DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2021.12.021

基于红外与可见光图像融合的苹果表面缺陷检测方法

Apple surface defect detection method based on fusion of infrared and visible images

王云鹏 司海平 宋佳珍 万 里

WANG Yun-peng SI Hai-ping SONG Jia-zhen WAN Li

(河南农业大学信息与管理科学学院,河南 郑州 450046)

(*College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan* 450046, *China*)

摘要:目的:解决目前中国苹果分级分类大部分情况下仍需要进行人工筛选的问题。**方法:**采用基于多尺度变换的红外与可见光图像融合算法对所采集到的苹果的可见光图像和红外图像进行融合,得到缺陷特征更加直观的融合图像,对该图像进行图像的预处理操作得到二值化图像数据集,再采用卷积神经网络的 AlexNet 模型对之前的苹果表面缺陷数据集进行训练、验证和检测。**结果:**该检测方法在所制作的苹果表面缺陷数据集上对完好果、缺陷果、花萼/果梗、花萼/果梗加缺陷识别的平均准确度为 99.0%,其中对花萼/果梗的识别准确率可达 95.8%,对完好果、缺陷果和花萼/果梗加缺陷的识别准确率高达 100%。**结论:**该方法对苹果表面缺陷的检测精度比较高,可以满足对苹果的在线分级的需求。

关键词:图像融合;缺陷检测;多尺度变换;卷积神经网络;图像处理

Abstract: Objective: To solve the current situation of manual screening in most cases of Chinese apple classification. **Methods:** The infrared and visible image fusion algorithm based on multi-scale transformation was used to fuse the collected visible image and infrared image of the apple to obtain a more intuitive fusion image with defect characteristics, and performed image preprocessing operations on the image to obtain a binary value. The image data set was transformed, and then the AlexNet model of the convolutional neural network was used to train, verify and detect the previous Apple surface defect data set. **Results:** The detection method has an average accuracy of 99.0% for intact fruit, defective fruit, calyx/stalk, calyx/stalk plus defect on the produced apple surface defect data set, and the average accuracy was 99.0%. The recognition accuracy rate could reach 95.8%, and the recognition accuracy rate of intact fruit, defective fruit and calyx/fruit stem plus defect was as high as 100%. **Conclusion:** This method has a relatively high detection accuracy for apple surface defects, which can meet the demand for online classification of apples.

Keywords: image fusion; defect detection; multi-scale transformation; convolutional neural network; image processing

苹果是在全球范围内,种植面积与产量仅次于香蕉和柑桔的第三大水果。与发达国家相比,中国的苹果产业存在品质较差、整体价格较低、出口量较小以及产品的附加值较低等问题。其原因主要是苹果的采后分类环节不够完善,产品采摘收集完成后,立即投放市场,导致苹果市场中产品质量不一,市场竞争力不足。因此苹果采摘后进行实时分类成为了一个急需解决的问题。与此同时,国内外采用计算机视觉对苹果的尺寸、形状、颜色等特征的自动检测技术已较为成熟,但由于果梗、花萼与苹果表面缺陷具有较为相似的灰度特征,因此容易导致误判[1]。目前,传统的苹果分类方法主要是人工检测。随着图像技术的快速发展,基于红外热成像、机器视觉、光谱检测等技术开发了许多水果类无损的检测方法[2]。如邱光应等[3]提出了一种基于决策树支持向量机的苹果表面缺陷检测方法,该方法的平均准确率能达到 97.7%。孟庆龙等[4]提出了一种基于高光谱成像技术结合图像分割技术的苹果表面缺陷识别算法,该方法对于完好无损苹果和表面有缺陷苹果的正确识别率分别达到了 97.5% 和 95%。高辉等[5]提出了一种基于机器视觉的苹果表面缺陷检测方法,该检测方法的识别准确率为99.1%,对于

基金项目:国家科技资源共享服务平台项目(编号:NCGRC-2020-57);河南省重大公益专项(编号:201300210300)

