

1961—2018 年南水北调中线水网区水文干旱 时空演变与区域分异研究

杨子谦,王宗志,万文华,程 亮,王文琪

(南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室)

摘要:基于三维聚类算法识别了 1961—2018 年南水北调中线水网区的历史水文干旱事件,定量分析了历史干旱集群与特大干旱事件的时空演化过程,揭示了水源区与受水区的水资源亏缺时空遭遇规律,探讨了干旱空间分异的潜在成因以及水网密度对干旱历时的影响。结果表明:1961—2018 年水网区发生多场长历时、大范围的特大干旱和重旱事件,与实际旱情基本吻合;水源区与受水区的干旱呈现显著的时空分异特征,与降水和下垫面条件的差异有关;受水区干旱频次、强度显著高于水源区,但在 20 世纪 90 年代水源区干旱频次有所上升,在 21 世纪后与受水区呈现时空异步现象;水网密度对干旱历时存在一定调节作用,但存在边际效应。

关键词:水文干旱;水网密度;三维聚类算法;水源区;受水区;南水北调中线工程

Study on spatiotemporal evolution and regional differentiation of hydrological drought in water network area of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project from 1961 to 2018//Yang Ziqian, Wang Zongzhi, Wan Wenhua, Cheng Liang, Wang Wenqi (*National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute*)

Abstract: Based on the three-dimensional clustering algorithm, historical hydrological drought events in the water network area of the South to North Water Diversion Middle Route Project from 1961 to 2018 were identified. The spatiotemporal evolution process of historical drought clusters and severe drought events was quantitatively analyzed, revealing the spatiotemporal encounter patterns of water deficit in the water source and water receiving areas. The potential causes of spatial differentiation of drought and the influence of water network density on drought duration were explored. The results indicate that from 1961 to 2018, multiple prolonged and large-scale extreme and severe drought events occurred in the water network area, which are basically consistent with the actual drought situation. The drought in the water source and water receiving areas shows significant spatiotemporal differentiation characteristics, which are related to differences in precipitation and underlying surface conditions. The frequency and intensity of drought in the water receiving area are significantly higher than those in the water source area. But in the 1990s, the frequency of drought in the water source area increased, and after the 21st Century, it showed a spatiotemporal asynchronous phenomenon with the water receiving area. The density of water networks has a certain regulatory effect on drought duration, but there is a marginal effect.

Key words: hydrological drought; water network density; three-dimensional clustering algorithm; water source area; water receiving area; the South-to-North Water Diversion Middle Route Project

我国北方地区以 19% 的水资源量承载了全国 64% 的国土面积、40% 的人口和近 50% 的经济总量^[1],水资源短缺已成为制约其高质量发展和民生保障的突出短板^[2-3]。南水北调中线工程作为国家骨干水网之“纲”^[4],构建了以总干渠为核心、以配套渠系为骨干的复杂水网系统,形成了跨越长江、淮河、黄河、海河四大流域的南水北调中线水网区,重

塑了区域水资源供需格局,提升了区域水资源系统韧性。截至 2025 年 2 月,南水北调中线工程已向北方累计调水逾 700 亿 m³,惠及 1.14 亿人,为沿线 26 座大中城市 200 多个县(市、区)经济社会高质量发展提供了有力的水资源保障^[5-6]，“南水”已成为京津冀豫沿线大中城市主力水源。

南水北调中线水网区历史上发生区域性干旱的

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3006601);国家自然科学基金项目(U2240223,52409040)

作者简介:杨子谦(1996—),男,博士研究生,主要从事干旱及水文遥感研究。E-mail:njnuyzq1996@163.com

通信作者:王宗志(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源复杂系统运行调度与管理研究。E-mail:wangzz77@163.com

频率极高。例如,河南在元代以后的 654 年里,有 60% 的年份发生了旱情,包括 11 场波及全省、持续时间达 4~5 a 的特大干旱^[7];河北自 1368 年后,有近 71% 的年份发生了干旱,包括明清时期 4 场特大干旱事件^[8]。近期研究表明,中线受水区和水源区的降水量均呈现下降趋势,同时受水区年均气温显著上升,未来干旱风险将显著增大^[9-10]。以往研究多聚焦于由降水短缺引起的气象干旱^[11-15],对以径流短缺为表现形式的水文干旱缺乏关注。单纯依赖气象干旱指标既未考虑蒸散发所带来的水分损耗,又缺乏对水文过程时空异质性特征(如地表径流调蓄能力、地下水补给等)的系统表征,尤其是在中线水网区这一具有复杂气候背景、水系结构及下垫面特征的区域,降水量的多寡难以作为判断区域实际水资源亏缺状况的直接依据。

干旱事件识别和表征是研究干旱时空演变的前提。一场干旱事件的影响不仅体现在不同地域的干旱强度上,还涉及干旱在时间轴上的持续性和演变过程,以一维视角呈现固定区域内干旱的时间演变^[16]或是从二维视角分析一定持续时间内干旱的空间变化^[17-18],都将会导致大量时空信息的损失,难以实现干旱事件的完整表示。近年来,国内外学者为实现对干旱事件发展过程的全面捕捉和干旱特征动态变化的精确刻画,逐渐将研究维度转向三维层面,并取得了一定的进展。Andreadis 等^[19]提出了一种聚类算法,并通过建立严重性-干旱面积-持续时间(severity-area-duration, SAD)曲线,评估了一定持续时间内干旱的空间变异性。Lloyd-Hughes^[20]进一步提出了一种具备明确三维结构(经度-纬度-时间)的干旱识别方法,实现了干旱事件的完整时空表示。Xu 等^[21]采用此三维聚类方法识别了 1961—2012 年中国气象干旱事件,发现大旱灾通常集中在华北平原至长江下游地区。徐翔宇等^[22-23]也将这种时空连续的干旱事件三维识别方法分别应用于识别中国西南地区 and 整个中国地区的气象干旱。可见,基于三维聚类算法的干旱识别方法在捕捉干旱演变过程和揭示干旱时空规律方面具有显著优势,不仅能刻画干旱事件全过程,还为深入理解干旱现象及其影响提供了新的分析维度。近年来,该方法在水文干旱识别中逐步得到应用^[24-25],但以往研究多聚焦于流域层面,针对南水北调中线水网区这种跨流域的国家水网核心区域的长时期水文干旱研究还相对较少。

