

汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关性

张潇丹^{1,2}, 杨煜达¹, 任国玉^{2,3}, 杨国威³, 何源²

(1. 复旦大学中国历史地理研究所, 上海 200433; 2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074;
3. 国家气候中心, 北京 100081)

摘要: 南水北调中线工程水源区(汉江上游)和受水区(华北北部)存在多个时间尺度的同旱现象, 迫切需要了解其共同的气候影响因子。利用1700—2023年汉江上游和华北北部的旱涝等級序列, 以及太阳黑子序列, 主要探讨了11 a、30 a和50 a时间尺度上, 太阳黑子与两地旱涝的相关性。结果表明, 汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系随时间呈阶段性变化。在太阳黑子数值较高时期, 汉江上游和华北北部极端干旱事件的发生频次往往偏多。汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的位相变化对两地之间旱涝对应关系的转变有很大影响, 当汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子基本同/逆向变化时, 两地旱涝以正/负相关为主。汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子均存在2~4 a的年际周期, 11~12 a的年代际周期, 以及20~30 a和50 a的多年代际周期。在多个时间尺度上, 太阳黑子变化均可能影响两地的旱涝变化。此外, 当太阳黑子明显突变上升, 两地均更趋向偏旱。

关键词: 历史旱涝; 汉江上游; 华北北部; 太阳黑子; 年代际变率; 多年代际变率; 南水北调中线工程

DOI: 10.11821/dlxb202507001

1 引言

水资源是基础性的自然资源和战略性的经济资源, 在当前气候变化的背景下, 水资源紧缺已经成为不可忽视的全球性问题^[1-4]。IPCC第六次报告指出^[5], 自20世纪中叶以来, 全球性的气候变化显著改变了水循环过程, 虽然降水强度整体增加, 但时空分布不均, 造成欧洲南部、西非、亚洲中部等地区的干旱强度增强且持续时间增长, 而欧洲、北美和亚洲整体强降水事件则主要呈增多增强趋势。此外, 全球约40亿人每年至少遭遇一个月的严重水资源短缺(中等信度); 仅1970—2019年全球7%的灾害事件与干旱相关, 因灾致死人口中与旱灾相关的高达34%^[5-6]。中国是受到气候变化影响最大的国家之一; 20世纪初以来, 中国整体气候在波动中趋向偏干, 尤其是近半个世纪, 干旱的发生范围扩大, 频次增加, 强度增强, 极端干旱增加趋势明显; 此外, 气候变化还将导致中国水资源配置的不确定性增加, 水资源短缺的矛盾将进一步加剧^[7-11]。

在现有气候时空差异格局下, 中国地表水资源时空分布不均, 呈现南多北少的基本分布特征, 严重阻碍了社会经济的可持续发展^[12]。南水北调工程是解决中国北方水资源短缺, 优化水资源配置的重大战略工程, 其中中线一期工程从汉江上游的丹江口水库向

收稿日期: 2024-11-07; 修订日期: 2025-04-08

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(22&ZD223); 国家重点研发计划(2018YFA0605603) [Foundation: Major Project of National Social Science Foundation of China, No. 22&ZD223; National Key R&D Program of China, No. 2018YFA0605603]

作者简介: 张潇丹(1993-), 女, 河南郑州人, 博士后, 主要从事历史地理学研究。E-mail: xdzhang0527@163.com

通讯作者: 杨煜达(1968-), 男, 云南腾冲人, 教授, 博导, 主要从事历史地理学研究。E-mail: ydyang@fudan.edu.cn

华北地区包括北京、天津在内的19个大中城市和100多个县（市）提供生活和工业用水，希望以此缓解城市与农业、生态用水的矛盾^[12]。经过11 a的建设，南水北调中线工程于2014年12月12日正式通水。截至2024年6月，中线工程总调水量近650亿m³，沿线直接受益人口超1.08亿，成为名副其实的供水“生命线”^[13]。

对历史时期汉江流域旱涝变化的研究发现，19世纪以来汉江上游的干旱和极端干旱发生频次为过去近600 a之最^[14-15]。利用降水、蒸发量和径流量等气象观测资料的研究发现，自20世纪中期以来气候变化造成汉江上游蒸发量增加，降水季节分配发生改变，旱涝和极端旱涝灾害的发生频率增加，径流量下降；此外，汉江上游和华北地区各流域的同旱概率处于历史高位，水资源矛盾日益突出^[16-20]。根据我们的研究发现^[21]，汉江上游和华北北部地区在过去5个多世纪中，在多个时间尺度上均存在显著旱—旱相遇现象，并不仅仅是受到近几十年来气候变化的影响。同时，南水北调中线工程开始调水后，汉江中下游的工农业用水量减少，水资源无法满足人类活动的用水需求^[16]。因此，为了更好地预测未来降水和旱涝变化趋势，为汉江流域水资源的合理规划，以及南水北调中线工程水资源的科学调控和合理配置提供科学的参考依据，迫切需要了解长时间尺度上造成汉江上游和华北北部地区旱—旱相遇的影响因子。

太阳活动作为地球气候系统的主要能量来源，是天气、气候形成和演变的主要外部驱动力，也是全球生态环境、水循环、降水和旱涝变化的重要影响因子^[22-25]。太阳黑子是最重要的太阳活动现象之一^[25]。19世纪初，Herschel发现伦敦小麦价格与太阳黑子的变化密切相关，进而验证了太阳黑子对降水的影响^[26]。Meehl等研究发现，11个太阳黑子峰值年合成的异常海表温度与拉尼娜事件相似，其对应的全球降水异常分布型表现为热带太平洋地区降水偏少，而其南北两侧降水偏多^[27]。利用不同振幅的太阳活动和大气含水量进行分析，Wasko等发现全球大气含水量存在与太阳活动11 a变化周期相接近的周期^[28]。Hodell等利用墨西哥尤卡坦半岛的湖泊沉积物，发现太阳活动对该地区世纪尺度的干旱变化有着显著影响，太阳活动增强对应着干旱增加，并与玛雅文明的间断相对应^[29]。中国学者亦有诸多太阳活动对气候变化影响的相关研究成果。例如，李崇银^[30]研究发现，江淮梅雨量与太阳黑子均有11 a左右和30~40 a的变化周期，太阳活动与中国夏季降水的相关关系十分复杂，具有明显的年代际变化特征。周群等^[31]的研究表明，太阳黑子的11 a周期对东亚季风有一定影响，当太阳活动偏弱，长江流域中游降水偏多，而华南地区则明显偏少。宋燕等^[32]研究发现，太阳活动对青藏高原积雪、东亚夏季风和中国夏季雨带位置具有调制作用，在太阳活动偏强的年份，高原积雪导致中国汛期主雨带位置偏北，反之则偏南。此外，葛全胜等^[33]综合探讨了过去千年尺度上太阳活动异常与中国东部地区旱涝格局的对应关系，发现在太阳活动极小期，中国东部地区的旱涝自北向南呈涝—旱—涝的分布格局；而在太阳活动极大期，长江流域和西北东部地区相对偏涝，华北和华南地区则整体偏旱。

可以看出，太阳黑子变化对长江流域和华北降水/旱涝可能存在明显影响。然而，太阳活动对降水、旱涝变化的影响非常复杂，不同时间尺度和区域往往表现出不同的对应关系；同时，受地形、地貌、水体和植被等多种因素的综合影响，即使是中小尺度的地区和流域内部，其对降水和气候其他要素的影响也可能存在空间差异^[34]。受限于气象观测数据的时间长度，大多数相关研究均集中在20世纪中叶以后，因此目前仍不清楚年代到多年代尺度上，太阳黑子是否对汉江上游和华北北部地区的旱涝变化具有潜在影响，或者它们之间的相关关系是否存在阶段性变化。此外，随着全球气候变化，某种外强迫对特定区域降水影响的机理可能表现出新的特征，其与不同地区降水的相关关系亦可能随之发生改变^[30]。

本文利用1700—2023年汉江上游和华北北部历史旱涝等级序列和太阳黑子序列,探讨多时间尺度上太阳黑子与汉江上游和华北北部旱涝的相关性,希望加深对汉江上游和华北北部地区旱涝变化影响因子的科学认识,丰富与南水北调中线工程管理相关的历史气候研究,为汉江流域应对气候变化和水资源调度管理,提供新的科学信息和依据。

2 研究区域

汉江流域位于中国中部地区,是长江第一大支流(图1)。汉江发源于秦岭南麓,主要流经陕西、河南、湖北三省,属东亚副热带季风气候区,也是对环境变化响应的敏感区和过渡区^[35]。汉江主流全长1577 km,流域面积15.9万km²,多年平均降水量700~1800 mm,降水季节分配不均,7—9月的降水量占全年的40%~60%左右,5—10月的径流量占全年的75%左右,是长江径流量变化最大的支流^[35]。汉江主流丹江口以上为上游,山高谷深,有局部平坝和丘陵地貌,多滩险峡谷,地形落差较大,主河道自西向东穿行于秦岭和大巴山之间,水流湍急,水能资源丰富,河长925 km,流域面积9.52万km²^[35]。

