

基于 SPI-RRV 指数中国气象干旱及其 风险时空演变特征研究

杨肖丽^{1,2}, 罗定^{1,2}, 叶周兵^{1,2}, 谢灵枫^{1,2}, 任立良^{1,2,3}, 江善虎^{1,2}, 袁山水^{4,5}

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学长江保护与绿色发展研究院,
江苏 南京 210098; 5. 河海大学水利部水循环与水动力系统重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:为全面揭示变化环境下我国多维气象干旱特征,耦合气象干旱指数(SPI)和可靠性-回弹性-脆弱性(RRV)指数,提出了一种基于SPI-RRV指数的干旱风险评价方法,定量评价了中国气象干旱及其风险的时空演变特征。结果表明:SPI-RRV指数具有特征稳定和时空可比性强的特点,能够较为准确地评估气象干旱风险时空演变特征;南方平均干旱栅格比、干旱月占比和频次大于北方,湿润区和半湿润区干旱历时短、烈度大,半干旱区和干旱区干旱历时长、烈度相对较小;干旱高风险区转移具有显著年代际变化规律,空间上从西北向西南地区转移。

关键词:气象干旱;标准化降水指数;可靠性-回弹性-脆弱性指数;干旱风险

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2024)01-0044-08

Study on spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought and its risk in China based on SPI-RRV index//YANG Xiaoli^{1,2}, LUO Ding^{1,2}, YE Zhoubing^{1,2}, XIE Lingfeng^{1,2}, REN Liliang^{1,2,3}, JIANG Shanhu^{1,2}, YUAN Shanshui^{4,5}(1. National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro-Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 5. Key Laboratory of Hydrologic Cycle and Hydrodynamic System of Ministry of Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To fully reveal multi-dimensional meteorological drought characteristics in China under changing environment, an SPI-RRV index-based drought risk assessment method was put forward by coupling the meteorological drought index(SPI) and the reliability-resilience-vulnerability(RRV) index to assess spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought and the drought risk in China. The results show that the SPI-RRV index has characteristics of high stability and strong spatio-temporal comparability, and can accurately assess spatio-temporal evolution characteristics of meteorological drought risk. The average drought grid ratio, proportion of drought months, and number of drought events in southern China are larger than those in northern China. Droughts in humid and semi-humid regions have higher intensity and shorter durations, while droughts in semi-arid and arid regions have lower intensity and longer durations. The transfer of high drought risk areas has a significant interdecadal variation pattern, with a transferring trend from northwest to southwest.

Key words: meteorological drought; standardized precipitation index; reliability-resilience-vulnerability index; drought risk

随着气候变暖和人类活动加剧,各类干旱事件的发生频次、干旱强度和影响范围等都呈现增加的趋势,对全球农业生产、水资源、生态环境安全和可持续发展威胁日益严重^[1-2]。中国是一个干旱灾害频发的国家,据《水旱灾害公报(2021)》统计,每年作物干旱受灾平均面积高达21万km²。2022年长江流域发生罕见夏秋冬连旱,是有完整实测资料以

来最严重的气象水文干旱,旱情峰值时,直接经济损失高达512.8亿元^[3]。因此,研究气象干旱的时空演变特征及其风险变化趋势对我国干旱早期应对、旱灾预警与经济社会发展有着重要意义。

降水稀少是干旱发生的主要原因。近年来中国降水时空变异趋势显著,华北、东北、西南降水年际变异性强,且具有减少趋势^[4-6],华中和华东年降水

量增加^[7-8],西北呈现显著湿润化趋势。北方春季和冬季降水增加,夏季和秋季呈干旱化趋势^[9]。20 世纪 60 年代以来,北方易受旱灾影响且大范围干旱灾害连年发生^[10],东北、华北和西南干旱均有加剧的趋势^[11-13]。2001 年以后,历经半个世纪的东部“南涝北旱”和北部“西湿东干”的格局可能会发生年代际尺度上的转折变化,重大干旱事件有明显增多趋势,季节性干旱事件增加尤为明显^[10]。在北方干旱频发的同时,南方干旱频次明显增多,长江上中游及江淮流域干旱化趋势显著^[14],东部干旱事件发生频次明显增加,且多于西部^[15],这表明干旱中心逐渐有向南方转移的趋势。叠加气候变化和多种人类活动的影响,干旱的发生、发展和演变更加复杂。

基于干旱指数,如帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)^[16]、标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)^[17]、标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[18] 等,结合干旱特征 (频次、历时、强度等) 分析干旱时空演变特征是研究干旱时空特征的常用方法,但该类方法存在无法全面综合概括干旱事件从发生到结束的时空状态变化过程^[19]。近年来,气象水文等领域学者^[20-24] 将干旱指数与水资源系统性能评价指标中的可靠性、回弹性、脆弱性^[20] 相结合来评估干旱状态的演变趋势,如 Chanda 等^[21] 利用干旱管理指数 (drought management index, DMI) 和可靠性-回弹性-脆弱性 (reliability-resilience-vulnerability, RRV) 指数分析印度长期干旱时空变化特征,并预测评价未来干旱情况;Sadeghi 等^[22] 利用 SPI 和 RRV 指数分析了伊朗沙赞德流域健康状况时空变化;Zeng 等^[23] 基于 SPEI-RRV 指数研究中国未来流域健康状况。大量研究表明,RRV 指数与干旱指数结合能从干旱持续时间、回弹速度和严重程度多角度更全面地定量评估干旱发展演变时空特征^[21-24]。

