

# 基于连续统去除法的冬小麦叶片氮积累量的高光谱评价\*

张雪红<sup>1,2,\*</sup> 田庆久<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093 ;<sup>2</sup> 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044 )

**摘 要** 作物氮素状况是评价长势、提高产量和改善品质的重要指标,它对作物氮素诊断与管理具有重要意义。本文基于不同施氮水平下的冬小麦冠层光谱及相应的叶片氮积累量数据,将广泛应用于岩矿高光谱分析中的连续统去除法借用至作物冠层氮素营养状况评价。通过对 550 ~ 760 nm 波段的冠层光谱进行连续统去除处理,提取了 3 个吸收特征。结果表明:在所有生育期中,叶片氮积累量均随着施氮量的增加而增大;在所有氮处理中,从起身期、拔节期、孕穗期到抽穗期,叶片氮积累量均呈先增加后减小的趋势,且在孕穗期达到峰值;在各生育期,吸收峰总面积、吸收峰左面积和吸收峰右面积均随着施氮量的增加而增大,面积归一化最大吸收深度均随着施氮量的增加而减小。通过相关分析发现:各吸收特征参数与叶片氮积累量之间均存在显著性相关,且面积归一化最大吸收深度参数的相关性最好;全生育期的相关性高于各单生育期;但从单生育期来看,孕穗期是监测叶片氮积累量最佳时期。回归分析结果发现,基于全生育期建立的叶片氮积累量评价模型均达到了极显著性水平。

**关键词** 植被指数;红边参数;冠层反射率;高光谱遥感;吸收峰

中图分类号 Q945.79 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2010)1-0181-06

**Hyperspectral evaluation of nitrogen accumulation in winter wheat leaves based on continuum-removed method.** ZHANG Xue-hong<sup>1,2</sup>, TIAN Qing-jiu<sup>1</sup>(<sup>1</sup>International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; <sup>2</sup>School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China). *Chinese Journal of Ecology* 2010 29(1):181-186.

**Abstract:** Crop nitrogen status is a key indicator of crop growth, yield production, and grain quality, and of significance in crop nitrogen diagnosis and management. Based on the data of winter wheat canopy spectra and corresponding leaf nitrogen accumulation (LNA) acquired under different nitrogen application levels, the nitrogen nutrition of crop canopy was evaluated by continuum-removed method, a widely used method in spectra analysis of rock and mineral. Three absorption features were acquired by the continuum-removed treatment of canopy spectra ranging from 550 nm to 760 nm. The LNA at all growth stages increased with increasing nitrogen fertilization; but under the same levels of nitrogen application, the LNA increased from erecting stage to booting stage, and decreased from booting stage to heading stage. At all growth stages, the total area of absorption peak (TA), left area of absorption peak (LA), and right area of absorption peak (RA) increased with increasing nitrogen fertilization, whereas the normalized maximal absorption depth by area (NMAD) decreased. All the absorption feature parameters of continuum-removed spectra had significant correlations with LNA, and the relationship between NMAD and LNA was the best. The correlations in whole growth period were higher than that at any growth

\* 国防科技工业民用专项科研技术研究项目(2006A02A100602)、南京信息工程大学科研基金(20070069)和国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA12Z175)。

\* \* 通讯作者 E-mail: zxbnu@gmail.com

收稿日期:2009-05-20 接受日期:2009-08-11

stage. From the viewpoint of growth stage, booting stage was the best growth stage to monitor the LNA. Regression analysis displayed that the LNA regression model based on the whole growth period was most available.

