

基于正交变换与 SPXY 样本划分的冬小麦叶绿素诊断

毛博慧¹ 孙红¹ 刘豪杰¹ 张俊逸¹ 李民赞^{1,2} 杨立伟¹

(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. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 冬小麦叶绿素含量的准确预测, 可为冬小麦田间精细化管理提供依据。采集冬小麦冠层 400 ~ 900 nm 范围反射光谱, 经一阶微分预处理后, 为了抑制由于连续波长自变量多重共线性对叶绿素含量诊断模型的干扰, 利用 Gram - Schmidt 正交变换算法初步提取叶绿素敏感波长特征参数为 848、620、677 nm。在定量模型的建立过程中, 对比了传统随机样本集划分与以空间中样本间距离远近为指导的 SPXY 样本集划分方法, 并讨论了大田冠层反射光谱对叶绿素浓度诊断的最优精度, 研究结果表明, 以 620 nm 和 677 nm 两个敏感波长结合 SPXY 样本划分方法建立的多元线性回归模型预测精度较高, 且叶绿素质量浓度为 0.3 mg/L 分辨间隔时, 建模决定系数和验证决定系数分别达 0.730 和 0.739, 可为无损检测冬小麦拔节期叶绿素含量提供技术支持。

关键词: 冬小麦; 叶绿素; 光谱分析; Gram - Schmidt 算法; SPXY 样本划分

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0160-06

Prediction of Winter Wheat Chlorophyll Content Based on Gram - Schmidt and SPXY Algorithm

MAO Bohui¹ SUN Hong¹ LIU Haojie¹ ZHANG Junyi¹ LI Minzan^{1,2} YANG Liwei¹

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Accurate prediction of wheat chlorophyll content is important for guiding precision management in the field. The canopy spectrum of winter wheat canopy was measured by ASD Field Spec Handheld 2, and the first-order differential processing method was conducted on the band of 400 ~ 900 nm in the paper. In order to select the sensitive bands for the chlorophyll content detection of winter wheat, the Gram - Schmidt transformation algorithm was used in the research. The insignificant variables and the redundant information were identified and removed from the independent variables set. As a result, the orthogonal transformation data of first-order differential at 848 nm, 620 nm and 677 nm were extracted. A representative set of wheat chlorophyll content of modeling samples was selected by using sample set partitioning based on joint $x - y$ distance algorithm (SPXY). The results showed that multiple linear regression (MLR) prediction model based on Gram - Schmidt and SPXY algorithm is better than the random sampling method. The chlorophyll content of winter wheat were clustered respectively at intervals of 0.2 mg/L, 0.3 mg/L and 0.5 mg/L. The modeling results showed that the optimal resolution was at 0.3 mg/L, the determination coefficient R_c^2 and the R_v^2 of the calibration model which was built based on 620 nm and 677 nm sensitive bands were respectively 0.730 and 0.739. The study could help to evaluate the nutritional status of winter wheat and precision fertilization.

Key words: winter wheat; chlorophyll content; spectrum analysis; Gram - Schmidt algorithm; SPXY algorithm

收稿日期: 2017-07-10 修回日期: 2017-11-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300600-2016YFD0300606、2016YFD0300610)、国家自然科学基金项目(31501219)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017TC029)

作者简介: 毛博慧(1994—),女,硕士生,主要从事光谱检测传感器研究,E-mail: maobohui@cau.edu.cn

通信作者: 李民赞(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事精细农业系统与农业信息化技术研究,E-mail: limz@cau.edu.cn

引言

叶绿素含量与作物冠层光合作用的强弱有密切关系,是其生长状态的良好指示指标^[1]。光谱分析技术因其具有无损和实时性好的优点广泛应用于小麦、玉米等作物叶绿素含量的反演^[2-6]。

为了有针对性地检测目标含量,对采集的连续光谱通常采用数据降维的方法来获取检测参数^[7],如敏感波长或构建植被指数选取、主成分分析法等。基于相关性分析,吴长山等^[8]选取 762 nm 为敏感波长,建立了水稻和玉米叶绿素密度回归模型,线性回归的标准差为 0.272 g/m²,相对误差为 19.4%,说明可以利用导数光谱来对作物的叶绿素密度进行统一的估计。潘蓓等^[9]利用 794 nm 和 763 nm 组合的比值植被指数对苹果冠层叶绿素含量进行了反演。基于主成分分析选取代表性主成分数,赵毅、岳学军、张晓东等^[10-12]分别建立了冬小麦、柑橘叶片叶绿素含量和油菜氮素定量分析模型。

