

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.037

基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟

王海宾¹ 彭道黎¹ 范应龙² 李伟涛¹ 张超¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中南林业调查规划设计院, 长沙 410014)

摘要: 以北京市密云县一类清查的样地蓄积量为研究对象, 结合与蓄积量相关的辅助因子, 采用普通克里格法、协同克里格法对森林蓄积量进行空间插值估测, 并与文献[25]同一研究区的基于偏最小二乘法回归法估测结果进行比较分析。结果表明, 普通克里格法、基于辅助信息的协同克里格法、偏最小二乘回归法的蓄积量估测值与实测值间的相关系数分别为 0.389、0.845、0.766; 基于辅助信息的协同克里格法要优于普通克里格法和偏最小二乘回归法, 能够明显提高预测精度; 与普通克里格法相比, 所产生的均方根误差减小了 71%, 预测值和实测值的相关系数提高了 54%。最后生成了密云县森林蓄积量空间分布图。研究表明应用地统计学方法进行蓄积量估测具有很好的应用前景, 可以为森林蓄积量的估测提供一种可行的方法。

关键词: 森林蓄积量; 普通克里格; 协同克里格; 辅助信息

中图分类号: S758.5⁺.1; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0283-07

Spatial Modeling of Forest Stock Volume Based on Auxiliary Information

Wang Haibin¹ Peng Daoli¹ Fan Yinglong² Li Weitao¹ Zhang Chao¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. South - Central Forest Inventory and Planning Institute of SFA, Changsha 410014, China)

Abstract: Taking the stock volume of continuous forest inventory in Miyun District of Beijing as research object, and combining auxiliary factors associated with stock volume, the spatial interpolation analysis of the stock volume was carried out by using the ordinary Kriging and Co-Kriging methods, and the results were compared with those of reference 25 in the same study area based on the partial least squares regression method. The results show that based on the auxiliary information, Co-Kriging method is superior to ordinary Kriging and partial least squares regression method, the correlation coefficient between the estimated value and the measured value based on Co-Kriging method was 0.845, the correlation coefficient between the estimated value and the measured value based on ordinary Kriging method was 0.389, and the correlation coefficient between the estimated value and the measured value based on partial least squares regression method was 0.766, respectively. Co-Kriging can significantly improve the prediction accuracy compared with ordinary Kriging, generating the root mean square error decreased by 71%, respectively, and the correlation coefficient between predicted values and measured values increases by 54%. Finally, the spatial distribution map of forest stock volume in Miyun was generated. The research shows that the application of geo-statistical methodology has a good application prospect, and it can provide a feasible method for the estimation of forest stock.

Key words: forest stock volume; ordinary Kriging; Co-Kriging; auxiliary information

收稿日期: 2016-03-11 修回日期: 2016-04-04

基金项目: 国家林业局 948 项目(2015-4-23)和国家重点林业工程监测技术示范推广项目([2015]02 号)

作者简介: 王海宾(1985—), 男, 博士生, 主要从事林业遥感与信息技术研究, E-mail: haibin-w@163.com

通信作者: 彭道黎(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事森林资源监测与评价和森林经营管理研究, E-mail: dlpeng@bjfu.edu.cn

引言

森林蓄积量作为森林资源经营管理中的一个重要因子,它在全球陆地植被生物量中占据着主要的地位,它是评估森林固碳能力和森林碳收支的重要指标^[1-3],也是评价森林资源数量与质量、反映森林经营管理水平的重要因子,可为森林可持续经营发展和国家林业发展战略的制定提供决策依据^[4]。目前,对森林蓄积量进行估测的方法较多,传统的森林资源一类和二类的蓄积量调查,需要投入大量的人力、物力和财力,并且调查周期较长,数据更新较慢^[4],基于遥感技术估测森林蓄积量的研究也呈现出多样化,主要集中在选取不同数据源(如光学遥感数据、微波和雷达数据)和不同方法估测森林蓄积量,在这些方法中,应用较多的有简单的线性回归、主成分回归、岭估计、最小二乘估计、偏最小二乘回归、人工神经网络、K近邻等方法^[3-11],这些方法在某种程度上提高了估测效率,并逐步地应用到实际的蓄积量估测中,虽然这些方法提供了便捷的估测技术,但大多数研究都没有考虑空间异质性对森林蓄积量的影响,缺乏明确的地理空间信息,同时研究方法也存在物理机制不明确或是过于单一的问题。另外,遥感数据的获取及处理也存在诸多问题,如遥感数据量较大,不容易实现时时覆盖,易受到气象条件(如云、雾)的影响,产生阴影以及同谱异物和同物异谱的现象。

