

安太堡煤矿复垦区刺槐径向生长对气候因子的响应

杨东甲¹, 李颖俊², 冯煜清¹

(1. 太原师范学院地理科学学院, 山西 晋中 030619; 2. 太原师范学院历史地理与环境变迁研究所, 山西 晋中 030619)

摘要: 在全球变暖的背景下, 区域干旱化程度加强, 严重限制了干旱和半干旱地区树木的生长。安太堡矿区位于农牧交错带, 生态环境脆弱, 对气候变化敏感。通过树木年轮学研究方法, 建立了安太堡煤矿复垦区人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)的树轮宽度标准年表, 树轮气候响应分析发现水分是限制研究区刺槐生长的主要因素, 上一年9月至当年8月的水文年降水以及主要生长季(6~8月)的降水对树木的生长有重要的促进作用, 但是当年9月降水有限制作用; 生长季前冬季(12月、1月)的较高温度也是限制刺槐径向生长的重要因素。

关键词: 树木年轮; 刺槐; 安太堡; 煤矿复垦区; 气候响应

中图分类号: S718.5; P468 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)08-0193-06

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告显示, 全球平均温度较工业化前上升0.8~1.2℃, 进入21世纪以来, 温度上升更加明显^[1]。《中国气候变化蓝皮书(2019)》指出, 随着全球气候变化, 我国发生高温、洪涝、干旱等灾害的风险将进一步加剧。气候与森林生态系统之间存在着密切而复杂的关系。在全球变暖的大背景下, 气候变化已经成为影响森林生态系统结构和功能的重要因素。全球变暖导致部分干旱和半干旱地区的干旱程度加剧, 导致森林生物量下降, 甚至部分树木死亡, 严重影响了森林生态系统的生态安全。

树木年轮具有定年精确、分辨率高、连续性好和能准确记录环境信息等特点, 被广泛运用于气候变化与森林动态研究工作^[2]。自1910年美国天文学家Douglass首次发现树轮宽度与太阳黑子活动周期之间的相关性以来, 树木年轮已在历史气候重建^[3]、树木生长与气候响应^[4]和林线附近树轮气候稳定性^[5]等方面得到广泛应用和发展。德国北部的樟子松(*Pinus sylvestris*)、花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)和挪威云杉(*Picea abies*)的树轮研究显示, 气候对不同树种生长的影响不同, 樟子松和花旗松的生长主要受到冬季温度升高的影响, 而挪威云杉的生长则主要受到当年5—7月的降水变化以

及3月的温度升高的影响, 在未来气候变暖和夏季干旱加剧的条件下, 将会给挪威云杉的生长带来负面影响^[6]。相较于欧美发达国家, 我国树轮研究正式起步相对较晚, 但是发展迅速。近年来, 随着全国绿化工作的开展, 森林覆盖率显著提升, 人工林是森林的主要组成部分, 人工林较天然林对气候变化的响应更加敏感, 因此对人工林气候响应的研究备受关注。韦景树等^[7]对羊圈沟的人工物种和天然物种进行研究, 发现刺槐人工林更容易受到干旱胁迫限制。管崇帆等^[8]研究了气候和竞争对刺槐径向生长的影响, 发现温度和降水是影响刺槐生长的关键因素, 高密度刺槐更易受到干旱胁迫影响。安塞刺槐受9、10月干旱指数——标准化降水蒸散差指数(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)的影响, 而吉县刺槐受6、7月SPEI的影响^[9]。河北东北部和内蒙古中东部的油松人工林主要受5—7月降水影响^[10]。生长季持续的高温 and 干旱是东灵山地区人工针叶林生长下降的主要因素^[11], 而该地区的辽东栎(*Quercus liaotungensis koidz.*)主要是受5月和夏季干旱的限制^[12]。河北坝上地区衰退和健康小叶杨(*Populus simonii*)受4月温度的抑制作用, 7月降水利于衰退小叶杨的生长, 衰退小叶杨对气候因子响应更加敏感^[13]。随着树木年轮学的不断发展, 它已成为研究气候敏感区

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2019L0807); 山西省研究生科研创新项目(2023KY691)

作者简介: 杨东甲(1996—), 男, 山西汾阳人, 硕士研究生, 研究方向为树轮气候与树轮生态学; 通信作者李颖俊(1984—), 女, 河北唐山人, 博士, 副教授, 研究方向为树轮气候与树轮生态学; 冯煜清(1999—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为树轮气候与树轮生态学。