然而,由于在大田中光照环境、作物结构、内部养分元素关联等条件复杂,作物冠层采集的反射光谱与叶绿素含量之间关系也难以简单解析,基于线性相关分析的光谱参数选取忽视了光谱与对象间的非线性关系。而王惠文等^[13]研究指出,如采用常规的主成分分析法,由于主成分回归的成分提取仅在自变量集合中进行,没有考虑提取成分与因变量的相关关系,因此,第一主成分是对自变量信息概括最高的综合变量,但对因变量的解释能力并不一定最强。冯利华等^[14]也验证了主成分分析失效的现象。基于正交变换的 Gram - Schmidt 算法^[15]的提出可快速筛选出对因变量有最佳解释作用的自变量,并删除变量中的冗余信息,为敏感诊断参数提供支持。

此外,在光谱建模样本集划分方面,GALVÃO 等^[16-18]研究发现校正集选择方法会影响近红外定量模型预测的性能。经比较 CS (Conventional selection)、KS (Kennard - Stone) 和 SPXY (Sample set partitioning based on joint $x - y$ distance) 3 种校正集选择方法对光谱学诊断定量模型准确性和稳健性的影响,指出 SPXY 校正集选择方法能显著提高光谱学定量模型的预测准确度^[19]。

因此,为了建立高精度的大田冬小麦冠层叶绿素含量光谱学诊断模型,本文采集冬小麦冠层反射光谱,应用基于正交变换理论的 Gram - Schmidt 算法,进行光谱数据降维和有效敏感波长筛选,讨论叶绿素含量定量诊断建模中样本集划分方法对冬小麦叶绿素建模精度与稳定性的影响,并分析大田采集

冬小麦冠反射光谱对叶绿素浓度的有效分辨率,最终建立冬小麦叶绿素含量诊断模型,以期作为作物管理提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地及种植情况

试验于 2015 年 5 月 5 日 10:00—14:00 在山东省桓台试验农场进行,选用冬小麦种植品种为小偃 22 号,物候期为拔节后,植株高度为 60 ~ 90 cm。试验在 110 m × 45 m 的冬小麦种植区域中进行。测试当天天气晴好,采集冬小麦冠层叶片反射光谱数据并进行叶片采样,样本 80 个,将采样叶片带回实验室用分光光度法测量叶片的叶绿素含量。

1.2 光谱数据采集

冬小麦冠层反射光谱采用美国 ASD FieldSpec HH 光谱辐射仪进行采集,其测量波长范围为 325 ~ 1 075 nm,光谱分辨率 1 nm,光谱数据采集选择晴朗无云的天气,在北京时间 10:00—14:00 时采集田间冬小麦冠层叶片反射光谱。光谱仪探头垂直向下,距冬小麦叶片冠层 30 cm 左右,每次采集目标光谱前后进行参考板校正,去除暗电流的影响,每点反复测量 3 次取平均值作为该样本光谱测量结果。

1.3 叶绿素含量测定

将田间采集叶片样本装在密封袋带回实验室,于当日测定叶绿素含量。测定之前,首先去除叶片主茎,将叶片剪碎混匀,称取 0.4 g 用 99% 丙酮与无水乙醇按体积比 2:1 的混合液 25 mL 浸泡 24 h。在浸泡过程中摇动 3 次,以加速叶绿素的提取。取萃取液用分光光度计分别测定 645 nm 和 663 nm 处的吸光度。叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量计算公式为

