气候变化背景下横断山区植被叶面积 指数时空变化特征分析

杨正兰 1,2 张廷斌 1,3 易桂花 4,5 秦岩宾 2 李景吉 3,6 王国严 4 姚明月 41

- (1. 成都理工大学地球科学学院,四川 成都 610059;
- 2. 重庆城市职业学院建筑工程学院, 重庆 402160:
- 3. 成都理工大学国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室,

四川 成都 610059;4. 成都理工大学旅游与城乡规划学院,

四川 成都 610059:5. 蒙大拿大学蒙大拿科技分校, 比尤特 蒙大拿州 美国

59701:6. 成都理工大学生态环境学院, 四川 成都 610059)

【摘 要】: 叶面积指数作为陆地生态过程的重要参数,对生态系统碳循环和区域水土保持具有重要意义。基于MOD15A2H/LAI 遥感数据集,利用 Theil-Senmedia 斜率分析、Mann-KendalI 趋势检验法以及相关分析法,研究了2001~2018 年横断山区植被 LAI 时空分布格局及变化趋势,根据气象数据、土地覆盖数据和 DEM 数据,重点分析了横断山区植被 LAI 对气候变化的响应。结果表明: (1)2001~2018 年横断山区植被 LAI 均值为 1.22,空间上呈由北向南逐渐递增的分布特征; (2)横断山区植被 LAI 受地形影响明显,植被 LAI 值随海拔升高表现为"升高-降低-稳定"的特征,随坡度增加植被 LAI 值呈上升趋势; (3)近 18a横断山区植被 LAI 整体以 0.07 • (10a) 1的速率增加,其中 68.92%的区域呈增加趋势,31.08%的区域呈退化趋势;(4)横断山区植被 LAI 与气温和日照时长呈正相关关系,与降水呈负相关关系。在 P<0.05 显著性水平下,植被 LAI 与气温、降水和日照时长的显著相关面积比例依次为 22.7%、33.58%和 31.80%,表明植被 LAI 受降水和日照时长影响较大,气温的影响相对较弱。

【关键词】: LAI 趋势分析 相关性分析 气候因子 横断山区

^{&#}x27;作者简介: 杨正兰(1996~), 女,硕士研究生,主要研究方向为环境遥感. E-mail:yangzhenglan@stu.cdut.edu.cn;张廷斌, E-mail:zhangtb@cdut.edu.cn

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0307);国家自然科学基金项目(41801099);四川省安全监管局(煤监局)安全生产科技项目(aj20170517210246)

【中图分类号】:X87【文献标识码】:A【文章编号】:1004-8227(2021)11-2670-12

叶面积指数通常指单位地表面积上植被叶子总面积的一半^[1],用于表征叶片的疏密程度和冠层结构,反映植被的结构参数。LAI 的大小影响着植被光合作用、呼吸和蒸腾等诸多生生态过程^[2,3]。目前,遥感技术作为监测区域植被生长状况最有效的工具,常用的数据源主要有归一化植被指数和植被净初级生产力等。在高植被覆盖区域,NDVI 存在饱和现象^[4],不利于反映地表植被真实情况^[5]。冠层对植被生产力具有重要影响^[6],叶面积指数是总初级生产力的主要反演参数之一^[7,8]。随着遥感技术的快速发展,植被 LAI 的估算模型也发展迅速。一种基于地面测量的有效 LAI 与遥感影像的光谱和空间信息之间建立的经验模型用于估算植被 LAI,该模型显著提升了叶面积指数的估算精度,尤其是在光谱指数趋于饱和的森林地区^[9]。另外,以 MODISLAI 产品为参考,利用 MODISLAI 与 Landsat 反射率数据相关的回归树,估算了 LandsatLAI 数据^[10]。目前,LAI 在农作物估产方面应用广泛。相关研究表明^[11],将 LAI 和 ET 之间的相关关系同化到作物模型中可估测冬小麦的产量。将 LAI 作为遥感特征参数,可对河北中部平原夏季玉米单产进行预测^[12]。在气候变化背景下,将 LAI 作为陆地生态系统能量循环的重要参数,对植被生长状况进行监测,研究其对气候变化的响应关系逐渐成为近年来的研究重点^[13,14]。柳艺博等^[15]研究了 2000~2010 年中国森林 LAI 时空变化特征,结果表明不同区域的植被 LAI 呈现明显的空间异质性,不同区域与气温和降水的关系差异较大;段利民等^[14]研究表明近 30a 来,锡林河流域植被 LAI 呈上升趋势,LAI 值的分布受地形因子影响较大。

