

福建省马尾松叶面积指数对气候的响应

许章华^{1,2}, 刘健^{1,2,3*}, 余坤勇^{1,2}, 龚从宏^{1,2}, 唐梦雅^{1,2},
谢婉君^{1,2}, 赖日文^{1,2}, 李增禄^{1,3}

(1. 福建农林大学 3S 技术应用研究所, 福州 350002; 2. 福建农林大学林学院, 福州 350002; 3. 三明学院, 福建三明 365000)

摘要: 掌握马尾松叶面积指数 (*LAI*) 的时空分布规律是实现马尾松毛虫害空间监测与预警的基础要求。以福建省 38 个气候台站测定的 2010 年平均气温、平均气温距平、降雨量、降雨量距平、日照时数及日照时数距平等 6 个气候要素及实地测定的 90 个马尾松 *LAI* 数据为基础, 分别从省域、地市两个尺度分析了福建省马尾松 *LAI* 对气候的响应规律。结果表明: (1) 除日照时数距平外, 其他 5 个气候要素对马尾松 *LAI* 均有显著影响, 相关系数排序为: 平均气温 > 降雨量 > 日照时数 > 平均气温距平 > 降雨量距平; (2) 从省域尺度上看, 马尾松 *LAI* 对平均气温的响应呈开口向下的抛物线, 对平均气温距平的响应可以用三次曲线较好地予以说明; *LAI* 对降雨量的响应是负向的, 降雨量距平对 *LAI* 的影响与平均温度相似; 对日照时数的响应则呈开口向上的抛物线; (3) 从地市尺度上看, 马尾松主产区南平、三明、龙岩 3 市的 *LAI* 普遍低于沿海非主产区, 尤以南平最低, 一方面是由于马尾松 *LAI* 对气候要素的直接响应, 另一方面则是通过气候对松毛虫分布的影响, 使 *LAI* 呈现沿海高、内陆低的空间特征。

关键词: 马尾松; 叶面积指数 (*LAI*); 气候要素; 响应; 福建省; 马尾松毛虫

中图分类号: Q949.66+5; S763; S757

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2013)02-0114-10

Response of *Pinus massoniana* Leaf Area Index (*LAI*) to Climate Indicators in Fujian Province

XU Zhang-Hua^{1,2}, LIU Jian^{1,2,3*}, YU Kun-Yong^{1,2}, GONG Cong-Hong^{1,2}, TANG Meng-Ya^{1,2},
XIE Wan-Jun^{1,2}, LAI Ri-Wen^{1,2}, LI Zeng-Lu^{1,3}

(1. Institute of Geomatics Application, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

3. Sanming University, Sanming, Fujian 365000, China)

Abstract: To understand spatial and temporal distribution regularity of *Pinus massoniana*, we used leaf area index (*LAI*) to achieve *Dendrolimus punctatus* Walker damage spatial monitoring and early warning. We used six climate indicators, namely average temperature, average temperature anomalies, precipitation, precipitation anomalies, sunshine hours and sunshine hour anomalies measured from 38 climate stations in 2010 in Fujian Province and 90 field measured *LAI*, and analysed the response of *P. massoniana* *LAI* to the climate from provincial and city scales, respectively. Results showed that: (1) in addition to sunshine anomalies, the other five climate indicators significantly influenced *P. massoniana* *LAI* in the order average temperature > precipitation > sunshine hours > average temperature anomalies > precipitation anomalies with the coefficients; (2) seen from the provincial scale, the response of *P. massoniana* *LAI* to average temperature presented as an open side down parabola, and the response to average anomalies was explained by a cubic curve; the response of *LAI* to precipitation was negative and the influence of precipitation anomalies was similar to average tem-

收稿日期: 2012-08-20, 修回日期: 2013-01-13。

基金项目: 福建省科技计划重点项目 (2011N0031); 国家自然科学基金资助项目 (40971043)。

作者简介: 许章华 (1985 -), 男, 福建福清人, 博士研究生, 研究方向为 3S 技术在资源环境中的应用 (E-mail: fafuxzh@163.com)。

* 通讯作者 (Author for correspondence): 刘健 (1963 -), 男, 福建福州人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为森林经营管理与 3S 技术应用。

perature, while response to sunshine hours presented as an open side upward parabola; (3) seen from the prefecture-level city scale, the *LAI* of Nanping, Sanming, and Longyan, the main producing areas of *P. massoniana* in Fujian, were generally lower than that in non- or low-producing coastal areas, with the *LAI* of Nanping being the lowest. On one hand, why the *LAI* of Nanping, Sanming, and Longyan being lower than other areas was because of the direct response of *P. massoniana* *LAI* to climate indicators, and on the other hand, by the impact of climate on the distribution of *Dendrolimus punctatus* Walker, *LAI* showed the spatial characteristics of coastal high and inland low.

Key words: *Pinus massoniana*; Leaf area index; Climate indicators; Response; Fujian Province; *Dendrolimus punctatus* Walker

