

呼伦贝尔沙地核心保护区樟子松径向生长的气候响应特征

包 光^{1,2}, 刘 娜^{1,2}

1. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡文理学院 地理与环境学院, 宝鸡 721013

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

摘要: 沙地樟子松是我国三北防护林工程的主要推广树种, 查明该树种核心区的树木生长的气候环境制约因子, 有助于提升对全球变化不利影响的适应能力, 为区域生态文明建设与可持续发展提供科学数据。通过对呼伦贝尔沙地樟子松保护区核心区树轮样本的研究, 揭示森林内部该树种年轮记录的生长气候响应特征。结果表明: 与标准年表相比, 差值年表具有更好的气候要素表征能力。水分是核心区沙地樟子松径向生长的主要限制因子, 差值年表与上年8月至当年7月降水总量显著相关(0.512, $p<0.01$)。在过去的81年中极端湿润年和干旱年分别出现15次和11次。核心区沙地樟子松差值年表具有显著的2—8年的周期信号, 空间相关显示差值年表有一定的区域水文气候变化代表性。

关键词: 生长 - 气候响应; 樟子松; 呼伦贝尔沙地

Climatic responses of radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the core area of Hulunbeier Sandy Land

BAO Guang^{1,2}, LIU Na^{1,2}

1. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, School of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

Abstract: Background, aim, and scope *Pinus sylvestris* var. *mongolica* is the main tree species of the Three-North Shelterbelt Project in China. The relationships between tree rings and climatic factors are helpful to serve the construction of regional ecological civilization. **Materials and methods** Through the study of the tree-ring samples in the core area of the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* protected area in the Hulunbeier Sandy Land,

收稿日期: 2018-04-08; 录用日期: 2018-06-25

Received Date: 2018-04-08; **Accepted Date:** 2018-06-25

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS005); 陕西省自然科学基础研究计划项目(2018JQ4022); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1711); 宝鸡文理学院重点项目(ZK2018047)

Foundation Item: Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Modeling(17JS005); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China(2018JQ4022); Project of State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology(SKLLQG1711); Key Program of Baoji University of Arts and Sciences(ZK2018047)

通信作者: 包光, E-mail: baoguang23@163.com

Corresponding Author: BAO Guang, E-mail: baoguang23@163.com

引用格式: 包光, 刘娜. 2018. 呼伦贝尔沙地核心保护区樟子松径向生长的气候响应特征 [J]. 地球环境学报, 9(4): 392–397.

Citation: Bao G, Liu N. 2018. Climatic responses of radial growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the core area of Hulunbeier Sandy Land [J]. *Journal of Earth Environment*, 9(4): 392–397.

the characteristics of the growth-climate response of the tree species in the forest were revealed. **Results** The residual chronology had better capability of reflecting climatic signal than the standard chronology did. **Discussion** Moisture was the main limiting factor for the radial growth of pines in the core area. The residual chronology was significantly correlated with the total precipitation from August of previous year to July of current year ($0.512, p < 0.01$). In the past 81 years, the extreme wet and the dry events appeared 15 years and 11 years, respectively. The chronology of the pines in the core area had a significant 2—8 year periodic signal, and the spatial correlation showed that the residual chronology showed a certain representation of regional hydrological climate change. **Conclusions** *Pinus sylvestris* var. *mongolica* had potential capability for hydrological study on regional scales. **Recommendations and perspectives** The climatic and environmental factors of tree growth in the core area were identified, which could improve the adaptive capacity of global change and its adversely affect.

