doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.022

基于连续统去除法的冬小麦叶片全氮含量估算

李粉玲[1,2]　常庆瑞[1,2]

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100;2.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西杨凌 712100)

摘要:以陕西省关中地区冬小麦小区试验为基础,获取不同生育期冬小麦的冠层高光谱数据,提取其连续统去除光谱和 7 类吸收特征参数,对比原始冠层光谱和连续统去除光谱对叶片氮含量的响应,分析连续统去除光谱吸收特征参数对叶片氮含量的估算能力。结果表明:连续统去除光谱在 721 ~ 727 nm 波段与叶片氮含量呈极显著负相关,相关系数为 -0.851;吸收特征参数增强了对叶片氮含量的估算能力,400 ~ 550 nm 波段吸收特征参数与叶片氮含量的相关性弱于 550 ~ 770 nm 波段;叶片氮含量与 550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 的吸收峰总面积、吸收峰左面积以及吸收峰右面积呈显著正相关,与面积归一化最大吸收深度呈显著负相关,且相关系数绝对值均在 0.8 以上;550 ~ 770 nm 波段的吸收峰总面积建立的叶片氮含量指数估算模型精度最高,R^2 达到 0.82,模型检验结果稳定,可用来定量估算冬小麦叶片氮素含量水平。

关键词:冬小麦;叶片;全氮含量;估算;连续统去除;高光谱

中图分类号:TP79;S127　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)07-0174-06

Estimation of Winter Wheat Leaf Nitrogen Content Based on Continuum Removed Spectra

LI Fenling[1,2]　CHANG Qingrui[1,2]

(1. *College of Natural Resources and Environment*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China*, *Ministry of Agriculture*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Based on plot experiments of winter wheat in Guanzhong area of Shaanxi Province, canopy hyper-spectral reflectance data was collected at different winter wheat growth stages. Seven absorption features were calculated based on continuum removed spectra of original canopy spectrum, which were used to explore the quantitative relationship with leaf nitrogen content. The results showed that continuum removed processing enlarged the small differences inherent in original canopy spectra and absorption characteristics controlled by nitrogen stress. The continuum removal spectra obviously improved the correlationship between original canopy reflectance and leaf nitrogen content. It was negatively correlated with leaf nitrogen content in 721 ~ 727 nm with determination coefficient of -0.851. The absorption characteristics parameters improved the leaf nitrogen estimation accuracy compared with sensitive bands, and the estimation accuracy by absorption parameters in 550 ~ 770 nm performed well than that by the variables in 400 ~ 550 significantly. Between all the absorption parameters in 550 ~ 770 nm and 400 ~ 770 nm bands, the total absorption area, left absorption area, right absorption area and area normalized maximal absorption deep gave more stable achievements than the others, and passed the significant test at $P < 0.01$ level with absolute value of correlation coefficient over 0.8. The best prediction model was built by total absorption area in 550 ~ 770 nm with determination coefficient of 0.82 with exponential formation. Accuracy test also confirmed the conclusion that the prediction model by total absorption area in 550 ~ 770 nm was more suitable for estimating the leaf nitrogen content of winter wheat quantificationally.

Key words: winter wheat; leaf; nitrogen content; estimation; continuum removal; hyper-spectra

收稿日期:2016-10-27　修回日期:2016-11-23

基金项目:国家高技术研究发展计划项目(2013AA102401)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452017108)

作者简介:李粉玲(1981—),女,讲师,博士,主要从事遥感与 GIS 应用研究,E-mail:fenlingli@nwsuaf.edu.cn

通信作者:常庆瑞(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究,E-mail:changqr@nwsuaf.edu.cn