横断山区位于东亚、南亚和青藏高原三大地理区域的交汇处,是长江上游的重要生态屏障^[16,17],是河流下游中外居民福祉的重要保证^[18]。王强等^[19]研究表明 2004~2014 年横断山区植被 NPP 整体呈上升趋势,但郑朝菊等^[20]和吴炳方等^[21]发现横断山区中北部等局部地区的森林覆盖度呈衰退趋势。2004 年以来国家发展和改革委员会将横断山区作为全国生态移民试点重点区域,实施退耕还林还草等政策,以促进该区生态环境逐步恢复。在气候变化和生态恢复工程实施的背景下,植被的变化趋势及其对气候变化的响应成为当前研究的热点之一。目前,利用 LAI 对横断山区植被动态变化进行监测的研究还比较缺乏。本文利用 MODIS MOD15A2H/LAI 数据研究了横断山区 2001~2018 年植被 LAI 时空分布特征,结合气象数据、DEM 等资料,分析了植被 LAI 对气候变化的响应,为监测横断山区植被生长健康状况和生态环境评价提供科学依据。

1研究区概况

横断山区地处青藏高原东南缘和川滇藏交界处(24°49′N~34°00′N,96°20′E~104°30′E),大部分区域位于云南省和四川省,共计102个县级行政单元,总面积约450000km²。横断山区地势由西北向东南倾斜,区内地形起伏较大,地貌以高山峡谷为主,海拔在294~7049m之间,平均海拔为3300m(图 1a)。研究区内水资源丰富,分布有澜沧江、金沙江和岷江等水系,邛海、洱海和泸沽湖等湖泊。区内植被类型多样^[22,23],植被垂直分带明显^[24],从低到高植被类型依次为农作物、阔叶林、针叶林和草地(图 1b),是中国乃至世界范围内山地垂直带谱最大、最复杂的区域之一,对我国中西部地区的生态安全及气候环境变化具有重要影响^[25]。横断山区集中了北半球南亚热带、中亚热带、北亚热带和暖温带等多种气候类型^[26]和生物群落^[27,28]。

2数据来源与研究方法

2.1 数据来源

LAI 数据来源于美国国家航空航天局发布的 MODIS MODI5A2H(V6),空间分辨率为 500m,时间分辨率为 8d,该产品经过辐射校正和大气校正等预处理。气象数据来自中国国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/),选取横断山区内部及周边74个气象站点日值数据。植被类型采用 2001~2018 年 MODIS/MCD12Q1 数据的植被功能型分类数据,根据研究区植被分布特点,基于 PFT 将常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林、草地、谷物作物和阔叶作物等 7 类土地覆盖类型归并为农作物、阔叶林、针叶林和草甸 4 种类型(图 1b)。DEM 数据来源于中国科学院"地理空间数据云"(http://www.gscloud.cn/)的GDEM(V2),空间分辨率为 30m。

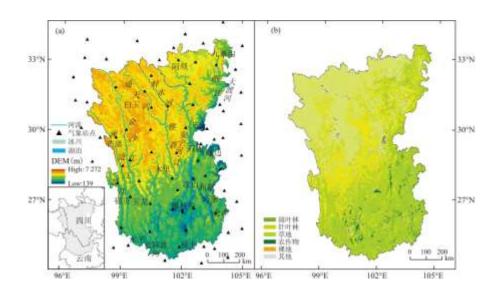


图 1 横断山区 DEM、气象站点分布图(a)和土地覆盖类型(b)

2.2 数据预处理

利用 MODIS Reprojection Tools 工具对 MOD15A2H 数据进行格式转换、重投影和镶嵌等预处理工作。利用质量控制文件对 MOD15A2H/LAI 数据进行质量评价,结果表明横断山区 2001~2018 年 LAI/8d 数据高质量数据占比超过 90%;其次,根据数据用户 手册剔除填充值 (249~255)、永久性湖泊和冰川;最后,采用最大值合成法 (Maximun Value Composite, MVC) 生成研究区月尺度 和年尺度 LAI 值。

对气象数据进行同质性检验剔除不可用数据^[29],采用 Kriging 插值法分别对降水量和日照时长进行空间插值。因气温受一定海拔影响^[30,31],采用样条函数将高程作为协变量进行空间插值。研究中所使用的植被类型、DEM 以及气象数据等均通过投影变换和裁剪,分辨率均统一为 500m。

2.3 研究方法

采用 Theil-Senmedia 斜率分析^[32]和 Mann-Kendall 趋势检验法^[33]相结合,对 2001~2018 年横断山区植被 LAI 数据进行逐像 元趋势变化分析及检验。Theil-Senmedia 趋势分析属于一种稳健的非参数斜率计算方法,使用序列中值估算方法,具有良好的 抗噪性。

Mann-Kendall 趋势检验能有效判断某一自然过程存在的显著变化趋势^[34],不需要样本服从一定分布^[35,36],同时也不受少数异常值的干扰^[37]。使用 Mann-Kendall 法进行趋势检验时,将研究时段内的时间序列数据看作 n 个独立、随机同分布的样本。进行双边趋势检验时,在给定置信水平 α 上判断植被 LAI 变化趋势的显著性,如 $|Z|>Z_{1-\alpha}$ 表示时间序列数据存在明显上升或下降趋势,当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha}$ 则表示时间序列数据未通过显著性水平检验。

