

一种针对作物生育期光谱迁移的修正植被指数

刘豪杰¹, 李民赞¹, 张俊逸¹, 高德华¹, 孙红^{1*}, 吴静珠²

1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083

2. 北京工商大学, 食品安全大数据技术北京市重点实验室, 北京 100048

摘要 针对基于固定特征波长的植被指数不能适用于多个生育期叶绿素含量的诊断这一问题, 研究优化提出一种基于双波长计算光谱覆盖面积的叶绿素诊断植被指数, 用于稳健地诊断多生育期的营养。以拔节期、孕穗期和扬花期的冬小麦为研究对象, 采集其 325~1 075 nm 范围的冠层反射光谱, 测定采样样本的叶绿素含量。采用小波去噪和多元散射校正算法对光谱数据进行预处理。通过相关性分析, 确定生育期特征波长的迁移范围, 进而提出了基于光谱覆盖面积的冬小麦叶绿素含量光谱诊断参数(modified normalized area over reflectance curve, MNAOC)。以信噪比(SNR)和平滑度指标(S)进行综合评价, 小波去噪函数的最佳参数为(“sqtwolog”, “mln”, “3”, “db5”)。相关性分析结果表明, 生育期特征波段的迁移范围为(700 nm, 723 nm)。在分析 MNAOC 指数对叶绿素含量诊断分辨率的基础上, 以 0.5 mg·L⁻¹ 的分辨率建立一元线性回归模型的结果为: 拔节期 $R_c^2=0.8401$, $R_v^2=0.8237$; 孕穗期 $R_c^2=0.8655$, $R_v^2=0.8174$; 扬花期 $R_c^2=0.8338$, $R_v^2=0.8076$ 。与 ratio vegetation index(RVI)等 5 种双波长植被指数对比表明, 由于 700 和 723 nm 计算的光谱面积包含了由于生育期导致的光谱动态迁移特征, 使得 MNAOC 指数在模型精度上和多个生育期的普适性上, 都优于其他双波长代数运算植被指数, 为大田环境冬小麦生育期叶绿素含量诊断提供支持。

关键词 叶绿素诊断; 光谱迁移; 生育期响应; 光谱覆盖面积; 植被指数

中图分类号: O433.4

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)10-3040-07

引言

光谱学诊断作为一种快速、无损的检测方法^[1-2], 已被广泛应用于作物的氮素营养诊断。通过筛选敏感波长实现光谱数据的降维, 并组合计算如 normalized difference vegetation index(NDVI)、RVI 和 normalized difference red edge index(NDRE)等植被指数用于叶绿素含量的诊断^[3-5]。

然而, 在大田作物不同生育期的氮素营养诊断中, Li Fei 等在利用冠层光谱检测冬小麦氮素营养的研究中发现, NDVI 指数在扬花期以后的检测能力会下降, 且包含“红边”波段的植被指数有更好的预测能力^[6]; 针对玉米作物, NDRE_(790 nm, 720 nm) 指数在 V6—V7 生育期的诊断能力($R^2=0.49$)较低, 随着生育期推进, 进入 V10—V12 诊断能力得到提升($R^2=0.79$), 认为土壤背景可能是影响的主要因素^[7]。

进而, Gnyp 等指出 NDVI 指数在水稻生长后期由于植被的高覆盖度而容易出现饱和现象^[8]。综上可知, 随着生育期的推进, 作物内部养分吸收状况、作物外部结构参数(如株高、叶面积指数等)和环境背景噪声等都会发生动态变化, 进而导致作物光谱在不同生育期存在特征迁移现象, 而基于固定波长计算的植被指数无法有效反映这种动态迁移现象, 降低了其在不同生育期间的适用性。因而, 减少噪声影响并准确的反映作物生育期光谱迁移现象是提升光谱参数对作物叶绿素含量诊断适用性的关键。

由于作物冠层反射光谱中陡峭爬升的“红边”(680~780 nm)位置会随着叶绿素含量的增加向长波方向移动^[9], 使得红边位置和红边面积等参数对生育期动态光谱迁移有指示作用。Delegido^[10]等也分析了 600~800 nm 范围内反射光谱与叶绿素含量的相关性, 并提出了基于一种连续区间内光谱覆盖面积的植被指数(normalized area over reflectance curve,

收稿日期: 2018-12-03, **修订日期:** 2019-04-16

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题(2016YFD0300600-2016YFD0300606, 2016YFD0300600-2016YFD0300610), 国家自然科学基金项目(31501219), 中国农业大学研究生培养项目(ZYXW037, HJ2019029, YW2019018), 青产学研项目(2017-12, BKBD-2017KF03)资助

