

刘晓梅,布仁仓,邓华卫,胡远满,刘志华,吴志伟. 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. 生态学报, 2011, 31(16): 4783-4790.

Liu X M, Bu R C, Deng H W, Hu Y M, Liu Z H, Wu Z W. Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(16): 4783-4790.

## 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

刘晓梅<sup>1,2</sup>, 布仁仓<sup>1,\*</sup>, 邓华卫<sup>1,2</sup>, 胡远满<sup>1</sup>, 刘志华<sup>1</sup>, 吴志伟<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于丰林保护区 1997 年样地调查数据, 根据一元生物量估测模型, 计算样地生物量, 在此基础上, 利用 ArcGIS 地统计插值方法得到整个研究区森林生物量分布, 并从林分结构(林型、林龄组)和地形因子(海拔、坡度、坡向)两个方面对保护区森林生物量空间格局进行了分析。结果表明, 利用地统计插值得到区域水平的森林生物量是可行的, 保护区森林平均生物量水平为 171.5 t/hm<sup>2</sup>, 总生物量为 3.08 Tg(1 Tg=10<sup>12</sup> g); 不同林分结构(林型、林龄组)有不同的生物量水平; 地形因子与生物量有显著的相关性, 并得到它们之间的回归方程, 为保护区森林生态系统的可持续经营提供了科学依据。

**关键词:** 生物量; 地统计插值; 空间格局分析; 丰林保护区

## Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics

LIU Xiaomei<sup>1,2</sup>, BU Rencang<sup>1,\*</sup>, DENG Huawei<sup>1,2</sup>, HU Yuanman<sup>1</sup>, LIU Zhihua<sup>1</sup>, WU Zhiwei<sup>1,2</sup>

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The biomass of 120 randomly selected from 158 sample plots, were calculated based on forest inventory data in 1997, Fenglin National Nature Reserve, Northeastern China, through the biomass estimation model. In addition, the remaining 38 sample plots were used to validate the model with correlation coefficients between the predicted and real values. Furthermore, the spatial distribution of forest biomass for each cell of the study region was derived by the spatial interpolation with geostatistics of ArcGIS on the biomass of those plots, and the relationship between the spatial distribution pattern of biomass, forest structures (including 8 forest type and 5 age groups) and terrain factors (including elevation, aspect and slope) were analyzed. The results showed that the interpolation method is mostly available method to estimate forest biomass based on forest inventory point data, since the predicted and real biomass was mostly correlated ( $R^2 = 0.78$ ). Spatially, the biomass varied obviously in this region, it ranged from 41.6 t/hm<sup>2</sup> to 376.9 t/hm<sup>2</sup>, and at average the biomass was 171.5 t/hm<sup>2</sup>. The total biomass of this region kept up to 3.08 million ton for that time. Respect to forest biomass and forest structure, the biomass varied significantly with forest age, and increased with increasing forest age. The oldest forest yielded more biomass than younger forest; the biomass for the former was up to 174.8 t/hm<sup>2</sup> and for the latter reached 155.1 t/hm<sup>2</sup>. In addition, the biomass varied with forest type, and decrease from coniferous forest (e. g. fir-spruce forest), conifer-deciduous mixed forest (e. g. mixed Korean pine forest) to deciduous forest. The biomass in

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项-应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050201); 国家林业公益性行业专项(200804001); 国家自然科学基金项目(30870441)

收稿日期: 2010-09-19; 修订日期: 2010-12-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Burc@iae.ac.cn

coniferous forest, conifer-deciduous mixed forest and deciduous forest were 175.0 t/hm<sup>2</sup>, 162.5 t/hm<sup>2</sup>, and 156.7 t/hm<sup>2</sup>, respectively. Respect to forest biomass and terrain factors, the biomass was significantly affected by the terrain factors. The sites at the increasing elevation yielded lower biomass, and at the gradient of elevation (from 250 m to 700 m) the biomass decreased from 175.0 t/hm<sup>2</sup> to 155.1 t/hm<sup>2</sup>. The sites at the wet-cold aspect showed higher biomass than that on dry-warm aspect, and at the gradient it ranged from 174.0 t/hm<sup>2</sup> to 163.5 t/hm<sup>2</sup>. However, the relationship between slope index and the biomass showed more complicated results, the biomass decreased from 176.0 t/hm<sup>2</sup> to 167.0 t/hm<sup>2</sup> while the slope increased from 0° to 24°, and then increased to 175.0 t/hm<sup>2</sup> while slope continue to increase. Our results would be a guide to forest manager to estimate the biomass based on the inventory data, and provide a way to mitigate forest type and age to control local biomass and carbon stocks.

