

基于作物生长监测诊断仪的玉米 LAI 监测模型研究

贺佳¹ 郭燕¹ 王利军¹ 张彦¹ 赵犇² 王来刚¹

(1. 河南省农业科学院农业经济与信息研究所, 郑州 450002; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453000)

摘要: 为探索作物生长监测诊断仪(CGMD-402型)在作物长势监测应用中的精准性与适用性,连续2年在不同氮肥水平下进行不同玉米品种的实验。使用作物生长监测诊断仪采集冠层归一化差值植被指数(Normalized differential vegetation index,NDVI)、比值植被指数(Ratio vegetation index,RVI),并同步以ASD FR-2500型野外高光谱辐射测量仪获取冠层光谱反射率,构建NDVI、RVI高光谱植被指数;通过对比两种仪器获取的植被指数特征及其定量关系,评价CGMD-402型作物生长监测诊断仪监测精度;基于CGMD-402型作物生长监测诊断仪获取的NDVI、RVI,建立叶面积指数(Leaf area index,LAI)监测模型,并对模型监测精度进行验证。结果表明:玉米冠层NDVI、RVI随施氮量增加而增加,增加幅度分别为8.20%~36.59%、4.40%~25.16%;CGMD-402型作物生长监测诊断仪与ASD FR-2500型野外高光谱辐射测量仪获取的NDVI、RVI相关系数分别为0.991、0.985,决定系数分别为0.983、0.969,说明CGMD-402型作物生长监测诊断仪具有较高的监测精度,可替代ASD FR-2500型野外高光谱辐射测量仪获取NDVI、RVI指数;利用CGMD-402型作物生长监测诊断仪获取NDVI、RVI,建立LAI监测模型的决定系数分别为0.911、0.898;以独立数据对模型精度进行验证,模型预测值与田间实测值间决定系数分别为0.963、0.954,相对误差分别为6.65%、9.37%,表明二者具有高度一致性。研究表明,利用作物生长监测诊断仪能有效监测玉米不同品种LAI动态变化,可以替代AccuPARLP-80型植物冠层分析仪获取玉米LAI数据。

关键词: 玉米; 叶面积指数; 作物生长监测诊断仪; 监测模型

中图分类号: S127; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)12-0187-08

Monitor Model of Corn Leaf Area Index Based on CGMD-402

HE Jia¹ GUO Yan¹ WANG Lijun¹ ZHANG Yan¹ ZHAO Ben² WANG Laigang¹

(1. *Institution of Agricultural Economy and Information, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China*

2. *Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453000, China*)

Abstract: Hyperspectral remote sensing is an important technology to fulfill real-time monitoring for crop growth status based on its superior performance in acquiring vegetation canopy information rapidly and non-destructively. The objectives were to test the accuracy, reliability and adaptability of the crop growth monitoring and diagnosis 402 (CGMD-402) in crop growth monitoring and application. The experiments were carried out during 2017—2018 at Experimental Bases Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, China. The main promoted summer maize (*Zea mays* L.) varieties in the north Henan plain were chosen, and nitrogen treatments included five nitrogen fertilizer application rates (0 kg/hm², 75 kg/hm², 150 kg/hm², 225 kg/hm² and 300 kg/hm² pure nitrogen, expressed as N), the leaf area index (LAI), normalized differential vegetation index (NDVI), and ratio vegetation index (RVI) of different varieties and fertilizer treatments were monitored at jointing, bellbottom, tasseling, filling and maturity stages, respectively. The NDVI and RVI were monitored by different sensors of analytical spectral devices Field-spec Pro FR-2500 spectroradiometers (ASD FR-2500) or CGMD-402, respectively. NDVI or RVI characteristics were compared by ASD FR-2500 and CGMD-402, and analyzing the quantitative relationships of vegetation index between ASD FR-2500

收稿日期: 2019-04-18 修回日期: 2019-07-23
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300609、2018YFD0300702)、国家自然科学基金项目(41601213)和河南省重大科技专项(171100110600)
作者简介: 贺佳(1985—),男,助理研究员,博士,主要从事农业遥感应用及高效农作制度研究,E-mail: hejia2011@163.com
通信作者: 王来刚(1979—),男,副研究员,博士,主要从事农业遥感应用研究,E-mail: wlaigang@sina.com

