

河南省 1960—2018 年旱涝演变及其极端与持续性分析

楚纯洁, 周金凤

(平顶山学院 旅游与规划学院, 河南 平顶山 467000)

摘 要:为探究河南省旱涝变化规律及其气候驱动因子,利用河南省 17 个国家基准气象台站 1960—2018 年逐日降水、气温资料,采用降水和潜在蒸发均一化旱涝指标,对河南省旱涝时空演变特征进行了多尺度、系统性分析。结果表明:(1)近 59 年河南省旱涝呈振荡性波动且具显著干旱化趋势,1980s 偏涝程度最强,1990s 中期之后趋于偏旱,而且干旱化趋势在未来将持续增强。季节间旱涝存在明显差异,尤其春季、秋季干旱化趋势最显著,夏季、冬季无显著干旱化趋势。全年、季节旱涝演变普遍存在 3~5 a 的年际周期变化,秋季还存在 7~8 a 的周期变化,全年与春、夏、冬季还存在 13~14 a 的周期性。(2)河南省全年与秋季呈全域性干旱化趋势,尤其以开封、郑州和新乡等黄河沿岸连片区干旱化趋势最为显著,夏季全省无明显旱涝变化趋势,冬春季干旱化趋势呈不同局域性。(3)1990s 中期之后河南省极端干旱发生频次快速增多,连片、区域性干旱化趋势显著增强,极端雨涝则显著减少,冬季极端旱涝较少,夏季发生频次最高,全年与季节极端旱涝在空间变化上呈规律性差异分布。(4)1990s 中期以来河南省持续性干旱事件的增多增强已成为必然趋势,发生次数、强度、持续时间均远超以往,而持续性雨涝事件则在 1990s 中期之后显著减少,两者的发生演化基本呈反相同步呼应、此消彼长的特点。河南省旱涝演变呈显著干旱化趋势,且呈全域性干旱化趋势分布特点,极端干旱、持续性干旱事件增多增强已成为必然趋势。

关键词:旱涝演变;极端旱涝;持续性旱涝;河南省

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0164-08

Extreme and Persistent Feature of Drought-Flood Evolution in Henan Province During 1960—2018

CHU Chunjie, ZHOU Jinfeng

(College of Tourism and Planning, Pingdingshan University, Pingdingshan, Henan 467000, China)

Abstract:In order to explore the variation law of drought-flood in Henan Province and its driving factors, based on the daily precipitation and temperature data of 17 national meteorological stations in Henan Province during the period from 1960 to 2018, spatiotemporal variation of drought and flood in Henan Province was systematically analyzed on multi-time scale by using homogenized drought-flood index of precipitation and latent evaporation. The results showed that: (1) drought and flood in Henan Province showed oscillatory fluctuation and significant drought trend in 1960—2018; the degree of waterlogging was the strongest in 1980s, but the climate tended to be dry after mid-1990s, and the drought trend would continue to increase in the future; the climate in four seasons showed different degrees of drought trend, especially in spring and autumn, and there was no significant drought trend in summer and winter; the annual and seasonal drought-flood evolutions in Henan Province generally had 3~5 years periodicity, 7~8 years periodicity in autumn, and 13~14 years periodicity in whole year, spring, summer and winter, respectively; (2) the drought and flood in Henan Province showed a widespread-regional drought trend in whole year and autumn, especially in the contiguous areas along the Yellow River such as Kaifeng, Zhengzhou and Xinxiang; there was no obvious drought-flood trend in summer, and the drought trend in winter and spring showed different localization; (3) after mid-1990s, the frequency of extreme drought in Henan Province increased rapidly, and the trend of

收稿日期:2021-05-18

修回日期:2021-06-06

资助项目:河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(202102310300);平顶山学院高层次人才资助项目(PXY-BSQD-2017004)

第一作者:楚纯洁(1978—),男,河南叶县人,博士,教授,主要从事自然地理、灾害地理研究。E-mail:zzfccj@163.com

contiguous and regional drought was significantly enhanced; however, extreme flood decreased significantly; extreme droughts and floods were less in winter, and the highest frequency occurred in summer; annual and seasonal extreme droughts and floods showed regular differences in spatial distribution; (4) the increase of persistent drought events in Henan Province since mid-1990s had become an inevitable trend; the number, intensity and duration of persistent drought events were far more than those in past, while persistent flood events significantly reduced after mid-1990s; the occurrence and evolution of two events in past 59 years were basically anti-synchronous. The evolution of drought and flood in Henan Province shows a significant drought trend, and shows the distribution characteristics of drought trend in widespread region. The increase and enhancement of extreme drought and persistent drought events has become an inevitable trend.

Keywords: drought-flood evolution; extreme drought-flood; persistent drought-flood; Henan Province

全球气候系统变暖已成为现实,而由于气候变暖所导致的极端气候事件发生频率增多、强度加大已成为全球性趋势,由此导致气象灾害频发。干旱、洪涝是气象灾害中最主要的灾害,而且在当前趋势下很多地区未来发生更严重旱涝灾害的风险也在显著增大^[1]。自然环境的多样性使得中国成为世界上气象灾害最为严重的国家之一^[2],近年来许多学者开展了很多具有区域特色的旱涝事件及其与气候变化关系的研究^[3-12],这对于区域防灾减灾、水资源管理及农业可持续发展具有重要的实践意义,并为现代灾害应急管理机制的进一步完善提供一定借鉴。

