

DOI: 10.5846/stxb201601270193

张启, 闫明, 梁寒雪. 山西省长治市过去一百五十年森林的生长抑制和释放历史. 生态学报, 2017, 37(9): - .

Zhang Q, Yan M, Liang H X. History of growth suppression and release events in forests in Changzhi Prefecture, Shanxi Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

# 山西省长治市过去一百五十年森林的生长抑制和释放历史

张 启<sup>1</sup>, 闫 明<sup>1</sup>, 梁寒雪<sup>2,3,\*</sup>

1 山西师范大学生命科学学院, 临汾 041004

2 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093

3 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 森林生长与气候变化有着紧密的关系, 在全球变暖情形下了解树木的干扰历史对准确预测森林生长的变化具有促进作用. 本文选择山西黄土高原东南部长治地区保存较好的一个油松 (*Pinus tabuliformis*) 和两个白皮松 (*Pinus bungeana*) 森林为研究对象, 利用树木年轮学方法分析了其干扰历史. 结果表明: 黎城县、平顺县和屯留县研究地点中年龄最老的树木分别有 227、185 和 102 年; 通过计算树木径向生长的变化幅度, 发现该地区在过去一百五十年中发生了 3 次大的生长抑制事件 (分别发生在 1873—1877、1925—1930 和 1994—1997 年期间) 和 5 次大的生长释放事件 (分别发生在 1867—1871、1878—1884、1930—1935、1980—1985 和 1999—2004 年期间). 树木径向生长与气象观测资料的相关分析显示, 该地区森林生长在年际尺度上主要与 6 月份温度呈负相关而与 4—5 月份水分条件呈正相关, 揭示了由降水减少或高温下水分蒸散所带来的极端干旱事件是导致森林抑制现象的主要原因. 这些森林历史研究结果对区域林业管理具有实践意义, 营林建设更宜选择在森林生长释放时期; 经历多次干扰而存留下来的老龄树具有较强的抗干扰能力和丰富的历史信息, 加强对老龄树的鉴定与针对性保护可有效维护区域森林生态服务功能.

**关键词:** 黄土高原; 长治; 树木年轮; 生长抑制; 生长释放

## History of growth suppression and release events in forests in Changzhi Prefecture, Shanxi Province, China

ZHANG Qi<sup>1</sup>, YAN Ming<sup>1</sup>, LIANG Hanxue<sup>2, 3, \*</sup>

1 College of Life Science, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China

2 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Forest growth is closely associated with climate change, and understanding the history of growth disturbances can help predict potential changes in forest growth caused by global warming. In this study, we utilized dendrochronological methods to study growth release and suppression events of trees in order to reconstruct the disturbance history of forests. A total of 27 samples were collected from one *Pinus tabuliformis* forest and two *Pinus bungeana* forests in Changzhi Prefecture (southeast of Loess Plateau). After measuring and cross-dating the tree ring width, we found that the oldest trees in the Licheng, Pingshun, and Tunliu sampling sites were 227, 185, and 102 years old, respectively. Percentage of growth change (GC%) was calculated to identify the disturbance events. Growth release was defined as an average GC% (five

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31330015)

收稿日期: 2016-01-27; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dtxlhx@163.com

years) of more than 0.25, while growth suppression was defined as an average  $GC\%$  (five years) of less than -0.25. In this study, the results indicated that in the past 150 years, growth suppression occurred three times (1873—1877, 1925—1930, and 1994—1997), while growth release occurred five times (1867—1871, 1878—1884, 1930—1935, 1980—1985, and 1999—2004). Although the three forests had similarities in their disturbance histories, there were also differences in their spatial and temporal scales. These differences may be caused by the genetic characteristics of the different species and local environmental variations. To further understand the causes of the disturbances, a correlation analysis was performed for the first order difference of the three tree ring width chronologies and the meteorological records. The correlation coefficients showed that forest growth was negatively correlated with June temperature and positively correlated with April—May precipitation. This suggested that the historical growth suppression events might be related to extreme drought events, caused by precipitation reduction or excessive water evapotranspiration, whereas the growth release events might be related to an abundant supply of water. To validate these results, we compared our study with historical records and local paleoclimate studies. The drought events recorded in the historical materials, and reconstructed using other paleoclimate studies reasonably fit our results, which indicates that our study successfully rebuilt the historical growth history and that dendrochronological methods could be used in forest disturbance research in the east edge of the Loess Plateau. This study provided useful information for forestry management. For example, forest plantations should be carried out in moist conditions during the growing season. The old growth trees that survived multiple disturbance events have strong resilience and contain valuable information about historical environmental changes; identifying and protecting old growth trees is important for maintaining efficient and healthy forest ecosystem services.

