



应用与环境生物学报

Chinese Journal of Applied and Environmental Biology

ISSN 1006-687X, CN 51-1482/Q

《应用与环境生物学报》网络首发论文

题目: 晋西黄土区油松林的生长释放与生长抑制
作者: 何如梦, 王百田, 于显威, 王旭虎, 刘涛, 王岩松, 刘臻
DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.03002
收稿日期: 2018-03-01
网络首发日期: 2018-06-04
引用格式: 何如梦, 王百田, 于显威, 王旭虎, 刘涛, 王岩松, 刘臻. 晋西黄土区油松林的生长释放与生长抑制. 应用与环境生物学报.
<https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2018.03002>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

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 气候变化对植被生长的影响日益得到关注,人为活动对植被的干扰越来越多,在人工林面积不断增加的背景下了解气候变化与抚育间伐对林木生长的影响十分必要。为了探究气候变化和人类活动对油松林生长的影响,本文选取黄土高原东部山西省临汾市吉县人工油松林中三个不同密度的林分,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1月分降水和上年12月的最高温负相关,与7月的降水和10月的最高温正相关;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使树木生长受到抑制,间伐抚育在一段时间内能够促进树木快速生长,上述研究结果能够为后期的林业管理决策提供一定的参考。

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

Growth Release and Growth Inhibition of *Pinus tabulaeformis* Forest in the Loess Plateau of Western of 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 The impacts of climate change on vegetation growth are increasingly paid attention, and human activities interfere with the vegetation. It is essential to discuss that the effects of climate change and thinning activity on forest growth in the context of expanding 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 derived from three different density areas of *P. tabulaeformis* forest at Lin Fen 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 the precipitation in January and the monthly maximum temperature in December of the previous year, while positively correlated with precipitation in July and the monthly maximum temperature in October. The phenomena of growth release and inhibition could be attributed to the impacts of climate change and thinning during 1978-2003. Plot 1 showed a moderate growth inhibition period when the growth rate was less than -50%, and a growth release caused by thinning. The growth rate was greater than 47% in the period of growth release. Besides, there existed a slight growth release 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 rate less than -32% and a moderate growth release by

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

*国家重点研发计划(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)

the interaction of cutting and comfortable counterpart made growth 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 over time. The results above can provide a reference for local forest management.

Keywords the Loess Plateau; *P. tabulaeformis*; plantation forest; radial growth process; growth release; growth suppression

黄土高原总面积达 $62.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，这里沟壑纵横，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(*P. tabulaeformis*)由于其耐干旱、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，如由于密度过大导致树木生长受到抑制、林分的退化，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于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，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，发现由于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几乎黑河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 通过生长释放分析发现由于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，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。

本研究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。本文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以期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 62km，南北宽 48km，总面积 1777.26 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 2538h，大于 10 的有效积温 3361.5。无霜期多年平均 172d，年均气温 10.2，年均日较差 11.5，年均降水 522.8mm。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(*P. tabulaeformis*)、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(*Quercus*

wutaishansea Mary), 灌木树种主要有沙棘 (*Hippophae rhamnoides*), 虎棒子(*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, 三个样地的立地条件详细情况如表 1 所示。本研究在 2008 年时分别选择三种不同密度的油松林样地, 设置三个 20m×20m 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。

表 1 样地概况

Table1 Survey of sample plot

样地 Plot	经度 Longitude(E)	纬度 Latitude(N)	坡度 Slop	密度 (株/hm ²) Density (N/hm ²)	坡向 Aspect	海拔/m Elevation/m	间伐时间 Cutting time	年龄/a Age/a
样方 1	N36°12'27"	E110°47'53"	20°	1075	阴坡	1339	1988、2006	35
样方 2	N36°12'26"	E110°48'29"	30°	1875	阴坡	1318	1988	34
样方 3	N36°12'22"	E110°48'51"	15°	3275	阳坡	1351	1996	32

