

文章编号: 0253-2239(2008)11-2237-06

苋菜红与胭脂红荧光光谱的比较分析

史爱敏¹ 朱拓² 顾恩东¹ 张银志³ 刘周忆¹

(¹ 江南大学通信与控制工程学院, 江苏 无锡 214122; ² 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122)

³ 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122

摘要 测量了胭脂红以及其同份异构体苋菜红的荧光光谱。胭脂红标准溶液在 220~400 nm 不同波长激发光下, 分别在 420 nm, 530 nm, 635 nm, 687 nm 波长处产生了四个荧光峰, 苋菜红在 220~430 nm 不同波长激发光下, 在 654 nm 处产生了一个明显荧光峰。胭脂红产生四个荧光峰是由于其具有四种可以发射荧光的荧光团, 为了研究这四种荧光团在不同激发光激励下产生荧光的敏感程度, 以及找到胭脂红和苋菜红这两种色素产生荧光的基团之间的联系。利用荧光强度的加和性原则, 分别对这两种物质的荧光强度进行了理论计算。认为苋菜红的荧光峰对应于胭脂红的第三个荧光峰, 根据此特点, 初步分析了四种荧光团对这两种色素在荧光发射过程中的影响程度, 同时还从结构上分析了两种色素荧光光谱差异的根本原因。

关键词 荧光光谱; 荧光团; 荧光峰; 苋菜红; 胭脂红

中图分类号 O657.39 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082811.2237

Study on Fluorescent Spectra of Amaranth and Ponceau 4R

Shi Aimin¹ Zhu Tuo² Gu Endong¹ Zhang Yinzhì³ Liu Zhouyi¹

¹ School of Communication and Control Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

² School of Science, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

³ State Key Laboratory of Food Science and Technology, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract The fluorescent spectra of amaranth and ponceau-4R have been measured by a fluorescence spectrophotometer. The result shows that ponceau 4R excited at 220~400 nm has four obvious fluorescence peaks at 420 nm, 530 nm, 635 nm and 637 nm respectively. Under the same condition, amaranth excited at 220~430 nm has only one obvious fluorescent peak at 654 nm. It is considered that the ponceau-4R's four obvious fluorescence peaks are resulted from four fluorescent clusters. In order to find the sensitivity of every fluorescent cluster when excited by different-wavelength light, and the relation between the two pigments, the intensity of fluorescent peaks was calculated by matrix operation based on the principle of additive property of fluorescent intensity. The fluorescent peak of amaranth is found to be homologous to the third fluorescent peak of ponceau 4R. Based on this, the influence of four fluorescent clusters on two pigments' fluorescent spectra was discussed. The origin of different fluorescence spectra was studied from the difference in the structure.

Key words fluorescent spectra; fluorescent cluster; fluorescent peak; amaranth; ponceau 4R

1 引 言

人们喜欢向食品中添加色素,使其色泽更诱人。研究报告指出,几乎所有的合成色素都不能向人体提供营养物质,某些合成色素甚至会危害人体健康。

因此近年来国内外关于食用合成色素的研究越来越多,目前报道的食品色素测量方法有分光光度法、紫外-可见吸收光谱法、微柱法、极谱法、高效液

相色谱法(HPLC)等。如刘慧等利用连续波长紫外分光光度法对合成食用色素混合体系同时定量测定,准确度较高,相对误差在 2.60% 内^[1]。任艳平等利用单一底液连续直接测定色素的示波极谱法对饮料中苋菜红、日落黄、柠檬黄、胭脂红、亮蓝和糖精钠进行回收率试验和平行试验,结果回收率在 96%~103% 之间,标准曲线的相关系数在 0.9993~

收稿日期: 2008-01-14; 收到修改稿日期: 2008-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(20671044)资助课题。

作者简介: 史爱敏(1978-),女,硕士研究生,主要从事食品色素荧光光谱方面的研究。E-mail: ss.08@163.com

导师简介: 朱拓(1957-),教授,博士生导师,主要从事现代光学的研究与教学工作。

E-mail: Tzhu@jiangnan.edu.cn(通信联系人)

