

偏最小二乘回归在Hyperion影像叶面积指数反演中的应用

孙华^{1,2}, 鞠洪波¹, 张怀清¹, 林辉², 凌成星¹

(¹中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; ²中南林业科技大学林业遥感信息工程研究中心, 长沙 410004)

摘要: 叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是一个重要的森林结构参数指标, 遥感技术被认为是区域 LAI 反演的有效手段。现有遥感反演模型多以单变量的曲线估计及线性回归模型为主, 模型的通用性、建模精度以及植被指数的选择上需要更进一步的探讨。以攸县黄丰桥林场为研究区, Hyperion 影像为数据源, 提取归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)等 13 个因子, 利用 LAI-2000 冠层分析仪开展 130 个样地(60 m×60 m)的叶面积指数测量, 选用变量投影重要性(VIP)指标、变量解释能力及变量权重作为变量筛选的依据, 采用偏最小二乘回归分析方法建立植被指数与实测样地的回归模型, 开展叶面积指数反演并制图。研究结果表明: 偏最小二乘回归分析在 LAI 反演中取得了较好的预测效果, 其中以 6 个植被因子建立的回归模型预测精度最高, 预测值与实测值的决定系数 R^2 为 0.91; LAI 与植被指数之间具有良好的线性关系, 其中 RVI 与 LAI 的相关性最大; 残差分析表明, 反演模型的自变量个数选取以 4~6 个为宜。

关键词: 遥感反演; 叶面积指数; 变量投影重要性指标; Hyperion

中图分类号: S757

文献标志码: A

论文编号: 2011-3088

Partial Least Squares Regression Application in LAI Inversion Using Hyperion Data

Sun Hua^{1,2}, Ju Hongbo¹, Zhang Huaiqing¹, Lin Hui², Ling Chengxing¹

(¹Research Institute of Forest Resources Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091;

²Research Center of Forestry Remote Sensing & Information Engineering,
Central South University & Technology, Changsha 410004)

Abstract: Leaf area index (LAI) is an important indicator of forest structural parameters. Remote sensing was considered to be an effective means of regional LAI inversion. Single variable curve estimate and linear regression was the dominant model in LAI inversion using remote sensing, but the model generality, modeling accuracy and vegetation index on the choice of the need to further discussed. Hyperion data as a data source, through LAI-2000 instrument to obtain 130 samples (60 m×60 m) leaf area index of ground measurements at Huangfengqiao forest farm in Youxian County. Extract NDVI, RVI and other 13 factors from Hyperion image, Variable Importance in the Projection (VIP), Proportion of Variance Explained and variable weights was used in variable selection, using partial least squares regression analysis (PLS) to establish vegetation index and measured plots of regression models, which to inversion the leaf area index and mapping in study area. The results as followed: PLS regression analysis had good prediction effect in LAI inversion, among all the fitting

基金项目: 林业公益性行业科研专项“林分结构与生长模拟技术研究”(201104028); 创新方法工作专项“地球科学方法总论”(2008IM050100); 国家自然科学基金项目“森林树种波谱特及生化成分相关性研究”(30871962)。

第一作者简介: 孙华, 男, 1979 年出生, 湖南邵阳人, 讲师, 博士生, 主要从事林业遥感和地理信息系统的教学与科研工作。通信地址: 100091 北京市海淀区东小府 1 号 中国林业科学研究院资源信息研究所, E-mail: sunhuayiw@126.com。

通讯作者: 张怀清, 男, 1973 年出生, 湖南宁乡人, 研究员, 博士, 主要从事森林可视化模拟计算与湿地资源监测研究。通信地址: 100091 北京市海淀区东小府 1 号 中国林业科学研究院资源信息研究所, Tel: 010-62888500, E-mail: zhang@caf.ac.cn。

收稿日期: 2011-10-26, **修回日期:** 2012-01-18。

models, the effect of 6 vegetation factors atrial least-square regression was best with R^2 coefficient of 0.91; LAI and vegetation index had a good linear relationship. The results showed that the sensitivity of ratio vegetation index (RVI) was highest among all the modeling factors. Residual analysis showed that it was reliable to build model using 4 to 6 independent variables, prediction accuracy of partial least-square regression was highest.

Key words: remote sensing inversion; leaf area index; variable importance in projection; Hyperion

0 引言

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)自1947年提出以来,成为一个重要的植物结构参数和评价指标在农业、林业及生态学领域得到广泛的研究与应用^[1-4]。小范围内的叶面积指数一般通过仪器进行测量,获得信息有限。而对于区域性范围的叶面积指数,多数通过多光谱和高光谱遥感数据进行反演。叶面积指数一直是遥感反演领域的研究热点和难点,国内外专家在这方面开展了大量对比与实证研究^[5-9]。农业方面的研究主要集中在小麦和水稻的叶面积指数或生理生化参数反演方面^[10-14],研究认为叶面积指数与植被指数以及植物冠层参数间存在较好的定量关系。林业及生态领域主要用于估测区域范围内森林的叶面积指数,将叶面积指数作为一个重要的参数来开展森林生物量的估测。在反演数据的选择上,一般以Landsat、MODIS等中低分辨率的多光谱影像为主^[15-16],机载高光谱数据(CASI, PHI, HyMap)为辅以及部分成像光谱数据如Hyperion, CHRIS等。

