

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.007

青藏高原复合干热事件及其对植被的影响

程玉佳¹, 张珂^{1,2,3,4,5}, 晁丽君^{1,4}

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210024; 4. 中国气象局水文气象重点开放实验室, 江苏 南京 210024; 5. 水利部水利大数据重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 基于 Copula 函数联合标准化降水指数 (SPI) 和标准化地表温度指数 (SLTI), 构建了复合干热事件指数 (CDHI) 用于评价青藏高原复合干热事件, 分析了 2000—2019 年夏季干旱和高温的时空变化特征, 探究了降水和地表温度对复合干热事件的相对贡献度及不同植被对复合干热事件的响应程度。结果表明: SPI 与 SLTI 拟合效果最好的函数为 Gaussian Copula 函数, CDHI 与标准化增强型植被指数 (SEVI) 拟合效果最好的函数也为 Gaussian Copula 函数; 青藏高原夏季干热情况有轻微加重的趋势, 4 种植被类型中草地和林地的干热情况加重, 干热情况在空间上呈现北部减缓、南部加重的趋势; SLTI 持续增大是复合干热事件严重程度加重的主要原因, 农田的 SPI、SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度差值最大, 分别为 0.71 和 0.29; 东北部的植被生长易受复合干热事件影响, 农田对复合干热事件最为敏感。

关键词: 极端气候事件; 复合干热事件; 干旱; 高温; 植被; 青藏高原

中图分类号: TV213.4; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2023)04-0052-07

Compound dry-hot events on Qinghai-Tibet Plateau and their effects on vegetation // CHENG Yujia¹, ZHANG Ke^{1,2,3,4,5}, CHAO Lijun^{1,4} (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China; 3. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210024, China; 4. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210024, China; 5. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the Copula function combined with the standardized precipitation index (SPI) and the standardized land surface temperature index (SLTI), the compound dry-hot events index (CDHI) was constructed to evaluate the compound dry-hot events and applied to the Qinghai Tibet Plateau as an example. The spatiotemporal changes of drought and high temperature in summer from 2000 to 2019 were investigated to explore the relative contribution of precipitation and land surface temperature to the compound dry-hot events and the response of different vegetation types to the compound dry-hot events. The results show that Gaussian Copula is the most appropriate distribution function for fitting SPI and SLTI as well as CDHI and standardized enhanced vegetation index (SEVI). The summer dry-hot situation in the study area shows a slight aggravation trend. Among the four vegetation types, the dry-hot situation in grasslands and forests intensifies, and the dry-hot situation shows a spatial trend of slowing down in the north and worsening in the south. The continuous increase in SLTI is the main reason for the aggravation of the severity of compound dry-hot events, with the relative contribution differences of SPI and SLTI in farmland to CDHI changes are the largest, with values of 0.71 and 0.29, respectively. The vegetation growth in the northeast is easily affected by compound dry-hot events, and farmland is the most sensitive to compound dry-hot events.

Key words: extreme climate events; compound dry-hot events; drought; hot; vegetation; Qinghai-Tibet Plateau

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52009028, 51879067); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (B220203051)

作者简介: 程玉佳 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yujiacheng@hhu.edu.cn

通信作者: 晁丽君 (1987—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: lijunchao@hhu.edu.cn

复合干热事件是指同时发生干旱和高温的气候事件,作为一种极端气候事件,近些年来在七大洲均观测到^[1-2]。由于全球气候变化的影响,预计未来干旱和高温将更频繁地出现,导致许多地区出现更多复合干热事件。与干旱和高温相比,复合性干热事件可能对自然生态系统和人类社会造成更具破坏性的影响^[3],是最具破坏力的复合极端事件之一。例如:2003年欧洲夏季热浪伴随干旱,造成大量人员伤亡^[4];2010年夏季,俄罗斯同时遭遇了严重的干旱和前所未有的极端气温,导致了大规模的农作物歉收并引发火灾,给人类生命财产安全带来巨大威胁^[5]。因此,系统地探究复合干热事件的变化趋势及影响已成为亟须研究的科学问题。

