

基于3D-EEM对不同品种咖啡液 指纹图谱的研究

廖紫玉, 弘子珊, 黄艾祥, 龚加顺, 谭超*

(云南农业大学 食品科学技术学院, 云南 昆明 650201)

摘要:该文基于三维荧光分析技术(three-dimensional excitation-emission matrix, 3D-EEM)对不同品种生咖啡、烘焙咖啡浸提液中3种特征成分绿原酸(chlorogenic acid, CGA)、咖啡因(caffeine, CAF)、葫芦巴碱(trigonelline, TRI)建立荧光指纹图谱。结果表明,CGA、CAF、TRI均有特征荧光峰;不同品种生咖啡浸提液荧光峰较为散乱,主要荧光峰分布在 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(359\sim450)\text{ nm}/(365\sim761)\text{ nm}$ 和 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(750\sim860)\text{ nm}/(450\sim560)\text{ nm}$ 两个范围。咖啡烘焙后浸提液荧光峰与烘焙前明显发生变化,荧光峰红移至 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(380\sim600)\text{ nm}/(450\sim750)\text{ nm}$,瑞利散射明显减弱,两条倍频峰线消失。不同品种烘焙咖啡浸提液荧光峰位移大小有差异。利用3D-EEM初探定量表明,不同品种咖啡生豆CGA含量为0.685%~1.377%,烘焙后CGA含量下降至0.057%~0.105%;咖啡生豆CAF含量为4.121%~8.372%,烘焙后下降至1.713%~2.354%;咖啡生豆TRI含量为0.075%~0.101%,烘焙后下降至0.035%~0.077%。咖啡豆烘焙后CGA、CAF和TRI含量均有下降。

关键词:咖啡;三维荧光;绿原酸;咖啡因;葫芦巴碱

Study on Fingerprint of Different Coffee Liquid Based on 3D-EEM

LIAO Zi-yu, HONG Zi-shan, HUANG Ai-xiang, GONG Jia-shun, TAN Chao*

(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China)

Abstract: In this paper, the research was carried out based on the three-dimensional excitation-emission matrix (3D-EEM), the fluorescent fingerprints of three kinds of components characteristic of chlorogenic acid (CGA), caffeine (CAF), and trigonelline (TRI) in the raw and roasted coffee extracts from different varieties. The results showed that CGA, CAF, and TRI had specific fluorescence peaks. The fluorescence peaks of the extracts of different varieties of raw coffee are scattered, and the main fluorescence peaks were distributed at $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(359\sim450)\text{ nm}/(365\sim761)\text{ nm}$ and $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(750\sim860)\text{ nm}/(450\sim560)\text{ nm}$. After roasting, the fluorescence peak of the raw coffee extract changed significantly compared to before roasting. The fluorescence peak red-shifted to $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(380\sim600)\text{ nm}/(450\sim750)\text{ nm}$, the rayleigh scattering was significantly weakened, and the two frequency-doublet peak lines disappear. The fluorescence peak displacements of different varieties of roasted coffee extracts were distinctive. Preliminary 3D-EEM quantitative analysis showed that the CGA content of green coffee beans in different varieties was 0.685%~1.377%, the CGA content of roasted coffee beans dropped to 0.057%~0.105%, the CAF content of raw coffee beans was 4.121%~8.372% which decreased to 1.713%~2.354%, and the TRI content of green coffee beans was 0.075%~0.101%, which decreased to 0.035%~0.077% after roasting.

Key words: coffee; the three dimensional fluorescence; chlorogenic acid; caffeine; trigonelline

基金项目:云南农业大学自然科学基金青年科研基金(2016ZR04);云南省高校食品加工与安全控制重点实验室开放基金项目(YJK[2014]16 KF06);云南省建立农科教相结合新型农业社会化服务体系试点项目(2014NG004-08)

作者简介:廖紫玉(1995—),女(汉),在读硕士,研究方向:食品加工与安全。

* 通信作者:谭超(1985—),男(汉),讲师,博士,研究方向:咖啡及制品。

引文格式:

廖紫玉,弘子姗,黄艾祥,等. 基于 3D-EEM 对不同品种咖啡液指纹图谱的研究[J]. 食品研究与开发,2020,41(24): 200-206

LIAO Ziyu, HONG Zishan, HUANG Aixiang, et al. Study on Fingerprint of Different Coffee Liquid from Based on 3D-EEM[J]. Food Research and Development,2020,41(24):200-206

