

# 鲜食葡萄冷链物流气体传感器响应特征试验研究

王 想<sup>1</sup> 肖新清<sup>1</sup> 朱志强<sup>2</sup> 张永军<sup>1,3</sup> 张小栓<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学食品质量与安全北京实验室, 北京 100083;

2. 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 天津 300384; 3. 山东商业职业技术学院, 济南 250103)

**摘要:** 随着冷链耦合保鲜/气调技术的发展, 气体成分参数已经成为鲜食葡萄冷链物流监测与追溯的重要指标之一。针对现有气体传感器不能满足冷链物流监测与追溯的高精度和微量需求, 选取 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 为基本参数, 利用基于时域特征参数提取方法, 研究气体传感器静态、动态响应的特征参数, 用线性回归法进行优化, 筛选最佳特征参数。研究表明, 鲜食葡萄冷链物流 O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 传感器最佳特征参数分别为空气中的响应基值  $X_a$ 、稳态响应幅值  $X_g$ 、响应速度  $D_{res}$ 、响应恢复速度  $D_{rec}$ 、响应时间  $t_{res}$ 、响应恢复时间  $t_{rec}$  和响应幅值的累积  $I_{intPres}$ , 其中, CO<sub>2</sub> 传感器响应幅值的累积特征低于 O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 传感器。最佳特征参数能够对冷链物流中具有累积效应的气体传感信号进行有效地特征分析, 进一步提高冷链物流气体传感器应用及监控的精度、灵敏度和稳定性。

**关键词:** 鲜食葡萄; 冷链物流; 气体传感器; 特征参数; 气调

中图分类号: F252; TS972.24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)01-0240-07

## Experimental Study of Response Characteristics of Gas Sensors for Monitoring Table Grape Cold-chain Logistics

Wang Xiang<sup>1</sup> Xiao Xinqing<sup>1</sup> Zhu Zhiqiang<sup>2</sup> Zhang Yongjun<sup>1,3</sup> Zhang Xiaoshuan<sup>1</sup>

(1. Beijing Food Quality and Safety Laboratory, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National Engineering Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products, Tianjin 300384, China

3. Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 250103, China)

**Abstract:** Modified atmosphere techniques and preservation technologies, coupling with cold-chain have been approved themselves as key tools to prevent spoilage and prolong shelflife for the fruit storage and transportation. Taking table grape as example, modified atmosphere techniques create gaseous microenvironments which usually consist of reduced O<sub>2</sub>, elevated CO<sub>2</sub> concentrations compared to air and fresh keeping agent of sulfur dioxide which commonly used to release SO<sub>2</sub> and strongly retard the growth of these pathogenic fungus. Thus, there is an increasing concern about gas monitoring to improve the transparency and traceability during cold-chain. However, the existed industrial gas sensor can not meet the demand of cold-chain logistics in scale and precision. Then, the paper aimed to extract the static and dynamic response characteristics of gas sensors for table grape cold-chain logistics, which developed the method of characteristic parameter extraction based on time domain, and the carbon dioxide, oxygen and sulfur dioxide were developed as basic parameters. The method of linear regression was used to optimize characteristics of gas sensors, so the best feature parameters were got for gas sensing signal, which contain the response of gas sensor in the air, steady response of gas sensor, the speed of response and response recovery, time of response and response recovery, and response integrated signal respectively. The best feature parameters can be used to analyze the characteristics of gas sensing signal which has a cumulative

收稿日期: 2015-05-26 修回日期: 2015-06-26

基金项目: 2014 国家农业科技成果转化基金(山东)项目和教育部新世纪优秀人才计划项目(NCET-11-0491)

作者简介: 王想(1990—), 女, 博士生, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: wxzrj@cau.edu.cn

通信作者: 张小栓(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事农业系统工程与信息化研究, E-mail: zhxshuan@cau.edu.cn

effect on the quality in cold-chain. It is possible to improve the application and monitoring precision, monitoring sensitivity and monitoring stability of gas sensor in the cold-chain logistics further more.

