

彭小梅,车存伟,苏靖茸,等.干旱区人工林稳定性与适宜性的树轮学评价体系构建与应用[J].中国沙漠,2024,44(1):33-42.

# 干旱区人工林稳定性与适宜性的树轮学 评价体系构建与应用

彭小梅<sup>1</sup>,车存伟<sup>1,2</sup>,苏靖茸<sup>1,2</sup>,肖生春<sup>1</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室,甘肃 兰州 730000;  
2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**中国北方干旱区生态系统结构改善及生态功能稳定维持和调控,是目前该区域生态建设的重要研究内容。开展干旱区人工林稳定性和适宜性评价,并提出气候变化背景下人工林稳定性维持的管理对策,对区域生态恢复和可持续发展具有重要实践意义。基于国内外相关研究进展,针对乔灌木人工林主体,初步构建了以树轮学方法为主的稳定性与适宜性评价体系。该评价体系突出树木径向生长过程和气候-环境限制因素分析,辅以林分生长表观、林相特征、立地条件和土壤水分状况等指标对比,基于对人工林稳定性和适宜性的综合评价,提出人工林稳定维持的针对性抚育管理对策。同时展示了黄土高原区不同降雨梯度、林分类型、立地条件和管理方式下多个树种的应用实例,并提出了进一步拓展的领域。

**关键词:**人工林;稳定性与适宜性;树木年轮学;评价体系

**文章编号:** 1000-694X(2024)01-033-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00064

**中图分类号:** S75

**文献标志码:** A

## 0 引言

生态文明建设是中国特色社会主义事业的重要内容。水土流失是全球陆地生态系统重要的环境问题,深刻影响着环境健康和社会经济发展<sup>[1]</sup>。增强生态系统稳定性,持续发挥和稳定提升生态系统服务功能和价值,是实现生态环境质量总体改善主要目标的重要基础,是最终将生态优势变成经济和发展优势的重要保障。

中国北方干旱区是中国水土流失、植被退化和荒漠化最为严重的地区之一;而处于干旱半干旱气候带的黄土高原西部,水土流失现象尤为严重。荒漠化面积占整个黄土高原区的18%左右<sup>[2]</sup>,由风蚀和水蚀造成的年平均土壤流失达 $15\ 000\ \text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ <sup>[3]</sup>。在“三北”防护林、水土保持和退耕还林还草等多个工程推进下,大面积农用坡地转化成为了草地、灌木和乔木林地,林草地面积增加了6%~8%,相应的水土流失面积减少了24%<sup>[4-7]</sup>,在区域水土流失治理和

植被恢复方面取得了很好成效。但由于气候变化、树种选择、造林设计和后期管理措施等因素影响,土壤旱化和人工植被稳定性之间的矛盾在黄土高原日益凸显,尤其在西部干旱区<sup>[8]</sup>。作为典型生态脆弱区,中国北方干旱区生态系统结构改善及生态功能稳定维持和调控,依然是目前该区域生态建设的重要研究内容。开展干旱区人工林稳定性和适宜性评价,并提出气候变化背景下人工林稳定性维持的管理对策,对区域生态恢复和可持续发展具有重要实践意义。

## 1 人工林稳定性与适宜性评价研究进展

降水及其形成的土壤水资源承载力是干旱区人工植被恢复和演替的主要限制因素<sup>[9-12]</sup>。大面积人工林建植具有负面环境影响,如乔灌木低保存率、低生产力和由林草植被过度消耗土壤水分形成

收稿日期:2023-04-21; 改回日期:2023-05-15

资助项目:国家自然科学基金项目(41977419,42171167);内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2021CG0046);阿拉善盟科技计划项目(AMYY 2021-19)

作者简介:彭小梅(1989—),女,江西赣县人,副研究员,主要从事树木年轮学研究。E-mail: pxmpha@163.com

通信作者:肖生春(E-mail: xiaosc@lzb.ac.cn)

了不同厚度的根际土壤干层<sup>[5]</sup>。虽然一些乔灌木树种在造林初期生长表现良好,但在后期长势显著衰退,甚至在干旱年份死亡。诸如气候变化、干旱、树种选择不当、不适宜的栽植密度、坡向配置和人工植被演替阶段等都会造成植被退化和土壤旱化,最终导致人工林水土保持、气候调节等生态服务功能退化和价值丧失<sup>[1,5,13-15]</sup>。

干旱区人工林稳定性和适宜性不仅受到造林树种耗水性、抗旱性等自身遗传特性影响,还受到气候变化影响,以及造林方式(如反坡梯田、水平沟、鱼鳞坑、反坡集雨覆盖等措施、纯林与混交模式)、灌溉与雨养、密度、坡位与坡向、人工抚育措施(灌木平茬、乔木修枝、间伐等)等营林措施、林分管理和微域环境条件的影响<sup>[10,16]</sup>。运用气象资料及其衍生数据,结合主成分、滤波及相似性检验等分析方法,Li等<sup>[17]</sup>从生态位角度评价了全球刺槐人工林引种区的气候生态位动态及其适宜性。结合人工林类型、种群/群落结构、系统功能、抗逆性/恢复力等属性,众多学者对人工林稳定性概念给出了多种定义<sup>[18-20]</sup>,并借鉴天然群落的种群数量、频度比例、更新能力、物种多样性、生产力、土壤肥力等单一或综合指标的方法体系进行人工林稳定性测度或评价<sup>[21-23]</sup>,但目前还未建立起完整的评价体系<sup>[24]</sup>。而且,上述评价只是单一时间点或主题上的人工林景观综合稳定性测度结果,还缺乏基于过程的长时间尺度研究。