目前国外应用地统计学方法对植被相关参数进行估测的研究较多,主要集中在植被生物量和森林调查因子估测上,通过采用不同的地统计学方法对变量进行空间插值及验证分析^[12-18]。国内学者在植被相关参数的估计上也开展了一些研究,通过采用地统计学方法,对植被生物量、碳储量和森林结构进行研究分析^[19-25]。地统计方法可以克服上文中传统一类、二类调查和遥感估测蓄积量面对的问题,同时兼顾了空间结构特征并具备完好的空间制图功能,并且在森林蓄积量的估测上,缺少应用地统计方法进行森林蓄积量估测的研究实例。因此,应用地统计学方法对森林蓄积量进行插值的研究具有较强的实践意义。

本文根据森林蓄积量的空间分布特性及其相关的森林调查因子,提出一种应用辅助因子进行森林蓄积量估测的方法,通过采用2种不同的地统计学方法,对森林蓄积量进行估测,以此分析地统计学方法在森林蓄积量估测中的应用潜力,以期对森林蓄积量估测提供一个新的途径和方法。

1 研究区及实验数据

1.1 研究区概况

研究区位于北京市密云县,地理坐标为东经116°39'33"~117°30'25",北纬40°13'7"~40°47'57",位于北京市东北部,东南至西北依次与本市的平谷、顺义、怀柔3区接壤,北部和东部分别与河北省的滦平、承德、兴隆3县毗邻。该区属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区,四季分明,年平均气温10℃,年平均降水量约660 mm,降水主要集中在6—9月份。其植被属于针阔混交林森林植被带,现存植被主要为人工林以及一些次生植被类型。主要森林类型有:侧柏林(*Platycladus orientalis*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)、栎林(*Quercus* spp.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、杨树(*Populus* spp.)、桦木(*Betula* spp.)、核桃楸(*Juglans mandshurica*)、五角枫(*Acer mono*)等。

1.2 数据来源

采用的地面数据是密云县第7次森林资源清查数据,数据采集时间为2011年7月,其中样地为系统布设样地,样地间距为2 km×2 km,其中有林地样地个数为121个(剔除6个缺失样地)。样地面积为0.067 hm²,样地主要调查因子有树种、胸径、树高、坡向、坡度、海拔、株数、年龄等,起测胸径为5 cm。所用数据还包括密云县边界数据。密云县有林地样地分布见图1。

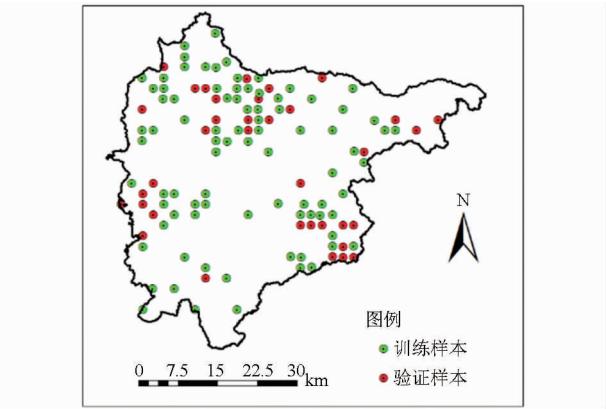


图1 研究区样地分布图

Fig. 1 Distribution samples and study area

2 研究方法

2.1 样地数据处理

在密云县第7次森林资源清查的样地数据中,提取有林地样点,剔除非有林地以外的样点,基于提取的121个样地数据,采用数表法^[8]和树干横断面积公式($g = \pi d^2 / 4$)^[26]计算样地内每株乔木的蓄积量和胸高断面积,然后累加得到每块样地的蓄

