

基于光谱指数的不同叶倾角分布下玉米冠层叶绿素含量反演

孙奇^{1,2}, 焦全军^{2*}, 戴华阳¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 数字地球重点实验室, 北京 100094

摘要 遥感是开展地面/近地面、航空及航天层次无损探测植物叶绿素信息的主要手段。目前多波段计算光谱指数方法已被广泛地应用于植被冠层叶绿素含量的经验/半经验反演及应用中。考虑不同作物及同种作物不同品种间存在着一定的植被叶倾角分布(LAD)特征差异, 针对叶倾角分布对光谱指数反演冠层叶绿素含量(CCC)的影响进行分析, 并开展针对叶倾角分布变化不敏感的叶绿素相关光谱指数优选和冠层叶绿素反演建模研究。基于 PROSAIL 辐射传输模型模拟了不同叶片叶绿素含量(LCC)、叶面积指数(LAI)和LAD对应的冠层反射率数据。模拟结果显示, 在相同 LAI 和 LCC 条件下, 不同 LAD 对应的冠层反射率有明显差异, 冠层反射率随着平均叶倾角的增加而降低。通过计算 12 个常用的叶绿素相关光谱指数与 CCC 的相关性指标, 来评估光谱指数在不同 LAD 下反演叶绿素含量的敏感性差异, 并依次优选出 MTCI, MNDVI8, MNDVI1 和 $CI_{red-edge}$ 4 个对 LAD 变化较不敏感的叶绿素相关光谱指数。利用玉米实测数据对光谱指数进行冠层叶绿素估测的建模和模型检验, 模型的建立和验证结果显示, MNDVI8 对 LAD 变化最不敏感, 反演模型的精度最高, 决定系数 $R^2=0.70$, 均方根误差 $RMSE=22.47 \mu g \cdot cm^{-2}$ 。 $CI_{red-edge}$ ($R^2=0.63$, $RMSE=24.06 \mu g \cdot cm^{-2}$), MNDVI ($R^2=0.66$, $RMSE=24.07 \mu g \cdot cm^{-2}$) 和 MTCI ($R^2=0.65$, $RMSE=26.76 \mu g \cdot cm^{-2}$) 反演模型的精度较为接近并稍弱于 MNDVI8。通过对反演结果分析得出结论, 不同的光谱指数对 LAD 变化的敏感性不同, 优选的光谱指数普遍对叶绿素含量具有较好的相关性和敏感性, 其中 MNDVI8 受 LAD 影响最小, 能较高精度的反演 LAD 变化下的玉米冠层叶绿素含量。优选的其他光谱指数 MTCI, $CI_{red-edge}$ 和 MNDVI1 反演能力虽然稍弱于 MNDVI8, 但受 LAD 影响较小, 同样具有较好的反演能力。该工作开展 LAD 对光谱指数叶绿素反演的敏感性分析和光谱指数优选研究, 其实测数据的检验结果和模拟数据的分析结果一致; 基于优选光谱指数的冠层叶绿素含量反演建模结果及精度分析结论, 对开展缺乏叶倾角分布差异先验知识下的大范围作物叶绿素含量遥感估测和应用具有借鉴意义。

关键词 叶绿素反演; 光谱指数; 叶倾角分布; 叶面积指数

中图分类号: S127

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-2257-07

引言

植被叶片中的叶绿素是植被光合作用中起主导作用的色素, 叶绿素含量的多少是植被光合作用能力强弱、生理胁迫状况、固碳能力及氮利用效率的良好指示器^[1]。在不同时空尺度下通过遥感手段精确反演具有群体特征的冠层叶绿素含量(canopy chlorophyll content, CCC)对开展有效监测作物长势、精确估产非常重要^[2]。

基于光谱特征分析建立的经验性光谱指数是目前反演叶绿素含量最常用的方法, 可选取对植被叶绿素敏感度较高的光谱指数来反演作物叶绿素含量。研究表明叶绿素在红边波长范围(680~750 nm)对太阳辐射吸收较低, 红边区域能够减少叶绿素辐射吸收的饱和效应, 同时其反射率仍然对叶绿素变化敏感^[3]。利用 705 和 750 nm 等红边波段反射率构建新的叶绿素相关光谱指数, 这些红边波长光谱指数能够较好用于植被叶绿素含量估算^[4]。