作者简介: 刘豪杰, 1990 年生, 中国农业大学信息与电气工程学院博士研究生 e-mail: hliu267@163.com

* 通讯联系人 e-mail: sunhong@cau.edu.cn

NAOC), 选取 643~795 nm 区间内的光谱进行积分运算, 分析的结果表明: 该面积参数对生育期动态下作物叶绿素含量具有较好的量化分析能力。

尽管如此, 该参数积分运算使用的特征波长数量远远多于常规植被指数, 计算复杂性上升的同时也无法避免相邻波长存在高度相关的问题。因而, 如果能将上述植被指数和面积指数两类指标进行结合, 提出一种简化面积积分运算的修正植被指数, 则可以在数据降维减少变量间高度相关性的基础上, 解决叶绿素诊断时因光谱动态迁移问题导致的植被指数在不同生育期间适用性不强的问题。

首先对冬小麦作物拔节期、孕穗期和扬花期三个关键生育期的冠层反射光谱, 进行小波去噪和多元散射校正, 其中以信噪比(SNR)和平滑度(S)为小波降噪参数选取指标, 以降低外部环境与植株结构的影响。其次, 明确不同生育期叶绿素特征波长的迁移特征, 并结合光谱迁移区域特征提出一种基于光谱覆盖面积的修正植被指数。最后, 讨论说明了该参数对各个生育期叶绿素含量诊断的优势和在田间应用的可行性。

1 实验部分

1.1 田间试验与数据采集

试验分别于 2016 年 4 月 13 日(拔节期), 4 月 20 日(孕穗期)和 4 月 28 日(扬花期)上午 10—12 时在北京市昌平区小汤山镇国家精细农业示范基地进行, 试验当天天气晴朗。小麦品种为京冬 12 号, 田间划分为 70 个 2 m×2 m 的小区, 在各小区内采用美国 ASD FieldSpecHH 光谱辐射仪(Analytical Spectral Devices, Inc, USA)测量小麦冠层反射光谱, 其波长范围为 325~1 075 nm, 光谱分辨率 1 nm。光谱仪探头垂直向下距小麦冠层 30 cm 左右, 每次采集目标光谱前后进行参考板校正, 每点测量 3 次取平均值作为该小区光谱测量结果。

测定叶片样本叶绿素含量时, 首先去除叶片主茎并剪碎混匀, 称取 0.4 g 用 99% 丙酮和无水乙醇 2:1 混合液 25 mL 浸泡 24 h, 浸泡过程中每隔 8 小时摇动一次, 加速叶绿素的提取。然后, 用分光光度计测定萃取液在 645 和 663 nm 波长处的吸光度值。最后利用式(1)和式(2)分别计算叶绿素 a 和叶绿素 b 值的含量。其中 A 代表吸光度; c_a 和 c_b 分别代表叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量, 二者相加即得到叶绿素总含量。

$$c_a = 12.72A_{663} - 2.59A_{645} \quad (1)$$

$$c_b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663} \quad (2)$$

1.2 光谱数据预处理

为了减少环境噪声对特征光谱迁移的影响, 需要对原始光谱信号进行预处理。由于小波变换通过伸缩平移运算对信号进行多尺度细化, 能够保护有用的尖峰信号和突变信号。因此, 研究先对原始光谱信号进行小波去噪, 再利用多元散射校正算法(multiplicative scatter correction, MSC)对去噪后的光谱进行基线校正。

小波基函数、阈值选择规则、分解层数和阈值调整方案等参数的不同组合产生的去噪效果也不尽相同。因而, 本研

究设计正交试验, 综合信噪比(signal to noise ratio, SNR)和平滑度(smoothness, S)指标共同用于去噪效果评价, 以确定小波去噪函数最佳参数组合。SNR 和 S 两个指标的计算公式分别如式(3)和式(4)。在充分去噪情况下, SNR 越大去噪效果越好; 而反映去噪信号平滑程度的 S 值, 在信号不发生畸变的前提下, S 值越小, 信号越平滑。SNR 指标值对去噪不充分的情况反映不灵敏, 但对过度去噪指示性较好; S 指标值刚好相反, 对去噪不充分指示性较好, 但对过度去噪反映不灵敏。因而, 综合二者可为小波去噪效果提供客观评价。

$$SNR = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N 10 \times \log_{10} \left(\sum_{i=1}^L \frac{x'_{ij}{}^2}{(x'_{ij} - x_{ij})^2} \right) \quad (3)$$

$$S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^{L-1} (x'_{i+1,j} - x'_{i,j})^2 \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^{L-1} (x_{i+1,j} - x_{i,j})^2 \right\} \quad (4)$$

其中 x_{ij} 代表原始光谱中第 j 个样本在 i nm 波段处的反射率, x'_{ij} 代表去噪光谱中第 j 个样本在 i nm 波段处的反射率; N 代表样本数; L 表示每个样本光谱中包含的波段数。

