

DOI: 10.5846/stxb201801100079

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): - .

Wei J S, Li Z S, Jiao L, Chen W L, Wu X, Wang X C, Wang S. Climate effect on the radial growth of introduced and native tree species in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

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

韦景树^{1,2}, 李宗善^{1*}, 焦磊³, 陈维梁^{1,2}, 伍星¹, 王晓春⁴, 王帅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 中国科学院大学, 北京 100049

3 陕西师范大学, 西安 710119

4 东北林业大学林学院生态研究中心, 哈尔滨 150040

5 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘要:为揭示黄土高原人工和自然物种径向生长对气候变化的响应差异,在延安羊圈沟小流域分别获取人工和自然物种的树木年轮材料并构建标准年表,其中人工物种为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和柠条(*Caragana korshinskii*),自然物种为山杏(*Armeniaca sibirica*)和荆条(*Vitex negundo var. heterophylla*),并对年表中的气候信号进行了统计分析。结果表明:1)人工物种年表中的气候信号较强,主要表现在5—8月份,与温度呈负相关关系(刺槐: $r = -0.427 \sim -0.511, P < 0.05$;柠条: $r = -0.227 \sim -0.738, P < 0.05$),与降雨则呈正相关关系,但相关系数未达到显著性水平;自然物种年表中的气候信号较弱,与温度和降雨的相关关系均较低;2)不同于自然物种,人工物种树轮年表还与去年夏季(7—9月份)温度(负相关)和降水(正相关)存在相关关系,表明人工物种树木生长对气候因子存在一定滞后性;3)人工物种树轮年表与PDSI干旱指数在各月份均维持正相关关系,在生长季(刺槐4—9月、柠条4—8月)达到显著水平(刺槐: $r = 0.481 \sim 0.704, P < 0.05$;柠条: $r = 0.314 \sim 0.610, P < 0.05$);而自然物种年表与PDSI干旱指数的相关关系较弱,均未达到相关性水平。从各年表与气候要素(温度、降雨、PDSI)响应强度来看,黄土高原人工物种树木生长受水分胁迫显著,且以刺槐最为明显,其次是柠条;自然物种树木生长则没有明显干旱胁迫的影响,仅山杏生长受一定水分胁迫影响,荆条生长则与各气候要素关系较弱,水分胁迫对其生长的影响已很小。本研究的结果表明黄土高原人工物种生长明显受到水分条件限制,而自然恢复物种生长则受水分条件影响较小,能适应黄土高原干旱半干旱气候条件。

关键词:黄土高原;径向生长;气候响应;年轮指数;PDSI;植被恢复

Climate effect on the radial growth of introduced and native tree species in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau

WEI Jingshu^{1,2}, LI Zongshan^{1,*}, JIAO Lei³, CHEN Weiliang^{1,2}, WU Xing¹, WANG Xiaochun⁴, WANG Shuai⁵

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

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

4 Center For Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

基金项目:国家自然科学基金项目(41571503)、国家重点研发计划项目(2016YFC0501602)和中国科学院科技网络服务计划项目(KFJ-STZ-DTP-036)资助

收稿日期:2018-01-10; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zsli_st@cees.ac.cn

5 Beijing State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: A considerable challenge faced by the largest Grain-to-Green Programme of the Chinese Loess Plateau (CLP) is whether planted species can adapt to semi-arid climates. Our project aimed to explore the adaption characteristics of introduced vegetation under warming and drying climates in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau. We analyzed and compared the differences of inter-annual radial growth responding to climate change between introduced and native tree species. Based on dendrochronological methods, we collected tree-ring samples and established ring-width chronologies for both introduced (*Robinia pseudoacacia*, *Caragana korshinskii*) and native (*Armeniaca sibirica*, *Vitex negundo* var. *heterophylla*) species. Relationships between the environmental factors (temperature, precipitation, Palmer Drought Severity Index (PDSI)) and tree-ring index were determined using correlation analyses. The results showed that: 1) The tree-ring width series of introduced species had significantly passive correlations with May-August temperatures (*R. pseudoacacia*: -0.511 to -0.427; *C. korshinskii*: -0.738 to -0.227; $P < 0.05$) and positive correlations with May-August precipitation; tree-ring series of native species were also negatively correlated with the temperature and positively correlated with precipitation, but not significantly; 2) Different from those of native species, the tree-ring width series of introduced species showed a relationship with the temperature and precipitation from the growing season of the previous summer (July-September), indicating that the environmental factors had a lag-effect on the growth of the introduced species; 3) The tree-ring width series of introduced species maintained positive correlations with PDSI each month with the highest correlation coefficients (*R. pseudoacacia*: 0.481 to 0.704; *C. korshinskii*: 0.314 to 0.610; $P < 0.05$) in the growing season (*R. pseudoacacia* April-September, *C. korshinskii* April-August). However, there was a weak correlation that did not reach a significant level between the native species and PDSI; 4) The tree-ring chronologies showed a specific intensity response to environmental factors (temperature, precipitation, PDSI), introduced species were strongly negatively affected by water stress in the CLP semi-arid region, with *R. pseudoacacia* affected the most followed by *C. korshinskii*; however, native trees were only weakly affected by drought, where *A. sibirica* growth was normal in the severe drought condition, and *V. negundo* var. *heterophylla* was the most drought tolerant species and relatively robust to the effects of climate change. In conclusion, introduced species were strongly negatively affected by water stress, suggesting their growth would be unsustainable in the future, and native trees were weakly affected by drought, and could adapt to the climate change trends in the CLP semi-arid area.

