

doi: 10.3788/gzxb20164507.0730004

# 温度对奶粉荧光光谱的影响

吴彬青, 叶满萍, 史亚荣, 郑梟, 赵春柳, 陈华才

(中国计量学院 光学与电子科技学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 采用荧光光谱和荧光寿命技术研究了温度对奶粉荧光特征的影响. 通过比较奶粉与酪蛋白、乳糖及维生素的荧光光谱, 确定了奶粉的荧光主要来自酪蛋白的贡献. 随着温度的升高, 奶粉和酪蛋白的荧光强度减小, 其中幼儿配方奶粉和成人普通奶粉的荧光强度随温度升高减小的趋势基本相同, 而婴儿配方奶粉的荧光强度随温度的升高出现了一个相对变化缓慢的平台区, 酪蛋白的荧光强度随温度升高呈缓慢下降的趋势, 下降的速度比奶粉的要缓. 酪蛋白加热到 90℃ 然后冷却至 25℃, 荧光强度部分恢复, 说明一部分蛋白质的结构变化或者荧光基团的活性变化是可逆的. 测量了不同温度下奶粉和酪蛋白的荧光寿命. 奶粉和酪蛋白的荧光寿命曲线在双指数拟合之后, 都有两个寿命, 这两个寿命可能来自于色氨酸和苯丙氨酸. 随着温度的升高, 奶粉和酪蛋白的两个荧光寿命都减小.

**关键词:** 荧光光谱; 荧光寿命; 奶粉; 酪蛋白; 温度; 氨基酸

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0730004-7

## Effect of Temperature on Fluorescence Spectra of Milk Powder

WU Bin-qing, YE Man-ping, SHI Ya-rong, ZHEN Xiao, ZHAO Chun-liu, CHEN Hua-cai  
(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The effect of temperature on the fluorescence of milk powder was studied by fluorescence spectra and fluorescence lifetime technology. Firstly, the fluorescence of milk powder is mainly from casein determined by comparing the fluorescence spectra of milk powder, casein, lactose and vitamins. Secondly, as the temperature increases, the fluorescence intensity of infant formula powder, toddler formula powder, adult ordinary milk powder and casein are generally reduced. The trend of fluorescence intensity with temperature of toddler formula powder and adult ordinary milk is almost same. The change of the fluorescence intensity of infant formula powder with temperature is different, which shows a relatively slow-changing platform area. Casein's fluorescence strength is a slow downward with increasing temperature, falling slower than milk. When heated to 90 degrees and then cooled to 25 degrees, casein was partially recovered, indicating that changes in the activity of the protein structural or fluorophore are partially reversible. Finally, the fluorescence lifetime of milk powder and casein at different temperatures were measured. Milk powder and casein have two lifetimes after double exponential fit, which can be derived from tryptophan and phenylalanine. As the temperature increases, fluorescence lifetimes of milk powder and casein are decreasing.

**Key words:** Fluorescence spectroscopy; Fluorescence lifetime; Milk; Casein; Temperature; Amino acids

**OCIS Codes:** 300.6280; 120.4640; 170.6280; 170.2520

## 0 引言

奶粉是用冷冻或加热的方法将新鲜牛奶或羊奶干燥, 然后添加适量的维生素、乳糖、矿物质等制成的. 奶

粉是营养价值极高的食品, 在人类的食物中占有重要地位, 尤其是婴幼儿配方奶粉, 是母乳的替代品. 奶粉中含有蛋白质、脂肪、乳糖和维生素等营养物质<sup>[1]</sup>, 其中蛋白质是奶粉的主要成分. 奶粉中的蛋白质又分为

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(No. 21103155)和浙江省重点科技创新团队项目(No. 2010R50028)资助

第一作者: 吴彬青(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. Email: 1099407934@qq.com

导师(通讯作者): 叶满萍(1980-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为光谱分析. Email: 276051346@qq.com

收稿日期: 2015-12-18; 录用日期: 2016-04-08

<http://www.photon.ac.cn>

酪蛋白和乳清蛋白,其中酪蛋白占蛋白质总量的80%。奶粉根据适用的年龄段可以分为婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉以及成人奶粉,不同年龄段的配方奶粉,其成分含量是不一样的。

在储藏过程或运输过程中,奶粉的基料易发生变化或相互作用,国晓炜<sup>[2]</sup>等通过 FT-IR 法研究了不同温度下牛奶中脂肪酸结构的变化,发现温度对牛奶中的不饱和脂肪酸结构有一定的影响。谷玲<sup>[3]</sup>等利用荧光光谱法研究了温度对液态牛奶的影响,发现温度变化会破坏牛奶中成分的结构。周睿<sup>[4]</sup>等利用红外光谱法研究了温度对奶粉蛋白质和脂肪二级结构的影响。有关荧光光谱技术研究温度对奶粉品质影响的研究报道非常少。

