

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.038

不同生育时期冬小麦 FPAR 高光谱遥感监测模型研究^{*}

贺佳 刘冰峰 李军
(西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过连续 5 年定位研究不同氮磷耦合水平下,不同生育时期冬小麦群体 FPAR 与冠层光谱反射率,建立基于不同植被指数的不同生育时期 FPAR 分段监测模型。结果表明:随着氮磷水平增加 FPAR 呈递增趋势,不同品种间存在差异;冬小麦群体 FPAR 与 670、850、960 nm 具有较高的相关性,在可见光和近红外波段处均有敏感波段;在拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期和成熟期 FPAR 与 SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、DVI、RVI 均达极显著相关,相关系数 r 范围为 0.818~0.942;在不同生育时期,分别基于 SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、RVI、RVI 能建立较好的 FPAR 分段监测模型,决定系数 R^2 分别为 0.854、0.888、0.811、0.844、0.911;标准误差 SE 分别为 0.054、0.032、0.044、0.047、0.044;以不同年份独立数据对模型进行验证,田间实测值与模型预测值之间相对误差 RE 分别为 14.1%、17.4%、12.8%、18.8%、10.7%;均方根误差 RMSE 分别为 0.139、0.146、0.136、0.158、0.130。该结果较拔节期至成熟期 FPAR 统一监测模型监测精度及验证效果均有所改善。因此,在拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期和成熟期可分别用 SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、RVI、RVI 预测冬小麦群体 FPAR,具有较好的年度间重演性和品种间适用性。不同生育时期 FPAR 分段监测模型较统一监测模型有较好的监测效果。

关键词: 冬小麦 光合有效辐射分量 高光谱遥感 监测模型

中图分类号: S512.1⁺1; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0261-09

FPAR Monitoring Model of Winter Wheat Based on Hyperspectral Reflectance at Different Growth Stages

He Jia Liu Bingfeng Li Jun
(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Hyperspectral remote sensing is an important technique to fulfill real-time monitoring for crop growth status based on its superior performance in acquiring vegetation canopy information rapidly and non-destructively. The objective of this study was to establish the best simulating accuracy and adaptability of wheat fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) estimation model based on wheat canopy hyperspectral reflectance with different nitrogen or phosphorus application rate treatments, and to improve the forecast precision of the FPAR estimation model at different growth stages of dryland wheat on the Loess Plateau. The experiments were carried out during 2009—2014 at Northwest A&F University, Yangling, China. Different winter wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties with stronge or weak drought resistance were chosen for the treatments in different years, nitrogen and phosphorus treatments included five nitrogen fertilizer application rates (0, 75, 150, 225 and 300 kg/hm² pure nitrogen, expressed as N) and four phosphorus application rates (0, 60, 120 and 180 kg/hm² P₂O₅, expressed as P), the FPAR and canopy hyperspectral reflectance of different varieties and fertilizer treatments were monitored at jointing, booting heading, grain filling and maturity stage, respectively. Then FPAR monitoring models at different growth stages of winter wheat were constructed by using

收稿日期: 2014-11-06 修回日期: 2014-12-02
^{*} 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102902)和国家自然科学基金资助项目(31071374、30771280)
作者简介: 贺佳, 博士生, 主要从事高效农作制度研究, E-mail: hejia2011@163.com
通讯作者: 李军, 教授, 博士生导师, 主要从事旱作农业生态、高效农作制度和数字农作技术研究, E-mail: junli@nwsuaf.edu.cn

correlation analysis, regression analysis and other methods. The results showed that the FPAR of wheat increased with nitrogen and phosphorus application rate increasing in different growth stages, there were significant differences among test cultivars. A good correlation relationship was presented between FPAR and canopy spectral reflectance at 670, 850 and 960 nm, and the sensitive band of the FPAR occurred mostly within visible and near-infrared spectrum. The correlations between soil adjusted vegetation index (SAVI), red edge normalized difference vegetation index (NDVI₇₀₅), enhanced vegetation index (EVI), difference vegetation index (DVI) and ratio vegetation index (RVI) to FPAR were significant, and the range of correlation coefficient was 0.818 ~ 0.942 at jointing, booting, heading, filling and maturity stages. Monitoring models based on SAVI, NDVI₇₀₅, EVI, RVI and RVI produced better estimation for FPAR at different growth stages, and the determination coefficients (R^2) were 0.854, 0.888, 0.811, 0.844 and 0.911, and the standard errors (SE) were 0.054, 0.032, 0.044, 0.047 and 0.044, accordingly. Meanwhile, comparing the predicted value with measured value to verify reliability and applicability of monitoring model, result showed that the relative errors (RE) between measured value and predicted value were 14.1%, 17.4%, 12.8%, 18.8%, 10.7%, and the root mean square errors (RMSE) were 0.139, 0.146, 0.136, 0.158, 0.130, respectively. Therefore, it was suggested the vegetation indices of SAVI, NDVI₇₀₅, EVI, RVI and RVI was the most suitable model for monitoring winter wheat FPAR at jointing, booting, heading, filling and maturity stages, respectively, and there was higher prediction precision with different vegetation indices in monitoring FPAR of winter wheat at different growth stages, and different N and P rates. These conclusions had important implications for the large areas FPAR monitoring of winter wheat in the Loess Plateau. Meanwhile, there was a higher prediction accuracy of monitoring model based on the different vegetation indices at different growth stages.

Key words: Winter wheat FPAR Hyperspectral remote sensing Monitoring model

引言

植物吸收性光合有效辐射分量 (Fraction of photosynthetically active radiation, FPAR) 是植被吸收的光合有效辐射 (Absorbed photosynthetically active radiation, APAR) 占入射太阳辐射的比例^[1], 是表征植被冠层光能吸收强弱, 研究作物生长模型、生产力模型、生态模型等的重要参量^[2-8]。传统的 FPAR 监测通过冠层分析系统或光量子传感器等设备, 仅能准确获取某一观测位点作物群体冠层信息, 在监测尺度上具有一定局限性。高光谱遥感技术, 基于大范围空间异质性, 获取区域内作物冠层信息^[9-10], 建立适于较大范围的 FPAR 监测模型, 在测量范围上较传统仪器设备具有一定的优越性^[11]。

20 世纪末, 国外科学家已经提出基于遥感技术研究 FPAR 是可行的^[12-13]。Roujean 等^[14] 和 Myneni 等^[15] 指出 FPAR 与归一化植被指数 (NDVI) 具有较好的线性或非线性关系。Cristiano 等^[16] 指出绿波段归一化植被指数 (Green-NDVI) 是估算 FPAR 的最佳植被指数。Huthe 等^[17] 指出增强型植被指数 (EVI) 可以提高 FPAR 反演精度。Viña 等^[18] 借助遥感技术监测玉米和大豆 FPAR。这些研

