

6 种鱼类鱼汤中脂肪酸组成和挥发性风味物质比较

徐斯婕^{1,2}, 张 权^{1,2}, 胡明明^{1,2}, 钟比真^{1,2}, 李金林^{1,2*}

(1. 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022; 2. 江西师范大学, 国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西省淡水鱼高值化利用工程技术研究中心, 南昌 330022)

摘 要: **目的** 探究 6 种不同鱼类脂肪酸组成, 及其鱼汤中挥发性风味物质的差异与联系。**方法** 分别采用气相色谱法和气相色谱-质谱法, 对鳊鱼、鲫鱼、鳙鱼、黄鱼、三文鱼、鲢鱼 6 种鱼类鱼肉脂肪酸组成与鱼汤中的挥发性风味物质进行测定与对比。**结果** 在 6 种鱼肉中共检测出 20 种脂肪酸, 鳊鱼、鲫鱼、鳙鱼与三文鱼中主要含有棕榈酸、油酸和亚油酸, 相比于这 4 种鱼, 鲢鱼和黄鱼中的 ω -3 多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA)含量较高, 而亚油酸含量较少。在鱼汤中共检测出挥发性风味物质 72 种, 鱼汤的挥发性风味物质中均以萜类、醛类、醇类、烃类为主, 淡水鱼的挥发性风味物质中醇类与醛类含量均高于海水鱼。**结论** 黄鱼与淡水鱼脂肪酸组成接近, 鲢鱼和黄鱼的 ω -3 PUFA 含量较高, 脂肪酸组成对醛、醇、酮等风味影响较大, 不同鱼制备的鱼汤中脂肪氧化型风味存在较大差异。

关键词: 鱼类; 鱼汤; 脂肪酸; 挥发性风味物质

Comparative of fatty acid composition and volatile flavor compounds in fish soups made from 6 kinds of fishes

XU Si-Jie^{1,2}, ZHANG Quan^{1,2}, HU Ming-Ming^{1,2}, ZHONG Bi-Zhen^{1,2}, LI Jin-Lin^{1,2*}

(1. College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 2. National Research and development Center for Freshwater Fish Processing, Engineering Research Center for Freshwater Fish High-value Utilization of Jiangxi Province, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

ABSTRACT: Objective To explore the fatty acid composition of 6 kinds of different fish, and explore the differences and relationships of volatile flavor substances in fish soup. **Methods** The fatty acid compositions of 6 kinds of fish, including *Parabramis pekinensis*, *Carassius auratus*, *Aristichthys nobilis*, *Larimichthys crocea*, *Oncorhynchus*, *Gadus macrocephalus*, and the volatile flavor substances in fish soup were determined and compared by gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry, respectively. **Results** A total of 20 kinds of fatty acids were detected in 6 kinds of fish, *Parabramis pekinensis*, *Carassius auratus*, *Aristichthys nobilis*, *Oncorhynchus*, mainly contained palmitic acid, oleic acid and linoleic acid, compared with these 4 kinds of fish, *Gadus macrocephalus* and *Larimichthys crocea* had higher content of ω -3 polyunsaturated fatty acids (PUFA), and less linoleic acid. A total of 72 kinds of volatile flavor compounds

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060557)、江西省重点研发计划项目(20203BBFL63062)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (32060557), and the Key Research and Development Project of Jiangxi Province (20203BBFL63062)

*通信作者: 李金林, 高级工程师, 主要研究方向为水产加工、风味化学与食物资源高值化利用。E-mail: lijnlin405@126.com

*Corresponding author: LI Jin-Lin, Senior Engineer, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, No.99, Ziyang Road, Nanchang County, Nanchang 330022, China. E-mail: lijnlin405@126.com

were detected in fish soups, the volatile flavor compounds in fish soups were mainly terpenoids, aldehydes, alcohols and hydrocarbons, the content of alcohols and aldehydes in the volatile flavor compounds of freshwater fish were higher than those of seawater fish. **Conclusion** The fatty acid composition of yellow croaker is similar with freshwater fish, and *Oncorhynchus* and *Gadus macrocephalus* have higher content of ω -3 PUFA, and the composition of fatty acids has a great influence on the flavor of aldehydes, alcohols and ketones, and there is a great difference in the flavor of lipid oxidation in fish soup prepared by different fish.

KEY WORDS: fish; fish soup; fatty acid; volatile flavor compounds

0 引言

鱼类因蛋白质含量高、脂肪含量低且富含多不饱和脂肪酸及矿物质而被人们追捧。生鲜肉常需通过热加工处理才能产生香味。中国烹饪方式多种多样,目前鱼肉加工方式主要有煎、炸、水煮、蒸制、烤制等^[1]。其中鱼汤因其鱼肉蛋白水解完全、滋味小肽含量高、营养物质保存好、风味醇厚等深受广大消费者的喜爱。目前国内外对鱼汤的研究主要集中在其营养特性、滋味等^[2-4],对其挥发性风味成分研究较少。本课题组前期已对草鱼鱼汤烹制过程中风味物质的变化及形成规律进行了研究^[5-6],发现草鱼汤中风味物质主要来源于煮制过程中香辛料中物质的溶解与鱼肉中脂肪酸的氧化,其中萜烯类物质主要来源于生姜,含硫化物主要来源于大蒜;脂肪族的醛、醇、酮及芳香族化合物主要来源于草鱼脂肪的氧化。关海宁等^[7]研究也表明,在肉汤煮制的过程中,肉中的脂质会受热分解为游离脂肪酸并进一步形成挥发产生风味物质,且鱼肉中的脂肪酸组成差异对其风味形成具有较大影响。因此,为进一步探究不同来源鱼类脂肪酸差异及其对鱼汤风味物质的影响,本研究对制备鱼汤的 3 种常用淡水鱼类[鳊鱼(*Parabramis pekinensis*)、鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)、鲫鱼(*Carassius auratus*)]及 3 种常用海水鱼[黄鱼(*Larimichthys crocea*)、三文鱼(*Oncorhynchus*)、鳕鱼(*Gadus macrocephalus*)]的脂肪酸含量及鱼汤风味物质进行分析,并探究鱼肉脂肪酸组成与鱼汤中挥发性风味物质差异的联系,以期丰富我国烹饪的风味化学理论,为我国鱼汤的工业化、标准化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲫鱼、鳙鱼、鳊鱼、生姜、大蒜购于南昌天虹商场;冰冻三文鱼块、鳕鱼块、黄鱼购于南昌家乐福超市;大豆油购于益海嘉里(南昌)粮油食品有限公司。