叶面积指数(Leaf area index, *LAI*)有多种定义,最为针叶林常用的定义是单位面积上总叶面积的一半^[1]。*LAI*是植被的重要结构变量之一,可定量分析地球生态系统的能量交换特性,对全球变化和碳循环研究具有重要意义^[2,3]。因此,在降雨、温度、日照等气候要素的影响下,植被 *LAI* 亦呈现极为显著的全球性、区域性空间分异特征,植被 *LAI* 对气候因子的响应规律也成为林学、生态学、气象学等多个领域的研究热点。在国外, Tokar 等^[4] 分析了近 100 年来南欧黑松(*Pinus nigra*) *LAI*、产量等要素的演变特征,以此阐释这些指标对气候等环境要素的响应规律; Brut 等^[5] 以法国西南部为研究区,构建了该区域植被 *LAI* 的 CO₂ 响应地表模型(ISBAA-gs model of Météo-France),并基于该模型的反演结果与遥感反演产品 MODIS-*LAI* 比较; Dermody 等^[6] 研究了多年单作生态系统 *LAI* 与气候的变化对应关系,结果表明由于干旱气候造成的土壤水分流失将导致该系统 *LAI* 的降低。在国内,张佳华等^[7] 利用遥感反演的 *LAI* 数据和生物气候数据,建立了全球尺度 *LAI* 与降水、温度等因子的总体相关与距平相关,进一步阐明了植被季节和年际变化对气候变化的响应特征;王凤敏等^[8] 利用贵州省 2001 年全年 MODIS 影像反演的 8 天一景的 *LAI* 平均资料,建立了各种植被 *LAI* 与温度、降水的相关关系,揭示了植被 *LAI* 对季节、气候变化的敏感特征响应及其发生机制;罗宇翔等^[9] 同样采用 MODIS-*LAI* 数据,分析了 *LAI* 与温度、降水、日照时数及水汽压等气象要素的相关关系,结果表明,温度、水汽压、日照时数和降水对 *LAI* 的影响显著;丹利等^[10] 则利用 AVHRR-*LAI* 数据,对新疆 1982 – 2000 年植被时空变化进行定量分析,结果表明,该地区 *LAI* 受水分的

严格制约,与气温呈负相关,表现出干旱内陆地区植被受降水控制的地带特征;梁妙玲等^[11] 模拟了我国植被 *LAI* 的时空分布,结果发现年际 *LAI* 的分布与我国干燥度分布形势一致。有研究表明,失叶量或 *LAI* 是反映松毛虫危害程度的重要可监测因子之一^[12],因此,掌握 *LAI* 的时空分布规律对实现马尾松毛虫害空间监测与预警技术的突破具有决定性意义。为此,本文在现有数据基础上,通过分析马尾松 *LAI* 与气温、降雨、日照等气候要素间的关系及其对气候的响应规律,为马尾松毛虫害空间监测与预警研究提供重要参考。

1 研究区概况

研究区福建省位于我国东南沿海,是海峡西岸经济区的主体,纬度范围为:23°30′ ~ 28°22′N、115°50′ ~ 120°40′,东西长约 480 km,南北长约 530 km,土地总面积 12.4 万 km²,海域面积 13.6 万 km²。福建省素有“八山一水一分田”之称,境内峰岭耸峙、丘陵连绵;地势上呈西北高、东南低之态;拥有极为丰富的森林资源,是全国南方重点集体林区。至 2011 年底,全省共有林业用地 1.37 亿亩,占土地总面积的 75.3%;有林地面积 1.15 亿亩,森林覆盖率达 63.1%,居全国第一;森林蓄积量 4.84 亿 m³,列全国第七,多为人工林,蓄积量达 1.96 亿 m³,居全国第一。杉木、马尾松是福建省最主要的两种针叶用材树种。

2 研究方法

2.1 数据收集

2012 年 2 – 5 月,在福建省三明市、将乐县、沙县、南平市、华安县、云霄县、南安市、安溪县、莆田市、长汀县、建阳市、宁德市及福清市等 13 个县

(市)开展马尾松毛虫害调查。原则上,每县(市)调查松林小班 12 个,并设置长期监测站点,每个小班取 4 个测点,测点间保持 30 m 以上的距离,每个测点均进行相同的数据采集工作。测点立地质量等级以Ⅱ、Ⅲ级为主,林分龄组主要为中龄林与近熟林。由于生长的差异性及松毛虫的影响,测点郁闭度范围跨度较大,低者 0.20 以下,高者 0.90 以上。本文所用数据包括:GPS 坐标、*LAI*,*LAI* 的测定仪器是美国 LI-COR 公司的 *LAI*-2000 植物冠层分析仪。收集的气候数据包括:福建省 38 个气候台站(图 1)测定的年平均气温(℃)、年平均气温距平(℃)(距平是指当年值与历史多年平均值的差距,下同)、年降雨量(mm)、年降雨量距平(mm)、年日照时数(h)和年日照时数距平(h),年份为 2010 年。由于实地调查时间与气候数据时间存在差异,为避免时间不同步造成的干扰,综合野外调查结果与历史数据,选择 2010–2012 年林分健康状况较为一致的测点,将测得的 *LAI* 视同 2012 年,共计 90 组,数据分布情况见表 1。

2.2 气候要素空间化

气候要素由气候台站测定得到,台站分布位置与我们野外调查的位置不同,因此,首先应当使气候

要素与 *LAI* 相匹配;台站在全省范围内分布较为均匀,故可采用空间插值的方法对气温、降雨、日照及距平点状数据予以空间化。空间插值常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面,是空间模拟

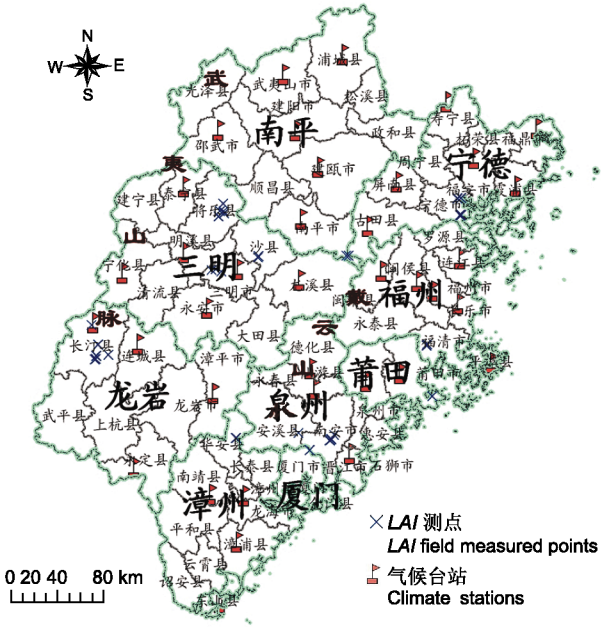


图 1 福建省 38 个气候台站及 90 个 *LAI* 测点分布
Fig. 1 Distribution of 38 climate stations and 90 Leaf area index (*LAI*) field measured points in Fujian Province