鉴于此,本文基于三维聚类算法构建水文干旱识别与特征解析框架,将其应用于南水北调中线水网区,系统剖析 1961—2018 年水文干旱时空动态演

变特征,识别干旱的时空变化路径和历史演变规律,以期为国家水网,特别是南水北调中线工程的干旱应对提供参考。

1 研究区概况

南水北调中线水网是以中线输水干渠为“主干”,沿线连通的输水管道为“枝杈”所形成的水网脉系,汉江上游流域(丹江口以上)为水源区,京津冀沿线的北京、天津、石家庄和郑州等 20 个大中城市为受水区(图 1)。中线输水干渠总长 1432 km,沿线设立 77 处分水口,通过输水管道向沿线 20 个地市供水,多年平均设计年调水规模为 95 亿 m³。中线水网区自西南向东北方向延伸,涵盖长江、黄河、海河、淮河四大流域,涉及 6 个省份共 27 个市级行政区,总面积达 30.13 万 km²,区域内分布河流近 700 条。

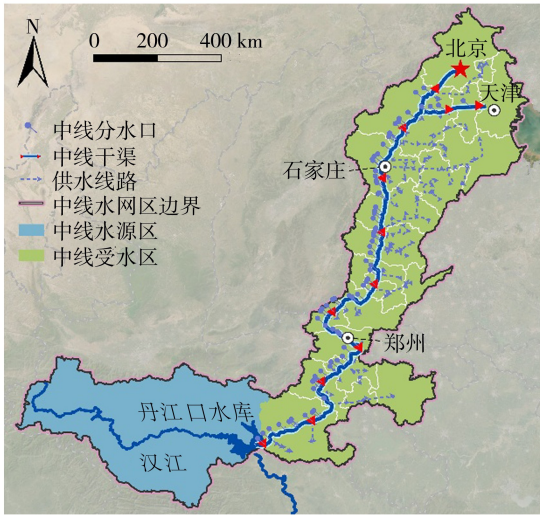


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

中线水网区年人均水资源量为 511 m³,仅为全国平均水平(2100 m³)的 1/4,气象、水文、社会经济等多方面均存在明显的空间异质性(图 2)。受水区年均降水量为 600 mm 左右,仅为水源区的 2/3,水资源总量接近水源区的 1/2,但人口密度则是水源区的 7 倍以上,受水区人均水资源占有量与水源区相差 10 倍,短缺严重区域如北京主城(北四河下游平原)的年人均水资源占有率更是仅为 51 m³。除此之外,受水区区内还分布有大量的耕地,约占水网区总面积的 62%,单位耕地面积水资源量约 3700 m³/hm²,远低于我国北方地区的平均值(5640 m³/hm²),而区域耕地面积占比越大,代表区域农业生产脆弱性越高,相应地土壤持水能力越弱,抗旱能力越低^[26]。这些数据表明,中线水网区不仅承担着人口、经济、农业等极高的用水需求,还面临

着干旱应对能力不足的风险。

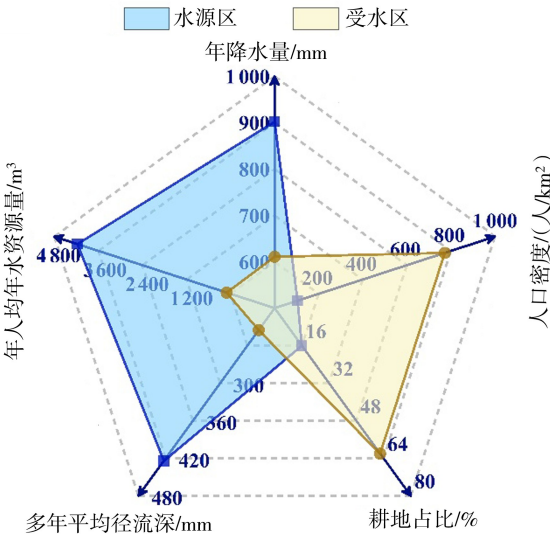


图2 研究区气象、水文、社会经济特征
Fig.2 Meteorological, hydrological and socio-economic characteristics in study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究采用的1961—2018年月尺度天然径流数据来源于中国天然径流量格点数据集(CNRD v1.0)。CNRD是一套高质量时空连续的径流格网数据集,提供了空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ 的天然径流估算量日值、月值和年值^[27]。相较于CMIP6、ISIMIP、GLDAS等天然径流格网数据,CNRD展现出了较好且稳定的应用效果,更符合我国不同流域的实际情况^[28]。迄今为止,较少有研究将CNRD数据集应用于干旱评估,该数据集在探索区域干旱的长期趋势和时空变化方面具有较高的潜力。

2.2 水文干旱识别与特征解析方法

图3为水文干旱识别与特征解析框架,依次包括3个主要环节:干旱指数计算,用于定量刻画区域水资源状态;三维干旱事件识别,旨在从时空维度上精准界定干旱事件的范围与过程;干旱特征解析,用以提取和量化干旱事件的关键特征(如历时、烈度、质心等)。

a. 干旱指数计算。标准化径流深指数(SRI)是一种基于径流深数据的标准化干旱指标,标准化过程确保了不同位置的干旱状况可比性,使跨区域的水文干旱对比分析成为可能,从而有效反映区域水文干旱的时空动态特征。吕潇雨等^[23]的研究表明,应用3月尺度的干旱指数可以有效捕捉干湿变化的季节性特征,既能避免干旱指数波动过于剧烈,又能避免因时间跨度过长导致干旱指数值过于平

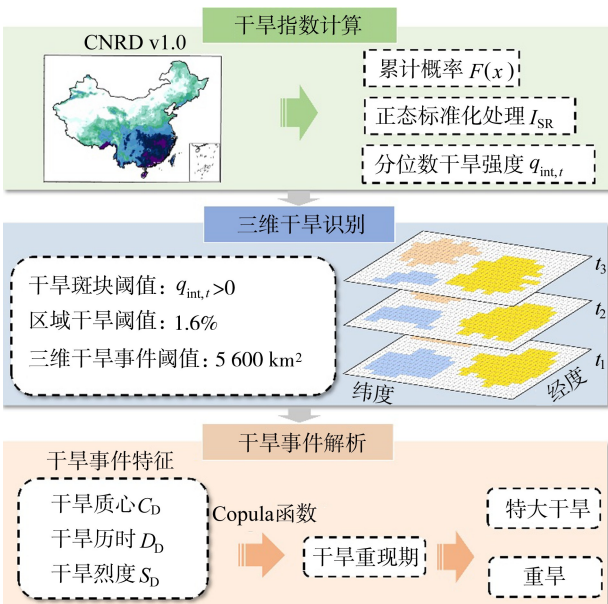


图3 水文干旱识别与特征解析框架
Fig.3 Framework of hydrological drought identification and feature analysis

缓。因此,本文采用月尺度(3月滑动平均)SRI描述水文干旱,计算公式为:

$$I_{SR,t} = \begin{cases} \sqrt{-2\ln F(x)} - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} & F(x) > 0.5 \\ -\sqrt{-2\ln F(x)} - \frac{c_0 + c_1t + c_2t^2}{1 + d_1t + d_2t^2 + d_3t^3} & F(x) \leq 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中 } F(x) = \int_0^x \frac{1}{\gamma^\beta \Gamma(\beta)} x^{\beta-1} e^{-\frac{x}{\gamma}} dx \quad (\beta > 0, \gamma > 0)$$

