

毛竹林叶面积指数和郁闭度空间分布协同克里格估算

赵 晓^{1,2}, 吕玉龙³, 王 聪^{1,2}, 李亚丹^{1,2}, 杜华强^{1,2}

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 环境与资源学院, 浙江 临安 311300; 3. 浙江省安吉县林业局, 浙江 安吉 313300)

摘要: 在地面调查的基础上, 利用协同克里格插值法对研究区内毛竹 *Phyllostachys edulis* 林叶面积指数 (LAI, leaf area index) 和冠层郁闭度 (CC, canopy closure) 2 个冠层参数进行空间分布估算研究, 并与普通克里格插值法进行了比较。研究表明: ①球状模型可以用来反映 LAI 和 CC 的空间变异, 且两者具有强烈的空间自相关特征。②协同克里格插值得到的 LAI 预测值与实测值之间的决定系数 R^2 为 0.635 1, 而 CC 的决定系数 R^2 为 0.428 5; 与普通克里格法相比, 基于协同克里格法的 LAI 和 CC 预测精度均得到改善, 其中 LAI 预测精度提高了 1.94%, 均方根误差减少 2.00%, 平均标准误差减少 0.18%, 而 CC 预测精度提高了 4.82%, 均方根误差减少 1.90%, 平均标准误差减少 1.30%。③安吉县毛竹林 LAI 和 CC 都具有从西南到东北逐渐递减空间分布格局, 在一定程度上反映了安吉县不同区域毛竹林经营水平的差异。图 7 表 4 参 37

关键词: 森林生态学; 毛竹林; 叶面积指数; 冠层郁闭度; 协同克里格

中图分类号: S718.45 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2014)04-0560-10

Spatial distribution for leaf area index and canopy closure of *Phyllostachys edulis* stand using Cokriging

ZHAO Xiao^{1,2}, LÜ Yulong³, WANG Cong^{1,2}, LI Yadan^{1,2}, DU Huaqiang^{1,2}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 3. Forest Enterprise of Anji County, Anji 313300, Zhejiang, China)

Abstract: The study provides a new method for estimating leaf area index (LAI) and canopy closure (CC) of a *Phyllostachys edulis* stand. Through on ground investigation, spatial distribution of leaf area index and canopy closure were estimated using Cokriging and compared to Kriging. On that basis the spatial distribution pattern maps of canopy parameters for *Phyllostachys edulis* stand of Anji County, Zhejiang Province were mapped. Results showed that: (1) Geostatistical analysis showed a spherical model with the spatial variation of LAI and CC both having strong spatial autocorrelation features. (2) Cokriging improved the prediction accuracies with the coefficient of determination (R^2) between predicted and measured values for LAI (0.635 1) and for CC (0.428 5). Also with Cokriging for LAI a decrease in the root mean square error (RMSE) (2.00 %) and the average standard error (ASE) (0.18%) was found; whereas, for CC a decrease in RMSE (1.90 %) and ASE (1.30%) was measured. Additionally with Cokriging, prediction accuracy values increased for LAI (1.94%) and for CC (4.82%). (3) The spatial distribution pattern maps of canopy parameters for the *Phyllostachys*

收稿日期: 2013-11-04; 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31070564); 浙江省林业碳汇与计量创新团队资助项目(2012R10030-01); 浙江省本科院校中青年学科带头人学术攀登计划项目(pd2013239); 浙江农林大学农林碳汇与生态环境修复研究中心预研基金资助项目

作者简介: 赵晓, 从事森林资源遥感监测与信息技术等研究。E-mail: vickyzyx729@gmail.com。通信作者: 杜华强, 教授, 博士, 从事遥感、森林碳汇遥感估算以及空间统计等研究。E-mail: dhqrs@126.com

edulis stand from Anji County, Zhejiang Province showed a gradual decrease in canopy coverage from southwest to northeast. Thus, Cokriging improved prediction accuracies of LAI and CC compared to Kriging, and canopy coverage reflected differences in *Ph. edulis* forest management for different regions of Anji County. [Ch, 7 fig. 4 tab. 37 ref.]

Key words: forest ecology; *Phyllostachys edulis* stand; leaf area index; canopy closure; Cokriging