咖啡以其独特的风味受到人们的喜爱。绿原酸(chlorogenic acid, CGA)、咖啡因(caffeine, CAF)、葫芦巴碱(trigonelline, TRI)是咖啡中重要的物质,影响着咖啡的风味变化。CGA 是由奎宁酸与肉桂酸盐类合成的,属多酚类化合物,占咖啡物质组成的 6%~12%^[1],是咖啡中独特的成分之一^[2],影响着咖啡的苦涩味。CGA 在烘焙中经 Strecker 降解反应分解为咖啡酸、阿魏酸与奎尼酸,间接影响咖啡最终的酸度,并赋予咖啡收敛性和苦味^[3]。CAF 是一种黄嘌呤生物碱化合物,也是咖啡中重要的风味物质^[4],呈苦味,影响咖啡的醇厚感和苦涩度^[5]。TRG 为尼克酸甲基化的产物,是植物体内的烟酰胺腺嘌呤二核苷酸(nicotinamide adenine dinucleotide, NAD)和烟酰胺腺嘌呤二核苷酸磷酸(nicotinamide adenine dinucleotide phosphate, NADP)代谢或转化产物,决定着咖啡的涩味,并兼具提神功效^[6]。

三维荧光法是将荧光强度表示为激发波长-发射波长两个变量的函数,即三维荧光光谱(three-dimensional excitation-emission matrix, 3D-EEM),它能够表示激发波长(excitation wavelength, λ_{ex})和发射波长(emission wavelength, λ_{em})同时变化时的荧光强度信息^[9],物质不同,特征荧光谱也不同。3D-EEM 具有良好的选择性和高灵敏度,检测方法也较为简捷、所需样品少、复现性好,这些优点使得其在食品检测和生物检测中得到广泛的应用^[7]。目前,对咖啡中成分的检测方法主要有高效液相色谱法(high performance liquid chromatog-

raphy, HPLC)^[8-11]、毛细管电泳电化学检测法^[12-13]、高效液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)^[14-16]和分光光度法^[17]等,但这些方法样品的前处理较为复杂繁琐,近年来利用 3D-EEM 在牛肉新鲜度评价^[18]、兽药残留检测^[19]、水体污染物的检测^[20-21]、药物研究^[22]已有较多报道,而利用 3D-EEM 针对咖啡成分的研究还较少。

本文基于 3D-EEM 对不同品种生咖啡、烘焙咖啡浸提液荧光光谱进行研究,针对特征成分 CGA、CAF、TRG 建立 3D-EEM 图谱特征数据,结合特征图谱探究其半定量可行性,为咖啡豆品种的快速鉴别以及咖啡豆中 CGA、CAF、TRG 含量快速测定提供一定理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

5 种不同品种咖啡豆(2016 产季):广州伊蕴丽贸易有限公司;CGA 标准品、TRG 标准品:上海源叶生物科技有限公司;CAF 标准品:成都德锐可生物科技有限公司。

F97Pro 型荧光分光光度计:上海棱光技术有限公司;兴盛多功能高速粉碎机:永康市兆申电器有限公司;SANTOKER R500E 烘焙机:三豆客咖啡科技;Coffee Roast Analyzer RA-710 烘焙度测试仪:Acronova Technolog。

咖啡豆样品见表 1。

表 1 咖啡豆样品
Table 1 Sample of coffee beans

编号	品种	产地	风味描述	失水率/%	烘焙度	烘焙等级
A	高山卡蒂姆	中国(云南)	口感均衡,坚果香,后段特殊香	13.54	73.3	中度烘焙
B	Geisha 瑰夏种	巴拿马	柳橙、苹果果酸、花香、蜂蜜	14.12	62.3	深度烘焙
C	阿拉比卡	印尼	热带水果、发酵酒香浓郁、樱桃巧克力,余韵持久	15.14	56.7	中深烘焙
D	阿拉比卡原生种豆	埃塞俄比亚	莓果,莱姆,整体口感明亮、多汁,香浓滑顺	13.47	64.7	深度烘焙
E	牙买加蓝山种铁比卡	巴布亚新几内亚	葡萄柚酸香、水果口感、柠檬皮香气、黑巧克力	14.94	69.7	深度烘焙

1.2 试验方法

1.2.1 样品及标准品制备

咖啡生豆、烘焙豆粉碎后用 UP 水制备为浓度为

2.5 mg/mL 的溶液备用。各配制浓度为 0.5 mg/mL 的 4 种 CGA、CAF、TRG、CGA-CAF-TRG(体积比 1:1:1)混合溶液备用。

1.2.2 咖啡豆烘焙

咖啡生豆采用 SANTOKER R500E 烘焙机烘焙。火力 0.5 kPa, 风门 4, 转速 60 r/min。每次入豆 250 g。烘焙失水率范围控制在 13.47%~15.14%。烘焙程度范围在 56.7~73.3 基本上在 65 左右, 接近于中、深度烘焙。

