

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.031

基于光谱和形状特征的水稻扫描叶片氮素营养诊断*

顾清¹ 邓劲松¹ 陆超¹ 石媛媛² 王珂¹ 沈掌泉¹

(1. 浙江大学污染环境修复与生态健康教育部重点实验室, 杭州 310058; 2. 百色市烟草公司, 百色 533000)

【摘要】 使用扫描仪获取水稻叶片图像,综合运用数字图像处理技术、参数优选和分类方法,研究了不同氮素水平水稻叶片的光谱和形状特征,并进行了氮营养的诊断与识别。研究利用面向对象的分类方法提取叶尖部位的黄化面积比例,指数回归分析结果显示此参数与叶片氮含量具有很高的相关性($R^2 = 0.863$)。提取整叶和叶尖的颜色参数并分别与叶片氮含量进行指数回归分析,发现叶尖部位的颜色特征能更好地反映叶片的氮素营养状况。采用 CfsSubsetEval 和 Scatter search 相结合方法对特征进行约简与优化,根据选择结果结合支持向量机方法进行模式识别。精度检验结果显示该方法对缺氮和正常叶片的正确识别率较高,随氮素水平的升高,正确识别率降低,对过量水平的正确识别率较低,叶面积在缺氮和正常模式下能对识别起到很好的辅助作用。

关键词: 水稻 图像 氮素 光谱特征 形状特征 模式识别

中图分类号: S123 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0170-05

Diagnosis of Rice Nitrogen Nutrition Based on Spectral and Shape Characteristics of Scanning Leaves

Gu Qing¹ Deng Jinsong¹ Lu Chao¹ Shi Yuanyuan² Wang Ke¹ Shen Zhangquan¹

(1. Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecological Health, Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China 2. Baise Tobacco Company, Baise 533000, China)

Abstract

The leaves of rice were captured by scanner. Integrated method combining digital image processing, parameter optimization and classification was used to explore leaves spectral and shape characteristics which were adopted to diagnose and recognize rice nitrogen nutrition. Proportion of etiolated area in the tip of leaf was extracted by method of object-oriented classification. The results of exponential regression analysis showed high correlation between tip etiolated area proportion and leaf nitrogen concentration ($R^2 = 0.863$). The color indices of tip as well as whole leaves were extracted and exponential regression analysis with leaf nitrogen concentration was made, which illustrated the better performance of representation of rice nitrogen nutrition with tip information. Optimal selection of subset by means of CfsSubsetEval and Scatter search combined with support vector machine were used for pattern recognition. The result of accuracy assessment indicated that nitrogen deficiency and healthy leaves could be easily recognized and the accuracy descended with the improvement of nitrogen treatment. The accuracy of excessive nitrogen nutrition status was low. The leaf area could be a favorable assistant for recognition under deficient and healthy status.

Key words Rice, Image, Nitrogen, Spectral feature, Shape feature, Pattern recognition

收稿日期: 2011-09-19 修回日期: 2011-11-15

* 国家自然科学基金资助项目(31172023,30800703)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA10Z204)

作者简介: 顾清, 博士生, 主要从事农业信息技术研究, E-mail: funny@zju.edu.cn

通讯作者: 王珂, 教授, 博士生导师, 主要从事农业遥感与信息技术研究, E-mail: kwang@zju.edu.cn

引言

氮素是水稻生长最重要的元素之一,氮营养状况的诊断一直是研究的热点^[1]。常规室内分析费时、费力,又具破坏性^[2],实时、无损营养诊断技术是目前水稻营养诊断的主要研究方向。水稻缺氮后生长缓慢,叶绿素合成受阻,叶色淡黄;而氮肥过量时,叶色深绿,肥厚宽大,因此可根据水稻叶片在光谱、形状和纹理等方面的差异对氮营养状况进行评价。

