

DOI: 10.5846/stxb202111233313

李宗善, 陈维梁, 焦磊, 李兆林, 王聪, 高光耀, 孙婧雅, 白应飞, 温润泉. 黄土高原南北样带尺度人工刺槐林对气候响应的敏感性分析. 生态学报, 2023, 43(15): 6454-6464.

Li Z S, Chen W L, Jiao L, Li Z L, Wang C, Gao G Y, Sun J Y, Bai Y F, Wen R Q. Climate sensitivity of black locust plantations along the precipitation gradient in the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6454-6464.

黄土高原南北样带尺度人工刺槐林对气候响应的敏感性分析

李宗善^{1, 2, *}, 陈维梁¹, 焦磊³, 李兆林^{1, 2}, 王聪^{1, 2}, 高光耀^{1, 2}, 孙婧雅⁴, 白应飞⁴, 温润泉⁵

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 陕西黄土高原地球关键带国家野外科学观测研究站, 西安 710061

3 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

4 延安市退耕还林工程领导小组办公室, 延安 716000

5 延安市宝塔区南泥湾国有生态林场, 延安 716000

摘要: 根据黄土高原南北样带尺度的人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)的年轮宽度资料, 分析了该地区刺槐树木生长趋势, 以及刺槐年表对气候响应随降雨梯度变化规律。研究结果表明延安以北的刺槐样点(绥德、神木)年轮指数近期趋于下降, 树木有生长衰退现象; 而延安以南刺槐样点(延安、富县、宜君、永寿)年轮指数近期趋于上升, 树木无生长衰退现象。气候响应结果表明, 刺槐年表对气候响应均以延安样点最为敏感, 表现年表与温度的负相关关系, 以及年表与降雨和干旱指数的正相关关系, 而延安以北和以南刺槐样点对气候响应敏感性均较低。黄土高原中部延安地区地处森林草原过渡带, 刺槐生长对外界环境变化最为敏感, 年表中气候信号也较强; 延安以南地区地处森林植被带, 气候条件较为适宜刺槐林生长, 因而年表中气候信号较弱; 延安以北地区地处草原植被带, 气候条件比较恶劣, 刺槐生长对干旱气候已有一定适应性特征, 因而年表中气候信号也较弱。

关键词: 树木年轮; 气候响应; 降雨梯度; 人工刺槐林; 黄土高原

Climate sensitivity of black locust plantations along the precipitation gradient in the Loess Plateau of China

LI Zongshan^{1, 2, *}, CHEN Weiliang¹, JIAO Lei³, LI Zhaolin^{1, 2}, WANG Cong^{1, 2}, GAO Guangyao^{1, 2}, SUN Jingya⁴, BAI Yingfei⁴, WEN Runquan⁵

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 National Observation and Research Station of Earth Critical Zone on the Loess Plateau in Shaanxi, Xi'an 710061, China

3 School for Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4 Grain to Green Project Management Office of Yan'an Government, Yan'an 716000, China

5 Nanniwan State-owned Ecological Forestry Station of Baota District, Yan'an 716000, China

Abstract: A network of six tree-ring width chronologies for black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation on the Loess Plateau along the precipitation gradients (from 420 mm to 600 mm) was constructed. The dendroclimatological techniques

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(41991233); 国家自然科学基金面上项目(42071125, 41877539)

收稿日期: 2021-11-23; **采用日期:** 2023-01-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zslst@rcees.ac.cn

were used to assess the impact of climatic factors on radial tree growth of black locust trees exposed to the increasing drought stress. The results indicated that tree-ring indices of black locust plantations in the north of Yan'an (annual total precipitation about 500 mm) had experienced severe growth reductions since the 1990s, and the signal of tree growth decline was evident. In contrast, black locust plantation in the south of Yan'an (annual total precipitation more than 500 mm) have experienced overall positive growth trend since the 1990s, and no signal of tree growth decline was found. Correlation analysis between tree-ring chronologies and climatic data (monthly and seasonally) indicated that radial growth of black locust trees in Yan'an site had the higher climatic sensitivity, representing significantly negative correlation with temperature and positive correlations with precipitation and Palmer Drought Severity Index. However, the radial growth of black locust trees sampled from north and south of Yan'an site both had lower climatic sensitivity, and no determined associated patterns between tree rings and climate variables were found. Multiple linear regression models between tree-ring data and the climatic variables most influential for radial growth indicated that the explained variance of climate for radial growth of black locust trees was highest in Yan'an site and reached the significant level. In contrast, the explained variance for sites northern and southern of Yan'an sites were comparatively lower and did not reached the significant level. Yan'an site is located in the forest-steppe transition zone in the middle area of the Loess Plateau, where tree annual growth is most sensitive to fluctuations of external environment factors and climatic signal in tree rings is strong. The sample sites south of Yan'an site is located in the typical forest vegetation zone, where climatic conditions are suitable for radial growth of black locust plantations and climatic signal in tree rings is weak. The sample sites north of Yan'an site are located in the typical steppe vegetation zone, where climatic conditions are harsh and black locust trees maybe has developed adaptable strategy dealing with dry climatic condition. Consequently, the climatic signals of tree rings in those site were also relatively weak. Our results should benefit the understanding of site-specific growth-climate patterns for black locust plantations under drought stress conditions on the Loess Plateau, China.

Key Words: tree rings, climatic response, precipitation gradient, black locust plantations, the Loess Plateau

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)由于生长速率快,且具有较强的环境适应性和抗干旱胁迫能力,在黄土高原地区得到了广泛的种植,是黄土高原生态恢复建设的重要人工林类型之一。然而,刺槐林这种速生、高耗水的林型在属于干旱半干旱区的黄土高原广泛种植和推广造成了其生态适应性与当地气候条件出现了脱节,造成土壤水分过度消耗而出现土壤干层,导致土壤供水能力大大下降,局地生存条件恶劣,黄土高原延安以北地区的人工刺槐林已出现大面积生长衰退问题^[1]。因而对黄土高原人工林刺槐林对环境因子的生态适应性研究具有较为重要的生态学意义,目前树木蒸腾耗水特征^[2]、树木生态型和生活型谱特征^[3]、植物化学计量参量^[4-5]、植物功能形状^[6]和生长适宜生态区划^[7]等方法对该地区人工槐林的生态适应性均有一定的研究。

