

唐代陕西黄土高原中南部地区洪涝灾害与气候特征

刘 乐¹, 岳大鹏¹, 赵景波^{1,2}, 赵 艳¹

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘 要: 鉴于洪涝灾害对陕西黄土高原中南部地区的生态建设与经济发展影响重大, 基于洪灾历史文献记录, 结合数理统计、距平分析、连续小波变换及湿润指数等方法, 对唐代(公元 618—907 年)陕西黄土高原中南部地区洪灾发生规律与气候变化进行了分析。结果表明: 洪灾发生频次可分为 4 个阶段: 618—637 年与 728—847 年为洪灾高频期; 638—727 年与 848—907 年为洪灾低频期; 受夏季风影响, 洪灾发生频次整体变化趋势呈波动下降趋势; 洪灾等级具有 2~5 a, 5~9 a, 20~30 a 及 52~80 a 的周期, 推测洪灾的发生与 ENSO 及 PDO 正负相位存在一定联系; 空间上, 崂山以南的黄土高原沟壑区为洪灾多发区; 气候干湿特征表现为 618—637 年气候偏湿, 638—837 年整体偏干但存在 10 a 及 20 a 尺度气候偏湿的时期, 838—907 年以约 10 a 尺度进入干湿交替状态。唐代陕西黄土高原中南部地区较大洪灾年份与降水持续时间较长、暴雨这类极端降水事件及气候波动频繁存在联系。

关键词: 洪涝灾害; 洪涝周期; 气候特征; 唐代; 陕西黄土高原

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)06-0284-06

Flood Disasters and Climate Characteristics in Tang Dynasty in the Middle South of Loess Plateau in Shaanxi

LIU Le¹, YUE Dapeng¹, ZHAO Jingbo^{1,2}, ZHAO Yan¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: In view of the significant impact of flood disasters on the ecological construction and economic development of the middle south Loess Plateau in Shaanxi, based on historical records of flood disaster combined with the methods of mathematical statistics, anomaly analysis, continuous wavelet transform, the humidity index method, the varying regularity of flood disasters and the climate change in the middle south of Loess Plateau were analysed in Shaanxi Province in Tang dynasty (618—907 AD). The conclusions are as follows: The frequency of flood disasters can be divided into four stages, 618—637 and 728—847 are the high frequency period of flood disasters, 638—727 and 848—907 are the low frequency period. The variation of flood frequency is affected by the summer monsoon showing a downward fluctuating trend. Flood disaster grade has periods of 2~5 years, 5~9 years, 20~30 years and 52~80 years, inferring flood disaster is related to ENSO and the positive and negative phases of PDO. In terms of space, the high frequency area of flood disaster is mainly located in the gully region of south of Laoshan Mountain. Dry and wet characteristics of Climate were that, the climate was wet during 618—637, dry in 638—837 but existing scales of 10 years and 20 years of wet stage. From 838 to 907, it entered into the state of dry and wet alternation in a scale of about 10 years. In the Tang Dynasty, the major flood years were closely related to the long duration of precipitation, extreme precipitation events such as rainstorm and frequent climate fluctuations.

Keywords: flood disaster; flood periodicity; climatic characteristics; Tang Dynasty; the Loess Plateau in Shaanxi

收稿日期: 2021-08-26

修回日期: 2021-09-20

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41930641); 黄土与第四纪地质国家重点实验室项目(SKLLQG2013)

第一作者: 刘乐(1994—), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源评价与规划。E-mail: lle0528@snnu.edu.cn

通信作者: 岳大鹏(1964—), 男, 陕西兴平人, 博士, 教授, 主要从事自然地理、土壤侵蚀和土地资源与环境研究。E-mail: yuedp@snnu.edu.cn

全球变暖加剧了气候系统的不稳定性,与气候系统密切相关的极端水文灾害如洪涝灾害成为社会各界关注的焦点^[1-2]。中国人口众多,地域广阔,气候类型多样且气候变率较大,近年来显著增加的极端天气事件导致我国洪灾发生频次增多,对国民经济发展和社会稳定性形成较大的冲击性^[2-4],根据《中国水旱灾害防御公报 2019》统计,1950—2019 年中国平均每年因洪涝灾害死亡的人数为 4 047.29 人,造成的经济损失达 1 522.81 亿元/a^[5]。历史时期区域尺度旱涝灾害演变规律是“过去全球变化研究”(PAGES)的重要研究内容^[1]。国外学者多从树木年轮、湖泊和河流沉积物中提取过去洪水事件的信息,对洪水动力学及其触发机制展开研究^[6-7]。中国文化源远流长,既有树轮、冰芯、湖泊沉积、石笋等自然证据,也有记载详实、定年准确、气候指示意义清楚的史料记录覆盖自然证据匮乏区域,是开展过去气候变化研究的理想场所^[1,3-4]。我国学者通过统计分析历史文献记录,对数百年至千年尺度中国东部、西北、西南等区域的旱涝灾害时空分布格局与演变特征、极端旱涝事件序列进行了深入的研究^[3-4,8-9],还基于流域尺度参考史料记录或对比河流洪水沉积剖面对流域不同时期洪水特征、洪灾成因及气候变化背景进行分析^[10-12]。以上研究多从宏观尺度探究过去气候环境变化规律,对于典型的气候变化敏感区如夏季风过渡地带的旱涝灾害的时空分布与其气候背景的研究少有报道^[12]。

