

香格里拉高山松地上生物量及遥感因子的时空变化特征研究

王书贤^{1,2}, 张加龙^{1*}, 鲍瑞³, 韩东阳¹, 廖易¹

(1. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224; 2. 云南省遥感中心, 云南 昆明 650034;
3. 国家林业和草原局 西南调查规划院, 云南 昆明 650031)

摘要:分析香格里拉市高山松单位面积地上生物量(AGB)的时空变化特征,为日后监测 AGB 空间变化和模拟预测提供理论依据。采用 1987—2017 年经过 BSTS 滤波算法处理的 Landsat 遥感影像和反演得到的高山松 AGB 数据,运用 Moran's I 系数和半变异方差函数对 7 个时期的高山松 AGB 及遥感因子进行空间自相关性和空间异质性分析。结果表明:1)1987—1997 年高山松 AGB 随分布面积的减小而减小,1997 年后的高山松 AGB 并未随分布面积的增加而增加,而是呈减少趋势;2)1987—1992 年高山松 AGB 在南北方向 60 000 m 范围内呈聚集状态,1997—2007 年的高山松 AGB 整体呈破碎化状态,而 2017 年高山松 AGB 在全局 25 000 m 范围内呈聚集状态;3)1987—2012 年的最优半变异函数模型为指数模型,2017 年为球型模型,高山松 AGB 的结构比 $C_0/(C_0+C)$ 都接近 0,其中 2017 年最接近 0,空间自相关较好;与生物量具有相似空间分异特征的遥感因子为 NBR 和 B3/Albedo。分析表明,1992—1997 年的高山松 AGB 空间分布主要受人为干扰,不具有整体性,空间分布呈破碎化状态;1987 年和 2002—2017 年的高山松 AGB 主要受立地条件因素影响,空间分布呈聚集状态;遥感因子时空变化特征分析结果可为高山松 AGB 时空模拟和制图提供依据。

关键词:高山松;生物量;遥感因子

中图分类号:S791.24

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0043-06

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Above Ground Biomass of *Pinus densata* Forest and Remote Sensing Factors in Shangri-La

WANG Shu-xian^{1,2}, ZHANG Jia-long^{1*}, BAO Rui³, HAN Dong-yang¹, LIAO Yi¹

(1. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China;

2. Yunnan Remote Sensing Center, Kunming 650034, Yunnan, China;

3. Southwest Investigation and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031, Yunnan, China)

Abstract: The objective of this study was to provide theoretical basis for monitoring the spatial variation of AGB and simulation prediction in the future by analyzing the temporal and spatial variation characteristics of the aboveground biomass (AGB) per unit area of *Pinus densata* forest in Shangri-La City. Using the Landsat remote sensing images processed by the BSTS filtering algorithm from 1987 to 2017 and the AGB data obtained by inversion. The Moran's I coefficient and the semivariogram function were used to analyze the spatial autocorrelation and spatial heterogeneity of the AGB and the remote sensing factors in 7 periods. The results showed that: 1) the AGB of *P. densata* decreased with the decrease of distribution area from 1987 to 1997, and the AGB of *P. densata* didn't increase with the increase of distribution area after

收稿日期:2022-03-12 修回日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金(31860207);2020 年云南省高层次人才培养支持计划“青年拔尖人才”专项(81210468);西南林业大学科研启动基金(111932)。

