8%,RMSE 降低了 75.5%;较 ITU-R P.530-16 雨衰模型, $R^2$  提升了 2.6%,NSE 提升了 77.3%,MAE 降低了 40.9%,RMSE 降低了 34.6%。

表 1 21 条链路中 11 场降雨雨强反演结果评价指标平均值

Table 1 Mean values of evaluation indicators for rain intensity inversion results of 11 rainfall events in 21 links

模型	$R^2$	NSE	MAE/(mm/h)	RMSE/(mm/h)
幂律模型	0.55	-4.08	1.84	2.78
ITU-R P.530-16 雨衰模型	0.76	0.44	0.66	1.04
指数雨胞雨衰模型	0.78	0.78	0.39	0.68

为了更直观地展示模型反演效果,本文从 21 条链路中选取了编号 499 的链路进行详细分析。该链

路位于 11 场降雨事件的降雨区域内,可以有效地展示模型在不同降雨条件下的响应和准确度。如图 5 所示,指数雨胞雨衰模型反演结果与雨量站实测数据过程相似度很高,显示出较好的拟合效果,ITU-R P.530-16 雨衰模型次之,幂律模型效果最差,且 ITU-R P.530-16 雨衰模型和幂律模型都存在明显的估计值偏高现象,尤其在雨峰处更为突出。

### 2.2.2 模型雨强适应性比较

为验证指数雨胞雨衰模型在不同雨强条件下的反演效果,根据雨强不同峰值,将 11 场降雨按照小雨(1.5~4.0 mm/h)、中雨(>4.0~6.5 mm/h)和大雨(>6.5 mm/h)划分为 3 类,并分析比较 3 种模型对不同雨强的适应性。

表 2 为不同雨强下指数雨胞雨衰模型评价指标的变化情况。可以看出,与幂律模型反演结果相比,指数雨胞雨衰模型在所有雨强等级下的反演效果都有显著提升,尤其在中小雨中提升更为明显。其中, $R^2$  提升率在小雨中最大、中雨中次之、大雨中最小,且在小雨和中雨中明显大于其大雨中的值;NSE 提升率在中雨中最大、小雨中次之、大雨中最小;MAE 下降率在中雨中最大、大雨中次之、小雨中最小;RMSE 下降率在中雨中最大、小雨中次之、大雨中最

