

# 基于无人机遥感的不同施氮水稻 光谱与植被指数分析

裴信彪<sup>1,2</sup>, 吴和龙<sup>1,2</sup>, 马 萍<sup>1,2</sup>, 严永峰<sup>3</sup>, 彭 程<sup>1</sup>, 郝 亮<sup>1\*</sup>, 白 越<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 吉林省农业科学院 水稻研究所, 吉林 公主岭 136100)

**摘要:** 卫星遥感空间分辨率低且易受大气、云层、雨雪等因素的影响。本文使用共轴十二旋翼无人机搭载光谱仪构成农情遥感系统。首先, 给出自主设计的无人机结构和飞行控制系统, 围绕飞行平台、控制系统、遥感载荷构建了多环节数据备份的无人机遥感数据采集系统; 然后, 试验测试 4 种施氮水平水稻的光谱指数变化规律; 最后, 通过试验数据分析可得: 在可见光区水稻冠层光谱反射率随氮素水平增加而减小, 在近红外区, 光谱反射率一开始随氮素水平增加而增大, 但氮素水平增大到一定程度后再增加氮素导致反射率降低。在 4 种氮素水平下, 水稻植被指数 RVI 和 NDVI 由分蘖期到拔节期先增大, 然后至抽穗期又逐渐减小, 且抽穗期 RVI 和 NDVI 值小于其分蘖期 RVI 和 NDVI 值。试验表明以多旋翼无人机为平台搭载光谱仪器构成农情遥感监测系统用于反演作物植被指数方面是可行的。本文设计的无人机遥感数据采集系统能够有效、实时获取遥感信息, 其获取的高空间分辨率和光谱分辨率的农田实时信息能够为作物长势的分析、健康状况的监测提供必要的的数据支持。

**关键词:** 无人机; 数据采集; 水稻植被指数; 氮素

**中图分类号:** S565; TP79      **文献标识码:** A      doi:10.3788/CO.20181105.0832

**收稿日期:** 2017-12-14; **修订日期:** 2018-03-02

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No. 11372309, No. 61304017); 吉林省科技发展计划重点项目 (No. 20150204074GX, No. 20160204010NY); 省院合作科技专项资金项目 (No. 2017SYHZ0024); 中科院青促会项目 (No. 2014192).

Sponsored by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11372309, No. 61304017); Key Technology Development Project of Jilin Province (No. 20150204074GX, No. 20160204010NY); the Provincial Special Funds Project of Science and Technology Cooperation (No. 2017SYHZ0024); Youth Innovation Promotion Association (No. 2014192).

# Analysis of the spectrum and vegetation index of rice under different nitrogen levels based on unmanned aerial vehicle remote sensing

PEI Xin-biao<sup>1,2</sup>, WU He-long<sup>1,2</sup>, MA Ping<sup>1,2</sup>, YAN Yong-feng<sup>3</sup>, PENG Cheng<sup>1</sup>, HAO Liang<sup>1\*</sup>, BAI Yue<sup>1\*</sup>

( 1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Institute of Rice, Jilin Academy of Agriculture, Gongzhuling 136100, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: baiy@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** Satellite remote sensing has low spatial resolution and is susceptible to the atmosphere, cloud layer, rain, and snow and so on. In this paper, the coaxial remote sensing system is constructed by using a coaxial 12-rotor unmanned aerial vehicle with spectrometer. Firstly, the self-designed UAV structure and flight control system are introduced, and a multi-link data backup UAV remote sensing data acquisition system is built around the flight platform, control system and remote sensing load. Then, the change of spectral index of four rices with different nitrogen levels is tested. Finally, by analyzing the experimental data, it can be obtained that the spectral reflectance of rice canopy decreases with the increase of nitrogen level in the visible region, and the spectral reflectance increases with the increase of nitrogen level in the near-infrared region. However, when the nitrogen level is increased to a certain extent, the increase of nitrogen will cause the reflectivity to decrease. Under the four nitrogen levels, the RVI and NDVI increased from tillering stage to jointing stage, then decreased gradually in heading stage, and the values of RVI and NDVI at heading stage are lower than those of RVI and NDVI in tillering stage. The test shows that the multi-rotor UAV platform equipped with a spectrometer composed of agricultural remote sensing monitoring system is feasible in the inversion of crop vegetation index. The UAV remote sensing data acquisition system designed in this paper can obtain remote sensing information effectively and in real time. The real time information of farmland with high spatial resolution and spectral resolution can provide necessary data support for crop growth analysis and health monitoring.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; multi link data backup; data acquisition; rice vegetation index; nitrogen