树木生长与气候关系的重要分析工具,并为深入了解全球气候变化对区域森林的影响提供一定的科学依据。

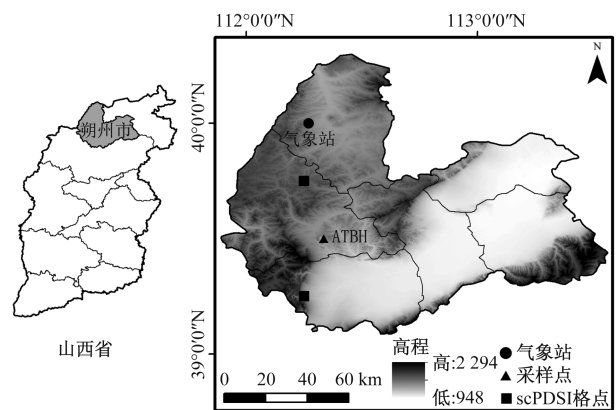
安太堡露天煤矿是我国规模最大的露天煤矿生产基地,煤矿资源的开发利用促进了社会经济的发展,但也给自然环境造成了严重破坏,带来了一系列的生态环境问题,严重威胁了人们的生存与经济发展。为了实现可持续发展的目标,采取有效的生态修复措施来减少矿产开采对环境的负面影响,近几十年来矿区生态修复成为世界矿产大国的研究焦点^[14]。安太堡矿区从1991年起采用了“采剥、排弃、造地、复垦”一条龙的模式,为了改善生态环境,进行了大规模的包括乔木、灌木、草本植物及农作物的引种及不同配置模式试验工作^[15]。该矿区植被恢复种类的选择上乔木以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、家榆(*Ulmus pumila* L.)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等为主,优势草本植物有紫苜蓿(*Medicago sativa*)、硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)等^[16]。刺槐属于豆科植物,因其适应性强、成活率高,成为北方地区先锋造林树种^[17]。刺槐也是干旱半干旱区生态修复治理中重要的水土保持植物,其具有耐旱、耐贫瘠土壤、生长较快、根系发达等特点,在防治沙漠化、治理水土流失,维护生态平衡等方面起了关键作用^[18]。近年来,在黄土高原北部的半干旱地区,刺槐林出现了不同程度的衰退现象,导致生态修复林的功能明显减弱^[7]。目前对该地区刺槐的研究多集中于土壤微生物群落结构^[19]、植被重建特征和植被演替^[16]等相关领域,但是针对气候变化背景下树木生长对环境的适应性研究较少。因此,本文探究安太堡煤矿复垦区刺槐对气候变化的适应性,寻找影响刺槐径向生长的主要气候因子,可为矿区生态修复林的管理、保护和更新建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安太堡露天矿区位于山西省北部的朔州市(图1)(112°11′~113°30′E,39°23′~39°37′N),属于晋、陕、蒙“黑三角”接壤区世界特大型煤田的一部分^[20]。该区域为黄土高原东部的低山丘陵区,水力和风力侵蚀作用明显,海拔为1 213.80~1 537.90 m,北高南低,无天然森林,仅有少量的人工疏林^[20]。本区属于生态脆弱敏感区,超大规模露天煤炭开采造成地貌破坏、土壤结构松散、自然植被严重退化、生物多样性减少等生态问题^[16]。矿区面积达

376 km²,现共有6个排土场,较早开始土地复垦与植被重建工作^[21]。区域内的植被恢复、土地复垦历来备受政府以及学术界的广泛关注^[20]。安太堡露天矿区处于半干旱地带,温带大陆性季风气候最为典型^[20]。该区域内年均气温为4.2℃,多年平均降水量为420 mm,雨热同期(图2)。降水主要分布在6—9月,最热月为7月,平均气温为19.8℃,最冷月为1月,平均气温为-14.5℃。年平均日照时间为2 693.3 h,太阳辐射强,年蒸发量为1 786.6~2 598.0 mm,是降水量的4倍以上,温度的日较差、年较差均较大,一年中约70%的时间有风,年平均风速为2.3~4.7 m/s,无霜期较短为115~130 d^[20]。



