

1850 年以来川西高原北部植被气候 生产潜力时空变化特征

王春学¹, 秦宁生¹, 周 斌², 庞轶舒², 罗 玉², 茅海祥³

(1.中国气象局 成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,
成都 610072; 2.四川省气候中心, 成都 610072; 3.铜仁市气象局, 贵州 铜仁 554300)

摘 要:为了研究历史时期川西高原北部的植被气候生产潜力时空变化特征,利用采自四川省阿坝州境内 4 个样点的树轮样本建立树轮宽度标准年表,使用 Miami 模型重建了 1850—2010 年阿坝州 13 个站点的气候生产潜力。结果表明:树轮宽度标准年表具有表征过去气候变化的潜力,并且与温度决定的气候生产力(M_T)有很好的对应关系。阿坝州 M_T 呈自东南向西北递减的分布状况,经验正交函数分解(EOF)第一模态为全区一致变化型,其中西部和北部为大值带。1850—1950 年 M_T 没有明显的变化趋势,1950—1980 年逐渐减小,随后一直到 2010 年迅速增加。阿坝州 M_T 在 1967 年和 1990 年前后分别出现两次突变,同时 M_T 有显著的准 2 a 周期和 4~5 a 周期。研究表明利用树木年轮资料重建历史时期植被气候生产潜力是一种有效的方法,过去 161 a 阿坝州 M_T 具有明显的空间分布差异和年际、年代际波动,尤其 20 世纪 80 年代以来 M_T 的增加速率和绝对值都达到 1850 年以来最大,这也从侧面为全球变暖提供了证据。

关键词:气候变化; 气候生产潜力; Miami 模型; 树木年轮

中图分类号:S162

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0188-08

Spatial and Temporal Variations of Climate-Induced Potential Productivity of Vegetation in Northwestern Sichuan Plateau Since 1850

WANG Chunxue¹, QIN Ningsheng¹, ZHOU Bin², PANG Yishu², LUO Yu², MAO Haixiang³

(1.Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu/ Key Laboratory of Heavy
Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin of Sichuan Province, Chengdu 610072, China; 2.Sichuan

Provincial Climate Center, Chengdu 610072, China; 3.Tongren Meteorological Bureau, Tongren, Sichuan 554300, China)

Abstract:In order to study the spatial and temporal variations of climate-induced potential productivity of vegetation in Northwestern Sichuan Plateau, four tree ring samples from Aba Prefecture in Sichuan Province were used to establish the standard tree ring width chronology. The Miami model was used to reconstruct the climate-induced potential productivity of vegetation of 13 stations in Aba Prefecture from 1850 to 2010. It is found that the standardized chronologies have the potential to reflect past climate change and have good relationship with temperature determining productivity (M_T) in Aba Prefecture. The M_T in Aba Prefecture decreased from southeast to northwest, and first mode was consistent in the whole region, with the western and northern regions being large value zones. During the 100 years from 1850 to 1950, M_T had no obvious change trend, but M_T gradually decreased in the period from 1950 to 1980, and then increased rapidly until 2010. There were two mutations of M_T in Aba Prefecture before and after 1967 and 1990, respectively, and M_T had significant quasi-2-year cycle and 4-5-year cycle. These results show that it is an effective method to reconstruct climate-induced potential productivity of vegetation by using tree ring data. In the past 161 years, M_T in Aba Prefecture had obvious spatial distribution differences and interannual and interdecadal fluctuations, especially since the 1980s, the increase rate and absolute value of M_T had reached

收稿日期:2020-02-14

修回日期:2020-03-02

资助项目:国家自然科学基金(41772173);四川省科技厅应用基础研究计划项目(2019YJ0620);中国气象局气候变化专项(CCSF202034)

第一作者:王春学(1985—),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士,高级工程师,主要从事气候监测诊断与气候变化研究。E-mail:2005wangchunxue@163.com

通信作者:秦宁生(1962—),男,河南商丘人,学士,研究员,主要从事气候变化研究。E-mail:qinns0515@163.com

the maximum since 1850, which also provided evidence for global warming.

Keywords: climate change; climate-induced potential productivity of vegetation; Miami Model; tree rings

植被气候生产潜力是指在其他条件均适宜的情况下,自然生长发育的植被由气候资源所决定的在单位时间单位面积上由光合作用产生的生物学产量或经济产量^[1]。生产潜力是表征陆地生态过程的关键参数和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要指标^[2]。对生产潜力的研究不但可以揭示生产力与气候要素之间的内在联系,还可以用来预测生产力的未来发展趋势^[3]。我国人多地少,资源相对贫乏,对生产潜力的研究显得更加迫切和重要,可以为合理开发利用自然资源和应对全球变化提供科学依据^[4]。

Miami 模型是经典的、使用最广泛的生产潜力估算模型^[5]。Miami 模型主要针对自然森林草原植被,利用五大洲 53 个地点的气象资料,获得了气象因子模拟自然植被生物量的关系表达式,之后中国学者对模型进行了验证,认为该模型适合中国自然植被生产潜力的研究应用^[6]。树木年轮(树轮)数据拥有长时间序列和高空间分辨率的特点,利用树轮资料重建生产潜力有其独特的优势,能够获取长时间尺度的数据^[7]。许多研究表明,树轮资料结合传统的研究方法能够较好地表征生产潜力的逐年变化,对生产潜力的估算研究起到了推动作用^[8-12]。