究大多通过实测光谱数据构建植被指数建立 FPAR 监测模型, 是目前基于高光谱遥感监测 FPAR 的主要手段^[19-20]。近年来, 国内学者也开始基于高光谱遥感的 FPAR 研究。王培娟等^[21] 研究表明复归一化植被指数 (RDVI) 与 FAPR 的相关系数达 0.975。杨飞等^[22-23] 表明可通过近、短波红外波段估算玉米、大豆 FPAR, 估算模型决定系数 R^2 达到 0.80 以上; 并且通过一阶导数和植被指数估测玉米 FPAR。辛明月等^[24] 研究指出一阶导数光谱能很好地估测水稻冠层 FPAR。夏天等^[25] 指出 NDVI 与小麦 FPAR 值相关系数达 0.889。

基于植被指数研究 FPAR 仍是当前遥感研究热点^[26]。但是, 由于大气环境、土壤背景、生态区域等诸多因素综合影响着植被指数与 FPAR, 使遥感建模存在许多不确定因素, 导致模型预测精度不高。本文通过连续 5 年定位研究不同氮磷耦合水平下、不同生育时期、不同类型冬小麦群体冠层光谱反射率与 FPAR, 挖掘不同氮磷耦合水平下冬小麦冠层光谱信息, 分析不同生育时期 FPAR 与植被指数的定量关系, 探索能适应不同生育阶段的更为精准的植被指数, 增强 FPAR 监测模型的稳定性与普适性, 建立不同生育时期冬小麦 FPAR 分段监测模型,

可提高模型预测精度,为实现更大区域范围的冬小麦不同生育时期、不同肥力水平下长势实时监测和精确诊断提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于西北农林科技大学北校区,108°10'E,34°10'N,海拔 454.8 m,温带大陆性季风型气候,年平均温度 12 ~ 14℃,无霜期 220 d,年蒸发量 1 400 mm,年平均降水量 621.6 mm。试验地为粉砂粘壤土,0 ~ 20 cm 土层土壤养分含量分别为:有机质 14.26 g/kg,全氮 0.90 g/kg,碱解氮 36.00 mg/kg,速效磷 17.64 mg/kg;20 ~ 40 cm 土层养分含量分别为:有机质 10.04 g/kg,全氮 0.62 g/kg,碱解氮 25.29 mg/kg,速效磷 23.85 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于 2009—2014 年实施,采取随机区组设

计,每年设置 2 个不同抗旱程度的冬小麦品种,共 8 个品种,5 个氮素水平,4 个磷肥水平,3 组重复。小区面积为 30 m² (3 m × 10 m)。5 个氮肥 (46% N 尿素) 水平分别为: N₀ (0 kg/hm² 纯氮)、N₁ (75 kg/hm² 纯氮)、N₂ (150 kg/hm² 纯氮)、N₃ (225 kg/hm² 纯氮) 和 N₄ (300 kg/hm² 纯氮),使之表现为严重缺氮、缺氮、适量氮、过量氮、严重过量氮等不同梯度氮素营养状况,总氮肥 60% 作为基肥,40% 作为追肥于返青后拔节前施入。4 个磷肥 (16% CaP₂H₄O₈) 水平分别为: P₀ (0 kg/hm² P₂O₅)、P₁ (60 kg/hm² P₂O₅)、P₂ (120 kg/hm² P₂O₅)、P₃ (180 kg/hm² P₂O₅),使之表现为严重缺磷、缺磷、适量磷、过量磷等不同梯度磷素营养状况,磷肥作为底肥一次性施入。不施钾肥,其他田间管理按照黄土高原高产田措施进行良好管理。播种量均为 187.50 kg/hm²,每小区播种量约 0.56 kg。不同年份供试品种、播种、收获及数据采集日期见表 1。

表 1 不同年份田间试验基本情况
Tab.1 Basic information for experiment in different years

年份	品种		播种日期	收获日期	数据采集日期
	强抗旱型	弱抗旱型			
2009—2010	晋麦 47	西农 979	2009-10-09	2010-06-05	04-07、04-22、05-07、05-20、05-27
2010—2011	晋麦 47	西农 979	2010-10-13	2011-06-10	04-09、04-23、05-07、05-18、06-03
2011—2012	普冰 9946	西农 2000	2011-10-16	2012-06-08	04-08、04-23、05-05、05-19、06-03
2012—2013	周麦 18	小偃 22	2012-10-10	2013-06-09	04-03、04-17、05-03、05-18、05-30
2013—2014	长旱 58	漯麦 9 号	2013-10-08	2013-06-11	04-05、04-20、05-04、05-19、06-04

1.3 测定指标及方法

1.3.1 冠层光谱反射率测量

冬小麦冠层光谱反射率采集用美国 Analytical Spectral Devices (ASD) 公司 Field-spec Pro FR-2 500 型背挂式野外高光谱辐射测量仪,波段为 350 ~ 2 500 nm,350 ~ 1 000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1 000 ~ 2 500 nm,光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。冠层光谱在天气晴朗、无风时测量,时间为每天 10:00 ~ 14:00。测量时传感器探头垂直向下,光谱仪视场角为 7.5°,距冠层顶垂直高度约 25 ~ 30 cm,地面视场范围直径为 0.5 m。于冬小麦拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、成熟期测量。每个观测点记录 10 个采样光谱,每小区测 3 次重复,取算数平均值作为该观测点光谱反射率。测量过程中,于每一处理测量完毕后,及时进行标准白板校正 (标准白板反射率为 1,因此所得目标物光谱为相对反射率),以便准确测量下一处理。

1.3.2 PAR 测量

PAR 数据采集与冠层光谱采集同步进行,在同

一取样范围内,以美国 Decagon 公司 AccuPAR PAR/LAI ceptometer 型植物冠层分析仪 (model LP-80 型) 测量,AccuPAR 探测器长 86.5 cm,内嵌 80 个 GaAsP 型光敏传感器,PAR 传感器量程为 0 ~ 2 500 μmol/(m²·s),传感器分辨率 1 μmol/(m²·s),波长范围 400 ~ 700 nm。探头中包括 80 个间隔为 1 cm 的 PAR 光敏传感器,用于测量环境光照中 PAR 的变化。采集冠层顶部 PAR 值时,探测器水平至于冠层顶部;采集冠层底部 PAR 值时,将探测器水平置于作物冠层底部,与作物行向垂直。每个测量点测 3 次,取算数平均值为该观测点的光合有效辐射值,单位为 μmol/(m²·s)。根据 Gallo 和 Daughtry 计算公式求得 FPAR 值^[27]。

APAR = PAR_{ci} - PAR_{cr} - (PAR_{gi} - PAR_{gr})

FPAR = APAR/PAR_{ci}

式中 APAR——植物吸收性光合有效辐射量
PAR_{ci}——冠层上部光合有效辐射入射量
PAR_{cr}——冠层上部光合有效辐射反射量
PAR_{gi}——冠层底部光合有效辐射入射量