复合干热事件具有多变量的特征属性,标准化温度指数(standardized temperature index, STI)与标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)常用于复合干热事件的监测和预测^[2,6-7]。例如:Hao等^[2]提出了标准化复合事件指标(standardized compound event indicator, SCEI),通过SPI和STI的联合概率来评估复合干热事件的严重程度;Fang等^[8]将STI和SPI相结合,使用多变量统计模型对导致玉米减产的不同干热事件发生的可能性进行量化;Li等^[9]基于日尺度标准化前期降水蒸散指数(standardized antecedent precipitation evapotranspiration index, SAPEI)和日尺度STI的联合概率分布,构建了标准化复合旱热指数(standardized compound drought and heat index, SCDHI),提供了一种量化复合干热事件次月特征的新工具,用来监测复合干热事件的开始、发展和衰减。

已有的复合干热事件监测多基于地面站点观测数据或陆面模型模拟数据。站点观测数据虽然可以准确表征站点周边的干热事件状况,但观测站点空间密度有限,仅靠常规站点的观测不能描述干热事件发生发展的整个过程,特别是在站点稀疏的地区^[10];陆面模型模拟的数据虽然可以弥补站点数据的不足,但模拟结果不确定性较高,即使基于相同的气象驱动数据,不同模型的模拟结果可能相差较大,影响监测精度^[11]。随着遥感技术的发展,其能够提供覆盖范围大、时空连续的气象、水文和植被信息,具有重访周期短、空间分辨率高、数据获取方便、资料客观等优点^[12-13],为复合干热事件的监测提供了新的数据源。因此,为量化复合干热事件并弥补离散站点监测空间和时间不连续的缺点,本文基于降水和地表温度等卫星数据产品,运用Copula函数构建一种复合干热事件指数(compound dry-hot events index, CDHI),以实现有效、及时、大范围地监测青藏高原的复合干热事件;分析2000年6月至2019

年8月青藏高原干热情况的时空变化特征、气象干旱和温度异常对复合干热事件的相对贡献程度及复合干热事件对植被生长的影响,以期对青藏高原生态环境保护以及粮食安全保障提供参考。

1 研究区概况与数据来源

青藏高原位于74°E~104°E、25°N~40°N之间,平均海拔4000m以上,面积约为250万km²(图1),是全球最大的高原地区。此外,青藏高原也是长江、黄河、雅鲁藏布江、印度河、恒河等亚洲主要河流的发源地,是我国甚至亚洲水资源产生、赋存和转移的战略要地^[14-15]。由于特殊的地形地貌和地理位置,导致了与周边地区不同的复杂气候系统,对亚洲季风环流有很强的动力作用及热力作用,是研究整个亚洲乃至全球气候的关键区域^[16]。

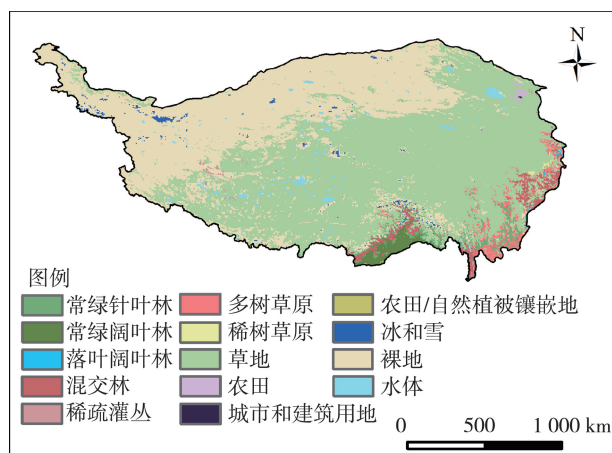


图1 研究区域范围及土地覆盖类型

Fig. 1 Location and land cover types of study area

本文使用的数据来自中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)和GPM多卫星降水联合反演计划(integrated multi-satellite retrievals for GPM, IMERG)产品。月降水量和地表温度数据分别从IMERG V06产品和MODIS V6产品数据中获得,空间分辨率分别为0.1°和0.05°,采用双线性插值法将分辨率统一至0.05°,时间范围为2000年6月至2019年8月;地表温度选取的是日间和晚间地表温度的均值。本文仅关注夏季的复合干热事件,因为此类事件更容易对人类、农业和生态系统造成不利的影响^[17]。为评估复合干热事件对植被的影响,从MODIS V6产品数据中获取研究期内每年8月的增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI),空间分辨率为0.05°,对于未通过质量控制的栅格和缺失值采用最近邻插值法进行补充。与其他植被状态指数相比,EVI能够减少大气状况、双向反射辐射、土壤和叶冠背景的影响,且对高生物量区更