## 1 引 言

水稻是我国最重要的主粮,氮素是水稻生长过程中最重要的营养元素之一,也是土壤中最活跃的元素之一<sup>[1-2]</sup>。水稻产量在一定范围内和氮肥施用量有直接关系,但过量施用氮肥会导致氮肥利用率降低,同时污染水体,造成土壤板结和硬化<sup>[3-5]</sup>,因此,实现水稻营养状况的快速诊断,对水稻氮素含量进行监测以便合理施用氮肥具有重要

意义。营养诊断的传统方法是采用实验室测试,准确性高,但时效性差,难以满足其在生产中的快速诊断需求<sup>[6-9]</sup>。随着遥感技术的发展,基于星载的光谱技术被用于农业、气象、国土勘察等众多领域中<sup>[10-12]</sup>,成为诊断的一种方法。

Thenkabail 等人<sup>[13]</sup>将 TM 影像与同期采集的地面实测数据相结合,建立了玉米和大豆的叶面积指数估算模型,预测精度可达 66% 以上。Bunnik<sup>[14]</sup>利用遥感技术成功提取出植被覆盖度与叶面积指数。Walthall 等人<sup>[15]</sup>利用 ETM + 影像反

演了玉米和大豆的叶面积指数,并对比分析了使用神经网络算法和经验模型在反演上的差异。虽然卫星遥感技术已经成功地应用于宏观农情监测中,并获得了较好的应用效果,提高了农业生产效益,但卫星遥感技术存在影像分辨率低、重访周期长等缺点<sup>[16]</sup>,另外,基于卫星遥感的监测精度还会受到云层、大气和雨雪等环境一定程度的干扰,监测得到的数据往往与真实值有较大的偏差。随着无人机技术越来越成熟,无人机在农业很多领域成功地进行了实际应用。无人机平台使用灵活、遥感距离近、受环境影响小,能够实时快速地获取遥感数据<sup>[17]</sup>,成为当前农业遥感应用的研究热点和前沿手段,可作为卫星遥感之外的新型测量方法<sup>[18]</sup>。当前利用无人机平台搭载光谱传感器进行农业遥感的相关工作还较少,本文使用共轴十二旋翼无人机搭载光谱仪构成农情遥感系统,测试不同施氮水平水稻的光谱指数变化规律,并使用广泛应用的比值植被指数(RVI)和归一化植被指数(NDVI)来分析不同氮素水平下水稻关键生育期内长势情况。RVI和NDVI均可以预测水稻叶片氮素含量及氮素积累量,且具有较高的准确性,且光谱参数对叶片氮素积累量的预测效果优于叶片氮含量。由于差值植被指数(DVI)对土壤背景的变化极为敏感,故本文采用RVI和NDVI来分析不同氮素水平下水稻关键生育期内长势情况,以期作为作物长势分析、健康状况监测提供必要的的数据支持,同时验证无人机搭载光谱遥感获取数据的有效性,为水稻氮素的合理施用提供更多理论指导。

## 2 高光谱遥感数据采集系统结构

### 2.1 飞行平台

试验使用的飞行平台为自主研发的六轴十二旋翼无人机,处于同一平面内的六个等长碳纤维机臂围绕中心点均匀分布构成机体平面;6组12个电机和旋翼构成驱动单元依次安装于机臂末端。电机轴向与机体平面夹角为 $\zeta$ ( $0 < \zeta < 20^\circ$ ),使得升力在偏航方向分量增大,显著增强偏航控制力矩,提升了系统风扰下的航向稳定性。飞行平台实物图如图1所示。



图1 六轴十二旋翼无人机

Fig. 1 Twelve-Rotor UAV

飞行平台空载4.3 kg,最大带载10 kg,空载续航时间40 min,详细参数如表1所示。

表1 六轴十二旋翼无人机参数

Tab. 1 Twelve-Rotor UAV parameters

参数	数值
质量/kg	4.3
对角电机轴距/m	0.91
$x/y$ 轴转动惯量/( $\text{Nm} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$2.6 \times 10^{-2}$
$z$ 轴转动惯量/( $\text{Nm} \cdot \text{s}^{-2}$ )	$51. \times 10^{-2}$
旋翼升力系数/( $\text{Ns}^2$ )	$6.2 \times 10^{-5}$
旋翼阻力系数/( $\text{Ns}^2$ )	$1.3 \times 10^{-6}$