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

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

式中 A_{663} ——663 nm 波长处的吸光度

A_{645} ——645 nm 波长处的吸光度

将 C_a 和 C_b 相加即得叶绿素总量 C_T 。

1.4 Gram - Schmidt 算法

Gram - Schmidt 正交变换算法^[20]总可以使任意线性无关向量组变换成为正交向量集合。定理为:设自变量 X 和因变量 Y ,自变量 x_1, x_2, \dots, x_n 经过 Gram - Schmidt 正交变换成为正交集,即

$$X = ZR \quad (3)$$

其中 $Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_s]$

$$z_s = x_s - \sum_{k=1}^{s-1} \frac{x'_s z_k}{z'_k z_k} \quad (z_1 = x_1)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_2^1 & r_3^1 & \cdots & r_s^1 \\ 0 & 1 & r_3^2 & \cdots & r_s^2 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & r_s^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_j^k = \frac{x_j' z_k}{z_k' z_k} \quad (j=2,3,\dots,s; k=1,2,\dots,s-1)$$

R 为可逆矩阵,则可得

$$Z = XR^{-1} \quad (4)$$

假设 Y 与 Gram-Schmidt 变量 Z 有线性关系,并且线性回归方程为

$$Y = Z\beta \quad (5)$$

式中 β ——回归系数

把式(4)代入式(5),则得到

$$Y = XR^{-1}\beta \quad (6)$$

因此, Gram-Schmidt 正交变换算法对自变量进行直角变换,通过选择对判别分类解释性最强的信息,删除无显著解释作用的信息以及重复解释的信息,并把挑选出来的解释变量集合变换成若干正交变量。一方面实现了判别分析模型中的变量筛选,同时也解决了自变量多重共线条件下的有效建模问题。

1.5 SPXY 算法

SPXY 法是一种基于统计基础的样本集选择方法^[16],具有能够有效地覆盖多维向量空间,从而改善所建模型的预测能力的优点。SPXY 在样品间距离计算时将 x 变量和 y 变量同时考虑在内,其距离公式为

$$d_x(p, q) = \sqrt{\sum_{j=1}^J [x_{p(j)} - x_{q(j)}]^2} \quad (p, q \in [1, N]) \quad (7)$$

式中 J ——样本数

$$\max_{p, q \in [1, N]} = \sqrt{(y_p - y_q)^2} \quad (p, q \in [1, N]) \quad (8)$$

x 变量和 y 变量同时考虑在内,其距离公式如 SPXY 的逐步选择的过程和 KS 法相似,但用 $d_{xy}(p, q)$ 代替了 $d_x(p, q)$,同时为了确保样本在 x 和 y 空间具有相同的权重, $d_x(p, q)$ 和 $d_y(p, q)$ 分别除以它们在数据集中的最大值,因此标准化的 xy 的距离公式为

$$d_{xy}(p, q) = \frac{d_x(p, q)}{\max_{p, q \in [1, N]} d_x(p, q)} + \frac{d_y(p, q)}{\max_{p, q \in [1, N]} d_y(p, q)} \quad (9)$$

2 结果与分析

2.1 光谱数据预处理

试验共采集 80 个冬小麦样本,总体叶绿素质量浓度均值 43.463 mg/L,最大值和最小值分别为

49.789 mg/L 和 34.464 mg/L。

80 个样本的原始光谱曲线如图 1 所示,其他样本光谱分布在两条曲线之间。观察 325 ~ 1 075 nm 范围内反射率情况可知:冬小麦样本在 400 ~ 900 nm 波段的谱图整体比较平滑,符合典型植被光谱曲线特征,即 400 ~ 450 nm 波段为叶绿素强吸收带,425 ~ 490 nm 波段是类胡萝卜素强吸收带,所以紫外线和蓝紫光绝大部分被作物吸收,平均反射率小于 0.1。550 nm 波长附近是叶绿素的强反射区,600 ~ 700 nm 波段是叶绿素的强吸收带,700 ~ 750 nm 植物反射率急剧上升。