干旱区人工植被恢复的主要限制因素为土壤水分条件,因此,在人工植被稳定性和适宜性评价方面,大量研究聚焦于短尺度的人工林土壤水分动态及水平衡、单株树木耗水和抗旱适应性的生长状况等方面<sup>[25]</sup>。许多学者以土壤水分特征和土壤水分亏缺状态下的土壤干层开展定量化研究,如由土壤稳定湿度、田间持水量和凋萎湿度构建的土壤干化指数<sup>[26-29]</sup>,以及以当地顶级演替群落作为参照的土壤水分相对亏缺指数,用于量化评价不同样地及土层间的土壤水分亏缺程度,最终用于不同人工恢复植被稳定性和适宜性评价<sup>[11,30]</sup>。受区域降水季节性分配格局和年际变化影响,短期土壤水分评估结果不完全适用于人工植被-土壤水分长期相互作用下的系统稳定性和树种适宜性评价。

针对人工林不同树种适宜性评价,其抗/耐旱性指标包括形态指标(叶片萎蔫、黄叶和枯枝率等)、生长指标(叶量、新梢长、地径、分枝数、株高和冠幅

等)、生理生化指标(光合、蒸腾、液流速率、束缚/自由水、水势、水分利用效率、叶绿素、脯氨酸等)、标记基因等<sup>[31-33]</sup>,以幼苗盆栽和中幼龄林木短期控水实验为主<sup>[34-35]</sup>。通过对不同立地条件下林地土壤水分状况和光合、水分生理等指标测定,多名学者对黄土高原主要人工乔灌木造林树种,如沙棘、山桃、山杏、沙枣、刺槐、小叶杨和柠条等的抗旱适应性进行了综合评价研究<sup>[10,32,36-38]</sup>。李蒙蒙等<sup>[39]</sup>基于气候相似理论,对樟子松在全国10省区引种的适宜性进行了评价和分区,但忽视了管理措施对该树种区域适应性的促进作用。

对人工柠条林地土壤水分和生物量等指标的长期定位监测结果表明,在中龄阶段,植被成为土壤水分动态变化的主控因子<sup>[40]</sup>;至成熟龄阶段,植株生长主要受天然降水控制,并因地形、整地/集雨方式和密度而异,达到新的植被-土壤水平衡状态<sup>[41-43]</sup>。对黄土高原不同气候植被带25~30龄油松、刺槐和沙棘人工乔灌木林地土壤水平衡分析表明,在森林带、森林草原带和典型草原带,人工林均需在一定龄级阶段进行间伐和平茬,才能有效缓解和补充恢复林地深层土壤干层的水分亏缺<sup>[25,44]</sup>。土壤水分季节动态变化是降水和植被耗水综合作用的结果,可分为春-初夏消耗期、雨季补给期和秋末冬初平稳期3个阶段;在干旱黄土高原区,降水量稍高的区域由于植被繁茂、耗水量大,生长季土壤水分状况要低于降水量较低区域,在非生长季则相反;各种整地、集雨和地表覆盖措施均可显著改善林地土壤水分状况,从而促进和稳定人工林生长<sup>[45-46]</sup>。基于不同立地条件和柠条人工林生长状况调查数据相关分析、回归分析及模糊决策方法,黄海霞等<sup>[47]</sup>提出了兰州地区柠条造林最适宜的立地类型。因此,正确划分和确定不同立地人工林生长阶段,制定出相应抚育管理对策,对于调节植被-土壤水平衡和人工林稳定维持至关重要。

对上述环境-植被相互作用的深入理解需要长时间尺度数据支撑,而树木径向生长过程则可提供该方面的信息<sup>[48-49]</sup>。树木年轮学旨在建立长序列的树木径向生长与气候变化相互关系,评价不同生境(如坡向、坡位等)和人为干扰条件下森林管理措施(如造林密度、整地方式、间伐等)对天然林和人工林的影响<sup>[50-53]</sup>。树木年轮序列包含了树木的整个生长过程以及环境、气候变化、林地管理等方面的信息<sup>[54]</sup>。通过长序列的气候和树木生长关系分析,树

木年轮学可用来辨析树木生长的限制因素<sup>[55-56]</sup>。王露露<sup>[24]</sup>基于树木年轮学和多指标模糊评判方法对陕北黄土高原区人工乔木林群落稳定性测度对比研究表明,前者是研究干旱区乔木林稳定性更为可靠的方法。通过人工油松林标准木和优势木径向生长对当年春季和前一年生长季干旱等级的相关分析,王利娜<sup>[57]</sup>认为黄土高原中部人工油松林稳定性自南向北逐渐变差。树木的生长潜力或趋势主要取决于其遗传特性和年龄。通常,这一生长累计过程符合逻辑斯蒂曲线,即树木轮宽或连年生长速率在幼龄期呈增加趋势,然后降低并维持在相对稳定生长状况<sup>[48]</sup>。基于轮宽或基径断面积序列(绝对生长量),可以构建出相对生长量和生长速率曲线,并确定各生长曲线的峰值和拐点,从而评价不同树种的长势或活力,诊断和模拟出生长变化的时间节点<sup>[58-60]</sup>。树木生长弹性理论和方法,被用来评价树木生长对环境影响(如干旱、洪涝、低温冷害和火灾等)的抵抗力和恢复力,并确定其可靠的驱动因子<sup>[61-62]</sup>。因此,轮宽生长曲线可提供直观的树木长势状况,以及确定由于环境、气候等因素导致的生长受限和抑制阶段,从而进行树木生长退化和衰败过程预测,最终用于指导林地经营管理实践,如森林间伐、采伐以及灌木平茬复壮等措施,尤其对于干旱区人工林管理<sup>[55, 58, 63-66]</sup>。