积量和总的胸高断面积,同时提取样地内的平均树高和株数因子,最后将单位统一转换为单位面积蓄积量、单位面积胸高断面积、单位面积株数和平均树高。

在进行空间插值操作前,需要对所用数据进行描述性统计分析,检验其是否符合正态分布。采用 SPSS 20.0 统计软件,采用对数转换、域处理法(样本平均值 $\bar{x} \pm 3\sigma$)、平方根转换 3 种方法对样本数据进行处理,并采用 K-S 检验对数据进行正态性检验。

影响蓄积量估测的因素很多,在以往有关蓄积量的研究中,地形因子(如海拔、坡度、坡向)和林分调查因子对估测结果的影响较为明显^[7,9]。在本研究中,地形因子、林分调查因子与蓄积量间可能存在一定程度的相关性,为较好地 对蓄积量进行空间插值估测,选取单位面积胸高断面积、单位面积株数、平均树高、平均年龄、平均胸径、海拔、坡度等因子进行相关性分析。

2.2 地统计学方法

地统计学是以区域化变量理论为基础,以变异函数为主要工具,研究那些在空间分布上既有随机性又有结构性、或是空间相关性和依赖性的自然现象的科学,它集合了确定性和统计工具,旨在通过预测和模拟了解和模拟变量的空间变异性^[27]。

2.2.1 变异函数

变异函数也称为半方差函数,它是地统计学中研究变量空间变异性的关键函数,是用来描述变量性质的空间连续变异的一个连续函数,反映变量性质的不同距离观测值之间的变化^[27]。

在本研究中,如果区域化变量蓄积量 $Z(x)$ 满足二阶平稳或固有假设,则有蓄积量变异函数为

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

式中 $r(h)$ ——蓄积量变异函数

$N(h)$ ——某一方向上距离等于 h 的点对数

$Z(x_i)$ ——处于点 x_i 处变量的蓄积量实测值

$Z(x_i + h)$ ——与点 x_i 偏离 h 处变量的蓄积量值

2.2.2 克里格法

克里格法(Kriging)也称空间局部估计或空间局部插值,是空间统计学的主要内容之一,它是建立在变异函数理论及结构分析基础上,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计的一种方法^[24]。

(1) 普通克里格

普通克里格法(Ordinary Kriging, OK)是区域化变量的线性估计,它假设数据变化呈正态分布,认为

区域化变量 Z 的期望值是未知的。插值过程类似于加权滑动平均,权重值的确定来自于空间数据分析。

普通克里格插值公式为

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

其中

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

式中 $Z^*(x_0)$ ——待估点处的蓄积量估测值

λ_i ——第 i 个实测值的权重

$Z(x_i)$ ——样地 x_i 处蓄积实测值

n ——参与估计 x_0 处蓄积量的样地数目

(2) 协同克里格

协同克里格法(Co-Kriging, COK)是普通克里格法的拓展。以往的研究表明^[28-30],协同克里格法比普通克里格法能更好地提高估计精度及采样效率。它是利用 2 个或 2 个以上的变量,将其中 1 个作为主变量,其他变量作为辅助变量,将主变量的自相关性和主辅变量的交互相关性结合起来进行无偏最优估计,其公式为

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^m \lambda_{2i} Z_2(x_j) \quad (3)$$

其中

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{1i} = 1 \quad \sum_{i=1}^n \lambda_{2i} = 0$$

