

文章编号 1004-924X(2006)01-0001-07

二阶导数光谱预处理在用 FTIR/ATR 方法定量测定葡萄糖-6-磷酸和果糖-6-磷酸中的应用

陈洁梅¹, 潘涛², 陈星旦^{3,4}

- (1. 暨南大学 生命科学技术学院, 广东 广州 510632; 2. 暨南大学 信息科学技术学院, 广东 广州 510632;
3. 暨南大学 理工学院, 广东 广州 510632;
4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:利用傅里叶变换红外光谱(FTIR)和衰减全反射(ATR)技术,建立了一种葡萄糖-6-磷酸(G6P)和果糖-6-磷酸(F6P)同时定量测量的方法。作为磷酸己糖异构酶(PGI)反应系的模拟,G6P-F6P-Tris混合溶液被作为定量对象,并通过采集组分浓度已知的G6P-F6P-Tris混合溶液的光谱来建立定标方法。分别用吸光度光谱或二阶导数光谱,并分别用G6P,F6P,Tris的主要吸收峰($1\ 086\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 082\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 065\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 036\ \text{cm}^{-1}$ 和 $978\ \text{cm}^{-1}$)的数据或指纹领域($1\ 200\sim 900\ \text{cm}^{-1}$)全段数据,共进行了4种模式的多元线性回归分析,比较各种模式下浓度的预测值与实测值的相关系数、平均相对误差和交叉检验均方误差(RMSECV值)。结果表明,采用二阶导数光谱比采用吸光度光谱所得到的预测值具有更高的精度,而采用指纹领域全段数据比采用G6P,F6P,Tris主要吸收峰的数据所得到预测值具有更高的精度。

关键词:傅立叶变换红外光谱; 衰减全反射; 二阶导数光谱; 定量分析

中图分类号: O433.4, Q493.4, Q532.3 **文献标识码:** A

Application of second derivative spectrum prepares in quantification measuring glucose-6-phosphate and fructose-6-phosphate using a FTIR/ATR method

CHEN Jie-mei¹, PAN Tao², CHEN Xing-dan^{3,4}

- (1. *College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China;*
2. *College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China;*
3. *College of Science and Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;*
4. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: A simultaneous quantification measurement method of glucose-6-phosphate (G6P) and fructose-6-phosphate (F6P) was developed using a Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer and attenuated total reflection (ATR) techniques. For applying the quantification method to the enzyme reaction system from G6P to F6P with phosphoglucose isomerase (PGI), the G6P-F6P-Tris mixture

收稿日期:2005-10-14; 修订日期:2005-11-18.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10061001),教育部留学回国人员科研启动基金项目(教外司留[2005]383号),暨南大学引进优秀人才科研启动基金项目(No. 51204057)

solution was used as the quantification object, and the spectra of the G6P-F6P-Tris mixture solutions which the concentrations were known were used as calibration spectra. Corresponding to the absorbance spectra or the second derivative spectra, selecting the value in main absorption peaks of $1\ 086\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 082\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 065\ \text{cm}^{-1}$, $1\ 036\ \text{cm}^{-1}$ and $978\ \text{cm}^{-1}$ or the data in the fingerprint region of $1\ 200\sim 900\ \text{cm}^{-1}$, four types of the multiple linear regressions analyses were performed. By comparing the related coefficients, the average relative error and the root mean square error cross validation (RM-SECV) values for the calculated values and the actual values for the concentrations corresponding to all types, the enough accuracy could be achieved for the calculated values based on the data in the fingerprint region for the second derivative spectra. The calculated values corresponding to the second derivative spectra have the higher accuracy than ones corresponding to the absorbance spectra, and the calculated values based on the data in the fingerprint region have the higher accuracy than ones based on the data in main absorption peaks.

Key words: Fourier transform infrared spectroscopy; attenuated total reflection; second derivative spectra; quantification analysis

1 引 言

继基因组学、蛋白质组学之后,代谢组学已经成为生命科学研究领域最重要的热点之一,它是生物体内代谢物的整体为研究对象的新兴交叉学科,它试图通过对生命体内代谢物的分布组成和时空动态变化的分析测定,结合化学计量学、计算生物学和计算机建模,从本质上把握生物代谢网络调控规律,最终做到可以定量预测基因改变和环境变化后生物代谢网络的变动规律,从而为优化生物代谢功能、提高研究和生产效率提供坚实的理论支持和强大的技术后盾。

