

DOI: 10.13595/j.cnki.issn1000-0720.2020.011003

## HPLC-FLD 法测定青藏高原 4 种茶藨子叶片中游离脂肪酸

邹林有<sup>1,2,3</sup>, 胡娜<sup>1,3</sup>, 王煜伟<sup>2</sup>, 王洪伦<sup>\*1,3</sup>

(1. 中国科学院藏药研究重点实验室, 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2. 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海大学, 西宁 810016; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 采用柱前衍生高效液相色谱-荧光检测法(HPLC-FLD)对茶藨子叶片中的游离脂肪酸进行分析。以2-(4-氨基)苯基-1-氢-菲[9,10-d]咪唑(PIA)作为荧光标记试剂对脂肪酸进行柱前衍生,经梯度洗脱分离、荧光检测和质谱鉴定,建立了同时测定20种脂肪酸的分析方法,并将该方法应用于青藏高原4种茶藨子叶片中游离脂肪酸的分析。结果表明,20种脂肪酸能够在39 min内实现基线分离,方法检测限为0.20~0.58 ng/mL,定量限为1.26~3.94 ng/mL,回收率为84.3%~103.4%。对4种茶藨子叶进行分析,发现其组织中均含有丰富的游离脂肪酸,主要以C18:3, C18:2, C16, C17和C18为主;不饱和脂肪酸的比例较高,尤其是五裂茶藨子,总量达804.8 μg/g,占比达到72.56%。方法可应用于植物叶片中游离脂肪酸的快速测定,为茶藨子植物资源进一步的开发与利用提供科学的依据。

**关键词:** 青藏高原; 茶藨子; 叶片; 游离脂肪酸; 柱前衍生; 高效液相色谱-荧光检测

中图分类号: O657.63 文献标识码: A 文章编号: 1000-0720(2020)10-1183-05

## Determination of free fatty acids of leaves in four species *Ribes* from Qinghai - Tibet plateau by HPLC - FLD

ZOU Linyou<sup>1,2,3</sup>, HU Na<sup>1,3</sup>, WANG Yuwei<sup>2</sup>, WANG Honglun<sup>\*1,3</sup> (1. Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008; 2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016; 3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** Free fatty acids in *Ribes* leaves were analyzed by high performance liquid chromatography fluorescence detection (HPLC-FLD) with pre-column derivatization. The simultaneous determination of 20 kinds of fatty acids by pre-column derivatization with 2-(4-amino) phenyl-1-hydrogen-Philippine [9,10-d] imidazole (PIA) as a derivatization was established after gradient elution, fluorescence detection and online mass spectrometry (MS) identification. The method was also employed to the analysis of free fatty acids in leaves of four species *Ribes* from Qinghai-Tibet plateau. The results showed that baseline separation could be achieved in 39 min. The method was further validated, limits of detection and limits of quantification were in the range of 0.20 - 0.58 ng/mL and 1.26 - 3.94 ng/mL, respectively. The recovery was between 84.3% and 103.4%. There are abundant free fatty acids in the leaves of four *Ribes* species, which were mainly composed of C18:3, C18:2, C16, C17 and C18. Moreover, the proportion of total unsaturated fatty acids was relatively high, especially for *Ribes meyeri* Maxim., the content could reach 804.8 μg/g, and the proportion was up to 72.56%. This method can be applied to the rapid determination of free fatty acids in plant leaves, which also can provide reliably scientific basis for the development and application of *Ribes* resources.

**Keywords:** Qinghai-Tibet plateau; *Ribes*; leaves; free fatty acids; pre-column derivatization; HPLC-FLD

收稿日期: 2020-01-10

基金项目: 青海省科技厅项目(2017-SF-A8, 2017-ZJ-Y11) 资助

作者简介: 邹林有,男(1983-) 副研究员 在读博士。研究方向: 野生植物资源开发利用 zly198300@163.com

\* 通信作者: 王洪伦,男(1979-) 研究员 博士生导师。研究方向: 天然药物化学 hlwang@nwipb.cas.cn

茶藨子属( *Ribes* L. ) 植物属虎耳草科,在中国共有 59 种 30 变种,主要分布在西南、西北至东北<sup>[1]</sup>。其中,青海省有 11 种,1 个变种,主要生于海拔 2800 ~ 4000 m 的林下、林缘灌丛,分布极为广泛<sup>[2]</sup>。茶藨子植物具有良好的食用、观赏及药用价值<sup>[3]</sup>。

