

引用格式: 赵维俊, 牛赞, 杜军, 马雪娥, 张克海. 祁连山青海云杉林叶面积指数的空间异质性[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 312-319.

ZHAO Weijun, NIU Yun, DU Jun, MA Xue'e, ZHANG Kehai. Spatial heterogeneity of leaf area index of *Picea Crassifolia* forest in the Qilian Mountains, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 312-319.

祁连山青海云杉林叶面积指数的空间异质性

赵维俊¹, 牛赞^{2*}, 杜军³, 马雪娥¹, 张克海¹

(1. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院 甘肃祁连山森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 张掖 734000;
2. 淮阴师范学院 地理科学与规划学院, 江苏 淮安 223300; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 73000)

摘要: 叶面积指数(leaf area index, LAI)在山地森林具有高度的空间异质性。基于大样地尺度的山地森林叶面积空间异质性的研究较少, 而且不涉及 LAI 对地形的响应研究。基于 LAI 的空间异质性和地形因子的相关性, 确定取样尺度, 可为提升区域尺度上 LAI 的空间遥感精度提供依据。本研究依托祁连山大野口流域 10.2 ha (340 m × 300 m) 的青海云杉林动态监测样地, 使用 CID CI-110 植物冠层数字图像分析仪对样地内 255 个 20 m × 20 m 样方进行五点法 LAI 测定, 分析 LAI 的空间异质性特征和空间分布格局及其与地形因子的相关性。研究结果表明: (1) LAI 具有中等变异性, 指数模型是变异函数的最佳理论模型, 具有强烈的空间自相关, 变程为 16 m, 南—北方向上是 LAI 分布的优势格局。(2) LAI 的空间分布格局相对简单, 具有一定的斑块性, LAI 为 0.56 ~ 1.43 的斑块所占面积最大。(3) LAI 与海拔和坡度均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与坡度和曲率的相关性均不显著 ($P > 0.05$)。 (4) 青海云杉林 LAI 空间异质性与尺度和方向有关, 部分地形因子对 LAI 存在着显著影响。研究结果可为青海云杉林生态过程分析以及遥感技术反演 LAI 参数提供依据。

关键词: 青海云杉林; 动态监测样地; 叶面积指数; 空间异质性

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

叶面积指数(leaf area index, LAI)是描述植被冠层与二氧化碳、水分、养分等物质及能量交换过程的量化指标, 也是模拟植被生产力、碳水循环、植被结构特征以及生态水文模型的关键参数^[1-2], 已在植物生态学、植被学、植物生理学等学科中得到广泛的应用^[3]。LAI 常用于评估冠层太阳辐射、光合作用、降水截留等物理过程^[4-5], 结合卫星遥感技术分析大尺度森林群落的 LAI 空间异质性, 确定林木生长、水文生态功能、森林生产力^[6]。

在森林生态系统中, 受气候、林分结构、地形等因素的影响, LAI 具有高度的空间异质性。研究山地森林叶面积空间异质性, 主要涉及两个层面。一

是采用光学仪器测量样地尺度上的 LAI 的空间特性, 例如, 采用 LAI-2200 植物冠层分析仪测定小兴安岭谷底云冷杉 LAI 空间异质性^[7]; 采用半球摄影技术调查云冷杉 LAI 空间异质性与林分结构^[6]。另一个是采用遥感手段反演得到一定尺度上 LAI 的空间分布, 例如, 应用 PROSAIL 模型遥感估测凉水实验林场的 LAI^[8]。

通过研究 LAI 的空间异质性来确定 LAI 的取样尺度, 也有助于结合遥感数据进行大尺度 LAI 的抽样。研究表明, 研究地形影响下的山地森林 LAI 对其反演模型具有较强的估算能力^[9]; 与实测叶面积密度值相比, 机载和地基雷达数据协同反演可以提

收稿日期(Received date): 2024-04-29; 改回日期(Accepted date): 2024-06-18

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(32060247, 32071606)。[National Natural Science Foundation of China (32060247, 32071606)]

作者简介(Biography): 赵维俊(1981-), 男, 甘肃靖远人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 森林与土壤生态。[ZHAO Weijun (1981-), male, born in Jingyuan, Gansu province, Ph. D., professor of research, research on forest and soil ecology] E-mail: zhaoweijun1019@126.com

