

树轮记录的吕梁山北部过去 175 年来帕尔默干旱指数变化

王振威^{1,2}, 李强^{2,3,4}, 刘禹^{2,3,4,5}, 杨银科¹, 任萌^{2,6}, 崔琳琳^{2,6}

1. 长安大学 环境科学与工程学院 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054
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
3. 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061
4. 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875
5. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院 环境科学与技术系, 西安 710049
6. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 利用采自吕梁山北部地区的油松样本, 建立了过去 175 年来的树轮宽度年表。相关分析表明: 标准年表 (STD) 与当年 5—6 月的帕尔默干旱指数 (Palmer drought severity index, PDSI) 相关性最好, 相关系数为 0.687 ($n=50$, $p<0.001$)。因此, 采用树轮宽度标准年表 (STD) 序列重建了 1829—2003 年 5—6 月的 PDSI 序列, 重建方程的方差解释量达到 47.16%。重建序列发现 9 个偏湿时段, 分别为 1833—1836 年、1845—1851 年、1857—1863 年、1869—1874 年、1882—1887 年、1896—1899 年、1932—1939 年、1949—1965 年、1975—1985 年; 10 个偏干时段, 分别为 1829—1832 年、1837—1844 年、1852—1856 年、1864—1868 年、1875—1881 年、1888—1895 年、1900—1931 年、1940—1948 年、1966—1974 年、1986—2003 年。同时发现 20 世纪 20 年代的严重干旱事件以及 20 世纪末气候干旱化加重的趋势。空间相关结果显示: 重建的 PDSI 代表了周边大范围的干旱变化, 同时, 与基于历史文献的干湿指数 (DWI) 显著相关 ($p<0.002$), 说明无论是空间还是时间尺度上, 重建结果都可以代表吕梁山周边大范围的干旱变化。此外, 重建序列与不同定义的东亚夏季风指数都显著相关 ($p<0.02$), 说明东亚夏季风对研究区的干湿变化具有调制作用。多窗谱分析表明重建序列存在 2—7 年、12 年、13.6 年、19.2 年、21.6 年、26.1 年的周期变化, 这些周期变化可能与 ENSO、太阳活动有关。

关键词: 吕梁山北部; 树轮宽度; PDSI 重建; 东亚季风

PDSI variations recorded by tree rings in the northern Lüliang Mountains during the past 175 years

WANG Zhenwei^{1,2}, LI Qiang^{2,3,4}, LIU Yu^{2,3,4,5}, YANG Yinke¹, REN Meng^{2,6}, CUI Linlin^{2,6}

收稿日期: 2019-06-21; 录用日期: 2019-10-21; 网络出版: 2019-10-25

Received Date: 2019-06-21; Accepted Date: 2019-10-21; Online first: 2019-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41873021); 中国科学院青年创新促进会 (2017451); 中国科学院“西部之光”项目; 陕西省青年科技新星项目

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41873021); Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2017451); CAS “Light of West China” Program; Program of Youth Science and Technology Nova of Shaanxi Province

通信作者: 李强, E-mail: liqiang@ieecas.cn

Corresponding Author: LI Qiang, E-mail: liqiang@ieecas.cn

引用格式: 王振威, 李强, 刘禹, 等. 2020. 树轮记录的吕梁山北部过去 175 年来帕尔默干旱指数变化 [J]. 地球环境学报, 11(1): 72–80.

Citation: Wang Z W, Li Q, Liu Y, et al. 2020. PDSI variations recorded by tree rings in the northern Lüliang Mountains during the past 175 years [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(1): 72–80.

1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
3. CAS Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Xi'an 710061, China
4. Joint Center for Global Change Studies (JGCS), Beijing 100875, China
5. Department of Environmental Science and Technology, School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Background, aim, and scope Lüliang Mountains, range in the west of Shanxi Province, China. Northeast striking, about 400 kilometers from north to south, located between the Yellow River and the Fenhe River. Due to the decrease of available water in recent years and the aggravation of drought, it is necessary to study the drought history of this area. In this paper, tree rings of pines from Lüliang Mountains were used to study the dry-wet change in the past and its influencing factors. **Materials and methods** 42 pine cores were collected from Lüliang Mountains, then they were dried, fixed and polished in the laboratory, the width was measured by LINTAB with an accuracy of 0.01 mm. The COFECHA program was then used for cross-dating quality control to ensure that each tree-ring had an accurate calendar year. Finally, three chronologies were generated with ARSTAN. **Results** Correlation analysis showed that the palmer drought index (PDSI) had the best correlation with the standard chronology (STD) from May to June, with a correlation coefficient 0.687 ($n=50$, $p<0.001$). In addition, the STD chronology retained more low-frequency signals than the RES chronology. So the width standard chronology (STD) were selected to reconstruct the PDSI index changes from May to June during 1829—2003, the variance interpretation of the reconstructed equation was 47.16%. The reconstructed sequences including 9 wet sequences and 10 dry sequences. **Discussion** The reconstruction sequence reveals the drought in the 20th century and the intensification of drought in the end of the 20th century. Compared with the DWI index sequence in Yang et al (2013), the correlation coefficient is -0.235 ($n=175$, $p<0.002$). After 10 years of low-pass filtering, the correlation coefficient is -0.4 , indicating that the reconstruction sequence is reliable. **Conclusions** The east Asian summer monsoon has an important influence on the dry and wet changes in the study area. Multiwindow spectral analysis showed that the reconstructed sequences had periodic changes of 2—7 a, 12 a, 13.6 a, 19.2 a, 21.6 a and 26.1 a, which may be related to ENSO and solar activity. **Recommendations and perspectives** Further research into the factors affecting drought in the region is needed. At the same time, finding other sources of water available to alleviate water shortages is essential.

