

## 基于地统计模型的林分蓄积量空间异质性研究

和云润<sup>1</sup>,陈朝情<sup>1</sup>,殷唐燕<sup>1</sup>,刘畅<sup>1</sup>,张加龙<sup>1</sup>,魏晓燕<sup>2\*</sup>

(1. 西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224;2. 云南省测绘资料档案馆/云南省基础地理信息中心,云南 昆明 650003)

**摘要:**基于云南省昭通市大关县天星镇林分二调数据,以林分蓄积量作为因变量,将郁闭度、平均胸径、平均海拔和坡度作为自变量,采用最小二乘法模型(OLS)和地理加权回归模型(GWR),对林分蓄积量的空间效应进行分析。结果表明:1)距离在 6 075 m 以内,林分蓄积量在总体上呈现出显著的空间自相关性,且随距离的增大自相关性逐渐减小最后趋于稳定;2)随着间隔距离的增加,基台值逐渐减小,块金值逐渐增加,在距离达到 6 075 m 时趋于稳定;3)平均胸径、郁闭度和平均海拔与林分蓄积量呈现出正相关性,而坡度与林分蓄积量具有负相关性;4)GWR 模型的  $R^2$  (0.73) 和预测精度  $P$  (0.60) 均大于 OLS 模型  $R^2$  (0.34) 和预测精度  $P$  (0.54)。林分蓄积量在空间尺度上具有异质性,且 GWR 模型能很好地描述林分蓄积量的空间异质性,采用合理的经营方式以促进林木胸径、郁闭度的生长,同时考虑海拔和坡度的影响,从而促进林分蓄积量的增长。

**关键词:**空间异质性;空间非平稳性;林分蓄积量;最小二乘法模型;地理加权回归模型

**中图分类号:**S758.51      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2023)03-0169-07

### Research on the Spatial Heterogeneity of Forest Stand Volume Based on Geostatistical Model

HE Yun-run<sup>1</sup>, CHEN Chao-qing<sup>1</sup>, YIN Tang-yan<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, ZHANG Jia-long<sup>1</sup>, WEI Xiao-yan<sup>2\*</sup>

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

2. Yunnan Provincial Surveying and Mapping/Yunnan Provincial Geomatics Centre, Kunming 650003, Yunnan, China)

**Abstract:** Based on the forest management inventory in Tianxing Township, Daguan County, Zhaotong City, Yunnan Province, with stand volume as the dependent variable and canopy closure, average DBH, average altitude and slope as independent variables, the least squares model (OLS) and geographically weighted regression models (GWR) were used to analyze the spatial effects of stand stock. The results showed that 1) within the distance of 6 075 m, the stand volume presented a significant spatial autocorrelation on the whole, and the autocorrelation gradually decreased with the increase of the distance and finally stabilized. 2) With the increase of separation distance, the abutment value gradually decreased, the nugget value gradually increased, and tended to be stable when the distance reached 6 075 m. 3) The average DBH, canopy closure and average altitude showed positive correlation with the stand volume, while the slope was negatively correlated with the stand volume. The stand volume had a negative correlation with slope degree. 4) The  $R^2$  (0.73) and prediction accuracy  $P$  (0.60) of the GWR model were both greater than those of the OLS model  $R^2$  (0.34) and prediction accuracy  $P$  (0.54). The stand volume has heterogeneity on the spatial scale, and the GWR model can well describe the spatial heterogeneity of the stand volume. Reasonable management methods should be adopted to promote the growth of tree diameter at breast height and canopy density, and at the same time, the effects of altitude slope degree should be taken into consideration to pro-

收稿日期:2022-04-01 修回日期:2022-05-25

基金项目:国家自然科学基金项目(42061074,41701470);云南省国有自然资源资产权益管理试点项目(632171);云南省高层次人才培养支持计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2020-164)。

第一作者:和云润。研究方向:森林蓄积量估测。E-mail:hyr18213104806@163.com

\* 通信作者:魏晓燕,高级工程师。研究方向:空间分析、路网分析的应用。E-mail:19423221@qq.com

mote the growth of stand volume.