* 通讯作者(Corresponding author): 牛赞(1974-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 生态水文。[NIU Yun (1974-), male, Ph. D., professor, research on eco-hydrology] E-mail: 747650046@qq.com

升落叶松林叶面积密度的估算精度^[10]。但基于大样地尺度的叶面积空间异质性研究较少,而且分析 LAI 对地形的响应的研究也较少。

本研究以建立在祁连山中段大野口流域 340 m × 300 m 的青海云杉林动态监测样地为试验基地,使用 CID CI-110 植物冠层数字图像分析仪对其样地内 255 个 20 m × 20 m 样方进行五点法 LAI 测定;分析 LAI 的空间异质性特征和空间分布格局及其与地形因子的相关关系。研究结果以期了解青海云杉林生态过程提供关键参数,也为遥感技术反演准确获得局域或区域尺度上 LAI 的空间分布特征提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

以祁连山国家公园内的大野口流域为研究区域,其地理位置为 38°16′ ~ 38°33′N、100°13′ ~ 100°16′E,海拔 2600 ~ 4600 m,平均海拔为 3330 m,流域面积约为 68 km²。该流域年均降水量为 300 ~ 500 mm,年均蒸发量为 1051.7 mm,年均气温为 -0.6 °C ~ 2.0 °C,年均日照时数为 1893 h,日辐射总量均值为 110.30 kW · m⁻²^[11-12]。自然条件相对复杂,特别是水热和地形条件的差异导致了植被类型和土壤类型呈带状分布。在海拔 2400 ~ 3300 m 的阴坡和半阴坡分布着以青海云杉为建群种的寒温性针叶林,土壤类型为山地灰褐土;青海云杉林与草地犬齿交错,形成林草复合流域,还有零星分布的祁

连圆柏林,形成了独具特色的祁连山典型森林植被景观。

青海云杉林动态监测样地位于大野口流域(图 1),其群落结构稳定,主要植被类型是以青海云杉为主的天然次生林,林下光照不足,灌木种类较少。林下灌木优势种主要有金露梅(*Potentilla fruticosa*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)等;林下草本优势种主要有珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、鲜生马先蒿(*Pedicularis muscicola*)等^[11,13]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及调查

按照森林生态学的动态监测样地建设技术规范^[14-15],2010 年在祁连山中段大野口流域中心区域建立了青海云杉林动态监测样地,大样地面积大小为 340 m × 300 m,中心位置坐标为 38°31′55″N、100°15′03″E,最高海拔 2959 m,最低海拔 2852 m,平均海拔约 2889 m,高差约 107 m,样地北面、西面较平缓,整体地势由北向南沿山脊上升(如图 2)。利用全站仪进行放样,将样地划分为 255 个 20 m × 20 m 的样方,每个样方顶点编号并设置石桩,并记录每个顶点坐标(西安 1980 坐标系)。

1.2.2 LAI 的测定

2023 年 10 月,在每个样方 4 个顶点和中心点应用 CID CI-110 植物冠层数字图像分析仪获取被测样方的 LAI。利用 150° 的鱼镜头角度距离地面 1.5 m 处进行半球形图像的捕获,对捕获的图像可视化鱼镜头上方的青海云杉林植物冠层,分析仪通过迭代间隙率反演模型估计有效的 LAI,所用的具