### 2.2 飞行控制系统

飞行控制系统包括硬件模块和软件模块,其中硬件模块如图2所示。

其中,飞控主芯片采用STM32F429,实时处理用户发出的飞行航迹指令、遥感载荷工作指令,并回传飞行状态和遥感数据。同时主控制芯片与遥感载荷交互间,采用RS232-TTL遥感数据电平转换实现实时传输,并配备MicroSD卡进行存储。

软件模块中,核心是飞行控制方法的选择,无人机搭载遥感载荷进行数据采集时,需要良好的轨迹跟踪精度,为此采用一个基于双环嵌套结构的飞行器轨迹跟踪飞行控制系统,如图3所示。

无人飞行器自主轨迹跟踪飞行控制闭环系统被设计为内、外环嵌套的结构。其中,在控制系统的外环设计一个基于ADRC算法的位置控制器,其作用为对比飞行器的位置信息以及期望轨迹信息,确定飞行器在各个方向上所需求的位置控制量,将位置控制量转化为期望的姿态角信号,并将

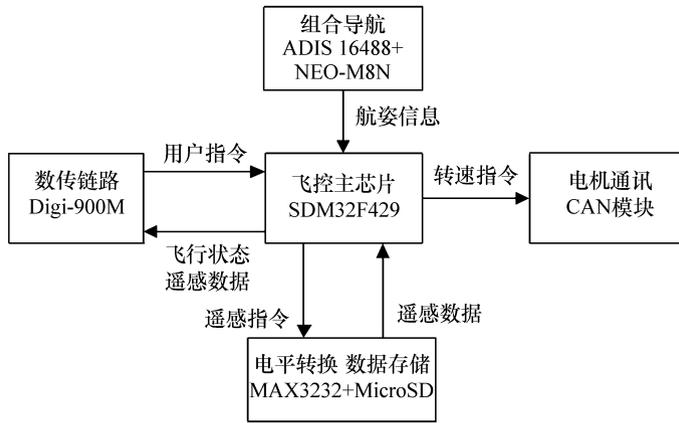


图 2 飞行控制硬件模块

Fig. 2 Hardware module of flight control

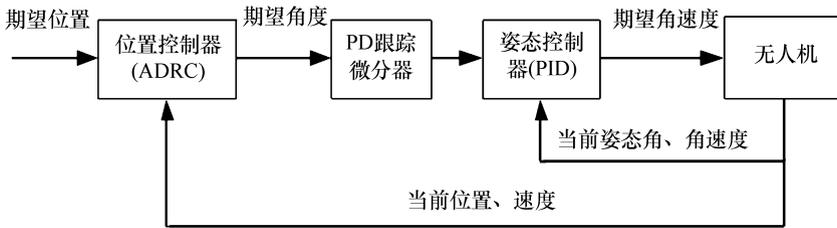


图 3 飞行控制轨迹跟踪方法

Fig. 3 Trajectory tracking method for flight control

其作为输入传送给内环的飞行器姿态控制系统。PD 跟踪微分器环节,可以有效地平滑姿态角的期望信号,便于姿态跟踪算法的实现。内环采用 PID 算法保证飞行器的姿态实时跟踪,实现对期望轨迹的自主跟踪飞行。飞行控制参数如表 2 所示。

表 2 飞行控制系统参数

Tab. 2 Parameters of flight control system

参数	数值
组合导航姿态精度/(°)	0.1
组合导航位置精度/m	1
角度跟踪精度/(°)	2.0
位置跟踪精度/m	3
地面站-无人机通讯速率/bps	115 200
无人机-光谱仪通讯速率/bps	115 200

Spectral Device) FieldSpec HandHeld 便携式光谱仪,适用于从遥感测量、农作物监测、森林研究到工业照明测量、海洋学研究和矿物勘察的各方面应用。操作简单,软件包功能强大。此仪器用来测量辐射、辐照度、CIE 颜色、反射和透射。具体参数指标如表 3 所示。

表 3 ASD FieldSpec 光谱仪参数

Tab. 3 Parameters of ASD FieldSpec

参数	数值
波长范围/nm	350 ~ 1 05
波长精度/nm	0.5
波长重复性/nm	优于 0.3
光谱分辨率/nm	3
积分时间/ms	2n × 17
扫描时间/ms	100
续航时间/h	2.5
重量/kg	1.5