本文所指华北北部地区主要包括南水北调中线工程供水的京、津、冀地区(图1),主要为温带季风气候,年降水量约500~800 mm。华北北部地区包括首都北京以及天津、石家庄、保定、唐山等著名工业城市,同时也是中国小麦的主要产区,在中国政治、经济、文化等方面均具有极其重要的地位。然而,20世纪60年代以后,本地区开始出现水资源危机,平原内的大多数河流无法通航,转变成季节性河道;地下水开采严重,地面下沉,且水污染日益严重^[12]。尤其是20世纪80年代以来,华北北部经历了持续干旱,严峻的缺水情况带来了巨大经济损失,水资源短缺已经成为本地区社会经济持续发展的关键制约因素^[12]。

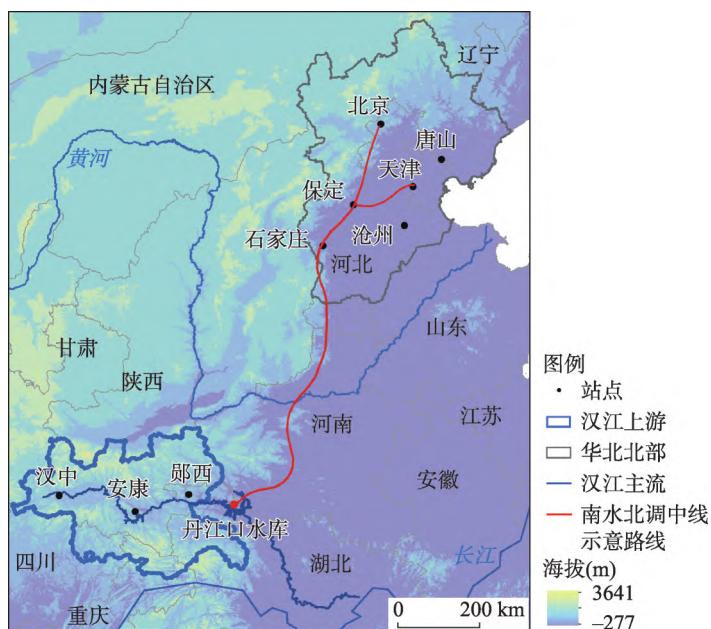


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic of the study area

3 数据与方法

3.1 数据来源

3.1.1 1700—2023年汉江上游和华北北部旱涝等级变化序列 本文使用的汉江上游旱涝等级序列来自此前的重建工作^[14-15]。重建工作利用了多种来源历史记载中的旱涝信息（1426—1950年）与器测时期（1951—2017年）的降水数据，其中史料数据主要来自地方志、清代档案、日记、报纸、杂志等；器测时期数据来自《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）》中的月降水数据^[36]。

在重建方法上，主要利用五等级分类法^[37]，对1426—2017年汉江流域8个站点（汉江上游站点为汉中、安康和郧西站，图1）的历史旱涝等级变化序列进行了重建。该方法根据历史资料记录，将旱涝情况按照严重程度，分为1级涝、2级偏涝、3级正常、4级偏旱和5级旱；同时，采用10%（1级涝和5级旱）、20%~30%（2级偏涝和4级偏旱）和30%~40%（3级正常）的理想频率标准对各等级的占比进行划分。为了更好地与太阳黑子进行对比分析，本文选取1700年以来的汉江上游旱涝等级序列，并利用与此前相同来源的月降水数据^[36]，将汉江上游旱涝等级序列更新至2023年。

历史时期（1700—1950年）华北北部地区6个站点（图1）的旱涝等级序列来源于《中国近五百年旱涝分布图集》^[37]；该序列同样利用五等级分类法，依据历史资料记载重建。为了与汉江上游旱涝等级序列保持一致，器测时期（1951—2023年）华北北部旱涝等级序列的降水数据来源与汉江上游相同^[36]。

本文使用的历史旱涝资料、重建方法和局限性等相关内容在此前的工作中已有详细描述^[14-15]，为了节约篇幅，在此不予赘述。

3.1.2 太阳黑子序列 太阳黑子相对数年平均值来自比利时皇家天文台太阳物理研究所的太阳活动数据分析中心（Solar Influences Data Analysis Center, SIDC, <https://www.sidc.be/>），资料选取范围为1700—2023年。

3.2 研究方法

3.2.1 滑动平均法 滑动平均法相当于低通滤波器，能在一定程度上剔除短期或长期的波动因素对时间序列变化特征的影响，从而显示出变化趋势^[38]。本文使用滑动平均法反映多时间尺度上汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关变化特征等。

3.2.2 滑动相关分析 滑动相关系数是自相关系数的扩展，可以反映两组时间序列在不同时间尺度上随时间变化的相关程度。本文使用滑动相关分析法，主要分析1700—2023年太阳黑子与汉江上游和华北北部旱涝在不同时间窗口的相关关系变化特征。

3.2.3 一元线性回归分析 一元线性回归分析是分析只有一个自变量的线性相关关系的方法。该方法是气象统计分析中的常用方法，主要通过计算自变量与因变量的最小离差平方和，从而得到数据的最优函数解^[39]。本文利用一元线性回归分析法，验证汉江上游和华北北部的极端旱涝事件是否与太阳黑子有线性相关关系。

3.2.4 EEMD(Ensemble Empirical Mode Decomposition) EEMD常用来揭示气候要素波动中多个尺度变率特征及长期变化趋势，可将不同时间尺度的波动从原始序列中逐级分离，分解后可得到各时间尺度的本征模态函数（Intrinsic Mode Function, IMF）和反映信号总体变化趋势的趋势项（Residue, RES）^[40]。IMF各分量反映了在不同时间尺度上，原始序列中固有的由高频到低频的准周期振荡特征，IMF分量的振幅大小表示相应周期的强弱程度，其振幅越大/小，表明相应时间尺度周期在该时段越强/弱。

3.2.5 格兰杰因果关系检验 因为相关分析结果无法证明气候影响因子与旱涝波动之间是否存在因果关系, 本文利用格兰杰因果关系检验法, 分析过去300余年来太阳黑子与汉江上游和华北北部旱涝变化的因果关联。格兰杰因果模型通过比较不同回归模型中残差的大小, 判断某一变量的历史值是否对另一变量有显著预测效果, 从而识别两组时间序列之间是否存在潜在因果联系。

3.2.6 M-K(Mann-Kendall)检验 为了解当太阳黑子发生突变后, 汉江上游和华北北部旱涝是否随之产生变化, 采用M-K检验法对1700—2023年太阳黑子进行了突变检验。M-K检验法的优点在于计算简便, 并且不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量^[41-42]。

4 结果分析

4.1 时间变化特征

为了解不同时期汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子在不同时间尺度的位相变化特征, 将数据进行标准化, 并分别计算11 a、30 a和50 a的滑动平均 (11 a尺度上, 第一个时段是1700—1710年, 第二个时段是1701—1711年, ……, 最后一个时段是2013—2023年; 30 a尺度上, 第一个时段是1700—1729年, 第二个时段是1701—1730年, ……, 最后一个时段是1994—2023年; 50 a尺度上, 第一个时段是1700—1749年, 第二个时段是1701—1750年, ……, 最后一个时段是1974—2023年), 以及对应尺度的均值变化 (11 a尺度的最后一个时段是2008—2023年; 30 a和50 a尺度的最后一个时段均结束于2000年), 如图2所示。

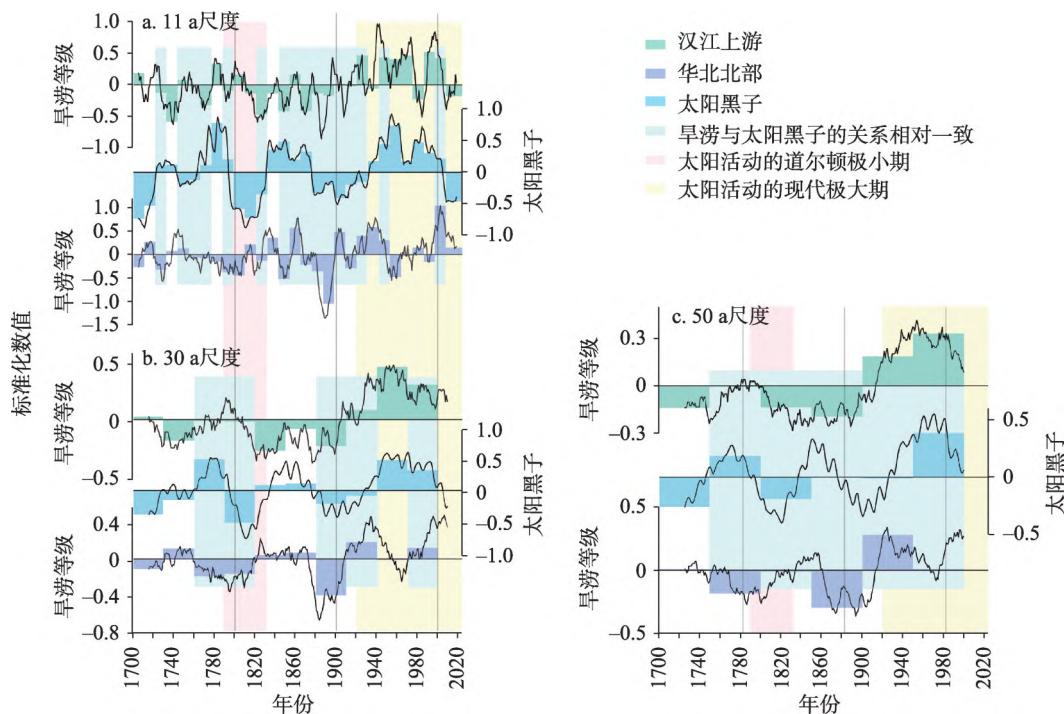


图2 1700—2023年汉江上游和华北北部标准化旱涝等级与太阳黑子各时间尺度均值及滑动平均序列

Fig. 2 The standardized sliding average series of sunspot number (SN) with the upper Hanjiang River (UH) and northern North China's (NNC) drought and flood grade (DFG) at 11 a, 30 a, and 50 a time scales from 1700 to 2023