**Key words:** vegetation index; red edge parameter; canopy reflectance; hyperspectral remote sensing; absorption peak.

叶片氮积累量是叶片氮浓度与叶重的乘积,它既反映植株个体叶片氮含量的信息,又包含植被群体盖度特征。叶片氮积累量对作物群体长势及氮素诊断具有重要的现实意义(冯伟等,2008b)。由于在600~700 nm的红光波段区域为叶绿素和氮素的强烈吸收区域(田永超等,2007),因此作物反射率,尤其是可见光区域的反射率差异反映了作物的营养状况,特别是叶片的氮素状况(Sullivan *et al.*, 2004)。因此作物叶片、甚至群体冠层的氮素含量可以通过光谱分析方法来估测。

作物氮素的光谱特征为弱吸收特征,因此基于遥感方法诊断作物氮素营养状况一直是研究的难点与热点。随着高光谱遥感技术的发展,可以直接对地物进行微弱光谱差异的定量分析。目前,基于高光谱遥感提取作物氮素信息的方法主要有以下两大类方法:一类是基于可见光近红外区域的高光谱植被指数,如GREEN-NDVI(冯伟等,2008a),DVI(810,680)(冯伟等,2008a),DVI(810,560)(冯伟等,2008b),DVI(1100,560)(冯伟等,2008b),RVI(810,560)(薛利红等,2003;冯伟等,2008c),RVI(870,660)(朱艳等,2006;Zhu *et al.*, 2008),RVI(810,660)(朱艳等,2006;Zhu *et al.*, 2008),RVI(1100,560)(周冬琴等,2006),RVI[Average(760, 810, 870, 950, 1100),660](李映雪等,2006),RVI(1220,660)(薛利红等,2004),NDVI(810,610)(吴华兵等,2007),NDVI(1220,460)(薛利红等,2004),SAVI(周冬琴等,2006),OSAVI(周冬琴等,2006)。此类方法在一定程度上可以消除大气和背景的影响,但有时候会暴露出过于敏感的特点(Broge *et al.*, 2001);第二类是基于微分技术所衍生的导数光谱参数,如红边位置、红边幅值(黄春燕等,2007;冯伟等,2008b),红边面积(黄春燕等,2008),红蓝边面积比、红蓝边振幅比(冯伟等,2008c),红边面积与蓝边面积之差(冯伟等,2008a)。此类方法可以消除大气和土壤背景的影响,压缩背景噪声,提高分析的精度。

连续统去除法广泛应用于矿物高光谱分析中

(Clark *et al.*, 1984),其优势就是能够压抑背景光谱,扩大弱吸收特征信息。本研究尝试应用此方法至作物高光谱分析。虽然也有人运用连续统去除法对作物鲜叶氮素信息进行诊断(张金恒,2006;张雪红等,2008),但由于作物冠层光谱是一种综合信息,是背景土壤、枯枝落叶、茎、叶片等组分的混合光谱。因此,通过直接对作物冠层进行遥感来探测作物营养信息比对作物鲜叶更为困难。本研究通过设计野外试验来对连续统去除法直接从作物冠层混合光谱中提取作物冠层氮素含量信息的可行性进行探讨。

本研究通过人为地控制冬小麦施氮量,同时基于冬小麦关键生育期的光谱数据以及配套生化参量的测量,采用连续统去除法直接提取冠层光谱中的氮素吸收特征信息,并探讨其定量评价作物叶片氮积累量的可行性,为航天遥感是否能够直接对作物氮素营养评价提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件与数据获取

观测资料来自中国典型地物波谱数据库,数据由国家农业信息化工程技术研究中心观测于2001年北京市小汤山精准农业示范基地。试验小区面积为144 m<sup>2</sup>,行距0.15 m,供试冬小麦品种为8138,设置2个重复。冬小麦氮素养分水平以控制尿素施用量分为6个等级:0、75、150、225、300和375 kg·hm<sup>-2</sup>,且氮肥分为小麦的底肥和返青后、拔节初期三次施入(王纪华等,2009)。

冬小麦冠层反射光谱分别在冬小麦的起身期(4月14日)、拔节期(4月21日)、孕穗期(4月30日)和抽穗期(5月9日)进行了野外测试。测量仪器采用美国ASD公司生产的Fieldsec FR Pro地物光谱仪器,波段范围350~2500 nm,其视场角为25°,传感器探头垂直向下,距冠层顶垂直高度约1.3 m。测量时选择在晴朗无云、风力较小的天气,时间范围为10:00—14:00。每测点测20次,取平均值作为该小区的光谱反射率值,各处理测定前后立即进行参考板校正。

