

基于无人机偏振遥感的水稻冠层氮素含量反演模型

许童羽^{1,2} 杨佳欣¹ 白驹驰¹ 金忠煜¹ 郭忠辉¹ 于丰华^{1,2}

(1. 沈阳农业大学信息与电气工程学院, 沈阳 110866; 2. 辽宁省农业信息化工程技术研究中心, 沈阳 110866)

摘要: 受水稻冠层几何结构的影响,传统的无人机高光谱获取到的反射光谱信息中包含与水稻内部组成物质无关的镜面反射信息,从而影响水稻氮素含量的反演精度,因此在利用无人机获取水稻冠层反射光谱信息时,有必要考虑通过偏振测量技术去除反射光谱中的镜面反射分量,进而实现提升水稻氮素含量反演精度的目的。基于无人机偏振遥感测量得到的水稻分蘖期多角度偏振光谱数据和与之对应的氮素含量数据,采用植被指数方法分析二者之间的相关性,得到了水稻冠层偏振光谱数据与其对应氮素含量相关性最高时对应的角度,选取该观测角度下的偏振光谱数据,利用连续投影法(Successive projections algorithm, SPA)提取特征波段,在此基础上,基于数学变换的方法,提出了构建植被指数的新思路,构建了由2个波段组成的偏振光谱植被指数(Polarisation spectrum vegetation index, PSVI),并利用线性回归方法建立水稻冠层氮素含量的反演模型。结果表明,通过对不同观测天顶角下水稻冠层偏振光谱数据与氮素含量相关性分析,得到最佳观测角度为 -15° (后向观测 15°);利用连续投影法提取得到该角度下偏振光谱信息中的6个特征波长为500、566、663、691、736、763 nm;运用数学变换思想构建了由波长500 nm和566 nm组成的偏振光谱植被指数(PSVI);将PSVI作为模型输入,利用线性回归方法建立水稻冠层氮素含量反演模型,模型训练集 R^2 为0.783 8, RMSE为0.428 mg/g;验证集RMSE为0.662 mg/g,反演结果优于差值植被指数(Difference vegetation index, DSI)、比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)等常见的植被指数构建的氮素含量反演模型。综上,基于无人机获取的水稻分蘖期偏振光谱数据,以PSVI植被指数作为模型输入,能提升水稻冠层氮素含量的反演精度。

关键词: 水稻氮素; 偏振遥感; 植被指数; 反演模型; 线性回归

中图分类号: S252 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0171-08 OSID: 

Inversion Model of Nitrogen Content of Rice Canopy Based on UAV Polarimetric Remote Sensing

XU Tongyu^{1,2} YANG Jiaxin¹ BAI Juchi¹ JIN Zhongyu¹ GUO Zhonghui¹ YU Fenghua^{1,2}

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Liaoning Agricultural Informatization Engineering Technology Research Center, Shenyang 110866, China)

Abstract: Due to the geometry of the rice canopy, the reflectance spectral information obtained by conventional UAV hyperspectroscopy contains specular reflection information which is not related to the internal composition of rice, thus affecting the inversion accuracy of the nitrogen content of rice. The inversion accuracy of rice nitrogen content was improved by removing the specular reflection component from the reflectance spectra. Based on the multi-angle polarimetric spectral data of rice tillering stage and the corresponding nitrogen content data obtained from UAV polarimetric remote sensing measurements, the correlation between them was analysed by the vegetation index method, and the angle with the highest correlation between the polarimetric spectral data of the rice canopy and its corresponding nitrogen content was obtained. The polarisation spectrum vegetation index (PSVI) was constructed based on a mathematical transformation method. The inverse model of the nitrogen content of the rice canopy was developed by using a linear regression method. The results were as follows: the best observation angle of -15° (15° for backward observation) was obtained by analyzing the correlation between the polarisation spectral data and the nitrogen content of the rice canopy at different observation zenith angles; the six

characteristic bands of the polarisation spectral information at this angle were extracted by the continuous projection method, specifically 500 nm, 566 nm, 663 nm, 691 nm, 736 nm and 763 nm; the mathematical transformation idea was applied to the polarization spectral vegetation index (PSVI), consisting of 500 nm and 566 nm was constructed; the PSVI was used as the model input, and the linear regression method was used to establish the inversion model of nitrogen content in the rice canopy. The inversion results were better than the inverse models of nitrogen content constructed by difference vegetation index (DSI), ratio vegetation index (RVI) and other common vegetation indices. In conclusion, based on the polarization spectral data of rice tillering stage acquired by UAV and using PSVI vegetation index as model input, the accuracy of inversion of nitrogen content in rice canopy can be improved.