式中: $I_{SR,t}$ 为 t 时刻正态标准化处理后的SRI值; $F(x)$ 为采用 Γ 分布拟合一定时间尺度的径流深 x 的累积概率; β, γ 别为 Γ 分布的形状参数和尺度参数,通过极大似然法估算; $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ 均为系数,本文分别取2.515517、0.802530、0.010328、1.432788、0.189269、0.001308。为了更有效地识别和区分不同持续时间的干旱,采用分位数的形式代替SRI值,旨在为最极端值提供固定的下界,从而得到分位数干旱强度,计算公式为:

$$q_{int,t} = \frac{0.2 - F(I_{SR,t})}{0.2} \quad (2)$$

式中: $q_{int,t}$ 为 t 时刻的分位数干旱强度,其取值范围为 $-1 \sim 1$, $q_{int,t} = -1$ 表示极度湿润,完全未出现干旱, $q_{int,t} = 1$ 则表示出现严重干旱。 $F(I_{SR,t})$ 反映了不发生干旱的概率,0.2为广泛用于区分干旱和非干旱区域的阈值^[27],因此 $q_{int,t} > 0$ 表示发生了干旱。

b. 三维干旱事件识别。干旱现象具有时空连续的三维特征,传统的干旱识别方法通常将其简化为一维或二维,即在固定区域内确定干旱的起止时间,或仅表示为一组固定地理位置的干旱指数分布。本文基于 Guo 等^[29]提出的三维聚类算法识别干旱事件,在经度、纬度、时间 3 个坐标轴构成的三维空间中,按时间顺序将二维的干旱数据堆叠成三维数组,从而量化展示干旱事件的时空演化特征。具体包括两个步骤:①干旱斑块判定与筛选。基于研究区历年逐月的 I_{SR} 数据,计算逐月的分位数干旱强度, $q_{int,t} > 0$ 的空间格网标记为干旱,并进一步聚合相同干旱状态的临近格网,得到多个不同面积的干旱斑块。为避免大范围的干旱事件被分割为多处较小的区域,本文参考 Xu 等^[21-22,29]的研究成果,将区域干旱最小面积阈值设定为研究区总面积的 1.6%,并剔除小于该阈值的零星干旱斑块。②三维干旱事件识别。在完成逐月干旱斑块的判定与筛选之后,计算临近时刻的干旱斑块在经度-纬度二维平面上投影后的重合面积,通过比较该面积是否大于重合面积阈值以过滤小规模干旱事件,本文的重合面积阈值依据 Andreadis 等^[19]的研究设为 9 个像元 (3×3 窗口),根据 CNRD 格点数据的空间分辨率该阈值约为 5 600 km²。若重合面积大于该阈值,则认为此干旱事件在这几个时刻是连续发生的,归并为同一场干旱事件,反之则被划分为几场相互独立的干旱事件。经迭代计算获得三维时空连续的干旱斑块,每个时空连通的干旱斑块即构成独立的三维干旱事件。

c. 干旱特征解析。本文基于 3 种干旱特征指标和重现期来解析干旱事件:①干旱历时 D_D 代表干旱状态的持续时间,即从一次干旱事件开始到结束的月数,在三维空间中为一次三维干旱事件时间轴的高度。②干旱烈度 S_D 是干旱程度的量化表达,为一次干旱事件历时内全部干旱斑块的分位数干旱强度总和。③干旱质心 C_D 为分位数干旱强度在三维空间中的加权中心,对于每个时刻,干旱质心为干旱斑块的二维空间质心。为还原和刻画干旱事件的发展过程,通过逐一计算并连接起一场三维干旱事件逐时刻的干旱质心,可得到这场干旱事件的时空迁移路径,形象地刻画出干旱时空演变规律。为更好地比较中线水网区干旱事件的时空变化特征,本文通过计算每场三维干旱事件的干旱质心空间位置判定其发生区域位于水源区或受水区。④重现期是指干旱事件在长时间序列中再次发生的平均时间间隔,对于干旱频率的表征尤为重要。鉴于 Copula 函数在多元水文频率分析中的显著优势,本文采用

Kendall 相关系数法确定 Copula 函数参数^[30],构建干旱历时与干旱烈度的联合分布函数,从双变量角度系统表征干旱事件特征,双变量的干旱事件重现期的计算公式为:

$$T_k = \frac{\mu}{1 - P[C_g(u,v) \leq p]} \tag{3}$$

$$\text{其中} \quad C_g(u,v) = \exp \left\{ - \left[(-\ln u)^{-\theta} + (-\ln v)^{-\theta} \right]^{-1/\theta} \right\} \quad (\theta \geq 1)$$

式中: T_k 为双变量的干旱事件重现期; μ 为干旱事件平均时间间隔; p 为判断干旱事件是否发生的概率阈值; $C_g(u,v)$ 为 Gumbel-Hougaard 极值 Copula 函数; θ 为参数; u,v 分别为干旱历时与干旱烈度的边缘分布。鉴于目前针对水文干旱的极端等级(特大干旱、重旱)尚缺乏统一划分标准,参考气象干旱领域已有相关统计资料(如长江流域历史极旱事件统计^[31]),设定水文干旱事件等级: $T_k > 50$ a(发生频率小于 2%)为特大干旱, $20 \text{ a} < T_k \leq 50 \text{ a}$ (发生频率为 2%~5%)为重旱。

3 结果与分析

3.1 水文干旱事件识别

采用三维聚类算法识别 1961—2018 年南水北调中线水网区的水文干旱事件,共识别出 232 场三维水文干旱事件,其中,153 场干旱历时为 3 月及以内,44 场干旱历时超过 6 月,14 场干旱历时超过 12 月。受 CNRD 数据集时间序列的限制,本文未涉及 2019 年之后的干旱,如 2022 年发生的长江流域特大干旱事件不在本次评估范围内。基于干旱历时和干旱烈度计算每场干旱事件的双变量重现期和干旱质心,结果表明 1961—2018 年南水北调中线水网区共发生 $T_k > 50$ a 的特大干旱事件 2 场,干旱质心均位于受水区范围内,干旱历时分别为 45 月和 33 月,最严重时干旱辐射到了整个研究区近 80% 的面积; T_k 为 $> 20 \sim 50$ a 的重旱事件有 24 场, $5 \text{ a} < T_k \leq 20 \text{ a}$ 的干旱事件有 89 场,在水源区和受水区均有分布。将干旱事件按重现期大小排序,表 1 为 1961—2018 年研究区最严重的 20 场干旱事件及其干旱特征。时间上,这 20 场严重的干旱事件中,有 14 场集中于 20 世纪 90 年代和 21 世纪初,表明南水北调中线水网区在这一时期的水资源亏缺程度相对较大。空间上,干旱事件主要集中在河北省的衡水市、邯郸市、保定市以及河南省的南阳市,这些地区多位于华北平原,水资源相对匮乏,且受季风气候影响显著,易发生持续性干旱。大多数干旱事件持续时间较长,尤其是排名前几位的干旱事件,干旱历时普遍超过 20 月,甚至达到 45 月,表明该地区干旱具有长