本文采用荧光光谱和荧光寿命技术<sup>[5-7]</sup>,考察温度对奶粉的荧光特征的影响。蛋白质是由多种氨基酸通过肽键缩合而成的高分子化合物,组成蛋白质的色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸能够发出荧光<sup>[8-9]</sup>。通过检测在不同温度下的奶粉和酪蛋白的荧光光谱和荧光寿命,探究温度对奶粉荧光特征的影响,为得出奶粉的最佳储藏温度和冲奶粉的最佳水温提供实验参考。

## 1 实验

### 1.1 仪器

日立 F-2700 荧光分光光度计 (Hitachi Fluorescence Spectrophotometer F-2700, HORIBAtcspc) 荧光寿命光谱仪、低温恒温槽、比色皿。

### 1.2 材料

婴儿配方奶粉(贝因美,购自超市),幼儿配方奶粉(贝因美,购自超市),成人普通奶粉(雀巢,购自超市),酪蛋白(分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司),维生素 B1、维生素 B2 和维生素 C(药片剂,湖北华中药业有限公司生产),乳糖(分析纯 AR,上海山浦化工有限公司)。

### 1.3 方法

婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉、酪蛋白、维生素 B1、维生素 B2、维生素 C 和乳糖均未进行任何处理,直接使用。进行实验时,将样品粉末装入特定的样品池的金属小凹槽中,盖上 11 mm×8 mm×0.9 mm 的石英片,样品厚度约 0.5 mm。样品池直接放在仪器的金属样品架中,通过旋钮调整凹槽的角度达到最佳效果。样品架与恒温低温槽相连,直接用水浴控制样品的温度,温度控制范围在 5~90℃。

#### 1.3.1 荧光光谱的测定

分别取适量婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉、酪蛋白、维生素 B1、维生素 B2、维生素 C 和乳糖粉末装入样品池中,激发波长选择 289 nm,发射波长范围为 300~550 nm,激发和发射狭缝都是 2.5 mm,光

电倍增管电压为 400 V,扫描速度为 1500 nm/min。测定时,温度从 5℃ 升高至 90℃,间隔 5℃,待温度稳定 10 min 后用日立 F-2700 荧光分光光度计测得荧光光谱。

#### 1.3.2 荧光寿命的测定

激发光源是波长为 256 nm 的 NanoLED 脉冲光源,脉宽 1 ns,狭缝宽度为 6 mm,最大光子数为 5 000,测量波长是 330 nm。分别取适量婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉和酪蛋白粉末装入样品池中,将温度从 5℃ 升高至 90℃,间隔 5℃,待温度稳定 10 min 后,用 HORIBAtcspc 荧光寿命光谱仪测得奶粉和酪蛋白的荧光寿命。

## 2 结果与讨论

### 2.1 几种配方奶粉的荧光光谱

图 1(a) 是婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉在 25℃ 时测得的荧光光谱,图 1(b) 是酪蛋白在 25℃ 时测得的荧光光谱,激发波长 289 nm,发射波长范围为 300~550 nm。曲线 a 是婴儿配方奶粉(婴儿)的荧光光谱,曲线 b 是幼儿配方奶粉(幼儿)的荧光光谱,曲线 c 是成人奶粉(成人)的荧光光谱,曲线 d 是酪蛋白的荧光光谱。

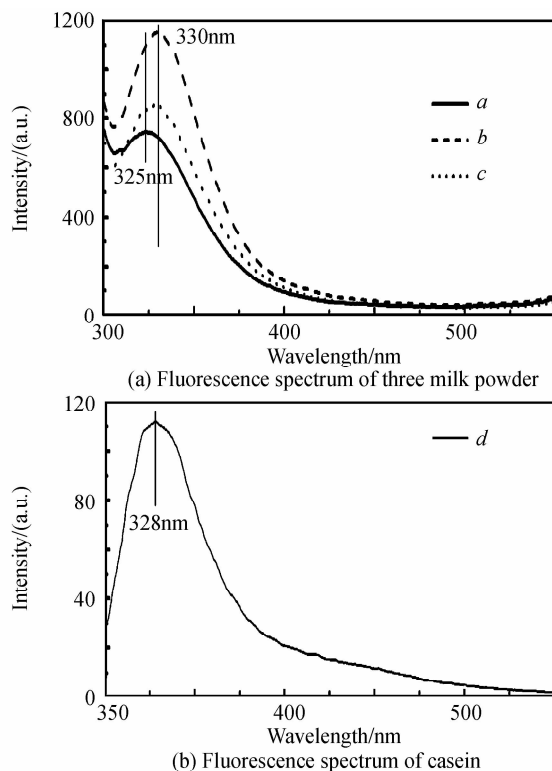


图 1 在室温下的荧光光谱

Fig. 1 Fluorescence spectrum at room temperature (a—infant, b—toddler, c—adult, d—casein)

