DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260486

抚河流域干旱高温事件特征演变分析

张超超[1,2],沈略撼[3],何　强[4],夏丽安[4],杨　霞[1,2]
(1.江西省水利科学院,江西 南昌 330029;2.江西省洪图技术咨询有限公司,江西 南昌 330029;3.江西省峡江水利枢纽工程管理局,江西 南昌 330095;4.江西省南丰县水利局,江西 南丰 344500)

摘　要: 在干旱高温事件日益频发的背景下,抚河流域的社会经济和生态环境均受到严重影响。基于干旱指数(Standardized Precipitation Index,SPI)、高温指数(Standardized Temperature Index,STI)及干热指数(Standardized Dry and Hot Index,SDHI)研究抚河流域干旱、高温事件和复合干热事件的时空演变特征。结果表明,抚河流域SPI-6与STI-12相关性最优,且东北区域相关性高于西南区域。流域干湿呈阶段性波动,极端干旱具有时间聚集性;极端高温由偶发向群发转变,热胁迫风险加剧。1982—2022年复合干热事件呈阶段性集中爆发,2000年后频发且以中高强度为主。旱热事件均由局地向全域快速扩张,核心区消退滞后;复合干热全域分布,边缘强度高于中部且空间演变同步,流域干热复合灾害风险突出。

关键词: 抚河流域;干旱;高温;复合干热;时空特征
中图分类号:　　**文献标志码:**　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0013-05

Analysis on Evolution Characteristics of Drought and High-temperature Events in Fu River Basin

ZHANG Chaochao[1,2], SHEN Luehan[3], HE Qiang[4], XIA Li'an[4], YANG Xia[1,2]
(1. Jiangxi Province Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Hongtu Technical Consulting Co., Ltd., Nanchang 330029, China; 3. Jiangxi Xijiang Water Conservancy Hub Project Administration Bureau, Nanchang 330095, China; 4. Jiangxi Province Nanfeng County Water Conservancy Bureau, Nanfeng 344500, China)

Abstract: In the context of increasingly frequent drought and high-temperature events, the social economy and ecological environment of the Fu River Basin have been severely affected. The spatiotemporal evolution characteristics of drought, high-temperature events, and combined dry-hot events in the Fu River Basin are studied according to drought index (Standardized Precipitation Index, SPI), high-temperature index (Standardized Temperature Index, STI), and dry-hot index (Standardized Dry and Hot Index, SDHI). The results show that the correlation between SPI-6 and STI-12 of the Fu River Basin is the best, and the correlation in the northeastern region is higher than that in the southwestern region. The dry and wet conditions in the basin fluctuate periodically, and the extreme drought has temporal clustering. The extreme high temperatures have changed from sporadic to clustered, and the risk of heat stress has intensified. From 1982 to 2022, the combined dry-hot events occurred periodically, and after 2000, the events occurred frequently and are mainly of medium to high intensity. The drought and heat events expands rapidly from local to the entire region, and the core area recedes slowly. The combined dry-hot events are distributed throughout the region. The edge intensity is higher than the middle part and the spatial evolution is synchronous. The risk of dry-hot combined disasters in the basin is prominent.

Keywords: Fu River Basin; drought; high temperature; combined dry heat; spatiotemporal characteristic

0　引　言

在全球气候变化背景下,极端干旱与高温事件常并发或连续出现,形成的复合极端事件对自然生态系统和人类社会的影响远大于单一极端事件,其发生频率、强度及空间范围均呈显著上升趋势,已成为全球气候研究的核心热点之一[1-3]。由于复合极端事件破坏力极强,给我国生态环境和经济造成十

收稿日期:2026-05-06
基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3209005);江西省水利厅科技项目(2025 26YBKT02)
作者简介:张超超(1998—),男,硕士,助理工程师,水利水电工程规划、设计及相关工作。
通信作者:沈略撼(1999—),男,硕士,助理工程师,从事水利工程管理相关工作。电子信箱:2217524732@qq.com

