



# 基于高光谱遥感数据的水稻叶温反演

梁金晨, 江晓东\*, 杨沈斌, 孙浩, 梁文毅, 妙丹书

(南京信息工程大学/江苏省农业气象重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210000)

**摘要:**【目的】研究水稻叶温与冠层反射光谱间的关系,为水稻叶温的模拟与监测提供理论依据。【方法】利用FieldSpec Pro FR光谱仪和Raynger ST红外温度探测仪测量水稻抽穗期冠层的反射光谱和叶片温度,分析原始反射光谱、一阶微分光谱、归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(DVI)、再归一化差值植被指数(RDVI)和转换型土壤调整指数(TSAVI)与叶温的关系。【结果】叶温的变化直接影响水稻冠层光谱的反射率,影响水稻红边特征。一阶微分光谱与叶温存在极显著相关性( $P < 0.01$ ,下同),990 nm处相关系数(0.889)最高,885 nm处相关系数(-0.893)最低。选取叶温敏感波段光谱组合计算植被指数,发现RDVI和TSAVI与叶温的关系呈极显著相关,相关系数分别为0.724和0.733。由RDVI和TSAVI建立经验模型,结果显示由TSAVI建立的叶温估算模型效果更好,其验证样本的决定系数为0.610,相对误差为1.97%,均方根误差为2.546。【建议】综合考虑多种预处理方法,最大程度还原光谱信息;优化特征波长的提取,提高建立模型的精度;基于高光谱技术,实现冠层叶温的无损监测。

**关键词:** 水稻; 叶温; 高光谱遥感; 植被指数; 模型反演

**中图分类号:** S127

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-1191(2020)01-0230-07

## Rice leaf temperature inversion based on hyperspectral remote sensing data

LIANG Jin-chen, JIANG Xiao-dong\*, YANG Shen-bin, SUN Hao,  
LIANG Wen-yi, MIAO Dan-shu

(Nanjing University of Information Science & Technology/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology,  
Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210000)

**Abstract:** 【Objective】The canopy reflectance spectra of rice at different leaf temperatures were measured to study the relationship between leaf temperature and canopy reflectance spectra, which provided a theoretical basis for the simulation and monitoring of rice leaf temperature. 【Method】The reflectance spectra and leaf temperature of canopy in rice heading stage were measured by FieldSpec Pro FR spectrometer and Raynger ST infrared temperature detector. Original reflection spectrum, first-order differential spectrum, normalized vegetation index (NDVI), difference vegetation index (DVI), renormalized difference vegetation index (RDVI), and converted soil adjustment index (TSAVI) and leaf temperature relationship were analyzed. 【Result】The change of leaf temperature directly affected the reflectance of rice canopy spectrum and affected the red edge characteristics of rice. There was highly significant correlation between the first-order differential spectroscopy and leaf temperature ( $P < 0.01$ , the same below). The correlation coefficient at 990 nm was the highest (0.889), and the correlation coefficient at 885 nm was the lowest (-0.893). Vegetation index were calculated by spectral combination of leaf temperature sensitive bands. The relationship between RDVI and TSAVI and leaf temperature was highly significantly correlated, and the correlation coefficients were 0.724 and 0.733, respectively. The empirical model was established by RDVI and TSAVI. The results showed that the model established by TSAVI had better effects. Its determinant coefficient for sample detection was 0.610, relative error was 1.97% and root mean square error was 2.546. 【Suggestion】Comprehensive consideration of multiple pre-processing methods to maximize spectral information; optimize the extraction of characteristic wavelengths and improve the accuracy of model building; and the non-destructive monitoring of the canopy leaf temperature should be realized based on the hyperspectral technique.

**Key words:** rice; leaf temperature; hyperspectral remote sensing; vegetation index; model inversion

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (41875140); Public Welfare Industry (Meteorology) Research Project (GYHY201506018); Nanjing University of Information Science & Technology Program for Off-campus (Field) Internship and Practice of Marine Meteorology (YWKC2017A10); Nanjing University of Information Science & Technology Program for Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship (201910300285)

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41875140); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506018); 南京信息工程大学大气科学类校外(野外)实习实践考察项目(YWKC2017A10); 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(201910300285)

作者简介: \*为通讯作者, 江晓东(1976-), 副教授, 主要从事农业气象研究工作, E-mail: jiangxd@nuist.edu.cn。梁金晨(1994-), 研究方向为农业气象, E-mail: 2540101642@qq.com

## 0 引言

【研究意义】叶温是反映植物的生理过程及其对外界环境响应程度的参数,是植物与外界环境进行能量交换的重要指标,也是植物研究中常用指标(Chen et al., 2014)。因此,叶温的变化不仅可用于评估植物光合作用和呼吸作用强度(Rogers et al., 2017)、环境对植物生长的影响(姚振坤等, 2010),以及研究植物与环境间能量和辐射传递中复杂的物理过程(Bian et al., 2017),还可结合遥感等技术对植物生理状况进行研究和预测(程高峰等, 2008; 刘亚等, 2009)。

