

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0025

李帅,王怀军,潘莹萍.基于 Max-Stable 模型的海河流域气候极值变化特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):31-43. LI S,WANG H J,PAN Y P. Analysis of climate extremes using Max-Stable processes in the Haihe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(2):31-43. (in Chinese)

# 基于 Max-Stable 模型的海河流域气候极值变化特征

李帅<sup>1</sup>,王怀军<sup>2,3</sup>,潘莹萍<sup>4</sup>

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院,兰州 730000;2. 淮阴师范学院 城市与环境学院,江苏 淮安 223300;  
3. 水利部应对气候变化研究中心,南京水利科学研究所,南京 210029;4. 北京师范大学 地理科学学部,北京 100875)

**摘要:**为了解在全球变暖的背景下海河流域对气候极端事件的响应,基于海河流域 1961—2016 年气温与降水数据,使用 RCLimDex 模型、MK 趋势检验、Max-Stable 模型对海河流域气候极值进行建模分析,研究海河流域气温极值、降水极值不同重现期的时空分布、变化特征。结果表明:海河流域温度极值  $TX_x$  在空间上表现出从北向南递减趋势,值域为 30~40 °C,其中 36~40 °C 占大部分地区。 $TX_x$  在南方呈降低趋势,北方呈上升趋势。降水极值  $RX_{1day}$  空间上表现出从东南向西北方向递减的趋势,值域为 50~100 mm,其中 60~90 mm 占据绝大部分区域。 $RX_{1day}$  整体呈下降趋势,其中渤海地区  $RX_{1day}$  下降趋势最大。海河流域 GEV 模型拟合结果表明,海河流域气温极值主要受纬度、海拔影响,随纬度、海拔增加而降低,其变化波动为北方强于南方。降水极值  $RX_{1day}$  受海拔和经度影响较大,主要表现为随海拔增大而下降的空间分布,其次表现为随经度变化由西向东递增的空间分布,其变化波动随海拔升高而降低。通过 Q-Q 百分位图、非参数极值系数  $\theta$ 、GEV 与 Max-Stable 参数和重现期强度散点图判定系数  $R^2$ ,确定 Max-Stable 模型可以很好地模拟海河流域气候极值,达到 GEV 模型同等效果。气候极值  $TX_x$  与  $RX_{1day}$  主要受到纬度、经度和海拔的影响,但距海岸距离的加入仅可以优化  $TX_x$  模型的建立。2、10、50、100 a 一遇气温极值  $TX_x$  的空间分布均表现为自东北向西南递增的分布模式,高值区均分布于西南大部一带,最高温度达 40~44 °C。2、10、50、100 a 一遇降水极值  $RX_{1day}$  的空间分布主要受纬度影响,其次受经度和海拔的影响,均表现为从西南偏中向北方递减,高值区分布在西南偏中一带,最大降水量达 80~200 mm。

**关键词:**海河流域;空间建模;Max-Stable processes;气候极值;广义极值分布

中图分类号:P339 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of climate extremes using Max-Stable processes in the Haihe River basin

LI Shuai<sup>1</sup>, WANG Huaijun<sup>2,3</sup>, PAN Yingping<sup>4</sup>

(1. Northwest Normal University-College of Geography and Environment Science, Lan'zhou 730000, China;

2. School of Urban and Environmental Sciences, Huai'jin Normal University, Huai'an 223300, China;

3. Research Center for Climate change, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In order to understand the response of Haihe River basin (HRB) to extreme climate events in the context of global warming, climate variables (temperature and precipitation) from 1961 to 2016 were used. The RCLimDex model, M-K trend test and Max-Stable model, and the climate extremes of HRB was modeled and analyzed. The spatial and temporal distribution and variation characteristics of temperature and precipitation extremes in HRB were studied. The results showed that  $TX_x$  displayed

收稿日期:2019-02-23 修回日期:2019-09-28 网络出版时间:2019-10-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191012.1518.006.html>

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508101);国家自然科学基金(41701034)

作者简介:李帅(1994—),男,江苏徐州人,主要从事区域环境与资源开发方面的研究。E-mail: nwnulishuai@163.com

通信作者:王怀军(1986—),男,湖南永州人,副教授,博士,主要从事极端气候事件研究。E-mail: wanghj@hytc.edu.cn

a decreasing trend from north to south with a range of 30-40 °C, of which 36-40 °C accounted for most areas in the HRB. TXx exhibited a decreasing trend in the south and increasing trend in the north. The precipitation extreme value RX1day showed a decreasing trend from southeast to northwest with a range of 50-100 mm of which 60-90 mm occupied most areas. The overall RX1day showed a downward trend among which the Circum-Bohai Sea region had the largest downward trend. The GEV model fitting results showed that the temperature extremes were mainly affected by latitude and elevation, and decreased with the increase of latitude and elevation and the variation fluctuation was stronger in the north compared south in the HRB. The extreme value of precipitation RX1day was greatly affected by the altitude and longitude, which was mainly represented by the spatial distribution that decreased with the increase of altitude, followed by the spatial distribution that increased from west to east with the change of longitude. Based on the Q-Q percentile graph, non-parametric extreme value coefficient  $\theta$ , GEV and Max-Stable parameters, and the determination coefficient  $R^2$  of the intensity scatter plot for the recurrence period, it was determined that the Max-Stable model could well simulate the climate extremes in the HRB and GEV had the same effect. Climate extremes TXx and RX1day were mainly affected by latitude, longitude, and altitude, but the addition of distance from the coast could only optimized the establishment of the TXx model. The spatial distribution of temperature extremes TXx once in 2, 10, 50, and 100 years showed an increasing distribution pattern from northeast to southwest, and the high-value areas were distributed in most of the southwest, with the highest temperature reaching 40-44 °C. The spatial distribution of extreme rainfall values TX1day once in 2, 10, 50, and 100 years was mainly affected by latitude, followed by longitude and altitude. All of them showed a decrease from the southwest to the north, and the high value areas were distributed in the southwest. Centrally, the maximum precipitation was 80-200 mm.

**Key words:** Haihe River basin; spatial modeling; Max-Stable processes; climate extremes; generalized extreme distribution

在过去的几十年里,许多证据表明极端天气、气候事件在强度、频率和持续时间上发生了变化<sup>[1]</sup>,特别是日极端气温和日极端降水的频率和强度都有所增加<sup>[2]</sup>。大量的研究表明全球变暖对极端气候事件的影响极大<sup>[3-4]</sup>。据联合国减灾办公室(The United Nations Office for Disaster Risk Reduction)报道,2015 年是有记录以来最热的一个年份,在这一年当中,自然灾害影响了近 1 亿人口;受到灾害影响最重的国家都在亚洲,它们是中国、印度、菲律宾和印度尼西亚;自然灾害共导致 2.2 万人死亡,带来的经济损失约合 660 亿美元。

在全球变暖背景下,极端气候对海河流域造成的影响愈演愈烈,已有大批学者<sup>[5-9]</sup>对海河流域极端气候的时空分布特征进行研究:海河流域极端高温的强度、频率和持续时间均有较强的增加趋势,但于极端低温增幅相比并不显著;海河流域整体呈暖干趋势,在降水总量减少的情况下,短历时强降水量有较明显的增加趋势;降水量总体空间分布特征是西北部山区偏少,东北部山前平原区偏多,流域中南部接近正常年份;降水年际变化总体呈显著下降趋势。目前对海河流域气候极值的研究多基于站点数据,对某气候要素最大值(最小值)强度、发生频率、周期及变化趋势值分析,气候变化背景下通过系统建模分析气候极值重现期及其强度的研究较少。Max-Stable model(极值稳定模型)于 20 世纪 80 年代末

至 90 年代初,由 Resnick<sup>[10]</sup>率先提出,之后许多研究者不断提出不同的研究方法<sup>[11-12]</sup>。Youngsaeng 等<sup>[13]</sup>验证 Max-Stable 方法可以很好地刻画气候极值的空间结构和特征。Davison 等<sup>[14]</sup>使用 Brown Max-Stable 模型,并证明其可以模拟出瑞士年最大降水量的变化。Zhang 等<sup>[15]</sup>表明降水极值的空间分布受到地形的影响,故将海拔作为一个协变量加入模型以改善 Max-Stable 模型的评估准确度。

本文基于海河流域 1961—2016 年气温与降水数据,采用 RCLimDex 模型、MK 趋势检验、Max-Stable 模型,对海河流域气候极值进行建模分析,研究海河流域气温极值、降水极值不同重现期的时空分布、变化特征。研究结果旨在全面了解海河流域气候极值的时空格局及变化趋势,为南水北调工程制定提供借鉴参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况和数据来源

海河流域位于东经 112°~120°、北纬 35°~43°,包括滦河、海河及徒骇马颊河三大水系,东达渤海,西至山西高原,南瞻黄河,北顾蒙古高原。海河流域位于暖温带、400~800 mm 等降水量线之间,属于半湿润东亚季风气候区。植被划分为内蒙古高原温带草原区、华北山地暖温带落叶阔叶林区和平原暖温带落叶阔叶林栽培作物区 3 个区,土壤主要为黄

