

许方岳,陈帅威,王立夫,等.干旱对庐山日本柳杉径向生长量的影响[J].江西农业大学学报,2020,42(4): 811-820.



干旱对庐山日本柳杉径向生长量的影响

许方岳^{1,2},陈帅威³,王立夫^{1,2},叶清^{1,2*},
幸娇萍^{1,2},彭琳玉^{1,2},张艳玲¹,白天军^{1,2}

(1.江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045;2.江西农业大学 鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业局重点实验室,江西 南昌 330045;3.福建农林大学 林学院,福建 福州 350002)

摘要:【目的】研究选用 SPEI(标准化降水蒸散指数)分析庐山自然保护区干旱状况,及其对日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)径向生长的影响,为庐山日本柳杉的生长和林分经营等提供一些理论依据。【方法】通过建立 STD(树轮年表)的树轮宽度指数来反映庐山日本柳杉的径向生长量情况,计算分析 SPEI 来反映庐山自然保护区近几十年来的干旱变化情况。采用 Mann-Kendall 突变检验、相关性检验分析、小波分析、多元回归等方法探讨研究庐山日本柳杉径向生长量以及干旱变化。【结果】研究发现:(1)在 1967—1970 年、1977—1981 年、2004—2012 年庐山日本柳杉生长情况低于预期标准;(2)标准化降水蒸散指数随时间尺度的增大,波动周期越来越长,相对而言,SPEI12 更为集中、波动较小,能够更好更准确的反映干旱年变化特征。SPEI12 反映出庐山 1967—1970 年达到重旱程度,1978—1980 年特旱,2002—2003 年中旱,2005—2013 年中旱至重旱;(3)树轮宽度指数与月尺度、半年尺度标准化降水蒸散指数呈显著正相关,与年尺度标准化降水蒸散指数呈极显著正相关关系。同时树轮宽度指数与上年 8 月至当年 6 月年尺度标准化降水蒸散指数呈显著正相关,其中与当年 5 月呈极显著正相关。【结论】日本柳杉生长量的周期变化与干旱周期变化接近,日本柳杉生长量变化相对干旱的变化会持续一到两年左右。

关键词:庐山;日本柳杉;径向生长量;干旱;标准化降水蒸散指数

中图分类号:S791.31;S718.5 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2020)04-0811-10

Effects of Drought on Radial Growth of *Cryptomeria japonica*

XU Fang-yue^{1,2}, CHEN Shuai-wei³, WANG Li-fu^{1,2}, YE Qing^{1,2*}, XING Jiao-ping^{1,2},
PENG Lin-yu^{1,2}, ZHANG Yan-ling¹, BAI Tian-jun^{1,2}

(1.College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Key Laboratory of State Forestry Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 3.School of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] In this study, SPEI(The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) was used to analyze the drought status of the Lushan Nature Reserve and its influence on the radial growth of *Cryptomeria japonica*, and provide some theoretical basis for the growth and forest management of the *Cryptomeria ja-*

收稿日期:2020-01-10 修回日期:2020-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31730014)

Project supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China(31730014)

作者简介:许方岳,orcid.org/0000-0001-8941-1989,fangyuexu@foxmail.com;*通信作者:叶清,副教授,博士,主要从事气候资源利用与农业减灾研究,orcid.org/0000-0003-0373-7502,yeqing@jxau.edu.cn。

ponica.**[Method]** The tree-ring width index of the standardized chronology (STD) was established to reflect the radial growth of the *Cryptomoria japonica*, the calculation and analysis of SPEI were conducted to reflect the drought changes in the Lushan Nature Reserve in recent decades. Mann-Kendall mutation test, correlation test analysis, wavelet analysis, multiple regression and other methods were used to investigate the radial growth of *Cryptomoria japonica* changes in drought. **[Result]** The results showed that: (1) the growth of *Cryptomoria japonica* in Lushan was lower than expected in 1967—1970, 1977—1981 and 2004—2012; (2) the standardized precipitation evapotranspiration index increased with time scale, and the fluctuation period was relatively long. Relatively speaking, SPEI12 is more concentrated and less volatile, and can better reflect the characteristics of drought years. SPEI12 reflects the degrees of drought in Lushan from 1967 to 1970, the extreme drought in 1978—1980, the drought in 2002—2003, and the drought to heavy drought in 2005—2013; (3) tree-ring width index showed a significant positive correlation with monthly scale and semi-annualized scale of SPEI, and it was significantly positively correlated with the annualized scale of SPEI. At the same time, the tree-ring width index was significantly correlated with the annual SPEI from August of last year to June, which was significantly correlated with the positive electrode in May of that year. **[Conclusion]** The periodic change of growth of *Cryptomoria japonica* is close to that of drought, and the changes in *Cryptomoria japonica* growth relative to the drought will last about one to two years.