and CGMD-402, respectively. Then, the LAI monitoring models of corn were constructed based on CGMD-402 NDVI and CGMD-402 RVI by using correlation analysis, regression analysis and other methods. The results showed that the canopy NDVI and RVI of corn were increased with the increase of nitrogen application rate in different growth stages, and the increase amplitude were 8.20% ~ 36.59% and 4.40% ~ 25.16%, respectively. The correlation coefficient (R) of NDVI or RVI based on ASD FR-2500 and CGMD-402 were 0.991 and 0.985, and the determination coefficient (R^2) were 0.983 and 0.969, respectively. The results indicated that there was a highly consistent of vegetation indexes based on ASD FR-2500 and CGMD-402, and the NDVI and RVI from CGMD-402 were much better than ASD FR-2500. Monitoring models based on NDVI and RVI produced better estimation for LAI, and R^2 were 0.911 and 0.898. Compared the predicted value with measured value to verify reliability and applicability of monitoring model, results showed that the R^2 were 0.963 and 0.954, and the relative error (RE) of the measured value and predicted value were 6.65% and 9.37%, respectively. Therefore, it was suggested that the vegetation indices of NDVI and RVI by CGMD-402 was the most suitable model for monitoring corn LAI, and there was higher prediction precision, reliability and adaptability at different growth stages, and different N rates. The results indicated that the LAI from CGMD-402 was much better than that from AccuPARLP-80. These conclusions had important implications for monitoring crop growth by CGMD-402 in the the main corn producing area.

Key words: corn; leaf area index; crop growth monitoring and diagnosis; monitoring model

0 引言

自20世纪末遥感技术广泛应用于农业生产研究领域以来,基于地物光谱特征的作物生长监测诊断技术取得了迅速发展,已成为支持农作物生长信息获取的关键技术。特别是基于高光谱的遥感信息源能够实时、快速、无损获取作物生长信息,广泛应用于作物生产的肥水调控、精确管理、生产力估测等领域。因此,研究基于光谱技术的作物生长信息监测诊断技术,对提高现代精准农业生产管理水平、推进精确栽培技术的开发应用具有重要的理论与实践意义^[1-4]。

近年来,国内外学者通过地物光谱设备提取作物生长信息响应特征波段,构建了归一化差值植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)、绿波段比值植被指数(Green ratio vegetation index, GRVI)、增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)等植被指数,用于监测作物长势^[5-12]。由于地物光谱设备价格昂贵、田间应用成本高,且特征光谱波段提取分析复杂,目前在大田作物研究应用中仍有一定局限性。因此,研究者基于农学参数的光谱响应特征,研制了获取作物生长信息的作物生长监测诊断设备。如文献[13]基于550、650、766、850 nm等波长光谱研制便携式作物反射光谱测量仪,预测了小麦分蘖数;文献[14]采用560、710、720、810 nm等波长光谱研制获取作物生长信息的传感器,平均测量误差约5.00%;文献[15]基于730、810 nm波长光谱设计了能快速准确获取作物冠层NDVI、RVI的作

物生长信息监测仪;文献[16]基于720、810 nm波长光谱研制多光谱作物生长传感器,反演作物生长信息;文献[17]采用720、810 nm波长光谱研发作物生长监测诊断仪,该设备对水稻叶面积指数(Leaf area index, LAI)监测精度达到86.00%,平均误差为6.24%。基于作物生长监测诊断仪获取的NDVI、RVI,监测玉米LAI精度达到90%以上^[18],预测马铃薯病害精度达95%以上^[19]。文献[20]基于作物生长监测诊断仪监测水稻LAI的精度达到90.00%以上。文献[21]基于作物生长监测诊断仪监测小麦LAI的精度达89.00%以上。

现有研究成果表明,便携式作物生长监测诊断仪能有效监测作物长势信息。但是由于作物冠层光谱信息受生态环境、作物品种类型、栽培条件等诸多条件的影响,其监测精度及适应性需不断验证和完善。本文以黄淮海平原豫北玉米为研究对象,使用CGMD-402型作物生长监测诊断仪(简称CGMD-402)与ASD FR-2500型野外高光谱辐射测量仪(简称ASD FR-2500)同步获取冠层植被指数,分析不同传感器获取的植被指数特征与定量关系,探索CGMD-402型作物生长监测诊断仪的稳定性与适用性;同时,利用该设备获取的植被指数建立玉米LAI遥感监测模型,并对模型监测精度进行验证,以为作物生长监测诊断提供更加快捷高效的技术途径,为作物精确栽培提供理论与实践支撑。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验在河南省新乡市中国农业科学院新乡综合

实验基地进行,实验基地位于 113°46′8.10″E, 35°8′3.67″N,海拔 78.9 m,温带大陆性气候,年平均温度 14.2℃,无霜期 210 d,年日照时数约 2 400.0 h,年蒸发量约 2 000.0 mm,年平均降水量 585.0 mm。土壤为黄河冲积物发育潮土,0~20 cm 碱解氮质量比 68.65 mg/kg,速效磷质量比 9.21 mg/kg,速效钾质量比 71.12 mg/kg,有机质质量比 10.21 mg/kg。

实验于 2017—2018 年实施,采取随机区组设计,每年设置 2 个玉米品种,5 个氮肥水平,3 组重复。2 个玉米品种分别为郑单 958 (ZD958)、登海 605(DH605);5 个氮肥(46.00% N 尿素)水平分别为 N0(0 kg/hm²)、N1(75 kg/hm²)、N2(150 kg/hm²)、N3(225 kg/hm²)、N4(300 kg/hm²),总氮肥 60% 作为基肥、40% 作为追肥,磷钾肥施用量分别为 120 kg/hm² 和 120 kg/hm²;种植密度为 67 500 株/hm²,行距 0.60 m,株距 0.25 m;其他管理方式按照豫北平原高产玉米措施管理。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 植被指数采集