**Key words:** spatial heterogeneity; spatial nonstationarity; forest stand volume; ordinary least square; geographical weighted regression model

森林蓄积量是森林资源管理的基本指标,更是经营管理、采伐利用的主要依据。林业经济效益主要靠森林蓄积量的增长或消失状态为指标,可以采用科学的方法对森林进行林分蓄积量的预测,为森林规划和管理提供非常可靠的依据<sup>[1-5]</sup>。空间的异质性常用来描述空间非平稳性的指标<sup>[6-7]</sup>,空间数据中普遍都存在空间非平稳性。

地理加权回归模型(geographically weighted regression)基于普通线性回归模型,并加入地理信息位置等因素,从空间上探讨各变量的非平稳性<sup>[8-9]</sup>。戈冬梅等<sup>[10]</sup>使用地理加权回归模型,研究中国 31 个省域之间的旅游影响因素的空间差异。关伟等<sup>[11]</sup>利用 OLS(ordinary least squares)和 GWR 模型对黑龙江、吉林和辽宁 3 省旅游经济和各个因子之间的关系进行分析,发现 GWR 模型的精度较好。尚清芳等<sup>[12]</sup>选取了 5 个变量作为甘肃省旅游空间异质性的指标,建立了 GWR 模型,探讨了甘肃省空间异质性和非平稳性特征。阚博颖等<sup>[13]</sup>利用 OLS 模型和 GWR 模型,分析得出 GWR 模型能够更加准确地研究住宅地价的非空间异质性。戚玉娇<sup>[14]</sup>通过实测,利用遥感技术及多种模型来对森林中地上碳储量进行评估,得出了 GWR 模型不仅能够有效消除残差的空间相关性,而且还可以使空间异质性降低。时保国等<sup>[15]</sup>采用 GWR 模型,得出我国省级人均卫生费用存在着空间异质性。近年来,许多学者都在深入研究地理加权回归模型,该模型得以广泛应用于经济学、气象学等学科<sup>[16-17]</sup>,当前 GWR 模型已被应用到经济、自然资源管理、医学等多个研究领域。Kashki 等<sup>[18]</sup>利用 OLS 和 GWR 模型对伊朗什拉茨市地表温度的空间分布进行回归分析,结果表明 GWR 模型更好地反映该市地表温度的空间分布。Wu 等<sup>[19]</sup>从社会、经济、环境等多个层面捕捉 COVID-19 的影响因素,并对得克萨斯州县级区域的时空异质性进行了适当分析,发现 GWR 模型比 OLS 模型提供了更高的拟合度和更多面向地理数据的信息。当前,GWR 模型也可应用于分析林木的空间分布规律和特征,建立林木生长模型,反映样地内林木之间局部的复杂关系<sup>[20]</sup>。本研究以云南省昭通市大关县天星镇的林木调查数据为对象,建立林分蓄积量与林分因子、地形因子之间的模型,利用 GWR 模型分析林分因子、地形因子对林分蓄积量的影响程度及其空间非平稳性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

大关县天星镇处于云南省东北部、大关县中部(103°54′—101°47′E,27°44′—27°58′N),属于北亚热带季风气候。截至 2020 年底,大关县森林面积达到了 8.976 万  $\text{hm}^2$ 。其中罗汉坝森林公园位于大观县天星镇政府东北处,占地 76  $\text{km}^2$ ,有 3 366.67  $\text{hm}^2$  原始森林,植被具有滇、川交界原生阔叶林植被的过渡性特征,是我国亚热带常绿阔叶林的类型之一,其中主要以壳斗科中的峨眉栲(*Castanopsis platyacantha*)、峨眉石栎(*Lithocarpus cleistocarpus* var. *omeiensis*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)为优势树种,被称为“亚热带山地湿性常绿阔叶林”,是我国亚热带常绿阔叶林类型之一,动植物资源丰富,森林覆盖率高达 99%<sup>[21-22]</sup>。

### 1.2 数据来源

采用的数据为云南省昭通市大关县天星镇林分二类调查数据,包括天然次生林和人工林。因变量为林分蓄积量,自变量为郁闭度、平均胸径、平均海拔和坡度(表 1)。

表 1 研究数据  
Table 1 Research data

统计量	最小值	最大值	平均值	标准误差
林分蓄积量/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	10	6 230	403.82	22.20
郁闭度	25	70	49.51	0.23
平均胸径/cm	6	21.6	12.18	0.09
平均海拔/m	715	2 465	1 350.56	9.19
坡度/(°)	15	50	30.19	0.15

### 1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析 空间自相关分为全局空间自相关及局部空间自相关<sup>[23]</sup>,全局空间自相关描述整个研究区域内空间对象的属性值特征,通过此特征来判断对空间是否存在集聚性现象,但不能准确判断集聚的位置<sup>[24-25]</sup>,本研究用 Moran's *I* 进行分析,Moran's *I* 的取值范围为  $[-1, 1]$ ,当 *I* 的值等于 0 或接近于 0 时,代表空间自相关不存在,是一种随机分布的现象;当  $I < 0$  时存在空间负相关,说明在该变量在空间内呈现离散分布,反之则说明该变量在空间内呈现集聚分布<sup>[26]</sup>,基于 ArcGIS 软件对大关县天星镇林分蓄积量进行全局空间自相关分析,公式为