在冠层尺度上反射率不仅受到叶片理化参数影响, 还由

收稿日期: 2018-05-30, 修订日期: 2018-10-09

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFA0603001), 国家重点研发计划课题(2016YFB0500304)和国家自然科学基金项目(41701396)资助

作者简介: 孙奇, 1991年生, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院博士研究生 e-mail: sunqicumtb@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jiaqj@radi.ac.cn

叶面积指数(leaf area index, LAI)、叶倾角分布(leaf inclination angle distribution, LAD)、非光合物质比例、土壤背景等因素决定^[5]。Croft 等评估对不同叶片类型、叶面积指数下的叶片叶绿素含量估测的适用性,认为叶片和冠层结构对叶绿素反演影响显著^[6]。在不同生长期,玉米和大豆叶绿素含量受 LAI 影响显著^[7]。不同叶倾角分布反映了不同作物类型以及品种间的重要冠层结构差异,在田间观测实验、植被辐射传输模型模拟中,叶倾角分布特征都是重要的植被结构观测参数^[8]和模型输入参数^[9]。鉴于叶倾角分布特征差异是冠层反射率的重要影响因子,同时叶倾角分布特征先验数据在开展叶绿素遥感反演时难以获取,因此,评估光谱指数对叶倾角分布变化的敏感性并开展鲁棒性的模型建模变得十分必要。选取了 12 种常用的叶绿素相关光谱指数,基于 PROSAIL 模型模拟实验开展评估光谱指数对叶倾角分布的敏感性差异,筛选出 4 种对 LAD 变化不敏感的光谱指数,最后利用具有不同 LAD 特征的玉米地面实测数据建立基于优选指数的玉米冠层叶绿素含量反演模型并进行精度评价。

1 实验部分

1.1 样品

样品采自北京市海淀区四季青乡板井小区玉米试验田(北京市农林科学院实验农场, 116.28°E, 39.93°N)。2003 年 8—9 月份开展田间观测实验和冠层光谱观测实验^[10]。选择 10 种玉米品种,共 80 个样本。生育期为 7 月到 10 月。研究区各个实验地块在玉米生长期采用一致的施肥、灌溉、病虫害和杂草控制等田间管理。

1.2 冠层光谱测量

玉米冠层光谱反射率的测定使用 ASD FieldSpec 地物光谱仪,其波段范围为 350~2 500 nm,输出波段数为 2 151 个,光谱分辨率在 50~1 000 nm 为 3 nm,在 1 000~2 500 nm 为 10 nm。视场角 25°。试验分别在夏玉米孕穗期(2003 年 8 月 11 日)、吐丝初期(2003 年 8 月 20 日)、吐丝中期(2003 年 8 月 29 日)和乳熟期(2003 年 9 月 8 日)进行 4 次光谱测定。选择玉米长势均匀的地点作为采样点,在晴朗无云、太阳直射和北京时间 10:30—14:00 进行测量。

1.3 玉米生化参数的测定

在光谱测量的同时,测量样本叶片叶绿素含量、叶面积指数和叶倾角分布参数。使用便携式激光叶面积仪(CI-203)测定样本叶片叶面积,利用样本叶片面积和植株密度计算冠层叶面积指数。叶倾角定义为叶片切平面与水平面间的夹角,用半圆量角器和一个垂直于其中心的铅垂线测量玉米叶片的叶倾角。玉米株型分类结果见表 1。80 个玉米样本中包括 40 个喜斜型样本和 40 个喜直型样本。将现场采集 80 个样本叶片带回实验室测定玉米叶片叶绿素含量^[11]。根据公式 $CCC=LCC \times LAI$,计算获得玉米冠层叶绿素含量。

1.4 模型参数

PROSAIL 模型是冠层辐射传输模型 SAIL 模型与叶片光学模型 PROSPECT 的耦合模型,是目前使用最广泛的冠层辐射传输模型之一^[9]。PROSAIL 模型的输入参数及其范

表 1 供试品种及其叶倾角类型

Table 1 Tested varieties and their LAD

玉米品种	叶倾角类型
京玉 7	喜斜型
唐玉 10	喜直型
唐抗 5 号	喜直型
高油 115	喜斜型
户单 2000	喜直型
中原单 32	喜斜型
京试白 1 号	喜斜型
中单 9409	喜直型
中单 958	喜斜型
豫玉 22 号	喜斜型

