

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.05.014

刘宏宇, 海全胜, 刘美萍, 等. 1960—2021 年内蒙古高温干旱复合事件特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(5): 164-176.

1960—2021 年内蒙古高温干旱复合事件特征分析

刘宏宇^{1,2}, 海全胜², 刘美萍², 常菲²

1. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022;

2. 内蒙古科技大学包头师范学院 生态环境学院, 内蒙古 包头 014030

摘要: 内蒙古作为中国北方重要的生态安全屏障, 正面临着高温干旱复合事件的严重威胁, 复合事件已经成为影响该区域生态系统稳定和可持续发展的重要风险。利用 1960—2021 年 100 个气象站点的标准化降水指数和标准化气温指数, 基于 Copula 函数研究了内蒙古夏季高温干旱复合事件特征和重现期。结果表明: ① 时间上, 1960—2021 年高温干旱复合事件的发生频次呈增加趋势, 在 2000 年后逆转为高温主导大于干旱主导, 半干旱区的发生频次高于干旱区和半湿润区。② 空间上, 赤峰市中部和呼伦贝尔市西部是复合事件发生的高频地区, 赤峰市南部、兴安盟东部、通辽市以及锡林郭勒盟是中频地区。③ 在干旱区和半干旱区, Copula 函数以 BB1 类型为主, 在半湿润区, 以 Joe 类型为主。④ “轻度—轻度”型、“中度—中度”型、“重度—重度”型以及“极重度—极重度”型复合事件的重现期分别为 7、20、100、500 a, 半湿润区的复合事件重现期最长, 其次是干旱区和半干旱区。

关键词: 干旱; 高温; Copula 函数; 重现期; 内蒙古

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2025)05-0164-13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Characteristics of Compound High Temperature and Drought Events in Inner Mongolia from 1960 to 2021

LIU Hongyu^{1,2}, HAI Quansheng², LIU Meiping², CHANG Fei²

1. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;

2. College of Ecology and Environment, Baotou Teachers' College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia 014030, China

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41901009); 内蒙古自治区研究生科研创新项目(B20231058Z); 内蒙古师范大学基本科研业务费专项资金项目(2022JBXC017); 内蒙古自治区高等学校人文社会科学重点研究基地阴山文化研究中心项目(23YSYJ00014)。

作者简介: 刘宏宇, 博士研究生, 主要从事气候变化与区域响应研究。

通信作者: 海全胜, 副教授, 硕士研究生导师。

Abstract: Inner Mongolia, as an important ecological security barrier in northern China, is under a serious threat of high temperature and drought compound events, which have become an important risk affecting the stability and sustainable development of the regional ecosystem. Using the standardized precipitation index and standardized temperature index by 100 meteorological stations from 1960 to 2021, the characteristics and return periods of summer heat and drought compound events were studied using the Copula function. The results show that: ① In the term of time, the frequency of heat and drought compound events showed an increasing trend during 1960—2021, turned to be dominated by heat rather than drought, and the frequency of semi-arid areas was higher than that of arid and semi-humid areas after 2000. ② In the term of space, the central region of Chifeng City and the western region of Hulun Buir were the high-frequency areas for compound events, while the southern region of Chifeng, the eastern region of Hinggan League, Tongliao, and Xilingol League were the medium-frequency areas. ③ In arid and semi-arid areas, the Copula function is mainly the BB1 type, while in sub-humid regions, it is primarily the Joe type. ④ The return periods for ‘mild-mild’ ‘moderate-moderate’ ‘severe-severe’ and ‘extreme-extreme’ composite events are 7 years, 20 years, 100 years, and 500 years, respectively. The longest return periods for composite events are observed in semi-humid regions, followed by arid regions, and then semi-arid regions.

Key words: drought; high temperature; Copula function; return periods; Inner Mongolia

干旱不仅破坏生态环境,还极大地阻碍经济社会的可持续发展^[1-2]。在全球变暖背景下,中国近年来干旱灾害频发,已导致大量的财产损失^[3]。高温干旱复合事件(以下简称“复合事件”)是指高温与干旱同时发生在同一地区,是一种破坏性极强的复合型极端事件^[4]。例如,2022年夏季在长江流域以及2024年在印度发生的复合事件^[5-6]。这类事件不仅对生态系统造成不可逆的影响,还增加人群的健康和死亡风险^[7-8]。复合事件包含了多个极端变量,比独立的极端现象影响更大。与单一的高温或干旱相比,复合事件使作物损失的概率更高^[9]。在农业方面容易引起缺水、作物减产甚至绝收,并可能诱发蝗灾等次生灾害^[10-11]。在牧业方面,导致草场减产或退化,增加牲畜的饲养成本和死亡率^[12]。此外,还会引发地下水位下降,增加用水压力,甚至导致饮水困难。因此,揭示复合事件的特征对于提高灾害防范能力和保障区域协调发展具有重要意义。

中国是复合事件发生的热点区域^[13],学者们采用统计分析方法在长江流域与黄河流域^[14]、青藏高原^[15]、黄土高原^[16]以及西南地区^[17]展开了系列研究。以往研究多聚焦于高温和干旱特征,通过设定单一变量的极端阈值进行识别,以计数的方式量化^[18-20]。这些方法虽然能够揭示复合事件的特征,但是均以单变量的视角分析高温或干旱事件,不能全面考虑高温与干旱之间的相互作用及其综合影响。在气候变暖的情景下,气温升高会加剧干旱形成的风险,使降水在短期内可能呈现更加极端的趋势^[21-22]。降水模式的变化进一步增加干旱的发生频率和强度,加重对极端事件的影响^[23]。因此,组合降水和气温变量监测复合事件充分地考虑了干湿条件的综合特征,为全面评估提供了更为科学的视角。目前,基于标准化降水指数和标准化气温指数的联合概率方法在监测中得到了广泛应用^[24-25]。然而,虽然已有研究使用遥感产品数据进行分析,但相较于实测数据,其精度和可靠性仍有待进一步提高和检验。

内蒙古地处中国北方干旱半干旱区,既是重要的生态安全屏障,也是国家典型农畜产品生产基地,复合事件的负面影响不容忽视。然而,当前针对该区域的研究相对匮乏,特别是缺乏基于复合指标的长时间序列分析,制约了对复合事件发生规律及应对策略的科学认知。鉴于此,本研究基于1960—2021年气象站点观测数据,利用标准化降水指数与标准化气温指数,结合 Copula 函数,定量

分析内蒙古夏季复合事件的时空特征, 揭示高温和干旱事件的联合分布及重现期, 为防灾减灾和灾难预警提供决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

内蒙古位于中国正北方(图 1), 地理范围为 $37^{\circ}24'22''-53^{\circ}19'52''N$, $97^{\circ}10'19''-126^{\circ}04'34''E$, 平均高程为 998 m。全区共辖有 12 个盟市, 以温带大陆性季风气候为主, 年平均降水量 324.83 mm, 自东向西逐渐递减, 降水集中在 6—8 月。年均温 $5.20^{\circ}C$, 平均最低温度出现在呼伦贝尔市的额尔古纳右旗站点, 在 1 月达到 $-33.55^{\circ}C$, 平均最高温度出现在阿拉善盟的拐子湖站点, 在 7 月达到 $31.53^{\circ}C$ 。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>), 包括月尺度的气温和降水量数据, 时间跨度为 1960 年 1 月至 2021 年 12 月。依据多年平均降水量划分气候分区, 分为干旱区 (<200 mm)、半干旱区 ($200\sim400$ mm) 和半湿润区 (>400 mm)(图 1), DEM 数据来源于地理空间数据云 SRTMDEM 90 m 空间分辨率原始高程数据产品 (<https://www.gscloud.cn/>)。