1.2.3 CGA、CAF、TRG 三维荧光二维荧光指纹图谱及测定线性浓度范围的建立

1) CGA、CAF、TRG 三维荧光分析条件设置: 发射波长 λ_{em} = 200 nm~900 nm, 激发波长 λ_{ex} = 200 nm~900 nm, 每隔 10 nm 激发扫描一次, 扫描速度为 30 000 nm/min, 激发宽带、发射宽带为 10 nm, 光电倍增管增益 (photo-multiplier tube, PMT) = 900 V 高, 相应时间自动匹配。按照 CGA、CAF、TRG 三维荧光分析条件设置分别对制备好的 CGA、CAF、TRG 标准溶液和 CGA、CAF、TRG 混合标准溶液进行三维荧光扫描, 建立 CGA、CAF、TRG 的三维荧光指纹图谱。以相同方法做纯净水空白对照组。

2) CGA、CAF、TRG 的二维荧光分析条件设置(激发模式): 测量类型为波长扫描, 扫描模式为激发模式, 数据模式为荧光模式, λ_{em} 分别为: CGA 457 nm; CAF 681 nm; TRG 380 nm。 λ_{ex} 起始波长分别为: CGA 320 nm; CAF 360 nm; TRG 280 nm。 λ_{ex} 终止波长分别为: CGA 420 nm; CAF 480 nm; TRG 360 nm。扫描速度均为 300 nm/min, 等待时间均为 0 s, 激发带宽均为 10 nm, 发射带宽均为 10 nm, 增益(PMT)均为 15 档(900 V), 响应时间自动匹配, 自动光门未使用, 重复次数为一次, 重复间隔为 0 s。

1.3 数据处理

采用 F97Pro 型荧光分光光度计连接电脑自带软件进行数据统计和处理, 做 3 次平行。

2 结果与分析

2.1 对照、标准品及混标的 3D-EEM 光谱特征

图 1 为对照、标准品及混标的 3D-EEM 光谱特征图。

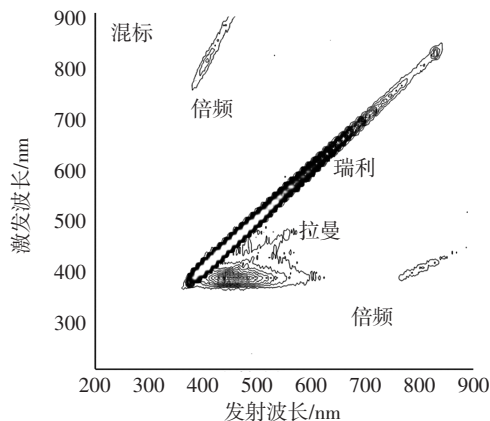
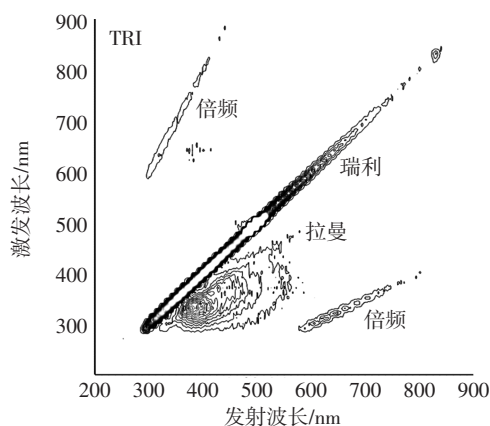
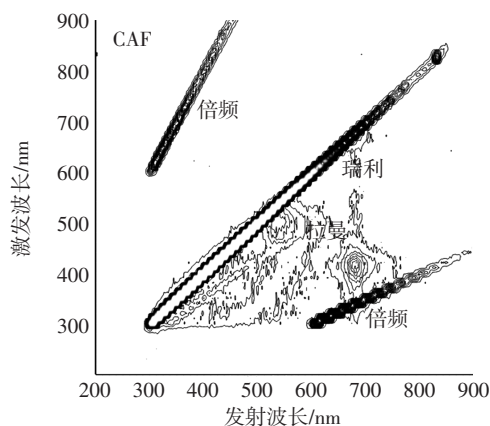
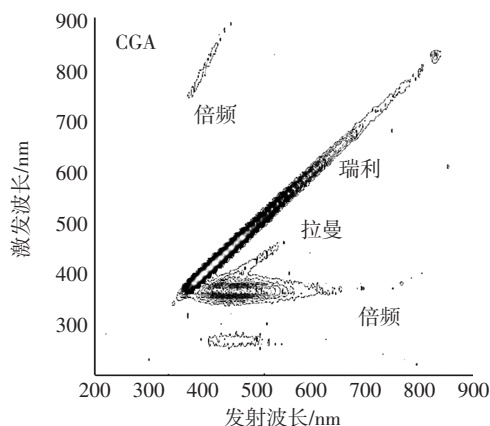
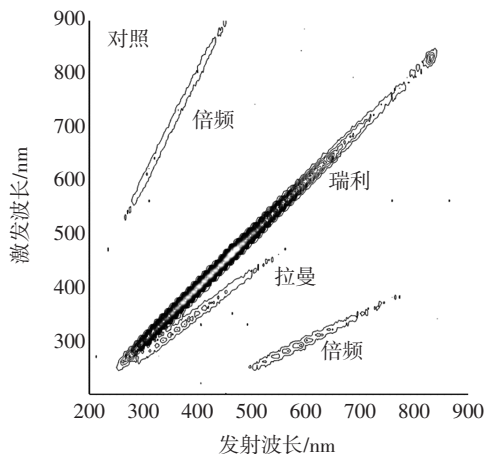


