

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.013

京津冀地区干旱事件时空聚集性特征分析

洪思扬¹,程涛^{2,3}

(1. 广东省农业科学院农业经济与信息研究所,广东 广州 510640; 2. 广东省水利水电科学研究院,广东 广州 510635; 3. 广东工业大学环境生态工程研究院,广东 广州 510006)

摘要:在计算京津冀地区1961—2015年逐月标准化降水蒸散指数(SPEI)的基础上,借助SaTScan时空扫描软件,对不同程度干旱的时空聚集特征及其变化趋势进行了探究。结果表明:京津冀地区1961—2015年干旱发生频率持续增加,干旱化程度不断加剧;轻旱和中旱的时空聚集特征与总旱相似,集中发生于石家庄、保定、衡水和邢台;重旱和特旱的时空聚集特征相似,集中发生于廊坊、保定、沧州和石家庄;1961—1993年干旱聚集状态保持平稳,1994年后聚集的空间波动性增大,聚集范围和聚集程度均有所增强;随着干旱程度的加重,聚集发生的难度增加,聚集范围的差异性增大,空间波动性和不可预测性均有所增强。

关键词:干旱事件;SPEI;时空聚集性;SaTScan时空扫描;京津冀地区

中图分类号:TV213;S166 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0087-09

Analysis on spatial-temporal gathering characteristics of drought events in Beijing-Tianjin-Hebei region // HONG Siyang¹, CHENG Tao^{2,3} (1. Institute of Agricultural Economics and Information, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 3. Institute of Environmental & Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: On the basis of calculating the monthly SPEI values of the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1961 to 2015, the spatial-temporal gathering characteristics and change trends of different degrees of drought events were explored using the SaTScan spatial-temporal scanning software. The results showed that the frequency of drought in the Beijing-Tianjin-Hebei region continued to increase from 1961 to 2015, and the degree of drought continued to intensify. The spatial-temporal gathering characteristics of light drought and moderate drought are similar to that of total drought, and they mainly occur in Shijiazhuang, Baoding, Hengshui and Xingtai cities. The spatial-temporal gathering characteristics of severe drought and extreme drought are similar, and they occur mainly in Langfang, Baoding, Cangzhou and Shijiazhuang cities. From 1961 to 1993, the gathering state of drought remained stable. After 1994, the spatial fluctuation of drought gathering increased, and the gathering range and degree were enhanced. With the aggravation of drought, the difficulty of drought gathering occurrence increases, the difference of gathering range increases, and the spatial volatility and unpredictability are enhanced.

Key words: drought events; SPEI; spatial-temporal gathering; SaTScan spatial-temporal scanning; Beijing-Tianjin-Hebei region

干旱是一种循环发生的极端气候事件,是我国主要的气象灾害之一^[1],在我国的成灾率达53%^[2],对农业生产、水资源供给和环境生态系统

产生重要影响^[3-4]。在全球变暖的背景下,干旱发生的频率和强度有所增加,极端干旱事件造成的影响有所加重^[5-6],且以北半球表现更为显著。20

基金项目:广东省哲学社会科学规划项目(GD21YYJ15);广州市哲学社会科学发展“十四五”规划项目(2021GZGJ25);广州市科技计划项目(202201011166,202201011541);广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515010898);广东省农业科学院产业经济与都市农业团队项目(202124TD)

作者简介:洪思扬(1990—),女,助理研究员,博士,主要从事水资源系统分析研究。E-mail: hongsy@mail.bnu.edu.cn

通信作者:程涛(1990—),男,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: tao_cheng@mail.bnu.edu.cn

世纪 70 年代以来,干旱在我国东北和华北地区持续发生,对农业生产和经济发展形成了严重制约^[7-8],探究干旱的发展规律和演化特征具有重要现实意义。

基于不同的研究视角和侧重点,美国气象学会提出,将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 类^[9],在某种程度上反映了干旱发展的不同阶段^[10]。本文主要研究气象干旱,具体指水分支出大于水分收入而造成水分短缺现象,主要强调水分收支平衡。干旱的成因错综复杂,为了准确地评估、量化和监测干旱,相关学者从多个视角构建了气象干旱指数,据世界气象组织统计,现有气象干旱指数达 50 余种^[11],包括降水 Z 指数^[12]、降水距平百分率 (percentage of precipitation anomaly, Pa)^[13]、标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)^[14] 等仅考虑降水因素的干旱指数,以及标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)^[15]、帕默尔干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI)^[16] 和气象干旱综合指数 (meteorological drought composite index, MCI)^[17] 等综合考虑降水、气温和蒸发的多要素干旱指数,各指标在不同地区的适用性各异。其中,应用最为广泛的两类是 PDSI 和 SPI^[18-19],PDSI 是基于土壤湿度供需模型的干湿指标,该指标考虑了众多因素,计算过程比较复杂,参数区域性较强,且不利于时空上的有效比较;而 SPI 的计算仅需要降水数据,具有多时间尺度特性,但忽略了气温上升引起的蒸散量变化对干旱的影响^[20]。基于此, Vicente-Serrano 等^[20]在 SPI 的基础上提出了 SPEI,该指标融合了 PDSI 对蒸散需求变化的灵敏性和 SPI 具备多时间尺度和计算简便的特性,得到了广泛应用。

京津冀地区降水量空间分布不均,丰水年的降水量可达枯水年的 4~5 倍,降水变率较大,旱涝灾害频发^[21-22]。随着人口和产业的进一步聚集,地区面临的干旱风险有所增长。作为一种极端气象灾害,干旱在时间和空间上的聚集均会对生产生活造成严重影响。现有研究对京津冀地区干旱的时空特征进行了详细分析^[23-25],但针对干旱时空聚集方面的研究尚且匮乏。借助时空聚集分析,可以深入挖掘干旱在时间和空间上的聚集特征,有助于揭示干旱灾害的时空格局、演变特征和机理规律。基于此,本研究选取 SPEI 表征干旱程度,量化京津冀地区 1961—2015 年干旱的发生状况,在此基础上,利用 SaTScan 时空扫描软件,对京津冀地区不同程度干旱的时空聚集特征进行分析,以期对干旱灾害趋势诊断与风险管理提供有益参考和借鉴。

