

# 基于 ALI 影像的植被冠层叶面积指数的遥感反演研究

张妮慧<sup>2</sup>, 张玲玲<sup>2</sup>, 赖格英<sup>1,2\*</sup>, 易发钊<sup>2</sup>, 曾祥贵<sup>2</sup>, 潘瑞鑫<sup>2</sup>

(1. 鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西南昌 330022; 2. 江西师范大学地理与环境学院, 江西南昌 330022)

**摘要** 以鄱阳湖源头之一的梅江流域作为研究区, 该地区植被多呈混交状态, 且疏密程度不均, 针对这一特性, 采用 EO-1 上搭载的高级陆地成像仪 (ALI) 生成的多光谱影像作为遥感信息源, 对该影像预处理后计算各植被指数信息; 考虑到研究区裸地比较多, 其中垂直植被指数 (PVI) 的计算引入土壤线参数。同时, 借助植物冠层分析仪 LAI-2000 实地测量获得研究区的 LAI 值, 而后对采样所得的 LAI 数据与通过遥感影像所获得的植被指数建立空间位置上的联系, 提取出相应点的 VI 值, 拟合两者之间的关系, 得到相应的反演模型, 在回归模型中依据相关系数  $R^2$  找出最佳模型, 最后反演制图得到该研究区的植被冠层 LAI 图。

**关键词** 叶面积指数; 植被指数; 土壤线; 遥感反演

**中图分类号** S126 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)23-09833-05

## Remote Sensing Inversion Study of Vegetation Canopy Leaf Area Index Based on ALI Image

ZHANG Ni-hui et al. (Key Lab of Poyang Lake Wetland and Watershed Research of Ministry of Education, Nanchang, Jiangxi 330022)

**Abstract** With Meijiang River watershed as the study area, in view of the features of mixed state of vegetation and uneven density degree, using the Advance Land Image (ALI) as the remote sensing data, different forms of Vegetation Index (VI) was derived from the ALI after conducting several basic pretreatment. Considering there are many bare land in the study area, the PVI computing was introduced into the soil line parameters. At the same time, the measured LAI value was obtained by the Plant Canopy Analyzer LAI-2000, then a spatial relationship between the measured LAI and the VI value which was calculated by the remote sensing data was established, the corresponding VI was derived. Then the retrieval model was obtained by fitting the linear and nonlinear relationship between LAI value and VI value, and according to the correlation coefficient ( $R^2$ ) to find out the best retrieval model for LAI inversion, the vegetation canopy LAI figure in the study area was obtained by inversion mapping.

**Key words** Leaf area index; Vegetation index; Soil line; Remote sensing inversion

叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 是表征地表植被冠层结构及其变化活动的基本而又重要的参数, 也是定量分析地球生态系统能量交换特性的重要结构变量<sup>[1]</sup>。它有多种定义方法, 目前较为普遍的是定义为单位面积上总叶面积的一半<sup>[2]</sup>。

近年来, LAI 的测量方法包括直接测量法和间接测量法。直接测量法虽然精确, 但却耗时费力, 对植被也具有一定的破坏性, 且采样不一定具有代表性<sup>[3]</sup>。间接测量方法包括光学仪器法和遥感反演法。光学仪器测量法测量数据相对精确且快, 但其无法进行大范围获取 LAI。遥感反演法包括统计模型法和光学模型法, 其中统计模型法主要是利用植被具有的特殊光谱特性进行构建得到不同形式的植被指数, 并用其与实测植被 LAI 建立相关性。已有诸多研究表明, 不同形式的植被指数和研究区一定数量的地面实测 LAI 数据相结合, 再采用相关数学统计方法构建回归模型, 利用模型可在大区域内反演地表 LAI 的信息<sup>[4]</sup>。为此, 笔者利用统计模型法反演梅江流域的 LAI, 针对梅江流域混合植被像元的特征, 使用 ALI 影像计算出的多种植被指数与实测 LAI 值建立回归模型, 考虑到研究区某些地方裸地较多, 引入土壤线以增强模型精度, 最后反演出最精确的 LAI 值。