土、栗钙土、灰褐土、棕壤、潮土、盐碱土等。海河流域是我国重要的粮食生产基地,集中了全国近 10% 的人口,也是我国七大流域中水资源最为紧缺、水资源供需矛盾最为突出的流域;同时,海河流域又是我国华北地区气候变化最为显著的区域之一<sup>[8]</sup>。全流域多年平均降水量为 541.55 mm,降水年际变化较明显,最大为 1964 年的 880.93 mm,最小值为 1997 年的 359.8 mm;流域多年平均气温在 10.36 °C,气温年际变化不明显,最大为 11.92 °C,最小为 9.00 °C<sup>[16]</sup>。

所用气象数据为海河流域 29 个气象站点 1961—2016 年日气温、降水资料,所有数据在中国气象数据网获得(<http://data.cma.cn/en>),并使用标准正态检验方法(standard normal homogeneity test)对数据进行预处理<sup>[17]</sup>,均通过一致性检验。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。距海岸距离使用 arcgis10.5 进行处理得到。其中纬度、经度、海拔和距海岸距离值的范围分别为 35°N~43°N,112°E~120°E,-37~2 905 m,0~472.21 km (图 1)。

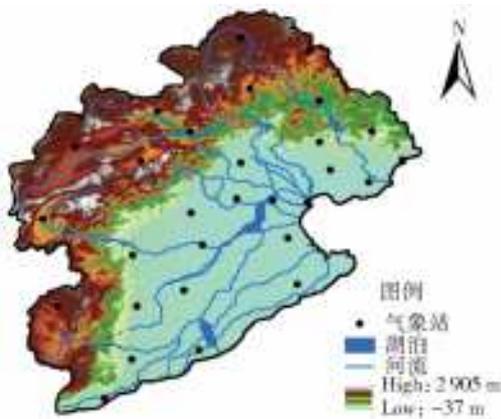


图 1 海河流域及其气象站点分布

Fig. 1 Location of meteorological stations in Haihe River basin, China

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 RCLimDex 模型

RCLimDex 是用于计算多种极端气候指数的模型,该程序由加拿大环境部气候研究中心推出,可计算 11 个极端降水类指数、16 个极端温度类指数(<http://www.climdex.org/indices.html>),众指数被 WMO 世界气象组织认可。本研究选用 RCLimDex 模型中 RX1day 指数(1 d 最大降水量/mm)和 TXx 指数(日最高气温的极大值)来分别代表降水和温度极值(下同)。

### 1.2.2 MK 趋势检验

Manner-Kendall 检验<sup>[18-19]</sup>是一种成熟趋势检

验方法,具体展开见参考文献<sup>[20]</sup>。在进行 Manner-Kendall 趋势检验前,使用 R 语言包(ZYP)来消除时间序列自相关带来的影响,否则就会产生误差,然后计算各站点气候极值倾斜度  $\beta$ ,定义  $10\beta$  为各气候要素气候倾向率。

### 1.2.3 Max-Stable 模型

Max-Stable 模型可以看作多元高斯分布的极值类比理论或者是极值理论的延伸<sup>[21]</sup>。Max-Stable 模型能充分考虑气候极值的空间相关性,很好地模拟气候极值的空间分布<sup>[22-24]</sup>。该模型在 R 语言中可以直接建模("spatial extremes")<sup>[25]</sup>。一般来说,对区域气候极值的重现期研究要先选择合适的统计学分布函数对极值数据进行拟合。主要的分布函数有广义极值分布(generalized extreme value distribution, GEV)、广义帕累托分布(generalized pareto distribution, GP)和伽马分布(gamma),后两者是基于 GEV 分布演变而来的。这三种分布模型均可直接对站点数据做出极好的拟合效果,得出气候要素极值重现期(概率),并计算重现期对应的极值强度<sup>[26]</sup>。但是对于无观测数据的其他区域,只能通过 GIS 插值进行模拟,精确度只能靠插值方法提高。Max-Stable 模型直接依据纬度、经度、海拔等协变量与站点数据进行建模,建模完成后通过协变量即可得出全流域的气候极值重现期及其强度。因此 Max-Stable 模型被选择用来对海河流域气候极值进行建模。

极值稳定过程  $Z(\cdot)$  是独立同分布随机场中最大值的极限过程,设随机过程  $Z(\cdot)$  是一个可以在独立、同分布随机场  $(Y_i(x), x \in R^d)$  上最大值的极限过程。如果参数  $a_n(x) > 0, b_n(x) \in R$  存在,满足

$$Z(x) = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\max_{i=1}^n Y_i(x) - b_n(x)}{a_n(x)} \quad x \in R^d \quad (1)$$

可以把  $Z(x)$  视为一个极值稳定过程(即 Max-Stable process)。在区域气候极端分析中, $Z(x)$  被认为是  $S$  个站点的气候极值的一个随机变量, $n$  代表时间,通常为 356 d(1 年)。同时, $Z(x)$  的边缘分布函数应该服从广义极值分布(即 GEV, Generalized Extreme Value),定义为

$$Z(x) = \exp\left\{-\left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right\} \quad x \in R^d \quad (2)$$

其中  $1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0; \mu, \sigma$  和  $\xi$  分别代表位置参数、规模参数和形状参数。记  $z = \left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{1/\xi}$ ,并按照下式将边缘分布函数转化为单位 Frechet 边缘分布

$$\Pr[Z(x) \leq z] = \exp\left(-\frac{1}{z}\right) \quad \forall x \in R^d \quad z > 0 \quad (3)$$

为了使空间极值模型达到最优,在对比 Whittle-Matern 模型、Cauchy 模型、Powered Exponential 模型、Bessel 模型以及 Brown-Resnick 模型后,采用模拟效果最好的 Brown-Resnick 模型。这也是最近大量文章所使用的一种 Max-Stable 模型。Brown-Resnick 模型的二元累计分布函数表达为

$$\Pr\{Z(x_1) \leq z_1, Z(x_2) \leq z_2\} = \exp\left[-\frac{1}{z_2} \Phi\left(\frac{a}{2} + \frac{1}{a} \log\left(\frac{z_2}{z_1}\right)\right) - \frac{1}{z_1} \Phi\left(\frac{a}{2} + \frac{1}{a} \log\left(\frac{z_1}{z_2}\right)\right)\right] \quad (4)$$

式中:  $a = \text{Var}\{Y(x_1 - x_2)\}$ ;  $\Phi$  表示标准正态累计分布函数。

空间极值的相关性可以使用极值系数表示,两点(成对)之间极值系数为

$$\theta(h) = -z \log \Pr\{Z(x_1) \leq z, Z(x_2) \leq z\} \quad z > 0 \quad (5)$$

Brown-Resnick 模型的极值系数可以进而表示为

$$\theta(h) = \theta(x_2 - x_1) = 2\phi\{\sqrt{\gamma(h)}/2\} \quad (6)$$

极值系数的取值范围为  $[1, 2]$ , 其中 1 表示完全相关; 2 表示完全不相关。

由于传统似然法需要求出所有站点的联合密度函数,所有它并不能直接应用于 Max-Stable 模型。但是,可以使用二元 Max-Stable 分布模型;即使用成对似然法来拟合 Max-Stable 模型<sup>[27-28]</sup>。成对似然函数为

$$l_p(\psi; z) = \sum_{n=1}^N \sum_{i < j} \log f_z(z_i^{(n)}, z_j^{(n)}; \Psi) \quad (7)$$

其中  $z$  是研究区可用数据;  $f(\dots)$  是 Max-Stable 单位 Frechet 分布的二维联合概率密度函数。同时,式(7)也要求数据符合单位 Frechet 边缘分布。为了使年最大日较值可以直接在 Max-Stable 模型中使用,引入一个双映射  $(y_i, y_j) = f(z_i, z_j)$ , 公式为

$$\begin{cases} z_i = \left(1 + \gamma_i \frac{y_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)_+^{\frac{1}{\gamma_i}} \\ z_j = \left(1 + \gamma_j \frac{y_j - \mu_j}{\sigma_j}\right)_+^{\frac{1}{\gamma_j}} \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),得

$$l_p(\psi; z) = \sum_{n=1}^N \sum_{i < j} \log f_Y(y_i^{(n)}, y_j^{(n)}; \Psi) |J(y_i, y_j)|^{-1} \quad (9)$$

式中:  $J(y_i, y_j)$  是雅可比行列式。

## 2 结果与分析

### 2.1 海河流域气候极值时空变化

将海河流域气候极值(TXx、RX1day)多年平均

均值、气候倾向率使用 IDW 反距离加权进行空间插值(图 2)。图 2(a)、2(b)显示, TXx 值域为 30~40 °C, 其中 36~40 °C 占大部分地区, 空间上表现出从北向南递减趋势, 主要受到纬度地带性的影响; RX1day 值域为 50~100 mm, 其中 60~90 mm 占据绝大部分区域, 空间上表现出从东南向西北方向递减的趋势, 受到海拔差异大及距海岸距离的综合影响。图 2(c)、2(d)显示, TXx 的气候倾向率呈现两个模式, 一是南方的降低趋势; 二是北方的上升趋势, 结合其均值空间分布, 发现 TXx 较小区域反而具有较大的上升趋势; RX1day 整体呈下降趋势, 气候倾向率表现为从内陆向沿海递减的趋势, -2~0 mm/(10a) 所占区域最大; 渤海地区, RX1day 下降趋势最大。TXx 和 RX1day 的平均趋势强度分别为 0.004、-0.244 (仅 RX1day 具有统计学意义), 这与张兵等<sup>[29]</sup>“海河流域的极端降水事件强度在年际变化中均呈减小趋势”、王刚等<sup>[8]</sup>“海河流域整体的暖干趋势以及降水集中的趋势”相符。

