

DOI: 10.20103/j.stxb.202209302795

屈卓然, 李小雁, 邓元红. 青藏高原木本植物扩张对生长季地表昼夜温度的影响. 生态学报, 2023, 43(21): 8816-8829.

Qu Z R, Li X Y, Deng Y H. Effect of woody plant encroachment on daytime and nighttime land surface temperature during growing season on Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8816-8829.

青藏高原木本植物扩张对生长季地表昼夜温度的影响

屈卓然^{1,2}, 李小雁^{1,2,*}, 邓元红^{1,2}

1 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 北京 100875

摘要: 木本植物扩张或灌丛化是全球性的生态环境问题。近年来青藏高原发生了大规模的木本植物扩张。然而木本植物在青藏高原扩张的时空分布特征及其对局地地表温度(LST)如何影响尚不清楚。基于 MODIS 土地覆盖产品识别出青藏高原木本植物扩张的空间分布, 并利用移动窗口搜索法, 探究其对生长季昼夜 LST 的影响规律及成因。结果表明, 2001 至 2018 年木本植物扩张的范围和程度均整体呈增加的趋势。在 2018 年, 木本植物扩张使生长季白天 LST 降低(2.60 ± 0.34) °C, 夜间 LST 增加(0.94 ± 0.22) °C, 净效应使日均 LST 降低(0.83 ± 0.24) °C。产生这种现象的原因是蒸散发增加($+13.46 \pm 6.65$) mm/a 等引发的降温效应超过了以反照率减少(-0.031 ± 0.003) 为代表的增温效应。气候背景对该影响的空间分布具有相当的控制作用, 即降水主导着白天 LST 的改变, 但气温在夜间 LST 变化中占据更重要的地位。总体上, 在气温越低、降水率越高、高程越低的地方发生的木本植物扩张更倾向于降低局地 LST。与同一年中越湿润的地方越倾向于降温“相悖”的是, 在不同的水文年, 更干旱的年份对白天 LST 具有更强的降温作用, 这可能是受木本植物和草本植物从土壤深处吸水能力差距的影响。理解木本植物扩张在改变 LST 方面的生物物理效应有利于准确预测青藏高原植被变化带来的气候反馈, 并为土地利用和管理提供借鉴。

关键词: 木本植物扩张; 青藏高原; 地表温度; 气候反馈; 土地覆被变化

Effect of woody plant encroachment on daytime and nighttime land surface temperature during growing season on Qinghai-Tibet Plateau

QU Zhuoran^{1,2}, LI Xiaoyan^{1,2,*}, DENG Yuanhong^{1,2}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Woody plant encroachment or shrub encroachment is a globally ecological environment problem, which has widely occurred on the Qinghai-Tibet Plateau in recent years. However, the temporal and spatial characteristics of woody plant expansion on the Tibetan Plateau and its impact on local land surface temperature (LST) are still unclear. This study uses MODIS land cover products to identify the spatial distribution of woody plant encroachment on the Qinghai-Tibet Plateau, and explores its impact on LST, albedo, and evapotranspiration during the growing season based on the moving-window searching method. The results depicted an overall increasing trend of the range and extent of woody plant encroachment from 2001 to 2018. In 2018, woody plant encroachment on the Qinghai-Tibet Plateau decreased daytime LST by (2.60 ± 0.34) °C, and increased nighttime LST by (0.94 ± 0.22) °C, while its net effect decreased the daily average LST by (0.83 ± 0.24) °C during the growing season. This is because the cooling effect including the increase of evapotranspiration ($+13.46 \pm 6.65$) mm/a exceeds the warming effect represented by the decrease of albedo ($-0.031 \pm$

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0306); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA2010010202)

收稿日期: 2022-09-30; **网络出版日期:** 2023-07-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@bnu.edu.cn

0.003). Background climate strongly influences the results, that is, precipitation dominates the change of daytime LST, but temperature plays a more important role in that of nighttime LST. In general, there is a greater tendency for local LST of the sites with lower air temperature, larger precipitation rate and lower elevation to decrease. Contrary to the tendency for wetter sites to cool more in the same year, drier years had a stronger cooling effect on daytime LST among different hydrological years, which is possibly due to the differences between woody and herbaceous plants' ability to access water from deep soil. Understanding the potential of woody plant encroachment to change LST is beneficial for accurately predicting the future climate change on the Qinghai-Tibet Plateau and providing references for land use and management.

Key Words: woody plant encroachment; Qinghai-Tibet Plateau; land surface temperature; climate feedback; land cover change

土地覆盖/覆被的变化已被公认为是区域气候变化的一个非常重要的驱动因素^[1-2]。它可以通过生物地球化学过程(特别是光合作用和碳固存)以及生物地球物理过程(主要是辐射传输、水文循环、湍流)^[3],改变陆地表面的物质和能量的流动,进而影响地表温度(LST)。作为土地覆被变化的类型之一,木本植物扩张表现为木本植物密度、覆盖率和生物量的增加^[4-5]。在气候变暖、放牧强度增加、火灾频率降低等因素的作用下^[6],木本植物扩张已在全世界范围内广泛发生。尤其是发生在非洲的热带稀疏草原^[7]、北美和澳大利亚的半干旱草原^[8-9]、地中海沿岸^[10]和北极地区^[11]的木本植物扩张得到了大量的报道和关注。过去的研究表明,木本植物扩张将会带来一系列生态系统结构和功能的变化^[12],对地上和地下的生物组成及其分布^[13-14]、水循环^[15-16]、养分循环^[17]、碳源汇^[18]等产生重要影响。具体表现包括致使北美 13 个草原/稀树草原群落的物种丰富度显著下降(平均-45%)^[13],改变了全球草地土壤有机碳含量(0—50cm 的变化范围为-50%至+300%)^[19],以及减少了美国南部大平原地表和地下径流,并导致了从蓄满产流到超渗产流的转变^[20]。

值得注意的是,其他更长期的环境和气候效应也可能正在发生,并受到木本植物特征和环境变量(气温、降水等)的复杂影响,在不同生态系统中呈现出差异化的生态后果。Beltrán-Przekurat 等^[21]发现由草地向豆科灌木和石炭酸灌木的转变可以对大气产生完全相反的热作用。研究表明木本植物扩张增加了大多数北温带半干旱地区一整天的地表温度^[22],却减少了美国俄克拉荷马州半干旱和半湿润草原白天的地表温度^[23]。而在寒冷的北极,响应于苔原向灌木的大规模转换,地表反照率的降低在春季和夏季对大气产生了显著的加热作用^[24]。灌木和树木持续的扩张趋势可能会进一步将大气加热放大两到七倍^[25]。并且与矮灌木相比,高灌木的入侵系统地提高了土壤温度,加深了活动层,并更能引发永久冻土退化^[24]。Williamson 等^[26]提出近 50 年内与北极植被演变相关的生长季节反照率变化的数量级可能仍然很小,但在某些情况下也可能构成对气候变暖的负面反馈。与此同时,在许多北极、高山、沙漠和沿海景观中,木本植物扩张对温度的改变潜力可以诱发反馈作用,例如通过一系列生物或非生物机制增加夜间温度^[27],有利于克服海拔或纬度对其耐寒性的限制而更好地建立和生存,进一步影响到木本植被动态和生态稳定性^[28]。

由于气候变暖和畜牧业方式的转变(从迁徙到定居),青藏高原从 20 个世纪起经历了大规模的木本植物扩张^[29]。此种可观的土地覆盖变化可能引起一系列的生物物理效应,进而对区域气候产生重要影响。但目前并没有相关研究揭示青藏高原高寒生态系统木本植物扩张对当地地表温度的影响,因而该种植被覆盖变化将通过何种方式,对局地气候产生何种程度的影响是尚不明确的。先前关于植树造林和森林砍伐产生的气候效应的研究表明,温度对植被变化的响应取决于其所处的纬度——热带森林全年具有较强的降温效果,北方森林冬季变暖,夏季略降温,全年净升温^[30-31]。但目前仍不清楚木本植物扩张对地表温度的影响将在背景环境(气温、降水、地形等)的影响下呈现出怎样的空间异质性。青藏高原面积广阔,地形复杂,年平均近地气温介于-19.2℃至 23.6℃之间,年平均降水量从 22.4mm 到 2451.2mm 不等,为研究该问题提供了丰富的条件。但由于气候模型的粗分辨率和过程参数化的不确定性^[32],在这一复杂的高寒生态系统中实现精确模拟仍然面临着严峻的挑战。实地测量虽然可以提供可靠的证据,但受空间范围的限制,这种局部尺度分析的结果外

