

近 30 年来小兴安岭地区生物量变化 及地统计分析

毛学刚, 李明泽, 范文义*, 姜欢欢

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 以 20 世纪 80 年代、90 年代、2000 年以后三个时期的遥感数据和同期的森林资源清查样地数据为基础, 应用遥感信息模型的方法, 估算了小兴安岭地区森林生物量, 并应用 GIS 和地统计相结合的方法, 研究了小兴安岭地区 20 世纪 80 年代、90 年代、2000 年以后三个时期的森林生物量时空变化、空间自相关性和异质性。结果表明: 研究区的生物量自上世纪 80 年代到 2000 年以后整体上呈现了波动变化, 研究区 80 年代低等级生物量占绝对优势, 生物量值普遍较低, 呈现低等级生物量连片化分布, 空间自相关程度较高, 但 80 年代的中高等级生物量的随机因素增强, 说明人为干扰程度不断加强。研究区 90 年代的中等级生物量占主要优势, 主要是 80 年代占优势的低等级生物量转化为中等级生物量。10 多年的变化说明, 生物量整体上呈恢复趋势; 由于数据主要集中在 90 年代末期, 天然林保护工程已经启动, 森林状态向着好的方向发展, 所以生物量值整体上有所提高。研究区 2000 年以后生物量整体上的空间自相关性不高, 但是中高等级生物量相近, 并且在各个方向上均匀变化, 中等级生物量呈现大片分布, 但高等级生物量斑块的规模较小, 破碎化仍然存在, 人为干扰等随机因素和空间自相关因素引起的空间变异相近, 出现稳定趋势。

关键词: 生物量; 森林生物量; 地统计; 小兴安岭

文章编号: 1000-0585(2011)06-1110-11

1 引言

森林是地球上最重要的陆地生态系统之一, 在全球变化研究中居重要地位, 作为陆地生态系统的主体, 森林植被生物量约占全球陆地植被生物量的 85%^[1, 2]。森林生物量是森林固碳能力的重要指标, 也是评估区域森林碳平衡的重要参数^[3, 4]。森林生物量是表征植物活动的关键变量, 对森林生物量的研究关系生态系统生产力、碳循环, 是全球变化研究的基础参数^[4]。因此, 准确地估算区域森林生物量对研究区域陆地生态系统的生产力、碳循环、营养元素格局和生物质能积累具有十分重要的意义^[5, 6]。对森林生态系统生物量进行实际调查和资料收集, 国外科学家早在 20 世纪 50 年代就已经开始, 比如日本、前苏联、英国等国^[7, 8]。在国际生物学计划 (IBP) 期间, 全球森林生物量的研究工作得到了很大的发展。我国森林植被生物量的研究开始于 20 世纪 70 年代末 80 年代初, 冯宗炜、李文华等最早开始对中国森林植被生物量进行了测定。康蕙宁、罗天祥、马钦彦、王效科

收稿日期: 2010-08-28; 修订日期: 2011-01-18

基金项目: 国家林业局 948 项目 (2011-4-80); 中央高校科研业务经费专项资金项目 (DL09EAQ01)

作者简介: 毛学刚 (1981-), 男, 黑龙江省哈尔滨人, 博士研究生, 研究方向为 3S 技术及其应用。

E-mail: maoxuegang@yahoo.com.cn

通讯作者: 范文义 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为 3S 技术及其应用。

等随后开展了对大区域森林生物量的模拟研究^[9-12]。传统的森林生物量统计需要进行大量的实地调查,工作量大,周期长,并对森林形成一定的破坏作用。因此在需要精确推测大面积林分生物量和生产力时,待测的林分每木检尺数据往往难以获得。随着遥感技术的普及,利用遥感技术和地理信息系统等先进手段可以测定从林分到区域等不同空间尺度的森林生物量。目前森林生物量的研究存在以下几个问题:第一:森林生物量建模野外实测数据的代表性存在局限^[13]。一方面,是野外实测数据不足;另一方面是实测数据的样地分布不能遍及研究范围。第二:基于森林资源清查数据进行生物量估测,难以获得时空尺度一致的实测数据资料;第三:对森林生物量研究缺乏时间的连续性,以及缺乏对生物量多角度分析的深入研究。正是基于以上问题,本文以20世纪80年代、90年代、2000年以后三个时期的遥感数据和同期的森林资源清查样地数据为基础,应用遥感信息模型的方法,估算了小兴安岭地区森林生物量,并应用地统计和GIS相结合的方法分别从空间自相关程度、空间变异主导因子以及空间变异方向性等方面展开分析,并指出了这些特征所表征的地学意义。

2 研究区域概况

小兴安岭地区位于中国黑龙江省东北部,地处北纬 $46^{\circ}28'$ ~ $49^{\circ}21'$,东经 $127^{\circ}42'$ ~ $130^{\circ}14'$ 。北部以黑龙江中心航线为界,与俄罗斯隔江相望,边境线长249.5km,是中国东北边疆的重要门户。林业施业区面积386万 hm^2 。林区森林茂密,树种较多。有林地面积280万 hm^2 ,森林覆被率为72.6%,活立木总蓄积2.4亿 m^3 。森林类型是以红松为主的针阔叶混交林。主要树种有红松、云杉、冷松、兴安落叶松、樟子松、水曲柳、黄菠萝、胡桃楸、杨、椴、桦、榆等,藤条灌木遍布整个施业区。

