

基于 Sentinel-2 遥感影像的玉米冠层叶面积指数反演

苏伟¹ 侯宁¹ 李琪² 张明政¹ 赵晓凤¹ 蒋坤萍¹
(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国土地勘测规划院, 北京 100035)

摘要: 叶面积指数是描述玉米冠层结构的重要参数之一, 决定玉米冠层的光合作用、呼吸作用、蒸腾和碳循环等生物物理过程, 因此精确反演叶面积指数对玉米长势监测具有重要意义。以河北省保定市的涿州市、高碑店市、定兴县为研究区, 利用 Sentinel-2 遥感影像和 LAI-2000 地面同步实测数据进行玉米冠层叶面积指数反演, 使用归一化差异光谱指数和比值型光谱指数两类指数, 构建了单变量和多变量玉米冠层叶面积指数反演模型, 通过决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 筛选出最佳模型。研究结果表明, 由 $NDSI_{(783,705)}$ 构建的单变量模型为最优反演模型, 其决定系数为 0.534 2, 均方根误差为 0.288 5。因此, 基于 Sentinel-2 遥感影像利用植被指数反演玉米冠层叶面积指数的方法可作为判断玉米长势状况的初步判断依据。

关键词: Sentinel-2 遥感影像; 玉米冠层; 叶面积指数; 红边波段; 光谱指数

中图分类号: TP79; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0151-06

Retrieving Leaf Area Index of Corn Canopy Based on Sentinel-2 Remote Sensing Image

SU Wei¹ HOU Ning¹ LI Qi² ZHANG Mingzheng¹ ZHAO Xiaofeng¹ JIANG Kunping¹
(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035, China)

Abstract: Leaf area index is one of the important parameters to describe the canopy structure of corn, which determines the biophysical processes of corn canopy photosynthesis, respiration, transpiration and carbon cycle. Therefore, retrieval of leaf area index is of great significance to corn growth monitoring. The Sentinel-2 remote sensing image and LAI-2000 ground synchronous data were used to retrieve the leaf area index of corn canopy. Normalized difference spectral index (NDSI) and ratio spectral index (RSI) were extracted to build the univariate and multivariate empirical models. The best LAI retrieving models were identified based on the best combinations of coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE). Finally, spatial distributions of LAI in the study area were mapped through the optimal retrieve model. Results showed that all spectral indices tested were significantly correlated with LAI of corn, and the correlation between spectral indices built with red-edge bands and LAI was higher than that built without red-edge bands. Validation analysis result indicated that although the accuracy of the multivariate empirical model was high, its ability to predict LAI was poor. Linear regression model of $NDSI_{(783,705)}$ most accurately explained retrieval of LAI of corn, with R^2 of 0.534 2 and RMSE of 0.288 5. Therefore, linear regression model of $NDSI_{(783,705)}$ was recommended as the most legible model for estimating LAI of corn. The red-edge bands confirmed from Sentinel-2 remote sensing image improved the accuracy of retrieving the LAI of corn. Moreover, the results also provided a powerful evidence to develop the Sentinel-2 remote sensing image and red-edge bands application in retrieving the LAI of corn.

Key words: Sentinel-2 remote sensing image; corn canopy; leaf area index; red-edge bands; spectral indices

0 引言

叶面积指数(Leaf area index, LAI)定义为单位地表面积上单面绿叶面积的总和,是模拟陆地生态过程、生物地球化学循环以及水热循环的重要参数^[1],在农业、林业、生态、气候变化等领域已经得到了广泛的应用。研究表明,LAI 同作物长势、物候期、产量、净初级生产力等具有较强的相关关系^[2]。因此快速、准确、可靠地获取农作物 LAI 具有重要意义。