推到生物物理特征和气候条件变化很大的广阔区域时要格外慎重^[2]。卫星观测数据的优势在于能够从整个青藏高原的视角调查木本植物扩张对局地地表温度的影响及其空间差异^[2, 31],并进一步分析背景环境(气温、降水、地形)对结果的影响,形成对木本植物扩张的气候效应的综合认识。此项研究有利于促进对青藏高原地区植被变化对生态系统影响的理解,同时为气候模型中模拟土地覆盖对气候的反馈作用补充新的细节,从而有利于减少预测青藏高原未来气候变化中的不确定性,为青藏高原土地利用的规划、管理和保护提供参考,以更好地维持高寒生态系统的健康和稳定。

本文旨在解决 3 个主要问题:(1)2001—2018 年青藏高原木本植物扩张的趋势和空间分布;(2)青藏高原木本植物扩张对生长季地表温度(LST)的影响,及其内在驱动因子(反照率和蒸散发)的变化;(3)在不同的水文年,青藏高原木本植物扩张对生长季 LST 的作用差异。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

青藏高原位于中国西南部(25.99°N—39.83°N, 73.50°E—104.67°E),平均高程约 4384m,最大高程超过 8800m,因而有“第三极”之称。受大气环流和地形的强烈影响,青藏高原从东南部湿润的季风气候区逐渐过渡到西北部的寒带干旱高原气候区^[33]。年平均近地面气温介于-19.2℃至 23.6℃之间,年平均降水量从 22.4mm 到 2451.2mm 不等。高原上形成了典型的高山植被生态系统。根据生物多样性和野生动植物解决方案计划出版的 RESOLVE 全球生态分区方案(<https://ecoregions2017.appspot.com/>),青藏高原包括 6 个生物群落和 31 个生态区(图 1)。草地是高原上分布最为广泛的植被类型,约占整个高原面积的 54.9%(2018 年)。

1.2 数据来源

MODIS 产品(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)由于其丰富的产品内容和较高的质量而被广泛应用于监测陆地生态系统过程。其数据可以通过 AppEEARS(<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>)平台下载。MCD12Q1 产品提供 2001—2018 年青藏高原 500m 的土地覆盖数据。MCD43A3 产品提供的短波波段的黑空反照率和白空反照率(500m 分辨率),由二者的平均值计算实际(蓝天)反照率^[31]。在短波波段数据质量图层中,值为 2 或 4 的像元对应的数据可能存在较大误差,需要参考其他质量保证。为了控制数据质量,仅使用在整个研究期内此类数据占比小于 3%的像元进行分析。8d 蒸散发产品 MOD16A2GF 是改进的 MOD16,在每年年底通过叶面积指数和光合有效辐射系数的质量筛选和线性插值生成。

地表温度数据采用国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/>)中国陆域及周边逐日 1km 全天候地表温度数据集。该数据集是基于地表温度时间分解模型集成多种数据而制得的,具有良好的图像质量和精度^[34—36]。由白天和夜间地表温度的平均值代表日均地表温度。

地形数据采用 MERIT DEM(http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/~yamada/MERIT_DEM)。该数据使用多个卫星数据集和滤波技术从已有 DEM 数据集(SRTM3 v2.1 and AW3D-30m v1)中分离了多个误差分量,从而显著改善了产品精度^[37]。近地面气温和地面降水率数据来自于国家青藏高原科学数据中心中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)^[38—39]。

按照实际需求,将以上数据从原始的时间尺度聚合到月,或者聚合到生长季(5—9 月)的平均值。投影方式统一采用阿尔伯斯等积圆锥投影。除土地覆盖数据外,其余数据均重采样至 0.1°以相互匹配。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 木本植物扩张的识别

MCD12Q1 产品采用国际地圈生物圈计划(IGBP)的分类方案,共有 17 种土地覆盖类型。其中,与木本植物扩张相关的类型代码为 1—10(代码 1—10 分别对应常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、郁闭灌丛、稀疏灌丛、木本稀树草原、稀树草原、草地)。首先,将代码为 1—4 的林地重新赋值为 5,从而避免在后续分析中将森林之间的转换纳入木本植物扩张。木本植物扩张像元(W)需满足以下条件:①参考

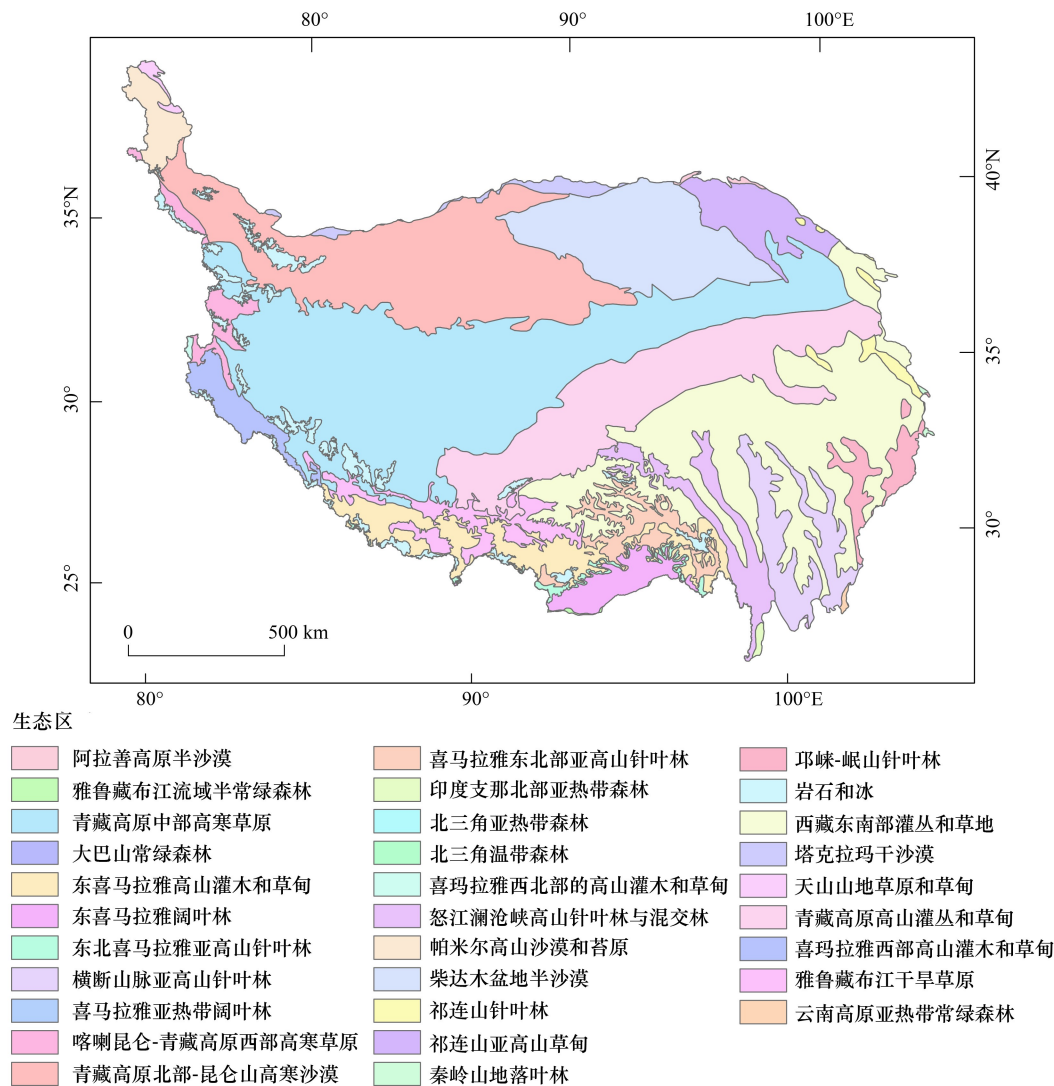


图 1 青藏高原生态分区
Fig.1 Ecoregions of Qinghai-Tibet Plateau

年(2001 年)土地覆盖类型代码属于[6,10];②研究年土地覆盖类型代码小于2001 年。无木本植物扩张像元(NW)定义为参考年和研究年土地覆盖类型均为草地(代码9)的像元。