分严重的影响，对南方地区的影响尤为显著[4-5]。

为预防干旱，目前研究基本采用构建干旱指数来监测干旱事件。干旱基本被分为四大类型：气象干旱、水文干旱、农业干旱、生态干旱。因此，每种干旱事件均有相应的干旱指数进行监测[6]。例如，气象干旱一般采用标准化降水指数（Standardized Precipitation Index，SPI）来监测[7-8]；水文干旱的监测指数为标准化径流指数（Standardized Runoff Index，SRI）[9-10]；农业干旱常用的监测指数为作物水分指数（Crop Moisture Index，CMI）[11-12]；而生态干旱多依赖于植被健康指数（Vegetation Health Index，VHI）[13]。近年来，极端高温事件频发，研究人员对高温事件也日益重视，因此标准化温度指数（Standardized Temperature Index，STI）常被用来研究极端高温事件的特征及影响。然而复合极端事件因其本身的复杂性和影响严重性引起广泛关注，标准化干热事件指数（Standardized Dry and Hot Index，SDHI）能够很好地表达干旱高温复合事件的特征变化[14]。已有研究表明，气象干旱和高温事件的复合作用对生态环境的影响最为严重，同时气象干旱事件和高温事件也受学者广泛关注。抚河流域作为江西省五大流域之一，也是省内主要粮食产区，长期受到干旱事件和高温事件的严重影响。因此，本文利用标准化降水指数、标准化温度指数及标准化干热事件指数来研究抚河流域干旱事件、高温事件和复合干热事件的特征演变规律，以期为抚河流域的抗旱减灾提供理论参考和技术支撑。

1　研究区域

抚河为鄱阳湖水系第二大支流，干流全长 349 km，发源于武夷山脉西麓，流域总面积 15 856 km²，地处赣东区域，属亚热带湿润季风气候（见图 1）。该区年均降水日 179.5 d，多年平均降水量 1 750 mm，气温极值区间为−11 ~ 42 ℃；降水时空分布不均，4 ~ 7 月汛期降水占全年 50% ~ 60%。

2　数据来源

本文所有数据均来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心（http://www.geodata.cn）。其中降水和气温数据的时间跨度为 1982—2022 年，时间尺度为 1 个月。降水数据和气温数据的空间分辨率均为 0.008 333 3°（约 1 km）[15]。

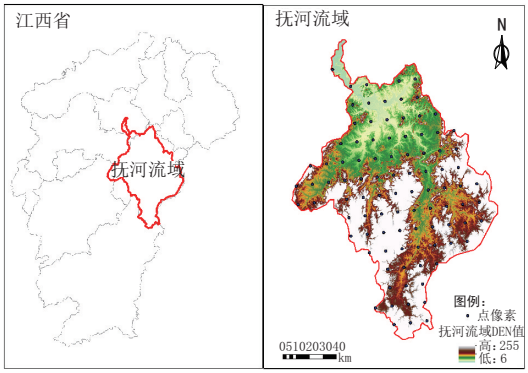


图 1　抚河流域地理位置图

3　研究方法

3.1　标准化降水指数 SPI

标准化降水指数（Standardized Precipitation Index，SPI）是分析干旱事件的一个重要参数，该指数利用降雨量的异常程度来表征干旱的严重程度，能够有效地分析当地长期的降雨情况和干旱特征。

SPI 指数的具体计算方法：利用伽马（Gamma）分布密度函数拟合降水数据，采用极大似然法进行参数估计并进行 Kolmogorov-Smirnov（K-S）检验，通过累计频率 $F(x)$ 和正态标准化得到 SPI 值[7]。

假设每月平均降水为 x，用伽马分布密度函数进行拟合得到函数 $g(x)$。

$$g(x)=\frac{x^{\alpha-1}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}e^{-\frac{x}{\beta}} \tag{1}$$