本文利用 1961—2022 年降水数据计算 SPI,采用 Mann-Kendall (MK) 趋势检验方法研究降水时空变化特征,根据游程理论分析气象干旱特征及其时空演变规律,并基于 SPI-RRV 指数评价各研究区气象干旱风险,以期气候变化下气象干旱早期预警与应对提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

中国的地理位置及其三级阶梯的地形地貌,使其具有独特的季风气候。降水量呈现从东南向西北递减的特点^[25],内陆地区常年少雨,比较容易发生干旱。降水量在时间上分配不均,夏季 (6—8 月) 最

多,春季 (3—5 月)、秋季 (9—11 月) 次之,冬季 (12 月至次年 2 月) 最少。本文依据多年平均降水量等值线 800、400、200 mm 将研究区划分为湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区 4 个区域 (图 1,地图审图号为 GS(2022)1873 号)。

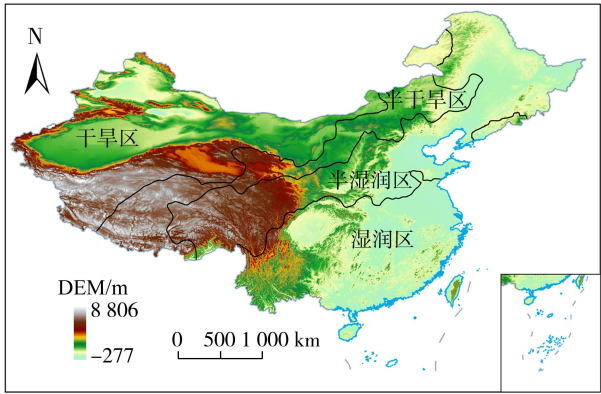


图 1 中国地形与干湿区分布

Fig.1 Landform and distribution of dry and humid regions in China

本文采用的降水量数据来自 CN05.1 格点化日降水数据集 (1961—2022 年)^[26]。该数据集基于中国 2400 余个地面气象台 (站) 的观测资料,具有较高的精度和可靠性^[26-27],在观测台站密集的地方精度更高,与高原实地观测的降水量数据在空间分布及其变化趋势等方面均具有较好的一致性^[28]。由于 CN05.1 数据集未提供中国台湾地区降水量数据,本文研究不包括台湾地区。

2 研究方法

2.1 气象干旱及其特征识别方法

SPI 基于概率分布衡量不同时间尺度下降水的短缺量识别气象干旱事件,时空可比性好,对干旱变化响应敏感,能够客观描述气象干旱发生的强度和持续时间^[17]。本文依据 GB/T 20481—2017《气象干旱等级》,根据 SPI 值的大小划分气象干旱等级,判断气象干旱的严重程度。当 SPI 值的范围分别为 >-0.5 、 $>-1.0 \sim -0.5$ 、 $>-1.5 \sim -1.0$ 、 $>-2.0 \sim -1.5$ 、 ≤ -2.0 时,对应的气象干旱等级分别为无旱、轻旱、中旱、重旱和极旱。在此基础上,采用游程理论^[29] 识别中度以上气象干旱特征 (干旱栅格比、月占比、频次、历时和烈度)。同时将间隔不超过 1 月,且中间月 SPI 值小于 0 的两次干旱事件合并为一次干旱事件。

2.2 MK 趋势检验方法

本文采用 MK 趋势检验方法^[30] 分析气象水文要素的演变趋势。在给定显著性水平为 0.05 (置信

度为 95%) 的情况下,当 MK 趋势检验值 $Z>0$ 时,表示统计变量有增加趋势;反之,则表示统计变量有减少趋势。当 $|Z|\geq 1.96$,说明变量的变化趋势显著;反之,则表示统计变量趋势不显著。

2.3 SPI-RRV 指数

SPI-RRV 指数能够综合考虑气象干旱事件的频次、持续时间和破坏程度,定量刻画某一时间段气象干旱的影响^[31-32]。本文根据 SPI 气象干旱等级划分,分析中等以上干旱事件时空状态特征和演变趋势。

a. 计算可靠性 R_{el} 、回弹性 R_{es} 和脆弱性 V_u :

$$R_{el} = 1 - \sum_{j=1}^M t_j / T \tag{1}$$

$$R_{es} = \sum_{j=1}^M t_j / M - 1 \tag{2}$$

$$V_u = \sum_{i=1}^T \left[\frac{L_{obi} - L_{thi}}{L_{thi}} H(L_{obi} - L_{thi}) \right] / M \tag{3}$$

其中 $H(L_{obi} - L_{thi}) = \begin{cases} 0 & L_{obi} - L_{thi} < 0 \\ 1 & L_{obi} - L_{thi} \geq 0 \end{cases}$

