

夏玉米叶面积指数遥感反演研究

刘珺^{1,2} 庞鑫³ 李彦荣³ 杜灵通⁴

(1. 太原理工大学安全技术工程博士后科研流动站, 太原 030024;

2. 山西省交通科学研究院博士后科研工作站, 太原 030006; 3. 太原理工大学矿业工程学院, 太原 030024;

4. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要: 利用 LAI-2000 的观测数据与基于 HJ 卫星遥感数据生成的植被指数, 结合 3 种常用的回归模型, 构造了夏玉米分别按全生育期、不同生育阶段和阈值分段的叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 反演模型; 获取了 3 种模式下 LAI 的最优反演模型; 在验证和评价各模型可靠性之后, 生成了夏玉米在营养生长期、抽雄期和生殖生长期的 LAI 分布图; 并将基于 HJ 影像反演得到的 LAI_{HJ} 与 MODIS LAI 产品 (MOD15A2) LAI_M 进行了对比。研究发现, 与各种通用植被指数相比, 针对 HJ CCD 数据构造的环境植被指数 HJVI 与 LAI 的相关性在 3 种反演模式中均为最佳。HJVI 与全生育期 LAI 的相关性达到 0.875, 在不同生育阶段与 LAI 的相关性也高于其他植被指数 (营养生长期线性模型最佳, 决定系数为 0.769; 抽雄期对数模型最佳, 决定系数为 0.783; 生殖生长期指数模型最佳, 决定系数为 0.703)。普适性植被指数中, OSAVI 适用于夏玉米生长前中期的 LAI 反演, NDVI 适用于夏玉米生长后期的 LAI 反演。在夏玉米全生育期内, 各植被指数与 LAI 的相关性整体较高, 但最优回归模型出现在按不同生育阶段反演的模式中。LAI 小于 3 时 EVI 为精度最佳指数 (决定系数为 0.358), LAI 不小于 3 时 OSAVI 为精度最佳指数 (决定系数为 0.515)。在夏玉米 3 个生育阶段, LAI_M 与 LAI_{HJ} 的相关性分别达到 0.732、0.761、0.661。HJ 遥感数据具有较强的 LAI 反演能力, 其高时间和高空间分辨率的特征可以使其代替传统的中分辨率遥感数据而成为农业遥感研究的重要数据源。

关键词: 夏玉米; 叶面积指数; 反演; 植被指数; HJ 卫星

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)09-0309-09

Inversion Study on Leaf Area Index of Summer Maize Using Remote Sensing

Liu Jun^{1,2} Pang Xin³ Li Yanrong³ Du Lingtong⁴

(1. Postdoctoral Scientific Research Station of Safety Technology and Engineering,

Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. Postdoctoral Research Workstation of Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China

3. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

4. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-Western China, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The observation data of LAI-2000 and vegetation index was generated by satellite remote sensing data of HJ, combining three kinds of commonly used regression model. LAI (Leaf area index) inversion model was constructed according to growth period, growth stage and threshold boundaries of summer maize, respectively. The optimal LAI inversion model was acquired based on the above three modes. The summer corn LAI scatter grams of the vegetative growth period, the tasseling stage as well as the reproductive stage were generated after verification and evaluation of the model reliability. The productions of MODIS LAI (MOD15A2) were verified by LAI_{HJ} based on the inversion of model HJ image. According to the survey, except HJVI, during the whole growth period of summer maize, a linear

收稿日期: 2015-11-16 修回日期: 2016-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201438)、山西省青年研究基金项目(2014021032-1)和太原理工大学校基金项目(2013Z016)

作者简介: 刘珺(1981—),女,讲师,博士,主要从事资源环境遥感研究,E-mail: 8886355@163.com

model of RVI with LAI was regarded as the best fitting model ($R^2 = 0.662$); during the vegetative growth period, a linear model of OSAVI with LAI was regarded as the best fitting model ($R^2 = 0.724$); at the tasseling stage, index model of OSAVI with LAI was regarded as the best fitting model ($R^2 = 0.749$); at the reproductive stage, a linear model of NDVI with LAI was regarded as the best fitting model ($R^2 = 0.700$). The correlation of HJVI and LAI at the growth period achieved to 0.875, and the correlation at different growth stages with LAI is higher than the other vegetation indexes (during the vegetative period, $R^2 = 0.769$; at the tasseling stage, $R^2 = 0.783$; at the reproductive stage, $R^2 = 0.703$). EVI is the best index when LAI is less than 3 ($R^2 = 0.358$), while OSAVI is the best when LAI is more than 3 ($R^2 = 0.515$). During the three reproductive periods, R^2 of LAI_M and LAI_{HJ} is 0.732, 0.761 and 0.661. Conclusions were drawn: the inversion method of LAI at different stages is optimal. HJVI shows obvious advantage for LAI inversion ability. The production of MODIS LAI could be used for crop monitoring in special situation. The study not only broadens the mode of inversion LAI using vegetation index, but also confirms the importance of HJ data in agricultural field.