3 数据来源及研究方法

3.1 数据来源

3.1.1 样地数据 野外样地典型抽样调查数据主要从林业部门收集上世纪80年代(1985年)、90年代(1995年)、2000年以后(2005年)的森林资源连续清查固定样地数据。本研究收集的三个时期样地数据个数分别为907个、1182个、1568个。

3.1.2 遥感数据 本研究的遥感数据主要采用美国Landsat系列卫星影像,80年代的遥感数据使用拍摄时间为1987年为代表的Landsat-TM数据;90年代的遥感数据使用拍摄时间为1999年为代表的Landsat-ETM数据;2000年以后的遥感数据使用拍摄时间为2007年为代表的Landsat-TM数据。遥感影像获取时,因太阳位置、大气条件、传感器成像、地形起伏、遥感平台姿态、地球自转等多种因素的作用,对遥感影像有一定程度的影响,因此有效的消除各种因素对遥感影像的影响能够达到增强信息量,提高光谱特征精确度,细化影像纹理特征的目的,遥感影像经过预处理后要能够全面准确的反应出研究区的地表信息。遥感数据的预处理包括多光谱数据组建、几何校正、辐射定标、大气校正、多时相辐射归一化处理等过程。

3.2 样地生物量计算及森林生物量估算模型建立

结合遥感数据的特点,本文研究的是地上森林生物量。样地生物量有乔木、灌木和草本三部分组成,乔木生物量计算方法为:首先将样地内林木的胸径代入相应树种的树高模型得到树高,再将同一树种各器官(包括茎、枝、叶)生物量累加,得到该树种生物量。

将同一样地的生物量按不同树种累加求和, 最后除以样地面积 (0.06hm^2 或 0.1hm^2) 得到不同样地的单位面积的乔木生物量。灌木草本生物量的计算方法为: 首先建立灌木草本生物量与高度的模型; 然后根据固定样地中记录的灌木和草本高度代入模型计算生物量, 乘以盖度得到该样地的灌木草本总生物量; 最后除以样地面积得到不同样地的单位面积的灌木、草本生物量。乔木、灌木和草本的生物量计算完毕后相加得到单位面积样地总生物量, 模型如表 1 所示。

大量研究表明^[14~16], 森林生物量与遥感光谱值、波段比值、地学因子(如海拔等)具有相关关系。因此, 本文以遥感光谱值、波段比值及地学因子等 20 个变量为自变量因子, 样地森林生物量为因变量, 应用逐步回归筛选相关显著的变量, 然后建立遥感地学因子与森林生物量的多元线性回归模型用于估测森林生物量, 森林生物量遥感估测模型如表 2 所示, 估算的生物量结果如图 1~3 所示。

表 1 灌木和草本生物量模型

Tab 1 Shrubs and herbaceous biomass

类型	生物量模型	N	R ²
灌木	$Bio = 0.0398 \times h - 0.3326$	38	0.88
草本	$Bio = 0.0175 \times h - 0.2888$	79	0.89

注: Bio 为生物量; h 为灌木或草本的高度

注: Bio 为生物量; gc 为高程; Y 为纵坐标; B_4 为 TM 的第 4 波段; B_5 为 TM 的第 5 波段; $NDVI = (TM_4 - TM_3) / (TM_4 + TM_3)$

表 2 生物量遥感估测模型

Tab 2 Estimation models of biomass by remote sensing

年代	生物量模型	N	R ²	预估精度/%
80 年代	$Bio = 0.0584 \times gc - 0.0198 \times B_5 - 0.00007 \times Y + 0.0032 \times B_4 + 434.6013$	333	0.71	72.41
90 年代	$Bio = -62.2040 \times NDVI - 13.9555 \times TM_3 - 0.0361 \times B_5 - 0.00006 \times Y + 565.0454$	433	0.72	74.45
2000 年以后	$Bio = 0.1112 \times gc - 0.0371 \times B_5 - 0.00003 \times Y + 0.0083 \times B_4 + 249.1515$	450	0.75	75.21

注: Bio 为生物量; gc 为高程; Y 为纵坐标; B_4 为 TM 的第 4 波段; B_5 为 TM 的第 5 波段; $NDVI = (TM_4 - TM_3) / (TM_4 + TM_3)$

3.3 生物量分级及随机生物量点提取

本研究采用 GIS 分析和地统计分析相结合的方法来分析研究区生物量的变化。在采用 GIS 方法分析研究生物量的变化时, 将森林生物量分为九个等级 ($0 \sim 20\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $20 \sim 40\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $40 \sim 60\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $60 \sim 80\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $80 \sim 100\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $100 \sim 120\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $120 \sim 140\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $140 \sim 160\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $> 160\text{t}/\text{hm}^2$), 以便于更精确的研究生物量的变化。在采用地统计方法研究生物量变化时将生物量分为三级: 低等级生物量 ($0 \sim 40\text{t}/\text{hm}^2$)、中等级生物量 ($40 \sim 80\text{t}/\text{hm}^2$)、高等级生物量 ($> 80\text{t}/\text{hm}^2$), 在三个等级中分别提取随机点(表 3), 通过地统计软件 GS+ 对研究区的生物量进行地统计分析。