图 1 对照、标准品及混标的 3D-EEM 光谱特征

Fig.1 3D-EEM spectral characteristics of reference standard and mixed standard

考虑到咖啡液体以水为溶剂,因此选择超纯水作空白对照组,图中从原点起始的斜线部分主要有瑞利散射(rayleigh scattering)、拉曼散射(raman scattering)和倍频峰线。在瑞利散射中,入射光与物质分子没有发生能量交换,它的波长和激发波长相同,强度是入射光强度的 10^{-3} 倍;拉曼散射是由于处在激发态的分子没有跃迁至基态而偏离原来的能级,到达稍高或稍低能级产生的,强度是入射光强度的 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 。拉曼散射、瑞利散射与水中粒子的浓度和体积有关。倍频峰是由光栅衍射造成的。这4条峰线均属干扰散射,除此以外可以看出荧光光谱纯净,无杂质干扰。各添加 0.5 mg/mL CGA、CAF、TRG 标准品均能出现特征荧光峰。CGA 主要位于 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(340 \sim 400) \text{ nm}/(390 \sim 600) \text{ nm}$, $\lambda_{ex}=371.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=457.0 \text{ nm}$ 处荧光信号最强。CAF 主要出现两个峰分别位于 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(363 \sim 456) \text{ nm}/(640 \sim 750) \text{ nm}$ 和 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(460 \sim 527) \text{ nm}/(508 \sim 586) \text{ nm}$, 在 $\lambda_{ex}=411.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=681.0 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{ex}=499.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=538.0 \text{ nm}$ 处荧光信号最强。TRG 主要位于 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(280 \sim 410) \text{ nm}/(345 \sim 550) \text{ nm}$, $\lambda_{ex}=330.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=380.0 \text{ nm}$ 处荧光信号最强。混合浓度为 0.5 mg/mL 的 CGA、CAF、TRG 3种标准液后,荧光峰发生了变化,仅出现一个峰,主要位于 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(357 \sim 410) \text{ nm}/(390 \sim 595) \text{ nm}$, $\lambda_{ex}=380.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=457.0 \text{ nm}$ 处荧光信号最强。荧光特征峰范围非常接近 CGA 峰范围。

从3种标准液的荧光强度上看,在相同浓度条件下 CGA、CAF、TRG 的激发波长、发射波长和荧光强度都不同。荧光强度: $\text{TRG} > \text{CGA} > \text{CAF}$ 。TRG 在 $\lambda_{ex}=330.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=380.0 \text{ nm}$ 处相对荧光强度为 1 036.00, CGA 在 $\lambda_{ex}=371.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=457.0 \text{ nm}$ 处相对荧光强度为 852.20, CAF 在易辨的 $\lambda_{ex}=411.0 \text{ nm}$, $\lambda_{em}=681.0 \text{ nm}$ 处相对荧光强度为 74.32。

