

基于车载近地遥感系统的冬小麦生育早期产量估测方法

李树强^{1,2}, 李民赞^{2*}

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003;

2. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 冬小麦生育早期的产量估测对于制定冬小麦整个生长期的精准管理策略具有重要的参考意义。该文利用车载近地遥感估产系统对冬小麦生育早期冠层叶片光谱信息进行动态获取, 提出了一种基于冠层光谱信息的动态光化学植被指数 MPRI (mobile photochemical reflectance index), 构建了基于 MPRI 的冬小麦产量车载近地遥感估产模型, 分析了估测效果, 结合 GIS 手段对估产数据进行了空间分析。研究结果表明: 冬小麦生育早期冠层指数 MPRI 对冬小麦的产量单点估测具有一定的效果, 决定系数 R^2 约为 0.78。车载近地遥感估产系统动态测量时, MPRI 表现出良好的数据识别能力。通过设置阈值能够剔除动态测量中的土壤背景干扰信息, 说明 MPRI 对于冬小麦生育早期产量具有较好的估测效果。对动态估产结果进行空间分析, 能够掌握小区域内小麦生育早期产量的空间分布情况, 为冬小麦生育早期产量估测提供了新的思路和方法。

关键词: 农作物; 遥感; 模型; 生育早期; 产量预测; MPRI; GIS

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.016

中图分类号: S127; S512.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0120-08

李树强, 李民赞. 基于车载近地遥感系统的冬小麦生育早期产量估测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 120—127.

Li Shuqiang, Li Minzan. Yield estimation of winter wheat in early growth periods by vehicle-borne ground-based remote sensing system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 120—127. (in Chinese with English abstract)

0 引言

小麦的遥感估产已经达到了实用化的程度, 取得了良好的经济效益和社会效益^[1-3]。常用的遥感手段有航天遥感、航空遥感、近地遥感, 近地遥感以其配置灵活、操作方便、设备价格合理、逐步成为遥感估产的重要手段, 成为国内外研究的热点^[4-7]。杨贵军等^[8]对农田辐射传输光学遥感成像技术进行了研究和分析, 建立叶片-土壤-冠层-大气-遥感器成像模拟耦合模型, 实现农田多维遥感数据模拟。黄敬峰等^[9]使用遥感方式对水稻种植面积进行了多方位的估测, 比较了3种非参数分类方法, 提出了新的算法思路, 为降低遥感算法的不确定性提供了线索。可以看出, 目前遥感对农田信息的获取与应用主要集中于大范围, 大尺度方面, 对于小尺

度下利用遥感方法获取农田作物信息和车载近地遥感估产方面研究较为有限。本文提出的车载近地遥感估产系统是利用光谱无损检测的原理, 将近地遥感设备搭载在农用车辆上。随着车辆的行进, 车载传感器获取小麦的冠层信息。分析冠层信息与小麦产量之间关系, 构建相应的预测模型, 对小区域内的小麦产量早期预估提供了新的思路。

小麦生育早期是生长的重要阶段, 分析和掌握该阶段的小麦长势情况, 实施精准化管理, 对小麦的最终产量具有重要的意义^[10-11]。生育早期, 小麦的地表覆盖率较低, 车载动态测量时, 获取的冠层信息中含有大量的土壤背景光谱反射信息, 直接使用车载遥感获取的信息构建估产模型效果不理想, 甚至会导致模型构建失败。因此减小土壤背景对车载遥感估产的干扰, 剔除混杂的光谱干扰信息, 成为了提高车载近地遥感估产效果的关键。

本研究针对几类光谱指数的单点估产效果进行了分析, 显示了光谱指数对于冬小麦产量早期估测的可行性。根据车载系统的特点构造了适用于车载动态估产的植被指数, 构建基于该指数的动态估产模型, 并对估产效果的空间分布情况进行了分析。为优化车载估产系统的估产效果提出了新的思路, 对于小区域小麦早期估产具有一定的指导作

收稿日期: 2013-08-21 修订日期: 2013-12-27

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH29B04); 863计划(2012AA101901)联合资助

作者简介: 李树强(1979—), 男, 汉族, 河南, 讲师, 研究方向: 精细农业系统集成。洛阳 河南科技大学农业电气化与自动化专业, 471003。Email: dr_ls@163.com。

*通信作者: 李民赞(1963—), 男, 汉族, 河北, 教授, 博士, 主要研究方向: 精细农业系统集成。北京 中国农业大学(东校区)125信箱, 100083。Email: limz@cau.edu.cn

用。本文旨在找到一种快捷、方便的方法,为小区小麦生育产量估测提供方法建议,为制定小区域小麦精准化管理提供决策支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验平台介绍