**Key Words:** forest biomass; interpolation; spatial pattern analysis; Fenglin Nature Reserve

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,自身维持着大量的植被碳库(约占全球植被碳库的86%以上),同时森林也维持着巨大的土壤碳库(约占全球土壤碳库的73%)<sup>[1]</sup>,与其它陆地生态系统相比,森林生态系统具有较高的生产力,每年固定的碳约占陆地生态系统的三分之二<sup>[2-3]</sup>,在维持全球气候稳定、调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用<sup>[4]</sup>。森林生物量是森林生态系统物质循环与能量流动的基础,是衡量森林生产力的重要标志,也是评估森林碳收支的重要参数<sup>[5]</sup>。近年来,森林生物量估算已成为现代林业科研的热点问题<sup>[6]</sup>。

森林生物量的估算方法有直接测量和间接估算2种<sup>[7]</sup>:直接测量即收获法,准确度高,但是耗时耗力,对森林有一定的破坏性;间接估算包括生物量模型、生物量估算参数及3S技术等方法<sup>[8]</sup>。目前测定生物量的方法主要是间接估算,即根据样木测定及样地调查数据,外推到较大范围内进行估算,该方法的难点就是要解决尺度推移过程中产生的误差<sup>[9]</sup>。随着GIS和空间统计技术的发展,地统计学方法在研究森林土壤更新过程、养分和水分空间变异以及物种空间分布格局、森林干扰、林分因子、地表死可燃物载荷量和种子资源的空间格局等方面取得了成功的应用<sup>[10-11]</sup>,已成为分析森林生态系统(病虫害、土壤和林木)空间变化的重要工具<sup>[12-13]</sup>。然而,地统计学在森林生物量的估测方面的研究尚不多见,缺乏应用的基础,地统计方法可以在生物量空间异质性分析基础上实现区域尺度生物量估测,为此,本文基于丰林国家级自然保护区1997年158个样地调查数据,利用一元生物量估测模型<sup>[14-15]</sup>,生成样地生物量数据库,在此基础上利用GIS地统计插值对丰林保护区森林生物量进行了估测,实现了样地尺度推移到区域尺度森林生物量估测,并从林分结构(林型和林龄组)和地形(海拔、坡度、坡向)两个方面分析了森林生物量的空间分布格局,为保护区森林生态系统可持续管理提供了科学依据。

## 1 研究区概况

丰林国家级自然保护区位于我国东北小兴安岭南坡北段,黑龙江省北部伊春市五营区境内(128°59′—129°15′E, 48°02′—48°12′N),总面积是18165hm<sup>2</sup>。大陆性季风气候,年均温为-0.5℃,年平均降水量640.5mm,主要集中在6—9月,空气相对湿度为73%,无霜期120d左右,土壤为山地棕色森林土,土层厚20—50cm,生长期间雨量集中,温度适宜,有利于植被生长。全区属于低山丘陵地形,呈孤岛状,三面环水,低洼,地势由北、东南部边缘向中部缓慢抬高,台地与谷地较宽,海拔高度在285—688m,以中部低山所占面积最大,海拔高度集中在300—450m,地段占65%以上。山地一般顶部浑圆,坡度为10°—35°,最大坡度为50°,平缓地段占90%以上,境内主要河流有汤旺河、丰林河、平原河等9条河流,以及季节性流水小溪,纵贯全区,构成完整水系。

保护区地带性植被类型为以红松为优势的针阔混交林,属于中国东北区长白植物区系小兴安岭亚区<sup>[16]</sup>。森林覆被率为95%,是我国目前原始红松林生态系统保存最完整、面积最大的近纯天然的原始林,主要针叶乔木树种有红松(*Pinus koraiensis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、冷杉(*Abies*

*nephrolepis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)等,主要阔叶乔木树种有白桦(*Betula platyphylla*)、枫桦(*Betula costata*)、黑桦(*Betula davurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、紫椴(*Tilla amurensis*)、糠椴(*Tilla mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)等。保护区是小兴安岭南坡森林物种、基因、群落和生态系统演替规律的缩影,是珍贵的“森林遗产”,对指导现有森林如何持续经营有着重要的现实意义。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