表 1 1961—2018 年研究区 20 场最严重的干旱事件及其干旱特征

Table 1 20 most severe drought events and their drought characteristics in study area from 1961 to 2018

起始时间	终止时间	T_k/a	$D_D/月$	S_D	C_D			
					经度/(°)	纬度/(°)	时间	区域
2000-03	2003-11	85	45	2 810.3	115.38	37.79	2001-11	河北衡水
1997-08	2000-04	66	33	1 927.4	115.55	37.77	1999-01	河北衡水
1991-09	1994-06	42	34	958.1	115.31	37.51	1993-03	河北邢台
1981-05	1982-07	40	15	867.0	114.65	36.71	1982-01	河北邯郸
1986-06	1989-02	39	33	850.6	114.53	36.21	1987-05	河北邯郸
1966-07	1967-02	36	8	753.9	111.17	33.30	1966-10	河南南阳
1983-08	1985-08	34	25	690.8	115.90	39.13	1984-08	河北保定
1961-03	1962-06	34	16	690.9	113.45	33.68	1961-09	河南平顶山
1967-02	1969-06	33	29	654.1	115.91	37.73	1968-07	河北衡水市
1998-11	1999-04	32	6	608.5	109.83	32.99	1999-01	湖北十堰
2011-01	2011-09	30	9	543.7	110.92	33.11	2011-04	湖北十堰
1997-06	1998-03	28	10	503.9	108.70	32.96	1997-10	陕西安康
1971-10	1973-06	28	21	486.8	114.79	38.03	1972-12	河北石家庄
2005-11	2007-07	27	21	463.7	116.16	39.31	2006-10	河北保定
1995-03	1995-07	27	5	454.9	110.68	33.19	1995-05	陕西商洛
1991-09	1992-02	26	6	429.9	109.19	33.06	1991-12	陕西安康
2013-08	2014-03	25	8	414.2	111.40	33.41	2013-11	河南南阳
2014-07	2015-04	25	10	399.5	115.57	38.54	2014-12	河北保定
1996-02	1996-05	25	4	397.9	110.32	33.06	1996-03	湖北十堰
2015-08	2016-11	24	16	382.5	109.97	32.89	2016-03	湖北十堰

期性和持续性特征。此外,干旱烈度较高的地区主要集中在河北省,尤其是衡水市和邯郸市,反映了这些地区在干旱期间水资源短缺问题尤为突出。此外,干旱质心的空间分布显示,河北省的干旱事件多集中在华北平原,而河南省和湖北省的干旱事件则更多影响汉江流域及周边地区。此外,部分干旱事件干旱历时较短,但干旱烈度仍然较高,可能对局部地区造成严重影响。

3.2 典型干旱事件特征分析

为直观展示南水北调中线水网区水文干旱事件的时空格局和演变过程,选取 1961—2018 年研究区最严重的一场干旱事件按月进行切片分析,完整还原该次特大水文干旱事件的三维结构(图 4)及整个干旱周期内逐月干旱质心在水网区的迁移过程(图 5)。由图 4 可见,作为 1961—2018 年研究区遭遇的最严重特大水文干旱事件,自 2000 年 3 月开始至 2003 年 11 月消退历时共 45 月,是干旱历时最长的一场干旱,且其影响范围极广,几乎辐射到了整个南水北调中线水网区。2000 年 5 月,此次特大水文干旱事件的影响范围达到峰值,影响面积达 22.98 万 km²,约占研究区总面积的 76%。根据安莉娟等^[32]的研究及国家气候中心的统计数据,2000 年春夏北方发生大旱灾(华北受灾严重),2001 年 3—7 月华北发生严重干旱,2002 年华北出现严重的夏秋连续干旱,这些历史重大干旱灾害事件在时间轴和空间位置上与本文的识别结果基本一致。

由图 5 可见此次特大水文干旱事件从产生至消退的全过程时空动态演变及其迁移路径,每个点代表逐月干旱集群的质心,箭头指示迁移方向。此次特大水文干旱事件起源于南水北调中线水源区,随后迅速向东北方向扩展,历时 2 月蔓延至河南省焦作市(受水区);此后,干旱质心继续移动,在短暂影响河北省衡水市后,主要稳定在廊坊-保定东部-北京南部-天津西部一带(图中黑色虚线区域),并在此滞留长达 27 月(2000 年 7 月至 2003 年 9 月);随后,干旱质心向西南方向有限迁移,连续 10 月位于河北省衡水市境内(图中绿色虚线区域);2003 年 8 月,干旱质心重返廊坊市(图中白色实线区域),最终于 2003 年 11 月消退。综合来看,此次特大水文干旱事件大致可以分为 3 个阶段:发展阶段(2000 年 3 月至 2000 年 6 月)、维持阶段(2000 年 7 月至 2003 年 9 月)和恢复阶段(2003 年 8 月至 2003 年 11 月),整个过程中干旱质心由水源区迅速向受水区迁移,干旱烈度最大的区域位于受水区内的河北省衡水市和廊坊市。

3.3 水源区与受水区干旱时空对比

图 6 为 1961—2018 年研究区发生的 232 场水文干旱事件干旱质心的空间分布,其中有 86 场干旱质心位于水源区范围内,有 146 场干旱质心位于受水区范围内。通过分析发现,153 场重现期较小且干旱历时为 1~3 月的小规模水文干旱事件在整个南水北调中线水网区均有分布,但在这 153 场小规

