

文章编号: 1000-7032(2018)04-0580-09

# 农产品品质光谱成像的空间预测规律

杨君荣<sup>1</sup>, 汪希伟<sup>1</sup>, 赵茂程<sup>1,2\*</sup>, 陈一鸣<sup>1</sup>, 姚凤莹<sup>3</sup>

(1. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037;

2. 泰州学院, 江苏 泰州 225300; 3. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 由于受到化学检测手段限制,无法获取光谱图像中的农产品品质在各像素位置处的参考值,因此无法直接验证基于光谱图像得到的农产品品质空间预测结果。为探索基于光谱图像的农产品空间品质检测规律,本文采用计算机生成已知空间品质样本,并分别以固定曝光和变曝光方式采集不同灰度等级标准板的光谱图像。定量分析采集系统误差,借助样本区域光谱与区域指标之间的全波段偏最小二乘(ALL-PLS)和遗传特征波长偏最小二乘(GA-PLS)预测函数,研究出区域指标预测准确时样本空间品质指标的预测精度规律,建立光谱成像空间预测准确度模型。实验结果表明:变曝光方式下的数据采集可以提高光谱图像信噪比,在波段两侧极限处尤为明显;应用区域品质数据预测空间品质分布,空间预测误差主要受光谱图像采集噪声影响;即使区域预测准确,空间预测可能已完全失真。通过衡量数据采集系统误差,可以间接评价农产品品质空间预测的准确度。只有在数据采集系统误差在允许范围内时,光谱成像技术才可准确预测农产品品质的空间分布。

**关键词:** 空间预测; 光谱图像; 遗传算法; 偏最小二乘; 系统误差

中图分类号: TS201.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183904.0580

## Law of Spatial Prediction of Agro-product Qualities Based on Spectral Imaging

YANG Jun-rong<sup>1</sup>, WANG Xi-wei<sup>1</sup>, ZHAO Mao-cheng<sup>1,2\*</sup>, CHEN Yi-ming<sup>1</sup>, YAO Feng-ying<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Taizhou University, Taizhou 225300, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

\* Corresponding Author, E-mail: mczhao@njfu.edu.cn

**Abstract:** Due to the limitation of chemical testing methods, we cannot get reference value of agro-product qualities in every pixel location and are not directly to verify spatial prediction results of agro-product qualities based on spectral images. In order to research spatial prediction laws of agro-product qualities based on spectral images, the computer was used to generate the samples of known spatial distribution and to acquire the spectral images of different gray-level reflectance standard boards by ways of fixed and variable exposures respectively. The error of data acquisition system was analyzed quantitatively. The spatial prediction accuracy model of spectral imaging was built and the prediction accuracy law of spatial qualities was researched as regional parameter values which could

收稿日期: 2017-08-15; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31570714); 江苏省重点研发计划(BE2015304-3); 江苏省高校优势学科建设工程(PAPD); 2016年度省级战略性新兴产业发展专项资金; 南京市2015年度科技发展计划(201505058)资助项目  
Supported by Natural Science Foundation of China(31570714); Key Research and Development Plan of Jiangsu Province(BE2015304-3); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions(PAPD); 2016 Annual Special Funds of Provincial Strategic Emerging Industry Development Project; 2015 Nanjing Science and Technology Development Project(201505058)

be predicted accurately by means of partial least squares (PLS) prediction methods based on full wavelengths and characteristic wavelengths between regional spectral values and regional parameter values. The results show the signal-to-noise ratio of the spectral image can be improved by changing exposure time and it is more obvious on both sides of the spectral band. When these models that can predict regional parameter values accurately are used to predict space parameter values, their spatial prediction accuracy is affected by error in a similar way. The accuracy of spatial prediction results of agro-product qualities can be evacuated by the way of measuring the error of the data acquisition system. Spectral image detection technology can be used to predict spatial parameter values of agro-product qualities when the error of acquisition system is limited in a specified range.

**Key words:** space prediction; spectral image; genetic algorithm; partial least squares; systematic error

## 1 引言

光谱成像技术是基于非常窄波段的影像数据技术,能同时记录一幅图像包含的空间信息和光谱信息<sup>[1-2]</sup>,即“谱像合一”。从20世纪80年代开始,该技术凭借其间接、快速、无损的优点得到了世界各国的重视,逐渐发展为检测分类的有力工具,已被广泛应用于众多领域<sup>[3-4]</sup>。军用方面主要利用高光谱图像识别伪装和障碍<sup>[5]</sup>;民用方面包括地质调查、植被遥感<sup>[6]</sup>、农业监测及农畜产品质量检测等<sup>[7-8]</sup>。在食品质量检测方面也有很大突破,成功实现了对各化学指标的空间分布情况预测<sup>[9]</sup>,相比于区域单一化学指标值,增加了空间维度,从此人们可以不仅讨论样本某个指标的平均值,还可以“看见”局部检测值出现在样本表面的位置及覆盖面积。