Keywords: Lushan; *Cryptomoria japonica*; radial growth; drought; SPEI

【研究意义】气候变化已是广受学者们关注的环境问题,气候变化背景下干旱事件将呈增加趋势,干旱事件经常性发生且一次干旱发生时间过长,会使社会经济遭受极大的损失^[1]。中国地貌地势较为复杂,气候多变,自古以来灾害频发,其中干旱常年发生,给社会经济造成不小的损失,据统计资料表明,干旱发生带来的损失约占15%以上,且发生次数最多,约占总气象灾害发生次数的33%^[2]。**【前人研究进展】**庐山地处长江中下游以南的江西省北部,是干旱受灾情况较为严重的地区之一。依据《中国气象灾害大典—江西卷》记录,庐山历史上的干旱灾害较多,春、夏、秋、冬都可能出现干旱。1952年,九江夏旱,干塘2 706口;1955年,庐山9月中旬至12月中旬大旱,山上吃水困难;1963年,庐山春旱,山上饮水困难;1973年,庐山秋旱连冬旱,山下耕作困难,山上供水困难;1978年,庐山夏、秋连旱,山上供水困难;1997年,庐山春旱,山上供水困难……近些年,干旱依然对庐山自然环境、旅游经济及人民生活有一定影响,庐山珍贵的森林资源与干旱之间关系的研究也变得更为重要。国内外的研究人员对针叶树树轮与气象因子间的关系进行了大量的研究。在对挪威云杉(*Picea asperata* Mast.)的树轮宽度和气候因素等方面进行研究,发现树轮宽度与当年7月中旬到8月的平均气温为正相关^[3]。中国天山气候因子对西伯利亚落叶松(*Larix sibirica* Ledeb)径向生长的影响,通过线性回归模拟基底面积增量的趋势,表明西伯利亚落叶松的生长速率先增加后减小,且对干旱和半干旱地区的森林区域产生更大的影响^[4]。在大兴安岭的漠河地区研究结果显示,落叶松的树轮宽度随树木生长期前的气温波动而波动,且十分敏感^[5]。在库都尔地区研究兴安落叶松发现:在5月份和7月份当地的气温与兴安落叶松树轮宽度的变化表现为极显著负相关关系,树轮宽度变化与6~8月份PDSI(帕默尔干旱指数)呈显著相关关系,表明区域降水和温度对兴安落叶松的生长共同发挥作用^[6]。通过不同时间尺度的标准化降水蒸散指数(SPEI)与植被状况关系的研究,发现人工林和天然林二者受持续干旱影响程度较短期干旱影响程度深^[7]。**【本研究切入点】**本文将研究庐山日本柳杉近几十年来径向生长量变化,结合庐山历史观察气象数据探讨庐山日本柳杉径向生长量与干旱之间的关系。**【拟解决的关键问题】**研究日本柳杉径向生长量及干旱指数的趋势变化、周期变化,分析日本柳杉径向生长量对近几十年干旱变化的响应,为了解庐山日本柳杉在干旱灾害背景下的生长情况提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庐山自然保护区地处江西省九江市(115°51'~116°07'E, 29°30'~29°41'E),海拔25.0~1 473.8 m,根据

多年庐山气象数据记载,庐山温度适宜,全年平均温度 11.4 ℃,年降水量在 1 900 mm 左右。庐山拥有两千多种野生植物,其中大约有 40 多种植物第一次在庐山被发现或用庐山命名,其复杂的地理自然环境,使得古老的植物类型得以保存,也有利于新的植物类型引种成功^[8],这其中,日本柳杉是庐山的重要树种之一。本文选取庐山南山公路沿线 3 块样地对日本柳杉径向生长量进行研究,海拔分别为 800 m、950 m 和 1 150 m(图 1)。

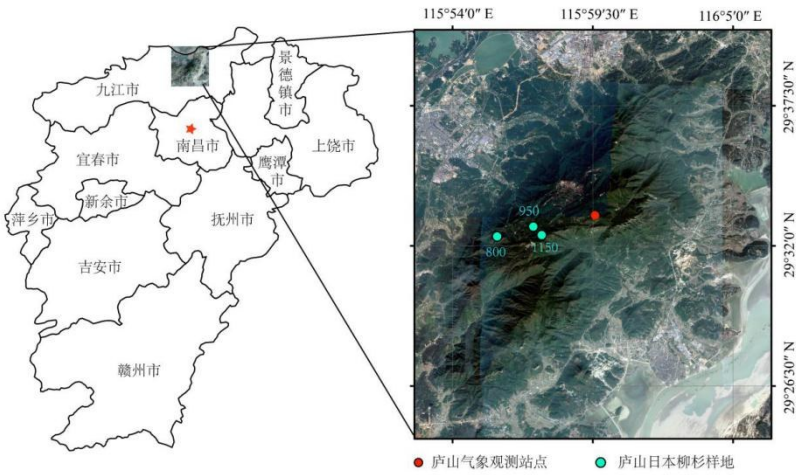


图 1 研究区域图

Fig.1 Map of study area

1.2 数据来源及处理

本文所使用气象数据均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。下载了 1955—2015 年庐山自然保护区温度、降水量等气象观测数据。利用 Excel 2016 对气象数据、日本柳杉标准年表进行整理,SPSS 进行相关性与回归分析,并通过 MATLAB 进行小波分析。径向生长量变化通过建立日本柳杉标准化年表来表达。

1.3 研究方法

1.3.1 样品采集和年表的建立 本研究于 2018 年 7 月份在庐山自然保护区南坡 3 个不同海拔高度处 A、B、C 3 个样点采样(A=800 m、B=950 m、C=1 150 m,图 1 和表 1),选取的样点为日本柳杉生态环境良好,离环山道路保持 20 m 左右的距离并受人为干扰较少的日本柳杉纯林样地,3 个取样点的基本信息如表 1 所示。

表 1 庐山 A、B、C 3 个海拔树轮采样点信息

Tab.1 Sampling point information of three altitude tree rings in Lushan A,B and C