0.9998 之间^[2]。

但这些研究多为对食用色素进行简单的定量测量上,而对于涉及色素分子结构的光谱特性,尤其是荧光光谱方面的研究却很少见。如何在保证食品色泽艳丽的同时更保证食品的安全质量,需要深入研究色素的性质及生理功能,因此必须进一步研究其内部结构。

本文研究了在食品中最常使用的苋菜红和胭脂红这两种色素的荧光光谱,分析了其荧光光谱的特性,同时对这两种色素中可以发射荧光的荧光团的荧光强度进行了数学计算。胭脂红和苋菜红色素均是食品中最常使用的食用合成色素,国家标准对它们在食品中的使用剂量以及使用范围都有严格规定。

2 实验准备和方法

2.1 实验装置

采用美国 Roper Scientific 公司的 SP-2558 多功能光谱测量系统获得荧光光谱。所使用的光源为氙灯,样品所发射的荧光经单色仪系统再由 CCD 采集信号。激发单色仪系统中的光栅为 1200 line/mm 的闪耀光栅(闪耀波长为 300 nm),发射单色仪中用 150 line/mm 的光栅(闪耀波长为 500 nm)。装置如图 1 所示。

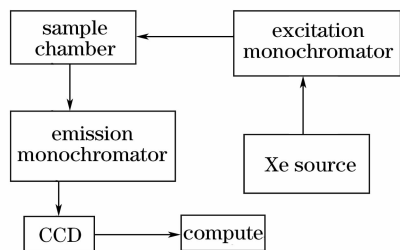


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

2.2 试剂

实验中使用苋菜红和胭脂红为国家标准物质中心生产标准物质,浓度均为 0.5 mg/ml。

表 1 苋菜红不同激发光波长对应荧光峰荧光相对强度

Table 1 Intensities of the fluorescent of amaranth peaks excited by different-wavelength light

Exciting light /nm	340	350	360	370	380	390	400	410	420	430
Intensity / (a. u.)	81	311	492	491	491	491	449	377	311	233

3.2 胭脂红溶液荧光光谱图

如图 3 所示,胭脂红具有四个明显的荧光峰,分别在 420 nm, 530 nm, 635 nm, 687 nm 波长处。这四个荧光峰在不同激发光激励下的荧光相对强度列于

2.3 实验方法

使用美国 Roper Scientific 公司的 SP-2558 多功能光谱测量系统,具体方法是,将试样盛于本身激发不出荧光的石英比色皿中,置于光谱测量系统样品室中,由氙灯通过激发单色仪获得所选定的不同波长激发光,每隔 10 nm 照射一次,激励试样,产生的荧光通过发射单色仪由 CCD 采集,扫描时间为 10 s,实时输入计算机,测得光谱图。

3 实验结果

3.1 苋菜红标准溶液的荧光光谱

苋菜红分子具有共轭结构,存在共轭的 $\pi \rightarrow \pi^*$ 跃迁^[3,4],同时具有平面刚性结构,预示着其可能具有较好的荧光性能^[5,6]。实验测得的荧光光谱如图 2 所示。可以看出,在 220~330 nm 激发光波长下,苋菜红标准水溶液的荧光相对强度比较小,变化也较缓慢,峰值比较模糊,没有明显的波峰。而随着激励光波长的增大,在 330 nm 激发光以后,荧光相对强度增强比较快,出现了明显的荧光峰,在 360 nm 激发光波长,荧光相对强度达到最大,且荧光峰中心波长基本保持不变,一直在 654 nm 附近。不同激发光对应荧光峰相对强度列于表 1 中。

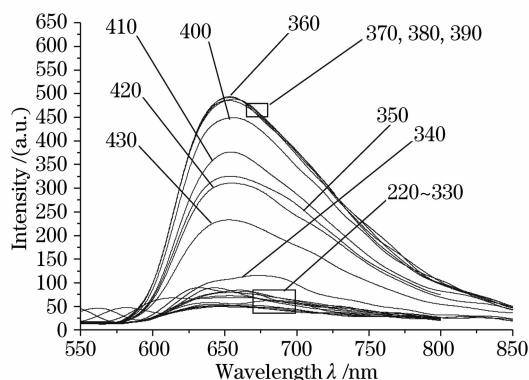


图 2 不同激发光波长苋菜红标准溶液荧光光谱

Fig. 2 Fluorescence spectra of amaranth excited by different-wavelength light

表 2 中。比较图 2 和图 3,可以清楚的看出这两种物质的荧光光谱差异显著,苋菜红只有一个明显的荧光峰,而胭脂红却有四个明显的荧光峰,利用此差异,可以很方便地区分这两种色素物质。