但目前对于各种样本和不同指标的空间品质预测,都是基于区域光谱和区域指标建立的预测模型,即在预测模型对区域指标准确预测的前提下,应用到对象的空间指标分布上<sup>[10-16]</sup>,这种方法未曾考虑系统噪声对小尺度目标空间造成的不良影响,得到的空间预测结果是否正确反映对象指标值的实际空间分布情况不得而知。现实中,理化检测得到的是区域内的一个化学平均指标值,各像素点上的指标值无法获得,因此对象实际化学指标的空间分布情况无法获得,预测模型得到的空间化学指标分布无法直接验证准确性。笔者也未见有相关文献对其进行研究证明。

本文的研究目的是针对“应用光谱成像技术对农产品品质指标的‘空间’分布情况进行预测”技术,探究品质指标空间分布检测规律,建立预测

准确度理论模型。虽然研究对象与指标千差万别,但农业产品品质光谱成像的空间检测技术框架的共性本质可以抽象为“根据区域光谱的特征(均值)曲线对像素光谱进行(空间)预测。综合考虑实际化学指标测量误差、光谱数据采集误差和相机量子转化效率等因素,分析这些误差在光谱成像预测模型中传递的基本规律,及其对空间预测精度的影响规律,研究出一种可间接评价空间品质预测准确度的新方法,为评判空间预测结果的可靠性提供依据。

## 2 数据与方法

### 2.1 样本生成及处理

本文在输入数据的选择方面,没有采用某种对象的具体指标,而是为体现一般性,采用一组公开数据,即 Matlab2012a 中 spectra 光谱数据的 60 个 octane 辛烷值和 60 条 401 个通道的 NIR 光谱曲线作为数据来源,开展对基于光谱成像的农业产品品质空间检测这一技术框架普遍规律的探索。其中 octane 辛烷值与 NIR 光谱曲线被认为噪声几乎为 0,利用 60 个辛烷值数据随机填充生成 200 个 20×20 像素大小的区域来模拟已知空间化学指标分布的样本;利用 NIR 光谱曲线生成与每个样本对应的 401 张光谱图像,作为预测模型的光谱输入数据。

本文的区域光谱是检测区域在光谱建模时所体现的代表光谱,采用光谱图像中检测区域内所有像素位置处光谱的均值作为该检测区域的区域光谱。区域指标是样本在光谱建模时所体现的代表指标值,采用样本检测区域内所有像素位置处化学指标值的均值作为该样本的区域指标。本文技术路线如图 1 所示。