丰林保护区森林资源调查数据:在每个公里网格交叉点上机械设置 0.06hm<sup>2</sup>样地,进行每木检尺(胸径,树高等),起测胸径标准为 6cm。

丰林保护区图件:丰林保护区的林相图(2000年)、数字高程模型 DEM 及相关资源数据库。

### 2.2 GIS 软件和统计软件

本研究采用 ArcGIS(9.3)进行森林生物量的空间插值估测和空间格局分析;采用软件 PC-Ord 5.0 进行统计分析并对最后插值结果验证分析。

### 2.3 研究方法

#### 2.3.1 样地生物量计算

采用 158 块样地检尺数据,根据一元生物量估测模型<sup>[14-15]</sup>(表 1)计算每株乔木的生物量(包括地上和地下部分的生物量)统计各样地的总生物量,将单位面积生物量作为实测值,在 ArcGIS 中通过关键字段实现生物量数据与点状图属性表的关联,最终生成每个样地的生物量数据库。

表 1 研究区各树种生物量方程<sup>[14]</sup>

Table 1 The biomass equation of the species in the study area

树种 Species	生物量方程 Biomass equation
红松 <i>Pinus koraiensis</i>	$W = 0.063 D_{1.3}^{2.52134}$
云杉 <i>Picea jezoensis</i> & <i>Picea koraiensis</i> , 冷杉 <i>Abies nephrolepis</i>	$W = 0.0737 D_{1.3}^{2.51264}$
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	$W = 0.0267 D_{1.3}^{2.83184}$
白桦 <i>Betula platyphylla</i> , 枫桦 <i>Betula costata</i> , 黑桦 <i>Betula davurica</i>	$W = 0.2227 D_{1.3}^{2.26251}$
黄檗 <i>Phellodendron amurense</i> , 水曲柳 <i>Fraxinus mandshurica</i>	$W = 101.871 + 2.468 \times \log_{10} D_{1.3}^{15}$
紫椴 <i>Tilla amurensis</i> , 糠椴 <i>Tilla mandshurica</i>	$W = 0.0549 D_{1.3}^{3.36032}$
山杨 <i>Populus davidiana</i>	$W = 0.6858 D_{1.3}^{1.9138}$
蒙古栎 <i>Quercus mongolica</i>	$W = 0.34433 D_{1.3}^{2.212}$
春榆 <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japojica</i>	$W = 0.0980 D_{1.3}^{2.2998}$
色木槭 <i>Acer mono</i>	$W = 1.9394 D_{1.3}^{1.6483}$

$D_{1.3}$ 表示胸径,  $W$ 表示生物量

#### 2.3.2 生物量插值及验证

利用 ArcGIS(9.3)软件将 158 块样地数据随机生成两部分,其中 120 个点用来插值,38 个点用来验证最后插值结果。利用地统计模块进行样地数据的统计分析、变异函数的计算、理论变异函数的最优拟合及检验,最后运用克吕格插值,实现整个研究区生物量的估测,结合地统计模块交叉验证的结果,并采用 PC-Ord 5.0 对 38 个实测值和预测值统计比较,验证插值的可行性。

#### 2.3.3 生物量空间格局分析

利用变异函数拟合的相关参数,分析生物量的空间异质性及其主要影响因素(内部因素),选择林分结构(林型、林龄组)和地形因子(海拔、坡度、坡向)两个方面分析森林生物量的空间格局。

利用保护区林相图及资源数据库提取保护区林型及林龄组的分布图,其中林型在董云宝<sup>[17]</sup>研究基础上加以概括,划分为人工樟子松、落叶松林、椴树红松林、阔叶林、针阔混交林、云冷杉林、枫桦红松林和云冷杉红

松林 8 个林型 统计分析不同林型和林龄组生物量空间分布。

利用保护区数字高程模型 DEM 提取海拔、坡度和坡向地形因子,其中坡向采用太阳辐射坡向指数 (TRASP) 来表示<sup>[18]</sup>,其公式为:

$$\text{TRASP} = \frac{1 - \cos(\pi/180) (\text{Aspect} - 30)}{2} \quad (1)$$

式中, $\pi$  圆周率=3.1415926,Aspect 表示坡向,TRASP 的范围为 0—1,0 表示最冷、湿的坡向,1 表示最热、干的坡向。利用 PC-Ord 5.0 统计分析地形因子与森林生物量的关系。