样点 Sites	海拔/m Elevation	经度/E Longitude	纬度/N Latitude	样芯数量 Core numbers	平均胸径/cm Average DBH	平均树高/m Average height
A	800	115°55'45"	29°32'22"	20	29.2	18.6
B	950	115°57'10"	29°32'45"	20	30.5	20.0
C	1 150	115°57'30"	29°32'25"	20	30.1	19.5

在完成所有的预处理工作后,用 COFECHA 程序^[9]以及 WinDENDRO 树轮分析系统(测量精度为 0.01 mm)控制树轮宽度质量,检验交叉定年,如果输出结果中出现问题或者相关系数的年份较低,就要进行再次调整和检查,尽可能避免人为误差,要保证测量和定年的准确性。为了消除树木之间竞争的相互干扰和树木生长与自身年龄相关的生长趋势所导致的非一致性波动^[10],需要在 ARSTAN 程序^[11]中利用负指数和样条函数来进行趋势处理以及标准化的操作;通过双权重平均法对树轮曲线进行标准化处理,最终建立庐山日本柳杉标准年表(STD)。

1.3.2 潜在蒸散量 SPEI 计算 标准化降水蒸散指数(SPEI)^[12]用来反映某一区域的干旱情况,通过计算

降水量与蒸散量的差值,比较其与平均状态的离散程度。SPEI 计算公式复杂,所需参数较多,本研究采用 R 语言 SPEI 计算程序包对庐山的标准化降水蒸散指数进行计算。SPEI 具有不同时间尺度(可取 1 月、3 月、6 月、12 月等特点,文中主要分析 12 个月时间尺度下的 SPEI 指数。参考《气象干旱等级》对 SPEI 干湿等级的划分,将干旱划分为 5 个等级,见表 2。

表 2 SPEI 等级划分
Tab.2 SPEI classification

等级 Level	类型 Type	标准化降水蒸散指数 SPEI
1	无旱	$-0.5 < \text{SPEI}$
2	轻旱	$-1.0 < \text{SPEI} \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < \text{SPEI} \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < \text{SPEI} \leq -1.5$
5	特旱	$\text{SPEI} \leq -2.0$

1.3.3 小波分析 小波函数是进行小波分析的基础,其振荡特性可以将其快速衰减为 0^[13],本研究基于小波分析原理,利用 MATLAB 软件的 wavemenu 窗口进行时间序列的小波分析,并算出小波系数实部,将实部数据整理好后输入 Surface 12.0,进行小波系数等值线图制作。

1.3.4 Mann-Kendall 突变分析 由于 Mann-Kendall 突变分析方法^[14]在运用时不用考虑样本的分布形态,且检验范围较广、计算简便和定量化程度较高,所以自 1945 年 Mann-Kendall 突变检验分析提出以来,这个突变检验方法就在气象学中被广泛运用。本研究采用这个方法对庐山自然保护区日本柳杉生长量和庐山干旱进行突变分析。

2 结果与分析

2.1 庐山日本柳杉标准年表

2.1.1 标准年表建立 庐山日本柳杉标准年表的主要统计特征见表 3,其中平均敏感度反映了树轮宽度对气候变化的敏感程度,庐山日本柳杉年表中平均敏感度为 0.155,与亚热带地区华南五针松年表平均敏感度接近^[15],一阶自相关系数反映了上年气候变化对当年树木生长的影响,一阶自相关系数 0.606 比较高,表明前年的气候条件对日本柳杉生长有一定影响。同时,样本总体代表量为 0.94,均大于样本总体代表系数临界值(0.85),说明年表的样本量能够较好的代表该区域的总体特性。日本柳杉标准年表的平均敏感度、信噪比、样本代表性都较好,说明其适合进行树轮气候分析。

树轮宽度指数大于 1 说明该年树轮宽度指数大于模拟的理想树轮宽度指数,日本柳杉生长良好;小于 1 说明该年树轮宽度指数小于预期标准,日本柳杉生长情况不理想。由图 2 可以看出日本柳杉标准年表树轮宽度指数变化趋势波动明显,其中有几处生长情况低于预期标准的时间序列,如 1967—1970 年、1977—1981 年、2004—2012 年,此外,还有个别年份也出现低于标准的情况。

表 3 样本序列基本统计特征
Tab.3 Basic statistical characteristics of the sample sequence

序列长度 Sequence length	均值 Mean	标准差 SD	平均敏感度 Mean sensitivity	一阶自相关系数 First-order coefficient of autocorrelation	序列间相关系数 Serial correlation	信噪比 SNR	样本总体代表性 Overall representativeness of samples
1966—2017	1.000	0.232	0.155	0.606	0.606	20.943	0.940

2.1.2 树轮宽度指数周期分析 从图 3 中的 UF 可以看出,庐山自然保护区日本柳杉生长量呈低-高-低的趋势,1974—2009 年和 2017 年 UF 值大于 0,表明在这一时期,径向生长量呈上升趋势,其他年份 UF 值都小于 0,径向生长量呈现下降趋势,在±1.96 临界线内 UF、UB 曲线相交于 1973、2015 年,说明年生长量突变年份可能为 1973、2015 年。