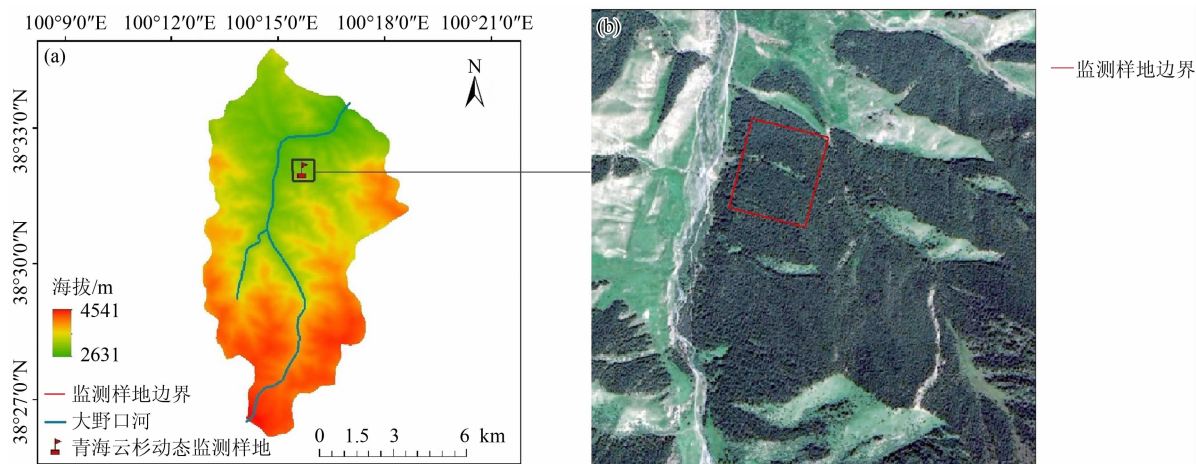


图 1 祁连山青海云杉林动态监测样地位置图

Fig. 1 Location map of dynamic monitoring plots of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains of China

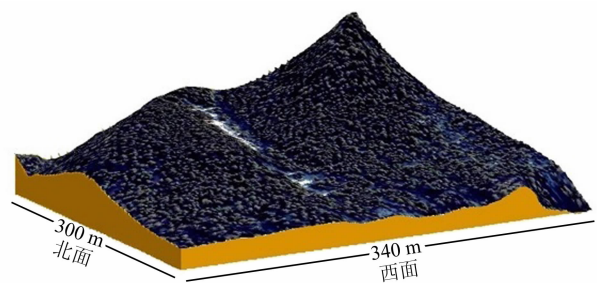


图2 祁连山青海云杉林动态监测样地地形立体图
Fig. 2 Topographic stereo map of dynamic monitoring plots
of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains

体算法来自 Gap-Fraction Inversion Procedure^[16]和椭圆叶角分布参数(Ellipsoidal Blade Angle Distribution Parameters)^[17],使用专业软件 Plant Canopy Analysis System 对半球影像图片进行分析,从而得出 LAI 数值。

1.3 数据处理

1.3.1 地形划分

按照 Legendre^[18]等方法,应用 ArcGIS10.4.1 软件计算每个样方的平均海拔、平均坡度、平均坡向和平均曲率 4 个地形因子,并完成相关地形数据的制图。其中,平均海拔为每个样方 4 个顶点的海拔平均值;从样方 4 个顶点任取 3 个顶点组成的 4 个平面与样方投影面夹角的平均值为该样方的平均坡度;利用每个样点的高程数据,构建不规则三角网(Triangular Irregular Network),基于不规则三角网进行平均坡向计算;平均曲率为该样方的海拔减相邻 8 个样方的海拔平均值的差值。坡度分为 4 个等级: <6°、6°~15°、16°~25°和 >25°;坡向分为 4 个

等级:阴坡(337.5°~22.5°,22.5°~67.5°)、半阴坡(67.5°~112.5°,292.5°~337.5°)、半阳坡(112.5°~157.5°,247.5°~292.5°)和阳坡(157.5°~247.5°);曲率分为 3 个等级:<-2、-2~2、>2。

1.3.2 变异函数

应用地统计学软件进行半方差函数、空间自相关分析、分形维数和 Kriging 分析,其中半方差函数分析和空间自相关应用 GS+ 软件进行分析,Kriging(克里格)插值应用 ArcGIS10.2 软件进行分析,其详细的分析方法见参考文献^[19]。

1.3.3 相关性分析

应用 SPSS25.0 软件研究动态监测样地 LAI 的空间分布格局与地形因子(海拔、坡度、坡向和曲率)之间的关系,采用 Pearson 相关分析法在 0.01 和 0.05 的两种显著水平下双尾检验进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 LAI 的统计特征分析

青海云杉林动态监测样地 LAI 的最大值和最小值差距较大,其均值为 1.707(标准差 $SD=0.320$),变异系数为 18.75%,属于中等变异性(表 1)。通过 Shapiro-Wilk 对 LAI 进行正态性检验,结果显示其接近正态分布,无须进行数据的转换,可直接用于空间异质性的分析。

2.2 LAI 的变异函数分析

青海云杉林动态监测样地 LAI 的变异函数最佳理论模型是指数模型,其决定系数 R^2 值为 0.709。空间结构比为 0.913,结构比大于 0.75(表 2),具有