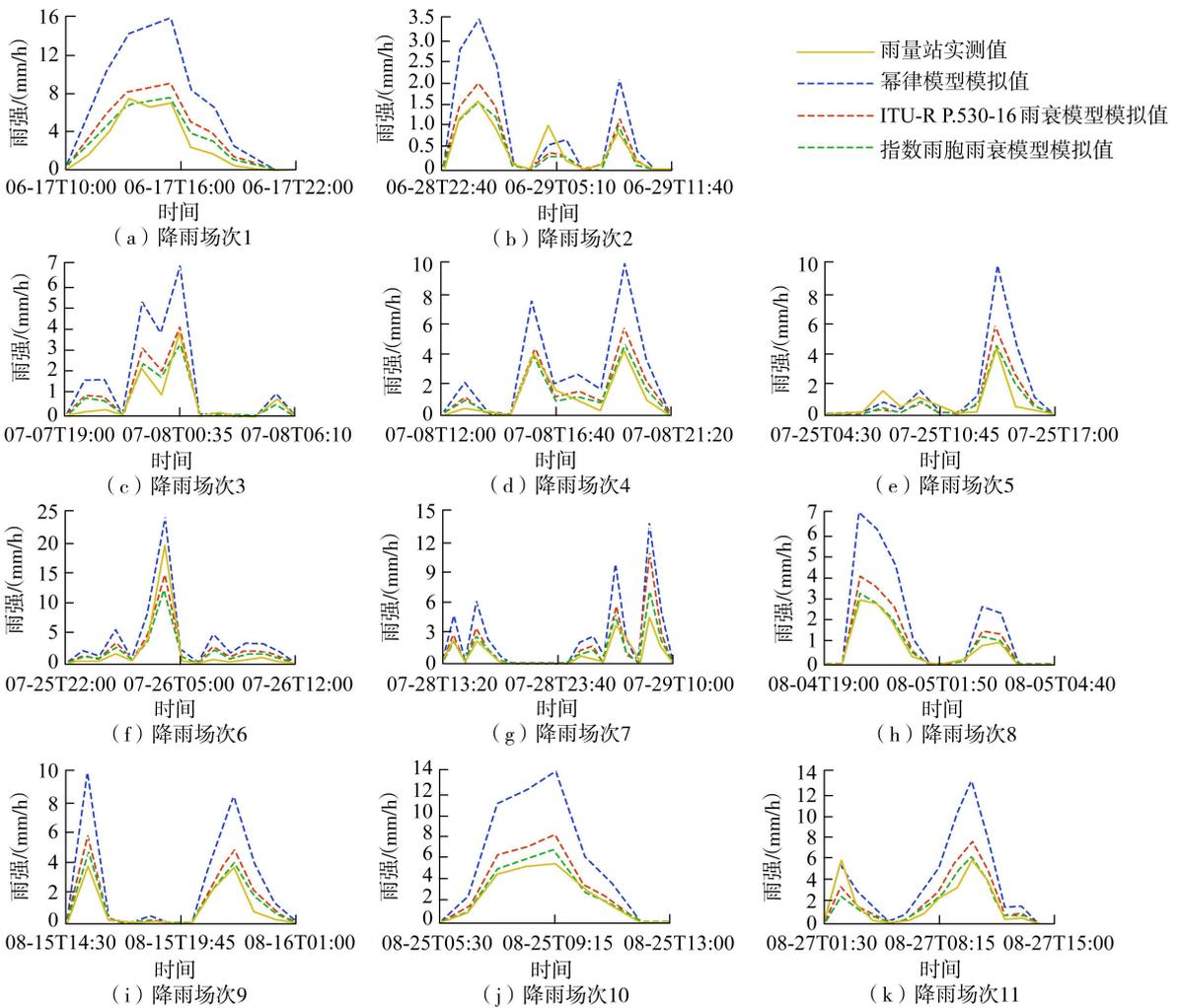


图 5 编号 499 链路的 11 场降雨雨强反演结果

Fig. 5 Rain intensity inversions results of 11 rainfall events in link 499

表 2 不同雨强下指数雨胞雨衰模型评价指标的变化情况

Table 2 Variation of each indicator of exponential rain cell rain attenuation model under different rain intensities

模型	$R^2$ 提升率/%			NSE 提升率/%			MAE 下降率/%			RMSE 下降率/%		
	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨	小雨	中雨	大雨
幂律模型	46.3	44.6	29.1	118.4	119.3	118.2	77.5	80.3	79.4	76.0	78.8	74.0
ITU-R P. 530-16 雨衰模型	3.9	3.8	-5.3	87.5	60.8	75.6	37.5	43.2	40.9	35.6	39.5	29.7

小, NSE、MAE 和 RMSE 整体在小雨和中雨中的值与大雨中差别不大。

与 ITU-R P. 530-16 雨衰模型相比, 指数雨胞雨衰模型在中小雨中反演效果提升较大。其中,  $R^2$  提升率在小雨中最大、中雨中次之、大雨中最小, 且指数雨胞雨衰模型反演结果的  $R^2$  在大雨中低于 ITU-R P. 530-16 雨衰模型; NSE 提升率在小雨中最大、大雨中次之、中雨中最小; MAE 下降率在中雨中最大、大雨中次之、小雨中最小, 但在不同雨强级别下差异不大; RMSE 下降率在中雨中最大、小雨中次之、大雨中最小, 且在小雨和中雨中下降较明显。

### 2.2.3 模型链路适应性比较

为验证指数雨胞雨衰模型在不同链路长短下的

反演效果, 本文根据链路长度的不同, 将 21 条微波链路分为短链路 (0~1 km)、中长链路 (>1~2 km)、长链路 (>2 km) 3 类, 并分析比较 3 种模型对每类链路的适应性。

不同链路长度下指数雨胞雨衰模型评价指标变化情况如表 3 所示。与幂律模型相比, 指数雨胞雨衰模型在不同链路长度下反演效果都有显著提升, 尤其在短链路中提升最为明显。其中,  $R^2$  提升率在短链路中最大、中长链路中次之、长链路中最小, 且在短链路中的提升非常明显; NSE 提升率在中长链路中最大、短链路中次之、长链路中最小; MAE 和 RMSE 下降率在短链路中最大、中长链路中次之、长链路中最小。

表3 不同链路长度下指数雨胞雨衰模型评价指标变化情况

Table 3 Variation of each indicator of exponential rain cell rain attenuation model under different link lengths

