

DOI: 10.5846/stxb201612222650

张启, 方欧娅. 山西忻州地区 1900—2012 年典型森林的健康历史. 生态学报, 2018, 38(1): 236–243.

Zhang Q, Fang O Y. History of forest health from 1900 to 2012 in Xinzhou Prefecture, Shanxi Province, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 236–243.

山西忻州地区 1900—2012 年典型森林的健康历史

张 启¹, 方欧娅^{2,*}

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

摘要:健康的森林对维持其区域生态系统服务起着至关重要的作用, 了解树木的生长历史对评估气候变化背景下森林的健康状况具有促进作用。选择山西高原中北部忻州地区保存较好的 4 个森林为研究对象, 利用树木年轮学方法分析其生长变化特征, 获得了该地区森林健康的时间和空间特征。结果表明: 该地区森林在过去 1 个世纪中, 存在 3 次不健康事件 (1910—1940、1970—1987 和 1990—2012 年) 且在空间上表现出明显的同步性, 不同时期的不健康事件持续时间和强度不尽相同, 1930s 的不健康事件持续时间最长也最为显著。树木径向生长与气象观测资料的相关分析显示, 该地区森林生长主要与当年 5—6 月份温度呈负相关, 与 7 月份降水和 5—9 月 PDSI 指数呈正相关。生长季持续的高温或降水减少造成的极端干旱事件是不健康事件空间一致性的主要驱动力, 各采样点树种以及林分组成差异是影响时间特征不一致的可能原因。研究结果提供的森林健康历史数据对评估极端气候条件对森林健康生长的影响及制定合理的森林保护措施具有积极的现实意义。

关键词:森林健康; 生长历史; 山西忻州; 树木年轮

History of forest health from 1900 to 2012 in Xinzhou Prefecture, Shanxi Province, China

ZHANG Qi¹, FANG Ouya^{2,*}

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

Abstract: Forest health is a serious problem worldwide. Knowledge of the intensity and causes of rapidly declining forests is important for managing various forest types under the scenario of climate change. In the present study, we report on the health conditions of four young conifer forests by applying dendrochronological techniques to measure unexpected growth decline in Xinzhou District, northern Shanxi Plateau. A total of 86 samples in the form of increment cores were obtained from the study sites. The widths of tree-rings from all the samples were measured and cross-dated, then each individual tree series was standardized to identify health conditions using spatial characteristics of temporal growth. We defined unhealthy tree growth intervals as being a decrease in the growth of the individual (tree-ring index < 0.9) for at least five years when the mean tree-ring index was less than 0.7 and at least one year of tree-ring index values reached a minimum of 0.5. We calculated the percentage of trees that were unhealthy in each year, and defined an unhealthy event for the site if greater than 30% of the trees were in decline. We found three major unexpected decline growth events in the majority of individual trees in the four forests, these being 1910—1940, 1970—1987, and 1990—2012. However, the growth declines in each forest showed deviations in intensity and duration such as declines were more vigorous in the KeLan forest during the 1930s than in the other forests. To better understand the causes of the unhealthy events, a correlation analysis was performed for

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31330015)

收稿日期: 2016-12-22; 网络出版日期: 2017-09-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: oyfang@ibcas.ac.cn

the three tree ring width chronologies and the meteorological records. The correlation coefficients showed that forest growth was negatively associated with May-June temperatures. However, precipitation revealed positive correlation in July and the Palmer Drought Severity Index showed positive correlation over the growing season of May-September. To validate these results, we compared our study with historical records and local paleoclimate studies. The drought events recorded in the historical documents and other paleoclimate reconstructions reasonably matched our results. These results suggest that extreme drought events caused by persistent high temperature or reduction of precipitation in the growing season are the main driving factors for radial growth decreases in trees, which was the main reason for the spatial coherence of unhealthy events. The differentiation of local stand characteristics or tree species might play a role in the inconsistency of the time characteristics. Therefore, the present study provides useful information for forest health, which has positive and realistic significance for assessing the impact of extreme climatic conditions on the healthy growth of forests and for developing reasonable forest protection measures.