表1 LAI 的描述性统计
Tab.1 Descriptive statistics of LAI

最大值	最小值	均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 值
3.286	0.000	1.707	0.320	18.75	0.707	2.770	1.707

表2 LAI 的半方差函数的模型模拟及参数
Tab.2 Model simulation and parameters for semivariograms of LAI

理论模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	空间结构比 $C/C_0 + C$	变程/m	决定系数 R^2	残差
高斯模型	0.010	0.102	0.902	18	0.314	4.090×10^{-4}
指数模型	0.009	0.104	0.913	16	0.709	3.045×10^{-4}
球状模型	0.001	0.102	0.990	36	0.304	4.156×10^{-4}
线性模型	0.095	0.105	0.095	206	0.156	5.032×10^{-4}

强烈的空间自相关,即由随机因素产生的变异小于结构变异,LAI 在 16 m 尺度内具有强烈的空间自相关。其变异系数随距离的增大而逐渐增加,然后趋于平稳(图 3)。

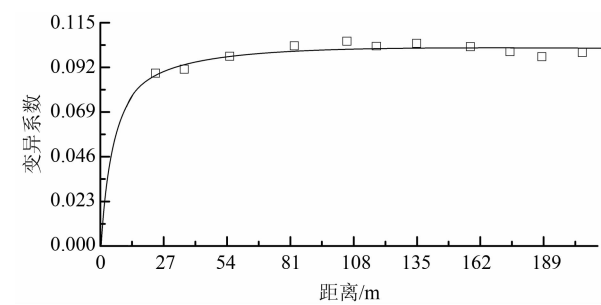


图 3 LAI 的变异函数图
Fig. 3 Semivariograms of LAI

青海云杉林动态监测样地 LAI 的各向异性空间变异分形维数是 1.964(表 3)。从方位来看,分形维数在南—北方向最小,小尺度的变异表现更明显,其均一性最差。但该方向的决定系数最大($R^2 = 0.835$),说明该方向是 LAI 分布的优势格局。在东北—西南方向最大,空间自相关弱,其均一性最好。

表 3 LAI 的各向异性空间变异的分形维数和决定系数
Tab. 3 Fractal dimension and determination coefficient of anisotropic spatial variation of LAI

方位	分形维数	决定系数 R^2
全方位	1.964	0.380
南—北	0.886	0.835
东北—西南	1.979	0.044
东—西	1.975	0.076
西北—东南	1.957	0.453

2.3 LAI 的空间分布格局分析

青海云杉林动态监测样地 LAI 的空间分布格局相对简单,空间分布呈斑块状分布(图 4)。从各分级面积统计来看(表 4),青海云杉林 LAI 的高值区域面积最小,仅占总面积的 12.15%,呈零星的分布;中值区域面积最大,占总面积的 74.14%,分布较为连续;而低值区域面积较小,占比为 13.70%,呈零星的分布。

2.4 LAI 的空间分布格局与地形因子的相关性

青海云杉林动态监测样地 LAI 与 4 个地形因子

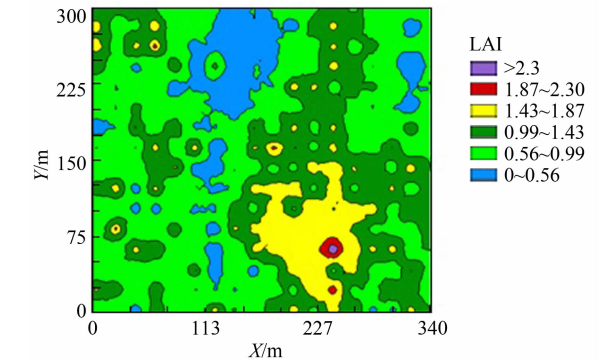


图 4 LAI 的空间分布格局图
Fig. 4 Spatial distribution patterns of LAI

表 4 LAI 插值后分级面积统计
Tab. 4 Classified area statistics for reserve of LAI

LAI 值分区	LAI 值	分级面积	百分比/%
低值区域	0.00 ~ 0.56	12 200	13.70
	0.56 ~ 0.99	39 611	44.47
中值区域	0.99 ~ 1.43	26 431	29.67
	1.43 ~ 1.87	10 086	11.32
	1.87 ~ 2.30	660	0.74
高值区域	> 2.30	81	0.09

