

渭河流域百年尺度水旱特征及其影响因素

胡浩楠¹, 刘引鸽^{1,2}, 马凯¹

(1. 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013; 2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: [目的] 分析渭河流域在气候变化下百年尺度的旱涝特征及其影响因素, 为区域水资源规划管理、生态环境建设与保持、气候预估及防灾减灾工作提供科学支持。[方法] 通过收集 1800—2017 年历史资料重建旱涝序列, 采用小波变换、滑动 t 检验、滑动相关等方法探究渭河近 200 a 来的旱涝规律, 并探讨引起旱涝的可能原因。[结果] 渭河流域近 200 a 来轻旱出现频率最高, 大涝出现频率最低, 前 100 a 上游以旱为主, 下游以涝为主, 后 100 a 则相反, 中游旱涝变化波动较小。旱涝变化第一主周期上游为 18 a, 中游 62 a, 下游 10 a, 以中小周期为主。ENSO 指数与渭河旱涝序列的滑动相关系数与 ENSO 方差下降的一致性, 表明渭河旱涝与 ENSO 之间的遥相关机制。对比发现太阳黑子与旱涝存在显著相关关系, 旱涝周期与降水分析表明两者在短周期下变化较为趋同。[结论] 渭河旱涝前后突变有很高的继承性, 与气候环境变化密切相关; 旱涝空间差异明显, 且太阳黑子谷值时更应注意防灾减灾。

关键词: 气候变化; 旱涝灾害; 渭河流域; ENSO; 滚动相关

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)02-0255-08

中图分类号: P467

文献参数: 胡浩楠, 刘引鸽, 马凯. 渭河流域百年尺度水旱特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 255-262. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.037; Hu Haonan, Liu Yinge, Ma Kai. Characteristics and its influencing factors of drought and flood at centennial-scale in Weihe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 255-262.

Characteristics and Its Influencing Factors of Drought and Flood at Centennial-scale in Weihe River Basin

Hu Haonan¹, Liu Yinge^{1,2}, Ma Kai¹

(1. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China;

2. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation of Shaanxi Province, Baoji, Shaanxi 721013, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of the drought and flood in the Weihe River basin and their influencing factors under climate change were studied, in order to provide scientific support for regional water resources planning and management, ecological environment construction and maintenance, climate prediction, and disaster prevention and mitigation. [Methods] We used historical data during 1800—2017 to establish the drought and flood sequence, and the wavelet transform, sliding t -test, rolling correlation and other methods to study the flood/drought characteristics of the Weihe River for more than 200 years. And the possible causes of droughts and floods were explored. [Results] The frequency of mild droughts was the highest, while the frequency of major floods was the lowest in the past 200 years. In the first hundred years, the upper reaches of the river was dominated by drought, and the lower reaches was dominated by floods. The next 100 years were opposite to the previous ones. The fluctuations of drought and flood in the middle reaches were less. The first main period of drought and flood change was 18 years for the upstream, 62 years for the midstream, and 10 years for the downstream. Most of them were small and medium cycles. The

收稿日期: 2019-11-05

修回日期: 2019-11-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“近 200 年来渭河流域气候变化水文效应及机制研究”(41771048); 国家社会科学基金项目(15XZZ012); 宝鸡文理学院重点项目(ZK16061); 宝鸡文理学院自然地理学陕西省重点学科项目

第一作者: 胡浩楠(1993—), 男(汉族), 陕西省商洛市人, 硕士研究生, 研究方向为区域气候变化及历史灾害。Email: kuangbiao_2009@163.com。

通讯作者: 刘引鸽(1965—), 女(汉族), 陕西省兴平市人, 博士, 教授, 主要从事气候变化、资源环境管理及生态方面研究。Email: yingeliu@163.com。

consistency between the sliding correlation coefficient and the decrease of ENSO variance was obtained, indicating the remote correlation mechanism between the drought/flood of Weihe River and ENSO. There was a teleconnection between the drought/flood sequence and ENSO. The analysis of drought and flood period and precipitation showed that the changes of sunspot and flood period were similar in short period. [Conclusion] The mutation of drought and flood in Weihe River has a high inheritance, which is closely related to climate and environmental change. Besides, more attention should be paid to disaster prevention when the number of sunspots is low.

Keywords: climate change; drought and flood disaster; Weihe River basin; ENSO; scroll related

作为国际气候变率与可预报性计划的重要内容^[1],历史气候成为越来越多学者研究的焦点。在全球气候变化速度加快的背景下,我国旱涝灾害发生次数显著上升,对区域水资源和经济发展产生重大影响。我国关于历史气候,降水及早涝灾害的史料及档案记载较为丰富,学者利用历史资料建立灾害序列重建历史气候已取得一定进展^[2-7],为认识历史时期气候变化下的旱涝灾害规律,时空特征等提供了重要借鉴。但前人的研究大多集中于我国大尺度研究或东部季风区研究,对渭河流域在百年尺度气候变化下极端气象灾害及其水文影响的研究甚少。为此,本文在前人研究基础上,通过对 1800—2017 年渭河洪涝灾害的统计,重建近 200 a 来渭河旱涝序列,探索历史时期渭河旱涝时空变化特征,分析灾害发生的周期规律,从太阳活动、ENSO 和降水等方面对可能引起旱涝灾害的原因进行探究,对区域水资源规划管理、生态环境建设与保持、气候预估及防灾减灾工作的开展具有重要意义。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