加敏感^[12]。为了探究不同植被类型对复合干热事件的响应,从 MODIS V6 产品数据中获得土地覆盖类型数据,空间分辨率为 0.05°,选取国际地圈生物圈计划(international geo-biosphere program,IGBP)分类作为分类依据。IGBP 分类包含 17 种土地覆盖类型,考虑到青藏高原区域的独特性,将研究区内不涉及的类别剔除,并对剩余类别根据类间相似性进行重新归类,得到研究区共 14 种土地覆盖类型,其中的常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林和混交林 4 种归为林地,稀疏灌丛归为灌丛;多树草原、稀疏草原和草地 3 种归为草地,农田和农田/自然植被镶嵌地 2 种归为农田,城市和建筑用地、冰和雪、裸地和水体 4 种归为其他。

2 研究方法

2.1 二维联合分布函数

Copula 函数可以组合服从任意边缘分布的两个或多个变量来构造它们的联合分布函数,能够有效刻画和描述多个变量之间的线性、非线性关系和尾部相关性^[18]。在 Copula 函数中,对于二维的随机变量 X, Y ,联合分布函数为

$$P(X \leq x, Y \leq y) = C(u, v) \quad (1)$$

其中 $u = F(x)$ $v = F(y)$

式中: P 为概率; u, v 分别为随机变量 X 和 Y 的边缘分布函数; C 为 Copula 函数。

给定 X, Y 的条件概率可以表示为

$$P(X \leq x | Y \leq y) = \frac{C(u, v)}{v} \quad (2)$$

Copulas 函数类型丰富,例如 Archimedean、Meta-elliptic、Extreme Value 和 Miscellaneous 等。Archimedean Copulas 结构简单、代表性广^[19-20],选取其中的 Gumbel、Clayton 和 Frank Copula 函数以及 Meta-elliptic Copulas 中的 Student t Copula 和 Gaussian Copula 作为备选函数,并采用极大似然法进行参数估计。利用拟合得到的 Copula 函数与经验 Copula 函数的赤池信息量准则(Akaike information criterion, AIC)、贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)和均方根误差(root mean square error, RMSE)来进行拟合优度评价。

2.2 CDHI 的构建

本文基于 Copula 函数联合降水、地表温度等遥感数据,构建 CDHI。降水用于计算 SPI^[21],地表温度按照计算 SPI 类似的步骤得到标准化地表温度指数(standardized land surface temperature index, SLTI)。为了避免降水和地表温度分布的参数假设,使用 Gringorten 经验频率公式^[22]来估计边缘分

布并推导 SPI 和 SLTI。以 3 月时间尺度(即 6—8 月)的 SPI 和 SLTI 代表夏季气象干旱和高温。假设 SPI 和 SLTI 分别为两个随机连续变量 X 和 Y ,复合干热事件的概率可表示为

$$P(X \leq x, Y > y) = P(X \leq x) -$$

$$P(X \leq x, Y \leq y) = u - C(u, v) = q \quad (3)$$

式中 q 为复合干热事件的概率。

与单变量情况下的边缘概率不同,联合概率可能不是均匀分布的,因此,将 Gringorten 经验概率分布拟合到联合概率。同时,为了方便表达和量化复合干热事件的严重程度,再基于标准正态分布 φ 进行标准化,可得到 CDHI,计算公式为

$$I_{CDHI} = \varphi^{-1}(G(q)) \quad (4)$$

式中: I_{CDHI} 为 CDHI 值; φ 为标准正态分布; G 为 Gringorten 经验频率分布。

2.3 趋势分析方法

Sen 趋势分析及 Mann-Kendall 检验方法是目前气象水文领域进行趋势判断的主要方法^[23-24]。Sen 趋势分析是一种非参数统计的趋势计算方法,常用于长时间序列数据的趋势分析^[25],当趋势度 $\beta > 0$ 时,表示时间序列呈上升趋势,反之呈下降趋势。同时进行 Mann-Kendall 统计检验,对统计检验量 Z ,在给定 $\alpha = 0.05$ 显著性水平下,当 $|Z| \geq 1.96$ 时,表示该研究序列在 α 水平下存在显著变化。