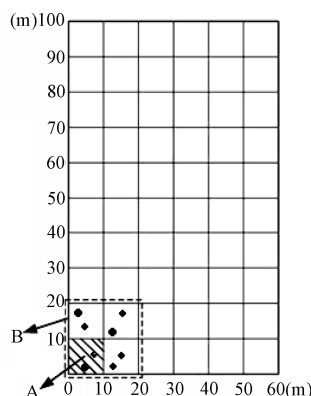
本文采用的车载系统是车载作物长势检测系统平台^[12](以下简称“平台”),平台前端搭载传感器的中心波长分别为 550、650、766 及 850 nm,随着车辆的前进实时的获取被测目标不同波长的反射信息,本研究动态测量使用的是固定匀速测量的方法,车辆以 1 m/s 的速度匀速行进,车辆前端传感器采样周期为 1 s。获取的反射信息通过平台的车载电脑构建相应的指数。平台配置亚米级 GPS 接收设备,能够较为准确的获取平台测量时的实时位置信息。

小麦冠层叶片的光谱信息获取,采用的设备是美国 ASD FieldSpec HH 光谱辐射仪(Analytical Spectral Devices, Inc, USA),测量的波长范围是 325~1 075 nm,波段的宽度为 850 nm,分辨率为 1 nm。测试时 ASD 光谱仪探头垂直与小麦冠层叶片,距离约为 30 cm,每次采集前后使用参考板进行校正,每个采样位置测量 5 次取其平均值做为测量结果。

1.2 田间试验环境与数据获取

试验于 2012 年 4 月 6 日在国家精准农业研究示范基地进行,该基地位于北京市昌平区小汤山镇,研究区域位于 40°6'N, 116°15'E。研究区域长度约 100 m,宽度约 60 m,试验区域内种植的冬小麦品种为京冬 8 号,试验开始时,小麦正处于返青期初期,植株的长势较差,生长较为稀疏,露地面积较大。

整个区域按照 2 类统计尺度进行划分。整个区域被划分为 60 个小区,每个小区约为 100 m²,形成 A 类区域。以 4 个 A 类小区构成 B 类区域, B 类区域共 15 个。2 类区域的划分如图 1。



注: 斜线方格为一个 A 区域, 4 个 A 类小区构成 B 类区域。
Note: Diagonal grid is a A area, B region is composed by 4 A area.

图 1 区域划分

Fig.1 Scale design

A 类小区的边界均用标杆标出,在小区内设置随机采样点,采样点的位置信息由 GPS 获取,部分采样点位置如图 1 所示。以采样点的小麦植株冠层叶片光谱指数 I 和叶绿素含量 C_T 表征该小区的测试信息。在小麦收获期,采用对固定面积内的小麦质量进行测量的方法,对 A 类小区采样点周边 0.5m² 的小麦进行收获,脱粒后称质量得到产量 Y_A ; B 类区域由 4 块 A 类区域邻接而成,作为一个整体区域进行光谱指数 I 与产量的预测分析, B 类区域的光谱指数 I_B 和产量 Y_B 的表达式如式 (1)、式 (2)。

$$I_B = \frac{\sum_{i=1}^4 I_{A_i}}{4} \quad (1)$$

$$Y_B = \frac{\sum_{i=1}^4 Y_{A_i}}{4} \quad (2)$$

式中: I_{A_i} 为 A 类区域的光谱指数; Y_{A_i} 为 A 类区域的产量, kg; I_B 为 B 类区域的光谱指数; Y_B 为 B 类区域的产量, kg。

2 结果与讨论

2.1 生育早期小麦冠层光谱特征及常用长势分析植被指数

使用 ASD 对 A 类区域的采样点样品的冠层光谱进行测量,每一列任选一处采样点的光谱曲线,分为 400~700、700~900 nm, 2 个波长范围进行展示,如图 2。

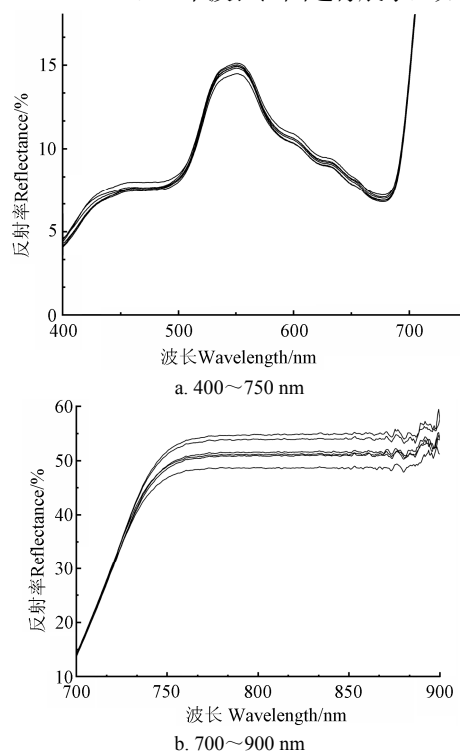


图 2 小麦冠层光谱曲线

Fig.2 Curve of wheat canopy

图 2 中分别描述了 2 个波长范围内光谱曲线的形状, 通常以 400~700 nm 波段的反射率, 构建植被指数描述小麦长势^[13-15]。常用的植被指数有, 归一化植被指数 NDVI (normalized difference vegetation index)、转换型叶绿素吸收反射率指数 (TCARI, transformed chlorophyll absorption in reflectance index)。定义式分别为:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} + R} \quad (6)$$

