

重庆市伏秋旱时空演变特征及其影响因素分析

刘波¹ 刘玉冰¹ 黎春蕾² 王文鹏¹ 蒋佳怡¹ 吴福婷¹ 陈敏³¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 重庆市水文监测总站, 重庆 401120;

3. 福建省水利水电勘测设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

【摘要】: 伏秋旱是指发生在夏季或秋季的干旱现象, 在重庆市较为多发且造成的灾害损失较大。基于重庆市 34 个国家级气象站 1965~2016 年 7~9 月逐日降水资料, 采用标准化降水指数、降水量距平百分率指标, 分析重庆市伏秋旱的时空演变特征。利用 Spearman 等级相关系数法与逐步回归方法筛选与 SPI 序列相关性较强的气候因子。结果表明: 7~9 月伏秋连旱的频率为 7.7%; 7、8 月伏旱同步的比例占 15.4%; 8、9 月干旱同步的比例占 13.5%, 重庆市伏秋旱情况年际变化大。20 世纪 60~70 年代, 伏秋旱情况较严重; 自 20 世纪 80 年代中后期起, 旱涝交替出现; 21 世纪严重伏秋旱频发。从 20 世纪 60 年代以来, 全市年平均总早旬数从 3.3 旬增加至 4.1 旬, 连旱旬数从 2 旬增加至 2.5 旬。在 1965~2016 年, 重庆市西部多年平均总早旬数为 3.6 旬, 连旱旬数为 2.2 旬, 相对较少。2006 年特大旱灾之后, 东南部和东北部伏秋旱程度轻, 中部和西部程度严重。重庆市伏秋旱事件与环流、海温异常存在密切关系, 主要影响因子包括: 北半球副高脊线位置指数、北半球副高北界位置指数、NINO4 区海表温度距平指数、黑潮区海温指数等。重庆市 7 月 SPI 与同年 1 月北半球副高脊线位置指数、9 月 SPI 与同年 4 月 NINO4 区海表温度距平指数均呈负相关关系。研究成果可为保障重庆市水安全、实现水资源科学配置提供理论基础。

【关键词】: 伏秋旱 时空演变特征 影响因素 重庆市

【中图分类号】: P426.616 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2022)05-1077-09

在全球变化背景下, 世界各地自然灾害事件和极端气候事件频发, 未来气候事件导制的极端天气气候事件的风险大幅增加^[1]。旱灾是影响我国范围最广、持续时间最长、造成损失最重的自然灾害之一^[2]。2012~2016 年间, 旱灾导致我国直接经济损失高达 2889.7 亿元, 约占所有气象灾害直接经济损失总和的 15.6%^[3]。因此, 对干旱的研究是目前气候水文学探讨的热点。

干旱研究中常用的气象干旱指标有: 多时间尺度的降水量距平百分率(PA), 月以上时间尺度的相对湿度指数(MI)、标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)和帕默尔干旱指数(PDSI), 以及日尺度的气象干旱综合指数(CI)^[4]等。已有研究表明, SPI 和 SPEI 在青海省^[5]、滇西南地区^[6]、重庆地区^[7]的干旱特征分析中适用性较好, PA^[8]、MI^[9]、PDSI^[10]和 CI^[11]也在我国西部和西南地区干旱研究中得到了广泛的应用。干旱事件关联性因子在不同区域的差异较大, 目前主要通过相关分析方法提取。如秦岭—淮河流域各分区降水与 ENSO 关系密切^[12]; 我国西南地区秋季干旱的影响因素是西太平洋副热带高压和热带印度洋—太平洋海表

作者简介: 刘波(1980~), 女, 副教授, 主要研究方向为水资源评价与管理. E-mail: Bobo13705@163.com; 王文鹏 E-mail: wangwenpeng@hhu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3900601); 中央高校基本科研业务费项目(B220201028)