近年来,较多的研究探索利用数码相机结合计算机图像处理技术进行作物氮营养的识别诊断^[3-4],但拍摄过程易受多种因素影响,不同条件下获得的图像差异较大。而图像扫描在相对封闭的空间中进行,受周围环境的干扰较小,能保证图像色彩与尺寸的真实度,很好地弥补了数码相机稳定性差、图像噪声大、标准化操作困难等缺点。目前已经市场化的小型便携式扫描仪为田间高质量扫描图像的获取提供了可能,这也将促进扫描图像在作物氮营养诊断中的应用^[5]。

本文使用扫描仪作为水稻叶片图像获取手段,提取图像的光谱信息和形状特征并与叶片氮含量进行相关性分析,采用 CfsSubsetEval (Cfs) 和 Scatter search (Ss) 相结合方法对特征进行选择 and 约简,利用支持向量机方法对叶片氮营养状况进行诊断识别,为精确评价水稻氮营养状况以及推荐施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

水稻的种植采用水培方法,于 2009 年 6~10 月在浙江大学温室内进行,水稻品种为中浙优壹号。实验共设 6 个氮营养水平,营养液氮质量浓度分别为 0、10、20、40、60 和 80 mg/L,其中 40 mg/L 为正常生长浓度,其他所需元素按国际水稻所配方配置,设重复 6 次。

1.2 水稻叶片图像获取

研究显示,水稻顶部第三完全展开叶(简称顶三叶)对营养特征参量比较敏感,能较好地代表植株的氮素水平,为水稻氮素营养诊断的最适宜叶位^[6-8],本研究选取此叶位为研究对象。

利用 EPSON GT20000 型扫描仪获取水稻植株顶三叶的数字图像,设置分辨率为 300 dpi。取样后立即扫描,避免由于枯萎造成叶面颜色变化。

1.3 叶片全氮含量测定

扫描完成后,将叶片在 105℃ 烘箱中杀青 30 min,再用 75℃ 干燥至恒质量,用凯氏定氮法测定

叶片的全氮含量^[7]。

1.4 颜色和形状参数提取

叶色是表征作物长势最重要的信息^[9],并且具有较强的稳定性。本研究选取 RGB 和 HIS 颜色空间实现对图像颜色特征的提取,选用对应的 R 、 G 、 B 、 H 、 S 、 I 差值 $B-R$ 、 $R-G$ 、 $B-G$ 和标准化值 r 、 g 、 b 作为颜色特征参数。

不同营养状态下水稻叶片的形状也存在着较大差异,本文同时考虑形状特征作为辅助因子进行水稻氮素营养诊断的研究。在选用叶片周长、面积、长轴长、短轴长等绝对值特征的同时,还选择提取 4 项相对几何特征:矩形度、面积凹凸比、圆形度和偏心率,计算公式和含意如表 1 所示^[10]。由于所有图像的分辨率相同,用叶片区域的像素总数表示叶面积,用叶片边缘上每两个相邻像素点距离的和来表示叶片周长。

各特征参数的提取均在 Matlab 软件中实现,提取前用中值滤波法对图像进行去噪处理。

表 1 形状特征计算公式		
Tab.1 Calculating equations of shape indices		
形状特征	计算公式	含意
矩形度	$R = A_o/A_b$	叶面积与最小包围盒面积的比值
面积凹凸比	$A = A_o/A_c$	叶面积与凸包面积的比值
圆形度	$C = R_i/R_e$	内切圆半径与外切圆半径的比值
偏心率	$F = L_l/L_s$	长轴长与短轴长的比值

1.5 面向对象的分类和局部信息提取

当水稻缺氮时,症状先从叶尖开始发生,因此推断利用叶尖部位的特征对氮营养进行诊断可能更有效。通过观察水稻叶片扫描图像也发现,缺氮素叶片的黄化现象主要发生在叶尖,故本研究截取叶片尖部并提取此区域的黄化面积比例和颜色特征参数进行水稻氮营养的诊断研究。叶尖的划分是从叶片尖端开始,1/6 长轴长度内的叶片区域,此区域包含了样品中极端缺氮条件下叶片尖部的黄化部分。