与光谱测量同步,采用凯氏定氮法测定叶片全氮浓度,取当时已全展的最顶部及临位下叶 70 ~ 100 片,烘干后粉碎混匀供试。叶片氮素积累量  $LNA(g N \cdot m^{-2}) = \text{叶片全氮浓度 } LNC(\%) \times \text{叶片干质量 } LDW(g DW \cdot m^{-2})$ 。

光谱波段选择在可见光波段中的“红谷”区域,具体的波段范围为 550 ~ 760 nm。绿色植物光谱特征在此波段内主要表现为由叶绿素强烈吸收形成的吸收峰。叶绿素浓度与氮素浓度存在显著的正相关,因此从理论上讲,可以通过此波段的光谱特征来间接地评价叶片氮积累量。

1.2 数据处理

对光谱数据进行连续统去除处理。图 1 为连续统去除法示意图,图中的虚线即为包络线,它从外观上看就相当于原始反射光谱曲线的“外壳”,就像用一层薄膜包裹凹凸不平的固体物,则薄膜只与固体物的凸出部分接触。实际的光谱曲线是由离散的样点组成,所以可用连续的折线来近似光谱曲线的包络线(Clark *et al.*, 1984)。求取光谱曲线包络线的算法具体请参看相关文献(童庆禧等, 2006),文中的包络线消除处理全部采用遥感图像处理软件 ENVI 来实现。在获得包络线后,原始光谱与对应波段包络线的比值即为该波段的连续统去除后的归一化光谱值。连续统去除后的归一化光谱的特点是起始点数值为 1,其间的点位于(0, 1)(图 1)。连续统去除法具有压抑背景光谱,扩大弱吸收特征信息的优势。

通过连续统去除处理后,可以提取出如下几个典型吸收特征:1)吸收峰总面积(TA),定义为吸收峰的积分面积;2)面积归一化最大吸收深度(NMAD),定义为吸收峰中最大吸收值(即1 ~ 最小

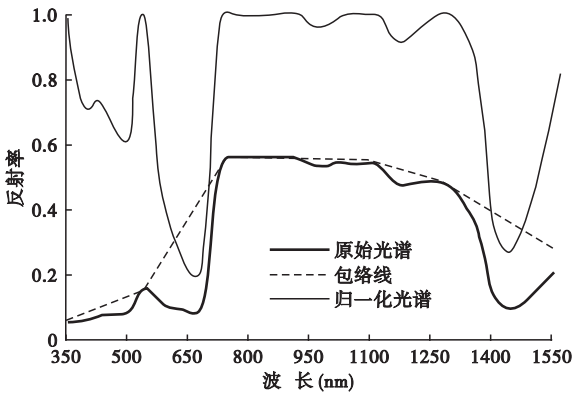


图 1 连续统去除示意图  
Fig. 1 Sketch map of continuum-removed method

反射值)与吸收峰总面积的比值;3)吸收峰左面积(LA),定义为以吸收峰中最小反射波长处为临界点,其左边的吸收峰积分面积;4)吸收峰右面积(RA),定义为以吸收峰中最小反射波长处为临界点,其右边的吸收峰积分面积。

为了与其他常用的叶片积累量评价方法进行对比分析,本文同时选择了比值植被指数(朱艳等, 2006)、红边幅值(冯伟等, 2008b)、红边面积(黄春燕等, 2008)分别与叶片积累量进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同氮处理下叶片氮积累量随生育期的变化

从图 2 可知,在所有生育期中,叶片氮积累量均随着施氮量的增加而增大。其原因是植株所需的氮素营养部分来源于施肥。因此,施氮肥的多少直接影响着植株(尤其是叶片组分)中的氮素含量。另外,在所有氮处理中,从起身期、拔节期、孕穗期到抽穗期,叶片氮积累量均呈先增加后减小的趋势,且在孕穗期达到峰值。这是因为冬小麦植株在拔节期及拔节期之前以营养生长为主,根、茎、叶等营养器官发育迅猛,营养器官的氮积累量迅速增加;拔节以后至孕穗期,冬小麦的营养生长和生殖生长并进,营养器官的氮积累量增加速度减缓,且在孕穗期达到最大;进入抽穗期后,氮素主要输往籽粒,根、茎、叶等营养器官氮积累减少。