作者简介:王云鹏,男,河南农业大学在读硕士研究生。

通信作者:司海平(1978—),男,河南农业大学教授,博士。E-mail: pingsss@126.com

收稿日期:2021-07-23

苹果表面缺陷的识别精度较高。

基于多尺度变换的图像融合在图像融合领域中，一直备受关注，多尺度变换的基本思想是先将源图像变换到多个尺度上，再按照一种或多种融合规则，分别对不同尺度上的分量图像进行特征融合，最后把所得到的融合分量利用逆变换的方法用以得到融合结果。为解决目前检测苹果表面缺陷方法对于以划伤为代表的机械损伤的检测准确率较低的现状，可将红外图像和可见光图像进行融合，充分利用两种图像数据的互补优势来获取苹果表面更加明显的缺陷特征[6]。研究拟采用基于多尺度变化的红外与可见光图像融合算法对苹果表面缺陷进行研究，以期实现苹果的在线检测与分级。

1　基于多尺度变换的图像融合算法

采用基于多尺度变换的图像融合算法[7]进行红外与可见光图像的融合工作，其算法步骤：

(1) 将红外图像与可见光图像的原图像设为 I_n，$n=2$，对于 $n>2$ 的源图像，其融合方法相同，文中以 $n=\{1,2\}$ 为例。

(2) 将 I_n 以分为基本部分 I_n^b 和细节部分 I_n^d，I_n^b 和 I_n^d 采用引导滤波[8]的方法进行计算，I_n^b 其计算公式如式(1) 和式(2)所示。

$$I_n^b=\arg\min_{I_n^b}\| I_n-I_n^b\|_F^2+\lambda(\| g_x*I_n^b\|_F^2+\| g_y*I_n^b\|_F^2), \tag{1}$$

$$I_n^d=I_n-I_n^b, \tag{2}$$

式中：

g_x——水平梯度算子；

g_y——垂直梯度算子；

λ——用以控制两个项之间权衡的正参数。

1.1　基本部分

从源图像中提取的基本部分包含了红外图像与可见光图像的共同特征和冗余信息。为最大程度保留源图像基本部分的共同特征，采用加权平均的融合策略对基本部分进行融合，由式(3)可得基本部分的融合结果 $F_b(x,y)$。

$$F_b(x,y)=\lambda_1 I_1^b(x,y)+\lambda_2 I_2^b(x,y), \tag{3}$$

式中：

$I_1^b(x,y)$——红外图像分解得到的基本部分的对应位置；

$I_2^b(x,y)$——可见光图像分解得到的基本部分的对应位置；

λ_1、λ_2——I_1^b 和 I_2^b 对应的权重值，文中为得到最大全局特征和减少冗余信息 λ_1、λ_2 二者取 0.5。

1.2　细节部分

对于细节内容的处理，采用预训练的 VGG-19 卷积神经网络模型[9]来提取特征信息，采用多层融合策略来获得权重图。

$$\varphi_n^{i,m}=\Phi(I_n^d), \tag{4}$$

式中：

$\varphi_n^{i,m}$——从第 i 层提取得到的第 n 个详细内容的特征图(m 指第 i 层的通道数)；

$\Phi(\cdot)$——VGG-19 神经网络中的特征层(4 层特征)；

令 $\varphi_n^{i,1:M}(x,y)$，M 为 m 可取的最大值，$\varphi_n^{i,1:M}(x,y)$ 作为在特征图 $\varphi_n^{i,m}$ 中，坐标为(x,y)的内容，当提取到 4 层特征 $\varphi_n^{i,m}$ 后，各特征层在各自的通道维度中求 l1-范数，$\varphi_n^{i,1:M}(x,y)$的 l1-范数可以作为源图像的细节部分的活动水平度量，因此初始的活动性水平图可由式(5)得到。

$$C_n^i(x,y)=\| \varphi_n^{i,1:M}(x,y)\|_1, \tag{5}$$

式中：

$C_n^i(x,y)$——活动性水平图。

为降低所得活动性水平图的配准错误的概率，可对初始的活动性水平图使用区域均值的方法得到最终活动性水平图 $\hat{C}_n^i(x,y)$。

$$\hat{C}_n^i(x,y)=\frac{\sum_\beta^r\sum_{\theta=-r}^r C_n^i(x+\beta,y+\theta)}{(2r+1)^2}, \tag{6}$$