PAR_{gr} ——冠层底部光合有效辐射反射量

1.4 植被指数及拟合模型的选择

在前人研究基础上,选择比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)^[28],土壤调整植被指数(Soil adjusted vegetation index, SAVI)^[29],增强植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)^[30],红边归一化植被指数(Red edge normalized difference vegetation index, NDVI₇₀₅)^[31];差值植被指数(Difference vegetation index, DVI)^[32]等5种植被指数,于不同生育时期监测冬小麦群体 PAR,计算 FPAR,以 FPAR 为因变量,不同类型植被指数为自变量,建立 FPAR 高光谱遥感监测模型。不同植被指数计算公式及来源见表 2。

表 2 采用的光谱植被指数
Tab.2 Hyperspectral vegetation indices

植被指数	计算公式	来源
RVI	$RVI = R_{A1} / R_{A2}$	文献[28]
SAVI	$SAVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED} + L) \cdot (1 + L)$	文献[29]
EVI	$EVI = 2.5(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + 6R_{RED} - 7.5R_{BLUE} + 1)$	文献[30]
NDVI ₇₀₅	$NDVI_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$	文献[31]
DVI	$DVI = R_{A1} - R_{A2}$	文献[32]

注: R_{A1} 、 R_{A2} 、 R_{NIR} 、 R_{RED} 、 R_{BLUE} 、 R_{750} 、 R_{705} 分别为 λ_1 、 λ_2 、近红外、红光、蓝光、750 nm、705 nm 波段光谱反射率。 L 为调整系数,取值为 0.5。

1.5 数据处理与分析

依据不同年份、不同氮磷水平、不同生育时期、不同品种类型将 PAR 和冠层光谱反射率数据进行分类,按照表 2 公式计算植被指数,按 1.3.2 节计算 FPAR。用 ViewSpec 软件对冠层光谱反射率进行预处理。以 2010—2011 年数据为例分析不同氮磷水平对 FPAR 的影响;以 2011—2012 年抽穗期西农 2000 冠层光谱反射率为例,分析不同氮磷耦合水平对冬小麦冠层光谱反射率的响应趋势;将 2009—2014 年试验所得全部数据汇总,分析冠层光谱反射率与 FPAR 相关性,在此基础上建立从拔节期至成熟期的 FPAR 统一监测模型,对统一模型精度进行验证;以 2011—2012 年和 2012—2013 年数据建立不同生育时期 FPAR 监测模型,以 2010—2011 年和 2013—2014 年独立试验数据对模型进行精度验证;比较分析田间实测值与模型预测值均方根误差(Root mean square error, RMSE)和相对误差(Relative error, RE),筛选精确可靠的模型,确定不同生育时期冬小麦 FPAR 监测模型。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷水平对冬小麦 FPAR 的影响

以 2010—2011 年 FPAR 数据为例,分析不同氮

磷水平对 FPAR 的影响(表 3)。由表 3 可知:不同氮磷水平下,不同生育时期不同品种冬小麦 FPAR 间存在显著差异($P < 0.05$)。从拔节期到成熟期不同处理 FPAR 呈“低-高-低”的趋势。在抽穗期,冬小麦冠层结构逐渐密闭,FPAR 达最大值;在灌浆期,植株由营养生长转入生殖生长,营养逐渐转向籽粒,叶片枯萎,FPAR 值逐渐降低。

同一氮肥水平下,随着施磷量的增加(N_2P_0 、 N_2P_1 、 N_2P_2 、 N_2P_3),FPAR 呈显著递增趋势($P < 0.05$),抽穗期西农 979 N_2P_3 处理分别比 N_2P_2 、 N_2P_1 、 N_2P_0 增加 2.53%、3.80%、15.19%。同一磷肥水平下,随着施氮量的增加(N_0P_2 、 N_1P_2 、 N_2P_2 、 N_3P_2 、 N_4P_2),FPAR 亦呈显著递增趋势($P < 0.05$),抽穗期西农 979 N_4P_2 处理比 N_3P_2 、 N_2P_2 、 N_1P_2 、 N_2P_2 分别增加 1.11%、1.11%、10.00%、17.78%。在不同生育时期亦有不同程度的提高。表明适量增施氮磷肥,能改善冬小麦群体 FPAR。在灌浆期和成熟期,高氮处理(N_4P_2 、 N_3P_2)FPAR 仍有较高趋势,说明过量氮投入会影响冬小麦后期正常生长发育,导致贪青晚熟。

2.2 不同氮磷水平下冬小麦冠层光谱反射率

以 2011—2012 年抽穗期西农 2000 冠层光谱反射率为例,分析不同氮磷水平对冠层光谱反射率的影响(图 1)。为降低噪声影响,将全波段范围(350 ~ 2 500 nm)内 1 300 ~ 1 400 nm、1 800 ~ 1 900 nm 和 2 400 ~ 2 500 nm 波段及其附近波段噪声数据剔除,以便于数学分析及建模。由图 1 可知:不同氮磷水平下冬小麦冠层光谱反射率在 550 nm 处有一反射峰,不同氮磷水平存在较大差异;在 710 ~ 760 nm 之间,光谱反射率急剧上升,不同氮磷水平下差异较小;在 970 nm 附近光谱反射率出现一个吸收谷,随着氮磷水平增加,该吸收谷有加深趋势;在 760 ~ 950 nm 和 1 000 ~ 1 120 nm 波段内,反射率随氮磷水平增加呈递增趋势。

在适量氮水平下,随着施磷量的增加(N_2P_0 、 N_2P_1 、 N_2P_2 、 N_2P_3),冠层光谱反射率在可见光波段(380 ~ 760 nm)呈降低趋势, N_2P_2 、 N_2P_3 较 N_2P_0 、 N_2P_1 显著降低 2% ~ 5% ($P < 0.05$);在近红外波段(760 ~ 1 400 nm)呈递增趋势, N_2P_2 、 N_2P_3 较 N_2P_0 、 N_2P_1 显著增加 5% ~ 10% ($P < 0.05$)。在适量磷水平下,不同氮磷处理(N_0P_2 、 N_1P_2 、 N_2P_2 、 N_3P_2 、 N_4P_2)亦有相似规律。随着施氮量的增加,在可见光波段(380 ~ 760 nm)冠层光谱反射率呈降低趋势, N_2P_2 、 N_3P_2 、 N_4P_2 较 N_0P_2 、 N_1P_2 降低 3% ~ 5% ($P < 0.05$);在近红外波段(760 ~ 1 400 nm), N_2P_2 、 N_3P_2 、 N_4P_2 较 N_0P_2 、 N_1P_2 显著增加为 4% ~ 10% ($P < 0.05$)。总

表 3 不同氮磷水平下冬小麦 FPAR 变化 (2010—2011 年)

