生 态 学 报 2010,30(13):3465—3471
Acta Ecologica Sinica

森林立地指数的地统计学空间分析

曾春阳[1],唐代生[2,3,*],唐嘉锴[4]

(1.广西壮族自治区林业勘测设计院 南宁 530011;2.中南林业科技大学 长沙 410004;
3.武汉大学空间信息与数字工程研究中心 武汉 430079;4.衡阳市林业局 衡阳 421001)

摘要:森林生态系统立地质量的评估是森林生态系统经营管理和造林营林的重要理论基础与规划方法,也是研究森林生态系统生产力的重要内容。森林立地指数是一种已被普遍接受的评价森林立地质量的方法,然而由于技术所限,传统的森林立地指数调查方法因其耗时长、花费大,很难大面积的对森林立地指数进行估测和空间分析,地统计学结合地理信息系统技术为研究森林立地及空间格局提供了一条新的途径。以杉木人工林为研究对象,地统计学及地理信息系统技术为手段,根据江西省景德镇枫树山林场杉木立地指数空间分布特点,选取合适的变异函数理论模型,对其森林立地指数进行了估测和空间分析,并在精度验证的基础上对结果进行了评价。研究结果表明,江西省枫树山林场杉木人工林立地指数有中等程度的空间相关。通过模型模拟结果和实测结果对比,K-贝塞耳函数(K-Bessel)模型有较好的拟合效果和较高的精度,说明地统计学在森林立地指数的估测和空间分析中有一定的应用价值。

关键词:立地指数;杉木人工林;地统计学;变异函数模型

Spatial pattern analysis of forest ecosystem site index using geostatistical technology

ZENG Chunyang[1], TANG Daisheng[2,3,*], TANG Jiakai[4]

1 *Guangxi Forestry Survey and Design Institute*, *Nanning* 530011, *China*

2 *Central South University of Forestry & Technology*, *Changsha* 410004, *China*

3 *Research Center of Spatial Information & Digital Engineering*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430079, *China*

4 *Forestry Bureau of Hengyang City*, *Hengyang* 421001, *China*

Abstract: The evaluation of site index and site quality provides not only a fundamental theory but also basic tools for forest ecosystem management and silviculture practice. Site index is a well-received method of evaluating site quality, However, the traditional site index inventory method is very time consuming and cost, It is difficult to apply this method for spatial analysis in large area due to the limitation of technology. Geostatistics which combine with geographic information system provides a new approach for studying forest site index and its spatial pattern. In this study, the site index spatial distribution pattern of Chinese fir plantation forest was described using geostatistics and geographic information system after choosing appropriate variogram model in Fengshushan Forest Farm in Jiangxi Province, We then evaluated the results through the accuracy assessment. The results show that site index of Chinese fir plantation forest has middle degree spatial correlation. After comparing the estimated results with actual results, the K-Bessel models are confirmed with high accuracy. This study indicates that this new evaluation approach can be used for site index spatial pattern analysis in different forest ecosystems.

Key Words: site index; Chinese fir plantation; geostatistics; variogram model

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30871962);国家林业局科技司资助项目(069320);湖南省科技厅科技计划重点资助项目(2007[F]4200)

收稿日期:2009-05-14; **修订日期**:2009-09-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tdaisheng@163.com

立地在生态学上又称“生境”,指的是“林地环境和该环境所决定的林地上的植被类型及质量”[1]。更确切地说,立地是森林或其它植被类型生存的空间及相关的自然因子的综合[2]。科学地划分立地类型、评价立地质量,在森林经营中具有重大意义。在制定森林经营方案、确定森林经营的目标和方向;造林调查设计中安排树种规划、初植密度;营林活动中考虑林木培育、间伐、确定主伐年龄、轮伐期,计算材积和生长、预估收获及产量等都涉及到立地质量问题。森林立地类型的评价始于 18 世纪,德国林学家试图用林分收获量来评价林地生产力的高低,BULL 提出了不同立地质量优势高生长曲线的多形特性的观点,Chapman-Richards 提出了采用简单函数分段拟合和采用生长函数建模的方法等[3-5],现在依然是现代森林生态系统经营管理的主要工具[6-7]。随着计算机技术和多元统计分析等数学方法的介入,不仅使综合多因子分类成为可能,也使森林立地分类评价逐渐从定性迈向定量化或定性和定量相结合的分类评价阶段[8-10],其中立地指数表是评价森林立地质量,预测林分生产力的一种重要的森林经营基础数表[11]。在实际工作中由于利用定量化的方法进行森林生态系统立地分类还存在许多困难,大面积对森林立地数据的采集和调查非常耗时和耗力,许多森林立地类型也不可能做全面的调查,如何通过少量的样本数据对一定范围的森林生态系统的立地进行空间分析,国内外学者一直研究的比较少。