Key Words: forest health; tree ring; Xinzhou county; growth history

森林健康是森林生态系统健康与恢复的简称,是指森林在发挥必要的生态服务功能的同时,保持其自身良性存在和更新的状态^[1]。近年来由于全球气候变化所带来的高温和干旱等极端气候事件的频发,使得世界上大多数国家的森林生态系统都存在不同程度的退化^[2-4],主要表现为树木在生长发育过程中的生理机能下降、生产力降低、生长发育滞缓或死亡等现象。在我国,森林覆盖率已由建国初期的 12.5% 上升至 2013 年的 21.63%^[5]。然而与快速恢复性增长的森林覆盖率呈鲜明反差的是,许多现存的森林处于破碎化或次生演替状态。中国森林退化问题突出,森林健康状况堪忧,影响了森林发挥必要的生态服务功能^[1],使得森林健康的研究十分迫切。

目前国内外学者对森林健康的研究提出了许多评价方法^[6-8],但是由于对森林群落缺乏长期观测,人们难以得知其健康历史。树木年轮记录了树木个体的生长历史,具有精确定年、分辨率高、连续性强和复本量好等特点^[9],在反映过去森林衰退方面有着突出的贡献^[10-12]。研究表明,树木在生长过程中会受到不同范围生物和非生物多元化组合的影响,可能出现树冠枯死、低生长或死亡等不健康生长的现象^[4,13-14]。由于限制因子发生的顺序、时间和强度的不同,其影响可能是持续或者短暂的,森林健康在空间上的表现较为复杂^[2,15-17]。因此,过去的森林不健康事件在发生程度和持续时间上有何特征是一个亟待解决的生态学问题。对森林健康历史时空特征以及其驱动因子的深入研究很大程度上丰富了历史时期森林生态学特征的研究。

忻州地处山西高原中北部,位于吕梁山生态脆弱区。针对上述问题,我们该选择地区保存较好的 4 个森林为研究对象,试图利用树木年轮学评价该地区森林健康状况,旨在研究以下两个具体问题:1) 忻州地区森林健康状况在过去 100 年中发生了怎样的变化? 2) 研究时间段内多次森林不健康事件在空间上是否有同步性? 研究结果所得森林健康时空信息也可作为林业部门制定合理的经营管理方案提供数据依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究区位于山西省忻州市地区(38°08'—39°40'N, 110°53'—113°58'E),西临黄河,东止太行山。该区地形西高东低,逐步倾斜,北、西、南三面环山,东部开阔平坦,为忻定盆地的主体部分。境内流经滹沱河、云中河及牧马河等重要河流。由于受温带大陆性季风气候的影响,该地区夏季多东南风,冬季多西北风,春温高于秋温。年平均气温为 8.5℃ 左右,年平均降水量为 405 mm,降水集中于 7—9 月份^[18]。

1.2 树轮样品采集与气象资料

忻州地区自然植被资源丰富,全区森林面积 $4.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$,森林覆盖率为 16.4%。本研究选取忻州地区

植被覆盖率较高的 4 个县作为采样点。其中宁武梅洞 ($38^{\circ}71'N$, $111^{\circ}96'E$; 海拔 1772 m; 青扦 *Picea wilsonii*) 和大石洞林场 ($38^{\circ}92'N$, $112^{\circ}08'E$; 海拔 1752 m; 青扦) 属于吕梁山脉, 坡度 5° — 10° 。繁峙沙河宽滩林场 ($39^{\circ}06'N$, $113^{\circ}47'E$; 海拔 2184 m; 臭冷杉 *Abies nephrolepis*) 属于五台山区域, 坡度为 0° — 5° 。岢岚县中寨林场 ($38^{\circ}58'N$, $111^{\circ}43'E$; 海拔 1745 m; 油松 *Pinus tabulaeformis*) 属于黑茶山区域, 坡度为 15° — 20° (图 1)。4 个采样点区域天然次生林植被丰富, 主要有白桦林、青扦林、华北落叶松林、白桦林、山杨林、辽东栎林、油松林等。野外样品采集于 2012 年 10 月, 我们选择区域内年龄较老的树木, 使用生长锥在胸高处 (1.3 m) 采集树芯样本。取样方向为沿山坡的等高线方向, 每株立木采集一根树芯样本, 共采集了 86 棵树的树芯样本。

本研究选用距离采样点较近位置的原平气象站 ($38^{\circ}44'N$, $112^{\circ}43'E$; 海拔 828.2 m, 数据自 1954 年起测定) 和五寨气象站 ($38^{\circ}55'N$, $111^{\circ}49'E$; 海拔 1401 m, 数据自 1957 年起测定) 的气候数据 (图 1)。气候因子包括月总降水量 (Monthly total precipitation, Pm) 以及月平均气温 (Monthly mean temperature, Tm)。由于两地同属暖温带季风气候区域, 气象站数据差异性较小, 因此将两个气象站的气候数据平均值作为该区域的气候数据^[19], 分别分析不同样点与区域气候的响应关系。干旱指数 Palmer drought severity index (PDSI) 数据来自荷兰皇家气象研究所的数据共享网 (<http://climexp.knmi.nl/>), 区域范围为 38.59° — $39.06^{\circ}N$, 111.43° — $113.47^{\circ}E$ 。