二氯甲烷(分析纯,天津大茂化学试剂厂);无水硫酸钠(分析纯,广东西陇化工有限公司);邻二氯苯内标(纯度 99.9%,上海安谱科技仪器有限公司);香精标准品(纯度 $\geq$ 99%,美国 Sigma 公司);37 种脂肪酸甲酯混合标准品(上海安谱实验科技股份有限公司)。

1.2 仪器与设备

C21-DC005 型电磁炉(九阳股份有限公司);ZQ02CJ2

不粘锅(浙江爱仕达电器股份有限公司);1000-500 型同时蒸馏萃取装置(安徽东冠机械设备有限公司);20 cm 韦氏分馏柱(南昌市青云谱区恒盛玻璃仪器厂);DK-98-1 型电热恒温水浴锅(天津市泰斯特仪器有限公司);Leader-A1 超纯水机(上海领德仪器有限公司);Milli-Q 超纯水机(美国 Millipore 公司);DB-WAX 毛细管柱(30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)、HP-INNOWAX 毛细管柱(30 m $\times$ 0.32 mm, 0.25 μ m)、7890A/5975 气相色谱-质谱联用仪(美国 Agilent 公司);RE-52C 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);MTN-2800D 氮吹浓缩装置(天津奥特赛恩斯仪器有限公司);TGL16A 台式高速低温离心机(湖南凯达科学仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 预处理

新鲜活鱼,经宰杀、去鳞、去内脏、去头、去尾、清洗后,沿鱼背鳍两侧剖开,去鱼鳍,得鱼背部肉。将鱼背部肉切成鱼块(125 g/块),随机混合,搭配均匀,并从中取两块制成一份样品(250 g/份),冷藏放置,备用。

冰冻黄鱼,经解冻、去头、去内脏、去鳞、清洗后,沿鱼背部两侧剖开,得鱼肉,将鱼背肉切成鱼块(125 g/块),取两块制成一份样品(250 g/份)。三文鱼、鳕鱼直接选购冰冻鱼肉块,解冻后称取 250 g 制成一份样品。

1.3.2 鱼汤的制备

参照李金林等^[5]的方法,取 23 g 大豆油,倒入不粘锅中,采用电磁炉加热,功率设置为 1400 W、2 min 后,放入鱼块(250 g),在相同功率下油煎 2 min(正反各 1 min),倒入 80~100 $^{\circ}$ C 热水 1000 g,待水沸腾后加入生姜 4.5 g、大蒜 8.7 g,并开始计时,并在相同功率下煮制 25 min 后停止加热,趁热($\geq$ 80 $^{\circ}$ C)采用双层普通医用纱布过滤,得鱼汤,计重并用 80~100 $^{\circ}$ C 热水稀释至 250 g,备用。

1.3.3 鱼汤风味挥发性成分萃取

参照 RATTAN 等^[8]方法,以二氯甲烷作为萃取剂,采用同时蒸馏萃取(simultaneous distillation-extraction, SDE)装置进行鱼汤风味物质萃取,取 1.3.2 中制备的鱼汤 100 g 放入 1000 mL 圆底烧瓶中并加入 500 g 水,取 250 mL 二氯甲烷放入 500 mL 圆底烧瓶,同时接入同时蒸馏萃取仪,其中水相(含样品的圆底烧瓶)接入高端,有机相接入低端,水相采用可温控电磁炉加热,温度维持在 100 $^{\circ}$ C,有机相采用水浴锅加热,温度维持在 58 $^{\circ}$ C,萃取 2.5 h,收集有机

相, 加入 25 g 无水硫酸钠置于冰箱冷藏过夜, 备用。

1.3.4 风味萃取液的浓缩

采用韦氏分馏柱分馏, 初始温度 30 °C, 逐步提高温度, 使溶剂蒸发速度控制在 2~3 s/滴, 浓缩结束后转移至样品瓶, 加入一定量已知浓度的内标物(邻二氯苯标准储备液), 用二氯甲烷定容至 2 mL。

1.3.5 脂肪酸成分测定

参照 LI 等^[9]方法。取生鱼肉样品 25 g, 加入 50:100:50 (V:V:V)的氯仿-甲醇-蒸馏水溶液 200 mL, 在 4 °C 冰浴下, 采用高速组织匀浆机以 9600 r/min 转速均质 2 min, 随后加入氯仿 50 mL, 继续均质 1 min, 加入 50 mL 蒸馏水后再继续均质 30 s。其后 4 °C、1200 r/min 离心 10 min, 上清液经分液瓶分液, 氯仿层转入 125 mL 锥形瓶中, 加 2~5 g 无水硫酸钠充分摇匀后采用中速滤纸过滤, 滤液经真空旋转蒸发至接近干燥(干燥时水浴温度控制 20 °C), 然后采用氮气将萃取液吹干, 备用。

参照 ISO 1990:5508 方法进行脂肪酸的甲酯化, 然后采用气相色谱法(gas chromatography, GC)进行脂肪酸组成的测定, 色谱柱: HP-INNOWAX 毛细管柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm), 以氮气为载气, 流速 1 mL/min; 采用分流模式, 分流比 1:2; 程序升温: 起始温度为 100 °C, 保持 0 min; 以 5 °C/min 的速率升至 200 °C; 再以 1 °C/min 升温至 230 °C 并保持 10 min, 进样口与检测器温度分别设置为 250 和 300 °C。脂肪酸甲酯混合标准品采用相同的色谱条件进行分析, 根据保留时间及峰面积计算样品中脂肪酸含量。

