

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 24 期 Vol.32 No.24 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 24 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

从文献计量角度分析中国生物多样性研究现状.....	刘爱原,郭玉清,李世颖,等 (7635)
CO ₂ 浓度升高和模拟氮沉降对青川箭竹叶营养质量的影响.....	周先容,汪建华,张 红,等 (7644)
陕西中部黄土高原地区空气花粉组成及其与气候因子的关系——以洛川县下黑木沟村为例.....	吕素青,李月从,许清海,等 (7654)
长三角地区 1995—2007 年生态资产时空变化.....	徐昔保,陈 爽,杨桂山 (7667)
基于智能体模型的青岛市林地生态格局评价与优化.....	傅 强,毛 锋,王天青,等 (7676)
青藏高原高寒草地生态系统服务功能的互作机制.....	刘兴元,龙瑞军,尚占环 (7688)
北京城市绿地的蒸腾降温功能及其经济价值评估.....	张 彪,高吉喜,谢高地,等 (7698)
武汉市造纸行业资源代谢分析.....	施晓清,李笑诺,赵吝加,等 (7706)
丽江市家庭能耗碳排放特征及影响因素.....	王丹寅,唐明方,任 引,等 (7716)
基于分布式水文模型和福利成本法的生态补偿空间选择研究.....	宋晓谕,刘玉卿,邓晓红,等 (7722)
设施塑料大棚风洞试验及风压分布规律.....	杨再强,张 波,薛晓萍,等 (7730)
湖南珍稀濒危植物——珙桐种群数量动态.....	刘海洋,金晓玲,沈守云,等 (7738)
云南岩陀及其近缘种质资源群体表型多样性.....	李萍萍,孟衡玲,陈军文,等 (7747)
沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响.....	杨慧玲,梁振雷,朱选伟,等 (7757)
栗山天牛天敌花绒寄甲在栎林中的种群保持机制.....	杨忠岐,唐艳龙,姜 静,等 (7764)
基于相邻木排列关系的混交度研究.....	娄明华,汤孟平,仇建习,等 (7774)
三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较.....	孙 华,鞠洪波,张怀清,等 (7781)
红松和蒙古栎种子萌发及幼苗生长对升温与降水综合作用的响应.....	赵 娟,宋 媛,孙 涛,等 (7791)
新疆杨边材贮存水分对单株液流通量的影响.....	党宏忠,李 卫,张友焱,等 (7801)
火干扰对小兴安岭毛赤杨沼泽温室气体排放动态影响及其影响因素.....	顾 韩,牟长城,张博文 (7808)
不同潮汐和盐度下红树植物幼苗秋茄的化学计量特征.....	刘滨尔,廖宝文,方展强 (7818)
腾格里沙漠东南缘沙质草地灌丛化对地表径流及氮流失的影响.....	李小军,高永平 (7828)
西双版纳人工雨林群落结构及其林下降雨侵蚀力特征.....	邓 云,唐炎林,曹 敏,等 (7836)
西南高山地区净生态系统生产力时空动态.....	庞 瑞,顾峰雪,张远东,等 (7844)
南北样带温带区栎属树种种子化学组成与气候因子的关系.....	李东胜,史作民,刘世荣,等 (7857)
模拟酸雨对龙眼叶片 PS II 反应中心和自由基代谢的影响.....	李永裕,潘腾飞,余 东,等 (7866)
沈阳市城郊表层土壤有机污染评价.....	崔 健,都基众,马宏伟,等 (7874)
降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响.....	高 翔,郝卫平,顾峰雪,等 (7883)
冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响.....	于天一,逢焕成,任天志,等 (7894)
施氮量对小麦/玉米带田土壤水分及硝态氮的影响.....	杨蕊菊,柴守玺,马忠明 (7905)
微山湖鸟类多样性特征及其影响因素.....	吕昭智,潘卫林,张 鑫,等 (7913)
新疆北部棉区作物景观多样性对棉铃虫种群的影响.....	吕昭智,潘卫林,张 鑫,等 (7925)
杭州西湖北里湖沉积物氮磷内源静态释放的季节变化及通量估算.....	刘静静,董春颖,宋英琦,等 (7932)
基于实码遗传算法的湖泊水质模型参数优化.....	郭 静,陈求稳,张晓晴,等 (7940)
气候环境因子和捕捞压力对南海北部带鱼渔获量变动的影响.....	王跃中,孙典荣,陈作志,等 (7948)
象山港南沙岛不同养殖类型沉积物酸可挥发性硫化物的时空分布.....	颜婷茹,焦海峰,毛玉泽,等 (7958)
专论与综述	
提高植物抗寒性的机理研究进展.....	徐呈祥 (7966)
植被对多年冻土的影响研究进展.....	常晓丽,金会军,王永平,等 (7981)
凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动.....	查同刚,张志强,孙 阁,等 (7991)
街尘与城市降雨径流污染的关系综述.....	赵洪涛,李叙勇,尹澄清 (8001)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 374 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 40 * 2012-12	

封面图说: 永兴岛海滩植被——永兴岛是中国西沙群岛的主岛,也是西沙群岛及南海诸岛中最大的岛屿。国务院 2012 年 6 月批准设立的地级三沙市,管辖西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛的岛礁及其海域,三沙市人民政府就驻西沙永兴岛。永兴岛岛上自然植被密布,野生植物有 148 种,占西沙野生植物总数的 89%,主要树种有草海桐(羊角树)、麻枫桐、野枇杷、海棠树和椰树等。其中草海桐也称为羊角树,是多年生常绿亚灌木植物,它们总是喜欢倚在珊瑚礁岸或是与其他滨海植物聚生于海岸沙滩,为典型的滨海植物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111291819

孙华, 鞠洪波, 张怀清, 林辉, 凌成星. 三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较. 生态学报, 2012, 32(24): 7781-7790.

Sun H, Ju H B, Zhang H Q, Lin H, Ling C X. Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(24): 7781-7790.