式中 $Z^*(x_0)$ ——待估点处的蓄积量估测值

$\lambda_{1i}, \lambda_{2i}$ ——主变量 Z_1 和辅变量 Z_2 实测值的权重

m ——辅助变量 Z_2 的实测值数目

2.3 变异函数和克里格插值的评价

运用不同的变异函数对蓄积量数据进行拟合,评价变异函数模型的拟合效果和克里格的预测精度。本研究采用 ArcGIS 地统计分析模块来进行处理,可选择的变异函数模型有:指数模型(exponential)、高斯模型(Gaussian)、圆形模型(circular)、球状模型(spherical)、四球模型(tetraspherical)、五球模型(pentaspheical)、有理二次方程式(rational quadratic)、孔穴效应(hole effect)、K-贝塞耳模型(K-Bessel)、J-贝塞耳模型(J-Bessel)和稳定模型(stable)。

变异函数的拟合效果采用交叉检验(cross-validation)来验证,通过交叉检验中的预测值和实测值进行回归分析,采用决定系数(R^2)和残差对交叉检验的精度进行评价^[23]。变异函数拟合效果的评价标准为:主要考虑决定系数(R^2)和残差, R^2 越大,残差越小;其次是考虑变程和块金值,变程越大,块金值越小^[2]。

用 COK 的均方根误差相对于 OK 的均方根误

差(RMSE)减小的百分数(RRMSE)表示预测精度的提高程度^[2],即

$$R_{MSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z^*(x_i))^2 / n}$$
$$R_{RMSE} = (R_{MSE_{OK}} - R_{MSE_{COK}}) / R_{MSE_{OK}} \times 100\%$$

式中 $Z(x_i)$ 、 $Z^*(x_i)$ ——在 x_i 处的测量值和预测值
用 R_R 表示 COK 相对于 OK 的预测值和实测值之间相关系数的提高程度^[28],即

$$R_R = (R_{COK} - R_{OK}) / R_{COK} \times 100\%$$

2.4 蓄积量插值及验证

为比较 OK 和 COK 的插值精度,在研究区 121

个采样点数据中,随机抽取 36 个样点作为验证样点,其余 85 个样点进行 OK 和 COK 插值。最后采用 SPSS 20.0 对随机抽取的 36 个样地的实测值和预测值进行统计对比分析,验证插值精度。

3 结果与分析

3.1 描述性统计分析

对单位面积蓄积量(以下简称蓄积量)、单位面积胸高断面积、单位面积株数、平均树高进行了一般描述性统计。表 1 是原始数据的描述性统计和正态性分布检验结果。

表 1 森林参数描述性统计结果

Tab.1 Statistical feature values of variables

参数	样地数	平均值	标准差	中数	最小值	最大值	K-S 检验
单位面积蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²)	121	5.24	2.45	5.01	0.83	10.66	0.048
胸高断面积/(m ² ·hm ⁻²)	121	0.55	0.43	0.44	0.01	1.67	0.096
单位面积株数/(株·hm ⁻²)	121	680	442	660	45	1 845	0.491
平均树高/m	121	7.6	3.7	6.9	0.8	21.4	0.107

在对原始数据进行 K-S 检验后,发现蓄积量数据不服从正态分布,其他 3 个变量服从正态分布。因此,在地统计插值前需要对蓄积量数据进行转换,采用对数转换、域处理法(样本平均值 $\bar{x} \pm 3\sigma$)、平方根转换 3 种方法对蓄积量数据进行转换并检验,结果表明平方根转换法能够较好地使蓄积量数据呈现正态分布。

3.2 蓄积量与其他因子之间的相关分析

在选择多个变量信息进行插值时,当第一变量信息固定或有限时,合理有效地选择其他变量

信息进行辅助插值成为提高预测精度的关键^[11]。对蓄积量和其他因子进行相关性分析,结果表明(表 2),蓄积量与单位面积胸高断面积、单位面积株数、平均树高、平均胸径之间存在显著的相关关系,相关系数分别为 0.971、0.615、0.539 和 0.403,而反映地理信息的海拔和坡度与蓄积量则无显著相关关系。考虑到插值辅助信息的数量问题,本研究选择单位面积胸高断面积、单位面积株数、平均树高 3 个因子作为辅助因子参与协同克里格插值分析。