叶尖黄化面积比例的计算要求提取出叶尖区域的黄化部分,运用面向对象的分割技术和最邻近分类器,根据叶片的空间和光谱特征进行分割,利用对象的光谱信息进行黄化区域的提取。面向对象的分割是一种区域扩展与合并技术,使具有相似特性的像元聚集构成若干多边形,每个多边形即为一个对象,并保证分割后对象的异质性最小化^[11]。对水稻叶片叶尖图像面向对象的分割与分类在软件 Ecognition 4.0 中进行。

1.6 特征的约简和优选

本研究引入 Cfs 特征选择方法,配合 Ss 搜索法

则进行属性约简和最优子集的选取。Cfs 算法用启发性评价函数 Merit 来选择特征子集,Merit 根据参数间相关程度对子集评分,根据分值大小搜索和选择最佳的子集^[12],抛弃对预测识别作用不大的特征,同时高度相关的多余特征也会被抛弃。Ss 算法是一种基于种群的启发式搜索方法,目的是为了在原有解的基础上产生更好的解^[13~14]。本文中 Cfs 和 Ss 选择过程在 Weka 3.6 软件中进行。Merit 值的计算公式为

$$M = \frac{kF_c}{\sqrt{k + k(k-1)F_f}}$$

(1)

式中 k ——子集包含的特征数
 F_c ——特征与类别间的平均相关系数
 F_f ——特征与特征间的平均相关系数

2 结果与分析

2.1 面向对象的分类与局部信息提取

利用面向对象分割技术生成对象的过程中,设定分割尺度为 10,并根据图像呈现出的光谱和形状特征将光谱因子与形状因子的权重分别设为 0.8 和 0.2,紧密度和光滑度的权重分别设为 0.6 和 0.4。分割得到的对象很明显地把黄化区域与正常区域分开,有利于最后的信息提取。

根据识别目标的特点,选择目标信息的典型特征,对分割后的对象进行分类。图像共分为 3 类:正常、黄化和背景。分别选取各种类型的样本,用最近邻法对对象进行分类,结果如图 1 所示。目标黄化区域的特征以光谱特征为主,因此本研究使用的特征为对象光谱信息中的比值、均值和标准差。从图 1 中可以看出,分类结果较准确地把原始图像中的 3 类区分出来,分别由 3 种颜色表示,进行下一步的量化。

将分类后图像导出,计算各类型所包含的像素数作为面积,并求得黄化区域占叶尖总面积的比例作为水稻氮素营养状况识别的特征参数,记为 P_{TEA} 。

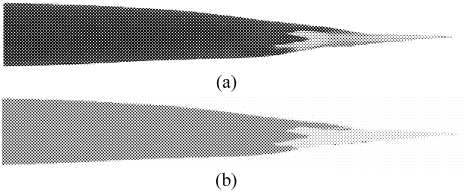


图 1 原始图像与分类结果的对比

Fig.1 Comparison between classification result and scanning image
(a) 扫描图像 (b) 分类结果

2.2 特征参数与叶片氮含量之间的回归分析

2.2.1 叶尖黄化比例与氮含量

使用 SPSS 数据分析软件,以叶片氮含量 (N_c)

为因变量,叶尖黄化比例为自变量进行直线与曲线回归分析。发现采用指数模型能获得最佳的拟合效果, R^2 为 0.863,而采用直线回归 R^2 仅为 0.793 (图 2)。这表明了氮含量较低时参数值的差异较大,而当氮含量较高时参数值的差异变小,说明缺氮状况下特征非常明显,故本研究以下的回归分析均选用指数模型。