Key Words: Chinese loess plateau; radial growth; tree-ring index; climate response; PDSI; vegetation restoration

黄土高原地区由于历史上长期的人为活动,该区域原始林已经被破坏殆尽,水土流失严重、生态环境脆弱,加上气候变化的影响,生态系统功能及结构的稳定性受到极大威胁^[1-2]。为控制水土流失并改善黄土高原的生态环境,自1999年以来,国家开展了大规模的植被恢复建设,已使得黄土高原森林覆盖率明显提高,人工林面积有逐年增加的趋势^[3-5]。通过植被覆盖指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据显示,1999—2013年黄土高原年均NDVI值从0.454增加至0.613,且随着黄土高原二期退耕还林工程的实施,未来黄土高原三分之二面积的植被将持续得到改善^[6]。但是大面积的人工植被种植亦带来一些负面的生态效应,譬如土壤干化^[7]、林木生长衰败^[8]、小生境恶化^[9]、地力衰退^[10]等,Feng等通过构建自然-社会-经济水资源可持续利用耦合模型框架,指出当前黄土高原植被恢复已接近该区域水分植被承载力阈值上限^[11]。众多研究表明黄土高原气候有暖干化的趋势,水资源匮乏将成为该区域森林植被生长所面临的主要问题之一^[12-15],因此,探讨黄土高原人工植被对气候变化的响应及适应具有重要的生态学意义。

树轮年代学具有定年精确、连续性强、可获复本量大和分辨率高等特点,成为揭示植物径向生长与气候环境变化关系的重要途径^[16]。此外,灌木的年轮也可以用来重建过去的气候变化历史,也可以根据灌木径向生

长对环境的适应性特征为当地进行生态恢复建设提供有价值的信息^[17]。目前黄土高原西部和北部等区域是树木年轮研究的热点地区,并取得一些重要成果,譬如 Chen 等通过甘肃长岭油松 (*Pinus tabulaeformis*) 树木年轮重建过去近 300 年的降雨历史,发现降雨是该区域树木径向生长的主要限制因子^[18]; Chen 等利用黄土高原西北部贺兰山的青海云杉 (*Pinus crassifolia* Kom.) 等树轮年表重建过去近 300 年的降雨信号,发现该区域东亚季风受气候变暖影响正在逐渐减弱,降雨在近 20 年亦呈现下降的趋势^[19]; Kang 等通过祁连山北部的 187 个油松 (*Pinus tabulaeformis*) 样芯,发现包括黄土高原在内的中国中北部地区季风减弱导致植物径向生长下降^[20]; Yi 等通过中国北部地区夏季温度和降雨的重建,发现黄土高原过去经历暖干时期和冷湿时期的交替,且暖干时期夏季的增温和少雨导致该区域树木易形成窄轮^[21]。这些研究都是在自然保护区获取长时间序列的年表,并侧重于该区域历史气候的重建,也有一些研究涉及树轮年表的非气候信号^[22]、树木径向生长日变化^[23]以及草根年轮^[24]等方面。

以上开展的工作为研究黄土高原气候变化对植被生长的影响提供了经验和依据,从整体上看目前还是集中在森林植被条件较好的自然保护区,主要研究方向还是古气候重建等方面,而对黄土高原人工植被生长对气候响应特征及与自然植被响应特征的比较研究还未引起足够的重视。因此,本研究应用树木年代学理论方法和技术,以该区域常见人工物种刺槐和柠条为主要研究对象,并以自然物种山杏和荆条作为对照,研究干旱半干旱区植物径向生长与气候要素的响应关系,主要研究目标:1) 确定该区域影响树种径向生长的主要气候因素;2) 4 个物种树轮年表与温度、降水的相关响应关系及其物种间的差异;3) 4 个物种径向生长与 PDSI 响应特征及其物种间的差异。拟进一步探讨人工和本土物种的生态适应性及稳定性的差异化,以权衡该区域人工植被对气候的适应能力,旨在深入研究该区域气候变化与植物的响应关系,为森林的可持续性经营提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

羊圈沟小流域位于陕北延安李渠镇,属于黄土高原中部地区(图 1), 109°31'—109°71'E, 36°42'—36°82' N。海拔在 1050—1295 m 之间。地貌类型为黄土梁和黄土沟,沟谷密度为 2.74 km/km²,属典型黄土丘陵沟壑区。区域气候为半干旱大陆性季风气候,年日照时数 2528.8 h,年平均气温 9.4℃,气温年较差 29.4℃,≥10℃的活动积温 2500—3400℃。年平均降水量 535 mm,降水多集中在 7—9 月,约占全年降雨量的 79%。流域内土壤以黄绵土为主,抗蚀性差,水土流失严重。流域植被在区划上属于森林草原过渡带。流域内由于人为活动的干扰,自然植被破坏殆尽,如今多以人工种植的次生植被为主,植物种类中人工物种主要有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana korshinskii*)、小叶杨 (*Populus simonii*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 和紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 等;自然物种主要有山杏 (*Armeniaca sibirica*)、荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、铁杆蒿 (*Tripolium vulgare* Nees)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、白羊草 (*Bothriochloa ischaemum*)、委陵菜 (*Potentilla chinensis*) 和绣线菊 (*Spiraea salicifolia*) 等。

1.2 样本采集及年表建立

于羊圈沟小流域海拔 1250 m 左右分别采集刺槐、山杏、荆条、柠条 4 个树种样品。对乔木树种取样时,选择优势木,在树高胸径大约 1.3 m 处用 5.15 mm 生长锥钻取树芯,根据采样环境及条件,样芯的钻取高度和方向有所不同,并将取到的样芯放在塑料管内编号封存。采样时尽量选择远离人为活动且生长状况良好的乔木,为了对树木的伤害减至最小,每株乔木采集 1 根样芯,其中刺槐采集了 52 根样芯,山杏采集了 39 根样芯。灌木年轮采样通过系列茎干取样法 (Series Section),沿着灌木茎干从基部至顶端每隔几厘米至几十厘米截取圆盘^[25],最后柠条和荆条各收集到圆盘 12 个。