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中: $n$  为观测值个数; $X_i, X_j$  是变量在  $i$  和  $j$  处的值; $\bar{X}$  为变量  $X$  的平均值; $W_{ij}$  为空间权重函数,并且随着条件的不同  $W_{ij}$  也会跟着改变。当  $i$  与  $j$  相邻的时候, $W_{ij}$  就为 1;而当  $i$  与  $j$  不相邻的时候, $W_{ij}$  则为 0。

1.3.2 半变异函数 变异函数可以从距离、方向视角分析数据,它是一种很好的描述空间异质性的方法,补充了 Moran's  $I$  的不足,揭示了变量在整个尺度上的空间变异,可以确定变量空间自相关性的范围<sup>[27]</sup>。为了确定大关县天星镇林分蓄积量空间异质性的组成及在不同尺度上变化,以 500 m 为间隔,计算从 2 075~9 575 m 的块金值、基台值,对各个值进行拟合,从而得到变异曲线,其中块金值表示随机性对空间异质性的影响,基台值表示空间异质性的程度<sup>[4]</sup>,半变异函数公式如下:

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

式中: $\gamma(h)$  表示半变异函数值; $Z(x_i)$  表示样本点在  $x$  位置的时候实际上测到的值; $Z(x_i + h)$  表示与  $x$  位置相距距离为  $x_i + h$  处的值; $N(h)$  表示样本点之间隔着  $h$  距离的样本点的数量。

研究人员通常使用球状、线性等模型来拟合在试验中的半变异函数,结合本研究的数据,经过试验,发现球状模型更适合

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h=0 \\ C_0 + C \left( \frac{3h}{2a} - \frac{1h^3}{2a^3} \right) & 0 \leq h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\gamma(h)$  为变异函数; $a$  表示变程; $C_0 + C$  表示基台值; $C_0$  表示块金; $h$  表示间距。

1.3.3 建立 OLS 模型 OLS 模型是线性回归模型中的一种,研究自变量与因变量之间的相互关系,这种模型是所有空间回归分析最基本的一个形式<sup>[13]</sup>,以郁闭度、平均胸径、平均海拔和坡度为自变量,以林分蓄积量为因变量建立 OLS 回归方程

$$Y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k x_{ik} + \epsilon_i \quad (4)$$

式中: $Y$  是因变量; $Y_i$  表示在  $i$  点时  $Y$  所得到的值; $\epsilon_i$  为残差; $x$  为自变量; $x_{ik}$  表示第  $k$  个  $x$  在  $i$  点时所得到的值; $\beta_0$  为截距; $\beta_k$  为第  $k$  个自变量的回归系数。

1.3.4 建立 GWR 模型 GWR 模型是 OLS 模型的拓展,研究过程中通常用 GWR 模型来处理空间异质性,在允许局部参数估计的情况下,将观测值的

空间位置信息考虑到建模中,同时 GWR 模型在克服空间异质性对模型拟合干扰的同时,还能够对空间非平稳性进行较好的处理<sup>[28-29]</sup>。因此在 GWR 4.0 软件中使用与 OLS 模型相同的变量构建 GWR 模型,其表达式如下

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \quad (5)$$

式中: $(\mu_i, v_i)$  是第  $i$  点的空间位置; $\beta_k(\mu_i, v_i)$  是连续函数  $\beta_k(\mu, v)$  在  $(\mu_i, v_i)$  处的值。

### 1.3.5 模型评价

1) 通过观察模型的拟合优度( $R^2$ )和 AICc 值来进行评价模型的拟合程度<sup>[14]</sup>;

2) 用随机抽样的方法选择 80% 的数据建立 GWR 模型,用剩余 20% 的数据进行预测。在试验中,利用平均误差( $M_E$ )、均方根绝对误差( $R_{MSE}$ )、平均绝对误差( $M_{AE}$ )和模型预测精度  $P$  来衡量模型预测能力<sup>[27]</sup>,平均误差( $M_E$ )越小或接近于 0,则越能说明模型预测偏移程度越小;平均绝对误差( $M_{AE}$ )和均方根绝对误差( $R_{MSE}$ )2 个数的值越小,则越能说明这个模型具有的预测精度越高,预测能力也就越好;而预测精度  $P$  的 2 个值越大越接近 1,就越能够说明这个模型的预测能力强。计算公式如下

$$M_E = \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right) \quad (6)$$

$$M_{AE} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} \right| \quad (7)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (8)$$

$$P = \left[ 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \right] \quad (9)$$

