

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0113

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 L, LU Y J, ZHANG Z X, 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)

南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险评估

张璐^{1,2,3}, 卢一杰¹, 张增信¹, 胡鑫¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 广东省水务大数据与水生态工程技术研究中心, 深圳 518001;
3. 深圳市水务规划设计院股份有限公司, 深圳 518001)

摘要: 基于 1961—2019 年气象观测数据和 CMIP6 模式数据, 利用标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)计算南水北调中线水源区和受水区的干旱指数, 并利用经验正交分析法、主成分分析法和 Copula 函数法, 对水源区与受水区的干旱演变规律进行分析, 揭示干旱遭遇的联合概率分布, 并对未来干旱遭遇进行预估。研究结果表明: 水源区和受水区干旱事件遭遇频繁, 1965—1971 年和 1987—2005 年均出现较为严重的干旱遭遇事件, 同时在 1970 年代中后期至 1985 年前后, 出现了长期明显的区域差异性; 水源区和受水区中旱和重旱的联合重现期分别约为 18 年一遇(5.51%)和 123 年一遇(0.81%), 两地同时出现极端干旱的重现期约为 323 年一遇(0.31%); 不同气候情景下以年尺度 SPEI 指数, 对南水北调中线水源区和受水区的未来干旱事件预估表明, 未来水源区和受水区在 SSP1-2.6 情景下干旱遭遇次数相对较少, 而在 SSP2-4.5 情景下的 2034—2036 年、2044—2045 年以及在 SSP5-8.5 情景下的 2032—2033 年、2068—2070 年, 将有可能发生较严重的干旱遭遇事件。

关键词: 南水北调中线; 水源区; 受水区; 气候变化; 干旱; 干旱遭遇; SPEI

中图分类号: TV68 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



南水北调中线工程对于完善国家水网、优化水资源配置总体格局具有重要意义。然而, 受极端气候变化影响, 特别是极端干旱事件影响, 流域内水资源时空分布不均问题突出, 严重制约了南水北调中线工程的效益发挥^[1-3]。

近年来, 有关极端干旱监测的研究越来越多, 目前有多种气象水文干旱指数模型得到广泛应用, 如标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)、Palmer 干旱指数、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)等^[4-6]。李忆平等^[7]认为 SPEI 指数模型因考虑了蒸散发因素, 相较于其他两个干旱指数模型具有一定

的优势。石卫等^[8]基于 SPEI 对南水北调中线水源区干旱时空特征进行分析, 对比分析认为 SPEI 指数可作为 SPI 指数的一个重要补充分析手段, 可应用于描述南水北调中线水源区不同时间尺度的干旱特征。郑金丽等^[9]以鄱阳湖流域为研究区, 比较得出多种干旱指数的适用性评价结果。

众多学者针对南水北调水源区和受水区气候变化开展过一些研究。例如: 刘孟凯等^[10]基于中线总干渠沿线的 8 个气象站点 1968—2017 年的逐日气温资料, 探讨了各站点冬季平均气温的趋势性与突变性, 并进一步制定了寒潮同步分析标准。余江游等^[11]基于 Copula 函数理论, 以 SPEI 作为干旱指标,

收稿日期: 2022-05-12 修回日期: 2022-11-01 网络出版时间: 2022-11-18

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221117.0948.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409000); 国家自然科学基金面上项目(41971025)

作者简介: 张璐(1998—), 女, 河北唐山人, 主要从事水文及水资源研究。E-mail: zhang_lu0110@163.com

通信作者: 张增信(1977—), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 主要从事气候变化对生态水文过程影响研究。E-mail: nfuzhang@163.com

建立了南水北调中线工程水源区与海河流域受水区汛期、非汛期及全年 SPEI 的联合分布,并结合未来气候模式数据,研究了变化情景下南水北调中线工程水源区与海河流域受水区各时期干旱遭遇概率变化及其对工程运行风险的影响。但是,很少有研究探讨未来气候变化背景下的水源区和受水区干旱遭遇问题。

政府间气候变化专门委员会制定的气候系统模式相互比较计划(CMIP, coupled model intercomparison project),从该机构的第三阶段(CMIP3)开始,便立足于研究工业革命时期以来温室气体的历史演变规律,以及根据未来不同条件下温室气体程度,划分不同情景进行对应的模拟预估研究,得到历史和未来时期不同情景模式下的预估实验结果^[12-13]。本研究利用大量气象观测资料和最新的 CMIP6 气候模式资料,采用 SPEI,选取经验正交分析法(empirical orthogonal function, EOF)^[14-15]、主成分分析(principal component analysis, PCA)和 Copula 函数法,研究南水北调中线工程水源区和受水区在历史时期的干旱时空分布以及干旱遭遇,以 CMIP6 气象数据集作为驱动数据,预估未来不同气候情景下的水源区和受水区的干旱遭遇问题,为水资源规划和管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 流域介绍

南水北调中线工程水源区地处长江最大支流汉江的中上游,属丹江口水库所在流域^[16],受水区则包括河南、河北、北京和天津,供水总面积为 15.5 万 km²,南水北调中线工程正式通水以来,引江水已经由原来的补充水源变成许多大中型城市的主要水源。