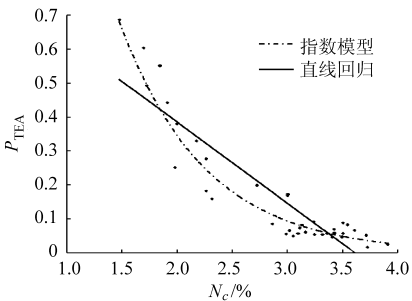


图 2 叶片氮含量与叶尖黄化比例拟合曲线
Fig.2 Fitting curves between N_c and P_{TEA}

2.2.2 颜色特征与氮含量

对提取的完整叶片和叶尖的 12 个颜色特征值分别与叶片氮含量作回归分析,采用指数模型进行拟合,得到的决定系数 R^2 如表 2 所示。可以看出大部分颜色特征值与含氮量的拟合度较好,有 79.2% 的参数与氮含量之间的拟合达到极显著水平。其中除 $B-G$ 特征叶尖 R^2 略低于整叶 R^2 外,其余各参数叶尖 R^2 均高于整叶 R^2 ,说明叶尖的颜色特征能更好地反映叶片的氮素状况。由于水稻缺氮首先从叶尖开始黄化,故缩小目标范围后,更能突出水平间的特征差异,用叶尖颜色特征代替整叶进行水稻氮素状况的分析是合理的选择。

表 2 颜色参数与叶片氮含量的回归分析
Tab.2 Regression analysis between color indices and N_c

颜色特征	R^2	
	整叶	叶尖
R	0.731 **	0.787 **
G	0.801 **	0.836 **
B	0.455 **	0.608 **
r	0.318 **	0.483 **
g	0.338 **	0.504 **
b	0.032	0.120 *
$B-R$	0.721 **	0.783 **
$B-G$	0.768 **	0.766 **
$R-G$	0.238 **	0.552 **
H	0.038	0.119 *
S	0.027	0.279 **
I	0.762 **	0.803 **

注: * 表示显著性检验 $P < 0.05$, ** 表示显著性检验 $P < 0.01$ 。表 3 同。

2.2.3 形状参数与氮含量

将整叶的 8 个形状特征值分别与叶片氮含量作指数回归分析,决定系数如表 3 所示。所选参数除偏心率与圆形度以外,与氮含量的拟合均达到了极显著水平,说明氮营养状况对叶片的形状也具有较大的影响。从结果中可以发现绝对值特征与氮含量的关系比相对值特征与氮含量的关系更密切,说明氮营养对叶片形状的影响主要表现在叶片绝对大小的变化上。

表 3 形状参数与叶片氮含量的回归分析
Tab.3 Regression analysis between shape indices and N_e

形状特征	R^2	形状特征	R^2
长轴长	0.391 **	偏心率	0.033
短轴长	0.423 **	矩形度	0.242 **
周长	0.407 **	面积凹凸比	0.269 **
面积	0.516 **	圆形度	0.003

2.3 Cfs 与 Ss 相结合方法优选特征

为了考察形状参数作为辅助信息对诊断识别的作用,分别对单独的光谱信息(包括 P_{TEA} 和颜色参数)和光谱信息结合形状参数进行特征选择。从选择结果(表 4)来看,入选最优子集的特征主要为 P_{TEA} 和叶尖颜色参数,而整叶颜色参数和形状参数较少,这与上文的回归分析结果也较一致。其中 P_{TEA} 入选了大部分最优子集,说明 P_{TEA} 对最优子集的选择起到了最重要的作用。入选的形状参数主要为面积,子集($P_{TEA}, G^*,$ 面积)的 Merit 值要高于(P_{TEA}, G^*),说明面积对光谱特征起到了一定的信息补充作用。

表 4 特征优选结果
Tab.4 Result of feature optimization

特征组合	M
P_{TEA}, G^*	0.897
$P_{TEA}, (B - G)^*$	0.891
P_{TEA}, G^*, I^*	0.886
$B - R, I^*$	0.834
$B - G, R^*, g^*, (R - G)^*$	0.803
B^*	0.733
$P_{TEA}, G^*,$ 面积	0.920
$P_{TEA}, B^*, (B - G)^*,$ 面积	0.918
P_{TEA}, G^*, G	0.888
$P_{TEA}, G^*, B^*, (B - R)^*, (B - G)^*,$ 面积	0.884
$B^*, (B - R)^*, (B - G)^*, I,$ 短轴长	0.863
$(B - R)^*, G, B - G$	0.853

