

DOI: 10.20103/j.stxb.202303150482

刘杰, 李宗善, 梁海斌. 黄土高原中部降水对乔灌木气候响应敏感性的影响. 生态学报, 2024, 44(3): 1203-1220.

Liu J, Li Z S, Liang H B. Climate response sensitivity analysis of trees and shrubs with precipitation gradients in the central of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1203-1220.

黄土高原中部降水对乔灌木气候响应敏感性的影响

刘 杰^{1, 2}, 李宗善^{1, 3, *}, 梁海斌⁴

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 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3 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

4 太原师范学院地理科学学院, 晋中 030619

摘要: 基于黄土高原中部地区降水梯度上(绥德 447mm, 延安 531mm, 宜君 603mm)的乔灌木年轮材料, 通过树木年轮气候学方法分析了不同降水条件下, 乔木刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、灌木酸枣(*Ziziphus jujuba*)、白刺花(*Sophora davidii*)径向生长的气候敏感性差异。结果表明:(1) 绥德、宜君酸枣标准年表的相关统计参量明显偏低, 个体生长一致性较差, 年轮材料中包含的气候信息较少, 这表明绥德和宜君地区的酸枣对本地气候条件已高度适应, 径向生长受气候影响较小。(2) 刺槐、山杏、酸枣、白刺花均在森林草原过渡带(延安)表现出较高的气候敏感性, 气候要素对各物种径向生长的解释率在该地区最高。除绥德、宜君酸枣外, 各样点的乔灌木气候——生长关系均存在“时滞效应”。整体上研究区内酸枣气候敏感性最差。在绥德和宜君地区, 灌木气候敏感性明显弱于乔木。(3) 乡土物种山杏、酸枣、白刺花三个采样点均对长期干旱胁迫不敏感, 对当地环境具有较强的生态适应性。人工物种刺槐在延安地区, 从上年生长季末至当年生长季结束持续对干旱胁迫响应敏感, 而在绥德和宜君地区则对干旱胁迫不敏感。刺槐、山杏、白刺花在宜君地区与温度的响应特征整体上发生明显趋势转换, 温度对刺槐、白刺花的负反馈减弱正反馈增强, 而对山杏的正反馈减弱负反馈增强。

关键词: 黄土高原; 降水梯度; 径向生长; 气候敏感性; 乔灌木

Climate response sensitivity analysis of trees and shrubs with precipitation gradients in the central of the Loess Plateau

LIU Jie^{1, 2}, LI Zongshan^{1, 3, *}, LIANG Haibin⁴

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

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

4 Institute of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China

Abstract: Using tree and shrub ring materials from precipitation gradients (Suide: 447 mm, Yan'an: 531 mm, and Yijun: 603 mm) in the central of the Loess Plateau, the climatic sensitivity of radial growth of *Robinia pseudoacacia*, *Armeniaca sibirica*, *Ziziphus jujuba*, and *Sophora davidii* under different precipitation conditions was analyzed by methods of dendroclimatology. The results are as follows: (1) the standard chronology of *Ziziphus jujuba* in Suide and Yijun had lower statistical parameters, lower individual growth consistency, and less climate information in the tree-ring material. It indicated that *Ziziphus jujuba* in Suide and Yijun County were highly adapted to local climatic conditions and its radial

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, 42101104)

收稿日期: 2023-03-15; **网络出版日期:** 2023-11-08

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

growth was less affected by climate. (2) *Robinia pseudoacacia*, *Armeniaca sibirica*, *Ziziphus jujuba*, and *Sophora davidii* all showed higher sensitivity to climate in forest-steppe transition zone (Yan'an), and the explanation rate of climate factors to radial growth of species was the highest in this area. Except for *Ziziphus jujube* in Suide and Yijun, there were time-lag effects in the climate-growth relationship of trees and shrubs at different sample sites. On the whole, the climate sensitivity of *Ziziphus jujube* was the weakest. In Suide and Yijun, the sensitivity of shrubs to climate was significantly lower than that of trees. (3) Natural species *Armeniaca sibirica*, *Ziziphus jujuba*, and *Sophora davidii* were not sensitive to long-term drought stress under the three sample sites, which showed strongly ecological adaptability. The response characteristics of *Robinia pseudoacacia*, *Armeniaca sibirica*, and *Sophora davidii* in Yijun showed a trend shift. The negative feedback of temperature to *Robinia pseudoacacia* and *Sophora davidii* decreased and the positive feedback of temperature increased, while the positive feedback of temperature to *Armeniaca sibirica* decreased and the negative feedback of temperature increased.

Key Words: the Loess Plateau; precipitation gradient; radial growth; climate sensitivity; tree and shrub

近几十年来,随着全球变暖加剧,黄土高原气候暖干化趋势明显,1961年—2012年间,年平均潜在蒸散量显著下降,极端温度事件发生的频率和强度有所增加^[1]。自1999年黄土高原开展大规模退耕还林还草与封山禁牧工程,黄土高原林地、灌丛、草地面积进一步扩大^[2],然而随着植被覆盖度的增加,一些广泛种植的人工林速生、高耗水的生理特性使得土壤水分被过度消耗,从而导致土壤水分亏缺,形成深层土壤干层,严重制约土壤供水能力,在气候、生物双重因素的驱动下,黄土高原植被生长面临衰退甚至死亡的风险激增^[3]。因此,在气候变暖背景下,开展黄土高原植被生长—气候关系相关研究,识别限制不同植被类型植物生长的主要气候因子,对于区域森林生态系统管理和植被恢复具有重要意义。

遥感数据常用于大尺度植被生长与气候变化关系方面的研究^[4-5],但由于缺乏树木生长实测数据,对于物种水平上的生态适应性解释有限。树木年轮记录了树木每年的生长增量,蕴含了丰富的环境信号,可以用于研究不同遗传背景和不同环境梯度下植物生长的气候敏感性。目前,黄土高原树木年轮学研究主要集中于西部和北部等森林植被条件较好的自然保护区,研究内容以温度、干旱指数等气候重建和气候响应为主。譬如,Fang等^[6-8]基于黄土高原西部贵清山和崆峒山的油松年轮材料,重建了1618—2005年和1615—2009年的PDSI干旱指数;Cai等^[9]重建了黄土高原中北部地区1826—2004年4—9月平均温度。Keyimu等^[10-11]利用黄土高原中部地区辽东栎和刺槐的年轮材料分析了树木生长-气候关系,发现辽东栎生长受到水热条件的共同限制(上年秋末、冬季,当年春季、初夏温度和上年秋季、当年春季、初夏降水),目前正处于稳定生长阶段;而刺槐在延安以南的半湿润地区和延安以北的半干旱地区则表现出不同的气候响应模式。李晓琴^[12]等利用延安地区油松、狼牙刺、黄刺玫的年轮材料分析了三个物种径向生长对气候响应的差异,并定量分析了三个物种对极端干旱事件的生态弹性;Chen等^[5]基于黄土高原油松年轮材料,分析了不同降水梯度油松径向生长的气候响应模式,发现南部地区油松生长主要受到潮湿环境条件的限制,而北部地区油松生长则主要受到气候暖干化引起的干旱胁迫影响。然而,上述工作主要是基于单一物种或样点尺度的气候敏感性和生态适应性研究,在黄土高原地区基于年轮材料的多物种、多降水条件下的对比研究仍较为缺乏。灌丛是黄土高原地区分布最为广泛的植被类型,总面积约为15万km²,占区域总面积的23%,灌丛生态系统对提高黄土高原植被覆被率、加强水土流失治理、改善生态环境、增加区域碳汇和调节区域气候等方面都具有重要的生态功能^[13-14]。因此,开展黄土高原沿降水梯度典型乔灌木的气候敏感性研究,对于当地科学建设生态屏障具有重要价值。

本研究以黄土高原典型乔灌木刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、白刺花(*Sophora davidii*)为研究对象,在绥德、延安、宜君三个降水梯度分别采集年轮材料,探讨了不同降水梯度乔灌木的气候敏感性特征,并量化了主要气候因子对其径向生长的解释率,以期气候变化背

景下黄土高原人工、自然植被的合理管护建设提供科学依据。

1 材料与方

1.1 研究区概况

绥德辛店沟小流域(110°31'E, 37°6'N)、延安羊圈沟小流域(109°52'E, 36°6'N)、宜君赵家塬林场(109°12'E, 35°34'N)位于黄土高原中部地区,海拔变化范围为 919—1335m,年平均气温变化范围为 9.7—10.1℃,多年平均降水量变化范围为 447—603mm。辛店沟小流域和羊圈沟小流域均属典型黄土丘陵沟壑区,流域内气候干燥,属干旱、半干旱温带大陆性季风气候,流域内土壤以黄绵土为主,土壤质地疏松,抗侵蚀性差,水土流失较为严重;植被区划上分别属于典型草原带和森林草原过渡带。宜君赵家塬林场位于黄土高原南缘、铜川市北部,属于东部季风湿润区与内陆干旱区过渡地带,四季分明,降水量较多,植被区划上属于暖温带落叶阔叶林带。由于历史气候变化和人类活动的双重影响,黄土高原天然植被遭受严重破坏,现存多以人工植被为主。本研究区内主要分布有乔木:刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等;灌木白刺花(*Sophora davidii*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、荆条(*Vitex negundo var. heterophylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;草本:委陵菜(*Potentilla chinensis*)、紫苜蓿(*Medicago sativa*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等。

1.2 样品采集及预处理

本研究所用乔灌木树轮资料(刺槐、山杏、酸枣、白刺花)于 2016 年 9 月和 2022 年 6 月在黄土高原南北样带上获取(表 1),共在 3 个年轮样点采集(图 1),从南到北依次为宜君赵家塬林场、延安羊圈沟小流域、绥德辛店沟小流域,采样点年均降水量变化范围为 447—603mm(1960—2020 年),海拔高度变化范围为 1180—1350m。按照树木年代学方法,在每个样地内选取生长状况良好的树木个体,乔木样芯用生长锥在树木胸高处沿垂直于山坡不同方向分别钻取一个样芯。灌木年轮样品采集选取贴近地面径级较大的灌丛分支,截取直径大于 5cm 的植株分支圆盘。为了尽量减少采样对植株生长产生影响,每株灌丛仅钻取两个分支圆盘。每个样地采样数量尽量不少于 30 个,所获取的乔、灌木年轮样品分别放置于塑料样管内和自封袋中,并标注样品的编号、海拔、立地条件等信息。将野外采集的树芯和圆盘按照树木年代学基本方法依次进行晾干、固定、

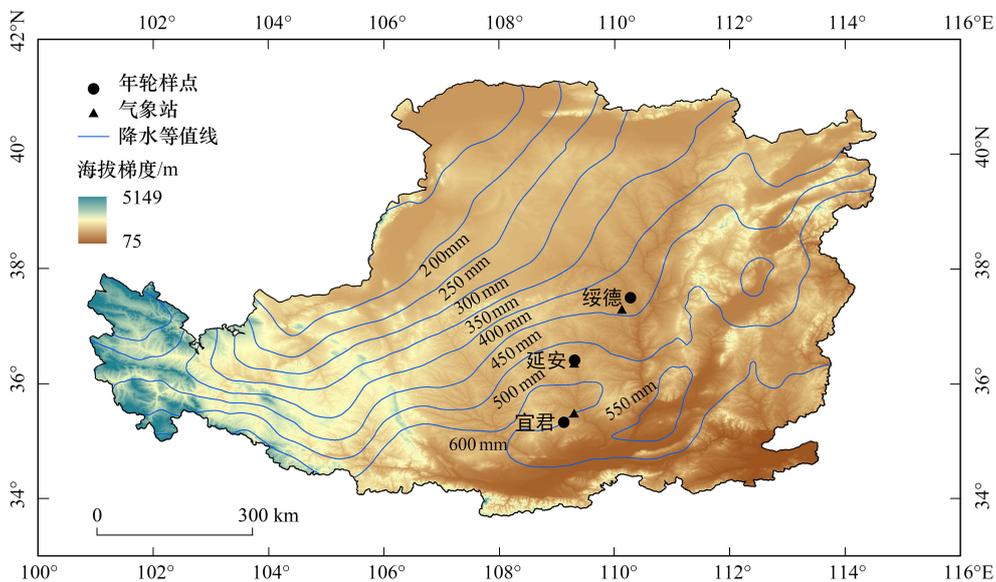


图 1 黄土高原中部乔灌木采样点及气象站分布图

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

打磨等操作^[15],直到样品表面光滑,年轮界限清晰。

表 1 黄土高原乔灌木年轮采样点统计表

Table 1 The basic information of tree-shrub ring chronologies in the Loess Plateau

