

# 利用新型光谱指数改善冬小麦估产精度

刘良云<sup>1</sup>, 王纪华<sup>1</sup>, 黄文江<sup>1</sup>, 赵春江<sup>1</sup>, 张兵<sup>2</sup>, 童庆禧<sup>2</sup>

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089; 2. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘要:** 基于冬小麦返青期至乳熟期 8 次采样的地面光谱数据和收割时的产量数据, 首先, 利用光谱反射率与产量进行了统计分析, 可见光波段的光谱反射率与产量在起身后期才达到稳定的显著负相关水平; 近红外波段的光谱反射率与产量在所有生育期都表现出稳定的显著正相关; 短波红外波段的光谱反射率与产量在进入灌浆期后才达到稳定的显著负相关水平。其次, 根据冬小麦冠层光谱的波形特征, 利用近红外波段 890 nm 反射峰、980 nm 和 1 200 nm 两个弱水汽吸收谷、短波红外 1 650 nm 和 2 200 nm 反射峰, 设计归一化差值光谱指数, 并与冬小麦产量进行相关分析, 结果表明: 利用上述波段组合定义的归一化差值光谱指数与产量在各个生育期都达到了显著或极显著相关水平, 而归一化差值植被指数 (NDVI) 与产量间的相关在营养生长阶段不显著。最后, 以 (890 nm, 1200 nm) 弱水汽吸收光谱指数为例, 建立了各个生育期的产量预报模型, 为实现冬小麦营养生长期长势监测与更早、更可靠的产量预报提供了依据。

**关键词:** 高光谱; 水汽吸收光谱指数; 归一化差值植被指数; 产量

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0172-04

## 0 引言

卫星遥感作物估产具有高时效性、动态性、经济性与实用性等优点, 其中小麦卫星遥感估产已达到了实用化程度, 取得了良好的经济效益与社会效益。随着社会信息化程度的提高和中国加入 WTO, 对小麦卫星遥感估产的时效性和精度提出了更高的要求。另一方面, 在遥感方法上, 光谱植被指数得到了成功的应用, 特别是红波段与近红外波段定义的归一化差值植被指数 NDVI 比值植被指数 RVI 垂直植被指数 PVI 等<sup>[1-8]</sup>。随着卫星遥感仪器技术的发展, 可应用于遥感估产的波段也越来越丰富, 如 EOS 的 MODIS、Hyperion、我国的 CMODIS 等高光谱卫星便能够在可见~短波红外范围提供数十个、甚至数百个波段, 为进一步探索新的光谱参量, 从而实现更早、更好的遥感估产展现了广阔的前景。本文的研究目的便是充分利用高光谱遥感的优势, 设计新的光谱参量, 实现更早、更好的作物长势与产量遥感及预报。

## 1 数据与测试方法

**试验条件:** 试验于 2001~2002 年在北京市昌平区小汤山精准农业实验基地进行, 试验选用 3 个不同株形的冬小麦品种, 即偏紧凑型京冬 8、偏披散形的中优 9507 和居于二者之间的京 9428。为了造成肥水梯度差异, 为每个品种都设计了 4 种梯度肥处理和 4 种梯度的水处理, 共有 48 个肥水处理小区。小区面积为 32.4 × 30 m<sup>2</sup>。肥处理施肥量为, 肥料 0 处理无返青肥和拔节肥; 肥料 1 处理返青和拔节期各追施尿素 50 kg/hm<sup>2</sup>;

肥料 2 处理返青和拔节期各追施尿素 200 kg/hm<sup>2</sup>; 肥料 3 处理返青和拔节期各追施尿素 350 kg/hm<sup>2</sup>。水处理灌溉量: 水 0 处理不灌溉; 水 1 处理灌溉量为 225 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>; 水 2 处理灌溉量为 450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>; 水 3 处理灌溉量为 675 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。中间两种水肥处理正常, 两端水平的两个处理为不足或过量。