从图 1 中可以看出,幼儿和成人的最大荧光峰位置在 330 nm 处,而婴儿的荧光峰位置在 325 nm 处。根

据这个实验结果发现,所用的奶粉样品婴儿的荧光峰位置相对幼儿和成人的荧光峰发生了蓝移,蓝移了 5 nm. 查阅资料发现,可能是因为婴儿配方奶粉为了更加接近母乳的成分,去除了部分酪蛋白,增加了乳清蛋白<sup>[10]</sup>. 不同的蛋白质含有不同的氨基酸,荧光峰位置会发生变化. 图 1 中曲线 *d* 酪蛋白的荧光峰位在 328 nm 处,与婴幼儿奶粉和成人奶粉的荧光峰位比较接近,荧光峰的峰宽,峰形都很相似. 初步判断奶粉的荧光主要来自于酪蛋白.

为了进一步说明奶粉荧光的来源,分别测量了室温下维生素 B1、维生素 B2、维生素 C 和乳糖的荧光光

谱,激发波长选择 289 nm,发射波长范围为 300 ~ 550 nm,结果如图 2. 图 2(a) 曲线是维生素 B2 的荧光光谱,荧光峰位在 524 nm 处,峰很宽. 图 2(b) 曲线是维生素 B1 的荧光光谱. 图 2(c) 曲线是维生素 C 的荧光光谱,图 2(d) 曲线是乳糖的荧光光谱. 它们都在 300 ~ 500 nm 范围内有一个很宽而且倾斜的荧光背景,并且在 337 nm 处有一个很尖的峰. 这四种样品的荧光峰与奶粉的荧光峰明显不同,可以推断它们对奶粉的荧光贡献很小. 综上所述,可以确定奶粉中的荧光是主要来自酪蛋白的贡献,其他成分贡献很小.

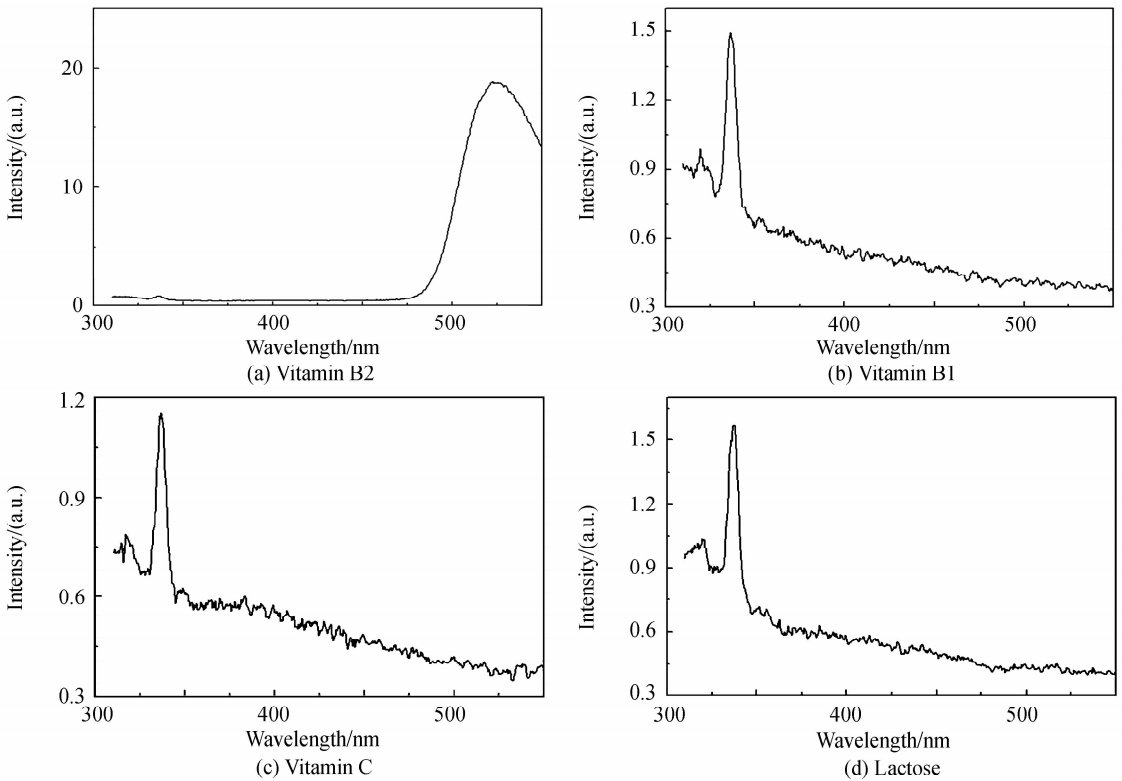


图 2 维生素 B1, 维生素 B2, 维生素 C 和乳糖的荧光光谱图(激发光波长为 289 nm)

