农业信息与电气技术。

中图分类号: TP701

162

红边位置改进算法的冬小麦叶绿素含量反演

钱彬祥^{1,2,3},黄文江^{2,3*},叶回春^{2,3},孔维平⁴,

任 淯^{1,3}, 邢乃琛^{1,3}, 焦全军^{2,3}

(1. 中国科学院大学,北京 100049; 2. 海南省地球观测重点实验室,三亚 572029; 3. 中国科学院空天信息创新研究院,数字 地球重点实验室,北京 100094; 4. 中国科学院空天信息创新研究院,定量遥感信息技术重点实验室,北京 100094)

摘 要: 植被反射光谱的红边位置对叶绿素含量高度敏感,利用遥感数据建立基于红边位置的作物叶绿素含量反演模型, 可实现大范围作物及时的长势监测。该研究以冬小麦为研究对象,在学习 6 种经典红边位置求解算法的基础上,提出牛 顿-切比雪夫插值法和牛顿八点插值法 2 种改进红边位置求解算法。根据不同算法的红边位置分布特征综合分析了改进算 法的优缺点,并在此基础上建立基于红边位置的冬小麦叶绿素含量反演模型。结果表明,与传统算法相比,2 种改进算 法均显著改善了双峰现象和红边位移,且基于新算法的模型预测值与叶绿素含量实测值的决定系数>0.619,较最大一阶 导数法提高了 5.024%~10.480%,具有更高的精度。同时,在 2 种改进算法中,牛顿八点插值法具有更高的稳定性与实 用性。研究结果为植被理化参数反演与农业生产应用提供理论与技术支撑。

关键词: 算法; 遥感; 模型; 冬小麦; 叶绿素反演; 牛顿-切比雪夫插值法; 牛顿八点插值法; 红边位置 doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.019

文献标志码: A 文章编号: 1002-6819(2020)-23-0162-09

钱彬祥,黄文江,叶回春,等. 红边位置改进算法的冬小麦叶绿素含量反演[J]. 农业工程学报,2020,36(23):162-170. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.019 http://www.tcsae.org

Qian Binxiang, Huang Wenjiang, Ye Huichun, et al. Inversion of winter wheat chlorophyll contents based on improved algorithms for red edge position[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(23): 162-170. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.23.019 http://www.tcsae.org

0 引 言

叶绿素含量是一种综合反映作物受外界环境胁迫情况、光合作用能力强弱和新陈代谢旺盛程度的非常敏感的指示剂^[1-2]。研究表明,作物反射光谱的红边位置(Red Edge Position, REP)与叶绿素含量具有相当高的相关关系,是作物生理生化参数遥感反演的一个重要指标^[3-5]。建立基于红边位置的作物叶绿素含量反演模型,为实现大面积作物及时的长势监测提供了一种快速而实用的方法^[6]。红边波段一般认为在可见光波段的 660~770 nm 范围内,由于带宽较宽,不利于其与作物理化参数相关模型的建立,所以通常用位于红光-近红外波段作物反射光谱的突变点来精确定位红边位置^[7-8]。

目前,红边位置求解算法可分为基于微分插值和基于曲线拟合两大类。基于曲线拟合思想的算法提出的更早,Miller等^[3]提出倒高斯模型法(Red Edge Position calculated by Inverted Gaussian, REP_IG),即用一条倾斜的倒高斯曲线近似红边波段范围内的作物反射光谱,

收稿日期: 2020-09-24 修订日期: 2020-11-23

作者简介: 钱彬祥, 博士生, 主要从事植被定量遥感及应用研究。

Email: 2789281754@qq.com

※通信作者:黄文江,博士,研究员,博士生导师,主要从事植被定量遥感 及应用研究。Email: huangwj@radi.ac.cn

该模型较为复杂,需先经等价变换才能进行下一步解算。 为了简化计算, Demetriades-Shah 等^[9]用红边波段范围内 作物反射光谱的一阶导数最大值对应的波段位置确定红 边位置。Dawson等^[10]研究表明最大一阶导数法(Red Edge Position calculated by Maximum First Derivative, REP MFD)提取红边位置的精度取决于传感器平台的波 段范围和光谱分辨率,为减少红边位置求解精度对光谱 分辨率的过度依赖,提出了拉格朗日三点内插法(Red Edge Position calculated by Lagrange, REP LAGR) . Clevers 等^[11]认为拉格朗日三点内插法只适用于粗分辨率 光谱,且不能解决红边位置求解过程中存在双峰现象 (bimodal phenomenon, BP) 的问题,为此提出了线性四 点内插法(Red Edge Position calculated by Linear Four-Point Insert, REP LFPI),该方法是最简单、易行 的红边位置求解算法, 只需要 4 个波段和简单的线性插 值运算。此外,Pu等^[12]采用5次多项式拟合作物反射光 谱,多项式一阶差分最大值对应的波段位置即为红边位 置,并利用实测光谱数据验证了该方法的合理性。Li等[13] 开展了拉格朗日三点内插法和多项式拟合法(Red Edge Position calculated by Polynomial fitting, REP POLY) 的 精度对比研究,发现拉格朗日三点内插法的精度取决于 波段组合,且对噪音尤为敏感,而多项式拟合法的适用 性更高、稳定性更强。Cho 等^[14]为减少双峰现象带来的 不稳定性的影响,提出了线性外推法(Red Edge Position calculated by Line Extrapolate, REP LE)。陈西亮等^[4]

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFD0300601);国家自然科学基金 青年科学基金项目(41871339,41901369);国家高层次人才特殊支持计划 项目(黄文江)

将牛顿插值法(Red Edge Position calculated by Newton Interpolation, REP_NI)应用于红边位置求解过程,利用 6个等距的红边波段反射光谱数据内插出红边位置,求解 精度位于倒高斯模型法和线性四点内插法之间。陈西亮 等^[4]的研究中存在以下不足:1)选取 ENVI 自带的 USGS 植被波谱库中的矮松树、山杨树、草坪和蓝云杉 4 种植 被的 4 条反射光谱做分析,数据量过少,分析结果受偶 然误差和样本选取的影响较大,且与实际生产相脱离, 研究缺乏普适性;2)由于缺乏实验数据,无法分析不同 算法求解出的红边位置的分布特征(如双峰现象、红边 位移),仅利用红边位置的相对误差来衡量算法的优劣 缺乏科学性;3)没有将新算法与作物生理生化参数遥感 反演相结合,无法检验新算法的实用性。