1.3 树轮数据的分析方法

样本在自然状态下干燥后, 按照基本程序进行固定、磨光处理和交叉定年^[20]。在测量精度为 0.001 mm 的 LINTAB 树轮宽度测量仪 (RINTECH, Heidelberg, German) 上测量每一年轮的宽度, 并利用国际树木年轮库的软件程序 COFECHA^[21] 进行定年质量控制。更正因缺轮、伪轮和测量误差等带来的错误, 最终使树芯样本上的每一个树轮都对应其实际生长年份。应用 ARSTAN^[22] 程序, 用负指数函数或直线拟合每个测量序列的生长趋势, 用加权平均法将去趋势序列合并成树轮宽度指数序列。研究计算了宁武县两个采样点年表间的滑动相关系数矩阵, 将梅洞和大石洞的样本合并。同时设定了分析健康历史的起始年, 采用子样本信号强度 SSS (Sub-sample Signal Strength) > 85% 的样本量作为分析的起始点, 高于该样本量的健康序列认为是可靠的。

森林中树木个体生长的健康状况由于树木自身或局部生长小环境的原因会产生差别, 在不利环境条件下, 一些树木具有较强的恢复力而能够及时响应环境的变化, 而一些树木受到外界影响后不能及时恢复到健康的状况, 从而导致了树木的健康与不健康的分异。不健康树木较健康树木年轮生长较慢, 而且不健康树木的低生长是一个持续的过程。结合树木年轮数据, 定义树木的不健康时段表现为树轮指数连续 5 a 低于正常值。基于此定义, 从下面 3 个步骤挑选出不健康时段的树木: 1) 挑出树木至少持续 5 a 低生长片段 (树轮指数小于 0.9); 2) 挑出同时期树轮指数平均值低于 0.7, 且期间指数最小值低于 0.5 的树为非健康树; 3) 统计各点每年中出现非健康树的样本量所占百分比。将挑出的非健康树年份中的树轮值平均作为非健康树年表, 同时将非健康树轮值剔除平均剩余值作为健康树年表。通过对比各采样点结果, 找出该区域时间和空间上非健康历史的特征。

为了研究该地区森林生长在对当地气候变化的响应特征, 研究利用 DendroClim2002 程序^[23] 分别分析各点的树轮宽度标准年表与逐月气候因子的相关关系, 逐月气候因子包括前 1 年 10 月到当年 9 月的气候指标 (月总降水量和月平均气温、PDSI)。

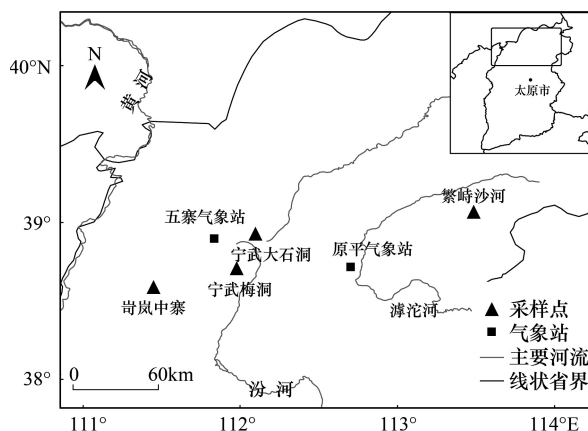


图 1 采样点示意图

Fig.1 The location map of the sampling sites

2 研究结果

2.1 树轮样本及交叉定年结果

经过对树芯样本测量和交叉定年后,得到了共 86 个年龄准确可用于分析的树轮数据。各年表的统计特征见表 1,其中该地区年龄最大的树为 223 a,年龄最小的树为 25 a。各采样点序列间平均相关系数都达到了 0.5 以上,表明该区域内各点树木个体间的轮宽变化均较为一致,对外界环境变化有着一致的响应。一阶自相关系数也都达到了 0.6 以上,表明上一年气候状况对当年树轮生长有着持续性影响。样本总体代表性都高于 0.85,各样点含着大量的共同信号。