注：* 表示此为叶尖部位的颜色参数。表 5 同。

2.4 模式识别与精度评价

根据特征优选的结果,选择特征组合(P_{TEA}, G^*)和($P_{TEA}, G^*,$ 面积)作为自变量,利用 SVM 对不同氮素水平的水稻扫描叶片进行模式识别研究。样本按所设的氮营养水平分成 4 种类别:极缺(0 mg/L)、微缺(10、20 mg/L)、正常(40 mg/L)和过量(60、80 mg/L),下文分别用 N1、N2、N3、N4 表示。本研究将叶片数据分成 2 部分,60% 为训练集,40% 为测试集。

基于 SVM 的训练与测试在 Lib - SVM 平台中完成。分类方法采用 C - SVC,选择径向基核函数作为核函数,使用 Lib - SVM 提供的 grid. py 工具,计算确定惩罚因子 c 和核函数中的最佳参数 γ 。利用训练集建立规则模型,用测试集对模型进行精度检验,结果如表 5 所示。

表 5 精度检验结果
Tab.5 Recognition accuracy %

特征组合	类别			
	N1	N2	N3	N4
P_{TEA}, G^*	100	80.30	76.19	50.90
$P_{TEA}, G^*,$ 面积	100	85.00	78.57	46.80

从总体来看,对 N1 的识别率最高,能够全部被识别,这是因为极缺状态下特征非常明显,易于识别;正确识别率随氮素水平的提高而降低,由此可见,缺素程度越严重,症状表现越明显,正确识别率也越高,这也符合植物营养学原理。从两组特征比较来看,对 N1 的识别率均为 100%,在 N2 和 N3 模式下,加入面积参数后的识别效果更好,而对 N4 的识别率(P_{TEA}, G^*)组合略高;说明缺氮情况下叶面积有比较显著的变化,能够对识别起到很好的辅助作用,而在氮过量时并没有帮助。同时值得注意的是,对氮素过量水平的识别率显著低于缺素和正常水平叶片,此研究方案较难识别氮过量状态。

3 结束语

以不同氮素水平下的水稻顶三叶为研究对象,使用扫描仪获取叶片图像。采用面向对象的分类和 Matlab 图像处理等方法,提取了叶片的光谱和形状特征,并分别与叶片氮含量进行指数回归分析。结合 Cfs 和 Ss 相结合方法对特征进行约简与优选,最后采用支持向量机方法对不同氮营养模式进行识别。

精度检验结果显示该方法对缺氮和正常叶片的正确识别率均较高,随氮素水平的升高,正确识别率降低。对过量水平的正确识别率较低,分析原因可能是:氮素在水稻体内移动性很大,在叶片间由下而

上转运,并总是优先供应新生叶片,但本研究仅选用了顶三叶为研究对象,今后的研究中需进一步探究上部叶位的情况。

从本研究来看,叶片症状集中发生部位的光谱信息结合形状等特征是较理想的水稻氮营养识别参数组合。由于本研究中用来进行识别的形状参数为

绝对值特征叶面积,缺少普适性,故采用不同的数据挖掘技术,寻找高识别率、高普适性的特征组合,并建立高精度的识别模型是今后研究的主要内容。同时,考虑到田间水稻营养状况的复杂性,需要继续对其他所需营养元素单一以及交互作用的特征表现进行研究。

