

过去千年太阳活动异常期的中国东部旱涝格局

葛全胜¹, 刘路路^{1,2}, 郑景云¹, 郝志新¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 根据过去千年中国东部旱涝等级资料, 采用各级旱涝发生几率的比率差指标, 参照新近重建的5条过去千年太阳活动序列, 重建了其11个太阳活动异常期的中国东部旱涝格局。结果发现: 在11个太阳活动异常期, 中国东部旱涝格局各不相同。其中在5个太阳活动极小期(1010-1050年、1280-1350年、1460-1550年、1645-1715年、1795-1823年), 中国东部旱涝格局虽不一致, 但长江中下游地区(华北地区)出现偏旱(涝)的几率更高; 而在2个太阳活动极大期和4个太阳辐射高值期, 中世纪极大(1100-1250年)整个东部多偏旱, 1845-1873年的太阳辐射高值期, 整个东部多偏涝; 其余4个时段(1351-1387年、1593-1612年、1756-1787年、1920-2000年)则旱涝相间出现。集合平均表明: 在太阳活动极小期, 中国东部呈自南向北的“涝—旱—涝”分布: 长江流域偏旱, 南北两侧的华南沿海和华北平原偏涝, 且西北东部及西南偏旱; 而在太阳活动极大期和太阳辐射高值期, 长江流域及西北东部多偏涝, 华南和华北多偏旱。

关键词: 太阳活动极小期; 极大期; 旱涝格局; 中国东部; 过去千年

DOI: 10.11821/dlxb201605001

1 引言

太阳活动是全球气候变化的主要驱动力之一, 也是影响年代至百年尺度降水与旱涝变化的重要因子^[1-5]。揭示太阳活动异常时的降水与旱涝变化特征, 对于辨识其间的可能联系机制, 预测未来降水与旱涝变化具有重要意义。

关于太阳活动与降水变化的关系问题, 早在20世纪初期就已有研究^[6]。在全球尺度上, 最近通过对实测降水与短波、长波强迫因子序列的比较研究表明: 20世纪全球大气水分含量变化存在1个与太阳活动接近的11年周期^[7]; 且陆地降水变率与自然短波强迫驱动的变率接近, 但与长波强迫变化(同人类活动导致的温室效应增强密切相关)关系不大^[8]。对11个太阳黑子峰值年的合成分析表明: 其海温分布与La Niña模态相似, 因而使得热带太平洋地区降水偏少, 其南北两侧的降水偏多; 然而在同纬度上, 海洋与陆地的降水变化型存在很大差异^[9]。还有研究显示: 太阳活动异常会导致北半球环状模(North Annular Mode)的显著变化, 进而影响北半球的降水格局^[10]。在太阳活动与全球各地的降水变化方面, 特别是关于各地降水准周期变化与太阳活动的对应特征, 同样也有大量研究。如在美国, 虽然许多地区的降水变化滞后于太阳辐射变化^[11], 但太阳活动的周期

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-02-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430528); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05080100); 科技基础性工作专项项目(2011FY120300) [Foundation: Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.41430528; The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA05080100; Basic Research Project of the Ministry of Science and Technology, No.2011FY120300]

作者简介: 葛全胜(1963-), 男, 研究员, 主要从事全球变化研究。E-mail: geqs@igsrr.ac.cn

通讯作者: 郝志新(1975-), 女, 研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: haozx@igsrr.ac.cn

变化对过去千年美国中西部干旱的准 20 年周期有显著调制作用^[12], 且大平原北部干旱时期对应于太阳活动极小期^[13]。在欧洲, 太阳活动极小期, 降水多呈现中北欧增多、北欧减少的格局^[14]。在非洲, 过去 1100 年赤道东非的年代际至百年尺度降水与太阳辐射变化基本呈反相关, 其中 4 次大旱均出现在太阳辐射高值期, 而相对湿润期则出现在太阳活动极小期, 尤以蒙德尔极小期降水最多^[15]。在印度, 过去 120 年中季风降水明显偏多的时段与太阳辐射高值期对应, 其可能原因是太阳辐射高值期易造成沃克环流和哈德来环流增强^[16]。

中国学者在 20 世纪早期, 就注意到太阳活动对中国气候异常的影响问题^[17-18]。此后, 许多学者分别对中国各地的降水、旱涝变化与太阳活动变化的对应关系进行了研究^[19]。如通过对器测时期的降水、旱涝变化与太阳活动变化对比分析发现: 黄河流域和关中平原的旱涝与太阳黑子变化呈负相关^[20-21]; 淮河地区在太阳黑子峰值年易发生旱灾, 谷值年易发生涝灾^[22]; 总体上, 在太阳黑子峰值年, 中国南方、东北夏季少雨, 黄河中上游流域、黄淮地区以及长江中上游多雨; 而太阳黑子谷值年, 则是华南及黄河以北多雨, 长江流域及以北到黄河中上游少雨^[23]。徐群等^[24]对 1954-1981 年间逐月太阳黑子数和北半球 500 hpa 副热带高压的对应分析还发现: 在太阳活动强时, 西太平洋副高增强、面积增大、脊点西伸, 脊线与北界偏北; 反之则西太平洋副高减弱、面积缩小、脊点东退, 脊线与北界偏南; 这一现象大致与上述的太阳黑子峰(谷)值年中国降水异常的总体特征大体对应。

