

晋西黄土区油松林的生长释放与生长抑制*

何如梦¹ 王百田^{1**} 于显威² 王旭虎¹ 刘涛¹ 王岩松¹ 刘臻¹

¹北京林业大学水土保持学院 北京 100083

²辽宁水利职业学院 沈阳 110122

摘要 为探究气候变化和抚育间伐对油松林生长的影响,选取黄土高原东部山西省临汾市吉县人工油松林中3个不同密度的林分,采用年轮生态学的方法对油松的径向生长过程进行分析。年轮宽度指数与气候因子的相关性分析表明该地区油松生长在年际尺度上与当年1月降水和上年12月最高气温负相关,与当年7月降水和10月最高气温正相关;生长释放和生长抑制分析表明由于气候变化和间伐的影响在1978-2003年之间,样方1出现了1次中度生长抑制,生长变化率低于-50%,1次由间伐引起的轻度生长释放,生长变化率大于47%;样方2出现了1次间伐产生的轻度生长释放,生长变化率超过39%;样方3出现了1次气候条件不适导致的轻度生长抑制,生长变化率低于-32%,1次由间伐和气候条件适宜共同作用产生的中度生长释放,生长变化率大于75%;间伐产生的生长释放效应能够维持5年左右。综上所述,不适宜的气候条件会抑制树木生长,间伐抚育能够使树木在5年内快速生长,结果可为后期的林业管理决策提供一定的参考。(图5 表2 参51)

关键词 黄土高原;油松;人工林;径向生长过程;生长释放;生长抑制

CLC S791.254 : S718.5

Growth release and growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* forest in the Loess Plateau of western Shanxi Province, China*

HE Rumeng¹, WANG Baitian^{1**}, YU Xianwei², WANG Xuhu¹, LIU Tao¹, WANG Yansong¹ & LIU Zhen¹

¹ School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

² Liaoning Water Conservancy Vocational College, Shenyang 110122, China

Abstract There has been increased focus on the impacts of climate change on vegetation growth, and human activities that interfere with the vegetation. Discussing the effects of climate change and thinning activity on forest growth is essential to expand plantation areas. In this study, the dendroecological method was used to analyze the radial growth of *Pinus tabulaeformis* to reveal the impacts of climate change and human activities on forest stand growth. These samples were derived from three different density areas of *P. tabulaeformis* forest at the Linfen City of Shanxi Province (the east of Loess Plateau). The correlation analysis between tree ring width index and climatic factors indicated that the growth of *P. tabulaeformis* was negatively related to precipitation in January and the monthly maximum temperature in December of the previous year, whereas positively correlated with precipitation in July and the monthly maximum temperature in October in that year. The phenomena of growth release and inhibition could be attributed to the impacts of climate change and thinning during 1978–2003. However, growth inhibition was closely related to unsuitable climatic conditions. Plot 1 showed a moderate growth inhibition period when the growth variation was less than -50%, and growth release was caused by thinning. The growth variation was greater than 47% in the period of growth release. Moreover, a slight growth release occurred due to tending in plot 2, and the rate of growth change exceeded 39%. A slight growth suppression induced by uncomfortable climatic condition caused growth variation less than -32% and a moderate growth release by the interaction of cutting and comfortable counterpart made variation rate larger than 75% in plot 3. The release effects of thinning can last for about 5 years. In summary, inappropriate climatic conditions can inhibit the growth of trees, and thinning can promote tree growth by about 5 years. The results can provide a reference for local forest management.

Keywords the Loess Plateau; *Pinus tabulaeformis*; plantation forest; radial growth process; growth release; growth inhibition

收稿日期 Received: 2018-03-01 接受日期 Accepted: 2018-04-24

*国家重点研发计划项目(2016YFC0501704)资助 Supported by the National Key R&D Plan of China (2016YFC0501704)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: wbaitian@bjfu.edu.cn)

黄土高原总面积达 $62.38 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该区沟壑纵横, 降水少且时空分布不均, 暴雨集中, 植被覆盖度低, 是中国水土流失最为严重的地区之一, 也是黄河泥沙的主要源区^[1]. 为改善区域生态环境, 应对气候变化, 上世纪中期政府先后开展了水土流失综合治理项目、三北防护林工程、退耕还林还草工程等生态工程, 人工林的面积不断增加, 已经成为黄土区主要的森林植被类型. 油松 (*Pinus tabulaeformis*) 由于耐干旱, 耐贫瘠, 根系发达, 适应性强^[2], 成为了黄土高原地区主要造林树种之一, 但是现有林分存在许多问题, 如密度过大导致树木生长受到抑制、林分退化, 因此油松林的林分密度调控受到极大的重视, 众多学者也针对油松林的密度调控问题进行了研究^[3-4]. 大多研究试图通过编制密度控制图及建立林分密度控制模型来估计最佳的林分密度, 虽然密度控制图和模型分析在一定范围内具有普适性, 但通过这两者制定的间伐措施不完全合理, 因此了解林分的生长状况和历史对合理的密度调控十分重要.