第一作者:王书贤。研究方向:资源与环境遥感。E-mail:esther@swfu.edu.cn

* 通信作者:张加龙,博士,教授。研究方向:林业遥感。E-mail:jialongzhang@swfu.edu.cn

1997, AGB decreased with the decrease of distribution area from 1987 to 1997, and after 1997, the AGB of *P. densata* didn't increase with the increase of distribution area, but showed a decreasing trend. 2) from 1987 to 1992, the AGB of *P. densata* forest formed an aggregated state within a range of 60 000 m in the north-south direction. From 1997 to 2007, the AGB was in a state of fragmentation as a whole, and in 2017, the AGB gathered in a global range of 25 000 m. 3) The optimal semi-variance function model was an exponential model in 1987–2012 and a spherical model in 2017, and the structural ratios $C_0/(C_0+C)$ of *P. densata* AGB were close to 0, with the closest to 0 in 2017, which was a good spatial autocorrelation; remote sensing factors with similar spatial differentiation characteristics with biomass were NBR and B3/Albedo. It was concluded during 1992–1997, the spatial distribution of the AGB of *P. densata* was mainly affected by human interference, which was not integrated, and the spatial distribution was fragmented; the AGB in 1987 and 2002–2017 was mainly affected by site conditions, and the spatial distribution was clustered. The analysis results of the temporal and spatial variation characteristics of remote sensing factors can provide a basis for the temporal and spatial simulation and mapping of the AGB of *P. densata*.

Key words: *Pinus densata*; biomass; remote sensing factor

森林地上生物量(aboveground biomass, AGB)是估算森林生态系统碳储量、碳通量的重要参数^[1-2], 森林 AGB 空间分布变化能够更好地量化碳储量的空间分异特征, 对于研究森林生态系统碳循环具有重要意义。现阶段主要运用 ArcGIS 软件中的空间插值法来对森林 AGB 的空间异质性进行分析研究, 而用遥感影像数据反演森林 AGB, 然后对其进行空间异质性分析的研究较少^[3-6]。基于遥感与地统计方法, 能够有效揭示属性变量在空间上的分布特征及其变异性^[7-13], 当前运用空间地统计学方法的林业研究主要集中于森林土壤空间变异、物种空间分布、森林干扰、林分因子和种子资源这五个方面^[7, 14], 而森林 AGB 空间的统计分析研究还较少。在森林 AGB 的估算中, AGB 的空间关系未引起研究者的重视。当前估算森林 AGB 的方法还是以统计分析为主, 这种方法不但不能准确、及时地得到森林 AGB 的空间分布信息, 而且也不能有效反映森林 AGB 的空间自相关性和异质性^[13, 15]。

香格里拉地处青藏高原地区东南部, 其气候变化是全球气候变化的敏感响应区^[16]。高山松(*Pinus densata*)是该地区的优势树种之一, 探究其 AGB 的时空变化特征对研究高原地区生态系统的碳循环, 提高对该类型地区森林生态价值的认识具有重要意义^[15]。本研究以香格里拉市高山松区域 7 个时期(1987–2017 年)的 Landsat 遥感影像为基础, 对不同阶段高山松 AGB 采用地理信息系统(GIS)和地统计学 2 种方法进行时空变异分析, 探究该地区高山松 AGB 的空间变化特征, 为日后监测 AGB 空间变化和模拟预测提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉市

(99°20′–100°19′E, 26°52′–28°52′N), 地处云南省西北部, 迪庆州东北部。境内海拔最高 5 545 m, 最低 1 503 m, 相对高差 4 042 m。香格里拉市位于高海拔低纬度地带, 属山地寒温带季风气候。境内地貌复杂多样, 地势北高南低, 立体气候明显, 植被南北分布差异明显。研究区植被类型主要为寒温性针叶林, 其树种有高山松、丽江云杉(*Picea likiangensis*)等, 其中高山松森林覆盖面积占优势树种面积的 22.7%^[15, 17]。

2 材料与方法

2.1 数据来源

2.1.1 样地数据 样地数据来自国家森林资源连续清查项目, 时间为 1987–2017 年, 每隔 5 a 进行一次样地实测, 共 7 期。每块调查样地面积为 0.08 hm² (28.28 m×28.28 m), 共有 136 块高山松样地, 各年份样地数量各异, 部分样地为复测样地。