Key words: northern Lüliang Mountains; tree ring width; PDSI reconstruction; the east Asian monsoon

近年来, 全球气候变暖, 极端气候事件发生的频率持续增加, 20 世纪 90 年代以来全球发生气候灾害的次数比 20 世纪 50 年代多 5 倍 (李书严等, 2012)。要预知未来气候变化, 必须了解过去。现代气候记录长度有限, 我国 95% 以上的气象观测记录始于 20 世纪 50 年代 (张丕远, 1996)。因此, 需要寻找其他长时间、高分辨率的代用指标来研究过去气候变化。

作为气候记录代用指标之一的树木年轮, 具有适用区域广、定年准确、连续性强、分辨率高和易于获取复本等特点 (刘禹等, 2012a; 杨颖川等, 2018), 成为研究过去气候变化的重要手段。树轮

的研究指标主要有宽度、密度、同位素等方面。我国学者已开展多年树木年轮研究工作, 且取得一定的研究成果。我国西北地区、青藏高原等高海拔地区, 树木生长对气候变化响应敏感, 树轮研究成果较多, 重建指标包括降水、温度、湿度、干旱指数、径流量等; 而东南部地区, 气候湿润, 树木生长对气候变化的敏感性较低, 相对西北地区, 东南部地区树轮研究成果较少。吕梁山地区位于我国 400 mm 降水等值线附近, 400 mm 降水等值线是我国半湿润、半干旱区的分界线, 该区域适宜农业生产且树木生长对气候变化更为敏感。该地区已有的气候研究集中于单个气象指标, 如温度、降水等:

易亮等 (2006) 利用采自山西芦芽山地区的树木年轮, 根据宽度年表重建了 1676—2003 年 5—7 月温度变化; 蔡秋芳等 (2010) 利用采自山西吕梁山中部的油松样本, 重建了 1836—2007 年 5—7 月平均气温变化, 发现 20 世纪 50 年代以来气温呈上升趋势; 李强等 (2006, 2013) 利用采自山西宁武地区的油松样本, 重建了该地区 1686—2003 年上年 8 月至当年 7 月的降水、5—7 月的温度变化。该区树轮研究成果有限, 不足以深刻认识过去气候变化特征, 已重建的温度、降水指标无法满足农业生产需求, 需要根据树轮特征重建与农业生产相关的综合干湿变化指数。

PDSI 是一个与降水、温度相关的综合性指标, 且 PDSI 能够反应农业上的干湿变化, 所以其具有监测和预测农作物产量的潜力。本文利用采自吕梁山北部地区的油松样本建立树轮宽度年表, 建立转换方程, 重建该地区 1829—2003 年 5—6 月的 PDSI 变化, 并对重建序列进行分析, 进一步调查该地区旱涝变化受到的大尺度气候动力学影响因子, PDSI 指数的重建也能够丰富吕梁山地区气候研究资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与年表建立

吕梁山北部地区属于温带大陆性气候, 气温寒冷, 冬季漫长。根据 1954—2003 年的气象记录, 多年年平均气温 2—6℃, 极端最低温 -27℃。年平均总降水量 400—500 mm, 雨量集中在 7 月、8 月, 降水年际变化十分明显, 气温、降水有明显的垂直分布。城镇化及工业化的快速发展, 以及水资源的不合理开发利用, 导致水资源危机日益严重。帕尔默干旱指数是 Palmer 于 20 世纪 60 年代提出的, 该指数充分考虑到降水、气温和土壤水分蒸发等多种因素, 同时也考虑了前期干旱的积累效应, 能够体现降水等气象条件对树木生长的滞后效应 (Dai et al, 2004), 所以本文选择重建 PDSI 指数。

样品采集于 2004 年 7 月, 采样点 (LLB) 位于山西省北部 (38°48'N, 112°06'E, 海拔 1500—2800 m), 属吕梁山脉 (图 1)。优势树种为油松 (*Pinus tabulaeformis*), 夹杂有冷杉 (*Abies fabri*), 采样点在吕梁山脉管涔山森林上缘, 林间间隙大, 按照国际树木年轮数据库的标

准, 使用直径为 5 mm 的生长锥在每棵树胸高位置呈垂直角度方向取两根树芯 (李强等, 2017; 张芬等, 2012), 共采集油松 21 棵, 共取树芯 42 根。

