

DOI: 10.5846/stxb202112173576

黄辉, 郑昌玲, 孟平, 张劲松, 同小娟, 程向芬. 2001—2019 年太行山南麓栓皮栎人工林叶面积指数与气候因子的关系. 生态学报, 2023, 43(4): 1646-1654.

Huang H, Zheng C L, Meng P, Zhang J S, Tong X J, Cheng X F. Relationship between leaf area index and climate factors in a *Quercus variabilis* plantation at the southern foot of Taihang Mountain from 2001 to 2019. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1646-1654.

2001—2019 年太行山南麓栓皮栎人工林叶面积指数与气候因子的关系

黄 辉^{1,2}, 郑昌玲³, 孟 平^{1,2}, 张劲松^{1,2,*}, 同小娟⁴, 程向芬^{1,2}

1 中国林业科学研究院林业研究所/国家林草局林木培育重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

3 国家气象中心, 北京 100081

4 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

摘要: 栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 是我国天然分布最广的树种之一, 太行山南麓属我国林业工程重点区域, 对气候变化较敏感, 研究该地区栓皮栎人工林叶面积指数 (LAI) 与气候因子的关系对我国林业生态工程建设、温带森林碳汇功能评估有重要意义。依托河南黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站, 利用 LAI 实测数据对 2001—2019 年基于 MODIS 地表反射率反演的 LAI 产品进行校正, 分析了近 19 年来太行山南麓的气候变化趋势, 以及 40 年生栓皮栎-刺槐-侧柏混交人工林 LAI 的变化特征及其与气候因子的关系。结果表明: 2001—2019 年实验区气候为变暖、变湿润趋势, 气温升高变化率为 0.70℃/10a, 生长季增温高于非生长季, 生长季和非生长季降水量分别为增加和减少趋势。近 10 年来气候暖湿化趋势加快, 高温天气发生的频率和强度增加。实验区栓皮栎混交人工林 LAI 为增加趋势, 近 19 年平均值为 2.09, 增长率为 0.21/10a, 近熟林时期 LAI 增长率低于中龄林时期。气温是影响 LAI 季节和年际变异的主导气候因子, 降水量主要影响 LAI 的季节变异。近熟林时期高温天气超过 35 d 的年份 LAI 比上一年度减小。

关键词: 气候因子; 叶面积指数; 高温; 气候变化; 栓皮栎

Relationship between leaf area index and climate factors in a *Quercus variabilis* plantation at the southern foot of Taihang Mountain from 2001 to 2019

HUANG Hui^{1,2}, ZHENG Changling³, MENG Ping^{1,2}, ZHANG Jinsong^{1,2,*}, TONG Xiaojuan⁴, CHENG Xiangfen^{1,2}

1 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forest University, Nanjing 210037, China

3 National Meteorological Centre, Beijing 100081, China

4 School of Ecology and Nature Conversation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: *Quercus variabilis* is one of the most widely distributed natural tree species in China. The southern foot of Taihang Mountain is one of the key areas of forestry engineering in China, which is sensitive to climate change. The study on the relationship between leaf area index (LAI) of *Quercus variabilis* plantation and climate factors in this area is of great significance to the construction of forestry ecological engineering and the evaluation of temperate forest carbon sink function

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFA0608101); 科技基础资源调查专项课题 (2021FY100701)

收稿日期: 2021-12-17; **网络出版日期:** 2022-10-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

in China. In this study, a 40-year-old mixed plantation (*Quercus variabilis*, *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis*) in the southern foot of Taihang Mountain was taken as the research object. Firstly, we corrected the MODIS LAI product from 2001 to 2019 by using measured LAI data. Secondly, we analyzed the climate change trend in the research area in recent 19 years. Finally, we analyzed the variation characteristics of LAI and discussed the relationship of LAI and climate factors. The results showed that the climate in the experimental area was warming and humid from 2001 to 2019. The rising rate of temperature is $0.70^{\circ}\text{C} \cdot \text{per ten years}$. The temperature increase in the growing season was higher than that in the non-growing season. The precipitation in growing season and non growing season increased and decreased, respectively. In recent 10 years, the trend of climate warming and humidification has accelerated, and the frequency and intensity of high-temperature weather have increased. The LAI showed an increasing trend, the average value in recent 19 years was 2.09, and the growth rate was $0.21/10\text{a}$. The growth rate of LAI in near-mature forest period was lower than that in middle-aged forest period. Temperature was the dominant climatic factor affecting the seasonal and inter-annual variation of LAI, and precipitation mainly affected the seasonal variation of LAI. The LAI in the years with high temperature days higher than 35 days was lower than that in the previous year in the near-mature forest period.