2.1.2 遥感数据 采用美国地质勘探局(United states geological survey, USGS)和美国国家航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)已经过校准的 Landsat 地表反射率数据(SR)作为时间序列遥感数据, 运用可提高数据精度的最优斜率算法(the best slope temporal segmentation filtering, BSTS)对数据进行了时间序列滤波重构^[17]。

2.1.3 其他数据 DEM(数字高程模型)数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 30 m×30 m。

2.2 基于随机森林回归的生物量反演结果

2.2.1 遥感特征变量的选择 遥感特征变量的选取参考了香格里拉高山松 AGB 估测研究中常用的遥感因子, 纹理因子是基于 ENVI 5.3 软件对 Landsat 的

6 个波段分别计算了 7 种纹理因子, 总共计算了 $3 \times 3, 5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9, 11 \times 11, 13 \times 13, 15 \times 15, 17 \times 17, 19 \times 19$ 共 9 种不同的窗口大小。由于纹理特征种类过多, 单独对 378 种纹理特征进行了筛选。将全部的 378 个特征因子数据输入随机森林模型中, 通过迭代筛选, 选出 15 个遥感与纹理特征(表 1)。

2.2.2 多期高山松 AGB 估测数据 使用筛选出的 15 个遥感与纹理特征变量, 基于随机森林估测模型对 1987、1992、1997、2002、2007、2012、2017 年香格里拉高山松地上生物量进行估测反演, 得到各年份的高山松地上生物量反演数据结果。

表 1 15 个遥感因子特征变量

Table 1 Characteristic variables of 15 remote sensing factors	
因子类型	特征变量
遥感因子	B2、NBR、B3/Albedo
纹理因子	FR03B4CO、FR13B3ME、FR17B7HO、FR11B3ME、FR11B3CT、FR17B7DS、FR15B4CO、FR19B4SM、FR19B4HO、FR09B5CO、FR11B2VA、FR19B7DS

注: B2、Landsat 第 2 波段($0.52 \sim 0.60 \mu\text{m}$); NBR, 归一化燃烧指数; B3/Albedo, Landsat 第 3 波段($0.63 \sim 0.69 \mu\text{m}$)与地表反照率的比值。FR03B4CO 参数特征名称中: F 代表经过滤波, R03 代表窗口大小为 3×3 , B4 代表了 Landsat 第 4 波段; 纹理因子参数类型: CO(相关性)、ME(均值)、HO(同质性)、CT(对比度)、DS(相异性)、SM(角二阶矩)、VA(方差)。

2.3 地统计分析方法

在 ArcGIS 10.7 中对 7 期的高山松 AGB 随机取点, 样本量取值为 200 个随机点, 进行标准化异常值处理后, 各年份样本量见表 2。应用 GS+9.0 地理空间分析软件对高山松 AGB 的随机点计算 Moran's I 系数和半变异函数, 然后对其进行空间自相关性和空间异质性分析。

表 2 随机点在各年份中的分配

Table 2 Distribution of randomplots in each year	
年份	高山松地上生物量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
1987 年	156
1992 年	158
1997 年	146
2002 年	145
2007 年	136
2012 年	149
2017 年	114

2.3.1 空间自相关性分析方法 通过 Moran's I 系数计算高山松 AGB 和遥感因子的空间自相关度, 并用 Moran's I 系数图进行分析, 计算公式^[5,9,11,18-20]如下。

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij}) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} (i \neq j) \quad (1)$$

式中: N 为总的样本数; i 和 j 的样本总数; \bar{x} 为变量的平均值; x_i 和 x_j 是分别为 \bar{x} 在空间位置 i 和 j

中的取值; ω_{ij} 为空间位置 i 和 j 的相邻权重。

Moran's I 系数的取值范围在 $(0, 1]$, 说明高山松 AGB 和遥感因子的空间分布呈正相关是聚集化状态, 有整体性分布; Moran's I 系数的取值范围在 $[-1, 0)$, 说明高山松 AGB 和遥感因子的空间分布呈负相关, 是破碎化状态, 没有整体性分布。