地貌通过影响植被和土壤能接收到的太阳辐射而改变局地小气候,特别是温度、空气相对湿度和土壤水分状况,并最终影响植被与气候生长之间的关系。但这一相互关系会因区域和树种等有所差异。对高山环境下生长在山顶和阴阳坡的岩高兰属灌木径向生长变化研究表明,该树种径向生长变化主要受区域气候变化控制,而不是地貌条件<sup>[67]</sup>。相反,在中国祁连山对不同坡向祁连圆柏和青海云杉的研究表明,坡向对这两个树种径向生长变化有着显著限制作用<sup>[68]</sup>。对挪威北部的樟子松林,北美的黄杨、橡树和红枫林,北极两种柳属和桦属落叶灌木,黄土高原西部柠条人工林等的研究结果也支持上述观点<sup>[53, 69-71]</sup>。但Graumlich<sup>[72]</sup>在北美的研究表明了针阔混交林中,树种之间的差异要大于地形(坡向)因素的影响。对巴西同一立地条件下人工林研究表明,相同树龄的5种热带豆科树木径向生长表现出很大差异<sup>[58]</sup>。基于回归和滤波分析等数学方法,赵西平等<sup>[73]</sup>定量评价了气候因素、遗传因素、培育措施和立地条件等因素对东北地区

人工落叶松径向生长变化的影响,其中前两者分别达40%和30%。对辽宁省人工林樟子松径向生长不同水热梯度变化响应研究结果表明,区域水分条件对人工林樟子松生长具有显著的限制作用;同时,人工林的生长规律较之原产地也会发生较大变化,如生长量、生长高峰和稳定期发生的时间节点、持续时间等<sup>[56, 74]</sup>。因此,在干旱区大面积造林的树种选择方面,应针对不同树种,开展树木生长与气候、地形因素之间的相互作用等基础研究,以及适宜性和稳定性评价显得至关重要<sup>[5, 10]</sup>。同时,通过人工林和天然林同一树种径向生长过程和气候环境因子响应模式对比,可从中辨析人工林生长的主要限制因素,进行适宜性评价。

## 2 人工林稳定性与适宜性树轮学评价体系构建

### 2.1 总体思路、构架和指标选取原则

干旱区人工林稳定性与适宜性树轮学评价体系主要针对人工林这一评价主体,基于乔灌木生长特性(如连年生长量、树高、冠幅、分枝数和枯枝率等)和生长过程(快速生长、稳定生长和衰退阶段)分析,开展乔灌木径向生长气候响应的树木年轮学研究,明晰人工林生长的主要水热限制因素、对干旱气候事件的抵抗/恢复力等特征,结合土壤环境要素(如土壤水分状况)变化、林下植被状况和立地条件等,对人工林稳定性和适宜性进行评价,并提出人工林稳定维持的抚育管理对策(图1)。

评价体系中各项指标选取应遵循以下原则:①体现评价主体和目标。主要针对人工林乔灌木树种及其稳定性和适宜性评价目标,选择与人工林生长密切相关的径向生长、表观特征和气候环境指标。②指标的易获得性。所选取指标应可通过已有长期监测部门监测数据及衍生数据(如气象数据和干旱指数等)、野外调查和仪器监测就地获取(如林分表观特征、立地条件和土壤水分等),或样本采集后经实验室标准程序处理后可获得(如年轮指标)。

### 2.2 评价体系内容、方法和指标

#### 2.2.1 树木生长特征和径向生长阶段界定

林分表观特征表征了乔灌木人工林造林后至调查时生长的总体状况,包括树高、冠幅、地径、轮



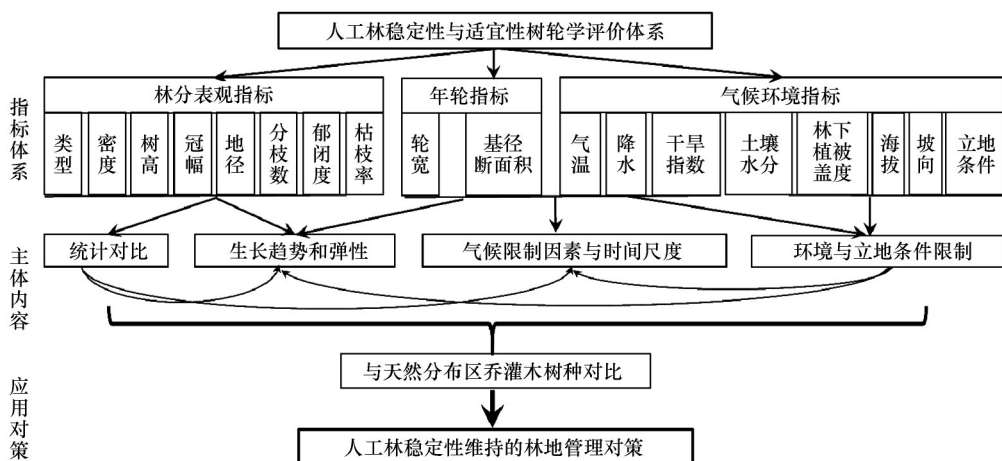


图1 人工林稳定性与适宜性树轮学评价体系

Fig.1 Structure of a dendrochronological evaluation method for the stability and suitability of artificial forests in arid areas

宽、分枝数、林分郁闭度、枯枝率及枯梢率等指标。通过与同一树种天然林及不同生境林分的对比分析,可以对人工林表现生长状况优劣作出评价。

树木累积径向生长曲线可表征树木生长的整个过程,该过程可用逻辑斯蒂曲线拟合,即S型曲线表达。完整的生长过程包括幼龄缓慢生长期、快速生长期和中龄稳定生长期及老龄衰退期几个阶段。受林龄、造林密度、林分类型、生境和立地条件等影响,人工林各个生长阶段及其持续时间与天然林会有很大差别。利用轮宽可得到树木累积径向生长曲线和基径断面积(BAI)增长曲线,通过回归方法进行生长趋势拟合,推导不同林分的生长峰值和拐点等参数,可划分出生长变化节点、判断人工林生长阶段和预测后续生长趋势。

## 2.2.2 树木径向生长气候限制因子辨析

基于树轮年表与区域气候因子的相关分析,包括气温和降水单因子及干旱指数(如帕尔默干旱指数SPDI/scSPDI和标准化降水蒸散指数SPEI等)等综合指标,可明确人工林生长的气候限制因子;进一步,通过“climwin”程序可以确定与树木径向生长最相关的气候因素和气候窗口<sup>[75-77]</sup>。结合区域气候限制因子变化及趋势,可预测人工林稳定性与适宜性。