汉江上游属北亚热带湿润气候,年平均气温 13.5 ℃,最低气温低至-12 ℃ 以下,最高气温超过 40 ℃,年均降水量 600~1 000 mm,年均蒸发量 800~1 300 mm。汉江上游的最高温度及蒸发量集中在 7、8 月份,降水特征表现为多为大雨、降水时间短、降水面积集中,容易引发洪涝灾害。汉江上游水系比较发达,丹江口水库作为南水北调中线工程的水源区,在渔业航运、防洪抗旱、养殖业以及旅游业等多方面都发挥着不可替代的重要作用,给南水北调中线工程提供了丰富的高质量水源。

1.2 数据来源

气象数据:历史气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),采用该网站的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),其中包含汉江流域及南水北调中线工程水源区与受水区对应的共 69 个气象测站点 1961—2019 年的日历史气象数据,主要包括气温、气压、相对湿度、水汽压、风速、降水量等要素。

数字高程、土地利用和土壤属性数据:使用的 DEM 数据为地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)网站中下载的 GDEMDEM 30 m 分辨率数字高程模型;土地利用采用中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)分辨率为 1 km 的数据;土壤属性利用国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)下载的 1 km 分辨率土壤属性网格数据,进行相关土壤参数计算,分类后重新导入模型数据库中,作为后续水文响应单元(Hrus)划分的依据之一。

气候情景模式资料:选取最新发布的 CMIP6 多模式数据集(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>),根据文献阅读、自身研究要求以及相关数据获取可行性等综合因素考虑,选取不同排放路径下 BCC、CanESM5 和 KIOST 这 3 种模式的气温、降水数据,并在 SPEI 计算前使用统计降尺度和纠偏等方法对 CMIP6 数据进行处理^[17-19]。

1.3 研究方法

1.3.1 标准降水蒸散发指数

为更合理评估温升效应给环境带来的影响,采用 SPEI 干旱指数模型开展流域干旱研究^[20-21]。其过程主要是通过算法所需气象数据计算得到潜在蒸散发,并与不同尺度的降水数据结合计算差值,根据水量平衡方程算法得到最终的 SPEI 值,计算公式为

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

$$I_{SPEI} = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 2W^2 + d_3 W^3} \quad (2)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln P} \quad (3)$$

式中: α 、 β 分别为尺度参数、形状参数; I_{SPEI} 为 SPEI 值; P 为降水量,mm,当 $P \leq 0.5$ 时 $P=1-F(x)$,当 $P > 0.5$ 时 SPEI 取相反值;常数 $C_0=2.515 5$, $C_1=0.802 8$, $C_2=0.010 3$, $d_1=1.432 7$, $d_2=0.180 2$, $d_3=0.001 3$ 。

1.3.2 Copula 函数

Copula 函数主要是根据各个变量的边缘分布函数,求取多个变量之间的关系,研究不同样本的

总体联合概率分布情况,它首先假设有两个已知变量分别为 X 与 Y ,两个变量对应的边缘分布函数分别为 F_x 和 F_y ,两个变量 X 和 Y 的联合分布函数为 $F(x, y)^{[22-25]}$ 。如果经过验证得到 F_x 和 F_y 连续,那么可以确信存在唯一函数 $C(u, v)$ 使得:

$$F(x, y) = C_\theta[F_x(x), F_y(y)], \forall x, y \quad (4)$$

式中: $C_\theta(u, v)$ 表示 Copula 函数的函数关系; θ 为其对应的待定参数。

2 结果与分析

2.1 水源区和受水区气象干旱演变特征

对月尺度下的 SPEI-12 进行 EOF 分析,选取前

两个模态来对流域内的不同地区时空分布进行分析,如图 1(a)为第一空间模态,以下简称 EOF1,贡献率为 29.7%,对应的空间值全部为正值,体现出良好的全区一致性,表示在部分情况下全区的 SPEI-12 呈现出较为相近的分布趋势。其中:在河南境内此种趋势最为明显,水源区与河北南部次之。图 1(b)中第二空间模态贡献率为 20.1%,体现了南北分布明显的差异性,水源区和河南境内多为正值,河北、北京以及天津则为负值,表明不同地区同时存在旱涝交替出现的情况。