中国受夏季风影响的区域广泛,夏季风强度的年循环、年代际变化及其趋势性突变过程造就了中国旱涝交替的基本气候特征,也导致了区域重、特大旱涝灾害的出现^[2-3,12-13]。而夏季风过渡地带往往处于农牧交错带或地表类型以生态过渡区为主,生态环境相对脆弱,水土流失十分严重^[13]。陕西黄土高原地处夏季风过渡区,该区降水、径流的年内分配不均且年际变化大,易产生历时短、强度大的特大暴雨,因其突发性强,破坏性高,引发的洪水灾害对该区人民生活影响较大^[13-15]。唐代是气候史上的相对暖湿时期,在这种特殊的气候背景下降水偏多,雨量丰沛^[16-17]。唐代 290 年中洪涝灾害年占比接近一半,远高于其他类型自然灾害^[17]。陕西黄土高原中南部地区在唐时期临近政治统治中心,洪灾相关的历史资料较多且记载较为详细,有利于开展洪涝灾害的相关研究^[18-21]。本文利用历史文献资料,提取该区唐代 618—907 年的洪涝灾害信息,探讨唐代研究区洪灾时空变化规律及气候特征,有助于了解气候过渡带的

洪灾对历史时期气候变化的响应,对黄土高原地区灾害的预防及生态环境建设具有重要的实际意义。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

本文研究区域为陕西黄土高原中南部地区,该区海拔为 1 000~1 600 m,其中耀州区南部的河谷平原区海拔为 600~700 m^[14],为全区最低的地段。地理坐标位于 34°29′—37°30′N,106°25′—110°36′E,地跨陇县、千阳县、麟游县、永寿县、长武县、彬州市、旬邑县、淳化县、白水县、澄城县、合阳县、韩城市、宜君县、印台区、王益区、耀州区及延安地区,共计 22 个县、5 个区、2 个市。研究范围内,白于山以南、崂山以北的延安地区属于黄土高原丘陵沟壑区,延安地区以南的县市位于黄土塬沟壑区,区间黄土塬、梁状丘陵与基岩山地等地形单元交错分布^[14]。陕西黄土高原地处东亚夏季风和 中纬度西风的耦合区,干湿条件空间变异性较大,其中部属于大陆性季风气候,南部属于半湿润性季风气候,年平均降水量为 350~600 mm,自中部向南整体干燥程度减弱,湿润程度增强^[14,19]。

1.2 研究方法

(1) 灾害等级法。参考前人洪灾的分级方法,结合研究区具体情况,按照洪灾范围大小、降水持续时间长短及洪灾的影响程度,把洪涝灾害划分为 4 个等级(表 1)^[10,22],将文献记录中定性的描述定量化。

(2) 趋势分析法。结合最小二乘法意义下的 6 次多项式拟合与距平分析探究洪灾发生的阶段性与趋势特征^[10]。

(3) 小波分析。连续小波变换(CWT)在提取信号特征方面具有优势,近年来在气候学相关研究中被广泛运用^[23]。运用连续小波变换对洪涝灾害等级序列进行分析,提取等级序列的局部特征以研究不同时间段的周期变化特征。

(4) 湿润指数法。从概率论统计观点出发,把研究区域某个时间段内发生的水旱灾害次数作为水旱事件的总体,用水旱灾害的比值来代表气候的干湿状况,能一定程度上消除水旱资料的时空不均匀性^[22],其计算公式如下:

$$I=\frac{2F}{F+D}$$

式中: I 为湿润指数,其数值在 0~2 范围内; F 为某区域某年的水灾(洪涝灾害)的记载次数; D 为相应的旱灾记载次数。 $I=1$,是水旱灾害相等的年份(包括水旱均无记载的年份),代表旱涝中等; $0<I<1$,代表气候偏旱; $1<I<2$,代表气候偏湿。