树木年轮准确地记录了树木年度生长量信息,具有气候信号明确、数据连续性强、样本地分布广泛等优点^[8-9],已经被广泛地应用于树木生长对气候变化响应和适应研究当中。利用树木年轮材料对黄土高原人工刺槐林生长与气候条件的生态适应性研究也逐渐引起人们的关注,胡万银^[10]利用山西中部地区刺槐和旱柳的树木年轮数据,来统计物种生态反应数值对其生态环境适应性进行了研究,表明生态反应值与树木生长情况呈负相关,可以作为树木对生态环境适应能力的评价指标;而李颖^[11]则利用山西比较常见的五个外引树种,法桐、新疆杨、樟子松、刺槐、水杉的树木年轮数据构建树木年轮生态敏感度,对这些物种树木生长情况对环境因子的适应性情况进行了评价。然而基于树木年轮材料,从黄土高原区域尺度上对人工刺槐生长对气候条件的适应特征研究还未引起人们的关注。

本研究在黄土高原沿降雨梯度,在区域尺度获取多点人工刺槐林树轮数据,并探讨了人工刺槐林树木生长对干旱胁迫响应特征及其空间表现规律,对科学认识当前气候条件下黄土高原人工刺槐林生态适应性有重要意义,也将为在气候变化背景下该地区人工刺槐林生态恢复建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河中游(34°—40° N, 101°—113° E),位于我国中北部地区,总面积约 64 万 km²,该区域自北而南跨越我国温带和暖温带,从东南向西北包括半湿润、半干旱和干旱地带,年均温度为 年均降雨量为 250—600 mm、海拔范围为 800—3000 m(图 1)。黄土

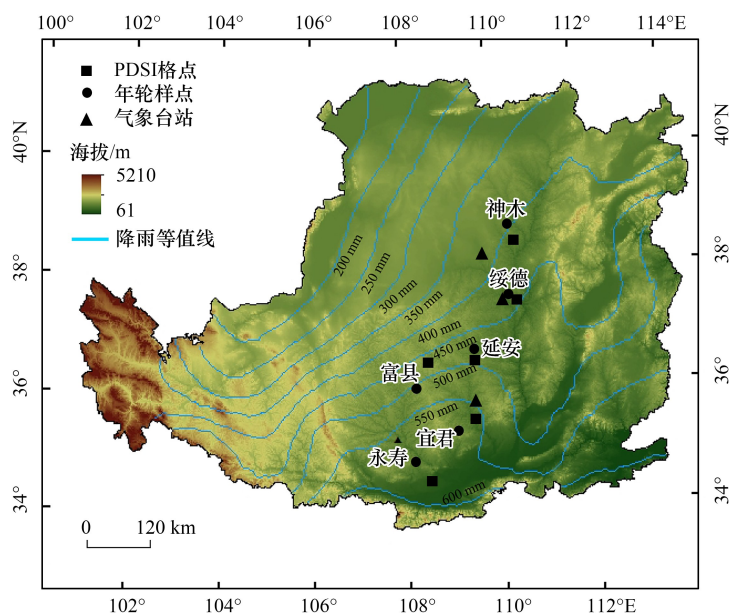


图 1 黄土高原人工刺槐林树木年轮采样点及气象站空间分布图

Fig.1 Location map of tree-ring sample sites and meteorological stations for the black locust plantations in the Loess Plateau of China

PDSI 格点, 毗邻年轮采样点的 PDSI 干旱指数网格点

高原是世界上面积最大的黄土堆积区,具有连续的第四纪黄土堆积,区内高塬沟壑区和丘陵沟壑区黄土厚度大多在 100—300 m^[12-13]。黄土高原大多数区域存在严重的土壤侵蚀问题,是世界上水土流失最为严重的区域之一^[14]。

刺槐林是黄土高原半干旱半湿润地区植被恢复和重建的主要人工林类型之一,作为一种典型的中生树种,既喜湿润肥沃的土壤又耐干旱瘠薄,有较强的适应性和抗逆性;在 20 世纪 70 年代末到 80 年代初,陕北黄土高原从南到北进行了大面积的栽植,对改善这一地区的生态环境、防治水土流失,乃至调节黄河流域的水文状况发挥了重要作用^[1, 6]。

1.2 年轮样品采集及处理

本文所用人工刺槐林树轮资料是 2015 年 6 月至 2016 年 9 月在黄土高原南北样带上获取的,一共采集了 6 个年轮样点,从南到北依次为永寿、宜君、富县、延安、绥德、神木,采样点年均降雨量变化范围为 420—600 mm,海拔高度变化范围为 1180—1350 m(图 1,表 1)。选择人工刺槐林分布典型、受人为活动干扰较少的地段采集年轮样品;为获得较长的树木年轮样本,在树轮样品采集点选择年龄较老的树木个体获取样本。样芯采集通常在胸高部位,在垂直于山坡方向上用生长锥钻取树轮样本。取到的样芯放置在塑料样管内,并在样管上用油性笔标注代码。每个采样点保障采集 30—40 刺槐植株,每个植株采集一根树木年轮样芯。

样品预处理基本按照 Stokes 和 Smiley^[15]的方法进行。首先将样品放置于平坦处晾干,然后将其粘在特制的木槽中;将粘牢的样芯依次用颗粒由粗到细(280—800 目)的砂纸进行打磨。

1.3 树轮年表构建

样本经预处理后,用骨架示意图进行交叉定年^[8],然后使用 LINTAB5.0 年轮分析仪对树木年轮宽度逐年进行测量,该测量系统精度可达 0.01 mm。利用 COFECHA 程序^[16]对定年和测量结果进行了检验,保证定年与测量的准确性。对于那些效果较差、与主序列之间的相关系数达不到 99% 置信区的样芯予以剔除,最终 206 根刺槐树芯用于年表的构建。

经过交叉定年的年轮序列,用 ARSTAN 程序^[17]进行去趋势和标准化,这一过程消除了树木生长中与年龄增长相关联的生长趋势及部分树木之间的非一致性扰动,排除了其中的非气候信号。首先对每个年轮宽度序列进行负指数曲线拟合,以去除与树木年龄有关的生长趋势;如果不成功,则用任意斜率的线性回归进行直线拟合,并以取树轮宽序列和与其对应的生长趋势拟合曲线的比值,对所得到的去趋势年轮序列进行双权韧性平均处理,合成了平均值为 1、无量纲的树轮宽度标准年表。

