

文章编号: 1007-4619 (2003)03-0176-06

# 利用高光谱遥感图像估算小麦氮含量

张 霞<sup>1</sup>, 刘良云<sup>1</sup>, 赵春江<sup>2</sup>, 张 兵<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放实验室, 北京 100101; 2 北京市农林科学研究院, 北京 100089)

**摘 要:** 利用 2001-04-26 实用型模块化成像光谱仪(OMIS)在北京小汤山地区获取的航空高光谱遥感图像,对图像进行了精确的几何纠正和反射率转换,提取出 43 条小麦图像光谱与地面叶片全氮含量数据相对应,运用红边、光谱吸收特征分析方法和逐步回归算法,选择和设计了叶片全氮反演的特征波段和特征参数,并进行了全氮含量填图。实验结果表明:由吸收特征光谱(590—756nm, 1096—1295nm, 1295—1642nm)确定的特征深度与面积能够很好地对叶片全氮含量进行反演; $NDVI(NRCA_{1175.8}, NRCA_{733.9})$ 和 $NDVI(dr745, dr699.2)$ 与 $TN$ 的关系最好( $R^2$ 分别为 0.8145, 0.769);全氮含量填图的值域和分布与地面调查和测量结果一致。

**关键词:** 高光谱分辨率; 图像光谱; 氮; 逐步回归; 光谱特征; 填图

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A

## 1 引 言

营养元素是影响作物的生长发育乃至最终产量的关键因素,而氮又是其中的关键之关键。它在氨基酸、蛋白蛋、核酸等物质的生物合成,提高小麦的光合作用能力、增加同化产物等方面起着重要作用。植物营养元素含量的多少、缺乏与否都会在叶片的光谱特性上有所反映,这是通过光谱手段获取生化参量信息的理论基础,这不仅使田间非破坏性、快速、简易地诊断营养状况有了可能,而且随着高光谱遥感技术的日趋完善和高光谱航天时代的到来,使得大面积监测植物的营养状况成为可能<sup>[1]</sup>。20 世纪最后两个十年是高光谱遥测叶片生化参量的飞速发展时期,90 年代的重点则是应用机载成像光谱仪进行树冠生化参量的反演,其中对营养元素,特别是氮的估测已有不少研究<sup>[1-3]</sup>。国内的研究多以野外光谱分析或者实验室叶片光谱分析为主<sup>[4,5]</sup>,即使应用成像光谱仪图像,也往往是地面光谱分析结果在图像上的直接应用,这不可避免地带来误差,原因不仅在于地面光谱测量与图像像元之间的尺度差异,而且也在于仪器本身的差异(如光谱分辨率、信噪比等)以及大气影响等原因。

本文以中国上海技术物理研究所研制的 128 通道实用型模块化成像光谱仪(OMIS)图像为基础,以图像光谱分析为着眼点,进行了从高光谱遥感图像直接获取小麦氮素分布的方法探索和可行性分析。

## 2 数据源

本文利用 2001-04-26,在北京郊区小汤山精准农业示范区,利用实用型模块化成像光谱仪(OMIS)获取的 128 波段高光谱遥感图像,以及配套的地面同步定点光谱测量(定标白布和黑布)和小麦叶片全氮生化分析数据(4 月 21 日)。数据获取时天气晴朗,能见度好,风力 2 级。光谱测量和生化分析采样都在预先设定的大田均布点和差异点上进行,这些点都有精确的差分 GPS 定位数据。研究区面积约 167hm<sup>2</sup>,其中小麦种植区域约 100hm<sup>2</sup>,地处北纬 40°10'31"—40°11'18",东经 116°26'10"—116°27'05",地势平坦,地块整齐,当时小麦正处在孕穗期。

### 2.1 OMIS 高光谱遥感图像

OMIS 由上海技术物理研究所研制,共有 128 个通道,详细技术指标见表 1。试验中将 OMIS 搭载在运五-B 飞机上,飞行高度约 1000m,像元地面分辨

收稿日期: 2002-01-30; 修订日期: 2002-04-17

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(编号: A00300100584)资助和国家“973”重点基础研究发展规划项目(G200007900)资助。

作者简介: 张霞(1972—),女,1998年毕业于北京师范大学资源与环境科学系,获遥感与地理信息系统硕士学位。现主要从事高光谱信息提取与大气纠正等方面研究。E-mail: zhangxia@ms.iss.ac.cn