区域 Region	采样点 Sample site	物种 Species	林分类型 Stand type	生活型 Life form	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude	降水/mm Precipitation
绥德	辛店沟小流域	刺槐	人工林	乔木	110.31	37.6	1290	447
		山杏	人工林	乔木	110.21	37.49	1337	447
		酸枣	天然林	灌木	110.28	37.5	919	447
		白刺花	天然林	灌木	110.28	37.5	1337	447
延安	羊圈沟小流域	刺槐	人工林	乔木	109.52	36.7	1250	531
		山杏	人工林	乔木	109.52	36.7	1250	531
		酸枣	天然林	灌木	109.52	36.7	1250	531
		白刺花	天然林	灌木	109.52	36.7	1250	531
宜君	赵家塬林场	刺槐	人工林	乔木	109.12	35.34	1350	603
		山杏	人工林	乔木	109.1	35.31	1335	603
		酸枣	天然林	灌木	109.1	35.31	1335	603
		白刺花	天然林	灌木	109.1	35.31	1335	603

1.3 年表构建

样品经预处理后,首先用显微镜对树芯和圆盘进行目视定年,然后采用 WINDENDRO 年轮分析仪进行年轮宽度测量,其精度为 0.001 mm。通过 COFECHA 程序和 EDRM 程序进行交叉定年和年轮序列的校正,对于效果较差且与主序列相关系数达不到 99% 置信水平的样品予以剔除^[16]。通过 ARSTAN 程序^[17]采用负指数函数拟合树木生长趋势,这一过程可以消除树木自生长趋势和树木之间干扰竞争产生的释放和抑制等非气候信号,从而实现年轮序列的去趋势和标准化;如果不成功,则用任意斜率的线性回归进行直线拟合,并取年轮宽度序列和与其对应的生长趋势拟合曲线的比值,对去趋势序列以双权重平均法合成平均值为 1、无量纲的树轮宽度标准年表。为更好评估年表质量,分别计算了各年表的样芯间相关系数(Rbar)、平均敏感度(MS)、信噪比(SNR)、样本群体表达信号(EPS)等统计参量。

1.4 气象资料与数据分析

气象数据来自与采样点相邻的气象台站,自北向南分别为绥德站、延安站、洛川站;海拔高度分别为 930m、959m、1160m;气象站分别距采样点 13km、22km、63km。气象数据由国家气象局(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供,时间区间为 1965—2020 年,气候要素包括包括月平均气温(TMP)、月平均最高气温(TMx)、月平均最低气温(TMN)、月降水量(PRE)、相对湿度(RHU)。同时,本研究还从 CRU TS v. 3.22 全球气候数据库(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hr/>)中下载了对应采样点的帕默尔干旱指数(PDSI),时间区间为 1965—2020 年,精度为 0.5 度(约 25km)。帕默尔干旱指数基于水平衡原理,通过计算降水、温度、土壤有效水分等指数来衡量地区干旱程度,被广泛应用于区域旱情时空分布特征、干旱气候评价和干旱面积评估等方面,有研究表明,帕默尔干旱指数能更准确的反映干旱对植被径向生长的影响^[18]。

采用 Mann-Kendall (MK) 非参数检验法对 1965—2020 年气象数据进行突变检验。基于 Pearson 相关性分析研究年轮宽度指数对气候因子的响应关系,考虑到前一年气候状况对当年树木生长的影响,所用气候资料的时间跨度为前一年 6 月到当年 9 月。树轮年表与气候要素的响应关系通过 R 语言中“treeclim”包实现^[19],相关统计显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。气候响应区间设置为各物种生长区间内最大公共时段,由于刺槐采样年份较早,所以响应区间单独设置为 1985—2016 年;其他三个物种响应区间设置为 1997—2020 年。为了量化气候因子对径向生长的影响,以年轮宽度指数为预测变量,与其显著相关($P < 0.05$)的气候因子作为解释变量,进行多元后向逐步回归分析,获得优化回归模型。为了定量气候因子对径向生长的解释率,用回归模型中的总 R^2 作为气候要素对年轮生长的解释率,用各解释变量标准化回归系数绝对值占所有解释变量

回归系数绝对值总和的百分率作为不同气候因子对年轮生长的解释率^[20]。

2 研究结果

2.1 研究区气候变化趋势

过去 55 年(1965—2020),研究区各气候序列未发生突变,整体趋势较为稳定,可以满足气候响应分析需要。研究区年均温度、年均最低温度和年均最高温度均呈显著上升趋势(图 2),每十年上升约 0.13—0.38℃;其中,年均温度和年均最高温度以宜君上升幅度最大,年均最低温度以延安上升幅度最大。年总降水量变化趋势较为平稳(图 3),每十年变化幅度约-4—5.2 mm;其中,绥德和延安年总降水量略有上升趋势,宜君年总降水量略有下降趋势,但均未达显著水平。PDSI 干旱指数均呈下降趋势($R = -0.16$ — -0.38);PDSI 和相对湿度均以延安下降趋势最为显著($R = -0.36$ — -0.48 , $P < 0.01$),绥德和宜君相对湿度变化较为平稳($R = -0.09$ — 0.08 , $P > 0.05$)。整体上看,过去 55 年黄土高原中部地区气候暖干化趋势明显,具体表现为年均温度快速上升,而年降水总量波动趋势不大,PDSI 干旱指数呈下降趋势。延安地区暖干化趋势最为明显。