### 2.3 光谱遥感设备

光谱遥感设备选用美国 ASD ( Analytical

光谱仪的使用条件范围广,可手持或固定在

三脚架上,也可作为有效载荷挂载在无人机上。本文将光谱仪挂载在无人机机体正下方,对不同施氮量的水稻土地进行光谱测量,可实时测量原始数据、反射、透射、辐射和辐照度光谱曲线,其中 ASD 可测量的最大辐射值超过  $0^\circ$  天顶角处 100% 反射白板辐射值的 2 倍。

## 2.4 数据采集系统

光谱遥感数据采集系统,要求能够实时传输位置信息和遥感信息,因此采用遥感载荷-飞行平台-无人机的传输方式,系统在这 3 个工作节点,都对采集的遥感数据进行了实时存储,实现多环节数据存储和备份,如图 4 所示。

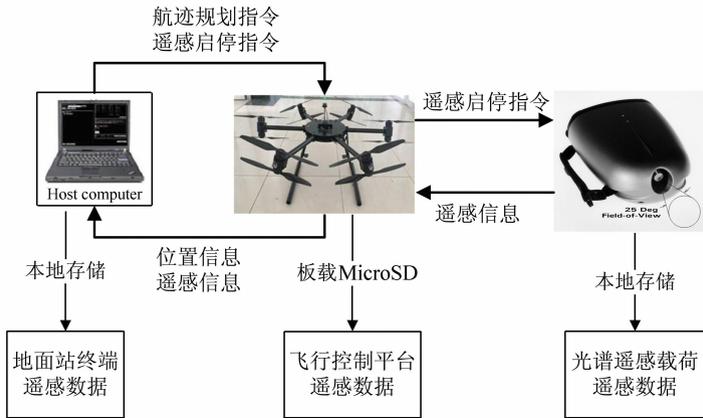


图 4 遥感数据采集系统

Fig. 4 Acquisition system of remote sensing data

采集的遥感数据,ASD 光谱仪本地进行存储备份,同时回传至飞行平台。平台对数据进行校验和板载 SD 卡存储。在飞行平台与地面站的实时通信中,将遥感数据和位置信息组合成数据包,经 900M 无线数传模块上传至地面站窗口显示并保存。系统在地面站、飞行平台、遥感载荷 3 个环节都进行了数据备份。飞行平台备份遥感载荷数据会产生极少量数据误码,地面站备份时由于无线传输会产生微量误码。然而多环节的备份可为试验自由选择数据源提供方便,选择地面站数据时可以直接通过窗口观测遥感数据,使用飞行平台 SD 卡的遥感数据,可以在试验结束后详细分析多项参数。

## 3 试验结果与分析

试验地点位于吉林省公主岭市水稻研究所试验田 ( $124^\circ 44' E, 43^\circ 28' N$ ),该地区为平原地区,土壤类型为水稻土。设计 4 个施氮水平试验区域,分别为不施氮区 (N1)、施氮量  $50 \text{ kg} / \text{hm}^2$  (N2)、施氮量  $100 \text{ kg} / \text{hm}^2$  (N3) 和施氮量

$200 \text{ kg} / \text{hm}^2$  (N4) 4 个区域。

选择天气条件良好、晴朗无风的上午 9:00 - 10:30,分别在水稻分蘖期、拔节期和抽穗期测定水稻冠层光谱反射率。试验测试时多旋翼无人机遥感系统距离测试区上空 10 m 并保持静止,光谱仪视场通过三轴稳定云台保持垂直向下,每个测量区域在不同位置均进行 5 次测量,每次测量开始和结束都对采集位置的光谱进行白板校正,以 5 次试验测量点平均作为该区域光谱反射值。试验时的数据源选择飞行平台存储的遥感数据,试验场景如图 5 所示。