Key words: rice nitrogen; polarimetric remote sensing; vegetation index; inversion model; linear regression

0 引言

氮素是植物生长必需的营养物质之一,为植物光合作用提供重要支持,对植物生长、产量和品质有着重大影响^[1]。及时、准确地判断水稻氮素营养状况,进而做出合理的施肥决策,对实现少氮肥高产量的目的尤为重要^[2]。目前,无人机光谱遥感技术以其覆盖面积大、速度快、无损坏等优点被广泛应用于水稻、玉米、大豆、小麦等主要农作物的生物量检测中^[3-5]。通常,水稻氮素含量可以从叶片和冠层两种尺度进行估算。冠层光谱参数测量作为作物氮素含量定量检测的关键步骤,对监测作物生长发育至关重要。光谱遥感技术通过获取冠层的光谱反射特性间接反映作物叶片的营养成分,为作物营养诊断和合理施肥提供参考^[6-7]。大量研究表明,水稻冠层光谱反射率与叶片含氮量呈显著正相关,且归一化差值植被指数 (NDVI)、绿波段归一化植被指数 (GNVI)、比值植被指数 (RVI) 等植被指数都是估测水稻叶片氮素含量的有效指标^[8-9]。傅友强等^[10]提出美香占 2 号 (MXZ2H) 的叶片氮素含量与 NDVI、比值植被指数 (RVI)、差值植被指数 (DVI) 等呈正相关;吉丰优 1002 (JFY1002) 的叶片氮素含量与 RVI、EVI、改进非线性植被指数 (MNLI)、DVI、NDVI 呈正相关。可见,利用植被指数进行水稻冠层氮素含量的反演具有一定可行性。

上述研究中,利用无人机平台进行遥感监测时,大多都基于垂直方向进行反射强度测量,因此只能利用来自冠层顶部的光谱信息进行氮素含量的反演。而对分蘖期的水稻,垂直方向上的测量数据中包含的水稻信息较少,且由于水稻冠层结构复杂,受水体、叶倾角、太阳高度角、传感器观测角等^[11]多种因素的影响,获取的高光谱影像数据中包含镜面反射分量和漫反射分量。但镜面反射信息与植物叶片内部的物质组成无关^[12]。因此,进行氮素含量反演时,有必要考虑镜面反射对反

演精度的影响。LI 等^[13]基于偏振多光谱成像系统,提出了一种新的镜面反射去除植被指数 (NSRVI) 来消除植物的镜面反射干扰,提高植物健康状况检测的准确性。该方法通过构建新的植被指数来消除镜面反射对结果的影响。目前,在植物应用研究方面,通常使用偏振测量技术对镜面反射分量和漫反射分量进行区分^[14]。MICHIO 等^[15]采用不同观测天顶角对小麦冠层进行了偏振测量,发现采用偏振度表征镜面反射分量时,能够更好地描述小麦抽穗期开始时间。吕云峰^[16]对抽穗前不同生长时期的玉米冠层进行了垂直方向上的高光谱偏振观测,发现偏振光在总反射光中的比例高达 10%。国内外学者将偏振遥感应用于植物研究中,并取得了一定的成果,但大部分研究是利用偏振测量进行角度效应分析,缺乏偏振测量在水稻营养元素反演方面的应用。

综上,本文在进行水稻冠层氮素含量反演时,利用无人机偏振遥感技术,将镜面反射信息从高光谱中剥离,结合多角度观测,分析不同观测天顶角下,去除镜面反射信息前后的光谱信息与水稻冠层氮素含量的相关性,进而得到无人机偏振测量的最优观测角度。基于最优观测天顶角下偏振光谱数据(即去除镜面反射信息的高光谱数据),构建适用于偏振光谱数据的植被指数——偏振光谱植被指数 (Polarisation spectrum vegetation index, PSVI),以期构建一种高效、精准的植被指数,为水稻冠层氮素含量快速检测提供监测方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究试验区位于辽宁省海城市耿庄镇沈阳农业大学精准农业航空科研基地 (40°58′45.39″N, 122°43′47.006 4″E),选用水稻品种为“沈农 9816”。在水稻试验区 (图 1) 共设置 5 个氮肥梯度,即 N0 (0 kg/hm²)、N1 (75 kg/hm²)、N2 (150 kg/hm²)、N3

(225 kg/hm²) 和 N4(300 kg/hm²), 氮肥基追比为 5:3:2。各个试验小区之间采用田埂进行划分。每个梯度设置 3 个重复小区, 共设 3 × 5 = 15 个小区。每个小区面积为 5 m × 8 m = 40 m², 除氮肥梯度外, 每小区田间管理一致, 磷钾肥采用当地标准进行施用, 磷肥标准施用量为 144 kg/hm², 钾肥标准施用量为 192 kg/hm², 基追比为 1:1, 其余田间管理同常规高产管理一致。田间采样由分蘖期至抽穗期, 采样间隔 7 d, 每次采样在各试验小区选取具有代表性的 3 穴水稻进行水稻氮素含量与地上干物质量的获取, 最后结果取平均值作为该小区的水稻氮素含量与地上干物质量。