1.3.6 气相色谱-质谱法分析

色谱条件: 色谱柱为 DB-WAX 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 250 °C; 载气 He, 流速 1.0 mL/min; 采取分流模式进样, 进样量 1 μL, 分流比 10:1; 升温程序: 起始温度 40 °C, 保持 3 min, 以 5 °C/min 的速度升至 240 °C, 保持 10 min。

质谱条件: 电子轰击(electron impact, EI)电离源, 电离电压 70 eV, 离子源温度 230 °C, 四极杆温度 150 °C, 扫描质量范围为 35~400 amu。

定量方法: 以邻二氯苯为内标, 依据待测成分与内标物的色谱峰面积比计算待测成分在供试样品中浓度, 并根据样品处理过程计算鱼汤中待测成分浓度。

挥发性成分鉴定: 采用 GC-MS 进行草鱼汤风味挥发性成分分析与鉴定, 获得供试样品的 GC-MS 色谱图, 与 NIST 08 质谱库进行匹配, 同时测定各组分的线性保留指数(linear retention indice, LRI)^[10-11], 与其他文献的相对保留指数进行比较, 并经标准品确认, 最终鉴定各挥发性风味物质。

1.3.7 统计分析

除挥发性风味物质测定的数据外, 本研究所测数据均表示为平均值±标准偏差, 重复 2 次, 且采用 SPSS 19.0 对数据进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较分析,

$P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 6 种鱼类鱼肉脂肪中脂肪酸组成分析

由表 1 可知, 6 种鱼肉中共检测出 20 种脂肪酸, 其中, 3 种淡水鱼和三文鱼脂肪中以棕榈酸(C16:0)、油酸(C18:1n-9)、亚油酸(C18:2n-6)为主, 这 3 种脂肪酸占其总脂肪的 80.70%、74.74%、71.94%、57.00%。黄鱼中棕榈酸、棕榈油酸、油酸、二十二碳六烯酸(docosahexaenoic acid, DHA)含量较高, 这 4 种脂肪酸占其总脂肪的 74.82%; 鳕鱼中棕榈酸、油酸、二十碳五烯酸(eicosapentaenoic acid, EPA)、DHA 含量较高, 这 4 种脂肪酸分别占其总脂肪的 75.65%, 由此可见, 6 种鱼肉脂肪中脂肪酸组成存在差异。

脂质是鱼汤中挥发性化合物的重要前体物质, 脂质在鱼汤熬制的过程中会发生一系列复杂的变化, 对鱼汤的风味起关键作用^[6], 脂肪氧化是挥发性风味成分(包括醛类、酮类、烃类、酯类等)产生的重要来源^[12]。此外, 不饱和脂肪酸因为有双键的存在, 比饱和脂肪酸更容易发生氧化, 产生风味性物质, 且其氧化产物如酮、醛等挥发性羰基化合物可以产生特有的香气, 如肉香味、油脂味和醛味等, 是食物在烹饪中风味物质的重要来源^[13]。

由表 1 可知, 6 种鱼肉脂肪中 MUFA 均以油酸为主, 油酸可氧化产生辛醛和壬醛^[14], 这两种物质主要赋予鱼汤腥味、青草味、黄瓜味、熟土豆味等。油酸含量从高到低排序分别为鳊鱼(46.36%)>三文鱼(41.82%)>鲫鱼(29.27%)>鳙鱼(22.18%)>鳕鱼(20.87%)>黄鱼(20.27%), 其中, 黄鱼与鳕鱼之间没有显著性差异, 其他 4 种鱼之间均存在显著性差异($P<0.05$)。但是黄鱼中棕榈油酸(11.06%)含量显著高于其他 5 种鱼($P<0.05$), 而棕榈油酸氧化可以形成挥发性醇类物质 1-壬醇、1,4-戊二醇等^[15]。6 种鱼肉脂肪中 ΣMUFA 含量从高到低分别为鳊鱼(51.43%)>三文鱼(45.56%)>黄鱼(33.37%)>鲫鱼(32.81%)>鳙鱼(28.58%)>鳕鱼(22.95%), 其中, 除黄鱼与鲫鱼之间没有显著性差异, 其他鱼之间均存在显著性差异。

除黄鱼和鳕鱼外, 各鱼肉脂肪中的 PUFA 均以亚油酸(C18:2n-6)为主, 其含量从高到低依次为鲫鱼(31.34%)>鳙鱼(18.92%)>鳊鱼(18.15%)>三文鱼(17.90%)>鳕鱼(6.69%)>黄鱼(1.64%), 6 种鱼之间均存在显著性差异($P<0.05$), 亚油酸可氧化产生(E)-2-辛烯醛、(E)-2-癸烯醛、己醛等^[16]。黄鱼和鳕鱼两种海水鱼脂肪中的 PUFA 以 EPA 和 DHA 为主, EPA+DHA 含量从高到低依次为鳕鱼(36.31%)>黄鱼(21.98%)>鳙鱼(10.46%)>三文鱼(8.27%)>鲫鱼(5.51%), 各组之间均存在显著性差异($P<0.05$), 淡水鱼中鳊鱼不含 EPA 和 DHA。6 种鱼肉脂肪中 ΣPUFA 含量从高到低分别为鳕鱼(49.21%)>鲫鱼(47.09%)>鳙鱼(44.16%)>三文鱼(35.34%)>黄鱼(29.60%)>鳊鱼(25.08%), 且 6 种鱼之间差异显著($P<0.05$)。

表 1 6 种鱼类鱼肉脂肪中的脂肪酸组成(n=2)
Table 1 Fatty acid compositions of fish fats from 6 kinds of fishes (n=2)