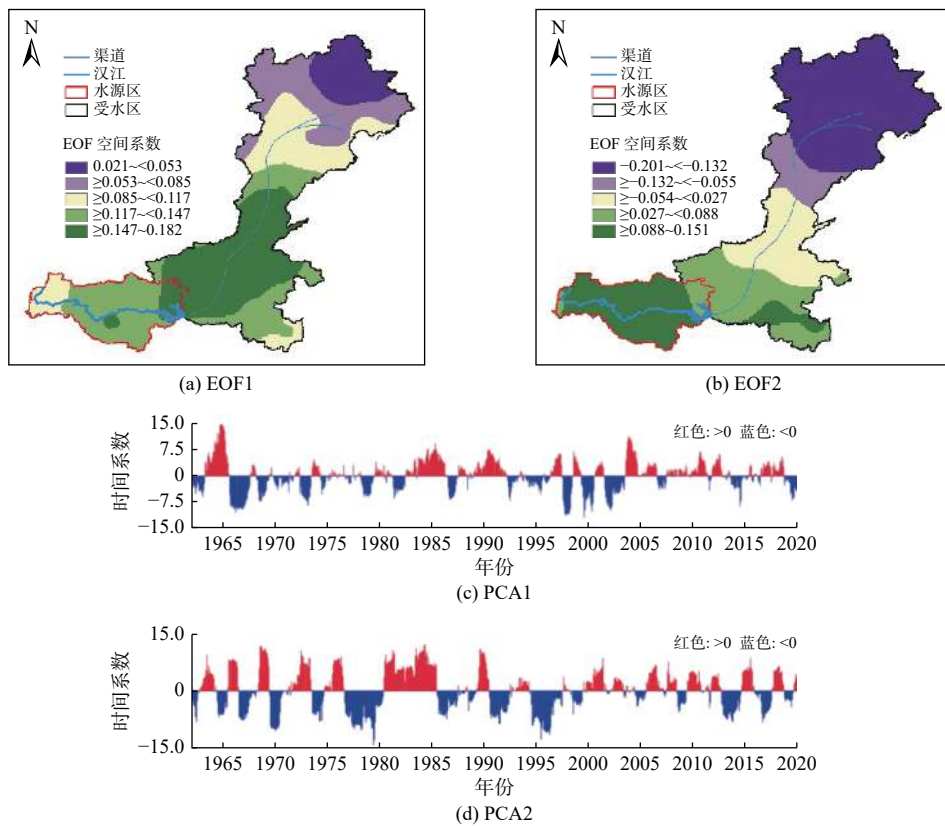


图 1 1961—2019 年全区 SPEI-12 的 EOF 经验正交分解
Fig. 1 Empirical orthogonal decomposition of SPEI from 1961 to 2019 of the whole basin

结合对应的时间模态可以看出: EOF1 以及 PCA1 的结果图 1(c)表明,在 20 世纪 80 年代以前和 20 世纪 90 年代末全区出现干旱的频率明显高于其他时期,在 20 世纪 80 年代至 20 世纪 90 年代初,2000—2013 年,全区偏涝。 EOF2 以及 PCA2 的结果图 1(d)表明,1976—1980 年研究区南部普遍偏旱且历时较长,同时北部地区偏涝,在 1980—1985 年前后两地的旱涝情况倒置,呈现出明显的北旱南涝分布情况,1985 年以前发生较为明显且周期性显著,

在 1995—1998 年也有明显的南旱北涝现象发生,21 世纪之后差异性依旧存在,但不算显著。余江游等^[11]的研究结果指出水源区自 1996 年开始, SPEI 一直处于低值,存在水源区可调水量不足的情况,而受水区从 1998 年前后开始有一定的增加趋势。历史上在 1978—1983 年,全国连续 6 年大旱,其中长江中下游地区 1978 年的伏旱最为严重,水源区就可能受到影响。这都反映了该结论与前人研究成果及历史事件较为吻合^[26]。

2.2 水源区和受水区干旱遭遇研究

不同干旱程度情景发生频率统计的情况见图2,即统计流域各处发生轻度干旱频率的分布情况时,全域轻旱的发生频率分布在14.06%~16.07%,河南与河北的交界处发生的频率较其他地区较低,而河北北部以及河南的中南部整体发生干旱频率较高,水源区次之;总体看中旱发生的频率明显较轻旱低,大致在9.94%~12.73%,河北的北部以及北京发生中度以上干旱频率较高,达到11.5%以上,且中旱相对高频率的干旱面积,整体较轻旱有向河北南部蔓延的趋势,而河南河北交界处的中度以上干旱情况总体依旧较低,河南省内发生中旱的频率较轻旱的地区分布而言有所降低,水源区发生中度以上干旱的频率高于河南省而低于河北北部;重度干旱的计算结果表明,水源区的重度以上干旱较受水

区偏高,特别是水源区中游,重度以上干旱频率达到5%,河北北部以及京津等地,发生重度干旱频率相对偏低;而在极端干旱频率空间分布中(即 $SPEI < -2$)可以看出,受水区高值重心较重度干旱的分布向北偏移,大致位于河南河北交界处,自交界处大致向东北和西南呈梯形递减的分布趋势。水源区干旱遭遇的研究与汪琳等^[27]对汉江流域1961—2018年多尺度气象干旱时空演变特征进行的研究结果中不同类型干旱频率相近。对于受水区干旱遭遇的研究,卢洪健等^[28]根据Palmer干旱指数的分类等级,统计分析华北平原极端、严重、中等和轻微干旱发生频率空间分布格局研究结果,受水区不但干旱频发,而且不同干旱强度发生的频率存在很大的空间差异。综上,SPEI值得出的干旱频率空间分布情况能较好地反映水源区和受水区干旱遭遇情况。