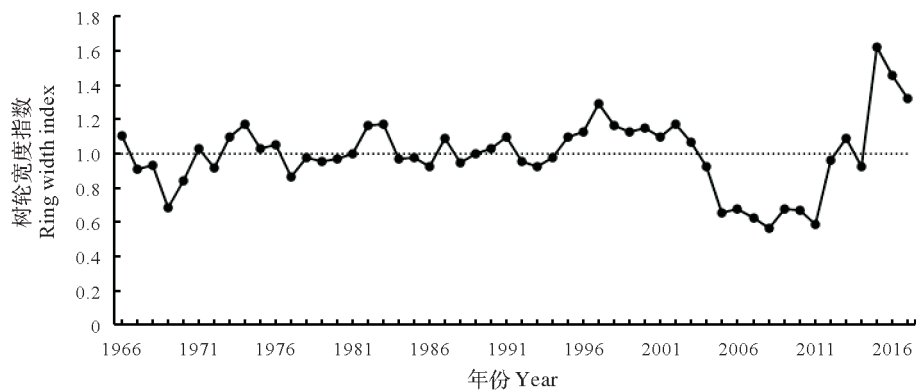


图2 庐山日本柳杉标准年表

Fig.2 The standardized chronology of Lushan *Cryptomeria japonica*

通过 Matlab 计算树轮宽度指数小波系数实部,再用 Surface 制作等值线图,等值线图可以准确反映日本柳杉生长量在不同时间尺度的周期变化情况,还可以反应它在时间域中的分布状况,进而能判断在不同的时间尺度上,庐山日本柳杉生长量变化趋势。从图 4 可以看出,在庐山日本柳杉生长量演变过程中存在着多个尺度的周期变化规律,在 26~32 年的尺度上,出现了高低起伏的震荡。

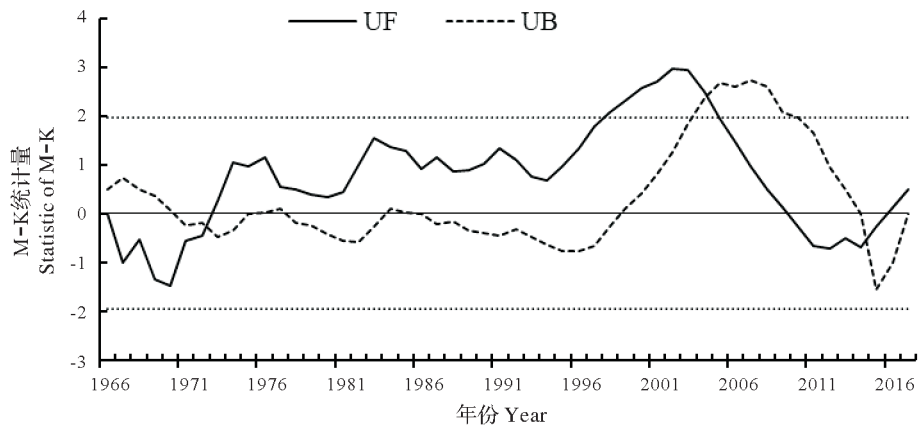


图3 日本柳杉生长量 M-K 突变检验曲线

Fig.3 M-K mutation test curve of *Cryptomeria japonica* growth

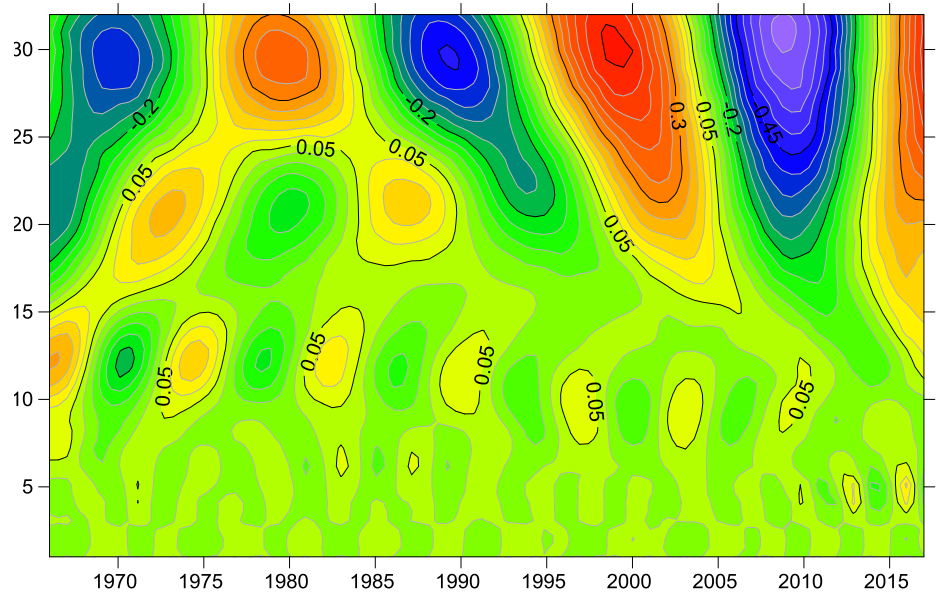


图4 小波系数实部等值线图

Fig.4 The contour of the real part of the wavelet coefficient

2.2 庐山标准化降水蒸散指数(SPEI)分析

2.2.1 标准化降水蒸散指数(SPEI)统计与分析 根据中国气象数据网提供的庐山自然保护区气象资料,包括1955—2015年共61年每月的平均气温、降水等,根据不同尺度(月、季、半年和年尺度)计算SPEI(用SPEI1、SPEI3、SPEI6、SPEI12表示,图5),分析庐山近61年来的干旱变化特征。分析的时间尺度越短,SPEI对降水的响应也越快,其值在围绕0值变化的频次也越快;随着时间尺度的增长,SPEI正负变化的周期数减少。从图5可以看出,SPEI1沿着0值上下剧烈波动,未呈现出明显的干湿交替现象;而随着时间尺度的增加,SPEI3、SPEI6波动周期增长,能够反映干湿季节变化规律;SPEI12相对集中、稳定,更能反映干旱年变化特征。SPEI连续为负值并且能够达到-1.0时(中旱及以上)表示干旱事件的开始,SPEI变为正值时表示干旱时间的结束,开始到结束的时间跨度即为干旱事件的持续时间。