2.2 不同氮处理下冠层反射光谱特征

从图 3 可知,冠层叶片氮积累量的差异显著影响冠层光谱反射特征,在不同波段区域光谱响应不同。冠层光谱反射率在 350 ~ 720 nm 和 1400 ~

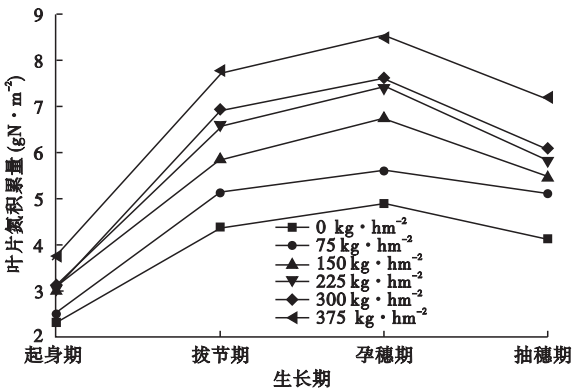


图 2 不同施氮水平下冬小麦叶片氮积累量的均值变化  
Fig. 2 Variations of leaf nitrogen accumulation in winter wheat with growth stages under different nitrogen levels

2500 nm 波段随叶片氮积累量水平的增加而降低 ; 相反 , 在 740 ~ 1350 nm 波段范围内提高。进一步考察其对应的生化含量及冠层结构参数 : 在 0、75、150、225、300、375 kg · hm<sup>-2</sup> 中的叶绿素密度均值分别为 1.227、1.499、1.652、1.809、1.844 和 1.962 g · m<sup>-2</sup> , 叶片氮积累量均值分别为 5.039、5.763、6.844、7.520、7.657 和 8.562 g · m<sup>-2</sup> , 冠层叶面积指数为 0.877、1.853、2.555、2.963、2.924 和 3.153。从以上的生化含量及冠层结构参数可知 : 随着施氮量的增加 , 冠层叶绿素密度和叶片氮积累量依次增加 , 叶面积指数也呈增加趋势。这是由于植株受到氮素的胁迫 , 从而导致叶片等营养器官中氮素浓度以及群体覆盖度的变化 , 另外群体覆盖度、叶绿素密度又与氮素浓度存在较强的相关性 , 所以氮素的胁迫导致生化含量及冠层结构参数的变化 , 从而影响外在的光谱特征。