然而, 这些研究因受器测资料长度的限制, 主要着眼于太阳活动 11 年周期与中国降水变化的对应特征研究。虽然也有一些学者利用更长时段的降水代用资料或重建序列对降水与太阳活动的对比特征进行了研究^[25-27], 如发现: 在太阳活动较弱时(如 Maunder 极小期), 长江中下游地区易发生干旱事件, 反之则易发生洪涝事件^[25]; 太阳活动强, 对应黄河中下游地区的干旱期, 反之对应偏涝期^[26]; 太阳活动偏强, 青藏高原东北部的德令哈地区降水量偏多, 反之偏少^[27]。但这些研究多限于长时期太阳活动异常与局地降水变化序列的对比分析, 而对其与中国旱涝格局的研究至今未见。为此, 本文拟根据中国东部旱涝等级资料, 结合国际上新近重建的太阳活动变化序列, 对过去千年太阳活动异常与中国东部旱涝格局的对应特征进行探讨。特别是最近几年, 随着过去千年气候变化重建结果的不断丰富, 中国在多年代至百年尺度的冷暖阶段变化与旱涝格局的对应关系研究上取得了显著进展^[28-29], 这为开展上述问题研究提供了重要资料基础和思路借鉴。

2 资料与方法

2.1 太阳活动变化资料及过去千年太阳活动异常期辨识

太阳活动变化资料(图 1)为国际古气候数据库(<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/climate-forcing>)收录的 4 条过去千年太阳活动变化重建结果及 Vieira 等的最新重建结果^[30]。已有研究表明: 在过去千年中, 太阳活动经历了 5 个极小期和 2 个极大期(图 1), 分别是: 奥尔特极小(Oort Minimum, Om), 约 1010~1050 年; 中世纪极大(Medieval Maximum, MedM), 约 1100~1250 年; 沃尔夫极小(Wolf Minimum, Wm), 约 1280~1350 年; 斯普雷尔极小(Spörer Minimum, Sm), 约 1460~1550 年; 蒙德尔极小(Maunder Minimum, Mm), 1645~1715 年; 道顿极小(Dalton Minimum, Dm), 1795~1823 年; 现代极大(Modern Maximum, ModM), 1920 年以后。这 7 个太阳活动异常期与图 1 各序列所显示过去千年太阳辐射变化特征基本吻合。

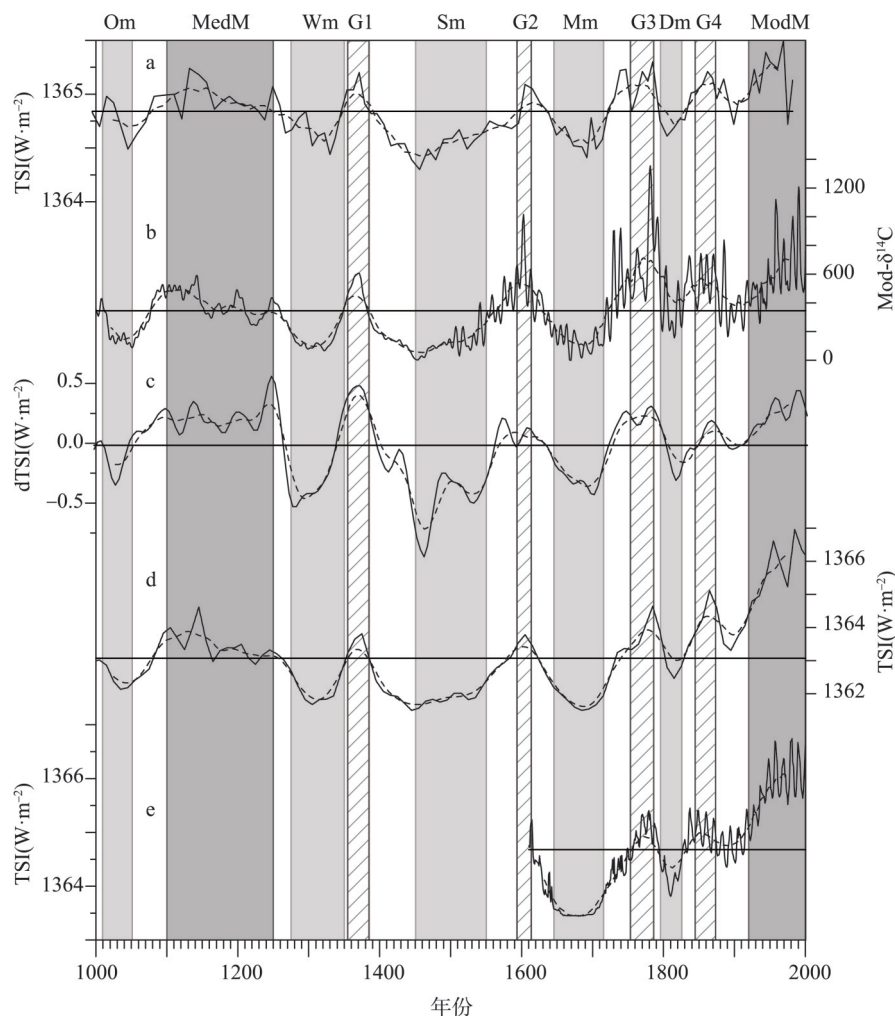


图1 过去千年太阳辐射变化及太阳活动极小期(浅灰柱)、极大期(灰柱)和太阳辐射高值期(斜线柱)
(a. Delaygue等(2010)重建的1000-1982年太阳总辐照度变化; b. 根据 $\delta^{14}\text{C}$ 重建的1000-2001年太阳调制函数变化(Muscheler等, 2007); c. Steinhilber等(2009)重建的太阳总辐照度距平变化; d. Vieira等(2011)重建的太阳总辐照度变化; e. Lean(2000)重建的1610-2000年太阳总辐照度变化)

Fig. 1 The variation of solar irradiance, and the periods of Solar Minimum (light gray column), Solar Maximum (gray column) and high solar irradiance (diagonal column) during the past millennium

(a. Total solar irradiance in 1000-1982 reconstructed by Delaygue et al. (2010); b. Solar modulation function based on ^{14}C in the past millennium (Muscheler et al., 2007); c. Anomaly of total solar irradiance reconstructed by Steinhilber et al. (2009); d. Total solar irradiance reconstructed by Vieira et al. (2011); e. Total solar irradiance in 1610-2000 reconstructed by Lean (2000))