式中：

r——自定义的区域大小。

对最终活动性水平图进行 Soft-max 操作，由式(7)可得不同尺度的初始权重图 $W_k^i(x,y)$。

$$W_k^i(x,y)=\frac{\hat{C}_k^i(x,y)}{\sum_{n=1}^K\hat{C}_n^i(x,y)}。 \tag{7}$$

由于初始权重图对应不同的尺度，因此需要进行上采样至相同尺度得到相同大小的最终权重图，采用左上角元素填充的方式进行上采样，上采样率与特征深度呈指数关系。由式(8)可得到最终权重图。

$$\hat{W}_n^i(x+p,y+q)=W_n^i(x,y),\ p,q\in\{0,1,\cdots,(2^{i-1}-1)\}, \tag{8}$$

式中：

p——横坐标上的变量；

q——竖坐标上的变量；

i——4 层特征的层数。

通过将现有的 4 对最终权重图与融合图像的细节部分进行加权计算，得到对于初始的细节部分融合结果：

$$F_d^i(x,y)=\sum_{n=1}^K\hat{W}_n^i(x,y)\times I_n^d(x,y),K=2, \tag{9}$$

式中：

K——红外与可见光源图像的数量。

对于所得到的初始细节部分的融合结果，采用最大值策略，对图像逐像素选最大值，得到最终的细节部分融合效果。

$$F_d(x,y)=\max\{F_d^i(x,y)\},i\in\{1,2,3,4\}。\quad(10)$$

1.3 最终融合部分

当分别得到红外与可见光图像的基本部分和细节部分后,由式(11)可得到最终融合结果。

$$F(x,y)=F_b(x,y)+F_d(x,y),\quad(11)$$

式中:

$F_b(x,y)$ ——基本部分的融合结果;

$F_d(x,y)$ ——细节部分的融合结果。

2 仿真试验

2.1 试验环境

CPU: Core(TM) i7-10750H,英特尔;GPU:GeForce RTX 2060,英伟达;操作系统:Windows 10, 微软;工作软件:MATLAB R2021A,美国 MathWorks 公司;试验中网络的模型训练、测试全部在 NVIDIA GeForce RTX 2060 中进行。

2.2 图像获取和预处理

由于所采集图像的质量对其后续的处理会产生较大影响,考虑到在自然条件下,不同时间和不同天气的环境、光照度和温度的变化比较大,因此搭建了红外与可见光图像采集实验箱,如图 1 所示。

采用由深圳市大疆创新科技有限公司自主开发生产的御2行业进阶版无人机所携带的双光相机。该相机性能参数如表 1 和表 2 所示。

采用 50 W 的小灯泡对苹果进行加热 40 s,使得苹果表面温度达到 32.8 ℃左右与 25.8 ℃的环境温度产生明显差距,使得红外相机采集到明显的苹果轮廓。李星恕等[10]研究发现,在温度低于 60 ℃时温度对苹果组织细胞结构的影响很小。因此,试验条件下温度对正常苹果的影响可以忽略。由于苹果的表面缺陷部位的温度与完好部位的温度有所差别,因此在红外图像中的缺陷部位与完好部分特征较为明显,如图 2 所示。

首先对图像进行灰度化操作,图 3(a)为对图 2 进行灰度化操作,图 3(b)是对图 3(a)采用 BM3D 去噪算法[11]进行降噪处理后的图像,图 3(c)是对图 3(b)进行增强处理后的图像效果,由增强算法处理过后的红外图像与可见光图像与源图像相比,其视觉效果有了明显的提高,图

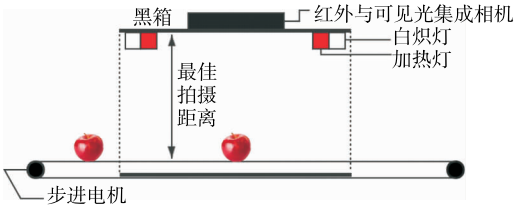


图 1　红外与可见光的图像采集平台

Figure 1　Infrared and visible light image acquisition platform

表 1　红外相机

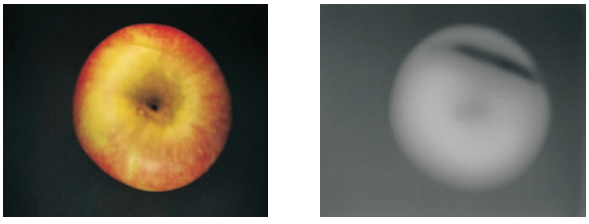
Table 1　Infrared camera

传感器	镜头焦距	传感器分辨率	红外测温精度
非制冷氧化钒微测辐射热计	定焦镜头焦距约 9 mm 等效焦距约 38 mm	640×512 @30Hz	±2 ℃或±2%(取较大值)