温度异常^[13];汉江流域的夏季降水与热带北大西洋海温、西太平洋副高位置有关,秋季降水受热带中东太平洋海温、印缅槽及巴尔喀什湖低槽影响^[14]。

重庆市属亚热带季风性湿润气候,年平均降水量在 1000~1350mm 之间,多集中在 5~9 月,地形地貌多样、大气环流特征复杂,天气气候多变,干旱频发且危害严重^[15]。伏秋旱指在 7~9 月夏季或秋季发生的干旱,由于伏秋季节气温较高,如果降水偏少,无法满足作物生长需水,更容易导致旱灾。重庆市 6 月下旬至 9 月上旬(伏秋季)干旱发生频率最高,长江、嘉陵江、涪江等沿江地区伏旱发生频率多在 70%以上,东北部地区秋旱发生频率在 40%以上^[15]。2001 年 6 月下旬,重庆市出现长达 60~80d 的连晴高温天气,普遍遭受了特大伏旱灾害,造成直接经济损失 33.59 亿元^[16]。在 2006 年的百年一遇的特大旱灾中,重庆市因灾直接经济总损失达 80.4 亿元,其中农业经济损失达 59.5 亿元^[17]。

可见,伏秋旱往往发生迅速且跨月份持续,发生频率高、影响大,更适宜采用旬或日的时间尺度进行研究。本文选择 SPI、PA 干旱指标,从月尺度、旬尺度来描述伏秋旱时间、空间演变特征,借助 Spearman 等级相关系数法与逐步回归方法探究气候因子对伏秋旱的影响,以深化重庆市伏秋旱演变规律的认识,为重庆市防灾抗旱提供理论依据和决策参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究数据

根据重庆市区域划分将重庆市分为东南部、东北部、中部、西部四个区域。重庆市有国家级气象站 34 个(图 1)。1965~2016 年逐日降水资料源于中国气象科学数据共享服务网(<https://data.cma.cn/>)。本文采用 1964~2016 年逐月 114 项气候因子资料进行伏秋旱前期影响因素分析,其中包括 88 项环流因子,26 项海温因子。环流因子包括副高强度指数、副高脊线位置指数、极涡中心位置指数、极涡中心强度指数、北极涛动指数等。海温因子包括暖池面积指数、暖池强度指数、黑潮区海温指数、ENSO 指数等。

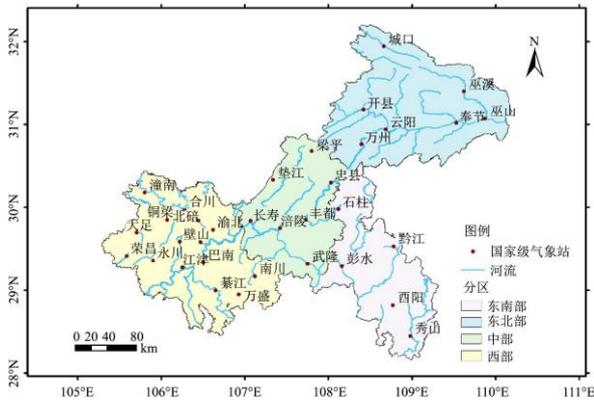


图 1 重庆市气象站分布图

1.2 研究方法

根据《气象干旱等级 GB/T20481-2017》国家标准的定义,标准化降水指数(SPI)是用来表征某时段降水量出现概率多少的指标,被广泛应用于月及以上尺度干旱监测和评估^[7]。降水量距平百分率(PA)用于表示某时段内的降水同平均状态的偏离程度^[18]。在本文中,利用 SPI 评估 7~9 月总体干旱状况,采用 PA 分析旬尺度干旱过程。当旬尺度 PA 小于等于-40%时,判定该旬发生了干旱^[4]。总旱旬数定义为 7~9 月 PA 小于等于-40%的总旬数,连旱旬数定义为 7~9 月 PA 连续小于等于-40%的最大旬数,干旱等

级划分如表 1 所示。

表 1 基于 SPI 指数和旬尺度 PA 的干旱等级划分

等级	类型	SPI	总旱旬数	连旱旬数
1	无旱	$-0.5 < \text{SPI}$	< 2	≤ 1
2	轻旱	$-1.0 < \text{SPI} \leq -0.5$	< 3	≤ 2
3	中旱	$-1.5 < \text{SPI} \leq -1.0$	< 4	≤ 3
4	重旱	$-2.0 < \text{SPI} \leq -1.5$	< 5	≤ 4
5	特旱	$\text{SPI} \leq -2.0$	≥ 5	> 4