红边波段是介于红波段和近红外波段之间的波段,波段范围为 680 ~ 760 nm。许多研究表明,红边是指示绿色植物生长状况的敏感性光谱波段^[3],红边范围内的光谱数据与表征作物生长状况的农学参数之间有很好的相关关系^[4-8]。HANSEN 等^[4]研究表明小麦高光谱反射率与叶绿素密度、叶面积指数等变量的相关性好的敏感波段,87% 集中在 680 ~ 750 nm 红边光谱范围内;刘伟东等^[9]研究水稻光谱与叶绿素密度、叶面积指数相关显著的波段集中在红边 740 ~ 770 nm 范围内;唐延林等^[8]对玉米、水稻、棉花的研究表明,这 3 种作物的冠层红边参数分别与其对应的叶面积指数呈极显著的线性相关关系(R 均在 0.6 以上),叶绿素含量与红边位置也呈极显著的线性相关。

随着遥感技术的发展,越来越多的卫星载荷已经开始通过增加多光谱谱段来提高卫星的应用能力,如欧洲航空局的 Sentinel-2 卫星^[10],德国 RapidEye AG 公司 RapidEye 卫星^[11],美国 Digital globe 公司的 Worldview-2 卫星^[12],都包含红边波段传感器,为红边波段作物遥感监测提供了数据支持。其中,欧洲航空局的 Sentinel-2 卫星能够提供高空分辨率(10、20、60 m)的多光谱数据,其红边波段对监测植被信息非常有效,对于叶面积指数(LAI)的反演具有重要意义^[13]。但目前将 Sentinel-2 遥感影像应用在农业方面的研究较少,还未充分挖掘其应用价值,为此,本文以 Sentinel-2 遥感影像为信息源,结合地面同步实测玉米 LAI,通过建立回归模型研究玉米冠层叶面积指数的反演方法。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

研究区位于河北省保定市北部的涿州市、高碑店市和定兴县(图 1),地处 115°29' ~ 116°14'E, 39°05' ~ 39°36'N,主要地貌为平原,地势西北高、东南低,由西北向东南倾斜。该地区四季分明,属暖温

带半湿润半干旱大陆性季风气候,年平均气温为 12.0 ~ 14.0 ℃,年日照率达 60% 左右,年降水量约为 550 mm。区内农作物播种面积占耕地总面积的 80% 以上,主要农作物有玉米、小麦、高粱、谷子、薯类等。大部分地区农作物一年两熟,但各地耕作制差异很大,地块较为零碎。

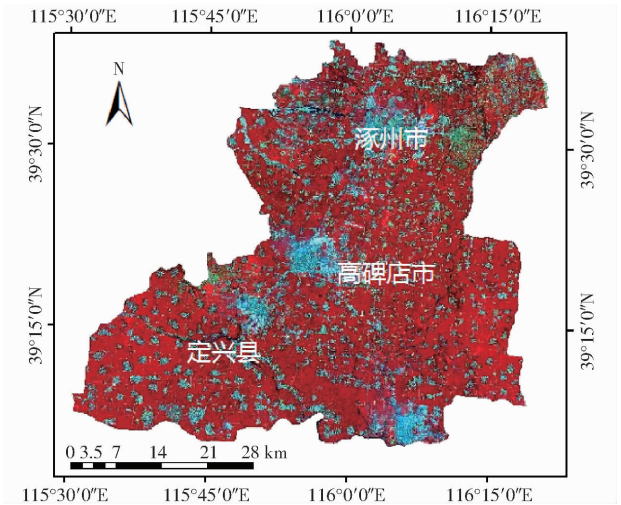


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

1.2 数据源

1.2.1 地面数据调查与收集

2016 年 8 月 21 日,在河北省涿州市、高碑店市和定兴县开展玉米叶面积指数野外调查,在研究区内分别选取 50 个采样点,采样点均匀分布整个研究区,测量仪器为 LAI2000 型植物冠层分析仪,由美国 LI-COR 公司生产,测量过程中用 GPS 记录样点中心坐标。根据自然条件和玉米种植情况选择试验点进行地面数据采集,试验点的分布充分估计了空间分布的均匀性。选取 100 m × 100 m 的样方,在样方内间隔均匀的不同位置分别测量 5 次,取平均值代表小样方的 LAI,以 3 个小样方为单位组成一个样方,取 3 个小样方的均值作为该试验点的 LAI 真实值。

