

吕 玮, 李玉环, 毛伟兵, 等. 基于高光谱的小麦旗叶净光合速率的遥感反演模型的比较研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 582-586.

LÜ Wei, LI Yu-huan, MAO Wei-bing, et al. Comparison of Estimation Methods for Net Photosynthetic Rate of Wheat's Flag Leaves Based on Hyperspectrum [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(6): 582-586.

基于高光谱的小麦旗叶净光合速率的遥感反演模型的比较研究

吕 玮¹, 李玉环^{1*}, 毛伟兵^{2*}, 宫 雪¹, 陈士更³

(1. 山东农业大学资源与环境学院, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271000; 2. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271000; 3. 山东农大肥业科技有限公司, 山东 泰安 271000)

摘 要: 植物净光合速率是植物生产的基础, 是体现植物生长状况的重要生理指标。本文将小麦旗叶高光谱波段反射率进行一阶导数变换后与净光合速率(Pn)进行相关性分析确定敏感波段, 分别采用二次多项式逐步回归(QPSR)、偏最小二乘法(PLSR)、BP神经网络法(BPNN)3种方法构建小麦旗叶的净光合速率反演模型, 并对3种模型的预测精度进行比较分析。结果表明: (1) 将小麦旗叶的原始光谱进行一阶导数变换后与Pn进行相关性分析确定的敏感谱区集中在750~925 nm之间, 确定的6个敏感波段分别是: 760、761、767、814、815、889 nm; (2) 基于QPSR、PLSR、BPNN3种方法以及敏感波段的反射率一阶导数构建的Pn估测模型预测精度都较高, 说明用这3种方法以及敏感波段对Pn的估测是可行的, 其中模型估算能力顺序为QPSR>BPNN>PLSR, 说明小麦旗叶Pn的最佳高光谱分析模型为小麦叶片750~925 nm反射率一阶导数变化后的QPSR模型。

关键词: 小麦旗叶; 高光谱; 净光合速率; 遥感反演

中图分类号: S127

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)06-0582-05

doi: 10.13254/j.jare.2017.0173

Comparison of Estimation Methods for Net Photosynthetic Rate of Wheat's Flag Leaves Based on Hyperspectrum

LÜ Wei¹, LI Yu-huan^{1*}, MAO Wei-bing^{2*}, GONG Xue¹, CHEN Shi-geng³

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian 271000, China; 2. Water Conservancy and Civil Engineering College, Shandong Agricultural University, Taian 271000, China; 3. Shandong Agricultural University Fertilizer Science and Technology Co., Ltd. Taian 271000, China)

Abstract: Net photosynthetic rate of plants is the basis of plant production, and is an important physiological index to reflect the growth of plants. In this paper, hyperspectral reflectance of flag leaves of wheat was transformed with the first derivative and then correlated with net photosynthetic rate(Pn) to determine the sensitive bands, adopting three methods quadratic polynomial stepwise regression(QPSR), partial least squares regression(PLSR), back propagation neural network(BPNN) respectively to construct the inversion model of Pn for flag leaves of wheat, and to compare and analyze the prediction accuracy of the three models. The result showed that: (1) After the first derivative transformation of the original spectra of wheat leaves, and analysis with Pn in correlation the determined sensitive zone concentrate occurred on 750~925 nm, and the six sensitive bands were determined as 760, 761, 767, 814, 815 nm and 889 nm. (2) Based on QPSR, PLSR and BPNN the Pn estimation model constructed was highly forecasting precision. This illustrates the three methods and sensitive band was feasible to estimate Pn. Among them the order of the ability to estimate the model was QPSR>BPNN>PLSR, which indicated the best hyperspectral model for flag leaf Pn of wheat was QPSR model whose first derivative changed after 750~925 nm reflectivity of wheat leaf.