## 1 研究区概况

梅江流域地处江西省赣州市东北部, 为鄱阳湖的主要源头之一。梅江流域集水面积约 3 304 km<sup>2</sup>, 地跨 115°44'28" ~ 116°16'06"E、26°17'34" ~ 27°08'54"N。属中亚热带季风性湿润气候, 适宜于亚热带作物的正常生长。境内以中低山貌为主, 其平均高程为 379 m<sup>[5]</sup>。土壤多为山地红壤和黄红壤。流域内地带性植被为中亚热带常绿阔叶林, 森林覆盖率达 70%, 天然林面积占森林面积的 87%<sup>[6]</sup>。流域内的植被群系主要为针叶林、常绿落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、竹林、矮(曲)林、灌丛、草丛。在一些天然植被群系中, 常绿阔叶林和针叶林优势明显, 其中针叶林的优势树种是马尾松 (*P. massoniana* Lamb.) 和杉木 [*C. (Lamb.) Hook.*], 主要分布在中低丘陵岗地; 常绿阔叶林有 17 种树种, 但优势树种为丝栗栲 (*C. fargesii* Fr.) 和苦槠栲 [*C. sclerophylla* (Lindl.) Schott.], 主要分布在人类活动较少且海拔大于 600 ~ 700 m 的高山上<sup>[7]</sup>, 低丘陵以樟树 (*Cinnamomum camphora*) 和木荷 (*Schima superba*) 为主, 主要分布在居民地附近; 落叶阔叶林的垂直地带性分布表现出低矮岗地以杨树 (*Populus*)、桉树 (*Eucalyptus* spp.)、苦楝 (*Melia azedarach*)、乌桕 (*Sapium sebiferum*) 等为主, 中高山地以枫 (*Liquidambar formosana* Hance)、栎 (*Q. aliena* var. *acu-teserrata*) 为主; 竹林以毛竹 (*P. pubescens* Mazel) 为主, 但总量不多, 主要分布在低矮岗地。此外, 流域内不仅有零星分布的果茶园林而且裸地分布较广, 并且在裸地上仅存有少量稀疏的灌丛。

## 2 数据源及预处理

**2.1 野外数据采集** 该研究进行遥感反演所用的样地实测 LAI 数据是于 2011 年 7 月 11 ~ 17 日和 11 月 10 ~ 13 日用

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目 (40971266, 41171393)。  
**作者简介** 张妮慧 (1989 - ), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 研究方向: GIS 与 RS 应用, E-mail: zhangniaojia445566@126.com。\* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事遥感与地理信息系统应用及流域水文与地表过程模拟研究, E-mail: laigeying@126.com。

**收稿日期** 2013-07-10

LAI-2000 植物冠层分析仪在梅江流域展开实地测量所得。对研究区实地考察时,采样的植被分布在纬度范围差不超过  $1^\circ$ ,在高山处植被主要以常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林为主,在低矮处植被主要以针叶林、竹林、矮(曲)林、灌丛、草丛为主;实际测量中对冠层上方(A值)、冠层下方(B值)实行分开测量的方法,即在空旷地带先测量得到A值,隔1 min后,再进入林地中测量得到B值。每个样点测量3组数据,取其平均值作为该样点的LAI值。

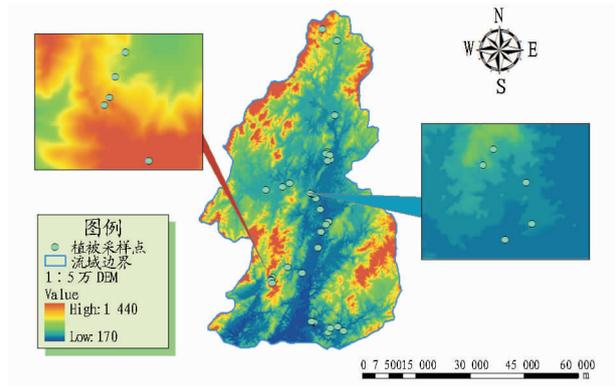


图1 实测LAI样点图

**2.2 遥感数据的来源及预处理** 选用的是2009年3月16日、5月1日和6月5日共3景ALI遥感影像镶嵌成整个研究区所需的遥感影像(其中6月份这一景数据位居中间,正是部分野外采样点集中分布的地方)。影像的预处理方面,先对获取的2009年3景遥感影像数据进行几何精校正和辐射定标、大气校正。然后以ALI原始10 m空间分辨率的全色波段为基础,对ALI原始30 m空间分辨率影像进行图像融合,以获得分辨率为10 m的多波段遥感数据。