地统计学是以区域变量理论为基础,以变异函数为主要工具,研究那些在空间上既有随机性又有结构性,或具有空间相关性和依赖性的自然现象的科学[12-13]。区域化变量能够同时反映变量的空间分布结构性与随机性,所以无论是用完全确定性的数学方法还是用经典统计学的方法来研究、描述这类变量都是困难的或者根本不可能的[14-15]。而地统计学中的一个基本工具—变异函数,则能够较好地描述区域化变量的上述特征,从而使针对区域化变量的空间变异性分析得以实现。由于森林立地受气候,地质,地貌,土壤,水文,植被等综合因素的影响,形成了各种各样的立地类型。即使在同一立地类型内,不同空间位置上,森林的立地条件也不相同。这表明森林立地是不均一的和变化着的。森林立地是时空连续的变异体,不论在大尺度上还是在小尺度上,森林立地的空间异质性均存在。利用地统计学结合地理信息系统技术分析森林生态系统的立地指数及其空间的动态变化将帮助人们深入认识和了解森林生态系统的生产力。

杉木(*Cunninghamia Lanceolata*),是我国特有的速生商品材树种,东至浙江、福建沿海山地及台湾山区,西至云南东部、四川盆地西缘及安宁河流域,南自广东中部和广西中南部,北至秦岭南麓、桐柏山、大别山。因为该树种适应性强且材质优良,在我国生产经营中占有十分重要的地位,是南方主要更新造林树种,在实施退耕还林等工程中发挥重大作用。对于该树种的立地指数已经开展了大量的调查和分析,积累了许多的数据,为开展本研究提供了重要的前期工作基础。

本文以杉木人工林森林生态系统为对象,利用地统计学为研究手段,根据江西省景德镇枫树山林场杉木人工林森林生态系统立地指数的空间分布特点,通过少量样本数据对林场杉木人工林的森林立地指数进行了估测,在精度评估的基础上分析了地统计学在该领域应用的价值和潜力。

1 研究区概况

枫树山林场位于江西省东北部(图 1,图 2),为低山丘陵地区,地处黄山余脉怀玉山脉与鄱阳湖平原过渡地带,属中亚热带气候,是江西省森林资源最丰富的林区之一。森林植被以亚热带常绿阔叶林和常绿针叶林为主,最为典型的是以杉木、马尾松纯林为主的人工针叶林群落,其中杉木多为人工同龄林。全场共 11 个分场,分别为柏树下、浮东、浮南、浮西、黄岭、磨刀港、南山、三宝、双桥、塘坞、樟树坑分场。本文以除浮东、双桥分场以外的 9 个分场为研究对象。

2 材料与方法

2.1 调查方法

在枫树山林场 9 个分场的杉木人工林林中设置了 498 块临时标准地,标准地要求林分郁闭度在 0.2 以上,林内没有明显的林窗,林木生长发育正常,林分中没有霸王树,能反映林分结构特征。样地调查包括生境因子、林分树木平均胸径,平均树高,平均年龄,林分蓄积量,优势木年龄和高度,样木解析及林分内地被物等。

根据国内外多采用林分上层木高作为生产力指标(因变量)与生境因子(自变量)来建立生境潜在生产力预测模型[3]。本文杉木人工林立地指数计算采用5株优势木平均高的方法[16],共获得110株优势木的树干解析数据,通过计算确定其标准年龄为20a。选取多个数学模型对优势木平均树高导向曲线进行拟合,比较得出Richards生长模型相关系数最高,标准差最小,效果最好。最后选定的导向曲线数学模型为:$H=26.641(1-\exp(-0.058A))^{1.449}$,并导出枫树山林场杉木人工林的立地指数模型式:$SI=0.579836H/(1-\exp(-0.058A))^{1.449}$,式中,$H$为林分优势木平均高;$A$为林分年龄;$SI$为立地指数。

