以树轮资料进行年代际气候预测实例评估

刘禹

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

E-mail: liuyu@loess.llqg.ac.cn

2021-04-02 收稿, 2021-05-18 修回, 2021-05-19 接受, 2021-05-20 网络版发表

中国科学院B类战略性先导科技专项(XDB40010300)、中国科学院国际合作项目(132B61KYSB20170005)、中国科学院前沿科学重点研究计划(QYZDJ-SSW-DQC021)和国家自然科学基金(41630531)资助

摘要 对未来多年代际气候准确预测是气候变化研究的目标,也是当前气候领域的研究热点和极其困难的问题。截至目前,没有多年代际长期预测成功的实例报道,主要原因一是长期气候预测理论发展迟缓,二是足够长度的、精确的、高分辨率的、严格规范的气候代用指标十分缺乏。我们于2004年采用Caterpillar-SSA(毛毛虫-奇异谱分析法)方法对贺兰山地区树轮时间序列进行分解和趋势外推,预测了1998~2022年降水趋势。20多年后的今天,可以用气象观测数据对这个树轮预测结果进行客观评估,旨在探索更合适的年代际气候预测方法。评估结果表明,气象观测记录支持树轮资料对1998年之后20多年来贺兰山地区降水变化趋势和极端干旱事件的预测。这是迄今为止,全球发表的利用树轮资料进行的20年气候多年代际变化趋势统计预测较为成功的实例,它将树轮气候统计预测向前实质性地推进了一大步。这个结果表明未来气候变化可以较准确预知,高分辨率的树轮资料在长期气候趋势变化预测中具有很大潜力,应该引起足够重视。

关键词 树轮, 降水, 干旱事件, 趋势预测, 观测数据验证

气候预测是指根据过去的气候演变规律或者当前的气候状态来推断未来气候的变化趋势^[1]。面向未来10~30年的年代际气候预测对政府决策和中长期规划具有重要参考价值,因此,备受国际科学界关注,也是世界气候研究计划(World Climate Research Program, WCRP)的“大挑战计划”所关注的具有重要需求的国际前沿科学问题之一^[2]。但是,气候预测存在诸多困难。一方面由于目前观测资料长度不足,无法进行超长期预测;另一方面由于大气运动的混沌性和外部强迫(包括太阳活动、火山喷发到平流层的气溶胶等外强迫,温室气体、气溶胶排放、土地利用变化等人类活动)的不确定性^[3],导致预测理论发展迟缓。而且,在构建基于气候模式的预测系统时,既需要通过初始化来考虑气候内部变率的初始状态,又要考虑大气成分变化导致

的辐射强迫变化^[4]。这使得依靠模式预测有很大的不确定性。当前基于气候系统模式的年代际气候预测技巧至多在5~8年,最长不超过10年,而且技巧限于海温,对于区域降水和温度的预报期限和技巧还要更低,几乎国际上所有的模式都如此^[5]。因此,发展基于统计技术的年代际气候预测方法是国际科学界的前沿话题。

20世纪末期,在全球增暖的背景下,我国北方地区干旱化趋势日渐明显,亟需对北方的干旱趋势及其未来演变进行全面认识。1999年,国家重点基础研究发展计划(973计划)——“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”顺势立项,项目在实施的2000~2004年取得了颇为丰硕的研究成果^[6,7]。其中,集成预测工作组采用13类数据源,利用均生函数模型、时域组合模

引用格式: 刘禹. 以树轮资料进行年代际气候预测实例评估. 科学通报, 2021, 66: 3474–3479

Liu Y. Example of near-term decadal climate trend prediction based on tree-ring data (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3474–3479, doi: 10.1360/TB-2021-0327