## 2.2.3 树木生长对极端干旱事件的抵抗和恢复力评价

基于树木生长弹性理论和方法<sup>[61]</sup>,选择树木生长过程中气象记录的极端干旱事件,可对3个干旱脆弱性指数进行量化,即抵抗力、恢复力和生长弹性。其中,抵抗力量化干旱与干旱前树木径向生长

的差异,表征树木抵抗干旱维持生长的能力;恢复力量化干旱与干旱后径向生长的差异,表征树木在干旱后恢复生长的能力;生长弹性表征树木在干旱后恢复到干旱前生长水平的能力。通过比较“完全恢复生长弹性曲线”和“实际生长弹性曲线”之间的偏差和交点,对同样地/树种的恢复能力进行比较,系统地认识和评价树木应对干旱胁迫的恢复过程和能力<sup>[78]</sup>,从而对人工林稳定性与适宜性作出判定。

## 2.2.4 林分立地条件与土壤环境变化评估

在干旱区,大气干旱和土壤干旱是制约人工林生长的主要因素,土壤水分状况也是人工林植被与气候共同作用的结果。人工林营造的坡向、海拔、初始密度、混交类型、林下植被盖度和整地方式(鱼鳞坑、水平台 and 水平沟等集雨方式)等都深刻影响着其后续生长的可持续性和环境的支撑能力。因此,通过生长季中期(土壤水分大量消耗期)和后期(土壤水分补充期)土壤水分监测,结合区域土壤类型凋萎湿度,可判别土壤储水状况对林分生长的支撑能力;通过不同类型生境及天然林的对比,可对林分立地条件对人工林稳定性和适宜性进行评判。

## 2.2.5 人工林稳定维持的抚育管理对策

结合不同区域、管理方式下人工林各树种径向生长特征、土壤储水量等,提出干旱区不同区域人工植被恢复和建植管理对策,如造林初期的整地方式、乔灌木树种选择配置(如豆科/非豆科、喜光/耐阴、针/阔叶物种等)和密度控制,中后期林地林分密度调控(如林木间伐和择伐等)、地上部生物量控制(如修枝、平茬和草本刈割等)和土壤水分调控(如

水平翻耕和集雨带改造修整等)等过程管理,从而实现人工林稳定维持和生态功能持续发挥。

### 3 人工林稳定性与适宜性树轮学评价体系应用实例

#### 3.1 不同降水梯度灌木柠条人工林径向生长特征及气候限制因素空间格局演变研究<sup>[53,79]</sup>

基于黄土高原西部不同降水梯度下10个样点柠条径向生长特征及气候限制因素空间格局演变研究,发现柠条径向生长在0~4 a迅速增加,之后快速下降,在中龄期末(12~14 a)生长逐渐缓慢并趋于稳定。随着降水量的增加,干旱胁迫对柠条生长的限制逐渐减弱(图2)。“climwin”气候响应模型结果也显示随着降水量(由270 mm至461 mm)的增加,干旱胁迫对径向生长变化的解释量(由53.8%下降至4.4%)逐渐减弱(图3)。

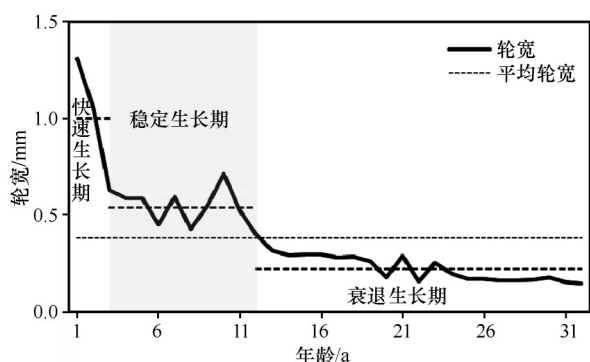


图2 柠条径向生长过程及阶段划分

Fig.2 Radial growth process and stage division of the shrub *Caragana korshinskii*

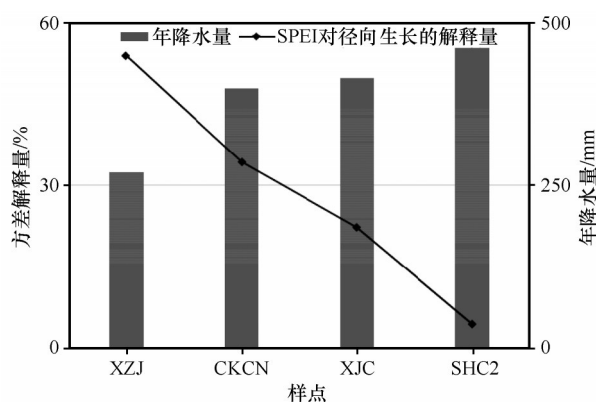


图3 SPEI-径向生长的“climwin”气候模型结果

Fig.3 Result of "climwin" climate response model for SPEI and shrub radial growth

干旱脆弱性指数结果显示随着降水量的增加,半干旱和半湿润区人工柠条对极端干旱的抵抗力均显著( $P<0.05$ )高于干旱区天然柠条,而后者在极端干旱后的恢复力显著高于半干旱和半湿润区的人工柠条。

对不同坡向人工林柠条径向生长变化的气候响应模式分析结果表明,幼龄柠条在黄土高原西部径向生长变化主要受到生长季早春气温的影响,而降水则处于次要地位。几项柠条生长指标中,除丛枝数外,冠幅、株高和年径向生长量(轮宽)均以半阴坡最大。土壤水分监测结果表明,不同坡向2 m土层内均没有土壤干层出现,土壤水分较为活跃的10~60 cm土层以半阴坡水分条件最好。因此,在干旱黄土高原西部,柠条是适宜的造林灌木种,半阴坡是较为适宜的造林坡向。