Tab.3 Changes of FPAR in winter wheat under different N and P application rates (2010—2011)

处理		西农 979					晋麦 47				
		拔节期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期	拔节期	孕穗期	抽穗期	灌浆期	成熟期
N ₀	P ₀	0.43 ^a	0.51 ^a	0.69 ^a	0.65 ^a	0.57 ^a	0.34 ^a	0.44 ^a	0.55 ^a	0.49 ^a	0.45 ^a
	P ₁	0.48 ^b	0.64 ^b	0.71 ^b	0.68 ^a	0.66 ^b	0.46 ^b	0.57 ^b	0.67 ^b	0.60 ^b	0.54 ^b
	P ₂	0.50 ^b	0.66 ^b	0.74 ^b	0.66 ^a	0.68 ^b	0.50 ^b	0.56 ^b	0.70 ^b	0.66 ^b	0.57 ^b
	P ₃	0.54 ^c	0.68 ^b	0.81 ^c	0.67 ^a	0.65 ^b	0.53 ^b	0.62 ^b	0.78 ^c	0.67 ^b	0.65 ^c
N ₁	P ₀	0.53 ^a	0.64 ^a	0.68 ^a	0.64 ^a	0.61 ^a	0.55 ^a	0.64 ^a	0.68 ^a	0.58 ^a	0.56 ^a
	P ₁	0.54 ^a	0.71 ^b	0.76 ^b	0.74 ^b	0.70 ^b	0.59 ^a	0.71 ^b	0.72 ^b	0.68 ^b	0.58 ^b
	P ₂	0.53 ^a	0.74 ^b	0.81 ^c	0.80 ^b	0.71 ^b	0.57 ^a	0.64 ^a	0.75 ^b	0.69 ^b	0.65 ^c
	P ₃	0.58 ^b	0.76 ^b	0.88 ^d	0.88 ^c	0.81 ^c	0.59 ^a	0.76 ^b	0.78 ^b	0.77 ^c	0.68 ^c
N ₂	P ₀	0.58 ^a	0.68 ^a	0.79 ^a	0.65 ^a	0.63 ^a	0.57 ^a	0.65 ^a	0.70 ^a	0.68 ^a	0.65 ^a
	P ₁	0.59 ^a	0.76 ^b	0.88 ^a	0.78 ^b	0.73 ^b	0.61 ^a	0.78 ^b	0.78 ^b	0.70 ^a	0.68 ^a
	P ₂	0.62 ^b	0.76 ^b	0.89 ^a	0.83 ^c	0.79 ^c	0.62 ^b	0.77 ^b	0.82 ^b	0.75 ^b	0.70 ^a
	P ₃	0.62 ^b	0.79 ^b	0.91 ^b	0.88 ^c	0.87 ^c	0.64 ^b	0.80 ^b	0.88 ^b	0.77 ^b	0.73 ^a
N ₃	P ₀	0.63 ^a	0.67 ^a	0.76 ^a	0.71 ^a	0.66 ^a	0.63 ^a	0.64 ^a	0.72 ^a	0.70 ^a	0.61 ^a
	P ₁	0.63 ^a	0.76 ^b	0.87 ^b	0.85 ^b	0.78 ^b	0.67 ^b	0.74 ^b	0.82 ^b	0.75 ^b	0.70 ^b
	P ₂	0.67 ^b	0.80 ^b	0.89 ^b	0.82 ^b	0.75 ^b	0.66 ^b	0.71 ^b	0.84 ^b	0.78 ^b	0.75 ^b
	P ₃	0.68 ^b	0.85 ^c	0.92 ^c	0.86 ^b	0.80 ^b	0.67 ^b	0.78 ^b	0.85 ^b	0.80 ^b	0.75 ^b
N ₄	P ₀	0.65 ^a	0.74 ^a	0.85 ^a	0.78 ^a	0.73 ^a	0.65 ^a	0.72 ^a	0.81 ^a	0.75 ^a	0.73 ^a
	P ₁	0.68 ^a	0.83 ^b	0.88 ^b	0.82 ^b	0.79 ^b	0.67 ^a	0.94 ^b	0.87 ^b	0.80 ^b	0.80 ^b
	P ₂	0.70 ^a	0.85 ^b	0.90 ^b	0.85 ^b	0.82 ^b	0.65 ^a	0.73 ^a	0.88 ^b	0.81 ^b	0.79 ^b
	P ₃	0.76 ^b	0.84 ^b	0.90 ^b	0.88 ^b	0.88 ^c	0.66 ^a	0.89 ^b	0.90 ^b	0.83 ^b	0.81 ^b

注：同列数据后，不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

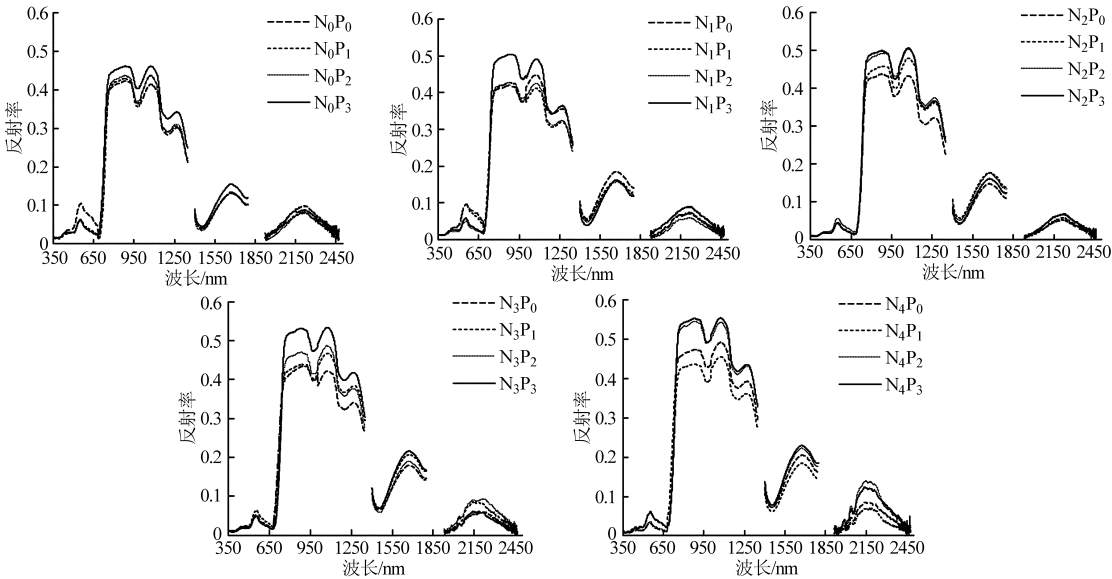


图 1 不同氮磷水平下冬小麦冠层光谱反射率的变化 (2011—2012 年抽穗期)