型、历史相似外推、非线性动力学、物理因子概念模型、区域气候模式和树轮等方法开展未来10~50年干湿变化趋势预测研究,最后形成13种预测意见(<http://www.docin.com/p-36407767.html>),但是绝大多数预测结果没有形成论文发表。作为集成预测工作组的成员之一的刘禹等人^[8]2004年发表了利用树轮重建的降水序列(树轮资料截止时间为1997年),采用Caterpillar-SSA(毛毛虫-奇异谱分析法)方法对贺兰山地区树轮时间序列进行分解和趋势外推,对1998~2022年降水趋势进行了预测。预测结果指出2000~2014年期间贺兰山及我国西北降水会快速减少,并在2013~2014年间达到极小值,随后降水将有所增加。文章发表至今,20多年过去了。我们结合实际气象观测,对这个预测结论进行了验证,发现这个结论成功预测了2005年以后季节降水减少的趋势以及2013~2014年西北东部严重干旱事件,得到了气象观测数据的支持和验证。本研究结合气象观测记录对当年树轮预测进行评估,以便在今后预测工作中扬长避短,采用更有效的方法,取得更好的预测效果。我国已广泛开展基于树轮过去数百年的气候要素重建工作。截至2017年底,已有108条温度重建序列、380条降水、相对湿度和干旱指数等重建序列^[9]。充分挖掘这些序列的潜力,十分有利于提高我国年代际气候预测能力。

1 对贺兰山地区树轮降水预测的评估

我们基于贺兰山树轮晚材宽度重建的1726~1997年(共272年)5~7月降水量序列^[10],采用毛毛虫-奇异谱分析法,预测1998~2022年降水自然变化趋势。毛毛虫-奇异值分析是功能强大的时间序列分析和预测方法,其目的是对给定规则取样的一套图,识别出空间和时间凝聚型。该方法本质上是一种变形的经验正交分解,最大优点在于不必事先选定试用模型,而是利用特征向量分析提取其中的长期趋势、季节波动、周期、噪音等成分,分解时间序列组成结构,找出演变主要趋势,然后进行趋势外推,对未来气候进行预测。主要步骤如下^[11]。

(i) 嵌套。将长度为 N 的一维时间序列 $F = (f_1, f_2, \dots, f_N)$ 嵌套为 $L \times K$ 的轨迹矩阵 $X = (x_1, x_2, \dots, x_K)$, $x_i = (f_i, f_{i+1}, \dots, f_{i+L-1})^T$, $i = 1, 2, \dots, K$, 其中 L 为最大时滞,一般取 $L \leq N/2$, $K = N - L + 1$ 。

$$X = \begin{pmatrix} f_1 & f_2 & \cdots & f_K \\ f_2 & f_3 & \cdots & f_{K+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_L & f_{L+1} & \cdots & f_N \end{pmatrix}. \quad (1)$$

(ii) 奇异值分解。此时,轨迹矩阵 X 的秩: $R \leq \min\{L, K\}$ 。对 X 进行奇异值分解(SVD)得到

$$USV^T = X, \quad (2)$$

其中, U 为左奇异矩阵, $U = (u_1, u_2, \dots, u_R)$, 这里 $u_i = (u_{1,i}, u_{2,i}, \dots, u_{L,i})^T$, $i = 1, 2, \dots, R$, 表示第 i 个左奇异向量; S 为一对角矩阵, $S = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_R)$, 其中 $s_1, \dots, s_R$ 为奇异值; V 为右奇异矩阵, $V = (v_1, v_2, \dots, v_R)$, 这里 $v_i = (v_{1,i}, v_{2,i}, \dots, v_{K,i})^T$, $i = 1, 2, \dots, R$, 表示第 i 个右奇异向量。

根据奇异值和奇异向量计算得到 R 个秩为1的初等矩阵 X_i , $i = 1, 2, \dots, R$, 满足 $X = X_1 + X_2 + \dots + X_R$ 。其中,

$$X_i = s_i u_i v_i^T = s_i \begin{pmatrix} u_{1,i} v_{1,i} & u_{1,i} v_{2,i} & \cdots & u_{1,i} v_{K,i} \\ u_{2,i} v_{1,i} & u_{2,i} v_{2,i} & \cdots & u_{2,i} v_{K,i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{L,i} v_{1,i} & u_{L,i} v_{2,i} & \cdots & u_{L,i} v_{K,i} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