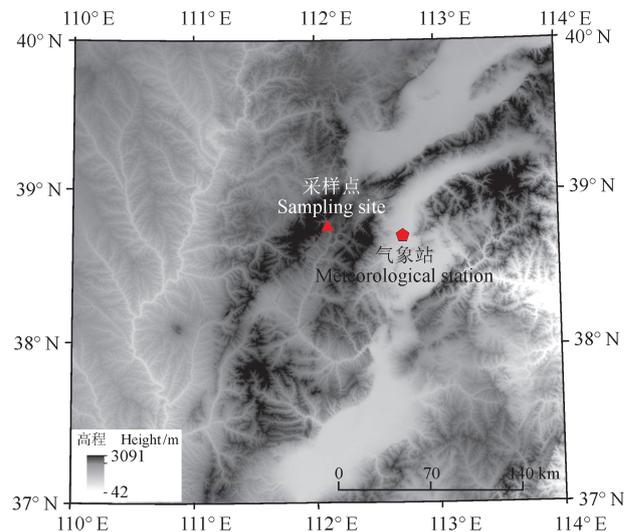


图 1 采样点和气象站位置图

Fig.1 Location of sampling site and meteorological station

样品带回实验室后, 经过固定, 放在通风处自然风干 (秦莉等, 2012), 依次用 240 目、600 目和 1200 目砂纸对样品进行打磨, 直到树轮细胞清晰可见。在显微镜下辨认真伪轮, 对树轮进行计数。然后用精度为 0.01 mm 的 LINTAB 宽度仪逐轮测量树轮宽度 (蔡秋芳等, 2012), 之后, 用 COFECHA 程序进行交叉定年的质量控制, 确保每一轮能够有准确的日历年份。采用负指数函数的方法拟合树木的生长趋势, 该方法能保留更多的低频信号 (宋慧明等, 2017)。用 ARSTAN 程序生成该采样点树轮宽度的标准年表 (STD)、差值年表 (RES)、自回归年表 (ARS) (图 2)。在样本量较少的前提下, 可以取 $SSS > 0.75$ 作为选择年表长度的标准, 如 Liu et al (2007) 根据五当召、喇嘛洞的油松样本重建两个地区 2—7 月的降水, 孙军艳等 (2006) 利用采自内蒙古额济纳地区的胡杨, 建立宽度年表, 重建了该地区 1771 年—2002 年地下水位变化中, 把 0.75 作为选取年表长度的标准。本文也选取子样本信号强度大于 0.75 作为选择年表长度的标准, 即 1829—2003 年合计 175 年。

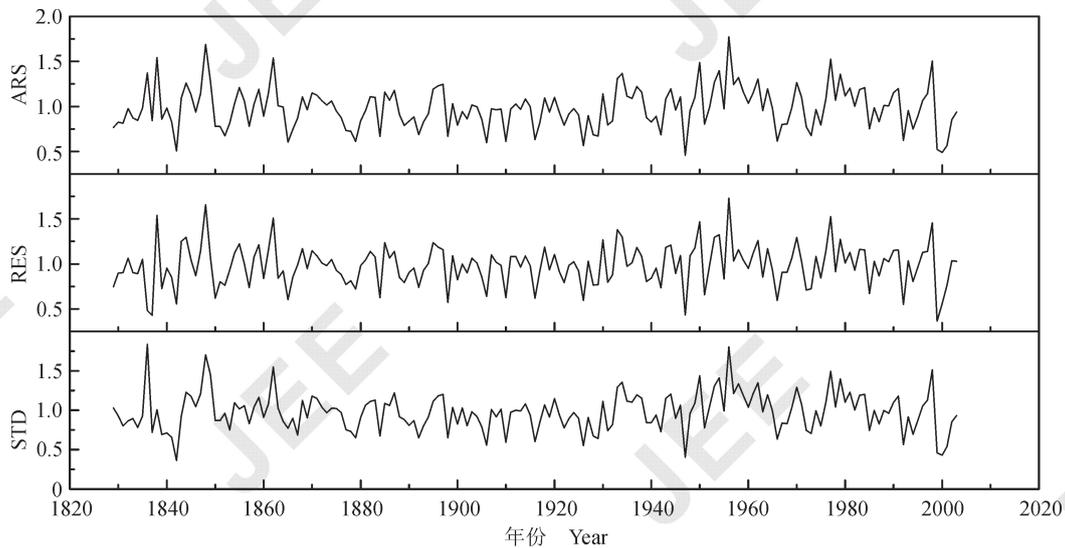


图 2 LLB 组树轮宽度标准年表 (STD)、差值年表 (RES)、自回归年表 (ARS)

Fig.2 Standard chronology of tree-ring width (STD), residual chronology (RES) and autoregressive chronology (ARS) of LLB

1.2 气象资料

采样点附近共有两个气象站, 五寨气象站、原平气象站, 分别距离采样点 42 km 和 46 km, 气候记录的长度为 1957—2004 年、1954—2003 年, 两气象站记录的降水资料不存在非一致性变动 (Li et al, 2013), 两站记录的月平均温度存在差异, 是由于两站所处的纬度不同造成的。气象站的选取应与采样点属于同一气候区, 以保证重建的准确性 (王梦麦等, 2009)。两个气象站中, 由于五寨气象站与采样点之间有吕梁山 (李强等, 2006), 所以, 最终选取原平气象站来分析树木年轮对干旱的响应 (气象数据见图 3)。原平气象站资料显示降水集中在 7 月、8 月, 年内温度最高的月份是 7 月。

2 结果与讨论

2.1 转换方程的建立

树轮宽度的三种年表中, 标准年表 (STD) 比差值年表 (RES) 保留较多的低频信号 (刘禹等, 2012b), 更能反映气候的自然变化, 所以将 STD 年表与 PDSI 上年 4 月至当年 11 月的各种月份组合做相关分析, 结果表明: 两者显著正相关, 所以选取标准年表 (STD) 重建 PDSI 指数变化。在单月相关性分析中, 6 月的相关性最好, 相关系数为 0.690 ($n=50, p<0.001$), 在月份组合中, 轮宽标准年表与当年 5—6 月 PDSI 相关性最好, 相关系数为 0.687 ($n=50, p<0.001$)。为了能够重

建一年中更多月份的气候、水文变化, 选择标准年表 (STD) 重建 1829—2003 年 5—6 月的 PDSI 指数变化, 重建方程如下:

$$PDSI_{5-6} = -10.919 + 8.796 \times TRW \quad (1)$$

式中: $PDSI_{5-6}$ 为当年 5 月到 6 月的 PDSI 值, TRW 为树轮宽度标准年表。重建方程的相关系数为 0.687, 方差解释量 R^2 为 47.16% (调整后的方差解释量为 46.06%), F 检验值为 42.84。重建值和观测值的相关系数为 0.687 (图 4a), 经过一阶差去趋势后, 相关系数为 0.756, 两者变化趋势基本一致 (图 4b)。