的相关性表现为:LAI 与海拔和坡度均呈极显著负相关($P < 0.01$);LAI 与坡向和曲率的相关性均不显著($P > 0.05$)。另外,海拔与坡度和曲率均呈极显著正相关($P < 0.01$),其他地形因子之间的相关性均不显著($P > 0.05$)(表 5)。

表 5 LAI 与地形因子的相关系数($n = 255$)

Tab. 5 Correlation coefficient between LAI and topographic variables ($n = 255$)

	LAI	海拔	坡度	坡向	曲率
LAI	1.000				
海拔	-0.230 **	1.000			
坡度	-0.217 **	0.385 **	1.000		
坡向	-0.116	-0.018	0.061	1.000	
曲率	-0.005	0.175 **	-0.088	-0.042	1.000

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关。

3 讨论

祁连山 10.2 ha 青海云杉林动态监测样地 LAI

的描述性统计分析表明其具有中等变异性,这与青海云杉林的生境条件有关,也与青海云杉自身的生态学和生物学特性有关^[20-21]。指数模型为 LAI 变异函数的最优模型,空间自相关引起的空间变异达到了 91.3%,反映出 LAI 在现有研究尺度上强烈的空间相关性,其距离大小存在于 16 m 的尺度范围内。因此,建议测定青海云杉林 LAI 的最优样方大小为 16 m × 16 m。LAI 的空间异质性不仅与尺度有关,还受方向性的影响。斑块面积随分形维数的增加而变大,空间依赖性越强^[22]。本研究中东一西南方向分形维数最大,这说明空间变异很大程度上发生在较小的尺度上,其格局源于林木生长在小尺度上对资源的竞争引起的,表明在试验设计当中研究 LAI 或者其他参数变量的空间异质性还要考虑方向性^[23]。南—北方向上是 LAI 分布的优势格局,原因是样地由北向南海拔逐渐升高,影响了青海云杉林的分布和生长,进而影响 LAI 的差异。

植物的空间分布格局受到生物因素(如苔藓枯落物、枯死木、风倒木等)和非生物因素(如地形、温度、水分等)共同的影响。在不同尺度上,影响因素的不同导致其空间分布格局的不同,其分布格局围绕多个中心呈聚集分布状态且具有相似性的特点。LAI 的空间连续范围较大,斑块较少而且单一,格局相对明显。目前祁连山青海云杉林采取的是封育的保护措施,林木没有受到破坏,从而增加了 LAI 的空间异质性,同时长期的封育对土壤结构的改良产生了不同程度的改善,进而改变了青海云杉林的结构和功能,强化了 LAI 的空间异质性,但由于林下更新不良,部分地形 LAI 呈较小的空间分布。同时研究还发现,青海云杉林动态监测样地 LAI 的斑块空间格局具有面积大、个数少的特点,空间依赖性强,该研究与赵维俊^[24]等对该样地的群落结构的空间分布格局基本一致。

山地森林微地形的改变影响了非生物因子诸如温度、湿度、光照等非生物因子的再分配,进而影响森林植被的生长的空间分布及其 LAI。已有研究^[25-26]表明,植被生长与地形因子的相互作用关系密切。本研究表明,青海云杉林动态监测样地 LAI 与海拔和坡度呈极显著负相关,该研究结论与刘志理^[26]等的研究结论一致,该研究表明冷杉的 LAI 与海拔和坡度呈极显著负相关,这与青海云杉生物学特性对环境的适应有关,即:与树种的生活习性对生

境的选择有着密切的关系。但是不同时间影响 LAI 的变异因子有可能不同,比如吴启超^[27]就发现 4 月份影响 LAI 变异的因子是海拔和坡向,而 7 月份影响 LAI 变异的因子是坡度,因此不同季节的 LAI 对地形因子的响应有待深入研究。

已有研究^[28]表明,在生长季的初期(5 月份)和生长季的末期(10 月份)对祁连山青海云杉林的 LAI 测定更为合理,因为这两个月所在的时段内林下覆盖的灌草植被处于萌芽状态和生长枯死状态,而青海云杉林为常绿针叶林且生长季的初期和末期 LAI 变化差异不大。因此,本研究选择了 10 月份对青海云杉林动态监测样地的 LAI 进行了测定,是实现准确测量和空间化生态模型参数的重要一步,有利于借助地面监测结合遥感数据进行局域或者区域较大尺度上高分辨率、高精度的 LAI 空间分布的反演进行。