1.4 气象资料

气象数据来自与刺槐年轮采样点距离较近的气象站,一共在黄土高原选取了 5 个气象站台站,从南到北依次有长武站(对应永寿采样点)、洛川站(对应宜君和富县采样点)、延安站(对应延安采样点)、绥德站(对应绥德采样点)、榆林站(对应神木采样点)。气候资料气象数据由国家气象局(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供,时间区间为 1951—2020 年,气候要素包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降雨量。为了能够较好反映出采样点气候干旱程度,本研究选取了与采样点临近的 CRU 网格化 PDSI 干旱指数数据,共提取了 6 个临近样点的 PDSI 指数格点数据。CRU 干旱指数格点数据从 CRU TS v. 3.22 全球气候数据库(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>)^[18]下载,时间跨度为 1951—2020 年,精度为 0.5 度(约为 25 km)。

表 1 黄土高原人工刺槐林树木年轮样点统计表

Table 1 The basic information of tree-ring chronologies for black locust plantations in the Loess Plateau

区域 Regions	采样点 Sample site	类型 Type	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Elevation	降雨/mm Precipitation
神木	六道沟小流域	刺槐林	110.36	38.78	1320	420
绥德	辛店沟小流域	刺槐林	110.31	37.6	1290	450
延安	羊圈沟小流域	刺槐林	109.52	36.7	1250	530
富县	任家台林场	刺槐林	108.22	36.06	1180	560
宜君	赵家塬林场	刺槐林	109.12	35.34	1350	580
永寿	槐坪林场	刺槐林	108.16	34.83	1080	600
长武	—	气象站	107.8	35.2	1207	—
洛川	—	气象站	109.5	35.82	1160	—
延安	—	气象站	109.5	36.5	959	—
绥德	—	气象站	110.22	37.5	930	—
榆林	—	气象站	109.78	38.27	1157	—
—	六道沟小流域	PDSI 格点	110.5	38.5	—	—
—	辛店沟小流域	PDSI 格点	110.5	37.5	—	—
—	羊圈沟小流域	PDSI 格点	109.5	36.5	—	—
—	任家台林场	PDSI 格点	108.5	36.5	—	—
—	赵家塬林场	PDSI 格点	109.5	35.5	—	—
—	槐坪林场	PDSI 格点	108.5	34.5	—	—

PDSI 格点,毗邻年轮采样点的 PDSI 干旱指数网格点

1.5 数据分析

采用相关分析统计树轮生长对于气候要素的响应,考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响^[8],所用气候资料的时间跨度为前一年 6 月到当年 9 月,气候要素包括月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降雨量、PDSI 干旱指数,树轮年表与气候要素的响应关系均用 DENDROCLIM2002 程序实现^[19],相关

统计显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 研究结果

2.1 研究区气候变化特征

从气象站过去 70 年(1951—2020)气候数据来看(图 2),黄土高原年均温度呈线性上升趋势,每 10 年上升 0.16—0.32℃,以延安采样点气温上升幅度最大;年总降雨量则大致有不断下降的趋势,每 10 年下降 16.1—