3.4 数据分析

表 3 小兴安岭地区分等级采样点

3.4.1 空间自相关性分析

Tab 3 Ranks sampling point of Xiao Hinggan

年代	全局	低等级生物量	中等级生物量	高等级生物量
80 年代	475	118	219	200
90 年代	471	112	198	217
2000 年以后	471	196	199	200

对要素的空间自相关程度的具体测算有多种方法, 本研究采用了 Moran 于 1948 年提出的 Moran's I 系数衡量研究

区的生物量空间自相关度, 并对研究区内生物量的空间分布特征及其对领域的影响程度进行评价。Moran's I 系数的计算公式为:

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

式中, x_i 和 x_j 是变量 x 在相邻配对空间单元的取值, \bar{x} 是变量的平均值, w_{ij} 是相邻的权重, n 是空间单元总数, *Moran's I* 系数的取值在 -1 和 1 之间。从地学角度来理解, 如果 *Moran's I* 系数为正值, 表示生物量用倾向聚集, 空间分布具有较好的整体性; 如果 *Moran's I* 系数为负值, 表示空间分布呈现破碎化。使用 GS+ 软件计算研究区生物量的空间自相关性, 即 *Moran's I* 系数, 并将计算的结果导出到 Excel 中, 在 Excel 中绘制 *Moran's I* 系数图。

3.4.2 空间异质性分析 在地统计学中, 空间异质性分析主要采用半变异函数。半变异函数又称半变差函数、半变异矩, 是地统计分析的特有函数。区域化变量 $Z(x)$ 在点 x 和 $x+h$ 处的值 $Z(x)$ 与 $Z(x+h)$ 差的方差的一半称为区域化变量 $Z(x)$ 的半变异函数, 记为 $r(h)$, $2r(h)$ 称为变异函数。

公式为^[15,16]:

$$r(x, h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] \quad (2)$$

$$r(x, h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \quad (3)$$

$Z(x)$ 表示在 x 处的生物量, $Z(x+h)$ 表示距位置 x 距离为 h 样点的生物量。通过半变异函数可以得到地统计学的 4 个极其重要的参数: 块金值 (nugget) 用 C_0 表示, 但间隔距离 $h=0$ 时, 变异函数 $r(x, h) = C_0$, 该值称为块金值, 较大的块金值表示较小的尺度上的某种过程不可忽视。基台值 (sill) 用 C_0+C 表示, 当变异函数随着间隔距离的增大, 从非零值达到一个相对稳定的常数时, 该常数称为基台值, 基台值是系统或系统属性中最大的变异。基台值越大, 表示总的空间异质性程度越高; 块金值与基台值之比 $C_0/(C_0+C)$ 。反映块金值占空间异质性的程度, 可以用来判断随机因子对空间总变异的影响程度, 如果该比值较高, 说明随机部分引起的空间异质性程度高; 如果比值较低, 则景观中某一变量在整个尺度上具有恒定的变异, 则说明结构性成分引起的空间变异起主导作用。变程 (Range), 用 A_0 表示, 但变异函数达到基台值时的间隔距离 a 称为变程。变程表示在 $h \geq a$ 以后, 区域化变量 $Z(x)$ 的空间相关性消失。本文使用 GS+ 软件计算研究区生物量的半变异函数, 分别得出不同年代的块金值、基台值、空间结构比、空间变异比、变程, 并对其进行分析。

4 结果分析

4.1 森林生物量 GIS 分析

由于小兴安岭地区森林面积保护的相对比较好, 另外 1998 年实施了天然林保护工程, 所以假定三期森林的面积无变化, 应用 GIS 软件, 利用前文所建立的森林生物量遥感估算模型计算出该地区的森林生物量, 然后再与 2000 年以后的土地类型图进行叠加分析, 去除该地区的非林地的生物量, 获得该地区的森林生物量。图 1~3 分别是 80 年代、90 年代、2000 年以后小兴安岭地区平均生物量的分布情况。从 80 年代平均生物量的空间分