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 Lintab 测量年轮宽度, 然后经过 COFECHA 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], 年表更能够反应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 的方法来计算油松当年年轮宽度指数序列的生长变化百分率 GC%^[24]。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。

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

(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%、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]。

本文使用 SPSS17 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科学科学数据中心, 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 研究结果

2.1 树轮数据

利用 ARSTAN 程序建立了三个样方的年表, 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, 因此信噪比普遍较低, 最高只有 6.27。由于林分密度相对较高所以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。

表 2 吉县 3 个油松 STD 年表特征值

Table 2 Statistics characteristics of three chronologies of *P. tabulaeformis* in Jixian county

主要特征参数	样方 1	样方 2	样方 3
	Plot1	Plot2	Plot3
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

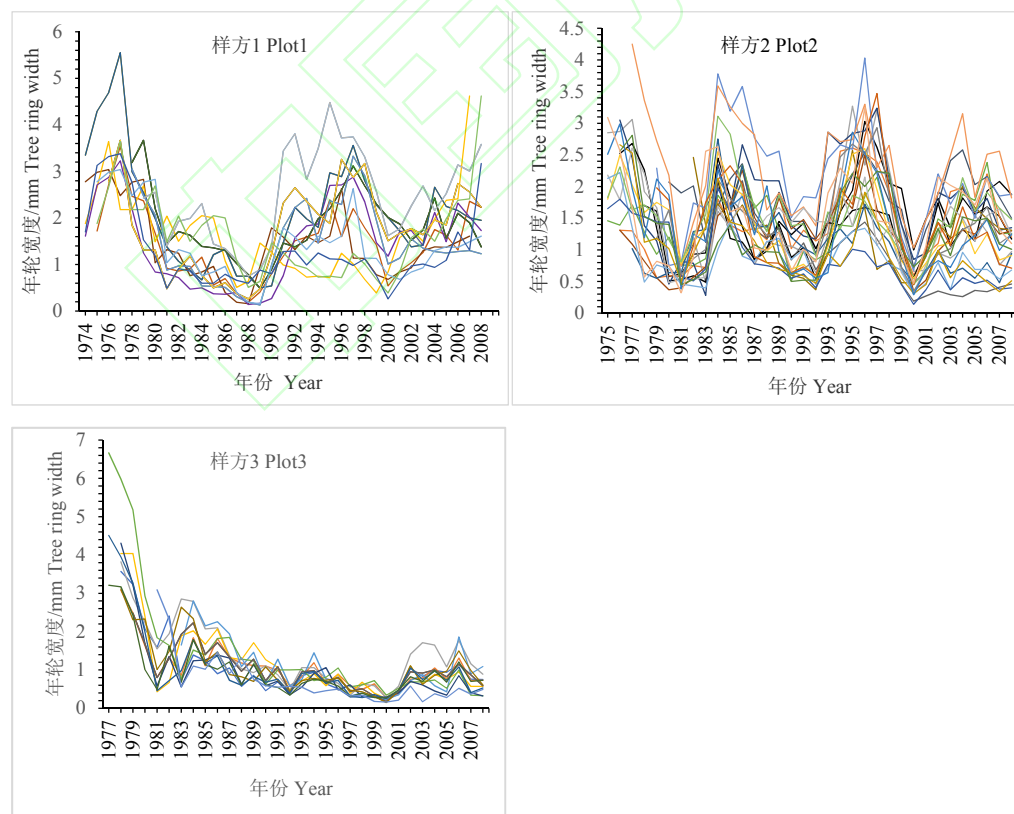


图 1 吉县三个样方年轮宽度曲线图

Fig.1 Tree ring width of three plots in Jixian County

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 月的气温降水有较高的相关性^[30-31]，因此选择上年 11 月份到当年 10 月的降雨、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。

