

# 不同磷肥水平的小麦冠层多光谱特征研究

任红艳<sup>1</sup> 潘剑君<sup>1\*</sup> 张佳宝<sup>2</sup>

(1 南京农业大学资源与环境学院 南京 210095; 2 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

**摘要** 利用便携式冠层光谱仪对小麦进行连续观测获取光谱数据。本文分析了小麦在不同 P 肥施用水平及生育期变化情况下冠层的光谱响应特征, 运用 t-检验等统计方法获得了小麦冠层光谱对不同 P 肥水平的敏感波段, 并由此找到判断 P 肥施用是否合理的关键生育期。结果表明: 小麦冠层光谱的近红外波段 (810~1100 nm) 对 P 素的相应关系优于可见光波段, 870nm 等近红外波段为小麦 P 素敏感波段; 从拔节期到孕穗期前后为其 P 素丰缺状况光谱诊断的关键生育期; 归一化植被指数 (NDVI) 也可与小麦产量建立很好的回归方程。

**关键词** 小麦; 磷肥; 冠层光谱; 敏感波段; 关键生育期

**中图分类号** TP79

现代“精确农业”的一个很重要技术手段, 就是利用遥感技术监测土壤的时空变化<sup>[1]</sup>及作物的营养状况与长势, 并为最终的作物估产提供有效手段<sup>[2]</sup>。卫星遥感信息反映的是野外条件下地物的反射辐射状况, 田间野外测定的地面光谱与其具有很好的可比性<sup>[3]</sup>。野外鲜叶光谱分析具有非破坏性、适宜于田间指导生产等优点, 有一些研究者致力于鲜叶及冠层光谱特性与化学组成或养分含量以及最终作物产量相互关系的研究<sup>[3~6]</sup>。植物 N 素水平与光谱特性的关系研究较多, 结果也较一致<sup>[4, 5]</sup>。P 是植物生长发育不可缺少的营养元素之一, 它既是植物体内许多重要有机化合物的组分, 同时又以多种方式参与植物体内的各种代谢过程, 对作物高产及保持品种的优良特性有明显的作<sup>[7]</sup>。植物 P、K 状况与光谱特性的关系研究较少, 结果也不太一致<sup>[8]</sup>。由于 P 的丰缺与植物叶片的结构和水分状况关系密切, 其结果必然会影响近红外、中红外的光谱信息。利用光谱分析可区分 3~5 级的 P、K 营养水平<sup>[9]</sup>。在田间条件下, 由于 P、K 的缺乏不严重, 获得的结果有时不太一致。除了吉川年彦、王珂等曾尝试利用近红外分光法测定水稻的 K 含量外<sup>[10~12]</sup>, 利用光谱分析来诊断植物 P、K 营养或估测 P、K 含量的研究未见诸于报道。而且, 作为转移性强的大量元素—P 素一旦缺乏, 相应症状会在植株老体部分比较迟缓地显露出来, 不利于及时采取相应的对策。本文借

助地面光谱测量仪器, 研究不同施肥水平措施对小麦冠层光谱特征和产量的影响, 以为早期发现 P 素的丰缺状况, 改善作物品质和提高产量提供一种科学、简便、快捷、非破坏性的诊断方法, 为卫星遥感监测和产量估计建立作物光谱数据库提供参考。

## 1 实验方法

### 1.1 试验设计

试验设在中国科学院栾城农业生态系统试验站, 北纬 37°58', 东经 114°40', 海拔 50 m 的大田进行。P 素试验设计 3 个等级: 严重缺 P、轻度缺 P 和适量 P, P 肥 (含 P 量 100 g/kg 的过磷酸钙) 施用量分别为纯 P: 0、32.5 和 65 kg/hm<sup>2</sup>, 依次用 P1、P2、P3 表示, 均作底肥一次施用; 适量 P 肥的施用是依据该品种的当地生长需要和产量水平要求。各处理均按标准两次 (底肥和追肥) 施用 N 素 200 kg/hm<sup>2</sup>, K 素控制在 75 kg/hm<sup>2</sup>, 另外为确保施肥的准确性, 均不施用任何有机肥。供试小麦为 9204 品种。小区面积为 4.2 m × 7.5 m = 31.5 m<sup>2</sup>, 随机区组排列, 重复 3 次。收获时测定各小区产量。

### 1.2 光谱测定

各小区小麦的群体光谱数据测量采用美国 Cropscan 公司生产的 MSR-16R 型多光谱冠层便携式辐射计, 仪器视角为 31°, 波段特征见表 1。该仪器的光谱分辨率已经达到高光谱的光谱分辨率