式中：α 和 β 均为伽马分布密度函数的参数，用极大似然法进行估计。

随后计算伽马分布密度函数的累计概率函数 $G(x)$。

$$G(x)=\int_0^x g(x)\mathrm{d}x \tag{2}$$

当 $0<G(x)\leqslant 0.5$ 时：

$$\mathrm{SPI}=-\left(t-\frac{c_2t^2+c_1t+c_0}{d_3t^3+d_2t^2+d_1t+1}\right) \tag{3}$$

$$t=\sqrt{\ln\left[\frac{1}{G(x)^2}\right]} \tag{4}$$

当 $0.5<G(x)\leqslant 1$ 时：

$$\mathrm{SPI}=\left(t-\frac{c_2t^2+c_1t+c_0}{d_3t^3+d_2t^2+d_1t+1}\right) \tag{5}$$

$$t=\sqrt{\ln\left\{\frac{1}{[1-G(x)]^2}\right\}} \tag{6}$$

式中：c_0=2.515 517，c_1=0.802 853，c_2=0.010 328，d_1=1.432 788，d_2=0.189 269，d_3=0.001 308。

3.2　标准化温度指数 STI

标准化温度指数（Standardized Temperature Index，STI）主要用于高温事件分析，利用长序列的温度数据，采用正态分布拟合，再进行正态标准化处理，广泛应用于各流域的高温特征分析。STI 计算公式与 SPI 计算方法一致，具体参照 SPI[9]。

3.3　标准化干热事件指数 SDHI

SDHI 是根据干旱和高温事件的边际概率分布比率计算的，公式如下：

$$\mathrm{SDHI} = \Phi^{-1}\left[F\left\{\frac{G_1(x)}{G_2(y)}\right\}\right] \tag{7}$$

式中，$G_1(x)$和$G_2(y)$分别为 SPI 和 STI 的边际概率分布；F 分布可以通过经验 Gringorten 公式进行拟合；Φ^{-1}为标准正态分布的反函数[13]。

4　结果与分析

4.1　抚河流域干旱高温事件的时空特征

为深入了解抚河流域干旱高温事件的风险特征，本研究通过对比不同尺度 SPI 和 STI 的相关程度，选择相关性最好的干旱尺度和高温尺度作为研究指标，研究结果如图 2 所示。结果发现，6 个月尺度的干旱指数和高温指数的相关性最优，并呈现出流域东北区域的相关性高于流域西南区域的空间格局。

基于标准化降水指数（SPI-6）的长时序监测结果显示，抚河流域干湿状态呈现显著的阶段性波动与多尺度周期性特征，干旱事件具有明确的时间分异规律。从时间演化来看，流域干湿状态围绕 0 值基准线呈现高频交替波动，反映出降水的年内与年际变率特征。其中，极端干旱事件具有明显的时间聚集性与间歇性：1986、1996、2003、2019 年为典型极端干旱年份，对应 SPI-6 指数分别降至 -2.0 以下（见图 3），达到中—重度干旱等级。反映出流域干旱风险的长期稳定性与极端性并存的特征。

基于 12 个月尺度标准化温度指数（STI-12）的长时序监测结果显示（见图 4），从极端高温事件的时间特征分析，流域极端高温事件呈现频次增加、强度增大、持续性延长的显著趋势：1998、2006 年为典型极端高温年，对应 STI-12 指数峰值分别接近 2.0，属于单次爆发型极端高温，事件持续时间短、间歇期长；而 2019—2022 年出现持续性极端高温过程，STI-12 指数峰值突破 2.0，且正异常呈连片式分布，无明显间歇期，体现出极端高温由“年际偶发”向“年代际群发”的转变特征，反映了全球变暖背景下流域热胁迫风险的持续加剧。