1.3 基于光谱覆盖面积的修正型植被指数

通过对基于积分运算的 NAOC 指数进行变量降维和线性运算简化提出了一种新的修正型指数 MNAOC, 并选择了几种常见植被指数进行对比分析。包括: NDVI, NDRE, RVI, difference vegetation index(DVI)和 soil-adjusted vegetation index(SAVI)植被指数计算公式

$$NAOC = 1 - \left(\int_a^b R d\lambda \right) / (R_{\max}(b-a)) \quad (5)$$

$$MNAOC = 1 - (R_a + R_b) / (2R_b) \quad (6)$$

式中, a , b 分别是取值上边界和下边界波长, R_a 和 R_b 分别是其对应的反射率, $d\lambda$ 是最小积分单位(1 nm), R_{\max} 是(a , b)区间内的最大反射率。

$$RVI = R_{Nir} / R_{Red} \quad (7)$$

$$DVI = R_{Nir} - R_{Red} \quad (8)$$

$$NDVI = (R_{Nir} - R_{Red}) / (R_{Nir} + R_{Red}) \quad (9)$$

$$NDRE = (R_{Nir} - R_{Edg}) / (R_{Nir} + R_{Edg}) \quad (10)$$

$$SAVI = (R_{Nir} - R_{Red})(1+L) / (R_{Nir} + R_{Red} + L) \quad (11)$$

式中, R_{Red} , R_{Edg} 和 R_{Nir} 为可见光波段 650 nm、红边波段 730 nm 和近红外波段 800 nm 处的光谱反射率; L 为植被密度化参数, 通常取值 0.5。

其中, NAOC 计算公式如式(5), 其几何示意图如图 1 所示, NAOC 值为矩形区域($abcd$)内非阴影区域所占面积的比例, 它反映了积分区间内光谱的吸收面积与外包络特征。由于红边上升曲线可以近似看作线性变化且高精度光谱仪采集的反射光谱数据相邻两波段乃至邻近波段内存在较高相关性^[11], 结合作物生育期叶绿素诊断敏感波长筛选可以减少参与运算的变量数, 实现数据降维。因此, 所提出的 MNAOC 指数计算如式(6), 其几何意义为, 用直角梯形 $abce$ 面积近似代替阴影曲边梯形面积, 进而得到非阴影区域所占面积的比例。研究根据不同生育期冬小麦冠层反射光谱特征波长的迁移范围确定 a 和 b 的位置。数据处理通过使用软件 MatlabR2014a 和 Excel 迭代运算实现。

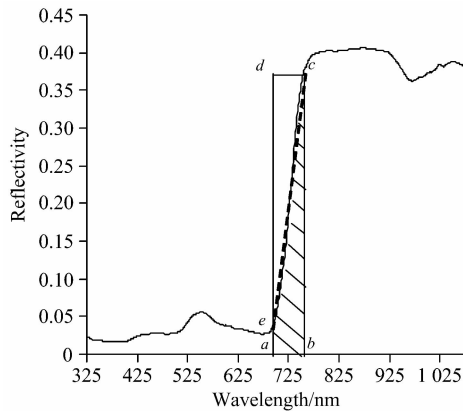


图 1 NAOC 和 MNAOC 几何示意图

Fig. 1 Geometric schematic of NAOC and MNAOC

2 结果与讨论

2.1 样本集统计

首先,对 3 个生育期采集的各 70 个样本使用 SPXY 算法按照 2:1 的比例进行划分,建模集 47 个样本,验证集 23 个样本。各个数据集的统计结果如表 1 所示,各生育期建模集的叶绿素含量范围均包括了验证集的叶绿素含量范围,其值在生育期呈现动态变化:拔节期、孕穗期和扬花期的叶绿素含量均值分别为 27.08, 35.28 和 45.75 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随生育期的推进而增加;而各生育期叶绿素含量取值区间和标准差均随生育期的推进而减小。

表 1 各生育期叶绿素含量数据集划分统计/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ Table 1 Dataset partitioning statistics/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$

| 生长期 | 数据集 | 样本量 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 标准差 |
|-----|-----|-----|-------|-------|-------|------|
| 拔节期 | 总样本 | 70 | 39.40 | 18.68 | 27.08 | 3.60 |
| | 建模集 | 47 | 39.40 | 18.68 | 27.04 | 3.71 |
| | 验证集 | 23 | 35.92 | 20.56 | 27.17 | 3.45 |
| 孕穗期 | 总样本 | 70 | 39.59 | 23.50 | 35.28 | 3.34 |
| | 建模集 | 47 | 39.59 | 23.50 | 35.08 | 3.54 |
| | 验证集 | 23 | 39.54 | 26.28 | 35.38 | 2.97 |
| 扬花期 | 总样本 | 70 | 49.48 | 38.08 | 45.75 | 2.06 |
| | 建模集 | 47 | 49.48 | 38.08 | 45.70 | 2.17 |
| | 验证集 | 23 | 49.28 | 41.51 | 45.87 | 1.85 |