叶面积指数的遥感反演方法一般通过2种途径实现:物理模型法和经验模型法。物理模型法首先对影像进行大气校正,然后以PROSPECT+SAIL模型为基础,从物理机理角度反演植被叶面积指数^[17-19]。整个反演过程需要输入叶片的生化参数和结构参数,但现有PROSPECT+SAIL模型所采用的植被叶片理化参数均参考国外数据库(LOPEX 93数据库和JHU光谱数据),和研究的实际植被类型有一定差别。经验模型法虽然存在模型参数随时间或研究区域变化的缺陷,但具有输入参数少、计算效率高、容易实现等优点。且大量的研究表明,植被指数与 LAI 指数之间具有良好的定量关系,利用遥感技术获取各种植被指数,计算植被指数与 LAI 的回归关系模型,可达到间接反演林分的叶面积指数效果,这是经验模型反演 LAI 的理论基础^[20-24]。

植被指数的选取是经验模型反演叶面积指数的重点,归一化植被指数($NDVI$),比值植被指数(RVI),土壤修正植被指数($SAVI$),抗土壤和大气的植被指数($SARVI$),修正的归一化差值植被指数($MNDVI$)^[20]及波段比值等因子是开展叶面积指数反演常用的变量,但

是并非所有的植被指数因子都参与回归分析,大部分研究最终采用的建模因子为 $NDVI$ 、 RVI 等少数几个因子,有的甚至只选择一个相关性最大的因子参与最终的回归分析。

由此可知,植被指数与 LAI 均具有较好的相关性,一般通过地面实测 LAI 和从遥感影像上提取植被指数系列因子来建立回归模型,从而得到区域范围内的叶面积指数反演图。主成分分析和逐步回归分析是变量筛选的常用方法,回归模型以单因子的线性与非线性回归为主。本研究在借鉴前人研究的基础上,以Hyperion影像为数据源,提取 $NDVI$ 等13个因子为自变量,在攸县黄丰桥林场利用 $LAI-2000$ 进行地面叶面积指数的测量,采用偏最小二乘回归分析方法建立植被指数与实测样地的回归模型,开展叶面积指数反演并制图,尝试使用变量投影重要性指标(Variable importance in Projection, VIP)结合变量解释能力及变量权重来进行变量筛选,取得了较好的效果。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄丰桥国有林场呈带状跨株洲市攸县东西部,介于东经 $113^{\circ}04'$ — $113^{\circ}43'$,北纬 $27^{\circ}06'$ — $27^{\circ}24'$ 。东北部与江西的莲花、萍乡交界,东南与茶陵县接壤,西北部与株洲、醴陵毗邻。全场林地分布于13个乡镇72个村,现有林地面积 10122.6 hm^2 ,森林覆盖率为 86.24% 。全场地貌以中低山为主,东部由海拔 800 m 以上的中山构成重叠山群,山峦起伏,地形复杂,地势由东向西,由中山向低山到丘陵递降,西部孤峰突起,地势由西向东,由中山到丘陵陡降。境内最高海拔 1270 m ,最低海拔 115 m ,坡度一般在 20° ~ 35° 。林场地处中亚热带季风湿润气候区,年平均气温 17.8°C ;平均无霜期为292天;年平均降水量 1410.8 mm 。此次研究的区域主要包括柏市、广黄和长冲3个分场(图1)。

1.2 LAI 实地数据获取

2011年7月5日—12日,在黄丰桥林场广黄、柏市及长冲3个分场进行地面调查。调查的主要参数包括林分冠层 LAI 、郁闭度、土壤类型、土壤厚度、年龄、胸径和平均树高等因子。

林分冠层的叶面积指数使用 $LAI-2000$ 仪器进行

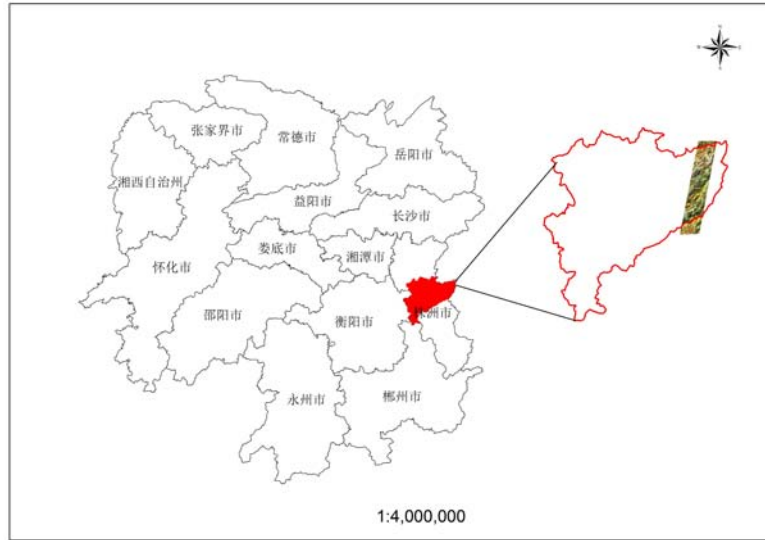


图1 研究区位置图

测量,调查期内研究区的天气以阴天为主,比较适合测量。在 60 m×60 m 的样地范围内,测量 4 个角上 10 m×10 m 样方及样地中心位置 10 m×10 m 样方的 LAI 值,取 5 次测量的均值作为样地的 60 m×60 m 范围的 LAI 值,共测量 130 个样地,同时,在样地范围内开展了林分郁闭度,土壤类型,土壤厚度,年龄,胸径和平均树高等因子的调查,并进行记录。