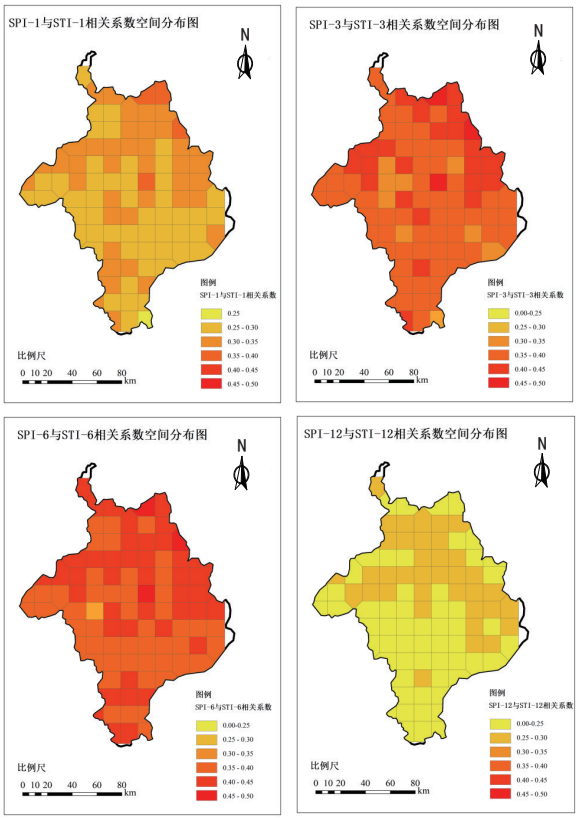


图 2　干旱指数 SPI 与高温指数 STI 的相关关系图

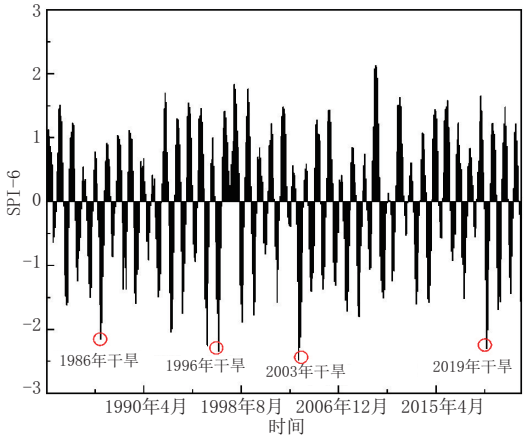


图 3　干旱指数 SPI-6 年际分析图

基于 2019 年 11 月—2020 年 4 月逐月标准化降水指数（SPI）的空间分布格局（见图 5），抚河流域此次极端干旱事件呈现出由局地向全域蔓延、由轻旱向重旱或特旱升级、旱情先加剧后缓解的阶段性演变特征。2020 年 1 月，北部山区、中部平原区为特旱核心区，旱情强度显著高于其他区域，体现出地形、下垫面及水资源禀赋对干旱响应的空间差异；缓解期则呈现“核心区后消退、边缘区先缓解”的特征。从 2019 年 11 月局地轻旱到 2020 年 1 月全域特旱仅历时 2 个月，发展速度极快；且重旱状态持续至 2020 年