### 3 基于植被指数的LAI反演模型的建立与分析

**3.1 植被指数的选择** 由于研究区裸地较多,加之ALI影像的特征,综合分析并考虑后选取基于红波段和近红外波段的双波段组合的植被指数、加入蓝波段的3波段组合的植被指数、考虑研究区土壤因子的植被指数以及加入土壤线斜率的植被指数共9种和LAI建立关系。它们分别为比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)、土壤调整植被指数(SAVI)、垂直植被指数(PVI)、抗大气植被指数(ARVI)和修正的土壤调节植被指数(MSAVI),再归一化植被指数(RDVI)以及转换型归一化植被指数(TNDVI),其公式见表1。公式(1)~(9)中, $\rho_{ir}$ 、 $\rho_r$ 和 $\rho_b$ 分别为近红外波段的反射率、红波段反射率以及蓝波段反射率, $L$ 为土壤调节参数, $a$ 和 $b$ 分别表示土壤线的斜率和截距, $\gamma$ 为大气调节系数, $C_1$ 、 $C_2$ 分别表示大气修正红光校正参数和大气修正蓝光校正参数。

**3.2 土壤线方程的求解** 土壤线(Soil Line)最早由Richardson提出<sup>[8]</sup>,指的是土壤光谱值在近红外和红波段的反射率或亮度值在二维平面上构成的线性关系。通过对研究区野外实地观察发现该地裸地较多,而且在裸地上仅存有少量稀少的灌丛,因此有必要考虑加入土壤线的植被指数以消除裸地对计算结果的影响。土壤线的表达式为<sup>[9]</sup>:

$$\rho_{ir} = a \times \rho_r + b \quad (10)$$

式中, $\rho_{ir}$ 和 $\rho_r$ 分别是近红外和红波段反射率, $a$ 和 $b$ 分别是土壤线的斜率和截距。

表1 植被指数计算公式

名称	计算公式	公式排序	作者(年代)
RVI	$RVI = \frac{\rho_{ir}}{\rho_r}$	(1)	Jordan et al (1969)
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r}$	(2)	Rouse et al (1974)
DVI	$DVI = \rho_{ir} - \rho_r$	(3)	Richardson (1977)
SAVI	$SAVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r + L}(1 + L)$	(4)	Huete et al (1988)
PVI	$PVI = \frac{(\rho_{ir} - a \times \rho_r - b)}{\sqrt{1 + a^2}}$	(5)	Jackson et al (1980)
ARVI	$ARVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_{rb}}{\rho_{ir} + \rho_{rb}}$ 其中 $\rho_{rb} = \rho_r - \gamma(\rho_b - \rho_r)$	(6)	Kanfan et al (1992)
MSAVI	$MSAVI = \frac{[2\rho_{ir} + 1 - \sqrt{(2\rho_{ir} + 1)^2 - 8(\rho_{ir} - \rho_r)}]}{2}$	(7)	Qi et al (1994)
RDVI	$RDVI = (\rho_{ir} - \rho_r) / \sqrt{\rho_{ir} + \rho_r}$	(8)	Roujean et al (1995)
TNDVI	$TNDVI = \sqrt{(\rho_{ir} - \rho_r) / (\rho_{ir} + \rho_r + 0.5)}$	(9)	田庆久等 (1998)

该研究利用遥感影像近红外和红波段信息进行土壤线的自动提取,对研究区植被覆盖度和裸土情况进行实地考察并对影像特征进行观察,选取ALI影像一些裸土像元作为感兴趣区并裁剪出来,在裁剪出来的新裸土影像中选取若干个点,导出相对应的近红外和红波段的土壤像元的反射率值,构成点对( $\rho_{ir}$ ,  $\rho_r$ ),对这些点对数据进行线性拟合,得到的直线回归方程即作为土壤线的方程,如图2所示。该研究就利用该土壤线方程的参数来计算相关的植被指数。