率约 3m。OMIS 安装在一个高精度陀螺稳定平台上, 确保了飞行的稳定性, 同时姿态记录系统和 GPS 定位系统可以提供高精度的飞行参数和定位数据, 使得高精度的图像几何纠正成为可能。

表 1 OMIS 光谱仪主要技术参数

Table 1 Main characteristics of OMIS

总波段数		128
光谱仪	光谱范围/nm	波段数/个
	460—1100	64
	1060—1700	16
	2000—2500	32
	3000—5000	8
	8000—12500	8
光谱分辨率/nm		
瞬时视场/mrad	3	
总视场/(°)	> 70	
扫描率/(s/s)	5, 10, 15, 20 可选	
行像元数	512	
数据编码/bit	12	
最大数据率/Mbps	21.05	
探测量	Si, InGaAs, InSb, MCT 线列	

## 2.2 地面光谱测量

与高光谱遥感图像获取同步进行地面光谱测量, 使用的仪器为 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪, 该光谱仪的采样间隔为 1.4nm (350—2500nm 区间) 和 2nm (在 1000—2500nm 区间)。本文主要使用试验中测得的定标白布与黑布的光谱以完成图像的光谱重建。试验中使用了 9m×9m 的黑布与白布各一块, 布置在相对平坦的闲置地里, 可以很容易地从图像上确定他们对应的纯像元, 从而保证了图像反射率转换的高精度。

## 2.3 叶片全氮分析数据

4月21日, 在预先精确设置的大田均布点和奇异点上, 在地面光谱测量同时进行小麦叶片采样, 将样本迅速封装在塑料袋内送往实验室进行生理生化参量分析, 叶片全氮使用 B-339 型凯氏定氮仪的凯氏定氮法测定, 所有测量在采样后 3 个小时内完成, 保证了分析数据的有效性。

## 3 图像数据处理

### 3.1 图像光谱重建

图像光谱重建采用经验线性法, 该方法通过地面同步的地物测量光谱  $R$  与图像上的对应像元的  $DN$  曲线的比对, 建立经验线性公式进行图像反射率转换:  $R = k \times DN + b$  ( $k, b$  为系数), 研究证实, 经验线性法可以在一定程度上消除大气的影响<sup>[9]</sup>。在本实验中以白布和黑布作为高、低反射体定标源, 对 460—2500nm 波长范围共 112 个波段进行定标, 获得反射率图像。以下处理与分析均是基于这 112 个波段。

### 3.2 图像几何纠正

为保证定位的精确性, 首先利用机载姿态和 GPS 数据对 OMIS 高光谱图像进行粗纠正。然后, 利用纠正好的 0.25m 高分辨率航片作为基准图, 选取 88 组控制点做精纠正, 重采样的像素大小为 2.5m 分辨率, 精度 1 个像元。对应图像为 504×590 像素 (图版 1, 图 1)。

### 3.3 图像光谱提取

根据地面生化参量采样点的差分 GPS 数据, 将地面采样点在 OMIS 图像上定位, 以定位点为中心取十字形共 5 个像元的数据做平均, 作为地面生化参量采样点的图像光谱。共取得 43 组图像光谱和相对应的叶片全氮含量数据 (图版 I 图 1)。

## 4 数据分析方法

### 4.1 基于红边特征的分析方法

红边是基于光谱位置变量估算植被生物物理和生物化学参量的主要着眼点之一。野外光谱数据和机载成像光谱仪数据均证实, 红边位置能够跟踪叶绿素、生物量和物候变化, 因此被认为是绿色植物的可诊断性特征<sup>[7]</sup>。红边定义为 680—750nm 波长范围内反射率光谱的一阶微分最大值对应的波长, 本文应用的是红边的两个特征参数, 即红边斜率和红边面积。其中, 红边斜率  $Srg$  是红边位置对应的一阶微分值, 红边面积  $Arg$  则是该 680—750nm 波长范围内的反射率光谱对波长的积分值。公式如下:

$$Srg = \max \left( \left. \frac{dr(\lambda)}{d\lambda} \right|_{680}^{750} \right) \quad (1)$$

$$Arg = \int_{680}^{750} Rd\lambda \quad (2)$$

红边位置通常由一阶导数最大值的光谱位置来确定,但是直接求导往往会放大噪声。因此,我们利用倒高斯模型对原始光谱做平滑处理,其理论基础是植被在 680—800nm 波长范围非常近似于倒高斯函数<sup>[8]</sup>。首先利用最小二乘法进行倒高斯函数拟合;然后计算红边位置、红边斜率(导数最大值)和红边面积。建立它们与叶片全氮的关系。