Key words: summer maize; leaf area index; inversion; vegetation index; HJ satellite

引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)被定义为地面面积上绿色叶子的单面面积之和,是描述植被生长状况的重要参数之一^[1],在植被碳、水循环中起着重要作用^[2]。作物是生态系统的重要组成部分, LAI 是反映作物产量、光合作用能力、生长健康状况的重要指标^[3]。

传统的叶面积指数一般采用直接测量法,直接测量法包括收获测量法、落叶收集法和异速生长测量法,但由于该方法耗时、耗力、工作量大,且对农作物具有一定的破坏性,因此其应用受到一定的限制。

利用遥感技术反演 LAI 已成为近年来植被遥感领域的研究热点。利用遥感反演 LAI 的方法主要为经验模型法和物理模型法。物理模型法包括几何光学模型法、辐射传输模型法和混合模型法。它是目前反演全球 1 km 尺度 LAI 产品的主流算法。虽然物理模型法具有较高的 LAI 反演精度,但其受传感器覆盖范围和获取时相的制约较大^[4],且物理模型法需要的输入参数不但难以获取,而且本身带有一定误差,同时其反演精度受模型模拟精度、查表精度、实测数据采集精度等因素的影响^[5]。而经验模型法是利用实测 LAI 与植被指数 VI (Vegetation index) 建立可靠的回归模型,从而间接求得大范围内 LAI 的方法。由于植被指数本身具有克服干扰因素的特点,因此经验模型法简化了冠层内光子的复杂传输过程,减少了参数的不确定性,提高了 LAI 估算精度,是广域范围内低成本估算 LAI 的有效方法,已成为进行小区域 LAI 反演的常用方法^[6]。

由于遥感数据捕获的空间变异特性有利于调整

区域内作物和土壤特性,因此高时间、高空间分辨率的遥感数据在经验模型中具有不可替代的位置^[7]。地物在可见光的反射可用来控制土壤背景的干扰,而在近红外波段的反射则可探测大范围内的动态波动^[8]。因此,由可见光和近红外波段组合而成的植被指数被广泛地应用于 LAI 反演研究中。其中归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)是目前应用最广的植被指数,但是它受土壤背景影响较大,且容易达到饱和;为了弥补这个缺点,提出了土壤调节植被指数(Soil adjusted vegetation index, SAVI)、优化的土壤调节植被指数(Optimized soil adjusted vegetation index, OSAVI)和修正的土壤调节植被指数(Modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)^[9-11];而为了提高 LAI 较大时的敏感度、减少大气干扰,增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)也被较多地应用于 LAI 反演^[12-13]。在 LAI 反演研究中,学者们还应用了其他植被指数。如谭昌伟等^[14]通过测定不同时期的夏玉米冠层光谱反射率与 LAI,探索了比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)等 10 种植被指数与 LAI 的相关性,利用 R810/R560 与 LAI 之间的极其显著相关性,高精度地反演了夏玉米的叶面积指数。赵虎等^[15]利用 NDVI、EVI、RVI、SAVI 等反演了冬小麦叶面积指数,证明了叶面积指数和不同植被指数之间有较强的相关关系。YANG 等^[16]利用 NDVI、EVI 反演夏玉米 LAI,通过比较发现 EVI 的反演精度高于 NDVI。贾玉秋等^[17]在分析 GF-1 和 Landsat-8 谱段特征的基础上,利用红光、蓝光和绿光的不同组合构成的归一化植被指数(NDVI、GNDVI、BNDVI、GRNDVI、GBNDVI、BRNDVI、PNDVI)分别反演了玉米的叶面积指数,说明采用高

空间分辨率的数据可以提高 LAI 估算精度。赵娟等^[18]采用分生育期反演的办法,分别基于宽波段植被指数(OSAVI、NDVI、EVI、TVI、NDGI、RVI)和窄波段植被指数(NDVI705、mRVI705、mNDVI705、VOGI)反演了不同生育期的冬小麦 LAI,有效改善了冬小麦 LAI 的反演精度。苏伟等^[19-20]用激光雷达数据精确研究了农作物冠层参数与叶面积指数之间的关系。可以看出,已有研究集中于2方面:利用窄波段植被指数探求高精度反演 LAI 的模型;通过细化和改进反演方法,利用宽波段植被指数估算 LAI。这些研究都存在一些问题:与宽波段植被指数比较,构建窄波段植被指数对数据来源要求较高,不易获得,且数据处理工作繁重;大多数研究使用的是已经过验证的 TM、SPOT、MODIS 等国外的遥感数据,较少使用国产数据。

HJ 卫星是我国自主研发的资源环境卫星,已被应用于各个领域,其中农业领域的研究也不少,但是针对 LAI 反演的精细研究尚不多见。为了验证 HJ 卫星在 LAI 估算方面的能力,同时得到更高的夏玉米 LAI 反演精度,本文以太原市为例,利用我国自主研发的 HJ 卫星 CCD 遥感数据生成的宽波段植被指数,分别从全生育期、不同生育阶段和 LAI 阈值分段3个角度反演夏玉米 LAI。通过探索不同模式下各植被指数与实测夏玉米 LAI 之间的相关关系,建立回归模型,进一步探寻在遥感数据空间分辨率一定的前提下,有效提高夏玉米叶面积指数反演精度的途径和方式,并验证我国 HJ 卫星在精细农业方面的应用能力。

1 研究区概况

太原地区(111°30'E ~ 113°09'E, 37°27'N ~ 38°25'N,图1)下辖太原市市辖区、古交市、清徐县、娄烦县、阳曲县等地区。区域内粮食作物面积为7.33万hm²,其中夏玉米播种面积约5万hm²,占全省夏玉米面积的68%。区域内种植的夏玉米主要

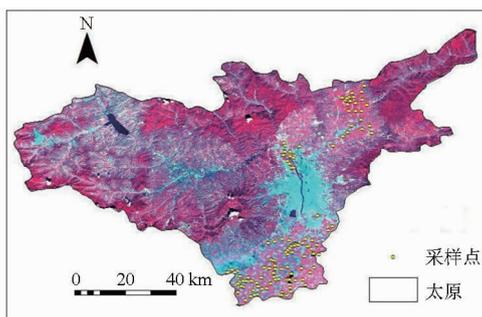


图1 太原市 HJ 假彩色(432)合成图及采样点
Fig. 1 HJ-1 composited image for band 4,3,2 of Taiyuan city and sample points