考虑到历史资料保存的完整性,以及地理环境和气候特点,基于空间分布的匀称性,选取渭河干流域具有代表性的 50 个县作为研究区域,选取的县区均距渭河干流 100 km 以内,包括咸河、散渡河、牛头河、千河、漆水河、黑河、灞河、泾河、洛河等 25 条支流流域,较完整的涵盖干流上中下游,因此具有代表性,可体现该流域的旱涝特征,收集文献中关于旱涝灾害的记载(如洪水泛滥、河流干涸粮价飞涨等)。历史资料源自《陕西历史自然灾害简要纪实》《陕西省志水利志》《凤翔县志》《陇县志》《中国气象灾害大典·陕西卷》《中国气象灾害大典·甘肃卷》《西北灾荒史》《中国三千年气象记录总集》,21 世纪以来的旱涝情况从当年的气候影响评价、气候公报和气象观测资料中获得。ENSO(厄尔尼诺—南方涛动)指数资料提取自

文献[8]及网络 https://Origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php,太阳黑子资料源自网络 <http://sidc.oma.be/index.php>。

1.2 研究方法

依据《气象干旱等级(GB/T20481-2006)》《气象灾情收集上报调查和评估试行规定》《中华人民共和国水利行业标准:洪涝灾情评估标准(SL579-2012)》,借鉴标准化降水指标 SPI^[9-10],将历史文献记载的定性资料转化为定量的旱涝等级数据,重建旱涝等级序列,在界定灾害等级时,结合渭河沿岸地区实际情况,采用典型用语,指定满足条件,使用 7 级划分法对旱涝等级序列进行重建,1 至 7 级分别代表大涝、轻涝、微涝、正常、微旱、轻旱、大旱,并计算灾害指数,具体过程见参考文献[11]。

小波分析具有时频多分辨功能的特点,采用此方法判断旱涝在时间序列上的变化周期。滑动 t 检验通过对两组数列平均值是否存在显著差异来判别是否存在突变,采用此方法检测旱涝突变。运用 Origin, Matlab, DPS, ArcGIS 等软件对数据进行处理,分析渭河流域的旱涝变化特征。

2 结果分析

2.1 旱灾与涝灾的时间变化特征

根据以上方法建立的渭河旱涝灾害等级序列,为验证所建立灾害序列的有效性,将所建立的灾害序列与中央气象局气象科学研究所主编的《中国近 500 年旱涝分布图集》^[12]做 5 a 滑动平均对比(图略),此图集因能反映中国过去 500 a 的干湿状况而被广泛使用。对比发现两曲线的走势有较好一致性,表明所建立的旱涝序列比较符合实际情况。通过对旱灾和涝灾进行统计(图 1)。发现 19 世纪的前 50 a 未发生大涝灾害,大旱的灾害出现了 3 次,轻涝 4 次,轻旱 2 次。19 世纪的后 50 a,大涝灾害仅出现了 1 次,大旱出现 4 次,轻涝 2 次,轻旱 3 次。20 世纪的前 50 a 大涝出现多达 8 次,大旱出现了 5 次,轻涝出现 4 次,轻

旱出现了 8 次。20 世纪的后 50 a 中,大涝出现 4 次,而大旱出现了 9 次,轻涝 4 次,轻旱 11 次。2000 年后至今,大涝出现 2 次,大旱 5 次,轻涝 3 次,轻旱 2

