

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.028

基于核磁共振成像技术的香梨褐变检测*

张建锋¹ 何勇¹ 龚向阳² 刘飞¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 浙江大学医学院附属邵逸夫医院放射科, 杭州 310016)

摘要: 将核磁共振成像技术与人工神经网络理论相结合,对香梨内部褐变进行了检测。在磁共振 T2 加权图像中选取果核区域作为感兴趣区域,提取出反映褐变特性的 10 个微观纹理特征参数,建立了 BP 神经网络模型进行识别研究。针对 BP 神经网络模型存在的不足,利用遗传算法对网络模型的权值和阈值进行优化。通过验证性试验发现:对于 4 组香梨样本,优化后 BP 神经网络模型的平均正确识别率为 92.50%,比未优化模型的平均正确识别率 80.83%,提高了 11.67 个百分点;同一组香梨样本相比较,优化后模型的识别效果也均优于未优化模型,每组香梨的识别率都得到了不同程度的提高。结果表明:遗传算法优化后的 BP 神经网络模型具有很好的预测精度和泛化能力,可以实现香梨内部褐变的无损检测。

关键词: 香梨褐变 核磁共振成像 检测 BP 神经网络 遗传算法

中图分类号: S121; O657.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0169-05

Browning Detection of Fragrant Pear Using Magnetic Resonance Imaging

Zhang Jianfeng¹ He Yong¹ Gong Xiangyang² Liu Fei¹

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Department of Radiology, Sir Run Run Shaw Hospital, School of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Magnetic resonance imaging (MRI) technology and artificial neural network theory were used to discriminate the browning disease inside the fruit. Areas corresponding to the core of fragrant pear in T2-weighted image were selected to the region of interest (ROI). Quantitative analysis of the ROI was achieved by extracting ten texture features that reflected the browning characteristics. Back propagation (BP) neural network was carried out on the statistical features to predict the internal browning of fragrant pear. Genetic algorithm (GA) was adopted to optimize the initial weights and threshold in BP neural network. For four groups of samples, the optimization model showed 92.50% accuracy in detecting the presence of browning in fragrant pear, compared with the correct recognition rate 80.83% of the non-optimization, an 11.67 percent increased. For the same group samples, the recognition results of optimized model were also better than the non-optimized model and the correct recognition rate of each group was improved to varying degrees. The result of our experiment shows that the optimized model has good predictive accuracy and generalization ability to identify the internal browning of fragrant pear.

Key words: Fragrant pear browning Magnetic resonance imaging Detection BP neural network Genetic algorithm

引言

香梨采后储藏过程中,随着果实的成熟衰老,香

梨极易出现失重、果心和果肉褐变等问题,严重影响果实品质和商品价值^[1-3]。目前,国内外关于梨果内部品质的无损检测研究,主要集中在光谱技术方

收稿日期: 2013-06-12 修回日期: 2013-07-10

* 国家自然科学基金资助项目(31201137)、国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100705)、农业科技成果转化资金资助项目(2011GB23600008)、国家公益性农业专项资助项目(200903044)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

作者简介: 张建锋, 博士生, 主要从事机器视觉和光谱成像技术研究, E-mail: zhang-jfeng@163.com

通讯作者: 何勇, 教授, 博士生导师, 主要从事数字农业与 3S 技术研究, E-mail: yhe@zju.edu.cn

面^[4-9]。虽然光谱技术能够对香梨内部褐变进行判别,但是无法确定褐变的严重程度,位置以及褐变的发生变化过程。

核磁共振成像(Magnetic resonance imaging, MRI)是一种先进的非接触式无损检测方法,在水果内部品质检测方面具有巨大潜力,可以实现水果内部品质的可视化检测。虽然MRI技术在水果内部品质检测方面能够取得较好的效果^[10-13],但是目前国内外关于利用MRI技术对梨果内部褐变研究的报道还很少。