三种回归分析方法在 Hyperion 影像 LAI 反演中的比较

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:借助 GPS 进行地面精确定位, 利用 LAI-2000 冠层分析仪在攸县黄丰桥林场开展 130 个样地 (60m×60m) 的叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI) 测量。采用 FLAASH 模块对 Hyperion 数据进行大气校正并与地面同步冠层观测数据进行拟合, 通过研究地面实测 LAI 与 Hyperion 影像波段及其衍生的系列植被指数 (NDVI、RVI 等) 的相关性, 筛选出估算叶面积指数的植被指数因子。应用曲线估计、逐步回归及偏最小二乘三种回归分析技术分别建立叶面积指数的最优估算模型。结果表明: 参与建模的因子中, 比值植被指数 (RVI) 与 LAI 的相关性最大, 敏感性最高, 其次是 SARVI_{0.1}, NDVI₇₀₅, NDVI, SARVI_{0.1}, SARVI_{0.25}; 曲线估计、逐步回归分析和偏最小二乘回归三种分析方法所建的 6 个回归模型中, 偏最小二乘回归的拟合效果最好, 预测值与实测值的决定系数 R^2 为 0.84; 曲线估计的拟合效果最低, 预测值与实测值的决定系数 R^2 为 0.64; 建模精度分析表明, 选用 5—6 个自变量因子进行 LAI 建模是可靠的, 以 6 个植被因子建立的偏最小二乘回归模型预测精度最高。

关键词:遥感反演; 叶面积指数; 偏最小二乘回归; 植被指数; 黄丰桥林场

Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data

SUN Hua^{1,2}, JU Hongbo^{1,*}, ZHANG Huaiqing¹, LIN Hui², LING Chengxing¹

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

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

Abstract: This paper focuses on Leaf Area index (LAI) inversion, using EO-1 Hyperion data for Huangfengqiao forest farm, YouXian County, Hunan Province. First, LAI was acquired using a LAI-2000 canopy analyzer at 130 sample plots (60 m × 60 m), with a Global Positioning System (Trimble GPS Geo XT). Second, atmospheric correction was applied to Hyperion data using the ground-synchronous canopy observation data. Third, effective vegetation indexes were selected to estimate LAI, according to research on correlation between LAI, bands and vegetation indexes derived from Hyperion imagery. Finally, an optimal estimation model of LAI was built by curve estimation, stepwise regression, and a partial least-squares regression algorithm. Results show that sensitivity of ratio vegetation index (RVI) was highest among all model factors, followed by SARVI_{0.1}, NDVI₇₀₅, NDVI, SARVI_{0.1}, and SARVI_{0.25}. Among all fit models, the effect of the partial least-squares regression was best, with R^2 coefficient 0.84, whereas the curve estimation effect was worst, with R^2 coefficient 0.64. Model precision analysis shows that it is reliable to build the model using 5 to 6 independent variables, and prediction accuracy of the partial least-square regression was the greatest.

Key Words: remote sensing inversion; leaf area index; partial least-squares regression; vegetation index; Huangfengqiao

基金项目: 国家“十二五”863 项目 (2012AA102001); 林业公益性行业科研专项 (201104028)

收稿日期: 2011-11-29; 修订日期: 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ju@caf.ac.cn

forest farm

叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是表征植被冠层特征的主要指标之一^[1-3],同时也是决定生态系统净初级生产力的重要因子^[1],是植被定量遥感研究的重要参数,对全球变化和生态系统碳循环研究具有重要意义。目前小范围内的叶面积指数一般通过仪器进行测量,大范围的叶面积指数通过遥感反演模型模拟获得。现有的研究主要集中于主要农作物的叶面积指数与生理生化参数反演^[4-7],森林郁闭度^[8]、森林生物量^[9-10]的估测等方面。用于反演的数据一般以 Landsat、MODIS 等中低分辨率的多光谱影像为主^[11-20],少量机载高光谱数据(CASI、PHI、HyMap)及部分成像光谱数据如 Hyperion、CHRIS 等。

叶面积指数的遥感反演一般通过两种途径实现:物理模型法和经验模型法。物理模型法主要以 PROSPECT+SAIL 模型为主,从物理机理角度反演植被叶面积指数^[21-24]。反演过程需要输入叶片的生化参数和结构参数。经验模型法主要通过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,达到间接反演林分叶面积指数的效果^[25-26]。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,这是经验模型反演 LAI 的理论基础。归纳现有经验模型的研究成果可知, LAI 反演回归模型以单因子的线性与非线性回归居多,大部分论文只采用一种回归方式,使用多种方法进行比较的少,论文以 Hyperion 影像为研究对象,采用曲线估计,逐步回归,偏最小二乘回归方法在攸县黄丰桥林场开展叶面积指数(LAI)反演研究,并对 3 种方法所得结果进行对比,旨在分析不同回归分析方法的特点,找出对 LAI 反演敏感性高的植被指数因子。

1 研究区概况

黄丰桥国有林场呈带状分布横跨株洲市攸县东西部,介于东经 113°04′至 113°43′,北纬 27°06′至 27°24′之间。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。现有林地总面积 10122.6 hm²,森林覆盖率为 86.24%。全场地貌以中低山为主,境内最高海拔 1270 m,最低海拔 115 m,坡度介于 20—35°之间。林场地处中亚热带季风湿润气候区,年均气温 17.8℃;平均无霜期为 292 d;年均降水量 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)。

2 材料与方法

2.1 数据处理

2.1.1 Hyperion 影像处理

研究所用星载高光谱影像为 Hyperion 影像的 L1G 数据,通过美国地质调查局网站下载(<http://glovis.usgs.gov/>),影像的成像时间为 2010 年 12 月 28 日,原始数据只进行了简单的辐射校正,在 ENVI4.5 软件中使用 FLAASH 大气校正模块对影像进行大气校正,校正时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,经过大气校正后图像质量得到明显提高。利用 SPOT5 的 10m 分辨率多光谱影像为参考影像对校正后的 Hyperion 数据进行几何校正,共选取 24 个明显地物点,系统均方根误差为 0.41 个像元,基本满足研究所需的精度。为了更好的分析大气校正的结果,在研究区采用美国 ASD 公司的 Field Spec 手持式地物光谱仪,同步测量了 11 个杉木样地的光谱反射率地物,并与大气校正后的数据进行了数据拟合,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(R^2 为 0.94)。

2.1.2 地面样地 LAI 数据获取

样地内的叶面积指数测量使用的是美国 LI-COR 公司生产的 LAI-2000 仪器,调查期内研究区的天气以阴

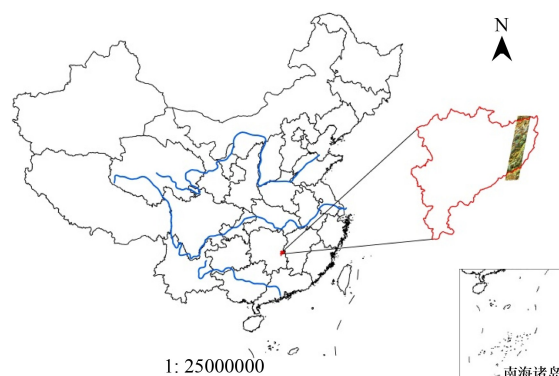


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Location of study area

天为主,比较适合测量。在 60m×60m 的样地范围内,测量 4 个角上 10m×10m 样方及样地中心位置 10m×10m 样方的 LAI 值,取 5 次测量的均值作为样地的 60m×60m 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。