采用相关分析研究横断山区植被 LAI 对气候因子的响应^[38],利用 t 双侧检验法对一元线性回归系数进行显著性检验^[39]。本文利用 Python 语言编程实现以上研究方法对植被 LAI 的分析。

3 结果与分析

3.1 横断山区植被 LAI 时空分布特征

近 18a 横断山区植被 LAI 整体呈现由北向南递增的空间分布格局(图 2),研究区各植被多年均值介于 0.01~5.34 之间,平均 LAI 值为 1.22。由于横断山区地形差异大,高程由北到南逐渐降低,植被垂直地带性明显,植被类型由南向北依次为阔叶林、针叶林和草地(图 1b),与植被 LAI 值从高到低分布相对应。LAI 低值区主要分布在巴塘县-理塘县-稻城县、察雅县-贡觉县-芒康县和德格县-甘孜县-新龙县一带,植被类型多为草地。LAI 高值区主要分布在研究南部地区,集中于仁和区西南-大姚县-姚安县-牟定县和禄丰县-楚雄市一带,区内的植被类型主要为阔叶林和农作物。

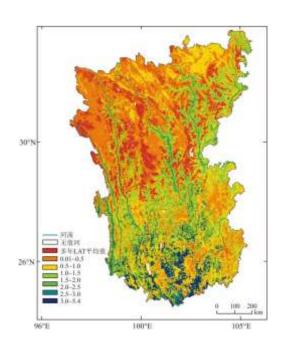


图 2 2001~2018 年横断山区植被 LAI 空间分布图

横断山区包含低海拔(<1000m)、中海拔(1000~3500m)、高海拔(3500~5000m)和极高海拔(>5000m)4种地貌类型^[40],以中海拔(49.37%)和高海拔(49.47%)为主。研究区植被 LAI 低值区多集中在 4500m 以上的高海拔区域,高值区多集中在 3000m 以下海拔区域。为了进一步分析植被 LAI 与海拔之间的关系,将研究区海拔分为 12 级,其中低海拔(<1000m)为一级,中海拔和高海拔以 500m 为间隔进行分级,将海拔 6000m 以上归为一级。结果表明(图 3a),2500m 以下高程区间植被 LAI 值随海拔升高呈上升趋势,2500~5500m 高程区间随着海拔升高 LAI 值表现为急剧下降趋势;随高程升高植被 LAI 值变化呈现"升高-降低-稳定"的特征,该现象可能与研究区植被垂直带谱有关。

横断山区地形起伏较大,坡度差异明显,以 5°为间隔将研究区划分为 6 个坡度等级,分级范围和所占面积比例依次为 0°~5°(14.18%)、5°~10°(22.88%)、10°~15°(22.24%)、15°~20°(17.74%)、20°~25°(12.30%)和大于 25°(10.66%)。结果表明(图 3b),LAI 值随坡度增大呈明显上升趋势,上升速率为 0.049/度(R^2 =0.99)。地势较平坦的地区主要为人口聚集地,以耕地和建设用地为主,受人类活动影响较大,自然植被比坡度较高区域少,并且农作物生长的季节性较强,年 LAI 值相比坡度较高地区低。随着坡度上升,植被受人类活动影响下降,随着各生态保护政策的实施,植被覆盖度增加,LAI 值上升。

近 18a 横断山区年际 LAI 值呈波动上升趋势(图 4a),增长速率为 0.066 • (10a) ⁻¹,多年 LAI 平均值为 1.22,整体线性趋势不明显。其中,LAI 值最小值出现在 2004 年,约为 1.10,最大值出现在 2013 年,约为 1.30。横断山区多年月平均 LAI 值表明(图 4b),研究区植被 LAI 值 1~12 月呈明显的季节性变化特征。植被 LAI 值在 2~4 月缓慢上升,5~7 月上升速度加快并在 8 月达到最大值,9~12 月呈下降趋势并在次年 1 月降到最低。春季气温逐渐回升,植被开始生长,夏季为全年气温最高和降水最充沛的

季节,同时日照充足,植被生长旺盛;秋季气温逐渐下降,植被枯黄,LAI 开始下降;冬季为全年气温最低和降水最少的季节,夜长昼短,大多数植物停止生长,LAI 值降到全年最低。整体上,多年月均 LAI 值反映了植被生长过程中的周期性变化。

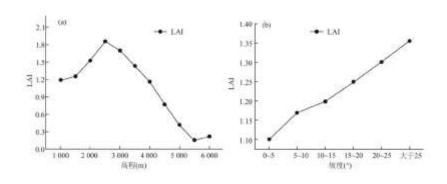


图 3 植被 LAI 随高程变化(a)和植被 LAI 随坡度变化图(b)

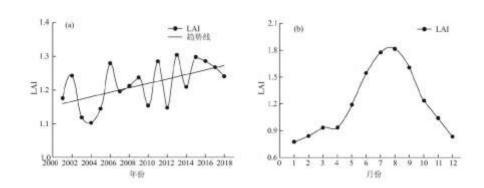


图 4 2001~2018 年横断山区植被 LAI 值年际变化图(a);植被 LAI 多年月平均变化图(b)