川西高原位于青藏高原东部,地广人稀,具有丰富的植被,是生态脆弱区和气候变化敏感区,其气候及生态特征对青藏高原乃至中国西南地区都有重要影响^[13-15]。陈卓奇等^[16]利用遥感数据反演了青藏高原生产潜力,发现降水量小于 450 mm 的区域生产潜力变化的主导因子为降水量,降水量大于 450 mm 的区域,主导因子变为气温,并且随着气温的升高生产潜力显著提高。刘刚等^[17]的研究也表明青藏高原生产潜力与温度有很好的正相关关系。朴世龙等^[18]发现青藏高原生产潜力自东南向西北递减,并且 1982—1999 年有逐渐上升的变化趋势。李宗善等^[19]重建了 1788—2010 年川西米亚罗地区的生产潜力,发现夏季至秋季温度是限制森林生长的最为重要的气候要素。

目前川西高原的生产潜力估算时间尺度主要集中在近几十年,更长时间尺度的估算较少,而且个别研究也只是针对单个站点展开的,非常缺乏对川西高原大范围、长时间生产潜力的科学认识。近些年川西高原树轮研究工作取得了比较丰富的成果,重建了川西高原多个地点的气候变化序列,揭示了川西高原部分地区的历史气候变化特征,同时也积累了大量的树

轮资料,这为利用树轮资料建立大范围、长时间生产潜力奠定了良好的理论和资料基础^[20-24]。本文将利用川西高原北部阿坝藏族羌族自治州(阿坝州)多条树轮资料重建 1850 年以来阿坝州生产潜力,并分析其时空变化特征,提高对川西高原历史时期生态系统的科学认识,为自然资源的合理开发利用和可持续发展提供科学支撑。

1 资料和方法

1.1 研究区概况及气象资料来源

阿坝州位于四川省西北部,地貌以高原和高山峡谷为主,岷江和大渡河贯穿全境,是黄河上游的重要水源地,野生动植物资源极其丰富。阿坝州是中国五大牧区之一的川西北牧区的重要组成部分,境内的若尔盖生态区是我国第一大高原沼泽湿地,也是气候变化的敏感区^[25]。阿坝州受西风南支急流、东南季风以及西南季风等综合影响,形成了冬寒夏凉、降水适中的山地气候^[24]。

本文使用的气象资料为阿坝州 13 个国家气象站(图 1)1961—2010 年逐月气温和降水量资料。分析发现阿坝州年平均气温 8.5℃,1 月最冷,平均气温 -1.6℃;7 月最热,平均气温 17.3℃;年平均降水量 663.5 mm,12 月最少,平均 2.7 mm;6 月最多,平均 119.5 mm。

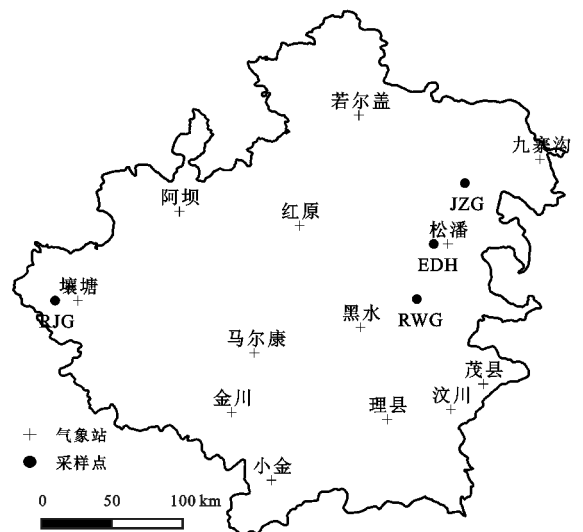


图 1 阿坝州气象站和树轮采样点分布

1.2 树轮资料来源及树轮年表建立

本文所用的树轮样本由中国科学院地理科学与资源研究所、国家气候中心和中国气象局成都高原气象研究所联合采集。采样点位于阿坝州境内(图 1),区域内森林呈带状分布于河谷两侧,受人类活动影响

较少。本文所用 4 个采样点的优势树种均为冷杉 [*Abies fabri* (Mast.) Craib], 除二道海采样点 (EDH) 的海拔高度接近 3 300 m 外, 其余 3 个采样点海拔高度均超过 3 500 m, 其中热务沟采样点 (RWG) 最高 (3 680 m)。树轮采样对象为树龄较长的活树,

每株至少采集 2 个树芯, 其中除九寨沟采样点 (JZG) 只有 11 株 29 个样芯外, 其余 3 个采用点的样本数均在 25 棵、50 个样芯以上, 热基沟采样点 (RJG) 样芯最多 (68 个), 4 个样本点共采集了 88 棵树的 213 条树芯, 复本量能够满足树轮气候研究的要求 (表 1)。

表 1 树轮采样点概况

代码	纬度	经度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	树种	复本量/(株/芯)
EDH	32°40'N	103°30'E	3290	东坡/西坡	30	岷江冷杉	25/52
JZG	33°03'N	103°43'E	3540	北坡	35	岷江冷杉	11/29
RJG	32°16'N	100°49'E	3530	北坡	30	岷江冷杉	26/68
RWG	32°17'N	103°23'E	3680	北坡	30	岷江冷杉	26/64

将采集到的样芯按照国际通用的基本程序进行干燥 (自然晾干)、固定、磨光处理和交叉定年, 并利用 COFECHA 程序对定年结果进行检查和验证。为了去除原始树轮宽度中所包含的非气候信息, 利用 ARSTAN 程序, 采用步长为样本长度 67% 的样条函数拟合生长趋势, 然后用双权重平均法进行合成, 得到每个采样点的标准化年表 (STD)。表 2 给出了各采样点标准年化表统计特征及公共区间分析结果, 可以看到 4 个标准化年表的统计特征比较相似, 其中平均敏感度略偏低, 但是一阶自相关系数和总体代表性都比较高, 具有一定的表征过去气候变化的潜力。从 $SSS>0.85$ 的起始年份来看, EDH 最晚 (1849 年), RJG 最早 (1514 年), 为了保证分析结果的可靠性和一致性, 后文统一选取 1850—2010 年的树轮宽度资料进行分析。