**Key Words:** Loess Plateau; Changzhi Prefecture; tree ring; growth suppression; growth release

干扰事件会对树木生长产生影响,使树木表现出生长抑制和释放两类不同的生长变化.径向生长率显著低于平均生长率的现象称作生长抑制,而径向生长率出现快速而持续增加的现象则被称作生长释放<sup>[1]</sup>.研究树木生长抑制和释放的规律和发生机制,可以推测过去的干扰历史,为预测未来的干扰提供重要的依据,对理解森林生长动态和森林保护至关重要.树木年轮由于能准确记录年际间的生长变化,具有重建历史时间长、定年准确、材料广泛容易获得的优点,所以可以有效地用于研究森林的释放和抑制历史<sup>[2]</sup>.目前国内对森林的生长抑制和释放已有一些相关研究,在不同的研究中确定生长抑制和释放的方法存在差异,生长释放和抑制事件的成因也因地区、树种的不同存在不同的解释<sup>[3-6]</sup>.

黄土高原东南部是中国东部季风区向西部干旱区的过渡地带,既是气候变化敏感区,又是生态环境脆弱带,还是黄河中上游水土保持重点区域<sup>[7]</sup>.20世纪以来,这一地区暖干化趋势十分明显,气象灾害发生频繁,对树木的生长构成极大威胁<sup>[8]</sup>.森林对于改善环境,涵养水源,防止水土流失的作用非常重要,保护森林植被是黄土高原治理的治本之策.对该地区森林生长干扰历史的研究,有助于了解树木的生长方式以及森林植被动态规律,对森林的保护也有参考意义.然而目前山西黄土高原上的树木年轮学研究主要集中在重建过去的气候变化与树轮气候响应上<sup>[9-12]</sup>,对于森林干扰历史的相关研究则很少.

山西长治地区位于黄土高原东南部,是东亚季风影响的边缘地带.由于自然气候变化和人类活动的影响,该地区的森林受到了严重的干扰,森林资源在逐年减少.本文在长治地区保存较好的一个油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和两个白皮松 (*Pinus bungeana*) 森林中采集了树木年轮样本,旨在研究以下两个问题:1) 该地区森林的年龄有多大,在其历史上经历了哪些抑制和释放干扰事件? 2) 造成该地区森林生长释放和抑制的因素可能是什么? 研究结果可为林业部门制定合理的经营管理方案,提供森林生长历史数据,对该地区森林的保护也有参考意义.

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

长治地区位于中国山西省东南部,海拔最高处为沁源太岳山 2453m,最低处为平顺漳河谷 380m<sup>[13]</sup>.长治地区植被类型多样,属于华北暖温带阔叶林地带,植被垂直分布明显,从下到上依次为:灌丛(或灌草丛)带、低中山针叶林(或针阔混交林)带、落叶阔叶林带、亚高山草甸带.土壤类型主为褐土、褐土性土、山地草甸土、棕壤<sup>[13]</sup>.该地区属于典型中温带半湿润大陆性季风气候,全年冬无严寒,夏无酷暑,雨热同季.年平均气温在 4.9—10.4℃之间.本研究中的气候数据来自长治市气象站(36.13°N,113.31°E),多年的统计结果表明该地区 1 月份最冷,平均最低气温为-6.9℃;7 月份最热,平均最高气温为 22.5℃.年日照时数 2418—2616h,一般年降水量在 537.4—656.7mm,7 月最多,为 132.2mm,1 月最少,为 5.5mm,年平均无霜期在 156.8—181.9h,年平均风速为 1.5—3.0m/s 之间<sup>[14]</sup>.

### 1.2 树轮数据

本研究选取长治地区保存较好,树龄相对较长的三个采样点,分别位于屯留县紫金山(36.21°N,112.47°E)、平顺县南垵山(36.20°N,113.29°E)、黎城县广志山(36.31°N,113.15°E)(图 1).其中屯留县位于长治市上党盆地西缘,属于太行山系,总土地面积 11.9 万 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率 28.30%;黎城县位于长治市东北部,太行山中南段,有林地面积 7.68 万 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率达 24.05%;平顺县长治市的东部,太行山南端,有林面积 94.74 万亩,森林覆盖率 41.6.三个县城都是山西省园林县城<sup>[15]</sup>.采样于 2012 年 10 月底进行,按照国际树木年轮取样的标准,我们在 3 个采样点选取年龄较老的树木,在其胸高处(1.3m)沿平行坡向取一根样芯,共采集到了 27 棵树的样芯.其中黎城县广志山油松(*Pinus tabuliformis*) 10 个树芯,平顺县南垵山白皮松(*Pinus bungeana*) 11 个树芯,屯留县紫金山白皮松(*Pinus bungeana*) 6 个树芯.

样品带回实验室后,按照国际树木年轮分析的基本程序<sup>[16]</sup>,将样本进行自然干燥、棉线固定、砂纸打磨,然后利用 LINTAB 树轮测量仪进行年轮宽度的测量,精度为 0.001mm.通过比较不同树木个体间的年轮序列,鉴别出缺轮、伪轮和测量误差,使每棵树上的每个年轮都被确定了其准确的生长年份.然后利用 COFECHA<sup>[17]</sup>程序对交叉定年结果进行了检查.

