

基于相位随机化的中国日降水随机模拟研究

张炳林^{1,2}, 宋松柏^{1,2}, 曾文颖^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院; 2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室)

摘要:利用中国 696 个气象站 1960—2017 年日降水资料,构建基于 1 阶离散自回归(DAR(1))与相位随机化模拟(PRS)的频域模型(PRS-DAR(1)),并与经典 WeaGETS 模型对比,检验两者在分布特征、时间相干性和多站点空间相干性上的表现。结果表明:PRS-DAR(1)模型能更准确地再现日降水序列的统计特征,尤其在时间和空间相干性方面优于 WeaGETS 模型;在不同日均降水量区间和空间分布上,PRS-DAR(1)模型均表现出较强的适用性,可为改进传统降水生成模型、提升日降水模拟精度提供一种新途径。

关键词:日降水量;相位随机化;小波变换;随机模拟;Kappa 分布

Random simulation of daily precipitation in China based on phase randomization//Zhang Binglin^{1,2}, Song Songbai^{1,2}, Zeng Wenying^{1,2} (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A & F University)

Abstract: Based on the daily precipitation data observed at 696 meteorological stations across China during the period from 1960 to 2017, a frequency-domain model (PRS-DAR(1)) was established by integrating the first-order discrete autoregressive model (DAR(1)) with phase randomization simulation (PRS) method. The performance of proposed model was compared with that of the classical WeaGETS model in terms of distribution characteristics, temporal coherence, and multi-site spatial coherence. The results indicate that PRS-DAR(1) model can more accurately reproduce the statistical characteristics of daily precipitation sequences, and it outperforms WeaGETS model especially in terms of temporal and spatial coherence. Moreover, PRS-DAR(1) model exhibits strong applicability across different daily average precipitation intervals and spatial distributions. The results in this paper provide a new approach for improving traditional precipitation generation models and enhancing the accuracy of daily precipitation simulation.

Key words: daily precipitation; phase randomization; wavelet transform; random simulation; Kappa distribution

降水是地球系统中极为关键且活跃的组成部分,在维系生态平衡、大气循环、农业生产等诸多方面发挥着至关重要的作用^[1-2],研究降水及其相关过程的变化特征、掌握降水事件的发生规律,不仅对人类的生产生活具有深远的意义,也是应对全球气候变化挑战的关键^[3-6]。然而,日尺度历史降水数据普遍存在时间跨度较短、观测资料缺失等问题,难以为科学研究与政策制定提供充足的数据支持^[7]。随机模拟技术可以生成具有与观测数据相似统计特性的长时间序列或大型事件集,显示一种现象的全部可变性^[8]。在水文学领域,随机模拟生成的日降水序列在水资源合理配置、水库系统优化管理及旱涝灾害风险评估等方面具有重要意义^[9-11]。

随机模拟的类型通常分为基于事件的随机模拟和连续随机模拟^[12]。基于事件(如极端降水)的随机模拟需要对事件进行先验定义和阈值划分,主要关注事件的分布特征,但易导致时间信息的缺失;连续随机模拟不仅关注事件的分布,还能刻画数据的波动性和非平稳性等时间特征^[12]。

随机模拟的方法通常分为非参数模型和参数模型两类。非参数模型本质上是一种重采样模型,例如,带有 γ 核扰动的 k 近邻重采样模型,能够避免对序列特定的概率分布形式做出假设^[13]。参数模型以自回归滑动平均、分数高斯噪声和马尔可夫链等模型及其修正模型为代表。自回归滑动平均模型广泛应用于随机水文模拟,但有研究表明,该类模型的

基金项目:国家自然科学基金项目(52379026)

作者简介:张炳林(1995—),男,博士研究生,主要从事流域水文模拟预报研究。E-mail:zbl0377@126.com

通信作者:宋松柏(1965—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:ssb6533@nwfufu.edu.cn

自相关性随着滞时的增加而迅速衰减,难以刻画日降水序列的相关^[14];分数高斯噪声模型则存在适用范围较窄、计算复杂度较高及参数估计难度较大等问题^[15];马尔可夫链模型假设未来状态的概率分布仅依赖于当前状态,而与过去状态无关,可以简洁、有效地描述降水发生与否,并通过假设降水量的分布特征进而对其进行模拟^[16]。作为马尔可夫链模型的典型代表,一阶离散自回归(discrete first-order autoregressive, DAR(1))模型在日降水模拟中的适用性已得到验证^[17-18]。目前,日降水模拟主要采用参数模型。

上述模型均基于时域进行时间序列模拟,通常采用自相关函数表征连续数据间的相关性。序列在时域的自相关函数可通过傅里叶变换转换为频域的功率谱密度函数,因此可将时域参数化等效替换为其在频域的共轭形式^[19]。目前,傅里叶变换已应用于气象数据频域特征分析、频谱天气发生器构建及日径流模拟等领域^[20-21]。然而,气候系统(如降水)序列往往表现出非线性和非平稳特征^[22],难以满足傅里叶变换对时间序列线性、平稳的基本假定。

相较于傅里叶变换,小波变换作为一种时频分析工具,更适用于分析和模拟具有非平稳特征的序列^[23]。小波变换一般通过实小波函数进行离散小波分解,得到随机化实值小波系数,再经逆小波变换得到模拟时间序列^[24]。尽管小波变换可有效实现时间序列模拟,但完全随机化的小波系数可能破坏序列原有的非平稳性等特征。与实小波函数相比,复小波函数能够同时提供振幅与相位信息,在随机化过程中以相位信息替代振幅,可避免非平稳性的损失^[25]。

作为一种基于频域的随机化方法,相位随机化模拟(phase randomization simulation, PRS)具有保持时间序列功率谱特征与线性自相关结构的显著优势^[26],能够较好地保留气象与水文序列的多尺度频谱特征,在结合小波分析后能进一步实现局地时频特征与多站点空间相干性的刻画^[12]。因此,PRS 不仅适用于统计检验与非线性分析,更为降水、径流量等水文气象变量的模拟提供了新的途径。然而,现有研究多集中于 PRS 在假设检验中的应用,在降水模拟等领域的实践较为有限,且 PRS 在理论与实现层面对多尺度分解及频域保持提出了更高的要求^[27]。目前,水文学领域仍以自回归滑动平均和马尔可夫链模型与天气发生器等作为日降水模拟的主要手段,已有若干探索性研究显示了 PRS 的应用潜力。例如,Wen 等^[28]提出了基于小波的随机模拟数据生成方法,为非平稳水文气象序列的模拟提供了

理论支撑与工具保障;Brunner 等^[26]构建了基于相位随机化的径流量随机模拟模型,验证了其在保持自相关与频谱特征方面的优势,进一步证实了 PRS 在气候与水文领域的适用性。尽管已有应用大多局限于局地或小样本尺度,缺乏大范围的系统性验证,但其结果为 PRS 在保持频谱结构、增强模拟真实性等方面提供了理论与实践依据。

