

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.029; CSTR:;32311.14.rswc.2026.01.029.

白云菲, 王海兵, 刘晶晶, 等. 库布齐沙漠小叶杨径向生长对气候的响应[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):400-410.

Bai Yunfei, Wang Haibing, Liu Jingjing, et al. Response of *Populus simonii* radial growth to climate in Kubuqi Desert[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):400-410.

库布齐沙漠小叶杨径向生长对气候的响应

白云菲¹, 王海兵^{1,2,3}, 刘晶晶⁴, 安达⁵, 陈雪¹, 包文凭⁶

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古农业大学 旱区水工程生态环境全国重点实验室, 呼和浩特 010018;

3. 内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 呼和浩特 017400; 4. 中国科学院

西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 5. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院,

呼和浩特 010010; 6. 名古屋大学 地球与环境科学 大气与水圈系, 名古屋市 464-8601)

摘要: [目的] 分析库布齐沙漠不同退化程度小叶杨防护林生长现状, 进而揭示其径向生长与气候因素的响应关系, 以期对优化“三北”防护林建设、打赢生态修复攻坚战提供理论与技术支撑。[方法] 在鄂尔多斯市达拉特旗内选择不同退化程度林地的小叶杨防护林, 用树木年轮生态学的方法建立年表, 收集气象数据并进行相关性分析, 结合地下水分析小叶杨径向生长对气候的响应。[结果] (1) 最近 50 年库布齐温度、降水、潜在蒸发量呈上升趋势, 帕尔默干旱指数、标准化降水蒸散指数呈下降趋势; (2) 2000 年以来地下水快速下降, 小叶杨径向生长受到干旱胁迫; (3) 重度退化、无退化防护林受高温干旱的双重胁迫, 中度退化和轻度退化防护林易受干旱缺水的影响, 良好林受到气候胁迫程度低。[结论] 地下水的下降加速了小叶杨的退化; 不同退化程度的小叶杨对气候的响应方式不同, 退化的小叶杨更容易受到气候胁迫。

关键词: 气候变化; 树木年轮; 径向生长; 退化

中图分类号: S792.116

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0400-11

Response of *Populus simonii* radial growth to climate in Kubuqi Desert

Bai Yunfei¹, Wang Haibing^{1,2,3}, Liu Jingjing⁴, An Da⁵, Chen Xue¹, Bao Wenping⁶

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;

2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 3. National Positioning Observation Research Station for the Hangjin Desert Ecosystem, Hohhot 017400,

China; 4. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 5. Inner Mongolia Autonomous

Region Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Hohhot 010010, China; 6. Department of Earth and

Environmental Sciences, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze the growth status of *Populus simonii* shelterbelts with different degrees of degradation in the Kubuqi Desert and reveal the response of their radial growth to climatic factors, thereby providing theoretical and technical support for optimizing the construction of the “Three-North” shelterbelts and achieving success in ecological restoration efforts. [Methods] *Populus simonii* shelterbelts were selected in forestlands with different degrees of degradation in Dalad Banner, Ordos City. Chronologies were established using the methods of dendroecology. Meteorological data were collected for correlation analysis, and the response of *Populus simonii* radial growth to climate was analyzed in combination with groundwater data. [Results] (1) Over the past 50 years in the Kubuqi Desert, temperature, precipitation, and potential

收稿日期: 2025-03-07

修回日期: 2025-04-16

接受日期: 2025-04-30

资助项目: 库布齐沙漠老化退化林更新及绿色廊道生态修复升级集成技术示范(2024JBGS0019); 荒漠化对气候变化的响应与反馈及其生态效应(2020YFA0608401); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(BR220101)

第一作者: 白云菲(1997—), 女, 内蒙古锡林浩特人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: byf_10460104253@163.com

通信作者: 王海兵(1982—), 男, 内蒙古丰镇人, 博士研究生导师, 主要从事干旱区风沙灾害及防治方面的研究。E-mail: hbwang@imau.edu.cn

<http://stbcyj.paperonice.org>

evapotranspiration showed increasing trends, while the Palmer Drought Severity Index and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index showed decreasing trends. (2) Since 2000, groundwater has declined rapidly, and the radial growth of *Populus simonii* was subjected to drought stress. (3) Severely degraded and non-degraded shelterbelts were subjected to the dual stress of high temperature and drought. Moderately degraded and slightly degraded shelterbelts were more affected by drought and water deficit, and shelterbelts in good condition experienced a low degree of climate stress. [Conclusion] The decline of groundwater accelerates the degradation of *Populus simonii*. *Populus simonii* with different degrees of degradation respond to climate in different ways, with degraded trees being more susceptible to climate stress.

Keywords: climate change; tree ring; radial growth; degradation

在全球气候变暖背景下,极端高温、干旱及其复合干热事件发生频率显著增加,加剧了对社会经济、生态环境的威胁^[1];植被作为陆地生态系统中对气候变化最敏感的组分^[2],其结构与功能受极端气候影响尤为突出,可能导致生物多样性退化、生态服务功能减弱等连锁反应,进一步削弱了生态系统的气候适应能力。

1978年以来国家启动三北防护林体系建设工程,库布齐防护林取得举世瞩目的成就,生态系统恢复良好,森林覆盖率提高,平均植被覆盖度增加,生态效益有所增加^[3],但是,近年来当地防护林出现不同程度的退化^[4]。杨树及防护林退化机制具有显著的区域异质性,是自然与人为因素交互作用的结果。研究表明,土壤水分亏缺是制约杨树生理生态过程的核心限制因子,直接影响其生长代谢^[5]。不同区域退化主导机制各异:例如,张北县防护林因持续性干旱加速退化^[6],而部分地区则以病虫害爆发或单一树种连作导致的生态系统脆弱性为主要诱因^[7]。在研究方法上,学者通过水同位素示踪与树干液流监测技术,定量揭示坝上地区小叶杨(*Populus simonii*)退化过程中水分运移与利用效率的动态变化^[8]。树木年轮凭借其高精度定年与连续性记录的优势,成为解析森林生态系统应对气候胁迫的核心研究手段^[9]。树木年轮多被用于历史气候重建^[10]、降水重建等^[11]方面,少有人研究极端气候条件下树木径向生长的快慢以及经历极端气候后的恢复情况。

鉴于此,本文以库布齐沙漠小叶杨防护林为研究对象,结合区域地下水和气象变化数据,基于树木年轮生态学的方法,分析不同退化程度的小叶杨径向生长与气候的响应关系,以期小叶杨防护林在库布齐沙漠的生长规律提供基础数据,对“三北”防护林建设和三大攻坚战提供理论和技术支撑。

1 研究方法

1.1 样地设置

库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原,是典型沙漠地

貌类型,地势南高北低,以流动沙丘为主,面积约1.86万 km²(109°48'35"—110°5'57"E, 40°12'21"—40°23'54"N)。库布齐沙漠昼夜温差大,气候干燥,地表年平均气温为7.97℃,年平均最高气温在7月为29.39℃,年平均最低气温在1月为-15.27℃,年平均降水量为350 mm左右;1999—2019多年平均地下水资源量为3.16亿 m³。库布齐沙漠防护林多为“三北”防护林第一期(1978—2000年)时所种,品种多为小叶杨。随着杨树的退化后补植补种树种以樟子松(*Pinus sylvestris*)为主。研究区原本为流动沙地,后经早期人们自发的植树造林以及“三北”工程的开展逐渐变为半流动沙地。

