

气候变化背景下的晋中柏树响应分异研究

陈泳江

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

森林作为重要的水源涵养区以及碳循环的主要发生地, 对全球气候变化具有较高的敏感度。自上个世纪下半叶以来, 全球气候变暖导致了树木生长与气候响应之间的差异, 出现了树木生长与气候响应之间的分异和不稳定现象。分异的发现对传统的树轮重构技术和成果提出了挑战, 打破了以往对于“均一性”原理的认识。本文以山西晋中地区的林中柏树为样本, 运用树轮生态学的方法, 对树轮生长特征、树轮生长与主要气候因子之间的相关性进行了研究, 并以此为依据, 分析树木生长如何响应气候变化, 并对其成因进行了深入探讨。结果表明: 以温度开始显著上升的1995年为界, 树木年轮与气候关系的稳定性变差。晋中地区柏树树轮宽度与当年5, 6月份的平均气温存在显著的负相关性, 与当年春季的降水量显著正相关, 且这两种相关性在1995年以后不断加强, 说明气候变暖所导致的春季“干旱胁迫”对树木生长造成很大影响。在1995~2012时段轮宽与4月份相对湿度相关性由负变正, 与1月份平均气压负相关增强, 与1, 2月份日照时数的负相关性减弱, 但与4月, 12月的负相关性增强。

关键词

树木年轮, 气候变化, 晋中地区, 响应分异

Study on Response Differentiation of Cypresses in Jinzhong under Climate Change Background

Yongjiang Chen

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: April 7, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

As an important water conservation area and the main place for carbon cycle, forest is one of the

important natural resources for human survival, and has a high sensitivity to global climate change. Since the second half of the last century, the phenomenon mainly characterized by global warming has changed the response relationship of tree growth to climate change. The discovery of the divergence phenomenon challenges traditional tree-ring reconstruction methods and results, and affects the global carbon cycle and carbon stock estimation research. In this paper, the cypress trees in the Jinzhong area of Shanxi are taken as samples, and the method of tree-ring ecology is used to study the correlation between tree-ring growth characteristics, tree-ring growth and main climatic factors. How tree growth responds to climate change and its causes are explored in depth. The results showed that the stability of the relationship between tree rings and climate became worse in 1995, when the temperature began to rise significantly. There is a significant negative correlation between the cypress tree ring width and the average temperature in May and June of that year, and a significant positive correlation with the precipitation in the spring of that year, and the two correlations have been strengthened since 1995, indicating that the climate is warming. The resulting "drought stress" in spring had a big impact on tree growth. During the period from 1995 to 2012, the correlation between wheel width and relative humidity in April changed from negative to positive, and the negative correlation with the average air pressure in January increased. Negative correlation increases.

Keywords

Tree-Ring, Climate Change, Jinzhong Area, Response Differentiation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

全球气候变化是指在某一特定时间内, 各个圈层的各种因素平均、变异超过 10 年, 并且是连续的。造成全球气候变化的因素很多, 但有两大因素: 一是由于自然因素造成的, 二是人为因素造成的; 二是由于近现代工业化进程的加快, 大量能源消耗使得二氧化碳、乙烷等在原有的大气中浓度持续上升, 使得温室效应进一步恶化。目前, 全球气候变化及其后果已不再是单纯的气象科学问题, 而是一个多学科、多领域的课题, 引起了全球各国与社会的关注。

IPCC 在它的第五次评估中明确指出[1], 1880~2012 年间, 地球表面的温度年增长率约为 0.02℃, 而 1983~2012 年的温度则是 1400 年以来的最高温度。这种趋势明显高于上个世纪的全球温度变化, 而目前的陆地温度上升速率明显高于海洋。许多气候变化在过去几十年甚至几千年里都没有发生过, 比如: 海水温度升高、冰雪融化、温室气体浓度升高等等。

20 世纪以来, 全球气候发生了重大变迁, 它在影响地球生态系统的连续性和稳定度的同时, 也将对人类生存和可持续发展产生严重威胁。由于全球气候的变化, 特别是上世纪 50 年代以后, 全球气候变暖导致了树木的生长对气候的响应能力的改变, 导致了树木的生长趋势分异和树轮与气候反应之间的不确定性[2]。晋中地区位于阶梯过渡带, 地形以山地、丘陵为主, 气候和植被垂直分布, 主要树种品类齐全, 其森林生态系统与气候变化响应关系的研究是气候变化和森林响应研究的重点。

树木年轮因其精度高、采样方法简便、区域分布范围广泛, 对于深入研究林木生长与气候变化之间的关联, 及其在地区发展和世界气候重建中具有重大的意义[2]。近年来不少研究人员都进行了较大区域

的林木年轮气候学研究，但由于大多分布于干燥、半干旱地区和中高纬度地带，对黄土高原所处的经纬度地带研究相对较少，且关注度低下，这也不利于发现黄土高原在不同区域气候反应规律性的不同。所以把晋中地区作为重点研究对象，对于深入研究地区的树木年轮及其气象反应规律有着重要意义。

1.2. 主要研究内容

了解晋中地区柏树对气候的响应状况，探寻该区域林区是否普遍存在“响应分异现象”[3]，分析气候变化对树木气候响应的差异，通过分析不同时段树木响应状况来了解响应分异发生的机制。重点解决以下两个主要问题。

(1) 建立树木年轮宽度年表，采用交叉定年法确定树轮年代，分析年表的平均序列长度、均值(标准差)系列相关性、平均值(标准偏差)AR1 等统计特征，在此基础上判定交叉定年结果的准确性，相关结果可进一步评估年表质量的可靠性。

(2) 从 1955~2012 年度晋中区域的气候变化入手，对其与气候因素的反应进行研究。通过对气候因素与树的年轮宽度指标的相关性分析，探究气候因素尤其是林木径向生长的制约因素对树木年轮生长影响的途径和强度。

1.3. 选题意义

本研究利用树木年轮学方法探究晋中地区树木生长与气候响应的关系，建立该地区柏树的树轮年表，通过与当地的气候记录进行统计分析，研究过去几十年来生长—气候关系是否发生变化。本研究相关结果可对认识气候变化背景下树木生长的生态学特征提供理论参考，同时也可以进一步完善和丰富黄土高原地区的树木年轮学以及森林健康方面的研究。

1.4. 研究综述

1.4.1. 树木年轮学的形成与进展

树木年轮是指利用树体的生长特性，以年轮来确定和分析历史上的环境变化的学科[4]。在 16 世纪早期，欧洲科学家发现年轮变化和空气湿度有一定的联系。1904 年，树木年轮学研究的重要方法 - 交叉定年原则首次提出。