目前,对脂肪酸的研究主要使用的方法是气相色谱法(GC)、气相色谱质谱联用法(GC-MS)和高效液相色谱(HPLC)衍生紫外检测法<sup>[4-9]</sup>。关于茶藨子植物脂肪酸研究的文献报道相对较少<sup>[10-11]</sup>。本研究以 2-(4-氨基)苯基-1-氢-菲[9,10-d]咪唑(PIA)为柱前荧光衍生试剂,利用柱前衍生高效液相色谱荧光检测法(HPLC-FLD)<sup>[12-15]</sup>对青藏高原 4 种茶藨子属植物叶中游离脂肪酸的组成进行了研究,以期茶藨子植物的开发与利用提供理论基础。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

Agilent 1260 HPLC-MS (美国 Agilent 公司), 配备四元梯度泵(G1311C)、在线真空脱气机(G1322B)、荧光检测器(G1321B)、自动进样器

(G1329B)和大气压化学电离源(APCI,G1947A); 10DX-FTIR 红外光谱仪(美国 Nicolet 公司); Hypersil GOLD 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm); F-7000 荧光光谱仪(日本日立公司)。

衍生试剂 2-(4-氨基)苯基-1-氢-菲[9,10-d]咪唑(PIA)由本课题组合成; 20 种脂肪酸标准品(阿拉丁试剂(上海)公司); 4-二甲氨基吡啶(DMAP)、1-乙基-(3-二甲氨基丙基)碳酰二亚胺盐酸盐(EDC·HCl)、二甲基甲酰胺(DMF)、氯仿、石油醚等均为分析纯; 乙腈(色谱级,上海化学试剂公司); 色谱用水为屈臣氏纯净水。

### 1.2 实验样品

于 2019 年 7 月在青海西宁市、化隆县、祁连县等区域采集 4 个不同种的茶藨子植物叶片,经青海大学马明呈教授鉴定为香茶藨子(*Ribes odoratum* Wendl.)、黑加仑(*Ribes nigrum* L.)、五裂茶藨子(*Ribes meyeri* Maxim.)和狭果茶藨子(*Ribes stenocarpum* Maxim.)。将采集到的植物叶片在自然条件下阴干,之后于粉碎机粉碎后过 0.25 ~ 0.85 mm 筛,阴凉干燥处保存待用。样品的采集信息如表 1。

表 1 4 种茶藨子属植物样品采集信息  
Table 1 The information of samples location

Species name	Origin	Altitude/ m	Longitude	Latitude
<i>Ribes odoratum</i> Wendl.	Ershilipu Town, Xining City	2356	E101°44.249	N36°42.978′
<i>Ribes nigrum</i> L.	Shidacang Town, Hualong County,	2828	E102°20.590′	N36°8.664′
<i>Ribes meyeri</i> Maxim.	Babao Town, Qilian County	2859	E100°15.326′	N38°9.570′
<i>Ribes stenocarpum</i> Maxim.	Babao Town, Qilian County	2694	E100°11.969′	N38°13.056′

### 1.3 标准品溶液配制

称取脂肪酸标准品,用色谱纯乙腈配成浓度为 10 mmol/L 的单标溶液,相应低浓度 0.5 mmol/L 的混合溶液由单标和乙腈混合稀释获得。称取 0.3665 g DMAP,用乙腈定容至 10 mL,浓度为 0.3 mol/L。称取 30.94 mg PIA 溶解于 10 mL DMAP 溶液中,浓度为 10 mmol/L。称取 191.7 mg EDC 用乙腈定容至 10 mL,浓度为 0.1 mol/L。所有溶液置于 4℃ 保存备用。

### 1.4 样品制备

称取 0.20 g 样品于 10 mL 玻璃刻度试管中,加入 5 mL 石油醚,50℃ 超声提取 30 min,再加入 3 mL 石油醚进行第 2 次提取。以 4000 r/min 速度离心 12 min,移取上清液 1 mL 在氮气流下吹干,乙腈复溶备用。

### 1.5 衍生化反应

向 2 mL 安瓿瓶中依次加入 20 μL 脂肪酸混合标准品溶液或提取物溶液,75 μL 衍生试剂,60 μL EDC 溶液,密封后摇匀,90℃ 水浴中震荡反应 1 h。反应结束后,加入乙腈稀释至 500 μL,过 0.45 μm 尼龙膜进行 HPLC 分析。