### 4.2 吸收特征分析

在反射率光谱上存在一系列的吸收特征,表现为若干个凹陷的谷,这些吸收特征一般对应一个或多个生化参量的特征吸收,如红谷(以 670nm 为中心)主要由叶绿素吸收引起。本文中根据原始图像反射率光谱,同时参照 Curran 等对干叶捣碎后的光谱吸收特征测定结果<sup>[9]</sup>,确定大的吸收特征 4 个(表 2)。为便于计算,采用去包络线技术将各吸收特征突现出来(图 2),分别求取各吸收特征对应的吸收深度和吸收面积,建立它们与叶片全氮的关系。处理过程的公式为:

表 2 入选吸收特征光谱的位置

Table 2 Locations of the selected absorption feature spectrum

波长范围/nm	中心位置/nm	波段数/个	解释*
590—756	675.8 或 687.5	15	叶绿素吸收
1097—1295.2	1175.8	6	木质素,纤维素
1295.2—1642.4	1409.1	10	木质素
2020—2116	2078.2	6	蛋白蛋,氮(2060nm)

\* 根据 Curran(1989)干燥、捣碎的多种植物叶子光谱确定的吸收特征对应表<sup>[9]</sup>。

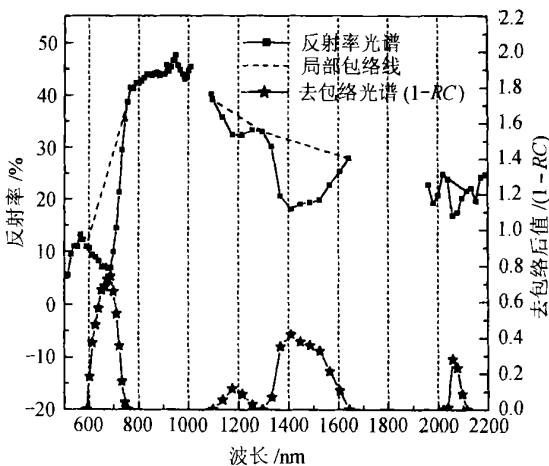


图 2 光谱去包络效果示意图

Fig. 2 Demonstration of continuum removal

去包络:  $RC = R/R_i$  ( $R$  和  $R_i$  分别为波段  $i$  对应的原始光谱和包络线上的值)

吸收深度:  $AD = 1 - \min(RC) \Big|_{\lambda_1}^{\lambda_2}$  ( $\lambda_1, \lambda_2$  为某吸收特征的波长范围)

吸收面积:  $AA = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RC d\lambda$  ( $\lambda_1, \lambda_2$  为某吸收特征的波长范围)

### 4.3 逐步回归分析

逐步回归分析方法是在高光谱植被研究中最普遍采用的技术,这种方法是建立在簇叶光谱是各种生化成分(以各自浓度为权重)吸收特征总和假设基础上的,用逐步回归方法可以确定对于某种化学成分重要的波长位置,从而可以用这些确定的波长位置来估算某种化学成分的浓度。

本文主要对归一化后的  $RC$  曲线进行逐步回归分析,归一化方法有两种,即基于吸收深度的归一化( $NRCD$ )和基于吸收面积的归一化( $NRCA$ ),公式分别为:

$$NRCD = (1 - RC) / AD \quad (5)$$

$$NRCA = (1 - RC) / AA \quad (6)$$

同时,为了便于比较,我们还对全部波段的原始光谱和一阶导数光谱进行了逐步回归分析。另外,对不同处理的入选波段进行两两组合分析,求取与氮相关性最好的简单比值植被指数( $RVI = r_i / r_j$ )和归一化植被指数[ $NDVI = (r_i - r_j) / (r_i + r_j)$ ],其中,  $r_i$  和  $r_j$  分别为入选波段  $i$  和  $j$  的不同处理值。

## 5 结果与讨论

与预期结果一致,红边斜率和红边面积对于叶片全氮( $TN$ )具有一定的估算能力,均呈显著对数关系(图 3):