2.2 冬小麦生育期光谱信号预处理

首先,在众的小波基函数中,因 Daubechies 小波具有正交对称紧支撑特性,对信号局部特性的描述能力较强的特点^[12],研究将 db3~db6 小波函数列为备选小波基函数。然后,初步观察法筛选分解层数区间。随机选取样本按照 1~8 层进行分解,去噪结果如图 2 所示。

观察可知,从 1 层分解到 6 层分解,随分解层数增加光谱曲线趋于平滑,其中 1 和 2 层分解在光谱曲线两端 400 nm 之前和 1 000 nm 之后的光谱曲线存在明显波动,而 3~5 层分解后此类波动得到了一定的平滑;6 层分解后,光谱曲线

显著畸变,说明可能存在过度去噪导致光谱信息丢失。由此,初步筛选分解层数为 3~6 层。

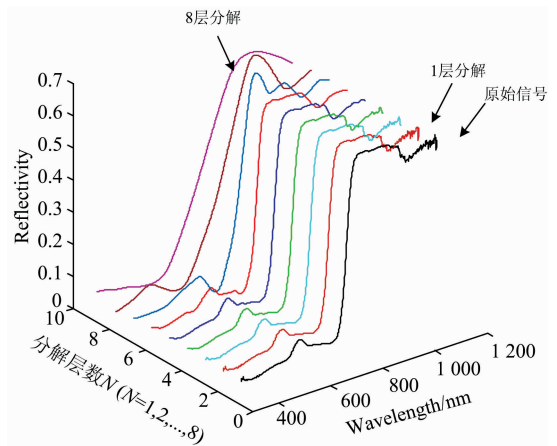


图 2 1~8 层分解去噪后的光谱曲线

Fig. 2 1st~8th layer wavelet decomposition curves of the spectral data

最后,针对 db3~db6 小波基函数、3~6 层分解层数,4 个阈值选择规则(rigrsure, heursure, sqtwolog 和 minimaxi)以及 3 种阈值调整方案(one, sln 和 mln)设计正交试验,以比较不同参数组合的去噪效果。研究采用拟水平法,将阈值调整方案的第三水平(mln)进行重复,构成 4 因素 4 水平,然后直接采用正交表 $L_{16}(4^4)$,得到小波去噪正交试验的结果如表 2 所示。

表 2 小波去噪正交试验结果

Table 2 Wavelet denoising orthogonal test results

| 试验号 | 小波 | 分解层数 | 阈值选择规则 | 阈值调整规则 | SNR | S |
|-----|-----|------|----------|--------|---------------|----------------|
| 12 | db5 | 6 | heursure | one | 241.49 | 0.310 7 |
| 14 | db6 | 4 | sqtwolog | one | 292.48 | 0.358 9 |
| 7 | db4 | 5 | minimaxi | one | 306.66 | 0.363 1 |
| 1 | db3 | 3 | rigrsure | one | 289.76 | 0.370 4 |
| 9 | db5 | 3 | sqtwolog | mln | 313.43 | 0.847 1 |
| 15 | db6 | 5 | heursure | mln | 275.32 | 0.848 2 |
| 3 | db3 | 5 | sqtwolog | mln | 283.05 | 0.853 2 |
| 5 | db4 | 3 | heursure | mln | 307.08 | 0.861 5 |
| 4 | db3 | 6 | minimaxi | mln | 259.66 | 0.869 0 |
| 10 | db5 | 4 | minimaxi | mln | 291.61 | 0.895 2 |
| 8 | db4 | 6 | sqtwolog | sln | 297.03 | 0.899 1 |
| 2 | db3 | 4 | heursure | sln | 308.25 | 0.934 7 |
| 13 | db6 | 3 | minimaxi | sln | 328.42 | 0.938 2 |
| 16 | db6 | 6 | rigrsure | mln | 293.78 | 0.941 8 |
| 6 | db4 | 4 | rigrsure | mln | 324.15 | 0.959 0 |
| 11 | db5 | 5 | rigrsure | sln | 370.5 | 0.980 4 |

为了方便观察与分析,按照平滑度指标从小到大,对表 2 正交试验结果进行排序。结果显示 S 值大致分布在 3 个区间:区间一(0.310 7, 0.370 4)的均值为 0.350 8,区间二(0.847 1, 0.899 1)的均值为 0.867 6,区间三(0.934 7,

0.980 4)的均值为 0.950 8; 对应区间内 SNR 平均值分别为: 282.60, 289.60 和 325.02。比较可知, 区间三的 SNR 和 S 均值都最大, 可能存在去噪不完全的情况; 区间一 S 均值和 SNR 均值都最小, 可能存在过过去噪造成信号发生畸变的情况; 而区间二 S 和 SNR 均值处于中间值, 综合评价说明区间二对应的参数组合具有较好的去噪能力。因此, 从区间二中选择 SNR 最大的值所对应的正交参数组合, 即本研究小波去噪的参数为 (“sqrtwolog”, “mln”, “3”, “db5”)。各生长期冠层光谱经小波去噪后, 分别进行多元散射校正, 用于后续分析。