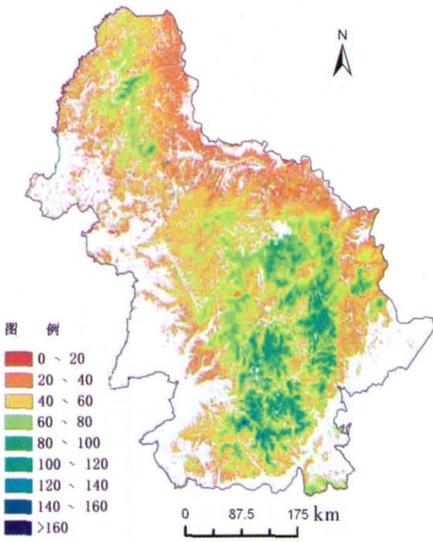


图 1 80 年代生物量等级分布

Fig. 1 Biomass ranks in the 1980s

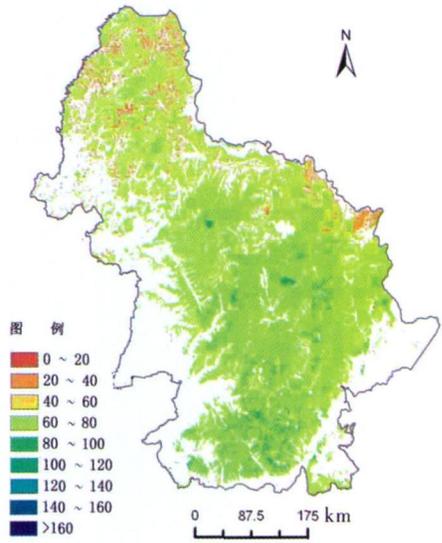


图 2 90 年代生物量等级分布

Fig. 2 Biomass ranks in the 1990s

布来看, 该区北部地区平均生物量比较低在 $0 \sim 20t/hm^2$ 之间, 中部地区平均生物量在 $20 \sim 40t/hm^2$ 之间, 南部地区平均生物量在 $40 \sim 60t/hm^2$ 之间, 在南部的个别地区平均生物量达到了 $80 \sim 100t/hm^2$ 。从 90 年代平均生物量的空间分布来看, 整个区域的平均生物量在 $40 \sim 60t/hm^2$ 之间; 从 2000 年以后年平均生物量的空间分布来看, 北部地区平均生物量主要集中在生物量比较低的三个等级在 $0 \sim 20t/hm^2$ 、 $20 \sim 40t/hm^2$ 、 $40 \sim 60t/hm^2$; 中部地区平均生物量主要集中在 $20 \sim 40t/hm^2$ 、 $40 \sim 60t/hm^2$ 两个等级, 南部地区平均生物量在 $120 \sim 140t/hm^2$ 之间。纵观研究区三个时期的森林生物量变化趋势基本保持一致, 都表现出从北向南逐步升高的趋势。

4 2 生物量空间自相关性分析

4 2 1 80 年代生物量空间自相关性分析 如图 4 所示, 研究区的森林生物量的在上世纪 80 年代表现出良好的空间自相关性, 在 1300m 范围内, 全局空间自相关性达到 0.56, 在 135° 方向的空间自相关程度最高为 0.618; 在 $0 \sim 6000m$ 范围内的森林生物量空间自相关各个方向的变化速度相同, 呈现各向同性; 除 90° 方向外, 其他各向在将 8000m 距离处的空间自相关逐渐接近 0, 而东西方向在 10000m 处有出现空间自相关系数的小峰值, 即 80 年代的东西方向的森林生物量具有多斑块东西排列的特点, 但是斑块的半径比较大。从图 5~7 三幅图中可以明显看出, 80 年代的低等级生物量的空间自相关性最佳, *Moran's I*

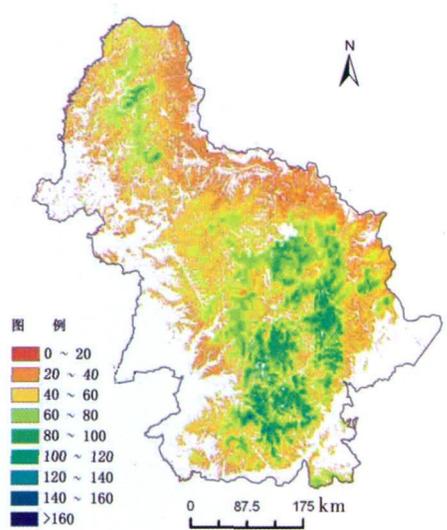


图 3 2000 年以后生物量等级分布

Fig. 3 Biomass ranks in the 2000s

系数最大值 0.618, 在 8000m 范围内低等级生物量的空间自相关随着距离加大各个方向均匀降低, 说明 80 年代的低等级生物量空间自相关性良好, 低等级生物量呈现低值聚集, 大斑块连片化分布; 相对于低等级生物量, 中等级生物量和高等级生物量的空降自相关性明显降低, 中等级生物量的 *Moran's I* 系数最大值不足 0.4, 高等级生物量的 *Moran's I* 系数最大值不足 0.2, 说明 80 年代的空间自相关性主要体现在低等级生物量, 中高等级生物量形势相对较弱。

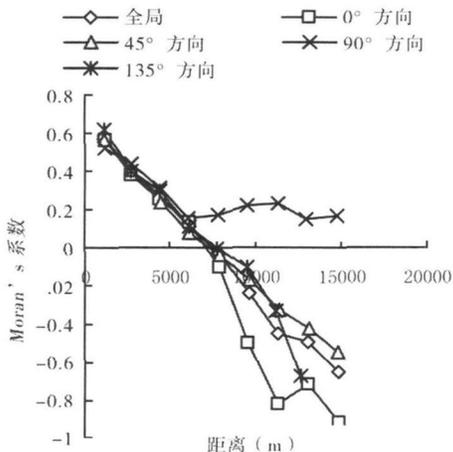


图 4 80 年代全局及各向 *Moran's I* 系数
Fig. 4 Global and each directions *Moran's I* coefficient in the 1980s

