

基于改进红边面积的夏玉米叶片氮素含量 导数光谱监测

刘 炜¹, 常庆瑞¹, 郭 曼¹, 邢东兴^{1,2}, 员永生¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 咸阳师范学院 资源环境系, 陕西 咸阳 712000)

【摘要】【目的】从夏玉米叶片一阶导数光谱中提取监测叶片氮素含量变化的敏感红边面积,为夏玉米氮素营养遥感监测提供依据。【方法】使用高光谱仪 ASD Field Spec Pro,于喇叭口期(08-05)、抽雄期(08-22)、吐丝期(09-05)和乳熟期(09-13)采集不同氮素处理水平下(0,120,240 kg/hm²)的夏玉米叶片光谱,并在红边波长范围(680~760 nm)求取一阶导数(一阶导数光谱),然后采用基于小波变换的阈值去噪方法对一阶导数光谱进行去噪处理;考察夏玉米 4 个生育时期内一阶导数光谱对不同氮素处理水平的响应特征,以及当波长范围从红边核心区域 720~740 nm 逐步扩展到 700~760 nm 时,对应包围面积与叶片氮素含量相关系数的变化情况,在此基础上分析红边面积常规计算方法的不足,并提出针对性的改进措施;在 4 个生育时期内,对改进红边面积 MS_{red} 和通过常规计算所得红边面积 S_{red} 与叶片氮素含量的相关性进行分析,并评价 MS_{red} 的效果。【结果】(1)对于不同的氮素处理水平,位于红边核心区域 720~740 nm 的一阶导数光谱值相对于红边边缘区域具有更显著的响应特征。(2)在 4 个生育时期内,当波长范围处于红边核心区域时对应红边面积值较小,但其与叶片氮素含量的相关性较高;当波长范围以 720~740 nm 为中心、2 nm 为步长扩展至 700~760 nm 时,对应包围面积值总体上呈线性增长趋势,而与其与叶片氮素含量的相关性则逐渐降低。(3)在喇叭期、抽雄期、吐丝期、乳熟期, MS_{red} 与夏玉米叶片氮素含量的相关系数分别为 0.876 8,0.827 5,0.844 2 和 0.883 8,比同生育时期 S_{red} 与叶片氮素含量的相关系数分别提高了 7.50%,5.00%,9.75% 和 5.54%。【结论】改进红边面积 MS_{red} 可以更准确地指示叶片氮素含量的变化,为采用高光谱技术快速诊断夏玉米氮素营养亏缺状况提供了新途径。

【关键词】 夏玉米;叶片氮素含量;一阶导数光谱;小波去噪;数值积分;红边面积

【中图分类号】 S127;TP79

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)04-0091-08

Monitoring of leaf nitrogen content in summer corn with first derivative of spectrum based on modified red edge

LIU Wei¹, CHANG Qing-rui¹, GUO Man¹, XING Dong-xing^{1, 2}, YUAN Yong-sheng¹

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi, 712100, China;

2 Department of Resources Environment, Xianyang Normal College, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed at extracting sensitive red edge as an indicator for leaf nitrogen content from first derivative of leaf spectrum of summer corn, and therefore provided a basis to estimate nitrogen nutrition in summer corn with remote sensing method. 【Method】 The hyper-spectral reflectance of leaf in summer corn was measured by a ASD FieldSpec Pro under 3 nitrogen levels (0, 120, 240 kg/hm²) at different growth stages, trumpet stage (08-05), tassel stage (08-22), spinning stage (09-05) and milking stage (09-13). In the red edge, 680-760 nm, first derivative of leaf spectrum was calculated and denoised by

* [收稿日期] 2009-10-23

[基金项目] 国家自然科学基金项目(30872073);国家“973”计划项目(2007CB407203)

[作者简介] 刘 炜(1978—),男,陕西咸阳市人,在读博士,主要从事遥感与 GIS 应用研究。E-mail: york5588@nwsuaf.edu.cn

[通信作者] 常庆瑞(1959—),男,陕西子洲人,教授,博士生导师,主要从事资源环境与 3S 技术应用研究。E-mail: chqr@nwsuaf.edu.cn

the threshold denoising method based on wavelet transform. After studying characteristics in first derivative of leaf spectrum resulted from different nitrogen levels, as well as correlations between leaf nitrogen content and red edges in which wavelength ranges expanded from 720-740 nm to 700-760 nm gradually, calculation method for modified red edge was built. At different growth stages, correlations between leaf nitrogen content with modified red edge (MS_{red}) and routine red edge (S_{red}) were compared to test the reliability of MS_{red} . **【Result】** (1) Within the central range of red edge (720-740 nm), characteristics in the first derivative of leaf spectrum resulted from different nitrogen levels were clearer and more stable than that at brink of red edge. (2) In the four growth stage, correlations between leaf nitrogen content and red edges in which wavelength ranged in the central range of red edge were significant, whereas the value of red edges was small; correlations between leaf nitrogen content and red edges in which wavelength ranges expanded from 720-740 nm to 700-760 nm at the speed of 2 nm decreased, whereas the value of red edges increased linearly. (3) In the four growth stages, coefficients of correlation of MS_{red} were 0.876 8, 0.827 5, 0.844 2 and 0.883 8, increasing by 7.50%, 5.00%, 9.75% and 5.54% than that of S_{red} . **【Conclusion】** Modified red edge (MS_{red}) can be used as one of the best indicators for leaf nitrogen content, further a new remote sensing descriptor to quickly diagnose the widespread illness about nitrogen nutrition in summer corn.