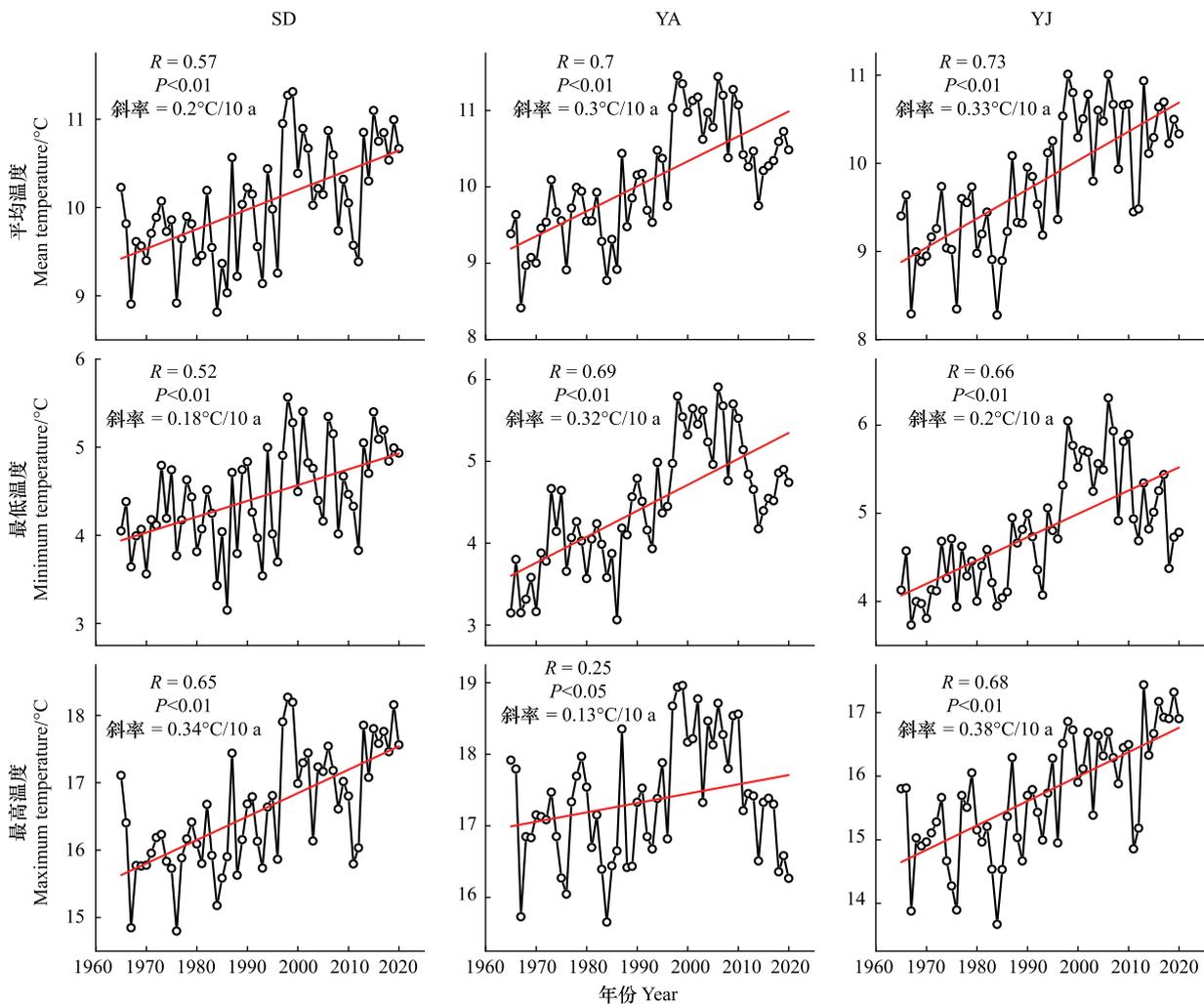


图 2 1965—2020 年期间绥德、延安、宜君地区温度变化趋势

Fig.2 Temperature trends in Suide, Yan'an and Yijun during 1965—2020

SD: 绥德, YA: 延安, YJ: 宜君

2.2 乔灌木标准年表统计特征

本研究中沿不同降水梯度构建的树轮宽度年表(图 4)时间长度为:乔木 32—52 a,以宜君刺槐年表长度

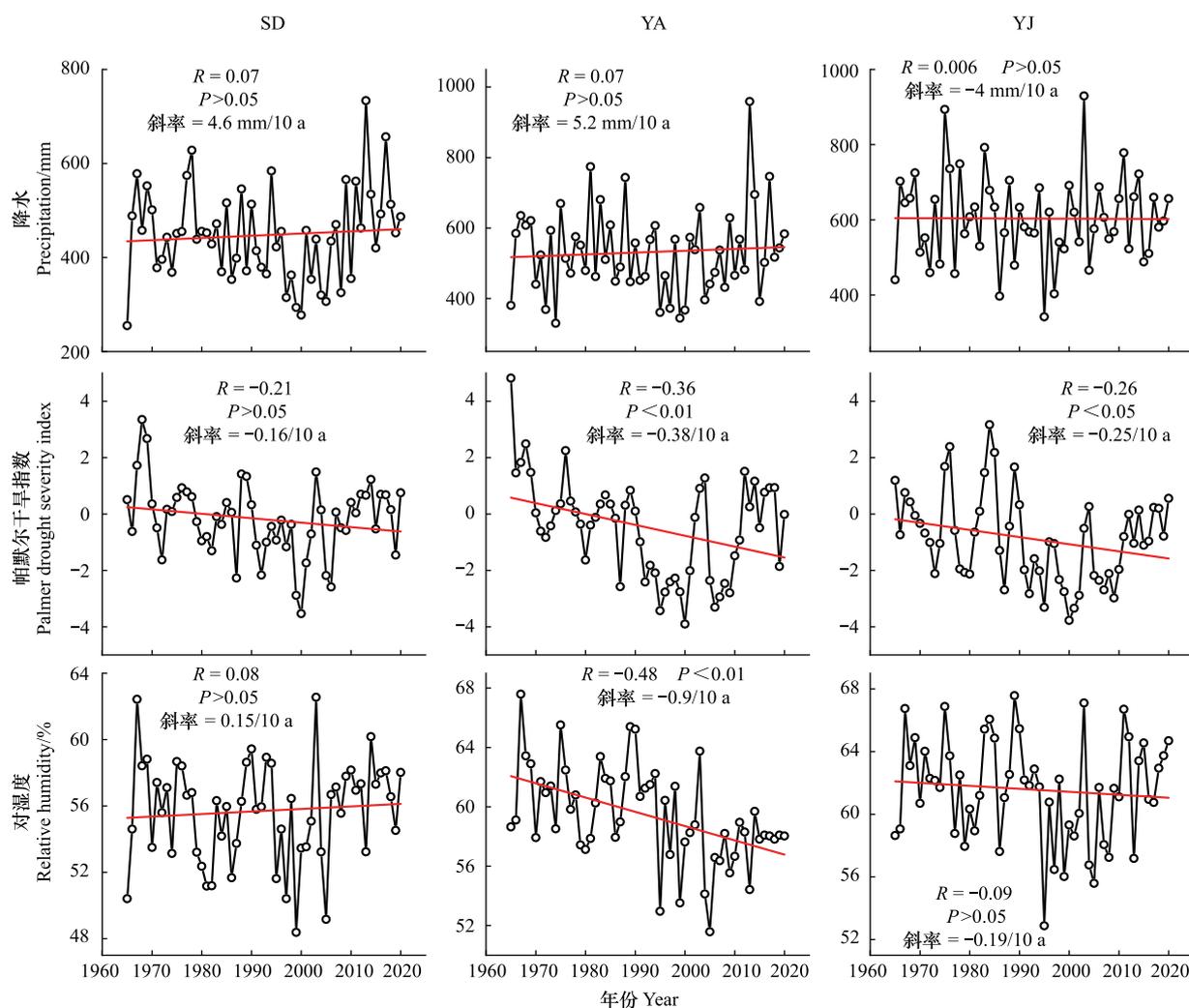


图3 1965—2020年期间绥德、延安、宜君地区水分条件变化趋势

Fig.3 Variation trend of water condition in Suide, Yan'an and Yijun during 1965—2020

最短(1985—2016),以延安山杏年表长度最长(1969—2021);灌木25—48年,以绥德白刺花和酸枣年表长度最短(1997—2021),以宜君酸枣年表长度最长(1969—2021)。从各树种采集样本的年龄分布特征来看(图5),绝大多数乔木刺槐、山杏样本的年龄均在20年以上,绝大多数灌木酸枣、白刺花样本的年龄均在15年以上。沿降水梯度刺槐样本的年龄平均值分别为31.7 a、30 a、22.5 a,山杏样本的年龄平均值分别为18.6 a、44.6 a、20.1 a,酸枣样本的年龄平均值分别为17.7 a、17 a、30.2 a,白刺花样本的年龄平均值分别为21.2 a、15.6 a、20.4 a。

从不同物种年表统计特征来看(表2),乔木年表的序列间相关系数(R_{bar})为0.234—0.513($P < 0.01$),灌木年表的 R_{bar} 为0.105—0.697,其中宜君酸枣的 R_{bar} 较低仅为0.105,这表明除宜君酸枣外,各样芯之间的轮宽变化一致性较强($P < 0.01$);乔木年表一阶自相关系数($AC1$)为0.105—0.601,灌木年表 $AC1$ 为0.016—0.601,绝大部分乔灌木的 $AC1$ 均大于0.4, $AC1$ 主要反映的是前一年气候状况对当年树轮生长的影响,值越大“滞后效应”越明显,其中在构建绥德和宜君酸枣年表时,未能输出 $AC1$,表明其基本未受上一年气候状况的影响;乔木年表平均敏感度(MS)为0.19—0.456,信噪比(SNR)为4.595—38.498;灌木年表 MS 为0.2—0.338, SNR 为0.965—12.603,其中绥德和宜君酸枣的 SNR 仅为0.965和1.784,表明年轮中包含的气候信号微弱。整体上乔木标准年表较灌木标准年表中保留了更为丰富的气候高频波动信号,同时该区域乔灌木年度宽度的

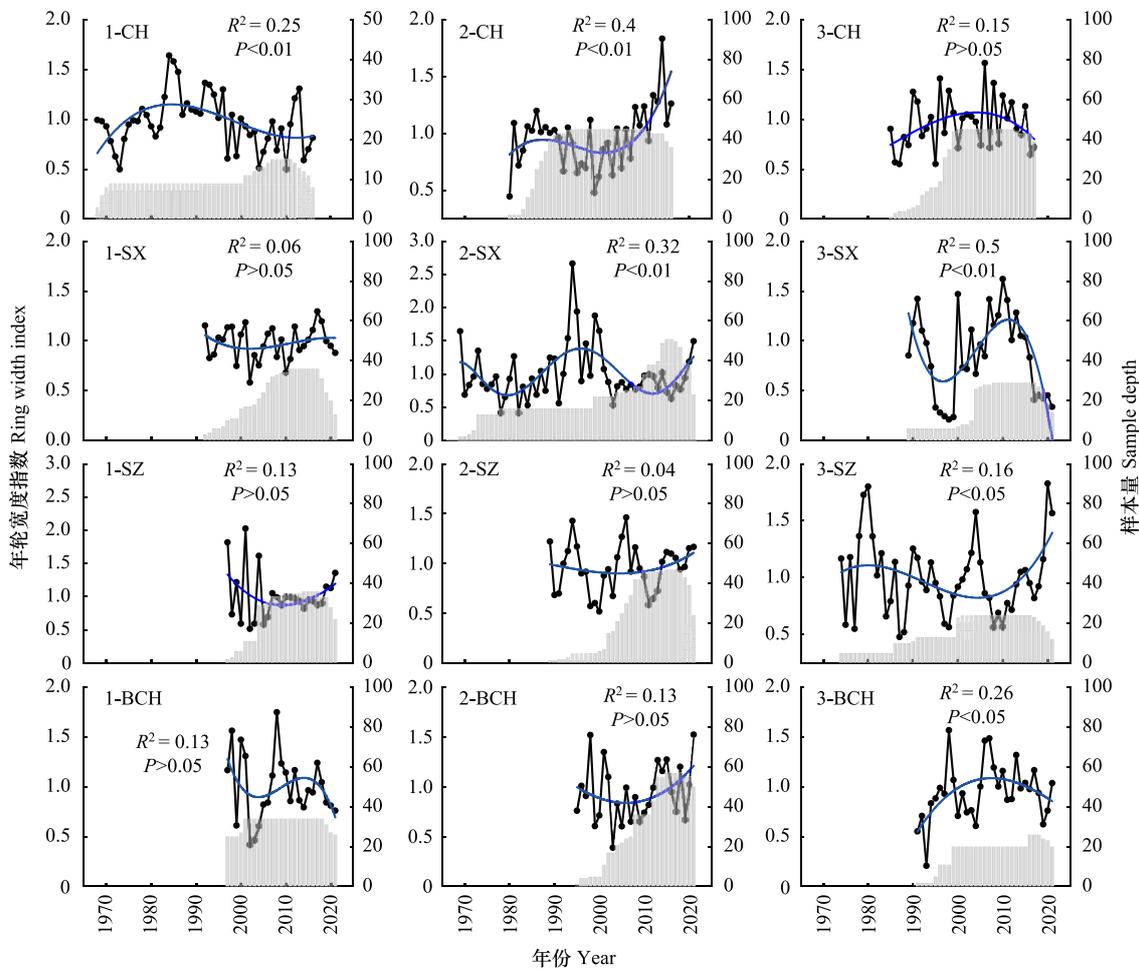


图 4 沿降水梯度乔灌木标准年表

Fig.4 Standard chronologies of trees and shrubs with precipitation gradients

蓝色线条表示用三次样条方法进行年表趋势拟合; 1:447 mm;2:531 mm;3:603 mm;CH:刺槐;SX:山杏;SZ:酸枣;BCH:白刺花

年际变化较大。乔木年表样本群体表达信号 (EPS) 为 0.821—0.975,灌木年表 EPS 为 0.491—0.975,其中绥德酸枣和宜君酸枣的 EPS 仅为 0.491 和 0.641,表明绥德酸枣和宜君酸枣各样本序列间的生长趋势一致性较差。

从不同降水梯度年表统计特征来看,各参数值均以延安样点最高,绥德、宜君次之,这表明延安样点乔灌木年表中可能蕴含了更多的气候信号。综上所述,除宜君、绥德酸枣年表外,其余各年表统计特征均表明了样本之间的树轮宽度变化有很好的一致性,记录了可靠区域气候信息,可用于年轮气候学分析。绥德、宜君酸枣年表的相关统计参量明显偏低可能表明酸枣在这两个地区的生长适应性强,个体之间生长差异性较大,气候敏感性低,而年表反映的主要是平均水平上的树木生长变化趋势,在交叉定年和去趋势过程中一些个体的特征会被掩盖。为了验证这一猜想,决定将绥德、宜君酸枣年表也纳入分析。

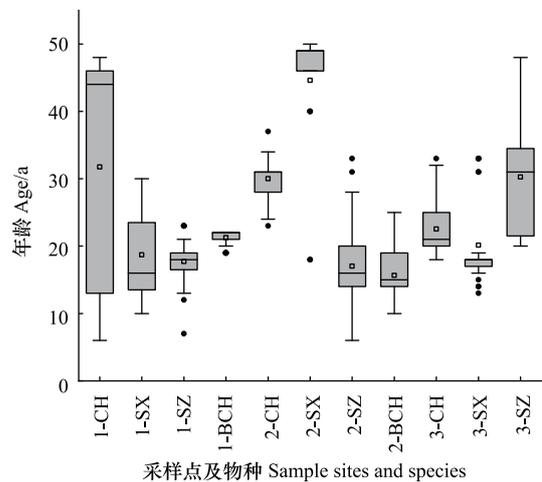


图 5 乔灌木样本年龄分布特征

Fig.5 Age distribution characteristics of tree and shrub samples

表 2 沿降水梯度乔灌木标准年表统计参量

Table 2 Main characteristic parameters of tree and shrub standard chronologies developed from the precipitation gradient