2.4 相对贡献度分析

不同强度的气象干旱和高温事件会对复合干热事件的严重程度产生不同影响。采用多元线性回归方法研究 SPI 和 SLTI 对复合干热事件严重程度趋势的贡献程度。对于每个网格, SPI、SLTI 和 CDHI 关系的线性回归方程为

$$I_{CDHI} = aI_{SPI} + bI_{SLTI} + c \quad (5)$$

式中: I_{SPI} 、 I_{SLTI} 分别为 SPI 值和 SLTI 值; a, b 为回归系数; c 为常数。

SPI 和 SLTI 对复合干热事件严重程度变化的贡献度计算公式为

$$C_{CP} = a\Delta I_{SPI}/\Delta I_{CDHI} \quad (6)$$

$$C_{CT} = b\Delta I_{SLTI}/\Delta I_{CDHI} \quad (7)$$

式中: C_{CP} 、 C_{CT} 分别为 SPI 和 SLTI 对 CDHI 变化程度的贡献度; ΔI_{SPI} 、 ΔI_{SLTI} 、 ΔI_{CDHI} 分别为 SPI、SLTI 和 CDHI 前 10 年和后 10 年的平均值之差。

SPI 和 SLTI 对复合干热事件严重程度变化的相对贡献度计算公式为

$$C_{CPr} = |C_{CP}| / (|C_{CP}| + |C_{CT}|) \quad (8)$$

$$C_{CTr} = |C_{CT}| / (|C_{CP}| + |C_{CT}|) \quad (9)$$

式中 C_{CPr} 、 C_{CTr} 分别为 SPI 和 SLTI 对 CDHI 变化程度的相对贡献度。

3 结果与分析

3.1 联合分布优选

表1为SPI和SLTI的二维Copula函数拟合优度评价结果。以AIC、BIC和RMSE值最小则拟合程度最优为判断标准,可见拟合SPI和SLTI最优的联合分布函数均为Gaussian Copula函数,因此选择该函数来构建CDHI。

表1 SPI和SLTI的拟合优度评价结果

Table 1 Goodness-of-fit evaluation for SPI and SLTI

Copula 函数	AIC 值	BIC 值	RMSE
Gaussian	-79.54	-78.54	0.13
Student <i>t</i>	-64.81	-62.82	0.18
Gumbel	-56.18	-55.19	0.23
Frank	-55.53	-54.53	0.24
Clayton	-55.35	-54.35	0.24

条件分布可用于评估复合干热事件对植被生长等其他变量的影响。为了便于统计建模,EVI也按照计算SPI和SLTI的类似步骤进行标准化,构建了标准化增强型植被指数(standardized enhanced vegetation index,SEVI)。对于CDHI和SEVI的二维Copula函数拟合优度评价结果见表2,可见Gaussian Copula函数对应的AIC、BIC和RMSE值最小,故拟合CDHI和SEVI最优的联合分布函数为Gaussian Copula函数。

3.2 复合干热事件时空变化分析

基于青藏高原2000年6月至2019年8月夏季

表2 CDHI和SEVI的拟合优度评价结果

Table 2 Goodness-of-fit evaluation for CDHI and SEVI

Copula 函数	AIC 值	BIC 值	RMSE
Gaussian	-64.12	-63.12	0.19
Student <i>t</i>	-43.93	-41.94	0.30
Gumbel	-60.80	-59.80	0.21
Frank	-60.36	-59.36	0.21
Clayton	-59.73	-58.74	0.21

的CDHI、SPI和SLTI数据,得到研究区及不同植被类型覆盖地区的3个指数随时间变化曲线如图2所示。由图2可见,不同植被类型覆盖地区,除草地外,其余地区发生复合干热事件($I_{CDHI} \leq -0.5$)时CDHI较低,说明这些区域发生复合干热事件时情况容易加重,应及时采取应对措施。CDHI序列的斜率表示复合干热事件严重程度的变化趋势,斜率为正则表示复合干热事件的严重程度得到减轻,区域气象干旱和高温的严重程度得到缓解。研究区复合干热事件的严重程度有轻微加重的趋势,不同植被类型覆盖地区CDHI变化趋势差异较大,其中灌丛和农田的复合干热情况得到缓解,且农田变化最为明显,达到了 0.043 a^{-1} ;而草地和林地复合干热情况加重,其中林地变化趋势最明显,为 0.017 a^{-1} 。此外,除林地外,研究区SPI呈现逐年升高的趋势,表明这些区域气象干旱风险程度低,水分条件持续变好。在全球变暖的影响下,除农田外,研究区SLTI呈现逐年升高的趋势,表明高温风险程度高,温度持续上升,增加了发生复合干热事件的可能性。