CGMD-402 型作物生长监测诊断仪基于作物不同氮化合物形态对光谱波段的特征反射规律,选用敏感波段 LED 光源照射作物冠层,同步获取作冠层光谱反射率,耦合作物生长监测诊断模型,快速、无损获取作物生长信息。该仪器包含可见光与近红外光 2 个光谱通道,中心波长为 730、815 nm,光谱带宽小于 8 nm FWHM,视场角 30°,采集面积 0.23~0.38 m²。本文于玉米拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期、成熟期,选择晴朗无风天气,以 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪测定冠层 NDVI、RVI(记作 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$),测定时间为 10:00—14:00,测量时探头垂直向下,测量探头距离冠层高度为 0.70 m,每个处理测量 3 次,取算术平均值为该测量点观测值。

1.2.2 高光谱植被指数构建

与 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪数据采集同步,利用美国 Analytical Spectral Devices(ASD)公司的 Field-spec Pro FR-2500 型野外高光谱辐射测量仪(350~2 500 nm)获取冠层光谱反射率,进一步构建植被指数。该仪器 350~1 000 nm 波段光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1 000~2 500 nm 波段,光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。测量时传感器探头垂直向下,光谱仪视场角为 7.5°,距冠层顶垂直高度 0.25~0.30 m,地面视场范围直径为 0.5 m。每个观测点记录 10 个采样光谱,每小区测 3 次重复,取算术平均值作为该观测点冠层光谱反射率。提取 730、815 nm 处光谱反射

率值,构建 NDVI、RVI(记作 $NDVI_{ASD}$ 、 RVI_{ASD})。在光谱反射率测量过程中,于每一处理测量前,及时使用专用参比白板进行校正(以白板反射率为 1,所得目标物光谱反射率为无量纲的相对反射率),所测数据用于检测 CGMD-402 构建植被指数的可靠性。

$$NDVI_{ASD} = \frac{R_{815} - R_{730}}{R_{815} + R_{730}}$$
$$RVI_{ASD} = \frac{R_{815}}{R_{730}}$$

式中 R_{815} ——815 nm 处光谱反射率
 R_{730} ——730 nm 处光谱反射率

1.2.3 LAI 测定

与 CGMD-402 数据采集同步,以美国 Decagon 公司的 AccuPARLP-80 型植物冠层分析仪测量冠层 LAI。在平行于玉米垄间、垂直垄间各测 3 次,取算术平均值为该测量点 LAI。AccuPARLP-80 型植物冠层分析仪是根据仪器探头的光合有效辐射光量子传感器,接收光照中光合有效辐射变化,通过计算天顶角、设置叶角分布参数与测量的上、下冠层光合有效辐射的比率,计算冠层 LAI 值。

1.2.4 数据分析

按照处理设置对获取的实验数据进行整理汇总。用 ViewSpec 软件对冠层 ASD 光谱反射率进行预处理;以 SPSS 19.0 对不同处理间 LAI、NDVI、RVI 进行差异性分析,评价 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 的精度;以连续 2 年 ZD958 品种实验数据建立 LAI 估测模型,以 DH605 实验数据为实测值对模型精度进行验证,通过对比分析均方根误差(Root mean square error, RMSE)、决定系数 R^2 (Determination coefficient)、相对误差(Relative error, RE)评价模型的监测精度。

2 结果分析

2.1 不同处理玉米 LAI 特征

表 1 为基于 AccuPARLP-80 型植物冠层分析仪获取的不同氮肥处理玉米 LAI 变化情况。由表可知,在同一施氮水平下,随着生育时期的延长,LAI 呈现“低-高-低”的抛物线趋势,在拔节期稍低,抽雄期达到最大值,灌浆期至成熟期,又呈逐渐降低的趋势。这是由于随着玉米生长,营养生长旺盛,所以从拔节期至抽雄期 LAI 逐渐增大;而在生育后期,由营养生长转向生殖生长,叶片生长缓慢,营养向生殖器官转移,所以在后期 LAI 稍低。而随着氮肥供应量的增加,在 N3、N4 处理下 LAI 降低缓慢,表明过量供应氮肥,可延缓叶片衰老。如 N3、N4 处理仅在

拔节期达到显著差异,而从大喇叭口期至成熟期均未达到显著差异。不同玉米品种 LAI 均随着氮肥供应量的增加逐渐增加,拔节期不同处理间达到显著差异;大喇叭口期至成熟期,不同处理间达到极显著

差异,当施氮量增加到 N3 时,处理间没有显著差异;同一生育时期,同一氮肥处理条件下,2 个玉米品种之间 LAI 差异较小,这与品种特征及对氮肥吸收利用特性有关。