本文以新疆库尔勒香梨为研究对象,采用核磁共振成像仪获取香梨的核磁切片图像,将人工神经网络技术与遗传算法相结合建立判别模型,实现香梨内部褐变的无损检测。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用香梨产于新疆库尔勒市,购于杭州水果批发市场。选取大小均匀,成熟度基本一致,且无伤病的香梨作为试验样本。采用高浓度CO₂处理促使新鲜梨果发生褐变^[14-15],具体做法如下:首先,用清水将梨果表面清洗干净,以免表面附着的病虫和微生物在储藏过程中引起梨果腐烂;待梨果晾干后,放入到透气性较差的聚乙烯袋中,并充入一定量的CO₂气体,而后对其进行密封储藏。所有的梨果样本均在4℃的环境下储藏2个半月。在核磁共振图像采集前,对每个梨果进行编号,并放置在温度为22℃的实验室24h,以保证图像采集时梨果样本与实验室的环境平衡。

1.2 核磁共振图像采集

试验时,用胶带将装满水的细小离心管固定到香梨的赤道区域,离心管轴线与梨果的果梗花萼轴线相平行,以此来标识香梨的检测位置。所用设备为GE 3.0T超导型核磁共振成像仪(General Electric Co. U.S.),以膝部线圈作为射频接收线圈,把香梨样本固定到其中进行图像采集。由于T₂加权图像能够揭示组织中水分子和水分分布的物理状态,而水果组织中的水分状态特征正是水果内部组织结构变化的反映,因此采用T₂加权成像对香梨褐变进行研究。具体参数如下:回波时间59ms;重复时间1800ms;采集次数 $n=2$;切片层厚2mm;成像矩阵为512×512。

采集后,把香梨样本沿离心管轴线方向切开,验证其内部是否褐变。选取96个香梨样本进行磁共振图像采集,每个样本采集4幅核磁共振图像,根据样本内部褐变发生的具体情况,共选取327幅核磁

共振图像作为试验图像,褐变果图像193幅,正常果图像134幅。选取典型的香梨褐变果和正常果图像各30幅,共计60幅作为判别模型训练样本,剩余图像随机组合作为模型检验样本。图1是香梨切片的数码图像和与之相对应的核磁共振图像。

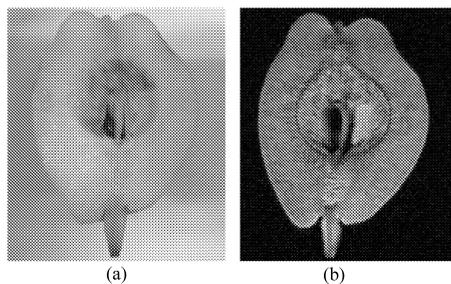


图1 香梨数码图像和对应的核磁共振图像
Fig.1 Pear digital images and corresponding magnetic resonance image

(a) 数码图像 (b) 对应的核磁共振

2 图像预处理与特征提取

2.1 图像预处理

在图像采集过程中,核磁共振成像仪自身的电子元器件和周围的空气都不可避免地会对图像产生噪声干扰。另外,在梨果储藏过程中,内部褐变一般首先发生在果心室部分,而后逐步向四周果肉发展。因此,合理选择感兴趣区域,准确提取到梨果的褐变特征,对梨果内部褐变检测至关重要。图像的整个预处理过程包括:图像格式转换、降噪、感兴趣区域选取等环节。

图2显示了图像的预处理过程。利用医学图像处理软件ORISIS将DICOM格式图像转换为BMP格式保存,如图2a所示。可以分辨出梨果的果肉和果核部分,其中内部褐变发生在果核区域。采用自适应二维低通滤波器对图像2a实施降噪处理,结果如图2b所示。用方形ROI区域选择工具选取图像的果核区域作为感兴趣区域,ROI区域包含1600个像素点,图2c是图2b果核区域的ROI选择结果。