表 1 马尾松 *LAI* 野外测定数据情况
Table 1 Conditions of *Pinus massoniana* *LAI* field measured data

统计指标 Statistical indicator	县(市) County (City)												
	安溪县 Anxi County	长汀县 Changting County	福清市 Fuqing City	华安县 Huaan County	建阳市 Jianyang City	将乐县 Jiangle County	南安市 Nan'an City	南平市 Nanping City	宁德市 Ningde City	莆田市 Putian City	三明市 Sanming City	沙县 Shaxian County	云霄县 Yunxiao County
最大值 Maximum	1.83	2.07	2.66	1.76	2.77	1.48	2.54	2.50	1.91	2.59	1.87	2.23	2.14
最小值 Minimum	0.96	1.08	1.05	1.13	0.78	0.92	1.62	0.78	0.09	1.89	1.22	1.05	1.08
均值 ± 标准差 Mean ± standard deviation	1.57 ± 0.41	1.65 ± 0.32	2.09 ± 0.52	1.39 ± 0.24	1.46 ± 0.80	1.26 ± 0.20	2.08 ± 0.38	1.30 ± 0.74	1.57 ± 0.26	2.31 ± 0.37	1.55 ± 0.36	1.64 ± 0.43	1.67 ± 0.40
测点数 Measured points number	5	8	7	6	6	9	9	6	11	5	5	7	6
总体均值 ± 标准差 Overall mean ± standard deviation									1.65 ± 0.46				

的最常用方法。按实现的数学原理不同,可分为确定性插值与地统计插值(即克里格插值)两类,而每一类方法又分别由多个子方法组成;常用于气象要素的空间插值方法有:反距离加权平均法(Inverse distance weighted)、多项式插值法(Polynomial interpolation)、克里格法(Kriging)、样条函数法(Spline function method)等。这些插值方法中不存在最佳普适性,无所谓优劣之分^[13]。结合气象数据的获取方式、分布特征及前人相关研究^[14],本研究采用样条函数法中的规则样条函数法。样条函数法是使用一种数学函数对一些限定点通过值控制估计方差与多项式拟合的方法来产生平滑的插值曲线的空间插值方法^[15,16],包括张力样条函数插值法(Tension spline)与规则样条函数插值法(Regularized spline)。样条函数的计算公式为:

$$Z = \sum_{i=1}^n A_i d_i^{-2} \log d_i + a + bx + cy。$$

式中:Z为待估气候要素栅格值; d_i 为插值点到第*i*个气候台站的距离; $a + bx + cy$ 为气候要素的

局部趋势函数; $x、y$ 为插值点的地理坐标; $\sum_{i=1}^n A_i d_i^{-2} \log d_i$ 为一个基础函数,通过该函数可获得最小化表面的曲率; n 为参与插值的气候台站数目; $A_i、a、b、c$ 均为方程系数。

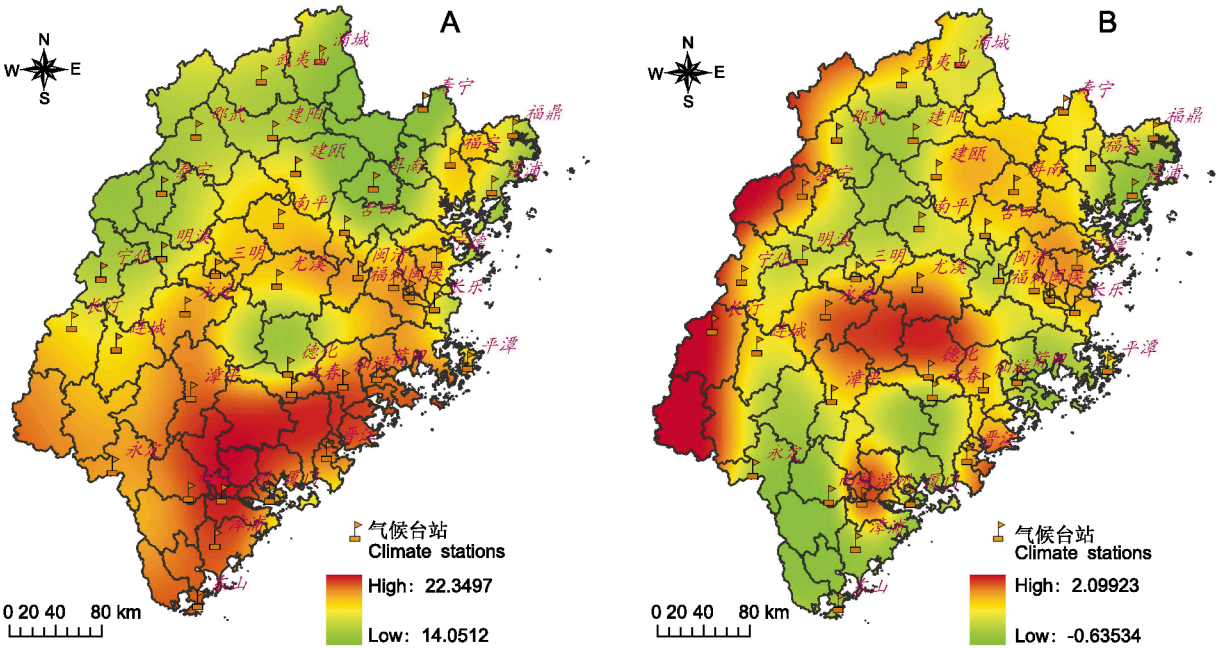
2.3 气候响应分析方法

从省域、地市两个空间尺度分别研究马尾松 LAI 对气候要素的响应特征。首先,利用相关分析法,探究省域尺度马尾松 LAI 对各气候要素的响应规律,分析气候要素与 LAI 的相关程度及其作用机制;在此基础上,以福建省 9 地市马尾松 LAI 为分析对象,分别统计 LAI 及各气候要素的均值,进而阐释地市尺度 LAI 与气候要素的对应关系及其原因。