其后，又经过一定阶段的发展，树木年轮学研究理论开始在各学科中得到广泛的应用。例如：树木年轮气候学探讨树木年轮与温室效应的未来气候变迁；树木年轮生态学对森林生态变化等因素进行了分析；树木年轮水文学研究了水环境因素和树木对环境的反应，例如河流的径流和洪水的历史；树木年轮地貌学对树木的年轮地形进行研究，把地形的改变记录在树形的年轮上，例如地震，泥石流，滑坡等；树木年轮生物学是对树木在自然灾害中保存下来的异常构造进行研究的学科。此外，研究指标也从单一化向多元化发展，例如木材的解剖特性、季节内的生长量以及树轮稳定同位素[5]等。

1.4.2. 树木年轮气候学的国内外研究进展

在上个世纪早期科学家就使用了树木的年轮数据来预测未来的气候，开启了树木年轮气候学研究。到 20 世纪 70 年代，Fritts [6]等始创信号处理技术，基于树轮的气候重构分析框架，充分考究树木年轮所包含的信息，捕捉其中的气候信号并以此来评估以往的气候变化。Graybill 和 Meko [7]共同利用树轮资料开创了树木年轮水文学的研究，估算了 16 世纪以来科罗拉多河的年径·流量变化。

近年来，由于树木年轮对气候因子研究的不断深入，世界范围内的大部分国家都开始了对树木年代学的研究，而大量的数据和科学研究也证实了这些研究结果的真实性和可行性。同时对森林年轮气候学的研究也从对某些气候参数的复原转向了对温度、干旱和降水的区域重构。其它学科的研究成果也开始

运用到树木的年轮气候学中，如图像分析、贝叶斯分析、化学成分和解剖学特征等方面，这些方法可以从不同的角度对树木进行精细的分析，从而为进一步的研究提供科学依据。

进入 21 世纪以来，由于科技进步和仪器设备的改进，树木年轮的大量研究工作得以迅速开展。其中，国际树木年轮数据库[8]的建立对其研究有巨大的推动。这个资料库以 Tccson 十年的格式标准[9]来储存树木年轮资料。在区域分布上，树木年轮的分布表现出明显的集中，亚洲和拉丁美洲更多。

国内的树木年轮理论研究从 20 世纪 30 年代正式启动，国内的相关研究者已开展了大量的现场取样与室内试验，但是由于缺乏对树木年轮分析的技术手段和气象资料的缺失，致使许多有关的研究陷入了困境。在经历了近 30 年的停滞期后，树木年轮学于 1990 年前后迎来了一段快速发展的时期，大量学者利用树轮年表结合逐月气候因子进行分析，以该模型为依据，对研究区历史气候变迁进行了重构[10]。21 世纪以来，国内的树木年轮学研究得到了国际社会的广泛认可，但其研究地点主要集中于西北及西南等人类活动较少的区域，目前仍有大量地区的研究还很有限。

1.5. 技术路线

技术路线图如下图 1。

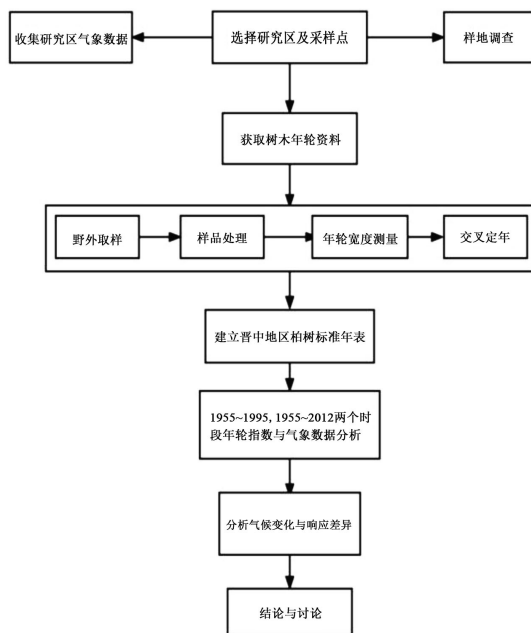


Figure 1. Technical roadmap

图 1. 技术路线图

2. 研究区概况与研究方法

2.1. 研究区概况

山西晋中地处太行山与汾河的交界处，地处中国山西省中部。大部分地区海拔在一千米以上，太岳山主峰海拔 2,567 米，与海拔最低处落差近 2,000 米。本区处于暖温带，是一种半干旱的大陆型季风气候，其温度、降雨量在方向上有很大的差别，总体上呈由东到西的逐渐递增分布模式，一年四季都有不同程度的变化。区域 1955~2012 年平均温度为 11.16℃，年平均降水量 545.56 毫米，主要集中在 7，8 月份，这两个月降水总量约占年降水量的 51% [11]。

2.2. 研究方法

2.2.1. 样品采集

采样地内分布有大量的天然次生林,林内有油松,辽东栎,侧柏等多种树种[12]。侧柏属于针叶树种,其年轮纹理清晰,具有较好的防腐性,生长慢且年龄长,适合用于树木年轮学研究。通过对晋中森林资源的实地考察和全面分析,选择了本区域内树种多且人为干扰少的林地,采样地坐标为 113.56°E, 36.78°N。抽样时,选取侧柏的优势树种,用生长锥在与斜坡等高线垂直的胸高处进行钻孔。采集样品芯的位置和方位因取样环境的限制而不同。在一般情况下,当所取树芯质量不达标时,需要钻取新的树芯,否则每棵树只取一个。利用以上方法,在该地区共采集 25 个树芯样本装入塑料管,注意不要将树芯完全封闭,并对林地信息和所调查树木的健康状况等信息进行记录。

2.2.2. 样品预处理

采集到的树芯标本,需要进行样品的预处理。首先,将样品芯从塑料管子中抽出,自然晾干,再将白色乳胶涂在专用的木槽内,放置时,需要将两个白色反光面分别放置在凹槽的两边,这样在加工后可以更清楚地辨别出轮纹。用胶带把中间的两头系紧,防止卷曲。待样品全部处理完毕,将样品放在平整的地方烘干,再用不同粒度的砂纸将样品中心的圆弧部分逐一剔除,直到用显微镜观察到圆周边缘为止[13]。

2.2.3. 轮宽测量与年表建立

用双目显微镜观察树轮的年数。采用 Lintab 年轮测量仪,以 0.01 毫米的精确度测定树轮的宽度,然后利用 COFECHA 软件检查结果,以减小误差。在年轮测年序列中,采用 ARSTAN 软件对年轮进行了归一化,用 32 年长度的样条函数去趋势并对树轮宽度进行了二次加权平均,使获得的年轮数据标准化,最后得到了各树种完整的统计年表。