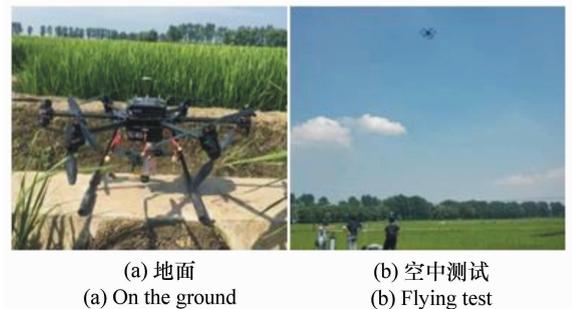


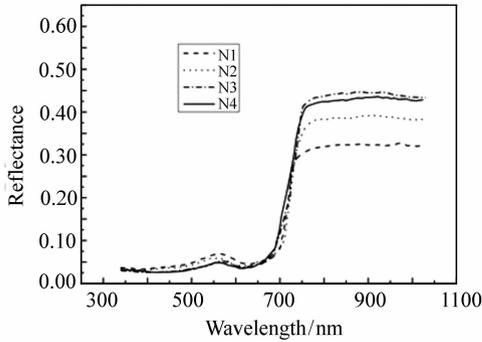
图 5 旋翼无人机遥感系统

Fig. 5 Remote sensing system of multirotor UAV

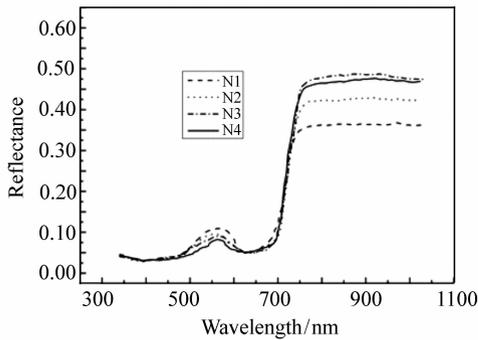
### 3.1 水稻冠层反射光谱特性

图 6 中 a、b、c 分别为分蘖期、拔节期、抽穗期不同氮素水平下水稻冠层光谱反射率曲线。由图 6 可以看出,水稻冠层光谱反射率在分蘖期、拔节期和抽穗期随氮素水平呈现一定的规律性:即在可见光区水稻冠层反射率随氮素水平增加呈减小趋势,其中区域 N1 最高,区域 N4 最低;在近红

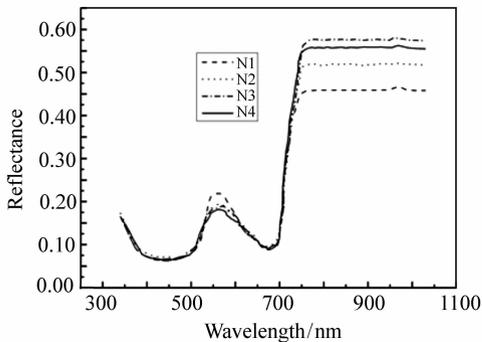
外区,光谱反射率一开始随氮素水平增加而增大,但氮素水平增大到一定程度后再增加氮素导致反射率降低,近红外区光谱反射率顺序为 N3 > N4 > N2 > N1。同时高氮素水平下,水稻冠层在近红外外的反射率较高,在可见光区的反射率较低,主要是由于高氮素水平对应着较高的叶绿素含量,而叶绿素在可见光区蓝、红光具有强烈吸收特性而在近红外区具有高度的反射、散射特性,叶绿素在可见区形成了一个可见光区的小反射峰,能看到对红光与蓝光波段的强吸收,使绿色波段的反射渐近突出。另外,近红外区的光谱反射率 N3 > N4 表明,当施氮水平超过一定量时,过高的氮素供应反倒影响水稻叶绿素积累,而叶绿素含量是作物长势的重要参数,因此,过高的氮素供应不但造成浪费,还会影响水稻生长。



(a) 分蘖期  
(a) In tillering stage



(b) 拔节期  
(b) In jointing stage



(c) 抽穗期  
(c) In heading stage

图 6 不同时期、不同区域、不同氮素含量的水稻冠层反射光谱

Fig. 6 Canopy reflectance spectra in different time and at different nitrogen levels

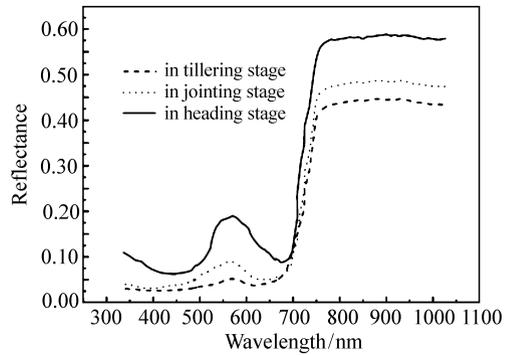


图 7 抽穗期不同氮素营养水平水稻冠层反射光谱  
Fig. 7 Canopy reflectance spectra in heading stage at different nitrogen levels

图 7 为 N3 施氮水平水稻冠层光谱反射率随生长进程变化曲线,由图 7 可以看出,随着水稻生长进程的增加,水稻冠层光谱反射率增加,其原因是随着生长进程增加,叶绿素的含量不断提高,使得对蓝、红光的吸收效应和近红外的反射效应增强。