1 研究区概况与数据来源

京津冀地区地处华北平原北部,地势西北高、东南低,地貌类型复杂多样,气候类型为温带半湿润半干旱大陆性气候,地区降水波动较大,70% 以上降水集中于夏季,冬季寒冷干燥,降水量少,降水量自东南向西北递减。受地形、地理位置及全球气候变暖等因素影响,地区干旱频发,素有“十年九旱”之称。本研究使用的气象数据为北京、天津和河北境内气象站点的逐月降水和气温数据,时间段为 1961 年 1 月—2015 年 12 月,数据来源于开放的中国气象数据网站 (<http://data.cma.gov.cn>),为了保障整体数据的有效性,剔除了缺测超过 1 个月的站点数据,最终 21 个气象站点通过质量控制 (图 1)。京津冀地区各县地理面积数据来源于中国经济与社会发展统计数据库 (<http://tongji.cnki.net>)。

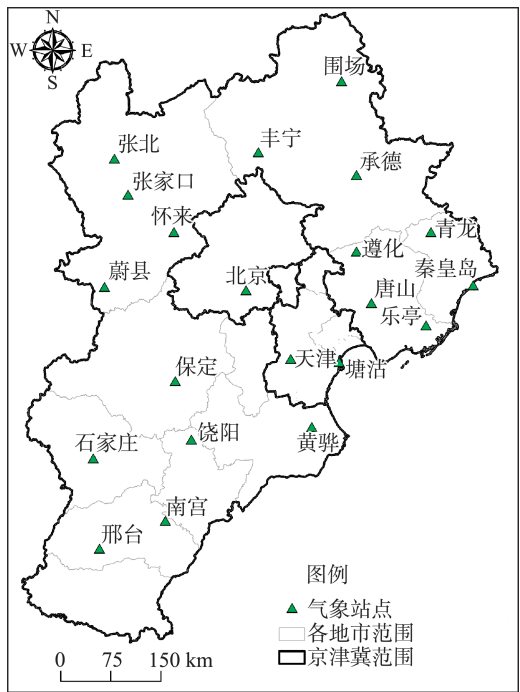


图 1 研究区气象站点

Fig. 1 Meteorological stations in study area

2 研究方法

2.1 SPEI 计算方法

SPEI 可以灵活改变时间尺度,计算不同累计周期下的指数值,较为理想地表征干旱特征,具体计算步骤如下。

步骤 1 计算潜在蒸散量:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量, mm/d ; R_n 为到达地面的净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; G 为土壤热通量密度, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; γ 为湿度表常数, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; u_2 为距离地面 2 m 处的风速, m/s ; Δ 为特定温度下饱和水汽压与温度曲线的斜率, $\text{kPa}/^\circ\text{C}$; e_s 为饱和水汽压; e_a 为实际水汽压。

步骤 2 计算水平衡:

$$D_i = P_i - ET_i \quad (2)$$

式中: D_i 为逐月降水量与潜在蒸散量的差值; P_i 为第 i 月降水量; ET_i 为第 i 月潜在蒸散量。

步骤 3 依据水分平衡构建水分盈亏累计序列, 可依据具体问题选取不同时间尺度。为反映长时间尺度降水变化格局, 本文选取 12 月为时间尺度:

$$D_{nk} = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - ET_{n-i}) \quad (n \geq k) \quad (3)$$

式中: D_{nk} 为不同时间尺度的累计水分盈亏量; n 为计算次数; k 为时间尺度(月), $k = 12$ 。

步骤 4 采用三参数概率密度函数对所建立的水分盈亏序列进行拟合:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (4)$$

式中: x 为累计水分盈亏序列; $f(x)$ 为 x 的概率密度函数; α 、 β 、 γ 为计算参数, 可通过参数估计方法获得。特定时间尺度的累计概率 $F(x)$ 为

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (5)$$

步骤 5 对序列进行标准正态分布转换, 从而得到 SPEI 值:

$$I_{\text{SPEI}} = \omega - \frac{c_0 + c_1 \omega + c_2 \omega^2}{1 + d_1 \omega + d_2 \omega^2 + d_3 \omega^3} \quad (6)$$

其中

$$\omega = \sqrt{-2 \ln P_0}$$

$$P_0 = \begin{cases} 1 - F(x) & P_0 \leq 0.5 \\ 1 - P_0 & P_0 > 0.5 \end{cases}$$

式中: I_{SPEI} 为 SPEI 值; c_0 、 c_1 、 c_2 、 d_1 、 d_2 、 d_3 均为常数项, $c_0 = 2.515517$ 、 $c_1 = 0.802853$ 、 $c_2 = 0.010328$ 、 $d_1 = 1.432788$ 、 $d_2 = 0.189269$ 、 $d_3 = 0.001308$ 。依据 SPEI 值划分干旱等级^[7]: $I_{\text{SPEI}} > -0.5$ 为无旱, $-1 < I_{\text{SPEI}} \leq -0.5$ 为轻旱, $-1.5 < I_{\text{SPEI}} \leq -1$ 为中旱, $-2 < I_{\text{SPEI}} \leq -1.5$ 为重旱, $I_{\text{SPEI}} \leq -2$ 为特旱。

2.2 SaTScan 时空扫描

Kulldorff 首次提出时空扫描统计分析方法, 该方法可以同时时间和空间上探测灾害事件发生的聚集性。具体而言, 在研究区内设置圆柱形的扫描窗口, 圆柱的底对应着地理区域, 高对应着时间, 圆柱可以在不同地理区域之间移动, 其位置和