2.3 基于相关性分析的冬小麦生育期光谱动态特征波长筛选

利用相关系数法分析不同生育期降噪后光谱数据与叶绿素含量的相关性, 结果如图 3, 在 325~700 nm 范围内各生育期冠层光谱反射率与叶绿素含量呈负相关; 在 700~750 nm 范围存在明显尖峰现象且相关系数绝对值均达到最大, 拔节期、孕穗期和扬花期分别达到 -0.46(723 nm), -0.52(700 nm), -0.51(703 nm), 说明了红边区域内特征波段与叶绿素含量相关性较高外, 随生长期特征波段推进表现出动态迁移; 750~1 000 nm 范围内, 拔节期反射率与叶绿素含量呈负相关, 孕穗期反射率与叶绿素含量呈正相关, 扬花期反射率与叶绿素含量相关系数绝对值在 0 附近。综上三个生育期内表征叶绿素含量变化的特征波段在 700~723 nm 区间内动态变化。

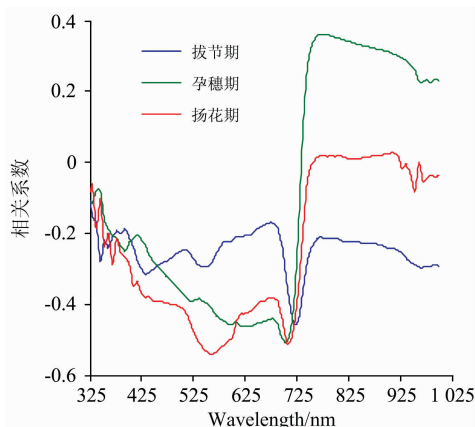


图 3 冬小麦冠层反射率与叶绿素含量相关性分析
Fig. 3 Correlation analysis between the reflectance and chlorophyll content

2.4 基于 MNAOC 指数的冬小麦生育期叶绿素含量诊断

基于(700 nm, 723 nm)区间, 利用 700 和 723 nm 波长处反射率代入式(6)计算 MNAOC 指数。MNAOC 指数与叶绿素含量的相关性分析结果显示, 二者在拔节期、孕穗期和扬花期的相关系数分别为 0.62, 0.66 和 0.65。对比图 3 所示各生育期相关系数绝对值的最大值结果均有所提高, 提高比例分别为 34.78%, 26.92% 和 27.45%。

为了对比基于双波长的 MNAOC 指数与积分运算的 NAOC 指数, 研究中设 NAOC 的积分区间为(700 nm, 723 nm), 计算 NAOC 与叶绿素含量相关系数, 在拔节期、孕穗

期和扬花期分别为 0.65, 0.69 和 0.71。尽管 MNAOC 指数在各生育期与叶绿素的相关性均低于 NAOC, 但是一方面精度降低幅度不大, 另一方面 MNAOC 为 2 个波长处反射率的组合运算, 较 24 个波段的积分运算参与运算变量少, 代数运算复杂度降低。

由样本叶绿素含量统计表 1 可知, 所用叶绿素含量单位为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且小数点后保留 2 位小数, 即上述光谱指数与叶绿素含量相关性讨论远高于 0.000 1% 级。综合实际生产精度要求, 及田间光谱数据反映复杂被测对象、环境和系统信息, 对叶绿素单一目标的分辨率有限, 研究仅以小数点后 1 位为目标, 分别以 0.1, 0.3, 0.5 和 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为间隔, 对间隔区间内样本求均值以实现数据聚类, 通过建立基于 MNAOC 的叶绿素含量诊断一元线性回归模型, 讨论在保证叶绿素诊断灵敏度与精度的前提下, MNAOC 对不同生育期诊断的适用性。