树木年轮宽度序列包含了与年龄有关的生长趋势以及树木间的相互竞争等微环境所导致的其他信号<sup>[18-19]</sup>.为了剔除这些信号,用 ARSTAN<sup>[20]</sup>程序对轮宽数据去趋势.考虑到样本年龄较短、样本量较少,而且本研究更加关注高频的信息,故选用了步长为 16 年的样条函数来拟合生长趋势,去掉了周期较长的信号,再用实际年轮宽度值除以对应的生长趋势线的值得到每个树轮序列的轮宽指数.

树木生长变化百分率被认为能够准确判定生长抑制和释放事件<sup>[21-22]</sup>.采用 Nowacki 和 Abrams 的方法计算每个样本轮宽指数序列的生长变化百分率<sup>[23]</sup>,本文计算的是 5 年滑动平均值,即  $GC\% = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100\%$ ,其中  $GC\%$  是生长变化百分率, $M_1$  和  $M_2$  分别是前 5 年(包括当年)和随后 5 年(不包括当年)轮宽指数的平均值.由于生长释放和抑制事件是一个连续多年的树木生长状态,为了区别于个别年份的偶然因素所造成的生长变化对生长释放和抑制事件检测的影响.我们以 5 年的时间为窗口,对得到的  $GC\%$  序列中的数值进行筛选.若 5 年内生长变化率平均值大于 0.25,则定义该时期发生了生长释放事件;若 5 年内生长变化率平均值小于 -0.25,定义该时期为生长抑制事件.为了研究整个区域森林的径向生长变化情况,我们又计算出各个样

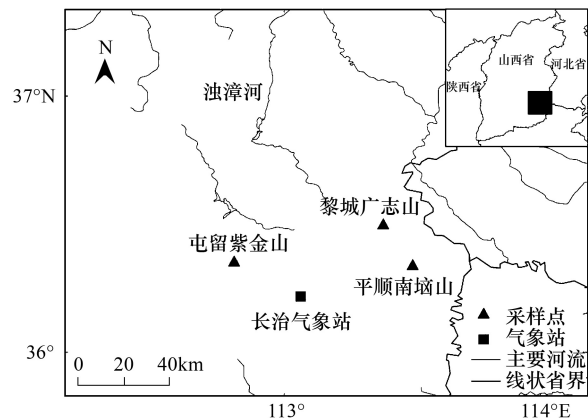


图 1 采样点示意图

Fig.1 The location map of the sampling sites

点所有树木每年生长变化百分率的中值,得到各样点的生长变化百分率序列,并分析了样点序列间的相关性来说明不同采样点树木径向生长变化的一致性.同时我们统计了各点树木发生生长抑制和释放的时间段及树木个数来分析其历史状况.

本研究使用 DendroClim 2002 程序<sup>[24]</sup>分析了各样点标准年表和气候因子一阶差序列的相关关系,以此来探讨该地区森林生长在年际尺度上对当地气候变化的响应特征.气候因子选取月平均温度和月降水量,其中月平均温度是基于长治气象观测站观测的当月每天的平均气温的平均值,月降水量是指当月每天降水量的总和.气象数据选取公共时间段(1958—2012年),选取前一年10月到当年9月的月平均温度和月降水量.

## 2 研究结果

### 2.1 树轮样本及交叉定年结果

经过交叉定年,我们获得了可用于分析的树轮数据,COFECHA 的检验结果表明定年准确可靠(表1).其中黎城样本总体年龄偏大,最大年龄为227年;平顺样本最大年龄为185年;屯留样本总体年龄相对偏小,最大年龄为102年.各采样点序列间平均相关系数都达到了0.5以上,表明该区域内各点的树木包含着大量的共同信号.

表1 3个采样点树木年轮样本的统计特征

Table 1 Statistic characteristics of tree-ring data in the three sampling sites

采样点 Sampling sites	平顺 Pingshun	黎城 Licheng	屯留 Tunliu
样本量 Number of samples	11	10	6
最大年龄 Maximum age	185	227	102
最小年龄 Minimum age	58	77	63
平均年龄 Average age	117	145	89
平均敏感度 Mean sensitivity	0.546	0.465	0.371
标准差 Standard deviation	0.686	0.602	0.546
序列间平均相关系数 Series intercorrelation	0.643	0.723	0.561
一阶自相关系数 First-order autocorrelation	0.525	0.684	0.723

### 2.2 树轮生长变化百分率

经计算得到的树轮生长变化百分率序列如图2所示,由于黎城1859年和平顺1894年以前样本量都不足3,所以计算结果分别从1860年和1895作为起始年.结果显示3个样点所有的树木生长变化百分率的变化趋势大致是一致的,高生长变化和低生长变化出现的时间段也基本一致.为了研究整体区域内树轮生长变化的特点,我们对各采样点(1915—2007年)生长变化序列在公共时间段内进行了相关分析,相关系数均达到了显著正相关,其中黎城和平顺之间的相关系数为0.660( $P < 0.001$ ),黎城和屯留之间的相关系数为0.560( $P < 0.001$ ),平顺和屯留之间的相关系数为0.564( $P < 0.001$ ).