2.3.2 空间异质性分析方法 运用半变异方差函数对高山松 AGB 和遥感因子进行空间异质性分析, 计算公式^[5,9,11,18-20]如下。

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中: $N(h)$ 表示某一空间方位上相距距离为 h 的固定样地对数; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别表示固定样地 x_i 和与 x_i 相隔距离 h 处的生物量值。

采用 4 个参数进行空间异质性分析, 分别为块金值 C_0 、基台值 $(C_0 + C)$ 、变程 A_0 、结构比 $C_0/(C_0 + C)$ 。块金值 C_0 为区域变量的方差; 基台值 $(C_0 + C)$ 反映区域化变量在研究范围内变异的强度^[21]; 变程 A_0 表示变量空间自相关的有效范围, 距离越近, 空间特征的相似程度越高, 超出该值范围则变量没有自相关关系; 结构比 $C_0/(C_0 + C)$ 判断随机因子对空间总变异的影响程度^[9], 也可表示变量的空间相关性程度, 若比例 $< 25\%$, 说明变量具有强烈的空间自相关; 若比例在 $25\% \sim 75\%$, 变量具有中等空间自相关; 比例 $> 75\%$ 时, 变量空间自相关很弱^[22]。

3 结果与分析

3.1 高山松 AGB 的时间变化

根据 AGB 反演结果(表 3), 1987—1997 年的高山松分布面积减小, 由 17.156 万 hm^2 减少到 17.059 万 hm^2 , 期间的 AGB 也在快速减少, 由 951.911 万 t 减少到 810.696 万 t ; 1997 年后香格里拉市高山松的分布面积开始增加, 截至 2017 年, 高山松分布面积达 18.484 万 hm^2 , 但该区域的高山松 AGB 并未随之相应增加, 而是呈减少趋势, 2017 年的高山松 AGB 总量为 741.084 万 t 。

表 3 1987—2017 年高山松 AGB 反演结果

Table 3 Inversion results of <i>P. densata</i> AGB during 1987—2017			
年份	高山松分布面积/万 hm^2	平均地上生物量/($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	地上生物量总量/万 t
1987	17.156	55.486	951.911
1992	17.156	53.893	924.597
1997	17.059	47.523	810.696
2002	17.059	45.020	810.696
2007	17.418	43.758	762.171
2012	17.421	42.839	746.319
2017	18.482	40.099	741.084

3.2 高山松 AGB 的空间自相关性

从图 1 可以看出,1987 年高山松 AGB 在 55 000 m 范围内为聚集状态,呈连片化、整体性空间分布,在南北方向的聚集状态为最好,空间格局尺度达 85 000 m 左右;1992 年高山松 AGB 在 60 000 m 内为聚集状态,在南北方向的聚集状态为最好,空间格局尺度为 75 000 m,但总体的 AGB 空间分布较为破碎;1997 年高山松 AGB 空间自相关性较差,整体呈破碎化空间分布,不具有整体性;2002 年和 2007 年的高山松 AGB 在 20 000~50 000 m 都呈现破碎化空间分布,在南北方向和东西方向也在该空间距离内呈现破碎化的空间分布;2012 年在 20 000 m 内和 50 000~70 000 m 具有聚集状态的高山松 AGB,其南北方向、东北-西南方向和西北-东南方向也在该空间距离内具有同样空间分布状态的高山松 AGB;2017 年的高山松 AGB 在不同空间距离上具有不同的空间分布,全局和各方向的空间分布趋势大体一致。