采样的防护林林地位于库布齐沙漠东部、达拉特旗中东部,包括南营子、白土梁、白泥井和七里沙4个林地、5种生长退化区(表1)。防护林体系为纯杨树林。退化防护林是指因环境变化、造林和经营不当、遭受自然灾害、林业有害生物危害等因素影响,林分提前或加速进入生理衰退阶段,出现林木枯死、濒死、生长不良等现象,稳定性降低,生态防护功能退化甚至丧失,难以通过自然能力更新恢复的防护林。研究区内的小叶杨退化属于植被的退化。在该地按照小叶杨退化程度设置重度退化、中度退化、轻度退化、无退化及良好5个采样点^[4]。重度退化林为半流动沙地,林下植被稀疏,小叶杨退化严重,绝大部分树木已经枯死,在生长季少有绿叶长出,缺乏生命力,现已砍伐一部分并补植补种樟子松;中度退化小叶杨退化较严重,出现大量枯枝断梢,在生长季约有70%的树可以长出绿叶,林下植被为白沙蒿(*Artemisia blepharolepis*)、蓼子朴(*Inula salsoloides*)和角蒿(*Incarvillea sinensis*);轻度退化林小叶杨生长季绝大部分可以长出绿叶,树木胸径较小,枯枝较多,缺乏修剪,林下植被为柠条(*Caragana korshinskii*)和白沙蒿;无退化林,退化现象较轻,树木长势较好,但也出现枯枝断梢,有退化的迹象,林下植被为白沙蒿;良好林树木长势良好,树干笔直,基本无枯枝断

梢现象,生长季都能长出绿叶,林下植被为苦豆子(*Sophora alopecuroides*)。中度退化林、轻度退化林、

无退化林及良好林均为半固定沙地。小叶杨为人工种植的防护林并非原生植被。

表1 5个样地基本信息

Table 1 Basic information of five sample plots

样地地点	海拔/m	经纬度	退化程度	林下植被特征
南营子林地	1020.6	109°55'32"E 40°17'30"N	重度退化	补植补种樟子松
白土梁林地	945.4	109°47'52"E 40°23'42"N	中度退化	白沙蒿、蓼子朴、角蒿
白土梁林地	1124.7	109°49'7"E 40°20'10"N	轻度退化	柠条、白沙蒿
白泥井林地	1047.7	110°7'E 40°13'N	无退化	白沙蒿
七里沙林地	1051.5	110°2'43"E 40°13'54"N	良好	苦豆子

1.2 数据与方法

1.2.1 气象数据 为探究库布齐沙漠地区小叶杨树木年轮对当地气候要素的响应,本研究收集整理1970—2020年采样区邻近的观测资料,包括平均温度、平均最高温、平均最低温、降水量这些单一的气候要素,由于气候因子中温度和降水共同作用于树木的径向生长,为分析气候因子对树木生长的综合作用,本文还选取帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)、潜在蒸发量(Potential Evapotranspiration, PET)、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)。PDSI充分考虑降水、气温和土壤水分蒸发等多种因素,可以表征树木对于干旱的敏感程度,该指数越高,表示当地越湿润。PET能够反映出—个地区的蒸发能力,若某一个地区的年降水量小于该地区的PET,则说明该地区降雨多被蒸发掉,无法形成地表径流。SPEI可以表明区域的干湿程度,该值越大,说明区域降水越充分。网格气象资料数据来源于CRU(Climatic Research Unit, <http://climexp.knmi.nl/>)。CRU格

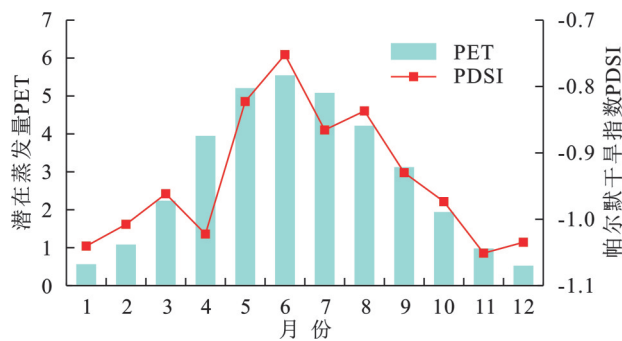


图2 研究区CRU格点1970—2020年逐月平均PET、逐月平均PDSI及逐月平均SPEI

Fig. 2 Monthly average PET, PDSI, and SPEI of CRU grid points in the study area (1970—2020)

1.2.2 地下水动态变化数据 GRACE地球重力卫星数据反演陆地水储量的原理是先求出地球表面的密度变化,再将密度变化转化为等效水高的变化,以此来反演陆地水储量的分布情况。本研究收集地下水蓄量空间分布数据是由GRACE卫星观测重力

点:109.5°—110.5°E,40.0°—40.5°N。本研究选取该地区温度、降水以及PET、PDSI、SPEI进行逐月分析(图1,图2)。气象数据覆盖树木一个生长年,但由于树木径向生长对气象要素的响应有一定的时滞效应,在干旱区时滞效应主要为1个月,随着干旱程度的增加时滞效应的时间也会增长^[12]。故本研究计算树木年轮宽度指数与气候要素相关性的时间是从上一年的9月到当年的11月。

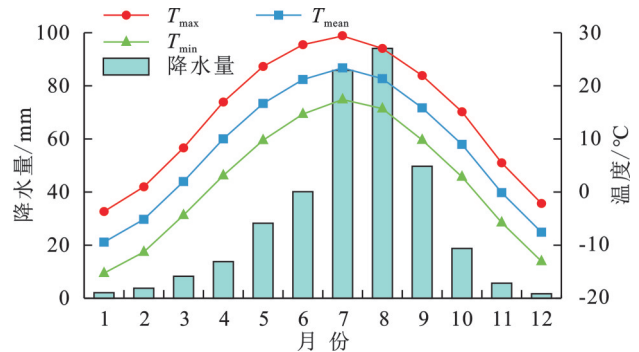
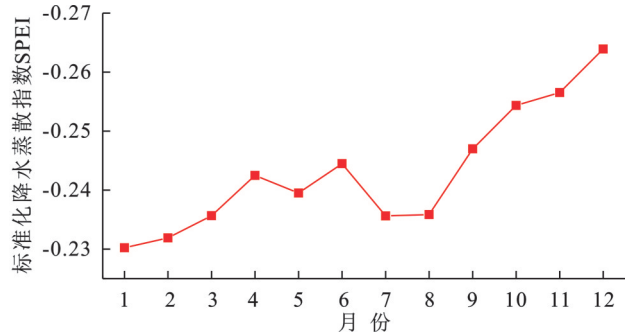


图1 研究区CRU格点1970—2020年逐月平均温度和平均降水

Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation of CRU grid points in the study area (1970—2020)



场(GRACE Level-1数据)随时间^[13]的变化,采用Mascon方法得到,并采用CLM 4.0水文模型和海岸线分辨率细化(CRI)滤波方法进一步提高了数据的空间分辨率。数据长度为2003—2022年,时间分辨率为月,下载数据空间分辨率为0.25°×0.25°,经投影