Key words: summer corn; leaf nitrogen content; first derivative of spectrum; wavelet denoising; numerical integration; red edge area

氮素是作物在生长过程中需求量最大的营养元素,它显著影响着作物的生长发育和产量品质。然而在土壤中氮素营养循环较快,特别是在干旱条件下,因分解、挥发、淋失、硝化和反硝化等原因,氮素营养损失较大。因此,生产上需要通过及时掌握作物氮素营养的亏缺状况,来指导适时适量的施用氮肥。氮肥施用量的变化会引起作物叶片生理及形态结构发生改变,进而导致作物叶片光谱反射特性产生相应的变化。故可通过解析作物叶片的光谱信息,快速获取其生化参数信息,对氮素营养亏缺状况进行实时跟踪监测,保障粮食的优质高产^[1-5]。

近年来,在作物氮素营养光谱监测研究中,红边参数应用越来越多。由于红光(波长 680~760 nm)被叶片叶绿素强烈吸收,以及近红外光(波长 760~1 300 nm)在叶片内部被多次散射、反射,致使植被叶片的反射波谱曲线在 680 nm 附近出现吸收“红谷”,以及在波长 760~1 300 nm 出现“近红外反射平台”,进而在波长 680~760 nm 产生一个反射率急剧上升、陡峭的“红边”。国内外学者对绿色植被这一特有的光谱特征予以高度关注,并采用红边振幅 $D\lambda_{red}$ (波长 680~760 nm 一阶导数光谱的最大值)、红边位置 λ_{red} (680~760 nm 一阶导数光谱最大值所对应的波长)和红边面积 S_{red} (波长 680~760 nm 一阶导数光谱包围的面积)来定量描述红边特征^[5]。唐延林等^[5-6]、赵春江等^[7]、程一松等^[8]、王秀珍等^[9]

对水稻、玉米和棉花 3 种作物,利用数值计算方法分析了红边参数与作物生物量和营养物质之间的关系;杨敏华等^[10]则采用倒高斯模型,分析了小麦冠层光谱红边位置与理化参数之间的相关关系;吴长山等^[11]探讨了水稻和玉米多时相叶片反射光谱数据与叶绿素含量的相关关系后认为,在波长为 730~760 nm,水稻和玉米叶片的一阶导数光谱比原始光谱数据能更好地反映叶片叶绿素含量的变化情况。以上研究表明,红边参数与叶子内部物理状态密切相关,包含了关于植被色素状态和健康状况的重要信息,可以用来监测作物在不同生育时期的氮素营养亏缺状况。

红边参数是从叶片一阶导数光谱中提取出的(即叶片原始光谱的一阶导数),但大量的试验结果表明,导数运算往往会引入一定的噪声,致使红边一阶导数光谱出现双峰或者多个极大值^[12-15],严重干扰了对红边振幅的识别以及对红边位置的准确定位,因此有必要采取适当的方法对一阶导数光谱进行去噪处理。此外,红边参数中,红边面积是波长 680~760 nm 一阶导数光谱包围的面积,由于覆盖了较多的波段数,包含了更多的光谱反射能量,其较红边振幅或红边位置受测试环境不确定因素的影响更小,具有更强的抗干扰能力、更好的稳定性。然而由于覆盖的波长范围过宽,包含了数量较多的非敏感波段,红边面积对监测目标含量变化的敏感性程度不高,致使近年来其应用受到了一定限制。

夏玉米生育期短,发育进程快,发育期内气温高、蒸散量大,受养分胁迫显著,目前采用红边参数,尤其是红边面积来监测夏玉米氮素营养状况的研究尚不多见。为此,本试验在陕西杨凌西北农林科技大学农作一站设置不同氮素处理水平的夏玉米试验小区,分别于喇叭口期、抽雄期、吐丝期和乳熟期采集夏玉米叶片光谱数据,并求取其一阶导数,在分析一阶导数光谱对不同氮素处理水平响应特征的基础上,提取表征夏玉米叶片氮素含量的敏感红边面积,旨在为遥感监测夏玉米氮素营养,以及提高光谱参数准确性和实用性提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地自然概况

试验于 2006 年在位于陕西杨凌的西北农林科技大学农作一站进行,试验地区处于秦岭北麓,渭河平原西部,东经 $108^{\circ}10'$,北纬 $34^{\circ}10'$,海拔 454.8 m,属黄土高原南部旱作区。该地区平均日照时数 2 015.2 h,年平均气温 $12\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温 $-15\sim -21\text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期约 220 d,多年平均降水量 621.6 mm,并主要集中在 7、8、9 月,春季降水偏少、干旱,年蒸发量约 1 400 mm,试验地区的气候类型属于暖温带半湿润气候。