3.3 高山松 AGB 的空间异质性

从表 4 可以看出:经过 GS + 9.0 的筛选,1987—2012 年的 AGB 的最优半变异函数模型均为指数模型,其结构比 $C_0/(C_0 + C)$ 都接近 0。除 1992 年和 1997 年的变程 $A_0 > 10$ km 外,其余年份的变程 A_0 都在 10 000 m 内。经过变程 A_0 筛选出与各年份 AGB 具有空间分异特征相似的遥感因子,分别是 NBR、B3/Albedo、FR11B2VA 和 FR17B7DS,其中,NBR 和 B3/Albedo 为出现频率最高的遥感因子;由于 2007 年 AGB 与遥感因子的变程 A_0 相差较大,因此该年没有与其具有相似空间分异特征的遥感因子;2017 年高山松 AGB 的半变异函数模型的最优模型为球形模型,其结构比 $C_0/(C_0 + C)$ 是近 30 a 来最接近 0 的,说明 2017 年香格里拉高山松 AGB 的空间自相关程度非常高。根据变程 A_0 的相近程度,具有与 2017 年 AGB 相似空间分异特征的遥感因子为 B3/Albedo。

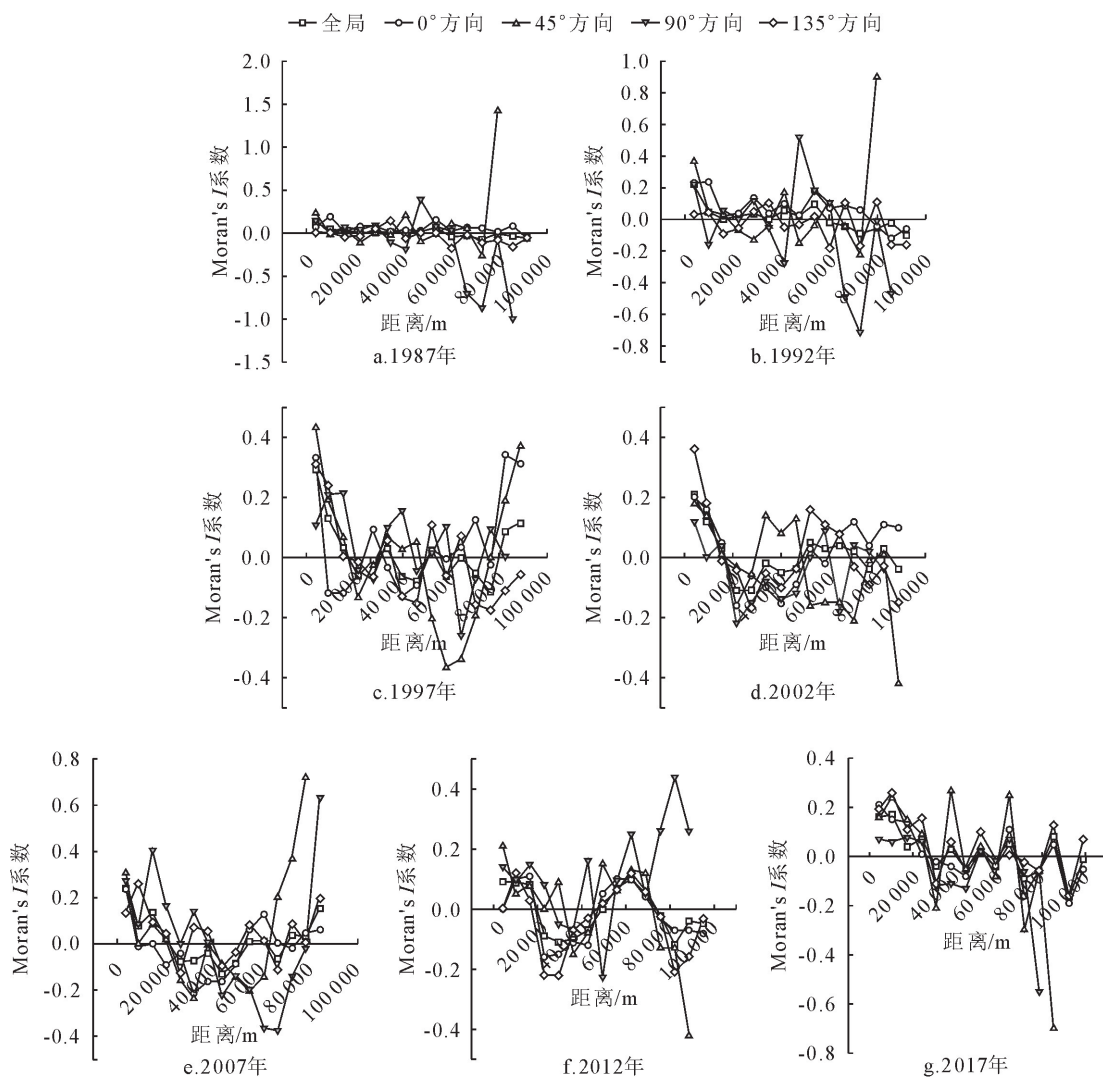


图 1 1987—2017 年高山松 AGB 的 Moran's I 系数

Fig. 1 Moran's I coefficient of *P. densata* AGB from 1987 to 2017

表 4 1987—2017 年半变异参数

Table 4 Semi-variation parameter table in 1987—2017

年份	遥感因子	模型	块金值	基台值	变程/m	结构比	决定系数 R^2
1987 年	AGB	指数模型	0.129	1.003	9 600	0.129	0.209
	NBR		0.006	0.043	9.00	0.127	0.440
1992 年	AGB		0.164	1.278	11 400	0.128	0.468
	NBR		0.007	0.048	10 800	0.138	0.516
1997 年	AGB		0.110	0.772	11.00	0.142	0.689
	B3/Albedo		0.003	0.022	10 800	0.136	0.213