Key Words: climatic factors; leaf area index; high temperature; climate change; *Quercus variabilis*

气候变化尤其是变暖问题日益突出,已成为生态学、气象学等学科关注的焦点问题之一^[1-2]。全球地表平均温度较 1850—1900 年已升高约 1.09°C ,气候变暖将进一步影响全球水循环^[3],导致温度、水分等气候资源时空分配发生变化,进而影响陆地生态系统生产力和碳收支^[4-5]。我国从 1909—2011 年平均升温 $0.9-1.5^{\circ}\text{C}$ ^[6],近 50 年变暖加速^[7]。了解气候敏感区的气候变化趋势及其对植被的影响对在当地开展气候变化研究、实施林业生态工程等具有重要意义。

叶面积指数(LAI)是表征植被冠层结构的基本参数,也是陆地生态、水文模型中不可缺少的植被参数^[8],被世界气象组织列为表征全球气候变化的关键陆表参数之一^[9],对准确估算地表和大气之间的碳、水交换至关重要^[10-11]。LAI 与植物叶片的生长以及植物种类的自身特性、外部环境条件等有关^[12],其生长状况具有明显的季节和年际变化特征,了解 LAI 与气候因子的关系,有助于揭示气候变化对植被的影响。以往研究表明 LAI 的时空分布主要受温度、降水影响^[13],自 20 世纪 80 年代以来,我国大部分地区 LAI 为增加趋势,温度是引起 LAI 变化的主要原因^[14-16],地形因素、林龄、林分类型等对 LAI 也有影响^[17-19]。这些研究大多基于遥感资料反演的 LAI 产品生成栅格化数据,研究的空间尺度为区域至全国,其结果难以直接应用于具体研究站点的生态系统水碳过程研究。

黄河中游地区近 60 年来气候和生态环境发生了显著变化,极端天气气候事件增多,黄河水资源总量减小,产沙区水土流失加重^[20],严重影响了黄河流域生态安全。栓皮栎(*Quercus variabilis*)是我国天然分布最广的树种之一,从 25°N 到 40°N 均有分布,横跨多个气候带^[21]。河南黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站(以下简称小浪底站)位于黄河中游,属我国林业工程重点区域,区域内春旱频发,夏季高温期如遇降水不足也易发伏旱,对气候变化较敏感^[22],研究该区域栓皮栎人工林 LAI 与气候因子的关系对我国林业生态工程建设、温带森林碳汇功能评估有重要意义。本文以小浪底站实验区内 40 年生栓皮栎人工林为研究对象,利用 3 年 LAI 实测数据对 2001—2019 年基于 MODIS 地表反射率反演的 LAI 产品进行了校正,并结合同期气象观测资料,分析了近 19 年来太行山南麓的气候变化趋势,以及栓皮栎人工林 LAI 的季节和年际变化特征,探讨 LAI 与气候因子的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文依托河南黄河小浪底地球关键带国家野外科学观测研究站($35^{\circ}01'\text{N}$, $112^{\circ}28'\text{E}$, 410 m)。小浪底站位于河南省济源市,地处黄河中游、太行山南麓。属暖温带亚湿润季风气候,雨热同季,生长季(4—10 月)降

水量占全年总降水量 88.9%,日照时数占全年 64.4%。7 月份为全年最热月份,降水量也达全年最高,该月降水量约占全年总降水量的 1/4。生长季盛行风向为偏东风,1980—2019 年平均气温为 14.7℃,年降水量为 583.5 mm,年日照时数为 1899.4 h。

实验点位于站区中心偏西方向的人工混交林样地,土壤为棕壤和石灰岩风化母质淋溶性褐土,主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*),三个树种所占比例分别约为 82%、7%和 11%,平均冠层高度约为 12m,林木覆盖率约为 96%。

1.2 数据与方法

1.2.1 气象数据

本文使用的济源气象台站数据来自中国气象局国家气象信息中心,以 2001—2019 年为研究时段,包括平均气温、降水量和日照时数逐日数据。气温、降水量和日照时数的月值和年值均由逐日资料计算得出,日平均气温稳定通过 10℃的初、终日期采用五日滑动平均法确定。气象数据序列比较完整,仅有极个别缺失数据,对于气温和日照时数缺失数据,采用线性内插法进行插补,降水量缺失数据采用实验点附近国有林场的气象观测场雨量数据代替。为便于分析,本文以 1980—2019 年气象要素的平均值为气候平均值。

1.2.2 LAI 实测数据

2014 年 9—12 月、2015 年 3—5 月和 2019 年 7—9 月在实验区偏西方向的栓皮栎混交林样地(20 m×20 m)内,利用美国 Licor 公司生产的植被冠层分析仪(2014、2015 年采用 LAI-2000,2019 年起采用 LAI-2200)对 LAI 进行了测定。每次测定设置 6 个观测样点,每个样点设 6 次重复,取平均值为实测结果,测定频率根据不同季节设为 10—30 d。因 12 月至次年 2 月是栓皮栎、刺槐落叶季,LAI 非常低,此期间在 2014 年 12 月有一次观测,1—2 月未对 LAI 进行观测。LAI 单位为 m^2/m^2 ,为了简化,以下文中均略去其单位。

1.2.3 MODIS LAI 数据

因 LAI 实测数据难以覆盖所有研究年份与月份,为保证研究时间序列的连续性,本文使用了基于 GLASS 产品的 LAI 遥感资料,并用地面实测数据对遥感资料进行了校正。LAI 遥感资料来自国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>) GLASS 产品-叶面积指数 LAI_modis 数据集^[23-24],空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d,时间长度为 2001 年 1 月至 2019 年 12 月。该 LAI 数据集合理剔除了噪点,具有良好的时间稳定性,可弥补实测值缺失的不足。

LAI 实测值与 MODIS LAI 数据有较好的线性相关性(图 1),根据图 1 所示的线性方程对 MODIS LAI 数据进行了校正,将校正后的 MODIS 数据(时间分辨率 8 d)补全时间序列,得到逐日 LAI 资料,并计算得出 LAI 月均值和年均值。