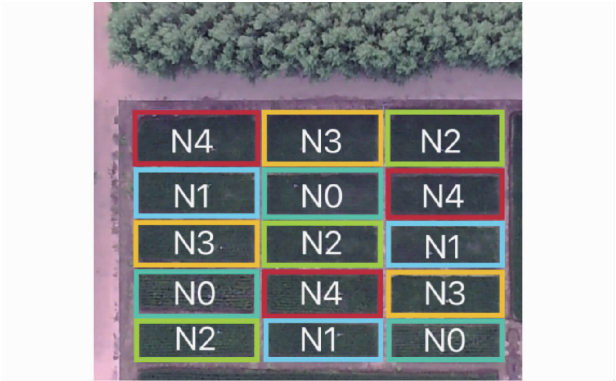


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据获取

1.2.1 水稻冠层偏振光谱反射率获取

采用耐司镀膜偏振镜, 卡口尺寸为 37 mm, 厚度为 3 mm。无人机是深圳大疆创新公司制造的 M600 PRO 型六旋翼无人机, 搭载四川双利合谱公司的 GaiaSky-mini 型高光谱成像系统, 将偏振片置于成像系统镜头前, 偏振光谱波段为 400 ~ 1 000 nm, 分辨率为 3 nm, 单幅影像记录时间为 15 s, 帧速率为 162 f/s, 设定无人机飞行高度为 100 m, 选取 9 个观测角度(-60°、-45°、-30°、-15°、0°、15°、30°、45°和 60°) 进行高光谱反射测量和偏振反射测量(其中“ - ”对应后向散射方向, “0°”对应垂直方向, “ + ”对应前向散射方向), 如图 2 所示, 2 次测量在 0.5 h 内完成。正午条件下, 光照效果较好且风速小, 既可以确保光照的稳定, 又可以实现无人机平稳飞行, 故将无人机光谱数据采集时间确定在 10:00—14:00。用工具软件 ENVI 5.3 对获取的偏振光谱影像进行提取, 通过计算每小区标签附近的平均光谱反射率来表征水稻冠层的偏振光谱反射率信息。

1.2.2 水稻冠层氮素含量测定

在每个试验小区的取样点对水稻进行整穴的破坏性取样, 带回实验室后, 将每穴水稻的所有新鲜叶

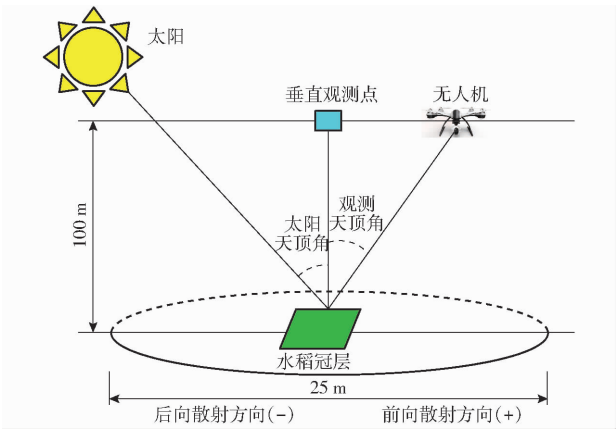


图 2 水稻冠层偏振光谱多角度观测示意图
Fig. 2 Multi-angle observation diagram of rice canopy polarization spectrum

片剪下置于干燥箱中, 在 120℃ 下杀青 60 min 后, 在 80℃ 下干燥, 达到恒定质量后, 称量并粉碎。采用凯氏定氮法利用研磨好的粉末检测叶片的氮素含量(mg/g)。最终共得到 40 组水稻冠层氮素含量的有效数据。之后, 使用 Kennard - Stone 算法^[17]按照训练集与验证集比例 7:3 将样本划分。氮素含量统计结果如表 1 所示。

表 1 训练集与验证集水稻叶片氮素含量统计结果
Tab. 1 Nitrogen content statistics of japonica rice leaves in training and validation sets

数据集	样本量	最大值/ (mg · g ⁻¹)	最小值/ (mg · g ⁻¹)	均值/ (mg · g ⁻¹)	标准差/ (mg · g ⁻¹)	变异系数/%
训练集	28	4.828	1.701	3.156	0.866	27.4
验证集	12	4.994	1.665	3.145	1.120	35.6

1.3 最优观测天顶角选择

植被指数是对地表植被状况简单、有效和经验的度量, 其在全球和区域土地覆盖、植被分类和环境变化等方面都有广泛应用。此外, 植被指数还可以转换成叶冠生物的物理学参数。本研究结合现有文献, 运用 6 种与水稻冠层氮素含量估算相关的植被指数, 即归一化差值植被指数^[18] (Normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数^[19] (RVI)、差值植被指数^[20] (Difference vegetation index, DSI)、宽动态范围植被指数^[21] (Wide dynamic range vegetation index, WDRVI)、再归一化植被指数^[22] (Renormalized vegetation index, RDVI) 以及转换型植被指数^[23] (Conversion vegetation index, TVI)。基于不同观测天顶角下的偏振光谱数据, 通过 Matlab 平台对各植被指数针对的波段范围进行遍历, 找到各植被指数的最优波长组合, 在此基础上构建植被指数, 计算去除偏振信息前后, 各观测角度下, 植被指数与对应水稻冠层氮素含量的相关系数

R 。根据各天顶角下相关系数 R 的结果,对比得出研究所需要的最优观测角度。

1.4 水稻冠层偏振光谱反射率特征波长选择

由于采集到的偏振光谱波段具有较高维度,存在大量无用和干扰波段,而构建植被指数通常是对几个特征波长进行一定的组合而形成的一种数学表达式。因此,需要基于最优观测天顶角下的偏振光谱反射率数据,提取与水稻氮素相关的特征波长,从而通过构建植被指数反演水稻氮素含量。

本研究采用连续投影法^[24] (Successive projections algorithm, SPA) 对最优观测角度下的偏振光谱反射率信息进行特征波长的提取。连续投影算法是一种使矢量空间共线性最小化的前向波段选择算法,它是将维度较高的光谱信息进行初步压缩,把筛选出的波段按照其对氮素含量的贡献值做进一步选择,从而剔除不敏感波长,降低复杂度^[25]。连续投影算法的优势在于可以提取全波段的几个特征波长,有效降低变量间的共线性,建立冗余信息最少的波段组合,实现数据降维,大大减少建模所用波段的数量。本研究采用 Matlab 平台实现连续投影算法提取特征波长。