表 1 唐代陕西黄土高原中南部地区洪涝灾害定级

洪涝等级	受灾状况	等级表示
轻度洪涝	局部、小范围的几个县发生,出现持续性时间不长的降水,对人民的生产生活未造成影响。文献中有小范围的“大水”“水”“大雨水”的灾害记录。如公元 629 年,“秋,陇县、千阳一带大水。”公元 838 年,“夏,鄜、坊等州大水。”	1
中度洪涝	受灾范围不大但降水持续时间较长,有庄稼被损害、农田被淹没、建筑损坏,或水灾额赋相应被减免的相关记载。如公元 665 年,“6 月,甘泉大水淹没房(窑)。”公元 843 年,“9 月,以雨霖免京兆府秋税。”	2
大洪涝	受灾范围较广,降水持续时间较长,大量民田被冲毁,出现庐舍受损、人畜死伤的现象。如公元 727 年,“鄜州雨,洛水溢入州城,平地丈余,损居人庐舍,死者不知其数。”公元 829 年,“4 月,同官县暴雨,漂没居民三百余家。”	3
特大洪涝	受灾范围最广,降水时间长并且强度大,造成生命财产损失、农田绝收等后果。如公元 895 年,“(盖寓)从(武皇)人关讨王行瑜。既平王行瑜,(十一月)旋师渭北,暴雨六十日。”	4

2 数据来源

洪涝灾害记录主要来源于系统的汇编资料包括《中国三千年气象记录总集》^[18]《中国气象灾害大典(陕西卷)》^[19]《中国灾害通史·隋唐五代卷》^[20]《西北灾荒史》^[21]及地方史志。依据唐代行政区划资料把唐代历史记录中洪涝灾害发生的地点对应于现代行政区划图上予以修正,经详细筛选和统计分析共得到洪涝灾害相关数据条目 110 条。

3 结果与分析

3.1 洪涝灾害发生情况

统计中不管洪涝灾害年内发生多地、多次均按一次并选取等级最高的记录计算,以年度为统计单位从 110 条灾害记录中筛选出研究区唐代洪灾相关条目 49 条,建立洪涝灾害等级序列(图 1),再对以上 49 条灾害条目以 10 a 为单位进行统计得到洪涝灾害发生频次分布图(图 2),结合距平分析可以进一步揭示研究区唐代洪涝灾害的阶段性特征(图 3)。

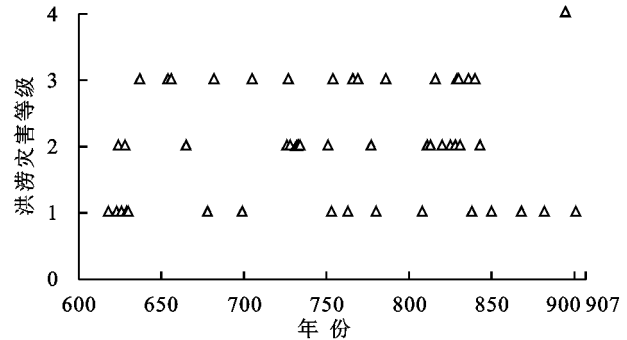


图 1 研究区唐代 618—907 年洪涝灾害等级序列

由图 2—3 可知,陕西黄土高原中南部地区唐代洪涝灾害发生频次整体呈波动下降趋势。根据频次变化特征将洪涝灾害分为 4 个阶段:第一阶段为 618—637 年,发生洪灾 8 次,平均每 2.5 a 发生一次,该阶段洪灾频次最高且以轻度洪涝为主。期间

623—624 年出现 2 a 连涝,628—630 年出现 3 a 连涝,均以轻度和中度洪涝为主。第二阶段为 638—727 年,发生洪灾 9 次,平均每 10 a 发生一次,灾害发生频次较低,以中度洪涝和大洪涝为主。第三阶段为 728—847 年,发生洪灾 27 次,平均每 4.48 a 发生一次,为洪灾高频期,以中度洪涝为主。该阶段内 732—734 年出现 3 a 连涝且均为中度洪涝,828—831 年出现 4 a 连涝且连续 2 a 为大洪涝灾害。第四阶段为 848—907 年,发生洪灾 5 次,平均每 12 a 发生一次,灾害发生频次最低且以轻度洪涝为主。从整体上来看,唐代研究区 618—637 年与 726—847 年洪灾距平值主要以正值为主,638—725 年与 848—907 年距平值则以负值为主(图 2)。综上可知,第一阶段与第三阶段为洪灾高频期,第二和第四阶段为洪灾低频期。