Fig.1 Changes of canopy spectral reflectance of winter wheat under different N and P application rates (heading stage, 2011—2012)

之,随着氮磷供应量的增加,冠层光谱反射率在可见光波段显著降低 2% ~ 5%,在近红外波段显著增加 4% ~ 10%。

2.3 不同生育时期冠层光谱反射率与 FPAR 的相关性

将 2009—2014 年不同生育时期冬小麦冠层光谱反射率与相对应的 FPAR 进行相关分析(图 2)。由图 2 可知,在不同生育时期,冠层光谱反射率与

FPAR 相关性趋势一致,在可见光波段呈显著负相关 ($P < 0.05$),近红外波段呈显著正相关 ($P < 0.05$),短波红外波段呈显著负相关 ($P < 0.05$),不同生育时期存在一定差异。可见光波段相关系数 r 绝对值达到 0.60 左右,随着波长增加,相关性逐渐减小,650 nm 处有较高的相关系数;至近红外波段,705 nm 附近有个小波谷,710 nm 附近相关性急剧降低,730 nm 附近相关性最小,730 ~ 1 100 nm 之

间有一个相对稳定平台,呈极显著正相关($P < 0.05$),850 nm 和 960 nm 处有较好的相关性,该波段范围内,光谱反射率对叶面积指数较为敏感,由于不同肥力梯度下不同生育时期叶面积指数存在一定差异,驱动 FPAR 对冠层光谱反射率反应亦较敏感。在短波红外波段,1 400 ~ 1 800 nm 和 1 950 ~ 2 400 nm 之间,光谱反射率与 FPAR 呈极显著负相关($P < 0.05$),成熟期相关系数较其他生育时期较大,具有较好相关性。总之,FPAR 在可见光波段及近红外波段均有敏感波段。

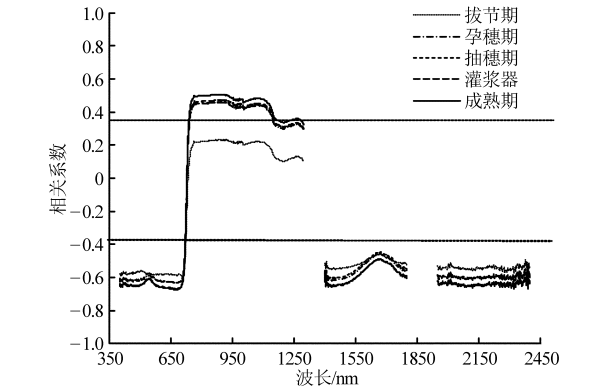


图2 不同生育时期冬小麦冠层光谱反射率与 FPAR 的相关性

Fig.2 Correlationship between canopy hyperspectral reflectance and FPAR of winter wheat at different growth stages

2.4 拔节期至成熟期 FPAR 统一监测模型的建立与验证

2.4.1 拔节期至成熟期植被指数与 FPAR 的相关性

通过对不同生育时期冠层光谱反射率与 FPAR 相关性分析,计算不同类型植被指数,分析 2009—2014 年从拔节期至成熟期植被指数与相对应的 FPAR 的相关性(表 4)。由表 4 可知,发现不同类型植被指数与 FPAR 均达到极显著相关($P < 0.01$),相关系数 r 范围为 0.477 ~ 0.674,具有一定的相关性,表明土壤调整植被指数 SAVI、红边归一化植被指数 NDVI₇₀₅、增强植被指数 EVI、差值植被指数 DVI、比值植被指数 RVI 均可以作为构建 FPAR 统一监测模型的参数。

表 4 拔节期至成熟期植被指数与 FPAR 的相关系数
Tab.4 Correlation coefficient between vegetation indices and FPAR from jointing to maturity stages

参数	植被指数				
	SAVI	NDVI ₇₀₅	EVI	DVI	RVI
FPAR	0.674 **	0.631 **	0.530 **	0.525 **	0.477 **

2.4.2 拔节期至成熟期 FPAR 统一监测模型的建立与验证

选择 2010—2013 年冬小麦 FPAR 与对应植被

指数($n = 600$)建立基于不同植被指数的拔节期至成熟期冬小麦 FPAR 统一监测模型,以 2009—2010 年和 2013—2014 年连续两年独立试验数据($n = 400$)对 FPAR 统一模型进行验证(表 5)。由表 5 可知,基于 SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、DVI、RVI 均能建立拔节期至成熟期冬小麦 FPAR 统一监测模型, R^2 范围为 0.227 ~ 0.454;SE 范围为 0.105 ~ 0.135;模型预测值与田间实测值的 RE 范围为:17.06% ~ 30.44%,RMSE 范围为 0.181 ~ 0.283。

表 5 拔节期至成熟期 FPAR 统一监测模型的拟合及验证
Tab.5 Fitting and performance of FPAR model of winter wheat from jointing to maturity stages

植被指数	拟合模型			验证模型	
	拟合方程	R^2	SE	RE/%	RMSE
SAVI	$y = 0.619x + 0.227$	0.454	0.105	17.06	0.181
NDVI ₇₀₅	$y = 0.670x - 0.055$	0.398	0.110	23.95	0.224
EVI	$y = 0.486x + 0.318$	0.281	0.121	25.01	0.268
DVI	$y = 0.729x + 0.074$	0.275	0.124	27.11	0.274
RVI	$y = 0.351x + 0.536$	0.227	0.135	30.44	0.283

2.5 不同生育时期 FPAR 分段监测模型的建立与验证

2.5.1 不同生育时期植被指数与 FPAR 的相关性

将 2011—2012 年和 2012—2013 年同一生育时期,不同品种冬小麦 FPAR 与相对应植被指数进行相关分析(表 6)。由表 6 可知,在不同生育时期,SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、DVI、RVI 均与 FPAR 达到极显著正相关($P < 0.01$),相关系数 r 范围为:0.818 ~ 0.942,表明这 5 种植被指数均能用于监测不同生育时期冬小麦 FPAR。

表 6 不同生育时期植被指数与冬小麦 FPAR 的相关系数
Tab.6 Correlation coefficient between vegetation indices and FPAR of winter wheat at different growth stages

生育时期	植被指数				
	SAVI	NDVI ₇₀₅	EVI	DVI	RVI
拔节期	0.924 **	0.921 **	0.909 **	0.860 **	0.886 **
孕穗期	0.932 **	0.942 **	0.931 **	0.875 **	0.818 **
抽穗期	0.884 **	0.892 **	0.900 **	0.893 **	0.874 **
灌浆期	0.913 **	0.886 **	0.939 **	0.917 **	0.919 **
成熟期	0.881 **	0.878 **	0.903 **	0.903 **	0.911 **