### 2.2 海河流域 GEV 模型及其参数分析

将研究区各站点 TXx、RX1day 时间序列分别带入广义极值分布模型, 得到各站点 location、scale 参数(图 3)与对应于 2、10、50、100 a 一遇的重现期强度(图 8)。图 3 中 a1 至 a3、b1 至 b3 为气温极值 TXx 拟合 location 参数、scale 参数与海拔、纬度、经度的散点图, 可以看出 TXx 的 location 参数与海拔、纬度呈较强的负相关, 相关系数分别为 -0.748、-0.729 (均通过显著性检验), 即海河流域气温极值主要受纬度、海拔影响, 从低纬度、低海拔地区向高纬度、高海拔方向递减。scale 参数仅表现出与纬度呈较强的正相关, 相关系数为 0.706 (通过显著性检验), 表明 TXx 的方差由南向北递增, 即北方气温极值变化强于南方地区。气温极值的拟合结果与图 2(a)、2(c)相符。

图 3 中 c1 至 c3、d1 至 d3 为降水极值 RX1day 拟合 location 参数、scale 参数与海拔、纬度、经度的散点图, 明显看出 RX1day 的 location 参数受海拔和经度影响较大, 相关系数分别为 -0.865、0.532 (均通过显著性检验), 即海河流域降水极值主要表现为随海拔增大而下降的空间分布, 其次表现为随经度变化由西向东递增的空间分布, 这与图 2(b)结果相符。scale 参数仅观察到与海拔呈较强的负相关, 相关系数为 -0.714 (通过显著性检验), 即随海拔升高, 降水极值的变化越小。

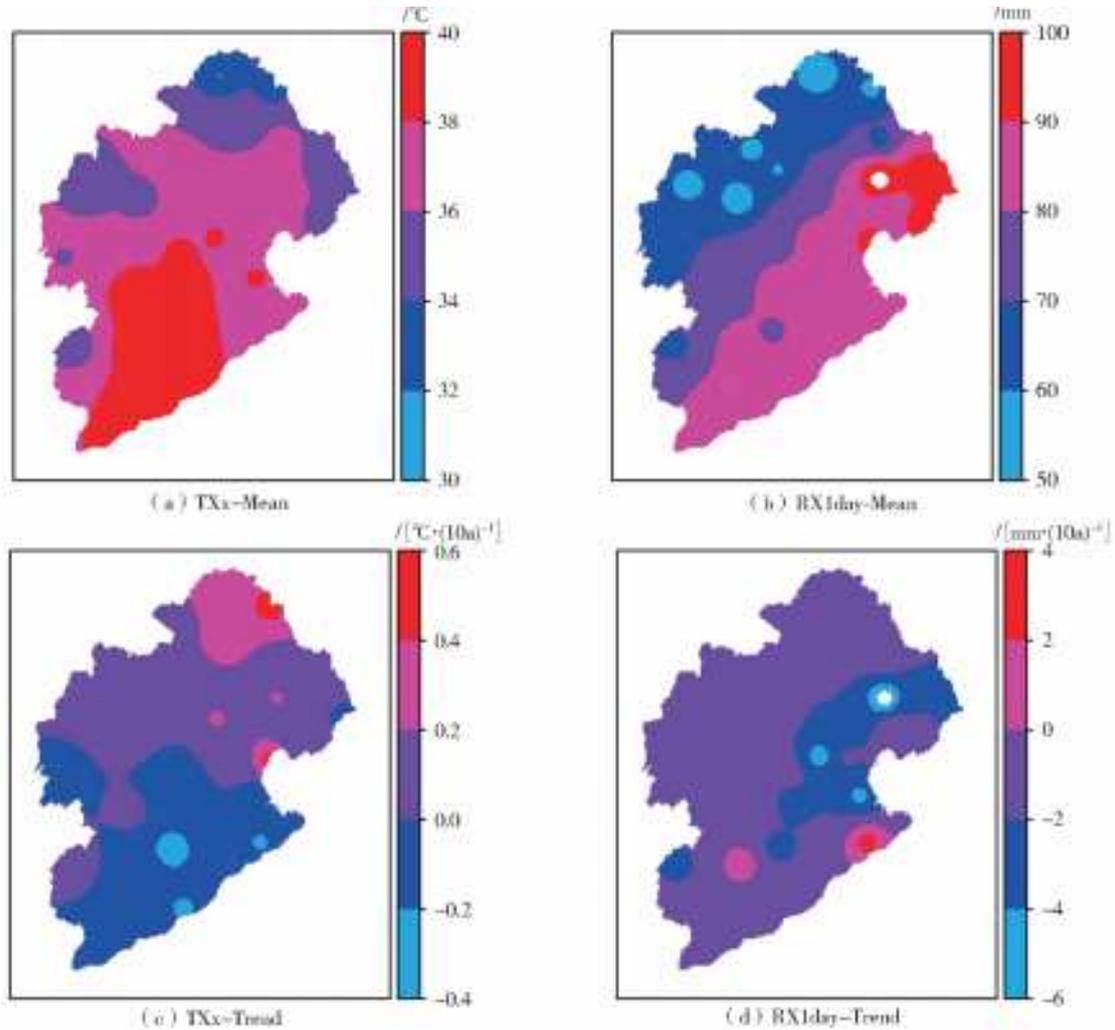


图 2 海河流域气候极值平均值与趋势强度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of mean and magnitude of climate extremes in Haihe River basin

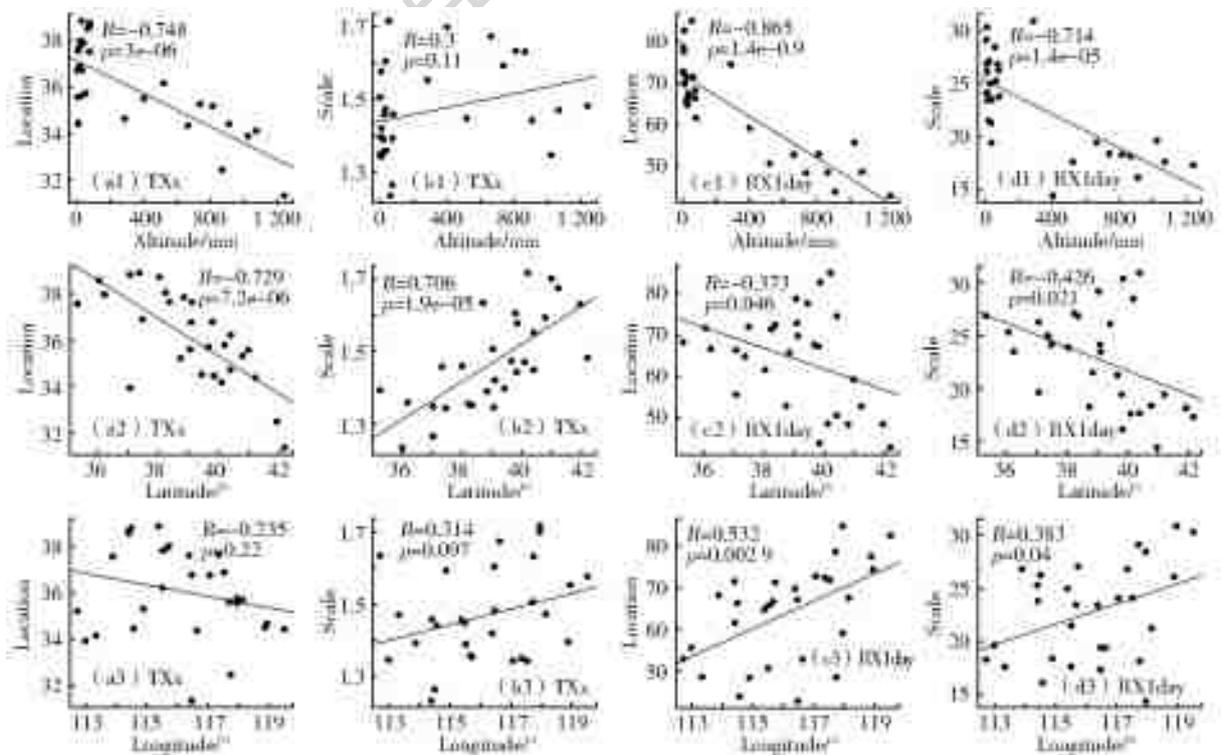


图 3 广义极值分布所得 location、scale 参数与各站点海拔、纬度、经度散点

Fig. 3 Location and scale parameter derived from GEV distribution against altitude, latitude and longitude for each station