式中: M 为干旱次数; t_j 为第 j 次干旱状态的持续时间; T 为月份总数; L_{obi} 为第 i 个时间节点的 SPI 值; L_{thi} 为相应的 SPI 阈值; $H(\cdot)$ 为赫维赛德函数,该函数可确保脆弱性计算仅涉及干旱状态。

b. 利用式(4)对 R_{el} 与 R_{es} 进行标准化,利用式(5)对 V_u 进行标准化:

$$Y_1 = (x_i - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \tag{4}$$

$$Y_2 = (x_{max} - x_i) / (x_{max} - x_{min}) \tag{5}$$

式中: Y_1 、 Y_2 为标准化后的变量值; x_i 为变量 x 的第 i 个值; x_{max} 、 x_{min} 分别为变量 x 的最大值和最小值。

c. 计算 SPI-RRV 指数:

$$I = \sqrt[3]{R'_{el} R'_{es} V'_u} \tag{6}$$

式中: I 为 SPI-RRV 指数; R'_{el} 、 R'_{es} 、 V'_u 分别为 R_{el} 、 R_{es} 和 V_u 标准化后的值。

根据 SPI-RRV 指数值划分干旱状态风险等级^[22-23]。当 SPI-RRV 指数值的范围分别为 $0 \sim 0.2$ 、 $>0.2 \sim 0.4$ 、 $>0.4 \sim 0.6$ 、 $>0.6 \sim 0.8$ 、 $>0.8 \sim 1.0$ 时,对应的干旱状态风险分别为大、较大、中等、较小和小。SPI-RRV 指数越低,气象干旱的破坏力越大。

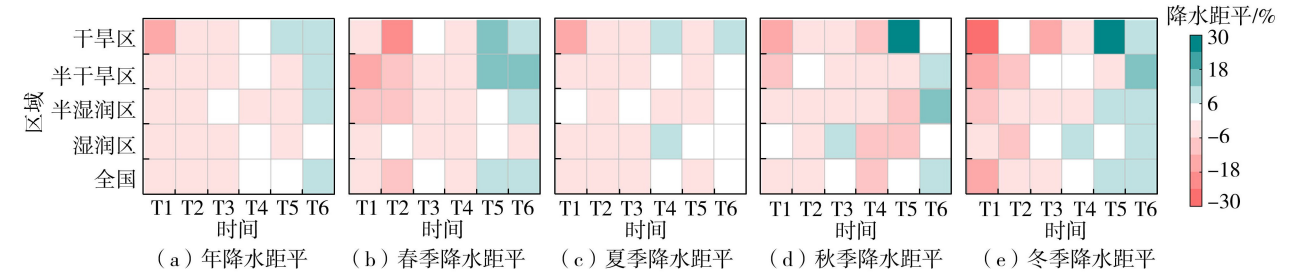


图2 1961—2022 年中国各区域年降水和季节降水的年代际降水距平

3 结果与分析

3.1 中国降水时空特征及变化趋势

1961—2022 年中国降水年代际降水距平增加明显(图 2, 图中 T1、T2、T3、T4、T5、T6 分别表示 1961—1970 年、1971—1980 年、1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2010 年和 2011—2022 年), 全国平均降水距平从 1961—1970 年的 -4.7% 增加到 2011—2022 年的 6.2% 。尽管各区域干湿状况差异大,但湿润区、半湿润区和半干旱区年降水距平年代变化趋势基本一致,呈现先增后减再增的波动增加趋势,干旱区年代际降水距平呈递增趋势。自 20 世纪 90 年代湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区季节性降水发生年代际转折,湿润区春夏秋冬降水减少,冬季降水增加,而半湿润区、半干旱区和干旱区四季却呈现增加趋势。

中国多年平均降水量从西北到东南逐渐递增(图 3(a)), 年平均降水量呈现北增南减的空间分布趋势(图 3(b))。1961—2022 年全国 37.1% 的地区年平均降水量呈现显著增加的趋势,主要集中在西北;东北、西南和黄土高原年降水量出现减少的趋势,导致干旱风险增大。受气候变化影响,1961—2022 年春季西北、东北和青藏高原降水量增加明显,而中东部湿润区和半湿润区降水量减少(图 3(c)); 全国 28.1% 的地区夏季降水量减小,这些地区主要分布在华北和西南(图 3(d); 南方湿润区和半湿润区秋季降水量减少(图 3(e)), 导致秋季气象干旱风险大大增加,说明 20 世纪 90 年代以后降水减少而引起的秋旱是气候变化的一个重要特征^[33-34]; 全国 32.6% 的地区冬季降水量增加显著,这些地区主要集中在干旱区和东北南部,而东北北部冬季降水量显著减少(图 3(f))。

3.2 中国气象干旱时空特征

1961—2022 年中国气象干旱事件的影响范围时空差异显著(图 4(a)), 1962 年、1965 年、1966 年、1986 年和 2022 年干旱栅格比超过 20% , 该结果与历史资料记载较为一致。根据《中国干旱

Fig.2 Interdecadal precipitation anomaly on annual and seasonal scales in each region in China from 1961 to 2022