次。近 200 a 以来,大涝共出现频率为 8%,大旱出现频率为 14%,轻涝出现频率 11%,轻旱出现频率 16%。

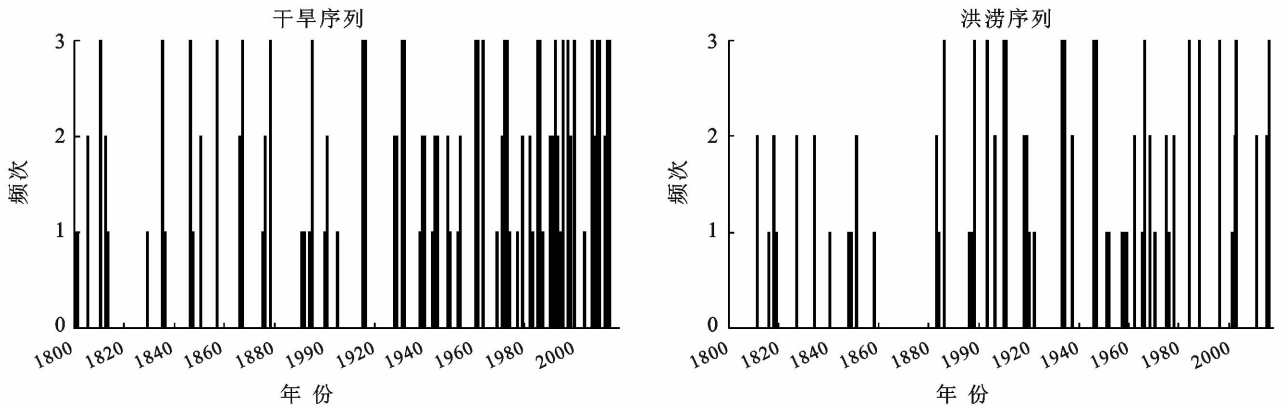


图 1 渭河流域旱涝序列频率

依据《中国近 500 年旱涝分布图集》和流域内站点资料的齐全程度,发现渭源、天水、宝鸡、咸阳、西安、铜川、渭南均位于渭河干流沿岸且在研究区内分布较为均匀,具有代表性,为了探究极端旱涝及其特殊性,选取这 7 个站点作为流域的典型站点进行分析。统计发现,图集中各站点大旱灾发生次数至少在 4 次以上,近 200 a 来大旱灾出现最多的站点是渭南,出现 8 次,大旱灾出现最少的是渭源,仅出现了 4 次,其中,1993—1995 年各大站点都发生连续大旱事件,1994—1996 年天水连续 3 a 发生大旱事件。旱灾中以 1929 年陕西大旱年为代表,此次旱灾致 25 万人死亡,40 余万人出逃,持续 3 a。各站点大涝年份至少出现过 2 次,近 200 a 来大涝出现最多的站点是宝鸡站,出现 7 次,大涝出现最少的是铜川,仅出现 2 次,其中 1983—1984 年,渭南、宝鸡和西安连续大涝,2003 年渭南出现大涝,2009—2010 年西安和渭南发生连续大涝,这些站也基本分布在渭河中下游。涝灾以 2003 年渭河洪灾为代表,共 56 万人受灾,37 万余人被迫迁移,直接经济损失 23 亿元。

2.2 旱灾与涝灾空间变化特征

由于统计结果为县级,史料缺少更低行政级别的记载,且限于地形因素,秦岭一侧的站点较少,空间分辨率相对较低,需要将县级灾害指数空间插值到整个研究区(图 2)。指数值越高表明越早,反之亦然。可见渭河上游呈现由涝转旱再转涝的趋势,上游在 1851—1900 年期间以旱灾为主,之后逐渐向涝灾转变,1951—2000 年主要是涝灾。中游由涝转旱的趋势不明显,下游在前 1800—1900 年以涝灾为主,在 1900 年后涝灾减少,旱灾有增多趋势。将旱灾、涝灾

指数分别插值(图 3),更能明显的看出旱、涝的空间分布特点。图 3 显示,200 a 来轻旱基本发生于渭河上游,大旱在渭河中游频发,下游为轻旱大旱交替发生。涝灾以渭河上游和下游较为显著,中游基本以轻涝为主,大涝发生较少。前 100 a 上游以旱为主,下游以涝为主,后 100 a 上游以涝为主,下游以旱为主,中游旱涝波动幅度较小。

总体上来看渭河旱涝各段差异明显。渭河属于大陆性季风气候,受西太平洋副热带高压或蒙古高压的控制,属于旱涝异常的敏感区域,水旱灾害频发。渭河流域旱涝灾害的演进过程与渭河流域的气候条件和人类活动密不可分。旱涝灾害多发地区人口稠密,人类活动的加剧,使得人地矛盾突出,人地关系紧张,致使河流生态环境较为脆弱,为旱涝灾害的发生提供了条件。

2.3 旱灾与涝灾周期及突变特征

运用 MATLAB 分别对上中下游旱涝序列进行小波分析(图 4)。由小波实部图可见,渭河上游存在 5~8 a,18~20 a 和 49~50 a 较为明显的旱涝周期,在 18 a 左右的周期震荡最强,为第一主周期,第二主周期 50 a,第三主周期 8 a。中游存在 8~10 a,47~49 a,60~63 a 较为明显的旱涝周期,在 62 a 左右的周期震荡最强,为第一主周期,第二主周期 49 a,第三主周期 9 a。下游存在 10~11 a,19~21 a,38~40 a 较为明显的旱涝周期,在 10 a 左右的周期震荡最强,为第一主周期,第二主周期 39 a,第三主周期 20 a。整体来看,渭河大多正负值中心均分布于 60 a 频段以下,说明渭河水旱灾害周期变化中小周期明显,且水旱灾害交替出现。

