

文章编号 1004-924X(2015)增-0000-07

体表分泌物中 KCl 含量的近红外光谱定性分析

王蒙军^{1*}, 董骊珠¹, 刘剑飞¹, 李刚²

(1. 河北工业大学 电子信息工程学院, 天津 300401;

2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要: 由于体表分泌物中氯化钾的含量与人体生理状态有直接关系, 研究了快速检测人体正常体温 36.5℃ 下体表分泌物中氯化钾含量的方法。首先, 基于近红外光谱法测量了标准氯化钾溶液的浓度。然后, 对钾离子近红外光谱进行分析, 采用最小二乘法对吸收峰进行拟合。分析拟合结果显示, 最小二乘法拟合的决定系数(r^2)能够达到 96.28%, 可以表达体表分泌物中氯化钾的吸收光谱随温度和浓度变化的规律。研究结果表明, 利用近红外光谱对体表分泌物中氯化钾成分的定性分析较为清晰地展现了近红外光谱吸收峰与体温变化和氯化钾浓度的关系: 同一温度下氯化钾的浓度越大, 吸收峰越强; 同一氯化钾的浓度下温度越高, 吸收峰越强。

关键词: 氯化钾; 溶液浓度; 体表分泌物; 近红外光谱; 最小二乘法; 定性分析

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0000

Qualitative analysis of KCl composition for skin secretion based on near infrared spectroscopy

WANG Meng-jun^{1*}, DONG Li-zhu¹, LIU Jian-fei¹, LI Gang²

(1. School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. College of Precision Instrument and Optic-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: wangmengjun@hebut.edu.cn

Abstract: As KCl composition at human body surface has a direct relationship with the human physiological condition, a detection method for the KCl composition of skin secretion at the normal body temperature 36.5℃ was explored. The near infrared spectroscopy was adopted to measure the solution concentration of KCl. After analyzing the solution concentration of K^+ based on near infrared spectroscopy, the least square method was used to fit the absorption peak. Fitting results show that the absorption spectrum for KCl composition of skin secretion varies with temperature and KCl concentration, and the determination coefficient of least square method (r^2) can reach to 96.28%. The results indicate that KCl composition qualitative analysis for skin secretion based on near infrared spectroscopy can clearly give the relationship between the absorption peak and solution concentration of KCl near the normal body temperature. At the same temperature, the absorption peak gets bigger with increasing the solution concentration of KCl. At the same solution concentration of KCl, the

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-05-30.

基金项目: 河北省高等学校自然科学研究重点基金资助项目 (No. ZD20131043); 河北省高等学校高层次人才科学研究资金资助项目 (No. GCC2014011); 天津市自然科学基金资助项目 (No. 15JCYBJC17000)

absorption peak gets bigger with increasing the temperature.

Key words: solution concentration; KCl; composition of sweat; near-infrared spectroscopy; least square method; qualitative analysis

1 引言

人体有多种分泌物,如血液、尿液等,其中体表分泌物是人体多种分泌物中较为重要的一种。通常所说的体表分泌物是指人体分泌的汗液,汗液中包括了多种成分,其中氯化钾(KCl)为汗液中较为重要的一种成分。KCl在人体中存在的形式为钾离子以及氯离子,这些离子在人体中的作用是维持人体正常的肌肉和神经兴奋,保证人体正常的心脏脉搏的活动^[1]。健康的成人体表分泌物中钾离子的含量约为总体的4.2%,因个体不同而存在微小差异。如果体表分泌物中的KCl含量增加,但却没有同时进行摄取补充的情况下,人体中参与正常生理活动钾离子会大大减少,影响人体的正常生理机能,如导致人体的兴奋性下降、精神倦怠,甚至肌肉无力、心率失常等病态症状^[2]。因此,需要研究体表分泌物中KCl含量的变化规律,以推断出被测试者的身体状况。