**Key words:** table grape; cold-chain logistics; gas sensor; characteristic parameters; modified atmosphere

## 引言

鲜食葡萄具有鲜嫩、易腐、易衰老的生物特性,是流通难度和风险很大的生鲜农产品之一<sup>[1-2]</sup>。冷链耦合保鲜剂或气调技术成为鲜食葡萄物流的主要形态之一<sup>[3-4]</sup>。常采用的保鲜剂是 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 双向启动的自动缓释型 SO<sub>2</sub> 试剂,通过释放 SO<sub>2</sub> 气体抑制影响葡萄品质的微生物的生长<sup>[5-6]</sup>;常采用的气调技术是从生物化学角度调节贮藏环境中 O<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 含量,抑制鲜食葡萄自身的呼吸作用<sup>[7-8]</sup>。因此,CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 气体等逐渐成为鲜食葡萄冷链物流全程监测与追溯的关键参数。

由相关文献[9-12]以及课题组的前期实地调研得知,市场上已商业化的气体传感器主要应用于工业领域,具有量程大、精度低和选择性差等特点,而且重点针对气体本身浓度和预警的特征分析,无法满足冷链物流小量程、高精度以及高选择性的需求<sup>[13]</sup>;农业(食品)领域相应的气体传感器(电子鼻)多关注适用于实验室品质的快速检测信号<sup>[14]</sup>,也就是提取即时点、离散的特征信号,无法满足冷链物流实时监测以及对具有累积效应的特征信号分析的需求。

因此,本文在定制适用于鲜食葡萄冷链物流气体传感器的基础上,利用基于时域特征参数提取方法,提取鲜食葡萄冷链物流环境中 CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 传感器的静态、动态响应特征参数,用线性回归法进行优化,筛选最佳特征参数,为提高冷链物流气体传感器的应用以及监控的精度、灵敏度、稳定性创造条件。

## 1 基于时域特征的特征参数提取方法

基于时域特征参数提取方法是进行鲜食葡萄冷链物流气体传感器响应特征试验研究的关键,是从传感器时域响应信号中选择特定的参数作为气体传感信号的特征,合适的参数将使得气体传感器的敏感膜能够全面反映所测气体的信息<sup>[15-18]</sup>。为了准确提取冷链物流气体传感信号特征参数,首先,需要获得时域光滑的气体信号数据记录曲线<sup>[19-21]</sup>。因此,需要对采集后的时域气体传感信号数据进行相应的数字滤波,去除实际测量过程中由各种干扰造成所采集数据的随机波动。滤波公式为

$$G_m(i) = \frac{1}{k} \sum_{u=i}^{i+k-1} G_u \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中  $G_u$ ——第  $u$  个点采集的气体信号数据值

$G_m(i)$ ——第  $i$  个点滤波后的数据值

从滤波后的气体信号曲线中只能获取响应时间、恢复时间和稳态值等以时间-幅值序列的特征参数,不能获取气体传感信号的幅值累积、响应变化速度、响应恢复变化速度以及加速度等特征参数<sup>[22-24]</sup>,其中气体传感信号的幅值累积、响应变化速度、响应恢复变化速度以及加速度等特征参数分别对应积分信号、响应微分信号、响应恢复微分信号以及二次微分信号。故对滤波后的气体传感信号数据进行积分、微分以及二次微分,公式为:

$$\text{积分信号} \quad I_t = \int_0^t C_t \quad (2)$$

$$\text{微分信号} \quad D'_t = \frac{\partial \sigma_t}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{二次微分信号} \quad D''_t = \frac{\partial^2 \sigma_t}{\partial t^2} \quad (4)$$

式中  $C_t$ —— $t$  时刻电压信号的差分信号

$\sigma_t$ ——滤波后传感器  $t$  时刻的电压信号

然后,分别从滤波后的积分、微分以及二次微分信号曲线上获取特征参数,剔除稳定性差的特征参数,变化系数  $v_\sigma$  越大,特征参数稳定性越差,公式为

$$v_\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}}{\bar{\sigma}} \quad (5)$$

式中  $\bar{\sigma}$ ——滤波后传感器电压信号的平均值

在考虑特征参数稳定性的同时,还要考虑特征参数之间的相关性。因此,去除特征参数之间的相关性是选取气体传感信号最佳特征参数的关键。本文采用线性回归分析方法计算特征参数之间的相关度。 $r$  越大,特征参数之间的相关性越大。

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{(x - \bar{x})^2} \sqrt{(y - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中  $x, \bar{x}$ ——某一类特征参数值、平均值