式中: $y_i$  为实测值; $\hat{y}_i$  为估计值; $n$  为样本个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 空间自相关分析

由表 2 可以看出,全局 Moran's  $I$  指数为 0.306 803,标准化  $Z$  为 27.331 810, Sig 值  $< 0.05$ ,在显著性水平 0.05 时,通过显著性检验。这表明,大关县林分蓄积量的空间分布规律并非随机分布,在整体上存在着空间正相关关系。

表 2 全局莫兰指数

Table 2 Global Moran index

Moran's $I$ 指数	0.306 803
方差	0.000 127
$Z$	27.331 810
Sig	0.000 000

由图 1 可见,从整体来看,莫兰指数随着距离阈值的增大而逐渐减小,说明林分蓄积量的空间自相关

性与距离有关,且自相关性逐渐减小,当距离阈值为 2 075 m 时,莫兰指数最大,说明自相关性最强,当距离超过 6 075 m 时,空间自相关性趋于稳定。

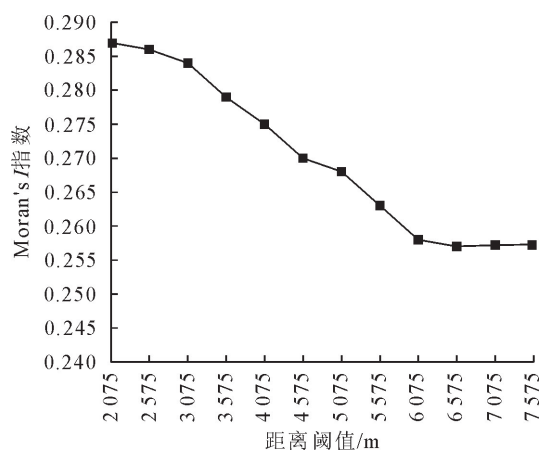


图 1 林分蓄积量的空间自相关性变化

Fig. 1 Spatial autocorrelation variation of stand volume

## 2.2 半变异函数

由图 2、图 3 可知,当间隔距离在 6 075 m 以内时,林分蓄积量的块金值呈现随着间隔距离的增大,块金值逐渐增大,当间隔距离超过 6 075 m 后,块金值随着间隔距离的增大而慢慢趋于稳定,由于块金值代表随机性程度引起的空间异质性,说明随着距离的增加,林分蓄积量的随机性会逐渐增大。随着间隔距离的增加,基台值也缓慢减小,这说明随着距离的增加,林分蓄积量的空间异质性会逐渐减弱。

## 2.3 最小二乘法(OLS)模型分析

由表 3 可知,林分蓄积量与郁闭度、平均胸径呈显著的相关关系,与坡度也呈现一定的相关性,且都通过了 10% 水平下的显著性检验。平均胸径对林分蓄积量有显著的正向影响,平均胸径越大,林分蓄积量就越高,而坡度对林分蓄积量具有负向影响,说明林分蓄积量随着坡度的升高而减小。

表 3 OLS 模型参数估计及检验结果

Table 3 OLS model parameter estimation and test results

自变量	回归系数	标准误差	T 统计量	Sig	方差膨胀因子
截距	-2 183.17	180.24	-12.11	0.000 000 *	—
郁闭度	23.64	3.00	7.89	0.000 000 *	1.44
平均胸径	59.25	7.63	7.767	0.000 000 *	1.53
平均海拔	0.78	0.07	11.62	0.000 000 *	1.13
坡度	-12.01	3.96	-3.03	0.002 506 *	1.09

注:表中 \* 表示 Sig<0.05。

2.4.2 平均海拔 平均海拔的回归系数值范围为  $[-0.89, 2.79]$ ,平均海拔对林分蓄积量的影响在中部地区呈现从中心向四周逐步递减的趋势,对靠近盐津县东北部地区的蓄积量影响较大,对西北和西南地区的蓄积量影响程度较低。

## 2.4 地理加权回归(GWR)模型分析

采用 GWR 模型分析各因素对林分蓄积量影响的空间异质性,由表 4、图 4 得出。

2.4.1 郁闭度 郁闭度的回归系数值范围为  $[-66.11, 106.74]$ ,郁闭度对天星镇靠近盐津县的东北部地区和西南部地区林分蓄积量的影响都较强,对中部地区靠近宜良县的影响较弱。