3 结果与分析

3.1 福建省主要气候要素分布

在 ArcGIS 平台下,采用默认值(weight =0.1, Number of points =12),得到 2010 年福建省平均气温、平均气温距平、降雨量、降雨量距平、日照时数及日照时数距平分布图(图 2 ~图 4)。



A. 平均气温(℃); B. 平均气温距平(℃)。
A. Average temperature(℃); B. Average temperature anomalies(℃)。

图 2 2010 年福建省平均气温及距平分布
Fig. 2 Average temperature and anomalies distributions in Fujian Province in 2010

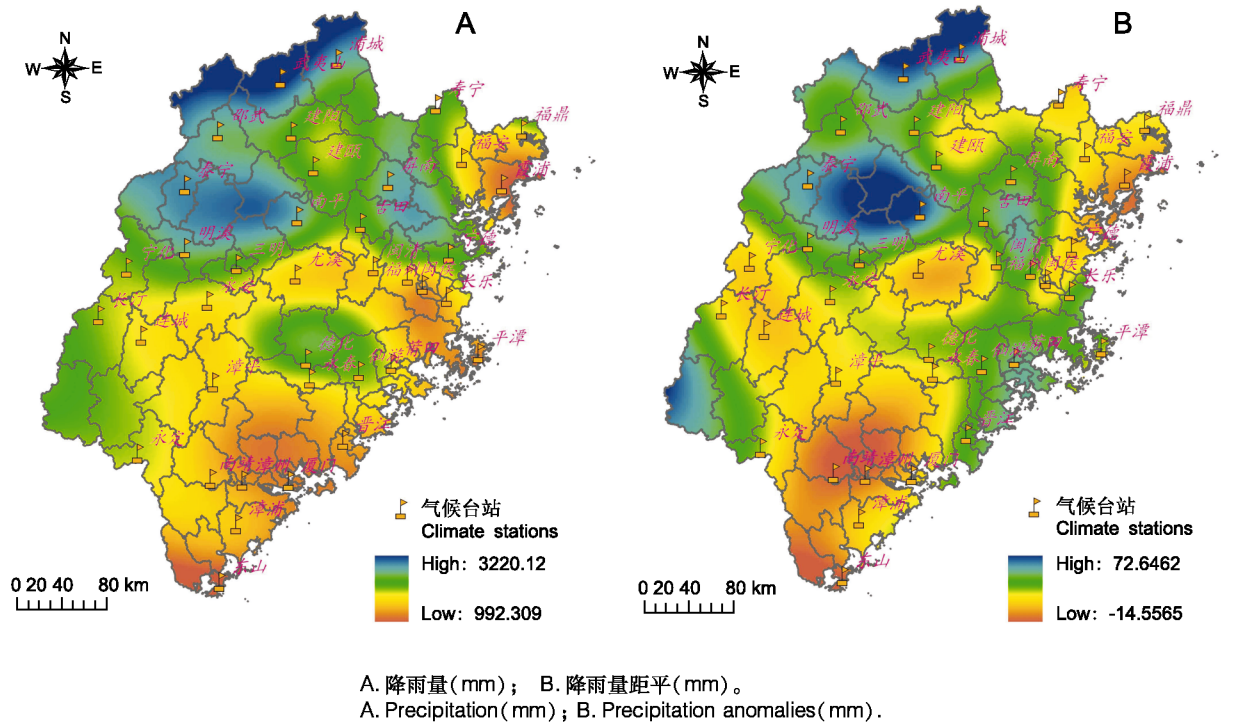


图 3 2010 年福建省降雨量及距平分布
Fig. 3 Precipitation and anomalies distributions in Fujian Province in 2010