表 1 不同氮水平下玉米 LAI 变化(2017 年)
Tab. 1 Changes of LAI of summer maize at different N rates (2017)

施肥水平	拔节期		大喇叭口期		抽雄期		灌浆期		成熟期	
	ZD958	DH605	ZD958	DH605	ZD958	DH605	ZD958	DH605	ZD958	DH605
N0	1.63 ^a	1.74 ^a	2.25 ^{aA}	2.27 ^{aA}	4.87 ^{aA}	4.81 ^{aA}	4.33 ^{aA}	4.26 ^{aA}	3.83 ^{aA}	3.64 ^{aA}
N1	1.88 ^b	1.93 ^b	3.03 ^{bB}	3.58 ^{bB}	5.43 ^{bB}	5.56 ^{bB}	4.83 ^{bB}	4.77 ^{bB}	4.27 ^{bB}	4.15 ^{bB}
N2	2.35 ^c	2.47 ^c	3.33 ^{cB}	3.77 ^{cB}	6.26 ^{cC}	5.94 ^{cB}	5.96 ^{cC}	5.34 ^{cC}	5.18 ^{cC}	4.96 ^{cC}
N3	2.41 ^c	2.56 ^c	3.93 ^{dC}	4.12 ^{dC}	6.47 ^{dC}	6.35 ^{dC}	6.07 ^{cC}	6.26 ^{cC}	5.76 ^{dD}	5.63 ^{dD}
N4	2.78 ^d	2.86 ^d	4.17 ^{dC}	4.23 ^{dC}	6.37 ^{cC}	6.33 ^{dC}	6.27 ^{cC}	6.24 ^{dC}	5.88 ^{dD}	5.71 ^{dD}

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$),下同。

2.2 不同光谱仪获取的玉米冠层植被指数特征

图 1a、1b 是由 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪获取的不同氮肥水平下不同生育时期玉米冠层 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 。由图可知,在同一生育时期, $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 均随着施氮量的增加呈递增趋势。抽雄期 N0、N1、N2、N3、N4 处理 $NDVI_{CGMD-402}$ 分别为 0.317、0.343、0.396、0.427、0.433,各施肥处理分别比 N0 处理增加了 0.026、0.079、0.110、0.116,增加幅度分别为 8.20%、24.92%、34.70%、36.59%;抽雄期 N0、N1、N2、N3、N4 处理 $RVI_{CGMD-402}$ 分别为 1.932、2.017、2.216、

2.353、2.418,各施肥处理分别比 N0 处理增加了 0.085、0.284、0.421、0.486,增加幅度分别为 4.40%、14.70%、21.79%、25.16%。不同生育时期植被指数表现为相似趋势。表明植被指数随着施氮量的增加呈递增趋势;当过量施用氮肥时,植被指数增加缓慢。这可能是由于随着施氮量的增加,促进作物叶片、冠层及组织结构的生长发育,营养生长加快,冠层覆盖度增大,植被指数逐渐增大;当氮肥增加到一定量时,作物对氮肥的吸收趋于饱和状态,冠层覆盖度增加缓慢甚至不再增加,植被指数增加缓慢。

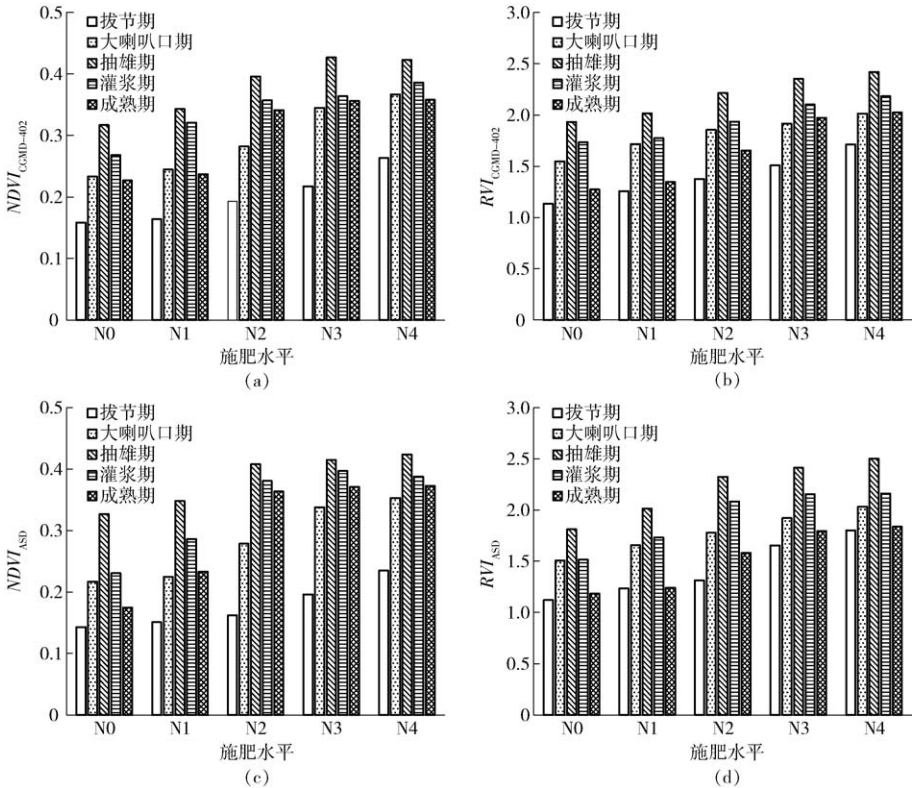


图 1 不同施氮水平下不同生育时期玉米冠层植被指数的变化(2017 年)