1.3 大气校正与数据预处理

大气校正的目的是部分消除和减弱大气辐射的影响,提高影像质量,增加地物之间的光谱可分性,是进行定量反演的基础。通过使用大气校正模块 FLAASH,选择合适的大气模式、水汽含量、气溶胶模型、波谱分辨率和多散射模型等参数,对黄丰桥林场的 Hyperion 高光谱遥感影像进行大气校正;校正前后图像视觉效果和反射辐射亮度发生明显变化,经校正后的图像更加清晰,说明 FLAASH 校正有效地去除了大气中气溶胶的影响,提高了图像质量。比较了校正前后地物的光谱反射曲线,如图 2,并将它们与地面同步测量的地物光谱曲线进行对比与数据拟合,经过大气校正后的地物光谱曲线和地面观测到的光谱曲线具有较好的一致性,数据拟合分析表明二者之间具有很强的线性相关,决定系数 R^2 为 0.9432。

1.4 植被指数提取

植被指数是反映绿色植被的相对丰度和活性的辐射量值,通过计算遥感影像不同光谱波段间的线性和非线性组合来实现,目前已提出并已使用的植被指数有 50 余种^[25-27]。研究在参考前人工作的基础上,共选取 NDVI、RVI、SAVI、SARVI、MNDVI、红边 NDVI₇₀₅、三角植被指数(TVI)等 7 个植被指数。其中 SAVI 和

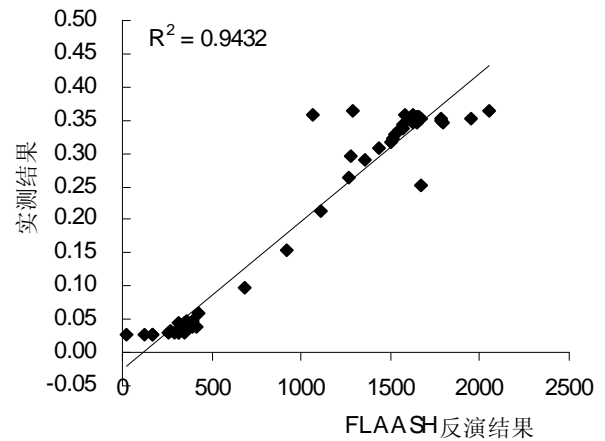


图2 LAI实测数据与FLAASH校正结果拟合效果

SARVI带有修正因子(L 取 0.1, 0.25, 0.35, 0.5; β 取 0.5 或 1),实际共计算了 13 个因子。每个植被指数公式计算方式及在 Hyperion 数据中对应的波段选择如表 1 所示。

1.5 偏最小二乘回归

偏最小二乘法(Partial Least-Squares Regression, PLS)是一种新型的多元统计分析方法,集多元线性回归分析、典型相关分析和主成分分析的功能和优点于一体,从感兴趣的研究目标中提取自变量和因变量(如森林结构参数和光谱值),力求响应与预测值方差解释变量平衡,同时,也最大限度的减少潜在的多重共线性问题的影响。要求从自变量中选取的特征向量与因变量之间具有很强的相关性,理论上讲,可以利用多个变量建模来进行组分的预测,但实际上标准的预测模型只用到很少的几个变量,通过反复交叉实验(leave-one-out)剔除不必要的变量,保留最佳建模因子。在文

表1 用于LAI反演的植被指数

植被指数名称	计算公式	Hyperion对应波段	文献出处
归一化植被指数(NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r}$	band48、band32	[28]
比值植被指数(RVI)	$RVI = \frac{\rho_n}{\rho_r}$	band48、band32	[29]
土壤修正植被指数(SAVI)	$SAVI = \frac{(\rho_n - \rho_r)(1 + L)}{\rho_n + \rho_r + L}$	band48、band32	[30]
抗土壤和大气的植被指数(SARVI)	$SARVI = \frac{(\rho_n - \rho_{rb})(1 + L)}{\rho_n + \rho_{rb} + L}, \rho_{rb} = \rho_r - \beta(\rho_b - \rho_r)$	band48、band32、band13	[31]
修正的归一化差值植被指数(MNDVI)	$MNDVI = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r} \left(1 - \frac{\rho_s - \rho_{s\min}}{\rho_{s\max} - \rho_{s\min}}\right)$	band48、band32、band150	[31]
红边归一化植被指数(NDVI ₇₀₅)	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	band40、band35	[32]
三角植被指数(TVI)	$TVI = \frac{120(\rho_n - \rho_g) - 200(\rho_r - \rho_g)}{2}$	band48、band32、band22	[33]

献[34]中可以找到有关PLS回归方程的详细内容。

利用遥感影像数据进行分析,特别是利用偏最小二乘回归模型选取光谱波段或计算植被指数进行回归分析已经做了很多的方面的研究工作^[35-38],本研究利用Hyperion影像的波段及衍生变量开展叶面积指数反演及制图研究。