引言

非成像高光谱遥感能够获取作物冠层或叶片精细的光谱数据，依据光谱数据的微小差异揭示作物生理生化的细微变化，为及时了解和掌握作物营养组分含量提供了丰富的信息来源[1-3]。氮素是作物生命体所需的大量元素，与作物的产量和品质密切相关。氮素自身的吸收特征比较微弱，主要通过蛋白质中的氨基酸吸收特性来表征；对叶绿素敏感的可见光波段是氮素的间接吸收波段，在作物氮素的遥感估算中得到广泛研究[4-7]。氮素高光谱监测无论是基于各种变换光谱，还是高光谱植被指数，目的就是要抑制环境背景噪声，直接或间接扩大氮素吸收的变异区间，提高氮素的估算能力。近年来，部分学者将在矿物高光谱分析领域应用的连续统去除法延伸到作物养分估算研究[8-10]。结果表明连续统去除法能有效去除光谱信息噪声，消除叶肉结构参数的影响，进而增加不同氮素处理之间吸收谷的深度差异[11-12]，基于连续统去除光谱发展的吸收特征参数可以提高对作物氮素的响应能力[4,13]，但相关结论还需要更多的作物和地区试验加以验证。当前，探讨连续统去除光谱对冬小麦叶片氮素响应能力的研究较少，且以往的研究很少对可见光-近红外波段范围内的整体连续统去除光谱以及叶绿素强烈吸收的蓝光吸收谷的连续统去除光谱进行探讨。本文基于多年小区试验所获取的冬小麦冠层光谱信息和相应叶片全氮含量（质量分数，%），采用连续统去除方法对 400 ~ 1 350 nm 的冠层光谱进行处理，探讨红光、蓝光和整个可见光范围内连续统去除方法定量估算冬小麦氮素含量的潜力，为冬小麦氮素营养的高光谱遥感监测提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验设计与数据获取

2013—2015 年在陕西杨凌西北农林科技大学农作 1 站，2014—2015 年在陕西省咸阳市乾县三合村进行冬小麦（小偃 22）氮素胁迫小区试验。小区面积分别为 12 m^2 和 36 m^2，播种量为 185 kg/hm^2，行距为 20 cm，设置 2 个重复。试验设 6 个氮素水平，分别为 0、1/4、2/4、3/4、1、5/4 标准施肥量，标准氮肥施入量为 120 kg/hm^2，以尿素作基肥（纯氮含量为 46%）一次施入，不追肥，小区管理按照大田模式进行。在冬小麦返青期、拔节期、孕穗期和乳熟期内，选择晴朗无风的天气，采用美国 SVC HR-1024I 型野外光谱辐射仪，在 10:30—14:00 之间进行冠层光谱测定。测量前进行标准白板校正，观测时传感器垂直向下，距离冠层 130 cm，视场角 25°。设置 1 次采样重复 10 次，以其平均值作为该观测样点的光谱。每个小区均匀采集 3 个样点，以样点光谱的平均值作为该样区的冠层光谱。在测量冠层光谱的区域选取有代表性小麦 20 株，采集其全部绿色叶片，在室内利用凯氏定氮法测定叶片全氮含量。

1.2　冠层光谱数据处理

将 400 ~ 1 350 nm 的冠层光谱重采样为 1 nm，利用二次多项式和 9 个平滑点数进行 Savitzky-Golay 平滑滤波处理。在 ENVI 4.8 中对去噪后的冠层光谱进行连续统去除光谱信息提取。连续统去除处理实质上就是将光谱曲线中的吸收谷归一化到吸收谷的连续统线上[4,14]。计算式为

$$S_{cr} = R/R_c \tag{1}$$

式中　S_{cr}——连续统去除光谱反射率

R——原始光谱反射率

R_c——连续统线反射率

S_{cr}的取值在[0,1]之间，其大小表征了光谱吸收特性的强弱，在其基础上提取 7 类吸收特征参数：①最大吸收深度：吸收峰中的最大吸收值。②吸收波段波长：最大吸收深度对应的波长。③吸收峰总面积：起始和终止波长内的波段深度的积分。④吸收峰左面积：吸收波段波长左边吸收峰积分面积。⑤吸收峰右面积：吸收波段波长右边吸收峰积分面积。⑥对称度：吸收峰左面积和右面积的比值。⑦面积归一化最大吸收深度：最大吸收深度与吸收峰总面积的比值。