表 1 各采样点标准年表的统计特征

Table 1 Statistic characteristics of standard tree-ring chronologies in the sampling sites

采样点 Sampling sites	繁峙 FS	宁武 NW	岢岚 KL
样本量 Number of samples	33	34	19
最大年龄 Maximum age	109	205	223
最小年龄 Minimum age	56	25	43
平均年龄 Average age	87	91	116
平均敏感度 Mean sensitivity	0.145	0.232	0.268
标准差 Standard deviation	0.260	0.259	0.337
序列间平均相关系数 Series intercorrelation	0.750	0.503	0.661
子样本信号强度>85%起始年 Year since SSS (Sub-sample Signal Strength) >85%	1915	1895	1857
一阶自相关系数 First-order autocorrelation	0.821	0.715	0.676
群体表达信号 Expresssd population signal	0.98	0.933	0.89

2.2 树轮和气候因子的响应关系

各样点标准年表与气候响应分析结果如图 2 所示。从图中可以看出,研究区域树轮宽度指数与月平均气温和月总降水量的相关结果有较好的一致性。各样点树轮主要响应于生长季中期的温度与生长季末期的降水,其中,以与当年 5—6 月平均温度的负相关关系最为显著($r=-0.51-0.26, P<0.05$);在树木径向生长与降水因子的关系中,主要与 7 月份的降水显著的正相关($r=0.29-0.43, P<0.05$)。从树轮指数与 PDSI 相关的分布图可以看出,4 个采样点树轮与该区域 PDSI 呈显著的正相关关系($r=0.22-0.55, P<0.05$)。

2.3 健康树与非健康树的径向生长历史

各采样点健康和非健康树轮指数序列如图 3 所示。结果表明,岢岚地区健康树 1900—1930 年间,生长量呈现明显的下降趋势,此时非健康树树轮指数也较低,其中 1910—1930 年期间均值仅为 0.43;在 1960 年之后健康树和非健康树也表现出低生长的趋势,一直持续到 2005 年。繁峙地区非健康树在 1920—1940 年间树轮指数均值为 0.55;健康树和非健康树在 1990—2010 年期间表现出明显的持久下降趋势。宁武地区非健康树在 1910—1940 年期间,树轮指数均值为 0.51,且在 1926 年极低;在 1970—1980 年和 2000 年以后树轮指数较低,均值分别为 0.58 和 0.54 存在稳定下降趋势。

研究统计了各采样点非健康树所占百分比情况(图 4),发现样本量百分比峰值年较为一致。在过去 1 个世纪的公共时期内,岢岚地区最为显著的不健康事件发生在 1913—1936 年期间,持续了 25 年,通过定义判断的非健康树木量达总体的 40%以上。而宁武地区的非健康树样本量从 1915 年就开始持续增多,1923 年达到峰值,期间非健康树所占比例达到 30%以上。超过 30%样本量的时期持续了 18 a。繁峙地区为 1925—1942 年,持续了 18 a。70 年代的非健康事件仅在岢岚和宁武地区有所体现,都是持续了 5 a,宁武从 1973 年开始发生,岢岚从 1983 年开始。20 世纪末,该区域的不健康事件在 3 个研究区域都有体现,都是从 1999 年开始。其中沙河地区持续时间最长为 14 a,一直持续到采样时间;岢岚地区 11 a;宁武地区持续时间较短,为 6 a。