$y, \bar{y}$ ——另一类特征参数值、平均值

## 2 试验材料与参数设定

### 2.1 试验材料及温阶设定

供试葡萄品种为巨峰,采自辽宁省盖州市,栽培方式为温室大棚。挑选大小均匀,并去除病虫害、霉变和机械损伤果粒的成熟果穗,2 h 后运回实验室预冷,待散去田间热后分装于带有 0.25 mm 塑料薄膜袋的塑料箱,每箱装 $(8 \pm 0.5)$  kg。

根据课题组前期的实地调研结果<sup>[25-27]</sup>,完整的冷链物流运输过程具体包括:原产地采收—预冷保鲜—冷藏车运输—批发市场,温度变化历程为 $15 \sim 30^\circ\text{C} - -2^\circ\text{C} - -2 \sim 2^\circ\text{C} - 0 \sim 2^\circ\text{C} - 20 \sim 30^\circ\text{C}$ ,相对湿度 93%~95%。因此,设置恒温箱温度分别为 $30^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$ 、 $5^\circ\text{C}$ 、 $0^\circ\text{C}$ ,相对湿度 93%~95%,其中 $0^\circ\text{C}$ 、 $5^\circ\text{C}$ 、 $10^\circ\text{C}$ 用来表征葡萄贮藏、运输过程中可能经历的温度, $20^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $30^\circ\text{C}$ 用来表征葡萄销售过程中可能经历的温度条件,将装有巨峰葡萄的 12 个塑料箱分别放置在不同温度的环境中,每个温度 2 箱,将气体传感器节点放入塑料薄膜袋中,置于葡萄的上面并密封。变温环境使用天津苏瑞科技有限公司 TEMI1880 型高低温交变试验箱(简称变温箱)模拟,恒温环境使用上海 LHS-150HC 型恒温恒湿培养箱(简称恒温箱)模拟。

### 2.2 参数设定与传感器定制

试验装置硬件由传感器节点和协调器组成,以 ZigBee 技术为基础构成无线传感器网络。传感器节点如图 1 所示,由气体传感器集成的传感器模块、CC2530 处理模块及无线射频模块组成。协调器通过 RS-232 串行接口与 GPRS 模块相连接,以实现无线传感器网络与远程实时监控端的远程通信,如图 2 所示。

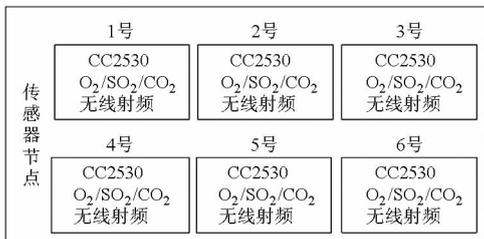


图 1 传感器节点示意图

Fig. 1 Sensor nodes

按照冷链物流环境中可能存在的气体浓度范围<sup>[28-30]</sup>,一次性调配好体积分数 5% 的 O<sub>2</sub>、0.001% 的 SO<sub>2</sub> 和 8% 的 CO<sub>2</sub> 充注,同时进行采样,连续采样 400 min,第 350 min 取出气体传感器置于空气中探究气体传感器的响应恢复特性,传感器采样间隔 1 s,重复测试 6 次。其中,O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 3 种标准气体来自于天津市赛美特种气体有限公司。



图 2 试验装置协调器的硬件结构图

Fig. 2 Physical implementation of network coordinator

通过查阅文献<sup>[28-30]</sup>以及实地调研,定制适用于鲜食葡萄冷链物流环境监测范围、测量精度以及湿度为 93%~95% 的 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 3 种传感器组成传感器模块,通过数次反复定制测试最终确定传感器如表 1 所示。其中,鲜食葡萄冷链物流中 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 体积分数的理论范围分别为 1%~21%、0~15% 和 0.001%~0.002%。定制 AP-M 型号的电化学 O<sub>2</sub> 传感器量程为 0~30%,精度为  $\pm 0.01\%$ ,性价比比较高,对冷链物流环境具有很好的适应度;冷链物流环境中的 CO<sub>2</sub> 气体浓度理论范围为 0~15%,定制的 COZIR-W 型红外传感器占用空间小、便携带,精度可以达到  $\pm 0.05\%$ ;鲜食葡萄贮藏环境中的 SO<sub>2</sub> 气体浓度通常控制在 0.001%~0.002% 范围内比较安全<sup>[30-31]</sup>,定制 MF-20 型电化学传感器,能够有效达到  $\pm 0.00005\%$  的精度,并且装卸方便。3 种类型传感器的供电电压都为 3.3 V,都满足低功耗的要求。