将样品取回室内后,乔木树种样芯按照国际上认可的方法^[26],自然晾干后用白乳胶对其进行固定,然后

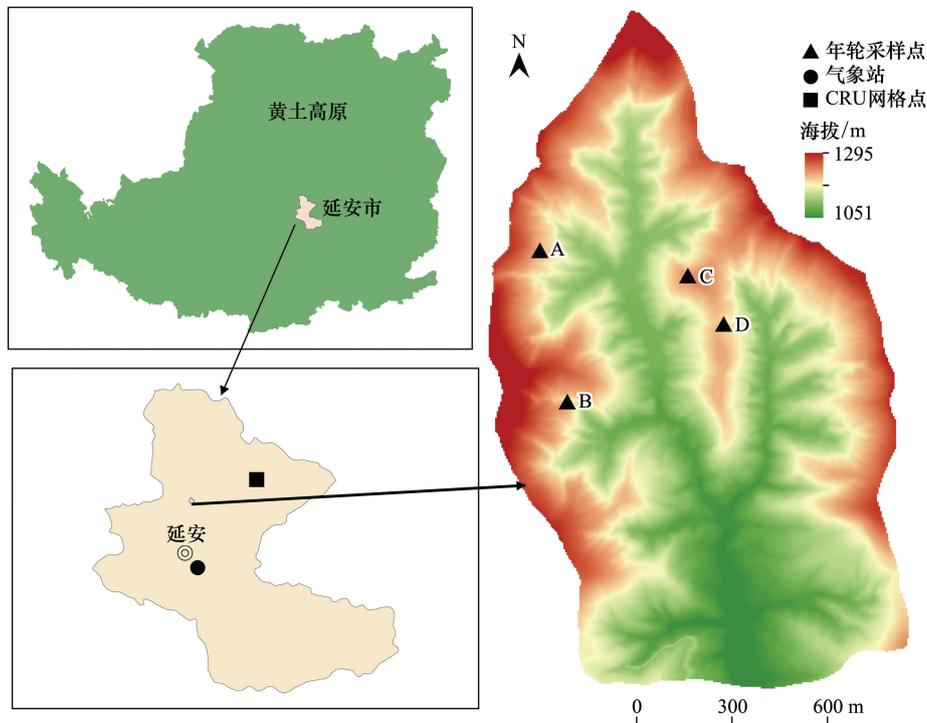


图1 黄土高原羊圈沟树轮采样点示意图

Fig.1 Location map of tree-ring sampling site of the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China

A、B、C、D 分别代表刺槐、山杏、荆条、柠条采样点,CRU 代表气象格点数据集,全称为:Climatic research unit

分别经过 120、400、600、800 目干砂纸逐次打磨抛光,直到树芯表面光滑清晰,达到树木年轮学分析要求。再用德国 Frank Rinn 公司生产的 LINTAB 轮宽分析仪测量树轮宽度,精度为 0.01 mm。为确保测量的准确性,最后利用 COFECHA^[27] 程序对交叉定年和测量结果进行校验,山杏分别保留 45、36 根样芯(表 1)。灌木年轮的采样同样遵循树木年代学的基本原理和方法,通过对灌木个体不同部位以及不同灌木个体之间茎干基部圆盘分别进行交叉定年,同样剔除不能正常交叉定年的序列。通过 ARSTAN^[28] 程序利用负指数函数(或者样条函数)拟合去掉树木本身遗传因子产生的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^[25],达到标准化的目的并对去趋势序列以双权重平均法分别合成标准年表(STD)、差值年表(RES)和自回归年表(ARS)。标准年表包含丰富的低频信息并剔除非气候信号和生长趋势,也蕴含着其他的扰动信号,相比差值年表和自回归年表具有明显的优势,因此本文采用标准年表进行研究^[29](图 2)。

1.3 气象资料与数据分析

气象数据选取距离采样点最近的延安李渠镇气象台站(109.5°E,36.6°N 海拔为 958.5 m 图 1),包括逐月的平均气温和降水量,时间区间为 1951—2016 年,气象资料来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。本研究采取不同年表与气象资料的最大公共时段进行相关分析(刺槐:1983—2016;柠条:2003—2016;山杏:1967—2016;荆条:1999—2016)。为了检验气候数据的均一性,采用 Mann-Kendall 法对其进行突变检验^[30],结果显示气象数据通过置信度为 0.05 的显著性水平,表明气象数据稳定可靠,可以满足本研究进行相关气候分析的需要。我们采取不同年表与气象资料的最大公共时段进行相关分析,一方面能够充分利用树轮年表的数据信号,另一方面分析时段较长也能保证年表与气象资料相关分析结果的可靠性考虑到上年气候因子对当年树木生长的影响,选用生长季前一年 8 月至当年 10 月的气象数据与所得的树轮标准年表进行相关及响应分析。相关分析过程由软件 DendroClim2002 实现^[31]。本文亦选用了距离采样点最近的 CRU 网格点的气象数据(图 1),包括逐月的平均气温、降水量、帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI),时间区间为 1951—2016 年,气象资料来自于全球气候数据(<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/>

data/hrg/),精度为 0.5° (约为 25 km)。CRU 网格点温度、降雨和 PDSI 与树轮宽度序列进行相关分析的时段亦为各个树种年表与其最大的公共时段(刺槐:1983—2016;柠条:2003—2016;山杏:1967—2016;荆条:1999—2016),该过程也由软件 DendroClim2002 实现^[31]。

表 1 黄土高原羊圈沟小流域树轮样点信息及标准年表统计特征

Table 1 Site information, chronology statistics and results of common interval span analysis of standard tree-ring chronologies from the Yangjuangou catchment in the Loess Plateau of China

类型 Type	地点 Location	海拔 Elevation/m	时间区间 Time length	样芯数量 Number of cores	SD	MS	AR1	Rbt	SNR	EPS	VFE
刺槐(乔木) Robinia pseudoacacia (tree)	109.52°E, 36.7°N	1290	1983—2016	45	0.278	0.279	0.135	0.414	15.525	0.939	0.467
柠条锦鸡儿(灌木) Caragana korshinskii (shrub)	109.52°E, 36.7°N	1245	2003—2016	12	0.3	0.36	0.48	0.75	—	—	—
山杏(乔木) Armeniaca sibirica (tree)	109.52°E, 36.7°N	1250	1967—2016	36	0.176	0.163	0.13	0.437	4.34	0.813	0.221
荆条(灌木) Vitex negundo var. heterophylla (shrub)	109.52°E, 36.7°N	1240	1999—2016	12	0.248	0.205	0.536	0.635	6.754	0.871	0.431
气象站 The climate station	109.5°E, 36.6°N	958.5	1951—2016	—	—	—	—	—	—	—	—
CRU 网格点 Climatic research unit	109.5°E, 36.5°N	—	1951—2016	—	—	—	—	—	—	—	—

SD:标准差 Standard deviation,MS:平均敏感度 Mean sensitivity;AR1:一阶自相关 Autocorrelation order 1;Rbt:样芯间相关系数 Mean inter-series correlation;SNR:信噪比 Signal-to-noise ratio;EPS:样本群体表达信号 Express population signal;VFE:第一主成分所占方差量 Variance in first eigenvector