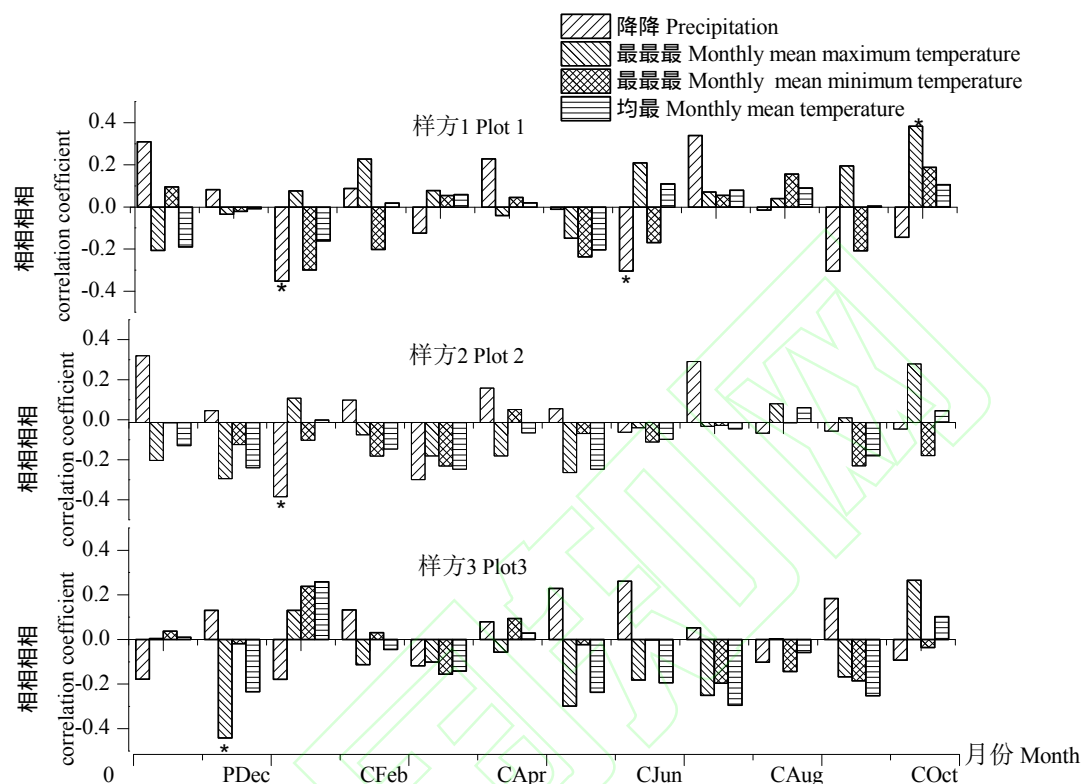


图 2 吉县油松径向生长与气候因子的相关性

Fig.2 Correlation between radial growth and climatic factors of *P. tabulaeformis* in Jixian County

相关分析结果中，*表示相关分析显著的月份 ($P < 0.05$, 双尾检验) ($P < 0.01$, 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。

In the correlation analysis results, asterisks represent significant effects ($P < 0.05$, two-tailed test), ($P < 0.01$, 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.

综合三个年来看 (图 2)，油松生长与 1 月份的降水 (1P) 呈现负相关，其中样方 1 和 2 达到显著水平,与 10 月的最高温 (10H) 呈正相关，样方 1 中油松的生长与 10H 显著正相关；油松生长与 7 月的降雨 (7P) 正相关，其中样方 1 中油松生长与 7P 显著正相关；油松生长与上年 12 月的最高温度 (12T) 负相关，其中样方 3 中油松生长与 12T 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 1P 和 12T 负相关，同时与 10H 和 7P 正相关，因此计算这 4 个气候因子的变化率。如图 3 所示 1P 在 1978 年到 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 1P 变化率的变化幅度最大，但是 1P 降雨量比较小，变化的范围较小；7P 与 1P 相比变化率的波动不明显，但是 7 月的降雨量较大变化范围较大；12T 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；10H 变化相对缓和。