中红外分光法是一种既可以测定物质的含量,又可以分析物质的结构变化的方法,具有测定时间短,精度高,并且可以进行复数成分测定、非破坏性测定、连续测定等优点,是在线(On Line)、实时(Real Time)、原位(In Situ)定量分析测定的主要方法之一。中红外分光法用于生物体系和生物过程分析的主要难点是水分子或有机溶剂的强烈的红外吸收干扰了待测组分的红外光谱,傅里叶变换红外光谱(FT-IR)和衰减全反射(ATR)技术的提出^[1],克服了上述困难,已经在农产品、食品的品质测定^[2-3],细胞培养和糖代谢过程计测^[4-5],发酵过程监测^[6-7],酶活性分析^[8-9]等方面有广泛应用,但是对于代谢物质的实时定量方面的应用还很少。因为代谢物多为解离性物质,其离解状态、分子构造等与代谢反应场的 pH 值有

很大依存性,解离性物质的红外光谱具有 pH 值高依赖性,使得这方面的光谱分析产生了困难,因此一直是一个值得研究的热点问题^[10-13]。

葡萄糖-6-磷酸(G6P)和果糖-6-磷酸(F6P)是糖代谢和糖异生途径的重要中间产物,广泛地存在于动植物和微生物体中。在糖酵解途径(EMP),葡萄糖经由己糖激酶反应磷酸化为 G6P,G6P 再经由磷酸己糖异构酶(PGI)反应异构化为 F6P,而 G6P 还是磷酸戊糖途径(PP)的起始物。位于糖酵解途径入口附近的 PGI 酶反应系影响着糖酵解途径和其他关联代谢途径的整体速度和效率,是代谢工程的重要研究对象。

G6P 和 F6P 的定量测定方法已有多种,如呈色反应法、色谱法和酶法等,但需要作复杂的预处理,测样时间长,或者需要介入别的附加反应,不是可行的在线、实时、原位的定量分析方法。

本文利用 FT-IR/ATR 光谱建立 G6P 和 F6P 的同时定量测定方法,为了能够应用到 PGI 酶反应系,作为 PGI 酶反应系的模拟^[14],G6P-F6P-Tris 混合溶液被作为定量对象,并通过采集组分浓度已知的 G6P-F6P-Tris 混合溶液的光谱来建立定标方法。这种方法考虑到混合系中可能存在的分子间的相互作用所引起的光谱变化,是针对测定对象的一种自然方法。考虑到生物体系中代谢物的浓度一般很低,相应混合系光谱减去背景光谱所得的差谱容易产生基线漂移(baseline shift)或者倾斜等一阶噪音,为此,本文也采用了二阶导数光谱预处理。分别用吸光度光谱或二阶

导数光谱,并分别用 G6P, F6P, Tris 的主要吸收峰数据或指纹领域全段数据,共进行 4 种模式的多元线性回归分析。结果表明,采用二阶导数光谱比采用吸光度光谱所得到预测值具有更高的精度,而采用指纹领域全段数据比采用 G6P, F6P, Tris 主要吸收峰数据所得到预测值具有更高的精度。

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

Nicolet 公司的 Magna-IR750 傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR), APPLIED SYSTEMS 公司的 Durasampl IR 衰减全反射附件(ATR)。

试剂为 D-葡萄糖-6-磷酸(G6P: D-Glucose-6-Phosphate Monosodium Salt, 生化试剂), D-果糖-6-磷酸(F6P: D-Fructose-6-Phosphate Disodium Salt, 生化试剂, 纯度 87%), 缓冲溶液试剂为三(羟甲基)甲胺(Tris: Tris (hydroxymethyl) aminomethane, 生化试剂)。结构式参见图 1。调整溶液的 pH 值采用 1N 盐酸和 2N 氢氧化钠。