1.5 水稻冠层氮素植被指数构建

目前,大多数关于水稻氮素含量植被指数的构建并未考虑镜面反射信息的影响。而冠层光谱探测过程中,受观测角度、植被冠层结构等因素的影响,传感器接收到的能量不仅包含进入植物内部多次散射后的能量(包含植物内部的生物化学信息),还包含未进入植物内部器官,在植物叶片表面发生镜面反射的能量(只与叶片表面结构的特性相关)^[12]。

本研究利用偏振遥感手段去除光谱信息中的镜面反射信息,采用 1.4 节中从最优观测天顶角下去除偏振信息的光谱数据中提取得到的特征波长来构建植被指数,构建植被指数的具体步骤如下:

(1)通过连续投影法降维得到最优观测天顶角下水稻冠层偏振光谱的特征波长反射率 R_1 、 R_2 、 $\cdots$ 、 R_n , n 为光谱波段。

(2)将特征波长 R_i ($i \in (1, 2, \cdots, n)$) 与 R_j ($j \in (1, 2, \cdots, n)$, 且 $j \neq i$) 做比,构建多组特征光谱比值,即 $Q_x = \frac{R_i}{R_j}$ ($x \in (1, 2, \cdots, n)$)。

(3)由于氮素含量较大,均大于 1 mg/g,而 Q_x 较小,均小于 1,为进一步增强二者之间的相关性,故在 Q_x 的基础上,均加 1 得 B_x 。

(4)为提高回归模型拟合优度,在上述步骤的基础上,采用“平方变换”方法^[26],最终得到最优观

测天顶角下基于偏振光谱的植被指数 (PSVI)

$$PSVI = B_x^2 = \left(\frac{R_i}{R_j} + 1 \right)^2$$

采用线性回归法构建水稻冠层氮素含量的反演模型,以均方根误差 (RMSE) 和模型决定系数 (R^2) 作为氮素反演模型的评价标准。

2 结果与分析

2.1 最优观测天顶角选择结果

基于去除偏振信息前后的各观测天顶角测量得到的光谱数据,计算 6 种植被指数与水稻冠层氮素含量的相关性,为了便于对比去除偏振信息前后,各观测角度下植被指数与氮素含量相关性的提升效果,本研究采用相关系数提升比率进行直观展示,如图 3 所示。显然,加入偏振片会对不同观测天顶角下的植被指数与氮素含量的相关性造成不同的影响。观测天顶角为 -60° 、 0° 、 30° 与 60° 时,各植被指数与水稻冠层氮素含量的相关性并没有得到提升;观测天顶角为 $-45^\circ \sim -15^\circ$ 、 15° 与 45° 时,各植被指数与水稻冠层氮素含量的相关性有明显提升,且在 -15° 时,提升效果最好。

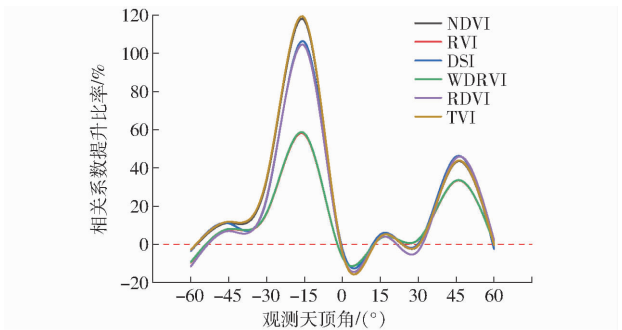


图 3 去除偏振信息后不同观测天顶角下各植被指数与氮素含量相关性提升结果

Fig. 3 Results of correlation enhancement between each vegetation index and nitrogen content at different observed zenith angles after removal of polarization information

为进一步确定最优观测天顶角,基于各观测天顶角测量得到的偏振光谱数据获得的 6 种植被指数与水稻冠层氮素含量相关性如表 2 所示(表中 ρ 为光谱反射率,下角数字表示特征波长)。由表 2 可知,去除偏振信息后,不同观测天顶角下的植被指数与水稻冠层氮素含量的相关性明显存在差异。观测天顶角的变化会对偏振光谱反射率所构建的植被指数与水稻冠层氮素含量的相关性产生影响。在水稻冠层多角度偏振光谱实测数据中,当垂直观测时,植被指数 NDVI、RVI、DSI、WDRVI、RDVI、TVI 与水稻氮素含量的相关性最低,且相关系数最大为 0.677;当观测天顶角变大时,即从垂直观测到前向观测

15°和后向观测 15°时,各植被指数与氮素含量的相关性都有所提升,后向观测 15°时的相关性达到最高,且相关系数最小为 0.802;当观测天顶角继续增大时,即从前向后 15°到前后向 30°时,各植被指数与氮素含量的相关性又明显下降,但仍高于垂直观

测时的相关性;当观测天顶角持续增大到前后 60°时,各植被指数与氮素的相关性波动不大,但较前后 30°时有所提升。综上,−15°为最优观测天顶角。因此,本研究选择观测天顶角为 −15°时的偏振光谱数据进行后续植被指数的构建。