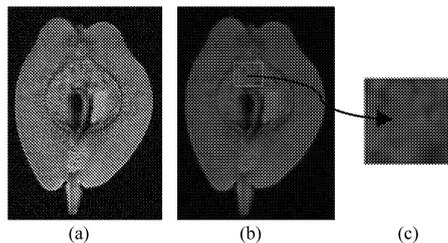


图2 图像预处理过程

Fig.2 Image pre-processing pipeline

(a) 格式转化图像 (b) 自适应滤波图像 (c) 感兴趣区域

2.2 特征提取

香梨褐变引起组织变质和发糠,使得褐变部分

的微观结构与正常组织不同,在 T2 加权图像中表现为不同的图像信息特征。其中,轻微褐变组织由于质子密度低导致了一个较低的信号强度,严重褐变组织则由于到了水烂的程度,水分浸出而产生较强的信号强度,而正常组织介于两者之间^[16]。

为全面考察梨果的褐变特征,根据灰度直方图和灰度-梯度共生矩阵提取了感兴趣区域的 5 种直方图统计特征和 15 种纹理特征,分析各个特征参数的分布情况,依据特征选择原则选取描述感兴趣区域的 10 种典型特征,主要包括:均值、方差、歪斜度、峰态、能量、灰度平均、灰度均方差、灰度分布不均匀性、相关性、灰度熵等。具体计算方法如下:

均值

$$\mu_m = \sum_{i=0}^{L_f-1} iH(i) \quad (1)$$

式中 i ——灰度级 L_f ——灰度级种类数

$H(i)$ ——图像灰度级离散函数

方差

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{L_f-1} (i - \mu_m)^2 H(i) \quad (2)$$

歪斜度

$$\mu_s = \frac{1}{\sigma^3} \sum_{i=0}^{L_f-1} (i - \mu_m)^3 H(i) \quad (3)$$

峰度

$$\mu_k = \frac{1}{\sigma^4} \sum_{i=0}^{L_f-1} (i - \mu_m)^4 H(i) - 3 \quad (4)$$

能量

$$\mu_n = \sum_{i=0}^{L_f-1} H^2(i) \quad (5)$$

灰度平均

$$\mu_1 = \sum_{i=0}^{L_f-1} i \left(\sum_{j=0}^{L_g-1} P(i,j) \right) \quad (6)$$

式中 $P(i,j)$ ——图像总像点数归一后的概率

L_g ——梯度图像的梯度级数目

灰度标准差

$$\partial_1 = \left[\sum_{i=0}^{L_f-1} (i - \mu_1)^2 \left(\sum_{j=0}^{L_g-1} P(i,j) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

灰度分布不均匀性

$$T_1 = \left[\sum_{i=0}^{L_f-1} \left(\sum_{j=0}^{L_g-1} H(i,j) \right)^2 \right] / \left(\sum_{i=0}^{L_f-1} \sum_{j=0}^{L_g-1} H(i,j) \right) \quad (8)$$

式中 $H(i,j)$ ——归一化的灰度图像和归一化的梯度图像中共同具有灰度为 i 和梯度为 j 的总像点数

相关性

$$T_2 = \frac{1}{\partial_1 \partial_2} \sum_{i=0}^{L_f-1} \sum_{j=0}^{L_g-1} (i - \mu_1)(j - \mu_2) P(i,j) \quad (9)$$

式中 μ_2 ——梯度均值 ∂_2 ——梯度标准差
灰度熵

$$T_3 = - \left[\sum_{i=0}^{L_f-1} \left(\sum_{j=0}^{L_g-1} P(i,j) \right) \lg \left(\sum_{j=0}^{L_g-1} P(i,j) \right) \right] \quad (10)$$

3 基于遗传神经网络的香梨褐变识别

3.1 BP 神经网络模型构建

在图像感兴趣区域提取上述 10 个特征向量,依据这些特征向量建立识别模型,对香梨是否褐变进行判别。采用 3 层完全结合方式的 BP 神经网络建模,其中网络输入向量的维数为 10,对应感兴趣区域的 10 个特征向量;输出向量的维数为 1,用 1 或 0 表示褐变果和正常果;采用经验法分析不同的隐含层神经元数目时神经网络的表现,最后确定最佳的隐含层神经元数目;输入层到隐含层的传递函数为 tan-sigmoid 函数,隐含层到输出层的传递函数为 log-sigmoid 函数,训练算法采用 L-M 学习规则,期望误差设为 0.1。

