

## 基于 Sentinel-2A 影像的玉米冠层叶绿素含量估算

苏伟<sup>1,2</sup>, 赵晓凤<sup>3</sup>, 孙中平<sup>4\*</sup>, 张明政<sup>1,2</sup>, 邹再超<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 史园莉<sup>4</sup>

1. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083
2. 农业部农业灾害遥感重点实验室, 北京 100083
3. 国家气象中心, 北京 100081
4. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

**摘要** 农作物叶片中的叶绿素通过吸收光能参与光合作用产生化学能, 及时、准确地估算叶绿素含量对于农作物长势、养分含量监测、品质评价和产量估算具有重要意义。Sentinel-2 卫星的重访周期为 5 d, 空间分辨率为 10 m, 具有 13 个光谱波段, 其中包括三个波宽仅为 15 nm 对叶绿素含量变化敏感的红边波段, 是叶绿素含量估算的理想数据源。植被指数是基于农作物在不同波段的反射特性, 通过不同波段组合方式刻画长势和叶绿素含量的差异, 可用于大区域范围内的玉米冠层叶绿素含量快速、精确估算。以 Sentinel-2A 影像为数据源, 开展基于多种植被指数的玉米冠层叶绿素含量估算方法研究。课题组于 2016 年 8 月 6—11 日在河北省保定市(115°29'—116°14'E, 39°5'—39°35'N)进行玉米冠层叶绿素含量的实地测量, 并在每个采样位置上采用中绘 i80 智能 RTK(real-time kinematic)测量系统进行定位。Sentinel-2A 影像预处理工作包括几何校正、辐射定标和大气校正, 其中大气校正使用 Sen2Cor 模型和 SNAP 模型。首先, 基于预处理后的 Sentinel-2A 遥感影像, 分别计算  $CI_{green}$  (green chlorophyll index),  $CI_{red-edge}$  (red-edge chlorophyll index), DVI (difference vegetation index), LCI (leaf chlorophyll index), MTCI (MERIS terrestrial chlorophyll index), NAVI (normalized area vegetation index), NDRE (normalized difference red-edge), NDVI (normalized difference vegetation index), RVI (ratio vegetation index), SIPI (structure insensitive pigment index) 植被指数。然后, 建立样方位置上实测叶绿素含量与各植被指数的统计关系, 从而构建玉米冠层叶绿素含量估算模型, 并以野外实测玉米冠层叶绿素含量为依据, 对基于各植被指数的估算结果进行精度评价。最后, 利用筛选出的最优叶绿素含量估算模型, 估算研究区内的玉米冠层叶绿素含量。研究的目标为: (1) 通过比较分析, 构建合适的玉米冠层叶绿素含量估算模型, 估算精度以决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE 以及相对误差 RE 作为评价指标; (2) 确定最优波段组合方案: 在红边波段中选择与可见光、近红外波段组合效果更优的波段组合方案; (3) 确定参与植被指数计算的红边波段的最优数量。精度评价结果表明: (1) 选用的植被指数与玉米冠层叶绿素含量呈多项式拟合关系, 其中使用红边波段计算的植被指数的估算结果明显优于未使用红边波段的估算结果; 红边波段引入后明显提高了可见光、近红外波段对叶绿素含量的拟合的精度,  $CI_{green(560, 705)}$  指数比  $CI_{green(560, 842)}$  的回归模型  $R^2$  提高 0.516, 红边波段参与计算的 DVI 相对于 RVI 来说, 估算结果更稳定。(2) 对于不同的植被指数, 参与运算的 Sentinel-2A 影像的两个红边波段, 估算精度的提高程度不同。对于可见光波段参与计算的植被指数来说, 在红边波段 1 (中心波长为 705 nm) 的估算精度较高, 如 LCI,  $CI_{green}$ , DVI 和 RVI 等; 对于近红外波段参与计算的植被指数来说, 在红边波段 2 (中心波长为 740 nm) 的估算精度较高, 如  $CI_{red-edge}$ , NDRE 和 NAVI 等。(3) 对于 Sentinel-2A 影像来说, 两个红边波段共同参与叶绿素含量估算时能取得最高的估算精度。选用的植被指数中,  $MTCI_{(665, 705, 740)}$  指数与玉米冠层叶绿素含量估算精度最高, 回归模型拟合精度  $R^2$  为 0.803, 模型验证  $R^2$  为 0.665, RMSE 为 3.185, 相对误差 RE 为 4.819%。 $MTCI_{(665, 705, 740)}$  指数计算中使用了两个红边波段, 突出红边波段反射率差值变化, 与玉米冠层叶绿素含量表现出很好的相关性。最后, 利用优选出的基于 MTCI 指数的叶绿素含量估算模型, 对研究区范围内的叶绿素含量进行估算并完成空间制图。

收稿日期: 2018-03-28, 修订日期: 2018-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671433, 41371327), 国家重点研发计划项目(2017YFB0503900-4-2)资助

作者简介: 苏伟, 1979 年生, 中国农业大学土地科学与技术学院副教授 e-mail: suwei@cau.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: sunnybnu114@163.com