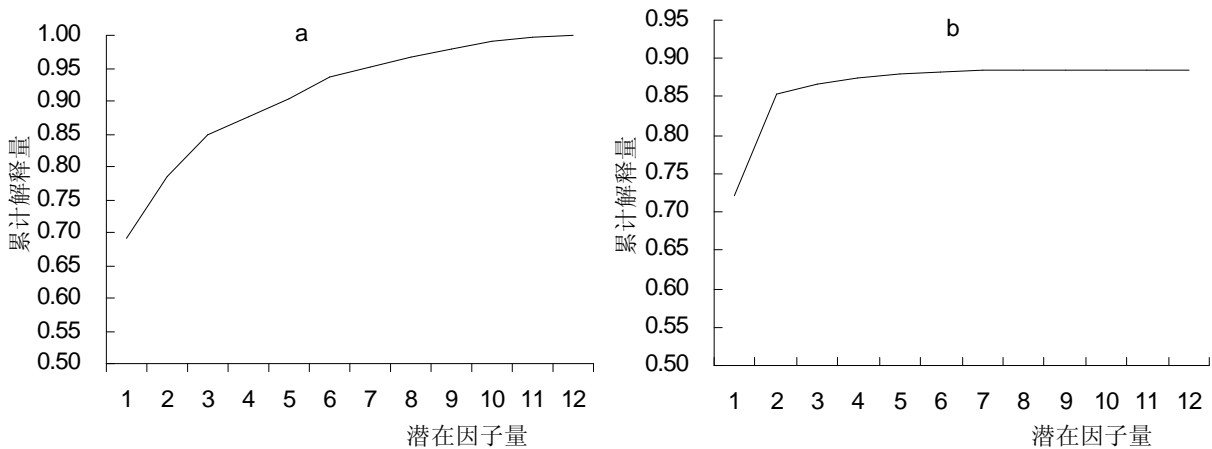
2 结果与分析

2.1 LAI回归变量的筛选

在多元线性回归模型中,选择自变量的基本要求是,在模型中应包含所有对因变量有重要意义的因素,并且能反映这些因素的自变量之间不存在多重相关性^[34]。因此,在实际工作中需要对变量进行筛选,本研究尝试使用VIP^[39]结合变量解释能力及变量权重来进行变量筛选,以叶面积指数LAI为因变量,13个植被指数为自变量,由于TVI指数与LAI的相关性最低,故最终参

与回归分析的自变量为12个。通过设置不同的潜在因子最大数量,设定模型效应等来开展PLS回归。为了更好的体现偏最小二乘回归分析的特点,首先将潜在因子的最大数量设为12个,即所有自变量都参与回归分析,分析结果如图3~6所示。

图3表达的是偏最小二乘回归分析的变量解释能力,从中可知,12个变量全部进行偏最小二乘回归分析时,自变量X和因变量Y的解释量是随着潜在因子量的变化而变化的,自变量X的解释量随着潜在因子量的增加增幅减少,当潜在因子量超过6个时,自变量X的累积解释量的增幅小于0.2,即在潜在因子量为6是增幅出现拐点,因变量Y的累积解释量也是类似的规律,尤其是当潜在因子量超过6个时,修正的R²出现了下降的趋势,则说明本次开展偏最小二乘回归分析的潜在因子量不宜超过6个(图4)。



a.自变量X的累积解释量;b.因变量Y的累积解释量

图3 自变量与因变量解释能力

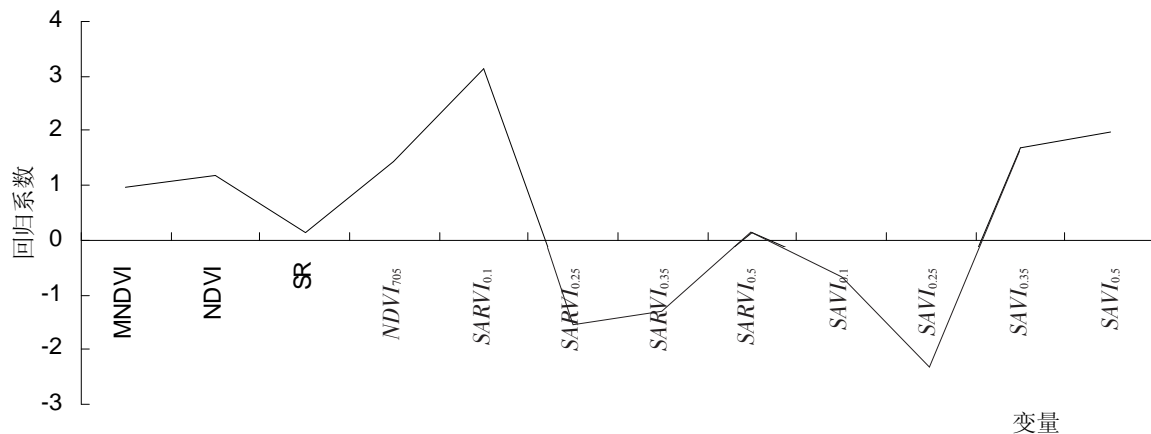


图4 变量回归系数

从前面的分析可知,参与偏最小二乘回归的变量以不超过6个为宜,为了分析自变量与因变量之间的关系,同时了解每一个变量在回归分析中的作用,可以用变量VIP来测度,即用分析VIP来筛选变量。图5中的变量投影重要性指标展示了12个变量的重要性指标, MNDVI、NDVI、RVI、NDVI₇₀₅、SARVI_{0.1}、SARVI_{0.25}

等6个植被指数的重要性排在前6位,其中重要性排在首位的是比值植被指数RVI,其次是NDVI₇₀₅,这从另一个角度证实了图3的结论。

图6说明12个植被指数变量在偏最小二乘回归中各变量的权重分布情况,变量权重分布的结果表明, RVI、SARVI_{0.1}、NDVI、NDVI₇₀₅、MNDVI、SARVI_{0.25}等6