在后期管理上,应根据不同区域的气候和立地条件,充分利用降水资源,并对密度过大的人工林在中龄期末进行分枝平茬,从而减少对土壤水分的过度消耗,以促进人工林的稳定可持续发展。

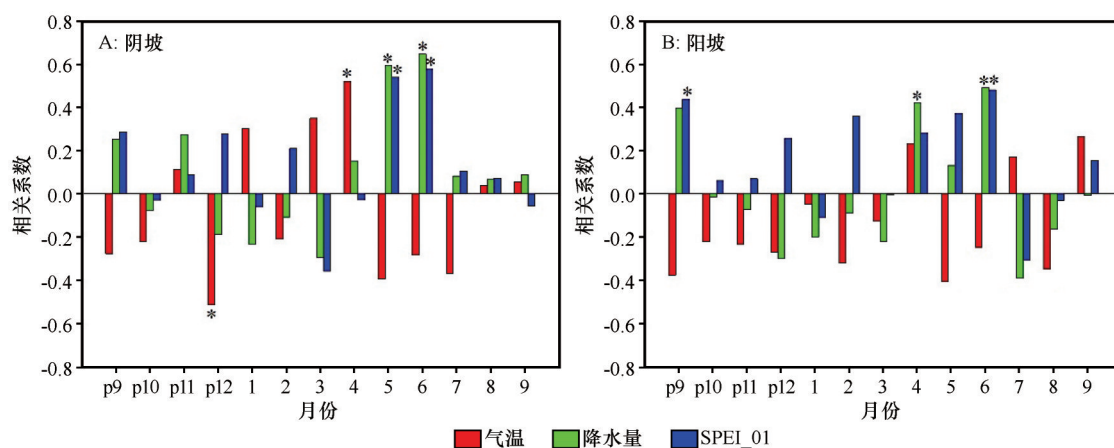
#### 3.2 不同坡向与密度条件下灌木沙棘人工林径向生长特征及对干旱的响应研究<sup>[80]</sup>

基于黄土高原西部不同坡向与密度条件下人工沙棘径向生长及对干旱的响应研究,发现不同坡向沙棘在生长初期差异较小,在生长中期(4~14 a),阴坡沙棘的生长速率显著( $P<0.05$ )高于阳坡,在12~14 a后,不同坡向沙棘径向生长逐渐趋于稳定。

气候-生长关系显示,生长季4—6月的降水量不足是限制沙棘径向生长的主要气候因素(图4)。在不同坡向,人工沙棘在阴坡相比阳坡更易受到降水和干旱胁迫的限制,降水在阴坡和阳坡分别解释了53.0%和30.6%的径向生长变化,造林密度是形成上述现象的主要原因。适宜的造林密度和林分抚育管理可缓解干旱对人工沙棘生长的限制。

#### 3.3 侧柏、柠条纯林与混交人工林径向生长特征及干旱适应能力研究<sup>[81]</sup>

基于半干旱黄土丘陵区侧柏、柠条纯林、侧柏-柠条混交林径向生长特征及干旱适应能力研究,发现干旱对柠条纯林的限制作用相比混交林更强,干旱模型对纯林和混交林生长变化的解释量分别为15.3%和23.8%。不同物种间混交相比纯林提高了人工林在极端干旱后的恢复能力。通过“完全恢复



注:p代表前一年;\*代表95%的显著性水平

图4 不同坡向沙棘轮宽年表与月平均气温、月降水量和SPEI\_01间的相关性分析

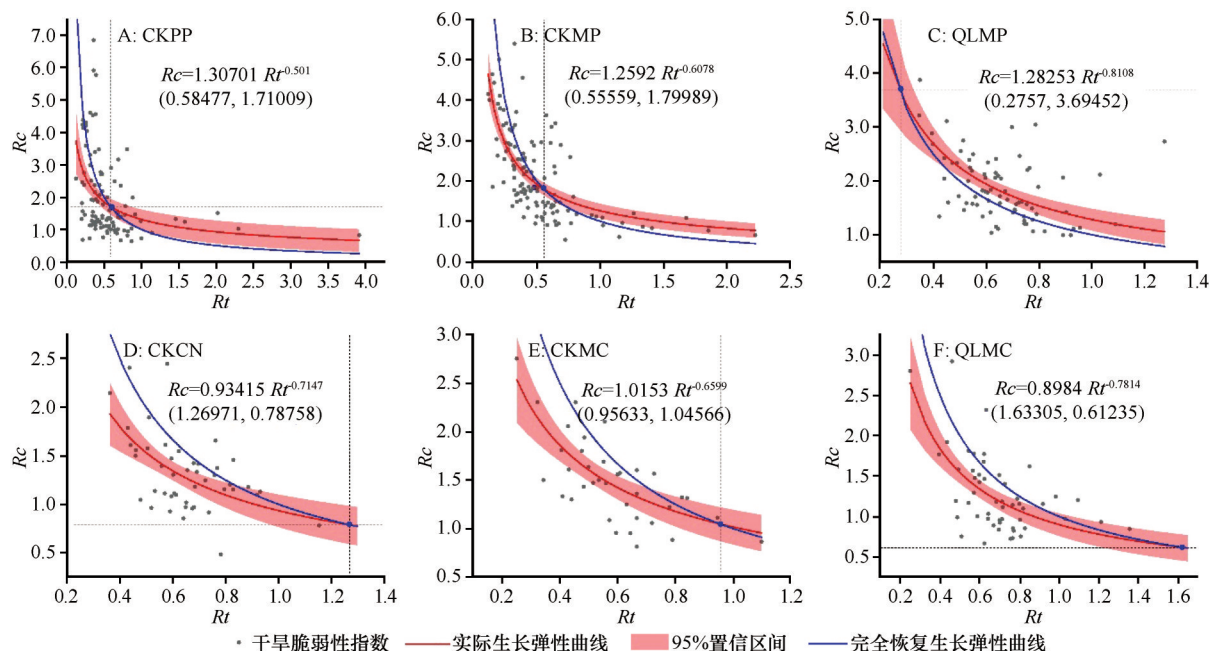
Fig.4 Correlation coefficient between *Hippophae rhamnoides* ring-width chronologies and month mean temperature, month precipitation and SPEI\_01 (prepresents previous year; Significance: \* $P<0.05$ )