为春播中晚熟型,其生育期为4月中旬—9月下旬。具体为:4月中旬播种,5月初出苗,5月中旬—6月中旬为夏玉米拔节期,之后随着温度逐渐升高,夏玉米生长加速,到7月中旬夏玉米进入抽雄期,8月中旬—9月上旬为灌浆期,9月中下旬时,夏玉米逐渐成熟,到9月底、10月初时收获。全生育期103~133d,为一年一熟的纯作夏玉米。

2 数据与方法

2.1 数据获取

2.1.1 夏玉米 LAI 观测

利用美国 LI-COR 公司生产的 LAI-2000 型植被冠层仪进行野外夏玉米 LAI 数据采集和测量。为了全面获取研究区夏玉米的叶面积指数,根据夏玉米种植面积和密度,在研究区所辖行政区(太原市市辖区、阳曲县、娄烦县、古交市和清徐县)内共选取了18个夏玉米地块的162个点进行叶面积指数测量(图1),样点 LAI 最大值为4.20,最小值为0.90,均值为2.45,标准差为0.67。样方的选择是根据夏玉米长势和植株密度确定的,参考 HJ 数据分辨率,将地块大小设置为30m×30m,并利用 Mobil Mapper 6 GPS 观测和记录了定位点信息。测量日期为2015年7月中旬—9月下旬,共进行了3次。

2.1.2 植被指数的选择

选用 NDVI、EVI、差值植被指数(Difference vegetation index, DVI)、RVI、OSAVI、3波段植被指数(Triangular vegetation index, TVI)6种应用广泛的典型植被指数^[14-21]和专门针对 HJ CCD 数据构造的环境植被指数(Huanjing vegetation index, HJVI)^[22]估算夏玉米 LAI。各植被指数计算公式及来源如表1所示。

表1 各植被指数计算公式

Tab. 1 Overview of spectral vegetation indices

植被指数	计算公式	文献序号
HJVI	$2(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}) / (6\rho_{\text{G}} - 7.5\rho_{\text{B}} + 0.9)$	[23]
NDVI	$\frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}}}$	[24]
EVI	$2.5 \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + 6\rho_{\text{R}} - 7.5\rho_{\text{NIR}} + 1}$	[25]
DVI	$\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}$	[26]
RVI	$\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{R}}}$	[27]
OSAVI	$(1 + 0.16) \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{R}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{R}} + 0.16}$	[11]
TVI	$60(\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{G}}) - 100(\rho_{\text{R}} - \rho_{\text{G}})$	[28]

注: ρ_{NIR} 、 ρ_{R} 、 ρ_{G} 、 ρ_{B} 分别为植被在近红外、红光、绿光、蓝光波段的反射率。

2.1.3 HJ CCD 遥感数据

为了将遥感影像与地面实测数据进行匹配,从中国资源卫星应用中心(<http://www.cresda.com/n16/index.html>)获取了与地面 LAI 观测日期同步的 HJ-1 CCD 影像,分别得到 7 月 29 日、8 月 22 日、9 月 19 日太原市 HJ 影像。利用采集的地面控制点对影像进行了几何校正、辐射校正、大气校正、研究区裁剪等预处理,其中几何校正误差控制在 0.5 个像元内,辐射校正根据资源卫星应用中心提供的定标参数进行,大气校正采用 6S 模型进行,利用研究区矢量图对大气校正后的影像进行裁剪,最终得到研究区各时相反射率影像。

根据表 1 中的公式,生成各生育期的 NDVI、EVI、DVI、RVI、OSAVI、TVI 影像。为了减小因几何校正造成的定位误差,夏玉米样点植被指数取 GPS 采样点周围 3 像元 \times 3 像元的平均值。

2.1.4 MODIS LAI 产品

从美国地质勘探局(<http://lpdaac.usgs.gov/>)下载研究区 MODIS 叶面积指数和光合有效辐射产品(MOD15A2),轨道号为 h26v05,产品空间分辨率为 1 km,时间分辨率为 8 d。利用 ENVI 软件对下载的数据进行了转投影、裁剪等处理,得到研究区叶面积指数影像。

2.2 LAI 估算模型的构建与比较

将实测 LAI 按照 2:1 的比例分开,选取其中的 98 个数据用于模型反演。通过获取相应点的 HJ 植被指数,构建夏玉米 LAI 反演模型。分别按照全生育期、不同生育阶段和 LAI 阈值分段 3 种方法进行建模。

2.2.1 全生育期建模

在多种的回归模型中,当样本量较大时,线性模型被认为是最具说服力的回归模型,因此,研究构建了全生育期内 VI 与 LAI 的线性回归模型。将 98 个样点的 NDVI、EVI、DVI、RVI、OSAVI、TVI 与夏玉米全生育期的 LAI 值一一对应,进行回归分析,得到整个生育期内各植被指数与 LAI 的线性相关性及其回归模型(表 2),并以决定系数 R^2 为指标评价各模型的可靠性。

从表 2 中可以看出,各线性模型中,HJVI 与 LAI 的相关性最高;其余植被指数与 LAI 的相关性由大到小分别为 RVI、EVI、NDVI、OSAVI、DVI、TVI。

2.2.2 不同生育阶段建模

虽然全生育期反演得到了较好的 LAI 反演精度,但细节性不足。其反演结果具有较好的整体性,但不足以监测作物长势、估算作物产量提供详细信息。为了提高夏玉米 LAI 反演精度,使研究结果