变换转化为5 km×5 km空间分辨率的地下水蓄量地图。为进一步对比分析,将原始数据的时间分辨率为每7 d的瞬时数据平均为月数据,以反映地下水季节性变化。单位0%代表全球最干旱地区地下水储量,100%代表全球最湿润地区地下水储量。

1.2.3 树轮样品采集与年表的建立 每个采样点于生长季选取40棵树(表2),每棵树用生长锥钻于树高1.3 m左右的位置,从两个方向穿过树干中心分别取树芯,共计400个树芯,按照国际通用方法预处理之后^[14],利用测量精度为0.01 mm的Lintab 6^[15]树木年轮宽度测量仪测量树木年轮宽度。将测量结果与TSAP-Win软件相结合进行目视定年。定年结果通过检验后,用ARSTAN程序^[16]建立年表。为消除树木之间的非气候信号和非一致性扰动,采用样条函数对各个宽度序列进行拟合。通过Osborn等^[17]的方法稳定年表方差变化,以减少样本随时间变化的影

响。最后采用双权重方法得到标准化年表。5个样地的平均敏感度符合其范围($MS > 0.2$),信噪比和第一主成分方差解释量均较高说明该地区的树木年轮宽度指数包含了较多的气候信息,适合用于树木年轮生态学研究(表3)。

表2 样树的基本信息
Table 2 Basic information of sample trees

参数	重度退化林	中度退化林	轻度退化林	无退化林	良好林	
树高	平均值/m	12.223	11.633	10.233	9.5175	13.378
	标准偏差/m	2.613	1.857	2.346	1.888	3.400
胸径	平均值/cm	144.925	112.3	64.725	88.35	99.475
	标准偏差/cm	32.503	17.327	9.254	19.296	18.657
冠幅	平均值/m	5.1	4.4645	3.21	4.503	6.11
	标准偏差/m	2.144	1.598	0.760	1.956	2.195

表3 5个样地STD年表统计特征

Table 3 Statistical characteristics of STD chronologies for five sample plots

样地	平均敏感度	平均标准差	偏度系数	峰度系数	信噪比	样本量总体代表性	第一主成分方差解释量%
重度退化林	0.277	0.302	0.365	3.060	0.498	0.332	28.3
中度退化林	0.424	0.699	4.706	24.999	3.703	0.787	38.1
轻度退化林	0.280	0.472	1.669	9.158	9.814	0.908	45.9
无退化林	0.354	0.395	1.165	4.715	6.779	0.871	49.9
良好林	0.277	0.287	0.712	3.561	8.654	0.896	39.8

2 结果与分析

2.1 小叶杨林地生长(衰退)现状分析

样地的树木用ARSTAN软件去趋势和标准化处理得到样地的标准化年表(图3)。从图中可以看出重度退化林年表长度最长,共74年,时段为1948—2022年;中度退化林年表长度为42年,时段为1980—2022年;轻度退化林年表长度为38年,时段为1984—2022年;无退化林年表长度最短为36年,时段为1986—2022年;良好林年表长度为45年,时段为1977—2022年。

结合趋势线和树木年轮宽度指数年表序列来看,重度退化林的树木年轮宽度指数在1950—1957年、1962—1965年、1975—1994年、2006—2016年呈现下降趋势;1957—1962年、1965—1975年、1994—2006年树木年轮宽度指数呈现上升趋势。中度退化林树木年轮宽度指数在1988—1996年、1998—2003年间出现下降趋势其间在1996—1998年树木年轮宽度指数出现回升。轻度退化林树木年轮宽度指数分别在1989—1991年、2003—2011年呈现下降的趋势;在

1991—2003年树木年轮宽度指数呈上升趋势。无退化林树木年轮宽度指数数值在1988—2001年、2003—2011年呈现下降趋势;2001—2003年树木年轮宽度指数呈现上升趋势。良好林的树木年轮宽度指数在1983—1990年、1998—2008年持续下降;1990—1998年树木年轮宽度指数呈上升趋势。

由此可以看出,重度退化林的衰退年份是1950—1957年、1962—1965年、1975—1994年、2006—2016年;中度退化林的衰退年份是1988—1996年、1998—2003年;轻度退化林的衰退年份是1989—1991年、2003—2011年;无退化林的衰退年份是1988—2001年、2003—2011年;良好林的衰退年份是1983—1990年、1998—2008年。将不同退化程度的防护林年表进行对比,发现存在不同退化程度的防护林生长衰退时段(即年表中树木年轮宽度指数持续下降时期)重合的现象;5种退化程度存在1988—1990年的衰退重合时期;中度退化林和良好林均在1998—2003年出现衰退时期;轻度退化林和无退化林均在2003—2011年出现衰退时期。

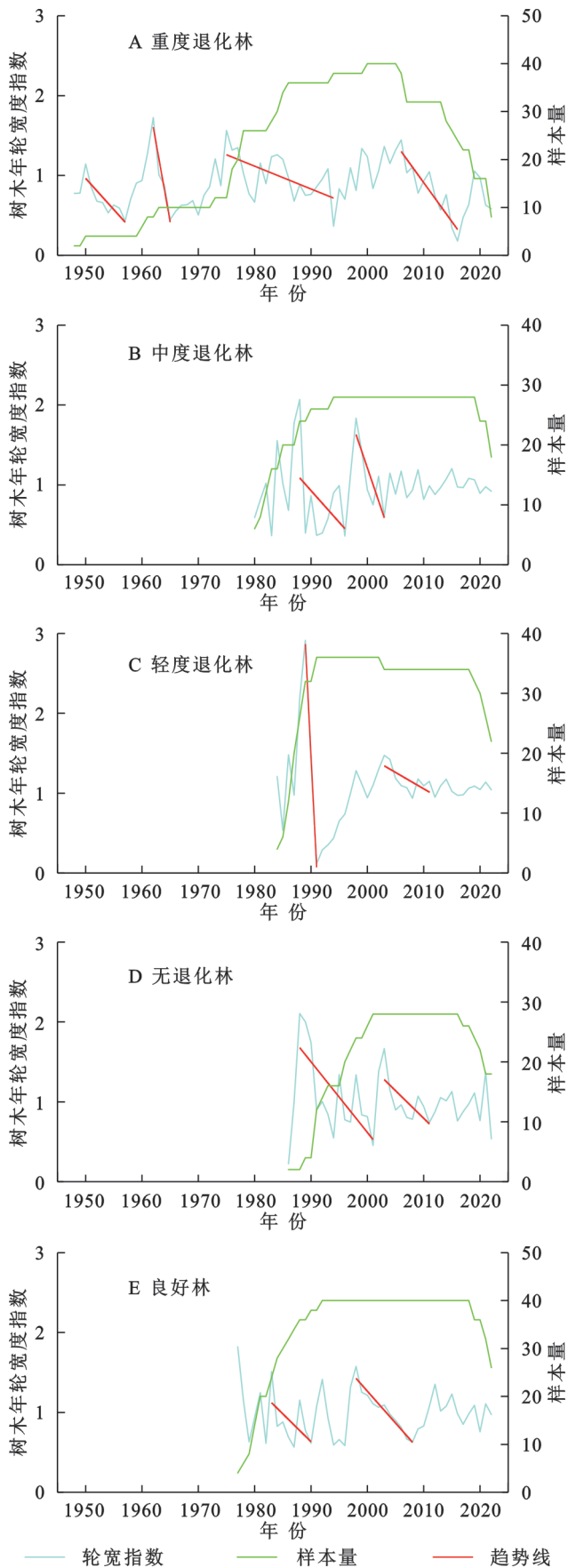


图 3 库布齐 5 个样地小叶杨树轮宽度指数

Fig. 3 Standardized tree-ring width indices of *Populus simonii* in five sample plots of Kubuqi Desert