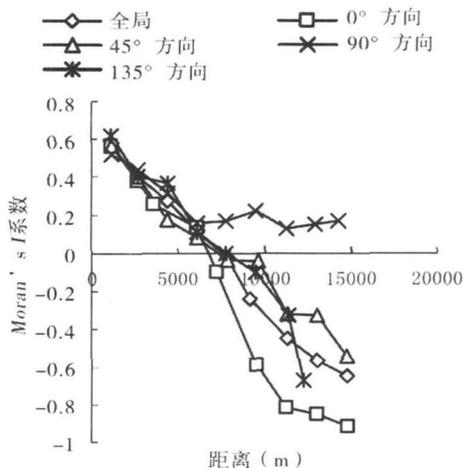


图 5 80 年代低等级生物量的 *Moran's I* 系数
Fig. 5 Lower biomass *Moran's I* coefficient in the 1980s

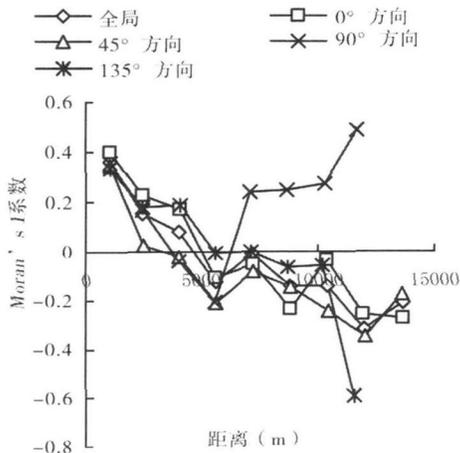


图 6 80 年代中等级生物量的 *Moran's I* 系数
Fig. 6 Medium biomass *Moran's I* coefficient in the 1980s

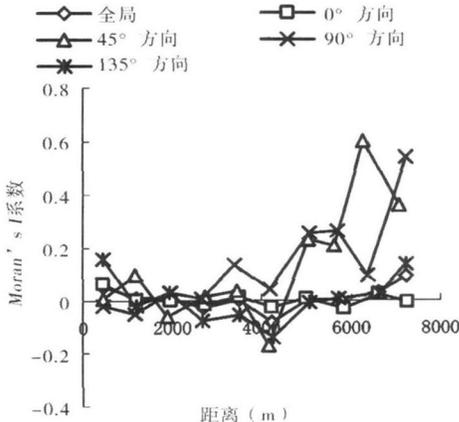


图 7 80 年代高等级生物量的 *Moran's I* 系数
Fig. 7 Higher biomass *Moran's I* coefficient in the 1980s

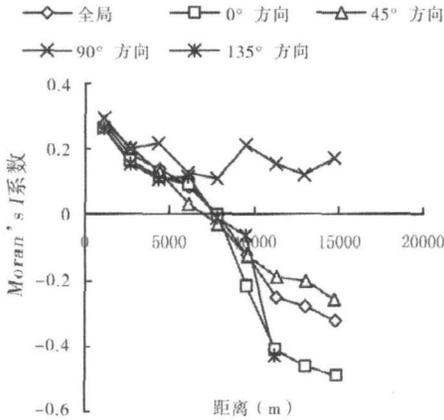


图 8 90 年代全局及各向 Moran's I 系数
Fig. 8 Global and each direction s Moran's I coefficient in the 1990s

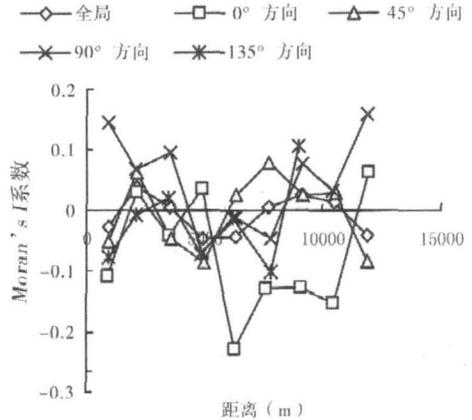


图 9 90 年代低等级生物量的 Moran's I 系数
Fig. 9 Lower biomass Moran's I coefficient in the 1990s

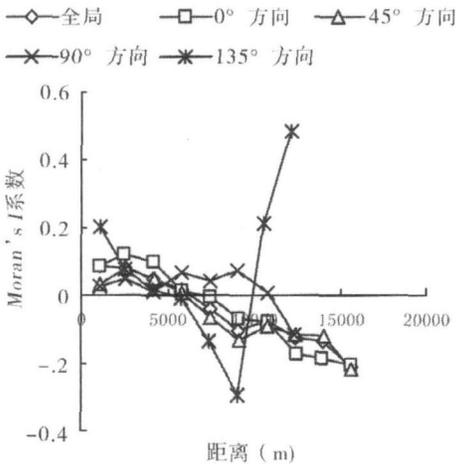


图 10 90 年代中等级生物量的 Moran's I 系数
Fig. 10 Medium biomass Moran's I coefficient in the 1990s

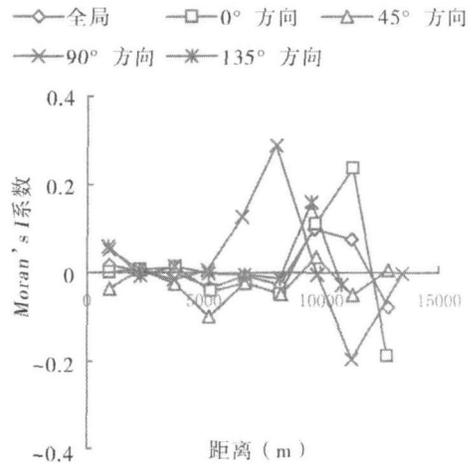


图 11 90 年代高等级生物量的 Moran's I 系数
Fig. 11 Higher biomass Moran's I coefficient in the 1990s