选取香梨褐变果和正常果图像各 30 幅,共计 60 幅作为网络训练样本,依次对其进行编号。1~30 号为香梨褐变果图像,31~60 号为香梨正常果图像。每个图像样本都提取了 10 个微观纹理特征值,作为网络的训练输入向量。在网络训练和测试前,对提取的特征向量进行了归一化处理,以避免动态范围大的特征淹没动态范围小的特征,使它们具有同等的作用,所有特征向量的范围都限定在 $[0,1]$ 之间。

隐含层神经元数目为 8、9、10、11、12、13 时,神经网络的网络输出与目标输出的回归分析的相关性系数 R 和网络误差,如表 1 所示。可以看出,隐含层神经元数目不同时,仿真的相关性系数之间比较接近;当隐含层神经元数目为 13 时,网络的逼近效果最好,网络误差为 2.601 0。因此,隐含层神经元数目设定为 13,香梨褐变识别网络模型的最优结构为“10-13-1”。

3.2 BP 神经网络模型验证

对 BP 神经网络模型进行检验,测试模型的泛化能力。在建模样本之外,随机选取出 4 组香梨样本图像作为测试样本,每组包括 60 幅图像,分别由 30 个褐变果图像和 30 个正常果图像组成,编号规则如前述。采用训练好的 BP 神经网络模型对其进行识别,以网络判别类型与目标类型是否一致来评价模型的性能,模型对每组样本的识别结果,如表 2 所示。

表1 隐层节点数不同的网络仿真相关系数和误差

Tab.1 Correlation coefficients and errors of simulation by neural network with different hidden nodes

传递函数	隐含层神经元节点	网络输出与目标输出的相关系数 R	网络误差
tan-sigmoid	8	0.846	5.746 0
	9	0.839	5.632 2
	10	0.854	4.366 1
	11	0.878	4.238 5
	12	0.864	4.168 7
	13	0.868	2.601 0

表2 BP神经网络模型验证

Tab.2 Validation results of BP neural network

测试样本	样本总数	褐变果结果	正常果结果	正确识别率/%	平均识别率/%
第1组	60	17	30	78.33	80.83
第2组	60	20	30	83.33	
第3组	60	19	30	81.67	
第4组	60	18	30	80.00	

由表2可知, BP神经网络模型对4组香梨的平均正确识别率仅为80.83%,模型的识别效果较差。分析香梨的褐变样本可以发现,未识别香梨样本多为轻微褐变样本,这主要是由于香梨的轻微褐变的核磁共振图像特征与正常果图像特征之间较为接近,特征值间的区分度不大,从而造成模型的识别效果较差。另外,所建立BP神经网络模型的权值和阈值是随机选取的,已有研究表明权值的初始化往往对最终解有强烈的影响,不同的初始化权值可能会对网络训练时间、收敛性、泛化能力造成极大差异^[17-18],所以需要网络模型进行优化,提高模型的识别能力。

3.3 遗传算法优化BP神经网络模型

将遗传算法和BP神经网络相结合,借助遗传算法的全局搜索能力对神经网络的权值和阈值进行优化,可以使BP神经网络获得较好的收敛性和泛化能力^[19]。本文选择实数编码法,直接对已建立BP神经网络的权值和阈值进行十进制编码,产生初始化种群;种群规模设置为50,遗传代数数为2500。经过选择、交叉、变异等遗传操作,获取到最优个体。解码最优个体来初始化神经网络的权值和阈值,经过学习与训练得到最佳的神经网络结构。

遗传进化过程中的误差平方和与适应度变化情况,如图3所示。由图3a可以看出,大约经过2000代的搜索以后,遗传神经网络的误差达到最小值。由图3b可得,在经过2000代的搜索后,遗传个体的平均适应度趋于稳定。