表 2 研究区变量间 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation matrix for variables of study area

	蓄积量	单位面积胸高断面积	单位面积株数	平均树高	平均胸径	海拔	坡度
蓄积量	1						
单位面积胸高断面积	0.971 **	1					
单位面积株数	0.615 **	0.659 **	1				
平均树高	0.539 **	0.517 **	0.249 *	1			
平均胸径	0.403 **	0.351 **	-0.149	0.531 **	1		
海拔	0.033	0	0.105	-0.081	-0.147	1	
坡度	0.040	0.028	0.185	-0.076	-0.136	0.170	1

注: ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.3 变异函数的选择

为更好地应用地统计方法对蓄积量进行空间估计,对常用的变异模型进行了计算和分析,根据变异函数的理论和评价方法,得到不同模型的拟合结果。

在变异函数的评价中,块金值通常表示由试验误差和小于试验取样尺度引起的变异^[2,14],基台值是半变异模型在自相关阈值点获得的半变异值;块金值/基台值表示系统变量的空间相关的程度,如果

块金值/基台值小于 25%,表明系统相关性很强;块金值/基台值在 25% ~ 75% 之间,表明系统具有中等的空间相关性;块金值/基台值大于 75%,表明系统相关性较弱^[2,23]。通过普通克里格法和协同克里格法的计算,得到最优变异函数的拟合结果(表 3)。

由表 3 可知,在普通克里格插值中,指数模型最符合变异函数的选择标准,在协同克里格插值方法中,有理二次方程式具有最好的插值效果。所以本

表 3 不同方法拟合的最优方差函数模型及参数

Tab.3 Optimal variance function model and parameters fitted by different methods							
插值方法	模型	R^2	R_{SS}	C_0	C	$C/(C+C_0)$	变程/m
普通克里格	指数函数	0.151	584.72	0.440 5	6.955 4	0.936 7	3 906.1
协同克里格	有理二次方程式	0.714	49.13	0.006 9	6.928 0	0.999 0	4 096.8

研究选择指数模型和 有理二次方程式作为普通克里格和协同克里格插值的最优变异函数。

应用 2 种插值方法对蓄积量进行插值,并对插值结果进行比较(表 4)。利用克里格插值方法的评价标准,选取均方根误差(RMSE)及实测值与预测值间的相关系数(R)作为比较指标。由表 4 可知,协同克里格法比普通克里格法预测的均方根误差减小了 71%,预测值和实测值的相关系数提高了 54%,表明协同克里格法预测精度要高于普通克里格法,这是由于协同克里格法融合了更丰富的辅助因子信息,能够提高预测结果的精度。

表 4 普通克里格和协同克里格估测精度的比较

Tab.4 Comparison of predict accuracy between ordinary Kriging and Co-Kriging						
样点数	OK		COK		$R_{RMSE}/$	$R_R/$
	R_{MSE}	R	R_{MSE}	R	%	%
85	2.622 8	0.389	0.760 3	0.845	71.00	54.00

3.4 插值结果的验证

利用交叉验证法讨论了模型预测值与实际值之间的误差及相关性,并得出了协同克里格法要优于普通克里格法的插值效果。为进一步验证插值效果,选择预留的 36 个样地,对插值结果进行检验(图 2),由图可知,蓄积量的预测值和实测值的线性方程为 $y=0.6437x+40.192$, $R^2=0.7069$,由此可知,协同克里格法的插值估测精度较高,可以作为蓄积量插值估测的方法。

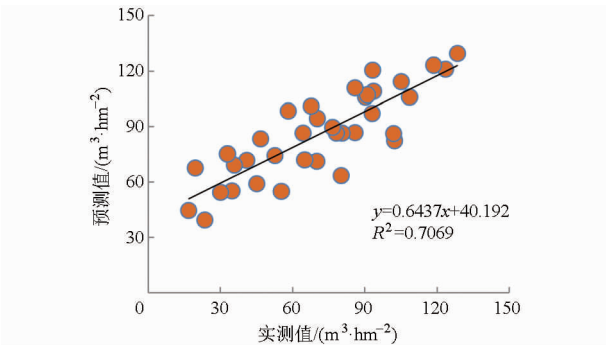


图 2 36 个样地实测值和预测值对比分析
Fig.2 Statistical comparisons between measured and predicted volume in 36 samples