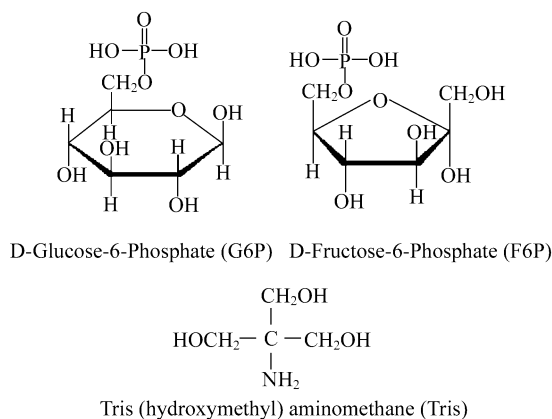


图 1 结构式
Fig. 1 Schemes

2.2 实验方法

各试剂成分用去离子水配成溶液,并利用盐酸和氢氧化钠滴定,每个溶液样品的 pH 值调整为 8.00。以 Tris · HCl 缓冲溶液为溶剂配制 G6P-F6P-Tris 混合溶液 8 个,其中各组分浓度的范围分别为 G6P: 6.180 5~31.355 5 mM, F6P: 3.018 5~25.799 3 mM 和 Tris: 75.603 9~99.892 7 mM。作为参照样品,配制 G6P 水溶液、

F6P 水溶液和 Tris · HCl 缓冲溶液各一个,浓度分别为 30.393 0mM、30.359 0 mM 和 100.890 5 mM(Tris)。FT-IR/ATR 光谱测定范围: 4 000~400 cm^{-1} 。分辨率: 4 cm^{-1} 。

3 结果与讨论

利用光谱减去技术将各溶液光谱减去去离子水光谱后分别得到各溶液中单组分物质或多组分物质的红外吸收光谱。图 2 给出了在指纹领域(1 200~900 cm^{-1}) G6P、F6P、Tris 的吸收光谱。图 3 是 8 个目标样品的 G6P-F6P-Tris 的吸收光谱。

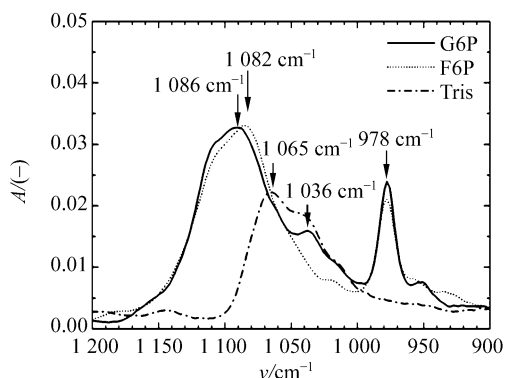


图 2 G6P, F6P 和 Tris 的吸收光谱
Fig. 2 Absorbance spectra for G6P, F6P and Tris

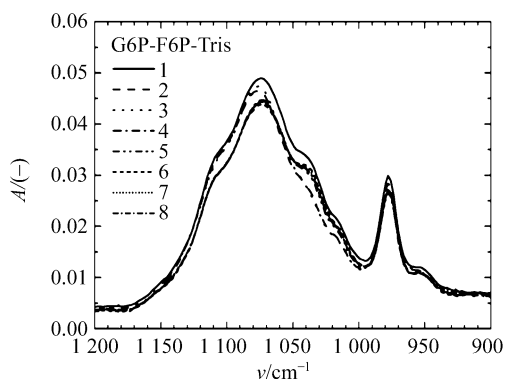


图 3 G6P-F6P-Tris 的吸收光谱
Fig. 3 Absorbance spectra for G6P-F6P-Tris

图 2 中,在 978 cm^{-1} 附近的强吸收峰是 G6P 和 F6P 所共有的,它对应于磷酸基团,而 G6P 和 F6P 的己糖基团的强吸收峰分别出现在非常靠近的 1 086 cm^{-1} 和 1 082 cm^{-1} 附近,此外, G6P 在 1036 cm^{-1} 附近有一个微弱的吸收峰,而 F6P 在

那里仅仅是一个很不明显的肩位。可见, G6P 和 F6P 的红外吸收光谱非常相似, 利用 G6P-F6P-Tris 混合的吸收光谱来测定 G6P 和 F6P 的含量可能会有一定的干扰。考虑到二阶导数光谱可以去掉一些高频噪音, 本文利用二阶导数光谱, 并使用 Savitzky-Golay 平滑化方法^[15] 计算二阶导数光谱。为了使得到的二阶导数光谱不会因为平滑不足出现过多的噪音或者由于平滑过度而丢失信息, 按照 Savitzky-Golay 平滑化方法, 分别使用了 5 点、7 点、9 点、11 点、13 点和 15 点的平滑化模式, 用于比较取舍。

图 4~6 给出按上述计算方法得到的 G6P、F6P、Tris 的二阶导数光谱(为了容易辨认, 只给出采用 5 点平滑、11 点平滑和 15 点平滑对应的结果)。从 3 个图中均观察到 5 点平滑结果出现较多的噪音, 而 15 点平滑结果开始显得平滑过度, 11 点平滑结果较为适中。