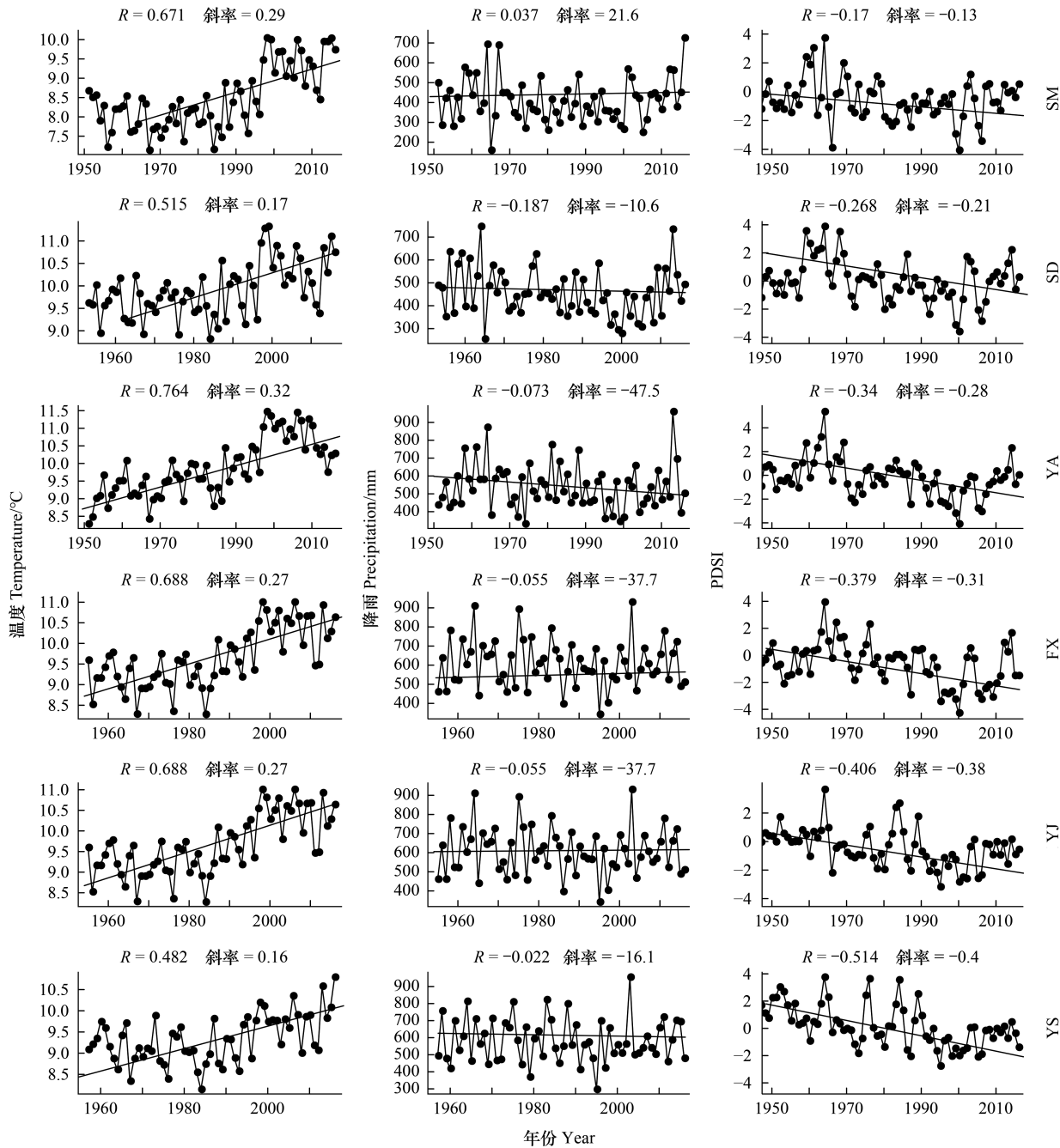


图 2 黄土高原人工刺槐林年轮采样点气候数据波动趋势

Fig.2 Climatic changing trend of the meteorological station and CRU grid near tree-ring site of black locust plantations in the Loess Plateau of China

SM, 神木; SD, 绥德; YA, 延安; FX, 富县; YJ, 宜君; YS, 永寿; PDSI, PDSI 干旱指数; R, 相关系数; Slope, 气候要素上升率

47.5 mm,以延安采样点的降雨下降最为明显,另外神木采样点的年总降雨量略有上升趋势;PDSI 干旱指数呈线性下降趋势,以分布在南部采样点(永寿、宜君、富县、延安)的干旱指数下降幅度较大($R=-0.34-0.514$, $P<0.01$),而分布在北部采样点(绥德、神木)的干旱指数下降幅度较小($R=-0.17-0.268$, $P>0.05$)。

从总体上看,黄土高原近代大致向气候暖干化方向发展,具体表现特征是年均温度迅速上升,而年总降雨量趋于下降,PDSI 干旱指数也成明显下降趋势;另外黄土高原暖干化气候程度以处于中部延安地区最为明显,其次是延安以南地区,而延安以北地区暖干化气候特征较不明显。

2.2 树轮年表统计特征

本研究构建的刺槐树轮宽度标准年表(简称年表)时间长度为 33—50 年,以宜君刺槐采样点年表年龄最短,长度为 33 年(1985—2017 年),以永寿刺槐年表年龄最长,长度为 50 年(1968—2017 年)(图 3)。从刺槐年表指数数十年来波动趋势来看,延安以北样点(绥德、神木)的年表指数有不断下降趋势,树木生长衰退现象比较明显;延安以南样点(延安、富县、宜君、永寿)的年表指数有不断上升趋势,树木生长无生长衰退现象。

年表的统计量特征可以反映树木生长的一些基本特征以及树轮年表所含不同频率信息量的多少(表 2)。结果表明,本研究采集的刺槐年表间具有较好的相关性(样芯间相关系数 $R_{bar}=0.257-0.557$, $P<0.01$),表明不同样芯之间的轮宽变化有很好的 consistency。各年表的一阶自相关系数为 0.22—0.558,说明树木前一年的生长状况对当年生长的影响较小^[8]。年表的平均敏感度(MS)数值为 0.363—0.446,这说明了树轮资料具有较强的高频波动信号。年表的信噪比(SNR)为 3.411—40.827,达到了较高的水平;年表具有较高的样本群体表达信号(EPS),数值为 0.773—0.976,这说明了本调查采集样本量所含的信号是能代表总体特征的^[20]。以上年表各种统计特征表明了样本之间的树轮宽度变化有很好的 consistency,记录了可靠区域气候信息,所以本次调查所用的树轮资料适于进行年轮气候学分析。

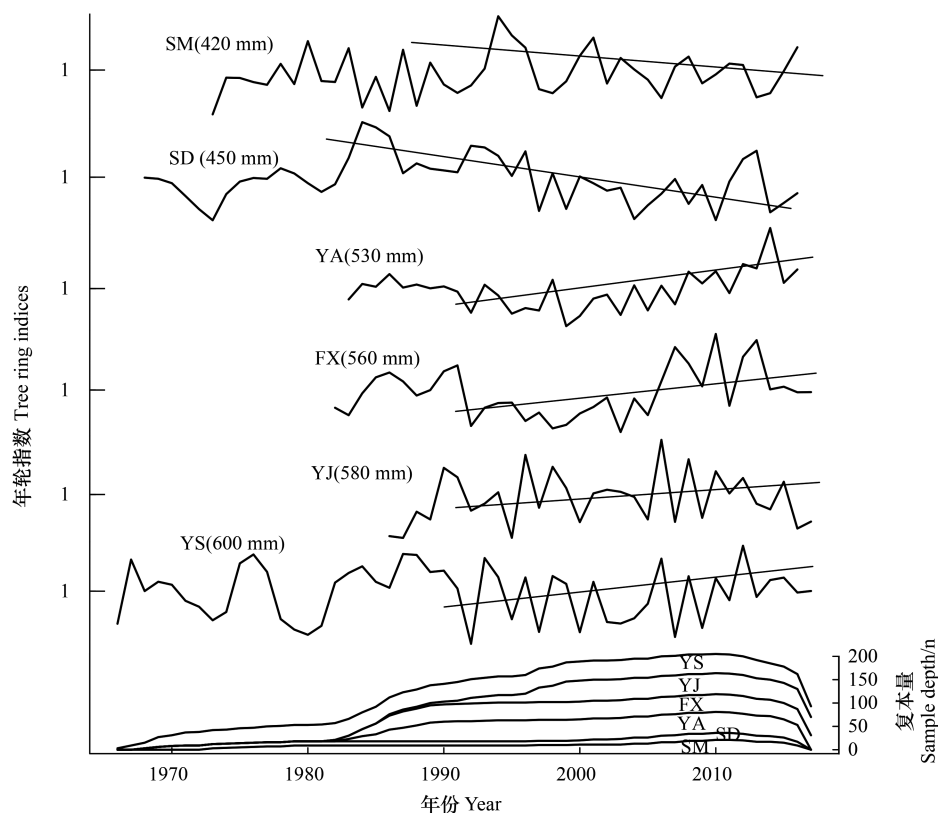


图 3 黄土高原人工刺槐林树轮标准年表

Fig.3 Climatic changing trend of the meteorological station and CRU grid near tree-ring site of black locust plantations in the Loess Plateau of China