**冠层光谱测定:** 光谱测量采用的仪器为 ASD Fieldspec FR 2500 光谱仪, 该光谱仪的光谱范围为 350~2500 nm; 采样间隔 1.4 nm (350~1000 nm 区间) 和 2 nm (在 1000~2500 nm 区间); 光谱分辨率 3 nm @ 700 nm、10 nm @ 1400 nm & 2100 nm。所有光谱测量是在天气晴朗、无风或风速很小时测量的, 时间范围为上午 10:00~14:00, 视场角 25°; 距地表 130 cm 处测定, 在视场范围内重复 20 次取平均, 各处理测定前后, 进行参考板校正。在冬小麦返青至乳熟期, 共有 8 次采样数据, 对应的光谱测定时间和生育期如表 1 所示。

表 1 光谱测定的日期及生育期

Table 1 Growth stages and spectral measurement date

日期	03-25	04-02	04-10	04-18	05-06	05-17	05-24	05-31
生育期	返青期	起身前期	起身后期	拔节期	抽穗期	灌浆始期	灌浆盛期	乳熟期

**产量取样:** 在小麦收割时, 从每个 32.4 m × 30 m 肥水处理小区中挑选能反映返青至乳熟期的 8 次光谱采样的代表性区域 5 m × 5 m 的小麦, 收割并称量, 从而获得准确的小麦产量数据。

## 2 利用高光谱遥感进行冬小麦单产分析

### 2.1 各个生育期的冬小麦冠层光谱的共性特点

图 1 为返青期至乳熟期的 6 个主要生育期的冬小麦冠层光谱反射率曲线。在 350~700 nm 紫外、可见光波段, 由于色素吸收, 特别是叶绿素 a、b 在 450 nm 和 660 nm 附近的强吸收, 在可见光波段形成“蓝边”、“绿峰”、“黄边”、“红谷”等区别于土壤、岩石、水体的独特植

收稿日期: 2003-03-19

基金项目: 国家发展计划委员会“北京精准农业示范工程”项目 (A00300100584); 北京市自然科学基金重点项目 (6021002) 资助

作者简介: 刘良云 (1975-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光学遥感。北京 2449 信箱 26 分箱 国家农业信息化工程技术研究中心, 100089

被光谱特征。在 700~ 780 nm 波段, 这是叶绿素在红波段的强吸收到近红外波段多次散射形成的高反射平台的过渡波段, 又称为植被反射率红边。在 780~ 1350 nm 近红外波段, 由于光线在叶片内部的多次散射形成, 且色素和纤维素在该波段来说是近似透明的(多次散射最多 10% 被吸收), 即便是叶片含水量也只在 980 nm、1200 nm 附近有两个微弱的吸收特征, 所以多次散射的结果便是近 50% 的光线被反射, 近 50% 被透射。在 1350~ 2500 nm 短波红外波段, 叶片水分吸收主导了该波段的光谱反射率特性, 由于 1400、1940、2700 nm 的强吸收特征, 这些吸收光谱位置中间, 形成两个主要反射峰, 位于 1600 nm 和 2200 nm 附近。

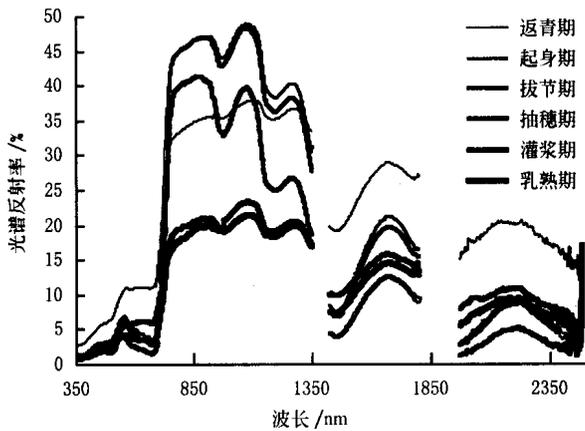


图 1 不同生育期的冠层光谱反射率曲线  
Fig 1 Canopy spectra of winter wheat in different growth stages