与传统算法相比,牛顿插值法具有明显优势。传统 算法普遍对传感器提出光谱分辨率高、采样均匀的要求, 且求解的红边位置存在双峰现象、红边位移 (Displacement of Red Edge Position, REPD)和精度不足 等缺点。牛顿插值法属于微分插值方法,相较于曲线拟 合方法需要的数据量更少,并且能够完全保留原始数据, 以及引入差分(Difference, DF)和差商(Difference Quotient, DFQ)的概念,可以计算非等距节点的光谱反 射率。同时,与拉格朗日插值法相比较,牛顿插值法不仅 克服了每增加一个节点整个计算必须重新开始的缺点,而 且可以节省乘、除法运算的次数,提高了计算速度^[15]。

鉴于牛顿插值法的优越性以及前人研究工作还有待 进一步完善,本研究以冬小麦为实验对象,采用数值分 析技术,在学习经典算法的基础上提出 2 种改进的红边 位置求解算法:牛顿八点插值法(Red Edge Position calculated by Newton Eight-Point Interpolation, REP_NEPI)和牛顿-切比雪夫插值法(Red Edge Position calculated by Newton-Chebyshev-Node Interpolation, REP_NCNI),并进行两者的综合比较,拟建立更高精度 的基于红边位置的冬小麦叶绿素含量反演模型。研究结 果可以为植被理化参数遥感反演增添新的理论依据,为 农业工程领域的冬小麦叶绿素含量监测、长势评估等实 际生产应用提供新的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验设计

研究区位于北京市昌平区小汤山国家精准农业示基 地(40°11′N,116°26′E),气候类型为暖温带半湿润大 陆季风气候。本研究选取 2002—2003 年和 2018—2019 年小麦生长季内不同品种、不同肥水处理下的冬小麦连 续开展了野外测量试验,在其关键生育期采集常规农学 数据与近地高光谱数据。具体处理方式如下:

1)小麦品种:2002—2003年选用3种不同株型、籽粒品质的冬小麦,包括株型紧凑、籽粒品质弱筋型的"京411",株型松散、籽粒面筋质量好的"中优9507"和株型与籽粒品质中间型的"京冬8"^[7-8]。2018—2019年选用株型半紧凑、籽粒面筋质量好的"轮选167"和株型紧凑、籽粒品质中间型的"京冬18"。

2) 肥水处理: 2002-2003 年的研究区共有 48 个肥 水处理小区,各小区面积为32.4 m×30 m,在试验区内对 不同品种的冬小麦分别进行肥水胁迫处理。4个梯度施肥 处理: 0N 处理, 返青期至成熟期不施肥; ②1N 处理, 返 青期和拔节期各追施尿素 50 kg/hm²;8N 处理, 返青期和 拔节期各追施尿素 200 kg/hm²;④14N 处理,返青期和拔 节期各追施尿素 350 kg/hm^{2[7-8]}。4 个梯度供水处理: 0 水 处理,全生育期不灌溉;②1 水处理,全生育期灌水 225 m³/hm²; 2 水处理, 全生育期灌水 450 m³/hm²; 3 水 处理,全生育期灌水 675 m³/hm^{2[7-8]}。2018—2019 年的研 究区共有 32 个肥水处理小区,各小区面积为 10 m×15 m, 在试验区内正常供水,对不同品种的冬小麦进行肥胁迫 处理: N0 处理, 返青期至成熟期不施肥; N1 处理, 基肥 (2018年9月) 97.5 kg/hm²和拔节期(2019年4月)追 肥 97.5 kg/hm²; N2 处理, 基肥 (2018 年 9 月) 195 kg/hm² 和拔节期(2019年4月)追肥 195 kg/hm²; N3 处理,基 肥(2018年9月)292.5 kg/hm²和拔节期(2019年4月) 追肥 292.5 kg/hm²。

3)测定项目:不同生育时期的冠层光谱反射率、配套的数码照片和包括叶绿素含量(mg/g)、叶面积指数 在内的常规田间调查农学参数。

4)测定时期:包括返青期(3月25日前后)、拔节 期(4月15日前后)、挑旗期(4月25日前后)、开花 期(5月10日前后)、灌浆中期(5月20日前后)、灌 浆后期(5月30日前后)在内的冬小麦6个关键生育期。 通过询问试验区内经验丰富的技术人员,获取试验区内 该年度冬小麦的长势情况、降水量和气温变化等信息, 并就此制定具体的测量时间与试验方案。

1.1 光谱和农学参数测定

小麦冠层光谱采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec FR 光谱辐射仪测定^[16],选取晴朗无云、风力较小的 10:30-14:00(北京时间)进行,采样范围为 350~2 500 nm,采样间隔为 1 nm。测定时,探头在距离冠层 约 1 m 处垂直向下观测,测定前后用标准参考板校正,每个点重复测定 20 次,取全部测数的均值作为该点的冠 层光谱反射率。同时,在目标区域附近利用打孔器获取 测试样品,称量后在黑暗环境下浸泡于 95%乙醇溶液中 24~48 h,使用 UV765PC 型分光光度计测定溶液在可见 光 440、649 和 665 nm 处的吸光度值,并由此计算叶绿 素含量(mg/g)。

1.3 红边位置求解算法

1.3.1 传统的红边位置求解算法

传统的红边位置求解算法主要有以下6种:

1) 最大一阶导数法

在红边波段范围内,植被光谱曲线反射率的一阶差 分最大值对应的波长位置即为红边位置^[17],其计算如式 (1)和式(2)所示:

$$DR_{\lambda_i} = (R_{\lambda_{i,1}} - R_{\lambda_i}) / \Delta_{\lambda} \tag{1}$$

$$\lambda_{\text{REP}} = \lambda_i(\max(DR_{\lambda_i})), \ \lambda \in 660 \sim 770 \text{ nm}$$
(2)

式中R₄和R₄分别为波长位于i和i+1处的光谱反射率;

 Δ_{λ} 波长变化的步长; DR_{λ} 为波长位于 i 和 i+1 处的中点位 置对应反射率的一阶差分值; λ_{REP} 为红边位置, nm; λ 为 传感器波长,nm。

2) 倒高斯模型法

采用一条倾斜的倒高斯曲线近似红边范围内的植被 反射光谱, 倒高斯曲线函数表达式^[18]如式(3)和式(4) 所示:

$$R(\lambda) = R_s - (R_s - R_0) \exp\left(-\frac{(\lambda_0 - \lambda)^2}{2\sigma^2}\right)$$
(3)
$$\lambda_{\text{REP}} = \lambda_0 + \sigma$$
(4)

式中 R(A)为倒高斯函数; R。为植被光谱反射率在红边波 段范围内的最大值; R₀、λ₀分别为红边位置范围内植被光 谱反射率最小值及其所对应的波长位置;σ为高斯模型标 准差系数,nm。