1.3　建模和检验样本提取

试验共获得冬小麦冠层光谱和相应叶片氮含量有效样本 315 个。全生育期中的叶片氮含量最小值为 0.22%，最大值为 3.87%，平均值为 1.47%，具有中等空间变异性，变异系数为 52.03%。将叶片氮含量按照由小到大的顺序进行排列，按照 4∶1 的比例抽取建模集和验证集，共获得建模样本 252 个，检验样本 63 个。全生育期样本、建模样本和检验样本的叶片氮含量数据服从标准正态分布。

2　结果与分析

2.1　原始冠层光谱和连续统去除光谱特性分析

400 ~ 1 350 nm 冬小麦原始冠层光谱和连续统去除光谱如图 1 所示。绿光波段的反射率（1.5% ~ 9.2%）低于近红外高反射平台（18.7% ~ 61%），可见光-近红外波段冠层光谱反射率在 770 nm 附近达到峰值，连续统去除光谱为 1。叶绿素强烈吸收蓝光（450 nm）和红光（600 nm）形成的 2 个吸收谷，在 400 ~ 770 nm 的连续统去除光谱上形成“双谷”结

构。本文以绿光中心位置 550 nm 和反射峰值 770 nm 为界,重点探讨 400 ~ 550 nm 和 550 ~ 770 nm 2 个叶绿素吸收谷,以及 400 ~ 770 nm 波段整体吸收特性的连续统去除光谱与叶片氮含量之间的相关关系。

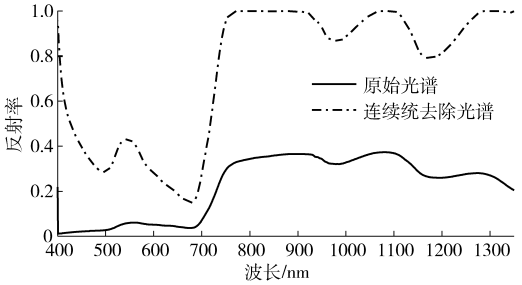


图 1 冬小麦冠层光谱特性曲线

Fig. 1 Canopy spectrum properties of winter wheat

2.2 原始冠层光谱与叶片氮含量的相关性分析

原始冠层光谱与叶片氮含量的相关性如图 2 所示,400 ~ 736 nm 波段光谱反射率与叶片氮含量呈显著负相关($P < 0.01$),其中 400 ~ 720 nm 相关系数绝对值高于 0.6,614 ~ 644 nm 波段相关系数为 -0.752。745 ~ 1 145 nm 光谱反射率与叶片氮含量呈显著正相关关系,779 ~ 785 nm 波段的相关系数最高,可以达到 0.4,相关程度整体上弱于 770 nm 以内的可见光部分。在与叶片氮含量相关性最好的波段区间内(614 ~ 644 nm),选择叶绿素吸收波段的 640 nm 波长作为原始冠层光谱的敏感波长。

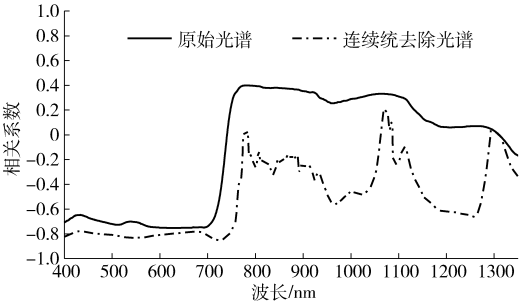


图 2 冬小麦冠层光谱与叶片氮含量的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between canopy spectrum and leaf nitrogen content