表 2 基于偏振光谱数据不同观测天顶角下植被指数与水稻冠层氮素含量的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients between vegetation index and nitrogen content of rice canopy at different observed zenith angles based on polarization spectral data

观测天顶角/(°)	NDVI($\rho_{756}、\rho_{931}$)	RVI($\rho_{763}、\rho_{931}$)	DSI($\rho_{756}、\rho_{931}$)	WDRVI($\rho_{756}、\rho_{931}$)	RDVI($\rho_{756}、\rho_{931}$)	TVI($\rho_{756}、\rho_{931}$)
−60	0.733	0.712	0.723	0.714	0.643	0.736
−45	0.721	0.742	0.713	0.744	0.704	0.724
−30	0.710	0.717	0.701	0.719	0.709	0.712
−15	0.804	0.837	0.826	0.838	0.802	0.804
0	0.677	0.676	0.630	0.676	0.648	0.677
15	0.764	0.744	0.722	0.745	0.732	0.765
30	0.729	0.739	0.701	0.740	0.687	0.731
45	0.763	0.737	0.736	0.738	0.744	0.763
60	0.766	0.760	0.725	0.760	0.730	0.767

2.2 偏振光谱特征波长选择结果

水稻冠层偏振光谱反射率对水稻氮素的定量反演十分重要,偏振光谱的本质是去除镜面反射信息的高光谱,而连续波段的高光谱反射率信息中存在大量的冗余信息。因此,本研究应用连续投影算法对全波段的水稻冠层偏振光谱进行特征波长筛选,并利用校正集进行内部交叉验证,当内部交叉验证时,交叉验证均方根误差(Root mean square error of cross validation, RMSECV)呈现出持续下降趋势且 RMSECV 达到最低,此时的 RMSECV 即为最优波长集合包含的波长数量,也就是该时期的最优子集波长数量。根据验证结果的 RMSECV 筛选出 6 个水稻冠层氮素含量高光谱特征波长(图 4):500、566、663、691、736、763 nm。

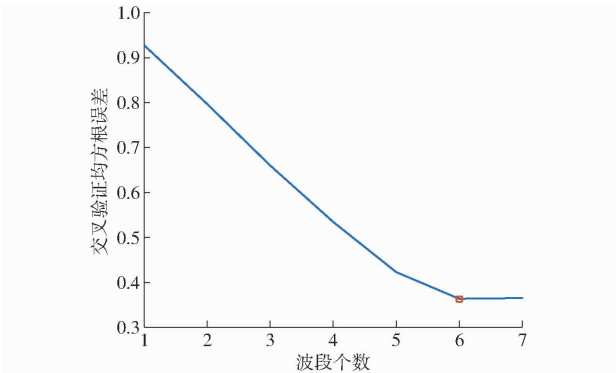


图 4 水稻冠层偏振光谱特征波段 SPA 筛选结果
Fig.4 Successive projections algorithm (SPA) screening results of hyperspectral characteristic bands of rice canopy

2.3 偏振光谱植被指数构建结果

本研究将连续投影法筛选得到的 6 个特征波长

的反射率两两组合,分别进行 PSVI 指数运算,得到 PSVI 指数与水稻冠层氮素含量相关系数。图 5 中最高时的组合为 500、566 nm,相关系数绝对值为 0.850。

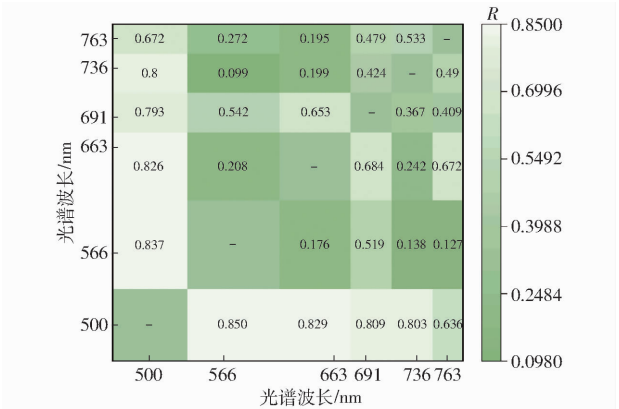


图 5 PSVI 指数与水稻冠层氮素含量的相关性
Fig.5 Correlation between PSVI index and nitrogen content of rice canopy

2.4 水稻氮素含量反演结果

将本研究所构建的 PSVI 新型植被指数作为模型的输入,利用非线性关系建立水稻冠层氮素含量的反演模型,模型训练集 R^2 为 0.783 8, RMSE 为 0.428 mg/g;验证集 RMSE 为 0.662 mg/g(图 6)。

2.5 反演结果分析与评价

当前,已有众多研究人员将植被指数作为模型输入,对水稻冠层氮素含量进行反演,从 IndexData-Base 数据库中选取 6 种常用于氮素反演的植被指数^[17],用来与本研究所构建的新型植被指数 PSVI 进行对比。将 6 种植被指数同样采用线性回归的方