基于 MNAOC 的不同聚类间隔下叶绿素含量诊断模型结果如表 3, 包括: 样本数量、MNAOC 指数对叶绿素含量的建模精度 R_c^2 和验证精度 R_v^2 , 以及模型精度在三个生育期之间的极差。总体而言, 聚类间隔增加样本量减少, 各生育期模型精度得到提高。对比无聚类时在拔节期、孕穗期和扬花期的 R_c^2 分别为 0.384 4, 0.435 6 和 0.422 5; R_v^2 分别为 0.360 4, 0.405 6 和 0.401 5。从 0.1 到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 各生育期模型精度(决定系数)提高显著, $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 R_c^2 依次为 0.840 1, 0.865 5 和 0.833 8, 增幅分别为 63.03%, 45.24% 和 55.94%; R_v^2 依次增加到了 0.823 7, 0.817 4 和 0.807 6, 增幅分别为 65.24%, 54.55% 和 51.35%。而 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 较 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间隔模型精度上升不显著, 三个生育期的 R_c^2 分别为 0.875 1, 0.892 6 和 0.874 3, 依次增加了 4.13%, 3.13% 和 4.86%; R_v^2 分别为 0.851 4, 0.873 7 和 0.834 4, R_c^2 依次增加了 3.36%, 6.89% 和 3.32%。考虑到 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间隔聚类时样本量过少, 可能会降低模型的鲁棒性。同时极差评价 MNAOC 指数在不同生育期之间建模的稳健性结果显示: 各聚类间隔下 R_c^2 和 R_v^2 的极差都小于 0.1, 说明该参数在不同的生育期数据集上建模能够保持相对稳定, 具有普适性。综上所述, 推荐 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为冠层光谱对叶绿素含量诊断的分辨率, 其模型可用于田间叶绿素含量诊断, 计算得出拔节期、孕穗期和扬花期生长期预测模型的 RMSE 依次为 1.520 7, 0.981 0 和 1.300。

2.5 基于双波长运算的冬小麦生育期叶绿素诊断参数比较

针对 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 分辨率, 比较 MNAOC 与 RVI, DVI, NDVI, NDRE 和 SAVI 等 5 种常见双波长运算植被指数对冬小麦叶绿素含量诊断的能力, 一元线性回归模型结果如表 4 所示。

对不同生育期建立的诊断模型精度方面, 总体而言, 各植被指数在拔节期模型决定系数均高于 0.6, 在扬花期低于 0.4, 说明常见植被指数在拔节期的诊断能力普遍高于扬花期。具体分析: (1) 随生育期的推进, 基于 RVI, DVI, NDRE 和 SAVI 的诊断模型精度依次下降, 其中 NDRE 在拔节期诊断的 R_c^2 和 R_v^2 最大分别为 0.747 3 和 0.713 8, 低于 MNAOC 的建模和验证精度 0.840 1 和 0.823 7; (2) NDVI

表 3 基于 MNAOC 的不同间隔聚类下叶绿素含量诊断模型结果

Table 3 Results of chlorophyll concentration diagnostic models by MNAOC under different intervals clustering

| 聚类间隔 | 模型评价 | 拔节期 | 孕穗期 | 扬花期 | 极差 |
|--------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|
| 0.1 mg · L ⁻¹ | 样本数 | 65 | 63 | 65 | |
| | 线性模型 | y=396x-357.67 | y=840.7x-777.52 | y=340.4x-287.74 | |
| | R _c ² | 0.515 3 | 0.595 9 | 0.534 7 | 0.080 6 |
| | R _c ² | 0.498 5 | 0.528 9 | 0.533 6 | 0.035 1 |
| 0.3 mg · L ⁻¹ | 样本数 | 54 | 49 | 46 | |
| | 线性模型 | y=452.45x-412.59 | y=928.31x-862.09 | y=370.38x-317.11 | |
| | R _c ² | 0.647 2 | 0.606 5 | 0.697 1 | 0.090 6 |
| | R _c ² | 0.593 5 | 0.592 9 | 0.672 1 | 0.079 2 |
| 0.5 mg · L ⁻¹ | 样本数 | 45 | 36 | 32 | |
| | 线性模型 | y=495.47x-455.93 | y=928.97x-862.99 | y=413.8x-359.65 | |
| | R _c ² | 0.840 1 | 0.865 5 | 0.833 8 | 0.031 7 |
| | R _c ² | 0.823 7 | 0.817 4 | 0.807 6 | 0.016 1 |
| 0.7 mg · L ⁻¹ | 样本数 | 33 | 28 | 27 | |
| | 线性模型 | y=512.29x-470.81 | y=1170.6x-1095.9 | y=424.69x-370.32 | |
| | R _c ² | 0.875 1 | 0.892 6 | 0.874 3 | 0.018 3 |
| | R _c ² | 0.851 4 | 0.873 7 | 0.834 4 | 0.039 3 |

表 4 基于双波长运算植被指数的冬小麦生育期叶绿素诊断比较

Table 4 Comparison among double-wavelength based vegetation indices in chlorophyll diagnosing for winter wheat during growth

| 植被指数 | 模型评价 | 拔节期 | 孕穗期 | 扬花期 | 极差 |
|------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| RVI | R _c ² | 0.634 9 | 0.568 3 | 0.236 2 | 0.398 7 |
| | R _c ² | 0.619 3 | 0.499 6 | 0.179 3 | 0.440 0 |
| DVI | R _c ² | 0.724 7 | 0.616 1 | 0.227 8 | 0.496 9 |
| | R _c ² | 0.627 5 | 0.539 3 | 0.114 6 | 0.512 9 |
| NDVI | R _c ² | 0.690 4 | 0.808 5 | 0.385 2 | 0.423 3 |
| | R _c ² | 0.637 7 | 0.769 4 | 0.287 5 | 0.481 9 |
| NDRE | R _c ² | 0.747 3 | 0.516 3 | 0.403 8 | 0.343 5 |
| | R _c ² | 0.713 8 | 0.463 7 | 0.355 0 | 0.358 8 |
| SAVI | R _c ² | 0.620 4 | 0.496 0 | 0.103 4 | 0.517 0 |
| | R _c ² | 0.606 2 | 0.252 7 | 0.102 4 | 0.503 8 |