【前人研究进展】随着遥感技术迅速发展,许多学者利用高光谱技术对植物的生理指标进行模拟和反演。辛明月等(2015)通过相关分析提取水稻冠层反射光谱中最优光谱波段和植被指数,建立叶面积指数(LAI)估算模型。张晶等(2018)通过对比Savitzky-golay平滑(S-G)、标准正态变换(SNV)、多元散射校正(MSC)及一阶微分(FD)等不同预处理方法以确定敏感波段,利用SPA提取特征波长,建立PLS和支持向量机(SVM)预测模型估测甜菜叶片氮素含量。王仲林等(2019)通过计算8种不同形式的宽窄波段组合的植被指数,构建玉米氮素含量估测模型,其决定系数为0.92,均方根误差为90%。杨晨波等(2019)利用连续投影法(SPA)筛选冬小麦光谱特征波长,结合多元线性回归法(MLR)构建冬小麦地上干生物量估测模型,其决定系数达0.96,均方根误差为9.2%。周龙飞等(2019)使用一阶微分和小波变换处理,通过偏最小二乘法(PLS)构建倒伏玉米叶面积密度(LAD)诊断模型。

【本研究切入点】目前,基于高光谱技术研究水稻的生理特性主要集中于水稻叶片叶绿素含量、氮素含量及LAI反演模型(陈瑛瑛等, 2018; 刘科等, 2018; 刘怡晨等, 2018),而应用高光谱技术对水稻冠层温度的研究较少。

【拟解决的关键问题】在水稻抽穗期开展水稻叶温和冠层反射光谱观测,研究冠层反射光谱对水稻叶温变化的响应,通过归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(DVI)、再归一化差值植被指数(RDVI)和转换型土壤调整指数(TSAVI)建立水稻叶温估算模型,以期探究水稻冠层叶温与光谱的关联提供理论支持。

## 1 田间数据及光谱数据的获取及处理

### 1.1 田间观测试验

于2017年8月14—15日在南京信息工程大学南京落桥农业气象试验基地(东经118°40', 北纬32°

12', 海拔5 m)进行水稻田间观测。该时期处于水稻抽穗期,水稻品种为南粳5055,种植方式为直播稻。试验田总面积约1100 m<sup>2</sup>,水稻播种密度为2.5×10<sup>5</sup>株/ha。将试验田均匀分为11份,每份田块面积为10 m×10 m,采用美国ASD公司生产的FieldSpec Pro FR光谱仪测定,视场角为25°,测量范围为350~2500 nm。选择晴朗无云的天气进行冠层反射光谱测量,测量时间为中午12:00(太阳高度角>45°),测量时探头垂直向下,距冠层垂直高度0.6 m。每小区进行3次测量,每次测量5次重复,取平均值作为该小区的光谱反射率值。每次采集目标光谱前后均进行标准白板校正。在冠层光谱观测的同时,采用Raynger ST手持式红外温度探测仪对水稻冠层顶部叶温进行测量,每小区进行3次测量,测量冠层光谱测量位置处旗叶叶温(℃),测量时探头垂直向下,距离叶片高度0.2 m。

### 1.2 数据处理

1.2.1 一阶导数光谱计算 由于光谱数据采集受外界因素的影响,为最大程度地获取有效光谱信息,需对原始光谱数据进行预处理。本研究采用一阶微分处理,由于稻田背景的光谱信息相对于水稻光谱信息的变化更加平缓,通过一阶微分处理能最大程度地减少外部因素的影响,完整保留水稻冠层光谱信息(刘芬等, 2017)。光谱数据的一阶导数计算方法为:

$$R'(\lambda_i) = \frac{dR(\lambda_i)}{d\lambda} = \frac{R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

式中, $\lambda$ 为冠层反射光谱波长, $i$ 为光谱波段。

1.2.2 植被指数计算 根据导数光谱数据和水稻叶温数据,通过相关分析筛选光谱对叶温敏感波段,并选用NDVI、DVI、RDVI和TSAVI等方法计算植被指数,具体见表1。

1.2.3 模型建立与检验 以植被指数中与叶温相关性最显著的指数作为叶温反演模型自变量,建立叶温反演经验模型。采用交叉验证,将2017年8月14日测定的叶温与冠层光谱数据作为训练集,进行模型建立。将2017年8月15日测定的叶温与冠层光谱数据作为测试集,对反演模型进行检验,通过均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)对模拟值与实测值的符合度进行分析,RMSE值越小,表明模拟值与实测值的偏差越小,模型的预测精度越高。

