不同龄组的热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析

杨存建^{1 2 3} 刘纪远² 骆剑承²

(1 四川师范大学资环学院遥感与 GIS 应用研究中心, 成都 610068)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101) (3 云南大学生态与地植物学研究所, 昆明 650018)

摘 要 在森林植被生物量遥感动态监测方面最基础性的研究是探讨生物量与遥感数据及其派生数据、地形数据和气象数据之间的相关性。为此, 以我国云南省西双版纳的热带森林植被为例, 分别对幼龄林、中龄林、近熟林和成过熟林的生物量与其对应的 LANDSAT TM 数据及其派生数据、气象数据和地形数据之间的相关性进行了分析。首先, 利用森林资源连续清查的林业固定样地数据, 通过各树种组的各器官生物量估算模型计算出各样地森林植被的生物量, 并根据样地的坐标来建立样地 GIS 数据库。然后, 利用地形图对遥感图像进行几何校正, 并对遥感图像进行主成分变换、缨帽变换以及植被指数的计算来产生其派生数据。其次, 将栅格样地数据、遥感数据(如 LANDSAT TM 数据)及其派生数据(如各种植被指数数据、主成分数据、缨帽变换的亮度、绿度和湿度数据)、栅格地形数据(如 DEM 和坡向)和栅格气象数据(包括年平均温度、大于 0 °C 的积温、年平均降雨量和湿润度)统一到同一坐标系和投影下, 并将所有的数据内插为 30 m 分辨率的格网数据, 利用样地数据与遥感数据及其派生数据、地形数据和气象数据进行栅格空间叠加分析, 从而得到各样地的样地数据、遥感数据及其派生数据、地形数据和气象数据。再次, 根据各样地优势树种所属的龄组将所有的数据层化为幼龄林、中龄林、近熟林和成过熟林等几个不同龄组的样本数据。最后, 分别对幼龄林、中龄林、近熟林和成过熟林的样地生物量与其对应的遥感数据和派生数据、气象数据和地形数据进行相关性分析。研究表明, 在所有的因子中, 幼龄林的生物量与 LANDSAT 的 TM1 和 TM6 波段的亮度值在 0.05 的水平上呈显著相关, 其相关系数均为 -0.33; 中龄林的生物量与降雨量在 0.05 的水平上呈显著相关, 其相关系数为 0.33; 近熟林的生物量与 LANDSAT TM 的派生数据 VI3、LANDSAT 的 TM4 和缨帽变换的亮度值在 0.05 的水平上呈显著相关, 其相关系数分别为 0.50、-0.45 和 -0.45; 成过熟林的生物量与主成分变换的第二主成分(PC2)在 0.05 的水平上呈显著相关, 其相关系数为 -0.46。在 0.05 的水平上, 近熟林的生物量与 LANDSAT TM 的派生数据 VI3 的相关系数最高, 达到 0.50, 其次是成过熟林的生物量与主成分变换的第二主成分的相关系数, 为 -0.46。

关键词 热带森林植被 生物量 遥感 相关性分析

CORRELATION ANALYSIS OF LANDSAT TM DATA AND ITS DERIVED DATA, METEOROLOGICAL DATA AND TOPOGRAPHIC DATA WITH THE BIOMASS OF DIFFERENT AGED TROPICAL FORESTS

YANG Cun-Jian^{1 2 3} LIU Ji-Yuan² and LUO Jian-Cheng²

(1 Research Center of Remote Sensing and GIS Applications, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

(2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

(3 Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650018, China)

Abstract Correlation analysis of LANDSAT TM data and its derived data, meteorological data and topographic data with the biomass of tropical forest vegetation of different ages (Young, middle-aged, near mature, mature and over mature forests) were explored in Xishuangbanna, Yunnan Province, China. The analysis included four steps. First, the biomass of each forest was determined from field inventory data and a GIS database based on the geo-coordinates of each forest sample site. Second, the LANDSAT TM images were geometrically corrected using topographic maps. The derived data were derived from the LANDSAT TM images using principal component analysis, tasseled cap transform and vegetation index analysis. Third, the data, including

收稿日期: 2003-10-20 接受日期: 2004-05-15

基金项目: 中国科学院知识创新项目(CX10G-E01-02-02) 国家自然科学基金项目(40161007) 以及科技部 863 项目(2002A135230)

对云南省林业调查规划设计院曹善寿、吕树英、邓佩文、肖健和参加样地调查处理的所有同志表示特别的感谢, 对中国科学院遥感应用研究所张增祥以及云南大学生态学所党承林教授等提供的帮助表示特别的感谢