表 2 各采样点标准年表统计特征及公共区间 (1800—2010 年) 分析结果

项目	EDH	JZG	RJG	RWG
序列起止年	1771—2010	1683—2010	1469—2010	1586—2010
树轮宽度指数均值	0.983	0.993	0.985	0.99
平均敏感度	0.085	0.141	0.107	0.094
平均标准差	0.126	0.201	0.177	0.155
一阶自相关系数	0.648	0.59	0.75	0.689
$SSS>0.85$ (年/株)	1849/10	1824/9	1514/9	1667/9
所有样芯平均相关系数	0.293	0.299	0.195	0.243
树间相关系数	0.288	0.277	0.186	0.234
树内相关系数	0.533	0.608	0.494	0.585
信噪比	10.12	3.825	4.807	7.63
总体代表性	0.910	0.793	0.828	0.884
第一主成分解释方差/%	33.3	36.8	23.3	27.7

1.3 气候生产力的估算模型及遥感资料验证

本文采用 Miami 模型^[3]估算阿坝州气候生产潜力, 相关计算公式为:

$$M_T = 30000 / [1 + e^{(1.315 - 0.119T)}]$$
 (1)

式中: M_T 为由年平均温度决定的气候生产潜力 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; T 为年平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

$$M_R = 30000 [1 - e^{(-0.000664R)}]$$
 (2)

式中: M_R 为由年平均降水量决定的气候生产潜力 [$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$]; R 为年降水量 (mm)。

为了验证模型估算结果, 本文使用了中国科学院地理科学与资源研究所的中国植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 遥感观测资料, 提取得了九寨沟、若尔盖、壤塘、马尔康和理县 5 个点的 2001—2010 年逐年资料。图 2 给出了模拟和遥感观测的对比情况, 可以看到 M_T 与遥感观测 NPP 的对应关系比较好, 从量值上看 M_T 为 NPP 的 1~1.5 倍, 二者散点图 (图 2A) 呈显著的正相关 ($R^2=0.78$), 从年平均变化 (图 2B) 来看, 2001—2010 年二者的变化趋势和年际波动情况基本一致。 M_R 与 NPP 的对应关系则不好, 可以看到 (图 2C) 二者为弱的负相关, 年际变化 (图 2D) 虽然都为增多趋势, 但是具体年际波动的对应关系较差。通过与遥感资料的对比验证, 发现利用温度估算的气候生产潜力比利用降水估算的气候生产潜力更据研究价值和代表性。

1.4 经验正交函数分解

气候统计诊断中应用最为普遍的方法是把原变量场分解为正交函数的线性组合, 构成为数很少的互不相关的典型模态, 代替原始变量场, 每个典型模态都含有尽量多的原始场信息。经验正交函数 (Empirical Orthography Function, EOF) 分解就是这样一种方法, EOF 的优点是没有固定函数, 能在有限区域对不规则分布的站点进行分解, 很容易将变量场的信息集中到几个模态上, 而且分离出的空间结构具有一定的物理意义^[26]。

1.5 MTM-SVD

MTM-SVD 方法是由 Mann 等^[27]提出的一种多变量频域分解技术。这是一种将谱分析的多锥度方法 (Multi-Taper Method, MTM) 和变量场的奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 方法结合在一起的气候周期信号检测技术, 详细内容参阅相关文献^[28-30]。