式中: NIR 为近红外光反射率, R 为红光反射率。

$$\text{TCARI} = 3 \times ((R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550}) \times (R_{700} / R_{670})) \quad (7)$$

式中: R_{700} 、 R_{670} 、 R_{550} 分别为分别为相应波长的反射率。

2 种植被指数能够掌握冠层叶片主要波长的光谱特性, 对于小麦的产量具有较好的估测效果^[16-19]。本文针对车载近地遥感估产的特点及平台的传感器的设计, 根据叶片光化学植被指数 PRI

(photochemical reflectance index) 对叶绿素含量的表征作用^[20], 提出了适合平台使用的动态光化学植被指数 MPRI (mobile photochemical reflectance index), MPRI 的定义如式 (8):

$$\text{MPRI} = \frac{R_{650} - R_{550}}{R_{650} + R_{550}} \quad (8)$$

式中: R_i ($i=650, 550$) 为对应波段 i 的反射率。

2.2 小麦生育早期平台单点静态估产效果分析

2.2.1 基于 NDVI 的产量预测

平台传感器获得的光谱反射数据构建的冠层 NDVI 与相应的产量进行分析, 构建的模型散点图如图 3。

对于 A 类区域, 预测模型的 R^2 为 0.67, 均方根误差 3.24; 而对于 B 类区域, 预测模型的 R^2 为 0.85, 均方根误差为 2.78, B 类区域的均方根误差较 A 类区域小。可以看出, 平台获取的小麦冠层 NDVI 对小麦的产量具有一定的预测效果, 通过分析尺度的变化, 预测模型的 R^2 得到提高, 预测效果得到改善。

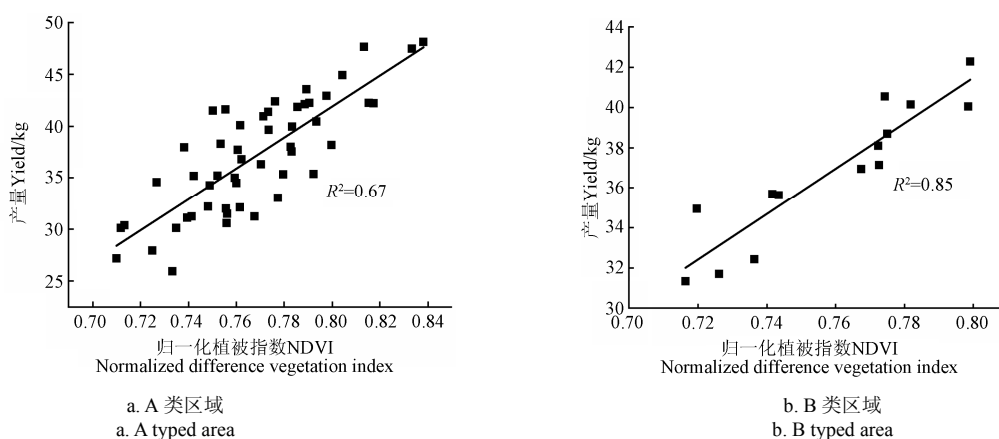


图 3 基于归一化差异植被指数 NDVI 的产量预测模型

Fig.3 Model of yield prediction based on normalized difference vegetation index

2.2.2 基于 TCARI 的产量预测

植被指数 TCARI 具有较宽的光谱分析能力, 因此构建 TCARI 与产量的预测模型具有重

要的应用意义^[21-22]。构建基于平台获取的小麦冠层植被指数 TCARI 的产量预测模型如散点图 4。

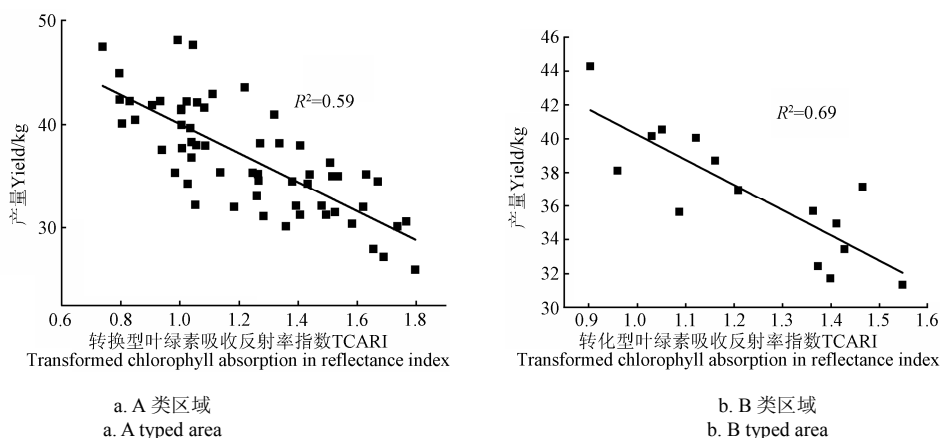


图 4 基于 TCARI 的小麦产量预测模型

Fig.4 Model of yield prediction based on transformed chlorophyll absorption in reflectance index