Fig. 2 Fluorescence spectra of vitamin B1, vitamin B2, vitamin C and lactose (excitation wavelength of 289 nm)

## 2.2 温度对奶粉荧光光谱的影响

为了探究温度对奶粉的影响,分别测量了婴儿、幼儿、成人奶粉和酪蛋白在 5 ~ 90 °C, 间隔 5 °C 的温度下的荧光光谱,激发波长为 289 nm,发射波长范围为 300 ~ 550 nm. 以幼儿奶粉为例,如图 3 所示,随着温度的增加,幼儿奶粉的荧光强度逐渐下降. 婴儿奶粉,成人奶粉和酪蛋白的荧光强度也逐渐下降,图未给出. 为了更好地观察温度对奶粉蛋白质荧光光谱的影响,取不同温度下波长在 330 nm 处的荧光强度,绘制温度与荧光强度的关系曲线,如图 4. 曲线 *a* 是酪蛋白的关系曲线,曲线 *b* 是幼儿奶粉的关系曲线,曲线 *c* 是成人奶粉的关系曲线,曲线 *d* 是婴儿奶粉关系曲线.

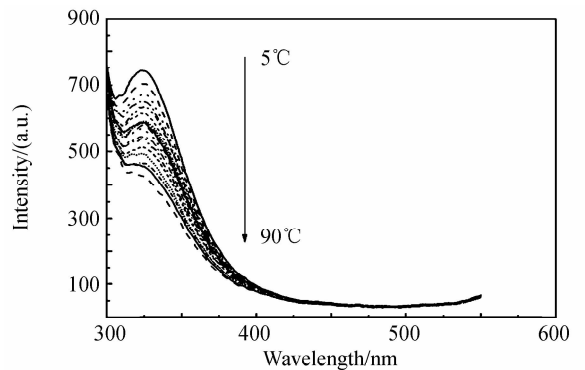


图 3 幼儿奶粉在不同温度下的荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of toddler formula milk powder at different temperatures

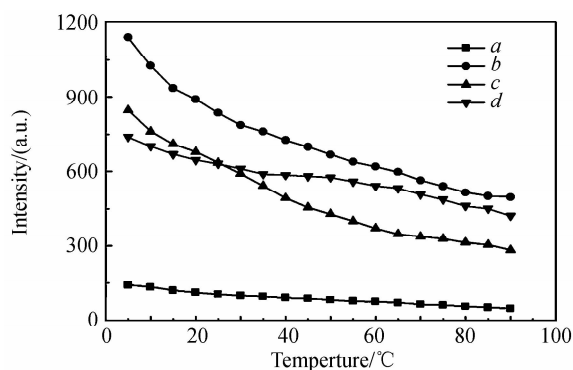


图4 温度和荧光强度的关系

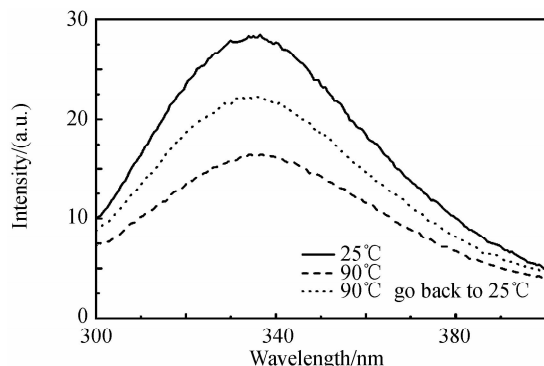
Fig. 4 Relationships between fluorescence intensity and temperature (a—casein, b—toddler, c—adult, d—infant)

从图中可以得出,随着温度的增加,酪蛋白的荧光强度呈现缓慢下降的趋势,下降比较均匀;幼儿奶粉在5~15°C之间,奶粉的荧光强度急剧减小,在20~90°C之间,荧光强度随温度增加呈较缓下降;成人奶粉的荧光强度随着温度的增加,基本呈均匀下降;婴儿奶粉在5~30°C和60~90°C之间,随着温度增加,奶粉荧光强度缓慢减小,在30~60°C之间,温度增加,奶粉的荧光强度基本不变.从这个实验中发现,幼儿奶粉和成人奶粉的荧光强度随温度变化的趋势基本相同,而婴儿奶粉的荧光强度随温度的变化却不一样,出现了一个相对变化缓慢的平台区,原因可能是婴儿奶粉中去除了部分酪蛋白,增加了乳清蛋白,乳清蛋白的结构与酪蛋白的结构不同<sup>[11]</sup>,所以随温度的变化也不一样.酪蛋白的荧光强度随温度升高呈缓慢下降的趋势,下降的速度比奶粉的要缓.