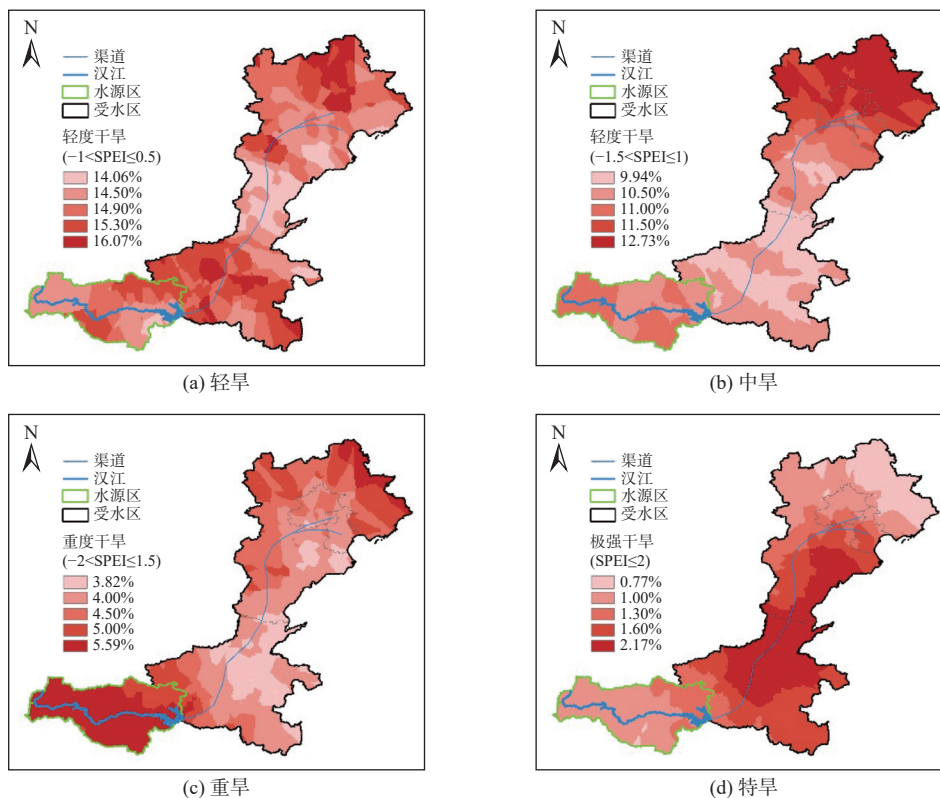


图2 南水北调中线水源区与受水区不同等级干旱频率空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of drought frequencies of different grades in water source and water-receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

根据图3可知,大部分情况下水源区与受水区的SPEI-12干旱联合概率分布均位于-2至1之间,且二者同时出现极大值或极小值的概率较小,大部分情况下还是处于此消彼长的状态。1961—2019年,水源区和受水区同时出现中度及以上气象干旱的时期共有4次,其中在1998年发生重度以上干旱1次。

具体特殊的概率 P 见表1,水源区发生中度、重度以及极端干旱的概率 P 分别为15.78%、6.61%和2.24%;受水区发生3种程度干旱的概率 P 分别是15.76%、6.6%和2.23%。两地同时发生中度、重度以及极端气象干旱的联合概率 P 分别为5.51%、0.81%和0.31%,对应的重现期为18.14 a、123.46 a以及322.58 a。

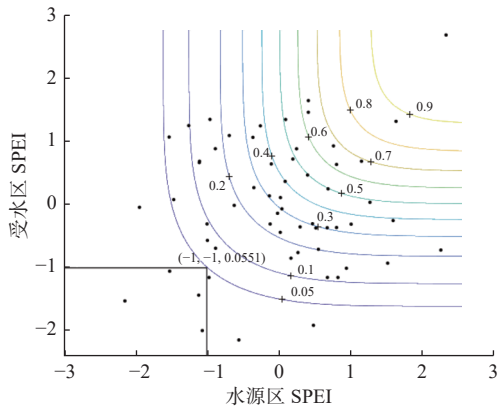


图 3 南水北调中线水源区与受水区的 SPEI 干旱联合概率分布

Fig. 3 Joint probability distribution of drought in water source area and water receiving area of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

表 1 南水北调中线水源区与受水区不同等级干旱联合概率分布统计

Tab. 1 Statistical table of joint probability distribution of drought of different grades in water source area and water receiving area of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

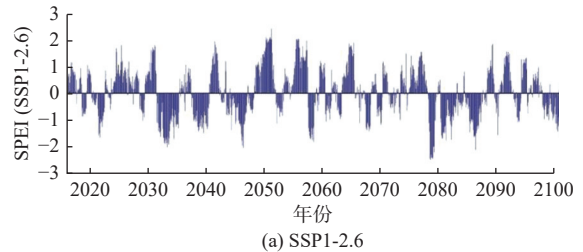
干旱程度	中旱	重旱	特旱
$P_{水源区}$	0.157 8	0.066 1	0.022 4
$P_{受水区}$	0.157 6	0.066 0	0.022 3
$P_{联合}$	0.055 1	0.013 3	0.003 1
重现期/a	18.149 0	123.456 8	322.580 6