2.2 气候要素的年际变化分析

研究区内的年平均最高温度、年平均温度和年平均最低温度虽然波动变化,但总体来说呈现一致的上升趋势(图 4)。这与全球气候变暖有关。上升的过程中在 1985 年、2012 年出现了气温较低的现象,在 1975 年、1983 年、1998 年、2007 年、2014 年出现了气温较高的现象。研究区地下水含量在 2008 年以前是较为缓慢的下降,2008 年开始呈现断崖式下降,降水虽然波动变化,但整体上呈较缓慢的上升趋势。结合实地调查,当地地下水在 1970—2020 年水位平均下降了 43 m,这与当地地下水动态变化特征相符。研究区内,降雨量虽然呈上升趋势,但缓慢,而地下水又急剧下降,其主要原因可能是在某一含水层或整个含水层之中,由于开发建设使得地下水过度开采,导致了地下水资源在一段特定的时间内无法得到有效地恢复和补充,储量逐渐被消耗。

研究区内多年平均降水每年起伏较大,总体上呈微弱的上升趋势(图 5),1974 年、2000 年、2005 年、2011 年降水较往年较少,其中 2005 年降水最少。PET 呈明显的上升趋势,上升的过程中在 1976 年、1996 年、2003 年出现了相对较低的点,这几年比较湿润,2005 年、2009 年、2017 年 PET 的值较高,蒸发能力较强,总体变化说明该地区的蒸发能力较强。通过 PET 与年总降水量对比可知,在 1996 年以前年总降水量高于 PET,在 1996 年以后年均降水量则低于 PET(图 6)。PDSI 和 SPEI 指数整体变化趋势相近,均呈现下降趋势,PDSI 下降较为缓慢,SPEI 下降较为迅速。这两个指数可以指示区域的干湿情况,因此可以说明研究区的气候较为干旱。PDSI 在 1977 年、2003 年、2016 年指数较高,1987 年、2000 年、2006 年、2011 年指数较低。SPEI 在 1977 年、2004 年指数较高,1973 年、1987 年、2001 年、2006 年指数较低。PDSI 与 SPEI 出现相对干旱或湿润时段的时间相近(图 5)。

2.3 库布齐小叶杨树轮与气候的相关和响应分析

2.3.1 库布齐小叶杨树轮与气候的单月相关和响应分析

通过单月的相关和响应函数分析可以看到,重度退化林的 PDSI 指数均为负相关。中度退化林的 PDSI 指数大多数表现为负相关,在当年 5 月表现为正相关;在上一年 9—10 月和当年的 3 月为显著负相关。轻度退化林 PDSI 指数多表现为正相关,在当年 3 月和 8 月表现为负相关。无退化林 PDSI 指数均表现为正相关,在当年 3—11 月呈现显著正相关。良好林 PDSI 指数在上一年 9—10 月和当年的 2 月表现为负

相关,在其他月份表现为正相关,且在5—6月呈现显著正相关。中度退化林的SPEI指数均表现为负相关,除当年9月外均呈显著负相关。无退化林的SPEI指数在当年的5—11月相关性显著。重度退化林的PET指数在上一年的11月表现为显著正相关,在当年的5月和9月表现为显著负相关。中度退化林的PET指数在上一年的9月、12月和当年的1月,4月,9—10月为显著正相关。轻度退化林的PET指数在当年的3月,6月,10—11月表现为显著正相关。无退化林PET

在3—9月表现为显著的负相关。良好林的PET指数无显著相关关系。重度退化林的降水与树轮的相关性在上一年的11月表现为显著负相关。中度退化林的降水在当年的5月表现为显著正相关,在当年的3月表现为显著负相关。轻度退化林的降水在上一年的9月、当年的4月、9月表现为显著正相关。无退化林的降水在当年3—5月、7月表现为显著正相关。良好林的降水在上一年的12月、当年的8月表现为显著负相关;在当年的5月表现为显著正相关(图7)。

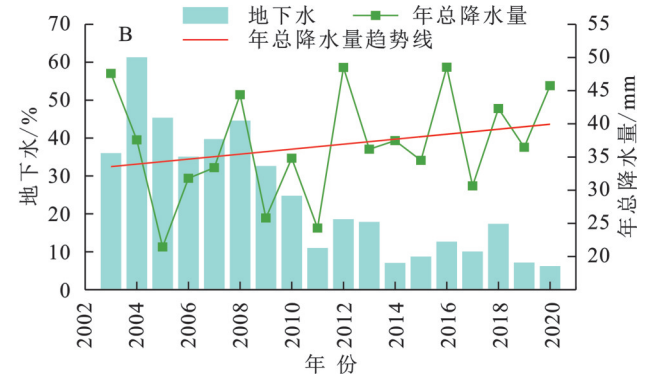
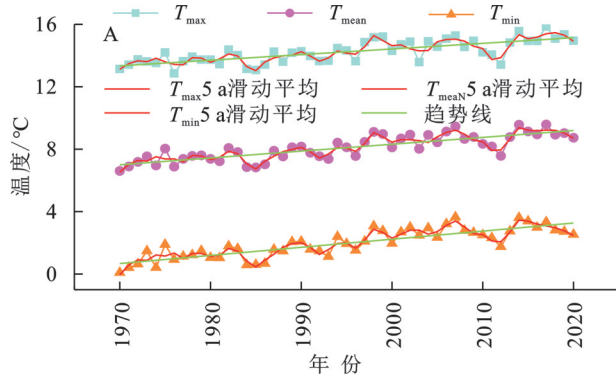


图4 研究区CRU格平均温度及地下水含量与年总降水量对比

Fig. 4 Comparison of average temperature and groundwater content of CRU grid points with total annual precipitation in the study area