对于长时间序列的趋势分析，Mann-Kendall 趋势检验法是世界气象组织推荐并被广泛使用的非参数检验方法。为了减少因自相关引起的趋势误判，本文采用方差校正预置白方法 (Variance Correction Prewhitening Method, VCPW-MK)，考虑气候水文变量的时序相依性，对序列方差及斜率方差进行校正，更加准确地对数据序列进行 MK 趋势检验^[19]。

干旱影响因素的关联性分析，基于计算的 SPI 序列，应用 Spearman 等级相关系数法与逐步回归方法，从 88 个环流因子指数和 26 个海温因子指数中筛选与 SPI 序列相关系数绝对值大于 0.3、置信度为 99% 的气候因子，并应用负相关系数和剩余标准差进行回归效果检验。本文筛选的气候因子均为前期因子，时段为研究月份之前的 2 到 12 个月。

2 重庆市伏秋旱时空演变特征

2.1 时间演变特征

基于重庆市 1965~2016 年 7~9 月降水序列，计算全市 SPI，采用 VCPW-MK 趋势检验，发现重庆市 7 月和 9 月 SPI 呈不显著的下降趋势，统计值 Z 分别为 -0.75 和 -1.52；8 月 SPI 呈不显著的上升趋势，统计值 Z 为 0.10。SPI 波动周期为 14 年。计算各区域逐月平均降水量，得到各区域夏秋季 SPI，分析伏秋旱时间演变特征 (图 2)。

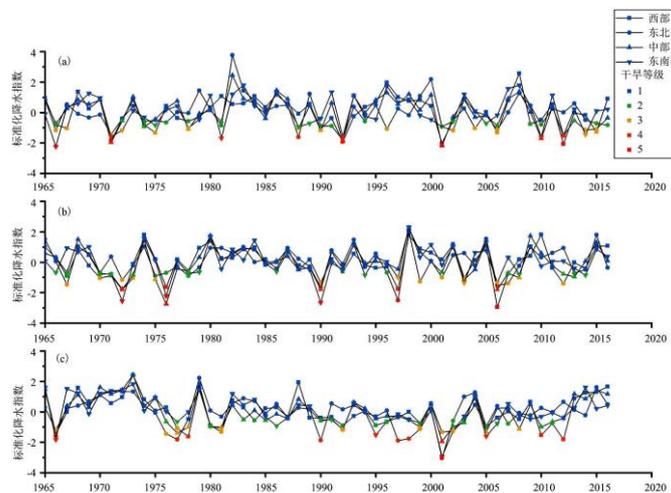


图 2 1965~2016 年(a)7 月、(b)8 月、(c)9 月重庆市各区域 SPI 变化图

重庆市 7~9 月均发生干旱的频率为 7.7%;7、8 月伏旱同步的比例占 15.4%;8、9 月干旱同步的比例占 13.5%,略低于 7、8 月。1965~2016 年伏秋旱情况年际变化大(图 2)。7 月,20 世纪 60 年代总体伏旱情况不严重;90 年代初发生严重伏旱(如 1992 年),中后期伏旱得到缓解;21 世纪后,干旱程度增大、频率升高。在 1965~2016 年,除东南部以外,其他区域 7 月 SPI 均不显著减少(表 2)。

8 月,各区域与全市 SPI 的相关系数分别为 0.89、0.84、0.92 和 0.84,SPI 区域差异较 7 月小。历年 9 月与 7、8 月的趋势有较大差别。在 1965~1975 年期间,重庆市降水充沛,SPI 的区域差异小。1976、1977 年后降水明显减少,SPI 的区域差异变大。20 世纪 80 年代中后期,与 7、8 月相似,9 月干旱程度较轻。在 90 年代,9 月发生干旱的频率高于 7、8 月。21 世纪起,9 月干旱发生频率升高。东南部 9 月 SPI 显著减少,干旱加剧(表 2)。

2.2 空间演变特征

计算重庆市 34 个国家级气象站 1965~2016 年 7~9 月逐旬的 PA,得出 34 个区县的干旱指标,即 7~9 月连旱旬数和 7~9 月总旱旬数。2006 年,重庆发生了百年一遇的特大旱灾,这是自 1891 年重庆有气象资料记录以来最严重的一次旱灾^[20],因此本文单独讨论了 2006 年特大旱灾之后的伏秋旱情况。基于 VCPW-MK 趋势检验,分别计算 1965~2016 年和 2007~2016 年的干旱指标的多年均值和趋势检验统计量,分析伏秋旱的空间演变特征。