目前,体表分泌物的研究分析多采用直接收集法,通过高温或者是剧烈运动的情况,促使被测试者在短时间内大量产生体表分泌物,实验员则通过作训服收集汗液^[3]。此种收集方法对于被测者运动强度的要求很高,且实验成本较高,不适合被测者接受程度低、收集场所空间狭小的测试情况,如驾驶员的疲劳驾驶监测、航天航空飞行员生理状态的监测等情况。如果能够在不干扰被测试者正常工作的状态下完成体表分泌物的采集和分析,测试条件则可变得更宽松,实用性也更强。

近红外光谱法测量分析体表的分泌物,目前主要针对体表分泌物中氯化钠(NaCl)的含量变化^[4]。与传统的采集以及分析方法相比,该方法所需要的分泌物样品量较小,采集容易、成本低;采集到的分泌物样品无需进行预处理,大大简化了测量过程;非接触式的测量方式能够降低被测试者的抵触情绪,不干扰被测试者的正常活动。因此该方法具有实时性、准确性、便捷性等优点。但是分泌物中NaCl的含量极易受到被测试者饮食条件的影响,对于生理状态的反映容易受到其

他因素的干扰。而通过分析体表分泌物中KCl的含量来判断人体的生理状况时,KCl受到被测者饮食的干扰较小,不会因被测者对食用盐、饮用水的摄入量变化而出现大幅变动,所以KCl含量变化的最主要影响因素就是被测者的生理状况。因而通过研究KCl的浓度从理论上能够较为准确地判断被测试者的生理状况。

目前,国内外相关领域对于近红外光谱分析体表分泌物的研究较少,尤其是在汗液成分分析的方面,缺乏汗液成分近红外光谱的定性分析,并且没有形成关于此方面的标准化结论。本文旨在通过大量的光谱测量以及数据分析,对不同浓度、不同温度下的体表分泌物中氯化钾的近红外光谱进行定性分析,以期能够形成标准化的数据结论。

2 实验过程

实验采用 AvaSpec-NIR256-1.7TEC 傅里叶变换近红外光谱仪(荷兰 Avantes 公司),TEC 热电制冷型的 InGaAs 信号探测器;近红外光源采用波长为 960 ~ 1 704 nm 的卤素灯;存放溶液的样品皿材料为氟化钙,底面为正方形,边长为 10 mm,高 30 mm,实验系统组成如图 1 所示。



图 1 实验系统组成

Fig. 1 Experimental system

实验时,存放溶液的样品皿放置于温控样品池中,保持恒温调节。温控样品池内部结构如图

2所示,型号为 QNWqpod2e(荷兰 Avantes 公司)近红外光通过入射光纤传输到 KCl 液体样品皿,被样品吸收后的近红外光通过出射光纤传输到信号接收器即光谱仪中进行分析处理。设备外接3根管道,分别实现与外界气体交换、冷却液输入以及输出的功能。通过冷却液在仪器中的流动来实现温度的调节与控制。温度调节的精确度为 0.05 °C。

实验中采用分析纯级别的 KCl(天津市致远化学试剂有限公司)以及蒸馏水(天津市致远化学试剂有限公司)配置 KCl 溶液。使用精密电子天平(上海卓精电子科技有限公司 BSM-120.4)称取 KCl 药品。设定浓度梯度为 0.05 mol · L⁻¹,浓度范围为 0.05 ~ 1 mol · L⁻¹,总计 20 组 KCl 样品。