生长弹性曲线”与“实际生长弹性曲线”的拟合结果发现,不同乔灌木间混交相比纯林提高了人工林在极端干旱后的恢复能力(图5)。对比不同树种,侧柏在极端干旱后的恢复能力强于柠条,即使极端干旱造成侧柏生长降低比例达到58.5%(混交林)和41.6%(纯林),仍然具有完全恢复的可能性,而柠条很难恢复到原有水平,可能会引起连续的生长降低现象,因此需定期对柠条人工林进行抚育(如分枝

平茬等),缓解对水分的过度消耗,增强人工林在极端干旱后的恢复能力。

### 3.4 人工林适宜树种、坡向和管理方式的树轮学评价<sup>[82]</sup>

基于树木年轮学方法,选择了该区域天然小灌木红砂、人工植被侧柏和桧柳作为研究对象,进行了不同坡向、灌溉与否等条件下3个树种的径向生



注 LCKPP、CKCN:侧柏和柠条纯林;CKMP、CKMC和QLMP、QLMC:侧柏-柠条混交林; $R_c$ 和 $R_t$ 为恢复力和抵抗力

图5 乔灌木混交树种“完全恢复生长弹性曲线”与“实际生长弹性曲线”间的差异

Fig.5 Comparisons of the “Line of full resilience” and “Line of actual resilience” under different tree species and stand structures (CKPP、CKCN:Pure *Platycladus orientalis* and *Caragana korshinskii*, CKMP, CKMC and QLMP, QLMC: Mixed *Platycladus orientalis* and *Caragana korshinskii* in two sampling sites;  $R_c$  and  $R_t$ : recovery and resistance)



长及其趋势评价,以及气候响应研究。研究结果表明:持续灌溉的园林管理模式下的侧柏径向生长明显优于其他管理条件下的侧柏和桤柳,乡土小灌木红砂径向生长具有很好的稳定性;3个树种径向生长主要受到生长季降水影响,而补灌无疑会缓解干旱胁迫和促进树木生长;侧柏在雨养条件下的适应性优于桤柳,桤柳不适于阳坡造林;但两树种在造林时均需辅以人工集雨补灌措施,如反坡集雨和栽植穴覆膜等;乔灌草结合是黄土高原适宜的生态恢复景观模式。

## 4 结论和建议

本文针对中国北方典型生态脆弱区生态系统结构改善及生态功能稳定维持和调控这一生态建设重要研究内容,在国内外人工林稳定性与适宜性评价研究进展基础上,初步构建了人工林稳定性与适宜性树轮学评价体系。该评价体系主要针对乔灌木人工林主体,运用树木年轮学和树轮气候学方法,突出树木径向生长过程和气候-环境限制因素分析,辅以林分生长表观林相特征、立地条件和土壤水分状况等指标对比,对人工林稳定性和适宜性进行综合评价,并提出人工林稳定维持的抚育管理对策。同时展示了黄土高原区不同降雨梯度、林分类型、立地条件和管理方式下多个树种的应用实例。

本文构建的评价体系主要是在林分和样地尺度进行的,今后的工作还需要进一步向宏观和微观尺度拓展和补充,如基于遥感方法补充景观尺度上人工林生态系统特征指标变化过程、植物器官和分子水平的木质部栓塞程度、抗逆性等生理生化指标,以及土壤盐分养分状况、林地幼苗更新情况等,以期对人工林稳定性与适宜性做出更为全面的评价。

## 参考文献:

- [1] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [2] Cheng X R, Huang M B, Si B C, et al. The differences of water balance components of *Caragana korshinskii* grown in homogeneous and layered soils in the desert: Loess Plateau transition zone[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 98: 10-19.
- [3] Yang X P, Liu T, Yuan B Y. The Loess Plateau of China: aeolian sedimentation and fluvial erosion, both with superlative rates [M]//Migon P. Geomorphological Landscapes of the World. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2010: 275-282.
- [4] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明. 黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响: 以延安市羊圈沟流域为例[J]. 地理学报, 1999, 54(3): 51-56.
- [5] Chen H S, Shao M A, Li Y Y. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [6] 杨永胜, 卜崇峰, 高国雄. 平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 323-332.
- [7] Jiang W Y, Yang S L, Yang X X, et al. Negative impacts of afforestation and economic forestry on the Chinese Loess Plateau and proposed solutions[J]. Quaternary International, 2016, 399: 165-173.
- [8] Liu B X, Shao M A. Modeling soil-water dynamics and soil-water carrying capacity for vegetation on the Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 176-184.
- [9] Guo Z S, Shao M A. Soil water carrying capacity of vegetation and soil desiccation in artificial forestry and grassland in semi-arid regions of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1460-1647.
- [10] Chen L D, Huang Z L, Gong J, et al. The effect of land cover/vegetation on soil water dynamic in the hilly area of the loess plateau, China[J]. Catena, 2007, 70(2): 200-208.
- [11] Wang Z Q, Liu B Y, Zhang Y. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19: 707-718.
- [12] Wang Z J, Jiao J Y, Su Y, et al. The efficiency of large-scale afforestation with fish-scale pits for revegetation and soil erosion control in the steppe zone on the hill-gully Loess Plateau [J]. Catena, 2014, 115: 159-167.
- [13] 李小芳, 李军, 王学春, 等. 半干旱黄土丘陵区柠条林水分生产力与土壤干燥化效应模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 3: 113-119.
- [14] Jia Y H, Shao M A. Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 33-42.
- [15] Hou J Y, Yin R S, Wu W G. Intensifying forest management in China: what does it mean, why, and how? [J]. Forest Policy and Economics, 2019, 98: 82-89.
- [16] 梁非凡, 朱清科, 王露露, 等. 陕北黄土区油松径向生长对气候因子的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 33-41.
- [17] Li G Q, Zhang X Q, Huang J H, et al. Afforestation and climatic niche dynamics of black locust (*Robinia pseudoacacia*) [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 407: 184-190.
- [18] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337-343.
- [19] 冯耀宗. 人工生态系统稳定性概念及其指标[J]. 生态学杂志, 2002, 21(5): 58-60.
- [20] 林考焕, 叶功富. 人工林生态系统稳定性研究综述[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(5): 88-94.
- [21] 李旭光, 于法稳. 大头茶种群动态模型及稳定性分析[J]. 植物