大小均处于动态变化之中^[26-27]。研究时段内, 时空扫描在整个区域范围内重复进行, 直至发现窗口内的异常值, 进而发现灾害事件在时间和空间上的聚集特征。目前, 时空扫描已广泛应用于医学^[28]、犯罪学^[29]、经济学^[30]等方面。自然灾害研究方面, 已有学者进行了初步探索^[31-32], 但相关研究仍需进一步拓展和完善。构建时空扫描统计量, 首先令:

$$\mu_Z = \frac{n_Z T_Z}{T} \quad (7)$$

$$\mu_G = \sum \mu_Z \quad (8)$$

式中: μ_Z 为基于无效假设得到的扫描窗口 Z 中的预期干旱次数; T_Z 为扫描窗口的地理面积, m^2 ; n_Z 为整个研究区的干旱发生次数; T 为整个研究区的面积, m^2 ; μ_G 为整个研究区的预期干旱次数, 是全部扫描窗口 Z 中预期干旱次数的总和。

研究区内区域 x 的概率密度函数 $f(x)$ 表示如下:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{p\mu_x}{p\mu_Z + q(\mu_G - \mu_Z)} & x \in Z \\ \frac{q\mu_x}{p\mu_Z + q(\mu_G - \mu_Z)} & x \notin Z \end{cases} \quad (9)$$

式中: μ_x 为基于无效假设得到的扫描窗口 x 中的预期干旱次数; p 为扫描窗口 Z 中干旱的实际发生次数与预期发生次数的比值; q 为扫描窗口 Z 外实际次数与预期次数的比值。进一步建立扫描窗口的对数似然函数值:

$$L(Z) = \frac{e^{-n_Z}}{n_Z!} \left(\frac{n_Z}{\mu_Z} \right)^{n_Z} \left(\frac{n_G - n_Z}{n_G - \mu_Z} \right)^{n_G - n_Z} \prod_{x \in Z} \mu_x \quad (10)$$

$$L_0 = \frac{e^{-n_G}}{n_G!} \left(\frac{n_G}{\mu_G} \right)^{n_G} \prod_{x \in Z} \mu_x \quad (11)$$

式中: $L(Z)$ 为时空扫描窗口中 Z 的似然函数; L_0 为基于无效假设得到的似然函数值; n_Z 为扫描圆形窗口 Z 中实际发生的干旱次数。将式(10)和(11)相除并取对数, 可得到对数似然率 L_{LR} , 其最大似然率可以表示为

$$\max L_{\text{LR}} = \frac{\max L(Z)}{L_0} = \max \left[\frac{\left(\frac{n_Z}{\mu_Z} \right)^{n_Z} \left(\frac{n_G - n_Z}{n_G - \mu_Z} \right)^{n_G - n_Z}}{\left(\frac{n_G}{\mu_G} \right)^{n_G}} \right] \quad (12)$$

L_{LR} 值最大的窗口 Z 即为干旱最可能发生聚集的区域。将 L_{LR} 值由大到小排序, 可以依次找到干旱最易发生聚集的几个区域, 按照可能性的大小, 依次为第一、第二、……聚集区。值得注意的是, 在时

空扫描过程中,对每一个窗口进行 Poisson 分布的假设检验会出现多重假设检验问题,从而导致虚假检验。为此,Kulldorf^[33] 选用蒙特卡罗模拟法定量评价了各个窗口的统计学意义,进而产生模拟数据集,计算显著性水平 P 值,判断其统计学意义。本研究限定最大扫描半径不超过整个研究区面积的 50%,蒙特卡罗模拟次数设置为 999,显著性水平为 $P < 0.01$ 。

SaTScan 是事件时空聚集性分析的强大软件,目前广泛应用于传染病疫情聚集性分析,该软件通过探测研究对象在空间、时间或时空范围内的发生情况,利用显著性水平判断事件在研究区内是否具备聚集性,以及聚集发生的具体位置及风险程度。SaTScan 软件可从网址(<http://www.satscan.org>) 免费获取,本文选用的 SaTScan v10.0 为最新版本。

3 结果与分析

3.1 京津冀地区干旱总体评价

12 月尺度的 SPEI 值可以反映干旱的年际变化情况,与河流水位、水库水位及地下水水位的相关度较高,是表征干旱较为理想的指标。因此,本文计算了京津冀地区 21 个气象站点研究时段内的逐月 SPEI-12 值,图 2 为北京、天津和石家庄 3 个站点的 SPEI 值多年变化趋势。可以看出,3 地 SPEI 值均呈下降趋势,线性倾向率均为负,说明干旱趋势有所加重。各站点中,仅有河北围场站点的 SPEI 值呈上升趋势,其余 20 个站点的 SPEI 值均呈下降趋势;MK 检验结果表明,90% 以上的站点通过了置信度为 0.01 的显著性检验,说明 SPEI 值的下降趋势十分显著。在此基础上,统计各站点干旱发生次数并计算其线性倾向率,其中,仅有围场和承德的线性倾向率为负,其余 19 个站点的数值均为正;对于不同等级干旱而言,轻旱、中旱、重旱和特旱发生次数分别占干旱发生总数的 47.30%、32.39%、17.02% 和 3.29%,且 4 类干旱发生次数的线性倾向率均为正;MK 检验结果表明,71% 的站点通过了置信度为 0.01 的显著性检验,表明干旱发生次数的上升趋势同样显著。以上分析充分说明在整个京津冀范围内,干旱形势不断加剧。

3.2 干旱时空聚集特征分析

SaTScan 时空扫描软件可在 SPEI 表征干旱趋势的基础上,进一步深入探索干旱的时空聚集特征。本研究选用该软件分别对 1961 年 1 月—1971 年 12 月、1972 年 1 月—1982 年 12 月、1983 年 1 月—1993 年 12 月、1994 年 1 月—2004 年 12 月、2005 年 1 月—2015 年 12 月 5 个时间段内轻旱、中旱、重旱、

