



池塘循环水槽养殖模式下斑点叉尾鲷肌肉特征挥发性风味成分

刘崇万^{1,2}, 朱晓华^{1,2*}, 徐志华^{1,2}, 孟勇^{1,2}, 陈校辉¹, 边文冀¹

(1. 江苏省淡水水产研究所, 江苏省渔业产品质量安全重点实验室, 江苏南京 210017;

2. 江苏省水产质量检测中心, 农业农村部渔业产品质量监督检验测试中心, 江苏南京 210017)

摘要: 为探究池塘循环水槽 (in-pond raceway system, 以下简称 IPRS) 养殖模式下斑点叉尾鲷肌肉中特征挥发性风味成分, 实验以传统大池塘养殖 (traditional pond system, 以下简称 TPS) 为对照, 利用 GC-MS 技术对两种模式下的斑点叉尾鲷肌肉中挥发性成分进行了萃取和分离鉴定, 并结合 ROAV 确定了不同模式下特征挥发性风味成分。结果显示, IPRS 及 TPS 模式分别检测出 49 种及 50 种挥发性风味成分, 主要由醛类、烃类、醇类及酯类等 4 大类组成, IPRS 模式斑点叉尾鲷肌肉中醇类和酮类物质均高于 TPS 模式, IPRS 模式 1-戊醇、1-戊烯-3-醇、乙酸乙烯酯、2-壬酮、2,3-辛二酮、1,3-戊二烯、十五烷等物质相对含量显著或极显著高于 TPS 模式, 己醛等部分醛类物质在含量较高时易呈现令人不愉快的气味, IPRS 模式优势显著。IPRS 模式特征挥发性风味成分主要包括 1-辛烯-3-醇、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、2,6-壬二烯醛、癸醛、2,4-癸二烯醛及 (E,E)-2,4-壬二烯醛, 其中庚醛、2,6-壬二烯醛为 IPRS 特有的特征挥发性风味成分。研究表明, 养殖模式对斑点叉尾鲷肌肉中挥发性风味成分及相对含量具有较大影响, IPRS 模式挥发性风味物质构成优于 TPS 模式, 适合斑点叉尾鲷集约化、高密度养殖。

关键词: 斑点叉尾鲷; 池塘循环水槽养殖; 挥发性风味成分; 全二维气相色谱/飞行时间质谱; 相对气味活度值

中图分类号: S 965.1; TS 254.4

文献标志码: A

斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*) 引入我国后^[1], 因其适应性强、生长速率快、肉质鲜美等特点, 养殖规模和出口量逐年增加, 2019 年, 全国养殖产量及出口量分别达到 30.0 万^[2] 及 0.5 万 t^[3], 已成为我国优良的水产养殖品种之一^[4-5]。水产品风味优劣是评价其质量的重要指标, 也是决定其市场的主要因素^[6], 其中挥发性风味成分对产品整体风味贡献较大^[7]。

挥发性风味成分与养殖模式之间的关系已被广泛研究与报道。曹静^[8]、吴浩然等^[9]及肖雄等^[10]

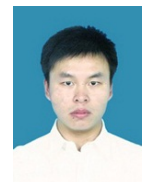
分别在对长吻鮠 (*Leiocassis longirostris*)、中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 及大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 的研究中指出, 养殖模式对水产品挥发性物质的种类和含量影响较大。池塘循环水槽养殖 (in-pond raceway system, 以下简称 IPRS) 是近年来新兴的一种以“小槽养鱼, 大池养水, 鱼水兼顾”为特色的生态养殖模式, 目前在大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*)^[11]、吉富罗非鱼 (*GIFT Oreochromis niloticus*)^[12]、半滑舌鳎 (*Cynoglossus semilaevis*)^[13]、鲇 (*Silurus asotus*)^[14] 等品种的应用结果

收稿日期: 2021-04-07 修回日期: 2021-05-16

资助项目: 江苏现代农业产业技术体系建设项目 (JATS[2020]329); 现代农业产业技术体系专项 (CARS-46); 2020 年度江苏省第五期“333 工程”科研资助项目 (BRA2020374)

第一作者: 刘崇万 (照片), 从事水产品质量安全检测研究, E-mail: liuchongwanujs@126.com

通信作者: 朱晓华, 从事水产品质量安全及营养品质研究, E-mail: xhz824@sina.com



表明,区别于传统大池塘养殖(traditional pond system,以下简称TPS)受外界环境影响较大且对环境污染较大的弊端,IPRS模式通过在池塘内进行功能区机械化改造,使整个池塘水体一直处于流动状态并实现养殖尾水循环再利用,减少养殖过程对周边水环境依赖,在实现高效集约化的绿色、生态养殖^[15]的同时可提高水产品营养品质。目前,关于IPRS模式与斑点叉尾鲷营养品质相互关系的研究较少,尤其是IPRS模式斑点叉尾鲷肌肉特征挥发性风味成分还不明确。

基于以上论述,本研究以斑点叉尾鲷为对象,以TPS模式为对照,采用全二维气相色谱/飞行时间质谱(GC×GC/TOFMS)技术对两种模式下肌肉挥发性成分进行对比分析,并结合相对气味活度值(ROAV)确定IPRS模式斑点叉尾鲷肌肉特征挥发性风味成分,为IPRS模式在斑点叉尾鲷养殖推广及深加工方面提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用的斑点叉尾鲷样品均采自江苏苏渔水产科技有限公司(江苏省宿迁市湖滨新区黄墩现代渔业产业园,采样时间为2020年10月15日9:00—11:30)。IPRS样品采自池塘循环水槽(34°7'33"N, 118°3'14"E),TPS样品采自池塘(34°7'33"N, 118°2'51"E),平均鱼体质量分别为(1 525±304)及(1 490±129)g。两种养殖模式投喂饵料一致,均按实际养殖及管理模式正常养殖。