从普通克里格法、协同克里格法的交叉检验和实地验证结果可知,基于辅助变量的协同克里格法在估计精度方面具有较为明显的优势,插值结果优

于普通克里格法。因此,在县域范围内,对蓄积量进行克里格插值是可行的,基于辅助信息的协同克里格法是一种值得考虑和推荐使用的方法,图 3 为协同克里格法插值生成的蓄积量空间分布图。

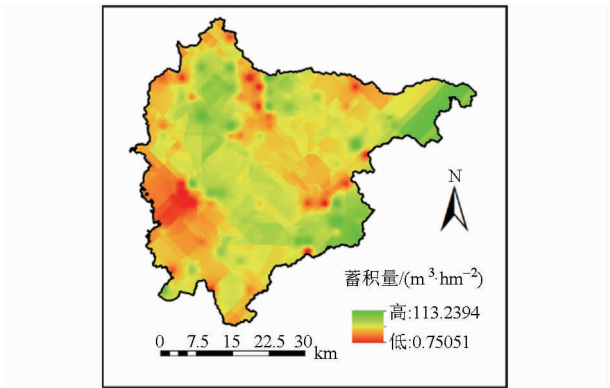


图 3 研究区蓄积量空间分布图
Fig.3 Map of volume spatial distribution pattern

4 讨论

(1)目前学者主要采用不同的地统计方法(如普通克里格法、协同克里格法、回归克里格等方法)对研究变量进行空间插值分析^[2,15-16,21]。本文选取 2 种插值方法对森林蓄积量进行了估测,在实际应用中,蓄积量会受到各种生物因素和非生物因素的影响,因此在应用不同的地统计学方法进行蓄积量插值估测时,要综合考虑研究区的地形和其他相关因子信息(如气候因子、抚育间伐影响),选择合适的插值方法和因子信息进行蓄积量的空间插值和分析。

(2)随着遥感技术的快速发展,尤其是高空间分辨率影像的不断出现,对结合遥感影像和地统计学方法的探讨被越来越多的研究者关注^[15,21,31],如何选取可靠的遥感数据源以及插值方法,综合考虑影像的光谱、植被指数、纹理等信息对蓄积量进行反演,将会为森林蓄积量的估测提供一个便捷可行的方法,在一定程度上能够提高蓄积量估测的效率,降低外业调查成本。

(3)探讨了蓄积量空间插值以及最优模型的拟合问题,对使用地统计学方法中的不同克里格插值法进行了探讨,对使用地统计学方法对森林蓄积量进行反演具有一定的参考价值。在以往的研究中,对不同的变量进行空间插值时,采样点的数量和分

布对插值结果具有较大的影响^[24],在本研究中,由于只提取了有林地的样地,去除了非有林地,因此样地在空间分布上呈现了聚集和空斑现象,由此会出现蓄积量局部插值偏高的问题,此部分问题有待于进一步研究分析。

5 结 论

(1)蓄积量与单位面积胸高断面面积、单位面积株数、平均树高、平均胸径因子具有较大的相关性,其中蓄积量与单位面积胸高断面面积、单位面积株数、平均树高、平均胸径之间存在显著的相关关系,相关系数分别为 0.971、0.615、0.539 和 0.403,与海拔、

坡度等地形因子相关性不显著。
(2)与普通克里格法相比,基于辅助因子的协同克里格法的插值精度有所提高,所产生的均方根误差减小了 71%,预测值和实测值的相关系数提高了 54%,与基于最小偏二乘回归法估测结果相比,3 种方法的估测值与实测值间的相关系数分别为 0.389、0.845、0.766,由此可知普通克里格法的估测效果不如偏最小二乘回归法效果好,而基于辅助信息的协同克里格法则要好于偏最小二乘回归法,结果表明选取相关性较高的辅助因子对蓄积量进行协同克里格插值具有较好的估测效果和适用性。