2.2 植被指数提取

研究在参考前人工作的基础上,共选取归一化植被指数 (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),红边归一化植被指数 NDVI(705),三角植被指数 (TVI) 等 7 个植被指数。其中 SAVI 和 SARVI 带有修正因子 (L 取 0.1, 0.25, 0.35, 0.5), 实际共计算了 13 个因子。每个植被指数计算方式及在 Hyperion 数据中对应的波段选择如表 1 所示。

表 1 用于 LAI 反演的植被指数

Table 1 Vegetation index for LAI inversion

植被指数 Vegetation index	计算公式 Formula	Hyperion 对应波段 Band of Hyperion image	参考文献 References
归一化植被指数 (NDVI)	$NDVI = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r}$	band48, band32	Tomoaki Miura, 2006 ^[28]
比值植被指数 (RVI)	$RVI = \frac{\rho_n}{\rho_r}$	band48, band32	Martin Schlerfa, 2005 ^[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	Peng Gong, 2003 ^[30]
抗土壤和大气的植被指数 (SARVI)	$SARVI = \frac{(\rho_n - \rho_{rb})(1 + L)}{\rho_n + \rho_{rb} + L}$ $\rho_{rb} = \rho_r - \beta(\rho_b - \rho_r), \beta \text{ 取 } 0.5 \text{ 或 } 1$	band48, band32 和 band13	AR Huete, 1997 ^[31]
修正的归一化差值植被指数 (MNDVI)	$NDVI = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r} \left(1 - \frac{\rho_s - \rho_{smin}}{\rho_{smax} - \rho_{smin}}\right)$	band48, band32 和 band150	AR Huete, 1997 ^[31]
红边归一化植被指数 (NDVI705)	$NDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}}$	band40, band35	MR Mobasher, 2007 ^[32]
三角植被指数 (TVI)	$TVI = \frac{120(\rho_n - \rho_g) - 200(\rho_r - \rho_g)}{2}$	band48, band32 和 band22	Shunlin Liang, 2004 ^[33]

2.3 叶面积指数反演

对野外调查所得的 130 个样本数据通过计算残差图分布进行数据筛选,剔除了 8 个离群值大的数据。随机选取 80 个样本数据进行叶面积指数反演建模,利用剩余 42 组数据作为测试数据对建立的反演模型进行精度检验。叶面积指数反演分 3 个阶段进行,首先开展单因子曲线估计建模,即每个植被指数与叶面积指数建立回归模型,选择 SPSS 软件曲线估计所列举的 11 种模型进行分析;其次,通过分析植被指数与叶面积指数的相关性,选取逐步回归分析方法以及偏最小二乘回归分析技术进行自变量的筛选,对筛选出的因子建立叶面积指数反演模型;最后对 3 种建模方式所得结果进行精度分析和比较。

2.4 模型精度评价

模型精度是衡量预测方法是否适用于预测对象的一个重要指标。论文选用残差标准差和模型评价指标值 (Model Evaluation Indicator, MEI)^[34] 来衡量 3 种回归分析方法的建模精度。计算公式为:

$$SSe = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\sigma}^2 = \frac{SSe}{n - 2} \\ \hat{\sigma}_R^2 = \frac{RSS_e}{m - q} \\ \hat{\sigma}_F^2 = \frac{RSS_F}{n - m} \\ MEI = 0.5\hat{\sigma}_R^2 + 0.5\hat{\sigma}_F^2 \end{array} \right.$$

式中, SS_e 表示残差平方和; $\hat{\sigma}$ 表示残差标准差; n 表示样地总数; m 表示参与反演的样地数量; q 参与反演的自变量个数; RSS_e 表示 m 个参与反演样地的残差平方和; RSS_F 表示用于精度检验的 $n-m$ 个测试数据样地残差平方和。原则上应选择 $\hat{\sigma}_R^2$ 和 $\hat{\sigma}_F^2$ 都达到最小的最优变量选择方法, 考虑建立方程与精度评价同等重要, 一般取模型评价指标值最小的方法为最优模型方法。

3 结果与分析

3.1 曲线估计模型

研究所选用的 13 种植被指数均参与建模, 为了对拟合结果进行比较, 各植被指数与 LAI 单独回归拟合, 在拟合方法上采用 SPSS 中的 11 种曲线拟合方法, 最终拟合结果保留 2 种拟合曲线, 即各植被指数与 LAI 的线性回归模型以及一个最佳的曲线拟合模型。

表 2 各植被指数与 LAI 最佳曲线估计拟合结果

Table 2 The best curve fitting results for LAI and Vegetation index

植被指数 Vegetation index	线性回归方程 Linear regression model	R^2	最佳回归方程 Best regression model	R^2
MNDVI	$Y=5.065x-0.164$	0.49	$Y=0.827x^{1.984}$	0.55
NDVI	$Y=5.332x-0.348$	0.57	$Y=\exp(2.023-0.8/x)$	0.60
RVI	$Y=0.418x+0.177$	0.73	$Y=1.033\exp(0.155x)$	0.74
NDVI ₇₀₅	$Y=4.223x+0.427$	0.53	$Y=1.725+2.877x^2+0.517x^3$	0.54
SARVI _{0.1}	$Y=5.187x-0.508$	0.68	$Y=0.759\exp(1.96x)$	0.71
SARVI _{0.25}	$Y=4.521x+0.03$	0.55	$Y=\exp(1724+0.9/x)$	0.59
SARVI _{0.35}	$Y=4.199x+0.092$	0.48	$Y=\exp(1.900-0.569/x)$	0.53
SARVI _{0.5}	$Y=3.428x+0.61$	0.35	$Y=\exp(1.35+1.115/x)$	0.40
SAVI _{0.1}	$Y=3.493x+0.721$	0.37	$Y=\exp(1.183+1.352/x)$	0.41
SAVI _{0.25}	$Y=4.036x+0.281$	0.42	$Y=\exp(1.559+0.973/x)$	0.49
SAVI _{0.35}	$Y=4.428x+0.071$	0.53	$Y=\exp(1.7+0.924/x)$	0.58
SAVI _{0.5}	$Y=4.032x+0.314$	0.45	$Y=\exp(1.055+1.569/x)$	0.51
TVI	$Y=0.505x+2.068$	0.24	$Y=1.818+0.351x+0.492x^2-0.148x^3$	0.30

从表 2 分析可知, 从 LAI 与各植被指数的回归模型来看, RVI 植被指数与 LAI 回归模型的决定系数 (R^2) 最高 (线性 0.73, 指数方程 0.74), NDVI 回归模型次之。TVI 决定系数最低 (线性 0.24, 三次方曲线模型 0.3) SARVI_{0.5} 决定系数次之 (线性 0.35, S 形曲线模型 0.40)。从决定系数中可以看出, 当决定系数小于 0.55 时, LAI 与单个植被指数的最佳回归模型以 S 形曲线模型居多。土壤调节因子 L , 对 LAI 与 SAVI 及 SARVI 的曲线回归模型影响较大, 对 SAVI 来说 $L=0.35$, 曲线拟合效果较好, 对 SARVI 而言, $L=0.1$, 曲线拟合效果最佳。