表 2 PROSAIL 模型的输入参数及其取值范围

Table 2 Input parameters and their value ranges for PROSAIL model

Input parameters	Parameter range
Chlorophyll content/ $(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	10~80
Leaf equivalent water thickness/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.017
Dry matter content/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$	0.012
Leaf area index	0.5~8
Leaf thickness parameters	1.4
Leaf inclination angle distribution	Planophile, Plagiophile, Spherical and Erectophile
Solar zenith angle/ $(^\circ)$	30
Observation zenith angle/ $(^\circ)$	0
Azimuthal difference between solar and observation angle/ $(^\circ)$	0

表 3 相关的光谱指数及其公式

Table 3 Related spectral index and formula

Spectral index	Calculation formula	Source
NDVI	$(R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	[13]
MTCI*	$(R_{754} - R_{709}) / (R_{709} - R_{681})$	[14]
$CI_{red-edge}^*$	$R_{780} / R_{705} - 1$	[15]
CI_{green}	$R_{780} / R_{550} - 1$	[15]
RTCARI/ROSAVI*	$3((R_{750} - R_{705}) - 0.2(R_{750} - R_{550})) \times (R_{750} / R_{705}) / 1.16 (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} + 0.16)$	[4]
SR	R_{800} / R_{670}	[16]
RMSR*	$((R_{750} / R_{705}) - 1) / \sqrt{((R_{750} / R_{705}) + 1)}$	[4]
MNDVI1*	$(R_{755} - R_{745}) / (R_{755} + R_{745})$	[17]
MNDVI8*	$(R_{755} - R_{730}) / (R_{755} + R_{730})$	[17]
MNDVI _{1e} *	$(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - R_{445})$	[18]
Datt99*	$(R_{850} - R_{710}) / (R_{850} - R_{680})$	[19]
Macc01	$(R_{780} - R_{710}) / (R_{780} - R_{680})$	[20]

* Vegetation indices combining Red-Edge informations

围见表 2,其中等效水厚度(leaf equivalent water thickness)、干物质含量(dry matter content)和叶片厚度参数(leaf thick-

ness parameters)来自于文献[2-12]。

1.5 光谱指数

共选取了 12 个常用的叶绿素相关光谱指数，其名称和计算公式见表 3。

2 结果与讨论

2.1 基于模拟数据的光谱指数对叶倾角分布的敏感性分析

2.1.1 不同叶倾角分布的植被冠层光谱特征分析

利用 PROSAIL 模型分别模拟了喜平型(Planophile)、喜斜型(Plagiophile)、球面型(Spherical)和喜直型(Erectophile) 4 种 LAD 在 9 种 LAI(LAI=0.5, 1, 2~8)和 8 种 LCC(LCC=10, 20~80)条件下的植被冠层反射率，每种 LAD 包含 72 个数据，其平均叶倾角分别为 26.76°, 45°, 57.3°, 63.24°。图 1 为 4 种 LAD 差异情况下的植被冠层光谱模拟结果，其对应的 LAI=4, LCC=40 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，其他参数见表 1。图 1 (a)显示不同 LAD 间的植被光谱存在明显差异，LAD 差异对冠层光谱全波段都有显著的影响。几乎所有波长的反射率都随着平均叶倾角的增大而减小，喜平型叶倾角分布的冠层反射率最高，而喜直型叶倾角分布对应的冠层反射率最低。

叶绿素密切相关的可见光及部分红边波长范围的光谱对比显示[图 1(b)]，喜直型叶倾角分布对应的光谱形状异于其余三种叶倾角分布对应的光谱形状，喜直型叶倾角对应的冠层反射率在 550 nm 附近的“绿峰”和在 680 nm 附近的“红谷”特征不明显，显示出相比其他叶倾角分布类型，喜直型叶倾角分布的植被冠层反射率中土壤背景因子的贡献更大。

2.1.2 基于叶倾角分布影响的叶绿素相关光谱指数筛选

利用 PROSAIL 分别模拟的喜平型、喜斜型、球面型、喜直型 4 种叶倾角分布下的植被冠层反射率光谱，建立 12 种光谱指数(表 2)与冠层叶绿素含量的回归关系，以决定系数 R^2 作为回归效果的评定指标。决定系数 R^2 的计算公式如式(1)所示。

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (\hat{y}_i - \bar{y})}{\sum_i^n (y_i - \bar{y})} \tag{1}$$