从图4可以看出,TCARI与产量成负相关关系,这与NDVI与产量的正相关关系不同,从预测效果来看,TCARI与NDVI同样具有预测产量的作用。A类区域TCARI的预测模型 R^2 为0.59,均方根误差为5.41;B类区域TCARI的预测模型 R^2 为0.69,均方根误差为4.33。可以看出,TCARI的预测模型 R^2 低于NDVI,均方根误差偏大。这主要是因为植被指数TCARI涵盖的光谱范围较广,测量时,虽然能够获取更多的光谱信息,但某个波长受到干扰,会影响整个TCARI指数的构建效果,对于模型的预测精度影响较大,因此使用车载近地遥感获取小麦生育早期冠层叶片光谱信息对其产量进行估产时,应考虑选用波长数较少的光谱指数作为构建产量预测模型的构建指标。

2.2.3 基于MPRI的产量预测

本研究中的MPRI是根据冠层叶片光谱400~700 nm波长范围内的波峰和波谷值构建的,经过分析可知,该光谱指数由光谱曲线的波峰、波谷位置的反射率构建,对于不同颜色目标具有较好的分辨能力,对于冠层和土壤背景有较好的区分效果^[23],具有较好的产量估测潜力。尤其适合于车载动态测量环境下,冠层光谱信息的分辨。构建基于平台获取的小麦生育早期冠层MPRI的产量预测模型如散点图5。

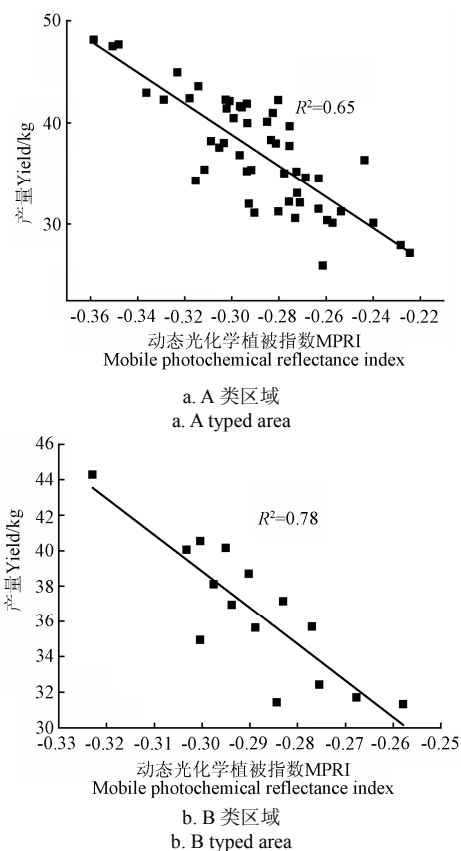


图5 光谱指数MPRI与产量的关系图

Fig.5 Model of yield prediction based on mobile photochemical reflectance index

MPRI与产量呈负相关关系,A类区域的预测 R^2 为0.65,均方根误差2.97,B类区域的预测 R^2 为0.78,均方根误差为2.14。结果表明MPRI在3类植被指数中对产量的估测效果较好。

通过对单点冠层光谱信息对产量进行预测效果的分析,表明3类植被指数对于小区域小麦产量早期预估具有一定的效果,MPRI表现出了良好的预测潜力,应作为平台动态估产的参数。

平台动态测量与单点静态测量差别较大,尤其是在小麦生育早期,地表覆盖率有限,动态获取的光谱信息中含有大量的地面反射信息,影响估产模型的构建,甚至导致构建失败。因此,对于动态估产而言,构建估产模型的植被指数不但要求具有良好的预测能力,而且要求对于土壤和冠层光谱信息具有较强的识别能力。使用ASD光谱分析仪对试验区域土壤的光谱信息进行采集,共选取30个采样点,计算土壤相应的光谱指数 $MPRI_{soil}$ 、 $NDVI_{soil}$ 、 $TCARI_{soil}$ 与采样点附近的冠层叶片的植被指数 $MPRI_{plant}$ 、 $NDVI_{plant}$ 、 $TCARI_{plant}$ 进行比较,结果如表1所示。