温度升高主要会引起奶粉中蛋白质的变性<sup>[11]</sup>,可能的原因是破坏了蛋白质分子中的氢键.温度升高,氢键的断裂引起蛋白质变性,荧光基团的环境发生变化,表现为荧光强度减小.蛋白质中主要发荧光的物质是色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸,它们都是芳香族含氮的化合物.在氢键的作用下,这些芳香族含氮化合物的最低激发单重态可能是 $(\pi, \pi^*)$ 态和 $(n, \pi^*)$ 态,荧光强度相对较强.氢键断裂以后,最低激发单重态变成 $(n, \pi^*)$ 态,因而荧光减弱.

蛋白质是由多种氨基酸通过肽键构成的高分子化合物,蛋白质变性主要是蛋白质的二级结构和三级结构有了改变或遭到破坏<sup>[12]</sup>.如果变性条件剧烈持久,蛋白质的变性是不可逆的.但是如果变性条件不持久,这种变性作用是可逆的,说明蛋白质分子内部结构的变化不大.这时,如果除去变性因素,在适当条件下变性蛋白质可恢复其天然构象和生物活性.温度对荧光强度的影响:一是通过改变蛋白质的结构影响荧光强度,二通过影响荧光基团外转换活性影响荧光强度<sup>[13-14]</sup>.

将加热到90°C的酪蛋白自然冷却到25°C,与原来25°C时的荧光光谱比较,如图5.实验表明自然冷却的酪蛋白荧光强度小于原来25°C时的荧光强度,但是比90°C时的荧光强度要大,说明变性的蛋白质在冷却之后有一部分变化是可逆的<sup>[15]</sup>.

图5 90°C, 25°C和90°C冷却到25°C的酪蛋白的荧光光谱  
Fig. 5 Fluorescence spectra of casein at 90°C, 25°C and 90°C cooling to 25°C

### 2.3 温度对奶粉荧光寿命的影响

时间分辨荧光光谱<sup>[16]</sup>检测的是特定波长处荧光强度随时间变化的动态信息,不同分子的荧光寿命是不同的.获得数据用仪器自带的DAS6荧光衰减分析软件进行拟合,室温下幼儿奶粉的荧光寿命拟合结果如图6.采用的是双指数方程,即 $F(t) = A + B_1 \exp(-t/\tau_1) + B_2 \exp(-t/\tau_2)$ ,  $\tau_1, \tau_2$ 为荧光寿命,拟合效果从CHISQ值1.07可以判断,是符合双指数过程的.

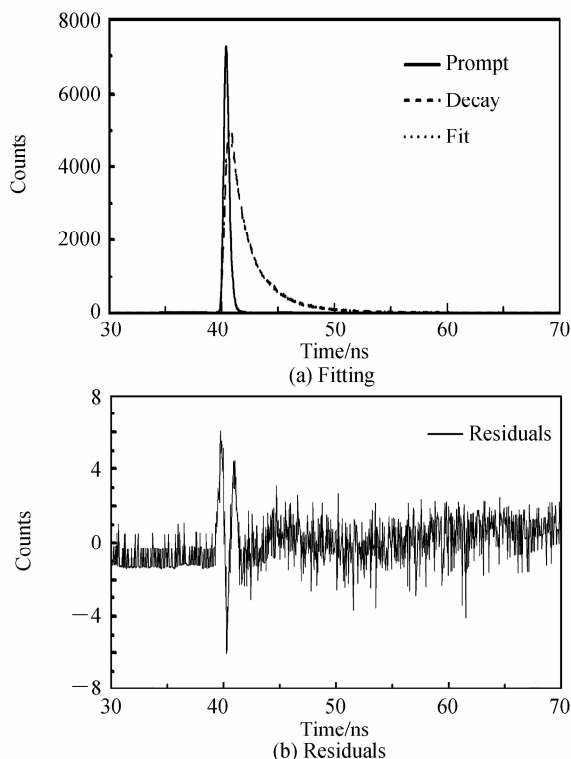
图6 婴儿奶粉在室温下的荧光寿命拟合曲线  
Fig. 6 Fluorescence lifetime fit of toddler formula milk powder at room temperature

图 6(a)是数据双指数拟合曲线,图 6(b)是拟合残差曲线.图 6 中横坐标为时间,单位为 ns,纵坐标为光子数. Prompt 曲线是石英片的散射曲线,作为仪器响应曲线,Decay 曲线是婴儿奶粉的荧光寿命衰减曲线,Fit 曲线是双指数拟合之后的婴儿奶粉的荧光寿命曲线,Residuals 是拟合之后残差曲线.拟合结果婴儿配方奶粉  $\tau_1, \tau_2$  分别是 1.85 ns 和 4.82 ns.