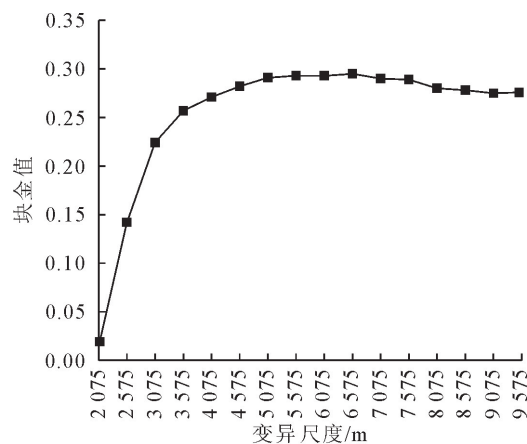


图 2 林分蓄积量块金值尺度变异

Fig. 2 The scale variation of the nugget value of the stand volume

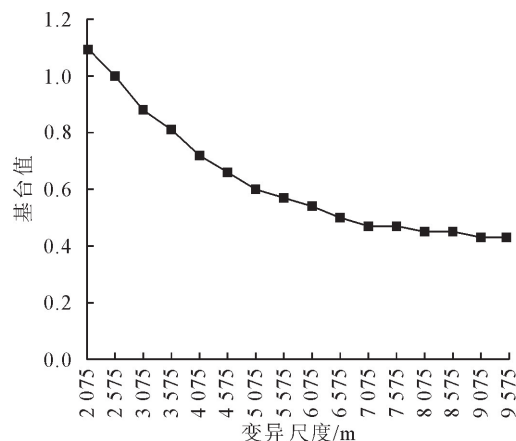


图 3 林分蓄积量基台值尺度变异

Fig. 3 Scale variation of stand stock base value

2.4.3 平均胸径 平均胸径的回归系数值范围为  $[-63.18, 521.83]$ ,从整体看,平均胸径对蓄积量的影响在靠近盐津县的东北部地区较为强烈,对其他地区林分蓄积量的影响较小。