本文结合 DAR(1)模型,提出基于小波变换的 PRS-DAR(1)模型用于日降水序列模拟,并与经典的 WeaGETS 日降水模拟模型进行对比,评估 PRS-DAR(1)模型的日降水模拟性能,以期为中国区域日降水模拟提供新的技术途径。

1 研究区域与数据来源

选用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的全国气象站日降水数据,筛选出建站时间早、资料完整性好的 696 个气象站进行分析,气象站空间分布如图 1 所示(本文地图均基于审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图)。为便于分析,统一选取 1960 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日的日降水数据,选取 4 个气象站(50758、51241、57028、58725)作为代表,验证 PRS-DAR(1)模型模拟单站日降水的有效性。同时,分别在降水稀少的西北地区 and 降水充沛的东南地区构建两个降水场,进一步分析 PRS-DAR(1)模型对于空间多站点日降水的模拟性能。

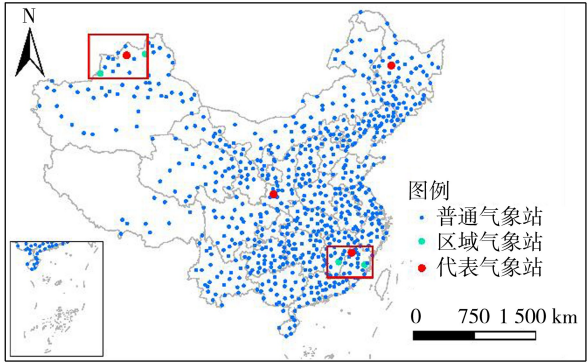


图 1 气象站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations

2 研究方法

2.1 连续小波变换

连续小波变换的核心思想是将信号分解为一系列不同尺度和位置的小波基函数,并通过这些小波基函数的线性组合表征信号。Morlet 小波因其具有优良的时频局部化特性,兼具复数形式的独特优势,且适应性强、多尺度分析能力突出,在水文领域得到了广泛的应用^[29]。因此,本文选择 Morlet 小波作为

连续小波变换的基函数。

2.2 四参数 Kappa 分布

四参数 Kappa 分布适用于降水序列的频率分析^[30],且在中国日降水模拟中属于优势分布^[31]。因此,选取四参数 Kappa 分布作为各气象站日降水序列的拟合概率分布。

2.3 PRS-DAR(1) 模型建模流程

a. 生成随机相位。给定日降水序列 $\{x_i\}$,从均值为 0、标准差为序列波动幅度 20% 的随机序列中采样出与该序列等长的白噪声序列。利用 Morlet 复小波基函数对白噪声序列进行分解,推导得到白噪声序列的随机相位。为充分挖掘降水序列的细节特征,小波分解尺度设为 100。

b. 模拟干期、湿期。以 0.1 mm 作为干日与湿日的划分阈值,日降水量达到 0.1 mm 及以上为湿日^[32]。提取 1—12 月多年日降水序列中的干湿过程,干日计为 0,湿日计为 1,计算各月份干湿转变的一步转移概率,通过蒙特卡洛模拟生成干湿转变的 0,1 序列 $P_{0,1}$ 。

c. 拟合 Kappa 分布。利用四参数 Kappa 分布分别拟合 1—12 月的多年湿日降水数据,得到不同月份日降水对应 Kappa 分布的参数。

d. 连续小波变换。利用 Morlet 复小波基函数对湿日降水数据进行连续小波变换,得到 100 个不同尺度的子序列,计算复共轭转换得到的实部,即子序列的振幅。

e. 逆小波变换。将步骤 a 生成的随机相位与步骤 d 的振幅相结合,通过逆小波变换在时域重构出具有原始时间序列特征、并增加随机性和复杂性的新序列。

f. 生成随机模拟降水序列。随机模拟降水序列 $\{x'_i\}$ 属于 Kappa 域。对应步骤 b 中的 $P_{0,1}$ 序列, $P_{0,1}$ 为 0 时, $\{x'_i\}$ 为干日,降水量为 0; $P_{0,1}$ 为 1 时, $\{x'_i\}$ 为湿日,湿日的降水量由步骤 c 中的参数逆 Kappa 分布生成,并根据 $\{x'_i\}$ 中的排名重新分配值来实现。

在进行单站点或者多站点日降水模拟时,步骤 a 仅运行 1 次,步骤 b~f 则针对每个站点按顺序迭代。

2.4 WeaGETS 模型

WeaGETS 模型是一种可用于模拟单站点日降水和温度的天气发生器^[33],其算法公开、结果稳健,常被用作评估新模型性能的基准^[34]。引入 WeaGETS 模型作为对照模型,旨在客观评估本文提出的 PRS-DAR(1) 模型在日降水模拟序列中的性能,以及相较于现有经典模型的优势与不足。

2.5 评价指标

选择平均值 ($\bar{x}$)、变差系数 (C_v)、偏态系数 (C_s)、95% 分位数降水量 (P_{95})、最大 1 d 降水量 ($P_{\max}$)、一阶自相关系数 (r_1) 和方差变异度 (D_{σ^2}) 为评价指标,以平均相对绝对误差 (MAPE) 来评估模拟序列与实测序列的误差。

3 模拟结果分析

采用 PRS-DAR(1) 和 WeaGETS 模型分别对 696 个气象站 1960 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日的日降水序列均值、离散度、偏度、极值、相关性和波动性进行模拟,模拟长度与相应站点实测长度相等,每个站点模拟 100 次,以选择不同站点的适用模型。依据逐月日降水量的统计特征、时间相干性和多站点空间相干性等指标体系,分析 PRS-DAR(1) 和 WeaGETS 模型在不同日均降水量区间和地理空间的适用性。

3.1 模型有效性验证

3.1.1 平均值、变差系数和偏态系数对比

表 1 为 PRS-DAR(1) 和 WeaGETS 模型对 4 个气象站日降水模拟序列与实测序列在 $\bar{x}$ 、 C_v 和 C_s 指标上的 MAPE 对比结果。两个模型日降水模拟序列在 $\bar{x}$ 指标上的表现较为接近,表明两者均能较好地反映日降水的中心趋势。相较于 WeaGETS 模型,PRS-DAR(1) 模型日降水模拟序列在 C_v 和 C_s 指标上具有明显优势,表明该模型能够更好地衡量日降水的离散程度和不对称性。综合来看,PRS-DAR(1) 模型的日降水模拟序列可以更好地保持日降水实测序列的统计特性。