1.2.4 统计分析 对水稻一阶导数光谱、植被指数与冠层叶温进行相关分析,并在Matlab R2015b中进行叶温经验模型建立和交叉验证。

表 1 植被指数计算方法及参数意义

Table 1 Calculation method and significance of vegetation index

植被指数 Vegetation index	定义公式 Define formula	参数意义 Parameter meaning
归一化植被指数 NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$	应用于检测植被生长状态、植被覆盖度和消除部分辐射误差等(Kaufman and Tanré, 1992)
差值植被指数 DVI	$DVI = \rho_{NIR} - \rho_{RED}$	绿色植物的灵敏指示参数,与叶绿素含量相关性高(Jordan, 1969)
再归一化差值植被指数 RDVI	$RDVI = \sqrt{NDVI \times DVI}$	适用于各种植被覆盖情况(Roujean and Breon, 1995)
转换型土壤调整指数 TSAVI	$TSAVI = \frac{a(\rho_{NIR} - a\rho_{RED} - b)}{a\rho_{NIR} + \rho_{RED} - ab}$	在NDVI的基础上修正了土壤环境的影响(Baret et al., 2002)
<i>a, b</i> 为土壤线的斜率和截距( <i>a</i> =1.243, <i>b</i> =1.625)		

## 2 基于光谱数据的水稻叶温相关分析及水稻叶温反演

### 2.1 不同水稻叶温冠层反射光谱及红边特征对比

从反射光谱曲线(图1)可看出,不同叶温下水稻冠层光谱的变化趋势一致,均具有一般绿色植物“绿峰”“红谷”及高反射平台的反射特征;不同叶温间冠层反射率在近红外区出现明显差异,28、30、32和34 °C叶温的近红外平台反射率平均值分别为0.45、0.51、0.57和0.61,平台反射率随着叶温的升高而逐渐升高。当叶温逐渐递增时,近红外平台反射率的增加逐渐减缓,28 °C到30 °C增加了0.06,30 °C到32 °C增加了0.05,32 °C到34 °C增加了0.03。

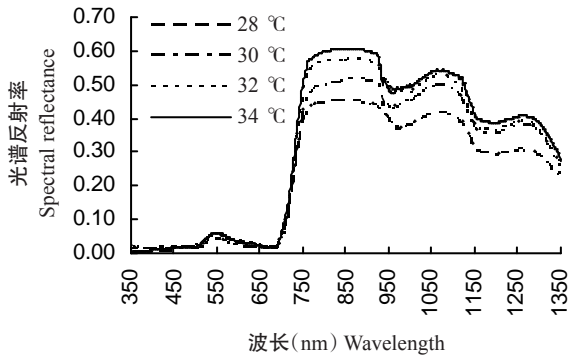


图 1 不同叶温下的水稻冠层反射光谱曲线  
Fig.1 Curves of rice canopy reflectance spectra at different leaf temperatures

红边是绿色植物最明显的光谱特征,常通过红边位置、红边幅值和红边面积来定量描述植被光谱红边特征。红边位置是红光范围(680~760 nm)内反射一阶导数光谱最大值所对应的波长,红边幅值是红光范围内一阶导数光谱的最大值,红边面积是红光范围的一阶导数光谱曲线所包围的面积。由图2可知,水稻红光波段的一阶导数光谱具有明显双峰现象,主峰主要位于730 nm处,次峰主要位于718 nm处,随着叶温的升高,双峰现象更加明显。28、30、32和34 °C叶温的红边位置分别为729、735、736和730 nm,随着叶温的升高,红边位置向长波方向偏

移,即“红移”,当叶温上升至34 °C时,红边位置向短波方向偏移,表现为“蓝移”;随着叶温的升高,红边幅值分别为0.913、1.019、1.203和1.214,红边面积分别为0.410、0.451、0.520和0.551,均出现“红移”现象。

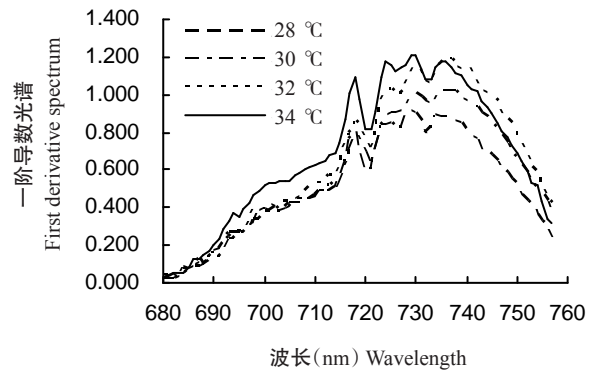


图 2 不同叶温下的水稻一阶导数光谱  
Fig.2 First derivative spectra of rice at different leaf temperatures