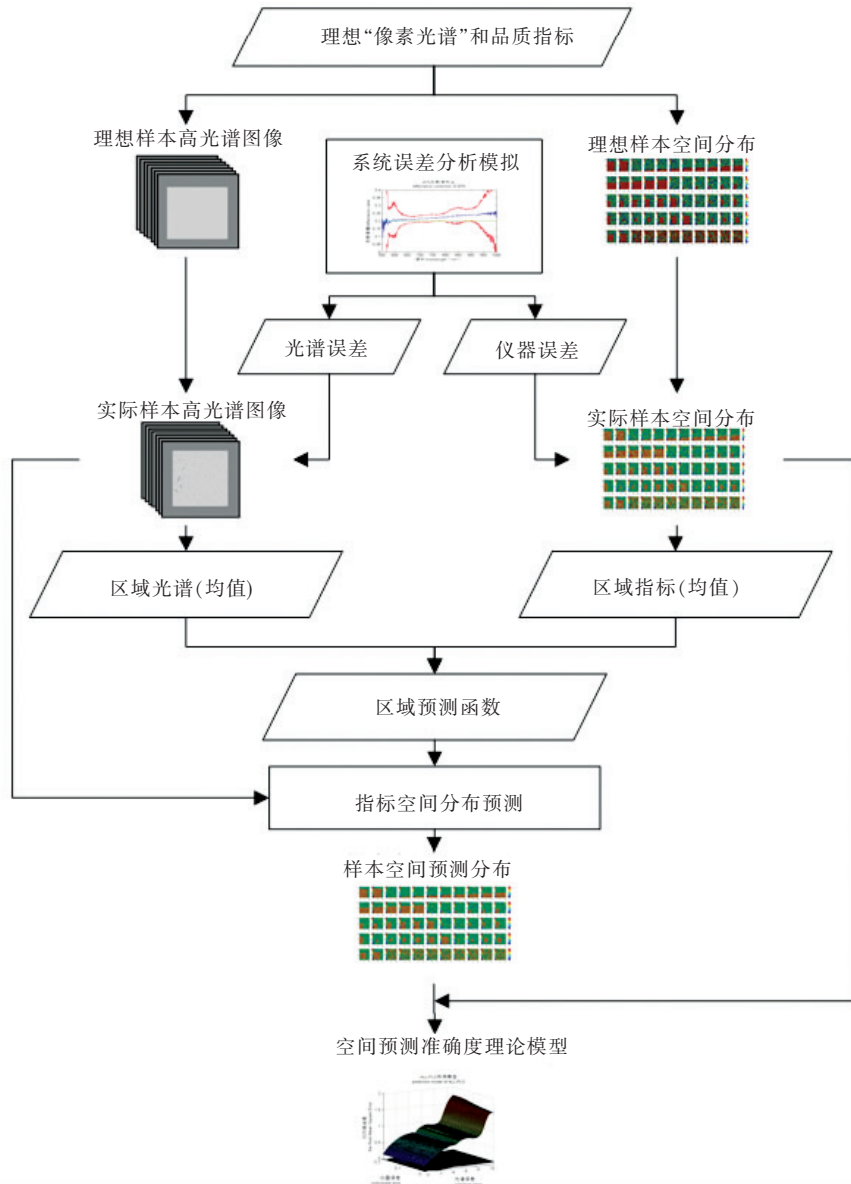


图 1 技术路线

Fig. 1 Technology roadmap

## 2.2 数据采集系统分析

数据采集系统包括光谱采集系统和理化检测仪器,分析光谱采集系统中各光谱波段信噪比和理化检测仪器中的误差波动规律,可以实现系统误差的评定和量化。

理化检测仪器误差的随机性较大,我们认为其误差服从随机分布;光谱采集系统误差需要逐波段分析,本文利用多块不同灰度等级反射率标准板进行分析。实验中不同灰度等级反射率标准板的光谱图像,均采用文献[17]所示基于 AOTF 的高光谱图像采集系统采集。在 550 ~ 1 000 nm 波段,1 nm 步长,分别在固定曝光(时间 0.1 s、增益 255)和变曝光下采集 99%、75%、50%、20%反

射率标准板的光谱图像和盖上镜头盖的暗噪声光谱图像,对 75%、50%、20% 的光谱数据进行反射率校正。变曝光是指对 99% 反射率标准板保证每一个通道在不过曝前提下反射率达到最大的曝光时间<sup>[18]</sup>。

反射率校正是为了消除光源不均匀及相机暗噪声等对光谱图像的影响<sup>[19-20]</sup>,对当日采集的样本光谱,采用当日系统暗噪声光谱及 99% 的标准反射率标定板光谱进行相对反射率校正,相对反射率校正计算公式为:

$$R = \frac{C - R_d}{R_w - R_d} \times 100\%, \quad (1)$$

式中  $R$  是反射率校正后的光谱; $C$  是待校正样本

的光谱; $R_w$  是 99% 反射率标准板的光谱, $R_d$  是盖上镜头盖采集的暗噪光谱。

### 2.3 预测方法与评价

为了使研究具有一定的适应性和鲁棒性,本文采用基于光谱成像技术对农产品品质指标空间分布研究中典型的两种方法:全波段建模和特征波长建模<sup>[21-23]</sup>。利用遗传算法(Genetic algorithm, GA)作为特征波长挑选算法,通过各项参数的选择,从任意初始群体出发,不断进行随机选择、交叉和变异操作,最终收敛到一群最适应环境的个体,即最佳波长组。一般认为特征波长个数在 10 以内为最佳,本文挑选 10 个特征波长作为最佳波长组。以偏最小二乘(Partial least squares, PLS)作为预测工具,构建全波段偏最小二乘(ALL-PLS)和遗传偏最小二乘(GA-PLS)预测函数,研究不同误差下对预测集样本空间像素指标的预测精度。

用预测集的样本预测值和实际值的均方根误差和确定系数评价模型预测能力<sup>[24-26]</sup>。均方根

误差越小,确定系数越接近 1,预测精度越高。区域均方根误差( $RMSE_y$ )判断预测函数对区域检测的准确性,区域确定系数( $R_y^2$ )判断样本标准值与区域预测值间的相关性;空间均方根误差( $RMSE_{ALL-PLS}$ 和 $RMSE_{GA-PLS}$ )判断预测函数对空间指标检测的准确性,空间确定系数( $R_{ALL-PLS}^2$ 和 $R_{GA-PLS}^2$ )判断样本标准值与空间预测值间的相关性,当空间确定系数大于 0.6 时,认为其指标像素预测准确。

## 3 结果与讨论

### 3.1 训练集和预测集

生成 200 个样本作为训练集,所有样本按化学指标值进行等概率抽取 55 个样本作为预测集,即预测集样本包含在训练集之中。区域集样本的变化范围以各个样本均值为指标;空间集样本的变化范围以样本中的各个像素值为指标。训练集和预测集实际化学指标值的变化范围、平均值及标准偏差如表 1 所示。

表 1 未添加噪声样本化学指标值结果

Tab. 1 Results of chemical detection of non-noise samples

样本集	样本数	变化范围	平均值	标准偏差	
区域集	训练集	200	85.796 6 ~ 87.755 7	86.763 8	0.509 3
	预测集	55	85.796 6 ~ 87.755 7	86.749 4	0.522 4
空间集	训练集	200	83.400 0 ~ 89.600 0	86.763 8	1.511 0
	预测集	55	83.400 0 ~ 89.600 0	86.749 4	1.490 5