地点 Site	物种 Species	样本量 Sample depth	标准差 SD	平均 敏感度 MS	样芯间相 关系数 Rbar	信噪比 SNR	样本群体 表达信号 EPS	一阶自相 关系数 AC1	时间区间 Time span
绥德	山杏	36	0.168	0.19	0.234	4.595	0.821	0.104	1992—2021
	白刺花	34	0.315	0.235	0.537	8.046	0.974	0.422	1997—2021
	酸枣	36	0.371	0.338	0.243	0.965	0.491	—	1997—2021
	刺槐	15	1.777	0.446	0.499	10.039	0.909	0.376	1968—2016
延安	山杏	51	0.411	0.334	0.493	15.579	0.940	0.405	1969—2021
	白刺花	57	0.289	0.365	0.441	12.603	0.926	0.016	1995—2021
	酸枣	47	0.244	0.204	0.445	7.731	0.885	0.490	1989—2021
	刺槐	45	1.406	0.456	0.513	38.498	0.975	0.444	1980—2016
宜君	山杏	29	0.416	0.294	0.467	10.527	0.913	0.601	1989—2021
	白刺花	26	0.285	0.288	0.697	9.485	0.975	0.398	1991—2021
	酸枣	24	0.268	0.238	0.105	1.784	0.641	—	1974—2021
	刺槐	45	1.906	0.430	0.395	20.084	0.953	0.251	1985—2017

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

2.3 刺槐径向生长与气候要素响应关系

刺槐年表与气候要素的响应分析结果表明(图 6 和图 7):在绥德样点,刺槐径向生长主要与各月温度呈

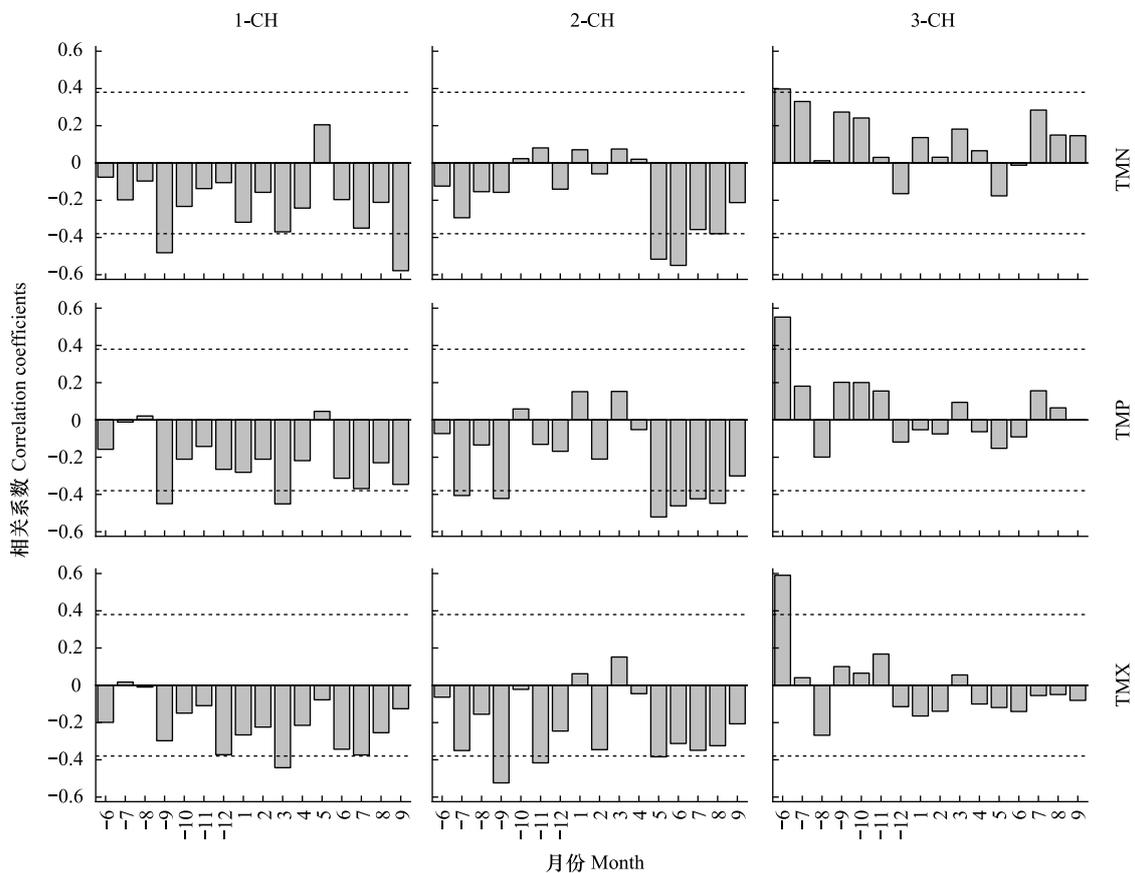


图 6 沿降水梯度刺槐与月温度要素的响应关系

Fig.6 Response relationship of *Robinia pseudoacacia* with precipitation gradients to monthly temperature

1—2—3, 447mm—531mm—603mm; TMN, 最低温度; TMP, 平均温度; TMX, 最高温度; ---, 达到 95% 显著水平

负相关关系,其中,与上年9月平均温度、最低温度,上年12月最高温度,当年3月、7月、9月平均温度、最低温度,当年3月、6月、7月最高温度呈显著负相关关系($R=-0.34\sim-0.57, P<0.05$)。刺槐径向生长与各月水分的整体响应关系相对较弱,与当年6月份降水,8月相对湿度的正相关关系达到显著性水平($R=0.34\sim 0.45, P<0.05$)。在延安样点,刺槐径向生长与各月温度整体上仍呈负相关关系,但是与上年10月到当年4月温度的负相关关系趋于减弱,而与当年5月到8月温度的负相关关系趋于增强,其中,与上年7月、9月平均温度和最高温度,上年11月和当年2月0最高温度,当年5到8月平均温度、最低温度和最高温度的负相关关系达到显著性水平($R=-0.34\sim-0.54, P<0.05$)。刺槐径向生长对上年7月降水、上年9月以及当年2月降水正响应关系显著增强($R=0.4\sim 0.53, P<0.05$)。刺槐对PDSI干旱指数也表现出高的敏感性,与上年10月至当年9月PDSI均呈显著正相关关系($R=0.35\sim 0.56, P<0.05$)。在宜君样点,刺槐径向生长对温度响应变化明显,体现为对各月温度负响应关系的减弱和正响应关系的增强,其中,与上年6月平均温度、最低温度、最高温度的正相关关系达到显著性水平($R=0.33\sim 0.59, P<0.05$)。刺槐径向生长与当年1月降水、相对湿度呈显著正相关关系($R=0.33\sim 0.39, P<0.05$),而对PDSI干旱指数响应不敏感。

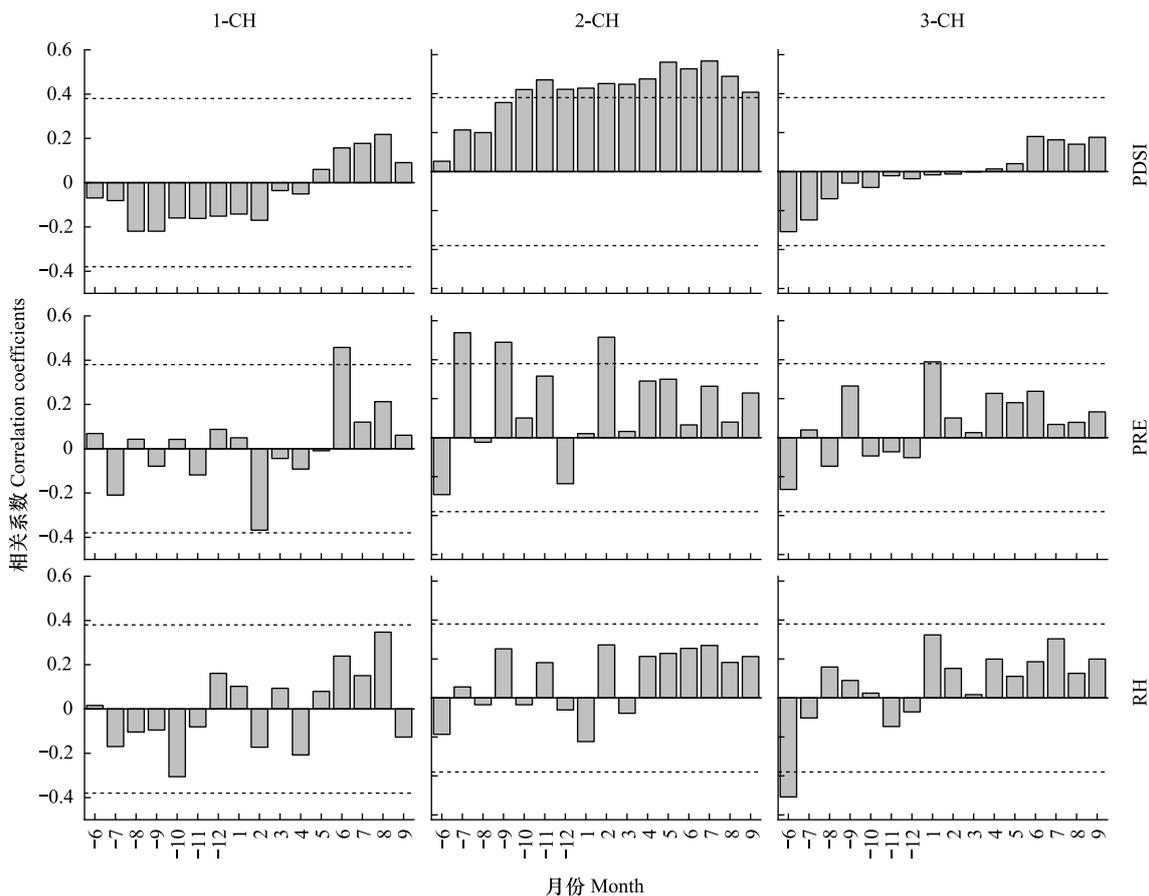


图7 沿降水梯度刺槐与月水分要素的响应关系

Fig.7 Response relationship of *Robinia pseudoacacia* with precipitation gradients to monthly moisture

1—2—3,447mm—531mm—603mm;PDSI,帕默尔干旱指数;PRE,降水;RH,相对湿度;---,达到95%显著水平

2.4 山杏径向生长与气候要素响应关系

山杏年表与气候要素的响应分析结果表明(图8和图9):在绥德样点,山杏径向生长与多数月份的平均温度、最低温度和最高温度均呈正相关关系,其中,与当年5月份平均温度和最高温度、当年7月份最低温度和上年12月份最高温度达到显著性水平($R=0.38\sim 0.48, P<0.05$)。山杏径向生长对月尺度水分因子的响应关系较不稳定,其中,与上年9月降水、PDSI、相对湿度的负相关关系均达到显著性水平($R=-0.38\sim-0.49$,