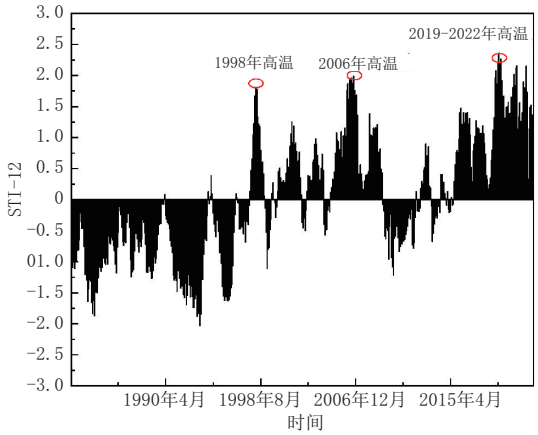


图 4　高温指数 STI-12 年际分析图

2 月，整个干旱事件总持续时长达 6 个月，兼具突发性与持续性，反映了流域干旱灾害的高风险特征。

基于 2019 年 11 月—2020 年 4 月逐月标准化温度指数（STI）的空间分布格局（见图 6），抚河流域此次伴随干旱发生的高温事件呈现出阶段性演变、全域性同步、空间异质性分异的特征，与同期干旱过程形成显著的时空耦合响应。2019 年 12 月—2020 年 1 月，北部山区、中部平原区为重度高温核心区，热胁迫强度显著高于其他区域，体现出地形、下垫面及城市化水平对高温响应的空间差异；缓解期则呈现“核心区后消退、边缘区先缓解”的特征，与干旱缓解的空间格局高度一致。从 2019 年 11 月局地弱暖到 2019 年 12 月全域重度高温仅历时 1 个月，发展速度极快；且重度高温状态持续至 2020 年 1 月，整个高温事件总持续时长达 6 个月，兼具突发性与持续性，凸显了流域干热复合灾害的高风险特征。