表 1 冷链物流环境下的监测参数及传感器

Tab. 1 Monitoring parameters and sensors under cold-chain environment

监测指标	理论范围 /%	传感器型号	传感器 量程/%	传感器 精度/%
O <sub>2</sub> 体积分数	1~21	AP-M	0~30	$\pm 0.01$
CO <sub>2</sub> 体积分数	0~15	COZIR-W	0~30	$\pm 0.05$
SO <sub>2</sub> 体积分数	0.001~0.002	MF-20	0~0.002	$\pm 0.00005$

## 3 实验结果与分析

### 3.1 鲜食葡萄冷链物流 CO<sub>2</sub> 传感器的响应特征分析

在模拟鲜食葡萄冷链物流恒温箱中,CO<sub>2</sub> 气体传感器 0℃ 条件下响应信号滤波后的曲线、一阶导数曲线及二阶导数信号曲线如图 3 所示,由图可知,CO<sub>2</sub> 气体传感器在空气中的响应值为 0.456%,随时间变化响应值急剧上升,达到峰值 15% 后开始下降,并稳定在平衡状态 8.05%,之后,气体体积分数迅速下降恢复到空气中响应值 0.39%。由一阶导数曲线可知,气体体积分数变化速度最大值为

0.498, 最小值为 -0.282。由二阶导数信号曲线可知, 气体响应加速度最小值为 -0.157, 最大值为 0.141, 气体恢复加速度的最小值为 -0.057, 最大值为 0.058。CO<sub>2</sub> 气体体积分数的峰值超过 8% 达到 15%, 在稳定状态下也会存在波动, 分析其原因可能是鲜食葡萄呼吸作用以及加入的 SO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 干扰等综合作用的结果。

从 CO<sub>2</sub> 气体滤波后的信号、微分信号、二次微分信号以及积分信号中提取特征参数和特征值, 利用变化系数公式剔除稳定性差的特征参数, 得到特征参数集如表 2 所示。这些特征参数一方面一定程度上反映了传感器的特性, 另一方面也可以作为冷链物流气体传感信号变化的关键参数, 在提取特征参数过程中具有重要意义。利用线性回归分析的方法去除相关性比较大的特征参数, 得到相关性最小的最佳特征参数子集, 分别为  $X_a$ 、 $X_g$ 、 $D_{res}$ 、 $D_{rec}$ 、 $t_{res}$ 、 $t_{rec}$  和  $I_{ntPrec}$ 。其中,  $X_a$  表征气体传感器在空气中的响应基值,  $X_g$  表征

气体传感器的稳态响应,  $D_{res}$  和  $D_{rec}$  分别表征气体传感器的响应速度和响应恢复速度,  $t_{res}$  和  $t_{rec}$  分别表征气体传感器的响应时间和响应恢复时间,  $I_{ntPrec}$  表征气体传感器的响应恢复幅值的累积。