### 2.2 光谱反射率与冬小麦单产的统计相关特性

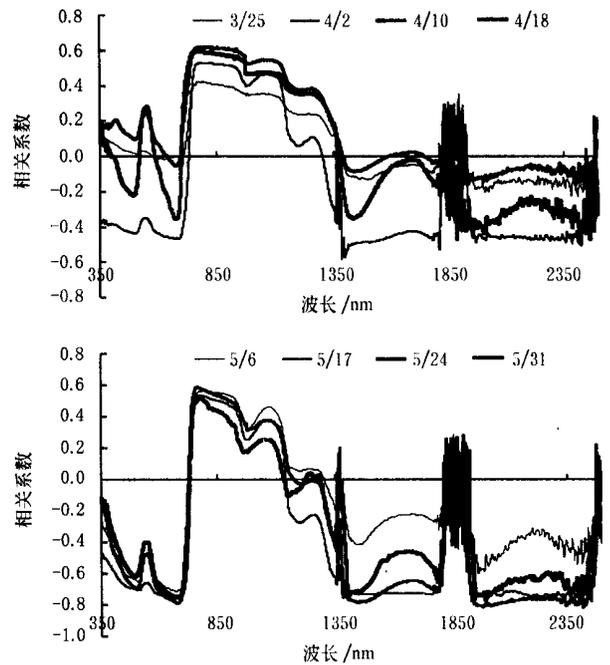
对小麦单产数据与各个生育期的光谱反射率进行统计相关分析, 便可以得到如图 2 所示的小麦单产与光谱反射率的统计相关系数曲线。

从图 2 可以看出, 产量与光谱反射率的统计相关性在不同生育期是比较相似的。其中, 在可见光波段, 光谱反射率与产量在起身后期才达到稳定的显著负相关水平; 在近红外波段, 光谱反射率与产量在所有生育期都表现出稳定的显著正相关特性; 在短波红外波段, 光谱反射率与产量在进入灌浆期后才达到显著负相关水平。这表明: 虽然可见光波段可以较好地反映作物叶绿素光合作用积累干物质的能力, 并最终形成产量, 但由于在营养生长阶段, 冬小麦植株的分蘖与叶面积扩张所构建的较大群体密度, 是形成产量的关键, 而近红外波段能够很好地反映作物单位面积的干物质和作物叶片的健康程度, 能够更好地反应作物群体的状况, 所以该波段的光谱反射率与产量的相关性优于可见光波段。

### 2.3 利用光谱特征参量进行冬小麦单产分析

近红外波段的光谱不仅能够很好地反映作物单位面积的干物质(LAI), 而且还能够很好地反映作物叶片的健康程度。从图 2 光谱反射率与产量的统计相关曲线也可以发现, 近红外光谱反射率越高, 作物长势也越好, 并且在全生育期与产量都极显著正相关。事实上, 当

作物受到病虫害或肥水胁迫, 近红外波段的光谱反射率及光谱特征的变异最大。所以, 利用近红外波段的弱水汽吸收特征的光谱指数进行作物产量估算与预报也是可行的。



注: 每次 48 组样本,  $r_{0.05(48)} = 0.2875$ ,  $r_{0.01(48)} = 0.3721$ ,  $r_{0.001(48)} = 0.4648$

图 2 冬小麦产量与光谱反射率在各个生育期的统计相关系数曲线

Fig 2 Correlation coefficients between yields and spectral reflectance

根据图 1 冬小麦作物各个生育期共有的光谱特征, 挑选和定义了 6 种归一化差值光谱指数, 如表 2 所示。归一化差值光谱指数的定义如下

$$NDVI_i = \frac{|R_n(B_1) - R_n(B_2)|}{R_n(B_1) + R_n(B_2)} \quad (1)$$

式中  $i$ ——光谱指数的编号;  $B_1, B_2$ ——相应的两个入选波长;  $R_n(B_i)$ ——第  $n$  对组合  $B_i$  波长的光谱反射率。

表 2 6 种归一化差值光谱指数

Table 2 Six normalized spectral indexes						
编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6
$B_1$ (nm)	560	670	890	890	890	890
$B_2$ (nm)	670	890	980	1200	1650	2200
解释	植被绿峰	NDVI	近红外波段弱水汽吸收光谱指数		近红外反射峰与短波红外反射峰差异光谱指数	