### 2.3 生长抑制和释放事件

从各点树轮生长变化百分率图(图2)及生长抑制和释放样本量来看(图3),黎城所表现出的生长释放事件年代分布最广,最早的一次释放事件出现在1867年,最后一次释放事件出现在2000年;每10年期间都会有个体发生释放,其中个体出现释放的高峰期主要是5个,分别是1867—1871、1878—1883、1892—1896、1931—1935和1981—1985.平顺样点的树木生长释放事件比较集中,几乎每年都会有个体发生释放,但主要有4个高峰期,分别集中在1929—1935、1943—1947、1981—1985和1999—2004年期间;屯留样点的树木生长释放事件主要集中在1931—1935、1943—1947、1959—1963、1980—1984和2002—2004年间.

黎城样点的树木生长抑制事件多集中在1864—1865、1873—1877、1889—1890、1925—1927和1977年期间.平顺所表现的抑制大体上呈现出3个高峰:1923—1927、1938—1942和1994—1997年期间.而屯留生长抑



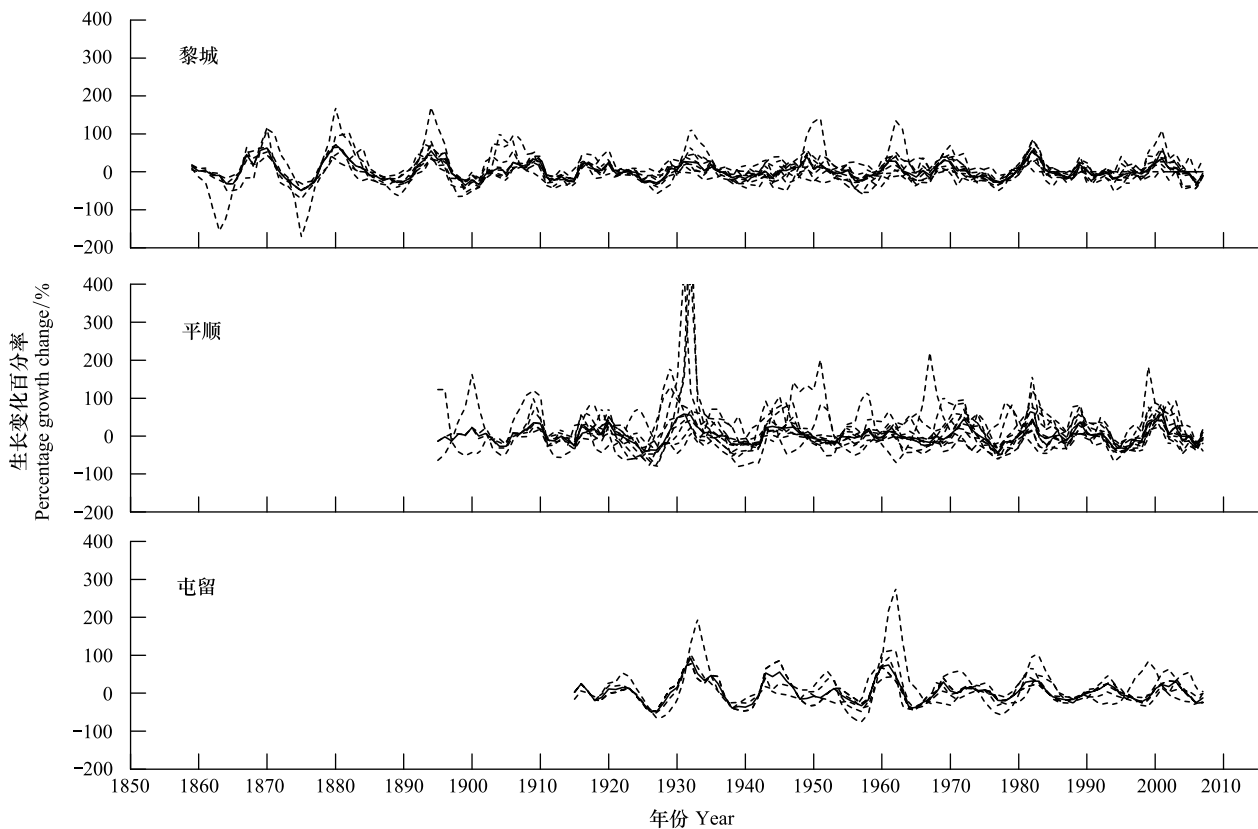


图 2 3 个采样点树木生长变化百分率情况

Fig.2 Percent growth change of the three sampling sites

虚线为单个树木的生长变化百分率,实线为各点所有树木的生长变化百分率的中介

制主要在 1925—1928、1938—1941 和 1964—1966 年期间。

综合统计了各点树木发生生长抑制和释放的时间段及树木个数,发现该地区森林在过去一百多年期间出现生长抑制的主要时期有三个,分别是 1873—1877、1925—1930 和 1994—1997 年期间;生长释放事件共有 5 次,分别发生在 1867—1871、1878—1884、1930—1935、1980—1985 和 1999—2004 年期间。