①中国科学院知识创新工程重要方向项目(K2CX2-404)和“863”项目(2001AA245013)资助。

\* 通讯作者

范围,且覆盖了小麦的敏感波段区(500~900 nm)。小麦光谱测量从3月28日(起身期)开始,以后在4月10日(拔节前期)、4月17日(拔节期)、4月27日(孕穗期)、5月17日(扬花期)、5月27日(灌浆期)各测量1次,每个处理取6个样点

测量后取平均值,共获得 $9 \times 6$ 组数据。测量选择在晴朗无云的日子进行,时段在10:00到14:00之间。仪器每季度用白色标准版校准1次,测量时高度保持在2.0 m左右。

表1 Cropscan 波段的中心波长和带宽  
Table 1 The center wavelength and bandwidth of Cropscan wave band (MSR-16R)

波段 (nm)	460	510	560	610	660	680	710	760
中心波长 (nm)	461.3	510.5	561.6	609.9	659.1	680.9	711.8	759.5
带宽 (nm)	8.3	8.1	8.5	10.0	10.8	11.3	9.2	9.8
波段 (nm)	810	870	950	1100	1220	1480	1500	1650
中心波长 (nm)	810.1	871.6	951.0	1101.9	1222.8	1481.1	1500.9	1669.0
带宽 (nm)	10.7	12.5	11.0	16.3	11.5	13.5	13.2	195.0

### 1.3 光谱数据处理

目前应用高光谱分辨率遥感数据估计作物农学参数主要有两类方法<sup>[13~16]</sup>:一是通过多元回归分析方法建立光谱数据或由此衍生的植被指数与作物农学参量之间的关系;二是通过作物的红边参数描述作物的物候变化及其农学参数。归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)综合运用了四则运算,研究应用最广泛。从获得数据的敏感波段组合的NDVI差异显著性来看,680 nm和1100 nm两个波段在6个生育期内原始光谱的t-检验达到0.05的显著水平,因此将其作为本文NDVI曲线所需的红光和近红外两因子: $NDVI = (R_{1100} - R_{680}) / (R_{1100} + R_{680})$ ,通过它来分析小麦光谱与最终产量的相关关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同P素水平下小麦的光谱特征

2.1.1 田间小麦长势和敏感波段的选择 在各个观测的生育期里进行同期比较,P肥施用不足的田块小麦生长不如P肥施用正常的田块,而且其长势差异随着P肥施用水平差距增加而更明显。

通过对所获得光谱数据进行差异显著性分析发现:近红外波段(810~1100 nm)除了开花期之外,在所有生育期内能很好地将近不同的P素水平区分开来(二尾的t-检验达到了0.05的显著水平):严重缺P(P1)与正常水平(P3)及轻度缺P(P2)小麦的光谱差异很显著(通过显著水平为0.01的二尾t-检验),轻度缺P与正常水平小麦光谱差异显著(通过显著水平为0.05的二尾t-检验);其次,不

同P素水平小麦冠层在760 nm波段的光谱率差异显著性也较好,同样除了开花期的数据外都通过了二尾的t-检验;而在可见光波段区分的情况则不如近红外波段的明显,只有560 nm处波段在除了开花期外的生育期内具有二尾t检验0.05的差异显著性。因此本文建议采用560、760 nm以及810~1100 nm的近红外波段作为检测小麦P素的光谱敏感波段。结果见图1所示。

2.1.2 不同P素水平下小麦的光谱曲线 缺P对植物光合作用、呼吸作用及生物合成过程都有影响,对代谢的影响必然会反映在生长上。通常,轻度缺P植物的单位叶面积中叶绿素含量较高<sup>[2~7]</sup>。据报道,不缺P与轻度缺P在作物冠层光谱上不易区分<sup>[17]</sup>。但本试验证明,在可见光区反射光谱的区分能力不够,却能够在小麦的近红外反射高台处被区分开来。从图1(限于篇幅,仅列出拔节期)可以看出在可见光附近,随着P素水平的增高,反射率却降低;随即从760 nm处冠层反射率发生跃升至近红外高台,并且反射率随着P素水平的增高而增高,这与N素对小麦冠层光谱的影响相似<sup>[18]</sup>,同样也可以为小麦P素丰缺的光谱遥感诊断提供依据。

### 2.2 小麦光谱随生育期的变化

2.2.1 不同生育期内不同P肥水平小麦冠层在敏感波段处的反射光谱 由于P的丰缺与植物叶片的结构和水分状况关系密切,其结果必然会影响到近红外、中红外的光谱信息。本文从数据分析结果中选取870 nm作为敏感波段进行小麦光谱随生育期变化规律的考察。如图2所示,随着P素水平的增加,小麦冠层反射率随之增高;严重缺P的小麦冠