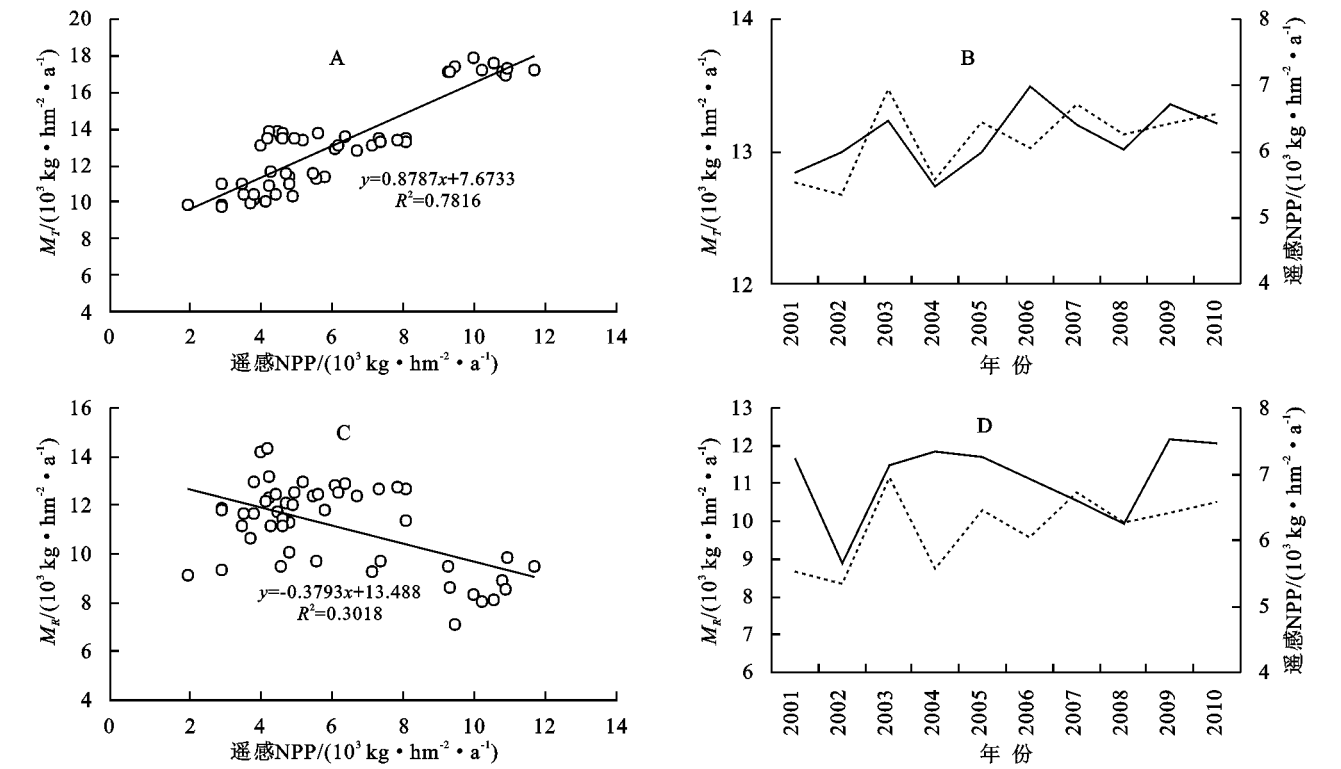


图 2 Miami 模型估算的 M_T 、 M_R 与遥感 NPP 的散点图(A,C)和逐年对比图(B,D)

2 结果与分析

2.1 树轮和气候生产潜力相关分析

利用 Miami 模型分别建立 1961—2010 年 13 个气象站 M_T 和 M_R ，并分别统计其与树轮宽度序列的相关特征。由于树木生长情况往往与前期气候状况密切相关，所以本文计算了当年树轮序列与 12 个月累积生产力的相关系数，累积值从上年 1 月开始逐月滑动至当年 1 月，找出每个气象站与树轮序列相关系数的最大值，然后统计 13 个气象站中超过一定显著性水平的台站数，并计算其平均值。

图 3A 为 M_T 与树轮序列的相关统计情况，可以看到 M_T 与树轮宽度都为正相关，其中上年 10 月—

当年 9 月的 M_T 与树轮相关系数最大(0.57)，同时 13 个站均超过了 0.01 显著性水平，其余时段的相关系数在 0.52 上下波动，显著台站数在 12 个左右。

图 3B 为 M_R 与树轮序列的相关统计情况，可以看到 M_R 与树轮宽度都为负相关，其中上年 8 月—当年 7 月的 M_R 与树轮相关系数最大(−0.41)，但是只有 1 个台站达到了 0.05 的显著性水平，其余时段的相关系数在 −0.35 上下波动，显著台站有 7 个左右。

由相关分析可知，树木生长越旺盛时， M_T 往往越大，反之则越小，即 M_T 可以代表阿坝州的气候生产潜力。另外相关分析发现树轮与上年 10 月—当年 9 月的 M_T 相关性最好，所以后文主要针对该时段的 M_T 展开分析。

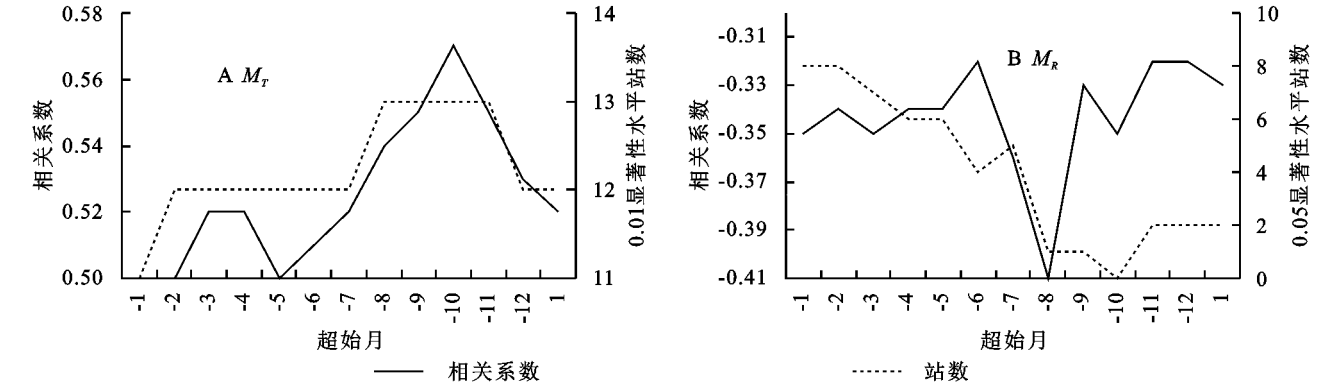


图 3 M_T 和 M_R 与树轮序列相关分析

表 3 为上年 10 月—当年 9 月 M_T 与树轮序列的具体相关系数情况，可以看到 13 个气象站与 4 个树

轮序列的相关系数都较高，除个别序列间的相关系数达到 0.05 显著性水平外，绝大多数相关系数都通过

了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

表 3 上年 10 月—当年 9 月 M_T 与树轮序列相关系数

站名	树轮			
	EDH	JZG	RJG	RWG
若尔盖	0.47**	0.5**	<u>0.63</u> **	<u>0.53</u> **
九寨沟	<u>0.55</u> **	0.53**	<u>0.68</u> **	0.52**
金川	0.29*	<u>0.34</u> *	<u>0.41</u> **	0.26*
阿坝	<u>0.42</u> **	0.37**	<u>0.54</u> **	0.39**
马尔康	0.37**	<u>0.47</u> **	<u>0.57</u> **	0.37**
红原	0.43**	0.44**	<u>0.6</u> **	<u>0.51</u> **
小金	<u>0.42</u> **	0.38**	<u>0.57</u> **	0.35**
茂县	0.41**	<u>0.48</u> **	<u>0.58</u> **	0.39**
松潘	0.51**	0.48**	<u>0.65</u> **	<u>0.54</u> **
汶川	0.45**	0.39**	<u>0.57</u> **	<u>0.45</u> **
理县	0.28*	<u>0.52</u> **	<u>0.48</u> **	0.31*
黑水	0.41**	<u>0.42</u> **	<u>0.56</u> **	0.38**
壤塘	0.36**	0.39**	<u>0.48</u> **	<u>0.39</u> **