2.3 不同氮处理下连续统去除光谱特征

对图 3 中 550 ~ 760 nm 波段的原始反射率光谱

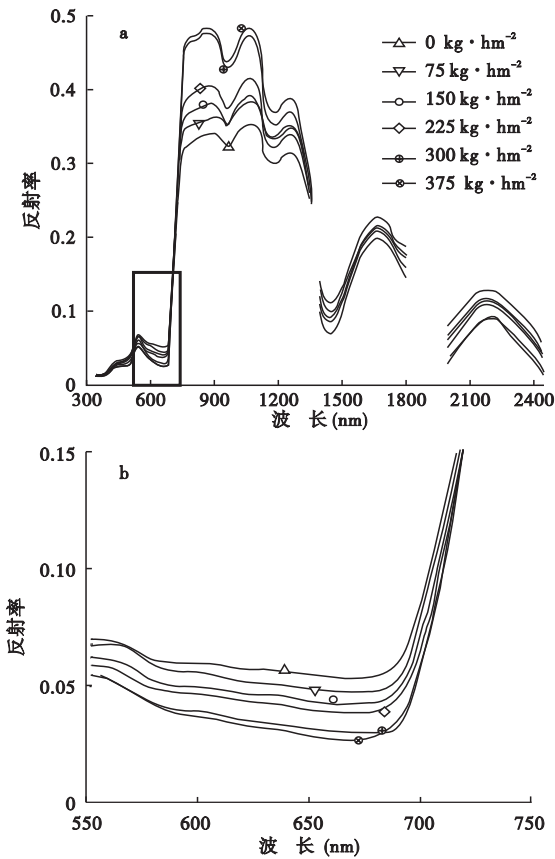


图 3 不同氮处理下孕穗期叶片平均反射光谱曲线  
Fig.3 Average spectra of winter wheat canopy under different nitrogen levels at the booting stage  
b 为 a 的 550 ~ 760 nm 的局部放大。

进行连续统去除处理 , 获得归一化光谱( 图 4 )。归一化光谱值随着氮素的增加均依次减小。通过比较图 3 和图 4 可见 : 图 4 归一化光谱随叶片氮积累量的增加而变化的幅度明显大于图 3 中的原始反射光谱。因此 , 连续统去除处理为定量评价作物冠层叶片氮积累量提供了可能。

利用连续统去除方法对不同生育期不同氮处理下的冬小麦当层反射光谱处理 , 提取吸收光谱特征参数均值及叶片氮积累量均值( 表 1 )。从表 1 可知 , 在 4 个生育期中 , 对于同一生育期 , 吸收峰总面积、吸收峰左面积和吸收峰右面积均随着施氮量的增加而增大 , 面积归一化最大吸收深度均随着施氮量的增加而减小。其原因是施氮量的增加使叶片叶绿素含量增大、作物群体密度也增大 , 导致其红光波段吸收加强加宽 , 反射减小。对于不同生育期同一施氮水平 , 吸收峰总面积、吸收峰左面积和吸收峰右面积均呈先增加后减小的趋势 , 且在孕穗期达到峰值。其主要原因是叶片中的叶绿素和氮素在拔节期及拔节期之前( 以营养生长为主 ) 迅速增加 , 作物群体密度也增大 , 拔节以后至孕穗期 , 冬小麦的营养生长和生殖生长并进 , 营养器官的叶绿素、氮素增加速度减缓 , 且在孕穗期达到最大 , 进入抽穗期后 , 冬小麦植株以生殖生长为主 , 叶绿素含量下降 , 叶片中氮素主要输往籽粒 , 营养器官氮积累减少。面积归一化最大吸收深度变化趋势则相反 , 即呈先减小后增加的趋势 , 且在孕穗期达到谷值 , 其原因同上。

2.4 连续统去除光谱参数与叶片氮积累量的相关性

表 2 表明 , 对于连续统去除波谱吸收特征参数 , 无论是单生育期 , 还是全生育期 , 吸收峰总面积、吸收峰左面积、吸收峰右面积和面积归一化最大吸收

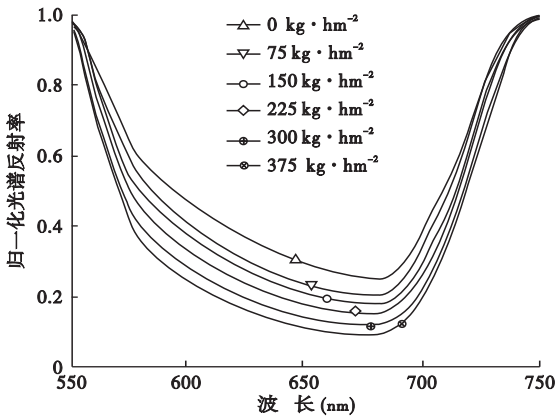


图 4 连续统去除处理后的 550 ~ 760 nm 波段的归一化光谱  
Fig.4 Continuum-removed spectra of winter wheat canopy range from 550 nm to 760 nm under different nitrogen levels

表 1 冬小麦冠层连续统去除光谱吸收特征参数及叶片氮素积累量(均值)  
Tab. 1 Average values of absorption characteristics parameters of continuum-removed spectra of winter wheat canopy and leaf nitrogen accumulation