1.2.2 遥感影像数据收集与处理

本研究采用的是 Sentinel-2 遥感影像数据,其获取的多光谱数据包含 13 个波段,不同波段的空分辨率略有不同(Sentinel-2 波段信息见表 1),其中 B5、B6 的主要用途为获取红边位置,B7 用于反演叶面积指数,B8a 是对 LAI、叶绿素和生物量敏感的波段。影像获取时间为 2016 年 8 月 21 日, Sentinel-2 遥感影像数据通过欧洲航空局的数据共享网站进行下载(下载网址: <https://scihub.copernicus.eu/s2/#/home>),所有数据均为已经进行过几何校正处理过的 L1C 大气顶反射率。因此,只需对影像数据进行大气校正。本文使用最

近邻插值法,将处理后的各波段重采样至 10 m 后,用于 LAI 反演的研究。

表 1 Sentinel-2 波段信息

Tab.1 Bands information of Sentinel-2 remote sensing image		
波段	中心波长/nm	分辨率/m
Band 4-Red	665	10
Band 5-Red-edge 1	705	20
Band 6-Red-edge 2	740	20
Band 7-Red-edge 3	783	20
Band 8-NIR	842	10
Band 8a-NIR narrow	865	20

2 模型与方法

2.1 分析方法

目前,叶面积指数的遥感反演一般有经验模型法和物理模型法。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^[14-17],反演过程需要输入叶片的生化参数和结构参数,调参过程比较复杂。经验模型法主要通过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^[18-19]。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。因此,本文采用经验模型法进行玉米 LAI 反演研究,其具体反演流程为:①以处理后的 Sentinel-2 遥感影像为数据源,提取试验点的植被指数。②基于经验模型法建立单变量和多变量反演模型,对比分析不同波段组合的植被指数与 LAI 的模型拟合精度,利用验证数据分析检验最优模型的玉米 LAI 预测能力。

2.2 模型的评价标准

选用决定系数、均方根误差对模型进行分析检验,其中均方根误差(RMSE)主要用于模型验证,反映了模拟值与真实值的偏离程度,其值越小,模型精度越高;决定系数(R^2)表示模拟值与实测值的拟合优度,其值越接近 1,表示模型的参考价值越高。

2.3 植被指数的选择

考虑到 Sentinel-2 遥感影像的红边波段、红波段和近红外波段的反射率组合与叶面积指数具有较好的相关性,以波段或波段组合信息含量大和各波段之间的相关性小为波段选取原则,本文选取了 B4、B5、B6、B7、B8 和 B8a 构建光谱指数(表 2)。

表 2 选用的反演玉米叶面积指数(LAI)的植被指数公式
Tab.2 Spectral indices expression of leaf area index (LAI) retrieving for corn

光谱指数	公式	文献序号
比值植被指数	$RVI = \frac{R_{800}}{R_{680}}$	[20]
归一化差异植被指数	$NDVI = \frac{R_{800} - R_{680}}{R_{800} + R_{680}}$	[20]
归一化差异光谱指数	$NDSI_{(i,j)} = \frac{R_i - R_j}{R_i + R_j}$	[21]
比值型光谱指数	$RSI_{(i,j)} = \frac{R_i}{R_j}$	[21]