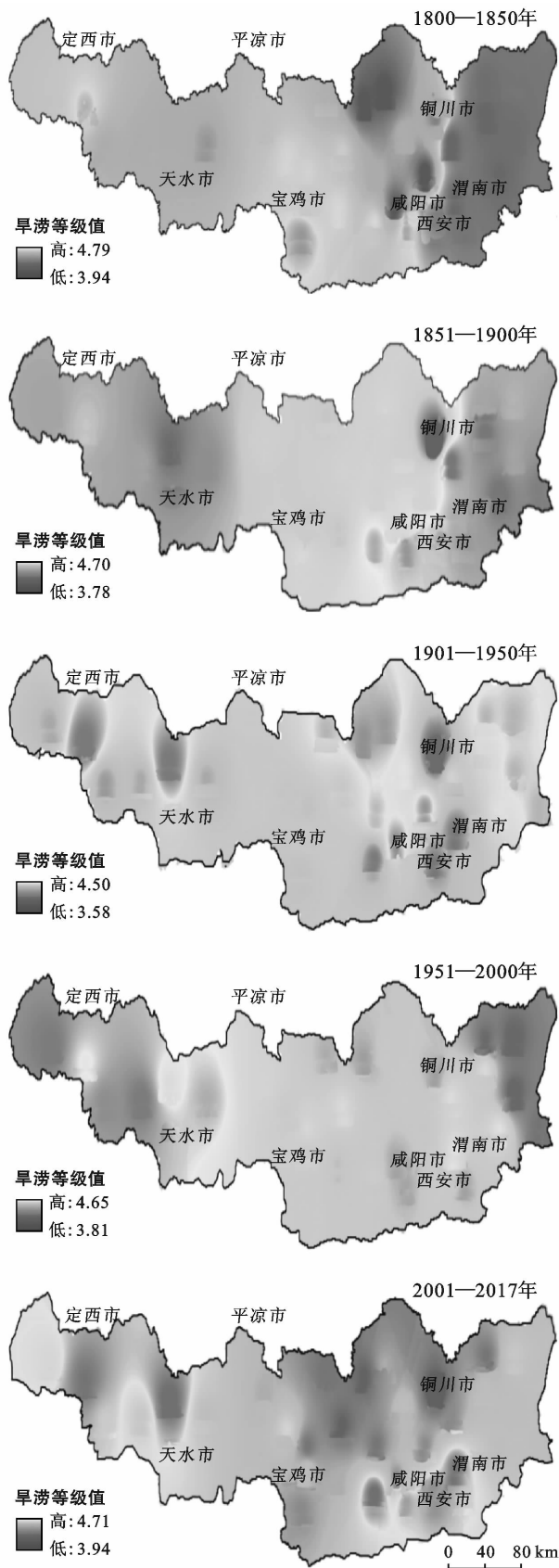


图 2 渭河旱涝灾害空间分布

气候突变是气候系统由稳定形态向另一种气候状态的变化,是气候性质非线性的一种表现^[13],分析

渭河旱涝突变对旱涝长期变化关系的研究和预测未来旱涝趋势有重要作用。使用 DPS 数据处理系统按上中下游对近 200 a 来渭河流域地区水旱灾害数据进行滑动 t 检验,达到 95% 置信水平以上,以分析渭河流域旱涝突变特征。由图 5 可以看出,上游的滑动 t 检验显示,近 200 a 以来,渭河上游存在 9 个突变点,分别是 1880, 1881, 1882, 1889, 1890, 1891, 1924, 1938 和 1999 年,共有 5 个突变年代。中游(图 5)存在 6 个突变点,分别为 1837, 1913, 1914, 1915, 1920 和 1931 年,共有 4 个突变年代。下游存在 8 个突变点,分别为 1825, 1881, 1902, 1916, 1917, 1918, 1919 和 1930 年,共有 5 个突变年代。综合上中下游,发现 1880, 1914, 1932 年前后都发生过突变,有很高的继承性,其中 1880 年前后表现为由旱转涝, 1914 年前后为由涝转旱, 1932 年前后为由旱转涝。这些突变的发生可能与气候环境变化密切相关。

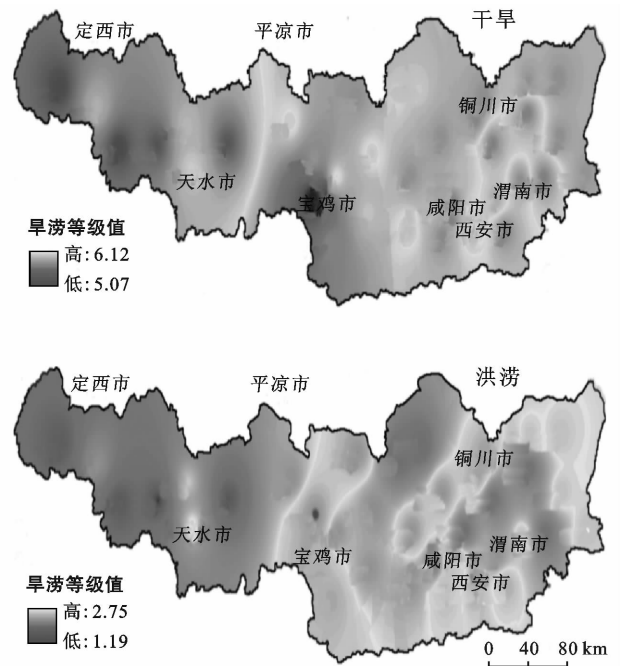


图 3 近 200 a 来渭河干旱、洪涝空间分布

2.4 旱涝阶段性和季节性特征

根据计算的旱涝指数,以旱灾平均指数(4.75)和涝灾平均指数(3.22)为基准线,分别绘制渭河旱灾、涝灾年代指数图(图 6),无灾值为 4,若某年的灾害指数离 4 越远,则那年灾害程度越强。可以看出,19 世纪前,旱灾指数多在涝灾平均指数值 3.225 以上。而该时期旱灾基本也是围绕旱灾平均指数值 4.752 小幅波动,说明 19 世纪旱涝灾害虽均有发生,但强度较小。自 19 世纪末开始,渭河沿岸地区呈现涝灾频繁,这是因为近 200 年来整个关中地区处于涝灾频繁发