森林冠层担负着森林生态系统物质能量的传输、太阳辐射的传输以及维护环境因子、生理参数等在空间上的分布状态的重要功能^[1]。冠层参数是反映区域乃至全球生态环境变化的重要指标,也是生态模型、碳循环、生物多样性等研究领域中的重要特征参数。其中,冠层郁闭度(CC, canopy closure)和叶面积指数(LAI, leaf area index)在森林生态系统和森林经营管理中尤为重要,如叶面积指数能够表征植被冠层结构,并控制着植被光合、呼吸、蒸腾、碳循环和降水截获等许多生物、物理过程,是陆面过程中重要的结构参数之一^[2]。因此,森林冠层参数空间估算及其相关研究对于森林生物量、碳储量的估测、空间分布的研究有重要意义。遥感技术为森林参数空间估算提供了重要的手段,而利用遥感信息估算森林参数大致可以分为 3 类方法即统计模型、物理模型以及统计模型和物理模型相结合的混合方法^[1]。其中统计模型大多是基于植被指数建立回归关系进行估算的,模型比较简单,但模型结构多样,且易受植被类型、光照条件、观察位置、冠层结构影响,对土壤背景等非植被因素比较敏感;物理模型如 SAIL 模型^[3]、LIBERTY 模型^[4]、GEOSAIL 模型^[5]、PROSPECT 模型^[6-7]等,建立在电磁波辐射传输理论和植被生态学理论之上,不受植被类型等因素的影响,因而成为国内外学者研究的热点,但模型比较复杂,存在模型解的非唯一性等问题;根据统计方法、物理模型的优点,将两者结合起来定量反演植被冠层参数的方法称为混合模型。地统计是森林参数空间估算的另一种重要方法,因该方法既能进行空间估算又能进行空间变异分析,使其在地质、林业、生态、环境等众多领域研究中得到重视和广泛应用^[8-11]。地统计学也称空间统计学,它是以区域化变量理论为基础,研究自然现象的空间变异与空间结构的一门学科,因其考虑了样的空间位置,而与传统统计学有着本质的差异^[8,12]。目前,应用地统计原理进行空间估算时,普通克里格法比较常用,如 Du 等^[11]基于野外调查数据,利用普通克里格方法对浙江省安吉县毛竹生物量的空间格局进行了分析,并对生物量总量进行了估计;刘晓梅等^[13]利用保护区样地调查数据,根据一元生物量模型计算样地生物量,在此基础上采用普通克里格方法进行插值,对整个保护区的生物量总量进行估计,并从林分结构和地形因子的角度分析了生物量的空间格局;万昌林等^[14]利用地统计学方法进行固体矿产资源储量的估算。与普通克里格相比,协同克里格更具优势,它能将调查数据的各种相关信息进行综合,通过主变量与辅助变量交互半方差函数的计算提高采样效率,从而提高插值的精度。贺鹏等^[15]采用地统计对吉林省汪清林业局金苍林场森林地上生物量进行估算,其中协同克里格估算精度明显高于普通克里格;闫海忠等^[16]也采用协同克里格插值对三坝乡黄背栎 *Quercus pannosa* 群落的生物量进行了空间估算,得到满意的结果;另外,协同克里格在预测矿产储量^[17]、土壤养分含量空间分布图^[18]以及区域气候要素空间插值^[19]等方面也都得到了很好的应用。毛竹 *Phyllostachys edulis* 林是中国亚热带地区(如浙江、安徽、江西和福建等省)特殊的森林类型,是所有竹种中分布最广、面积最大的一种竹林^[20-21]。近年研究表明,竹林资源特别是毛竹林具有高效固碳能力,在竹林生态系统大气二氧化碳减量及对全球碳平衡的贡献方面有重要作用^[8,22-24]。本研究在浙江省安吉县毛竹林外业调查数据获取的基础上,利用协同克里格插值法,对研究区内毛竹林叶面积指数、冠层郁闭度等 2 个冠层参数进行空间分布估算和评价,并对估算结果与普通克里格插值法进行比较。

1 研究区及研究方法

1.1 研究区概况

研究区为浙江省安吉县(图 1)。安吉县地处浙江省西北部,30°23'~30°53'N,119°14'~119°53'E,东邻湖州市吴兴区、德清县;南接杭州市余杭区、临安市;西与安徽省宁国市、广德县交界;北连湖州市长兴县。安吉县气候宜人,属亚热带海洋性季风气候,多年平均气温为 15.5℃。安吉县多年平均降水量为 1 400 mm,属亚热带东部常绿阔叶林亚区、中亚热带常绿阔叶林北部亚地带。安吉县竹类资源十

分丰富,其中毛竹林为 $5.527 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占有林地面积的 45% 左右。

1.2 数据来源

外业样地调查于 2008 年 8 月下旬到 9 月初完成,共调查了 55 个 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 不同经营水平的毛竹纯林样地,其中集约经营 11 个,中等经营水平 21 个,粗放经营 23 个。调查内容包括样地经纬度、海拔、坡度、坡向、胸径、年龄、样地内毛竹株数、郁闭度等,其中,样地株数最少的为 46 号样地(153 株),最大的为 15 号地(16 033 株)。另外,样地毛竹林年龄结构主要以 1~3 度为主,4~5 度也有少量分布。研究区毛竹林分布及调查样地如图 1 所示^[25],可见样地基本涵盖了安吉县毛竹林分布区域。在森林资源调查中,目测法是郁闭度最常用且简便迅速的方法,2003 年国家林业局《森林资源规划设计调查主要技术规定》中指出,有林地小班森林郁闭度可以通过目测法获取^[26],因此,本研究样地郁闭度是在安吉县林业局技术人员指导下采用目测法获取的。样地毛竹叶面积指数采用式(1)计算^[27]。

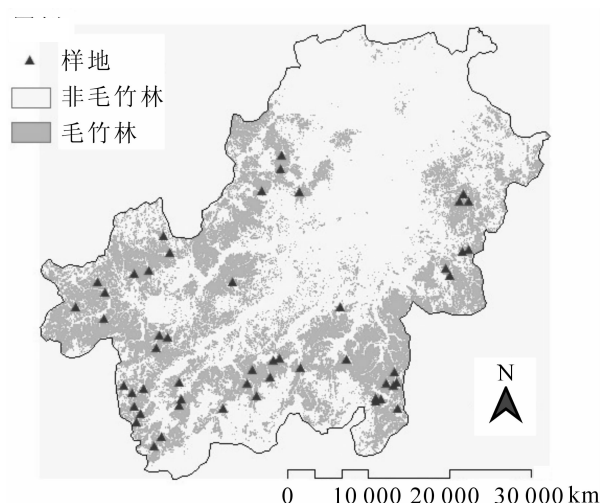


图 1 研究区及样地空间分布

Figure 1 Research area and field plots

$$L_{\text{LAI}i} = 0.007358 N_i^{0.9998} \bar{D}_i^{-0.7372}, \quad i=1, 2, \dots, 55. \quad (1)$$

式(1)中: $\bar{D}$ 表示样地内毛竹平均胸径, N 表示样地内毛竹总株数。

1.3 协同克里格空间估算基本原理

1.3.1 变异函数 克里格法是利用区域化变量即原始数据和变异函数的结构性,对未采样点的区域化变量取值进行线性无偏最优估计的一种方法^[8,15],因此,变异函数及其理论模型是克里格估算的基础。变异函数定义为间距为 h 的 2 个区域化变量及差的方差的一半,如式(2)所示:

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{a=1}^{N(h)} [Z(u_a) - Z(u_a+h)]^2. \quad (2)$$

式(2)中: $N(h)$ 为距离相隔为矢量 h 的所有点对的个数。变异函数理论模型一般包括球状模型、指数模型、高斯模型、线性模型等,对半方差函数进行理论模拟,并在模型优选的基础上通过模型参数如块金值、基台值、变程以及结构比分析区域化变量的空间分布特征^[28]。通常选择决定系数(R^2)大,残差小的理论模型作为变异函数拟合模型^[29]。

1.3.2 协同克里格算法简介 克里格包括简单克里格、普通克里格、趋势克里格、协同克里格、因子克里格、块状克里格等,其中协同克里格法(Cokriging)是用 1 个或多个次要变量(协变量)对感兴趣变量(主变量)进行插值估算。协变量与主变量都有相关关系,并且假设变量之间的相关关系能用于提高主要预测值的精度,估算公式如下:

$$Z_{\text{cok}}(u_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_a Z_a(u_i) + \sum_{j=1}^m \lambda_b Z_b(u_j). \quad (3)$$

式(3)中: $Z_{\text{cok}}(u_0)$ 为待估点 u_0 处的估测值; $Z_a(u_i)$ 和 $Z_b(u_i)$ 分别是主变量和协变量在 u_i 和 u_j 处的实测值;

λ_a 和 λ_b 分别为主变量和协变量的权重且 $\sum \lambda_a = 1$, $\sum \lambda_b = 0$; n 和 m 分别为参与估测的主变量和协变量样本个数。

1.4 毛竹林冠层参数协同克里格估算及验证

首先,设置主变量和协变量。研究表明:叶面积指数和林分密度存在指数关系,与冠层郁闭度也有密切的相关性^[30],因此,根据协同克里格算法,在对叶面积指数进行空间估算时,叶面积指数作为主变量,冠层郁闭度作为协变量,而对冠层郁闭度进行空间估算时,冠层郁闭度作为主变量,叶面积指数作

为协变量。其次，主变量和协变量设置好之后，利用 ArcGIS 地统计模块，对 55 个样地数据统计分析、变异函数计算、理论变异函数的最优拟合及检验，并在此基础上进行克里格插值，实现整个研究区叶面积指数和冠层郁闭度估算；最后，利用研究区毛竹林分布图(图 1)，对估算结果进行裁剪，从而得到研究区毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度空间分布。

克里格插值考虑了空间距离对估算结果的影响即离采样点越近，克里格估计误差就越小^[9]，但没有考虑地形条件。山区地形复杂，在野外布设样地时难免会遇到地形起伏，所以选择相对平坦的样地对结果进行检验是否合理^[27]。本研究从样地中筛选出 30 个相对平坦的样地，对叶面积指数和冠层郁闭度估算结果进行验证，验证的指标包括实测值与估计值之间的相关性 R^2 ，均方根误差(E_{RMS} , root mean square error)，平均标准误差(E_{AS} , average mean error)，标准均方根误差(S_{RMS} , root-mean-square standardized)^[29]，均方根值(S_{RM} , root mean square)，其中均方根值是样本平方平均值再开方，平均标准误差是指标准误差的平均值，均方根误差均方根误差计算公式如下：

$$E_{\text{RMS}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(X_{\text{obs},i}-X_{\text{model},i})^2}{n}}。$$

(4)

式(4)中： $X_{\text{obs},i}$ 和 $X_{\text{model},i}$ 分别为第 i 个样本的真实值和预测值， n 为样本个数。

另外，也可以通过均方根误差减少的百分数(R_{RMSE})和平均标准误差减少的百分数(R_{ASE})来表示预测精度的提高程度^[31]。 R_{RMSE} 和 R_{ASE} 的计算公式(5)(6)如下：

$$R_{\text{RMSE}}=(E_{\text{RMSE}}-E_{\text{RMSEK}})/E_{\text{RMSE}}\times100\%。$$

(5)

$$R_{\text{ASE}}=(E_{\text{ASE}}-E_{\text{ASEK}})/E_{\text{ASE}}\times100\%。$$

(6)

式(5)和式(6)中： E_{RMSE} 和 E_{ASE} 为普通克里格预测的均方根误差和平均标准误差； E_{RMSEK} 和 E_{ASEK} 为协同克里格预测的均方根误差和平均标准误差。

3 结果与分析

3.1 叶面积指数和冠层郁闭度统计分析 & 正态性检验

变异函数结构分析一般要求区域化变量符合正态分布，否则会产生比例效应^[32]。通过对毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度统计参数(表 1)及直方图(图 2~3)分析表明：样地毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度的平均值为与中值接近，存在轻微负偏，变异系数较小，分别为 13.66%和 14.08%。

表 1 毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度统计特征

Table 1 Statistic parameters of moso bamboo's leaf area index and canopy closure

项目	最大值	最小值	平均值	中值	偏度	峰度	变异系数/%	标准差
叶面积指数	11.466	5.661	8.680	8.692	-0.040	-0.100	13.660	1.186
冠层郁闭度	0.950	0.450	0.763	0.800	-0.820	0.460	14.080	0.107