### 2.2 冠层反射光谱与水稻叶温变化的相关性分析

对水稻叶温与光谱各波段的相关系数(图3)进行分析发现,水稻光谱与平均叶温相关性变化曲线的变化趋势在350~450 nm持续下降,450~700 nm为负相关,700 nm之后相关性快速升高,760 nm后逐渐稳定,780 nm之后的近红光波段冠层光谱与叶温的相关性呈显著相关( $P < 0.05$ ,下同),其中在945 nm处达相关系数最大值,为0.562。从图3可看出,水稻光谱与叶温相关性仅在945和1120 nm两个波段附近达0.05水平的显著性检验;从水稻叶温与一阶微分光谱各波段的相关系数(图4)可看出,相对于水稻叶温与原始反射光谱相关系数,在350~670 nm及850~1000 nm波段处有更多波长叶温与一阶反射光谱相关性达0.01水平的显著性检验,其中,在990 nm处相关系数最高,为0.889,在885 nm处相关系数最低,为-0.893,在650~850 nm波段及1200 nm后原始反射光谱与一阶导数光谱均未达显著相关。对比图3和图4,发现在近红光波段处,一阶光谱与叶温的相关性明显高于原始光谱与叶温的相关性,说明对反射



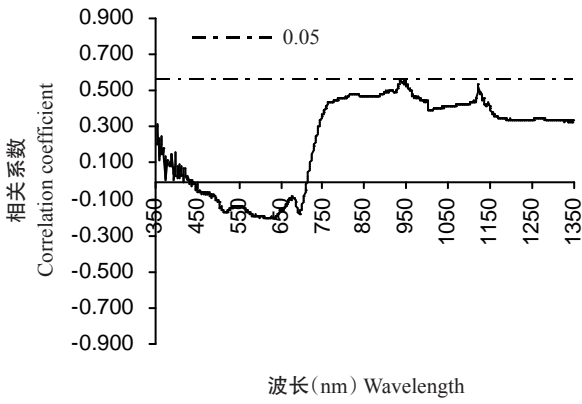


图 3 水稻叶温与光谱各波段的相关系数  
Fig.3 Correlation coefficient between leaf temperature and spectrum bands of rice

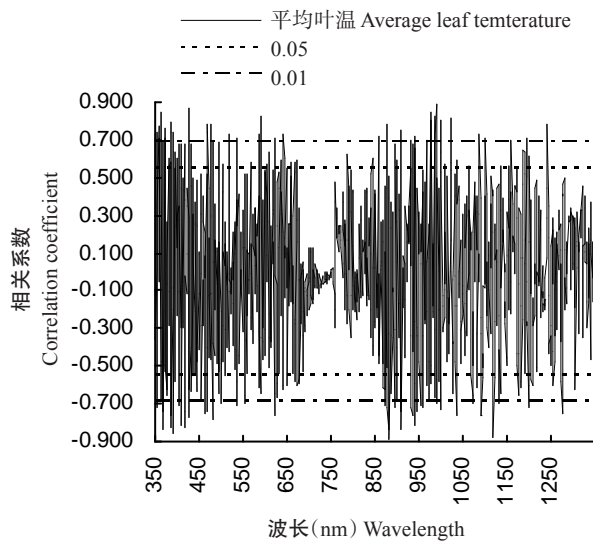


图 4 水稻叶温与一阶微分光谱各波段的相关系数  
Fig.4 Correlation coefficient between leaf temperature and first-order differential spectrum of rice

光谱进行一阶微分处理能较好地降低环境因素的影响。

2.3 植被指数与叶温的相关分析

对表1的植被指数进行计算,并根据图4选取叶温变化特征波长进行组合(885 nm, 990 nm),研究

各植被指数与叶温变化的关系。结果显示,只有NDVI未达显著相关水平,相关系数为0.411,RVI、RDVI、TSAVI与叶温的相关性均达显著相关水平,相关系数分别为0.639、0.724和0.733,其中RDVI和TSAVI达极显著相关水平( $P<0.01$ ,下同),与叶温的相关性最佳。

2.4 基于植被指数建立叶温估算模型

2.4.1 叶温估算模型 由上述分析可知,TSAVI和RDVI的相关性较高,说明采用这两个植被指数对叶温进行模拟具有较好精度。因此基于TSAVI和RDVI指数,选用2017年8月14日的叶温与冠层光谱数据作为建模样本建立叶温反演模型(表2),综合考虑两个模型的确定系数( $R^2$ )及RMSE,最佳的模拟结果应是选择 $R^2$ 相对较大而RMSE相对较小。因此,选择由RDVI建立的方程 $y=5770.137x^2-748.965x+53.615$ (建模样本 $R^2=0.544$ ,RMSE=2.443)和TSAVI建立的方程 $y=0.0007x^2+0.0067x+29.8645$ (建模样本 $R^2=0.632$ ,RMSE=2.458)进行模拟。