过去3个多世纪以来,汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的年代和多年代相关变化特征非常显著,其中汉江上游旱涝与太阳黑子的同向变化特征相对更加明显。11 a尺度上(图2a),汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子变化的对应关系比较同步的时段主要集中在18世纪40—70年代,以及19世纪40年代—20世纪30年代左右。20世纪30年代—20世纪末,汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的对应关系整体相反。在此时段内,太阳黑子较此前明显增多,相对应的,汉江上游经历了研究期间持续最久且程度最高的干旱,并且旱涝变率明显增大,但以1960年左右为分隔点,此前汉江上游旱涝与太阳黑子基本为同向变化,此后主要呈逆向变化特征;华北北部地区在此时段内的旱涝变率相对较平稳,与汉江上游相反,华北北部旱涝与太阳黑子主要经历了由逆向到同向的变化特征。20世纪末及21世纪以来,太阳黑子较此前减少,汉江上游旱涝与太阳黑子转为同向变化,并较此前湿润;华北北部旱涝与太阳黑子则在经历了一个短暂的逆向变化时段后,转为同向变化为主,干旱程度也有所减缓。

30 a和50 a尺度上(图2b~c),虽然一些时段的太阳黑子或者汉江上游和华北北部地区的旱涝异常并不明显,但整体来看,18世纪60年代—19世纪初,以及19世纪80年代—20世纪末期间,汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的对应关系均相对比较一致,当太阳黑子增多/减少,汉江上游和华北北部地区更容易偏旱/偏涝。此外,可以看出,在太阳活动的道尔顿极小期(1790—1830年),汉江上游和华北北部均相对偏湿润,其中汉江上游有较为明显的由偏旱转为偏涝的年代和多年代转折,华北北部地区则主要维持前期的偏湿润特征。在太阳活动的现代极大期(1920年以后),两地区整体均较此前明显偏旱,并且是1700年以来最干旱的阶段。此外,1774—1999年期间,当汉江上游旱涝滞后太阳黑子7~9 a时,相关系数通过了0.05水平的显著性检验(相关系数分别为0.163、0.196和0.164)。

为进一步了解不同时间尺度汉江上游和华北北部旱涝异常与太阳黑子之间相关关系随时间的变化特征,计算了1700—2023年两地区旱涝与太阳黑子的11 a, 30 a和50 a的滑动相关系数(图3)。

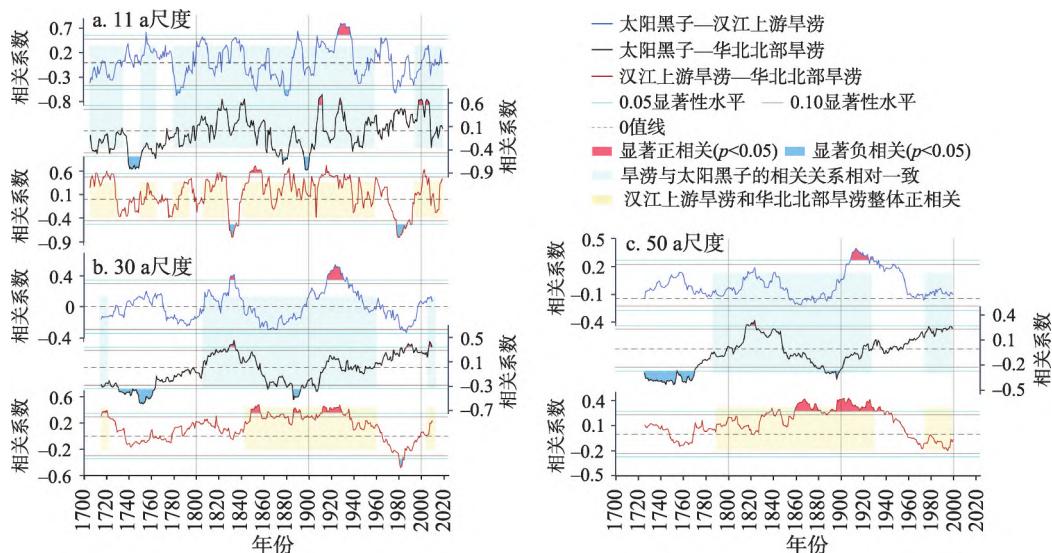


图3 1700—2023年汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子不同时间尺度的滑动相关系数

Fig. 3 Sliding correlation coefficients between drought/flood in the UH/NNC with SN, as well as drought/flood in the UH and drought/flood in NNC on 11 a, 30 a, and 50 a time scales from 1700 to 2023

从图3可以看出,汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系随时间变化特征十分显著,并有明显正负位相的转变。这种相关关系随时间呈现出的阶段性变化或相关性质的改变,正是影响因子本身显著的年代和多年代变化特性导致。

在11 a滑动相关系数序列上(图3a),18世纪30年代以前汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子均以负相关为主,并且两地区旱涝与太阳黑子相关关系的转变具有一定同步性。18世纪30—80年代两地区旱涝与太阳黑子的相关关系呈较为明显的逆向变化特征,汉江上游旱涝与太阳黑子以正相关为主,而华北北部旱涝与太阳黑子基本为负相关,并在1740—1752年出现显著负相关($p<0.05$),此外,18世纪50—60年代两地区旱涝与太阳黑子的相关关系出现短暂的同向变化。18世纪80年代—20世纪50年代汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系基本以同向变化的时段居多,其中19世纪下半叶和20世纪上半叶,两地区旱涝与太阳黑子均出现显著负相关和显著正相关($p<0.05$),尤其以1927—1938年汉江上游与太阳黑子的正相关最为显著。

20世纪60年代—20世纪末,汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系转为逆向变化为主,汉江上游旱涝与太阳黑子相关关系的年代际变率较大,其中在1980年左右出现显著负相关($p<0.05$);华北北部旱涝与太阳黑子则基本保持相对稳定的正相关关系。20世纪末以来两地区旱涝与太阳黑子的相关关系又趋向一致,并均以2006年为转折点,由正相关迅速转为负相关,又于2008年以后转为趋向正相关。从图3a还可以看出,18世纪80年代以后汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的年代际变率较此前明显增强。此外,汉江上游旱涝和太阳黑子分别主要于18世纪80年代、19世纪80年代以及20世纪80年代左右出现0.05水平显著负相关关系,基本间隔100 a左右。

在30 a滑动相关系数序列上(图3b),19世纪以前,尤其在18世纪20—70年代汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系基本呈逆向变化特征,此后汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系基本同时发生位相转变(分别在1770和1765年左右)。19世纪初—20世纪上半叶,汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系以同向变化特征为主,基本经历了正相关—负相关—正相关的变化过程,并且两地区旱涝与太阳黑子均在19世纪30年代出现显著正相关($p<0.05$)。20世纪下半叶,华北北部旱涝与太阳黑子的正相关关系逐渐增强,并在20世纪80年代出现显著正相关($p<0.05$),而汉江上游旱涝则与太阳黑子的负相关关系逐渐增强,并于80年代接近显著性临界值($p=0.05$),此后逐渐转为正相关;可以看出,20世纪80年代是1700年以来汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系逆向变化最突出的时期。21世纪以后两地区旱涝与太阳黑子均主要为正相关。

从50 a滑动相关系数序列看(图3c),汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的变化特征与30 a滑动平均序列上大致相同,但能够更加清晰看出在20世纪初—50年代左右,汉江上游旱涝和太阳黑子经历了自1700年以来最显著的正相关时段。

将汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子在11 a、30 a和50 a滑动相关系数序列,与汉江上游旱涝和华北北部旱涝在相同时间尺度的滑动相关系数序列对比来看,发现在两地区旱涝与太阳黑子相关关系的位相基本一致的时段内,汉江上游旱涝和华北北部旱涝往往以正相关为主。从11 a尺度来看(图3a),1700—2023年汉江上游旱涝和华北北部旱涝正相关持续时间最长、最稳定的时段是19世纪40年代—20世纪60年代,在此时段内两地区旱涝与太阳黑子的相关关系有明显的同位相变化特征;同时,与汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系开始逆向转变的时间一致,约1960年以后汉江上游和华北北部旱涝的相关关系也转为负相关变化趋势(很可能是受到东亚夏季风强弱转变的影响^[43-44],而太阳活动是东亚夏季风变异的最主要外强迫因子之一^[45]),并在1979—1988年