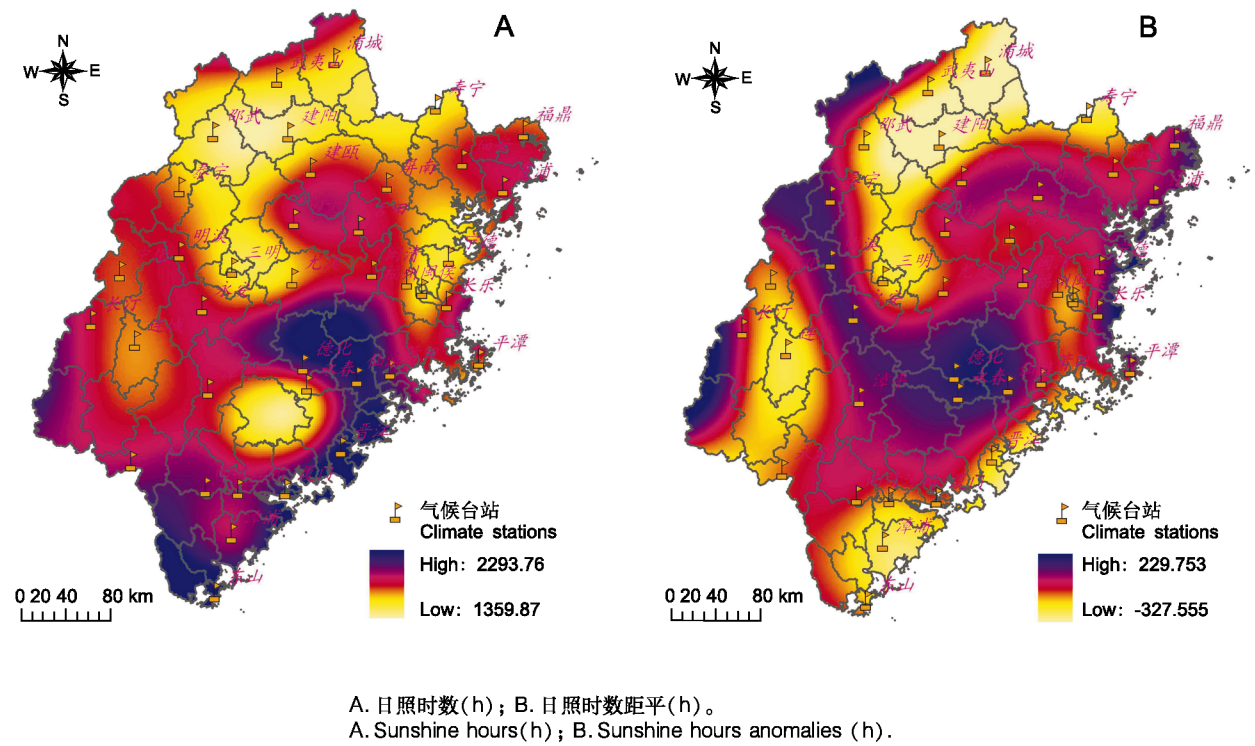


图 4 2010 年福建省日照时数及距平分布
Fig. 4 Sunshine hours and anomalies distributions in Fujian Province in 2010

3.2 马尾松 LAI 对气候的响应

为实现马尾松 LAI 与气候要素的一一对应,利用 90 个测点坐标读取 2010 年福建省平均气温、平均气温距平、降雨量、降雨量距平、日照时数及日照时数距平分布图的值;基于此数据分别从省

域、地市两个尺度研究马尾松 LAI 对气候的响应特征。

3.2.1 省域尺度马尾松 LAI 对气候的响应

对测点数据马尾松 LAI 与气候要素进行相关性分析,结果见图 5 ~图 7、表 2。

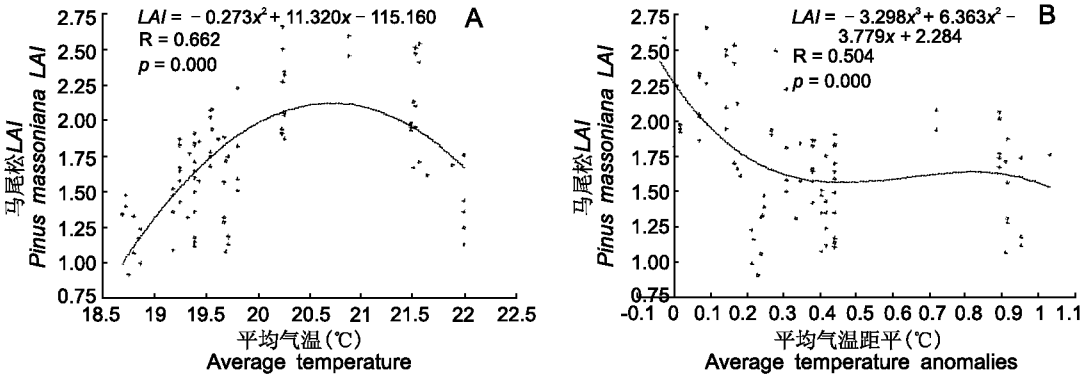


图 5 马尾松 LAI 与平均气温及距平相关关系
Fig. 5 Correlation relationships between *Pinus massoniana* LAI and average temperature, LAI and average temperature anomalies in Fujian Province

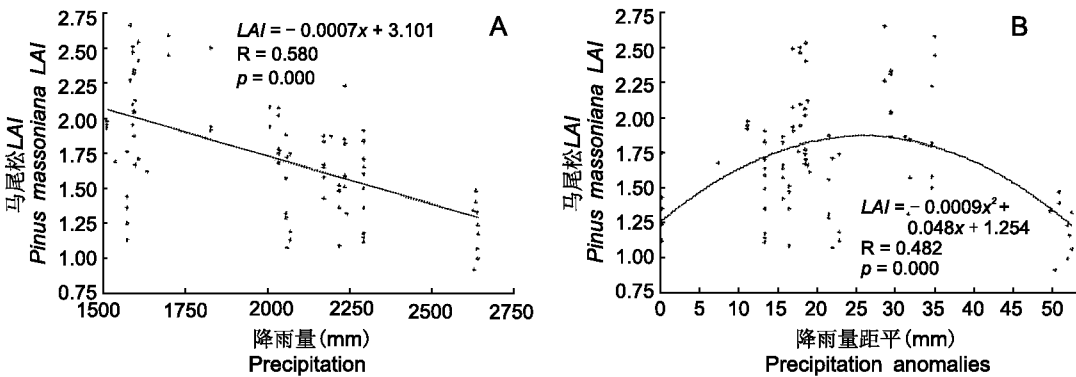


图 6 马尾松 LAI 与降雨量相关关系
Fig. 6 Correlation relationships between *Pinus massoniana* LAI and precipitation, LAI and precipitation anomalies in Fujian Province

