

三维同步荧光结合平行因子算法研究丹参粉的 荧光特征

李雷^{*}, 吴庆州, 王涛

南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210023

摘要 具有几十余种化学成分的丹参粉是典型的多组分物质,应用传统二维荧光光谱难以对其作定量分析。为了研究多组分共存的丹参粉水溶液的荧光特征,利用三维同步荧光光谱法结合平行因子分析法(PARAFAC)、分半信度法(split half method)、残差平方和(sum of squared error),解析光谱重叠严重的丹参粉水溶液荧光光谱。经上述方法分析确定丹参粉水溶液的平行因子模型组分数为 4,其相应组分荧光特征为:第 1 组分荧光特征 $\lambda_{Ex} = 470 \sim 480 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 520 \sim 530 \text{ nm}$;第 2 组分荧光特征 $\lambda_{Ex} = 400 \sim 410 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 490 \sim 500 \text{ nm}$;第 3 组分荧光特征 $\lambda_{Ex} = 370 \sim 380 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 460 \sim 470 \text{ nm}$;第 4 组分荧光特征 $\lambda_{Ex} = 560 \sim 570 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 620 \sim 630 \text{ nm}$ 。其中第 2 组分的荧光特征可能是丹酚酸 B 的荧光特征。实验结果表明,在多组分共存且有较多干扰物质时,三维同步荧光结合平行因子算法可以简化光谱分析,较好地表征丹参的整体荧光特性。本研究为多组分共存的中药材分析提供了建议与帮助。

关键词 光谱学; 荧光光谱; 三维同步; 平行因子算法; 丹参; 光谱分析

中图分类号 O433.4; R917

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0430001

Fluorescence Spectroscopy Characteristics of Radix *Salviae Miltiorrhizae* Powder Using Three-Dimensional Synchronous Fluorescence Combined with Parallel Factor Algorithm

Li Lei^{*}, Wu Qingzhou, Wang Tao

Zijin College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract Radix *Salviae miltiorrhizae* powder contains dozens of chemical constituents and is a typical multicomponent substance that is difficult to analyze quantitatively using traditional two-dimensional fluorescence spectroscopy. In this study, three-dimensional synchronous fluorescence combined with parallel factor algorithm, the split half method, and sum of squared error analysis were used to study the fluorescence characteristics of multicomponent Radix *Salviae miltiorrhizae* powder. The parallel factor model of a Radix *Salviae miltiorrhizae* powder solution was identified as four components. The corresponding component fluorescence characteristics were as follows. The first component synchronous fluorescence peak in this region was $\lambda_{Ex} = 470\text{--}480 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 520\text{--}530 \text{ nm}$, and the second component synchronous fluorescence peak in this region was $\lambda_{Ex} = 400\text{--}410 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 490\text{--}500 \text{ nm}$. The third component synchronous fluorescence peak in this region was $\lambda_{Ex} = 370\text{--}380 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 460\text{--}470 \text{ nm}$, and the fourth component synchronous fluorescence peak in this region was $\lambda_{Ex} = 560\text{--}570 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 620\text{--}630 \text{ nm}$. The fluorescence characteristic of the second component may be the fluorescence of salvianolic acid B. Experimental results demonstrate that the three-dimensional synchronous fluorescence method combined with the parallel factor algorithm has a distinct advantage for fluorescence spectroscopic analysis, especially for a complex multicomponent

收稿日期: 2020-08-13; 修回日期: 2020-09-12; 录用日期: 2020-09-22

^{*} E-mail: sina209@foxmail.com

substance coupled with a more interfering substance. This study can provide a reference for the analysis of multicomponent of Chinese patent medicine.

Key words spectroscopy; fluorescence spectroscopy; three dimensional synchronous; parallel factor algorithm; radix *Salviae miltiorrhizae*; spectral analysis

OCIS codes 300.6280; 170.6280; 000.1430

1 引言

丹参是唇形科植物丹参 (*Salvia miltiorrhiza* Bge) 的干燥根和根茎^[1-5], 在我国丹参用作药物有着非常悠久的历史^[1-4], 在多部古代中药学著作中都有记载, 如《神农本草经》《本草纲目》等。在现代中成药市场中, 主治心脑血管病的常用药如复方丹参片、复方丹参滴丸、丹参舒心胶囊等, 其主要成分就是丹参。丹参的主要有效成分有丹参素、丹酚酸 B 等水溶性成分, 以及丹参酮 I、隐丹参酮等脂溶性成分, 具有改善微循环、扩张冠脉血管、抑制血栓、抑制血小板黏附和聚集、保护心肌缺血等作用^[5-7]。同时对多种肝损伤均具有明显的保护作用, 对于肿瘤也表现出良好的抗肿瘤活性^[6-7]。鉴于丹参的重要药物价值, 对丹参的研究具有一定的实际意义。