树木的生长状况会随着外界条件的变化而变化, 这种变化能够在年轮上表现出来. 利用年轮宽度的变化和一定的记录资料能够重建林分的生长历史^[5-7]和干扰历史, 如大风、火灾、病虫害等^[8-10]. 大量研究表明, 通过生长释放和生长抑制分析能够了解林分的生长历史. 生长释放是指树木受到一定的干扰后径向生长出现快速而持续的增加, 而径向生长受到抑制生长率降低的现象称为生长抑制^[11]. 张启等对山西省长治市森林的生长释放和生长抑制进行判定, 发现地区降水减少或高温下水分蒸散所带来的极端干旱使得树木生长受到抑制^[12]. 赵玉芳通过生长释放判定发现黑河几乎所有红松样本都发生过1次生长释放, 单株平均释放2.75次^[13]. Zielonka等通过生长释放分析发现大风形成的林窗使得光热资源得到改善, 树木快速生长表现出生长释放^[14]. 幸福等通过判定云杉人工纯林生长释放, 发现采取小强度 ($\leq 30\%$) 的林窗疏伐能够改善林内的光热及水分条件, 显著促进保留木的径向生长速度及其生长量^[15]. 蒋子涵等的研究表明红松林在30%的采伐强度下, 保留木的年轮宽度显著增加, 且越是喜阳的树种径向生长量增加值越大^[16]. 但是关于黄土地区油松人工纯林林分中树木个体径向生长过程变化以及气候变化和间伐等因子对其生长的影响还缺乏深入的研究.

我们选择黄土高原地区山西省临汾市吉县人工油松林为研究对象, 这些油松林营造于上世纪70年代, 其中有的林分经过间伐调整, 目前这些林分生长状况差异较大, 其生长差异是否来源间伐扰动或是源于对气候变化的响应? 因此本文研究的主要目的在于: (1) 明确油松林木个体径向生长过程; (2) 评估间伐、气候因素的影响, 揭示不同林分的油松个体径向生长过程及其差异. 本研究通过年轮生态学的方法分析树木径向生长过程和生长历史可为今后林业管理决策提供参考意见.

1 研究区概况和试验方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县国营红旗林场, 地处山西西南边隅、黄河中游东岸、吕梁山南端, 东西长62 km, 南北宽48 km, 总面积1 777.26 km^2 , 地理坐标为东经 $110^\circ 30' - 110^\circ 43'$ 、北纬 $36^\circ 10' - 36^\circ 19' 30''$. 该区属暖温带大陆气候, 四季分明, 光照充足, 日照时数2 538 h, 大于 10°C 的有效积温3 361.5 $^\circ \text{C}$. 无霜期多年平均172 d, 年均气温 10.2°C , 年均日较差 11.5°C , 年均降水522.8 mm. 该区域从上世纪70年代起造林, 人工林主要树种有刺槐 (*Robin pseudoacacia*)、油松、侧柏 (*Platycladus orientalis*), 天然林树种有辽东栎 (*Quercus wutaishansea* Mary), 次生林树种为山杨 (*Populus davidiana*)、辽东栎, 灌木树种主要有沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、虎榛子 (*Ostryopsis dravidian*)、黄刺玫 (*Rosa xanthense*) 等. 这里的土壤主要有丘陵褐土、淋溶褐土、普通褐土, 土壤pH值在7-8之间^[17].

1.2 研究方法

1.2.1 树轮数据 研究区的油松林均为油松纯林, 营造于上世纪70年代, 初植密度相同, 1988年开始对不同小班进行间伐. 根据吉县红旗林场的间伐记录, 样方1分别在1988年和2006年进行过2次间伐, 样方2和3分别在1988和1996年进行过1次间伐. 目前样方3的密度远大于样方1和2的密度, 3个样地的立地条件详细情况如表1所示. 本研究在2008年时分别选择3种不同密度的油松林样地, 设置3个 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的标准样方进行每木检尺, 同时沿山坡等高线选取15棵上层林木钻取树芯^[18], 每棵树取两根树芯.

取回的树芯剔除在运输过程中碎裂者, 剩余的经过阴干、固定、打磨、标点、定年等预处理后用Lintab6测量年轮宽度, 然后经过COFECHA程序对定年质量进行控制和检验^[19], 剔除那些与主序列相关性不高和始终定年有误的年轮序列, 然后利用ARSTAN程序建立年表^[20], 年表更能够反映样地内整体的生长状况^[21-22], 本研究采用保守的负指数型去趋势方法对年轮宽度序列进行去趋势^[23].

利用标准化 (STD) 年表通过生长释放和生长抑制分析树木的生长过程, 首先根据 Nowacki 和 Abrams 的方法^[24]计算油松当年年轮宽度指数序列的生长变化百分率 (GC, %). 本文采用5年滑动中值, 中值比平均值更加稳定不易受极值的影响, 并且能凸显出非正常干扰事件的影响^[25-26]. 由于采用5年窗口进行滑动, 因此样方1分析1978-2003年, 样方2分析1979-2003年, 样方3分析1981-2003年的生长率变化.

$$GC = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, M_2 是后5年的年轮指数中值, M_1 是前5年 (包括当年) 的年轮指数中值. 当树木生长变化速率持续 5-10 年超过 25%、

表1 样地概况

Table 1 Survey of the sample plot

样方 Plot	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	坡度 Slop	密度 Density (N/hm^2)	坡向 Aspect	海拔 Elevation (h/m)	间伐时间 Cutting time	年龄 Age (t/a)
1	N36°12'27"	E110°47'53"	20°	1075	阴坡 Shade slope	1339	1988, 2006	35
2	N36°12'26"	E110°48'29"	30°	1875	阴坡 Shade slope	1318	1988	34
3	N36°12'22"	E110°48'51"	15°	3275	阳坡 Sunny slope	1351	1996	32