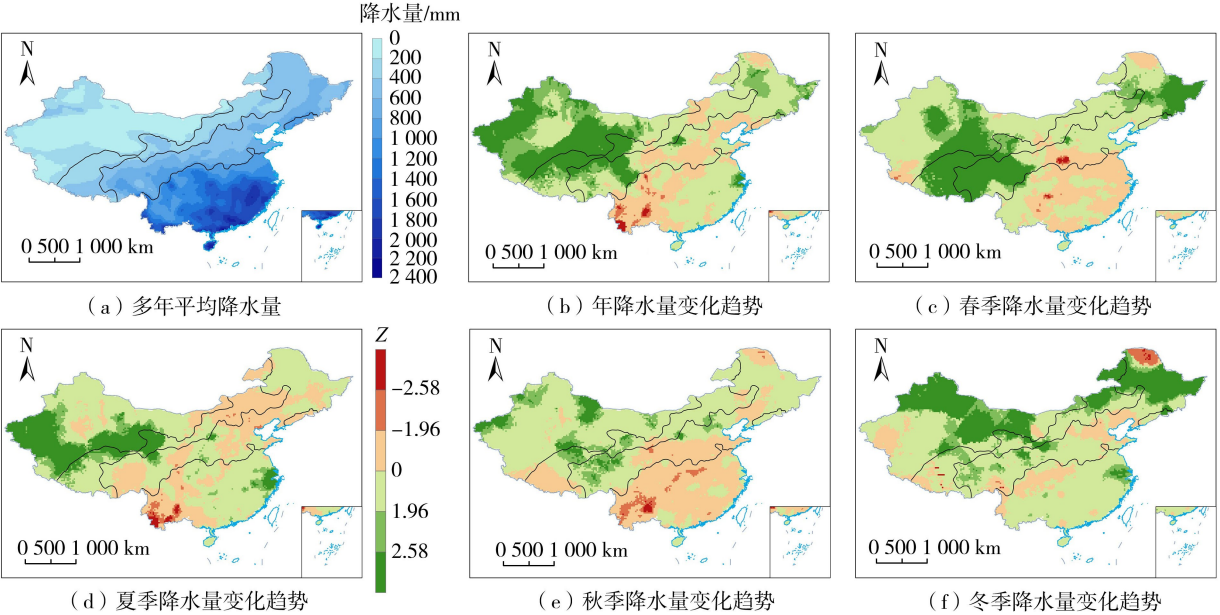


图3 1961—2022 年中国降水空间分布及其变化趋势

Fig.3 Spatial distribution and variation trend of precipitation in China from 1961 to 2022

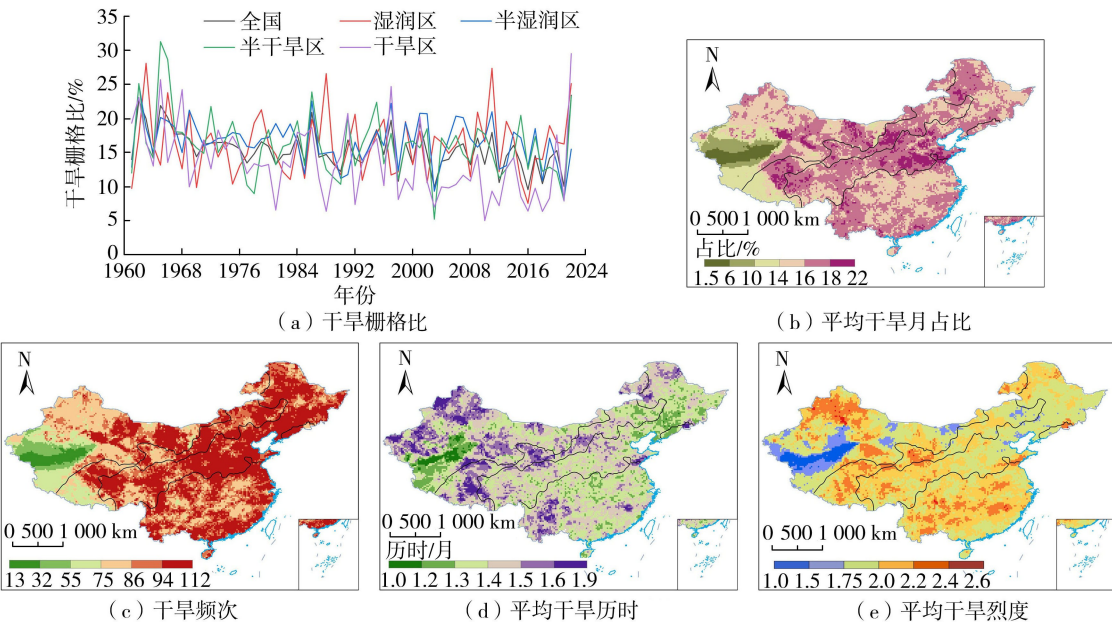


图4 1961—2022 年中国气象干旱特征时空分布

Fig.4 Spatio-temporal distribution of drought characteristics in China from 1961 to 2022