参 考 文 献

- 1 李刚华,丁艳锋,薛利红,等. 利用叶绿素计(SPAD-502)诊断水稻氮素营养和推荐追肥的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报,2005,11(3):412~416.
Li Ganghua, Ding Yanfeng, Xue Lihong, et al. Research progress on diagnosis of nitrogen nutrition and fertilization recommendation for rice by use chlorophyll meter[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 412~416. (in Chinese)
- 2 Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Diagnosis of nitrogen status in rice leaves with canopy spectral reflectance[J]. Agricultural Sciences in China, 2003, 2(3): 250~257.
- 3 贾良良,范明生,张福锁,等. 应用数码相机进行水稻氮营养诊断[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2176~2179.
Jia Liangliang, Fan Mingsheng, Zhang Fusuo, et al. Nitrogen status diagnosis of rice by using a digital camera[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2176~2179. (in Chinese)
- 4 王娟,雷咏雯,张永帅,等. 应用数字图像分析技术进行棉花氮素营养诊断的研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(1): 145~149.
Wang Juan, Lei Yongwen, Zhang Yongshuai, et al. Diagnosis of cotton N status using digital image analysis technique[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2008, 16(1): 145~149. (in Chinese)
- 5 丁晓东,石媛媛,路雪,等. 基于扫描图像光谱特征和模式识别的水稻叶片磷素诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1336~1339.
Ding Xiaodong, Shi Yuanyuan, Lu Xue, et al. Diagnosis study of rice leaf under phosphorus insufficiency based on spectral features of scan image and pattern recognition[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5): 1336~1339. (in Chinese)
- 6 江立庚,曹卫星,姜东,等. 水稻叶氮含量等生理参数的叶位分布特点及其与氮素营养诊断的关系[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 739~744.
Jiang Ligeng, Cao Weixing, Jiang Dong, et al. Distribution of leaf nitrogen, amino acids and chlorophyll in leaves of different positions and relationship with nitrogen nutrition diagnosis in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(8): 739~744. (in Chinese)
- 7 祝锦霞,邓劲松,石媛媛,等. 基于水稻扫描叶片图像特征的氮素营养诊断研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(8): 2171~2175.
Zhu Jinxia, Deng Jinsong, Shi Yuanyuan, et al. Diagnosis of rice nitrogen status based on characteristics of scanning leaf[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(8): 2171~2175. (in Chinese)
- 8 祝锦霞,邓劲松,林芬芳,等. 水稻氮素及其视觉诊断最佳叶位和位点的选择研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 179~183.
Zhu Jinxia, Deng Jinsong, Lin Fenfang, et al. Determination of suitable leaf for nitrogen diagnosis in rice based on computer vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 179~183. (in Chinese)
- 9 宋振伟,文新亚,张志鹏,等. 基于数字图像技术的冬小麦不同施氮和灌溉处理颜色特征分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 350~355.
Song Zhenwei, Wen Xinya, Zhang Zhipeng, et al. The color characteristics of digital image of winter wheat under different irrigation and N fertilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(14): 350~355. (in Chinese)
- 10 王晓峰,黄德双,杜吉祥,等. 叶片图像特征提取与识别技术的研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(3): 190~193.
Wang Xiaofeng, Huang Deshuang, Du Jixiang, et al. Feature extraction and recognition for leaf images[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(3): 190~193. (in Chinese)
- 11 邓劲松,石媛媛,陈利苏,等. 基于近红外传感器和面向对象光谱分割技术的田间棉株识别与提取[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1754~1758.

表 7 酶解程度对产品感官品质的影响
Tab.7 Sensory evaluation results of dried oat powder

DE 值	色泽	状态	香气	风味	口感	合计
1.6	2.6	2.0	3.6	2.4	2.8	13.4
30.1	5.0	4.4	4.4	5.0	5.6	24.4
33.5	4.8	4.2	4.2	4.4	5.4	23.0
36.2	5.6	5.6	4.4	5.0	5.6	26.2
41.1	5.6	6.0	4.6	5.2	5.4	26.8
51.7	5.8	5.6	4.8	4.8	5.0	26.0