2 结果

2.1 年表基本统计特征

统计结果表明(表 1),自然物种山杏和荆条 2 个年表的平均敏感度(MS)比人工物种刺槐、柠条的低,说明人工物种比自然物种对气候要素更敏感,同时 4 个年表较高的信噪比(SNR)也说明本研究所采集的样本具有丰富的环境信息。人工物种的样本总体代表性(EPS)均在 0.85 以上,自然物种山杏的 EPS 也达到 0.8 以上(无柠条数据),也说明了本调查采集样本量所含的信号基本能够代表总体特征^[32]。另外刺槐、山杏、荆条的第一主成分方差解释量(VFE)也达到了较高的水平,表明 3 个研究树种能够很好的反应气候变化一致性。而由于柠条年轮序列较短,VFE、EPS、SNR 等无法统计,但 MS、样芯间相关系数 Rbt 却是 4 个年表中最高的,表明柠条可用于作年轮—气候响应关系研究。相对而言,引进物种较自然物种的年表具有更丰富的环境信息,受到环境因子作用更明显,统计数据具有更高的可信度。总体来说,研究区域树木径向生长受到共同气候因子的制约,统计特征包含了较多的气候信号,所采集的 4 个树种的样品均适合进行年轮气候学研究。

2.2 人工和自然树种径向生长对温度、降水的响应

通过刺槐树轮年表与就近的延安气象站气候因子的相关和响应分析发现(图 3),刺槐树木径向生长与多数月份平均气温呈负相关关系,其中显著的负相关出现在生长季上年的 7、9 月份和当年的 5—9 月份(r 介于 -0.340 — -0.511 , $P < 0.05$),而正相关仅出现在上年的 10 月份和当年的 1、3、10 月份,且均没有通过显著性检验。刺槐树轮年表序列在大多数月份与降水正相关,其中在上年的 7、9 月份和当年的 2、5 月份达到显著水平(r 介于 0.331 — 0.531 , $P < 0.05$),只有前生长季 12 月份与当季 10 月份与降水呈负相关;除上年 9 月,生长

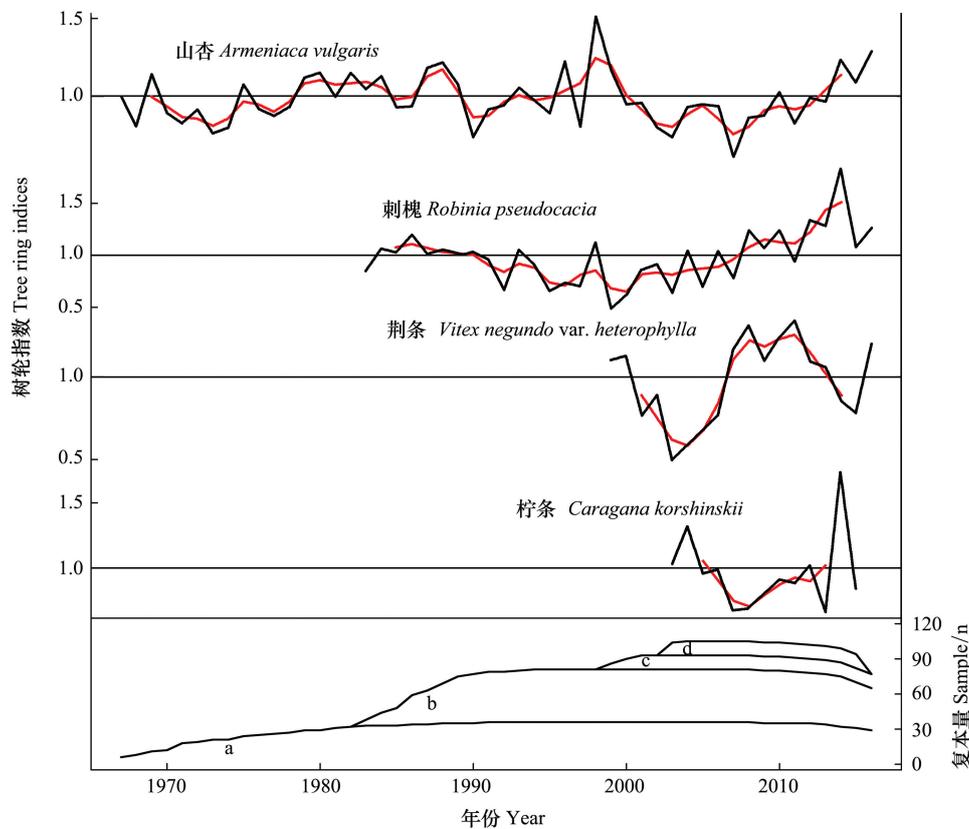


图2 黄土高原羊圈沟流域所采集树轮标准年表

Fig.2 The standard chronologies along with a smoothed 11-year moving average in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau

红色线条为年轮指数的11年滑动平均序列,a, b, c, d 分别代表山杏、刺槐、荆条、柠条

季当年1、4和10月份以外,柠条树轮年表与月平均气温均呈负相关关系,其中上年的8、12月份,生长季当年的5、6、8月份都达到显著水平(r 介于 -0.738 — -0.311 , $P < 0.05$),其中最显著值出现在当年8月($r = -0.738$, $P < 0.05$)。而其宽度序列与降雨在多数月份呈正相关关系,只有在当年生长季的2月($r = 0.542$, $P < 0.05$)、4月($r = 0.440$, $P < 0.05$)和9月($r = 0.359$, $P < 0.05$)达到显著水平。

通过山杏树轮年表与就近的延安气象站气候因子的相关和响应分析发现(图3),山杏树轮年表与多数月平均气温呈负相关关系:生长季当年2—3、5—8月份及上年的8、10—11月份,但均未达到显著水平。其与降水呈正相关关系出现在生长季当年3—8月份及上年的8、11月份,剩余其他月份均呈负相关,且所有月份的相关系数亦未达到显著水平;荆条的树轮年表与上年8—12月份的月均温均呈正相关关系,其中与上年10月份显著正相关($r = 0.462$, $P < 0.05$),与当年的1至4月份和7、9月份呈负相关关系,与5—6月份和8、10月份呈正相关,均未通过显著性检验;其与降雨负相关的月份有上年9至10月份、12月份及当年1月份、5至6月份、8至9月份,相关性都比较微弱,其中与上年12月份达到明显的负相关($r = -0.380$, $P < 0.05$),而与上年7—8、11月份和当年的2—4、7、10月份呈正相关关系,相关系数亦未通过显著性检验。