**关键词** Sentinel-2A; 玉米; 冠层叶绿素含量; 红边波段; 植被指数

**中图分类号**: TP79

**文献标识码**: A

**DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1535-08

## 引言

叶绿素是农作物叶片光合作用的载体, 叶绿素含量表征作物的光合速率、氮素含量和健康状态等, 也是表征作物植株养分状态以及衰老程度的指示器, 对农作物长势监测、养分含量监测、品质评价和产量估算具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。实验室测定叶绿素含量的方法过程复杂、成本高, 且不能进行实时的、大面积的监测; 迅速发展的遥感技术在快速获取大面积范围内农作物信息方面具有优势。基于遥感影像的农作物冠层叶绿素含量的估算方法可以分为两类: 基于经验/半经验模型的统计分析方法和基于辐射传输机理模型的反演方法。其中, 经验/半经验模型的统计分析方法是通过地面测量参数和遥感影像反射率之间的相关分析, 构建地面测量参数与不同波段反射率或不同植被指数的相关模型, 从而快速估算区域范围内的农作物冠层叶绿素含量。相对于基于辐射传输机理模型的反演方法, 基于植被指数的相关分析方法具有简单、快捷、容易实现的优势<sup>[3-4]</sup>。因此, 本工作采用植被指数的方法估算玉米冠层叶绿素含量。

植被指数的构建是基于农作物冠层在不同波段的反射率特征, 将对农作物冠层敏感的波段进行组合, 以在一定程度上消除环境背景(如非植被目标土壤、水体等)的影响。红边是绿色植物在 670~760 nm 之间反射率增速最快的区域, 对农作物叶绿素含量变化非常敏感。所以, 许多研究者使用红边波段提取红边参数、构建光谱指数、提取特征光谱等估算作物叶片和冠层尺度的叶绿素含量。Sentinel-2 是欧空局和欧洲委员会的地球环境与安全监视系统(GMES)中的多光谱卫星, 所获取的高时空分辨率(重访周期为 5 d, 空间分辨率为 10 m)多光谱影像, 覆盖 13 个光谱波段, 其中包括两个波段宽度为 15 nm 的红边波段, 是农作物冠层叶绿素含量估算的理想数据源。在利用 Sentinel-2 影像提取植被冠层叶绿素含量方面已有许多相关研究。Jesus 等<sup>[5]</sup>将高光谱影像重采样从而模拟 Sentinel-2 影像的各波段反射率, 然后基于模拟的多波段影像构建多种植被指数用于估算叶绿素含量。其研究表明红边波段未参与计算的 NAOC(normalized area over reflectance curve)植被指数的叶绿素含量估算精度较低。Schlemmer 等<sup>[6]</sup>用实测光谱数据的绿色波段和红边波段构建植被指数, 从而估算植被冠层叶绿素含量, 他们使用的光谱波段与 Sentinel-2 影像的光谱波段一致, 其研究表明利用有红边波段参与的植被指数得到的叶绿素含量反演精度较高。在植被覆盖度高的区域, 使用红/绿波段和近红外波段构建的植被指数存在易饱和的问题, 因而基于红/绿波段和近红外波段估算的冠层叶绿素含量精度较低。Peng 等<sup>[1]</sup>将实地测量的光谱数据重采样至与 Sentinel-2 多光谱 MSI(multi-spectral instrument)波段一致的范围, 并使用红边和近红外波段估算玉米和大豆两种作物的叶绿素含量, 其结果表明有红边波段参与的植被指数几乎没有指数饱和问题, 能

够准确的估算两种作物的冠层叶绿素含量。郑阳等<sup>[7]</sup>基于 Sentinel-2 影像构建红边叶绿素指数( $CI_{re}$ ), 并利用该指数估算生物量, 其结果表明红边叶绿素指数( $CI_{re}$ )与生物量的估算精度最高(决定性系数  $R^2$  为 0.83; 均方根误差 RMSE 为  $180.29 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

上述研究中多数使用基于高光谱影像或者高光谱数据模拟的近似 Sentinel-2 影像, 构建植被指数从而估算植被冠层叶绿素含量, 对于 Sentinel-2 影像来说上述指数或者叶绿素含量估算方法是否适用还需进一步验证。鉴于此, 以 Sentinel-2A MSI 影像为数据源, 以河北省保定市的涿州市、高碑店市和定兴县这三个县级市为研究区, 在计算多种植被指数的基础上构建各植被指数与地面实测的玉米冠层叶绿素含量的统计模型, 特别是构建多个由红边波段参与的植被指数, 从而探索红边波段在玉米冠层叶绿素含量估算中的适宜性与潜力。研究目标是: (1)构建合适的玉米冠层叶绿素含量估算模型: 估算结果的精度以决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE 以及相对误差 RE 作为评价指标, 筛选出最优的叶绿素含量估算模型; (2)确定最优波段组合方案: 在红边波段中选择与可见光、近红外波段组合效果更优的波段组合方案; (3)确定参与植被指数计算的红边波段的最优数量。

## 1 实验部分

### 1.1 研究区概况

研究区位于河北省保定市东北部的涿州市、高碑店市和定兴县, 地理范围为  $115^{\circ}29' - 116^{\circ}14'E$ ,  $39^{\circ}5' - 39^{\circ}35'N$ , 地理位置如图 1 所示。研究区地处华北平原, 属于温带大陆性季风气候, 雨热同期, 是保定市农作物的主要种植区。研究区内的土地利用类型主要为农田、城建区及水体, 主要耕作