2 研究方法

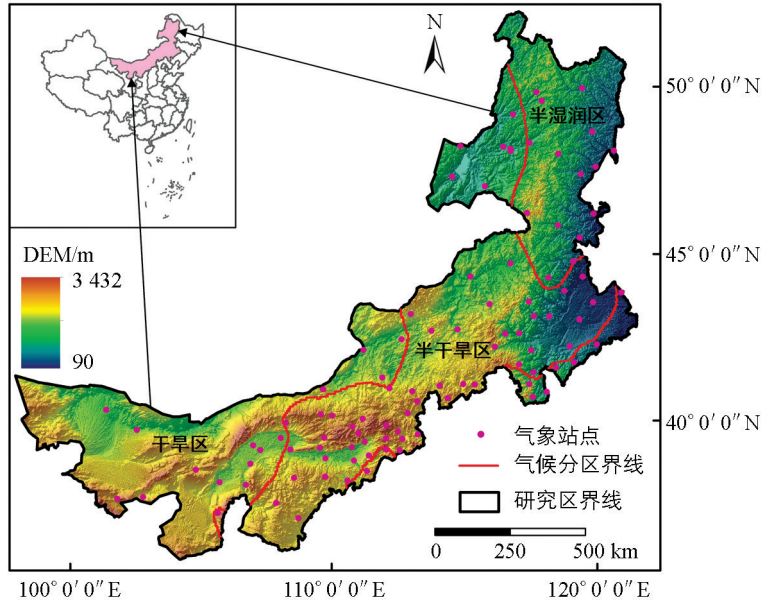
2.1 标准化降水指数与标准化气温指数

标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)已被证明适用于在内蒙古全年的各个时段评判旱情^[26], 选取标准化降水指数 \hat{X} 和标准化气温指数 \hat{Y} (Standardized Temperature Index, STI)进行干旱和高温检测^[27-28], 计算方法为:

$$\hat{X} = \varphi^{-1}[F_x(X)], \hat{Y} = \varphi^{-1}[F_y(Y)] \quad (1)$$

式中: X 和 Y 分别代表月降水与气温时间序列; F_x 和 F_y 是通过 Gringorten 绘图方法得到的概率分布函数^[29]; φ^{-1} 表示基于标准正态分布进行标准化的反函数。

气象干旱指标等级划分以《气象干旱等级》(GB/T 20481—2017)为标准, 高温划分依据参考文献^[30](表 1)。根据高温干旱事件等级划分标准, 当 SPI 值 ≤ -0.5 时干旱发生; 当 STI 值 > 0.5 时高温发生。因此, 当 SPI 值和 STI 值出现显著负相关且相关系数越大时, 复合事件越容易发生, 显著性水平设置为 $p < 0.05$ 。为了方便研究, 干旱强度定义为 SPI 的负值(即 $-SPI$ 值), 高温强度定义为 STI 的原值, 即在一次高温干旱复合事件中, 当高温强度大于干旱强度时, 则认为此复合事件由高温主导, 反之, 则由干旱主导。SPI-3 是指季节尺度的标准化降水指数, 反映每个季节的干旱情况^[31]。类似地, STI-3 代表季节尺度的标准化温度指数, 反映季节尺度的高温事件。SPI-3 一般用 1、4、7 和 10 月的值分别评估冬、春、夏和秋旱^[32], 因此, 采用 7 月的 SPI-3 和 STI-3 分别代表夏季干旱和高温对复合事件展开研究。



审图号: GS(2023)2765 号

图 1 研究区示意图

表 1 干旱/高温等级划分

干旱/高温程度	SPI 值	STI 值
轻度	(-1.0, -0.5]	(0.5, 1.0]
中度	(-1.5, -1.0]	(1.0, 1.5]
重度	(-2.0, -1.5]	(1.5, 2.0]
极重度	(-∞, -2.0]	(2.0, +∞]

2.2 Copula 函数

Sklar^[33]于 1959 年提出的 Copula 函数理论可用于干旱和水文分析,该函数可以将几个不同的单变量分布组合成一个双变量或多变量分布。对于随机变量 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_n$, 能够联结这些随机变量的分布函数与其边缘分布函数 $F_{x_1}(x_1), F_{x_2}(x_2), \dots, F_{x_n}(x_n)$, 其定义如下:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C_\theta[F_{x_1}(x_1), F_{x_2}(x_2), \dots, F_{x_n}(x_n)] \quad (2)$$

在本研究中,选择 8 种具有代表性的 Copula 函数构造联合分布,采用 Pearson 相关系数确定变量间的相关性,表 2 为不同的函数方程及其参数取值范围。

表 2 Copula 函数参数

Copula 函数	方程	参数
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta\mu} - 1)(e^{-\theta\nu} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$	$\theta \neq 0$
Gumbel	$\exp \{ - [(-\ln\mu)^\theta + (-\ln\nu)^\theta]^{\frac{1}{\theta}} \}$	$\theta \in [-1, +\infty)$
Clayton	$(\mu^{-\theta} + \nu^{-\theta} - 1)^{\frac{-1}{\theta}}$	$\theta \in [-1, +\infty)$
Gaussian	$\int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(\mu)} \int_{-\infty}^{\varphi^{-1}(\nu)} \frac{1}{2\pi\sqrt{-\theta^2}} \exp \left[\frac{2\theta xy - x^2 - y^2}{2(1-\theta^2)} \right] dx dy^a$	$\theta \in [-1, 1]$
AMH	$\frac{\mu\nu}{1-\theta(1-\mu)(1-\nu)}$	$\theta \in [-1, +\infty)$
Joe	$1 - [(1-\mu)^\theta + (1-\nu)^\theta - (1-\mu)^\theta(1-\nu)^\theta]^{\frac{1}{\theta}}$	$\theta \in [-1, +\infty)$
BB1	$\{ 1 + [(\mu^{-\theta_1} - 1)^{\theta_2} + (\nu^{-\theta_1} - 1)^{\theta_2}]^{\frac{1}{\theta_2}} \}^{\frac{-1}{\theta_1}}$	$\theta_1 \in [0, +\infty), \theta_2 \in [1, +\infty)$
BB5	$\exp \{ - [(-\ln(\mu))^{\theta_1} + (-\ln(\nu))^{\theta_1} - ((-\ln(\mu))^{\theta_1\theta_2} + (-\ln(\nu))^{\theta_1\theta_2})^{\frac{-1}{\theta_2}}]^{\frac{1}{\theta_1}} \}$	$\theta_1 \in [1, +\infty), \theta_2 \in [0, +\infty)$

注: a 表示标准高斯分布。

利用对数最大似然函数估计参数,该函数表示为:

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n \log \{ c_\theta[F_X(x_i), F_Y(y_i)] \} \quad (3)$$