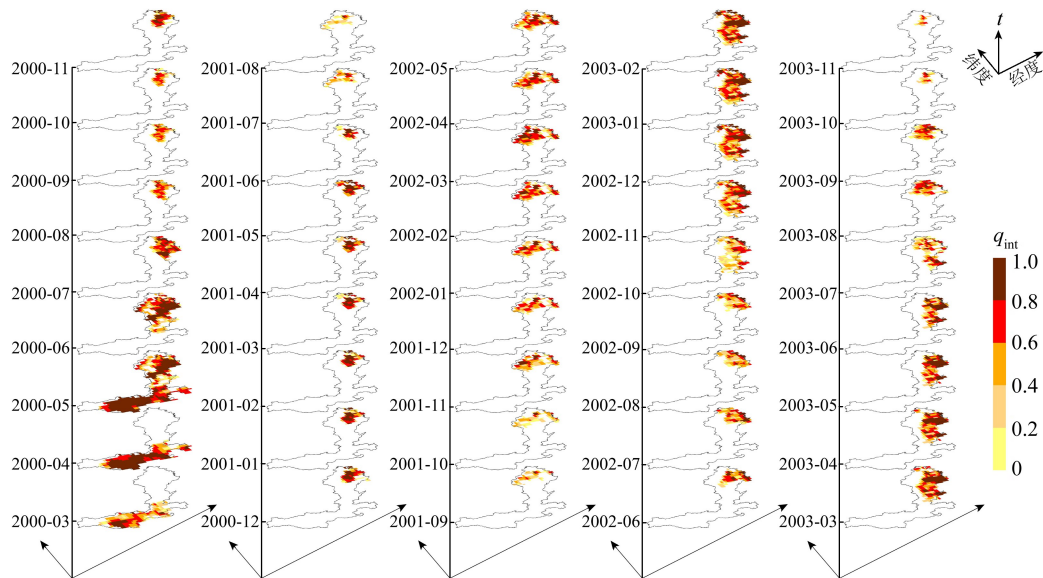


图 4 1961—2018 年研究区最严重干旱事件的三维切片

Fig. 4 Three dimensional slices of the most severe drought event in study area from 1961 to 2018

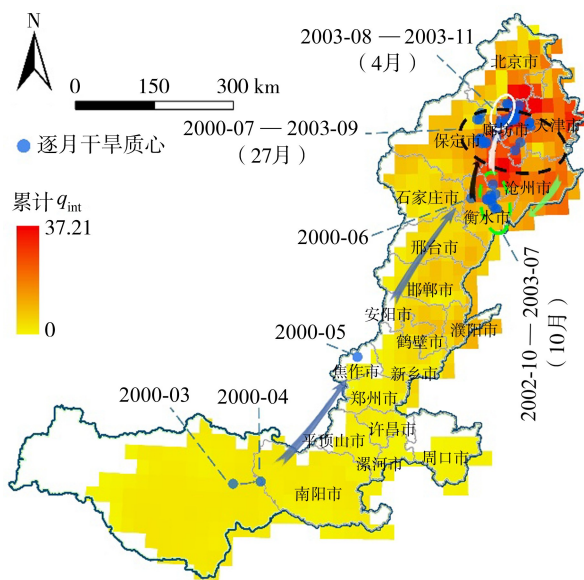


图 5 1961—2018 年研究区最严重干旱事件的时空迁移轨迹

Fig. 5 Spatiotemporal migration trajectory of the most severe drought event in study area from 1961 to 2018

模干旱事件中约有 67% 的干旱质心集中在南部的水源区及临近的几座河南省地级市。相比之下,重现期较大且长干旱历时的特大水文干旱事件多发于受水区,几场重大干旱事件的干旱质心主要集中在河北省南部的衡水、邯郸、邢台三市;水源区内则极少发生较大规模的干旱,在干旱历时超过 12 月的 14 场干旱事件中,仅有 1 场干旱质心位于水源区范围内,其余 13 场干旱质心均位于受水区。整体而言,南水北调中线受水区的水资源亏缺程度要远高出水源区。

图 7 在时间尺度上展示了水源区和受水区 1961 年初至 2018 年末发生的水文干旱的频次、持

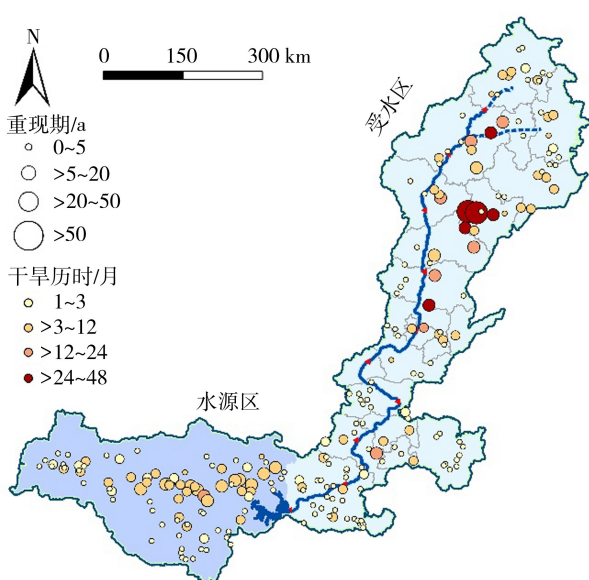


图 6 1961—2018 年研究区水文干旱事件干旱质心的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of drought centroids of hydrological drought events in study area from 1961 to 2018

续时间和严重程度(图中柱子的粗细表征干旱历时的长短)。结果显示,对于发生在水源区内的 86 场水文干旱事件,平均干旱历时约为 3 月,共有约 40% 的月份处在干旱背景下,平均每年的年内干旱月数为 4.7 月,平均干旱烈度为 (106 ± 162) 。20 世纪 90 年代以后水源区发生水文干旱事件的频次有明显上升:1961—1989 年有约 36% 的月份发生了水文干旱,而 1990—2018 年发生水文干旱的月份占比上升到了 57%。对于发生在受水区内的 146 场水文干旱事件,平均干旱历时约为 5 月,共有约 67% 的月份处在干旱背景下,平均每年的年内干旱月数达

8.0 月,平均干旱烈度为(104±322),研究期间受水区水文干旱的频次整体呈先升后降的趋势。

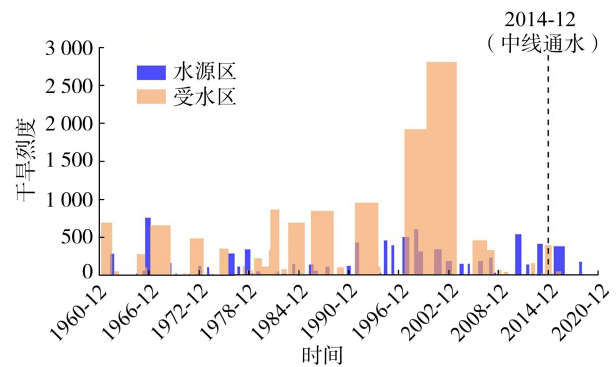


图 7 1961—2018 年研究区水文干旱事件的时间演变
Fig. 7 Temporal evolution of hydrological drought events in study area from 1961 to 2018