此外, 还选用了 2 个抗大气植被指数  $VARI_{green}$  和  $VARI_{700}$ <sup>[9]</sup>, 定义如下

$$VARI_{green} = \frac{R_{560} - R_{670}}{R_{560} + R_{670} + R_{450}} \quad (2)$$

$$VARI_{700} = \frac{R_{700} - 1.7R_{670} + 0.7R_{450}}{R_{700} + 2.3R_{670} - 1.3R_{450}} \quad (3)$$

式中  $R_\lambda$ ——波长  $\lambda$  处的光谱反射率。

将公式(1)、(2)、(3)所定义的 8 个光谱指数与产量数据进行线性统计相关分析, 统计分析的结果如表 3 所

示。

表 3 各个生育期的光谱参量与小麦产量的统计相关系数

Table 3 Correlation coefficients between spectral parameters and yields

光谱参量	03-25	04-02	04-10	04-18	05-06	05-17	05-24	05-31
VARI <sub>green</sub>	0.05	0.48	0.39	0.65	0.71	0.72	0.83	0.85
VARI <sub>700</sub>	-0.01	0.45	0.35	0.62	0.73	0.72	0.84	0.84
S1	0.01	0.47	0.39	0.64	0.72	0.72	0.84	0.85
S2	0.19	0.52	0.22	0.47	0.76	0.75	0.81	0.83
S3	0.47	0.54	0.51	0.68	0.72	0.7	0.77	0.79
S4	0.54	0.61	0.55	0.67	0.72	0.75	0.83	0.8
S5	0.44	0.59	0.42	0.59	0.67	0.74	0.83	0.8
S6	0.36	0.54	0.3	0.52	0.62	0.74	0.81	0.81

注: 每次 48 组样本,  $r_{0.05(48)} = 0.2875$ ,  $r_{0.01(48)} = 0.3721$ ,

$r_{0.001(48)} = 0.4648$

从表 3 可见, [890 nm, 1200 nm], [890 nm, 980 nm], [890 nm, 1650 nm], [890 nm, 1650 nm] 和 [890 nm, 2200 nm] 近红外波段组合的归一化差值光谱指数与产量数据达到了显著或极显著相关水平, 而其它 4 个可见/近红外植被指数与产量的显著或极显著相关主要表现在拔节期后。其中利用 [890 nm, 980 nm] 和 [890 nm, 1200 nm] 两个弱水汽吸收的光谱指数进行冬小麦早期产量预报的效果最好, 全生育期的 8 组采样数据的统计分析都在 99.9% 置信度显著相关。

从表 3 可以发现光谱参量与作物长势/产量的相关性, 即: 植被近红外波段弱水汽吸收光谱指数与产量显著正相关; 近红外波段的光谱反射率与可见光及短波红外波段的光谱反射率差异所定义的归一化差值光谱指数与产量显著正相关, 也就是差异越大, 作物长势越好, 产量越高。