供试土壤为红油土,质地为粉砂粘壤土,容重 1.32 g/cm^3 ,试验前测定土壤(0~40 cm)的基本肥力状况为:土壤有机质 15.85 g/kg,全氮 0.66 g/kg,碱解氮 76.65 mg/kg,速效磷 13.24 mg/kg,速效钾 189.91 mg/kg,pH 8.18。

1.2 试验设计

供试玉米品种为中单 2 号,试验设置 3 个氮素处理:0 kg/hm² (CK)、120 kg/hm² (N1)、240 kg/hm² (N2),每处理重复 2 次。氮肥以尿素(含 N 46%)为氮源,播种时施用 2/3,灌浆期追施 1/3。磷肥选用过磷酸钙(P₂O₅含量以 14%计),施用量按 112 kg/hm² 计,于播种前作为底肥均匀施入。试验区总面积为 300 m²,小区面积 2 m×4 m=8 m²,随机区组排列,株、行距分别为 33 和 50 cm,播种密度为 7 万株/hm²[16]。

1.3 项目测定及分析方法

分别于喇叭口期(08-05)、抽雄期(08-22)、吐丝期(09-05)和乳熟期(09-13),采集夏玉米穗位叶片,烘干、粉碎后,用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,用连续流动注射分析仪测定叶片氮素含量[17]。

试验采用 ASD Field Spec Pro 高光谱仪在波长

为 350~1 050 nm 连续测量夏玉米叶片反射光谱数据,光谱测量与叶片氮素含量测定同步进行,光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm。光源为能够提供平行光的 1 000 W 卤素灯,传感器探头的视场角选定为 7.5° ,在距离叶面 100 cm 垂直上方接收反射光谱数据,每次采集光谱数据前都应校正白色参考板(标准白板的反射率为 1,所测目标物光谱是无量纲的相对反射率),每一个样品叶片记录 5 条光谱信号后取平均值,然后求取一阶导数,有关求导运算参考文献[18-19]的方法进行。试验还利用数值积分方法从一阶导数光谱中提取一定波长范围的包围面积 $S(\lambda_1, \lambda_2)$ [5,15]:

$$S(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot d\lambda. \quad (1)$$

式中: λ_1, λ_2 为波长 $\lambda_1\sim\lambda_2$ nm 的上限和下限, $R(\lambda)$ 为波长 $\lambda_1\sim\lambda_2$ nm 的一阶导数光谱值。相关运算过程在软件 MATLAB 6.5 中实现。

小波变换具有多分辨率特性,可以聚焦到光谱信号的任意细节,光谱信号在多尺度下进行小波分解时,信号的细节、噪声具有不同的传递特性和表现特征,据此采用适当方法可以使光谱信号的细节和噪声有效分离。近年来,基于小波变换的阈值去噪方法在光谱分析中应用越来越多,与采用移动平均平滑数据的方法相比,该方法能够在去除噪声的同时很好地保留光谱信号锐变尖峰成分所携带的重要细节信息[20-21],因此本试验采用基于小波变换的阈值去噪方法,对喇叭口期夏玉米叶片一阶导数光谱进行去噪处理,并选取评估系数 η ,从噪声去除程度和原始光谱信息保留程度两方面对去噪结果进行评价[22-23]:

$$\eta = (\text{SNR} \times \text{SNR}^*) / 100. \quad (2)$$

式中:SNR 是将基于小波变换的阈值去噪方法应用于含噪信号得到的去噪信号信噪比,其值越高,去噪信号的噪声越少;SNR* 是将基于小波变换的阈值去噪方法应用于理想原始光谱信号得到的生成信号信噪比,其值越高,原始信号信息丢失越少。使 η 值最大的去噪方法具有最好的去噪效果。

表 1 显示了采用不同类型小波母函数和分解层数进行小波去噪后得到的评估系数 η 。经对比分析后,本试验采用“Symlet 8”作为小波母函数,分解 3 层,选择“HeurSure”阈值选取规则和“sln”阈值调整方法,对夏玉米叶片一阶导数光谱进行去噪处理。

表 1 采用不同类型小波母函数和分解层数进行小波去噪后的评估系数 η Table 1 Comparison of the η value with different kinds of mother wavelets & decomposing levels

小波母函数 Mother wavelet	分解层数 Decomposing level			
	2	3	4	5
Daubechies 4	10.461 1	11.583 2	12.925 5	12.687 4
Daubechies 7	12.504 9	14.863 5	14.414 6	14.169 4
Daubechies 9	13.467 3	15.156 6	14.795 2	14.326 5
Symlet 5	11.892 6	13.754 3	13.204 7	13.466 2
Symlet 8	13.624 4	15.525 3	15.190 6	15.208 3
Symlet 9	12.653 2	15.172 1	14.957 4	14.592 1
Coiflet 2	13.332 1	13.677 3	14.054 9	13.444 3
Coiflet 3	13.356 6	14.562 6	15.363 2	15.134 2