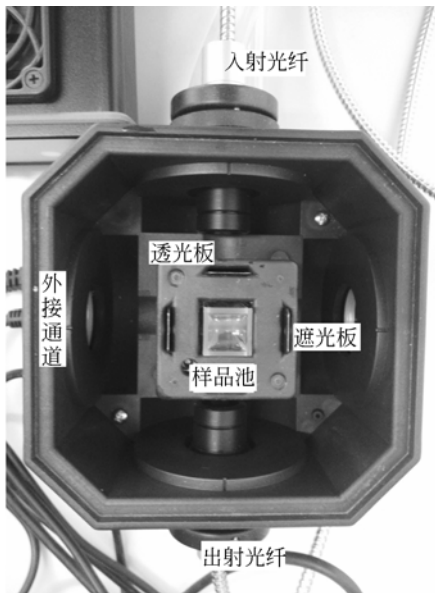


图2 温控样品池结构图

Fig.2 Structure of temperature control cell

光谱采集的扫描波长量程为 1 000 ~ 2 000 nm,分辨率为 6 ~ 60 nm,信噪比为 1 500: 1。将 KCl 溶液放入到样品皿中,整个实验过程中,样品皿整体放置在温控样品池中。KCl 溶液分为两组:第一组用来检测浓度对于 KCl 溶液吸收光谱的影响,选择较为接近人体正常体表温度 36.5 °C 为恒定温度值,分别将浓度为 0.05 ~ 1 mol · L⁻¹ 的 20 份 KCl 样品放置到液体池,每个样品扫描 3 次,取其平均值以减小实验误差,测量每份溶液的吸收光谱;第二组用来检测温度对于 KCl 溶液吸

收光谱的影响,设定温度为 20 ~ 45 °C,温度梯度为 0.5 °C。实验分别测量 0.05 ~ 1 mol · L⁻¹ 的 20 份 KCl 样品在此温度范围内的吸收光谱,在温度稳定后(约需 5 min)每个样品的温度点进行 3 次扫描。

3 实验结果分析

3.1 近红外光谱测量原理

不同分子具有不同的结构,每种结构有着不同的运动方式以及能量状态。总体而言,分子的能级是量子化的,分子运动的能量 E 为:

$$E = E_h + E_r + E_e + E_v. \quad (1)$$

其中: E 表示分子运动的总能量; E_h, E_r, E_v 分别表示分子运动的平动能、转动能和振动能; E_e 表示分子运动时释放和吸收的电子能量。 E_h 是连续不间断的,而其他几种能量都是符合量子化能级分布的,因而分子的总能量是符合量子化分布的^[5]。

如果使用波数连续的近红外光源照射液体样品,实验样品中的分子运动能够吸收特定波长的近红外光,因而到达检测器的光信号在通过 A/D 转换、傅里叶变换以后,就能得到相应的近红外光谱。近红外光谱中出现的峰称为吸收峰,表示在此波长处的光被样品大量吸收^[6]。样品对近红外光的吸收程度与此波长对应吸收峰的峰值大小是正相关,吸收越强,峰值越大。

不同的分子具有不同的近红外光谱吸收峰,吸收峰的强度以及对应的波长不仅同分子的种类有关,还和样品中分子的浓度有关。近红外光谱中吸收峰的分布依照朗伯-比尔定律:

$$A(v) = \lg \frac{1}{T(v)} = a(v)bc, \quad (2)$$

其中: $A(v), T(v)$ 分别是波数 v 处的吸光度以及透射率, $A(v)$ 为无量纲单位; $a(v)$ 为特定的实验样品在单位浓度、单位厚度的情况下,在波数 v 处的吸光度。对于液体的样品而言,此系数同温度的变化有直接的关系; b 为液体池的宽度,也就是近红外光的光程长; c 为实验样品中的分子浓度^[7-8]。依照朗伯-比尔定律能够得出以下结论:

(1) 实验样品种类不变的情况下,吸收峰的强度同样品中分子的浓度呈正比关系;

(2) 实验样品中分子浓度一定的情况下,吸收峰的强度同液体池宽度也就是光程长度成正

比;

根据上述分析,使用稳定连续的近红外光谱照射 KCl 样品溶液,保持光程长也就是液体池的宽度不变,那么所得到的样品的近红外吸收光谱只同样品的吸光度系数(本实验中主要为温度的影响)以及样品中分子的浓度有关,这也是本实验能够实施的理论依据。

3.2 钾离子水溶液的近红外吸收光谱原理

KCl 仅在远红外区存在频率为 150 cm^{-1} 的晶格振动谱带,但不存在近红外区域的吸收谱带。因而在近红外区域对于氯化钾浓度变化的检测依据是阴离子和阳离子浓度对水吸收光谱的影响^[9]。水分子为四面体结构,两个氢原子同单个氧原子发生 Sp^3 轨道杂化。氧原子处于四面体结构中心,而四面体的四个端点分别是两个氢原子,两个氧原子共用电子对。其中氧原子对电子的吸引能力很强,因而 O-H 键偏向氧原子,氢原子周围的电子被氧原子吸引,氢原子周围几乎没有电子。这样没有电子的氢原子同另外一个水分子的氧原子结合,在静电力的作用下形成氢键。氢原子周围的力场出现变动,O-H 转动惯量增强,振动力常数增大,进而转动能量 E 降低^[10],最终造成近红外光谱的吸收峰向波数低的一侧移动,同时吸收峰变宽。