在0.1°×0.1°网格内,分别用W和NW像元个数除以像元总数计算得到每个网格的木本植物扩张率和纯像元比例,从而将数据升尺度至0.1°空间分辨率。

1.3.2 移动窗口搜索法

移动窗口搜索法是探究土地覆盖变化对气候的反馈作用的常用方法^[40—41]。该方法假设距离较近的地区拥有相似的背景气候,因此,一个大小合适的窗口内,像元间的种种差异仅仅是由于土地覆盖类型不同引起的,从而实现了土地覆盖对气候反馈作用的提取和量化。

在0.1°的空间分辨率下,可比木本植物扩张像元(CWP)满足W比例不小于10%;无木本植物扩张像元(NWP)满足NW比例不小于90%。以CWP为中心构建11×11像元的窗口(要求其中NWP个数不少于10),以该窗口历遍青藏高原,识别出所有配对像元。窗口中心CWP的地表温度与所有NWP地表温度平均值的差值,即为木本植物扩张引起的地表温度的变化。

$$\Delta LST = LST_C - LST_N$$

(1)

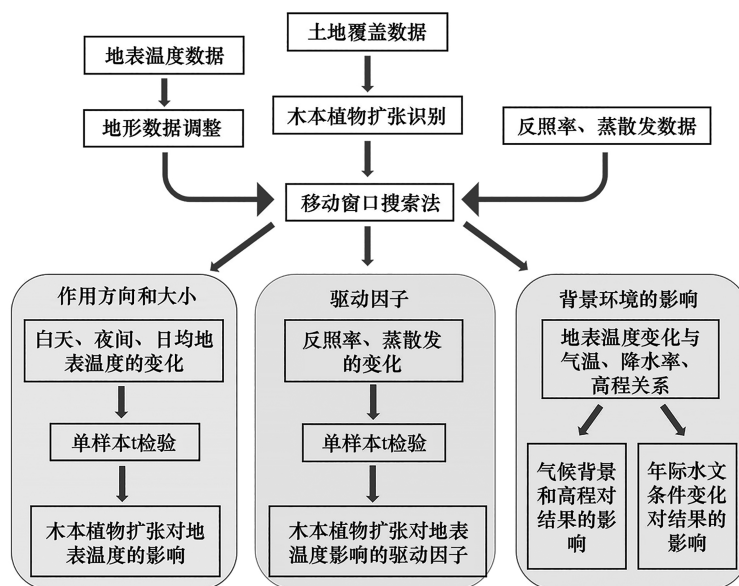


图2 技术路线图

Fig.2 Technology Roadmap

其中, ΔLST 是木本植物扩张引起的地表温度的变化值, LST_c 是可比木本植物扩张像元 (CWP) 的地表温度, LST_N 是无木本植物扩张像元 (NWP) 的地表温度。若 $\Delta LST > 0$, 表示木本植物扩张产生增温效应; 若 $\Delta LST < 0$, 表示木本植物扩张产生降温效应; 若 $\Delta LST = 0$ 表示木本植物扩张对地表气温没有影响。

反照率和蒸散发变化值的计算同(1)。

即使是同一个窗口内的 CWP 和 NWP 像元, 也可能由于高程不同而引起地表温度的差异。为了纠正这种系统误差, 用温度直减率对地表温度进行调整^[31], 并仅保留高程差在 $\pm 300\text{m}$ 内的像元对。LST 校正的公式如下:

$$LST_a = LST - b \times \Delta ELV \quad (2)$$

其中, LST_a 是调整之后的地表温度, LST 是调整之前的地表温度, b 是 11×11 像元窗口内 LST 和高程 (ELV) 线性回归的斜率, 即气温直减率。

1.3.3 数据分析

单样本 t 检验用于探究木本植物扩张导致变量的变化是否显著。以热图的方式展现不同气温和降水率条件下地表温度变化的方向和大小, 以线性回归的方式刻画高程与地表温度变化的关系, 以探究背景环境对木本植物扩张的反馈作用的影响。

基于 2002—2018 年青藏高原生长季降水量变化曲线的极值点和平均值, 选取 3 个干旱年 (2006、2009 和 2015)、1 个平水年 (2010) 和 3 个湿润年 (2005、2008 和 2017)。在每个年份分别计算地表温度变化值, 再求取干旱年、多年和湿润年的平均变化值, 分别代表干旱年份、平均年份和湿润年份下木本植物扩张对地表温度的影响。由于 3 种水文年的算术平均值均为 2010 年, 在比较不同水文条件下结果的年际差异时, 可以在一定程度上减小木本植物扩张阶段差异带来的误差。受数据时间序列的限制, 以 2018 年的结果反映最近的情况。

1.4 敏感性测试

对移动窗口的大小和高程控制进行敏感性测试。首先将移动窗口的大小分别改为 7×7 和 13×13 像元, 重新计算结果; 其次, 调整高程控制的严格程度, 在像元对高程差阈值分别为 $\pm 100\text{m}$ 和 $\pm 500\text{m}$ 的两种情况下重新计算, 以检验本研究结果对这些参数的选择是否稳健。

2 结果

2.1 木本植物扩张的时空格局

在所研究的年份中,木本植物扩张的范围和程度均整体呈增加的趋势(图3)。具体而言,2017年以前CWP个数逐年增长,由2005年的599个增至2017年的1289个。早期,CWP的木本植物扩张率集中在10%—30%。随着扩张的进一步发展,高扩张率像元(扩张率位于40%—50%或50%—60%)开始出现并逐渐增多。CWP扩张率的平均值和中位数分别以平均0.29%/a($P<0.001$)和0.22%/a($P<0.001$)的速度增加,扩张率最大值也在2015年之前逐年增大。然而,受低扩张率像元(扩张率介于10%—20%)显著减少的影响,CWP的总个数在2018年下跌至1221。CWP扩张率的最大值也在2015—2018年出现了偏离之前持续增长趋势的波动。这种现象可能是由变暖导致的干旱胁迫引起的。近年来,青藏高原饱和水汽压亏缺的急剧增加和干旱事件发生频率的上升,表明降水可能无法补偿变暖所引起的蒸发需求的增加^[42],从而产生了水分胁迫,造成了木本植物扩张潜力的降低和推进的停滞^[42—43],甚至发生逆过程。

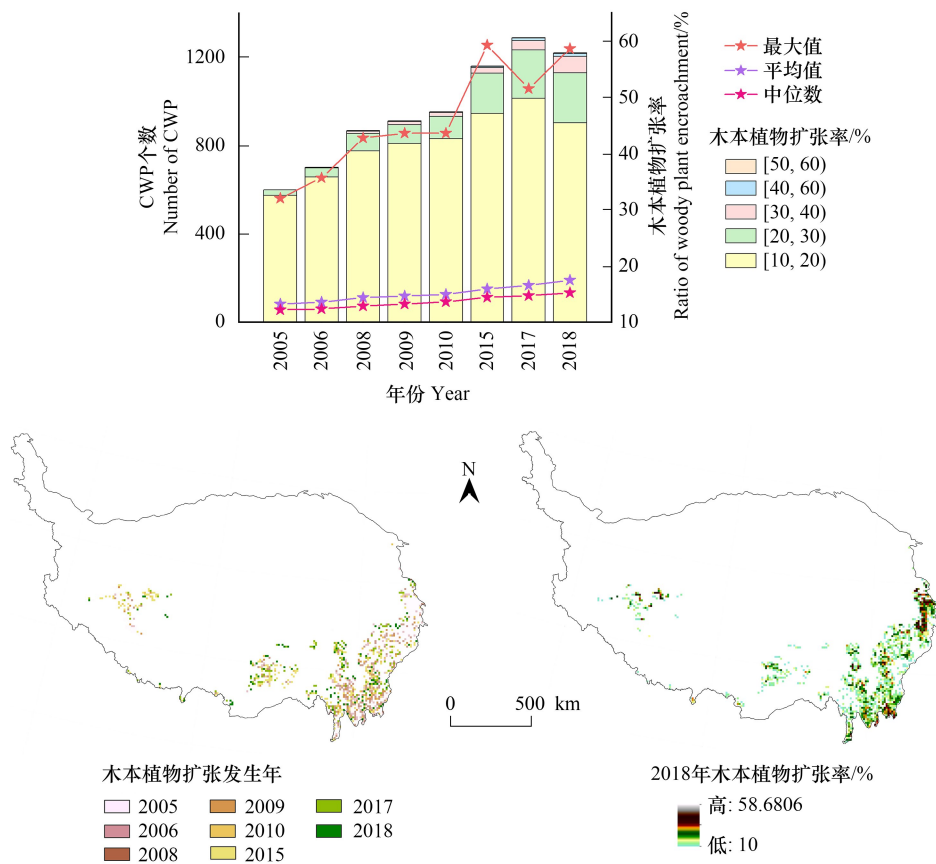


图3 2001—2018年青藏高原木本植物扩张的时空格局

Fig.3 Spatial and temporal patterns of woody plant encroachment on the Qinghai-Tibet Plateau from 2001 to 2018