表 2　可见光相机

Table 2　Visible light camera

影像传感器	镜头	ISO 范围	数字变焦
12.7 mm CMOS;有效像素 4 800 万	视角:84° 等效焦距:24 mm 光圈:f/2.8 对焦点:1 m 至无穷远	视频:100～12 800(自动) 照片:100～1 600(自动)	32 倍数码变焦



(a) 可见光苹果图像　　(b) 红外苹果图像

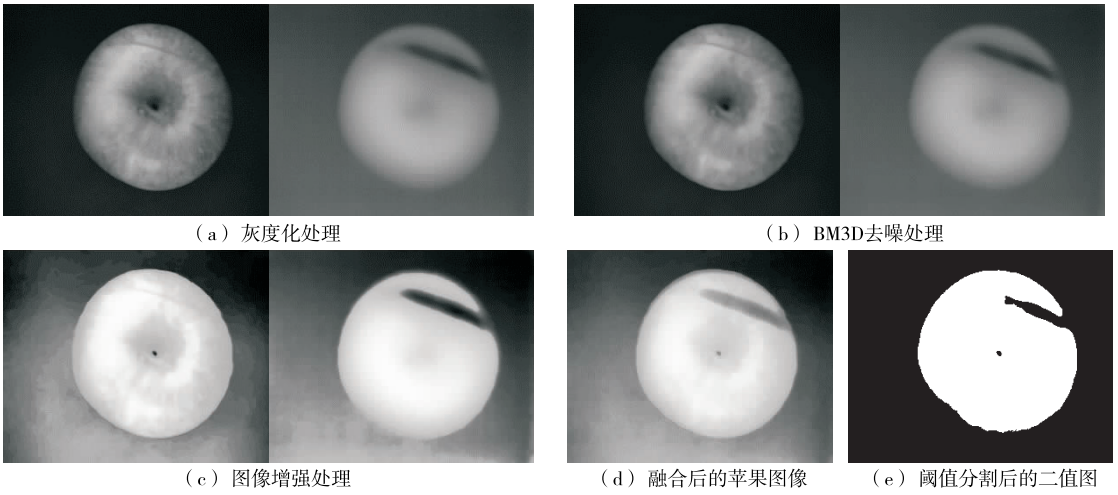
图 2　可见光苹果图像和红外苹果图像

Figure 2　Visible light apple image and infrared apple image

像中的细节部分得到增强,噪声被平滑,图像质量有了较大的提高,苹果表面的机械损伤部分更加明显。图 3(d)是对图 3(c)进行图像融合后的结果,经处理过后的融合图像中的缺陷细节得到了增强,其他不相关特征被消除,融合图像保留了红外图像的机械损伤细节和可见光图像的花萼和花梗部分。图 3(e)是对图 3(d)进行阈值分割后,所得到的二值图。

2.3 检测方法

从某农贸市场采购480个苹果,缺陷苹果分类可以



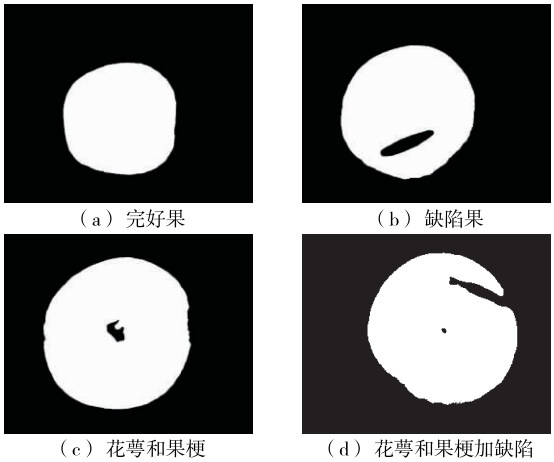
（a）灰度化处理　（b）BM3D去噪处理　（c）图像增强处理　（d）融合后的苹果图像　（e）阈值分割后的二值图