E-mail: yangcj9802@sina.com

LANDSAT TM data and its derived data, topographic data, such as *DEM* and aspect, and climatic data, such as annual average temperature, annual average accumulative temperature above zero degree, annual average precipitation and humidity, were referenced to the same projection and coordinate system and interpolated across a grid at a resolution of 30 meter. The LANDSAT TM data and its derived data, the topographic data and the climatic data for the samples were achieved by using overlay analysis. Fourth, all of the data were overlaid onto the different-aged forests. Finally, correlations among the LANDSAT TM and its derived data, meteorological data, topographical data and forest biomass were analyzed for each forest type. Our results are as follows: 1) Correlations between the biomass of the young forest and LANDSAT TM1 and LANDSAT TM6 were significant at the 0.05 level and both correlations reached -0.33 . 2) The correlation between the biomass of the middle-aged forest and precipitation was significant at the 0.05 level and reached 0.33 . 3) The correlations between the biomass of the near mature forest and *VI3*, *TM4* and Bright Index were significant at the level 0.05 and were 0.50 , -0.45 and -0.45 , respectively. 4) Correlations of the biomass of mature and over mature forest and the second principal component, which were significant at the 0.05 level, reached -0.46 . 5) The highest correlation existed between the near mature forest biomass and *VI3*.

Key words Tropical forest vegetation, Forest age, Biomass, Remote sensing, Correlation analysis

植被生物量的动态监测对于区域可持续发展的决策以及全球变化的研究均具有极其重要的意义。利用遥感技术进行植被生物量的动态监测既是发展生物量监测技术的需要,也是遥感技术应用发展的需要。遥感已成功用于植被的分类(刘纪远等, 1998; Li & Yang, 1993)和植物 *NPP* 的估算(郑元润等, 2000),但是在植被生物量的遥感监测方面还有待于深入,而在这方面最基础的研究就是探讨生物量与遥感数据及其派生数据、地形数据和气象数据之间的相关性。目前,对草本植被生物量与遥感数据的相关性分析较多,并得到一些重要的发现,如放牧草地的植被生物量与 LANDSAT TM 缨帽变换的绿度指数、湿度指数以及植被指数和红光波段(*TM3*)之间具有较好的相关关系,其复相关系数在 $0.62 \sim 0.67$ 之间(Todd *et al.*, 1998)。对森林植被生物量与遥感数据的相关性分析的研究结果表明,芬兰北部地区森林植被生物量与遥感植被指数之间相关关系不够明显(Hame *et al.*, 1997),而喀麦隆的热带森林植被生物量与中红外植被指数以及中红外波段之间具有较好的相关性,分别达到 0.47 和 -0.44 (Boyd *et al.*, 1999)。从已有的研究可以看出不同的植被,由于其种类、年龄以及所处地理环境等方面的差异,可能会导致其生物量与遥感数据及其派生数据之间相关性的差异。我国热带森林植被以及其不同龄组的森林植被生物量与遥感数据及其派生数据、气象数据和地形数据之间的相关性问题的研究,不仅有利于该领域的知识创新,而且还有利于我国以及类似区域的热带森林植被生物量的遥感监测。为此,本文以我国云南省西双版纳的热带森林植被为例来探讨不同龄组的森林植被生物量与遥感数据及其派生数据、气象数据以及地形数据之间的相关

性。

1 试验区及数据

试验区为我国云南省西双版纳傣族自治州,位于云南南部边疆。该区为我国热带森林生态系统保持较完整、热区生物资源十分丰富的地区,具有热带雨林、热带季雨林、亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林等。该区有大量的珍稀植物。如望天树(*Parashorea chinensis*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)以及版纳青梅(*Vatica fleuryana*)等。该区优越的地理位置、丰富的生物气候类型、不同的地貌形态和森林环境,孕育了丰富的野生动物资源。

所使用的数据包括气象数据、地形数据、森林资源连续清查的固定样地数据和遥感数据。这里所使用的固定样地数据为 1997 年森林资源连续清查的数据,样地的大小为 $28.28 \text{ m} \times 28.28 \text{ m}$ 。该样地数据包含了样地因子数据和每木检尺的数据。本文所使用的样地因子数据主要是样地号、样地的纵座标、横座标、样地类别、地类、龄组、优势树种等样地因子数据。所使用的每木检尺数据主要有样地号、立木类型、样木号、树种代码、检尺类型和直径。在 GIS 软件环境下,根据各样地的坐标,建成 GIS 的数据库。卫星遥感数据主要为 1997 年 2 月 10 日的 LANDSAT-5 的 TM 图像。利用地形图作为基础图,通过在地图和遥感图像上选取明显同名地物点对遥感图像进行几何校正,采用最近邻法进行像元亮度值的确定,将 *TM6* 波段重采样到 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 的像元大小,并实现遥感图像与样地 GIS 数据库的配准。