脂肪酸	淡水鱼/%			海水鱼/%		
	鳊鱼	鳙鱼	鲫鱼	三文鱼	鲑鱼	黄鱼
C12:0	0.10±0.02 ^b	0.51±0.01 ^a	0.03±0.00 ^d	0.05±0.00 ^c	ND	0.04±0.00 ^{cd}
C14:0	1.04±0.01 ^c	2.60±0.03 ^b	0.77±0.01 ^f	2.05±0.05 ^c	1.35±0.00 ^d	3.03±0.12 ^a
C15:0	ND	1.34±0.02 ^a	0.31±0.00 ^c	0.20±0.01 ^d	ND	0.47±0.02 ^b
C16:0	16.19±0.07 ^c	15.9±0.14 ^c	14.13±0.04 ^d	12.22±0.12 ^c	18.47±0.08 ^b	27.69±1.10 ^a
C17:0	0.17±0.02 ^c	0.87±0.00 ^b	0.36±0.00 ^d	0.21±0.00 ^c	0.99±0.08 ^a	0.56±0.02 ^c
C18:0	4.55±0.01 ^c	4.74±0.05 ^c	3.17±0.00 ^c	3.95±0.01 ^d	7.01±0.04 ^a	5.11±0.21 ^b
C21:0	1.43±0.01 ^a	1.27±0.02 ^b	1.32±0.00 ^b	0.43±0.04 ^c	ND	0.12±0.01 ^d
SFA	23.48±0.14 ^c	27.23±0.27 ^b	20.09±0.05 ^d	19.11±0.23 ^d	27.82±0.20 ^b	37.02±1.48 ^a
C16:1	3.96±0.03 ^c	4.94±0.05 ^b	2.01±0.01 ^c	2.64±0.03 ^d	2.08±0.03 ^c	11.06±0.43 ^a
C17:1	0.24±0.02 ^d	1.01±0.10 ^a	0.33±0.02 ^c	0.23±0.01 ^d	ND	0.73±0.02 ^b
C18:1n-9	46.36±0.02 ^a	22.18±0.26 ^d	29.27±0.00 ^c	41.82±0.03 ^b	20.87±0.03 ^c	20.27±0.84 ^c
C20:1	0.25±0.01 ^c	0.45±0.05 ^a	0.13±0.02 ^d	0.42±0.01 ^b	ND	0.46±0.05 ^a
C22:1n-9	0.62±0.03 ^c	ND	1.07±0.02 ^a	0.45±0.03 ^d	ND	0.85±0.06 ^b
ΣMUFA	51.43±0.11 ^a	28.58±0.46 ^d	32.81±0.07 ^c	45.56±0.11 ^b	22.95±0.06 ^c	33.37±1.40 ^c
C18:2n-6	18.15±0.02 ^c	18.92±0.19 ^b	31.34±0.03 ^a	17.90±0.01 ^d	6.96±0.04 ^c	1.64±0.07 ^f
C18:3n-6	0.38±0.03 ^c	0.57±0.00 ^b	0.81±0.00 ^a	0.22±0.00 ^d	ND	0.17±0.01 ^c
C18:3n-3	1.85±0.00 ^c	5.48±0.06 ^a	4.24±0.01 ^c	4.84±0.01 ^b	1.83±0.07 ^c	3.57±0.41 ^d
C20:2n-6	1.75±0.00 ^d	2.35±0.11 ^{ab}	1.97±0.04 ^c	2.42±0.03 ^a	2.29±0.22 ^b	1.08±0.02 ^c
C20:3n-6	0.86±0.05 ^c	1.45±0.03 ^a	0.76±0.01 ^d	1.26±0.01 ^b	0.74±0.07 ^d	0.19±0.04 ^c
C20:4n-6	2.09±0.02 ^c	4.93±0.06 ^a	2.46±0.03 ^b	0.43±0.02 ^f	1.08±0.10 ^d	0.97±0.04 ^c
C20:5n-3	ND	5.20±0.06 ^c	1.27±0.00 ^c	2.90±0.03 ^d	12.05±0.02 ^a	6.18±0.41 ^b
C22:6n-3	ND	5.26±0.82 ^c	4.24±0.02 ^c	5.37±0.07 ^c	24.26±0.11 ^a	15.80±0.68 ^b
EPA+DHA	ND	10.46±0.88 ^c	5.51±0.02 ^c	8.27±0.10 ^d	36.31±0.13 ^a	21.98±1.09 ^b
ΣPUFA	25.08±0.12 ^f	44.16±1.33 ^c	47.09±0.14 ^b	35.34±0.18 ^d	49.21±0.63 ^a	29.60±1.68 ^c

注: 饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA); 单不饱和脂肪酸(monounsaturated fatty acid, MUFA); 多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA); ND 表示未检测到该物质; EPA+DHA 为 ω-3 PUFA; 同行不同小写字母同表示差异显著, $P<0.05$ 。

综上, 6 种鱼肉中都含有的主要脂肪酸是棕榈酸和油酸。除三文鱼外中 DHA 与 EPA 含量低于鳊鱼外, 黄鱼和鲑鱼两种海水鱼中的 DHA、EPA 含量均高于淡水鱼。本研究中三文鱼 DHA 与 EPA 含量与其他研究相比较低, 这可能与同一种鱼类不同养殖模式及不同个体之间的脂质差异性有关^[17-19]。

2.2 鱼汤中挥发性成分分析

由表 2 可知, 从 6 种鱼汤中共检测出 72 种挥发性风味物质, 其中包括萜类 16 种、醛类 15 种、芳香族化合物 13 种、烃类 10 种、酯类 3 种、醇类 5 种、酮类 4 种、其他类 6 种。不同品种的鱼汤所含的挥发性风味物质在种类及含量上有所差异, 但其风味类型接近, 如 6 种鱼汤中挥发性成分含量较高的均主要为萜类、醇类、醛类和烃类物质, 而芳香族化合物、酯类、酮类与其他类物质含量均较低。

萜烯类化合物在 6 种鱼汤挥发性化合物中含量较高, 为 337.82~429.38 μg/kg, 其主要来自于鱼汤中的辅料生姜,

如 α-蒎烯、蒾烯、月桂烯、柠檬烯、姜烯、α-姜黄烯等, 赋予鱼汤花香、香菜味、草药味、青草味^[20]。GE 等^[21]和 BARTLEY 等^[22]分别从生姜精油和干生姜中鉴定出大量萜烯类化合物。