表 2 黄土高原人工刺槐林树木年轮年表统计量

Table 2 Main characteristic parameters of tree-ring chronologies developed from the black locust plantations of the Loess Plateau

区域 Region	采样点 Sample site	样本量 Sample depth	Rbar	MS	SD	AC1	EPS	SNR	区间 Time-span
神木	六道沟小流域	21	0.257	0.396	1.879	0.22	0.773	3.411	1967—2016
绥德	辛店沟小流域	15	0.499	0.446	1.777	0.376	0.909	10.039	1968—2016
延安	羊圈沟小流域	45	0.513	0.456	1.406	0.444	0.975	38.498	1980—2016
富县	任家台林场	38	0.557	0.363	1.315	0.558	0.976	40.827	1980—2017
宜君	赵家塬林场	45	0.395	0.43	1.906	0.251	0.953	20.084	1985—2017
永寿	槐坪林场	42	0.517	0.408	1.384	0.473	0.975	38.578	1968—2017

样芯间相关系数 Rbar; Mean inter-series correlation; 平均敏感度 MS; Mean sensitivity; 方差 SD; Standard deviation; 一阶自相关系数 AC1; Autocorrelation order 1; 样本群体表达信号 EPS; Express population signal; 信噪比 SNR, Signal-to-noise ratio

2.3 树木生长对气候的响应特征

年表与月际气候数据分析结果表明(图 4),刺槐年表与温度相关性以延安采样点最为明显,其中与去年

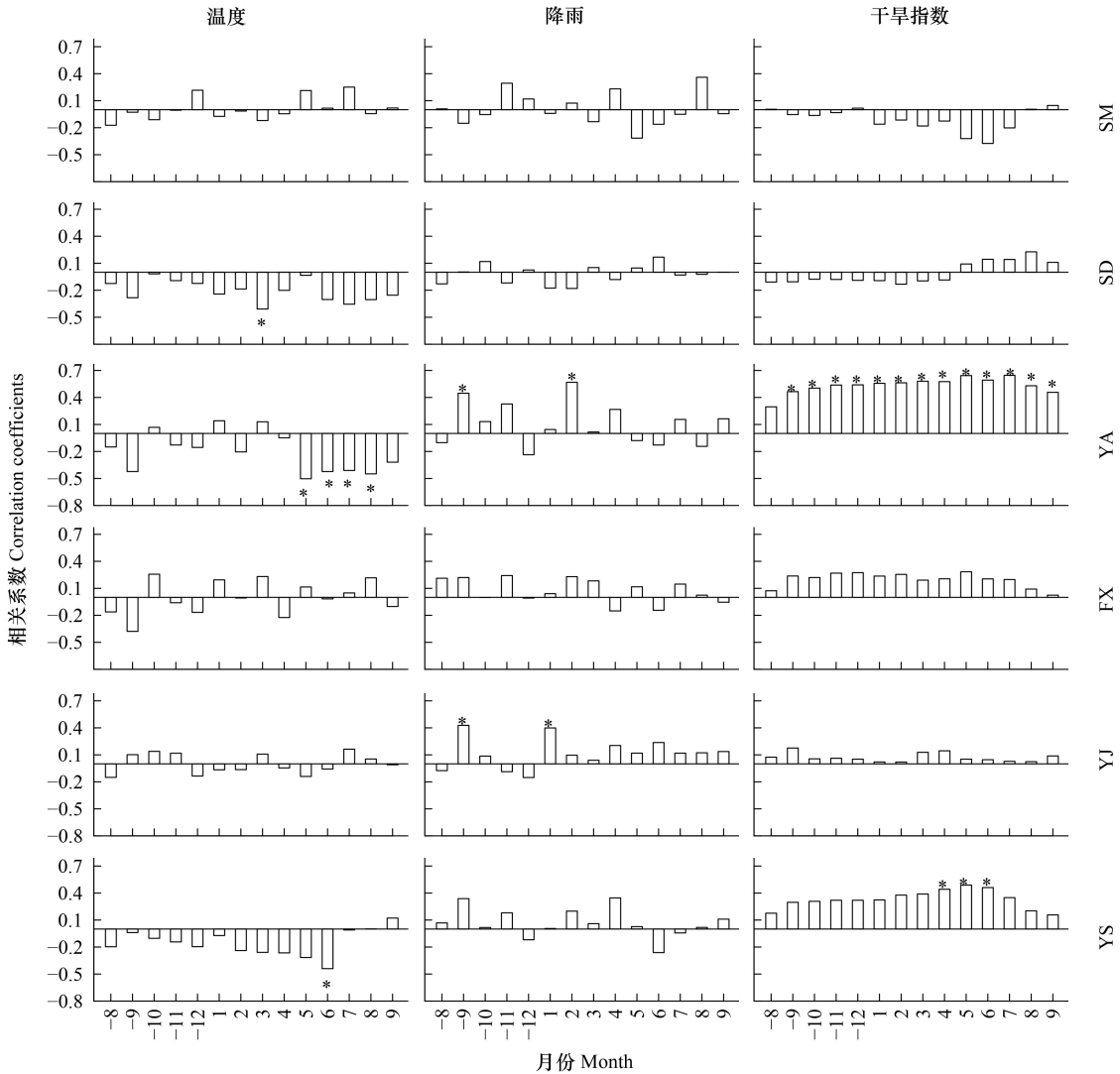


图 4 黄土高原刺槐人工林年表与月际气候要素的响应分析

Fig.4 Correlation analysis of monthly climate data with tree-ring chronology of black locust plantations in the Loess Plateau of China