随生育期推进诊断模型精度呈先上升后下降的趋势,其中孕穗期诊断模型 R_c² 和 R_c² 值达到最大,分别为 0.808 5 和 0.769 4,低于 MNAOC 的 0.865 5 和 0.817 4;(3)针对扬花期,5 种常见指数中基于 NDRE 的诊断模型 R_c² 和 R_c² 最大,分别为 0.403 8 和 0.355 0,仍然低于 MNAOC 的诊断精度 (R_c²=0.833 8 和 R_c²=0.807 6)。

比较生育期诊断模型精度之间的极差,结果显示 5 种常见植被指数在三个生育期之间的模型精度极差都大于 0.1,说明各指数在不同生育期之间的普适性都低于 MNAOC。尽管如此,与其他常见植被指数相比,NDRE 在生育期进行叶绿素含量诊断的极差最小,建模集和验证集精度极差分别为 0.343 5 和 0.358 8,说明由于 NDRE 中包含红边区域内(730 nm)的光谱特征,使得它比 RVI, DVI, NDVI 和 SAVI 参数

能够较好应对生育期光谱的动态迁移现象。而 MNAOC 在多个生育期之间建立模型的精度极差远小于 0.1,也正是由于它利用位于红边范围内的特征波长来计算该区域的光谱面积,更全面包含了由于生育期导致的光谱动态迁移特征,从而可以提高其在多个生育期之间的适用性。

综上所述,与常见的双波长运算植被指数相比,本文提出的 MNAOC 指数无论是在模型精度上还是在多个生育期诊断的适用性上都体现了其优势。尽管如此,MNAOC 指数基于红边内近似矩形区域面积比所提出,其应用推广的可靠性还需要多年的田间数据来进一步的验证并修正,以期最终可为大田环境中作物生育期叶绿素含量快速诊断提供技术支持。

3 结 论

为了解决由于不同生育期特征波段迁移而导致的基于固定特征波段代数运算的植被指数不能适用于多个生育期叶绿素营养诊断的问题,在进行田间冬小麦冠层光谱去噪预处理的基础上,研究分析了拔节期、孕穗期和扬花期 3 个关键生育期冠层反射光谱与叶绿素含量的动态响应关系,提出了一种能够克服光谱迁移的基于连续光谱覆盖面积的修正指数 MNAOC,得出以下结论:

(1)经小波关键参数正交试验,以 SNR 和 S 指标进行综合评价,当小波去噪函数 wden 的参数为("sqtwolog", "mln", "3", "db5")时,能够在信号不失真的前提下取得最大的信噪比。

(2)由各生育期光谱与叶绿素含量相关性分析得出,拔节期、孕穗期和扬花期相关系数最大值分别为: -0.46(723 nm), -0.52(700 nm), -0.51(703 nm),确定其生育期特征波长迁移范围(700 nm, 723 nm),并基于该区间计算 MNAOC 指数用于叶绿素含量诊断。

(3) 在讨论叶绿素含量分辨率的基础上, 选取 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 分辨间隔, 利用 MNAOC 指数建立叶绿素诊断一元线性回归模型, 结果分别为: 拔节期 $R_c^2 = 0.840 1$, $R_e^2 = 0.823 7$; 孕穗期 $R_c^2 = 0.865 5$, $R_e^2 = 0.817 4$; 扬花期 $R_c^2 = 0.833 8$, $R_e^2 = 0.807 6$ 。三个生育期回归精度极差都小于 0.1, 说明了 MNAOC 指数对多个生育期叶绿素含量诊断的普适性。

(4) 本文提出的 MNAOC 指数与 RVI 和 NDVI 等常见的

双波长运算植被指数相比, 因为利用了位于红边范围内的特征波长 700 和 723 nm 来计算该区域的光谱面积, 更全面地包含了由于生育期导致的光谱动态迁移特征, 使得其在模型精度上和多个生育期诊断的适用性上都体现了其优势, 未来还将继续开展试验为大田环境中实时诊断小麦的氮素营养提供技术支持。