Keywords: flag leaves of wheat; hyperspectrum; net photosynthetic rate; remote sensing inversion

收稿日期: 2017-06-26 录用日期: 2017-08-10

基金项目: 山东省重点研发计划“农田肥料高校利用数据智能采集处理关键技术”(2015GNC1101010); 国家研发计划项目(SQ2017ZY060105); 山东省“双一流”计划项目(SYL2017XTTD02)

作者简介: 吕 玮(1993—), 硕士研究生, 主要研究方向为土地遥感与应用。E-mail: 15650095916@163.com

* 通信作者: 李玉环 E-mail: yuhuan@sdaa.edu.cn 毛伟兵 maoweibing316@126.com

光合作用是植物物质生产的基础,它受外界环境条件和内部因素的限制,是一个复杂的生物物理化学过程^[1]。植物净光合速率是体现植物生长状况的重要生理指标。前人对净光合速率的研究已经作了很多工作,有学者将净光合速率的日动态变化或者不同生育期、不同纬度之间植被净光合速率的变化作为研究内容^[2-5],有的学者研究了不同试验环境或不同营养元素对净光合速率的影响^[6-9]。

近年来,基于光谱数据对各种植被的理化参数的定量分析及反演成为研究的热点。国内的丁希斌等^[10]以油菜叶片为研究对象,利用高光谱成像技术,成功建立了叶绿素相对值 SPAD 值的预测模型,孙俊等^[11]基于高光谱图像技术与极限学习机(Extreme learning machine, ELM)模式识别方法构建一套生菜叶片氮素水平鉴别模型。但是鲜有学者利用高光谱技术对植被叶片净光合速率进行遥感反演模型的构建及模型之间预测精度的比较。

本文以冬小麦旗叶为研究对象,利用高光谱技术,分别采用二次多项式逐步回归、偏最小二乘法、BP 神经网络对小麦叶片净光合速率进行遥感反演模型的构建,并对这 3 种方法进行预测精度的比较,旨在探讨运用遥感手段对植被光合参数的反演合理性及为农作物光合参数的估测提供新的方法。

1 材料与方法

1.1 实验区概况及数据获取

实验区设在山东省泰安市泰山区肥城县,试验地主要用于小麦-玉米长期定位试验,共 30 个处理,每个处理 2 个区,每个区 18 m²,共 1 080 m²,东西行向栽植。本研究选择 2016 年 5 月及 2017 年 5 月处在抽穗期的小麦作为研究对象。

1.1.1 光谱测定

本文光谱数据采集使用美国 ASD 公司生产的 Field Spec Handheld 仪器。Field Spec Handheld 仪器是一种便携式高光谱分析仪。该仪器采集光谱范围为 325~1 075 nm,光谱分辨率为 1 nm,广泛用于植被研究的可见光和近红外波段。具有采集数据快、便于野外携带的特点。光谱测定选择在无风无云或少云的天气进行。测量步骤为:每块实验区随机选 2 株小麦,对所选小麦的旗叶进行光谱数据采集,测量之前先开启光谱仪预热,再次测量之前都先进行光谱仪的优化,光谱数据采集前后都进行参考板反射率测定,测量时探头垂直向下,25°视场角,每一片小麦叶片采 20 条

光谱,后期在实验室内进行光谱数据统计分析。

1.1.2 净光合速率测定

本文净光合速率采集采用 LI-6400 光合测定仪,每块实验区随机选取 3 株小麦,对选取的每株小麦旗叶的光合速率($P_n, \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)进行测定,每个叶片重复 6 次测定,取平均值进行分析。

1.2 光谱预处理及特征波段选取

首先采用 5 点加权移动平均法对样本的原始光谱进行简单的去噪处理,然后对去噪后的原始光谱全波段进行一阶导数变换,并将一阶导数变换后的光谱数据作为输入光谱与小麦叶片 P_n 进行相关性分析,选取特征波段,用于小麦叶片净光合速率模型的建立。此过程主要利用 Excel 软件来实现。