河南省地处中国南北地理过渡带以及西部山地丘陵与东部黄淮平原的过渡带,汇集了黄河、淮河与长江三大流域,是亚热带向暖温带的气候过渡区。受特殊的气候和地理要素以及全球气候变化影响,季节间及季节内降水分配极不均衡,以致旱涝灾害成为河南省发生频率最高、危害和损失最大的自然灾害^[13]。因此,针对河南省旱涝灾害的研究一直是这一领域关注的重要地区。相关研究主要侧重于河南省气象干旱或旱涝时空规律的分析^[14-18]以及旱涝灾害的风险评估^[19],也有研究将气象资料与遥感分析相结合侧重于农业干旱的研究^[20-22]。尽管前人关于河南省干旱或旱涝灾害已做了较多研究,但对于河南省多尺度旱涝演变、极端旱涝和持续性旱涝特征的系统性研究尚不多见。基于此,本文利用最新资料,从多时间尺度对河南省旱涝演变及其极端和持续性特征进行系统性分析,以期对河南省防洪抗旱、减灾决策工作提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

气象数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),选取河南省 17 个国家基准气象站(图 1)1960 年 1 月 1 日—2018 年 12 月 31 日逐日

降水和平均气温数据资料,少数缺测数据采用回归替代法进行插补。其中研究所涉及的季节数据,依据气象学标准进行划分,即:春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月—次年 2 月。

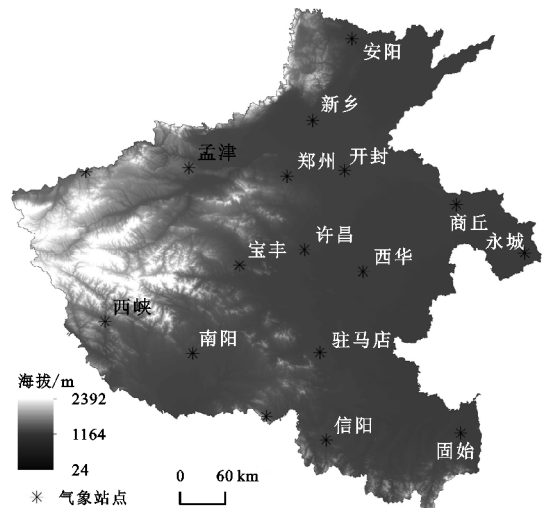


图 1 河南省地势变化与气象站点分布

1.2 研究方法

旱涝指数采用同时考虑降水和蒸发两个重要物理分量且具有计算所需资料少、计算过程简便等突出优点的降水与蒸发均一化指数进行表征计算^[23]。基于不同潜在蒸散量估算的特点^[24],地表潜在蒸发的计算采用 Thornthwaite 方法^[25]。采用区域平均序列构建区域旱涝的时间变化轴^[26],采用气候倾向率法^[27-28]、Hurst 指数法(R/S 分析)^[29]、Morlet 小波分析分别用于分析旱涝变化趋势与速率及其周期性特征。限于篇幅,所有指标的计算过程详见上述相关引用文献。

2 结果与分析

2.1 河南省旱涝时间演变特征

2.1.1 旱涝趋势年际与代际变化特征 由图 2 可以看出,近 59 a 河南省旱涝指数呈明显的振荡性波动并趋于干旱化(旱涝指数大于 0 表示偏涝,小于 0 表

示偏旱),其中 5 a 滑动曲线显示在 1990s 中期之前总体上偏涝,连续偏涝期最长达 10 个月,1990s 中期之后趋于偏旱,且干旱化趋势在近年显著增强,连续偏旱期最长达 11 个月。从年代际变化来看,2000 年之前整体偏涝,其中 1980s 雨涝程度最强,之后进入由涝转旱阶段,并在 2000 年之后整体进入干旱期,且干旱程度逐渐增强,并在 2010s 最为干旱。线性拟合结果显示,1960—2018 年河南省旱涝变化在 0.01 置信水平上呈显著干旱化趋势(图 2A)。根据 Hurst

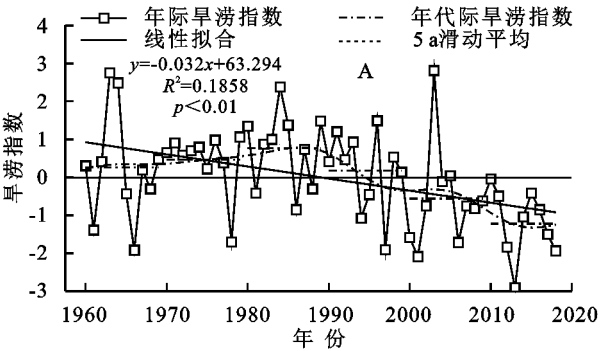
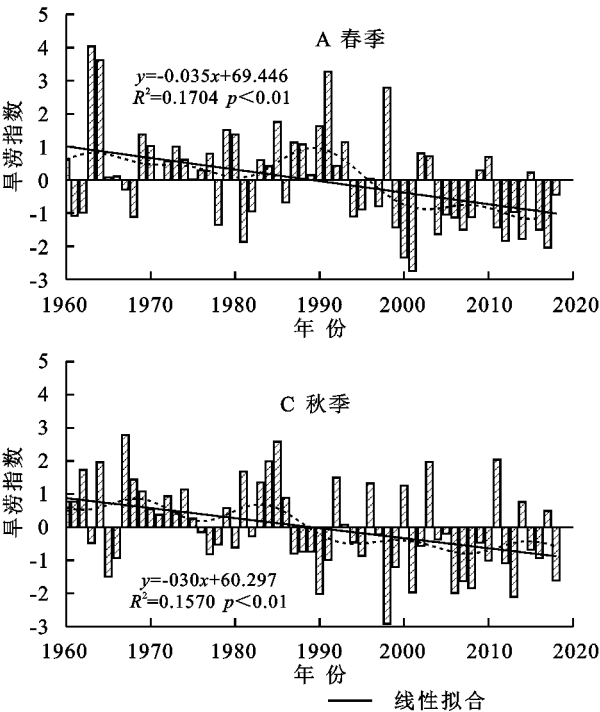