表 2 植被指数和叶温的关系模型(n=11)  
Table 2 Relationship model between vegetation index and leaf temperature(n=11)

植被指数 Vegetation index	方程 Equation	建模样本 $R^2$ RMSE	
RDVI	$y=20.738e^{4.920x}$	0.522	2.489
	$y=150.822x+18.695$	0.524	2.495
	$y=11.638\ln(x)+60.175$	0.518	2.514
	$y=5770.137x^2-748.965x+53.615$	0.544	2.443
TSAVI	$y=80.267x^{0.380}$	0.516	2.507
	$y=29.911e^{0.001x}$	0.529	2.449
	$y=0.036x+29.919$	0.537	2.463
	$y=0.0007x^2+0.0067x+29.8645$	0.632	2.458

2.4.2 模型检验 根据交叉验证,通过2017年8月15日测得的叶温与冠层光谱数据对反演模型进行检验。由图5和表3可知,由RDVI建立的方程其模拟值与实测值的 $R^2$ 为0.544,达极显著相关水平,RE为

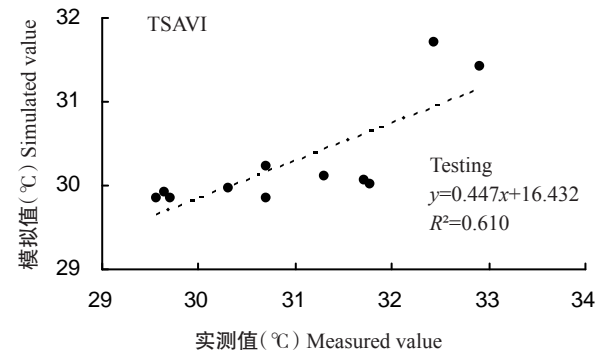
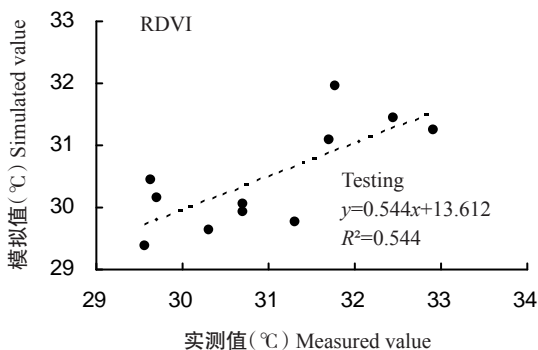


图 5 不同叶温模型模拟值与实测值的相关性  
Fig.5 Correlation between simulated values and measured values of different leaf temperature models

1.94%，均方根误差为2.567；由TSAVI建立的方程其模拟值与实测值的 $R^2$ 为0.610，达到极显著相关水平，RE为1.97%，RMSE为2.546。两种模型模拟结果的RE和RMSE较为接近，但由TSAVI建立的方程模拟结果的相关性更显著，因此使用TSAVI模拟的叶温模型能很好地反演叶温变化。

表 3 水稻叶温实测值与模拟值拟合评定指标(n=11)

Table 3 Evaluation index of the measured value of the leaf temperature of rice and the simulated value(n=11)

方程 Equation	$R^2$	RE(%)	RMSE
$y=5770.137x^2-748.965x+53.615$	0.544	1.94	2.567
$y=0.0007x^2+0.0067x+29.8645$	0.610	1.97	2.546

### 3 讨论

叶温作为植物的重要生理指标，其变化与气孔的开闭、叶片水含量、光合活性及酶活性的变化密切相关(吴冰洁等, 2015; 周宁等, 2017)，同时作物的反射光谱能较好地反映作物基本生理特性，因此，本研究分析了水稻冠层反射光谱与叶温间的关系，并根据光谱数据对叶温进行反演。

水稻为喜温作物，温度变化会直接影响水稻的生长，其在抽穗期最适生长温度为28~32℃(霍治国和王石立, 2009)。在本研究中，反射光谱近红外区的反射率随着叶温的升高而升高，与王平荣等(2009)的研究结果一致。且随着叶温的升高，光谱反射率增加的幅度越来越小，34℃时反射率仅增加0.03；对比水稻的最适生长温度，说明过高的温度会抑制叶片光合作用强度，与谢晓金等(2010)的研究结果一致。同时，红边参数在适宜的温度范围内，随着叶温的升高而发生“红移”现象，当叶温升高到34℃时，超过水稻的最适生长温度，红边参数出现“蓝移”现象，与周峰等(2010)的研究结论一致。通过对原始光谱及红边参数的对比分析，证明通过高光谱数据研究水稻叶温的可行性。