对多组分共存的中药材如丹参的研究, 传统的方法是经过反复的分离提纯后研究某一单一化学成分的图谱, 主要是以液相色谱法、薄层色谱扫描法等研究为主, 这些方法的分离过程往往冗长繁琐, 实验条件苛刻, 费时费力, 非专业人员难以操作^[5]; 仅测定复杂组分中的某一种或少数几种成分, 难以得到多组分共存时物质的整体特征。

单一波长差 (发射波长与激发波长的波长差 $\Delta\lambda = \lambda_{Em} - \lambda_{Ex}$) 的同步荧光光谱不能完整地表征丹参的荧光物质, 本文采用的三维同步荧光光谱是在一系列不同波长差 $\Delta\lambda$ 下激发强度、发射强度、荧光强度三个维度的同步光谱。三维同步荧光包含更丰富的光谱信息, 无需将研究对象提前预分离, 结合平行因子算法 (Parallel Factor Algorithm, PARAFAC) 去除部分干扰物质的影响, 可以从整体特征、全局视角全面地研究丹参的荧光发射规律和特征光谱。

2 实验部分

2.1 仪器和样本

实验仪器为英国爱丁堡公司 FLS920 稳态瞬态荧光光谱仪, 450 W 稳态氙灯 (作光源), 国内某公司电子天平和移液器。光谱仪光谱测量范围为 190~

870 nm, 信噪比为 6000 : 1, 分辨率为 0.1 nm。实验样品丹参购于医药店, 精加工为粉状物。实验用水为超纯水。

2.2 方法

实验温度为室温, 激发波长区间范围为 200~600 nm, 每隔 2 nm 激发一次; 为减少瑞利散射等影响, 激发波长与发射波长间隔 $\Delta\lambda$ 区间范围为 25~160 nm, 每隔 5 nm 同步扫描一次。

配置质量比为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9%、1.0%、2.0%、4.0%、6.0%、8.0% 的丹参粉水溶液共 14 个样本。测量上述样本的三维同步荧光光谱, 为了减少溶剂的拉曼散射影响, 同时测量超纯水的三维同步荧光光谱, 最后将丹参光谱结果统一扣除超纯水的空白样值。实验计算所用软件主要为 MATLAB。

2.3 算法原理

三维同步荧光光谱数据中往往含有未知干扰物成分信号、背景噪声等冗余信息, 需要用二阶校正算法压缩数据, 去除冗余信息, 进而解析得到具有物理意义的相应特征成分。本研究采用具有二阶优势的平行因子算法 (PARAFAC) 进行处理。

平行因子算法 (PARAFAC) 是基于三线性分解理论, 采用交替最小二乘法原理的迭代类型三维数据分解算法^[8-15], 将一系列实验荧光数据组成的三维阵列 \mathbf{X} 分解为三个载荷矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} , 即

$$\mathbf{A} = \left[\sum_{k=1}^K \mathbf{X}_k \mathbf{B} \cdot \text{diag}(\mathbf{C}_{(k)}) \right] \cdot \left[\sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{C}_{(k)}) \cdot \mathbf{B}^T \mathbf{B} \cdot \text{diag}(\mathbf{C}_{(k)}) \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \left[\sum_{k=1}^K \mathbf{X}_k \mathbf{A} \cdot \text{diag}(\mathbf{C}_{(k)}) \right] \cdot \left[\sum_{k=1}^K \text{diag}(\mathbf{C}_{(k)}) \mathbf{A}^T \mathbf{A} \cdot \text{diag}(\mathbf{C}_{(k)}) \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_{(k)} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} * \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \cdot \text{diag}(\mathbf{A}^T \mathbf{X}_k \mathbf{B}), \quad (3)$$

再进行残差计算

$$\sigma(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^I \left\| \mathbf{X}_i - \mathbf{B} \cdot \text{diag}(a_i) (\mathbf{C}^T) \right\|_F^2, \quad (4)$$

$$\sigma(\mathbf{B}) = \sum_{j=1}^J \left\| \mathbf{X}_j - \mathbf{C} \cdot \text{diag}(b_j) (\mathbf{A}^T) \right\|_F^2, \quad (5)$$

$$\sigma(\mathbf{C}) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{X}_k - \mathbf{A} \cdot \text{diag}(c_k)(\mathbf{B}^T)\|_F^2, \quad (6)$$