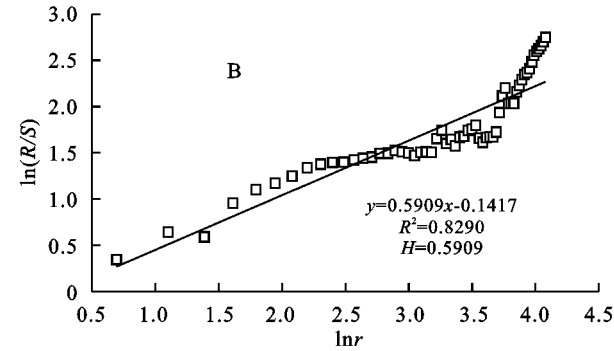
图 2 1960—2018 年河南省旱涝变化与趋势持续性分析

2.1.2 旱涝季节变化特征 由图 3 可以看出,河南省近 59 a 来年内四季均表现为不同程度的干旱化趋势,尤其春、秋两季干旱化趋势最显著($p < 0.01$),而夏季、冬季的干旱化趋势则不显著($p > 0.05$)。

从 5 a 滑动平均曲线来看,春、秋季旱涝变化特点相似且均具有两个阶段的变化,但春季在 1990s



指数表征的 R/S 分析结果, $H=1/2$ 表示历史增量与未来增量无关,时序完全随机,不能开展趋势性分析; $H>1/2$ 表示过去与未来增量成正相关,即过去时段的增长(减少)趋势将意味着未来也呈增加(减少)趋势; $0<H<1/2$ 表示过去与未来的增量呈负相关,即过去的增长(减少)趋势将意味着未来的减少(增加)趋势^[30]。由图 2B 可以看出,河南省年际旱涝指数 H 值略大于 $1/2$,印证了河南省干旱化趋势在未来将持续增强。



中期发生明显的涝转旱,与全年变化相似(图 2),而秋季从 1980s 末期开始即进入干旱期。冬季与春季也较相似,自 1990s 早期进入干旱期。夏季则表现为 3 个阶段,1970s 中期之前偏旱,之后转入长达近 35 a 的偏涝期,直到 2000s 末期才转入明显的干旱期。

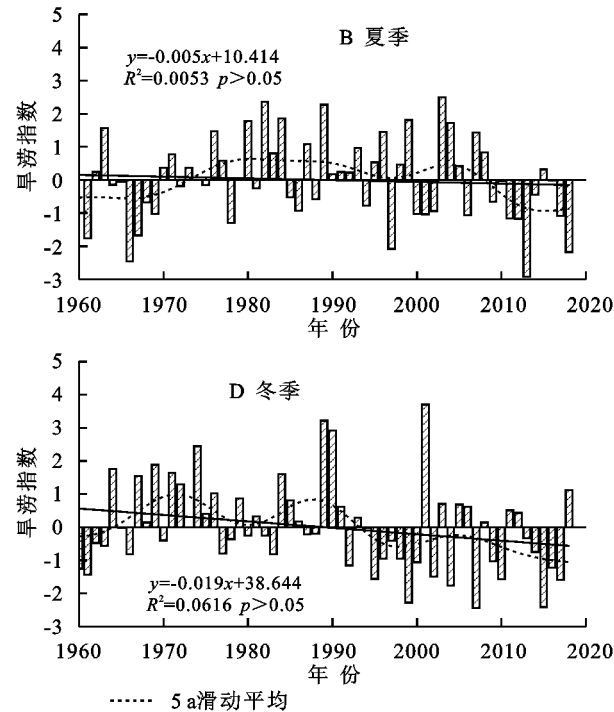


图 3 1960—2018 年河南省旱涝季节变化

2.2 旱涝周期变化特征

根据旱涝指数进行 Morlet 小波变换,结果见图

4。由图 4 可以看出,河南省全年与季节旱涝演变主要存在两种尺度的周期性变化。在年际尺度上,全年

和四季均存在3~5 a的周期变化,秋季还存在7.5 a的周期性变化,震荡信号均强烈,为第一主周期;在年代际尺度上,全年和四季表现不尽一致,震荡信号强弱也有差异,其中全年和春、夏、冬季普遍存在13~14 a的代际周期变化,为第二主周期,秋季不存在代际周期性。

在年际尺度上,全年与春、夏、秋季的3~5 a周期具有全域性,且全年与春、夏季呈同相变化,相关

系数分别达到了0.798,0.508($p<0.01$),而冬季3~5 a的周期主要出现在1980s中期至2000s中期,且冬季与夏季呈反相变化,相关系数为-0.506。秋季7.5 a周期主要出现在1980s以来且信号稳定。在13~14 a年代际周期变化上,全年与春季、冬季呈近似同步同相变化,但全年与春季在1980s以来才呈现稳定且强烈的周期信号,冬季则在全分析时段内均具有稳定且强烈的周期变化。

