

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2022)06-0495-13
DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.06.003

栽培生理

基于查找表法和优化光谱指数的马铃薯叶绿素反演

刘楠¹, 杨海波¹, 高飞¹, 孙智¹, 贾禹泽², 孙涛³, 李斐^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院/内蒙古土壤质量与养分资源重点实验室/

农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 包头市园林绿化事业发展中心, 内蒙古 包头 014010; 3. 扎兰屯职业学院, 内蒙古 呼伦贝尔 017010)

摘要: 叶绿素是光合作用中最重要的指示色素, 使植物能够通过将光能转化为化学能来为生物圈提供动力。由于叶绿素含量与植物的胁迫和衰老直接相关, 叶片叶绿素含量的实时监测对于实时掌握作物的生长状况具有重要意义, 可以有效促进精准农业的发展。研究通过PROSAIL模型模拟建立查找表并优化不同类型的光谱指数, 在大田试验的基础上校验基于查找表和优化光谱指数对马铃薯叶绿素含量的估测能力, 探究马铃薯叶绿素含量高光谱遥感测定方法。2017~2018年在内蒙古自治区马铃薯主产区进行不同氮梯度马铃薯田间试验, 在马铃薯关键生育时期进行冠层光谱参数和SPAD值的采集, 利用PROSAIL模型建立数据库, 在此基础上, 建立查找表对马铃薯关键生育时期的叶绿素含量进行估测, 同时对6类光谱指数进行波段优化, 寻找与马铃薯叶绿素含量相关性最佳的优化光谱指数, 建立马铃薯叶绿素含量的估测模型。查找表法预测的叶绿素含量与马铃薯实测叶绿素含量没有线性关系, 无法进行马铃薯叶绿素含量的估测。利用PROSAIL模型模拟的光谱数据库对6类光谱指数进行波段优化, 叶绿素含量的敏感区域主要集中在绿光、红光和红边, 波段优化算法确定的最佳光谱指数PSRI和EPI的中心波段分别位于594、572 nm和702、676 nm。田间的验证结果表明, 生育时期对优化光谱指数PSRI和EPI估测精度具有显著影响。在苗期优化光谱指数与马铃薯叶绿素含量相关性较差, 块茎形成期后优化光谱指数EPI和PSRI与叶绿素含量的相关性较好, 优化光谱指数PSRI和EPI与马铃薯全生育时期叶绿素含量的决定系数(R^2)分别为0.61、0.52。应用2种光谱指数对马铃薯冠层覆盖后叶绿素含量具有较好的估测能力, 为光谱指数估测马铃薯叶绿素含量的普适性提供了理论支持。

关键词: PROSAIL; 查找表法; 光谱指数; 马铃薯; 叶绿素含量

Potato Chlorophyll Inversion Based on LUT and Optimized Spectral Index

LIU Nan¹, YANG Haibo¹, GAO Fei¹, SUN Zhi¹, JIA Yuze², SUN Tao³, LI Fei^{1*}

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University/Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources/Key Laboratory of Agro-Ecological Security and Green Development of Autonomous Region Higher Education, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Baotou City Landscaping Business Development Center, Baotou, Inner Mongolia 014010, China; 3. Zhalantun Vocational College, Hulunbair, Inner Mongolia 017010, China)

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(32160757); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0038)。

作者简介: 刘楠(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为农业遥感。

*通信作者(Corresponding author): 李斐, 博士, 教授, 研究方向为农田生态系统高生产力与环境保护并重的养分资源综合管理和精准农业, E-mail: lifei@imau.edu.cn。

Abstract: Chlorophyll is the most important indicator pigment in photosynthesis, enabling plants to power the biosphere by converting light energy into chemical energy. Since chlorophyll content is directly related to plant stress and senescence, the real-time monitoring of chlorophyll content in leaves is of great significance to grasp the growth status of crops in real time and can effectively promote the development of precision agriculture. In this study, a look-up table (LUT) was established through PROSAIL model simulation and different types of spectral index were optimized. On the basis of field experiments, the estimation ability of potato chlorophyll content based on look-up table and optimized spectral index was verified, and a hyperspectral remote sensing determination method of potato chlorophyll content was explored. Potato field experiments with different nitrogen gradients were conducted in the main potato producing area of Inner Mongolia Autonomous Region from 2017 to 2018. Canopy spectral parameters and SPAD values were collected during the critical growth stage of potato. A look-up table was established with the database using PROSAIL model to estimate the chlorophyll content in the critical growth stage of potato. At the same time, the band optimization of six kinds of spectral indexes was carried out to find the optimal spectral index that has the best correlation with potato chlorophyll content, and the estimation model of potato chlorophyll content was established. There was no linear relationship between the chlorophyll content predicted by look-up table method and the measured chlorophyll content in potato, so it is impossible to estimate potato chlorophyll content. The spectral database simulated by PROSAIL model was used to optimize the band of six spectral indexes. The sensitive regions of chlorophyll content were mainly concentrated in green light, red light and red edge. The central bands of the optimal spectral indexes PSRI and EPI determined by the band optimization algorithm were located at 594 and 572 nm, and 702 and 676 nm, respectively. Field validation results showed that growth stage had significant influence on the estimation accuracy of optimized spectral index PSRI and EPI. The correlation between optimal spectral index and potato chlorophyll content was poor at seedling, but the correlation between optimal spectral index EPI and PSRI and chlorophyll content was good after tuber formation, and the coefficient of determination (R^2) of optimal spectral index PSRI and EPI and chlorophyll content in potato full growth period was 0.61 and 0.52, respectively. The two spectral indexes have good ability of estimating potato chlorophyll content after canopy covering, which provides theoretical support for the universality of spectral index estimation of potato chlorophyll content.

Key Words: PROSAIL; look-up table (LUT); spectral index; potato; chlorophyll content

马铃薯是中国继小麦、玉米和水稻之后的第四大粮食作物, 无论在过去解决温饱问题还是在未来保证粮食安全方面都起到了重要的作用^[1]。马铃薯叶绿素的实时监测对于马铃薯的种植监管至关重要。叶绿素是农作物生长的重要指示因子, 是植物器官的重要组成色素^[2], 与作物胁迫、衰老和含氮量有直接关系, 因此精准、高效、便捷的叶绿素含量测定方法, 对农田管理具有重要意义^[3]。然而传统测定叶绿素含量的方法费时费力, 破坏性强, 无法测定同一叶片叶绿素含量随时间的变化情况^[4,5]。为了增强叶绿素含量无损测定的实时性, 前人开始使用叶绿素仪进行叶绿素相对含量的快速测定, 利用CCM-200手持叶绿素仪对作物叶绿素值进行测

定, 与叶绿素含量(mg/cm^2)之间的相关性达到了显著水平^[6,7]。研究表明, 叶绿素仪读数会随着叶绿素浓度的变化引起误差, 叶绿素浓度不均匀分布会导致校准函数的偏差^[8]。并且叶绿素仪测定值为叶绿素相对含量而不是绝对含量, 在使用叶绿素仪测定时会受叶片大小的影响, 叶片较小时, 易取到叶脉部位, 影响测定结果^[9]。