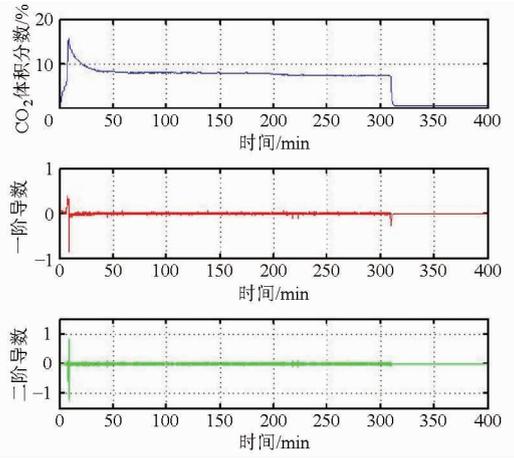


图 3 二氧化碳传感器的响应信号  
Fig. 3 Response of carbon dioxide sensor

表 2 特征参数以及特征值集

Tab. 2 Set of characteristic parameters and values

编号	特征参数	描述	特征值	编号	特征参数	描述	特征值
1	$X_a$ /%	空气中的基线值	0.456	11	$t_{res}$ /min	响应时间	1.541
2	$X_g$ /%	被测气体的稳定响应	8.05	12	$t_{rec}$ /min	恢复时间, 从气体出到稳定时间	1.16
3	$X_m$ /%	气体中的最大响应	15	13	$t_{Dres}$ /min	从气体进入到 $D_{res}$ 处的时间	0.774
4	$X_{recair}$ /%	最终恢复值	0.39	14	$t_{Drec}$ /min	从气体出到 $D_{rec}$ 处的时间	0.05
5	$D_{res}$	响应一阶导数最大值 (绝对值)	0.498	15	$t_{Dresn}$ /min	从气体进入到 $D_{resn}$ 处的时间	1.083
6	$D_{rec}$	恢复一阶导数最大值 (绝对值)	0.282	16	$t_{Dresx}$ /min	从气体进入到 $D_{resx}$ 处的时间	1.025
7	$D_{resn}$	最小二阶导数响应值	-0.157	17	$t_{Drecn}$ /min	从气体出到 $D_{recn}$ 处的时间	0.32
8	$D_{resx}$	最大二阶导数响应值	0.141	18	$I_{nt}$	从气体进入到气体出时间段内信号积分	210.035 9
9	$D_{recx}$	最大二阶导数恢复值	0.058	19	$I_{ntPres}$	从气体进入到 $t_{res}$ 时刻的信号积分	1.684 3
10	$D_{recn}$	最小二阶导数恢复值	-0.057	20	$I_{ntPrec}$	从气体出到 $t_{rec}$ 时刻的信号积分	0.356 6

将特征参数按表 2 的顺序进行编号, 把不同温度条件下试验特征参数绘制成三维图, 比较特征参数受温度的影响程度, 如图 4 所示。从图中可以看出参数  $X_m$ 、 $D_{resn}$ 、 $D_{resx}$ 、 $t_{Dresx}$  和  $I_{ntPres}$  等在不同的温度下波动变化很大, 因此其稳定性较差, 而一阶导数等参数受温度变化波动很小, 稳定性好, 比较适合作为特征参数, 再次验证得到最佳特征参数分别为  $X_a$ 、 $X_g$ 、 $D_{res}$ 、 $D_{rec}$ 、 $t_{res}$ 、 $t_{rec}$  和  $I_{ntPrec}$ , 说明这 7 个最佳特征参数能够很好地表征冷链物流 CO<sub>2</sub> 气体传感信号的特征。

### 3.2 鲜食葡萄冷链物流 O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 传感器的响应特征分析

O<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 传感器 0℃ 条件下响应信号滤波后的曲线、一阶导数以及二阶导数信号曲线如图 5 所示。由 SO<sub>2</sub> 传感器响应信号滤波后的曲线可知, 传感器在空气中的响应值为 0, 随着时间的变化响应值急剧上升到峰值 0.001 3%, 经过一段时间达到稳定状

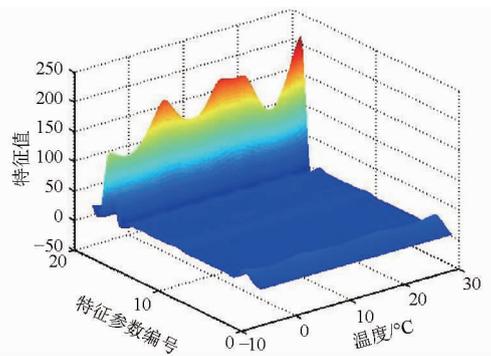


图 4 特征参数的三维效果图  
Fig. 4 Three-dimensional renderings of characteristic parameters

态 0.001 0%, 回到空气中的响应恢复时间为 1.25 min; 由 O<sub>2</sub> 传感器响应信号滤波后的曲线可知, 传感器在空气中的响应值为 20.9%, 随着时间的变化响应值急剧下降为 6.88%, 经过一段时间达到稳定状态 5.04%, 置入空气中的恢复时间为

1.19 min。SO<sub>2</sub>体积分数的峰值为0.0013%，高于稳态值，分析其原因可能是冷链物流环境中的气体、鲜食葡萄呼吸作用的气体以及人为因素干扰的结果。