1.2 仪器与设备

全二维气相色谱-飞行时间质谱仪(GC×GC-TOFMS),由Agilent 7890N气相色谱(美国Agilent公司)、KT-2001冷喷调制器(美国Zoex公司)和Pegasus III飞行时间质谱仪(美国Leco公司)组成。手动SPME进样器(美国Sigma公司)、50/30 DVB/CAR/PDMS萃取头(美国Supelco公司)。15 mL顶空采样瓶(美国Agilent公司)。电子天平(德国Sartorius公司)。

1.3 实验方法

样品采集与处理 两种养殖模式下,均分别从3个水槽(池塘)内随机各取10尾健康斑点叉尾鲷作为平行样。样品采集后,低温保存,尽快在鲜活状态下运到实验室,各选取6尾规格整齐

的斑点叉尾鲷进行称量,分别取背部肌肉并混合成1个样,经绞肉机混匀形成实验样品,置于4℃冰箱保存。

实验方法 挥发性成分收集^[10]:称取3g斑点叉尾鲷肌肉样品,转入顶空采样瓶中(含有微型磁力搅拌子),加入5mL饱和氯化钠溶液,置于加热磁力搅拌台上,将萃取头插入顶空瓶中,在60℃恒温水浴中顶空萃取30min后取出,并迅速插入全二维气相色谱/飞行时间质谱仪进样口,在250℃下解吸5min后,上机检测。色谱条件:采用不分流进样,载气为氦气,流速为1.0 mL/min,进样口温度为250℃。采用DB-5MS(30m×0.25mm,0.25μm)为一维色谱柱,升温程序为初始温度40℃,保持5min,以6℃/min的速率升温至180℃,保持2min,再以15℃/min的速率升温至270℃,保持2min;采用DB-17MS(2m×0.1mm,0.1μm)为二维色谱柱,以高于一维色谱柱5℃的温度平行升温。调制器补偿温度:10℃,调制周期为8s(热吹1.2s,冷吹2.8s)。质谱条件:EI离子源,电子能量70eV,离子源温度240℃,传输线温度300℃,检测器电压为1700V,质量扫描范围50~600m/z,采集频率为100次/s,质谱溶剂延迟时间为220s,由Pegasus工作站进行控制。

分析方法 特征性风味成分分析采用相对气味活度值法(ROAV),参考刘登勇等^[16]、Zhang等^[17]和Wei等^[18]的方法进行评价。实验数据处理由Chroma TOF软件系统完成。挥发性成分通过计算机谱库检索确认定性,且仅当正反匹配度(SI/RSI)均大于800(最大值为1000)的鉴定结果才予以报道。

数据分析 采用Excel及SPSS 19.0软件进行数据分析,运用单因素方差分析Duncan氏检验进行显著性方差分析, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著,结果以平均值±标准差(mean±SD)的形式表示,各挥发性成分的相对百分含量按面积归一化法进行定量分析。

2 结果

IPRS及TPS下斑点叉尾鲷肌肉GC-MS总离子流色谱图显示,本实验采用的SPME法可以较好地吸附新鲜斑点叉尾鲷肌肉中的挥发性风味成分,通过GC×GC/TOFMS分离检测,可得到良好的总离子流色谱图(图1,图2)。经计算机谱库检索及分析,鉴定出IPRS及TPS模式挥发性成分。

IPRS 及 TPS 模式分别检测出 49 种及 50 种挥发性风味成分，主要由醛类、烃类、醇类及酯类等 4 大类组成，相对含量占比超过 80% 以上，构成了 IPRS 及 TPS 模式斑点叉尾鲷肌肉主要挥发性风味成分。其中对风味贡献较大的主要是挥发性的醇类、酮类及醛类化合物^[19]，前者产生较为柔和的气味，后两者主要产生原生、浓郁的气

味^[20]。本实验中，IPRS 及 TPS 模式斑点叉尾鲷肌肉共检出醛、醇、酮类分别为 14、8、3 种和 13、8、4 种(表 1, 图 3)。从测定结果可知，IPRS 模式斑点叉尾鲷肌肉中醇类、酮类相对含量均高于 TPS 模式，其中，IPRS 模式酮类物质(2.381%±0.656%)显著高于后者(1.184%±0.096%)($P<0.05$)；IPRS 模式(30.926%±6.593%)斑点叉尾鲷肌肉中醛

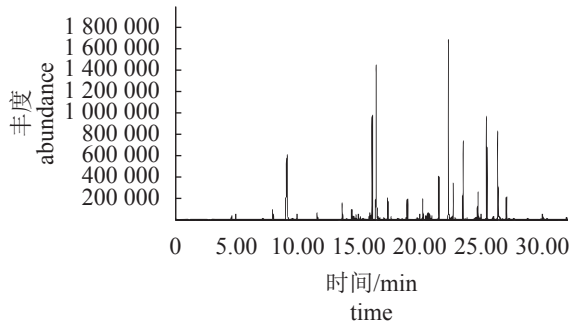


图 1 TPS 模式斑点叉尾鲷肌肉中挥发性物质总离子流图

Fig. 1 Ion-flow graph of the volatile flavor components of TPS in the muscle of *I. punctatus*

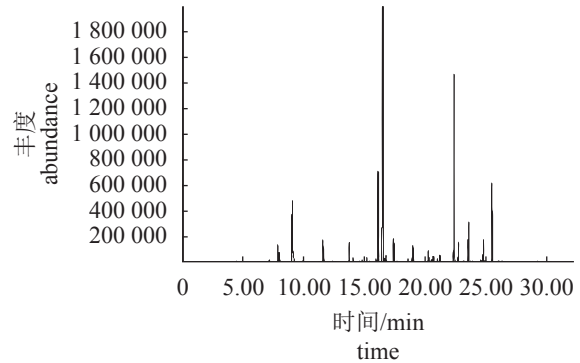


图 2 IPRS 模式斑点叉尾鲷肌肉中挥发性物质总离子流图

Fig. 2 Ion-flow graph of the volatile flavor components of IPRS in the muscle of *I. punctatus*

表 1 不同养殖模式下斑点叉尾鲷肌肉中挥发性成分及其相对含量

Tab. 1 Result of the volatile flavor components and the relative content of IPRS and TPS