	NBR		0.034	0.285	11 100	0.120	0.260
2002 年	AGB		0.171	1.189	6 300	0.144	0.084
	FR11B2VA		0.095	0.764	6 600	0.124	0.298
	FR17B7DS		0.013	0.108	6 300	0.121	0.182
2007 年	AGB		0.106	0.973	3 900	0.109	0.018
2012 年	AGB		0.130	1.052	9 300	0.124	0.091
	B3/Albedo		0.003	0.021	9 000	0.121	0.391
2017 年	AGB		0.124	1.808	8 700	0.069	0.180
	B3/Albedo		0.022	0.031	7 000	0.071	0.155

注:AGB,地上生物量;NBR,归一化燃烧指数;FR11B2VA 参数特征名称中,R11 代表窗口大小 11×11。

4 结论与讨论

1987—1992 年,南北方向的高山松 AGB 在 60 000 m 内的空间自相关性最好,呈聚集状态,高山松为连片化分布;1997—2007 年的高山松 AGB 全局空间自相关性差,呈破碎化空间状态;而 2017 年的高山松 AGB 在不同空间距离上呈现出不同的空间分布状态。

森林 AGB 的空间异质性产生的主要原因可能是立地条件的空间异质性^[9-10]。1987 年和 2002—2017 年的结构比 $C_0/(C_0+C)$ 都接近 0,变程 A_0 都在 10 000 m 内,说明该时期的高山松 AGB 和遥感因子变量的异质性变化是由空间自相关引起的,即其异质性变化是由结构性因素(立地条件,海拔、坡度等)及水热条件等自然因素引起的。该时期的 AGB 空间变异受人干扰因素(砍伐、污染等)的影响较小,也说明 1987 年和 2002—2017 年香格里拉高山松地区的森林保护良好。

1992 年和 1997 年的 $C_0/(C_0+C)$ 虽然接近于 0,但变程 $A_0>10\,000\text{ m}$,说明这 2 个时期的高山松 AGB 和遥感因子变量的异质性变化可能是由人为干扰等外界因素引起的。结合空间自相关可判断该时期的 AGB 不具有空间整体性。