3) 拉格朗日三点内插法

拉格朗日三点内插法是一种适用于粗采样光谱的三 点插值算法,具体原理是利用二次多项式拟合植被反射 率光谱一阶导数^[16],如式(5)和式(6)所示:

$$D_{\text{Ref}} = \frac{(\lambda - \lambda_i)(\lambda - \lambda_{i+1})}{(\lambda_{i-1} - \lambda_i)(\lambda_{i-1} - \lambda_i)} D_{\lambda_{i-1}} + \frac{(\lambda - \lambda_{i-1})(\lambda - \lambda_{i+1})}{(\lambda_{i-1} - \lambda_{i+1})(\lambda_i - \lambda_{i+1})} D_{\lambda_i} + \frac{(\lambda - \lambda_{i-1})(\lambda - \lambda_i)}{(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})(\lambda_{i+1} - \lambda_i)} D_{\lambda_{i+1}}$$

$$(5)$$

$$\lambda_{\text{REP}} = \frac{A(\lambda_i + \lambda_i) + B(\lambda_{i-1} + \lambda_{i+1}) + C(\lambda_{i-1} + \lambda_i)}{2(A + B + C)} \quad (6)$$

式中 D_{Ref} 为植被光谱反射率一阶导数值; λ_{i-1} 、 λ_i 、 λ_{i+1} 分 别代表在 *i*-1、*i* 和 *i*+1 处的波长位置; D_{λ,1}、 D_λ、 D_{λ,1}、 分别为波长位置在 i-1、i 和 i+1 处的光谱反射率一阶导 数值; $A = \frac{D_{\lambda_{i-1}}}{(\lambda_{i-1} - \lambda_i)(\lambda_{i-1} - \lambda_{i+1})}$, $B = \frac{D_{\lambda_i}}{(\lambda_i - \lambda_{i-1})(\lambda_i - \lambda_{i+1})}$, $C = \frac{D_{\lambda_{i+1}}}{(\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})(\lambda_{i+1} - \lambda_i)}$

4) 线性四点内插法

其假设红边波段范围内的植被反射率光谱近似为一 条直线,红边位置由4个特征点(R₆₇₀、R₇₀₀、R₇₄₀和 R₇₈₀) 的反射率值内插得到^[19],如式(7)和式(8)所示:

$$R_{\rm rep} = \frac{R_{670} + R_{780}}{2} \tag{(7)}$$

$$\lambda_{\rm REP} = 700 + 40 \frac{R_{\rm rep} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}} \tag{8}$$

式中 Rrep 为拐点反射率。

5) 多项式拟合法

多项式拟合法是利用高次多项式高精度逼近红边波 段的植被光谱曲线, 经多次实验表明 9 阶多项式的拟合 效果最好,均方根误差<0.15 和决定系数>0.999 93,其计 算如式(9)和式(10)所示:

$$R(\lambda) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i$$
 (9)

$$\lambda_{\text{REP}} = \lambda_i(\max(D_{R(\lambda)})), \ \lambda \in 660 \sim 770 \text{ nm} \quad (10)$$

式中 R(\lambda)为多项式的拟合值; D_{R(λ)} 为拟合值的一阶导数; α_0 为常数; α_i 、 λ_i 分别为第i阶的常数项系数和波长位置。 6) 线性外推法

基于一阶导数光谱在远红色(680~700 nm)和近红 如式(11)所示:

$$\lambda_{\text{REP}} = -(c_1 - c_2)/(m_1 - m_2) \tag{11}$$

式中 c1、m1 分别为远红色波段直线的截距与斜率: c7、 m,分别为近红外波段直线的截距与斜率。

1.3.2 本研究改进的红边位置求解算法

在学习传统方法的基础上,本研究运用数值分析技 术将牛顿插值法应用到红边位置的求解过程中。在利用 插值多项式进行近似逼近时,通常认为构建多项式的原 始插值节点越多、多项式阶数越高,多项式逼近原始数据 的效果就越好,可事实并非如此。龙格在 20 世纪初就证 明了高次插值多项式具有病态性:基于等距节点的高阶插 值多项式插值点数量越多,多项式在逼近区间两端产生的 振荡现象就会越明显,即插值结果越偏离原函数^[4],这种 病态性现象被称为龙格现象[21]。龙格现象在牛顿插值法 中尤为明显,为了有效减少龙格现象的影响,本研究提 出了以下 2 种解决方法: 一是选择适当的插值次数; 二 是借助切比雪夫零点替换等距节点。

1) 牛顿八点插值法

为确定适当的插值次数,本研究进行多次试验得 出:在红边位置范围内采集跨度为 20 nm 左右的 8 个 插值点的插值效果最好,8个插值点分别位于651、 671、691、711、731、751、771 和 790 nm 处。利用 差商原理将8个插值点代入牛顿插值多项式求取各阶 系数^[4]如式(12)所示:

$$R_n(\lambda) = R(\lambda_0) + R[\lambda_0, \lambda_1](\lambda - \lambda_0) + R[\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2](\lambda - \lambda_0)(\lambda - \lambda_1) + \dots + R[\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n](\lambda - \lambda_0)(\lambda - \lambda_1) \dots (\lambda - \lambda_n)$$
(12)

式中 $R[\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n]$ 为多项式系数; $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ 为插值节 点: n 为差商次数。

2) 牛顿-切比雪夫插值法

牛顿八点插值法中的节点选取比较固定, 会降低 算法的实用性,将切比雪夫零点应用到插值节点选取 中,用零点替换等距节点,可以使得插值点的选取更 具有科学性和普适性^[22],其计算如式(13)和式(14) 所示:

$$T_n(x) = \cos(n \cdot \arccos x) \tag{13}$$

$$x_i = \frac{b+a}{2} + \frac{b-a}{2}\cos\frac{(2i+1)\pi}{2(n+1)}, i = 0, 1, \cdots, n \quad (14)$$

式中 T_n(x)为切比雪夫多项式; a、b 分别为零点区间的上 下限; x_i为零点解。

进行上述9种算法核心思想的对比,如表1所示。

Table 1 Character description of eight Red Edge Position (REP) solving algorithms							
红边位置求解算法 Red Edge Position (REP) solving algorithms	红边位置求解算法的特征 Characterizations of Red Edge Position (REP) solving algorithms	参考文献 References					
最大一阶导数法 REP_MFD Red Edge Position calculated by Maximum First Derivative	严格按照定义的计算方法	文献[9]					
倒高斯拟合法 REP_IG Red Edge Position calculated by Inverted Gaussian	用倒高斯曲线近似植被光谱特征曲线	文献[3]					
拉格朗日三点内插法 REP_LAGR Red Edge Position calculated by Lagrange	解决粗采样光谱导致的红边位置精度较低的问题	文献[10]					
线性四点内插法 REP_LFPI Red Edge Position calculated by Linear Four-Point Insert	只需要 4 个波段和简单的线性插值运算	文献[11]					
多项式拟合法 REP_POLY Red Edge Position calculated by Polynomial fitting	能获取不对称的红边位置	文献[12]					
线性外推法 REP_LE Red Edge Position calculated by Line Extrapolate	减少红边位置的双峰现象	文献[14]					
牛顿插值法 REP_NI Red Edge Position calculated by Newton Interpolation	牛顿插值法在红边位置计算中的尝试	文献[4]					
牛顿八点插值法 REP_NEPI Red Edge Position calculated by Newton Eight-Point Interpolation	重新调整插值节点数量和位置,有效改善龙格现象、双 峰现象和红边位移	本研究改进					
牛顿-切比雪夫插值法 REP_NCNI Red Edge Position calculated by Newton-Chebyshev-Node Interpolation	借助切比雪夫零点替换等距节点,使插值点选取更具科 学性和普适性	本研究改进					