### 1.6 色谱、质谱条件

色谱条件: 荧光激发波长 245 nm,发射波长 410 nm。流动相 A: 5% 乙腈; 流动相 B: 100% 乙腈。液相洗脱梯度如下: 0 ~ 8 min, 65% ~ 90% B; 8 ~ 18 min, 90% ~ 92% B; 18 ~ 23 min, 92% ~ 100% B; 23 ~ 40 min, 100% B。进样量 10 μL,柱温 30℃,流速 0.8 mL/min。每次进样前用初始浓度平衡 5 min,色谱峰按标准对照品保留时间定性。

质谱条件: 大气压化学电离源(APCI) 正离子

模式, 喷雾压力 413 kPa; 干燥气流量 5 L/min, 干燥气温度 350℃, 气化温度 450℃, 毛细管电压 3.5 kV, 电晕电流 4000 nA(POS)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 提取条件优化

脂肪酸的常用提取方法主要是索式提取法、超临界 CO<sub>2</sub> 萃取法及超声提取法等<sup>[16-19]</sup>。经比较, 超声提取比较简单和廉价, 可以增加植物组织中脂肪酸的提取得率, 因此本实验中采取超声法提取脂肪酸。4 种有机试剂 - 乙醇、氯仿、氯仿甲醇(2:1, V/V) 和石油醚被用来提取脂肪酸, 结果表明氯仿甲醇体系作为溶剂时, 脂肪酸的提取率最高, 其次是石油醚。但是, 考虑到氯仿的毒性以及 AOAC 制定的石油醚作为提取脂肪酸的溶剂, 最终采用石油醚超声提取脂肪酸。

### 2.2 色谱分离和质谱鉴定

色谱分离: 考察了 Hypersil BDS C8 色谱柱(200 mm × 4.6 mm, 5 μm)、Agilent C18 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm)、Hypersil GOLD 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm)、Spherisorb C18 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm) 和 Hypersil BDS C18 色谱柱(200 mm × 4.6 mm, 5 μm) 对脂肪酸衍生物分离效果的影响。结果表明, Hypersil GOLD 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm) 对脂肪酸的分离效果更好。同时, 本实验考察了常用的流动相体系乙腈 - 水体系和甲醇 - 水体系对分离效果的影响。当选择用乙腈 - 水体系作为流动相时, 脂肪酸各衍生物的峰形更尖锐、峰对称性更好, 分离度更佳。最终实验结果表明, 以乙腈 - 水(5:95, V/V) 为流动相 A, 100% 乙腈为流动相 B 作为条件, 在 39 min 内可实现对 20 种脂肪酸的完全分离。

质谱鉴定: 电喷雾离子源(ESI) 的正离子模式被用于进一步鉴定脂肪酸的衍生物。C9 衍生后的

质谱图显示  $m/z$  450.2 为其特异性强度较大的分子离子峰,  $m/z$  364.0 和  $m/z$  310.5 是其分子离子碰撞后产生的碎片离子峰。碎片离子峰  $m/z$  310.5 来自于脂肪酸衍生物的 N-CO 键的断裂, 碎片离子峰  $m/z$  364.0 则是来自于碳链的 C-C 键的断裂。碎片离子峰  $m/z$  310.5 是鉴定脂肪酸衍生物的有效判定。

### 2.3 方法验证

对所建立的方法的线性、检测限、定量限、精确度和回收率进行了验证, 验证结果如表 2 所示。20 种脂肪酸在浓度为 0.078 ~ 10.0 mmol/L 的范围内, 线性关系良好, 线性相关系数均 > 0.9962。方法的检出限 LODs( $S/N=3$ ) 为 0.20 ~ 0.58 ng/mL, 定量限 LOQs( $S/N=10$ ) 为 1.26 ~ 3.94 ng/mL。精密度的测定是通过通过对同一标准品溶液平行分析 6 次来获得的, 结果表明该方法的日内精密度和日间精密度分别小于 3.1% 和 5.6%。回收率实验结果表明, 脂肪酸的回收率均在 84.3% ~ 103.4% 之间。