注: R 是光谱反射率,本文分别用 R_{665} 和 R_{842} 代替 R_{680} 和 R_{800} ; i 和 j 是一定范围内任意 2 个波段。

3 结果与分析

3.1 植被指数与 LAI 的相关分析

在进行回归分析前,首先分析光谱指数与 LAI 的相关关系,结果如表 3 所示。根据分析结果,22 种光谱指数与 LAI 均显著相关,相关系数均在 0.49 以上,整体来看有红边波段参与构建的光谱指数与 LAI 的相关性要高于无红边波段参与构建的光谱指数,其中 $NDSI_{(783,705)}$ 与 LAI 的相关性最强,相关系数为 0.730 9。

表 3 光谱指数与玉米 LAI 的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of spectral index and corn leaf area index			
光谱指数	相关系数	光谱指数	相关系数
$NDSI_{(740,665)}$	0.517 2	$RSI_{(740,665)}$	0.499 7
$NDSI_{(783,665)}$	0.627 7	$RSI_{(783,665)}$	0.601 1
$NDVI$	0.602 2	RVI	0.577 9
$NDSI_{(865,665)}$	0.615 0	$RSI_{(865,665)}$	0.591 9
$NDSI_{(783,705)}$	0.730 9	$RSI_{(783,705)}$	0.730 6
$NDSI_{(842,705)}$	0.715 4	$RSI_{(842,705)}$	0.715 4
$NDSI_{(865,705)}$	0.720 1	$RSI_{(865,705)}$	0.720 9
$NDSI_{(740,705)}$	0.718 6	$RSI_{(740,705)}$	0.716 0
$NDSI_{(783,740)}$	0.691 7	$RSI_{(783,740)}$	0.692 9
$NDSI_{(842,740)}$	0.571 9	$RSI_{(842,740)}$	0.575 6
$NDSI_{(865,740)}$	0.618 5	$RSI_{(865,740)}$	0.621 1

3.2 玉米 LAI 遥感反演模型的建立

在 30 个玉米 LAI 实测值中进行随机抽样,剔除异常点后选出 12 个作为建模样本,12 个作为检验样本。从构建的 22 种光谱指数中选取经典的植被指数 $NDVI$ 和 RVI ,以及覆盖所有红边波段并与玉米 LAI 取得较好相关关系的光谱指数 $NDSI_{(783,705)}$ 、 $NDSI_{(865,705)}$ 、 $NDSI_{(740,705)}$ 、 $NDSI_{(783,740)}$ 、 $RSI_{(783,705)}$ 、 $RSI_{(865,705)}$ 、 $RSI_{(740,705)}$ 、 $RSI_{(783,740)}$ 构建玉米 LAI 遥感反演模型。针对每种光谱指数分别使用线性、对数、指数和幂等模型进行拟合,从中选取与玉米 LAI 高

度相关且拟合精度相对较高的回归模型,结果如表 4。整体上基于 Sentinel-2 遥感影像构建的单变量模型都显著正相关;模型的决定系数 R^2 在 0.33 以上,表明单变量光谱指数与玉米 LAI 拟合效果较好,其中 $NDSI_{(783,705)}$ 具有最大值, R^2 为 0.534 2; RMSE 均在 0.35 以下,说明回归模型对 LAI 具有较好解释能力,其中 $NDSI_{(783,705)}$ 具有最小值, RMSE 为 0.288 5。在线性、对数、幂、指数 4 种模型中,线性模型对玉米 LAI 的解释能力最强。在由 10 种光谱指数构建的单变量回归模型中,由 $NDSI_{(783,705)}$ 构建的模型精度最高, R^2 为 0.534 2, RMSE 为

0.288 5。多变量回归模型中,选取 10 种光谱指数参与模型构建,得到的多元回归模型 R^2 为 0.983 6, RMSE 为 0.054 2。从整体水平来看,选用红边波段和未选用红边波段的光谱指数构建的反演模型精度进行对比,选用红边波段的光谱指数构建的反演模型精度比未选用红边波段的光谱指数的反演模型精度更高;进一步对选用不同红边波段的光谱指数的反演模型进行横向比较,综合分析选用红边 B5 构建的光谱指数的模型反演精度高于其他红边波段,对玉米叶面积指数具有更强的解释能力。