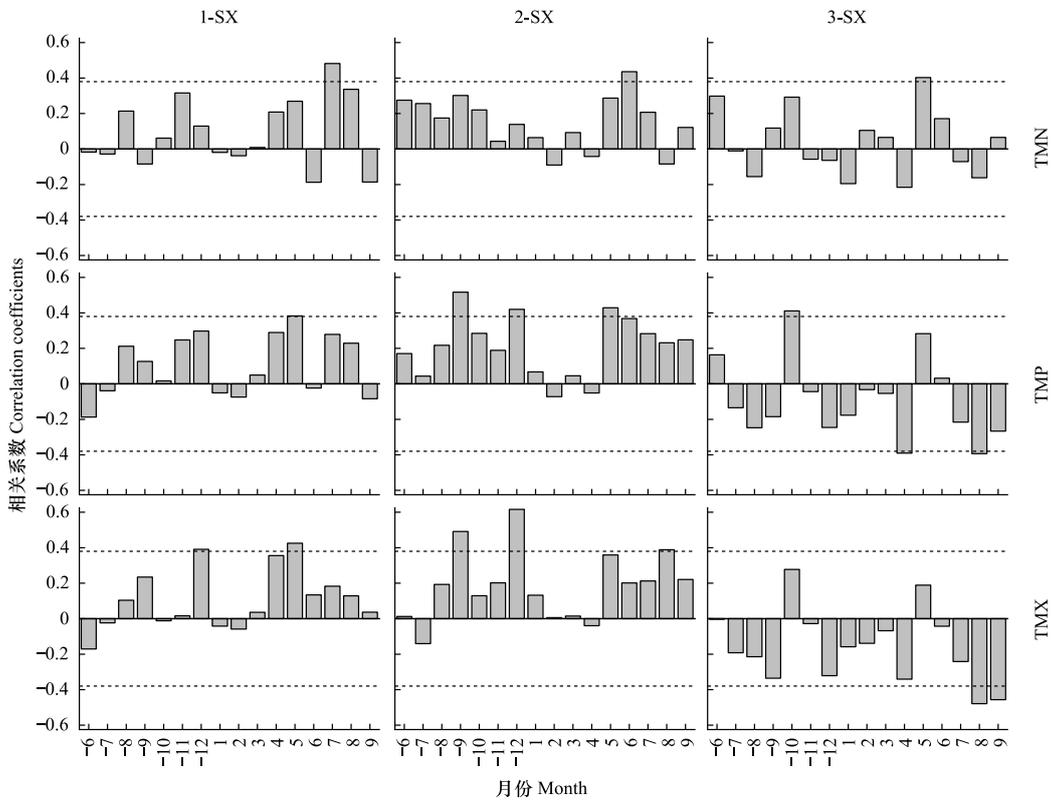


图 8 沿降水梯度山杏与月温度要素的响应关系

Fig.8 Response relationship of *Armeniaca sibirica* with precipitation gradients to monthly temperature

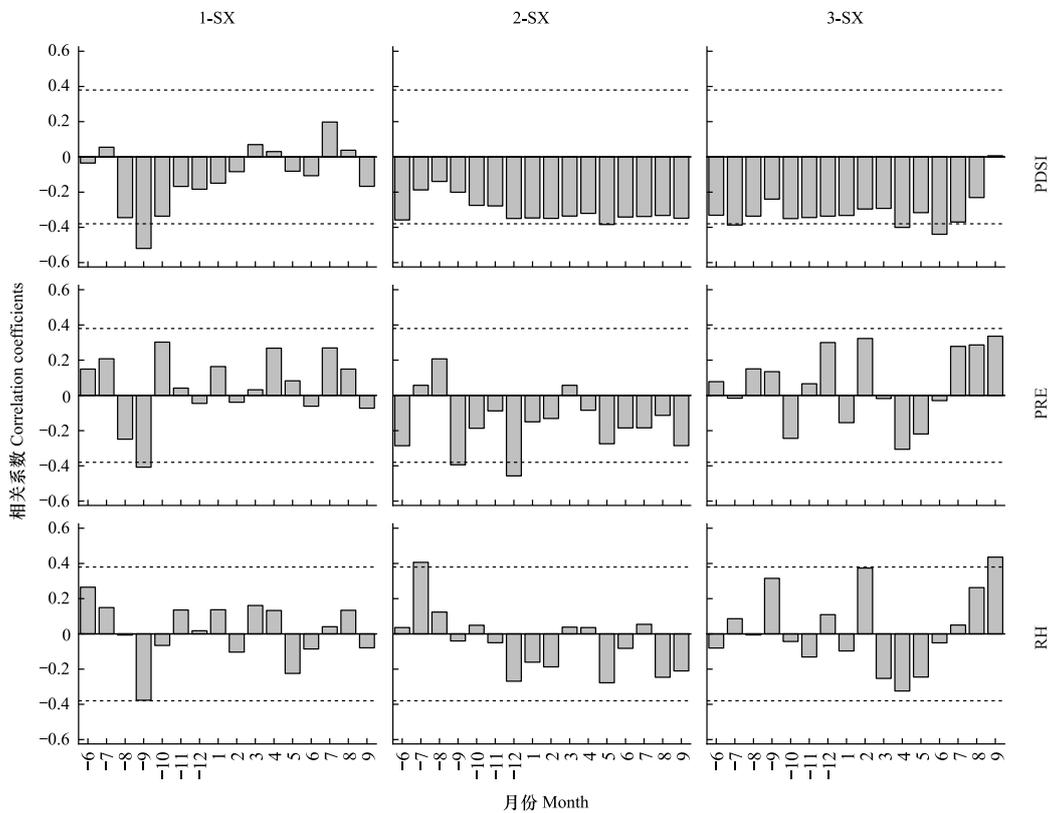


图 9 沿降水梯度山杏与月水分要素的响应关系

Fig.9 Response relationship of *Armeniaca sibirica* with precipitation gradients to monthly moisture

$P < 0.05$)。在延安样点,山杏径向生长与各月温度的正相关关系均呈增强趋势,其中,与上年9月、12月平均温度和最高温度、当年5月平均温度、当年6月最低温度、当年8月最高温度正相关关系达到显著性水平($R = 0.38 - 0.61, P < 0.05$)。山杏径向生长与水分因子的响应关系以负相关为主,其中,与上年9月、12月降水呈显著负相关关系($R = -0.39 - -0.48, P < 0.05$);与上年7月相对湿度呈显著正相关关系($R = 0.41, P < 0.05$),与各月PDSI干旱指数的负相关关系显著增强。在宜君样点,山杏径向生长与多数月份的平均温度、最低温度和最高温度均呈负相关关系,其中,与当年4月平均温度和最低温度、当年8月平均温度和最高温度、当年9月最高温度达到显著性水平($R = -0.38 - -0.47, P < 0.05$),与上年10月平均温度呈显著正相关关系($R = 0.41, P < 0.05$)。山杏径向生长与当年2月、9月相对湿度呈显著正相关关系($R = 0.37 - 0.43, P < 0.05$)。

2.5 酸枣径向生长与气候要素响应关系

酸枣年表与气候要素的响应分析结果表明(图10和图11):在绥德样点和宜君样点,酸枣与各气候因子的相关性均未达到显著性水平,整体上气候信号较弱。在延安样点,酸枣与温度整体上呈负相关关系,其中与上年8月、10月最高温度,上年6月、7月和当年6月最低温度的负相关关系达到显著性水平($R = -0.38 - -0.47, P < 0.05$),而与当年1月最低温度呈显著正相关关系($R = 0.44, P < 0.05$)。酸枣径向生长对水分因子的响应关系主要体现为对上年9月降水的显著正相关关系($R = 0.38, P < 0.05$)。

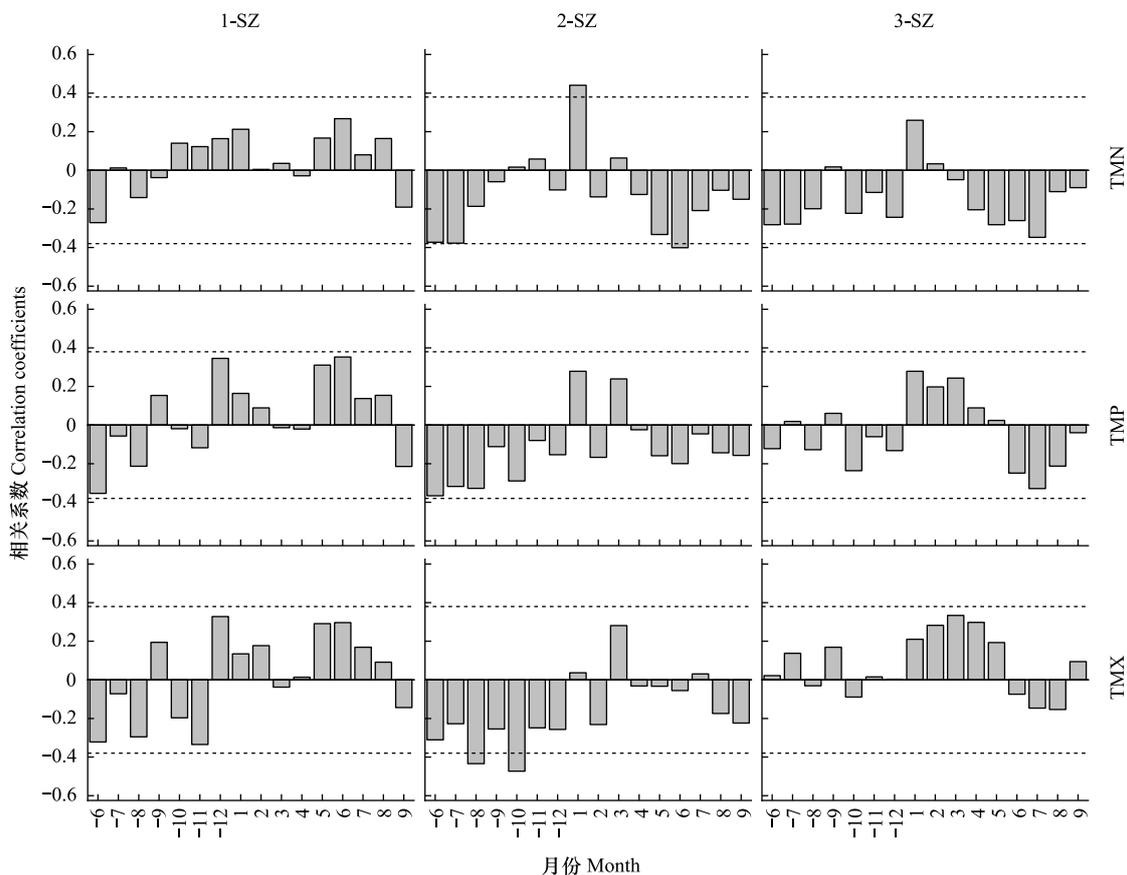


图10 沿降水梯度酸枣与月温度要素的响应关系

Fig.10 Response relationship of *Ziziphus jujuba* with precipitation gradients to monthly temperature

2.6 白刺花径向生长与气候要素响应关系

白刺花年表与气候要素的响应分析结果表明(图12和图13):在绥德样点,白刺花径向生长与当年7月份最低温度呈显著正相关关系($R = 0.4, P < 0.05$)。白刺花径向生长对水分因子的响应主要体现为与当年1—4月降水、相对湿度的正相关关系,但均未通过显著性检验。在延安样点,白刺花径向生长与各月温度的负相