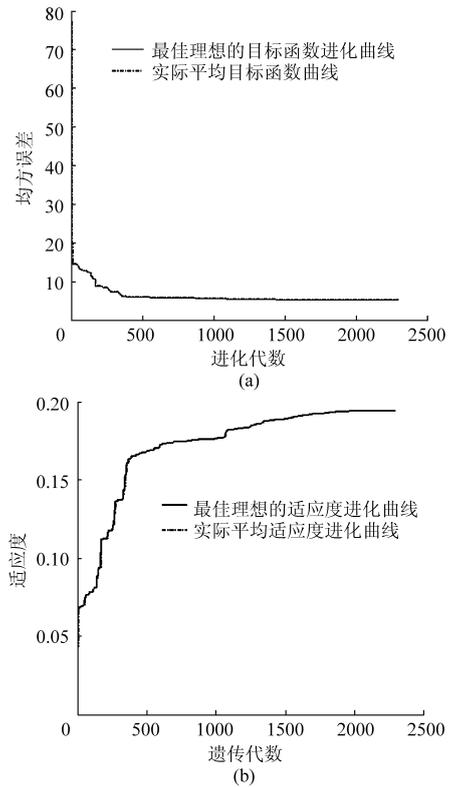


图3 遗传算法(GA)优化均方误差和适应度

Fig.3 Sum-squared errors and fitness of GA optimization

3.4 优化模型验证

选取4组香梨样本图像来验证遗传算法优化后BP神经网络模型的泛化能力。优化后模型对4组香梨样本的识别结果如表3所示。从表3可以看出,与未优化BP神经网络模型相比,优化后神经网络模型对4组香梨的平均正确识别率得到提高,平均正确识别率达到92.50%;对同一组香梨的识别而言,优化后神经网络模型的正确识别率均高于未优化BP神经网络模型的正确识别率,这主要是由于优化后神经网络模型对于轻微褐变香梨图像的识别得到提高的结果;优化后模型的预测能力有所增强。验证结果表明,通过遗传算法优化BP神经网络模型,可以提高神经网络模型的预测精度和泛化能力。

表3 遗传神经网络模型验证

Tab.3 Validation results of genetic neural network model

测试样本	样本总数	褐变果结果	正常果结果	正确识别率/%	平均识别率/%
第1组	60	25	30	91.67	92.50
第2组	60	27	30	95.00	
第3组	60	28	28	93.33	
第4组	60	26	28	90.00	

4 结论

(1) 香梨内部褐变区域可以清楚地在MR图像

中得到可视化显示。T2 加权 MR 图像对水分子的分布变化比较敏感,可以很好地反映出香梨内部结构组织的生理紊乱情况,T2 加权 MR 图像能够用于香梨内部褐变的识别检测。

(2) 通过对香梨 T2 加权 MR 图像的褐变特征分析,提取了表征褐变区域微观纹理的 10 个特征向量,设计 BP 神经网络模型对香梨是否褐变进行识别。选取 4 组香梨样本图像作为测试样本,验证 BP

神经网络模型的泛化能力,测试结果表明模型的误差较大,需要进一步对模型进行优化。

(3) 采用遗传算法优化 BP 神经网络的权值和阈值,验证结果表明:对于 4 组香梨样本图像,优化后模型的平均正确识别率较高为 92.50%,比未优化模型高 11.67 个百分点;每一组香梨样本的正确识别效果也均比未优化模型有所提高,表明遗传算法优化后网络模型的预测精度和泛化能力有所提高。