2.3 连续统去除光谱与叶片氮含量的相关性分析

连续统去除光谱反射率在 400 ~ 765 nm、934 ~ 1 050 nm、1 124 ~ 1 290 nm、1 304 ~ 1 350 nm 波段明显改善了原始光谱与叶片氮含量之间的相关性(图 2),其中 400 ~ 760 nm、1 180 ~ 1 270 nm 的连续统去除光谱反射率与叶片氮含量在 $P < 0.01$ 水平下显著负相关,且相关系数绝对值大于 0.6。红光波段 721 ~ 727 nm 的相关性最好,相关系数为 -0.851,本文选择 725 nm 波长作为连续统去除光谱对叶片氮含量的最佳敏感波长。

2.4 400 ~ 770 nm 连续统去除光谱对叶片氮含量的响应

2.4.1 连续统去除光谱随叶片氮含量的变化

如图 3 所示,400 ~ 550 nm 波段连续统去除光谱随着叶片氮含量的增加,吸收谷的位置向长波方向移动,最大吸收深度逐渐增加,吸收谷的面积没有明显的变化规律。550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 波段连续统去除光谱均随着叶片氮含量的增加整体下移,吸收谷的面积呈显著增加趋势,吸收谷的位置和最大吸收深度的变化规律同 400 ~ 550 nm 波段。

2.4.2 吸收特征参数与叶片氮含量的相关分析

基于 400 ~ 550 nm、550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 的连续统去除光谱反射率提取光谱吸收特征参数,计算其与叶片氮含量的相关性(表 1)。结果表明,400 ~ 550 nm 波段吸收峰左面积和吸收峰总面积与叶片氮含量的相关性较低,没有通过 0.05 水平的显著性检验,面积归一化最大吸收深度与叶片氮含量显著正相关,相关系数为 0.573。550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 的最大吸收深度、吸收峰左面积、吸收峰右面积、吸收峰总面积与叶片氮含量显著正相关,吸收波段波长、对称度和面积归一化最大吸收深度与叶片氮含量呈显著负相关。550 ~ 770 nm 吸收峰总面积与叶片氮含量的相关系数最高,为 0.851。

2.5 基于敏感波段的叶片氮含量估算与检验

以原始冠层光谱 640 nm 波长的反射率和连续统去除光谱 725 nm 波长的反射率建立叶片氮含量的回归估算模型(图 4),结果表明,敏感波长反射率与叶片氮含量的关系更适合用指数模型拟合。随着