呈显著负相关 ($p<0.05$)，而在该时段内，汉江上游旱涝与太阳黑子出现显著负相关 ($p<0.05$)，华北北部旱涝与太阳黑子则接近正相关 ($p<0.10$)。21世纪初汉江上游旱涝和华北北部旱涝再次呈显著正相关 ($p<0.05$)，此时两地区旱涝与太阳黑子亦均为正相关或同向变化趋势。此外，还可以发现，11 a尺度上汉江上游旱涝和华北北部旱涝负相关最显著的两个时段，即1830—1838年和1979—1988年两地区旱涝和太阳黑子的相关关系均为逆向变化，且1830—1838年当华北北部旱涝与太阳黑子呈负相关时，汉江上游旱涝与太阳黑子出现正相关 ($p<0.10$)；1979—1988年期间，汉江上游旱涝与太阳黑子出现显著负相关 ($p<0.05$)，而华北北部旱涝与太阳黑子则接近正相关 ($p<0.10$)。从30 a尺度上也可以看出（图3b），汉江上游旱涝和华北北部旱涝的显著负相关时期，正好对应到两地区旱涝与太阳黑子的相关关系逆向变化，且都达到/接近显著性水平的时段。

由此可知，在很大程度上汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的位相变化对两地区之间旱涝正负相关的转变有很大影响，当汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子基本同向变化时，两地区旱涝以正相关特征为主；当汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子以逆向变化为主时，两地区旱涝也以负相关时段居多；并且汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的逆向趋势越显著，两地区之间旱涝的负相关关系也随之显著。

此外，在30 a滑动相关系数序列上（图3b），汉江上游旱涝和太阳黑子的负相关时段为1700—1737年、1770—1807年、1842—1895年以及1950—1997年，分别经历了37 a、37 a、53 a和47 a；正相关时段分别为1737—1770年、1807—1842年、1895—1950年和1997—2023年，分别经历了33 a、35 a、55 a和26 a。华北北部旱涝与太阳黑子的负相关时段主要为1700—1807年和1858—1916年，分别经历了107 a和58 a；正相关比较明显的时段主要为1807—1858年和1960—2023年，分别经历了51 a和63 a；1916—1960年华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的多年代际变率相对比较平稳，以1926年为转折点，此前为正相关，此后转为平稳但比较微弱的负相关，1960年以后开始出现明显的正相关趋势。在30 a尺度上，至少每50~100 a华北北部旱涝与太阳黑子的相关关系才会发生明显转变；19世纪中叶以前，基本每30~40 a左右，汉江上游旱涝与太阳黑子的相关关系即发生明显转变，而19世纪中叶以后，延长至50 a左右。按照这个规律来看，未来数十年汉江上游和华北北部旱涝可能仍将与太阳黑子主要维持正相关关系，而汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的同向变化趋势，有利于两地区旱涝变化的正相关，即同时发生干旱或洪涝的几率更大。

4.2 极端旱涝事件与太阳黑子的相关性

为了解汉江上游和华北北部极端旱涝事件与太阳黑子数量多寡的相关关系，分别统计了1700—2023年汉江上游和华北北部地区发生概率为10%，即极端旱涝事件^[46]的每11 a和30 a发生频次，然后分别与同时段同尺度的太阳黑子均值进行分析（图4~图5）。

11 a尺度上，汉江上游和华北北部地区极端旱涝事件发生频次与太阳黑子数值高低的相关性整体较弱（图4a、4c），其中汉江上游极端干旱的发生频次随太阳黑子数值增多有上升趋势（图4a），但并不明显。相比之下，30 a尺度上（图4b、4d），当太阳黑子增多，汉江上游和华北北部地区极端干旱事件的发生频次均随之上升，虽然华北北部地区的极端洪涝事件也有一些上升趋势，但比较微弱，汉江上游极端洪涝事件则基本未受影响。

在太阳黑子数值较高的时段内，即18世纪下半叶、19世纪20—70年代左右和20世纪30年代到世纪末，汉江上游极端干旱事件的发生频次往往较前期有一定增加（图5）。18世纪期间，当太阳黑子数值较高，华北北部极端干旱/洪涝的发生频次相对更低/高，两者

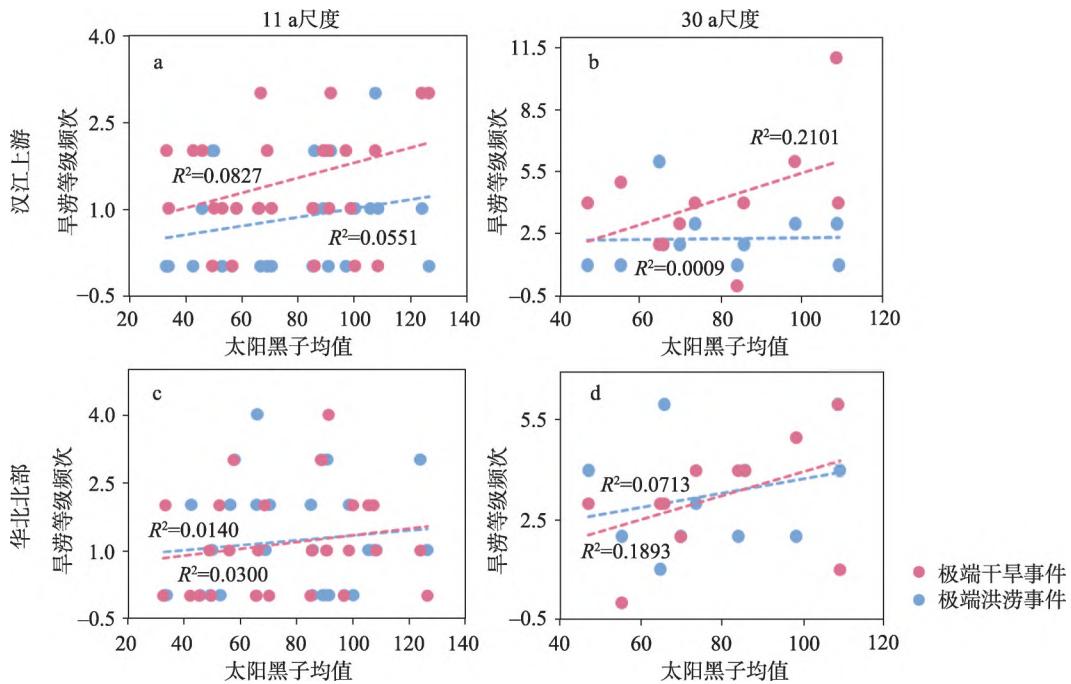


图4 1700—2023年11 a和30 a尺度上太阳黑子均值与极端旱涝事件发生频次的相关性

Fig. 4 Correlations between the frequency of extreme drought/flood in the UH and NNC and the average SN on every 11 a and 30 a scales from 1700 to 2023

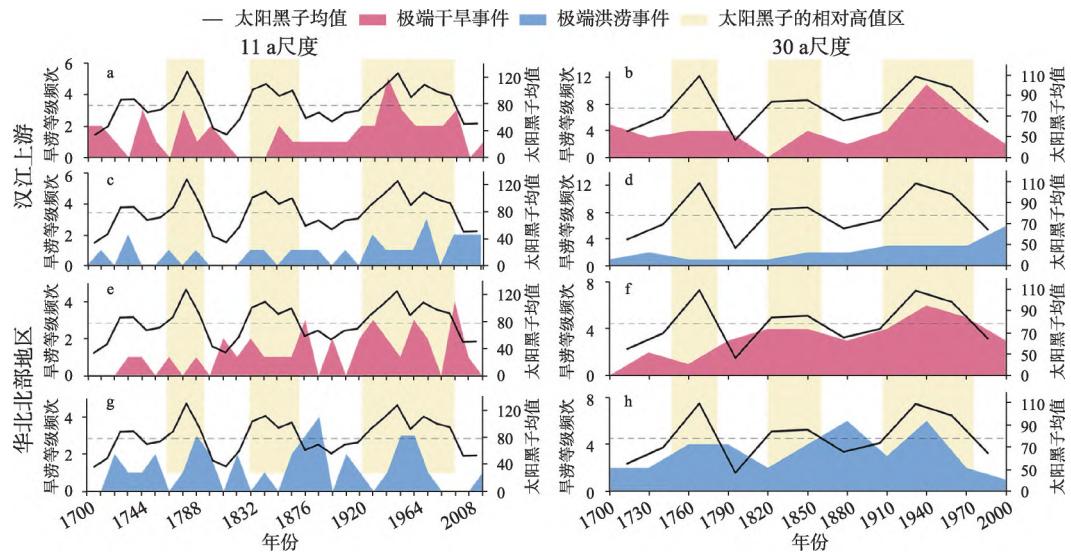


图5 1700—2023年汉江上游和华北北部地区每11 a和30 a太阳黑子均值及极端旱/涝事件发生频次

Fig. 5 The frequency of extreme drought/flood in the UH and NNC with the average SN on every 11 a and 30 a scales from 1700 to 2023

之间以负相关为主; 19世纪初以来华北北部极端旱涝的发生频次与太阳黑子数值出现正相关关系, 即当太阳黑子数值偏高, 华北北部极端干旱/洪涝事件相对增多/减少; 当太阳黑子数值偏低(19世纪70年代—20世纪20年代左右和21世纪以来), 华北北部则极端干旱/洪涝事件相对减少/增多。

整体来看, 1700—2023年太阳黑子数值较高时期汉江上游和华北北部地区极端干旱的发生频次往往偏多; 同时, 太阳黑子的数值多寡对华北北部地区极端洪涝事件也有一定影响, 但对汉江上游极端洪涝事件的影响相对较小。