Key words: growth-climatic response; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; Hulunbeier Sandy Land

全球变暖作为当前气候环境变化的主要表现显著影响了自然生态系统和人类社会活动 (Konisky et al, 2016; Stott, 2016)。水循环的强度和变率与全球变暖的背景密切相关,极端的水文气候事件及其影响受到普遍关注 (Milly et al, 2005; Maxwell et al, 2017)。区域水文气候要素的变化特点及规律的研究需要长时间尺度的环境信息记录,树轮作为高分辨率的代用指标是研究历史时期全球变化的主要载体,特别是在干旱半干旱的生态脆弱地区水文学研究中发挥了重要作用 (Liu et al, 2010; Devineni et al, 2013; Chen et al, 2016; Stagge et al, 2018; Zhang et al, 2018)。依据生态幅原理,森林边缘的树木受到气候因子的限制较强,是树轮气候学样品采集的首选位置,然而森林内部树木的生长决定了群落的健康状况,研究核心保护区内部树木揭示的主要限制因子,有助于提升应对全球气候变化不利影响的能力。樟子松以其特有的防沙固土、抗旱、耐寒、耐贫瘠等特性,在我国的三北地区大面积引种,且被列为三北防护林五期工程的重点树种 (http://www.gov.cn/jrzq/2009-09/06/content_1410489.htm/)。呼伦贝尔沙地伊敏河中游的红花尔基樟子松保护区是我国唯一集中连片的天然沙地樟子松林带,是国家“三北防护林”建设的种子生产基地。呼伦贝尔沙地樟子松天然林的健康与稳定直接关系着沙地-草原-森林景观和自然资源的生态安全。本文选取呼伦贝尔沙地樟子松保护区核心区域的树轮样本,基于树轮年代学的研究方法,查明树木的生长-气候响应特征,以期服务区域森林资源

的有效管理与保护,实现生态文明建设的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 气象数据

选取呼伦贝尔沙地北部的海拉尔气象站 ($49^{\circ}13'N, 119^{\circ}45'E$, 海拔 610 m) 和南部的阿尔山气象站 ($47^{\circ}10'N, 119^{\circ}57'E$, 海拔 1027 m) 两站的平均值作为樟子松保护区核心区域的气候要素指标,时段为 1953—2012 年。计算结果显示,年平均温度 $-2^{\circ}C$, 年降水量为 398.8 mm, 最冷月温度 $-25.6^{\circ}C$ 出现在 1 月, 最热月温度 $18.4^{\circ}C$ 出现在 7 月。夏季高温多雨,东亚季风气候特征明显。数据从中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn>) 获取。空间相关分析数据来源于 Climate Research Unit 发布的 CRU TS 4.01 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 网络格点月值数据集 (Harris et al, 2014)。

1.2 年表研制与周期分析

保护区内目标树木水热环境条件较好且集中分布,样点地理位置为 $48^{\circ}15'40.75''N, 120^{\circ}19'36.86''E$, 海拔 762 m。采用生长锥在樟子松胸高位置取样,每树取 1 个样芯,本文选取其中 28 棵树样芯进行分析。依据国际标准树轮年代学研究流程,对固定、打磨、交叉定年后的树轮样本进行年轮宽度测量,使用 COFECHA 程序进行质量控制 (Holmes, 1983)。利用 ARSTAN 程序的负指数函数对样芯进行标准化处理,剔除生长趋势及环境干扰等噪音,同时考虑到样本量变化对年表总体方差的影响,使用方差稳定技术获

取最终的标准年表、差值年表和自回归年表 (Cook and Kairiukstis, 1990)。树轮年表的周期信号使用多窗口谱分析方法, 置信度分别选取 95% 和 90% 的红噪音背景 (Mann and Lees, 1996)。