式中: c 为联合概率密度函数; $F_X(x_i)$ 和 $F_Y(y_i)$ 分别表示随机变量 X 和 Y 的边缘分布函数; x_i 和 y_i 分别表示对应的数据; θ 参数通过对数最大似然函数的最大化得到。通过经验 Copula 函数计算两个变量的经验联合概率,并与相应的理论值进行比较,选择最适合函数。分别采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、纳什效率系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)和赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)评价联合概率分布的拟合度。RMSE 值越接近 0, NSE 值越接近 1, AIC 值越小,说明对实际数据的模拟效果越好。

$$A_{\text{AIC}} = -2L(\theta) + 2k \quad (4)$$

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{b} \sum_{i=1}^b [p_c(i) - p_0(i)]^2} \quad (5)$$

$$N_{\text{NSE}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^b [p_c(i) - p_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^b [p_c(i) - p_c(i)^2]'} \quad (6)$$

式中: A_{AIC} 为赤池信息准则; R_{RMSE} 为均方根误差; N_{NSE} 为纳什效率系数; k 为模型参数的个数; b 为次数; p_c 是 Copula 的理论概率; p_0 是观测的经验概率。

2.3 重现期计算

复合事件可能在一年中发生几次, 重现期是指干旱强度和高温强度的联合分布函数之间的平均间隔时间^[34]。可以表示为:

$$T_{X>x \cap Y>y} = \frac{1}{1 - F_X(x) - F_Y(y) + C[F_X(x), F_Y(y)]} \quad (7)$$

式中: X 和 Y 是随机变量, 本研究中是 $-SPI$ 值和 STI 值, $F_X(x)$ 和 $F_Y(y)$ 为当随机变量 X 和 Y 小于阈值 x 和 y 时的累积概率, 这些累积概率由最佳的边缘分布函数得到, $C[F_X(x), F_Y(y)]$ 为双变量的联合概率, 由 Copula 函数拟合得到。

3 结果与分析

3.1 复合事件特征分析

3.1.1 时间特征

对于每个站点, 分别统计了 1960—1979 年、1980—1999 年以及 2000—2021 年 3 个时期复合事件发生频次并计算了整个研究区的均值(图 2a)。总体上看, 复合事件的发生频次呈增加趋势, 2000—2021 年与 1960—1979 年相比, 频次增加了 2 倍。干旱主导和高温主导的复合事件频次均有所增加, 2000—2021 年的增长幅度较之前的时期更大。1960—1999 年干旱主导作用大于高温主导, 然而, 2000 年以后高温主导的复合事件频次超过了干旱主导。图 2c 表示 1960—2021 年夏季平均气温的变化趋势, 黑色折线代表气温值, 红色虚线表示变化趋势。夏季平均气温的变化范围为 $18.67 \sim 22.16 \text{ } ^\circ\text{C}$, 气温呈增加趋势, 增加斜率为 $2.89 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ($p < 0.05$)。随着气温的不断升高, 复合事件的主导关系发生了变化, 由早期的干旱主导转变为高温主导。

从不同气候分区上看, 干旱区的平均发生频次为 5~10 次, 半干旱区和半湿润区的平均发生频次均为 6~13 次(图 2b)。复合事件发生频次在不同气候分区的分布存在差异, 干旱区的中位数为 8, 半湿润区的中位数为 8.5, 半干旱区的中位数为 9, 表明在半干旱区的发生频次高于其他两种气候分区, 这可能是由于降水量不稳定造成的。半干旱区的土地面积大于干旱区和半湿润区, 降水在不同地区的时空分布差异较大, 容易造成干湿不均匀现象, 从而影响干旱的发生频次。除此之外, 由于半干旱区的位置介于干旱区与半湿润区之间, 人口数量也大于其他两个区域, 人类活动的干扰相对更加频繁, 这些人类活动可能影响气温的变化, 从而间接地对复合事件的发生频次产生影响。

3.1.2 空间特征

利用反距离权重插值法对每个站点进行空间插值, 得到 16 个不同干旱和高温程度组合的发生次数图(图 3), 每个图按照“高温强度—干旱强度”定义程度。干旱和高温发生次数为 0~5 次, 因此, 按研究需求将 0~1 次定义为低频地区, 2~3 次定义为中频地区, 4~5 次定义为高频地区。干旱和高温发生次数随着强度的增加而减少, 与“极重度”类型有关事件的发生次数显著低于其他类型, 这表明极端复合事件发生的

次数较少。“轻度—轻度”类型复合事件的发生次数高于其他类型,这些事件主要分布在呼伦贝尔市北部、锡林郭勒盟西南部和东北部、赤峰市以及鄂尔多斯市中西部地区。其他类型的复合事件在空间分布上存在较大分异,但“轻度—轻度”类型中所涉及的区域主要为中频地区。