4.3 EEMD分析和格兰杰因果关系检验

分别对1700—2023年汉江上游和华北北部旱涝等级, 以及太阳黑子序列进行EEMD分解, 均得到7个不同时间尺度的固有模态函数IMF分量, 以及1个反映信号总体变化的趋势项(RES) (表1)。汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子均有2~4 a左右的年际变化周期, 11~12 a左右的年代际变化周期, 以及20~30 a和50 a左右的多年代际变化周期。

表1 太阳黑子、汉江上游和华北北部地区旱涝 EEMD 分解各 IMF 分量的平均周期及
其与原始序列的方差贡献率、相关系数以及趋势项和原始序列的相关系数

Tab. 1 Corresponding cycles for each IMF, and the Variance Contribution and Correlation Coefficient
to the original SN/UH and NNC's drought and flood series, as well as the correlation coefficient
between the residue and the original series

太阳黑子							
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7
平均周期(a)	3.81	11.17	21.6	46.29	108	162	324
方差贡献率(%)	13.93	38.30	2.97	6.33	4.90	1.14	0.05
相关系数	0.69**	0.84**	0.28**	0.30**	0.33**	0.03	0.037
汉江上游							
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7
平均周期(a)	2.92	5.68	12.46	24.92	54	108	162
方差贡献率(%)	53.41	18.11	8.33	3.73	0.87	0.78	0.31
相关系数	0.74**	0.56**	0.42**	0.29**	0.12*	0.16*	0.17*
华北北部地区							
	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	IMF6	IMF7
平均周期(a)	3.03	6.11	12	27	54	108	162
方差贡献率(%)	47.73	14.25	9.25	8.15	5.13	1.51	0.22
相关系数	0.74**	0.53**	0.42**	0.29**	0.24**	0.14*	0.04

注: **表示通过0.01水平显著性检验; *表示通过0.05水平显著性检验。

在年际、年代际和多年代际甚至百年尺度上, 汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子均具有相对一致的变化周期。因为百年尺度的方差贡献率较低(太阳黑子IMF5~7分量, 汉江上游和华北北部旱涝IMF6~7分量)以及边缘效应的影响, 百年周期的检测结果可靠性较低。因此, 根据汉江上游和华北北部旱涝以及太阳黑子序列各IMF分量的相对一致性, 并综合IMF各分量序列变化特征及其对原始序列的方差贡献率和相关关系, 本文选取太阳黑子IMF1~4分量, 以及汉江上游与华北北部IMF1~5分量, 分为年际、年代际和多年代尺度进行分析(表2、图6)。表2中太阳黑子IMF3为表1中的IMF3+4(多年代际), 汉江上游和华北北部旱涝的IMF2为表1中的IMF3(年代际), IMF3对应表1中的IMF4+5(多年代际)。

根据图6, 在同一时段内, 不同时间尺度的振荡分量随时间呈现不同强弱的非均匀变化特征。年际尺度上, 太阳黑子分别在1717—1742年、1766—1791年、1830—1870年和1925—1980年左右的波动相对较大, 其中除了1830—1870年左右以外, 汉江上游和华北北部地区的旱涝波动均随之增大(图6a~6b)。同样在年代尺度上(图6c~6d), 太阳黑子在18世纪中叶、19世纪中叶到世纪末以及20世纪下半叶的振幅相对较大, 这些时段内华

北北部地区旱涝波动均随之增大, 但汉江上游仅在19世纪中叶到世纪末产生明显的旱涝波动。此外, 根据趋势项可以看出(图6g~6h), 研究时段内太阳黑子表现出非线性的上升特征, 并于20世纪中叶以后上升幅度趋缓; 汉江上游和华北北部地区均呈现明显的偏旱趋势, 特别是华北北部的偏旱趋势与太阳黑子的上升趋势基本同步(但华北北部旱涝的趋势项并没有通过显著性检验, 表1), 而汉江上游则在18世纪中叶至19世纪上半叶相比此前偏涝, 19世纪中叶以后, 上升(偏旱)幅度显著增强。

此外, 不同时间尺度汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的EEMD分解结果, 同滑动相关系数(图3)有很好的对应, 这也进一步验证了EEMD分解结果的可靠性。结合图3和图6, 当汉江上游/华北北部旱涝与太阳黑子在年代和多年代尺度的波动变化中主要为同向变化时, 往往两地区旱涝与太阳黑子主要为正相关关系; 反之, 则为负相关。例如, 太阳黑子和汉江上游旱涝分别于19世纪30年代和20世纪上半叶出现显著正相关($p<0.05$), 在18世纪、19世纪以及20世纪末期出现显著负相关($p<0.05$); 太阳黑子和华北北部旱涝分别于19世纪30年代和20世纪末以及21世纪初出现显著正相关($p<0.05$), 18世纪中叶和19世纪下半叶出现显著负相关($p<0.05$)。由图6可以看出, 不论在年代还是多年代尺度上, 在以上汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子显著正/负相关的时段内, 两地区旱涝和太阳黑子基本呈现为同向/逆向变化, 尤其以年代尺度的对应关系更加紧密。

根据表1中各IMF分量的方差比例, 可知太阳黑子和华北北部旱涝的高频分量包括IMF1~IMF5, 方差占比分别达到66.43%和84.51%; 汉江上游旱涝的高频分量为IMF1~IMF4, 方差占比达83.58%。本文分别对太阳黑子与汉江上游和华北北部旱涝的年际、年代际和多年代际(表2)以及高频IMF分量进行格兰杰因果关系检验, 滞后阶数均为1~10阶, 检验结果如表3所示(仅显示因果关系最显著的结果, 其他结果略)。

年际、年代际和多年代尺度上, 太阳黑子均能显著预测汉江上游的旱涝变化, 两者之间存在显著因果关系(表3); 尽管整体的高频IMF分量检验结果仅达到0.10的显著性水平, 但太阳黑子的高频变化仍有可能影响汉江上游旱涝的高频变化。太阳黑子与华北北部旱涝在年际、年代际以及高频IMF分量之间存在显著因果关系, 即太阳黑子变化在统计上显著地先行于并影响华北北部的旱涝变化; 但多年代尺度上两者之间的检测结果并不显著, 因此无法拒绝原假设。

4.4 M-K检验

通过对1700年以来每50 a的(最后一个时段是1950—1999年)太阳黑子进行M-K检验, 发现太阳黑子共出现5次较为明显的突变点, 分别为1717年、1758年、1830年、1858

表2 太阳黑子、汉江上游和华北北部旱涝EEMD分解的年际、年代际和多年代尺度周期及其与原始序列的方差贡献率和相关系数

Tab. 2 Corresponding cycles for each IMF at inter-annual (IMF1), inter-decadal (IMF2) and multi-decadal (IMF3) scales, and the Variance Contribution (VC) and Correlation Coefficient (CC) to the original SN/ UH and NNC's drought and flood series

太阳黑子			
	年际(IMF1)	年代际(IMF2)	多年代(IMF3)
平均周期(a)	3.81	11.17	21.60~46.29
方差贡献率(%)	13.93	38.30	9.3
相关系数	0.69 ^{**}	0.84 ^{**}	0.37 ^{**}
汉江上游			
	IMF1	IMF2	IMF3
平均周期(a)	2.92	12.46	24.92~54.00
方差贡献率(%)	53.41	8.33	4.60
相关系数	0.74 ^{**}	0.42 ^{**}	0.32 ^{**}
华北北部地区			
	IMF1	IMF2	IMF3
平均周期(a)	3.03	12.00	27.00~54.00
方差贡献率(%)	47.73	9.25	13.28
相关系数	0.74 ^{**}	0.42 ^{**}	0.39 ^{**}