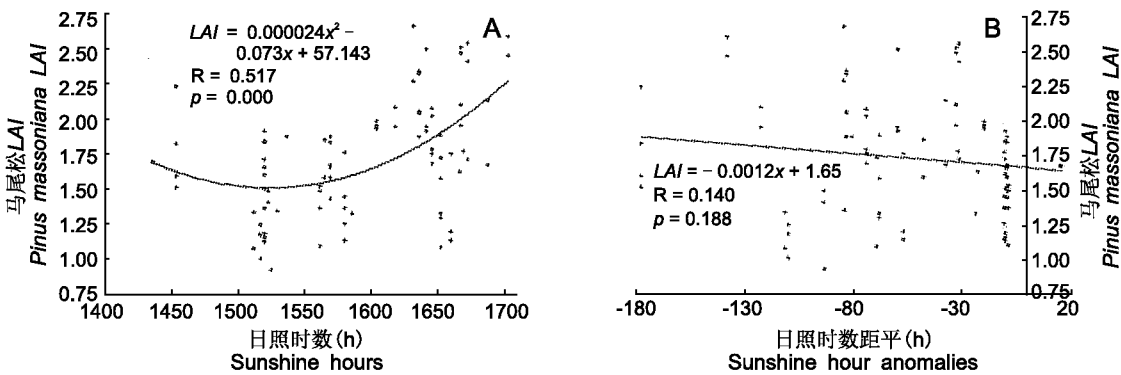


图 7 马尾松 LAI 与日照时数及距平相关关系
Fig. 7 Correlation relationships between *Pinus massoniana* LAI and sunshine hour, LAI and sunshine hour anomalies in Fujian Province

表 2 马尾松 LAI 与气候要素相关系数 (最佳拟合模型)
Table 2 Correlation coefficients between *Pinus massoniana* LAI and climate indicators (best fitting models)

统计指标 Statistical indicator	平均温度 Average temperature	平均温度距平 Average temperature anomalies	降雨量 Precipitation	降雨量距平 Precipitation anomalies	日照时数 Sunshine hours	日照时数距平 Sunshine hour anomalies
马尾松 LAI <i>Pinus massoniana</i> LAI	0.663 **	0.504 **	0.580 **	0.482 **	0.517 **	0.140

注: ** 表示通过 $p < 0.001$ 的显著性检验。
Note: ** indicates past $p < 0.001$ significance test.

由最佳拟合模型相关系数(图 5 ~ 图 7、表 2)可知,平均气温、平均气温距平、降雨量、降雨量距平及日照时数等 5 个气候要素对福建省马尾松 LAI 的影响非常显著,均通过了 99.9% 信度检验;而日照时数距平则未通过信度检验,说明该气候要素对马尾松 LAI 的影响未达到显著水平。按相关系数大小排序:平均气温 > 降雨量 > 日照时数 > 平均气温距平 > 降雨量距平,说明:(1)平均气温对马尾松 LAI 的影响最显著,两者关系最为密切,降雨量、日照时数、平均气温距平的影响程度依次减小;(2)在温度、降雨、日照 3 类气候要素中,温度要素对马尾松 LAI 的影响最显著,其次为降雨,而日照要素的影响程度最低;(3)较之于相对性指标(距平),绝对性指标与马尾松 LAI 的关系更为密切。

3.2.2 地市尺度 LAI 与气候要素的对应关系

为进一步分析马尾松 LAI 对气候要素的响应特征,对 90 个 LAI 测点数据进行空间插值(假设优势树种全为马尾松),得到福建省马尾松 LAI 的空间分布图(图 8),以全省 9 地市为单元,分别统计 LAI 及各气候要素的均值结果见表 3。

由图 8、表 3 可知,平均气温显示出明显的纬度地带性,南部漳州、厦门、泉州、莆田、龙岩均超过 20℃,由此以北的地市,除经济较为发达的福州年平均温度接近 20℃ (19.703℃)外,宁德、三明、南平等 3 个地市的均温都低于 19℃,其中南平最低。从平均气温距平来看,处于马尾松主产区的南平、三明、龙岩 3 市,2010 年均温较正常值有明显升高,非马尾松主产区域的“趋暖”现象总体上相对不明显。武夷山脉绵延 550 km,平均海拔达 1000 m,最高峰黄岗山 2158 m 有“华东屋脊”之美誉,山脉阻隔了来自东南沿海的季风,使处于迎风坡的南平、三明大部区域雨量明显较其他区域多。2010 年降雨量距平与平均气温距平保持基本一致的特征,即南

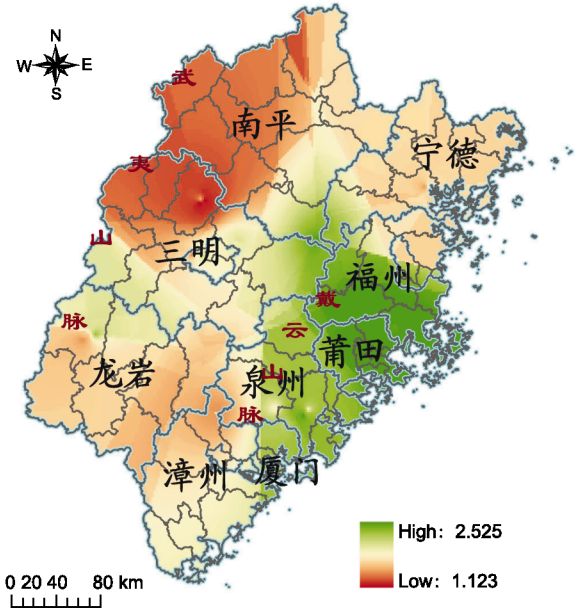


图 8 福建省马尾松 LAI 空间分布图
Fig. 8 Spatial distribution of *Pinus massoniana* LAI in Fujian Province

平、三明、龙岩 3 市 2010 年降雨量明显偏多。日照时数表现为较为明显的纬度地带性特征,南平、三明、龙岩 3 市由于山地丘陵众多,地形对日照时数的限制作用尤为明显:南平水汽多,地形限制大,日照时数最少;三明的日照时数亦处于较低水平,低于同纬度的福州;龙岩则显著低于同纬度的泉州。