3.2 逐步回归分析

从回归分析的角度来说, 一般认为回归方程包含的自变量越多, 回归平方和越大, 剩余的平方和越小, 剩余均方也随之较小, 预测值的误差也愈小, 模拟的效果也就越好。变量过多, 建模的工作量就会增加; 而且自变量之间本身也存在相关性, 因此在进行叶面积指数建模时, 一是要尽可能选择变量之间相关性较小的因子, 使变量之间具有较强的独立性, 二是需要进行自变量的筛选, 选择适宜数量的变量。在这种情况下可用逐步回归分析, 进行自变量因子的筛选。对于逐步回归分析而言, 首先要建立因变量 y 与自变量 x 之间的总回归方程, 再对总的方程及每一个自变量进行假设检验。当总的方程不显著时, 表明该多元回归方程线性关系不成立; 而当某一个自变量对 y 影响不显著时, 应该把它剔除, 重新建立不包含该因子的多元回归方程。筛选出有显著影响的因子作为自变量, 并建立“最优”回归方程。逐步回归分析结果见表 3 和表 4。

表 3 逐步回归拟合结果
Table 3 Results of stepwise regression

模型 Model	引入变量 Variable	R^2	修正的 R^2 Adj. R^2	估计标准误差 Std. Error of the Estimate	F	显著水平 Sig.
1	RVI	0.73	0.73	0.46	187.82	0.000
2	RVI, SARVI _{0.1}	0.83	0.82	0.37	162.77	0.000
3	RVI, SARVI _{0.1} , NDVI ₇₀₅	0.85	0.84	0.35	124.329	0.000
4	RVI, SARVI _{0.1} , NDVI ₇₀₅ , NDVI	0.87	0.87	0.33	107.050	0.000

表 3 反映了逐步回归分析过程,共进行了 4 次拟合,最先引入回归方程的自变量为比值植被指数 RVI,其次为 SARVI_{0.1},NDVI₇₀₅,NDVI。可以看出 4 个被选择的自变量经过逐步回归都进入了回归方程。随着模型中变量的增加, R^2 、修正的 R^2 随之增大,变量增至 4 个时,拟合方程的决定系数 R^2 为 0.87,修正的 R^2 为 0.87,修正的 R^2 和 R^2 能较好的反映拟合优度;另一个方面随着模型中变量个数的增加,估计标准误差随之减少,变量个数为 4 个时,估计标准误差为 0.33。回归方程包含不同的变量时虽然 F 检验的值随着模型中变量个数的增加而减少,但是其显著性概率值均小于 0.001,即拒绝回归系数为 0 的假设,回归方程相关非常显著。因此最终的回归方程应该包括 RVI, SARVI_{0.1},NDVI₇₀₅ 和 NDVI 等 4 个自变量,变量回归系数如表 4 所示。

表 4 逐步回归分析最终模型的统计量
Table 4 The final model statistic results of stepwise regression

变量 Variable	非标准的回归系数 Unstandardized coefficients		标准回归系数 Standardized coefficients	T	显著水平 Sig.
	B	Std. Error	Beta		
常数 Constant	-1.068	0.219		-4.879	0
RVI	0.213	0.034	0.436	6.354	0
SARVI ₀₁	1.331	0.514	0.211	2.592	0.012
NDVI ₇₀₅	1.144	0.378	0.198	3.024	0.004
NDVI	1.652	0.474	0.234	3.487	0

把表 4 中“非标准化回归系数”栏目中的“B”列数据代入多元回归模型得到最优的逐步回归模型。

$$Y = -1.068 + 0.213RVI + 1.331NDVI + 1.144NDVI_{705} + 1.652SARVI_{0.1}$$

由回归方程式可以看出,研究区的叶面积指数 LAI 与 RVI, SARVI_{0.1}, NDVI₇₀₅, NDVI 呈显著正相关。

3.3 偏最小二乘回归分析

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^[35]。论文尝试使用偏最小二乘回归分析方法的变量投影重要性指标(VIP)结合变量解释能力及变量权重来进行变量筛选,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 个较好的回归分析结果(表 5)。

表 5 偏最小二乘回归分析结果
Table 5 Calibration and validation results of PLS regression

模型 Model	引入变量 Variables Entered	X 方差累积解释量 Cumulative X Variance	Y 方差累积解释量 R^2 Cumulative Y Variance R^2	Adj. R^2
1	MNDVI, NDVI, RVI, NDVI ₇₀₅	0.881	0.890	0.883
2	MNDVI, NDVI, RVI, NDVI ₇₀₅ , SARVI _{0.1}	0.903	0.896	0.887
3	MNDVI, NDVI, RVI, NDVI ₇₀₅ , SARVI _{0.1} , SARVI _{0.25}	0.934	0.897	0.887

在整个回归分析过程中有 7 个因子的变量投影重要性指标小于 1 而被剔除(图 2)。对剩余 6 个因子进行回归建模,从表 5 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,最终得到 3 个偏最小回归模型:

$$Y = -1.060 + 0.484\text{MNDVI} + 2.092\text{NDVI} + 0.223\text{RVI} + 1.551\text{NDVI}_{705}$$

$$Y = -1.113 + 0.255\text{MNDVI} + 1.593\text{NDVI} + 0.207\text{RVI} + 1.145\text{NDVI}_{705} + 1.297\text{SARVI}_{0.1}$$

$$Y = -1.11 + 0.291\text{MNDVI} + 1.57\text{NDVI} + 0.199\text{RVI} + 1.152\text{NDVI}_{705} + 2.4\text{SARVI}_{0.1} - 1.072\text{SARVI}_{0.25}$$

3.4 反演模型的适用性检验

模型的适用性检验主要从两个方面对叶面积指数的反演模型进行检验,即利用 42 个测试数据数据样地,检验模型预测值与实际观测值是否存在较好的线性拟合关系;其二则是计算了 3 种回归分析方法的 6 个反演模型的残差、残差标准差 $\hat{\sigma}$ 、和模型评价价值指标 MEI,分析残差图是否落在置信带内 $[-2\hat{\sigma}, 2\hat{\sigma}]$,分析结果如图 3 和图 4 所示。