TMP: 温度; PRE: 降雨; PDSI: PDSI 干旱指数; *, 达到 95% 显著水平; - 代表上一年

夏季 7 月 ($R=-0.387$, $P<0.01$) 和秋季 9 月 ($R=-0.401$, $P<0.01$), 以及当年春季 5—6 月 ($R=-0.412$ — -0.498 , $P<0.01$) 和夏季 7—8 月 ($R=-0.392$ — -0.425 , $P<0.01$) 温度负相关关系达到了显著性水平; 其他样点刺槐年表与温度的关系大致也呈相关关系, 具体表现为绥德年表与春季 3 月温度 ($R=-0.42$, $P<0.01$) 和永寿年表与夏季 6 月 ($R=-0.44$, $P<0.01$) 温度的相关性。刺槐年表与降雨相关性也以延安采样点最为明显, 其中与去年夏季 7 月 ($R=0.515$, $P<0.01$) 和秋季 9 月 ($R=0.489$, $P<0.01$), 以及当年冬季 2 月 ($R=0.512$, $P<0.01$) 降雨正相关关系达到了显著性水平; 其他刺槐样点年表与降雨关系较弱, 大多未达到显著性水平。刺槐年表与 PDSI 干旱指数相关性同样以延安采样点最为明显, 其中与去年秋季 9 月到当年秋季 9 月的正相关水平达到了显著性水平 ($R=0.426$ — 0.632 , $P<0.01$), 其他刺槐样点年表与 PDSI 干旱指数关系较弱, 大多未达到显著性水平, 仅永寿年表与当年春季 3—5 月 PDSI 干旱指数具有较强的相关关系 ($R=0.389$ — 0.497 , $P<0.01$)。年表与季节平均 (三个月均值) 气候要素相关分析结果表明 (图 5), 年表与季节平均温度和 PDSI 干旱指数的相关结果基本与月际数据相一致, 与季节平均降雨相关结果要略弱于月际数据, 但是基本规律是相似的, 进一步验证了年表与气候数据相关结果的可靠性。

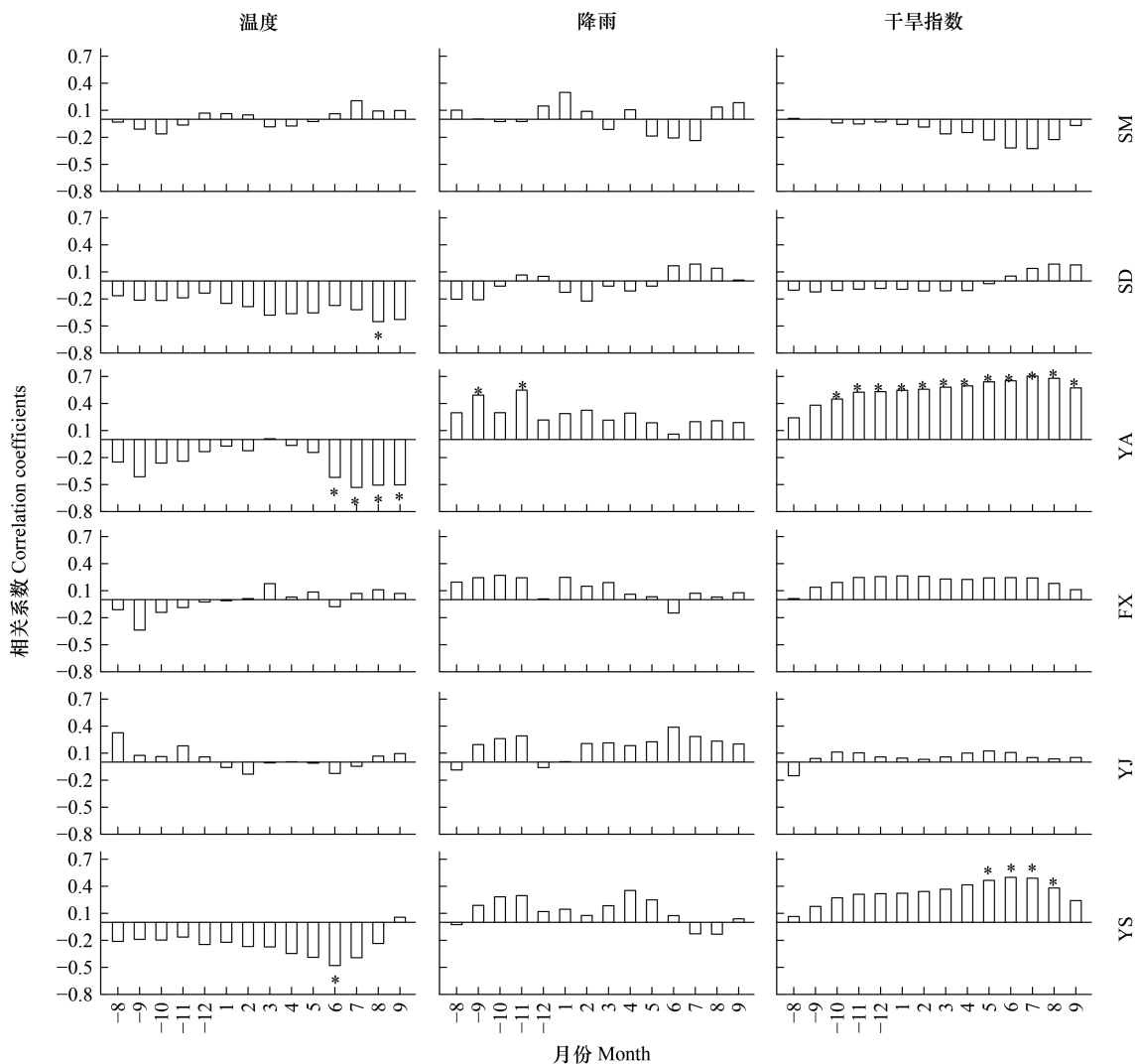


图 5 黄土高原刺槐人工林年表与季节平均 (3 个月) 气候要素的响应分析

Fig.5 Correlation analysis of seasonal (averaged from three months) climate data with tree-ring chronology of black locust plantations in the Loess Plateau of China

2.4 树木生长对气候响应的多元线性模型

根据刺槐年表与气候要素的相关分析结果,挑选出与刺槐年表相关显著的气候要素(当年 5 至 8 月份温度、当年 2 月份降雨、去年 9 月份降雨和年平均 PDSI 干旱指数)与刺槐年表进行多元线性回归和逐步回归分析,以便从整体水平揭示刺槐年际生长变化方差在多大程度上能被气候要素所解释。结果表明(表 3),处于黄土高原中部延安刺槐年表与气候要素回归模型结果最为显著,气候要素总体上可解释刺槐年表年际波动的 64.5% 的方差,回归方差中各气候要素与年表的相关性均通过显著性检验;其次是绥德、富县和永寿刺槐年表,气候要素总体上可解释刺槐年表年际波动的 20% 左右的方差,而宜君和神木刺槐年表与气候要素的回归模型结果较差,总体解释方差量也较低。