表 2 全生育期各植被指数与叶面积指数线性相关性

Tab.2 Correlativity between VIs and LAI in whole

growth period		
植被指数	线性模型	R^2
HJVI	$y = 5.6484x - 0.2409$	0.875
NDVI	$y = 3.1980x + 0.5292$	0.645
EVI	$y = 3.9781x + 0.7254$	0.651
DVI	$y = 7.2358x + 0.6945$	0.507
RVI	$y = 0.2129x + 1.4564$	0.662
OSAVI	$y = 3.5898x + 0.6796$	0.621
TVI	$y = 0.1052x + 0.9191$	0.450

可以得到更好地推广应用,按照不同生育阶段对夏玉米 LAI 进行反演。

作物的生育过程可以分为营养生长期、生殖生长期和抽雄期 3 个阶段。营养生长期是绿色植物根、茎、叶等营养器官的生长阶段。生殖生长期是植物花、果实、种子等生殖器官形成的时期。对夏玉米而言,抽雄期为营养生长和生殖生长的转折点,也是作物叶面积指数达到峰值的时期。

根据营养生长期、抽雄期和生殖生长期 3 个阶段对夏玉米 LAI 进行反演建模。在实地调查研究区夏玉米生长情况的基础上,3 个生育期分别选择 7 月 29 日、8 月 22 日和 9 月 14 日。分别将各生育期植被指数与对应点实测 LAI 值进行回归分析,得到不同生育阶段各植被指数与 LAI 的线性、对数、指数 3 种回归模型,如图 2 所示。

从图中可以看出,3 个生育期内,相关性最高的回归模型分别为 HJVI 与 LAI 在营养生长期的线性模型($R^2 = 0.769$)、抽雄期的对数模型($R^2 = 0.783$)、生殖生长期的指数模型($R^2 = 0.703$)。除 HJVI 之外,营养生长期内,普适性植被指数中,OSAVI 与 LAI 的线性模型相关性最高, $R^2 = 0.724$,其次为 NDVI 与 LAI 的线性模型、EVI 与 LAI 的指数模型、TVI 与 LAI 的线性模型、RVI 与 LAI 的线性模型、DVI 与 LAI 的线性模型,其中 DVI 与 LAI 的指数关系最差($R^2 = 0.486$)。抽雄期内,OSAVI 与 LAI 的相关性最高,且二者的相关性明显优于其他植被指数与 LAI 的相关性。在 OSAVI 与 LAI 的 3 种模型中,指数模型相关性最佳, R^2 为 0.749,其余依次为 NDVI 与 LAI 的指数模型、DVI 与 LAI 的对数模型、RVI 与 LAI 的对数模型、EVI 与 LAI 的的指数模型、TVI 与 LAI 的线性模型。其中 DVI、RVI 与 LAI 的相关性差异不明显,TVI 与 LAI 的指数关系最差, $R^2 = 0.352$ 。生殖生长期内,NDVI 与 LAI 的线性模型相关性最佳, $R^2 = 0.700$,其他回归模型依次为 RVI 与 LAI 的线性模型($R^2 = 0.605$)、OSAVI 的线性模型($R^2 = 0.558$)、TVI 与 LAI 的线性模型($R^2 = 0.543$)、