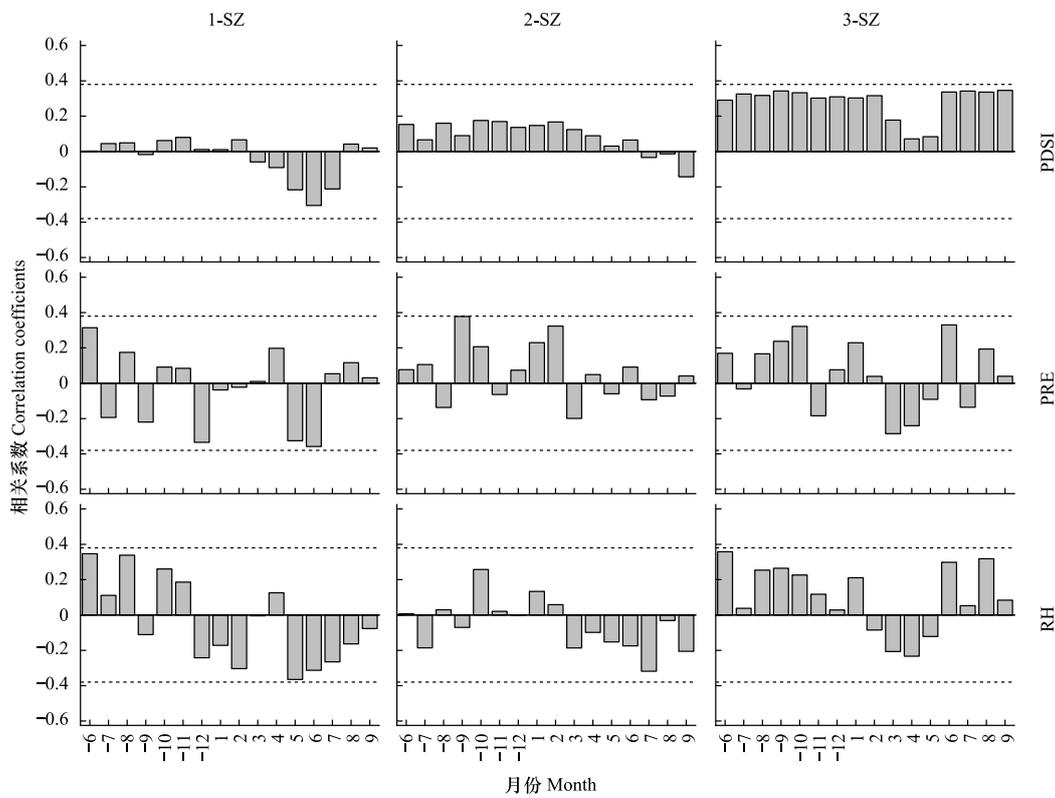


图 11 沿降水梯度酸枣与月水分要素的响应关系

Fig.11 Response relationship of *Ziziphus jujuba* with precipitation gradients to monthly temperature

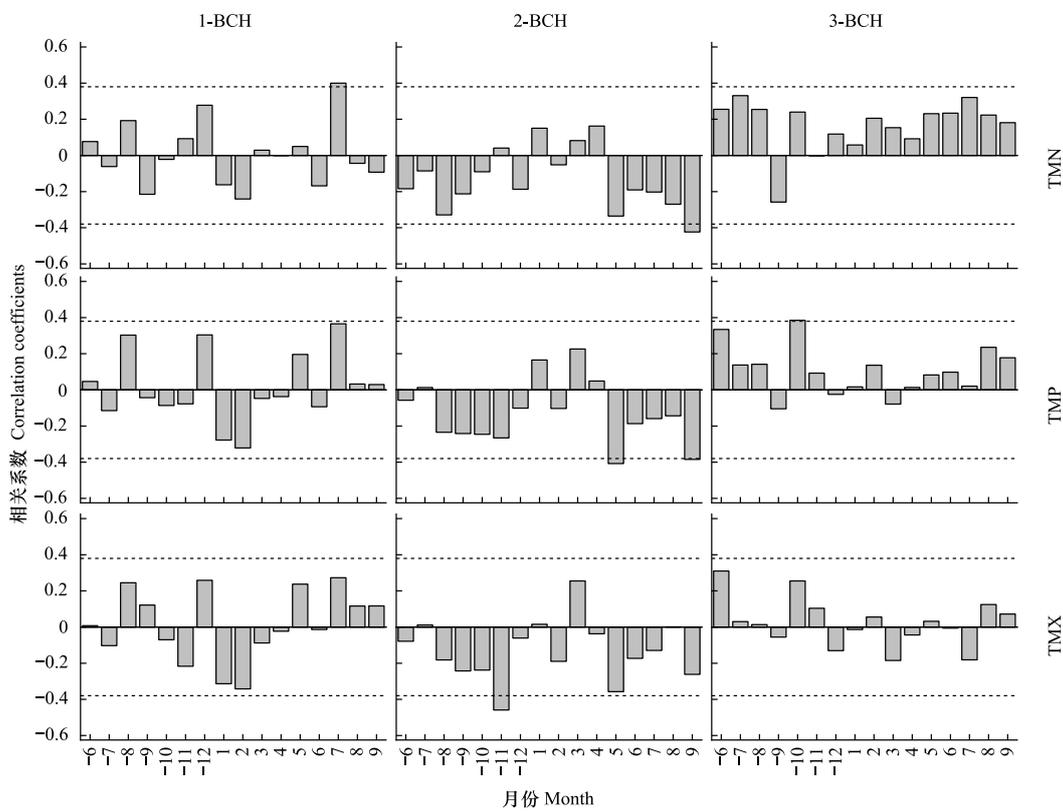


图 12 沿降水梯度酸枣与月温度要素的响应关系

Fig.12 Response relationship of *Ziziphus jujuba* with precipitation gradients to monthly temperature

关关系均呈增强趋势,其中,与上年 11 月最高温度、当年 5 月、9 月平均温度、当年 9 月最低温度负相关关系达到显著性水平($R=-0.38$ — -0.45 , $P<0.05$)。白刺花径向生长与水分因子的响应关系以正相关为主,其中,与当年 1 月份降水呈显著正相关关系($R=0.55$, $P<0.05$),与上年 6 月份降水呈显著负相关关系($R=-0.41$, $P<0.05$)。在宜君样点,白刺花径向生长对多数月份温度的负响应明显减弱,正响应明显增强;与上年 6 月和 9 月相对湿度的负相关关系达到显著性水平($R=-0.41$ — -0.54 , $P<0.05$);对当年 3 月份、5 月份、7 月份降水的正响应明显增强,其中,与当年 7 月份降水的正相关关系达到显著性水平($R=0.4$, $P<0.05$)。

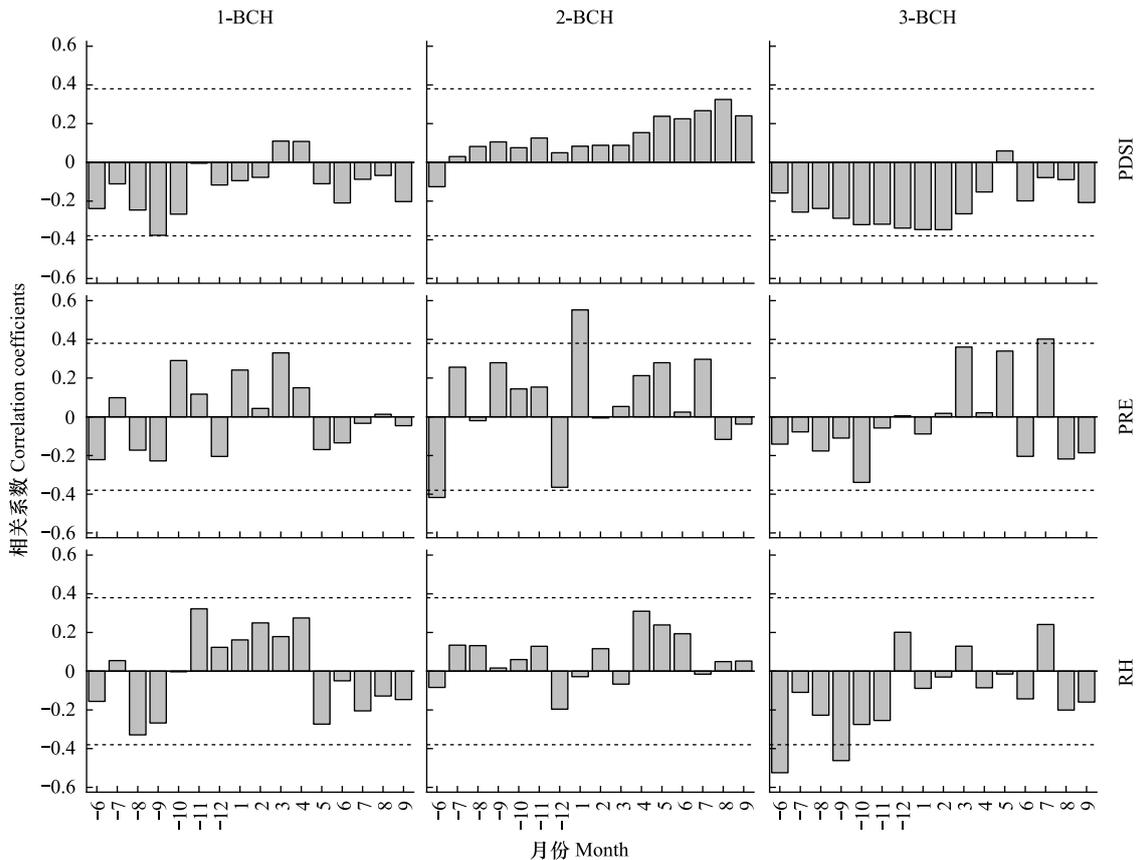


图 13 沿降水梯度酸枣与月水分要素的响应关系

Fig.13 Response relationship of *Ziziphus jujuba* with precipitation gradients to monthly temperature

2.7 气候因子对乔灌木径向生长解释率

多元回归分析结果表明(表 3 和图 14),除绥德白刺花外,气候要素对不同降水梯度下各物种径向生长变化方差的解释率均达到显著性水平。由于绥德和宜君酸枣与各气候要素的响应关系均未达显著性水平,所以本节中未将这两个地区的酸枣纳入分析。

气候要素对 4 个物种径向生长的解释率均以延安样点最高,气候要素分别解释了刺槐、山杏、酸枣、白刺花径向生长的 62.8%、66.6%、37%、61.2%,这表明位于林草交错带的延安地区,植被生长对气候变化的敏感性最高。此外,在不同降水条件下,气候要素对人工林乔木径向生长的解释率均高于对天然灌丛的解释率,这表明在相同降水条件下,人工乔木种刺槐、山杏的气候敏感性要优于天然灌丛酸枣、白刺花。在绥德和宜君样点,气候要素对白刺花径向生长变化方差的解释率也较低,分别为 18%和 26.3%,且气候因子与径向生长的相关程度均未达到显著性水平。山杏径向生长则主要是受到温度的影响,温度因子对绥德和宜君山杏径向生长的解释率均达 100%。刺槐径向生长在绥德样点明显受到生长季末期最低温度升高的负面影响,温度因子对其径向生长的解释率达到 75.7%,而在宜君样点,温度对刺槐径向生长的负面影响明显减弱,上年 6 月温度升

高对其径向生长有显著促进作用,温度因子对其径向生长解释率达 64.5%。

表 3 乔灌木年表与气候因子的多元回归统计结果

Table 3 Multiple regression statistics of of tree and shrub chronologies and climatic factors

采样点 Sample site	物种 Species	回归模型 Regression equation	R^2	调整 R^2 Adjusted R^2	P
绥德 447 mm	山杏	$Y = 0.425 \times TMN_7^* + 0.319 \times TMX_{p12}$	0.321	0.256	<0.01
Suide 447 mm	白刺花	$Y = 0.24 \times TMP_7 - 0.253 \times PDSI_{p9}$	0.18	0.102	>0.05
	刺槐	$Y = -0.472 \times TMN_9^* - 0.387 \times TMN_{p9}^* + 0.276 \times PRE_6$	0.548	0.5	<0.01
延安 531mm	山杏	$Y = 0.274 \times TMP_{p9} + 0.32 \times TMX_8^* - 0.3 \times PRE_{p12}^* + 0.37 \times RHU_{p7}^*$	0.666	0.573	<0.01
Yan'an 531 mm	白刺花	$Y = -0.277 \times TMP_9 - 0.47 \times TMX_{p11}^{**} + 0.493 \times PRE_{p6}^{**} + 0.335 \times PRE_1^*$	0.612	0.53	<0.01
	刺槐	$Y = 0.409 \times PRE_2^{**} + 0.373 \times PDSI_{4-9}^{**} - 0.348 \times TMX_{p9}^{**}$	0.628	0.588	<0.01
	酸枣	$Y = -0.44 \times TMN_{p6}^* + 0.49 \times TMN_1^{**}$	0.37	0.31	<0.01
宜君 603mm	山杏	$Y = 0.422 \times TMP_{p10}^{**} - 0.605 \times TMX_{8-9}^{**}$	0.521	0.476	<0.01
Yijun 603 mm	白刺花	$Y = 0.337 \times TMP_{p10} + 0.367 \times PRE_7$	0.263	0.192	<0.05
	刺槐	$Y = 0.537 \times TMX_{p6}^{**} + 0.295 \times PRE_1^*$	0.434	0.394	<0.01