### 3.2 不同氮素水平下水稻植被指数的变化

植被指数用来表征作物生长水平,本文采用的 RVI 和 NDVI 来分析水稻氮素水平和植被指数的关系

$$\left\{ \begin{aligned} RVI &= \frac{NIR}{R} \\ NDVI &= \frac{NIR - R}{NIR + R} \end{aligned} \right.$$

其中  $NIR$  为红外波段光谱反射率,  $R$  为红光光谱反射率。图 8 为由光谱反射率计算得到的植被指数  $RVI$  和  $NDVI$ , 为减小单点光谱误差影响,  $NIR$  为红外波段光谱, 选择 760 ~ 900 nm,  $R$  为红光光谱, 选择 630 ~ 690 nm, 选择范围与美国陆卫 5 卫星上专题制图仪 (Thematic mapper) 波段 TM4 (760 ~ 900 nm)、TM3 (630 ~ 690 nm) 相当<sup>[19]</sup>。

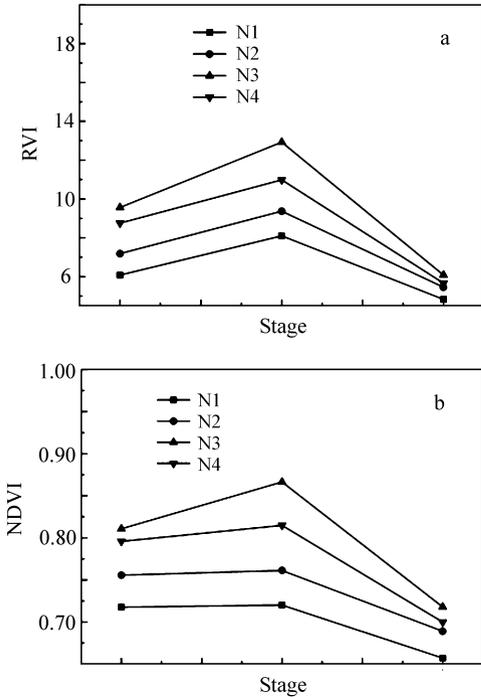


图 8 不同氮素水平水稻光谱植被指数  $RVI$  与  $NDVI$  变化

Fig. 8 Variation of  $RVI$  and  $NDVI$  of rice under different nitrogen levels

从图 8a 中可看出, 水稻植被指数  $RVI$  随生育期进程先增大再减小。4 种氮素水平 N1 到 N4 条件下, 分蘖期到拔节期之间  $RVI$  不断增大, 拔节期至抽穗期之间逐渐减小, 且抽穗期  $RVI$  值小于其分蘖期  $RVI$  值。上述变化原因分析为: 水稻生长进程中, 植株不断壮大, 随着叶面积不断增加以及叶绿素含量的增高, 对近红外波段的反射率不断增强, 同时叶绿素含量的提升使作物对可见波段红光的吸收增强, 因此  $RVI$  值在分蘖期到拔节期随生长进程显著增加。从拔节期到抽穗期生长进程中  $RVI$  值显著减小, 分析其原因, 随着生长进程不断趋于成熟, 叶面积逐渐减小, 水稻冠层对近红外波段的反射强度逐渐减小, 对可见光波段

的红光吸收效应减弱, 导致  $RVI$  显著减小, 另一方面, 随着生长进程水稻穗数逐渐增多, 稻穗的反射光谱在近红外波段和可见波段, 和水稻冠层叶片的反射光谱之间的差异逐渐增大, 直接体现为稻穗对水稻冠层光谱的影响不断增强, 同时随着水稻成熟进程的增加, 水稻叶片颜色逐渐由绿转黄, 叶绿素对红光的吸收减弱, 可见波段的红光反射增强, 因此, 水稻  $RVI$  随拔节期向抽穗期进程显著减小。

$NDVI$  在分蘖期至抽穗期的生育期内变化如图 8b 所示, 可以看出,  $NDVI$  也呈明显的规律性变化, 4 种氮素水平 N1 到 N4 条件下, 从分蘖期到拔节期  $NDVI$  都逐渐增大, 拔节期至抽穗期逐渐减小, 且抽穗期  $NDVI$  值小于其分蘖期  $NDVI$  值。归一化植被指数  $NDVI$  对简单比值植被指数  $RVI$  进行了非线性归一化处理并限制了  $RVI$  的无界增长, 从图 8b 中也可以看出  $NDVI$  的整体变化规律同  $RVI$  是一致的。