2.3 南水北调中线水源区和受水区未来干旱预估

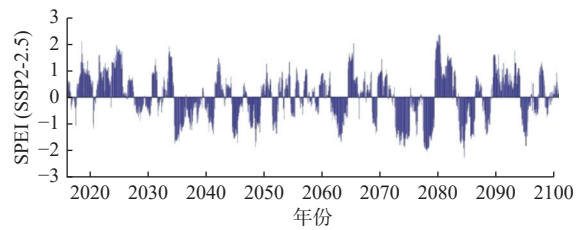
2.3.1 水源区 SPEI 年际变化预估

3 种未来辐射强迫情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下的水源区 SPEI-12 时间序列见图 4。图 4(a)表明在未来 SSP1-2.6 低辐射强迫情景下, SPEI-12 指数在 21 世纪前期的波动幅度较小,到 21 世纪中后期波动幅度相对较大,呈正负交替的分布状态。在 21 世纪 80 年代前后干旱等级达到极端干旱水平,区域可能面临着比较频繁的干旱风险问题,该地区在低辐射路径下具有由湿转干的趋势。图 4(b)表明在未来 SSP2-4.5 中辐射强迫情景下,总体 SPEI-12 在 21 世纪前期具有由湿转干的趋势,在 21 世纪中期波动幅度较小,但到 21 世纪后期波动幅度明显增大,呈正负交替的分布状态,旱涝趋势的规律性不明显。在此情景下,21 世纪 70 年代该地区可能将面临较为长期的干旱现象,干旱持续时间大致为 7~9 a,极端干旱现象发生概率大幅度增加,甚至在 80 年代后期会出现极端干旱水平。图 4(c)表明在未来 SSP5-8.5 高辐射强迫情景下,21 世纪 30 年代以前以正指数为主,21 世纪中期波动趋势波动幅度

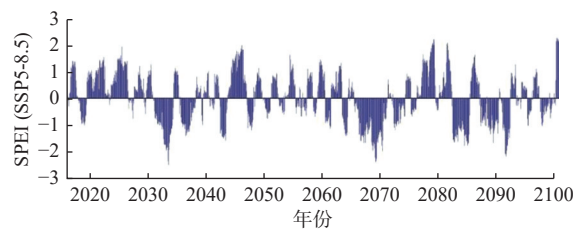
较小且与 SSP2-4.5 情景下类似,而自 21 世纪 60 年代中后期波动趋势明显增大,连续性极端旱涝事件频发。在此情景下,极端干旱发生频率很高,未来干旱风险加重。



(a) SSP1-2.6



(b) SSP2-4.5



(c) SSP5-8.5

图 4 未来不同气候情景下南水北调中线水源区的 SPEI-12 变化

Fig. 4 Meteorological drought changes under different climate scenarios in the future of the water source area of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

2.3.2 受水区 SPEI 年际变化预估

3 种未来辐射强迫情景(SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5)下的受水区 SPEI-12 时间序列见图 5。图 5(a)表明在未来 SSP1-2.6 低辐射强迫情景下, SPEI-12 指数在 21 世纪前期的波动幅度较小,到 21 世纪中后期波动幅度相对较大,总体呈由干转湿的趋势,在 21 世纪 30 年代、40 年代以非极端干旱为主,无极端干旱发生且干旱发生频率较低。图 5(b)表明在未来 SSP2-4.5 中辐射强迫情景下,受水区整体呈明显严重的干旱化趋势, SPEI-12 自 20 世纪 20 年代后以负指数为主,除个别年份外受水区以干旱为主的且极端干旱发生频率高且历时长,未来干旱风险严重。图 5(c)表明在未来 SSP5-8.5 高辐射强迫情景下,总体上受水区 SPEI 指数呈正负交替出现,21 世纪 70 年代至 80 年代波动幅度较大。在此情景下,极端干旱发生频率较低,仅在 21 世纪 70 年代发生 1 次。

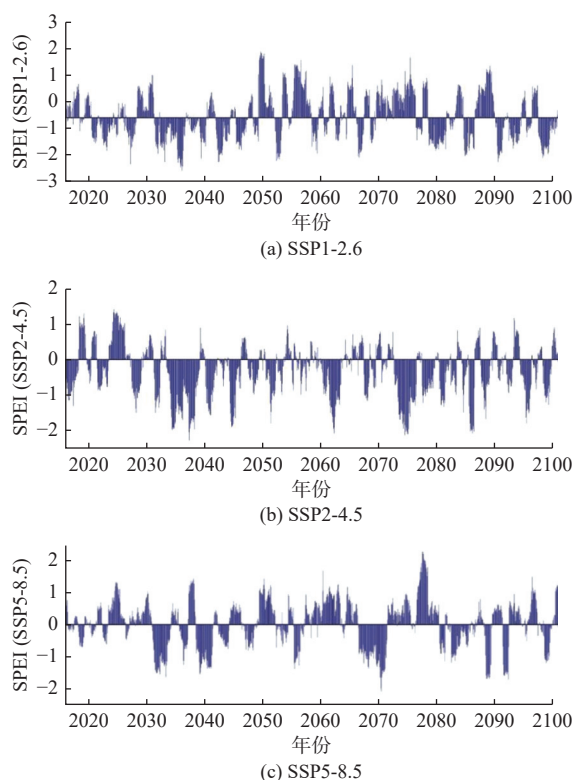


图5 未来不同气候情景下南水北调中线受水区的 SPEI-12 变化

Fig. 5 Meteorological drought changes under different climate scenarios in the future of the water receiving area of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