随着高光谱技术不断发展, 其无损、测定面积大的优点为估测作物叶绿素含量提供了强有力的工具^[10], 目前基于光谱信息的作物叶绿素含量的估算已经成为研究热点, 高光谱指数反演法因计算方式简单并且具有一定的机理性而被广泛应用^[11]。前人的研究表明, 基于叶片尺度的高光谱指数与叶绿素

含量具有良好的相关性,但是运用在冠层尺度上,由于植被结构和土壤背景对光谱反射率的影响,导致高光谱指数的估测能力降低^[12]。随着生育时期的推进,作物冠层结构不断变化,作物的叶绿素含量差异也逐渐增大,高光谱反射率特性也随之变化^[13],这样很可能造成高光谱指数的敏感波段组合形式的变化,从而最终影响到高光谱指数对叶绿素含量的估测能力^[14]。目前,用于减少背景效应并且增强光谱特征最广泛的方法是将有限数量的高光谱波段进行优化组合,寻找敏感波段,从而构建最佳高光谱指数^[15]。此外,高光谱指数的方程形式也会影响叶绿素含量的估测。目前,高光谱指数方程形式种类繁多,对农作物叶绿素含量估测能力不尽一致^[16]。因此,基于冠层光谱反射率的高光谱指数估测叶绿素含量不仅受到方程形式的影响,还受到波段组合的影响,使得很难找到具有普适性的高光谱指数,所以很有必要对指定的高光谱指数算法方程形式的敏感波段进行优化,提高高光谱指数的估测能力。

Jacquemoud等^[17]将PROSPECT模型和SAIL模型进行耦合得到PROSAIL模型,可以很好的模拟出高光谱反射率。PROSAIL模型是一个很好的工具,能够综合考虑土壤光学特性和植被的几何结构特征,根据输入参数值的不同组合能够模拟大量高光谱数据,建立查找表,依照实测数据,可以对农作物生化参数进行估测^[18]。查找表法是一种有效的反演算法,在反演之前模型完成了许多模拟过程,通过查找表利用一阶导数插值法对森林叶面积指数进行反演,并且证明了方法的准确性(RMSE = 1.3)^[19]。研究表明,通过PROSAIL模型可以对作物的高光谱反射率进行准确反演,利用查找表法结合实测数据对春小麦进行叶绿素含量估测,虽然相关性较好,但是估测值大于实测值^[20]。经过对模型参数的敏感性分析后,再对实测光谱和模拟光谱进行误差分析,建立查找表,进行玉米叶绿素含量估测,对模型进行评价,估测值接近实测值^[21]。尽管在物理机理方面较为可靠,但是,针对一些难以获取的参数例如太阳天顶角等,在模型建立时对其进行假设,随着外界

的变化,模型也需要进行改进;并且由于农作物不同,具体的参数设置也大不相同,这会限制模型设置的普适性。在反演中,查找表包含的高光谱信息越多才能保证方法在反演过程中的准确性,输入模型参数需要固定范围值且反演的光谱数多尽量覆盖输入参数的所有组合,这导致实测光谱与数据库进行匹配时计算速度变慢。此外,模型参数设置采用步长取值,那么随机取值匹配参数设置的模型能否提高估测水平还有待研究。除了查找表法,PROSAIL模型的另一个用处是可以对光谱指数进行优化,利用PROSAIL模拟数据对高光谱指数进行优化使光谱指数克服了本身的缺点^[22]。高光谱指数建立模型准确估测叶绿素含量的前提是对叶绿素含量敏感波段的优化,因此针对不同光谱指数算法方程形式的波段优化是非常有必要的。

马铃薯植被的冠层结构为地上部茎呈菱形,初生叶为单叶,全缘。随植株的生长,逐渐形成奇数不相等的羽状复叶。并且马铃薯的盛花期较长,冠层分布大量的花朵,导致提取植被信息受到影响。所以,本研究的目的在于探究查找表法对马铃薯叶绿素含量的估测能力,评价PROSAIL模型对光谱指数优化后的普适性。最终得到适用于马铃薯叶绿素含量的估测模型,为马铃薯叶绿素含量诊断提供一种可行的测试手段。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2017~2018年共设置了2个田间试验。试验地点在内蒙古自治区阴山北麓武川县,气候类型属于温带大陆性季风气候,年平均气温为-14.8℃,一年中7月气温最高,月平均气温为18.8℃。无霜期约124 d,年均降水量为354.1 mm左右^[23]。试验地土壤类型为栗钙土,试验地土壤基础理化性质见表1。田间试验设置了不同的氮梯度处理,每个处理4次重复,管理为农户管理。具体试验设计描述如下。

2017年试验在武川县进行,供试品种为‘夏坡蒂’,小区面积为72 m²,播种日期为2017年5月20

日, 收获日期为9月23日。试验设4个氮肥水平, 分别为N 0, 165, 190和350 kg/hm², 期间进行4次追肥。各处理配施 P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 180 kg/hm²。2018年试验在武川县进行, 供试品种为‘费乌瑞它’, 小区面积为114 m², 播种日期为2018年6月14日,

收获日期为9月15日, 设5个氮肥水平, 分别为N 0, 90, 180, 270和320 kg/hm², 期间进行4次追肥。各处理配施 P₂O₅ 80 kg/hm²、K₂O 157 kg/hm²。各小区随机排列。灌溉方式为滴灌, 田间管理措施与当地农民习惯一致。

表1 试验区土壤基础理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

年份 Year	地点 Site	有机质(g/kg) Organic matter	有效磷(mg/kg) Available P	速效钾(mg/kg) Available K	全氮(g/kg) Total N	硝态氮(mg/kg) Nitrate N
2017	武川	11.30	8.60	128.60	1.17	32.70
2018	武川	16.73	22.42	156.96	1.26	44.95

1.2 高光谱数据的采集

马铃薯冠层高光谱数据的测定需要选择在晴朗, 无风的天气状况下进行, 测定的时间段为10:00~14:00。每个小区扫描3次, 在不同氮肥梯度小区随机选取长势均匀的马铃薯两垄, 最终测定结果取3次扫描的平均值。高光谱仪(tec5, Oberursel)的波段范围为300~1 150 nm, 高光谱仪的探头在测定时距马铃薯冠层高度为50~80 cm。400 nm以下的波段噪声较大, 导致高光谱的不连续, 为了去除噪声的影响, 将采用的波段为400~1 150 nm。对2017年的马铃薯高光谱数据进行了3次采样分别为苗期、块茎形成期、淀粉积累期, 对2018年的马铃薯数据进行了2次采样分别为苗期、淀粉积累期。

1.3 叶绿素的测定

叶绿素含量的测定采用SPAD-502型手持式叶绿素仪, 在获取高光谱的当天同步测定马铃薯的SPAD值, 每处理选取代表其生长势的马铃薯植株20株, 每株取功能叶片(倒4叶)进行测量, 取平均值作为该样本的SPAD值。Vos和Bom^[24]通过SPAD值与叶绿素含量的线性关系, 将SPAD值转换为叶绿素含量进行估测。