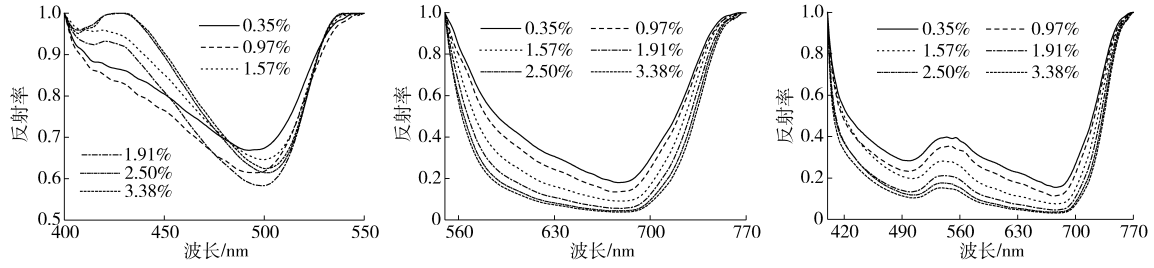


图 3 连续统去除光谱对叶片氮含量的响应

Fig. 3 Responses of continuum removed spectra to leaf nitrogen content

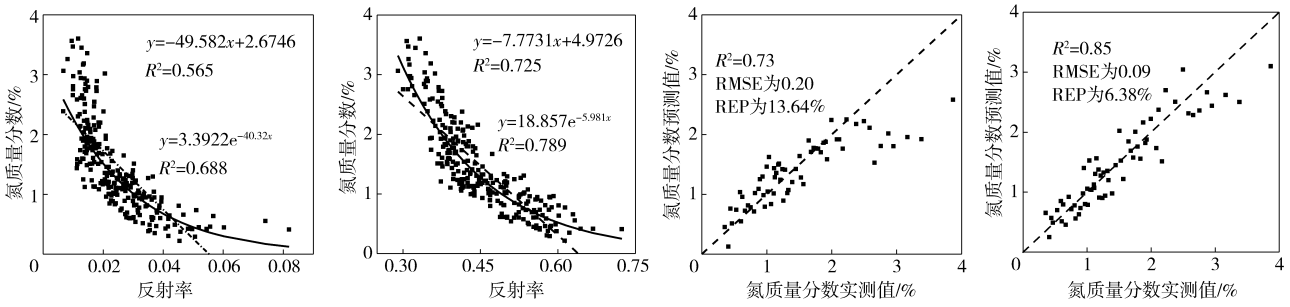
表 1　光谱吸收特征参数与叶片氮含量的相关分析（$n=252$）

Tab. 1　Correlation coefficients between LNC and spectrum absorption parameters

序号	变量	相关系数		
		400 ~ 550 nm	550 ~ 770 nm	400 ~ 770 nm
1	最大吸收深度	0.467 **	0.790 **	0.783 **
2	吸收波段波长	0.545 **	−0.317 **	−0.402 **
3	吸收峰总面积	0.107	0.851 **	0.830 **
4	吸收峰左面积	0.068	0.810 **	0.803 **
5	吸收峰右面积	0.196 **	0.829 **	0.829 **
6	对称度	−0.279 **	−0.360 **	−0.452 **
7	面积归一化最大吸收深度	0.573 **	−0.836 **	−0.807 **

注：** 表示通过 $P<0.01$ 显著性水平检验。

敏感波长反射率的增加，叶片氮含量均呈现下降的趋势，回归方程的决定系数分别为 0.688 和 0.789。63 个样本点的检验结果表明，连续统去除光谱的估算精度优于原始光谱，检验样本实测值与预测值的拟合决定系数（R^2）分别为 0.85 和 0.73，均方根误差（RMSE）和预测相对误差（REP）值均低于原始光谱的估算模型（图 4）。连续统去除光谱的预测值和实测值的分布接近于 1∶1 线，原始冠层光谱对叶片氮含量大于 2.6% 的模拟结果偏差较大，存在不同程度的低估。相对于原始冠层光谱，红边区域 725 nm 的连续统去除光谱反射率所建立的叶片氮含量指数估算模型更适于指示全生育期冬小麦叶片氮素状况的动态变化。



(a) 原始光谱640 nm回归估算模型　(b) 连续统去除光谱725 nm回归估算模型　(c) 原始光谱640 nm检验结果　(d) 连续统去除光谱725 nm检验结果

图 4　基于敏感波段的叶片氮含量估算模型与检验结果

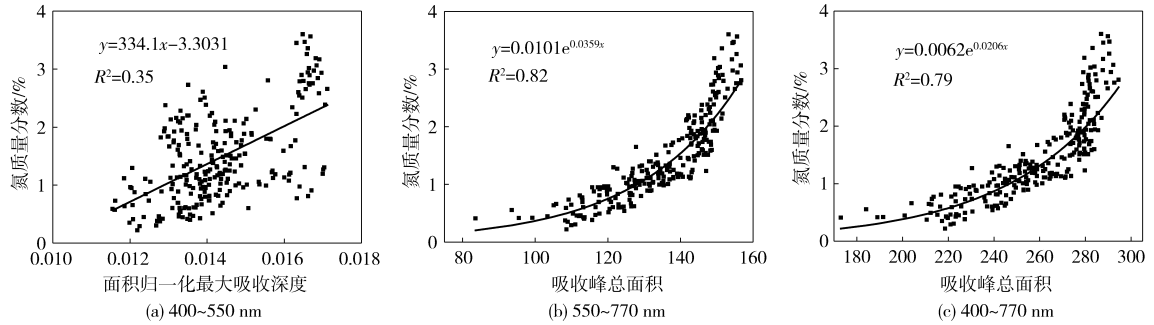
Fig. 4　Model estimation and testing for leaf nitrogen content based on sensitive bands