关于叶温的高光谱反演研究，许改平等(2014)发现随着叶温的升高，叶片反射率逐渐上升。黄春燕等(2014)研究发现620和850 nm单波长光谱参数及RVI、NDVI与冠层叶温均存在显著相关性，其中，NDVI和RVI与冠层叶片温度的相关性高于620和850 nm单波长光谱参数与冠层叶片温度的相关性，说明相较于单波长光谱参数，植被指数能更好地反映植被温度信息。本研究通过对原始光谱导数处理筛选光谱对叶温的敏感波段，发现885和990 nm的近红外波段水稻冠层反射光谱与叶温的相关性最显著，通过了0.01水平的显著性检验，与黄春燕等(2014)

在850 nm波长处研究结果一致，但在620 nm波长处无明显相关性，主要原因是试验作物、试验仪器和环境的不同；根据前人研究选用DVI、NDVI、RDVI和TSAVI等4种光谱指数，其中RDVI由DVI和NDVI组合计算，综合了两者的优点，更适用于水稻的冠层光谱研究，而基于土壤线的TSAVI能减少土壤背景的影响。结果显示，相对于DVI和NDVI，TSAVI和RDVI对叶温的相关性更好，其中TSAVI的相关系数最大；根据敏感波段计算植被指数，构建叶温反演模型，对比由RDVI和TSAVI分别构建的模型，发现由TSAVI构建的模型对叶温的模拟效果更好。

虽然本研究基于光谱数据成功地建立了水稻叶温反演模型，但仍存在一些缺陷。在对原始数据进行预处理时，只考虑稻田背景的光谱信息对原始光谱的影响，而忽略了作物叶片表面散射的影响，因此应优化光谱原始数据的预处理方法，如多元散射校正、聚类算法等，综合各种预方法最大程度地还原冠层光谱信息。另外，在提取与叶温相关性最显著的植被指数时，对叶温敏感波段内特征波长的筛选方法过于简单，可结合标准误差及相对误差等统计学参数优化特征波长的选取，提高模型的精度。

### 4 建议

#### 4.1 综合考虑多种预处理方法，最大程度还原光谱信息

光谱数据的精度会直接影响模型对作物生理指标的反演精度，而在测量光谱数据时，稻田环境、叶片本身的表面散射及作物茎秆等均会直接或间接影响光谱数据的准确性，因此在建立模型之前，对光谱数据进行预处理是必不可少的操作。不同的预处理方法能降低不同因素对光谱信息的干扰，其中，微分处理能降低稻田背景光谱信息的影响，多元散射校正能有效消除散射影响，聚类算法能减少作物茎秆、穗粒等对光谱信息的影响。综合多种预处理方法，可还原最准确的光谱信息。

#### 4.2 优化特征波长的提取，提高建立模型的精度

特征波长会直接影响植被指数的大小，进而改变叶温与植被指数间的相关性，改变叶温的建模方式，影响最终模型的准确性。首先根据预处理结果，提取叶温的敏感波段，在对特征波长进行提取时可对叶温敏感波段内的全波长进行组合计算植被指数，将所有的植被指数组合情况纳入考量，再通过决定系数、标准误差和相对误差确定最终的特征波长，提高植被指数与叶温的相关性水平，增加模型精度，优化反演结果。

### 4.3 基于高光谱技术,实现冠层叶温的无损监测

高光谱遥感技术以其光谱分辨率高、光谱信息量大等特点和优势,对植被的生长变化具有高度的敏感性,在农业监测方面展现出快速精确的特点,成为研究作物生理和生长的重要手段。通过高光谱数据反演叶温能减少因直接接触对水稻造成的损伤及增大测量区域的优点,避免人为测量可能出现的误差,且减少人工测量的工作量,为水稻叶温的模拟与监测提供数据支持。

