

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, 黄 河¹, 许辉熙¹, 党承林³

(1. 四川师范大学遥感与 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. 云南大学地植物学与生态研究所, 昆明 650018)

摘要: 以我国云南省西双版纳的热带森林为例, 对热带森林植被生物量与遥感地学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计算出各样地的森林植被生物量, 并建立其 GIS 数据库。然后, 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, 将样地数据、遥感数据及其派生数据, 地形和气象数据转换到统一的坐标系和投影下, 并将其内插为 30 米分辨率的格网数据。最后, 进行样地森林植被生物量与其遥感地学数据之间的相关性分析。该分析表明, 森林植被的生物量与年降雨量和第二主成分在 0.01 的水平上相关显著, 而与中红外植被指数、LANDSAT TM5、缨帽变换的亮度、湿度以及第一主成分在 0.05 的水平上相关显著。其中, 与年降雨量的相关性最高, 达到 0.308; 其次是与第二主成分, 达到 -0.231; 再次是与中红外植被指数和 LANDSAT TM5, 其相关系数分别为 0.203 和 -0.201。

关 键 词: 热带森林植被; 生物量; 遥感地学数据; 相关性分析

文章编号: 1000-0585(2005)03-0473-07

1 前言

在植被的遥感应用方面, 较多的是利用遥感数据进行植被的分类^[1,2]、农作物的种植分区^[3]、农作物的长势监测^[4]、农作物的估产^[5]、植物 NPP 的估算^[6], 以及植物叶面积指数的估算^[7]。植被生物量的遥感估算研究是植被遥感应用的一个重要方向, 在此方面, 国外已有学者进行了植被生物量与遥感数据及其派生数据之间的相关性分析。已有研究表明, 生物量与 SAR 的后向散射之间具有较强的相关性, 其生物量的饱和点大约在每公顷 40~60 吨^[8]。JERS-1/SAR 的后向散射数据与皆伐迹地上更新起来的热带次生林的生物量的相关性为 0.77, 而与择伐经营后所更新起来的热带次生林的相关性较低^[9]。也有研究表明, 放牧草地生物量与 TM 缨帽变换的绿色指数、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 到 0.67 之间^[10]。H. Ikeda 和 K. Okamoto 等的研究表明, NDVI 的累计值与光合产量具有较好的相关性, 利用 TM4/ TM5 的光谱指数估算生物量, 其模型的复相关系数为 0.75, 用 TM2/ TM3 的光谱

收稿日期: 2004-06-28; 修订日期: 2004-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40161007)、科技部 863 项目(2002a135230)以及中国科学院知识创新项目(CX10G-E01-02-03)、四川省青年基金项目(03ZQ026-032)资助

作者简介: 杨存建(1967-), 男, 四川成都人, 研究员。现主要从事遥感和地理信息系统的应用研究, 发表相关论文多篇。

指数估算生物量,其模型的复相关系数为 0.71,当用 NDVI 进行估算时,其模型的复相关系数为 0.67^[11]。C. M. Trotter 和 J. R. Dymond 分别在像元尺度和林分尺度上,利用 TM 数据对每公顷森林蓄积量进行了多元回归估算分析,其研究表明,当用林分尺度的平均数据进行估算时,其复相关系数高达 0.89。而用像元尺度上的数据进行估算时,其复相关系数多在 0.15~0.3^[12]。国外学者对芬兰北部的森林植被的研究表明,森林植被生物量与植被指数的相关关系不够明显^[13],而对喀麦隆的热带森林植被的研究却表明,中红外植被指数与热带森林植被的总生物量具有较好的相关性,其相关系数为 0.47,而与中红外反射波段也存在着较好的相关性,其相关系数为 -0.44^[14]。但是,就我国森林植被的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还有待研究。

为了探讨我国热带森林植被生物量与遥感地学数据之间相关性,本文以我国云南省西双版纳的热带森林植被为例,首先,在森林资源连续清查的林业固定样地数据的基础上,利用各树种组的生物量估算模型,计算出各样地中各树种组的生物量,并进一步统计出各样地的生物量。其次,根据样地的大地坐标,建立样地的 GIS 数据库。再次,将地形数据、气象数据、样地的 GIS 数据和遥感数据及其派生数据进行配准。最后,对样地生物量与其遥感地学数据进行相关性分析。