为了考察温度对奶粉荧光寿命的影响,分别测量了从 10~90℃,间隔 10℃的婴儿奶粉、幼儿奶粉、成人

奶粉及酪蛋白的荧光寿命,获得数据在 DAS6 荧光衰减分析软件中用双指数拟合,结果如表 1 和图 7,拟合的 CHISQ 值控制在 1 左右.图 7 中(a)是婴儿奶粉荧光寿命与温度的关系图,(b)是幼儿奶粉荧光寿命与温度关系图,(c)是成人奶粉荧光寿命与温度的关系图,(d)是酪蛋白荧光寿命与温度的关系图.表 1 列举了不同温度下婴儿奶粉、幼儿奶粉、成人奶粉和酪蛋白的荧光寿命.

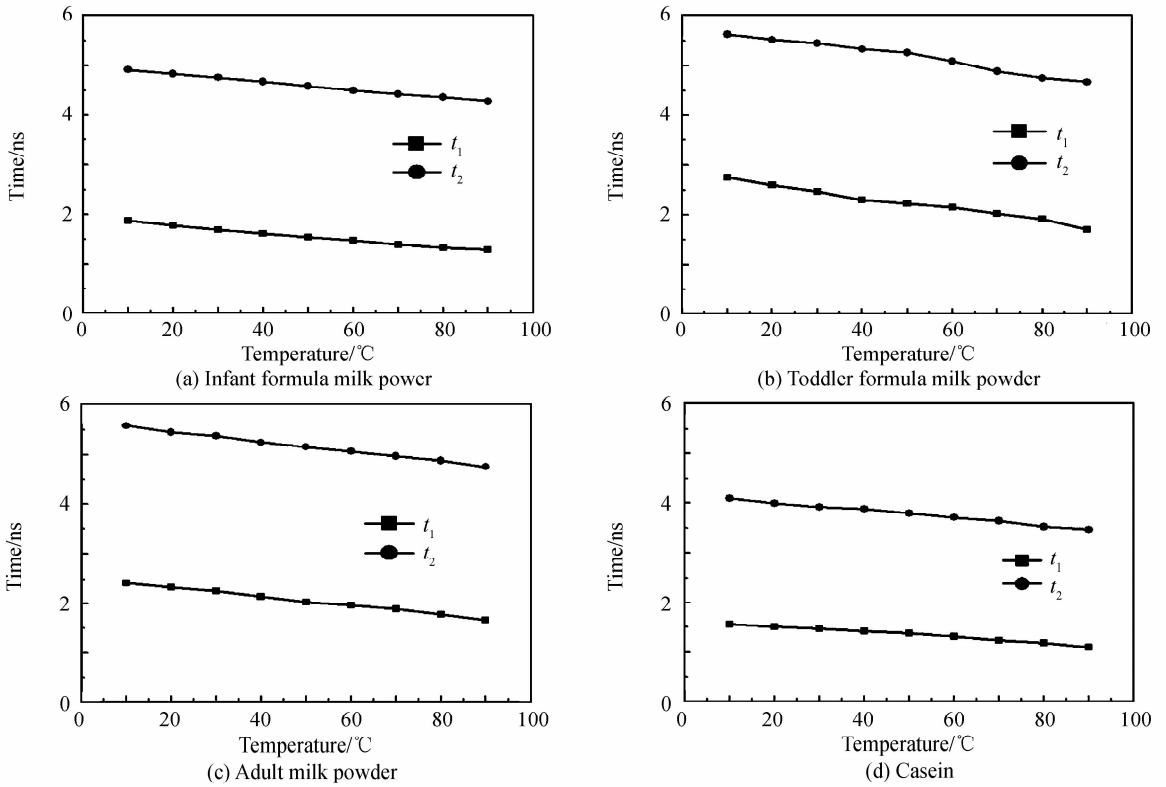


图 7 荧光寿命和温度的关系

Fig. 7 Relations of the fluorescence lifetime and temperature

表 1 婴儿奶粉、幼儿奶粉、成人奶粉及酪蛋白在不同温度下的荧光寿命

Table 1 Fluorescence lifetime of infant formula, toddler formula milk powder, adult milk powder and casein at different temperatures

Temperature/°C	Infant formula		Toddler formula		Adult milk powder		Casein	
	$\tau_1$ / ns	$\tau_2$ / ns	$\tau_1$ / ns	$\tau_2$ / ns	$\tau_1$ / ns	$\tau_2$ / ns	$\tau_1$ / ns	$\tau_2$ / ns
10	1.87	4.91	2.75	5.62	2.20	5.54	1.55	4.11
20	1.92	4.93	2.59	5.52	2.12	5.28	1.54	4.14
30	1.85	4.82	2.47	5.49	2.07	5.14	1.54	4.09
40	1.62	4.63	2.31	5.33	2.01	5.00	1.45	4.01
50	1.67	4.61	2.30	5.26	1.95	4.91	1.30	3.78
60	1.56	4.45	2.05	4.95	1.89	4.92	1.25	3.64
70	1.47	4.30	1.94	4.81	1.80	4.76	1.16	3.48
80	1.39	4.15	1.98	4.87	1.62	4.55	1.09	3.33
90	1.27	3.97	1.67	4.53	1.43	4.30	0.98	3.14