2.4.4 坡度 坡度的回归系数值范围为



$[-112.80, 237.78]$ ,坡度对林分蓄积量的影响在靠近盐津县东北部分地区最强,在西北部分地区最弱,对其他地区的影响较强。

2.5 模型评价

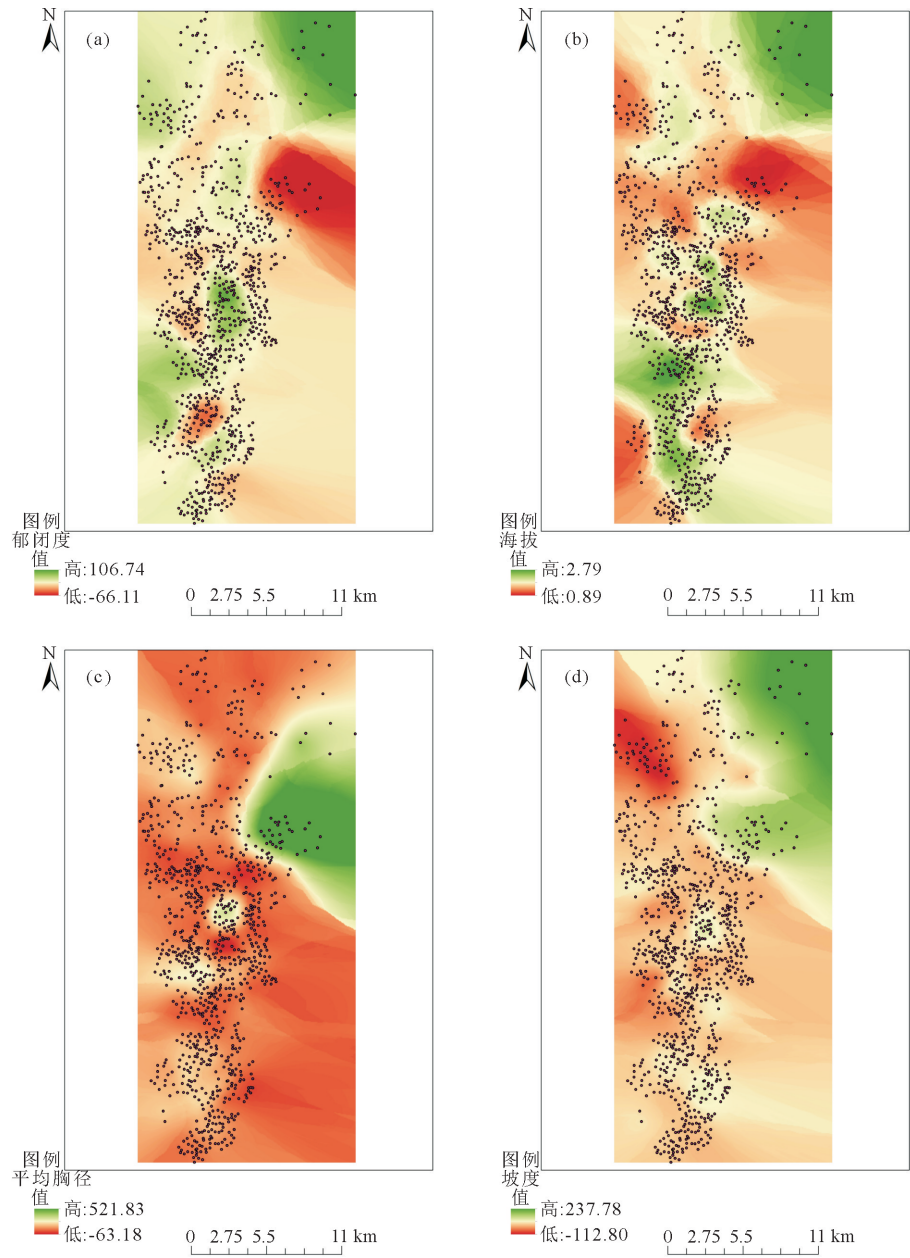
2.5.1 对模型的拟合效果进行评价 由表 5 可以

知,OLS 模型的  $R^2$  为 0.34,而 GWR 模型的  $R^2$  达到了 0.73。同时,在一般应用情况下,具有较小的 AICc 数值的拟合分析效果可能会相对较好,GWR 模型的 AICc 远远小于 OLS 模型,可以得出 GWR 模型的拟合优度比 OLS 模型高的结论。

表 4 GWR 模型参数估计及检验结果

Table 4 GWR model parameter estimation and test results

自变量	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值	平均值
截距	-14 475.28	-3 062.81	-1 850.47	-1 027.96	924.27	-2 349.43
郁闭度	-66.11	4.90	12.81	24.31	106.74	15.63
平均胸径	-63.18	13.80	40.17	90.56	521.83	62.61
平均海拔	-0.89	0.21	0.52	0.88	2.79	0.57
坡度	-112.80	-2.47	8.60	26.60	237.78	13.17



(a)郁闭度系数空间分布图;(b)海拔系数空间分布图;(c)平均胸径系数空间分布图;(d)坡度系数空间分布图。

图 4 GWR 模型影响因子回归系数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of GWR model impact factor regression coefficients

表 5 OLS 模型和 GWR 模型的比较

Table 5 Comparison of OLS model and GWR model

模型参数	AICc	拟合优度( $R^2$ )
OLS 模型	14 980.25	0.34
GWR 模型	14 532.88	0.73

2.5.2 对模型预测能力的精度评价 从表 6 可以看出:OLS 模型的预测精度  $P$  为 0.54,而 GWR 模型的预测精度则为 0.60,且 GWR 模型的 ME、MAE 和 RMSE 均小于 OLS 模型,这更加说明 GWR 模型的预测精度大于 OLS 模型。

表 6 OLS 模型和 GWR 模型预测能力的比较

Table 6 Comparison of predictive ability of OLS model and GWR model

模型参数	ME $/(m^3 \cdot hm^{-2})$	MAE $/(m^3 \cdot hm^{-2})$	RMSE $/(m^3 \cdot hm^{-2})$	$P$
OLS 模型	2.3	7.29	26.29	0.54
GWR 模型	1.8	6.11	22.02	0.60

### 3 结论

1)在进行空间自相关分析时,莫兰指数随着距离阈值的增大而逐渐减小,说明林分蓄积量的空间自相关性与距离有关,且自相关性逐渐减小,当距离阈值为 2 075 m 时,莫兰指数最大,说明自相关性最强,当距离超过 6 075 m 时,空间自相关性趋于稳定;

2)当间隔距离在 6 075 m 以内时,林分蓄积量的块金值呈现出随间隔距离的增大,块金值逐渐增大,基台值缓慢减小,当间隔距离超过 6 075 m 以后,块金值和基台值逐渐趋于稳定,这说明随着距离的增加,林分蓄积量的随机性会逐渐增大,同时林分蓄积量的空间异质性会逐渐减弱;

3)对 OLS 模型和 GWR 模型的结果进行分析,从总体上看,对林分蓄积量影响程度最大的是平均胸径,其次是郁闭度,说明平均胸径越大,郁闭度越大,林分蓄积量也就越大,平均胸径、郁闭度对林分蓄积量呈现出显著的正相关性,平均海拔对林分蓄积量的影响没有平均胸径和郁闭度的影响大,只有较弱的正相关性;而坡度与林分蓄积量具有负相关性,坡度越陡,林分蓄积量就越少。说明郁闭度、平均胸径、平均海拔和坡度在空间上对林分蓄积量的影响程度的分布是复杂的;