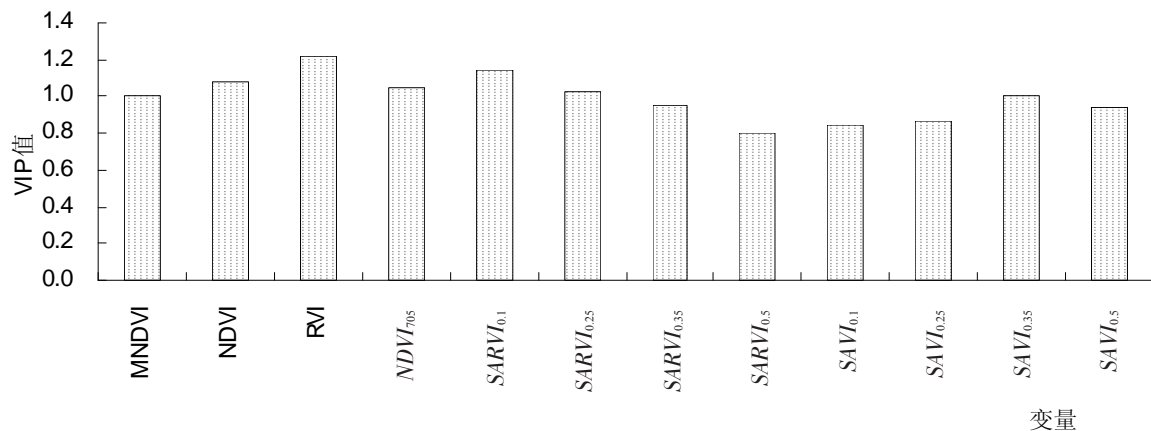


图5 变量投影重要性指标

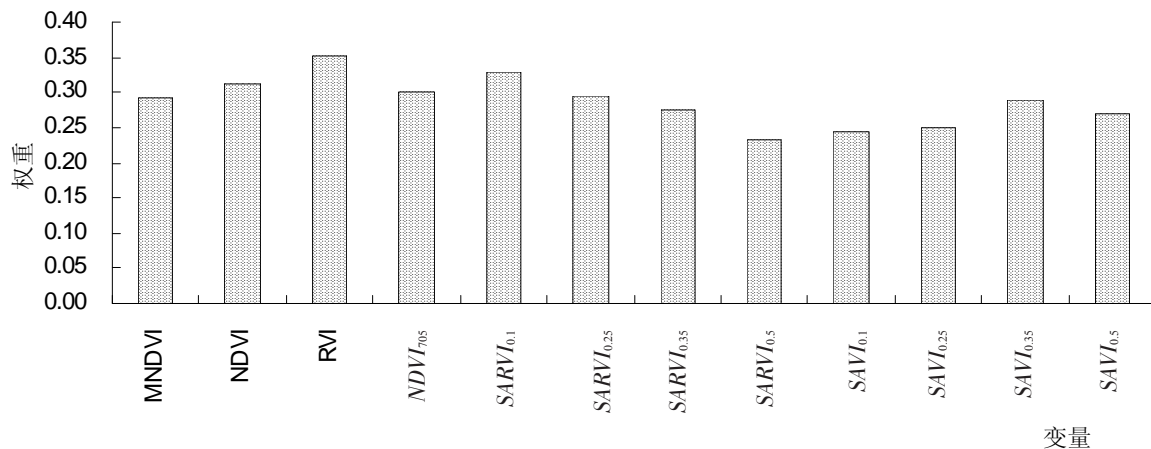


图6 变量权重分布

个植被指数的权重分布在 12 个植被指数因子的前 6 位, 结论与图 3 和图 5 一致。上述分析表明, 在进行偏最小二乘回归分析时, 变量解释能力、变量投影重要性指标和变量权重分布可以作为回归建模自变量筛选的重要依据。

2.2 反演模型的验证与分析

本研究分析的 12 个植被指数因子, 有 6 个因子的变量投影重要性指标较小而被剔除。对剩余 6 个因子进行回归建模, 从图 3 中可知, 其实在潜在因子量达到 4 个以后, 自变量的累积解释量和因变量的累积解释量的增幅开始减少, 为了更好的分析叶面积指数与各植被指数之间的偏最小二乘回归结果, 通过设置 3 次潜在因子的最大数量来开展分析, 其中模型效应设定为主效应, 得到 3 个偏最小回归模型。即:

- (1) $Y = -1.109 + 0.467MNDVI + 1.564NDVI + 0.179RVI + 1.378NDVI_{705} + 2.617SARVI_{0.1} - 1.488SARVI_{0.25}$;
- (2) $Y = -1.108 + 0.423MNDVI + 1.594NDVI + 0.189RVI + 1.345NDVI_{705} + 1.081SARVI_{0.1}$;
- (3) $Y = -1.086 + 0.344MNDVI + 1.523NDVI +$