具体计算公式为:

$$y = 2.26x - 0.92 \quad (1)$$

式中: y 是SPAD值, x 是叶绿素含量, 相关系数 $r = 0.97$, 单位mg/g。

本研究为了使用查找表法进行估测, 查找表法

中参数为叶绿素含量而不是SPAD值, 所以参考上述公式, 通过线性关系将测定的SPAD值进行基于重量的单位转化为叶绿素含量(mg/g)。

1.4 PROSAIL模拟及查找表建立

基于PROSAIL模型进行高光谱数据库的模拟工作, 模型中的参数取值以LOPEX'93以及前人设置模型参数^[25]为参考, 综合马铃薯有关参数实测值的范围和国内外应用物理模型模拟冠层高光谱设定关键参数时的取值, 模型输入参数具体取值见表2, PROSAIL模型编写软件为R_{3.6.3}。随后, 通过覆盖输入参数的所有可能组合, 模拟了10 000条高光谱数据, 波段范围为400~2 500 nm。本试验将采取模拟反射率数据从400到1 150 nm, 构建叶绿素含量冠层反射率查找表。为了单位统一, 根据模拟数据中有叶绿素含量(单位: $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)和干物质量(单位: g/cm^2), 可以把PROSAIL模型模拟的叶绿素含量单位换算成mg/g。

1.5 高光谱指数的选择及优化

为了使高光谱指数消除冠层散射问题, 有些研究使用反射率差比(RRD)等式来消除散射因子, 其具有独立校准数据集的优势, 并且在估测叶绿素含量的过程中具有较好的估测能力^[26]。公式为:

$$RRD = \frac{R_j - R_k}{R_i - R_h} \quad (2)$$

式中: h 、 i 、 j 和 k 代表全高光谱范围内的随机波长, 三波段高光谱指数是特殊RRD型高光谱指数^[27], 本试验中 h 、 k 相等。

表2 模型输入参数
Table 2 Model input parameter

模型输入参数 Model input parameter	单位 Unit	描述 Description	取值范围 Value range
N	-	叶片结构参数	1~2
Cab	μg/cm ²	叶绿素 a + b 的浓度	10~70
Car	μg/cm ²	类胡萝卜素的浓度	-
Cw	cm	等效水厚度	0.005~0.04
Cbrown	-	褐色素	-
Cm	g/cm ²	干物质含量	0.004~0.01
LAI	-	叶面积指数	0.001~6
psoil	-	干/湿土壤因素	-
hspot	-	热点参数	-
tts	-	太阳天顶角	-
tto	-	观测者天顶角	-
psi	-	相对方位角	-

本试验中, 假设RRD型的高光谱指数与马铃薯叶绿素含量具有较好的相关性, 并且受冠层结构的影响较小, 使用波段优化算法来确定RRD型高光谱指数的最佳波段组合, 确定RRD型高光谱指数优化过程中的固定波段^[27]。

为了探究查找表法和高光谱指数反演方法对马

铃薯叶绿素含量的估测能力, 本试验从已发表的多种可用于叶绿素测定的高光谱指数中选取了具有代表性的6类高光谱指数(表3), 并且利用PROSAIL模型模拟的数据库对已发表的高光谱指数通过波段优化算法进行了中心波段的选择, 目的是寻找马铃薯叶绿素含量的估测最佳中心波段。

表3 试验研究指数
Table 3 Indices studied in the experiment

高光谱指数 Hyperspectral index	通用公式 Formula	算法 Formula	参考文献 Reference
比值植被指数 Ratio vegetation index (RVI)	R_i/R_c	R_{790}/R_{670}	Jordan ^[28]
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	$(R_i - R_c)/(R_i + R_c)$	$(R_{800} - R_{680})/(R_{800} + R_{680})$	Blackburn ^[29]
蓝氮指数 Blue nitrogen index (BNI)	$R_i/(R_i + R_c)$	$R_{434}/(R_{496} + R_{401})$	Tian 等 ^[30]
植物衰老反射率指数 Plant senescence reflectance index (PSRI)	$(R_i - R_c)/R_c$	$(R_{680} - R_{550})/R_{720}$	Merzlyak 等 ^[31]
桉树色素指数 Eucalyptus pigment index (EPI)	$(R_i - R_c)/(R_i - R_c)$	$(R_{850} - R_{710})/(R_{850} - R_{680})$	Datt ^[15]
MERIS陆地叶绿素指数 MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI)	$(R_i - R_c)/(R_i - R_c)$	$(R_{750} - R_{710})/(R_{710} - R_{680})$	Dash 和 Curran ^[32]

注: $h = k$ 为特殊的RRD计算形式的高光谱指数, $(R_i - R_c)/(R_i - R_c)$ 与 $(R_i - R_c)/(R_i - R_c)$ 计算形式一致。

Note: $h = k$ is the hyperspectral index of the special RRD calculation form; $(R_i - R_c)/(R_i - R_c)$ is the same as $(R_i - R_c)/(R_i - R_c)$ calculation form.

1.6 模型的评价

本试验综合已有的查找表法和高光谱指数算法, 通过Excel 2019、Matlab 2018软件实现。在田间试验的基础上, 筛选对叶绿素含量敏感的高光谱指数。查找表法与高光谱指数建模均使用采集于马

铃薯苗期、块茎形成期和淀粉积累期的高光谱数据, 其中75%试验田马铃薯数据用于建立模型, 其余25%的数据用于模型的验证。利用决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)综合评价模型, 并绘制验证集的1:1关系图。

计算公式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (0 \leq R^2 \leq 1) \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / n} \quad (4)$$

$$RE = \left| \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{y_i} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中: n 为样本个数, y_i 为实测值, \hat{y}_i 为预测值, \bar{y} 为平均值。

2 结果与分析

2.1 基于查找表法的马铃薯叶绿素反演

通过查找表法(Look-up table, LUT)对马铃薯叶绿素含量进行估测(图1), 可以看出模型的估测值与马铃薯叶绿素含量的实测值无明显线性关系。对各生育时期的估测中, 估测值低于实测值, 而且年份对模型的估测能力具有一定的影响, 2018年的估测值高于2017年的估测值。整体来看, 本试验没有体现出查找表法对马铃薯叶绿素含量的有效估测。