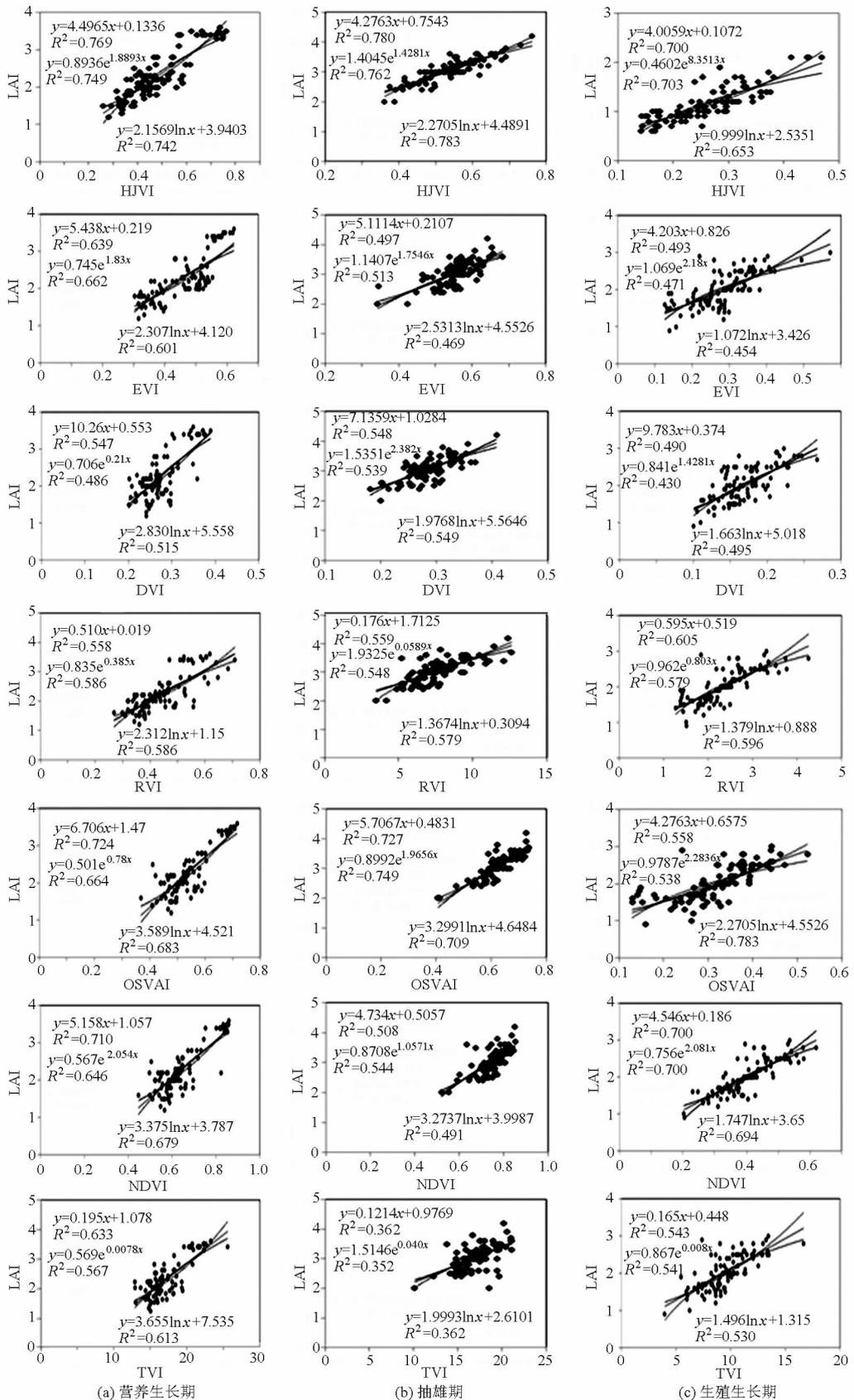


图 2 不同生育阶段各植被指数与叶面积指数 3 种模型相关性

Fig. 2 Correlativity between VIs and LAI in different growth stages of summer maize

DVI 与 LAI 的对数模型 ($R^2 = 0.495$)、EVI 的线性模型 ($R^2 = 0.493$)。生殖生长期内, EVI 与 LAI 的对数关系最差, $R^2 = 0.454$ 。

2.2.3 按叶面积指数阈值分段建模

以 LAI 等于 3 为分界值, 按照 LAI 小于 3 和 LAI 不小于 3 分段对夏玉米叶面积指数反演进行建

模,选择线性模型表征二者的相关性,得到各植被指数与 LAI 的相关性(表 3)。

表 3 按 LAI 阈值分段时植被指数与叶面积指数的线性相关性

Tab.3 Linear correlativity between VIs and LAI according to LAI values

植被指数	LAI 小于 3	LAI 不小于 3
HJVI	$y = 4.956x - 0.0636$ ($R^2 = 0.790$)	$y = 2.3676x + 1.88$ ($R^2 = 0.538$)
NDVI	$y = 1.8513x + 1.1358$ ($R^2 = 0.325$)	$y = 2.6186x + 1.2259$ ($R^2 = 0.202$)
EVI	$y = 2.3121x + 1.2394$ ($R^2 = 0.358$)	$y = 4.0339x + 0.9499$ ($R^2 = 0.296$)
DVI	$y = 3.3497x + 1.3784$ ($R^2 = 0.175$)	$y = 4.1068x + 2.024$ ($R^2 = 0.446$)
RVI	$y = 0.1668x + 1.5024$ ($R^2 = 0.323$)	$y = 0.0453x + 2.9252$ ($R^2 = 0.096$)
OSAVI	$y = 1.9265x + 1.2787$ ($R^2 = 0.282$)	$y = 4.1199x + 0.5972$ ($R^2 = 0.515$)
TVI	$y = 0.0467x + 1.4948$ ($R^2 = 0.156$)	$y = 0.0594x + 2.1891$ ($R^2 = 0.301$)

从表中可以看出,在 LAI 小于 3 和 LAI 不小于 3 两种情况下,HJVI 与 LAI 的线性回归模型的相关性远高于其他植被指数。除 HJVI 外,LAI 小于 3 时,EVI 与 LAI 的线性相关性最佳,其他植被指数与 LAI 的线性关系从大到小依次为 NDVI、RVI、OSAVI、DVI、TVI。LAI 不小于 3 时,除 HJVI 外,OSAVI 与 LAI 线性相关最强,其余由大到小分别为 DVI、TVI、EVI 和 NDVI,RVI 与 LAI 相关性最弱, R^2 仅为 0.096,说明 RVI 不适合 LAI 较大时的反演研究。

3 讨论

3.1 LAI 建模方式比较

3 种反演模式中,HJVI 具有其他植被指数不可比拟的优势,这与 HJVI 的构造有关,表明针对特定遥感数据构建的植被指数可以充分发挥该数据的特点。

各普适性植被指数与夏玉米 LAI 在全生育期内的线性相关性整体较高, R^2 最小为 0.450。这也是大多数研究植被 LAI 反演的学者们普遍采用全生育期反演的 LAI 原因。

分生育阶段反演的模式下:在营养生长期和抽雄期,OSAVI 与 LAI 的相关性最强,并且在这 2 个时期内,OSAVI 与 LAI 的线性相关性高于其他各植被指数与 LAI 在全生育期内的相关性,说明 OSAVI 适合用于夏玉米生长初期和中期的 LAI 反演。紧随其后的是 NDVI,NDVI 与 LAI 在营养生长期的线性相

关性也大于二者在全生育期内的相关程度,而在抽雄期则相反。这与 NDVI 在作物生长旺盛时期容易饱和溢出而造成其值与 LAI 值对应不准确有关。而在生殖生长期内叶片开始逐步失水、发黄,NDVI 值不易造成饱和。因此,在此期间内 NDVI 与 LAI 的相关性显著高于其他植被指数与 LAI 的相关程度,同时也高于 NDVI 与 LAI 在全生育期内的相关性。综上所述,NDVI 更适用于作物生长前期和后期的 LAI 反演。