式中: I, J, K 为正整数。

平行因子算法对于组分数十分敏感,故选择一个合适的组分数很重要。本文使用分半信度法(split half method)和残差平方和(sum of squared error)选择合适的组分数进行分析。分半信度法是指在测验后将测验项目分成相等的两组(两半),通常采用奇偶分组方法,即将测验项目按照序号的奇数和偶数分成两半,然后计算两项项目之间的相关程度。分半信度相关程度越高表示信度越高,或内部一致性程度越高。残差平方和是观察不同组分数时结果的波动性水平,波动性较小时的组分数优于波动幅度较大时的结果。

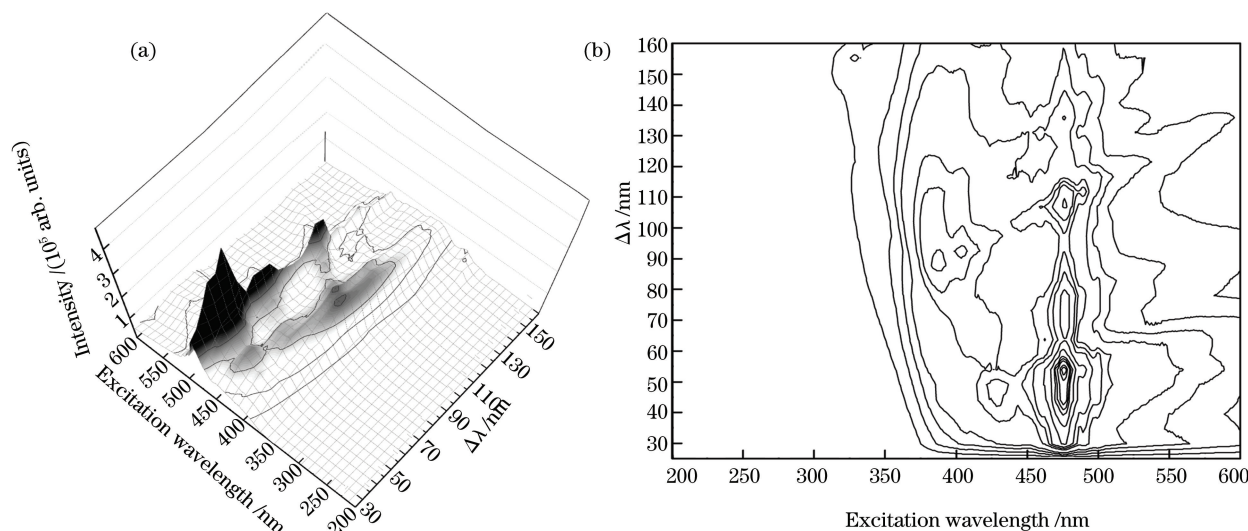


图 1 质量比为 0.4% 的丹参粉水溶液三维同步荧光光谱。(a) 三维光谱图; (b) 等高线图

Fig. 1 3D synchronous fluorescence spectrum of Radix Salviae miltiorrhizae powder solution with mass ratio of 0.4%.

(a) 3D plot; (b) contour plot

据文献[16-17]可知:丹酚酸 A(又称丹参酸甲)激发峰值波长在 370 nm 左右,荧光发射峰值波长在 418 nm 左右;异阿魏酸激发峰值波长在 350 nm 左右,荧光发射峰值波长在 438 nm 左右;丹酚酸 B 激发峰值波长在 400 nm 左右,荧光发射峰值波长在 500 nm 左右。而本实验结果显示,多组分共存时的丹参粉水溶液的主要几个显著的峰值分别是:峰值 1 的 $\lambda_{Ex} = 475 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 525 \text{ nm}$; 峰值 2 的 $\lambda_{Ex} = 476 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 541 \text{ nm}$; 峰值 3 的 $\lambda_{Ex} = 475 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 580 \text{ nm}$; 峰值 4 的 $\lambda_{Ex} = 405 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 490 \text{ nm}$ 等。除峰值 4 与丹酚酸 B 激发、发射波长较接近外,未发现文献中所述的丹酚酸 A、异阿魏酸等波长较短的特征峰,且仔细观察图 1 和三维同步荧光光谱实验数据结果,发现激发波长在 200~370 nm 区