## 2.3 海河流域 Max-Stable 模型选择及验证

### 2.3.1 Max-Stable 模型选择

选用海河流域纬度、经度、海拔、距海岸距离等数据作为 Max-Stable 模型的协变量进行建模, 首先建立 16 个以纬度、经度为协变量的基础模型(表 1), 然后以 TIC(takeuchi information criterion)<sup>[30]</sup>值作为判断模型拟合效果的依据, 值最小的模型作为最优模型<sup>[31]</sup>。在挑选出来的模型中, 依次加入海拔、距海岸距离, 并观测 TIC 值是否降低(表 2)。如果 TIC 降低, 则该变量可以作为一协变量加入 Max-Stable 模型中, 否则剔除该变量。图 4 表明, 仅考虑纬度、经度协变量时, TX<sub>x</sub> 最佳模型是 M13, RX1day 最佳模型是 M9。之后将海拔作为协变量加入相应模型(表 2 M17—M20)发现 M13 在加入海拔后, 其 TIC 值迅速降低。这与图 2、3 得到

的结果一致, 即海拔影响 TX<sub>x</sub> 极值, 加入海拔能改善 TX<sub>x</sub> 极值建模。由于 RX1day 的 TIC 值较大, M9 模型在加入协变量海拔之后, 其 TIC 值降低不明显, 但仍可以选择 TIC 值较小的 M18 继续建模。考虑到解释变量越多, 会降低模型自由度, 使整体系统拟合优度越高。即越多的相关变量的加入, 可以优化模型的建立。因此将距海岸距离作为新的协变量被加入建模过程中(表 2)。图 4 结果表明 TX<sub>x</sub> 与 RX1day 的 TIC 值均有所下降, 尽管下降不明显, 但将海拔加入 Max-Stable 极值建模确实能改善模型。同时 TIC 值下降不明显可能是由于距海岸距离与经度产生的作用有部分重合所导致的。因此在 RX1day 建模中不加入 DFS(距海岸距离), 即 M18 模型(表 2), 而 TX<sub>x</sub> 加入 DFS 以优化模型, 即 M21 模型。

表 1 Max-Stable 模型拟合方程  
Tab. 1 Max-Stable model fitting equation

Model	Location parameter	Scale parameter
M1	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lon}(x)$
M2	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x)$
M3	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}_2^2(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lon}^2(x)$
M4	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lon}^2(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}^2(x)$
M5	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}(x)$
M6	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x)$
M7	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \beta_2 \text{lon}(x)$
M8	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x)$
M9	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lat}^2(x) + \alpha_3 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lat}^2(x) + \beta_3 \text{lon}(x)$
M10	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lon}_2(x) + \alpha_3 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}_2(x) + \beta_3 \text{lon}(x)$
M11	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lat}(x) + \alpha_3 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}_2(x) + \beta_2 \text{lon}(x)$
M12	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lon}(x) + \alpha_3 \text{lon}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x)$
M13	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \alpha_3 \text{lon}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x)$
M14	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^2(x) + \alpha_2 \text{lon}_2(x) + \alpha_3 \text{lon}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}_2(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x)$
M15	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}^2(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}^2(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x)$
M16	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^2(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \beta_2 \text{lon}^2(x)$

注: 表中 lon(x) 和 lat(x) 是站点的经度、纬度, 形状参数设为常数。

表 2 加入海拔及距海岸距离协变量的 Max-Stable 模型参数  
Tab. 2 Parameters of the Max-Stable (GEV) distribution with covariates of altitude

Model	Location parameter	Scale parameter
M17	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \alpha_3 \text{lon}(x) + \alpha_4 \text{alt}(x) + \alpha_5 \text{alt}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \beta_3 \text{alt}(x)$
M18	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lat}^2(x) + \alpha_3 \text{lon}(x) + \alpha_4 \text{alt}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lat}_2(x) + \beta_3 \text{lon}(x) + \beta_4 \text{alt}^{0.5}(x)$
M19	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \alpha_3 \text{lon}(x) + \alpha_4 \text{alt}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \beta_3 \text{alt}^{0.5}(x)$
M20	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lat}^2(x) + \alpha_3 \text{lon}(x) + \alpha_4 \text{alt}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lat}^2(x) + \beta_3 \text{lon}(x) + \beta_4 \text{alt}(x)$
M21	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}^{0.5}(x) + \alpha_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \alpha_3 \text{lon}(x) + \alpha_4 \text{alt}(x) + \alpha_5 \text{alt}^{0.5}(x) + \alpha_6 \text{dfs}^{0.5}(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lon}^{0.5}(x) + \beta_3 \text{alt}(x) + \beta_4 \text{dfs}^3(x)$
M22	$\mu(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \text{lat}(x) + \alpha_2 \text{lat}^2(x) + \alpha_3 \text{lon}(x) + \alpha_4 \text{alt}^{0.5}(x) + \alpha_5 \text{dfs}^2(x)$	$\sigma(x) = \beta_0 + \beta_1 \text{lat}(x) + \beta_2 \text{lat}^2(x) + \beta_3 \text{lon}(x) + \beta_4 \text{alt}^{0.5}(x) + \beta_5 \text{dfs}^2(x)$

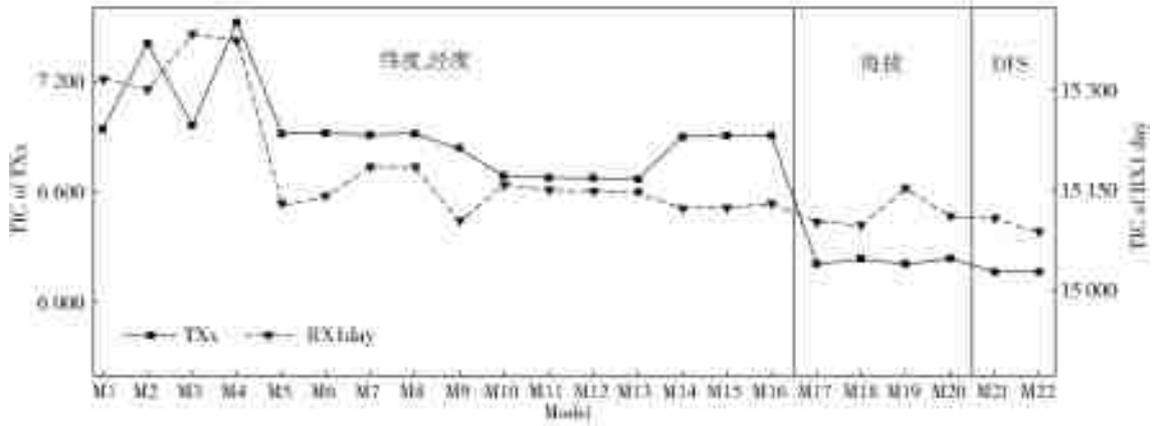


图 4 Max-Stable 模型 TIC 值散点图

Fig. 4 The scatter of TIC for different Max-Stable model

### 2.3.2 Max-Stable 模型验证

使用 Max-Stable 分布对全流域进行模拟,将模拟结果与 GEV 模型做比较,以检测 Max-Stable 模型在海河流域的适用性。图 5、6 为所选的两个 Max-Stable 模型的 Q-Q 图,用来观察模型所拟合出的概率分布是否近似于样本数据。可以看到,图 5、6 中挑选的 4 个随机点均处于 95% 置信水平虚线

内,分位数在置信区间内彼此匹配得较好,这表明 Max-Stable 的建模通过统计学显著性检验。图 5、6 给出  $\theta$  与  $h$  的非参数成对极值系数散点图(大图),  $h$  为两点距离。极值系数反映了自变量(即纬度、经度、海拔等)的相关性强度<sup>[27]</sup>。其中,  $\theta=1$  代表两点完全相关;  $\theta$  代表两点完全不相关。大图中的黑色曲线是由估计超参数(hyper-parameters)代入相关