2.2.4. 气象资料与数据分析

本研究采样地为晋中林区(东经 113.56°, 北纬 36.78°),气象资料采用 1955~2019 年山西省气象监测数据,所选用的参考指标包括月平均气温(Tmean)、月最高气温(Tmax)、月最低气温(Tmin)、月降水量(pre)、月平均气压(AP)、月平均相对湿度(RH)以及月日照时数(SunD)。气象数据分析起始年份以子样本信号强度(SSS)大于最低阈值 0.85 来界定,统计发现(图 2),自 1851 年以后,任意年份的子样本信号强度均大于 0.85,表明该年份之后的任意时段均为树木生长与气候关系计算的可信时段[14],本研究所选取的气象数据跨度为 1955~2012 年。

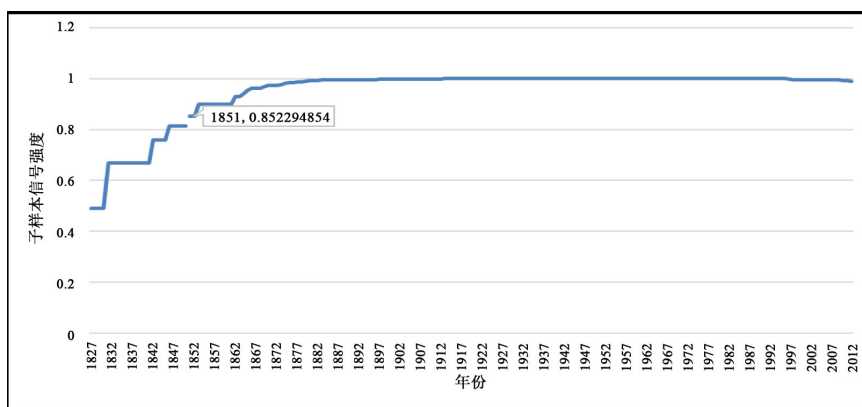


Figure 2. SSS (Subsample Signal Strength)

图 2. SSS (子样本信号强度)

观察山西地区 1955~2012 年以来的年均温趋势图(图 3)发现, 该区域年平均温度呈显著上升态势, 主要变化可以 1995 年为分界点, 前一阶段为缓慢升温期, 后一阶段为较快速升温期, 2012 年出现显著下降。后阶段年均温从最低 1984 年的 10.39℃增高至 1999 年最高 12.6℃, 气温变化幅度接近 2.2℃。晋中地区的年降水量有下降的趋势, 但变化不显著, 且年际变化大(图 4)。月最高均温出现在 7 月, 月最低均温出现在 1 月; 月最大降水量出现在 8 月, 月最低降水量主要出现在 1 月或 12 月。气温的上升, 证明该地区几十年来出现了一定的气候变化, 这为研究树木生长与气候变化的响应提供了可行性。

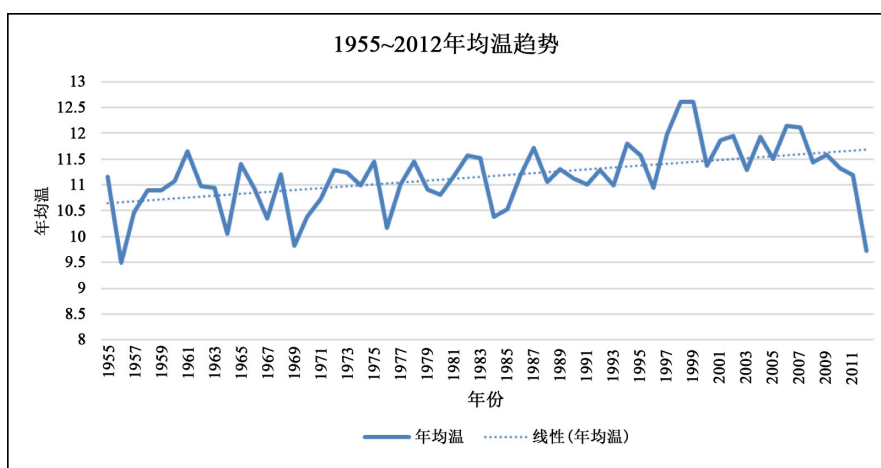


Figure 3. Annual average temperature change in Shanxi Province from 1955 to 2012
图 3. 山西省 1955~2012 年年平均温度变化

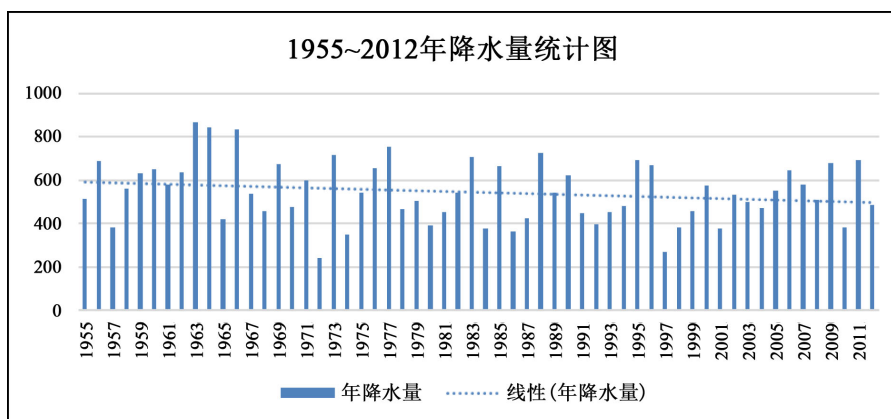


Figure 4. Precipitation statistics in Shanxi Province from 1955 to 2012
图 4. 山西省 1955~2012 年降水量统计

3. 气候变化与树木生长 - 气候响应差异

3.1. 年表及年表特征

3.1.1. 6 个不同时段年表特征的比较

本次研究共统计出 1838~1887、1863~1912、1888~1937、1913~1962、1938~1987、1963~2012 共 6 个不同时段和 1893~2012 共同区间时段的年表统计值(见表 1)。从该表可以看出, 在每个统计期间, 所有的样本相关系数($r_{\text{bar.tot}}$)和树间相关性($r_{\text{bar.bt}}$)都在 0.405~0.522 之间, 这表明, 在不同的时间周期中, 气候

变化对取样点的树木生长都有一定的影响。另外, 6 个时期的信噪比(snr)在 7.5~26.744 之间, 而总的群体表达信号(eps)则为 0.882~0.964, 都分别高于最低值 3 和 0.85, 这说明六个时期的时间序列都是研究气候变化的重要依据。而且, 这一地区的年表上的数据都很高, 说明这份年表中的信息非常丰富。对比发现, 统计年表中第 5 和第 6 两个时段的特征参数相较之前的统计结果显著减小, 表明气候变化使得气候因子对晋中地区柏树径向生长的影响减弱。