### 3.2 系统误差模拟

光谱成像系统中,样本的光谱特征通过相机各像元输出电信号的强度来衡量,因此相机各像元输出电信号强度与入射光强一致性越高,则相机信噪比越高,通常使用多块不同灰度等级反射率标准板来验证。利用基于 AOTF 的高光谱图像采集系统分别在变曝光和固定曝光下采集不同反射率标定板,进行反射率校正和计算各波段的标准差,可以分析得到两种采集模式下的光谱误差,如图 2 所示,蓝色为实际反射率值,红色为正负标准差,绿色为理想反射率值。

图 2(a)、(b)和(c)是固定曝光下 75%、50%和 20%的反射率校正结果,发现系统误差在 630 ~ 920 nm 之间波动幅度不大;在 550 ~ 630 nm 和 920 ~ 1 000 nm 之间波动剧烈。图 2(d)、(e)和

(f)是变曝光下 75%、50%和 20%的反射率校正结果。对比固定曝光可知,变曝光下系统误差波动更为平稳,有效改善了系统两侧波段的误差情况。表明自动控制相机曝光时间的方式能够有效提高各波段光谱图像的信噪比。

为使光谱系统误差模拟更为真实,添加光谱误差时需分段考虑。单个样本包含 401 张高光谱图像,本文将光谱图像分成前 1 ~ 80 张、中 81 ~ 320 张和后 321 ~ 401 张 3 部分,分别对这 3 部分添加服从正态分布的不同均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  的二维高斯噪声以模拟实际光谱图像采集系统误差。通常认为理化检测仪器的误差具有随机性,单个样本空间化学指标值上添加服从均匀分布的均值为 0 和  $[0, b]$  之间的二维随机噪声以模拟测量化学指标时出现的随机误差。

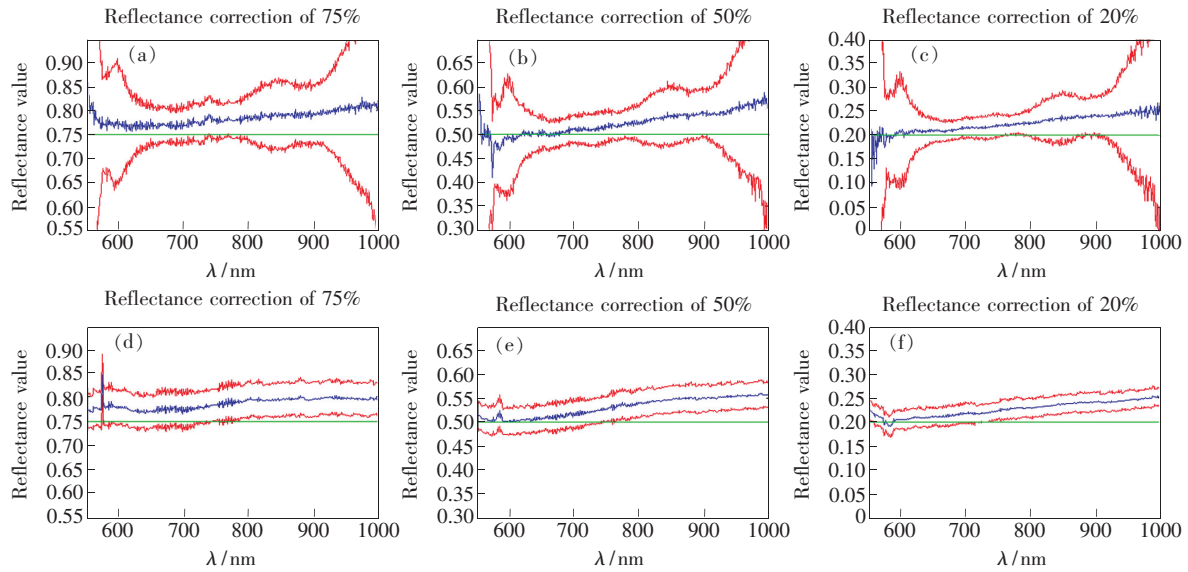


图 2 不同标准板光谱反射率校正

Fig. 2 Reflection correction of different standard plates

### 3.3 空间预测分析

空间预测中,通常用样本光谱图像每个像素点得到的化学指标值取代每个像素点的光强值,由此得到一幅由化学指标值构成的伪色彩图。本文利用计算机模拟的样本空间指标分布包含了“空间扩散”、“整体衰减”和“随机差异”3种模式,分别模拟由两种材质构成的兴趣区域及其品质差异和全局出现随机品质差异的情况。其中预测集55个样本无仪器误差时的实际空间指标分布如图3(a)所示。