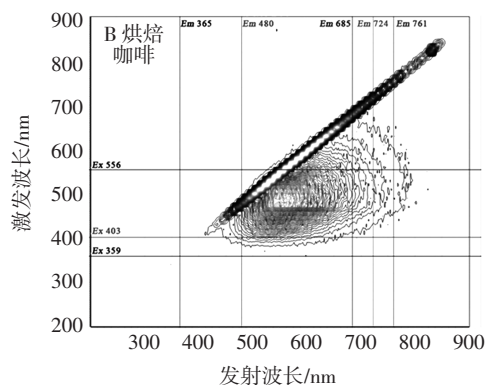
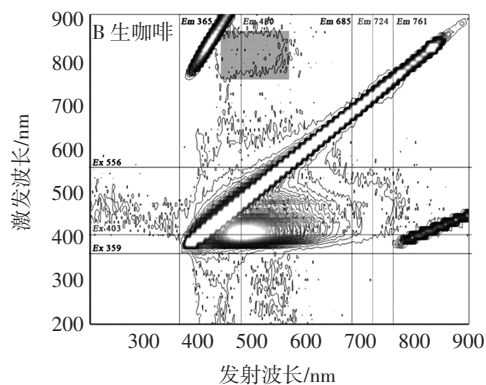
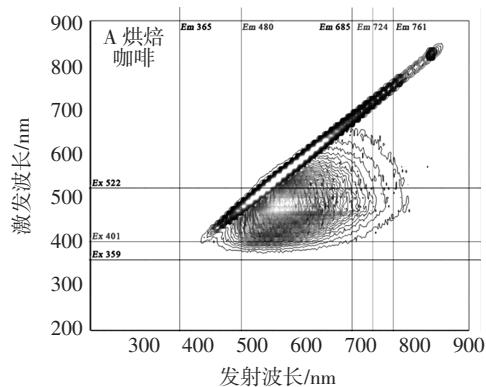
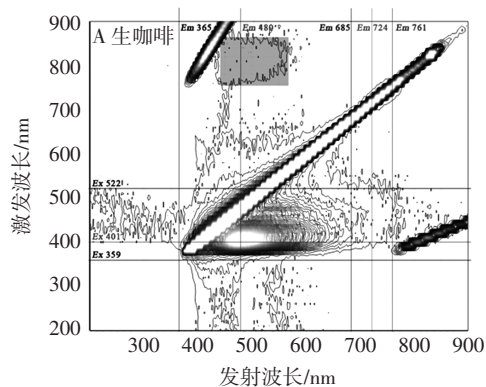
2.2 不同品种生咖啡、烘焙咖啡浸提液 3D-EEM 光谱特征

一些亲水性有机酸、核酸、氨基酸、碳水化合物、表面活性剂等,这些污染物分子结构大多具有共轭双键芳香烃或双键、羰基、羧基等共轭体系,在紫外光区受到特定波长光线的激发照射时会发射不同波长的荧光,咖啡中也含有类似成分。

5种不同品种生熟咖啡豆样品三维荧光差异对比图见图2。

由图2可知,不同品种生咖啡浸提液荧光峰较为散乱,主要荧光峰分布在两块,峰值最高的荧光峰在 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(359 \sim 450) \text{ nm}/(365 \sim 761) \text{ nm}$ 范围,另一块峰值较低为 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(750 \sim 860) \text{ nm}/(450 \sim 560) \text{ nm}$ 范围。咖啡烘焙后浸提液荧光峰与生咖啡浸提液荧光峰范围明显发生变化,荧光峰集中为一块在 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=(380 \sim 600) \text{ nm}$ 。