1.2.4 数据处理

气象数据处理及计算均采用 Matlab 软件。逐步回归分析采用 SPSS 软件,设置信度达 99%为显著。

2 结果与分析

2.1 气温和降水量的年际变化

图 2 为 2001—2019 年小浪底站气温和降水量的年际变化。近 19 年来,实验区气候变暖趋势明显,气温

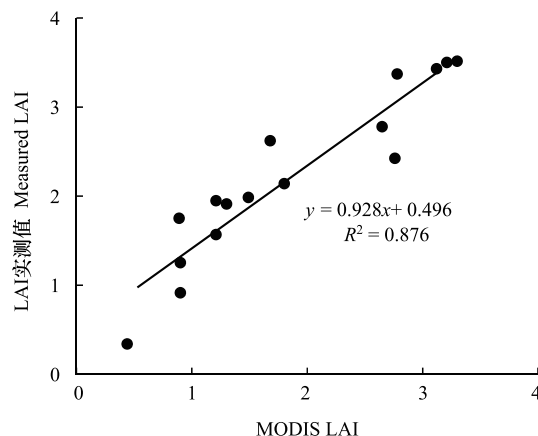


图 1 LAI 实测值与 MODIS LAI 的关系

Fig.1 Relationship between measured LAI and MODIS LAI

MODIS: 中分辨率成像光谱仪 Moderate-resolution Imaging spectroradiometer; LAI: 叶面积指数 Leaf area index

呈升高趋势,升温变化率为 $0.70^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。降水量年际差异较大,19 年里有 8 年降水量低于气候平均值,最高值出现在 2003 年,降水量达 979.3 mm,最低值出现在 2002 年,该年降水量仅有 374.8 mm。将 2001—2019 年分为 2001—2009 年、2010—2019 年两个时间段进行分析,2010 年之前的 9 年里、2010 年之后的 10 年里分别有 5 年和 3 年降水量低于气候平均值,分别有 3 年和 1 年气温低于气候平均值。2001—2009 年、2010—2019 年两个时间段的平均气温分别为 14.86°C 、 15.44°C ,平均降水量分别为 592.0、619.0 mm。近 10 年(2010—2019 年)整体为气温升高、降水增多的趋势,2010、2013 和 2019 年降水量比 40 年气候平均值分别偏低 12.4%、27.3%和 6.6%,其余 7 年降水量高于气候平均值,其中 2011、2018 年降水量比气候平均值分别高 47.0%、17.3%,其余 5 年的降水量增加均不超过 15.0%。

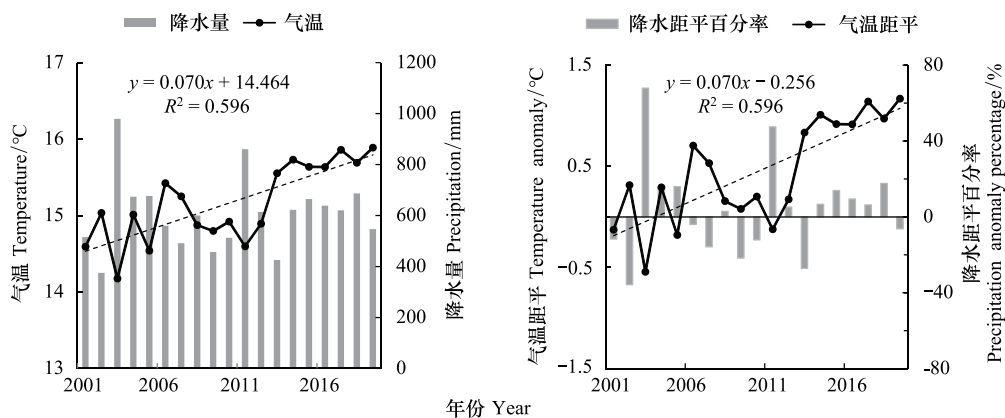


图 2 2001—2019 年气温和降水量的年际变化

Fig.2 Inter-annual variations of temperature and precipitation from 2001 to 2019

进一步比较 2001—2019 年生长季(4—10 月)和非生长季气温距平、降水距平百分率的年际变化(图 3)可发现,近 19 年来,生长季和非生长季年平均气温均为升高趋势,生长季气温升高变化率为 $0.82^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,高于非生长季。2001—2009 年、2010—2019 年生长季降水量低于生长季气候平均值(512.5 mm)的年份分别为 5 年和 2 年,2 个时段生长季降水量分别为 533.7、554.8 mm;非生长季降水量低于气候平均值的年份分别有 5 年和 7 年。两个时段生长季、非生长季气温低于气候平均值的年份分别有 3、2 年和 4、2 年,生长季平均气温分别为 21.91°C 、 22.61°C 。近 10 年(2010—2019 年)来,生长季平均气温在 2010、2011 年比气候平均值分别低 0.04°C 、 0.11°C ,其余年份均高于气候平均值,其中 2013、2018、2019 年比气候平均值增加 1.10°C 以上;非生长季气温在 2011、2012 年低于气候平均值,其余年份均高于气候平均值,其中 2014 年比气候平均值增加 1.48°C 。生长季降水量于 2010、2013 年分别低于气候平均值 5.8%、28.9%,其余年份均高于气候平均值;非生长季降水量在 2011、2015、2018 年高于气候平均值,其余年份均低于气候平均值。