21 世纪后,尽管受水区干旱频次下降、强度减弱,但水源区的水文干旱仍时有发生。2015—2018 年,受水区仅新增 5 场短历时、低强度的水文干旱事件,而水源区则新增了 9 场,其中包括 1 场 2015 年 8 月至 2016 年 11 月持续了 16 月之久的重旱事件,这也是 1961 年后水源区发生的干旱历时最久的水文干旱事件,根据重现期大小,该次干旱事件排在第 20 位(表 1)。李京芳等^[33]的研究基于 1964—2016 年汉江流域水文站逐月实测径流资料,识别出流域历时最长的水文干旱事件 2015 年 8 月开始至 2016 年 12 月结束,与本文提取的结果基本一致,表明水源区仍存在发生长历时干旱的风险,对南水北调中线工程的稳定供水保障提出了一定挑战。由于本文基于天然径流数据(未含人类活动影响)提取水文干旱事件,研究结果主要反映气候变化影响下的区域干旱状况,这种水源区与受水区之间愈发显著的时空异步现象揭示了区域降水格局改变与调水工程的潜在协同效应,体现了工程调度策略对干旱时空异质性的科学响应,建议在工程调度中建立合理的动态响应机制,从而更好地适应气候变化波动,有力保障中线调水工程的稳定运行。

4 讨论

4.1 南水北调中线水网区水文干旱空间分异的潜在成因分析

气候变化背景下,降水量是影响干旱发生的关键因素^[34]。通过对 1980—2018 年南水北调中线水网区周边 87 个气象站逐日降水数据的统计,发现各站点多年平均降水量在空间上差异显著(图 8),整体呈现出明显的由南向北逐渐递减的变化趋势。临近站点的统计结果显示,水源区年均降水量约为 902 mm,而受水区年均降水量约为 611 mm,仅为水源

区的 2/3。这种天然的降水梯度意味着水源区拥有更充沛的水资源输入,极大降低了其遭遇长历时特大干旱的风险。相反,受水区的水资源供给“先天不足”,更易遭受高频率、高强度干旱事件的冲击。

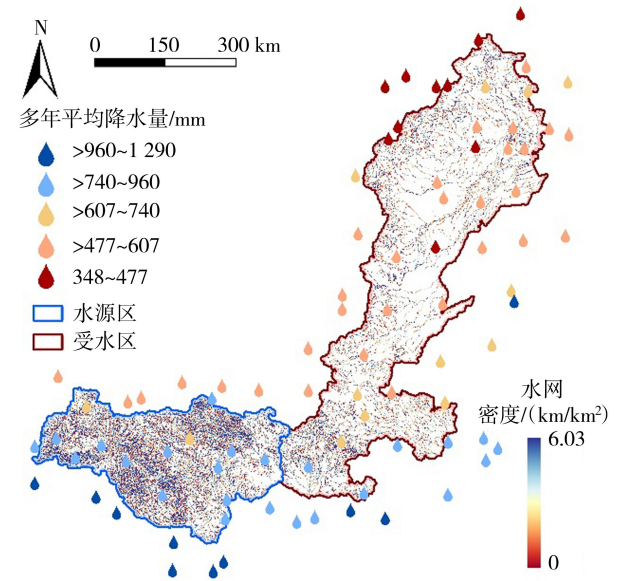


图 8 研究区多年平均降水量及水网密度的空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of annual average precipitation and water network density in study area

除气候变化外,下垫面条件也是影响区域水资源亏缺的重要因素^[34]。本文基于 Google Earth Engine 平台分别计算水源区和受水区 1982—2018 年的年均归一化植被指数(NDVI),结果如图 9 所示,发现南水北调中线水网区的植被盖度总体呈现上升趋势,水源区植被覆盖状况(年均 NDVI 为(0.57±0.02))显著优于受水区(年均 NDVI 为(0.39±0.02))。Zhu 等^[35]的研究表明植被通过冠层截留、增加入渗、降低土壤蒸发等方式提升了地表的持水能力与水分利用效率,有助于延缓干旱发展。此外,本文基于中国格网河网密度数据集^[36](1 km 分辨率)提取了南水北调中线水网区的水网密度分布(图 8),统计结果表明水源区的平均水网密度((0.67±0.8) km/km²)远高于受水区((0.23±

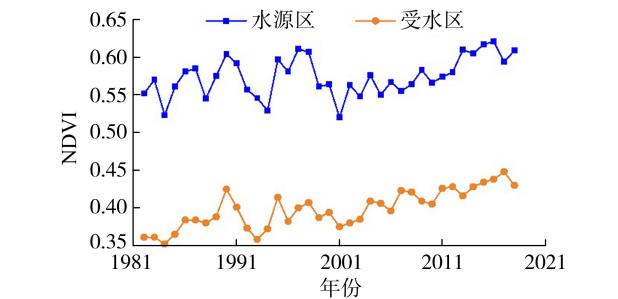


图 9 1982—2018 年研究区年均 NDVI
Fig. 9 Annual average NDVI in study area from 1982 to 2018

0.49) km/km²)。与图 6 中两场特大干旱质心的空间位置进行对比,发现这两场特大干旱的质心位置基本与受水区内大面积的低水网密度区域重合,这表明稀疏的水网可能是影响特大干旱的关键因素。在干旱发生时,缺乏自然水体作为缓冲,导致水资源亏缺加剧并难以恢复,从而极易演变为长历时、高强度的区域性特大水文干旱事件。

综上所述,南水北调中线水网区水文干旱的区域分异现象可能是降水条件、水网密度、植被覆盖共同作用的结果。水源区凭借丰沛的降水、密集的水网和良好的植被覆盖形成了相对较强的干旱抵御和恢复能力,使其主要遭受短历时、低强度干旱的影响;受水区则因水文系统脆弱性更高,导致其成为水资源亏缺程度相对严重的区域。

4.2 水网密度对干旱历时的影响分析

水网是地区水文过程与地形地貌的综合反映^[37],作为区域水循环的直接载体,其疏密程度关乎地表径流和地下水补给等水文过程,可能对水文干旱的维持与缓解产生深远影响。因此,为探究水网密度对水文干旱的调节效应,将南水北调中线水网区的水网密度与发生的 79 场干旱历时长于 3 月的水文干旱事件的干旱质心空间位置相匹配,提取干旱质心区域的平均水网密度,分析其对干旱历时的影响,结果如图 10 所示。由图 10 可见,水网密度小于 0.2 km/km² 的区域发生了 12 场持续时间满 1 a ($D_0 \geq 12$ 月)的长期水文干旱事件,平均干旱历时为 (16.8±9.2) 月,均值和中位数均显著高于其他区域。在水网密度为 0.2~0.4 km/km² 区域发生的水文干旱事件中,持续时间满 1 a 的仅有 2 场,干旱历时整体减小,且随着水网密度的继续增大干旱历时的分布也更加集中,均值基本维持在 6 月左右。表明水网密度对干旱历时具有显著影响,低密度的水网区域更易发生长期干旱过程,而增大水网密度可以抵御长期干旱的发生。但水网对干旱的调节作用存在边际效应,在水网密度达到一定规模后干旱历时会趋于稳定。进一步分析水网密度与干旱历时的定量关系,发现在水网密度较低区域 (<0.35 km/km²),干旱历时与水网密度在 0.01 水平上呈显著负相关关系(相关系数 $r = -0.51$);在水网密度较高区域 (≥ 0.35 km/km²),干旱历时与水网密度无显著相关关系 ($r = 0.01$),表明 0.35 km/km² 的水网密度可能是南水北调中线水网区抵御干旱的阈值。因此,在干旱防控与水资源配置中,应结合中线水网区的水资源亏缺背景,重点关注水网稀疏区域的干旱风险管理,适当补充人工水网以提升区域水资源系统的抗旱能力。