化合物种类 category	化合物名称 compounds name	感觉阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$) perception threshold	相对含量/% relative content	
			IPRS	TPS
醇类 alcohols	1-戊醇 1-pentanol	400 ^[10]	0.895±0.236*	0.547±0.214
	1-戊烯-3-醇 1-pentanol-3-ol	400 ^[10]	6.142±1.360*	5.213±1.242
	1-己醇 1-octanol		1.168±0.265	1.562±0.254
	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	10 ^[10]	8.814±1.542	9.542±2.142
	(E)-2-辛烯-1-醇 (E)-oct-2-en-1-ol	40 ^[10]	0.295±0.016*	0.456±0.036
	(Z)-1,5-辛二烯-3-醇 (Z)-octa-1,5-dien-3-ol		0.124±0.015	0.101±0.019
	正辛醇 capryl alcohol	110 ^[21]	1.119±0.257	1.143±0.128
	2-己基-1-癸醇 2-hexyl-1-decanol		0.486±0.135	0.426±0.147
	合计 total		19.043±3.826	18.990±4.182
酯类 lipids	乙酸乙烯酯 vinyl acetate		6.144±1.251**	3.892±1.161
	1,4-丁内酯 1,4-butyrolactone		0.149±0.011	0.158±0.011
	邻苯二甲酸二乙酯 diethyl phthalate		1.968±0.426	2.021±0.552
	反式-2-辛烯酸乙酯 ethyl trans-2-octenoate		0.582±0.146	0.564±0.256
	庚酸乙酯 ethyl heptanoate		1.101±0.243	0.913±0.297
	合计 total		9.944±2.077**	7.548±2.277
醛类 aldehydes	己醛 hexanal	4.5 ^[10]	14.205±1.943	19.792±2.511**
	庚醛 heptanal	3 ^[10]	0.924±0.112	0.851±0.202
	辛醛 octanal	0.7 ^[10]	2.651±0.531	2.534±0.722
	壬醛 nonanal	1 ^[10]	1.133±0.563	3.552±1.014**
	苯乙醛 phenylacetaldehyde	4 ^[10]	—	0.601±0.113
	2,6-壬二烯醛 2,6-nonadienal	0.8 ^[10]	0.246±0.113	0.189±0.056

· 续表 1 ·

化合物种类 category	化合物名称 compounds name	感觉阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$) perception threshold	相对含量/% relative content	
			IPRS	TPS
醛类 aldehydes	癸醛 decanal	0.1~2.0 ^[10]	1.891±0.785	2.304±0.729*
	十五醛 pentadecanal		0.234±0.159	—
	3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛 3,7-dimethyl-2,6-octadienal		0.189±0.097	—
	2,4-癸二烯醛 2,4-decadienal	0.07 ^[10]	1.946±0.319	2.253±0.452*
	4-乙基苯甲醛 4-ethylbenzaldehyde	123.13 ^[10]	0.157±0.018	—
	2,4-庚二烯醛 2,4-heptadienal	10 ^[10]	2.552±0.730	6.172±1.064**
	2-辛烯醛 2-octenal	3 ^[10]	0.831±0.426	1.093±0.268
	(E,E)-2,4-辛二烯醛 (E,E)-2,4-octadienal		—	0.951±0.753
	(E,E)-2,4-壬二烯醛 (E,E)-2,4-nonadienal	0.8 ^[10]	3.469±0.741	2.584±0.369*
	十二醛 dodecyl aldehyde	10 ^[10]	0.498±0.056*	0.789±0.321
	合计 total		30.926±6.593	43.674±8.574**
酮类 ketones	2-壬酮 2-nonanone	38.90 ^[9]	0.462±0.089**	0.167±0.042
	4-甲基-2-己酮 4-methyl-2-hexanone		—	0.103±0.017
	2,3-辛二酮 2,3-octadione		0.789±0.321*	0.428±0.027
	甲基正壬酮 undecanone		1.130±0.246	—
	51-(2-羟基-3,5-二甲基苯基)乙酮 1-(2-hydroxy-3,5-dimethylphenyl)ethanone		—	0.486±0.010
合计 total		2.381±0.656*	1.184±0.096	
酸类 acids	壬酸 nonanoic acid	3 000 ^[22]	0.264±0.017	—
	苯甲酸 benzoic acid		—	0.982±0.287
	合计 total		0.264±0.017**	0.982±0.287
烃类 hydrocarbons	1,3-戊二烯 1,3-pentadiene	2 500 ^[10]	1.463±0.567**	0.422±0.020
	乙基苯 ethylbenzene	2205.25 ^[10]	0.952±0.213	0.761±0.197
	1-甲基-1,3-环己二烯 1-methyl-1,3-cyclohexadiene		—	3.122±1.011
	壬烷 nonane		1.011±0.304	0.751±0.305
	51,2,3-三甲苯 1,2,3-trimethylbenzene		0.678±0.205	0.602±0.311
	对二甲苯 paraxylene	490 ^[10]	3.276±1.204*	5.991±0.957
	2,4-二氯甲苯 2,4-dichlorotoluene		1.124±0.524	0.875±0.106
	十三烷 n-tridecane	2 140 ^[9]	0.112±0.025	—
	十五烷 n-pentadecane		6.521±1.121**	3.282±0.924
	十六烷 n-hexadecane		1.150±0.149	1.973±0.365
	十九烷 nonadecane		0.301±0.020	0.265±0.060
	甲苯 methylbenzene	1 550 ^[10]	0.671±0.058	0.684±0.113
	苯乙烯 styrene	730 ^[22]	0.431±0.013*	0.241±0.010
	2,4-二甲基苯乙烯 1-ethenyl-2,4-dimethylbenzene		1.103±0.458**	2.054±0.571
	2,6,10,14-四甲基十五烷 2,6,10,14-tetramethylpentadecane		0.285±0.014	0.209±0.137
	萘 naphthalene	60 ^[10]	3.981±1.054**	1.946±0.934
	1-甲基萘 1-methyl naphthalene		0.511±0.021	0.416±0.014
合计 total		23.570±5.950	23.594±6.035	
其他 others	2-戊基呋喃 2-pentylfuran	6 ^[10]	—	0.571±0.143
	苯并噻唑 benzothiazole	80 ^[23]	1.854±0.526	—
	4-乙基苯酚 4-ethylphenol	13 ^[10]	0.208±0.013	0.183±0.020
	二氯甲烷 methylene chloride		—	0.528±0.043
	合计 total		2.062±0.539	1.282±0.206