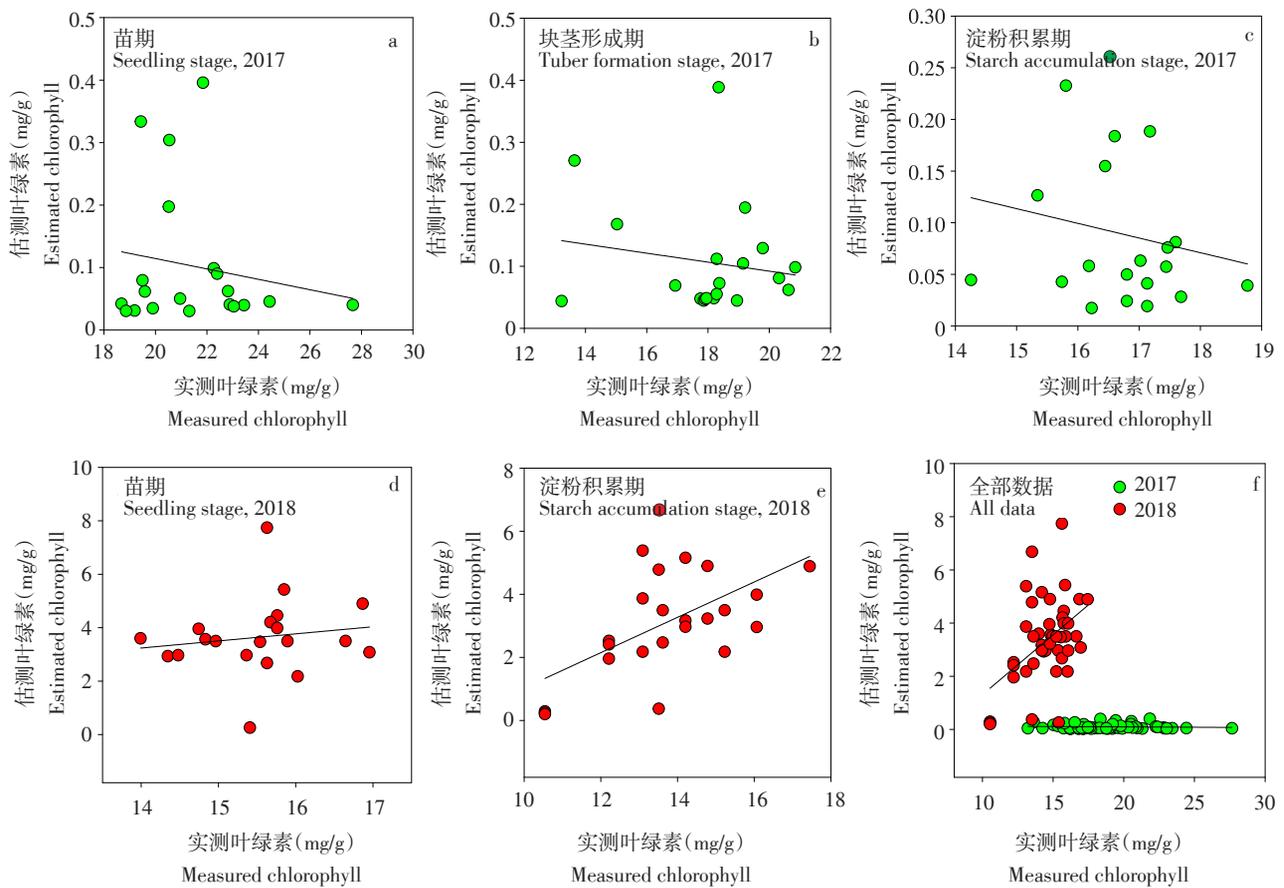


图1 查找表法估测叶绿素值和实测叶绿素值散点图

Figure 1 Scatter diagram of chlorophyll value estimated by look-up table (LUT) and measured chlorophyll value

2.2 基于PROSAIL模型的高光谱指数优化

高光谱指数对马铃薯叶绿素含量进行估测的过程中, 生育前期由于植株较小, 叶片无法有效覆盖扫描区域, 在数据采集过程中容易受到土壤

背景的影响; 生育后期由于叶绿素含量过高时, 受计算逻辑的影响, 高光谱指数会出现数据饱和和现象。为了解决这些问题, 提高高光谱指数在马铃薯叶绿素含量上的估测能力, 本试验以选择的

6类指数算法为依据(表3), 利用PROSAIL模型模拟的数据库, 通过不同高光谱指数与叶绿素含量的相关矩阵图进行寻优, 确定不同类型的优化高光谱指数(图2)。表4列出了与叶绿素含量相关性最好的波段组合形式及最优方程形式, 可以看出, 6类高光谱指数与叶绿素含量的线性决定系数均在0.55以上, 整体相关性较好, 其中与叶绿素含量相关性最好的是Opt-BNI, 决定系数(R^2)为0.65, 波

段组合为1146和730 nm。优化后高光谱指数的敏感区域主要集中在550~610 nm和700~1150 nm。RRD形式的优化高光谱指数敏感波段主要集中在550~600 nm和700~750 nm。表4的结果还表明优化后的高光谱指数与叶绿素含量的决定系数(R^2)因波段的组成形式和拟合函数方程形式的不同而存在差异, 但是都达到了极显著相关水平, 说明通过优化算法得到的高光谱指数具备叶绿素含量的估测能力。