2.5.2 不同生育时期 FPAR 分段监测模型的建立与验证

将不同生育时期 FPAR 与植被指数拟合,建立基于不同植被指数的不同生育时期 FPAR 分段监测模型,并以 2010—2011 年和 2013—2014 年两个生长季不同类型冬小麦品种的独立试验数据为实测值,对分段监测模型进行验证(表 7)。由表 7 拟合

模型可知：不同生育时期内，SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、DVI、RVI 均与 FPAR 有较好的线性关系。拔节期基于 SAVI 能建立较好的 FPAR 监测模型， R^2 和 SE 分别为 0.854 和 0.054；孕穗期以 NDVI₇₀₅ 建立的预测模型效果较好， R^2 和 SE 分别为 0.888 和 0.032；抽穗期以 EVI 建立的预测模型效果较好， R^2 和 SE 分别为 0.811 和 0.044；灌浆期和成熟期均以 RVI 建立的预测模型效果较好， R^2 分别为 0.844、0.911，SE 分别为 0.047、0.044。该结果较拔节期至成熟期 FPAR 统一监测模型有所改善。

表 7 不同生育时期 FPAR 监测模型的拟合与验证
Tab.7 Fitting and performance of FPAR model of winter wheat at different growth stages

生育时期	植被指数	拟合模型			验证模型	
		拟合方程	R^2	SE	RE/%	RMSE
拔节期	SAVI	$y = 1.108x - 0.069$	0.854	0.054	14.1	0.139
	NDVI ₇₀₅	$y = 1.662x - 0.262$	0.847	0.055	14.9	0.145
	EVI	$y = 1.269x - 0.209$	0.827	0.059	15.4	0.153
	DVI	$y = 1.764x - 0.644$	0.740	0.072	18.5	0.174
	RVI	$y = 3.841x - 2.642$	0.786	0.065	17.6	0.168
孕穗期	SAVI	$y = 0.991x + 0.005$	0.869	0.035	17.9	0.151
	NDVI ₇₀₅	$y = 1.020x - 0.044$	0.888	0.032	17.4	0.146
	EVI	$y = 1.015x - 0.007$	0.866	0.040	18.3	0.157
	DVI	$y = 1.176x - 0.340$	0.766	0.046	18.8	0.168
	RVI	$y = 0.516x + 0.149$	0.669	0.055	19.5	0.172
抽穗期	SAVI	$y = 0.934x + 0.079$	0.782	0.047	14.3	0.157
	NDVI ₇₀₅	$y = 0.769x + 0.444$	0.796	0.046	13.7	0.145
	EVI	$y = 0.823x + 0.243$	0.811	0.044	12.8	0.136
	DVI	$y = 0.419x + 0.568$	0.798	0.045	13.3	0.139
	RVI	$y = 1.341x - 0.305$	0.764	0.049	15.2	0.161
灌浆期	SAVI	$y = 1.019x - 0.013$	0.834	0.062	19.5	0.167
	NDVI ₇₀₅	$y = 0.680x + 0.402$	0.784	0.056	19.7	0.173
	EVI	$y = 0.996x + 0.003$	0.705	0.065	21.2	0.181
	DVI	$y = 0.996x + 0.003$	0.840	0.048	19.1	0.163
	RVI	$y = 1.245x - 0.308$	0.844	0.047	18.8	0.158
成熟期	SAVI	$y = 1.110x - 0.082$	0.776	0.049	13.8	0.147
	NDVI ₇₀₅	$y = 0.588x + 0.512$	0.770	0.050	14.7	0.152
	EVI	$y = 1.026x - 0.019$	0.903	0.056	11.2	0.141
	DVI	$y = 0.510x + 0.443$	0.816	0.045	13.1	0.164
	RVI	$y = 1.085x - 0.115$	0.911	0.044	10.7	0.130

通过比较模型预测值与田间实测值间 RMSE 和 RE 进行筛选验证结果较好的植被指数及预测模型。由表 7 验证模型可知：在拔节期基于 SAVI 建立的监测模型具有较好的验证效果，RE 和 RMSE 分别为 14.1% 和 0.139；在孕穗期基于 NDVI₇₀₅ 建立的监测模型具有较好的验证效果，RE 和 RMSE 分别为 17.4% 和 0.146；在抽穗期基于 EVI 建立的监测模型具有较好的验证效果，RE 和 RMSE 分别为 12.8% 和 0.136；在灌浆期和成熟期均基于 RVI 建

立的监测模型效果更好，RE 分别为 18.8% 和 10.7%，RMSE 分别为 0.158 和 0.130。这一验证结果也较 FPAR 统一模型有所改善。

3 讨论

3.1 不同氮磷水平对 FPAR 及冠层光谱反射率的影响

FPAR 是评价作物群体光能利用效率、产量预测的重要参数^[33]。通过连续 5 年不同氮磷水平的大田试验定位研究不同类型冬小麦不同生育时期 FPAR 与冠层光谱反射率，结果表明，随着氮磷供应水平的提高，冬小麦群体 FPAR 呈递增趋势，这种趋势有利于作物群体光能吸收及转化，但过量氮磷供应，会延缓作物衰老，延长灌浆期，最终影响产量形成。不同氮磷水平下，不同生育时期光谱反射率趋势相似，随着氮磷供应量的增加，光谱反射率在可见光波段呈降低趋势，在近红外波段呈递增趋势。不同生育时期、不同肥力水平下，由于冠层结构的差异，引起冠层光谱反射率的差异。FPAR 的敏感波段主要位于可见光波段的红光、蓝光波段，随着生育时期的延长，红波段反射率吸收谷加深。

3.2 拔节期至成熟期 FPAR 统一监测模型

结合前人研究，选择并优化不同类型植被指数。基于连续多年，不同生育时期分析从拔节期至成熟期植被指数与 FPAR 的相关性，发现 SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、DVI、RVI 与 FPAR 均达极显著相关 ($P < 0.01$)，但是建立的 FPAR 统一监测模型的精度不高 ($R^2 = 0.227 \sim 0.454$)，且模型预测值与实测值的相对误差偏高 (RE = 17.06% ~ 30.44%)。统一监测模型，基于连续多年，在不同生育时期 FPAR 有较大差异，参与建模的数据量过大，模型出现饱和性，导致模型监测及验证精度不高。鉴于此，将不同生育时期分段，使样本分布更加合理，提高冠层光谱反射率对 FPAR 的敏感性，选择不同生育时期的最佳植被指数，建立不同生育时期 FPAR 分段监测模型，以提高监测模型精度。

3.3 不同生育时期 FPAR 分段监测模型

不同类型的植被指数将不同波段光谱反射率组合，分解混合光谱信息，降低作物冠层背景噪声，消除大气溶胶对冠层光谱反射率的影响，增强冠层光谱反射率信息^[34]。在拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、成熟期 FPAR 与 SAVI、NDVI₇₀₅、EVI、DVI、RVI 均达极显著相关 ($P < 0.01$)，能建立较好的分段监测模型，且分段模型的预测精度 (R^2) 较统一模型有所改善，同时模型预测值与田间实测值间相对误差 (RE) 和均方根误差 (RMSE) 亦有一定程度的改善。