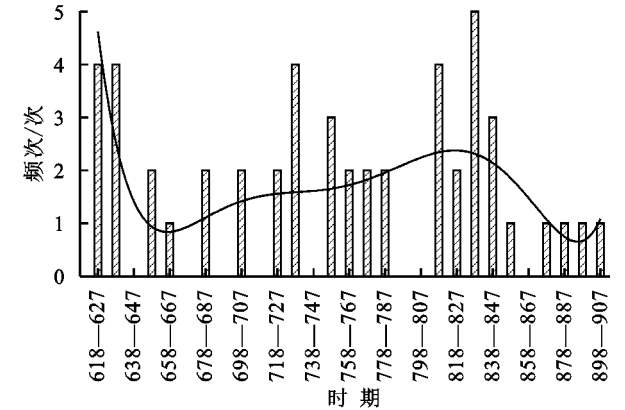


图 2 研究区唐代洪涝灾害每 10 a 频次分布和六次多项式拟合

3.2 洪涝灾害的周期性

对洪涝灾害等级序列进行连续小波变换得到图 4,图中颜色深浅反映出能量密度的相对变化,黑色粗实线圈内的值表示通过了 95%置信水平的红噪声检验,黑色细实线下方是小波影响锥 COI(连续小波变换数据边缘效应影响较大的区域)。在通过显著性检验的范围内,652—658 年、751—756 年、763—771 年、840—843 年、893—898 年具有 2~5 a 的主震荡周期;阶段 710—743 年存在 5~9 a,20~30 a 的周

期;阶段 816—839 年具有 2~5 a, 5~9 a 的周期;阶段 750—836 年具有 52~80 a 的周期。该区唐代洪灾等级的 2~5 a 周期与 ENSO 的 2~8 a 周期相对应,推测具有 2~5 a 周期的时段如 652—658 年、751—756 年及 763—771 年等时段洪灾的发生可能受 ENSO 信号的调节^[24];52~80 a 的周期与 PDO 的 50~70 a 的周期相符合^[25],推测 750—836 年旱涝灾害的发生与 PDO 正负相位可能存在一定关联^[25-26]。

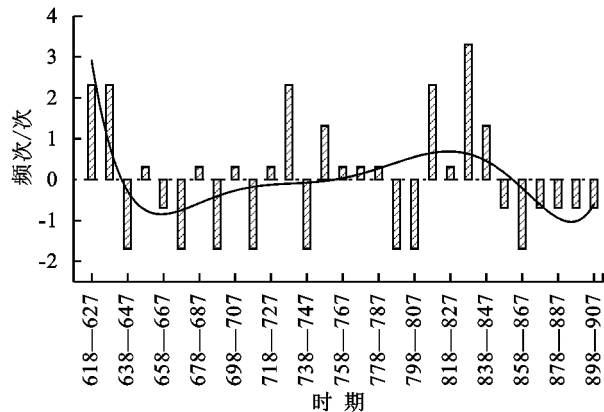
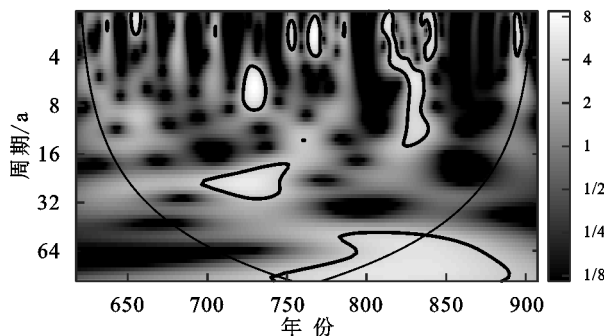


图3 研究区唐代洪涝灾害每 10 a 距平值和 6 次多项式拟合



注:右侧纵坐标数值代表小波能量,数值越高,能量越强,无单位。

图4 洪涝灾害连续小波功率谱

3.3 洪涝灾害空间变化特征

研究区唐代洪涝灾害的 110 条相关记录中 23 条没有具体的县市信息。对于个别县市区划范围同时隶属多个州的,凡所属州发生洪灾了则算作一次,统计中各县市一年中发生多次的均按一次且取等级最高的计算。按照我国现行 5 级行政区划,经统计分析后得到洪灾空间分布图(图 5)。

总体上研究区中部县域洪灾发生频次较南部与北部更多。洪灾频次达 5 次以上的县域中,甘泉县(6 次)、黄龙县(6 次)、富县(8 次)及洛川县(8 次)平均海拔 800~1 400 m,主要分布在崂山以南的黄土高原沟壑区。子午岭以南的铜川市地区包括王益区(8 次)与印台区(8 次)海拔在 960~1 100 m^[14]。以上县域中,甘泉县、黄陵县、富县、黄龙县分布在北洛河中游地区,塬面相对平坦,便于开展农耕活动,人口与农田分布相对密集,发生的洪涝灾害对农户的生产生

活具有较大影响^[14]。铜川地区的中部为黄土残原沟壑区,谷坡陡峭,易于径流聚集,河流比降大,暴雨易引发河水涨落导致洪灾的发生^[27],唐代铜川地区记载的 9 次洪灾中一半以上为大洪涝灾害,如公元 829 年,“4 月,同官县暴雨,漂没居民三百余家。”此外,唐代是较大规模兴修水利工程的时期,唐前期关内地区修建了大量的水利工程,垦辟农田数量随之增加导致大量植被遭到破坏,缺乏植被覆盖的地区对降水汇聚的地表径流无法有效拦截则更易引发洪灾^[16]。