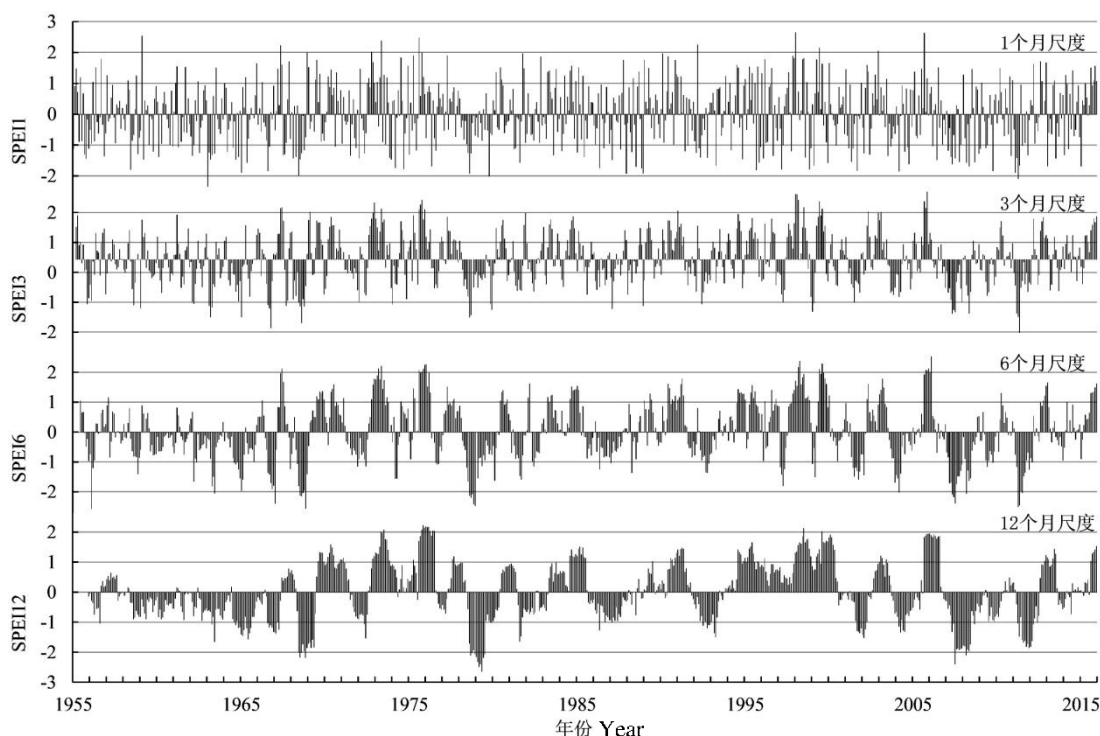


图5 庐山SPEI年际变化

Fig.5 Inter-annual variation of SPEI in Lushan

结果表明,近61年(1955—2015年),庐山自然保护区月尺度中旱及以上干旱事件共有97个,平均持续时间为2个月,其中重旱和特旱事件共计33个;季尺度中旱及以上干旱事件共有47个,平均持续时间为4个月,其中重旱及特旱事件共计23个;半年尺度中旱及以上干旱事件共有23个,平均持续时间为9个月,其中重旱和特旱事件共计14个;年尺度中旱及以上干旱事件共有14个,平均持续时间为14个月,其中重旱及特旱事件共计9个。

2.2.2 标准化降水蒸散指数(SPEI)周期分析 为了明确庐山干旱的年变化特征,本文对SPEI12进行了M-K突变分析和小波周期分析。从图6的M-K突变分析可以看出,1970—1886年、1990—1992年、1994—2010年UF值大于0,表明在这一时期,庐山自然保护区趋于湿润,其他年份UF值都小于0,都呈现趋于干旱的趋势,在上下2条 ± 1.96 ($\alpha=0.05$)的置信区间内1966—2015年庐山自然保护区SPEI的UF与UB两条曲线在1968和2004年出现交叉点,但只有1968年的交点在置信区间内,这说明1968年为干旱和湿润的突变年。1968—2004年庐山自然保护区有湿润的趋势,而2004年以后突变为干旱气候。

图7为标准化降水蒸散指数SPEI的小波时间序列等值线图,从图7可以看出,在干旱演变过程中存在着3~8 a、9~14 a、15~25 a、26~32 a的4类尺度的周期变化规律,其中30年左右为SPEI大周期。