官能团的含量增加或减少,或发生物质氧化作用时,



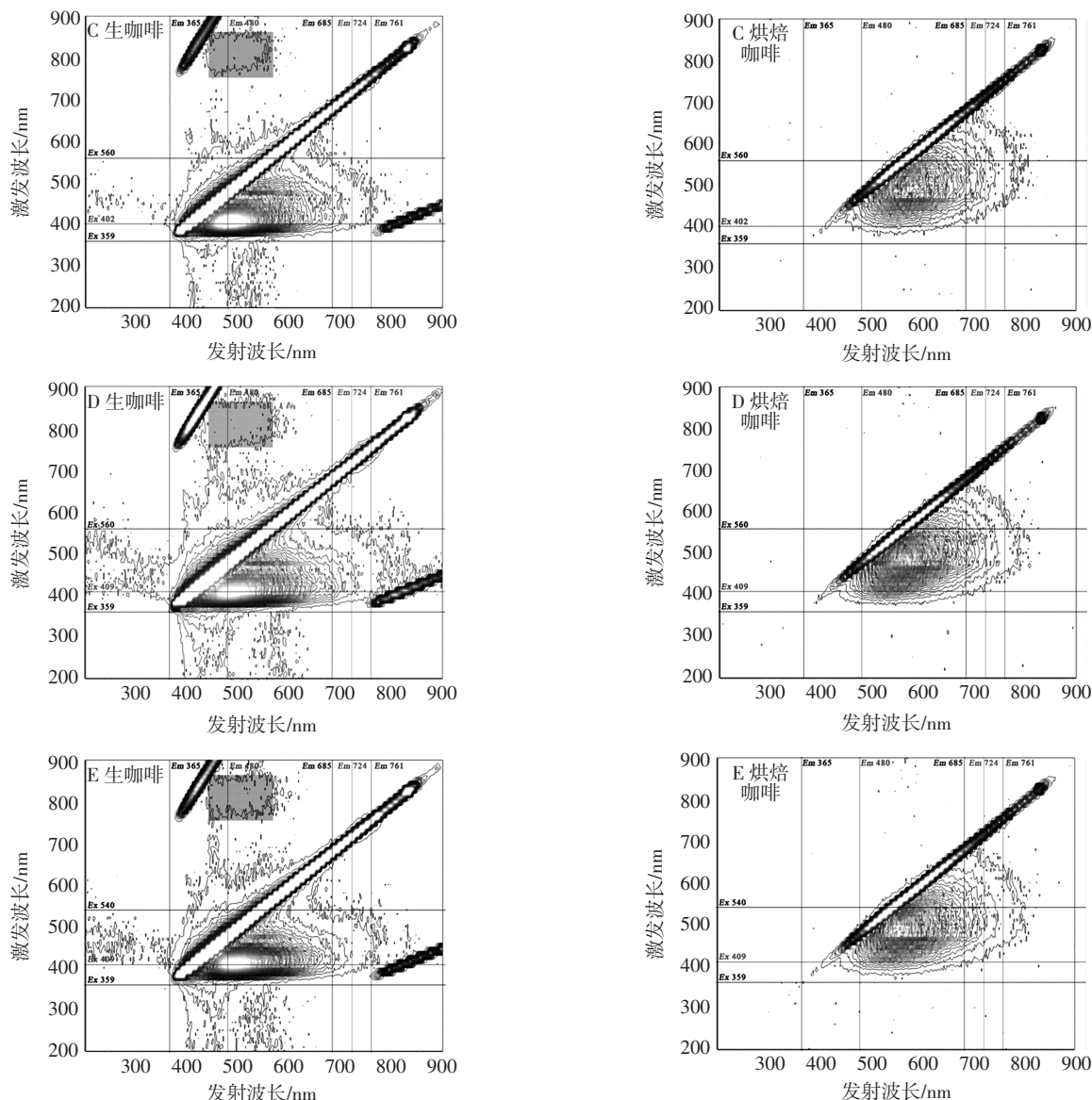


图2 5种不同品种生熟咖啡豆样品三维荧光差异对比图

Fig.2 Three-dimensional fluorescence difference comparison of 5 different varieties of cooked coffee beans

即相应地表现出荧光峰的红移或蓝移。咖啡烘焙后的浸提液中荧光峰最高点从 $\lambda_{ex}=401\text{ nm}$, $\lambda_{em}=480\text{ nm}$, 向 $\lambda_{ex}=480\text{ nm}$, $\lambda_{em}=550\text{ nm}$ 红移, 与咖啡豆中含有羟基、羰基、羧基等荧光基团数量的多少有关。

生咖啡浸提液的荧光峰分布松散, 烘焙咖啡浸提液荧光分布紧密, 黄微^[24]的研究表明, 3D-EEM 等高线的疏密程度反映了投影图中荧光峰的陡峭程度。咖啡烘焙后其等高圈面积增大, 荧光峰强度值变小。最高 λ_{ex} 发生红移, 荧光峰最大值衰减, 推测是由于咖啡中的 CGA、TRG 等物质分解及其他咖啡中化合物转化有关。烘焙咖啡与生咖啡浸提液相比荧光峰偏移的大小不同。

结合文献, 荧光指纹图和荧光位移表来看, 3D-

EEM 可以明显区分咖啡生豆浸提液和烘焙咖啡浸提液, 但由于咖啡成分的复杂性, 在区分咖啡品种方面较为困难。不同品种咖啡豆样品最高峰峰值及主荧光峰位移见表 2。

表2 不同品种咖啡豆样品最高峰峰值及主荧光峰位移

Table 2 Maximum peak-to-peak value and main fluorescence peak displacement table of 5 different species of coffee beans

波长	A	B	C	D	E
生咖啡豆					
λ_{ex}	401.0	403.0	402.0	409.0	409.0
λ_{em}	480.0	480.0	480.0	480.0	480.0
熟咖啡豆					
λ_{ex}	476.4	489.1	482.0	475.0	483.5
λ_{em}	559.3	565.4	563.9	557.7	563.9
λ_{ex} 位移	75.4	86.1	80.0	66.0	74.5
λ_{em} 位移	79.3	85.4	83.9	77.0	83.9

2.3 利用 3D-EEM 对咖啡浸提液中 CGA、CAF、TRG 定量初探
不同品种生熟咖啡豆样品中 CGA、CAF、TRG 差

异性对比见表 3。
结合 3D-EEM 数据分析,发现所有咖啡在烘焙后的浸提液中 CGA、CAF、TRG 荧光值均有下降,通过公

表 3 不同品种生熟咖啡豆样品中 CGA、CAF、TRG 差异性对比
Table 3 Differences of CGA,CAF and TRG in 5 different varieties of cooked coffee beans