注: IPRS表示池塘循环水槽养殖模式, TPS表示传统池塘养殖模式, *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$), “—”表示未检出
Notes: IPRS represents the in-pond raceway system, TPS represents the traditional pond system, * means significant difference($P<0.05$), ** means very significant difference($P<0.01$), “—” represents undetectable

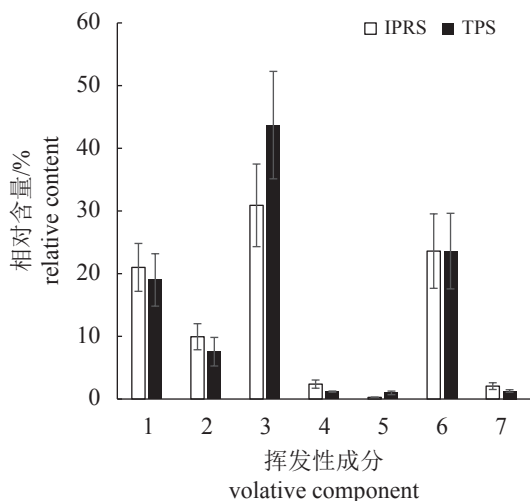


图3 IPRS模式斑点叉尾鲷肌肉挥发性物质种类
1.醇类, 2.酯类, 3.醛类, 4.酮类, 5.酸类, 6.烃类, 7.其他类

Fig. 3 Volatile flavor components of IPRS in the muscle of *I. punctatus*

1. alcohols, 2. lipids, 3. aldehydes, 4. ketones, 5. acids, 6. hydrocarbons, 7. others

类相对含量极显著低于TPS模式($43.674\% \pm 8.574\%$) ($P < 0.01$)。酯类物质中, IPRS模式乙酸乙烯酯($6.144\% \pm 1.251\%$)相对含量极显著高于TPS模式($3.892\% \pm 1.161\%$)。

此外, 两种模式下还检出酸类、烃类及其他物质。其中, 两种模式下均只检出一种酸性物质且相对含量较低[IPRS下检出壬酸, 相对含量($0.264\% \pm 0.017\%$); TPS模式下为苯甲酸, 相对含量($0.982\% \pm 0.287\%$)]。两种模式下均检出16种烃类物质且总相对含量基本持平(IPRS: $23.570\% \pm 5.950\%$, TPS: $23.594\% \pm 6.035\%$), 二者差别在于: 1-甲基-1,3-环己二烯在TPS模式检出且含量达到 $3.122\% \pm 1.011\%$, 在IPRS模式未检出; 十三烷在IPRS模式检出且含量达到 $0.112\% \pm 0.025\%$, 在TPS模式未检出; 1,3-戊二烯、对二甲苯、十五烷、苯乙烯及萘等几种物质之间差异显著或极显著。

3 讨论

3.1 两种养殖模式下挥发性风味物质主要差异及原因分析

醇类物质对食品风味的形成起调和作用, 一般而言, 饱和醇类物质感觉阈值相对较大, 所以对产品整体风味的贡献较小, 而不饱和醇类香气阈值一般较低, 对产品风味贡献较大^[24-26]。结果显示两种模式下均检出8种醇类物质, 相对含量

具有显著差异($P < 0.05$)的是1种饱和醇(1-戊醇)及2种不饱和醇[1-戊烯-3-醇及(E)-2-辛烯-1-醇]。其中, 1-戊醇作为饱和醇且相对含量较低, 因此, 对斑点叉尾鲷肌肉的风味影响可忽略不计^[25]。郝淑贤等^[27]指出1-辛烯-3-醇、1-戊烯-3-醇可以作为鱼肉鲜度的衡量指标, 本实验结果显示, 这两种醇类物质是相对含量最高的两种醇类, IPRS模式1-戊烯-3-醇相对含量($6.142\% \pm 1.360\%$)显著高于TPS模式($5.213\% \pm 1.242\%$) ($P < 0.05$), IPRS模式1-辛烯-3-醇相对含量($8.814\% \pm 1.542\%$)略低于TPS模式($9.542\% \pm 2.142\%$), 但无显著差异($P > 0.05$)。Chen等^[28]研究表明, 1-辛烯-3-醇具有鱼腥味, 是水产品异味土腥味来源之一, 是一种常见的淡水鱼类挥发性风味物质; 1-戊烯-3-醇具有类似蘑菇的香气。本实验结果显示, 这两种醇类的含量均高于卢春霞等^[22]对美国红鱼(*Sciaenops ocellatus*)、大黄鱼及花鲈(*Lateolabrax japonicus*)样品的检出含量。郝淑贤等^[29]在莫桑比克罗非鱼(*O. mossambicus*)样品中未检出这两种醇类物质。说明水产养殖品种及养殖模式对于醇类物质组成及含量均具有一定的影响。