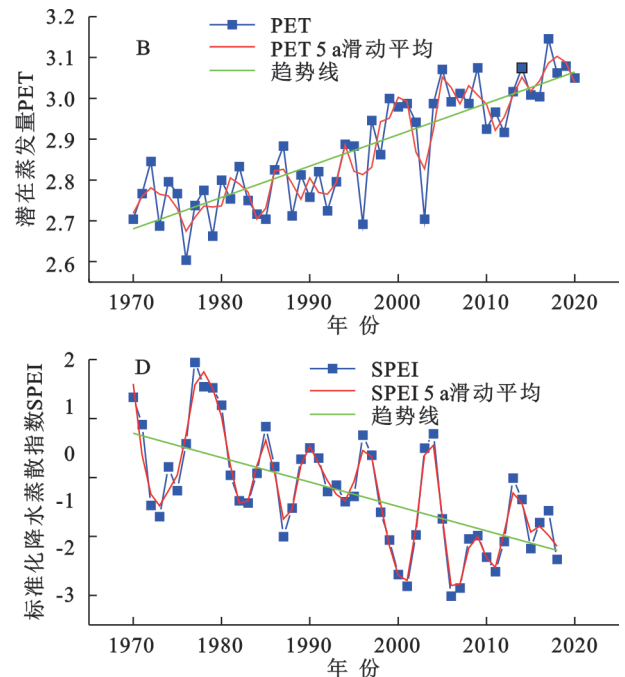
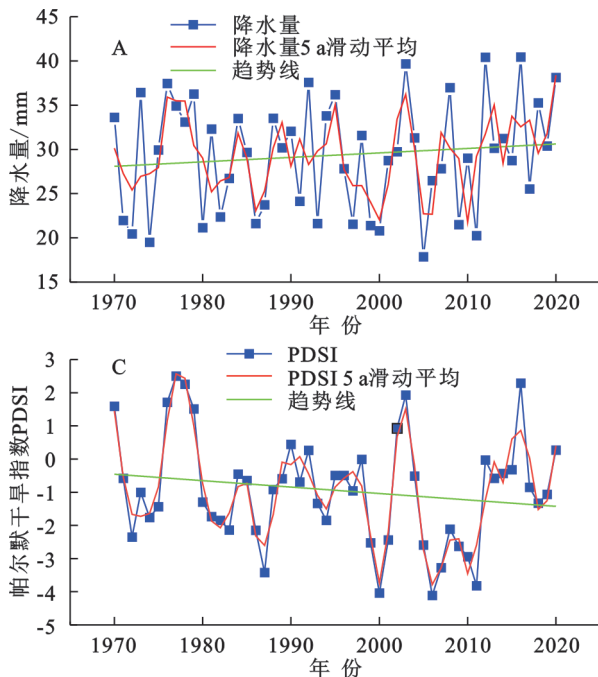


图5 研究区CRU格点1970—2020年逐年平均降水、逐年平均PET、逐年平均PDSI和逐年平均SPEI

Fig. 5 Annual average precipitation, PET, PDSI, and SPEI of CRU grid points in the study area (1970—2020)

重度退化林的年平均最高温度在当年5月表现为显著负相关。中度退化林的年平均最高温度在当年4月、9—11月表现为显著正相关。轻度退化林的年平均最高温度在当年的2—3月、6月、10—11月表现为显著正相关。无退化林在上一年的9月、当年的5—8月表现为显著负相关;在当年的10月表现为显著正相

关。良好林的年平均最高温度无显著相关性(图8A)。重度退化林的年平均最低温度在当年7月表现为显著负相关。中度退化林的年平均最低温度在当年的2月、4月、9—10月表现为显著正相关。轻度退化林的年平均最低温度在上一年的9月、当年的2—7月、9—11月表现为显著正相关。无退化林的年平均最低温度在

上一年的9月、12月和当年的5—8月表现为显著负相关。良好林的年平均最低温度无显著相关性(图8B)。

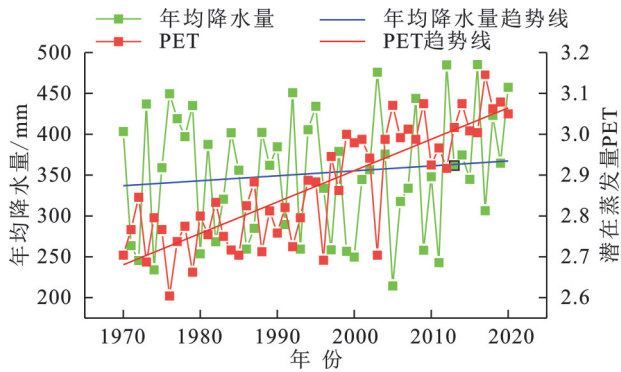
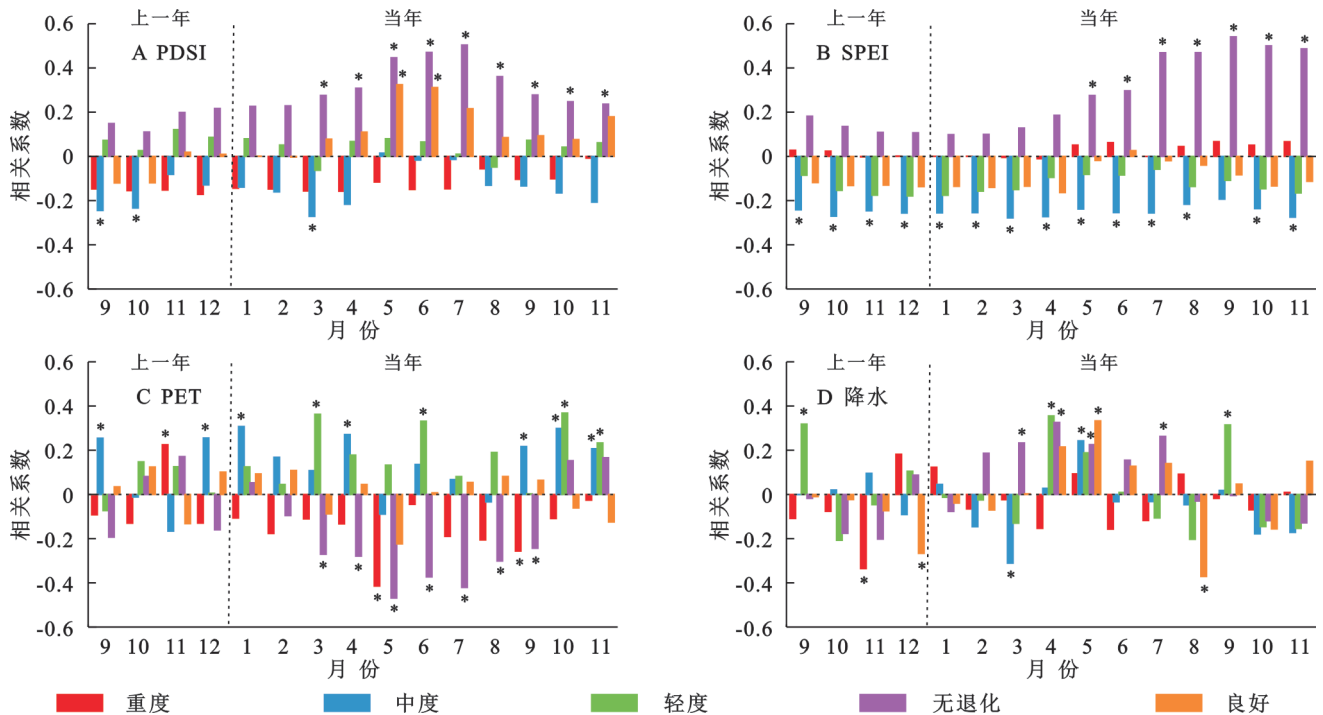


图6 研究区年均降水量年变化与PET年变化对比
Fig. 6 Comparison of annual average precipitation and PET variations in the study area

重度退化林的年平均温度在当年5月表现为显著负相关。中度退化林的年平均温度在当年的2月、4月、9—11月表现为显著正相关。轻度退化林的年平均温度在当年的2—4月、6月和9—11月表现为显著正相关。无退化林的年平均温度在上一年9月、