木本植物扩张主要集中在青藏高原东南部的西藏东南部灌丛和草地生态区、横断山脉亚高山针叶林生态区、邛崃—岷山针叶林生态区、怒江澜沧峡高山针叶林与混交林生态区,南部的东北喜马拉雅亚高山针叶林生态区,以及中西部的青藏高原中部高寒草原生态区(图3)。根据像元成为CWP的最早的时间,判断其发生木本植物扩张的时间。早期,木本植物从西藏东南部灌丛和草地生态区的东部和青藏高原中部高寒草原生态区的西部开始大规模地扩张。2006年之后,横断山脉亚高山针叶林生态区发生了大面积的木本植物扩张,并逐渐蔓延至高原内部。

2018 年,在原始的 500m 空间分辨率下,共识别出 W(木本植物扩张像元)179702 个,总面积约 $43.1 \times 10^3 \text{ km}^2$,即 2001—2018 年青藏高原共有这些面积的土地发生了木本植物扩张。聚合到 0.1° 空间分辨率后,共识别出 CWP(可比木本植物扩张像元)1221 个(图 3),总面积约 $1.65 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占整个青藏高原总面积的 6%。即 2001—2018 年青藏高原约 6% 的土地上发生了超过 10% 的木本植物扩张。CWP 扩张率的平均值为 17.5%,最大值为 58.7%,分布在青藏高原 17 个生态区中。其中,约 32% 和 31% 的 CWP 分别集中在西藏东南部灌丛和草地生态区和横断山脉亚高山针叶林生态区中。

2.2 木本植物扩张对地表温度的影响——最近的情况

移动窗口搜索法的结果显示,木本植物扩张使 2018 年青藏高原生长季白天 LST 降低(2.60 ± 0.34) $^\circ\text{C}$,夜间 LST 升高(0.94 ± 0.22) $^\circ\text{C}$,日均 LST 降低(0.83 ± 0.24) $^\circ\text{C}$ (图 4)。以上置信区间由 t 检验的 95% 置信水平估计,以检查 CWP(可比木本植物扩张像元)和 NWP(无木本植物扩张像元)相应变量的平均值差异是否显著(之后的置信区间也采用此方式给出)。t 检验的结果表明,木本植物扩张对 3 种地表温度的改变均是极显著的(通过 0.001 显著性水平的检验)。

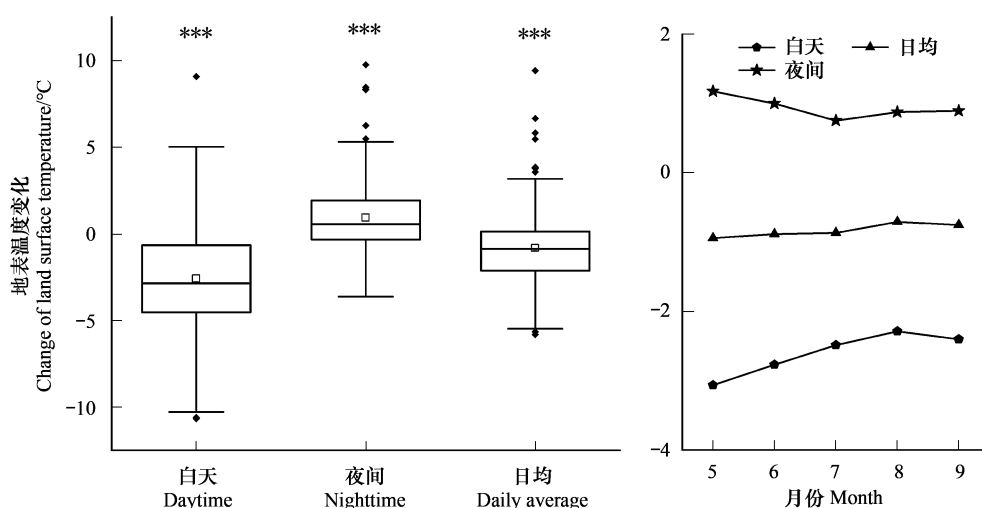


图 4 2018 年青藏高原木本植物扩张对地表温度的影响及其在不同月份的表现

Fig.4 Effects of woody plant encroachment on land surface temperature on the Qinghai-Tibet Plateau in 2018 and their differences among months

箱线图中,箱体表示 25%—75% 的范围,中间横线表示中位数,方框表示平均值;*** 表示通过 0.001 显著性水平的检验

在生长季的不同月份内,木本植物扩张对每种地表温度的作用方向是一致的,但作用强度会随时间改变(图 4)。5—8 月,木本植物扩张对白天 LST 的降温作用由最初的(-3.06 ± 0.39) $^\circ\text{C}$ 逐渐减小,并在 8 月达到最弱值(-2.29 ± 0.35) $^\circ\text{C}$ 。9 月,该降温作用又有一定程度的增强(-2.40 ± 0.36) $^\circ\text{C}$)。与此同时,木本植物扩张对夜间 LST 的增温作用在 5—7 月逐渐减小(从(1.18 ± 0.28) $^\circ\text{C}$ 到(0.75 ± 0.22) $^\circ\text{C}$),并在 7 月到达最低值后回增。5—9 月,木本植物扩张对日均 LST 的降温作用整体呈减小的趋势,但变化幅度不是特别大(范围在(-0.94 ± 0.27) $^\circ\text{C}$ 至(-0.71 ± 0.24) $^\circ\text{C}$)。

反照率和蒸散发在此种生物物理效应中扮演着重要的角色。在大多数情况下,木本植物相比于草本植物拥有更深的颜色,因而反照率更低^[44]。移动窗口搜索的结果表明,青藏高原木本植物扩张使当地反照率降低 0.031 ± 0.003 (图 5)。这将增加地表吸收太阳辐射的比例,从而产生增温作用。与此同时,木本植物通常具有更深的根,从而提高了植物从土壤深层吸收水分的能力^[23],加之更大的叶面积和表面粗糙度,有利于蒸散发的进行。移动窗口搜索的结果表明,青藏高原木本植物扩张使当地蒸散发增加(13.46 ± 6.65) mm/a (图 5),从而有利于地表以潜热的形式释放更多的能量,产生降温作用。在整个生长季内,反照率变化值呈现出先增加、

后减小的趋势,在 7 月达到最大值。而蒸散发变化值呈“M”型变化,在 6 月和 8 月达到两个极大值(图 5)。

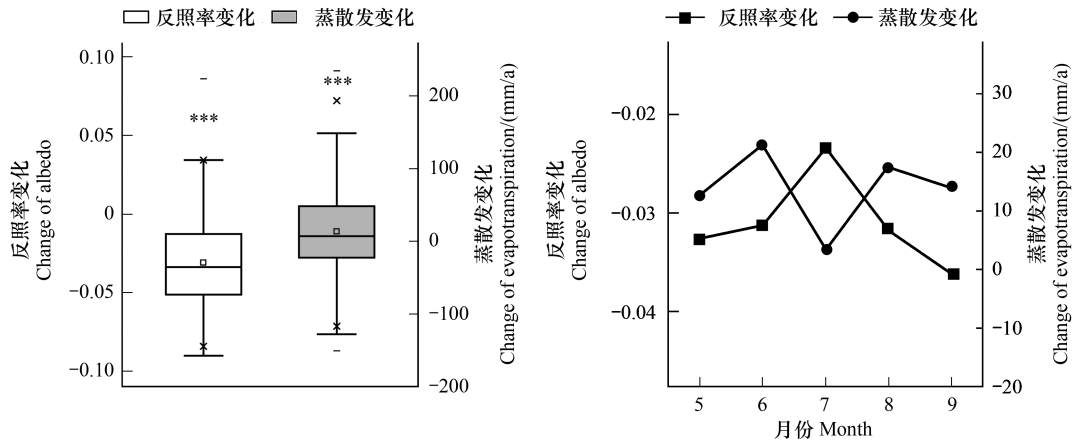


图 5 2018 年青藏高原木本植物扩张对反照率和蒸散发的影响及其在不同月份的表现

Fig.5 Effects of woody plant encroachment on albedo and evapotranspiration on the Qinghai-Tibet Plateau in 2018 and their differences among months