2 结果与讨论

2.1 树轮年表特征

定年质量 COFECHA 检验结果表明, 样本主序列时段为 1928—2015 年, 总共 88 年。样芯序列与主序列的平均相关系数为 0.559, 选取的 28 个样芯均能够响应共同的气候要素信号, 因此全部用于宽度年表的建立。ARSTAN 结果显示, 差值年表平均敏感度为 0.133, 高于标准年表的 0.127 及自回归年表的 0.108。选取 1945—2015 年间 71 年的共同时段, 因有 1 个样芯靠近树皮部分断裂, 无法获取 2015 年的年轮宽度信息, 故差值年表共同区间分析合计包含 27 个样本。计算结果显示差值年表的样本总体代表性 0.913, 信噪比为 10.497, 所有序列间相关系数 0.280, 这些指标均高于标准年表的 0.888、7.919 和 0.227。因此本文主要选取差值年表进行后续分析。在共同时段内, 差值年表 27 个样本第一主成分方差解释量达到 31.6%, 亚样本信号强度高于指定阈值 0.85 的起始年份为 1935 年, 样本量为 9 个芯, 因此年表的有效年份共 81 年, 起止时段为 1935 年至 2015 年。以上统计结果表明核心区樟子松宽度差值年表具有保留更多气候信息的能力。

2.2 树木径向生长 - 气候响应

轮宽度差值年表与气象因子的相关结果表明, 水分条件在樟子松径向生长过程中发挥了主要的制约作用。具体表现为: 差值年表与降水量和相对湿度呈显著正相关, 而与平均温度和最高温度无显著相关关系 (表 1)。差值年表与当年 5 月、6 月和 7 月降水正相关, 且与 7 月的相关系数达到 0.263 ($p < 0.05$, 1953—2012), 月份组合后与 5—7 月降水量相关系数为 0.352 ($p < 0.01$), 相近的生长 - 气候响应关系也出现在差值年表与相对湿度之间 (表 1)。值得注意的是, 树轮差值年表与长季前期 8 月份的降水显著正相关 0.317 ($p < 0.05$), 表明樟子松树木径向生长受到前期关键月份水文条件的影响, 即前一个生长季的水文气候要素对来年树木年轮的形成存在着显著滞后效应。因此跨年生长季的年尺度降水总量对保

护区核心区的沙地樟子松具有显著的调节作用, 最高的相关系数 0.512 ($p < 0.01$) 出现在差值年表与上年 8 月至当年 7 月的年降水总量之间。核心区沙地樟子松树木径向生长的气候响应模式反映了典型的干旱半干旱地区树木生长的主要限制因子为水分的基本规律。相似的气候生长关系在我国北方大部分受水分胁迫地区的树轮气候学研究中得到证实 (Li et al., 2006; Cai et al., 2015)。

表 1 差值年表与月或季节降水、平均温度、最高温度及相对湿度的相关结果

Tab.1 Correlations between the residual chronology and climatic factors including precipitation, mean temperature, maximum temperature and relative humidity

月份 Month	降水 Precipitation	平均温度 Mean temperature	最高温度 Maximum temperature	相对湿度 Relative humidity
P7	-0.052	0.186	0.210	-0.200
P8	0.317*	0.132	0.046	-0.008
P9	0.148	-0.008	-0.145	0.134
P10	0.190	0.116	0.015	0.178
P11	0.069	0.140	0.132	-0.095
P12	-0.008	0.098	0.100	0.035
C1	-0.012	-0.011	-0.040	0.093
C2	-0.075	0.129	0.083	0.190
C3	-0.065	0.094	0.100	0.042
C4	-0.001	0.080	0.057	0.145
C5	0.239	0.016	-0.075	0.260*
C6	0.173	-0.095	-0.196	0.297*
C7	0.263*	0.033	-0.080	0.347**
C8	0.053	0.049	0.051	0.095
C9	0.067	0.000	-0.043	0.205
C57	0.352**	-0.027	-0.184	0.413**
P8C7	0.512**	0.137	0.043	0.263*

* 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$; C 表示当年; P 表示前一年。

* indicates at the significance level $p < 0.05$; ** indicates at the significance level $p < 0.01$; C means current year; P means previous year.