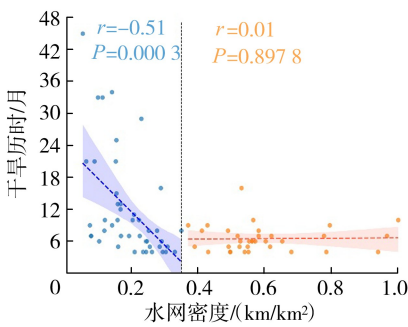


图 10 研究区干旱历时与水网密度的关系

Fig. 10 Relationship between drought duration and water network density in study area

5 结 论

a. 三维聚类方法可有效识别区域性水文干旱并捕捉干旱事件的时空特征。1961—2018 年南水北调中线水网区共发生 232 场时空连续的水文干旱事件,其中最严重的是干旱历时 45 月、重现期为 85 a 的特大干旱事件,影响最广时辐射到了水网区面积的 76%,干旱质心主要集中于受水区河北省境内,经历了发展、维持和恢复 3 个主要过程,该次水文干旱过程与实际旱情记载基本一致。

b. 南水北调中线水源区与受水区水文干旱特征存在显著时空分异。受水区是特大、长历时水文干旱事件的高发区,集中在河北省南部,其干旱频次、干旱历时、年内干旱月数均远高于水源区。水源区虽干旱变异性较低且历史大规模干旱罕见,但 20 世纪 90 年代后干旱频次显著上升,且在 2014 年 12 月(中线通水)后仍发生了历时 16 月的严重干旱事件,表明未来水源区仍存在发生长历时干旱的风险。

c. 南水北调中线工程通水后,水网区干旱格局变化反映了调水工程与气候间潜在的协同效应。2015—2018 年受水区与水源区水文干旱事件的时空异步现象尤其显著,反映了气候变化背景下区域降水格局的变化,未来工程调度中应建立合理的动态响应机制,以更灵活地适应气候变化波动,保障工程长期稳定运行。

d. 水网密度在一定程度上可以影响干旱历时。水网密度较低的区域更易发生长期干旱,增大水网密度能抵御长期干旱过程,但这种调节作用存在边际效应,南水北调中线水网区水网密度发挥干旱调节作用的参考阈值为 0.35 km/km²。

参考文献:

[1] 张建云,贺瑞敏,齐晶,等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展,2013,24(3):303-310. (Zhang Jianyun, He Ruimin, Qi Jing, et al. A new perspective on

- water issues in North China [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese))
- [2] 杨钦, 胡鹏, 王建华, 等. 基于“量-质-域-流-生”的京津冀水资源协同保护状态综合评价[J]. *水资源保护*, 2025, 41(1): 114-122. (Yang Qin, Hu Peng, Wang Jianhua, et al. Comprehensive evaluation of water resources collaborative protection status in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on “quantity-quality-domain-connectivity-biology” [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(1): 114-122. (in Chinese))
- [3] 牛玉国, 张金鹏. 构建黄河大水网促进黄河流域生态保护和高质量发展[J]. *水利经济*, 2023, 41(2): 1-4. (Niu Yuguo, Zhang Jinpeng. Research on building the Yellow River's large water network and promoting the ecological protection and high-quality development of the Yellow River Basin [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023, 41(2): 1-4. (in Chinese))
- [4] 新华社. 中共中央 国务院印发《国家水网建设规划纲要》[EB/OL]. 中国政府网. (2023-05-25) [2025-03-20]. https://www.gov.cn/zhengce/202305/content_6876214.htm.
- [5] 新华社. 南水北调中线工程调水突破 700 亿立方米 [EB/OL]. 中国政府网. (2025-02-24) [2025-03-20]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202502/content_7005376.htm.
- [6] 卢丽荣, 刘卫东, 姚丽华, 等. 南水北调中线工程跨区域转让水价成本核算体系研究[J]. *水利经济*, 2023, 41(4): 45-52. (Lu Lirong, Liu Weidong, Yao Lihua, et al. Study on cost accounting system of trans regional water transfer [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023, 41(4): 45-52. (in Chinese))
- [7] 萧廷奎, 彭芳草, 李长付, 等. 河南省历史时期干旱的分析[J]. *地理学报*, 1964, 30(3): 259-276. (Xiao Tingkui, Peng Fangcao, Li Changfu, et al. On the droughts occurring in historical period of Honan Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(3): 259-276. (in Chinese))
- [8] 唐锡仁, 薄树人. 河北省明清时期干旱情况的分析[J]. *地理学报*, 1962, 28(1): 73-82. (Tang Xiren, Bo Shuren. Analysis of droughts in Hebei Province during the Ming-Qing Period [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1962, 28(1): 73-82. (in Chinese))
- [9] 陈茜茜, 屈艳萍, 吕娟, 等. 南水北调中线工程水源区和受水区的降水时空变化特征及丰枯遭遇[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 136-146. (Chen Xiqian, Qu Yanping, Lyu Juan, et al. Temporal and spatial variation characteristics of precipitation and drought-waterlogging encounter probability in water source and receiving areas of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(1): 136-146. (in Chinese))
- [10] 张璐, 卢一杰, 张增信, 等. 南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1148-1157. (Zhang Lu, Lu Yijie, Zhang Zengxin, et al. Risk assessment of drought in the source and receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(6): 1148-1157. (in Chinese))
- [11] 石卫, 雷静, 李书飞, 等. 南水北调中线水源区与海河受水区丰枯遭遇研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(6): 82-87. (Shi Wei, Lei Jing, Li Shufei, et al. Occurrence probability of rich-scarce precipitation between water source area and Haihe River water receiving areas in middle route of South-to-North water diversion project [J]. *Yangtze River*, 2019, 50(6): 82-87. (in Chinese))
- [12] Zhao Zongzhi, Wang Hongrui, Yu Chao, et al. Changes in spatiotemporal drought characteristics over Northeast China from 1960 to 2018 based on the modified nested Copula model [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 140328.
- [13] 汪琳, 舒章康, 王国庆, 等. 汉江流域 1961—2018 年多尺度气象干旱时空演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(7): 1649-1658. (Wang Lin, Shu Zhangkang, Wang Guoqing, et al. Spatial and temporal evolution of multi-scale meteorological drought in Hanjiang River Basin from 1961 to 2018 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1649-1658. (in Chinese))
- [14] 王磊, 曾思栋, 阳林翰, 等. 基于 CMIP6 的气候变化下汉江流域气象干旱特征研究[J]. *水资源保护*, 2024, 40(5): 39-45. (Wang Lei, Zeng Sidong, Yang Linhan, et al. CMIP6-based meteorological drought characteristic study under climate change in the Hanjiang River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(5): 39-45. (in Chinese))
- [15] 瞿德业, 杨明月, 刘婷婷, 等. 基于 SPEI 的洮河流域气象干旱时空特征分析[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(5): 32-40. (Qu Deyue, Yang Mingyue, Liu Tingting, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of meteorological drought in Taohe River Basin based on SPEI [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(5): 32-40. (in Chinese))
- [16] Yao Ning, Li Yu, Lei Tingjun, et al. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 73-89.
- [17] Sun Shanshan, Li Qingyun, Li Jing, et al. Revisiting the evolution of the 2009-2011 meteorological drought over Southwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 385-402.
- [18] Zhang Ke, Li Zhilin, Shi Wuzhi, et al. Spatiotemporal changes and interconnections between meteorological and hydrological droughts in China over past 34 years [J].