2.6　基于吸收特征参数的叶片氮含量估算与检验

从表 1 中选择与叶片氮含量相关性最高，且达到 0.01 显著性水平的吸收特征参数进行叶片氮含量估算。连续统去除光谱 400 ~ 550 nm 的面积归一化最大吸收深度，550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 的吸收峰总面积所建立的叶片氮含量估算模型如图 5 所示。叶片氮含量随 400 ~ 550 nm 面积归一化最大吸收深度的变化没有明显的规律性，线性拟合方程的决定系数仅为 0.35。550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 的吸收峰总面积与叶片氮含量的关系均表现为显著的指数关系模型，估算模型的决定系数分别为 0.82 和 0.79。从模型检验的结果来看（图 6），基于 550 ~ 770 nm 和 400 ~ 770 nm 波段吸收峰总面积的估算模型明显优于 400 ~ 550 nm 波段。400 ~ 550 nm 面积归一化最大吸收深度估算模型的均方根误差和预测相对误差较大（RMSE 为 0.34，REP 为 22.77%），不宜用于叶片氮含量的动态监测。550 ~ 770 nm 波段吸收峰总面积的估算模型表现稳定，具有最小的均方根误差和预测相对误差，提升了叶片氮含量高值区的估算能力，是较为理想的叶片氮含量估算模型，表达式为 $y=0.010\,1e^{0.035\,9x}$，$R^2=0.82$。

3　讨论

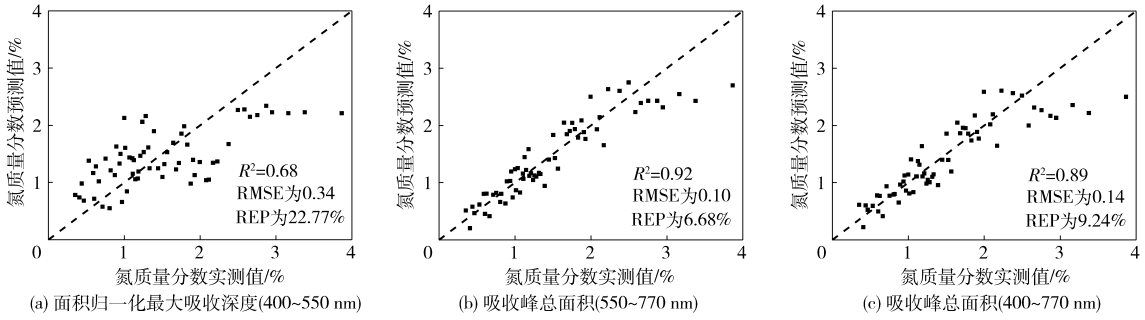
作物的光谱吸收是作物叶片中不同生物化学成分含量与每个成分吸收系数的代数和，光谱维方向的特征信息主要表现为作物中生物化学成分含量变



(a) 400~550 nm　(b) 550~770 nm　(c) 400~770 nm

图 5　吸收特征参数与叶片氮含量空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of leaf nitrogen content and absorption features



(a) 面积归一化最大吸收深度(400~550 nm) (b) 吸收峰总面积(550~770 nm) (c) 吸收峰总面积(400~770 nm)

图 6 基于吸收特征参数的叶片氮含量估算模型检验结果

Fig. 6 Testing of estimation models of leaf nitrogen content based on absorption features

化而形成不同的吸收波形[15-16]。连续统去除光谱将小麦冠层光谱映射到局部连续统线上,归一化处理使得局部吸收特征之间的差异放大。本文 400 ~ 1 350 nm 连续统去除光谱在 400 ~ 765 nm、934 ~ 1 050 nm、1 124 ~ 1 290 nm、1 304 ~ 1 350 nm 波段显著改善了原始光谱与叶片氮含量之间的相关性。叶片氮含量的最佳敏感波长位于可见光范围,连续统去除光谱 725 nm 处反射率的建模精度优于原始光谱 640 nm 波长的反射率。