2.3 极端干湿年份、周期及区域代表性

沙地樟子松差值年表与树木生长年降水总量显著相关, 但是方差解释量低于 30%, 表明研究地区的树木生长受到多个气候环境要素的协同作用。但是差值年表记录的年降水量的变化特征与器测气象数据存在着较好的对应关系, 特别是极端干旱年份和湿润年份, 年表的波动有效地揭示了观测记录的极端年份的水文变化特征 (图 1)。

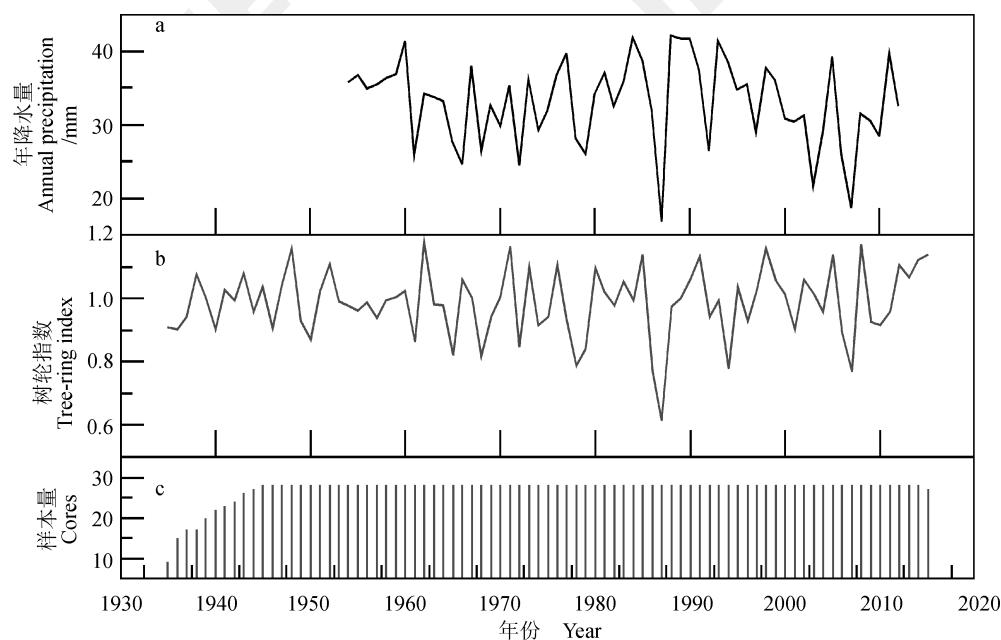


图1 上年8月至当年7月降水量与差值年表对比(1953—2012)

Fig.1 Comparison of residual chronology and precipitation from August of previous year to July of current year (1953—2012)

本文建立的差值年表可靠时段为1935—2015年,其均值(Mean)为0.986,标准偏差(SD)为0.107,因此定义极端干旱年份树轮指数为小于等于Mean-1SD,湿润年份为大于等于Mean+1SD。表2给出了差值年表揭示的15个湿润年和11个干旱年,它们分别占有效年份的18.5%和13.6%。其中1987年、2007年和1986年3个极端干旱年份的树轮指数均小于Mean-2SD。1987年和1950年的干旱年份与呼伦贝尔沙地海拉尔地区的年降水重建的极干年份一致(Liu et al., 2009),相似的结果在前期树轮水文气候重建中得到证实(Liu et al., 2015)。谱分析结果显示:差值年表具有3.31—3.40年($p<0.05$)年、4.34—4.49年($p<0.05$)、4.88—5.05年($p<0.05$)、6.57—9.31年($p<0.1$)及2.35—2.50年($p<0.1$)的准周期(图2),表明核心区域的树木生长受到大尺度的气候驱动的可能影响,比如ENSO活动,2—8年的周期信号在一定程度上反映了蒙古高原东部地区水文气候变化与赤道中东太平洋关键区域海水温度的联系。相似的周期和可能的作用机制在前期的研究结果得到印证(Liu et al., 2015)。空间相关分布结果显示:差值年表与同期CRU格点降水量数据显著正相关,并且主要响应区域位于呼伦贝尔沙地樟子松保护区,表明本文建立的核心区的树轮年表能够反演