其中 n 为样本数； \hat{y}_i , \bar{y} 和 y_i 分别为预测值、实测平均值和实测值。 R^2 的计算结果如图 2 所示。图 2 给出四种单一叶倾角分布和综合叶倾角分布下的决定系数，其中综合叶倾角分布为四种单一叶倾角分布的代数和，共有 288 个模拟的冠层

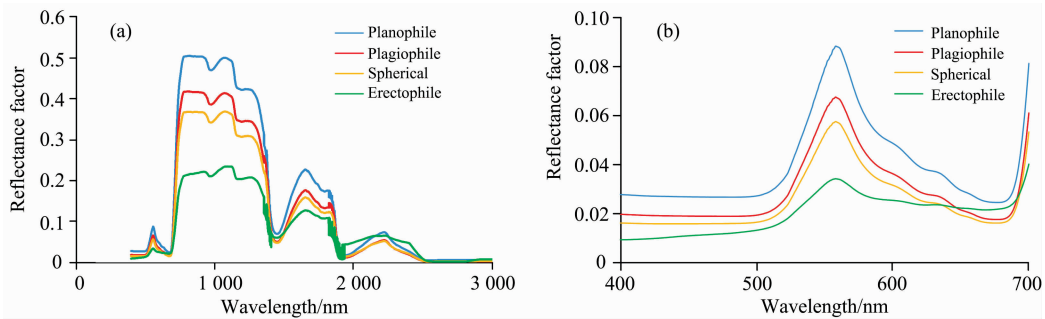


图 1 叶倾角分布差异对模拟的植被冠层光谱的影响(LAI=4, LCC=40 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig. 1 Canopy hyperspectral curves under different LAD(LAI=4, LCC=40 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)

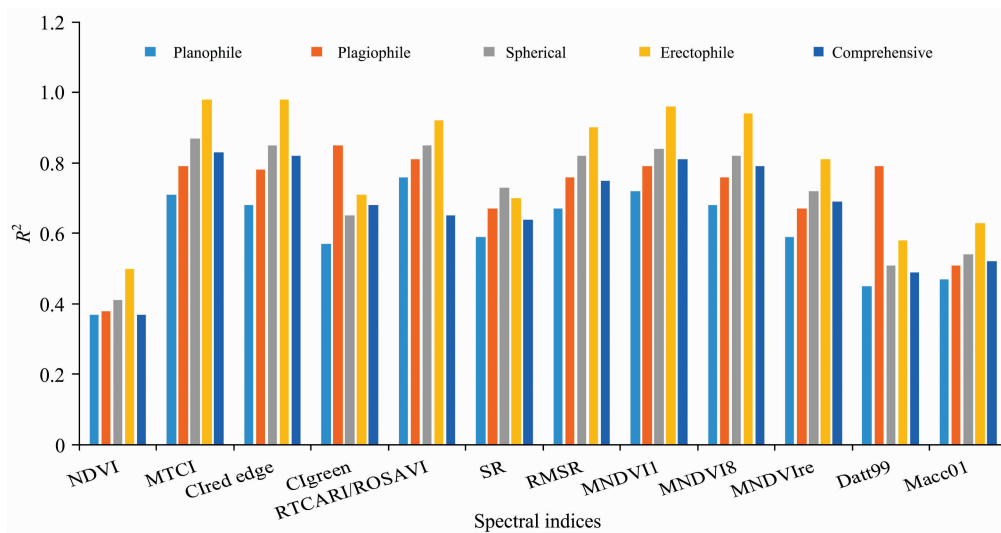


图 2 基于模拟数据的光谱指数与冠层叶绿素含量回归结果对比

Fig. 2 The comparison of regression results of between spectral indices and CCC based on simulated data