12月和当年的5—8月表现为显著负相关。良好林的年平均温度无显著相关性(图8C)。

2.3.2 库布齐小叶杨树轮与气候的季节相关和响应分析 除了单月的相关性分析外,还进行了季节组合的相关性分析。重度退化林和轻度退化林的PDSI多呈负相关且无显著相关性。轻度退化林的PDSI除夏季呈负相关外,其他季节均呈正相关。无退化林和良好林的PDSI多呈正相关;无退化林的PDSI在春、夏两季和生长季相关性显著。中度退化林的SPEI均呈显著负相关。无退化林的SPEI在夏、秋两季和生长季显著正相关。重度退化林的PET在春季和生长季显著负相关。中度退化林的PET在秋冬两季显著正相关。轻度退化林的PET与除冬季外的其他季节显著正相关。无退化林的PET在春夏两季和生长季呈显著负相关。良好林的PET无显著相关性。无退化林的降水在春季和生长季呈显著正相关。良好林的降水在春季表现为显著正相关,在冬季表现为显著负相关(图9)。



注:*为在95%置信区间内显著。下同。

图7 小叶杨树轮与PDSI, SPEI, PET和降水的单月相关性分析

Fig. 7 Monthly correlation analysis of *Populus simonii* tree ring with PDSI, SPEI, PET and precipitation

重度退化林的年平均最高温度在春季和冬季显著负相关。中度退化林的年平均最高温度在秋、冬两季显著正相关。轻度退化林的年平均最高温度在春、秋两季显著正相关。无退化林的年平均最高温度在春、夏两季和生长季呈显著负相关。重度退化林的年平均最低温度在冬季显著负相关。中度退化林的年平均最低温度在秋、冬两季显著正相关。轻

度退化林的年平均最低温度均呈显著正相关。无退化林的年平均最低温度在夏季和生长季呈显著负相关。重度退化林的年平均温度在春冬两季显著负相关。中度退化林的年平均温度在秋、冬两季显著正相关。轻度退化林的年平均温度均呈显著正相关。无退化林的年平均温度在春夏两季和生长季呈显著负相关(图10)。

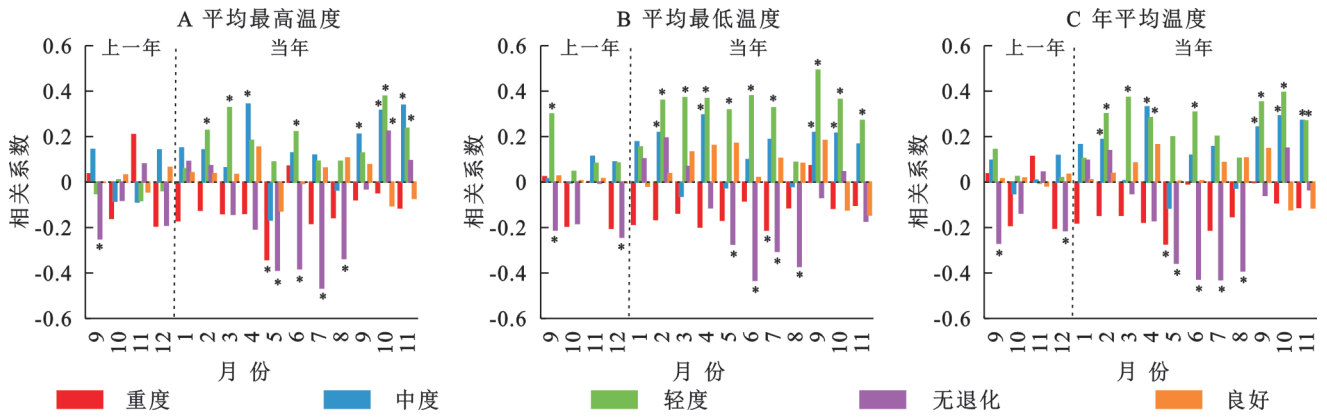


图 8 小叶杨树轮与温度的单月相关性分析

Fig. 8 Monthly correlation analysis between *Populus simonii* tree ring and temperature

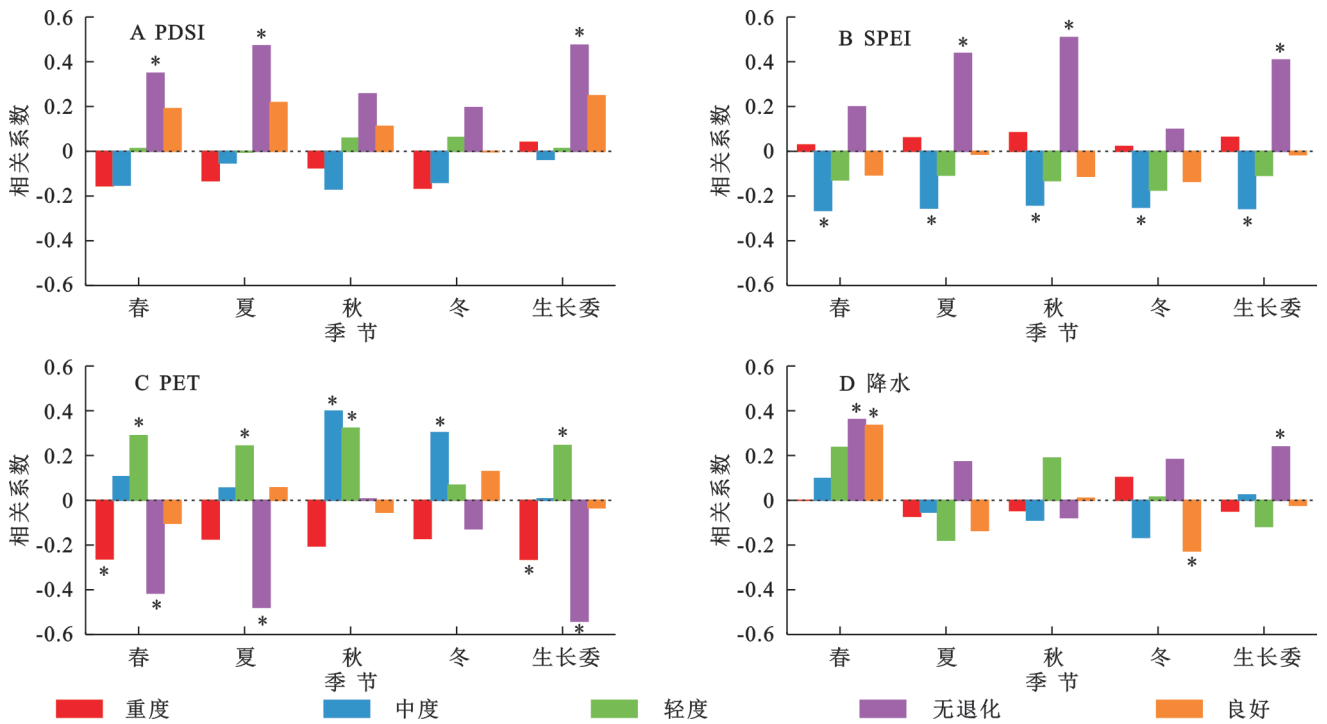


图 9 小叶杨树轮与 PDSI, SPEI, PET 和降水的相关系数在不同季节组合

Fig. 9 Correlation coefficients of *Populus simonii* tree ring with PDSI, SPEI, PET and precipitation under different seasonal combinations