2 试验区及数据

试验区为我国云南省南部的西双版纳傣族自治州。该区为我国热带森林生态系统保持较完整、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、千果榄仁、绒毛番龙眼以及版纳青梅等等。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,也孕育了丰富的野生动物资源,成为我国珍稀动物的集萃区。

研究使用的数据包括森林资源连续清查的林业固定样地数据和遥感地学数据。固定样地的大小为 28.28m × 28.28m,样地调查的时间为 1997 年。调查所获取的主要数据有样地号、样地的大地坐标、样地类别、地类、优势树种等,此外还有样地中的立木类型、样木号、树种组、每木检尺类型和直径。在 GIS 软件环境下,根据各样地的坐标数据,将其建成 GIS 的数据库。遥感地学数据包括遥感数据、气象数据和地形数据。卫星遥感数据主要为 1997 年 2 月 10 日的 LANDSAT TM 数据。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,选用最临近的插值方式,对遥感图像进行几何校正处理,并与样地的 GIS 数据库进行配准。为了减少位置误差对分析的影响,对各样地的遥感影像进行了目视判读分析,保留位于植被变化不大处的样地,而将位于植被变化较大处的样地去除,不参加分析。

气候数据包括温度和降雨数据,温度数据包括年平均温度数据(TA)和大于 0 的积温数据(TO)。降雨数据为年降雨量(PA)。所有这些数据都是对观察站点所采集到的多年气象数据,通过平均而得到的年平均数据。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)。该数据集的分辨率为 30m。

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),并在此基础上产生坡向数据

(ASP)。

以上数据均被转换到统一的坐标系和统一的投影下。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纬线, 中央经线为东经 105 度, 双标准纬线分别为北纬 25 度和北纬 47 度, 所采用的椭球体为 KRASOVSKY 椭球体。所有数据都被重采样为 30M 分辨率的栅格数据。

3 数据处理

3.1 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、土壤调整植被指数和变形土壤调整植被指数^[15]。其算法如下:

$$\text{差值植被指数: } DVI = TM4 - A \times TM3 \quad (1)$$

$$\text{归一化植被指数: } NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3) \quad (2)$$

$$\text{垂直植被指数: } PVI = (TM4 - A \times TM3 - B) / \sqrt{1 + A^2} \quad (3)$$

$$\text{比值植被指数: } RVI = TM4 / TM3 \quad (4)$$

$$\text{土壤调整比值植被指数: } SARVI = TM4 / (TM3 + B/A) \quad (5)$$

$$\text{变形土壤调整植被指数: } TSAVI = A \times (TM4 - A \times TM3 - B) / (TM3 + A \times TM4 - A \times B) \quad (6)$$

$$\text{中红外植被指数: } VI3 = 100 \times (TM4 - TM5) / (TM4 + TM5) \quad (7)$$

在以上式中, $TM3$ 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 0.96916 和 0.084726^[15,16]。

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)。

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

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

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

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第一 ($PC1$)、第二 ($PC2$)、第三 ($PC3$)、第四 ($PC4$) 和第五 ($PC5$) 主分。

3.2 从森林资源一类调查样地数据中产生生物量的数据

首先, 根据样地中的树种组来选择其生物量估算模型, 这些估算模型包括思茅松的生物量估算模型^[16]、栎类和其他阔叶生物量估算模型^[17]、柞木或桉木生物量估算模型^[18]、其他硬阔生物量估算模型^[19]、和其他软阔生物量估算模型^[20]。其次, 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。再次, 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 30m × 30m 大小的样地的生物量, 以及每公顷的生物量。各树种组的样木生物量估算模型的精度分别为: 思茅松的生物量估算误差为 1%, 栎类和其他阔叶生物量估算误差为 16%, 柞木或桉木生物量估算误差为 4%, 其他硬阔生物量估算误差为 14%, 其他软阔生物量估算误差为 10%。最后, 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, 从而得到各样地的生物量数据、地形数据、遥感数据及其派生数据, 以便于以下的分析。