50%或100%时,就认为发生了轻度、中度、重度释放,相反当树木生长变化速率持续 5-10 年低于 25%、50% 或100%时,认为发生了轻度、中度、重度抑制^[27]。

本文采用SPSS 17对年轮宽度指数和气候因子进行相关性分析,相关性检验采用皮尔逊相关分析(双尾检验),以探讨气候因子对油松生长的影响。

1.2.2 气候数据 本文所用临汾市气象数据下载于国家气象信息中心,选取1974-2008的气象数据,并采Double-mass方法检查气象数据的非随机变化^[28-29],结果表明气象数据可靠,能够代表该地区气候的基本特征。最终选取1974-2008年的气温(最高气温、最低气温、月平均气温)和降水,计算变化率,气候变化率的计算方法与年轮径向生长变化率的计算方法相同。

2 结果

2.1 树轮数据

利用ARSTAN程序建立了3个样方的年表,STD年表特征值如表2所示,样本间相关系数较高,满足分析的基本条件,由于人工林扰动较大,年轮宽度变化错乱不齐(图1),因此信噪比普遍较低,最高只有6.27。林分密度相对较高,对气候的变化敏感性较差,但均大于0.2,能够用于分析。样本的一阶自相关性较大,说明油松生长受前一年生长状况影响较大。

2.2 树木径向生长与气候因素的相关性

油松生长受到上年气候影响较大,也有研究表明黄土高原地区油松的生长与上年11月和12月的气温和降水有较高的相关性^[30-31],因此选择上年11月到当年10月的降水、最高气温、最低气温、月平均气温与年轮宽度指数进行相关性分析,结果如图2所示。

综合3个年表(图2)来看,油松生长与1月降水呈现负相关,其中样方1和2达到显著水平,与10月最高温呈正相关,样方1中油松生长与10月最高温显著正相关;油松生长与7月降水正相关,其中样方1中油松生长与7月降水显著正相关;油松生长与上年12月最高温度负相关,其中样方3中油松生长与12月最高温度显著负相关。

2.3 气候变化

通过油松径向生长与气候因子相关性分析可知油松的生长与1月降水和上年12月最高气温负相关,同时与10月最高气温和7月降水正相关,因此计算这4个气候因子的变化率。如

表2 吉县3个油松STD年表特征值
Table 2 Statistics characteristics of the three chronologies of *Pinus tabulaeformis* in Jixian County

主要特征参数 Main parameters	样方 Plot		
	1	2	3
平均敏感度 Mean sensitivity	0.266	0.239	0.326
一阶自相关 Autocorrelation order 1	0.762	0.588	0.394
标准差 Standard deviation (SD)	0.411	0.293	0.324
样本间相关系数 Mean inter-series correlation (Rbar)	0.758	0.566	0.678
信噪比 Signal-to-noise ratio (SNR)	6.274	2.610	4.220

图3所示,1月降水在1978-1983年小幅波动,1984-1990年之间迅速上升,之后又处于波动期,虽然1月降水变化率的变化幅度最大,但是1月降水量比较小,变化的范围较小;7月降水与1月降水相比变化率的波动不明显,但是7月的降水量较大变化范围较大;上年12月最高气温变化比较剧烈,1978-1979、1985-1989、1994-1998之间上升,1980-1984、1990-1993、1999-2003之间变化率为负值;10月最高气温变化相对缓和。

2.4 生长释放和抑制

如图4所示,3个样方生长变化率有相似之处,但由于干扰,其生长变化率的变化并不一致。样方1在1978-1986年期间出现了1次中度生长抑制,1988-1992年期间出现了1次轻度生长释放;样方2在1981-1985年期间出现了轻度生长释放;样方3在1994-1998年期间出现了轻度生长抑制,1999-2003年出现了中度生长释放。

3 讨论

3.1 树木径向生长对气候变化的响应

相关性分析表明油松径向生长对气候变化比较敏感,1月降水与油松的径向生长存在负相关,可能与1月份的温度较低有关,低温和降水共同作用可能会对树木造成冻害^[32],陈振举等研究表明油松年轮宽度指数与1月降水存在显著的负相关关系^[33],黄土高地区其他相关研究也表明油松生长与1月降水负相关^[34];7月降水与油松的生长存在正相关关系,7月是油松快速生长的时期,降水充足,有利于增加光合产量促进树木生长,蔡秋芳、姜庆彪等的研究也表明7月的降水充足有利于形成宽轮^[35-36];10月是油松生长的末期,空气温度逐渐降低,生长季末温度高能够使光合速率增加,有研究也表明10月温度与油松生长正相关^[37]。上年12月的温度高会增加土壤蒸发,不利于土壤水分的保持,会加剧第二年生长