4 结论

(1) 祁连山青海云杉林动态监测样地 LAI 呈中等变异性。指数模型是 LAI 变异函数的最佳理论模型,空间结构比 0.913,具有强烈的空间自相关,其变程为 16 m,建议在实际采样中将青海云杉林的调查面积设置为 16 m × 16 m。南—北方向是 LAI 的分布的优势格局。

(2) LAI 呈现明显的斑块空间分布格局,结构简单,空间格局变异的空间依赖性强。空间位置和方向的差异性导致 LAI 为 0.56 ~ 1.43 的斑块所占比例最大,建议加强青海云杉林 LAI 的提高,促进林下天然更新。

(3) 海拔和坡度 2 个地形因子对祁连山青海云杉林动态监测样地 LAI 的空间分布存在显著影响,呈极显著负相关($P < 0.01$)。

(4) 祁连山青海云杉林 LAI 空间异质性不仅与尺度有关,还与方向有关,同时还受地形因子的影响。

参考文献 (References)

- [1] DERMODY O, LONG S P, DELUCIA E H. How does elevated CO₂ or ozone affect the leaf-area index of soybean when applied independently [J]. *New Phytologist*, 2006, **169**(1): 145 - 155. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01565.x

- [2] TILLACK A, CLASEN A, KLEINSCHMIT B, et al. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-resolution satellite-based vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **141**: 52 – 63. DOI: 10.1016/j.rse.2013.10.018
- [3] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 等. 叶面积指数的研究和应用进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(5): 537 – 541. [WANG Xiqun, MA Luyi, JIA Zhongkui, et al. Research and application advances in leaf area index (LAI) [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(5): 537 – 541] DOI: 10.13292/j.1000-4890.2005.0306
- [4] ALTON P B. The sensitivity of models of gross primary productivity to meteorological and leaf area forcing: A comparison between a Penman - Monteith ecophysiological approach and the MODIS Light-Use efficiency algorithm [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, **218**: 11 – 24. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.11.010
- [5] BOUSSETTA S, BALSAMO G, BELJAARS A, et al. Impact of a satellite-derived leaf area index monthly climatology in a global numerical weather prediction model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, **34**(9 – 10): 3520 – 3542. DOI: 10.1080/01431161.2012.716543
- [6] 姚丹丹, 雷相东, 余黎, 等. 云冷杉针阔混交林叶面积指数的空间异质性[J]. *生态学报*, 2015, **35**(1): 71 – 79. [YAO Dandan, LEI Xingdong, YU Li, et al. Spatial heterogeneity of leaf area index of mixed spruce-fir-deciduous stands in northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(1): 71 – 79] DOI: 10.5846/stxb201403300593
- [7] 杨焕莹, 宋建达, 周焘, 等. 林分、土壤及空间因子对谷地云冷杉林叶面积指数空间异质性的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, **43**(4): 342 – 351. [YANG Huanying, SONG Jianda, ZHOU Tao, et al. Influences of stand, soil and space factors on spatial heterogeneity of leaf area index in a spruce-fir valley forest in Xiao Hinggan Ling, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, **43**(4): 342 – 351] DOI: 10.17521/cjpe.2018.0310
- [8] 何金有, 贾炜玮, 张小勇, 等. 应用 PROSAIL 模型对森林冠层叶面积指数遥感估测[J]. *东北林业大学学报*, 2023, **51**(11): 86 – 94. [HE Jinyou, JIA Weiwei, ZHANG Xiaoyong, et al. Remote sensing estimation of forest canopy LAI using different algorithms of PROSAIL model [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, **51**(11): 86 – 94] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2023.11.009
- [9] 凌菊, 李爱农, 靳华安. 基于 DART 模型和随机森林估算山地叶面积指数[J]. *遥感技术与应用*, 2023, **38**(1): 39 – 50. [LING Ju, LI Ainong, JIN Huaan, et al. Leaf area index estimation over mountainous areas by coupling the DART model and random forest [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2023, **38**(1): 39 – 50] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2023.1.0039
- [10] 余之灏, 范文义. 应用地基雷达和机载激光雷达数据反演落叶松冠层叶面积密度[J]. *东北林业大学学报*, 2024, **52**(4): 82 – 88. [YU Zhihao, FAN Wenyi. Inverting the leaf area density of *Larix gmelinii* canopy using ground-based LiDAR and airborne LiDAR data [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, **52**(4): 82 – 88] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2024.04.010
- [11] 刘贤德, 赵维俊, 张学龙, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉林土壤养分和 pH 变化特征[J]. *干旱区研究*, 2013, **30**(6): 1013 – 1020. [LIU Xiande, ZHAO Weijun, ZHANG Xuelong, et al. Variation of soil nutrient content and pH value under *Picea crassifolia* forest in the Pailugou drainage basin in the Qilian Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2013, **30**(6): 1013 – 1020] DOI: 10.13866/j.azr.2013.06.009
- [12] 赵维俊, 王顺利, 孟好军, 等. 祁连山排露沟流域青海云杉种群结构与空间分布格局[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, **38**(11): 75 – 80. [ZHAO Weijun, WANG Shunli, MENG Haojun, et al. Population structure and spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* in Pailugou basin, Qilian mountains [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2018, **38**(11): 75 – 80] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.11.011
- [13] 赵维俊, 刘贤德, 徐丽恒, 等. 祁连山青海云杉林动态监测样地土壤 pH 和养分的空间异质性[J]. *干旱区地理*, 2015, **38**(6): 1179 – 1189. [ZHAO Weijun, LIU Xiande, XU Liheng, et al. Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients of a dynamical monitoring plot of *Picea Crassifolia* forest in Qilian Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2015, **38**(6): 1179 – 1189] DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.06.011
- [14] GB/T 33027-2016. 森林生态系统长期定位观测指标体系[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017. [GB/T 33027-2016. Observation index system for long-term forest ecosystem research [S]. Beijing: China Standards Press, 2017]
- [15] LY/T 1952-2011. 森林生态系统长期定位观测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. [LY/T 1952-2011. Methodology for field long-term observation of forest ecosystem [S]. Beijing: China Standards Press, 2011]
- [16] BENTLEY B L, PEARCY R W, EHLENGER J R, et al. Plant physiological ecology: Field methods and instrumentation [J]. *BioScience*, 1990, **40**(10): 79 – 80. DOI: 10.2307/1311520.
- [17] CAMPBELL G S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, **36**(4): 317 – 321. DOI: 10.1016/0168-1923(86)90010-9
- [18] LEGENDRE P, MI Xiangcheng, REN Haibao, et al. Partitioning beta diversity in a subtropical broad-leaved forest of China [J]. *Ecology*, 2009, **90**(3): 663 – 674. DOI: 10.1890/07-1880.1
- [19] 杨道虎, 赵维俊, 闫春鸣, 等. 祁连山青海云杉林动态监测样地更新苗和成树格局的空间变异[J]. *中南林业科技大学学报*, 2022, **42**(7): 85 – 95. [YANG Xiaohu, ZHAO Weijun,