生区,降水量普遍增加,泾洛河涝灾频繁发生导致。进入 20 世纪,两曲线波动幅度逐渐剧烈,旱涝灾害强

度随年代逐渐增加,可见在近 200 a 来渭河流域旱灾和涝灾都具有明显的阶段性特征。

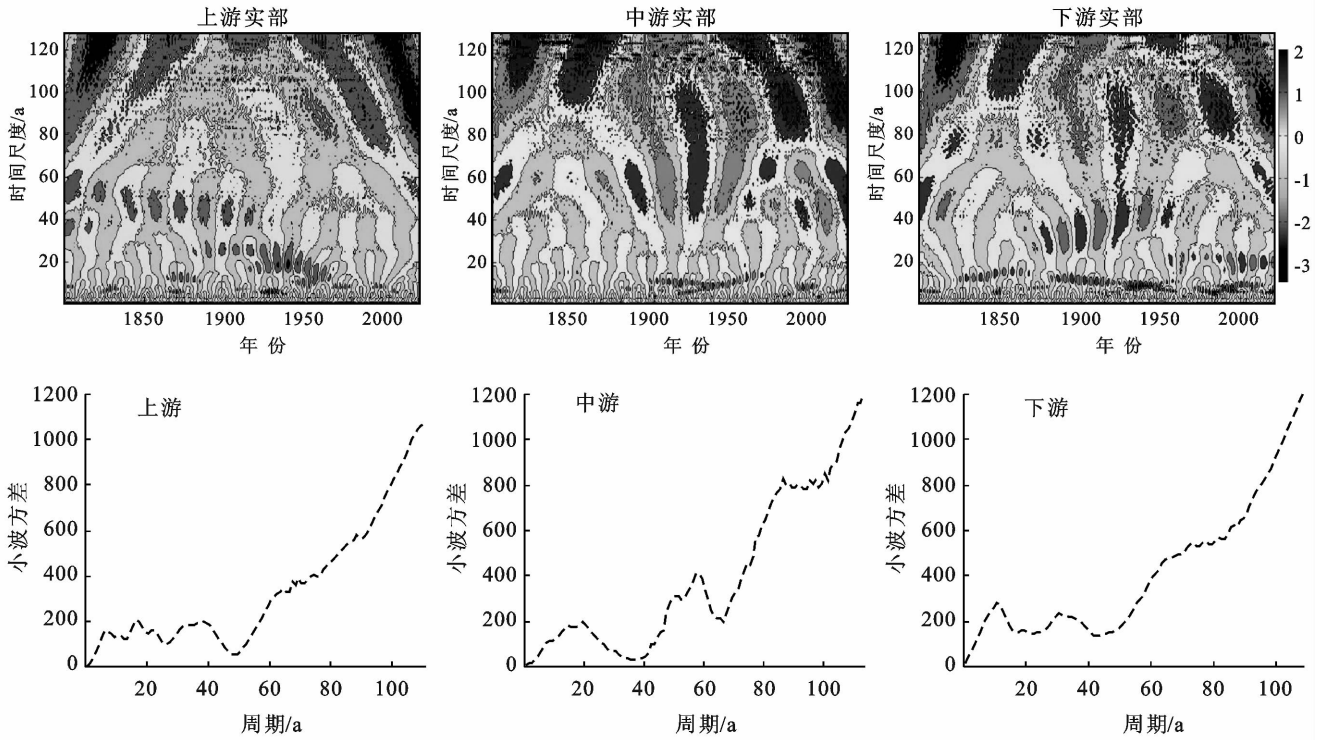


图 4 渭河流域旱涝序列小波实部及方差

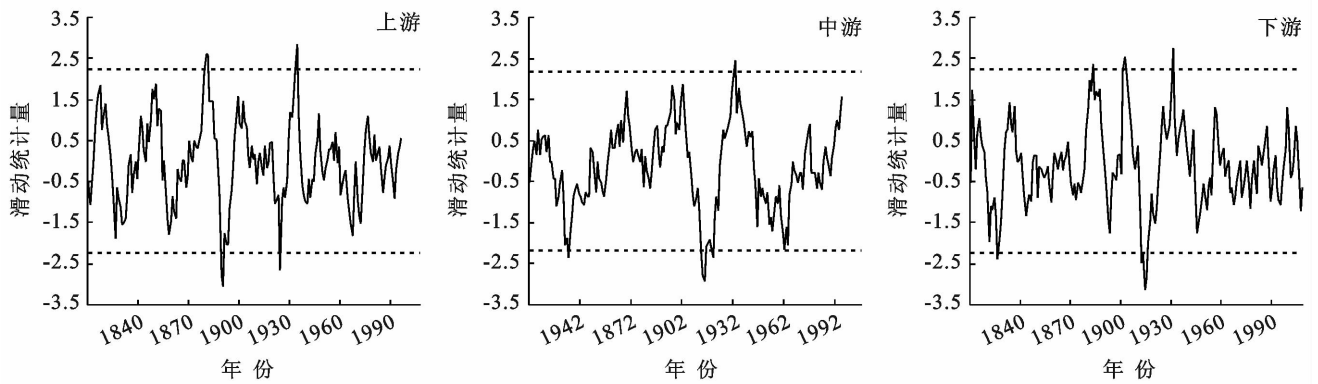


图 5 渭河流域旱涝序列滑动 t 检验

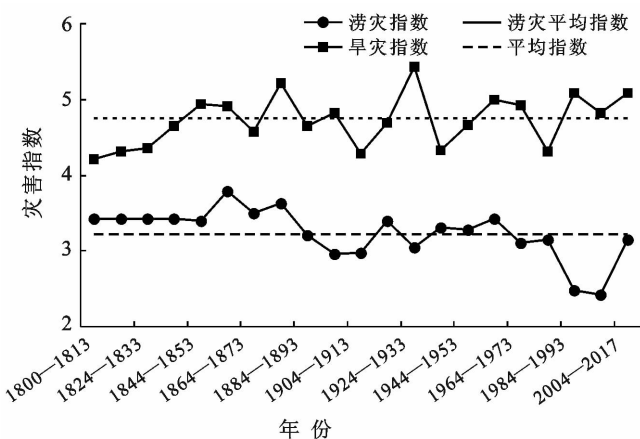


图 6 渭河流域旱涝灾害年代指数变化

通过对 1800—2017 年史料资料的收集和分析,统计得出有 28 a 的旱涝灾害无季节记载,有 177 a 明确记载着旱涝灾发生年份。近 200 a 来,渭河流域旱涝灾害在冬季极少发生,多发生在夏季,涝灾发生年数有 55 a,干旱发生年数有 59 a,秋、春二季发生旱涝的年数较为适中。发生频次由低到高分别为:冬<春<秋<夏,连涝主要集中在夏秋两季,连旱多发生在春夏秋三季,四季均有旱灾的发生的情况有 2 次。季风气候的波动与旱涝的季节分布特征联系密切,渭河流域位于西北地区东部边缘地区,是季风气候向大陆气候过渡地带,夏季旱涝灾害发生较多主要受夏季风变化的影响。在温带大陆气团的作用下,冬季气温较

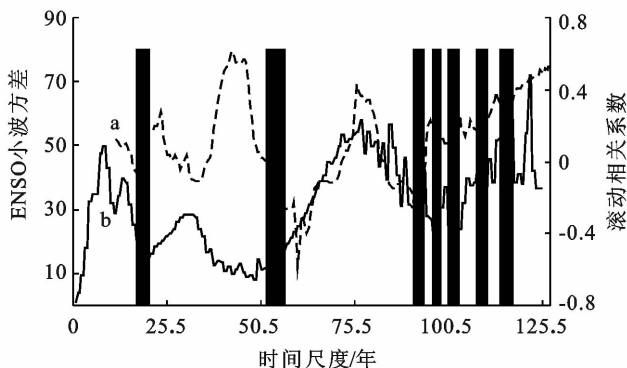
低且较为干燥,不易发生洪涝灾害。夏、冬季风交替的过渡期为秋、春季,使得春季温度上升快,降雨量下降,秋季降温迅速,阴雨连绵,致使关中地区成为我国秋季连阴雨发生频次较高的地区之一。

3 影响旱涝的因素

3.1 南方涛动与渭河旱涝的关系

许多研究对中国年西北地区的站点的古降水重建时均发现有来自 ENSO 的影响^[14-17],同时,ENSO 也被认为是引起中国水文气候变化的一个非常重要的因素^[18],为此,讨论了渭河旱涝与 ENSO 之间的关系及其全球变暖背景下的相关影响。