$0.173RVI + 1.391NDVI_{705}$ 。

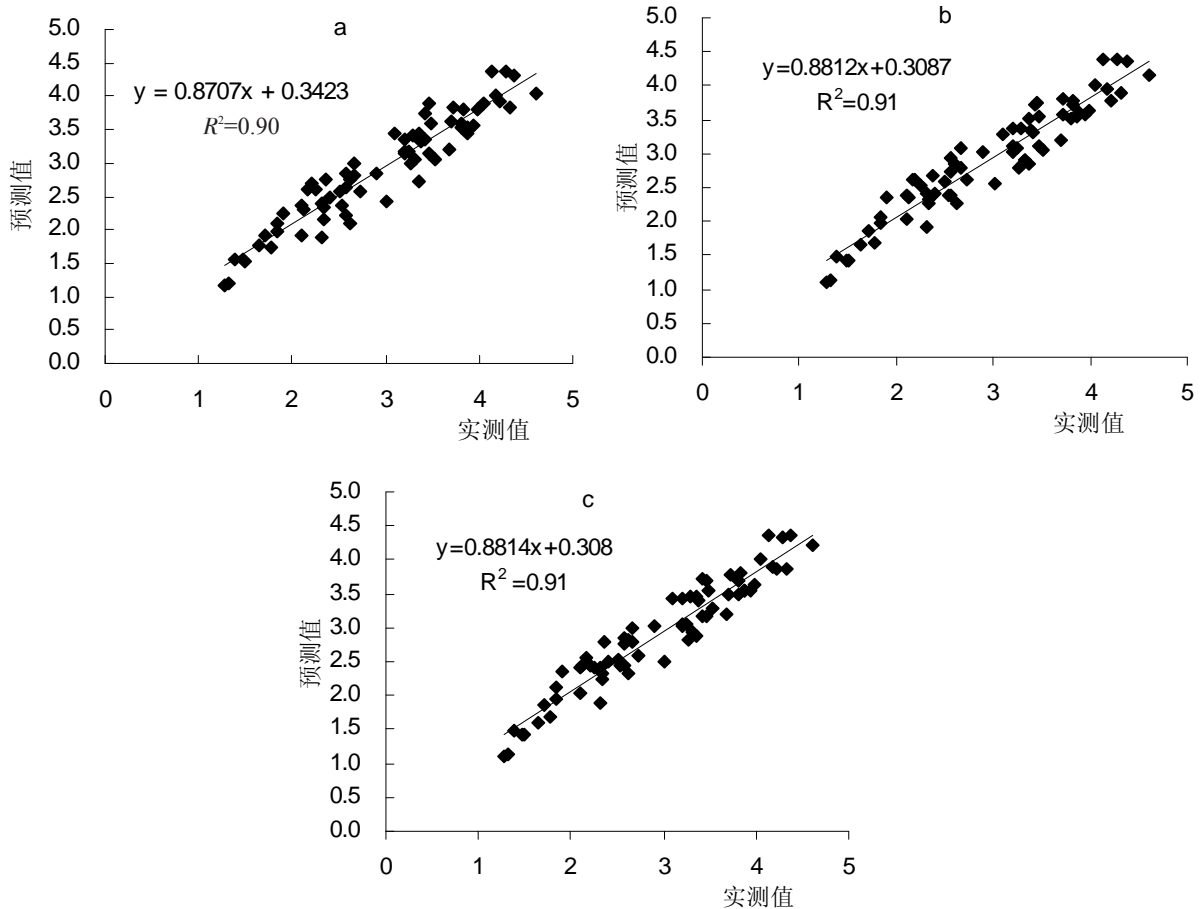
然后利用每次回归分析得到的模型, 对叶面积指数进行预测, 与实际观测结果进行分析, 可知预测值与实际观测值存在较好的线性关系, 如图 7 所示。

从图 7 结果来看, 利用偏最小二乘回归开展叶面积指数反演, 自变量因子采用 4~6 个因子所建模型预测结果与实测值的差异变化不大, 预测结果优于单个植被指数因子建模。

为了分析建模数据是否存在异常、周期性或者倾向性变化, 分别计算了 4 个回归分析状态下的残差和残差标准差 δ 。残差分布如图 8 所示, 从图中可知数据的残差绝大部分都在置信带内 $[-2\delta, 2\delta]$, 异常数据较少。残差分析表明, 选用 4~6 个自变量因子进行 LAI 建模是可靠的。

2.3 LAI 反演制图

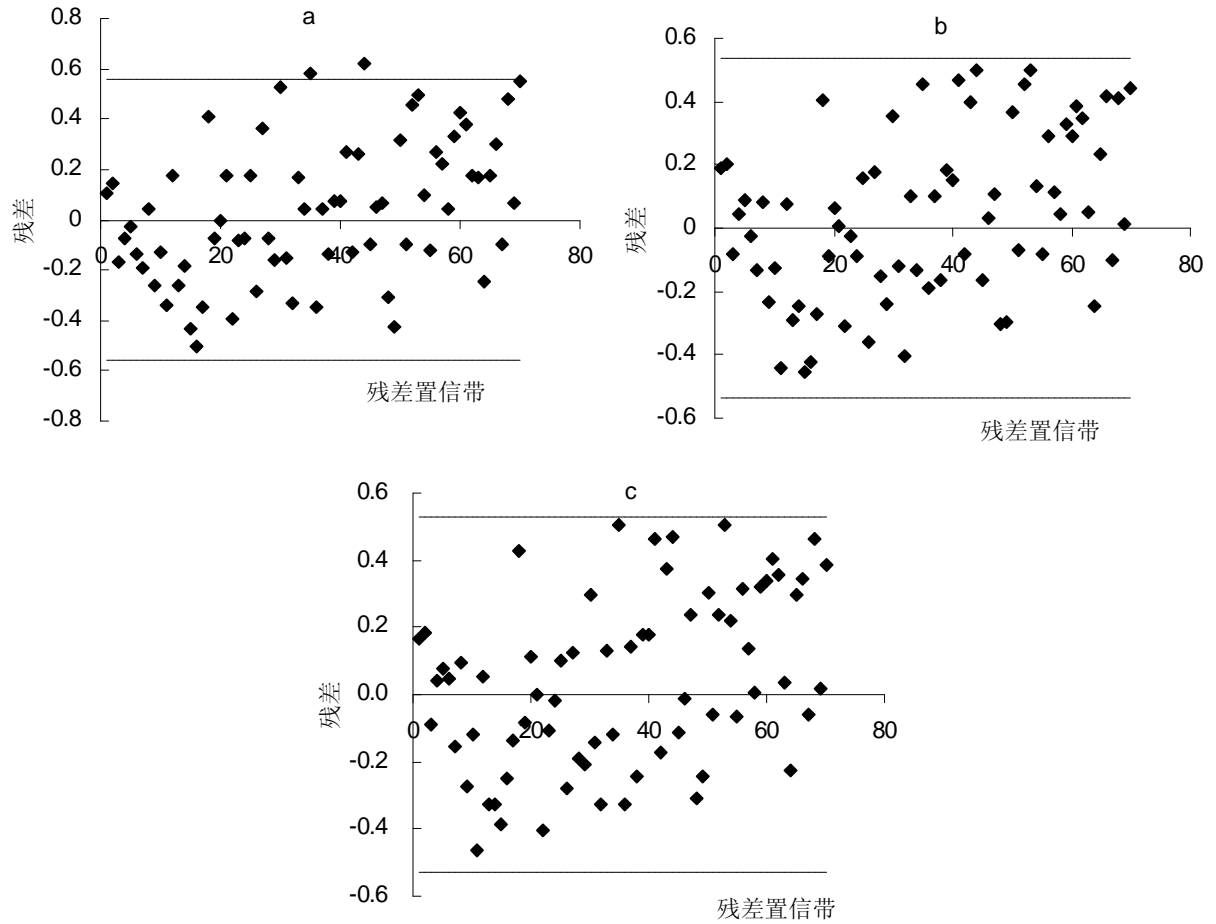
在上述分析的基础上, 按照偏最小二乘法回归分析结果进行叶面积指数 LAI 的反演, 在 ENVI4.5 软件中进行波段运算, 参与运算的波段即为偏最小二乘回归中最终保留的 6 个植被指数因子, MNDVI、NDVI、