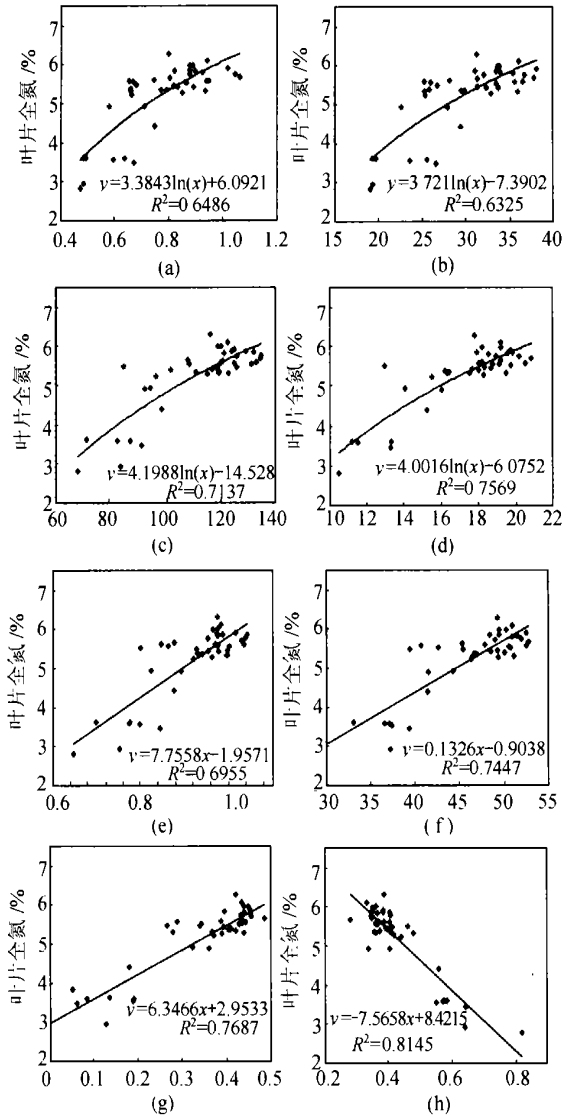
$$TN = 3.3843 \ln(Srg) + 6.0921 \quad (R^2 = 0.649) \quad (7)$$

$$TN = 3.7211 \ln(Arg) - 7.3902 \quad (R^2 = 0.633) \quad (8)$$

并且证实,倒高斯平滑处理能够滤掉部分噪声的影响,从而提高相关拟合精度(直接由原始光谱计算的  $R^2$  分别为 0.60 和 0.534)。

吸收特征的分析表明,670nm, 1175nm 和 1409nm 吸收特征对  $TN$  的估算精度  $R^2$  都在 0.7 以上,最高可达 0.78(图 3); 2078nm 吸收特征次之( $R^2$  为 0.58); 但是 2295nm 吸收特征几乎与  $TN$  无关。前 3 个吸收特征的分析结果说明了化学成分之间存在相

关性, 即氮与叶绿素、木质素、纤维素等的相关性。2078nm的分析结果则印证了Curran的实验室干物质分析结论, 而2295nm的不相关与传感器在短波红外区随波长增加信噪比迅速下降以及低光谱分辨率有关, 另一个可能的原因是大气的影



(a) 红边斜率与叶片全氮关系; (b) 红边面积与叶片全氮关系;  
(c) 1295—1642nm 吸收面积与叶片全氮关系; (d) 1096—1295nm 吸收面积与叶片全氮关系; (e) 590—756nm 吸收深度与叶片全氮关系; (f) 590—756nm 吸收面积与叶片全氮关系; (g)  $NDVI(dr745, dr699.2)$ 与叶片全氮关系; (h)  $NDVI(NRCA1175.8, NRCA733.9)$ 与叶片全氮关系

图3 特征参数与氮相关图(部分结果)