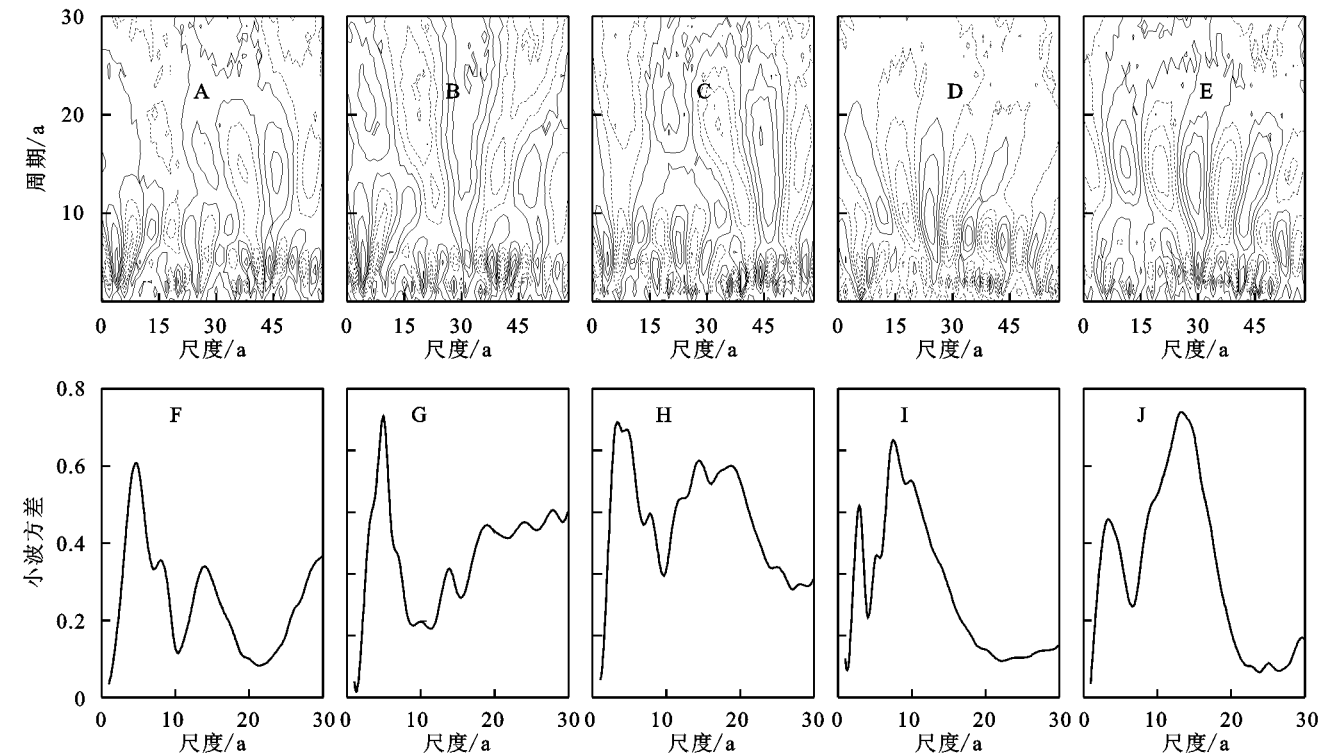


图4 1960—2018年河南省旱涝周期性演变分析

2.3 河南省年及季节旱涝指数倾向率空间变化

2.3.1 年际旱涝指数倾向率空间分布

采用 Arc-GIS 反距离加权方法对 1960—2018 年河南省旱涝指数全年与季节变化的线性倾向率及其趋势显著性、降水量、蒸发量的趋势系数等指标进行空间插值,见图 5。由图 5A 可以看出,河南省年际旱涝指数呈全域性下降分布,表现出一致的干旱化趋势,但下降幅度存在明显的空间差异。总体上黄河沿岸地区干旱化趋势最为显著,尤其以开封、郑州和新乡连片区干旱加剧趋势最为明显和集中,其次在豫东永城、豫南桐柏、信阳一带也呈极显著的干旱化趋势,而在中部以三门峡、宝丰、许昌和商丘为中心贯穿东西所形成的带状区域旱涝指数则无显著下降趋势,即没有显著的旱涝变化。

由河南省降水和蒸发趋势系数的空间分布可以看出(图 5F—P),全年与季节性降水倾向率变化均无显著性趋势($p>0.05$),大部分地区降水倾向率略呈减小特点,全年降水减少区域占比达到 76%。河南省全年蒸发倾向率均呈不同程度的增大趋势(图 5K),即年际蒸发量

趋于增大,而且大部分地区蒸发增强趋势具有极显著性,此趋势分布与全年旱涝指数相似。相关分析表明,全年旱涝指数与降水、蒸发倾向率的相关系数分别为 0.546,0.841,说明河南省全域性干旱化趋势主要与蒸发增强有关,而降水减少的支配作用相对较弱,这与近年来的全球变暖趋势是相符合的。

2.3.2 季节旱涝指数倾向率空间分布

由图 5B—D 可知,河南省不同季节旱涝指数呈现出不同的空间趋势。整体来看,4 个季节均表现出不同程度的全域性干旱化趋势,其中旱涝指数呈显著下降($p<0.05$)的占次比从大到小依次为:春季 88.2%、秋季 82.4%、冬季 47.1%、夏季 0.06%,可见春、秋季干旱化趋势最突出,夏季则无显著性干旱化趋势。从空间分布来看,春季豫南地区干旱化趋势最突出(图 5B),黄河沿岸的开封、郑州和新乡连片区干旱化趋势也较突出,而安阳和许昌周边地区趋势不明显,显著干旱化趋势具有全域性特点。秋季旱涝趋势空间分布与全年基本相似(图 5D),尤其在郑州、开封、新乡等中部周边地区干旱化倾向最突

出、趋势最显著。冬季显著干旱化空间范围进一步收缩,但仍以郑州、开封等中东部地区干旱化倾向最突出、趋势最显著,而许昌、平顶山及南阳、信阳等豫中、豫南地区则无明显旱涝变化趋势(图 5E)。从与降水和蒸发的对比来看,全省除夏季之外,其他季节降水与蒸发分别表现出一致的减少和增加趋势,而且其趋