2 结果与分析

2.1 红边范围内不同氮素处理对夏玉米叶片一阶导数光谱响应特征的影响

试验使用高光谱仪 ASD Field Spec Pro 于喇叭

口期、抽雄期、吐丝期和乳熟期采集不同氮素处理水平下的夏玉米叶片光谱并求取一阶导数,之后采用基于小波变换的阈值去噪方法进行去噪处理,结果如图 1 所示。

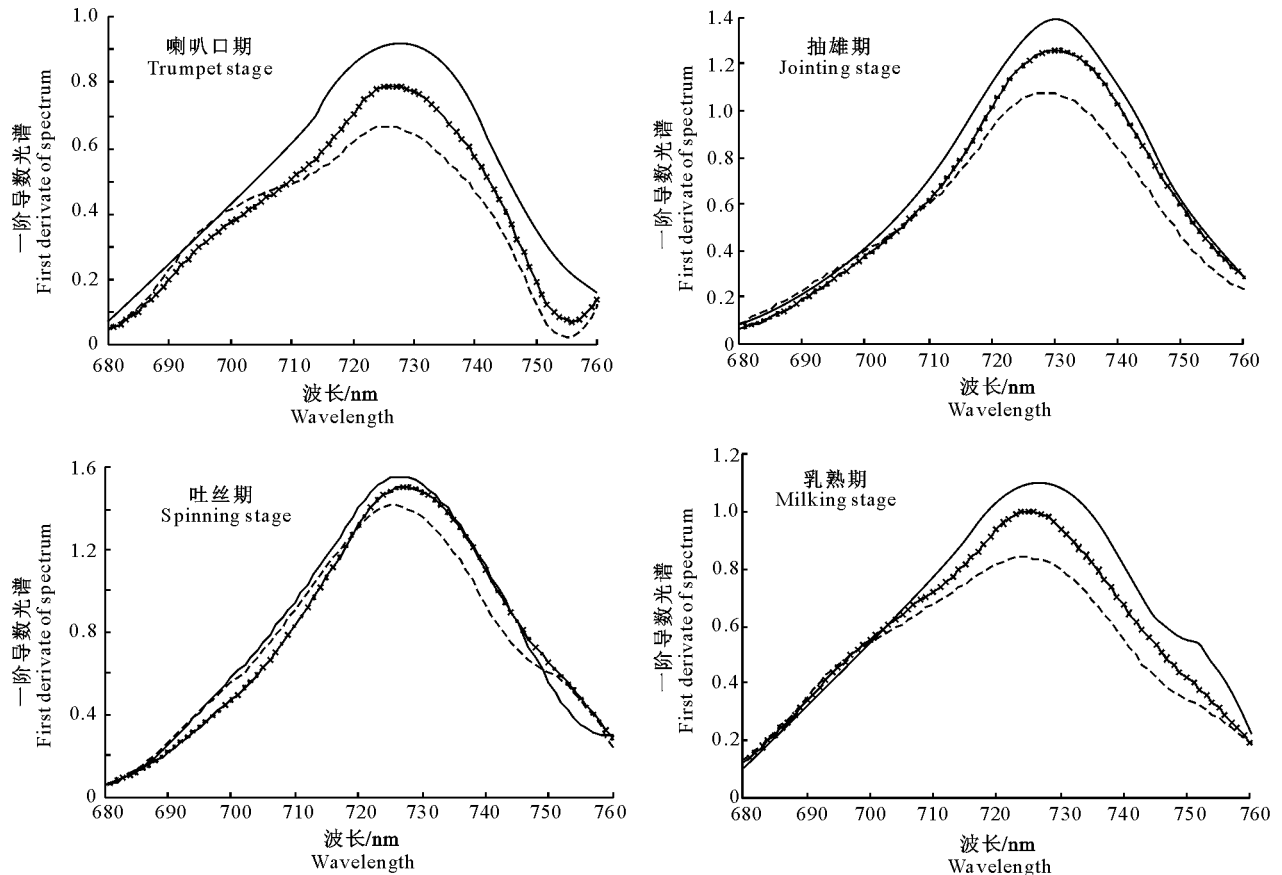


图 1 不同氮素处理对不同生育期夏玉米叶片一阶导数光谱的影响

----, CK; - · -, N1; —, N2

Fig. 1 First derivative of leaf spectrum at different growth stages under different nitrogen levels

从图 1 可以看出,去噪后的一阶导数光谱消除了噪声的遮蔽干扰,趋势走向清晰可辨,对叶片氮素含量变化的响应特征表现的十分明显。4 个生育时期内,不同氮素处理下一阶导数光谱均呈开口向下

的喇叭口状,其中位于红边核心区域 720~740 nm 的一阶导数光谱值位于喇叭口的顶端,其整体幅度在 4 个生育时期内随氮素处理水平的提高而提高,具有十分明显的分异表现。3 个氮素处理中,CK 与