本文基于不同植被指数建立 FPAR 分段检测模型,并对模型精度验证,参与建立模型和验证模型的数据均来自不同年份,不同品种,表明该分段模型具有较好的年度间重演性和品种间适应性。另外,该分段监测模型,将冬小麦生育期从时间序列上划分,在不同生育阶段,针对不同覆盖度群体,选择最佳植被指数,提高光谱反射率对 FPAR 的敏感性,同时避免建模数据的饱和现象,说明 FPAR 分段监测模型是可行有效的。

在拔节期,冬小麦覆盖度较低,光谱反射率噪声主要来自土壤背景及地表作物残叶的影响,而土壤调整植被指数(SAVI)通过对冠层光谱反射率的红光和近红外波段之间的差异矫正,有效降低土壤背景对冠层光谱反射率的干扰^[29],进而提高二者间的相关性。进入孕穗期,冠层逐渐郁闭,红边归一化植被指数(NDVI₇₀₅)将红光吸收波段与近红外反射平台结合,能较好地反映群体冠层结构变化^[35]。在抽穗期,冠层覆盖度较高,FPAR 达最大值,冠层光谱反射率的影响主要来自大气,增强植被指数(EVI)具有良好的抗大气干扰能力,能有效降低大气溶胶对作物群体冠层光谱反射率的影响^[36]。灌浆期至成熟期,冬小麦由营养生长转入生殖生长,植株叶片枯黄,叶面积有降低趋势,土壤背景干扰冠层反射率,而比值植被指数(RVI)改善土壤与作物群体反射光谱的对比,对后期作物衰老有较好的监测效果^[37]。

3.4 FPAR 高光谱遥感监测模型研究展望

基于不同植被指数建立不同生育时期冬小麦 FPAR 分段监测模型,较基于单一植被指数建立的统一监测模型预测精度有所改善,通过独立数据验证,模型具有一定的稳定性和适应性,为提高高光谱

遥感模型监测精度提供了理论依据。但是,由于高光谱数据信息丰富,而且不同类型植被指数具有不同适用范围,不同作物群体冠层结构及植被指数间机理仍有待进一步探索。另外,本文筛选的不同生育时期 FPAR 监测模型的建立和验证均以本试验区域内数据为基础,因此模型仍需在不同生态区域或其他类型品种的冬小麦进行更为广泛的验证,进一步完善模型的稳定性和适用性,进而促进在冬小麦精确生产管理中的应用。

4 结 论

(1) 适量增施氮磷供应水平能有效显著改善冬小麦群体 FPAR($P < 0.05$),过量氮磷供应导致贪青晚熟。总之,随着氮磷供应量的增加,冠层光谱反射率在可见光波段显著降低 2% ~ 5% ($P < 0.05$),在近红外波段显著增加 4% ~ 10% ($P < 0.05$)。冬小麦群体冠层光谱反射率与 FPAR 在可见光波段及段红外波段均呈负相关,在近红外波段呈正相关。FPAR 的敏感波段主要集中在波长 670、850 和 960 nm 附近。

(2) 基于以土壤调整植被指数(SAVI)、红边归一化植被指数(NDVI₇₀₅)、增强植被指数(EVI)、比值植被指数(RVI)建立的拔节期、孕穗期、抽穗期、灌浆期、成熟期 FPAR 分段监测模型,决定系数分别为 0.854、0.888、0.811、0.844、0.911;标准误差分别为 0.054、0.032、0.044、0.047、0.044;实测值与预测值间相对误差分别为 14.1%、17.4%、12.8%、18.8%、10.7%,均方根误差分别为 0.139、0.146、0.136、0.158、0.130。表明分段模型不仅具有较好的重演性和适应性,预测精度也较统一模型有所提高。

参 考 文 献

1 陈雪洋,蒙继华,吴炳方,等. 基于 HJ-1 CCD 的夏玉米 FPAR 遥感监测模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊1): 241 - 245.
Chen Xueyang, Meng Jihua, Wu Bingfang, et al. Monitoring corn FPAR based on HJ-1 CCD[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 241 - 245. (in Chinese)

2 郑健,蔡焕杰,王健,等. 日光温室内光合有效辐射基本特征分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 164 - 168,176.
Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Features of photosynthetic active radiation (PAR) in greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 164 - 168,176. (in Chinese)

3 Bruce D C, Paul V B, Erik N, et al. Using LiDAR and quickbird data to model plant production and quantify uncertainties associated with wetland detection and cover generalizations[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(11): 2366 - 2379.

4 Churkina G, Running S W. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global, terrestrial [J]. Ecosystems, 1998, 1(2): 206 - 215.

5 Lobell D B, Asner G P, Ortiz-Monasterio J I, et al. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2003, 94(2): 205 - 220.

6 任建强,陈仲新,唐华俊,等. 基于植物净初级生产力模型的区域冬小麦估产研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 111 - 117.
Ren Jianqiang, Chen Zhongxin, Tang Huajun, et al. Regional yield estimation for winter wheat based on net primary production