箱线图中,箱体表示 25%—75% 的范围,中间横线表示中位数,方框表示平均值。*** 表示通过 0.001 显著性水平的检验

2.3 背景环境(气温、降水和高程)对地表温度效应的影响

分别以生长季平均近地面气温和地面降水率为横纵坐标,制作 3 种地表温度变化值热图(图 6),以展现不同气温和降水率条件下地表温度变化的方向和大小。降水主导着白天地表温度的变化,并与其呈极显著的负相关(表 1, $P < 0.001$)。在白天地表温度变化值热图中存在明显的降水分界线,降水率 0.1mm/h 以上的绝大多数地区地表均表现为降温,其下的区域以升温为主(图 6)。而到了夜间,气温超过降水率成为更显著的影响因素(表 1)。夜间地表温度热图中存在着明显的气温分界线,平均气温在 9℃ 以上的地区夜间地表温度几乎都表现为升温(图 6)。最终,木本植物扩张对日均地表温度的改变值呈现出与气温极显著的正相关(相关系数为 0.271, $P < 0.001$),与降水率极显著的负相关(相关系数为 -0.337, $P < 0.001$),即青藏高原中气温越低、降水率越高的地区,日均地表温度越倾向于降低的现象(图 6)。

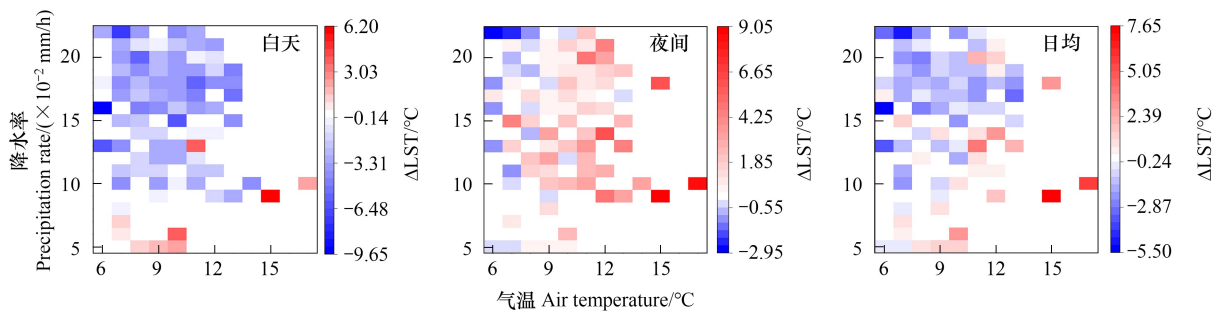


图 6 背景气候对地表温度改变值的影响

Fig.6 Influence of background climate on land surface temperature change

设置色带中 0℃ 为白色;红色越深,表示地表温度增加得越多;蓝色越深,表示地表温度降低得越多

高程与 3 种地表温度改变值均呈极显著的正相关($P < 0.001$),说明在高程越高的地方,木本植物扩张对地表温度的影响更倾向于降温效果减弱、增温效果增强的结果。平均而言,高程每增高 1km,将分别对白天、夜间和日均地表温度改变值产生 +2.28℃, +0.88℃, +1.58℃ 的改变。与夜间地表温度相比,白天地表温度和

日均地表温度表现出对高程更高的敏感性。

以上事实突出了气温、降水和高程在确定木本植物扩张对地表温度的影响方面的重要作用。在实际工作中评估木本植物扩张所产生的环境效应时,需要结合当地的气候、地形等背景环境信息,以更加准确和全面地认识这一问题。

表 1 3 种地表温度变化值与降水率和气温的相关分析

Table 1 Correlation analysis of three kinds of land surface temperature change with precipitation rate and air temperature

因子 Parameters	白天地表温度变化 Daytime land surface temperature change	夜间地表温度变化 Nighttime land surface temperature change	日均地表温度变化 Daily average land surface temperature change
降水率 precipitation rate	-0.357 ***	-0.168 **	-0.337 ***
气温 air temperature	0.031	0.532 ***	0.271 ***

** 表示通过 0.01 显著性水平检验,*** 表示通过 0.001 显著性水平检验

2.4 木本植物扩张对地表温度影响的年际差异

比较干旱年份、多年平均和湿润年份地表温度的改变值(图 7),发现木本植物扩张对白天 LST 的降温作用和夜间 LST 的升温作用均依次减小(白天 LST 变化值依次为-2.63℃、-2.60℃、-2.57℃,夜间 LST 变化值依次为 1.23℃、1.13℃、1.07℃),即木本植物扩张在更干旱的年份中能更大程度地降低白天地表温度和升高夜间地表温度。从干旱年、多年平均到湿润年,木本植物扩张引起的蒸散发的增加值从 17.24 mm/a 降至 13.05 mm/a 和 11.85mm/a(图 7)。说明在更干旱的水文条件下,木本植物扩张对蒸散发的影响更为显著。

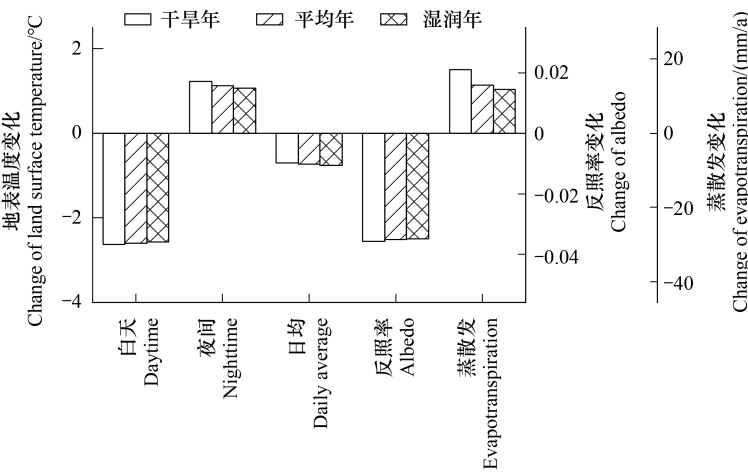


图 7 年际水文条件差异对地表温度、反照率和蒸散发变化的影响

Fig.7 Influence of interannual variation in hydrological conditions on changes in land surface temperature, albedo and evapotranspiration

3 讨论

3.1 木本植物扩张对地表温度的影响机制

绘制概念图以清晰地展示木本植物扩张对地表温度的影响机制(图 8)。青藏高原木本植物扩张对地表温度的改变呈现出昼夜不对称的现象。在白天,木本植物区高的蒸散发以潜热的形式释放了大量能量。同时,较高的表面粗糙度引起“地—气”之间更强的湍流^[45],也起到了降温作用。这些能量亏损超过了因反照率降低、太阳辐射吸收增加导致的能量增益,因而木本植物扩张对白天 LST 产生净冷却效应。在夜间,蒸散发的降温效应仍然存在,但是其强度很小,主导地表温度变化的过程由另两个代替。其一,在夜间地表向大气释放热量。由于木本植物区域具有更高的热容量^[46],其散热的速度更慢。其二,木本植物的冠层可以捕获部

分地表发射的长波辐射,并将一部分辐射归还给地面,从而减少了夜间地表温度的冷却^[44]。此外,白天较高的蒸散发促进了边界层空气湿度的增加和云层的形成^[47],也能产生类似的“庇护效应”。因此,木本植物扩张对夜间 LST 表现为净增暖作用。在整个日尺度上,木本植物扩张的净效应是各种增温和降温作用相互竞争的结果。在青藏高原,蒸散发增加和湍流增强产生的降温作用超过了反照率降低等产生的增温作用,使日均 LST 随木本植物扩张而降低。