醛类物质阈值较低^[30], 有研究显示, 醛类物质在罗非鱼^[19]、美国红鱼^[30]等水产品中含量较高, 对水产品整体风味贡献较大。本实验结果显示, 醛类物质整体相对含量是所有类别中最高的, 分别为 $30.926\% \pm 6.593\%$ (IPRS)及 $43.674\% \pm 8.574\%$ (TPS), 因此可以认为醛类物质是斑点叉尾鲷肌肉中的主要风味物质, 卢春霞等^[22]在对美国红鱼、大黄鱼及花鲈, 郝淑贤等^[29]在对罗非鱼, 杨雪玲等^[31]在对加州鲈(*Micropterus salmoides*)的研究中均得到类似结论。一般情况下, 醛类物质含量较高时会呈现令人不愉快的青草味和辛辣的刺激味。本实验中, IPRS模式己醛和2,4-庚二烯醛的含量均极显著低于TPS模式($P < 0.01$); 壬醛、癸醛、2,4-癸二烯醛及十二醛显著低于TPS模式($P < 0.05$); (E,E)-2,4-壬二烯醛显著高于TPS模式($P < 0.05$); 己醛是含量最高的物质, 在IPRS及TPS模式中, 含量分别达到了 $14.205\% \pm 1.943\%$ 及 $19.792\% \pm 2.511\%$, 主要呈现青草味、脂肪味, 是一种常见的淡水鱼风味物质, 含量较高时易呈现腥臭味^[30, 32]; 2,4-庚二烯醛具有青草香、脂肪香、蔬菜气味; 己醛、壬醛、癸醛、十二醛等饱和直链醛复合在一起时通常呈现令人不愉快的青草味和刺激性气味^[31]; (E,E)-2,4-壬二烯醛能产生瓜果类香气^[31-32]。

酮类物质的阈值一般较高,对食品风味贡献较小,但酮类物质具有独特的清香和果香风味,并且随着碳链的增长,香味愈强^[33]。本实验中,酮类物质检出呈现种类少、含量低的特征,其中甲基正壬酮只在IPRS模式检出,在水产品中较少检出,只有在大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)肌肉中检出的报道^[34]。

烃类化合物主要来源于脂肪酸烷氧自由基均裂,一般阈值较高,对食品直接风味贡献较小,但含量较高时可能会提高鱼肉整体香味^[30,32]。本实验中,IPRS及TPS模式均检出15种烃类物质,整体相对含量为 $23.570\% \pm 5.950\%$ 及 $23.594\% \pm 6.035\%$,其中IPRS模式1,3-戊二烯、十五烷及萘极显著高于TPS模式($P < 0.01$),2,4-二甲基苯乙烯极显著低于TPS模式($P < 0.01$)。

本实验还检出了酯类、酸类及其他类物质,IPRS模式($6.144\% \pm 1.251\%$)乙酸乙酯含量极显著高于TPS模式($3.892\% \pm 1.161\%$)($P < 0.01$),虽然单一酯类对鱼肉整体风味影响较小,但可能会通过风味叠加效应起到风味优化的效果^[34]。苯并噻唑只在IPRS模式检出,含量为 $1.854\% \pm 0.526\%$ 。

综上所述,本实验条件下,两种养殖模式的斑点叉尾鲷肌肉中挥发性风味物质从组成上差异较小,主要由醛类、烃类、醇类及酯类等4大类组成,但在一些诸如1-戊烯-3-醇、己醛、2,4-庚二烯醛等物质相对含量上具有显著差异($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),可能造成了两种模式下斑点叉尾鲷肌肉风味的区别,从结果来看,IPRS模式斑点叉尾鲷肌肉风味优于TPS模式,符合消费者感官评价,但从根本上来说,在其他条件一致的情况下,造成不同模式下挥发性风味物质区别的原因值得探讨。Parinet等^[35]及Schradera等^[36]探讨了养殖水质和水产品异味产生及分布的关系,指出水体污染或水体富营养化对于水产品异味产生起着决定性作用。王赛^[20]比较了不同底质对罗非鱼异味产生的影响,发现不同底质对罗非鱼腥味物质含量有影响,池塘底质又可以影响水质,进一步导致异味物质含量变化。周梦海^[37]研究了不同模式下罗非鱼体内异味物质组成及含量分布,研究发现养殖模式的不同会对养殖水体内的土腥味物质含量造成较大影响,水质污染越严重,则土腥味越加剧。在本研究中,IPRS模式的流水环境不断将养殖区产生的粪便及残料推向集污区,并且大水面净化区的自然净化保证了养殖区的水质,而

TPS模式粪便及残料一直沉降在池塘底部,只有在每一年度养殖周期结束时才彻底清塘1次,很容易引起水体富营养化。刘崇万等^[38]研究证实,IPRS模式溶解氧含量极显著高于后者($P < 0.01$),氨氮、悬浮物、总氮、溶解性总氮、总磷及高锰酸盐指数均显著或极显著低于后者($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。因此,可以认为不同模式的水质区别是造成鱼体挥发性物质区别的根本原因。

3.2 IPRS模式斑点叉尾鲷肌肉特征挥发性风味成分

前文分析了两种模式下挥发性风味物质的相对含量,但相对含量并不能直接表征斑点叉尾鲷肌肉的风味特征,其肌肉总体风味贡献由相对含量和感觉阈值共同决定。由表1中各成分相对含量及感觉阈值计算得出各挥发性风味物质的ROAV值,ROAV ≥ 1 的物质为所分析样品的特征性风味成分,0.1 \leq ROAV < 1 的物质对样品总体风味具有重要的修饰作用^[16]。ROAV计算公式中涉及到对样品整体风味贡献最大的组分,并设定其ROAV_{stan}=100,根据表1的结果,基于相对含量较高且阈值较小的原则,选择2,4-癸二烯醛作为对样品整体风味贡献最大的组分(阈值为0.07 $\mu\text{g}/\text{kg}$,IPRS及TPS模式相对含量分别为 $1.946\% \pm 0.319\%$ 及 $2.253\% \pm 0.452\%$)。

一种烯醇类(1-辛烯-3-醇)和多种醛类物质构成了两种模式下的特征性风味物质,对总体起修饰作用的主要是醛类物质(表2)。IPRS模式特征挥发性风味成分主要包括1-辛烯-3-醇、己醛、庚醛、辛醛、壬醛、2,6-壬二烯醛、癸醛、2,4-癸二烯醛及(E,E)-2,4-壬二烯醛。对应的TPS模式特征挥发性风味成分主要是1-辛烯-3-醇、己醛、辛醛、壬醛、癸醛、2,4-癸二烯醛、2,4-庚二烯醛、2-辛烯醛及(E,E)-2,4-壬二烯醛。