度较高的感受,而酶解程度最高的产品口感稀薄,评分较低。总体来看,DE 值为 36.2 和 41.1 的两款产

品的得分数最高,酶解程度超过 DE 值 41.1 时含糖量过高,不利于中老年消费者食用,因此 DE 值在 36.2 左右的产品最具有市场前景。

3 结束语

研究发现,酶解至 DE 值为 36.2 和 51.7 的燕麦粉在各个指标测评中表现较好,其中 DE 值为 51.7 的燕麦粉的溶解性明显好于其他样品,但其冲调后粘度低、含糖量较高,浓稠感较差。综合考虑,将酶解程度控制在 DE 值为 35~38 时,可以极大地提高生产效率,而且所得干粉的颗粒度适中,品质较佳。

参 考 文 献

1 Sara E, Adriana M, Edneli S, et al. Production and properties of casein hydrolysate microencapsulated by spray drying with soybean protein isolate [J]. LWT-Food Science and Technology,2009,42(5):919~923.

2 伟强,郭松旺.工艺参数对蛋白粉离心喷雾干燥质量问题的研究[J].食品工业科技,2006,27(2):53~55.
Wei Qiang,Guo Songwang. Research on process parameters for the quality problem in centrifugal spray drying of protein powder [J]. Science and Technology of Food Industry, 2006,27(2):53~55. (in Chinese)

3 忠会,李宏高.绿豆营养粉深加工的探讨[J].陕西科技大学学报,2005,23(4):44~48.
Zhong Hui, Li Honggao. Investigate the processing of green beans nutrition powder [J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2005,23(4):44~48. (in Chinese)

4 胡奇伟,王春维,过世东,等.血浆蛋白粉喷雾干燥工艺的研究[J].粮食与饲料工业,2005(9):33~36.
Hu Qiwei,Wang Chunwei,Guo Shidong, et al. Research on technology of plasma protein flour by pray drying [J]. Creal and Feed Industry, 2005(9):33~36. (in Chinese)

5 汤慧民,熊华,熊小青,等.干燥工艺对苦瓜粉品质的影响[J].食品与发酵工业,2005,31(4):92~94.
Tang Huimin,Xiong Hua,Xiong Xiaoqing, et al. Impact on the quality of bitter gourd powder by drying process[J]. Food and Fermentation Industries, 2005,31(4):92~94. (in Chinese)

6 张军合,刘俊红,李晓芳.喷雾干燥速溶天然无核枣粉的研制[J].食品研究与开发,2009,30(8):54~58.
Zhang Junhe, Liu Junhong, Li Xiaofang. Study on instant date powder by spray drying from natural ziziphus jujuba[J]. Food Research and Development, 2009,30(8):54~58. (in Chinese)

7 许春英,乔长晟,贾士儒,等.天然南瓜粉生产工艺及关键技术的研究[J].食品科学,2007,28(1):377~378.
Xu Chunying, Qiao Changsheng, Jia Shiru, et al. Study on the key technology in the processing of natural pumpkin powder [J]. Food Science, 2007, 28(1):377~378. (in Chinese)

8 GB/T 20882—2007 果葡糖浆[S]. 2007.

9 钟芳,王璋,许时婴.喷雾干燥条件对豆粉速溶性的影响[J].食品工业科技,2003,24(12):18.
Zhong Fang,Wang Zhang, Xu Shiyong. Conditions of spray drying on the nature of soybean meal instant[J]. Science and Technology of Food Industry, 2003,24(12):18. (in Chinese)

10 李鹤,许娟,马亚团,等.物理化学实验[M].杨凌:西北农林科技大学出版社,2009:42~44.

(上接第 174 页)

12 Vasconcelos J A,Maeiel J H R D,Parreiras R O. Scatter search techniques applied to electromagnetic problems[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,41(5):1 804~1 807.

13 罗家祥,唐立新.带释放时间的并行机调度问题的 ILS & SS 算法[J].自动化学报,2005,31(6):917~924.
Luo Jiaxiang,Tang Lixin. A new ILS & SS algorithm for parallel-machine scheduling problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2005,31(6):917~924. (in Chinese)

14 Glover F,Laguna M,Marta R. Fundamentals of scatter search and path relinking[J]. Control and Cybernetics,2000,39(3):1~23.