Fig. 1 Changes of vegetation indices for maize at different growth stages under different nitrogen rates (2017)

在同一施氮水平下,从拔节期至成熟期 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 均呈“低-高-低”的抛物线趋势(图 1a、1b),拔节期较低,大喇叭口期逐渐较高,抽雄期达到最大值,成熟期又缓慢降低。如 N2 处理,拔节期至成熟期 $NDVI_{CGMD-402}$ 分别为 0.193、0.282、0.396、0.357、0.341; RVI 亦呈相似趋势,如拔节期至成熟期 N2 处理 $RVI_{CGMD-402}$ 分别为 1.375、1.856、2.216、1.937、1.655。不同施氮水平下植被指数均呈现相似趋势。这是由于随着生育时期的延长,作物叶片内部组分与结构变化,引起冠层结构特征变化,进一步影响冠层光谱变化。在作物生育前期,细胞结构及细胞内养分逐渐积累,冠层结构逐渐郁闭,植被指数呈递增趋势;随着作物生长,养分逐渐转向籽粒,叶片内部结构发生变化,冠层叶片组分和结构也发生变化,植被指数逐渐降低。

基于 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射仪光谱反射率构建的 $NDVI_{ASD}$ 、 RVI_{ASD} 与 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪采集的植被指数变化趋势相似,不同处理间略有差异,如图 1c、1d 所示。两年间不同氮肥处理下基于不同传感器获取的植被指数呈现近似趋势。说明 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪与 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射仪获得的植被指数具有一致性。

2.3 ASD 植被指数与 CGMD-402 植被指数的定量关系

基于 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射测量仪采集玉米冠层光谱反射率,构建不同生育时期 $NDVI_{ASD}$ 、 RVI_{ASD} ,范围分别为 0.145~0.424、1.124~2.485;基于 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪直接采集不同生育时期 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 范围分别为 0.135~0.416、1.131~2.478;经过统计分析,不同传感器获取的 $NDVI$ 、 RVI 之间差异不显著, R 分别为 0.991、0.985,且具有极显著相关性。表明 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪可以稳定地反映作物光谱信息,获取作物植被指数。

选取 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射测量仪、CGMD-402 型作物生长监测诊断仪获取的不同生育时期玉米冠层 $NDVI$ 、 RVI 60 组进行对比拟合($n=60$),分析不同传感器获取植被指数的精度,结果如图 2 所示。由图可知:基于 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射测量仪构建的 $NDVI_{ASD}$ 、 RVI_{ASD} 与 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪采集 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 的决定系数分别为 0.983、0.969,表明二者具有高度的一致性。根据定量关系图还可以看出,当 $NDVI_{ASD}$ 小于 0.20 时, $NDVI_{CGMD-402}$ 略大于 $NDVI_{ASD}$;当 $NDVI$ 为 0.20~0.45

时, $NDVI_{CGMD-402}$ 则略小于或与 $NDVI_{ASD}$ 基本保持一致。当 RVI_{ASD} 小于 1.50 时, $RVI_{CGMD-402}$ 略高;当 RVI_{ASD} 大于 1.50 时, $RVI_{CGMD-402}$ 略小或与 RVI_{ASD} 基本保持一致。

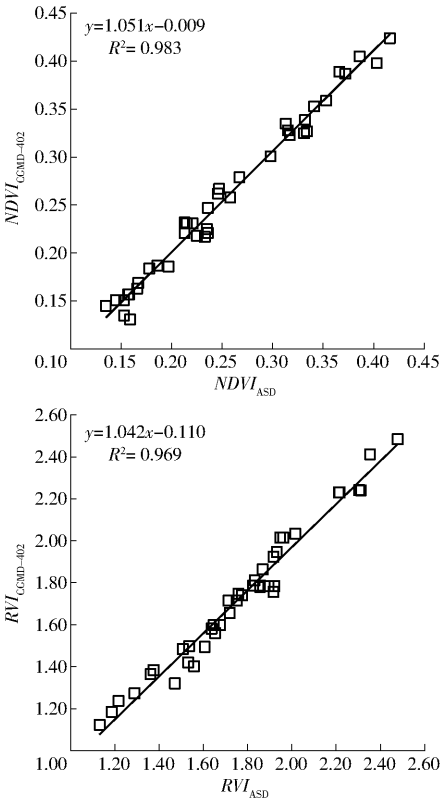


图 2 CGMD-402 植被指数与 ASD FR-2500 植被指数的定量关系 ($n=60$)