4 讨论

福建省属亚热带湿润季风气候,夏季炎热多雨,冬季温暖干旱,加之复杂的山地丘陵地形,水热条件表现出显著的时空分布差异^[17]。从省域尺度上看,马尾松 LAI 对平均气温的响应呈开口向下的抛物线(图 5:A),均温达 20.5℃左右的区域,马尾松 LAI 达到最大;在均温 <20.5℃的区域,随着平均温度的升高,马尾松 LAI 亦呈升高趋势;而在均温 >20.5℃

表 3 福建省 9 地市马尾松 LAI 与气候要素对应关系
Table 3 Correspondence between *Pinus massoniana* LAI and climate indicators of
nine prefecture-level cities in Fujian Province

统计指标 Statistical indicator	地市 Prefecture-level city								
	宁德 Ningde	福州 Fuzhou	莆田 Putian	泉州 Quanzhou	厦门 Xiamen	漳州 Zhangzhou	龙岩 Longyan	三明 Sanming	南平 Nanping
LAI 均值 LAI mean	1. 613	1. 999	2. 224	1. 930	1. 978	1. 631	1. 574	1. 602	1. 478
平均气温(℃) Average temperature	18. 099	19. 703	20. 481	20. 416	21. 021	21. 047	20. 101	18. 920	18. 064
平均气温距平(℃) Average temperature anomalies	0. 320	0. 410	0. 308	0. 420	0. 151	0. 039	0. 590	0. 538	0. 338
降雨量(mm) Precipitation	2056. 403	1887. 126	1952. 236	1827. 050	1470. 962	1622. 790	1960. 353	2164. 305	2412. 866
降雨量距平(mm) Precipitation anomalies	20. 041	23. 648	31. 691	18. 809	9. 030	2. 110	20. 536	25. 717	36. 082
日照时数(h) Sunshinehours	1616. 026	1654. 557	1837. 299	1742. 572	1758. 470	1793. 555	1672. 251	1617. 288	1536. 094

的区域,温度升高,LAI 反而下降。温度有利于植被的生长发育,当温度达到一定值时,植被 LAI 值的升高受到了“饱和抑制”^[8];当温度过高时,植物体内水分蒸发过度,对其生理产生不利影响,此时 LAI 反而下降。较之于平均气温,气温距平对马尾松 LAI 的影响更为复杂,可以用三次曲线较好地对二者的关系予以说明;总的来看,当年平均气温与多年平均气温接近时,马尾松 LAI 达到最大,而当平均气温距平量增大,LAI 呈总体下降趋势,当处于一定偏离范围内时,LAI 下降极为明显。这说明马尾松适宜在一个年均温较为一致的环境中生长,全球变暖将给马尾松的生长、发育带来负面影响^[18]。

从年降雨总量看,福建省每年可保持 1400 ~ 2000 mm 的降雨量,雨量十分充沛,可充分满足植被生长需要。马尾松最适宜的降雨环境(需要的降雨量)是 800 ~ 1800 mm/a,当年降雨超过该值时,对马尾松的生长是不利的,加之降雨对植被长势的滞后性影响^[8],使得区域内马尾松 LAI 对降雨量的响应是负向的。闽中、闽北区域是马尾松的主产区,由于武夷山脉、戴云山脉两大山脉产生的“雨影效应”,使得闽中、闽北年降雨量多于东南沿海区域,故虽然该区域马尾松分布众多,但 LAI 并未比东南沿海区域高。降雨量距平对马尾松 LAI 的影响与平均温度较为相似,年降雨量较往年略多的区域,LAI 高;当距平数超过一定界限时,LAI 降低。

马尾松 LAI 对日照时数的响应则呈开口向上的抛物线特征(图 7:A),当日照时数介于(1500 h, 1550 h)区间时,LAI 达到低点;在福建省大部分区域,年日照时数均可超过 1500 h,此时,日照时数越长,LAI 越大,这是由于日照加速了大气、森林生态系统及林木截留水汽的蒸发,抵消了降雨的“滞后效应”。

从地市尺度看,马尾松主产区南平、三明、龙岩 3 市的 LAI 普遍低于位于沿海的非主产区,尤以南平最低。除了温度、降雨、日照等气候要素的直接影响外,还有一个重要原因是温度骤升、雨天多、湿度大的环境最有利于松毛虫卵的孵化及初孵幼虫的生长发育,给松毛虫的大发生创造了有利的环境^[19]。数据表明,2010 年,南平、三明、龙岩的部分县(市)马尾松毛虫活动猖獗,建阳、武夷山、泰宁等区域均发生较为严重的松毛虫灾害,这说明 2010 年的闽中、闽西的水热条件十分利于松毛虫蔓延,松毛虫咀嚼松针,失叶量异常增加,直接导致 LAI 的急剧下降,这也是马尾松主产区 LAI 明显低于非主产区的重要原因。

马尾松 LAI 分布的地市尺度差异性说明,在森林资源丰富的闽中、闽西、闽北地区(即南平、三明、龙岩 3 市),作为先锋树种的马尾松正面临着严峻的生态挑战。马尾松毛虫是我国南方 15 省(区)发生最严重的一种森林害虫,在福建省一年发生 2 ~ 3

代,闽西北以2代为主,偶尔发生3代;而沿海地区则一般为3代。20世纪末期,福建沿海的松毛虫害十分严重,后经多项人为干预措施,虫害得到较为有效的控制;进入21世纪,松毛虫则主要在南平、三明及龙岩一带活跃,且呈现出明显的周期性特征。本研究结果表明,闽中、闽西、闽北的松毛虫检疫、防治工作任务艰巨,建立起区域性、实时性的虫害监测与预警体系迫在眉睫。随着国产北斗导航系统的建设,环境减灾及资源等系列卫星的服役,建立南方地区马尾松毛虫害空间监测与预警体系的技术可行性已经具备。