- model [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(5): 111–117. (in Chinese)
- 7 Reich P B, Turner D P, Bolstad P. An approach to spatially distributed modeling of net primary production (NPP) at the landscape scale and its application in validation of EOS NPP products [J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 70(1): 69–81.
- 8 武海巍, 于海业, 张蕾. 光合有效辐射预测模型的核函数组合优化[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 167–173.
Wu Haiwei, Yu Haiye, Zhang Lei. Optimized photosynthetic active radiation prediction model based on kernel function combination [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 167–173. (in Chinese)
- 9 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 小麦叶片色素含量的高光谱监测[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5): 992–999.
Feng Wei, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Monitoring of wheat leaf pigment concentration with hyper-spectral remote sensing [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5): 992–999. (in Chinese)
- 10 姚付启, 蔡焕杰, 王海江, 等. 冬小麦冠层高光谱特征与覆盖度相关性研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 156–162.
Yao Fuqi, Cai Huanjie, Wang Haijiang, et al. Correlation between percentage vegetation cover and hyperspectral characteristics of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 156–162. (in Chinese)
- 11 董泰锋, 蒙继华, 吴炳方. 基于遥感的光合有效辐射吸收比率 (FPAR) 估算方法综述[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7190–7201.
Dong Taifeng, Meng Jihua, Wu Bingfang. Overview on methods of driving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7190–7201. (in Chinese)
- 12 Daughtry C S T, Gallo K P, Goward S N, et al. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies[J]. Remote Sensing Environment, 1992, 39(2): 141–152.
- 13 Pinter P J. Solar angle independence in the relationship between absorbed PAR and remotely sensed data for alfalfa [J]. Remote Sensing Environment, 1993, 46(1): 19–25.
- 14 Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. Remote Sensing Environment, 1995, 51(3): 375–384.
- 15 Myneni R B, Nemani R R, Running S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(6): 1380–1393.
- 16 Cristiano P M, Posse G, Di Bella, et al. Uncertainties in fPAR estimation of grass canopies under different stress situations and differences in architecture [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15): 4095–4109.
- 17 Hutte A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1–2): 195–213.
- 18 Viña A, Gitelson A A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(17): 1–4.
- 19 Liu Liangyun, Wang Jihua, Bao Yansong, et al. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal Envisat-ASAR and landsat TM satellite image [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(4): 737–753.
- 20 Beeri O, Pelde A. Geographical model for precise agriculture monitoring with real-time remote sensing [J]. IPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(1): 47–54.
- 21 王培娟, 朱启疆, 吴门新, 等. 冬小麦冠层的 FAPAR、LAI、VIs 之间关系的研究[J]. 遥感信息, 2003(3): 19–22.
Wang Peijuan, Zhu Qijiang, Wu Menxin, et al. Research on the relationships among FAPAR, LAI and VIs in the winter wheat canopy [J]. Remote Sensing Information, 2003(3): 19–22 (in Chinese)
- 22 杨飞, 张柏, 宋开山, 等. 玉米和大豆光合有效辐射吸收比例与植被指数和叶面积指数的关系[J]. 作物学报, 2008, 34(11): 2046–2052.
Yang Fei, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Relationship between fraction of photosynthetically active radiation and vegetation indices, leaf area index of corn and soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(11): 2046–2052. (in Chinese)
- 23 杨飞, 张柏, 宋开山, 等. 玉米光合有效辐射分量高光谱估算的初步研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 1947–1954.
Yang Fei, Zhang Bai, Song Kaishan, et al. Hyperspectral estimation of corn fraction of photosynthetically active radiation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(7): 1947–1954. (in Chinese)
- 24 辛明月, 殷红, 张涛, 等. 基于高光谱遥感的水稻冠层吸收光合有效辐射的估算研究[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 443–446.
Xin Mingyue, Yin Hong, Zhang Tao, et al. Estimation of rice absorbed photosynthetically active radiation by hyperspectral remote sensing [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2011, 25(4): 443–446. (in Chinese)
- 25 夏天, 周勇, 张海涛, 等. 基于高光谱的小麦冠层光合有效辐射比率估算研究[C]//2010年国际遥感会议论文集, 2010.
Xia Tian, Zhou Yong, Zhang Haitao, et al. Study on estimation of wheat canopy FPAR based on hyper-spectral technology[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS), 2010. (in Chinese)
- 26 Steinberg D C, Goetz S J, Hyer E J. Validation of MODIS FPAR products in boreal forests of Alaska [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(7): 1818–1827.
- 27 Gallo K P, Daughtry C S T. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies [J]. Agronomy Journal, 1986, 78(4): 752–756.

9 曾发明,杨波,吴德文,等. 基于 Canny 边缘检测算子的矿区道路提取[J]. 国土资源遥感,2013,25(4):72-78.
Zeng Faming, Yang Bo, Wu Dewen, et al. Extraction of roads in the mining area based on Canny edge detection operator[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(4):72-78. (in Chinese)

10 吴健生,刘建政,黄秀兰,等. 基于面向对象分类的土地整理区农田排灌系统自动化识别[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 25-31.
Wu Jiansheng, Liu Jianzheng, Huang Xiulan, et al. Automatic identification of irrigation and drainage system in land reclamation area based on object-oriented classification[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(8):25-31. (in Chinese)

11 沈明霞,姬长英,张瑞合. 基于小波变换的农田景物边缘检测[J]. 农业机械学报, 2001, 32(2): 27-29.
Shen Mingxia, Ji Changying, Zhang Ruihe. Edges detectiong of a cropland scenery using wavelet transform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 27-29. (in Chinese)

12 张红霞,张铁中,陈兵旗. 基于模式识别的农田目标定位线检测[J]. 农业机械学报,2008,39(2):109-111.
Zhang Hongxia, Zhang Tiezhong, Chen Bingqi. Detection algorithm for orientation lines based on pattern recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(2):109-111. (in Chinese)

13 姜国权,柯杏,杜尚丰,等. 基于机器视觉和随机方法的作物行提取算法[J]. 农业机械学报, 2008,39(11): 85-88,93.
Jiang Guoquan, Ke Xing, Du Shangfeng, et al. Detection algorithm of crop rows based on machine vision and randomized method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(11):85-88, 93. (in Chinese)

14 赵瑞娇,李民赞,张漫,等. 基于改进 Hough 变换的农田作物行快速检测算法[J]. 农业机械学报, 2009,40(7):163-165.
Zhao Ruijiao, Li Minzan, Zhang Man, et al. Rapid crop-row detection based on improved Hough transformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(7):163-165. (in Chinese)

15 李伟涛,彭道黎,吴见. 基于改进边缘分割算法的幼苗信息提取[J]. 农业机械学报,2014,45(4):259-263.
Li Weitao, Peng Daoli, Wu Jian. Extraction of seedlings information based on improved edge segmentation algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):259-263. (in Chinese)

16 刘炜,王聪华,赵尔平,等. 基于面向对象分类的细小河流水体提取方法研究[J]. 农业机械学报,2014,45(7):237-244.
Liu Wei, Wang Conghua, Zhao Erping, et al. Extraction of small river information based on object-oriented classification[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(7):237-244. (in Chinese)

17 Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on pattern Analysis Machine Intelligence, 1986, 8(6):679-698.

(上接第 269 页)

28 Pearson R L, Miller D L. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie [C]// Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment. Michigan: Ann Arbor, 1972, 2: 1357-1381.

29 Huete A R. A soil vegetation adjusted index (SAVI) [J]. Remote sensing of Environment, 1988, 25(3):295-309.

30 Huete A R, Justice C, Liu H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 49(3): 224-234.

31 Sim D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 331-354.

32 Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1977, 43(12):1541-1552.

33 吴炳方,曾源,黄进良. 遥感提取植物生理参数 LAI/FPAR 的研究进展与应用[J]. 地球科学进展, 2004, 19(4): 585-590.
Wu Bingfang, Zeng Yuan, Huang Jinliang. Overview of LAI/FPAR retrieval from remotely sensed data [J]. Advance in Earth Sciences, 2004, 19(4): 585-590. (in Chinese)

34 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.

35 Gamon J A, Surfus J S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer [J]. New Phytologist, 1999, 143(1): 105-117.

36 Gamon J A, Penuelas J, Field C B. A narrow waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency [J]. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1):35-44.

37 Hatfield J L, Kanemasu E T, Asrar G, et al. Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat [J]. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6(1): 167-175.