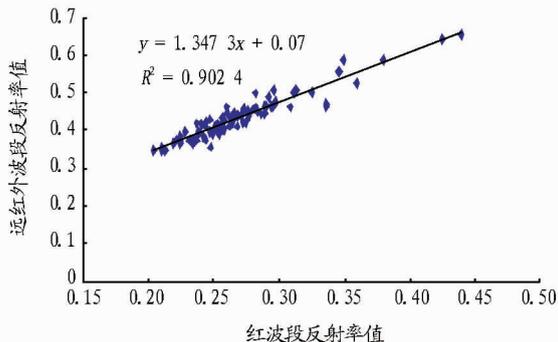


图2 研究区的土壤线方程

**3.3 植被指数的提取** 在ENVI软件中进行植被指数的提取,并根据GPS野外测量的经纬度坐标,导入ArcGIS中,在生成的植被指数图中提取与各实测点对应的植被指数值。其中,土壤调整植被指数(SAVI)的 $L$ 分别取值0.25和0.50,这主要是考虑到研究区有些地区的植被覆盖度不是很高。

**3.4 叶面积指数反演模型的建立与分析** 确定10个植被指数用于和实测冠层的LAI建立统计模型,所采用的统计模

型有一元线性回归模型、非线性回归模型和多元线性回归模型。

**3.4.1 一元线性回归模型。**在 SPSS 软件中以植被指数为自变量,以实测 LAI 为因变量做线性回归分析。通过分析植

被指数与 LAI 之间的关系,建立它们之间的线性回归关系,得到其拟合结果(表 2),表中列出了植被指数和 LAI 的一元线性回归方程、 $R^2$ 、自由度  $df$ 、检验统计量  $F$  以及检验值的实际显著性水平  $Sig.$ 。

表 2 LAI-VI 的一元线性回归模型

植被指数	线性回归模型	$R^2$	$F$ 统计量	$df_1$	$df_2$	$Sig.$
NDVI	$y = 8.5558x - 2.0531$	0.5260**	29.456	1	28	0
ARVI	$y = 4.5544x + 0.0107$	0.2587	9.268	1	28	0.005
DVI	$y = 0.7721x + 0.0801$	0.4158*	20.014	1	28	0
PVI	$y = 1.4880x + 0.3154$	0.4698**	24.875	1	28	0
RVI	$y = 1.1434x - 1.3099$	0.5030**	28.370	1	28	0
MSAVI	$y = 8.6504x - 3.2123$	0.5601**	36.614	1	28	0
RDVI	$y = 2.8540x - 1.0053$	0.5403**	32.899	1	28	0
SAVI(0.25)	$y = 7.1827x - 2.0287$	0.5404**	32.014	1	28	0
SAVI(0.50)	$y = 6.2700x - 2.0093$	0.5595**	35.775	1	28	0
TNDVI	$y = 16.4580x - 14.234$	0.5093**	34.615	1	28	0

注: $R_{(a=0.01)} = 0.46289, R_{(a=0.05)} = 0.36101$ 。

结果发现,MSAVI 与 LAI 的回归拟合程度要优于其他植被指数, $R^2$  达到 0.5601。MSAVI 和 LAI 的一元线性回归模型方程为:

$$y = 8.6504x - 3.2123 \quad (11)$$

式中, $y$  表示实测冠层的 LAI, $x$  表示植被指数,拟合曲线的斜率和截距分别为 8.6504 和 3.2123。

MSAVI 和 LAI 的一元线性回归模型见图 3。

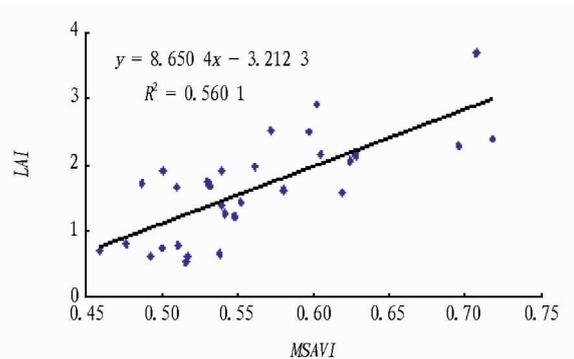


图 3 修正的土壤调节植被指标 (MSAVI) 和实测叶面积指数 (LAI) 的一元线性回归模型图

**3.4.2 多元线性回归模型。**与一元线性模型相比,多元线性模型增加了自变量的个数,可以有效地提高模型的拟合效果。

该研究仅从以上植被指数中挑选出其中 4 个植被指数 (NDVI、PVI、MSAVI、RDVI) 作为自变量,将实测 LAI 作为因变量代入模型进行拟合,得到多元线性回归模型如下:

$$y = 9.703NDVI - 11.149PVI - 22.180MSAVI + 26.501RDVI - 4.763 \quad (12)$$

根据统计结果显示, $F$  值是 12.880, $Sig.$  为 0,说明自变量和因变量存在线性关系,其相关系数  $R^2$  为 0.6730,拟合情况良好。

**3.4.3 非线性回归模型。**该研究采取的非线性回归模型包括多项式模型、对数模型、指数模型和幂函数模型。

(1) 多项式模型。多项式函数模型用来拟合各种曲线可行,而且其测定的系数相对都比较高。

在这 10 种回归模型中,RDVI 与 LAI 的多项式回归拟合程度要优于其他植被指数, $R^2$  达到 0.6314。其次为加入研究区土壤线参数的 PVI, $R^2$  为 0.5952。

RDVI 和 LAI 的二次多项式回归模型方程为:

$$y = -4.7652x^2 + 12.74x - 5.89 \quad (13)$$

RDVI 和叶面积指数的二次多项式回归模型见图 4。

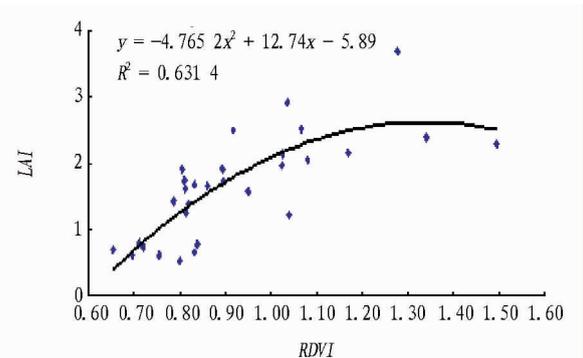


图 4 再归一化植被指数 (RDVI) 和实测叶面积指数 (LAI) 的二次多项式回归模型图

(2) 指数模型。将 10 种植被指数与实测 LAI 结合建立指数模型,结果发现,RDVI 与 LAI 的回归拟合程度要优于其他植被指数, $R^2$  达到 0.4873,其表达式为:

$$y = 0.255e^{1.8741x} \quad (14)$$

RDVI 和 LAI 的指数回归模型见图 5。

(3) 对数回归模型。通过分析植被指数与 LAI 之间的关系,建立它们之间的对数回归模型,在这 10 种回归模型结果中,RDVI 与 LAI 的回归拟合程度要优于其他植被指数, $R^2$  达到 0.5838,其表达式为:

$$y = 2.9527\ln(x) + 1.9245 \quad (15)$$

RDVI 和 LAI 的指数回归模型见图 6。

(4) 幂函数模型。在这 10 种植被指数与实测 LAI 建立

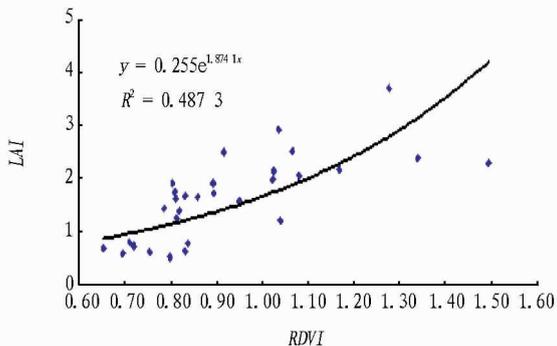


图5 再归一化植被指标 (*RDVI*) 和实测叶面积指数 (*LAI*) 的指数回归模型图

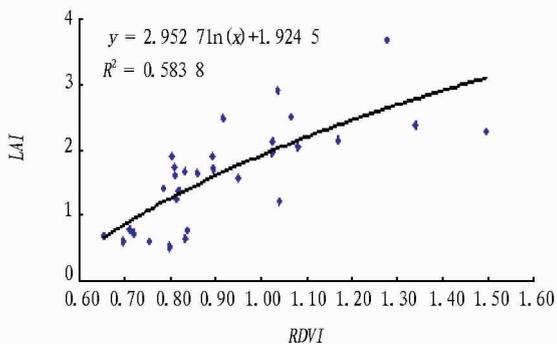


图6 再归一化植被指标 (*RDVI*) 和实测叶面积指数 (*LAI*) 的对数回归模型图

的幂函数模型中,不难发现,*RDVI* 与 *LAI* 的回归拟合程度要

表3 模型精度检验结果分析

预测指标	估算模型	实测值与估测值的		检验指标		
		拟合方程	$R^2$	<i>RMSE</i>	<i>EA</i> //%	
MSAVI	$y = 8.6504x - 3.2123$	$y = 0.7929x - 0.0692$	0.3997	0.7731	54.05	
RDVI	$y = -5.89 + 12.74x - 4.7652x^2$	$y = 0.9979x - 0.3157$	0.4405	0.6228	62.98	
RDVI	$y = 0.255e^{1.8741x}$	$y = 1.3972x - 0.6824$	0.5460	0.5044	70.02	
RDVI	$y = 1.7509x^{1.9678}$	$y = 1.2012x - 0.4523$	0.5318	0.5056	69.95	
RDVI	$y = 2.9527\ln(x) + 1.9245$	$y = 1.2248x - 0.6434$	0.4895	0.5609	66.66	
多元线性	$y = 9.703NDVI - 11.149PVI - 22.180MASVI + 26.501RDVI - 4.763$	$y = 0.7423x + 0.0015$	0.5078	0.7882	53.15	

由表3可知,在6种最佳反演模型中,反演精度均超过了53%,但以*RDVI*为自变量的指数模型的效果最好,其拟合程度最高,为70.02%。因此该研究采用反演所得精度最高的*LAI-RDVI*的指数模型进行遥感反演制图。

**3.6 研究区叶面积指数的反演制图** 经过对比分析各种模型的检验精度,该研究采用检验精度最高的以*RDVI*为自变量的指数模型( $y = 0.255e^{1.8741x}$ )进行研究区的*LAI*反演制图。由于该研究所需的仅仅是土地类型中有林地植被冠层的*LAI*,因而利用研究区的土地利用数据图把研究区内的非林地的土地类型剔除,剔除非林地的反演*LAI*结果见图8。该图为研究区植被冠层的*LAI*。图中白色部分为研究区的非林地土地利用类型,其*LAI*被剔除,所以呈白色。

#### 4 结论与讨论

该研究利用不同形式的植被指数和梅江流域实测*LAI*数据相结合,建立回归模型,最后得出大区域内地表*LAI*的信息,结果如下。

优于其他植被指数, $R^2$ 达到0.5424,其表达式为:

$$y = 1.7509x^{1.9678} \quad (16)$$

*RDVI*和*LAI*的幂函数回归模型见图7。

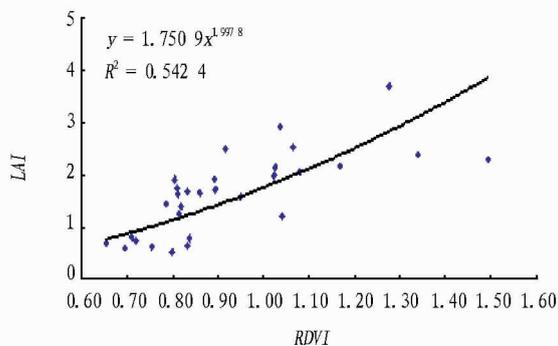


图7 再归一化植被指数 (*RDVI*) 和实测叶面积指数 (*LAI*) 的幂函数回归模型图

**3.5 模型精度检验** 利用从研究区实测8组检验样本*VI*值,在*LAI-VI*s所建立的各种线性和非线性模型中,选出各模型中拟合效果最佳的*LAI-VI*模型进行检验,通过综合对比分析,最后选取了*LAI-MSAVI*一元线性模型,多元线性模型以及非线性模型中的*LAI-RDVI*二次多项式模型、*LAI-RDVI*指数模型、*LAI-RDVI*对数模型以及*LAI-RDVI*幂函数模型作为该研究精度检验的模型对象。