2.3 人工和自然物种与PDSI响应关系

人工植物树轮年表对PDSI的响应特征有较高的一致性(图5):刺槐树轮年表与PDSI除与上年7、8月份和当年10月份不显著外,其他月份均达到0.05的显著水平(r 介于 0.481 — 0.704 , $P < 0.05$),其中最高值出现在生长季当年的7月份($r = 0.704$, $P < 0.05$);而柠条树轮年表与PDSI相关除了8、9月份不显著外,其他月份均月均呈正相关关系(r 介于 0.314 — 0.610 , $P < 0.05$),因此人工植物对水分胁迫极为敏感,尤其在生长季;而自然植物的树轮年表对PDSI的响应具有较好的一致性:山杏树轮年表与每月的PDSI均正相关,但响应值

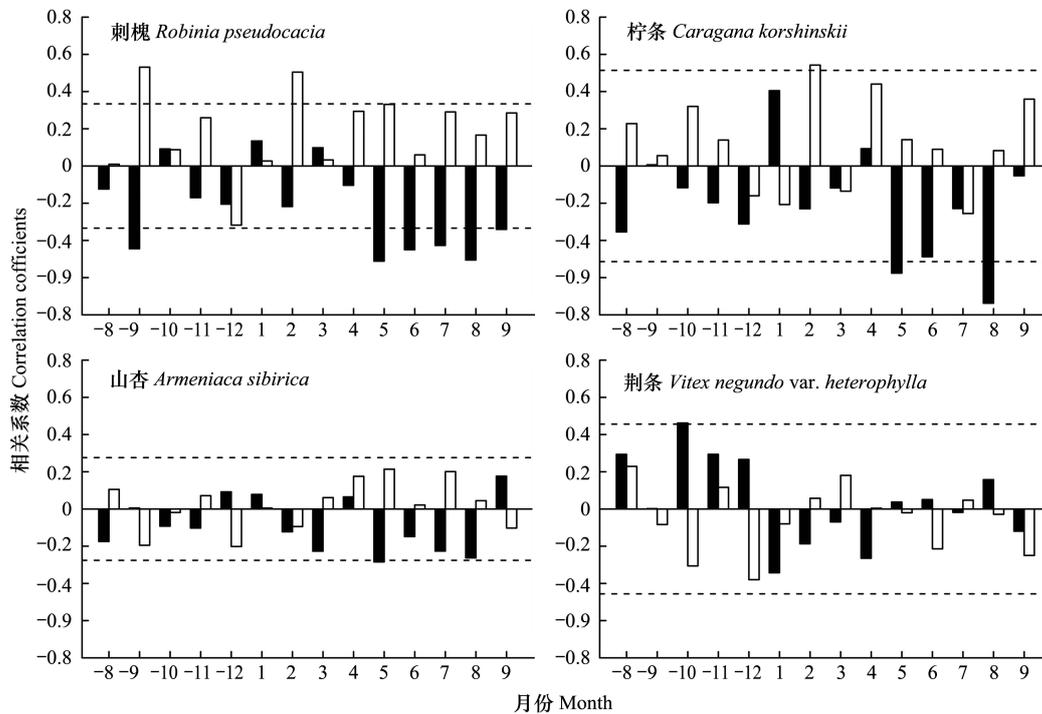


图3 黄土高原羊圈沟树轮年表与地面气象台站气候数据相关分析

Fig.3 Correlation analysis between climate (temperature and precipitation) of the meteorological station and tree-ring chronologies in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau

虚线代表显著性水平($P < 0.05$)。实心柱代表温度,空心柱代表降雨;“-”代表上年的月份,如“-8”代表上年8月份。各树种年表与气象数据相关分析时间段为刺槐:1983—2016;柠条:2003—2016;山杏:1967—2016;荆条:1999—2016

较小,只有5月($r = 0.344, P < 0.05$)和7月($r = 0.350, P < 0.05$)通过显著性检验。荆条树轮年表对PDSI响应上下波动无明显规律性,且无法通过显著性检验(图5)。因此PDSI对山杏的影响非常微弱,而荆条则基本不受到PDSI的影响(图5),表明这两个自然物种对水分胁迫敏感性较低。

3 讨论

3.1 影响黄土高原半干旱区植物径向生长的主要气候因素

全球变暖导致了洲际和区域的森林生长衰退及死亡率增加成为普遍现象^[33]。近50年的气候数据表明,黄土高原增温现象明显,1961—2010年的平均气温增长了 1.91°C ,就降水而言,1961—2010年的年降水量减少了 29.11 mm ^[14]。因此,气候作为该区域生态系统结构及过程的一个主要驱动因素之一,树木生长对气候因子的响应也发生改变,植物个体的生理过程亦受到影响,但同一区域不同树种之间对气候响应的敏感度及稳定性存在差异。譬如,在温度升高降水减少条件下,在祁连山中部林线附近的青海云杉(*Picea crassifolia*)常有缺轮现象,树木径向生长受到抑制^[34];在青藏高原东北部的5—6月高温不利于祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)宽轮的形成^[35];郭明明等分析青藏高原半湿润区不同物种树木径向生长对气候变化响应规律时发现:4—5月的增温少雨对铁杉(*Tsuga chinensis*)径向生长影响最严重,岷江冷杉(*Abies faxoniana*)次之,紫果云杉(*Picea purpurea*)受影响最小^[36]。

PDSI作为反映土壤湿度的代用指标,在干旱区的相关研究中被广泛应用,其数值大小代表着土壤水分有效性状况^[37],从结果来看(图5),人工物种树轮年表与PDSI在各月份均维持正相关关系,在生长季达到显著水平,表明人工植物深刻受到水分胁迫的影响,而自然物种年表与PDSI干旱指数的相关关系较弱,在多数月份均未达到相关性水平,与人工植物形成鲜明对比。说明自然物种能较好的适应缺水的环境条件。从四种植