使用小波变换研究 1867 年以来渭河流域旱涝与 ENSO 之间的关系(图略),发现渭河旱涝序列存在 10~20 a 短周期和 80 a 长周期,旱涝交替发生,ENSO 序列存在 10 a 和 30 a 的中短周期震荡和 80 a 的长周期,且间歇性发生,表明两个序列之间存在有显著的相关性。为进一步研究二者之间的关系,计算 ENSO 指数与渭河旱涝序列的滑动相关系数,并与 ENSO 指数的 131 a 方差对比(图 7),可以看出滑动相关系数与 ENSO 方差下降的一致性。滑动相关系数可进一步说明旱涝序列与 ENSO 相关关系的年代际变化特征^[19]。这些表明 ENSO 与渭河旱涝之间有一定的遥相关机制,即渭河旱涝的发生受到周期性的 ENSO 影响。一般认为 ENSO 与中国西北地区的干旱异常相联系。赤道东太平洋的海水表面温度受厄尔尼诺现象而上升,经向温度梯度变大,哈德来环流增强,导致西太平洋副热带高压强度增大,从而影响中国西北地区降水^[20],而且 ENSO 对泛太平洋地区水文和气候的影响随着 ENSO 的加剧而增大,反之亦然^[21]。



注:a 旱涝序列与 ENSO 指数的滑动相关系数;b ENSO 指数小波方差灰色垂直阴影表示滑动相关系数与 ENSO 方差下降的一致性。

图 7 ENSO 与渭河旱涝的遥相关机制

3.2 太阳黑子与渭河旱涝的关系

图 8 为渭河流域的旱涝指数与太阳黑子的相关性,整体来看,太阳黑子数和渭河旱涝指数表现为正相关,太阳黑子数越大旱涝指数越大,表示干旱发生可能性越大,反之亦然。在太阳黑子达到峰值时,旱涝指数呈现 2~3 a 的滞后期达到峰值。如 1848, 1859, 1870, 1893, 1928, 1957 和 1979 年等为太阳黑子峰值年,而 1850, 1861, 1871, 1895, 1931, 1960 和 1982 年为旱涝指数的峰值年。统计发现,自 1800 年始,太阳黑子 19 次达到谷值,20 次达到峰值,在谷值的前后 3 a 内共发生灾害 36 次,其中涝灾 13 次,重度涝灾 4 次,中度涝灾 7 次。在太阳黑子峰值前后 3 a 中共发生灾害 33 次,其中旱灾发生 21 次,其中重度旱灾 4 次,中度旱灾 10 次。由此可推断,在太阳黑子达到谷值时渭河流域出现灾害频次较多,更应该注意防灾减灾。