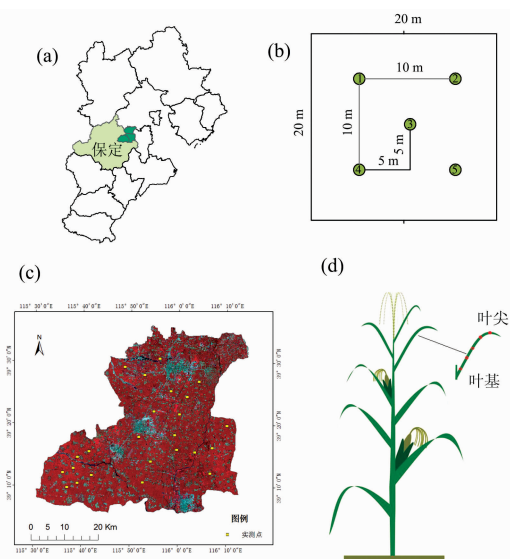


图 1 研究区位置及野外调查样点空间分布图  
Fig. 1 Location of the study area and samplings in field work

制度是冬小麦-夏玉米轮作模式。

### 1.2 数据源

#### 1.2.1 Sentinel-2A 影像

Sentinel-2 是由欧洲委员会和欧空总署局联合倡议研发的全球环境与安全监测计划的第二颗卫星<sup>[20]</sup>，Sentinel-2A、B 星分别于 2015 年 6 月 23 日、2017 年 3 月 7 日发射成功，双星在轨运行的重返周期为 5 d。Sentinel-2 遥感影像有 13 个光谱波段，包括可见光、红边、近红外、水汽、卷云以及短波红外波段，其空间分辨率和波谱范围如表 1 所示。该影像可通过 ESA scihub 网站免费下载 L1C 大气表现反射率产品 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)，经过影像辐射定标和大气校正、影像重采样、波段合成、影像镶嵌和掩膜等预处理后，采用支持向量机分类方法提取研究区内的玉米种植区。综合考虑影像质量和研究区内的玉米生育期时间，选取 2016 年 8 月 21 日的无云 Sentinel-2A 卫星影像，影像轨道号为 75，识别号为 50SLJ 和 50SMJ。

表 1 Sentinel-2A 影像波段光谱参数  
Table 1 The band indexes of Sentinel-2A image

波段	空间分辨率/m	中心波长/nm	波段宽度/nm
B2-Blue		490	65
B3-Green	10	560	35
B4-Red		665	30
B8-NIR		842	115
B5-Red edge		705	15
B6-Red edge		740	15
B7-Edge of the NIR plateau	20	783	20
B8a-Narrow NIR		865	20
B11-SWIR		1 610	90
B12-SWIR		2 190	180
B1-Coastal aerosol		443	20
B9-Water Vapour	60	945	20
B10-Cirrus		1 375	30

#### 1.2.2 野外测量数据

为验证叶绿素含量的估算精度，课题组于 2016 年 8 月 6—11 日在研究区内随机选取 24 个有代表性的实验样方测量各样方内的玉米冠层叶绿素含量，使用的仪器为 SPAD-502 便携式叶绿素测定仪<sup>[8]</sup>。研究表明，植被叶绿素含量随 SPAD 值的增大而增大，呈一定函数变化规律，且达到极显著相关的水平。测量样方的尺寸为 10 m×10 m，分别在样方的四个角和中心位置上进行测量，样方内部测量点的空间分布如图 1(b)所示，研究区内所有样点的空间分布如图 1(c)所示。对于所测的玉米植株来说，其冠层叶绿素含量的测量方法为：从植株上部叶片到下部叶片随机选取 6 片叶子，每个叶片从叶基到叶尖用 SPAD-502 均匀测量 3~5 次叶绿素值，测量方法如图 1(d)所示，取其平均值作为该叶片的叶绿素含量；然后，取这 6 个叶片上所有叶绿素测量值的平均值作为该株玉米的叶绿素含量；最后，取 5 个样点的所有叶绿素含量的平均值作为该样方的玉米冠层叶绿素含量值。

### 1.3 叶绿素含量估算方法

玉米植株中的叶绿素在红光波段有强烈吸收，在近红外波段强烈反射，通常在 680~760 nm 之间形成陡而直的斜边，称其为红边<sup>[9]</sup>，因而红边波段对作物植株叶绿素含量非常敏感。但是，自卫星遥感出现以来，由于受到卫星传感器硬件条件的限制，大部分卫星影像不包含红边波段，导致红边波段在农作物长势监测、胁迫监测、养分亏缺、估产中的优势没有得到充分发挥。特别值得注意的是，Sentinel-2 影像包含三个红边波段，在农作物植株叶绿素含量估算中具有很大的应用潜力，因此，本研究在借鉴现有植被指数构建方法的基础上，引入红边波段替代可见光波段或者近红外波段，构建新的植被指数，以达到敏锐监测玉米植株叶绿素含量细微变化的目的。全面对比分析了基于多种植被指数的叶绿素含量估算精度，各植被指数的计算公式如表 2 所示。其中，CI<sub>red-edge</sub>，LCI，MTCI，NDRE 是包含红边波段的植被指数，利用红边波段与近红外波段或者红波段的光谱反射特征表达不同叶绿素含量的差异。DVI 和 RVI 是基于红波段和近红外波段构建的植被指数，本研究进行了替换和演变，从而将红边波段引入到植被指数的构建中。NDRE 和 LCI 最初是基于高光谱影像波段构建的，但 Sentinel-2 影像的各波段光谱范围与指标建立时使用的高光谱影像波段的中心波长和波段宽度不完全一致，所以在该研究中估算叶绿素含量时进行了验证。CI<sub>green</sub>，CI<sub>red-edge</sub> 和 NAVI 均是采用两波段比值与归一常数的构建方法，LCI，MTCI，NDRE，NDVI 和 SIPI 等考虑多个波段的加、减、除的运算，计算形式相对复杂。