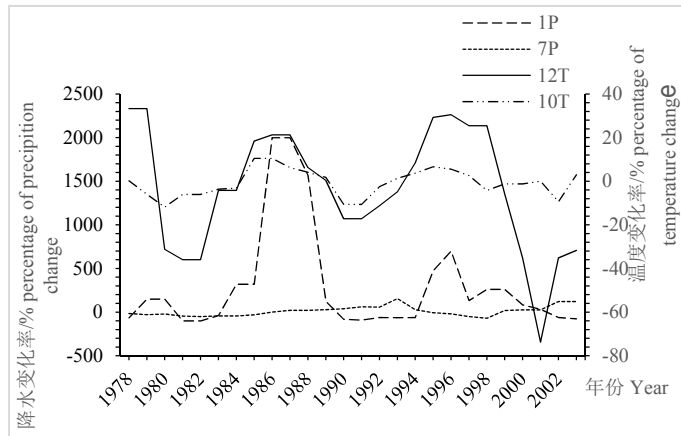


图3 吉县气温和降水变化率

Fig.3 Percentage of temperature and precipitation change in Jixian County

2.4 生长释放和抑制

如图4所示三个样方生长变化率有相似之处，但由于干扰其生长变化率变化并不一致。样方1在1978-1986年期间出现了一次中度生长抑制，1988-1992年期间出现了一次轻度生长释放；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。

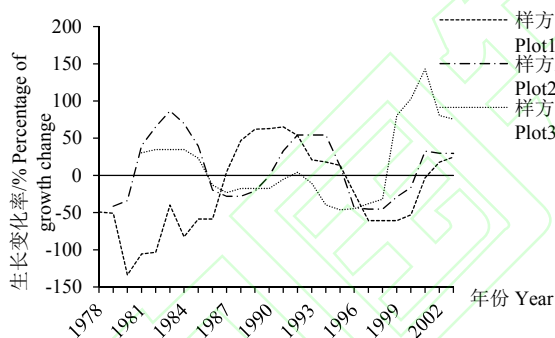


图4 吉县红旗林场三个样方油松的生长率变化

Fig.4 Percentage of growth change of *P. tabulaeformis* among three plots of Hongqi Farm of Jixian County

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，1P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]，陈振举研究表明油松年轮宽度指数与1P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月降雨负相关^[34]；7P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，降雨充足，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月的降雨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，会加剧第二年生长初期的水分胁迫，且12T过高会加快呼吸速率过多的消耗积累的光合产物，因此12T与油松生长负相关，但王婷等的研究表明油松生长与12T正相关，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15mm，本地区只有5.01mm）^[38]，12月降水过多与低温共同作用会使树木遭受冻害。

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 年期间三个样方内树木年轮宽度指数都在减小, 这期间 1P 呈增加趋势(图 3), 7P 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, 12T 迅速降低, 10H 在波动中缓慢上升(图 3), 1P 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, 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 1P 减少, 避免了低温冻害, 12T 呈降低趋势, 土壤能够长时间的蓄持降水, 因此能够在生长季初期提供更多的水分, 从而极大的促进了林木生长^[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 年期间三个样方的生长速率都为负值, 1996-1998 年之间 1P 增加, 7P 减少, 上年 12T 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 7P、上年 12T 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^[11]; 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, 三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, 另外据调查可知样方 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 1P 较低, 7P 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。