表 2 1965~2016 年 7~9 月重庆市各区域 SPI 趋势检验统计量

趋势检验统计量	西部	东北部	中部	东南部
7 月	-0.66	-0.31	-1.37	0.07
8 月	0.25	-0.10	0.17	0.43
9 月	-1.60	-1.37	-1.43	-2.20**

注:**表示达到 0.05 显著性水平。

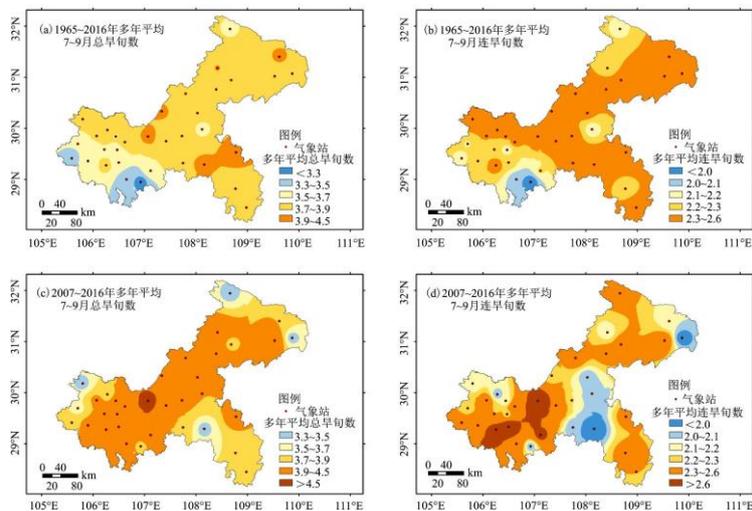


图3 1965~2016年及2007~2016年重庆市伏秋季多年平均总旱旬数(a)(c)与连旱旬数(b)(d)的空间分布

1965~2016年期间,西部的多年平均总旱旬数为3.6旬,连旱旬数为2.2旬,相对较少(图3a、图3b)。2006年特大旱灾之后的年平均总旱旬数和连旱旬数,西部分别为4.0旬和2.6旬,中部分别为4.1旬和2.3旬,相对较多(图3c、图3d)。东南部和东北部的平均总旱旬数分别为3.8旬和3.9旬,连旱旬数为2.2旬和2.3旬。2007~2016年期间,伏秋旱总体呈现东南部和东北部程度轻,西部和中部程度严重的现象,其主要原因是:(1)东南部位于四川盆地的盆周山区外缘,地处夏季风的迎风坡,易形成地形雨;(2)东北部山高坡陡,多地形雨,并受到北方冷空气的侵袭,冷暖空气交汇形成锋面雨^[21]。

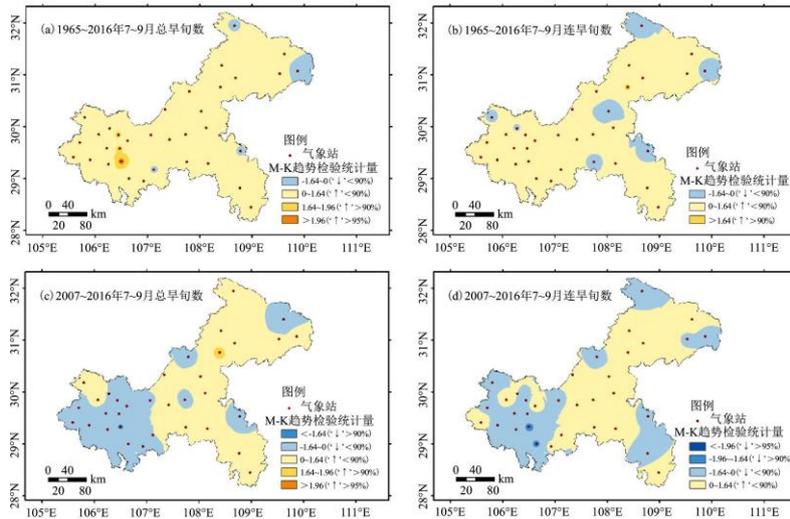


图4 1965~2016年及2007~2016年重庆市伏秋季总旱旬数(a)(c)与连旱旬数(b)(d)演变趋势的空间分布

重庆市1965~2016年7~9月的总旱旬数和连旱旬数总体呈不显著增加的趋势(图4),这与SPI指数分析的结论一致。从20世纪60年代到21世纪,全市年平均总旱旬数从3.3旬上升到4.1旬,连旱旬数从2旬增加至2.5旬。在2007~2016年,重庆市西部7~9月的总旱旬数和连旱旬数整体在减少,但没有通过信度90%的显著性检验。2006年特大旱灾之后,西部区域的总旱旬数和连旱旬数均较大并有减少的趋势(图3)。