1.3 模型构建与验证

本研究将 2016 年 5 月在肥城县采集的样本数据共 60 个作为建模集,将 2017 年 5 月在肥城县采集的样本数据共 30 个作为验证集。基于小麦叶片 P_n 的样本数据,分别采用二次多项式逐步回归(QPSR),偏最小二乘回归(PLSR),BP 神经网络(BPNN)方法构建小麦叶片 P_n 的高光谱估测模型。利用 30 个验证集对构建的模型进行验证。

1.3.1 二次多项式逐步回归(QPSR)法建模

二次多项式逐步回归是基于最小二乘法原理通过逐步回归剔除对因变量不起作用或作用极小的因子,挑选出显著性因子,组建类似于二次回归模型的多元

二次多项式模型,即 $y=b_0+\sum_{i=1}^m b_i x_i+\sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2+\sum_{i=1}^{i<j} b_{ij} x_i x_j$ 。

相关计算采用 DPS 软件实现。

1.3.2 偏最小二乘法(PLSR)建模

偏最小二乘法回归分析可以有效的克服目前回归建模的许多实际问题,借鉴了普通多元回归、主成分分析和典型相关分析思想,对自变量间的多重共线性问题作了很好的解决,并且可以克服目前回归建模的许多实际问题,如样本容量小于变量个数时进行回归建模,以及多个因变量对多个自变量的同时回归分析等一般最小二乘回归分析方法无法解决的问题。本文的相关计算采用 DPS 软件实现。

1.3.3 BP 神经网络模型构建

BP 神经网络即多层前馈式误差反向传播神经网络,是一种反向传递并修正误差的多层映射神经网络,也是各种神经网络模型中具有代表性和应用最广泛的一种神经网络。BP 神经网络的基本结构由 3 部分组成:输入层、输出层和隐层,对于输入信号,要先

向前传播到隐层节点,经作用函数后,再把隐层节点的输出信号传播到输出节点,最后给出输出结果。本研究采用 DPS 软件实现模型的构建,输入层节点数设为 6,输出层节点数设为 2,隐层节点数设为 6。

1.3.4 模型精度评价方法

本研究采用决定系数 R^2 、均方根误差(RMSE)、相对分析误差(RPD)作为模型精度的评价方法。对于建模集来说, R^2 越大, RMSE 越小, 建模精度越高,模型越稳定;对于验证集模型精度来说, R^2 越大, RMSE 越小, RPD 越大, 预测精度就越高。

2 结果与讨论

2.1 基于光谱数据的 P_n 相关性分析及敏感波段确定

对一阶导数变化后的光谱波段与 P_n 进行相关性分析(图 1), 可以看出 P_n 的敏感谱区主要集中在 750~925 nm 之间, 根据敏感波段的选取原则, 将 760、761、767、814、815、889 nm 作为特征波段, 其一阶导数变化后的反射率与 P_n 的相关系数分别为: 0.72、0.70、-0.57、0.71、0.65、0.71。将这 6 个波段作为输入样本进行模型的构建。