- YAN Chunming, et al. Spatial variation of regeneration patterns in a dynamic monitoring plot of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, **42**(7): 85–95] DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2022.07.010
- [20] 赵传燕, 沈卫华, 彭焕华. 祁连山区青海云杉林冠层叶面积指数的反演方法[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(5): 860–869. [ZHAO Chuanyan, SHEN Weihua, PENG Huanhua. Methods for determining canopy leaf area index of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, China [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2009, **33**(5): 860–869] DOI: 10.3773/j.issn.1005–264x.2009.05.004
- [21] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉(*Picea crassifolia*)种群格局的分形特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, **28**(4): 1383–1389. [ZHANG Lijie, ZHAO Wenzhi, HE Zhibin. Characteristics in *Picea crassifolia* forest fractal dimension and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(4): 1383–1389] DOI: 10.3321/j.issn:1000–0933.2008.04.005
- [22] 王政权, 王庆成, 李哈滨. 红松老龄林主要树种的空间异质性特征与比较的定量研究[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(6): 718–723. [WANG Zhengquan, WANG Qingcheng, LI Habin, et al. Characteristics and comparison of spatial heterogeneity of the main species of Korean pine in old growth forests [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, **24**(6): 718–723] DOI: 10.1038/sj.cr.7290038
- [23] LIU Zhili, JIANG Feng, ZHU Yu, et al. Spatial heterogeneity of leaf area index in a temperate old-growth forest: Spatial autocorrelation dominates over biotic and abiotic factors [J]. Science of the Total Environment, 2018, **634**: 287–295. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.333
- [24] 赵维俊, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山青海云杉林群落结构的时空异质性[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(9): 2591–2599. [ZHAO Weijun, LIU Xiande, JING Wenmao, et al. Spatial heterogeneity of community structure of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, **26**(9): 2591–2599] DOI: 10.13287/j.1001–9332.20150630.006
- [25] 姜杰. 长白山森林物候及冠层叶面积指数的地形分异研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2023: 39–44. [JIANG Jie. Topographic variation of forest phenology and canopy leaf area index in Changbai Mountain [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2023: 39–44] DOI: 10.27214/d.cnki.glcslu.2023.000977
- [26] 刘志理, 毕连柱, 宋国华, 等. 典型阔叶红松林叶面积指数的空间异质性[J]. 北京林业大学学报, 2018, **40**(11): 1–11. [LIU Zhili, BI Lianzhu, SONG Guohua, et al. Spatial heterogeneity of leaf area index in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, **40**(11): 1–11] DOI: 10.13332/j.1000–1522.20170468
- [27] 吴启超. 茂兰喀斯特森林叶面积指数时空变异及其影响因子[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022: 19–32. [WU Qichao. Temporal and spatial variation of leaf area index and its influencing factors in karst forest of Maolan [D]. Guiyang: Guizhou University, 2022: 19–32] DOI: 10.27047/d.cnki.ggudu.2022.001883
- [28] 赵传燕, 沈卫华, 彭焕华, 等. 青海云杉林叶面积指数空间分布模拟——以祁连山区排露沟流域为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, **45**(5): 68–72. [ZHAO Chuanyan, SHEN Weihua, PENG Huanhua, et al. Simulation of spatial distribution of leaf area index of *Picea crassifolia* forest: With Pailugou basin of Qilian Mountain as an example [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, **45**(5): 68–72] DOI: 10.13885/j.issn.0455–2059.2009.05.026