表 1 日降水模拟序列 MAPE 对比 单位: %

Table 1 Comparison of MAPE for daily precipitation						
simulation sequences						unit: %
气象站	PRS-DAR(1) 模型			WeaGETS 模型		
	$\bar{x}$	C_v	C_s	$\bar{x}$	C_v	C_s
50758	1.43	1.26	6.73	2.08	4.86	8.11
51241	1.44	1.29	6.58	1.71	6.40	13.49
57028	1.53	1.12	3.69	1.79	3.56	5.40
58725	1.13	0.88	4.20	1.31	1.94	5.91

通过对比 PRS-DAR(1) 和 WeaGETS 模型模拟序列与实测序列逐月日降水统计量(图 2),进一步分析模型对不同月份降水的模拟效果。

两个模型模拟序列逐月 $\bar{x}$ 和 C_v 与实测序列的变化基本一致,但 WeaGETS 模型模拟序列的 C_s 值在降水量较少的时期(特别是冬季 1 月、2 月和 12 月)或降水量较少的气象站(图 2(f))与实测序列差异显著。相较于 WeaGETS 模型,PRS-DAR(1) 模型模拟序列的 C_s 值在不同时期均能与

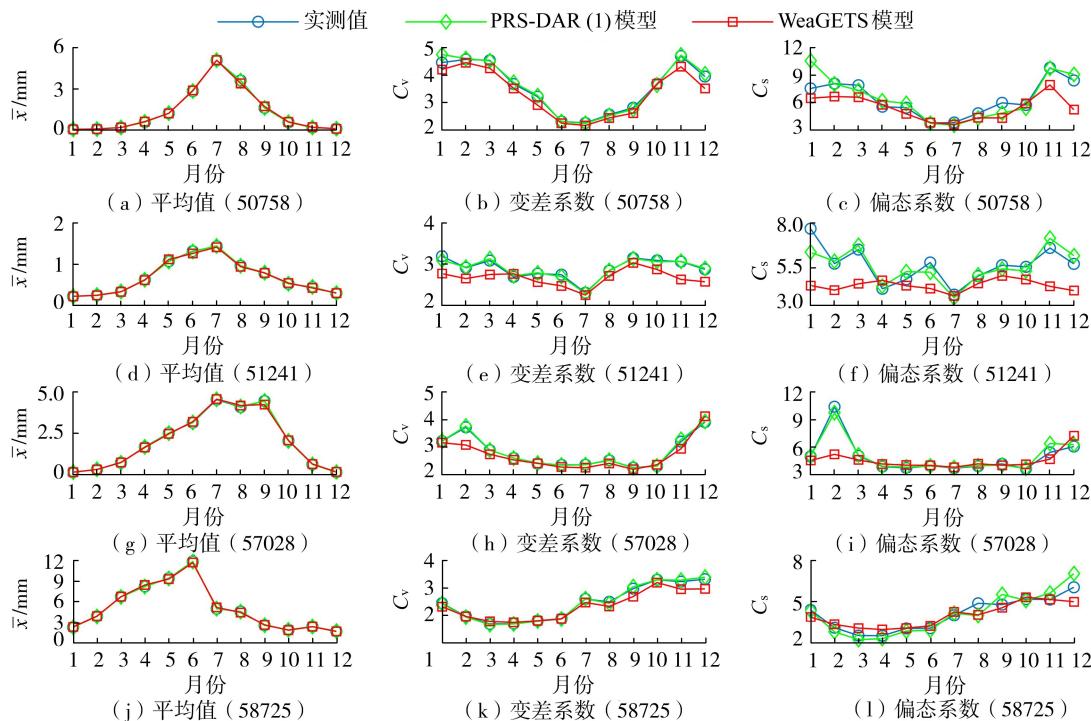


图2 序列模拟与实测日降水统计特征值对比

Fig. 2 Comparison of statistical characteristic values between simulated and observed daily precipitation sequences

实测序列的变化保持一致,能够更好地反映实测序列的偏斜程度。对比两个模型的模拟结果,PRS-DAR (1)模型的模拟序列更准确地捕捉了逐月日降水的季节性和周期性特征。

3.1.2 极值对比

极端降水事件对全球气候变化的影响极为显著,其频率与强度的变化直接影响洪水、山体滑坡等自然灾害的发生频率及严重程度^[31]。因此,日降水模拟方法需能准确重现极端降水事件。通过对比 PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型对 4 个气象站 100 次模拟结果 P_{95} 与 $P_{\max}$ (图 3) 的准确度,分析两个模型的极值模拟能力。PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型对 4 个气象站 P_{95} 模拟的平均 MAPE 分别为 2.04% 和 3.18%,均能较好地模拟该项指标。在 $P_{\max}$ 模拟中,两个模型的模拟结果均大于实

测序列值,这有助于准确评估极端降水事件发生的可能性。PRS-DAR (1) 模型对 4 个气象站 $P_{\max}$ 模拟的平均 MAPE 为 13.75%,明显优于 WeaGETS 模型 (21.04%)。同时,PRS-DAR (1) 模型模拟序列的极值区间更窄,表明 PRS-DAR (1) 模型模拟结果的方差更小,有助于降低日降水模拟的不确定性,能够更准确地反映实际降水事件的强度。

3.1.3 时间相干性对比

时间相干性用于描述同一地点降水事件在时间维度上的统计关联特征,反映降水过程的时间持续性。本文采用日降水模拟序列的自相关系数和干湿期长度两个指标表征时间相干性。

自相关系数是描述时间序列内部线性相关程度的重要指标。在进行日降水序列的随机模拟时,模拟序列的自相关系数应与实测序列保持一致,以确

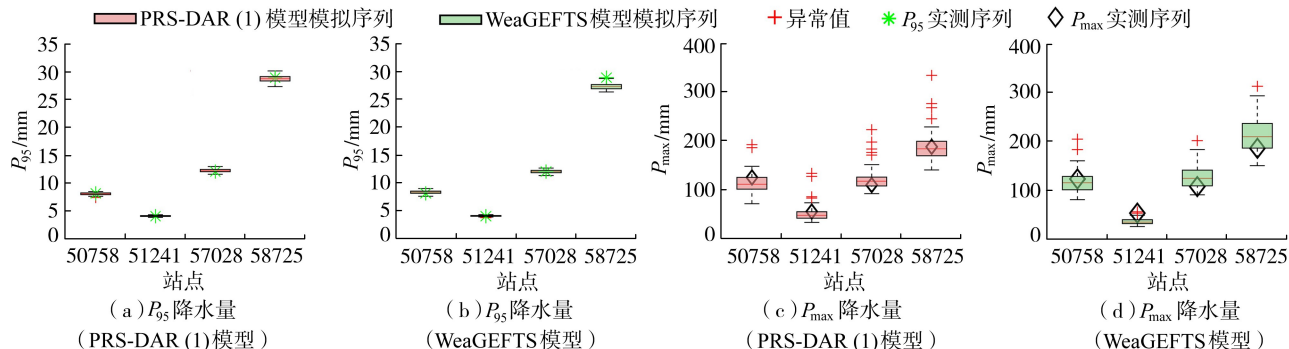


图3 模拟与实测序列的极值对比

Fig. 3 Comparison of extremes between simulated and observed sequences

保模拟结果能够准确反映降水事件的时间依赖性。对比不同气象站 PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型的模拟序列与实测序列(图 4),可以看出 WeaGETS 模型低估了实测序列的 r_1 值,除 51241 站外,其余气象站实测序列的 r_1 值均超过模拟序列的上限;PRS-DAR (1) 模型虽然在一定程度上高估了实测序列的 r_1 值,但模拟序列的平均 r_1 值与实测序列较为接近,且 4 个气象站 r_1 值平均 MAPE 为 12.18%,远低于 WeaGETS 模型 (32.73%)。可见 PRS-DAR (1) 模型模拟序列能够更好地保持实测序列的 r_1 值,对实测序列时间相关性的模拟更为准确。