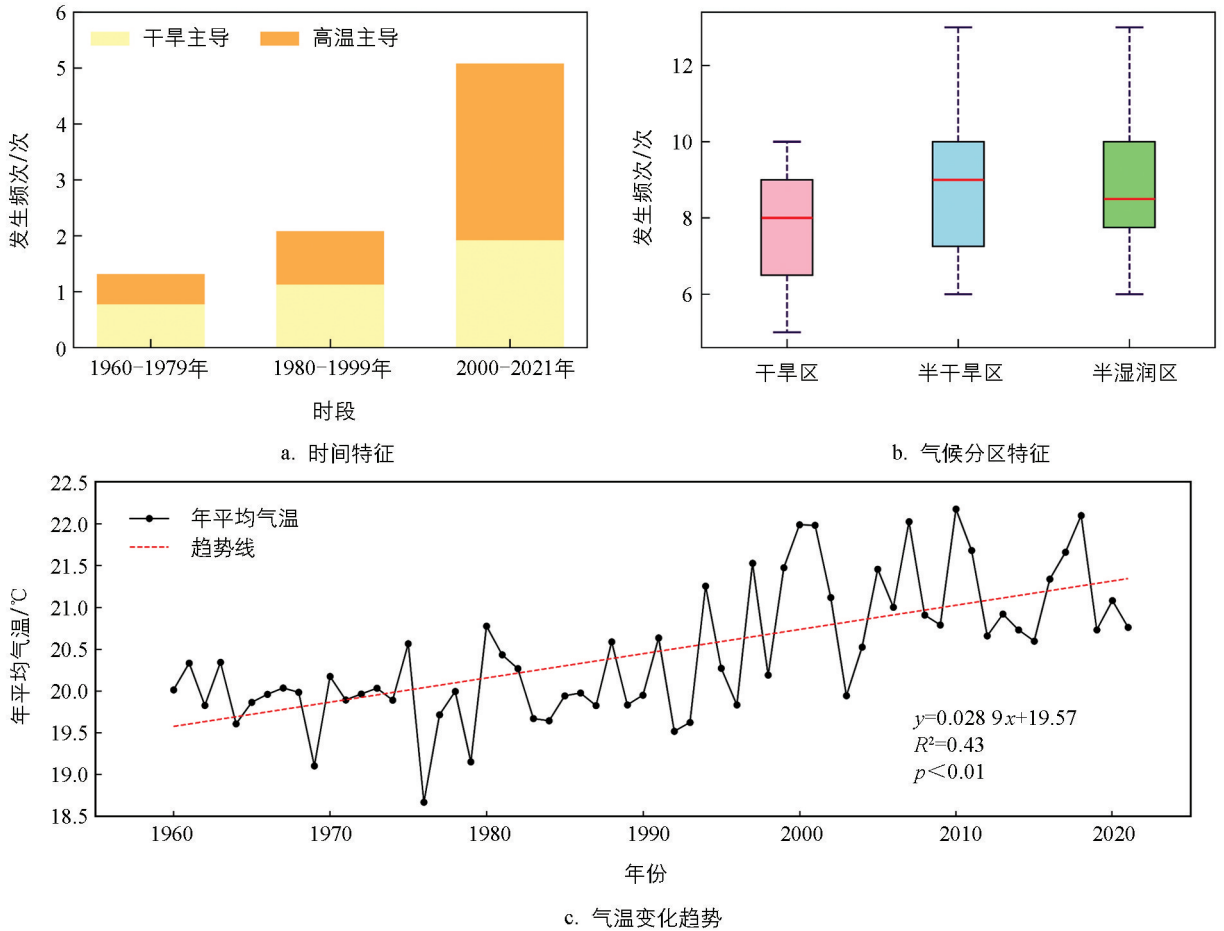


图 2 1960—2021 年干旱和高温的发生频次

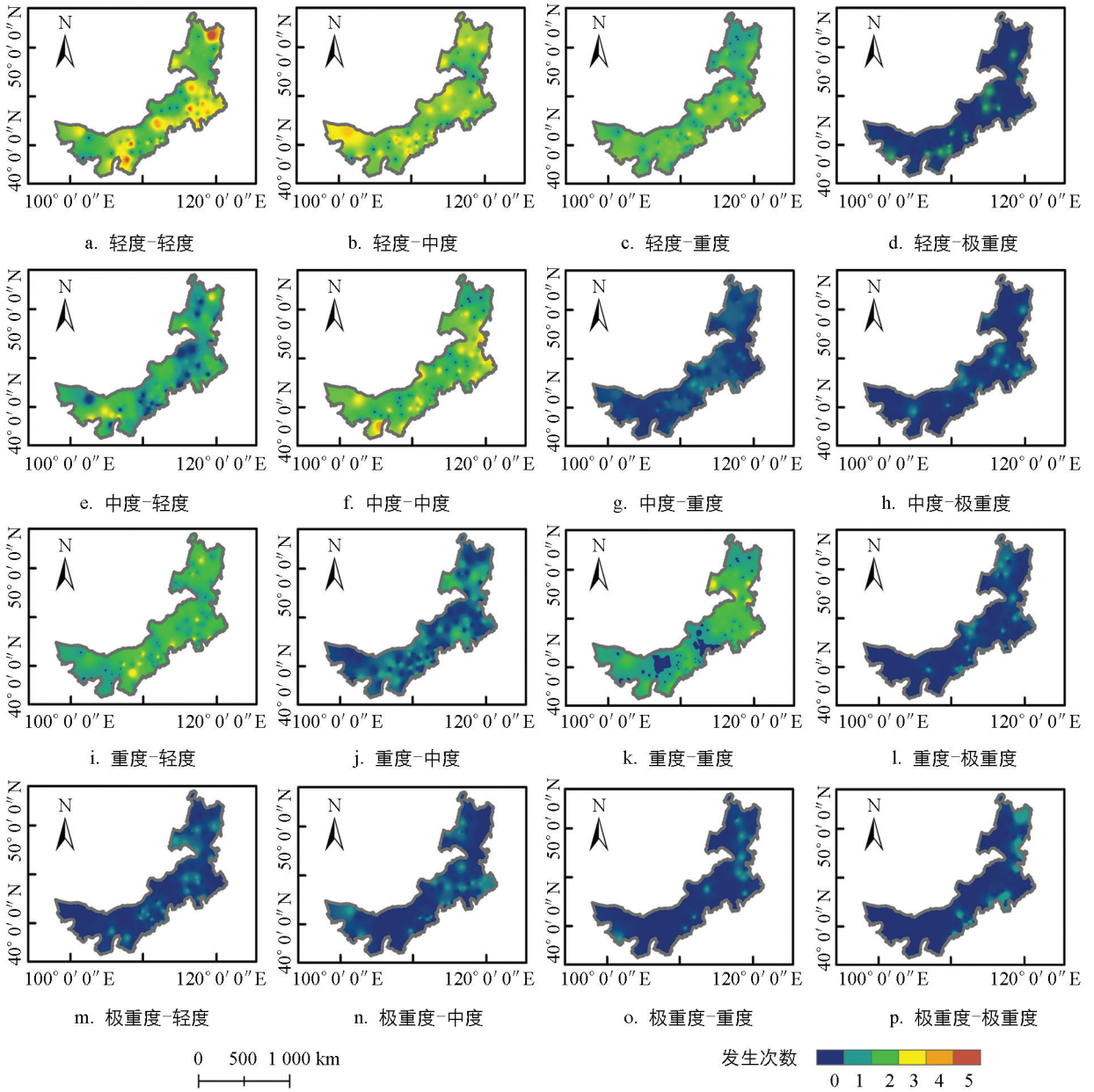
3.2 干旱强度和高温强度的联合分布特征

3.2.1 边缘分布情况

利用 Matlab 软件分别选择正态分布、Logistic 分布、广义极值分布、Location-Scale t 分布和广义帕累托分布拟合 -SPI 和 STI 变量的边缘分布,采用最大似然法估计分布参数,当似然函数的参数值取得最大值且在 $p<0.05$ 显著性水平下通过 Kolmogorov-Smirnov 检验,选择最优理论概率分布。结果表明,研究区内所有站点的双变量最佳拟合边缘分布均为正态分布。如图 4 所示,以巴林右旗站点为例,图 4a 和图 4c 分别展示了一-SPI 和 STI 的边缘分布拟合概率曲线,图 4b 和图 4d 分别展示了拟合的分位数曲线(Q-Q 图)。双变量拟合的 p 值均小于 0.05,从图上可以看出,干旱强度和高温强度指标的拟合效果较好。

3.2.2 最佳 Copula 拟合函数

计算干旱强度和高温强度两个变量的 RMSE、NSE 和 AIC,以评估 Copula 函数的拟合效果, RMSE 值越接近于 0, NSE 值越接近于 1, AIC 值越小时,拟合效果越好。以双变量相关性系数大于 0.4 且分别位于干旱区、半干旱区和半湿润区的苏尼特左旗、巴林右旗和扎赉特旗站点为例,表 3 列出了这 3 个站点的拟合结果, RMSE 值为 0.094~0.114, NSE 值均大于 0.99,表明 3 个站点的拟合效果较好。



审图号: GS(2023)2765 号

图 3 不同程度高温和干旱强度事件发生次数的空间分布

表 3 最佳 Copula 函数拟合结果

站点	最佳 Copula 函数	RMSE 值	NSE 值	AIC 值	参数值
苏尼特左旗	Frank	0.093 6	0.997 9	-494.360 2	$\theta=2.728 6$
巴林右旗	Frank	0.135 7	0.995 4	-501.574 6	$\theta=3.967 1$
扎赉特旗	BB5	0.114 0	0.997 0	-331.446 4	$\theta_1=1.001 5, \theta_2=0.679 4$