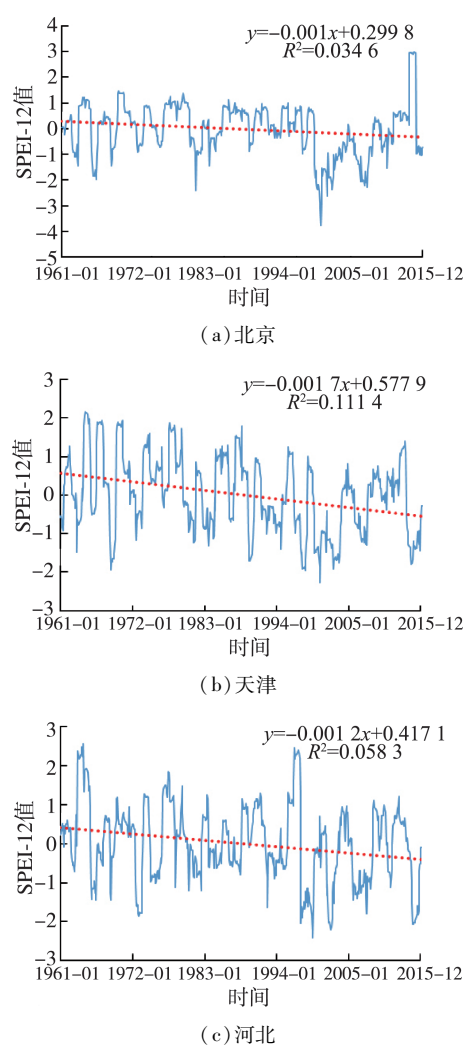


图 2 各站点 1961—2015 年 SPEI-12 值序列
Fig. 2 SPEI-12 value series of different stations in Beijing-Tianjin-Hebei region from 1961 to 2015

特旱、总旱的次数进行时空扫描分析,扫描生成的 Shapefile 文件可在 ArcGIS 中可视化。

图 3 为轻旱的时空聚集特征,可以看出,相比于其他等级干旱,轻旱的时空聚集特征与总干旱最为相似。1961—2015 年,京津冀地区轻旱发生次数占总干旱的 47.30%,比例位居各类干旱的首位,主要在石家庄、秦皇岛和张家口等地聚集。其中,第一聚集区的中心点在石家庄和秦皇岛两地之间交替出现,说明以两地为中心的地区容易受到轻旱灾害的影响。第一聚集区的聚集时间为 4~5 a,干旱聚集程度在 1994—2004 年有所增强,在 2005—2015 年有所缓解。

图 4 为中旱的聚集特征。统计发现,中旱发生次数占总干旱次数的 32.39%,其比例仅次于轻旱。相比于轻旱,中旱在不同时间段的空间波动性更强。第一聚集区的中心点在石家庄、唐山、保定和衡水几地之间交替出现,空间波动性强。1961—1993 年,中旱聚集面积呈缩减趋势,至 1994—2015 年,聚集

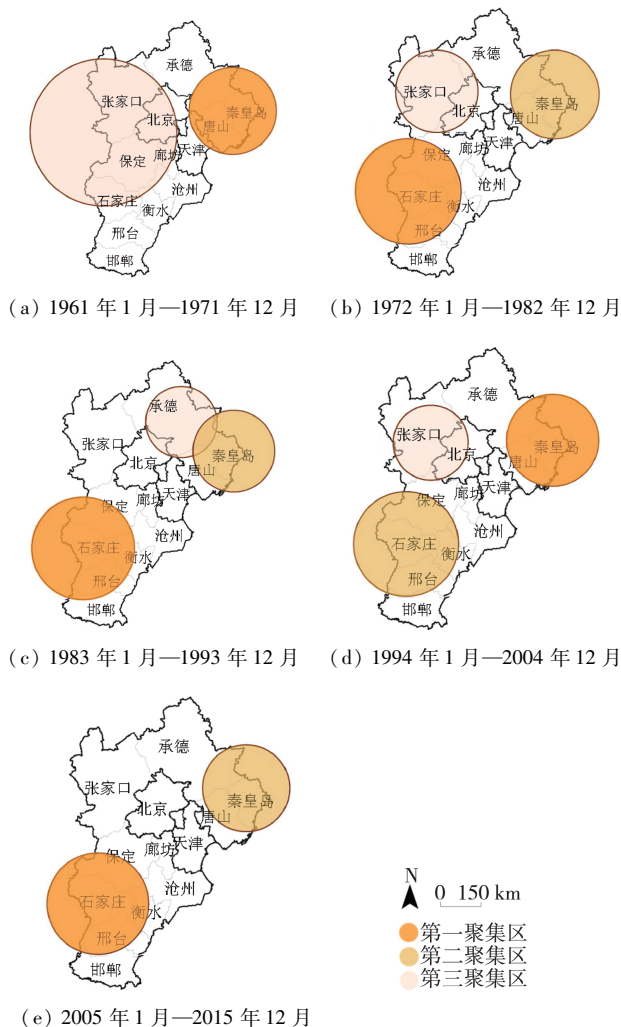


图3 轻旱的时空聚集特征

Fig. 3 Spatial-temporal gathering characteristics of light drought

面积转而增大,发生次数显著增加,第一聚集区和第二聚集区在空间上交替出现,聚集范围的时间波动性较强,聚集程度在1994—2015年呈现增强趋势。

图5为重旱的时空聚集特征。对比发现,重旱的空间聚集范围显著大于轻旱和中旱,在研究时间段内的发生次数占总干旱次数的17.02%。第一聚集区的聚集中心始终保持在张家口、保定、石家庄、衡水和邢台一带,位于京津冀的西南部,聚集面积在1961—1993年有所缩减,而后显著增加。1994—2004年,重旱的聚集半径达289.14 km,涉及北京、保定、廊坊、沧州、石家庄、衡水、邢台和邯郸7个城市,几近研究区面积的50%,重旱次数高达116次,显著高于其他时段,干旱聚集时间自1997年8月一直持续到2002年8月,历时较长。相关研究发现,1997—2003年海河流域发生了自20世纪初以来最为严重的重旱^[34],而在京津冀地区,1996年为降水突变年,其后研究区内各地区的干旱发生频率均有所增加,且在北京、天津、石家庄、秦皇岛、唐山和衡