3.2 植被 LAI 空间趋势变化

根据 Mann-Kendaill 趋势检验 (图 5a) Z 值结果,在 α =0.05 显著性水平下,将横断山区植被 LAI 趋势变化划分为: 当 S<0, $|Z|>Z_{I-\alpha}$, 植被 LAI 为显著退化; S<0, $|Z|<Z_{I-\alpha}$ 时,植被 LAI 为不显著退化; S>0, $|Z|>Z_{I-\alpha}$ 时,植被 LAI 为显著改善; S>0, $|Z|<Z_{I-\alpha}$ 时,植被 LAI 为不显著改善。结果表明 (图 5b),横断山区 2001~2018 年植被 LAI 整体呈改善趋势,其中,显著改善趋势面积占研究区总面积的 19.72%,集中分布在研究区南部的盐源县—宁蒗县—古城县—鹤庆县、美姑县—昭觉县—普格县和巧家县—会泽县—寻甸县—带;不显著改善区域面积占研究区总面积的 49.20%,分布在整个横断山区。显著退化区域面积比例约为 2.88%,主要分布在研究区中部和南部,集中于宾州县—祥云县—弥渡县、乡城县—稻城县—木里县—香格里拉市和雅江县北部区域;不显著退化区域面积占比约为 28.20%,主要分布在研究区北部和中部。其中,显著改善区域植被类型主要为阔叶林和农作物,不显著退化区植被覆盖类型主要为草地。

植被 LAI 趋势变化在不同高程区间具有明显差异,根据横断山区地形特点,以 3500m 为界限将研究区划分为中海拔地区 (≤3500m, 49.84%) 和高海拔地区 (≥3500m, 50.16%)。中海拔地区和高海拔地区 LAI 呈增加趋势的面积比例分别为 55.91%和 44.09%, 呈减少趋势的面积比例分别为 34.44%和 65.56%。其中,中海拔和高海拔区域 LAI 显著增加的面积比例分别为 16.94%和 2.77%, 呈显著减少趋势的面积比例分别为 2.88%和 2.66%。整体上,中海拔地区植被 LAI 呈显著增加趋势面积远远大于高海拔地区。

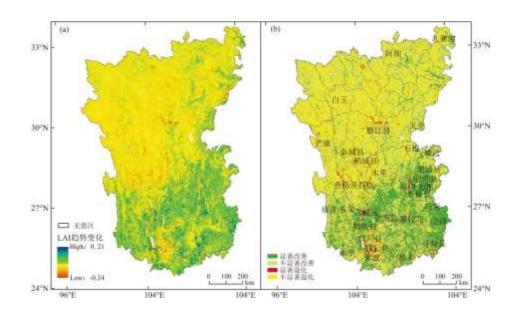


图 5 2001~2018 年横断山区植被 LAI 趋势分布图 (a); LAI 趋势变化类型图 (b)

表 1 横断山区 2001~2018 年植被 LAI 变化趋势统计

S	Z (α=0.05)	趋势类型	占总面积百分比(%)	
S>0	Z >1.96	显著改善	19. 72	
S>0	Z ≤1.96	不显著改善	49. 20	
S<0	Z >1.96	显著退化	2.88	
S<0	Z ≤1.96	不显著退化	28. 20	

3.3 横断山区植被 LAI 对气候变化的响应

3.3.1 气候因子变化特征

2001~2018 年横断山区气温呈波动上升趋势 (图 6a)。研究区年均气温介于 10.83℃~11.72℃之间,多年平均气温为 11.33℃,研究时段内,年均气温最小值出现在 2004 年,约为 10.83℃;之后 6a 间年均气温波动较大,在 2009 年年均气温达到最大,为 11.72℃;2010~2017 年呈明显上升趋势,到 2018 年稍降。研究区累计降水量介于 671.74~992.40mm 之间 (图 6b),多年平均累 计降水量为 816.20mm。累计日照时长介于 1915.09~2163.75h 之间 (图 6c),多年平均累计日照时长为 2032.05h。横断山区年均气温以 0.26℃/10a 的速度增加,累计降水呈增加趋势,累计日照时长略有减少,线性趋势均不显著。