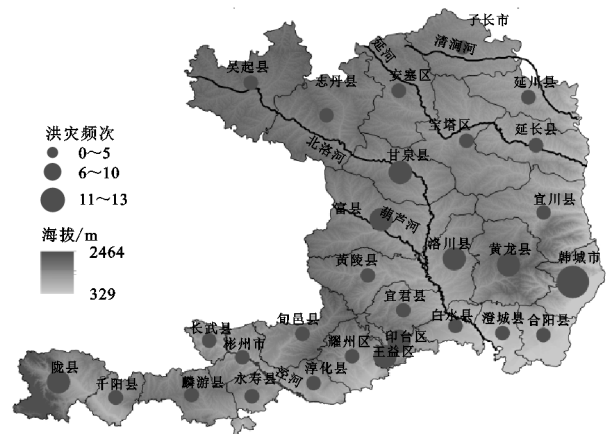


图5 唐代洪涝灾害频次空间分布

4 讨论

4.1 洪涝灾害与气候变化

对研究区唐代旱涝文献汇编资料及地方史志^[18-21]进行梳理与统计可知,湿润指数年代际波动明显(图 6)。618—637 年湿润指数均值为 1.14,处于气候较为湿润的时期。638—727 年洪涝与干旱灾次比达到 1:3,湿润指数均值为 0.59,表明该阶段气候明显偏干。728—847 年处于旱灾较洪灾发生更加频繁的时期,湿润指数均值为 0.84,整体上偏干。848—907 年这 60 a 干湿年代际波动较大,水旱灾害都较为频繁,湿润指数均值为 1.08。可以看出研究区在唐代前 20 a(618—637 年)气候偏湿,638—837 年虽然整体偏干,但 648—657 年与 718—737 年有 30 a 湿润指数 $I > 1$ 。在 838 年之后,以约 10 a 尺度交替进入干湿演替状态。对比本区唐代湿润指数序列(图 7D)与中国东部去趋势干湿指数(图 7A)^[28]序列表明:二者变化过程在绝大多数时段高度一致,均以 618—630 年、718—740 年、888—897 年气候相对偏湿,640—700 年、750—777 年气候偏干,而二者所揭示的多年代尺度波动趋势与黄河中下游地区干湿指数序列^[29](图 7B)及西安旱涝等级序列 50 a 滑动平均曲线^[30](图 7C)基本对应,整体均呈现出 618—700 年气候偏湿,700—907 年气候偏干的特点。