参 考 文 献

- 李学文,张辉,逢焕明,等. 库尔勒香梨采后特征品质的研究[J]. 中国农学通报,2010,26(15):100~102.
Li Xuewen, Zhang Hui, Pang Huanming, et al. Study on characteristic quality of postharvest fragrant pears [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(15):100~102. (in Chinese)
- 陈国刚,王祯丽,董军茂. 库尔勒香梨采后果实褐变与多酚氧化酶酚类物质及细胞膜结构的关系[J]. 中国农学通报,2005,21(8):83~85.
Chen Guogang, Wang Zhenli, Tong Junmao. Relationship among postharvest browning of *Pyrus bretschneideri* rehd, polyphenol oxidase, phenolics compound, cell membrane structure [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(8):83~85. (in Chinese)
- 陈国刚. 库尔勒香梨采后贮藏中果皮锈斑产生机制的研究[D]. 无锡:江南大学,2012.
Chen Guogang. Studies on formation mechanism of fruit peel epidermis rust on korla fragrant pear during storage [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2012. (in Chinese)
- Sun T, Lin H J, Xu H R, et al. Effect of fruit moving speed on predicting soluble solids content of cuiauan' pears (*Pomaceae pyrifolia* nakai cv. cuiguan) using PLS and LS-SVM regression[J]. Postharvest Biology and Technology, 2009, 51(1):86~90.
- 孙通. 梨可溶性固形物和酸度的可见/近红外光谱静态和在线检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
Sun Tong. Static and on-line detection of soluble solid content and PH of pears by visible/near infrared spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- Li J B, Huang W Q, Zhao C J, et al. A comparative study for the quantitative determination of soluble solids content, pH and firmness of pears by vis/NIR spectroscopy[J]. Journal of Food Engineering, 2013,116(2):324~332.
- 李东华. 南果梨内在品质近红外光谱无损检测技术研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2009.
Li Donghua. Study on nondestructive detecting internal quality in 'Nanguo' pears by NIRS technology[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 涂润林. 基于光物性的鸭梨黑心病无损检测方法的研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.
Tu Runlin. The research of nondestructive detection of brown core in Chinese pear 'Yali' based on its light physical properties [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 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 Yankun, Zhang Leilei. Advancement and trend of hyper spectral imaging technique for nondestructive detection of agro-product quality and safety[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):137~145. (in Chinese)
- Taglienti A, Massantini R, Botondi R, et al. Postharvest structural changes of Hayward kiwifruit by means of magnetic resonance imaging spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2009, 114(4):1583~1589.
- Zhou R, Li Y F. Texture analysis of MR image for predicting the firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* nakai, cv. Huanghua) during storage using an artificial neural network [J]. Magnetic Resonance Imaging, 2007, 25(5):727~732.
- 周然,闫丽萍,谢晶,等. 可食性保鲜涂膜对冷藏黄花梨品质的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(5):275~279.
Zhou Ran, Yan Liping, Xie Jing, et al. Effects of edible coatings on postharvest qualities of Huanghua pear fruits during cold storage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5):275~279. (in Chinese)
- 周水琴,应义斌,商德胜. 基于形态学的香梨褐变核磁共振成像无损检测[J]. 浙江大学学报:工学版,2012,46(12):2141~2145.
Zhou Shuiqin, Ying Yibin, Shang Desheng. Morphology based noninvasive detection for fragrant pears browning with magnetic resonance imaging [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2012, 46(12):2141~2145. (in Chinese)
- 王志华,丁丹丹,王文辉,等. 黄金梨气调贮藏中 CO₂对果实组织褐变及品质的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(7):114~118.
Wang Zhihua, Ding Dandan, Wang Wenhui, et al. Effects of different CO₂ volume fraction on fruit browning and quality of 'Whangkeumbae' during controlled atmosphere storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):114~118. (in Chinese)

