浙 江 农 林 大 学 学 报，2013，**30**(3)：325 – 329
Journal of Zhejiang A & F University

基于遥感信息模型的香格里拉森林生物量估算

王金亮[1]，程鹏飞[2]，徐　申[3]，王小花[4]，程　峰[1]

（1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院，云南 昆明 650500；2. 云南省一九八煤田地质勘探队，云南 昆明 650208；3. 昆明市西山区第一中学，云南 昆明 650106；4. 重庆市梁平县规划局，重庆 梁平 405200）

摘要：森林生物量是陆地生态系统碳循环过程中最主要的参数，森林生物量准确估算是进行森林碳循环和碳储量及变化分析的基础。以香格里拉这一特殊区域为研究区，以野外调查样方数据为基础，利用植被指数、降水、积温、太阳总辐射量、海拔等多个因子，组合成遥感综合因子层、地理综合因子层与水、光、热一同构成变量，建立了研究区丽江云杉 *Picea likiangensis*-长苞冷杉 *Abies georgei* 林，川滇高山栎 *Quercus aquifolioides* 林，云南松 *Pinus yunnanensis* 林，高山松 *Pinus densata* 林等 4 个建群种森林生物量遥感估算模型，并进行了检验。据此模型开展其生物量估算研究，结果表明：研究区 4 种森林总生物量为 1.14 亿 t，其中云冷杉林、栎类林、云南松林、高山松林 4 种森林的生物量分别是 0.715 亿 t，0.14 亿 t，0.09 亿 t 和 0.20 亿 t；4 种森林总的生物量分布在海拔、坡度上都具有明显的规律，在坡向上无明显分布规律。图 1 表 7 参 10

关键词：森林生态学；香格里拉；遥感信息模型；生物量；估算；空间分布
中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-0756(2013)03-0325-05

Forest biomass estimation in Shangri-La based on the remote sensing

WANG Jinliang[1]，CHENG Pengfei[2]，XU Shen[3]，WANG Xiaohua[4]，CHENG Feng[1]

（1. College of Tourism & Geographical Sciences，Yunnan Normal University，Kunming 650500，Yunnan，China；2. Yunnan 198 Coal Geological Exploration Team，Kunming 650208，Yunnan，China；3. No.1 Middle School of Xishan District，Kunming 650106，Yunnan，China；4. Urban Planning Bureau of Liangping County，Chongqing Municipality，Liangping 405200，Chongqing，China）

Abstract：To provide a basis for analyzing the forest carbon cycle，carbon storage，and carbon changes，forest biomass，the main parameter for determining carbon cycle processes in terrestrial ecosystems，was estimated. Variables measured in the study site of Shangri-La，Yunnan Province，included the vegetation index，precipitation，accumulated temperature，total radiation，and elevation. Established models of regional forest biomass estimations for spruce-fir forests（*Abies georgei* and *Picea likiangensis*），oak forests（*Quercus aquifolioides*），Yunnan pine forests（*Pinus yunnanensis*），and alpine pine forests（*Pinus densata*）were tested by combining layers of remote sensing integrated factors，of geographic comprehensive factors，and of the above listed variables. Then，forest biomass was estimated. Results revealed a total biomass of 1.14 hundred million tons with the following forest type biomass estimates in hundred million tons：spruce fir forests was 0.71，oak forests 0.14，Yunnan pine forests 0.09，and Alpine pine forests 0.20. Also，for these forest types，altitude and slope influenced distribution of total biomass，but aspect did not.［Ch，1 fig. 7 tab. 10 ref.］

Key words：forest ecology；Shangri-La；remote-sensing information model；biomass；estimates；spatial distribution

森林生态系统是陆地最大的碳库，森林生物量的估算是进行森林碳循环和碳储量及变化分析的基

收稿日期：2012-04-08；修回日期：2012-05-29
基金项目：国家自然科学基金资助项目(40861009)；云南省中青年学术技术带头人培养项目(2008PY056)
作者简介：王金亮，教授，博士，从事遥感与地理信息系统应用研究。E-mail：wang_jinliang@hotmail.com