灾情资料(1949—1999)》和有关资料记载^[3,35], 1962 年北方、西南和华南发生大面积重旱;1965 年 3—6 月东北大部、冀东北和蒙东发生重旱,5—10 月黄河流域和海河流域发生特大旱;1966 年多地发生重度和特大干旱;1986 年蒙、晋、鲁、豫等省干旱严重^[35]。此外,2022 年长江流域干旱持续时间长,波及范围广,湘、鄂、赣、苏、皖等省受旱灾波及^[3]。

1961—2022 年中国发生气象干旱的平均干旱月占比范围为 1.8%~21.8% (图 4(b)),湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区发生气象干旱的平均干旱月占比分别为 16.2%、16.6%、16.1% 和 13.6%,南方平均干旱月占比总体上大于北方。干

旱频次整体上呈现出从东南到西北递减的格局 (图 4(c)),湿润区和半湿润区干旱频次分别为 90.8 和 93.5,超过了半干旱区和干旱区 (分别为 87.6 和 74.5)。各区域平均干旱历时和干旱烈度空间差异性显著 (图 4(d)(e)),湿润区和半湿润区平均干旱历时短 (分别为 1.41 和 1.40 月),平均干旱烈度大 (分别为 2.05 和 1.98),而半干旱区和干旱区平均干旱历时长 (分别为 1.46 和 1.43 月),平均干旱烈度相对较小 (分别为 2.03 和 1.91)。

3.3 中国气象干旱风险时空演变特征

图 5 为典型干旱年 SPI-RRV 指数分布及其变化趋势,SPI-RRV 指数越低,对应的气象干旱越严

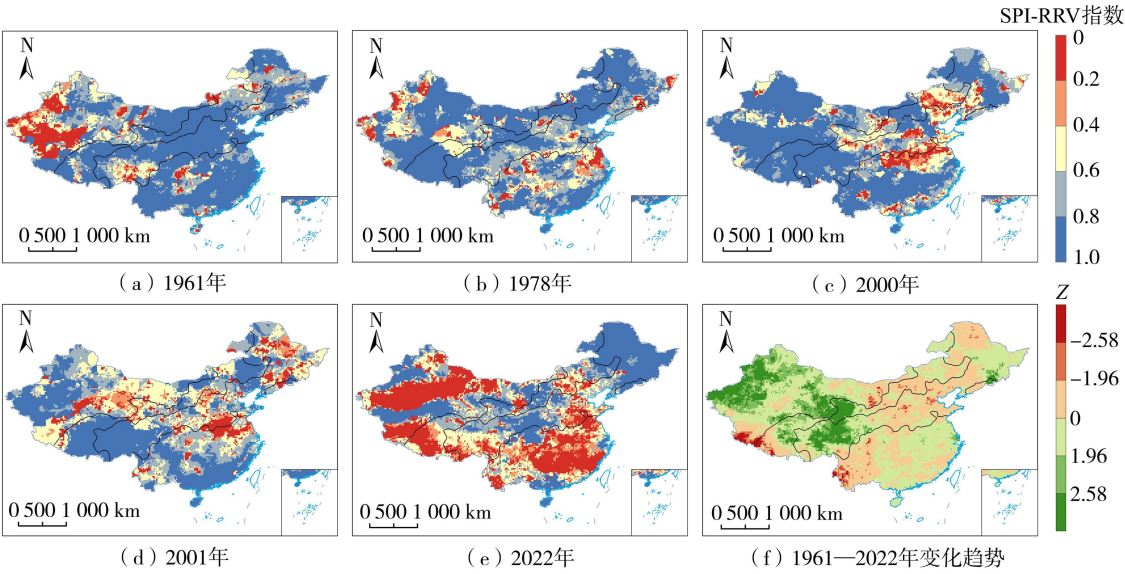


图5 典型干旱年 SPI-RRV 指数分布及其变化趋势

Fig. 5 Spatial distribution of SPI-RRV index in typical drought years and its variation trend

重。图 5 中的结果与资料记载的历史干旱事件(表 1)较为一致^[35-38],如 2022 年长江流域受旱严重^[3],图 5(e)中该区域 SPI-RRV 指数范围在 0 ~ 0.2 之间,反映出干旱风险大,破坏性强。表明本文构建的 SPI-RRV 指数具有时间尺度灵活、特征稳定和时空可比性强等优点,能够较为准确地评价气象干旱风险时空分布。

表 1 典型干旱年干旱事件

干旱年份	资料记载干旱情况
1961	渝、鄂、贵、川以及长江中下游等地重旱
1978	海河、黄河、淮河、长江流域以及华中、海南岛特大旱
2000	华北、东北以及甘、鄂等地大旱
2001	吉、蒙、晋、黑、鄂、渝、冀、川、皖、豫、鲁、陕、辽等地旱情严重
2022	长江流域夏秋冬连旱及夏季高温

中国各区域 SPI-RRV 指数呈现不同的演变趋势(图 5(f)), 34.7% 的地区 SPI-RRV 指数减少,且西南、华北和东北一带减少显著,表明其干旱风险呈现增加趋势;64.7% 的地区 SPI-RRV 指数增加,显著增加区域集中在西北地区。1961—2022 年,湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区干旱风险时空差异显著(图 6)。其中,湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区干旱破坏情况最严重年份分别出现在 2022 年、1962 年、1965 年和 2022 年,4 个区域出现中等以上干旱风险(SPI-RRV 指数小于 0.6)分别为 6、5、9、7 a。