3 结果与讨论

丹参粉水溶液的三维同步荧光光谱见图 1 所示。丹参粉水溶性成分有丹酚酸 A、丹酚酸 B、丹酚酸 C、原儿茶醛、异阿魏酸、咖啡酸、原儿茶酸、紫草酸、迷迭香酸等近 40 种;脂溶性成分有丹参酮 I、丹参酮 II A、丹参酮 II B、丹参酮 V、丹参酮 VI、隐丹参酮、异丹参酮 I、异丹参酮 II、异丹参酮 II B、丹参二醇 A、丹参二醇 B、丹参二醇 C 等几十余种;且上述大部分化学成分都可以发出荧光。因为荧光成分多且杂乱,传统二维荧光很难定量分析。丹参粉水溶液的三维同步荧光光谱特别是其等高线图可以表征为丹参的指纹图谱,该指纹图谱体现了多组分共存时荧光叠加后的整体特征,从全局视角表达了中药材的全貌。

间段、发射波长在 225~440 nm 区间段未见显著峰值。对于这种现象,分析认为多组分共存的丹参水溶液中某些化学成分的荧光发射波长与另一些化学成分的激发波长相重叠,导致荧光共振能量产生了转移,即当波长较短的激发光照射某荧光分子(称为供体分子)时供体分子将能量转移给相邻的另外一个荧光分子(受体分子),使受体分子发出荧光,此过程中供体分子未发射荧光,而受体分子发出荧光,造成荧光光谱向长波长段红移,故在发射波长 225~440 nm 区间段未见显著荧光发射峰。此外,由于可以发出荧光的化学成分较多,在 440 nm 以上区间荧光特征峰也存在明显的重叠现象。

如图 2 所示,当丹参粉水溶液的浓度超过一定阈值时,其荧光光谱会因内滤效应发生畸变。在对

系列样本进行平行因子算法分析计算中同样会发现这些异常样本(质量比为 4.0%、6.0%、8.0%时的

样本),后续将异常样本予以删除,以保证结果的精度。

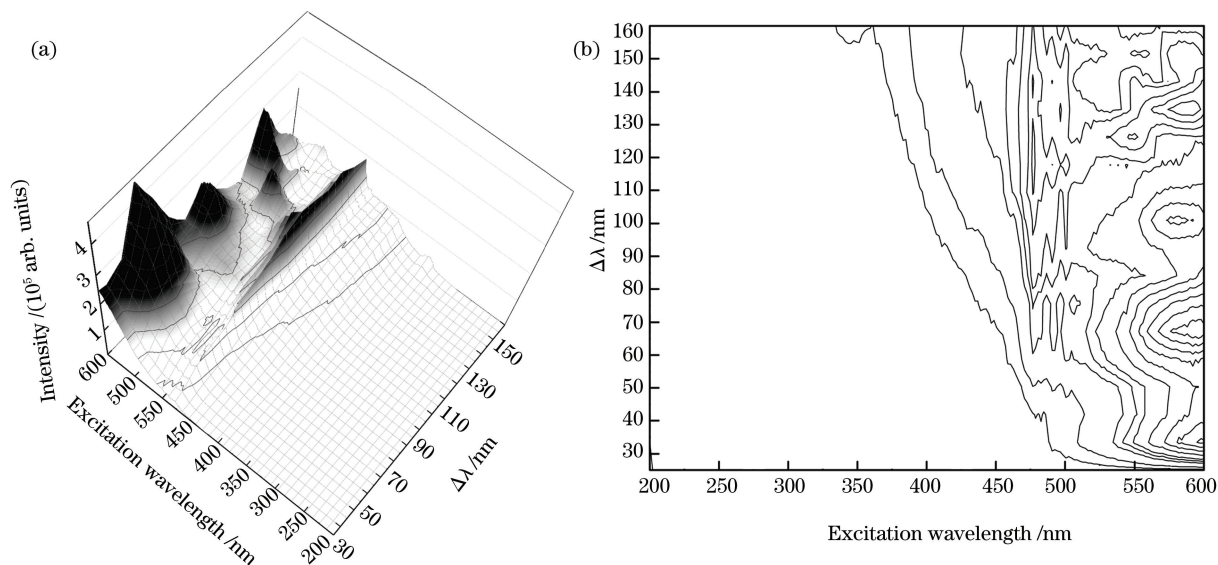


图 2 质量比为 4%浓度的丹参粉水溶液三维同步荧光光谱。(a)三维光谱图;(b)等高线图谱

Fig. 2 3D synchronous fluorescence spectrum of Radix Salviae miltiorrhizae powder solution with mass ratio of 4%. (a) 3D plot; (b) contour plot