Spatial Heterogeneity of Leaf Area Index of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains, China

ZHAO Weijun¹, NIU Yun^{2*}, DU Jun³, MA Xue'e¹, ZHANG Kehai¹

- (1. State Positioning Observation and Research Station of Forest Ecosystem of the Qilian Mountain, Gansu Province Academy of Water Resources Conservation Forest of the Qilian Mountains, Zhangye 734000, Gansu, China;
2. School of Geography and Planning, Huaiyin Normal University, Huaian 223300, Jiangsu, China;
3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The leaf area index (LAI) serves as a primary parameter characterizing forest ecological processes and structural features. LAI has high spatial heterogeneity in mountain forests. Studies of spatial heterogeneity of leaf area in montane forests based on sample plot of a large scale were scarce and did not investigate the dependency of

LAI on topography. Determining the sampling scale based on spatial heterogeneity of LAI and its correlation with topographic factors can provide an accuracy calibration of spatial remote sensing of LAI on a regional scale.

This study was exemplified by dynamic monitoring plots of *Picea crassifolia* forest built in the Dayekou watershed of the Qilian Mountains, northwestern China, covering an area of 10.2 hectares (340 m × 300 m). LAI at 255 plots of 20 m × 20 m in size was determined by five-point method using CID CI-110 plant canopy digital imaging analyzer. Then the spatial heterogeneity and spatial distribution pattern of LAI and its correlation with terrain factors were analyzed.

(1) LAI exhibited moderate variability, whose variogram function could be interpreted by an exponential model as the optimal theoretical model, which had strong spatial autocorrelation with a variable range of 16 meters, and the dominant pattern of LAI distribution was in the south-north direction.

(2) The spatial distribution pattern of LAI is relatively simple, exhibiting certain patchiness, with the largest area occupied by patches of LAI ranging from 0.56 to 1.43.

(3) LAI is significantly negatively correlated with altitude and slope ($P < 0.01$), while its correlation with slope and curvature is not significant ($P > 0.05$).

(4) The spatial heterogeneity of LAI in *Picea crassifolia* forests is related to scale and direction, with certain topographic factors exerting significant influence on LAI.

The study provides a basis for the analysis of ecological processes of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains and the determination of LAI parameters in remote sensing techniques.

Key words: *Picea crassifolia* forest; dynamics monitoring plot; leaf area index; spatial heterogeneity

(责任编辑 钟雨倩)