2.2 1829—2003 年 5—6 月 PDSI 值的重建

根据转换方程, 重建了吕梁山北部地区 1829—2003 年 5—6 月 PDSI 值 (图 4c)。重建 $PDSI_{5-6}$ 序列的最大值是 5.23, 最小值是 -7.73, 均值是 -2.31, 标准差是 2.15。运用重建的 PDSI 值确定过去的干旱年与湿润年, 需结合当地的降水、气温等气象因子。如 PDSI 值高于 -3.5 时, 在内蒙古东部地区属于湿润状态 (梁尔源等, 2007), 在新疆伊犁地区属于干旱状态 (陈峰等, 2011), 所以需要根据山西北部气候确定湿润年与干旱年的分界线。本文以 $PDSI_{5-6} \geq \text{Mean} + 2\sigma$ ($PDSI_{5-6} \geq 1.99$) 或 $PDSI_{5-6} \leq \text{Mean} - 2\sigma$ ($PDSI_{5-6} \leq -6.61$) 作为判断极端湿润年、极端干旱年的临界值, 得到的极端湿润年有 1836 年、1956 年、1848 年、1862 年、1998 年、1977 年,

占总序列的 3%；极端干旱年有 1999 年、2000 年、1947 年、1842 年，占总序列的 2%。偏湿时段与偏干时段以 $PDSI_{5-6} \geq \text{Mean}(PDSI_{5-6} \geq -2.31)$ 或 $PDSI_{5-6} \leq \text{Mean}(PDSI_{5-6} \leq -2.31)$ 为临界值，得到的偏湿时段有 9 个：1833—1836 年、1845—1851 年、1857—1863 年、1869—1874 年、1882—1887 年、1896—1899 年、1932—1939 年、1949—1965 年、1975—1985 年；偏干时段有 10 个：1829—1832 年、1837—1844 年、1852—1856 年、1864—1868 年、1875—1881 年、1888—1895 年、1900—1931 年、1940—1948 年、1966—1974 年、1986—2003 年。

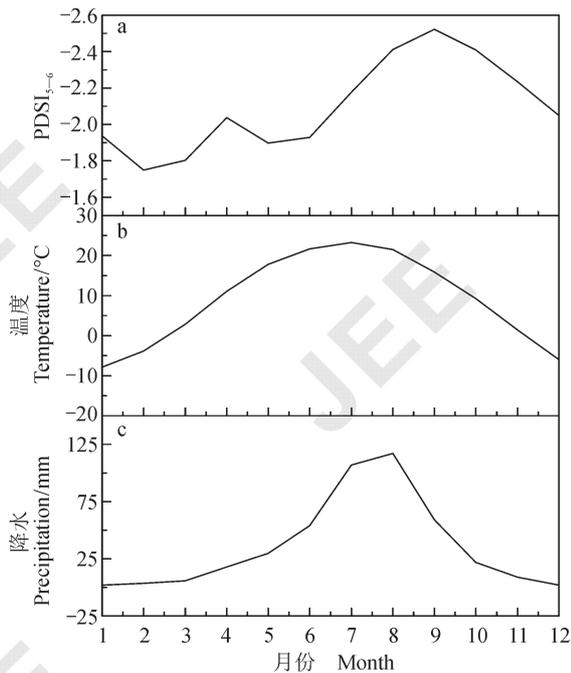


图 3 1954—2003 年原平气象站多年月平均降水、月平均气温及月平均 PDSI 图

Fig.3 Monthly average precipitation, monthly average temperature and monthly average PDSI chart of Yuanping meteorological station from 1954 to 2003

重建序列中，1875—1881 年对应我国历史上著名的 1876—1879 大旱，此次旱灾被认为是我国北方最严重的旱灾之一（张德二和梁有叶，2010）。1900—1931 年为干旱时段，与我国北方 20 世纪 20 年代到 30 年代初的干旱比较吻合（梁尔源等，2004）。19 世纪干湿时段的波动高于 20 世纪，说明 19 世纪是气候波动比较明显的世纪。1998 年夏秋季我国发生了特大洪水，影响范围广（王文臣，2012），持续时间长，重建序列中，1998 年为极端

湿润年。1956 年 8 月上旬，山西发生全省性的大暴雨，受灾面积 300 多万亩，受灾面积达 92 个县（钱林清等，1991），1956 年 PDSI 值为 4.19，也是极端湿润年。1999 年及 2000 年夏季华北地区出现持续性旱灾，1999 年夏季，黄河以北受大陆暖性高压脊控制，温度偏高 1—2℃，2000 年，华北地区气温比常年偏高 2—4℃（卫捷等，2004）。重建序列中，1999 年、2000 年为极端干旱年。

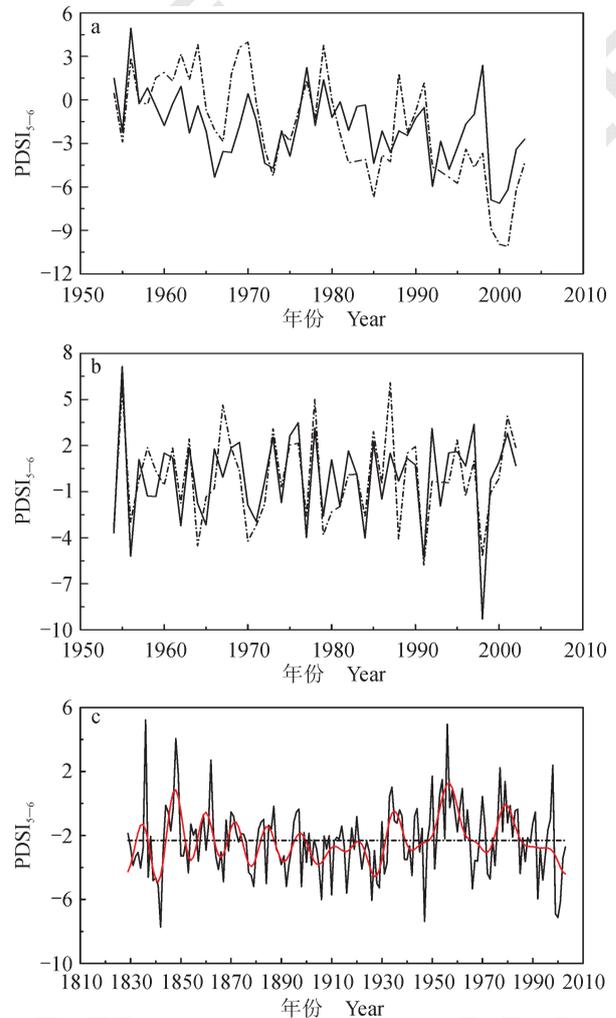


图 4 1954—2003 年 PDSI 观测值（虚线）与重建值（实线）曲线（a）及它们的一阶差去趋势曲线（b），1829—2003 年 $PDSI_{5-6}$ 逐年变化曲线（黑实线）、10 年低通滤波曲线（红实线）及平均值（黑虚线）（c）