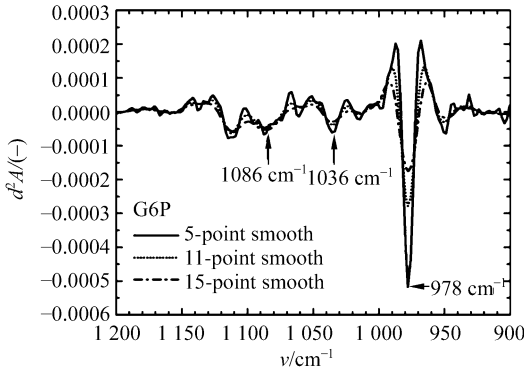


图 4 对应 5 点平滑、11 点平滑和 15 点平滑的 G6P 的二阶导数光谱

Fig. 4 Second derivative spectra for G6P corresponding to 5-point smooth, 11-point smooth and 15-point smooth, respectively.

二阶导数光谱的下凸谷位对应原光谱的吸收峰位或肩位。例如, 图 4 中 G6P 的二阶导数光谱的下凸谷位 978 cm^{-1} 、 1036 cm^{-1} 和 1086 cm^{-1} 对应图 2 中原光谱的吸收峰位, 图 5 中 F6P 的二阶导数光谱的下凸谷位 978 cm^{-1} 和 1082 cm^{-1} 对应图 2 中原光谱的吸收峰位, 图 6 中 Tris 的二阶导数光谱的下凸谷位 1065 cm^{-1} 对应了图 2 中原光谱的吸收峰位。因此, 二阶导数光谱在这些波数的数据包含了更为重要的信息。

本文使用 11 点平滑的 Savitzky-Golay 方法计算二阶导数光谱, 其公式如下:

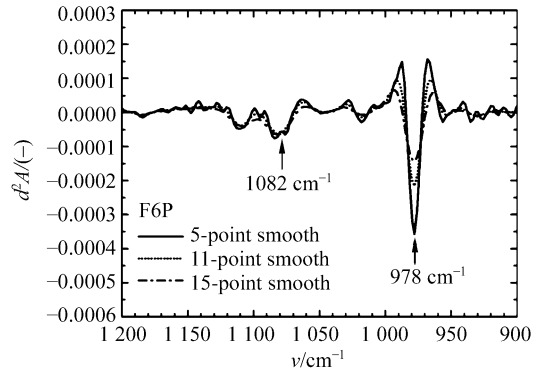


图 5 对应 5 点平滑、11 点平滑和 15 点平滑的 F6P 的二阶导数光谱

Fig. 5 Second derivative spectra for F6P corresponding to 5-point smooth, 11-point smooth and 15-point smooth, respectively.

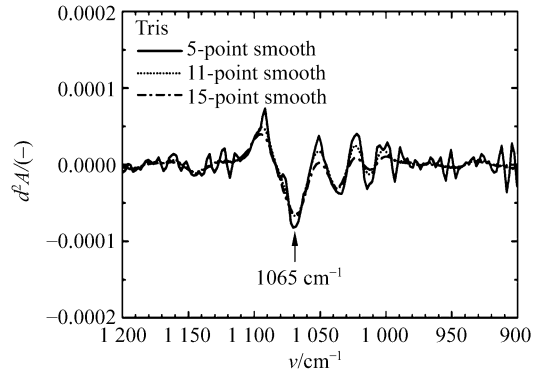


图 6 对应 5 点平滑、11 点平滑和 15 点平滑的 Tris 的二阶导数光谱

Fig. 6 Second derivative spectra for Tris corresponding to 5-point smooth, 11-point smooth and 15-point smooth, respectively.

$$d^2 A(\nu) = \frac{1}{429 d\nu^2} \{ 15[A(\nu+5\Delta\nu) + A(\nu-5\Delta\nu)] + 6[A(\nu+4\Delta\nu) + A(\nu-4\Delta\nu)] - [A(\nu+3\Delta\nu) + A(\nu-3\Delta\nu)] - 6[A(\nu+2\Delta\nu) + A(\nu-2\Delta\nu)] - 9[A(\nu+\Delta\nu) + A(\nu-\Delta\nu)] - 10A(\nu) \}, \quad (1)$$