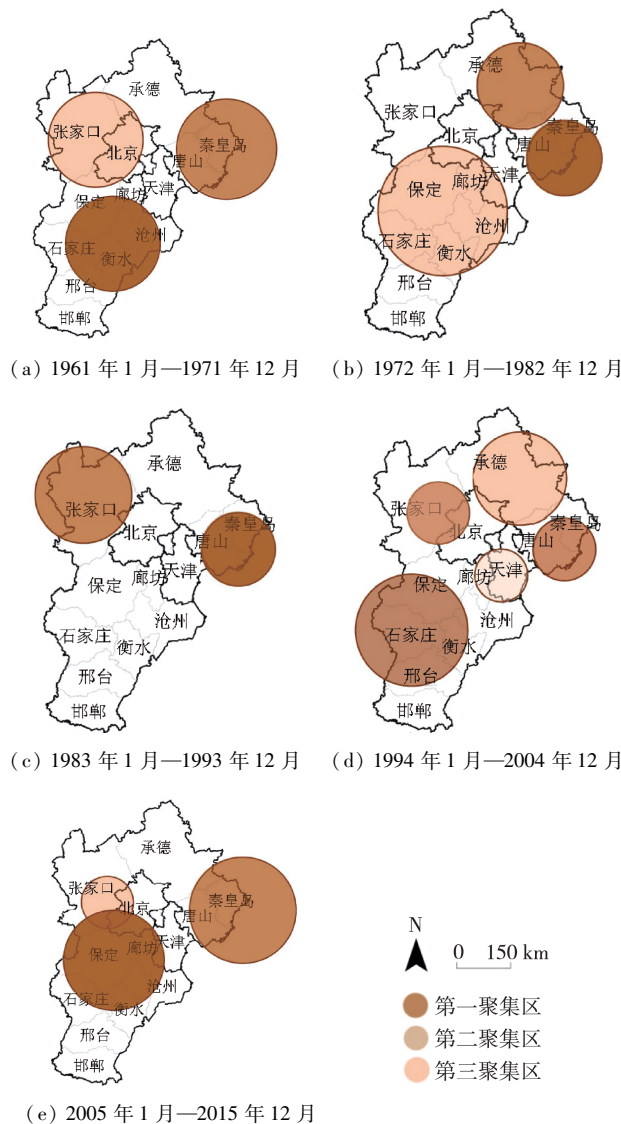


图4 中旱的时空聚集特征

Fig. 4 Spatial-temporal gathering characteristics of moderate drought

水更为显著^[35],年平均气温在20世纪90年代初开始显著上升^[36]。以上发现与本文研究结果比较吻合,从侧面验证了时空扫描的有效性,降水的减少和气温的增加是京津冀地区20世纪90年代后重旱增加迅速的本质原因,进而形成了重旱的大范围时空聚集。

图6为特旱的时空聚集特征。特旱仅在1961—1971和1994—2015年发生聚集,且自1994年开始加剧,而在1972—1993年未形成聚集。特旱的第一聚集区主要位于京津冀地区南部,涉及保定、廊坊、沧州、石家庄、衡水、邢台、邯郸和北京。在1961—1971年和2005—2015年,特旱分别发生11次和6次,聚集范围相对较小;而在1994—2004年,发生次数高达65次,聚集范围大,半径达264.5 km, L_{LR} 值为108.53。第二聚集区仅在1994—2004年形成历时短,强度弱,范围小的聚集。相关研究表明,

海河流域的重旱和特旱发生频率在 20 世纪 90 年代后显著增长^[37],发生范围有所扩大,佐证了本研究的结论。

图 7 为总干旱的时空聚集特征,总干旱在 5 个时间段的空间聚集特征具有较强相似性。其中,第一聚集区位于整个京津冀地区的南部,中心点在石家庄境内,聚集范围包括石家庄、邢台大部、衡水西部和保定南部,其聚集半径为 131.9 km,聚集时间为 3~6 a,实际干旱发生次数为 102~252 次,可见干旱的聚集程度非常强。第二聚集区,即干旱发生可能性的次高区位于京津冀地区的东部,中心点位于秦皇岛境内,聚集范围包括秦皇岛、承德的东南部和唐山的东北部,1961—1993 年,虽聚集面积保持稳定,但实际干旱发生次数有所减少,1994—2004 年,干旱发生的次数增加至 282 次, L_{LR} 值高达 159,显著高于其他时间段,与方宏阳等^[35]的研究结论“20 世纪