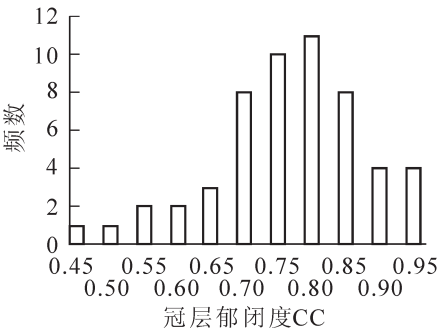


图 2 冠层郁闭度数据直方图

Figure 2 Histogram of canopy closure

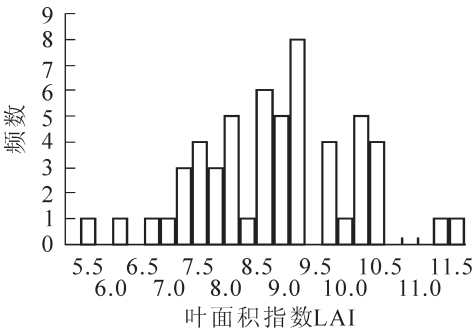


图 3 叶面积指数数据直方图

Figure 3 Histogram of leaf area index

$P-P$ 概率图($P-P$ probability plots)可以检验样数据的正态性,即根据变量分布累积比和正态分布累积比生成的图形进行正态性判断,如果数据是正态分布,被检验数据成一条直线^[33-34]。图 4a 和 4b 分别是叶面积指数和冠层郁闭度的正态 $P-P$ 图,由图可见叶面积指数和冠层郁闭度的正态 $P-P$ 图基本成一条直线,且检验表明,在 0.05 置信区间内,叶面积指数和冠层郁闭度均服从正态分布。

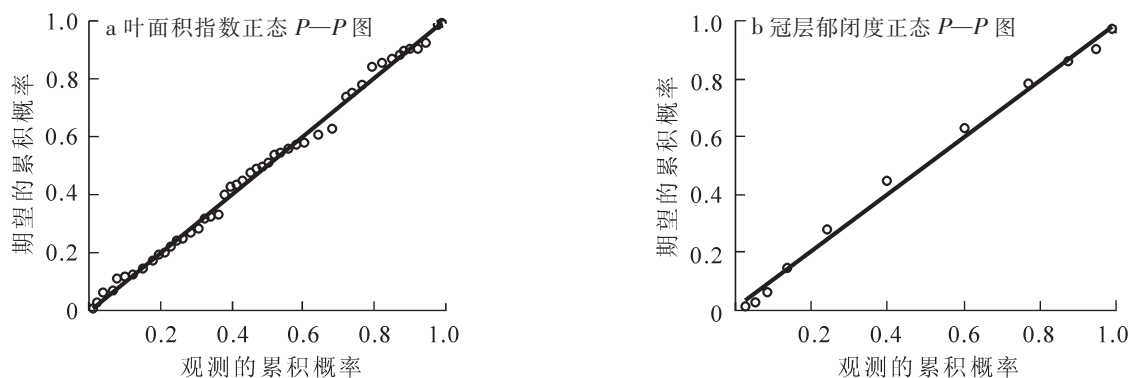


图 4 叶面积指数(a)和冠层郁闭度(b)的正态 $P-P$ 图

Figure 4 Normal $P-P$ plot of leaf area index(a) and canopy closure(b)

3.2 变异函数模型选择及其结构特征

根据决定系数最大和残差值最小的原则,得到研究区叶面积指数和冠层郁闭度最优模型理论变异函数均为球状模型,模型相关参数如表 2。

表 2 叶面积指数和冠层郁闭度变异函数的相关参数

Table 2 Statistic parameters of semivariogram of leaf area index and canopy closure

模型	变量	决定系数 R^2	残差 R_{ss}	块金值 C_0	基台值 C_0+C	结构比 $C/(C_0+C)$	变程
LAI	球状模型	0.943	0.065	0.312	1.908	0.836	67 440
	协变量			0.448	2.075	0.784	7 789
CC	球状模型	0.836	0.176	0.448	2.075	0.784	7 789
	协变量			0.312	1.908	0.836	67 440

表 2 中 C_0 为块金效应,表示区域化变量的随机方差; C 为区域化变量的结构方差; C_0+C 为变异函数基台,为区域化变量总方差; $C/(C_0+C)$ 为结构比,是区域化变量空间相关性程度的指标,大于 75.0%,说明具有强烈的空间相关性,在 25.0%~75.0%,为中等的空间相关性,小于 25.0%,说明系统空间相关性很弱^[35];变程是区域化变量影响范围的大小,在变程以内,区域化变量是空间自相关的。

由表 2 可见:叶面积指数变异函数的结构比为 83.6%,冠层郁闭度变异函数的结构比为 78.4%,均大于 77.0%,说明两者变程范围内存在具有强烈的空间自相关性;另外,叶面积指数和冠层郁闭度间自相关范围也远远大于最小抽样间距(360 m),说明本次采样密度是合理的^[11],因此,在变异函数模型的基础上可以对叶面积指数和冠层郁闭度进行空间估算。

3.3 叶面积指数和冠层郁闭度估算结果与精度评价

3.3.1 协同克里格叶面积指数的估算结果与精度评价 协同克里格估算结果与毛竹林分布信息叠加裁剪得到的研究区毛竹林叶面积指数空间分布图,如图 5a 所示。由于安吉县北部几个乡镇很少有毛竹林分布,没有布设样地,因此这些区域没有预测值。根据图 5a 可看出:研究区内叶面积指数分布整体上呈西南到东北逐渐递减空间分布格局,西南地区几个乡镇叶面积指数值最高,最大值可达 10.731,北部几个乡镇的叶面积指数值较低。叶面积指数协同克里格估算值与实测值之间的相关关系如图 5b 所示。由图 5 可见:两者具有较好的线性关系, R^2 为 0.635 1,均方根误差较小为 0.541 6(表 3),说明基于协同克里格插值得到的叶面积指数结果较好。