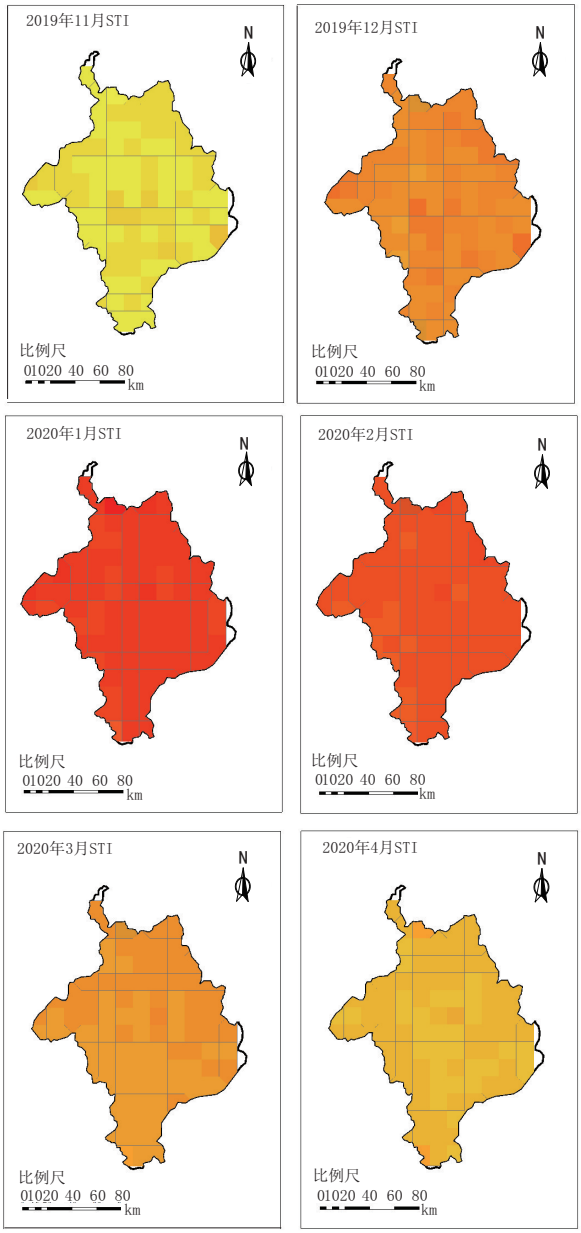


图 5　2019—2020 年逐月干旱空间分布图

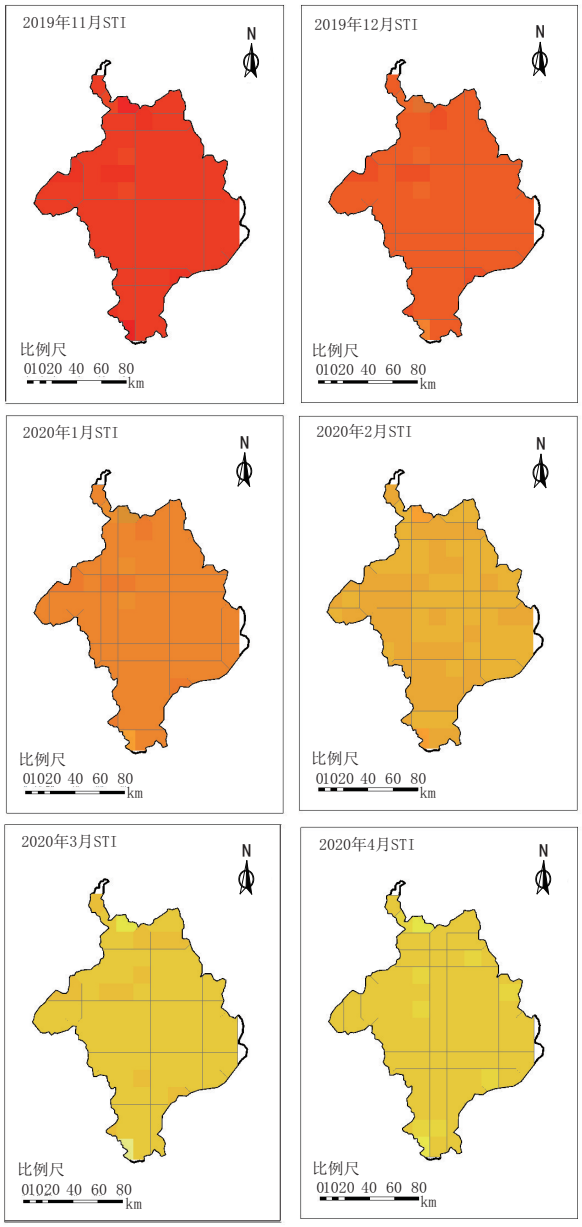


图 6　2019—2020 年逐月高温空间分布图

4.2　抚河流域复合干热事件的时空特征

复合干热事件在 1982—2022 年期间呈阶段性集中发生特征，事件发生间隔存在波动，无明显固定周期，但 2000 年后（2003、2011、2019 年）事件发生频率相对更高，呈现后期频发趋势。各关键年份 SDHI 负值绝对值均较大（见图 7），其中 1984 年 SDHI 谷值最低，达极端强度等级；1996、2003、2011、2019 年 SDHI 负值次之，为重度至特大强度等级，表明抚河流域复合干热事件以中高强度为主，1984 年为全时段最强事件年。全时段 SDHI 序列呈显著波动特征，正负值交替出现，反映流域干湿热状况的年际变率大；而复合干热事件发生年份的负向峰值整体未呈现持续增强或减弱的线性趋势，仅表现为阶段性强事件集中出现。

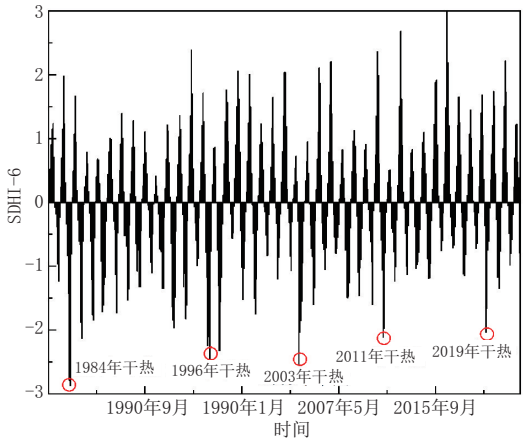


图 7　复合干热指数 SDHI-6 年际分析图

复合干热事件发展至峰值阶段时覆盖抚河流域全域，无明显“非干热区”，体现事件的大范围、流域尺度的影响特征。干热峰值期（2020 年 1 月）的极端干热区集中于流域北部、南部边缘地带，中部区域以中度干热为主，呈现边缘强、中部相对缓和的空间梯度。各阶段干热范围与强度的空间演变高度同步，无明显区域滞后或超前响应，体现流域复合干热事件的空间协同性（见图 8）。抚河流域本次复合干热事件呈现流域尺度全域性、边缘高强度、演变同步化的空间特征，干热由局部萌发后快速扩张至全流域，峰值期边缘区域极端化，随后逐步全域衰减，反映事件的大范围影响与空间协同性。