Fig. 2 Relationships between vegetation indices from CGMD-402 and ASD FR-2500 ($n=60$)

2.4 玉米 LAI 监测模型

选取 60 组一一对应的 LAI 与 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$,分析 LAI 与植被指数相关性($n=60$)。发现 LAI 与 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 具有极显著相关性, R 分别为 0.955、0.947。按照统计学规定,当 $|R|>0.80$ 时,则认为二者之间高度相关。说明 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 与 LAI 间高度正相关,表明可以基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 建立玉米 LAI 监测模型。以植被指数为自变量 x ,LAI 为因变量 y ,建立监测模型(表 2)。由表 2 可知,基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 预测 LAI 的决定系数(R^2)分别为 0.911、0.898;标准误差(Standard error,SE)分别为 0.014、0.321;说明 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 与 LAI 间具有较好的定量关系,基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 可以建立较好的 LAI 监测模型。 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 与 LAI 的定量关系见图 3。

2.5 玉米 LAI 监测模型的验证

以不同氮肥处理 DH605 独立 LAI 为实测值,共

表 2 基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 的玉米 LAI 监测模型 ($n=60$)

Tab. 2 Fitting monitoring model of LAI of summer maize based on CGMD-402 ($n=60$)

植被指数	相关系数	监测模型		
		拟合模型	决定系数 R^2	标准误差 (SE)
$NDVI_{CGMD-402}$	0.955 **	$y=16.262x-0.580$	0.911	0.014
$RVI_{CGMD-402}$	0.947 **	$y=3.898x-2.922$	0.898	0.321

注：**表示在 0.01 水平上显著相关。

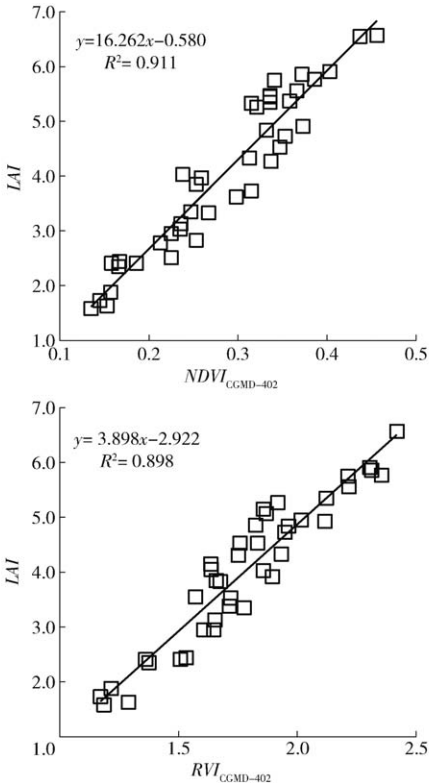


图 3 CGMD-402 植被指数与 LAI 的关系

Fig. 3 Relationships between vegetation indices in corn by CGMD-402 and LAI

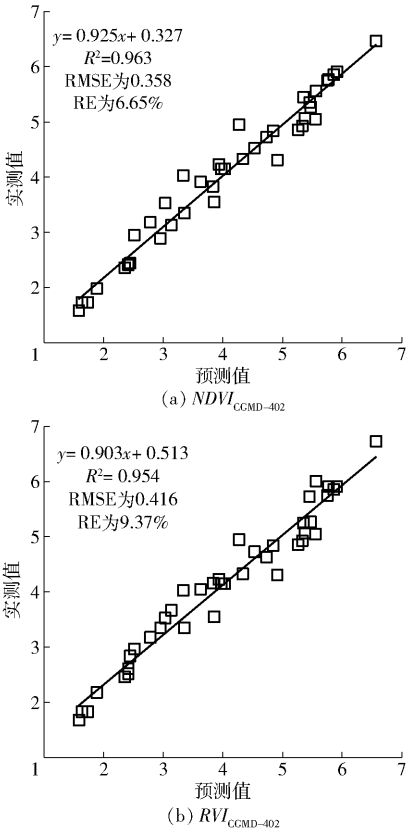


图 4 LAI 监测模型拟合及验证 ($n=30$)

Fig. 4 Performance of monitoring model of LAI of summer maize ($n=30$)

30 组 ($n=30$), 对 2.4 节 LAI 预测模型进行验证 (图 4), 通过分析实测值与预测值之间的 R^2 、RMSE、RE 等指标, 评价监测模型精度。由图可知: 基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 与 $RVI_{CGMD-402}$ 的模型预测值与田间实测值间 R^2 分别为 0.963、0.954, RMSE 分别为 0.358、0.416, RE 分别为 6.65%、9.37%。在统计学中, R^2 、RMSE、RE 等指标常用于评价回归模型优劣程度, 当 R^2 越接近于 1, RMSE、RE 越小时, 则认为模型预测值与实测值间具有高度的一致性。本研究模型预测值与田间实测值间具有较高的 R^2 和较低的 RMSE、RE, 说明预测值与实测值间具有较高的一致性, 表明基于 CGMD-402 监测玉米 LAI 具有较好的品种间适应性。