势分布与干旱化趋势分布基本相似。

2.4 河南省极端旱涝时空变化特征

2.4.1 极端旱涝多尺度时间变化特征

(1)年代变化。依据前人对极端旱涝的界定(月旱涝指数 $\geq 1, \leq -1$ 的月份分别为极端雨涝、极端干旱月份)^[6],对河南省极端旱涝进行多维尺度的时空分析。

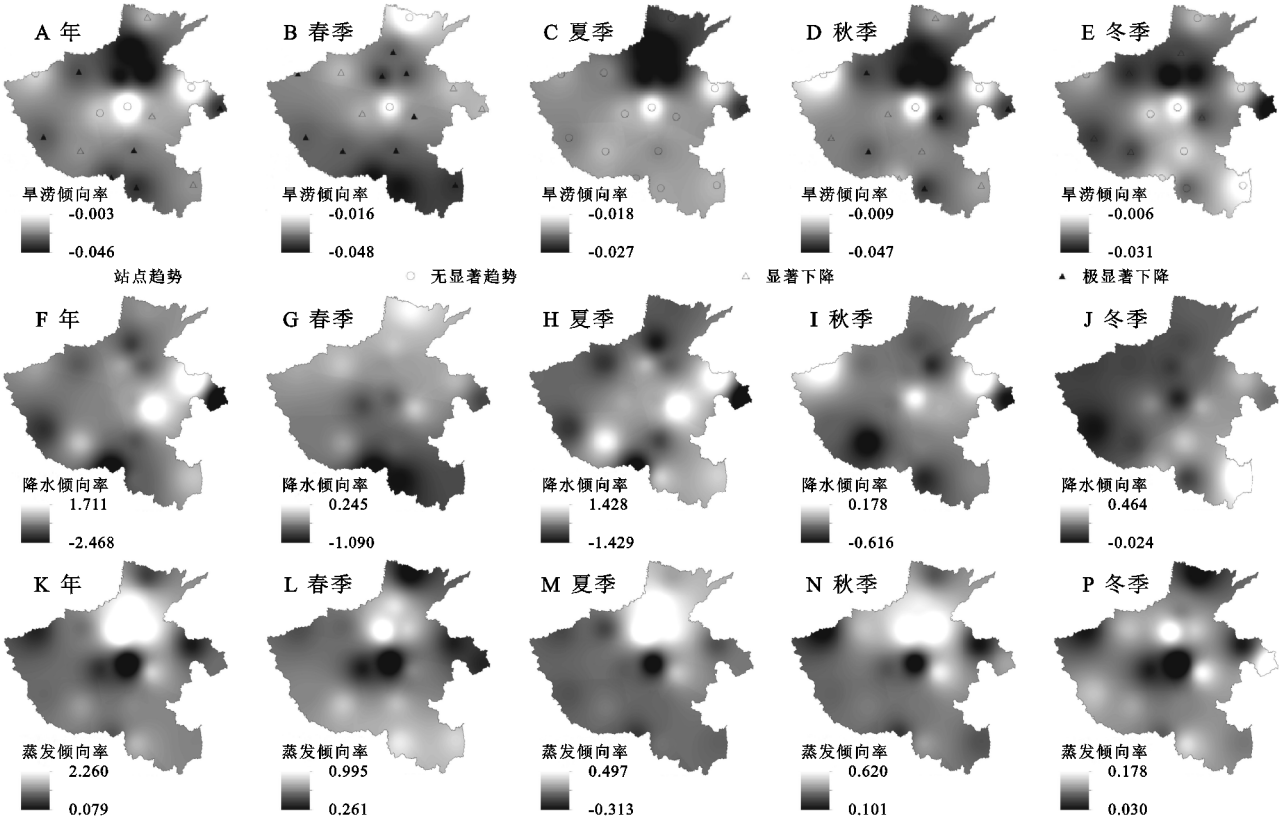


图 5 1960—2018 年河南省年际与季节旱涝指数、降水量与蒸发量趋势系数的空间分布

由图 6 可以看出,河南省不同年代发生极端雨涝的频次波动不大,呈先增多后减少的特点,1980s 发生频次最多,达到 28.24%,而同时期极端干旱发生频次最低,仅占 15.78%。极端干旱与极端雨涝变化相反,总体上呈先减少后增多的趋势,但在 1980s 之后增速显著,到 2010s 全省极端干旱发生占次比高达 48.04%。

(2)年际变化。在年际变化上(图 6),极端雨涝在 1990s 中期之前多数年份发生频次比例较高,超过

3/4 的年份占次比高于 20%,1990s 中期之后极端雨涝发生频次明显减少。极端干旱在 1990s 中期之前发生比例较低,之后发生频次快速增多,尤其 2017 年全省发生极端干旱的占次比高达 58.33%,反映了近年来连片、区域性干旱化趋势显著增强。从整体来看,极端雨涝与极端干旱分别呈极显著下降、上升趋势,而极端干旱线性倾向率达到了极端雨涝的 2 倍,反映了近年来河南省全域性干旱化趋势快速增强。