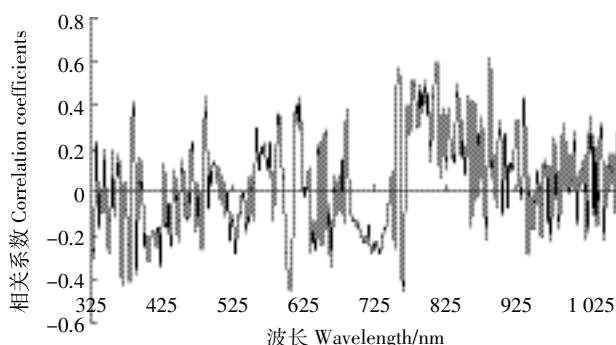


图 1 光谱数据一阶导数变化后的反射率与 P_n 的相关系数

Figure 1 Correlation between the first derivative of reflectance and P_n

2.2 P_n 的高光谱估算模型

分别采用 QPSR、PLSR、BPNN 3 种方法构建 P_n 的估算模型, 根据建模集的决定系数和均方根差选取最佳模型, 并对构建的最佳模型进行验证, 其验证结果根据验证集的决定系数和均方根差来判定, 得出 P_n 的建模和验证精度(表 1)。可以看出: 对于 P_n , 采用 QPSR、PLSR、BPNN 所构建的 3 种模型, 建模集与验证集的 R^2 都达到了 0.7 以上, RMSE 在 0.7~1 之间, RPD 都大于 2, 表明基于 3 种方法的敏感波段建立的最佳模型具有较好的预测能力。

对比 3 种建模方法, QPSR 的建模集与验证集的

表 1 基于 QPSR、PLSR、BPNN 的 P_n 建模和验证精度

Table 1 The calibration and validation accuracies of P_n based on QPSR, PLSR and BPNN

估测指标	建模方法	建模集		验证集		相对分析误差 RPD
		决定系数 R^2	均方根差 REMSc	决定系数 R_v^2	均方根差 REMSv	
$P_n/\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	QPSR	0.821	0.78	0.805	0.71	2.9
	PLSR	0.723	0.97	0.868	0.86	2.4
	BPNN	0.759	0.94	0.887	0.78	2.6

R^2 都大于 0.8, RMSE 的均方根差分别为 0.78 和 0.71, 均小于 0.8, RPD 为 2.9, 大于其他 2 种方法, 所以其预测能力明显优于其他 2 种建模方式; 其次是采用 BPNN 构建的模型, 建模集 R^2 为 0.759, RMSEc 为 0.94, RPD 为 2.6, 相较于 BPNN 的预测能力稍低; PLSR 的预测能力最低, 其建模集与验证集的 R^2 都小于其他 2 种方法, REMSc 为 0.97, 验证集 REMSv 为 0.86, RPD 为 2.4。

图 2 为 P_n 的 3 种模型预测值和实测值的散点图, 可以看出, 散点基本均匀分布在 $X=Y$ 线的两侧, 表明预测值和实测值整体呈现较好的线性关系, 该估算模型较能满足应用的要求。

3 结论

本文野外采集的 90 个植被样本作为数据源, 从测定的小麦叶片高光谱数据及光合数据入手, 经过五点平滑法及一阶导数变化后的小麦叶片光谱反射率, 分别构建 P_n 的 QPSR、PLSR、BPNN 模型。确定小麦叶片 P_n 的最佳估测模型, 研究结论如下:

(1) 将小麦叶片的原始光谱进行一阶导数变换后与 P_n 进行相关性分析确定的敏感谱区集中在 750~925 nm 之间, 并确定了 6 个敏感波段, 分别是: 760、761、767、814、815、889 nm。

(2) 基于 QPSR、PLSR、BPNN 3 种方法以及敏感波段的反射率一阶导数构建的 P_n 估测模型预测精度都较高, 说明用这 3 种方法以及敏感波段对 P_n 的估测是可行的, 其中对小麦叶片 P_n 估算能力最好的模型为 QPSR, 其次是 BPNN, 估测能力最低的是 PLSR 模型, 这可能是因为 BPNN 与 QPSR 能更好地处理光谱与 P_n 之间的关系。通过对比分析, QPSR、PLSR、BPNN 3 种方法的小麦叶片 P_n 的最佳高光谱分析模型为小麦叶片 750~925 nm 反射率的一阶导数的 QPSR 模型。