PRE:降水;TMP:平均温度;TMN:最低温度;TMX:最高温度;RHU:相对湿度;PDSI:帕默尔干旱指数;*、**自变量与因变量之间的相关程度分别达到 95%和 99%置信水平

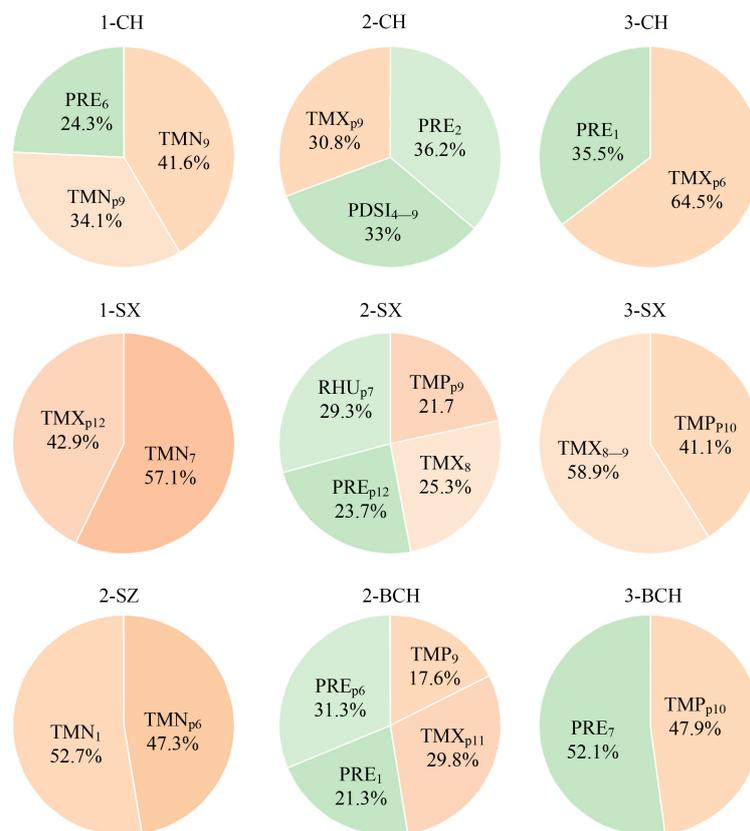


图 14 沿降水梯度酸枣与月温度要素的响应关系

Fig.14 Response relationship of *Ziziphus jujuba* with precipitation gradients to monthly temperature

PRE:降水;TMP:平均温度;TMN:最低温度;TMX:最高温度;RHU:相对湿度;PDSI:帕默尔干旱指数

3 讨论

乔灌木年表与月尺度气候要素的响应分析结果表明,不同降水条件下同一物种和同一降水条件下的不同

物种在气候敏感性方面均存在差异。从整体上看,乔灌木在延安样点均表现出了较高的气候敏感性,气候要素对于径向生长的解释率均为三个降水梯度下最高。这可能与黄土高原中部地区植被的地带性分布有关,在本研究中的采样区自北向南分别位于绥德、延安、宜君,植被类型分别属于典型草原带、森林草原过渡带、暖温带落叶阔叶林带。在森林向灌丛、草原过渡的群落交错区,植被生长对于外部气候环境变化最为敏感,这与高山林线交错带树木生长的气候敏感性格局类似。在高山环境中,森林分布海拔上限和下限的树木生长对于气候响应的敏感性显著不同,位于森林分布海拔上限的树木往往对于温度变化较为敏感,而位于森林分布海拔下限的树木更易受干旱胁迫的影响,这已经在诸多研究中得到证实^[21-23]。

3.1 沿降水梯度刺槐径向生长对气候响应特征

位于南北降水梯度带上的人工林刺槐对于气候响应的敏感性也表现出了不同的格局,在绥德和延安地区,刺槐生长主要受到温度的负面影响,特别是生长季中后期温度升高对刺槐生长的抑制作用明显,在绥德样点,刺槐仅与初夏降水和夏末相对湿度呈显著正相关,对于 PDSI 干旱指数则相关性微弱。这表明在年降水量 447mm 的绥德地区,刺槐对于当地的干旱气候已经具备一定的生态适应性,对于气候要素的敏感性相对较低。生长季中后期,温度升至全年最高,刺槐蒸腾速率加快影响叶片水汽压亏缺,导致植株蒸发需求增加,进而导致叶片部分气孔关闭,二氧化碳吸收减少,碳同化速率降低,最终减少了树木径向生长量^[24],而在此期间,有效的降水补给会缓解干旱对植物生长的影响^[10]。在延安样点,刺槐从上年生长季末期到当年生长季结束,对于 PDSI 干旱指数表现出了极高的敏感性,在整个生长年中均受到明显的干旱胁迫,上年夏末秋初降水对其生长的影响也显著增强。另外一项研究也表明,在延安地区天然林辽东栎树木年轮中发现了温度对于其生长的负面影响在加剧,而水分对于其生长的促进作用也在增强^[11],这与我们在本研究中观察到的延安地区刺槐的气候响应模式基本一致,近年来延安地区升温速率明显快于绥德和宜君,而降水变化则整体较为平稳,延安地区的乔木生长很可能会进一步受到干旱胁迫的影响。在宜君样点,刺槐对温度的敏感性发生了明显转型特征,温度升高对其生长的负效应明显减弱而正效应趋于增强,特别是上年初夏温度升高对刺槐生长的促进作用明显,对于水分条件变化并不敏感,仅冬末降水增加对其生长有明显促进作用,与 PDSI 干旱指数相关性微弱,未体现出干旱胁迫信号。宜君相较绥德、延安,气候条件更为优越,降水较为充沛,刺槐生长不易受到干旱胁迫的影响,年轮对气候要素的敏感性也相对较低。上年初夏温度对于刺槐生长的积极作用表征了其对于气候响应具有一定的“时滞效应”,在水分充足的条件下,初夏温度升高,有利于提高植物的光合速率,促进碳水化合物的积累,为木质部活动提供充足的养分^[25]。冬末充足的降水量,在初春温度升高时会加速积雪融化,增加土壤湿度,补充土壤水分有效性,有利于木质部细胞的拓展,从而促进生长^[26]。

3.2 沿降水梯度山杏径向生长对气候响应特征

不同降水条件下的山杏对于气候要素的响应特征整体上较为一致,但对部分月份的相关气候要素响应趋势发生了转换。首先,在 3 个采样点,山杏与 PDSI 干旱指数均呈负相关关系(图 9),在延安和宜君地区,负相关关系整体趋于增强。此外,山杏对于降水、相对湿度的敏感性整体也较差。这表明山杏生长基本未受到干旱胁迫的影响,作为黄土高原乡土树种,在长期的生长过程中对于黄土高原的气候环境表现出了较高的适应性,反之,过多的土壤水分会对其生长产生负面影响。基于山杏的生理学实验研究表明,在适宜的水分条件下山杏具有较低的蒸腾速率且受光照影响强度不大,其蒸腾速率与气象因子的相关性微弱,具有低耗水性,这是由其自身的物种特性决定的^[27]。发现随着降水的增加,PDSI 干旱指数对于山杏生长的负面影响在增强,这进一步说明山杏对于水分的需求可能存在一定阈值,土壤含水量过多可能会导致根系缺氧,抑制其呼吸作用从而对生长产生负面影响^[28]。在绥德和延安,生长季中期温度和冬季温度升高均对山杏生长有促进作用,在延安地区,上年生长季末期温度升高也利于山杏生长。不易受到干旱胁迫的树种或者在水分较为充足的条件下,高温会促进植物光合速率进而影响植物生长,而生长季末期温度升高在延长生长季节长度的同时刺激年轮细胞形成较宽的年轮^[29]。冬季较高的温度可以减少低温冻害对植物根系的损伤,从而表现为对其生长的正反馈^[11]。在宜君地区,温度对于山杏生长的促进作用减弱,特别是生长季末期最高温度的升高对其生长抑

制作用明显,而相对湿度在此期间对其生长的促进作用较为明显。生长季内,植物经历了剧烈的生理活动,而生长季末期降水和空气相对湿度的增加,可以减少植物蒸腾导致的水分损失,间接促进碳水化合物的储存,从而在一定程度上弥补因夏季高温造成的植物可利用水分的减少^[30]。

3.3 沿降水梯度酸枣径向生长对气候响应特征

酸枣在各降水条件下对气候要素整体上均呈不敏感特征,在绥德和宜君地区,酸枣径向生长与所有气候要素的响应关系均未通过显著性检验。在延安地区酸枣径向生长表现出对上年夏季温度的显著负响应特征和上年生长季末期降水、冬末最低温度的显著正响应特征,而在回归方程中,仅两个月份的温度参数通过了显著性检验被保留下来量解释率,方程整体的解释率与同一梯度下其他三个物种相比也处于较低水平。绥德和宜君地区酸枣与气候要素的响应结果可以从以下两个方面解释,一是在交叉定年过程中,我们发现这两个地区的酸枣在一些关键的统计指标上都明显偏低,其中宜君酸枣的样芯间相关系数(R_{bar})仅有 0.1 左右,说明各样芯序列间的相似性较差,而两个地区酸枣年表的信噪比(SNR)分别为 0.965 和 1.784,说明年表中包含的气候信号很低;两个年表的(EPS)值仅为 0.491 和 0.641,可以认为整体上很难代表所采样品的整体生长信号,一般来说,年表的 EPS 值会随着样本量的增加而增大^[31],但是在本研究中,两个地区的样本量分别为 36 和 24,样本量相对来说并不算少,在交叉定年过程中,作者曾反复对各样芯进行了比对修正,但 EPS 值始终较低,这可能表明在黄土高原典型半干旱区和半湿润区,酸枣对当地的气候条件已经高度适应,个体生长表现出了较高的异质性特征,对于气候变化敏感性差,故基于年表的气候响应关系也整体呈现弱相关特征。二是基于酸枣已有的生理学实验研究证据。基于酸枣生理结构的可塑性系列研究表明,随着自然干旱梯度的增加,酸枣的根系分布、木质部导管、叶片结构均会做出相应的调整来应对干旱胁迫,主要表现为深层土壤中细根分布比例的增加,导管形态和结构的变化,叶面积逐渐变小,叶片厚度增加,叶表皮角质层加厚^[32-34]。在不同的干旱生境中,酸枣均表现出了强的适应性特征。