为了验证基于各指数模型得到叶绿素含量估算结果的精度，以野外实测的叶绿素含量值为真值，使用决定系数 R<sup>2</sup>、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 以及相对误差 (relative error, RE, %) 进行叶绿素含量估算结果的精度评价，三种评价指标的具体计算公式如式(1)~式(3)

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$= 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_g - y_s)^2}{n}} \quad (2)$$

$$RE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_g - y_s|}{y_s} \times 100\% \quad (3)$$

式中， $\hat{y}_i$  为各样方玉米冠层叶绿素含量的拟合值， $\bar{y}$  为实测叶绿素含量均值， $y_i$  为各样方叶绿素含量实测值， $y_g$  和  $y_s$  分别为玉米冠层叶绿素含量 (SPAD 值) 估算和野外实测值， $n$  为样方数量。根据表 2 中计算公式计算各植被指数，对植被指数与玉米冠层叶绿素含量进行相关性分析，从而构建玉米冠层叶绿素含量估算模型，并计算估算模型的 R<sup>2</sup>，RMSE 和 RE，如表 3 所示。

表 2 植被指数  
Table 2 Vegetation indexes selected in this study

植被指数	缩写	原始公式	变形公式
green chlorophyll index <sup>[10]</sup>	CI <sub>green</sub>	$\rho_{NIR} / \rho_{green} - 1$	$\rho_A / \rho_{green} - 1$
red-edge chlorophyll index <sup>[10]</sup>	CI <sub>red-edge</sub>	$\rho_{NIR} / \rho_{red-edge} - 1$	$\rho_{NIR} / \rho_A - 1$
difference vegetation index	DVI	$\rho_{NIR} - \rho_{red}$	$\rho_A - \rho_{green} \cdot \rho_A - \rho_{red} \cdot \rho_{NIR} - \rho_A$
leaf chlorophyll index <sup>[11]</sup>	LCI	$(\rho_{NIR} - \rho_{red-edge}) / (\rho_{NIR} - \rho_{red})$	$(\rho_{NIR} - \rho_A) / (\rho_{NIR} - \rho_{red})$
MERIS terrestrial chlorophyll index <sup>[12]</sup>	MTCI	$(\rho_{red-edge2} - \rho_{red-edge1}) / (\rho_{red-edge1} - \rho_{red})$	$(\rho_{red-edge2} - \rho_{red-edge1}) / (\rho_{red-edge1} - \rho_{red})$
normalized area vegetation Index <sup>[13]</sup>	NAVI	$1 - \rho_{red} / \rho_{NIR}$	$1 - \rho_A / \rho_{NIR}$
normalized difference red-edge <sup>[14]</sup>	NDRE	$(\rho_{NIR} - \rho_{red-edge}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red-edge})$	$(\rho_{NIR} - \rho_A) / (\rho_{NIR} + \rho_A)$
normalized difference vegetation index	NDVI	$(\rho_{NIR} - \rho_{red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$	$(\rho_{NIR} - \rho) / (\rho_{NIR} + \rho_{red})$
ratio vegetation index	RVI	$\rho_{NIR} / \rho_{red}$	$\rho_A / \rho_{green} \cdot \rho_A / \rho_{red} \cdot \rho_{NIR} / \rho_A$
structure insensitive pigment index <sup>[15]</sup>	SIPI	$(\rho_{NIR} - \rho_{blue}) / (\rho_{NIR} - \rho_{red})$	$(\rho_A - \rho_{blue}) / (\rho_A - \rho_{red})$

Note:  $\rho_{green}$ ,  $\rho_{red}$ ,  $\rho_{red-edge}$  and  $\rho_{NIR}$  are the reflectance in green, red red-edge and NIR bands;  $\rho_A$  is the reflectance of red-edge band of Sentinel-2A image.

## 2 结果与讨论

一般来说,农作物冠层反射率在绿波段有较低的反射峰,在红波段有一个吸收谷,而在近红外波段又达到一个较高的反射峰,红边波段是位于红波段和近红波段之间斜率变化最大的位置上。因此,可以通过引入红边波段并与绿波段、红波段和近红外波段进行不同波段的组合,以达到增强植被指数对叶绿素含量的敏感性,从而提高农作物冠层叶绿素含量估算精度的目的。所以,利用野外测量所得的玉米冠层叶绿素含量与各植被指数分别建立线性、对数、指数、二次多项式模型。表 3 为各植被指数与实测冠层叶绿素含量之间的回归模型以及与之对应的决定系数  $R^2$ 、均方根误差 RMSE、相对误差 RE。