表1 光谱指数分布范围分析

Table 1 Data distribution range

光谱指数 Spectral index	均值 Mean	最大值 Max	最小值 Min	中位数 Median
$MPRI_{soil}$	0.12	0.14	0.04	0.13
$MPRI_{plant}$	-0.14	-0.05	-0.25	-0.15
$NDVI_{plant}$	0.63	0.79	0.39	0.51
$NDVI_{soil}$	0.11	0.31	0.02	0.05
$TCARI_{soil}$	0.0036	0.253	0.0022	0.0057
$TCARI_{plant}$	1.178	1.797	1.035	1.335

从表1可以看出,土壤和植株的植被指数的数据分布范围明显不同。对于土壤和植株而言,TCARI、NDVI 2类植被指数正负性质相同,仅在数值分布范围有所区别。若使用这2类植被指数识别土壤和作物冠层数据,需要通过大量的前期试验分析被测区域的土壤和作物冠层数据特点,寻找2类目标数据的分布范围,根据统计数据的规律,人为确定识别阈值,从而区分2类信息,在动态测量时,剔除土壤干扰信息。光谱指数MPRI对于土壤和冠层信息则表现出完全不同的数据变化方向,土壤的MPRI大于0而植株的MPRI小于0,分析原因主要是因为作物冠层叶片与土壤背景在颜色上有较为明显的区分,因此以光谱曲线吸收峰、谷值构成的植被指数MPRI对于2类信息有较好的区分能力,区分2类信息的阈值为0,该阈值受地域和环境的影响较小,具有良好的稳定性和环境适应性。MPRI作为车载动态估产模型的信息数据的识

别优化能力显而易见,应作为平台动态估产模型构建的首选指标。

2.3 平台动态估产模型研究

平台动态测量是指使用车载平台对待测区域小麦的冠层光谱信息进行连续测量,并通过 GPS 设备实时获取位置信息。针对动态测量所得到的采样点处的 MPRI 值,构建产量预测模型如图 6。

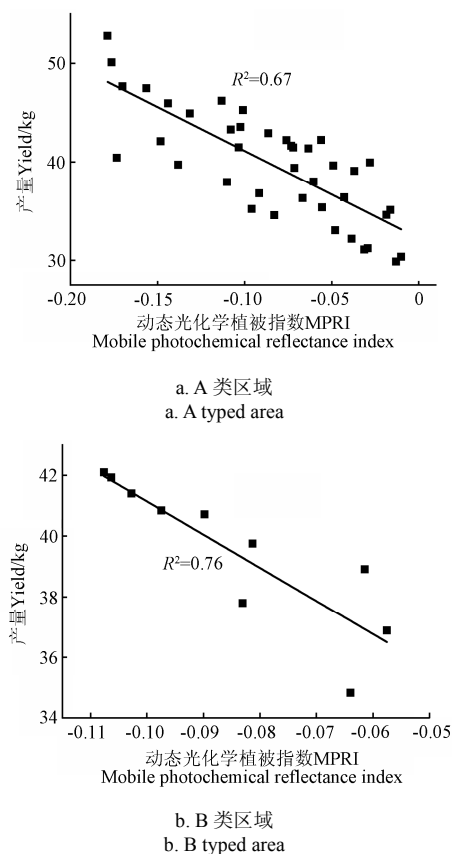


图 6 平台动态测量光化学植被指数 MPRI 的产量预测

Fig.6 Model of yield prediction based on MPRI by vehicle-borne remote sensing system

图 6a 为平台动态测量 A 类区域的冠层 MPRI,构建产量预测效果。模型的预测 R^2 为 0.67,调整 R^2 为 0.65,均方根误差为 3.11。模型如式 (7)。

$$y = -88.71x + 32.248 \quad (7)$$

式中: y 为 A 类区域产量, x 为动态测量获得的 MPRI。

图 6b 为平台动态测量 B 类区域冠层 MPRI 构建的产量预测模型效果图。模型的预测 R^2 为 0.76,调整 R^2 为 0.73,均方根误差为 2.25。平台动态估产效果与单点估产效果相当。

2.4 平台动态估产效果的空间分析

对于产量预测而言,掌握整个种植区域的产量分布情况对于制定相应的精准管理决策有重要的意义^[24-25]。本文采用反距离加权法对 MPRI 及预测产量进行空间分布分析。空间分布图如图 7。