从图 6 预测结果与实测值比较结果来看,3 种回归分析方法所对应的 6 个反演模型的预测值与实际观测值之间拟合度较高,存在较好的线性关系;其中以 5—6

个因子建立的偏最小二乘回归分析方法所得结果的决定系数 (R^2) 最高,为 0.84,逐步回归分析结果的决定系

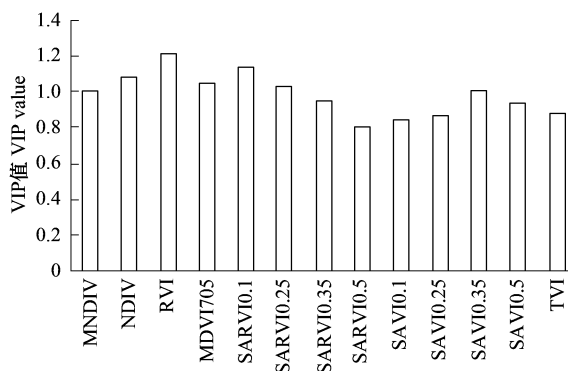


图 2 变量投影重要性指标

Fig. 2 Variable Importance in the Projection

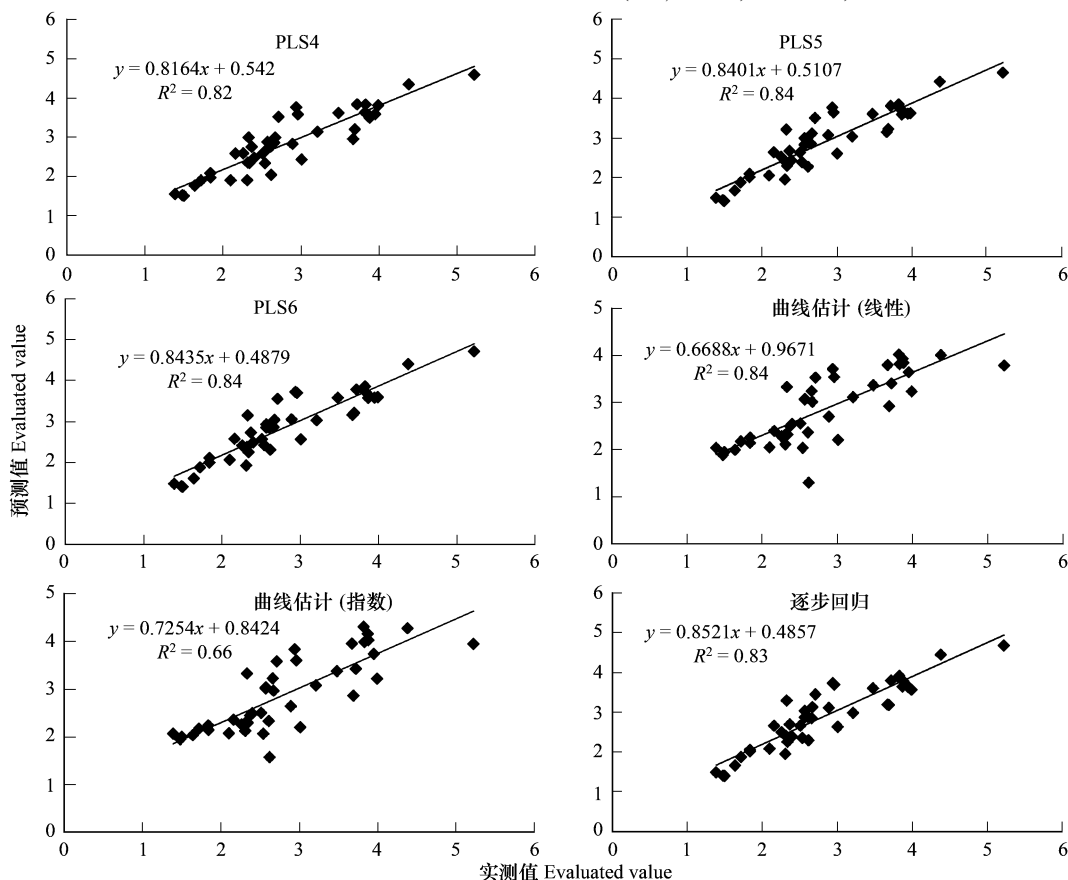


图 3 LAI 预测结果与实测值比较

Fig. 3 Observed values and predicted values of LAI

数次之,为 0.83,以 4 个因子建立的偏最小二乘回归分析方法所得结果的决定系数为 0.82;曲线估计中的线性回归的决定系数最低为 0.64,曲线估计中指数性回归的决定系数次之,为 0.66,从建模因子的选择上看,比值植被指数(RVI)出现在每一个反演模型中,是最敏感的建模因子,其次是 $SARVI_{0.1}$, $NDVI_{705}$, $NDVI$;从回归方法的选择上看,逐步回归与偏最小二乘回归分析方法要优于曲线估计所得结果,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 5—6 个因子所建模型预测结果与实测值的差异变化不大。在自变量个数相同时,逐步回归与偏最小二乘回归分析两种方法所得的反演模型的精度基本相近。