年代际 SPI-RRV 指数分布表明中国干旱高风险区的转移具有明显的年代际变化规律(图 7),全国 1961—1970 年和 1991—2000 年干旱风险最高。20 世纪中期西北干旱风险较高(图 7(a)),70 年代

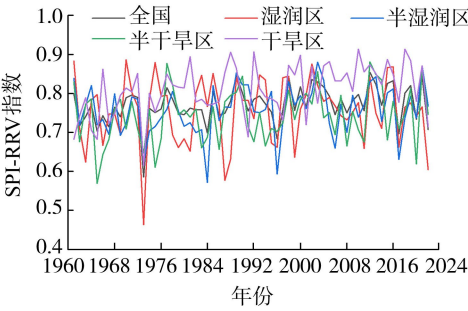


图 6 1961—2022 年中国各区域平均 SPI-RRV 指数

Fig. 6 Average SPI-RRV index of each region in China from 1961 to 2022

干旱中心向南转移,以长江中下游为中心出现干旱高风险区(图 7(b))。80 年代中国 SPI-RRV 指数发生明显转折变化,华北、华中和青藏高原转变为干旱高风险中心(图 7(c)),而 90 年代 SPI-RRV 指数低值区中心出现在黄河流域(图 7(d))。21 世纪初期湿润区及东北干旱风险高(图 7(e)),之后 10 年,湿润区干旱风险变大,西南地区转变成干旱高风险区(图 7(f))。

4 讨论

本文研究结果反映出中国降水呈现南减北增的空间格局,北方降水增加与来自海洋的水汽输送能力加强有关,即与西太平洋副热带高压异常活动和太平洋年代际振荡有关^[39-40]。Zhang 等^[41-42]对干旱与厄尔尼诺-南方涛动的相关性和周期性进行了量化,揭示了影响西南干旱的可能因素,发现 3 月尺度 SPI 与大尺度气候指数(海洋尼诺指数和南方涛动指数)的相关性表现出明显的季节特征,表明干旱

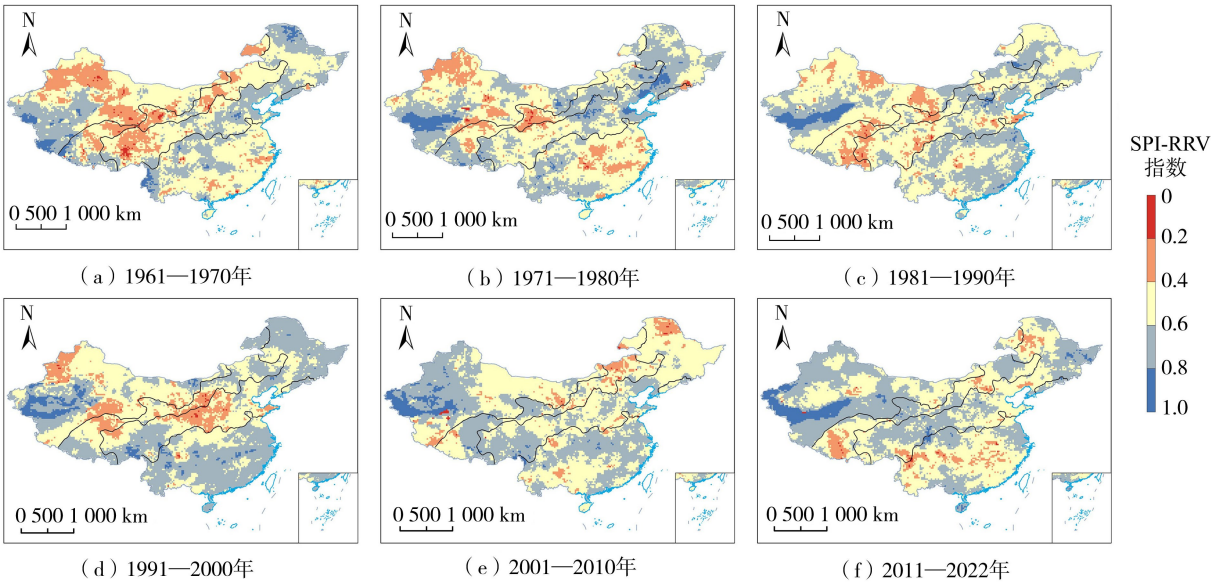


图7 年代际 SPI-RRV 指数时空分布

Fig.7 Spatio-temporal distribution of interdecadal SPI-RRV index

可能与拉尼娜事件有关,大气环流和海温异常是导致中国南北干旱特征差异的主要原因。

本文研究结果还反映出 SPI-RRV 指数变化趋势与降水变化趋势基本一致,可能是由于 SPI 计算只与降水有关。干旱是许多复杂因子与环境相互作用的结果,中国气象干旱发生发展既受到全球气候变化的影响,也受到经济社会发展的影响,后期研究需要进一步分析人类活动对气候变化和气象干旱的影响。