2.2 高温日数和有效积温的年际变化

由图 2、图 3 可见,小浪底站区近 19 年来生长季降水量增加、非生长季降水减少的发生概率较高,即气候整体呈变暖、变湿润的趋势。生长季降水量增加理论上有利于植被生长,但由于同期温度也升高,需同时考虑升温尤其是高温对植被的影响。图 4 表示 2001—2019 年高温日数及 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温(A_e)的年际变化,其中高温指日最高气温达到 35°C 以上的天气。近 19 年实验区高温天气发生频次为增加趋势,增长速率为 $6.75 \text{ d}/10\text{a}$,有 4 年高温天气发生日数大于 35 d(2002、2013、2017、2019 年),其中有 3 年均发生在近 10 年。

10°C 是喜温植物适宜生长的起始温度^[25-26], $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温是衡量区域热量资源的重要指标,稳定通过 10°C 的初终日期可一定程度影响植被物候期。由图 4 可见, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温为增加趋势,变化率为 $215.44^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,近 19 年有效积温最低值出现在 2003 年,次低值出现在 2010 年。分析这两年有效积温较低的原因发现,2003 年平均气温为 14.18°C ,比气候平均值偏低 0.54°C ,是近 19 年里温度最低的年份。2010 年 10°C 持续日数是近

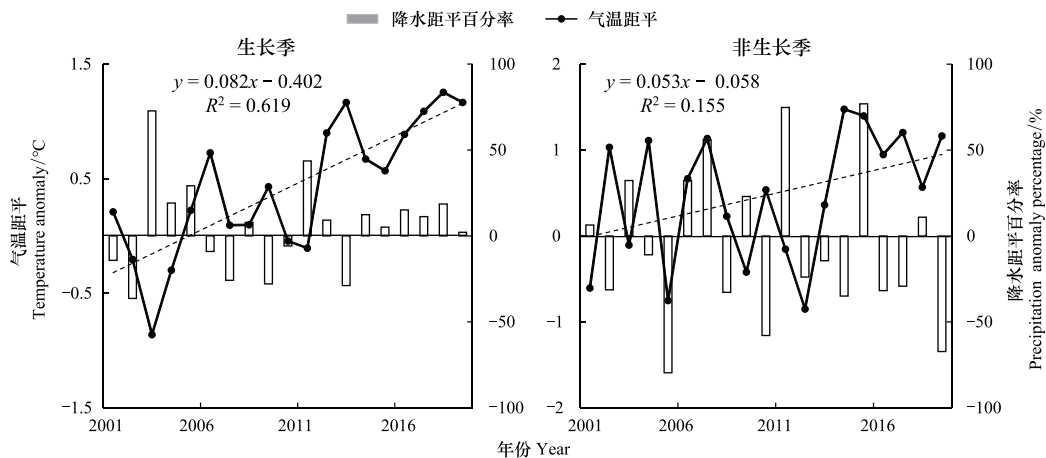


图3 2001—2019 年生长季和非生长 TA 和 PAP 的年际变化

Fig.3 Inter-annual variations of TA and PAP in growing season and non-growing season from 2001 to 2019

虚线为气温距平的线性趋势线; TA: 气温距平 Temperature Anomaly; PAP: 降水距平百分率 Precipitation anomaly percentage

19 年里最少的年份,分析该年逐日气象资料发现,该年 4 月中旬出现了一次强冷空气过程,48 小时内日最低气温降幅达 9℃,导致该年 10℃ 初日较迟、10℃ 持续日数低于其它年份。

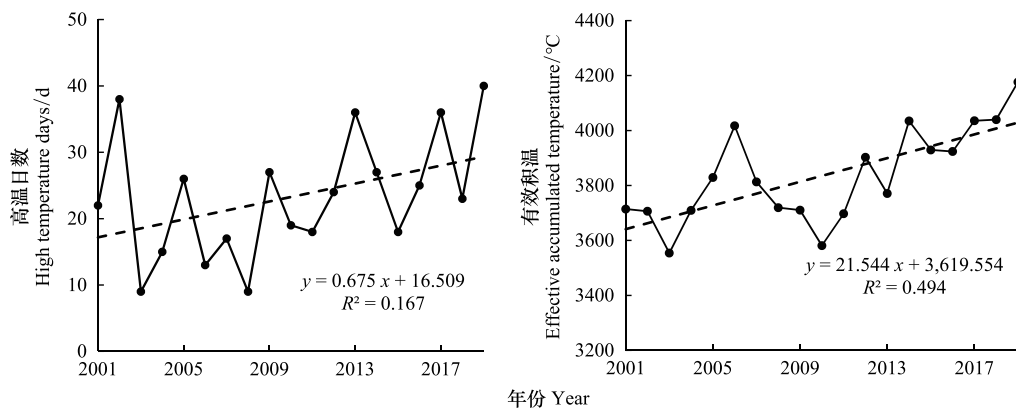


图4 2001—2019 年高温日数和 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温的年际变化

Fig.4 Inter-annual variations of high temperature days and effective accumulated temperature