Fig. 3 Part of the correlation diagrams

逐步回归分析入选波段和评定见表3, 分析可知归一化光谱  $NRCD$  和  $NRCA$  可在入选波段最少的情况下获得很高的相关性  $R^2$ , 且均方根误差最小, 其单波段的  $R^2$  均在 0.75 以上, 但入选波段均在可见光和近红外区域, 与  $N$  含量并不直接有关; 原始图像光谱和导数光谱的入选波段较多, 分别有 2 个和 3 个与氮有关的波段(处于短波红外区), 但在相同数量入选波段的情况下确定系数要小于  $NRCA$  的  $NRCD$  的对应值, 而均方根误差相比要大得多, 这从反面证实了去包络与归一化处理的有效性。总之, 各分析光谱组的入选波段或者与氮素直接有关, 要么与木质素和纤维素或叶绿素有关, 后者可用植被生化成分间的相关性解释<sup>[1]</sup>, 虽然所选择波段与氮不直接相关, 但它却是与氮素密切相关的化学成分如叶绿素和木质素的特征吸收波段, 逐步回归的结果是将这个波段或一系列相关波段选择出来。

对不同处理的入选波段的两两组合的结果是, 由面积归一化吸收光谱  $NRCA$  构建的归一化差异植被指数  $NDVI(NRCA1175.8, NRCA733.9)$  与叶片全氮显著相关( $R^2=0.8145$ ), 由导数光谱  $dr$  构建的  $NDVI(dr745, dr699.2)$  相关显著( $R^2=0.769$ ), 由深度归一化吸收光谱  $NRCD$  构建的  $NDVI(NRCD733.9, NRCD710.9)$  与氮相关性次之( $R^2=0.66$ ), 由原始图像光谱构建的  $NDVI(R_{1038.4}, R_{710.9})$  与氮的  $R^2=0.627$ 。由它们组成的简单植被指数  $RVI$  与氮的相关性明显低于  $NDVI$ , 但  $R^2$  也在 0.55 以上。

最后我们将本次实验中得出的最优估算方程应用到整个图像上, 得到了实验区小麦的叶片全氮分布图(图版 I 图 4), 图像上氮的值域为 1.8%—6.5%, 与地面的分析结果基本一致, 且叶片全氮值的大小分布与小麦长势分布一致, 这在一定程度上说明估算方程的有效性。

总之, 我们通过本实验, 基于最小量的辅助数据, 探讨了直接从图像光谱提取氮信息的方法, 证实了在精确的几何校正和图像光谱重建前提下, 能够从图像光谱直接找到氮的最佳估算波段和特征参数, 并能保证大范围氮素填图的有效性。该工作对于大面积监测作物养分亏缺, 实施精细田间管理(如适时适量施肥)是非常有意义的。

表 3 逐步回归分析结果  
Table 3 Stepwise regression results

步数	入选波长/nm	解释	$R^2$	标准方差
深度归一化吸收光谱(NRCD)				
1	733.9	叶绿素	0.786	0.4217
2	687.5	叶绿素	0.806	0.4035
3	710.9	叶绿素	0.836	0.3583
面积归一化吸收光谱(NRCA)				
1	733.9	叶绿素	0.787	0.4234
2	687.5	叶绿素	0.847	0.3612
3	1175.8	木质素, 纤维素, 淀粉(1200nm)	0.869	0.3325
原始图像光谱				
1	710.9	叶绿素	0.511	0.6860
2	722.5	叶绿素	0.599	0.6286
3	527.7	叶绿素	0.789	0.4621
4	663.9	叶绿素	0.817	0.4352
5	2378.0	蛋白质, 氮, 纤维素(2350nm)	0.838	0.4153
6	2189.0	蛋白质, 氮(2180nm)	0.856	0.3970
导数光谱				
1	745.0	叶绿素	0.594	0.6248
2	699.2	叶绿素	0.742	0.5042
3	2097.4	淀粉, 纤维素(2100nm)	0.783	0.4680
4	2171.6	蛋白质, 氮(2180nm)	0.814	0.4395
5	2207.7	蛋白质, 氮(2180nm)	0.838	0.4154
6	540.5	叶绿素	0.854	0.3998
7	1564.9	蛋白质, 氮(1580nm)	0.877	0.3722