2.3.3 南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇

在不同气候情景等级下,水源区和受水区在未来一段时期内长历时干旱遭遇统计结果见表2。在 SSP1-2.6 低辐射强迫情景下,水源区干旱遭遇最长历时 13 个月,受水区共发生 6 次超 6 个月的长历时干旱,最长历时 12 个月。在 SSP2-4.5 情景下,水源区长历时干旱遭遇较受水区严重,超 10 个月的长历时干旱共发生 7 次,最长历时达 22 个月,而受水区最长历时干旱遭遇为 15 个月,在此情景下 2034—2036 年以及 2044—2045 年,水源区和受水区具有同时面临严重干旱的风险。在 SSP5-8.5 高辐射强迫情景下从干旱历时角度看水源区干旱仍较受水区严重,在此情景下 2032—2033 年、2068—2070 年以及 2091 年,水源区和受水区也具有同时面临严重干旱的风险。综合分析水源区和受水区主要在 21 世纪 30、40、60 年代及 70 年代同时发生长历时干旱遭遇。与不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究^[29]结果相近,说明在基于 SSP1-2.6、SSP2-4.5、SSP5-8.5 这 3 种辐射强迫情景下对未来水源区和受水区干旱历时进行的预估具有一定的合理性。

表 2 南水北调中线水源区和受水区未来不同情景下干旱遭遇

Tab. 2 Drought encounters in different future scenarios in water source areas and water receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

研究区域	SSP1-2.6		SSP2-4.5		SSP5-8.5	
	时间	历时/月	时间	历时/月	时间	历时/月
水源区	2032年9月—2033年9月	13	2034年8月—2036年3月	20	2032年11月—2033年10月	12
	2038年7月—2039年2月	8	2044年8月—2045年7月	12	2036年6月—2037年4月	11
	2057年11月—2058年5月	7	2062年8月—2063年7月	12	2042年8月—2043年6月	11
	2067年8月—2068年5月	10	2072年9月—2075年3月	19	2068年8月—2070年4月	21
	2078年9月—2079年3月	7	2077年7月—2079年4月	22	2083年1月—2084年3月	15
	2086年4月—2086年7月	4	2083年10月—2085年1月	16	2085年1月—2085年5月	5
受水区			2094年9月—2095年7月	11	2091年9月—2091年11月	3
	2035年7月—2036年6月	12	2034年8月—2034年3月	8	2032年10月—2033年6月	9
	2042年8月—2043年4月	9	2035年4月—2036年6月	15	2040年6月—2041年5月	12
	2052年8月—2053年4月	9	2037年8月—2037年11月	4	2055年8月—2056年2月	7
	2066年7月—2067年2月	8	2040年11月—2041年4月	6	2069年8月—2070年2月	7
	2084年10月—2085年3月	6	2044年11月—2045年2月	4	2088年8月—2089年4月	9
	2090年8月—2091年5月	10	2074年11月—2075年2月	4	2091年9月—2091年12月	4
			2085年11月—2086年6月	8		

3 结论

选取南水北调中线水源区和受水区作为研究区,利用 SPEI 干旱指数、EOF、PCA 和 Copula 函数方法,揭示了 1961—2019 年区域干旱时空演变规律,并基于 CMIP6 气候数据对未来水源区和受水区干旱遭遇预估,结论如下。

水源区和受水区在第一空间模态下全区 SPEI-12 呈现出较为相近的分布趋势,其中在河南境内此种趋势最为明显,第二空间模态下呈现出南北分布明显的差异性,不同地区同时存在旱涝交替出现的情况。水源区和受水区干旱事件遭遇频繁,1965—1971 年和 1987—2005 年均出现较为严重的干旱遭遇事件,同时在 1970 年代中后期至 1985 年前后,出现了长期明显的区域差异性。

南水北调中线水源区和受水区轻旱的发生频率分布在 14.06% ~ 16.07%,中旱发生频率大致在 9.94% ~ 12.73%,水源区发生重度干旱的频率较受水区高,而受水区河北北部发生中旱的频率以及河南全省发生特旱的频率都要高于水源区。水源区和受水区中旱和重旱的联合重现期分别约为 18 年一遇(5.51%)和 123 年一遇(0.81%),两地同时出现极端干旱的重现期约为 323 年一遇(0.31%)。

不同气候情景下以年尺度 SPEI 指数对南水北调水源区和受水区的未来干旱事件预估表明,SSP1-2.6 情景下未来水源区和受水区干旱遭遇次数相对较少,而在 SSP2-4.5 情景下的 2034—2036 年、2044—2045 年以及在 SSP5-8.5 情景下的 2032—2033 年、2068—2070 年,水源区和受水区可能发生较严重的干旱遭遇事件。多模式多情景表明,未来南水北调水源区和受水区干旱遭遇风险可能在增加,因此需要加强南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇问题的研究,以期更好地发挥工程效益。

参考文献(References):