根据立地指数模型式,把调查数据所得的小班优势木平均年龄和平均树高数据导入EXCEL2003,算出各小班的立地指数,研究区内样本数据为498个。

2.2　分析方法

2.2.1　变异函数

变异函数表示分隔距离为h的两点x_i和x_i+h的区域化变量$Z(x_i)$和$Z(x_i+h)$之间的变异,可用其增量$[Z(x_i)-Z(x_i+h)]$平方的数学期望表示[12]:

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

式中,$N(h)$为距离等于h的点对数,$Z(x_i)$为处于点x_i处变量的实测值,$Z(x_i+h)$为与点x_i偏离h处变量的实测值。变异函数中有3个最重要的参数:块金值(Nugget),基台值(Sill)和变程(Range)[12]。块金值表示随机部分的空间变异性,它通常表示由试验误差和小于试验取样尺度引起的变异,较大的块金值表明较小尺度上的某种过程不可忽视,基台值通常表示系统内总的变异。一般以块金值与基台值的比值作为衡量变量空间相关程度的尺度。

2.2.2　变异函数理论模型

地统计学中用来拟合实际变异曲线图的理论模型有很多种,如球状模型(Spherical)、指数模型(Exponential)、高斯函数(Gaussian)、K-贝塞耳函数(K-Bessel)等[17]。

2.2.3　地统计学插值方法

Kriging法是一种估计观测样点间内插值的地统计学方法。它基于区域化变量理论,当获得了某个变量的变异函数的模拟模型后,可利用样点观测值对研究区域上未取样点的区域化变量值进行最小误差估计[12]。ArcGIS9.3的Geostatistical Analyst模块可以将原始调查数据,通过克里格法绘制成反映调查样点与样点之间,以及森林立地指数和环境因子之间关系的图形。杉木人工林森林立地指数的空间格局分析由ArcGIS9.3软件生成。

2.2.4　交叉验证

如果Kriging法对样本的估计值是精确的,则对数据集中任何一个样本i($i=1,2,\cdots,n$;n为样本总数),由其余$n-1$个样本的实测值对该样本作出的估测值就应等于其实测值。这一性质给出了一种评价所选择变异函数模型优劣的方法,即交叉验证。其基本思想是,在所有样本数据中,每次去掉其中一个点,用剩余的值估测改点的值,通过比较实测值和估测值之间的差异验证空间插值分析的准确程度,从而选择最佳的变异函数模型[12]。GIS软件提供了方便的交叉验证功能,可对现有各个变异函数理论模型分别进行交叉验证。

3　结果与分析

3.1　样本数据分析

数据的统计分析就是对所获得的地统计学空间取样数据进行平均值、标准差、变异系数、相关特征等的分析。用统计分析方法分析杉木人工林立地指数的数据统计特征及其分布规律是十分重要的。本研究采用经典统计学方法研究了杉木人工林立地指数数据的统计特征值。主要包括最小值、最大值、平均值、中位数、标准差、偏度系数、峰度系数和分布类型的描述。