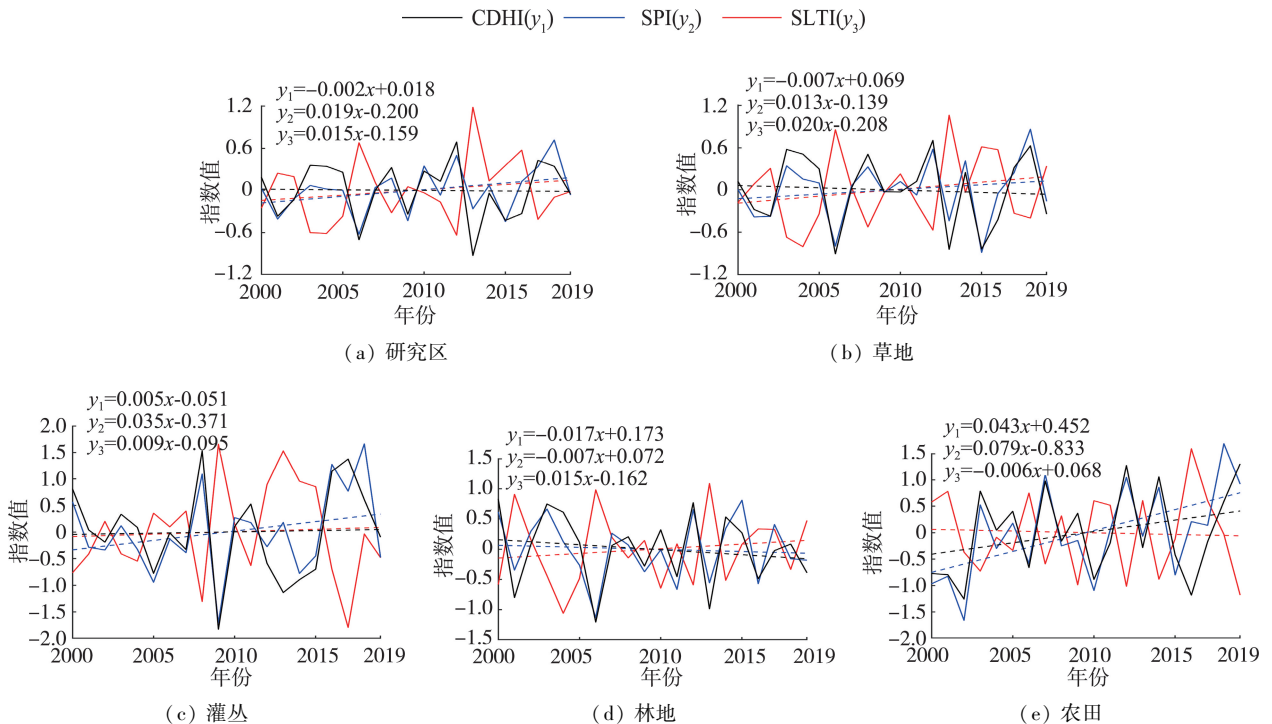


图2 2000—2019年夏季SPI、SLTI和CDHI随时间变化

Fig.2 Temporal variations of SPI, SLTI and CDHI during the summer from 2000 to 2019

基于 Sen 和 Mann-Kendall 趋势分析方法,从像元尺度研究夏季 CDHI 变化趋势的空间分布,结果如图 3 所示(图中红点代表复合干热事件的严重程度显著加重,蓝点代表显著减轻)。研究区复合干热事件的严重程度整体呈现北部减缓南部加重的趋势。复合干热事件的严重程度显著加重的区域分布在研究区的西北部、中部和南部,这些区域的植被类型以草地和林地为主。总的来说,青藏高原的水分条件虽逐渐变好,但受到全球变暖的影响,复合干热事件的风险增大,当地农业部门需提高警惕,防止干旱和高温发生带来的经济损失。