3.3 IPRS应用于水产养殖中的可行性分析

水产养殖动物的生长及养殖效益的提升,得益于建立适宜其生存和生长状态的最优化环境,并满足其营养需求,同时隔绝病害发生^[13]。TPS属于“静水”养殖,整个池塘水体既是养殖动物生长生活场所,又是饲料等投入品残料及养殖动物排泄物聚集场所,如在高密度养殖且生产管理不规范的情况下,很容易造成生态失衡,同时一旦缺乏有效的处理设施,养殖尾水直接排放到环境中,对环境污染较大。IPRS早在2006年在江苏

表 2 不同养殖模式下斑点叉尾鲷肌肉特征挥发性风味成分

Tab. 2 Key flavor compounds of IPRS and TPS

ROAV范围 range of ROAV	化合物名称 compounds name	ROAV值 value of ROAV		气味特征 flavor characteristics	
		IPRS	TPS		
ROAV \geq 1	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	3.16	2.97	蘑菇香气、泥土味 ^[28]	
	己醛 hexanal	17.0	20.5	青草味、脂肪味 ^[30,32]	
	庚醛 heptanal	1.11	—	鱼腥味、油脂味 ^[31]	
	辛醛 octanal	13.6	11.2	水果味、油脂味 ^[31]	
	壬醛 nonanal	4.06	11.0	脂肪香、青草香味 ^[31]	
	2,6-壬二烯醛 2,6-nonadienal	1.10	—	青草味 ^[10]	
	癸醛 decanal	3.39~67.8	3.58~71.6	脂肪味 ^[31]	
	2,4-癸二烯醛 2,4-decadienal	100	100	脂肪味、青草味 ^[10]	
	2,4-庚二烯醛 2,4-heptadienal	—	1.92	青草味 ^[10]	
	2-辛烯醛 2-octenal	—	1.13	青草味、油脂味 ^[10]	
	(E,E)-2,4-壬二烯醛 (E,E)-2,4-nonadienal	15.6	10.0	青草味 ^[26]	
	0.1 \leq ROAV<1	正辛醇 capryl alcohol	0.893	0.788	
		庚醛 heptanal	—	0.882	鱼腥味、油脂味 ^[31]
苯乙醛 phenylacetaldehyde		—	0.467		
2,6-壬二烯醛 2,6-nonadienal		—	0.735	青草味 ^[10]	
2,4-庚二烯醛 2,4-heptadienal		0.915	—	青草味 ^[10]	
2-辛烯醛 2-octenal		0.994	—	青草味、油脂味 ^[10]	
十二醛 dodecyl aldehyde		0.179	0.245	油脂味 ^[10]	
萘 naphthalene		0.238	0.101	樟脑球味 ^[10]	

注：“—”代表该物质的ROAV值不在相应的ROAV范围内或是该物质未检出，不进行ROAV值计算

Notes: “—” represents the value of the compound is out of the corresponding range or the compound is undetectable

开始测试，2013年于江苏省平望养殖场正式示范，自此，在全国开始大量推广，目前全国范围内以江苏、安徽、浙江的发展推广规模较大^[38]，养殖品种从最初的草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 试养，目前已经先后在鲤 (*Cyprinus Carpio*)、斑点叉尾鲷、加州鲈、大鳞鲃 (*Luciobarbus capito*)、中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 等品种上成功应用，同时建立了多种混养模式的新形态，已成为国家推广生态健康养殖的主推模式之一。

IPRS 通过将池塘实行功能区划分，不断流动的水体既为水产养殖动物提供了良好的生存环境，同时可以将养殖区废料集中到集污区，再由人工吸污，实现了废料的无害化处理，另外，大面积的水质净化区可以实时净化养殖区产生的养殖尾水，减少了对环境的危害^[15]。目前已有大量研究表明，IPRS 在实现节水、环保、高产的同时，对水产养殖动物的生长性能、营养品质提升也具有一定的作用^[10,12,15]。刘崇万等^[39]研究证实 IPRS 模式可显著提高斑点叉尾鲷肌肉粗蛋白质含量并降

低粗脂肪含量，同时对于部分氨基酸及脂肪酸也具有明显的提升作用。本研究显示，IPRS 模式在改善肌肉风味方面显示出优越性，IPRS 模式作为绿色生态养殖模式，适合斑点叉尾鲷集约化、高密度养殖。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Liu H Y, Li D, Guo S D. Extraction and properties of gelatin from channel catfish (*Ictalurus punctatus*) skin[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2008, 41(3): 414-419.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.