施氮水平 (kg·hm <sup>-2</sup> )	起身期					拔节期					孕穗期					抽穗期				
	TA	LA	RA	NMAD (10 <sup>-3</sup> )	LNA ( $\frac{g}{m^2}$ )	TA	LA	RA	NMAD (10 <sup>-3</sup> )	LNA ( $\frac{g}{m^2}$ )	TA	LA	RA	NMAD (10 <sup>-3</sup> )	LNA ( $\frac{g}{m^2}$ )	TA	LA	RA	NMAD (10 <sup>-3</sup> )	LNA ( $\frac{g}{m^2}$ )
0	96	69	27	7.74	2.56	107	76	31	7.38	4.54	116	83	33	7.24	5.04	113	80	33	7.28	4.29
75	99	72	28	7.67	2.78	109	78	32	7.32	5.25	122	86	35	7.09	5.76	119	84	35	7.10	5.27
150	108	78	30	7.45	3.26	114	81	33	7.21	5.91	124	88	36	7.04	6.84	122	86	36	7.09	5.61
225	108	78	31	7.49	2.94	116	83	34	7.17	6.64	127	90	37	6.97	7.52	125	88	37	7.02	5.98
300	115	83	32	7.34	3.30	120	84	35	7.10	6.98	129	91	38	6.93	7.66	127	90	38	6.94	6.16
375	122	87	35	7.12	3.90	123	88	36	7.04	7.74	132	92	39	6.85	8.56	129	91	38	6.91	7.23

深度吸收特征参数与叶片氮积累量之间均存在显著性相关。全生育期的相关性高于各个单生育期,但从各生育期来看,抽穗期相关性比其他 3 个单生育期偏低,孕穗期最优;从吸收特征参数来看,吸收峰总面积在起身期和抽穗期的相关性高于其他 3 个参数,面积归一化最大吸收深度在拔节期、孕穗期和全生育期高于其他 3 个参数所以,总体上面积归一化最大吸收深度与叶片氮积累量相关性最为密切。因此,冬小麦的叶片氮积累量评价模型的建立应从全生育期来考虑。

比值植被指数及红边参数与叶片氮积累量的相关性分析表明,比值植被指数在各生育期及全生育期均达到极显著性检验,红边幅值除了在起身期达到显著性水平外,其他生育期均达到了极显著性水平,红边面积除了在起身期没通过显著性检验,其他生育期均达到了极显著性水平。通过对连续统去除波谱吸收特征参数及比值植被指数、红边参数进行比较,发现连续统去除波谱吸收特征参数与叶片氮素积累量的相关性普遍高于比值植被指数、红边参数。

2.5 叶片氮积累量高光谱评价模型

基于全生育期对叶片氮积累量与连续统去除后

提取的吸收峰总面积、吸收峰左面积、吸收峰右面积和面积归一化最大吸收深度进行逐步回归分析和非线性拟合。其建模优选的结果如表 3 所示:逐步回归分析中入选的为面积归一化最大吸收深度,在非线形拟合模型中,参数面积归一化最大吸收深度拟合的指数模型为最优。

在所有生育期中,叶片氮积累量均随着施氮量的增加而增大。在所有氮处理中,从起身期、拔节期、孕穗期到抽穗期,叶片氮积累量均呈先增加后减小的趋势,且在孕穗期达到峰值。冠层叶片氮积累量的差异显著影响冠层光谱反射特征,在不同波段区域光谱响应不同。冠层光谱反射率在 350 ~ 720 nm 和 1400 ~ 2500 nm 波段随叶片氮积累量水平的增加而降低;相反,在 740 ~ 1350 nm 波段内提高。通过连续统去除处理后 550 ~ 760 nm 波段的归一化波谱随叶片氮积累量水平的增加而降低,但其放大了由氮素胁迫引起的波谱吸收特征。因此,连续统去除法为定量评价作物氮营养提供了可能。在各生育期,吸收峰总面积、吸收峰左面积和吸收峰右面积均随着施氮量的增加而增大,面积归一化最大吸收深度均随着施氮量的增加而减小。对于不同生育期同一施氮水平,吸收峰总面积、吸收峰左面积和吸收峰右面积均呈先增加后减小的趋势,且在孕穗期达到峰值。