3 结论

(1) 针对当前高光谱设备在获取作物生长信息中存在的问题, 采用 CGMD-402 型作物生长监测

诊断仪与 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射测量仪同步获取不同生育时期玉米冠层 NDVI、RVI, 对比分析不同传感器获取植被指数的差异, 同时基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 构建了玉米 LAI 监测模型, 并以 AccuPARLP-80 型植物冠层分析仪获取独立 LAI 数据, 对模型精度进行了验证。

(2) 在同一生育时期, $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 均随着施氮量的增加呈递增趋势, 增加幅度分别为 8.20%~36.59%、4.40%~25.16%; 在同一施氮水平下, 从拔节期至成熟期二植被指数均呈“低-高-低”的抛物线趋势, 这一趋势与基于 $NDVI_{ASD}$ 、 RVI_{ASD} 相似, 说明 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪获取的植被指数与 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射仪测得的光谱反射率构建植被指数具有一致性, 这一结果与前人研究结果一致^[21]。

(3) 基于 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射测

量仪与 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪获取的 NDVI 分别为 0.145 ~ 0.424、0.135 ~ 0.416, RVI 分别为 1.124 ~ 2.485、1.131 ~ 2.478; 不同传感器获取的 NDVI、RVI 之间差异不显著, 且极显著相关, 相关系数 R 分别为 0.991、0.985, 决定系数 R^2 分别为 0.983、0.969, 说明 CGMD-402 获取的植被指数具有高度稳定性。表明 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪可以替代 ASD FR-2500 型野外高光谱辐射测量仪在田间高效准确地获取玉米冠层 NDVI、RVI。

(4) 基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 建立 LAI 监测模型, R^2 分别为 0.911、0.898, SE 分别为 0.014、0.321, 说明 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 与 LAI 间具有较好的定量关系; 以独立 LAI 数据对模型精度进行验证, 实测值与预测值间 R^2 分别为 0.963、0.954, RMSE 分别为 0.358、0.416, RE 分别为 6.65%、9.37%, 说明基于 CGMD-402 植被指数能有效反演玉米 LAI, 且监测模型具有较好的稳定性和适应性。这一结果初步实现了 CGMD-402 作物生长监测诊断仪在黄淮海豫北平原玉米 LAI 监测中的应用, 是对前人研究的进一步本地化应用, 丰富了 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪的应用区域与监测对象, 在一定程度上克服了传统监测方法“以点带面”的取样误差, 可为下一步根据玉米生长信息调控氮肥用量提供基础。

(5) 通过对比分析 $NDVI_{CGMD-402}$ 、 $RVI_{CGMD-402}$ 与 LAI 的相关性、建模精度、验证精度等参数, 发现基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 与 LAI 的相关性优于 $RVI_{CGMD-402}$, 且基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 建立 LAI 监测模型与验证模型的精度均优于 $RVI_{CGMD-402}$, 表明基于 $NDVI_{CGMD-402}$ 更适于监测 LAI。这可能与两个植被指数对玉米群体密度、冠层结构的反映有关, 本研究所选供试品种株型相近、种植密度相同, 所以该问题有待进一步研究。

(6) 利用 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪采集植被指数、反演玉米 LAI 信息, 表明基于 CGMD-402 型作物生长监测诊断仪能够快捷、准确地反演玉米 LAI 信息, 所建模型具有较好的稳定性和适用性, CGMD-402 具有一定的区域应用价值和推广价值, 可以替代 AccuPARLP-80 植物冠层分析仪获取玉米 LAI。

(7) 研究中玉米 LAI 监测模型的构建和测试均以豫北平原生态区开展, 可为当地的玉米精确栽培提供服务, 并形成本地化的技术规范。但玉米群体、冠层反射率信息因生态区域、栽培措施等不同而产生差异, 所以监测模型仍需通过更多的生态区域、玉米品种、栽培措施等实验不断校正, 进一步完善 CGMD-402 对作物生长信息监测诊断的精确性与适应性, 推动近地传感技术在黄淮海玉米主产区的高效应用。