气象数据包括温度数据和降雨数据,温度数据包括年平均温度数据(*TA*)和大于 0°C 的积温数据

(T_0)降雨数据为年平均降雨量数据(PA)。所有这些数据都是观察站点所采集到的多年气象数据的年平均数据。利用 GIS 并结合 DEM 数据和有关地学和气象学知识,对温度和降雨数据进行空间插值,从而得到相应的面状数字数据,并在温度和降雨量的基础上产生湿润度指数的数据(IM)。

地形数据主要为 1:25 万的地形图数字化数据。从地形图数字数据中提取等高线,利用 GIS 软件 ARC/INFO 获取数字高程数据(DEM)和坡向数据(ASP)。

以上数据均被统一到同一坐标系和投影下。所采用的投影为等面积割圆锥投影,并采用全国统一的中央经线和双标准纬线,中央经线为 $105^{\circ}E$,双标准纬线分别为 $25^{\circ}N$ 和 $47^{\circ}N$,所采用的椭球体为 KRASOVSKY 椭球体。所有数据都被重采样为 30 m 分辨率的栅格数据。

2 数据处理

2.1 从遥感数据中产生其派生数据

从 LANDSAT TM 数据中产生系列植被指数的派生数据,如差值植被指数、归一化植被指数、垂直植被指数、比值植被指数、土壤调整比值植被指数、土壤调整植被指数、变形土壤调整植被指数(John *et al.*, 1998; Weiser *et al.*, 1986)和中红外植被指数(Boyd *et al.*, 1999)。其算法如下:

差值植被指数:

$$DVI = TM4 - A \times TM3 \quad (1)$$

归一化差值植被指数:

$$NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3) \quad (2)$$

垂直植被指数:

$$PVI = (TM4 - A \times TM3 - B) / \sqrt{1 + A^2} \quad (3)$$

比值植被指数:

$$RVI = TM4 / TM3 \quad (4)$$

土壤调整比值植被指数:

$$SARVI = TM4 / (TM3 + B / A) \quad (5)$$

变形土壤调整植被指数:

$$TSAVI = A \times (TM4 - A \times TM3 - B) / (TM3 + A \times TM4 - A \times B) \quad (6)$$

中红外植被指数:

$$VI3 = 100 \times (TM4 - TM5) / (TM4 + TM5) \quad (7)$$

式中, $TM3$ 和 $TM4$ 是 LANDSAT TM 的红光波段和近红外波段,根据有关参考文献确定 A 和 B 的值分

别为 0.969 16 和 0.084 72(John *et al.*, 1998; Weiser *et al.*, 1986)。

此外,利用如下变换式对 LANDSAT TM 图像进行缨帽变换,产生亮度($BRIGHT$)、绿度($GREEN$)和湿度(WET)。

$$BRIGHT = 0.3037TM1 + 0.2793TM2 + 0.4743TM3 + 0.5585TM4 + 0.5082TM5 + 0.1863TM7 \quad (8)$$

$$GREEN = -0.2848TM1 - 0.2435TM2 - 0.5436TM3 + 0.7243TM4 + 0.084TM5 - 0.18TM7 \quad (9)$$

$$WET = 0.1509TM1 + 0.1973TM2 + 0.3279TM3 + 0.3406TM4 - 0.7112TM5 - 0.4572TM7 \quad (10)$$

最后,对 LANDSAT TM 图像进行主成分变换,所产生各主成分的分量分别为 $PC1$ 、 $PC2$ 、 $PC3$ 、 $PC4$ 和 $PC5$,分别为第一、第二、第三、第四和第五主分。