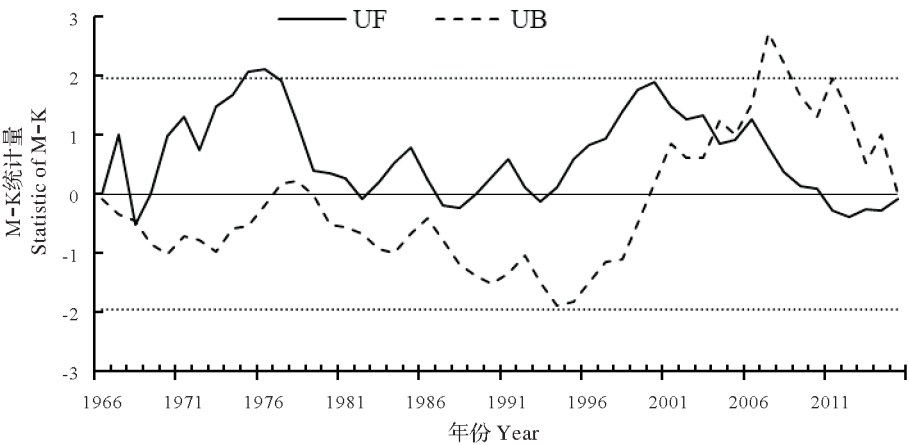


图6 年尺度标准化降水蒸散指数(SPEI12)M-K突变检验曲线

Fig.6 Annual scale standardized precipitation evapotranspiration index(SPEI12)M-K mutation test curve

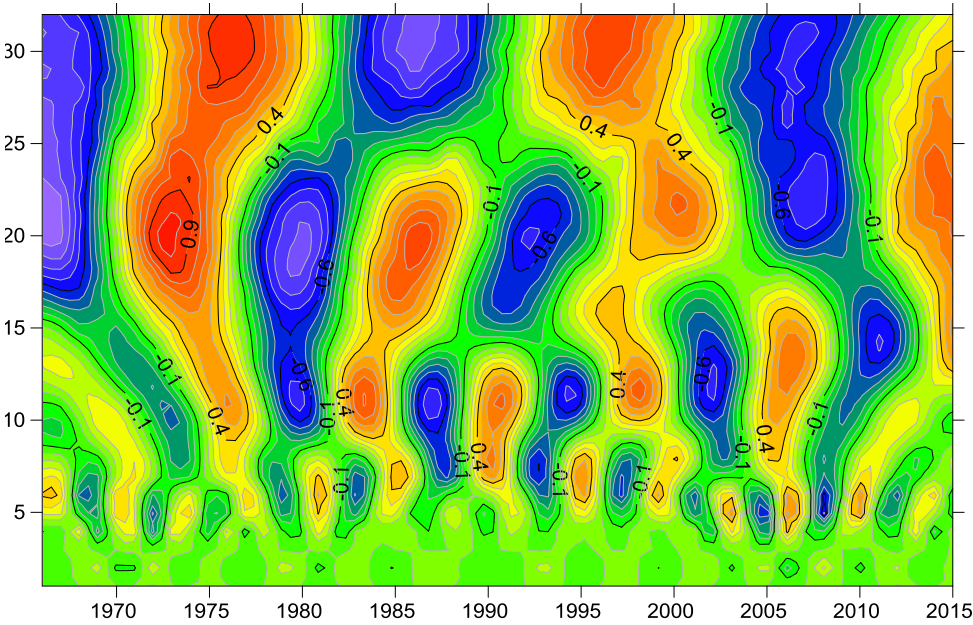


图7 小波系数实部等值线图(SPEI12)

Fig.7 Real-line contour plot of wavelet coefficients(SPEI12)

2.3 庐山日本柳杉树轮宽度指数与SPEI相关分析

2.3.1 树轮宽度指数与SPEI相关性分析 相关性研究的时间序列选取两者的共同包含年份,即1966—2015年。SPEI月尺度数据对气候因素较为敏感,长时间尺度干湿变化波动周期长,且更加稳定,能够更好地反映干旱的年际变化特点^[6]。因为树轮宽度指数反映了年尺度上的变化特征,在与SPEI不同尺度的相关分析中,其与SPEI12相关性最强(SPEI1:0.318*;SPEI3:0.276;SPEI6:0.302*;SPEI12:0.389**),所以本文采用SPEI12(下文所提SPEI均为SPEI12)与日本柳杉树轮宽度指数进行进一步的相关分析。

图8可以看出树轮宽度指数与前年8月至当年6月的SPEI都有相关性,且与当年5月的SPEI相关性最强。说明当年的树木生长受到了前一年秋冬季与当年春夏季水分亏盈的影响,特别是当年5月的水分。

2.3.2 树轮宽度指数与SPEI周期分析 小波方差图能反映庐山日本柳杉生长量和干旱时间序列的波动能量中存在的主周期。在研究庐山日本柳杉生长量的小波方差图中(图9)有一个相对明显的峰值,就是30年的时间尺度,说明30年左右的周期震荡最强,为生长量变化的主周期。庐山干旱指数SPEI12的小波方差图中(图9)存在4个明显的峰值,它们顺次对应着31年、21年、11年和6年的时间尺度。最大周期为31年,说明该尺度震荡最强烈,为干旱变化的第一主周期,21年、11年、6年尺度分别为第二、三、四主周期。

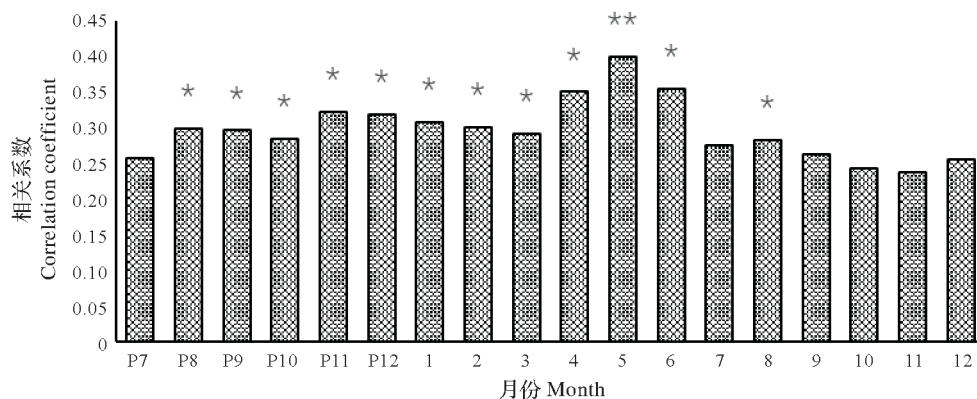


图8 庐山日本柳杉树轮宽度指数与SPEI12相关关系

Fig.8 Correlation between the width index of the *Cryptomeria japonica* and the SPEI12