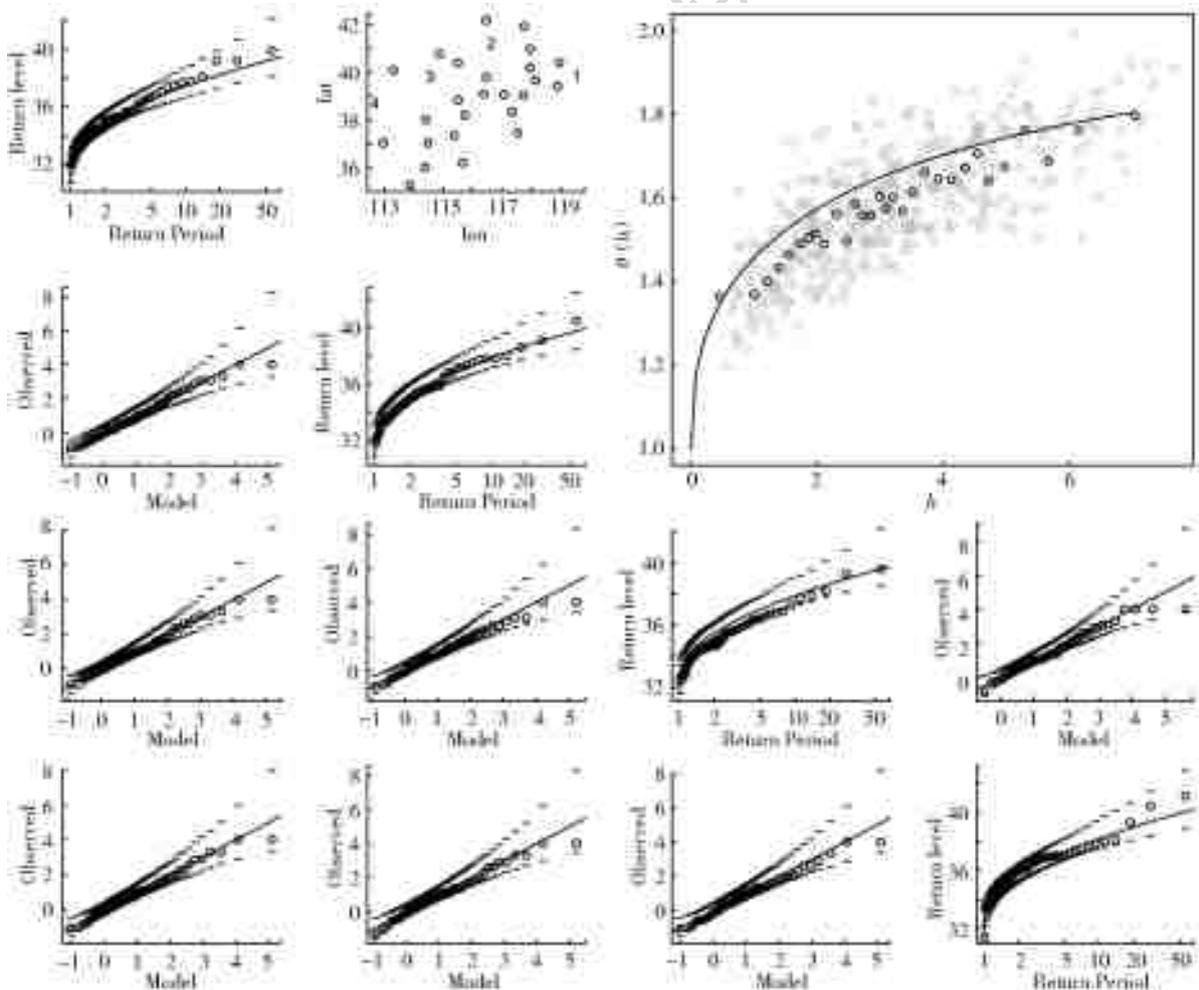


图 5 气温极值 (TXx) Max-Stable 建模精度验证 (图中虚线表示最适 Max-Stable 模型模拟的 95% 置信区间)

Fig. 5 Temperature extreme value (TXx), Max-Stable modeling accuracy verification (the dashed line in the figure indicated the 95% confidence interval of the optimal Max-Stable model simulation)

性函数计算得来的理论极值系数方程。从图 5、6 大图中看出,极值系数散点贴近于理论极值系数方程(黑色曲线),且曲线平滑,表明所选模型适用于气候极值的空间建模。仅以 TIC 值判断协变量的选取或许会遗漏一些协变量的属性,因此对所选模型的验证时,进一步比较将距海岸距离加入模型是否能够优化模型(图 7、8)。图 7、8 中模拟参数(simulated parameter)是从 Max-Stable 模型中提取出来的站点结果;观测参数(observed parameter)则是基于站点观测数据使用 GEV 广义极值模型做出的模拟结果(如 2.2 节所示)。图 7(a1-a2)、7(b1-b2)明显表明在未考虑 DFS(距海岸距离)时,模拟参数与观测参数存在高度相关,且都通过了统计显著性检验,其中模拟与观测 location 参数的判定系数  $R^2$  分别为 0.949、0.832, scale 参数的判定系数  $R^2$  分别为 0.465、0.615。在模型加入 DFS 后,参数间的判定系数  $R^2$  均有所上升,其中 TXx 的 scale 参数在加入距海岸距离后,其判定系数  $R^2$  增加到 0.572,这表明 DFS 的加入能有效地改善 Max-Stable 模型的

建立。图 8 是两种模型(GEV、Max-Stable)不同重现期强度进行比较,其中对应于重现期  $T$  的重现期强度  $R_T$  是事件平均每  $T$  年发生一次的强度值(对于 TXx 为  $^{\circ}\text{C}$ ;RX1day 为 mm)。可以看到,在未加入 DFS 之前,TXx 的 4 个重现期的两种模型结果都具有极高的判定系数,这表明 Max-Stable 模拟效果极好。但 TXx 在加入距海距离后,50 a 一遇及 100 a 一遇的判定系数  $R^2$  有了非常轻微下降,这可能是上文提到的距海岸距离与经度产生的作用有部分重合所导致的。对于 RX1day,在未考虑 DFS 时 Max-Stable 模型在模拟重现期时的效果不如 TXx 的效果好,这与图 4 得到的结果“由于海拔落差过大及环渤海导致的降水量极值差异过大导致 Max-Stable 分布无法精确模拟 RX1day”相符。虽然 RX1day 的 50 a 一遇及 100 a 一遇的判定系数  $R^2$  较小,但同样通过了统计学显著性水平。而且在加入距海岸距离后,其判定系数  $R^2$  明显变大,进一步说明距海岸距离会影响海河流域气候极值。

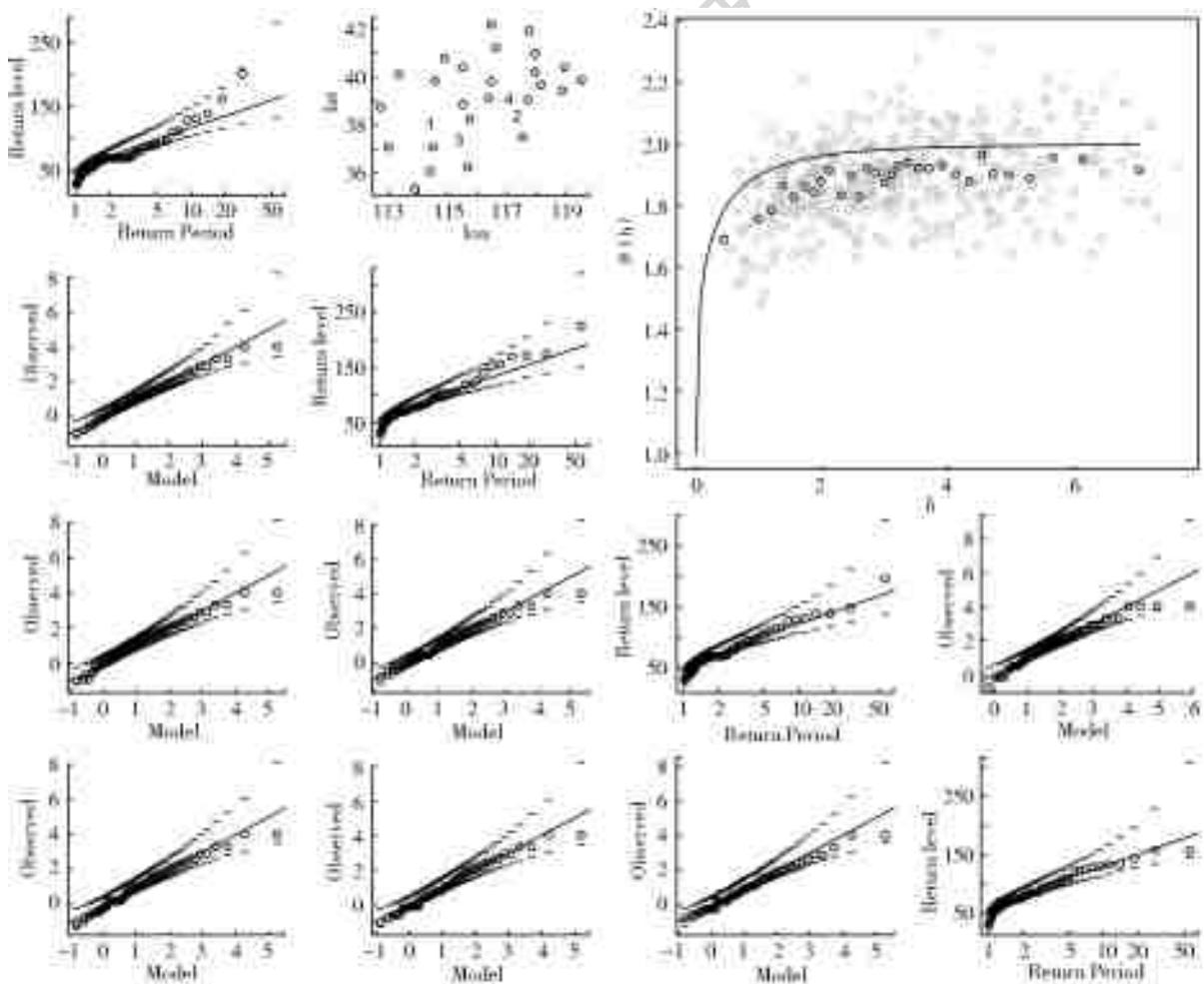


图 6 降水极值(RX1day)Max-Stable 建模精度验证(图中虚线表示最优 Max-Stable 模型模拟的 95%置信区间)  
 Fig. 6 Verification of the accuracy of the Max-Stable modeling for precipitation extremes (RX1day) (the dashed line in the figure indicates the 95% confidence interval simulated by the optimal Max-Stable model)