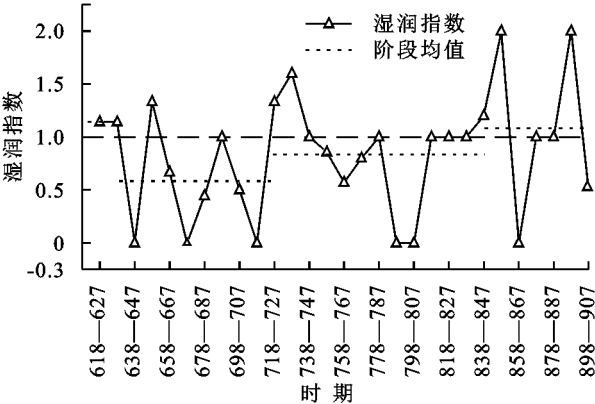


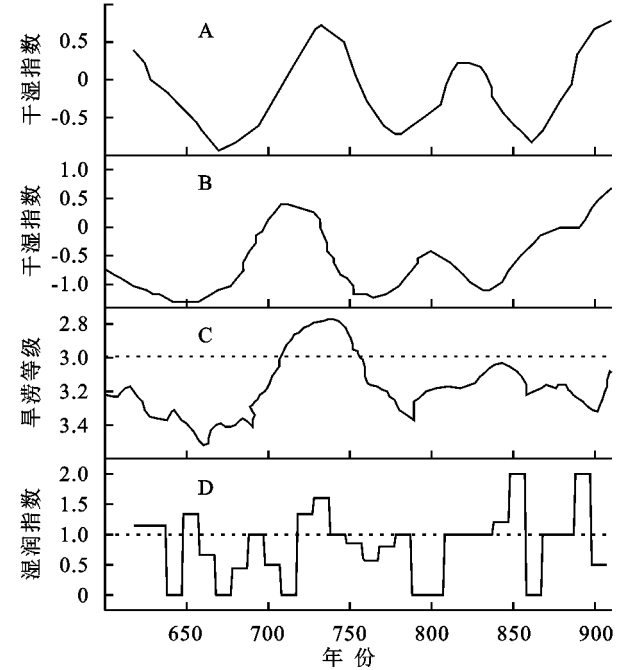
图 6 研究区唐代(618—907 年)湿润指数变化

综合分析吴宏岐^[31]、郑景云^[3,29]、费杰^[32]等对于唐代冷暖波动特征的研究,唐代陕西黄土高原中南部地区 618—750 年气候偏暖,800—907 年偏冷,750—799 是气候由暖转冷的过渡期。结合本文的洪灾阶段特征(图 3)及湿润指数变化特点(图 7),得到研究区唐代不同阶段气候冷暖干湿特征(表 2)^[3,29,31-32]。研究表明我国黄土高原南部地区在 845 年和 880 年气候出现了 10 a 尺度的波动^[32],因而研究区在 838—847 年与 888—897 年这两个阶段大洪涝灾害的频繁发生可能与该时期气候波动频繁有关^[20,32]。表 2 中大洪涝发生频次较高的时期气候均偏湿,648—657 年与 718—727 年为暖湿气候,838—847 年与 888—897 年为冷湿气候。唐代较大洪灾年份与降水持续时间较长或暴雨这类极端降水事件密切相关^[10,17],如公元 840 年富县、黄龙县,“6 月 20 日鄜州大雨,水溢州城,平地水深丈余,冲毁房舍,淹死人畜。”及公元 895 年延长、甘泉等县,“乾宁二年,渭北遇雨 60 日。”现代洪灾研究也表明大洪涝及特大洪灾的发生与降水量的增加密切相关。据统计,陕西黄土高原中南部地区在 1981 年、1988 年、2003 年、2011 年、2013 年、2014 年、2017 年这 7 个年份降水量距平值超过 100 mm (数据来源:美国国家海洋和大气管理局 <https://www.noaa.gov/>降水数据再分析资料),参考《中国气象灾害大典(陕西卷)》^[19]及相关资料对现代洪涝年的记录,可确定以上年份均出现了大洪涝或特大洪涝灾害,其中 2003 年、2013 年降水量距平值分别为 191,237 mm 左右,均为特大洪涝年。

4.2 洪涝灾害与夏季风

东亚夏季风边缘带在我国东部地区到达的最北位置存在年际、年代际变化,其推进与位置变化决定我国北方地区旱涝降水型分布^[33]。黄土高原地区因地处东亚夏季风影响过渡区的典型地带,对东亚夏季风边缘最北位置的进退较为敏感,夏季风由南向北推进过程中北边缘越偏南,黄土高原地区的气候则呈现出越干燥的特征^[33]。我国黄土高原地区的雨季开始时间在夏季风弱的年份提前,在夏季风强的年份推迟,该区旱涝灾害的

发生与降雨的时间之间具有一定的相关性,因而夏季风强度是影响该区旱涝变化的主要因素^[34]。研究认为唐代(公元 618—907 年)季风强度呈波动下降趋势(图 8A)^[24],这与研究区唐代洪涝灾害发生频次整体呈波动下降趋势相吻合(图 8B),公元 860 年前后季风强度急剧减弱本区洪灾发生频次下降趋势明显,公元 850—907 年晚唐弱季风期对应本区洪灾发生频次最低的阶段^[35],故本区洪灾频次变化受夏季风影响且与季风强度呈现出一定的正相关性。

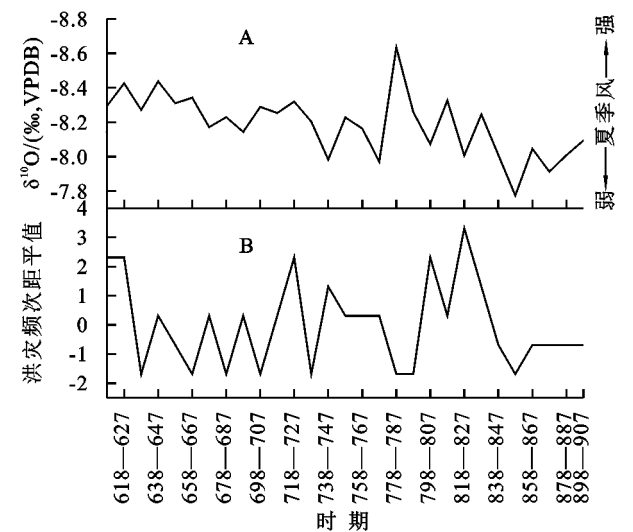


注:A 为中国东部地区标准化干湿指数序列的 30 a FFT 平滑滤波(根据参考文献[28]改绘);B 为黄河中上游地区干湿指数(根据参考文献[29]改绘);C 为西安地区旱涝等级序列 50 a 滑动平均变化曲线(根据参考文献[30]改绘);D 为唐代陕西黄土高原中南部地区湿润指数。