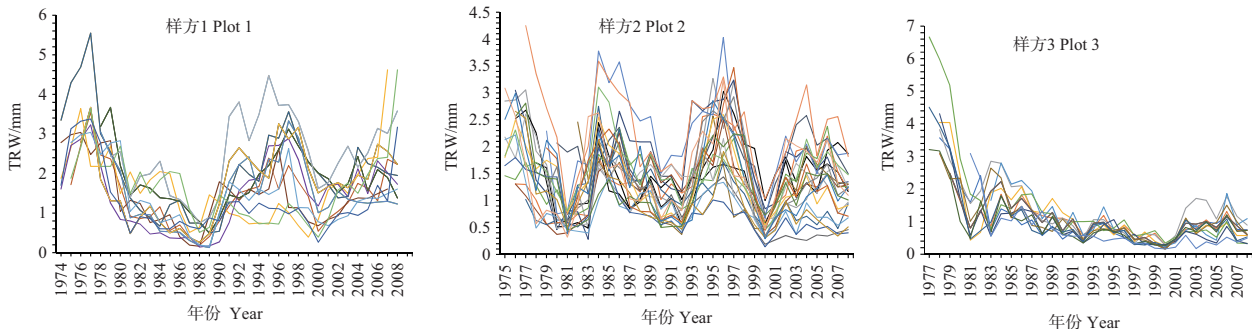


图1 吉县3个样方年轮宽度 (TRW) 曲线图。
Fig. 1 Tree ring width (TRW) of the three plots in Jixian County.

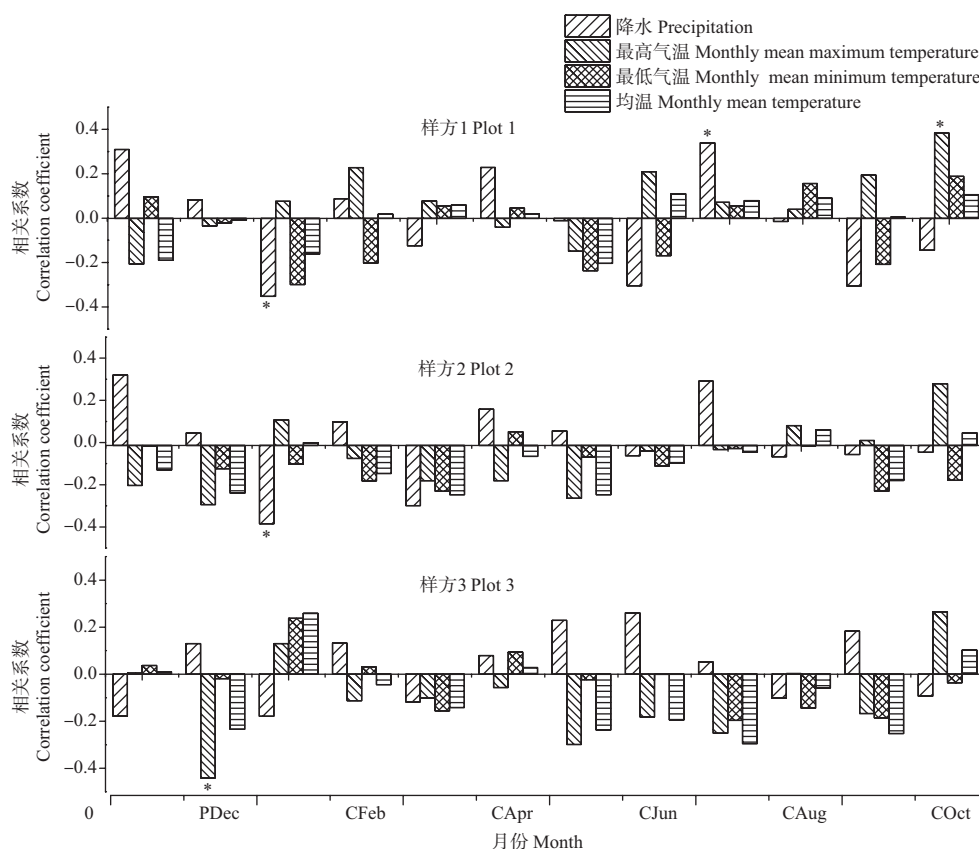


图2 吉县油松径向生长与气候因子的相关性。*表示相关分析显著的月份 ($P < 0.05$, 双尾检验)。PDec表示上年12月份, CFeb、CApr、CJun、CAug、COct分别表示当年2、4、6、8、10月份。

Fig. 2 Correlation between radial growth and climatic factors of *Pinus tabulaeformis* in Jixian County. Asterisks represent significant effects ($P < 0.05$, two-tailed test). PDec means Dec. of the last year, and CFeb, CApr, CJun, CAug, COct represent Feb., Apr., Jun., Aug., Oct. of the current year, respectively.

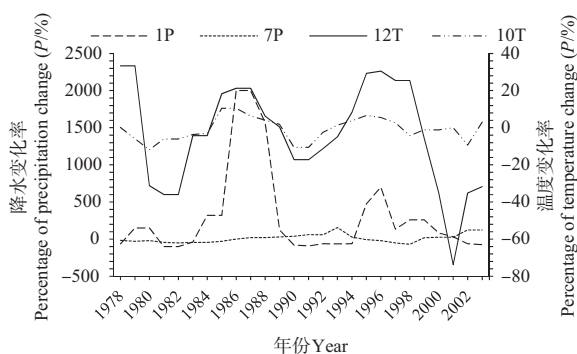


图3 吉县气温和降水变化率。1P与7P分别为当年1月和7月的降水, 12T为上年12月的最高气温, 10T为当年10月最高温。

Fig. 3 Percentage of temperature and precipitation change in Jixian County. 1P and 7P are the precipitation in January and July of the current year, respectively, 12T is the maximum temperature in December of last year, and 10T is the maximum temperature in October of the current year.