#### 2.4 树轮与气候要素的相关分析

3 个样点的标准年表与气候因子(月平均温度和月总降水量)的一阶差相关结果如图 4 所示。从图中可以看出,研究区域树轮宽度指数与月平均温度的相关结果一致性较差。3 个样点只与当年 6 月份平均温度都显著负相关,相关系数分别为黎城 $-0.47$ ( $n=10$ ,  $p<0.05$ )、平顺 $-0.48$ ( $n=11$ ,  $P<0.05$ )和屯留 $-0.31$ ( $n=6$ ,  $P<0.05$ )。其他月份的相关系数既有正值也有负值,相关系数也比较低。从树轮与月总降水量的相关性来看,三个样点的树木生长均与当年 4—5 月份总降水量都达到显著正相关。其中与 4 月份总降水量相关系数分别为黎城 $0.28$ ( $n=10$ ,  $P<0.05$ )、平顺 $0.36$ ( $n=11$ ,  $P<0.05$ )、屯留 $0.43$ ( $n=6$ ,  $P<0.05$ );与 5 月份总降水量分别为黎城 $0.35$ ( $n=10$ ,  $P<0.05$ )、平顺 $0.32$ ( $n=11$ ,  $P<0.05$ )、屯留 $0.39$ ( $n=6$ ,  $P<0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 树木径向生长对气候变化的响应

该地区各点森林生长在年际尺度上与气候响应类似,都对生长季 5—6 月的平均温度负相关和 4—5 月的降水正相关,其它时期生长对气候条件的响应关系较弱。在我国黄土高原地区,4—6 月是油松开始和快速生长的时期<sup>[25]</sup>,生长季前期过高的温度加速了树木的蒸腾量,使树木体内的水分散失过快,限制了树木的生理代谢活动,不利于树木的径向生长,从而导致了较窄的轮宽。在黄土高原的崆峒山<sup>[26]</sup>、山西芦芽山<sup>[27]</sup>、陕西黄

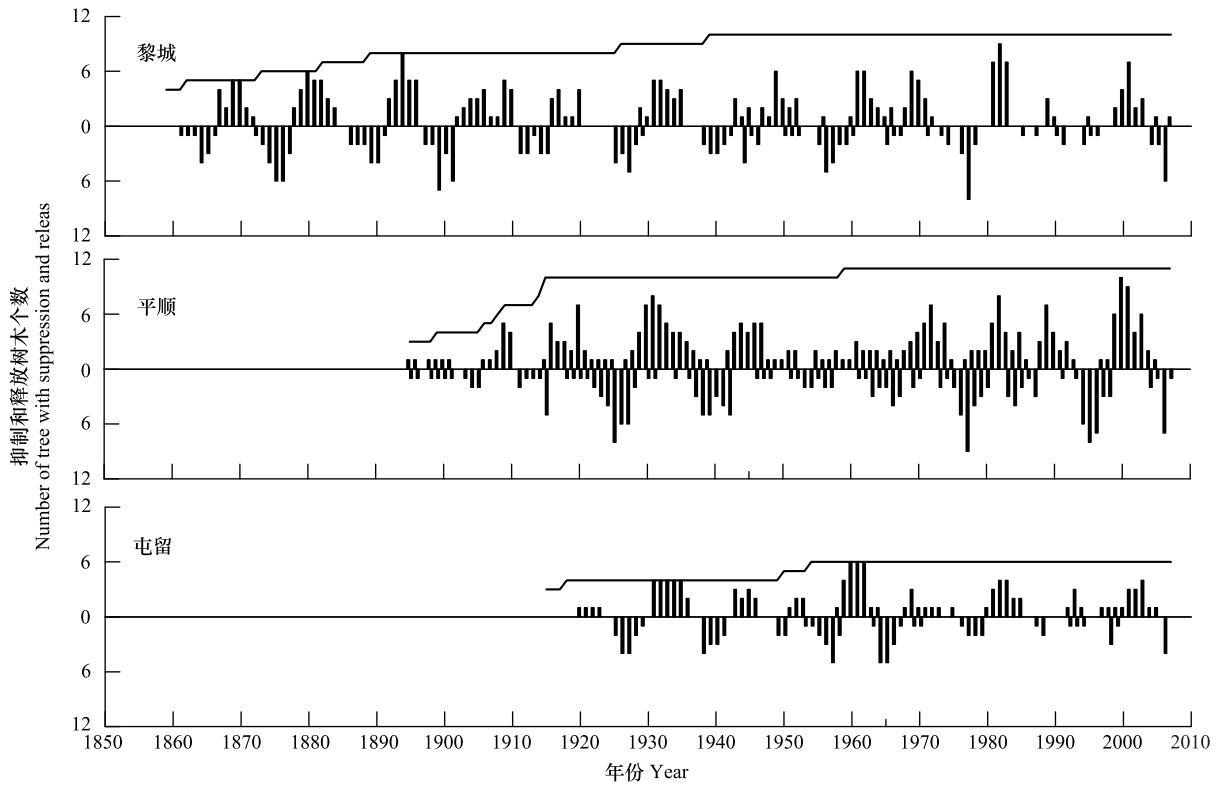


图3 各点生长释放和生长抑制树木个数随时间的变化

Fig.3 Number of trees with release and suppression over time in the three sampling sites