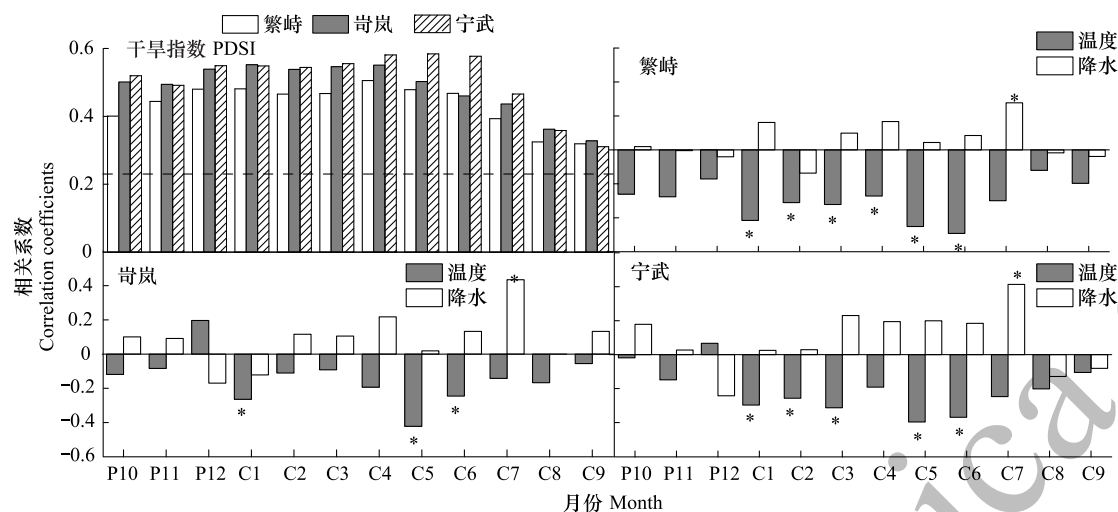


图2 树轮标准年表和气候因子的相关关系

Fig.2 Correlation between standard tree-ring chronologies and climate factors

左图为各采样点标准年表和 PDSI 相关关系,下图为采样点和温度降水的相关关系; P 为上一年月份, C 为当年月份,虚线和 * 表示该月份相关达到 95% 显著水平

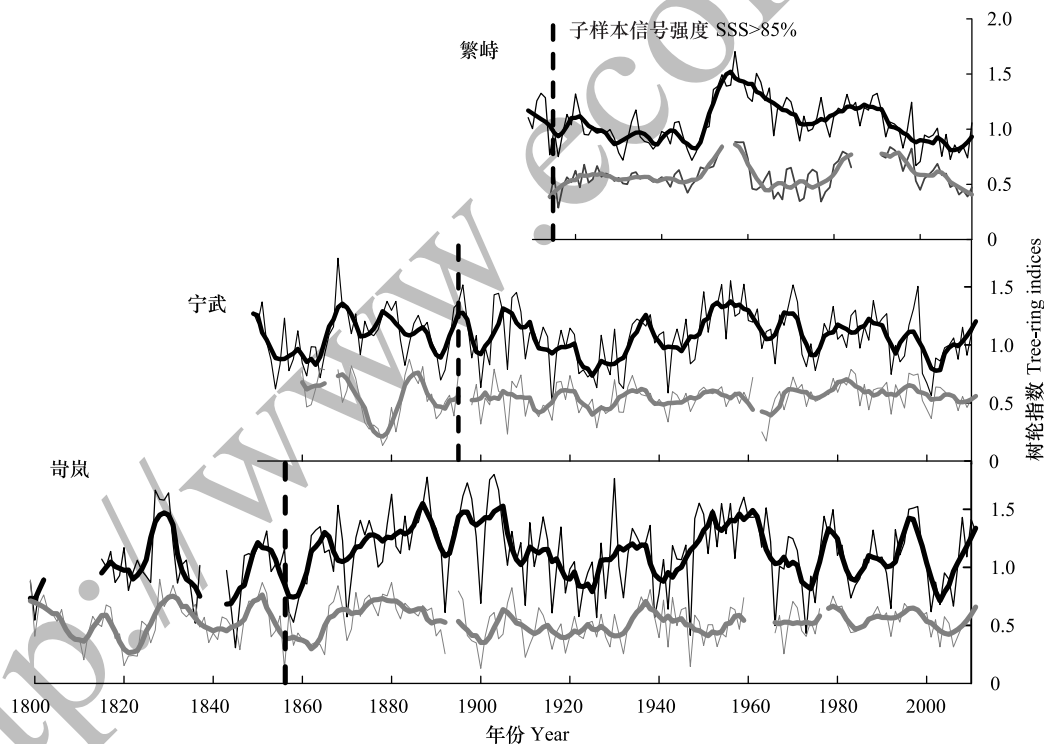


图3 各采样点健康树年表和非健康树年表

Fig.3 Ring-width index of healthy and unhealthy trees in the four sampling sites

黑色和灰色折线分别为健康树和非健康树树轮指数值及其对应的 11 年滑动平均值,虚线为 SSS>85% 的起始年

3 讨论

3.1 树木径向生长与气候的关系

忻州市地处中纬度地带内陆,受大陆性季风气候以及北部地区的风蚀,使得该地区的年蒸发量远超过于降水量。在干旱及半干旱地区,降水量是树木生长的主要限制因子之一^[24]。本文中树轮宽度主要与生长季