- Water Science and Engineering, 2025, 18(3): 274-287.
- [19] Andreadis K M, Clark E A, Wood A W, et al. Twentieth-century drought in the conterminous United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(6): 985-1001.
- [20] Lloyd-Hughes B. A spatio-temporal structure-based approach to drought characterisation [J]. International Journal of Climatology, 2012, 32(3): 406-418.
- [21] Xu Kai, Yang Dawen, Yang Hanbo, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: a climatic perspective [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 253-264.
- [22] 徐翔宇, 许凯, 杨大文, 等. 多变量干旱事件识别与频率计算方法 [J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 373-381. (Xu Xiangyu, Xu Kai, Yang Dawen, et al. Drought identification and drought frequency analysis based on multiple variables [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 373-381. (in Chinese))
- [23] 吕潇雨, 郭浩, 孟翔晨, 等. 基于三维识别的中国干旱事件演变特征分析 [J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 849-862. (Lyu Xiaoyu, Guo Hao, Meng Xiangchen, et al. Characterization of the evolution of drought events in China based on 3D identification [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 849-862. (in Chinese))
- [24] Xu Chen, Li Fawen, Li Jianzhu, et al. Three-dimensional identification of hydrological drought and multivariate drought risk probability assessment in the Luanhe River basin, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 137(3): 3055-3076.
- [25] 董蓉蓉, 粟晓玲, 屈艳萍, 等. 2022 年长江流域不同类型干旱时空响应关系 [J]. 水资源保护, 2024, 40(3): 61-70. (Dong Rongrong, Su Xiaoling, Qu Yanping, et al. Spatiotemporal response relationships between different types of droughts in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(3): 61-70. (in Chinese))
- [26] 邹君, 杨玉蓉, 田亚平, 等. 南方丘陵区农业水资源脆弱性概念与评价 [J]. 自然资源学报, 2007, 22(2): 302-310. (Zou Jun, Yang Yurong, Tian Yaping, et al. Concept and assessment on vulnerability of agricultural water resource in hilly area of southern China [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(2): 302-310. (in Chinese))
- [27] Gou J, Miao C, Samaniego L, et al. CNRD v1. 0: a high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2021, 102(5): E929-E947.
- [28] 潘扎荣, 王恺文, 盛志刚, 等. 多源径流数据在中国不同流域的比较研究 [J]. 地理研究, 2024, 43(4): 1004-1017. (Pan Zharong, Wang Kaiwen, Sheng Zhigang, et al. Comparing multi-source runoff data in different watersheds across China [J]. Geographical Research, 2024, 43(4): 1004-1017. (in Chinese))
- [29] Guo H, Bao A M, Ndayisaba F, et al. Space-time characterization of drought events and their impacts on vegetation in Central Asia [J]. Journal of Hydrology, 2018, 564: 1165-1178.
- [30] 周平, 周玉良, 金菊良, 等. 水文双变量重现期分析及在干旱中应用 [J]. 水科学进展, 2019, 30(3): 382-391. (Zhou Ping, Zhou Yuliang, Jin Jinliang, et al. Understanding of hydrological bivariate return periods and its application to drought analysis [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(3): 382-391. (in Chinese))
- [31] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策 [J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153. (Xia Jun, Chen Jin, She Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1143-1153. (in Chinese))
- [32] 安莉娟, 任福民, 李韵婕, 等. 近 50 年华北区域性气象干旱事件的特征分析 [J]. 气象, 2014, 40(9): 1097-1105. (An Lijuan, Ren Fumin, Li Yunjie, et al. Study on characteristics of regional drought events over North China during the past 50 years [J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(9): 1097-1105. (in Chinese))
- [33] 李京芳, 彭涛, 董晓华, 等. 基于 Copula 函数的汉江流域水文干旱风险研究 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(3): 179-188. (Li Jingfang, Peng Tao, Dong Xiaohua, et al. Hydrological drought risk in the Hanjiang River basin based on Copula function [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3): 179-188. (in Chinese))
- [34] 袁星, 周诗琦, 马凤, 等. 气候和下垫面变化下骤旱形成演变机制研究进展 [J]. 地球科学进展, 2024, 39(9): 877-888. (Yuan Xing, Zhou Shiyu, Ma Feng, et al. Review on the formation and evolution mechanisms of flash droughts under climate and land cover change [J]. Advances in Earth Science, 2024, 39(9): 877-888. (in Chinese))
- [35] Zhu Guofeng, Yong Leilei, Xia Zhao, et al. Evaporation, infiltration and storage of soil water in different vegetation zones in the Qilian Mountains: a stable isotope perspective [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2022, 26(14): 3771-3784.
- [36] 彭晋福, 张定祥, 李亚南, 等. 2019 年中国 1 km 格网河网密度数据集 [DS/OL]. V3. Science Data Bank, 2022. (2024-03-27). DOI: 10. 57760/sciencedb. j00001. 00759
- [37] 孟宪萌, 黄檬, 黄杰, 等. 流域地貌与河网结构影响机制及其演化模型的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2023, 38(8): 780-789. (Meng Xianmeng, Huang Meng, Huang Jie, et al. Recent advances in influencing mechanisms and evolution models of watershed geomorphology and river network structure [J]. Advances in Earth Science, 2023, 38(8): 780-789. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-07-19 编辑: 王芳)