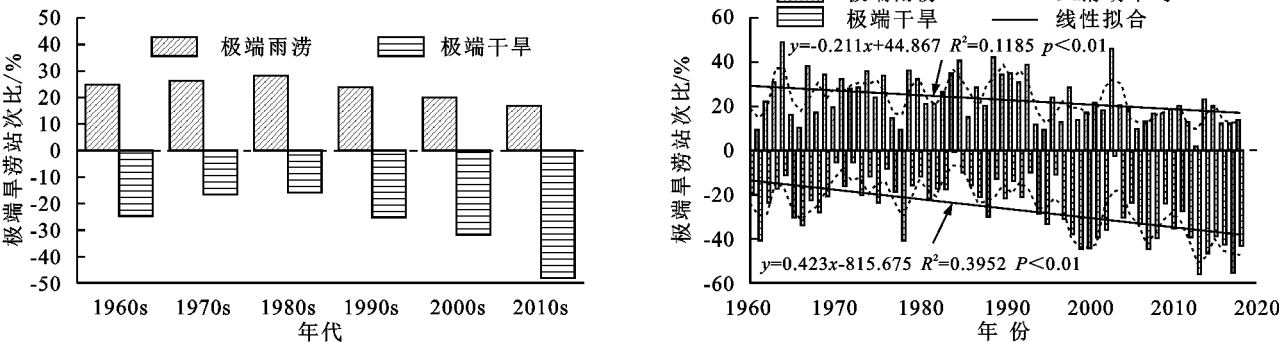


图 6 1960—2018 年河南省极端旱涝年代与年际变化

(3)季节变化。由图7可以看出,除了1月、2月、10月份极端雨涝发生站次比略高于极端干旱之外,其他月份均低于极端干旱,而且1—2月极端旱涝发生频次明显低于其他月份。从季节尺度来看,各季节极端干旱频次均略高于极端雨涝,而且除冬季极端旱涝发生频次明显较少之外,其他季节之间极端旱涝频次较接近,尤以夏季极端旱涝发生频次最高。

2.4.2 极端旱涝空间变化特征 由图8可以看出,

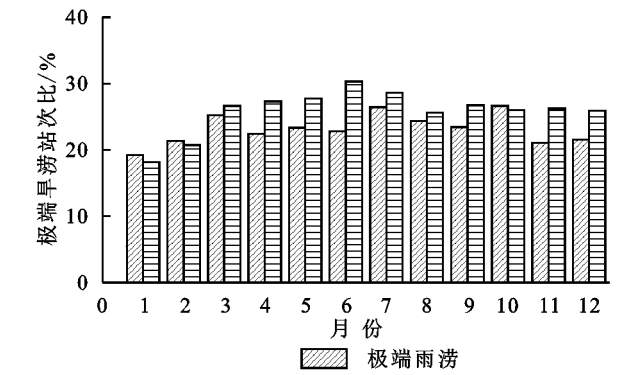


图7 1960—2018年河南省极端旱涝月与季节变化

从季节变化来看(图8),春季极端旱涝的空间分布与全年分布基本一致,所不同的是,极端干旱发生频率较低的区域不仅集中于豫东地区,还向南延伸至豫南固始一带。夏季极端干旱高发区范围缩小,仅分布于沿黄河及以北一线的豫西、豫北一带,而夏季极端雨涝的高发区范围没有发生变化,仍与春季、全年分布一致。秋季极端旱涝的空间分布发生了明显变化,极端干旱高发区呈全域连片式特点,低发区则呈散点状交错其中,而极端雨涝高发区与低发区则呈相互交错连片式分布特点。冬季极端旱涝空间分布相

整体上河南省全年极端旱涝的发生频率虽然均有西多东少的特点,但两者仍存在明显差异。其中,全年极端干旱发生频次最高的区域主要集中于河南西部、南部地区,自西南向东北部减少,在商丘、永城等豫东地区发生频率最低;全年极端雨涝发生频率最高的区域范围相对较小,仅集中于豫西三门峡、孟津等黄河沿线地区,其他地区发生频次较少,豫西南、豫北地区发生频次最低。

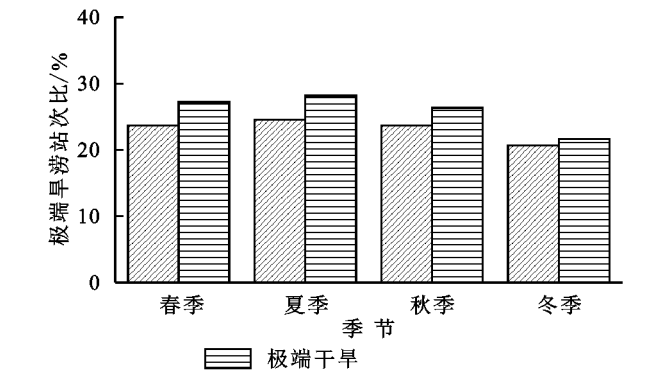


图8 1960—2018年河南省极端旱涝发生频率空间分布

2.5 河南省持续性旱涝特征

2.5.1 持续性干旱事件 相比一般旱涝事件,持续

性旱涝事件的影响更大、更深、更重,而以往涉及河南省持续性旱涝的研究较少。根据前人对持续性旱涝

的界定^[6],对 1960—2018 年河南省持续性旱涝事件进行统计,见表 1,表 2。

由表 1 可以看出,近 59 a 来河南省共发生 20 次持续性干旱事件,单次事件持续时间平均达到了 4.9 个月,平均强度达到了-2.36。从年代变化上,1990s 之前,持续性干旱事件较少,仅有 3 次,每个年代均只有 1 次,持续时间为 3~4 个月;1990s 之后,持续性干旱事件明显增多,仅 1990s 就发生了 4 次,其中 3 次出现在 1 995 之后,而 2000s,2010s 持续性干旱事件分别达到了 6 次、7 次。在持续时间上,持续时间最条的干旱事件为 9 个月,有 2 次,分别为 1998 年 9 月和 2018 年 2 月开始的,持续时间达到 8 个月也有 2 次,但大多数干旱事件持续时间为 3~4 个月,达到了 13 次。在季节分布上,春、夏、秋、冬四季持续性干旱事件分别发生了 15 次、8 次、10 次和 12 次,分别累计历经 29 个月、22 个月、23 个月和 23 个月,其中春季发生持续性干旱事件概率最大,夏季最小。从强度变化来看,1990s 中期之前持续性干旱事件强度超过平均强度的次数只有 1 次,而 1990s 中期之后则达到了 10 次,占全部持续性干旱事件的一半,其中 2002 年 1 月和 2013 年 6 月开始出现的持续性干旱事件强度分别达到了-3.19,-4.43。由此可见,1990s 中期