以 NDVI 和 [890 nm, 1200 nm] 两个波段定义的归一化差值光谱指数为例, 建立冬小麦产量的分生育期遥

感模型, 如表 4 所示。

表 4 基于 NDVI 和 [890 nm, 1200 nm] 归一化差值光谱指数的产量预报模型

Table 4 Yield prediction models using NDVI and [890 nm, 1200 nm] spectral index

生育期	基于 NDVI 的统计模型	[890 nm, 1200 nm] 光谱指数的统计模型
返青期	未达到显著相关	$y = 1602.8x + 289.61$ , $R^2 = 0.2876$
起身前期	$y = 376.78x - 32.096$ , $R^2 = 0.2801$	$y = 1068.9x + 187.28$ , $R^2 = 0.3698$
起身后期	未达到显著相关	$y = 1297.1x + 164.35$ , $R^2 = 0.2979$
拔节期	$y = 861.63x - 486.08$ , $R^2 = 0.234$	$y = 1770.3x + 76.912$ , $R^2 = 0.4501$
抽穗期	$y = 1065x - 696.17$ , $R^2 = 0.577$	$y = 979.85x + 68.167$ , $R^2 = 0.5248$
灌浆始期	$y = 505.3x - 150.41$ , $R^2 = 0.5614$	$y = 837.01x + 173.97$ , $R^2 = 0.5666$
灌浆盛期	$y = 455.55x - 91.673$ , $R^2 = 0.6595$	$y = 1084.1x + 172.69$ , $R^2 = 0.6908$
乳熟期	$y = 370.04x + 25.512$ , $R^2 = 0.7011$	$y = 1134.3x + 191.31$ , $R^2 = 0.6324$

图 3 为 [890 nm, 1200 nm] 两个波段归一化差值光谱指数与产量数据在各个生育期的统计散点图。从散点图分布可以发现: 统计样本的分布较好, 线性动态范围也较宽。其它光谱参量, 如 [890 nm, 980 nm], [890 nm, 1650 nm], [890 nm, 1650 nm], [890 nm, 2200 nm] 等归一化差值光谱指数与产量数据的统计相关不仅在各个生育期都达到或超过了显著相关水平, 并且样本的散点图分布也比较好。所有这些光谱参量, 特别是 [890 nm, 1200 nm] 和 [890 nm, 980 nm] 两个归一化差值光谱指数是最为理想的产量早期预报、后期检验的光谱参量。

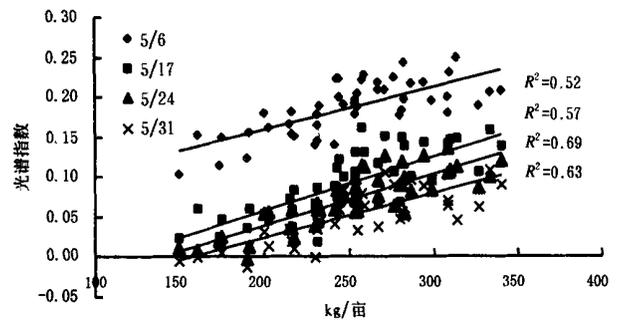
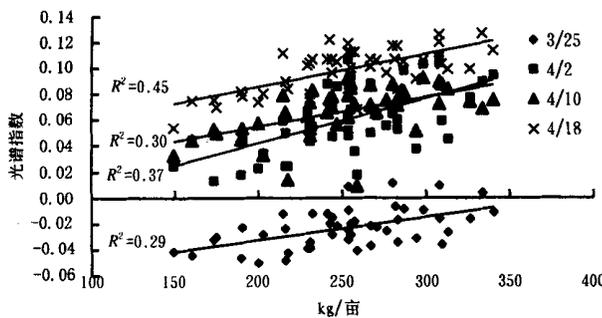


图 3 利用 [860 nm, 1200 nm] 两个波段的归一化光谱指数进行冬小麦估产的散点图

Fig 3 Scatterplots of yields and [860 nm, 1200 nm] spectral indices in different growth stages

### 5 讨论

关于冬小麦估产时期与波段选择: 返青期一起身期, 植株从越冬后恢复至转绿, 叶绿素变化大, 可见光波段能反映叶绿素变化, 但植被覆盖度较小, 土壤干扰大, 难以用于估产。起身期—拔节期是群体扩张的主导期, 近红外波段反射率通过反映群体状况与产量关系密切, 但土壤背景的干扰仍较大, 此期以近红外波段的光谱参

量用于估产的效果较好。抽穗开花以后, 叶绿素的降解上升为主要因子, 叶片叶绿素的迅速降解成为影响产量形成的关键, 且作物群体状况已经稳定, 所以此时利用 NDVI 等植被指数进行估产效果较好。

关于近红外波段光谱在作物长势监测和估产中的作用: 近红外波段能够很好地反映作物单位面积的干物质质量和作物叶片的健康程度, 相比其它波段, 能够更好地反应作物群体的营养及生殖生长功能, 所以该波段的