3.3 降水与渭河旱涝的关系

为了确定渭河旱涝变化与降水时间序列是否有周期的相关性,选取渭河干流具有代表性的天水,宝鸡,咸阳,西安,渭南 5 个站自 1960 年以来的降水数据,与其对应的旱涝序列做小波方差对比(图 9),曲线的每个峰值表面对应所在尺度下有显著周期^[22]。由图可见,天水站的旱涝方差峰值出现在 7 a, 22 a, 28 a, 而其降水方差峰值出现在 4 a, 7 a, 12 a, 19 a, 表明天水的旱涝序列与降水序列在 7 a 左右的周期下变化趋势相同。宝鸡站的旱涝方差最高峰值出现在 12 a, 故其第一主周期为 12 a, 宝鸡站降水方差最高峰值也在 12 a 出现, 表明宝鸡站旱涝序列与时间序列的第一主周期变化趋势相同。咸阳站的旱涝方差峰值出现在 5 a, 11 a, 29 a, 而其降水方差峰值出现在 7 a, 11 a, 24 a, 表明咸阳的旱涝序列与降水序列在 11 a 左右的周期下变化趋势相同。西安站的旱涝方差峰值出现在 7 a, 11~12 a, 30 a, 而其降水方差峰值出现在 7 a, 11~12 a, 23~24 a, 表明西安的旱涝序列与降水序列在 7 a, 11~12 a 左右的周期即第二、第三主周期下变化趋势相同。渭南站出现多个旱涝方差峰值, 但与其降水方差峰值重合的只有 7 a 和 15 a, 表明渭南的旱涝序列与降水序列在 7 a 与 15 a 左右的周期下变化趋势相同。总的来说各站点的旱涝周期与其对应降水序列的周期变化趋势有重合, 尤其存在 7 a, 11~12 a 左右显著周期的重合, 表明了降水与旱涝在短周期上存在一致性, 但并不完全相同, 这可能是由于旱涝变化受多种因素影响的结果^[23-24], 降水也是重要原因之一。

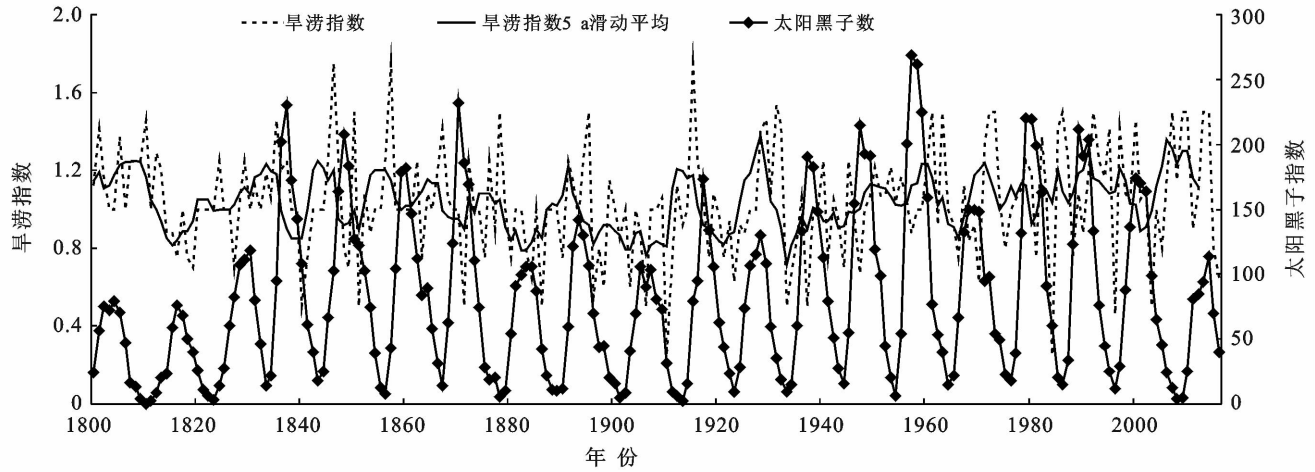


图 8 近 200 a 来太阳黑子与渭河旱涝指数的相关性

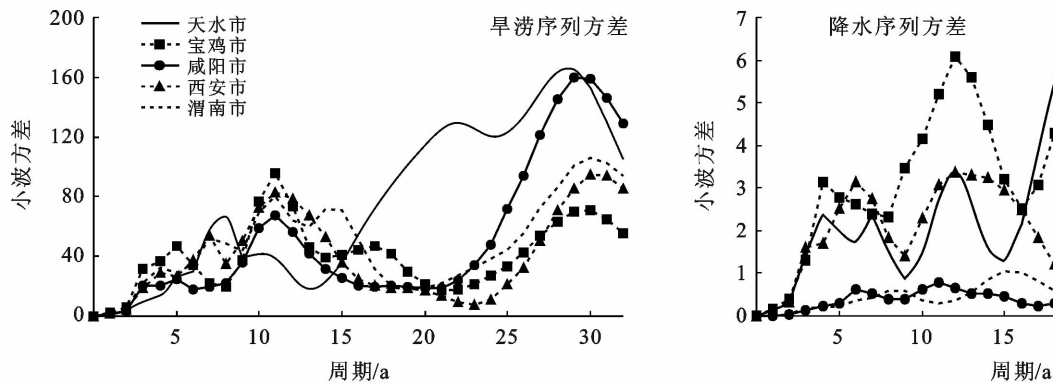


图 9 渭河流域各站点旱涝序列方差与年降水方差

4 结论

(1) 近 200 a 以来,渭河流域旱涝灾害出现频率最高的为轻旱,出现频率最低的为大涝,以渭源、天水、宝鸡、咸阳、西安、铜川、渭南为典型,大旱均发生 4 次以上,大涝至少出现 2 次。在空间上,前 100 a 上游以旱为主,下游以涝为主,后 100 a 则相反,中游旱涝变化波动较小。上游旱涝变化第一主周期为 18 a,中游 62 a,下游 10 a,检验发现上中下游分别存在 9 个、6 个和 8 个突变点,1880(由旱转涝),1914(由涝转旱),1932(由旱转涝)年前后均发生突变,有很高的继承性,这些突变的发生可能与气候环境变化密切相关。