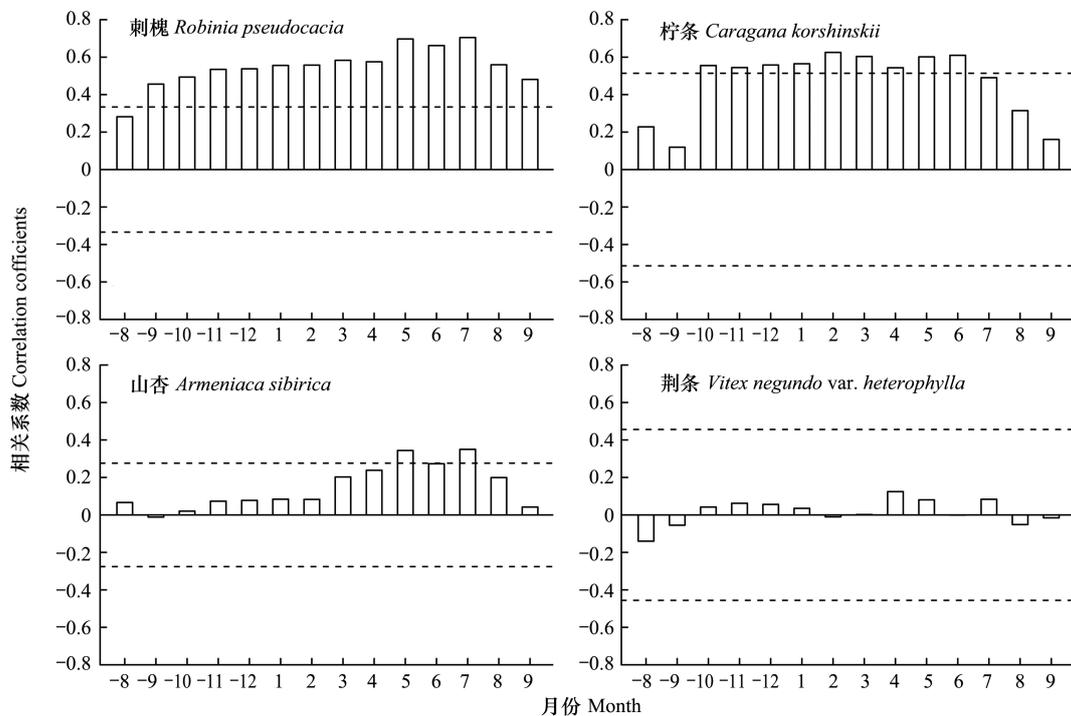


图4 黄土高原羊圈沟树轮年表与PDSI干旱指数数据相关分析

Fig.4 Correlation analysis between PDSI data of CRU grid and tree ring chronologies in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau

虚线代表显著性水平($P < 0.05$);“-”代表上年的月份,如“-8”代表上年8月份;各树种年表与气象数据相关分析时间段与图3同

物对年降水相关响应分析来看,人工物种均不同程度受到水分胁迫的影响,而乡土物种均能很好的适应干旱的气候条件。因此,干旱是黄土高原干旱半干旱区人工植物径向生长的主要影响因子,刺槐受影响最大,柠条次之。在我国北部、西北部以及西伯利亚南部的其他干旱半旱地区,大量树木年轮材料数据显示,在20世纪90年代亚洲内陆就已经发生树木生长减缓的现象^[38];河北半干旱区的侧柏(*Platycladus orientalis*)径向生长日动态受到土壤水分有效性的限制^[39]。这些研究均表明如果干旱的时间延长及强度持续上升,将导致森林生态系统服务功能下降,进而有可能提高病虫害和火灾发生的几率,林木个体出现枯梢现象,生长减缓及死亡率增加。因此,如果未来气候继续暖干化,气候要素将持续影响该地区人工植物的生长,可能引发人工植物群落的大面积生长衰退,生产力下降。

3.2 黄土高原半干旱区植物对气候响应的初步探讨

大多数研究表明,在树木的生长季,气候要素是决定年轮宽窄的主要因素^[40]。羊圈沟小流域人工植物刺槐和柠条的树轮年表与气候要素的相关性表现出相对一致的特点:1) 树木年轮宽度序列与5—8月份温度呈负相关,与5—8月降水普遍呈正相关,且与温度相关系数通过显著性检验(图3)。这可能是因为生长季中后期是温度逐渐上升至全年最大值,降雨也较为集中的时期,植物生长主要不是受降雨的限制,而是受高温的影响。温度主要通过影响植物蒸腾和土壤蒸发量来改变人工林的土壤水分有效性,进而影响年轮的宽窄^[41]。生长季温度过高可能会造成树木的蒸腾作用加强和土壤水分有效性降低,进而导致叶面气孔部分关闭,引起光合作用减弱,进而合成的有机物质减少,但呼吸作用仍不断地消耗供树木生长的营养物质,从而导致植物生长缓慢^[42];2) 在春末夏初,人工植物树木生长主要受到降水的正影响,但是由于刺槐作为乔木,而柠条作为灌木,生长起始时间和自身生理条件有所差异,导致两个物种的树轮宽度指数受降水限制的月份有所不同。一般在高寒针叶林区地区,植物在早材形成阶段,受到温度限制影响更大,因为只有适宜的温水平以上,温度逐渐升高将加速积雪的融化过程,更有利于木质部细胞活动的扩展^[40,43]。而黄土高原人工树种在萌芽展叶时期对降水温度更敏感,说明在黄土高原人工植物生长季初期温度适宜,而土壤水分有效性起到限制作

用,在该时期降水充足有利于轮宽的的形成,而此时还未到降雨集中的时期,因此少量的降雨成为该时期树木径向生长的主要限制因素;3) 温度和降水对树木的径向生长均有滞后影响,但降水与树轮宽度序列相关系数更高。生长季后期降水主要用于补充根系层内土壤水分,是下一年生长季初期水分的重要来源,因此这一时期的降水量基本决定了生长季后期和次年生长初期土壤含水量能否满足人工植物生长的需要,而该时期温度逐渐升至全年的最大值,高温将加剧土壤水分的耗散和蒸腾,且植物需大量消耗体内的碳水化合物来维持代谢平衡,使分配于次年生长季初期早材形成的能量减少,光合速率下降^[44]。