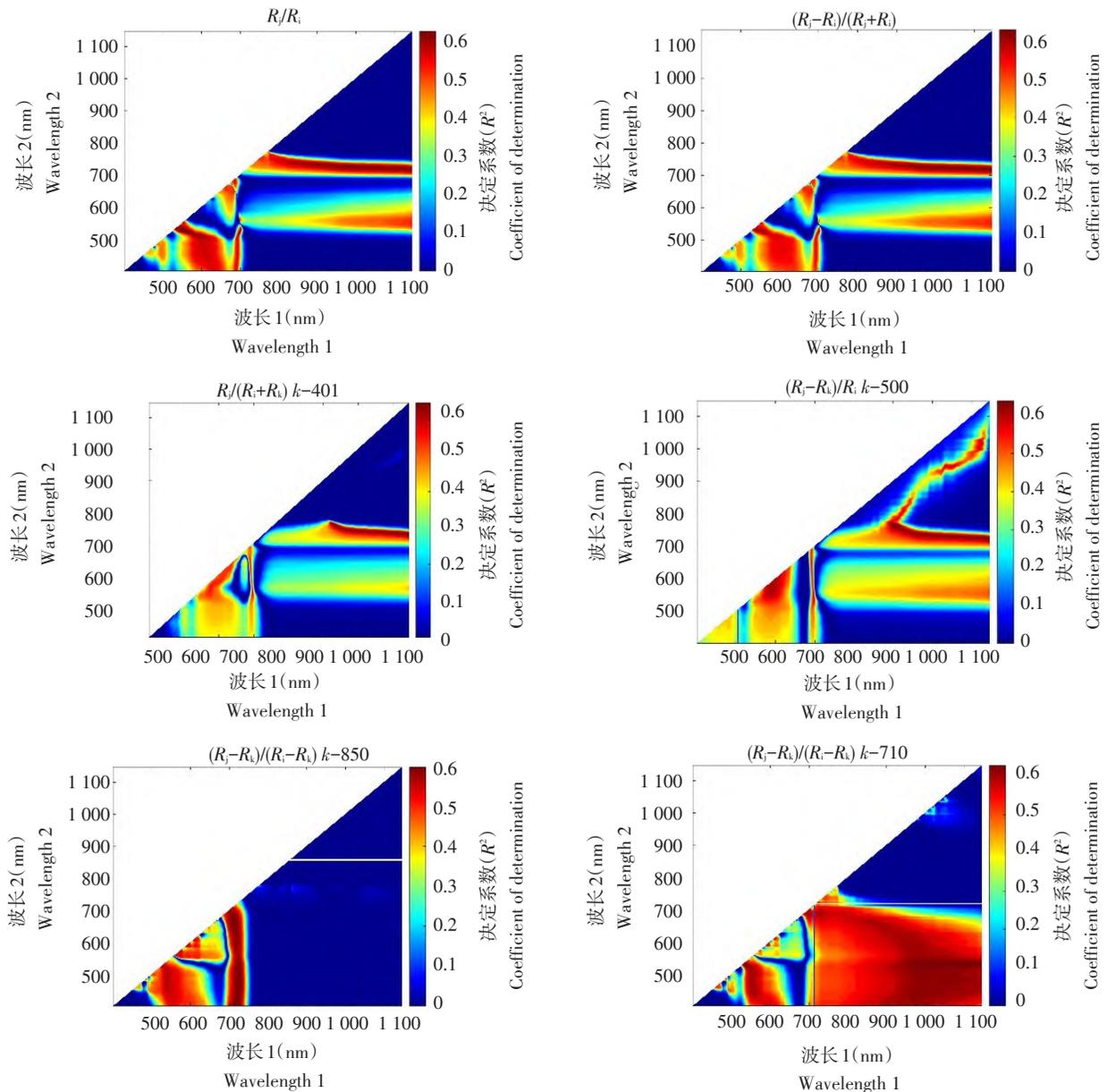


图2 马铃薯叶绿素含量与不同波段高光谱指数之间线性拟合决定系数(R^2)的等值线图

Figure 2 Contour diagrams of coefficient of determination (R^2) between potato chlorophyll content and hyperspectral index

表4 高光谱指数与马铃薯叶绿素含量的方程式和决定系数

Table 4 Equation and coefficient of determination between hyperspectral index and potato chlorophyll content

指数 Index	算法 Formula	线性 Linear function		指数 Exponential function		对数 Logarithmic function		多项式 Polynomial function		幂函数 Power function	
		方程式 Equation	R^2	方程式 Equation	R^2	方程式 Equation	R^2	方程式 Equation	R^2	方程式 Equation	R^2
		Opt-RVI	R_{558}/R_{524}	$y = -0.0653x + 1.7195$	0.61**	$y = 1.7223e^{-0.048x}$	0.61**	$y = -0.466\ln(x) + 2.0939$	0.72**	$y = 0.0081x^2 - 0.1987x + 2.1416$	0.73**
Opt-NDVI	$(R_{534}-R_{546})/(R_{534}+R_{546})$	$y = 0.0111x - 0.0957$	0.60**	-	-	$y = 0.0773\ln(x) - 0.1558$	0.76**	$y = -0.0012x^2 + 0.0315x - 0.1601$	0.77**	-	-
Opt-BNI	$R_{1146}/(R_{730}+R_{401})$	$y = 0.0423x + 1.1351$	0.65**	$y = 1.1507e^{0.0299x}$	0.62**	$y = 0.269\ln(x) + 0.9508$	0.69**	$y = -0.0025x^2 + 0.0838x + 1.004$	0.70**	$y = 1.004x^{0.1934}$	0.70**
Opt-PSRI	$(R_{594}-R_{500})/R_{572}$	$y = -0.0346x + 0.5269$	0.60**	-	-	$y = -0.232\ln(x) + 0.6987$	0.70**	$y = 0.0032x^2 - 0.0875x + 0.694$	0.71**	-	-
Opt-EPI	$(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{576})$	$y = 0.0197x + 0.7102$	0.58**	$y = 0.71e^{0.0244x}$	0.54**	$y = 0.1384\ln(x) + 0.6014$	0.75**	$y = -0.0023x^2 + 0.057x + 0.5924$	0.75**	$y = 0.6176x^{0.174}$	0.73**
Opt-MTCL	$(R_{536}-R_{710})/(R_{710}-R_{526})$	$y = -0.0092x - 0.8515$	0.63**	-	-	$y = -0.062\ln(x) - 0.8063$	0.73**	$y = 0.0008x^2 - 0.0229x - 0.8083$	0.74**	-	-

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。下同。
Note: * means $P < 0.05$, and ** means $P < 0.01$. The same below.

2.3 基于大田数据的验证及评价

为了进一步验证构建优化高光谱指数的稳定性和鲁棒性, 利用大田实测数据与优化后的指数进行不同生育时期相关性分析(表5)。在马铃薯苗期6类优化高光谱指数与实测数据的相关性较差。在2017年马铃薯块茎形成期的高光谱指数Opt-EPI与马铃薯叶绿素含量的相关性最好, 决定系数(R^2)为0.58, 在淀粉积累期, 高光谱指数Opt-PSRI与马铃薯叶绿素含量的相关性最好, 决定系数(R^2)为0.42; 在2018年, 马铃薯淀粉积累期高光谱指数Opt-PSRI与马铃薯叶绿素含量的相关性最好, 决定系数(R^2)为0.53。

研究结果表明(表5), 生育时期和种植年份会影响高光谱指数对马铃薯叶绿素含量的估测能力。从整体分析来看, 高光谱指数Opt-PSRI和Opt-EPI与马铃薯叶绿素含量的相关性较高, 决定系数(R^2)为0.61、0.52, 体现在马铃薯块茎形成期和淀粉积累期的叶绿素含量与优化高光谱指数的相关性随着冠层的逐渐稳定显著提高, 说明优化后的高光谱指数具备马铃薯叶绿素含量的估测潜力。

为了进一步评价两个优化高光谱指数的估测能

力, 本试验运用总样本的75%进行建模分析(图3a、3b), 其中高光谱指数Opt-PSRI的建模水平高于Opt-EPI的建模水平。模型验证是检查模型适用性的过程, 本试验在总样本中随机选取25%的实测数据进行模型验证。通过实测值和估测值的线性关系的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)来检验模型的估测能力和精度。验证结果如图3c、3d所示, 基于高光谱指数Opt-PSRI和Opt-EPI模型的马铃薯叶绿素含量的估测值与实测值线性拟合决定系数(R^2)分别为0.72、0.63, 且RMSE和RE明显较低, 其中验证效果最好的是高光谱指数Opt-PSRI, 估测值与实测值更接近1:1线, 数据的离散程度更小, 模型的RMSE和RE较低, 分别为2.22 mg/g、2.00%。

为了检验优化高光谱指数是否受生育时期的影响, 分生育时期进行分析(图4), 结果表明, 在苗期, 优化高光谱指数与叶绿素含量的相关性较低(决定系数相比较于其他生育时期略低, 图4a、4e); 在块茎形成期的时候高光谱指数Opt-EPI与马铃薯叶绿素含量的相关性升高; 在淀粉积累期的时候, 两个优化高光谱指数与马铃薯叶绿素含量的相关性