审图号:晋S(2020)005号

图1 研究区概况

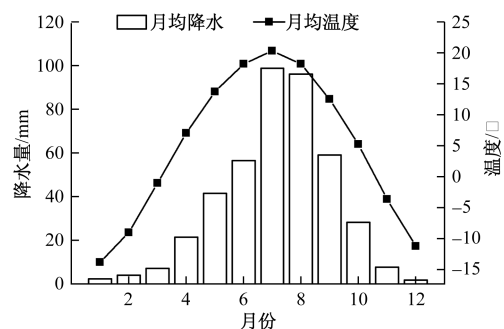


图2 研究区1995—2018年月平均温度、总降水

1.2 样品采集与年表建立

2019年10月,在安太堡煤矿复垦区进行野外树轮样本的采集。刺槐(ATBH)采样点位于安太堡露天煤矿的生态复垦区,土壤层较薄,主要由黄土和少量红土铺垫而成,还掺杂些许煤矸石、碎石等杂质,质地多为沙壤土和壤土^[22]。根据国际年轮数据库(International Tree-Ring Data Bank, ITRDB)采样标准,选择人为干扰少的刺槐纯林种植区,选取长势良好、树干无疤痕、无真菌感染且年龄较大

的刺槐,在胸高处(1.3 m)用内径为 5.05 mm 的树木生长锥(Huglof)在相互垂直的方向钻取样芯(2根),将钻取后的树轮样芯装入孔径相当的纸管内保存,详细记录树木的胸径、树高、生长环境等信息,并且对每一根样芯进行编号,如 ATBH01A。采集安太堡煤矿复垦区刺槐树轮样本,共计 20 棵树木,40 根样芯。刺槐树芯样品带回实验室后进行固定、晾干、打磨。初步定年后,使用树木年轮宽度测量仪(Velmex)测量树轮宽度,精确到 0.001 mm。使用 TSAP 软件辅助定年,使用 COFECHA 软件进行定年质量控制^[23]。利用 ARSTAN 程序去除刺槐的生理趋势,为了尽可能多地保留环境信息,采用负指数函数和线性函数来拟合生长趋势,最终建立安太堡煤矿复垦区刺槐树轮宽度标准年表(Standard chronology, STD),年表可靠时段为 1995—2018 年^[24](图 3)。

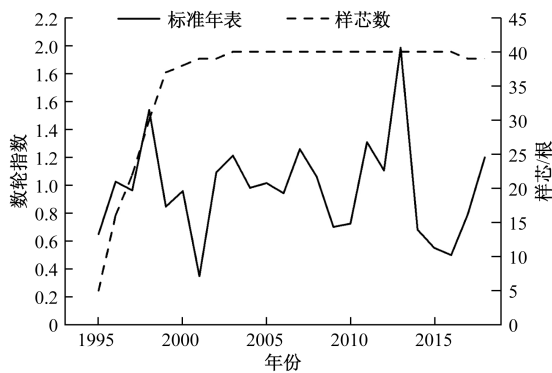


图 3 刺槐年轮宽度标准年表(STD)及样芯数

1.3 数据来源与研究方法

采用距离采样点附近的右玉气象站 1995—2018 年的观测资料,气象要素包括月均温度和月均降水。从荷兰皇家气象研究所共享网站(<http://climexp.knmi.nl>)获取距离采样区域最近的 1995—2018 年的自校准帕默尔干旱指数(self-calibrating Palmer drught severity index, scPDSI)数据。考虑到树木径向生长可能受到上一年气候的影响,故选取上一年 10 月至当年 9 月的气象资料进行树轮气候响应分析。采用 Person 相关分析法计算月均温度、降水量、scPDSI 与 STD 年表之间的相关系数。

2 结果与分析

2.1 刺槐树轮宽度标准化年表特征

刺槐 STD 年表的可靠时段为 1995—2018,年表统计信息如表 1 所示。样芯序列间的相关性(R)代表着采样点内树木生长的共同趋势,该值较高,说明各采样区域内刺槐的径向生长变化相对一致。