表 4 玉米叶面积指数 (LAI) 与各类光谱指数构建的反演模型及模型精度检验结果 ($n=12$)

Tab.4 The best inversion models and accuracy verification of leaf area index (LAI) of corn and spectral indices ($n=12$)

光谱指数	模型	表达式	R^2	RMSE
NDVI	线性	$y = 13.967\ 0x - 7.090\ 3$	0.362 7	0.337 5
$NDSI_{(783,705)}$	线性	$y = 12.339\ 4x - 4.810\ 1$	0.534 2	0.288 5
$NDSI_{(865,705)}$	线性	$y = 12.944\ 3x - 5.496\ 0$	0.518 6	0.299 3
$NDSI_{(740,705)}$	线性	$y = 12.044\ 7x - 3.233\ 8$	0.516 5	0.293 9
$NDSI_{(783,740)}$	线性	$y = 23.126\ 6x - 0.614\ 5$	0.478 4	0.305 3
RVI	线性	$y = 0.265\ 5x + 1.662\ 0$	0.334 0	0.345 0
$RSI_{(783,705)}$	线性	$y = 0.494\ 6x + 0.991\ 0$	0.533 8	0.288 6
$RSI_{(865,705)}$	线性	$y = 0.447\ 2x + 1.046\ 4$	0.519 7	0.293 0
$RSI_{(740,705)}$	线性	$y = 0.945\ 9x + 0.176\ 7$	0.512 7	0.295 1
$RSI_{(783,740)}$	线性	$y = 7.421\ 4x - 7.129\ 1$	0.480 1	0.304 8
$NDVI$ 、 $NDSI_{(783,705)}$ 、 $NDSI_{(865,705)}$ 、 $NDSI_{(740,705)}$ 、 $NDSI_{(783,740)}$ 、 RVI 、 $RSI_{(783,705)}$ 、 $RSI_{(865,705)}$ 、 $RSI_{(740,705)}$ 、 $RSI_{(783,740)}$	多元	$y = 55.320\ 9x_1 + 1\ 805.0107x_2 - 1\ 768.505\ 6x_3 -$ $39.178\ 7x_4 + 869.066\ 6x_5 - 1.373\ 9x_6 - 11.778\ 3x_7 +$ $55.955\ 2x_8 - 79.475\ 6x_9 - 487.711\ 3x_{10} + 585.934\ 4$	0.983 6	0.054 2

3.3 模型反演精度

经验回归模型预测精度的高低与参与建模的样本数量密切相关,使用未参与建模的 12 个样本数据对单变量回归模型以及由 $NDVI$ 、 $NDSI_{(783,705)}$ 、 $NDSI_{(865,705)}$ 、 $NDSI_{(740,705)}$ 、 $NDSI_{(783,740)}$ 、 RVI 、 $RSI_{(783,705)}$ 、 $RSI_{(865,705)}$ 、 $RSI_{(740,705)}$ 、 $RSI_{(783,740)}$ 10 种光谱指数构建的多元回归模型进行精度验证,综合评价两种模型对玉米 LAI 的预测能力(表 5)。实验结果显示,虽然多变量模型的建模精度较高,但其对玉米 LAI 的预测能力较差,出现这种情况的原因是这 10 种光谱指数与玉米 LAI 的相关性都很高,并不是相互独立,且受野外实测样本数量较少的限制,在两种以光谱指数为自变量,玉米 LAI 为因变量的多元回归模型中,出现自变量数据对因变量数据过度拟合现象^[22],导致在 $NDVI$ 、 $NDSI_{(783,705)}$ 、 $NDSI_{(865,705)}$ 、 $NDSI_{(740,705)}$ 、 $NDSI_{(783,740)}$ 、 RVI 、 $RSI_{(783,705)}$ 、 $RSI_{(865,705)}$ 、 $RSI_{(740,705)}$ 、 $RSI_{(783,740)}$ 构建的多元回归模型时发生过度拟合,导致模型的精度较高,但是预测