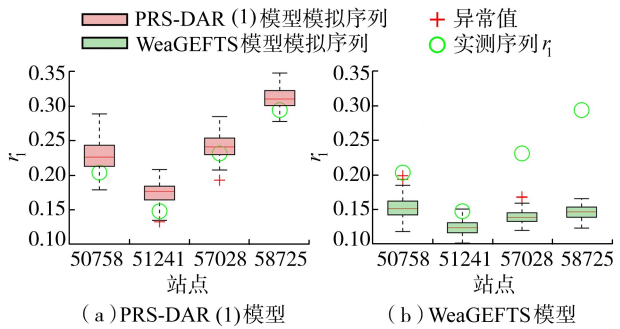


图 4 模拟与实测序列 r_1 对比

Fig. 4 Comparison of first-order autocorrelation coefficients between simulated and measured sequences

PRS-DAR (1) 模型模拟序列具有更好的时间相关性,其原因可能在于该模型将时间序列分解为多个与特征频率相关联的分量,通过对每个分量的模拟,更有效地保留了原有序列的相关特性。

干湿期长度可反映降水事件的持续时间和发生频率特征。PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型均能有效模拟各气象站不同干湿期长度的降水过程,其中

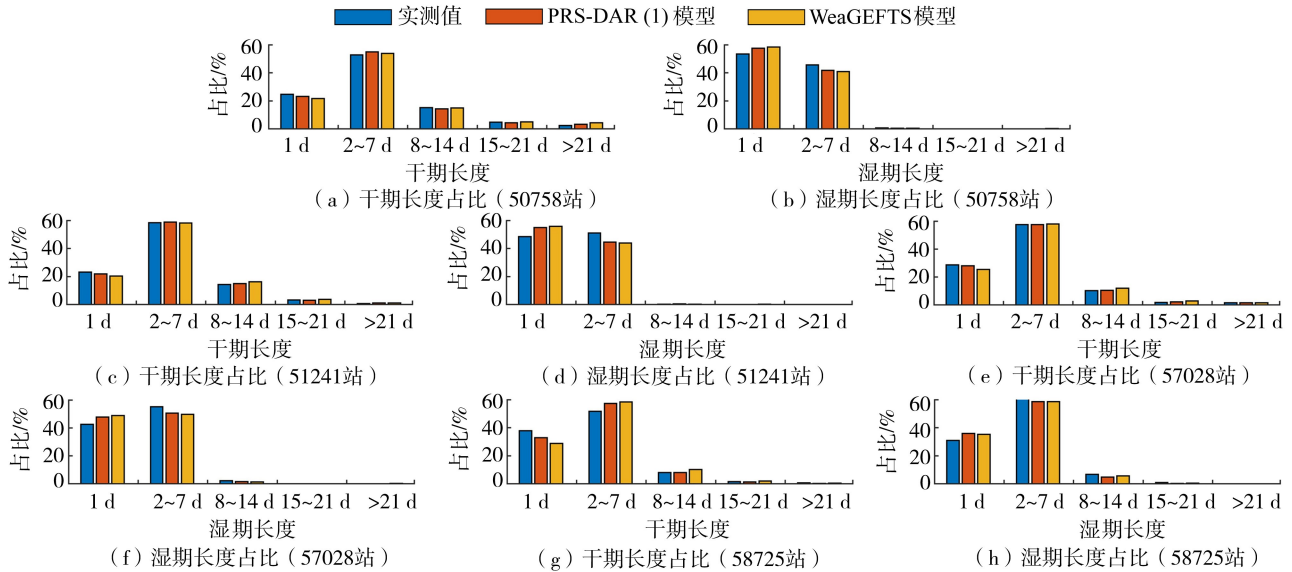


图 5 模拟与实测序列干湿期长度所占比例对比

Fig. 5 Comparison of proportion of dry and wet period lengths between simulated and observed sequences

PRS-DAR (1) 模型的模拟结果与实测序列更为接近(图 5)。两个模型均倾向于低估长度为 1 d 的干期频率,高估长期的干期频率;同时高估长度为 1 d 的降水频率,低估长期的降水频率。

3.1.4 空间相干性对比

空间相干性用于描述不同空间位置降水事件的同步关联程度,反映降水系统的空间结构特征。采用邻近区域不同气象站间模拟序列的交叉相关系数表征空间相干性。

PRS-DAR (1) 模型不仅可以在单个站点重现日降水序列的统计特征,还能用于多站点空间相关日降水序列的模拟。以降水充沛的东南地区 58725、58806、58933 站和降水稀少的西北地区 51241、51156、51437 站构成两个降水场,对比 PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型不同滞时的实测与模拟序列交叉相关系数,结果如图 6 和图 7 所示。可以看出,PRS-DAR (1) 模型的模拟序列能较好地保持站点间的交叉相关系数,而 WeaGETS 模型不同站点间的模拟值难以体现站点间的空间相关特征。

3.2 模型适用性分析

3.2.1 不同日均降水量区间适用性

根据多年日均降水量将气象站分为 6 组,其中 $<0 \sim 1$ mm 区间 116 个, $<1 \sim 2$ mm 区间 222 个, $<2 \sim 3$ mm 区间 116 个, $<3 \sim 4$ mm 区间 129 个, $<4 \sim 5$ mm 区间 85 个, >5 mm 区间 28 个。分别计算 PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型在 6 个日均降水量区间每个气象站 100 组模拟结果的评价指标,并统计各评价指标下模型模拟更优占比。结果表明,PRS-DAR (1) 模型在模拟日降水序列时整体表现优于