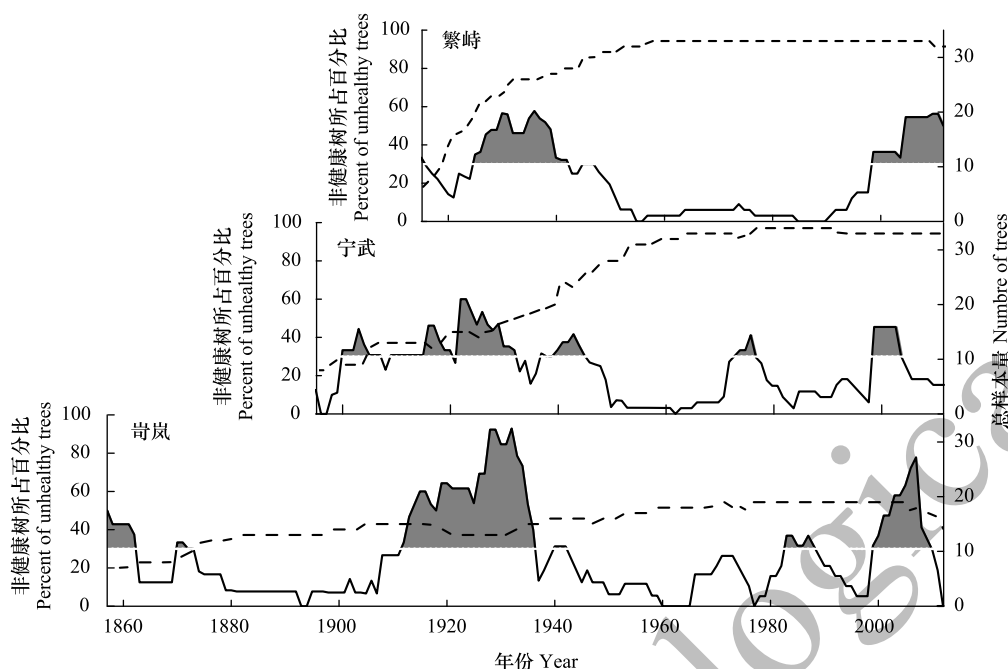


图 4 各采样点非健康树样本所占百分比情况

Fig.4 Percentage of unhealthy trees in the four sampling sites

灰色阴影区为非健康树样本量百分比大于 30% 以上的时期,虚线为总样本量

中期 5—6 月的月平均温度以及 7 月总降水量呈显著的相关关系。树轮宽度与降水和温度的这种相关关系与戴君虎等^[25]在山西忻州五台山地区、李颖俊等^[26]在芦芽山地区、蔡秋芳等^[27]在吕梁山地区的研究结果相似。忻州地区 5—6 月份降水量不足,较高的温度必然会加速树木的蒸腾量,使树木体内的水分散失过快,同时也会加速土壤水分的蒸发量,形成水分胁迫限制了树木的生理代谢活动,从而降低了树木的生长量。7 月份降水充足,同时较高的气温和地温也使该地区冻土融化,有效的提供树木径向细胞分裂和伸长所需的必要水分,促进了树木的生长。树轮与 PDSI 的相关系数结果要高于降水或温度(图 4),也表明该地区的树木主要受到水分作用的限制,更多地体现在土壤水分的有效供应方面。Cai 等^[28]在山西太行山中部地区和 Sun 等^[29]在汾河流域的研究也得到了类似的结果。

3.2 森林健康的时空特征

由于微环境、限制因子、树木个体耐受力、群落竞争等状况的影响,树木生长个体间存在着差异^[30]。本文利用生长指数的差异性挑选出特定时期健康树和非健康树,得到了该区域在时间和空间尺度上的森林健康信息,并且非健康树所占百分比的统计进一步补充了不健康事件发生的程度。各采样点非健康树样本情况(图 4)显示该区域出现高于 30% 阈值的不健康事件在空间上表现出明显的同步性,主要集中在 1910—1940、1970—1987 和 1990—2012 年期间。各地区不同时期的不健康事件持续时间和强度不尽相同,如岢岚地区在 20 世纪 30 年代不健康事件持续时间最长强度也最大。20 世纪 70 年代时期,岢岚和宁武非健康树比例都较高,而该时期繁峙地区非健康仅占少数比例。20 世纪末,繁峙地区不健康事件持续时间最长。梁尔源等^[31]对中国中西部地区树轮研究发现,极端干旱事件导致 20 世纪 20 年代和 20 世纪 30 年代初期大范围的树木生长下降现象。Liu 等^[10]探究了亚洲中部半干旱地区森林衰退现象,也发现 20 世纪 70 年代末 80 年代初和 21 世纪初期树轮表现出显著的生长下降。我们认为,大尺度的气候事件导致森林不健康事件发生的空间格局具有很强的一致性。不同林分特征的森林对气候变化的抗干扰能力和恢复能力有显著的差异^[32],并且不同树种对气候变化的敏感度不同^[30],这可能是影响不健康事件发生强度和持续时间不一致的重要因素。