注：* 表示 $\alpha=0.05$ ，** 表示 $\alpha=0.01$ 显著性水平，下划线表示参与回归方程建模的树轮。

2.2 建立回归方程

从表 3 中不难发现，除了理县站与 JZG 的相关

系数最高外，其余站均与 RJG 的相关系数最高，但是如果只用 RJG 单一序列来重建所有站的 M_T ，那么就无法体现 M_T 空间变化的差异，所以为了更多地提取时空特征信息，在保证回归方程具有一定显著性水平的前提下，尽量多地选取树轮序列参与重建。经过反复试验，发现选择相关系数最高的 2 个树轮序列参与回归方程重建时，可以满足上述要求，即 $M_T=B_0+B_1X_1+B_2X_2$ ，式中： B_0, B_1, B_2 为回归系数； X_1, X_2 分别为选择的两个树轮年表指数。

为了检验重建方程是否稳定可靠，采用国际惯用的严格显著性检验方法（逐一剔除法，leave one out）对方程进行检验，表 4 给出了各重建方程的回归系数及相应检验统计量，可以看到所有方程的相关系数、F 检验值、乘积平均数(t)和误差缩减值(RE)均达到了 0.01 的显著性水平，说明重建方程具有一定的稳定性和可靠性。符号检验有 3 个达到 0.01 显著性水平，5 个达到 0.05 显著性水平，5 个接近 0.05 的显著性水平，但同时一阶差符号检验都没有通过 0.05 的显著性检验，表明重建方程对低频变化的重建要好于高频变化的重建。

表 4 回归方程系数及逐一剔除检验统计量

站名	相关系数	F 值	B_0	B_1	B_2	符号检验	一阶差符号 检验	乘积平均 数(t)	误差缩减 值(RE)
若尔盖	0.63	15.33	5.23	1.26(RJG)	0.7(RWG)	31(32,34)	21(32,34)	3.5	0.32
九寨沟	0.72	25.21	14.12	1.56(RJG)	1.09(EDH)	36(32,34)	23(32,34)	4.42	0.47
金川	0.41	4.71	15.4	0.77(RJG)	-0.02(JZG)	31(32,34)	22(32,34)	0.87	0.05
阿坝	0.58	11.86	6.88	1.27(RJG)	0.85(EDH)	32(32,34)	25(32,34)	4.09	0.27
马尔康	0.56	10.61	11.89	1.16(RJG)	-0.09(JZG)	32(32,34)	23(32,34)	2.75	0.22
红原	0.63	15.25	5.51	1.14(RJG)	0.73(RWG)	31(32,34)	22(32,34)	3.67	0.33
小金	0.6	12.76	14.35	1.13(RJG)	0.59(EDH)	33(32,34)	24(32,34)	2.94	0.28
茂县	0.58	11.79	13.92	1.35(RJG)	-0.1(JZG)	32(32,34)	23(32,34)	3.18	0.26
松潘	0.65	17.01	8.65	1.37(RJG)	0.75(RWG)	33(32,34)	25(32,34)	3.63	0.36
汶川	0.58	11.4	14.56	1.99(RJG)	0.87(RWG)	30(32,34)	22(32,34)	3.58	0.26
理县	0.53	9.21	13.9	0.45(RJG)	1.12(RWG)	38(32,34)	24(32,34)	1.2	0.2
黑水	0.57	11.09	12.36	1.41(RJG)	-0.44(JZG)	34(32,34)	24(32,34)	3.65	0.24
壤塘	0.49	7.38	8.62	0.81(RJG)	0.43(RWG)	30(32,34)	28(32,34)	2.65	0.16

2.3 重建结果与分析

2.3.1 EOF 模态分析 图 4A 给出了 1850—2010 年阿坝州 M_T 平均值分布图，可以看到阿坝州南部的小金—若尔盖—汶川一线 M_T 超过了 15 000 kg/(hm²·a)，九寨沟—松潘—马尔康一线为 11 000~14 000 kg/(hm²·a)，西北部若尔盖—阿坝—壤塘一线只有 7 000~10 000 kg/(hm²·a)，即阿坝州 M_T 分布不均，由东南向西北递减，南部大值区 M_T 可达北部低值区的 1 倍以上。从

1850—2010 年阿坝州年平均 M_T 变化来看(图 4B)，1850—1950 年 M_T 主要表现为年际波动，没有明显的变化趋势，1950—1980 年出现波动减少的变化趋势，1980—2010 年出现显著增多的变化趋势。

对重建的阿坝州 13 个站 1850—2010 年 M_T 进行 EOF 分析，第一模态通过了显著性检验，解释方差贡献率达 92%，从其空间型(图 5)可以看到整个区域都为正值，即全区一致变化型，其中西部和北部为大值带，对应

时间系数与其年平均曲线变化基本一致。进一步利用滑动 t 检验方法对其时间系数进行突变检验,图 6 给出了 20 a 滑动的统计量曲线,可以看到 1850 年以来统计量有 2 处超过 0.01 的显著性,一处为正值(1967 年

前后),另一处为负值(1990 年前后),即过去 161 a 中阿坝州 M_T 出现过两次突变,20 世纪 60—80 年代经历了一次显著的由多到少的转变,20 世纪 90 年代开始又经历了一次明显的由少到多的变化。