### 3 结果与分析

#### 3.1 样地生物量的统计分析

地统计空间插值过程 需要事先对样本数据的分布特征进行分析,变异函数的计算一般要求待插值数据符合正态分布,要求平均值与中值大致相等,偏度为 0,峰度为 3<sup>[19]</sup>,否则可能会使变异函数产生比例效应<sup>[20]</sup>。从统计分析结果(表 2)可见,样地生物量数据服从正态分布,可以进行地统计插值。

表 2 研究区样地生物量的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of biomass in the study area ( $n=120$ )

样地生物量 Biomass/(t/hm <sup>2</sup> )					峰度	偏度
最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	中值 Median	标准差 Std. Dev	Kurtosis	Skewness
41.57	376.89	172.89	170.84	59.504	3.3686	0.4702

#### 3.2 变异函数模型的选择

对样地生物量数据进行变异函数拟合,并选择最优模型:结构比( $C/C_0+C$ )表示自相关部分引起的空间异质性的 高低,研究认为结构比>75%时,系统具有强烈的空间相关性;结构比在 25%—75%,表明系统具有中等相关性;结构比<25%,说明系统的相关性很弱。3 种模型的结构比都高于 75%,具有强烈的空间相关性,可以进行地统计插值。变异函数模型选择标准为决定系数大,残差小,由表 3 得到,选用球状变异函数模型,采用变异函数相关参数,在 GIS 中实现克吕格插值,得到保护区生物量分布图(图 1,表 3)。

#### 3.3 插值结果的验证

Arc GIS 地统计模块采用交叉验证方法来评价插值的效果。交叉验证分析重复从已知数据集中删除一个采样点的过程,用剩下的采样点估算删除点的数值,并计算误差均值绝对值和误差均方根<sup>[21]</sup>等。其标准为:平均值最接近 0,均方根预测误差最小,平均标准误差

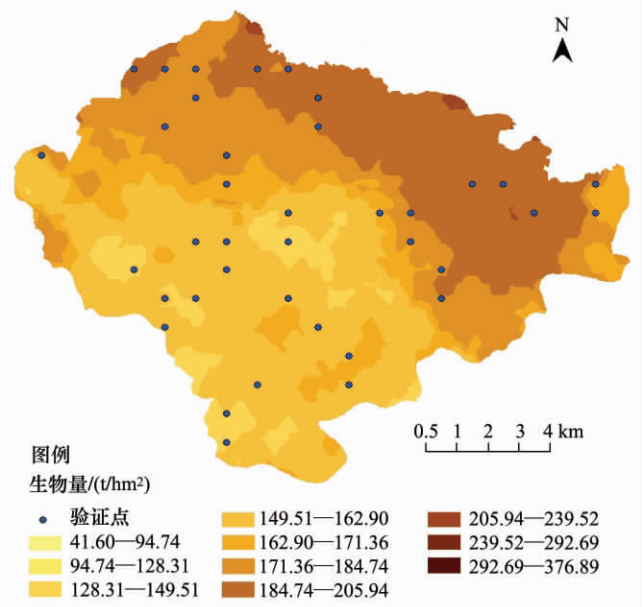


图 1 研究区生物量空间分布图

Fig. 1 The spatial distribution of biomass in the study area

表 3 生物量变异函数的相关参数值

Table 3 Parameters of variogram models for biomass

模型 Model	决定系数 R <sup>2</sup>	残差 Residual SS	块金 Nugget	基台 Still	结构比 Structural ratio	变程 Range
球状 Spherical	0.799	110546	30	3526	0.991	1630
高斯 Gaussian	0.744	129042	230	3524	0.935	1470
指数模型 Exponential	0.797	110913	330	3527	0.906	1385

最接近均方根预测误差,标准均方根预测误差最接近 1<sup>[22]</sup>。参照标准,交叉验证的结果(表 4)得到克吕格插值是可行的,这种交叉验证方法一般是不同插值方法进行对比时采用的方法,本文插值结果的验证最终采用 PC-Ord(5)对 38 个实测数据和插值数据进行统计分析,结果如图 2,  $y = 0.8309x + 35.001$ ,  $R^2 = 0.7836$ ,克吕格插值精度较高,是一种可行的方法。

表 4 研究区生物量实测值与预测值交叉验证的结果

Table 4 Cross Validation of measured and predicted value for biomass in the study area