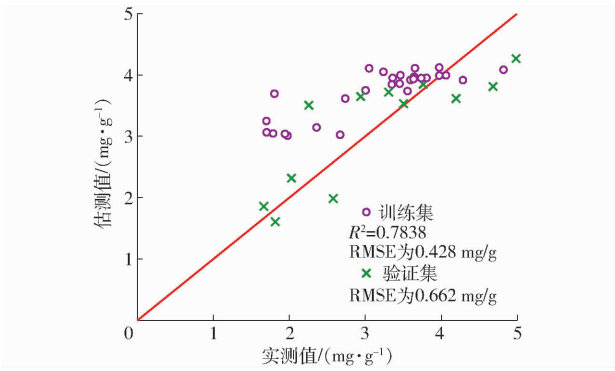


图 6 水稻氮素含量反演结果

Fig. 6 Inversion results of rice nitrogen content

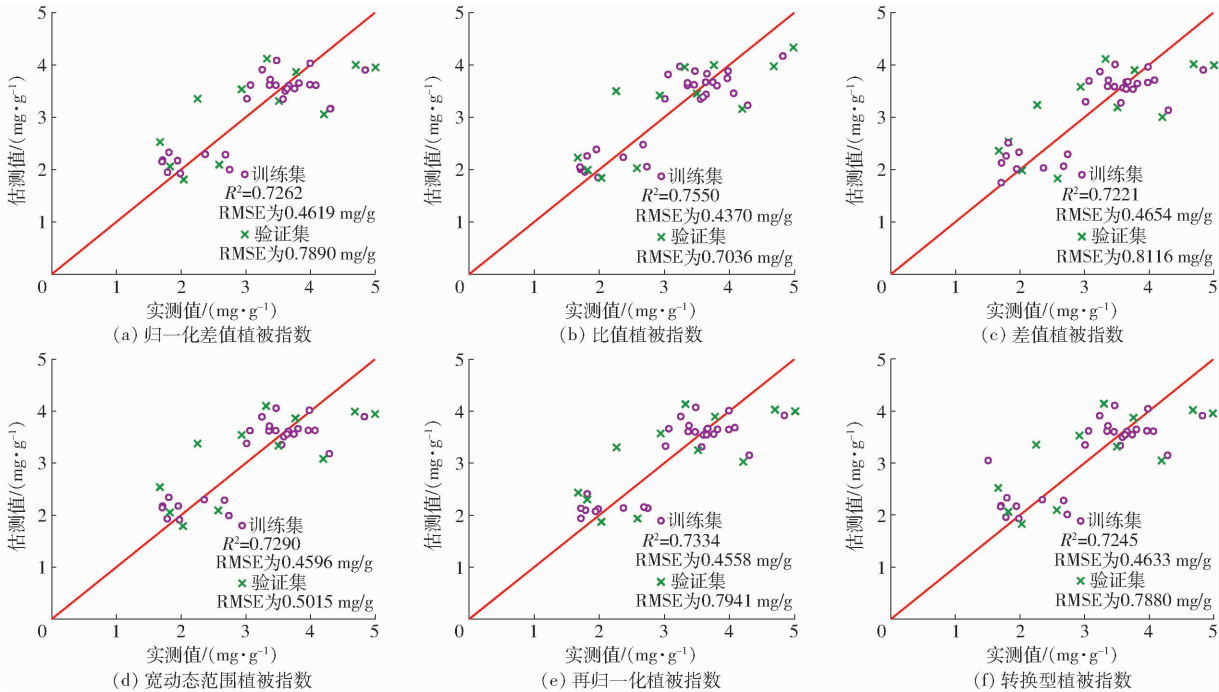


图 7 不同植被指数反演结果

Fig. 7 Inversion results of different vegetation indices

素含量的反演精度。为了进一步提升水稻冠层氮素含量的反演精度,本研究结合多角度偏振测量技术与数据驱动方式,对无人机偏振遥感的水稻冠层氮素含量反演方法开展了研究,基于水稻冠层多角度偏振光谱数据,构建了新型植被指数 PSVI 定量估算水稻冠层叶片氮素含量。由于不同观测天顶角下的偏振光谱存在一定的差异,本研究结合 6 种常用于植物氮素含量反演的植被指数,通过分析不同观测天顶角下各植被指数与水稻冠层氮素含量的相关性,得到最优观测天顶角为后向观测 15°,这一结果与 HE 等^[27]研究结果一致。这是由于后向观测主要来自具有较高反射率的水稻冠层上方阳光照射的叶片,而前向观测包含更多来自遮阴叶片的信息,较少来自阳光照射冠层水稻叶片的信息,因此后向观测 15°在去除偏振信息的同时能够更多地收集到来自水稻冠层的光谱信息,从而具有更高的相关性。

式构建基于最优观测角度下偏振光谱的水稻冠层氮素含量反演模型,如图 7 所示,结果显示,这 6 种指数所构建的反演模型的决定系数 R^2 均小于 0.783 8,且反演精度最高的 R^2 为 0.755。综上,本研究所构建的新型植被指数 PSVI 线性反演效果最好。

3 讨论

目前,已有较多研究人员利用无人机遥感获取的水稻冠层光谱反射率进行氮素含量的反演建模,但大多数研究仅基于垂直观测下的光谱数据,通过数据驱动的方式,构建反演模型以提升水稻冠层氮