表1 8种红边位置求解算法的特征描述

1.4 叶绿素含量反演方法与精度评价指标

研究采用红边位置分布特征的描述统计量对不同算 法进行特性分析,这些统计量包括最值、平均值、相对 误差(Relative Error, RE)等。并运用最小二乘回归原 理(Least Square Regression, LSR)建立基于不同算法红 边位置的冬小麦叶绿素含量反演模型,对反演模型的预 测值与叶绿素含量实测值进行线性拟合,评定各个模型 的精度,精度评价指标包括拟合方程的斜率、截距、决 定系数(coefficient of determination, R^2)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE)和标准均方根误差 (Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE)。各指 标计算如式(15)~式(18)所示:

$$RE = \Delta \lambda_i = \frac{|\lambda_i - \lambda|}{\lambda} \cdot 100\%$$
 (15)

$$R^{2} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(y_{i} - y_{e})^{2}}{(y_{i} - y^{-})^{2}}, i = 0, 1, \cdots, n$$
(16)

RMSE
$$(ye, y) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} (ye_i - y_i)^2}, i = 0, 1, \cdots, n$$
 (17)

NRMSE(ye, y) =
$$\frac{\text{RMSE}(ye, y)}{y^{-}}$$
 (18)

式中 $\Delta \lambda_i$ 为红边位置的相对误差; λ_i 为各类算法所求的红边位置,nm; λ 为作为参考标准的红边位置,nm;此处, y、 y_i 分别为植被光谱反射率实测值的数组和元素;ye、 ye_i 分别为植被光谱反射率拟合值的数组和元素; y^- 为植 被光谱反射率实测值的平均值。一般认为,当NRMSE<0.1 时,认为模型的拟合优度很好;当0.1<NRMSE<0.2 时, 认为模型的拟合优度较好;当0.2<NRMSE<0.3 时,认为 模型的拟合优度中等;当NRMSE>0.3 时,认为模型的拟 合优度较差^[23-25]。

挑旗期、开花期、灌浆中期是冬小麦生长周期中新 陈代谢最为旺盛的3个时期,本研究选取以上3个生育 期的原始实验数据进行研究,其中,2002-2003 年的样本数据(样本数为136)用于不同算法的特性分析与冬小麦叶绿素含量反演模型的建立,2018-2019 年的样本数据(样本数为64)进行模型的检验。

2 结果与分析

2.1 不同算法的特性分析

实现 8 种红边位置求解算法,并对建模集数据进行 处理,得到不同算法红边位置的分布特征和算法特性(表 2)。同时,为了直观的观察不同算法的红边位移与双峰 现象,绘制出的红边位置与叶绿素含量的散点图(图1)。 各种算法红边位置的最小值在 694~717 nm, 主要集中在 694~706 nm, 线性四点内插法的最小值显著偏大 (717 nm); 红边位置的最大值在 729~736 nm, 主要集 中在 735~736 nm, 倒高斯模型法的最大值相对偏小 (729 nm);红边位置的平均值在 719.5~727.2 nm,主要 集中在 725.4~727.2 nm, 倒高斯模型法和线性外推法的 最大值明显偏小,分别为715.9和721.9nm。红边位置的 变幅是评价红边算法对植被反射光谱敏感程度的重要指 标之一,在一定程度上,红边位置的变幅越大,说明该 算法对植被光谱曲线越敏感;变幅较小会存在红边位置 的饱和现象。以上算法红边位置的变幅在 14~41 nm, 主 要集中在 30~41 nm, 线性四点内插法的变幅明显偏小 (14 nm)。考虑到最大一阶导数法是严格遵守红边位置 定义的算法,所以将其计算结果作为参考标准计算得到 其他算法的 RE 在 0~0.882%, 主要集中在 0~0.179%。 其中, 拉格朗日三点内插法的 RE 最小, 可忽略不计, 倒 高斯模型法和线性外推法的 RE 较大,分别为 0.882%和 0.551%。

双峰现象和红边位移对叶绿素含量反演模型的建立 是非常不利的。根据散点图中红边位置与叶绿素含量的 分布特征可知,最大一阶导数法、拉格朗日三点内插法、 倒高斯模型法和九阶多项式拟合法在进行红边位置求解 时均出现明显的双峰现象,即红边位置出现在中心波长 分别为 698 和 730 nm 的集中区。与之相比,其他 4 种方 法在不同程度上削减了双峰现象的不利影响,且牛顿插 值法的效果最佳。同时,线性四点内插法的红边位置向 长波方向收拢(不是红移,是收拢,整体集中在 720~ 730 nm);倒高斯模型法、线性外推法存在红边位置向 短波方向位移(蓝移)。

年进行要求報告	Distrit	红: oution characte	边位置分布料 eristics of Red	红辺位直永解昇法的特性分析 Characteristic analysis of Red Edge Position (REP) solving algorithm					
は、辺辺上1、水肝芽イム ed Edge Position (REP) solving algorithms	最小值 Minimum values/nm	最大值 Maximum values/nm	平均值 Mean/nm	变幅 Amplitudes/n m	相对误差 RE Relative Error/%	光谱波段 Spectral band	红边位移 Displacement of Red Edge Position (REP)	双峰效应 Bimodal effect	
最大一阶导数法 REP_MFD Red Edge Position calculated by Maximum First Derivative	694	735	725.9	41	0.000	多波段	蓝移	严重	
拉格朗日三点内插法 REP_LAGR Red Edge Position calculated by Lagrange 维性处推注 REP LE	694	735	725.9	41	0.000	多波段	准确	严重	
Red Edge Position calculated by Line Extrapolate	694	733	721.9	39	0.551	多波段	准确	严重	
线性四点内插法 REP_LFPI Red Edge Position calculated by Linear Four-Point Insert	717	731	725.4	14	0.069	4 波段	红移	明显改善	
倒高斯拟合法 REP_IG Red Edge Position calculated by Inverted Gaussian	695	729	719.5	34	0.882	多波段	准确	严重	
多项式拟合法 REP_POLY Red Edge Position calculated by Polynomial fitting	699	735	727.2	36	0.179	多波段	蓝移	改善	
牛顿八点插值法 REP_NEPI Red Edge Position calculated by Newton Eight-Point Interpolation	705	736	726.5	31	0.083	8 波段	准确	明显改善	
牛顿-切比雪夫插值法 REP_NCNI Red Edge Position calculated by Newton-Chebyshev-Node Interpolation	706	736	727.1	30	0.163	多波段	准确	明显改善	

	表 2 不同红边位置求解算法的特性分析
Table 2	Characteristic analysis of different Red Edge Position (REP) solving algorithms

注: 进行不同红边位置求解算法的特性分析所用的数据来源于 2002-2003 年的试验数据(样本数为 136)。

Note: Data used to analyze the characteristics of different Red Edge Positions (REP) solving algorithms comes from the experimental data from 2002 to 2003 (The number of samples are 136).