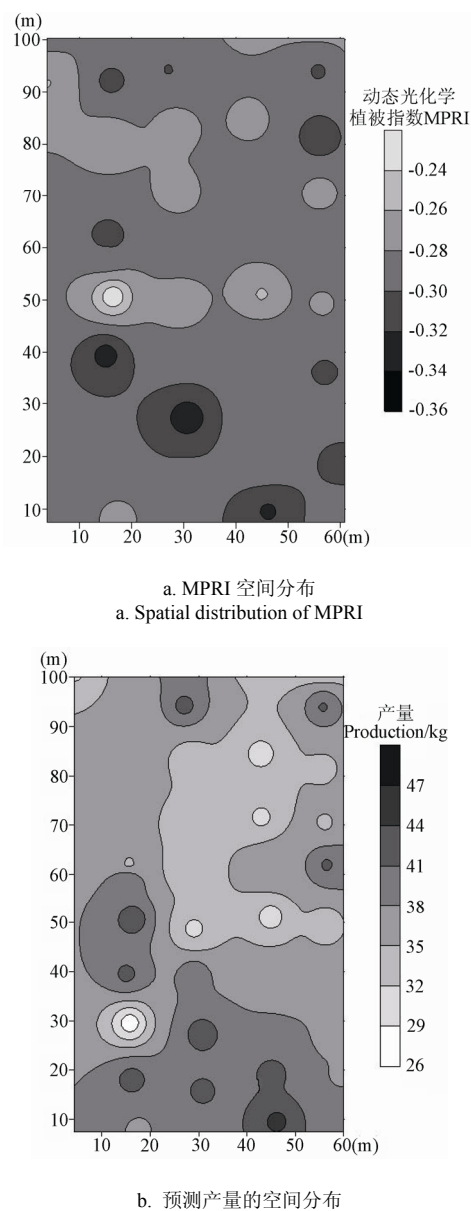


图 7 研究区产量空间分布图

Fig.7 Spatial distribution prediction of yield

图 7a 是平台动态测量获取的小麦冠层 MPRI 的空间分布图,图 7b 是 MPRI 预测的产量空间分布图,可以看出整个区域的 MPRI 和产量分布整体差异不大,这是因为待测区域多年进行的都是平均施肥,土壤肥力相对平均,小麦生育早期的长势情况和产量差异较小。对比 2 个图可以看出,MPRI 和产量的空间域上依然表现出较好的负相关关系,表明 MPRI 具有一定的近地空间分析能力。

通过分析每个区域的 MPRI 和产量的回归关系及产量的 GIS 信息能够得到区域的小麦的产出能力及空间分布状况,本文提出的 MPRI 预测及空间分析方法,对于小麦生育早期的精准管理和后期的产量预测具有重要的指导意义。

3 结 论

本研究基于车载平台获取的小麦冠层叶片的动态光化学植被指数 MPRI 对小麦的产量进行预测, 对结果的空间分布状况进行分析得出以下几点结论:

1) 利用小麦生育早期冠层叶片的植被指数 MPRI 能够预测小麦的产量。通过 A 类区域和 B 类区域的估产效果可以看出, MPRI 同其他植被指数相比, 预测模型拟合度较佳, 产量估测精度较高。对土壤和作物冠层混杂光谱信息有较高的识别率, 且识别效果受环境影响小, 模型鲁棒性强。表明 MPRI 具有车载动态测量应用潜力。

2) 小麦生育早期冠层 MPRI 具有产量的空间预测能力。通过分析产量的空间分布图, 能够对待测区域内的小麦产量分布状况进行分析, 制定相应的管理策略, 为小麦生长中后期到收获期的精准化管理提供决策参考。

3) 小麦生育早期的 MPRI 对于其后期产量的预测具有较好的预测效果, 能够在小麦生长的初期对小麦的生产潜力进行评估, 并据此制定出相应的差异化管理方法, 但是小麦生长全过程中对于小麦产量的影响因素较多, 需要全面考虑各因素对产量的影响, 制定更加精准的管理策略。

[参 考 文 献]

- [1] 陈鹏飞, 杨飞, 杜佳. 基于环境减灾卫星时序归一化植被指数的冬小麦产量估测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 124—131.
Chen Pengfei, Yang Fei, Du Jia. Yield forecasting for winter wheat using time series NDVI from HJ satellite[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 124—131. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李军玲, 郭其乐, 彭记永. 基于 MODIS 数据的河南省冬小麦产量遥感估算模型[J]. 生态环境学报, 2012, 21(10): 1665—1669.
Li Junling, Guo Qile, Peng Jiyong. Remote sensing estimation model of Henan province winter wheat yield based on MODIS data[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(10): 1665—1669. (in Chinese with English abstract)
- [3] 侯学会, 牛铮, 黄妮, 等. 小麦生物量和真实叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 国土资源遥感, 2012, 12(4): 31—35.
Hou Xuehui, Niu zheng, Huang ni, et al. The hyperspectral remote sensing estimation models of total biomass and true LAI of wheat[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, 12(4): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈联裙, 朱再春, 张锦水, 等. 冬小麦遥感估产回归尺度分析[J]. 农业工程学报, 2010,

26(Supp.1): 169—175.