选择合适平行因子算法组分数的方法如下。根据残差平方和分析(见图 3),可知当组分数选择 4、5 时的残差平方和曲线波动幅度明显小于组分数为 3 时的曲线波动幅度,这说明组分数选择 4 或 5 时结果较优。接着,观察组分数分别为 4、5 时的激发负载拟合曲线图(见图 4),可发现:当组分数为 5 时激发曲线有部分值为负值,不合理;而组分数为 4 时激

发负载拟合曲线较好,没有出现负值问题。进一步选取组分数为 4 进行分半信度法验证(见图 5),结果相对较好。对比组分数为 4 时的平行因子算法模型结果和实验结果(见图 6),亦可发现吻合度较为一致。综合上述残差平方和分析、分半信度法等多方面分析结果,本研究在平行因子算法中将组分数确定为 4。

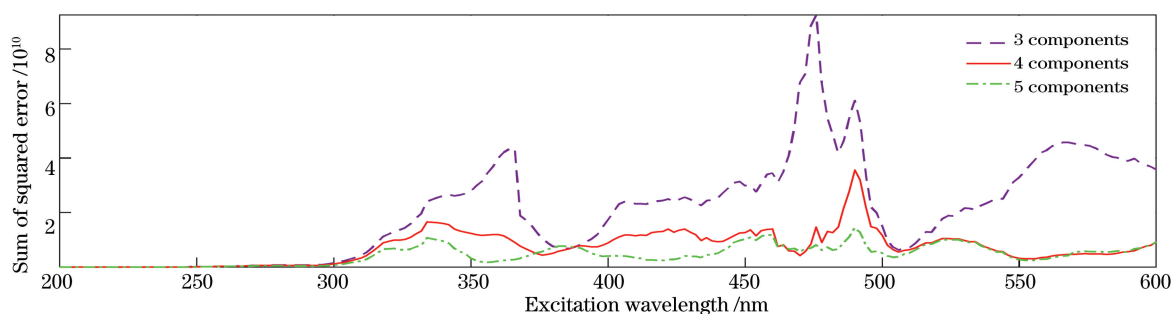


图 3 不同组分数时的残差平方和曲线图

Fig. 3 Sum of squared error curves for different components number

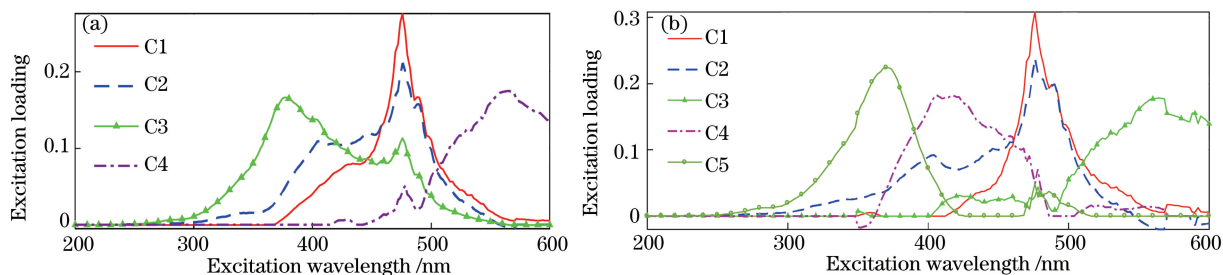


图 4 不同组分数时的激发负载曲线。(a)组分数为 4;(b)组分数为 5

Fig. 4 Excitation loadings curves for different components number. (a) Components number is 4; (b) components number is 5