醇类物质可由脂肪酸氧化或产生^[23]。除不饱和醇外, 多数醇类感官阈值较高, 对风味影响较小^[24]。6 种鱼汤中, 鳊鱼、鳙鱼及鲫鱼这 3 种淡水鱼鱼汤醇类物质含量相对较高, 分别为 1258.50、1224.31 和 860.17 μg/kg, 以硬脂醇、蒜醇为主, 其中硬脂醇风味阈值高, 对风味影响小; 蒜醇具有刺激性芥末味, 在鲑鱼汤、鳊鱼汤和鲫鱼汤中含量较高, 分别为 120.00、96.94、77.97 μg/kg, 其他 3 种鱼中含量较低。

醛类物质通常阈值较低, 具有脂肪香味^[25], 对食品风味具有重要贡献, 被认为是鱼肉的主体风味。6 种鱼汤中醛类物质含量较高, 这与鱼肉中多不饱和脂肪酸含量较高有关, 醛类物质主要来自于多不饱和脂肪酸氧化^[26]。除黄鱼中醛类含量稍高于鳊鱼外, 鲫鱼、鳊鱼和鳙鱼这 3 种淡

水鱼鱼汤中醛类物质含量相对其他 2 种鱼汤较高, 分别为 810.64、487.79 和 398.78 $\mu\text{g/kg}$, 以反,反-2,4-癸二烯醛、2,4-癸二烯醛为主, 其中鲫鱼汤中反,反-2,4-癸二烯醛、2,4-癸二烯醛含量最高。6 种鱼汤中均检出反,反-2,4-癸二烯醛、2,4-癸二烯醛、反,反-2,4-庚二烯醛、辛醛、壬醛、正戊醛、正己醛和正庚醛, 其中, 反,反-2,4-癸二烯醛、2,4-癸二烯醛、反,反-2,4-庚二烯醛是鱼类的主要特征性风味物质, 具油脂香、肉腥味, 可能由亚油酸和亚麻酸经氧化降解形成^[27]。鲫鱼中的亚油酸含量显著高于另外 5 种鱼类, 其鱼汤中的

反,反-2,4-癸二烯醛、2,4-癸二烯醛含量也高于另外 5 种鱼类, 反,反-2,4-庚二烯醛含量高于除黄鱼外 4 种鱼类; 说明反,反-2,4-癸二烯醛、2,4-癸二烯醛、反,反-2,4-庚二烯醛的形成与亚油酸含量正相关。辛醛、壬醛主要是油酸氧化的产物^[28], 具有油脂味、腊香, 鳊鱼中的油酸含量最高, 其鱼汤中的辛醛与壬醛含量也高于其他鱼类。正己醛和正庚醛主要产生于亚油酸和花生四烯酸的氧化, 具青草气味, 3 种淡水鱼中的亚油酸含量均高于海水鱼, 其鱼汤中的正己醛含量也高于 3 种海水鱼^[29-30]。

表 2 鱼汤中挥发性风味物质
Table 2 Volatile flavor compounds in fish soups

名称	CAS 号	含量/(μg/kg)					
		鳊鱼	鲫鱼	鳙鱼	黄鱼	三文鱼	鲑鱼
萜类							
α-蒎烯**	80-56-8	1.04	18.02	20.00	5.16	7.15	28.00
莰烯*	79-92-5	82.01	84.80	50.52	26.16	31.73	66.14
月桂烯*	123-35-3	7.00	8.37	4.36	3.95	ND	ND
柠檬烯*	138-86-3	14.76	15.90	9.18	37.54	1.95	14.32
β-水芹烯**	555-10-2	18.73	34.05	20.27	14.52	24.68	43.00
间伞花烃*	535-77-3	1.34	1.36	0.99	ND	0.83	1.30
冰片*	507-70-0	17.57	22.88	31.66	42.34	50.00	23.87
姜烯**	495-60-3	20.09	37.00	34.60	7.27	19.43	7.76
β-甜没药烯**	495-61-4	3.56	3.91	1.79	155.62	3.38	4.56
α-姜黄烯**	644-30-4	10.13	17.02	9.56	16.48	7.62	10.55
α-法尼烯*	502-61-4	ND	4.01	7.30	4.46	1.15	1.60
香叶醇*	106-24-1	6.42	7.53	11.09	7.82	4.59	3.71
桉叶油醇*	470-82-6	27.87	25.68	22.96	0.95	13.90	19.25
橙花醛**	141-27-5	167.56	146.58	200.00	ND	180.00	120.82
醋酸冰片**	76-49-3	0.18	2.27	1.27	15.55	ND	ND
柏木脑**	77-53-2	ND	ND	1.91	ND	ND	0.22
小计		378.26	429.38	427.46	337.82	346.41	345.10
醛类							
正戊醛**	110-62-3	4.38	1.99	2.00	0.95	1.71	2.10
正己醛*	66-25-1	34.13	42.22	56.70	5.75	6.00	28.19
反-2-戊烯醛*	1576-87-0	2.16	1.53	ND	5.89	ND	ND
正庚醛*	111-71-7	3.43	3.88	5.30	7.32	2.12	3.03
反-2-己烯醛*	6728-26-3	1.95	2.06	ND	5.25	1.93	1.85
辛醛*	124-13-0	8.44	3.16	16.05	4.38	3.08	3.68
反-2-庚烯醛*	18829-55-5	5.08	5.00	4.12	ND	6.99	11.72
壬醛*	124-19-6	37.12	32.74	120.00	25.14	28.05	28.12
反-2-辛烯醛*	2548-87-0	8.21	11.82	9.22	ND	5.34	4.79
反,反-2,4-庚二烯醛*	881395	19.94	47.82	10.88	99.40	7.04	6.26
反-2-壬烯醛*	18829-56-6	ND	4.16	7.98	ND	2.37	4.10
5-甲基糠醛*	620-02-0	2.39	0.91	ND	5.80	0.69	ND
2-十一碳烯醛**	2463-77-6	7.38	16.33	ND	ND	10.54	8.54
2,4-癸二烯醛**	2363-88-4	56.59	141.91	50.87	49.82	35.73	46.02
反,反-2,4-癸二烯醛*	25152-84-5	207.58	495.11	204.67	191.43	110.00	156.89
小计		398.78	810.64	487.79	401.13	221.59	305.29
芳香类							
甲苯**	108-88-3	ND	3.08	8.00	2.93	3.47	2.98