础，开展区域森林生物量的估算正愈来愈受到科学家们的普遍关注。遥感影像信息具有良好的综合性和现势性，与森林生物量之间存在相关性，基于遥感信息的森林生物量估测比传统方法更加优越。区域植物生物量估测的遥感模型基础，是从光合作用即植被生产力形成的生理过程出发，根据植物对太阳辐射的吸收、反射、透射及其辐射在植被冠层内及大气中的传输，结合植被生产力的生态影响因子，在遥感信息与生物量之间建立数学模型及其解析式进行遥感信息与环境因子的反演[1]。香格里拉县隶属云南省迪庆藏族自治州，属于滇西北三江并流区东段横断山地区，位于 26°52′~28°52′N，99°20′~100°19′E。全县东、南、西三面被金沙江环绕，与四川及云南丽江市毗邻。全县总面积为 1.16 万 km^2，森林覆盖率达 74.99%，主要植被类型为寒温性针叶林，常见的森林类型有丽江云杉 *Picea likiangensis*-长苞冷杉 *Abies georgei* 林，川滇高山栎 *Quercus aquifolioides* 林，云南松 *Pinus yunnanensis* 林，高山松 *Pinus densata* 林等[2]。香格里拉县属生态系统脆弱、敏感区，其森林碳储量的变化可以在一定程度上反映全球变化的特征。因此，拟运用遥感方法对森林生物量进行研究，以期对区域生物量和生态环境的研究提供可行的方法和基础数据。

1 模型的选择与构建

1.1 模型的选择

近年来，遥感(remote sensing)，地理信息系统(geography information systems)和全球定位系统(global positioning systems)技术发展迅速，人们对空间数据的使用不断深入，地理信息建模也迅速发展。遥感信息模型由于综合了遥感、地理信息系统、物理学等多学科知识，在气象气候、水文地理、土壤地理、植物地理、地质地貌等领域中得到了广泛的应用[3]。

生物量模型表达式为：

$$y=a_0R^{a_1}T^{a_2}(W)^{a_3}(P)^{a_4}(S)^{a_5}。\tag{1}$$

式(1)中：y 为样地生物量，R 为生长季辐射，T 为生长季积温，W 为生长季降水；P 为对多个遥感植被指数进行主成分分析得到的遥感植被信息层；S 为地理综合因子层，由植被类型、海拔、坡度、坡向、坡位、土壤类型经过层次分析得到；a_0，a_1，a_2，a_3，a_4，a_5 为常数[4]。

1.2 建模数据

1.2.1 *遥感数据* 采用 2009 年 12 月遥感影像，对其进行几何校正、辐射校正后，提取 12 个常用植被指数，并对其进行主成分分析，以前 3 个主成份值分别乘以各自贡献率之和作为遥感植被指数层 P(表1)。

1.2.2 *气候因子的选择* 研究区生长季光能辐射、生长积温、生长季降水分别采用云南省农业气候资源及区划[5]和中国气象局提供的数据[6]。

1.2.3 *综合因子的选择* 通过分析，选择了地形地貌、土壤有机质含量、树种生长率 3 组指标作为综合因子并进行分析。①地形地貌因子。选取了海拔、坡度、坡向、坡位 4 个指标(表 2)。利用研究区数字高程模型(DEM)数据，用 ArcGis10 提取海拔、坡度、坡向、坡位；计算海拔变化率，并对坡位进行空间分布提取及定量化[7]。②植被因子。植物的类型对生物量有着直接的影响，不同优势树种的生长速度与生物量积累的速度也不一致。利用多项式复合模型计算相同年龄不同树种积累生物量的速度[8]，云冷杉生长率为 1.00，川滇高山栎为 1.05，高山松为 2.29，云南松为 3.22。③土壤因子。土壤数据采用研究区 2006 年森林资源规划设计调查数据土壤分布数据[9]及实测土壤有机质数据，选取不同土壤类型有机质含量作为生物量估测的因子之一。指标量化后，需要确定不同指标的权重，以确定综合影响因子层各因子对生物量积累的贡献值。采用层次分析法(AHP)对不同指标进行权重赋值，确定因子权重。根据各种立地条件在植物生长中的重要性，利用层次分析软件 yaahp052 计算出生物量各影响因子权重系数(表 2)。对表 2 因子取值，乘以权重，将不同因子计算结果求和，得到地理综合因素层(S)。