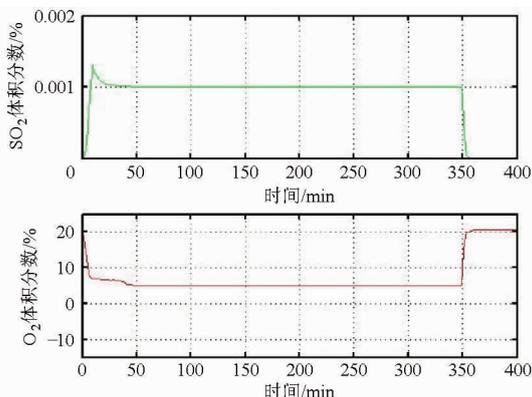


图5 O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器响应信号

Fig. 5 Response of oxygen sensor and sulfur dioxide sensor

利用时域特征参数提取方法，提取O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器的最佳特征参数，得到 $X_a$ 、 $X_g$ 、 $D_{res}$ 、 $D_{rec}$ 、 $t_{res}$ 、 $t_{rec}$ 和 $I_{ntPres}$ 等7个最佳特征参数。将SO<sub>2</sub>传感器的最佳特征参数的编号以及不同温度条件下的特征比值绘制成三维图，如图6所示。这7个最佳特征参数基本不受温度的影响，能够很好地表征冷链物流O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器的特征。其中 $I_{ntPres}$ 表征O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>气体传感器响应幅值的累积，其他均与CO<sub>2</sub>传感器响应的最佳特征参数子集的前6个相同，唯一不同的是积分信号，即CO<sub>2</sub>传感器响应恢复幅值的累积特征高于O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器，响应幅值的累积特征低于O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器。

## 4 结论

(1) 鲜食葡萄冷链物流中CO<sub>2</sub>传感器响应的

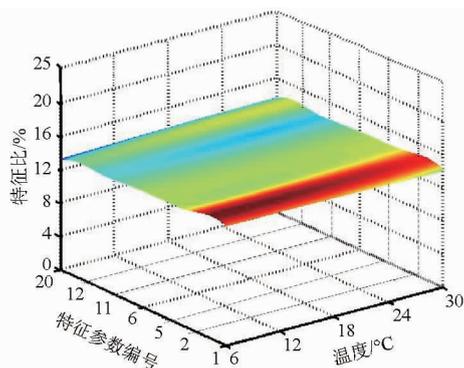


图6 不同温度条件下特征参数的三维效果图

Fig. 6 Three-dimensional renderings of characteristic parameters at different temperatures

最佳特征参数为 $X_a$ 、 $X_g$ 、 $D_{res}$ 、 $D_{rec}$ 、 $t_{res}$ 、 $t_{rec}$ 和 $I_{ntPres}$ ，有效地表征了CO<sub>2</sub>传感器的响应基值、稳态响应、响应速度和响应恢复速度、响应时间和响应恢复时间以及响应恢复幅值累积等特征。

(2) 鲜食葡萄冷链物流中O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器响应的最佳特征参数也是7个，没有响应恢复幅值累积特征参数 $I_{ntPres}$ ，而有响应幅值累积特征参数 $I_{ntPres}$ ，说明CO<sub>2</sub>传感器响应恢复幅值的累积特征高于O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器，响应幅值的累积特征低于O<sub>2</sub>和SO<sub>2</sub>传感器。

(3) 不受温度、时间效应影响的最佳特征参数，能够有效地表征冷链物流气体传感器的响应特征，以改善现有气体传感器不能满足冷链物流监测需求的现状，对于开发适用于冷链物流监测的气体传感技术具有重要意义，为提高冷链物流气体传感器的应用以及监控的精度、灵敏度和稳定性创造了条件。

## 参 考 文 献

- 张平,王莉,朱志强,等. 鲜食葡萄贮藏保鲜技术与现代低温物流技术体系[J]. 保鲜与加工,2011,11(6):1-5.  
Zhang Ping,Wang Li,Zhu Zhiqiang, et al. Technology of storage and transportation of table grape and modern low temperature logistics technical system[J]. Storage & Process,2011,11(6):1-5. (in Chinese)
- 张平,朱志强,任朝晖. 国内外现代果蔬物流运输保鲜环境调控系统发展现状及展望[J]. 保鲜与加工,2010,10(2):1-4.  
Zhang Ping,Zhu Zhiqiang, Ren Chao. Domestic and foreign present aspects and prospects in modern system of environmental control for fresh-keeping transportation of fruits and vegetables[J]. Storage & Process,2010,10(2):1-4. (in Chinese)
- 杨相政,李喜宏,马宏原,等. SO<sub>2</sub>熏蒸处理对维多利亚葡萄保鲜效果研究[J]. 食品工业科技,2013,34(16):326-329.  
Yang Xiangzheng,Li Xihong, Ma Hongyuan, et al. Effect of different concentrations of SO<sub>2</sub> fumigation treatment on Victoria grape [J]. Science and Technology of Food Industry,2013,34(16):326-329. (in Chinese)
- 张平,田海龙,崔亚东,等. 塑料薄膜和箱式气调对巨峰葡萄贮藏品质和采后生理影响的研究[J]. 保鲜与加工,2012,12(2):14-19.  
Zhang Ping,Tian Hailong, Cui Yadong, et al. Effects of modified atmosphere film and box storage on quality and postharvest physiology of Kyoho grape cultivar[J]. Storage & Process,2012,12(2):14-19. (in Chinese)
- Xu W,Li D,Fu Y, et al. Preparation and measurement of controlled-release SO<sub>2</sub> fungicide active packaging at room temperature