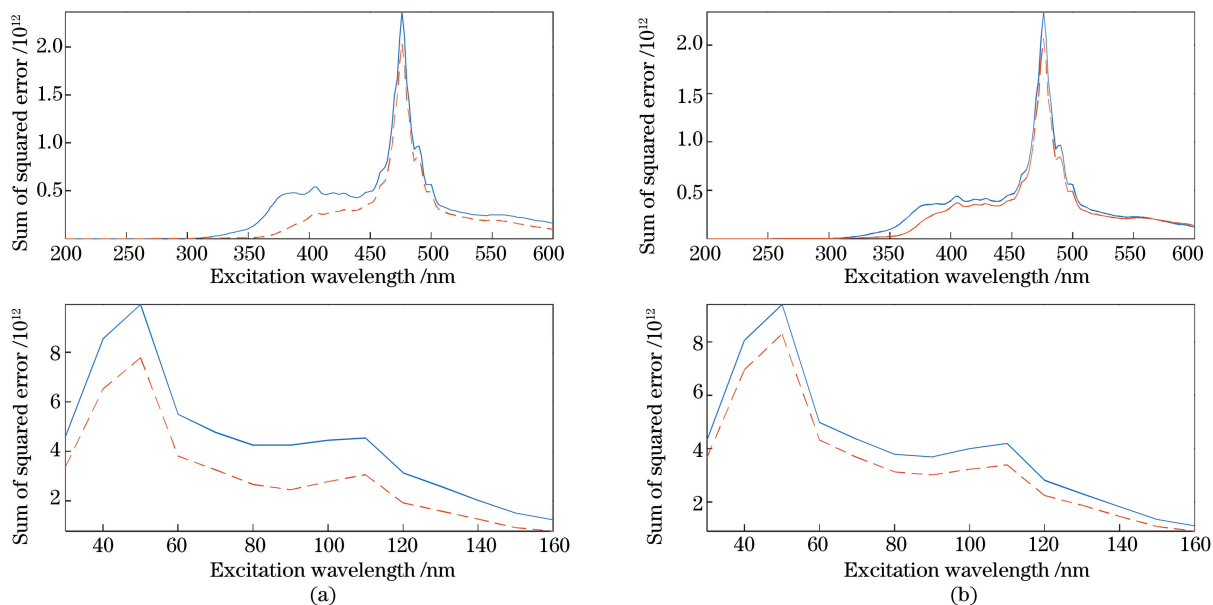


图 5 组分数为 4 时的分半信度法图像。(a)前一半;(b)后一半

Fig. 5 Images based on split half method for components number is 4. (a)Split 1-2; (b)split 3-4

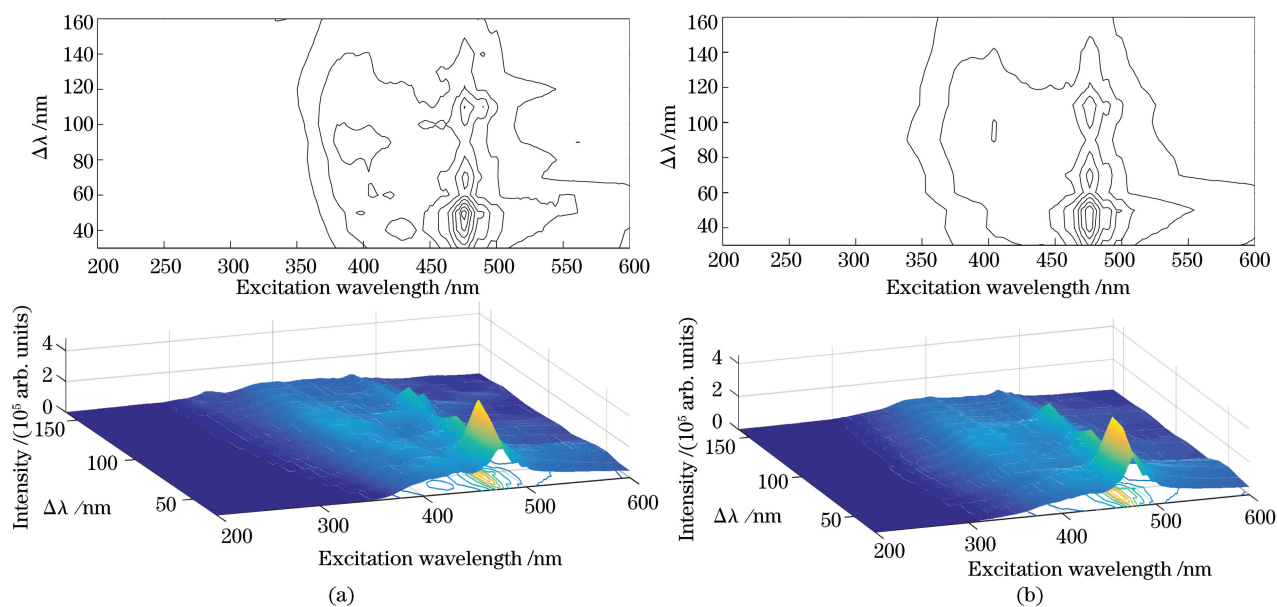


图 6 组分数为 4 时平行因子算法的实测结果和模拟结果。(a)实测值;(b)模拟值

Fig. 6 Measured results and experimental results based on parallel factor algorithm when components number is 4.