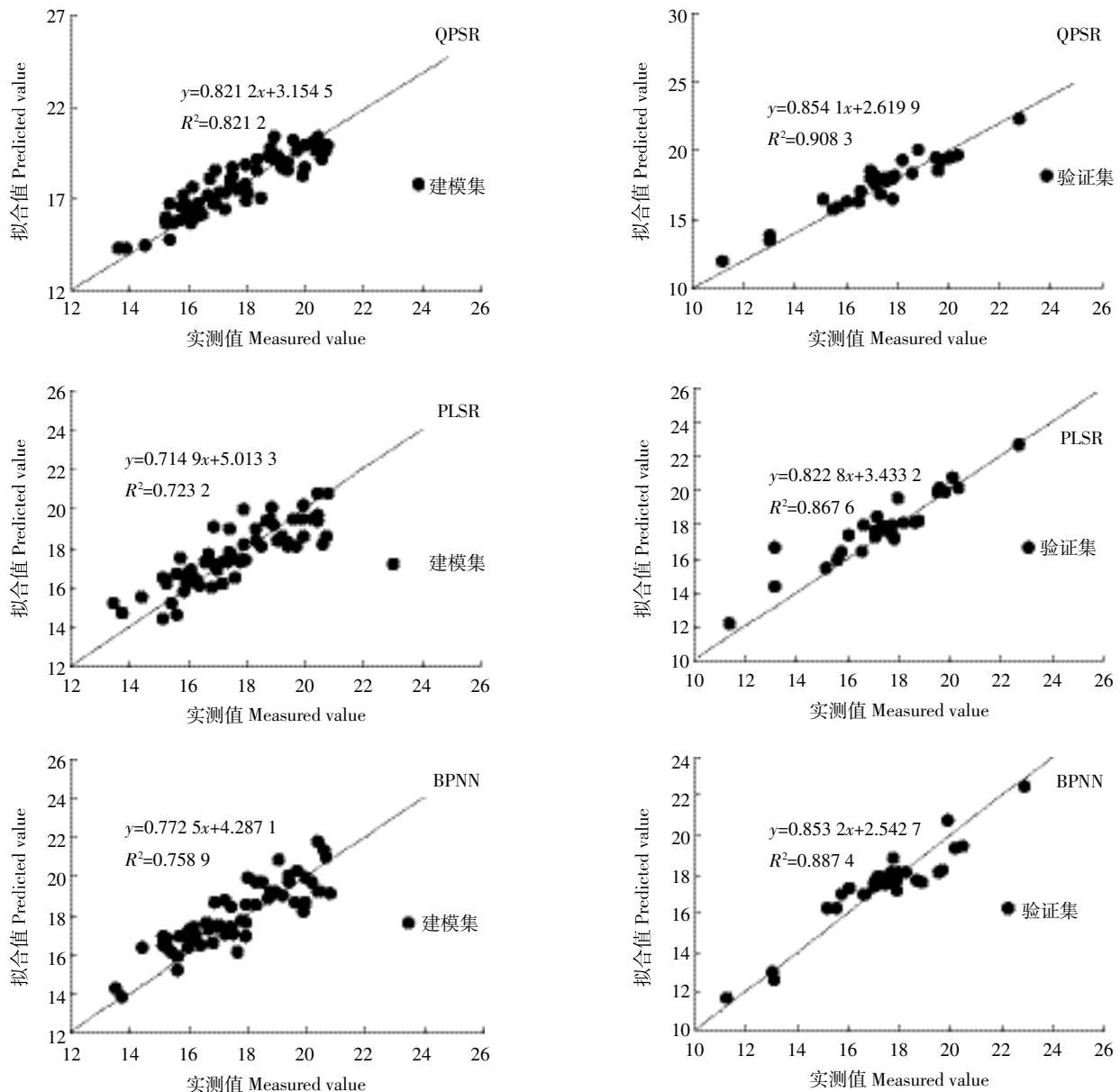


图 2 基于 Pn 敏感波段的 QPSR、PLSR、BPNN 模型散点图

Figure 2 The scatter plots of measured and predicted value of the QPSR, PLSR and BPNN model based on the significant characteristic spectra

参考文献:

- [1] 李合生. 现代动植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 129-137.
LI He-sheng. Modern animal and plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 129-137. (in Chinese)
- [2] 贺安娜, 姚 奕. 虎耳草冬季净光合速率、蒸腾速率日变化及其影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2011(4): 1298-1302.
HE An-na, YAO Yi. Analysis of net photosynthetic rate, transpiration rate change and its influencing factors of saxifrage in winter[J]. Southwest China Journal of Agriculture, 2011(4): 1298-1302. (in Chinese)
- [3] 王 静, 秦 俊, 高 凯, 等. 冬夏季桂花净光合速率及其对环境因

子的响应[J]. 生态环境学报, 2010(4): 908-912.