分析得到系统变曝光下的光谱误差大约在前段(0.03,0.03)、中段(0.02,0.02)、后段(0.03,0.03),系统固定曝光下的光谱误差大约在前段(0.03,0.15)、中段(0.03,0.05)、后段(0.04,0.12),将两种模式下的光谱误差分别添加到数据集对应的光谱图像上。综合考虑样本指标变化范围,定义仪器误差为0.2较为符合实际,将仪器误差添加到数据集样本的空间指标分布上。ALL-PLS和GA-PLS区域预测函数中,全波段基于10个主成分、特征波长基于9个主成分。图3(d)和(g)为图2(a)加上仪器误差后得到。

在未添加误差情况下,图3(a)为预测集样本指标分布实际图,图3(b)和(c)是样本指标分布预测图;在添加变曝光误差情况下,图3(d)为预测集样本指标分布实际图,图3(e)和(f)是样本

指标分布预测图;在添加固定曝光误差情况下,图3(g)为预测集样本指标分布实际图,图3(e)和(f)是样本指标分布预测图。

由图3(a)、(b)和(c)可知,无误差时样本指标空间分布实际图和预测图几乎相同;从图3(d)~(i)可知,随着误差出现,样本指标分布实际图和预测图出现了偏差,固定曝光下的偏差较为严重。无误差时,经计算空间预测精度均小于0.1500,确定系数均大于0.9900,基于区域光谱建立的ALL-PLS和GA-PLS预测模型可以推广到样本指标的空间分布;添加系统误差后,两种模型对样本空间预测都不同程度地偏离实际指标分布,固定曝光下空间预测精度较差( $RMSE_{ALL-PLS} = 1.7329$ ,  $R^2_{ALL-PLS} = 0.5321$ ;  $RMSE_{GA-PLS} = 2.1047$ ,  $R^2_{GA-PLS} = 0.2154$ ),而变曝光下空间预测精度( $RMSE_{ALL-PLS} = 0.6924$ ,  $R^2_{ALL-PLS} = 0.6724$ ;  $RMSE_{GA-PLS} = 0.8290$ ,  $R^2_{GA-PLS} = 0.6244$ )在可接受范围内。同时发现,空间预测时当确定系数达到临界值0.6时,RMSE在1附近,可认为RMSE在1以内,空间像素指标预测准确。

为进一步探索空间分布结果图的数据可靠性的变化规律,逐渐增加光谱成像系统中的噪声和理化检测仪器中的噪声。其中误差形式如表2所示,不同 $(\mu, \sigma)$ 形成光谱误差;不同 $b$ 形成仪器误差。