- [J]. *Packaging Technology and Science*, 2013, 26(Supp.): 51 - 58.
- 6 赵飞, 朱志强, 张平, 等. 不同 SO<sub>2</sub> 伤害对红地球葡萄货架期品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(3): 322 - 325.  
Zhao Fei, Zhu Zhiqiang, Zhang Ping, et al. Effects of different SO<sub>2</sub> injury on quality of Red Globe grapes during shelf-life[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(3): 322 - 325. (in Chinese)
- 7 Guillén F, Zapata P J, Martínez Romero D, et al. Improvement of the overall quality of table grapes stored under modified atmosphere packaging in combination with natural antimicrobial compounds[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(3): S185 - S190.
- 8 Deng Y, Wu Y, Li Y. Effects of high O<sub>2</sub> levels on post-harvest quality and shelf life of table grapes during long-term storage[J]. *European Food Research and Technology*, 2005, 221(3 - 4): 392 - 397.
- 9 姚娜, 张记龙, 王志斌, 等. 基于相关滤波技术的 SO<sub>2</sub> 气体浓度监测系统的设计[J]. *自动化与仪表*, 2011, 26(4): 11 - 13.  
Yao Na, Zhang Jilong, Wang Zhibin, et al. Detection system of SO<sub>2</sub> concentration based on gas filter correlation technology[J]. *Automation & Instrumentation*, 2011, 26(4): 11 - 13. (in Chinese)
- 10 陈立伟, 杨建华, 崔博. 基于金属氧化物气体传感器的气味罗盘的实验分析研究[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(11): 1532 - 1535.  
Chen Liwei, Yang Jianhua, Cui Bo. Experimental study on odor compass system based on metal oxide gas sensors[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(11): 1532 - 1535. (in Chinese)
- 11 Baldwin E A, Bai J, Plotto A, et al. Electronic noses and tongues: applications for the food and pharmaceutical industries[J]. *Sensors*, 2011, 11(5): 4744 - 4766.
- 12 Zhang J, Zhang X S, Zhang L, et al. Design on wireless SO<sub>2</sub> sensor node based on CC2530 for monitoring table grape logistics[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2013, 11(1): 115 - 117.
- 13 肖新清, 齐林, 傅泽田, 等. 基于压缩感知的鲜食葡萄冷链物流监测方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(22): 259 - 266.  
Xiao Xinqing, Qi Lin, Fu Zetian, et al. Monitoring method for cold chain logistics of table grape based on compressive sensing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(22): 259 - 266. (in Chinese)
- 14 Haddi Z, Mabrouk S, Bougrini M, et al. E-nose and e-tongue combination for improved recognition of fruit juice samples[J]. *Food Chemistry*, 2014, 150: 246 - 253.
- 15 海铮, 王俊. 电子鼻信号特征提取与传感器优化的研究[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(3): 606 - 610.  
Hai Zheng, Wang Jun. Studies on signal feature extraction and sensor optimization of an electronic nose[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2006, 19(3): 606 - 610. (in Chinese)
- 16 魏广芬, 唐祯安, 陈正豪, 等. 微气体传感器的稳定性测试研究[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(14): 1247 - 1250.  
Wei Guangfen, Tang Zhen'an, Chen Zhenghao, et al. Investigation on measurement of micro gas sensor stability[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(14): 1247 - 1250. (in Chinese)
- 17 Leone A, Distante C, Ancona N, et al. A powerful method for feature extraction and compression of electronic nose responses[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 105(2): 378 - 392.
- 18 安文, 魏广芬, 杨春英. 气体传感器特征参数分析[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(4): 438 - 443.  
An Wen, Wei Guangfen, Yang Chunying. Analysis of feature parameters of gas sensors[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2012, 25(4): 438 - 443. (in Chinese)
- 19 李瑞钧, 叶寒, 杨湘杰, 等. 铸铁热分析冷却曲线特征参数的数据处理方法[J]. *铸造技术*, 2015, 36(1): 147 - 148.  
Li Ruijun, Ye Han, Yang Xiangjie, et al. Data processing method of characteristic parameters on cooling curve of cast iron thermal analysis[J]. *Foundry Technology*, 2015, 36(1): 147 - 148. (in Chinese)
- 20 Padilla M, Montoliu I, Pardo A, et al. Feature extraction on three way enose signals[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 116(1): 145 - 150.
- 21 Zhang S, Xie C, Zeng D, et al. A feature extraction method and a sampling system for fast recognition of flammable liquids with a portable E-nose[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2007, 124(2): 437 - 443.
- 22 Zhang S, Xia X, Xie C, et al. A method of feature extraction on recovery curves for fast recognition application with metal oxide gas sensor array[J]. *Sensors Journal, IEEE*, 2009, 9(12): 1705 - 1710.
- 23 Kim B, Kim J S. Gas sensing characteristics of MEMS gas sensor arrays in binary mixed-gas system[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 138(1): 366 - 374.
- 24 黄家锐, 李广义, 徐伟宏, 等. 基于单传感器动态检测和神经网络的气体监测[J]. *传感器技术*, 2006, 24(7): 72 - 75.  
Huang Jiarui, Li Guangyi, Xu Weihong, et al. Monitoring of gases based on single sensor's dynamic detection and neural network[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2006, 24(7): 72 - 75. (in Chinese)
- 25 李玉香, 李志刚. 新疆鲜食葡萄流通模式分析[J]. *武汉市经济管理干部学院学报*, 2013, 27(2): 34 - 36.