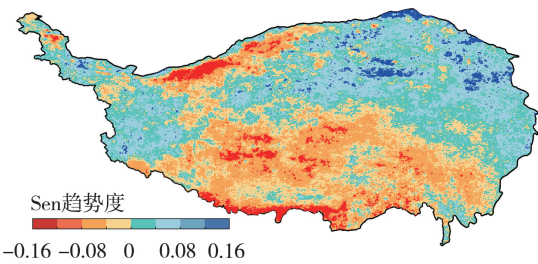
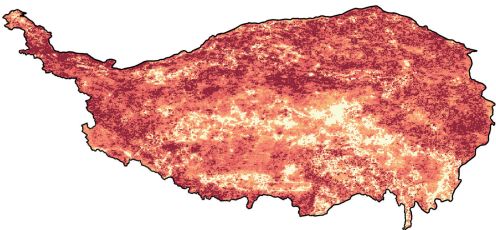
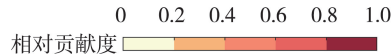


图 3 夏季 CDHI 变化趋势的空间分布

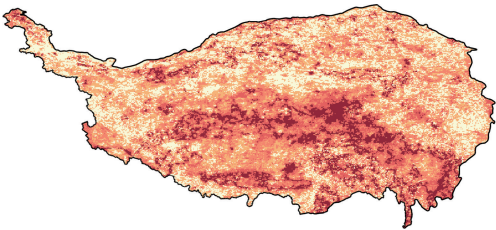
Fig. 3 Spatial distribution of summer CDHI variation trend

3.3 SPI 和 SLTI 对复合干热事件严重程度变化的相对贡献度

图 4 为夏季 SPI、SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度,可以反映 SPI 和 SLTI 对复合干热事件的影响程度。可见,在研究区北部 SPI 对复合干热事件严重程度的影响通常大于 SLTI,而 SLTI 对南部的影响更大。结合图 3 可知,研究区复合干热事件严重程度加重的区域主要分布在南部,表明 SLTI 的贡献在复合



(a) SPI 对 CDHI 变化的相对贡献



(b) SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献

图 4 夏季 SPI 和 SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度

Fig. 4 Relative contribution of summer SPI and SLTI to changes in CDHI

干热事件严重程度加重中占主导地位,即温度上升可能主导了青藏高原复合干热事件严重程度的增加。

为了进一步探讨不同植被类型覆盖地区 SPI、SLTI 变化对复合干热事件严重程度变化的相对贡献度,对研究区及不同植被类型覆盖地区的相对贡献度取均值,结果如图 5 所示。总体而言,SPI 对复合干热事件的影响相对较大,其中农田的 SPI、SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度差别最大,SPI 对 CDHI 变化的相对贡献为 0.71,SLTI 为 0.29;林地的 SPI、SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度差别最小,SPI 和 SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度均为 0.50。这可能是因为林地类型的植被根系发达,能够吸收深层土壤中的水分,具有一定的耐受性。相比于林地植被,农作物的根系较浅,降水是其获取水分的重要途径,对气象干旱胁迫敏感。

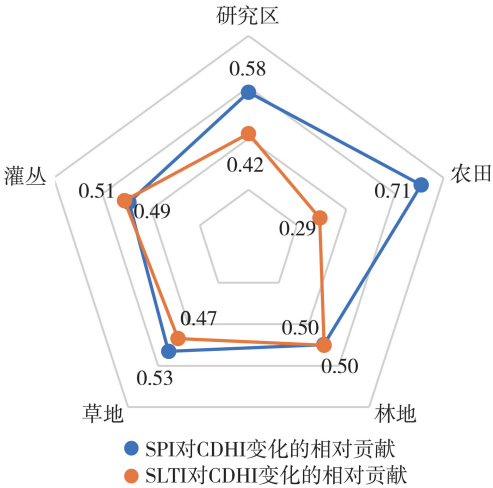


图 5 研究区及不同植被覆盖区 SPI 和 SLTI 对 CDHI 变化的相对贡献度均值

Fig. 5 Mean relative contributions of SPI and SLTI in study area and different vegetation coverage areas to CDHI changes

3.4 复合干热事件对植被生长状况的影响

本文采用 SEVI 作为植被生长情况的衡量标准。为了探讨复合干热事件对植被的影响,计算在发生复合干热事件的条件下($I_{CDHI} \leq -0.5$)植被生长异常($I_{SEVI} \leq -0.5$)(I_{SEVI} 为 SEVI 值)的条件概率,结果如图 6 所示。具有高条件概率的地区大多位于研究区东北部,该区域大部分是干旱和半干旱或湿润和半湿润气候的过渡地区。强烈的陆气相互作用可以解释这种现象,降水不足导致温度上升;同时,温度的上升和蒸散发的增加可能导致土壤水分减少,进一步加剧干旱的发生,导致干旱和高温的同时出现,影响植被生长情况。总体而言,这些结果证实了在研究区东北部的大部分地区,复合干热事件与植被生长情况之间存在很强的相关性,表明当复