追溯香格里拉市各年高山松变化情况可知:20 世纪 80—90 年代,当地为了发展经济盲目新建了许多森林木材工厂企业,从而加剧了森林资源的消耗,因此可解释引起该变化的因素主要是人为干扰^[16]。1997 年后国家出台全面禁止天然林采伐的政策,同时实施了退耕还林等一系列森林生态保护工程和森

林保护措施,使得香格里拉高山松开始恢复,从 2002—2017 年的研究结果也反映了该恢复情况^[15,22,23]。研究表明,基于遥感与地统计学相结合的方法能够高效地获得 AGB 及其相关的遥感因子的时空变异特征,即可在一定变程 A_0 范围内判断高山松 AGB 的分布,以及可大体判断受何种类型因素的影响,该方法可为日后高山松 AGB 的时空模拟预测和反演制图奠定一定的理论依据。

相较于空间插值法受样本点的影响^[22],本研究采用经过 BSTS 滤波算法重构时间序列数据来估测反演高山松 AGB 提供了更可靠的数据源^[3,4,11,25-26];受地统计方法样本量的取值大小,以及获取样地点实测数据局限性的影响,样地点的样本量采用随机取点的方式满足研究条件。样本量的取值多少在此类研究中暂无具体的科学依据,后续对该部分内容值得探究;本研究运用了 30 m 分辨率的遥感影像数据,若用分辨率更高的遥感影像数据,可能会获得更加精确的结果。

参考文献:

[1] DIXON R K, SOLOMON A M, BROWN S. Carbon pools and flux of global forest ecosystems[J]. Science, 1994, 263(5144): 185-190.

[2] 赵敏,周广胜. 基于森林资源清查资料的生物量估算模式及其发展趋势[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1468-1472.

[3] 贺鹏,张会儒,雷相东,等. 基于地统计学的森林地上生物量估计[J]. 林业科学, 2013, 49(5): 101-109.

HE P, ZHANG H R, LEI X D, et al. Estimation of aboveground forest biomass based on geostatistics[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(5): 101-109. (in Chinese)