Bureau of Fisheries of Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of
中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- Fisheries. China fishery statistical yearbook 2020[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020 (in Chinese).
- [3] 代云云, 袁永明, 袁媛, 等. 中国鲟鱼产业安全预警分析[J]. *现代商贸工业*, 2019, 40(29): 15-17.
- Dai Y Y, Yuan Y M, Yuan Y, *et al.* Early warning analysis on the safety of channel catfish industry in China[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2019, 40(29): 15-17 (in Chinese).
- [4] Chen X H, Zhong L Q, Bian C, *et al.* High-quality genome assembly of channel catfish, *Ictalurus punctatus*[J]. *GigaScience*, 2016, 5(1): 39.
- [5] Zhong L Q, Song C, Chen X H, *et al.* Channel catfish in China: historical aspects, current status, and problems[J]. *Aquaculture*, 2016, 465: 367-373.
- [6] Hayat Z, Cherian G, Pasha T N, *et al.* Sensory evaluation and consumer acceptance of eggs from hens fed flax seed and 2 different antioxidants[J]. *Poultry Science*, 2010, 89(10): 2293-2298.
- [7] McCrummen S T, Wang Y F, Hanson T R, *et al.* Culture environment and the odorous volatile compounds present in pond-raised channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. *Aquaculture International*, 2018, 26(2): 685-694.
- [8] 曹静. 养殖和野生长吻鲷肌肉营养品质评价和挥发性风味物质比较研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Cao J. Comparative study on nutritional composition and volatile flavor compounds of cultured and wild *Leiostichus longirostris*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [9] 吴浩然, 林琳, 葛梦甜, 等. 四种不同生境模式养殖的雄性中华绒螯蟹性腺挥发性风味成分比较[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(6): 92-101,47.
- Wu H R, Lin L, Ge M T, *et al.* Comparison of volatile flavor components in gonad of male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) cultured with four different eco-environment modes[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2019, 35(6): 92-101,47 (in Chinese).
- [10] 肖雄, 林淑琴, 吴雄飞, 等. 三种不同养殖模式下大黄花鱼鱼皮、鱼鳞挥发性风味成分分析[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(2): 341-354.
- Xiao X, Lin S Q, Wu X F, *et al.* Volatile flavor compounds on the skin and scales of *Larimichthys crocea* cultured using three different methods[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(2): 341-354 (in Chinese).
- [11] Yuan J L, Ni M, Liu M, *et al.* Analysis of the growth performances, muscle quality, blood biochemistry and antioxidant status of *Micropterus salmoides* farmed in in-pond raceway systems versus usual-pond systems[J]. *Aquaculture*, 2019, 511: 734241.
- [12] 阴晴朗, 郭忠宝, 肖俊, 等. 池塘循环水槽养殖模式下吉富罗非鱼的生长及生理响应变化[J]. *水产学报*, 2020, 44(7): 1065-1074.
- Yin Q L, Guo Z B, Xiao J, *et al.* Growth and physiological responses of GIFT *Oreochromis niloticus* in an in-pond raceway system[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(7): 1065-1074 (in Chinese).
- [13] 王峰, 雷霖. 半滑舌鳎成鱼开放流水与循环水养殖模式下生长及肌肉营养成分差异研究[J]. *水产学报*, 2015, 39(4): 520-528.
- Wang F, Lei J L. Research on variance analysis of breeding and quality in muscles of *Cynoglossus semilaevis* adult fish in open flow through and recirculating aquaculture mode[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2015, 39(4): 520-528 (in Chinese).
- [14] Brown T W, Boyd C E, Chappell J A. Organic carbon and dissolved oxygen budgets for a commercial-size, in-pond raceway system[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2015, 46(5): 539-548.
- [15] 阴晴朗, 罗永巨, 郭忠宝, 等. 池塘循环水槽养殖模式研究进展[J]. *水产学杂志*, 2019, 32(5): 76-82.
- Yin Q L, Luo Y J, Guo Z B, *et al.* Research advances on in-pond raceway system: a review novation of traditional[J]. *Chinese Journal of Fisheries*, 2019, 32(5): 76-82 (in Chinese).
- [16] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. *食品科学*, 2008, 29(7): 370-374.
- Liu D Y, Zhou G H, Xu X L. “ROAV” method: A new method for determining key odor compounds of rugao ham[J]. *Food Science*, 2008, 29(7): 370-374 (in Chinese).
- [17] Zhang Y R, Zhang S W, Fan W X, *et al.* Identification of volatile compounds and odour activity values in quinoa porridge by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(8): 3957-3966.
- [18] Wei J P, Wang S Y, Zhang Y X, *et al.* Characterization

- and screening of non-*Saccharomyces* yeasts used to produce fragrant cider[J]. *LWT*, 2019, 107: 191-198.
- [19] 江健, 王锡昌, 陈西瑶. 顶空固相微萃取与GC-MS联用法分析淡水鱼肉气味成分[J]. *现代食品科技*, 2006, 22(2): 219-222.
- Jiang J, Wang X C, Chen X Y. Analysis odors of freshwater fish meat by HS-SPME combined with GC-MS[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2006, 22(2): 219-222 (in Chinese).
- [20] 王赛. 水质、藻类变化对罗非鱼异味产生的影响及异味去除初步探讨 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
- Wang S. The preliminary study on impacts of water quality and algae changes on off-odour generation in tilapia and removal methods[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012 (in Chinese).
- [21] 翁丽萍, 陈飞东, 王宏海, 等. SPME-GC-MS法分析温室甲鱼中的挥发性风味物质[J]. *食品工业*, 2014, 35(12): 266-269.
- Weng L P, Chen F D, Wang H H, *et al.* Investigation on the volatile flavor compounds of *Pelodiscus sinensis* grown in greenhouse by SPME-GC-MS[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(12): 266-269 (in Chinese).
- [22] 卢春霞, 翁丽萍, 王宏海, 等. 3种网箱养殖鱼类的主体风味成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(10): 163-169.
- Lu C X, Weng L P, Wang H H, *et al.* Investigation on the key odor compounds of three cage-farming fishes[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 36(10): 163-169 (in Chinese).
- [23] 林亚楠, 涂丹, 沈清, 等. 美国生长的鲫营养品质及关键风味物质研究[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(3): 99-106.
- Lin Y N, Tu D, Shen Q, *et al.* Study on nutritional quality and key flavor substances of American *Carassius auratus*[J]. *South China Fisheries Science*, 2018, 14(3): 99-106 (in Chinese).
- [24] Josephson D B, Lindsay R C, Stuijber D A. Variations in the occurrences of enzymically derived volatile aroma compounds in salt-and freshwater fish[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 1984, 32(6): 1344-1347.
- [25] Selli S, Cayhan G G. Analysis of volatile compounds of wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) by simultaneous distillation-extraction (SDE) and GC-MS[J]. *Microchemical Journal*, 2009, 93(2): 232-235.
- [26] 龙斌. 养殖南方大口鲈与川鲈挥发性风味物质研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- Long B. Study on the volatile flavor compounds of cultured *Silurus soldatovi meridionalis* Chen and *Silurus meridionalis* Chen×*Silurus* spp.[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014 (in Chinese).
- [27] 郝淑贤, 李晓燕, 李来好, 等. 鲟营养组成、高值化加工利用及质量安全研究进展[J]. *南方水产科学*, 2014, 10(6): 101-106.
- Hao S X, Li X Y, Li L H, *et al.* Research progress on nutrition composition, high threshold processing technology and quality & safety of sturgeon[J]. *South China Fisheries Science*, 2014, 10(6): 101-106 (in Chinese).
- [28] Chen D W, Zhang M. Analysis of volatile compounds in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. *Journal of Food and Drug Analysis*, 2006, 14(3): 297-303.
- [29] 郝淑贤, 叶鸽, 李来好, 等. 不同养殖模式罗非鱼的挥发性成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(6): 147-152.
- Hao S X, Ye G, Li L H, *et al.* Volatile component analysis of tilapia under different cultivating system[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(6): 147-152 (in Chinese).
- [30] 王怡娟, 娄永江, 陈梨柯. 养殖美国红鱼鱼肉中挥发性成分的研究[J]. *水产科学*, 2009, 28(6): 303-307.
- Wang Y J, Lou Y J, Chen L K. The volatile compounds in muscle of cultivated red drum *Sciaenops ocellatus*[J]. *Fisheries Science*, 2009, 28(6): 303-307 (in Chinese).
- [31] 杨雪玲, 王彩霞, 白婵, 等. 加州鲈挥发性物质分析方法的建立与分析[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(24): 237-244, 297.
- Yang X L, Wang C X, Bai C, *et al.* Establishment of analysis method of volatile compounds and analysis of flavor components in *Micropterus salmoides*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(24): 237-244, 297 (in Chinese).
- [32] Frank D, Poole S, Kirchoff S, *et al.* Investigation of sensory and volatile characteristics of farmed and wild barramundi (*Lates calcarifer*) using gas chromatography-olfactometry mass spectrometry and descriptive sensory analysis[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(21): 10302-10312.
- [33] Selli S, Rannou C, Prost C, *et al.* Characterization of