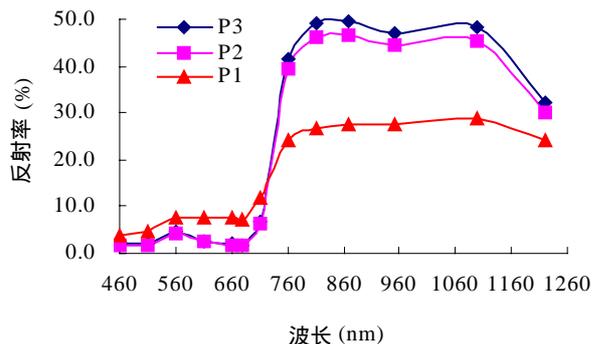


图 1 不同 P 素水平小麦冠层光谱反射率(拔节期)

Fig. 1 Reflectance from wheat canopy different in P level at the jointing stage

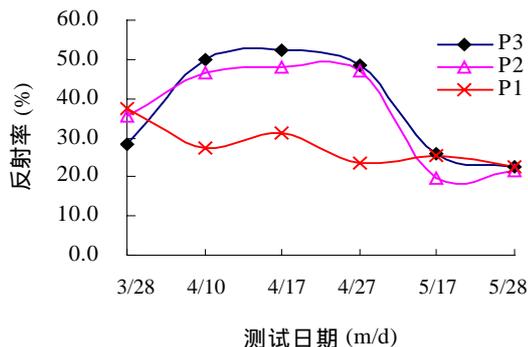


图 2 不同生育期内不同 P 素水平小麦冠层反射率(870 nm)

Fig. 2 Reflectance from wheat canopy differential in P level at 870 nm at various growth stages

层光谱下降变化趋势比较平缓，而且从拔节期到孕穗期前后与轻度缺 P 和正常水平小麦的冠层反射率有很大的差异，直至开花期才开始与有 P 处理的冠层反射率缩小差距。因此可以确定 870 nm 等近红外波段为小麦 P 素冠层光谱的敏感波段，而且从拔节期到孕穗期前后为小麦 P 素丰缺状况的冠层光谱诊断的关键生育期。

### 2.2.2 不同生育期内正常 P 素水平小麦的光谱

通过分析 P3 处理的小麦在不同生育期内的冠层反射光谱发现（图 3）：在可见光区（460 ~ 760 nm），拔节期前的起身期（3 月 28 日）的反射率一直处于比较高的水平（10.0 %）外，其他生育期的反射率大致落在 1.0 % ~ 5.0 % 之间，而且各生育期之间变化不大；至跃升进入近红外区（810 ~ 1100

nm），小麦冠层反射出现“两极分离” 本文所确定的几个关键生育期的反射率远高于其他几个生育期的相应值，形成两组，且两组内部各自的变化趋势大体一致；而所有生育期的反射率在 1220 nm 处趋于相互靠近。这可能是因为在拔节期以前小麦从土壤中吸收的 P 很少，被小麦利用的更少，出现在拔节期以前的生育期可见光区反射率高而近红外区低；小麦的叶片、叶鞘和茎含 P 率在拔节期前后（4 月 10 日和 4 月 17 日）达到高峰；到孕穗期虽然 P 的积累速率已到最高点，但是 P 素开始逐渐向生殖器官中转移，此时小麦植株体内的 P 素含量已经很高。但是由于生殖生长的需要而使得 P 大部分在籽粒中积累，而茎、叶中的 P 素含量相对降低，使得开花期和灌浆期的冠层反射率进一步降低。