马尾松 LAI 的空间分布受气候、立地、虫害、人为干扰等多种因素的影响,在气候要素中,气温、降雨和日照对马尾松毛虫的生长发育意义重大^[20],本文在已有数据的基础上,围绕马尾松 LAI 对气温、降雨、日照及其相应距平等要素的响应规律分别作了探讨,但要素的相互作用对 LAI 的影响规律仍须进一步研究。

5 结论

马尾松是我国南方地区重要针叶用材树种,该树种具有极强的耐瘠薄性,在林地质量条件极差的区域亦可存活,有“先锋树种”之美誉,生态效益极为可观。叶面积指数是反映马尾松生长状况的一项重要指标,摸索其对气候要素的响应规律具有重要意义,也是实现松毛虫害空间监测与预警必须掌握的基础内容。本研究结果表明:

(1)平均气温、平均气温距平、降雨量、降雨量距平及日照时数等5个气候要素对福建省马尾松 LAI 的影响非常显著,按相关系数大小排序为:平均气温 > 降雨量 > 日照时数 > 平均气温距平 > 降雨量距平;日照时数距平对马尾松 LAI 的影响未达到显著水平。

(2)从省域尺度上看,马尾松 LAI 对平均气温的响应呈开口向下的抛物线,均温达20.5℃左右的区域, LAI 达到最大,气温距平对 LAI 的影响比较复杂,可以用三次曲线较好地对其关系予以说明;马尾松 LAI 对降雨量的响应是负向的,降雨量距平对 LAI 的影响与平均温度相似;对日照时数的响应则呈开口向上的抛物线特征,当日照时数介于

(1500 h, 1550 h) 区间时, LAI 达到低点。

(3)从地市尺度上看,马尾松主产区南平、三明、龙岩3市的 LAI 普遍低于位于沿海的非主产区,尤以南平最低,这符合 LAI 对平均气温、平均气温距平、降雨量、降雨量距平及日照时数的响应规律。同时,2010年,南平、三明、龙岩地区气候条件十分有利于松毛虫的生长、发育,局部县(市)松毛虫害较为严重,这也是该区域 LAI 明显低于沿海区域的重要原因。

(4)气候要素既直接影响马尾松的生长,又通过影响马尾松毛虫的时空分布,对马尾松 LAI 产生作用;马尾松 LAI 的空间分布特征是对气候要素、森林健康状况综合响应的结果。

参考文献:

- [1] Chen J M, Black T A. Define leaf area index for non-flat leaves[J]. *Plant Cell Environ*, 1992, 15(4): 421–429.
- [2] Pocock M J O, Evans D M, Memmott J. The impact of farm management on species-specific leaf area index (LAI): Farm-scale data and predictive models[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2010, 135(4): 279–287.
- [3] Poulter B, Heyder U, Cramer W. Modeling the sensitivity of the seasonal cycle of GPP to dynamic LAI and soil depths in tropical rainforests[J]. *Ecosystems*, 2009, 12(4): 517–533.
- [4] Tokar F, Krekulova E. Structure, quality, production, LAI and dendrochronology of 100 years old Austrian pine (*Pinus nigra* ARNOLD) stand[J]. *J For Sci (Prague)*, 2005, 51(2): 67–76.
- [5] Brut A, Rudiger C, Lafont S, et al. Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France[J]. *Biogeosciences*, 2009, 6(8): 1389–1404.
- [6] Dermody O, Weltzin J F, Engel E C, et al. How do elevated CO_2 , warming, and reduced precipitation interact to affect soil moisture and LAI in an old field ecosystem? [J]. *Plant Soil*, 2007, 301(1–2): 255–266.
- [7] 张佳华, 符淙斌, 延晓冬, 等. 全球植被叶面积指数对温度和降水的响应研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 631–637.

- [8] 王凤敏,田庆久. 植被 MODIS-LAI 的温度降水响应[J]. 遥感信息, 2006(2): 34-37, 45.
- [9] 罗宇翔,向红琼,郑小波,等. MODIS 植被叶面积指数对贵州高原山地气象条件的响应[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 19-23.
- [10] 丹利,季劲钧,马柱国. 新疆植被生产力与叶面积指数的变化及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3582-3592.
- [11] 梁妙玲,谢正辉. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(5): 582-592.
- [12] 谢舒菁,李秀平,刘健,等. 马尾松毛虫害林分失叶量估测研究[J]. 三明学院学报, 2010, 27(6): 558-564.
- [13] Asa E, Saafi M, Membah J, *et al.* Comparison of linear and nonlinear Kriging methods for characterization and interpolation of soil data[J]. *J Comput Civil Engin*, 2012, 26(1): 11-18.
- [14] 王勇,李朝奎,陈良,等. 权重对空间插值方法的影响分析[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2008, 23(4): 77-80.
- [15] Deng X S, Tang Z A. Moving surface spline interpolation based on Green's function [J]. *Math Geosci*, 2011, 43(6): 663-680.
- [16] Allasia G, Cavoretto R, De R A. A class of spline functions for landmark-based image registration [J]. *Math Methods Appl Sci*, 2012, 35 (8): 923-934.
- [17] 张容焱,邓自旺,沈新勇,等. 福建春雨多时空尺度变化特征[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(1): 121-127.
- [18] 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.
- [19] 黄向东. 湖南省山区马尾松毛虫发生规律和可持续控制的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2003.
- [20] 朱建华,陈顺立,张再福. 森林病虫害预测预报[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2002: 160.

(责任编辑:王豫鄂)