- aroma-active compounds in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) eliciting an off-odor[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(25): 9496-9502.
- [34] Xu Y X, Liu Y, Jiang C C, *et al.* Determination of volatile compounds in turbot (*Psetta maxima*) during refrigerated storage by headspace solid-phase microextraction and gas chromatography—mass spectrometry[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(12): 2464-2471.
- [35] Parinet J, Rodriguez M J, Sérodes J. Influence of water quality on the presence of off-flavour compounds (geosmin and 2-methylisoborneol)[J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 5847-5856.
- [36] Schradera K K, Davidson J W, Summerfelt S T. Evaluation of the impact of nitrate-nitrogen levels in recirculating aquaculture systems on concentrations of the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol in water and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 57: 126-130.
- [37] 周梦海. 我国罗非鱼不同养殖模式的异味物质含量分布 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- Zhou M H. Determination of off flavor of tilapia in different culture patterns[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2015 (in Chinese).
- [38] 杨晓梅. 池塘循环微流水养殖模式发展现状及建议[J]. *水产研究*, 2020, 7(3): 163-169.
- Yang X M. Development status and suggestions of in-pond raceway aquaculture model[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2020, 7(3): 163-169 (in Chinese).
- [39] 刘崇万, 朱晓华, 孟勇, 等. 池塘循环水槽养殖模式对斑点叉尾鲷鱼肉营养品质的提升作用[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(2): 418-425.
- Liu C W, Zhu X H, Meng Y, *et al.* Improvement of In-pond raceway system on the nutritional quality in the muscle of *Letaurus punetaus*[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(2): 418-425 (in Chinese).

Characteristic volatile flavor components of in-pond raceway system in the muscle of channel catfish (*Ictalurus punctatus*)

LIU Chongwan^{1,2}, ZHU Xiaohua^{1,2*}, XU Zhihua^{1,2}, MENG Yong^{1,2}, CHEN Xiaohui¹, BIAN Wenji¹

(1. Key Laboratory for Fishery Product of Jiangsu, Quality and Safety,

Freshwater Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China;

2. Fishery Analysis & Testing Center of Jiangsu Province, Quality Control & Inspection Center for Domestic Fishery Products, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Nanjing 210017, China)

Abstract: In order to investigate the characteristic volatile flavor components in the muscle of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) by in-pond raceway system (IPRS), and the traditional pond system (TPS) served as control. The volatile flavor components of *I. punctatus* selected randomly under the two modes were extracted and identified by the headspace solid phase microextraction combined with comprehensive two-dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry, and the characteristic components were determined by ROAV (relative odor activity value). The results showed that 49 and 50 components were identified under the IPRS and TPS, respectively, which were mainly composed of aldehydes, hydrocarbons, alcohols and lipids. The relative contents of alcohols and ketones by IPRS were higher than those by TPS, and 1-pentanol, 1-penten-3-ol, vinyl acetate, 2-nonone, 2,3-octanedione, 1,3-pentadiene and n-pentadecane were significantly higher or very significantly higher than those of TPS ($P < 0.05$ or $P < 0.01$). Some aldehydes, such as hexanal, tended to present unpleasant odor when the content was high, the advantage of IPRS in the study were obvious. The characteristic volatile flavor components by IPRS were composed of 1-octen-3-ol, hexanal, heptanal, octanal, 2,6-nonadienal, nonanal, decanal, 2,4-decadienal and (E, E)-2,4-nonadienal, among them, the heptanal and 2,6-nonadienal were the particular components. In conclusion, the culture mode had a great influence on the volatile flavor components and relative contents, The composition of volatile flavor components under IPRS was better than that under TPS, which was suitable for intensive and high-density cultivation of *I. punctatus*.

Key words: *Ictalurus punctatus*; in-pond raceway system (IPRS); volatile flavor components; GC×GC/TOFMS; relative odor activity value (ROAV)

Corresponding author: ZHU Xiaohua. E-mail: xhz824@sina.com

Funding projects: Jiangsu Modern Agricultural Industrial Technology System Construction Project (JATS[2020]329); China Agriculture Research System (CARS-46); the Fifth "333 Project" of Jiangsu Province in 2020 (BRA2020374)