从此实验结果可知,在室温下婴儿配方奶粉的  $\tau_1, \tau_2$  分别是 1.85 ns 和 4.82 ns,幼儿配方奶粉的  $\tau_1, \tau_2$  分别是 2.47 ns 和 5.49 ns,成人普通奶粉的  $\tau_1, \tau_2$  分别是

2.07 ns 和 5.14 ns,酪蛋白的  $\tau_1, \tau_2$  分别是 1.54 ns 和 4.09 ns. 婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉和酪蛋白的荧光曲线在双指数拟合之后,都有  $\tau_1, \tau_2$  两

个寿命,这说明它们的成分中都至少含有两种发荧光的物质.由文献[17]可知,蛋白质中主要发荧光的物质是色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸,它们都是芳香族含氮的化合物,色氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸的荧光寿命分别为2.58 ns、3.21 ns、4.67 ns.根据氨基酸的荧光寿命,推断奶粉和酪蛋白中的这两种发荧光的物质是色氨酸和苯丙氨酸.进一步比较发现,酪蛋白的两个荧光寿命相比奶粉要小,说明奶粉中的其他辅料可能对酪蛋白的结构有影响.从图7中可以看出,随着温度的增加,奶粉和酪蛋白的两个荧光寿命都是逐渐减小的.表明荧光发色团与蛋白质的相互作用增强,因为发色团与蛋白质的相互作用主要是影响蛋白质和发色团分子内的内转换过程(包括无辐射弛豫过程).相互作用强了,内转换过程加快,荧光寿命因而缩短.

### 3 结论

采用荧光光谱与荧光寿命技术,考察温度对奶粉荧光特征的影响.研究结果表明:

1)通过测量婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉、酪蛋白、乳糖和维生素的荧光光谱,比较分析可以确定奶粉荧光是主要来自酪蛋白的贡献,其他成分的贡献很小.

2)随着温度的增加,奶粉和酪蛋白的荧光强度都是减小的.幼儿配方奶粉和成人普通奶粉的荧光强度随温度变化的趋势基本相同,而婴儿配方奶粉的荧光强度随温度的变化却不一样,出现了一个相对变化缓慢的平台区,原因可能是婴儿配方奶粉中酪蛋白含量较少.酪蛋白的荧光强度随温度升高呈缓慢下降的趋势,下降的速度比奶粉的要缓.

3)酪蛋白加热到90℃然后冷却到25℃,荧光强度部分恢复,说明一部分蛋白质的结构变化或者荧光基团的活性变化是可逆的.

4)婴儿配方奶粉、幼儿配方奶粉、成人普通奶粉和酪蛋白的荧光曲线在双指数拟合之后,都有 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 两个寿命,这两个寿命可能来自于色氨酸和苯丙氨酸.随着温度的增加,奶粉和酪蛋白的两个荧光寿命都是逐渐减小的.

5)奶粉中的荧光主要来自酪蛋白的贡献,荧光强度的大小也主要取决于酪蛋白的多少,温度越高,奶粉的荧光强度越小,说明在升温的过程中部分酪蛋白发生了变性,所以在贮藏和运输过程中最好是采用冷藏运输的办法,尤其是在夏天避免高温直射.奶粉的冲调也最好是采用常温冲调,避免用沸水直接冲调.

#### 参考文献

[1] GU Chun-feng, LAN Xiu-feng, YU Yin-shan, *et al.* Research on influencing factors of milk aqueous solution fluorescence spectrum[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(03): 130-2012.

顾春峰, 兰秀凤, 于银山, 等. 牛奶水溶液荧光光谱影响因素的研究[J]. *激光与光电子学进展* 2012, **49**(03):130-135.

[2] GUO Xiao-wei, LI Li-hua, ZHANG Jing-sheng, *et al.* Effect of temperature on structure of fatty acids in milk by FT-IR[J]. *Food Research and Development*, 2012, **33**(05):178-180.

国晓伟, 李丽华, 张金生, 等. FT-IR法测定温度对牛奶脂肪酸结构的影响[J]. *食品研究与开发*, 2012, **33**(05):178-180.

[3] GU Ling. Based on the fluorescence spectroscopy of composition analysis of milk[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.

谷玲. 基于荧光光谱技术对牛奶的成分分析[D]. 无锡: 江南大学, 2011.

[4] ZHOU Rui. Temperature effect on FT-MIR spectra of milk powder products [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014.