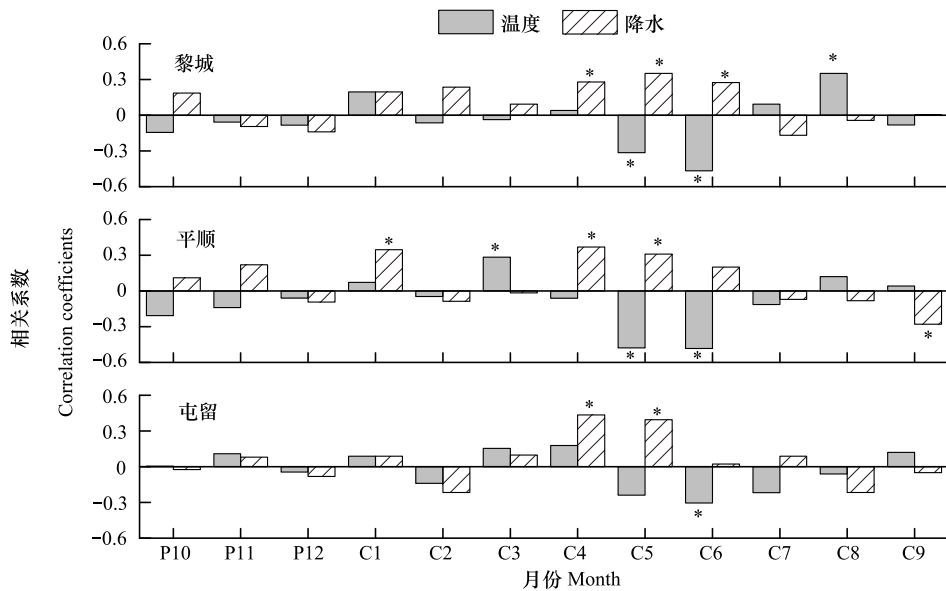


图4 树轮径向生长和气候因子一阶差的相关关系

Fig.4 Correlation coefficients between the 1st differences of tree ring width chronologies and climate factors

P 为上一年月份, C 为当年月份, \* 表示该月份相关达到 95% 显著水平

龙山<sup>[28]</sup>等地区的相关研究也发现了类似的结果.生长季前期(4—5月)充足的降水能够使树木储存足够的水分供给生长以及养分的运输,从而导致了树木较高的生长量.而到了7—8月份是树木生长旺盛时期,尽管温度较高,但长治地区充足的降水能满足树木的生长,此时的温度和降水都不成为它们生长的限制因子<sup>[29]</sup>.尽

管 3 个样点树木生长都和 6 月的平均温度显著负相关( $n=27, r=-0.31-0.48, P<0.05$ ), 与 4—5 月的降水显著正相关( $n=27, r=0.28-0.43, P<0.05$ ), 但是对树轮生长的方差解释量和其他树轮气候学的研究相比系数较低, 说明局部小环境对样地树木生长也产生了一定的影响。

### 3.2 森林生长抑制与释放的特征及解释

本研究发现长治地区森林的释放与抑制现象在有些时间段上表现出很强的一致性。例如, 3 个点的树木在 1923—1928 年期间都表现较强的生长抑制, 之后直到 1936 年期间, 都存在生长释放的情况。同样的在 1970—1985 年间也存在一致的生长变化。这种区域森林的抑制和释放现象的一致性, 极有可能是由于气候事件导致的<sup>[6]</sup>。但是在个别时期也存在微小的差异, 平顺和屯留的白皮松在 1938—1942 期间都存在生长抑制, 随后在 1943—1947 期间都进入快速生长阶段, 而黎城的油松在此期间少数树木表现出类似的生长变化。屯留的白皮松在 1956—1957 年间生长降低, 之后 1959—1963 发生了生长释放事件, 而其它两个地方没有明显的释放表现, 这种情况可能是由于样点微环境或者树木自身生长特性的不同所导致的。