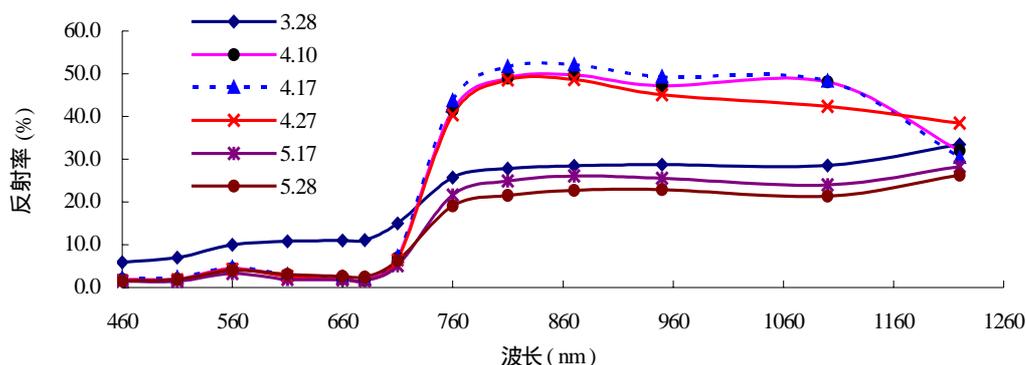


图 3 不同生育期内 P3 处理小麦冠层光谱

Fig. 3 Wheat canopy reflectance (P3) at various growth stages

### 2.3 小麦光谱与产量相关关系分析

对于小麦产量而言，P 素的限制作用不如 N 素强。但由于遭受缺 P 胁迫的小麦的光合作用效率很低，最终会影响到小麦的结实状况<sup>[7]</sup>。同时因为不

同 P 素水平与小麦冠层光谱之间有很好的相关性，因此通过关键生育期内小麦冠层光谱来分析它与小麦产量的相关关系<sup>[18]</sup>，并试图建立起二者的回归方程。本文尝试分析了 NDVI 与小麦最终产量二者之

间的相关性,结果表明从拔节前期、拔节期到孕穗期二者的相关性都在 0.75 以上,而在拔节前期和孕穗期则高达 0.99,证明此方法在关键生育期内完全可行(表 2)。若能经过更多样本数据的检验可行,则这种通过关键生育期的冠层光谱及其植被指数形势估计作物产量的方法可以为遥感技术的估产应用提供更准确的参考和依据。

表 2 小麦最终产量(Y)与 NDVI(x)的相关分析

Table 2 Correlation analysis between wheat yields and NDVI

生育期	线性方程	决定系数 <sup>*</sup>
起身期	$Y = -4377.3x + 7072.3$	$R^2 = 0.3695$
拔节前期	$Y = 8674x - 3145.3$	$R^2 = 0.9981$
拔节期	$Y = -1500x + 6956.3$	$R^2 = 0.7781$
孕穗期	$Y = 11220x - 5480.7$	$R^2 = 0.9969$
扬花期	$Y = -10337x + 12507$	$R^2 = 0.2787$
灌浆期	$Y = -8545.9x + 10275$	$R^2 = 0.3009$

\*所有分析用 Excel 和 SPSS 软件在 95%的置信水平上进行。

### 3 讨论

利用遥感技术进行作物营养状况和长势监测是一种简便、快速和非破坏性的有效手段,它不需要直接接触作物而进行实时地监测,突破了时间和空间的限制,具有很好的应用前景。通过找到作物各养分的特征波谱和不同波段构造与养分对应的植被指数,可进行作物各养分状况的监测。本试验是人为控制的单因素作用情况,实际生产中肥料的品种、施用方式、作物生长特性<sup>[19]</sup>及灌溉与水分条件等<sup>[20, 21]</sup>对其都有很大的影响。实际的田间情况中植物冠层光谱特性是植物光谱特性与背景土壤特性<sup>[22]</sup>的总和,受太阳光入射角、双向反射、气溶胶、风速等诸多外部因素的影响。由于植物营养状况能影响到叶面积、冠层形态结构、内在生理特征,而且不同营养元素的影响程度也不一,如一般叶面积指数(LAI)达到 3 左右时,冠层在可见光和中红外波段的反射率基本稳定,而在近红外波段, LAI 达到 5~6 时反射率才能饱和。因此,要很好地利用各指数形式进行监测(同时最好能测定辅助数据如 LAI 和进行叶绿素密度分析等),还有待各因素作用机理的进一步明确。尽管如此,随着光谱分辨率的提高,利用微分技术等数据处理技术来提高原始光谱鉴别不同缺素的专一性特征的能力,在精准农业或卫星遥感农业应用中有着很好的应用前景。

### 4 结论

在田间试验中借助地面遥感仪器,通过分析所获得的小麦光谱数据,确定了小麦 P 素的光谱敏感波段和关键生育期;并且发现不同 P 肥处理水平与不同生育期内的小麦光谱均存在着有规律的显著差异,光谱的衍生形式(NDVI 等植被指数)与产量之间有显著的相关关系。这些说明利用光谱分析来简便、快速地诊断小麦 P 素营养状况并指导田间施肥具有可能,同时这还为卫星遥感的农业应用提供了方法理论参考。