参 考 文 献

- [1] 雷雨, 韩德俊, 曾庆东, 等. 基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级方法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 226-232.
LEI Yu, HAN Dejun, ZENG Qingdong, et al. Grading method of disease severity of wheat stripe rust based on hyperspectral imaging technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 226-232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180526&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.026. (in Chinese)
- [2] COZZOLINO D, CYNKAR W U, SHAH N. Multivariate data analysis applied to spectroscopy: potential application to juice and fruit quality [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1888-1896.
- [3] ELMASRY G, KAMRUZZAMAN M, SUN D W. Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(11): 999-1023.
- [4] CHEN G L, YANG Z L, HAN L J. A review on the use of near-infrared spectroscopy for analyzing feed protein materials [J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2013, 48(7): 509-522.
- [5] 李子扬, 钱永刚, 申庆丰, 等. 基于高光谱数据的叶面积指数遥感反演[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 944-949.
LI Ziyang, QIAN Yonggang, SHEN Qingfeng, et al. Leaf area index retrieval from remotely sensed hyperspectral data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 944-949. (in Chinese)
- [6] 贺佳, 刘冰锋, 李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 141-150.
HE Jia, LIU Bingfeng, LI Jun. Monitoring model of leaf area index of winter wheat based on hyperspectral reflectance at different growth stages [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 141-150. (in Chinese)
- [7] 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 Ke, ZHOU Qingbo, WU Wenbin, et al. Comparison between multispectral and hyperspectral remote sensing for LAI estimation [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 155-162. (in Chinese)
- [8] WANG Fumin, HUANG Jingfeng, ZHOU Qifa, et al. Optimal waveband identification for estimation of leaf area index of paddy rice [J]. Journal of Zhejiang University Science (B), 2008, 9(12): 953-963.

- [9] LIU Jiangui, ELIZABETH P, GUILLAUME J. Assessment of vegetation indices for regional crop green LAI estimation from Landsat images over multiple growing seasons[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 123(8): 347–358.
- [10] FENG Wei, ZHANG Haiyan, ZHANG Yuanshuai, et al. Remote detection of canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat by using water resistance vegetation indices from in-situ hyperspectral data[J]. Field Crops Research, 2016, 198: 238–246.
- [11] KAUWE M G D, DISNEY M, QUAIFFE T, et al. An assessment of the MODIS collection 5 leaf area index product for a region of mixed coniferous forest [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 767–780.
- [12] GONSAMO A, PELLIKKA P. The sensitivity based estimation of leaf area index from spectral vegetation indices [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 70(6): 15–25.
- [13] 张猛, 孙红, 李民赞, 等. 基于 4 波段作物光谱测量仪的小麦分蘖数预测[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 341–347. ZHANG Meng, SUN Hong, LI Minzan, et al. Prediction of winter wheat tiller number based on 4-waveband crop monitor with spectral reflectance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 341–347. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160946&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.046. (in Chinese)
- [14] 倪军, 王婷婷, 姚霞, 等. 作物生长信息获取多光谱传感器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 207–212. NI Jun, WANG Tingting, YAO Xia, et al. Design and experiments of multi-spectral sensor for rice and wheat growth information[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 207–212. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130536&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.036. (in Chinese)
- [15] 卢少林, 倪军, 曹卫星, 等. 基于主动光源的作物生长信息监测仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 199–206. LU Shaolin, NI Jun, CAO Weixing, et al. Design and experiment for crop growth information monitoring instrument based on active light source [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 199–206. (in Chinese)
- [16] 刘乃森, 倪军, 董继飞, 等. 多光谱作物生长传感器温度特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 157–164. LIU Naisen, NI Jun, DONG Jifei, et al. Test on temperature characteristics of multi-spectral sensor for crop growth [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 157–164. (in Chinese)
- [17] 杨建宁, 张井超, 朱艳, 等. 便携式作物生长监测诊断仪性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 208–212, 201. YANG Jianning, ZHANG Jingchao, ZHU Yan, et al. Experiments on performance of portable plant growth monitoring diagnostic instrument [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 208–212, 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130436&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.036. (in Chinese)
- [18] 陈青春, 蒋锋, 林欢, 等. 基于 CGMD-302 光谱仪的甜玉米生长发育指标监测研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(11): 31–35, 101. CHEN Qingchun, JIANG Feng, LIN Huan, et al. Growth parameter monitoring of sweet corn by CGMD-302 spectrometer [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2013, 42(11): 31–35, 101. (in Chinese)
- [19] 陈青春, 黎学记, 刘鹏飞, 等. 应用 CGMD-302 光谱仪监测马铃薯病害[J]. 中国马铃薯, 2016, 30(5): 302–307. CHEN Qingchun, LI Xueji, LIU Pengfei, et al. Rapid monitoring for potato disease by CGMD-302 spectrometer [J]. Chinese Potato Journal, 2016, 30(5): 302–307. (in Chinese)
- [20] 王睿, 李飞飞, 吕尊富. 基于 CGMD-302 水稻生长指标光谱监测技术研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(20): 21–25. WANG Rui, LI Feifei, LÜ Zunfu. Study on spectral monitoring technique of rice growth index based on CGMD-302 [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(20): 21–25. (in Chinese)
- [21] 周晓楠, 黄正来, 张文静, 等. 基于双波段光谱仪 CGMD-302 的小麦叶面积指数和叶干重监测[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 102–111. ZHOU Xiaonan, HUANG Zhenglai, ZHANG Wenjing, et al. Monitoring leaf area index and leaf dry weight of winter wheat with dual-wave bands spectrometer CGMD-302 [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 102–111. (in Chinese)