2.3 LAI 的年际和季节变化

图 5 表示 2001—2019 年 LAI 的季节和年际变化。LAI 的季节变化与气温和降水较为一致,春季升温后 LAI 开始迅速增加,并在夏季达到最大,于秋季逐渐降低,冬季为全年最低值。2001—2019 年实验区栓皮栎混交林 LAI 整体表现为增加趋势,变化率约为 0.21/10a,其中 2001—2009 年处于中龄林时期,也是栓皮栎速生期,LAI 年增长较快,变化率为 0.38/10a,9 年平均 LAI 和生长季平均 LAI 分别为 2.01、2.74;2010—2019 年处于近熟林时期,人工林进入胸径生长盛期,LAI 年增长变缓,变化率为 0.30/10a,平均 LAI 和生长季平均 LAI 分别为 2.17、2.93。近 19 年 LAI 年平均值和月平均值的变化区间分别是 1.75—2.32、0.72—3.74,19 年平均值为 2.09。LAI 较上一年度明显降低的年份有:2003、2010、2013、2017 及 2019 年,对比同期气候状况发现,2003 年降水异常偏高(大于 900 mm),气温为近 19 年最低,日照时数也比气候平均值偏低 14.5%;2010、2013 年为高温干旱年份,日照时数均低于气候平均值;2017 和 2019 年为异常高温年份,气温较气候平均值偏高 1.10℃ 以上。异常的气候条件可能是这几个年份 LAI 比上一年明显偏低的原因。

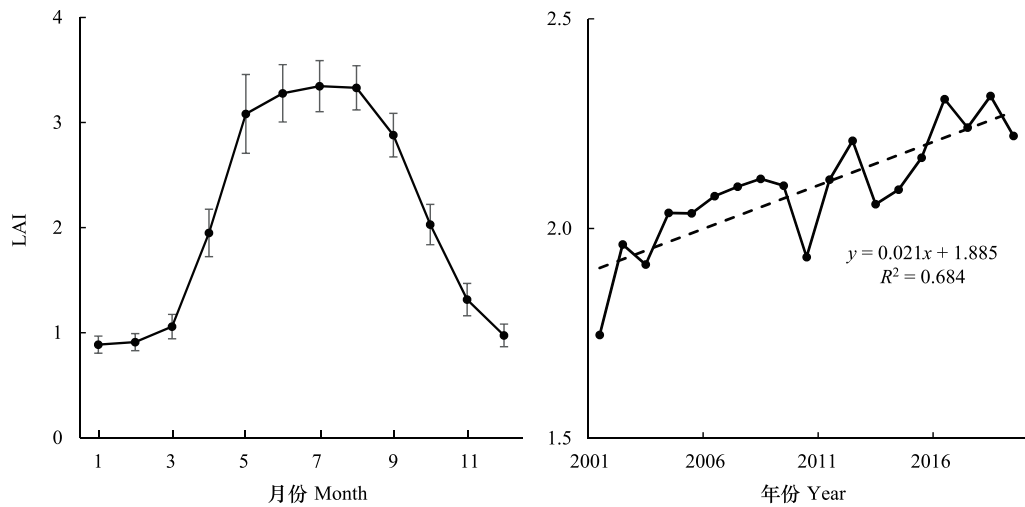


图 5 2001—2019 年 LAI 的季节和年际变化

Fig.5 Seasonal and inter-annual variations of LAI from 2001 to 2019

2.4 LAI 与气候因子的关系

图 6 表示 2001—2019 年 LAI 与气候因子在不同时间尺度上的关系。气温和 LAI 为明显的正相关关系,在月尺度上,平均气温高的月份,LAI 也更大;年平均气温每升高 1℃,LAI 增加约 0.18。月降水量高的月份,LAI 也较高,尤其是月降水量高于 100 mm 的月份,LAI 均值大于 3,这是由于这些月份大多处于夏季(6—8 月)植被旺盛生长期;近 19 年仅有 1 个月降水量大于 250 mm(2011 年 9 月),该月 LAI 为 3.003。年降水量在 600—700 mm 之间时最适宜植被生长,出现的频率也最高,LAI 平均值为 2.17(图 6)。年降水量高于 900 mm(2003 年)及低于 400 mm(2002 年)的两年,人工林处于中龄林时期,LAI 整体水平要低于近熟林时期。在月尺度和年尺度上,LAI 均随日照时数增加而增大。月日照时数低于 50 h 一共出现 2 次,分别为 2005 年 7 月和 2014 年 2 月,这两个月的 LAI 分别为 3.29 和 0.82。

对 LAI 与气候因子相关性的逐步回归分析表明(表 1),气温是影响 LAI 季节和年际变异的主要气候要素,降水量对生长季月平均 LAI 有协同影响,辐射对 LAI 的影响主要表现在非生长季,即生长季内辐射不是 LAI 的限制因素。

表 1 不同时间尺度 LAI 与气候因子相关性的逐步回归分析参数

全年 Whole year		生长季 Growing season		非生长季 Non-growing season	
气候因子 Climatic factor	<i>r</i>	气候因子 Climatic factor	<i>r</i>	气候因子 Climatic factor	<i>r</i>
<i>T</i> ^a	0.95 **	<i>T</i> ^a	0.87 **	<i>T</i> ^a	0.59 **
<i>T</i> , <i>P</i> ^a	0.95 **	<i>T</i> , <i>P</i> ^a	0.88 **	<i>T</i> , <i>n</i> ^a	0.62 **
<i>T</i> ^b	0.66 **	<i>T</i> ^b	0.60 **	—	—

r: 逐步回归的相关系数;*T*: 气温 Temperature;*P*: 降水 Precipitation;*n*: 日照时数 Sunshine duration;*a*,*b*分别为月尺度和年尺度;* * 表示通过 0.01 的显著性水平检验