除此之外, 各序列还显示, 在这些极小与极大期之间, 还存在数个持续时间较短的太阳辐射相对高值期^[31-32]。为确定这些相对高值期, 本文采用滑动平均方法分析上述5条太阳活动变化序列, 计算每条序列44年(相当于4个太阳周)的滑动平均值, 求得这些太阳辐射相对高值期的最高值年, 以其最高值年前后各22年作为各个相对高值的起讫时间。考虑到由于这些重建序列的定年方法存在差异, 导致各序列所揭示的相对高值期的起讫年份也不一致, 因此, 将各序列覆盖的最晚和最早年份确定为各个相对高值期出现的起讫年份, 分别记为G1、G2、G3和G4(表1)。如4条显示G1的最大值年分别为1371

表1 过去千年太阳活动变化重建结果揭示的太阳辐射高值期(除中世纪和现代极大外)起讫年份
Tab. 1 The duration of high solar irradiance period (excluding Medieval Maximum and Modern Maximum) revealed by solar activity reconstruction for the past millennium

序列	高值期 1(G1)		高值期 2(G2)		高值期 3(G3)		高值期 4(G4)	
	最大值年	起讫年份	最大值年	起讫年份	最大值年	起讫年份	最大值年	起讫年份
Delaygue	1371	1349-1393	1615	1593-1637	1770	1748-1792	1862	1840-1884
Muscheler	1365	1343-1387	1594	1572-1616	1771	1749-1793	1853	1831-1875
Steinhilber	1365	1343-1387	1590	1568-1612	1765	1743-1787	1867	1845-1889
Vieria	1369	1347-1391	1602	1580-1624	1778	1756-1800	1862	1840-1884
Lean					1771	1749-1793	1851	1829-1873
共有时段		1349-1387		1593-1612		1756-1787		1845-1873

年、1365年、1365年、1369年，其前22年的最晚年份为1349年，其后22年最早年份为1387年，则以1349-1387年作为G1的起讫时段。然而因据此确定的时段可能与其他太阳极值期存在时间交叉，故还需将交叉时段舍去。如根据上述方法确定的G1起始时段1349-1350年与Wm交叉，故最终以1351-1387作为G1的起讫时间。同理可得G2、G3和G4的起讫时间分别为1593-1612年、1756-1787年和1845-1873年。

2.2 旱涝等级资料与旱涝格局重建

本文以中国东部过去2000年旱涝等级数据集作为重建太阳活动异常期旱涝格局的基础资料。该数据集涵盖63个站点(图2)，时间分辨率为年，且已被用于年代至百年尺度的冷暖阶段变化与旱涝格局的对应关系研究中^[28-29]；其中各站旱涝等级根据历史文献记载的各地每年旱涝灾害强度、持续时间及影响大小确定，1级为重旱；2级，旱；3级，正常；4级，涝；5级，大涝。该数据集较过去500年旱涝等级数据集覆盖时段更长，且覆盖中国季风气候的大部分地区，也较先前其他历史时期旱涝等级数据集覆盖区域更广^[33-34]；这为研究千年时段的中国东部旱涝格局提供了可能。但因受原始记载遗漏、失传与“记异不记常”、“厚今薄古”及地区间社会经济文化发展不平衡、战乱等多个因素影响，该数据集1470年之前的旱涝等级数据存在不同程度的缺值。因而，为重建各个太阳活动异常期的旱涝格局，本文借鉴重建冷、暖时段旱涝格局的方法^[28]，即以各站各级旱涝发生几率的比率差(简称“DDF”)为指标，计算每个太阳活动异常期各站旱涝状况偏离过去千年平均状况的程度。具体算法如下：设某年某站除正常或无记录年份外的旱涝等级 $G_{ij}=k$ ；正常或无记录年份的旱涝等级 $G_{ij}=0$ ；并记：

$$F_{ij}^T = \begin{cases} 0 & (\text{当 } G_{ij} = 0 \text{ 时}) \\ 1 & (\text{当 } G_{ij} \neq 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad F_{ij}^k = \begin{cases} 0 & (\text{当 } G_{ij} \neq k \text{ 时}) \\ 1 & (\text{当 } G_{ij} = k \text{ 时}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： i 、 j 分别为年份、站点序号； k 为旱涝等级值； T 指除3级(即正常)外的所有

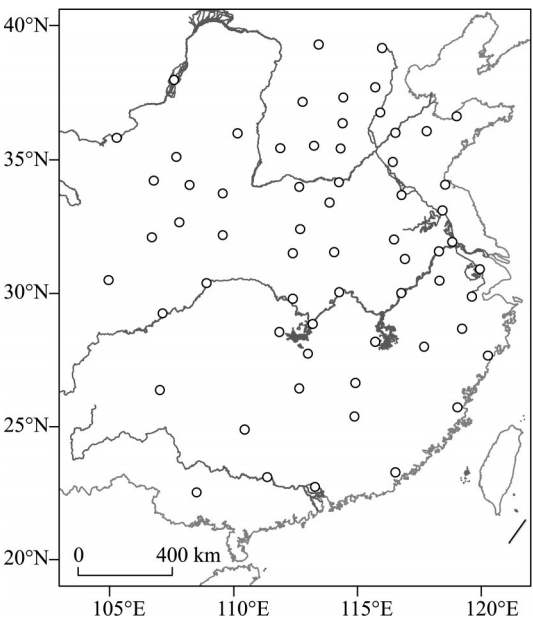


图2 旱涝等级数据集的站点分布

Fig. 2 Location of sites with drought/flood grade data used in this study

旱涝等级集合, 即 $T=\{1, 2, 4, 5\}$ 。则可知, 在某个时段各站实有旱涝 (除正常年外) 年份中, 发生 k 级旱涝的几率为:

$$p_j^k = \frac{\sum_{i=s}^{s+t-1} F_{ij}^k}{\sum_{i=s}^{s+t-1} F_{ij}^T} \quad (2)$$