表 2 胭脂红各荧光峰对应不同激发光波长荧光相对强度

Table 2 Intensities of fluorescent spectral peaks excited by different-wavelength light of ponceau 4R

Exciting wavelength /nm	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330
420 nm relative intensity	102	206	229	168	102	77	69	69	79	97	113	96
Exciting wavelength /nm	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330
530 nm relative intensity	136	198	226	207	203	215	199	159	130	111	99	86
Exciting wavelength /nm	310	320	330	340	350	360	370	380	390	400		
635 nm relative intensity	136	198	226	207	203	215	199	159	130	111		
Exciting wavelength /nm	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	
687 nm relative intensity	150	236	306	382	500	546	462	303	189	125	86	

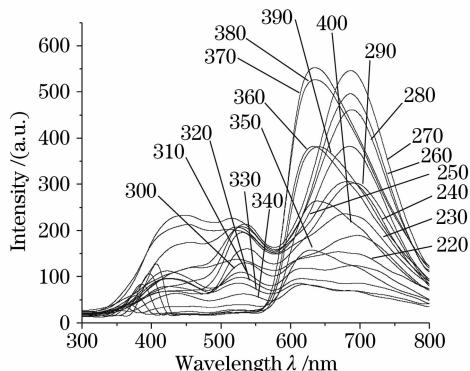


图 3 不同激发光波长激发的胭脂红标准溶液荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of ponceau 4R excited by different-wavelength light

4 结果分析与讨论

4.1 分析

胭脂红与苋菜红的分子结构式分别如图 4 和图 5 所示。从结构式可以看出,两者的明显区别只是一 SO_3Na 的取代位置不同,因此荧光光谱的差异主要就是由 $-\text{SO}_3\text{Na}$ 引起的,在胭脂红分子中, $-\text{SO}_3\text{Na}$ 与 $-\text{OH}$ 处于萘环的对位,增强了胭脂红分子的共轭程度,其原子处在同一平面上,萘基虽然能在平面外振动,但电子振荡完全在该平面,不能引起横的振动,因此胭脂红具有强的吸光能力,并发出强荧光;而苋菜红分子中, $-\text{SO}_3\text{Na}$ 与 $-\text{OH}$ 在萘环上为邻位取代,其共轭程度没有胭脂红高,其原子不在同一平面,