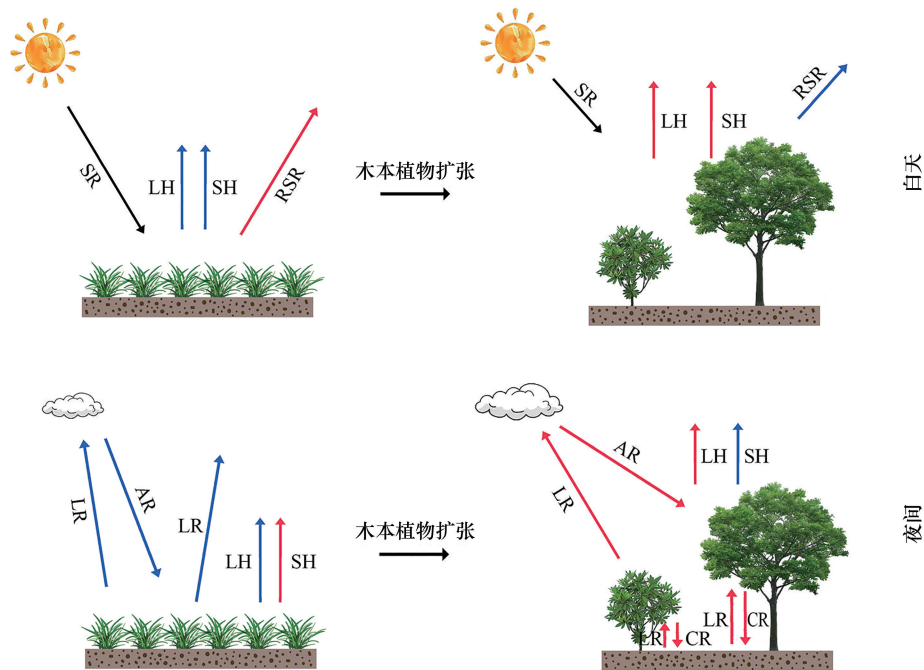


图 8 青藏高原木本植物扩张对地表温度的影响机制概念图

Fig.8 Conceptual map of the influence mechanism of woody plant encroachment on land surface temperature on Qinghai-Tibet Plateau

SR, 太阳辐射; RSR, 地表反射的太阳辐射; LH, 潜热; SH, 显热; LR, 地表长波辐射; AR, 大气逆辐射; CR, 冠层逆辐射。其中, 红色、蓝色箭头分别表示与另一种植被类型相比较强、弱的过程

在世界上不同的地区, 木本植物扩张对地表温度的作用方向和大小受当地背景环境的影响而呈现出异质性。在寒冷的北极地区, 木本植物扩张通过降低反照率, 增加了地表吸收的太阳辐射, 从而产生广泛的增温作用^[24–25]。Bonfils 等^[24]的建模结果表明, 北极灌木扩张区更高的蒸散发速率会增加大气中的水蒸气浓度, 从而增强向下的长波辐射, 进一步加强地表加热。与之相对的是中纬度的干旱和半干旱地区。Shen 等^[22]发现灌木入侵后由于裸土比例的增加, 土壤在白天表现出更大的地面热通量, 并在夜间维持更大的向外长波辐射, 从而增加了大多数北温带半干旱地区年均的白天、夜间和日均 LST。这与 Duman 等^[48]基于新能源平衡法预测的美国西南部塞维利亚塔国家野生动物保护区内杂酚油灌木入侵草地的结果一致。但在干旱的中亚中部, 灌木扩张加剧了土壤水分的流失, 导致反照率增加, 从而降低了白天和夜间 LST。而在相对潮湿的北美西南部灌木入侵后由于蒸散量的增加和裸土比例的降低将降低当地的白天 LST^[22]。青藏高原虽然属于高寒生态系统, 但受到木本植物耐寒性的限制^[27–28], 扩张多发生在较为温暖的地区。这些地区多年平均气温约 11.28℃, 比寒冷的北极更温暖。同时, 这些地区平均年降水量约 1219mm, 比干旱的草原更湿润。背景气候的差异使得青藏高原木本植物扩张对 LST 的作用结果和驱动机制既区别于寒冷的北极苔原, 也区别于大部分中纬度的干旱半干旱草原, 呈现出白天 LST 降低、夜间 LST 增加、日均 LST 降低的现象。结合不同地区的背景气候来理解木本植物扩张对世界上不同区域地表温度的独特影响, 有利于促进对这一问题更全面的认识, 并进一步思考这些气候反馈对生态系统结构和功能可能的后续影响。

Beltrán-Przekurat 等^[21]发现, 奇瓦瓦沙漠北部由草地向豆科灌木的转变使近地表大气降温, 而由草地向

石炭酸灌木的转变使近地表大气升温。这突出了不同类型的木本植物扩张可能会在同一地区产生完全不同的效应。计算表明,青藏高原灌丛扩张至草地、森林扩张至草地、森林扩张至灌丛对生长季地表温度的作用方向一致但大小有差异。这可能与植物不同的功能性状和用水策略有关^[21]。未来的研究可以结合原位观测数据,进行更为深入和细致的探究。

3.2 水文条件在年内和年际的“相悖”影响

2018 年年内,青藏高原木本植物扩张导致的生长季 3 种 LST 变化值均与当地降水表现出显著的负相关,即在高原上更湿润的地点发生的木本植物扩张更倾向于降低生长季 LST;尤其是在白天地表温度变化值热图中存在着明显的 0.1mm/h 降水率分界线,其上的区域绝大多数都表现为降温(图 6)。这是由于在降水较为充足的地区,水分胁迫的可能性降低,可以为蒸散发的增加提供充足的水分,有助于木本植物扩张区以潜热的形式释放更多的热量^[49];而在干旱的地区,蒸散发过程受到水分限制,导致木本植物扩张的降温效应减弱,不足以抵消因反照率降低而吸收的多余短波辐射引发的加热效应,因而表现为增温。

值得注意的是,不同水文条件下白天 LST 变化值的年际差异却呈现出越干旱、降温效果越强烈的现象(图 7)。这似乎与之前得出的同一年份内空间分布上越湿润越降温的结果相悖。事实上,从干旱年到多年平均、湿润年,青藏高原木本植物扩张对生长季白天 LST 降温作用的依次减小,与蒸散发增加量的依次减小相吻合(图 7),这可能与木本植物和草本植物应对不同水文条件的水分吸收策略等生理生态过程有关。已有的研究表明,区别于主要利用浅层土壤水的草本植物,木本植物通常具有更深、更发达的根系统^[50],因而能从更深处获得水源^[23]。在更干旱的年份,浅层土壤水趋于匮乏,木本植物和草本植物从土壤深处吸水的能力差距和蒸散发增加的潜力差距表现得更为明显^[30, 50]。木本植物扩张区和无木本植物扩张区更大的显热和潜热通量差距,是导致整个研究区木本植物扩张在干旱年份比在湿润年份具有更显著的日间降温的原因^[23]。

3.3 不确定性分析

为了检验结果的可靠性,对移动窗口的大小和高程控制条件进行敏感性测试。测试结果显示,移动窗口越小或者高程控制越严格,符合要求的窗口数越少,用于比较的配对样本数越少。但当改变移动窗口大小和高程控制条件时,结果所呈现的基本规律是一致的,说明本文研究结果是稳定、可靠的。

作为生态较为脆弱的地区,青藏高原对气候变化和人类活动的敏感性更高。有报道称,在过去的五十年中,青藏高原经历了大约三倍于全球平均水平的变暖趋势^[51],其上木本植物分布的最高界限可能经历着最高的变暖速率^[52]。经计算,2002—2018 年青藏高原生长季平均地表温度以 0.056℃/a 的速度上升,生长季平均近地表气温以 0.025℃/a 的速度上升(图 9)。而木本植物扩张的净效应使 2018 年青藏高原生长季日均 LST

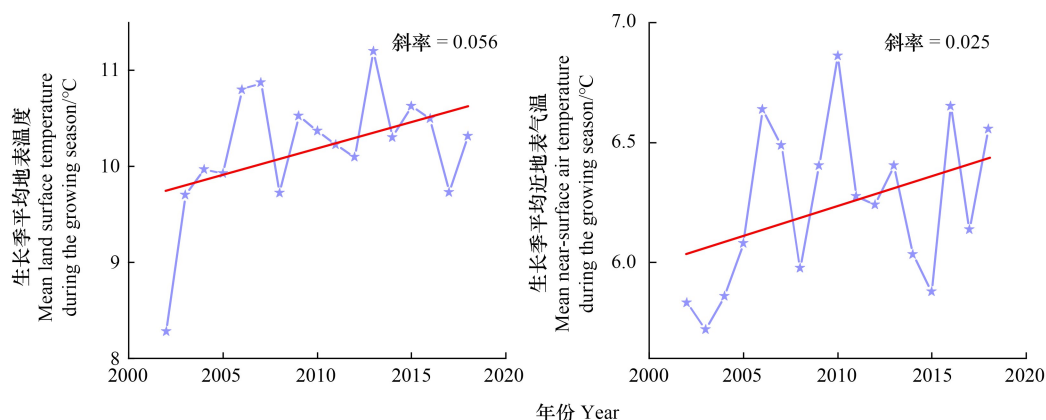


图 9 2002—2018 年青藏高原生长季平均地表温度和近地表气温的年变化

Fig.9 Annual variation of mean land surface temperature and mean near-surface air temperature during the growing season on the Qinghai-Tibet Plateau from 2002 to 2018