表 2(续)

名称	CAS 号	含量/(μg/kg)					
		鳙鱼	鲫鱼	鳊鱼	黄鱼	三文鱼	鲑鱼
乙苯**	100-41-4	16.25	14.79	60.00	9.40	15.43	14.24
对二甲苯*	106-42-3	4.68	3.19	ND	7.04	7.28	ND
间-二甲苯*	108-38-3	8.58	7.35	59.91	0.84	3.00	7.21
邻二甲苯*	95-47-6	4.78	0.22	31.69	ND	3.92	1.28
苯乙烯**	100-42-5	3.92	ND	83.22	ND	ND	ND
1,2,3,4-四甲基苯**	488-23-3	ND	ND	ND	75.41	ND	ND
苯乙酮*	98-86-2	ND	1.63	ND	ND	1.22	1.59
苯甲醇*	100-51-6	ND	0.51	ND	0.91	ND	0.32
2,6-二叔丁基对甲基苯酚**	128-37-0	2.87	ND	8.62	ND	85.90	ND
2,4-二特丁基苯酚**	96-76-4	27.85	ND	ND	12.46	25.52	28.64
邻苯二甲酸二异丁酯**	84-69-5	11.67	ND	9.00	ND	ND	8.78
邻苯二甲酸二丁酯**	84-74-2	ND	ND	ND	ND	ND	10.57
小计		80.60	27.69	252.44	106.06	142.27	72.63
烃类							
正十烷*	124-18-5	27.45	19.69	37.25	12.57	40.00	19.80
十一烷*	1120-21-4	2.56	ND	ND	0.98	1.12	ND
十二烷*	112-40-3	49.89	36.91	150.00	23.30	47.22	20.00
二十二烷*	629-97-0	36.49	42.94	ND	23.90	50.00	40.00
二十三烷*	638-67-5	22.61	ND	14.47	10.03	19.15	17.25
二十四烷*	646-31-1	27.13	25.36	ND	19.38	30.00	16.97
十四烷*	629-59-4	19.50	16.98	115.88	ND	18.10	11.18
十五烷*	629-62-9	17.58	15.40	19.57	ND	34.74	6.33
十六烷*	544-76-3	25.96	26.22	30.00	1.04	20.50	17.00
十九烷*	629-92-5	10.28	ND	8.00	ND	ND	ND
小计		239.45	183.50	375.17	91.20	260.83	148.53
酯类							
醋酸丁酯**	123-86-4	ND	ND	3.09	ND	1.66	0.81
棕榈酸甲酯*	112-39-0	2.22	2.15	28.93	2.28	1.88	1.92
硬脂酸甲酯*	112-61-8	0.94	1.69	ND	0.55	0.51	0.32
小计		3.16	3.84	28.93	2.83	2.39	2.24
醇类							
蒜醇**	107-18-6	96.94	77.97	30.05	18.02	2.50	120.00
正丁醇*	71-36-3	1.46	2.49	2.78	3.43	1.48	2.21
十二醇*	112-53-8	ND	18.91	18.62	18.23	10.77	3.24
硬脂醇*	112-92-5	1118.30	754.27	1200.00	682.69	452.17	111.30
辛醇**	111-87-5	7.61	6.53	7.05	ND	6.59	6.95
小计		1224.31	860.17	1258.50	722.37	473.51	243.70
酮类							
2-庚酮**	110-43-0	1.21	1.18	1.53	0.64	0.52	0.59
3-羟基-2-丁酮*	513-86-0	ND	101.15	ND	1.89	6.62	ND
2-壬酮*	821-55-6	ND	ND	ND	25.05	ND	0.14
3-辛烯-2-酮**	1669-44-9	0.33	ND	ND	6.69	ND	ND
小计		1.54	102.33	1.53	34.27	7.14	0.73
其他							
烯丙基硫醚*	592-88-1	2.61	2.15	1.00	0.67	4.14	2.12
二烯丙基二硫醚*	2179-57-9	52.33	62.76	20.00	ND	55.98	111.01
甲基烯丙基三硫醚**	34135-85-8	18.74	1.28	10.18	26.47	8.44	29.29
二烯丙基三硫醚*	2050-87-5	5.60	3.21	2.58	8.40	4.69	15.61
二甲基三硫*	3658-80-8	ND	ND	0.69	ND	ND	ND
2-正戊基呋喃*	3777-69-3	16.85	17.29	22.57	ND	7.13	4.67
小计		96.13	86.69	57.02	35.54	80.38	162.70

注: ND 表示未检测到该物质; *采用质谱库匹配、线性保留指数比对及标准品对照鉴定; **采用质谱库匹配和线性保留指数比对鉴定。

芳香类化合物在6种鱼汤中含量在27.69~252.44 $\mu\text{g/kg}$ 之间,鳊鱼中芳香族化合物的含量最高,黄鱼和三文鱼中的芳香族化合物含量高于鳙鱼和鲫鱼,而一些含苯化合物具有令人不愉快的气味^[13]。6种鱼汤中都检出较高含量的烃类物质,为91.20~375.17 $\mu\text{g/kg}$ 。烃类物质一般不具有风味活性且感官阈值比较高^[31]。酮类物质源自不饱和脂肪酸的热氧化降解、氨基酸降解,具有独特的花香、水果香等^[32]。6种鱼汤中酮类物质化合物种类数与含量均较低,其中鲫鱼汤中含量显著高于其他鱼汤,为102.33 $\mu\text{g/kg}$,可能与其 $n-6$ PUFA含量较高有关,且鲫鱼中不饱和脂肪酸含量也相对较高,而其余5种鱼汤中含量较低,为0.73~34.27 $\mu\text{g/kg}$ 。6种鱼汤中共同检出的酮类化合物仅2-庚酮一种,具花香味,可能对鱼汤特殊香味的形成有一定贡献。酯类物质大部分有一种香甜的果香味,对风味有重要作用,但除内酯和硫酯以外的酯感官阈值都较高,对风味的影响不大^[33]。在鱼汤中检测出来的酯类物质含量均不高,推测对鱼汤的风味影响不大。