依据 Buijs 和 Choppin 的研究,水在液态的情况下有 3 种分子形式:(1)水分子没有同 O-H 氢键结合,此种状态下水分子的振动频率最大;(2)水分子同 O-H 键结合为氢键,这种状态下 O-H 键的极性以及振动频率处于中等状态;(3)水分子同两个 O-H 键结合为氢键,这种状态下水分子的振动频率最小,且 O-H 键的极性最弱。依据分子吸收光谱的振动原理,越大的振动频率会导致吸收峰向波数较高的区域移动^[11-12]。如果不是纯水状态,而是溶液样品,那么溶液中的离子会同水分子结合成水合化合物,很大程度上降低了处于后两种状态的水分子的数量,换言之,就是说第 1 种状态下水分子的数量会大大增加。所以,溶液的近红外吸收光谱吸收峰会比纯水状态近红外吸收光谱吸收峰更窄,同时会更加靠近高波数区域。

3.3 钾离子水溶液的近红外吸收光谱分析

按照上述 KCl 溶液的近红外光谱测量原理,在不同测试条件下进行 KCl 溶液的测量和分析,

得到不同条件下 KCl 溶液吸收峰的测量结果,如图 3~5 所示。

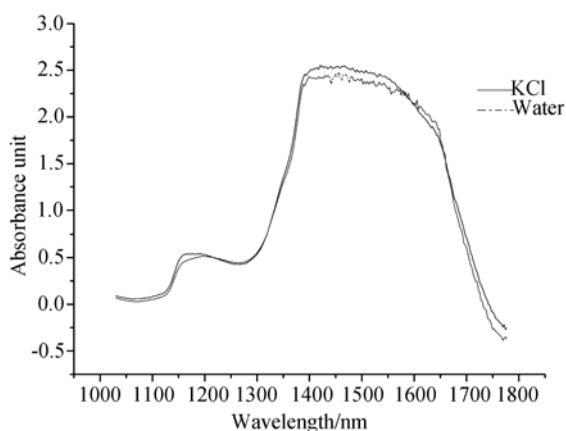


图3 蒸馏水和 $0.55\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液的近红外光谱
Fig. 3 NIR spectra of pure water and $0.55\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl solution

图 3 为 $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时纯蒸馏水和 $0.55\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液的近红外光谱。可以看出,KCl 溶液造成了水的吸收峰的显著变化。由于水分子和氯离子的水合作用比水分子之间氢键的作用大很多,极大地破坏了水分子之间氢键的结合。水的吸收峰的强度变大,并且朝着波数较高的方向移动。

图 4 为 $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同浓度的 KCl 溶液的近红外光谱。可以看出,不同浓度的 KCl 溶液的近红外光谱变化趋势以 $0.45\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为界分为两个部分:第一部分的浓度值小于 $0.45\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,此部分的吸收峰的强度与溶液浓度呈正比关系,主要考虑的是溶液中的离子与水分子之间的氢键被破坏的原因;第二部分的浓度值大于 0.45 mol

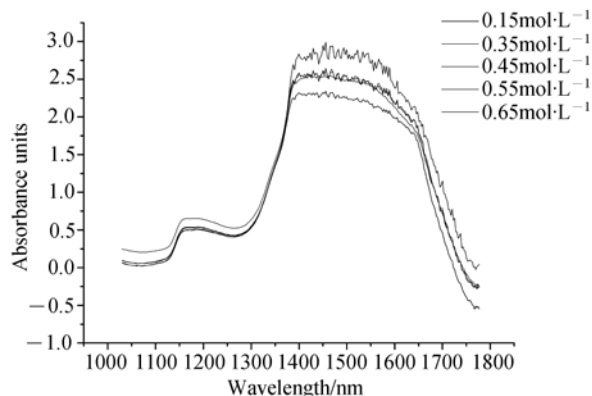


图4 不同浓度 KCl 在 $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的近红外光谱
Fig. 4 NIR spectra of different KCl solutions at $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