(a) Measured results; (b) experimental results

根据三维同步荧光光谱实验数据、平行因子算法分析以及算法中关于激发波长杠杆系数曲线图像(见图 7)等多方面的综合情况,可得到组分数为 4 的丹参粉水溶液荧光特征参数表(见表 1)。

观察表 1 数据可发现,组分 C2 的荧光特征参数与丹酚酸 B 的荧光特征($\lambda_{Ex} = 400 \text{ nm}$, $\lambda_{Em} = 500 \text{ nm}$ 左右)很接近,且丹酚酸 B 在丹参粉中的含量处于较高水平,分析认为组分 C2 可能是丹酚酸 B 的荧光。组分 C1、C3、C4 的荧光特征参数与已查到

的丹参化学成分如丹参素、紫草酸、迷迭香酸、异阿魏酸、丹参酮 I、丹参酮 II A、隐丹参酮等不能相对应。结合平行因子算法的理论思想,在几十余种成分共存的丹参粉水溶液中确定组分数为 4 的物理含义并不仅仅代表 4 种单一的化学成分荧光,还可能代表由多种荧光分子叠加组合而成的某一荧光类别。因此,分析认为组分 C1、C3、C4 分别为多种化学成分荧光组合而成的 3 种类别,其类别内荧光分子之间还存在着荧光共振能量转移和荧光光谱重叠

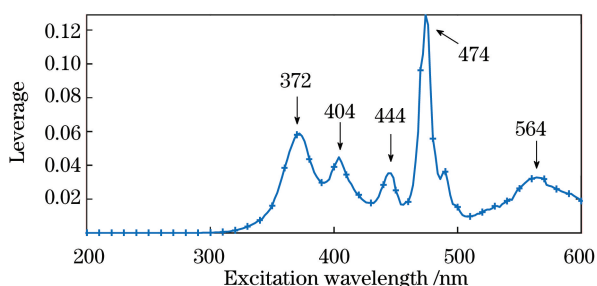


图 7 平行因子算法中激发波长杠杆系数曲线

Fig. 7 Excitation leverage curve based on parallel factor algorithm

表 1 荧光特征参数表

Table 1 Characteristic parameters of fluorescence spectrum

Component	Excitation wavelength region /nm	Emission wavelength region /nm	Note
C1	470-480	520-530	
C2	400-410(470-480)	490-500(560-570)	It may be the fluorescence of salvianolic acid B
C3	370-380(470-480)	460-470(560-570)	
C4	560-570(470-480)	620-630(530-540)	

4 结 论

实验测量了多组分共存的丹参粉水溶液的三维同步荧光光谱,其等高线图具有指纹图谱信息,可以丰富完善中药材指纹图谱库。

丹参粉水溶液三维同步荧光光谱结合平行因子算法以及分半信度法、残差平方和分析,确定丹参水溶液的平行因子模型组分数为 4,得到了不同组分数所对应的荧光特征参数,从全局视角表征了丹参多组分的荧光面貌。实验结果表明,在多组分共存且有较多干扰物质时,三维同步荧光结合平行因子算法可以较好地表征以丹参为代表的中药材的整体荧光特性,简化了高维光谱数据分析,降低了干扰成分的影响,为多组分共存的中药材分析提供了建议与帮助。

参 考 文 献

- [1] Pharmacopoeia Commission of the Ministry of Health of the People's Republic of China. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Medical Science Press, 2015: 76-77.
国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 76-77.
- [2] Luan R Q, Li H F, Zhang X L, et al. Research progress on chemical composition transformation and pharmacokinetics of *Salvia miltiorrhiza* [J]. Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine, 2018, 45(2): 437-439.
- [3] Fang W T, Deng A P, Ren Z L, et al. Research progress on quality evaluation of *Salviae miltiorrhizae Radix et Rhizoma* (Danshen) [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2018, 43(6): 1077-1085.
方文韬, 邓爱平, 任振丽, 等. 丹参品质评价研究进展[J]. 中国中药杂志, 2018, 43(6): 1077-1085.
- [4] Dong Q, Yu H T, Dai Y T, et al. Establish quality evaluation method based on standard decoction of Danshen extract [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2017, 42(5): 817-822.
董青, 於化桃, 代云桃, 等. 以标准汤剂为基准建立丹参的质量评价方法[J]. 中国中药杂志, 2017, 42(5): 817-822.
- [5] Li L, Han C Q, Liu Y, et al. The study of three-dimensional synchronous fluorescence spectral characteristics of radix *Salviae miltiorrhizae* powder and its adulterants[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2019, 30(11): 1231-1238.
李雷, 韩彩琴, 刘莹, 等. 基于三维同步荧光光谱鉴定丹参及其伪品[J]. 光电子·激光, 2019, 30(11): 1231-1238.
- [6] Feng X, Zhang X X, Feng T J, et al. Antitumor effect of Tanshinone II A submicron emulsion and effect on its reversal of multidrug resistance in SMMC-7721/VCR tumor[J]. The Chinese Journal of Clinical Pharmacology, 2017, 33(5): 427-430.