3.4 沿降水梯度白刺花径向生长对气候响应特征

白刺花在绥德地区,对于气候要素的敏感性均保持在较低水平,与 PDSI 干旱指数基本呈负相关关系(图 13),在回归方程中,7 月平均温度和上年 9 月 PDSI 干旱指数对其径向生长的变化的解释量也均未通过显著性检验(表 3),表明这一地区的白刺花对于气候响应不敏感,未受到干旱胁迫影响。在延安和宜君,白刺花对于温度和 PDSI 干旱指数的响应呈现大致相反的格局,在延安样点,生长季初期和末期的温度对其生长的抑制作用明显,冬末降水对其生长有促进作用,与 PDSI 干旱指数呈弱正相关,在生长季中后期正相关关系趋于增强。这表明在延安地区,白刺花生长受到轻微的干旱胁迫,生长季内温度的升高加剧了土壤蒸散发,土壤可利用水减少,进而导致叶片部分气孔关闭影响植物生长^[24],这与同一降水条件下的刺槐对于温度的响应类似。上年冬末较好的水分条件有利于植物积累光合产物,促进来年早材细胞生长。这一结果与李等^[12]对同一降水条件下狼牙刺的气候响应研究基本一致。在宜君样点,生长季末期最低温度对其生长的促进作用增强,7 月降水增多对白刺花生长有促进作用,与 PDSI 干旱指数整体呈负相关。这表明在宜君地区白刺花生长没有反映出干旱胁迫信号,在回归方程中,上年 10 月温度和 7 月降水对其径向生长变化的解释量也达到了较高水平,当年夏季和上年秋末水热条件变化对其生长的影响较大。有研究表明,白刺花在受到不同程度的水分胁迫时,可以通过调节保护酶的活性而维持细胞膜的完整性,而当其处于中度干旱胁迫时,地上地下生物量相比其处于适宜水分条件下仍有所增加,体现出了较强的抗旱性^[35-36]。在我们的研究中,不同降水梯度下的白刺花整体上均表现出了相对较低的气候敏感性,对于干旱胁迫反应不明显,而仅在降水条件较为适宜的延安地区受到夏季土壤水分有效性的一定制约。

基于黄土高原中部地区 4 个典型乔灌木物种的年轮宽度资料,通过气候响应分析和逐步回归分析,量化了 4 个物种沿降水梯度的气候敏感性变化。年轮宽度资料能够有效识别限制木本植物生长的主要气候因子,但是在生理层面上进一步揭示具体影响木本植物对气候变化响应机制仍需要借助基于生理学性状的证据,譬如木质部导管特征、根、茎、叶等生理学性状,未来开展相关工作时可以考虑将相对静态的生理学实验研究和

反映植物长时间生长动态的年轮学证据结合起来,对于科学阐释生态敏感区不同植物群落应对气候变化的生活史策略具有一定意义。

4 结论

以黄土高原中部地区典型乔灌木刺槐、山杏、酸枣、白刺花为研究对象,利用树木年轮气候学方法构建了3个地点4个物种共12个树轮宽度标准年表,分析了沿降水梯度乔灌木气候敏感性差异。结果表明,影响不同降水梯度乔灌木生长的主要气候因子不同。在绥德地区,当年和上年生长季末期(9月)最低温度升高对刺槐生长有显著的抑制作用,夏季(7月)最低温度对山杏生长有明显促进作用,而气候要素对酸枣和白刺花生长的影响并不明显。在延安地区,生长季内(4—9月)充足的土壤水分和冬末(2月)降水增加是促进刺槐生长的主要因素,而上年生长季末期(9月)最高温度的升高对其生长有显著负面影响。山杏生长主要受益于上年7月相对湿度增加和当年8月最高温度的上升,而冬季(12月)降水对其生长有负面影响。酸枣生长主要受益于冬季(1月)较高的最低温度,上年初夏(6月)较高的最低温度则会对其生长产生抑制作用。上年6月降水增多和11月最高温度上升对白刺花生长有显著抑制作用,而1月降水量增加对其生长有积极影响。在宜君地区,上年初夏(6月)最高温度上升和当年1月降水增加有利于刺槐生长。上年生长季末期(10月)较高的平均温度对山杏生长有促进作用,而当年8、9月最高温度上升对其生长有负面影响。白刺花主要受到上年生长季末期(10月)平均温度和当年7月降水的共同促进作用,酸枣径向生长受气候影响不明显。

整体而言,乔灌木物种沿降水梯度的气候响应敏感性呈现单峰模式,以位于林草过渡带的半湿润易旱区样点的气候敏感性最高;不同降水条件下,人工林乔木(刺槐、山杏)气候敏感性均优于天然灌丛(酸枣、白刺花)。酸枣气候敏感性在整个研究区内最弱,在绥德和宜君地区,酸枣个体生长异质性较高,年轮中蕴含的气候信息极低。乡土物种(山杏、酸枣、白刺花)在不同降水条件下均对长期干旱胁迫不敏感,对当地环境具有较强的生态适应性;外来物种刺槐在半湿润易旱区,整个生长季内持续对干旱胁迫响应敏感,而在半干旱区和半湿润区则对长期干旱胁迫不敏感。研究结果对黄土高原区域植被提质增效和生态建设具有一定意义。

参考文献(References):

- [1] Gao X R, Zhao Q, Zhao X N, Wu P T, Pan W X, Gao X D, Sun M. Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 191-200.
- [2] 王超,甄霖,杜秉贞,孙传璋. 黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析. *中国生态农业学报*, 2014, 22(7): 850-858.
- [3] 韦景树,李宗善,冯晓琦,张园,陈维梁,伍星,焦磊,王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [4] Zhang B Q, Tian L, Zhao X N, Wu P T. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the Loess Plateau in China. *Science China Earth Sciences*, 2021, 64(6): 920-931.
- [5] Yang C, Fu M C, Feng D R, Sun Y Y, Zhai G H. Spatiotemporal changes in vegetation cover and its influencing factors in the loess plateau of China based on the geographically weighted regression model. *Forests*, 2021, 12(6): 673.
- [6] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, D'Arrigo R, Li J B. Tree-ring based drought reconstruction for the Guiqing Mountain (China): linkages to the Indian and Pacific Oceans. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(8): 1137-1145.
- [7] Fang K Y, Gou X H, Chen F H, Liu C Z, Davi N, Li J B, Zhao Z Q, Li Y J. Tree-ring based reconstruction of drought variability (1615-2009) in the Kongtong Mountain area, Northern China. *Global and Planetary Change*, 2012, 80/81: 190-197.
- [8] Fang K Y, Guo Z T, Chen D L, Linderholm H W, Li J B, Zhou F F, Guo G Y, Dong Z P, Li Y J. Drought variation of western Chinese Loess Plateau since 1568 and its linkages with droughts in western North America. *Climate Dynamics*, 2017, 49(11): 3839-3850.
- [9] Cai Q F, Liu Y, Song H M, Sun J Y. Tree-ring-based reconstruction of the April to September mean temperature since 1826 AD for north-central Shaanxi Province, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(8): 1099-1106.
- [10] Keyimu M, Li Z S, Fu B J, Chen W L, Wei J S, Jiao L, Gao G Y, Lü Y H. Spatial differences in the radial growth responses of black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.) to climate on the Loess Plateau, China. *Dendrochronologia*, 2021, 67: 125832.

- [11] 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*, 2022, 36(6): 1811-1822.
- [12] 李晓琴, 张凌楠, 曾小敏, 王可逸, 王雅波, 路强强, 刘晓宏. 黄土高原中部针叶树与灌木径向生长对气候的响应差异. *生态学报*, 2020, 40(16): 5685-5697.
- [13] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [14] 李斌, 张金屯. 黄土高原灌丛景观斑块形状的指数和分形分析. *中国农学通报*, 2009, 25(22): 296-300.
- [15] Stokes M A, Smiley T L. An introduction to tree-ring dating. Chicago: 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] Wang A, Gao X R, Zhou Z Y, Yang H, Zhao X H, Wang Y M, Li M, Zhao X N. Dynamic responses of tree-ring growth to drought over Loess Plateau in the past three decades. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109423.
- [19] Zang C, Biondi F. Treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 2015, 38(4): 431-436.
- [20] 申佳艳, 李帅锋, 黄小波, 雷志全, 施兴全, 苏建荣. 南盘江流域云南松径向生长对气候暖干化的响应. *植物生态学报*, 2019, 43(11): 946-958.
- [21] Camarero J J, Gazol A, Sánchez-Salguero R, Fajardo A, McIntire E J B, Gutiérrez E, Batllori E, Boudreau S, Carrer M, Diez J, Dufour-Tremblay G, Gaire N P, Hofgaard A, Jomelli V, Kirilyanov A V, Lévesque E, Liang E Y, Linares J C, Mathisen I E, Moiseev P A, Sangüesa-Barreda G, Shrestha K B, Toivonen J M, Tutubalina O V, Wilmking M. Global fading of the temperature-growth coupling at alpine and polar treelines. *Global Change Biology*, 2021, 27(9): 1879-1889.
- [22] Lu X M, Huang R, Wang Y F, Sigdel S R, Dawadi B, Liang E Y, Camarero J J. Summer temperature drives radial growth of alpine shrub willows on the northeastern Tibetan Plateau. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2016, 48(3): 461-468.
- [23] Lu X M, Huang R, Wang Y F, Zhang B Q, Zhu H F, Camarero J J, Liang E Y. Spring hydroclimate reconstruction on the south-central Tibetan Plateau inferred from *Juniperus pingii* var. *Wilsonii* shrub rings since 1605. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(12): e2020GL087707.
- [24] Lloyd J, Farquhar G D. Effects of rising temperatures and [CO₂] on the physiology of tropical forest trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2008, 363(1498): 1811-1817.
- [25] Rossi S, Deslauriers A, Gričar J, Seo J W, Rathgeber C B, Anfodillo T, Morin H, Levanic T, Oven P, Jalkanen R. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, 17(6): 696-707.
- [26] 韦景树, 李宗善, 焦磊, 陈维梁, 伍星, 王晓春, 王帅. 黄土高原羊圈沟小流域人工物种和自然物种径向生长对气候变化的响应差异. *生态学报*, 2018, 38(22): 8040-8050.
- [27] 张淑勇, 周泽福, 张光灿, 夏江宝. 半干旱黄土丘陵区 4 种天然次生灌木光合生理和水分利用特征. *林业科学*, 2008, 44(12): 140-146.
- [28] Kramer K, Vreugdenhil S J, van der Werf D C. Effects of flooding on the recruitment, damage and mortality of riparian tree species: a field and simulation study on the Rhine floodplain. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(11): 3893-3903.
- [29] Xie Y Y, Wang X J, Jr Silander J A. Deciduous forest responses to temperature, precipitation, and drought imply complex climate change impacts. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(44): 13585-13590.
- [30] Chen M, Zhang X, Li M, Zhang J J, Cao Y. Climate-growth pattern of *Pinus tabulaeformis* plantations and their resilience to drought events in the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2021, 499: 119642.
- [31] Sheppard P R. *Dendroclimatology: extracting climate from trees*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2010, 1(3): 343-352.
- [32] 朱广龙, 邓荣华, 马茵, 魏学智. 酸枣茎导管对自然梯度干旱生境响应的结构特征. *生态学报*, 2015, 35(24): 8268-8275.
- [33] 朱广龙, 邓荣华, 魏学智. 酸枣根系空间分布特征对自然干旱梯度生境的适应. *生态学报*, 2016, 36(6): 1539-1546.
- [34] 朱广龙, 魏学智. 酸枣叶片结构可塑性对自然梯度干旱生境的适应特征. *生态学报*, 2016, 36(19): 6178-6187.
- [35] 王海珍, 梁宗锁, 郝文芳, 韩路. 白刺花(*Sophoraviciifolia*)适应土壤干旱的生理学机制. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 106-110.
- [36] 王海珍, 梁宗锁, 韩蕊莲, 韩路. 土壤干旱对黄土高原 4 个乡土树种生长及干物质分配的影响. *植物资源与环境学报*, 2005, 14(1): 10-15.