与人工植物对比,山杏和荆条的年轮宽度序列与气象站及 CRU 网格点的温度和降水相关系数多数月份维持在较低水平(图 3、图 5),表明乡土植物已长期适应该区域的气候环境。而不同于荆条,山杏在生长季后期受到 PDSI 一定的负面影响,可能是因为山杏作为乔木,在多数月份耗水量与土壤储水量长期维持稳定的供求关系,在生长季盛期一旦遇到高温天气,过高的土壤水分亏缺值(Vapor Pressure Deficit, VPD)使山杏受到一定水分胁迫的作用。而山杏天然林在群落系统内部常年积累了一定厚度的枯枝落叶层,增加了降雨的入渗能力,一旦降雨发生,土壤水分得到迅速补充,并且枯枝落叶层能减少了地表的蒸发,在增加和保持土壤水分总量的同时,提高了其利用率,因而在受到水分胁迫后能够迅速缓解以维持正常的生长态势。荆条与温度、降水、PDSI 常年维持在具有较低水平,表明其生长基本未受到气候要素的作用,在干旱条件下,荆条已经形成良好的适应机制,其气孔对降水的响应可能较为敏感,可通过迅速关闭气孔和渗透调节来维持体内水势,从而实现很好的水分平衡,使其能够长期生存于干旱环境而未受影响。

本研究亦曾尝试将 4 个年表统一时段(2003—2016)与气象数据进行分析,研究结果表明,尽管相关分析时段大为缩短,这些年表和气象站以及 CRU 的温度、降雨数据相关分析仍能得出与本文相似的结果。总体来说,人工植物和本土植物对水的需求形成鲜明对比,刺槐和柠条属于速生耗水树种,其生长的耗水需求与黄土高原水资源匮乏的现状已成为日益突出的矛盾。因此黄土高原植被恢复建设应综合考虑区域的地理、气候

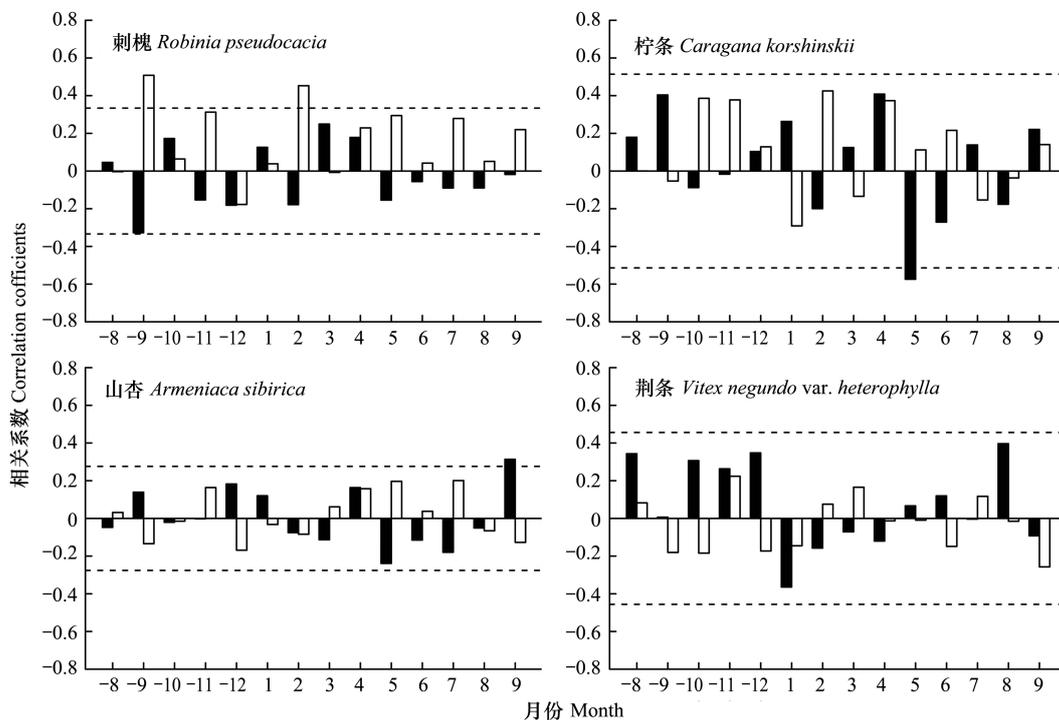


图 5 黄土高原羊圈沟树轮年表与 CRU 网格气候数据相关分析

Fig.5 Correlation analysis between climate (temperature and precipitation) of the CRU grid and tree ring chronologies in the Yangjuangou catchment of the Loess Plateau

虚线代表显著性水平($P < 0.05$); 实心柱代表温度,空心柱代表降雨;“-”代表上年的月份,如“-8”代表上年 8 月份;各树种年表与气象数据相关分析时间段与图 3 同

条件及植物的生态适应性和稳定性,对植被恢复树种的选择应根据其耗水需求而“因水制宜^[6]”,可根据植物在不同区域对气候敏感性和适应性,谨慎选择速生耗水的外来物种,推广适宜的乡土植物。同时在植被恢复策略方面要着眼于气候变化和人为活动现状,从土地利用管理、乔灌草搭配及类型、种植密度、植被承载力、小流域改造等角度出发,充分考虑气候因子与植被的相互作用过程,确定合理的人工林生态恢复方案,实现黄土高原森林可持续性经营。

4 结论

黄土高原半干旱区刺槐、柠条、山杏、荆条成功交叉定年并建立了4个年表,年表统计参数表明,人工树种比自然树种更适合做树木年轮气候学研究;降雨量不足是区域植被生长的主要限制因子;从各年表与气候要素(温度、降雨、PDSI)响应强度来看,人工植物和自然植物对水分胁迫的响应存在差异:人工植物树木生长受水分胁迫显著,刺槐受影响最显著,柠条次之;自然植物都能很好地适应该区域当前的气候条件,仅山杏受到PDSI微弱影响。因此人工物种和自然物种的乔木、灌木的生态适应性及稳定性分别为:山杏>刺槐,灌木:荆条>柠条,这说明自然物种与人工物种相对气候变化敏感性较弱,而应对干旱胁迫能力较强,在黄土高原植被恢复建设物种选择时应“因水制宜”,谨慎选择人工植物,可优先考虑对水分需求低的自然物种。本文对黄土高原半干旱区人工和自然物种径向生长与气候要素的关系以及对于干旱胁迫的响应机制做了初步探讨,对该地区生态恢复建设具有一定科学指导意义。