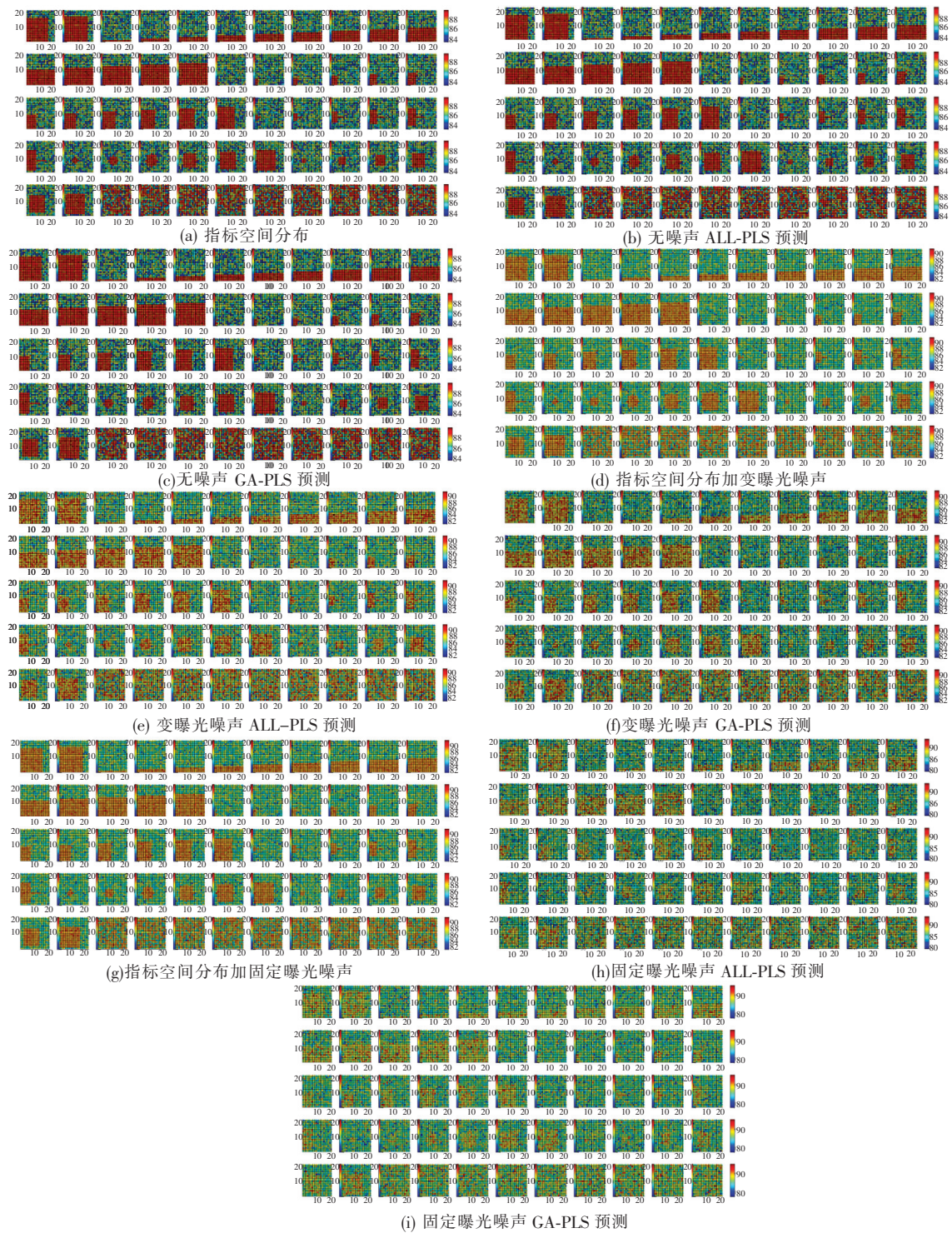


图 3 预测集样本空间品质分布实际值与预测值对比

Fig. 3 Comparison between true value and measured value on the spatial prediction

表 2 光谱误差和仪器误差

Tab.2 Spectrum error and instrument error

光谱误差	(0.00,0.00)	(0.02,0.02)	(0.03,0.03) *	(0.03,0.05)	(0.03,0.1)	(0.03,0.1)	(0.03,0.1)	(0.03,0.15) **
仪器误差	0	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15	0.18	0.21

注: \* 表示变曝光模式下的光谱误差, \*\* 表示固定曝光模式下的光谱误差。

不同仪器和光谱误差下,分别对预测集进行化学指标的区域预测和空间预测,计算两种模型的预测精度,研究两种模型下误差程度与空间预测精度之间的定量关系。将表 2 中的光谱误差按噪声程度划分为 11 个等级体现在图 4 光谱误差轴上。

图 4 中箭头指向点分别表示变曝光和固定曝光模式下空间预测精度。从图 4 可知,两种函数对预测集的区域指标能够准确预测,应用到空间指标预测上都易受到误差干扰而降低准确度,光谱误差为主要影响因素;两种预测函数空间可视化预测精度的恶化趋势相一致,误差对 ALL-PLS 和 GA-PLS 在空间预测上的影响方式相似。光谱误差前期两种函数空间预测精度随着误差增大而缓慢降低;中期随着误差增加,两种函数空间预测精度都出现了逆向回升,可以认为是一定程度的噪声对特征信息出现了互补,实现了误差补偿;误差增加后期,两种函数空间预测精度快速恶化。GA-PLS 空间预测精度与 ALL-PLS 相比,变化趋势更为明显,可以认为是基于少数特征波长的预

测函数在空间预测上对噪声更加敏感。

不考虑光谱和仪器误差时,ALL-PLS 和 GA-PLS 对样本空间指标分布预测精度均较高,可以准确反映样本实际指标分布;随着光谱和仪器误差增加,两种函数空间预测精度快速下降,当光谱误差达到前段(0.03,0.1)、中段(0.03,0.03)、后段(0.03,0.1)和仪器误差达到 0.2 时,空间预测精度( $RMSE_{ALL-PLS} > 1, R^2_{ALL-PLS} < 0.6$ ;  $RMSE_{GA-PLS} > 1, R^2_{GA-PLS} < 0.6$ )降到临界值之下,不再可信。

在实际检测系统中,不可避免地受到成像系统噪声的影响。当系统噪声增大时,上述技术框架所得的空间检测结果是否依然可信?受检测技术限制,采集的像素光谱噪声水平明显高于区域光谱数据。本文在对系统噪声研究中,通过构建“理想光谱图像中的各像素位置的光谱”,获得接近无噪声理想条件下开展光谱成像空间分布检测的数据基准。在此基础上通过逐渐增加光谱成像系统中的光谱噪声,逼近真实光谱成像系统检测情况,以此探索所得空间分布结果图的数据可靠性变化规律。发现通过对光谱噪声的衡量与控制,能够间接实现对基于光谱图像的农产品品质空间预测准确度的评定及改善。

## 4 结 论

本文对基于“利用光谱成像检测方法对农产品品质空间分布检测”这一技术框架的共性本质,即“根据区域光谱的特征(均值)曲线对像素光谱进行(空间)预测”结果随系统噪声变化时指标空间分布预测结果的数据可靠性规律进行了探索。不受具体理化检测手段与检测对象种类限制,只要满足两个条件:一、其光谱成像预测建模数据所用的理化指标数据是针对“区域”的;二、预测结果的空间分辨率是面积小于理化检测时的数据采样区域的“像素”指标,即适用本文的研究所得的空间可靠性规律。