(iii) 聚合。采用聚类分析,将初等矩阵 X_i , $i = 1, 2, \dots, R$ 分成 M 组,然后把每个组内的初等矩阵加起来构成合成矩阵:

$$Y_c = \sum_{1 \leq l \leq R_c} X_l = \begin{pmatrix} \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{1,l} v_{1,l} & \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{1,l} v_{2,l} & \cdots & \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{1,l} v_{K,l} \\ \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{2,l} v_{1,l} & \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{2,l} v_{2,l} & \cdots & \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{2,l} v_{K,l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{L,l} v_{1,l} & \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{L,l} v_{2,l} & \cdots & \sum_{1 \leq l \leq R_c} s_l u_{L,l} v_{K,l} \end{pmatrix}, \quad c = 1, 2, \dots, M, \quad (4)$$

其中, R_c 表示每类包含的初等矩阵个数, 满足 $R = \sum_{1 \leq c \leq M} R_c$ 。此时, $X = \sum_{1 \leq c \leq M} Y_c$ 。聚类方法为Ward方法,以欧氏距离系数进行系统聚类,逐级归并。

(iv) 对角线平均。将每个合成矩阵 Y_c 转换为长度为 N 的一维时间序列 $\hat{F}_c = (\hat{f}_{c,1}, \hat{f}_{c,2}, \dots, \hat{f}_{c,N})$, $c = 1, 2, \dots, M$, 满足 $F = \hat{F}_1 + \hat{F}_2 + \dots + \hat{F}_M$ 。我们用 y_{ij} 表示 Y_c 中第 i 行第 j 列

的元素($1 \leq i \leq L$, $1 \leq j \leq K$), 则 F_c 中第 k 个元素 $\hat{f}_{c,k}$ 为所有满足 $i+j=k+1$ 的 y_{ij} 的平均.

$$Y_c = \begin{pmatrix} y_{1,1} & y_{1,2} & y_{1,3} & y_{1,4} \\ y_{2,1} & y_{2,2} & y_{2,3} & y_{2,4} \\ y_{3,1} & y_{3,2} & y_{3,3} & y_{3,4} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

如上所示, 这里假设 $N=6$, $L=3$, 则 $K=4$. $\hat{f}_{c,k}$, $k=1, 2, \dots, N$ 即为沿每条向右倾斜对角线上所有元素的平均.

经过以上操作, 我们对贺兰山1998~2022年5~7月降水趋势进行了预测. 结果表明, 贺兰山降水量峰值出现在2002年前后, 之后的10年降水持续减少, 2013~2014年降水量跌入谷底, 随后降水将略有增加, 但达不到1970~2002年的平均水平^[8]. 研究点周围多个气象站20余年的实际气象观测表明, 这个预测结果接近于此后20年真实的降水趋势, 观测记录支持这个结果(图1), 把握了先变湿, 再迅速变干, 再缓慢变湿的变化趋势. 如预测结果与盐池观测记录两个序列之间的相关系数达到0.87(图1), 两个序列平均值之差为-27.39%. 预测结果十分理想, 预测的变化趋势和极端事件的时间点与实际发生均对应较好, 预测到在2013~2014年间西北东部大部分地区发生大旱. 树轮重建序列能够较好地预测未来降水变化, 不仅因为树轮重建能够反映过去长时间当地及区域的气候, 而且可以反映气候影响因子^[12,13], 另外, 树轮重建气候序列严格遵循了统计预测所要求的数据长、连贯、类推、相关、动态、周期等原则, 并运用了多种数学分析方法^[8,11].

基于树轮序列的贺兰山5~7月降水预测不仅能够反映其附近区域降水变化趋势, 而且可以代表整个西北东部区域降水变化趋势(图1). 2014年我国北方干旱严重, 政府高度重视2014年的抗旱减灾工作, 国家领导人多次作出重要指示^[14]. 据统计, 2014年全国作物受旱面积为3.43亿亩(1亩 $\approx 666.667 \text{ cm}^2$), 因旱造成粮食损失2006万吨、经济作物损失276亿元、直接经济总损失910亿元, 共有1783万人、883万头大牲畜因旱发生饮水困难^[14].