式中: s 为时段的起始年; t 为时段长度。同理, 在过去千年 (长度记为 R) 各站实有旱涝 (除正常年外) 记录年份中, 发生 k 级旱涝的几率为:

$$\bar{p}_j^k = \frac{\sum_{i=1}^R F_{ij}^k}{\sum_{i=1}^R F_{ij}^T} \quad (3)$$

那么, 比率 p_j^k / \bar{p}_j^k 就反映了各站该时段实际发生 k 级旱涝几率偏离过去千年发生 k 级旱涝平均几率的程度。最后定义:

$$DDF_j = 2 \times \frac{p_j^5}{\bar{p}_j^5} + \frac{p_j^4}{\bar{p}_j^4} - \frac{p_j^2}{\bar{p}_j^2} - 2 \times \frac{p_j^1}{\bar{p}_j^1} \quad (4)$$

式中: DDF_j 反映了每个时段各站所有级别旱涝发生几率偏离过去千年平均状况的总体程度。当 $DDF_j = 0$ 时, 表明该站该时段的旱涝程度与过去千年一致; $DDF_j > 0$, 表明该站该时段偏涝; 反之 $DDF_j < 0$, 则表明该站该时段偏旱。 DDF_j 的绝对值越大, 表示偏离程度越严重。

同时, 对 1470 年以前的时段, 还根据每年实有旱涝等级 (除正常年份外) 记录站数占全部站数的百分率 (简称 “数据实有率”), 选取其中数据实有率高于每个异常期数据实有率平均值的年份作为代表性样本, 计算各个太阳活动异常期的 DDF。由于每个时段的 DDF 反映了该时段各站所有级别旱涝发生几率偏离过去千年平均状况的程度; 因此, 这一方法能有效消除资料缺失对旱涝状况偏离程度计算结果的影响, 从而保证了不同时段之间的可比性^[29]。

3 结果分析与讨论

3.1 各个异常期的旱涝格局

从 5 个太阳活动极小期、2 个太阳活动极大期和 4 个太阳辐射高值期中国东部旱涝格局的分布可看出 (图 3), 5 个极小期的旱涝格局分别是: 奥尔特极小期 (1010-1050 年, 图 3a), 大致呈自南向北的 “涝—旱—涝” 分布: 华北至长江流域偏旱, 其南北两侧的江南地区和黄土高原北部偏涝, 秦岭地区偏涝。沃尔夫极小期 (1280-1350 年, 图 3b), 中国东部旱涝大致呈自东南向西北的带状分布: 西北东部、长江中下游至华南地区偏旱, 东南沿海、云贵高原至华北地区偏涝。斯普雷尔极小期 (1460-1550 年, 图 3c), 中国东部总体偏旱, 局部 (甘肃、京冀、黄淮、长江三角洲和华南地区) 偏涝。蒙德尔极小期 (1645-1715 年, 图 3d), 西北、江南及东南沿海偏旱, 其他地区偏涝。道顿极小期 (1795-1823 年, 图 3e), 115°E 以西呈自南向北的 “涝—旱—涝” 分布: 长江流域偏旱, 其南北两侧的西北东部和华南地区偏涝; 115°E 以东总体偏涝。从总体上看, 5 个极小期的旱涝格局虽不尽相同, 但长江中下游有 4 个时段 (图 3a~3d) 整体偏旱, 1 个时段 (图 3e) 大部偏旱, 即出现偏旱的几率更高; 华北地区 3 个时段 (图 3b、3d、3e) 整体偏涝。

2个极大期和4个高值期的旱涝格局分别是：中世纪极大期（1100-1250年，图3f），总体偏旱，仅西北东部、西南和江淮流域部分地区偏涝。高值期G1（1351-1387年，图3g），115°E以西大致呈自南向北的“旱—涝—旱”分布：四川盆地、西北东部以及华南沿海偏旱，中间的云贵高原偏涝；115°E以东至120°E则偏旱，120°E附近偏涝。高值期G2（1593-1612年，图3h），110°E以西偏旱；以东呈自南向北的“旱—涝—旱”分布：华北北部和华南地区偏旱，中间的江南地区至华北南部偏涝。高值期G3（1756-1787年，图3i），大致呈自东南向西北的带状分布：东南沿海、云贵高原至华北平原、西北东部偏旱，中间的江南地区东部、四川盆地至黄土高原偏涝。高值期G4（1845-1873年，图3j），中国东部普遍偏涝，仅华东沿海、宁夏、广西和汉水流域偏旱。现代极大期（1920-2000年，图3k），大致呈自西南向东北的带状分布，华北、西南地区偏旱，西北东部至东南地区、华南沿海偏涝。从总体上看，2个极大期和4个高值期的旱涝格局也不尽相同，中世纪极大期整体偏旱，高值期G4整体偏涝，其余4个时段则旱涝相间出现。其中长江中下游有4个时段（图3g、3h、3j、3k）偏涝，华北地区有3个时段（图3f、3g、3k）整体偏旱，另有1个时段江南偏涝、江北偏旱（图3i）。

从各个异常期的旱涝格局对比看，沃尔夫极小期与现代极大期之间的旱涝格局除江南东部外，整体旱涝格局大致相反，两者的空间相关系数为-0.256，达到了0.05的显著性水平。蒙德尔极小期与高值期G1的旱涝格局也大致相反，两者的空间相关系数为-0.306，亦达0.05的显著性水平。