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Curran P J, Dungan J L, Peterson D L. Estimating the Foliar Biochemical Concentration of Leaves with Reflectance Spectrometry-Testing the Kokaly and Clark Methodologies [ J ]. *Remote Sens. Environ.*, 2001, **76**(3): 349-359.
- [2] Mary E M, John D A. High Spectral Resolution Remote Sensing of Forest Canopy Lignin, Nitrogen and Ecosystem Processes [ J ]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(2): 431-443.
- [3] Johnson L F, Billow C R. Spectrometric Estimation of Total Nitrogen Concentration in Douglas-fir Foliage [ J ]. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, **17**(3): 489-500.
- [4] Niu Z *et al.* Mechanism Analysis of Leaf Biochemical Concentrations by High Spectral Data [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(2): 125-129. [ 牛铮等. 叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析 [ J ]. 遥感学报, 2000, **4**(2): 125-129.]
- [5] Liu W D, Xiang Y Q, Zheng L F *et al.* Relationships between Rice Leaf Area Index, Chlorophyll Density and Hyperspectral Data [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(4): 279-283. [ 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析 [ J ]. 遥感学报, 2000, **4**(4): 279-283.]
- [6] Liu J G. Recognition and Extraction of Urban and Man-made Objects Using Hyperspectral Data [ D ]. Ph. D. Dissertation of Institute of Remote Sensing Applications, 1999. [ 刘建贵. 高光谱城市地物及人工目标识别与提取 [ D ]. 遥感所博士学位论文, 1999.]
- [7] Miller J R, *et al.* Correlation of Metal Concentrations with Anomalies in Narrow Band Multispectral Imagery of the Vegetation Red Reflectance Edge [ A ]. Proc. of the International Symposium on Remote Sensing, Fourth Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology [ C ]. 1985: 143-153.
- [8] Miller J R, Hare E W, Wu J. Quantitative Characterization of the Vegetation Red Edge Reflectance I. An Inverted-gaussian Reflectance Model [ J ]. *Int. J. Remote Sens.*, 1990, **11**(10): 1755-1773.
- [9] Curran P J. Remote Sensing of Foliar Chemistry [ J ]. *Remote Sens. Environ.*, 1989, **30**(3): 271-278.

## Estimating Wheat Nitrogen Concentration with High Spectral Resolution Image

ZHANG Xia<sup>1</sup>, LIU Liang-yun<sup>1</sup>, ZHAO Chun-jiang<sup>2</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Beijing Agriculture Information Technology Research Center, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Accurate remotely sensed estimates of the chemical concentration of vegetation canopies provide a valuable aid to the understanding of ecosystem function and real-time agricultural decision-making. This is because many biochemical processes, such as photosynthesis, respiration and evapotranspiration are highly related to the biochemical concentrations such as chlorophyll, nitrogen, water and so on. Hyperspectral remote sensing images are providing an attractive way for biochemical estimates in a large scale promptly. In this study, investigation was designed to determine whether hyperspectral images of the airborne operative modular imaging spectrometer(OMIS) could be used to estimate foliar nitrogen concentration of wheat at a spatial resolution of 3m. OMIS image had 128 bands covering the V-TIR wavelength range, among which bands between 400nm and 2500nm accounting for 112 bands which were used in this paper. The images were acquired by the airborne OMIS in Xiaotangshan Area, Beijing, China, on April 26th, 2001 under a fairly clear weather. While the wheat leaves being sampled and measured foliar biochemistry, calibration was carried out synchronously. Red edge analysis and absorption feature analysis as well as stepwise regression analysis were utilized to determine the characteristic bands and parameters for the canopy-level nitrogen retrieval after accurate geometric correction and accurate image spectra rebuilt. The five concerned absorption features were centered around 675.8nm, 1175.8nm, 1409.1nm, 2078.2nm, 2295.1nm, which were selected according to the original image spectra shapes as well as some rational laboratory analysis results of dry materials. At last, the best estimation equation was applied to all the wheat pixels of the image so that a nitrogen concentration distribution map of wheat was obtained. As expected, the red edge slope ( $Srg$ ) and area ( $Arg$ ) could estimate the total foliar nitrogen ( $TN$ ) fairly well ( $R^2=0.656, 0.643$  respectively). The absorption depths and absorption areas of the three absorption features centered around 670nm, 1175nm and 1409nm were effective estimators of wheat foliar nitrogen concentration ( $R^2=0.7447, 0.7569$  and  $0.7073$  respectively,  $n=43$ ). The new developed spectral indices,  $NDVI(NRCA_{1175.8}, NRCA_{733.9})$  and  $NDVI(dr745, dr699.2)$  were the best estimators of  $TN$  ( $R^2=0.8145$  and  $0.769$  respectively). The values of the nitrogen concentration distribution map ranged from  $1.8\%$  to  $6.5\%$ , which was quite consistent with those of field measurements ( $2.8\%—6.3\%$ ). The distribution agreed highly with the growth status distribution. Therefore to some extent, the estimation equation was validated. So it's possible, feasible and time-saving to estimate foliar nitrogen concentration at a large scale by using hyperspectral remote sensed images.