误差平均值 Mean	误差均方根 Root-Mean-Square	平均标准误差 Average Standard Error	标准平均值 Mean Standardized	标准均方根误差 Root-Mean-Square Standardized
0.5294	60.03	60.29	0.008088	0.9961

### 3.4 生物量空间格局分析

从图 1 可以看出,生物量在东北部、北部较高,最高为 370 t/hm<sup>2</sup>,西部及中部的生物量较低,生物量整体水平较高,平均生物量为 171.5 t/hm<sup>2</sup>,与二氧化碳信息中心(CDIAC)研究成果<sup>[23]</sup>相比,插值得到生物量是可行的,保护区总的生物量为 3.08Tg(1Tg = 10<sup>12</sup>g)。由表 3 可以得到保护区生物量具有强烈的空间相关性和空间异质性,结构比为 0.991,体现了空间结构(内部因素)对空间异质性贡献的大小,表明空间自相关因素是森林生物量空间异质性的主导因素,与保护区为原始森林,人为干扰少相符合,森林内部因子(地形、土壤、气候、物种等)对生物量分布格局的空间变异起主要作用。利用 ArcGIS 统计分析不同林型、林龄组及地形因子的生物量空间分布。

#### 3.4.1 不同林分结构(林型和林龄组)生物量的空间分布

从表 5 得到,幼龄林面积约为 10hm<sup>2</sup>,占森林总面积的 0.57%,平均生物量为 155.13t/hm<sup>2</sup>,总生物量约为 0.02Tg;中龄林面积约为 1550hm<sup>2</sup>,占森林总面积的 8.6%,平均生物量为 164.32t/hm<sup>2</sup>,总生物量为 0.25Tg;近熟林的面积约为 3078hm<sup>2</sup>,占森林总面积的 17.2%,平均生物量为 174 t/hm<sup>2</sup>,总生物量为 0.54Tg;成熟林面积为 7160hm<sup>2</sup>,占森林总面积的 40%,平均生物量为 169.74 t/hm<sup>2</sup>,总生物量为 121.5 万吨;过熟林面积为 6030 hm<sup>2</sup>,占森林总面积的 33.5%,平均生物量为 174.75 t/hm<sup>2</sup>,总生物量为 1.05Tg。平均生物量水平由高到低为过熟林>近熟林>成熟林>中龄林>幼龄林,近

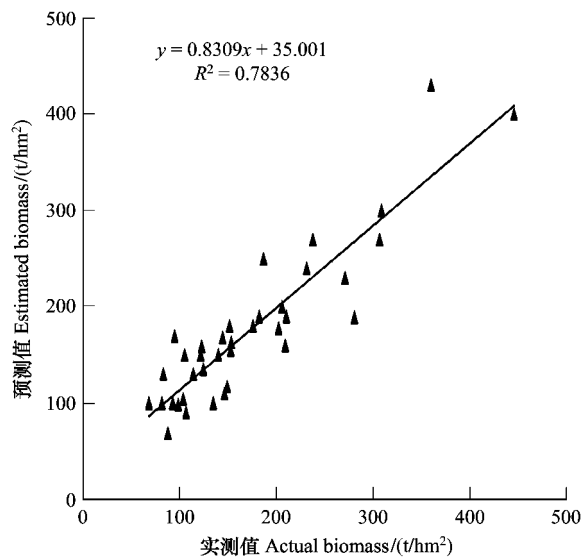


图 2 38 个样地实测值和预测统计比较

Fig. 2 Statistical comparisons between measured and predicted biomass in 38 samples

表 5 研究区不同林龄组的生物量

Table 5 The biomass of different age group in the study area

林龄组 Age group	面积/hm <sup>2</sup> Area	平均生物量/(t/hm <sup>2</sup> ) Mean biomass	总生物量/Tg Total biomass
幼龄林 Sampling	102.51	155.13	0.02
中龄林 Mid-age	1548.63	164.32	0.25
近熟林 Near-mature	3078.09	173.97	0.54
成熟林 Mature forest	7159.77	169.74	1.22
过熟林 Old-growth	6030.63	174.75	1.05
总计 Total			3.08