3.3 干旱事件对森林健康的指示

Liu 等^[10]认为气候变暖和干旱加速了亚洲中部半干旱地区森林树木生长的下降。Liang 等^[11]探究了青藏高原东北部半干旱地区云杉林在全球变暖背景下的森林衰退现象,也认为干旱事件导致了森林衰退,快速的气候变暖对森林树木的生长有着非常重要的影响。本研究发现该区域三次较为严重的非健康事件爆发的高峰主要集中在 1930s、1970s 和 2000s 左右。根据研究区的气象记录,忻州地区 5—9 月平均气温与同一时期降水量显着负相关,即研究区气候具有高温少雨、低温多雨的组合模式。在中国北方地区,高温少雨总是和干旱联系在一起。20 世纪 20—30 年代前后由于东亚夏季风减弱而导致中国北方降水量明显减少,而这次著名干旱事件在许多树轮研究中也得到印证^[31,33]。李强等^[34]对山西宁武地区降水重建资料显示,1966—1972 年和 1988—2003 年为降水较少的时期(低于多年平均降水量 413 mm),其中 1972 年干旱尤为严重。蔡秋芳等^[27]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,这一持续高温事件对此次干旱事件的爆发无疑贡献巨大。Williams 等^[35]认为干旱会导致气孔关闭,光合作用降低,从而限制了形成层活动,使得树木在生长季受到严重的水分胁迫。本研究发现的 3 次较大的不健康事件与历史时期严重干旱事件时间相吻合,表明该地区降水减少或高温所带来的极端干旱是影响该区域森林健康生长的主要原因。

20 世纪中叶以来的气候变暖是不容置疑的^[36]。忻州地区地形崎岖,多为山地丘陵,水分条件较差,干旱事件发生的频率和干旱程度在未来气候变化背景下都可能会增加。高温对育苗造成的严重危害和干旱对造林成活率和保存率的严重影响等都是该地区林业发展的不利因素。要针对这些不利的限制性气候因子,选择合理的造林季节,避开高温和干旱时期因地制宜地选择耐旱树种进行栽培和经营,实现林业的可持续发展。

4 结论

本文以忻州地区 4 个采样点森林为研究对象,利用树木年轮生态学方法重建了自 1900 年以来忻州森林的健康历史,分析了森林健康状况的时空变化特征,并对产生不健康事件的原因进行深入探讨。研究结果表明:过去 100 年中该地区森林不健康事件主要集中发生在 1910—1940、1970—1987 和 1990—2012 年期间,4 个采样点在 20 世纪 30 年代和世纪末不健康事件在空间上较为一致,20 世纪 70 年代的不健康事件在宁武和岢岚地区表现较强,而在繁峙地区仅有少量树木表现出非健康生长。在经历了 3 次较严重的不健康事件的影响,树木能够度过环境不利时期依然存活,表明该地区的森林具有较强的抵抗力或生态弹性。升温或降水减少所引起的极端干旱是造成该区域森林非健康生长的主要原因,也是不健康事件空间一致性的主要驱动力。研究结果有助于进一步认识区域森林健康在全球气候背景下时间和空间上的变化特征以及其驱动因子,对科学地制定森林保护措施具有积极的现实意义。在以后的研究中仍需加强空间同步信号的鉴别能力,在更广泛的区域和气候背景下开展森林健康的研究,来提高我们对森林衰退的预防和治理能力。

致谢:中国科学院植物研究所树木年轮实验室提供树轮样本,张齐兵研究员在论文写作过程中给予建议,邱红岩老师帮助实验工作,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] 高均凯. 森林健康基本理论及评价方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [2] Amoroso M M, Daniels L D, Larson B C. Temporal patterns of radial growth in declining *Austrocedrus chilensis* forests in Northern Patagonia: the use of tree-rings as an indicator of forest decline. *Forest Ecology and Management*, 2012, 265(1): 62-70.
- [3] Brouwers N C, Mercer J, Lyons T, Poot, Veneklaas E, Hardy G. Climate and landscape drivers of tree decline in a Mediterranean ecoregion. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(1): 67-79.
- [4] Rodríguez-Catón M, Villalba R, Srur A M, Luckman B. Long-term trends in radial growth associated with *Nothofagus pumilio* forest decline in Patagonia: integrating local-into regional-scale patterns. *Forest Ecology and Management*, 2015, 339: 44-56.