3 重庆市伏秋旱影响因素

3.1 典型环流因子

影响重庆市降水的因素多且复杂,降水的产生并不是单个因子作用的结果,而是多个因子共同作用的结果^[22]。就大尺度而言,环流调整、海温异常均会给重庆市降水造成影响。重庆市伏秋旱受北半球副高脊线位置、北半球副高北界位置、太平洋区极涡强度等影响(表3)。已有研究^[23]表明重庆市发生伏秋旱的成因主要是大气环流异常,主要天气系统为西太平洋副热带高压和南亚高压。重庆处于北纬 30° 附近,受副高控制,若西太平洋副热带高压影响时间提前,位置偏西,很有可能会延伸到内陆重庆。若南亚高压强度非常强,则会使重庆处于下沉气流当中,形成夏季高温少雨的特点。此外,南亚高压与西太平洋副热带高压有相互作用,这促进西太平洋副热带高压向重庆延伸,导致南方的暖湿气流向北输送时受到阻碍,水汽输送异常少,使重庆市伏秋旱异常严重。

与副高强度、面积、北界位置、西伸脊点指数相比,副高脊线位置指数对中国夏季气候影响最大,降水的分布与脊线南北位置的变化关系密切^[24]。赵俊虎等^[25]发现,副高脊线位置偏北是长江流域汛期干旱以及伏秋连旱的重要原因。北半球副高脊线位置

指数定义为：500hPa 高度场，10° N~60° N、5° E~360° E 区域内，逐条经线上副热带高压中心(即纬向风 $u=0$ 、 $\partial u/\partial y > 0$) 位置所在纬度的平均值。本文以重庆市 1965~2016 年 7 月 SPI 序列与 1 月北半球副高脊线位置指数为例进行分析。

表 3 重庆市 7~9 月 SPI 的相关环流因子和海温因子

月份	环流因子	海温因子
7 月	1 月北半球副高脊线位置指数	上年 7 月 NINOA 区海表温度距平指数
	上年 9 月北半球副高脊线位置指数	
	上年 9 月北半球副高北界位置指数	
8 月	上年 9 月东太平洋副高脊线位置指数	
	上年 9 月太平洋区极涡强度指数	
	上年 11 月北半球极涡中心纬向位置指数	
9 月	上年 9 月太平洋区极涡面积指数	3 月 NINOA 区海表温度距平指数
	2 月欧亚纬向环流指数	4 月 NINOA 区海表温度距平指数
	2 月欧亚经向环流指数	3 月黑潮区海温指数

当 1 月北半球副高脊线位置指数较大时，该年 7 月 SPI 则较小，易发生伏旱，二者呈负相关关系，相关系数为-0.41(图 5a)。20 世纪 90 年代末，重庆市 7 月 SPI 较大，相应的环流指数较小。而 21 世纪伏旱频发，环流指数较大。北半球副高脊线位置偏北，北半球中高纬呈两脊一槽环流型发展，重庆位于四川盆地东部地区，受深厚的高压系统控制^[26]。这样的环流形势利于西风槽和高原涡的发展^[27]，从而使得重庆夏季降水偏少，尤其是被副高主体控制时，容易发生伏旱。

3.2 典型海温因子

NINOA 区海表温度距平、黑潮区海温与重庆市伏秋旱关系密切(表 3)。已有研究表明，海温异常是影响我国秋季气候异常的主要外强迫因子，其中热带太平洋和印度洋海温异常是影响东亚大气环流的重要因素^[28]。由表 3 可知，与 7 月、8 月相比，9 月 SPI 序列的相关海温因子数量最多，海温对 9 月降水的影响较大。NINOA 区海表温度距平指数定义为：25° N~35° N、130° E~150° E 区域内，海表温度距平的区域平均值。