蓝线为温度变化折线,红线为线性拟合直线。k1 和 k2 分别为左右两图拟合直线的斜率

减小(0.83 ± 0.24) $^{\circ}\text{C}$, 多年平均生长季日均 LST 减小 0.73°C 。这比上述两个温度年变化率大了一个数量级。由此可见, 木本植物扩张对青藏高原地表温度的影响是不容忽视的, 甚至可能在减缓青藏高原变暖方面扮演着重要角色。如果没有木本植物扩张, 青藏高原的地表温度可能经历着更剧烈的上升, 除了对气候的直接影响外, 还可能进一步地改变水资源的供应^[53], 增加碳循环的速度^[18], 影响生物的生命活动^[54], 干扰永久冻土的稳定性^[55-56], 威胁生态系统的健康和稳定。

由于遥感数据的限制, 尤其是青藏高原高分辨率、高质量的感热数据的缺乏及现有数据之间明显的不一致性^[57], 青藏高原木本植物扩张对生长季地表温度(LST)的影响这一问题仍缺乏实测数据的验证和补充。在未来, 需要结合小尺度上的实验和观测数据, 以更好地阐释其内在机制, 并进一步地探究不同类型的木本植物扩张是否会对地表温度产生异质性的作用, 以及微气候的改变是否会影响植被的生长状况, 进而增强或减弱木本植物扩张所产生的气候效应。现在气候建模越来越强调纳入更现实的情景^[55], 以增强可靠预测的能力, 提供与实际生产规划有关的有用信息。因此, 在推演青藏高原未来的气候变化、规划和管理青藏高原土地利用等工作中, 应该充分重视木本植物扩张这种植被覆盖变化所引起的生物物理效应, 理解其对地表温度的改变和作用机制, 以正确预测和评估其潜在气候效应, 科学、系统地认识和指导实践, 维持高寒生态系统结构与功能的稳定。

4 结论

2001—2018 年, 青藏高原木本植物扩张的范围和程度整体呈现增加的趋势。但 2018 年左右, 干旱引起的水分胁迫导致部分低扩张率的地区发生了扩张逆过程。截止 2018 年, 青藏高原约 6% 的土地(面积约 $1.65\times 10^5\text{km}^2$)上发生了扩张率超过 10% 的木本植物扩张。其中约 32% 和 31% 分别集中在西藏东南部的灌丛和草地生态区和横断山脉亚高山针叶林生态区中。在青藏高原这一高寒生态系统中, 木本植物扩张对地表温度的作用机制和结果是不同于寒冷的北极(反照率和水蒸汽的增温效果占主导)和大部分北温带半干旱地区(裸土比例增加引起全天增温)的。具体表现为, 该种植被覆盖变化使青藏高原生长季白天 LST 极显著地减小($(-2.60\pm 0.34)^{\circ}\text{C}$), 夜间 LST 极显著地增加($(+0.94\pm 0.22)^{\circ}\text{C}$), 最终净效应使日均 LST 极显著地减小($(-0.83\pm 0.24)^{\circ}\text{C}$)。产生这种结果的原因与地表的生物物理属性的改变相关。具体表现为蒸散发增加等引发的降温效应超过了反照率减少等引发的增温效应。

受背景环境的影响, 木本植物扩张对地表温度的影响结果存在空间差异。降水主导着白天 LST 的改变, 降水率 0.1mm/h 以上的绝大多数地区白天 LST 均表现为降低。但气温在夜间 LST 变化中占据更重要的地位, 平均气温在 9°C 以上的地区夜间 LST 几乎都表现为升高。总的来说, 在气温越低、降水率越高、高程越低处的 LST 更倾向于降低。然而在年际差异中, 却呈现出越干旱、白天越降温的现象。相比于多年平均的情况和湿润年份, 木本植物扩张在更干旱的年份中能更大程度地降低白天地表温度和升高夜间地表温度。前者与更明显的木本植物和草本植物从土壤深处吸水能力的差距和蒸散发的潜力差距有关。

综合而言, 木本植物扩张对青藏高原生长季地表温度的降温作用是显著且可观的, 在生长季白天和日均所引起的降温与十年到世纪时间尺度上的背景气候变暖趋势具有相同的幅度。正确认识其潜在的环境效应对于准确预测青藏高原未来的气候变化、采取合理的保护措施以维持生态系统的健康和稳定具有重要价值。

参考文献(References):

- [1] Pielke R A Sr. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310(5754): 1625-1626.
- [2] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth. *Science*, 2017, 356(6343): 1180-1184.
- [3] Peñuelas J, Rutishauser T, Filella I. Ecology. Phenology feedbacks on climate change. *Science*, 2009, 324(5929): 887-888.
- [4] Cao X, Liu Y, Cui X H, Chen J, Chen X H. Mechanisms, monitoring and modeling of shrub encroachment into grassland: a review. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(6): 625-641.
- [5] Van Auken O W. Causes and consequences of woody plant encroachment into western North American grasslands. *Journal of Environmental*