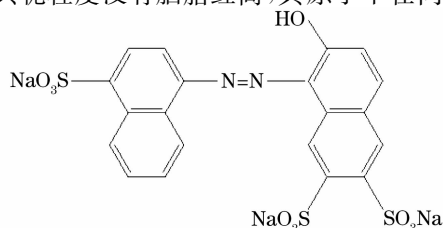


图 4 胭脂红结构式

Fig. 4 Structural formula of ponceau 4R

容易发生偶合作用并将能量用在振动上^[6],因此荧光相对于胭脂红较弱。

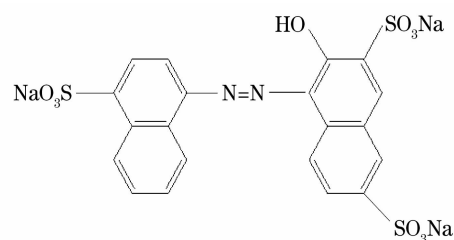


图 5 苋菜红结构式

Fig. 5 Structural formula of amaranth

胭脂红可以产生四个明显的荧光峰,根据荧光发射的条件分析,胭脂红溶液中应有能够发射荧光的荧光团,而一种荧光团的荧光光谱一般只有一个荧光峰^[7~11],因此胭脂红溶液中应有四种可以发射荧光的荧光团。苋菜红是胭脂红的同份异构体,具有和胭脂红一样的取代基团,因此认为苋菜红中也应象胭脂红一样有四种可以发射荧光的荧光团。但从两者的荧光光谱图上,很难发现两者之间的联系。且胭脂红的四个荧光峰相互干扰,也很难对不同荧光团进行区分。虽然由于不同发光结构的叠加,实验观测到的光谱峰值位置有可能并不对应每个荧光团的峰值,但每个荧光峰都是四个荧光团共同影响下的结果,在相互竞争的过程中,总有一个处于优势地位,从而使得这个荧光峰能大体反映出处于优势地位的荧光团的性质。由此,利用荧光强度加和性原则^[12,13],对各荧光峰处的荧光强度进行了数学计算,以期能够了解各荧光团的发光性质。

4.2 基本公式

荧光物质稀溶液的荧光强度 I 与其荧光量子产率 ϕ 及该入射光强度 I_0 相关^[14,15]:

$$I = \phi I_0 \epsilon c, \quad (1)$$

式中 ϵ 为该物质的摩尔吸光系数, c 为物质的浓度。

4.3 胭脂红中四个荧光峰荧光强度讨论

根据(1)式,胭脂红溶液的总荧光强度为

$$I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 I_0 \epsilon_1 c_1 \\ \phi_2 I_0 \epsilon_2 c_2 \\ \phi_3 I_0 \epsilon_3 c_3 \\ \phi_4 I_0 \epsilon_4 c_4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 为胭脂红溶液中四个荧光峰的荧光量子效率, c_1, c_2, c_3, c_4 为荧光发射基团的含量, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ 为荧光发射基团摩尔吸光系数。

为保证荧光谱有最大信号强度响应且稳定,即分别选取能够产生最大荧光强度的激发波长作为参考点,对各荧光峰荧光强度进行表征,由于胭脂红 420 nm 和 530 nm 处的荧光峰在 240 nm 激励下荧

光相对强度达到最大,我们另选取一激发波长 320 nm 为参考点,即分别选取激发波长 240 nm, 270 nm, 320 nm, 370 nm 为参考点,对四个荧光峰值处的荧光强度进行表示,以荧光中心波长在 420 nm 处的第一个荧光峰为例,其发射荧光主要是由于吸收 240 nm 的激发光所致,同时也有一部分是吸收了波长为 270 nm, 320 nm 和 370 nm 的激发光引起的,用 $\phi_1^{240}, \phi_1^{270}, \phi_1^{320}, \phi_1^{370}$ 分别表示其吸收这四种入射光从而发射荧光的量子产率,同理,其他的三个荧光峰也根据此原则,从(2)式可以得出

$$I = \begin{bmatrix} I_1^{420} \\ I_2^{530} \\ I_3^{635} \\ I_4^{687} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1^{240} I_0 \epsilon_1^{240} c_1 & \phi_1^{270} I_0 \epsilon_1^{270} c_1 & \phi_1^{320} I_0 \epsilon_1^{320} c_1 & \phi_1^{370} I_0 \epsilon_1^{370} c_1 \\ \phi_2^{240} I_0 \epsilon_2^{240} c_2 & \phi_2^{270} I_0 \epsilon_2^{270} c_2 & \phi_2^{320} I_0 \epsilon_2^{320} c_2 & \phi_2^{370} I_0 \epsilon_2^{370} c_2 \\ \phi_3^{240} I_0 \epsilon_3^{240} c_3 & \phi_3^{270} I_0 \epsilon_3^{270} c_3 & \phi_3^{320} I_0 \epsilon_3^{320} c_3 & \phi_3^{370} I_0 \epsilon_3^{370} c_3 \\ \phi_4^{240} I_0 \epsilon_4^{240} c_4 & \phi_4^{270} I_0 \epsilon_4^{270} c_4 & \phi_4^{320} I_0 \epsilon_4^{320} c_4 & \phi_4^{370} I_0 \epsilon_4^{370} c_4 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} \phi_1^{240} & \phi_1^{270} & \phi_1^{320} & \phi_1^{370} \\ \phi_2^{240} & \phi_2^{270} & \phi_2^{320} & \phi_2^{370} \\ \phi_3^{240} & \phi_3^{270} & \phi_3^{320} & \phi_3^{370} \\ \phi_4^{240} & \phi_4^{270} & \phi_4^{320} & \phi_4^{370} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1^{240} c_1 & \epsilon_2^{240} c_2 & \epsilon_3^{240} c_3 & \epsilon_4^{240} c_4 \\ \epsilon_1^{270} c_1 & \epsilon_2^{270} c_2 & \epsilon_3^{270} c_3 & \epsilon_4^{270} c_4 \\ \epsilon_1^{320} c_1 & \epsilon_2^{320} c_2 & \epsilon_3^{320} c_3 & \epsilon_4^{320} c_4 \\ \epsilon_1^{370} c_1 & \epsilon_2^{370} c_2 & \epsilon_3^{370} c_3 & \epsilon_4^{370} c_4 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