图 1 研究区域示意图

Fig. 1 The study area in Jiangxi province of china

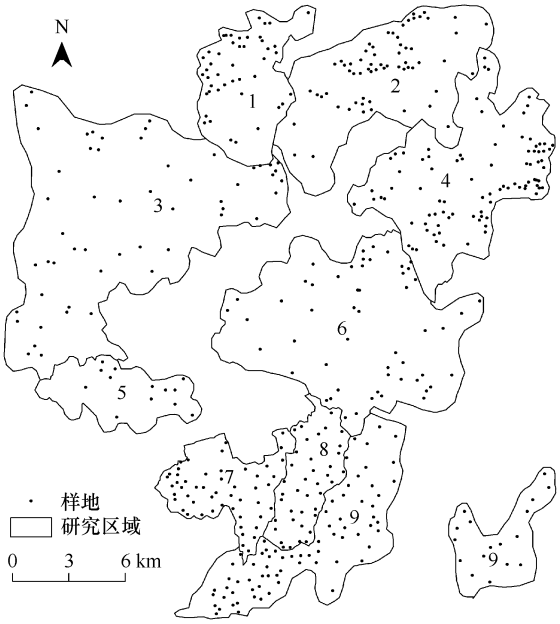

图 2 调查样地分布示意图

Fig. 2 The sampling plots in the study area

1 樟树坑分场,2 磨刀港分场, 3 浮西分场,4 柏树下分场,5 塘坞分场 ,6 浮南分场,7 南山分场,8 三宝分场,9 黄岭分场

本次研究数据的统计分析主要采用 EXCEL2003,SPSS13 for Windows 统计软件完成。表 1 是枫树山林场杉木人工林立地指数的统计特征表。

从表 1 可以看出,枫树山林场区域内杉木人工林森林立地指数的空间异质性明显,从最低的 4.900,到最高的 24.300。最高值分别是最低值的 4.959 倍。平均数为 13.330,中位数位 13.100,平均数和中位数很接近,特异值对样本的数值影响较小,杉木人工林森林立地指数的分布规律为正态分布。

表 1 立地指数统计特征表

Table 1 Statistics of site index

名称 Name	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Average	中位数 Median	标准差 Standard deviation	偏度系数 Skewness coefficient	峰度系数 Kurtosis coefficient	分布类型 Distribution type
杉木 Chinese fir	4.900	24.300	13.330	13.100	2.791	0.969	4.678	正态 Normal distribution

3.2 杉木人工林森林立地指数的变异函数理论模型参数分析

表 2 为枫树山林场杉木人工林立地指数估测选择的理论模型和拟合的相应参数。按照区域化变量空间相关性程度分级标准[18],当块金值与基台值的比值为≤25%、>25%—75%、>75%时,分别提示变量空间自相关程度为强烈、中等及微弱。变量空间自相关程度为微弱时,反映其变异主要由随机变异组成,不适合采用插值方法进行空间插值。从表 2 可知由球状模型(Spherical)、指数模型(Exponential)、高斯函数(Gaussian)、K-贝塞耳函数(K-Bessel)模拟的曲线比值分别为:75.11%、37.76%、62.34%、33.70%,除球状模型(Spherical)外,其他为中等程度的空间相关,可进行空间插值。

3.3 空间插值结果交叉验证

根据以上变异函数理论,并结合其空间建模方式,得到枫树山林场杉木人工林森林立地指数的空间插值

表 2　立地指数理论模型和相应参数

Table 2　Model and its parameter of site index

名称 Name	理论模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill/%
杉木 Chinese fir	球状模型 Spherical	6.405	8.528	75.11
杉木 Chinese fir	指数模型 Exponential	3.091	8.185	37.76
杉木 Chinese fir	高斯函数 Gaussian	5.154	8.267	62.34
杉木 Chinese fir	K-贝塞耳函数 K-Bessel	3.017	8.952	33.70

数据。图 3 为分别由各个模型计算出的估测立地指数和实测立地指数的回归曲线,纵坐标(y)为估测值,横坐标(x)为实测值,其中实线为理想回归曲线。以此获得的交叉验证精度评价统计量如表 3。