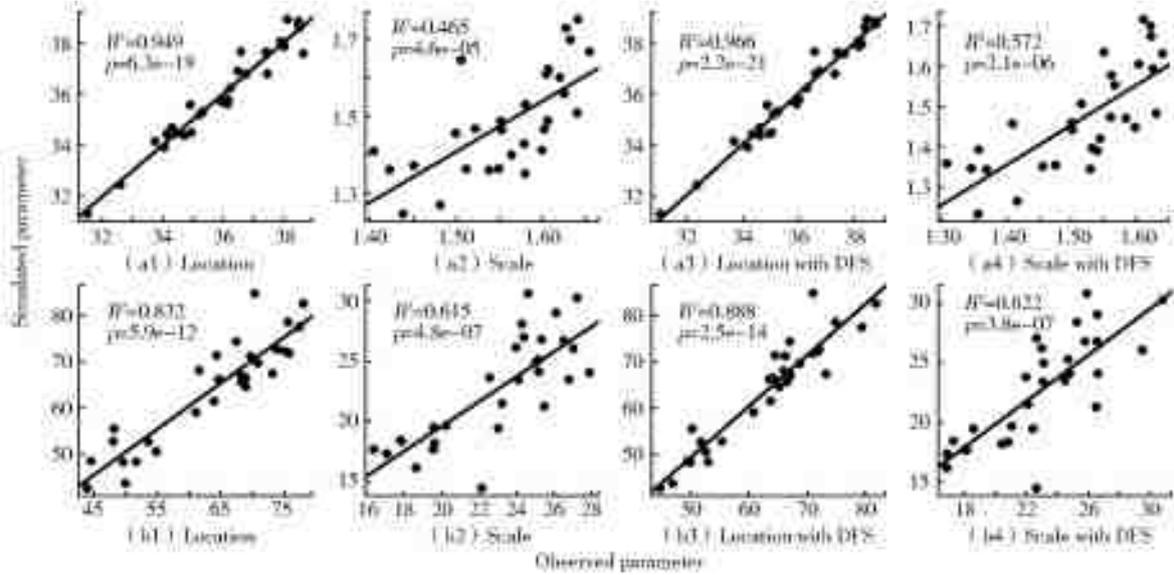


图7 各站点 TXx(a1-a4)与 RX1day(b1-b4)的广义极值分布参数与 Max-Stable 模型参数散点图  
 Fig.7 Relationship of GEV parameters estimated by Max-Stable model and maximum-likelihood estimation at individual station for TXx (a1-a4) and RX1day (b1-b4)

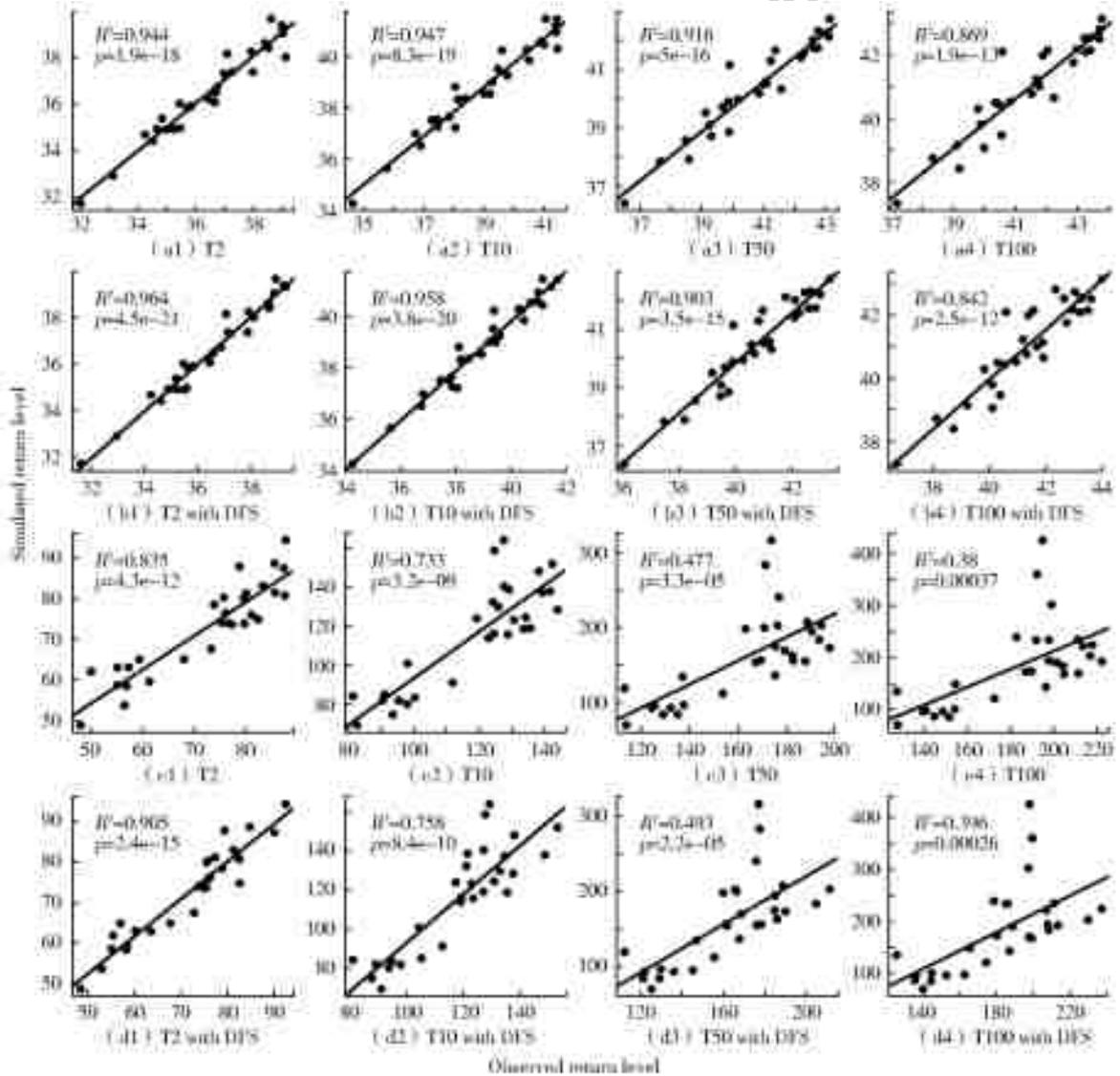


图8 各站点 TXx(a1-b4)与 RX1day(c1-d4)的广义极值分布所得重现期强度与 Max-Stable 模型所得重现期强度散点图  
 Fig.8 Relationship between the observed return level derived from the GEV at individual station and simulated data from the Max-Stable model (a1-b4;TXx;c1-d4;RX1day)

## 2.4 Max-Stable 模型的气候极值重现期空间模拟

TXx 与 RX1day 对应不同重现期的强度 RT 空间分布模式见图 9。在未考虑距海岸距离时, TXx 四个重现期强度 RT 空间分布相似, 均表现为自东北向西南递增的分布模式。极值范围由 T2 的 22~40 °C 增加到 T100 的 26~44 °C, 2、10、50、100 a 一遇 TXx 的高值区在西南大部一带, 所占面积超过 1/3, 东北大部一直为低值区。值得注意的是, 本来 TXx 极值应该低的高海拔地区, 其极值反而同西南地区一样高。结合王永财等<sup>[9]</sup>得出的结论: 海河流域西部及西南地区降水量趋势显著减少, 降水频率低, 这导致土壤表面干旱引起的低反射率, 进而出现温度极值<sup>[32]</sup>。TXx 在考虑距海岸距离后(图 9b1-b4), 四个重现期强度 RT 均整体下降, 尤其是该流域靠近渤海地

区, 但极值范围双向扩大, 由原本最低 22 °C 跌至 20 °C, 最高 44 °C 增大到 45 °C。RX1day 不同重现期强度的空间分布相似, 均表现为从西南偏中向北方递减。极值范围由 T2 的 40~80 mm 增加到 T100 的 120~200 mm, 2、10、50、100 a 一遇 RX1day 的高值区在西南偏中一带; 低值区则主要处于北部流域。这表明 RX1day 的重现期空间分布主要受纬度影响, 其次受经度和海拔的影响; 从流域最西南角的低值区体现出海拔对降水极值的影响。图 9(d1-d4) 表明 RX1day 在加入距海岸距离后, T2 对应的强度范围扩大 3 倍: 20~140 mm; 并且呈现出极强的东西地带性(即受渤海影响较大)。这表明距海岸距离或许并不能有效地改善 RX1day 模型的建立, 尽管 TIC 及图 5 至 8 的结果显示距海岸距离的加入能轻微改善模型。图 10(c1-c4)、图 10(d1-d4) 给出了更有