此外,6种鱼汤中还检测出少量含硫化合物、呋喃化合物以及酚类化合物。含硫化合物如烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚、甲基烯丙基三硫醚等,其感官阈值极低,能够赋予鱼汤大蒜味、洋葱味和辣根味,主要来源于鱼汤中的大蒜^[5]。呋喃类化合物感官阈值极低,通常具有很强的肉香味,来自于脂肪的氧化、美拉德反应和碳水化合物的降解^[34]。酚类化合物感官阈值较高,对鱼汤的风味的影响不大。

3 结论

本研究以鳙鱼、鲫鱼、鳊鱼、黄鱼、三文鱼与鲑鱼为研究对象,探究了6种鱼脂肪酸的组成与鱼汤中挥发性物质的差异与联系。结果表明,鱼类中脂肪酸组成会对其鱼汤中的挥发性物质造成影响,不同鱼类鱼汤中的挥发性物质种类相近,但含量不同。几种鱼汤的挥发性物质中萜类物质含量接近,但脂肪酸氧化产生的风味物质含量相差较大。6种鱼汤中共检测出72种风味物质,主要为萜类、醇类、醛类、烃类;其中醛和醇为主要香味物质,6种鱼汤中醛类含量从高到低依次为鲫鱼、鳊鱼、黄鱼、鳙鱼、鲑鱼、三文鱼;醇类含量从高到低依次为鳊鱼、鳙鱼、鲫鱼、黄鱼、三文鱼、鲑鱼。不饱和脂肪酸含量高的鱼类,其鱼汤挥发性物质中的醛类含量也会相对较高;亚油酸含量高的鱼类,其鱼汤挥发性物质中亚油酸氧化产物的含量也会较高。但具体脂肪酸在鱼汤风味形成过程中的作用与其变化机制,还有待进一步的研究。

参考文献

- [1] 雷乙,陈竟豪,涂金金,等. 鱼肉加工过程特征气味物质变化研究进展[J]. 食品研究与开发,2020,41(15): 201-210.
LEI Y, CHEN JH, TU JJ, *et al.* Research progress on changes of

- characteristic odor substances in fish processing [J]. Food Res Dev, 2020, 41(15): 201-210.
- [2] 徐永霞,李鑫晰,赵洪雷,等. 六种海水鱼类鱼汤的呈味物质比较分析[J]. 食品与发酵工业,2021,47(21): 240-245.
XU YX, LI XX, ZHAO HL, *et al.* Comparative analysis of taste compounds in soup from six kinds of marine fishes [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(21): 240-245.
- [3] 徐永霞,曲诗瑶,白旭婷,等. 菌菇鲢鱼汤加工工艺优化及核苷酸含量的变化[J]. 中国食品学报,2021,21(8): 200-207.
XU YX, QU SY, BAI XT, *et al.* Optimization of processing technology and nucleotide content changes of mushroom cod soup [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2021, 21(8): 200-207.
- [4] 钱雪丽,苏红,樊馨怡,等. 金枪鱼头汤中脂肪酸组成、维生素E含量分析及微观形貌观察[J]. 上海海洋大学学报,2019,28(5): 801-810.
QIAN XL, SU H, FAN XY, *et al.* Fatty acid composition, vitamin E and microscopic morphology of tuna (*Thunnus obesus*) head soup [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2019, 28(5): 801-810.
- [5] 李金林,涂宗财,张露,等. SPME-GC-MS法分析草鱼汤烹制过程中挥发性成分变化[J]. 食品科学,2016,37(22): 149-154.
LI JL, TU ZC, ZHANG L, *et al.* SPME-GC-MS analysis of changes in volatile compounds during preparation of grass carp soup [J]. Food Sci, 2016, 37(22): 149-154.
- [6] 李金林,万亮,陈春艳,等. $\omega-3$ LCPUFAs模拟热加工鱼肉脂肪氧化形成风味物质的研究[J]. 中国食品学报,2020,20(6): 95-105.
LI JL, WANG L, CHEN CY, *et al.* Studies on formation of flavor compounds in fish meat during heat process based on oxidation models of $\omega-3$ LCPUFAs [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20(6): 95-105.
- [7] 关海宁,徐筱君,孙薇婷,等. 肉汤中特征风味体系的形成机理及分析方法研究进展[J]. 肉类研究,2021,35(1): 66-73.
GUAN HN, XU XJ, SUN WT, *et al.* Recent progress in the formation mechanism and analytical methods for characteristic flavor compounds in broth [J]. Meat Res, 2021, 35(1): 66-73.
- [8] RATTAN S, PARANDE AK, RAMALAKSHMI K, *et al.* Effect of edible coating on the aromatic attributes of roasted coffee beans [J]. J Food Sci Technol, 2015, 52(9): 5470-5483.
- [9] LI JL, TU ZC, SHA XM, *et al.* Effect of frying on fatty acid profile, free amino acids and volatile compounds of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets [J]. J Food Process Preserv, 2016. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13088>
- [10] 李玲,吕磊,董昕,等. 顶空气相色谱-质谱联用技术结合保留指数鉴别猫人参中的挥发性成分[J]. 药学实践杂志,2016,34(1): 52-55.
LI L, LV L, DONG X, *et al.* Analysis of volatile components from *Actinidia valvata* by HS-GC-MS based on retention index [J]. J Pharm Pract, 2016, 34(1): 52-55.
- [11] VAN DDH, KRATZ PD. A generalization of the retention index system including linear temperature programmed gas-liquid partition chromatography [J]. J Chromatogr A, 1963, 11: 463-471.
- [12] 刘勇. 犏牦牛肉用品质、脂肪酸及挥发性风味物质研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学,2010.
LIU Y. Study on meat quality, fatty acids, volatile flavor compounds of Yak calf [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010.
- [13] 高先楚,王锡昌,顾赛麒,等. 中华绒螯蟹性腺加热熟制前后挥发性成分和脂肪酸组成分析[J]. 现代食品科技,2014,30(9): 265-274.