5 结 论

a. 1961—2022 年中国降水量呈现南多北少、北增南减特征。湿润区和半湿润区干旱频次高,干旱区和半干旱区干旱历时长、烈度相对较小。

b. SPI-RRV 指数能够有效捕捉中国各区域历史旱情。中国 34.7% 和 64.7% 的地区分别呈现干旱破坏性增加和减小的趋势。西北地区气象干旱风险显著减小,西南、华北和东北一带气象干旱风险增加显著。

c. 中国干旱高风险区的转移具有明显的年代际变化规律,全国 20 世纪 60 年代和 90 年代干旱风险最高。1961—2022 年气象干旱高风险区从西北地区向西南转移。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[3] 中华人民共和国应急管理部. 应急管理部发布 2022 年全国自然灾害基本情况 [EB/OL]. (2023-01-13) [2023-05-19]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202301/t20230113_440478.shtml.

[4] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))

[5] 曹永兴, 蔡宏珂, 向卫国, 等. 我国西南地区 1963—2012 年降水集中指数的变化特征 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38 (10): 117-124. (CAO Yongxing, CAI Hongke, XIANG Weiguo, et al. Characteristics of precipitation concentration index variations in southwest China from 1963 to 2012 [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2016, 38 (10): 117-124. (in Chinese))

[6] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近 40a 中国北方降水量与蒸发量变化 [J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17 (2): 6-11. (YANG Jianping, DING Yongjian, CHEN Rensheng, et al. Variations of precipitation and evaporation in north China in recent 40 years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2003, 17 (2): 6-11. (in Chinese))

[7] 杨肖丽, 马慧君, 吴凡, 等. 基于 CMIP6 的全球及干旱带干旱时空演变 [J]. 水资源保护, 2023, 39 (2): 40-49. (YANG Xiaoli, MA Huijun, WU Fan, et al. Spatio-temporal evolution of global and arid zone drought based on CMIP6 [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 40-49. (in Chinese))

[8] 吴志勇, 白博宇, 何海, 等. 珠江流域 1981—2020 年水

- 文干旱时空特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):1-9. (WU Zhiyong, BAI Boyu, HE Hai, et al. Temporal and spatial characteristics of hydrological drought in the Pearl River Basin from 1981 to 2020 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(1):1-9. (in Chinese))
- [9] 冯凯,李彦彬,王飞,等. 基于改进三维识别方法的西北地区干旱事件分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):63-72. (FENG Kai,LI Yanbin,WANG Fei,et al. Analysis of drought events in Northwest China based on an improved three-dimensional identification method [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):63-72. (in Chinese))
- [10] 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. (ZHANG Qiang, YAO Yubi, LI Yaohui, et al. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China [J]. Acta Meteorologica Sinica,2020,78(3):500-521. (in Chinese))
- [11] 梁丰,刘丹丹,王婉昭,等. 基于 SPEI 的中国东北地区 1961—2014 年干旱时空演变[J]. 中国沙漠,2017,37(1):148-157. (LIANG Feng, LIU Dandan, WANG Wanzhao, et al. Temporal and spatial distributions of drought in northeast China in 1961-2014 based on standardized precipitation evapotranspiration index [J]. Journal of Desert Research,2017,37(1):148-157. (in Chinese))
- [12] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu,et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):8-13. (in Chinese))
- [13] 石朋,唐汉,瞿思敏,等. 西南地区气象干旱向水文干旱传播的特征[J]. 水资源保护,2023,39(1):49-56. (SHI Peng,TANG Han, QU Simin, et al. Characteristics of propagation from meteorological drought to hydrological drought in Southwest China [J]. Water Resources Protection,2023,39(1):49-56. (in Chinese))
- [14] 马柱国,符淙斌,杨庆,等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化[J]. 大气科学,2018,42(4):951-961. (MA Zhuguo,FU Congbin, YANG Qing,et al. Drying trend in northern China and its shift during 1951-2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2018,42(4):951-961. (in Chinese))
- [15] 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))
- [16] PALMER W C. Meteorological drought[R]. Washington: US Department of Commerce Weather Bureau,1965.
- [17] MCKEE T B,DOESKENN J,KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration totime scales [C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim: Meteorelogy Society, 1993: 179-183.
- [18] VICENTE-SERRANO S M,BEGUERÍA S,LÓPEZ-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: thestandardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate,2010,23(7):1696-1718.
- [19] 杨肖丽,崔周宇,任立良,等. 1966—2015 年长江流域水文干旱时空演变归因[J]. 水科学进展,2023,34(3):349-359. (YANG Xiaoli,CUI Zhouyu,REN Liliang,et al. Patterns and attributions of hydrological drought in the Yangtze River Basin from 1966 to 2015 [J]. Advances in Water Science,2023,34(3):349-359. (in Chinese))
- [20] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, andvulnerability criteria for water-resource system performance evaluation [J]. Water Resources Research,1982,18(1):14-20.
- [21] CHANDA K,MAITY R,SHARMA A,et al. Spatiotemporal variation of long-term drought propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought management index[J]. Water Resources Research,2014,50(10):7662-7676.
- [22] SADEGHI S H, HAZBAVI Z. Spatiotemporal variation of watershed health propensity through reliability-resilience-vulnerability based drought index (case study: Shazand Watershed in Iran) [J]. Science of the Total Environment,2022,587-588:168-176.
- [23] ZENG Peng,SUN Fengyun,LIU Yaoyi, et al. Future river basin health assessment through reliability-resilience-vulnerability: thresholds of multiple dryness conditions [J]. Science of the Total Environment, 2020, 741: 140395.
- [24] 黄梦杰. 长江流域非平稳 SPI 干旱时空特征分析[D]. 长沙:湖南师范大学,2021.
- [25] 方国华,丁紫玉,闻昕,等. 厄尔尼诺事件及其对我国夏季降水量时空分布的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(6):481-488. (FANG Guohua, DING Ziyu,WEN Xin,et al. EI Nino event and its impact on the spatial and temporal distribution of summer precipitation in China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2017,45(6):481-488. (in Chinese))
- [26] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比[J]. 地球物理学报,2013,56(4):1102-1111. (WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics,