LAI 为 3 是植被叶面积指数高低的分界点,LAI 小于 3 时对应的各植被指数较小,LAI 不小于 3 时对应的各植被指数相应也较大。LAI 小于 3 时,EVI 与 LAI 的相关性较强,这是由于 EVI 克服了土壤背景和大气干扰的影响,其值更真实地反映了植被的生长状况。此外,NDVI 与 LAI 的相关性也证实了该植被指数在 LAI 较小时的反演能力。LAI 不小于 3 时,OSAVI 与 LAI 的相关性高于二者在 LAI 小于 3 时的相关性,而且优于其他植被指数与 LAI 的相关性;其次,由于植被在近红外波段和红波段的反射率差异较大,使得 DVI、TVI 与 LAI 的对应关系也较好。除 OSAVI、DVI 和 TVI 之外,其余植被指数与 LAI 不小于 3 时的相关性均小于其与 LAI 小于 3 时的相关性。

综合比较 3 种反演方式,不难发现,按不同生育阶段反演的 LAI 最优精度高于其他 2 种方式的最优反演精度;全生育期的各植被指数对 LAI 的反演精度总体较高,但最佳精度不及分生育阶段的值;EVI、NDVI、RVI 适合于 LAI 小于 3 时的反演,OSAVI、DVI、TVI 则适合于 LAI 不小于 3 时的反演;3 种模式下,HJVI 均具有最优的 LAI 反演精度,且明显优于其他普适性植被指数。

3.2 模型验证

为了检验 LAI 各反演模型的可靠性,研究利用各生育阶段 HJVI 与 LAI 的反演模型得到 LAI 的最佳反演值,并将实测 LAI 作为真值,利用建模样本以外的其余 64 个样点 LAI 实测值与基于 HJVI 反演的 LAI 值进行回归分析,以决定系数 R^2 和均方根误差 (RMSE) 为指标对其进行精度评价,并利用 Z-检验对 2 组数据进行统计分析。得到各生育期 LAI 反演值 (LAI_R) 与真实值 (LAI_T) 之间的相关关系(图 3)。

从图 3 中可以看出,利用 HJVI 反演的营养生长期、抽雄期和生殖生长期的 LAI_R 与 LAI_T 之间的线性决定系数 R^2 分别为 0.695、0.681、0.591, RMSE 分别为 0.271、0.217、0.213(图 3a、3b、3c);利用 HJVI 反演的全生育期的 LAI_R 与 LAI 真值之间的线性决定系数 R^2 为 0.837, RMSE 为 0.409(图 3d)。

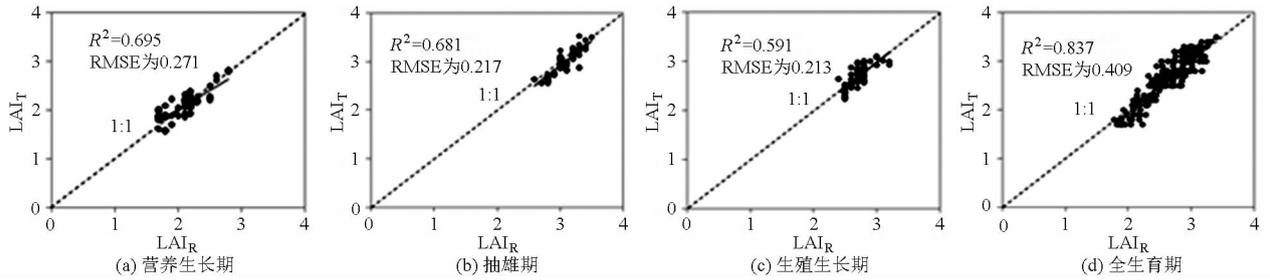


图3 不同生育期真实叶面积指数与基于HJVI反演的叶面积指数相关性分析

Fig. 3 Correlation of measured LAI and retrieval value based on HJVI at different stages

综合分析图3可以得出,虽然各生育期相关性不同,但其RMSE最大值为0.271,说明基于HJVI的夏玉米不同生育期LAI反演模型能真实反映夏玉米的长势及其变化情况,其反演结果较好。

3.3 LAI成图

在验证各反演模型可靠性的基础上,利用最佳反演模型分别生成太原市夏玉米的LAI空间分布图(图4)。

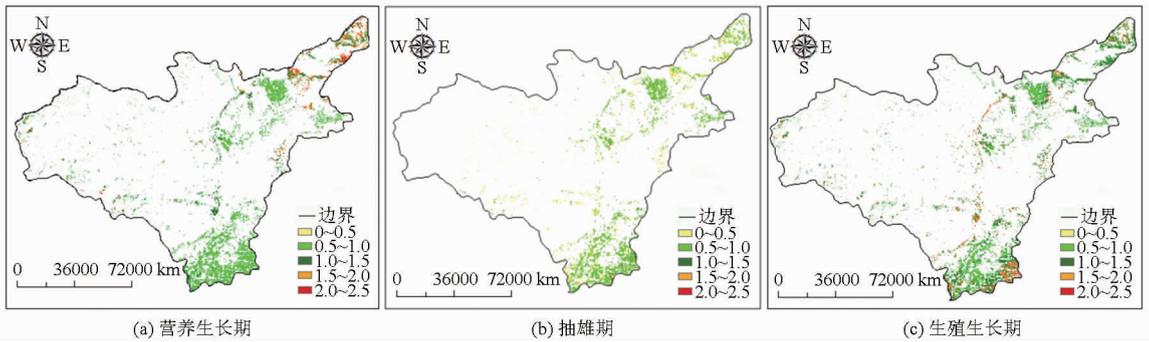


图4 研究区夏玉米不同生育期叶面积指数空间分布

Fig. 4 LAI spatial distribution maps of summer maize at different stages in Taiyuan