### 2.4 样品中游离脂肪酸含量分析

茶藨子叶片中游离脂肪酸色谱分析如图 1 所示, 测定结果列于表 3。由表 3 可知, 香茶藨子、黑加仑、五裂茶藨子和狭果茶藨子叶片中均含有较丰富的游离脂肪酸, 游离脂肪酸的种类主要以 C18:3, C18:2, C16, C17 和 C18 为主。4 种茶藨子叶片中的总脂肪酸含量存在较大差异, 最高为五裂茶藨子, 达到 1109 μg/g, 最低为香茶藨子, 达到 82.7 μg/g, 这种差异可能是栽培种与野生种的区别(香茶藨子、黑加仑为栽培种, 五裂茶藨子、狭果茶藨子为野生种)。不饱和脂肪酸的比例均较高, 最高为五裂茶藨子, 达到 72.6%, 最低为香茶藨子, 达到 47.3%。特别是五裂茶藨子, 不饱和脂肪酸 C18:3, C18:2 的含量高达 362.5 μg/g 和 339.8 μg/g。

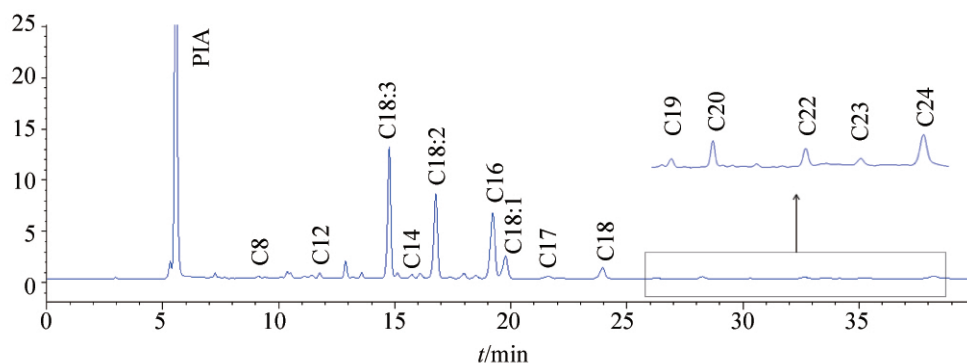


图 1 五裂茶藨子叶片中游离脂肪酸衍生物的色谱分析图

Fig. 1 Chromatogram of fatty acid derivatives from leaves of *Ribes meyeri* Maxim

表 2 相关系数、检测限、定量限、精密度及回收率测定

Table 2 Linear regression equations , correlation coefficients , limits of detection , limits of quantification , precisions and recoveries for fatty acids

Analyte	Regression Equation	R <sup>2</sup>	LOD/ ( ng/mL)	LOQ /( ng/mL)	RSD/% ( n =6)		Recovery/% ( n =3)
					Intra-day	Inter-day	
C8	$y = 0.0556x - 0.1670$	0.9962	0.23	1.69	1.2	1.8	92.1 ± 1.6
C9	$y = 0.0672x - 0.1750$	0.9964	0.20	2.48	1.6	2.1	90.7 ± 3.3
C10	$y = 0.0701x - 0.1898$	0.9965	0.23	1.92	2.0	3.4	91.6 ± 2.1
C11	$y = 0.0943x - 0.2151$	0.9967	0.40	1.26	1.5	2.6	87.9 ± 0.8
C12	$y = 0.0669x - 0.2177$	0.9969	0.45	1.84	1.8	3.1	90.4 ± 2.3
C13	$y = 0.0837x - 0.2303$	0.9970	0.30	2.42	2.1	3.6	88.4 ± 1.8
C18:3	$y = 0.1092x - 0.3025$	0.9969	0.51	2.76	2.4	3.9	94.5 ± 2.5
C14	$y = 0.1051x - 0.2766$	0.9971	0.29	1.62	1.1	2.5	103.4 ± 3.9
C18:2	$y = 0.1332x - 0.2923$	0.9973	0.35	1.34	3.1	5.6	89.1 ± 1.6
C15	$y = 0.1002x - 0.2512$	0.9974	0.30	1.87	2.6	3.1	84.3 ± 3.6
C16	$y = 0.0784x - 0.2651$	0.9974	0.46	3.94	1.2	2.8	87.4 ± 4.3
C18:1	$y = 0.1145x - 0.2988$	0.9974	0.29	2.66	1.8	3.1	84.8 ± 4.2
C17	$y = 0.1158x - 0.2845$	0.9974	0.44	1.97	2.6	4.9	94.4 ± 2.3
C18	$y = 0.1221x - 0.293$	0.9976	0.36	2.13	1.9	3.7	89.2 ± 3.2
C19	$y = 0.1238x - 0.3055$	0.9976	0.53	2.57	2.3	4.6	90.7 ± 1.3
C20	$y = 0.1038x - 0.3212$	0.9977	0.58	1.74	2.1	3.8	87.4 ± 2.8
C21	$y = 0.1303x - 0.3318$	0.9978	0.49	1.41	1.5	3.7	88.6 ± 4.1
C22	$y = 0.1505x - 0.3462$	0.9979	0.43	1.69	2.7	4.9	94.7 ± 1.5
C23	$y = 0.1514x - 0.3573$	0.9981	0.46	1.84	1.9	3.5	90.4 ± 2.9
C24	$y = 0.1411x - 0.0675$	0.9986	0.46	2.35	2.2	3.8	87.1 ± 2.7