CI<sub>green</sub>, DVI, NAVI, NDVI, RVI, SIPI 这六种植被指

数未使用红边波段信息,在利用这六种植被指数的叶绿素含量估算结果中,DVI<sub>(665, 842)</sub>指数与玉米冠层叶绿素含量的拟合精度最高, $R^2$ 为 0.339。CI<sub>red-edge</sub>, LCI, MTCI, NDRE 这四种植被指数考虑了红边波段信息,在利用这四种植被指数的叶绿素含量估算结果中,CI<sub>red-edge(705, 842)</sub>和 NDRE<sub>(705, 842)</sub>这两个指数的合精度最低, $R^2$ 均为 0.407,但都高于未有红边波段参与运算的 DVI<sub>(665, 842)</sub>指数,这说明红边波段信息的引入,提高了玉米冠层叶绿素含量的估算精度。此外,我们还将 Sentinel-2A 影像的 2 个红边波段引入原来不包含红边波段的植被指数的计算中,建立了 DVI<sub>(665, 705)</sub>, CI<sub>green(560, 705)</sub>, SIPI 指数。精度评价结果表明:除 SIPI 指数,其余植被指数的决定系数  $R^2$  均有所提高,其中拟合精度最高的是 DVI<sub>(665, 705)</sub>,  $R^2$  为 0.796, CI<sub>green(560, 705)</sub> 指数比 CI<sub>green(560, 842)</sub> 的决定系数  $R^2$  从 0.070 提高到 0.516。

表 3 玉米冠层叶绿素含量估算模型及精度评价结果

Table 3 Estimation models of corn canopy chlorophyll content and the accuracy assessment result

植被指数	计算波段	一元二次多项式模型	建模 $R^2$	验证 $R^2$	验证 RMSE	验证 RE/%
CI <sub>green</sub>	(560, 842)	$y = 0.074x^2 - 1.225x + 54.201$	0.070	0.004 2	3.223	5.575 8
	(560, 705)	$y = -13.143x^2 + 10.722x + 47.930$	0.586	0.234 6	3.002	5.116 3
	(560, 740)	$y = -0.256x^2 + 3.427x + 38.477$	0.037	0.079 9	3.156	5.290 9
CI <sub>red-edge</sub>	(705, 842)	$y = -0.080x^2 + 2.130x + 39.663$	0.407	0.356	3.317	4.850
	(740, 842)	$y = -182.744x^2 + 184.479x + 4.419$	0.519	0.496	4.346	6.443
DVI	(665, 842)	$y = 0.000x^2 - 0.077x + 158.134$	0.339	0.184	33.903	65.578
	(560, 665)	$y = -0.001x^2 - 0.322x + 29.718$	0.125	0.021	5.043	6.488
	(560, 705)	$y = -0.000x^2 + 0.069x + 46.526$	0.680	0.406	3.308	4.939
	(560, 740)	$y = 0.000x^2 - 0.015x + 63.807$	0.002	0.001	3.465	5.698
	(560, 842)	$y = 0.000x^2 - 0.071x + 145.552$	0.330	0.329	28.331	54.567
	(665, 705)	$y = -0.001x^2 + 0.296x + 13.121$	0.796	0.468	3.868	6.619
	(665, 740)	$y = 0.000x^2 - 0.080x + 130.030$	0.022	0.097	3.194	5.344
	(705, 842)	$y = 0.000x^2 - 0.047x + 105.376$	0.407	0.181	5.431	9.016
	(740, 842)	$y = -0.000x^2 + 0.036x + 26.553$	0.431	0.562	2.244	3.798
LCI	(665, 705, 842)	$y = -2391.756x^2 + 4445.892x - 2015.226$	0.782	0.567	4.760	6.325
	(665, 740, 842)	$y = -1029.453x^2 + 713.395x - 72.759$	0.648	0.500	6.081	7.935

续表 3

MTCI	(665, 705, 740)	$y = -1.133x^2 + 16.626x - 10.072$	0.803	0.665	3.185	4.819
	(665, 842)	$y = 2.877.160x^2 - 5.361.599x + 2.546.259$	0.220	0.0003	3.418	5.666
NAVI	(705, 842)	$y = 172.616x^2 - 238.826x + 127.449$	0.407	0.351	3.318	4.834
	(740, 842)	$y = -775.294x^2 + 519.196x - 35.992$	0.533	0.475	3.274	4.903
NDRE	(705, 842)	$y = 49.975x^2 - 37.831x + 49.827$	0.407	0.360	3.495	4.893
	(740, 842)	$y = -1.609.934x^2 + 648.025x - 14.261$	0.528	0.484	3.453	4.858
NDVI	(665, 842)	$y = 926.090x^2 - 1.617.535x + 754.730$	0.226	0.0004	3.609	5.695
	(665, 842)	$y = 0.022x^2 - 0.741x + 55.057$	0.237	0.0002	3.393	5.691
	(560, 665)	$y = 147.568x^2 - 191.332x + 110.341$	0.375	0.144	8.403	15.348
	(560, 705)	$y = -13.143x^2 + 37.009x + 24.065$	0.586	0.235	3.001	5.116
	(560, 740)	$y = -0.256x^2 + 3.939x + 34.794$	0.037	0.080	3.156	5.291
RVI	(560, 842)	$y = 0.074x^2 - 1.372x + 55.499$	0.070	0.072	3.401	5.729
	(665, 705)	$y = -2.494x^2 + 11.981x + 35.684$	0.102	0.165	3.402	5.749
	(665, 740)	$y = 0.060x^2 - 1.455x + 57.568$	0.189	0.036	3.279	5.499
	(705, 842)	$y = -0.080x^2 + 2.291x + 37.453$	0.407	0.006	3.743	6.237
	(740, 842)	$y = -182.744x^2 + 549.967x - 362.804$	0.519	0.496	4.336	6.426
	(490, 665, 842)	$y = 3.465.065x^2 - 7.020.704x + 3.605.172$	0.103	0.023	3.425	5.715
	(490, 665, 705)	$y = 27.071x^2 - 60.789x + 83.094$	0.094	0.148	35.980	49.348
SIPI	(490, 665, 740)	$y = 1.659.309x^2 - 3.376.093x + 1.766.260$	0.099	0.023	3.443	5.733