根据小波方差检验的结果,绘制出了庐山日本柳杉生长量和干旱演变的第一主周期小波系数图(图10)。图10显示,庐山日本柳杉生长量在30年特征时间尺度上,生长量变化的平均周期为20年左右,大约经历了2个丰-欠转换期;干旱在31年特征时间尺度上(图10),庐山干旱的平均变化周期为20年左右,大约2个周期的丰-欠变化。同时可分析出,日本柳杉生长量丰-欠变化相对干旱的变化会推迟一到两年左右。

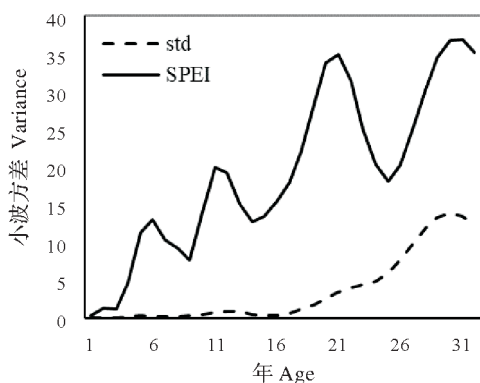


图9 小波方差

Fig.9 Wavelet variance diagram

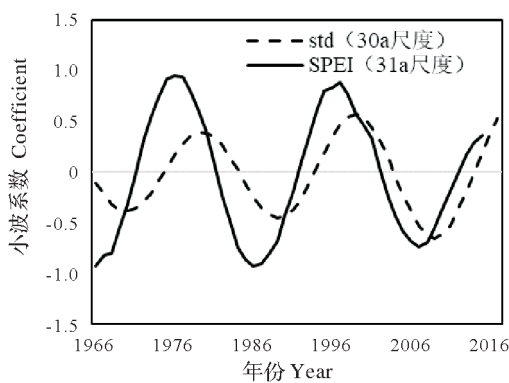


图10 小波系数

Fig.10 Wavelet coefficient diagram

3 讨论

树木生长过程中,轮宽度的年际差异反映了树木径向生长对气候变化的响应,温度降水等气候条件适宜,树轮则可形成宽轮,而在不利的气候条件下,形成的树轮则较窄^[17-18]。采用标准化降水蒸散指数(SPEI)评价庐山自然保护区气候干湿变化,通过建立了日本柳杉的标准化年表,分析庐山日本柳杉径向生长情况,并探讨庐山自然保护区日本柳杉径向生长量对干旱的响应。研究表明:

(1)日本柳杉标准年表树轮宽度指数变化趋势波动明显,其中1967—1970年、1977—1981年、2004—2012年生长情况低于预期标准的时间序列。其树轮宽度指数在26~32年的尺度上,有高低起伏的主周期震荡变化特征。

(2)庐山自然保护区SPEI计算结果中,月尺度中旱及以上干旱平均持续时间为两个月,季尺度平均持续时间为4个月,半年尺度平均持续时间为9个月,年尺度平均持续时间为14个月。1968年为庐山干旱和湿润的突变年,1968—2004年庐山自然保护区有湿润的趋势,而2004年以后突变为干旱气候。在庐山干旱演变过程中存在30年尺度的SPEI大周期。

(3)不同尺度的标准化降水蒸散指数与日本柳杉树轮宽度相关性不同,年尺度计算的SPEI12相关性最强,树轮宽度指数与干旱呈正相关关系。庐山日本柳杉径向生长量与干旱状况大致呈现出一致的变化趋势,年尺度标准化降水蒸散指数与日本柳杉树轮宽度指数进行相关性分析,可看出上年秋冬季节和

当年春夏季节的干旱与当年日本柳杉径向生长显著相关,说明上年秋冬季节至当年春夏季节的干旱对庐山日本柳杉当年生长量有一定的影响。

(4)在1968—1970年庐山地区重旱,日本柳杉树轮宽度指数较低,尤其是1969年,树轮宽度只有0.682,远低于预期标准,1968年6月至1969年6月庐山自然保护区SPEI12明显低于-1.5,该地区干旱达到重旱至特旱程度,因此严重影响日本柳杉的树轮生长;2005—2013年庐山地区干旱程度较严重且持续时间长,日本柳杉受干旱影响严重,长势差,年轮宽度在2008年呈现最低,同样笔者发现在2007年8月至2008年6月SPEI12较低,该地区2008年3月特旱,其余月份达到重旱程度。

4 结 论

庐山日本柳杉径向生长量变化与干旱发生有一定的关系,干旱事件的发生会阻碍日本柳杉的生长,干旱等级越严重的时候,庐山日本柳杉的径向生长量也越小。日本柳杉生长量的周期变化与干旱周期变化接近,日本柳杉生长量变化相对干旱的变化会持续一到两年左右。

参考文献:

- [1] 金菊良,陈鹏飞,陈梦璐,等.基于知识图谱的自然灾害风险防控研究进展的文献计量分析[J].灾害学,2019,34(2): 145-152.
Jin J L, Chen P F, Chen M L, et al. Bibliometric analysis of research progress in natural disaster risk prevention and control based on knowledge graph[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(2): 145-152.
- [2] 袁文平,周广胜.干旱指标的理论分析与研究展望[J].地球科学进展,2004,19(6):982-991.
Yuan W P, Zhou G S. Theoretical study and research prospect on drought indices[J]. Advances in Earth Science, 2004, 19(6): 982-991.
- [3] Gindl W, Grabner M, Wimmer R. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width[J]. Trees, 2000, 14(7): 409-414.
- [4] Jiao L. Divergent responses to climate factors in the radial growth of *Larix sibirica* in the eastern Tianshan Mountains, north-west China[J]. Trees, 2015, 29(6): 1673-1686.
- [5] 王丽丽,邵雪梅,黄磊,等.黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应[J].植物生态学报, 2005, 29(3): 280-285.
Wang L L, Shao X M, Huang L, et al. Tree-ring characteristics of *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and their response to climate in Mohe, China[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(3): 280-285.
- [6] 张先亮,崔明星,马艳军,等.大兴安岭库都尔地区兴安落叶松年轮宽度年表及其与气候变化的关系[J].应用生态学报, 2010, 21(10): 2501-2507.
Zhang X L, Cui M X, Ma Y J, et al. *Larix gmelinii* tree-ring width chronology and its responses to climate change in Kuduer, Great Xing'an Mountain[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2501-2507.
- [7] 罗惠,周涛,吴昊,等.云南人工林和天然林对短期与持续干旱响应的差异性[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 518-524.
Luo H, Zhou T, Wu H, et al. Different responses of planted and natural forests to short-term and prolonged droughts in Yunnan[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2016, 52(4): 518-524.
- [8] 刘新圣,李松志,莫申国.庐山植物旅游资源及其开发利用[J].南方园艺, 2015, 26(4): 56-59.
Liu X S, Li S Z, Mo S G. Plant tourism resources and its utilization in Lushan Mountain[J]. Southern Horticulture, 2015, 26(4): 56-59.
- [9] 何海.川西亚高山针叶林主要针叶树种年轮生态学研究[D].成都:中国科学院成都生物研究所,2006.
He H. Dendroecological studies on dominant conifers of subalpine coniferous forests in western Sichuan, Southwest China [D]. Chengdu: Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [10] 白雪,范泽鑫.哀牢山中山湿性常绿阔叶林水青树年轮宽度对气候变化的响应[J].林业科学, 2018, 54(3): 161-167.
Bai X, Fan Z X. Response of tree ring width to climate change of *tetracentron sinensis* in humid evergreen broad-leaved for-

- est in the middle Ailao Mountains[J].Scientia Silvae Sinicae,2018,54(3):161-167.
- [11] 宇汝兰.豫南马尾松树轮宽度年表及其对气候要素的响应[D].南京:南京师范大学,2014.
Yu R L.A chronology of the tree-ring width of *Pinus massoniana* in southern Henan and its response to climatic factors[D].Nanjing:Nanjing Normal University,2014.
- [12] 罗登泽,靳晓言,强皓凡,等.基于 SPEI 的若尔盖湿地干湿时空演变特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2):227-233.
Luo D Z,Jin X Y,Qiang H F,et al.Analysis on the spatial and temporal evolution characteristics of dry-wet conditions in Zoige Wetland based on SPEI[J].Research of Soil and Water Conservation,2019,26(2):227-233.
- [13] 张海.基于小波分析的气候要素长时间序列分析[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
Zhang H.Long-time sequence analysis of climate factors based on wavelet analysis[D].Beijing:China University of Geosciences,2018.
- [14] 张振香.广东省气温和降水的趋势与突变分析[D].北京:华北电力大学(北京),2018.
Zhang Z X.Trend and mutation analysis of temperature and precipitation in the Guangdong Province[D].Beijing:North China Electric Power University,2018.
- [15] 李越,李胜利,杨昌腾,等.南岭华南五针松树轮宽度对气候因子的响应[J].亚热带资源与环境学报,2016,11(1):26-31.
Li Y,Li S L,Yang C T,et al.Responses of tree-ring width of *Pinus kwangtungensis* to climatic factors in Nanling[J].Journal of Subtropical Resources and Environment,2016,11(1):26-31.
- [16] 李翔翔,居辉,刘勤,等.基于 SPEI-PM 指数的黄淮海平原干旱特征分析[J].生态学报,2017,37(6):2054-2066.
Li X X,Ju H,Liu Q,et al.Analysis of drought characters based on the SPEI-PM index in Huang-Huai-Hai Plain[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(6):2054-2066.
- [17] 徐小军,程银正,朱迪恩.基于光能利用率模型模拟干旱胁迫下毛竹林总初级生产力研究[J].江西农业大学学报,2019,41(3):512-520.
Xu X J,Chen Y Z,Zhu E D.Simulation of gross primary productivity of Moso Bamboo forest under drought stress based on a light use efficiency model[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2019,41(3):512-520.
- [18] 许海洋,刘立斌,郭银明,等.我国西南地区喀斯特森林树木年轮对气候变化的响应[J].地球与环境,2018,46(1):23-32.
Xu H Y,Liu L B,Guo Y M,et al.Tree-rings of dominant species in Karst forests in southwestern China and their responses to climate change[J].Earth and Environment,2018,46(1):23-32.