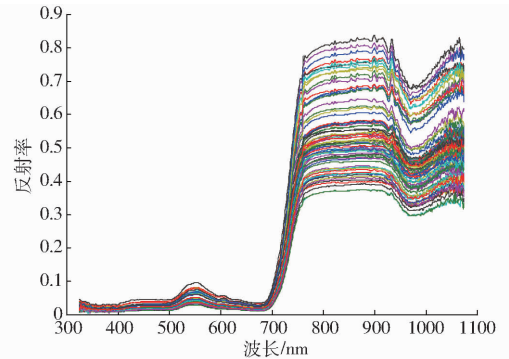


图 1 原始光谱反射率

Fig.1 Original reflectance spectra

由于冬小麦冠层光谱在大田环境中采集,存在土壤背景、光照、温度和风吹等环境因素的影响,因此,为了降低光谱数据中存在的高频环境随机噪声和仪器漂移的影响,研究选取一阶微分对原始数据进行预处理。对图 1 显示的光谱曲线进行一阶微分预处理之后的结果如图 2 所示。其中,对离散变量的一阶微分光谱计算公式为

$$f'(x) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x} \quad (10)$$

式中 x_i ——波段中心波长

Δx ——波长 x_{i+1} 到 x_{i-1} 的差值

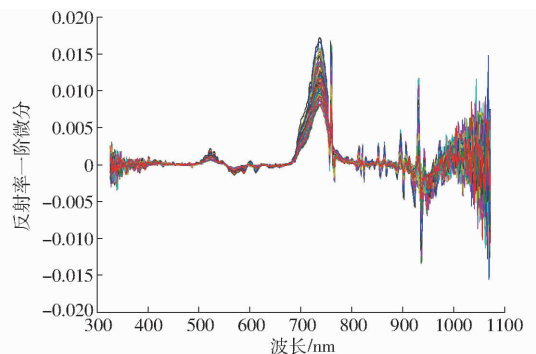


图 2 反射率一阶微分光谱

Fig.2 First-order differential reflectance spectra

2.2 Gram-Schmidt 算法提取敏感波段参数

光谱数据经过预处理后,首先分析了其与叶绿

素含量的相关关系,结果表明经过光谱反射率经过一阶微分预处理以后,在 400~900 nm 波长范围内,共有 848、860、440 nm 等 30 个波长与叶绿素量的相关性高于 0.3。但进一步观察发现,部分波长之间存在很高的相关性,例如 846 nm 与 858、844 nm 的相关系数分别达到 0.88 和 0.68。

为了避免光谱数据间多重共线性的影响,研究采用 Gram-Schmidt 算法,在正交化的过程中,对判别分析模型进行变量筛选,并且将挑选出来的解释变量集合变换成若干直交变量。研究对 400~900 nm 连续波段进行特征波段提取。分别对每个波段经过一阶微分预处理的光谱数据与叶绿素含量测定值进行一元线性回归分析,得出 t 值,与检验 $t_{0.025}(78) = 1.990$ 值进行比较,提取绝对值最大的 848 nm 波长作为主成分 Z_1 ,对剩余波段经预处理后的冬小麦冠层光谱反射率数据分别与 848 nm 做 Gram-Schmidt 正交变换,得到的正交向量组与叶绿素含量再做一元线性回归分析,得出 t 值,与检验 $t_{0.025}(77) = 1.991$ 值进行比较,提取绝对值最大的 620 nm 波长作为 Z_2 ,如此迭代直到所有的 t 值均不通过检验,选出 677 nm 作为 Z_3 。

Z_1 、 Z_2 、 Z_3 即是利用 Gram-Schmidt 算法在 400~900 nm 波段内提取的主成分,分别为 848、620、677 nm 处冬小麦冠层反射率一阶微分的正交变换。620 nm 和 677 nm 波长处于叶绿素的强吸收带,848 nm 波长附近处为水的弱吸收点,说明植物水分对叶绿素含量的浓度具有一定的影响。

分析 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 与叶绿素含量的相关关系,相关系数分别为 0.48、0.58 和 0.30。由一阶微分光谱与叶绿素含量间相关性分析结果,848、620、677 nm 波长处光谱微分数据与叶绿素含量相关性分别为 0.48、0.46 和 0.35。说明 Gram-Schmidt 算法选取的 3 个主成分中 620 nm 波长处,经正交变换后的向量组包含了更多能解释叶绿素指标的信息,使得二者之间的相关系数为 0.58,大于没有经过正交变换前的 0.46。Gram-Schmidt 算法对 400~900 nm 连续的光谱信息进行了有效降维,可用于叶绿素含量检测。