重庆市 9 月 SPI 与 4 月 NINOA 区海表温度距平指数呈负相关关系，相关系数为-0.31(图 5b)。20 世纪 60 年代末至 70 年代初，9 月 SPI 较大，相应的海温指数较小。21 世纪初秋旱频发，9 月 SPI 较小，海温指数较大。NINOA 区位于西太平洋，西太平洋地区海温偏高，暖池上空对流活动增强，导致西太平洋热源增强，而在中、东太平洋对流减弱，环流距平场为异常强的下沉运动^[29]。Walker 环流和局地 Hadley 环流得到增强，使得副高系统呈现异常西伸、脊线偏北、强度偏强的特点，在位于 25° N~35° N 的重庆出现下沉运动，因持续受副高系统控制，重庆易形成罕见的极端伏秋旱天气^[30]。

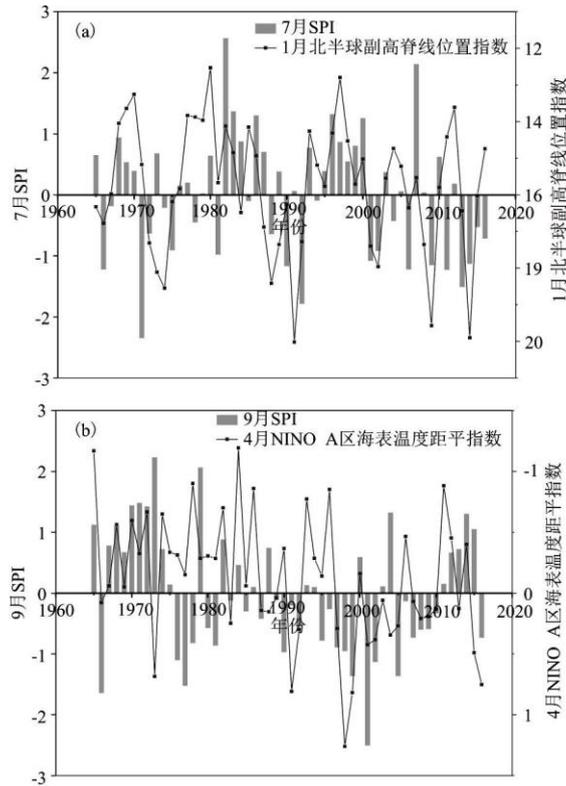


图 5 1965~2016 年重庆市 7 月 SPI 与 1 月北半球副高脊线位置指数 (a)、
9 月 SPI 与 4 月 NINO A 区海表温度距平指数 (b) 变化图

4 结论与讨论

本文对重庆市伏秋旱的时空演变特征以及典型影响因子进行分析，主要得出以下结论。

(1) 重庆市伏秋旱情况年际变化大。重庆市 7~9 月均发生干旱的频率为 7.7%;7、8 月伏旱同步的比例占 15.4%;8、9 月干旱同步的比例占 13.5%。20 世纪 60~70 年代，伏秋旱情况较严重；自 20 世纪 80 年代中后期起，旱涝交替出现；21 世纪严重伏秋旱频发。从 20 世纪 60 年代以来，全市年平均总旱旬数从 3.3 旬增加至 4.1 旬，连旱旬数从 2 旬增加至 2.5 旬。

(2) 重庆市区域降水分布不均衡。在 1965~2016 年，西部多年年平均总旱旬数为 3.6 旬，连旱旬数为 2.2 旬，相对较少。2006 年特大旱灾之后，东南部和东北部的年平均总旱旬数分别为 3.8 旬和 3.9 旬，伏秋旱程度轻；中部和西部分别为 4.1 旬和 4.0 旬，程度严重。

(3) 重庆市伏秋旱事件与环流、海温异常存在密切关系，主要影响因子包括：北半球副高脊线位置指数、北半球副高北界位置指数、NINO A 区海表温度距平指数、黑潮区海温指数等。重庆市 7 月 SPI 与同年 1 月北半球副高脊线位置指数呈负相关关系，相关系数为-0.41;重庆市 9 月 SPI 与同年 4 月 NINO A 区海表温度距平指数呈负相关关系，相关系数为-0.31。