我们将结果与史料记载和近代有气象记录以来气候相关的研究进行了对比, 以此来分析该地区生长释放和抑制产生的原因。本研究发现黎城树木在 1860—1865 以及 1873—1877 年间均发生了明显的生长抑制。根据史料记载长治地区 1862 年发生了严重的干旱事件, 同样的在 1875—1878 年间的降雨量也非常小<sup>[30]</sup>。此时, 根据树轮重建的降水序列显示山西宁武地区也处于持续的干旱时期<sup>[31]</sup>。3 个点树轮年表在 1928—1931 年形成极窄年轮及缺失轮, 且在 1925—1930 期间都有生长抑制现象。20 世纪 20 年代末期的旱灾, 是中国近代十大灾荒之一<sup>[32]</sup>, 而且多次被树轮的生长异常检测到<sup>[33, 34]</sup>。根据李强等对山西宁武地区树轮重建的降水序列显示该地区在 1901—1930 年降水量平均值为 399mm, 降水量特别少导致持续的干旱时期<sup>[31]</sup>。长治地区 20 世纪 70—90 年代除春季降水处于增多趋势外, 夏、秋、冬季降水均处于不同程度的减少趋势, 处于长期干旱时期<sup>[35]</sup>。黎城样本在 70 年代后生长缓慢, 表现出较弱的生长抑制。而重建的降水序列也显示 1972 年降水量只有 324mm, 远远低于多年平均值的 413mm<sup>[31]</sup>。根据长治市气象站的记录, 在 1995—2000 期间长治地区的温度呈持续上升趋势, 2000 年后温度下降趋于平稳。蔡秋芳等对山西吕梁山气温变化的研究中发现, 1994—2002 年的温度是过去近 170 年中温度最高的时段<sup>[10]</sup>。平顺和屯留的白皮松在这个时间段内表现出生长抑制现象。持续异常的高温会加速地表水分蒸发与树木体内水分的蒸腾, 当温度恢复正常水平后, 树木出现释放事件。3 个点生长抑制和释放与极端气候事件在时间上的一致性, 表明该地区降水减少或高温下水分蒸散所带来的极端干旱是该区域森林生长抑制的主要原因。

本研究区域内树龄超过 150 年的古树有 7 棵, 其中最大年龄为 227。树木自身的生理功能也就是光合作用、水分传导以及耐旱能力等随着年龄而发生变化<sup>[36]</sup>。不同龄级的树木的抗旱, 抗高温能力也是不同的。对于老龄树, 夏季的水分需要量更多, 在水分条件一定的条件下, 夏季较高的温度, 加强了蒸腾速率, 造成树木生长的干旱胁迫, 因此老龄树木对夏季气温的变化更敏感<sup>[37]</sup>。能够经历多次各种干扰而存留下来的老龄树具有较强的抗干扰能力。老龄树复杂的年龄结构常常能反映过去气候的变化情况, 也记录了该树种从生到死的总规律<sup>[38]</sup>。因此我们要加强对老龄树的针对性保护以此来保存珍贵的历史信息, 维护区域森林生态服务功能。此外, 森林生长释放时期良好的环境适宜树木的生长, 营林建设更宜选择在此时。

## 4 结论与展望

本文利用长治地区 3 个县采样点的树轮数据计算了树木生长的生长变化百分率, 以此重建了过去一百五十年间森林的生长抑制和释放历史, 结果表明该地区森林在过去一百五十年期间发生生长释放和抑制的时间基本上是同步的, 但是也存在由于树种以及微环境的差异所产生的微小不同, 主要有 3 次大的生长抑制事件和 5 次大的生长释放事件。而通过树木生长与气候响应分析结果以及其他相关历史资料的佐证, 表明该地区森林抑制现象主要是由于极端干旱事件引起的干扰导致的。主要的生长抑制和释放时间与史料以及其他相关研究结果一致, 表明我们的研究准确可靠, 说明该地区利用树轮来研究森林的干扰历史是可行的。研究结果还

为林业部门提供了合理的森林经营建议,为今后进一步研究整个黄土高原的森林生长干扰历史,以及群落的更新和保护提供了可供参考的方法.