参 考 文 献

1 刘志华,常禹,陈宏伟. 基于遥感、地理信息系统和人工神经网络的呼中林区森林蓄积量估测[J]. 应用生态学报,2008,19(9):1891-1896.
LIU Zhihua, CHANG Yu, CHEN Hongwei. Estimation of forest volume in Huzhong forest area based on RS, GIS, and ANN[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(9):1891-1896. (in Chinese)

2 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 Peng, ZHANG Huiru, LEI Xiangdong, et al. Estimation of forest aboved-ground biomass based on geostatistics[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(5):101-109. (in Chinese)

3 ZHENG Sheng, CAO Chunxiang, DANG Yongfeng, et al. Retrieval of forest growing stock volume by two different methods using Landsat TM images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014,35(1):29-43.

4 刘俊,毕华兴,朱沛林,等. 基于 ALOS 遥感数据纹理及纹理指数的柞树蓄积量估测[J]. 农业机械学报,2014,45(7):245-254.
LIU Jun, BI Huaxing, ZHU Peilin, et al. Estimating stand volume of *Xylosma racemosum* forest based on texture parameters and derivative texture indices of ALOS imagery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(7):245-254. (in Chinese)

5 SAARELA S, GRAFSTRÖM A, STÅHL G, et al. Model-assisted estimation of growing stock volume using different combinations of LiDAR and Landsat data as auxiliary information[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 158:431-440.

6 亢新刚. 森林资源经营管理[M]. 北京:中国林业出版社,2001.

7 李崇贵,赵宪文,李春干. 森林蓄积量遥感估测理论与实现[M]. 北京:科学出版社,2006.

8 涂云燕. 森林蓄积量遥感估测研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
TU Yunyan. The research of estimating forest volume based on remote sensing[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2013. (in Chinese)

9 XU Q, HOU Z, TOKOLA T. Relative radiometric correction of multi-temporal ALOS AVNIR-2 data for the estimation of forest attributes[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 68(3):69-78.

10 KAJISA T, MURAKAMI T, MIZOUE N, et al. Estimation of stand volumes using the k-nearest neighbors method in Kyushu, Japan[J]. Journal of Forest Research, 2008, 13(4):249-254.

11 瞿明凯. 几种地统计学方法在县域土壤空间信息处理上的应用与研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
QU Mingkai. Application and study of several geostatistical methods in soil spatial information processing at county scale[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)

12 LUDOVISI A, MINOZZO M, PANDOLFI P, et al. Modelling the horizontal spatial structure of planktonic community in Lake Trasimeno (Umbria, Italy) using multivariate geostatistical methods[J]. Ecological Modelling, 2005, 181(2-3):247-262.

13 PARK N W, CHIK H, KWON B D. Geostatistical integration of spectral and spatial information for land-cover mapping using remote sensing data[J]. Geosciences Journal, 2003, 7(4):335-341.

14 SALES M H, SOUZA C M, KYRIAKIDIS P C, et al. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondônia, Brazil[J]. Ecological Modelling, 2007, 205(1-2):221-230.

15 ELDEIY A A, GARCIA L A. Comparison of ordinary Kriging, regression Kriging, and CoKriging techniques to estimate soil salinity using LANDSAT images[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2015, 136(6):355-364.

16 DUNGAN J. Spatial prediction of vegetation quantities using ground and image data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(2):267-285.

17 AKHAVAN R, KIA-DALIRI H. Spatial variability and estimation of tree attributes in a plantation forest in the Caspian region of Iran using geostatistical analysis [J]. Caspian Journal of Environmental Sciences, 2010, 8(2):163-172.