4 生物量与遥感地学数据之间的相关性分析

4.1 生物量与遥感数据之间的相关性分析

对 137 个林业固定样地的生物量数据与其对应的 LANDSAT TM 图像中的各波段的亮度值进行相关性分析, 结果如表 1 所示。

表 1 样地生物量与 LANDSAT TM 各波段亮度值之间的相关系数

Tab 1 Correlation coefficients between forest vegetation biomass, LANDSAT TM and its derived data

遥感数据及其派生数据	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7
与生物量的相关系数	- 0.072	- 0.107	- 0.128	- 0.142	- 0.201 *	0.032	- 0.157

注: * 为在 0.05 的水平上相关显著

从表 1 可以看出, 根据与森林植被生物量相关性的高低对 LANDSAT TM 各波段的排序为 TM5、TM7、TM4、TM3、TM2、TM1、TM6。除森林植被生物量与其 LANDSAT TM6 波段呈正相关外, 其余均呈负相关。在 0.05 的水平上, 森林植被生物量只与其 LANDSAT TM5 的相关系数显著, 且呈负相关, 这说明生物量越高的森林植被, 其 LANDSAT TM5 的值就越低。

对样地生物量与 LANDSAT TM 的主成分变换以及缨帽变换的各分量进行相关性分析, 结果如表 2 所示。

表 2 样地生物量与 LANDSAT TM 主成分变换各分量和缨帽变换各分量之间的相关系数

Tab 2 Correlation coefficients between forest vegetation biomass, components of the principal component analysis and components of Tasscap transform of LANDSAT TM

遥感数据及其派生数据	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	BRIGHT	GREEN	WET
与生物量的相关系数	-0.189 *	-0.231 **	-0.102	0.009	-0.055	-0.191 *	-0.118	0.188 *

注: ** 为 0.01 的水平上相关显著, * 为在 0.05 的水平上相关显著

从表 2 中可以看出, 根据与样地森林植被生物量相关性的高低对其各主成分分量的排序为 PC2、PC1、PC3、PC5、PC4。除样地森林植被生物量与其 PC4 呈正相关外, 与其余的各主分量均呈负相关。在 0.01 的水平上, 只有 PC2 与森林植被生物量的相关系数显著, 且呈负相关, 这说明生物量越高的森林植被, 其第二主分量的值就越低。对缨帽变换各分量而言, 按其与森林植被生物量相关系数的高低排序为亮度、湿度和绿色度。除森林植被生物量与湿度分量呈正相关外, 与其余各分量均呈负相关。在 0.05 的水平上, 森林植被生物量与亮度分量呈显著负相关, 而与湿度分量呈显著正相关。这表明生物量越高的森林植被, 其亮度分量的值就越低, 而湿度分量的值却越高。

对样地生物量与 LANDSAT TM 的各植被指数进行相关性分析, 结果如表 3 所示。

表 3 样地生物量与 LANDSAT TM 各植被指数之间的相关系数

Tab 3 Correlation coefficients between forest vegetation biomass and several vegetation indices

遥感数据及其派生数据	VI3	TSAVI	DVI	RVI	SARVI	PVI	NDVI
与生物量的相关系数	0.203 *	-0.020	-0.107	-0.053	-0.053	-0.107	-0.020

注: * 为在 0.05 的水平上相关显著

从表 3 可以看出, 根据各植被指数与生物量相关系数的高低排序为 VI3、DVI、PVI、

SARVI、RVI、NDVI、TSAVI，除与 VI3 为正相关外，其他的均为负相关。在 0.05 的水平上，VI3 与森林植被生物量的相关系数显著。这表明生物量越高的森林植被，其 VI3 的值就越高。

在森林植被生物量与 LANDSAT TM 及其派生数据的相关系数中，森林植被生物量与主成分变换的第二主分量之间的相关系数最高，达到 - 0.231，在 0.01 的水平上呈显著负相关。其次是与 VI3 的相关系数，达到了 0.203，再次是与 LANDSAT TM5 的相关系数，达到了 - 0.201，它们均在 0.05 的水平上呈显著相关。此外，在 0.05 的水平上呈显著相关的还有缨帽变换的亮度和湿度分量，以及第一主分量。