Note: Data used to draw the scatter plot comes from the experimental data from 2002 to 2003 (The number of samples are 136).

图1 叶绿素含量与不同红边位置求解算法所求的红边位置的散点图

Fig.1 Scatter plot of chlorophyll content and red edge position calculated by different Red Edge Position (REP) solving algorithms

经以上分析,可以得到以下结论:1)最大一阶导数 法、拉格朗日三点内插法的红边位置变幅最大(41 nm), 对叶绿素含量十分敏感,然而存在明显的双峰现象;2) 倒高斯模型法的结果介于 695~729 nm 之间,平均值最 小(719.5 nm),整体向短波方向移动(蓝移),且 RE 最大(0.882%);3)线性四点内插法的结果介于 717~ 731 nm 之间,整体向长波方向收拢,平均值为 725.4 nm, 红边位置变幅最小(14 nm),对叶绿素含量变化不敏感; 4)线性外推法的结果变幅较好(37.1 nm),但平均值偏 低(721.9 nm),整体向短波方向移动(蓝移),且 RE 较大(0.551%);5)九阶多项式拟合法的结果整体较 好,不过双峰现象最为显著;6)牛顿八点插值法和牛 顿-切比雪夫插值法的结果最小值偏大(705 和 706 nm), 平均值、变幅和 RE 较为理想,并有效克服了双峰现象 和红边位移。

2.2 基于红边位置的冬小麦叶绿素含量反演

2.2.1 基于红边位置的冬小麦叶绿素含量反演模型的 建立

利用2002-2003年冬小麦的叶绿素 a(Chlorophyll-a, Chla)、叶绿素 b(Chlorophyll-b, Chlb)和叶绿素 a+b (Chlorophyll-ab, Chlab)含量实测数据与红边位置计算 结果进行相关性分析,得到基于不同算法的冬小麦叶绿 素含量反演模型(表3),研究表明8种方法计算出的红 边位置和叶绿素含量均有很好的相关性。

Table 5 Inversion models of winter wheat chlorophyli content based on different Red Edge Position (REP) solving algorithms								
	红边位置求解算法 Red Edge Position (REP) solving algorithms	叶绿素 a 反演方程 Inversion models of Chlorophyll-a	决定系数 Coefficient of determination R ²	叶绿素 b 反演方程 Inversion models of Chlorophyll-b	决定系数 Coefficient of determination R ²	叶绿素 a+b 反演方程 Inversion models of Chlorophyll-ab	决定系数 Coefficient of determination R ²	
	牛顿八点插值法 REP_NEPI Red Edge Position calculated by Newton Eight-Point Interpolation	<i>y</i> =0.078 2 <i>x</i> -55.148	0.758	<i>y</i> =0.024 0 <i>x</i> -16.854	0.694	<i>y</i> =0.102 2 <i>x</i> -72.003	0.751	
	牛顿-切比雪夫插值法 REP_NCNI Red Edge Position calculated by Newton-Chebyshev-Node Interpolation	<i>y</i> =0.078 7 <i>x</i> -55.563	0.732	<i>y</i> =0.024 3 <i>x</i> -17.137	0.682	y=0.103 1x-72.699	0.728	
	倒高斯拟合法 REP_IG Red Edge Position calculated by Inverted Gaussian	<i>y</i> =0.067 3 <i>x</i> -44.136	0.718	<i>y</i> =0.019 0 <i>x</i> -13.128	0.624	<i>y</i> =0.082 7 <i>x</i> -57.264	0.703	
	线性四点内插法 REP_LFPI Red Edge Position calculated by Linear Four-Point Insert	<i>y</i> =0.157 0 <i>x</i> -112.170	0.688	<i>y</i> =0.015 6 <i>x</i> -10.718	0.707	<i>y</i> =0.207 9 <i>x</i> -148.57	0.700	
	多项式拟合法 REP_POLY Red Edge Position calculated by Polynomial fitting	<i>y</i> =0.050 4 <i>x</i> -34.953	0.706	<i>y</i> =0.014 9 <i>x</i> -10.301	0.604	<i>y</i> =0.065 3 <i>x</i> -45.255	0.688	
	拉格朗日三点内插法 REP_LAGR Red Edge Position calculated by Lagrange	<i>y</i> =0.050 1 <i>x</i> -34.647	0.645	<i>y</i> =0.014 7 <i>x</i> -10.120	0.542	<i>y</i> =0.064 8 <i>x</i> -44.766	0.626	
	最大一阶导数法 REP_MFD Red Edge Position calculated by Maximum First Derivative	<i>y</i> =0.050 0 <i>x</i> -34.612	0.644	<i>y</i> =0.014 7 <i>x</i> -10.111	0.542	<i>y</i> =0.064 7 <i>x</i> -44.722	0.625	
т	线性外推法 REP_LE	<i>y</i> =0.053 6 <i>x</i> -37.039	0.551	<i>y</i> =0.015 6 <i>x</i> -10.718	0.455	y=0.069 2x-47.457	0.533	

注:建立不同红边位置求解算法的冬小麦叶绿素反演模型的数据来源于 2002—2003 年的试验数据(样本数为136)

Note: Data used to build the inversion models of winter wheat chlorophyll content based on different Red Edge Position (REP) solving algorithms are the experimental data from 2002 to 2003 (The number of samples are 136).