3 讨论

小浪底站栓皮栎混交林年和生长季平均 LAI 增长率分别为 0.21/10a 和 0.28/10a,中龄林、近熟林时期生长季 LAI 增长率分别为 0.63/10a、0.38/10a,高于华北地区年和生长季平均 LAI 增长率(分别为 0.12/10a 和 0.16/10a)^[15]及河北省生长季平均 LAI 增长率(0.08/10a)^[27]。原因可能是由于本文是对具体试验站点、具体

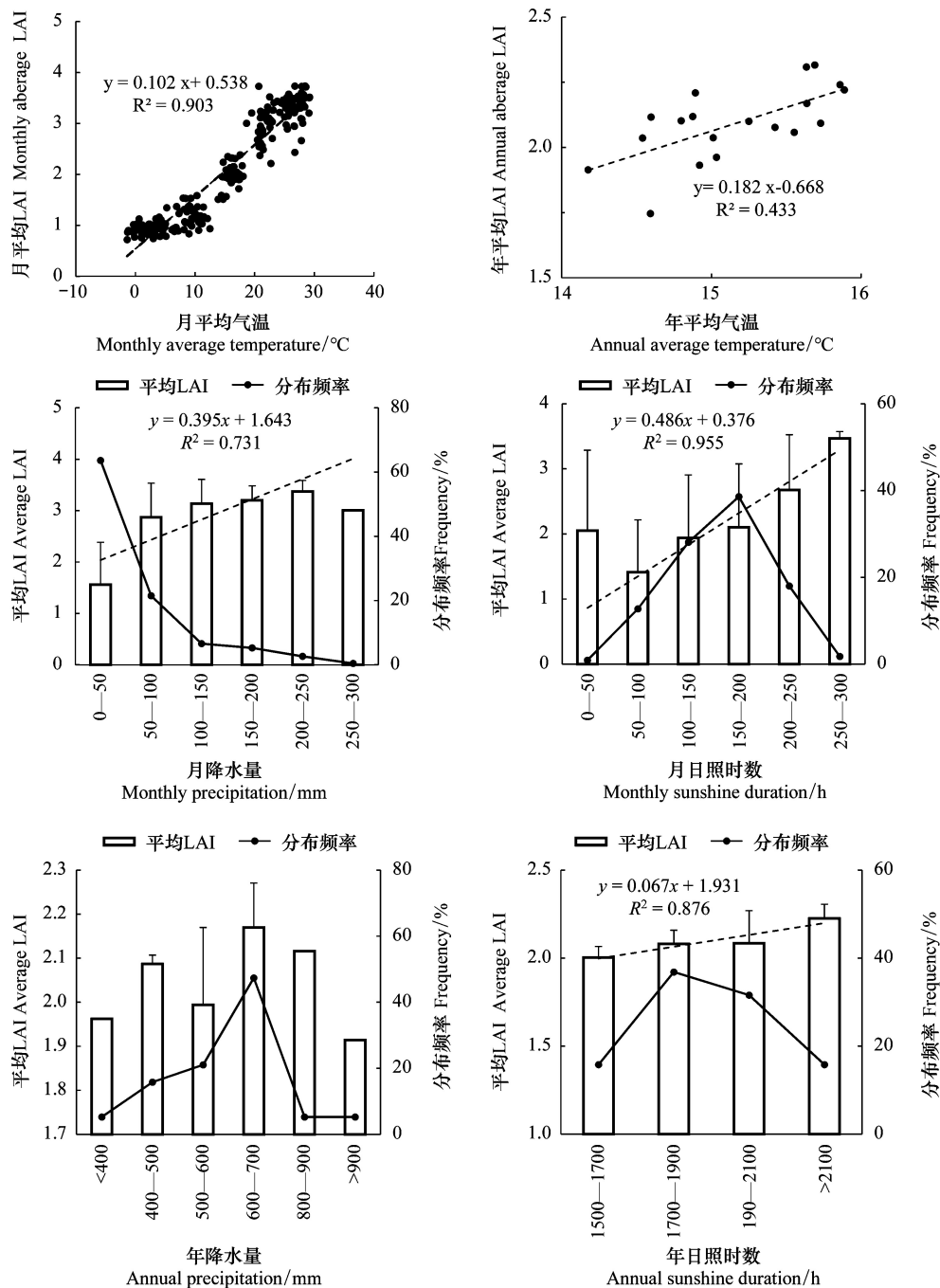


图6 2001—2019年 LAI 与气候因子的关系

Fig.6 Relationship between LAI and climatic factors

林分类型人工林的研究,而以往对华北地区或河北省 LAI 的研究结果为基于遥感数据估算的区域内多种植被类型的整体平均值,且未考虑林龄、地形、土壤等因素的影响。

对比北京山区栓皮栎天然次生林生长季(6—9月) LAI 平均值 3.78^[17],小浪底站栓皮栎人工混交林生长季(4—10月) LAI 平均值为 2.84,6—9月 LAI 平均值为 3.21,略低于北京山区次生林。两处研究区域主要土壤类型相似,均为棕壤、褐土且土层较薄;在气候条件方面,小浪底站年平均气温略高于北京山区,年降水量偏低 116.5 mm;两地海拔高度和经度相差不大,北京山区纬度在 40 $^{\circ}\text{N}$ 附近;北京山区栓皮栎天然次生林主要林下灌木为荆条、蚂蚱腿子,小浪底站栓皮栎人工林主要林下灌木为荆条、胡枝子、扁担木,此外,北京山区的研