为了明确整个研究区干旱强度和高温强度的关系以及每个站点的最佳 Copula 函数, 对研究区的所有站点进行了计算。图 5a 展示了每个站点干旱强度与高温强度的相关系数及显著性, 显著性相关的站点比例从大到小依次为: 半干旱区(72.13%)、半湿润区(62.50%)、干旱区(60%), 不显著且相关性小于 0.25 的站点占 32%, 零散分布在除赤峰市、通辽市和锡林郭勒盟以外的多个地区。显著相关且相关系数大于 0.5 的站点有 9 个, 集中分布在赤峰市中部和呼伦贝尔市西部, 这两个区域相关性较高, 也是复合事件发生的

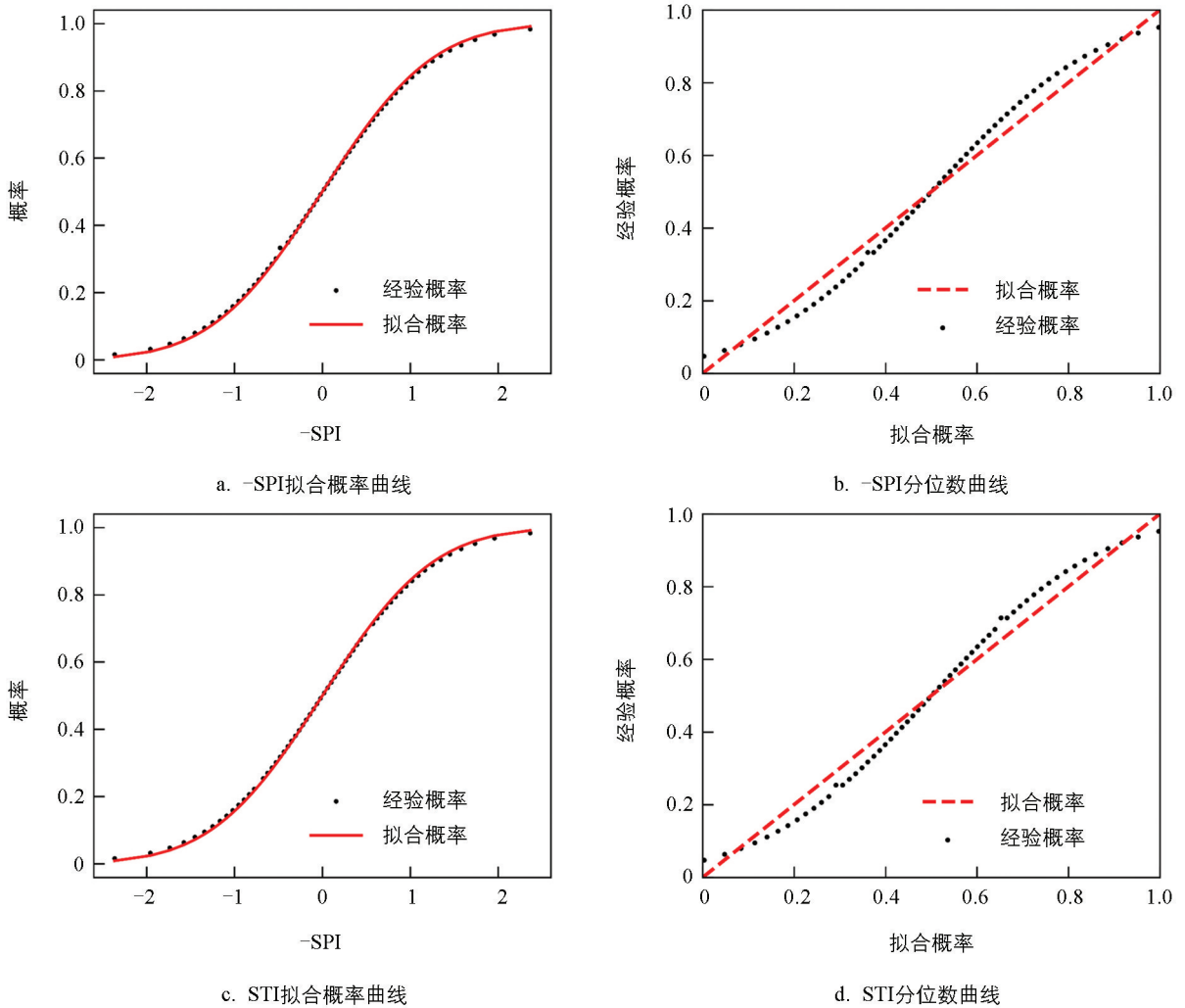


图 4 巴林右旗站复合事件变量拟合的边缘分布和 Q-Q 图

高频地区。显著相关系数大于 0.4 且小于 0.5 的站点有 18 个，主要分布在赤峰市南部、兴安盟东部、通辽市以及锡林郭勒盟，这几个区域是复合事件发生的中频地区。

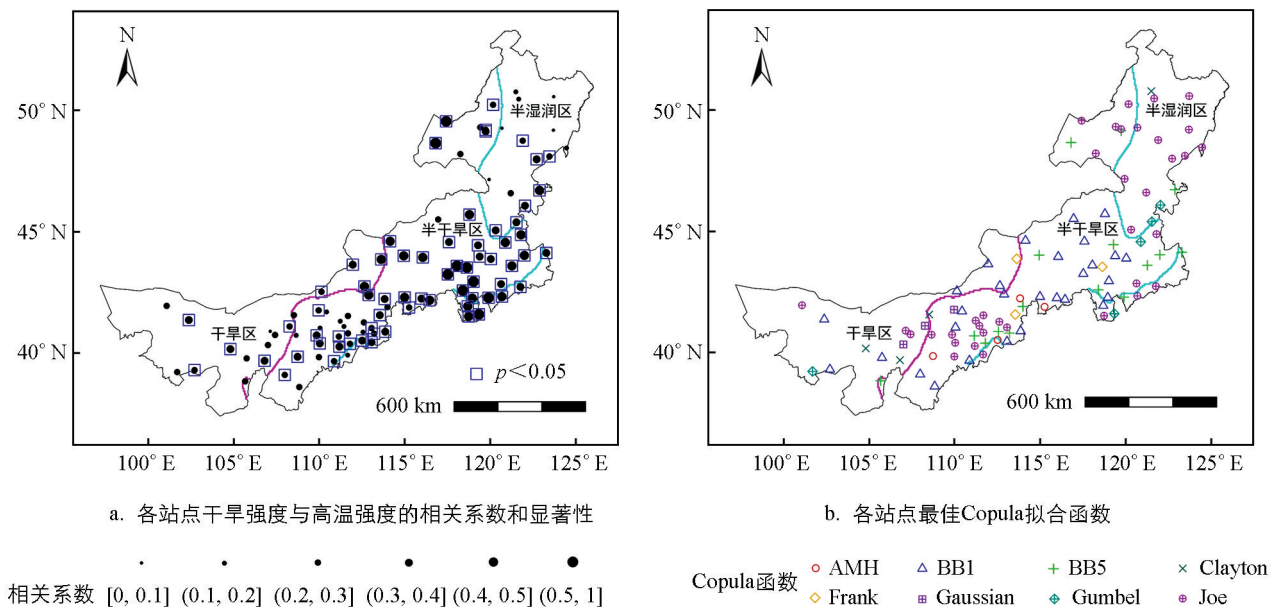
选择的 8 种 Copula 函数在全区站点均有分布，如图 5b 所示，不同站点的 Copula 函数类型在空间分布上存在明显差异。Joe 类型覆盖的站点数最多，占比为 36%，其次是 BB1(29%)和 BB5(16%)。在干旱区和半干旱区，以 BB1 类型为主；在半湿润区，以 Joe 类型为主。