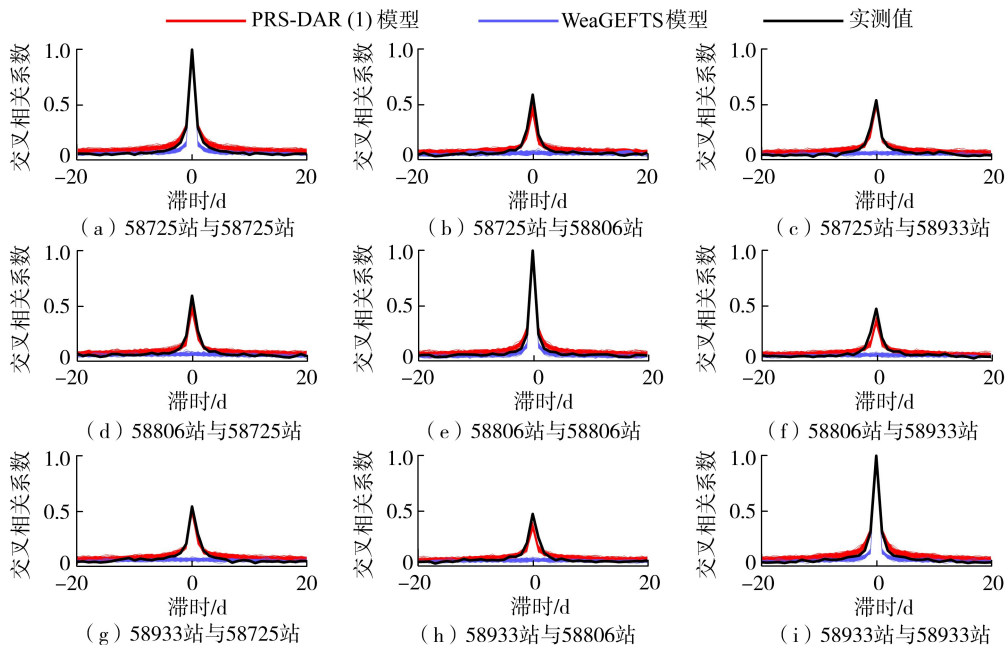


图 6 东南地区降水场模拟与实测序列交叉相关系数对比

Fig. 6 Comparison of cross-correlation coefficients between simulated and observed precipitation field sequences in the southeastern region

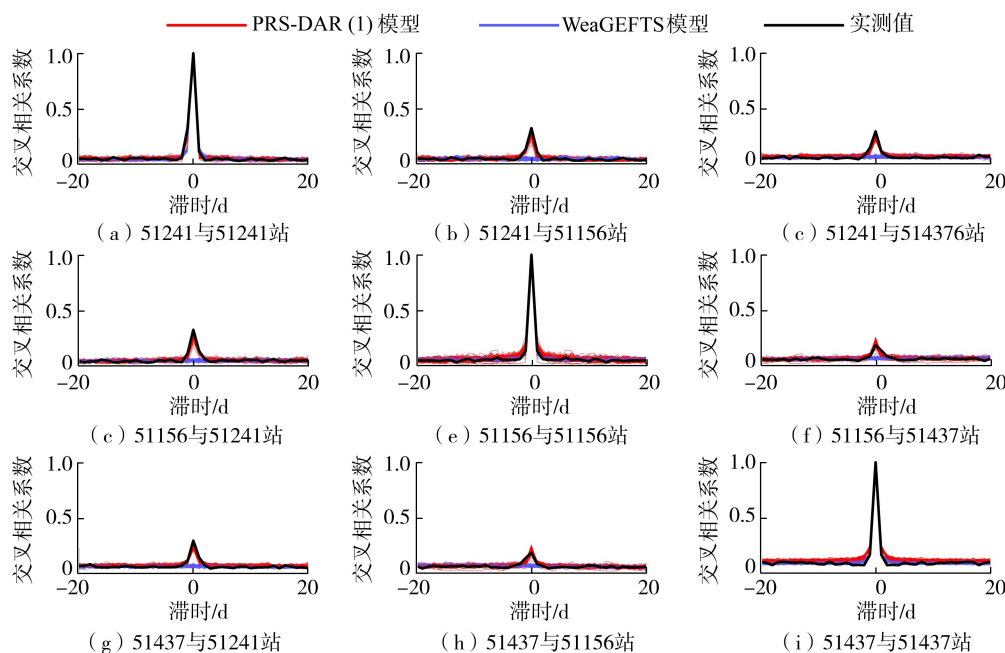


图 7 西北地区降水场模拟与实测序列交叉相关系数对比

Fig. 7 Comparison of cross-correlation coefficients between simulated and observed precipitation field sequences in the northwest region

WeaGETS 模型。PRS-DAR (1) 模型在所有日均降水量区间 C_v 、 C_s 、 P_{95} 、 r_1 、 D_{σ^2} 指标的误差更小,且在 这些指标上表现更优的气象站占比更高,说明其能更准确地刻画日降水序列的变化特征。需要注意的是,在 $>5\text{ mm}$ 高降水量区间, PRS-DAR (1) 模型 $\bar{x}$ 和 $P_{\max}$ 指标的误差略大于 WeaGETS 模型,但其在 $\bar{x}$ 指标上的更优占比仍全面领先。综合来看,PRS-DAR(1)模型在不同日均降水量区间均表现出更优

的整体模拟性能。

为进一步分析 PRS-DAR (1) 模型在极端降水模拟中存在的高估问题,对不同日均降水量区间的各气象站分别采用两个模型进行 100 次模拟,提取每个气象站 100 组模拟值中 P_{95} 与 $P_{\max}$ 的中位数,计算其与对应实测值的相对误差,见图 8。可见, PRS-DAR (1) 模型在不同日均降水量区间各气象站模拟序列 P_{95} 的中位数相对误差近似对称分布于

0 两侧,且偏差范围明显小于 WeaGETS 模型,印证了 PRS-DAR (1) 模型 P_{95} 指标的模拟精度优于 WeaGETS 模型;对于 $P_{\max}$, PRS-DAR (1) 模型在多数日均降水量区间呈高估(正偏)特征,而 WeaGETS 模型呈低估(负偏)特征。

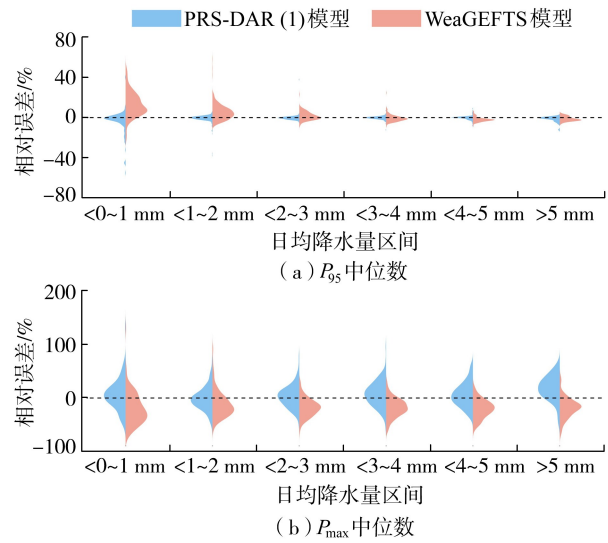


图 8 不同极端降水指标模拟序列中位数与实测值的相对误差

Fig. 8 Relative errors between medians of simulated sequences and observed values for different extreme precipitation indices