叶绿素含量。在不同叶倾角分布下光谱指数与叶绿素含量回归分析的决定系数存在普遍差异,说明叶倾角分布对基于光谱指数的植被叶绿素遥感估测影响显著。其中 SR 指数在球面型叶倾角分布下的叶绿素含量估测效果最优, Datt99 和 CI_{green} 指数在喜斜型叶倾角分布下的叶绿素含量估测效果明显优于其余三种叶倾角分布类型。NDVI, MTCl, $CI_{red-edge}$, 随着平均叶倾角的增加 RTCARI/ROSAVI, RMSR, MNDVI1, MNDVI8, MNDVI_{re} 和 Macc01 指数与叶绿素含量的相关关系越显著, 在喜直型叶倾角下回归关系达到最优, 这与图 1 显示的光谱反射率随平均叶倾角的增加而降低有密切的联系。光谱指数在喜平型叶倾角分布下与冠层叶绿素含量的回归关系最弱, 这与植被光谱指数在 LAI 较高时普遍存在饱和的现象有关^[21]。另外, 不同的光谱指数对叶绿素含量的估测能力存在较大的差异, MTCl, $CI_{red-edge}$, RTCARI/ROSAVI, RMSR, MNDVI1, MNDVI_{re} 和 MNDVI8 在单一的叶倾角分布下和综合 4 种叶倾角分布下都有较好的回归关系, 其中 RTCARI/ROSAVI 在综合叶倾角分布下与叶绿素含量的关系较弱, 弱于单一叶倾角分布的情况; 而 $CI_{red-edge}$, MTCl, MNDVI1 和 MNDVI8 在综合叶倾角分布下的决定系数较为平均, R^2 分别为 0.82, 0.83, 0.81 和 $R^2=0.79$ 。RMSR 和 MNDVI_{re} 指数在综合叶倾角分布下与叶绿素含量的回归关系弱于以上 4 种光谱指数, 但也具有一定的估测能力, R^2 分别为 0.75 和 0.69。NDVI, Datt99 和 Macc01 的回归关系较弱, R^2 分别为 0.37, 0.49 和 0.52。

依据光谱指数与不同叶倾角分布的冠层叶绿素含量回归关系的绝对系数, 作为量度叶倾角分布因子变化对光谱指数反演能力的评定指标, 筛选出 MTCl, $CI_{red-edge}$, MNDVI1 和 MNDVI8 共 4 个受叶倾角分布影响较小的叶绿素光谱指数。由于红边区域对叶绿素变化敏感, 并且对高叶绿素含量具有一定的抗饱和特点, 使用红边区域的光谱指数与叶绿素含量普遍具有良好关系^[5]。

2.2 基于实测数据的模型建立与验证

2.2.1 不同叶倾角分布类型的玉米实测光谱对比

为了对比叶倾角分布对玉米冠层光谱反射率的影响, 挑选了 LAI 和 LCC 最接近、两种叶倾角分布的玉米冠层实测光谱。图 3 为玉米在喜斜型和喜直型叶倾角分布下的光谱对比, 由于叶绿素影响的光谱范围集中在可见光和近红外波段, 实测光谱对比只展示 350~900 nm 的波长范围。图 3 显示, 相近 LAI 和 LCC 状况下的喜斜型叶倾角分布冠层反射率高于喜直型, 喜直型叶倾角分布对应的光谱形状在“绿峰”和“红谷”两处的光谱形状特征均不明显, 与图 1 中的模拟数据结果的规律一致。

2.2.2 优选指数和未筛选指数对叶倾角分布变化的敏感性对比

利用 40 个喜斜型玉米实测样本和 40 个喜直型实测样本, 将由模拟结果优选出的 $CI_{red-edge}$ 和 MNDVI8 以及未筛选的 MNDVI_{re} 和 RMSR 分别与喜斜型玉米和喜直型玉米的冠层叶绿素含量建立回归模型并进行对比分析, 结果如图 4 所示。图 4 显示, MNDVI_{re} 和 RMSR 在喜斜型和喜直型两种 LAD 类型下的回归曲线相对离散, 并且不同 LAD 下的回归

关系的相关性反演精度差别较大(MNDVI_{re}: 喜斜型: $R^2=0.42$, 喜直型: $R^2=0.64$; RMSR: 喜斜型: $R^2=0.40$, 喜直型: $R^2=0.67$)。而本文的优选指数(以 MNDVI8 和 $CI_{red-edge}$ 为例)在喜斜型和喜直型下与冠层叶绿素含量回归曲线相对集中, 不同 LAD 下的回归关系的相关性都较高($CI_{red-edge}$: 喜斜型: $R^2=0.54$, 喜直型: $R^2=0.69$; MNDVI8: 喜斜型: $R^2=0.68$, 喜直型: $R^2=0.75$)。此结果也与基于模拟数据得出的优选光谱指数对叶倾角变化不敏感的分析结果相对应。此外, 测试的光谱指数在喜直型叶倾角分布下的冠层叶绿素反演模型精度都高于喜斜型叶倾角分布的模型精度, 这与基于模拟数据得出的结论一致。