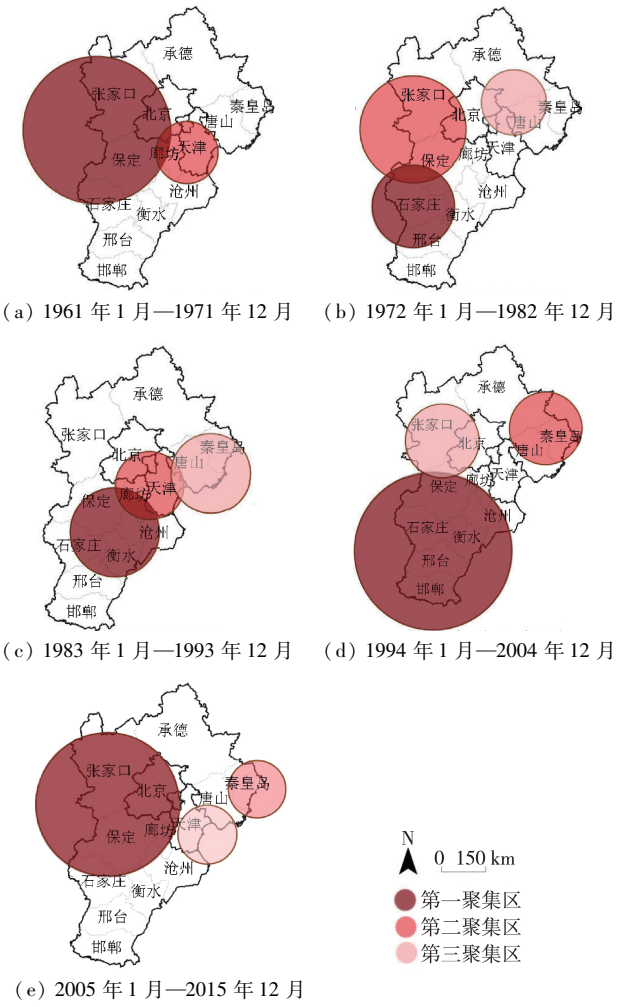


图 5 重旱的时空聚集特征
Fig. 5 Spatial-temporal gathering characteristics of severe drought

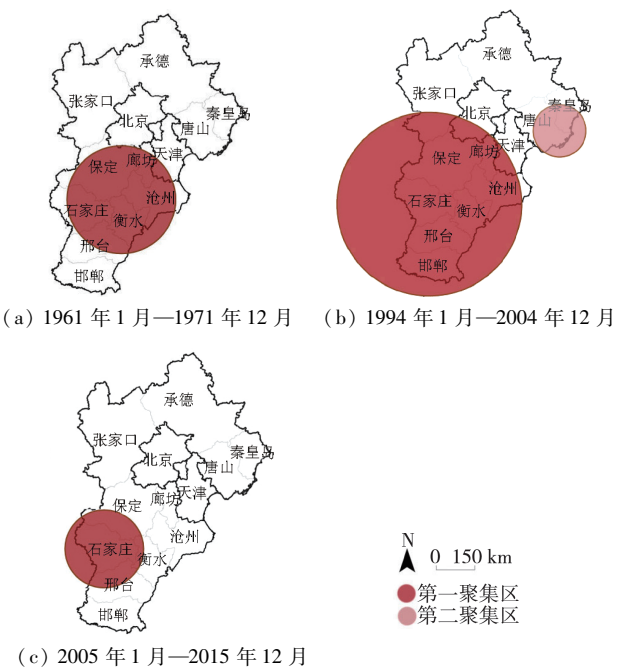


图 6 特旱的时空聚集特征
Fig. 6 Spatial-temporal gathering characteristics of extreme drought

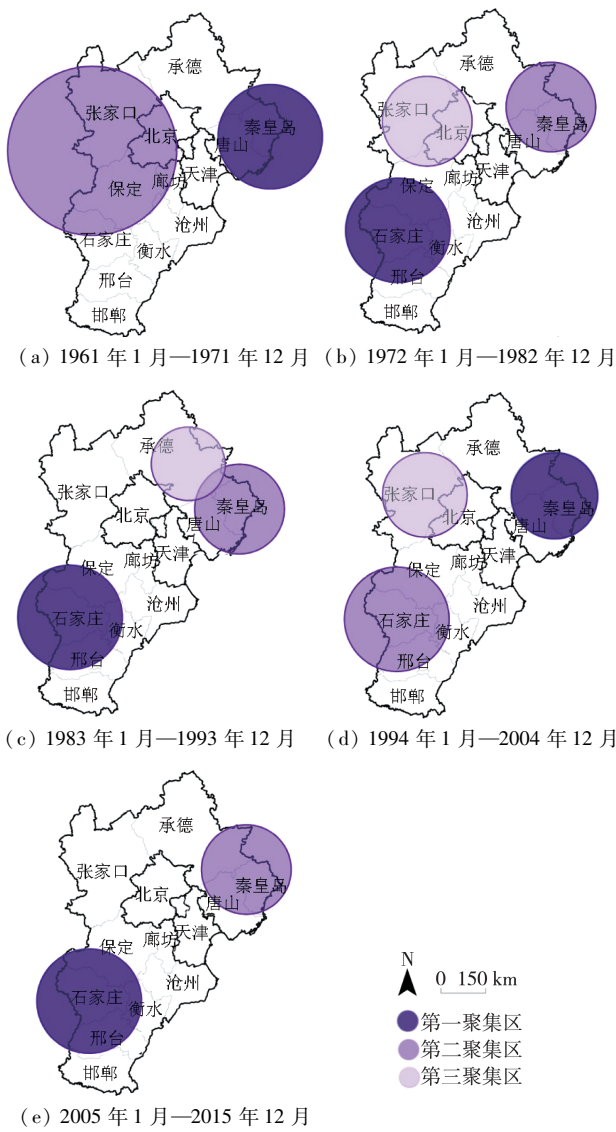


图 7 总干旱的时空聚集特征
Fig. 7 Spatial-temporal gathering characteristics of total drought