其中, $\nu(\text{cm}^{-1})$ 为波数, $A(\nu)$ 为吸光度, $\Delta\nu$ 为光谱数据的波数间隔, 在本实验中 $\Delta\nu = 1.9285 (\text{cm}^{-1})$ 。图 7 给出得到的 8 个目标样品的 G6P-F6P-Tris 的二阶导数光谱。

G6P-F6P-Tris 的吸收光谱和二阶导数光谱

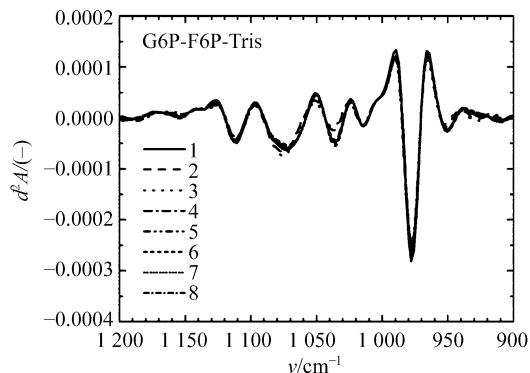


图 7 G6P-F6P-Tris 的二阶导数光谱

Fig. 7 Second derivative spectra for G6P-F6P-Tris

关于各组分的加和性表示如下:

$$A_{G6P-F6P-Tris}(\nu) = C_{G6P} \hat{A}_{G6P}(\nu) + C_{F6P} \hat{A}_{F6P}(\nu) + C_{Tris} \hat{A}_{Tris}(\nu), \quad (2)$$

$$d^2 A_{G6P-F6P-Tris}(\nu) = C_{G6P} d^2 \hat{A}_{G6P}(\nu) + C_{F6P} d^2 \hat{A}_{F6P}(\nu) + C_{Tris} d^2 \hat{A}_{Tris}(\nu), \quad (3)$$

其中 $A_{G6P-F6P-Tris}(\nu)$ 、 $d^2 A_{G6P-F6P-Tris}(\nu)$ 分别是 G6P-F6P-Tris 在波数 ν 的吸光度及其二阶导数, $\hat{A}_{G6P}(\nu)$ 、 $\hat{A}_{F6P}(\nu)$ 、 $\hat{A}_{Tris}(\nu)$ 、 $d^2 \hat{A}_{G6P}(\nu)$ 、 $d^2 \hat{A}_{F6P}(\nu)$ 、 $d^2 \hat{A}_{Tris}(\nu)$ 分别是 G6P, F6P, Tris 在波数 ν 的摩尔吸光度(单位摩尔浓度的吸光度)及其二阶导数, C_{G6P} 、 C_{F6P} 、 C_{Tris} 分别是 G6P-F6P-Tris 混合系中 G6P, F6P, Tris 的浓度。

基于在每一个波数的各已知样品的吸光度和各组分浓度的数据,根据关系式(2)(或关系式(3)),用多元线性回归(MLR)确定了各组分物质在每一个波数的摩尔吸光度(或二阶导数)。这样定标后,再基于各组分物质的摩尔吸光度光谱(或二阶导数光谱)和未知样品的吸收光谱(或二阶导数光谱),根据关系式(2)(或关系式(3)),再用 MLR 分析可以确定未知样品中各组分物质的浓度。在上述计算过程中,使用了 Leave-One-Out 的交叉检验(Cross-Validation)来比较预测值与实测值。

在选取数据段做 MLR 分析时,再分开两种模式:(1)采用 G6P, F6P, Tris 的主要吸收峰(1 086 cm^{-1} 、1 082 cm^{-1} 、1 065 cm^{-1} 、1 036 cm^{-1} 和 978 cm^{-1})处的数据;(2)采用指纹领域(1 200~900 cm^{-1})的全段数据。这是因为很多的方法是利用主要吸收峰处的数据定量,本文分别利用主

要吸收峰处的数据和指纹领域全段数据来定量,是为了有所比较,便于选择更好的方法。

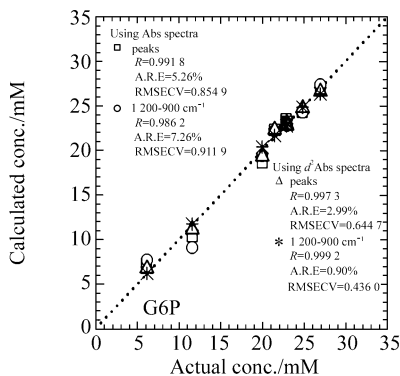


图 8 对应 4 种定量模式的 G6P 浓度的预测值与实测值的比较

Fig. 8 Comparison of the calculated values with the actual ones for G6P concentration corresponding to the four quantification models