初期的水分胁迫, 且12月最高气温过高会加快呼吸速率过多的消耗积累的光合产物, 因此上年12月最高气温与油松生长负相关, 但王婷等的研究表明油松生长与12月最高气温正相关^[38], 可能与其研究区12月降水量相对较大有关(宝曼自然保护区12月多年平均降水约15 mm, 本地区只有5.01 mm), 12月降水过多与低温共同作用会使树木遭受冻害。

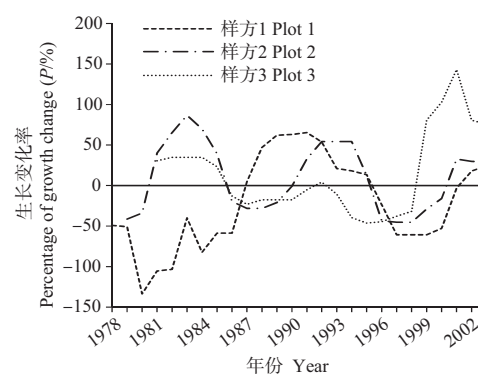


图4 吉县3个样方油松的生长率变化率。

Fig. 4 Percentage of growth change of *Pinus tabulaeformis* in the three plots of Jixian County.

3.2 生长释放与抑制特征解释

1978-1986年期间样方1出现生长抑制, 1978-1981年期间3个样方内树木年轮宽度指数都在减小, 这期间1月降水呈增加趋势(图3), 7月降水在减少(图5), 这两个气象因子变化均不利于油松的生长; 1981-1986年气候条件较好, 12月最高气温迅速降低, 10月最高气温在波动中缓慢上升(图3), 1月降水有波动但从总体来看降水较少(图5), 这些气象条件的变化均有利于油松的生长, 样方2与样方1立地条件相似, 处

于生长释放期, 样方3生长较好, 因此这期间样方1的生长抑制不是由于气候因素导致的, 另外吉县红旗林场的间伐开始于1988年, 这段时间林分未进行过间伐, 因此这次的生长抑制也不会是大强度的采伐导致林木生长不良^[39], 应该是由其他方面的原因引起的. 样方1在1988-1992年发生了一次轻度释放, 虽然未达到中度释放也已接近中度释放, 同时样方2、3生长都在减缓, 1988年样方1进行过间伐, 因此这次的生长释放应是间伐之后林内光热条件改善, 树木之间生长竞争减弱而产生的^[15-16].

1981-1985年期间样方2发生了生长释放, 样方3虽然没有达到生长释放的标准, 其生长速率也处于大幅的增长中(图4). 从图3中可看出在1981-1983年1月降水减少, 避免了低温冻害, 12月最高气温呈降低趋势, 土壤能够长时间地蓄持降水, 因此能够在生长季初期提供更多的水分, 从而极大地促进了林木生长^[40]; 同时期长治市的树木也表现出生长释放^[11], 因此样方2的这次生长释放较大的可能是由于气候条件适宜产生的.

1994-1998年期间样方3发生生长抑制, 1996-1998年期间3个样方的生长速率都为负值, 1996-1998年之间1月降水增加, 7月降水减少, 上年12月最高气温略有增加(图5), 而这几个因子均与油松的生长呈负相关, 样方3与7月降水、上年12月最高气温相关性更高, 受到这2个因素的影响更大, 这2个因素的变化都会加剧水分的亏缺, 且这期间山西省干旱事件频繁发生^[41-42], 张启等的研究也表明在1994-1997年山西长治市的树木生长受到干旱抑制^[12]; 样方3处于阳面, 样方1和2处于阴面, 阳面相比于阴面水分条件稍差一些^[43], 样方3对水分限制的反应比样方1和2更加敏感一些, 因此样方3的这次生长抑制主要是气候因素影响水分供应所导致的.

1999-2003样方3发生了中度生长释放, 而样方1在1999-2001年生长变化率为负值, 样方2在1999-2000年生长变化率为负值, 3个样方的生长变化不相同, 而气候因素导致的生长释放在大范围内具有一致性^[25], 所以这次生长释放与气候因素的关系较小, 另外据调查样方3在1996年进行过一次间伐, 但1997年为山西的大旱年^[41], 干旱事件对树木生长的影响能够持续几年^[44-45], 因此1997年和1998年未能表现出生长释放. 刘禹等的研究表明1999-2001年由于干旱汾河流域的油松生长呈下降趋势^[46], 但这期间样方3处于生长释放期, 显然这是间伐的作用, 2002年之后1月降水较低, 7月降水逐渐升高(图5), 气候条件趋向于有利的方向变化, 样方1和2的生长率也变为正值, 但是样方3的生长变化率大于样方1和2的生长变化率, 因此这这一次的生长释放应是气候条件改善和间伐共同作用的结果.

从气候对径向生长过程的影响来看, 1月降水增加对油松的生长不利, 1月降水与1月的低温相互作用会对树木的生长造成不利影响, 7月降水增加能够促进光合作用形成宽轮, 10最高气温升高有利于提高光合效率.

从间伐记录来看, 样方1和2在1988年均进行过间伐, 但是样方1在1988年出现了生长释放现象, 而样方2未表现出生长释放, 而是在1988-1989年之间生长增加, 之后又处于生长速率增减的波动期(图1), 1992年之后生长大幅增加接近生长释放(连续4年的生长变化率均大于25%), 这可能与样

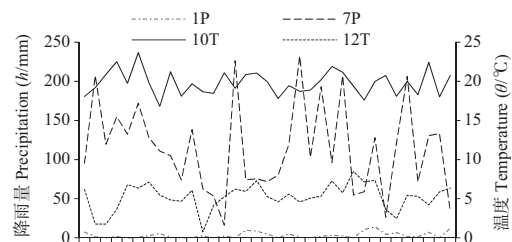


图5 吉县气温和降雨变化. 1P与7P分别为当年1月和7月的降水, 12T为上一年12月的最高气温, 10T为当年10月最高温.