一阶自相关系数($Ac1$)反映的是上一年的树木生长对当年生长的影响^[25]。ATBH 年表的一阶自相关系数为 0.035,表明刺槐受到上一年树木生长的影响较小。这与其生长环境有一定的关系,土壤贫瘠、气候环境恶劣均导致树木光合产物更多用于当年生长,而储存下来用作第二年生长的量较少。刺槐的平均敏感度(mean sensitivity, MS)为 0.430,这表明在安太堡煤矿复垦区,刺槐对环境因子的变化比较敏感。标准差(standard deviation, SD)是衡量数据集离散程度的重要指标,刺槐的年轮宽度标准差处于较高水平,年表的质量较高。信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)较高,说明采集的刺槐树芯样本中所包含的环境信息较为丰富。样本总体代表性(expressed population signal, EPS)达到了 0.986,表明年表是可靠的。一系列数据说明安太堡矿区刺槐的年表质量较好。

表 1 安太堡刺槐树轮宽度标准年表(STD)统计特征值

特征	标准年表(STD)
时间跨度 SSS>0.85	1995—2018 年
序列间相关(R)	0.667
一阶自相关系数($Ac1$)	0.035
平均敏感度(MS)	0.430
标准差(SD)	0.436
信噪比(SNR)	71.950
总体代表性(EPS)	0.986

2.2 树轮宽度年表与气候因子的关系

对刺槐 STD 年表与气候因子进行直接相关分析与一阶差相关分析(图 4),直接相关显示,刺槐 STD 年表与 7 月的温度负相关系数最高,与同期降水正相关系数最高,与 6 月 scPDSI 正相关系数最高,但均未达显著水平;月份组合上,与上一年 9 月至当年 1 月的气温显著负相关,与当年 3—7 月的降水显著正相关。一阶差相关更能准确地揭示树木生长与高频气候变化之间的联系^[26]。可以发现,刺槐 STD 年表与月均气象资料一阶差相关系数波动幅度更大,说明高频气候信号给刺槐生长带来的影响更显著。刺槐 STD 年表与当年 7 月气温显著负相关,与同期降水正相关,且接近显著水平,与当年 9 月降水显著负相关;与 scPDSI 的一阶差相关均是正相关,其中当年 6、7 月接近显著水平。月份组合上,刺槐与上一年 9 月至当年 8 月降水正相关关系最为显著,与上一年 12 月至当年 1 月的气温负相关最显著,与当年 6—8 月降水显著正相关,与 6—8 月的 scPDSI 的相关性最高。

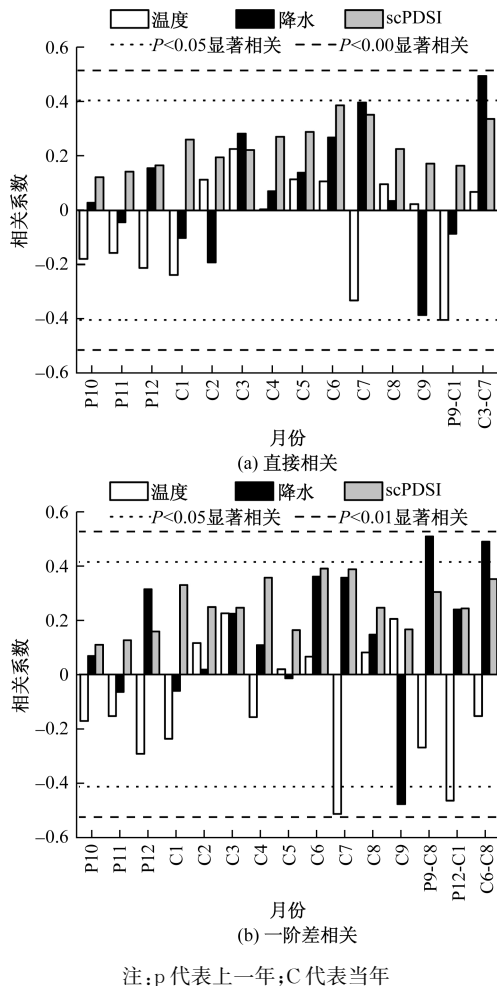


图4 刺槐年表与温度、降水、scPDSI 直接相关和一阶差相关

3 讨论

一般认为,降水是影响干旱及半干旱区域树木主要的气候因子。从分析结果看,刺槐生长对降水的相关系数更加显著,采样点位于干旱、半干旱气候过渡的区域,因此水分成为刺槐生长的主要限制因素。水文年(上一年9月至当年8月)降水对刺槐的径向生长有重要意义。水文年降水在干旱地区影响显著^[27],许多干旱地区树木生长和水文年的水分之间存在显著相关性,这种现象在昌灵山^[28]、河北木兰围场^[29],兴隆山脉^[30]均有所发现。9月为生长季结束的时间,上一年9月到当年8月为树木生长的整个周期,所以该时期的降水对树木生长的影响较大。有研究表明,树木年轮生长对非生长季和生长季降水的组合有响应,青藏高原等寒旱地区的树木与上一年8月到当年7月水文年的降水量显著相关,可能是受到不同地区和不同树种的生长结束时间影响,青藏高原等寒旱地区的树木生长季结束时间较早,可能在8月就停止生长^[31]。非生长季节的融雪所产生的水分被储存在土壤中,占树木生长季早期所需水分的很大一部