首先分别计算出与之对应的预测*LAI*值,采用总均方根差和估测精度进行此次研究结果的精度检验,结果见表3。

(1)通过对比分析10种植被指数与*LAI*所构建的线性与非线性模型发现,多元线性回归模型拟合的效果相对较好,其次为二次多项式回归模型,相对较差的模型属指数函数模型。通过对所选模型的精度检验及综合分析发现,以*RDVI*为自变量建立的指数模型在相关系数、总均方根差以及估测精度方面都要优于其他模型,因而该研究选择*LAI-RDVI*的指数模型作为反演*LAI*的最佳模型。另外,线性回归模型中,要属*LAI-MSAVI*得到的结果相对更好,相关系数更高。

(2)用该研究区土壤线斜率和截距计算的*PVI*植被指数,拟合的效果也较好,其 $R^2$ 最高达到了0.5952,这表明以研究区实际的土壤线去构建*PVI*植被指数是可取的。

(3)在研究中虽然积累了一定的结论和经验,但存在局限性,主要表现在对研究区进行实地采样时,针叶林海拔较低,阔叶林海拔较高,导致采样点多为针叶林,由此可能影响采样数据的全面性。此外,由于条件所限,手持GPS的定位取点存在一定的偏差,加上此次研究中所使用的样本数量偏

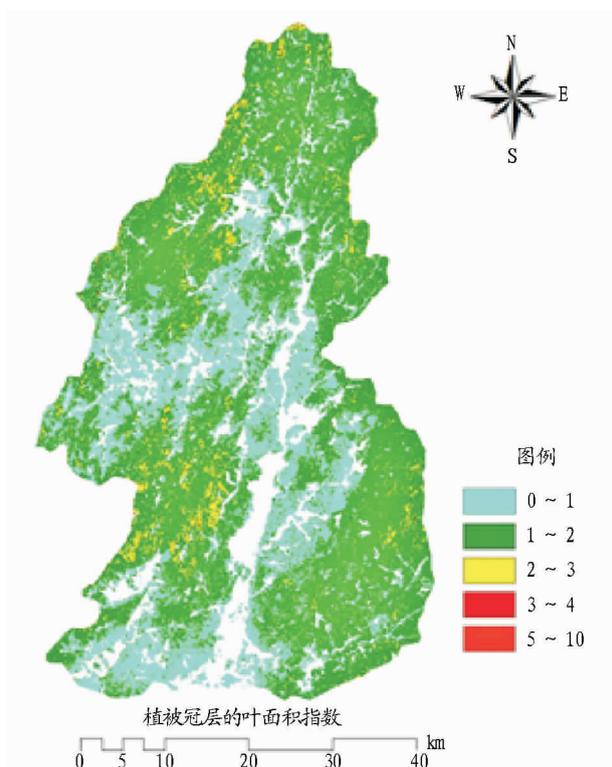


图8 LAI 反演等级分布图

少,其中用于构建模型的只有 30 组,检验模型的只有 8 组,因而也会对结果的精度有一定的影响,这些细节问题在今后

(上接第 9831 页)

要为挖方区,面积为  $7\ 684\ \text{m}^2$ ,占整个研究区面积的 97%。根据生成的栅格图属性表值,分别对其中的正负数值进行累加,得到了变电站区的挖填方量。经计算得出,站区需挖土约  $42\ 000\ \text{m}^3$ ,填土为  $300\ \text{m}^3$ 。