a.4 个变量的 PLS 回归预测结果与实测值散点图; b.5 个变量的 PLS 回归预测结果与实测值散点图;

c.6 个变量的 PLS 回归预测结果与实测值散点图

图 7 因变量实测值与预测值图



a.PLS4 残差图; b.PLS5 残差图; c.PLS6 残差图

图8 偏最小二乘回归分析的残差分布图

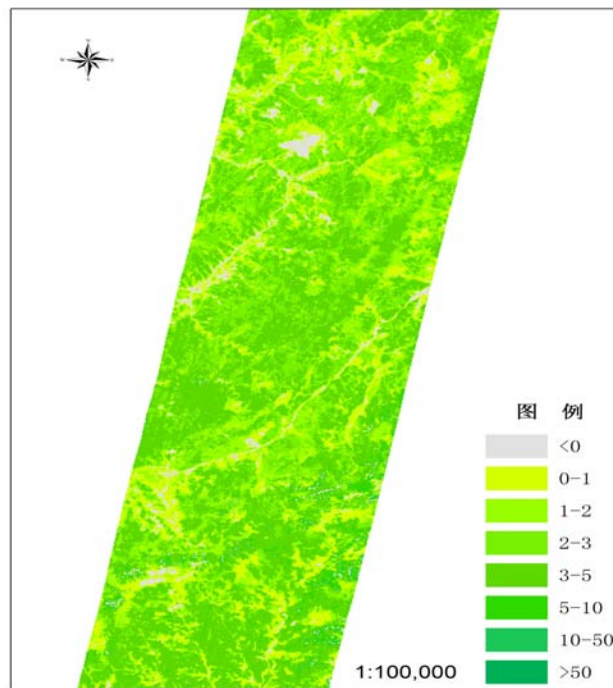


图9 研究区 LAI 分布图

RVI 、 $NDVI_{705}$ 、 $SARVI_{0.1}$ 和 $SARVI_{0.25}$ 。将这些植被指数波段运算成一个影像。然后对影像进行假彩色密度分割,按照 LAI 的大小进行赋值,在 ARCGIS 软件中进行制图。

3 结论与讨论

以 Hyperion 数据为研究对象,采用偏最小二乘回归分析方法建立植被指数与实测样地的回归模型,在黄丰桥林场开展叶面积指数反演与制图研究,主要研究结论如下:

(1) 大气校正是 LAI 遥感定量研究的基础。图像的大气校正不仅能部分消除和减弱大气辐射的影响,提高图像质量,而且可以增加地物之间的光谱可分性。

(2) 偏最小二乘回归分析可以很好的进行大范围内的叶面积指数反演,预测精度较高,预测值与实测值之间拟合效果较好,决定系数 R^2 为 0.91。

(3) LAI 与植被指数之间具有良好的线性关系。在参与分析的 12 个植被指数中, $MNDVI$ 、 $NDVI$ 、 RVI 、 $NDVI_{705}$ 、 $SARVI_{0.1}$ 、 $SARVI_{0.25}$ 等 6 个植被指数的重要性排在前三位。其中 RVI 与 LAI 的相关性最大。