3.2 异常期集合平均的旱涝格局

由于旱涝格局变化除受太阳活动异常影响外，还受到太阳活动异常之外的其他因素影响；因而会造成太阳活动各异常期的中国东部旱涝格局不尽相同。而集合平均方法可滤去部分其他信号的影响，从而保留更多的太阳活动异常对中国东部旱涝格局的影响信号^[35]。为此，图4给出了过去千年5个太阳活动极小期、2个太阳活动极大期和4个太阳辐射高值期（简称“极大/高值期”）的旱涝等级集合平均状况。从中可以看出：太阳活动极小期（图4a），中国东部季风及其尾闾区总体偏干，旱涝格局呈自南向北的“涝—旱—涝”分布：华北平原及汾河、渭河流域偏涝，西北东部、长江流域及其以南广大地区偏旱。而在极大/高值期（图4b），则总体偏湿，且呈长江流域及西北东部多偏涝、华南

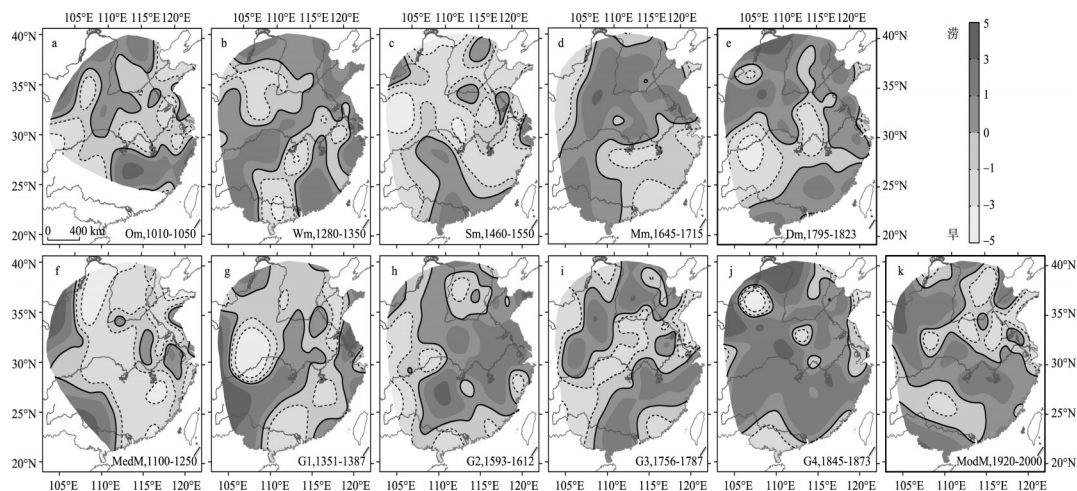


图3 过去千年5个极小期(a-e)、2个极大期(f, k)和4个高值期(g-j)DDF分布

Fig. 3 Spatial patterns of DDF in 5 Solar Minimum periods (a-e) and 2 Solar Maximum (f, k) as well as 4 high solar irradiance periods (g-j) during the past millennium

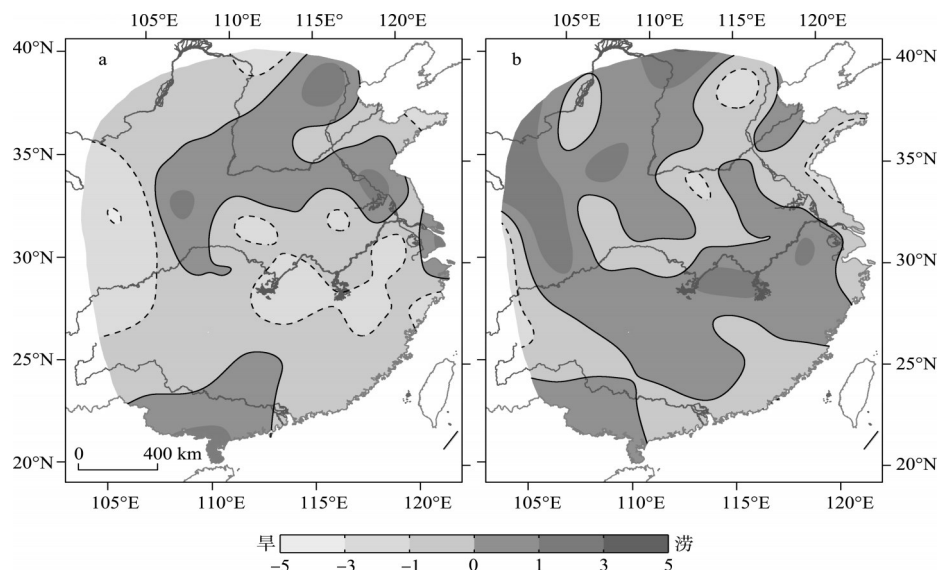


图4 过去千年太阳活动极小期(a)和极大/高值期(b)的DDF集合平均分布

Fig. 4 Spatial patterns of DDF ensemble mean for 5 Solar Minimum periods (a) and 6 Solar Maximum or high solar irradiance periods (b) during the past millennium

和华北大部偏旱格局。两者的空间相关系数为 -0.545 ，达到了 0.01 的显著性水平。这说明：太阳活动极小期与极大/高值期间的中国东部旱涝格局大致相反。此外，5个极小期和6个极大/高值期集合平均的旱涝格局分别与蒙德尔极小期（图3d）和现代极大期（图3k）的旱涝格局最为相似，其相关系数分别为 0.591 和 0.724 ，均达到 0.01 的显著性水平。