表 3 黄土高原南北样带人工刺槐林树轮年表与气候要素的多元线性回归方程

Table 3 Most supported ordinary least-squares regression models of climate on tree-ring chronologies of the black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations along the south-north transect in the Loess Plateau of China

采样点 Sample site	降雨量/mm Precipitation	线性模型 Linear model	R^2	Adjusted R^2	P	AIC
神木	420	$Y = -0.568 \times \text{TMP}_{5-8} + 3.34 \times \text{PRE}_{-9} + 1.658$	0.068	0.045	> 0.05	-139.9
绥德	450	$Y = -0.158 \times \text{TMP}_{5-8}^* + 1.25 \times \text{PRE}_2 + 4.514$	0.208	0.174	< 0.05	-134.9
延安	530	$Y = -0.711 \times \text{TMP}_{5-8}^* + 1.61 \times \text{PRE}_2^* + 1.61 \times \text{PRE}_{-9}^* + 0.574 \times \text{PDSI}_{\text{yr}}^* + 2.333$	0.645	0.596	< 0.01	-117.3
富县	560	$Y = 0.179 \times \text{TMP}_{5-8} + 1.44 \times \text{PRE}_{-9} + 0.888 \times \text{PDSI}_{\text{yr}} - 2.67$	0.197	0.119	> 0.05	-86.8
宜君	580	$Y = 1.453 \times \text{PRE}_{-9} + 8.43$	0.074	0.042	> 0.05	-82.2
永寿	600	$Y = -0.895 \times \text{TMP}_{5-8} + 6.362 \times \text{PRE}_2^* + 1.01 \times \text{PRE}_{-9} + 2.577$	0.201	0.154	< 0.05	-149.8

多元线性回归模型是用线性回归方法阐明因变量(Y)被多个自变量($X_1, X_2, \dots, X_i$)线性拟合程度和解释方差量; * 自变量和因变量之间的相关程度达到 95% 的可信水平; R^2 , 解释方差量; Adjusted R^2 , 调整自由度的解释方差量; AIC, 线性模型间对比的 AIC 标准

3 讨论

基于黄土高原南北样带尺度的人工刺槐林树木年轮材料,本研究发现延安以北的刺槐样点(绥德、神木)在 1990 年代以来出现明显生长衰退趋势,延安以南的刺槐样点(延安、富县、宜君、永寿)在 1990 年代以来有明显生长趋势,无生长衰退现象。基于黄土高原刺槐林生长耗水和土壤水分动态关系研究表明,延安以北地区刺槐林林地土壤出现严重退化,深层土壤含水量产生严重亏缺,在 1.6—2.0 m 以下出现持续性干层,部分土壤退化严重地点 3.0—5.0 m 平均土壤含水量已接近土壤萎蔫含水量,严重影响到人工刺槐林的持续健康生长,树木生长出现明显衰退,最终导致大面积生态低效的刺槐“小老头树”林出现^[21-22]。王力等^[1]通过对陕北黄土高原南北 6 个人工刺槐林样地进行标准地调查,分析了人工刺槐林树高、胸径、材积等指标的生长状况与土壤含水量亏缺的关系,研究发现黄土高原北部刺槐林的平均树高(4.5 m)、胸径(5.8 cm)、材积(10.79 m³/hm²)水平要明显低于南部刺槐林(平均树高、胸径、材积分别为 11.8 m、11.5 cm、1.62 m³/hm²),这表明黄土高原北部刺槐林树木生长受到明显的干旱因素限制,出现了明显的生长衰退现象,这与本研究的树木年轮学结果具有较好的对应关系。

从刺槐树轮年表与气候要素响应特征来看,处于黄土高原中部的延安地区刺槐年轮生长对气候响应敏感性最高,其年表与温度呈负相关关系,而与降雨和 PDSI 干旱指数呈正相关关系,体现出对于干旱胁迫气候具有较强的响应特征。延安地区处于黄土高原森林植被向草原植被的过渡地带^[1,7],年降雨量大约在 500 mm 左右,应该是处于黄土高原人工刺槐林适宜生长区域的北界,一般认为森林生长在其空间分布的边缘地带,即森林向灌丛或草地的过渡地带,对外界环境条件变化最为敏感,譬如森林分布海拔上限的树木生长对温度响应最为敏感,而森林分布海拔下限的树木生长对降雨响应最为敏感^[23-24]。基于延安南泥湾地区天然辽东栎的树木年轮材料,买尔当·克依木等^[25]发现该地区辽东栎径向生长对气候响应敏感性具有时间不稳定性特征,表现在与温度由正相关转为负相关,与降雨正相关关系则逐渐加强,这表明延安地区天然辽东栎林生长主要

受到水分胁迫条件的影响,而这是与本研究相互吻合的。

延安以北地区属于典型草原植被带,年降雨量一般在 450 mm 左右,该地区的水分条件已不足以支撑人工刺槐林的正常发育,本研究树轮年表数据显示该地区刺槐树木生长速率较慢,树木生长对气候响应敏感性也较低,体现出刺槐生长对于干旱气候条件体现出的一定的适应性特征。已有许多研究表明黄土高原北部干旱区刺槐林为了维持在干旱条件下的新陈代谢,并减少水分散失,在一系列生态生理特征上体现出对于干旱气候的适应性,譬如比叶面积较小、叶片较厚、叶片栅栏组织发达、植物比根长和可溶性糖分含量较高等^[26—28];刺槐对于干旱气候的适应策略需要分配更多的物质给吸收和保持水分的组织和器官,从而对刺槐生长的物质投入较少,使得刺槐生长速率较慢且对于干旱胁迫条件不具有敏感性特征^[29—30]。延安以南地区属于典型森林植被带,年降雨量一般在 550 mm 左右,该地区气候条件相对优越,土壤水分条件足以支撑人工刺槐林生长需求,本研究表明该地区刺槐树轮年表生长速率较快,但年表对气候要素响应敏感性较低,也无明显干旱胁迫信号,这主要是因为延安以南地区是人工刺槐林生长适宜地区,刺槐生长还未受到水分胁迫的限制性影响的原因^[31—32]。