光谱反射率以及光谱特征参量与产量有很好的统计相关性。本文的研究结果也证实了这一点, 即: 近红外波段的光谱反射率越高, 作物长势越好, 产量也越高; 植被近红外波段弱水汽吸收光谱指数越大, 980 nm 和 1200 nm 的弱水汽吸收特征越明显, 作物产量越高; 近红外波段的光谱反射率与可见光及短波红外波段的光谱反射率差异越大, 产量越高。此外, 作物产量形成的机理十分复杂, 并且产量的物质积累与转化也主要发生在拔节期、抽穗期、灌浆期、乳熟期, 尽管越早的遥感产量预报对指导农业生产与国家政策的意义也越大, 但早期的产量预报也需要后期数据的验证, 特别是后期遭到气候、病虫害等不利因素的干扰。但作物生长具有十分明显的继承性, 对于正常生长与管理的作物, 早期的产量预报不仅是可行的, 而且可以指导农业生产, 尤其在生产力水平较低的大面积中低产地区, 小麦产量主要受到春季田间肥水管理水平的制约, 返青后一起身—拔节前的群体数量大小与产量密切相关, 通过遥感手段掌握冬小麦生长早期田间群体动态, 可以用于估算后期产量。但对于生产力水平较高的高产地区, 群体通常已经较大, 群体过大引起倒伏进而影响产量的潜在因素显现, 这时群体质量上升为主要因子, 早期预报产量难度增加, 对此, 还需要更加深入研究。

#### [参 考 文 献]

[1] 李郁竹. 冬小麦气象卫星遥感动态监测与估产[M]. 北京:

气象出版社, 1993

- [2] Barnett J L, Thompson D R. Large area relation of Landsat MSS and NOAA-6 AVHRR spectral data to wheat yield[J]. *Remote Sens Environ*, 1983, 13(2): 277- 290
- [3] Labus M P, Nielsen G A, Lawrence R L, et al. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery[J]. *Int J Remote Sens*, 2002, 23(20): 4169- 4180
- [4] Manjunath K R, Potdar M B, Purohi N L. Large area operational wheat yield model development and validation based on spectral and meteorological data [J]. *Int J Remote Sens*, 2002, 23(15): 3023- 3038
- [5] Singh R, Goyal R C, Saha S K, et al. Use of satellite spectral data in crop yield estimation surveys[J]. *Int J Remote Sens*, 1992, 13(13): 2583- 2592
- [6] Singh R, Senwal D P, Rai A, et al. Small area estimation of crop yield using remote sensing satellite data[J]. *Int J Remote Sens*, 2002, 23(1): 49- 56
- [7] Shibayama, et al. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements[J]. *Remote Sens Environ*, 1991, 36(1): 45- 53
- [8] 王人潮, 黄敬峰. 水稻遥感估产[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001, 38- 76
- [9] Anatoly A, Gitelson Y, Yoram J K, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction[J]. *Remote Sens Environ*, 2002, 80(1): 76- 87.

## Improving winter wheat yield prediction by novel spectral index

Liu Liangyun<sup>1</sup>, Wang Jihua<sup>1</sup>, Huang Wenjiang<sup>1</sup>, Zhao Chunjiang<sup>1</sup>, Zhang Bing<sup>2</sup>, Tong Qingxi<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China;

2. Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract** The coefficients of correlation between yields and spectral reflectances in eight different growth stages were first calculated. The statistical results show that yield is positively correlative with spectral reflectance in NIR bands for all the growth stages, negatively correlative in visible bands from late jointing stage, and also negative correlative in shortwave-infrared bands from seeding stage. Second, the normalized difference spectral indices combined by [890 nm, 1200 nm], [890 nm, 980 nm], [890 nm, 1650 nm], [890 nm, 1650 nm] and [890 nm, 2200 nm] are significantly correlative with yields in all the 8 growth stages, which is better than NDVI. Finally, the remote sensing models in different growth stages for winter wheat yield were built by [890 nm, 1650 nm] weak water absorption index.

**Key words:** hyperspectral; weak water absorption spectral index; NDVI; yield