4)通过比较 GWR 和 OLS 模型,OLS 模型的  $R^2$  为 0.34,而 GWR 模型的  $R^2$  达到了 0.73,同时 GWR 模型的预测精度  $P$  为 0.60,大于 OLS 模型的预测精度  $P$  (0.54),这验证了 GWR 模型在模型拟合和模型预测方面均比 OLS 模型有明显的优势。

本研究利用 OLS 模型和 GWR 模型分析了林分蓄积量的影响因素和空间非平稳性,结果表明,在空间尺度上林分蓄积量存在空间异质性,林分蓄积量受到平均胸径、郁闭度、平均海拔和坡度的影响,同时,建立地理加权回归模型对区域的森林经营管理有着更好的指导意义。此外,如何提高胸径、郁闭度,选择合适的坡度、海拔从而提高林分蓄积量,需要根据不同的林分结构制定适宜的森林经营方案,进行合理规划。

### 参考文献:

- [1] 罗洪斌,岳彩荣,张国飞,等.基于哑变量和因子选择的森林蓄积量估测研究[J].西北林学院学报,2022,37(1):205-210.  
LUO H B, YUE C R, ZHANG G F, *et al.* Forest volume estimation based on dummy variables and factor selection[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 205-210. (in Chinese)
- [2] 张博,王照利,雷方隼.基于层次分析法和物元分析法的森林资源质量评价——以延川县为例[J].西北林学院学报,2022,37(2):208-215.  
ZHANG B, WANG Z L, LEI F J. Quality evaluation of forest resources based on analytic hierarchy process and matter element analysis——a case study of Yanchuan County[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 208-215. (in Chinese)
- [3] 罗蜜,孙玉军,张博,等.应用衍生纹理指数对杉木林分蓄积量的估测[J].东北林业大学学报,2019,47(7):43-49.  
LUO M, SUN Y J, ZHANG B, *et al.* Estimation of stand volume of *Cunninghamia lanceolata* with derivative texture indices [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(7): 43-49. (in Chinese)
- [4] 刘畅,李凤日,甄贞.空间误差模型在黑龙江省森林碳储量空间分布的应用[J].应用生态学报,2014,25(10):2779-2786.  
LIU C, LI F R, ZHEN Z. Prediction of spatial distribution of forest carbon storage in Heilongjiang Province using spatial error model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(10): 2779-2786. (in Chinese)
- [5] 朱坤,彭建松,张文莉,等.曲靖市森林生态系统固碳释氧的生态效益[J].森林工程,2022,38(2):34-43.  
ZHU K, PENG J S, ZHANG W L, *et al.* Ecological benefits and value evaluation of carbon fixation and oxygen release in Qujing city[J]. Forest Engineering, 2022, 38(2): 34-43. (in Chinese)
- [6] 刘畅,胥辉,欧光龙.思茅松天然林单木含碳量空间异质性分析[J].西南林业大学学报:自然科学,2019,39(4):76-82.  
LIU C, XU H, OU G L. Spatial heterogeneity analysis of carbon content in individual tree of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* natural forests[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences, 2019, 39(4): 76-82. (in Chinese)
- [7] 覃文忠.地理加权回归基本理论与应用研究[D].上海:同济大学,2007.
- [8] 朱永凤,瓦哈甫·哈力克,何琛.基于 GWR 模型新疆旅游景区