#### 参考文献:

- 陈瑛瑛,王徐艺凌,朱宇涵,武威,刘涛,孙成明. 2018. 水稻穗部氮素含量高光谱估测研究[J]. 作物杂志, (5): 116-120. [Chen Y Y, Wang X Y L, Zhu Y H, Wu W, Liu T, Sun C M. 2018. Hyperspectral estimation of nitrogen content in rice panicle[J]. Crops, (5): 116-120.]
- 程高峰,张佳华,李秉柏,李萍萍,杨沈斌,王小宁. 2008. 不同温度处理下水稻高光谱及红边特征分析[J]. 江苏农业学报, 24(5): 573-580. [Cheng G F, Zhang J H, Li B B, Li P P, Yang S B, Wang X N. 2008. Hyperspectral and red edge characteristics for rice under different temperature stress levels[J]. Journal of Jiangsu Agricultural Sciences, 24(5): 573-580.]
- 黄春燕,王登伟,肖莉娟,王雅芳. 2014. 不同水分条件下棉花光谱数据对冠层叶片温度的响应特征[J]. 棉花学报, 26(3): 244-251. [Huang C Y, Wang D W, Xiao L J, Wang Y F. 2014. The responsive characteristics between cotton canopy leaves temperature from infrared thermography and hyperspectral data under different water conditions [J]. Cotton Science, 26(3): 244-251.]
- 霍治国,王石立. 2009. 农业和生物气象灾害[M]. 北京: 气象出版社: 16-25. [Huo Z G, Wang S L. 2009. Agricultural and biological meteorological disasters[M]. Beijing: Meteorological Press: 16-25.]
- 刘芬,屈成,肖楠,陈光辉,唐文帮,王悦. 2017. 水稻高光谱变化特征与叶绿素含量监测研究[J]. 激光生物学报, 26(4): 326-333. [Liu F, Qu C, Xiao N, Chen G H, Tang W B, Wang Y. 2017. A study on spectral characteristics and chlorophyll content in rice[J]. Acta Laser Biology Sinica, 26(4): 326-333.]
- 刘科,陆键,高梦涛,卢碧林,魏中伟,马国辉,田小海,张运波. 2018. 施氮量对杂交水稻叶片光谱特征、SPAD值和光能拦截率关系的影响[J]. 核农学报, 32(2): 362-369. [Liu K, Lu J, Gao M T, Lu B L, Wei Z W, Ma G H, Tian X H, Zhang Y B. 2018. Effects of different nitrogen treatments on the relationship between flag leaves spectral characteristic and SPAD and IPAR in hybrid rice varieties[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 32(2): 362-369.]
- 刘亚,丁俊强,苏巴钱德,廖登群,赵久然,李建生. 2009. 基于远红外热成像的叶温变化与玉米苗期耐旱性的研究[J]. 中国农业科学, 42(6): 2192-2201. [Liu Y, Ding J Q, Subhash Chander, Liao D Q, Zhao J R, Li J S. 2009. Identification of maize drought-tolerance at seedling stage based on leaf temperature using infrared thermography [J]. Scientia Agricultura Sinica, 42(6): 2192-2201.]
- 刘怡晨,马驿,仝春艳,段博,蒋琦. 2018. 基于偏角光谱检索算法的油菜和水稻LAI反演研究[J]. 中国生态农业学报, 26(7): 999-1010. [Liu Y C, Ma Y, Tong C Y, Duan B, Jiang Q. 2018. Estimation of leaf area index of rapeseed and rice based on deflection angle and spectral retrieval algorithm[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 26(7): 999-1010.]
- 王平荣,张帆涛,高家旭,孙小秋,邓晓建. 2009. 高等植物叶绿素生物合成的研究进展[J]. 西北植物学报, 29(3): 629-636. [Wang P R, Zhang F T, Gao J X, Sun X Q, Deng X J. 2009. An overview of chlorophyll biosynthesis in higher plants[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 29(3): 629-636.]
- 王仲林,谌俊旭,程亚娇,范元芳,李凡,赵刚成,杨峰,杨文钰. 2019. 不同宽窄波段组合的光谱参量对夏玉米穗位叶氮素含量估测[J]. 四川农业大学学报, 37(2): 152-160. [Wang Z L, Chen J X, Cheng Y J, Fan Y F, Li F, Zhao G C, Yang F, Yang W Y. 2019. Estimating nitrogen content of maize leaf based on spectral parameters of different wide and narrow band combination[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 37(2): 152-160.]
- 吴冰洁,刘玉军,姜闯道,石雷. 2015. 叶片生长进程中气孔发育对叶温调节的影响[J]. 植物生理学报, (1): 119-126. [Wu B J, Liu Y J, Jiang C D, Shi L. 2015. Effects of stomatal development on leaf temperature during leaf expansion[J]. Plant Physiology Communications, (1): 119-126.]
- 谢晓金,申双和,李映雪,李秉柏,程高峰,杨沈斌. 2010. 高温胁迫下水稻红边特征及SPAD和LAI的监测[J]. 农业工程学报, 26(3): 183-190. [Xie X J, Shen S H, Li Y X, Li B B, Cheng G F, Yang S B. 2010. Red edge characteristics and monitoring SPAD and LAI for rice with high temperature stress[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 26(3): 183-190.]
- 辛明月,殷红,陈龙,张美玲,任智勇,苗静. 2015. 不同生育期水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 中国农业气象, 36(6): 762-768. [Xin M Y, Yin H, Chen L, Zhang M L, Ren Z Y, Miao J. 2015. Estimation of rice canopy LAI with different growth stages based on hyperspectral remote sensing data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 36(6): 762-768.]
- 许改平,吴兴波,刘芳,王玉魁,高岩,左照江. 2014. 高温胁迫下毛竹叶片色素含量与反射光谱的相关性[J]. 林业科学, 50(5): 41-48. [Xu G P, Wu X B, Liu F, Wang Y K, Gao Y, Zuo Z J. 2014. The correlation between the pigment content and reflectance spectrum in *Phyllostachys edulis* leaves subjected to high temperature[J]. Scientia Silvae Sinicae, 50(5): 41-48.]