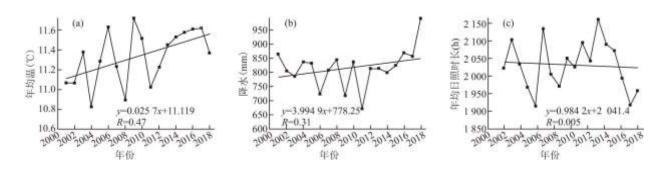


图 6 横断山区 2001~2018 年均气温(a)、降水(b)和日照时长(c)年际变化

3.3.2 植被 LAI 对气候变化响应分析

横断山 2001~2018 年植被 LAI 与气温相关性分析结果表明(图 7a),研究区多年平均 LAI 与气温主要呈正相关关系;呈正相关区域主要分布于研究区南部,盐源-宁蒗一盐边、仁和-永仁-大姚以及维西-兰坪-云龙县一带,面积占比约为 62.26%;呈负相关区域主要位于研究区北部,分布江达-德格-白玉-理塘和九寨沟-松藩-茂县-理县一带,面积占比约为 37.74%。显著性检验表明(表 2),研究区通过 P<0.05 显著性水平的区域主要分布在维西-兰坪-云龙县和永仁县东北部,总面积为 100708km²,面积占比约为 22.77%,显著正相关和显著负相关面积占比约为分别为 16.74%和 6.03%;通过 P<0.01 显著性水平检验的区域主要分布在维西县南部、兰坪南部和云龙县北部,总面积为 36886km²,面积占比约为 8.34%,显著正相关和显著负相关面积占比分别为 6.40%和 1.94%。

表 2 横断山区植被 LAI 与气候因子不同显著水平检验统计表

气候因子	通过显著性检验 面积占比(P<0.05)(%)	显著正相关(%)	显著负相关(%)	通过显著性检验 面积占比(P<0.01)(%)	显著正相关(%)	显著负相关(%)
气温	22. 77	16. 74	6.03	8. 34	6.40	1.94
降水	33. 58	5.07	28. 51	16. 58	1.69	14.89
日照时长	31.80	26. 29	5. 51	15. 24	13. 15	2. 09

植被 LAI 与降水相关性分析结果表明(图 7b),研究区多年平均 LAI 与降水主要呈负相关关系;呈负相关区域主要位于研究区北部和南部,分布于新龙县-雅江县-道孚县-金川县、永仁县-大姚县和盐源县中部一带,约占研究区总面积的 69.97%;呈正相关区域主要位于研究区北缘和东南缘,分布在红原县-阿坝东北部、雷波县-金阳县-会泽县和九寨沟东北部一带,约占研究区总面积 30.03%。显著性检验结果表明(表 2),研究区通过 P<0.05 显著性水平检验的区域主要分布在新龙县-道孚县-丹巴县和盐源县中部,总面积为 148430km²,约占研究区总面积 33.58%。显著负相关和显著正相关面积占比分别为 5.07%和 28.51%;通过 P<0.01 显著性水平的区域主要分布在道孚县-丹巴县和盐源中部,总面积为 73311km²,约占研究区总面积 16.58%,显著负相关和显著正相关面积占比分别为 1.69%和 14.89%。

横断山区 2001~2018 年植被 LAI 与日照时长相关性分析结果表明(图 7c),研究区多年平均 LAI 与日照时长主要呈正相关关系;呈正相关区域主要分布在研究区北部新龙县-雅江县-道孚县-金川县和南部的盐源县-米易县-宁南县一带,约占研究区总面积的 69.69%;呈负相关区域主要位于研究区北缘阿坝东北部-红原县、九寨沟-松藩-茂县、峨边县-美姑县-雷波县和南部的会泽县东北部,约占研究区总面积 30.31%。显著性检验结果表明(表 2),研究区通过 P<0.05 显著性水平的区域主要分布在道孚县-金

川县和盐源县-米易县一带,总面积为140586km²,约占研究区总面积31.80%,显著正相关和显著负相关面积占比分别为26.29%和5.51%;通过P<0.01显著性水平的区域主要分布在道孚县-炉霍县和米易县,总面积为67388km²,约占研究区总面积15.24%,显著正相关和显著负相关面积占比分别为13.15%和2.09%。

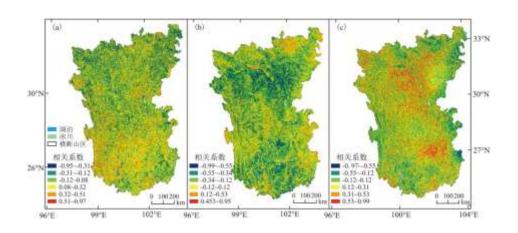


图 7 横断山区 LAI 与气温(a)、降水(b)和日照(c)相关系数图

4 讨论

横断山区位于我国第一阶梯和第二阶梯的过渡带,区内水资源丰富,具有多种气候类型,生物多样性复杂,是我国典型的生态敏感区,在调节气候和维持生态平衡方面发挥着重要作用。相关研究表明[41],西南地区植被覆盖呈波动上升趋势,其中横断山区中度改善和明显改善区域主要位于南部,横断山区植被 NPP 整体呈上升趋势[19],植被生长状况呈改善趋势。胡实等[42]研究表明横断山区植被 NDVI 呈增加趋势,植被空间分异性显著。植被 LAI 作为最重要的植被结构参数之一[43,44],是陆地生态和水文模拟中的不可或缺的因子。本文基于 MOD15A2H/LAI 数据对横断山区植被 LAI 时空变化特征进行分析,发现横断山区 LAI 整体呈上升趋势,表明植被生长状况逐步改善,在气候变化背景下,横断山区植被 LAI 受降水和日照时长影响大于气温。同时,这一结论也证明横断山区多年来实行的生态移民、"天然林资源保护"和退耕还林还草等生态恢复措施对植被恢复起到了积极促进作用[45]。