- [1] 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 W,LEI J,LI S F,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)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.06.016.
- [2] 左其亭,郭佳航,李倩文,等.借鉴南水北调工程经验构建国家水网理论体系[J].*中国水利*,2021,11:22-24,21.(ZUO Q T,GUO J H,LI Q W,et al.Drawing on experience from the South-to-North Water Diversion Project and establishing a theoretical system of national network of water resources[J].*China Water Resources*,2021,11:22-24,21.(in Chinese))
- [3] 徐宗学,庞博,冷罗生.河湖水系连通工程与国家水网建设研究[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(4):757-764.(XU Z X,PANG B,LENG L S.Research on the construction of river-lake system connectivity and national water network[J].*South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*,2022,20(4):757-764.(in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0077.
- [4] ALI A,HAMID M,MEHMET C D.A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: Elucidating the role of temperature[J].*Journal of Hydrology*,2017,553:785-797. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.08.047.
- [5] ALI D M,ALI UNAL S,ERCAN K,et al.Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: Case study of Ankara, Turkey[J].*Hydrological sciences journal*,2020,65(1/4):254-268. DOI: 10.1080/02626667.2019.1691218.
- [6] 袁星,马凤,李华,等.全球变化背景下多尺度干旱过程及预测研究进展[J].*大气科学学报*,2020,43(1):225-237.(YUAN X,MA F,LI H,et al.A review on multi-scale drought processes and prediction under global change[J].*Transactions of Atmospheric Sciences*,2020,43(1):225-237.(in Chinese)) DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191105005.
- [7] 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 Y P,LI Y H.Advances in adaptability of meteorological drought indices in China[J].*Journal of Arid Meteorology*,2017,35(5):709-723.(in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0709.
- [8] 石卫,雷静,马立亚,等.基于SPEI的南水北调中线水源区干旱时空特征[J].*人民长江*,2019,50(7):92-97,103.(SHI W,LEI J,MA L Y,et al.Spatio-temporal drought characteristics in water source area of the middle route Project of the South-North Water Diversion Project based on SPEI[J].*Yangtze River*,2019,50(7):92-97,103.(in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.07.015.

- [9] 郑金丽,严子奇,周祖昊,等. 基于综合干旱指数的鄱阳湖流域干旱时空分异特征研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(8): 91-100. (ZHENG J L, YAN Z Q, ZHOU Z H, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics of drought in Poyang Lake basin based on comprehensive drought index[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(8): 91-100. (in Chinese)) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.009](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.08.009).
- [10] 刘孟凯,杨佳,黄明海. 南水北调中线总干渠沿线地区冬季气温特征分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(7): 93-99. (LIU M K, YANG J, HUANG M H. Analysis on winter temperature characteristics along main channel of middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(7): 93-99. (in Chinese)) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.07.016](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.07.016).
- [11] 余江游,夏军,余敦先,等. 南水北调中线工程水源区与海河受水区干旱遭遇研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(1): 63-68, 194. (YU J Y, XIA J, SHE D X, et al. The analysis of encounter probability of drought between the water source area and the Haihe River water receiving area in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project in China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(1): 63-68, 194. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180010](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.20180010).
- [12] 王磊,包庆,何编. CMIP6高分辨率模式比较计划(HighResMIP)概况与评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 498-502. (WANG L, BAO Q, HE B. Short commentary on CMIP6 high resolution model intercomparison project (HighResMIP)[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 15(5): 498-502. (in Chinese)) DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2019.077](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2019.077).
- [13] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌. CMIP6情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 519-525. (ZHANG L X, CHEN X L, XIN X G. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP)[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 15(5): 519-525. (in Chinese)) DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2019.082](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2019.082).
- [14] 余志明,邹清水,张雄杰. 基于EOF分析方法的闽江下游高潮位时空变化特征分析[J]. *水利科技*, 2021(3): 20-24. (YU Z M, ZOU Q S, ZHANG X J. Analysis of temporal and spatial variation characteristics of high tide level in the lower reaches of the Min River based on EOF analysis method[J]. *Hydraulic Science and Technology*, 2021(3): 20-24. (in Chinese))
- [15] 李勇,刘秀明,王世杰,等. 1961—2017年贵州降水时空变化特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 145-150. (LI Y, LIU X M, WANG S J, et al. Temporal and spatial distribution of precipitation in Guizhou Province from 1961 to 2017[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 145-150. (in Chinese)) DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.022](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2019.06.022).
- [16] 左其亭,王妍,陶洁,等. 南水北调中线水源区水文特征分析及其水资源适应性利用的思考[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 42-49. (ZUO Q T, WANG Y, TAO J, et al. Hydrological characteristics and adaptive utilization of water resources in water source area of the middle route of South-to-North Water Diversion Project[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 42-49. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0095](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0095).
- [17] 胡一阳,徐影,李金建,等. CMIP6不同分辨率全球气候模式对中国降水模拟能力评估[J/OL]. *气候变化研究进展*, 2021: 1-19. (HU Y Y, XU Y, LI J J, et al. Evaluation on the performance of CMIP6 global climate models with different horizontal resolution in simulating the precipitation over China[J/OL]. *Advances in Climate Change Research*, 2021: 1-19. (in Chinese))
- [18] 刘昌新,张海玲,吴静. 基于SSPs情景的中国极端降水影响评估[J]. *环境保护*, 2021, 49(8): 29-34. (LIU C X, ZHANG H L, WU J. Impact assessment of extreme precipitation in China under SSPs scenario[J]. *Environmental Protection*, 2021, 49(8): 29-34. (in Chinese)) DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.08.006](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2021.08.006).
- [19] WANG T, TU X, SINGH V P, et al. Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 126091. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2021.126091](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126091).
- [20] 李小涵,潘兴瑶,杨默远,等. 基于多尺度SPEI指数的北京市干旱时空特征分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(11): 50-63. (LI X H, PAN X Y,