- 2013,56(4):1102-1111. (in Chinese))
- [27] 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))
- [28] 栾澜,翟盘茂. 基于多源数据的青藏高原雨季降水特征变化分析[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(2): 173-190. (LUAN Lan, ZHAI Panmao. Changes in rainy season precipitation properties over the Qinghai-Tibet Plateau based on multi-source datasets[J]. Climate Change Research, 2023, 19(2): 173-190. (in Chinese))
- [29] BONACCI O. Hydrological identification of drought[J]. Hydrological Processes, 1993, 7(3): 249-262.
- [30] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [31] HOQUE Y M, TRIPATHI S, HANTUSH M M, et al. Watershed reliability, resilience and vulnerability analysis under uncertainty using water quality data[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 109: 101-112.
- [32] HOQUE Y M, HANTUSH M M, GOVINDARAJUR S. On the scaling behavior of reliability-resilience-vulnerability indices in agricultural watersheds[J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 136-146.
- [33] 杨帅,于志岗,苏筠. 中国气象干旱的空间格局特征(1951—2011)[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10): 54-60. (YANG Shuai, YU Zhigang, SU Yun. Spatial pattern of meteorological drought in China (1951-2011)[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(10): 54-60. (in Chinese))
- [34] 湛芸,施能. 我国秋季降水、温度的时空分布特征及气候变化[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 622-630. (CHEN Yun, SHI Neng. Spatial and temporal distribution of autumn precipitation and temperature in China and climatic change[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2003, 26(5): 622-630. (in Chinese))
- [35] 曲建和. 1986年干旱及其影响评价[J]. 灾害学, 1987(3): 39-44. (QU Jianhe. The study of dryness of 1986 and assessment of impact[J]. Journal of Catastrophology, 1987(3): 39-44. (in Chinese))
- [36] 干旱分析小组. 我国2000年干旱情况分析与发展趋势展望[J]. 气象, 2000, 26(10): 3-9. (The Drought Analysis Group. The drought analysis in 2000 and its outlook[J]. Meteorological Monthly, 2000, 26(10): 3-9. (in Chinese))
- [37] 郑丽虹,刘懿,任立良,等. 黄河流域气象干旱与水文干旱时空特征及其传递关系[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 87-95. (ZHENG Lihong, LIU Yi, REN Liliang, et al. Spatio-temporal characteristics and propagation relationship of meteorological drought and hydrological drought in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 87-95. (in Chinese))
- [38] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 2001年全国旱情及抗旱行动情况[J]. 防汛与抗旱, 2002(1): 54-60. (Office of China Flood Control and Drought Relief Headquarters. Drought situation and drought relief action in China in 2001[J]. China Flood & Drought Management, 2002(1): 54-60. (in Chinese))
- [39] 钱琦雯,梁萍,祁莉. 西太平洋副热带高压的季节内活动与变异研究进展[J]. 气象与环境科学, 2021, 44(6): 93-101. (QIAN Qiwen, LIANG Ping, QI Li. Advances in the study of intraseasonal activity and variation of western Pacific subtropical high[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2021, 44(6): 93-101. (in Chinese))
- [40] 从靖,赵天保,马玉霞. 中国北方干旱半干旱区降水的年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(6): 643-657. (CONG Jing, ZHAO Tianbao, MA Yuxia. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of northern China and its relationship with pacific decadal oscillation index[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(6): 643-657. (in Chinese))
- [41] ZHANG Linyan, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Dynamic multi-dimensional identification of Yunnan droughts and its seasonal scale linkages to the El Niño-Southern Oscillation[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022, 42: 101128.
- [42] 薛亮,袁淑杰,王劲松. 我国不同区域气象干旱成因研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2023, 41(1): 1-13. (XUE Liang, YUAN Shujie, WANG Jinsong. Progress and prospects of research on causes of meteorological drought in different regions in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(1): 1-13. (in Chinese))

(收稿日期:2023-05-19 编辑:施业)