图 7 研究区唐代(618—907 年)湿润指数变化与其他地区对比
表 2 唐代陕西黄土高原中南部地区气候特征与大洪涝灾害

时期	间隔 年/a	冷暖期	干湿 特征	每隔多少年发生 3 级 以上(大洪涝及特大 洪涝)灾害/a
618—637 年	20	暖期	偏湿	20
638—647 年	10	暖期		
648—657 年	10	暖期	偏湿	5
658—717 年	60	暖期	偏干	30
718—727 年	10	暖期	偏湿	10
728—737 年	10	暖期	偏湿	
738—777 年	40	由暖到冷(过渡期)	偏干	13
778—837 年	60	由暖到冷(过渡期)		12
838—847 年	10	冷期	偏湿	10
848—857 年	10	冷期	偏湿	
858—887 年	30	冷期		
888—897 年	10	冷期	偏湿	10
898—907 年	10	冷期	偏干	

注:(1)表中干湿特征主要基于上文的湿润指数(图 7),“空白”表明该阶段缺少旱涝灾害相关记载无具体干湿特征。



注:A 为万象洞 The WX42B 的 $\delta^{18}\text{O}$ (VPDB) 记录(每 10 a 均值)(根据^[35]改绘);B 为陕西黄土高原中南部地区每 10 a 洪灾频次距平值。

图 8 洪涝灾害每 10 a 距平值与万象洞的 WX42B 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录对比

5 结论

(1) 唐代陕西黄土高原中南部地区洪涝灾害发生频次整体呈波动下降趋势,可将其划分为 4 个阶段,第一阶段 618—637 年与第三阶段 728—847 年为洪灾高频期,第二阶段 638—727 年和第四阶段 848—907 年为洪灾低频期。洪灾频次变化受夏季风影响且与夏季风整体变化趋势具有一致性。

(2) 唐代陕西黄土高原中南部地区洪涝灾害等级具有 2~5 a,5~9 a,20~30 a 及 52~80 a 的周期。洪灾的发生可能受 ENSO 信号的调节,与 PDO 正负相位可能存在一定关联。

(3) 空间分布上来看,研究区洪灾发生频次中部较南北两侧更多,洪灾高频区主要位于崂山以南的黄土高原沟壑区。

(4) 从气候特征来看,研究区在唐代前 20 a (618—637 年)气候偏湿,638—837 年虽然整体偏干,但 648—657 年与 718—737 年有 30 a 气候偏湿;在 838 年之后,该区以约 10 a 尺度进入干湿交替状态。

(5) 该区唐代较大洪涝灾害与降水持续时间较长、暴雨这类极端降水事件及气候频繁波动密切相关。

参考文献:

[1] 郑景云,刘洋,郝志新,等.过去 2000 年气候变化的全球集成研究进展与展望[J].第四纪研究,2021,41(2):309-322,308.

[2] 胡畔,陈波,史培军.中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J].地理学报,2021,76(5):1148-1162.

[3] 郑景云,郝志新,张学珍,等.中国东部过去 2000 年百年冷暖的旱涝格局[J].科学通报,2014,59(30):2964-2971.

[4] Hao Z X, Wu M W, Zheng J Y, et al. Patterns in data of extreme droughts/floods and harvest grades derived from historical documents in eastern China during 801—1910[J]. Climate of the Past, 2020,16(1):101-116.

[5] 叶建春,田以堂,匡尚富,等.中国水旱灾害防御公报 2019[R].北京:中华人民共和国水利部,2019.

[6] Sánchez-García C, Schulte L, Carvalho F, et al. A 500-year flood history of the arid environments of southeastern Spain: The case of the Almanzora River[J]. Global and Planetary Change,2019,181:102987.

[7] Ota Y, Kawahata H, Sato T, et al. Flooding history of Lake Nakaumi, western Japan, inferred from sediment records spanning the past 700 years[J]. Journal of Quaternary Science, 2017,32(8),1063-1074.

[8] 何则,何元庆,王世金,等.基于历史文献的 1470—2008 年中国西北地区气候干湿序列分区重建[J].中国沙漠,2016,36(5):1278-1285.

[9] 刘威,杨煜达.过去 600 年中国西南地区极端旱涝事件的重建与分析[J].第四纪研究,2021,41(2):368-378.

[10] 赵景波,顾静,邵天杰.唐代渭河流域与泾河流域涝灾研究[J].自然灾害学报,2009,18(2):50-55.

[11] 靳俊芳,殷淑燕,王学佳.汉江上游北宋时期洪水事件的沉积记录和文献记录对比[J].山地学报,2016,34(3):266-273.

[12] Chen X Y, Quan Q, Zhang K, et al. Spatiotemporal characteristics and attribution of dry/wet conditions in the Weihe River Basin within a typical monsoon transition zone of East Asia over the recent 547 years[J]. Enviromental Modelling and Software, 2021,143:105116.

[13] 张强,岳平,张良,等.夏季风过渡区的陆-气相互作用:述评与展望[J].气象学报,2019,77(4):758-773.