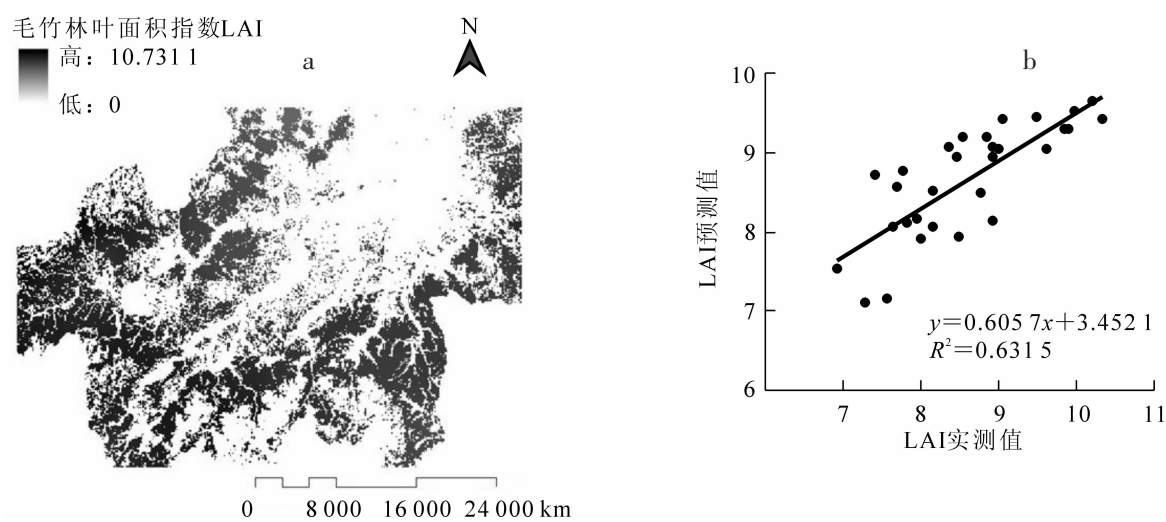


图 5 协同克里格叶面积指数空间分布(a)及预测值与实测之间的相关关系(b)
Figure 5 Spatial distribution (a) and correlation between the predicted and measured (b) of leaf area index based on Cokriging

3.3.2 协同克里格冠层郁闭度的估算结果与精度评价 图 6a 是研究区毛竹林冠层郁闭度空间分布估算结果。图 6a 表明：研究区内冠层郁闭度分布整体上呈西南到东北逐渐递减趋势，中南部地区几个乡镇冠层郁闭度值最高，最大值可达 0.870，北部几个乡镇的冠层郁闭度值较低。这一空间分布格局与叶面积指数具有相似的特点，也印证了先前关于两者具有密切关系的描述及可以相互作为协变量进行估算的合理性。图 7b 是冠层郁闭度协同克里格估算值与实测值之间的相关关系。由图可见，两者之间的决定系数 R^2 为 0.428 5，相关系数为 0.654 6，尽管相关性低于叶面积指数，但均方根误差也较小（表 4），说明估计结果在一定程度也是可靠的。

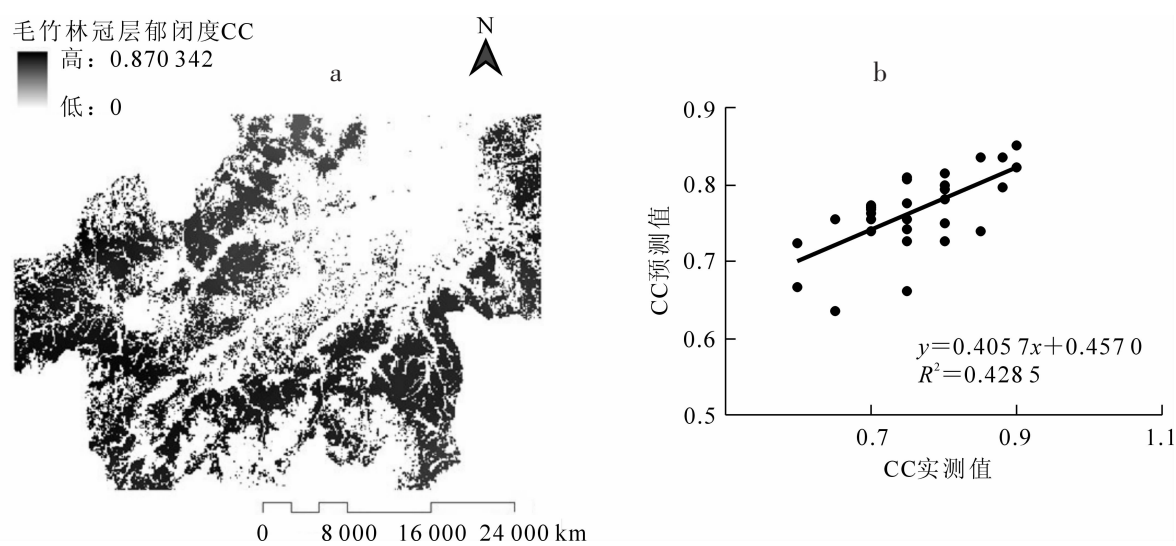


图 6 协同克里格法冠层郁闭度空间分布(a)及预测值与实测之间的相关关系(b)
Figure 6 Spatial distribution (a) and correlation between the predicted and measured (b) of canopy closure based on Cokriging

3.3.3 与普通克里格估算结果的比较 图 7 是普通克里格插值得到的叶面积指数和冠层郁闭度预测值与实测值之间的相关关系，从图 5~6 对比可以看出，基于协同克里格插值方法得到的研究区的叶面积指数和冠层郁闭度预测值和实测值的相关性明显高于普通克里格方法。表 3~4 详细比较了 2 种方法估算的精度。通过对比发现：协同克里格估测叶面积指数和冠层郁闭度的均方根误差、均方根、平均标准误差、标准均方根误差等误差标均小于普通克里格法，其中叶面积指数均方根误差减少 2.00%，平均标准误差减少 0.18%，且预测值和实测值的相关系数提高了 1.94%，而冠层郁闭度均方根误差减少 1.90%，平均标准误差减少 1.30%，预测值和实测值的相关系数提高了 4.82%。以上分析说明，相对于普通克里格法