- 生态学报, 1997, 21(1): 29-34.
- [22] 吴明作, 刘玉萃. 栓皮栎种群数量动态的谱分析与稳定性[J]. 生态学杂志, 2000, 19(4): 23-26.
- [23] 郑元润. 森林群落稳定性研究方法初探[J]. 林业科学, 2000, 36(5): 28-32.
- [24] 王露露. 陕北黄土区主要人工乔木林群落稳定性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [25] Jiao L, Lu N, Fu B J, et al. Comparison of transpiration between different aged black locust (*Robinia pseudoacacia*) trees on the semi-arid Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Land, 2016, 8: 604-617.
- [26] 陈洪松, 邵明安. 黄土区深层土壤干燥化程度的评价标准[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 164-166.
- [27] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同干旱类型区苜蓿草地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 75-89.
- [28] 李军, 陈兵, 李小芳, 等. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [29] 段建军, 王小利, 张彩霞, 等. 黄土高原土壤干层评定指标的改进及分级标准[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 151-154.
- [30] 王力, 邵明安, 侯庆春. 土壤干层量化指标初探[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 87-90.
- [31] 刘淑明, 陈海滨, 孙长忠, 等. 黄土高原主要造林树种的抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(4): 149-153.
- [32] 蒋志荣, 杨占彪, 汪君, 等. 兰州九州台四种绿化树种抗旱性机理比较研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 553-558.
- [33] 夏永秋, 邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1376-1382.
- [34] 宋耀选, 肖洪浪, 段争虎, 等. 黄土高原西部植物耗水实验研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 543-547.
- [35] 于占辉, 陈云明, 杜盛. 黄土高原半干旱区侧柏(*Platycladus orientalis*)树干液流动态[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3970-3976.
- [36] 徐炳成, 山仑. 半干旱黄土丘陵区沙棘和柠条水分利用与适应性特征比较[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2025-2028.
- [37] 王志强, 刘宝元, 王晓兰. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 113-120.
- [38] 张益望, 程积民, 贺学礼. 半干旱区人工林生长与水分生态研究[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 18-22.
- [39] 李蒙蒙, 丁国栋, 高广磊, 等. 樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)在中国北方10省(区)引种的适宜性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1021-1028.
- [40] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J]. 林业科学, 2005, 41(2): 37-41.
- [41] 徐荣, 张玉发, 潘占兵, 等. 不同柠条密度在退化草地恢复过程中对土壤水分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1): 172-175.
- [42] 赵艳云, 程积民, 王延平, 等. 半干旱区环境因子对柠条灌木林结构的影响[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 10-14.
- [43] 莫保儒, 蔡国军, 杨磊, 等. 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 4011-4020.
- [44] 陈云明, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原人工林土壤水分效应的地带性特征[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 195-200.
- [45] 陈小红, 段争虎, 宋耀选, 等. 兰州市南北两山人工灌木林地土壤水分动态[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 532-535.
- [46] 段争虎, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 黄土高原西部兰州市郊地貌驱动的土壤水分变化及对植物的影响分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 522-526.
- [47] 黄海霞, 张玉珍. 兰州北山“三水”造林区柠条的生长适宜性[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 72-76.
- [48] Schweingruber F H. Tree Rings and Environment; Dendroecology [M]. Berne, Germany: Paul Haupt Publishers, 1996: 1-609.
- [49] Downes G M, Wimmer R, Evans R. Understanding wood formation: gains to commercial forestry through tree-ring research [J]. Dendrochronologia, 2002, 20(1/2): 37-51.
- [50] Fritts H C, Shatz D J. Selecting and characterizing tree-ring chronologies for dendroclimatic analysis [J]. Tree-Ring Bulletin, 1975, 35: 31-40.
- [51] Måren I E, Karki S, Prajapati C, et al. Facing north or south: does slope aspect impact forest stand characteristics and soil properties in a semiarid trans-Himalayan valley? [J]. Journal of Arid Environments, 2015, 121: 112-123.
- [52] Toigo M, Vallet P, Tuilleras V, et al. Species mixture increases the effect of drought on tree ring density, but not on ring width, in *Quercus petraea*-*Pinus sylvestris* stands [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 345: 73-82.
- [53] Xiao S C, Xiao H L, Peng X M, et al. Dendroecological assessment of Korshinsk peashrub (*Caragana korshinskii* Kom.) from the perspective of interactions among growth, climate, and topography in the western Loess Plateau, China [J]. Dendrochronologia, 2015, 33: 61-68.
- [54] Spiecker H. Tree rings and forest management in Europe [J]. Dendrochronologia, 2002, 20(1/2): 191-202.
- [55] Antos J A, Parish R, Nigh G D. Growth patterns prior to mortality of mature *Abies lasiocarpa* in old-growth subalpine forests of southern British Columbia [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(5/6): 1568-1574.
- [56] 李露露, 李丽光, 陈振举, 等. 辽宁省人工林樟子松径向生长对水热梯度变化的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4508-4517.
- [57] 王利娜. 黄土高原油松人工林干旱风险评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [58] Costa M S, Ferreira K E, Botosso P C, et al. Growth analysis of five Leguminosae native tree species from a seasonal semidecidual lowland forest in Brazil [J]. Dendrochronologia, 2015, 36: 23-32.
- [59] Rodríguez-Catón M, Villalba R, Srur A M, et al. Long-term trends in radial growth associated with *Nothofagus pumilio* forest decline in Patagonia: integrating local-into regional-scale patterns [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 339: 44-56.