Fig. 5 The variation in temperature and precipitation of Jixian County. 1P and 7P are the precipitation in January and July of the current year, respectively, 12T is the maximum temperature in December of last year, and 10T is the maximum temperature in October of the current year.

方1和2的立地条件差异有关, 样方2坡度比样方1的坡度陡, 降雨入渗速率小, 因此土壤水分条件差^[47], 树木的生长环境差, 对气候的波动有更明显的反应, 年轮气候学中对古气候重建时往往也会选取受到某一气候因子限制的树木年轮, 树木对这一气候因子的变化响应更敏感^[48], 由图1也可看出样方2中年轮宽度序列对气候变化更敏感.

从间伐的影响来看, 间伐能够在一段时间内促进树木的生长, 有研究表明间伐后树木生长增加能够持续20年, 但并不多见^[49]. 本文中样方1间伐后5年内能够维持较高的生长率(图4), 样方1间伐后生长变化率5年内大于47%, 说明在该地区正常情况下油松间伐产生的生长释放效应能够维持5年, 样方2间伐后产生的生长释放效应持续了5年. Laurent等的研究表明间伐促进生长的效应能够维持6年, Anning等的研究发现在间伐后5年内树木表现出生长释放^[50-51], 均与本文的结果相近.

4 结论

本研究通过对3个不同密度样方内的油松林进行生长释放和生长抑制分析, 得到如下结论:

(1) 油松的生长释放或抑制反映了其生长环境条件的变化程度与方向. 在1978-2003年之间样方1出现1次中度生长抑制、1次轻度生长释放, 样方2出现了1次轻度生长释放, 样方3出现了1次轻度生长抑制、1次中度生长释放. 这几次生长抑制主要是气候条件变差所导致的, 而生长释放效应与气候条件变得更加适宜油松生长及间伐改善油松生长环境条件都有关系.

(2) 水热条件的适宜性对油松生长的抑制或释放具有重要的影响, 气候变化引起不同年份的水热组合条件波动影响油松的生长过程. 该地区1月降水与低温复合效应会限制油松的生长, 7月降水增多和10月最高气温升高有利于油松生长, 12月最高气温的升高对油松生长不利.

(3) 油松间伐后生长释放效应能够维持5年, 可作为该地区油松林分密度调控的参考依据之一.

(4) 本研究选取的人工林年龄较短, 年轮宽度序列记录的气候变化与间伐历史较短, 今后可选取林龄较长的经过不

同强度间伐的人工林或天然林,以反映气候变化趋势对油松林的生长影响。

致谢 感谢刘琪璟老师、高露双老师、于健师兄在论文写作与数据分析中给予指导。感谢山西吉县森林生态气候国家野外科学观测研究站提供技术支持。

参考文献 [References]