根据最佳 Copula 拟合函数，得到每个站点的联合累积概率。如图 6 所示，以苏尼特左旗、巴林右旗和扎赉特旗站点为例，干旱强度小于 0.5 且高温强度小于 0.5 的发生概率分别为 0.32、0.36、0.33，3 个站点的联合累积概率随干旱强度和高温强度的增加呈相似趋势。

3.3 复合事件特征分析

对不同气候区中不同程度复合事件的重现期进行分析，结果如表 4 所示，I 表示干旱区，II 表示半干旱区，III 表示半湿润区，行数据代表干旱强度的变化，从轻度到极重度递增，列数据代表高温强度的变化。分析结果显示，“轻度—轻度”型复合事件的重现期大约为 7 a，“中度—中度”型复合事件的重现期大约为 20 a，对于“重度—重度”型的复合事件，重现期接近 100 a，“极重度—极重度”类型的重现期则超过 500 a。对于不同强度组合的高温干旱复合事件，其重现期处于单一强度组合事件的阈值区间。对比同一气候区，随着复合事件强度递增，重现期的时间明显延长。进一步比较不同分区下的重现期规律，半湿润区的重现期最长，其次是干旱区，最后是半干旱区。此外，无论干旱程度如何，随着高温强度的增加，重现期都显著延长，这表明极端事件的重现期更

长。同样地, 不考虑高温强度的变化, 干旱强度的增加也会导致重现期的显著延长。



审图号: GS(2023)2765 号

图 5 复合事件逐站点特征

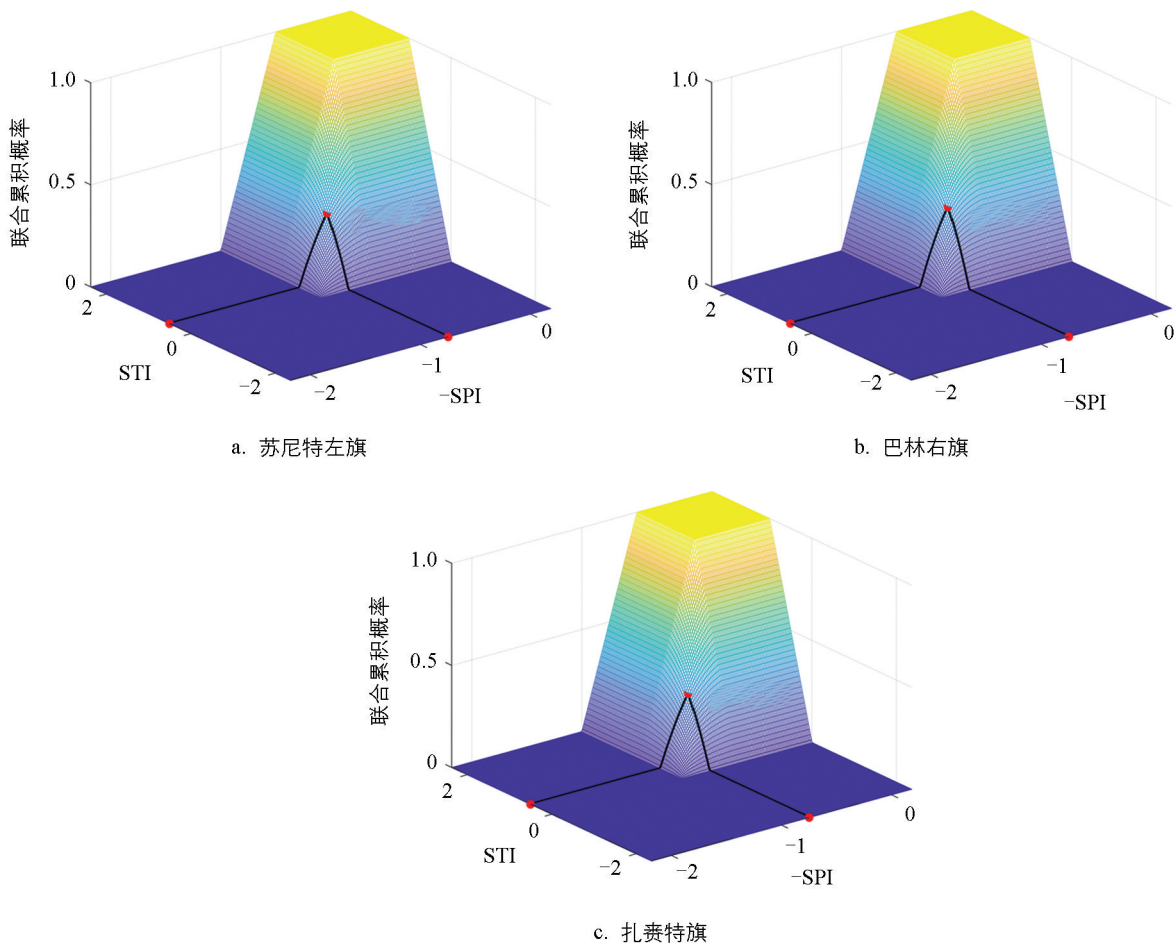


图 6 典型站点干旱强度(-SPI)和高温强度(STI)的联合累积概率

表 4 不同高温强度和干旱强度的重现期

a

高温强度	轻度			中度			重度			极重度		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
轻度	7.79	7.37	7.79	13.95	13.02	14.05	30.70	28.35	31.22	84.29	77.27	86.80
中度	13.92	13.01	14.02	24.04	22.02	24.48	50.91	45.82	52.67	134.46	119.32	141.96
重度	30.53	28.29	31.06	50.76	45.78	52.52	103.15	90.74	109.45	261.16	224.83	286.23
极重度	83.52	77.08	86.11	133.58	119.17	141.13	260.23	224.73	285.33	630.66	528.89	725.82

如图 7 所示,按照 5~500 a 不等间距绘制重现期等值线。随着干旱和高温强度的增加,重现期也相应延长。苏尼特左旗和扎赉特旗站点的最小重现期大于 10 a,这表明在相同的重现期内,这些站点发生复合事件的概率较低。与另外两个站点相比,扎赉特旗站点的等值线距离更大一些,特别是大于 50 a 的重现期,这表明在相同重现期的复合事件中,如果 3 个站点的干旱强度相近,那么苏尼特左旗和巴林右旗的气温可能会更低。以 100 a 重现期的复合事件为例,干旱强度为 2 时,扎赉特旗的高温强度是 2.4,苏尼特左旗和巴林右旗分别是 1.1 和 1.3。从数量上看,苏尼特左旗、巴林右旗和扎赉特旗发生复合事件的重现期分别是 9、10、10 a。其中,1990 年以后发生复合事件的数量相对更多。