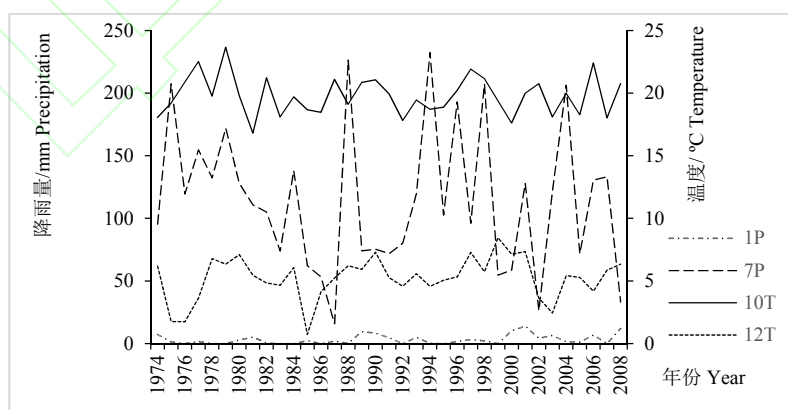


图 5 吉县气温和降雨变化图

Fig.5 The variation of temperature and precipitation of Jixian County

从气候对径向生长过程的影响来看 1P 增加对油松的生长不利, 1P 与 1 月的低温相互作用会对树木的生长造成不利影响, 7P 增加能够促进光合作用形成宽轮, 10H 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 年之后生长大幅的增加接近生长释放(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。Misson 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

本文通过对 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。这几次的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的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 月份降雨与 1 月份的低温复合效应会限制油松的生长,7 月份降雨和 10 月份最高温度升高有利于油松生长,12 月最高温度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) 本文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。

参考文献 [References]

- 1 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 (05):1026-1032 [Jiao X, Liu GQ. Growth and Its Influencing Factors of *Pinus tabulaeformis* in the Loess Plateau of Shaanxi Province [J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2009, 29 (05):1026-1032]
- 2 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]
- 3 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 Bao, 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]
- 4 江萍. 不同林龄油松人工林抚育间伐效应研究[D]. 北京林业大学, 2015 [Studies on thinning effects of different aged [D]. Beijing Forestry University, 2015]
- 5 Glitzenstein JS. disturbance, succession, and maintenance of species diversity in an east Texas Forest [J]. *Ecol Monogr*, 1986, 56 (3):243-258
- 6 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

- 7 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
- 8 Abrams MD, Van d 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
- 9 Lafon C W, Speer J H. Using dendrochronology to identify major ice storm events in oak forests of southwestern Virginia [J]. *Clim Res*, 2002, **20** (1):41-54
- 10 Durland L Shumway, Marc D Abrams, Charles M Ruffner. 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
- 11 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]
- 12 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** (09):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** (09):3115-3123
- 13 赵玉芳. 黑龙江省红松生长释放判定及解释[D]. 东北林业大学, 2011 [Zhao YF. Growth release determination and interpretation of Korean Pine in Heilongjiang Province, China [D]. Northeast Forestry University, 2011]
- 14 Zielonka T, Holeksa 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
- 15 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** (02):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]
- 16 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]
- 17 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 Forestry University]
- 18 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
- 19 Grissino-Mayer HD. Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA [J]. *Tree-Ring Res*, 2001, **57** (2):205-221
- 20 Cook ER, Holmes RL. Users manual for ARSTAN. Tucson: Laboratory of tree-ring research. university of Arizona, 1986.
- 21 Fritts HC. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 1976
- 22 Schweingruber FH. Tree rings and environment: dendroecology [J]. *Tree Rings & Environment Dendroecology*, 1996
- 23 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)
- 24 Nowacki GJ, Abrams MD. Dial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks [J]. *Ecol Monogr*, 1997, **67** (2): 225-249
- 25 Rubino DL, Mccarthy BC. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events [J]. *Dendrochronologia*, 2004, **21** (3):97-115
- 26 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** (05):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]
- 27 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** (03):111-117 [Tao FQ,

- Gao LS, Wang XM. Determination and climatic response of growth release /inhibition of diecious species [J]. *J Beijing For Univ*,2015,**37** (03):111-117]
- 28 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
- 29 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 tabuliformis* 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, Q 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 JangFeng ,Shishove V Reconstruction of May-July precipitation in the north Helan Mountain, Inner Mongoliasince A.D.1726 from tree-ring late-wood widths[J]. *科学通报(英文版)*, 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 tabuliformis* 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. The Influence of Dalin window caused by harvesting on the natural regeneration of broadleaved 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]. *干旱区资源与环境*,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.
- 42 王伟斯. 近 50 年山西省极端天气气候与灾害研究[D].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 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. Boreal.-Occident.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. Tech. Engrg.*, 2017, **17** (14):45-53]
- 48 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 气象出版社, 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 Mgt*, 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