1.3 模型的构建

将遥感信息提取的各自变量带入方程(1)，并对两边取对数得到方程(2)：

$$\lg y=\lg a_0+a_1\lg R+a_2\lg T+a_3\lg W+a_4\lg P+a_5\lg S。\tag{2}$$

将各样点数据代入式(2)，计算出模型中参数值 a_0，a_1，a_2，a_3，a_4，a_5。得到香格里拉森林生物量的遥感信息模型，如式(3)：

表 1　植被指数主成分分析表

Table 1　Principal component analysis of vegetation index

植被指数名称	表达式	主成分		
		P_1	P_2	P_3
归一化植被指数	$N_{DVI}=(N_{IR}-R)/(N_{IR}+R)$	0.200	0.967	−0.099
比值植被指数	$R_{VI}=R/N_{IR}$	0.245	0.936	0.044
垂直植被指数	$P_{VI}=\sqrt{(0.355N_{IR}-0.149R_{ed})^2+(0.355R_{ed}-0.852N_{IR})^2}$	0.940	0.185	0.242
绿色植被指数	$G_{VI}=-0.160\ 3T_{MI}-0.281\ 9T_{M2}-0.493\ 9T_{M3}+0.794\ 0\ T_{M4}-0.000\ 2T_{M5}-0.144\ 6T_{M7}$	0.812	0.528	0.144
差值植被指数	$D_{VI}=N_{IR}-R_{ed}$	0.823	0.519	0.150
亮度植被指数	$B_{VI}=0.024\ 3T_{M1}+0.415\ 8T_{M2}+0.552\ 4T_{M3}+0.574\ 1T_{M4}+0.312\ 4T_{M5}+0.230\ 3T_{M7}$	0.913	−0.337	0.188
修正型土壤植被指数	$M_{SAVI}=\frac{2N_{IR}+1-\sqrt{(2N_{IR}+1)^2-8(N_{IR}-R_{ed})}}{2}$	0.203	0.949	−0.153
ND32	$N_{D32}=(T_{M3}-T_{M2})/(T_{M3}+T_{M2})$	0.737	−0.509	−0.360
VIS123	$V_{IS123}=T_{M1}+T_{M2}+T_{M3}$	0.791	−0.534	0.200
1/TM3	$T_{m3}=1/T_{M3}$	−0.866	0.307	0.341
1/TM4	$T_{m4}=1/T_{M4}$	−0.899	−0.102	0.402
ALBEDO	$A_{LBEDO}=T_{M1}+T_{M2}+T_{M4}+T_{M5}+T_{M7}$	0.876	−0.415	0.185
特征值		6.672	4.231	0.654
贡献率/%		55.598	35.254	5.452
累计贡献率/%		55.598	90.852	96.304

$$y=0.282\ 5R^{0.327}T^{0.103}(W)^{0.567}(P)^{1.179}(S)^{0.252}。\tag{3}$$

利用未参加建模的预留野外样点对模型进行适用性检验，用实测值与模型估测值组对，建立线性回归方程 $y=a+bx$，如果模型拟合的很好，常数项(a)和回归系数(b)就分别趋近于 0 和 1。经检验，遥感信息模型的常数项 a 及回归系数 b 值分别为 0.009 和 1.021，均接近理想值。这表明，该模型适应性较好。

表 2　生物量影响因子权重系数表

Table 2　Weight coefficient of the biomass factors

一级指标	一级系数	二级指标	二级系数
植被	0.40	树种生长率	
地形地貌	0.35	海拔	0.34
		坡度	0.37
		坡向	0.17
		坡位	0.12
土壤	0.25	土壤有机质	

遥感信息模型属于非线性模型，不能直接用线性模型的检验方法来检验，但可通过将模型化解为对数线性模型后对拟合的结果进行检验。检验得到模型的相关系数 R，复相关系数 R^2，判定系数 aR^2 及 F 统计量分别为：0.809，0.655，0.661 和 101.436；模型相关系数、调整判定系数值均较高，显著性较好，系数显著。利用预留的 22 个野外样方生物量值，与模型估测的森林生物量估测值进行了比较，估算精度达到了 76.43%。

2　森林生物量估算

2.1　森林生物量估算结果及精度

用遥感信息模型估算香格里拉云冷杉林(包括长苞冷杉和丽江云杉)，栎类林为川滇高山栎林、云南松林和高山松林等 4 种森林的生物量(图 1)。4 树种总生物量为 1.14 亿 t，各树种生物量见表 3。

利用 2006 年森林资源规划设计调查数据及相近区域相同树种的蓄积量-生物量转换方程[10]，计算各树种生物量，并与遥感信息模型估算的各树种森林生物量数据对比，对比结果如表 4。