## 5 小结

土方量一直是变电站建设的重要组成部分,对变电站的投资预算具有较大的影响,因而快速准确的土方量计算成为土建设计的重要工作。笔者以野外高程数据为基础,以 Arc-GIS 为技术平台,采用普通克里格方法,空间插值生成了变电站的高程空间分布图,并对土方量计算进行了量化研究。结果表明,实测样点和预测点的高程相关性分析说明模型的模拟效果较好且拟合度较高,验证了普通克里格法模拟高程分布具有可行性;站区需挖土约  $42\ 000\ \text{m}^3$ ,填土为  $300\ \text{m}^3$ ;站区以挖方区为主,面积为  $7\ 684\ \text{m}^2$ ,占整个站区面积的 97%。

的研究过程中都要有所改善。

## 参考文献

- [1] MARTENS S N,USTIN S L,ROUSSEAU R A. Estimation of tree canopy leaf area index by gap fraction analysis [J]. Forest Ecology and Management,2004,61:91-108.
- [2] CHEN J M,BLACK T A. Define leaf area index for non-flat leaves [J]. Plant Cell Environ,1992,15(4):421-429.
- [3] 周宇宇,唐世浩,朱启疆,等. 长白山自然保护区叶面积指数测量及结果 [J]. 资源科学,2003,25(6):38-42.
- [4] 武红敢,乔彦友,陈林洪,等. 马尾松林叶面积指数动态变化的遥感监测研究 [J]. 植物生态学报,1997,21(5):485-488.
- [5] 江西省赣州地区行署林垦局. 赣南树木 [M]. 赣州:江西省赣州地区行署林垦局,1981.
- [6] 陈绪志,赖格英. 基于线型混合模型的丘陵山区植被丰度信息提取研究——以江西梅江流域为例 [J]. 江西科学,2012,30(4):473-479.
- [7] 张海星,方红亚,涂晓斌,等. 江西生物多样性调查与评估 [M]. 南昌:江西科学技术出版社,2010.
- [8] RICHARDSON A J,WIEGAND C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing,1977,43(2):1541-1552.
- [9] 李开丽,倪绍祥,扶卿华. 垂直植被指数及其计算方法 [J]. 农业化研究,2005,2(3):84-89.
- [10] 熊万彩,邱权,陈天华,等. 叶面积指数间接测量方法分析 [J]. 安徽农业科学,2013,41(15):7022-7024.
- [11] 张传来,周瑞金,宋秀丽. 大久保桃叶面积回归测算方法研究 [J]. 西南农业学报,2012(2):635-638.
- [12] 康耀江. 植被指数在草地遥感中的应用初探 [J]. 湖南农业科学,2011(Z1):39-41.
- [13] 曹建军,顾祝军,徐建华,等. 基于 CHRIS/PROBA 的植被叶面积指数估算模型研究 [J]. 安徽农业科学,2013,41(2):907-910.

## 参考文献

- [1] 胡振琪,高永光,李江新,等. ERDAS 在土地整理土方量计算中的运用 [J]. 中国土地科学,2006,20(1):50-54.
- [2] 张光辉. 快速计算土方量的方法 [J]. 测绘通报,1997(5):23-24.
- [3] 王礼先. 水土保持工程学 [M]. 北京:中国林业出版社,2000.
- [4] 刘桦. 土方量的表格法测算 [J]. 测绘通报,2000(4):64-65.
- [5] 俞志新,李艳,黄明祥. 地统计克里格插值法在工程土方量计算中的应用 [J]. 浙江水利科技,2003(4):38-39.
- [6] 张增荣,鄂亦俊,雷挺,等. 基于 DEM 和 ArcGIS 的挖填土方量计算在净水厂设计中的应用 [J]. 给水排水,2011(2):116-120.
- [7] 陈勇. 利用 ArcGIS 地统计分析进行土地平整土方量计算的研究 [J]. 安徽农业科学,2007,35(1):70-71,103.
- [8] 肖斌,赵鹏大,侯景儒. 地质统计学的新进展 [J]. 地球科学进展,2000,15(3):293-297.
- [9] 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.
- [10] 姚永慧,潘志强,孙英君,等. ArcGIS 地统计分析实用指南 [M]. 北京:ArcInfo 中国技术咨询与培训中心,2002.
- [11] 周越轩. 基于 DTM 的土方工程计算与精度分析 [J]. 长沙交通学院学报,2000,16(4):39-43.