(4) VIP 指标、变量解释能力及变量权重可以作为偏最小二乘回归模型变量筛选的依据。从本研究的结果来看,参与偏最小二乘回归分析的建模因子以 4~6 个为宜。

(5) 本研究所选建模因子基本上为植被指数因子,建立的回归分析模型多为线性模型,有关非线性模型及定性因子的引入,有待进一步研究。

参考文献

- 王希群,马履一,贾忠奎,等.叶面积指数的研究与应用进展[J].生态学杂志,2005,24(5):537-541.
- 杨贵军,黄文江,王纪华,等.多源多角度遥感数据反演森林叶面积指数方法[J].植物学报,2010,45(5):566-578.
- 赵丽芳,谭炳香,杨华,等.高光谱遥感森林叶面积指数估测研究现状[J].世界林业研究,2007,20(2):50-54.
- 邢著荣,冯幼贵,李万明,等.高光谱遥感叶面积指数(LAI)反演研究现状[J].测绘科学,2010,35(增刊):162-163.
- 蒙继华,吴炳方,李强子.全国农作物叶面积指数遥感估算方法[J].农业工程学报,2007,23(2):160-167.
- 汪小钦,江洪,傅银贞.森林叶面积指数遥感研究进展[J].福州大学学报:自然科学版,2009,37(6):822-828.
- 王东伟,孟宪智,王锦地,等.叶面积指数遥感反演方法进展[J].五邑大学学报:自然科学版,2009,23(4):47-52.
- Nemani R, Pierce L, Running S, et al. Forest ecosystem processes at the watershed scale: sensitivity of remotely-sensed Leaf Area Index estimates[J]. International journal of remote sensing,1993,14(13):2519-2534.
- David P T, Warren B C, Robert E K, et al. Relationships between Leaf Area Index and Landsat TM Spectral Vegetation Indices across Three Temperate Zone Sites[J].Remote sensing of environment,1999(70):52-68.
- 田永超,杨杰,姚霞,等.高光谱植被指数与水稻叶面积指数的定量关系[J].应用生态学报,2009,20(7):1685-1690.
- 宋沙磊,李平湘,龚威,等.基于水稻高光谱遥感数据的PLS波长选择研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2010,35(2):219-223.
- 梁亮,杨敏华,臧卓.利用可见/近红外光谱测定小麦叶面积指数的改进研究[J].激光与红外,2010,40(11):1205-1210.
- 王纪华,黄文江,劳彩莲,等.运用PLS算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布[J].光谱学与光谱分析,2007,27(7):1319-1322.
- 赵祥,刘素红,王培娟,等.基于高光谱数据的小麦叶绿素含量反演[J].地理与地理信息科学,2004,20(3):36-39.
- Alemu G P, Pellikka D J, King B. Large-scale leaf area index inversion algorithms from high-resolution airborne imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,2011,32(4):3897-3916.
- Alemu G. Normalized sensitivity measures for leaf area index estimation using three-band spectral vegetation indices[J]. International Journal of Remote Sensing,2011,32(7):2069-2080.
- 蔡博峰,绍霞.基于PROSPECT+SAIL模型的遥感叶面积指数反演[J].国土资源遥感,2007(2):39-43.
- Jacquemoud S. Inversion of the PROSPECT + SAIL Canopy Reflectance Model from AVIRIS Equivalent Spectra:Theoretical Study[J].Remote sensing of environment,1993(44):281-292.
- 刘照言,马灵玲,唐伶俐.基于SAIL模型的多角度多光谱遥感叶面积指数反演[J].干旱区地理,2010,33(1):93-98.
- 朱高龙,居为民,Jing M.Chen,等.帽儿山地区森林冠层叶面积指数的地面观测与遥感反演[J].应用生态学报,2010,21(8):2117-2124.
- 赵传燕,沈卫华,彭焕华.祁连山区青海云杉林冠层叶面积指数的反演方法[J].植物生态学报,2009,33(5):860-869.
- 李开丽,蒋建军,茅荣正,等.植被叶面积指数遥感监测模型[J].生态学报,2005,25(6):1491-1496.
- 席建超,张红旗,张志强.应用遥感数据反演针叶林有效叶面积指数[J].北京林业大学学报,2004,26(6):36-39.
- 吴彤,倪绍祥,李云梅,等.由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较[J].南京师大学报:自然科学版,2006,29(1):111-115.
- 田庆久,闵祥军.植被指数研究进展[J].地球科学进展,1998(4):327-333.
- 惠凤鸣,田庆久,金震宇,等.植被指数与叶面积指数关系研究及量化分析[J].遥感信息,2003(2):10-13.
- 张红旗,陈永瑞,牛栋.红壤丘陵区针叶林有效叶面积指数遥感反演模型[J].江西农业大学学报,2004,26(2):159-163.
- Tomoaki M, Alfredo H, Hiroki Y. An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data[J].Remote Sensing of Environment,2006,100(2):223-236.
- Martin S, Clement A, Joachim H. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment,2005,95(2):177-194.
- Gong P, Pu R L, Biging G S, et al. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data [J].Geoscience and Remote Sensing,2003,41(6):1355-1362.

- [31] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS[J].Remote Sensing of Environment,1997(59):440-451.
- [32] Mobasher M R, Rezaei Y, Valadan M J Z. A Method in Extracting Vegetation Quality Parameters Using Hyperion Images, with Application to Precision Farming[J].World Applied Sciences Journal,2007,2(5):476-483.
- [33] Shunlin Liang. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces[M]. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken. New Jersey,2004:273-275.
- [34] 王惠文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006:97-123.
- [35] Peter T W, Philip A. Townsend, Brian R. Sturtevant. Estimation of forest structural parameters using 5 and 10 meter SPOT-5 satellite data[J].Remote Sensing of Environment,2009(113): 2019-2036.
- [36] 杜晓明,蔡体久,琚存勇.采用偏最小二乘回归方法估测森林郁闭度[J].应用生态学报,2008,19(2):273-277.
- [37] 李晓松,李增元,高志海,等.基于NDVI与偏最小二乘回归的荒漠化地区植被覆盖度高光谱遥感估测[J].中国沙漠,2011,31(1): 162-166.
- [38] 张正健,刘志红,郭艳芬,等.偏最小二乘在遥感监测西藏草地生物量上的应用[J].草地学报,2009,17(6):735-739.
- [39] 曾涛,琚存勇,蔡体久,等.利用变量投影重要性准则筛选郁闭度估测参数[J].北京林业大学学报,2010,32(6):37-41.