从整体上看, Chla、Chlb、Chlab 反演方程的 *R*²分别 介于 0.551~0.758、0.455~0.694 和 0.533~0.751, 每种 算法都普遍存在决定系数由大到小依次为 *R*²_{Chla}、 *R*²_{Chla}和 *R*²_{Chlb}的规律。从算法层面上看,基于两种新算法(牛顿 八点插值法和牛顿-切比雪夫插值法)的反演方程的 *R*² 高 于经典方法,以最大一阶导数法的 *R*²为参考标准,牛顿 八点插值法的精度提高了 17.701%~28.044%;牛顿-切比 雪夫插值法的精度提高了 13.665%~25.830%。

2.2.2 基于红边位置的冬小麦叶绿素含量反演模型的 精度评定

为验证以上反演模型的真实性,利用 2019 年冬小麦的 Chla、Chlb、Chlab 实测数据与模型预测值进行线性拟合,获得了预测值与实测值的拟合方程及精度检验数据(表 4)。从整体上看,拟合方程的 *R*²分别介于 0.396~0.656、0.518~0.622 和 0.443~0.630(由于倒高斯模型法的模型精度较低,此处不计入),整体低于上一节中反演方程的 *R*²(0.455~0.758),每种算法都普遍存在决定

系数由大到小依次为 R_{Chla}^2 、 R_{Chlab}^2 和 R_{Chlb}^2 的现象,这与反 演方程的规律一致。从算法层面上看,基于两种新算法 的拟合方程的 R^2 较其他方法高,均大于 0.619; RMSE 较 其他方法小,均小于 0.406; NRMSE 较其他方法小,均 小于 0.151,即模型优度"较好"。以最大一阶导数法为 参考标准,牛顿八点插值法的 R^2 提高 6.321~9.947%, NRMSE 降低了 21.277~46.693%;牛顿-切比雪夫插值法 的 R^2 提高 5.024~10.480%, NRMSE 降低了 19.681~ 48.638%。

同时,基于几种算法建立的 Chlab 预测值与测量值的 拟合方程式的斜率在 0.406~1.191,截距在 0.101~1.524。 其中,线性四点插值法和牛顿八点插值法的斜率分别为 1.052 和 0.868,接近于 1,截距分别为 0.101 和 0.378, 接近于 0,说明基于以上 2 种方法建立的反演模型的预测 值能够高精度接近叶绿素含量实测值。相比之下,牛顿-切比雪夫插值法存在系统误差,其斜率在 0.498~0.628 之间,与理论值不相符。

表 4 基于不同红边位置求解算法的冬小麦叶绿素含量反演模型的精度检验

Table 4 Accuracy test of inversion models of winter wheat chlorophyll content based on different Red Edge Position (REP) solving

			aigo	nunns					
	叶绿	素 a 拟合方程制 Accuracy test of	精度	叶结	录 b 拟合方利 Accuracy test lesenbull b m	呈精度 of adala	叶绿素 a+b 拟合方程精度 Accuracy test of		
红边位置求解算法 Red Edge Position (REP) solving algorithms	拟合方程 Fitting equations	決定系数 Coefficient of determination R ²	hr准均方根 误差 NRMSE Normalized Root Mean Squared Error	拟合方程 Fitting equations	決定系数 Coefficient of determination R ²	标准均方根 误差 NRMSE Normalized Root Mean Squared Error	拟合方程 Fitting equations	決定系数 Coefficient of determination R ²	iodels 标准均方根 误差 NRMSE Normalized Root Mean Squared Error
牛顿八点插值法 REP_NEPI REP calculated by Newton Eight-Point Interpolation	<i>y</i> =0.902 7 <i>x</i> +0.077 5	0.656	0.137	<i>y</i> =0.876 2 <i>x</i> +0.065 9	0.619	0.148	y=0.839 1x +0.378 2	0.627	0.135
牛顿-切比雪夫插值法 REP_NCNI REP by Newton-Chebyshev-Node Interpolation	<i>y</i> =0.628 2 <i>x</i> +0.689 1	0.648	0.132	<i>y</i> =0.498 3 <i>x</i> +0.327 1	0.622	0.151	<i>y</i> =0.589 9 <i>x</i> +1.123 6	0.630	0.125
线性四点内插法 REP_LFPI REP calculated by Linear Four-Point Insert	<i>y</i> =1.114 9 <i>x</i> -0.441 3	0.653	0.152	y=0.283 6x +0.458 7	0.622	0.186	y=1.052 0x -0.100 9	0.628	0.160
拉格朗日三点内插法 REP_LAGR Red Edge Position calculated by Lagrange	<i>y</i> =0.471 7 <i>x</i> +0.926 3	0.617	0.175	y=0.346 9x +0.391 9	0.563	0.194	<i>y</i> =0.428 3 <i>x</i> +1.368 9	0.575	0.177
最大一阶导数法 REP_MFD REP calculated by Maximum First Derivative	<i>y</i> =0.470 7 <i>x</i> +0.890 3	0.617	0.257	y=0.346 9x +0.400 9	0.563	0.188	<i>y</i> =0.427 6 <i>x</i> +1.341 7	0.575	0.183
多项式拟合法 REP_POLY REP calculated by Polynomial fitting	y=0.422 5x +0.958 1	0.581	0.189	<i>y</i> =0.328 1 <i>x</i> +0.385 6	0.531	0.213	y=0.406 2x +1.377 9	0.552	0.192
线性外推法 REP_LE Red Edge Position calculated by Line Extrapolate	y=0.399 1x +0.872 0	0.396	0.264	y=0.348 6x +0.337 0	0.518	0.243	y=1.190 8x -1.523 9	0.443	0.405
倒高斯拟合法 REP_IG Red Edge Position calculated by Inverted Gaussian	<i>y</i> =0.456 9 <i>x</i> +3.117 5	0.129	0.822	<i>y</i> =0.461 9 <i>x</i> +0.182 8	0.240	0.357	y=0.475 5x +0.670 6	0.175	0.374

注:反演模型的精度检验数据来源于 2018-2019 年的试验数据(样本数为 64)。

Note: The accuracy test data of the inversion model comes from the test data from 2018 to 2019 (The number of samples are 64).

经以上分析,可以得出:1)反演方程的 R^2 (0.455~0.758)整体高于拟合方程的 R^2 (0.396~0.656);2)各种算法的反演方程与拟合方程均存在决定系数由大到小 依次为 R^2_{Chla} 、 R^2_{Chla} 和 R^2_{Chlb} 的规律;3)牛顿-切比雪夫插 值法、牛顿八点插值法和线性四点插值法的 R^2 (0.619~0.656)接近,且较其他 5 种算法大,NRMSE 均<0.2,证 明模型效果较好。