- 3 Karhu K, Fritze H, Tuomi M, et al. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in two boreas forest soil profiles[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(1):72~82.
- 4 Peng S S, Piao S L, Wang T, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5):1 008~1 014.
- 5 张一平. 土壤水分热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 6 Shaw R H, Buchele W F. The effect of the shape of the soil surface profile on soil temperature and moisture[J]. *Iowa State College Journal Science*, 1957, 32: 95~104.
- 7 Orgill J F, Hollands K G T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface [J]. *Solar Energy*, 1977, 19(4): 357~359.
- 8 Sharratt B S, Schwarzer M J, Campbell G S, et al. Radiation balance of ridge-tillage with modeling strategies for slope and aspect in the subarctic [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1 376~1 384.
- 9 Ipbal M. An introduction to solar radiation [M]. Toronto: Academic Press, 1983.
- 10 Spencer J W. Fourier series representation of the position of the sun [J]. *Search*, 1971, 2(5): 172.
- 11 李彩霞. 沟灌条件下 SPAC 系统水热传输模拟[D]. 新乡: 中国农业科学院农田灌溉研究所, 2011.
- 12 戚鹏程, 赵传燕, 冯兆东, 等. 干旱荒漠区土地利用变化对地表温度的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11):310~316.
Qi Pengcheng, Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, et al. Influence of land use change on land surface temperature in arid desert region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11):310~316. (in Chinese)
- 13 段龙飞, 黄晓东, 王梦. 基于大气上界太阳辐射的地表温度估算[J]. *矿山测量*, 2011(2):64~67.
- 14 李崇银. 气候动力学引论[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
- 15 杨新, 延军平. 陕甘宁地区气候暖干化趋势分析[J]. *干旱区研究*, 2002, 19(3): 67~70.
Yang Xin, Yan Junping. Analysys on the climatic warming-drying trend in the juncture of Shaaxi and Gansu provinces and Ningxia hui autonomous region[J]. *Arid Zone Research*, 2002, 19(3):67~70. (in Chinese)
- 16 刘明春, 李玲萍. 石羊河流域地表 0 cm 温度的长期变化[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(3):478~484.
Liu Mingchun, Li Lingping. Long-term change of ground temperature in the shiyang river basin[J]. *Arid Zone Research*, 2011, 28(3):478~484. (in Chinese)
- 17 Campbell G S, Jungbauer J D, Bidlake W R, et al. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity[J]. *Soil Science*, 1994, 158(5): 307~313.
- 18 Hiraiwa Y, Kasubuchi T. Temperature dependence of thermal conductivity of soil over a wide range of temperature(5~75℃) [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 211~218.
- 19 陆森, 任图生. 不同温度下的土壤热导率模拟[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(7):13~18.
Lu Sen, Ren Tusheng. Model for predicting soil thermal conductivity at various temperatures[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7): 13~18. (in Chinese)
- 20 张鹏, 张宏升, 杜金林, 等. 科尔沁沙地地区地表温度的确定和分析[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(4):655~663.
Zhang Peng, Zhang Hongsheng, Du Jinlin, et al. Analysis of the surface temperature over keerqin sand aera in inner Mongolia [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(4):655~663. (in Chinese)
- 21 袁巧霞. 温度和含水率对土壤比热容影响的神经网络预测[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(5):108~111.
Yuan Qiaoxia. Prediction for the effect of temperature and water content on the soil specific heat by BP neural network[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(5):108~111. (in Chinese)
- 22 何芬, 马承伟, 周长吉, 等. 基于有限差分法的日光温室地温二维模拟[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4):228~232.
He Fen, Ma Chengwei, Zhou Changji, et al. 2-D simulation of soil temperature in solar greenhouse based on finite difference method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4):228~232. (in Chinese)

(上接第 173 页)

- 15 祝美云, 李梅, 梁丽松, 等. 西洋梨气调贮藏不同时间后货架期品质变化[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8):377~382.
Zhu Meiyun, Li Mei, Liang Lisong, et al. Quality changes in shelf-life of *Pyrus communis* L. after different CA storage period [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 377~382. (in Chinese)
- 16 Thybo A K, Jespersen S N, Laerke P E, et al. Nondestructive detection of internal bruise and spraing disease symptoms in potatoes using magnetic resonance imaging[J]. *Magnetic Resonance Imaging*, 2004, 22(9):1 311~1 317.
- 17 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- 18 张建军, 张利, 穆海芳, 等. 基于改进粒子群优化 BP 网络的发动机故障诊断方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 198~203.
Zhang Jianjun, Zhang Li, Mu Haifang, et al. Improved BP-neural net work of the particle swarm optimization in the research on engine fault diagnosis [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1):198~203. (in Chinese)
- 19 孙建平, 王逢瑚, 胡英成, 等. 基于遗传神经网络的农作物秸秆板材优化设计[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):319~323.
Sun Jianping, Wang Fenghu, Hu Yingcheng, et al. Optimization design of panels made by crop straw based on genetic neural network [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 319~323. (in Chinese)