从图4中可以看出,营养生长阶段夏玉米LAI取值在0.5~3.0之间,且夏玉米LAI值大多集中于0.5~2.0之间,均值为1.90。LAI介于1.5~3.0之间的较大值主要集中在太原市东北方向,这是由于该区夏玉米播种时间较其他区域早,因此其植株生长较其他区域茂盛。在抽雄期,夏玉米LAI值主要集中于1.5~3.5之间,均值为2.74。LAI大于3的值位于太原市南部的清徐县,研究区西部的娄烦县和古交市夏玉米LAI总体较小。夏玉米进入成熟期后,玉米果实逐步形成,LAI有所降低,主要集中在1.0~2.5之间,均值为1.79。其中LAI较大值主要集中于南部的清徐县。

3.4 MODIS LAI产品验证

为了进一步验证反演模型的准确性,研究将反

演得到的夏玉米3个典型生长期LAI影像重采样到1 km,并随机选取了143个点,将基于HJ遥感影像的夏玉米营养生长期、抽雄期和生殖生长期的叶面积指数(LAI_{HJ})与对应时相的MODIS叶面积指数产品(MOD15A2, LAI_M)进行回归分析,得到夏玉米营养生长期、抽雄期和生殖生长期LAI_{HJ}与LAI_M的相关关系(图5)。

而从图5中可以看出,夏玉米3个典型生长期LAI_M与LAI_{HJ}呈现出较好的一致性,其中抽雄期二者的相关性最好,R²达到0.761(图5b);营养生长期次之,R²为0.732(图5a);生殖生长期二者相关性也较好,R²为0.661(图5c)。对143个样点的均值进行统计发现,营养生长期LAI_{HJ}均值为2.02, LAI_M均值为1.75;抽雄期LAI_{HJ}均值为3.06, LAI_M均值为

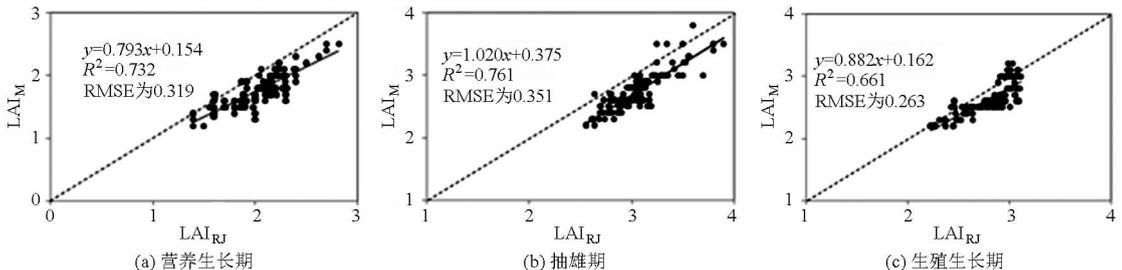


图5 不同生育期LAI_{HJ}与LAI_M相关性分析

Fig. 5 Correlation of LAI_{HJ} and LAI_M

2.75;生殖生长期 LAI_{HJ} 均值为 2.79, LAI_M 均值为 2.63。3 个夏玉米生长期 LAI_M 均不同程度地低于 LAI_{HJ} , 这与 MODIS 空间分辨率低、像元混合严重的情况有关。这种高估或低估的现象也被其他学者证实过^[3,29]。

4 结论

(1)以夏玉米为研究对象,利用实测 LAI 数据和基于 HJ 卫星生成的 HJVI、NDVI、EVI、DVI、RVI、OSAVI、TVI 数据,构造了全生育期、不同生育阶段、LAI 阈值分段 3 种模式下的夏玉米 LAI 反演模型。3 种反演模式下,HJVI 均具有最优的 LAI 估算精度。

(2)3 种夏玉米 LAI 反演模式中,全生育期内各植被指数与 LAI 的相关性整体较高,但其细节性不强,无法精确反映作物在不同生育阶段的生长状况。而最优反演精度出现在按不同生育期反演的模式中。说明分不同生育阶段反演能有效提高 LAI 的估算精度,有利于更准确地监测作物生长状况,估算其

产量。

(3)分生育期反演模式中各普适性植被指数与 LAI 的相关性差异较大。营养生长期,OSAVI 与 LAI 线性相关性最佳;抽雄期,OSAVI 与 LAI 指数模型相关性最佳;生殖生长期,NDVI 与 LAI 线性相关性最佳。说明在夏玉米生长前期 OSAVI 具有较强的 LAI 反演能力。

(4)按 LAI 阈值分段反演的精度是 3 种反演模式中最差的,各普适性植被指数中反演精度最高为 0.515(LAI 不小于 3,OSAVI 与 LAI),最低精度仅为 0.096(LAI 不小于 3,RVI 与 LAI)。这种反演模式不利于利用 LAI 研究作物长势和产量。