2.2 从森林资源一类调查样地数据中产生生物量的数据

根据各样地中的各树种所属树种组选择相应的各树种组的各器官生物量估算模型,如思茅松(*Pinus kesiya* var. *langbianensis*)的生物量估算模型(吴兆录等,1992)、栎类(*Quercus*)和其它阔叶生物量估算模型(吴兆录等,1992)、桦木(*Betula*)或桤木(*Alnus*)生物量估算模型(党承林等,1992)、其它硬阔(党承林等,1994)、其它软阔(党承林等,1997),并利用每株样木的胸径,计算各样木器官的生物量,然后将各样木器官的生物量相加,从而得到每株样木的生物量,最后,将样地中各株样木的生物量相加,从而得到样地森林植被的生物量,并将其换算成 30 m $\times$ 30 m 大小的样地生物量,以及每公顷的生物量。各主要树种组的样木生物量的估算精度分别为:思茅松的生物量估算误差为 1%,栎类和其它阔叶生物量估算误差为 16%,桦木或桤木生物量估算误差为 4%,其它硬阔生物量估算误差为 14%,其它软阔生物量估算误差为 10%。在 GIS 的环境下,利用点状样地栅格数据与遥感数据及其派生数据、气候数据以及地形数据进行空间叠加,从而得到各样地的遥感及其派生数据、气候数据以及地形数据,以便于以下的分析。

3 不同龄组森林植被的生物量和遥感地学数据相关性分析

根据各样本所属的龄组将所有样本分成幼龄林、中龄林、近熟林和成过熟林,其样本数分别为

38、56、22 和 21。然后分别对每一个龄组内的样本数据进行生物量与遥感地学数据之间的相关性分析。

3.1 对幼龄林的分析

对幼龄林样本的生物量数据与 LANDSAT TM 各个波段的亮度值、各主成分值、各种植被指数、缨帽变换的亮度值、绿度值和湿度值、气象数据和地形数据进行相关分析,其相关性相对较高的如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,在幼龄林中,其生物量与 LANDSAT 的 *TM1* 和 *TM6* 波段的亮度值在 0.05 的水平上显著相关,其相关系数均为 -0.33。而在这个水平上与其它因子之间的相关性均不够显著。

3.2 对中龄林的分析

对中龄林样本的生物量数据与 LANDSAT TM 各个波段的亮度值、各主成分值、各种植被指数、缨帽变换的亮度值、绿度值和湿度值、气象数据和地形数据进行相关分析,其相关性相对较高的结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出,生物量与降雨量在 0.05 的水平上显著相关,其相关系数为 0.33。而在这个水平上与其它因子的相关性均不够显著。

3.3 对近熟林的分析

对近熟林样本的生物量数据与 LANDSAT TM 各个波段的亮度值、各组成分值、各种植被指数、缨帽变换的亮度值、绿度值和湿度值、气象数据和地形数据进行相关分析,其相关性相对较高的结果如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,对于近熟林而言,其生物量与 *VI3* 的相关系数最高,为 0.50。其次是与 LANDSAT 的 *TM4* 波段的亮度值的相关系数,为 -0.45。再次是与缨帽变换的亮度值的相关系数,为 -0.45。这些都在 0.05 的水平上呈显著相关。其它变量在此水平上,其相关性均不显著。

3.4 对成过熟林的分析

对成过熟林样本的生物量数据与 LANDSAT TM 各个波段的亮度值、各主成分值、各种植被指数、缨

表 1 幼龄林生物量与遥感数据及其派生数据、气象数据和地形数据之间的相关性分析

Table 1 The correlation analysis of the biomass of young forest and remote sensing data and its derived data , meteorological data , and topological data																	
	遥感数据及其派生数据											气象数据				地形数据	
	Remote sensing data and its derived data											Meteorological data				Topographical data	
	<i>TM1</i>	<i>TM2</i>	<i>TM3</i>	<i>TM4</i>	<i>TM5</i>	<i>TM6</i>	<i>BRIGHT</i>	<i>VI3</i>	<i>DVI</i>	<i>PVI</i>	<i>PC4</i>	<i>IM</i>	<i>PA</i>	<i>T0</i>	<i>TA</i>	<i>ASP</i>	<i>DEM</i>
相关系数	-0.33 *	-0.315	-0.23	-0.28	-0.21	-0.33 *	-0.28	0.25	-0.21	-0.21	-0.23	-0.16	-0.08	-0.29	-0.29	0.29	0.13
Correlation coefficient	-0.33 *	-0.315	-0.23	-0.28	-0.21	-0.33 *	-0.28	0.25	-0.21	-0.21	-0.23	-0.16	-0.08	-0.29	-0.29	0.29	0.13
* : $p < 0.05$																	