- [5] 刘世荣, 代力民, 温远光, 王晖. 面向生态系统服务的森林生态系统经营: 现状、挑战与展望. 生态学报, 2015, 35(1): 1-9.
- [6] 高广磊, 信忠保, 丁国栋, 李丛丛, 张佳音, 梁文俊, 安云, 贺宇, 肖萌, 李文叶. 基于遥感技术的森林健康研究综述. 生态学报, 2013, 33(6): 1675-1689.
- [7] 王彦辉, 肖文发, 张星耀. 森林健康监测与评价的国内外现状和发展趋势. 林业科学, 2007, 43(7): 78-85.
- [8] Innes J L. Methods to estimate forest health. *Silva Fennica*, 1993, 27(2): 145-157.
- [9] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. 第四纪研究, 1997, 17(3): 265-271.
- [10] Liu H Y, Williams A P, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [11] Liang E Y, Leuschner C, Dulamsuren C, Wagner B, Hauck M. Global warming-related tree growth decline and mortality on the north-eastern Tibetan plateau. *Climatic Change*, 2016, 134(1/2): 163-176.
- [12] 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 小兴安岭红皮云杉年轮-气候关系及其衰退原因. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1935-1944.
- [13] Millar C I, Stephenson N L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance. *Science*, 2015, 349(6250): 823-826.
- [14] Whyte G, Howard K, Hardy G E S J, Burgess T I. The tree decline recovery seesaw: a conceptual model of the decline and recovery of drought stressed plantation trees. *Forest Ecology and Management*, 2016, 370: 102-113.
- [15] Mitchell P J, Battaglia M, Pinkard E A. Counting the costs of multiple stressors: is the whole greater than the sum of the parts? *Tree Physiology*, 2013, 33(5): 447-500.
- [16] Zhang Q B, Alfaro R I. Spatial synchrony of the two-year cycle budworm outbreaks in central British Columbia, Canada. *Oikos*, 2003, 102(1): 146-154.
- [17] 胡海清, 赵致奎, 王晓春, 张远东. 基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾的频度分析. 生态学报, 2010, 30(23): 6372-6379.
- [18] 佟杰, 张永国. 忻州市城区空气污染特征及防治对策. 忻州师范学院学报, 2007, 23(5): 63-65.
- [19] Kimball K D, Keifer M. Climatic comparisons with tree-ring data from montane forests: are the climatic data appropriate? *Canadian Journal of Forest Research*, 1988, 18(4): 385-390.
- [20] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990: 51-55.
- [21] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 44(3): 69-75.
- [22] Cook E R, Holmes R L. *Users Manual for ARSTAN*. Tucson: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986.
- [23] 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.
- [24] Liang E Y, Shao X M, Hu Y X, Lin J X. Dendroclimatic evaluation of climate-growth relationships of Meyer spruce (*Picea meyeri*) on a sandy substrate in semi-arid grassland, north China. *Trees*, 2001, 15(4): 230-235.
- [25] 戴君虎, 潘娜, 崔海亭, 唐志尧, 刘鸿雁, 曹燕丽. 五台山高山带植被对气候变化的响应. 第四纪研究, 2005, 25(2): 216-223.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Cai Q F, Liu Y. Climatic response of Chinese pine and PDSI variability in the middle Taihang Mountains, north China since 1873. *Trees*, 2013, 27(2): 419-427.
- [29] Sun J Y, Liu Y, Sun B, Wang R Y. Tree-ring based PDSI reconstruction since 1853 AD in the source of the Fenhe river basin, Shanxi province, China. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(11): 1847-1854.
- [30] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990: 77-234.
- [31] 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.
- [32] 周丹卉, 贺红土, 李秀珍, 周春华, 王绪高, 陈宏伟. 小兴安岭不同年龄林分对气候变化的潜在响应. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 110-117.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Williams A P, Allen C D, Millar C I, Swetnam T W, Michaelsen J, Still C J, Leavitt S W. Forest responses to increasing aridity and warmth in the southwestern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(50): 21289-21294.
- [36] IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press, 1-1535.