Note :  $x$  is the vegetation index and  $y$  is the chlorophyll content of corn canopy

DVI 和 RVI 两个植被指数在最初构建时均使用红波段和近红外波段, 未考虑红边波段的信息, 在该研究中将两个红边波段引入替换红波段反射率, 精度评价结果表明: 两个指数均在红边波段 2(中心波长为 740 nm)处取得最好的拟合精度,  $DVI_{(740, 842)}$ ,  $RVI_{(740, 842)}$  的拟合精度分别是 0.431 和 0.519, 比未使用红边波段的拟合精度分别提高了 0.092 和 0.282。再者, 还将红边波段引入替换近红外波段的反射率,  $DVI_{(665, 705)}$  的拟合精度比  $DVI_{(665, 842)}$  的提高 0.457,  $RVI_{(665, 705)}$  和  $RVI_{(665, 740)}$  的拟合精度未提高。此外, 将绿波段做除数或减数, 分别与红波段、红边波段、近红外波段构建新的植被指数, 精度评价结果表明差值/比值植被指数均在红边波段 1(中心波长为 705 nm)处取得最好的拟合精度, 其中  $DVI_{(560, 705)}$  模型拟合精度为 0.680,  $RVI_{(560, 705)}$  拟合精度为 0.586, 与原始值数的估算结果相比分别提高了 0.341 和 0.349。

利用基于红边波段构建的植被指数  $CI_{red-edge}$ , LCI 和 NDRE, 分别利用 Sentinel-2A 影像的两个红边波段估算玉米冠层叶绿素含量, 精度评价结果表明  $CI_{red-edge(740, 842)}$ ,  $LCI_{(665, 705, 842)}$ ,  $NDRE_{(740, 842)}$  分别取得各自最高的估算精度, 相对于 LCI,  $CI_{green}$ , DVI 和 RVI 指标来说, 红边波段 1(中心波长为 705 nm)的估算精度较高, 对于  $CI_{red-edge}$ , NDRE, NAVI 指标来说, 红边波段 2(中心波长为 740 nm)的估算精度较高。在本研究所使用的 10 种植被指数中,  $MT-CI_{(665, 705, 740)}$  指数与实测叶绿素含量的拟合精度最高,  $R^2$  为 0.803, RMSE 为 3.185, 相对误差 RE 为 4.819%,  $MT-CI_{(665, 705, 740)}$  指数与实测玉米冠层叶绿素含量的拟合精度如图 2 所示; 其次是  $DVI_{(665, 705)}$ , 决定系数  $R^2$  为 0.796, RMSE 为 3.868, 相对误差 RE 为 6.619%; 植被指数

$LCI_{(665, 705, 842)}$ ,  $CI_{green(560, 705)}$ ,  $RVI_{(560, 705)}$ ,  $NAVI_{(740, 842)}$ ,  $NDRE_{(740, 842)}$ ,  $CI_{red-edge(740, 842)}$ , NDVI, SIPI $_{(490, 665, 842)}$  的估算精度依次降低。

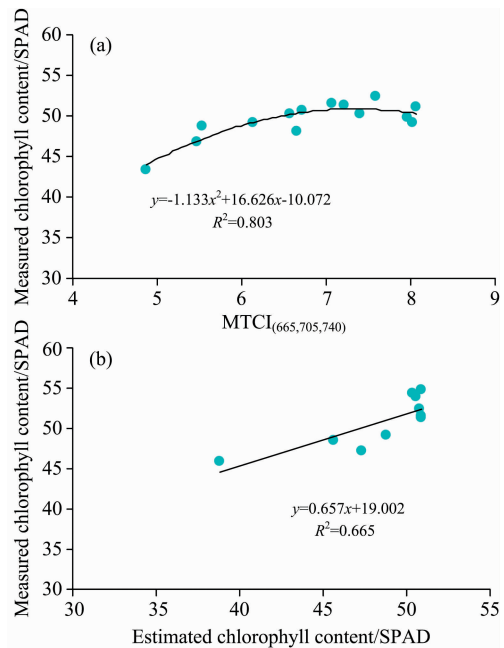


图 2 MTCI(665, 705, 740) 指数与玉米冠层叶绿素含量相关性精度验证散点图

Fig. 2 Correlation between MTCI(665, 705, 740) and chlorophyll content and accuracy assessment results

图 3 为基于 MTCI 指数估算的研究区内玉米冠层叶绿素含量的空间分布图, 从图中可以看出玉米冠层叶绿素含量主

要集中在 45~52 之间。从空间分布规律来看,研究区北部涿州市的叶绿素含量偏低,与实际测量结果相一致,主要原因是所研究时段内该市的种植时间晚于其他两个市,平均玉米长势与其他两市相比略差。研究区南部是定兴县和高碑店市,玉米种植面积较大且分布较为集中,玉米冠层叶绿素含量较高。如图 3 所示,研究区内玉米长势较好,并未出现大面积养分和水分胁迫问题。