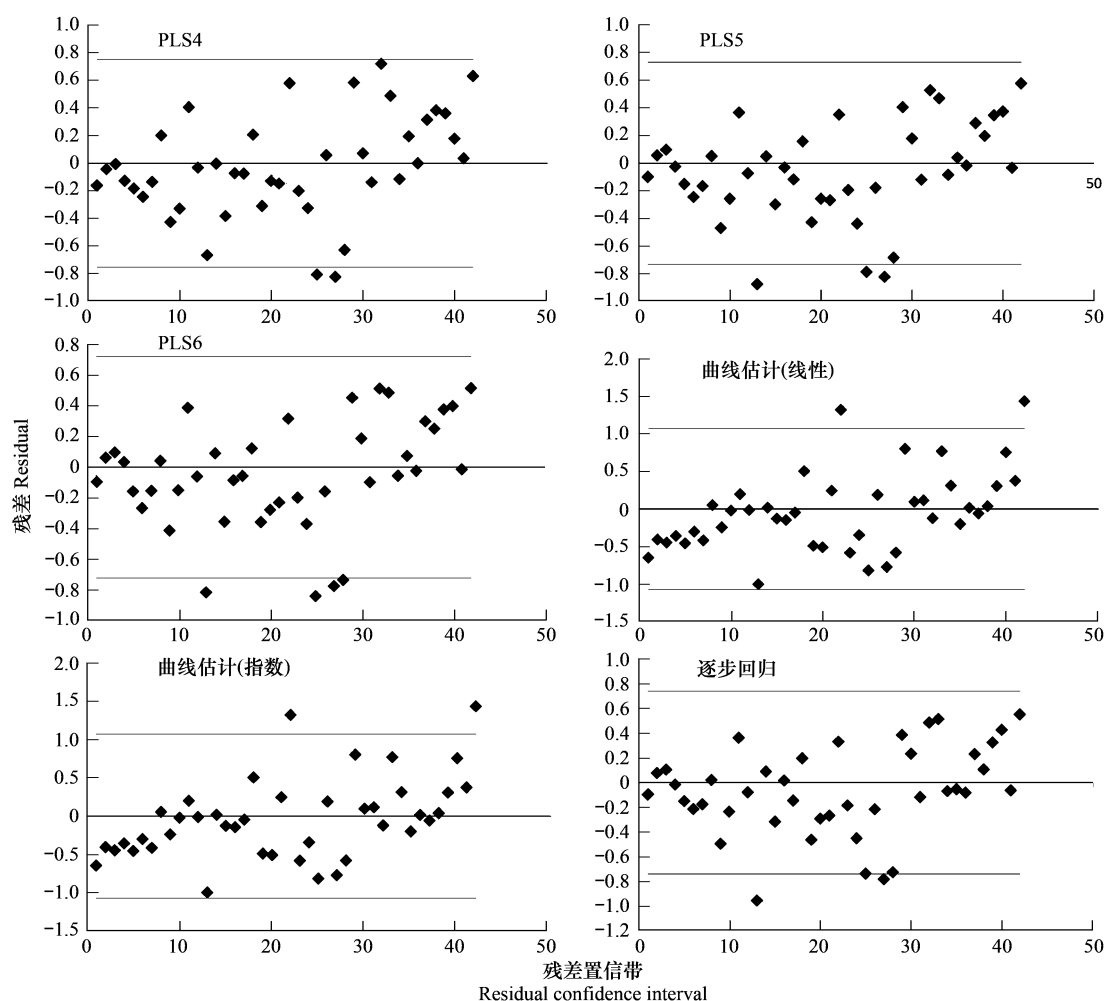


图 4 回归分析的残差图

Fig. 4 Residual results of three regression analysis methods

从图 7 中可知数据的残差绝大部分都在置信带内 $[-2\hat{\sigma}, 2\hat{\sigma}]$, 4 因子的偏最小二乘回归模型的预测值与实测值虽然有较好的拟合关系,但残差全部落在置信带正区间内,随机性较差。残差分析表明,选用 5—6 个自变量因子进行 LAI 建模是可靠的,建模方法以偏最小二乘回归所得模型的精度最高。

由表 6 可知,由 5—6 个因子建立的偏最小二乘回归方程,对样点预测比较稳定且残差平方和最小,可见偏最小二乘法建立的估测模型在三种回归分析方法比较中是最理想的。

4 结论与讨论

采用曲线估计、逐步回归分析和偏最小二乘回归分析方法对黄丰桥林场进行叶面积指数进行估测,结合地面调查结果,分析了叶面积指数与植被指数的关系,建立了叶面积指数估算模型。利用与残差相关的多种参数和相关图形表达,不仅检验了建模精度,而且进行了模型的适用性检验,得出结论。

表 6 3 种回归分析方法建模精度比较

Table 6 Modeling precision of three regression analysis methods

	逐步回归分析 Stepwise regression	曲线估计 Curve estimation		偏最小二乘回归 Partial least-square regression		
		Linear	Exponential	PLS4	PLS5	PLS6
$\hat{\sigma}_R^2$	0.11	0.211	0.232	0.118	0.11	0.10
$\hat{\sigma}_F^2$	0.131	0.272	0.262	0.133	0.127	0.123
MEI	0.121	0.242	0.247	0.126	0.119	0.112

(1) 植被指数反映植被结构和覆盖状态信息,是体现绿色植被相对丰度和活性的辐射量值指标,在不同领域中得到广泛应用,一般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,本次研究参与分析的 13 个植被指数中,RVI 与 LAI 的相关性最大,敏感性最高,其次是 SARVI_{0.1}, NDVI₇₀₅, NDVI, SARVI_{0.1}, SARVI_{0.25},且 6 个指数都参与了叶面积指数反演建模,所得模型的拟合效果较好,说明利用植被指数来建立研究区 LAI 的遥感监测模型是可行的。

(2) 建立了植被指数与叶面积指数的曲线估计、逐步回归及偏最小二乘回归分析方法的 6 个模型,对这些模型的分析发现,植被指数与叶面积指数之间的最佳回归模型为偏最小二乘回归模型,模型预测值与实测值拟合的决定系数 R^2 的最大值为 0.84,参与建模的植被指数因子为 6 个,线性回归模型的决定系数最低为 0.64。建模因子相同时,逐步回归分析与偏最小二乘回归所得结果基本接近。

(3) 模型的适用性检验表明,5—6 个因子建立的偏最小二乘回归分析模型和逐步回归模型的残差点分布随机性较好,以 0 为基准线上下对称分布。曲线估计方法所得的结果的残差分布图较差,说明单个因子建模精度较差,表 6 中模型评价指标值的分析也得到了类似的结论。认为建模因子在 5—6 个之间所得的模型精度较高。

(4) 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。

References:

- [1] Huang M, Ji J J. The spatial-temporal distribution of leaf area index in China: a comparison between ecosystem modeling and remote sensing reversion. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3057-3064.
- [2] Wang X Q, Ma L Y, Jia Z K, Xu X Y. Research and application advances in leaf area index. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(5): 537-541.
- [3] Wu T, Ni S X, Li Y M, Chen J. A comparison on the algorithms for retrieval of LAI based on gap fraction of vegetation canopy. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science*, 2006, 29(1): 111-115.
- [4] Tian Y C, Yang J, Yao X, Zhu Y, Cao W X. Quantitative relationships between hyper-spectral vegetation indices and leaf area index of rice. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1685-1690.
- [5] Song S L, Li P X, Gong W, Wang J P. PLS wavelength selection by hyper-spectral remote sensing in rice. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 219-223.
- [6] Liang L, Yang M H, Zang Z. Improvement research of wheat leaf area index measurement using visible /near-infrared spectra. *Laser and Infrared*, 2010, 40(11): 1205-1210.
- [7] Zhao X, Liu S H, Wang P J, Wang J D, Tian Z K. A method for inverting chlorophyll content of wheat using hyperspectral. *Geography and Geo-Information Science*, 2004, 20(3): 36-39.
- [8] Du X M, Cai T J, Ju C Y. Estimation of forest canopy closure by using partial least square regression. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 273-277.
- [9] Zhang J, Zhang Q, He J M, Sun B. Estimation and analysis of grass biomass in desert by remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6): 2294-2302.
- [10] Guo Z H, Peng S L, Wang B S. Estimating forest biomass in Western Guangdong using Landsat TM data. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11):

1832-1840.