$\cdot \text{L}^{-1}$,此部分的吸收峰的强度与溶液浓度呈负相关,离子对于氢键的破坏作用小于离子对于光线的光学作用,如散射、吸收等。

图5为 $0.35 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液在不同温度下的近红外光谱。可以看出,浓度不变的情况下,近红外光谱的吸收峰与温度变化呈正比关系,但变化较小。在近红外波段内,水对于温度的变化较为敏感。温度的升高会造成水分子的振动能量和跃迁的几率提高,所以水分子氢键的作用随温度的升高会逐渐减小。同时由于温度的升高,KCl的溶解度越高,和水分子的水合作用越充分。两种情况共同作用时,水的温度敏感度起主要作用,呈现出图中规律。

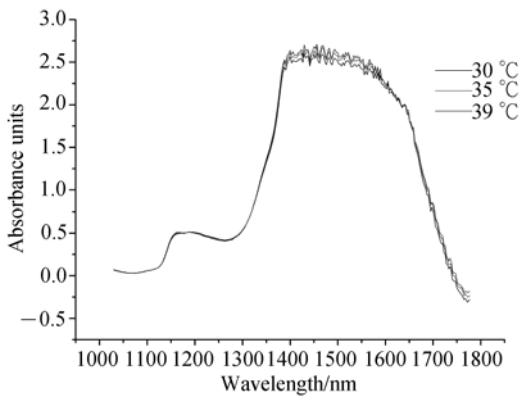


图5 不同温度溶液近红外光谱

Fig. 5 NIR spectra of $0.35 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl solutions at different temperatures

4 水溶液的近红外吸收光谱拟合分析

为了能够获得标准的定性分析结果,将近红外光谱吸收峰数据进行拟合,以减少噪声的影响。

4.1 最小二乘法拟合原理

最小二乘法(Least Square Method, LSM)为常见的拟合方法之一,主要适用于处理一些实验数据,这些数据由于实验测量过程中不可避免地存在一些误差。采用LSM拟合曲线不需要通过全部的数据点,只限定了拟合后的点和原始数据点之间的误差值,有效地抑制了原始实验数据的误差在后期数据分析中的积累以及叠加。LSM的实施准则是保证误差的平方和最小,拟合公式为:

$$J(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^m \delta_i^2 = \sum_{i=1}^m [f(x_i) - y_i]^2, \quad (3)$$

其中 $i=1 \dots m$ 。使 m 个数据点 (x_i, y_i) 与其相对应的 $(x_i, f(x_i))$ 的距离平方和的值最小^[13]。

4.2 拟合结果分析

图6为对纯蒸馏水以及 $0.55 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液在1500 nm附近的吸收峰的最小二乘法拟合。从图中能够清晰地得到蒸馏水的吸收峰在1520 nm处,KCl溶液的吸收峰在1500 nm处。相较于蒸馏水,KCl溶液的吸收峰向波数较高也就是波长较小的方向移动,同时吸收强度变大,这与之前的分析相符合。

图7为36.5 °C时不同浓度的KCl溶液在1500 nm附近的吸收峰拟合。对比图4,图7更加清晰地展现了浓度同吸收峰强度的关系。同一温度下,对于不同浓度的KCl溶液,其吸收峰的位置基本没有变化,强度随着浓度的变化而改变。对于浓度值不超过 $0.45 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溶液,溶液浓度越大,溶液中离子和水分子的水合作用越明显,同OH基团结合的水分子越少,吸收强度越大,所以吸收峰的强度越大。当KCl溶液的浓度超出 $0.45 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,溶液中的离子同水分子的结合基本达到饱和状态,此时对近红外吸收强度起主要作用的是溶液中离子对光的折射以及散射等现象。所以随着溶液浓度的增加,溶液中的离子数量增加,对光的折射和散射效果增强,从而出现吸收峰强度同溶液浓度呈负相关的现象。经过对光谱数据扣除背景光谱等数据处理以后,选择在1500 nm处进行最小二乘法拟合,计算显示此处得