熟林中针叶林的比例大,所以生物量高于成熟林。总生物量水平从大到小为成熟林>过熟林>近熟林>中龄林>幼龄林,保护区森林以成过熟林为主,其生物量所占比重大。

从表6得到,不同林型有不同生物量水平,从大到小依次为云冷杉红松林>椴树红松林>云冷杉林>人工樟子松林>枫桦红松林>落叶松林>针阔混交林>阔叶林,不同林型所占的面积不同,总生物量水平相差很大,从大到小依次为云冷杉红松林>枫桦红松林>云冷杉林>针阔混交林>阔叶林>椴树红松林>落叶松林>人工樟子松,可见保护区森林以针叶林为主,其生物量水平约占总生物量水平的84%。

表6 研究区不同林型生物量

Table 6 The biomass of different forest type in the study area

林型 Forest type	面积/hm <sup>2</sup> Area	平均生物量/(t/hm <sup>2</sup> ) Mean biomass	总生物量/Tg Total biomass
人工樟子松 Scotch pine plantation	3.42	173.28	0.0005
落叶松林 Larch forest	99.45	171.26	0.02
椴树红松林 Tilia-Korean pine forest	897.03	174.82	0.15
阔叶林 Broad-leaved forest	1472.31	156.71	0.23
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	1458.99	162.45	0.25
云冷杉林 Spruce-fir forest	4123.62	174.17	0.72
枫桦红松林 Birch-Korean pine forest	4233.42	172.41	0.74
云冷杉红松林 Spruce-fir-Korean pine forest	5522.85	174.99	0.96
总计 Total			3.08

### 3.4.2 生物量与地形因子的关系

生物量随海拔的变化规律:由图3可以得到,随着海拔的升高,生物量呈现降低趋势,两者的回归关系为  $y = -0.0002x^2 + 0.1682x + 143.56$ ,  $R^2 = 0.755$ 。保护区云冷杉林及云冷杉红松林等针叶林分布在沟谷或者海拔低的下坡位,随着海拔的升高,分布为针阔混交林、阔叶林,从而生物量水平降低。

生物量随着坡度的变化规律:由图4可以得到,生物量随坡度变化是比较复杂的,随着坡度的增大,生物量先降低,当坡度达到25°左右,生物量开始升高。其回归关系为  $y = 0.0148x^2 - 0.7004x + 175.54$ ,  $R^2 = 0.5675$ 。保护区云冷杉林、云冷杉红松林分布在沟谷,生物量水平较高,中等坡度分布有针阔混交林、柞树红松林、部分云冷杉红松林、红松母树林等分布在陡坡,生物量水平也比较高。