3.3 可能机制与预警意义讨论

尽管目前对太阳活动异常影响中国旱涝格局变化的机制研究很少，但已有的一些气候模拟诊断研究表明：太阳活动的强弱变化可能通过热带和副热带太平洋地区海气耦合反馈机制影响全球降水。具体表现为：太阳活动强时（如峰值年），热带和亚热带太平洋晴空区域吸收的太阳辐射增加，增加的太阳辐射使地表、特别是海洋蒸发加强，由此产生的更多水汽通过夏季风环流被输送到季风区，从而造成季风及其边缘区的降水总体增多^[36-38]。但同时，太阳活动强又会造成北半球 500 hPa 位势高度出现正异常，尤以 20°N 以南的热带地区和 $45^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$ 之间的区域最为显著，且中国上空也为正异常；此时在对流层中低层 850 hPa 上，欧亚大陆北部为反气旋式环流，热带印度洋也为一明显的反气旋式环流，且中国东部 $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 间的区域出现异常偏北风，从而导致雨区多集中在 30°N 及其两侧区域；同时中国东部 $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 间的区域位势高度异常场的垂直分布呈现类似正压的稳定结构，使该区域的垂直对流减弱；二者相互配合使得中国东部形成了长江流域偏涝、华北大部偏旱格局。而在太阳活动弱时（如谷值年），上述作用过程则相反，从而形成了在极小期时中国东部季风及其尾闾区总体偏干，且易出现华北偏涝、长江流域及其以南广大地区偏旱的格局^[39]。

对比表明：本文研究结果同前人所得到的太阳活动异常时中国一些地区降水变化研究结果具有一致性。如前人研究发现：过去1000年在太阳活动较弱时，长江中下游易发生干旱^[25]，陇西地区^[40]、福建北部山地^[41]均对应降水偏少；相反，黄河中下游则易偏涝^[26]；这与本文得到的太阳活动极小期时中国东部旱涝呈自南向北的“涝—旱—涝”分布格局基本一致。

此外, 根据俄罗斯科学院普尔科沃天文台对太阳总辐照度的观测记录分析发现^[42]: 自 21 世纪初起, 未来几十年太阳黑子数和 TSI 将逐渐减小, 太阳活动可能由强转弱; 而这可能会导致未来数十年长江流域转向偏旱, 华北地区转向偏涝。值得注意的是, 根据国家气候中心对中国气候基本要素及长江中下游梅雨等的监测 (http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/cn_moni_china.php?product=cn_moni_china_basic): 2000-2013 年的 14 年间, 有 11 年长江中下游地区梅雨量偏少, 其中 7 年偏少 5 成以上; 自 2006 年川渝大旱以来, 位于长江上游的西南地区又于 2009-2013 年连续多年发生严重干旱 (主要出现在春季至初夏), 其中自 2009 年 8 月-2010 年 6 月初的持续干旱波及西南 5 省的大多数区域, 为有完整气象观测以来的最极端干旱^[43]。同时, 2009-2014 年的 6 年间, 中国东部季风区降水有 3 年 (分别是 2009、2011、2013 年) 出现了“南 (长江流域) 旱北 (华北) 涝”格局。对比 2005-2014 年间年降水量平均值与其前 10 年平均值的差异 (图 5), 可以明显看出: 与其前 10 年相比, 2005-2014 年间中国东部降水已呈现出明显的“南旱北涝”特征: 长江以北地区偏涝, 以南地区偏旱, 但华南亦偏涝。

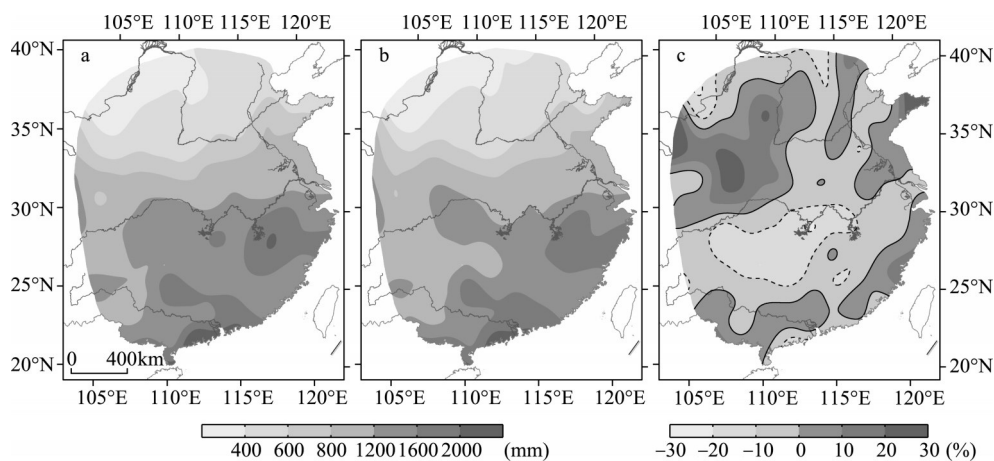


图 5 2005-2014 年年降水量平均值(b)与其前 10 年平均值(a)的距平百分率(c)

Fig. 5 Precipitation anomaly percentage (c) between annual mean during 2005-2014 (b) and annual mean of previous 10 years (a)

4 结论

过去千年太阳活动异常与中国东部旱涝格局的对应特征研究认识可归纳为:

(1) 过去千年, 11 个太阳活动异常期对应的中国东部旱涝格局各不相同, 其中在 5 个太阳活动极小期, 长江中下游有 4 个时段整体偏旱; 华北地区有 3 个时段整体偏涝。而在 2 个太阳活动极大期和 4 个太阳辐射高值期中, 长江中下游有 4 个时段偏涝, 华北地区有 3 个时段整体偏旱, 另有 1 个时段江南偏涝、江北偏旱; 其中中世纪极大期中国东部整体偏旱, 而 1845-1873 年的太阳辐射高值期, 中国东部则整体偏涝。

(2) 集合平均结果表明: 太阳活动极小期的中国东部旱涝格局与极大期 (包括太阳辐射高值期) 的旱涝格局大致相反。其中太阳活动极小期, 中国东部降水呈自南向北的“涝—旱—涝”分布, 华北平原及汾河、渭河流域偏涝, 西北东部、长江流域及其以南广大地区偏旱; 反之, 则长江流域及西北东部多偏涝, 华南和华北大部多偏旱。当太阳活动由强转弱时, 可能会导致长江流域转向偏旱, 华北地区转向偏涝。