4 结论

本研究依照树木年轮气候学传统技术和方法,在黄土高原沿南北样带尺度(降雨梯度为 180 mm 量,从 420 mm 到 600 mm)构建了 6 个地点(永寿、宜君、富县、延安、绥德、神木)人工刺槐林树轮年表宽度序列,并对这些刺槐年表的生长趋势和气候响应敏感性特征进行了分析。结果表明延安以北绥德和神木采样点(降雨量大约 450 mm)属于典型草原植被带,气候条件较为干旱恶劣,刺槐林年轮指数近期趋于下降,树木有较为明显的生长衰退现象,刺槐年表中气候信号较弱,体现出树木生长对于干旱胁迫气候一定的适应性特征;延安采样点(降雨量大约 500 mm)位于黄土高原中部,属于森林植被向草原植被过渡地带,气候条件适中,刺槐树木生长速率有上升趋势,树轮年表对气候响应敏感性较高,树木生长对于干旱胁迫响应最为敏感;延安以南富县、宜君和永寿采样点(降雨量大约 550 mm)属于典型森林植被带,气候条件较为优越,刺槐树木生长速率有上升趋势,树轮年表对气候响应敏感性较低,这是由于干旱胁迫还未对刺槐生长产生限制影响的原因。

就黄土高原区域人工刺槐林经营和维护方面而言,黄土高原南部(延安以南地区)人工刺槐虽未发生生长衰退问题,刺槐树轮年表对气候响应特征也未体现出明显的干旱胁迫特征,但是由于刺槐种植密度过高,需要对人工刺槐林进行适当疏伐和群落结构改良措施,以免刺槐林在其生命周期中后期出现大面积生长衰退问题;黄土高原北部(延安以北地区)人工刺槐林已出现明显生长衰退问题,对气候响应敏感性也较差,刺槐林生长处于明显亚健康状态,且具有明显小老头树特征,很难发挥其生态效益,在延安以北地区应逐步以耗水量较小的灌丛和草地恢复措施替代人工刺槐林。

参考文献(References):

- [1] 王力,邵明安,张青峰. 陕北黄土高原土壤干层的分布和分异特征. 应用生态学报, 2004, 15(3): 436-442.
- [2] 单长卷,梁宗锁. 土壤干旱下刺槐幼苗蒸腾速率及其与影响因子的关系. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(11): 93-96.
- [3] 刘江华,李登武,刘国彬,李小利,侯禧禄. 刺槐林下植被的水分生态型和生活型谱特征. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 95-99.
- [4] 杨佳佳,张向茹,马露莎,陈亚南,党廷辉,安韶山. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究. 土壤学报, 2014, 51(1): 133-142.
- [5] 李佳佳,樊妙春,上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(21): 7996-8002.
- [6] 宋光,温仲明,郑颖,丁曼. 陕北黄土高原刺槐植物功能性状与气象因子的关系. 水土保持研究, 2013, 20(3): 125-130.
- [7] 王忠林,薛智德. 黄土高原刺槐林生长适宜生态区划. 水土保持研究, 1994, 1(3): 43-47.
- [8] Fritts H C. Tree Rings and Climate. New York: Academic Press, 1976.
- [9] Schweingruber F H. Tree Rings and Environment. Dendroecology Bern: Paul Haupt Verlag, 1996.
- [10] 胡万银. 晋中地区不同树木年轮和生态反应值的相关性研究. 天津农业科学, 2013, 19(12): 95-97.
- [11] 李颖. 树木年轮生态敏感度研究及在树木适应性评价中的应用[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013.

- [12] 傅伯杰. 黄土高原生态平衡的探讨. 生态科学, 1983, 2(1): 44-48.
- [13] 邵明安, 贾小旭, 王云强, 朱元骏. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.
- [14] 金钊. 走进新时代的黄土高原生态恢复与生态治理. 地球环境学报, 2019, 10(3): 316-322.
- [15] Stokes M A, Smiley T I J. An introduction to tree-ring dating. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.
- [16] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-78.
- [17] Cook E. Methods of dendrochronology. New York: Springer, 1990.
- [18] Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 Dataset. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.
- [19] 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.
- [20] Wigley T M L, Briffa K R, Jones P D. On the average value of correlated time-series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1984, 23(2): 201-213.
- [21] 杨文治, 马玉玺, 韩仕峰, 杨新民. 黄土高原地区造林土壤水分生态分区研究. 水土保持学报, 1994, 8(1): 1-9.
- [22] 杨维西. 试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. 林业科学, 1996, 32(1): 78-85.
- [23] Körner C. A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. Oecologia, 1998, 115(4): 445-459.
- [24] 王晓春, 周晓峰, 孙志虎. 高山林线与气候变化关系研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 301-305.
- [25] Keyimu M, Li Z S, Jiao L, Chen W L, Wu X C, Fan Z X, Zeng F J, Fu B J. Radial growth response of *Quercus liaotungensis* to climate change-a case study on the central Loess Plateau, China. Trees-Structure and Function, 2022, 36: 1811-1822.
- [26] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. Functional Ecology, 2001, 15(4): 423-434.
- [27] 马文静, 魏小红, 宿梅飞, 骆巧娟, 赵颖. 干旱胁迫下紫花苜蓿幼苗非结构性碳水化合物代谢对 NO 的响应. 生态学报, 2019, 39(21): 8068-8077.
- [28] 任磊, 赵夏陆, 许靖, 张宏毅, 郭彦宏, 郭福龙, 张春来, 吕晋慧. 4 种茶菊对干旱胁迫的形态和生理响应. 生态学报, 2015, 35(15): 5131-5139.
- [29] Westoby M, Falster D S, Moles A T, Vesk P A, Wright I J. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33: 125-159.
- [30] 梁建萍, 贾小云, 刘亚令, 吴云, 周然, 冯前进. 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及根部次生代谢物含量的影响. 生态学报, 2016, 36(14): 4415-4422.
- [31] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原油松和刺槐叶片光合生理适应性比较. 应用生态学报, 2007, 18(1): 16-22.
- [32] 张中典. 黄土高原降水梯度带刺槐 SPAC 系统水分传输对干旱环境的适应性[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.