从表 4 可知：高山松林生物量的估算精度最高，云冷杉林与云南松林次之，栎类林估算精度最低，

4 种森林的平均估测精度达到了 80.92%，总体精度较高。

2.2 香格里拉县森林生物量分析

香格里拉 4 种森林生物量总量较大为 1.14 亿 t，其中云冷杉林、栎类林、云南松林、高山松林的生物量分别是 0.71，0.14，0.09 和 0.20 亿 t。4 种森林生物量具有明显空间分布规律。

2.2.1 *香格里拉森林生物量海拔梯度分布* 根据香格里拉海拔和不同树种在不同海拔上的分布特征，将海拔划分为 7 个等级(表 5)。将研究区海拔分布图与生物量分布图做叠加分析，结果显示：香格里拉森林生物量主要分布在 2 400~4 000 m，占总生物量的 86.15%；海拔低于 2 000 m 和超过 4 000 m 生物量所占比例较小。从不同海拔等级来看，生物量在 3 600~4 000 m 分布最多，占总生物量的 35.01%，其次，在 3 200~3 600 m 和 2 800~3 200m 分布也比较集中，分别占到总量的 22.63%和 19.39%。总体变化呈现出近似正态分布规律即生物量主要分布于平均海拔附近，高海拔地区和低海拔地区的生物量分布较少。

图 1 香格里拉 4 种主要森林生物量分布图

Figure 1 Distribution of Shangri-La forest biomass

表 3 各树种林分生物量估测值

Table 3 Estimation value of biomass for the forest types

树种	总生物量/亿 t	单位面积生物量/(t·hm⁻²)		
		平均值	最小值	最大值
云冷杉林	0.71	238.274	26.487	598.714
栎类林	0.14	112.997	15.889	374.091
云南松林	0.09	89.013	56.244	214.188
高山松林	0.20	114.161	43.456	358.672

表 4 森林生物量估测精度对照表

Table 4 Estimation accuracy of forest biomass

树种	估算值/亿 t	森林调查值/亿 t	估测差/亿 t	估测精度/%
云冷杉林	0.71	0.60	−0.11	81.63
栎类林	0.14	0.19	0.05	76.17
云南松林	0.09	0.07	−0.02	79.84
高山松林	0.20	0.23	0.03	86.04

2.2.2 *香格里拉森林生物量坡度分布* 根据林业调查中对坡度的分级方法，将坡度从 0°~90°分为平坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡、险坡 6 类(表 6)。将研究区坡度分级图与香格里拉森林生物量分布图叠加分析显示：生物量多分布在坡度 6°~45°，即缓坡、斜坡、陡坡、急坡。其中又以斜坡和陡坡上分布的最多，分别占 33.73%和 43.91%，两者之和近 80%。在平坡和险坡上，生物量分布则较少，两者之和不足 1%，总体呈正态分布规律。

2.2.3 *香格里拉森林生物量坡向分布* 根据森林调查中对坡向的分级方法，将坡向分为东、南、西、北、东北、东南、西南、西北 8 类。研究区森林生物量在各个坡向上分布较为均匀，其中东北坡生物量

表 5 不同海拔森林生物量分布情况

Table 5 Distribution of forest biomass at different altitudes

海拔范围/m	总生物量/t	占总生物量的比例/%
2 000 以下	2 424 873.89	2.12
2 000~2 400	6 706 169.14	5.87
2 400~2 800	10 421 487.48	9.12
2 800~3 200	22 156 011.29	19.39
3 200~3 600	25 850 110.32	22.63
3 600~4 000	39 996 149.07	35.01
>4 000	6 698 165.86	5.86

表 6 不同坡度森林生物量分布情况

Table 6 Distribution of forest biomass in different slopes

坡度	坡度范围/(°)	总生物量/t	占总生物量的比例/%
平坡	0~5	215 439.00	0.19
缓坡	6~15	11 705 763.86	10.25
斜坡	16~25	38 541 210.92	33.73
陡坡	26~35	50 166 135.50	43.91
急坡	36~45	12 956 111.23	11.34
险坡	>45	668 306.54	0.58