分^[27]。在安太堡矿区,生长季前期(4、5月)降雨较少,约占全年降水的13.4%,因此土壤储存的生长季前期的降水量对树木生长有重要影响。

刺槐生长与当年6—8月降水显著正相关,与7月的气温显著负相关,与降水正相关接近显著水平。说明其受生长季6—8月干旱胁迫。该时期为树木的主要生长季,水热条件对其生长起着重要作用^[32],该时期较高的降水能缓解干旱,促进树木的生长。7月是安太堡矿区全年温度最高的月份,高温往往超过树木的生理阈值,使刺槐蒸腾速率加快,导致叶片水汽压亏缺,部分叶片气孔关闭,光合速率降低,对树木生长产生不利影响^[33]。高温还会加速土壤蒸发和植被蒸腾失水,降低土壤湿度,使根系无法获取足够的水分,此时丰沛的降水将减轻刺槐生长缺水的问题,缓解干旱。生长季树木的需水量大,当土壤水分不足时,会抑制树木的径向生长速度,因此,生长季较多的降水可以积累更多的光合产物,加速树木的生长^[18]。

刺槐的生长受上一年12月到当年1月较高温度的限制,此时是安太堡矿区全年温度最低的冬季,树木生长处于停滞状态,如果这时温度过高,会导致树木呼吸作用增强,过度耗费存留的光合产物,从而限制来年的生长^[34]。树木生长的休眠期较高的温度对给树木生长带来限制作用的现象在其他地区的研究中也被证实,如在日本中部Norikura山林线的岳桦(*Betula ermanii*)与上一年12月和当年1月的温度也呈负相关关系^[35],同一纬度的长白山的低龄红松(*Pinus koraiensis*)、岳桦也得到了相似的研究结果^[36]。

刺槐与当年9月降水显著负相关。9月是刺槐的生长季末期^[33],此时的温度下降明显,土壤蒸发和植物蒸腾作用减弱,研究区9月降水相对充足(约占全年降水的13%),但是刺槐生长的土层较薄,先前的降雨已经使土壤中的水分接近或达到饱和状态,土壤中水分过多可能会使根系缺氧,呼吸作用受到限制,从而抑制树木生长^[37]。另外,阴雨天气频繁出现也会减弱树木的光合作用,以致形成窄轮。同纬度地区的研究中,千山蒙古栎(*Quercus mongolica*)径向生长与生长季后期8月降水量呈负相关^[38];张芬等^[39]在祁连山东部发现不同年龄油松与8—10月的降水量呈负相关。

由图5可知,树木生长最显著的限制因子水文年(上一年9月到当年8月)降水在1995—2018年呈现上升趋势,这将有利于该地区刺槐的径向生

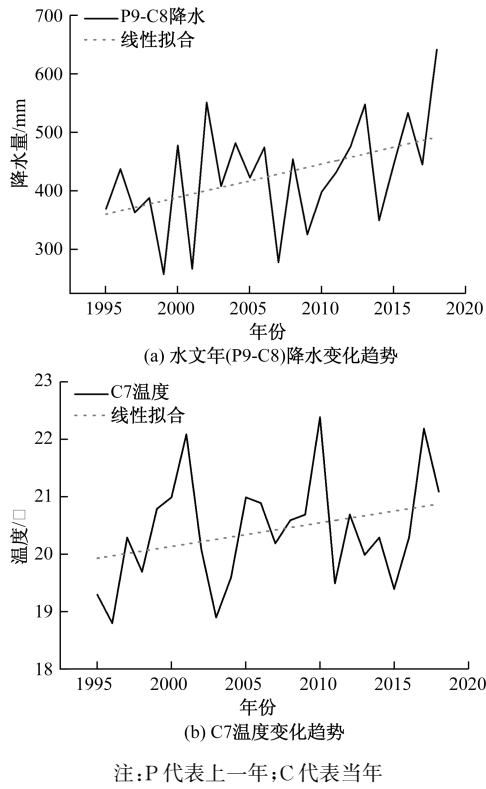


图5 水文年(P9—C8)降水(a)与C7温度(b)变化趋势 (1995—2018年)