N1、N2处理的夏玉米叶片一阶导数光谱的差异大于N1与N2处理之间的差异。对于同一氮素处理,波长720~740 nm的一阶导数光谱值随生育时期的推进呈现出先上升后下降的变化趋势,从喇叭口期到吐丝期逐步上升,至吐丝期达到最大值,之后则快速下降,其中CK处理的夏玉米叶片一阶导数光谱的下降幅度最大,而N2处理的下降幅度则相对较小。

从图1还可以看出,当波长从720 nm向红边短波边缘680 nm移动时,夏玉米叶片一阶导数光谱值下降很快,同时因氮素处理水平不同而引起的光谱响应差异也在逐渐缩小;当波长从740 nm向红边长波边缘760 nm移动时,表现出了类似的光谱响应特征。通过以上分析可以发现,对于不同的氮素处理水平,位于红边核心区域720~740 nm的一阶导数光谱值较红边边缘区域具有更明显的分异表现。

2.2 不同氮素处理下夏玉米4个生育时期红边面积的改进分析

试验采用数值积分的方法,计算了4个主要生育时期不同氮素处理水平下的红边面积 S_{red} ,并对不同氮素处理水平下的红边面积 S_{red} 与叶片氮素含量进行相关分析,可知喇叭口期、抽雄期、吐丝期和乳熟期的相关系数分别为0.815 6,0.788 0,0.769 2和0.827 5,均未达0.01极显著水平,表现不够理想。这是因为红边面积 S_{red} 覆盖的波长范围过宽,包含了数量较多的非敏感波段,导致其对叶片氮素含量变化的敏感性不高。从图1可以发现,这些非敏感波段都大致位于红边的长波边缘和短波边缘,为此本试验拟考察当波长范围从较小的区间逐步扩展至680~760 nm时,对应一阶导数光谱包围面积的变化趋势,以及这些包围面积与叶片氮素含量相关系数的变化情况,在此基础上分析红边面积常规计算方法的不足之处,并提出针对性的改进措施,以增强改进红边面积对叶片氮素含量变化的敏感性;此外,在提出改进方法的同时还应考虑红边面积应具有一定的波段覆盖数量,以维持良好的稳定性。

对图1进行分析可知,对于不同的氮素处理水平,位于红边核心区域720~740 nm的一阶导数光谱值相对于红边边缘区域,具有更显著的响应特征,因此可以进一步深入考察当波长范围从红边核心区域向边缘区域逐步扩展时,对应包围面积与叶片氮素含量相关系数的变化趋势,为改进红边面积的计算方法提供依据。为此,本试验将波长范围(720, 740), (719, 741), (718, 742), ..., (700, 760)排成一

个序列,并在4个生育时期不同氮素处理水平下求取该序列每一个波长范围对应的包围面积 $S_{m,m}$ (720-i, 740+i),其中 $m=1, 2, 3, 4$,分别代表喇叭口期、抽雄期、吐丝期和乳熟期; $n=1, 2, 3$,分别代表CK、N1和N2; $i=0, 1, 2, \dots, 20$ 。经计算可得到4个生育时期不同氮素处理对应的21个包围面积,这些包围面积的波长范围以720~740 nm为中心,每次同时分别在短波方向递减1 nm及在长波方向增加1 nm,逐步扩展至700~760 nm。图2显示了以喇叭口期为例,当波长从720~740 nm逐步扩展至700~760 nm时,对应包围面积的变化趋势,即波长范围覆盖宽度以20 nm为起点,2 nm为步长,逐步增至40 nm时,对应包围面积的变化趋势,其他3个生育时期的变化趋势与此基本一致。此外,本试验将4个生育时期不同氮素处理水平下的包围面积与叶片氮素含量进行相关性分析,结果如图3所示。

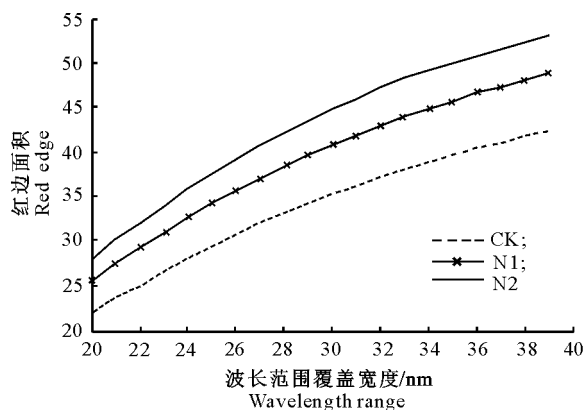


图2 夏玉米喇叭口期不同氮素处理下波长范围逐步扩展时红边面积的变化趋势

Fig. 2 Red edges corresponding to expending wavelength ranges at the trumpet stage under different nitrogen levels