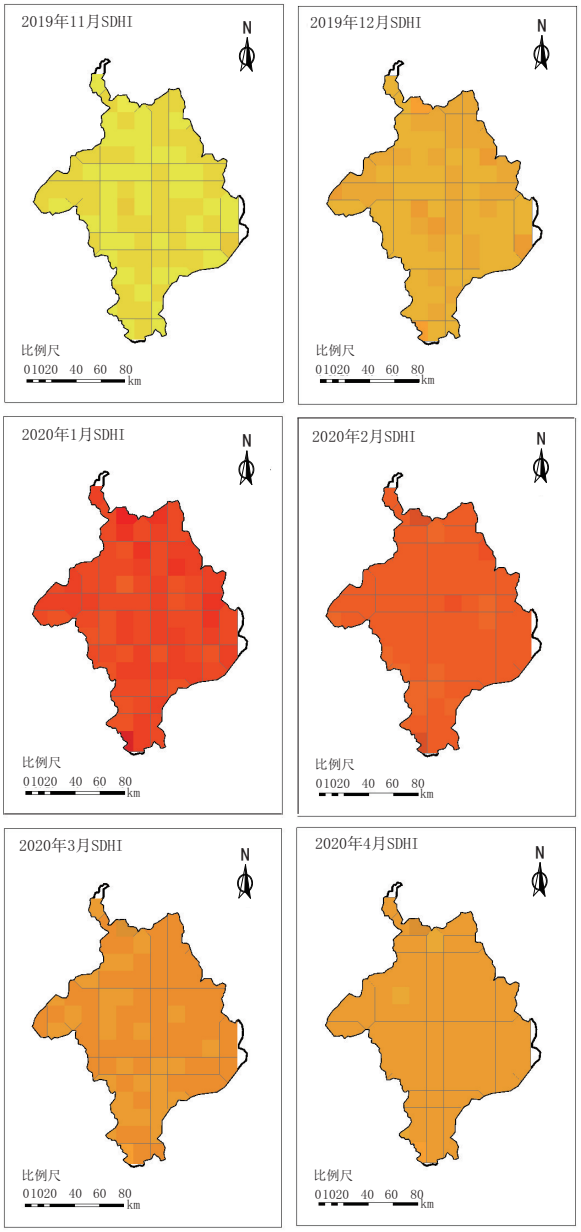


图 8　2019—2020 年逐月复合干热空间分布图

5　结　语

（1）6 个月尺度干旱指数（SPI-6）与高温指数（STI-12）相关性最优，且流域东北区域相关性显著高于西南区域，奠定了干热复合研究的指标基础。

（2）流域干湿状态呈阶段性波动与多尺度周期性，极端干旱事件具有时间聚集性与间歇性；极端高温事件则呈现频次增加、强度增大、持续性延长的趋势，由“年际偶发”向“年代际群发”转变；1982—2022 年复合干热事件呈阶段性集中发生，2000 年后频发趋势明显，以中高强度为主，1984 年为全时段最强事件年，序列年际变率大，无持续线性趋势。

（3）空间分布格局方面，极端干旱与伴随性高温事件均表现为“局地萌发—全域扩张—核心区后消退”的阶段性演变，2020 年 1 月北部山区、中部平原为旱热核心区，发展迅速且持续时间长，兼具突发性与持续性；复合干热事件呈流域尺度全域性分布，峰值期极端干热区集中于南北边缘，中部强度相对缓和，各区域演变高度同步，体现大范围连片分布与协同发展的空间格局。

（下转第 28 页）