- 焦醒, 刘广全. 陕西黄土高原油松生长状况及其影响因子分析[J]. 西北植物学报, 2009, **29** (5): 1026-1032 [Jiao X, Liu GQ. Growth and its influencing factors of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau of Shaanxi Province [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2009, **29** (5): 1026-1032]
- 罗伟祥, 刘广全, 李嘉珏. 西北主要树种培育技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 238-245 [Luo WX, Liu GQ, Li JY. Northwest Major Tree Cultivation Techniques [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 238-245]
- 玉宝, 王百田. 山西省吉县刺槐、油松人工林密度动态调控技术[J]. 东北林业大学学报, 2012, **40** (7): 18-21 [Yu B, Wang BT. Dynamic control technology of density of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantations in Jixian County of Shanxi Province [J]. *J Northeast For Univ*, 2012, **40** (7): 18-21]
- 江萍. 不同林龄油松人工林抚育间伐效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015 [Jiang P. Studies on thinning effects of different aged *Pinus tabulaeformis* plantation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015]
- Glitzenstein JS. Disturbance, succession, and maintenance of species diversity in an east Texas Forest [J]. *Ecol Monogr*, 1986, **56** (3): 243-258
- Payette S, Filion L, Delwaide A. Disturbance regime of a cold temperate forest as deduced from tree-ring patterns: the Tantara Ecological Reserve, Quebec [J]. *Can J For Res*, 1990, **20** (6): 607-608
- Abrams MD, Orwig DA. A 300-year history of disturbance and canopy recruitment for co-occurring white pine and hemlock on the Allegheny Plateau, USA [J]. *J Ecol*, 1996, **84** (3): 353-363
- Abrams MD, Van de GS, Dodson RC, Copenheaver CA. The dendroecology and climatic impacts for old-growth white pine and hemlock on the extreme slopes of the Berkshire Hills, Massachusetts, U. S. A. [J]. *Can J Bot*, 2000, **78** (7): 851-861
- Lafon CW, Speer JH. Using dendrochronology to identify major ice storm events in oak forests of southwestern Virginia [J]. *Clim Res*, 2002, **20** (1): 41-54
- Shumway DL, Abrams MD, Ruffner CM. A 400-year history of fire and oak recruitment in an old-growth oak forest in western Maryland, U. S. A. [J]. *Can J For Res*, 2001, **31** (8): 1437-1443
- 王树芝, 赵秀海. 树轮生态学研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, **23** (2): 17-21 [Wang SZ, Zhao XH. Advances in dendroecology research [J]. *World For Res*, 2010, **23** (2): 17-21]
- 张启, 闫明, 梁寒雪. 山西省长治市过去150年森林的生长抑制和释放历史[J]. 生态学报, 2017, **37** (9): 3115-3123 [Zhang Q, Yan M, Liang HX. History of growth suppression and release events in forests in Changzhi Prefecture, Shanxi Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (9): 3115-3123]
- 赵玉芳. 黑龙江省红松生长释放判定及解释[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011 [Zhao YF. Growth release determination and interpretation of Korean Pine in Heilongjiang Province, China [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2001]
- Zielonka T, Holeska J, Fleischer P, Kapusta P. A tree-ring reconstruction of wind disturbances in a forest of the Slovakian Tatra Mountains, western Carpathians [J]. *J Veg Sci*, 2010, **21** (1): 31-42
- 幸福, 包维楷, 庞学勇, 闫晓丽, 刘鑫. 云杉人工纯林中树木个体径向生长过程及林窗疏伐后的释放效应[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (2): 262-271 [Xing F, Bao WK, Pang XY, Yan XL, Liu X. Radial growth process of *Picea asperata* and its response to gap model thinning within the single spruce plantation at the western Sichuan, China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (2): 262-271]
- 蒋子涵, 金光泽. 择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响[J]. 生态学报, 2010, **30** (21): 5843-5852 [Jiang ZH, Jin GZ. Effects of selection cutting on diameter growth and vertical growth among major tree species in the mixed broadleaved-Korean pine forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (21): 5843-5852]
- 于显威. 油松和樟子松人工林水分生产函数及结构调控模型的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012 [Yu XW. Study on *P. tabulaeformis* and *P. sylvestris* var. *mongolica* artificial forest water production function and stand structure control model [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012]
- Lorimer CG, Dahir SE, Singer MT. Frequency of partial and missing rings in *Acer saccharum* in relation to canopy position and growth rate [J]. *Plant Ecol*, 1999, **143** (2): 189-202
- Grissino-Mayer HD. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA [J]. *Tree-Ring Res*, 2001, **57** (2): 205-221
- Cook ER, Holmes RL. Users Manual for ARSTAN [M]. Tucson: Laboratory of Tree-ring Research, University of Arizona, 1986
- Fritts HC. Tree Rings and Climate [M]. London: Academic Press, 1976
- Schweingruber FH. Tree rings and environment: dendroecology [M]. Vienna: Paul Haupt Publishers, 1996
- Rydval M, Druckenbrod D, Anchukaitis KJ, Wilson R. Detection and removal of disturbance trends in tree-ring series for dendroclimatology [J]. *Can J For Res*, 2016, **46** (3): 387-401
- Nowacki GJ, Abrams MD. Dial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks [J]. *Ecol Monogr*, 1997, **67** (2): 225-249
- Rubino DL, Mccarthy BC. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events [J]. *Dendrochronologia*, 2004, **21** (3): 97-115
- 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[J]. 生态学报, 2011, **31** (5): 1230-1239 [Wang XC, Zhao YF. Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (5): 1230-1239]
- 陶发墙, 高露双, 王晓明. 雌雄异株植物生长释放/抑制判定及其气候解释[J]. 北京林业大学学报, 2015, **37** (3): 111-117 [Tao FQ, Gao LS, Wang XM. Determination and climatic response of growth release / inhibition of dioecious species [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37** (3): 111-117]
- Kohler MA. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making require adjustments [J]. *Bull Am Meteorol Soc*, 1949, **82**: 96-97
- 于健, 刘琪璟, 徐倩倩, 罗春旺, 王红梅, 李俊清. 长白山东坡植被指数变化及其对气候变化的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2015,