- [11] Gonsamo A, Pellikka P, King D J. Large-scale leaf area index inversion algorithms from high-resolution airborne imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(4): 3897-3916.
- [12] Gonsamo A. Normalized sensitivity measures for leaf area index estimation using three-band spectral vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(7): 2069-2080.
- [13] Sun P S, Liu S R, Liu J T, Li C W, Lin Y, Jiang H. Derivation and validation of leaf area index maps using NDVI data of different resolution satellite imageries. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3826-3834.
- [14] Zhang W C, Zhong S, Hu S Y. Spatial scale transferring study on leaf area index derived from remotely sensed data in the Heihe River Basin, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2495-2503.
- [15] Chen X F, Chen J M, An S Q, Liu Y H, Fang X Q, Wang S M. Comparison of different atmospheric correction models in their effects on Landsat TM estimation of forest leaf area index. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 769-773.
- [16] Yang G J, Huang W J, Wang J H, Xing Z R. Inversion of forest leaf area index calculated from multi-source and multi-angle remote sensing data. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(5): 566-578.
- [17] Li K L, Jiang J J, Mao R Z, Ni S X. The modeling of vegetation through leaf area index by means of remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1491-1496.
- [18] Chen J, Ni S X, Li J J, Wu T. Scaling effect and spatial variability in retrieval of vegetation LAI from remotely sensed data. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1502-1508.
- [19] Turner D P, Cohen W B, Kennedy R E, Fassnacht KS, Briggs JM. Relationships between leaf area index and landsat TM spectral vegetation indices across Three Temperate Zone Sites. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 52-68.
- [20] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3): 440-451.
- [21] Cai B F, Shao X. Leaf area index retrieval based on remotely sensed data and Prospect+ Sail model. *Remote Sensing for Land and Resource*, 2007, (2): 39-43.
- [22] Jacquemoud S. Inversion of the PROSPECT+SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2/3): 281-292.
- [23] Liu Z Y, Ma L L, Tang L L. Inversion of LAI based on SAIL model with multi-angle and multi-spectral remote sensing data. *Arid Land Geography*, 2010, 33(1): 93-98.
- [24] Chen Y H, Zhang W C, Yong B. Retrieving leaf area index using a neural network based on classification knowledge. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2785-2793.
- [25] Zhu G L, Ju W M, Chen J M, Fang W Y, Zhou Y L, Li X F, Li M Z. Forest canopy leaf area index in Maoershan Mountain: ground measurement and remote sensing retrieval. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2117-2124.
- [26] Zhao C Y, Shen W H, Peng H H. Methods for determining canopy leaf area index of *Picea Crassifolia* Forest in QILIAN Mountain, CHINA. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(5): 860-869.
- [27] Wang Z X, Liu C, Huete A. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979-987.
- [28] Miura T, Huete A, Yoshioka H. An empirical investigation of cross-sensor relationships of NDVI and red/near-infrared reflectance using EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 223-236.
- [29] Schlerfa M, Atzberger C, Hilla J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2): 177-194.
- [30] Gong P, Pu R L, Biging G S, Larrieu M R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1355-1362.
- [31] Huete A R, Liu H Q, Batchily K, van Leeuwen W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(3): 440-451.
- [32] Mobasheri M R, Rezaei Y, Valadan Zoj M J. A method in extracting vegetation quality parameters using hyperion images, with application to precision farming. *World Applied Sciences Journal*, 2007, 2(5): 476-483.
- [33] Liang S L. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New Jersey: John Wiley and Sons Inc, 2004: 273-275.
- [34] Li C G, Zhao X W, Li C G. Theory and realization of estimating forest stock volume by remote sensing. Beijing: Science Press, 2006: 109-110.
- [35] Wang H W, Wu Z B, Meng J. *Partial Least-Squares Regression — Linear and Nonlinear Methods*. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 97-123.

参考文献:

- [1] 黄玫, 季劲钧. 中国区域植被叶面积指数时空分布——机理模型模拟与遥感反演比较. 生态学报, 2010, 30(11): 3057-3064.
- [2] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究与应用进展. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
- [3] 吴彤, 倪绍祥, 李云梅, 陈健. 由冠层孔隙度反演植被叶面积指数的算法比较. 南京师大学报: 自然科学版, 2006, 29(1): 111-115.
- [4] 田永超, 杨杰, 姚霞, 朱艳, 曹卫星. 高光谱植被指数与水稻叶面积指数的定量关系. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1685-1690.
- [5] 宋沙磊, 李平湘, 龚威, 汪金平. 基于水稻高光谱遥感数据的 PLS 波长选择研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(2): 219-223.
- [6] 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. 激光与红外, 2010, 40(11): 1205-1210.
- [7] 赵祥, 刘素红, 王培娟, 王锦地, 田振坤. 基于高光谱数据的小麦叶绿素含量反演. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3): 36-39.
- [8] 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. 应用生态学报, 2008, 19(2): 273-277.
- [9] 张杰, 张强, 何金梅, 孙冰. 荒漠草原牧草生物量的遥感估算及空间分布. 生态学报, 2007, 27(6): 2294-2302.
- [10] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. 利用 TM 数据提取粤西地区的森林生物量. 生态学报, 2002, 22(11): 1832-1840.
- [13] 孙鹏森, 刘世荣, 刘京涛, 李崇巍, 林勇, 江洪. 利用不同分辨率卫星影像的 NDVI 数据估算叶面积指数(LAI)——以岷江上游为例. 生态学报, 2006, 26(11): 3826-3834.
- [14] 张万昌, 钟山, 胡少英. 黑河流域叶面积指数(LAI)空间尺度转换. 生态学报, 2008, 28(6): 2495-2503.
- [15] 陈新芳, 陈镜明, 安树青, 刘玉虹, 方秀琴, 王书明. 不同大气校正方法对森林叶面积指数遥感估算影响的比较. 生态学杂志, 2006, 25(7): 769-773.
- [16] 杨贵军, 黄文江, 王纪华, 邢著荣. 多源多角度遥感数据反演森林叶面积指数方法. 植物学报, 2010, 45(5): 566-578.
- [17] 李开丽, 蒋建军, 茅荣正, 倪绍祥. 植被叶面积指数遥感监测模型. 生态学报, 2005, 25(6): 1491-1496.
- [18] 陈健, 倪绍祥, 李静静, 吴彤. 植被叶面积指数遥感反演的尺度效应及空间变异性. 生态学报, 2006, 26(5): 1502-1508.
- [21] 蔡博峰, 绍霞. 基于 PROSPECT+SAIL 模型的遥感叶面积指数反演. 国土资源遥感, 2007, (2): 39-43.
- [23] 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. 干旱区地理, 2010, 33(1): 93-98.
- [24] 陈艳华, 张万昌, 雍斌. 基于分类知识利用神经网络反演叶面积指数. 生态学报, 2007, 27(7): 2785-2793.
- [26] 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. 植物生态学报, 2009, 33(5): 860-869.
- [27] 王正兴, 刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [34] 李崇贵, 赵宪文, 李春干. 森林蓄积量遥感估测理论与实践. 北京: 科学出版社, 2006: 109-110.
- [35] 王惠文, 吴载斌, 孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法. 北京: 国防工业出版社, 2006: 97-123.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 24 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