究未提及林龄。林分类型、林龄、水热资源以及地理地形等因素的差异可能是造成两地栓皮栎林 LAI 差异的原因。此外,不同区域的栓皮栎对环境变化的适应与响应机制差异^[28—29]也可能是造成小浪底站 LAI 低于北京山区的原因。

LAI 的时空分布主要受气温、降水影响^[13,30],我国大部分地区 LAI 为增加趋势,并且气温变化是引起 LAI 年际差异的主要原因^[14—16],降水量增加会导致华北森林 LAI 上升^[31],LAI 的季节变化特征与气温、降水的季节性变化特征一致^[27,30]。本文结果也显示,LAI 季节和年际变异主要受气温影响,降水量主要表现在对 LAI 季节变异的影响(图 6、表 1)。林龄也是 LAI 的影响因素之一,乔木中龄林、成熟林的 LAI 高于过熟林和幼龄林^[19]。本文研究对象人工林在 2001—2009 年、2010—2019 年分别处于中龄林、近熟林时期,林龄的影响相对较小,尤其是 2010 年以后,林木进入胸径生长盛期,林龄对 LAI 的影响相对较低,LAI 的年际变异更多地受气候因素影响。LAI 最低的两年出现在 2010、2013 年(图 5),对比气象条件发现(图 2、图 3),这两年降水量比气候平均值偏低 10.0%以上,生长季降水量也偏低,其中 2010 年 LAI 为近 10 年最低值,其生长季气温和降水比气候平均值分别低 0.04℃、5.83%,有效积温也为近 10 年最低,生长季内较低的气温以及降水减少是引起该年 LAI 较低的原因。2013 年气温和降水比气候平均值分别偏高 0.83℃、减少 27.1%,尤其是生长季气温和降水分别比气候平均值分别偏高 1.17℃、减少 28.9%,高温偏旱的生长季导致该年 LAI 较低。2016、2018 年平均 LAI 为 2.31、2.32,为近 10 年 LAI 最高的两年,这两年生长季气温、降水分别比气候平均值偏高 0.89℃和 1.25℃、14.4%和 17.8%,适宜的水热条件使得这两年 LAI 较高。

高温天气均出现在生长季,频繁发生高温天气会抑制植被的光合作用,降低净光合速率,进而影响植物生长^[32—34]。近 19 年高温日数为增加趋势(图 4)。近熟林时期高温日数超过 35 d 的 3 年:2013、2017、2019 年(图 4),其 LAI 均比上一年度减小(图 5),可能是由于高温天气通过抑制植被光合作用进而对 LAI 产生影响。

南方地区由于多雨尤其是生长季内降水较多,辐射(日照时数)也是影响 LAI 的重要气候因素^[35]。本文研究区域生长季内日照时数约占全年总日照时数 64.4%,辐射在生长季内并不是栓皮栎人工林 LAI 的限制因子,但可影响非生长季 LAI 的季节变异(表 1),文中以气象台站常规观测的日照时数资料代表辐射,未来可结合能见度、气溶胶、云量、植被光合作用等观测资料进一步分析辐射对人工林生长的影响。

4 结论

2001—2019 年小浪底站实验区气候变化趋势整体为趋于暖湿化,生长季增温高于非生长季,生长季降水量增加、非生长季降水减少。近 10 年来气候暖湿化趋势加快,高温天气发生的频率和强度增加。实验区栓皮栎人工林 LAI 为增加趋势,近熟林时期 LAI 增长率低于中龄林时期。气温是影响 LAI 季节和年际变异的主导气候因子,降水量主要影响 LAI 的季节变异。近熟林时期高温天气超过 35 d 的年份 LAI 均比上一年度减小。气候变暖有利于植被生长,但也会导致极端天气事件发生频次增加。气候变暖尤其是高温天气对研究区域植被的影响,需结合植被生长相关数据作进一步的研究。本文分析了小浪底站近 19 年气候变化趋势及栓皮栎人工林 LAI 与气候因子的关系,可为当地气候变化研究和林业生态工程实施以及维护黄河流域生态安全和推动黄河流域高质量发展提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] Ding Y H. Sustainable management and action in China under the increasing risks of global climate change. *Engineering*, 2018, 4(3): 301-305.
- [2] Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, Benz D, Willis K J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 2016, 531(7593): 229-232.
- [3] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al.]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 5.
- [4] Allen C D, Macalady A K, Chenchouni H, Bachelet D, McDowell N, Vennetier M, Kitzberger T, Rigling A, Breshears D D, Hogg E H, Gonzalez P, Fensham R, Zhang Z, Castro J, Demidova N, Lim J H, Allard G, Running S W, Cobb N. A global overview of drought and heat-

- induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(4): 660-684.
- [5] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature*, 1996, 382(6587): 146-149.
- [6] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015: 13.
- [7] 任国玉, 任玉玉, 李庆祥, 徐文慧. 全球陆地表面气温变化研究现状、问题和展望. *地球科学进展*, 2014, 29(8): 934-946.
- [8] Chen J M, Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 153-162.
- [9] GCOS. The Global Observing System for Climate: Implementation Needs (GCOS-200). World Meteorological Organization, 2016: 31-32.
- [10] Rogers C, Chen J M, Croft H, Gonsamo A, Luo X Z, Bartlett P, Staehler R M. Daily leaf area index from photosynthetically active radiation for long term records of canopy structure and leaf phenology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 304/305: 108407.
- [11] 侯吉宇, 周艳莲, 刘洋. 不同叶面积指数遥感数据模拟中国总初级生产力的时空差异. *遥感技术与应用*, 2020, 35(5): 1015-1027.
- [12] 朱高龙, 居为民, 范文义, 周艳莲, 李显凤, 李明泽. 帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2117-2124.
- [13] 黄玫, 季劲钧. 中国区域植被叶面积指数时空分布——机理模型模拟与遥感反演比较. *生态学报*, 2010, 30(11): 3057-3064.
- [14] 韩思淇, 麻泽龙, 庄文化, 鲁恒, 刘铁刚, 申军. 2000—2018 年黄河源植被叶面积指数时空变化特征. *灌溉排水学报*, 2019, 38(12): 57-62.
- [15] 彭飞, 孙国栋. 1982—1999 年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系. *气候与环境研究*, 2017, 22(2): 162-176.
- [16] 王志慧, 姚文艺, 汤秋鸿, 杨二, 孔祥兵, 王玲玲, 肖培青. 2000—2014 年黄土高原植被叶面积指数时空变化特征. *中国水土保持科学*, 2017, 15(1): 71-80.
- [17] 蒋丽伟, 张家琦, 赵一臣, 赵永雷. 北京山区典型林分生长季叶面积指数动态变化. *林业资源管理*, 2019(2): 132-136.
- [18] 刘志理, 毕连柱, 宋国华, 王全波, 刘琪, 金光泽. 典型阔叶红松林叶面积指数的空间异质性. *北京林业大学学报*, 2018, 40(11): 1-11.
- [19] 黄柳菁, 林欣, 刘兴诏, 庄长伟, 肖荣波. 广东不同林龄乔木生物量及物种多样性与叶面积指数的关系. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2017, 37(6): 91-98.
- [20] 王有恒, 谭丹, 韩兰英, 李丹华, 王鑫, 卢国阳, 林婧婧. 黄河流域气候变化研究综述. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 235-246.
- [21] 倪妍妍, 胡军, 刘建锋, 王小菲, 张玉婷, 江泽平. 氮磷添加对栓皮栎不同地理种源幼苗温度耐性的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1061-1068.
- [22] 黄辉, 孟平, 张劲松, 郑宁, 贾长荣. 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子. *生态学报*, 2014, 34(3): 667-673.
- [23] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Xiang Y, Zhao X, Song J L. Long-time-series global land surface satellite leaf area index product derived from MODIS and AVHRR surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(9): 5301-5318.
- [24] Xiao Z Q, Liang S L, Wang J D, Chen P, Yin X J, Zhang L Q, Song J L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 209-223.
- [25] 刘少华, 严登华, 翁白莎, 邢子强, 王刚. 近 50a 中国 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温时空演变. *干旱区研究*, 2013, 30(4): 689-696.
- [26] 郑度, 欧阳, 周成虎. 对自然地理区划方法的认识与思考. *地理学报*, 2008, 63(6): 563-573.
- [27] 张宇佳, 袁金国, 张莎. 2002—2011 年河北省植被 LAI 时空变化特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2015, 39(1): 86-92.
- [28] 李焱, 张兴旺, 方炎明. 气候变暖对中国栓皮栎地理分布格局影响的预测. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3381-3389.
- [29] 吴丽丽, 康宏樟, 庄红蕾, 刘春江. 区域尺度上栓皮栎叶性状变异及其与气候因子的关系. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2309-2316.
- [30] 任宏昌, 史学丽, 张祖强. 2003—2009 年中国地区叶面积指数变化特征分析. *气象科学*, 2014, 34(2): 171-178.
- [31] 柳艺博, 居为民, 陈镜明, 朱高龙, 邢白灵, 朱敬芳, 何明珠. 2000—2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征. *科学通报*, 2012, 57(16): 1435-1445.
- [32] 张燕红, 吴永波, 刘璇, 朱嘉馨. 高温和干旱胁迫对杨树幼苗光合性能和抗氧化酶系统的影响. *东北林业大学学报*, 2017, 45(11): 32-38.
- [33] 李力, 刘玉民, 王敏, 吴念, 刘正艳, 翁敏. 3 种北美红枫对持续高温干旱胁迫的生理响应机制. *生态学报*, 2014, 34(22): 6471-6480.
- [34] 黄澈澈, 张念念, 胡庭兴, 李晓清, 何远洋, 尹丽. 高温胁迫对不同种源希蒙得木叶片生理特性的影响. *生态学报*, 2011, 31(23): 62-70.
- [35] 许章华, 刘健, 余坤勇, 龚从宏, 唐梦雅, 谢婉君, 赖日文, 李增禄. 福建省马尾松叶面积指数对气候的响应. *植物科学学报*, 2013, 31(2): 114-123.