- 21 (2): 323-332 [Yu J, Liu QJ, Luo CW, Wang HM, Li JQ. Variation of vegetation index in response to climate change on the eastern slope of Changbai Mountain, Northeast China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (2): 323-332]
- 30 Zhang F, Gou XH, Liu WH, Levia DF, Li YJ. Individual and time-varying tree-ring growth to climate sensitivity of *Pinus tabulaeformis* Carr. and *Sabina przewalskii* Kom. in the eastern Qilian Mountains, China [J]. *Trees*, 2013, **27** (2): 359-370
- 31 Wang HQ, Chen F, Zhang RB, Qin L. Seasonal dynamics of vegetation of the central Loess Plateau (China) based on tree rings and their relationship to climatic warming [J]. *Environ Dev Sustain*, 2017, **19**: 2535-2546
- 32 Liu YU, Shi JF, Shishove V. Reconstruction of May-July precipitation in the North Helan Mountain, Inner Mongoliasince A. D. 1726 from tree-ring late-wood widths [J]. *Chin Sci Bull*, 2004, **49** (4): 405-409
- 33 陈振举, 何兴元, 陈玮, 孙雨, 张春涛, 付印东, 田伟, 刘铁红. 沈阳福陵油松年轮对全球性气温波动的响应[J]. 应用生态学报, 2007, **18** (9): 1945-1952 [Chen ZJ, He XY, Chen W, Sun Y, Zhang CT, Fu YD, Tian W, Liu TH. Responses of Chinese pine tree ring in Shenyang suburb (Fu Mausoleum) to global temperature fluctuation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18** (9): 1945-1952]
- 34 Fang KY, Guo ZT, Chen DL, Linderholm WH, Li JB, Zhou FF, Guo GY, Dong ZP, Li YJ. Drought variation of western Chinese Loess Plateau since 1568 and its linkages with droughts in western North America [J]. *Clim Dyn*, 2017, **49**: 3839-3850
- 35 Cai Q, Liu Y. Climatic response of Chinese pine and PDSI variability in the Middle Taihang Mountains, North China since 1873 [J]. *Trees*, 2013, **27** (2): 419-427
- 36 姜庆彪, 高露双, 王晓明, 王雨茜. 浑善达克沙地油松树轮宽度与气候因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **32** (12): 3859-3865 [Jiang QB, Gao LS, Wang XM, Wang YQ. Growth response to climate in Chinese pine as a function of tree diameter [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **32** (12): 3859-3865]
- 37 Zhang F, Gou XH, Liu WH, Levia DF, Li YJ. Individual and time-varying tree-ring growth to climate sensitivity of *Pinus tabulaeformis* Carr. and *Sabina przewalskii* Kom. in the eastern Qilian Mountains, China [J]. *Trees*, 2013, **27** (2): 359-370
- 38 杨国馨, 叶永忠, 袁志良, 潘娜, 王婷. 宝天曼自然保护区油松生长释放研究[J]. 河南科学, 2012, **30** (1): 58-61 [Yang GX, Ye YZ, Yuan ZL, Pan N, Wang T. Research on growth release for *Pinus tabulaeformis* Carr. in Baotianman National Reserve [J]. *Henan Sci*, 2012, **30** (1): 58-61]
- 39 郝清玉, 周玉萍, 孙显林. 采伐作业产生的大林窗对阔叶林天然更新的影响[J]. 吉林林学院学报, 1998, **14** (2): 69-73 [Hao QY, Zhou YP, Sun XL. Effects of larger gaps caused by harvesting on natural regeneration in broad-leaved forest [J]. *J Jilin For Univ*, 1998, **14** (2): 69-73]
- 40 张同文, 袁玉江, 魏文寿, 喻树龙. 内蒙古东北部莫尔道嘎地区树轮年表的建立[J]. 干旱区资源与境, 2009, **23** (12): 177-182 [Zhang TW, Yuan YJ, Wei WS, Yu SL. Establishment of tree-ring chronology in the Morghoogar region of northeastern Inner [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2009, **23** (12): 177-182]
- 41 周晋红, 李丽平, 秦爱民. 山西气象干旱指标的确定及干旱气候变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, **28** (3): 240-247 [Zhou JH, Li LP, Qin AM. Determination of meteorological drought index in Shanxi and study on drought climate change [J]. *Agric Res Arid Regions*, 2018, **28** (3): 240-247]
- 42 王伟斯. 近50年山西省极端天气气候与灾害研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2014 [Wang WS. The research of Shanxi in recent 50 years on extreme weather and disasters [D]. Chengdu: Chengdu University of Information Technology, 2014]
- 43 王梅, 张文辉. 不同坡向人工油松林生长状况与林下物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2009, **29** (8): 1678-1683 [Wang M, Zhang WH. growth and species diversity of *Pinus tabulaeformis* artificial forest on different slope aspects [J]. *Acta Bot Bor -Occid Sin*, 2009, **29** (8): 1678-1683]
- 44 Clarke J. Erratum to: growth response to climate and drought in *Pinus nigra* Arn. trees of different crown classes [J]. *Trees*, 2008, **22** (3): 363-373
- 45 Vitali V, Forrester DI, Bauhus J. Know Your neighbours: drought response of Norway spruce, silver fir and Douglas fir in mixed forests depends on species identity and diversity of tree neighbourhoods [J]. *Ecosystems*, 2018 (2): 1-15
- 46 Sun J, Liu Y. Responses of tree-ring growth and crop yield to drought indices in the Shanxi Province, North China [J]. *Int J Biometeorol*, 2014, **58** (7): 1521-1530
- 47 李义豪, 李传哲, 穆文彬, 刘佳, 严登华. 不同坡度和前期土壤含水率下裸地和草地的降雨产流试验分析[J]. 科学技术与工程, 2017, **17** (14): 45-53 [Li YH, Li CZ, M WB, Liu J, Yan DH. Analysis on rainfall runoff test of bare land and grassland under different slopes and soil moisture content [J]. *Sci Technol Energ*, 2017, **17** (14): 45-53]
- 48 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京: 气象出版社, 1990 [Wu XD. Tree Rings and Climate Change [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 1990]
- 49 Thorpe HCTC, Thomas SCTC, Caspersen JPCP. Residual-tree growth responses to partial stand harvest in the black spruce, boreal forest [J]. *Can J For Res*, 2007, **37** (9): 1563-1571
- 50 Laurent M, Antoine N, Joel G. Effects of different thinning intensities on drought response in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) [J]. *For Ecol Manage*, 2003, **183** (1): 47-60
- 51 Anning AK, Mccarthy BC. Long-term effects of prescribed fire and thinning on residual tree growth in mixed-oak forests of southern Ohio [J]. *Ecosystems*, 2013, **16** (8): 1473-1486