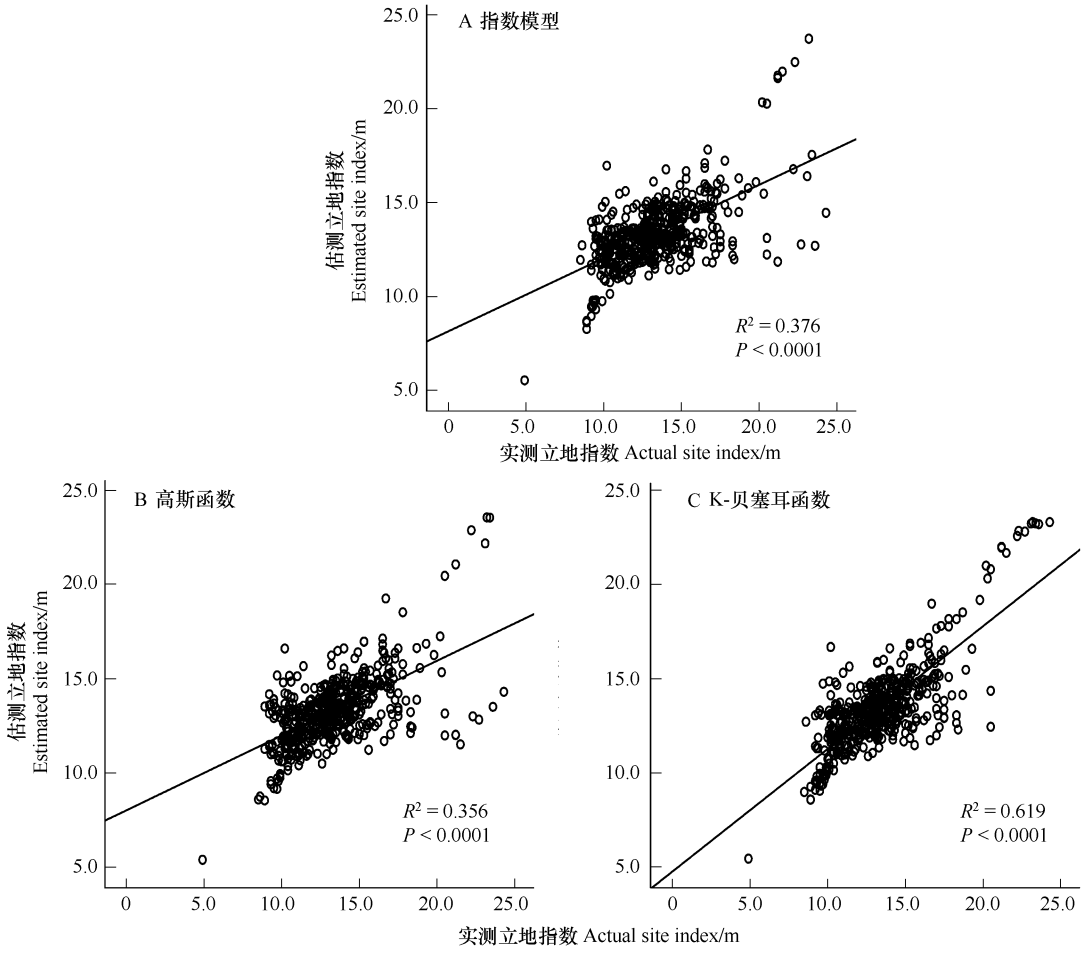

图 3　估测立地指数(y)与实测立地指数(x)回归统计图

Fig. 3　The regression analysis of estimated (y) and actual (x) site index

表 3　立地指数交叉验证精度评价表

Table 3　Cross validation for precision evaluation of site index

模型 Model	SE	R^2	SE predictive	拟合方程 Fitting equation
指数模型 Exponential	0.011	0.376	1.323	$y = 0.390x + 8.138$
高斯函数 Gaussian	0.012	0.356	1.321	$y = 0.397x + 8.005$
K-贝塞耳函数 K-Bessel	0.009	0.619	1.314	$y = 0.651x + 4.744$

SE:回归系数的标准误差,R^2:相关系数的平方,SE prediction:标准误差预测值

模拟结果的精度分析可以帮助判断模型的优劣,发现进一步改进的方向。通过对模型估测结果和实际测

定结果的比较研究,从 1:1 的估测值与实测值回归统计分析图中可以看出,K-贝塞耳函数所拟合的效果优于其他模型,说明通过地统计学的方法估测森林立地指数和对其进行空间分析可以得到较高的精度,有一定的应用价值。

表 3 中的 SE 是回归系数的标准误差,其值越小精度越高;R^2是相关系数的平方,其值越大回归效果越好;SE prediction 为标准误差预测值,其值越大误差越大。由表可见 K-贝塞耳函数(K-Bessel)拟合效果优于其他模型,这跟从实测值与估测值回归统计图中得出的结论是一样的,故可选择 K-贝塞耳函数(K-Bessel)作为普通 Kriging 插值的理论变异函数模型。