(5) LAI_M 与 LAI_{HJ} 虽然有差异,但在对精度要求不高的情况下,MODIS LAI 产品亦可反映作物的生长状况。

(6)HJ 遥感数据具有较强的 LAI 反演能力,其高时间和高空间分辨率的特征可以使其代替传统的中分辨率遥感数据而成为农业遥感研究的重要数据源。

参 考 文 献

- 1 MYNENI R B, HOFFMAN S, KNYAZIKHIN Y, et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 214 - 231.
- 2 刘洋,刘荣高,陈镜明,等.叶面积指数遥感反演研究进展与展望[J].*地球信息科学学报*, 2013,15(5): 734 - 743.
LIU Yang, LIU Ronggao, CHEN Jingming, et al. Current status and perspectives of leaf area index retrieval from optical remote sensing data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(5): 734 - 743. (in Chinese)
- 3 LE Maire G, MARSDEN C, VERHOEF W, et al. Leaf area index estimation with MODIS reflectance time series and model inversion during full rotations of eucalyptus plantations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 586 - 599.
- 4 LIANG S, ZHAO X, LIU S, et al. A long-term global land surface satellite (GLASS) data-set for environmental studies[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(1): 5 - 33.
- 5 刘玉琴,孟庆岩,沙晋明,等.基于 HJ-1A CCD1 数据的台湾相思树叶面积指数反演[J].*地球信息科学学报*, 2014, 16(4): 645 - 652.
LIU Yuqin, MENG Qingyan, SHA Jinming, et al. Comparison of different methods for retrieving acacia rachii leaf area index based on HJ-1A CCD1 imagery[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2014, 16(4): 645 - 652. (in Chinese)
- 6 赵静,李静,柳钦火,等.联合 HJ-1/CCD 和 Landsat8/OLI 数据反演黑河中游叶面积指数[J].*遥感学报*, 2015, 19(5): 733 - 749.
ZHAO Jing, LI Jing, LIU Qinhuo, et al. Leaf area index inversion combining with HJ-1/CCD and Landsat 8/oli data in the middle reach of the Heihe river basin[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015, 19(5): 733 - 749. (in Chinese)
- 7 GUÉRIF M, DUKE C L. Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000, 81(1): 57 - 69.
- 8 PINTY B, LAVERGNE T, WIDLOWSKI J L, et al. On the need to observe vegetation canopies in the near-infrared to estimate visible light absorption[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(1): 10 - 23.
- 9 HUETE A R. A soil-adjusted vegetation index(SAVI)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 25(3): 295 - 309.
- 10 RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95 - 107.
- 11 QI J, CHEHBOUNI A, HUETE A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 48(2): 119 - 126.
- 12 HUETE A, DIDAN K, MIURA T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1): 195 - 213.
- 13 JIANG Z, HUETE A, DIDAN K, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3833 - 3845.
- 14 谭昌伟,黄义德,黄文江,等.夏玉米叶面积指数的高光谱遥感植被指数法研究[J].*安徽农业大学学报*, 2004, 31(4): 392 - 397.

- TAN Changwei, HUANG Yide, HUANG Wenjiang, et al. Study on colony leaf area index of summer maize by remote sensing vegetation indexes method[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2004, 31(4): 392-397. (in Chinese)
- 15 赵虎, 裴志远, 马尚杰, 等. 利用 HJ-1-A/B CCD2 数据反演冬小麦叶面积指数[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 172-176.
- ZHAO Hu, PEI Zhiyuan, MA Shangjie, et al. Retrieving leaf area index of winter wheat using HJ-1-A/B CCD2 data[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 172-176. (in Chinese)
- 16 YANG Fei, SUN Jiulin, FANG Honliang, et al. Comparison of different methods for corn LAI estimation over northeastern China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 18: 462-471.
- 17 贾玉秋, 李冰, 程永政, 等. 基于 GF-1 与 Landsat-8 多光谱遥感影像的玉米 LAI 反演比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 173-179.
- JIA Yuqiu, LI Bing, CHENG Yongzheng, et al. Comparison between GF-1 image and Landsat-8 images in monitoring maize lai [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 173-179. (in Chinese)
- 18 赵娟, 黄文江, 张耀鸿, 等. 冬小麦不同生育时期叶面积指数反演方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9): 2546-2552.
- ZHAO Juan, HUANG Wenjiang, ZHANG Yaohong, et al. Inversion of leaf area index different growth stages in winter wheat[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(9): 2546-2552. (in Chinese)
- 19 苏伟, 郭皓, 赵冬玲, 等. 基于优化 PROSAIL 叶倾角分布函数的玉米 LAI 反演方法[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 234-241.
- SU Wei, GUO Hao, ZHAO Dongling, et al. Leaf area index retrieval for maize canopy using optimized leaf angle distribution function of PROSAIL model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 234-241. (in Chinese)
- 20 苏伟, 展郡鸽, 张明政, 等. 基于机载 LiDAR 数据的农作物叶面积指数估算方法研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 272-277.
- SU Wei, ZHAN Junge, ZHANG Mingzheng, et al. Crop leaf area index estimation based on airborne LiDAR data [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 272-277. (in Chinese)
- 21 ZHENG G, MOSKAL L M. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: theories, methods and sensors[J]. Sensors, 2009, 9(4): 2719-2745.
- 22 BARET F, GUYOT G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2): 161-173.
- 23 张瀛, 孟庆岩, 武佳丽, 等. 基于环境星 CCD 数据的环境植被指数及叶面积指数反演研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(10): 2789-2793.
- ZHANG Ying, MENG Qingyan, WU Jiali, et al. Study of environmental vegetation index based on environment satellite CCD data and LAI inversion [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(10): 2789-2793. (in Chinese)
- 24 ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts [J]. NASA Special Publication, 1974, 351: 309.
- 25 LIU H Q, HUETE A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995(2): 457-465.
- 26 JORDAN C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor [J]. Ecology, 1969, 50(4): 663-666.
- 27 PEARSON R L, MILLER L D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, pawnee national grasslands, colorado [C] // Proceedings of the 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 1972: 1357-1381.
- 28 BROGE N H, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 156-172.
- 29 FENSHOLT Rasmus, SANDHOLT Inge, RASMUSSEN M S, et al. Evaluation of MODIS LAI, fAPAR and the relation between fAPAR and NDVI in a semi-arid environment using insitu measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 91(3-4): 490-507.