- Li Yuxiang, Li Zhigang. The circulation mode analysis of table grapes in Xinjiang[J]. Journal of Wuhan Commercial Service College, 2013, 27(2): 34-36. (in Chinese)
- 26 马常阳, 傅泽田, 姚萌萌, 等. 时间温度指示器等量线匹配适应性评估方法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 183-188.  
Ma Changyang, Fu Zetian, Yao Mengmeng, et al. Selection method of the time temperature indicator based on the contour lines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 183-188. (in Chinese)
- 27 傅泽田, 姚萌萌, 马常阳, 等. 基于化学型时间温度指示器的鲜食葡萄品质监测[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(6): 186-191.  
Fu Zetian, Yao Mengmeng, Ma Changyang, et al. Applicability of a chemical time temperature indicator as a quality indicator for table grape[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(6): 186-191. (in Chinese)
- 28 李春媛, 张平, 朱志强, 等. 箱式气调贮藏对巨峰葡萄果实质地变化的调控[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(14): 114-118.  
Li Chunyuan, Zhang Ping, Zhu Zhiqiang, et al. Effects of plastic modified atmosphere box storage on texture changes of Kyoho grape[J]. Food Research and Development, 2013, 34(14): 114-118. (in Chinese)
- 29 马常阳, 张小栓, 朱志强, 等. 基于多元回归的鲜食葡萄保鲜技术效果评估[J]. 农业机械学报, 2015, 45(1): 216-223.  
Ma Changyang, Zhang Xiaoshuan, Zhu Zhiqiang, et al. Comprehensive evaluation on performance of preservation technologies for table grape based on multiple regressions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 45(1): 216-223. (in Chinese)
- 30 李传友, 赵丽霞, 张京开, 等. 缓释 SO<sub>2</sub> 的包装材料对‘玫瑰香’葡萄保鲜效果研究[J]. 农学学报, 2014, 4(5): 35-40.  
Li Chuanyou, Zhao Lixia, Zhang Jingkai, et al. Research on the influence of sustained release SO<sub>2</sub> package material on fresh-keeping effect of Muscat Hamburg grape[J]. Journal of Agriculture, 2014, 4(5): 35-40. (in Chinese)
- 31 肖新清, 齐林, 张雷, 等. 面向鲜食葡萄冷链物流的无线实时监测系统[J]. 电子技术应用, 2013, 39(8): 77-79.  
Xiao Xinqing, Qi Lin, Zhang Lei, et al. Wireless real-time monitoring system for table grape cold-chain logistics[J]. Application of Electronic Technique, 2013, 39(8): 77-79. (in Chinese)