Table 1. Statistical values of chronological table for periods from 1893 to 2012

表 1. 1893~2012 区间时段年表统计值

	start.year	mid.year	end.year	n.cores	n.trees	n	n.tot	n.wt	n.bt	rbar.tot	rbar.wt	rbar.bt	c.eff	rbar.eff	eps	snr
1	1838	1862	1887	22	22	11.02	21	0	21	0.405	NA	0.405	1	0.405	0.882	7.5
2	1863	1887	1912	24	24	20.32	231	0	231	0.489	NA	0.489	1	0.489	0.951	19.445
3	1888	1912	1937	25	25	24.24	276	0	276	0.522	NA	0.522	1	0.522	0.964	26.429
4	1913	1937	1962	25	25	25	300	0	300	0.517	NA	0.517	1	0.517	0.964	26.744
5	1938	1962	1987	25	25	25	300	0	300	0.416	NA	0.416	1	0.416	0.947	17.825
6	1963	1987	2012	25	25	24.2	300	0	300	0.418	NA	0.418	1	0.418	0.946	17.407
7	1893	1952	2012	25	25	24.467	300	0	300	0.49	NA	0.49	1	0.49	0.959	23.47

3.1.2. 年表特征

通过对晋中地区的树芯进行测量, 并进行了交叉测定, 获得了 25 条能够进行树轮数据分析的序列。晋中森林样本的总序列年份和平均序列长度分别为 1827~2012 和 144.64 年, 并有 28 个缺席年轮(见表 2)。统计结果显示(见表 3), 抽样点的序列相关性为 0.62, 大于 0.5, 这说明在这一抽样区中, 各树种的年轮宽度变化具有很高的 consistency。总代表性(eps)值为 0.959, 远高于可接受值 0.85, 信噪比为 23.47, 说明其具有良好的品质, 并含有丰富的气象资料, 适用于研究年轮气候。

Table 2. Statistics of missing annual rings years

表 2. 缺失年轮年份统计

系列名称	缺失年轮年份
DWL02	1981
DWL03	1902、1905、1906、1907、1908
DWL06	1975
DWL13	1905、1931
DWL14	1942
DWL16	1905、1975、2005
DWL18	1894、1942
DWL19	1902、1905、1942、1975、1993
DWL20	1942、1943
DWL22	1993
DWL23	1900、1905、1906、1908
DWL24	1902

Table 3. Statistical results of annual ring sequences
表 3. 年轮序列统计结果

统计项	数值
Number of dated series	25
Number of measurements	3616
Avg series length	144.64
Range	186
Span	1827~2012
Mean (Std dev) series intercorrelation	0.6244947 (0.0724864)
Mean (Std dev) AR1	0.6984 (0.06819763)

晋中地区树轮轮宽标准年表(STD)及样本量(sample depth)如图所示(图 5)。由图可知, 晋中地区柏树树轮指数波动较大, 年际变化不稳定, 尤其在 1840~1850, 1900~1910, 1930~1940 等时段波动差异明显, 但在后半段趋于平缓。

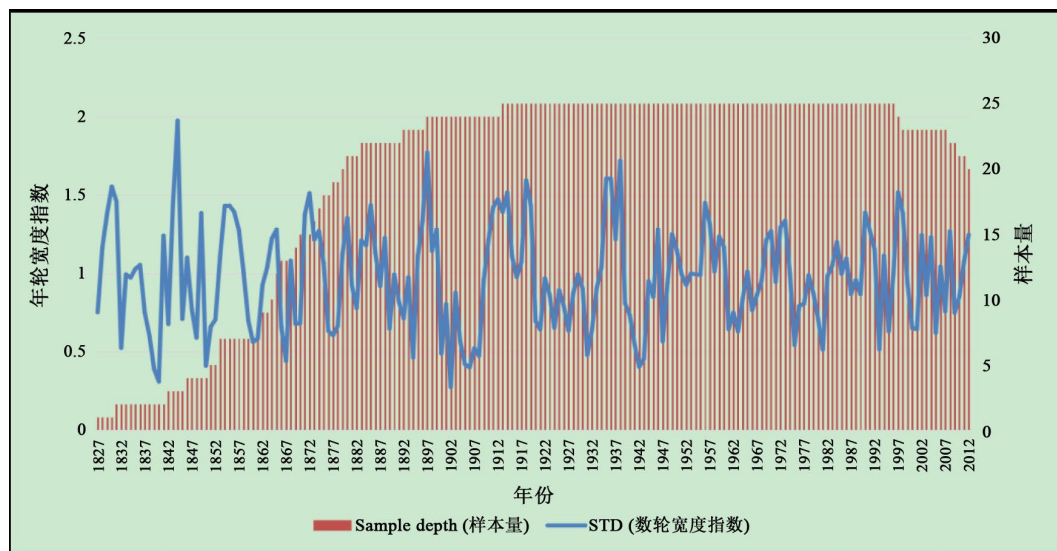


Figure 5. Standard annual tree-ring width chronology and corresponding sample sizes for the Jinzhong region
图 5. 晋中地区树轮宽度标准年表及对应的样本量

3.2. 树木年轮与气候因子的响应分析

3.2.1. 树木年轮与月最低及最高温度的相关分析

年表与月最低温度之间的相关关系如图 6 所示。从图中可以看出, 晋中的柏树年轮指数与上一年十月至次年二月的的气温有明显的相关性, 特别是 1985~1995 年度的年轮指数较以往同期为极高; 而在 1995 以后, 年轮指数与以上几个月之间的正向关系逐步变弱, 而与当年六月的最低气温呈负相关关系, 而且这种趋势在不断加强, 并达到了一个非常显著的程度($P < 0.05$)。年轮指数和月最高气温之间的相关关见图 7, 其相关性主要体现在: 柏树年轮的宽度与当年十二月和次年八月的最高温度成正比, 而与当年二月成反比; 1955~1995 时段内与当年 4 月显著正相关, 但在 1995~2012 年内与 4 月份最高温相关性下降甚至出现负响应。