模型	$R^2$ 提升率/%			NSE 提升率/%			MAE 下降率/%			RMSE 下降率/%		
	短链路	中长链路	长链路	短链路	中长链路	长链路	短链路	中长链路	长链路	短链路	中长链路	长链路
幂律模型	83.6	36.6	4.1	108.7	226.0	94.8	84.0	69.7	51.0	81.9	67.3	44.9
ITU-R P. 530-16 雨衰模型	0.8	6.4	1.0	142.0	36.4	57.3	41.9	35.0	46.2	34.8	31.8	39.6

与 ITU-R P. 530-16 雨衰模型相比,指数雨胞雨衰模型在短链路中反演效果提升较为明显。其中, $R^2$  提升率在中长链路最大、长链路中次之、短链路中最小,但在短链路和长链路中差别不大;NSE 提升率在短链路中最大、长链路中次之、中长链路中最小,且在短链路中提升非常明显;MAE 和 RMSE 下降率在长链路中最大、短链路中次之、中长链路最小,但在不同长度链路中差别不大。

### 3 结 语

本文基于指数雨胞雨衰模型提出了一种新的微波链路雨强反演方法,并应用于瑞典哥德堡市。实例验证结果表明,传统幂律模型忽略了降雨空间分布的随机性,ITU-R P. 530-16 雨衰模型所采用的柱状雨胞分布假设与实际观测不符,导致反演值与实测值差异较大,出现明显的高估现象。指数雨胞雨衰模型考虑了降雨空间分布规律,且指数雨胞更符合真实雨胞分布,相比传统幂律模型,雨强反演的准确度和稳定性有显著提升,与 ITU-R P. 530-16 雨衰模型相比也有所改进,特别是在中小雨和短距离链路中有更强的适用性。

指数雨胞雨衰模型在处理大雨或暴雨事件时的反演精度仍有待提高,后续将深入探索极端降雨空间分布物理规律,以提升模型对极端降雨事件的适用能力。本文指数雨胞雨衰模型的降雨率调整因子采用了固定参数系数,未来将针对不同地域和情景进行参数率定,以进一步提升模型精度及泛化能力。此外,本文所用的微波数据覆盖范围较小,且时序较短,未来将致力于验证本文结论在大面积区域及长时序数据中的普适性。指数雨胞雨衰模型使微波测雨技术实现了更精准的降雨监测,为水文气象领域提供了一种新的降雨监测数据源,未来将通过融合雷达、卫星遥感和雨量站数据,重构高分辨率雨量场,提升降雨监测及预报精度,为各类洪涝灾害预警预报提供更加精准的数据支撑。

### 参考文献:

[1] 刘家宏, 骆卓然, 张永祥, 等. 城市化对河南省极端降水空间分布的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 100-105. (LIU Jiahong, LUO Zhuoran, ZHANG Yongxiang, et

al. Influence of urbanization on spatial distribution of extreme precipitation in Henan Province [J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (1): 100-105. (in Chinese))

[2] 黄国如, 李梅萍. 基于微观交通仿真的城市内涝对道路交通的影响评估研究进展[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 69-78. (HUANG Guoru, LI Meiping. Research progress on impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on micro traffic simulation [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 69-78. (in Chinese))

[3] 任宏昌, 张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 1-9. (REN Hongchang, ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 1-9. (in Chinese))

[4] 王晟, 张珂, 晁丽君, 等. 基于集合模拟的汉江上游洪水与滑坡灾害风险评估[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 70-76. (WANG Sheng, ZHANG Ke, CHAO Lijun, et al. Assessment of flood and landslide hazard risk based on ensemble simulation over upstream of the Han River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 70-76. (in Chinese))

[5] 谢志高, 贾文豪, 王霞雨, 等. 西江流域极端降水演变规律及其对洪水径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(6): 128-136. (XIE Zhigao, JIA Wenhao, WANG Xiayu, et al. Evolution characteristics of extreme rainfall and influence on flood runoff in Xijiang River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(6): 128-136. (in Chinese))

[6] 贾玉雪, 张奇, 曾冰茹, 等. 湘江流域多源降水与气温产品组合的径流极值模拟精度评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 8-16. (JIA Yuxue, ZHANG Qi, ZENG Bingru, et al. Accuracy evaluation of runoff extremum simulation for the product combination of multi-source precipitation and temperature in the Xiangjiang River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 8-16. (in Chinese))