由图 8a 和图 8b 可以看出, 相对 N3 的施氮水平, N4 施氮水平下水稻  $RVI$  和  $NDVI$  两种植被指数均小于同生育期 N3 施氮水平水稻的植被指数, 其结果同图 2 光谱反射率结果相一致, 因此, 植被指数  $RVI$  和  $NDVI$  都可以反映和水稻长势密切相关的叶绿素含量, 两种植被指数的大小与氮含量、叶绿素含量有直接对应关系, 对过量施用氮素影响水稻生长也可以直观反映在植被指数  $RVI$  和  $NDVI$  上。

## 4 结 论

本文利用多旋翼无人机搭载光谱仪对不同施氮水平的水稻关键生育期进行了遥感测量, 测量结果表明不同氮素营养水平水稻的冠层光谱存在差异, 在可见光区水稻冠层反射率随氮素水平增加而减小, 在近红外区, 光谱反射率一开始随氮素水平增加而增大, 但氮素水平增大到一定程度后再增加氮素导致反射率降低。水稻植被指数  $RVI$  和  $NDVI$  都随生育期进程先增大再减小, 4 种氮素水平条件下, 从分蘖期到拔节期  $RVI$  值都不断增大, 拔节期至抽穗期又逐渐减小, 且抽穗期  $RVI$  和  $NDVI$  值小于其分蘖期  $RVI$  和  $NDVI$  值。因

此,植被指数  $R_{Vi}$  和  $NDVI$  都可以反映和稻长势密切相关的叶绿素含量,且两种植被指数的大小与氮含量、叶绿素含量有直接对应关系,对过量施用氮素影响水稻生长也可以直观反映在植被指数  $R_{Vi}$  和  $NDVI$  上。实验结果说明利用多旋翼无人机为平台同步搭载光谱仪器构成农情遥感监测系统在反演作物植被指数方面是可行的。本文设计的基于无人机平台的遥感数据采集系统能够有

效、实时获取光谱信息,其获取的农田实时信息,高空间分辨率和光谱分辨率等能够为作物长势分析、健康状况监测提供必要的技术支持。另外,无人机平台在低空(几米至几十米)遥感数据受大气、云层风等外界因素的干扰较小,可以更加准确地反映反演区真实状况,可以作为现有卫星、航空以及地面遥感的有益补充,作为一环构建更为合理的综合遥感系统。

## 参考文献:

- [1] 殷春渊,张庆,魏海燕,等.不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异[J].中国农业科学,2010,43(1):39-50.  
YIN CH Y,ZHANG Q,WEI H Y,*et al.*. Difference in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2010,43(1):39-50. (in Chinese)
- [2] 谢芳,韩晓日,杨劲峰,等.不同施氮处理对水稻氮素吸收及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2010(4):24-26,45.  
XIE F,HAN X R,YANG J F,*et al.*. Effect of N fertilizer application on nitrogen absorption and yield of rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*,2010(4):24-26,45. (in Chinese)
- [3] 齐冰洁,刘全国,张博研,等.高分辨率遥感图像 SIFT 和 SURF 算法匹配性能研究[J].中国光学,2017,10(3):331-339.  
QI B J,LIU J G,ZHANG B Y,*et al.*. Research on matching performance of SIFT and SURF algorithms for high resolution remote sensing image[J]. *Chinese Optics*,2017,10(3):331-339. (in Chinese)
- [4] 巩盾.空间遥感测绘光学系统研究综述[J].中国光学,2015,8(5):714-724.  
GONG D. Review on mapping space remote sensor optical system[J]. *Chinese Optics*,2015,8(5):714-724. (in Chinese)
- [5] 吴银花,胡炳樑,高晓惠,等.利用区域增长技术的自适应高光谱图像分类[J].光学精密工程,2018,26(2):426-434.  
WU Y H,HU B L,GAO X H,*et al.*. Adaptive hyperspectral image classification using region-growing techniques[J]. *Opt. Precision Eng.*,2018,26(2):426-434. (in Chinese)
- [6] 侯榜煊,姚敏立,贾维敏,等.面向高光谱图像分类的空谱判别分析[J].光学精密工程,2018,26(2):450-460.  
HOU BA H,YAO M L,JIA W M,*et al.*. Spatial-spectral discriminant analysis for hyperspectral image classification[J]. *Opt. Precision Eng.*,2018,26(2):450-460. (in Chinese)
- [7] 陈明,汪正坤,辛鑫,等.基于高光谱的微藻生物膜生长特性研究[J].光学精密工程,2017,25(10s):39-45.  
CHEN M,WANG ZH K,XIN X,*et al.*. Study on growth characteristics of microalgae biofilm based on hyperspectral imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*,2017,25(10s):39-45. (in Chinese)
- [8] 吴龙国,王松磊,何建国,等.基于高光谱成像技术的土壤水分机理研究及模型建立[J].发光学报,2017,38(10):1366-1376.  
WU L G,WANG S L,HE J G,*et al.*. Soil moisture mechanism and establishment of model based on hyperspectral imaging technique[J]. *Chinese Journal of Luminescence*,2017,38(10):1366-1376. (in Chinese)
- [9] 贾瑞栋,夏志伟,王玉鹏,等.太阳光谱辐照度绝对测量及其定标单色仪[J].光学学报,2017,38(8):1097-1101.  
JIA R D,XIA ZH W,WANG Y P,*et al.*. Absolute solar spectral irradiance measurement and its calibration monochromator[J]. *Acta Optica Sinica*,2017,38(8):1097-1101. (in Chinese)
- [10] 朱西存,赵庚星,王凌,等.基于高光谱的苹果花氮素含量预测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(2):416-420.  
ZHU X C,ZHAO G X,WANG L,*et al.*. Hyper spectrum based prediction model for nitrogen content of apple flowers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2010,30(2):416-420. (in Chinese)