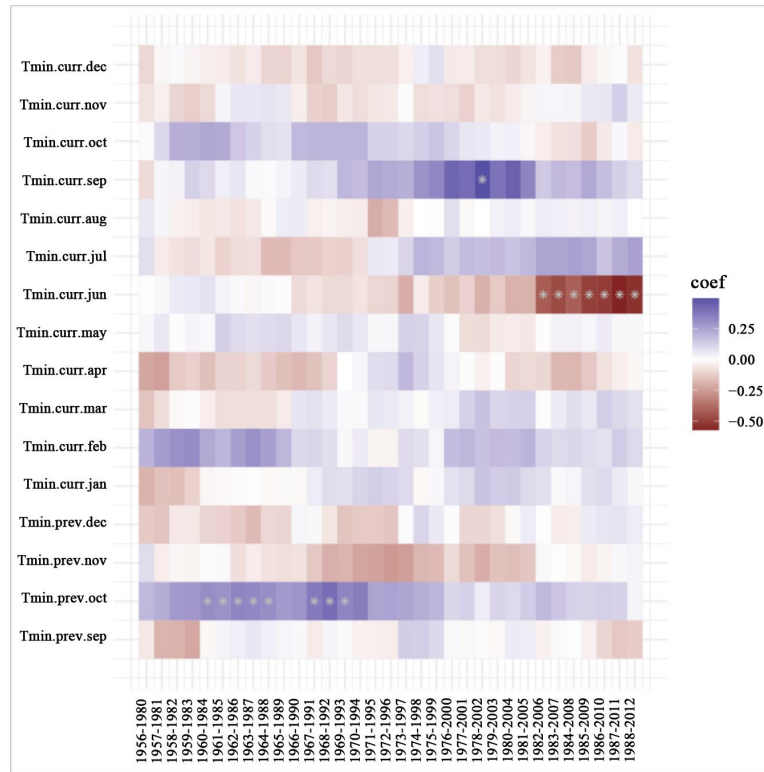


Figure 6. Correlation between annual ring index and monthly minimum temperature
图 6. 年轮指数与月最低温的相关性

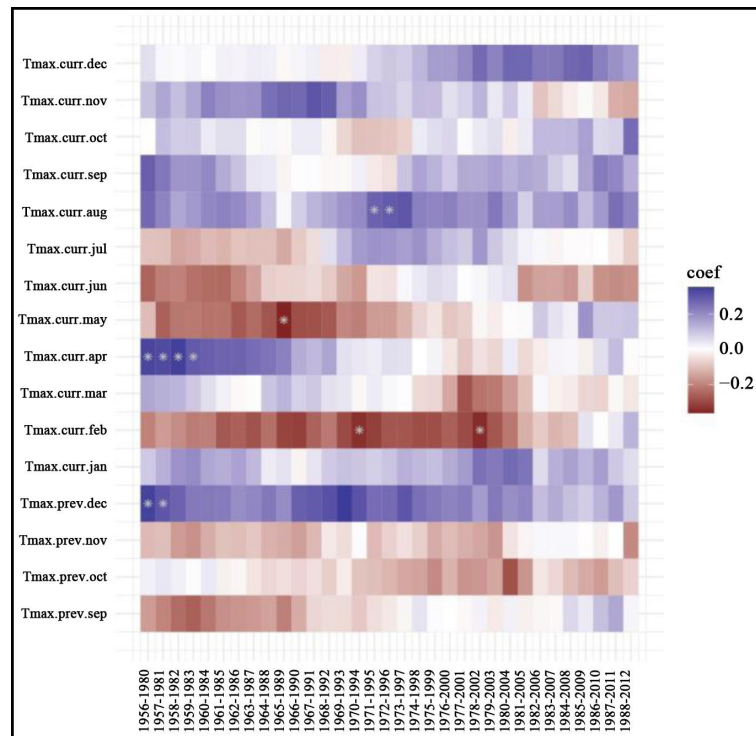


Figure 7. Correlation between annual ring index and monthly maximum temperature
图 7. 年轮指数与月最高温的相关性

3.2.2. 树轮宽度与月平均温度的相关性分析

由图 8 可以看出, 在 1955~1995 这个时段内, 轮宽与月均温因子的相关性不显著($P > 0.05$); 但在后一个阶段内, 平均温度对树木生长的影响大大增强。具体表现为: 月均温与当年 5~6 月份的负相关性增强且达到非常显著的程度, 说明当年生长季温度的上升对树木生长的抑制作用明显增强。其余的变化还有上一年 10 月和当年的 8 月, 这两个月的正相关性有所增强, 1999~2004 年内连续出现与当年 8 月的显著正相关性($P < 0.05$)。

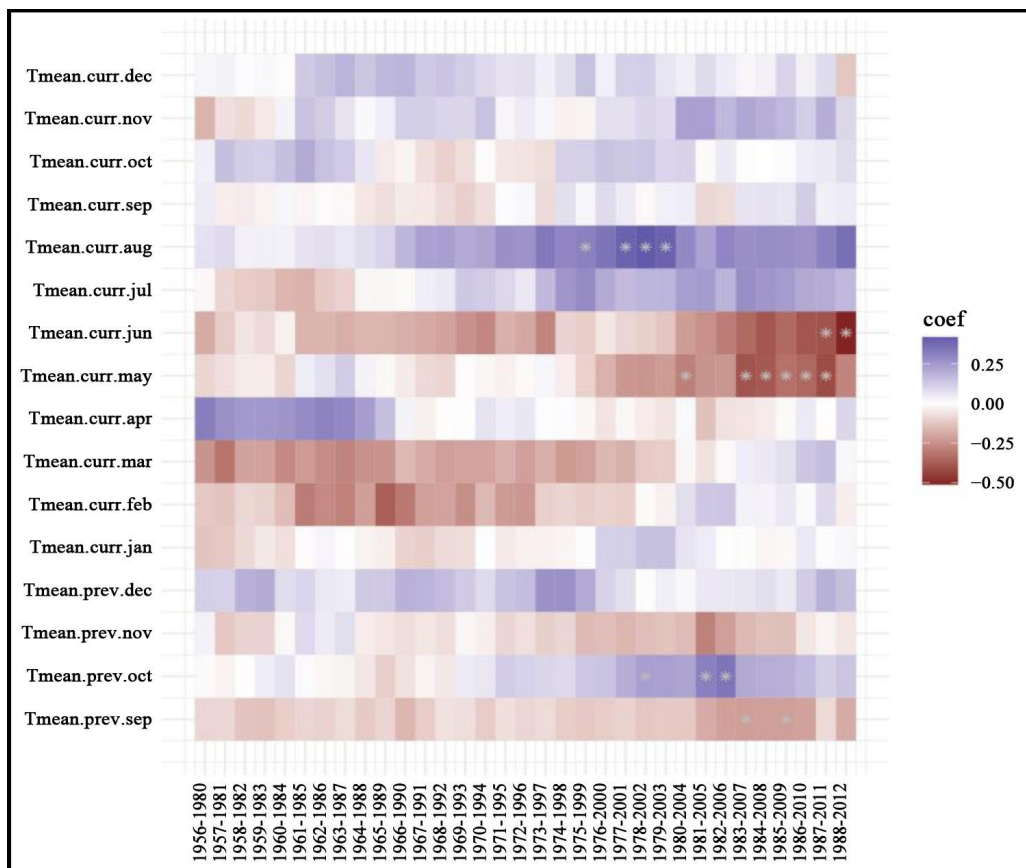


Figure 8. Correlation between annual ring index and monthly mean temperature
图 8. 年轮指数与月均温的相关性