4 2 2 90 年代生物量空间自相关性分析 如图 8 所示, 90 年代森林生物量的空间变化较 80 年代复杂, 整体上看空间自相关的范围没有变化, 在 2500m 范围内存在各项同性的特点, 随着距离的逐渐加大, 空间自相关性逐渐减弱, 135°方向和 0°方向出现以 6000m 半径的生物量空间自相关大斑块聚集, 90°方向明显表现出与众不同的变化, 东西方向 4200m 和 9800m 处相继出现小高峰, 相对 80 年代, 90 年代的东西方向的斑块的半径减小, 森林生物量小斑块聚集更明显。从图 9~ 11 三幅图上可以明显看出 90 年代的森林生物量的空间自相关性极差, 低等级生物量的 Moran's I 系数最高值 0.14, 中等级生物量的 Moran's I 系数最高值 0.21, 高等级生物量的 Moran's I 系数最高值是 0.28; 并且从图上显示, 低等级生物量的空间自相关图十分错乱, 各个方向不统一, 曲线呈现多峰多谷说明生物量低值小斑块破碎聚集, 分布呈现破碎化; 相对于低等级生物量分布, 中等级生物量的空间自

相关图呈现一定的规律性, 6000m 范围内 $Moran's I$ 系数逐渐降低, 高等级生物量的 $Moran's I$ 系数十分小, 最高值不足 0.1, 说明高等级生物量的空间自相关程度很低, 80 年代的低等级生物量的优势转化为中等级生物量; 10 多年的变化说明, 生物量整体上呈恢复趋势, 由于数据主要集中在 90 年代末期, 天然林保护工程已经启动, 森林状态向着好的方向发展, 所以生物量值整体上有所提高。

4.2.3 2000 年以后生物量空间自相关性分析 如图 12 所示, 研究区 2000 年以后的森林生物量的空间自相关在 6000m 范围内各项变化程度相似, 45° 方向的空间自相关半径明显由以前的 7000m 左右缩小到 5000m 以内, 这说明 2000 年以后小兴安岭地区的东北西南方向出现明显破碎化现象, 90° 方向仍然保持着较好的整体连接性, 生物量聚集的斑块半径逐步扩大, 而 135° 方向的森林生物量在 9500m 以外急剧上升, 说明生物量在西北东南方向大斑块聚集度加大。从图 13~ 15 三幅图上可以明显看出研究区在 2000 以后的空间自相

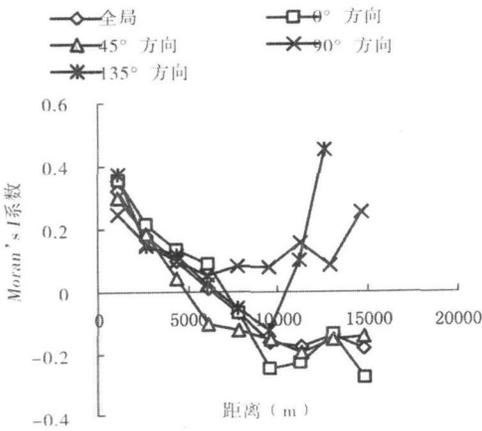


图 12 2000 年以后全局及各向 $Moran's I$ 系数
Fig. 12 Global and each directions $Moran's I$ coefficient in the 2000s

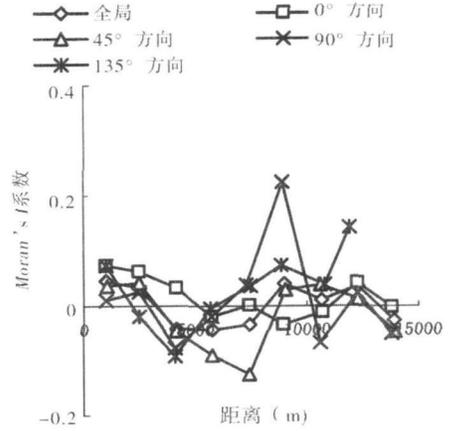


图 13 2000 年代低等生物量的 $Moran's I$ 系数
Fig. 13 Lower biomass $Moran's I$ coefficient in the 2000s

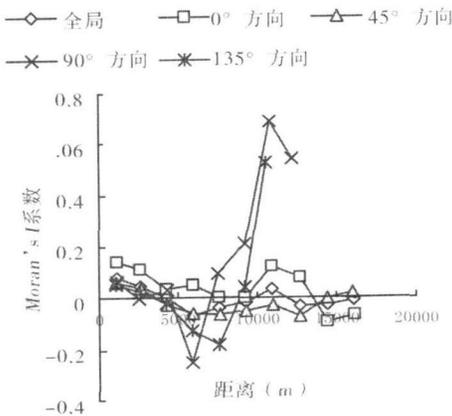


图 14 2000 年以后中等生物量的 $Moran's I$ 系数
Fig. 14 Medium biomass $Moran's I$ coefficient in the 2000s