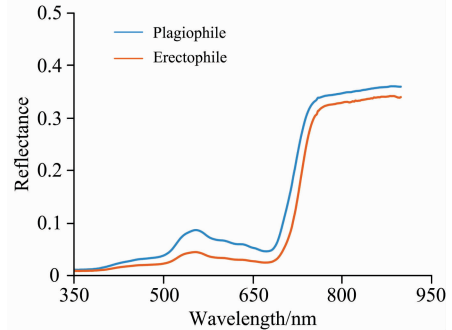


图 3 玉米在喜斜型和喜直型叶倾角分布下的光谱对比(喜斜型 LAI=5.3, LCC=25 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; 喜直型 LAI=5.1, LCC=23 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)

Fig. 3 Hyperspectral curves of corn under different LAD (plagiophile: LAI=5.3, LCC=25 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$; erectophile: LAI=5.1, LCC=23 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)

表 4 光谱指数与综合不同叶倾角分布类型的玉米冠层叶绿素含量之间的回归模型与验证结果

Table 4 The regression model and validation result between spectral indices and corn CCC with comprehensive different LAD

Spectral index	Regression model		Validation result
	Formulation	R^2	RMSE
MNDVI8	$y=47.014e^{5.600}5x$	0.70	22.47
MNDVI1	$y=55.29e^{23.422}x$	0.66	24.07
MTCl	$y=69.037e^{0.193}9x$	0.65	26.76
$CI_{red-edge}$	$y=67.443e^{0.355}9x$	0.63	24.06
MNDVI _{re}	$y=23.595e^{3.029}4x$	0.60	32.06
RTCARI/ROSAVI	$y=71.765e^{0.181}6x$	0.55	30.12
CI_{green}	$y=76.471e^{0.158}4x$	0.54	30.95
RMSR	$y=51.252e^{0.813}5x$	0.53	33.66
SR	$y=88.709e^{0.060}8x$	0.52	33.78
Datt99	$y=3.0242e^{4.945}3x$	0.52	28.22
Macc01	$y=3.3768e^{4.817}8x$	0.51	28.28
NDVI	$y=6.9751e^{3.895}3x$	0.47	33.88

2.2.3 光谱指数与玉米叶绿素含量之间回归模型的建立与结果分析

将 80 个玉米叶绿素样本作为综合不同叶倾角分布类型

的样本,从中随机挑选 20 个样本作为验证数据,剩余 60 个样本与 12 个光谱指数建立回归模型,结果如表 4 所示。表 4 显示,基于综合不同 LAD 类型的玉米实测数据构建的 4 个优选指数 MNDVI8, $CI_{red-edge}$, MNDVI1, MTCI 与 CCC 建立的回归模型精度较高,决定系数 R^2 均大于 0.6,此结果与基于模拟数据的光谱指数敏感性分析结果相对应。MNDVI8, $CI_{red-edge}$, MNDVI1, MTCI 对叶倾角分布差异不敏感,能够较好的反演冠层叶绿素含量。其中与玉米冠层叶绿素含量相

关性最高的 MNDVI8 对 LAD 变化最不敏感,建立的冠层叶绿素模型为 $CCC = 47.014e^{5.600 \cdot 5x}$,反演模型检验精度最高(均方根误差 $RMSE = 22.47 \mu g \cdot cm^{-2}$),最适用于综合不同叶倾角分布类型的植被观测叶绿素反演。 $CI_{red-edge}$ ($RMSE = 24.06 \mu g \cdot cm^{-2}$), MNDVI1 ($RMSE = 24.07 \mu g \cdot cm^{-2}$) 和 MTCI ($RMSE = 26.76 \mu g \cdot cm^{-2}$) 反演模型的精度较为接近并稍弱于 MNDVI8。