分布稍多占 14.91%，而生物量分布最少的南坡也有 9.49%(表 7)。可以看出，香格里拉森林生物量在向上分布较均匀，分布规律不明显。

表 7　不同坡向森林生物量分布情况

Table 7　Distribution of forest biomass in different aspects

坡向	总生物量/t	占总生物量比例/%
东坡	15 021 002.46	13.45
南坡	10 809 312.84	9.46
西坡	16 376 636.44	14.33
北坡	14 963 875.46	13.10
东北坡	17 031 381.98	14.91
东南坡	11 310 549.82	9.90
西南坡	13 765 658.21	12.05
西北坡	14 974 550.50	13.11

3　结语

利用遥感信息模型估算研究区 4 个树种的森林生物量总量为 1.14 亿 t，与森林调查规划数据相比，平均估算精度达到了 80.92%。生物量空间分布的分析结果显示：总生物量在海拔3 600~海拔 4 000 m 分布最多，其次是 3 200 ~3 600 m，总的生物量随海拔的变化呈现出近似正态分布规律；在坡度方面，生物量多分布在坡度为 6°~45°，又以斜坡、陡坡最多，坡度平缓和陡峭地区生物量分布较少，呈正态分布；在不同坡向上，生物量的分布较为均匀，无明显规律。

本研究对乔木层地上部分生物量估测，虽然取得了较高的精度，但未考虑地下生物量。今后有必要补充这方面的研究。另外，已有的资料表明，森林生物量的主要组成部分——乔木层的生物量在单株树木的叶、枝、干、根的分布随树种不同而差异较大，是否这种差别能在植物叶绿素含量、有效吸收光合辐射等机理性指标上体现，并与遥感信息存在相关性，目前尚无具体研究，这是生物量遥感估测有待解决的问题。

参考文献：

[1] 马炜，孙玉军. 我国的森林生物量研究[J]. 世界林业研究，2009，**22** (5)：71 – 76.
MA Wei，SUN Yujun. Forest biomass in China [J]. *World For Res*，2009，**22** (5)：71 – 76.

[2] 宋发荣. 迪庆藏族自治州森林资源规划设计调查报告[R]. 大理：云南省林业调查规划院大理分院，2006：12 – 18.

[3] 李娜. 川西亚高山森林植被生物量及碳储量遥感估算研究[D]. 雅安：四川农业大学，2008：32 – 39.
LI Na. *Application of Remote Sensing Model in Biomass Estimation and Carbon storage of the Subalpine Coniferous Forest in Western Sichuan Province* [D]. Ya'an：Sichuan Agricultural University，2008：32 – 39.

[4] 钱乐祥，李爽，丁圣彦. 面向对象的地理遥感信息模型建模过程[J]. 计算机工程与应用，2003 (12)：112 – 113.
QIAN Lexiang，LI Shuang，DING Shengyan. Process of modeling object-oriented remote sensing information models of geographical [J]. *Comp Eng Appl*，2003 (12)：112 – 113.

[5] 王宇. 云南省农业气候资源及区划[M]. 北京：气象出版社，1990：13 – 118.

[6] 中国气象局. 历史气象数据查询[DB/OL]. [2009-11-20]. http://www.cma.gov.cn/lssjcx/.

[7] 秦承志，朱阿兴，李宝林，等. 坡位的分类及其空间分布信息的定量化[J]. 武汉大学学报：信息科学版，2009，**34** (3)：374 – 377.
QIN Chengzhi，ZHU Axing，LI Baolin，*et al*. Taxonomy of slope positions and quantification of their spatial distribution information [J]. *Geomatics & Inform Sci Wuhan Univ*，2009，**34** (3)：374 – 377.

[8] 黄春，施本俊. 用多项复合模型预测林分蓄积生长过程[J]. 云南林业调查规划，1996，**3** (1)：16 – 18.
HUANG Chun，SHI Benjun. Number of composite model to predict stand volume growth process[J]. *For Invent Plann*，1996，**3** (1)：16 – 18.

[9] 王绍强，周成虎，李克让，等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报，2000，**55** (5)：537 – 541.
WANG Shaoqiang，ZHOU Chenghu，LI Kerang，*et al*. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. *Acta Geogr Sin*，2000，**55** (5)：537 – 541.

[10] 黄从德，张健，杨万勤，等. 四川省及重庆地区森林植被碳储量动态[J]. 生态学报，2008，**28** (3)：966 – 975.
HUANG Congde，ZHANG Jian，YANG Wanqin，*et al*. Dynamics on forest carbon stock in Sichuan Province and Chongqing City [J]. *Acta Ecol Sin*，2008，**28** (3)：966 – 975.