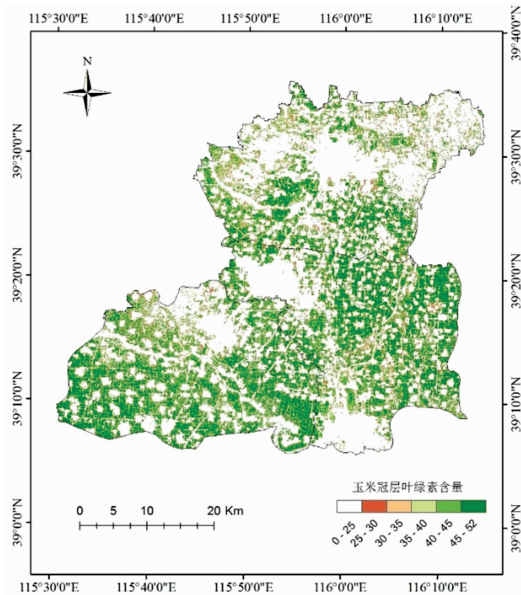


图 3 玉米冠层叶绿素含量估算空间分布图  
Fig. 3 The estimated corn canopy chlorophyll content results

### 3 结 论

以 Sentinel-2A 影像为数据源,分别构建包含红边波段和不包含红边波段的植被指数,构建玉米冠层叶绿素含量估算模型,从而估算河北省保定市东北部的涿州市、高碑店市和定兴县三个县市范围内的夏玉米叶绿素含量,目的是在确定最优的叶绿素含量估算模型、确定对于 Sentinel-2A 影像来说最优的波段组合方案、确定参与植被指数计算的红边波段最优数量的基础上,探索利用考虑遥感影像红边波段的统计分析模型估算玉米冠层叶绿素含量的方法。研究结论如下:

(1)红边波段的加入可以提高玉米冠层叶绿素含量的估算精度。引入红边波段后玉米冠层叶绿素含量的估算精度比未使用红边波段的估算精度决定系数  $R^2$  提高 0.3 以上,其中基于  $DVI_{(665, 705)}$  植被指数的估算最高,  $R^2$  为 0.796。

(2)对于不同的植被指数,参与运算的 Sentinel-2A 影像的两个红边波段,估算精度的提高程度不同。对于可见光波段参与计算的植被指数来说,在红边波段 1(中心波长为 705 nm)的估算精度较高,如 LCI,  $CI_{green}$ , DVI, RVI 等;对于近红外波段参与计算的植被指数来说,在红边波段 2(中心波长为 740 nm)的估算精度较高,如  $CI_{red-edge}$ , NDRE, NAVI 等。

(3)对于 Sentinel-2A 影像来说,两个红边波段共同参与叶绿素含量估算能取得最高的估算精度。选用的植被指数中,  $MTCI_{(665, 705, 740)}$  指数与玉米冠层叶绿素含量估算精度最高,回归模型拟合精度  $R^2$  为 0.803,模型验证  $R^2$  为 0.665, RMSE 为 3.185,相对误差 RE 为 4.819%。 $MTCI_{(665, 705, 740)}$  指数计算中使用了两个红边波段,突出红边波段反射率差值变化,与玉米冠层叶绿素含量表现出很好的相关性。

### References

- [ 1 ] Peng Y, Nguy-Robertson A, Arkebauer T, et al. Remote Sensing, 2017, 9(3): 226.
- [ 2 ] Chemura A, Mutanga O, Odindi J. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, (99): 1.
- [ 3 ] JIANG Hai-ling, YANG Hang, CHEN Xiao-ping, et al(姜海玲, 杨 杭, 陈小平). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(4): 975.
- [ 4 ] DONG Heng, MENG Qing-ye, WANG Jin-liang, et al(董 恒, 孟庆野, 王金梁, 等). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2012, 31(4): 336.
- [ 5 ] Jesús D, Jochem V, Luis A, et al. Sensors, 2011, 11(7): 7063.
- [ 6 ] Schlemmer M, Gitelson A, Schepers J, et al. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2013, 25(1): 47.
- [ 7 ] ZHENG Yang, WU Bing-fang, ZHANG Miao(郑 阳, 吴炳方, 张 淼). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2017, 21(2): 318.
- [ 8 ] WANG Xiao-xing, CHANG Qing-rui, LIU Meng-yun, et al(王晓星, 常庆瑞, 刘梦云, 等). Journal of Northwest A & F University · Nat. Sci. Ed(西北农林科技大学学报·自然科学版), 2016, 44(2): 48.
- [ 9 ] DING Yong-jun, ZHANG Jing-jing, LI Xiu-hua, et al(丁永军, 张晶晶, 李修华, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2016, 47(3): 292.
- [ 10 ] Gitelson A A, Keydan G P, Merzlyak M N. Geophysical Research Letters, 2006, 33(11): 431.
- [ 11 ] Dash J, Curran P J. Evaluation of the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (MTCT), Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'04, 2004.
- [ 12 ] Dash J, Curran P J. The Meris Terrestrial Chlorophyll Index, International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5403.
- [ 13 ] Carmona F, Rivas R, Fonnegra D C. European Journal of Remote Sensing, 2015, 48: 319.
- [ 14 ] Barnes E M, Clarke T R, Richards S E, et al. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using

Ground-based Multispectral Data. International Conference on Precision Agriculture and Other Resource Management, 2015.