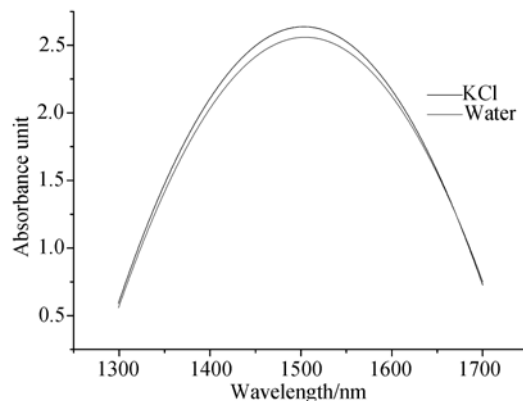


图6 最小二乘法拟合得到的蒸馏水和 $0.55 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液在1500 nm的吸收峰

Fig. 6 Absorption spectra of pure water and $0.55 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl solution at 1500 nm fitted by least square method

到的结果效果较好,相关系数 r^2 能够达到 96.54%。

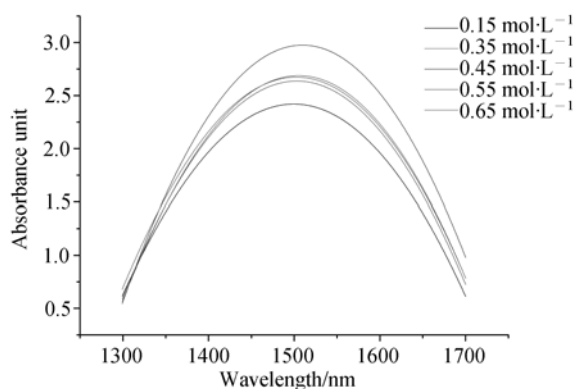


图 7 不同浓度 KCl 溶液 36.5 °C 时吸收峰的最小二乘法拟合

Fig. 7 Absorption spectra of different KCl solutions at 1500 nm at 36.5 °C fitted by least square method

图 8 为 $0.35 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KCl 溶液在 1500 nm 处不同温度时吸收峰的拟合。对近红外光谱数据进行拟合后,能够有效地消除实验对光谱数据的影响。对比图 5,图 8 更加清晰地展现了温度同吸收峰强度的关系。对于不同温度的 KCl 溶液,吸收峰的位置基本保持不变,强度随温度的升高而增强。水在近红外光谱区域对温度的敏感度很高,温度升高,水分子之间的活动增强,氢键的稳定性下降,减少了 OH 基团结合的水分子的数量;同时由于温度升高,溶液中离子的活跃度增强,同水分子的结合增多,同 OH 基团结合的水分子的数量减少,最终造成第一类水分子总数的增加,溶液的近红外光谱的吸收强度的增加。该

分析方法得到的相关度 r 为 96.28%,处理效果较为理想。

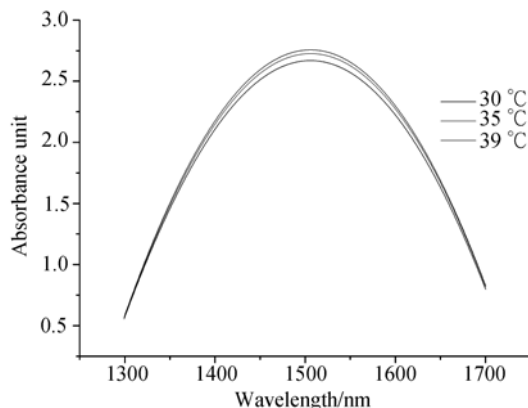


图 8 不同温度 KCl 溶液吸收峰的拟合

Fig. 8 Absorption spectra of $0.35 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl solution at different temperatures fitted by least square method