- YANG M Y, et al. Spatial and temporal characteristics of drought in Beijing based on multiple scale SPEI index[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(11): 50-63. (in Chinese) DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.11.006](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.11.006).
- [21] 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 W G, HUANG Y, XING W Q, 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)) DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.002](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.002).
- [22] WANG F, WANG Z, YANG H, et al. A new copula-based standardized precipitation evapotranspiration streamflowindex for drought monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124793. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.124793](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124793).
- [23] ZHAO Z Y, H W. 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. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.140328](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140328).
- [24] YU, LI L, JIN Q W, et al. Coupling the two-level programming and Copula for optimizing energy-water nexus system management: A case study of Henan Province[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124832. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2020.124832](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124832).
- [25] HAN C, LIU S G, GUO Y P, et al. Copula-based analysis of flood peak level and duration: Two case studies in Taihu basin, China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2018, 23(6): 05018009. DOI: [1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001661](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001661).
- [26] 赵英, 陈华, 杨家伟, 等. 基于SWAP和SRI的汉江流域旱涝急转时空特征分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(4): 94-99. (ZHAO Y, CHEN H, YANG J W, et al. Spatio-temporal variations of drought-flood abrupt alternation events in Hanjiang River basin based on SWAP and SRI[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(4): 94-99. (in Chinese)) DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.015](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2020.04.015).
- [27] 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 L, SHU Z K, WANG G Q, et al. Spatial and temporal variation of multi-scale meteorological drought in the Hanjiang River basin from 1961 to 2018[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1649-1658. (in Chinese))
- [28] 卢洪健, 莫兴国, 胡实. 华北平原1960—2009年气象干旱的时空变化特征[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(6): 72-82. (LU H J, MO X G, HU S. Spatio-temporal variation characteristics of meteorological droughts in north China plain during 1960-2009[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(6): 72-82. (in Chinese)) DOI: [10.13577/j.jnd.2012.0611](https://doi.org/10.13577/j.jnd.2012.0611).
- [29] 张奇谋, 陈思, 陈松生, 等. 不同RCP情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6): 1470-1480. (ZHANG Q M, CHEN S, CHEN S S, et al. Research on projection of meteorological droughts in the Hanjiang River basin under different RCPs scenarios[J]. *Resources and Environment of Yangtze Basin*, 2019, 28(6): 1470-1480. (in Chinese))

Risk assessment of drought in the source and receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project

ZHANG Lu^{1,2,3}, LU Yijie¹, ZHANG Zengxin¹, HU Xin¹

(1. College of Hydrology and Water Sources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Water Affairs Big Data and Water Ecology, Shenzhen 518001, China; 3. Shenzhen Water Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: The South-to-North Water Transfer Project is of great strategic significance for improving the national water network and optimizing the overall pattern of water resource allocation. The drought situation and water quantity changes in the source area of the South-to-North Water Transfer Project affect the stability of the water transfer project and are of great significance to the industrial, agricultural, and residential water use and other aspects of the cities along the route. In recent years, there has been more research on extreme drought monitoring,

and a variety of meteorological hydrological drought index models have been widely used, such as the standardized precipitation evapotranspiration index, palmer drought index, standardized precipitation index, and so on. The standardized precipitation evapotranspiration index model is superior to the other two drought index models because it takes into account the evapotranspiration factor. Although some research has been conducted in recent years on climate change in the water source or water-receiving areas of the South-to-North Water Transfer Project, few studies have explored the drought encounters in water source and water-receiving areas in the context of future climate change.

By integrating a large number of meteorological observation data and the latest Coupled model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) climate model data, using standardized precipitation evapotranspiration index, empirical orthogonal function analysis, Copula function, and other methods, the spatial and temporal distribution of drought in the water source area and the water receiving area of the South-to-North Water Transfer Project in the historical period was calculated. The drought encounter problem in the water source area under different climate scenarios in the future was estimated using the CMIP6 meteorological dataset as the driving data and then provided a theoretical basis for water resources planning and management. The empirical orthogonal function was performed using the calculation results of the SPEI and the copula function for the joint probability distribution of drought between the water source and the water receiving area. The mean CMIP6 multi-mode data is used as the input data for future SPEI calculations, and the drought comprehensive evaluation is carried out on the water source area of the South-to-North Water Transfer Project.

Results showed that drought events in water-source areas and water-receiving areas were frequent, with more serious drought encounters in 1965-1971 and 1987-2005, and long-term obvious regional differences from the mid-to-late 1970s to around 1985. The combined recurrence periods of drought and severe drought in water-source areas and water-receiving areas were about once in 18 years (5.51%) and once in 123 years (0.81%), respectively, and the recurrence period of extreme drought in both places was about once in 323 years (0.31%).

The annual SPEI estimates of future drought events in different climatic scenarios indicate that the number of future drought occurrences under the SSP1-2.6 scenario is relatively small, while the more severe drought encounters in the water source and water-receiving areas may occur in 2034-2036 and 2044-2045 under the SSP2-4.5 scenario and in 2032-2033 and 2068-2070 under the SSP5-8.5 scenario. Multi-modality and multi-scenarios indicate that the risk of drought in the water source area and the water-receiving area of the South-to-North Water Transfer Project may increase in the future. To better play the benefits of the project, it is necessary to strengthen the research on the drought encounter problem in the water source area and the water-receiving area of the middle line of the South-to-North Water Transfer Project.

Key words: middle route of South-to-North Water Transfer Project; water source area; water-receiving; climate change; drought; drought encounter; SPEI