WANG Jing, QIN Jun, GAO Kai, et al. Seasonal response of net photosynthesis to environmental factors in *Osmanthus fragrans*[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2010(4): 908-912. (in Chinese)

- [4] 刘群龙, 宁婵娟, 王 朵, 等. 翅果油树净光合速率日变化及其主要影响因子[J]. 中国生态农业学报, 2009(3): 474-478.

LIU Qun-long, NING Chan-juan, WANG Duo, et al. Diurnal variation in net photosynthetic rate and influencing environmental factors of *Elaeagnus mollis* Diels leaf[J]. *Chin J Eco-agri*, 2009(3): 474-478. (in Chinese)

- [5] 赵宏瑾, 朱仲元, 王喜喜, 等. 不同生育期榆树净光合速率对生态因子和生理因子的响应[J]. 生态学报, 2016(6): 1645-1651.

ZHAO Hong-jin, ZHU Zhong-yuan, WANG Xi-xi, et al. Effect of eco-

- logical factors and photosynthetic rate of *Ulmus pumila* at various growth stages[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016(6): 1645–1651. (in Chinese)
- [6] 邱 权, 李吉跃, 王军辉, 等. 水肥耦合效应对楸树苗期叶片净光合速率和 SPAD 值的影响[J]. *生态学报*, 2016(11): 3459–3468.
QIU Quan, LI Ji-yue, WANG Jun-hui, et al. Interactive effects of soil water and fertilizer application on leaf net photosynthetic rate and SPAD readings of *Catalpa bungei* seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016(11): 3459–3468. (in Chinese).
- [7] 崔菁菁, 徐克章, 武志海, 等. 不同年代水稻品种叶片氮含量变化及其与净光合速率的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016(7): 70–77, 86.
CUI Jing-jing, XU Ke-zhang, WU Zhi-hai, et al. Changes of nitrogen content in leaf and its correlation with net photosynthetic rate of rice cultivars in different years[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)*, 2016(7): 70–77, 86. (in Chinese)
- [8] 罗 凡, 龚雪蛟, 张 厅, 等. 氮磷钾对春茶光合生理及氨基酸组分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015(1): 147–155.
LUO Fan, GONG Xue-jiao, ZHANG Ting, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on photo-biological characteristics and amino acid components of tea plants in spring[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015(1): 147–155. (in Chinese)
- [9] 杨 军, 马振峰, 刘桂华. 钾营养对柰李叶片光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. *中国农学通报*, 2010(20): 238–244.
YANG Jun, MA Zhen-feng, LIU Gui-hua. Potassium nutrition on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in nai-plum leaves[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010(20): 238–244. (in Chinese)
- [10] 丁希斌, 刘 飞, 张 初, 等. 基于高光谱成像技术的油菜叶片 SPAD 值检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015(2): 486–491.
DING Xi-bin, LIU Fei, ZHANG Chu, et al. Prediction of SPAD value in oilseed rape leaves using hyperspectral imaging technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015(2): 486–491. (in Chinese)
- [11] 孙 俊, 金夏明, 毛罕平, 等. 基于 Adaboost 及高光谱的生菜叶片氮素水平鉴别研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013(12): 3372–3376.
SUN Jun, JIN Xia-ming, MAO Han-ping, et al. Identification of lettuce leaf nitrogen level based on Adaboost and hyperspectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013(12): 3372–3376. (in Chinese)