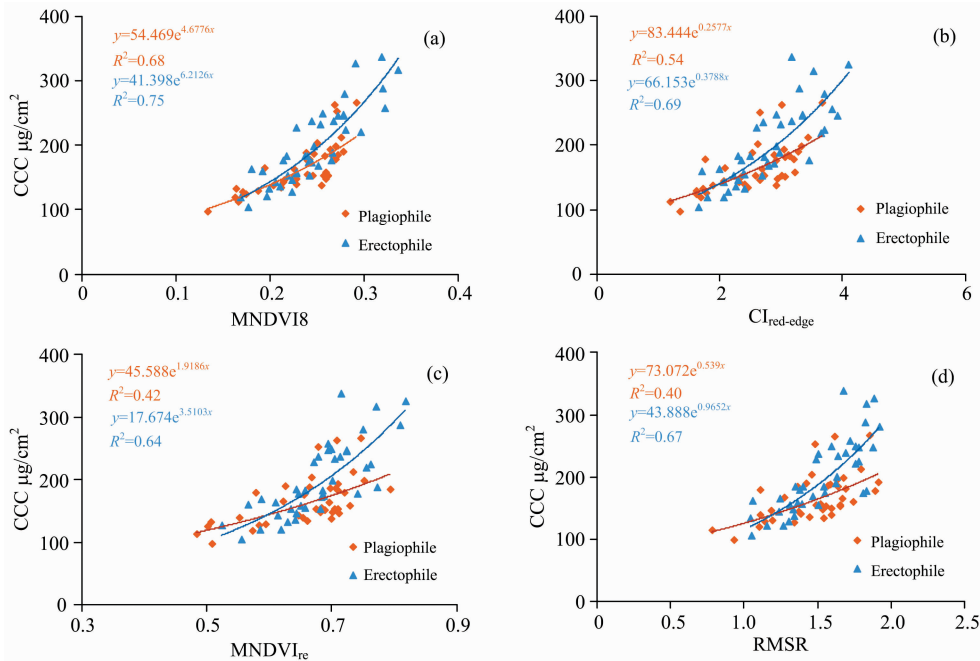


图 4 优选指数 (a, b) 和未筛选指数 (c, d) 与喜斜型和喜直型玉米叶绿素含量的回归关系对比

Fig. 4 The comparison of regression relationship between preferred spectral indices and unselected spectral indices and chlorophyll content of corn with plagiophile and erectophile

3 结论

利用不同叶倾角分布下的模拟光谱和实测光谱,分析光谱指数对叶倾角分布参数的敏感性差异,筛选出对叶倾角分布差异不敏感的光谱指数并建立与玉米冠层叶绿素含量的估算模型,得出以下结论。

(1) 植被的叶倾角分布对全波段植被光谱反射率影响较大,叶绿素密切关系的可见光及红边波段反射率与平均叶倾角大致呈反比关系。

(2) 叶倾角分布差异对基于光谱指数的叶绿素含量反演模型影响显著,且喜直型叶倾角分布下的冠层叶绿素反演能力优于其他叶倾角分布类型。

(3) 通过实测数据验证,基于优选 MNDVI8, MNDVI1, MTCI 和 $CI_{red-edge}$ 光谱指数构建的叶绿素含量估测模型对叶倾角分布变化相对不敏感,其中, MNDVI8 反演精度最高,建立的冠层叶绿素模型为 $CCC = 47.014e^{5.600 \cdot 5x}$,验证精度为 $RMSE = 22.47 \mu g \cdot cm^{-2}$,最适用于综合不同叶倾角分布类型的植被观测叶绿素反演。

上述研究结果是由植被传输模拟数据和玉米地面实测数据得出,模拟数据的分析结果在实测数据检验中得到一致性良好的印证,优选出对叶倾角分布变化相对不敏感的光谱指数可以提高玉米叶绿素反演的精度。这些结论对未知作物叶倾角分布先验知识情况下开展大范围作物叶绿素含量遥感估测具有一定的借鉴意义,但仍需要在区域尺度以及不同类型作物方面进行更进一步的研究。

References

- [1] Curran P J, Dungan J L, Ghglz H L. Tree Physiology, 1990, 7(1-4): 33.
- [2] Zhang S and Liu L. Remote Sensing Letters, 2014, 5(8): 733.
- [3] Gitelson A A, Merzlyak M N. Journal of Plant Physiology, 1996, 148(3-4): 494.