而言, 协同克里格估算得到叶面积指数和冠层郁闭度估计精度高, 更能反映: 安吉县毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度实际空间分布情况。

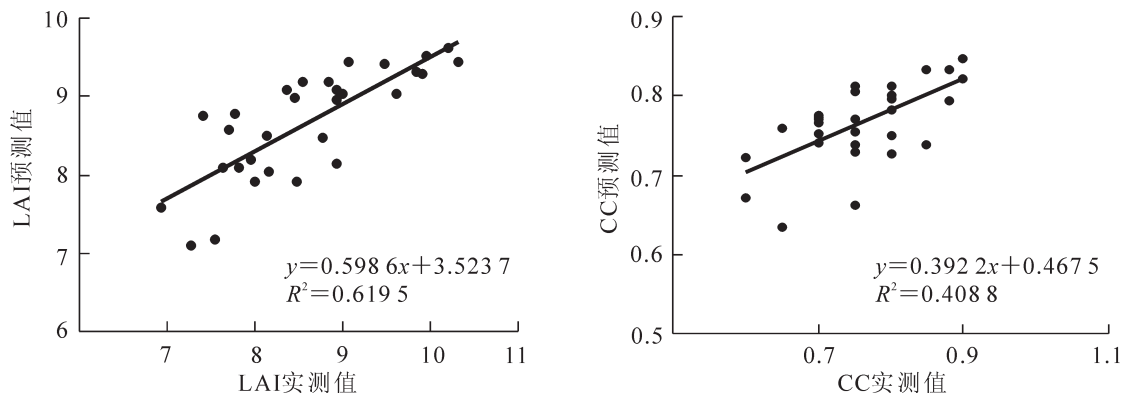


图 7 普通克里格法叶面积指数和冠层郁闭度预测值与实测值的相关关系

Figure 7 Relationships between predicted and measured of leaf area index and canopy closure based on ordinary Kriging

表 3 叶面积指数的普通克里格法和协同克里格法估测精度的比较

Table 3 A comparison of prediction accuracy of leaf area index estimation by ordinary Kriging and Cokriging

插值方法	均方根误差	均方根	平均标准误差	标准均方根误差	$E_{\text{RMS}}/\%$	$E_{\text{AS}}/\%$
普通克里格法	0.552 9	0.981 0	0.740 2	1.315 0	2.00	0.18
协同克里格法	0.541 6	0.950 0	0.738 9	1.279 0		

表 4 冠层郁闭度的普通克里格法和协同克里格法估测精度的比较

Table 4 A comparison of prediction accuracy of canopy closure estimation by ordinary Kriging and Cokriging

插值方法	均方根误差	均方根	平均标准误差	标准均方根误差	$E_{\text{RMS}}/\%$	$E_{\text{AS}}/\%$
普通克里格法	0.068 8	0.107 0	0.084 6	1.265 0	1.94	1.30
协同克里格法	0.067 5	0.104 0	0.083 5	1.232 0		

4 结论与讨论

在地面调查的基础上, 利用协同克里格插值法对研究毛竹林叶面积指数、冠层郁闭度进行空间分布估算研究, 并与普通克里格插值法进行比较。研究表明: 基于协同克里格插值得到的毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度预测值与实测值之间的决定系数 R^2 分别为 0.635 1 和 0.428 5, 说明叶面积指数、冠层郁闭度空间估算结果在一定程度上是可靠的, 且协同克里格法预测精度高于普通克里格法。当然, 受条件所限, 本研究叶面积指数和冠层郁闭度预测与实测之间的相关性还有待进一步提高, 将遥感技术和地统计分析方法结合进行综合估算, 可能会改善两者预测精度。另一方面, 地统计空间估算除协同克里格法和普通克里格法外, 还包括趋势克里格、漂移克里格、因子克里格、块状克里格等多种方法, 需要根据实际情况进行选择或分析比较, 当区域化变量分布存在某种趋势时, 可以考虑采用漂移克里格法, 而当变量实测样本数量较少时, 可以考虑采用协同克里格法^[8]。因此, 本研究根据样本的实际情况选择协同克里格法进行叶面积指数、冠层郁闭度空间分布估算。另外, 安吉县毛竹林面积占有林地面积的 45% 左右, 对毛竹这个单一物种, 本研究样地基本涵盖了毛竹林主要分布区域, 且样本叶面积指数和冠层郁闭度呈正态分布的统计结果(图 4)也在一定程度上反映了样本的代表性和合理性, 为空间插值提供了基础。地统计学是一种空间统计学, 它在对样本进行统计分析时, 与传统统计学最大的区别就是考虑了区域化变量的空间分布特征值, 因此, 可以在变异函数模拟的基础上进行空间分布估算及其变异分析, 并将“点上”信息向“面上”信息尺度转换^[8,15]。研究表明: 球状变异函数模型能够揭示安吉县毛竹林叶面积指数、冠层郁闭度空间变异特征, 并在此基础上通过协同克里格法实现了叶面积指数和冠层郁闭度样地信息(图 1)转换为空间分布信息(图 7a 和图 8a)。分析表明, 叶面积指数和冠层郁闭度在空间上具有强烈的空间自相关性, 且其空间分布基本呈现出从西南到东北逐渐递减的格局。对比安吉县森林资源