2 青藏高原中东部树轮温度预测

我们采用同样的方法预测了公元1981~2134年青藏高原中东部地区气温变化趋势^[15]. 预测温度由高变低的转折点出现在公元2006年左右. 截至目前, 从青藏高原中东部7站(德令哈、都兰、格尔木、拉萨、那

图1 贺兰山预测的降水序列(蓝色)^[8]与观测(橙色)的降水序列对比(序列均为标准化和10 a滑动平均). r 为预测序列与每个气象站观测序列两者之间的相关系数

Figure 1 Comparison between the predicted (blue)^[8] and observed (orange) precipitation in Mt. Helan region (all series are standardization and 10-a moving average). r is the correlation coefficient between prediction sequence and observation sequence of each meteorological station

曲、大柴旦、班戈)实际观测记录来看, 这个转折点在预测和观测序列中都出现了, 而且2006年以后青藏高原中东部温度出现明显下降趋势(图2). 但预测结果表现出的下降斜率要远大于实际气温下降趋势. 实际观测温度从公元2006~2020年下降了 0.245°C , 而预测下降数值同期为 1°C . 原因可能有两方面: 一可能是由于人类活动, CO_2 排放导致的增暖减缓了温度下降斜率. 与贺兰山地区降水预测的结果相比较, 说明人类活动对气温的影响可能比降水更显著. 二是研究发现青藏高原温度变化存在1300年左右的长期趋势的大周

图2 青藏高原中东部年平均温度观测序列(橙色)与预测序列(蓝色)^[15]趋势对比。黑线为峰值点后的线性趋势, 预测序列为5 a滑动平均
Figure 2 Trend comparison of the observed (orange) and predicted (blue)^[15] annual mean temperature in the mid-eastern Tibetan Plateau. The black lines are the linear trends after the peak point, and the predicted temperature is 5-a moving average

期^[15], 亦即有600年左右的半周期特性。如果从公元1600年前后的小冰期极盛期出现的温度回升开始算起, 这个600年半周期升温才进行了约400年, 距离温度上升到周期顶点尚有200年左右的时间。也就是说, 在今后200年左右的时间, 青藏高原温度变化会呈现高低起伏、总体上升的趋势, 直至公元2200年前后达到下一次温度顶点, 此后将会出现600年左右的长时间温度下降趋势, 直至公元2800年前后。但是目前受控于100和200年周期下降相位的共同作用, 温度大约会持续下降到公元2068年。这个预测被美国学者评价为“首开树轮预测之先河”^[16,17]。

3 总结

在全球变暖的背景下, 气候预测始终是人们十分关注的焦点, 但是目前准确预测多年代际气候长期变化趋势十分困难, 主要是由于观测资料时间长度严重不足、预测理论发展迟缓。基于气候序列内在关系和变化规律的树轮重建统计预测法不仅能给出连续变化

趋势, 还可以预测出极端气候事件的时间节点。它最大优势在于不需要依靠大型计算机进行长时间、大数据量的运算, 就可以获得比其他方法更好的预测准确度和代表性。而且, 基于树轮重建序列的未来气候预测重复性好、周期特征比较明显。我们在2004年的预测是一次较为成功的有意义尝试。但是这个方法的前提条件是对树轮资料本身具有很高的要求, 树轮序列需具有完好的连续性、突出的周期性、序列平稳性和遍历性^[18]。此外, 目前预测理论要求^[11]预测长度最多是原序列长度的1/10才是可靠的。本研究的预测方法在一定程度上可以适用于拥有满足标准要求的重建序列的世界上其他地区, 构建类似的预测模型, 开展气候预测探索。在今后的年代际气候预测可考虑将基于动力方程求解的数值模式预测法^[19,20], 即模式方法, 与树轮统计方法相结合以获得更优的预测结果, 提高超长期气候趋势预测的能力。模式与高分辨率重建序列相结合的预测方法将是现阶段及未来很长时期里提高气候预测准确度的重要途径。