18 VIANA H, ARANHA J, LOPES D, et al. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models[J]. *Ecological Modelling*, 2012, 226: 22 – 35.

19 WANG Guangxing, ZHANG Maozhen, GERTNER G Z, et al. Uncertainties of mapping aboveground forest carbon due to plot locations using national forest inventory plot and remotely sensed data[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2011, 26(4): 360 – 373.

20 DU Huaqiang, ZHOU Guomo, FAN Wenyi, et al. Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory[J]. *Plant Ecology*, 2010, 207(1): 131 – 139

21 MENG Qingmin, CIESZEWSKI Chris, MADDEN Marguerite. Large area forest inventory using Landsat ETM + : a geostatistical approach[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(1): 27 – 36.

22 李艳丽, 杨华, 亢新刚, 等. 长白山云冷杉针阔混交林天然更新空间分布格局及其异质性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 311 – 317.
LI Yanli, YANG Hua, KANG Xin'gang. Spatial heterogeneity of natural regeneration in a spruce-fir mixed broadleaf-conifer forest in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 311 – 317. (in Chinese)

23 曾春阳, 唐代生, 唐嘉锴. 森林立地指数的地统计学空间分析[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3465 – 3471.
ZENG Chunyang, TANG Daisheng, TANG Jiakai. Spatial pattern analysis of forest ecosystem site index using geostatistical technology[J]. *Acta Ecologica Sinaica*, 2010, 30(13): 3465 – 3471. (in Chinese)

24 PAVEL Propastin. Modifying geographically weighted regression for estimating aboveground biomass in tropical rainforests by multispectral remote sensing data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 82 – 90.

25 刘琼阁, 彭道黎, 涂云燕. 基于偏最小二乘回归的森林蓄积量遥感估测[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(2): 81 – 84, 132.
LIU Qiongge, PENG Daoli, TU Yunyan. Estimation of forest stock volume based on partial least squares regression[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(2): 81 – 84, 132. (in Chinese)

26 孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 1996: 18 – 19.

27 冯益明. 空间统计学理论及其在林业中的应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.

28 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 35 – 141.

29 范磊, 程永政, 郑国清, 等. 基于 Cokriging 插值修正冬小麦面积遥感监测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 206 – 211.
FAN Lei, CHENG Yongzheng, ZHENG Guoqing, et al. Monitoring of winter wheat area by remote sensing based on Cokriging[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(10): 206 – 211. (in Chinese)

30 石淑芹, 陈佑启, 李正国, 等. 基于土壤类型和微量元素辅助信息的土壤属性空间模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(12): 199 – 205.
SHI Shuqin, CHEN Youqi, LI Zhengguo, et al. Spatial interpolation of soil properties based on soil types and trace micro-elements[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 199 – 205. (in Chinese)

31 LIU Xingmei, WU Jianjun, XU Jianming. Characterizing the risk assessment of heavy metals and sampling uncertainty analysis in paddy field by geostatistics and GIS[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(2): 257 – 264.

(上接第 339 页)

17 YUAN W, SCHNERR G H. Numerical simulation of two-phase flow in injection nozzles interaction of cavitation and external jet formation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2003, 125(6): 963 – 969.

18 左承基, 钱叶剑, 徐天玉, 等. EGR 与富氢进气对柴油机性能和排放的影响[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(4): 12 – 15.
ZUO Chengji, QIAN Yejian, XU Tianyu, et al. Effect of EGR and intake hydrogen enrichment on performance and emissions of automotive diesel engine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(4): 12 – 15. (in Chinese)

19 PAYRI F, BENMUDZ V, PAYRI R, et al. The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles[J]. *Fuel*, 2004, 83(4): 419 – 431.

20 孙春华, 宁智, 吕明, 等. 气泡雾化喷嘴气体溢出过程声波信号的时频特征研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 315 – 322.
SUN Chunhua, NING Zhi, LÜ Ming, et al. Time-frequency characteristics of acoustic signal in gas flowing process of effervescent spray nozzle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 315 – 322. (in Chinese)