然而,从图 3 可以看出,第一个荧光峰在 370 nm 激发光下,荧光效率为零,而从谱峰的相对强度可以看出,吸收 240 nm 激发光产生的量子效率最大,吸收 270 nm 和 320 nm 激发光产生的荧光量子效率分别为吸收 240 nm 激发光产生量子效率的 1/3 和 1/2。其它三个荧光峰也根据这种方法计算,得出

$$I = I_0 \begin{bmatrix} \phi_1^{240} & \phi_1^{270} & \phi_1^{320} & 0 \\ \phi_2^{240} & \phi_2^{270} & \phi_2^{320} & 0 \\ 0 & 0 & \phi_3^{320} & \phi_3^{370} \\ \phi_4^{240} & \phi_4^{270} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1^{240} c_1 & \epsilon_2^{240} c_2 & \epsilon_3^{240} c_3 & \epsilon_4^{240} c_4 \\ \epsilon_1^{270} c_1 & \epsilon_2^{270} c_2 & \epsilon_3^{270} c_3 & \epsilon_4^{270} c_4 \\ \epsilon_1^{320} c_1 & \epsilon_2^{320} c_2 & \epsilon_3^{320} c_3 & \epsilon_4^{320} c_4 \\ \epsilon_1^{370} c_1 & \epsilon_2^{370} c_2 & \epsilon_3^{370} c_3 & \epsilon_4^{370} c_4 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$I = I_0 \begin{bmatrix} \phi_1^{240} & \phi_1^{240}/3 & \phi_1^{240}/2 & 0 \\ \phi_2^{240} & \phi_2^{240} & \phi_2^{240}/2 & 0 \\ 0 & 0 & \phi_3^{370}/3 & \phi_3^{370} \\ \phi_4^{270}/2 & \phi_4^{270} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_1^{240} c_1 & \epsilon_2^{240} c_2 & \epsilon_3^{240} c_3 & \epsilon_4^{240} c_4 \\ \epsilon_1^{270} c_1 & \epsilon_2^{270} c_2 & \epsilon_3^{270} c_3 & \epsilon_4^{270} c_4 \\ \epsilon_1^{320} c_1 & \epsilon_2^{320} c_2 & \epsilon_3^{320} c_3 & \epsilon_4^{320} c_4 \\ \epsilon_1^{370} c_1 & \epsilon_2^{370} c_2 & \epsilon_3^{370} c_3 & \epsilon_4^{370} c_4 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

则各荧光峰处的荧光强度分别为

$$I_1^{420} = 6I_0 \phi_1^{240} c_1 \begin{bmatrix} \epsilon_1^{240} \\ \epsilon_1^{270} \\ \epsilon_1^{320} \\ \epsilon_1^{370} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$I_3^{635} = 5I_0 \phi_3^{370} c_3 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_3^{240} \\ \epsilon_3^{270} \\ \epsilon_3^{320} \\ \epsilon_3^{370} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$I_2^{530} = 2I_0 \phi_2^{240} c_2 \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_2^{240} \\ \epsilon_2^{270} \\ \epsilon_2^{320} \\ \epsilon_2^{370} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$I_4^{687} = 2I_0 \phi_4^{270} c_4 \begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_4^{240} \\ \epsilon_4^{270} \\ \epsilon_4^{320} \\ \epsilon_4^{370} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