现象,所以暂时无法将其一一指出,该问题将在后续的研究中继续深入展开。虽然目前还不能完美地解释其中 3 个组分,但要指出的是三维同步荧光光谱与平行因子算法的结合已经体现出比普通二维荧光光谱更明显的优势,大大降低了多组分共存物质如中药材的荧光分析难度,简化了多维光谱,降低了干扰成分的影响,得到了组分数所对应的特征荧光参数,其代表了多组分共存的中药材整体特征。

- 冯欣, 张须学, 冯涛聚, 等. 丹参酮 II A 亚微乳抗肿瘤作用及对逆转 SMMC-7721/VCR 肿瘤多药耐药的影响 [J]. 中国临床药理学杂志, 2017, 33(5): 427-430.
- [7] Dai X X, Su S L, Guo S, et al. Research progress on biological activity and application development of tanshinones [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2017, 48(7): 1442-1448.
- 戴新新, 宿树兰, 郭盛, 等. 丹参酮类成分的生物活性与应用开发研究进展 [J]. 中草药, 2017, 48(7): 1442-1448.
- [8] Yuan Y Y, Wang S T, Wang J Z, et al. Rapid detection of the authenticity and adulteration of sesame oil using excitation-emission matrix fluorescence and chemometric methods [J]. Food Control, 2020, 112: 107145.
- [9] Liu Z, Zhao H Y, Yang G L, et al. Study of photo degradation kinetics of aflatoxins in cereals using trilinear component modeling of excitation-emission matrix fluorescence data [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 235: 118266.
- [10] Song F H, Wu F C, Feng W Y, et al. Depth-dependent variations of dissolved organic matter composition and humification in a plateau lake using fluorescence spectroscopy [J]. Chemosphere, 2019, 225: 507-516.
- [11] Wang X R, Zhang L J, Wang Y T, et al. Rapid determination of phenol in water by three-dimensional fluorescence combined with second-order calibration [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(1): 113-118.
- 王选瑞, 张立娟, 王玉田, 等. 三维荧光结合二阶校正快速测定水中酚类 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(1): 113-118.
- [12] Li R, Chen G Q, Zhu C, et al. Quantitative analysis of two food colors using excitation-emission matrix spectra coupled with parallel factor algorithm [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 111-115.
- 李润, 陈国庆, 朱纯, 等. 三维荧光光谱结合平行因子算法测定两种食品色素的含量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 111-115.
- [13] Zhao X T, Che X G, Wang S T, et al. Rapid detection of quinolones in water based on fluorescence spectrometry and BLLS/RBL [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0930001.
- 赵兴涛, 车先阁, 王书涛, 等. 荧光光谱法结合 BLLS/RBL 用于快速检测水中喹诺酮类抗生素 [J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0930001.
- [14] Wang S T, Wu X, Zhu W H, et al. Fluorescence detection of polycyclic aromatic hydrocarbons by parallel factor combined with support vector machine [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0530002.
- 王书涛, 吴兴, 朱文浩, 等. 平行因子结合支持向量机对多环芳烃的荧光检测 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0530002.
- [15] Zuo Z L, Zhao N J, Meng D S, et al. Identification of petroleum organic matter in soil based on three-dimensional fluorescence spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 222601.
- 左兆陆, 赵南京, 孟德硕, 等. 基于三维荧光光谱的土壤中石油类有机物分类识别 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 222601.
- [16] Kou Z N, Zhu J B. Fluorescence characteristics of *Salvia miltiorrhiza* Bge. aqueous extract [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2010, 29(2): 109-112.
- 寇自农, 朱靖博. 丹参水浸提液的荧光光谱特性 [J]. 大连工业大学学报, 2010, 29(2): 109-112.
- [17] Ye Y, Gao H G. Fluorescence properties of salvianolic acid B in root of *Salvia miltiorrhiza* Bge [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2007, 18(8): 1810-1811.
- 叶勇, 高何刚. 丹参酚酸 B 的荧光特性研究 [J]. 时珍国医国药, 2007, 18(8): 1810-1811.