表 1 1960—2018 年河南省持续性干旱事件统计特征

开始年-月	跨越 季节	持续 时间/月 (最小指数)	干旱强度 指数 (最小指数)	累计旱涝 指数	月均旱涝 指数
1966-6	夏、秋季	4	-2.77	-5.70	-1.43
1978-4	春、夏季	3	-2.13	-3.91	-1.30
1981-3	春季	3	-1.80	-3.41	-1.14
1994-7	夏、秋季	3	-1.37	-3.38	-1.13
1995-1	冬、春季	3	-1.35	-2.85	-0.95
1997-5	春、夏季	4	-2.37	-5.69	-1.42
1998-9	秋、冬、春季	9	-2.63	-14.01	-1.56
2000-2	冬、春季	4	-2.67	-6.10	-1.53
2001-5	春、夏、秋季	7	-2.75	-8.27	-1.18
2002-1	冬、春季	3	-3.19	-8.16	-2.72
2004-2	冬、春季	3	-2.85	-6.78	-2.26
2007-9	秋、冬季	4	-1.35	-3.98	-1.00
2008-9	秋、冬、春季	8	-1.64	-8.22	-1.03
2010-10	秋、冬季	3	-2.92	-6.40	-2.13
2012-4	春、夏季	4	-2.19	-6.68	-1.67
2013-6	夏、秋、冬季	8	-4.43	-15.37	-1.92
2014-10	秋、冬、春季	6	-2.82	-8.88	-1.48
2016-2	冬、春季	3	-2.41	-5.22	-1.74
2016-12	冬、春季	6	-1.83	-8.05	-1.34
2018-2	冬、春、夏、秋季	9	-1.71	-9.77	-1.09

3 结 论

(1) 近 59 a 河南省旱涝呈振荡性波动且具显著干旱化趋势,1980s 偏涝程度最强,1990s 中期之后趋

以来河南省持续性干旱的增多增强已成为必然趋势,而且这一趋势与国内其他地区相似^[4,6],反映了全国大范围持续性干旱现象日益突出的事实。

2.5.2 持续性雨涝事件 由表 2 可以看出,近 59 a 来河南省共发生 18 次持续性雨涝事件,比持续性干旱事件略少,单次事件持续时间平均达到了 4.1 个月,平均强度达到了 2.16。从年代变化上,1960s—1980s 有 10 次,1990s 有 5 次,2000s 有 3 次,2010s 以来则没有发生持续性雨涝事件。其中 1990s 发生的 5 次事件中就有 4 次出现在 1995 年之前,由此可见,1990s 中期之后持续性雨涝事件显著减少。在持续时间上,持续时间最长的雨涝事件为 11 个月,有 1 次,而持续时间 3 个月的雨涝事件占这一事件的主体,达到了 11 次。在季节分布上,春、夏季持续性雨涝事件各有 13 次,秋、冬季各有 5 次,4 个季节分别累计历经 29 个月、27 个月、9 个月和 9 个月,其中春、夏季发生持续性干旱事件概率最大,秋、冬季最小,季节差异显著。从强度变化来看,1990s 中期之后持续性雨涝事件强度超过平均强度的次数仅有 1 次,其中最大强度的持续性雨涝事件始于 1963 年 3 月。从持续性干旱与雨涝事件的对比来看,两者在近 59 a 内的发生演化基本呈反相同步呼应、此消彼长的特点。

表 2 1960—2018 年河南省持续性雨涝事件统计特征

开始年-月	跨越 季节	持续 时间/月 (最大指数)	雨涝强度 指数 (最大指数)	累计旱涝 指数	月均旱涝 指数
1963-3	春季	3	4.35	7.40	2.47
1967-2	冬、春季	3	2.21	4.50	1.50
1971-2	冬、春季	3	1.19	2.54	0.85
1971-10	秋、冬、春季	6	1.61	7.00	1.17
1973-4	春、夏季	4	1.73	4.67	1.17
1979-3	春季	3	1.84	3.72	1.24
1980-3	春、夏季	6	2.00	7.52	1.25
1982-7	夏、秋季	3	2.65	5.45	1.82
1984-5	春、夏季	3	2.08	4.20	1.40
1989-5	春、夏季	4	1.83	5.23	1.31
1990-1	冬、春、夏季	6	3.53	10.40	1.73
1991-3	春、夏季	4	3.66	8.43	2.11
1992-8	夏、秋季	3	1.55	3.30	1.10
1993-4	春、夏季	3	1.37	2.41	0.80
1996-6	夏季	3	1.17	2.61	0.87
2003-2	冬、春、夏、秋季	11	2.81	12.58	1.14
2004-6	夏季	3	1.91	3.31	1.10
2005-7	夏、秋季	3	1.43	3.40	1.13

于偏旱,至 2010s 干旱化程度最强,而且干旱化趋势在未来将持续增强。季节间旱涝存在明显差异,尤其春季、秋季干旱化趋势最显著,夏季、冬季无显著干旱化趋势。全年、季节旱涝演变普遍存在 3~5 a 的年

际周期变化,秋季还存在7~8 a的周期变化,全年与春、夏、冬季还存在13~14 a的周期性。

(2) 从空间趋势变化来看,河南省全年与秋季表现出一致的全域性干旱化趋势,尤其以开封、郑州和新乡等黄河沿岸连片区趋势最为显著。夏季全省无明显旱涝变化趋势,冬、春季干旱化趋势呈不同局域性,春季以豫南地区突出,冬季以郑州、开封和永城等中东部地区最突出。河南省干旱化趋势变化主要与蒸发增强有关,而降水减少的支配作用相对较弱,这与近年来的全球变暖趋势是相符合的。