研究表明:采用自动控制相机曝光的方式逐波段进行光谱采集系统的灵敏度校正,能够有效提高光谱图像信噪比,对波段两侧极限处尤为明显;基于区域品质数据得到的预测函数应用到空间品质指标预测,预测准确度受光谱图像采集噪声影响较大——即使区域预测准确,空间预测可能已完全失真。通过对数据采集系统误差的衡量,能够间接实现对基于光谱图像的农产品品质空间预测准确度的评价,为后续进一步研究提供了参考依据。

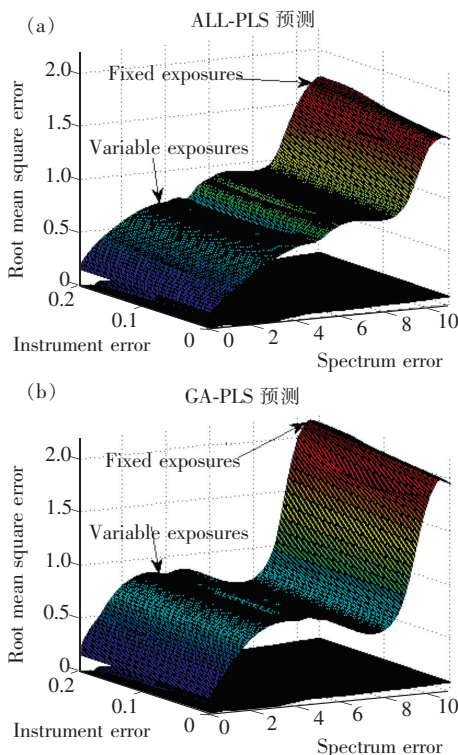


图 4 两种函数的空间预测与区域预测精度对比(下层是区域预测,上层是空间预测)。(a) ALL-PLS 预测; (b) GA-PLS 预测。

Fig. 4 Accuracy comparison between spatial prediction and regional prediction. (a) Prediction of ALL-PLS. (b) Prediction of GA-PLS.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 彭彦昆,张雷蕾. 农畜产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 137-145.  
PENG Y K, ZHANG L L. Hyperspectral nondestructive testing technology progress and trends of the quality safety of agricultural and livestock products [J]. *J. Agricult. Machin.*, 2013, 44(4):137-145. (in Chinese)
- [ 2 ] 谢传奇,王佳悦,冯雷,等. 应用高光谱图像光谱和纹理特征的番茄早疫病早期检测研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6):1603-1607.  
XIE C Q, WANG J Y, FENG L, *et al.*. Study on early detection of tomato early blight with spectral and texture features of hyperspectral images [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2013, 33(6):1603-1607. (in Chinese)
- [ 3 ] 何勇,彭继宇,刘飞,等. 基于光谱和成像技术的作物养分生理信息快速检测研究进展 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):174-189.  
HE Y, PENG J Y, LIU F, *et al.*. Research progress on rapid detection of nutrient physiological information of crops based on spectroscopy and imaging technology [J]. *Agricult. Eng. J.*, 2015, 31(3):174-189. (in Chinese)
- [ 4 ] 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, 35(2): 486-491.  
DING X B, LIU F, ZHANG C, *et al.*. Detection of SPAD values of rape leaves based on hyperspectral imaging [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2015, 35(2):486-491. (in Chinese)
- [ 5 ] 曹佃生,石振华,林冠宇. 机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1403-1409.  
CAO D S, SHI Z H, LIN G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6):1403-1409. (in Chinese)
- [ 6 ] 张成业,秦其明,陈理,等. 高光谱遥感岩矿识别的研究进展 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(8):2407-2418.  
ZHANG C Y, QIN Q, CHEN L, *et al.*. Research and development of mineral identification utilizing hyperspectral remote sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2407-2418. (in Chinese)
- [ 7 ] 王耀鹏,顾志荣,孙宇靖,等. 近红外光谱快速定量技术在中药分析中的最新应用进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2015, 21(9):223-226.  
WANG Y P, GU Z R, SUN Y J, *et al.*. The latest progress in the application of fast quantitative near infrared spectroscopy in the analysis of Chinese medicine [J]. *Chin. Experiment. Prescript. J.*, 2015, 21(9):223-226. (in Chinese)
- [ 8 ] 张凯华,臧明伍,王守伟,等. 基于光谱技术的畜禽肉新鲜度评价方法研究进展 [J]. 肉类研究, 2016, 30(1): 30-35.  
ZHANG K H, ZANG M W, WANG S W, *et al.*. Research progress on evaluation method of meat freshness based on spectral technology [J]. *Meat Res.*, 2016, 30(1):30-35. (in Chinese)
- [ 9 ] QIAO J, NGADI M O, WANG N, *et al.*. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system [J]. *J. Food Eng.*, 2007, 83(1):10-16.
- [ 10 ] 蔡健荣,万新民,陈全胜. 近红外光谱法快速检测猪肉中挥发性盐基氮的含量 [J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2808-2812.  
CAI J R, WAN X M, CHEN Q S. Fast detection of the content of volatile basic nitrogen in pork by near infrared spectroscopy [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2009, 29(10):2808-2812. (in Chinese)
- [ 11 ] JACKMAN P. Prediction of beef palatability from colour, marbling and surface texture features of longissimus Dorsi [J]. *J. Food Eng.*, 2010, 96(1):151-165.
- [ 12 ] 朱启兵,肖盼,黄敏,等. 基于特征融合的猪肉新鲜度高光谱图像检测 [J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(3): 246-252.  
ZHU Q B, XIAO P, HUANG M, *et al.*. Detection of hyperspectral image of pork freshness based on feature fusion [J]. *J. Food Biotechnol.*, 2015, 34(3):246-252. (in Chinese)
- [ 13 ] WANG X, ZHAO M, JU R, *et al.*. Visualizing quantitatively the freshness of intact fresh pork using acousto-optical tunable filter-based visible/near-infrared spectral imagery [J]. *Comput. Electron. Agricult.*, 2013, 99(7):41-53.