叶绿素与叶片氮含量之间存在较好的相关性[17-18],蓝光和红光吸收谷是小麦叶绿素含量的直接表征。本文对叶绿素强烈吸收的蓝光、红光附近的连续统去除光谱与叶片氮含量的相关性进行了探讨,其中蓝光吸收谷(400 ~ 550 nm)较浅,吸收深度较低,吸收谷的位置和深度与叶片氮含量显著相关,随着叶片氮含量的变化呈现一定的规律性。而其他吸收特征参数规律性并不明显,这是因为随着叶片氮含量的增加,冠层反射光谱曲线在 420 nm 附近形成一个微弱的峰值,连续统去除光谱将这一现象扩大化,使得吸收峰左半部分光谱曲线交叉,规律性减弱。550 ~ 770 nm 的红光波段连续统去除光谱特征参数均与叶片氮含量呈显著相关关系。随着叶片氮含量的增加,吸收谷的位置向长波方向移动,最大吸收深度和吸收谷的面积增加,与叶片氮含量呈显著正相关关系,放大了由氮素胁迫间接引起的光谱吸收特性。可见光范围(400 ~ 770 nm)整体的连续统去除光谱对叶片氮含量的变化响应敏感,变化规律与 550 ~ 770 nm 波段相同,建模精度略低于 550 ~ 770 nm 波段。550 ~ 770 nm 波段吸收峰总面积建立的叶片氮含量指数估算模型,其建模精度和模型检验精度最高,估算能力优于连续统去除光谱的敏感波段。

原始光谱敏感波段反射率、连续统去除光谱敏感波段反射率以及连续统去除光谱在 400 ~ 770 nm 和 550 ~ 770 nm 的吸收峰总面积与冬小麦叶片氮含量的关系均表现为非线性,更适合用指数模型表达,这与张雪红等[10]的研究结果一致。随着敏感波段反射率的增加,叶片氮含量下降;随着吸收峰总面积的增加,叶片氮含量增加。所有的模型对叶片氮含量的高值均存在不同程度的低估,即叶片氮含量增加到一定程度时,冠层光谱的原始反射率、连续统去除光谱反射率以及相关吸收特征参数都存在饱和现象,各特征参数的饱和位置存在差异。总体上,基于连续统去除光谱的饱和点略高于原始光谱,可以在一定程度上改善高值氮含量的估算精度。本研究中,连续统去除光谱对 2.6% ~ 3.3% 的叶片氮含量的估算精度改善明显,当然这一现象仍需要大量的试验数据加以验证。后续的研究中应增加高值氮含量的样点数目,加强分生育期连续统去除光谱对叶片氮含量的估算能力探讨,尝试研究冬小麦群体氮素含量指标与连续统去除光谱的定量关系。

4 结论

(1)连续统去除光谱改善了原始冠层光谱与叶片氮含量之间的相关性,在 721 ~ 727 nm 与叶片氮含量呈显著负相关,相关系数达到 -0.851,红边区域 725 nm 波长的连续统去除光谱反射率所建立的叶片氮含量指数估算模型优于原始冠层光谱 640 nm 波长。

(2)吸收特征参数增强了吸收波段对叶片氮含量的估算能力,蓝光(400 ~ 500 nm)波段吸收特征参数与叶片氮含量的相关性整体上弱于红光(550 ~ 770 nm)波段,利用 550 ~ 770 nm 波段的吸收峰总面积所建立的叶片氮含量指数估算模型优于敏感波段所建模型,模型的精度和稳定性较高,可用来定量估算冬小麦叶片氮素含量。

参 考 文 献

1 THOMAS V, TREITZ P, MCCAUGHEY J H, et al. Canopy chlorophyll concentration estimation using hyperspectral and lidar data

for a boreal mixedwood forest in northern Ontario, Canada[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(4): 1029 – 1052.