- [60] Pommerening A, Muszta A. Relative plant growth revisited: towards a mathematical standardisation of separate approaches [J]. *Ecological Modelling*, 2016, 320: 383–392.
- [61] Lloret F, Keeling E G, Sala A. Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests [J]. *Oikos*, 2011, 120(12): 1909–1920.
- [62] Fang O Y, Zhang Q B. Tree resilience to drought increases in the Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 245–253.
- [63] Bigler C, Gričar J, Bugmann H, et al. Growth patterns as indicators of impending tree death in silver fir [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 199(2/3): 183–190.
- [64] Schöngart J, Wittmann F, Worbes M, et al. Management criteria for *Ficus insipida* Willd. (Moraceae) in Amazonian white-water floodplain forests defined by tree-ring analysis [J]. *Annals of Forest Science*, 2007, 64(6): 657–664.
- [65] 刘荣. 间伐抚育对刺槐人工林林分结构和林分健康的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [66] Cabon A, Mouillot F, Lempereur M, et al. Thinning increases tree growth by delaying drought-induced growth cessation in a Mediterranean evergreen oak coppice [J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 409: 333–342.
- [67] Bär A, Pape R, Bräuning A, et al. Growth-ring variations of dwarf shrubs reflect regional climate signals in alpine environments rather than topoclimatic differences [J]. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(4): 625–636.
- [68] Liang E Y, Shao X M, Eckstein D, et al. Topography-and species-dependent growth responses of *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to climate on the northeast Tibetan Plateau [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 236(2/3): 268–277.
- [69] Kirchhefer A J. The influence of slope aspect on tree-ring growth of *Pinus sylvestris* L. in northern Norway and its implications for climate reconstruction [J]. *Dendrochronologia*, 2000, 18: 27–40.
- [70] Fekedulegn D, Hicks Jr R R, Colbert J. Influence of topographic aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed [J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/3): 409–425.
- [71] Young A B, Watts D A, Taylor A H, et al. Species and site differences influence climate-shrub growth responses in West Greenland [J]. *Dendrochronologia*, 2016, 37: 69–78.
- [72] Graumlich L J. Response of tree growth to climatic variation in the mixed conifer and deciduous forests of the upper Great Lakes region [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1993, 23(2): 133–143.
- [73] 赵西平, 郭明辉, 关鑫. 人工林落叶松生长轮宽度年表的建立 [J]. *东北林业大学学报*, 2007, 35(3): 7–9.
- [74] 刘芳, 章尧想, 马迎宾, 等. 乌兰布和沙漠绿洲樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 生长规律初探 [J]. *中国沙漠*, 2015, 35(5): 1234–1238.
- [75] Bailey L D, Van De Pol M. Climwin: an R toolbox for climate window analysis [J]. *PloS One*, 2016, 11(12): e0167980.
- [76] Van De Pol M, Bailey L D, Mclean N, et al. Identifying the best climatic predictors in ecology and evolution [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(10): 1246–1257.
- [77] Camarero J J, Rubio-Cuadrado I. Relating climate, drought and radial growth in broadleaf mediterranean tree and shrub species: a new approach to quantify climate-growth relationships [J]. *Forests*, 2020, 11(12): 1250.
- [78] Schwarz J, Skiadaresis G, Kohler M, et al. Quantifying growth responses of trees to drought: a critique of commonly used resilience indices and recommendations for future studies [J]. *Current Forestry Reports*, 2020, 6: 185–200.
- [79] Che C W, Xiao S C, Ding A J, et al. The characteristics of radial growth and ecological response of *Caragana korshinskii* Kom. under different precipitation gradient in the western Loess Plateau, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 862529.
- [80] Che C W, Xiao S C, Ding A J, et al. Growth response of plantations *Hippophae rhamnoides* Linn. on different slope aspects and natural *Caragana opulens* Kom. to climate and implications for plantations management [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108833.
- [81] Che C W, Xiao S C, Peng X M, et al. Radial growth of Korshinsk peashrub and its response to drought in different sub-arid climate regions of northwest China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 326: 116708.
- [82] Xiao S C, Peng X M, Tian Q Y, et al. Stem radial growth indicate the options of species, topography and stand management for artificial forests in the western Loess Plateau, China [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2019, 11(3): 226–238.

## Construction and application of a dendrochronological evaluation method for the stability and suitability of artificial forests in arid areas

Peng Xiaomei<sup>1</sup>, Che Cunwei<sup>1,2</sup>, Su Jingrong<sup>1,2</sup>, Xiao Shengchun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In the arid zone of northern China, an important part of the current research on ecological construction is the improvement of ecosystem structure and the stable maintenance and regulation of ecological functions. The evaluation of the stability and suitability of artificial forests in arid zones and the proposed management measures for maintaining the stability of these forests in the context of climate change are of great practical significance for regional ecological restoration and sustainable development. Based on the relevant research progress in China and abroad, this paper constructed a preliminary stability and suitability evaluation method mainly based on dendrochronological methods for the artificial tree and shrub forests. The evaluation method highlights the radial growth process of trees and analysis of the limiting factors of different environmental factors, supplemented by comparisons of stand growth appearance, forest features, stand conditions and soil moisture status. Targeted conservation management measures to maintain the stability of artificial forests could be proposed based on a comprehensive evaluation of the stability and suitability of artificial forests. The paper also showed examples of the application of several tree species in the Loess Plateau region under different precipitation gradients, forest stand types, site conditions and management practices, and suggested further expansion.

**Key words:** artificial forests; stability and suitability; dendrochronology; evaluation methods