- Management, 2009, 90(10): 2931-2942.
- [6] D'Odorico P, Okin G S, Bestelmeyer B T. A synthetic review of feedbacks and drivers of shrub encroachment in arid grasslands. *Ecohydrology*, 2012, 5(5): 520-530.
- [7] Roques K G, O'Connor T G, Watkinson A R. Dynamics of shrub encroachment in an African savanna: relative influences of fire, herbivory, rainfall and density dependence. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(2): 268-280.
- [8] Van Auken O W. Shrub invasions of North American semiarid grasslands. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2000, 31: 197-215.
- [9] Fensham R J, Fairfax R J, Archer S R. Rainfall, land use and woody vegetation cover change in semi-arid Australian savanna. *Journal of Ecology*, 2005, 93(3): 596-606.
- [10] Maestre F T, Bowker M A, Puche M D, Belén Hinojosa M, Martínez I, García-Palacios P, Castillo A P, Soliveres S, Luzuriaga A L, Sánchez A M, Carreira J A, Gallardo A, Escudero A. Shrub encroachment can reverse desertification in semi-arid Mediterranean grasslands. *Ecology Letters*, 2009, 12(9): 930-941.
- [11] Knapp A K, Briggs J M, Collins S L, Archer S R, Bret-Harte M S, Ewers B E, Peters D P, Young D R, Shaver G R, Pendall E, Cleary M B. Shrub encroachment in North American grasslands: shifts in growth form dominance rapidly alters control of ecosystem carbon inputs. *Global Change Biology*, 2008, 14(3): 615-623.
- [12] Eldridge D J, Bowker M A, Maestre F T, Roger E, Reynolds J F, Whitford W G. Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: towards a global synthesis. *Ecology Letters*, 2011, 14(7): 709-722.
- [13] Ratajczak Z, Nippert J B, Collins S L. Woody encroachment decreases diversity across North American grasslands and savannas. *Ecology*, 2012, 93(4): 697-703.
- [14] Collins C G, Spasojevic M J, Alados C L, Aronson E L, Benavides J C, Cannone N, Caviezel C, Grau O, Guo H, Kudo G, Kuhn N J, Müllerová J, Phillips M L, Pombubpa N, Reverchon F, Shulman H B, Stajich J E, Stokes A, Weber S E, Diez J M. Belowground impacts of alpine woody encroachment are determined by plant traits, local climate, and soil conditions. *Global Change Biology*, 2020, 26(12): 7112-7127.
- [15] Honda E A, Durigan G. Woody encroachment and its consequences on hydrological processes in the savannah. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 371(1703): 20150313.
- [16] Schreiner-McGraw A P, Vivoni E R, Ajami H, Sala O E, Throop H L, Peters D P C. Woody plant encroachment has a larger impact than climate change on dryland water budgets. *Scientific Reports*, 2020, 10: 8112.
- [17] Hibbard K A, Archer S, Schimel D S, Valentine D W. Biogeochemical changes accompanying woody plant encroachment in a subtropical savanna. *Ecology*, 2001, 82(7): 1999-2011.
- [18] Cahoon S M P, Sullivan P F, Shaver G R, Welker J M, Post E. Interactions among shrub cover and the soil microclimate may determine future Arctic carbon budgets. *Ecology Letters*, 2012, 15(12): 1415-1422.
- [19] Li H, Shen H H, Chen L Y, Liu T Y, Hu H F, Zhao X, Zhou L H, Zhang P J, Fang J Y. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28974.
- [20] Qiao L, Zou C B, Stebler E, Will R E. Woody plant encroachment reduces annual runoff and shifts runoff mechanisms in the tallgrass prairie, USA. *Water Resources Research*, 2017, 53(6): 4838-4849.
- [21] Beltrán-Przekurat A, Pielke R A Sr, Peters D P C, Snyder K A, Rango A. Modeling the effects of historical vegetation change on near-surface atmosphere in the northern Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(10): 1897-1910.
- [22] Shen X J, Liu Y W, Liu B H, Zhang J Q, Wang L, Lu X G, Jiang M. Effect of shrub encroachment on land surface temperature in semi-arid areas of temperate regions of the Northern Hemisphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 320: 108943.
- [23] Wang J, Xiao X M, Basara J, Wu X C, Bajgain R, Qin Y W, Doughty R B, Iii B M. Impacts of juniper woody plant encroachment into grasslands on local climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 307: 108508.
- [24] Bonfils C J W, Phillips T J, Lawrence D M, Cameron-Smith P, Riley W J, Subin Z M. On the influence of shrub height and expansion on northern high latitude climate. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(1): 015503.
- [25] Chapin F S 3rd, Sturm M, Serreze M C, McFadden J P, Key J R, Lloyd A H, McGuire A D, Rupp T S, Lynch A H, Schimel J P, Beringer J, Chapman W L, Epstein H E, Euskirchen E S, Hinzman L D, Jia G, Ping C L, Tape K D, Thompson C D C, Walker D A, Welker J M. Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, 2005, 310(5748): 657-660.
- [26] Williamson S N, Barrio I C, Hik D S, Gamon J A. Phenology and species determine growing-season albedo increase at the altitudinal limit of shrub growth in the sub-Arctic. *Global Change Biology*, 2016, 22(11): 3621-3631.
- [27] D'Odorico P, He Y F, Collins S, De Wekker S F J, Engel V, Fuentes J D. Vegetation-microclimate feedbacks in woodland-grassland ecotones. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(4): 364-379.
- [28] Huang H, Anderegg L D L, Dawson T E, Mote S F, D'Odorico P. Critical transition to woody plant dominance through microclimate feedbacks in North American coastal ecosystems. *Ecology*, 2020, 101(9): e03107.
- [29] Geissler K, Fiedler S, Ni J, Herzschuh U, Jeltsch F. Combined effects of grazing and climate warming drive shrub dominance on the Tibetan Plateau. *The Rangeland Journal*, 2019, 41(5): 425-439.
- [30] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [31] Li Y, Zhao M S, Motesharrei S, Mu Q Z, Kalnay E, Li S C. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature*

- Communications, 2015, 6: 6603.
- [32] Oleson K W, Bonan G B, Levis S, Vertenstein M. Effects of land use change on North American climate: impact of surface datasets and model biogeophysics. *Climate Dynamics*, 2004, 23(2): 117-132.
- [33] Wang C, Gao Q, Yu M. Quantifying Trends of Land Change in Qinghai-Tibet Plateau during 2001-2015. *Remote Sensing*, 2019, 11(20):
- [34] Zhang X D, Zhou J, Liang S L, Wang D D. A practical reanalysis data and thermal infrared remote sensing data merging (RTM) method for reconstruction of a 1-km all-weather land surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 260: 112437.
- [35] Zhang X D, Zhou J, Göttsche F M, Zhan W F, Liu S M, Cao R Y. A method based on temporal component decomposition for estimating 1-km all-weather land surface temperature by merging satellite thermal infrared and passive microwave observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(7): 4670-4691.
- [36] Zhou J, Zhang X D, Zhan W F, Göttsche F M, Liu S M, Olesen F S, Hu W X, Dai F N. A thermal sampling depth correction method for land surface temperature estimation from satellite passive microwave observation over barren land. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4743-4756.
- [37] Yamazaki D, Ikeshima D, Tawatari R, Yamaguchi T, O'Loughlin F, Neal J C, Sampson C C, Kanae S, Bates P D. A high-accuracy map of global terrain elevations. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5844-5853.
- [38] He J, Yang K, Tang W J, Lu H, Qin J, Chen Y Y, Li X. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. *Scientific Data*, 2020, 7: 25.
- [39] Yang K, He J, Tang W J, Qin J, Cheng C C K. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.
- [40] Deng Y H, Li X Y, Shi F Z, Hu X. Woody plant encroachment enhanced global vegetation greening and ecosystem water-use efficiency. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(12): 2337-2353.
- [41] Mendes C B, Prevedello J A. Does habitat fragmentation affect landscape-level temperatures? A global analysis. *Landscape Ecology*, 2020, 35(8): 1743-1756.
- [42] Wang Y F, Liang E Y, Lu X M, Camarero J J, Babst F, Shen M G, Peñuelas J. Warming-induced shrubline advance stalled by moisture limitation on the Tibetan Plateau. *Ecography*, 2021, 44(11): 1631-1641.
- [43] Lu X M, Liang E Y, Wang Y F, Babst F, Leavitt S W, Julio Camarero J. Past the climate optimum: recruitment is declining at the world's highest juniper shrublines on the Tibetan Plateau. *Ecology*, 2019, 100(2): e02557.
- [44] Grimmer C S B, Robeson S M, Schoof J T. Spatial variability of micro-climatic conditions within a mid-latitude deciduous forest. *Climate Research*, 2000, 15(2): 137-149.
- [45] Davin E L, de Noblet-Ducoudré N. Climatic impact of global-scale deforestation: radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, 2010, 23(1): 97-112.
- [46] Houspanossian J, Noretto M, Jobbágy E G. Radiation budget changes with dry forest clearing in temperate Argentina. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1211-1222.
- [47] Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, Ciais P, Zhou L M, Li L Z X, Myneni R B, Yin Y, Zeng H. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2915-2919.
- [48] Duman T, Huang C W, Litvak M E. Recent land cover changes in the Southwestern US lead to an increase in surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108246.
- [49] Pitman A J, Avila F B, Abramowitz G, Wang Y P, Phipps S J, de Noblet-Ducoudré N. Importance of background climate in determining impact of land-cover change on regional climate. *Nature Climate Change*, 2011, 1(9): 472-475.
- [50] Liu X, Zhuang Q L, Lai L M, Zhou J H, Sun Q L, Yi S G, Liu B B, Zheng Y R. Soil water use sources and patterns in shrub encroachment in semiarid grasslands of Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 308/309: 108579.
- [51] Qiu J. China: The third pole. *Nature*, 2008, 454(7203): 393-396.
- [52] Lu X M, Liang E Y, Camarero J J, Ellison A M. An unusually high shrubline on the Tibetan Plateau. *Ecology*, 2021, 102(6): e03310.
- [53] Keen R M, Nippert J B, Sullivan P L, Ratajczak Z, Ritchey B, O'Keefe K, Dodds W K. Impacts of riparian and non-riparian woody encroachment on tallgrass prairie ecohydrology. *Ecosystems*, 2022: 1-12.
- [54] Asmus A L, Chmura H E, Høye T T, Krause J S, Sweet S K, Perez J H, Boelman N T, Wingfield J C, Gough L. Shrub shading moderates the effects of weather on arthropod activity in Arctic tundra. *Ecological Entomology*, 2018, 43(5): 647-655.
- [55] Lawrence D M, Swenson S C. Permafrost response to increasing Arctic shrub abundance depends on the relative influence of shrubs on local soil cooling versus large-scale climate warming. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045504.
- [56] Lehnert L W, Wesche K, Trachte K, Reudenbach C, Bendix J. Climate variability rather than overstocking causes recent large scale cover changes of Tibetan pastures. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24367.
- [57] Xie J, Yu Y, Li J L, Ge J, Liu C. Comparison of surface sensible and latent heat fluxes over the Tibetan Plateau from reanalysis and observations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2019, 131(3): 567-584.