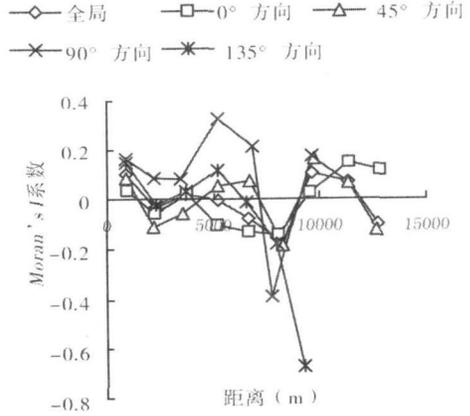


图 15 2000 年以后高等生物量的 $Moran's I$ 系数
Fig. 15 Higher biomass $Moran's I$ coefficient in the 2000s

关性整体不高,低等级生物量仍然呈现破碎状态,尤其是东西方向斑块破碎化严重;中等级生物量较低等级生物量的空间自相关程度强,但是 $Moran's I$ 系数仍然保持较低,说明中等级生物量的聚集度较低,呈现离散大面积连片化分布,并且斑块不破碎,整体性强;高等级生物量的 $Moran's I$ 系数小,空间自相关程度低,并且从图上看,高等级生物量的各个方向的斑块大小相近,呈现斑块均匀分布。

4.3 生物量空间异质性分析

4.3.1 80年代空间异质性分析 从表4看出,低、中、高等级生物量模拟 R^2 均大于0.4,全局的基台值高达610,说明整体上80年代的研究区呈现较好的空间变异性,空间结构比为0.918;而低等级生物量的基台值明显减小为152,说明其空间异质性较整体差,但变程较大,说明是连片分布在较大范围;而由自相关引起的空间结构变异比为55.3%,由随机因素引起的空间结构变异比为44.7%,表明随机因素引起的空间变异显著增强。从表4中得出,中、高等级生物量由自相关部分引起的空间变异减弱,而随机因素增强,说明人为干扰程度不断加强,包括砍伐,火烧等,使得中、高等级生物量减少。

表4 80年代半变异统计参数表

Tab 4 Semivariogram model and parameter in the 1980s

等级	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 A_0	$C_0 / (C_0 + C)$	$C / (C_0 + C)$	R^2
全局	球状模型	50	610	29650	0.082	0.918	0.965
1级	线性模型	77	172	30950	0.447	0.553	0.445
2级	指数模型	40	47	13540	0.99	0.010	0.410
3级	线性模型	45	47	7233	1	0	0.486

4.3.2 90年代生物量空间异质性分析 从表5可以看出,研究区全局基台值为654,由自相关引起的空间变异比为73.7%,表现出较高的空间异质性;低等级生物量的空间异质性较低,空间结构比和空间异质比均为50%,说明随机因素和空间自相关引起的空间变异各占一半,中等级生物量的由空间自相关引起的空间变异略有提高占52%,高等级生物量的由空间自相关引起的空间变异达到88.1%,说明90年代中高等级生物量值呈现整体提高趋势,空间异质性增强,空间结构更加复杂。

表5 90年代半变异统计参数表

Tab 5 Semivariogram model and parameter in the 1990s

时期	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 A_0	$C_0 / (C_0 + C)$	$C / (C_0 + C)$	R^2
全局	球状模型	172	654	33030	0.263	0.737	0.965
1级	指数模型	80	160	31100	0.5	0.5	0.761
2级	指数模型	136	272	41100	0.472	0.52	0.743
3级	高斯模型	80	670	15280	0.119	0.881	0.832

4.3.3 2000年以后生物量空间异质性分析 通过表6可以得出研究区全局基台值很高,说明整体上研究区的空间异质性很强,由空间自相关引起的空间结构比为62.5%,由随机因素引起的空间变异比为37.5%,说明整体上空间连接性较好,低、中、高等级生物量的空间结构比和空间异质比都是50%,说明2000年以后的各个等级生物量的空间异质程度相近,自然原因和人为活动的干扰程度相近,趋于稳定。

表 6 2000 年以后半变异统计参数表

Tab 6 Semivariogram model and parameter in the 2000s

时期	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 A_0	$C_0 / (C_0 + C)$	$C / (C_0 + C)$	R^2
全局	指数模型	434	1156	23530	0.375	0.625	0.983
1 级	线性模型	81	163	41100	0.5	0.5	0.476
2 级	指数模型	113	227	41100	0.5	0.5	0.483
3 级	高斯模型	136	273	41100	0.5	0.5	0.596

5 结论与讨论

本文和地统计应用遥感信息模型方法, 估算了小兴安岭地区森林生物量及其变化, 得出了以下结论:

(1) 研究区三个时期的森林生物量变化趋势基本保持一致, 都表现出从北向南逐步升高的趋势。80 年代到 2000 年以后森林生物量呈现逐渐升高的趋势, 其主要原因是 1998 年实行了天然林保护工程, 说明自从实行天然林保护工程以后天然林资源得到了有效恢复, 林地生产力也得到了提高, 并真正起到维持生态平衡的作用。