**致谢:**中国科学院栾城农业生态系统试验站为本研究的光谱测量提供了实验小区,中国科学院石家庄农业现代化研究所张玉铭副研究员在光谱测定方面给予了大力支持,特此致谢。

### 参考文献

- 1 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性. 土壤学报, 2003, 40(5): 697~703
- 2 Xu HW, Wang K. Regionalization for rice yield estimation by remote sensing in Zhejiang Province. *Pedosphere*, 2001, 11(2): 175~184
- 3 黄敬峰, 谢国辉. 冬小麦气象卫星综合遥感. 北京: 气象出版社, 1996, 42~43
- 4 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊): 7~14
- 5 Hinzman LD, Bauer ME, Daughtry CST. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 19: 47~61
- 6 Blackmer TM, Schepers JS, Varvel GE, Elizabeth A. Walter-Shea nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn canopies. *Agron. J.*, 1996, 88(1): 1~5
- 7 陆景陵主编. 植物营养学(上册). 北京: 中国农业大学出版社, 2001, 10~26
- 8 斋藤元也, 福厚道一. 北海道农业试验场研究报告. 1982, 4~134
- 9 王珂, 沈掌泉, 王人潮. 利用光谱分析估测水稻钾素营养水平的研究初报. 浙江农业大学学报, 1993, 19(增刊), 104~108

- 10 吉川年彦. 应用近红外分光法测定水稻叶片的氮、镁、钾. 日本土壤肥料学杂志, 1991, 62: 641 ~ 642
- 11 王珂, 沈掌泉, Abou-Ismail O, Yaghi A, 王人潮. 不同钾营养水平的水稻冠层和叶片光谱特征研究初报. 科技通报, 1997, 13 (4): 211 ~ 214
- 12 牛铮, 陈永华, 隋洪智, 张庆员, 赵春江. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析. 遥感学报, 2000, 4 (2): 125 ~ 129
- 13 Shibayama, et al. Seasonal visible, near infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and aboveground dry phytomass. Remote Sens. Environ., 1989, 27 (2): 119 ~ 127
- 14 Danson FM. The red edge response to leaf area index. Int. J. Remote Sensing, 1995, 16 (1): 183 ~ 188
- 15 Filelia I, Peñ uelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. Int. J. Remote Sensing, 1994, 15 (7): 1459 ~ 1470
- 16 Railyan VY. Red edge structure of canopy reflectance spectral of triticale. Remote Sens. Environ., 1990, 33 (1): 55 ~ 64
- 17 王珂, 沈掌泉, 王人潮. 植物营养胁迫与光谱特性. 国土资源遥感, 1999, 1 (1): 9 ~ 14
- 18 任红艳, 潘剑君, 张佳宝. 不同氮素水平下小麦冠层光谱特征及产量分析. 土壤通报, 2005, 36 (1): 26 ~ 29
- 19 Shi Z, Huang MX, Li Y. Physico-chemical properties and laboratory hyperspectral reflectance of coastal saline soil in Shangyu City of Zhejiang Province, China. Pedosphere, 2003, 13 (3): 193 ~ 198
- 20 何园球, 沈其荣, 王兴祥, 李志明. 不同水分和施磷量对旱作水稻耗水量和水分利用率的影响. 土壤学报, 2003, 40 (6): 902 ~ 907
- 21 李寿田, 周健民, 王火焰, 陈小琴, 杜昌文. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究. 土壤学报, 2003, 40 (6): 908 ~ 914
- 22 Zhu YG, Howes NK, Smith SE. Phosphorus uptake and utilisation efficiencies of different wheat cultivars based on a sand-culture screening system. Pedosphere, 2002, 12( 4): 329 ~ 337

## SPECTRAL REFLECTANCE CHARACTERISTICS OF WHEAT DIFFERENT IN PHOSPHORUS FERTILIZER APPLICATION RATE

REN Hong-yan<sup>1</sup> PAN Jian-jun<sup>1</sup> ZHANG Jia-bao<sup>2</sup>

(1 College of Resource and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095;

2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008 )

**Abstract** With a mobile spectral radiometer, spectral reflectance of wheat canopy was observed continuously. And analysis was done of spectral response from the canopy of wheat variant in P fertilization rate at various developmental stages and relationship between spectral reflectance and wheat yield. Statistic technologies such as T-test were used to search for sensitive bands of wheat canopy reflectance responding to different P fertilization levels and hence a key developmental stage for determining whether or not P fertilization is reasonable. The results show that NIR (810 ~ 1100 nm) exhibited much better ability to differentiate variant P fertilizer levels than VIS, especially during the stage from jointing to booting, so that NIR (810, 870, 950 and 1100 nm) could be defined as sensitive bands to P nutrition of wheat and the stage from jointing to booting could be determined to be the key developmental stage to diagnose wheat P nutrition by means of canopy reflectance. Thus a good regression equation can be built up between NDVI and wheat yield.

**Key words** Wheat, P fertilizer, Canopy spectral reflectance, Sensitive bands, Key developmental stages