地形因子是决定植被生长环境的主导因素,其中海拔和坡度的影响最大^[46]。横断山区植被 LAI 随海拔升高呈先增加后减小的特征,在海拔 2500m 以下植被 LAI 随海拔升高而升高,这种现象主要是由于低海拔地区是人口和城镇的聚集区,植被受人类活动影响较大,植被 LAI 偏低。随着高海拔逐渐升高,人类活动影响减弱,同时横断山区生态保护工程和退耕还林还草等保护政策实施,该区域植被状况逐渐改善,植被 LAI 水平处于中等;海拔上升到 2500m 时,在该区域形成降雨带促进植被生长,年均植被 LAI 达到最大;随着海拔的持续升高,气温下降,不利于植被生长发育 [47],植被 LAI 开始下降;当海拔升至 5500m 以上时,该区间水热条件差,表土层稀薄,土壤肥力差,植被生长环境恶化,植被稀少,导致植被 LAI 降到最低并趋于稳定 [48]。坡度方面,随坡度增加植被覆盖度呈先增加后减少的特征,坡度较大地区单个像元上植被生长密度较平坦像元大,另一方面,横断山区坡度较大区域主要分布在中海拔地区,该区域主要植被覆盖类型为阔叶林和针叶林 [49],导致横断山区植被 LAI 值随坡度增加呈上升趋势 [50]。在趋势分析中,植被 LAI 显著改善区域主要位于研究区南部,这可能与生态移民工程的实施、人口集中安置以及农业生产方式的转变等相关,降低了人类活动带来的影响;植被 LAI 的显著退化主要分为两种类型,一种为自然灾害导致的区域植被状况恶化,主要位于雅江县和西昌市,两地都曾发生过较大滑坡、泥石流和火灾等;另外一种为横断山区特有的干旱河谷地理景观引起的生态系统严重退化,表现为植被退化 [51],主要位于金沙江、澜沧江和雅砻江中下游,整个干旱河谷区域逐渐向荒漠化发展,该地区植被 LAI 呈显著退化特征。

韩思淇等^[52]研究发现黄河源区植被 LAI 与气温和降水均呈正相关关系。本文分析了横断山区植被 LAI 对气温、降水和日照时长的响应关系,结果表明横断山区植被 LAI 整体与气温和日照呈正相关关系,与降水呈负相关关系。温度升高能够使植被返青

期提前,温度升高促使植被生长速度加快;日照时间充足,促进植被光合作用,植被生长旺盛^[58]。受地形因素影响,不同区域植被 LAI 对气候因子的响应存在明显差异。横断山区植被 LAI 与气温呈负相关区域主要分布在中低海拔区域,该区域是城镇、人口和产业的聚集地,可能受人类活动干扰^[54, 55,56]。LAI 与降水呈负相关区域主要分布在研究区高海拔区域,该区域主要植被覆盖类型为草地,降水偏多会抑制高海拔地区植被生长^[57]。LAI 与日照呈正相关区域主要分布在中高海拔区域,该区域内植被覆盖类型主要为草地和针叶林,在日照充足的条件下,有利于植被进行光合作用,促进植被生长。

植被 LAI 变化受多种因素共同影响,MODISLAI 产品是基于三维辐射传输模型模拟查找表反演而成,LAI 受输入地表反射率和植被类型数据影响较大^[58,59]。现有的 LAI 产品众多,这些 LAI 产品的优缺点各有不同,Jin 等^[60]研究证明在西南地区 MOD15A2H/LAI 比 Glass/LAI 更适用,MOD15A2H/LAI (V6)数据源于 MODISTerra 卫星,空间分辨率由 V5 的 1km×1km 提升至 500m×500m。近年来,一些研究利用 POLDER、MODIS 和 MISR 数据生成分辨率较高的空间聚集度系数产品^[61,62,63],以期进一步增强 LAI 的可靠性。后续研究中,在提高 LAI 反演精度,促进 LAI 产品的应用方面仍具有很大研究潜力。

5 结论

基于 MOD15A2H/LAI 数据、横断山区内部及周围 74 个气象站点的气温、降水和日照时长数据,利用 Theil-Senmedia 趋势分析、Mann-Kendaill 趋势检验及相关分析研究了横断山区 2001~2018 年植被 LAI 时空分布特征、变化趋势以及植被 LAI 对气候变化的响应,得到以下结论:

- (1) 横断山区 $2001 \sim 2018$ 年植被多年平均 LAI 值介于 $0.01 \sim 5.34$ 之间,空间上植被 LAI 由北向南逐渐降低,对应的植被类型依次为农作物、针叶林、阔叶林和草地;植被 LAI 在 2500m 以下高程区间呈上升趋势,在 $2500 \sim 5500m$ 高程区间 LAI 值呈下降趋势,当海拔超过 5500m 时,植被 LAI 逐渐趋于稳定;植被 LAI 随坡度增大呈明显上升趋势,上升速率为 0.049/度 ($R^2=0.99$)。
- (2) 近 18a 横断山区植被 LAI 呈缓慢上升趋势 (0.07 (10a)⁻¹), 整体以不显著改善趋势为主, 面积占比为 49.20%, 显著改善面积占比大于显著退化面积, 分别为 19.72%和 2.88%, 不显著退化面积占比为 28.20%。
- (3) 横断山区 2001~2018 年气温和降水均呈波动上升趋势,上升速度分别为 0. 26℃/10a 和 39. 9mm/10a; 年均累计日照时长呈波动下降趋势,下降速率约为 9. 8h/10a, 线性趋势均不明显。相关性分析结果表明,LAI 与气温和日照时长呈正相关关系,其显著正相关面积占比分别为 17. 74%和 26. 29%; 与降水呈负相关关系,其显著负相关面积占比为 28. 51%, 受地形因素影响显著。整体上,横断山区植被 LAI 主要受降水和日照时长影响,其次为气温。

参考文献:

- [1]CHEN J M, BLACK T A. Defining leaf area index for non-flat leaves[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 15(4):421-429.
- [2]BONAN G B. Forests and climate change: Forcings, Feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. Science, 2008, 320 (5882): 1444-1449.
- [3]SPTINTSIN M, COHEN S, MASEYK K, et al. Long term and seasonal courses of leaf area index in a semi-arid forest plantation[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(5):565-574.
- [4]MUTANGAO, SKIDMORE A K. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(19):3999-4014.

- [5] 王志慧,姚文艺,汤秋鸿,等.2000-2014 年黄土高原植被叶面积指数时空变化特征[J].中国水土保持科学,2017,15(1):71-80.
 - [6] 肖锐, 张同峰, 马莹. 天然落叶松叶量及叶面积模型研究[J]. 林业科技情报, 2014, 46(2): 34, 41.
- [7]BARR A G, BLACK T A, HOGG E H, et al. Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspenhazelnut forest in relation to net ecosystem production[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2004, 126 (3-4):237-255.
- [8] SAIGUSA N, YAMAMOTO S, MURAYAMA S, et al. Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2005, 134(1-4):4-16.
- [9]GRAY J, SONG C. Mapping leaf area index using spatial, spectral, and temporal information from multiple sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119 (none):173-183.
- [10]GAO F, ANDERSON, C. M. Simple method for retrieving leaf area index from Landsat using MODIS leaf area index products as reference[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2012, 6(1):063554.
- [11]包姗宁,曹春香,黄健熙,等.同化叶面积指数和蒸散发双变量的冬小麦产量估测方法[J].地球信息科学学报,2015,17(7):871-882.
 - [12]李俐,许连香,王鹏新,等.基于叶面积指数的夏玉米单产预测[J].农业机械学报,2020:1-16.
- [13]吴国训,阮宏华,李显风,等.基于 MODIS 反演的 2000-2011 年江西省植被叶面积指数时空变化特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(1):11-17.
- [14]段利民,李玮,罗艳云,等.锡林河流域植被叶面积指数时空变化特征及其对地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(3):224-231.
 - [15]柳艺博,居为民,陈镜明,等. 2000~2010年中国森林叶面积指数时空变化特征[J]. 科学通报, 2012, 57 (16):1435-1445.
 - [16] 樊杰. 中国主体功能区划方案[J]. 地理学报, 2015, 70(2):186-201...
 - [17]张荣祖. 横断山区自然地理[M]. 科学出版社, 1997.
- [18] WANG Y, DAI E, YIN L, et al. Land use/land cover change and the effects on ecosystem services in the Hengduan Mountain region, China[J]. Ecosystem Services, 2018, 34.
- [19]王强, 张廷斌, 易桂花, 等. 横断山区 2004-2014 年植被 NPP 时空变化及其驱动因子[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3084-3095.
 - [20] 郑朝菊,曾源,赵玉金,等. 20世纪90年代以来中国西南地区土地覆被变化[J]. 生态学报,2016(23):7858-7869.