参考文献(References):

- [1] Fu B J, Chen L D, Ma K M, Zhou H F, Wang J. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the loess plateau in northern Shaanxi, China. *CATENA*, 2000, 39(1): 69-78.
- [2] Chen L D, Wei W, Fu B J, Lu Y H. Soil and water conservation on the loess plateau in china; review and perspective. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(4): 389-403.
- [3] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS One*, 2012, 7(2): e31782.
- [4] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [5] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [6] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 程圣东. 黄土高原植被恢复潜力研究. *地理学报*, 2017, 72(5): 863-874.
- [7] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 87-90.
- [8] 刘江华. 黄土高原刺槐人工林生长特征及其天然化程度评价[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2008.
- [9] 刘恩田, 赵忠, 宋西德, 张永, 张晶晶, 严尚凯, 李玉新. 渭北黄土高原刺槐林健康评价指标体系的构建. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(10): 67-75.
- [10] 梁非凡, 朱清科, 王露露, 李萍, 郑学良, 赵彦敏. 陕北黄土区油松径向生长对气候因子的响应. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2015, 43(5): 33-41.
- [11] 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.
- [12] 侯庆春, 韩蕊莲, 韩仕锋. 黄土高原人工林草地“土壤干层”问题初探. *中国水土保持*, 1999, (5): 11-14.
- [13] 王力, 邵明安. 黄土高原退耕还林条件下的土壤干化问题. *世界林业研究*, 2004, 17(4): 57-60.
- [14] Wang Q X, Wang M B, Fan X H, Qin Z D, Wang M B. Change trends of temperature and precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961-2010. *Global and Planetary Change*, 2012, 92-9338-147.
- [15] 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.
- [16] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990.
- [17] 芦晓明, 梁梁源. 灌木年轮学研究进展. *生态学报*, 2013, 33(5): 1367-1374.
- [18] Chen F, Yuan Y J, Wei W S, Yu S L, Fan Z, Zhang R B, Zhang T W, Shang H M. Erratum to: Tree-ring-based reconstruction of precipitation in

- the Changling Mountains, China, since A. D. 1691. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56(4): 765-774.
- [19] Chen F, Yuan Y J, Zhang T W, Linderholm H W. Annual precipitation variation for the southern edge of the Gobi Desert (China) inferred from tree rings: linkages to climatic warming of twentieth century. *Natural Hazards*, 2016, 81(2): 939-955.
- [20] Kang S Y, Yang B, Qin C. Recent tree-growth reduction in north central China as a combined result of a weakened monsoon and atmospheric oscillations. *Climatic Change*, 2012, 115(3/4): 519-536.
- [21] Yi L, Yu H J, Ge J Y, Lai Z P, Xu X Y, Qin L, Peng S Z. Reconstructions of annual summer precipitation and temperature in north-central China since 1470 AD based on drought/flood index and tree-ring records. *Climatic Change*, 2012, 110(1/2): 469-498.
- [22] Fang K Y, Chen D, Gou X H, D'Arrigo R, Davi N. Influence of non-climatic factors on the relationships between tree growth and climate over the Chinese Loess Plateau. *Global and Planetary Change*, 2015, 132: 54-63.
- [23] 李秧秧, 石辉, 邵明安. 黄土丘陵区乔灌木叶水分利用效率及与水力学特性关系. *林业科学*, 2010, 46(2): 67-73.
- [24] Shi S L, Li Z S, Wang H, von Arx G, Lüu Y H, Wu X, Wang X C, Liu G H, Fu B J. Roots of forbs sense climate fluctuations in the semi-arid Loess Plateau: Herb-chronology based analysis. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28435.
- [25] Cook E R, Kairiukstis L A. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. New York: Springer, 1990.
- [26] Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree-Ring Dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [27] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 51-67.
- [28] Cook E R, Holmes R L. *Users Manual for AR-STAN*. Tucson, USA: Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, 1986.
- [29] Fritts H C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976.
- [30] Kendall M G, Gibbons J D. *Rank Correlation Methods*. 5th ed. London: Edward Arnold, 1990.
- [31] Biondi F, Waikuli K. DENDROCLIM2002: a C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences*, 2004, 30(3): 303-311.
- [32] 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 Climatology and Applied Meteorology*, 1984, 23(2): 201-213.
- [33] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Cobb N. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [34] 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.
- [35] 贺敏慧, 杨保, 秦春, 刘晶晶, 康淑媛. 青藏高原东北部与南部地区树木径向生长对气候要素的响应——以祁丰和林周树轮为例. *中国沙漠*, 2013, 33(4): 1117-1123.
- [36] 郭明明, 张远东, 王晓春, 刘世荣. 川西米亚罗林区主要树木生长对气候响应的差异. *应用生态学报*, 2015, 26(8): 2237-2243.
- [37] Palmer W C. *Meteorological drought*. Washington D C: U S Department of Commerce Weather Bureau, 1965.
- [38] Liu H Y, Park Williams A, 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.
- [39] Jiang Y, Wang B Q, Dong M Y, Huang Y M, Wang M C, Wang B. Response of daily stem radial growth of *Platycladus orientalis* to environmental factors in a semi-arid area of North China. *Trees*, 2015, 29(1): 87-96.
- [40] 李广起, 白帆, 桑卫国. 长白山红松和鱼鳞云杉在分布上限的径向生长对气候变暖的不同响应. *植物生态学报*, 2011, 35(5): 500-511.
- [41] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 白学平, 赵学鹏, 李俊霞, 陆旭. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应. *植物生态学报*, 2017, 41(3): 279-289.
- [42] Jiao L, Jiang Y, Wang M C, Kang X Y, Zhang W T, Zhang L N, Zhao S D. Responses to climate change in radial growth of *Picea schrenkiana* along elevations of the eastern Tianshan Mountains, northwest China. *Dendrochronologia*, 2016, 40: 117-127.
- [43] 刘洪滨, 邵雪梅. 利用树轮重建秦岭地区历史时期初春温度变化. *地理学报*, 2003, 58(6): 879-884.
- [44] McDowell N, Pockman W T, Allen C D, Breshears D D, Cobb N, Kolb T, Plaut J, Sperry J, West A, Williams D G, Yezpe E A. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, 2008, 178(4): 719-739.