4.2 生物量与气象数据和地形数据之间的相关性分析

对 137 个林业固定样地的生物量数据与其对应的年平均温度数据（TA），大于 0 的积温数据（T0），平均年降雨量数据（PA），湿润度指数的数据（IM），数字高程数据（DEM）和坡向数据（ASP）进行了相关性分析，结果如表 4 所示。

表 4 森林植被生物量与气候数据和地形数据之间的相关系数

Tab 4 Correlation coefficients between forest vegetation biomass, meteorological data and topographical data

气候和地形因子	IM	PA	T0	TA	ASP1	DEM
与生物量的相关系数	0.069	0.308 **	0.068	0.062	0.104	-0.067

注：**为 0.01 的水平上相关显著

从表 4 中可以看出，森林植被的生物量与平均年降雨量在 0.01 的水平上显著相关，而与其他因子的相关性均不够显著。按其 与生物量相关系数的高低排序为 PA、ASP、IM、T0、DEM 和 TA。

从以上分析中，可以看出森林植被的生物量与平均年降雨量的相关性最高，达到 0.308，其次是与第二主成分，达到 - 0.231。再次是与 VI3，其相关系数为 0.203，以及与 LANDSAT TM5，其相关系数为-0.201。

5 结果与讨论

本文通过对 137 个林业固定样地的森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性进行了分析。分析表明，在 0.01 的水平上，森林植被生物量与平均年降雨量呈显著正相关，而与第二主分量呈显著负相关。这表明平均年降雨量越高的样地，其生物量就越高。森林植被生物量越高的样地，其第二主分量的值就越低。第二主分量是 TM3、TM5 和 TM7 的加权和与 TM1、TM2、TM4 和 TM6 的加权和之差，差值越大的样地，其生物量就越低。在 0.05 的水平上，森林植被生物量与 VI3 和缨帽变换的湿度分量呈显著正相关，而与 LANDSAT TM5、缨帽变换的亮度分量以及主成分变换的第一主分量之间呈显著负相关。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之间差异的大小，也反映了近红外到中红外之间坡度的大小，中红外植被指数越高的样地，其生物量就越高。缨帽变换的湿度分量越高的样地，其生物量就越高。LANDSAT TM5 的值越高的样地，其生物量越低。缨帽变换的亮度分量值越高的样地，其生物量越低。主成分变换的第一主分量值越高的样地，其生物量越低。本文的研究与国外学者在喀麦隆的类似研究相比，本文的相关系数与他们的结果相比偏低。其原因在于他们的研究是基于区域尺度的相

关性分析,而本文的研究是基于像元尺度的相关性分析。进一步的探讨在于根据样本所属的树种组或树龄组对样本数据进行分层,然后再分别对其进行相关性分析以及在区域尺度上进行相关性分析。

致谢:对云南省林业调查规划设计院曹善寿、吕树英、邓佩文、肖健和所有参加样地调查处理的同志表示特别的感谢!对中科院遥感应用研究所张增祥以及云南大学生态所王宝荣教授等提供的帮助表示特别的感谢!本文中所使用的气象数据和地形数据主要来自于国家“九五”科技攻关项目:“国家级基本资源与环境遥感动态信息服务体系的建立”中的部分成果,在此,对参与该项目的所有同志表示感谢。

参考文献:

- [1] 刘纪远,庄大方,凌扬荣. 基于 GIS 的中国东北植被综合分类研究. 遥感学报, 1998, 2(4): 285 ~ 291.
- [2] 刘纪远,庄大方,凌扬荣. 基于 GIS 的中国东北植被综合分类研究. 遥感学报, 1998, 2(4): 285 ~ 291.
- [3] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1031 ~ 1040.
- [4] 武建军,杨勤业. 干旱区农作物长势综合监测. 地理研究, 2002, 21(5): 593 ~ 598.
- [5] 江晓波,李爱农,周万村. 3S 一体化技术支持下的西南地区冬小麦估产. 地理研究, 2002, 21(5): 585 ~ 592.
- [6] 郑元润,周广胜. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型. 植物生态学报, 2000, 24(1): 9 ~ 12.
- [7] Fassnacht K S, Gower S T, MacKenzie M D, *et al.* Estimating the leaf area index of north central Wisconsin forests using the Landsat Thematic Mapper. Remote Sensing of Environment, 1997, 61(2): 229 ~ 245.
- [8] Imhoff M L. Radar backscatter and biomass saturation: ramifications for global biomass inventory. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 511 ~ 518.
- [9] J M Chen, J Cihlar. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(1): 153 ~ 162.
- [10] Todd S W, Hoffer R M, Milchunas D G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(3): 427 ~ 438.
- [11] Ikeda H, Okamoto K, Fukuhara M. Estimation of aboveground grassland phytomass with a growth model using Landsat TM and climate data. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(11): 2283 ~ 2294.
- [12] Trotter C M, Dymond J R. Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(10): 2209 ~ 2223.
- [13] Hame T, Salli A, Andersson K, Lohi A. A new methodology for the estimation of biomass of conifer-dominated boreal forest using NOAA AVHRR data. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15): 3211 ~ 3243.
- [14] Boyd D S, Foody G M, Curran P J. The relationship between the biomass of Cameroonian tropical forests and radiation reflected in middle infrared wavelengths. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(5): 1017 ~ 1023.
- [15] Weiser R L, Asrar G, Miller G P, *et al.* Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. Remote Sensing of Environment, 1986, 20: 141 ~ 152.
- [16] John G L, Ding Y, Ross S L, *et al.* A change detection experiment using vegetation indices. PE&RS, 1998, 64(2): 143 ~ 150.
- [17] 吴兆录,党承林. 云南昌宁县思茅松林的生物量和净第一性生产力. 云南大学学报, 1992, 14(2): 137 ~ 141.
- [18] 党承林,吴兆录. 季风常绿阔叶林短刺栲群落的生物量研究(短刺栲). 云南大学学报, 1992, 14(2): 98 ~ 102.
- [19] 党承林,吴兆录,张泽. 黄毛青冈群落的生物量研究(黄毛青冈). 云南大学学报, 1994, 16(3): 206 ~ 209.
- [20] 党承林,吴兆录,张强. 西双版纳沟谷热带雨林的生物量研究. 云南植物研究, 1997, (增刊): 125 ~ 129.

Correlation analysis of the biomass of the tropical forest vegetation , meteorological data and topographical data

YANG Cun-jian^{1,2,3} , LIU Ji-yuan² , HUANG He¹ , XU Hui-xi¹ , DANG Cheng-lin³

(1. Research Center of Remote Sensing and GIS Applications , Sichuan Normal University , Chengdu 610066 ,China ; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , CAS , Beijing 100101 ,China ; 3. Institute of Geobotany and Ecology , Yunnan University , Kunming 650018 ,China)

Abstract : This paper analyses the correlations between the biomass of the tropical forest vegetation and LANDSAT TM data , meteorological data and topographical data taking Xishuangbanna of China's Yunnan province as an example. It includes four steps. Firstly , the biomass for each forest sample is calculated by using the field inventory data of each sample. GIS Database is established according to the coordinate of each forest sample. Secondly , the LANDSAT TM images are geometrically corrected by using topographic maps. The derivative data are derived from the LANDSAT TM images by using principal component analysis , tasseled cap transform and vegetation index analysis. Thirdly , the data including Landsat TM data and its derivative data , the topographical data such as DEM and aspect , and the climatic data such as annual mean temperature , annual average accumulative temperature above zero degree , annual average precipitation and humidity are referenced to the same projection and coordination , and interpolated as the grid data with a resolution of 30 m. The Landsat TM data and its derivative data , the topographical data and the climatic data for the samples are achieved by overlay analysis. Finally , the correlation between the LANDSAT TM and its derived data , meteorological data , topographical data and the biomass are analyzed. It is shown that the biomass of the tropical forest vegetation is most obviously correlated with annual average precipitation and the second principal component of the principal component analysis of LANDSAT TM at 0.01 confident level. The correlation coefficients are respectively 0.308 and -0.231. The biomass is obviously correlated with spectral index VI3 , Landsat TM5 , spectral index such as brightness and humidity of the Tasscap transform , the first principal component at 0.05 confident level. The correlation coefficients are respectively 0.308 , -0.231 , 0.203 and -0.201.

Key words : tropical forest vegetation ; biomass ; remotely sensed geographic data ; correlation analysis