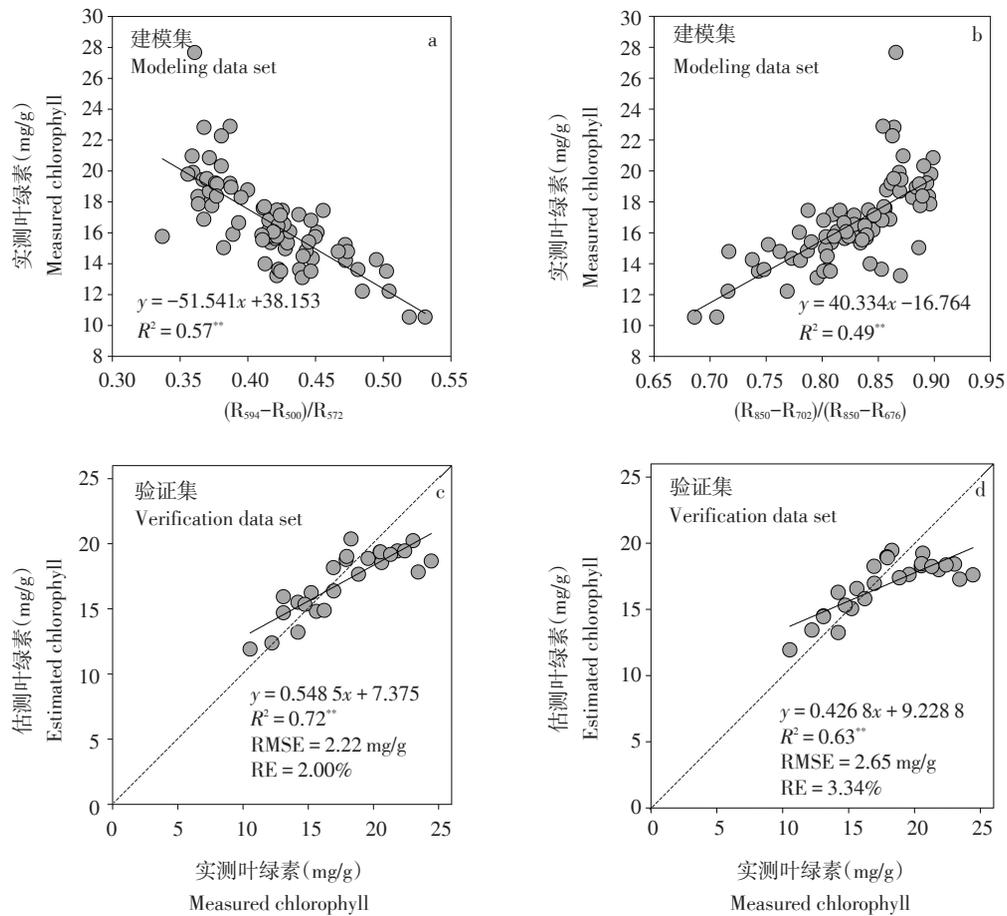
最好。从整体数据来看, 高光谱指数的估测能力并不高, 受苗期的影响较大。对块茎形成期和淀粉积

累期组合生育时期进行计算(图5), 高光谱指数模型估测能力显著提高, 决定系数(R^2)均为0.69。

表5 优化高光谱指数与实测马铃薯叶绿素含量的决定系数

Table 5 Coefficient of determination between optimized hyperspectral index and potato chlorophyll content

指数 Index	算法 Formula	2017			2018		全部数据 All data
		苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	淀粉积累期 Starch accumulation	苗期 Seedling	淀粉积累期 Starch accumulation	
Opt-RVI	R_{538}/R_{524}	0.05	0.00	0.03	0.10	0.04	0.30**
Opt-NDVI	$(R_{534}-R_{546})/(R_{534}+R_{546})$	0.05	0.00	0.01	0.16	0.13	0.09*
Opt-BNI	$R_{1146}/(R_{730}+R_{401})$	0.15	0.53**	0.34**	0.03	0.09	0.45**
Opt-PSRI	$(R_{594}-R_{500})/R_{572}$	0.02	0.43**	0.42**	0.19	0.53**	0.61**
Opt-EPI	$(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$	0.01	0.58**	0.36**	0.21*	0.45**	0.52**
Opt-MTCI	$(R_{536}-R_{710})/(R_{710}-R_{526})$	0.01	0.49**	0.10	0.00	0.42**	0.04*

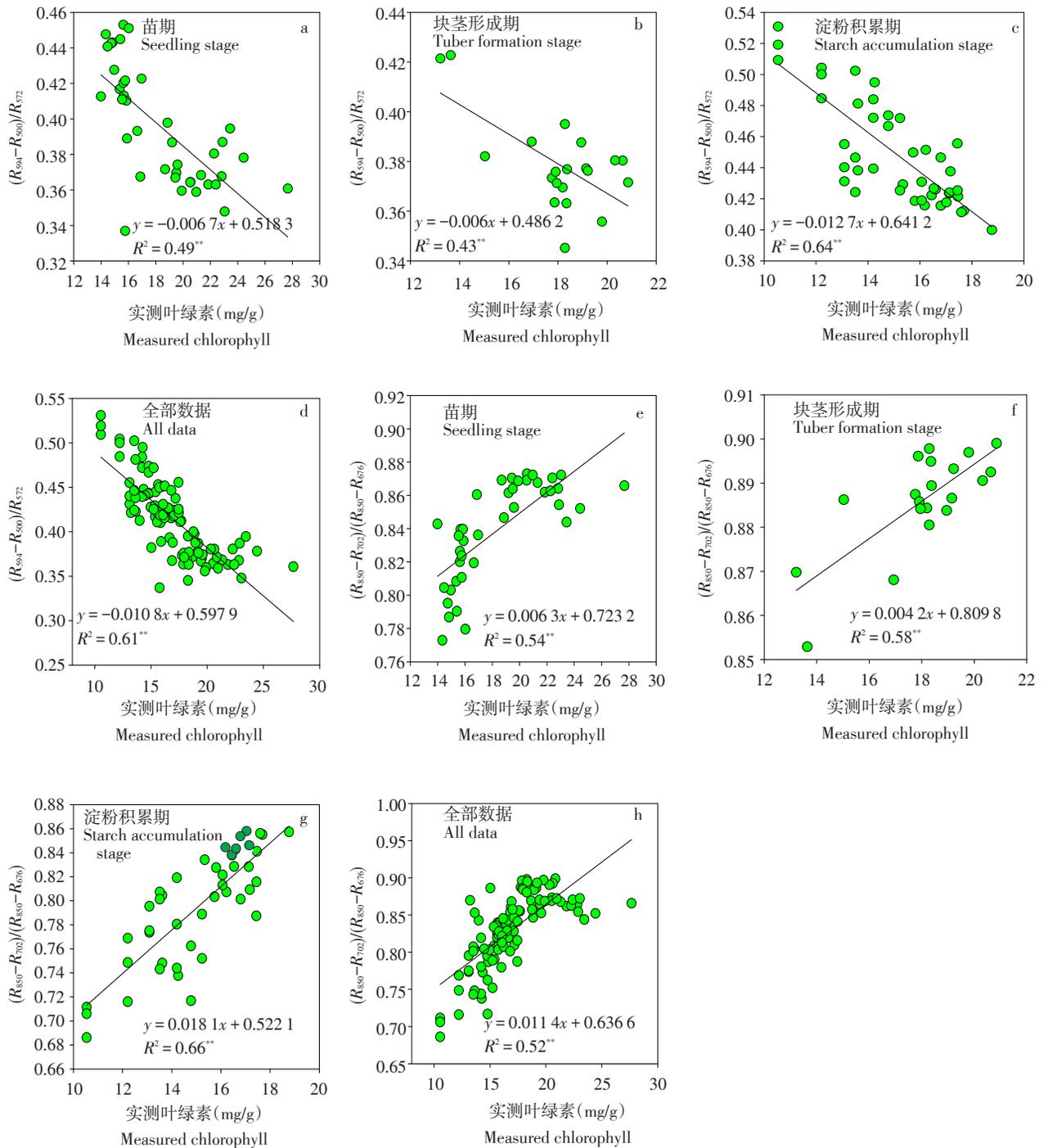


注: a, c. Opt-PSRI $(R_{594}-R_{500})/R_{572}$; b, d. Opt-EPI $(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$ 。 **表示 $P < 0.01$ 。下同。

Note: a, c. Opt-PSRI $(R_{594}-R_{500})/R_{572}$; b, d. Opt-EPI $(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$ 。 ** means $P < 0.01$. The same below.