3.2.2 不同地理空间适用性

基于 PRS-DAR (1) 与 WeaGETS 模型的随机模拟结果,分析两个模型在单一指标下的更优分布区域,结果如图 9(a)~(g) 所示。对于单个气象站,若同一模型的模拟结果在 7 个评价指标中有 4 个及以上更优,则将该模型判定为该站点的适用模型,据此对 696 个气象站进行模型优选,结果见图 9(h)。

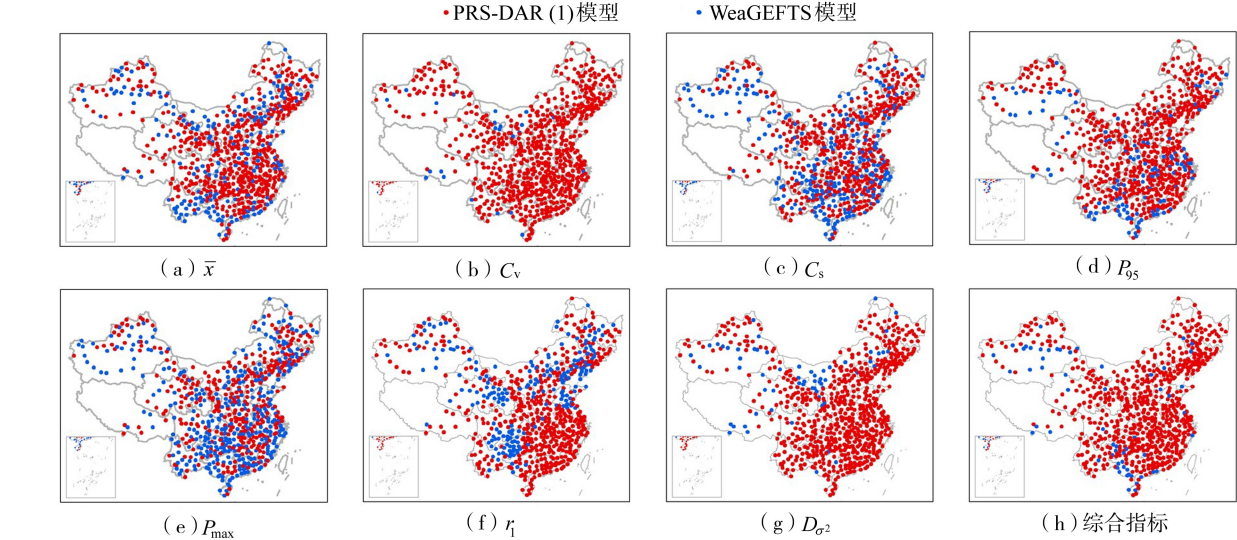


图 9 单一指标和综合指标更优模型空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of better-performing models for single indicators and comprehensive indicators

对于 $\bar{x}$ 、 C_v 、 P_{95} 、 r_1 和 D_{σ^2} 指标,PRS-DAR (1) 模型作为更优模型,其空间分布范围更广,在东部地区的适用性高于西部地区,尤其在东北、华东和华南地区,该模型占据主导优势,表明 PRS-DAR(1) 模型对于这些区域日降水量相关指标的模拟优势显著;西北北部-华北北部-东北西部一带是 WeaGETS 模型模拟性能优势区域;西南南部-华南南部沿线,WeaGETS 模型在 $\bar{x}$ 和 P_{95} 指标上表现更优。

对于 r_1 指标,WeaGETS 模型在西南东部处于主导地位;而 C_s 和 $P_{\max}$ 指标,两个模型的优势站点呈交错分布特征,受 Kappa 分布对于 C_s 和 $P_{\max}$ 指标极值存在高估的影响,总体上 PRS-DAR (1) 和 WeaGETS 模型分别在 C_s 和 $P_{\max}$ 指标上更具优势。

综合 7 项指标对气象站进行模型优选,PRS-DAR(1)模型判定为最佳模型的比例达 91.52%,显著优于 WeaGETS 模型,特别是在华南、华东、华中和东北地区。即便在干旱少雨的西北地区与气候多变的西南山区,PRS-DAR (1) 模型作为最佳模型的气象站数量仍高于 WeaGETS 模型,表明 PRS-DAR (1) 模型具有较为广泛的适用性。

3.3 讨论

在气候变化、人类活动影响及其他外部驱动力等多种因素的共同作用下,日降水模拟序列呈现非平稳特性,给传统基于平稳假设的模拟方法带来挑战^[35-36]。PRS-DAR (1) 模型将 PRS 与 DAR (1) 过程相结合,在频域层面引入随机性的同时,保留原始数据的时频分布特征,从而无需对时间依赖结构进行假设,即可更灵活地再现降水序列的幅度分布、时空相关性及非平稳特征^[37]。本文结果表明,PRS-DAR (1) 模型在日降水模拟中能够较好再现非平

稳性及时空相关特征,但同时也存在一定的局限性。

a. 极端降水再现方面,PRS-DAR (1) 模型结合 Kappa 分布虽能较好刻画降水序列的重尾特征,但在 $P_{\max}$ 等指标上仍存在一定的低估倾向。该问题一方面源于 Kappa 分布在尾部拟合中对极值点的敏感性^[31],在极端事件样本有限时容易产生参数偏差,从而高估高尾分位数^[38],导致尾部外推过长,放大极端事件的不确定性^[39];另一方面,PRS 虽保持了总体谱特征,但在离散时序相关的过程中削弱了极端事件的局部约束,导致模拟序列尾部波动偏大。

b. 波动性刻画方面,PRS-DAR (1) 与 WeaGETS 模型均存在 D_{σ^2} 低估现象。 D_{σ^2} 反映模型对高阶相关性和长记忆特征的再现能力,其系统性低估表明现有模型尚不足以完全捕捉降水的高阶依赖性、持续性及极端驱动的波动性。Zha 等^[40]在降水模拟框架研究中指出,低阶发生模型在再现干湿期持续性与多日依赖性方面存在系统性偏差,难以反映更长干湿期的持续性,进而低估降水序列的方差与变异度。Vorobeyskii 等^[41]强调,基于一阶马尔可夫过程的生成方法易弱化极端驱动的波动性,且会低估强降水事件的方差;Brunner 等^[12]从极端降水模拟角度论证了现有发生模型普遍难以捕捉由极端驱动的波动性及跨尺度相关性,导致尾部分布与极端聚集性的再现精度不足。这些研究共同说明, D_{σ^2} 的低估并非单一模型的缺陷,而是现有统计建模在处理高阶依赖、长记忆效应及极端驱动波动性时面临的普遍挑战。