长;但第二显著的限制因子当年7月温度也呈现上升趋势,这将对刺槐的径向生长产生负面影响。因此,受这两种主要限制气候因子共同作用,安太堡矿区刺槐在未来气候变化的背景下,其生长趋势还有待进一步研究。

4 结论

利用树木年轮学的基本原理,在安太堡煤矿复垦区建立刺槐树轮宽度标准年表 STD(1995—2018年),研究了树轮宽度标准年表与当地温度、降水、scPDSI 的相关关系,明确了安太堡矿区刺槐径向生长对气候因子的响应机制及敏感时期,该区刺槐径向生长主要受上一年9月到当年8月水文年少降水的影响,其次受到当年7月高温的限制,同时生长季(6—8月)的多降水对树木生长有明显促进作用。9月过多的降水以及冬季(12、1月)偏高的温度对树木生长有限制作用。在未来该矿区刺槐人工林经营管理中,需要特别关注刺槐对气候因子响应的敏感期,适当给予水分补充,这将有助于提升刺槐人工林的质量,有效地发挥其生态修复功能。另外,刺槐人工林生长过程也受林分密度和树龄等因素影响,这些因子如何影响刺槐对气候因子的响应以及未来气候变暖背景下该地区刺槐的生长趋势等问题,仍需更深入的研究。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis: contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge (New York): Cambridge University Press, 2021.
- [2] 董燕, 贾飞飞. 树木径向生长对气候的响应研究进展[J]. 四川林业科技, 2023, 44(3): 1-9.
- [3] 乔晶晶, 王轶夫, 孙玉军, 等. 基于红松树轮重建小兴安岭南麓过去140年6月份平均温度变化[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8769-8779.
- [4] SONG W, ZHAO B, MU C, et al. Moisture availability influences the formation and characteristics of earlywood of *Pinus tabulaeformis* more than latewood in northern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 327: 109219.
- [5] 薛盼盼, 缪宁, 岳喜明, 等. 青藏高原东缘岷江冷杉径向生长对升温响应分异的坡向和海拔差异[J]. 林业科学, 2023, 59(7): 65-77.
- [6] GAULI A, NEUPANE P R, MUNDHENK P, et al. Effect of climate change on the growth of tree species: dendroclimatological analysis [J]. Forests, 2022, 13(4): 496.
- [7] 韦景树, 李宗善, 冯晓珂, 等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [8] 管崇帆, 郑京生, 李雅婧, 等. 气候和密度对刺槐径向生长和干旱脆弱性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3261-3272.
- [9] 胡晓创, 高婉婷, 孙守家, 等. 刺槐生长和内在水分利用效率对气候因子的响应[J]. 应用生态学报, 2023, 34(10): 2610-2618.
- [10] 蔡立新. 基于树木年轮学研究的油松人工林树木在其北方地区的气候适宜性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [11] 肖健宇, 张文艳, 牟玉梅, 等. 树木年轮揭示的东灵山主要树种间干旱耐受性差异[J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3487-3496.
- [12] 李宗善, 陈维梁, 韦景树, 等. 北京东灵山辽东栎林树木生长对气候要素的响应特征[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 27-37.
- [13] 刘亚玲, 信忠保, 李宗善, 等. 近40年河北坝上地区杨树人工林径向生长对气候变化的响应差异[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 9108-9119.
- [14] 崔柳. 露天煤矿土地复垦系统分析及考核评价方法[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [15] 白中科, 郟文聚. 矿区土地复垦与复垦土地的再利用——以平朔矿区为例[J]. 资源与产业, 2008(5): 32-37.
- [16] 耿冰瑾, 王舒菲, 曹银贵, 等. 山西平朔露天矿区不同年限复垦地植被重建特征对比分析[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3400-3419.