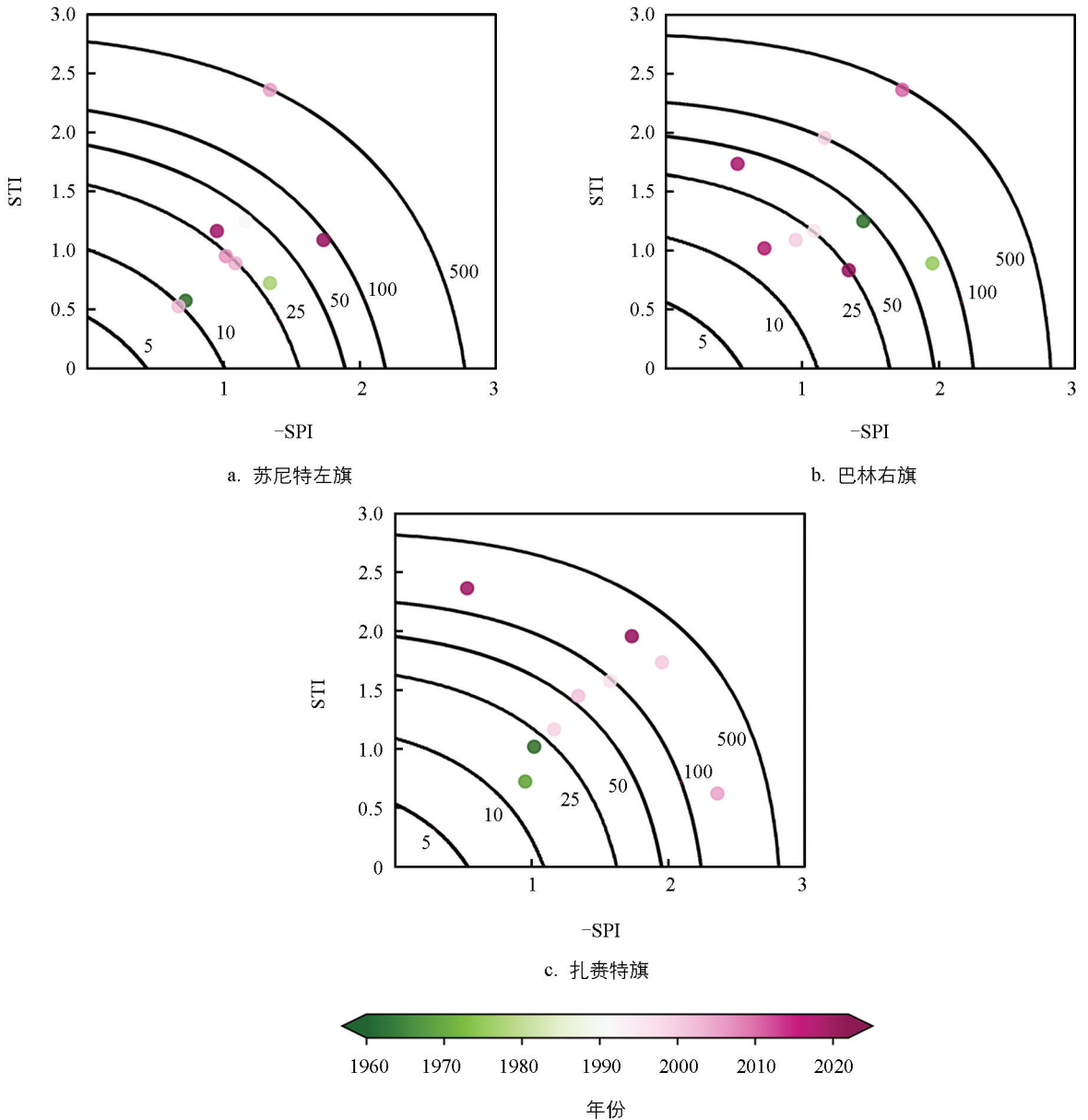


图 7 典型站点复合事件的重现期等值线

4 讨论与结论

4.1 讨论

根据复合事件发生的时间趋势和空间格局, 1990 年以来发生数量相比之前有所增加, 进入 2000 年后增加趋势更加显著, 赤峰市中南部、呼伦贝尔市西部、兴安盟东部、通辽市以及锡林郭勒盟是发生数量较多的地区, 本研究结果与武新英等^[13]和廖国清等^[35]的结果基本一致。武新英等^[13]的研究结果表明, 1988—2014 年东北和华北地区复合事件增加幅度较大, 并指出气温的变化可能是复合事件变异的重要驱动。虽然研究时段略有差别, 但从时空上看, 两者相对一致, 尤其是高频和中频地区。廖国清等^[35]的研究表明, 夏季是干旱和热浪的主要爆发期, 复合事件发生频率高, 高发区和本研究的空间范围基本一致, 频次有所区别, 主要是因为廖国清等^[35]的研究是年际尺度, 而本研究聚焦于夏季, 因此频次较低。关于重现期的研究, 本研究结果与熊少堂等^[36]的结果也基本一致, 熊少堂等^[36]的研究使用了 CRU TS 数据, 但对比重现期的空间分布特征可以发现, 内蒙古复合事件的重现期也主要处于 5~500 a。研究结果显示, 半湿润区的重现期最长, 这可能是由于干湿条件变化所引起的。半湿润区主要处于季风区和非季风区交界处, 冷暖气流时常交汇。在夏季, 气温上升趋势显著, 增温速率快, 气温倾向率和日较差较大, 降水时空分布不均, 因此复合事件的发生具有较大的随机性, 导致其重现期较长, 这在相关研究中已得到证实^[37]。

全球变暖从根本上改变了气候变量原有的变率, 导致复合事件频率、强度和空间范围不断扩大, 因此, 应切实采取措施降低复合事件的风险。结合内蒙古的实际情况, 节能减排、发展低碳经济和提高生态系统服务能力是有效手段。本区域可再生能源(如太阳能和风能)比较充足, 关键在于提高绿色能源的研发和利用水平, 减少对化石能源的依赖, 逐步以清洁能源产业替代高耗能产业, 形成减排环境。通过产业调整、理念创新和经营转变等手段优化生产与发展格局, 探索从生产消费到回收利用的可持续途径。同时, 还应重点关注环保行业并鼓励人才进行科研攻关。提倡企业和个人采取低碳生活方式, 向社会各个层面不断推广应对气候变化的认识。内蒙古拥有丰富的森林、草原、湿地和沙漠资源, 在加强保护和恢复的基础上, 还应加以创新利用, 如借助互联网和短视频社交平台, 推广生态旅游产品和特色农牧业, 全面提升生态系统服务能力。

本研究未对 2021 年以后的复合事件进行分析, 而这一时期以来的复合事件也应该成为重点关注的对象。由于阿拉善地区的气象站点在空间分布上相对稀少, 这在一定程度上影响了空间插值过程和研究结果。此外, 没有对驱动机制进行深入分析, 复合事件的影响因素比较复杂, 涉及到陆—气系统耦合、水文循环过程以及人类活动等多个方面, 其发生机理还需要进一步探讨。

4.2 结论

利用气象站点数据, 通过标准化降水指数与标准化气温指数, 结合 Copula 函数, 对 1960—2021 年内蒙古夏季复合事件的特征和重现期进行分析, 得出以下主要结论:

1) 内蒙古夏季复合事件呈增加趋势, 在 2000—2021 年更为明显, 高温主导型的作用逐渐加强, 半干旱区的发生频次高于其他气候分区。

2) 呼伦贝尔市西部、锡林郭勒盟、赤峰市中南部、兴安盟东部以及通辽市的复合事件发生频次相对较高, 这些高频区域既是草原生态功能的核心区, 也是农牧优质产品的产业带, 应重点关注并尽快建立和实施更加有效的灾害预警与管理措施。