- [14] ELMASRY G, SUN D W, ALLEN P. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef [J]. *J. Food Eng.*, 2012, 110(1):127-140.
- [15] 王志新. MATLAB 程序设计及其数学建模应用 [M]. 北京:科学出版社, 2013.  
WANG Z X. *MATLAB Program Design and Application of Mathematical Modeling* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [16] 赵杰文. 食品、农产品检测中的数据处理和分析方法 [M]. 北京:科学出版社, 2012.  
ZHAO J W. *Method of Data Processing and Analysis in Food and Agricultural Products Detection* [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 汪希伟. 基于光谱成像的猪肉新鲜度检测方法 [D]. 南京:南京林业大学, 2014. (in Chinese)  
WANG X W. *New Approach to Detect Freshness of Pork Using Spectral Imaging* [D]. Nanjing: Najing Forestry University, 2014. (in Chinese)
- [18] 高志帆, 张红平, 吴琼水, 等. AOTF 高光谱成像系统的标定及性能测试 [J]. 光子学报, 2015, 44(7):125-131.  
GAO Z F, ZHANG H P, WU Q S, *et al.*. Calibration and performance test of AOTF hyperspectral imaging system [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(7):125-131. (in Chinese)
- [19] 姜奕雯. 基于高光谱图像的猪肉新鲜度预测模型建立方法 [D]. 南京:南京林业大学, 2015.  
JIANG Y W. *Building Method of Pork Freshness Prediction Model Based on Hyperspectral Image* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015. (in Chinese)
- [20] FENG Y Z, SUN D W. Determination of total viable count (TVC) in chicken breast fillets by near-infrared hyperspectral imaging and spectroscopic transforms [J]. *Talanta*, 2013, 105(4):244-249.
- [21] ELMASRY G, IQBAL A, SUN D W, *et al.*. Quality classification of cooked, sliced turkey hams using NIR hyperspectral imaging system [J]. *J. Food Eng.*, 2011, 103(3):333-344.
- [22] SOLFRIZZI V, NARDO G A, PANZA F, *et al.*. Detection of adulterations with different grains in wheat products based on the hyperspectral image technique; the specific cases of flour and bread [J]. *Arch. Gerontol. Geriat.*, 2015(S1):69-72.
- [23] 吕程序, 姜训鹏, 张银桥, 等. 基于变量选择的小麦粗蛋白含量近红外光谱检测 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(s1):340-346.  
LYU C X, JIANG X P, ZHANG Y Q, *et al.*. Detection of wheat crude protein content by near infrared spectroscopy based on variable selection [J]. *J. Agricult. Machin.*, 2016, 47(s1):340-346. (in Chinese)
- [24] 林志丹, 汪玉冰, 王儒敬, 等. 波长优选对土壤有机质含量可见光/近红外光谱模型的优化 [J]. 发光学报, 2016, 37(11):1428-1435.  
LIN Z D, WANG Y B, WANG R J, *et al.*. Improvements of Vis-NIRS model in the prediction of soil organic matter content using wavelength optimization [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(11):1428-1435. (in English)
- [25] QIAO Y, ZHANG S. Near-infrared spectroscopy technology for soil nutrients detection based on LS-SVM [J]. *IFIP Adv. Inform. Commun. Technol.*, 2016, 368:325-335.
- [26] 刘永平, 王霞, 李帅帅, 等. 基于红外技术的气体浓度检测方法研究 [J]. 光子学报, 2015, 44(1):0112002.  
LIU Y P, WANG X, LI S S, *et al.*. Gas concentration detection method based on infrared absorption spectroscopy technology [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(1):0112002. (in Chinese)



杨君荣(1993 -),男,江苏盐城人,硕士研究生,2015 年于常熟理工学院获得学士学位,主要从事农产品无损检测、图像处理方面的研究。

E-mail: muijames@126.com



赵茂程(1966 -),男,江苏扬州人,教授,博士生导师,2003 年于南京林业大学获得博士学位,主要从事无损检测与图像处理等方面的研究。

E-mail: mczhao@njfu.edu.cn