此外,偏振光谱受植被冠层的几何结构、平均叶倾角等影响较大。不同观测天顶角下去除镜面反射信息后,相关性的提升效果存在一定的差异,后续还需进一步研究。

在得到最优观测天顶角下的偏振光谱数据后,为尽可能减少该偏振光谱信息中的冗余信息,减小变量间的共线性,本研究采用连续投影法得到与水稻冠层氮素含量相关性最好的 6 个特征波长,分别为 500、566、663、691、736、763 nm。由于该算法可以在确保不同波段之间共线性最小的同时,保留原始数据中的大部分特征,因此筛选到的波长分别处于与叶片氮素含量较高的绿光和红光波段,与前期的研究结果相吻合^[28-29]。本研究在构建植被指数的过程中,基于表 2 的相关性结果可知,比值植被指数 (RVI) 的整体相关性较好,因此本研究将比值植被指数的比值形式作为指数构建的基础形式,为进一

步提升指数与氮素含量的相关性,利用数学变换的方法,构建了新型植被指数 PSVI。该指数基于后向观测 15°下的水稻冠层偏振光谱数据进行计算,将计算结果作为模型输入,采用线性回归方式进行反演,得到的 PSVI 植被指数具有较好的反演精度。然而在对 PSVI 植被指数的反演效果进行验证时,虽然该指数的反演效果优于其它 6 个植被指数,但该指数用于其它数据集时可能出现反演精度下降的情况,因此存在普适性不足的问题,这也是数据驱动模型的弊端,缺乏农学机理上关于氮素含量与波段之间关系的解释。未来的科研中需要对上述内容进行更深入探讨。但由于植被指数计算简单,检测装置易于开发与集成,基于植被指数的水稻冠层氮素反演方法仍具有一定的研究价值^[30]。本文采用线性回归方法构建了水稻叶片氮含量的反演模型。与其它神经网络算法相比,线性回归建模方法思想简单,易于实现,建模迅速,对于小数据量、简单的关系很

有效,能够实现对水稻冠层氮素含量的反演。

4 结论

(1) 基于多角度偏振光谱数据,分析得到水稻冠层氮素含量反演的最优观测天顶角为后向观测 15°。

(2) 通过连续投影法 (SPA) 筛选得到的特征波长为 500、566、663、691、736、763 nm。将 6 个特征波长两两组合,计算得到的 PSVI 指数与水稻氮素含量相关性最高时的波长组合为 500、566 nm,相关系数 R 为 0.850。

(3) 以 PSVI 为输入,运用线性回归法构建的水稻冠层氮素含量反演模型,模型训练集 R^2 为 0.783 8, RMSE 为 0.428 mg/g; 验证集 RMSE 为 0.662 mg/g,模型的拟合度优于归一化植被指数、比值植被指数等传统植被指数所构建的水稻氮素含量反演模型。

参 考 文 献

- [1] 高小峰,景航,闫本帅,等. 长期施氮对谷子根系内生真菌群落特征的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(5):303–311.
GAO Xiaofeng, JING Hang, YAN Benshuai, et al. Effects of long-term nitrogen application on the community characteristics of endophytic fungi in millet roots[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(5):303–311. (in Chinese)
- [2] HEUVELINK E. Plants in action: adaption in nature, performance in cultivation[J]. MacMillan Education Aust, 2003, 86(2):170–173.
- [3] 刘昌华,王哲,陈志超,等. 基于无人机遥感影像的冬小麦氮素监测[J]. 农业机械学报,2018,49(6):207–214.
LIU Changhua, WANG Zhe, CHEN Zhichao, et al. Nitrogen monitoring of winter wheat base on unmanned aerial vehicle remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(6):207–214. (in Chinese)
- [4] FU Youqiang, ZHONG Xuhua, ZENG Jiahuan, et al. Improving grain yield, nitrogen use efficiency and radiation use efficiency by dense planting, with delayed and reduced nitrogen application, in double cropping rice in South China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(2):565–580.
- [5] 许童羽,白驹驰,郭忠辉,等. 基于无人机高光谱遥感的水稻氮营养诊断方法[J]. 农业机械学报,2023,54(2):189–197,222.
XU Tongyu, BAI Juchi, GUO Zhonghui, et al. Diagnosis method of rice nitrogen deficiency based on UAV hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(2):189–197,222. (in Chinese)
- [6] 李金敏,陈秀青,杨琦,等. 基于高光谱的水稻叶片氮含量估计的深度森林模型研究[J]. 作物学报, 2021, 47(7):1342–1350.
LI Jinmin, CHEN Xiuqing, YANG Qi, et al. Deep learning models for estimation of paddy rice leaf nitrogen concentration based on canopy hyperspectral data[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(7):1342–1350. (in Chinese)
- [7] ZHAO Yu, WANG Jianwen, CHEN Liping, et al. An entirely new approach based on remote sensing data to calculate the nitrogen nutrition index of winter wheat[J/OL]. Journal of Integrative Agriculture, 2021. DOI:10.1016/S2095–3119(20)63379–2.
- [8] 陈春玲,周长献,于丰华,等. 基于光谱特征参数的梗稻冠层氮素含量反演方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2):218–224.
CHEN Chunling, ZHOU Changxian, YU Fenghua, et al. A study on inversion method of nitrogen content in japonica rice based on spectral characteristic parameters[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(2):218–224. (in Chinese)
- [9] RUI J, SA B, KL B, et al. UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency[J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2020. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.125705.
- [10] 傅友强,钟旭华,黄农荣,等. 基于无人机多光谱遥感的水稻冠层光谱特征和氮素营养关系研究[J]. 广东农业科学, 2021,48(10):121–131.
FU Youqiang, ZHONG Xuhua, HUANG Nongrong, et al. Research on relationship between canopy spectral characteristics and nitrogen nutrient of rice cultivars based on UAV multispectral remote sensing[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2021, 48(10):121–131. (in Chinese)
- [11] 何宇航. 多角度遥感植物冠层叶绿素含量反演研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2021.
HE Yuhang. Research on plant canopy chlorophyll content retrieval multi-angle remote sensing techniques[D]. Hangzhou:

- Hangzhou Dianzi University, 2021. (in Chinese)
- [12] 张子晗, 晏磊, 刘思远, 等. 基于偏振反射模型和随机森林回归的叶片氮含量反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(9):2911–2917.
ZHANG Zihan, YAN Lei, LIU Siyuan, et al. Leaf nitrogen concentration retrieval based on plarization reflectance model and random forest regression[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(9):2911–2917. (in Chinese)
- [13] LI S, JIAO J, CHEN J, et al. A new polarization-based vegetation index to improve the accuracy of vegetation health detection by eliminating specular reflection of vegetation[J]. Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60(4414718):1–18.
- [14] VANDERBILT V C, GRANT L, BIEHL L L, et al. Specular, diffuse, and polarized light scattered by two wheat canopies[J]. Appl. Opt., 1985, 24(15):2408–2418.
- [15] MICHIO S, TOSHIHIRO S, AKIHIKO K. A multiband polarimetric imager for field crop survey — instrumentation and preliminary observations of heading-stage wheat canopies[J]. Plant Production Science, 2011, 14(1):64–74.
- [16] 吕云峰. 基于垂直观测的植被冠层高光谱偏振反射特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4):1028–1031.
LÜ Yunfeng. Study of hyperspectral polarized reflectance of vegetation canopy at nadir viewing direction[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4):1028–1031. (in Chinese)
- [17] 许童羽, 邢思敏, 于丰华, 等. 基于多植被指数组合的 BAS-ELM 梗稻冠层氮含量反演方法[J]. 沈阳农业大学学报, 2021, 52(5):577–585.
XU Tongyu, XING Simin, YU Fenghua, et al. A BAS-ELM inversion method of japonica rice canopy nitrogen content based on a combination of multiple vegetation indices[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2021, 52(5):577–585. (in Chinese)
- [18] XIE H, TIAN Y Q, GRANILLO J A, et al. Suitable remote sensing method and data for mapping and measuring active crop fields[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(2):395–411.
- [19] PINTER P J, HATFIELD J L, SCHEPERS J S, et al. Remote sensing for crop management[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2003, 69(6):647–664.
- [20] TUCKER C J, ELGIN J H, III M M, et al. Monitoring corn and soybean crop development with hand-held radiometer spectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(3):237–248.
- [21] HERRMANN I, PIMSTEIN A, KARNIELI A, et al. LAI assessment of wheat and potato crops by VEN μ S and Sentinel-2 bands[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8):2141–2151.
- [22] MAIN R, CHO M A, MATHIEU R, et al. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation[J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2011, 66(6):751–761.
- [23] RAYMOND H E, DAUGHTRY C S T, EITEL J U H, et al. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible band index[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(4):1090–1099.
- [24] 黄平捷, 李宇涵, 俞巧君, 等. 基于 SPA 和多分类 SVM 的紫外-可见光光谱饮用水有机污染物判别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(7):2267–2272.
HUANG Pingjie, LI Yuhuan, YU Qiaojun, et al. Classification of organic contaminants in water distribution systems developed by SPA and multi-classification SVM using UV-Vis spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(7):2267–2272. (in Chinese)
- [25] 高洪智, 卢启鹏, 丁海泉, 等. 基于连续投影算法的土壤总氮近红外特征波长的选取[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(11):2951–2954.
GAO Hongzhi, LU Qipeng, DING Haiquan, et al. Choice of characteristic near-infrared wavelengths for soil total nitrogen based on successive projection algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(11):2951–2954. (in Chinese)
- [26] 胡良平. 提高回归模型拟合优度的策略(Ⅲ)——校正均值变换与其他变量变换[J]. 四川精神卫生, 2019, 32(1):16–20.
HU Liangping. Strategy of improving the goodness of fit of the regression model(Ⅲ)—the transformation of the corrected arithmetic mean and the other variable transformations[J]. Sichuan Mental Health, 2019, 32(1):16–20. (in Chinese)
- [27] HE L, SONG X, FENG W, et al. Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174:122–133.
- [28] 王娇娇, 宋晓宇, 梅新, 等. 基于高斯回归分析的水稻氮素敏感波段筛选及含量估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(6):1722–1729.
WANG Jiaojiao, SONG Xiaoyu, MEI Xin, et al. Screening and content estimation of nitrogen sensitive bands in rice based on Gaussian regression analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(6):1722–1729. (in Chinese)
- [29] TAN K, WANG S, SONG Y, et al. Estimating nitrogen status of rice canopy using hyperspectral reflectance combined with BPSO-SVR in cold region[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2017, 172:68–79.
- [30] 于丰华, 邢思敏, 郭忠辉, 等. 基于特征转移植被指数的水稻叶片氮素含量定量估算[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2):175–182.
YU Fenghua, XING Simin, GUO Zhonghui, et al. Remote sensing inversion of the nitrogen content in rice leaves using character transfer vegetation index[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(2):175–182. (in Chinese)