- 杨晨波,冯美臣,孙慧,王超,杨武德,谢永凯,靖秉翰. 2019. 不同灌水处理下冬小麦地上干生物量的高光谱监测[J]. 生态学杂志,38(6): 1767-1773. [Yang C B, Feng M C, Sun H, Wang C, Yang W D, Xie Y K, Jing B H. 2019. Hyperspectral monitoring of aboveground dry biomass of winter wheat under different irrigation treatments[J]. Chinese Journal of Ecology,38(6): 1767-1773.]
- 姚振坤,罗新兰,李天来,吕薇薇,李东,颜阿丹,仇家奇. 2010. 日光温室番茄叶温的模拟及与环境因子的关系[J]. 江苏农业学报,26(3): 587-592. [Yao Z K, Luo X L, Li T L, Lü W W, Li D, Yan A D, Qiu J Q. 2010. A simulation model of the relationship between tomato leaf temperature and ambient factors in solar greenhouse[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences,26(3): 587-592.]
- 张晶,张珏,田海清. 2018. 基于高光谱成像技术的甜菜叶片氮素遥感估测[J]. 中山大学学报(自然科学版),57(6): 103-112. [Zhang J, Zhang J, Tian H Q. 2018. Remote sensing estimation research of leaf nitrogen in sugar beet based on hyperspectral imaging[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,57(6): 103-112.]
- 周龙飞,顾晓鹤,成枢,杨贵军,孙乾,束美艳. 2019. 倒伏胁迫下玉米抽穗期叶面积密度光谱诊断[J]. 中国农业科学,52(9): 1518-1528. [Zhou L F, Gu X H, Cheng S, Yang G J, Sun Q, Shu M Y. 2019. Spectral diagnosis of leaf area density of maize at heading stage under lodging stress[J]. Scientia Agricultura Sinica, 52(9): 1518-1528.]
- 周宁,景立权,王云霞,朱建国,杨连新,王余龙. 2017. 开放式空气中CO<sub>2</sub>浓度和温度增高对水稻叶片叶绿素含量和SPAD值的动态影响[J]. 中国水稻科学,31(5): 524-532. [Zhou N, Jing L Q, Wang Y X, Zhu J G, Yang L X, Wang Y L. 2017. Dynamic effects of CO<sub>2</sub> concentration and temperature increase on chlorophyll content and SPAD value in rice leaves in open air[J]. Chinese Rice Science,31(5): 524-532.]
- 周峰,华春,周泉澄,王仁雷. 2010. 高温胁迫对菠菜类囊体膜蛋白亚基和光谱特征的影响[J]. 南京师大学报(自然科学版),33(1): 98-101. [Zhou F, Hua C, Zhou Q C, Wang R L. 2010. Effects of high temperature stress on protein subunit and spectra characteristic of thylakoid of spinach[J]. Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition),33(1): 98-101.]
- Baret F, Guyot G, Major D J. 2002. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation[C]//12<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver: IEEE. doi: 10.1109/IGARSS.1989.576128.
- Bian Z J, Cao B, Li H, Du Y M, Song L S, Fan W J, Xiao Q, Liu Q H. 2017. A robust inversion algorithm for surface leaf and soil temperatures using the vegetation clumping index[J]. Remote Sensing,9(8): 780-795.
- Chen Z H, Guo J B, Zha T S, Qin S G, Tang S L, Jia X. 2014. Seasonal variation and water response of leaf nitrogen content for three psammophytic shrub species[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 28(6): 63-67.
- Jordan C F. 1969. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology,50(4): 663-666.
- Kaufman Y J, Tanré D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(2): 261-270.
- Rogers A, Medlyn B E, Dukes J S, Bonan G, von Caemmerer S, Dietze M, Kattge J, Leakey A D B, Mercado L M, Niinemets Ü, Prentice I C, Serbin S P, Sitch S, Way D A, Zaehle S. 2017. A roadmap for improving the representation of photosynthesis in Earth system models[J]. New Phytologist,213(1): 22-42.
- Roujean J L, Breon F M. 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements[J]. Remote Sensing of Environment,51(3): 375-384.

(责任编辑 邓慧灵)