本次研究结合重庆市伏秋旱事件的特点，从旬尺度分析了重庆市 1965~2016 年的伏秋旱空间演变特征，为后续更加深入地研究重庆市伏秋旱的发展趋势和伏秋旱特征指标的中长期预测做了必要的准备工作。

参考文献:

- [1] IPCC. Summary for policymakers, in climate change 2022: Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. England: Cambridge University Press, 2022.
- [2] 廖永丰, 赵飞, 王志强, 等. 2000-2011年中国自然灾害灾情空间分布格局分析[J]. 灾害学, 2013, 28(4): 55-60.
- [3] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2017) [M]. 北京: 气象出版社, 2018.
- [4] 中国气象局. 气象干旱等级国家标准(GB/T 20481-2017) [S]. 北京: 气象出版社, 2017.
- [5] 唐敏, 张勃, 张耀宗, 等. 基于 SPEI 和 SPI 指数的青海省东部农业区春夏气象干旱特征的评估[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 1029-1042.
- [6] 赵平伟, 郭萍, 李立印, 等. SPEI 及 SPI 指数在滇西南地区干旱演变中的对比分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(1): 142-149.
- [7] 孙德亮, 吴建峰, 李威, 等. 基于 SPI 指数的近 50 年重庆地区干旱时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 197-203.
- [8] 孙丽, 陈曦炜, 宋振华, 等. 武陵山地区干旱时空特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014(s1): 118-125.
- [9] 丁怡博, 徐家屯, 李亮, 等. 基于 SPEI 和 MI 分析陕西省干旱特征及趋势变化[J]. 中国农业科学, 2019, 52(23): 4296-4308.
- [10] 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.
- [11] 刘可群, 李仁东, 刘志雄, 等. 基于 CI 指数的湖北干旱及其变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(10): 1274-1280.
- [12] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013 年秦岭—淮南北极降水时空变化特征及其影响因素[J]. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363.
- [13] 张顾炜, 曾刚, 倪东鸿, 等. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 311-323.
- [14] 起永东, 何明琼, 郑永宏, 等. 汉江流域降水结构时空特征及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 192-200.
- [15] 易佳. 基于 EOS-MODIS 的重庆市干旱遥感监测技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 17-18.
- [16] 陈勇, 李光强, 姜红. 重庆市应急水文监测技术前期研究[C]//中国水文科技新发展——2012 中国水文学学术讨论会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2012: 389-395.

-
- [17]王建华, 郭跃. 2006年重庆市特大旱灾的特征及其驱动因子分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(5):1290-1292.
- [18]尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象, 2013, 31(1):182-193.
- [19]WANG W, CHEN Y, BECKER S, et al. Variance Correction Prewhitening Method for Trend Detection in Autocorrelated Data[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2015, 20(12):04015033.
- [20]高路, 陈思, 周洪建, 等. 重庆市2006年特大旱灾分析与灾后恢复性研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(1):21-26.
- [21]徐羽. 重庆市参考作物蒸散量及地表湿润指数时空分布规律研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015:25-26.
- [22]LAI X, GONG Y F. Relationship between Atmospheric Heat Source over the Tibetan Plateau and Precipitation in the Sichuan-Chongqing Region during Summer[J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(3):555-566.
- [23]江玉华, 程炳岩, 邓承之, 等. 重庆市严重伏旱气候特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(1):31-38.
- [24]任广成, 吴小林, 李旺. 盛夏副高脊线异常变化对我国气温影响及海气背景分析[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(3):1-5.
- [25]赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布[J]. 气象学报, 2012, 70(5):1021-1031.
- [26]齐冬梅, 李跃清, 刘昆鹏. 四川地区夏季旱涝与西太平洋副热带高压的关系[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(2):41-46.
- [27]朱艳峰, 宇如聪. 川西地区夏季降水的年际变化特征及与大尺度环流的联系[J]. 大气科学, 2003, 27(6):1045-1056.
- [28]赵俊虎, 王永光. 2018年秋季我国气候异常及成因分析[J]. 气象, 2019, 45(4):565-576.
- [29]ZHOU T, YU R, ZHANG J, et al. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the Late 1970s[J]. Journal of Climate, 2009, 22(8):2199-2215.
- [30]彭莉莉, 戴泽军, 罗伯良, 等. 2013年夏季西太平洋副高异常特征及其对湖南高温干旱的影响[J]. 干旱气象, 2015, 33(2):195-201.