图 3　融合图像的处理过程

Figure 3　Process of fusion image

分为完好果、花萼、果梗、缺陷果，但由于花萼和果梗外形近似，因此将花萼和果梗分成一类，此外，由于花萼和果梗可能与缺陷部位出现在同一视角，因此分成一类为花萼和果梗＋缺陷，最后对所采集的苹果表面缺陷共分为 4 类，即完好果、缺陷果、花萼和果梗、花萼和果梗＋缺陷，如图 4 所示。根据上述基于多尺度变换红外与可见光图像融合的苹果缺陷检测方法，将选用的 480 个苹果进行图像处理，分成 4 类各 120 个制作成为苹果表面缺陷的数据集。

在前期所制作的数据集上，采用卷积神经网络模型 AlexNet[12] 进行苹果表面缺陷的检测。由于数据量过少，网络泛化能力较差，对图像进行水平方向随机翻转、水平和垂直方向随机缩放及水平和垂直方向随机平移等操作得到 2 880 张图像数据，网络训练 300 epoch，学习率最初热身值为 0.000 1，动量为 0.9，将数据集按 8∶1∶1 的比例分为训练集、验证集和测试集。



（a）完好果　（b）缺陷果　（c）花萼和果梗　（d）花萼和果梗加缺陷

图 4　苹果分类结果

Figure 4　Apple classification results

2.4　结果与分析

网络训练大约耗时 24 min，在验证集上得到 97.5%的结果，测试集上得到 99.0%的结果，而且单果的检测时间不超过 0.3 s。对苹果表面缺陷的评估进行检验，融合图像有着更明显的特征，经图像处理后的经由 AlexNet 模型进行分类识别，由于苹果的机械损伤部分在红外图像中较为明显，经过图像融合和图像处理后可得到特征明显的二值图，经由测试集测试后对完好果、缺陷果、花萼/果梗加缺陷进行识别的准确度可达 100%。同时，对于苹果的花萼和花萼部分在红外图像中并不明显，但在可见光图像中较为清晰，因此在经过融合后所得到的融合图像可以明显地显示花萼和花梗部分，经由图像处理所得的二值图在 CNN 中检测准确度也可以达到95.8% 的准确度。苹果表面的各图像类型识别精度见表 3 所示。

3　结论

研究提出以基于多尺度变换的红外与可见光图像融合苹果表面缺陷检测方法，该方法分为图像融合、图像处理、图像分类 3 个部分，基于多尺度变换的红外与可见光图像融合算法将可见光和红外图像分别分解为基本部分和细节部分，对于基本部分采用加权平均值融合规则，细节部分采用预训练的 VGG-19 模型来提取特征，最终融合得到苹果表面缺陷特征更加直观的红外与可见光融合

表 3　苹果缺陷识别精度

Table 3　Apple defect recognition accuracy

图像类型	准确率/%	平均准确度/%
完好果	100.0	99.0
缺陷果	100.0	
花萼/果梗	95.8	
花萼/果梗加缺陷	100.0	

图像。之后对融合图像进行图像处理得到二值图,最后采用 AlexNet 模型对所制作的苹果表面缺陷数据集进行检测。由仿真试验表示,该方法对于苹果缺陷检测的效果较好,对于缺陷检测的准确率相较于传统的缺陷检测方法较高,但由于所采集的红外图像和可见光图像尺寸不同,因此无法直接进行融合,需要预先进行图像配准,之后的研究将采用合适的图像配准算法获取可以直接融合的图像,以提高该检测方法的融合效果。

参考文献

[1] 邱光应. 基于机器视觉的苹果果梗/花萼与缺陷识别[D]. 重庆: 西南大学, 2017: 4-9.
QIU Guang-ying. Machine vision-based recognition of apple stem/calyx and defects[D]. Chongqing: Southwest University, 2017: 4-9.

[2] 彭步迅, 张晓, 任显丞, 等. 无损检测技术在水果轻微损伤检测中的应用研究[J]. 现代食品, 2020(23): 142-144.
PENG Bu-xun, ZHANG Xiao, REN Xian-cheng, et al. Application of non-destructive testing technology in the detection of minor damage to fruits[J]. Modern Food, 2020(23): 142-144.