然而, 中国东部旱涝变化, 除受太阳活动异常的影响外, 还同时受气候系统的其他

内外强迫因子共同影响, 如有研究表明: 当太平洋年代际振荡 (PDO) 处于负位相时, 中国东部降水易呈“涝—旱—涝”格局; 反之, 则长江流域偏涝、华北地区偏旱^[44-45]。这说明: 太阳活动异常与中国东部旱涝之间的对应关系可能极为复杂, 因而本文的上述认识仍可能存在不确定性; 特别是本文对二者之间联系机制和预警意义的分析仅是基于现有一些研究结果的讨论和推测。所以, 将重建结果、观测事实和气候模拟相结合, 进一步揭示太阳活动异常与中国东部旱涝格局的多尺度对应关系, 深入探讨太阳活动变化对中国旱涝格局的影响机制, 是下一步需要研究的重点问题。

参考文献(References)

- [1] Hoyt D V, Schatten K H. The Role of the Sun in Climate Change. New York: Oxford University Press, 1997.
- [2] Rind D. The Sun's Role in Climate Variations. *Science*, 2002, 296: 673-677.
- [3] Herman J R, Goldberg R A. Sun, Weather and Climate. Honolulu, Hawaii: University Press of the Pacific, 2005.
- [4] Lean J L. Cycles and trends in solar irradiance and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2010, 1: 111-122.
- [5] Zhao Liang, Xu Ying, Wang Jinsong, et al. Progress in studies on the influence of solar activity on climate change during the last 100 years. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2011, 1(4): 37-48. [赵亮, 徐影, 王劲松, 等. 太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展. *气象科技进展*, 2011, 1(4): 37-48.]
- [6] Clayton H H. *World Weather*. New York: MacMillan, 1923.
- [7] Wasko C. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(3): 1-5.
- [8] Lambert F H, Stott P A, Allen M R, et al. Detection and attribution of changes in 20th century land precipitation. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(10): 1-4.
- [9] 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.
- [10] Ruzmaikin A. Effect of solar variability on the Earth's climate patterns. *Advances in Space Research*, 2007, 40(7): 1146-1151.
- [11] Perry C A. Solar-irradiance variations and regional precipitation fluctuations in the western USA. *International Journal of Climatology*, 1994, 14: 969-984.
- [12] Woodhouse C A, Overpeck J T. 2000 years of drought variability in the central United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 2693-2714.
- [13] Yu Z, Ito E. Possible solar forcing of century-scale drought frequency in the northern Great Plains. *Geology*, 1999, 27(3): 263-266.
- [14] Martin- Puertas C, Matthes K, Brauer A, et al. Regional atmospheric circulation shifts induced by a grand solar minimum. *Nature Geoscience*, 2012, 5(6): 397-401.
- [15] Verschuren D, Laird K R, Cumming B F. Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1100 years. *Nature*, 2000, 403(6768): 410-414.
- [16] Bhattacharyya S, Narasimha R. Regional differentiation in multidecadal connections between Indian monsoon rainfall and solar activity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, 112(D24): 1-10.
- [17] Zhu Kezhen. Climate pulsation of our history. *Science Transaction*, 1926, 16(2): 274-282. [竺可桢. 我国历史上气候的脉动. *科学汇刊*, 1926, 16(2): 274-282.]
- [18] Tu Changwang. Chinese floods and droughts and their relationship with the Centers of Action in the Far East. *Acta Meteorologica Sinica*, 1936(12): 600-619. [涂长望. 东亚活动中心与我国水旱灾之关系. *气象杂志*, 1936(12): 600-619.]
- [19] Wang Shaowu. Long-term changes of atmospheric action centers on the East Asia and climate variability in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1962, 32(1): 19-36. [王绍武. 东亚大气活动中心的多年变化与我国的气候振动. *气象学报*, 1962, 32(1): 19-36.]
- [20] Li Chunhui, Yang Zhifeng. Relationship between solar activities and precipitation in the Yellow River Basin. *Meteorological Monthly*, 2006, 31(11): 42-44. [李春晖, 杨志峰. 太阳活动与黄河流域降水关系分析. *气象*, 2006, 31(11): 42-44.]
- [21] Dou Ruiyin, Yan Junping. Relationships between drought and flood disasters in Guanzhong plain and the activities of