(3) 1990s中期之后河南省极端干旱发生频次快速增多,连片、区域性干旱化趋势显著增强,极端雨涝则显著减少。各季节极端干旱频次均略高于极端雨涝,冬季极端旱涝较少,其他季节较接近,但以夏季发生频次相对最高。全年与季节极端旱涝在空间变化上呈规律性差异分布。

(4) 1990s中期以来河南省持续性干旱事件的增多增强已成为必然趋势,发生次数、强度、持续时间均远超以往,而持续性雨涝事件则在1990s中期之后显著减少,两者的发生演化基本呈反相同步呼应、此消彼长的特点。

参考文献:

- [1] Markus M, Cai X, Sriver R. Extreme floods and droughts under future climate scenarios[J]. *Water*, 2019, 11(8): 1720. doi:10.3390/w11081720.
- [2] 陈发虎,吴绍洪,崔鹏,等.1949—2019年中国自然地理学与生存环境应用研究进展[J].*地理学报*, 2020, 75(9): 1799-1830.
- [3] 胡毅鸿,李景保.1951—2015年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析[J].*农业工程学报*, 2017, 33(7): 107-115.
- [4] 刘宇峰,原志华,李文正,等.1961—2013年黄土高原地区旱涝特征及极端和持续性分析[J].*地理研究*, 2017, 36(2): 345-360.
- [5] 曹永强,刘佳佳,王学风,等.黄淮海流域旱涝周期、突变点和趋势分析研究[J].*干旱区地理*, 2016, 39(2): 275-284.
- [6] 杨金虎,张强,王劲松,等.近60年来西南地区旱涝变化及极端和持续性特征认识[J].*地理科学*, 2015, 35(10): 1333-1340.
- [7] 何艳虎,陈晓宏,林凯荣,等.东江流域近50年旱涝时空演变特征[J].*地理科学*, 2014, 34(11): 1391-1398.
- [8] 叶正伟.基于SPI的江苏沿海开发地区旱涝演变特征分析:以盐城市为例[J].*地理科学*, 2014, 34(4): 479-487.
- [9] 刘琳,徐宗学,杨晓静.西南地区旱涝演变与ENSO事件的关系[J].*资源科学*, 2019, 41(11): 2144-2153.
- [10] 曹永旺,延军平,李敏敏,等.晋陕峡谷区气候变化与旱涝灾害响应研究[J].*干旱区资源与环境*, 2015, 29(4): 113-118.
- [11] 李双双,杨赛霓,刘宪锋.1960—2013年北京旱涝变化特征及其影响因素分析[J].*自然资源学报*, 2015, 30(6): 951-962.
- [12] 张平,延军平,王文静,等.1960—2014年淮河流域5省旱涝变化[J].*浙江大学学报:理学版*, 2017, 44(3): 345-353.
- [13] 李谢辉,王磊,苗长虹,等.河南省水旱灾害生态风险综合评价[J].*资源科学*, 2013, 35(11): 2308-2317.
- [14] 史本林,朱新玉,胡云川,等.基于SPEI指数的近53年河南省干旱时空变化特征[J].*地理研究*, 2015, 34(8): 1547-1558.
- [15] 秦琳琳,宋艳红.河南省近53年旱涝变化特征分析[J].*曲阜师范大学学报:自然科学版*, 2019, 45(1): 28-32.
- [16] 罗浩,包为民,王友恒.河南省旱涝态势时空特征分析[J].*人民黄河*, 2016, 38(11): 39-49.
- [17] 薛昌颖,张永涛,刘伟昌.1971—2016年河南省夏玉米生长季极端干旱时空特征[J].*干旱地区农业研究*, 2020, 38(2): 258-266.
- [18] 卫林勇,江善虎,任立良,等.基于模糊C均值聚类法的河南省近57年干旱特征分析[J].*水资源与水工程学报*, 2019, 30(1): 33-39.
- [19] 张竟竟.河南省农业水旱灾害风险评估与时空分布特征[J].*农业工程学报*, 2012, 28(18): 98-106.
- [20] 刘晓璐,周廷刚,温莉,等.基于VSWI和SPI的2000—2016年河南省干旱特征研究[J].*干旱区地理*, 2018, 41(5): 984-991.
- [21] 陈少丹,张利平,汤柔馨,等.基于SPEI和TVDI的河南省干旱时空变化分析[J].*农业工程学报*, 2017, 33(24): 126-132.
- [22] 唐饶,孙睿.基于气象和遥感数据的河南省干旱特征分析[J].*自然资源学报*, 2013, 28(4): 646-655.
- [23] 王鹏祥.西北地区干湿演变及其成因分析[D].南京:南京信息工程大学, 2008.
- [24] 周丹,张勃,沈彦俊.潜在蒸散量估算方法对干旱侦测指数计算的影响[J].*中国农业气象*, 2014, 35(3): 258-267.
- [25] 马柱国,符淙斌.1951—2004年中国北方干旱化的基本事实[J].*科学通报*, 2006, 51(20): 2429-2439.
- [26] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations[J]. *International Journal of Climatology*, 1996, 16(4): 361-377.
- [27] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社, 2013: 63-66.
- [28] 郭军,任国玉.黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J].*水科学进展*, 2005, 16(5): 666-672.
- [29] 黄登仕,李后强.分形几何学、R/S分析与分式布朗运动[J].*自然杂志*, 1990, 13(8): 477-482.
- [30] 楚纯洁,李亚丽.近60年黄河干流水沙变化及其驱动因素[J].*水土保持学报*, 2013, 27(5): 41-47.