- Chen Lianqun, Zhu Zaichun, Zhang Jinshui, et al. Regression scale analysis of winter wheat yield estimation by remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(Supp.1): 169—175. (in Chinese with English abstract)
- [5] Meng Bian, Andrew K. Skidmore, Martin Schlerf, et al. Predicting foliar biochemistry of tea (*Camellia sinensis*) using reflectance spectra measured at powder, leaf and canopy levels[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013, 78(4): 148—156.
- [6] Usha K, Bhupinder Singh. Potential applications of remote sensing in horticulture: A review[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 153(4): 71—83.
- [7] 谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 等. 基于 TM 和 PLS 的冬小麦籽粒蛋白质含量预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 388—392.
Tan Changwei, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Predicting grain protein content in winter wheat based on TM images and partial least squares regression[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 388—392. (in Chinese with English abstract)
- [8] 杨贵军, 柳钦火, 杜永明, 等. 农田辐射传输光学遥感成像模拟研究综述[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, 49(3): 537—544.
Yang Guijun, Liu Qinghuo, Du Yongming, et al. Review of optical remote sensing imaging simulation of farmland radiation transfer process[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2013, 49(3): 537—544. (in Chinese with English abstract)
- [9] 黄敬峰, 陈拉, 王晶, 等. 水稻种植面积遥感估算的不确定性研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 166—176.
Huang Jingfeng, Chen La, Wang Jing, et al. Uncertainty analysis of rice planting area extraction based on different classifiers using Landsat data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 166—176. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李卫国, 赵春江, 王纪华, 等. 基于卫星遥感的冬小麦拔节期长势监测[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(3): 523—527.
Li Weiguo, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Monitoring the growth condition of winter wheat in jointing stage based on land sat TM image[J]. Journal of Triticeae Crops, 2007, 27(3): 523—527. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张存岭, 纪永民, 陈若礼. 小麦拔节期追施磷钾肥产量效应研究[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(2): 60—62.
Zhang Cunling, Ji Yongmin, Chen Ruoli. Study on yield effects of dressing phosphate fertilizer and potassium fertilizer during jointing stage of the wheat[J]. Phosphate

- and Compound Fertilizer, 2010, 25(2): 60—62. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李树强, 赵旭辉, 李民赞, 等. 基于矩阵变换的车载玉米叶绿素含量快速预测系统偏差分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 44—51.
Li Shuqiang, Zhao Xuhui, Li Minzan, et al. Deviation analysis of vehicle-borne prediction system for maize chlorophyll content based on matrix transformation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 44—51. (in Chinese with English abstract)
- [13] 靳彦华, 熊黑钢, 张芳, 等. 不同地类春小麦拔节期冠层光谱与叶绿素差异研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1043—1047.
Jin Yanhua, Xiong Heigang, Zhang Fang, et al. Study on the difference in canopy spectral reflectance and chlorophyll content of spring wheat at jointing stage in different land[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1043—1047. (in Chinese with English abstract)
- [14] 林卉, 梁亮, 张连蓬, 等. 基于支持向量机回归算法的小麦叶面积指数高光谱遥感反演[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 139—146.
Li Hui, Liang Liang, Zhang Lianpeng, et al. Wheat leaf area index inversion with hyperspectral remote sensing based on support vector regression algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 139—146. (in Chinese with English abstract)
- [15] 姚霞, 刘小军, 田永超, 等. 基于星载通道光谱指数与小麦冠层叶片氮素营养指标的定量关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 431—437.
Yao Xia, Liu Xiaojun, Tian Yongchao, et al. Quantitative relationships between satellite channels-based spectral parameters and wheat canopy leaf nitrogen status[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 431—437. (in Chinese with English abstract)
- [16] 侯学会, 牛铮, 高帅, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 时间序列的农牧交错带植被物候监测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 142—150.
Hou Xuehui, Niu Zheng, Gao Shuai, et al. Monitoring vegetation phenology in farming-pastoral zone using SPOT-VGT NDVI data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 142—150. (in Chinese with English abstract)
- [17] 殷守敬, 陈晓玲, 吴传庆, 等. 基于时序 NDVI 的江西省植被覆盖时空变化分析[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2013, 47(1): 129—135.
Yin Shoujing, Chen Xiaoling, Wu Chuanqing, et al. Spatial-temporal analysis on the variations of the vegetation in Jiangxi Province based on NDVI time series[J]. Journal of Huazhong Normal University: Natural Sciences, 2013, 47(1): 129—135. (in Chinese with English abstract)
- [18] 栾海军, 田庆久, 余涛, 等. 基于分形理论的 NDVI 连续空间尺度转换模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1857—1862.
Luan Haijun, Tian Qingjiu, Yu Tao, et al. Modeling continuous scaling of NDVI based on fractal theory[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1857—1862. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张苏, 刘良云, 黄文江. 基于植被指数的叶绿素密度遥感反演建模与适用性研究[J]. 遥感信息, 2013, 28(3): 94—101.
Zhang Su, Liu Liangyun, Huang Wenjiang. Retrieval of canopy chlorophyll density based on hyperpectral vegetation Indices[J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(3): 94—101. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吴朝阳, 牛铮. 植物光化学植被指数对叶片生化组分参数的敏感性[J]. 中国科学院研究生院学报, 2008, 25(3): 346—354.
Wu Chaoyang, Niu Zheng. Sensitivity study of photochemical reflectance index to leaf biochemical components[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2008, 25(3): 346—354. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孟庆野, 董恒, 秦其明, 等. 基于高光谱遥感监测植被叶绿素含量的一种植被指数 MTCARI[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(8): 2218—2222.
Meng Qingye, Dong Heng, Qing Qiming, et al. MCTRI: A kind of vegetation index monitoring vegetation leaf chlorophyll content based on hyperspectral remote sensing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(8): 2218—2222. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张东彦, 刘镭源, 宋晓宇, 等. 应用近地成像高光谱估算玉米叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(3): 771—775.
Zhang Dongyan, Liu Rongyuan, Song Xiaoyu, et al. A field-based pushbroom imaging spectrometer for estimating chlorophyll content of maize[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(3): 771—775. (in Chinese with English abstract)
- [23] 薛惠云, 张永江, 刘连涛, 等. 干旱胁迫与复水对棉花叶片光谱、光合和荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2386—2393.
Xue Huiyun, Zhang Yongjiang, Liu Liantao, et al. Responses of spectral reflectance photosynthesis and chlorophyll fluorescence in cotton during drought stress and rewatering[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2386—2393. (in Chinese with English abstract)
- [24] 庄东英, 李卫国, 武立权, 等. 冬小麦生物量卫星遥感估测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 158—162.
Zhuang Dongying, Li Weiguo, Wu Liquan, et al. Estimating winter wheat biomass based on satellite