品种		A		B		C		D		E	
		荧光值	相对含量/%	荧光值	相对含量/%	荧光值	相对含量/%	荧光值	相对含量/%	荧光值	相对含量/%
CGA $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=372.0/457.0$	生豆	800.2	0.94	688.5	0.81	585.4	0.69	1175.0	1.38	645.8	0.75
	烘焙豆	50.4	0.06	73.0	0.08	85.2	0.10	91.5	0.11	85.2	0.10
CAF 主峰 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=414.0/681.0$	生豆	323.2	4.35	306.3	4.12	404.0	5.43	622.6	8.37	388.1	5.21
	烘焙豆	170.3	2.29	141.4	1.90	127.5	1.72	175.1	2.35	150.9	2.02
TRG $\lambda_{ex}/\lambda_{em}=334.0/380.0$	生豆	83.6	0.08	83.7	0.08	79.6	0.08	106.4	0.10	83.4	0.08
	烘焙豆	37.8	0.04	67.0	0.06	79.9	0.08	80.9	0.08	81.3	0.08

式计算,化合物相对含量=该化合物在咖啡液中特征荧光位置峰值/标准品特征荧光峰值×标准品浓度,得出该化合物的相对含量。可以看出不同品种咖啡生豆 CGA 含量为 0.69%~1.38%,烘焙后下降为 0.06%~0.11%;咖啡生豆 CAF 含量为 4.12%~8.37%,烘焙后下降为 1.71%~2.35%;咖啡生豆 TRG 含量为 0.08%~0.10%,烘焙后下降为 0.04%~0.08%。由于 CAF 在 3D-EEM 中含有两个峰,在计算中只以主峰计算相对含量,因此存在结果偏低可能。除此以外,3D-EEM 含量分析结果与邵金良等^[25]研究结果接近。邵金良等研究表明咖啡及咖啡制品 CGA 含量为 0.32%~6.24%,生咖啡豆>焙炒咖啡豆;CAF 含量 1.10%~4.62%,焙炒咖啡豆>生咖啡豆;TRG 含量为 0.09%~1.41%,生咖啡豆>焙炒咖啡豆。CGA 和 CAF 为第 1 主成分贡献率 64.932%,TRG 为第 2 主成分贡献率 34.944%。3D-EEM 对咖啡中化合物定量的数据变化趋势也符合蔡瑞玲^[26]、吕文佳^[1]与 Casal^[27]等的研究表明,CGA 在咖啡烘焙中,受热分解酯键断裂,生成奎宁酸及阿魏酸、肉桂酸、咖啡酸等物质;TRG 受热分解形成大量 CO₂ 及风味物质,因此,CGA 和 TRG 在咖啡烘焙后含量均会下降。由于 CAF 热稳定性比较强,烘焙对其含量影响不大,但由于烘焙过程中水分丧失,会导致烘焙咖啡中 CAF 的相对含量高于咖啡生豆。

目前,尚无利用 3D-EEM 测定咖啡中 CGA、CAF、TRG 的报道,利用 3D-EEM 对标准品进行指纹图谱建立,利用化合物特征荧光光谱定量,也存在一些问题。1)该技术对所检测的物质有一定限制,检测过程中必须能够捕捉到荧光信息;2)荧光强度会受到环境因素的影响;3)荧光会受到溶液介质中微小粒子或分子的影响而产生散射峰(主要是瑞利散射和拉曼散射)^[28]。作为初探本文并未采用加权法、德劳内三角形内插值

法、平行因子等方法^[29]进行去瑞利散射和拉曼散射,此外在定量方面也未进行加样回收率测试,未来尚需进一步研究。

3 结论

本文初探了不同品种生咖啡、烘焙咖啡浸提液中 CGA、CAF、TRG 的 3D-EEM 分析方法。发现 CGA、CAF、TRG 均有特征荧光峰,不同品种生咖啡、烘焙咖啡浸提液的 3D-EEM 图谱具有差异性。生咖啡浸提液在发射波长为 365 nm~761 nm 范围内会出现特征荧光峰,且荧光峰有各自的特点,易于区分。咖啡烘焙后的浸提液荧光特征最高峰的激发波长、发射波长向高波长区段移动,发生了荧光峰红移现象,不同品种烘焙咖啡浸提液荧光峰位移大小有差异。利用 3D-EEM 结合特征峰强度计算烘焙前后咖啡浸提液中 3 种特征成分含量,可知 CGA、CAF、TRG 在烘焙后含量均有下降。因此,3D-EEM 可对不同地区咖啡豆浸提液中 CGA、CAF、TRG 含量进行初步分析,可以明显区分咖啡生豆浸提液和烘焙咖啡浸提液,但由于咖啡成分的复杂性,在区分咖啡品种方面较为困难。

参考文献:

[1] 吕文佳,刘云,杨凯舟,等.咖啡主要烘焙风味物质的形成及变化规律[J].食品工业科技,2015,36(3):394-400
[2] Koshiro Y, Jackson M C, Katahira R, et al. Biosynthesis of chlorogenic acids in growing and ripening fruits of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* plants [J]. Zeitschrift Für Naturforschung C, 2007, 62 (9-10): 731-742
[3] 张梦娇,王蓓,李妍,等.咖啡中的特征风味组分研究进展[J].食品研究与开发,2016,37(16):213-219
[4] 李海霞,陈榕,周丹,等.咖啡的合成及其药理作用的研究进展[J].华西药杂志,2011,26(2):182-187