效果不理想,这与高林等^[23]的研究结果一致。

表 5 不同反演模型下的玉米叶面积指数 (LAI) 预测值与实测值的精度比较

Tab.5 Comparison between predicted and measured values of corn leaf area index (LAI) by different retrieving models

光谱指数	RMSE
NDVI	0.477 0
$NDSI_{(783,705)}$	0.387 0
$NDSI_{(865,705)}$	0.421 6
$NDSI_{(740,705)}$	0.431 6
$NDSI_{(783,740)}$	0.495 3
RVI	0.451 6
$RSI_{(783,705)}$	0.396 0
$RSI_{(865,705)}$	0.394 2
$RSI_{(740,705)}$	0.387 2
$RSI_{(783,740)}$	0.498 9
$NDVI$ 、 $NDSI_{(783,705)}$ 、 $NDSI_{(865,705)}$ 、 $NDSI_{(740,705)}$ 、 $NDSI_{(783,740)}$ 、 RVI 、 $RSI_{(783,705)}$ 、 $RSI_{(865,705)}$ 、 $RSI_{(740,705)}$ 、 $RSI_{(783,740)}$	0.798 3

经过验证分析,综合评价 $NDSI_{(783,705)}$ 是反演玉米 LAI 的最佳光谱指数,其构建的线性回归模型 $y = 12.3394NDSI_{(783,705)} - 4.8101$ 对玉米 LAI 的预测效果最理想,玉米 LAI 预测值和测量值拟合程度最高,为最优反演模型。

3.4 玉米 LAI 遥感反演及空间分析

在生态学中,LAI 是衡量地表植被生产力的重要指标。利用由 $NDSI_{(783,705)}$ 光谱指数构建的线性回归模型 $y = 12.3394NDSI_{(783,705)} - 4.8101$ 对研究区的玉米叶面积指数进行反演(图 2)。如图 2,研究区 LAI 空间分布规律整体上呈西北低、东南高的趋势,全区 LAI 主要分布在 3.0 ~ 5.0 之间。玉米 LAI 的高值区域主要分布在东南部和西南部,是玉米种植的集中区域;低值区主要分布在西北部,该区主要是道路和建筑的分布区,种植区域破碎化,长势较差。

4 结论

(1)构建的归一化差异光谱指数和比值型光谱指数都与叶面积指数达到了显著相关,红边波段参与构建的光谱指数与玉米叶面积指数取得更好的相关性,其中光谱指数 $NDSI_{(783,705)}$ 与玉米 LAI 达到最佳相关系数。

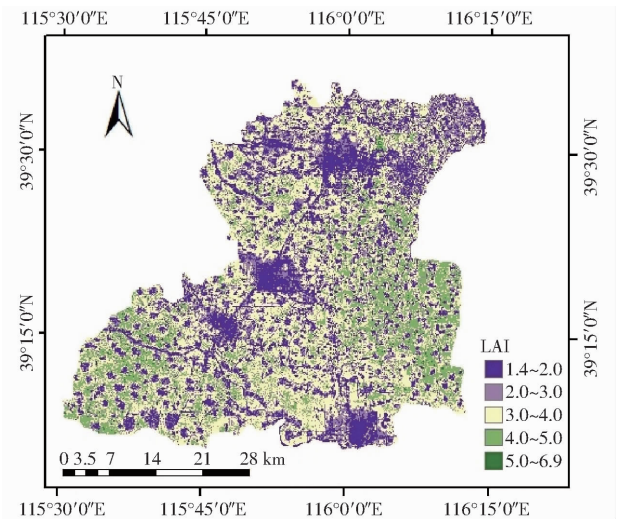


图 2 基于 $NDSI_{(783,705)}$ 线性模型遥感反演的研究区内玉米叶面积指数 (LAI)
Fig. 2 Retrieved corn leaf area index (LAI) in study area based on $NDSI_{(783,705)}$ linear model