[7] 王振亚, 姚成, 董俊玲, 等. 郑州“7·20”特大暴雨降水特征及其内涝影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 17-22. (WANG Zhenya, YAO Cheng, DONG Junling, et al. Precipitation characteristic and urban flooding influence of “7·20” extreme rainstorm in

- Zhengzhou [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(3):17-22. (in Chinese))
- [ 8 ] 蔡钊,王海鹏,刘九夫,等. 双层翻斗式雨量计翻斗特性的试验和模拟分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(6):79-85. (CAI Zhao, WANG Haipeng, LIU Jiufu, et al. Numerical and experimental investigation on characteristics of the double tipping bucket rain gauge [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(6):79-85. (in Chinese))
- [ 9 ] LI Wentao, ZHANG Jiapeng, SUN Ruochen, et al. Evaluation of Tianji and ECMWF high-resolution precipitation forecasts for extreme rainfall event in Henan in July 2021[J]. *Water Science and Engineering*, 2023, 16(2):122-131.
- [10] 李英华,原立格. 信息化背景下 5G 通信技术对智慧水利建设的作用分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(6):132-133. (LI Yinghua, YUAN Lige. Analysis of the role of 5G communication technology on smart water conservancy construction in the context of informationization [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(6):132-133. (in Chinese))
- [11] 刘西川,高太长,秦健,等. 降雨对微波传输特性的影响分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(3):2156-2162. (LIU Xichuan, GAO Taichang, QIN Jian, et al. Effects analysis of rainfall on microwave transmission characteristics[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3):2156-2162. (in Chinese))
- [12] MESSER H, ZINEVICH A, ALPERT P. Environmental monitoring by wireless communication networks [J]. *Science*, 2006, 312(5774):713-713.
- [13] MOUPFOUMA F. Improvement of a rain attenuation prediction method for terrestrial microwave links[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1984, 32(12):1368-1372.
- [14] CRANE R. Prediction of attenuation by rain [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1980, 28(9):1717-1733.
- [15] CRANE R K. A two-component rain model for the prediction of attenuation statistics [J]. *Radio Science*, 1982, 17(6):1371-1387.
- [16] LIN S H. A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths [J]. *Bell System Technical Journal*, 1975, 54(6):1051-1086.
- [17] HARDEN B N, NORBURY J R, WHITE W J K. Estimation of attenuation by rain on terrestrial radio links in the UK at frequencies from 10 to 100 GHz [J]. *IEE Journal on Microwaves, Optics and Acoustics*, 1978, 2(4):97-104.
- [18] REGONESI E, UINIL L, RIVA C. Limitations of the ITU-R P. 838-3 model for rain specific attenuation [C]//13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). New York: IEEE, 2019:1-4.
- [19] 陈渝青,郑鑫,宋莹,等. 短距离无线微波链路降雨反演模型研究[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(3):579-586. (CHEN Yuqing, ZHENG Xin, SONG Ying, et al. Study on a rainfall intensity retrieval model for short links [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2024, 39(3):579-586. (in Chinese))
- [20] Radiocommunication Sector of International Telecommunication Union (ITU-R). Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems [R]. Geneva: ITU-R, 2015.
- [21] 卢昌胜,赵振维,林乐科,等. 一种地面视距链路雨衰减预测模式[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(2):272-277. (LU Changsheng, ZHAO Zhenwei, LIN Leke, et al. A prediction model of rain attenuation for the terrestrial line-of-sight links [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2):272-277. (in Chinese))
- [22] 赵振维,吴振森. 水凝物的电波传播特性与遥感研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2001.
- [23] 赵振维,卢昌胜,林乐科. 基于雨胞分布的视距链路雨衰减预报模型[J]. *电波科学学报*, 2009, 24(4):627-631. (ZHAO Zhenwei, LU Changsheng, LIN Leke. Prediction model of rain attenuation based on the EXCELL rain cell model for the terrestrial line-of-sight systems [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, 24(4):627-631. (in Chinese))
- [24] 林乐科. 对流层环境对地空传播特性影响研究 [D]. 北京:中国电子科学研究院, 2004.
- [25] KRAUSE P, BOYLE D P, BÄSE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. *Advances in Geosciences*, 2005, 5:89-97.
- [26] SCHLEISS M, BERNE A. Identification of dry and rainy periods using telecommunication microwave links [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(3):611-615.
- [27] SCHLEISS M, RIECKERMANN J, BERNE A. Quantification and modeling of wet-antenna attenuation for commercial microwave links [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5):1195-1199.

(收稿日期:2024-04-09 编辑:施业)