A bibliometric study of biodiversity research in China	LIU Aiyuan, GUO Yuqing, LI Shiyong, et al (7635)
Effects of elevated CO ₂ and nitrogen deposition on leaf nutrient quality of <i>Fargesia rufa</i> Yi	 ZHOU Xianrong, WANG Jianhua, ZHANG Hong, et al (7644)
Airborne pollen assemblages and their relationships with climate factors in the central Shaanxi Province of the Loess Plateau: a case in Xiaheimugou, Luochuan County	LÜ Suqing, LI Yuecong, XU Qinghai, et al (7654)
Spatial and temporal change in ecological assets in the Yangtze River Delta of China 1995—2007	 XU Xibao, CHEN Shuang, YANG Guishan (7667)
Evaluation and optimization of woodland ecological patterns for Qingdao based on the agent-based model	 FU Qiang, MAO Feng, WANG Tianqing, et al (7676)
Interactive mechanism of service function of alpine rangeland ecosystems in Qinghai-Tibetan Plateau	 LIU Xingyuan, LONG Ruijun, SHANG Zhanhuan (7688)
Preliminary evaluation of air temperature reduction of urban green spaces in Beijing	 ZHANG Biao, GAO Jixi, XIE Gaodi, et al (7698)
Resources metabolism analysis for the pulp and paper industry in Wuhan, China	 SHI Xiaoqing, LI Xiaonuo, ZHAO Linjia, et al (7706)
The characteristics and influential factors of direct carbon emissions from residential energy consumption: a case study of Lijiang City, China	WANG Danyin, TANG Mingfang, REN Yin, et al (7716)
Spatial targeting of payments for ecosystem services Based on SWAT Model and cost-benefit analysis	 SONG Xiaoyu, LIU Yuqing, DENG Xiaohong, et al (7722)
The wind tunnel test of plastic greenhouse and its surface wind pressure patterns	 YANG Zaiqiang, ZHANG Bo, XUE Xiaoping, et al (7730)
Population quantitative characteristics and dynamics of rare and endangered plant <i>Davidia involucrata</i> in Hunan Province	 LIU Haiyang, JIN Xiaoling, SHEN Shouyun, et al (7738)
Phenotypic diversity in populations of germplasm resources of <i>Rodgersia sambucifolia</i> and related species	 LI Pingping, MENG Hengling, CHEN Junwen, et al (7747)
Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and growth of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. (Fabaceae) ...	 YANG Huiling, LIANG Zhenlei, ZHU Xuanwei, et al (7757)
Population-keeping mechanism of the parasitoid <i>Dastarcus helophoroides</i> (Coleoptera: Bothrideridae) of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) in oak forest	YANG Zhongqi, TANG Yanlong, JIANG Jing, et al (7764)
Study of mingling based on neighborhood spatial permutation	LOU Minghua, TANG Mengping, QIU Jianxi, et al (7774)
Comparison of three regression analysis methods for application to LAI inversion using Hyperion data	 SUN Hua, JU Hongbo, ZHANG Huaiqing, et al (7781)
Response of seed germination and seedling growth of <i>Pinus koraiensis</i> and <i>Quercus mongolica</i> to comprehensive action of warming and precipitation	ZHAO Juan, SONG Yuan, SUN Tao, et al (7791)
Impacts of water stored in sapwood <i>Populus bolleana</i> on its sap flux	DANG Hongzhong, LI Wei, ZHANG Youyan, et al (7801)
Dynamics of greenhouse gases emission and its impact factors by fire disturbance from <i>Alnus sibirica</i> forested wetland in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen (7808)
Different tide status and salinity alter stoichiometry characteristics of mangrove <i>Kandelia candel</i> seedlings	 LIU Biner, LIAO Baowen, FANG Zhanqiang (7818)
Effects of shrub encroachment in desert grassland on runoff and the induced nitrogen loss in southeast fringe of Tengger Desert	 LI Xiaojun, GAO Yongping (7828)
Community structure and throughfall erosivity characters of artificial rainforest in Xishuangbanna	 DENG Yun, [TANG Yanlin], CAO Min, et al (7836)
Temporal-spatial variations of net ecosystem productivity in alpine area of southwestern China	 PANG Rui, GU Fengxue, ZHANG Yuandong, et al (7844)

Relationships between chemical compositions of <i>Quercus</i> species seeds and climatic factors in temperate zone of NSTEC	LI Dongsheng, SHI Zuomin, LIU Shirong, et al (7857)
Effects of simulated acid rain stress on the PS II reaction center and free radical metabolism in leaves of longan	LI Yongyu, PAN Tengfei, YU Dong, et al (7866)
Assessment of organic pollution for surface soil in Shenyang suburbs	CUI Jian, DU Jizhong, MA Hongwei, et al (7874)
The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland	GAO Xiang, HAO Weiping, GU Fengxue, et al (7883)
Effects of winter crops on enzyme activity and morphological characteristics of root in subsequent rice crops	YU Tianyi, PANG Huancheng, REN Tianzhi, et al (7894)
Dynamic changes of soil moisture and nitrate nitrogen in wheat and maize intercropping field under different nitrogen supply	YANG Ruiju, CHAI Shouxi, MA Zhongming (7905)
Characteristics of the bird diversity and the impact factors in Weishan Lake	YANG Yuewei, LI Jiuen (7913)
The effect of cropping landscapes on the population dynamics of the cotton bollworm <i>Helicoverpa armigera</i> (Lepidoptera, Noctuidae) in the northern Xinjiang	LU Zhaozhi, PAN Weilin, ZHANG Xin, et al (7925)
The seasonal variations of nitrogen and phosphorus release and its fluxes from the sediments of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake	LIU Jingjing, DONG Chunying, SONG Yingqi, et al (7932)
Optimization of lake model salmo based on real-coded genetic algorithm	GUO Jing, CHEN Qiuwen, ZHANG Xiaoqing, et al (7940)
The influence of climatic environmental factors and fishing pressure on changes of hairtail catches in the northern South China Sea	WANG Yuezhong, SUN Dianrong, CHEN Zuozhi, et al (7948)
Seasonal and spatial distribution of acid volatile sulfide in sediment under different mariculture types in Nansha Bay, China	YAN Tingru, JIAO Haifeng, MAO Yuze, et al (7958)
Review and Monograph	
Research progress on the mechanism of improving plant cold hardiness	XU Chengxiang (7966)
Influences of vegetation on permafrost: a review	CHANG Xiaoli, JIN Huijun, WANG Yongping, et al (7981)
Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: a review	ZHA Tonggang, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (7991)
Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff	ZHAO Hongtao, LI Xuyong, YIN Chengqing (8001)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 24 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 24 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元