图3 基于优化高光谱指数的马铃薯叶绿素含量建模与验证

Figure 3 Modeling and verification of potato chlorophyll content based on optimized hyperspectral index



注: a、b、c、d. Opt-PSRI $(R_{594}-R_{500})/R_{572}$; e、f、g、h. Opt-EPI $(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$ 。

Note: a, b, c, d. Opt-PSRI $(R_{594}-R_{500})/R_{572}$; e, f, g, h. Opt-EPI $(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$.

图4 基于优化高光谱指数与马铃薯叶绿素含量随生育时期的估测模型

Figure 4 Estimation model with growth stage based on optimized hyperspectral index and potato chlorophyll content

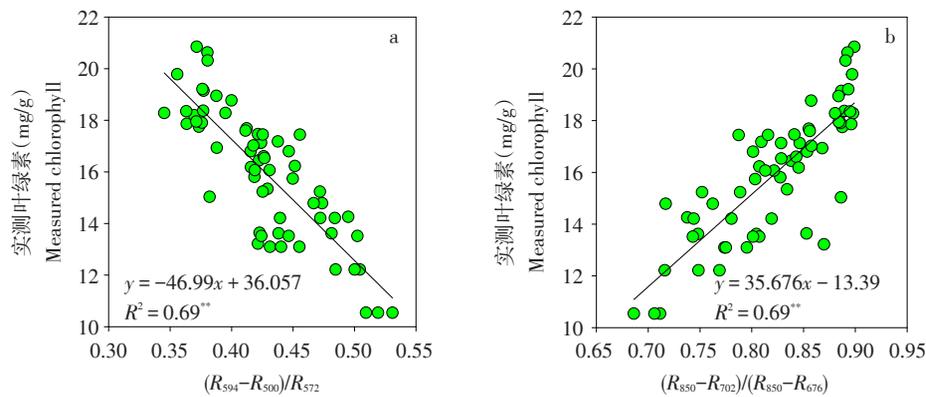


图5 基于优化高光谱指数 $\text{Opt-PSRI}(R_{594}-R_{500})/R_{572}$ 和 $\text{Opt-EPI}(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$ 与马铃薯块茎形成期和淀粉积累期叶绿素含量的估测模型

Figure 5 Estimation model of chlorophyll content at potato tuber formation and starch accumulation based on optimized hyperspectral index $\text{Opt-PSRI}(R_{594}-R_{500})/R_{572}$ and $\text{Opt-EPI}(R_{850}-R_{702})/(R_{850}-R_{676})$

3 讨论

实施无损获取作物的叶绿素含量是大田管理的前提, 而高光谱遥感技术的发展为快速估测叶绿素含量提供了重要途径, 植被冠层光谱受很多因素影响, 如植被结构、太阳高度角等, 这些因素都是不可人为控制的, 并且不存在函数关系。前人了解决这些问题, 研究出多种估测方法和光谱指数的构建。本试验使用 PROSAIL 模型模拟马铃薯光谱数据库, 利用查找表法对马铃薯叶绿素含量进行估测, 没有取得较好的估测效果。利用模拟数据库, 结合波段优化算法对 6 类光谱指数进行优化, 并反演马铃薯叶绿素含量, 结果发现光谱指数 Opt-PSRI 和 Opt-EPI 均可用于马铃薯叶绿素含量的估测, 光谱指数 Opt-PSRI 的估测能力优于其他光谱指数, 在估测马铃薯块茎形成期和淀粉积累期叶绿素含量具有一定的稳定性。

在波段优化算法下, 利用 PROSAIL 模型建立的数据库对传统光谱指数进行优化, 优化光谱指数 Opt-EPI 的敏感波段为 702 和 676 nm, 靠近红光和红边范围, 这与前人的研究一致^[33]; 基于 PROSAIL 模型的不同计算形式光谱指数的波段优化显著提高了光谱指数叶绿素含量的估测能力, 但是在运用到马铃薯中发现, 部分优化光谱指数

与马铃薯叶绿素含量的相关性较低, 无法进行估测模型的构建, 说明冠层水平的结构效应在波长上影响光谱反射率。不同计算形式的光谱指数与马铃薯叶绿素含量相关性研究发现, 相对于其他类型的光谱指数, RRD 类型的光谱指数计算形式优化后与叶绿素含量相关性较好, 这与前人的研究一致^[27], 说明了该类型光谱指数计算形式优化后在冠层水平估测生物化学参数上具有一定的优势。

马铃薯生育时期对优化光谱指数估测能力具有重要的影响。在冠层结构较小的时候光谱指数很难与生物量建立关系^[34], 从而光谱指数的估测能力较低, 所以在苗期线性关系较差, 由于冠层不稳定, 导致在扫描光谱的时候受到了土壤背景的影响, 并且马铃薯在苗期的时候一般不缺氮, 通过土壤和种子所提供的养分来维持幼苗的生长, 因此马铃薯苗期氮的实施诊断在农业生产中不是主要问题^[35]; 花后马铃薯植株冠层结构相对稳定, 受土壤等因素较小, 光谱指数与马铃薯叶绿素含量的相关性提高。并且可以说明优化算法在一定程度上克服了光谱指数在估测叶绿素含量时出现的饱和问题。马铃薯块茎形成期是关键生育时期, 所吸收的氮素占需求量的 80% 左右^[36], 追肥对产量有实质性的提高。在精准农业中运用遥感技术, 应考虑生育时期的影响, 在各生育时期冠层

结构的变化将原本在冠层光谱反射率中体现的叶绿素含量变化被掩盖^[27]。

对玉米各生育时期叶绿素含量的估测, 查找表法具有良好的实用性, 但均是基于单位面积内对叶绿素含量进行估测, 所以在研究过程中发现PROSAIL模型的叶面积指数作为参数极为重要^[37]。PROSAIL模型反演过程中会因为自身参数的不确定性、敏感性以及植被生理参数之间的相互作用带来误差影响^[38]。由于在本试验中, 没有对马铃薯叶面积指数进行测定, 并且叶绿素含量转换公式是基于重量进行转换, 在取样的过程中没有考虑重量的问题, 所以叶绿素的估测缺少限制条件, 导致估测不准确, 这也是理论模型的一个弊端。而且前人研究发现代价函数的选择也会影响查找表法的估测精度^[39], 所以利用物理模型估测马铃薯叶绿素含量时应应对参数设定、代价函数的选取等多方面进行深入研究, 在大田试验数据的获取中应增加测定项目对物理模型的马铃薯叶绿素含量估测加以限制条件, 进一步完善基于物理模型对马铃薯叶绿素含量的估测, 提高估测能力。