周睿. 温度对奶粉类食品红外光谱的影响研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.

[5] DING Zhi-qun, WANG Jin-xia, ZHAO Hong-xia, *et al.* Rapid analysing edible oil using three oimentional fluorescence spectrascopy[J]. *Acta Photonice Sinica*, 2015, **44**(3): 125-129.

丁志群, 王金霞, 赵红霞, 等. 基于三维荧光光谱技术的食用油快速分析研究[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3):125-129.

[6] LAN Xiu-feng, GU Chun-feng, YU Yin-shan, *et al.* Research on polarized three-dimensional fluorescence spectra of milk solution[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(12): 3281-3284.

兰秀凤, 顾春峰, 于银山, 等. 牛奶水溶液的偏振三维荧光光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(12):3281-3284.

[7] LIU Bao-sheng, ZHANG Li-hui, LI Zhi-yun, *et al.* Studies on the interaction mechanism between moxifloxacin and ctDNA by fluorescence spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(3):372-376.

刘保生, 张丽惠, 李志云, 等. 荧光光谱法研究拜复乐与小牛胸腺DNA的作用机理[J]. *发光学报*, 2014, **35**(3):372-376.

[8] WANG Shou-ye, XU Xiao-long, LIU Qing-liang, *et al.* The application of fluorescence spectroscopy in the study on protein conformation [J]. *Progress in Chemistry*, 2001, **13**(4): 257-260.

王守业, 徐小龙, 刘清亮, 等. 荧光光谱在蛋白质分子构象研究中的应用[J]. *化学进展*, 2001, **13**(04):257-260.

[9] LU Cong-wen, LAN Xiu-feng, ZHANG Lin, *et al.* Interaction between ebastine and bovine serum albumin by fluorescence spectroscopy[J]. *Acta Photonice Sinica*, 2015, **44**(10): 1030004.

陆从文, 兰秀凤, 张林, 等. 依巴斯汀与牛血清蛋白相互作用的荧光光谱研究[J]. *光子学报*, 2015, **44**(10):1030004.

[10] GU Chun-feng, LAN Xiu-feng, YU Yinshan, *et al.* Fluorescence spectrum of milk solution[J]. *Acta Photonice Sinica*, 2012, **41**(01): 107-111.

顾春峰, 兰秀凤, 于银山, 等. 牛奶水溶液的荧光光谱研究[J]. *光子学报*, 2012, **41**(01):107-111.

[11] CHANG Min. Study on mechanism and influence factors of optical measurement of milk quality [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.

常敏. 牛奶质量光学检测的作用机理及影响因素研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.

[12] LI Hui. The status of protein and trace elements in infant formula from shenzhen markets [J]. *Modern Preventive Medicine*, 2004, **31**(4): 572-574.

李慧. 某市市售婴儿配方奶粉中蛋白质和微量元素的监测及评价[J]. *现代预防医学*, 2004, **31**(04):572-574.

- [13] HOU Dong-yan, HUI Rui-hua, LI Tie-chun, *et al.* Determination of p rotein in milk powders[J]. *Journal of Anshan Normal University*, 2004 ,**6**(04): 37-39.  
侯冬岩, 回瑞华, 李铁纯, 等. 奶粉中蛋白质含量的光谱分析[J]. 鞍山师范学院学报, 2004,**6**(04):37-39.
- [14] JIA Xu-peng. Quality analysis study of key nutrients in infant milk powder[D]. Suzhou:Suzhou University,2014.  
贾晓旭. 婴幼儿奶粉关键营养素分析方法研究[D]. 苏州:苏州大学,2014.
- [15] LI Dong-xu, XU Xiao, LI Na, *et al.* Time-resolved fluorescence technology and fluorescence lifetime measurement[J]. *University Chemistry*, 2008,**23**(04) : 1-11.  
李东旭, 许潇, 李娜, 等. 时间分辨荧光技术与荧光寿命测量[J]. 大学化学, 2008,**23**(04):1-11.
- [16] LIN Yan-jin, HUANG Yan-tang, WU Jin-shu, *et al.* Relationship between rare earth fluorescence characteristic and temperature[J]. *Acta Photonice Sinica* , 2016, **45**(01): 0116002.  
林燕金, 黄衍堂, 吴锦树, 等. 稀土荧光特性与温度关系[J]. 光子学报, 2016,**45**(01):0116002.
- [17] ZHEN Xiao, YE Man-ping, LI Yi. Fluorescence spectra of Pd ( II)-BSA(bovine serum album) solvent systems[J]. *Journal of China Jiliang University*, 2015, **26**(01) : 60-64.  
郑泉, 叶满萍, 李裔. Pd( II)与牛血清白蛋白相互作用的荧光光谱研究[J]. 中国计量学院学报, 2015,**26**(01):60-64.