c. 针对极端降水易高估的不足,未来可通过稳健估计或贝叶斯估计方法提升参数推断的稳定性,引入极值分布对尾部数据进行校正^[42],或采用部分 PRS 与条件约束方法,在保留总体频域随机性的同时增强极端事件的时序再现能力^[43],从而提升极端降水模拟的精度与稳定性。为了更充分地捕捉日降水模拟序列的复杂统计特征和多尺度波动性,未来研究可考虑在降水发生过程模拟中引入高阶或隐马尔可夫链,以更好再现干湿期的持续时间及多状态转换特征,从而提升对降水发生过程相关结构与不同干湿期长度分布的再现能力^[44];在降水强度模拟中采用混合分布或条件异方差方法,使模型能够灵活刻画不同降水模态下的强度变化与极端聚集效应,增强尾部分布与时变波动性的再现能力^[45];在降水序列相关性模拟中结合长记忆模型与 PRS,刻画降水序列中长时滞的慢衰减自相关与多尺度协同关系^[46],以缓解 D_{σ^2} 低估问题,提升模型对于长程相关及多尺度波动性的刻画能力。

4 结 论

a. PRS-DAR(1) 模型可较好地再现不同区域日降水模拟序列的非平稳性和时空相关特征。通过 PRS 引入频域信息,该模型能够保留原始序列的幅度分布与时频结构,在非平稳降水序列处理中具有显著优势,为突破传统基于平稳假设的模拟方法提供了新的途径。

b. 在日均降水量区间划分和地理空间分区下,PRS-DAR (1) 模型在多数统计指标上优于 WeaGETS 模型,尤其在 $\bar{x}$ 、 C_v 、 C_s 、 P_{95} 、 r_1 和 D_{σ^2} 等指标上,表现出更高的特征再现能力,表明该模型不仅能精准再现降水过程的总体统计特征,而且在极端事件与时序相关结构的模拟方面也具备较高的稳健性,从而提高了其在不同气候区域和空间格局下的适用性。

c. 作为一种频域建模方法,PRS-DAR (1) 模型可在单站点与多站点尺度上实现降水序列的联合模拟,既满足了区域尺度的气候分析需求,也能为流域水文模拟、风险评估和工程设计等实际应用提供支撑,具有较高的模拟精度和灵活性,在未来气候变化情景下的水文与气候适应性研究中具有一定的应用价值。

参考文献:

[1] Yuan Xing, Wang Yumiao, Ji Peng, et al. A global transition to flash droughts under climate change [J]. Science, 2023, 380(6641): 187-191.

[2] Mederimid S, Nocco M, Lawston-Parker P, et al. Irrigation in the earth system [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2023, 4(7): 435-453.

[3] Jia Ziyu, Zhang Zhenhao, Cheng Yunxiang, et al. Grassland biomass spatiotemporal patterns and response to climate change in eastern Inner Mongolia based on XGBoost model estimates [J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111554.

[4] Tuoku L, Wu Zhijian, Men Baohui. Impacts of climate factors and human activities on NDVI change in China [J]. Ecological Informatics, 2024, 81: 102555.

[5] 沈哲辉, 韩静妍, 桂敬聪, 等. 长江流域再分析与卫星反演降水数据的适用性分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 50-61. (Shen Zhehui, Han Jingyan, Gui Jingcong, et al. Analysis of the applicability of reanalysis and satellite-derived precipitation data in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 50-61. (in Chinese))

[6] 胡文韬, 余钟波, 陈松峰, 等. 长江上游卫星反演与再分析降水数据的适用性评估 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 15-24. (Hu Wentao, Yu Zhongbo,

- Chen Songfeng, et al. Applicability evaluation of satellite and reanalysis precipitation products in upper Yangtze River Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3) : 15-24. (in Chinese)
- [7] 尹家波,郭生练,王俊,等. 基于贝叶斯模式平均方法融合多源数据的水文模拟研究[J]. 水利学报, 2020, 51 (11) : 1335-1346. (Yin Jiabo, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Blending multi-source data in hydrological simulations based on BMA method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51 (11) : 1335-1346. (in Chinese))
- [8] Ghezal A, Balegh M, Zemmouri I. Markov-switching threshold stochastic volatility models with regime changes [J]. Aims Mathematics, 2024, 9 (2) : 3895-3910.
- [9] Chen Ziyi, Liu Zhixin, Yin Lirong, et al. Statistical analysis of regional air temperature characteristics before and after dam construction [J]. Urban Climate, 2022, 41 : 101085.
- [10] 张伟,王璇,孙慧超,等. 基于多重精度降雨数据的北京市极端降雨事件研究 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (2) : 123-132. (Zhang Wei, Wang Xuan, Sun Huichao, et al. Research on extreme precipitation events in Beijing based on multi-resolution rainfall data [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (2) : 123-132. (in Chinese))
- [11] 陈靖凯,张志才,陈喜,等. 喀斯特流域降雨径流过程及其对于湿条件变化响应的模拟分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (1) : 41-49. (Chen Jingkai, Zhang Zhicai, Chen Xi, et al. Simulation and analysis of rainfall-runoff processes in karst catchment and their response to changes in dry-wet conditions [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (1) : 41-49. (in Chinese))
- [12] Brunner M I, Gilleland E. Stochastic simulation of streamflow and spatial extremes; a continuous, wavelet-based approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24 (8) : 3967-3982.
- [13] Zhou Lingfeng, Meng Yaobin, Abbaspour K C. A new framework for multi-site stochastic rainfall generator based on empirical orthogonal function analysis and Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2019, 575 : 730-742.
- [14] 王慧敏,宋松柏,张更喜. 基于季节长记忆双自回归模型的日径流模拟 [J]. 水利学报, 2023, 54 (6) : 686-695. (Wang Huimin, Song Songbai, Zhang Gengxi. Daily runoff simulation based on seasonal long-term memory DAR model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54 (6) : 686-695. (in Chinese))
- [15] Huang Yinzong, Xiao Weilin, Yu Xiaojian. Statistical inference for the first-order autoregressive process with the fractional Gaussian noise [J]. Quantitative Finance, 2024, 24 (10) : 1509-1527.
- [16] 陈军飞,张玉琦,嵇娟,等. 长三角城市群洪涝韧性时空演化及影响因素 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (6) : 58-68. (Chen Junfei, Zhang Yuqi, Ji Juan, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of flood resilience in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6) : 58-68. (in Chinese))
- [17] 秦道清,邓彩云,王红瑞,等. 陕西省宝鸡市日月耦合降水随机序列模拟 [J]. 水电能源科学, 2018, 36 (8) : 5-8. (Qin Daoqing, Deng Caiyun, Wang Hongrui, et al. Coupling daily and monthly time scales in stochastic generation of rainfall series in Baoji, Shaanxi Province [J]. Water Resource and Power, 2018, 36 (8) : 5-8. (in Chinese))
- [18] Kemsley S W, Osborn T J, Dorling S R, et al. Pattern scaling the parameters of a Markov-chain gamma-distribution daily precipitation generator [J]. International Journal of Climatology, 2024, 44 (1) : 144-159.
- [19] Zhang Yaxian, Guo Kai, Zhang Sen, et al. Spatio-temporal and multi-mode prediction for blast furnace gas flow [J]. Journal of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2024, 361 (18) : 107330.
- [20] Potts D L, Scott R L, Bayram S, et al. Woody plants modulate the temporal dynamics of soil moisture in a semi-arid mesquite savanna [J]. Ecohydrology, 2010, 3 (1) : 20-27.
- [21] Atencia A, Wang Yong, Kann A, et al. Probabilistic precipitation nowcasting system constrained by an ensemble prediction system [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2020, 29 (3) : 183-202.
- [22] 崔豪,江善虎,任立良,等. 基于四元驱动的非平稳水文干旱评估方法 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (1) : 71-78. (Cui Hao, Jiang Shanhu, Ren Liliang, et al. A non-stationary hydrological drought assessment method based on four-source driven [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (1) : 71-78. (in Chinese))
- [23] Mukhopadhyay S, Leung M, Cagigal L, et al. Understanding the natural variability of still water levels in the san francisco bay over the past 500 year; implications for future coastal flood risk [J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2023, 128 (2) : e2022J-e19012J.
- [24] 黄建雄,冶运涛,曹引,等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (3) : 25-33. (Huang Jianxiong, Ye Yuntao, Cao Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of the Yellow River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3) : 25-33. (in Chinese))
- [25] Vishwanatha J S, Pai P S, D' Mello G, et al. Image-processing-based model for surface roughness evaluation in titanium based alloys using dual tree complex wavelet