生物量随坡向的变化规律:从图5可以看出,随着太阳辐射坡向指数的增加,生物量先升高,后降低,其回

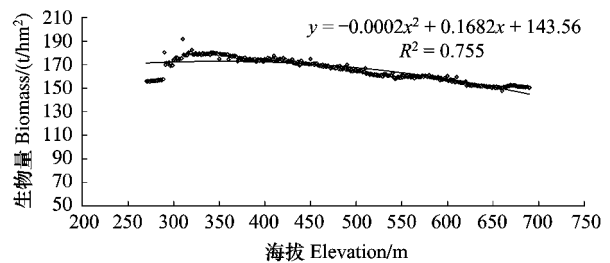


图3 研究区生物量与海拔的关系

Fig. 3 The relationship between biomass and elevation in the study area

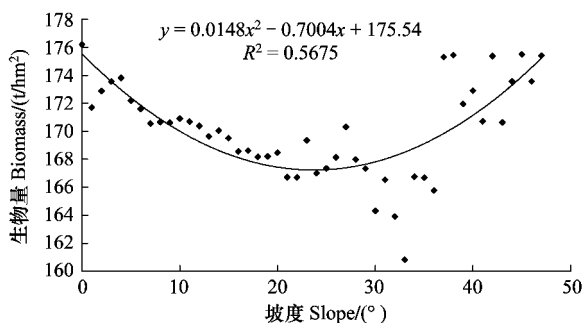


图4 研究区生物量与坡度的关系

Fig. 4 The relationship between biomass and slope in the study area

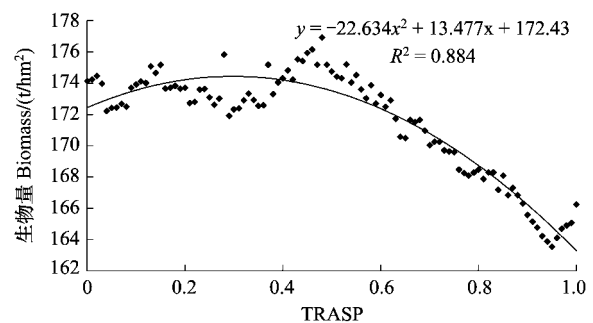


图5 研究区生物量与坡向(太阳辐射坡向指数)的关系

Fig. 5 The relationship between biomass and aspect (TRASP) in the study area

归关系为  $y = -22.634x^2 + 13.477x + 172.43$ ,  $R^2 = 0.884$ 。在阴湿的沟谷分布有云冷杉林及云冷杉红松林, 生物量较高, 当 TRASP 达到 0.55 左右的时候, 生物量就开始下降。可见, 保护区森林生物量在冷湿环境下较高, 而热、干环境下生物量偏低。

#### 4 讨论与结论

利用插值方法解决了尺度推移问题, 实现了由点到面的生物量空间分布格局。与传统的森林生物量估测方法相比, 其自身的优势体现在: 基于较少的样地数据, 就可以实现区域尺度生物量的估测, 方法较为简单, 直观可行, 精度较高; 利用地统计的变异函数分析生物量的空间异质性, 更深入的了解其空间分布格局。这种方法基于较少的样地数据即可得到区域水平上的生物量, 可以利用前期的调查数据, 例如森林一类清查数据, 插值实现生物量空间分布, 可以广泛应用到森林资源管理实践。

生物量估测方法很多, 关键是估测精度的提高, 这是当前森林生态学研究的热点和难点。生物量插值方法对样地数据的数量和分布有一定要求, 才能保证插值的可靠性, 其精度取决于样地生物量的精度及插值模型的选择, 如何选择合适的、针对性强的样地生物量计算方法很重要, 本文样地生物量计算过程中, 起测胸径是 6cm, 没有考虑胸径小于 6cm 的林木, 生物量估测会偏低。插值方法的选择最为关键, 今后研究中应注重对各种插值方法进行比较, 实现可以普适生物量最优插值方法, 基于地统计的插值方法还可以实现生物量空间分布异质性的分析。

从生物量的空间分布格局看出, 森林生物量空间分布具有明显的异质性。保护区东北部、北部生物量水平较高, 最高为  $370 \text{ t/hm}^2$ , 中部、南部生物量水平较低, 保护区人为干扰少, 成熟林、过熟林的面积比例大, 整体上生物量水平较高, 平均生物量为  $171.5 \text{ t/hm}^2$ , 总生物量为  $3.08 \text{ Tg}$ 。

林分结构(林龄组、林型)影响着森林生物量水平, 随着森林龄级的升高, 生物量增加, 生物量水平从幼龄林到近熟林依次增大, 成熟林的生物量稍低于近熟林, 过熟林的生物量最高, 保护区以成熟林、过熟林为主(面积占 75%), 其生物量多于总生物量的  $2/3$ , 保护区森林生态系统存在龄组老化现象。不同林型的生物量水平不同, 针叶林的平均生物量最高, 针阔混交林次之, 阔叶林生物量最低。保护区的针叶林(落叶松、人工樟子松、椴树红松林、枫桦红松林、云冷杉林、云冷杉红松林) 占总生物量 84%, 阔叶林与针阔混交林总生物量水平相差不大。

由于海拔、坡度和坡向的变化, 导致了温度、水分、光照等条件的变化, 引起森林生物量空间分布随海拔、坡度、坡向呈现一定的规律性: 随着海拔的升高, 生物量降低, 低海拔的生物量水平高; 随着坡度的增大, 变化趋势较为复杂, 生物量先下降后升高, 在沟谷、陡坡的生物量水平较高; 随着太阳辐射坡向指数的增加, 生物量先升高后降低, 阴湿环境下生物量水平较高。实现保护区森林生物量的估测及空间格局分析, 为保护区合理的经营与管理提供了科学依据。