表 2 冬小麦冠层高光谱特征参数及叶片氮素积累量的相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis between characteristics parameters of hyperspectra of winter wheat canopy and leaf nitrogen accumulation

吸收特征参数	起身期 (n = 21)	拔节期 (n = 23)	孕穗期 (n = 46)	抽穗期 (n = 24)	全生育期 (n = 114)
TA	0.671 **	0.627 **	0.671 **	0.582 **	0.698 **
LA	0.669 **	0.621 **	0.691 **	0.624 **	0.694 **
RA	0.669 **	0.632 **	0.615 **	0.489 **	0.695 **
NMAD	-0.660 **	-0.664 **	-0.703 **	-0.527 **	-0.744 **
RVI	0.678 **	0.558 **	0.568 **	0.601 **	0.665 **
RES	0.456 *	0.634 **	0.684 **	0.523 **	0.643 **
REA	0.431	0.617 **	0.649 **	0.513 **	0.560 **

\*、\*\* 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验;n 为样本容量;  
RVI、RES、REA 分别为比值植被指数,红边幅值和红边面积。

表 3 冬小麦冠层连续统去除光谱吸收特征参数及叶片氮素积累量的回归方程(n = 114)

Tab. 3 Regression equations between absorption characteristics parameters of continuum-removed spectra of winter wheat canopy and leaf nitrogen accumulation

入选参量	拟合方程	决定系数	F	显著性水平 P
NMAD	$y = 46.486 - 5687.097x$	0.554	139.10	<0.0001
NMAD	$y = 23343.6e^{-1170.9x}$	0.632	192.62	<0.0001
TA	$y = 0.266e^{0.0253x}$	0.552	138.21	<0.0001
LA	$y = 0.2174e^{0.038x}$	0.544	133.79	<0.0001
RA	$y = 0.0011x^{2.3961}$	0.557	140.61	<0.0001

相关分析表明,各吸收特征参数与叶片氮积累量之间均存在显著性相关,且面积归一化最大吸收深度相关性最强。全生育期的相关性高于各单生育期。因此,全生育期是冬小麦进行叶片氮积累量评价的最佳时期,但从单生育期来看,孕穗期是监测叶片氮积累量最佳时期。进一步基于各光谱吸收特征参数建立了冬小麦全生育期的叶片氮积累量评价模型,这些评价模型均达到了极显著性水平。连续统去除波谱吸收特征参数与叶片氮素积累量的相关性总体上高于比值植被指数、红边参数叶片氮素积累量的相关性。

### 3 讨论

本研究基于连续统去除法对冬小麦冠层的6种不同氮素处理水平下4个典型生育期冠层反射光谱进行处理,提取了能反映叶片氮素含量的4个吸收特征。通过与叶片氮积累量进行相关分析,发现3个吸收面积参量(吸收峰总面积、吸收峰左面积、吸收峰右面积)与叶片氮积累量呈较强的正相关,而面积归一化最大吸收深度则较强的负相关。其中原因是由于叶片氮积累量与叶绿素密度密切相关(黄春燕等 2007),当叶片氮积累量与叶绿素密度增大时,位于550~760 nm波段的吸收整体增强,从而造成此波段范围的吸收峰面积和吸收峰宽度也均增大。而面积归一化最大吸收深度的物理含义为最大吸收深度之半处吸收峰宽度的倒数,因此叶片氮积累量与其倒数为较强的负相关性。另外,孕穗期除吸收峰右面积外,其他3个参数与叶片氮积累量的相关性均高于其他各单生育期,其中可能的原因是孕穗期的冬小麦叶绿素密度、叶片氮积累量达到顶峰阶段(图2),550~760 nm波段的吸收整体上也强于其他生育期,从而导致由叶绿素、叶片氮素控制550~760 nm波段光谱特征的能力加强。