(2)通过回归分析发现,由 10 种光谱指数参与构建的多元回归反演模型精度虽然高于单变量回归模型,其 R^2 为 0.9836,但是模型存在过度拟合的缺点,其预测能力不及由 $NDSI_{(783,705)}$ 构建的单变量反演模型,因此综合评价由 $NDSI_{(783,705)}$ 构建的反演模型为最佳玉米 LAI 反演模型。

参 考 文 献

1 梁顺林,李小文,王锦地,等. 定量遥感: 理念与算法[M]. 北京: 科学出版社,2013: 317.
2 王东伟,王锦地,梁顺林. 作物生长模型同化 MODIS 反射率方法提取作物叶面积指数[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(1):73-83.
WANG Dongwei, WANG Jindi, LIANG Shunlin. Retrieving crop leaf area index by assimilation of MODIS data into crop growth model [J]. Science China: Earth Science,2010,40(1): 73-83. (in Chinese)
3 FILELLA I, PENUELAS J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status [J]. International Journal of Remote Sensing,1994,15(7):1459-1470.
4 HANSEN P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen statue in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. Remote Sensing of Environment,2003,86(4):542-553.
5 黄敬峰,王渊,王福民,等. 油菜红边特征及其叶面积指数的高光谱估算模型[J]. 农业工程学报,2006,22(8):22-26.
HUANG Jingfeng, WANG Yuan, WANG Fumin, et al. Red edge characteristics and leaf area index estimation model using hyperspectral data for rape [J]. Transactions of the CSAE,2006,22(8):22-26. (in Chinese)
6 宋开山,张柏,李方,等. 高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析[J]. 农业工程学报,2005,21(1):36-40.
SONG Kaishan, ZHANG Bai, LI Fang, et al. Correlative analyses of hyperspectral reflectance, soybean LAI and aboveground biomass[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(1):36-40. (in Chinese)
7 王登伟,李少昆,田庆玖,等. 棉花主要栽培生理参数的高光谱估测研究[J]. 中国农业科学,2003,36(7):770-774.
WANG Dengwei, LI Shaokun, TIAN Qingjiu, et al. Estimating of main cultivation physiology parameters of cotton by using hyperspectral remote sensing [J]. Scientia Agricultura Sinica,2003,36(7):770-774. (in Chinese)
8 唐延林,黄敬峰,王秀珍,等. 水稻、玉米、棉花的高光谱及其红边特征比较[J]. 中国农业科学,2004,37(1):29-35.
TANG Yanlin, HUANG Jingfeng, WANG Xiuzhen, et al. Comparison of the characteristics of hyperspectra and the red edge in rice, corn and cotton[J]. Scientia Agricultura Sinica,2004,37(1):29-35. (in Chinese)
9 刘伟东,项月琴,郑兰芬,等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. 遥感学报,2000,4(4):279-283.
LIU Weidong, XIANG Yueqin, ZHENG Lanfen, et al. Relationships between rice LAI, CH. D and hyperspectra data [J]. Journal of Remote Sensing,2000,4(4):279-283. (in Chinese)
10 RICHTER K, ATZBERGER C, VUOLO F, et al. Evaluation of Sentinel-2 spectral sampling for radiative transfer model based LAI estimation of wheat sugar beet, and corn[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2011, 4(2):458-464.