- transform and radial basis function neural networks [J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1) : 28261.
- [26] Brunner M I, Bárdossy A, Furrer R. Technical note: stochastic simulation of streamflow time series using phase randomization [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2019, 23 (8) : 3175-3187.
- [27] Kang Yanfei, Belusic D, Smith-miles K. A note on the relationship between turbulent coherent structures and phase correlation [J]. Chaos, 2014, 24 (2) : 023114.
- [28] Wen Pan, Liu Renjie, Wen Ruizhi. Wavelet packets-based simulation of non-stationary multivariate ground motions [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2023, 74: 103495.
- [29] Zhao Tongtiengang, Chen Zexin, Tian Yu, et al. A decomposition approach to evaluating the local performance of global streamflow reanalysis [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28 (15) : 3597-3611.
- [30] Hosking J. The 4-parameter kappa-distribution [J]. IBM Journal of Research and Development, 1994, 38 (3) : 251-258.
- [31] 顾学志, 叶磊, 赵铜铁钢, 等. 中国日降水量的概率分布 [J]. 水利学报, 2021, 52 (10) : 1248-1262. (Gu Xuezhi, Ye Lei, Zhao Tongtiengang, et al. Probability distribution of daily precipitation in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (10) : 1248-1262. (in Chinese))
- [32] 曾文颖, 宋松柏, 康艳, 等. Darma 模型在中国日降水量随机模拟中的适用性研究 [J]. 水利学报, 2022, 53 (8) : 991-1003. (Zeng Wenying, Song Songbai, Kang Yan, et al. Applicability of DARMA model in stochastic simulation of daily precipitation in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53 (8) : 991-1003. (in Chinese))
- [33] Yang Luhua, Zhong Ping'an, Zhu Feilin, et al. A comparison of the reproducibility of regional precipitation properties simulated respectively by weather generators and stochastic simulation methods [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2022, 36 (2) : 495-509.
- [34] Caron A, Leconte R, Brissette F. An improved stochastic weather generator for hydrological impact studies [J]. Canadian Water Resources Journal, 2008, 33 (3) : 233-255.
- [35] 王垚, 史海匀. 粤港澳大湾区极端降雨的时空变化及其潜在驱动因素探究 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (6) : 1-15. (Wang Yao, Shi Haiyun. Exploring spatiotemporal variations and driving factors of extreme precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (6) : 1-15. (in Chinese))
- [36] Nie Wanshu, Kumar S V, Getirana A, et al. Nonstationarity in the global terrestrial water cycle and its interlinkages in the Anthropocene [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121 (45) : e1891260175.
- [37] Li Yong, Wang Xiufeng, Lin Jing, et al. A wavelet bicoherence-based quadratic nonlinearity feature for translational axis condition monitoring [J]. Sensors, 2014, 14 (2) : 2071-2088.
- [38] Kjeldsen T R, Ahn H, Prosdocimi I. On the use of a four-parameter kappa distribution in regional frequency analysis [J]. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 2017, 62 (9) : 1354-1363.
- [39] Shin Y, Park J S. Modeling climate extremes using the four-parameter kappa distribution for r -largest order statistics? [J]. Weather and Climate Extremes, 2023, 39: 100533.
- [40] Zha Xini, Xiong Lihua, Chen Jie, et al. Estimating multisite precipitation by a stepwise NHMM-VAR model considering the spatiotemporal correlations of precipitation amounts [J]. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128065.
- [41] Vorobevskii I, Park J, Kim D, et al. Simulating sub-hourly rainfall data for current and future periods using two statistical disaggregation models: case studies from Germany and South Korea [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2024, 28 (2) : 391-416.
- [42] 王亚欣, 梁丙臣, 邵珠晓. 黄海南部海域的极值波高推算 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (6) : 117-122. (Wang Yaxin, Liang Bingchen, Shao Zhuxiao. Calculation of extreme wave height in southern Yellow Sea [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (6) : 117-122. (in Chinese))
- [43] Muruganandham S, Robel A A, Hoffman M J, et al. Statistical generation of ocean forcing with spatiotemporal variability for ice sheet models [J]. Computing in Science & Engineering, 2023, 25 (3) : 30-41.
- [44] Arcagni A, Cerqueti R, Grassi R. Higher-order assortativity for directed weighted networks and Markov chains [J]. European Journal of Operational Research, 2024, 316 (1) : 215-227.
- [45] Khoo T H, Pathmanathan D, Otto P, et al. A Markov-switching spatio-temporal ARCH model [J]. Statistics, 2024, 13 (3) : e713.
- [46] Guo Tianli, Song Songbai, Liu Xin, et al. A comparison of several cyclo-stationary and fractionally differenced time-varying autoregressive models in runoff simulation and prediction [J]. Journal of Hydrology, 2024, 638: 131509.

(收稿日期: 2025 - 01 - 13 编辑: 胡新宇)