注: ^{**}表示0.01水平显著; ^{*}表示0.05水平显著。

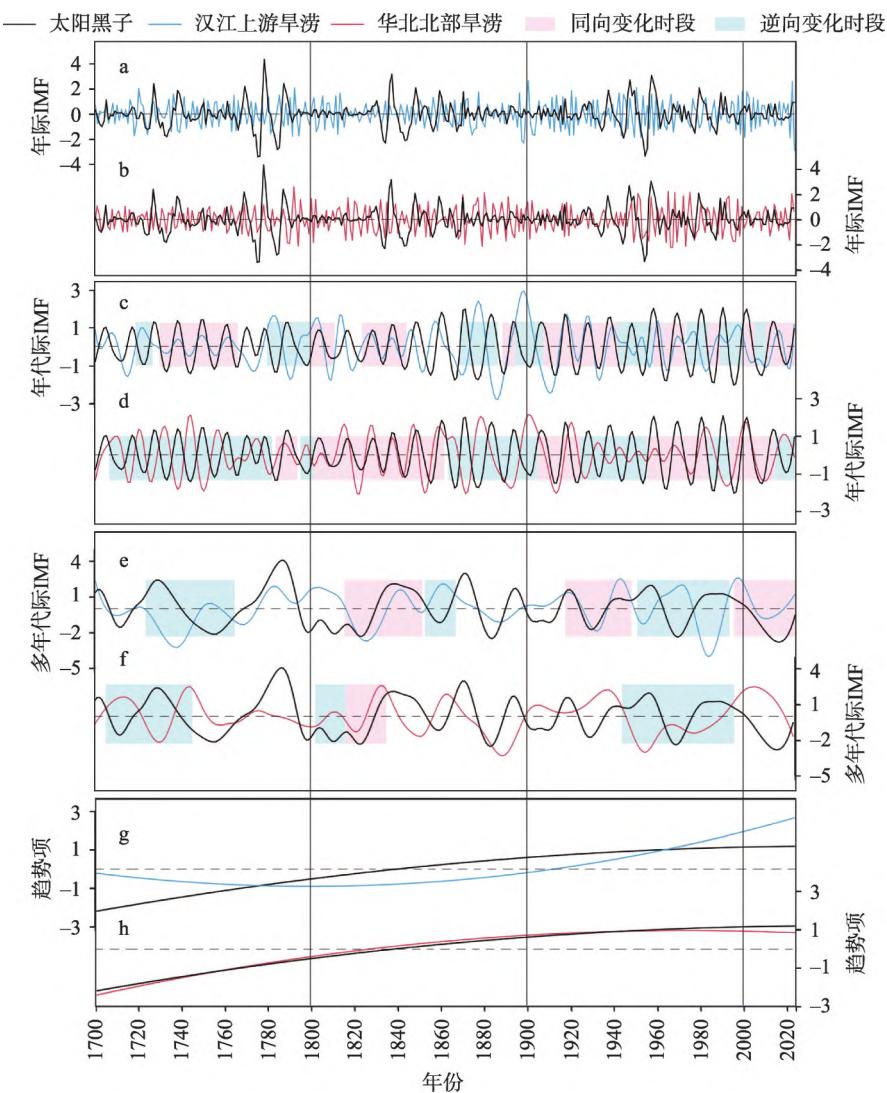


图6 1700—2023年太阳黑子序列、汉江上游旱涝和华北北部旱涝等级序列EEMD的分解标准化结果

Fig. 6 Decomposition results (after standardisation) of the EEMD for SN series, drought/flood series in the UH and NNC from 1700 to 2023

表3 不同时间尺度以及高频IMF分量的格兰杰因果关系检验结果。

Tab. 3 Results of Granger causality tests for different time scales as well as high-frequency IMF components.

原假设	序列类型	滞后阶数	F	P
太阳黑子不是汉江上游旱涝变化的原因	年际	9	2.106	0.040**
	年代际	3	5.006	0.003***
	多年代际	2	8.891	0.000***
	高频	10	1.756	0.086*
太阳黑子不是华北北部旱涝变化的原因	年际	5	3.799	0.004***
	年代际	2	7.968	0.001***
	多年代际	2	0.655	0.520
	高频	1	6.701	0.011**

注: ***表示0.01水平显著; **表示0.05水平显著; *表示0.10水平显著。

年和1874年; 其中除了在1874年以后太阳黑子数值下降趋势增强, 其余年份太阳黑子突变后均呈明显上升趋势。

分别计算两地区在太阳黑子发生突变前后1~10 a和1~30 a的旱涝等级均值(如以1830年为中心, 分别对比了汉江上游和华北北部在1829年和1831年的旱涝等级、1828—1829年的旱涝等级均值和1831—1832的旱涝等级均值, 1827—1829年的旱涝等级均值和1831—1833年的旱涝等级均值等)。同时, 也计算了汉江上游和华北北部地区在每一次太阳黑子发生突变前、后10 a和30 a的整体旱涝等级均值, 以及全部4次太阳黑子数突然上升年份前、后的整体均值(因为仅1874年以后太阳黑子突然明显下降, 所以不需要计算均值)。结果发现, 两地区旱涝在1874年太阳黑子突然明显减少后并没有明显变化趋势, 但是太阳黑子数值的突然增加对汉江上游和华北北部地区在10 a和30 a尺度上的旱涝变化均存在一定影响作用(图7~图8、表4)。

在研究时段内太阳黑子数值的4次突然明显上升以后, 其中有3次汉江上游在此后10 a和30 a的旱涝等级有一定程度的增加, 即较此前干旱; 尤其以1717年和1758年以后干旱的增长幅度最大, 这可能是因为汉江流域在18世纪整体相对湿润^[14-15]。此外, 虽然10 a尺度上1830年以后的汉江上游表现出较此前湿润的情况(图7c), 但在30 a尺度上则较此前略微偏旱(图8c); 而10 a尺度上1858年以后较此前干旱(图7d), 但从30 a尺度来看则偏涝(图8d)。相比较之下, 在太阳黑子的4次突然明显上升以后, 10 a尺度上华北北部地区也有3次经历了不同程度的偏旱, 并以1830年以后的偏旱最为突出; 但这种对应关系在30 a尺度上并不明显, 仅1830年以后出现大幅度的偏旱。

整体来看, 太阳黑子发生明显突变上升以后, 汉江上游在10 a和30 a尺度上均更趋向较此前相对干旱, 华北北部地区则仅在10 a尺度上更容易偏旱, 且干旱的增长幅度整体较汉江上游更小。

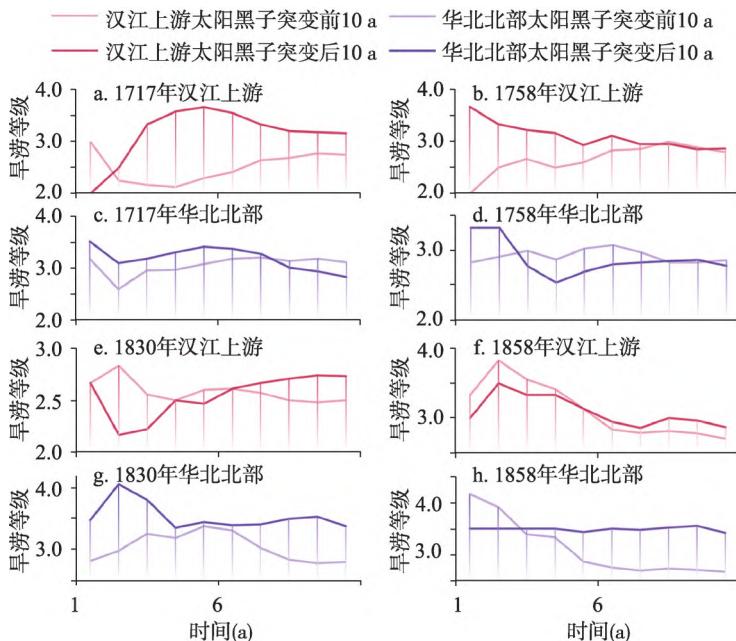
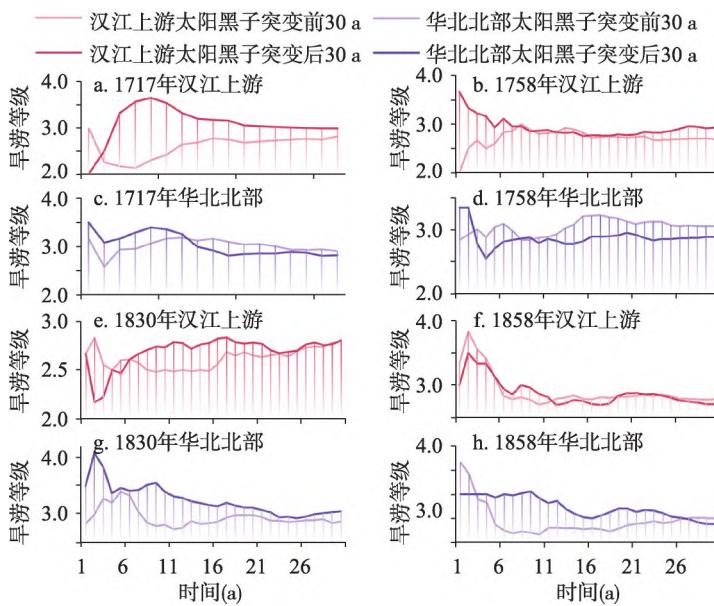


图7 1700—2023年太阳黑子突然明显上升的前后10 a汉江上游和华北北部的旱涝等级均值变化

Fig. 7 Characteristics of the average DFG in the UH and NNC during the 10 years before and after the abrupt SN rises from 1700 to 2023



注：因数据长度原因，仅分析1717年前后17 a的旱涝变化。

图8 1700—2023年太阳黑子突然明显上升的前后30 a汉江上游和华北北部地区旱涝等级均值变化特征

Fig. 8 Characteristics of the average DFG in the UH and NNC during the 30 years before and after the abrupt SN rises from 1700 to 2023

表4 1700—2023年太阳黑子突然明显上升的前/后10 a和30 a
汉江上游和华北北部的旱涝等级均值变化特征

Tab.4 Characteristics of the average values of DFG in the UH and NNC for the 10 and 30 years before and after each abrupt SN rise from 1700 to 2023

太阳黑子突变年份	汉江上游		华北北部	
	前10 a/后10 a	前30 a/后30 a	前10 a/后10 a	前30 a/后30 a
1717	2.95/3.17	2.82/2.99	2.72/2.82	2.91/2.82
1758	2.61/2.87	2.69/2.93	2.92/2.78	3.05/2.88
1830	3.10/2.73	2.80/2.81	2.65/3.40	2.88/3.06
1858	2.70/2.87	2.78/2.71	3.30/3.42	3.01/2.88
均值	2.84/2.91	2.77/2.84	2.90/3.10	2.97/2.92