Note:  $x$  = peak area ,  $y$  = theoretical concentration of fatty acids

表 3 4 种茶藨子叶片中游离脂肪酸含量测定

Table 3 The measured contents of free fatty acids in leaves of four *Ribes* species

Free Fatty Acid	Found/( μg/g)			
	<i>R. odoratum</i>	<i>R. nigrum</i>	<i>R. meyeri</i>	<i>R. stenocarpum</i>
C8	ND	1.93 ± 0.05	4.18 ± 0.14	1.04 ± 0.03
C9	ND	ND	0.95 ± 0.02	0.66 ± 0.01
C10	1.15 ± 0.04	1.25 ± 0.04	4.00 ± 0.11	ND
C11	ND	ND	ND	ND
C12	0.52 ± 0.01	1.26 ± 0.05	2.13 ± 0.07	0.75 ± 0.02
C13	ND	ND	ND	ND
C18:3	29.75 ± 0.92	72.44 ± 2.99	362.51 ± 10.35	62.65 ± 2.31
C14	ND	5.29 ± 0.21	10.10 ± 0.59	3.17 ± 0.12
C18:2	9.37 ± 0.33	26.21 ± 0.61	339.79 ± 10.87	44.38 ± 1.21
C15	ND	1.65 ± 0.06	3.75 ± 0.11	1.28 ± 0.03
C16	18.76 ± 0.64	32.03 ± 1.01	187.48 ± 6.93	59.33 ± 2.10
C18:1	ND	ND	102.50 ± 3.15	13.71 ± 0.43
C17	11.30 ± 0.81	14.10 ± 0.58	14.82 ± 0.45	13.42 ± 0.51
C18	6.97 ± 0.28	11.87 ± 0.39	56.34 ± 2.02	23.15 ± 0.72
C19	4.24 ± 0.15	4.26 ± 0.13	3.22 ± 0.46	3.80 ± 0.09
C20	0.60 ± 0.01	1.23 ± 0.06	7.63 ± 0.27	1.88 ± 0.04
C21	ND	ND	ND	0.58 ± 0.01
C22	ND	ND	0.74 ± 0.03	2.87 ± 0.07
C23	ND	ND	ND	4.63 ± 0.11
C24	ND	ND	8.98 ± 0.18	ND
Total Unsaturated FFA	39.12	98.65	804.8	120.74
Total FFA	82.66	173.52	1109.12	237.3
Ratio of Unsaturated FFA/%	47.33	56.85	72.56	50.88

ND: not detect.

### 3 结论

利用合成试剂 2-(4-氨基)苯基-1-氢-菲 [9, 10-d]咪唑(PIA)作为衍生试剂,对 20 种脂肪酸化合物进行了柱前标记,并对样品前处理条件和色谱分离条件分别进行了优化,建立了一种快速测定游离脂肪酸的高效液相检测方法。此方法能够在 39 min 内使得 20 种脂肪酸实现基线分离。与本文

文献中的方法相比,本方法表现出灵敏度高、稳定性好、反应条件温和等优点;同时,本实验所用的荧光衍生试剂具有更好的性能和分离度,且经条件优化后分离时间更短、效率更高。该方法成功地被应用于香茶藨子、黑加仑、五裂茶藨子和狭果茶藨子叶片中游离脂肪酸的测定。