本试验通过PROSAIL模型模拟和光谱测量获得马铃薯冠层反射率数据, 利用查找表法对马铃薯叶绿素含量没有得到有效地估测。通过PROSAIL模型模拟数据库可对不同计算形式的光谱指数中心波段进行优化, 来实现估测马铃薯叶绿素含量, 光谱指数优化后的敏感波段主要集中在绿光、红光和红边。优化后高光谱指数对马铃薯块茎形成期和淀粉积累期组合的叶绿素含量进行估测, 光谱指数Opt-PSRI(594和572 nm)和Opt-EPI(702和676 nm)与马铃薯块茎形成期和淀粉积累期组合的叶绿素含量相关性最优, 估测模型的可靠性和准确性较好为高光谱指数估测马铃薯叶绿素含量的普适性提供了理论支持。

[参 考 文 献]

- [1] 聂向荣. 不同氮肥水平下马铃薯品质变化及氮素营养诊断的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [2] Singhal G, Bansod B, Mathew L, *et al.* Chlorophyll estimation using multi-spectral unmanned aerial system based on machine learning techniques [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, 15: 100235.
- [3] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, *et al.* Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(2): 229-239.
- [4] Cartelat A, Cerovic Z G, Goulas Y, *et al.* Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2005, 91(1): 35-49.
- [5] Steele M R, Gitelson A A, Rundquist D C. A comparison of two techniques for nondestructive measurement of chlorophyll content in grapevine leaves [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 779-782.
- [6] 王爱玉, 张春庆, 吴承来, 等. 玉米叶绿素含量快速测定方法研究 [J]. *玉米科学*, 2008(2): 97-100.
- [7] Almansoori T, Salman M, Aljazeri M. Rapid and nondestructive estimations of chlorophyll concentration in date palm (*Phoenix dactylifera* L.) leaflets using SPAD-502+ and CCM-200 portable chlorophyll meters [J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2021, 33(7): 544-554.
- [8] Dong T, Shang J, Chen J M, *et al.* Assessment of portable chlorophyll meters for measuring crop leaf chlorophyll concentration [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2706.
- [9] 苏云松, 郭华春, 陈伊里. 马铃薯叶片SPAD值与叶绿素含量及产量的相关性研究 [J]. *西南农业学报*, 2007(4): 690-693.
- [10] Ciganda V, Gitelson A, Schepers J. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content [J]. *Plant Physiology*, 2008, 166(2): 157-167.
- [11] Bannari A, Morin D, Bonn F, *et al.* A review of vegetation indices [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 13(1-2): 95-120.
- [12] Zarco-Tejada P J, Miller J R, Morales A, *et al.* Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90(4): 463-476.
- [13] 王凯龙, 熊黑钢, 张芳. 干旱区冬小麦不同生长阶段的光谱特征与叶绿素含量估测研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(11): 45-49.
- [14] 赵佳佳, 冯美臣, 王超, 等. 基于光谱植被指数的冬小麦叶绿素含量反演 [J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2014, 34(5): 391-396.

- [15] Datt B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using eucalyptus leaves [J]. *Plant Physiology*, 1999, 154(1): 30–36.
- [16] 潘蓓, 赵庚星, 朱西存, 等. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(8): 2203–2206.
- [17] Jacquemoud S, Baret F, Andrieu B, *et al.* Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. Application to TM and AVIRIS sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 52(3): 163–172.
- [18] 吕杰. 基于机器学习和辐射传输模型的农作物叶绿素含量高光谱反演模型 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [19] Gastellu J P, Gascon F, Estève P. An interpolation procedure for generalizing a look-up table inversion method [J]. *Remote Sensing Environment*, 2003, 87(1): 55–71.
- [20] 葛丽娟. 基于PROSAIL模型的半干旱区春小麦生理生态参数反演 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [21] 吴文强. 基于PROSAIL模型玉米叶面积指数和叶绿素反演 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [22] 吴朝阳, 牛铮. 基于辐射传输模型的高光谱植被指数与叶绿素浓度及叶面积指数的线性关系改进 [J]. *植物学通报*, 2008, 25(6): 714–721.
- [23] 乌英嘎, 孟凡浩, 周瑞平. 基于Landsat数据的中国西北干旱半干旱地区土壤风蚀时空分布——以武川县为例 [J]. *农业与技术*, 2021, 41(5): 76–82.
- [24] Vos J, Bom M. Hand-held chlorophyll meter: a promising tool to assess the nitrogen status of potato foliage [J]. *Potato Research*, 1993, 36(4): 301–308.
- [25] Duan S B, Li Z L, Wu H, *et al.* Inversion of the PROSAIL model to estimate leaf area index of maize, potato, and sunflower fields from unmanned aerial vehicle hyperspectral data [J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2013, 26: 12–20.
- [26] Datt B. Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in eucalyptus leaves [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(14): 2741–2759.
- [27] Yu K, Lenz-Wiedemann V, Chen X, *et al.* Estimating leaf chlorophyll of barley at different growth stages using spectral indices to reduce soil background and canopy structure effects [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 97: 58–77.
- [28] Jordan C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor [J]. *Ecology*, 1969, 50(4): 663–666.
- [29] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches [J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, 66 (3): 273–285.
- [30] Tian Y C, Yao X, Yang J, *et al.* Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance [J]. *Field Crops Research*, 2011, 120(2): 299–310.
- [31] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, *et al.* Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening [J]. *Plant Physiology*, 1999, 106(1): 135–141.
- [32] Dash J, Curran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5403–5413.
- [33] 尼加提·卡斯木, 师庆东, 王敬哲, 等. 基于高光谱特征和偏最小二乘法的春小麦叶绿素含量估算 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 208–216.
- [34] 杨海波, 张加康, 杨柳, 等. 品种和生育时期对冠层光谱指数 (NDVI) 估测马铃薯植株氮素浓度的影响 [J]. *作物学报*, 2020, 46(6): 950–959.
- [35] 于静, 陈杨, 樊明寿. 马铃薯氮素营养特性及氮肥管理 [J]. *中国马铃薯*, 2021, 35(2): 183–190.
- [36] 刘紫佳, 于静, 樊明寿, 等. 氮肥效率的评价及其在马铃薯上的研究进展 [J]. *中国马铃薯*, 2021, 35(5): 469–473.
- [37] 杨曦光, 范文义, 于颖. 基于PROSPECT+SAIL模型的森林冠层叶绿素含量反演 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(11): 3022–3026.
- [38] 唐普恩, 丁建丽, 葛翔宇, 等. 基于Sentinel-2A影像干旱区棉花叶片SPAD数字制图 [J]. *生态学报*, 2020, 40(22): 8326–8335.
- [39] 白丽. 基于高光谱数据的玉米LAI和叶绿素含量遥感反演方法的研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2020.