3.2.3. 树轮宽度与月降水量和平均湿度的相关性分析

图 9 为晋中柏树标准年表与月降水量(Pre)的相关性统计分析, 该图表明: 该区域内树木年轮宽度指数主要与上一年 12 月以及当年夏季的降水呈负相关, 在 1955~1995 时段内与上一年末期的降水正相关, 但在后一阶段, 轮宽与降水因子的相关性趋势发生了显著改变, 转为与当年生长季降水量显著正相关, 并在 3, 4, 5 月份达到极显著水平($P < 0.05$), 且与 4 月份的降水相关性增强。

晋中柏树年轮指数与平均相对湿度(RH)相关性统计分析见图 10, 由图可知: 月平均相对湿度对树木生长量的影响集中在上一年 9 月以及当年春季, 而与其它月份呈不显著的负相关($P > 0.05$)。柏树年轮宽度与湿度因子的相关性具体表现为: 与当年春季 3 月份的湿度显著正相关, 在 1955~1995 时段内表现为与当年 2 月的正相关以及 4 月的负相关, 但在后一阶段该相关性均发生转变, 且与 4 月份湿度的相关性显著增强。

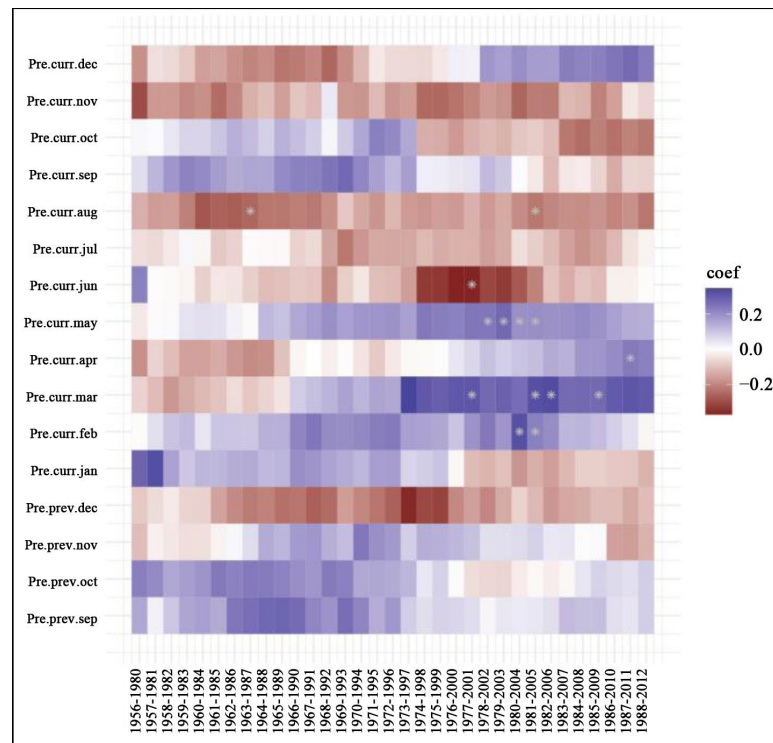


Figure 9. Correlation between annual ring index and monthly precipitation
图 9. 年轮指数与月降水量的相关性

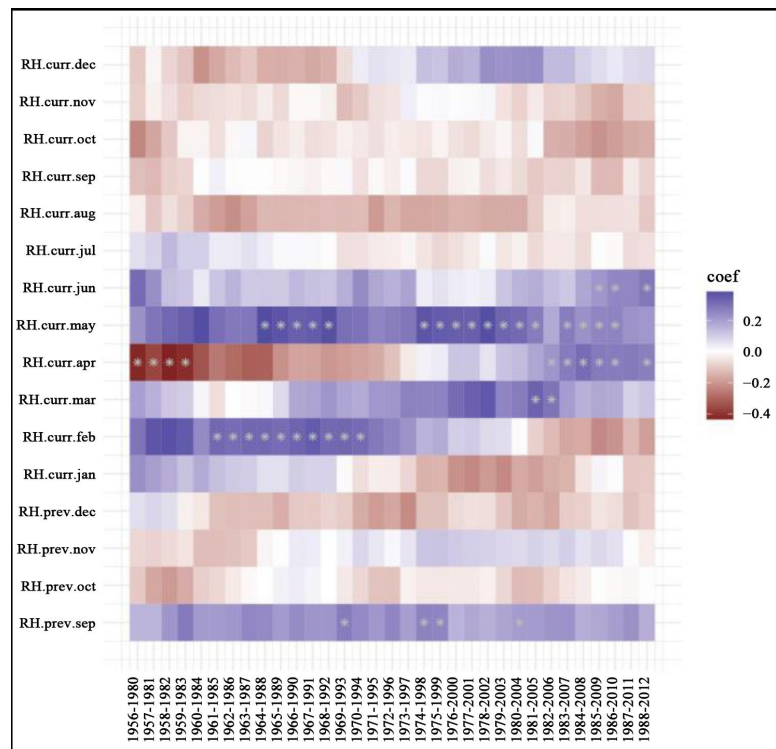


Figure 10. Correlation between annual ring index and monthly mean humidity
图 10. 年轮指数与月均湿度的相关性

3.2.4. 树轮宽度与平均气压及日照时数的相关性分析

晋中柏树生长与月平均气压的相关性(见图 11)不显著($P > 0.05$), 主要与各月呈负相关性, 与当年 3 月不显著正相关, 在 1995~2012 时段内与当年 1 月份平均气压的负相关性显著增强。柏树轮宽与日照因子的相关性(见图 12)表现为: 在 1955~1995 年间与当年 1 月和 2 月的日照时数显著负相关($P < 0.05$), 在 1995~2012 年间则转变为与当年 4 月与 12 月显著负相关($P < 0.05$)。

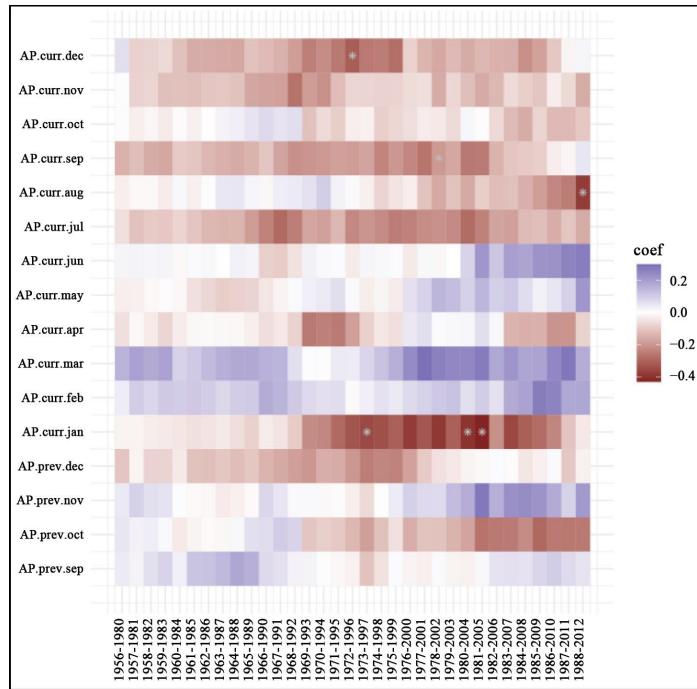


Figure 11. Correlation between annual ring index and monthly mean atmospheric pressure
图 11. 年轮指数与月均气压的相关性