[14] 陕西省地方志编纂委员会.陕西省志第五卷黄土高原志[M].西安:陕西人民出版社,1995.

[15] 李双双,孔锋,韩鹭,等.陕北黄土高原区极端降水时空变化特征及其影响因素[J].地理研究,2020,39(1):140-151.

[16] 葛全胜.中国历朝气候变化[M].北京:科学出版社,2011.

[17] 刘俊文.唐代水害史论[J].北京大学学报:哲学社会科学版,1988(2):50-56,64.

[18] 张德二.中国三千年气象记录总集[M].南京:江苏教育出版社,2013.

[19] 翟佑安.中国气象灾害大典·陕西卷[M].北京:气象出版社,2005.

[20] 袁祖亮.中国灾害通史·隋唐五代卷[M].郑州:郑州大学出版社,2008.

[21] 袁林.西北灾荒史[M].兰州:甘肃人民出版社,1994.

[22] 殷淑燕,徐潇悦,党群.陕西省明代水旱灾害与干湿特征[J].干旱区资源与环境,2020,34(1):115-122.

surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995,34(4):745-756.

[22] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994,50(1):1-17.

[23] 韩飞飞,闫俊杰,郭斌.阿勒泰地区植被覆盖度及 ET 对气温变化的响应[J].*干旱区地理*,2019,42(6):1436-1444.

[24] 陈妍,宋豫秦,王伟.基于随机森林回归的草场植被盖度反演模型研究:以新疆阿勒泰地区布尔津县为例[J].*生态学报*,2018,38(7):2384-2394.

[25] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2013 年黄土高原地区气温变化对 Hiatus 现象的响应[J].*水土保持研究*, 2020,27(4):213-219.

[26] 贾学斌,张超,朱永明.基于 USLE 模型的承德市水土流失敏感性时空演变分析[J].*林业与生态科学*,2020, 35(1):37-47.

[27] 宁佳,邵全琴.黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究[J].*农业环境科学学报*,2020,39(4): 774-785.

[28] Wang J, Dong J, Liu J, et al. Comparison of gross primary productivity derived from IMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in Southeast Asia [J]. *Remote Sensing*, 2014,6(3):2108-2133.

[29] 刘铮,杨金贵,马理辉,等.黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J].*应用生态学报*,2021,32 (1):113-122.

[30] 黑哲.黄土高原植被覆盖变化过程及评价方法差异性研究[D].北京:中国科学院大学,2014.

[31] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].*自然资源学报*,2019,34 (8):1748-1758.

[32] 李宇恒,江涛,郭庆华.黄土高原植被覆盖度时空变化与预测分析[J].*北京测绘*,2020,34(11):1564-1569.

[33] 贾振宇,高艳妮,刘学,等.2000—2015 年三江源区土壤保持功能及其价值时空变化分析[J].*环境生态学*, 2020,2(5):35-42.

[34] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].*农业机械学报*,2014, 45(2):169-176.

[35] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,86(4):542-553.



(上接第 289 页)

[23] Chen X B, Yin L R, Fan Y L, et al. Temporal evolution characteristics of PM2.5 concentration based on continuous wavelet transform[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,699:134244.

[24] 郝志新,刘可邦,张学珍,等.地球系统模式 CESM 模拟的 ENSO 变率与中国东部降水格局[J].*自然资源学报*,2016,31(12):1984-1994.

[25] 马柱国,邵丽娟.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J].*大气科学*,2006,30(3):464-474.

[26] 韩健夫,杨煜达.过去千年黄土高原干湿变化和极端干旱事件与太平洋年代际振荡[J].*中国历史地理论丛*, 2017,32(2):5-12.

[27] 铜川市地方志编纂委员会.铜川市志[M].西安:陕西师范大学出版社,1997.

[28] Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, et al. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1 500 years[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006,17(3):579-592.

[29] 郑景云,文彦君,方修琦.过去 2000 年黄河中下游气候与土地覆被变化的若干特征[J].*资源科学*,2020,42 (1):3-19.

[30] 李兆元,李莉,全小伟.西安地区(380—1983 年)旱涝气候变化[J].*地理研究*,1988,7(4):64-69.

[31] 吴宏岐,党安荣.隋唐时期气候冷暖特征与气候波动[J].*第四纪研究*,1998(1):31-38.

[32] 费杰,侯甬坚,刘晓东,等.基于黄土高原南部地区历史文献记录的唐代气候冷暖波动特征研究[J].*中国历史地理论丛*,2001,16(4):75-82,129.

[33] Zhang H L, Zhang Q, Yue P, et al. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016,121(23):13901-13918.

[34] 刘欢,潘威.黄土高原地区 1766—1950 年雨季开始时间及其对夏季风的响应[J].*地球环境学报*,2014,5(6):378-384.

[35] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1 810-year Chinese cave record [J]. *Science*, 2008, 322 (5903):940-942.