植被指数、红边参数本质上是反映植被反射光谱680~750 nm处的陡坡特性,而叶片氮素积累量、叶绿素密度与此陡坡斜率又存在密切关系(吴长山等 2000)。本文提取的作物冠层550~760 nm波段吸收特征参数能直接反映叶绿素、叶片氮素的吸收特性。因此,这可能是导致连续统去除波谱吸收特征参数与叶片氮积累量的相关性总体上高于植被指数、红边参数(表2)的原因,但其中的物理机理还有待进一步深入研究和分析。本研究表明,连续统去除法定性和定量评价冬小麦叶片氮积累量的可行性。

波谱数据库(2002AA130010)提供研究数据。

### 参考文献

- 冯伟,姚霞,朱艳,等. 2008a. 基于高光谱遥感的小麦叶片含氮量监测模型研究. 麦类作物学报, 28(5): 851-860.
- 冯伟,朱艳,田永超,等. 2008b. 基于高光谱遥感的小麦叶片氮积累量. 生态学报, 28(1): 23-32.
- 冯伟,朱艳,姚霞,等. 2008c. 小麦氮素积累动态的高光谱监测. 中国农业科学, 41(7): 1937-1946.
- 黄春燕,王登伟,闫洁,等. 2006. 基于红边参数的棉花冠层叶片氮积累量之估算研究. 中国农学通报, 22(7): 563-566.
- 黄春燕,王登伟,闫洁,等. 2007. 棉花叶绿素密度和叶片氮积累量的高光谱监测研究. 作物学报, 33(6): 931-936.
- 李映雪,朱艳,田永超. 2006. 小麦叶片氮积累量与冠层反射光谱指数的定量关系. 作物学报, 32(2): 203-209.
- 田永超,朱艳,姚霞,等. 2007. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术. 生态学杂志, 26(9): 1454-1463.
- 童庆禧,张兵,郑兰芬. 2006. 高光谱遥感原理、技术与应用. 北京: 高等教育出版社.
- 王纪华,赵春江,黄文江,等. 2009. 农业定量遥感基础与应用. 北京: 科学出版社.
- 吴长山,项月琴,郑兰芬,等. 2000. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究. 遥感学报, 4(3): 228-232.
- 吴华兵,朱艳,田永超,等. 2007. 棉花冠层高光谱指数与叶片氮积累量的定量关系. 作物学报, 33(3): 518-522.
- 薛利红,曹卫星,罗卫红,等. 2003. 基于冠层反射光谱的水稻群体叶片氮素状况监测. 中国农业科学, 36(7): 807-812.
- 薛利红,曹卫星,罗卫红,等. 2004. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究. 植物生态学报, 28(2): 172-177.
- 张金恒. 2006. 基于连续统去除法的水稻氮素营养光谱诊断. 植物生态学报, 30(1): 78-82.
- 张雪红,刘绍民,何蓓蓓. 2008. 基于包络线消除法的油菜氮素营养高光谱评价. 农业工程学报, 24(10): 151-155.
- 周冬琴,朱艳,田永超,等. 2006. 以冠层反射光谱监测水稻叶片氮积累量的研究. 作物学报, 32(9): 1316-1322.
- 朱艳,姚霞,田永超,等. 2006. 稻麦叶片氮积累量与冠层反射光谱的定量关系. 植物生态学报, 30(6): 983-990.
- Broge NH, Leblanc E. 2001. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76: 156-172.
- Clark RN, Roush TL. 1984. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 89: 6329-6340.
- Sullivan DG, Shaw JN, Mask PL, et al. 2004. Evaluating corn nitrogen variability via remote-sensed data. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 35: 2465-2483.
- Zhu Y, Yao X, Tian Y, et al. 2008. Analysis of common canopy vegetation indices for indicating leaf nitrogen accumulations in wheat and rice. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10: 1-10.

作者简介 张雪红,男,1980年生,博士研究生,讲师。主要从事高光谱遥感、遥感尺度转换研究。E-mail: zxbhnu@gmail.com

责任编辑 李凤芹