可以看出,胭脂红中的四个荧光峰对不同的入射光敏感程度不同,第一、二个荧光峰主要是吸收

240 nm 的入射光从而引起荧光发射的,第三个荧光峰对 370 nm 入射光最为敏感,在 370 nm 的入射光激发下,荧光效率最大;第四种荧光峰在 270 nm 激发光下,荧光效率最大。

4.4 苋菜红中荧光峰荧光强度讨论

为了更好地与胭脂红相对比,仍旧选取 240 nm, 270 nm, 320 nm, 370 nm 四个激发波长为参考点,计算苋菜红 654 nm 处荧光峰的荧光强度

$$I_{654} = I_0 c_3 \begin{bmatrix} \phi^{240} & \phi^{270} & \phi^{320} & \phi^{370} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^{240} \\ \epsilon^{270} \\ \epsilon^{320} \\ \epsilon^{370} \end{bmatrix} = I_0 c_3 \begin{bmatrix} \frac{1}{10}\phi^{370} & \frac{1}{10}\phi^{370} & \frac{1}{5}\phi^{370} & \phi^{370} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^{240} \\ \epsilon^{270} \\ \epsilon^{320} \\ \epsilon^{370} \end{bmatrix}.$$

所以 $I_{654} = 10I_0\phi^{370}c_3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^{240} \\ \epsilon^{270} \\ \epsilon^{320} \\ \epsilon^{370} \end{bmatrix}.$ (10)

与(6)式、(7)式、(8)式、(9)式比较,可以发现,(10)式和(8)式比较接近,两者都是主要吸收 370 nm 左右的入射光,对 370 nm 左右的入射光比较敏感,且都是吸收 320 nm 入射光荧光量子产率的 5 倍,苋菜红虽然也吸收 240 nm 和 270 nm 的入射光,但其吸收很少,荧光量子产率很低,荧光峰不明显。这些特征都跟胭脂红中第三个荧光峰很接近,也就是说,苋菜红处于优势的荧光团和胭脂红中第三个荧光峰中处于优势影响地位的荧光团一样。因苋菜红只能观察到这一个荧光峰,也可以看出,第三种荧光团应该对这两种物质的荧光光谱性质影响最大。由于实验试剂均为水溶液,水分子作为氢键给予体,可以取代溶质分子的孤对电子形成氢键,会使的溶质分子的共轭程度减小,抑制了荧光的发射^[16,17]。在苋菜红中,其他三种荧光团的荧光特性都不明显,而只显示出荧光特性最强的第三种荧光体的荧光特性,这可能是由于其他三种荧光团与水分子形成氢键的能力较强,从而减小了荧光团的荧光量子产率,而第三种荧光团对于氢键作用应该还是比较不敏感,从而使其的荧光特性比较明显。

5 结 论

通过对胭脂红和苋菜红这两种合成色素荧光光

谱的分析与计算,从微观机理上对这两种色素产生不同荧光光谱的原因进行了分析。认为胭脂红有四个荧光峰是由于其具有四个可以发射荧光的荧光团,同时对胭脂红和苋菜红各荧光峰的荧光强度进行了数学计算;两者进行比较后分析认为,苋菜红的荧光峰对应于胭脂红的第三个荧光峰,从而对四种荧光团的性质进行了初步研究。