2.3 叶绿素含量检测模型

2.3.1 样本划分方法比较

为了比较常见随机样本集划分法与以空间中样本间距离远近为指导的 SPXY 样本划分法对叶绿素含量诊断模型的影响,研究分别采用两种方法建立了多元线性回归(Multiple linear regression, MLR)模型。应用 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为自变量,建模时 60 组用于建模,20 组用于验证。设定 T 检验和 F 检验的置信区

间为 95% 时变量 Z_1 未通过检验,因此保留 Z_2 和 Z_3 为自变量,回归结果如表 1 所示。结果表明,利用 SPXY 样本划分法进行样本建模集和验证集数据划分后,叶绿素含量诊断 MLR 模型的 R_c^2 为 0.454, R_v^2 为 0.379,比采用随机样本集划分法所建立模型精度有所提高。

表 1 多元线性回归模型参数

Tab. 1 Parameters of multiple linear regression

分类方法	R_c^2	R_v^2	Sig. 值
随机划分	0.248	0.167	3.42×10^{-4}
SPXY 划分	0.454	0.379	3.31×10^{-8}

2.3.2 叶绿素浓度检测精度讨论

由于作物光谱学诊断法本身是基于冠层反射光谱来判别作物内部生理营养的一种间接检测方法,因此它对叶绿素浓度的反映,在分辨精度上可能存在一定的限制。因此,为了讨论大田环境测得的冬小麦冠层反射率光谱数据对植物体内叶绿素含量的分辨精度,在叶绿素质量浓度为 0.1 mg/L 诊断的基础上(表 3),按照叶绿素质量浓度 0.2、0.3、0.5 mg/L 为间隔对象聚类,基于 Z_2 和 Z_3 ,建模集与验证集样本数比 3:1, T 检验和 F 检验的置信区间为 95%,分别采用随机法和 SPXY 划分集建立 MLR 回归结果如表 2 所示。

表 2 聚类后多元线性回归模型参数

Tab. 2 Parameters of multiple linear regression after clustering

分类方法	质量浓度间隔/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	R_c^2	R_v^2	Sig. 值
随机划分	0.2	0.572	0.480	8.73×10^{-5}
	0.3	0.643	0.411	2.59×10^{-4}
	0.5	0.595	0.907	1.69×10^{-2}
SPXY 法	0.2	0.690	0.694	2.48×10^{-6}
	0.3	0.730	0.739	2.86×10^{-5}
	0.5	0.732	0.831	6.85×10^{-5}

由表 2 和表 3 讨论叶绿素含量诊断最优分辨率可知,整体而言,随着叶绿素质量浓度间隔由 0.1~0.5 mg/L 的增加,两种数据集划分法所建模型 R_c^2 和 R_v^2 均呈上升趋势。

(1) 对随机法,当最优检测质量浓度间隔为 0.3 mg/L, R_c^2 和 R_v^2 分别为 0.643 和 0.411,当叶绿素质量浓度间隔达 0.5 mg/L 时, R_c^2 不仅没有增加反而下降为 0.595,但验证 R_v^2 突变为 0.907。一方面说明随着浓度间隔的增加能增加模型检测精度,另一方面说明随机法划分建模样本集会导致数据代表性不足的问题。

(2) 对 SPXY 法,质量浓度间隔为 0.3 mg/L 和

0.5 mg/L 二者的 R_c^2 分别为 0.730 和 0.732, 较为接近; 且 0.3 mg/L 时 R_c^2 和 R_v^2 分别为 0.730 和 0.739 较为接近, 说明模型稳定性较好。

综上所述, 以模型对叶绿素质量浓度分辨率尽可能高, 且模型稳定性和精度较高为原则, 大田冬小麦冠层反射率光谱数据对叶绿素质量浓度的最优分辨率精度为 0.3 mg/L。采用 SPXY 样本划分法所建立的 MLR 模型 R_c^2 和 R_v^2 分别为 0.730 和 0.739, 建模结果如图 3 所示。叶绿素含量多元线性回归模型为