5 结 论

本文使用近红外光谱测量分析体表分泌物中 KCl 在不同浓度以及不同温度下的吸收光谱,采用 LSM 对实验得到的近红外光谱数据进行拟合处理,得到了关于体表分泌物中 KCl 成分的定性分析结果。研究表明,KCl 溶液在浓度一定的情况下,其吸收峰的强度随着温度的升高而增强;在温度一定的情况下,以 $0.45 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度值为界,如果浓度值小于界限值,那么其近红外光谱吸收峰的强度随着浓度的增加而增强,反之,其近红外光谱吸收峰的强度随着浓度的增加而减弱。这种对于体表分泌物中 KCl 近红外光谱的定性分析可以作为不同温度条件下的 KCl 浓度的分析依据,可作为通过已有的近红外吸收光谱分析判定当前未知的 KCl 浓度实验的理论依据。今后,体表分泌物中 KCl 浓度的光谱分析达到量化的标准,则可应用于人体生理状态的测量以及人体生理健康的监控中。

参考文献:

[1] COYLE S, MORRIS D, LAU K T, *et al.*. Textile sensors to measure sweat pH and sweat-rate during exer-

cise[C]. *Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, 2009:1-6.

[2] MASSIE J, GASKIN K, ASPEREN P V, *et al.*. Sweat testing following newborn screening for cystic

- fibrosis [J]. *Pediatric Pulmonology*, 2000, 29(6): 452-456.
- [3] 肖辉, 朱钊民, 雷德桥. 湿热环境习服训练的人体汗盐成分变化[J]. *军事体育学报*, 2014, 33(1): 119-122.
XIAO H, ZHU ZH M, LEI D Q. Study on the components of sweat in artificial environmental of high temperature and humidity [J]. *Journal of Military Physical Education and Sports*, 2014, 33(1): 119-122. (in Chinese)
- [4] 陈剑虹, 朱凌建, 华灯鑫. 氯化钠近红外光谱检测技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(4): 949-952.
CHEN J H, ZHU L J, HUA D X. Determination of sodium by near infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(4): 949-952. (in Chinese)
- [5] APPENZELLER B M R, SCHUMMER C, RODRIGUES S B, *et al.*. Determination of the volume of sweat accumulated in a sweat-patch using sodium and potassium as internal reference [J]. *Journal of Chromatography B*, 2007, 852(1): 333-337.
- [6] 翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
WENG SH P. *Fourier Transform Infrared Spectrometry Analysis* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [7] ZUDE M, PFLANZ M, SPINELLI L, *et al.*. Non-destructive analysis of anthocyanins in cherries by means of Lambert-Beer and multivariate regression based on spectroscopy and scatter correction using time-resolved analysis[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(1): 68-75.
- [8] HUONG A, NGU X. Noninvasive diagnosis of carbon monoxide poisoning using extended modified Lambert Beer model [C]. *Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Electronic Design*, 2014: 265-269.
- [9] HUANG K. NIR spectroscopy based on least square support vector machines for quality prediction of tomato juice [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 931-934.
- [10] CURTO V F, ANGELOV N, COYLE S, *et al.*. My sweat my health: Real time sweat analysis using wearable micro-fluidic devices [C]. *Proceedings of 5th IEEE International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, 2011: 196-197.
- [11] ANTON A, AGAPIOU A. Breath and sweat analysis as a tool for medical diagnostics[C]. *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare*, 2014: 250-253.
- [12] CALDERON S M, PRIEGO C F, JURADO G B, *et al.*. Optimization study for metabolomics analysis of human sweat by liquid chromatography-tandem mass spectrometry in high resolution mode [J]. *Journal of Chromatography A*, 2014, 1333: 70-78.
- [13] WEI M, SUN W. The regression equation for the patients with IgA nephropathy in clinical research[C]. *Proceedings of 5th IEEE International Conference on Information Technology in Medicine and Education*, 2012: 545-549.

作者简介:



王蒙军(1978-),男,河北清苑人,博士,副教授,硕士生导师,2008年于天津大学获得博士学位,主要从事光电信息检测与处理、光谱分析等方面的研究。E-mail: wangmengjun@hebut.edu.cn



董骊珠(1991-),女,河北崇礼人,硕士研究生,主要从事光谱测量与分析方面的研究。E-mail: dlzdonglizhu@163.com