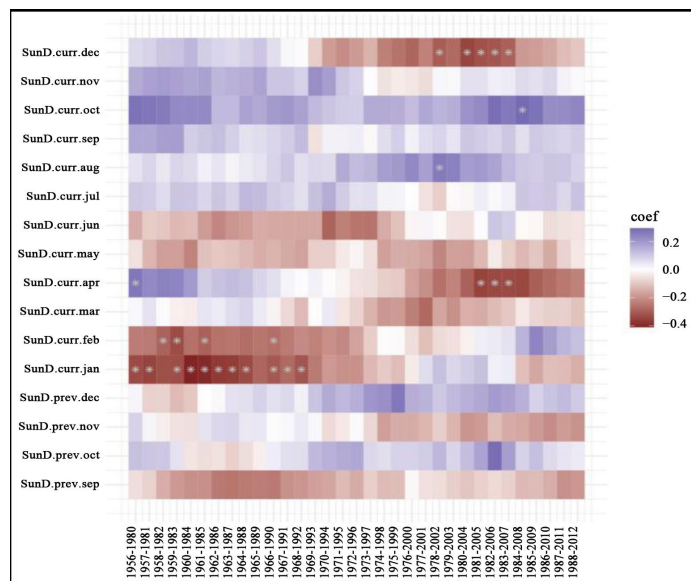


Figure 12. Correlation between annual ring index and monthly sunshine duration hours
图 12. 年轮指数与月日照时数的相关性

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本文根据引言中提出的需要解决的两个主要问题，选取了晋中地区柏树树种进行生长气候的响应研究，分析了1995年前后两个时段内树木与气候响应差异，所设定的研究目标基本完成，并得到以下二点结论：

(1) 气象资料与林木的径向生长相关分析表明，晋中地区的柏树轮宽与当年5月、6月的平均气温之间存在着极显著的负相关，而与去年春季的降水量则有较大的正相关性，并且这种相关性自1995年以后逐步加强。轮宽与4月相对湿度的相关性在1995~2012年间由负转正，与一月平均气压呈负相关，与1、2月份的日照时数呈负相关且逐渐减弱，但与4月和12月间的负相关关系有所加强。

(2) 滑动相关结果表明晋中地区柏树生长与气候因子之间的动态关系随时间推移发生了变化。气温升高或降水量下降导致的极度干旱是导致该变化的重要因素，同时也是导致树木生长与气候关系不稳定的重要因素。这一结果为深入了解全球气候变化条件下地区树木年轮的时空变化特点及其驱动因素提供了有益的参考。

4.2. 讨论

4.2.1. 气候变化下树木生长气候关系的稳定性变化

过去一百多年里，在全球气候变化变暖这个大环境影响下，黄土高原地区气候发生了显著变化。晋中地区地处黄土高原东缘，气候显著变暖是近代以来气候变化的显著趋势，其中1970~2010的气温上升速率达到了 $0.0336\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$ ，四十年来共升高了 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以1995年为分界点，对不同温度条件下的温度突变前后的树轮反应进行分析，结果表明：晋中林区的柏木在气温突变前，其径向生长具有正的温度反应，其生长趋向于平稳。但是，温度上升后，年轮增长量并未增加，反而春季温度的上升抑制了树木生长，树木生长对温度的反应度出现了下降。春天是树木生长的早期，树木对水分的需求很大，温度升高会加快土壤的蒸发、改变空气中的压力，使土壤含水量下降，进而抑制植物的生理代谢，从而对其生长产生不利的作用。在寒冷地区，树木的生长和温度有显著的正相关，温度升高有利于树木的生长；而当年轮指数与温度呈反比而与降水呈正向关系时，可认为是干旱胁迫的影响[15]。

受到气候变暖的影响，晋中地区的松柏受到的干旱胁迫主要表现在5月份，且在1995~2012时段内年轮与5月气温的负相关和降水的正相关均显著增强，表明干旱胁迫在该时段内有所加剧。有研究表明，生长季的高温有利于延长生长季并形成较宽的年轮，易与温度形成正相关，但本研究中6月份的相关性恰恰相反，这可能是因为6月降水相对不足，此时过高的气温不利于树木的生长。Makinen [16]等研究表明，树体的年轮宽度通常与春季气温有显著的正相关，在早春的时候，气温升高有利于树体免受内部组织液的损伤，从而为宽轮的形成作好准备。春季气温的上升，使形成层的活动提前，使坡面冰雪消融加快，使植株的生育期相应延长，对林木生长有利。而在此项研究中，轮宽与春季的最高气温呈负相关，其原因可能与树木的生理活动有关。当温度过高时，就会出现呼吸增强的现象，这时气温升高，就会产生更大的呼吸作用，同时也会增加养分的消耗。在植物的生长过程中，植物的径向生长速度因养分的大量消耗而减缓，此时气温与树木的径向生长呈显著的负相关。

以上研究表明，随着时间的推移，晋中柏树生长对气候响应不稳定，“响应分异现象”普遍存在，打破了以往对“均一性”原理的认识。“均一性”原理的首要前提是限制树木生长的主要因子不随时间发生改变，也就是基于气候变化的一致性，而“分异”现象的发生破坏了这一前提，那么就不能用当前的年轮与气象数据资料来重建过去的气候变化，否则将在很大程度上影响气候重建的精确度。

4.2.2. 响应分异的内在机制

晋中研究区柏树主体为侧柏，作为暖温带半干旱区典型乡土针叶树种，其固有的生理生态学特性是响应分异形成的内在核心。侧柏主根退化，85%以上吸收根集中分布于0~40 cm表层黄土，高度依赖土壤表层水分维持生长。1995年后晋中春季显著升温，表层土壤蒸散量激增，有效水分快速亏缺，加之黄土母质质地疏松、保水性差，根系吸水难度进一步加大，直接抑制形成层细胞分裂与径向生长，这是树轮宽度与5~6月均温负相关、与春季降水正相关持续增强的核心生理基础。侧柏管胞直径小、具加厚纹孔塞结构，干旱条件下可有效阻断气穴化扩散，抗水力失效能力强，属于典型的保守型水分利用策略。但该结构会大幅降低木质部水分传输效率，在气候变暖背景下，春季水分供需缺口持续扩大，有限的输水能力无法匹配生长季水分需求，直接导致树木生长对温度、湿度的响应模式突变，生长-气候关系稳定性下降。此外，侧柏径向生长关键期为3~5月，形成层3月启动、5~6月达到生长峰值，对温度与水分的协同匹配要求极高。1995年后春季升温提前，而区域降水节律未同步改善，形成升温早、供水迟的物候错位，高温加速呼吸消耗，光合产物积累不足，形成层活性受抑，最终表现为轮宽与春季温度负相关、与湿度正相关显著增强，4月相对湿度相关性由负转正。