末为京津冀地区旱涝灾害发生的突变年,整体上呈现洪涝缓解、干旱加剧的趋势”一致,同样验证了时空扫描的有效性。

由图3~7可以看出,不同程度干旱的时空聚集特征存在一定差异,同一等级干旱在不同时间段内的聚集状态也在不断发生变化。整体上看,总干旱、轻旱和中旱的时空聚集特征比较相似,重旱和特旱比较相似,前三者又与后两者存在显著差异。原因在于中度及以下程度干旱发生次数占总干旱次数的比例较大,达80%以上;而重旱和特旱的发生次数较少,只有当气温或降水等因素发生明显突变,或以上因素在研究区内各地区的差异达到显著时,才会形成重旱和特旱的时空聚集,一旦聚集形成,势必会对生产生活造成严重影响^[38-40],这也解释了不同等级干旱在张家口、秦皇岛等地重复发生聚集的原因。整体上看,干旱的时空聚集频繁发生于京津冀地区的南部和东北部,包括保定、石家庄、衡水、邢台、秦皇岛和唐山,重度干旱的聚集更易发生于京津冀南部,包括石家庄、保定、邢台、衡水、沧州和廊坊等地。干旱程度越重,越不易发生时空聚集,且随着干旱程度的加剧,聚集面积的差异增大,聚集发生的空间波动性增强,不可预测性和不稳定性增强,聚集发生造成的不利后果越严重。

4 结 论

a. SPEI值和干旱次数的线性倾向率和MK检验结果表明,1961—2015年,京津冀地区干旱发生频率持续增加,干旱化趋势不断加剧。

b. 不同程度干旱的空间聚集特征存在差异,总干旱、轻旱、中旱3类的时空聚集特征较为相似,主要集中在石家庄、保定、衡水和邢台。重旱和特旱的时空聚集特征比较相似,主要集中在保定、廊坊、沧州、石家庄和衡水等南部地区。以1994年为节点,其后干旱聚集的空间波动性加强,聚集范围和聚集程度均有所增强。

c. 随着干旱程度的加重,聚集发生的难度增加,聚集范围的差异性增大,聚集的空间波动性和不可预测性增强,且将造成更为严重的损失。

参考文献:

[1] 王晓丹, 张勃, 马彬, 等. 基于日值 SPEI 东北地区近 58a 干旱时空演变特征[J]. 高原气象, 2022, 41 (3): 721-732. (WANG Xiaodan, ZHANG Bo, MA Bin, et al. Spatial and temporal evolution of drought in northeast China in recent 58 years based on daily SPEI[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41 (3): 721-732. (in Chinese))

[2] 矫海燕. 农业应对气候变化蓝皮书: 气候变化对中国农业影响评估报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2014.

[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. (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))

[4] 马丽琿, 周婷婷, 徐刚. 重庆市干旱强度时空分布规律研究[J]. 地球与环境, 2019, 47 (3): 310-320. (MA Lihui, ZHOU Tingting, XU Gang. Research on temporal-spatial distribution of drought intensity in Chongqing, China[J]. Earth and Environment, 2019, 47 (3): 310-320. (in Chinese))

[5] 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))

[6] MALIK A, KUMAR A, KISI O, et al. Analysis of dry and wet climate characteristics at Uttarakhand (India) using effective drought index [J]. Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, 2021, 105: 1643-1662.

[7] 谢五三, 张强, 李威, 等. 干旱指数在中国东北、西南和长江中下游地区适用性分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1136-1146. (XIE Wusan, ZHANG Qiang, LI Wei, et al. Analysis of the applicability of drought indexes in the northeast, southwest and middle-lower reaches of Yangtze River of China [J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1136-1146. (in Chinese))

[8] 殷雨婷, 荣艳淑, 吕星玥, 等. 一种大范围干旱的识别方法及其应用[J]. 气象科学, 2021, 41 (4): 495-506. (YIN Yuting, RONG Yanshu, LYU Xingyue, et al. An identification method for a large-scale drought and its application[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2021, 41 (4): 495-506. (in Chinese))

[9] HOQUE A A, PRADHAN B, AHMED N. Assessing drought vulnerability using geospatial techniques in northwestern part of Bangladesh[J]. Science of the Total Environment, 2020, 705(25): 135957.

[10] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778. (ZHANG Qiang, ZHANG Liang, CUI Xiancheng, et al. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring [J]. Advances in Earth

- Science, 2011, 26(7): 763-778. (in Chinese))
- [11] 李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723. (LI Yiping, LI Yaohui. Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709-723. (in Chinese))
- [12] 颜玉倩, 何赵祥睿, 朱克云. 河南省冬小麦干旱指数特征分析及风险评估[J]. 农学学报, 2021, 11(3): 12-19. (YAN Yuqian, HE Zhaoxiangrui, ZHU Keyun. Winter wheat in Henan: drought index characteristics and risk assessment[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(3): 12-19. (in Chinese))
- [13] 毛春艳, 戴丽, 杨广斌, 等. 1960—2016 年喀斯特山区干旱时空动态分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 64-72. (MAO Chunyan, DAI Li, YANG Guangbin, et al. Analysis of the spatio-temporal dynamic of drought in karst mountainous from 1960 to 2016[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(3): 64-72. (in Chinese))
- [14] 李晓英, 吴淑君, 王颖, 等. 淮河流域陆地水储量与干旱指标分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 80-85. (LI Xiaoying, WU Shujun, WANG Ying, et al. Analysis of terrestrial water storage and drought indices in the Huaihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 80-85. (in Chinese))
- [15] 王佳瑞, 孙从建, 郑振婧, 等. 近 57 年来黄土高原干旱特征及其与大气环流的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(13): 5340-5351. (WANG Jiarui, SUN Congjian, ZHENG Zhenjing, et al. Drought characteristics of the loess plateau in the past 60 years and its relationship with changes in atmospheric circulation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5340-5351. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 王婉昭, 李晶, 胡春丽, 等. 辽宁春播期精细化气象干旱评价[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(5): 71-78. (WANG Wanzhao, LI Jing, HU Chunli, et al. Assessment of detailed meteorological drought during spring sowing in Liaoning Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(5): 71-78. (in Chinese))
- [18] HOFFMANN D, GALLANT A, ARBLASTER J M. Uncertainties in drought from index and data selection[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2020, 125(18): e2019JD031946.
- [19] OGUNRINDE T A, ENABOIFO M A, OLOTU Y, et al. Characterization of drought using four drought indices under climate change in the Sahel region of Nigeria: 1981-2015[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 143:843-860.
- [20] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [21] 曹永强, 李玲慧, 路洁, 等. 基于 SPEI 的辽宁省玉米生育期干旱特征分析[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 1-13. (CAO Yongqiang, LI Linghui, LU Jie, et al. Analysis of drought characteristics of maize growth period in Liaoning Province based on SPEI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 1-13. (in Chinese))
- [22] 王立丽, 张安兵. 基于温度供水干旱指数的京津冀春旱监测及时空分布分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(4): 72-75. (WANG Lili, ZHANG Anbing. Spring drought monitoring in Beijing-Tianjin-Hebei based on temperature water supply drought index[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(4): 72-75. (in Chinese))
- [23] 章杰, 孙福宝, 刘文彬, 等. 京津冀干旱时空演变规律分析[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6): 863-876. (ZHANG Jie, SUN Fubao, LIU Wenbin, et al. Spatio-temporal patterns of drought evolution over the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(6): 863-876. (in Chinese))
- [24] 苗正伟, 李娜, 路梅, 等. 1961—2017 年京津冀地区极端降水事件变化特征[J]. 水利水电技术, 2019, 50(3): 34-44. (MIAO Zhengwei, LI Na, LU Mei, et al. Variation characteristics of extreme precipitation event in Beijing-Tianjin-Hebei region during 1961-2017[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(3): 34-44. (in Chinese))
- [25] 张丽艳, 杨东, 马露. 京津冀地区气象干旱特征及其成因分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(12): 28-38. (ZHANG Liyan, YANG Dong, MA Lu. Characteristics of meteorological drought in Jing-Jin-Ji area and cause analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(12): 28-38. (in Chinese))
- [26] VOGEL J A, BUMHAM R I, MCVANEY K, et al. The importance of neighborhood in 9-1-1 ambulance contacts: a geospatial analysis of medical and trauma emergencies in Denver[J]. Prehospital Emergency Care, 2022, 26(2): 233-245.
- [27] TOMITA A, CUADROS D F, MABHAUDHI T, et al. Spatial clustering of food insecurity and its association with depression: a geospatial analysis of nationally