5 可能的机制和研究区域未来的旱涝变化讨论

太阳辐射是形成地球气候的原始驱动力，但目前关于太阳活动变化对气候影响过程、途径和机制的认识，仍存在争议^[5, 24-25]。

一些研究已经基本证实季风活动区很可能是太阳活动影响全球气候的主要区域和放大传播的主要传播通道^[24-25, 47]。例如，Wang等^[48]和Zhao等^[49]发现广义梅雨期是东亚夏季风对太阳活动响应的最显著时期；太阳活动信号能够体现在东亚夏季风的边缘位置、雨量多寡和主要强雨带的位置变化等方面。Zhao等发现20世纪的大多时段内，太阳信号对中国夏季风雨带有增幅作用，在太阳黑子峰值年的初夏，季风雨带相比于太阳黑子谷值年更向北移^[50]。潘静等研究发现^[51]，虽然太阳活动与中国夏季降水的相关关系十分复杂，存在显著年代际变化特征，但整体来看，20世纪中叶—21世纪初，当太阳活动偏强，则

华北平原降水量偏少,而江淮地区降水量偏多;他们还发现,太阳活动对大气环流形势有显著影响,当太阳活动偏强,易于造成中国40°N以南地区上空500 hPa位势高度出现正异常,此时欧亚大陆北部在对流层中低层850 hPa位势高度,以及热带印度洋地区出现明显的反气旋式环流,同时中国东部地区出现异常偏北风,对本区域降水不利。

此外,尤其自太阳黑子第23周以后,太阳黑子明显减少且周期延长,反映了近期太阳活动的减弱趋势^[24]。虽然当下对预测未来太阳活动的趋势和可能出现的极端事件还有很大难度,但仍有不少研究认为未来几十年太阳黑子将逐渐减少,太阳活动偏弱,甚至可能进入休眠期^[52-53]。在多年代尺度上,1960年左右至今太阳黑子与华北北部旱涝,以及1997年左右至今太阳黑子与汉江上游旱涝均主要为正相关关系,如果按照本文研究时段内汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系位相变化的时间规律来看,未来数十年太阳黑子与汉江上游和华北北部旱涝仍可能维持正相关关系;结合未来1~2个太阳活动周太阳黑子总体呈减弱趋势的预测结果,汉江上游和华北北部地区未来20余年降水可能继续维持相对偏多态势。这和先前利用气候模式模拟、长时期器测降水和旱涝等级数据序列多年代尺度变化规律预测华北地区和汉江上游降水变化趋势的结果^[1, 19, 54-55]基本一致。

但是,对于太阳活动和华北北部、汉江上游降水关系的认识还是初步的,有很多科学问题需要开展深入研究。由于历史记录不完善,尤其是影响气候变化的因子非常复杂,既有太阳活动等的外部因子,也有气候系统本身的大气圈、水圈、陆面等内部因子的相互联系^[56],因此本文各时间尺度特别是多年代尺度上的相关性并不十分显著,还需要结合其他数据予以证实或证伪;太阳活动与区域降水联系的机制,目前认识还很薄弱,需要结合多种观测数据和数值模拟技术,开展深入探讨。因此,上述关于华北北部和汉江上游地区未来降水趋势的预测,存在着一定不确定性,应该结合其他自然因素和人类活动的协调作用,加以调整。

6 结论

本文对1700—2023年多时间尺度上太阳黑子对汉江上游和华北北部旱涝的相关影响进行了分析,主要研究结论如下:

(1) 汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子的多时间尺度变化特征非常显著,两地区旱涝与太阳黑子的相关关系随时间变化呈阶段性变化。在太阳活动的道尔顿极小期(1790—1830年),汉江上游和华北北部均相对偏湿润;在太阳活动的现代极大期(1920年以后),两地区整体均较此前明显偏旱,并且是1700年以来最干旱的阶段。此外,在太阳黑子数值较高时期,汉江上游和华北北部极端干旱的发生频次往往偏多;太阳黑子的数值多寡对华北北部地区极端洪涝事件也有一定影响,但对汉江上游极端洪涝的影响相对较弱。

(2) 汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的位相变化对两地区之间旱涝正负相关的转变有很大影响,当汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子基本同向变化时,两地区旱涝以正相关为主;当汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子以逆向变化为主时,两地区旱涝也以负相关时段居多;并且汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子相关关系的逆向趋势越显著,两地区之间旱涝的负相关关系也随之显著。

(3) 汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子均有2~4 a左右的年际变化周期,11~12 a左右的年代际变化周期,以及20~30 a和50 a左右的多年代际变化周期。主要在年际和年代际尺度上,当太阳黑子周期振幅变率较大,汉江上游尤其是华北北部的旱涝周期变率往

往随之增大。EEMD分解的趋势项表明, 1700—2023年太阳黑子数值整体表现出非线性的增加特征, 汉江上游和华北北部地区均呈现明显的偏旱趋势。此外, 当汉江上游和华北北部旱涝与太阳黑子在年代和多年代尺度的周期变化中主要为同向变化时, 往往两地旱涝与太阳黑子主要为正相关关系; 反之, 则以负相关为主。

(4) 格兰杰因果关系检查结果显示, 在年际、年代际和多年代尺度上, 太阳黑子均能显著预测汉江上游的旱涝变化; 华北北部旱涝与太阳黑子在年际、年代际和高频IMF分量之间存在显著因果关系, 即太阳黑子变化在统计上能够显著影响华北北部的旱涝变化。

(5) 当太阳黑子明显突变上升, 汉江上游在10 a和30 a尺度上均更趋向较此前相对干旱, 华北北部地区则仅在10 a尺度上更容易偏旱, 且干旱幅度整体较汉江上游更小。

参考文献(References)

- [1] Ren Guoyu. Climate Change and Water Resources in China. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [任国玉. 气候变化与中国水资源. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [2] Hoekstra A Y. Water scarcity challenges to business. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5): 318-320.
- [3] Cosgrove W J, Loucks D P. Water management: Current and future challenges and research directions. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4823-4839.
- [4] Xia Jun, Li Yuanxuan. Vulnerability and Adaptation Countermeasures for China's Water Resources under the Impact of Climate Change. Beijing: Science Press, 2016. [夏军, 李原园. 气候变化影响下中国水资源的脆弱性与适应对策. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [5] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2022.
- [6] WMO. Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2019). 2021. <https://library.wmo.int/idurl/4/57564>.
- [7] Ren G Y, Ding Y H, Zhao Z C, et al. Recent progress in studies of climate change in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 958-977.
- [8] Shao D G, Chen S, Tan X Z, et al. Drought characteristics over China during 1980-2015. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(9): 3532-3545.
- [9] Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. On the aridification and its transitional changes in northern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(4): 951-961. [马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 关于我国北方干旱化及其转折性变化. 大气科学, 2018, 42(4): 951-961.]
- [10] Qin Dahe. National Assessment Report on Extreme Weather and Climate Events and Disaster Risk Management and Adaptation in China. Beijing: Science Press, 2015. [秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.]
- [11] Qin Dahe. The Evolution of Climate and Ecological Environment in China: 2021 (Volume One). Beijing: Science Press, 2021. [秦大河. 中国气候与生态环境演变: 2021(第一卷). 北京: 科学出版社, 2021.]
- [12] Editorial Committee of the South-to-North Water Diversion Project of China. South-to-North Water Diversion Project of China: Volume on Preliminary Work. Beijing: China Water&Power Press, 2018. [中国南水北调工程编纂委员会. 中国南水北调工程: 前期工作卷. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.]
- [13] The official website of the Chinese government. The first phase of the South-to-North Water Diversion Project's central route has cumulatively transferred 60 billion cubic meters of water. 2024. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202406/content_6955411.htm. [中国政府网. 南水北调中线一期工程累计调水600亿立方米. 2024. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202406/content_6955411.htm.]
- [14] Zhang X D, Ren G Y, Yang Y D, et al. Extreme historical droughts and floods in the Hanjiang River Basin, China, since 1426. *Climate of the Past*, 2022, 18(8): 1775-1796.
- [15] Zhang X D, Ren G Y, Bing H, et al. Reconstruction and characterization of droughts and floods in the Hanjiang River Basin, China, 1426-2017. *Climatic Change*, 2023, 176(5): 62. DOI: 10.1007/s10584-023-03538-9.
- [16] Ban Xuan, Zhu Biying, Shu Peng, et al. Analysis of meteorological and hydrological trends and driving forces in the