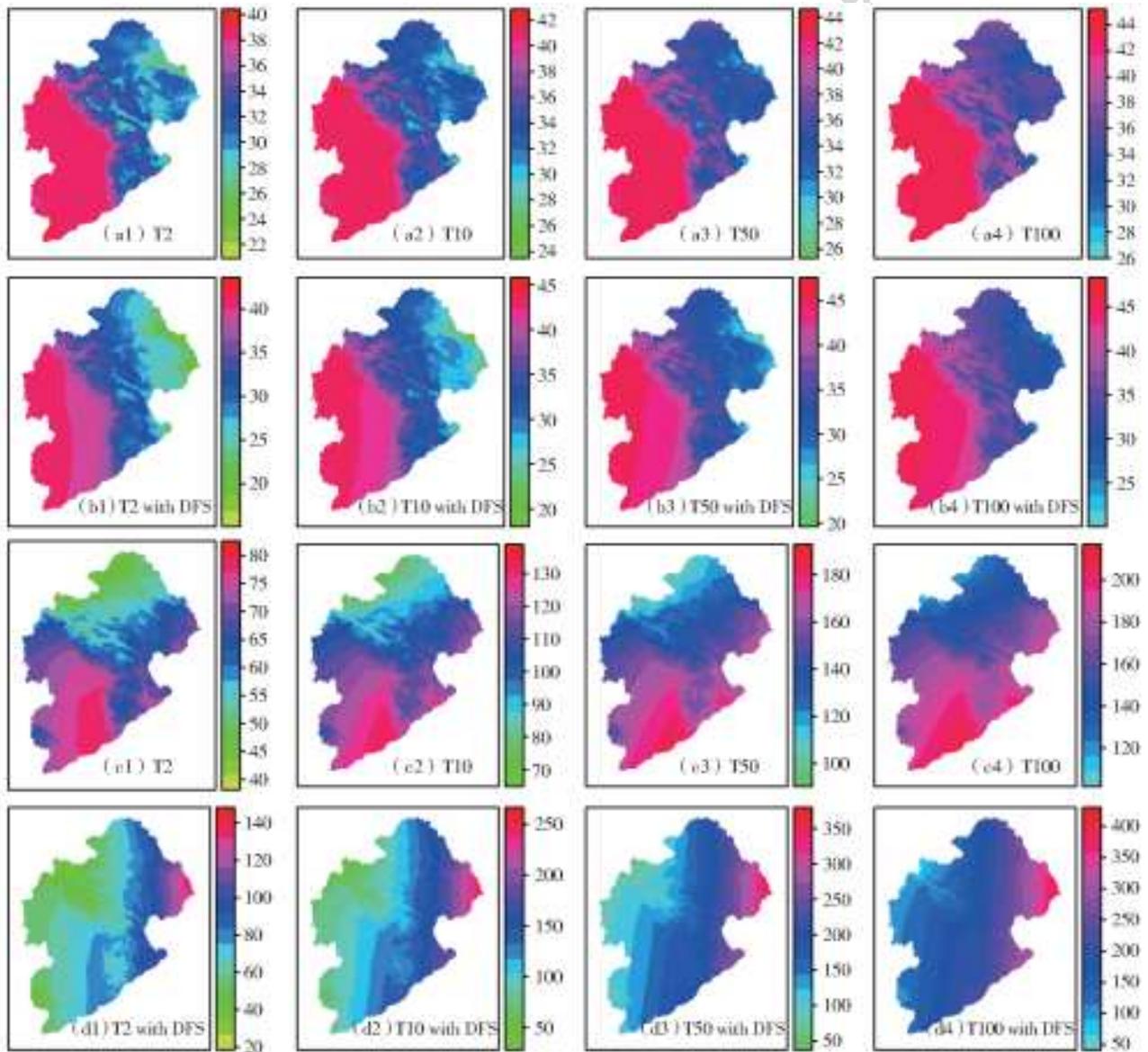


图 9 TXx 与 RX1day 最佳 Max-Stable 模型 2 a、10 a、50 a、100 a 一遇重现期强度空间分布(TXx 单位为 °C, RX1day 单位为 mm)

Fig. 9 Spatial distribution of the best Max-Stable model with a return period of 2, 10, 50, and 100 years for TXx and RX1day

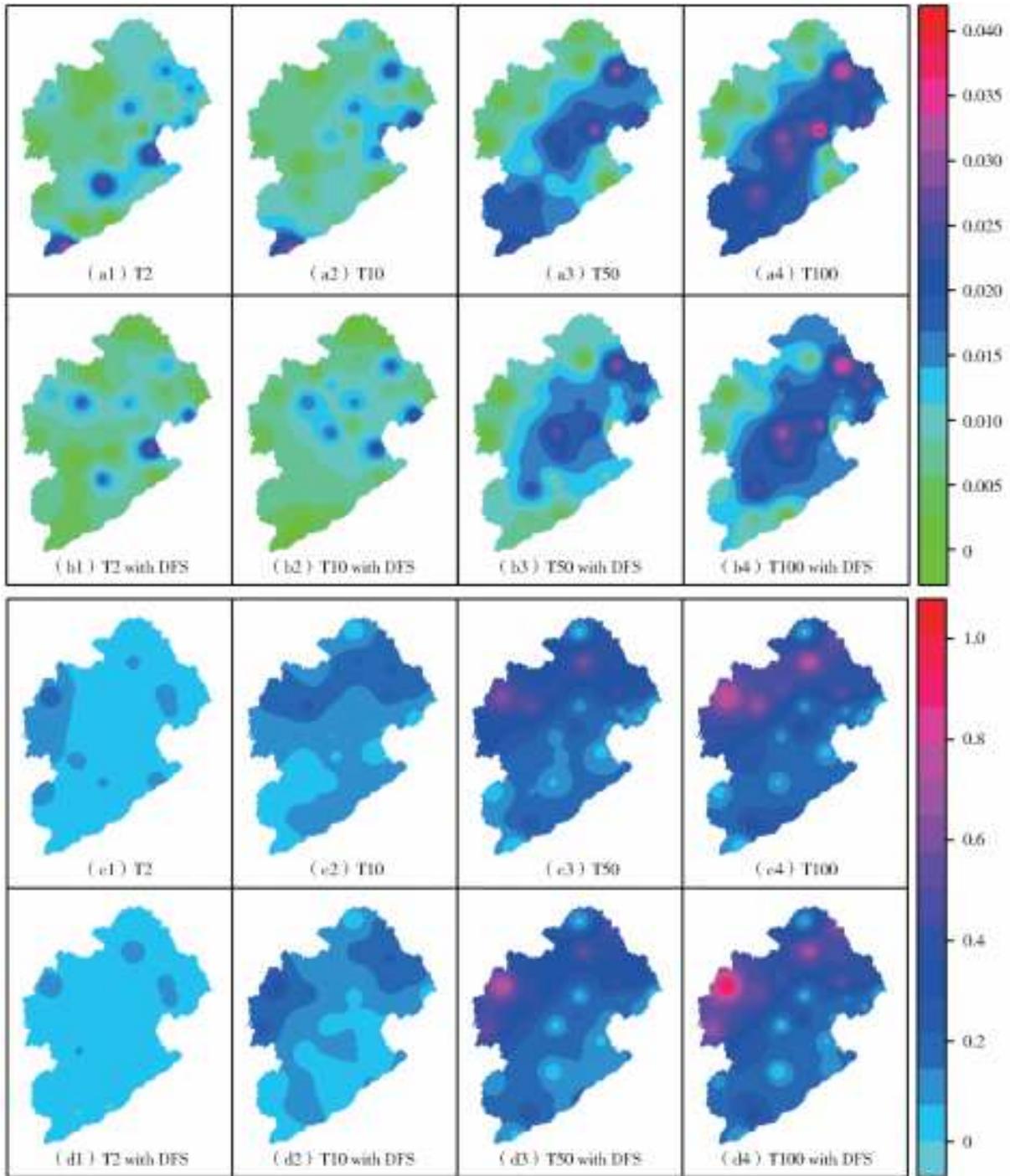


图 10 TXx(a1—b4)与 RX1day (c1—d4)广义极值分布与 Max-Stable 模型各重现期强度空间差异

Fig. 10 Spatial difference between the observed data derived from the GEV at individual station and simulated data from the Max-Stable model for TXx (a1-b4) and RX1day (c1-d4)

力的证据,模拟值与观测值的空间差异—相似的 MAE 也表明距海岸距离不能有效地改善模型 (MAE, Mean Absolute Error, 即  $[(\text{simulation}-\text{observation})/\text{observation}] \times 100$ 。对于 TXx, MAE 在考虑距海岸距离后明显减小,表明距海岸距离能有效改善模型的建立。

### 3 结 论

(1)海河流域温度极值 TXx 在空间上表现出从

北向南递减趋势,主要受到纬度地带性的影响,值域为 30~40 °C,其中 36~40 °C 占大部分地区。TXx 气候倾向率呈现两个模式,一是南方的降低趋势;二是北方的上升趋势,即 TXx 较小区域反而具有较大的上升趋势。降水极值 RX1day 空间上表现出从东南向西北方向递减的趋势,受到海拔差异大及距海岸距离的综合影响,值域为 50~100 mm,其中 60~90 mm 占据绝大部分区域。RX1day 整体呈下降趋势,气候倾向率表现为从内陆向沿海递减的趋势,