3) Copula 函数是拟合复合事件联合分布的有效工具, 在站点尺度上, 不同站点的 Copula 函数类型在空间分布上存在明显差异, Joe 类型覆盖的站点数最多, 其次是 BB1 和 BB5 类型。干旱区和半干旱区以 BB1 类型为主, 半湿润区以 Joe 类型为主。

4) “轻度—轻度”型、“中度—中度”型、“重度—重度”型以及“极重度—极重度”型复合事件的重现期分别为 7、20、100、500 a, 半湿润区的重现期最长, 其次是干旱区和半干旱区。尽管高强度的复合事件出现概率较低, 但低等和中等强度的复合事件仍需要引起足够重视, 提前制定有效防范措施以减小复合事件的不利影响。

参考文献:

- [1] 高歌, 李莹, 陈涛, 等. 2004—2019 年中国干旱多承灾体灾损风险特征评估 [J]. 气象, 2023, 49(5): 611-623.
- [2] 王莺, 王健顺, 张强. 中国草原干旱灾害风险特征研究 [J]. 草业学报, 2022, 31(8): 1-12.
- [3] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望 [J]. 气象学报, 2020, 78(3): 500-521.
- [4] 姚昊昕, 李清泉, 赵亮, 等. 淮河流域暖季极端高温干旱复合事件的演变特征及其与气候和植被的关系 [J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5596-5608.
- [5] 钱潭锐, 逯家彤, 粟晓玲, 等. 基于复合事件指数的西北地区高温干旱复合事件风险评估 [J]. 水资源与水工程学报, 2024, 35(1): 82-89.
- [6] 李瑞英, 吕桂恒, 郝晓雷, 等. 鲁西南区域性高温干旱复合事件特征及危险性分析 [J]. 中国农业气象, 2024, 45(6): 657-668.
- [7] SALVADOR C, NIETO R, VICENTE-SERRANOS M, et al. Public Health Implications of Drought in a Climate Change Context: A Critical Review [J]. Annual Review of Public Health, 2023, 44: 213-232.
- [8] COSTELLO A, ROMANELLO M, HARTINGER S, et al. Climate Change Threatens Our Health and Survival within Decades [J]. Lancet, 2023, 401(10371): 85-87.
- [9] RIBEIRO A F S, RUSSO A, GOUVEIA C M, et al. Risk of Crop Failure Due to Compound Dry and Hot Extremes Estimated with Nested Copulas [J]. Biogeosciences, 2020, 17(19): 4815-4830.
- [10] 王菜林, 范帅邦, 布仁吉日嘎拉, 等. 内蒙古干旱研究进展 [J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(1): 23-36.
- [11] 张计深, 陈笑蝶, 彭守璋. 2001—2100 年中国温度变化趋势及时空差异研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(12): 112-124.
- [12] 贾元童, 崔骁勇, 刘月仙, 等. 内蒙古自治区干旱脆弱性评价 [J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9070-9082.
- [13] 武新英, 郝增超, 张璇, 等. 中国夏季复合高温干旱分布及变异趋势 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(12): 90-98.
- [14] 姜雨彤, 郝增超, 冯思芳, 等. 长江与黄河流域复合高温干旱事件时空演变特征 [J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 70-77.
- [15] 周佰铨, 翟盘茂, 廖圳. 2022 年夏季青藏高原高温干旱复合事件的双变量归因 [J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(7): 2152-2166.
- [16] 张更喜, 王慧敏, 粟晓玲, 等. 复合干热胁迫下黄土高原夏季植被脆弱性评估 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 339-346.
- [17] 孙昭萱, 张强, 孙蕊, 等. 2022 年西南地区极端高温干旱特征及其主要影响 [J]. 干旱气象, 2022, 40(5): 764-770.
- [18] 张驰, 唐红玉, 吴遥, 等. 两种干旱指数在重庆极端干旱事件中的应用 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(11): 92-103.
- [19] 薛海丽, 张钦, 唐海萍. 近 60 a 内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析 [J]. 干旱区地理, 2018, 41(4): 701-711.
- [20] 汪士为. 近 20 年内蒙古干旱时空动态及其对气候、蒸散发变化的响应 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 231-239.
- [21] 贺山峰, 陈超冰, 李铮, 等. 黄河中上游极端降水特征及其对区域气候变化的敏感性 [J]. 资源科学, 2024, 46(3): 524-537.
- [22] 董欣, 倪相. 西南地区不同海拔极端降水时空变化特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(9): 110-121.

- [23] 史军, 崔林丽, 顾宇丹, 等. 气候变化背景下复合极端事件研究进展 [J]. 地球科学进展, 2023, 38(8): 771-779.
- [24] HAO Z C, HAO F H, SINGH V P, et al. Statistical Prediction of the Severity of Compound Dry-Hot Events Based on El Niño-Southern Oscillation [J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 243-250.
- [25] 俞昕, 张琪, 杨再强. 基于 Copula 函数分析华北地区年高温干旱复合事件发生特征 [J]. 中国农业气象, 2023, 44(8): 695-706.
- [26] 付丽娟, 曹杰, 德勒格日玛. 三种气象干旱指标在内蒙古地区的适用性分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 108-113.
- [27] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales [J]. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993, 17(22): 179-183.
- [28] ZSCHEISCHLER J, MICHALAK A M, SCHWALM C, et al. Impact of Large-Scale Climate Extremes on Biospheric Carbon Fluxes: An Intercomparison Based on MsTMIP Data [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2014, 28(6): 585-600.
- [29] GRINGORTEN I I. A Plotting Rule for Extreme Probability Paper [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(3): 813-814.
- [30] ZHANG Q, YU X, QIU R J, et al. Evolution, Severity and Spatial Extent of Compound Drought and Heat Events in North China Based on Copula Model [J]. Agricultural Water Management, 2022, 273: 107918.
- [31] 向大享, 姜莹, 陈喆, 等. 基于 SPI 和 VHI 的长江中下游地区干旱时空特征分析 [J]. 长江科学院院报, 2024, 41(3): 153-159, 165.
- [32] FANG G H, LI X, XU M, et al. Spatiotemporal Variability of Drought and Its Multi-Scale Linkages with Climate Indices in the Huaihe River Basin, Central China and East China [J]. Atmosphere, 2021, 12(11): 1446.
- [33] SKLAR M. Fonctions de Répartition à Dimensions et Leurs Marges [J]. Publ. Inst. Statist. Univ. Paris, 1959, 8: 229-231.
- [34] 方建, 陶凯, 牟莎, 等. 复合极端事件及其危险性评估研究进展 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(3): 587-601.
- [35] 廖国清, 朱焯, 吴光东, 等. 中国近 60 年干旱热浪演变趋势及并发特征分析 [J]. 长江科学院院报, 2023, 40(2): 169-176.
- [36] 熊少堂, 赵钢铁, 郭成超, 等. 我国各大流域复合高温干旱事件变化趋势与归因分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(1): 83-96.
- [37] 何文鑫, 徐玉霞, 马凯, 等. 内蒙古半湿润与半干旱过渡区气候干湿变化差异研究——以赤峰市与呼伦贝尔市对比为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(5): 110-119.

责任编辑 包颖