- Hanjiang River Basin. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(12): 2817-2829. [班璇, 朱碧莹, 舒鹏, 等. 汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12): 2817-2829.]
- [17] Chen Feng, Xie Zhenghui. The impact of climate change on the coincidence of precipitation abundance and shortage in the water source area and the water receiving area of the South-to-North Water Diversion Project's Central Route. Climatic and Environmental Research, 2012, 17(2): 139-148. [陈峰, 谢正辉. 气候变化对南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇的影响. 气候与环境研究, 2012, 17(2): 139-148.]
- [18] Yu Jiangyou, Xia Jun, She Dunxian, et al. Study on the coincidence of droughts in the water source area of the South-to-North Water Diversion Project's Central Route and the Haihe River Water Receiving Area. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 63-68, 194. [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. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 63-68, 194.]
- [19] Ren G Y, Liu H B, Chu Z Y, et al. Multi-time-scale climatic variations over eastern China and implications for the South-North Water Diversion Project. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(4): 600-617.
- [20] Liu H, Yin J, Feng L. The dynamic changes in the storage of the Danjiangkou Reservoir and the influence of the South-North Water Transfer Project. Scientific Reports, 2018, 8(1): 8710. DOI: 10.1038/s41598-018-26788-5.
- [21] Zhang X D, Ren G Y, Mikami T, et al. Correspondence of drought occurrences at multi-temporal scales between North China and Upper Hanjiang River. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(21): e2023JD039247. DOI: 10.1029/2023JD039247.
- [22] Rind D. The Sun's role in climate variations. Science, 2002, 296: 673-677.
- [23] Lean J L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2010, 1: 111-122.
- [24] Ding Yihui. The impact of solar activity on earth's climate and weather. Meteorological Monthly, 2019, 45(3): 297-304. [丁一汇. 太阳活动对地球气候和天气的影响. 气象, 2019, 45(3): 297-304.]
- [25] Xiao Ziniu. The influence of solar activity on earth's climate. Chinese Journal of Nature, 2021, 43(6): 408-419. [肖子牛. 太阳活动对地球气候的影响. 自然杂志, 2021, 43(6): 408-419.]
- [26] Herschel W. XIII. Observations tending to investigate the nature of the sun, in order to find the causes or symptoms of its variable emission of light and heat; with remarks on the use that may possibly be drawn from solar observations. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1801, 91: 265-318.
- [27] Meehl G A, Arblaster J M, Matthes K, et al. Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. Science, 2009, 325(5944): 1114-1118.
- [28] Wasko C, Sharma A. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. Geophysical Research Letters, 2009, 36 (3). DOI: 10.1029/2008GL036310.
- [29] Hodell D A, Brenner M, Curtis J H, et al. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. Science, 2001, 292 (5520): 1367-1370.
- [30] Li Chongyin. Research on possible mechanisms of decadal climate change. Climate and Environmental Research, 2019, 24 (1): 1-21. [李崇银. 关于年代际气候变化可能机制的研究. 气候与环境研究, 2019, 24(1): 1-21.]
- [31] Zhou Qun, Chen Wen. The influence and processes of the 11-year solar activity cycle on the relationship between the East Asian Winter Monsoon and the subsequent East Asian Summer Monsoon. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(4): 486-496. [周群, 陈文. 太阳活动11年周期对东亚冬季风与随后东亚夏季风关系的影响及其过程. 气候与环境研究, 2014, 19(4): 486-496.]
- [32] Song Yan, Li Zhicai, Zhang Jing, et al. Review and advances in the modulation effects of solar activity on plateau snow cover and the East Asian Summer Monsoon. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 148-154. [宋燕, 李智才, 张菁, 等. 太阳活动对高原积雪和东亚夏季风调制影响的回顾和进展. 气象科技进展, 2016, 6 (3): 148-154.]
- [33] Ge Quansheng, Liu Lulu, Zheng Jingyun, et al. Patterns of drought and flood in eastern China during anomalous solar activity periods of the past millennium. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 707-717. [葛全胜, 刘路路, 郑景云, 等. 过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局. 地理学报, 2016, 71(5): 707-717.]
- [34] Changjiang Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources. Flood and Drought Disasters in the Yangtze River Basin. Beijing: China Water & Power Press, 2002. [水利部长江水利委员会. 长江流域水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.]
- [35] Guo Shenglian, Tian Jing, Yang Guang, et al. Hydrological Simulation Forecasting and Optimal Reservoir Water Resource Allocation and Scheduling in the Hanjiang River Basin. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2020. [郭生

- 练, 田晶, 杨光, 等. 汉江流域水文模拟预报与水库水资源优化调度配置. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.]
- [36] Yang Su, Li Qingxiang. Methodology for homogenization analysis of precipitation series and update and refinement of dataset in China. *Climate Change Research*, 2014, 10(4): 276-281. [杨溯, 李庆祥. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 276-281.]
- [37] China Meteorological Administration. *The Atlas of Drought and Food Distribution in China in the Last 500 Years*. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1981. [中国气象局气象科学研究院. 中国近五百年来旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1981.]
- [38] Wei Fengying. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Techniques*. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 2版. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [39] Huang Jiayou. *Meteorological Statistical Analysis and Forecasting Methods*. 3rd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004. [黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法. 3版. 北京: 气象出版社, 2004.]
- [40] Yan Zhongwei, Hua Lijuan, Qian Cheng, et al. *Climate Statistical Methods and Applications*. Beijing: Science Press, 2024. [严中伟, 华丽娟, 钱诚, 等. 气候统计方法和应用. 北京: 科学出版社, 2024.]
- [41] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of hydrology*, 2002, 259(1-4): 254-271.
- [42] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 1948, 38(1): 55-94.
- [43] Ding Yihui, Si Dong, Liu Yanju, et al. On the characteristics, driving forces, and decadal variability of the East Asian Summer Monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(3): 533-558. [丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化. 大气科学, 2018, 42(3): 533-558.]
- [44] Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation. *Climate Dynamics*, 2011, 36: 1463-1473.
- [45] Huang C, Zeng T, Ye F, et al. Solar-forcing-induced spatial synchronisation of the East Asian summer monsoon on centennial timescales. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 514: 536-549.
- [46] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [47] Xiao Ziniu, Huo Wenjuan. The temporal and spatial selectivity of amplification processes in the influence of solar activity on climate. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016, 6(3): 141-147. [肖子牛, 霍文娟. 太阳活动影响气候的放大过程之时空选择性. 气象科技进展, 2016, 6(3): 141-147.]
- [48] Wang J S, Zhao L. Statistical tests for a correlation between decadal variation in June precipitation in China and sunspot number. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117(D23). DOI: 10.1029/2012JD018074.
- [49] Zhao L, Wang J S. Robust response of the East Asian monsoon rainband to solar variability. *Journal of Climate*, 2014, 27(8): 3043-3051.
- [50] Zhao L, Wang J S, Liu H W, et al. Amplification of the solar signal in the summer monsoon rainband in China by synergistic actions of different dynamical responses. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(1): 61-72.
- [51] Pan Jing, Li Chongyin, Gu Wei. The potential impact of solar activity on summer precipitation anomalies in eastern China. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2010, 30(5): 574-581. [潘静, 李崇银, 顾薇. 太阳活动对中国东部夏季降水异常的可能影响. 气象科学, 2010, 30(5): 574-581.]
- [52] Penn M J, Livingston W. Long-term evolution of sunspot magnetic fields. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2010, 6(S273): 126-133.
- [53] Abdussamatov H I. Bicentennial decrease of the total solar irradiance leads to unbalanced thermal budget of the Earth and the Little Ice Age. *Applied Physics Research*, 2012, 4(1): 178. DOI: 10.5539/apr.v4n1p178.
- [54] The Editorial Committee of the Fourth National Assessment Report on Climate Change. *The Fourth National Assessment Report on Climate Change*. Beijing: Science Press, 2022. [第四次气候变化国家评估报告编写委员会. 第四次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2022.]
- [55] Yue Ziying, Deng Yu, Ni Fuquan, et al. Changes in runoff in the upper and middle Hanjiang River Basin under future climate scenarios. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(7): 715-728. [岳紫莹, 邓玉, 倪福全, 等. 未来气候情景下汉江流域中上游径流量变化. 中国农业气象, 2024, 45(7): 715-728.]
- [56] Ding Yihui. *Climate of China*. Beijing: Science Press, 2013. [丁一汇. 中国气候. 北京: 科学出版社, 2013.]

Multiple time scale correlations between sunspots and droughts/floods in the Upper Hanjiang River and northern North China

ZHANG Xiaodan^{1,2}, YANG Yuda¹, REN Guoyu^{2,3}, YANG Guowei³, HE Yuan²

(1. Institute of Chinese Historical Geography, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. National Climate Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: The co-occurrence of droughts at multiple time scales in the water source area (Upper Hanjiang River, UH) and receiving area (northern North China, NNC) of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion project highlights the need to identify common climatic drivers for these concurrent phenomena. Using reconstructed drought/flood grade data and sunspot series from 1700 to 2023, this study analyzed the correlations of droughts/floods in the Upper Hanjiang River and northern North China with sunspots at 11-, 30- and 50-year scales. The results show that the correlation between sunspots and droughts/floods in these two areas varied in stages over time. During high sunspot periods, the frequency of extreme drought events increased in both areas. The phase change of the correlation between sunspots and droughts/floods in the Upper Hanjiang River and northern North China significantly influenced the shift in the drought-flood correspondence between the two areas. When droughts/floods in the Upper Hanjiang River and northern North China align with or oppose sunspot variations, the droughts/floods in the two areas are predominantly positively or negatively correlated. Both droughts/floods in the Upper Hanjiang River and northern North China as well as sunspots share inter-annual cycles of about 2-4 years, inter-decadal cycles of about 11-12 years, and multi-decadal cycles of about 20-30 years and 50 years. Sunspot variations may influence the droughts and floods in these two areas across multiple time scales. Additionally, when sunspots increase significantly and abruptly, the Upper Hanjiang River and northern North China tend to be more drought-prone.

Keywords: historical droughts and floods; Upper Hanjiang River; northern North China; sunspot; inter-decadal variability; multi-decadal variability; Middle Route of the South-to-North Water Diversion project