**Key words:** high spectral; image spectra; nitrogen; stepwise regression; spectral feature; mapping

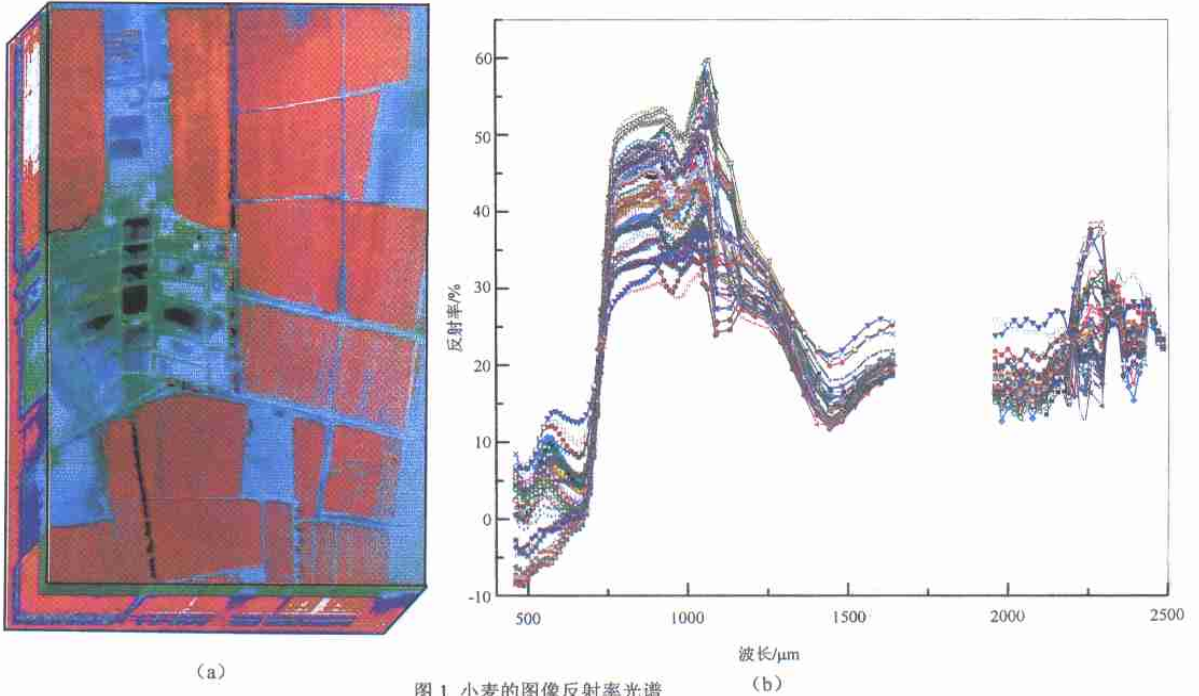


图1 小麦的图像反射率光谱

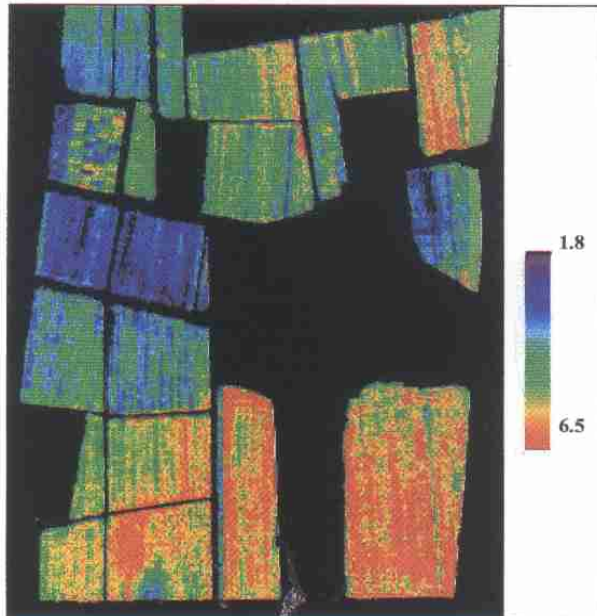


图4 叶片全氮分布图（以NDVI (dr745, dr699.2)为估算因子）