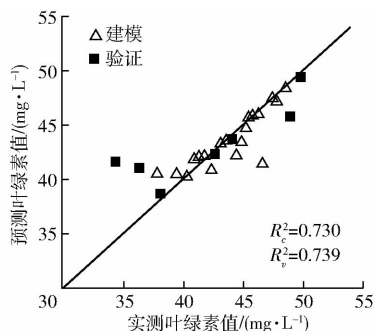


图3 叶绿素含量预测模型

Fig.3 Prediction models of chlorophyll content

$$Y = 0.502 - 24.997Z_2 + 10.69Z_3 \quad (11)$$

式中 Y ——冬小麦叶绿素质量浓度预测值

Z_2 ——Gram-Schmidt 算法选出的第 2 主成分

Z_3 ——Gram-Schmidt 算法选出的第 3 主成分

3 结论

(1) 原始光谱经一阶微分变换后, 基于 Gram-Schmidt 正交变换算法筛选出 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 变量分别为 848、620、677 nm 微分光谱的正交变换数据, 它们作为叶绿素含量诊断的特征参数。

(2) 比较随机样本划分与 SPXY 样本划分法在冬小麦叶绿素含量诊断建模中的差异结果表明, SPXY 样本划分法可有效提高模型的预测能力。

(3) 为了确定叶绿素诊断模型的最优分辨率, 对叶绿素质量浓度以 0.2、0.3、0.5 mg/L 为间隔进行聚类, 结合 SPXY 样本划分法建立多元线性回归模型, 结果表明, 叶绿素含量诊断模型的最优分辨率为 0.3 mg/L, 建模 R_c^2 和 R_v^2 分别为 0.730 和 0.739。

参 考 文 献

- 童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 等. 高光谱遥感的多学科应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- JAGO R A, CUTLER M E J, CURRAN P J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(3):217-224.
- HABOUDANE D, MILLER J R, TREMBLAY N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2):416-426.
- WALBURG G, BAUER M E, DAUGHTRY C S T. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield and reflectance characteristics of corn canopies[J]. Agronomy Journal, 1982, 74(4):677-683.
- 梁亮, 杨敏华, 张连蓬, 等. 基于 SVR 算法的小麦冠层叶绿素含量高光谱反演[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20):162-171. LIANG Liang, YANG Minhua, ZHANG Lianpeng, et al. Chlorophyll content inversion with hyperspectral technology for wheat canopy based on support vector regression algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20):162-171. (in Chinese)
- 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(2):172-177. XUE Lihong, CAO Weixing, LUO Weihong, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2):172-177. (in Chinese)
- 臧卓, 林辉, 孙华, 等. 南方主要针叶树种高光谱数据降维分类研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 30(11):20-25. ZANG Zhuo, LIN Hui, SUN Hua, et al. Study on hyper-spectral dimension reduction and classification for main southern coniferous species[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(11):20-25. (in Chinese)
- 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3):228-232. WU Changshan, XIANG Yueqin, ZHENG Lanfen, et al. Estimating chlorophyll density of crop canopies by using hyperspectral data[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(3):228-232. (in Chinese)
- 潘蓓, 赵庚星, 朱西存, 等. 利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8):2203-2206. PAN Bei, ZHAO Gengxing, ZHU Xicun, et al. Estimation of phosphorus content in apple tree canopy based on hyperspectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8):2203-2206. (in Chinese)
- 赵毅, 文瑶, 孙红, 李民赞, 等. 冬小麦冠层营养诊断光谱检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊):222-227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S036&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.036. ZHAO Yi, WEN Yao, SUN Hong, et al. Design and test of nutrition diagnosis system for wheat canopy based on spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):222-227. (in Chinese)
- 岳学军, 全东平, 洪添胜, 等. 柑橘叶片叶绿素含量高光谱无损检测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1):294-302. YUE Xuejun, QUAN Dongping, HONG Tiansheng, et al. Non-destructive hyperspectral measurement model of chlorophyll