(2) 研究区 80 年代的生物量主要是低等级生物量占绝对优势, 生物量值普遍较低, 呈现低值生物量连片化分布, 空间自相关程度较高, 但 80 年代的中高等级生物量的随机因素增强, 说明人为干扰程度不断加强; 研究区 90 年代中等级生物量占主要优势, 相对于 80 年代的低等级生物量的优势转化为中等级生物量。10 多年的变化说明, 生物量整体上呈恢复趋势, 由于数据主要集中在 90 年代末期, 天然林保护工程已经启动, 森林状态向着好的方向发展, 所以生物量值整体上有所提高; 研究区 2000 年以后的生物量整体上的空间自相关性不高, 但是中高等级生物量相近, 并且在各个方向上均匀变化, 中等级生物量呈现大片分布, 但高等级生物量斑块的规模较小, 破碎化仍然存在, 而人为干扰等随机因素和空间自相关因素引起的空间变异相近, 出现稳定趋势。

需要进一步指出的是: 由于空间统计等具有显著的尺度效应, 本研究中采用了空间分辨率为 30m 的栅格数据, 研究所得到的有关结论是在该尺度上的表现; 如果采用更高分辨率的影像数据, 有可能会得到更为精细的结论。

参考文献:

- [1] 方精云. 北半球中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算. 植物生态学报, 2000, 24(5): 635~ 638
- [2] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 等. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 Science 一文(Science, 2001, 291: 2320~ 2322) 的若干说明. Acta Botanica Sinica, 2002, 26(2): 243~ 249
- [3] 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. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1468~ 1472
- [4] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, et al. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. Science, 1994, 263: 185~ 190
- [5] Alban D H, Perala D A, Schrage B E, et al. Biomass and nutrient distribution in aspen, pine, and spruce stands on the same soil type in Minnesota. Canadian Journal of Forest Research, 1978, 8: 290~ 295
- [6] Brown S L, Schroeder P, Kern J S, et al. Spatial distribution of biomass in forests of the eastern USA. Forest Ecology and Management, 1999, 123: 81~ 90
- [7] Mokany K, Raison J R, Prokushkin S A. Critical analysis of root: Shoot ratios in terrestrial biomes. Global Change Biology, 2006, 12: 84~ 96
- [8] Muukkonen P. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. European

Journal of Forest Research, 2007, 26: 157~ 166

- [9] 康蕙宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林 C 汇功能基本估计. 应用生态学报, 1996, 7(3): 230~ 234.
- [10] 罗天祥, 李文华, 冷允法, 等. 青藏高原自然植被总生物量的估算与净初级生产量的潜在分布. 地理研究, 1998, 17(4): 337~ 344
- [11] 马钦彦, 谢征鸣. 中国油松林储碳量基本估计. 北京林业大学学报, 1996, 18(3): 31~ 34
- [12] 王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 13~ 16
- [13] 赵敏, 周广胜. 中国北方林生产力变化趋势及其影响因子分析. 西北植物学报, 2005, 25(3): 466~ 471.
- [14] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. 利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量. 生态学报, 2002, 22(11): 1833~ 1839
- [15] 李凯辉, 胡玉昆, 王鑫. 不同海拔梯度高寒草地上生物量与环境因子关系. 应用生态学报, 2007, 18(9): 2020~ 2024
- [16] 杨存建, 刘纪远, 黄河, 等. 热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析. 地理研究, 2005, 24(3): 473~ 479
- [17] 杜国明, 张树文, 张有全. 城市人口分布的空间自相关分析——以沈阳市为例. 地理研究, 2007, 26(2): 384~ 389

Biomass changes and geostatistical analysis of Xiao Hinggan region in recent 30 years

MAO Xue-gang, LI Ming-ze, FAN Wen-yi, JIANG Huan-huan
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Based on remote sensing data from three periods of 1980s, 1990s, and the period after 2000 as well as the data of plots in forest resource inventory over the same periods, forest biomass of Xiao Hinggan region was estimated by using the remote sensing information model. With the combination of GIS and geo-statistics, this paper studies the temporal changes in forest biomass, spatial autocorrelation and heterogeneity of Xiao Hinggan region in the three periods of 1980s, 1990s, and the period after 2000. Results indicated that the overall biomass presented fluctuation change in the research area from the 1980s to the 2000s. With relatively low biological value, low-grade biomass was dominant in the 1980s, and there was contiguous distribution of low-value biomass, with high degree of spatial autocorrelation. However, the random factors of medium and higher biomass increased, indicating the man-made interference degree continuously strengthened. In the 1990s the main advantages biomass in the study area was medium biomass, which evolved from dominant low-grade biomass in the 1980s. The changes in the 10 years showed that overall biomass tended to recover. For the data were mainly concentrated in the late 1990s when the Natural Forest Protection Project (NFPP) had been launched that made the forest status towards a good direction, the overall biological value was increased. After 2000 the spatial autocorrelation of overall biomass in the research area was not high, but medium and higher biomass was similar and changed evenly in every direction. Median biomass was distributed widely, while high-value biomass was of small patches with fragmentation, and the spatial variability caused by random factors such as man-made disturbance or the factor of spatial autocorrelation was just similar, and appeared a stability trend.

Key words: biomass; forest biomass; geo-statistics; Xiao Hinggan region