2.3 讨论

2.3.1 改进算法的性能评述

不难发现,与传统方法相比,改进方法在改善双峰 现象和红边位移方面具有显著优势。线性四点内插法在 改善双峰现象上的效果同样明显,但其红边位置变幅在8 种算法中最小(14 nm),对叶绿素含量变化不敏感,而 且存在红边位置整体向长波收拢,这对叶绿素反演模型 的建立是不利的。考虑到拟合方程的斜率与截距,牛顿-切比雪夫插值法便暴露出其缺点,这可能与切比雪夫零 点的选取区间过大导致其出现系统误差有关,下一步可 以缩小零点区间,验证切比雪夫零点替换等距节点的科 学性。同时,牛顿-切比雪夫插值法对光谱分辨率有较高 的要求,很大程度上限制了其应用范围,而牛顿八点插 值法不仅继承了牛顿插值法的优越性, 而且融合了线性 四点内插法对插值点需求少的特性,具有更高的精度、 稳定性和实用性。综合考虑算法特性和各项精度指标, 研究认为牛顿八点插值法优于传统算法和牛顿-切比雪夫 插值法。

2.3.2 基于红边参数的冬小麦叶绿素含量反演模型的 评价

8种算法拟合方程的 R²(0.396~0.656)普遍低于反 演方程的 R²(0.455~0.758)的现象,是由于 2002-2003 和 2018-2019年试验区内的冬小麦品种、长势与生境状 况不完全相同,对模型的适用性产生了一定的影响。下 一步可以在同一实验条件下,设置建模组与验证组,以 期提高模型的精度。

4 结 论

本研究以冬小麦为研究对象,1)采用最小二乘回归 分析方法,在实现6种经典红边位置求解算法的基础上, 将牛顿插值法应用于红边位置求解,提出牛顿八点插值 法和牛顿-切比雪夫插值法;2)根据不同算法的红边位置 分布特征综合分析了新旧算法的优缺点,对比了不同算 法的综合属性信息;3)建立了基于红边参数的冬小麦叶 绿素含量反演模型,进行了叶绿素含量反演模型的预测 值与实测值的线性拟合分析。通过以上研究得出,1)本 研究提出的牛顿八点插值法和牛顿-切比雪夫插值法不仅 有效地改善了红边位置求解时的双峰现象和红边位移, 具有更高的精度与稳定性,而且使用牛顿插值法建立的 叶绿素含量反演模型的决解时的双峰现象和红边位移, 具有更高的精度与稳定性,而且使用牛顿插值法建立的 叶绿素含量反演模型的改解时的双峰现象和红边位移, 具有更高的精度与稳定性,而且使用牛顿插值法建立的 叶绿素含量反演模型的预测值与叶绿素含量实测值的 拟合方程 R^2 较其他方法高,均大于 0.619;标准均方根误 差(Normalized Root Mean Squared Error, NRMSE)较其 他方法小,均小于 0.151,即模型优度较好;3)同时, 研究表明牛顿八点插值法比牛顿-切比雪夫插值法具有更 高的精度、稳定性和实用性;4)关于牛顿-切比雪夫插值 法中零点区间的选取和利用切比雪夫零点替换等距节点 的科学性还有待进一步研究。

根据本研究对不同红边算法的红边位置分布特征分 析、算法的综合属性信息对比以及基于红边参数的冬小 麦叶绿素含量反演模型的精度评定,可以认为将牛顿插 值法应用到冬小麦的红边位置计算和叶绿素含量反演的 效果优于传统方法。此外,考虑到牛顿八点插值法计算 红边位置只需要 8 个特定的光谱波段,为制作简易的作 物叶绿素含量测定传感器提供了理论基础。

[参考文献]

- [1] Velichkova K, Krezhova D. Extraction of the red edge position from hyperspectral reflectance data for plant stress monitoring [C]//10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union, 2019.
- [2] Ptushenko V, Ptushenko O, Tikhonov A. Chlorophyll fluorescence induction, chlorophyll content, and chromaticity characteristics of leaves as indicators of photosynthetic apparatus senescence in arboreous plants[J]. Biochemistry, 2014, 79(3): 260-272.
- [3] Miller J R, Hare E W, WU J. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. An inverted-Gaussian reflectance model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(10): 1755-1773.
- [4] 陈西亮,张佳华. 牛顿插值法在植被红边拟合中的应用[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(7): 1828-1831.
 Chen Xiliang, Zhang Jiahua. Application of Newton interpolation method in red edge fitting of vegetation[J].
 Hubei Agricultural Science, 2016, 55(7): 1828-1831. (in Chinese with English abstract).
- [5] 黄林生,江静,黄文江,等. Sentinel-2 影像和 BP 神经网络结合的小麦条锈病监测方法[J]. 农业工程学报,2019,35(17): 178-185.
 Huang Linsheng, Jiang Jing, Huang Wenjiang, et al. Sortingl 2 important and BP neural network manitoring

Sentinel-2 imaging and BP neural network monitoring method for wheat stripe rust[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 178-185. (in Chinese with English abstract).

- [6] Sun Yuanheng, Qin Qiming, Ren Huazhong, et al. Red-edge band vegetation indices for leaf area index estimation from Sentinel-2/MSI imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 826-840.
- [7] Curran P J, Dungan J L, Macler B A, et al. The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(1): 69-76.
- [8] 黄文江,王纪华,刘良云,等.冬小麦红边参数变化规律 及其营养诊断[J]. 遥感技术与应用,2003(4):206-211. Huang Wenjiang, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Variation of red border parameters in winter wheat and its nutritional diagnosis[J]. Remote sensing technology and Applications, 2003(4):206-211. (in Chinese with English abstract).
- [9] Demetriades-Shah T H, Steven M D, Clark J A. High resolution derivative spectra in remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 33(1): 55-64.
- [10] Dawson T P, Curran P J. Technical note A new technique for interpolating the reflectance red edge position[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(11):

2133-2139.