- representative South African data, 2008-2015 [J]. Scientific Reports, 2020, 10:13771.
- [28] 郭靖娴, 刘婷, 齐小娟, 等. 时空扫描法在浙江省食源性疾病时空聚集性分析中的应用[J]. 中国预防医学杂志, 2020, 21(11): 1171-1177. (GUO Jingxian, LIU Ting, QI Xiaojuan, et al. Application of spatio-temporal scanning in the analysis of spatio-temporal clusters of foodborne diseases in Zhejiang Province[J]. Chinese Preventive Medicine, 2020, 21(11): 1171-1177. (in Chinese))
- [29] 刘熠孟, 李卫红, 王昕. 微观尺度下毒品犯罪时空分布及成因分析: 以SZ市NH、DM街道为例[J]. 地理科学进展, 2020, 39(5): 841-852. (LIU Yimeng, LI Weihong, WANG Xin. Spatiotemporal distribution of drug crimes at micro-scale: taking NH and DM residential communities in SZ City as an example[J]. Progress in Geography, 2020, 39(5): 841-852. (in Chinese))
- [30] BERSIMIS S, CHALKIAS C, ANTHOPOULOU T. Detecting and interpreting clusters of economic activity in rural areas using scan statistic and LISA under a unified framework[J]. Applied Stochastic Models in Business & Industry, 2015, 30(5): 573-587.
- [31] 李双双, 杨赛霓, 刘焱序, 等. 1960—2013年京津冀地区干旱-暴雨-热浪灾害时空聚类特征[J]. 地理科学, 2016, 36(1): 149-156. (LI Shuangshuang, YANG Saini, LIU Yanxu, et al. Spatio-temporal clustering characteristics of drought, heavy rain and hot waves in the Beijing-Tianjin-Hebei region during 1960-2013 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(1): 149-156. (in Chinese))
- [32] 张婷, 程昌秀, 杨山力, 等. 时空聚集性探测方法在极端高温事件聚集分析中的应用研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(3): 51-57. (ZHANG Ting, CHENG Changxiu, YANG Shanli, et al. Application of spatio-temporal aggregation detection method in extreme high temperature aggregation analysis[J]. Geography and Geo-Information Science, 2019, 35(3): 51-57. (in Chinese))
- [33] KULLDORF M. Spatial scan statistic [J]. Communications in Statistics: Theory and Methods, 1997, 26: 1481-1496.
- [34] 任国玉, 王涛, 郭军, 等. 海河流域近现代降水量变化若干特征[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 103-111. (REN Guoyu, WANG Tao, GUO Jun, et al. Characteristics of precipitation variations in Haihe River Basin in modern times [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 103-111. (in Chinese))
- [35] 方宏阳, 杨志勇, 栾清华, 等. 基于SPI的京津冀地区旱涝时空变化特征分析[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 13-16. (FANG Hongyang, YANG Zhiyong, LUAN Qinghua, et al. SPI based analysis on characteristics of drought-flood spatial-temporal variation of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(10): 13-16. (in Chinese))
- [36] 周鑫. 中国气温的年际—年代际变化特征及其模拟检验研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
- [37] HE J, YANG X H, LI J Q, et al. Spatiotemporal variation of meteorological droughts based on the daily comprehensive drought index in the Haihe River Basin, China[J]. Natural Hazards, 2015, 75(2): 199-217.
- [38] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 80-86. (in Chinese))
- [39] 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))
- [40] 肖祖香, 朱双, 罗显刚, 等. 三江源区多尺度水文干旱特征及植被的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 515-520. (XIAO Zuxiang, ZHU Shuang, LUO Xiangang, et al. Multi-scale hydrological drought characteristics and vegetation responses in the Three-River-Source Region [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 515-520. (in Chinese))

(收稿日期:2021-06-26 编辑:王芳)