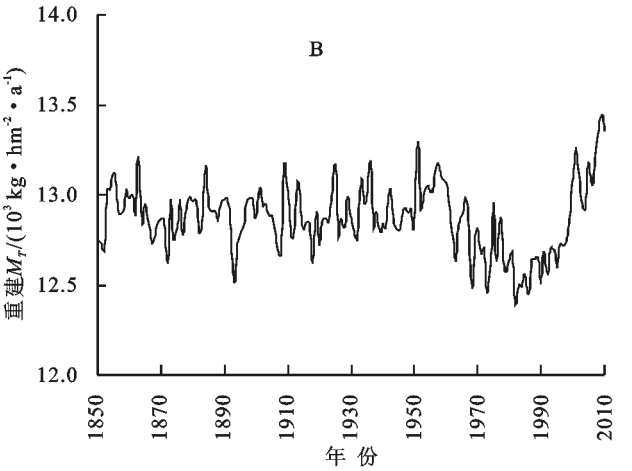
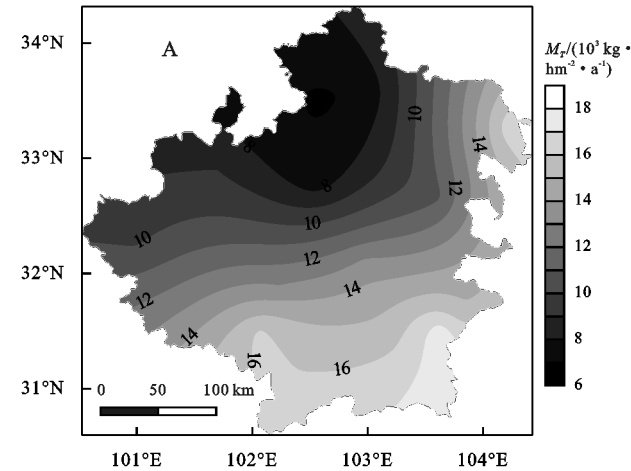


图 4 1850—2010 年 M_T 平均值分布及其逐年变化曲线

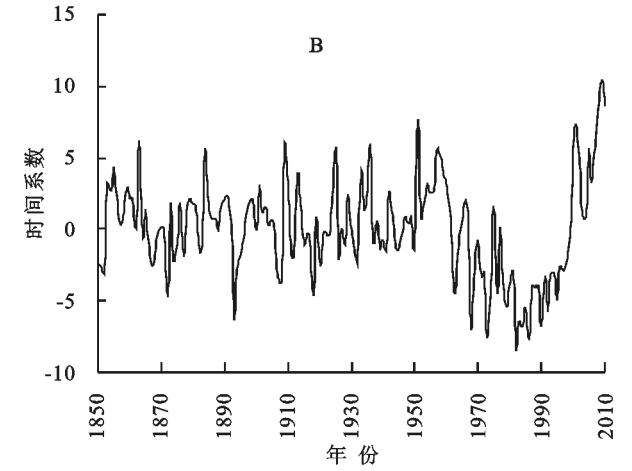
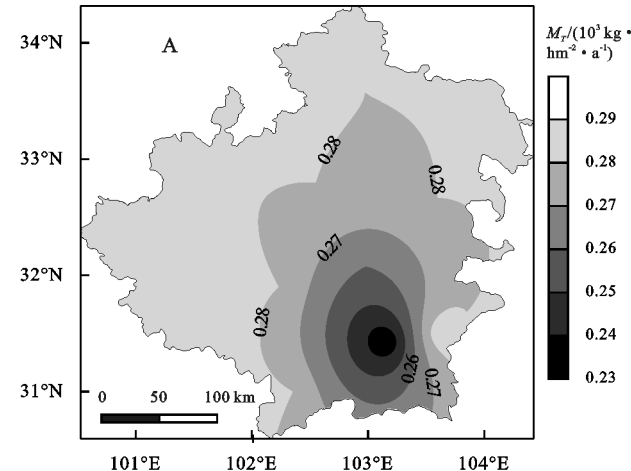
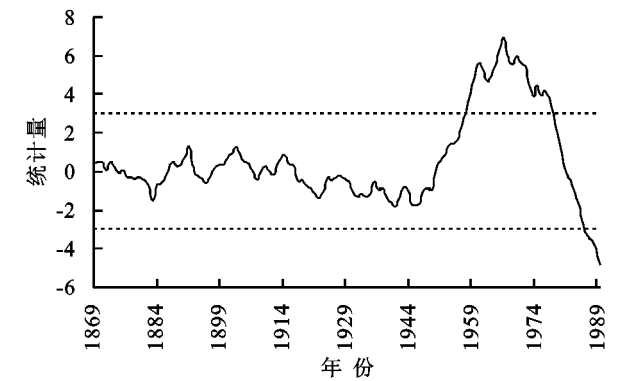