- [11] Clevers J G P W, De Jong S M, Epema G F, et al. The use of the MERIS standard band setting for deriving the red edge index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(16): 3169-3184.
- [12] Pu R, Peng G, Biging G S, et al. Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(4):916-921.
- [13] Lin L, Ustin S L, Lay M. Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1): 1-16.
- [14] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 181-193.
- [15] 何天荣. 牛顿插值法计算函数值的优缺点分析[J]. 考试与 评价, 2016(6): 70.
 He Tianrong. Analysis of advantages and disadvantages of Newton interpolation method for calculating function values[J]. Examination and Evaluation, 2016(6): 70. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曹中盛,李艳大,叶春,等. 基于高光谱的双季稻分蘖数 监测模型[J]. 农业工程学报,2020,36(4):185-192.
 Cao Zhongsheng, Li Yanda, Ye Chun, et al. Monitoring model of tiller number of double cropping rice based on hyperspectrum[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(4):185-192. (in Chinese with English abstract).
- [17] Ghule A, Deshmukh R R, Gaikwad C. MFDS-m Red Edge Position Detection Algorithm for Discrimination Between Healthy and Unhealthy Vegetable Plants[M]. Recent Trends in Image Processing and Pattern Recognition, 2019.
- [18] 高兴,李斐,杨海波,等.基于红边位置的马铃薯植株氮浓度估测方法研究[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(2): 134-148.
 Gao Xing, Li Fei, Yang Haibo, et al. Study on nitrogen concentration estimation method of potato plants based on red edge location[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2019, 25(2): 134-148. (in Chinese with English abstract).
- [19] 丁永军,张晶晶,李修华,等.基于光谱红边位置提取算 法的番茄叶片叶绿素含量估测[J].农业机械学报,2016, 47(3): 292-297.
 Ding Yongjun, Zhang Jingjing, LI Xiuhua, et al. Estimation of chlorophyll content in tomato leaves based on spectral red edge location extraction algorithm[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 292-297. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郝瑞娟,王周锋,王文科,等. CO₂ 胁迫下大豆叶片红边 位置最优算法的研究[J]. 大气与环境光学学报,2016, 11(1): 51-59.
 Hao Ruijuan, Wang Zhoufeng, Wang Wenke, et al. Study on the optimal algorithm of red edge position for soybean leaves under CO₂ stress[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2016, 11(1): 51-59. (in Chinese with English abstract)
- [21] Endre S, Mayers D F. An Introduction to Numerical Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [22] 余鹏,孙学金,赵世军. GPS 定位中卫星坐标计算的切比 雪夫多项式拟合法[J]. 气象科技, 2004, 32(3): 198, 4. Yu Peng, Sun Xuejin, Zhao Shijun. Chebyshev polynomial fitting method for satellite coordinate calculation in GPS positioning[J]. Meteorological Science and Technology, 2004, 32(3): 198, 4. (in Chinese with English abstract)
- [23] 任嘉衍,刘慧敏,丁圣彦,等. 伊河流域景观格局变化及
 其驱动机制[J]. 应用生态学报,2017,28(8):2611-2620.
 Ren Jiayan, Liu Huimin, Ding Shengyan, et al. Changes of

landscape pattern in Yi River basin and its driving mechanism[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2611-2620. (in Chinese with English abstract).

[24] 于汧卉,杨贵军,王崇倡. 地面高光谱和 PROSAIL 模型的冬小麦叶绿素反演[J]. 测绘科学, 2019, 44(11): 96-102.
Yu Qianhui, Yang Guijun, Wang Congchang. Ground winter wheat chlorophyll of hyperspectral and PROSAIL model inversion[J]. Mapping Science, 2019, 44(11): 96-102. (in

Chinese with English abstract).

[25] 吴伟斌,李佳雨,张震邦,等. 基于高光谱图像的茶树 LAI 与氮含量反演[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3): 195-201.
Wu Weibin, Li Jiayu, Zhang Zhengbang, et al. Inversion of tea tree LAI and nitrogen content based on hyperspectral images[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(3): 195-201. (in Chinese with English abstract)

Inversion of winter wheat chlorophyll contents based on improved algorithms for red edge position

Qian Binxiang^{1,2,3}, Huang Wenjiang^{2,3}, Ye Huichun^{2,3}, Kong Weiping⁴, Ren Yu^{1,3}, Xing Naichen^{1,3}, Jiao Quanjun^{2,3}

 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
 Key Laboratory for Earth Observation of Hainan Province, Sanya 572029, China;
 Key laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;
 Key laboratory of quantitative remote sensing information technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Red Edge Position (REP) of vegetation spectral reflectance is highly sensitive to chlorophyll content. The inversion model of crop chlorophyll content based on REP enables timely growth monitoring of the crops on a large scale. The displacement of REP and bimodal phenomenon are ubiquitous in 6 traditional algorithms of REP. To reduce the adverse effects effectively, the Newton interpolation method was applied to calculate REP in this study. And two improved REP solving algorithms, Newton-Chebyshev-Node Interpolation (REP_NCNI) and Newton Eight-Point Interpolation (REP_NEPI) were proposed. The strengths and weaknesses of the old and improved algorithms were analyzed, according to the distribution characteristics of REP from different algorithms, and the comprehensive attribute information of the different algorithms was compared. It was found that: 1) Maximum First Derivative (REP MFD) method and Lagrange Three-Point Interpolation (REP_LAGR) method had the largest variation of REP (41 nm), which was sensitive to chlorophyll content, however, there was an obvious bimodal phenomenon. 2) The REP calculated by an Inverted Gaussian (REP IG) model method ranged from 695 nm to 729 nm with the lowest mean value (719.5 nm). The whole model moved towards the short-wave direction (blue shift) with the highest Relative Error (RE) (0.882%). 3) The REP calculated by the Linear Four-Point Interpolation method (REP LFPI) were between 717 and 731 nm, with an average value of 725.4 nm. The whole result was clustered in the direction of a long wave, and the REP had the smallest variation (14 nm), which was not sensitive to the change of chlorophyll content. 4) The variation of the Linear Extrapolation (REP LE) method was better (37.1 nm), but the average value was lower (721.9 nm). The whole value moved towards the short-wave direction (blue shift), and the RE was larger (0.551%). 5) The results of polynomial fitting of the ninth order (REP POLY) were generally good, but the bimodal phenomenon was the most serious. 6) The REP_NCNI and REP_NEPI overcame the bimodal phenomenon and displacement of REP effectively with ideal mean value, amplitude, and RE. And the least square regression was adopted to establish the inversion model of chlorophyll content of winter wheat based on REP. The study revealed that compared with traditional algorithms, the improved algorithms exhibited the most accurate and robust performance, where the coefficient of determination of the chlorophyll content inversion model established by improved algorithms was higher than that of traditional algorithms with the coefficient of determination of 0.728 and 0.751, respectively. Moreover, in the improved algorithms, the coefficient of determination between the predicted value and the measured value was greater than 0.619, which was 10.480% higher than that of the REP MFD method, and the standard root mean square error was less than 0.151, indicating that the goodness of the model was better. At the same time, the coefficient of determination of the inverse equation (0.455-0.758) was higher than that of the fitting equation (0.396-0.656). And the inversion model was ranked chlorophyll-a model, chlorophyll-ab model, and chlorophyll-b model, according to the coefficient of determination from large to small. Besides, the research showed that in the two improved algorithms, the REP NEPI demonstrated the best and satisfactory performance than REP NCNI. Considering that only 8 bands were needed to calculate REP by REP_NEPI, it provided a theoretical basis for making a simple sensor to determine the chlorophyll content of crops. The results showed that REP_NEPI was the optimal selection for the calculation of REP and the inversion of chlorophyll content of winter wheat. And this study should provide theoretical and technical support for the inversion of biophysical and biochemical parameters of vegetation and the application in agricultural production. Keywords: algorithm; remote sensing; models; winter wheat; inversion of chlorophyll content; Newton-Chebyshev-node

interpolation; Newton eight-point interpolation; red edge position