References

- [1] Shardendu Kumar Singh, James H Houx, Michael J W, et al. *Field Crops Research*, 2017, 209: 47.
- [2] Li Dong, Cheng Tao, Zhou Kai, et al. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 129: 103.
- [3] Tan Kezhu, Wang Shuwen, Song Yuzhu, et al. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2018, 172: 68.
- [4] Cao Q, Miao Y, Li F, et al. *Precision Agriculture*, 2016, 18(1): 1.
- [5] Zhao B, Duan A W, Syed T A, et al. *European Journal of Agronomy*, 2018, 94: 113.
- [6] Li Fei, Bodo Mistele, Hu Yuncai, et al. *European Journal of Agronomy*, 2014, 52: 198.
- [7] Li F, Miao Y X, Feng G H, et al. *Field Crops Research*, 2014, 157: 111.
- [8] Gnyp M L, Miao Y X, Yuan F, et al. *Field Crops Research*, 2014, 155: 42.
- [9] Asa G, Jan M, Veronika K M, et al. *Forests*, 2016, 7(10): 226.
- [10] Jesús Delegido, Luis Alonso, Gonzalo González, et al. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, 12(3): 165.
- [11] XU Xin-gang, ZHAO Chun-jiang, WANG Ji-hua, et al(徐新刚, 赵春江, 王纪华, 等). *Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报)*, 2013, 32(4): 351.
- [12] Wang Junjie, Wang Tiejun, Shi Tiezhu, et al. *Remote Sensing*, 2015, 7(11): 15340.

A Modified Vegetationindex for Spectral Migration During Crop Growth

LIU Hao-jie¹, LI Min-zan¹, ZHANG Jun-yi¹, GAO De-hua¹, SUN Hong^{1*}, WU Jing-zhu²

1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Key Laboratory of Big Data Technology for Food Safety, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

Abstract The vegetation indices based on fixed characteristic wavelengths cannot be applied to the diagnosis of chlorophyll content across multiple growth stages. To solve this issue, this study proposed a diagnostic parameter based on spectral coverage area, which can be applied in multiple growth stages. The canopy reflectance spectra of 325~1 075 nm and leaf samples were collected at jointing stage, booting stage and flowering stage. The spectral were pretreated by wavelet denoising and multiple scattering correction (MSC) method and the chlorophyll content was measured by spectrophotometry. The migration range of characteristic wavelengths across different growth stages was determined by correlation analysis and a spectral parameter, named Modified Normalized Area Over reflectance Curve (MNAOC), was proposed based on the migration range coverage area. Firstly, the orthogonal experiment of wavelet parameters was designed for selecting the optimal parameters combination of wavelet basis function, decomposition layer number, threshold selection rule and threshold adjustment scheme. By the comprehensive evaluation of the SNR and S, the best parameter set was (“sqtwolog”, “mln”, “3”, “db5”). Then, correlation analysis showed that the migration range was (700 nm, 723 nm) within the characteristic wavelengths across different growth stages. After the resolution analysis, linear regression models were established for chlorophyll content diagnosis by the MNAOC with the concentration of $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Among them, R_c^2 of the models were 0.840 1, 0.865 5 and 0.833 8 for each stage respectively, and R_e^2 of the models were 0.823 7, 0.817 4 and 0.807 6 for each stage respectively. Finally, compared with the dual-wavelength based vegetation indices, the applicability advantage of MNAOC across multiple growth stages was verified. The comparison showed that MNAOC calculated by 700 and 723 nm, which contained the spectral dynamic migration characteristics, was superior to other dual-wavelength based vegetation indices, such as Ratio Vegetation Index (RVI) and Normalized Difference Vegetation In-

dex (NDVI), in terms of model accuracy and universality in multiple growth periods. The results provided support for diagnosing chlorophyll content during the growth of winter wheat in field environment.

Keywords Chlorophyll diagnosing; Spectral migration; Different growth stages response; Spectral coverage area; Vegetation index

* Corresponding author

(Received Dec. 3, 2018; accepted Apr. 16, 2019)

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

《光谱学与光谱分析》2020年征订启事

国内邮发代码: 82-68

国外发行代码: M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊,国内统一刊号:CN 11-2200/O4,国际标准刊号:ISSN 1000-0593, CODEN 码:GYGFED,国内外公开发行人,大16开本,332页,月刊;是中国科协主管,中国光学学会主办,钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版,每期售价95元,全年1140元。刊登主要内容:激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各个领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊,中国科协优秀科技期刊,中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊,中国科技论文统计源刊,“中国科学引文数据库”,“中国物理文摘”,“中国学术期论文摘”,同时被国内外的CSCD,SCI,AA,CA,Ei,AJ,MEDLINE,Scopus等文献机构收录。根据国家科技部信息研究所发布信息,中国科技期刊物理类影响因子及引文量《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告(广告经营许可证:京海市监广登字20170260号)。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅,若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址:北京市海淀区学院南路76号(南院),

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码:100081

联系电话:010-62181070,62182998

电子信箱:chnghxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱:gp2008@vip.sina.com

网 址: <http://www.gpxygpfx.com>