研究区域及周边的年尺度的降水变化特征(图3)。差值年表揭示的气候变化信号为区域多样点的水文气候要素场的重建提供了新的数据和视角。

表2 树轮记录的极端湿润年份和干旱年份
Tab.2 Extreme wetness and dryness year obtained from tree-ring index

年份 Year	极端湿润年 Extreme wetness year	年份 Year	极端干旱年 Extreme dryness year
1948	1.159	1950	0.868
1952	1.108	1961	0.863
1962	1.176	1965	0.820
1971	1.164	1968	0.817
1973	1.097	1972	0.847
1976	1.104	1978	0.787
1980	1.094	1979	0.841
1985	1.137	1986	0.772 ^a
1991	1.130	1987	0.614 ^a
1998	1.156	1994	0.778
2005	1.137	2007	0.767 ^a
2008	1.169		
2012	1.104		
2014	1.121		
2015	1.138		

^a 表示 $<2\text{SD}$ 。

^a indicates the value is smaller than 2 standard deviations.

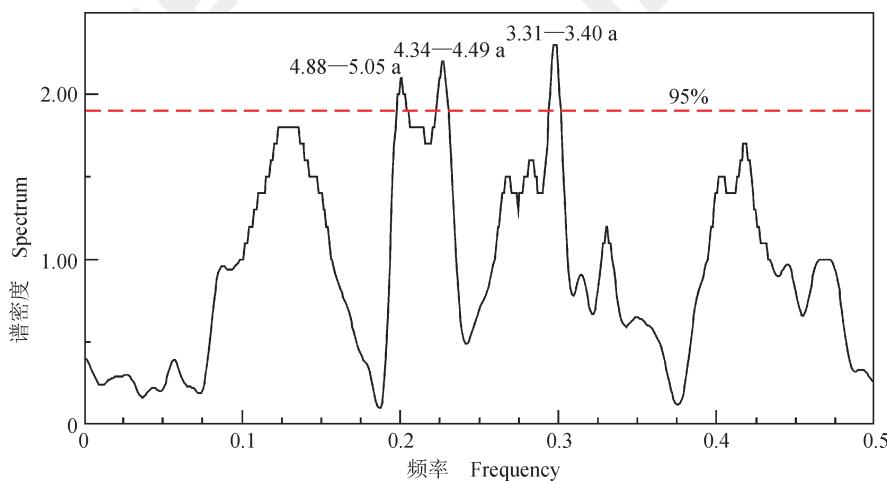


图2 差值年表谱分析
Fig.2 Spectrum analysis of residual chronology

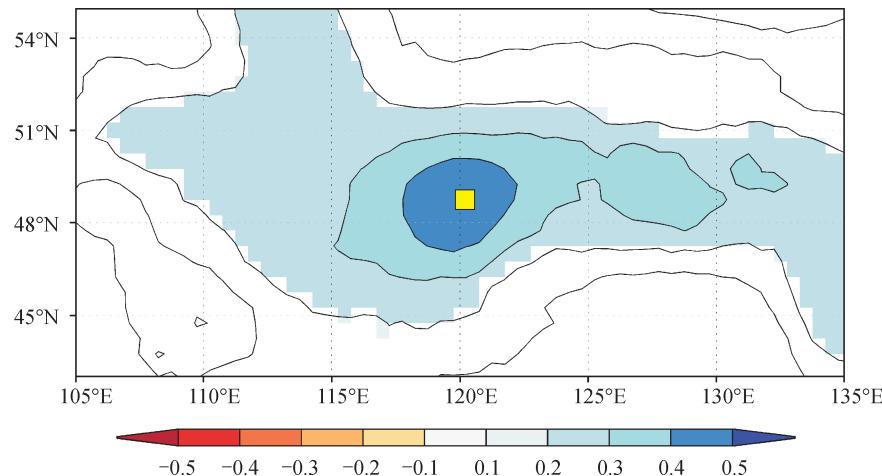


图3 差值年表与CRU上年8月至当年7月格点降水量的空间相关分布（1935—2014，正方形代表研究地点）
Fig.3 Spatial correlation of the residual chronology and CRU precipitation from August of previous year to July of the current year (1935—2014, square indicated the study site)