3.4 插值结果空间分析

图 4 为 K-贝塞耳函数(K-Bessel)作为普通 Kriging 插值的理论变异函数模型时的枫树山林场杉木人工林森林立地指数估测空间分布图。林场属中亚热带气候,地貌以低山丘陵为主,林场属饶河一级支流昌江河水系,是江西省杉木的中心产区之一,从研究结果(图 4)可以看出,枫树山林场整体上适宜杉木造林,立地指数大于 12 的地区占很大部分。研究区地势东北高,西南低,位于研究区东北部的磨刀港、柏树下分场大部分地区海拔为 500—800m 之间,土类主要为黄壤、红壤,土壤排水性好,腐殖层含量较高,气候湿润,分场内群山连绵,非常适宜杉木的生长。位于昌江流域周围的浮西、塘坞、黄岭分场的部分地区,由于流域周围水土保持较好,人为干扰较少,立地条件相对较好。从空间插值结果也可以看出位于研究区东北部的磨刀港、柏树下分场和昌江流域周围所在地区具有较高的立地指数,说明其生长条件和状况要优于其他地区。研究区内森林植被是亚热带常绿阔叶林和杉木、马尾松为主的常绿针叶林,森林资源多分布于昌江河流域周围,具有极其重要的森林生态效益,其中包括涵养水源、改良土壤、净化空气、保持水土、调节气候等作用。研究区内较高的森林立地指数和较好的生境为森林植被的生长提供了有力的条件,而丰富的森林植被又为其提供了天然的绿色保护屏障。

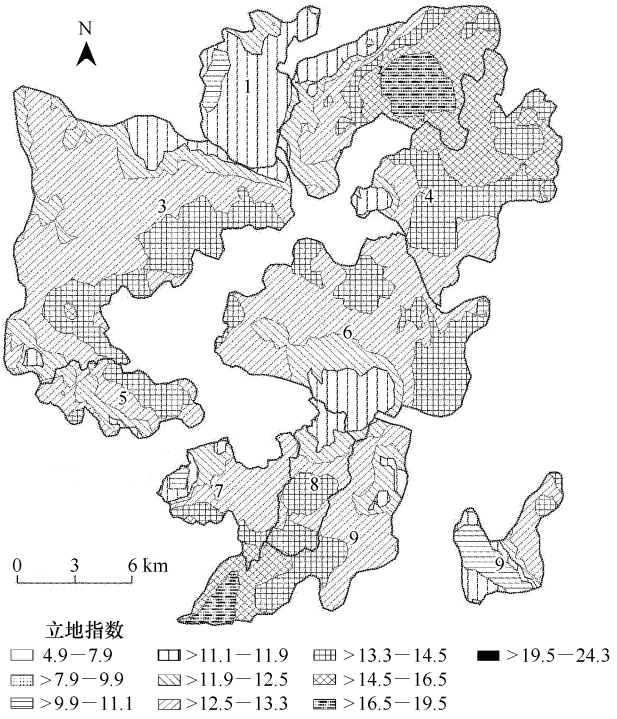

图 4 杉木人工林立地指数估测空间分布图

Fig. 4 The spatial distribution of estimated site index for Chinese fir plantation

1 樟树坑分场,2 磨刀港分场, 3 浮西分场,4 柏树下分场,5 塘坞分场 ,6 浮南分场,7 南山分场,8 三宝分场,9 黄岭分场

4 结论与不足

森林立地质量是影响森林生产能力所有因子的综合。立地因子由气候、土壤、生物等因素综合形成,而气候、土壤都具有明显的空间地域特征,生物的生长发育又依赖其不同空间位置的气候、土壤等因素,地统计学方法为大尺度范围下研究森林立地空间分布特征及其变异规律提供了一种新的方法。通过对样本数据的统计和分析,选取球状模型(Spherical)、指数模型(Exponential)、高斯函数(Gaussian)、K-贝塞耳函数(K-Bessel)理论模型对研究区杉木森林立地指数进行拟合,模拟的曲线比值分别为:75.11%、37.76%、62.34%、33.70%,除球状模型(Spherical)外,其他为中等程度的空间相关。结合回归统计和交叉验证精度评价方法,发现选择 K-贝塞耳函数(K-Bessel)理论模型对枫树山林场杉木森林立地指数进行空间插值的效果最好。

本文的研究为利用地统计学方法进行森林立地指数的估测,合理评估森林生态系统的生产能力和生态服务功能提出了一个新的研究方法,具有较大的实用价值。同时需要指出的是,影响利用地统计学方法高精度