#### References:

- [ 1 ] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 1982, 298( 5870 ): 156-159.
- [ 2 ] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Florida: Academic Press, 1985: 313-335.
- [ 3 ] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, 31( 1 ): 29-33.
- [ 4 ] Woodwell G M, Whittacker R H, Reiners W A, Likens G E, Delwiche C C, Botkin D B. Biota and the world carbon budget. *Science*, 1978, 199: 4325
- [ 5 ] Brown S, Sathaye J, Cannell M, Kauppi P E. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review ( United Kingdom )*, 1996, 75( 1 ): 80-90, 109-109, 111-112.
- [ 6 ] Li H K, Lei Y C. *Estimation and Evaluation of Forest Biomass Carbon Storage in China*. Beijing: China Forestry Press, 2010: 1-2.
- [ 7 ] West P W. *Tree and Forest Measurement*. Berlin: Springer-Verlag, 2009: 1-199.
- [ 8 ] Luo Y J, Zhang X Q, Wang X K, Zhu J H, Hou Z H, Zhang Z J. Forest biomass estimation methods and their prospects. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45( 8 ): 129-134.
- [ 9 ] Wang W F, Song L N, Sui X. Estimation of forest biomass and its temporal and spatial distribution patterns in Maershan Forest Farm,

- Heilongjiang Province. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(1): 47-49.
- [10] Feng Y M, Tang S Z, Li Z Y. Application of spatial statistic analysis in forestry. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(3): 149-155.
- [11] Liu Z H, Chang Y, Chen H W, Zhou R, Xing G Z, Zhang H X, Zhang C M. Spatial Pattern of land surface dead combustible fuel load in Huzhong forest area in Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 487-493.
- [12] Hock B K, Payn T W, Shirley J W. Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroa forest. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 1993, 23(3): 264-277.
- [13] Samra J S, Gill H S, Bhatia V K. Spatial stochastic modeling of growth and forest resource evaluation. *Forest Science*, 1989, 35(3): 663-676.
- [14] Chen C G, Zhu J F. *The Main Forest Biomass of Northeast Manual*. Beijing: China Forestry Press, 1989: 1-14.
- [15] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 9-16.
- [16] Li J W. *The Ecology and Management of the Pinus Mixed Forest*. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1997: 1-298.
- [17] Dong Y B, Song G H, Song Y, Xue C B, Ouyang Z Y, Wang X K. Index evaluation of forest sustainable management for Fenglin Nature Conservation. *Forestry Science and Technology*, 2000, 25(4): 18-20.
- [18] Roberts D W, Cooper S V. Concepts and techniques of vegetation mapping//Ferguson D, Morgan P, Johnson F D, eds. *Land Classifications Based on Vegetation: Applications for Resource Management*. Washington DC: US Department of Agriculture, 1989, 257: 90-96.
- [19] Wu X Q, Zhang H Y, Li R G, Zhang Z X, Dong G H. *ArcGIS 9 Geographic Information System Application and Practice*. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 432-435.
- [20] Vieira S R, Hatfield J L, Nielsen D R, Biggar J W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 1983, 58: 1246-1266.
- [21] Zhang W, Li C H, Jia X P, Chen P M, Fang L. Research on spatial Interpolation methods of Macro-benthic biomass. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(3): 351-356.
- [22] Tang G A. *Introduction to Spatial Analysis Using ArcGIS*. Beijing: Science Press, 2006: 452-455.
- [23] Carbon Dioxide Information Analysis Center. [2010-10-15]. <http://cdiac.ornl.gov>.

#### 参考文献:

- [6] 李海奎, 雷源才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010: 1-2.
- [8] 罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 侯振宏, 张治军. 森林生物量的估算方法及其研究进展. *林业科学*, 2009, 45(8): 129-134.
- [9] 王维芳, 宋丽楠, 隋欣. 帽儿山林场森林生物量估测及时空动态格局分析. *东北林业大学学报*, 2010, 38(1): 47-49.
- [11] 刘志华, 常禹, 陈宏伟, 周锐, 荆国志, 张红新, 张长蒙. 大兴安岭呼中林区地表死可燃物载荷量空间格局. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 487-493.
- [14] 陈传国, 朱俊凤. *东北主要林木生物量手册*. 北京: 中国林业出版社, 1989: 1-14.
- [16] 李景文. *红松混交林生态与经营*. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1997: 1-298.
- [17] 董运宝, 宋国华, 宋影, 徐存宝, 欧阳志云, 王效科. 丰林自然保护区森林可持续经营指标的评价. *林业科技*, 2000, 25(4): 18-20.
- [19] 吴秀芹, 张洪岩, 李瑞改, 张正祥, 董贵华. *ArcGIS 9 地理信息系统应用与实践*. 北京: 清华大学出版社, 2007: 432-435.
- [21] 张伟, 李纯厚, 贾晓平, 陈丕茂, 方良. 底栖生物量空间插值方法研究. *海洋通报*, 2010, 29(3): 351-356.