3 结论

本文以呼伦贝尔沙地樟子松保护区核心区的树轮样本为研究对象，分析了森林内部生境条件较好的树木年轮变化与主要气候环境因子的作用关系，初步获得以下结论：

- (1) 核心区沙地樟子松树轮宽度差值年表与标准年表相比保留了更多的生长气候信息。
- (2) 核心区沙地樟子松径向生长变化受到降水和相对湿度等水分条件制约，差值年表与生长季前期8月至当年夏季7月年降水量的相关最高。
- (3) 核心区沙地樟子松差值年表具有显著的

2—8年的周期信号，空间相关表明核心区树轮年表有一定的区域水文气候变化表征能力。

参考文献

- Cai Q, Liu Y, Liu H, et al. 2015. Reconstruction of drought variability in North China and its association with sea surface temperature in the joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 417: 554—560.
- Chen F, Yuan Y, Zhang R, et al. 2016. Shiyang River streamflow since AD 1765, reconstructed by tree rings, contains far reaching hydro-climatic signals over and beyond the mid-latitude Asian continent [J]. *Hydrological Processes*,

- 30(13): 2211–2222.
- Cook E R, Kairiukstis L. 1990. Methods of dendrochronology: applications in the environmental science [M]. Kluwer, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Devineni N, Lall U, Pederson N, et al. 2013. A tree-ring-based reconstruction of Delaware River basin streamflow using hierarchical Bayesian regression [J]. *Journal of Climate*, 26(12): 4357–4374.
- Harris I, Jones P D, Osborn T J. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS 3.10 Dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 34(3): 623–642.
- Holmes R L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bulletin*, 43(1): 69–78.
- Konisky D M, Hughes L, Kaylor C H. 2016. Extreme weather events and climate change concern [J]. *Climatic Change*, 134(4): 533–547.
- Li Q, Liu Y, Cai Q F, et al. 2006. Reconstruction of annual precipitation since 1686 AD from Ningwu region, Shanxi province [J]. *Quaternary Science*, 26(6): 999–1006.
- Liu N, Liu Y, Bao G, et al. 2015. A tree-ring based reconstruction of summer relative humidity variability in eastern Mongolian Plateau and its associations with the Pacific and Indian Oceans [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 438: 113–123.
- Liu Y, Bao G, Song H M, et al. 2009. Precipitation reconstruction from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hailar region, Inner Mongolia, China back to 1865 AD [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 282: 81–87.
- Liu Y, Sun J, Song H, et al. 2010. Tree-ring hydrologic reconstructions for the Heihe River watershed, western China since AD 1430 [J]. *Water Research*, 44(9): 2781–2792.
- Mann M E, Lees J M. 1996. Robust estimation of background noise and signal detection in climatic time series [J]. *Climatic Change*, 33: 409–445.
- Maxwell R S, Harley G L, Maxwell J T, et al. 2017. An interbasin comparison of tree-ring reconstructed streamflow in the eastern United States [J]. *Hydrological Processes*, 31(13): 2381–2394.
- Milly P C D, Dunne K A, Vecchia A V. 2005. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate [J]. *Nature*, 438(7066): 347–350.
- Stagge J H, Rosenberg D E, DeRose R J, et al. 2018. Monthly paleostreamflow reconstruction from annual tree-ring chronologies [J]. *Journal of Hydrology*, 557: 791–804.
- Stott P. 2016. How climate change affects extreme weather events [J]. *Science*, 352(6293): 1517–1518.
- Zhang T, Yuan Y, Chen F, et al. 2018. Reconstruction of hydrological changes based on tree-ring data of the Haba River, northwestern China [J]. *Journal of Arid Land*, 10(1): 53–67.