规划设计调查成果报告^[36-37]和相关文献^[11,25]发现：这一结果在很大程度上符合安吉县毛竹林立竹度高、生物量大等特征，也反映了安吉县西南部为毛竹产业示范区域、毛竹林经营集约化程度高的实际情况，说明采用协同克里格法和地面调查数据估算安吉县毛竹林叶面积指数和冠层郁闭度空间分布在一定程度上是可行的。

区域化变量的空间变异特征是土壤、气候、施肥、耕作方式、种植制度、管理措施、经营水平等众多内外因素影响的综合反映。浙江省安吉县为著名的“中国竹乡”，竹林资源经营管理和产业发展在该县林业发展中占据重要的位置。本研究关于毛竹林叶面积指数和郁闭度空间分布特征的研究结果，可为安吉县毛竹林经营管理提供参考价值。

参考文献：

- [1] 杜华强, 周国模, 徐小军. 竹林生物量碳储量遥感定量估算[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] CHEN J M, CIHLAR J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images [J]. *Rem Sens Environ*, 1996, **55**(2): 153 – 162.
- [3] VERHOEF W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model [J]. *Rem Sens Environ*, 1984, **16**(2): 125 – 141.
- [4] DAWSON T P, CURRAN P J, PLUMMER S E. LIBERTY: Modeling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra [J]. *Rem Sens Environ*, 1998, **65**(1): 50 – 60.
- [5] HUEMMERICH K F. The GeoSail model: a simple addition to the SAIL model to describe discontinuous canopy reflectance [J]. *Rem Sens Environ*, 2001, **75**(3): 423 – 431.
- [6] JACQUEMOUD S, BARET F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra [J]. *Rem Sens Environ*, 1990, **34**(2): 75 – 91.
- [7] FERET J B, FRANCOIS C, ASNER G P, *et al.* PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments [J]. *Rem Sens Environ*, 2008, **112**(6): 3030 – 3043.
- [8] 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.
- [9] DAVID M G, ZHANG C S, OWEN T C. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland [J]. *Environ Poll*, 2004, **127**(2): 239 – 248.
- [10] 张茂震, 王广兴, 周国模, 等. 基于森林资源清查、卫星影像数据与随机协同模拟尺度转换方法的森林碳制图[J]. *生态学报*, 2009, **29**(6): 2919 – 2928.
ZHANG Maozhen, WANG Guangxing, ZHOU Guomo, *et al.* Mapping of forest carbon by combining forest inventory data and satellite images with co-simulation based up-scaling method [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(6): 2919 – 2928.
- [11] 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 Ecol*, 2010, **207**: 131 – 139.
- [12] 王劲峰. 空间分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] 刘晓梅, 布仁仓, 邓华卫, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2011, **31**(16): 4783 – 4790.
LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, *et al.* Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on geostatistics [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(16): 4783 – 4790.
- [14] 万昌林. 地质统计学在矿产资源信息研究中的应用[J]. *有色冶金设计与研究*, 2002(4): 18 – 21.
WAN Changlin. The application of geostatistics in the mineral resources information research [J]. *Nonferrous Met Eng & Res*, 2002(4): 18 – 21.
- [15] 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 – 108.
HE Peng, ZHANG Huiru, LEI Xiangdong, *et al.* Estimation of forest above-ground biomass based on geostatistics [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(5): 101 – 108.
- [16] 闫海忠, 林锦屏, 王璟, 等. 基于 ARCGIS 的区域生物量 DEM 模型空间分析: 以云南香格里拉三坝乡黄背栎林生物量估算为例[J]. *安徽农业科学*, 2011, **39**(2): 852 – 855, 858.
YAN Haizhong, LIN Jinping, WANG Jing, *et al.* DEM model space analysis on regional biomass based on