- [11] 冯书谊,张宁,沈霖,等. 基于反射率特性的高光谱遥感图像云检测方法研究[J]. 中国光学,2015,8(2):198-203.  
FENG SH Y,ZHANG N,SHEN J,*et al.*. Method of cloud detection with hyperspectral remote sensing image based on the reflective characteristics[J]. *Chinese Optics*,2015,8(2):198-203. (in Chinese)
- [12] 刘轲,周清波,吴文斌,等. 基于多光谱与高光谱遥感数据的冬小麦叶面积指数反演比较[J]. 农业工程学报,2016,32(3):155-162.  
LIU K,ZHOU Q B,WU W B,*et al.*. Comparison between multispectral and hyperspectral remote sensing for LAI estimation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*(Transactions of the CSAE),2016,32(3):155-162. (in Chinese)
- [13] 周明辉,廖春艳,任兆玉,等. 表面增强拉曼光谱生物成像技术及其应用[J]. 中国光学,2013,6(5):633-641.  
ZHOU M H,LIAO CH Y,REN ZH Y,*et al.*. Bioimaging technologies based on surface-enhanced raman spectroscopy and their applications[J]. *Chinese Optics*,2013,6(5):633-641. (in Chinese)
- [14] THENKABAIL P S,WARD A D,LYON J G. Landsat-5 Thematic Mapper models of soybean and corn crop characteristics [J]. *International Journal of Remote Sensing*,1994,15(1):49-61.
- [15] BUNNIK N J J. The multispectral reflectance of shortwave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties[D]. Wageningen:Meded. Landbouwhoghe School,1978,1:167-175. .
- [16] WALTHALL C,DULANEY W,ANDERSON M,*et al.*. A comparison of empirical and neural network approaches for estimating corn and soybean leaf area index from Landsat ETM + imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*,2004,92(4):465-474.
- [17] 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2015,46(2):247-260.  
SHI ZH,LIANG Z ZH,YANG Y Y,*et al.*. Status and prospect of agricultural remote sensing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015,46(2):247-260. (in Chinese)
- [18] 刘峰,刘素红,向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究[J]. 农业机械学报,2014,45(11):250-257.  
LIU F,LIU S H,XIANG Y. Study on monitoring fractional vegetation cover of garden plots by unmanned aerial vehicles [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2014,45(11):250-257. (in Chinese)
- [19] 代辉,胡春胜,程一松,等. 不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(4):16-21.  
DAI H,HU CH SH,CHENG Y S,*et al.*. Correlation between agronomic parameters and spectral vegetation index in winter wheat under different nitrogen levels[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2005,23(4):16-21. (in Chinese)

#### 作者简介:



裴信彪(1990—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事多旋翼无人机多传感器数据融合、控制方法和应用方面的研究。E-mail:1181049978@qq.com



白越(1979—),男,辽宁北票人,博士研究生,研究员,博士生导师,2006年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事无人机技术、农业航空遥感方面的研究。E-mail:bai@ciomp.ac.cn



郝亮(1984—),男,吉林长春人,博士研究生,助理研究员,主要从事光机系统设计方面的研究。E-mail:24133412@qq.com