- [4] Wu C, Niu Z, Tang Q, et al. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(8): 1230.
- [5] Croft H, Chen J M, Zhang Y, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 133(12): 128.
- [6] Croft H, Chen J M, Zhang Y. *Ecological Complexity*, 2014, 17(1): 119.
- [7] Peng Y, Nguy-Robertson A, Arkebauer T, et al. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 226.
- [8] Zhao C, Li H, Li P, et al. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 55(1): 236.
- [9] Jacquemoud S, Verhoef W, Baret F, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2009): S56.
- [10] TAN Chang-wei, WANG Ji-hua, GUO Wen-shan, et al(谭昌伟, 王纪华, 郭文善, 等). *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University • Natural Science Edition(福建农林大学学报 • 自然科学版)*, 2006, 35(2): 123.
- [11] ZHU Xi-cun, ZHAO Geng-xing, WANG Rui-yan, et al(朱西存, 赵庚星, 王瑞燕, 等). *Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学)*, 2010, 43(6): 1189.
- [12] Ali A, Darvishzadeh R, Skidmore A, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(2): 898.
- [13] Rouse J, Haas R, Schell J, et al. *Nasa Special Publication*, 1974, 351: 309.
- [14] Dash J, Curran P J. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5403.
- [15] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271.
- [16] Jordan C. *Ecology*, 1969, 50(4): 663.
- [17] Mutanga O, Skidmore A K. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(19): 3999.
- [18] Sims D A, Gamon J A. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(2): 337.
- [19] Datt B. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(14): 2741.
- [20] Maccioni A, Agati G, Mazzinghi P. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2001, 61(1): 52.
- [21] Darvishzadeh R, Skidmore A. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 358.

Research on Retrieving Corn Canopy Chlorophyll Content under Different Leaf Inclination Angle Distribution Types Based on Spectral Indices

SUN Qi^{1,2}, JIAO Quan-jun^{2*}, DAI Hua-yang¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining, Technology, Beijing, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract Remote sensing is the main approach to carry out non-invasive detection of plant chlorophyll information on the ground/near ground, airborne and spaceborne levels. At present, spectral index for multi-band calculation has been widely used in empirical/semi-empirical estimation of canopy chlorophyll content. Taking the difference of leaf inclination angle distribution (LAD) between different crops and different varieties of homogeneous crop into consideration, this study analyzed the influence of LAD on retrieving chlorophyll content, and selected chlorophyll-related spectral indices that are insensitive to the variation of LAD and researched canopy chlorophyll retrieval model. PROSAIL radiative transfer model was used for simulating the canopy reflectance corresponding to different leaf chlorophyll content (LCC), leaf area index (LAI) and LAD. The simulation results showed that under the same LAI and LCC conditions, the canopy reflectance corresponding to different LAD was significantly different, and the canopy reflectance decreased with the increase of the average LAD. By calculating the correlation coefficient of 12 common chlorophyll-related spectral indices with CCC, the sensitivity of spectral indices in retrieval of chlorophyll content under different LAD was evaluated, consequently, four spectral indices that are insensitive to variation of LAD were selected: MT-CI, MNDVII, $CI_{red-edge}$ and MNDVI8. 80 measured corn samples were utilized to model and validate the estimation models of CCC. Model establishment and verification results showed MNDVI8 was the most insensitive to variation of LAD, thus it was the best spectral index for estimating chlorophyll content with the coefficient of determination (R^2) of 0.70 and the root mean square error (RMSE) of $22.47 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$. The precision of $CI_{red-edge}$ ($R^2=0.63$, $RMSE=24.06 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), MNDVI ($R^2=0.66$, $RMSE=24.07 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) and MTCI ($R^2=0.65$, $RMSE=26.76 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) retrieval model was relatively close but was weaker than that of MNDVI8. Through analyzing the retrieval results, it was concluded that different spectral indices had different sensitivities to variation of LAD. The preferred spectral indices generally had the best correlation and highest sensitivity to chlorophyll content, among which MNDVI8 was least affected by LAD and can be used to retrieve CCC in corn under different LAD types. Although retrieval capabilities of MTCI, $CI_{red-edge}$ and MNDVII were slightly weaker than MNDVI8, they were less

affected by variation of LAD and also had good retrieval capabilities. This paper researched the influence of LAD on retrieving chlorophyll content based on spectral indices, and the results from measured corn data were in accordance with those from simulated data. Based on the sensitivity analysis and validation results of canopy chlorophyll content retrieval models under different LAD types, this paper has a certain reference significance for remote sensing application of estimation of chlorophyll content in crop without prior knowledge of LAD in large scale.

Keywords Retrieval of chlorophyll content; Spectral indices; Leaf inclination angle distribution; Leaf area index

(Received May 30, 2018; accepted Oct. 9, 2018)

* Corresponding author

敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社