结合图2与图3可以看出,在喇叭口期,当波长范围处于红边核心区域720~740 nm时,对应包围面积值较小,但其与叶片氮素含量的相关性较高;当波长范围以720~740 nm为中心逐步扩展至700~760 nm时,对应包围面积值大致呈线性增长趋势,而其与叶片氮素含量的相关系数则以线性速率呈逐渐下降的趋势。其他生育时期相关系数的下降趋势与此大致相同(除了抽雄期)。考虑到红边核心区域的一阶导数光谱值对于不同氮素处理具有显著、稳定的响应特征;当波长范围从红边核心区域向红边边缘区域逐步扩展时,对应包围面积与叶片氮素含量的相关系数呈下降趋势,故认为可以通过提升红边核心区域对应包围面积,在红边面积中对叶片氮

素含量变化的解释权重,以增强红边面积对叶片氮素含量变化的敏感程度。

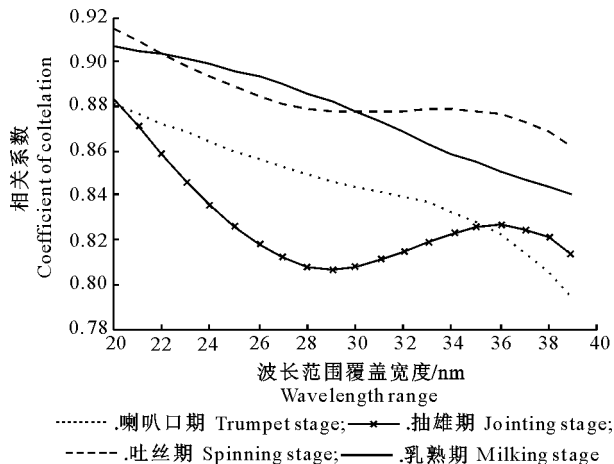


图 3 夏玉米不同生育时期波长范围逐步扩展时红边面积与叶片氮素含量的相关关系

Fig. 3 Correlation between leaf nitrogen content and red edges corresponding to expanding wavelength ranges at different stages

2.3 不同氮素处理下夏玉米 4 个生育时期改进红边面积的计算

红边面积 S_{red} 是指波长 680~760 nm 一阶导数光谱值包围的面积,常规计算是以(680,760)为积分区间,通过数值积分运算求取该面积。显然在常规计算方法当中, S_{red} 对每个波段一阶导数光谱值都赋予了等同的权重,即通过常规计算方法得到的红边面积 S_{red} ,只要波长范围的覆盖宽度相同,其对应包围面积对叶片氮素含量变化的解释权重是相同的。根据以上分析,本试验引入以下公式计算改进的红边面积 MS_{red} :

$$MS_{red} = \frac{1}{21} \cdot \sum_{i=0}^{20} S(720-i, 740+i) = \frac{1}{21} [S(720, 740) + S(719, 741) + S(718, 742) + \dots + S(700, 760)] \quad (3)$$

式中: $S(720-i, 740+i)$ 是在波长(720-i, 740+i)内对一阶导数光谱进行的数值积分。从式(3)的构造中可以看出,当波长范围从 700~760 nm 向红边核心区域逐步收缩时,其对应的包围面积被相加的次数不断增加,其中红边核心区域 720~740 nm 对应的包围面积 $S(720, 740)$ 被相加了 21 次。表明在 MS_{red} 中,波长 720~740 nm 一阶导数光谱值对叶片氮素含量变化的解释权重是 700 或 760 nm 一阶导数光谱值的 21 倍;与 S_{red} 相比,在 MS_{red} 中 $S(720, 740)$ 对叶片氮素含量变化的解释权重得到

了最大幅度的提升。同理,在 MS_{red} 中,其他波段与 720~740 nm 距离越近,该波段一阶导数光谱值对叶片氮素含量变化的解释权重也越大。本试验将夏玉米 4 个生育时期不同氮素处理下改进红边面积 MS_{red} 与叶片氮素含量进行了相关性分析,结果显示,喇叭口期、抽雄期、吐丝期和乳熟期的相关系数分别为 0.876 8, 0.827 5, 0.844 2 和 0.883 8,经检验可知,除抽雄期外,其他 3 个生育时期的相关性均达到了 0.01 极显著水平,比同生育时期 S_{red} 与叶片氮素含量的相关系数分别提高了 7.50%, 5.00%, 9.75% 和 5.54%。表明 MS_{red} 可以更准确地用来指示不同氮素处理夏玉米叶片氮素含量的变化情况。

3 结论与讨论

本试验求取了红边 680~760 nm 内 4 个主要生育时期下夏玉米叶片的一阶导数光谱,并采用基于小波变换的阈值去噪方法对其进行去噪处理,在深入考察一阶导数光谱对不同氮素处理响应特征的基础上,分析红边面积常规计算方法的不足之处,提出了针对性的改进措施,然后提取了对夏玉米叶片氮素含量变化反应敏感的改进红边面积,得出如下结论:

(1)在夏玉米叶片一阶导数光谱分析中,将基于小波变换的阈值去噪方法与求导运算结合,可以有效地去除一阶导数光谱中的噪声,提高光谱分析精度。

(2)对于不同的氮素处理,位于红边核心区域 720~740 nm 的一阶导数光谱值相对于红边边缘区域,具有更明显的分异表现及更稳定的响应特征。在夏玉米 4 个生育时期内,当波长范围处于红边核心区域时,对应包围面积值较小,但其与叶片氮素含量的相关性较高;当波长以 720~740 nm 为中心,2 nm 为步长逐步扩展至 700~760 nm 时,对应包围面积值大致呈线性增长趋势,而其与叶片氮素含量的相关系数则呈逐渐下降的趋势。

(3)在喇叭期、抽雄期、吐丝期、乳熟期, MS_{red} 与夏玉米叶片氮素含量的相关系数分别为 0.876 8, 0.827 5, 0.844 2 和 0.883 8,除抽雄期外,相关性均达到 0.01 极显著水平,比同生育时期 S_{red} 与叶片氮素含量的相关系数分别提高了 7.50%, 5.00%, 9.75% 和 5.54%。表明 MS_{red} 与叶片氮素含量具有更高的相关性,可以用来更准确地指示叶片氮素含量的变化。

除红边面积外,从夏玉米叶片一阶导数光谱中

还可以提取蓝边面积(430~480 nm 一阶导数光谱包围的面积)、绿边面积(540~590 nm 一阶导数光谱包围的面积)等^[1,2,12]。同样,可以通过深入地分析它们的光谱响应特征,提出适应其自身特点的改进方法,以增强其对叶片氮素含量变化的敏感性。此外,还可以借鉴 RVI 或 NDVI 的构造原理,将改进后的红边面积、蓝边面积和绿边面积组合,以获取具有更高准确性和可靠性的植被指数,为夏玉米氮素营养亏缺状况的快速诊断提供更实用有效的途径,这将是本试验下一步工作的重点。

[参考文献]

- [1] 冯 伟,朱 艳,田永超,等. 基于高光谱遥感的小麦冠层叶片色素密度监测 [J]. 生态学报, 2008, 28(10): 1094-1194.
Feng W, Zhu Y, Tian Y C, et al. Monitoring canopy leaf pigment density in wheat with hyper spectral remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 1094-1194. (in Chinese)
- [2] 冯 伟,姚 霞,田永超,等. 基于高光谱遥感的小麦糖氮比监测 [J]. 中国农业科学, 2008, 41(6): 1630-1639.
Feng W, Yao X, Tian Y C, et al. Monitoring the sugar to nitrogen ratio in wheat leaves with hyper spectral remote sensing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(6): 1630-1639. (in Chinese)
- [3] Patteye, Strachan I B, Boisvert J B, et al. Detecting effects of nitrogen rate and weather on corn growth using micrometeorological and hyper-spectral reflectance measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108: 85-89.
- [4] Strachan I B, Patteye, Boisvert J B. Impact of nitrogen and environment conditions on corn as detected by hyper-spectral reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80: 213-224.
- [5] 唐延林,王人潮,黄敬峰,等. 不同供氮水平下水稻高光谱及其红边特征研究 [J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 185-192.
Tang Y L, Wang R C, Huang J F, et al. Hyperspectral data and their relationships correlative to the pigment contents for rice under different nitrogen support level [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(2): 185-192. (in Chinese)
- [6] 唐延林,黄敬峰,王秀珍,等. 水稻、玉米、棉花的高光谱及其红边特征比较 [J]. 中国农业科学, 2004, 37(1): 29-35.
Tang Y L, Huang J F, Wang X Z, et al. Comparison of the characteristics of hyper-spectra and the red edge in rice, corn and cotton [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(1): 29-35. (in Chinese)
- [7] 赵春江,黄文江,王纪华,等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(8): 980-987.
Zhao C J, Huang W J, Wang J H, et al. Studies on red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(8): 980-987. (in Chinese)
- [8] 程一松,胡春胜,王 成,等. 养分胁迫下的夏玉米生理反应与光谱特征 [J]. 资源科学, 2001, 23(6): 54-58.
Cheng Y S, Hu C S, Wang C, et al. Physiological response and spectral characteristics of summer corn under nutrient stress condition [J]. Resources Science, 2001, 23(6): 54-58. (in Chinese)
- [9] 王秀珍,王人潮,李云海,等. 不同氮素营养水平的水稻冠层光谱红边参数及其应用研究 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2001, 27(3): 301-306.
Wang X Z, Wang R C, Li Y M, et al. Study on red edge characteristics of rice spectral caused by nitrogen level [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci Edition, 2001, 27(3): 301-306. (in Chinese)
- [10] 杨敏华,刘良云,刘团结,等. 小麦冠层理化参量的高光谱遥感反演试验研究 [J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 316-321.
Yang M H, Liu L Y, Liu T J, et al. Research on a method to retrieve biophysical and biochemical parameters of wheat canopy with hyper-spectral remote sensing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(4): 316-321. (in Chinese)
- [11] 吴长山,童庆喜,郑兰芬,等. 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 31-37.
Wu C S, Tong Q X, Zheng L F, et al. Correlation analysis between spectral data and chlorophyll of rice and maize [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8(1): 31-37. (in Chinese)
- [12] 蒋金豹,陈云浩,黄文江. 用高光谱微分指数监测冬小麦病害的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(12): 2475-2479.
Jiang J B, Chen Y H, Huang W J. Using hyper-spectral derivative index to monitor winter wheat disease [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(12): 2475-2479. (in Chinese)
- [13] 邢东兴,常庆瑞. 基于光谱分析的果树叶片微量元素含量估测研究-以红富士苹果树为例 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 143-150.
Xing D X, Chang Q R. Research on predicting the Fe, Mn, Cu, Zn, contents in fruit trees, fresh leaves by spectral analysis-Red Fuji apple tree as an example [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(11): 143-150. (in Chinese)
- [14] 薛利红,杨林章. 采用不同红边位置提取技术估测蔬菜叶绿素含量的比较研究 [J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 165-169.
Xue L H, Yang L Z. Comparative study on estimation of chlorophyll content in spinach leaves using various red edge position extraction techniques [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 165-169. (in Chinese)
- [15] 张 霞,刘良云,赵春江,等. 利用高光谱遥感图像估算小麦氮含量 [J]. 遥感学报, 2003, 7(3): 176-182.
Zhang X, Liu L Y, Zhao C J, et al. Estimating wheat nitrogen concentration with high spectral resolution image [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(3): 176-182. (in Chinese)
- [16] 郭 曼,常庆瑞,曹晓瑞. 不同氮营养水平与夏玉米光谱特性关系初报 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(11): 123-129.