- remote sensing[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(10): 158—162. (in Chinese with English abstract)
- [25] 于海洋, 刘艳梅, 董燕生, 等. 基于空间信息的农作物苗情监测系统[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(2): 253—256. (in Chinese with English abstract)
- Yu Haiyang, Liu Yanmei, Dong Yansheng, et al. Spatial information support systems for monitoring crop[J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(2): 253—256. (in Chinese with English abstract)

Yield estimation of winter wheat in early growth periods by vehicle-borne ground-based remote sensing system

Li Shuqiang^{1,2}, Li Minzan^{2*}

(1. College of Agricultural Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The index of crop growth monitoring has a close relationship with crop yield. It could forecast a large-scale food state that indicates a possibility of either a missing or surplus yield as early as possible, and it is therefore important for the macro control of food. Using near-ground remote sensing is significant to understanding the growth of crops and providing accurate and scientific data for precision agriculture. For the small area growers, the vehicle-borne system shows the good prospects and has gradually become the first choice method. This paper discusses a method that is one of the most important tools for yield prediction for winter wheat in the jointing stage. It is an efficient, flexible, and economical operation for a small region. Usually the vehicle-borne growth monitoring system cannot maintain steady operations due to the row spacing of winter wheat in the jointing stage. The background interference on the reflectance will not be suppressed effectively, which will result in a deviation in the growth monitoring and yield prediction. In order to overcome this problem, a new vegetation index named MPRI (mobile photochemical reflectance index) was applied for the yield prediction in this paper. The MPRI derives from the PRI (photochemical reflectance index), which is defined as a normalized difference index using two narrow reflectance bands at 531 and 570 nm that are closely related to xanthophyll cycle pigment content. It has been successfully used to estimate leaf photosynthetic light use efficiency (LUE) across species which vary in water content and nitrogen concentration. Previous research studies demonstrated that a consistent relationship could be established between PRI and LUE calculated from gas exchange measurements at the leaf, small canopy, and full forestor crop canopy scales. It also showed some relationship between the PRI, LUE and wheat yield. The MPRI, which is proposed by this article, was constructed from the two reflectance bands which is a similar principle to PRI, and is constantly obtained by the vehicle-borne system sensors. The tests were carried out by the vehicle-borne system on the winter wheat field. The vehicle-borne system collected the reflectance data of the wheat canopy with the sensors at a sampling rate of 1 point per second. The GPS receiver obtained the location information at the same rate. The indexes of NDVI, TCARI, and MPRI were separately used for the diagnosis and analysis of the yield of wheat canopy, and finally their diagnosis results were contrasted. The results indicated that: It has satisfactory forecasting accuracy on the wheat yield by using the MPRI on the moving monitoring, and the R^2 was about 0.76, which was same effect as much higher as by using NDVI. However, the MPRI has a better effect on removing the background interference. This is mainly because the canopy and the soil show the significant difference color. The MPRI of soil and winter wheat canopy are easily distinguishable by the threshold. By focusing on the yield spatial distribution, it was proposed that wheat yields, which were predicted by MPRI, were proven to be transformed with inverse distance weighted (IDW). It was proved that this method showed a positive effect on the yield prediction with the canopy reflectance in the jointing stage of wheat.

Key words: crops; remote sensing; models; early growth period; yield Estimation; MPRI; GIS

(责任编辑: 刘丽英)