表 2 中龄林中生物量与遥感数据及其派生数据、气象数据和地形数据之间的相关性分析

Table 2 The correlation analysis of the biomass of middle-aged forest and remote sensing data and its derived data , meteorological data , and topological data																	
	遥感数据及其派生数据											气象数据				地形数据	
	Remote sensing data and its derived data											Meteorological data				Topographical data	
	<i>TM1</i>	<i>TM5</i>	<i>TM6</i>	<i>TM7</i>	<i>BRIGHT</i>	<i>WET</i>	<i>VI3</i>	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC4</i>	<i>PC5</i>	<i>IM</i>	<i>PA</i>	<i>T0</i>	<i>TA</i>	<i>ASP</i>	<i>DEM</i>
相关系数	0.07	-0.05	0.11	-0.05	-0.04	0.06	0.04	-0.04	-0.13	0.06	0.04	-0.12	0.33*	0.17	0.17	0.02	-0.16
Correlation coefficient	0.07	-0.05	0.11	-0.05	-0.04	0.06	0.04	-0.04	-0.13	0.06	0.04	-0.12	0.33*	0.17	0.17	0.02	-0.16
* : $p < 0.05$																	

表 3 近熟林中生物量与遥感数据及其派生数据、气象数据和地形数据之间的相关性分析

Table 3 The correlation analysis of the biomass of near mature forest and remote sensing data and its derived data , meteorological data , and topological data																	
	遥感数据及其派生数据											气象数据				地形数据	
	Remote sensing data and its derived data											Meteorological data				Topographical data	
	TM1	TM4	TM5	BRIGHT	GREEN	VI3	TSVAI	DVI	PVI	PC1	PC3	IM	PA	T0	TA	ASP	DEM
相关系数	-0.35	-0.45 *	-0.38	-0.46	-0.40	0.50 *	-0.37	-0.41	-0.41	-0.40	-0.40	-0.19	0.17	0.13	0.12	0.42	0.04
Correlation coefficient	-0.35	-0.45 *	-0.38	-0.46	-0.40	0.50 *	-0.37	-0.41	-0.41	-0.40	-0.40	-0.19	0.17	0.13	0.12	0.42	0.04
* : $p < 0.05$																	

帽变换的亮度值、绿度值和湿度值、气象数据和地形数据进行相关分析 ,其结果如表 4 所示。

从表 4 中可以看出 ,对于成过熟林而言 ,其生物

量与 $PC2$ 在 0.05 的水平上显著相关 ,其相关系数为 -0.46 ,而与其它变量在此水平上的相关均不够显著。

表 4 成过熟林中生物量与遥感数据及其派生数据、气象数据和地形数据之间的相关性分析
Table 4 The correlation analysis of the biomass of mature and over mature forest and remote sensing data and its derived data , meteorological data , and topological data

	遥感数据及其派生数据												气象数据				地形数据	
	Remote sensing data and its derived data												Meteorological data				Topographical data	
	TM1	TM5	TM6	TM7	BRIGHT	GREEN	WET	VI3	PC1	PC2	PC4	PC5	IM	PA	T0	TA	ASP	DEM
相关系数																		
Correlation coefficient	0.13	-0.26	0.21	-0.14	-0.16	-0.12	0.32	0.15	-0.19	-0.46	0.33	-0.22	-0.17	0.25	0.01	0.01	-0.01	0.06

* : $p < 0.05$

4 结果与讨论

本文通过对幼龄林、中龄林、近熟林和成过熟林的样地生物量与其对应的遥感数据及其派生数据、气象数据和地形数据的相关分析发现 ,幼龄林的生物量与 LANDSAT 的 $TM1$ 和 $TM6$ 波段的亮度值在 0.05 的水平上呈显著相关 ,其相关系数均为 -0.33 。而与其它因子在这个水平上 ,其相关都不够显著。幼龄林的生物量与 $TM1$ 波段之间呈负相关关系 ,说明了生物量越高 ,对该波段的吸收越强 , $TM1$ 的值就越低。这主要是因为 $TM1$ 波段为蓝光波段 ,植被在进行光合作用时 ,植被中的叶绿素对蓝光具有较强的吸收作用 ,叶绿素的多少又与叶子的多少有关。幼龄林叶子的生物量占其总生物量的比重相对较大。因此 ,幼龄林的生物量越高 ,其 $TM1$ 波段的值越低。