合干热事件发生时,该区域植被受到损伤的可能性很大,对农业生产和管理构成威胁。

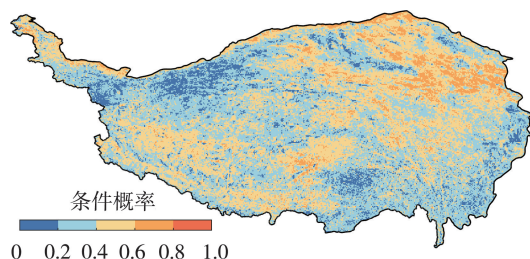


图6 $I_{CDHI} \leq -0.5$ 时 $I_{SEVI} \leq -0.5$ 的条件概率

Fig. 6 Conditional probability of $I_{SEVI} \leq -0.5$ when $I_{CDHI} \leq -0.5$

图7为发生复合干热事件时研究区及不同植被类型覆盖地区植被生长异常的条件概率,其中黑空心点代表异常值,红实心点代表均值,箱内黑线代表中位数。研究区均值为0.38,4种植被类型中,农田对复合干热事件最为敏感,条件概率均值达到0.55,林地对复合干热事件的响应最弱,条件概率均值为0.29。

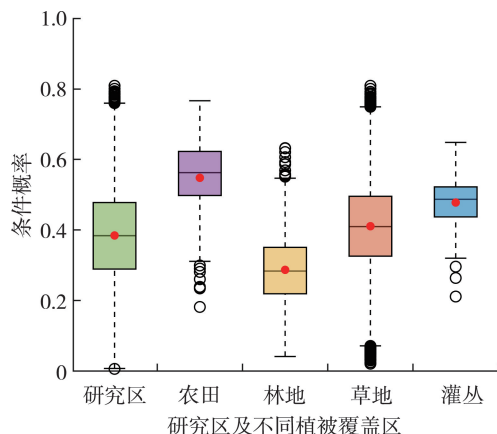


图7 研究区及不同植被覆盖区 $I_{CDHI} \leq -0.5$ 时 $I_{SEVI} \leq -0.5$ 的条件概率

Fig. 7 Conditional probability of $I_{SEVI} \leq -0.5$ when $I_{CDHI} \leq -0.5$ in study area and different vegetation coverage areas

4 结论

a. 5种备选联合分布函数中,Gaussian Copula函数拟合SPI和SLTI以及CDHI和SEVI的结果均最优,因此选择该函数来构建CDHI并利用其探究复合干热事件对植被生长的影响。

b. 时间上,虽然研究区气象干旱风险呈现降低趋势,但受全球变暖的影响,复合干热事件的情况有轻微加重的趋势;4种植被类型中,草地和林地的复合干热情况加重,其余得到缓解。空间上,复合干热事件的情况呈现北部减缓南部加重的趋势,严重程度显著加重的区域主要分布在研究区的西北部、中

部和南部。

c. 整体来看,SLTI虽然对复合干热事件严重程度的影响范围小于SPI,但其持续增大主导了复合干热事件严重程度的加重;4种植被类型中,农田的SPI、SLTI对CDHI变化的相对贡献度差别最大,分别是0.71和0.29,林地的最小,均为0.50,这种差异可能与植被根系发达程度及生长环境有关。

d. 复合干热事件对研究区东北部的植被生长有较大影响,当复合干热事件发生时,该区域植被易受影响;此外,4种植被类型中,农田对复合干热事件最为敏感。这一结论可为当地相关部门应对复合干热事件提供有效的技术支撑,对保障农业持续稳定发展具有现实意义。

参考文献:

- [1] MAZDIYASNI O, AGHAKOUCHAK A. Substantial increase in concurrent droughts and heatwaves in the United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2015, 112(37): 11484-11489.
- [2] HAO Z, HAO F, 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.
- [3] 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, 2021, 52(12): 90-98. (WU Xinying, HAO Zengchao, ZHANG Xuan, et al. Distribution and trends of compound hot and dry events during summer in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, 52(12): 90-98. (in Chinese))
- [4] MIRALLES D G, TEULING A J, VAN HEERWAARDEN C C, et al. Mega-heatwave temperatures due to combined soil desiccation and atmospheric heat accumulation[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(5): 345-349.
- [5] ZSCHEISCHLER J, WESTRA S, VAN DEN HURK B J, et al. Future climate risk from compound events[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 469-477.
- [6] WU X, HAO Z, ZHANG X, et al. Evaluation of severity changes of compound dry and hot events in China based on a multivariate multi-index approach [J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124580.
- [7] HAO Z, ZHANG X, SINGH V P, et al. Joint modeling of precipitation and temperature under influences of El Niño Southern Oscillation for compound event evaluation and prediction[J]. Atmospheric Research, 2020, 245: 105090.
- [8] FANG W, HUANG S, HUANG G, et al. Copulas-based risk analysis for inter-seasonal combinations of wet and dry conditions under a changing climate [J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(4): 2005-2021.

- [9] LI J, WANG Z, WU X, et al. A standardized index for assessing sub-monthly compound dry and hot conditions with application in China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021, 25(3): 1587-1601.
- [10] 郭锐, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18. (GUO Ni, WANG Xiaoping. Advances and developing opportunities in remote sensing of drought[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(1): 1-18. (in Chinese))
- [11] 郝增超, 侯爱中, 张璇, 等. 干旱监测与预报研究进展与展望[J]. 水利水电技术, 2020, 51(11): 30-40. (HAO Zengchao, HOU Aizhong, ZHANG Xuan, et al. Research progresses and prospects of drought monitoring and prediction [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(11): 30-40. (in Chinese))
- [12] 郭锐, 王小平, 王玮, 等. 干旱遥感监测技术进展[J]. 气象科技进展, 2020, 10(3): 10-20. (GUO Ni, WANG Xiaoping, WANG Wei, et al. Review of drought monitoring based on remote sensing technology [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(3): 10-20. (in Chinese))
- [13] 尹国应, 张洪艳, 张良培. 2001—2019 年长江中下游农业干旱遥感监测及植被敏感性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1245-1256. (YIN Guoying, ZHANG Hongyan, ZHANG Liangpei. Remote sensing monitoring of agricultural drought and vegetation sensitivity analysis in the middle and lower reaches of Yangtze River from 2001 to 2019 [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1245-1256. (in Chinese))
- [14] 张建云, 刘九夫, 金君良, 等. 青藏高原水资源演变与趋势分析[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1264-1273. (ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, JIN Junliang, et al. Evolution and trend of water resources in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1264-1273. (in Chinese))
- [15] 许朋琨, 张万昌. GRACE 反演近年青藏高原及雅鲁藏布江流域陆地水储量变化[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 23-29. (XU Pengkun, ZHANG Wanchang. Inversion of terrestrial water storage changes in recent years for Qinghai-Tibetan Plateau and Yarlung Zangbo River Basin by GRACE [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(1): 23-29. (in Chinese))
- [16] 王同美, 吴国雄, 万日金. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 1-9. (WANG Tongmei, WU Guoxiong, WAN Rijin. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area [J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(1): 1-9. (in Chinese))
- [17] COUMOU D, ROBINSON A. Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 034018.
- [18] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45. (WU Zhiyong, CHENG Dandan, HE Hai, et al. Research progress of composite drought index [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 36-45. (in Chinese))
- [19] 马明卫, 程玉佳, 崔惠娟, 等. 黄河唐乃亥站径流干旱多变量联合特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 1-9. (MA Mingwei, CHENG Yujia, CUI Huijuan, et al. Multivariate characteristics of streamflow drought at Tangnaihai station of the Yellow River [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 1-9. (in Chinese))
- [20] 栗晓玲, 梁笋. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护, 2019, 35(4): 17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 17-23. (in Chinese))
- [21] MCKEE T B, DOESKEN N J, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim: Colorado State University, 1993: 179-183.
- [22] GRINGORTEN I I. A plotting rule for extreme probability paper [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68(3): 813-814.
- [23] MANN H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica; Journal of the Econometric Society, 1945, 13(3): 245-259.
- [24] 陶然, 张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 50-56. (in Chinese))
- [25] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-08-21 编辑: 王芳)