Fig.4 PDSI observed (solid line) and reconstructed value (dotted line) curves (a) from 1954 to 2003 and their first-order detrend curves (b), 1829—2003 $PDSI_{5-6}$ year-by-year change curve (black solid line), 10-year low-pass filter curve (red solid line) and average value (black dotted line) (c)

2.3 重建序列与历史记录对比及空间代表性

为保证重建序列的准确性，将重建序列与采

样点周围地区历史资料进行对比。与 Yang et al (2013) 文中的 DWI (dry wet index) 指数序列进行对比, 相关系数为 -0.235 ($n=175$, $p<0.002$), 为了保留低频信号, 将两组序列分别做 10 年低通滤波处理 (图 5), 滤波后的相关系数为 -0.404 , 两条序列的变化趋势基本一致, 在 1873—1889 年、1924—1940 年两条序列基本重合, 同时, 两条序列共同反映出 1875—1881 年以及 20 世纪 20 年代的干旱。

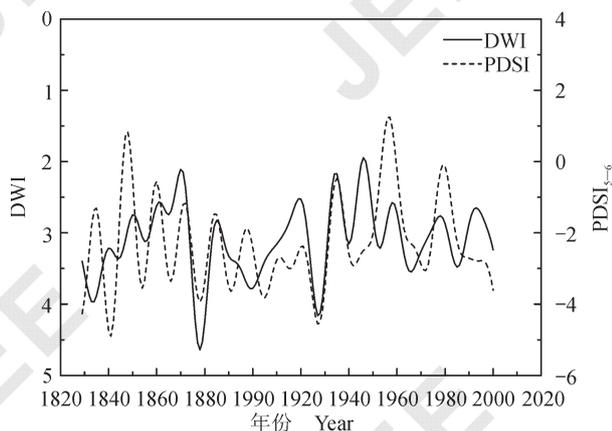


图 5 重建 PDSI₅₋₆ 序列与 DWI 序列 10 年低通滤波曲线
Fig.5 Reconstruction of 10-year low-pass filtering curve of PDSI₅₋₆ sequence and DWI sequence

为了解重建序列的空间代表性, 将重建 PDSI 序列与 CRU 格点数据做空间相关 (图 6)。研究区吕梁山北部属于华北地区, 空间代表性区域包括两部分, 第一部分为华北地区, 包括内蒙古中东部、河北北部、山西北部等地区, 该地区属于半湿润、半干旱区。第二部分为华中平原区, 该地区属于湿润区。以上区域均受夏季风影响。

2.4 东亚夏季风对研究区 PDSI 的影响

为进一步探究研究区干旱变化受到哪些大尺度环流的影响, 首先将重建序列与几条不同定义的东亚季风指数进行对比, 最终结果显示三条东亚季风序列与本文重建的 PDSI 关系显著 (图 7)。

与张庆云等 (2003) 的季风序列对比发现 4—5 月的相关性最好, 相关系数为 0.415 ($n=56$, $p<0.002$), 与 Wang and Fan (1999) 的季风序列对比时, 5—8 月相关性最好, 相关系数为 0.339 ($n=56$, $p<0.01$), 与 Lau et al (2000) 中的季风序列对比时, 4—8 月相关性最好, 相关系数为 0.204 ($n=153$, $p<0.02$)。将四条序列做 10 年低通滤波后发现, 重

建吕梁山北部地区 5—6 月 PDSI 指数与张庆云等 (2003) 和 Wang and Fan (1999) 的季风序列变化趋势基本一致, 与 Lau et al (2000) 的季风序列自 1950 年以来变化趋势基本一致。东亚夏季风是影响我国气候的重要因素之一, 对于华北地区, 东亚夏季风增强时, 有利于海洋水汽向北输送, 该地区多雨, 反之则少雨 (孙卫国等, 2009), 由季风带来的降雨对 PDSI 有很强的影响。此外, 20 世纪 70 年代中期左右, 东亚夏季风经历了由强变弱的年代际变化 (吕俊梅等, 2004), 重建 PDSI 序列 10 年低通滤波后 (图 4) 可以看出, 20 世纪 70 年代以来, PDSI 指数下降, 即干旱程度加重, 这与东亚季风的变化一致。因此, 山西吕梁山北部地区 PDSI 指数变化可能受东亚夏季风影响。

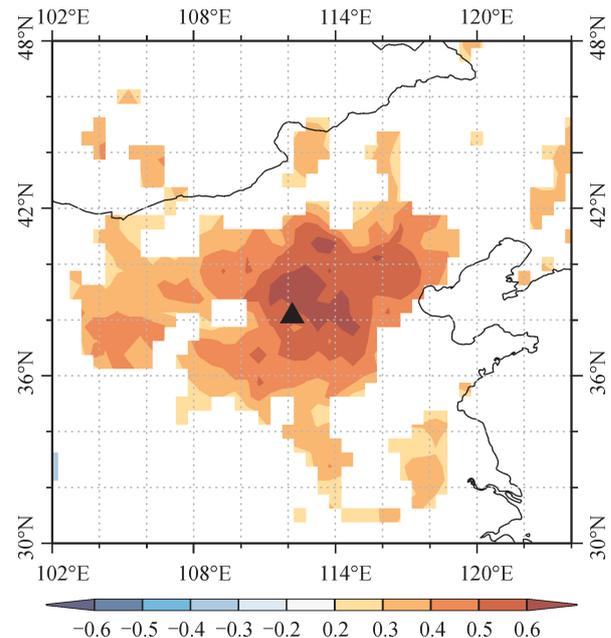


图 6 重建 PDSI₅₋₆ 序列与 scPDSI 序列 1954—2003 年空间相关图 ($p<10\%$, ▲代表采样点 LLB)
Fig.6 Reconstruction of PDSI₅₋₆ sequence with scPDSI sequence spatial correlation diagram from 1954 to 2003 ($p<10\%$, ▲ represents sampling sites LLB)