- ARCGIS [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2011, **39**(2): 852 – 855, 858.
- [17] 弓小平, 程勰. 协克里格法在空间插值中的研究应用[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2009, **39**(4): 533 – 536.
- GONG Xiaoping, CHENG Xu. Cokriging algorithm applied for interpolation [J]. *J Northwest Univ Nat Sci Ed*, 2009, **39**(4): 533 – 536.
- [18] 李楠, 徐东瑞, 吴杨洁. 土壤养分含量的协同克里格法插值研究[J]. 浙江农业学报, 2011, **23**(5): 1001 – 1006.
- LI Nan, XU Dongrui, WU Yangjie. Spatial distribution with different sampling numbers of soil nutrient using Cokriging [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2011, **23**(5): 1001 – 1006.
- [19] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. 高原气象, 2005, **24**(6): 974 – 980.
- YUE Wenze, XU Jinhua, XU Lihua. A study on spatial interpolation methods for climate variables based on geostatistics [J]. *Plateau Meteorol*, 2005, **24**(6): 974 – 980.
- [20] 王燕, 王兵, 赵广东, 等. 我国毛竹林生态系统碳平衡研究进展[J]. 林业科技开发, 2008, **22**(4): 9 – 12.
- WANG Yan, WANG Bing, ZHAO Guangdong, *et al.* The research progress of moso bamboo forest ecosystem carbon balance in our country [J]. *China For Sci Technol*, 2008, **22**(4): 9 – 12.
- [21] 林华. 毛竹林生态系统生物量动态变化规律研究[J]. 林业科技开发, 2002, **16**(增刊): 26 – 27.
- LIN Hua. The research of the dynamic changes of biomass of moso bamboo forest ecosystem [J]. *China For Sci Technol*, 2002, **16**(supp): 26 – 27.
- [22] 李正才, 傅懋毅, 徐德应. 竹林生态系统与大气二氧化碳减量[J]. 竹子研究汇刊, 2003, **22**(4): 1 – 6.
- LI Zhengcai, FU Maoyi, XU Deying. Bamboo ecosystem and carbon dioxide sequestration [J]. *J Bamboo Res*, 2003, **22**(4): 1 – 6.
- [23] 李惠敏, 陆帆, 唐仕敏, 等. 城市化过程中余杭市森林碳汇动态[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2004, **43**(6): 1044 – 1050.
- LI Huimin, LU Fan, TANG Shimin, *et al.* Dynamic carbon sink of forests in Yuhang City with the development of urbanization [J]. *J Fudan Univ Nat Sci*, 2004, **43**(6): 1044 – 1050.
- [24] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布[J]. 林业科学, 2004, **40**(6): 20 – 24.
- ZHOU Guomo, JIANG Peikun. Density, storage and spatial distribution of carbon in *Phyllostachy pubescens* forest [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **43**(6): 1044 – 1050.
- [25] 徐小军. 基于 LANDSAT TM 影像毛竹林地上部分碳储量估算研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2009.
- XU Xiaojun. *Study on Estimation of Aboveground Carbon Storage of Moso Bamboo Forest Based on LANDSAT TM Image* [D]. Lin'an: Zhejiang A & F University, 2009.
- [26] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. 世界林业研究, 2008, **1**(2): 40 – 46.
- LI Yongning, ZHANG Binlan, QIN Shuying, *et al.* Review of research and application of forest canopy closure and its measuring methods [J]. *World For Res*, 2008, **1**(2): 40 – 46.
- [27] DU Huaqiang, FAN Weiliang, ZHOU Guomo, *et al.* Retrieval of the canopy closure and leaf area index of moso bamboo forest using spectral mixture analysis based on the real scenario simulation [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, **49**(11): 4328 – 4340.
- [28] 李哈滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, **9**(6): 651 – 657.
- LI Habin, WANG Zhengquan, WANG Qingcheng. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1998, **9**(6): 651 – 657.
- [29] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [30] 白静, 田有亮, 韩照日格图, 等. 油松人工林地上生物量、叶面积指数与林分密度关系的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, **22**(3): 183 – 187.
- BAI Jing, TIAN Youliang, Hanzhaorigetu, *et al.* The research on the relationship between the ground biomass, the leaf area index and the stand density in *Pinus tabulaeformis* artificial forest [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 2008, **22**(3): 183 – 187.
- [31] SALES M H, SOUZA JR C M, KYRIAKIDIS P C. Improving spatial distribution estimation of forest biomass with geostatistics: a case study for Rondnia [J]. *Ecol Model*, 2007, **205**(1/2): 221 – 230.

- [32] VIEIRA S R, HATFIELD J L, NIELSEN D R, BIGGAR J W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties [J]. *Hilgardia*, 1983, **51**(3): 1 – 75.
- [33] GAN F F, KOEHLER K J. Goodness of fit tests based on P — P probability plots [J]. *Technometrics*, 1990, **32**(3): 289 – 303.
- [34] 王斌会, 徐勇勇. 正态性检验的图示方法及其应用[J]. 数理统计与应用概率, 1999, **11**(3): 249 – 256.
WANG Binhui, XU Yongyong. The graphic method of normality test and its application [J]. *Math Stat Appl Prob*, 1999, **11**(3): 249 – 256.
- [35] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究：以河北省遵化市为例 [J]. 应用生态学报, 2000, **11**(4): 557 – 563.
GUO Xudong, FU Bojie, MA Keming, *et al.* Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GISA case study in Zunhua City of Hebei Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2000, **11**(4): 557 – 563.
- [36] 安吉县林业局. 安吉县森林资源规划设计调查成果报告[R]. 安吉：安吉县林业局, 2008.
- [37] 安吉县林业局. 安吉县森林资源调查及规划设计成果汇编[R]. 安吉：安吉县林业局, 1999.

“香榧良种选育及高效栽培关键技术与推广” 获浙江省科学技术奖一等奖

2014 年 4 月 29 日，浙江省科学技术奖励大会在杭州举行。浙江农林大学“香榧良种选育及高效栽培关键技术与推广”科研项目获得一等奖。此外，“高性能竹层积材生产关键技术与应用”项目获得二等奖，“机械零部件产品集成创新设计技术及其应用”“西兰花安全高效生产关键技术与集成应用”等项目获得三等奖。

此次获得一等奖的科研项目“香榧良种选育及高效栽培关键技术与推广”由戴文圣教授领衔的科研团队主持完成。该项目针对制约香榧产业发展的瓶颈问题与关键技术，经过 10 余年的不懈努力，研究解决了一系列基础理论与应用技术：阐明了榧树群体的遗传分化程度，建立了首张香榧遗传连锁图谱，建成了国内种类最为齐全的榧树种质资源库；揭示了榧树种内性状变异和性状相关，选育国家级审定新品种 1 个，认定香榧新品种 3 个；发明双层塑膜拱棚增温催芽技术和香榧贴枝接技术，使榧树种子发芽率提高 40% 以上，香榧嫁接成活率提高 20% 以上；集成了提高香榧造林成活率关键技术，基地造林成活率由不到 40% 提高到 85% 以上；探明了香榧幼林生长发育和养分需求规律，研发香榧幼林林地和树体综合管理技术，使幼年林始果期提早 3~4 年；发表研究论文 18 篇，出版专著 2 本，获授权发明专利 1 项，制定了 LY/T 1774-2008《香榧栽培技术规程》，LY/T 1773-2008《香榧籽质量要求》等国家林业行业标准。

近 3 年来，利用榧树种子催芽技术、周年嫁接技术共培育了 560 万株实生苗、375 万株良种嫁接苗，推广良种栽植 10 000 hm²；新建高效栽培示范基地 900 hm² 以上，示范推广标准化栽培技术近 1 500 hm²，推广区域遍及香榧新老产地，累计增收香榧干果 43 万 kg，产生经济效益 2.53 亿元，使香榧这个古老树种成为山区农民脱贫致富奔小康的“致富树”。

杜春华