- content for citrus leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1):294 - 302. (in Chinese)
- 12 张晓东, 毛罕平, 程秀花. 基于 PCA - SVR 的油菜氮素光谱特征定量分析模型[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4):161 - 165. ZHANG Xiaodong, MAO Hanping, CHENG Xiuhua. Rape nitrogen content spectral character models based on PCA - SVR method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):161 - 165. (in Chinese)
- 13 王惠文, 王劫, 黄海军. 主成分回归的建模策略研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6):661 - 664. WANG Huiwen, WANG Jie, HUANG Haijun. Modeling strategy of principle component regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 34(6):661 - 664. (in Chinese)
- 14 冯利华, 贾春瑶. 主成分分析在环境质量评价中的失效问题[J]. 数学的实践与认识, 2005, 35(6):12 - 16. FENG Lihua, JIA Chunyao. Ineffective problem of principal component analysis in assessment of environmental quality[J]. Mathematics in Practice & Theory, 2005, 35(6):12 - 16. (in Chinese)
- 15 王惠文, 夏棒, 孟洁. 快速 Gram - Schmidt 回归方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(9):1259 - 1262. WANG Huiwen, XIA Bang, MENG Jie. Fast algorithm of Gram - Schmidt regression method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 39(9):1259 - 1262.
- 16 GALVÃO R K H, ARAUJO M C U, JOSÉ G E, et al. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67(4):736 - 40.
- 17 展晓日, 朱向荣, 史新元, 等. SPXY 样本划分法及蒙特卡罗交叉验证结合近红外光谱用于橘叶中橙皮苷的含量测定[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4):964 - 9687. ZHAN Xiaori, ZHU Xiangrong, SHI Xinyuan, et al. Determination of hesperidin in tangerine leaf by near-infrared spectroscopy with SPXY algorithm for sample subset partitioning and monte carlo cross validation[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2009, 29(4):964 - 968. (in Chinese)
- 18 PENG Y F, LUO H P, LUO X N, et al. SPXY Sample classification method and successive projections algorithm combined with near-infrared spectroscopy for the determination of total sugar content of southern xinjiang jujube[J]. Advanced Materials Research, 2014, 1030 - 1032:352 - 356.
- 19 詹雪艳, 赵娜, 林兆洲, 等. 校正集选择方法对于积雪草总苷中积雪草苷 NIR 定量模型的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014(12):3267 - 3272. ZHAN Xueyan, ZHAO Na, LIN Zhaozhou, et al. Effect of algorithms for calibration set selection on quantitatively determining asiaticoside content in centella total glucosides by near infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014(12):3267 - 3272. (in Chinese)
- 20 尹小君, 李满春, 赵思峰, 等. Gram - Schmidt 算法与 GRNN 融合的加工番茄早疫病高光谱预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):136 - 140. YING Xiaojun, LI Manchun, ZHAO Sifeng, et al. Highspectral prediction of early blight in processing tomato based on Gram - Schmidt algorithm and GRNN[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(12):136 - 140. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- 16 杨晔宏, 李伟生. 小生境概率主成分分析分布估计算法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(7):204 - 207. YANG Yehong, LI Weisheng. Estimation of distribution algorithms based on niche and probabilistic principal component analysis[J]. Microelectronics & Computer, 2006, 23(7):204 - 207. (in Chinese)
- 17 王幼琴, 赵忠盖, 刘飞. 缺失数据下基于 EM 算法的非线性过程建模[J]. 化工学报, 2016, 67(3):931 - 939. WANG Youqin, ZHAO Zhonggai, LIU Fei. Identification of nonlinear parameter varying systems with EM algorithm under missing output data[J]. CIESC Journal, 2016, 67(3):931 - 939. (in Chinese)
- 18 王戈, 于宏毅, 沈智翔, 等. 一种基于 EM 算法的快速收敛参数估计方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2013, 43(2):532 - 537. WANG Ge, YU Hongyi, SHEN Zhixiang, et al. Fast convergence parameter estimation method based on expectation-maximum algorithm[J]. Journal of University: Engineering and Technology Edition, 2013, 43(2):532 - 537. (in Chinese)
- 19 JIN Xing, WANG Siyun, HUANG Biao, et al. Multiple model based LPV soft sensor development with irregular/missing process output measurement [J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(2):165 - 172.
- 20 JUDI S. Dealing with missing data[J]. Res Lett Inf Math Sci, 2002(3):153 - 160.
- 21 DENG Jing, HUANG Biao. Identification of nonlinear parameter varying systems with missing output data[J]. Aiche Journal, 2012, 58(11):3454 - 3467.
- 22 PERONA P, MALIK J. Scale-space and edge-detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Mechine Intelligence, 1990, 12(7):629 - 639.