- 空间异质性与优化策略研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(6): 1-8.
- [9] 张金亭, 赵瑞. 基于地理加权回归的环渤海城市群房价影响因素研究[J]. 国土与自然资源研究, 2019(1): 87-93.  
ZHANG J T, ZHAO R. Study on the influence factors of housing price in the urban area of Bohai Ring Megalopolis based on geographically weighted regression[J]. Territory & Natural Resources Study, 2019(1): 87-93. (in Chinese)
- [10] 戈冬梅, 姜磊. 基于 GWR 模型的省域旅游影响因素空间差异分析[J]. 生态经济, 2013(7): 93-97, 132.  
GE D M, JIANG L. The spatial disparity analysis of determinants of tourism at provincial levels based on GWR[J]. Ecological Economy, 2013(7): 93-97, 132. (in Chinese)
- [11] 关伟, 郝金连. 东北地区旅游经济影响因素时空特征研究[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 935-943.  
GUAN W, HAO J L. Spatial-temporal characteristic study on impact factors of tourism economy in northeastern China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(6): 935-943. (in Chinese)
- [12] 尚清芳, 鲁建平. 基于地理加权回归模型的甘肃省旅游空间异质性分析[J]. 山西能源学院学报, 2020, 33(3): 69-71.
- [13] 阙博颖, 濮励杰, 徐彩瑶, 等. 基于 GWR 模型的南京主城区住宅地价空间异质性驱动因素研究[J]. 经济地理, 2019, 39(3): 100-107.  
KAN B Y, PU L J, XU C Y, *et al.* Driving factors on the spatial heterogeneity of residential land price in downtown Nanjing based on GWR model[J]. Economic Geography, 2019, 39(3): 100-107. (in Chinese)
- [14] 戚玉娇. 大兴安岭森林地上碳储量遥感估算与分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [15] 时保国, 孙玉凤. 基于 GWR 模型的中国省级人均卫生费用的空间异质性研究[J]. 中国卫生事业管理, 2020, 37(11): 823-826.
- [16] 闻妍宇, 李超, 欧光龙, 等. 基于地理加权回归模型的思茅松生物量遥感估测[J]. 林业资源管理, 2017(1): 82-90.
- [17] 薛瑞晖, 于晓平, 李东群, 等. 基于地理加权回归模型探究环境异质性对秦岭大熊猫空间利用的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(8): 2647-2654.  
XUE R H, YU X P, LI D Q, *et al.* Using geographically weighted regression to explore the effects of environmental heterogeneity on the space use by giant pandas in Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): 2647-2654. (in Chinese)
- [18] KASHKI A, KARAMI M, ZANDI R, *et al.* Evaluation of the effect of geographical parameters on the formation of the land surface temperature by applying OLS and GWR, a case study Shiraz City, Iran[J]. Urban Climate, 2021, 37: 100832.
- [19] WU X, ZHANG J. Exploration of spatial-temporal varying impacts on COVID-19 cumulative case in Texas using geographically weighted regression (GWR)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(32): 43732-43746.
- [20] 吴瑶. 不同类型红松林的空间分布格局及异质性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- [21] 杨宛青, 张梅, 代勋, 等. 昭通大关罗汉坝生态旅游可持续性发展研究[J]. 黑龙江科学, 2017, 8(10): 48-50.  
YANG W Q, ZHANG M, DAI X, *et al.* Zhaotong mark Luohanba eco-tourism sustainable development research[J]. Heilongjiang Science, 2017, 8(10): 48-50. (in Chinese)
- [22] 王越, 康萍, 赵英杰. 森林生态旅游发展路径的分析[J]. 森林工程, 2022, 38(3): 47-53.  
WANG Y, KANG P, ZHAO Y J. Analysis of forest eco-tourism development path[J]. Forest Engineering, 2022, 38(3): 47-53. (in Chinese)
- [23] 甘茂林, 吕王勇, 符璐. 基于改进 Moran's  $I$  指数的成都市  $PM_{2.5}$  的空间统计分析[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(9): 187-193.  
GAN M L, LÜ W Y, FU L. Spatial statistical analysis on  $PM_{2.5}$  in Chengdu based on improved Moran's  $I$ [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(9): 187-193. (in Chinese)
- [24] 刘艳清, 葛京凤, 李灿, 等. 基于空间自相关的城市住宅地价空间分异规律研究——以石家庄市城区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 55-62.  
LIU Y Q, GE J F, LI C, *et al.* Spatial differentiation characteristics of urban residential land prices of Shijiazhuang City based on spatial autocorrelation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(12): 55-62. (in Chinese)
- [25] GETIS A, ORD J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [26] 汤江龙, 范佳旭, 郭恩泽. 基于 Moran's  $I$  指数的耕地质量空间相关分析——以于都县为例[J]. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2019, 42(4): 406-411.
- [27] 公云龙, 张绍良, 章兰兰. 城市地价空间自相关分析——以宿州市为例[J]. 经济地理, 2011, 31(11): 1906-1911.  
GONG Y L, ZHANG S L, ZHANG L L. Spatial autocorrelation of urban land price: a case study of Suzhou[J]. Economic Geography, 2011, 31(11): 1906-1911. (in Chinese)
- [28] 谢绍锋, 肖化顺, 储蓉, 等. 基于泰森多边形的广州市林火空间分布规律研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 178-185.  
XIE S F, XIAO H S, CHU R, *et al.* Spatial distribution of forest fire based on the voronoi in Guangzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(3): 178-185. (in Chinese)
- [29] 孙钰森, 王维芳, 李国春. 基于地理加权回归克里格模型的帽儿山地区森林碳储量空间分布[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1642-1650.  
SUN Y S, WANG W F, LI G C. Spatial distribution of forest carbon storage in Maoershan region, northeast China based on geographically weighted regression kriging model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1642-1650. (in Chinese)