- Guo M, Chang Q R, Cao X R. Initial study of different nitrogen levels on summer corn's spectral characteristics [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(11): 123-129. (in Chinese)
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000; 14-38.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000; 14-38. (in Chinese)
- [18] 李民赞, 韩东海, 王 秀. 光谱分析技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006; 176-228.
- Li M Z, Han D H, Wang X. Spectral analysis technique and application [M]. Beijing: Science Press, 2006; 176-228. (in Chinese)
- [19] 蒲瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000; 52-207. (in Chinese)
- Pu R L, Gong P. Hyper-spectral remote sensing and its applications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000; 52-207. (in Chinese)
- [20] 王学顺, 戚大伟, 黄安民. 基于小波变换的木材近红外光谱去噪研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2059-2062.
- Wang X S, Qi D W, Huang A M. Study on denoising near infrared spectra of wood based on wavelet transform [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2059-2062. (in Chinese)
- [21] 黄明祥, 王 珂, 史 舟, 等. 土壤高光谱噪声过滤评价研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(3): 722-725.
- Huang M X, Wang K, Shi Z, et al. Quantitative evaluation of soil hyper spectra denoising with different filters [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(3): 722-725. (in Chinese)
- [22] 吕端兰, 吴铁军, 于 玲. 采用不同小波母函数的阈值去噪方法性能分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(7): 826-829.
- Lv D L, Wu T J, Yu L. Performance analysis of threshold denoising via different kinds of mother wavelets [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2004, 24(7): 826-829. (in Chinese)
- [23] 田高友, 袁洪福, 褚小立, 等. 结合小波变换与微分法改善近红外光谱分析精度 [J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(4): 516-520.
- Tian G Y, Yuan H F, Chu X L, et al. Near infrared Spectra (NIR) analysis of octane number by wavelet denoising-derivative method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(4): 516-520. (in Chinese)

(上接第 90 页)

- [7] 刘国顺. 烟草栽培学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- Liu G S. Tobacco cultivation [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999. (in Chinese)
- [9] 国家烟草专卖局. YC/T 142-1998 中华人民共和国烟草行业标准: 烟草农艺性状调查方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- State Tobacco Monopoly Bureau. YC/T 142-1998 Occupation standard of tobacco of the people's republic of china: Investigating methods of agronomical character of tobacco [S]. Beijing: Standards Press of China, 1998. (in Chinese)
- [10] 刘 军, 温学森, 郎爱东. 植物根系分泌物成分及其作用的研究进展 [J]. 食品与药品, 2007, 9(3): 63-65.
- Liu J, Wen X S, Lang A D. Progress in components and effects of plant root exudates [J]. Food and Drug, 2007, 9(3): 63-65. (in Chinese)
- [11] 郗红建, 常 江, 张自立, 等. 研究植物根系分泌物的方法 [J]. 植物生理学通讯, 2003, 39(1): 56-60.
- Gao H J, Chang J, Zhang Z L, et al. Methods for investigating root exudates of plants [J]. Plant Physiology Communications, 2003, 39(1): 56-60. (in Chinese)
- [12] Bertin C, Yang X, Weston L A. The role of root exudates and allelochemicals in the Rhizosphere [J]. Plant Soil, 2003, 256(1): 67-83.
- [13] 肖协忠, 吴帼英, 王宝华, 等. 烟草化学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997; 50-52, 65.
- Xiao X Z, Wu G Y, Wang B H, et al. Tobacco chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997; 50-52, 65. (in Chinese)