- GAO XC, WANG XC, GU SQ, *et al.* Analysis of volatile components and fatty acids derived from *Eriocheirs sinensis* gonad before and after cooking [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2014, 30(9): 265–274.
- [14] MURIEL E, ANTEQUERA T, PETRON MJ, *et al.* Volatile compounds in Iberian dry-cured lion [J]. *Meat Sci*, 2004, 68(3): 391–400.
- [15] 孙旭媛, 刘元法, 李进伟. HS-SPME-GC-MS 分析 4 种植物油加热氧化挥发性产物[J]. *中国油脂*, 2018, 43(10): 20–25.
- SUN XY, LIU YF, LI JW. Analysis of thermal oxidation volatile products of four vegetable oils by HS-SPME-GC-MS [J]. *China Oils Fats*, 2018, 43(10): 20–25.
- [16] ESTEVEZ M, MORCUENDE D, SONIA VA, *et al.* Analysis of volatiles in meat from Iberian pigs and lean pigs after refrigeration and cooking by using SPME-GC-MS [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(11): 3429–3435.
- [17] 夏腾, 曲乐天, 陈祥顺, 等. 饲料中不同脂肪源对 3 种食性鱼类生长及肌肉脂肪酸组成的影响[J]. *饲料研究*, 2022, 45(6): 60–66.
- XIA T, QU LT, CHEN XS, *et al.* Effect of different lipid sources in diet on growth performance and muscle fatty acid composition of three feeding habits fishes [J]. *Feed Res*, 2022, 45(6): 60–66.
- [18] 徐后国. 饲料脂肪酸对鲈鱼幼鱼生长、健康及脂肪和脂肪酸累积的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- XU HG. Effects of dietary fatty acids on growth performance, health and accumulation of lipids and fatty acids in juvenile Japanese seabass (*Lateolabrax japonicus*) [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [19] 胡建勇, 李晓东, 李林, 等. 两种养殖模式下草鱼幼鱼生长与肌肉组分的比较研究[J]. *饲料研究*, 2021, 44(15): 62–67.
- HU JY, LI XD, LI L, *et al.* Comparative study on growth and muscle composition of *Ctenopharyngodon idella* under two aquaculture patterns [J]. *Feed Res*, 2021, 44(15): 62–67.
- [20] VARIVAR PS, GHOLAP AS, THOMAS P. Effect of γ -irradiation on the volatile oil constituents of fresh ginger (*Zingiber officinale*) rhizome [J]. *Food Res Int*, 1997, 30(1): 41–43.
- [21] GE L, XU Y, XIA W. The function of endogenous cathepsin in quality deterioration of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets stored in chilling conditions [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2014, 50(3): 797–803.
- [22] BARTLEY JP, JACOBS AL. Effects of drying on flavour compounds in Australian-grown ginger (*Zingiber officinale*) [J]. *J Sci Food Agric*, 2000, 80(2): 209–215.
- [23] WANG S, HE Y, WANG Y, *et al.* Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis* [J]. *Food Chem*, 2016, 200: 24–31.
- [24] LORENZO JM, DOMINGUEZ R. Cooking losses, lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat as affected by cooking procedure [J]. *Flavour Fragr J*, 2014, 29(4): 240–248.
- [25] 秦琛强, 杨卫芳, 吕学泽, 等. 北京油鸡煲汤过程中鸡汤的风味变化[J]. *肉类研究*, 2021, 35(10): 25–32.
- QIN CQ, YANG WF, LV XZ, *et al.* Change in the flavor of Beijing-You chicken broth during cooking [J]. *Meat Res*, 2021, 35(10): 25–32.
- [26] 康生萍, 胡林勇, 张晓玲, 等. 不同月龄青海黑藏羊肌肉脂肪酸组成和风味差异比较[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2021, (20): 34–41, 46.
- KANG SP, HU LY, ZHANG XL, *et al.* Comparative analysis of muscle fatty acid composition and flavor among Qinghai Black Tibetan sheep with different month-age [J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2021, (20): 34–41, 46.
- [27] NIETO G, BANÓN S, GARRIDO MD. Effect of supplementing ewes' diet with thyme (*Thymus zygis* ssp. *Gracilis*) leaves on the lipid oxidation of cooked lamb meat [J]. *Food Chem*, 2011, 125(4): 1147–1152.
- [28] DING AZ, ZHU M, QIAN XQ, *et al.* Effect of fatty acids on the flavor formation of fish sauce [J]. *LWT Food Sci Technol*, 2020, 134: 110259.
- [29] 魏育坤, 魏好程, 伍菱, 等. SPME/SDE-GC-MS 分析宁德养殖大黄花鱼挥发性化合物[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(15): 129–136.
- WEI YK, WEI HC, WU L, *et al.* Analysis of volatile compounds in framed *Pseudosciaena crocea* from Ningde district by SPME/SDE-GC-MS [J]. *Food Res Dev*, 2020, 41(15): 129–136.
- [30] 顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 36–44.
- GU SQ, TANG JJ, ZHOU XX, *et al.* Quality change and aroma formation in cured fish during traditional sun drying processing [J]. *Food Sci*, 2019, 40(17): 36–44.
- [31] YU HZ, CHEN SS. Identification of characteristic aromaactive compounds in steamed mangrove crab (*Scylla serrata*) [J]. *J Food Res Int*, 2010, 43(8): 2081–2086.
- [32] 田迪英, 焦慧, 陶崑, 等. 5 种海鱼挥发性风味成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(10): 155–159.
- TIAN DY, JIAO H, TIAO W, *et al.* Analysis of volatile flavor components of five kinds of marine fish [J]. *Food Ferment Ind*, 2015, 41(10): 155–159.
- [33] ZHAO J, WANG M, XIE J, *et al.* Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig [J]. *Food Chem*, 2017, 226: 51–60.
- [34] CALKINS CR, HODGEN JM. A fresh look at meat flavor [J]. *Meat Sci*, 2007, 77(1): 63–80.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



徐斯婕, 硕士研究生, 主要研究方向为食品生物化学。
E-mail: 1270459590@qq.com



李金林, 高级工程师, 主要研究方向为水产加工、风味化学与食物资源高值化利用。
E-mail: lijnlin405@126.com