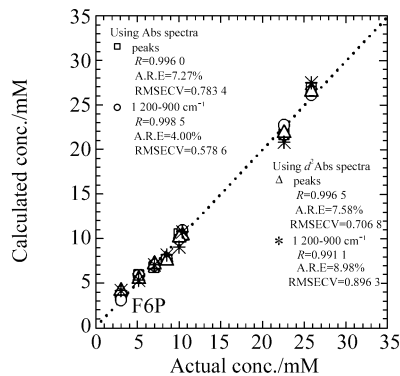


图 9 对应 4 种定量模式的 F6P 浓度的预测值与实测值的比较

Fig. 9 Comparison of the calculated values with the actual ones for F6P concentration corresponding to the four quantification models

按照采用吸光度光谱或二阶导数光谱和采用吸收峰处的数据或指纹领域全段数据划分,共有 4 种定量模式。本文对配制的 8 个 G6P-F6P-Tris 混合溶液,按照上述 4 种模式经 MLR 分析得到了 G6P, F6P, Tris 浓度的预测值。预测值与实测值的比较在图 8~10 给出。相应的预测值与实测值的相关系数(R)、平均相对误差(A. R. E)和交叉检验均方误差(RMSECV)在表 1 中给出,其中 RMSECV 值的计算式如下:

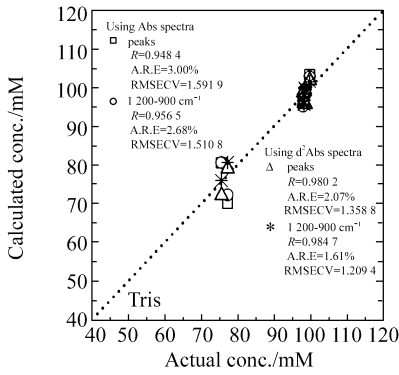


图 10 对应 4 种定量模式的 Tris 浓度的预测值与实测值的比较

Fig. 10 Comparison of the calculated values with the actual ones for Tris concentration corresponding to the four quantification models

$$\text{RMSECV} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{C}_i - C_i)^2}{n}}, \quad (4)$$

其中 \hat{C}_i, C_i 分别为第 i 样品的浓度预测值和实测

表 1 G6P, F6P 和 Tris 浓度的预测值与实测值的相关系数、平均相对误差和 RMSECV 值

Tab. 1 Related coefficient, average relative error and RMSECV value for the calculated value and the actual value for the concentration for G6P, F6P and Tris

		相关系数(R)				平均相对误差(%)				RMSECV			
		[G6P]	[F6P]	[Tris]	平均	[G6P]	[F6P]	[Tris]	平均	[G6P]	[F6P]	[Tris]	平均
吸收光谱	吸收峰	0.9918	0.9960	0.9484	0.9787	5.26	7.27	3.00	5.18	0.8549	0.7834	1.5915	1.0766
	指纹领域	0.9862	0.9985	0.9565	0.9804	7.26	4.00	2.68	4.65	0.9119	0.5786	1.5108	1.0004
二阶导数光谱	吸收峰	0.9973	0.9965	0.9802	0.9913	2.99	7.58	2.07	4.21	0.6447	0.7068	1.3588	0.9034
	指纹领域	0.9992	0.9911	0.9847	0.9917	0.90	8.98	1.61	3.83	0.4360	0.8963	1.2094	0.8472

4 结 论

利用 FT-IR/ATR 光谱技术,建立了 G6P-F6P-Tris 混合溶液中 G6P 和 F6P 的一种同时定量测量方法。结果表明,基于二阶导数光谱并采用指纹领域($1\ 200\sim 900\ \text{cm}^{-1}$)全段数据,所得的预测值与实测值吻合精度较高,采用二阶导数光谱比采用吸光度光谱所得到预测值具有更高的精度,而采用指纹领域全段数据比采用 G6P, F6P, Tris 主要吸收峰的数据所得到预测值具有更高的精度。