- [17] 王林, 冯锦霞, 万贤崇. 土层厚度对刺槐旱季水分状况和生长的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(3): 248-255.
- [18] KEYIMU M, LI Z, FU B, et al. Spatial differences in the radial growth responses of black locust (*Robinia pseudoacacia* Linn.) to climate on the Loess Plateau, China[J]. *Dendrochronologia*, 2021, 67: 125832.
- [19] 张鹏飞. 平朔矿区不同植被恢复方式下的土壤微生物群落结构差异研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [20] 赵冰清. 半干旱黄土区大型露天煤矿植被演替规律研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [21] 原野, 高国卿, 高娜, 等. 黄土区大型露天煤矿复垦 24a 土壤碳氮组分特征[J]. 农业工程报, 2021, 37(4): 167-174.
- [22] 白中科, 赵景逵. 工矿区土地复垦与生态重建[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [23] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. 1983, 44: 69-75.
- [24] FRITTS HC. *Tree Rings and Climate*[M]. London: Academic Press, 1976.
- [25] 潘磊, 段文标, 于澎涛, 等. 气候因子对不同竞争等级华北落叶松径向生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(11): 16-22.
- [26] 李颖俊, 方克艳, 白毛伟, 等. 闽东南地区马尾松古树对气候变化和虫灾的生态弹性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(10): 3539-3547.
- [27] FANG K, FRANK D, ZHAO Y, et al. Moisture stress of a hydrological year on tree growth in the Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(3): 034010.
- [28] CHEN F, YUAN Y, WEN W, et al. Tree-ring-based reconstruction of precipitation in the Changling Mountains, China, since AD 1691 [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2012, 56: 765-774.
- [29] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应——基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1733-1742.
- [30] LIU Y, SUN B, SONG HM, et al. Tree-ring-based precipitation reconstruction for Mt. Xinglong, China, since AD 1679 [J]. *Quaternary International*, 2013, 283: 46-54.
- [31] LI D, FANG K, LI Y, et al. Climate, intrinsic water-use efficiency and tree growth over the past 150 years in humid subtropical China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): 0172045.
- [32] 常永兴, 陈振举, 张先亮, 等. 气候变暖下大兴安岭落叶松径向生长对温度的响应[J]. 植物生态学报, 2017, 41(3): 279-289.
- [33] 刘杰, 李宗善, 梁海斌. 黄土高原中部降水梯度上乔灌木气候响应敏感性分析[J]. 生态学报, 2024(3): 1-18.
- [34] MÄKINEN H, N? JD P, KAHLE H P, et al. Radial growth variation of Norway spruce across latitudinal and altitudinal gradients in central and northern Europe[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 171(3): 243-259.
- [35] TAKAHASHI K, TOKUMITSU Y, YASUE K. Climatic factors affecting the tree-ring width of *Betula ermanii* at the timberline on Mount Norikura, Central Japan[J]. *Ecological Research*, 2005, 20: 445-451.
- [36] 王晓明. 长白山不同海拔森林优势树种树轮生态学研究[M]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [37] KRAMER K, VREUGDENHIL S J, 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[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(11): 3893-3903.
- [38] 李腾, 何兴元, 陈振举. 东北南部蒙古栎径向生长对气候变化的响应——以千山为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1841-1848.
- [39] 张芬, 勾晓华, 苏军德, 等. 祁连山东部不同树龄油松径向生长对气候的响应[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 634-639.

Response of Radial Growth of *Robinia Pseudoacacia* to Climatic Factors in Reclamation Area of Antaibao Coal Mine

YANG Dongjia¹, LI Yingjun², FENG Yuqing¹

(1. School of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China;

2. Institute of Historical Geographical and Environmental Change, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: In the context of global warming, the degree of regional drought has intensified, which has seriously limited the growth of trees in arid and semi-arid areas. The Antaibao mining area is located in the agro-pastoral ecotone of China. The ecological environment is fragile and sensitive to climate change. Based on the method of dendrochronology, the standard chronology of tree-ring width of *Robinia pseudoacacia* forest in Antaibao coal mine reclamation area was established. The analysis of tree-ring climate response shows that water is the main factor limiting the growth of *R. pseudoacacia* in the study area. The precipitation in the hydrological year from September to August of the previous year and the precipitation in the main growing season (June-August) plays an important role in promoting the growth of trees, but the precipitation in September of the current year has a limiting effect. The higher temperature in the winter before the growing season (December and January) is also an important factor limiting the radial growth of *R. pseudoacacia*.

Keywords: tree rings; *Robinia pseudoacacia*; Antaibao; coal mine reclamation area; climate response