侧柏适宜生长温度为10℃~25℃，气温超过28℃时呼吸速率增幅远超光合速率，净光合产物急剧减少。1995年后晋中5~6月均温频繁突破适宜阈值，树木用于径向生长的碳分配减少，生长受限。同时高温加剧气孔关闭，光合效率进一步下降，形成高温→干旱→生长抑制的正反馈循环，持续强化响应分异。而1月平均气压负相关增强，与高压控制下晴朗干燥、蒸散加剧、水分胁迫加重直接相关。1~2月日照负相关减弱、4~12月负相关增强，源于生长季日照延长加剧光抑制与蒸散耗水，非生长季日照的生理影响降低，体现侧柏对光照与蒸散耦合作用的季节性响应调整。

4.2.3. 干旱事件与气候变暖对林业管理的启示

Williams [17]等认为，干旱会造成气孔封闭，从而减少光合作用，进而抑制形成层的活动，使得树木在生长季节遭受严重的水分胁迫。在干旱胁迫条件下，“水力失效”可能对林木的生长发育起着至关重要的影响。树木的水分大部分是由木质部分输送的，从根部到顶部都有一排类似于麦秆的小管道。但在干旱环境下，树木难以吸收土壤中的水分，而气泡则会从周围的组织中渗入到木质部分。这样造成的空气堵塞会堵塞木材的导管，最后彻底切断木材的水分流通。

气候变暖是20世纪中叶以来最显著的气候变化，尤其是90年代中期发生的显著快速的升温现象，大大影响了晋中地区的树木生长，以往的研究结论已不能准确反映目前树木生长与气候关系的新变化，故在分时段下重新讨论树木生长-气候响应关系，对未来气候重建、林区的经营、森林的恢复等都具有一定的指导意义。山西高原地形起伏大、多山、少雨，在未来的气候环境中，极端气候事件的频繁和严重程度可能都会增大。由于气温升高，“干旱胁迫”加重，对苗木生长和成活率都有很大的影响，这将会成为制约当地林业发展的重要原因。因此，要想克服这些不利的气候条件影响，必须在适宜的造林季节，避免炎热、干旱，因地制宜，选择适宜的耐旱树种进行培育[18]。

4.3. 不足与展望

本文以晋中林区柏树为研究对象，系统分析了该树种在气候变化背景下生长和“响应分异现象”，并在野外调查、取样、室内处理、分析等方面积累了一定的工作经验，为今后深入了解黄土高原和世界气候变化提供了一定的参考。尽管对“响应分异”有了基本的了解和认识，但仍不明确其形成的规律和驱动机理[19]，未来应从以下几个方面着手：

- (1) 在不同的高度、不同的降雨量梯度下，扩展取样范围，尤其是其他干旱、半干旱地区的取样，对

“响应分异”进行全面的分析。并将其与本文的结果作比较。

(2) 运用更为科学的数据处理和分析手段, 建立一个更为完善的反应差异量化指标。

(3) 将年轮密度与同位素研究相结合, 以弥补宽度分析的缺陷, 使“响应分异”的研究得到全面推进。

参考文献

- [1] 傅莎, 邹骥, 张晓华, 姜克隽. IPCC 第五次评估报告历史排放趋势和未来减缓情景相关核心结论解读分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(5): 323-330.
- [2] 祁承经, 赵运林, 喻勋林, 吴毅. 树木年轮学综论[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(3): 1-8+16.
- [3] 高琳琳, 勾晓华, 邓洋, 张芬, 方克艳. 树轮气候学中分异现象的研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 453-460.
- [4] Fritts, H.C. (1925) Tree Rings and Climate. *Ecology*, **21**, 95-99.
- [5] Leng, M.J. (2004) Stable Isotopes in Tree Rings. *Quaternary Science Reviews*, **23**, 136-140.
- [6] Fritts, H.C. (1971) Dendroclimatology and Dendroecology. *Quaternary Research*, **1**, 419-449. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90057-3)
- [7] Meko, D. and Graybill, D.A. (1995) Tree-Ring Reconstruction of Upper Gila RWER Discharge. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **31**, 605-616. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1995.tb03388.x>
- [8] Grissino-Mayer, H.D. and Fritts, H.C. (1997) The International Tree-Ring Data Bank: An Enhanced Global Database Serving the Global Scientific Community. *The Holocene*, **7**, 235-238. <https://doi.org/10.1177/095968369700700212>
- [9] Holmes, R.L. (1992) Dendrochronology Program Library. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona.
- [10] Zhang, Q. (2020) Tree Rings Provide Evidence for Climate Regime Shifts. *Bulletin Of the Chinese Academy of Sciences*, **34**, 248-249.
- [11] 瞿中友, 梁丽君. 晋中地区近 40 年气象要素变化特征分析[J]. 现代农业科技, 2015(22): 251-251.
- [12] 李丽峰. 晋中市林业有害生物危害及防控[J]. 中国林业, 2006(16): 43.
- [13] Stokes, M.A. and Smiley, T.L. (1996) An Introduction to Tree-Ring Dating. University of Arizona Press.
- [14] Bunn, A.G., Sharac, T.J. and Graumlich, L.J. (2009) Using a Simulation Model to Compare Methods of Tree-Ring Detrending and to Investigate the Detectability of Low-Frequency Signals. *Tree-Ring Research*, **60**, 77-90. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-60.2.77>
- [15] 吴普, 王丽丽, 黄磊. 五个中国特有针叶树种树轮宽度对气候变化的敏感性[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 43-52.
- [16] Mäkinen, H., Nöjd, P., Kahle, H., Neumann, U., Tveite, B., Mielikäinen, K., *et al.* (2003) Large-Scale Climatic Variability and Radial Increment Variation of *Picea Abies* (L.) Karst. in Central and Northern Europe. *Trees*, **17**, 173-184. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0220-4>
- [17] Williams, A.P., Allen, C.D., Millar, C.I., Swetnam, T.W., Michaelsen, J., Still, C.J., *et al.* (2010) Forest Responses to Increasing Aridity and Warmth in the Southwestern United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **107**, 21289-21294. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914211107>
- [18] 张启. 山西中部针叶林 1900 年以来的健康历史[D]: [硕士学位论文]. 临汾: 山西师范大学, 2017.
- [19] 郭明明. 川西亚高山主要针叶树种年轮气候响应的分异规律研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.