2.5 重建序列周期分析

采用多窗谱 (MTM) 对重建的 1829—2003 年 PDSI₅₋₆ 序列进行周期分析 (图 8), 结果表明: 在 95% 置信水平上存在 12 年、6.7 年、3.2 年、2.6 年、2—2.4 年周期变化, 在 90% 置信水平上存在 26.1 年、21.6 年、19.2 年、13.2 年、3.8 年、3.6 年、3.4 年、3.3 年、3.1 年、3 年、2.1 年周期变化。2—7 年周期变化与厄尔尼诺 - 南方涛动 (ENSO)

振荡周期比较一致，反映出该区域 PDSI 变化可能与 ENSO 活动存在联系。太阳活动周期大约是 11 年（丁一汇，2019），上述 12 年、13.6 年周期变化可能与太阳黑子活动周期有关，26.1 年、21.6

年、19.2 年周期变化可能与太阳活动的双周期有关。太阳内部的聚变反应产生的能量，以辐射的方式，为地球上的生命活动提供源源不断的能量来源。

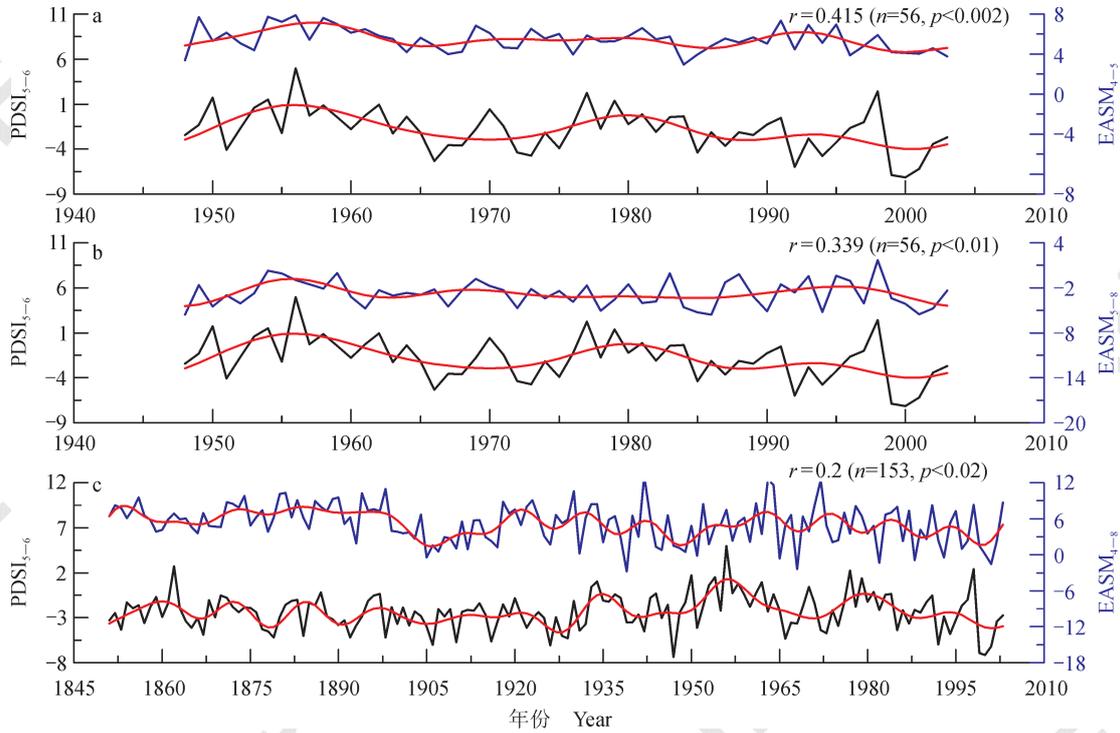


图 7 重建序列与季风指数对比图

Fig.7 Comparison between the reconstructed sequence and the monsoon index

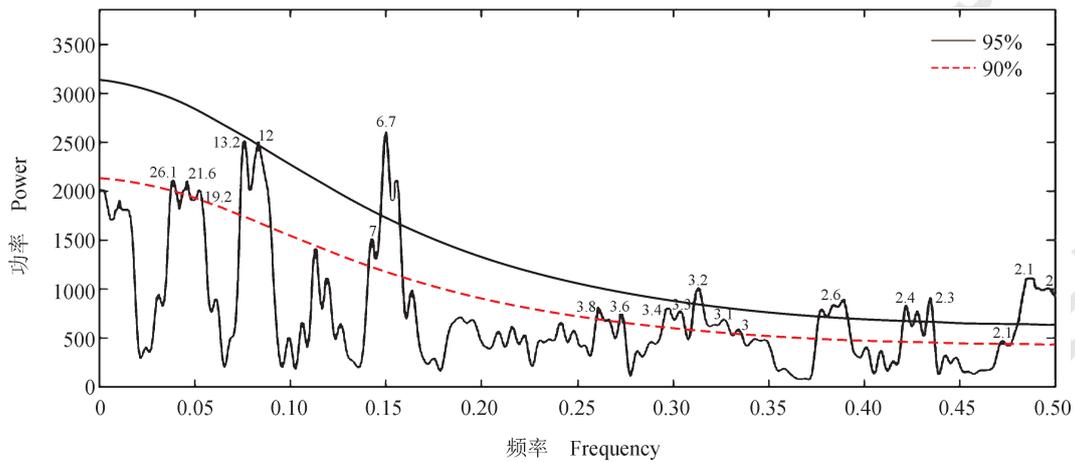


图 8 山西北部地区 PDSI 重建序列多窗谱 (MTM) 分析

Fig.8 Multi-window spectrum (MTM) analysis of PDSI reconstruction sequences in northern Shanxi Province