值, n 是待测样品数。

可以看出,采用二阶导数光谱,并采用指纹领域全段数据的定量结果得到充分的精度。虽然 F6P 浓度的预测值与实测值的相对误差表面较大,但仍然观察到两者的吻合程度很好,这是因为 F6P 的待测浓度普遍低,导致相对误差增大,另外, Tris 浓度的预测值与实测值的相关系数较低,其原因是 Tris 作为背景,用来代替测定目标外的浓度相对固定的其他所有物质,由于它的待测浓度范围很窄导致了相关系数变小。但仍然观察到 Tris 浓度预测值与实测值的吻合程度很好。

采用二阶导数光谱的定量精度普遍比采用吸光度光谱的高,采用指纹领域全段数据的定量精度比采用吸收峰处的数据的高,其主要原因是 G6P 和 F6P 的吸光度光谱非常相似,且严重重叠。采用二阶导数预处理后再定量,消除了一些高频噪音,即平移(如 baseline)、倾斜等一阶噪音。而由于谱段重叠,采用全段数据才能得到更多的信息,提高精度。

本文通过采集组分浓度已知的 G6P-F6P-Tris 混合溶液的光谱来建立定标方法,这种方法考虑到混合系中可能存在的分子间的相互作用所引起的光谱变化,是针对测定对象的一种自然方法。

作为 PGI 酶反应系的模拟, G6P-F6P-Tris 混合系被作为本文的定量对象,其中 G6P, F6P 是待测目标组分, Tris 用来代替测定目标外的浓度相对固定的其他所有组分,因此本文的方法可望应用到其他的多组分混合系,并为应用到实际的酶反应系和其他复杂的生命、细胞的代谢体系提供了一个阶梯。

参考文献:

- [1] MIRABELLA F M, HARRICK N J. *Internal reflection spectroscopy: review and supplement*[M]. New York: Harrick Scientific Corporation, 1985.
- [2] WILSON R H. Fourier Transform mid-infrared spectroscopy for food analysis[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 1990, 9: 127-131.
- [3] VanDeVoort F R. Fourier transform infrared spectroscopy applied to food analysis[J]. *Food Research International*, 1992, 25: 397-403.
- [4] HASHIMOTO A. Mid-infrared spectroscopic determination of sugar contents in plant-cell culture media using an ATR method[J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54: 1005-1011.
- [5] HASHIMOTO A. Sugar metabolic analysis of suspensions of plant cells using an FT-IR/ATR method[J]. *Biotechnology Progress*, 2001, 17: 560-564.
- [6] AXELSEN P H. Use of internal reflectance infrared spectroscopy for in situ study of supported lipid monolayers [J]. *Applied Spectroscopy*, 1995, 49: 526-531.
- [7] QIU J. Simultaneous quantitative analysis of sorbitol and sorbose in the fermentation broth with ATR/FTIR spectroscopy[J]. *Biochemical Engineering*, 1997, 2: 1188-1192.
- [8] WONG P T. FTIR spectroscopic kinetic analysis of alkaline phosphate under hyperbaric manipulation[J]. *Biochimica Et Biophysica Acta*, 1992, 1159: 237-242.
- [9] FUJII T. Infrared ATR spectroscopy of substrates in aqueous solution using cryoenrichment and its application in enzyme-activity assays[J]. *Applied Spectroscopy*, 1998, 52: 128-133.
- [10] MAX J J. Subtraction of the water spectra from the infrared spectrum of saline solutions[J]. *Applied Spectroscopy*, 1998, 52: 234-239.
- [11] MAX J J. Subtraction of the water spectra from infrared spectra in acidic and alkaline solutions[J]. *Applied Spectroscopy*, 1998, 52: 963-969.
- [12] NAKANISHI K, HASHIMOTO A, PAN T, *et al.* Mid-infrared spectroscopic measurement of ionic dissociative materials in metabolic pathway[J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, 57(12): 1510-1516.
- [13] PAN T, HASHIMOTO A, KANO M, *et al.* Development of a quantification system of ionic dissociative metabolites using an FT-IR/ATR method[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2003, 26(2): 133-139.
- [14] MURAMATSU N, NOSON Y. Purification and characterization of glucose-6-phosphate isomerase from bacillus stearothermophilus[J]. *Archives of Biochemistry Biophysics*, 1971, 144: 245-252.
- [15] SAVITZKY A, GOLAY M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures[J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36: 1627-1637.

作者简介:陈洁梅(1965—),女,博士,主要从事微生物发酵、代谢工程方面的研究;

潘涛(1964—),男,博士,教授,主要从事应用数学、生物信息、光谱分析方面的研究. Email: tpan@jnu. edu. cn