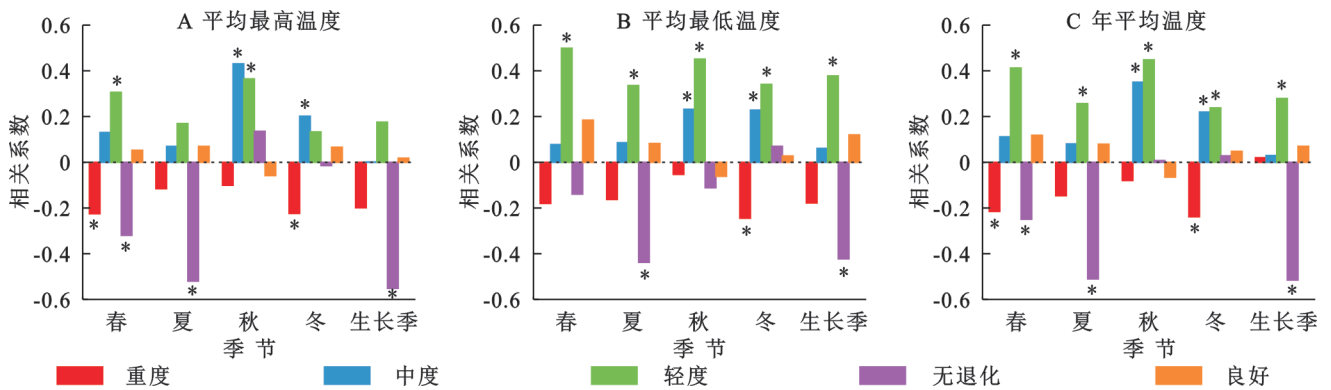


图 10 小叶杨树轮与温度的相关系数在不同季节组合

Fig. 10 Correlation coefficients between *Populus simonii* tree ring and temperature under different seasonal combinations

综上,从小叶杨树木年轮与各个气候因子的相关性可以看出重度退化和无退化的小叶杨防护林受

高温干旱的双重胁迫,中度退化和轻度退化的小叶杨防护林的生长主要控制因素为干旱而良好林的防

护林为健康林,立地条件良好。PDSI对于库布齐小叶杨生态防护林比较有指示意义,小叶杨重度和中度退化林PDSI的响应为负相关,轻度退化林对应的PDSI响应多为正相关,但相关性不强,在无退化林和良好林表现为正相关,且在5月、6月为显著正相关。

3 讨论

3.1 地下水对小叶杨径向生长的影响

研究结果发现库布齐的地下水从2004年开始呈下降趋势,且从2008年开始急剧下降。这与我们野外调查的结果相符合。该地区气候干旱,降雨无法形成有效径流,地下水难得到补充,但植物生长又与地下水位关系密切^[18]。

小叶杨防护林的退化可能与地下水水位下降有一定关系。小叶杨在干旱季节多利用深层土壤水,在降雨量较大的季节多利用浅层土壤水,而地下水的埋深和深层土壤水有很大关系^[19]。库布齐气候干旱,降雨少,蒸发量大,使得浅层土壤水难以得到补充,小叶杨的生长则更加依赖深层土壤水和地下水。随着鄂尔多斯市区域经济的快速发展,用水量也快速增长^[20],可能会造成地下水水位的下降。而退化程度的加重,使得小叶杨的水分利用从深层转到表层^[21],但表层土壤水分缺乏,因此小叶杨生长受到限制。此外,温度升高使得小叶杨木质部导管直径增大,输水效率提高^[22],因而需水量变大,而地下水的减少使得小叶杨的水分吸收出现问题,进而树木生长受到限制。也有文献表明地下水埋深的增加,可能会导致小叶杨受到干旱的胁迫,使得小叶杨的长势受到影响^[23]。从年表序列也可以看出2000年后不同退化程度的小叶杨均出现了衰退,在气候干旱的条件下,地下水的下降可能加剧了小叶杨的退化。

3.2 温度、降水对小叶杨径向生长的影响

本研究表明,重度退化和无退化的小叶杨防护林受高温干旱的双重胁迫;中度退化和轻度退化小叶杨防护林的生长主要受干旱制约。通过对树木年轮宽度指数的分析发现,大致在1988—1998年、1997—2010年出现小叶杨径向生长的变化节点,气候要素也在这些时段前后出现相对干旱或湿润的时段,这在一定程度上影响了小叶杨的径向生长。

以往对中国北方环境敏感区进行的研究表明,树木的生长主要由有效降水决定,温度则通过影响土壤中的水分含量来影响树木的生长^[24]。从季节上看,库布齐小叶杨对气候的响应多在春冬两季表现显著,这表明春冬两季的气温限制了小叶杨的生长,

春季的气温升高会加剧土壤缺水,同时限制树木的新陈代谢^[25]。随着气温的升高和降水的减少,降水对树木生长的重要性将增加,树木生长对环境变化的反应也将增加^[26]。小叶杨的叶水势及根和叶中的相对含水量会随着干旱胁迫的加重而降低,高温则会进一步加剧水分的降低,使植物承受更为严峻的干旱胁迫^[27]。而在气温发生突变的情况下,结构单一的华北落叶松人工林生长会由于水分胁迫的影响而衰退^[28],而库布齐沙漠小叶杨防护林林分结构单一,这也可能造成防护林的衰退。

重度退化的小叶杨在经历累计高温干旱事件后生长变得缓慢,抗旱能力变差;中度退化林和轻度退化林在经历第二次干旱事件后,恢复能力较第一次干旱事件后有所下降;无退化林和良好林在经历干旱事件后还能有较好的恢复能力。不同退化程度小叶杨在经历高温干旱事件后都出现了不同程度的生长下降,这与健康树较衰退树对气候胁迫的敏感性更低,同时小叶杨对累计干旱的适应能力较弱^[29]有关。年龄会影响树木生长对气候变化响应的敏感性^[30],不同退化程度的小叶杨对气候的响应不同可能是树龄的原因。

4 结论

地下水自2000年后快速下降,库布齐沙漠区域出现不同退化程度的小叶杨,小叶杨在高温干旱的气候下更容易受到干旱胁迫,这加剧了小叶杨的退化。所有样本均为35年以上成熟林,其树木年轮宽度指数波动与近50年区域干湿变化吻合,进一步分析发现,帕尔默干旱指数(PDSI)最能表征小叶杨径向生长与气候的响应关系,表明水分胁迫是驱动小叶杨退化的核心气候因子。地下水位的持续下降加剧了干旱胁迫效应,树木或许对极端气候响应存在年龄分异:幼龄树经历极端事件后生长恢复较快,老龄树则恢复力明显减弱。

参考文献(References):

- [1] 周佰铨,翟盘茂.未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J].气象,2023,49(3):257-266.
Zhou B Q, Zhai P M. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses [J]. Meteorological Monthly, 2023,49(3):257-266.
- [2] 张韬略,姜亮亮,刘冰,等.中国植被对气候变化的敏感性定量分析[J].生态学报,2025,45(5):2412-2423.
Zhang T L, Jiang L L, Liu B, et al. Quantitative analysis of vegetation sensitivity to climate change in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(5):2412-2423.
- [3] 纪平,邵全琴,王敏,等.中国三北防护林工程第二阶段