致谢 感谢中国科学院地球环境研究所方从羲、孙长峰、蔡秋芳、宋慧明和李强博士等对本文提出有益建议, 美国亚利桑那大学Steve Leavitt教授帮助修改英文。

参考文献

- 1 Wang S W. Research Progress of Modern Climatology (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2001. 1–458 [王绍武. 现代气候学研究进展. 北京: 气象出版社, 2001. 1–458]
- 2 Zhou T J, Chen X L, Wu B. Frontier issues on climate change science for supporting Future Earth (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 1967–1974 [周天军, 陈晓龙, 吴波. 支撑“未来地球”计划的气候变化科学前沿问题. 科学通报, 2019, 64: 1967–1974]

- 3 Chou J F. Short term climatic forecast: Present condition, problems and way out (1) (in Chinese). *Xinjiang Meteorol*, 2003, 26: 1–4 [丑纪范. 短期气候预测的现状、问题与出路(一). *新疆气象*, 2003, 26: 1–4]
- 4 Zhou T J, Wu B, Hu S. Decadal prediction system IAP-DecPreS and its predictive skill (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2020, 43: 159–168 [周天军, 吴波, 胡帅. IAP-DecPreS年代际气候预测系统及其预报技巧. *大气科学学报*, 2020, 43: 159–168]
- 5 Zhou T J, Wu B. Decadal climate prediction: Scientific frontier and challenge (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2017, 32: 331–341 [周天军, 吴波. 年代际气候预测问题: 科学前沿与挑战. *地球科学进展*, 2017, 32: 331–341]
- 6 Fu C B, An Z S, Guo W D. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in Northern China (I): Main scientific issues and achievement (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2005, 20: 1157–1167 [符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(I): 主要研究成果. *地球科学进展*, 2005, 20: 1157–1167]
- 7 Fu C B, An Z S, Guo W D. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in Northern China (II): Scientific innovations and its contribution to national demands (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2005, 20: 1168–1175 [符淙斌, 安芷生, 郭维栋. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究(II): 研究成果的创新性及项目实施效果. *地球科学进展*, 2005, 20: 1168–1175]
- 8 Liu Y, Shishov V, Shi J, et al. The forecast of seasonal precipitation trend at the north Helan Mountain and Baiyinaobao regions, Inner Mongolia for the next 20 years. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 410–415
- 9 Liu Y, Song H, Sun C, et al. The 600-mm precipitation isoline distinguishes tree-ring-width responses to climate in China. *Natl Sci Rev*, 2019, 6: 359–368
- 10 Liu Y, Shi J, Shishov V, et al. Reconstruction of May–July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongolia since A.D. 1726 from tree-ring late-wood widths. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 405–409
- 11 Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky A. *Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques*. Boca Raton: CRC Press, 2001. 1–305
- 12 Liu Y, Cai Q F, Ma L M, et al. Tree ring precipitation records from Baotou and the East Asia summer monsoon variations for the last 254 years (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2001, 8: 91–97 [刘禹, 蔡秋芳, 马利民, 等. 树轮降水记录及东亚夏季季风强弱变化——以内蒙古包头地区为例. *地学前缘*, 2001, 8: 91–97]
- 13 Fang K Y, Zhou F F, Dong Z P, et al. Responses of instrumental and tree-ring data to different indices of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) (in Chinese). *Quat Sci*, 2017, 37: 1064–1076 [方克艳, 周非飞, 董志鹏, 等. 器测和树轮资料对厄尔尼诺–南方涛动指数的响应特征. *第四纪研究*, 2017, 37: 1064–1076]
- 14 Sun Y B. National drought and drought relief action in 2014 (in Chinese). *China Flood Drought Manage*, 2015, 25: 21–24 [孙远斌. 2014年全国旱灾及抗旱行动情况. *中国防汛抗旱*, 2015, 25: 21–24]
- 15 Liu Y, Cai Q F, Song H M, et al. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future trends over the central-eastern Tibetan Plateau. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 2986–2994
- 16 Davis W, Taylor P, Davis W. The Antarctic centennial oscillation: A natural paleoclimate cycle in the Southern Hemisphere that influences global temperature. *Climate*, 2018, 6: 3
- 17 Davis W J, Taylor P J, Davis W B. The origin and propagation of the Antarctic centennial oscillation. *Climate*, 2019, 7: 112
- 18 Huang J Y. *Meteorological Statistical Analysis and Forecast Method* (in Chinese). 3rd Ed. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 1–298 [黄嘉佑. *气象统计分析与预报方法*. 第3版. 北京: 气象出版社, 2004. 1–298]
- 19 Chou J F. A problem of using past data in numerical weather forecasting. *Sci Sin*, 1974, 17: 814–825
- 20 Feng G L, Zhao J H, Zhi R, et al. Recent progress on the objective and quantifiable forecast of summer precipitation based on dynamical-statistical method (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2013, 24: 656–665 [封国林, 赵俊虎, 支蓉, 等. 动力–统计客观定量化汛期降水预测研究新进展. *应用气象学报*, 2013, 24: 656–665]