-2~0 mm/(10a)所占区域最大;渤海地区的 RX1day 下降趋势最大。

(2)海河流域 GEV 模型拟合结果表明, TXx 的 location 参数与海拔、纬度呈较强的负相关,即海河流域气温极值主要受纬度、海拔影响,随纬度、海拔增加而降低。scale 参数仅表现出与纬度呈较强的正相关,表明 TXx 的方差由南向北递增,即北方气温极值波动变化强于南方地区。RX1day 的 location 参数受海拔和经度影响较大,主要表现为随海拔增大而下降的空间分布,其次表现为随经度变化由西向东递增的空间分布。scale 参数仅观察到与海拔呈较强的负相关,即随海拔升高,降水极值的波动变化越小。

(3)使用 Max-Stable 模型对海河流域进行建模分析,通过 Q-Q 百分位图、非参数极值系数  $\theta$ 、GEV 与 Max-Stable 参数和重现期强度散点图判定系数  $R^2$ ,可以得知 Max-Stable 模型可以很好地模拟海河流域气候极值,达到 GEV 模型同等效果。海河流域温度极值 TXx 主要受到纬度、经度和海拔的影响,距海岸距离的加入可以改善模型的建立。对于降水极值 RX1day,距海岸距离的加入并不能有效地改善模型的建立。2、10、50、100 a 一遇气温极值 TXx 的空间分布均表现为自东北向西南递增的分布模式,高值区均分布于西南大部一带,所占面积超过 1/3,最高温度达 40~44 °C。2、10、50、100 a 一遇降水极值 TX1day 的空间分布主要受纬度影响,其次受经度和海拔的影响,均表现为从西南偏中向北方递减,高值区分布在西南偏中一带,最大降水量达 80~200 mm。

#### 参考文献(References):

- [1] TITLEY D, HEGERL G, JACOBS K, et al. Attribution of extreme weather events in the context of climate change [M]. Washington, DC: National Academies Press, 2016, DOI: 10. 17226/21852.
- [2] STOTT P. How climate change affects extreme weather events[J]. Science, 2016, 352(6293): 1517-1518. DOI: 10. 1126/science. aaf 7271.
- [3] DIFFENBAUGH N S, SINGH D, MANKIN J S, et al. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(19): 4881-4886. DOI: 10. 1073/pnas. 1618082114.
- [4] 王怀军, 潘莹萍, 李帅, 等. 基于栅格数据的气象灾害风险评估[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2019, 32(03): 99-110. (WANG H J, PAN Y P, LI S, et al. Risk

assessment and zonation of meteorological disasters based on rasterization in Jiangsu Province[J]. journal of Liaocheng university, 2019, 32(03): 99-110. )

- [5] 刘学锋, 向亮, 于长文. 海河流域降水极值的时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 451-461. (LIU X F, XIANG L, YU C W. Characteristics of temporal and spatial variations of the precipitation extremes in the Haihe River basin[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 451-461. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9585. 2010. 04. 13.
- [6] 刘学锋, 任国玉, 范增禄, 等. 海河流域近 47 年极端强降水时空变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 85-90. (LIU X F, REN G Y, FAN Z L, et al. Trends of precipitation extremes in the Haihe River basin during 1961-2007[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(8): 85-90. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2010. 08. 009.
- [7] 朱静思, 张治倩, 陈宏, 等. 基于 EOF 和 REOF 方法的海河流域近 61a 夏季降水时空演变规律分析[J]. 海河水利, 2017, 36(6): 1-6. (ZHU J S, ZHANG Z Q, CHEN H, et al. Analysis of temporal-spatial variations of 61years summer precipitation in Haihe River basin based on EOF and REOF[J]. Haihe Water Resources, 2017(6): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-7328. 2017. 06. 001.
- [8] 王刚, 严登华, 张冬冬, 等. 海河流域 1961 年-2010 年极端气温与降水变化趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 1-6. (WANG G, YAN D H, ZHANG D D, et al. Trend analysis of variations in extreme precipitation and temperature in the Hai River basin from 1961 to 2010[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2014. 01001.
- [9] 王永财, 孙艳玲, 张静, 等. 近 51 年海河流域气候变化特征分析[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2014, 34(4): 58-63. (WANG Y C, SUN Y L, ZHANG J, et al. Climate change characteristics of Haihe River basin in recent 51 years[J]. Journal of Tianjin Normal University(Natural Science Edition), 2014, 34(4): 58-63. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-1114. 2014. 04. 014.
- [10] RESNICK S. Extreme Values, Point Processes and Regular Variation [M]. New York: Springer Verlag, 1987.
- [11] SMITH R L. Max-stable processes and spatial extremes [D]. University of Surrey: Department of Mathematics, 1990.
- [12] COLES S G. Regional modelling of extreme storms via Max-Stable processes[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1993, 55(4): 797-816. DOI: 10. 2307/

- 2345994.
- [13] LEE Y S, SANGHOO, YOON, et al. Spatial modeling of the highest daily maximum temperature in Korea via Max-Stable processes[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30 (6): 1608-1620. DOI: 10. 1007/s00376-013-2216-y.
- [14] DAVISON A C, RIBATET S A P. Statistical modeling of spatial extremes[J]. *Statistical Science*, 2012, 27(2): 161-186. DOI: 10. 2307/41714789.
- [15] ZHANG Q, XIGO M, LI J, et al. Topography-based spatial patterns of precipitation extremes in the Poyang Lake basin, China: Changing properties and causes [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 229-239. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 03. 010.
- [16] 袁再健, 沈彦俊, 褚英敏, 等. 海河流域近 40 年来降水和气温变化趋势及其空间分布特征[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 24-26. (YUAN Z J, SHEN Y J, CHU Y M, et al. Variations and distribution of temperature and precipitation of Haihe River basin in recent 40 years[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3): 24-26. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STBY. 0. 2009-03-005.
- [17] ALEXANDERSSON H. A homogeneity test applied to precipitation data[J]. *Journal of Climatology*, 1986, 6(6): 661-675. DOI: 10. 1002/joc. 3370060607.
- [18] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(1): 245-259.
- [19] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1970.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 42-134. (WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction techniques[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 42-134. (in Chinese))
- [21] HAAN L D. A spectral representation for Max-stable processes[J]. *The Annals of Probability*, 1984, 12 (4): 1194-1204. DOI: 10. 2307/2243357.
- [22] BACRO J N, GAETAN C, TOULEMONDE G. A flexible dependence model for spatial extremes[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2015, 172 (1): 36-52. DOI: 10. 1016/j. jspi. 2015. 12. 002.
- [23] GOMES D P, NEVES M M, MOREIRA E. An exploratory study of spatial annual maximum of monthly precipitation in the northern region of Portugal[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c*, 2016, 94 (1): 77-84. DOI: 10. 1016/j. pce. 2015. 12. 001.
- [24] TAWN J, SHOOTER R, TOWE R, et al. Modelling spatial extreme events with environmental applications[J]. *Spatial Statistics*, 2018, 28(1): 39-58. DOI: 10. 1016/j. spasta. 2018. 04. 007.
- [25] RIBATET M, SINGLETON R, 2018. SpatialExtremes: Modelling Spatial Extremes. R package version 2. 0-6. <https://CRAN.R-project.org/package=SpatialExtremes>
- [26] 陈兴旺. 广义极值分布理论在重现期计算的应用[J]. *气象与减灾研究*, 2008, 31(4): 52-54. (CHEN X W. The application of generalized extreme value distribution theory in the calculation of return period[J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2008, 31 (4): 52-54. (in Chinese))
- [27] PADOAN S A, RIBATET M, SISSON S A. Likelihood-based inference for max-stable processes [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2010, 105 (489): 263-277. DOI: 10. 1198/jasa. 2009. tm08577.
- [28] RIBATET M, SINGLETON R, 2018. SpatialExtremes: Modelling Spatial Extremes. R package version 2. 0-6. <https://CRAN.R-project.org/package=SpatialExtremes>
- [29] 张兵, 韩静艳, 王中良, 等. 海河流域极端降水事件时空变化特征分析[J]. *水电能源科学*, 2014, 32(2). (ZHANG B, HAN J Y, WANG Z L, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation events in Haihe basin[J]. *Water Resources and Power*, 2014, 32(2): 15-34. (in Chinese))
- [30] K TAKEUCHI. Distribution of informational statistics and a criterion of model fitting[J]. *Mathematical Sciences*, 1976, 153(3): 12-18 (in Japanese)
- [31] GAO X, SONG X K. Composite likelihood bayesian information criteria for model selection in high-dimensional data[J]. *Publications of the American Statistical Association*, 2010, 105(492): 1531-1540. DOI: 10. 1198/jasa. 2010. tm 09414.
- [32] LEE Y S, SANGHOO, YOON, et al. Spatial modeling of the highest daily maximum temperature in Korea via max-stable processes[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30 (6): 1608-1620. DOI: 10. 1007/s00376-013-2216-y.