### 参考文献

- [1] Chinese flora commission of chinese academy of sciences. flora reipublicae popularis sinicae. Vol. 25(1) [M]. Beijing: Science Press, 1998: 280.  
中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志(第 25 卷第 1 分册) [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 280.
- [2] Li Y J. Flora of woody plants in qinghai [M]. Xining: Qinghai people's publishing house, 1987: 223.  
李耀阶. 青海木本植物志 [M]. 西宁: 青海人民出版社, 1987: 223.
- [3] Zhang J J, Ma M C, Xu Z C, Tian F, Zhang W. J Qinghai Univ (Nat Sci Ed) 2013, 31(3): 17.  
张晶晶, 马明呈, 徐宗才, 田丰, 张文. 青海大学学报: 自然科学版, 2013, 31(3): 17.
- [4] Hu M L, Zhang S, Fang Y, Fang S Q, Zhang X J. Chin J Anal Lab 2019, 38(5): 569.  
胡梦玲, 张帅, 方益, 方双琪, 张小军. 分析试验室, 2019, 38(5): 569.
- [5] Xia F B, Feng R B, Xu F G, Su H X, He C W, Hu Y J, Wan J B. Anal Chim Acta 2019, 1082: 86.
- [6] Gao Y P. J Anal Sci 2019, 35(2): 257.  
高永平. 分析科学学报, 2019, 35(2): 257.
- [7] Deng L, He J R, He Y, Shu J. China Condiment 2019, 44(6): 157.  
邓莉, 何静仁, 何毅, 舒静. 中国调味品, 2019, 44(6): 157.
- [8] Hayoung K, Joseph K, So Y C, Yun G A. J Anal Sci Technol 2019, 10(1): 1.
- [9] Chai J H, He T T, Zhong D B, Jin Z M. Food Res Dev 2017, 38(6): 133.  
柴军红, 何婷婷, 钟读波, 金志民. 食品研究与开发, 2017, 38(6): 133.
- [10] Liu L, Yang Y H, Wang D N, Gu X C, Yu Y X. Chinese J Anal Chem, 1993(3): 339.  
刘丽, 杨英华, 王大宁, 顾学成, 余元祥. 分析化学, 1993(3): 339.
- [11] Liu H Z, Hao R, Zhao X S, Li X D. Chin Wild Plant Res, 1995(03): 31.  
刘洪章, 郝瑞, 赵晓松, 李香丹. 中国野生植物资源, 1995(03): 31.
- [12] Hu N, Ji Z Y, Wang A H, Han L J, You J M, Suo Y R. Asian J Chem 2014, 26(24): 8339.
- [13] Hu N, Suo Y R, Han L J, Suo Y F, You J M. J Anal Sci, 2015, 31(1): 43.  
胡娜, 索有瑞, 韩丽娟, 索有芳, 王宁, 尤进茂. 分析科学学报, 2015, 31(1): 43.
- [14] Chen W Y, Chen Z, You J M. J Daqing Norm Univ, 2017, 37(3): 72.  
陈文艳, 陈志, 尤进茂. 大庆师范学院学报, 2017, 37(3): 72.
- [15] Wang H Y, Wang C, Guo L X, Zheng Y F, HU W H, Dong Tina T X; Wang T J; Tsim Karl W K. J Sep Sci 2019, 42(15): 2500.
- [16] Zhang Z, Lv Z Y, Ge F H, Ma J F, Yu R M. Mod Food Sci Tech 2017, 33(9): 276.  
张陈, 吕振岳, 葛发欢, 马晋芳, 于荣敏. 现代食品科技, 2017, 33(9): 276.
- [17] He Y J, Su Z H, Ning X Q, Dou H T, Wu H J, Zhang Y. Food Ind 2018, 39(7): 75.  
何雅静, 苏志豪, 宁晓强, 窦华亭, 吴厚玖, 张玉. 食品工业, 2018, 39(7): 75.
- [18] Zhou Y F, Zhang H D, Xiong K, Shen Y, Chen J, Tang Y T, Li X J, Hu Y Y. Sci Tech Food Ind 2019, 40(20): 334.  
周玉凤, 张海东, 熊昆, 申渝, 陈佳, 唐源桃, 李晓捷, 胡玥玥. 食品工业科技, 2019, 40(20): 334.
- [19] Wang H Y, Chao Y Z, Li D M, Hu B. Chem Ind For Prod 2019(6): 1.  
王豪缘, 钞运竹, 李冬梅, 胡滨. 林产化学与工业, 2019(6): 1.