[3] 邱光应, 彭桂兰, 陶丹, 等. 基于决策树支持向量机的苹果表面缺陷识别[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 131-135.
QIU Guang-ying, PENG Gui-lan, TAO Dan, et al. Apple surface defect recognition based on decision tree support vector machine[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 131-135.

[4] 孟庆龙, 张艳, 尚静. 基于高光谱成像技术的苹果表面缺陷无损检测[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(5): 168-172.
MENG Qing-long, ZHANG Yan, SHANG Jing. Nondestructive detection of defect on apples using hyperspectral imaging technology[J]. Food Research and Development, 2019, 40(5): 168-172.

[5] 高辉, 马国峰, 刘伟杰. 基于机器视觉的苹果缺陷快速检测方法研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 125-129, 148.
GAO Hui, MA Guo-feng, LIU Wei-jie. Research on apple defect quick detection method based on machine vision[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 125-129, 148.

[6] 陈乾辉, 吴德刚. 基于可见光—红外光图像融合的苹果缺陷检测算法[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 135-138.
CHEN Qian-hui, WU De-gang. Algorithm on apple defect detection based on visible light-infrared light image fusion[J]. Food & Machinery, 2018, 34(9): 135-138.

[7] LI H, WU X J, KITTLER J. Infrared and visible image fusion using a deep learning framework[C]// Pattern Recognition (ICPR), 2018 24rd International Conference on. [S.l.]: IEEE, 2018: 2 705-2 710.

[8] LI Shu-tao, KANG Xu-dong, HU Jian-wen. Image fusion with guided filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2013, 22(7): 2 864-2 875.

[9] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXiv Preprint arXiv, 2014(9): 1-14.

[10] 李星恕, 张博, 靳莉珍, 等. 加热温度对苹果组织中细胞阻抗特性及水分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 284-290.
LI Xing-shu, ZHANG Bo, JIN Li-zhen, et al. Effect of heating temperature on cell impedance properties and water distribution in apple tissue[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 284-290.

[11] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2007, 16(8): 2 080-2 095.

[12] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[J]. International Conference on Neural Information Processing Systems, 2012, 60(2): 1 097-1 105.

(上接第 79 页)

[6] 刘旭霞, 李洁瑜, 朱鹏. 美欧日转基因食品监管法律制度分析及启示[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2010(2): 26-27.
LIU Xu-xia, LI Jie-yu, ZHU Peng. Analysis and enlightenment of regulatory legal system of genetically modified foods in the United States, Europe and Japan[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Science Edition), 2010(2): 26-27.

[7] 杨桂玲, 张志恒, 袁玉伟, 等. 澳大利亚转基因食品溯源管理体系研究[J]. 江苏农业科学, 2011(4): 371-372.
YANG Gui-ling, ZHANG Zhi-heng, YUAN Yu-wei, et al. Study on the traceability management system of genetically modified foods in Australia[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2011(4): 371-372.

[8] 张瑞. 转基因食品法律规制研究: 评《转基因食品法律规制研究》[J]. 食品工业, 2020(1): 51-52.
ZHANG Rui. Research on legal regulation of genetically modified foods: Comment on research on legal regulation of genetically modified foods[J]. Food Industry, 2020(1): 51-52.

[9] 王婷. 我国转基因食品法律规制研究[D]. 上海: 上海大学, 2015: 30.
WANG Ting. Research on legal regulation of genetically modified foods in China[D]. Shanghai: Shanghai University, 2015: 30.

[10] 赵新, 赵云芬. 转基因食品安全的法律规制研究[J]. 经济师, 2020(12): 79.
ZHAO Xin, ZHAO Yun-fen. Research on legal regulation of genetically modified food safety[J]. Economist, 2020(12): 79.

[11] 赵伟勋. 以转基因食品的风险特性构建标识制度[J]. 农业科技管理, 2021(10): 39-40.
ZHAO Wei-xun. Constructing the labeling system based on the risk characteristics of genetically modified foods[J]. Agricultural Science and Technology Management, 2021(10): 39-40.

[12] 葛馨玥, 刘鑫. 从法律角度探究转基因食品安全事件应对机制[J]. 法制与社会, 2020(7): 135.
GE Xin-yue, LIU Xin. Exploring the response mechanism of genetically modified food safety incidents from the legal point of view[J]. Legal System and Society, 2020(7): 135.