Summary for “以树轮资料进行年代际气候预测实例评估”

Example of near-term decadal climate trend prediction based on tree-ring data

Yu Liu

The State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
E-mail: liuyu@loess.llqg.ac.cn

Accurately predicting future climate is the ultimate goal of palaeoclimate and climatology research, and it is also a hot topic and extremely difficult problem in the current climate field. In particular, the decadal climate prediction in the next 10–30 years is of great reference value for government decision-making and medium- and long-term planning. However, up to now, there has been no case of near-term decadal climate prediction reported in the literature. The main problem lies in the slow development of long-term climate prediction theory, and the lack of sufficiently long, accurate, high-resolution, precise, and standardized climate proxy indicators. Tree rings have become an important proxy for the study of past climate change due to their high temporal resolution, accurate dating, wide geographical distribution, and strong continuity. Tree-ring-based reconstruction of climate factors (such as precipitation and temperature) over the past few hundred years has been carried out extensively in China.

The tree-ring reconstruction series can reflect the local and regional climate factors in past long periods of time. In addition, the tree-ring reconstruction of climate series strictly follows the principles of data length, coherence, analogy, correlation, dynamics, and period required by statistical prediction. Therefore, by using a variety of mathematical analyses, we reconstructed the precipitation series from 1726 to 1997 based on the width of tree-ring latewood in the Mt. Helan region, and also used Caterpillar-Singular Spectrum Analysis (Caterpillar-SSA), a powerful time-series analysis and prediction method. Through the steps of nesting, singular value decomposition, aggregation, diagonal averaging, and extrapolation, the tree-ring time series in the Mt. Helan region were decomposed and the trend was extrapolated to forecast the precipitation trend from 1998 to 2022.

The prediction results showed that the peak of precipitation in the Mt. Helan region occurred around 2002, and the precipitation will continue to decrease in the following 10 years. The precipitation will reach its lowest point in 2013–2014, and will then increase slightly, but it cannot reach the average level of 1970–2002.

Today, more than 20 years later, actual weather observations can be used to objectively evaluate tree-ring prediction results, with the aim of exploring and improving appropriate near-term decadal climate prediction approaches. Results show that the aforementioned prediction result is close to the real precipitation trend in the subsequent 20 years at several meteorological stations around the research site. The observation records support this prediction result, grasping the changing trend of first becoming wet, then rapidly drying, and then slowly becoming wet. The extreme drought events appearing during 2013–2014 in the prediction were also confirmed by the observations in the Mt. Helan region.

The statistical prediction method of tree-ring reconstruction based on the internal relationship can not only give the continuous change trend, but can also predict the time nodes of extreme climate events. The method's biggest advantage is that it does not need to rely on a mainframe computer for a long-term and large amount of data calculations.

To date, to the best of our knowledge, this is the only published example of statistical prediction of the near-term decadal trend of climate change for 20 years based on tree-ring data, which substantially advances the statistical prediction capabilities of tree-ring climate proxies.

In future climate prediction, it is suggested to combine the numerical model prediction method based on dynamic equation solution with the tree-ring statistics method to obtain better prediction results and improve the ability of climate trend prediction. The combination of model and high-resolution reconstruction series will be an important way of improving the accuracy of climate prediction at present and into the future.

tree ring, precipitation, drought event, trend forecast, observation confirm

doi: [10.1360/TB-2021-0327](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0327)