地估测大范围森林立地指数的主要限制因子在于数据采集的质量,例如优势木高度和年龄是否准确。与此同时还要根据统计建模的要求考虑样本分布的代表性和样本的数量,空间插值时变异函数理论模型的选取对结果也有一定的影响。概括起来,大面积估测和动态分析森林立地条件及其变化,对于研究森林生态系统结构和功能的动态过程,了解森林生态系统的生产力,适地适树,合理提高森林经营水平,都是十分重要的依据。

森林立地的变化涉及到很多的因素,本文单从空间相关性来进行森林立地指数空间分析,存在一定的缺陷,将土壤、降水、高程、坡度、坡向等因子作为影响因素引入森林立地指数地统计学分析方法中,效果会更好。

References:

[1] Carmean W H. Forest site quality evalution in the USA. Advances in Agronomy, 1975, 27(1):209-290.

[2] Ma J L, Forest site study in the world-its present and future. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(sup.):105-106.

[3] The editing group of Forest Site Classification of China. The forest site classification of China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1989: 3-35.

[4] Sun Y W, Li S, Cui H, Li C S, Liu P, Zhang J H. Growth models and site index table of natural Korean pine forests. Journal of Forestry Research, 1999, 10(4):238-240.

[5] Alkan G, Emin Z B, Ali İ K, Lokman A. Forest site classification using Landsat 7 ETM data:A case study of Maçka-Ormanüstü forest, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 151(1/4):93-104.

[6] Jerome K. Vanclay, Jack B, Edwin C. Site Index Equation for Smallholder Plantations of Gmelina arborea in Leyte Province, the Philippines. Small-Scale Forestry, 2008, 7(1):87-93.

[7] Somarriba E, Valdivieso R, Vásquez W, Galloway G. Survival, growth, timber productivity and site index of Cordia alliodora in forestry and agroforestry systems. Agroforestry Systems, 2001, 51(2):111-117.

[8] Gordon N. Prediction Intervals for Estimates of Site Index Based on Ecosystem Type. Environmental Management, 1998, 22(2):197-202.

[9] Yasushi M, Shigejiro Y and Morio I. Development of height curves for Japanese larch in relation to GIS-derived site index. Journal of Forest Research, 2003, 8(3):199-207.

[10] Gu H Y, Yang K, Li C Y and Yang F J. Establishment of standardized site index of needle-leaved forest and its application in evaluation of site quality in Daxing'an Mountains. Journal of Forestry Research, 2001, 12(2):128-132.

[11] Ma M D, Jiang H, Liu S R, Zhu C Q, Liu Y J, Wang J X. The preliminary analysis of forest ecosystem site index using remote sensed date. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9):1182-1183.

[12] Tang G A, Yang X. Experiment course about spatial analysis using ArcGIS Geographic Information System. Beijing: Science Press, 2006: 368-405.

[13] Burrough P A. GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis. Environmental and Ecological Statistics, 2001, 8(4):361-363.

[14] Journel A G. Geostatistics: Models and tools for the earth sciences. Mathematical Geology, 1985, 18(1):119-140.

[15] Ozcan A U, Erpul G, Basaran M, Erdogan H E. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass-Çankırı, Turkey. Environmental Geology, 2008, 53(8):1731-1741.

[16] Xiao J, Fang S Z, Xu X Z. Construction of site index tables of poplar plantations in southern areas. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University, 2006, 35(6):604-609.

[17] Xiang J H. The application of GIS in regional crustal stability assessment in China. Shanxi Architecture, 2006, 32(4):24-26.

[18] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak J M, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America, 1994, 58(1):1501-1511.

参考文献:

[2] 马建路, 世界森林立地研究的现状与发展趋势. 应用生态学报, 1996, 7(增刊):105-106.

[3] 《中国森林立地分类》编写组. 中国森林立地分类. 北京: 中国林业出版社, 1989: 3-35.

[11] 马明东, 江洪, 刘世荣, 朱春全, 刘跃建, 王金锡. 森林生态系统立地指数的遥感分析. 生态学报, 2006, 26(9): 1182-1183.

[12] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学技术出版社, 2006: 368-405.

[16] 肖君, 方升佐, 徐锡增. 南方型杨树人工林立地指数表的编制. 福建农林大学学报, 2006, 35(6): 604-609.

[17] 相建华. GIS 在中国区域地壳稳定性评价中的应用. 山西建筑, 2006, 32(4): 24-26.