[15] Penuelas J, Baret F, Filella I. *Photosynthetica*, 1995, 31(2): 221.

## Estimating the Corn Canopy Chlorophyll Content Using the Sentinel-2A Image

SU Wei<sup>1,2</sup>, ZHAO Xiao-feng<sup>3</sup>, SUN Zhong-ping<sup>1\*</sup>, ZHANG Ming-zheng<sup>1,2</sup>, ZOU Zai-chao<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, SHI Yuan-li<sup>4</sup>

1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Remote Sensing for Agri-Hazards, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China

3. China Meteorological Center, Beijing 100081, China

4. Satellite Environment Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100094, China

**Abstract** The chlorophyll within crop leaves and crop canopy produces energy and participates in photosynthesis process by absorbing sunlight. Therefore, it is important to estimate the crop canopy chlorophyll content timely and accurately for crop growth monitoring, nutrient content monitoring and crop quality evaluation. Sentinel-2 has a wide-swath sensor with 5-days revisit period, so the Sentinel-2 image is produced with high spatial resolution (10 m) and 13 spectral bands. Specially, there are three red edge bands in Sentinel-2 image, which are sensitive to crop canopy chlorophyll content and its change. So the Sentinel-2 image is an ideal remote sensing data source for chlorophyll content estimation. Vegetation indexes depict the difference for the crop between different growth conditions and different chlorophyll contents, through the band combinations based on the reflection characteristics of crops at different spectral bands. So the vegetation indexes from Sentinel-2 image can be used to estimate the corn canopy chlorophyll content timely and accurately in a regional area. Therefore, this study is focusing on estimating the corn canopy chlorophyll content using 10 kinds of vegetation indexes computing from Sentinel-2A remote sensing images. And the study area is located in three counties of Baoding City, Hebei Province, ranging from 115°29'E to 116°14'E, 39°5'N to 39°35'N. We measured the corn plant chlorophyll content in 24 sampling areas distributed randomly in the whole study area from 6 August to 11 August, 2016. And each sampling area was located using Huace i80 real-time kinematic (RTK) GPS receiver (Huace Ltd., Shanghai, China). The Sentinel-2A image was preprocessed including geometric correction, radiometric calibration and atmospheric correction, and Sen2Cor model and SNAP were used to do atmospheric correction. 10 vegetation indexes were computed including  $CI_{green}$  (Green Chlorophyll Index),  $CI_{red-edge}$  (Red-edge Chlorophyll Index), DVI (Difference Vegetation Index), LCI (Leaf Chlorophyll Index), MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index), NAVI (Normalized Area Vegetation Index), NDRE (Normalized Difference Red-Edge), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), RVI (Ratio Vegetation Index), SIPI (Structure Insensitive Pigment Index). Secondly, the statistical correlativity was analyzed between these 10 vegetation indexes and measured chlorophyll content value for every sampling area. So the corn canopy chlorophyll content estimating was developed using this correlation analysis results. Lastly, the optimal chlorophyll content estimation model was selected to estimate the chlorophyll content in the whole study area. This study was focusing on (1) developing the estimation model for corn canopy chlorophyll content in the study area, and the accuracy was assessed using  $R^2$ , RMSE and RE; (2) deciding the optimal band combination; (3) deciding the optimal amount of red edge band participating in vegetation indexes calculation. The accuracy assessment results indicated that (1) there was polynomial correlation between measured chlorophyll content and the selected 10 vegetation indexes in this study, and the accuracy of estimated chlorophyll content using the vegetation indexes considering the red edge bands is better than the ones without red edge bands. The  $CI_{green(560, 705)}$  and DVI which were all considering red edge bands improved the chlorophyll content estimation accuracy, and the  $R^2$  improved 0.516 for  $CI_{green(560, 705)}$ . The statistical relationship between the measured chlorophyll content and the vegetation index in the field work was established, and the relationship was extended to the whole study area. This study was about the estimation of corn canopy LAI and chlorophyll content using these ten vegetation indexes, which was focusing on the following four parts. Firstly, we compared if the vegetation with or without red-edge band could get accurate LAI and chlorophyll content estimated result. Secondly, we added two red-edge bands to the vegetation indexes without red-edge band originally. Thirdly, we added two red-edge bands to the vegetation indexes with one red-edge band originally only. Fourthly, we set up the vegetation index with two red-edge bands. The results showed that there are polynomial regression between the selection of multi-VI and the field survey of canopy chlorophyll content. Because the introductions of the red edge band, the fitting accuracy improved more than 0.3 between the vegetation index and

corn canopy chlorophyll content, and the  $CI_{\text{green}}(560, 705)$  (Green Chlorophyll Index) improved 0.516 that is the highest. The index calculating between the visible light band and the first red edge band (705 nm), the near infrared band with the second red edge band (740 nm), both of which established the regression model with the field survey of corn canopy chlorophyll content, and promoted the best fitting precision. The MTCI (MERIS Terrestrial Chlorophyll Index) has the highest fitting precision in which the  $R^2$  is 0.803, RMSE is 3.185, RE is 4.819%. It is shown that adding the red edge band will improve the fitting precision and it is suitable for crop growth monitoring.

**Keywords** Sentinel-2A; Corn; Canopy chlorophyll content; Red-edge band; Vegetation index

(Received Mar. 28, 2018; accepted Aug. 5, 2018)

\* Corresponding author