- 11 TIGGES J, LAKES T, HOSTEN P. Urban vegetation classification: benefits of multitemporal RapidEye satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 136(5): 66–75.
- 12 UPADHYAY P, GHOSH S K, KUMAR A, et al. Effect on specific crop mapping using WorldView-2 multispectral add-on bands: soft classification approach [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2012, 6(3): 325–336.
- 13 JESÚS D, JOCHEM V, LUIS A, et al. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content [J]. *Sensors*, 2011, 11(7): 7063–7081.
- 14 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.
CAI Bofeng, SHAO Xia. Leaf area index retrieval based on remotely sensed data and PROSPECT + SAIL model [J]. *Remote Sensing for Land and Resource*, 2007(2): 39–43. (in Chinese)
- 15 JACQUEMOUD S. Inversion of the PROSPECT + SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2–3): 281–292.
- 16 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.
LIU Zhaoyan, MA Lingling, TANG Lingli. Inversion of LAI based on SAIL model with multi-angle and multi-spectral remote sensing data [J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(1): 93–98. (in Chinese)
- 17 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[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2785–2793.
CHEN Yanhua, ZHANG Wanchang, YONG Bin. Retrieving leaf area index using a neural network based on classification knowledge [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2785–2793. (in Chinese)
- 18 ZHU G L, JU W M, CHEN J M, et al. Forest canopy leaf area index in Maoershan Mountain: ground measurement and remote sensing retrieval [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2117–2124.
- 19 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.
ZHAO Chuanyan, SHEN Weihua, PENG Huanhua. Methods for determining canopy leaf area index of *Picea Crassifolia* Forest in QILIAN Mountain, CHINA [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(5): 860–869. (in Chinese)
- 20 PEÑUELAS J, ISLA R, FILELLA I, et al. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley [J]. *Crop Science*, 1997, 37(1): 198–202.
- 21 LI F, MISTELE B, HU Y, et al. Comparing hyperspectral index optimization algorithms to estimate aerial N uptake using multi-temporal winter wheat datasets from contrasting climatic and geographic zones in China and Germany [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 180: 44–57.
- 22 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013: 309–310.
- 23 高林, 杨贵军, 王宝山, 等. 基于无人机遥感影像的大豆叶面积指数反演研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(7): 868–876.
GAO Lin, YANG Guijun, WANG Baoshan, et al. Soybean leaf area index retrieval with UAV (unmanned aerial vehicle) remote sensing imagery [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(7): 868–876. (in Chinese)
- 24 李延峰, 毛德华, 王宗明, 等. 双台河口国家级自然保护区芦苇叶面积指数遥感反演与空间格局分析[J]. *湿地科学*, 2014, 12(2): 163–169.
LI Yanfeng, MAO Dehua, WANG Zongming, et al. Remote sensing retrieval and spatial pattern analysis of leaf area index of *phragmites australis* in Shuangtai estuary national nature reserve [J]. *Wetland Science*, 2014, 12(2): 163–169. (in Chinese)
- 25 高林, 李长春, 王宝山, 等. 基于多源遥感数据的大豆叶面积指数估测精度对比[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 191–200.
GAO Lin, LI Changchun, WANG Baoshan, et al. Comparison of precision in retrieving soybean leaf area index based on multi-source remote sensing data [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 191–200. (in Chinese)
- 26 IMMITZER M, VUOLO F, ATZBERGER C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central europe [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 166–192.
- 27 VERRELST J, RIVERA J P, VEROUSTRATE F, et al. Experimental Sentinel-2 LAI estimation using parametric, non-parametric and physical retrieval methods-A comparison [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 108(4): 260–272.
- 28 VAN DER MEER F D, VAN DER WERFF H M A, VAN RUITENBEEK F J A. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological application [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148(3): 124–133.
- 29 DU Y, ZHANG Y, LING F, et al. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10 m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 354–372.
- 30 PESARESI M, CORBANE C, JULEA A, et al. Assessment of the added-value of sentinel-2 for detecting built-up areas [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 299–316.
- 31 Fernandez-Manso A, Fernandez-Manso O, Quintano C. Sentinel-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 50(8): 170–175.
- 32 何亚娟, 潘学标, 裴志远, 等. 基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 226–231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130539&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.039.
HE Yajuan, PAN Xuebiao, PEI Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT remote sensing data [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 226–231. (in Chinese)