3 结论

基于树木年轮气候学基本方法，根据采自山西吕梁山北部地区的油松，重建了该地区过去 175

年（1829—2003）5—6 月 PDSI 指数变化。重建序列包括 9 个偏湿时段、10 个偏干时段，极端湿润年、极端干旱年分别占重建序列的 3%、2%。极

端湿润年 1956 年、1998 年, 极端干旱年 1999 年、2000 年与历史文献记录一致, 反映了重建序列的准确性, 且从重建曲线上可以看出 20 世纪 90 年代以来干旱的加重。

空间相关分析表明, 重建序列能够代表采样点附近大范围地区 PDSI 变化。相关分析表明, 重建序列与 3 条不同定义的季风序列存在相关性, 研究区气候变化可能受东亚夏季风影响。周期分析表明, 重建序列周期变化与太阳黑子活动、ENSO 较一致, 说明吕梁山北部地区气候变化可能与太阳黑子、ENSO 有关。

致谢: 本研究得到了中国科学院地球环境研究所“一带一路”气候环境研究中心的支持, 特此感谢。

参考文献

- 蔡秋芳, 刘禹, 包光, 等. 2010. 树轮记录的吕梁山地区公元 1836 年以来 5—7 月平均气温变化 [J]. *科学通报*, 55(20): 2033–2039. [Cai Q F, Liu Y, Bao G, et al. 2010. Tree-ring-based May–July mean temperature history for Lüliang Mountains, China, since 1836 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(20): 2033–2039.]
- 蔡秋芳, 刘禹, 王艳超. 2012. 陕西太白山树轮气候学研究 [J]. *地球环境学报*, 3(3): 874–880. [Cai Q F, Liu Y, Wang Y C. 2012. Dendroclimatic investigation of Chinese pine in Taibai mountain, Shaanxi Province [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(3): 874–880.]
- 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 2011. 树轮记录的伊犁地区近 354 年帕尔默干旱指数变化 [J]. *高原气象*, 30(2): 355–362. [Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. 2011. Variations of long-term Palmer Drought Index in recent 354 years in Yili based on tree-ring record [J]. *Plateau Meteorology*, 30(2): 355–362.]
- 丁一汇. 2019. 太阳活动对地球气候和天气的影响 [J]. *气象*, 45(3): 297–304. [Ding Y H. 2019. Effect of solar activity on earth's climate and weather [J]. *Meteorological Monthly*, 45(3): 297–304.]
- 李强, 刘禹, Takeshi Nakatsuka, 等. 2017. 西藏亚东地区铁杉树轮样本稳定氧同位素的气候响应 [J]. *地球环境学报*, 8(1): 6–14. [Li Q, Liu Y, Nakatsuka T, et al. 2017. Climate responses of tree-ring stable oxygen isotopes from Yadong County, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(1): 6–14.]
- 李强, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 2006. 山西宁武地区 1686 年以来年降水重建 [J]. *第四纪研究*, 26(6): 999–1006. [Li

Q, Liu Y, Cai Q F, et al. 2006. Reconstruction of annual precipitation since 1686 A.D. from Ningwu region, Shanxi Province [J]. *Quaternary Sciences*, 26(6): 999–1006.]

李书严, 马京津, 轩春怡, 等. 2012. 1951—2008 年北京极端天气事件分析 [J]. *气候与环境研究*, 17(2): 244–250.

[Li S Y, Ma J J, Xuan C Y, et al. 2012. Analysis of extreme weather events in Beijing during 1951–2008 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 17(2): 244–250.]

梁尔源, 邵雪梅, 黄磊, 等. 2004. 中国中西部地区树木年轮对 20 世纪 20 年代干旱灾害的指示 [J]. *自然科学进展*, 14(4): 469–474. [Liang E Y, Shao X M, Huang L, et al. 2004. The 1920s drought recorded by tree rings in central and western China [J]. *Progress in Natural Science*, 14(4): 469–474.]

梁尔源, 邵雪梅, 刘鸿雁, 等. 2007. 树轮所记录的公元 1842 年以来内蒙古东部浑善达克沙地 PDSI 的变化 [J]. *科学通报*, 52(14): 1694–1699. [Liang E Y, Shao X M, Liu H Y, et al. 2007. Changes of PDSI in Hunshandake sandy land, eastern Inner Mongolia recorded by tree rings since 1842 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1694–1699.]

刘禹, 解利, 李强, 等. 2012a. 公元 1820 年以来甘肃东大山地区树轮宽度对 3—9 月平均最低温度的响应分析 [J]. *地球环境学报*, 3(3): 900–907. [Liu Y, Xie L, Li Q, et al. 2012a. Growth-climate response analysis between tree-ring width and March–September mean minimum temperature in Dongda Mountain, Gansu, China since 1820 AD [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(3): 900–907.]

刘禹, 相楠, 宋慧明. 2012b. 内蒙古阿尔山过去 187 年温度变化的树轮记录 [J]. *地球环境学报*, 3(3): 862–867. [Liu Y, Xiang N, Song H M. 2012b. Tree-ring temperature records in Arxan, Inner Mongolia for the past 187 years [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(3): 862–867.]

吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 2004. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响 [J]. *热带气象学报*, 20(1): 73–80. [Lu J M, Ren J Z, Ju J H. 2004. The interdecadal variability of east Asia monsoon and its effect on the rainfall over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 20(1): 73–80.]

钱林清, 郑炎谋, 胡慧敏. 1991. 山西气候 [M]. 北京: 气象出版社. [Qian L Q, Zheng Y Q, Hu H M. 1991. Shanxi climate [M]. Beijing: China Meteorological Press.]

秦莉, 袁玉江, 喻树龙, 等. 2012. 利用树轮宽度资料重建天山东段近 443 年相对湿度变化 [J]. *地球环境学报*, 3(3): 908–914. [Qin L, Yuan Y J, Yu S L, et al. 2012. Tree-ring based monthly mean relative humidity reconstruction for the East Tianshan Mountains during the last 443 years [J].

- Journal of Earth Environment*, 3(3): 908–914.]
- 宋慧明, 刘禹, 梅若晨, 等. 2017. 甘肃竺尼山油松树轮宽度气候响应 [J]. *地球环境学报*, 8(2): 119–126. [Song H M, Liu Y, Mei R C, et al. 2017. The climatic response of *Pinus tabulaeformis* Carr. in Mt. Zhuni, Gansu [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(2): 119–126.]
- 孙军艳, 刘禹, 蔡秋芳, 等. 2006. 额济纳 233 年来胡杨树轮年表的建立及其所记录的气象、水文变化 [J]. *第四纪研究*, 26(5): 799–807. [Sun J Y, Liu Y, Cai Q F, et al. 2006. Climatic and hydrological changes of EJIN, Inner Mongolia, China during the past 233 years recorded in tree-rings of *Populus euphratica* [J]. *Quaternary Sciences*, 26(5): 799–807.]
- 孙卫国, 程炳岩, 郭渠. 2009. 东亚季风环流对华北地区降水蒸发差的影响 [J]. *中国农业气象*, 30(3): 327–334. [Sun W G, Cheng B Y, Guo Q. 2009. Influence of east Asian monsoon circulation on precipitation-evaporation difference in North China [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 30(3): 327–334.]
- 王梦麦, 戴君虎, 白洁, 等. 2009. 利用树木年轮重建六盘山地区 1900 年以来的干湿变化 [J]. *古地理学报*, 11(3): 355–360. [Wang M M, Dai J H, Bai J, et al. 2009. Reconstruction of humidity changes from tree rings in Liupan Mountains area since 1900 [J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(3): 355–360.]
- 王文臣. 2012. 中国 1998 年三江特大洪涝灾害 [J]. *生命与灾害*, (7): 32–33. [Wang W C. 2012. Massive floods in Sanjiang River in 1998, China [J]. *Life & Disaster*, (7): 32–33.]
- 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2004. 1999 及 2000 年夏季华北严重干旱的物理成因分析 [J]. *大气科学*, 28(1): 125–137. [Wei J, Zhang Q Y, Tao S Y. 2004. Physical causes of the 1999 and 2000 summer severe drought in North China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 28(1): 125–137.]
- 杨颖川, 刘禹, 郝赛宇. 2018. 兴隆山油松树轮宽度与太阳年辐射总量的关系分析 [J]. *地球环境学报*, 9(5): 470–479. [Yang Y C, Liu Y, Hao S Y. 2018. Analysis on the relationship between tree ring width of *Pinus tabulaeformis* Carr. and solar annual average radiation in Xinglong Mountain [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(5): 470–479.]
- 易亮, 刘禹, 宋慧明, 等. 2006. 山西芦芽山地区树木年轮记录的 1676 AD 以来 5—7 月温度变化 [J]. *冰川冻土*, 28(3): 330–336. [Yi L, Liu Y, Song H M, et al. 2006. Summer temperature variations since 1676 AD in Luya mountain, Shanxi Province of China, inferred from tree rings [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(3): 330–336.]
- 张德二, 梁有叶. 2010. 1876—1878 年中国大范围持续干旱事件 [J]. *气候变化研究进展*, 6(2): 106–112. [Zhang D E, Liang Y Y. 2010. A long lasting and extensive drought event over China during 1876—1878 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 6(2): 106–112.]
- 张芬, 高琳琳, 苏军德, 等. 2012. 青藏高原东北部阿尼玛卿山祁连山圆柏年龄结构与林线动态分析及其对气候变化的响应 [J]. *地球环境学报*, 3(3): 881–888. [Zhang F, Gao L L, Su J D, et al. 2012. Age structure and treeline dynamics of *Juniperus przewalskii* Kom. in response to climate change in the Anyemaqen Mountains, Northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 3(3): 881–888.]
- 张丕远. 1996. 中国历史气候变化 [M]. 济南: 山东科学技术出版社. [Zhang P Y. 1996. Climate change in China during historical times [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press.]
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61(5): 559–568. [Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. 2003. The inter-annual variability of east Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over east Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 61(5): 559–568.]
- Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. 2004. A global dataset of palmer drought severity index for 1870—2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6): 1117–1130.
- Lau K M, Kim K M, Yang S. 2000. Dynamical and boundary forcing characteristics of regional components of the Asian summer monsoon [J]. *Journal of Climate*, 13(14): 2461–2482.
- Li Q, Liu Y, Song H M, et al. 2013. Long-term variation of temperature over North China and its links with large-scale atmospheric circulation [J]. *Quaternary International*, 283: 11–20.
- Liu Y, Sun J Y, Yang Y K, et al. 2007. Tree-ring-derived precipitation records from Inner Mongolia, China, since A.D. 1627 [J]. *Tree-Ring Research*, 63(1): 3–14.
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of south Asian summer monsoon indices [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(4): 629–638.
- Yang F M, Shi F, Kang S Y, et al. 2013. Comparison of the dryness/wetness index in China with the Monsoon Asia Drought Atlas [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(3/4): 553–566.