2 ZHAO D, HUANG L, LI J, et al. A comparative analysis of broadband and narrowband derived vegetation indices in predicting LAI and CCD of a cotton canopy[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(1): 25 – 33.

3 姚付启,蔡焕杰,王海江. 冬小麦冠层高光谱特征与覆盖度相关性研究[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(7):156 – 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120729&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.029.
YAO Fuqi, CAI Huanjie, WANG Haijiang. Correlation between percentage vegetation cover and hyperspectral characteristics of winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7):156 – 162. (in Chinese)

4 KOKALY R F. Investigating a physical basis for spectroscopic estimates of leaf nitrogen concentration[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75(2): 153 – 161.

5 NGUYEN H T, LEE B W. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(4): 349 – 356.

6 SCHLEMMER M, GITELSON A, SCHEPERS J, et al. Remote estimation of nitrogen and chlorophyll contents in maize at leaf and canopy levels[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 25: 47 – 54.

7 黄双萍,洪添胜,岳学军,等. 基于高光谱的柑橘叶片氮素含量多元回归分析[J]. 农业工程学报,2013, 29(5):132 – 138.
HUANG Shuangping, HONG Tiansheng, YUE Xuejun, et al. Multiple regression analysis of leaf nitrogen content using hyperspectral technology[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5):132 – 138. (in Chinese)

8 张金恒. 基于连续统去除法的水稻氮素营养光谱诊断[J]. 植物生态学报,2006,30(1):78 – 82.
ZHANG Jinheng. Rice nitrogen nutrition diagnosis using continuum-removed reflectance[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1):78 – 82. (in Chinese)

9 张雪红,刘绍民,何蓓蓓,等. 基于包络线消除法的油菜氮素营养高光谱评价[J]. 农业工程学报,2008,24(10):151 – 155.
ZHANG Xuehong, LIU Shaomin, HE Beibei, et al. Hyperspectral evaluation of rape nitrogen nutrition using continumm removed method[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(10):151 – 155. (in Chinese)

10 张雪红,田庆久. 基于连续统去除法的冬小麦叶片氮积累量的高光谱评价[J]. 生态学杂志,2010,29(1):181 – 186.
ZHANG Xuehong, TIAN Qingjiu. Hyperspectral evaluation of nitrogen accumulation in winter wheat leaves based on continuum-removed method[J]. Chinese Journal of Ecology,2010,29(1):181 – 186. (in Chinese)

11 MUTANGA O, SKIDMORE A K, WIEREN V S. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, 57(4): 263 – 272.

12 施润和,庄大方,牛铮,等. 叶肉结构对叶片光谱及生化组分定量反演的影响[J]. 中国科学院研究生院学报,2005,22(5): 589 – 595.
SHI Runhe, ZHUANG Dafang, NIU Zheng, et al. Influence of mesophyll structure on leaf spectra and biochemical inversion [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(5):589 – 595. (in Chinese)

13 HUANG Z, TURNER B J, DURY S J, et al. Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1): 18 – 29.

14 NOOMEN M F, SKIDMORE A K, MEER F D V D, et al. Continuum removed band depth analysis for detecting the effects of natural gas, methane and ethane on maize reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 105(3): 262 – 270.

15 ECARNOT M, COMPAN F, ROUMET P. Assessing leaf nitrogen content and leaf mass per unit area of wheat in the field throughout plant cycle with a portable spectrometer[J]. Field Crops Research, 2013, 140: 44 – 50.

16 INOUE Y, SAKAIYA E, ZHU Y, et al. Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 126: 210 – 221.

17 MADAKADZE I C, STEWART K A, MADAKADZE R M, et al. Field evaluation of the chlorophyll meter to predict yield and nitrogen concentration of switchgrass[J]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22(6): 1001 – 1010.

18 LIN F F, DENG J S, SHI Y Y, et al. Investigation of SPAD meter-based indices for estimating rice nitrogen status[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(Supp.): S60 – S65.