- sunspot. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(8): 76-82. [窦睿音, 延军平. 关中平原太阳黑子活动周期与旱涝灾害的相关性分析. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(8): 76-82.]
- [22] Zheng Xiaodong, Lu Fan, Ma Jing. Study of relation between drought/flood and sunspot in Huaihe Basin during 50 Years. *Water Resources and Power*, 2013, 31(2): 1-4. [郑晓东, 鲁帆, 马静. 近50年淮河流域旱涝与太阳黑子的关系研究. *水电能源科学*, 2013, 31(2): 1-4.]
- [23] Duan Changchun, Sun Jihua. Relationship between abnormal solar activities and precipitation and temperature in China. *Meteorological Science and Technology*, 2006, 34(4): 381-386. [段长春, 孙绩华. 太阳活动异常与降水和地面气温的关系. *气象科技*, 2006, 34(4): 381-386.]
- [24] Xu Qun, Jin Long. The coupled oscillation of solar activity with the strength of subtropical high in Northern Hemisphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1986, 10(2): 204-211. [徐群, 金龙. 太阳活动与北半球副热带高压强度的耦合振荡. *大气科学*, 1986, 10(2): 204-211.]
- [25] Jiang Tong, Zhang Qiang, Wang Sumin. The relationship between droughts, floods and climatic changes in the middle and lower reaches of the Changjiang River since last 1000 years. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 518-524. [姜彤, 张强, 王苏民. 近1000年长江中下游旱涝与气候变化关系. *第四纪研究*, 2004, 24(5): 518-524.]
- [26] Hao Zhixin, Zheng Jingyun, Ge Quansheng. Precipitation cycles in the middle and lower reaches of the Yellow River (1736-2000). *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(1): 17-25.
- [27] Huang Lei, Shao Xuemei. Precipitation variation in Delingha, Qinghai and solar activity over the last 400 years. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 184-192. [黄磊, 邵雪梅. 青海德令哈地区近400年来的降水量变化与太阳活动. *第四纪研究*, 2005, 25(2): 184-192.]
- [28] Zheng Jingyun, Hao Zhixin, Zhang Xuezhen, et al. Drought/flood spatial patterns in centennial cold and warm periods of the past 2000 years over eastern China. *Science Bulletin*, 2014, 30: 2964-2971. [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. *科学通报*, 2014, 59(30): 2964-2971.]
- [29] Hao Zhixin, Zheng Jingyun, Ge Quansheng, et al. Spatial patterns of precipitation anomalies for 30-yr warm periods in China during the past 2000 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 26(3): 278-288.
- [30] Vieira L E A, Solanki S K, Krivova N A, et al. Evolution of the solar irradiance during the Holocene. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 531: 1-20.
- [31] Rigozo N R, Echer E. Reconstruction of Wolf sunspot numbers on the basis of spectral characteristics and estimates of associated radio flux and solar wind parameters for the last millennium. *Solar Physics*, 2001, 203(1): 179-191.
- [32] Russell C T, Luhmann J G, Jian L K. How unprecedented a solar minimum? *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(2): 1-16.
- [33] Wang Shaowu, Zhao Zongci, Chen Zhenhua. Drought/flood type in China for 950-1991 AD/Wang Shaowu. *Diagnosis Study on Variations of Drought and Flood Disasters in Yangtze River and Yellow River and Its Economics Effects*. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 55-66. [王绍武, 赵宗慈, 陈振华. 公元950年-1991年的旱涝型. 见: 王绍武. 长江黄河旱涝灾害发生规律及其经济影响的诊断研究. 北京: 气象出版社, 1993: 55-66.]
- [34] Zhang De'er, Liu Chuanzhi, Jiang Jianmin. Reconstruction of six regional dry/wet series and their abrupt changes during the last 1000 years in East China. *Quaternary Sciences*, 1997, 17(1): 1-11. [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. *第四纪研究*, 1997, 17(1): 1-11.]
- [35] Ding Yihui. Physical problems in the global climate change. *Physics*, 2009, 38(2): 71-83. [丁一汇. 全球气候变化中的物理问题. *物理*, 2009, 38(2): 71-83.]
- [36] Van Loon H, Meehl G A, Shea D J. Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2007, 112(D2): 1-8.
- [37] Meehl G A, Arblaster J M, Branstator G, et al. A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. *Journal of Climate*, 2008, 21(12): 2883-2897.
- [38] Liu J, Wang B, Cane M A, et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing. *Nature*, 2013, 493(7434): 656-659.
- [39] Pan Jing, Li Chongyin, Gu Wei. The possible impact of solar activity on summer rainfall anomaly in eastern China. *Journal of 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.]
- [40] Tan Liangcheng, Cai Yanjun, Yi Liang, et al. Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity. *Climate of the Past*, 2008, 4(1): 19-28.
- [41] Lei Guoliang, Zhu Yun, Jiang Xiuyang. Climate variations over the past 1400 years inferred from an α -cellulose $\delta^{13}\text{C}$ record from Xianshan peat in Southeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(8): 1018-1023. [雷国良, 朱芸, 姜

- 修洋. 福建仙山泥炭距今 1400a 以来的 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 记录及其气候意义. 地理科学, 2014, 34(8): 1018-1023.]
- [42] 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): 178-184.
- [43] Qin Dahe, Zhang Jianyun, Shan Chunchang, et al. China National Assessment Report on Risk Management and Adaptation of Climate Extremes and Disasters. Beijing: Science Press, 2015: 120-122. [秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等. 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: 120-122.]
- [44] Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns. *Chinese J. Geophys.*, 2005, 48(4): 789-797. [杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型. 地球物理学报, 2005, 48(4): 789-797.]
- [45] Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(4): 835-846. [邓伟涛, 孙照渤, 曾刚. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系. 大气科学, 2009, 33(4): 835-846.]

Spatial patterns of drought/flood over eastern China in the periods of anomalous solar activity during the past millennium

GE Quansheng¹, LIU Lulu^{1,2}, ZHENG Jingyun¹, HAO Zhixin¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on five new reconstructions of solar irradiance, the anomalous solar activity periods during the past millennium, including 5 Solar Minimum periods, 2 Solar Maximum, and 4 high solar irradiance periods, were identified. Furthermore, the spatial patterns of drought/flood over eastern China for these 11 periods were reconstructed using an index of difference between drought and flood frequency derived from a 63-site yearly drought/flood grade dataset. It was found that there are different drought/flood patterns over eastern China within 11 solar activity anomalies. Spatial patterns showed alternative distribution of drought and flood among 5 Solar Minimum (1010-1050, 1280-1350, 1460-1550, 1645-1715, 1795-1823), with a higher probability of drought (flood) dominating the middle and lower reaches of the Yangtze River (North China). In the periods of solar maximum and high solar irradiance, drought prevailed over eastern China in Medieval Maximum (1100-1250), while flood prevailed over eastern China in 1845-1873. The remaining four periods (1351-1387, 1593-1612, 1756-1787, 1920-2000) presented a pattern of alternate drought and flood. The ensemble mean patterns of drought/flood for all the 5 Solar Minimum presented a zonal distribution with flood in South China, drought in the middle and lower Yangtze River and flood in most parts of North China, whereas the reverse distribution, drought in South China, flood in the middle and lower Yangtze River and drought in most parts of North China, were shown in the ensemble mean patterns of drought/flood for all the 6 periods with solar maximum and high solar irradiance.

Keywords: Solar Minimum; Solar Maximum; spatial patterns of drought/flood; eastern China; past millennium