**致谢:**感谢中国科学院植物研究所树木年轮实验室提供的树轮样本,张齐兵研究员在数据分析和论文写作上的悉心指导,邱红岩老师对实验室工作的热情帮助.

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王树芝, 赵秀海. 树轮生态学研究进展. 世界林业研究, 2010, 23(2): 17-21.
- [ 2 ] 封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 王晓荣, 王瑞丽. 树木年轮在干扰历史重建中的应用. 生态学报, 2011, 31(11): 3215-3222.
- [ 3 ] 侯向阳, 韩进轩, 谢海生. 长白山红松林干扰节律研究. 生态学报, 2000, 20(3): 409-411.
- [ 4 ] 夏冰, 贺善安, 兰涛, 邓飞, 姚淦. 亚高山云冷杉混交林树木生长释放与干扰分析. 植物资源与环境, 1997, 6(1): 1-8.
- [ 5 ] 刘录三, 邵雪梅, 梁尔源, 王丽丽. 祁连山中部祁连圆柏生长与更新方式的树轮记录. 地理研究, 2006, 25(1): 53-61.
- [ 6 ] 王晓春, 赵玉芳. 黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释. 生态学报, 2011, 31(5): 1230-1239.
- [ 7 ] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 岳平, 陆登荣, 肖国举, 王洋, 刘林春. 黄土高原陆地表层最大可能蒸散量的变化特征. 生态环境学报, 2011, 20(8-9): 1189-1195.
- [ 8 ] 李晋昌, 刘勇, 张彩霞. 山西省春季气温、降水及其极端事件的变化. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 55-60.
- [ 9 ] 张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇, 郭媛媛. 芦芽山阳坡不同海拔白杆径向生长对气候变暖的响应. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1142-1152.
- [ 10 ] 蔡秋芳, 刘禹, 包光, 雷莺, 孙铂. 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. 科学通报, 2010, 55(20): 2033-2039.
- [ 11 ] 易亮, 刘禹, 宋惠明, 李强, 蔡秋芳, 杨银科, 孙军艳. 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. 冰川冻土, 2006, 28(3): 330-336.
- [ 12 ] 李颖俊, 王尚义, 牛俊杰, 方克艳, 李晓岚, 栗燕, 布文丽, 李玉晗. 芦芽山华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 树轮宽度年表对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36(6): 1608-1618.
- [ 13 ] 张桂萍, 栗建华. 长治市生态环境退化及成因分析. 山西大学学报: 自然科学版, 2010, 33(4): 620-624.
- [ 14 ] 长治市地方志编纂委员会. 长治市地方志. 北京: 海潮出版社, 1995.
- [ 15 ] 刘鑫焱. 长治: 弘扬太行精神, 打造绿色家园. 人民日报, 2009-08-20 [2015-12-25]. <http://env.people.com.cn/GB/9893665.html>
- [ 16 ] Cook E R, Kairiukstis L A. Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 51-55.
- [ 17 ] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.
- [ 18 ] Fritts H C. Tree Ring and Climate. London: Academic Press, 1976.
- [ 19 ] Schweingruber F H. Tree Rings and Environment Dendroecology. Berne: Paul Haupt, 1996.
- [ 20 ] Cook E R, Holmes R L. Users Manual for ARSTAN. Tucson: Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, 1986.
- [ 21 ] Lorimer C G, Frelich L E. A methodology for estimating canopy disturbance frequency and intensity in dense temperate forests. Canadian Journal of Forest Research, 1989, 19(5): 651-663.
- [ 22 ] Payette S, Filion L, Delwaide A. Disturbance regime of a cold temperate forest as deduced from tree-ring patterns: the Tantaré Ecological Reserve, Quebec. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(8): 1228-1241.
- [ 23 ] Nowacki G J, Abrams M D. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. Ecological Monographs, 1997, 67(2): 225-249.
- [ 24 ] Biondi F, Waikul K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & Geosciences, 2004, 30(3): 303-311.
- [ 25 ] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 王培榛. 土壤干旱对油松生长及水分利用的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 88-92.
- [ 26 ] 侯迎, 王乃昂, 李钢, 郑芳. 利用树轮资料重建 1751-2005 年崆峒山地区夏季温度变化. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 172-176.
- [ 27 ] 张文涛, 江源, 王明昌, 张凌楠, 董满宇. 芦芽山阳坡不同海拔华北落叶松径向生长对气候变化的响应. 生态学报, 2015, 35(19): 6481-6488.
- [ 28 ] 蔡秋芳, 刘禹, 宋惠明, 孙军艳. 树轮记录的陕西中-北部地区 1826 年以来 4—9 月温度变化. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(8): 971-977.
- [ 29 ] 王婷, 李聪, 张弘, 任思远, 李鹿鑫, 潘娜, 袁志良, 叶永忠. 宝天曼自然保护区不同针叶树径向生长对气候的响应. 生态学报, 2016, 36



(17): 1-9.

- [30] 钱林清, 郑炎谋, 胡慧敏. 山西气候. 北京: 气象出版社, 1991: 1-458.
- [31] 李强, 刘禹, 蔡秋芳, 孙军艳, 易亮, 宋惠明, 王雷. 山西宁武地区 1686 年以来年降水重建. 第四纪研究, 2006, 26(6): 999-1006.
- [32] 陕西历史自然灾害简要纪实编委会. 陕西历史自然灾害简要纪实. 北京: 气象出版社, 2002.
- [33] 梁尔源, 邵雪梅, 黄磊, 王丽丽. 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. 自然科学进展, 2004, 14(4): 469-474.
- [34] Liang E Y, Liu X H, Yuan Y J, Qin N S, Fang X Q, Huang L, Zhu H F, Wang L L, Shao X M. The 1920s drought recorded by tree rings and historical documents in the semi-arid and arid areas of northern China. Climatic Change, 2006, 79(3/4): 403-432.
- [35] 赵双巧, 李晶晶, 张卉, 张红英, 杨梅. 长治市近 54 年降水时空变化特征分析. 科技与创新, 2004, (14): 142-144.
- [36] Vieira J, Campelo F, Nabais C. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. Trees, 2009, 23(2): 257-265.
- [37] 宋来萍. 大兴安岭樟子松年轮气候响应及年龄影响探讨[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [38] 胡坚强, 夏有根, 梅艳, 王学勤. 古树名木研究概述. 福建林业科技, 2004, 31(3): 151-154.