- [21]吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 等. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 723-731.
- [22]郑度,杨勤业.横断山区自然区划若干问题[J].山地学报,1987(1):9-15.
- [23]杨勤业,郑度.横断山区综合自然区划纲要[J].山地学报,1989,007(1):56-64.
- [24]余有德, 刘伦辉. 横断山区植被分区[J]. 山地学报, 1989, 7(1):47-55.
- [25]姚永慧,张百平,韩芳,等.横断山区垂直带谱的分布模式与坡向效应[J].山地学报,2010,28(1):11-20.
- [26]张谊光. 横断山区气候区划[J]. 山地学报,1989(1):21-28.
- [27]李宗省,何元庆,辛惠娟,等. 我国横断山区 1960-2008 年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报,2010,65(5):563-579.
 - [28] 张涛, 李宝林, 何元庆, 等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 260-270.
- [29] XU Z X, WANG D J, GAO J. Homogeneity test on temperature series in Liaoning Province [J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(8):17-20.
- [30] YAN L, ZHOU G S, WANG Y H, et al. The spatial and temporal dynamics of carbon budget in the alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan plateau using the terrestrial ecosystem model[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 107(16):195-201.
- [31] 易桂花, 张廷斌, 何奕萱, 等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(1):115-128.
- [32] JIANG W, YUAN L, WANG W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015, 51 (S1):117-126.
 - [33]邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.
 - [34] 王雅鑫. 基于叶面积指数的内蒙古四子王旗荒漠草原植被动态分析[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2019.
 - [35]王建邦,赵军,李传华,等. 2001-2015年中国植被覆盖人为影响的时空格局[J]. 地理学报,2019,74(3):504-519.
- [36]刘亚龙,王庆,毕景芝,等.基于 Mann-Kendall 方法的胶东半岛海岸带归一化植被指数趋势分析[J].海洋学报,2010(3):79-87.
- [37] TONG S Q, ZHANG J Q, BAO H Y, et al. Analyzing vegetation dynamic trend on the Mongolian Plateau based on the Hurst exponent and influencing factors from 1982-2013 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(5):595-610.

- [38]刘军会, 高吉喜, 王文杰. 青藏高原植被覆盖变化及其与气候变化的关系[J]. 山地学报, 2013(2):108-116.
- [39]卓嘎, 陈思蓉, 周兵. 青藏高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2018, 38 (9): 3208-3218.
- [40] 龙晓君, 李小建. 基于多源数据的中国地形海拔分级指标调整研究[J]. 地理科学, 2017, 37(10):1577-1584.
- [41]王东. 西南地区植被覆盖变化及对不同时间尺度气候特征的响应分析[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [42] 胡实, 占车生, 赵茹欣, 等. 横断山区植被绿度的时空变化特征及其成因[J]. 山地学报, 2019, 37(5):669-680.
- [43] 孙佳佳,于东升,史学正,等. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J]. 土壤学报,2010,047(6):1060-1066.
 - [44] 冯强, 赵文武. USLE/RUSLE 中植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(16):4461-4472.
 - [45]王新源,连杰,杨小鹏,等. 玛曲县植被覆被变化及其对环境要素的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(3):170-182.
- [46]朱林富,谢世友,杨华,等.基于 MODIS EVI 的重庆植被覆盖变化的地形效应[J].自然资源学报,2017,32(12):2023-2033.
 - [47] 吕华丽. 长江流域植被覆盖变化及其驱动力因子研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- [48] 张振东, 昝梅. 伊犁地区植被生产力的时空分异及其与地形因子关系研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(4):711-720.
 - [49]毛转梅,陈劲松,彭尔瑞,等.甘肃省植被覆盖时空变化趋势研究[J].江西农业学报,2020,32(3):125-130.
- [50]熊巧利,何云玲,李同艳,等.西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应[J].水土保持研究,2019,26(6):259-266.
 - [51]孙辉, 唐亚, 黄雪菊, 等. 横断山区干旱河谷研究现状和发展方向[J]. 世界科技研究与发展, 2005(3):54-61.
- [52]韩思淇,麻泽龙,庄文化,等. 2000-2018 年黄河源植被叶面积指数时空变化特征[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12):57-62.
 - [53]郭连云,丁生祥,吴让,等.气候变化对三江源区兴海县天然牧草的影响[J].草业科学,2009,26(6):90-95.
 - [54]郑朝菊,曾源,赵玉金,等.近15年中国西南地区植被覆盖度动态变化[J].国土资源遥感,2017,29(3):128-136.
 - [55]李波, 邵怀勇. 气候变化与人类活动对川西高原草地变化相对作用的定量评估[J]. 草学, 2017, 000(3):16-21.
- [56] 张骞,马丽,张中华,等.青藏高寒区退化草地生态恢复:退化现状、恢复措施、效应与展望[J].生态学报,2019,39(20):7441-7451.

[57]ZHANG L, GUO H, JI L, et al. Vegetation greenness trend (2000 to 2009) and the climate controls in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1).

[58] FANG H, WEI S, JIANG C, et al. Theoretical uncertainty analysis of global MODIS, CYCLOPES, and GLOBCARBON LAI products using a triple collocation method[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124:610-621.

[59] FANG H, LI W, MYNENI R. The impact of potential land cover misclassification on MODIS leaf area index (LAI) estimation: A Statistical Perspective [J]. Remote Sensing, 2013, 5(2).

[60] JIN H, LI A, BIAN J, et al. Intercomparison and validation of MODIS and GLASS leaf area index (LAI) products over mountain areas: A case study in southwestern China[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2017, 55:52-67.

[61]HE L, CHEN J M, PISEK J, et al. Global clumping index map derived from the MODIS BRDF product[C]. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, 2012.

[62]朱高龙. 2000~2013 年中国植被叶片聚集度系数时空变化特征[J]. 科学通报, 2016, 061 (14):1595-1603.

[63] PISEK J, RYU Y, SPRINTSIN M, et al. Retrieving vegetation clumping index from Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) data at 275 m resolution[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 138:126-133.