图 5 1850—2010 年阿坝州 M_T 的 EOF 分析第一模态空间型及其对应的时间系数

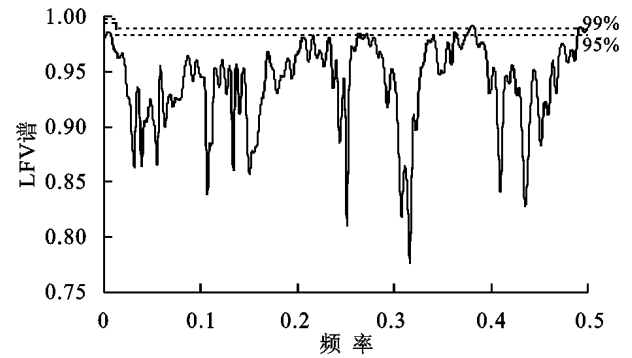


注:虚线为 0.01 显著性水平。

图 6 阿坝州 M_T 的 TC1 滑动 t 统计量曲线

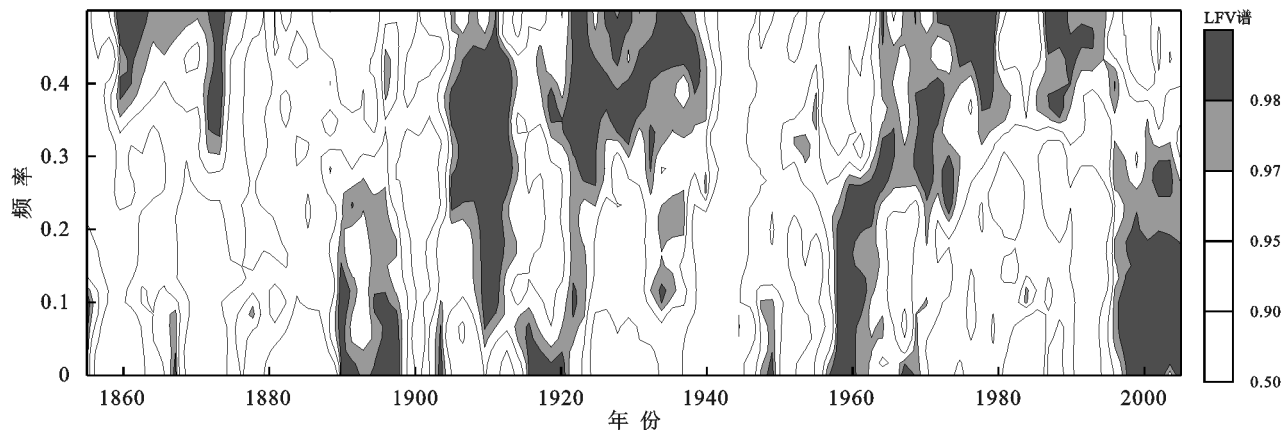
2.3.2 周期分析 MTM-SVD 方法可以对场空间进行周期分析,图 7 给出了 1850—2010 年阿坝州 M_T 场的 LFV 谱分析结果,可以看到年际尺度上的 2, 2.6 a 周期通过了 0.01 的显著性检验,4~5 a 周期通过了 0.05 的显著性检验,年代际尺度在 12, 17, 80 a

都出现峰值,但是没有达到一定的显著性水平。从对应的 10 a 滑动窗口分析可以发现(图 8),准 2 a 周期有 3 个显著时段,分别是 1860—1880 年、1910—1940 年和 1970—1990 年;4~5 a 周期也有 3 个显著时段,主要出现在 1890—1940 年、1950—1980 年和 1990—2010 年。



注:虚线为蒙特卡洛置信度。

图 7 1850—2010 年阿坝州 M_T 场的 LFV 谱



注:阴影表示通过置信度检验。

图 8 阿坝州 M_T 场 10 a 滑动窗口 LFV 谱

3 结论与讨论

通过与遥感资料的对比,发现在川西高原地区利用 Miami 模型估算的气候生产潜力具有可靠的研究价值和代表性,尤其是与温度的关系要好于降水,说明川西高原植被气候生产潜力对温度的变化更为敏感。同时发现该区域上年 10 月—当年 9 月的 M_T 与树轮宽度指数有很好的对应关系,建立的回归方程通过了显著性检验,重建的 M_T 稳定可靠。利用树轮宽度资料重建川西高原历史时期气候生产潜力是一种弥补观测资料年限短的有效方法,有助于增强对高原地区植被生态系统的科学认识,对自然资源的开发利用有重要参考价值,而川西高原森林资源丰富,在获得更多树轮样本资料的情况下,可以重建时间尺度更长、时空精度更高的植被气候生产潜力场。

分析表明,阿坝州气候生产潜力分布不均,由东南向西北递减,1850 年以来总体具有明显的年际和年代际变化特征,尤其 20 世纪 90 年代以来,气候生产潜力出现快速增大的变化趋势,虽然 1999 年以后出现了全球变暖停滞现象,但是川西高原 M_T 仍然保持着较快的增大速度,这与高寒地区对全球变暖的响应较低海拔地区偏慢是一致的^[31]。另外 1850 年以来阿坝州 M_T 出现过两次突变,20 世纪 60—80 年代经历了一次显著的由多到少的转变,20 世纪 90 年代开始又经历了一次明显的由少到多的变化,随着全球变暖减缓 21 世纪是否会再次出现较大的突变也值得密切关注。本研究增强了对阿坝州 M_T 空间分布、变化趋势、周期和突变等规律的科学认识,这对高原农业、牧业、林业的开发利用和发展规划都有重要意义。

由于阿坝州历史时期气候生产潜力的相关研究比较少,而且缺乏相关的公开数据,所以本文没有利

用其他资料对建立的 1850—2010 年气候生产潜力序列进行对比验证,后期还需要不断搜集相关研究成果,开展对比验证分析。另外本文只是探索了利用树轮资料建立阿坝州气候生产潜力的可能性,并对其分布特征和变化规律等事实进行了分析,没有探讨其变化机理,尤其是为什么气温决定的气候生产潜力更具代表性等问题,值得进一步深入研究。

Miami 模型在我国被广泛应用于气候生产潜力的估算,尤其是在西北干旱区^[32-33]、内蒙古草原^[34-35]以及我国南方地区^[36]已有大量的研究成果,但是在川西高原的应用还比较有限,而本研究则证明了其温度模型在高原地区的适用性。利用 Miami 模型可以方便快捷的给出植被气候生产潜力的时空动态演变,但是该模型受限于气象站点的分布,而本文使用了 13 个国家气象站,站点分布比较均匀,但是站点密度还是相对稀疏,如果能够利用更多的气象加密站点资料,无疑会获得更加准确的结果。

参考文献:

- [1] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere [M]. New York, USA: Springer-Verlag Press, 1975.
- [2] 冯险峰,刘高焕,陈述彭,等.陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述[J].自然资源学报,2004,19(3):369-378.
- [3] 赵慧颖,田宝星,宫丽娟,等.近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应[J].生态学报,2017,37(6):1900-1911.
- [4] 周广胜,张新时.自然植被净第一性生产力模型初探[J].植物生态学报,1995,19(3):193-200.
- [5] 赵俊芳,延晓冬,朱玉洁.陆地植被净初级生产力研究进展[J].中国沙漠,2007,27(5):780-786.