$TM6$ 波段为热红外波段 ,主要反映地物自身的热辐射 ,幼龄林生物量与 $TM6$ 波段之间呈负相关的关系 ,说明了幼龄林的生物量越低 ,其热辐射越高 ,这主要是由于林下土壤或岩石的影响。中龄林的生物量与降雨量在 0.05 的水平上呈显著相关 ,其相关系数为 0.33。而在这个水平上与其它因子的相关性均不够显著。这表明 ,对中龄林而言 ,其所处区域的降雨量越高 ,则其生物量就越高。这主要是由于中龄林处于生长旺盛时期。近熟林的生物量与 LANDSAT TM 的派生数据 $VI3$ 、LANDSAT 的 $TM4$ 和缨帽变换的亮度值在 0.05 的水平上呈显著相关 ,其相关系数分别为 0.50、 -0.45 和 -0.45 ,而与其它因子在此水平上的相关性均不够显著。中红外植被指数($VI3$)的高低反映了近红外的亮度值与中红外亮度值的大小 ,也反映了近红外到中红外之间坡度

的大小 ,近熟林的中红外植被指数越高 ,其生物量就越高。缨帽变换的亮度分量值是 LANDSAT TM 各个波段的亮度值的加权相加 ,其值越高 ,其对应的生物量就越低。

成过熟林的生物量与主成分变换的第二主成分 ($PC2$) 在 0.05 的水平上呈显著相关 ,其相关系数为 -0.46 ,而与其它变量在此水平上的相关性均不够显著。 $PC2$ 是 $TM3$ 、 $TM5$ 和 $TM7$ 的加权和与 $TM1$ 、 $TM2$ 、 $TM4$ 和 $TM6$ 的加权和之差 ,差值越大 ,其成过熟林的生物量越低。在 0.05 的水平上 ,近熟林的生物量与 LANDSAT TM 的派生数据 $VI3$ 的相关系数最高 ,达到 0.50 ,这比国外同类研究所得到的相关系数高。其次是成过熟林的生物量与主成分变换的第二主成分的相关系数 ,为 -0.46 。

参 考 文 献

Boyd, D. S. , G. M. Foody & P. J. Curran. 1999. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths. *International Journal of Remote Sensing*, **20**:1017 ~ 1023.

Dang, C. L. (党承林), Z. L. Wu (吴兆录) & Q. Zhang (张强). 1997. A study on biomass of the ravine tropical rain forest in Xishuangbanna. *Acta Botanica Yunnanica (云南植物研究)*, (Suppl. IX): 123 ~ 128. (in Chinese with English abstract)

Dang, C. L. (党承林), Z. L. Wu (吴兆录) & Z. Zhang (张泽). 1994. A study on the biomass of *Cyclobalanopsis delavayi* community. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)* (云南大学学报(自然科学版)), **16**: 206 ~ 209. (in Chinese with English abstract)

Dang, C. L. (党承林) & Z. L. Wu (吴兆录). 1992. Studies on the biomass for *Castanopsis echidnocarpa* community of monsoon evergreen broad-leaved forest. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)* (云南大学学报(自然科学版)), **14**: 95 ~ 107. (in Chinese with English abstract)

Hame, T., A. Salli, K. Andersson & A. Lohi. 1997. A new methodology for the estimation of biomass of conifer dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **18**:3211 ~ 3243.

John, G. L., Y. Ding, S. L. Ross & D. E. Chris. 1998. A change detection experiment using vegetation indices, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **64**:143 ~ 150.

Liu, J. Y. (刘纪远), D. F. Zhuang(庄大方), Y. R. Ling(凌扬荣) & Y. Awaya. 1998. Vegetation integrated classification and mapping using remote sensing and GIS techniques in north-east China. *Journal of Remote Sensing (遥感学报)*, **2**: 285 ~ 291. (in Chinese with English abstract)

Li, Z. X. & C. J. Yang. 1993. The study of mapping tropical forest vegetation by using multiple sensor information. *Remote Sensing of Environment*, **8**:180 ~ 188.

Todd, S. W., R. M. Hoffer & D. G. Milchunas. 1998. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, **19**:427 ~ 438.

Weiser, R. L., G. Asrar, G. P. Miller & E. T. Kanemasu. 1986. Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, **20**:141 ~ 152.

Wu, Z. L. (吴兆录) & C. L. Dang (党承林). 1992. The biomass and net primary productivity of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* stands in Changnin District, Yunnan. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (云南大学学报(自然科学版))*, **14**: 137 ~ 145. (in Chinese with English abstract)

Zheng, Y. R. (郑元润) & G. S. Zhou (周广胜). 2000. A forest vegetation *NPP* model based on *NDVI*. *Acta Phytoecologica Sinica (植物生态学报)*, **24**: 9 ~ 12. (in Chinese with English abstract)

责任编辑：彭少麟 责任编辑：刘丽娟