- [5] 武菲,付玉杰.葫芦巴碱在植物体内的生理功能[J].安徽农业科学,2012,40(10):5876-5878
- [6] 陈明惠,李昊,陈荣.三维荧光光谱检测地沟油[J].光学仪器,2014,36(1):6-10
- [7] 陶春先,阮俊,舒顺朋,等.三维荧光光谱对食用植物油中煎炸油的检测[J].中国激光,2016,43(1):219-225
- [8] 陈炯,刁玉华,肖丽恒.高效液相色谱法测定云南小粒咖啡豆中咖啡因的含量[J].科技创新导报,2017,14(19):126-127
- [9] 邵金良,杨东顺,樊建麟,等.高效液相色谱—紫外双波长同时测定咖啡及咖啡制品中10种化合物含量[J].食品科学,2016,37(12):128-133
- [10] Tran Van Cuong,鲁海霞,郭康权,等.咖啡中葫芦巴碱检测方法及其含量变化研究进展[J].食品工业,2015,36(8):263-269.
- [11] 王伟,季晓晖,李秀峰,等.HPLC法同时测定茶叶中多酚、咖啡因和维生素C[J].分析实验室,2014,33(12):1443-1446
- [12] 张兰,刘远环,何聿,等.毛细管电泳—电化学检测法用于中药石韦中绿原酸和槲皮素的同步测定[J].分析测试技术与仪器,2015,11(1):22-27
- [13] 陈立新,江帆,党丽敏,等.茶叶和饮料中咖啡因的快速电化学测定[J].食品科学,2014,35(20):220-223
- [14] 尹华.高效液相色谱—串联质谱法测定饮料中6种食品添加剂[J].卫生研究,2017,46(6):971-974,980
- [15] 梁慧,朱伟健,袁智泉,等.超高效液相色谱—串联质谱法对痲痧凉茶中18种活性成分的定量分析[J].分析测试学报,2015,34(5):558-563
- [16] Alarcón-Flores M I, Romero-González R, Martínez Vidal J L, et al. Determination of phenolic compounds in artichoke, garlic and spinach by ultra-high-performance liquid chromatography coupled to tandem mass spectrometry[J]. Food Analytical Methods, 2014, 7(10): 2095-2106
- [17] 高海荣,陈秀丽,杨玉珍,等.超声萃取—紫外分光法快速测定茶叶中咖啡因[J].食品研究与开发,2015,36(1):73-76.DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2015.08.020.
- [18] Liu H, Saito Y, Riza D F A, et al. Rapid evaluation of quality deterioration and freshness of beef during low temperature storage using three-dimensional fluorescence spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2019, 287: 369-374
- [19] 刘欢,刘文,韩东海,等.三维荧光指纹技术在牛乳兽药残留检测与受热程度判别中的应用研究(英文)[J].光谱学与光谱分析,2018,38(5):1633-1639
- [20] 吴静,崔硕,苏伟,等.北京城市水体的三维荧光特征[J].光谱学与光谱分析,2011,31(6):1562-1566
- [21] Lv J, Dou Y Y, Gong W J, et al. Characterization of Dissolved organic matter in hybrid constructed wetlands using three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy[J]. Journal of Water Chemistry and Technology, 2019, 41(2): 113-118
- [22] 李鑫,乔淞汾,朱丹丹,等.活血止痛胶囊的三维荧光指纹图谱研究[J].河北省科学院学报,2019,36(1):55-59
- [23] 何磊,王志伟,吴志超.餐饮废水MBR处理过程中DOM的三维荧光光谱分析[J].中国环境科学,2011,31(2):225-232
- [24] 黄微.基于三维荧光光谱的油类污染物检测方法研究[D].唐山:华北理工大学,2019
- [25] 绍金良,刘兴勇,杨东顺,等.咖啡及咖啡制品中葫芦巴碱、绿原酸和咖啡因含量比较分析[J].山西农业科学,2016,44(2):158-163
- [26] 蔡瑞玲,韩英素,赵晋府,等.焙炒条件对咖啡风味影响的研究[J].饮料工业,2003(6):32-37
- [27] Casal S, Beatriz Oliveira M, Ferreira M A. HPLC/diode-array applied to the thermal degradation of trigonelline, nicotinic acid and caffeine in coffee[J]. Food Chemistry, 2000, 68(4): 481-485
- [28] 梁逸曾.白灰黑复杂多组份分析体系及其化学计量学算法[M].长沙:湖南科学技术出版社,1997
- [29] 唐晓静.活体浮游植物同步荧光光谱特征分析研究[D].青岛:中国海洋大学,2006

收稿日期:2020-01-14