(2) 影响渭河旱涝的因素是多方面的。ENSO 周期与渭河旱涝周期的关联性表明,渭河旱涝与 ENSO 具有遥相关机制,与太阳黑子也有密切的相关性,太阳黑子谷值更应注意预防旱涝。降水与渭河旱涝存在 7 a,11~12 a 左右显著周期的重合,表明了降水与旱涝在短周期上存在一致性,降水是影响旱涝的重要因素之一。由于人口急剧增加,为了减少耕地竞争,

渭河流域沿岸围河造田,致使生态环境脆弱,河流自净能力下降,水土流失严重,也为旱涝灾害的发生提供了条件。未来需要结合人类活动及其响应,对渭河流域旱涝进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] Duplessy J C, Overpeck J. The PAGES/CLIVAR Intersection-providing paleoclimatic perspective needed to understand climate variability and predictability [R]. Venice, Italy: Coordinated research objectives of the IGB Pand WCR Pprograms, 1994.
- [2] Liu Ying, Wang Ninglian, Zhang Junhui, et al. Climate change and its impacts on mountain glaciers during 1960—2017 in Western China [J]. Journal Arid Land, 2019,11(4):537-550.
- [3] 郑景云,张不远,葛全胜,等.过去 2000 年中国东部干湿分异的百年际变化[J].自然科学进展,2001,11(1):65-70.
- [4] 王绍武,赵宗慈.近五百年我国旱涝史料的分析[J].地理学报,1979,34(4):329-341.
- [5] 张德二,刘传志,江剑民.中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析[J].第四纪研究,1997,4(1):1-11.

- [6] 郝志新,葛全胜,郑景云. 过去 2000 年中国东部地区的极端旱涝事件变化[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 388-394.
- [7] 李谢辉,韩荟芬. 河南省黄河中下游地区洪灾损失评估与预测[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 87-92.
- [8] Liu Yingge, Wang Ninglian, Wang Lingang, et al. Variation of cloud amount over China and the relationship with ENSO from 1951 to 2014 [J], *International Journal of Climatology*, 2016, 36(8): 2931-2941.
- [9] 叶柏松等,赵成义,姜逢清,等. 近 300 年来塔里木河流域旱涝灾害特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 173-182.
- [10] 毕硕本,钱育君,陈昌春,等. 1470—1912 年西北东部地区旱涝等级重建序列的特征及对比分析[J]. 干旱区地理, 2016, 39(1): 13-21.
- [11] 刘引鸽,胡浩楠,周欢欢,等. 近 200 年来渭河流域干旱洪涝事件特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 217-223.
- [12] 中央气象局气象科学研究所. 中国近 500 年旱涝分布图集[M]. 北京: 地图出版社, 1981.
- [13] 段文明. 渭河流域旱涝灾害研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
- [14] Fang Keyan, Gou Xiaohua, Chen Fahu, et al. Drought variations in the eastern part of Northwest China over the past two centuries; Evidence from tree rings [J]. *Climate Research*. 2009, 38(2): 129-135.
- [15] Keyan Fang, Xiaohua Gou, Fahu Chen, et al. Reconstructed droughts for the southeastern Tibetan Plateau over the past 568 years and its linkages to the Pacific and Atlantic Ocean climate variability [J]. *Climate Dynamics*, 2009, 35(4): 577-585.
- [16] Jinbao Li, Fahu Chen, Edward R. Cook, et al. Drought reconstruction for north central China from tree rings: The value of the Palmer drought severity index [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(7): 903-909.
- [17] Li J B, Gou X H, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the Central Tianshan area in Northwest China [J]. *Geophysical Research Letters*. 2006, 33(7): L07715.
- [18] Chen Jianhui, Chen Fahu, Song Feng, et al. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the medieval climate anomaly and little ice age: Spatial patterns and possible mechanisms [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 107: 98-111.
- [19] Harry F L, David D Z, Qing P. Reconstruction of the geographic extent of drought anomalies in Northwestern China over the last 539 years and its teleconnection with the Pacific Ocean [J]. *The Holocene*, 2015, 25(8): 1271-1284.
- [20] Feng Song, Hu Q. Variations in the teleconnection of ENSO and summer rainfall in Northern China: A role of the Indian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(24): 4871-4881.
- [21] Li J, Xie S P, Cook E R, et al. EI Nino modulations over the past seven centuries [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9): 822-826.
- [22] 张肖南,史兴民,杨尚英. 西安夏、秋季降水与太阳黑子的关系[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 485-490.
- [23] Liu Yingge, Wang Shaoxiong, Wang Yan, et al. Evaluation of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin based on statistical downscaling [J]. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 191(1): 1-7.
- [24] Liu Yingge, Guo Zhongming, Zhou Qi et al. The climate characteristics of the first date of ≤ 0 °C temperature in East China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2015, 47(2): 83-93.