- 生态效益综合评价[J]. 林业科学, 2022, 58(11):31-48.
- Ji P, Shao Q Q, Wang M, et al. Monitoring and assessment of ecological benefits of the shelter forest program in the three-north region during 2001—2020[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, 58(11):31-48.
- [4] 包文凭, 王海兵, 乔永刚, 等. 库布齐沙漠杨树锁边林退化表现特征及其成因[J]. 绿色科技, 2023, 25(8):17-22, 27.
- Bao W P, Wang H B, Qiao Y G, et al. Degradation characteristics and causes of *Populus L.* Forest in kubuqi desert [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2023, 25(8):17-22, 27.
- [5] 沈晗悦. 河北坝上杨树防护林土壤水分动态及其影响因素研究[D]. 北京:北京林业大学, 2021.
- Shen H Y. Study on soil moisture dynamics and its influencing factors of poplar shelterbelts in Bashang area, Heibei Province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [6] 孙守家, 李春友, 何春霞, 等. 基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7):2119-2127.
- Sun S J, Li C Y, He C X, et al. Retrospective analysis of the poplar plantation degradation based on stable carbon isotope of tree rings in Zhangbei County, Hebei, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7):2119-2127.
- [7] 张钰嫣. 甘肃三北防护林退化林分现状浅析及对策建议[J]. 甘肃林业, 2020(6):29-30.
- Zhang Y Y. Analysis on the present situation and countermeasures of degraded stand of three-north shelterbelt in Gansu Province[J]. *Forestry of Gansu*, 2020(6):29-30.
- [8] 孙立博. 坝上地区小叶杨人工林退化机制研究[D]. 北京:北京林业大学, 2021.
- Sun L B. Study on degradation mechanism of *Populus simonii* plantation in Bashang area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.
- [9] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review[J]. *Global and Planetary Change*, 2004, 40(1/2):11-26.
- [10] 黄力平, 胡东宇, 刘可祥, 等. 基于不同树干高度树轮宽度的历史气候重建潜力研究[J]. 地球环境学报, 2023, 14(3):352-360, 376.
- Huang L P, Hu D Y, Liu K X, et al. Based on tree-ring width historical climate reconstruction potential research from different stem height[J]. *Journal of Earth Environment*, 2023, 14(3):352-360, 376.
- [11] 于健, 陈佳佳, 孟盛旺, 等. 基于树木年轮重建大兴安岭北部过去 242 年 4-7 月降水量变化[J]. 第四纪研究, 2024, 44(4):895-907.
- Yu J, Chen J J, Meng S W, et al. April to July precipitation reconstruction based on tree-ring width for the past 242 years in the northern greater khingan mountains, Northeast China[J]. *Quaternary Sciences*, 2024, 44(4):895-907.
- [12] 薛泽, 李雪冬, 费龙, 等. 干旱对中国东北黑土区不同植被总初级生产力的时滞与累积效应[J]. 地理科学, 2024, 44(11):2060-2071.
- Xue Z, Li X D, Fei L, et al. Time lag and cumulative effects of drought on the gross primary productivity of different vegetation types in the black soil region of Northeast China [J]. *Geographic Sciences*, 2024, 44(11):2060-2071.
- [13] 钟敏, 段建宾, 许厚泽, 等. 利用卫星重力观测研究近 5 年中国陆地水量中空间尺度的变化趋势[J]. 科学通报, 2009, 54(9):1290-1294.
- Zhong M, Duan J B, Xu H Z, et al. Using satellite gravity observation to study the variation trend of land water volume in China in the middle and long spatial scales in recent five years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(9):1290-1294.
- [14] Stokes M A, Smiley T L. An Introduction to Tree-Ring Dating [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.
- [15] Rinn F. TSAP-Win: time series analysis and presentation for dendrochronology and related applications. Version 0.55 User reference. Heidelberg, Germany, 2003.
- [16] Cook E R. A time-series analysis approach to tree-ring standardization [D]. The University of Arizona Press, Tucson, 1985.
- [17] Osborn T J, Briffa K R, Jones P D. Adjusting variance for sample-size in tree-ring chronologies and other regional mean time series [J]. *Dendrochronologia*, 1997, 15, 89-99.
- [18] 张丽, 董增川, 黄晓玲. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(1):110-113.
- Zhang L, Dong Z C, Huang X L. Modeling on relation between major plants growth and groundwater depth in arid area[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1):110-113.
- [19] 苏文旭, 贾德彬, 冯蕴, 等. 浑善达克沙地杨树水分利用特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2):357-363.
- Su W X, Jia D B, Feng (W/Y), et al. Analysis of water use characteristics of poplar trees in Otindag Sandy Land [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(2):357-363.
- [20] 贺丽媛, 苏柳, 贾冬梅, 等. 鄂尔多斯市水资源需求预测

- 研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(9):59-61.
- He L Y, Su L, Jia D M, et al. Water demand prediction in Ordos City [J]. Yellow River, 2014, 36(9): 59-61.
- [21] 张欢, 曹俊, 王化冰, 等. 张北地区退化杨树防护林的水分利用特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5):1381-1388.
- Zhang H, Cao J, Wang H B, et al. Water utilization characteristics of the degraded poplar shelterbelts in Zhangbei, Hebei, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5):1381-1388.
- [22] 任洁. 杨树叶片和树皮绿色组织光合生理及形态结构对干旱和温度升高的响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- Ren J. Responses of photosynthetic physiological characteristics and anatomic structure of poplar leaves and bark chlorenchyma to drought-recovery and elevated temperature [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [23] 何亮, 韩风, 郭帅, 等. 塔里木河下游地下水及土壤对胡杨林长势的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(11):33-39.
- He L, Han F, Guo S, et al. Effects of groundwater and soil on the growth of *Populus euphratica* forest in lower reaches of Tarim River [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(11):33-39.
- [24] Bao G, Liu Y, Linderholm H W. April-September mean maximum temperature inferred from Hailar pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) tree rings in the Hulunbuir region, Inner Mongolia, back to 1868 AD [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2012, 313/314:162-172.
- [25] Cai Q F, Liu Y. January to August temperature variability since 1776 inferred from tree-ring width of *Pinus tabulaeformis* in Helan Mountain [J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3):293-303.
- [26] Sang W G, Wang Y X, Su H X, et al. Response of tree-ring width to rainfall gradient along the Tianshan Mountains of northwestern China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(21):2954-2962.
- [27] 贾静波. 杨树对高温与干旱胁迫的生理与转录响应机制研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Jia J B. A study on physiological and transcriptional mechanisms of poplars in responses to heat and drought [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2016.
- [28] 贾存, 郭明明, 王倩, 等. 华北落叶松人工林和天然林径向生长对气候变化的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1):120-128.
- Jia C, Guo M M, Wang Q, et al. Response of the radial growth of *Larix principis-rupprechtii* plantations and natural forests to climate change [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(1):120-128.
- [29] 袁超峰, 王文志, 吴喆虹, 等. 健康与衰退樟子松和杨树径向生长响应气候及其生态弹性差异[J]. 应用生态学报, 2025, 36(2):411-417.
- Yuan C F, Wang W Z, Wu Z H, et al. Differences in radial growth responses to climate and ecological resilience between healthy and declining *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Populus L* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(2):411-417.
- [30] 管增艳, 石松林, 金亚宁, 等. 四川峨眉山不同年龄冷杉径向生长对气候变化的响应差异[J]. 山地学报, 2023, 41(1):56-67.
- Guan Z Y, Shi S L, Jin Y N, et al. Response of radial growth of *Abies fabri* at different ages to climate change in mount Emei, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(1):56-67.