- [6] 李莉,周宏飞,包安明.中亚地区气候生产潜力时空变化特征[J].自然资源学报,2014,29(2):285-294.
- [7] 方欧娅,汪洋,邵雪梅.基于树轮资料重建森林净初级生产力的研究进展[J].地理科学进展,2014,33(8):1039-1046.
- [8] 吴祥定,邵雪梅.采用树轮宽度资料分析气候变化对树木生长量影响的尝试[J].地理学报,1996,63(S1):92-101.
- [9] Hasenauer H, Nemani R R, Schadauer K, et al. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria[J]. Forest Ecology & Management, 1999,122(3):209-219.
- [10] Nogueira E M, Fearnside P M, Nelson B W, et al. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: new allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories[J]. Forest Ecology and Management, 2008,256(11):1853-1867.
- [11] Picchio R, Neri F, Maesano M, et al. Growth effects of thinning damage in a Corsican pine (*Pinus laricio* Poiret) stand in central Italy[J]. Forest Ecology and Management, 2011,262(2):237-243.
- [12] 程瑞梅,封晓辉,肖文发,等.北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应[J].生态学报,2011,31(8):2086-2095.
- [13] 李跃清.近 40 年青藏高原东侧地区云、日照、温度及日较差的分析[J].高原气象,2002,21(3):327-332.
- [14] 刘禹,蔡秋芳,宋慧明.关于青藏高原 2485 年温度的季节和空间代表性问题[J].第四纪研究,2013,33(1):108-114.
- [15] 李金建,邵雪梅,李媛媛,等.树轮宽度记录的松潘地区年平均气温变化[J].科学通报,2014,59(15):1446-1458.
- [16] 陈卓奇,邵全琴,刘纪远,等.基于 MODIS 的青藏高原植被净初级生产力研究[J].中国科学:地球科学,2012,42(3):402-410.
- [17] 刘刚,孙睿,肖志强,等.2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系[J].生态学报,2017,37(15):4936-4945.
- [18] 朴世龙,方精云.1982—1999 年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化[J].自然资源学报,2002,17(3):373-380.
- [19] 李宗善,刘国华,伍星,等.川西米亚罗地区岷江冷杉林过去 223 年森林净初级生产力重建[J].第四纪研究,2014,34(4):830-847.
- [20] 邵雪梅,范金梅.树轮宽资料所指示的川西过去气候变化[J].第四纪研究,1999,19(1):81-89.
- [21] 宋慧明,刘禹,倪万眉,等.以树轮宽度重建九寨沟 1750 年以来冬半年平均最低温度[J].第四纪研究,2007,27(4):486-491.
- [22] 李宗善,刘国华,傅伯杰,等.利用树木年轮宽度资料重建川西米亚罗地区过去 200 年夏季温度的变化[J].第四纪研究,2011,31(3):522-534.
- [23] 喻树龙,袁玉江,魏文寿,等.川西马尔康 7 月平均气温的重建及其气候周期信号检测[J].高原气象,2012,31(1):193-200.
- [24] 肖丁木,秦宁生,黄小梅.树轮记录的川西高原北部过去 325 年 7—8 月平均气温变化[J].第四纪研究,2015,35(5):1134-1144.
- [25] 郭洁,李国平.若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J].高原气象,2007,26(2):422-428.
- [26] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2 版.北京:气象出版社,2007.
- [27] Mann M E, Park J. Global-scale modes of surface temperature variability on interannual to century timescales[J]. Journal of Geophysical Research-Allseries, 1994,99:25819-25833.
- [28] Mann M E, Park J. Joint spatiotemporal modes of surface temperature and sea level pressure variability in the Northern Hemisphere during the last century [J]. Journal of Climate, 1996,9(9):2137-2162.
- [29] Mann M E, Park J. Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: A multiple-taper spectral domain approach[J]. Advances in Geophysics, 1999, 41:1-131.
- [30] 王春学,李栋梁.基于 MTM-SVD 方法的黄河流域夏季降水年际变化及其主要影响因子分析[J].大气科学,2012,36(4):823-834.
- [31] 王绍武,罗勇,唐国利,等.近 10 年全球变暖停滞了吗[J].气候变化研究进展,2010,6(2):95-99.
- [32] 程曼,王让会,薛红喜,等.干旱对我国西北地区生态系统净初级生产力的影响[J].干旱区资源与环境,2012, 26(6):1-7.
- [33] 余海龙,黄菊莹,王亭荷.宁夏中部干旱带 56 年来气候生产潜力变化特征研究:以宁夏中宁县为例[J].水土保持研究,2012,19(6):172-175.
- [34] 刘新,刘林春,尤莉,等.内蒙古地区气候生产潜力变化及其敏感性分析[J].中国农业气象,2018,39(8):531-537.
- [35] 孙森,徐柱,柳剑丽.内蒙古农牧交错区草地气候生产力对气候变化的响应[J].草业科学,2011,5(6):1085-1090.
- [36] 孙善磊,周锁铨,石建红,等.应用 3 种模型对浙江省植被净第一性生产力(NPP)的模拟与比较[J].中国农业气象,2010,31(2):271-276.