[4] 刘双,阮宏华. 基于地统计学的广东省和广西森林生物量和

- NPP 空间格局分析[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2502-2509.
- LIU S, RUAN H H. Spatial pattern analysis of forest biomass and NPP in Guangdong and Guangxi based on geostatistics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2502-2509. (in Chinese)
- [5] 刘晓梅, 布仁仓, 邓华卫, 等. 基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4783-4790.
- LIU X M, BU R C, DENG H W, *et al.* Forest biomass estimation and spatial pattern analysis of Fenglin nature reserve based on geostatistics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 31(16): 4783-4790. (in Chinese)
- [6] 时雷雷, 骆士寿, 许涵, 等. 尖峰岭热带山地雨林土壤物理性质小尺度空间异质性研究[J]. 林业科学研究, 2012, 25(3): 285-293.
- SHI L L, LUO T S, XU H, *et al.* Small-scale spatial heterogeneity of soil physical properties in Jianfengling tropical mountain rainforest[J]. Forestry Research, 2012, 25(3): 285-293. (in Chinese)
- [7] 陈先刚, 张一平, 张小全, 等. 过去 50 年中国竹林碳储量变化[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5218-5227.
- CHEN X G, ZHANG Y P, ZHANG X Q, *et al.* Changes in bamboo forest carbon storage in China in the past 50 years[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 28(11): 5218-5227. (in Chinese)
- [8] 冯益明, 唐守正, 李增元. 空间统计分析在林业中的应用[J]. 林业科学, 2004, 40(3): 149-155.
- [9] 毛学刚, 王静文, 范文义. 基于遥感与地统计的森林生物量时空变异分析[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(2): 10-19.
- MAO X G, WANG J W, FAN W Y. Temporal and spatial variation analysis of forest biomass based on remote sensing and geostatistics[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(2): 10-19. (in Chinese)
- [10] 闫国东, 左雪漫, 陈瑾, 等. 基于多特征优选的 Sentinel-2 遥感影像林分类型分类[J]. 森林工程, 2023, 39(3): 12-20.
- [11] 张峰, 杜群, 葛宏立, 等. 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5275-5286.
- ZHANG F, DU Q, GE H L, *et al.* Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province based on geostatistics and CFI plots[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 32(16): 5275-5286. (in Chinese)
- [12] 赵安玖, 胡庭兴, 陈小红. 山地阔叶混交林林木生长的空间异质性[J]. 林业科学研究, 2008, 21(6): 751-756.
- ZHAO A J, HU T X, CHEN X H. Spatial heterogeneity of tree growth in mountain broad-leaved mixed forest[J]. Forestry Research, 2008, 21(6): 751-756. (in Chinese)
- [13] 周国模. 毛竹林生态系统中碳储量、固定及其分配与分布的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [14] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器——Ⅲ. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报, 1996(1): 108-115.
- PAN B T, LI J J. Qinghai-Tibet Plateau: driver and amplifier of global climate change—Ⅲ. Influence of Qinghai-Tibet Plateau uplift on climate change[J]. Journal of Lanzhou University, 1996(1): 108-115. (in Chinese)
- [15] 岳彩荣. 香格里拉县森林生物量遥感估测研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [16] 宋发荣. 香格里拉县的森林资源及其特点分析[J]. 西部林业科学, 2008(1): 124-128.
- [17] BAO R, ZHANG J L, LU C. Estimating above-ground biomass of *Pinus densata* Mast. using best slope temporal segmentation and landsat time series[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(2): 024507.
- [18] 付园园, 蒋萍, 刘爱华, 等. 不同受害程度林分杨盾蚧空间分布格局地统计学分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 187-193, 205.
- FU Y Y, JIANG P, LIU A H, *et al.* Geostatistical analysis of the spatial distribution pattern of *P. yangdensis* in stands with different damage degrees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 187-193, 205. (in Chinese)
- [19] 胡瑜珩, 武海卫, 许志春. 云斑天牛幼虫空间分布格局的地统计学分析[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 165-171.
- HU Y H, WU H W, XU Z C. Geostatistical analysis of spatial distribution pattern of longhorn beetle larvae[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 165-171. (in Chinese)
- [20] 李滨, 刘可宁. 基于无人机光学遥感的森林生物量估算研究[J]. 森林工程, 2022, 38(5): 83-92.
- [21] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M. Field-Scale variability of soil properties in central iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [22] 崔素萍. 基于地统计方法的山西省森林木本层生物量及碳密度空间分布格局研究[J]. 山西林业科技, 2019, 48(2): 7-9.
- CUI S P. Study on the spatial distribution pattern of woody layer biomass and carbon density in Shanxi Province based on geostatistical methods[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2019, 48(2): 7-9. (in Chinese)
- [23] ZHANG J L, LU C, XU H. Estimating aboveground biomass of *Pinus densata*-dominated forests using Landsat time series and permanent sample plot data[J]. Journal of Forestry Research, 2019, 30(5): 1689-1706.
- [24] 王淑君, 管东生, 黎夏, 等. 广州森林碳储量时空演变及异质性分析[J]. 环境科学学报, 2008(4): 778-785.
- WANG S J, GUAN D S, LI X, *et al.* Spatial-temporal evolution and heterogeneity analysis of forest carbon storage in Guangzhou[J]. Journal of Environmental Science, 2008(4): 778-785. (in Chinese)
- [25] DU H, ZHOU G, FAN W. Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory[J]. Plant Ecology, 2010, 207(1): 131-139.
- [26] 李小昱, 雷廷武, 王为. 农田土壤特性的空间变异性及 Kriging 估值法[J]. 西北农业大学学报, 2000(6): 30-35.