参 考 文 献

- Liu Hui, Hu Yangdong, Sun Xiaoyun *et al.*. Simultaneous quantification of mixed synthetic edible pigments using continuous wavelength ultraviolet spectrophotometry [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2006, **9**: 164~166
刘 慧,胡仰栋,孙晓云等.连续波长紫外分光光度法对合成食用色素的混合体系的同时定量测定[J]. *食品工业科技*, 2006, **9**: 164~166
- Ren Yanping, Jin Huijuan, Wang Cheng *et al.*. Measure the content of FMN by automanual biochemical analyzer[J]. *Henan Journal of Preventive Medicine*, 2001, **12**(4): 228~229
任艳平,靳会娟,王 成等.单一底液连续直接测定饮料中色素及糖精钠的示波极谱法[J]. *河南预防医学杂志*, 2001, **12**(4): 228~229
- Wang Guangbin, Gan Fuxi, Wang Jianguang *et al.*. Luminescence spectral properties of azo dye-doped polymer thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 495~497
王光斌,干福熹,王建岗等.偶氮染料掺杂高分子薄膜的荧光光谱特性[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 495~497
- Yang Shengke, Zhang Jinping, Xu Yonghua *et al.*. Ultraviolet-visible absorption spectral properties of Sudan III in different solvents[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(2): 325~328
杨胜科,张金平,徐永花等.苏丹Ⅲ在不同溶剂中的紫外-可见光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(2): 325~328
- Wang Yanji, Song Zengfu. *Spectrum Analysis and Chromatogram Analysis* [M]. Beijing: Peking University Press, 1995. 86
王彦吉,宋增福. *光谱分析与色谱分析* [M]. 北京:北京大学出版社, 1995. 86
- Xu Jingou, Wang Zunben. *Analysis Method of Fluorescent* [M]. Beijing: Science Press, 2006
许金钩,王尊本. *荧光分析法* [M]. 北京:科学出版社, 2006
- Hideki Hashimoto, Kazuhiro Yanagi, Masayuki Yoshizawa *et al.*. The very early events following photo excitation of carotenoids[J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2004, **430**(1): 61~69
- Ritsuko Fujii, Toru Inanba, Yasutaka Watatanabe *et al.*. Two different path way of internal conversion in carotenoids dependong length of the conjugate chain[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, **369**(12): 165~172
- Zhu Tuo, Chen Guoqing, Yu Ruipeng *et al.*. Study of fluorescent spectra of methanol[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 11~13
朱 拓,陈国庆,虞锐鹏等.甲醇分子荧光光谱的研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 11~13
- Xu Hui, Zhu Tuo, Yu Ruipeng *et al.*. Study on the absorption and fluorescence spectra between Ethylene glycol and Glycerol [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, **27**(7): 1381~1384
徐 辉,朱 拓,虞锐鹏等.乙二醇和丙三醇的吸收光谱和荧光光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(7): 1381~1384

- 11 Chen Rong, Zeng Haishan, Huang Baohua *et al.*. Fluorescent spectrum of skin with trichrome vitiligo[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 124~128
陈 荣,曾海山,黄宝华 等. 具有三种颜色的白癜风皮肤的荧光光谱[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 124~128
- 12 Liu Ying, Peng Changde, Lan Xiufeng *et al.*. Fluorescence spectrum characteristics of ethanol-water clusters [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(11): 5455~5461
刘 莹,彭长德,兰秀凤 等. 乙醇和水分子形成配合物与荧光光谱特性研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(11): 5455~5461
- 13 Shen Jinyuan, Han Yingze, Chang Shengjiang *et al.*. Neural network analysis and application of nonlinear fluorescence spectra [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 1000~1003
申金媛,韩应执,常胜江 等. 非线性荧光光谱的神经网络分析及其应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 1000~1003
- 14 Nakashima K, Yashuda S, Ozaki Y *et al.*. Two-dimensional fluorescence correlation spectroscopy. I. Analysis of polynuclear aromatic hydrocarbons in cyclohexane solutions[J]. *Phys. Chem. A*, 2000, **104**(40): 9113~9120
- 15 Zhang Jiancheng *et al.*. *Morden Photochemistry* [M]. Beijing: Chemical Industry Press
张建成,等. *现代光化学*[M]. 北京: 化学工业出版社
- 16 Li Jian, Shen Xinghai, Gao Hongcheng *et al.*. Study on the interactions between a 3H-indole probe molecule and triton X-100 micelles by spectral methods [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2001, **21**(4): 508~511
李 健,沈兴海,高宏成 等. 光谱法研究 3H-吲哚探针分子与 Triton X-100 胶束间的相互作用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2001, **21**(4): 508~511
- 17 Dai Songhui, Li Ping, Yang Xiaozhan *et al.*. Fluorescence spectra of lycopene in different solvents[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 141~146
戴松晖,李 萍,杨晓占 等. 不同溶剂中番茄红素的荧光光谱及其特性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 141~146