



· 综述 ·

水产动物体内土腥味物质的来源、检测及其 防控与去除的研究进展

刘利平^{1,2,3*}, 李 慷^{1,2,3}, 闫 莉¹

(1. 上海海洋大学, 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 土腥味一直是影响水产品品质与消费行为的主要因素, 长期困扰水产养殖相关产业。开展水产动物体内土腥味物质的来源、积累、检测和防控与去除方法等的研究, 对提高水产品品质具有重要意义。本文综述了水产动物体内土腥味物质的来源, 对放线菌、蓝藻等引起水产品土腥味的主要源头进行了分析和总结; 阐述了土腥味物质在水产品养殖过程中的积累途径。同时, 为有效评价水产品中土腥味物质的含量, 将目前生产和研究中采用的感官分析、仪器检测等方法进行了归纳和比较。此外, 文章比较了物理、化学和生物处理等方法, 为有效防控和清除水产品中的土腥味提供参考; 其中微生物拮抗和降解法以及池塘生态调控法是最有应用前景的防控方法。本综述总结了关于土腥味物质的最新研究成果, 为提升水产品品质、解决水产品土腥味问题提供了借鉴。

关键词: 土腥味; 水产品品质; 积累途径; 检测方法; 去除措施

中图分类号: TS 254

文献标志码: A

水产品是人类重要的动物蛋白质来源^[1-2], 因其肉质鲜美、脂肪含量低、多不饱和脂肪酸和维生素含量丰富而倍受消费者欢迎^[3]。据中国海关统计, 2019年我国水产品进口 626.5 万 t, 同比增长 19.9%; 进口额 187.0 亿美元, 同比增长 25.6%。出口 426.8 万 t, 同比下降 1.4%; 出口额 206.6 亿美元, 同比下降 8.0%^[4]。随着消费水平的提高, 人们对水产品品质的要求也在不断提升^[5]。对于消费者而言, 如果初次购买的水产品有土腥味, 将严重影响其对该水产品的二次购买^[6]。土腥味的存在影响了养殖、加工、销售和消费等整个产业链, 给相关从业者造成的经

济损失巨大。本综述将主要从鱼类土腥味物质的来源、累积途径、检测方法和防控去除等方面介绍最新的研究进展。

1 水产品中的土腥味物质

土腥味物质是多种化学物质的总称, 组成复杂、种类繁多^[6], 包括土臭素 (geosmin, GSM)、二甲基异茨醇 (2-methylisoborneol, 2-MIB) 和 E-2-壬烯醛等物质^[7]。土腥味的产生多数是由环境因素导致, 同时也包括水产动物体内发生的相关生化反应, 如脂肪酸的氧化、含硫含氮前体物

收稿日期: 2020-06-12 修回日期: 2020-07-20

资助项目: 上海市科技兴农重点攻关项目 [沪农科创字 (2018) 第 2-12 号]; 国家重点研发计划 (2019YFD0900303); 中国-东盟海上合作基金 (DF); 中国博士后科学基金 (2018M641984)

通信作者: 刘利平, E-mail: lp-liu@shou.edu.cn



质的酶催化转化、鱼体内三甲胺在微生物和酶作用下的降解等^[7]。最早有关水产品土腥味的报道是 1977 年由于欧洲芬兰湾水域受到石油等有机物的污染, 该区域捕捞的欧洲鳊 (*Abramis brama*) 以及虾类出现了土腥味^[8]。近年来由于水产品土腥味问题, 导致产品无法上市的情况时有发生, 例如厄瓜多尔出口到美国的对虾, 因土腥味强烈而被禁止上市^[9]; 2001 年在美国, 塘口价值约 4.45 亿美元的斑点叉尾鲷 (*Ictalurus punctatus*) 因土腥味问题造成约 1 500 万~2 300 万美元的直接经济损失^[10], 此外还导致每 kg 0.01~0.25 美元的间接经济损失^[10]。因此, 水产品中的

土腥味被认为是与生产相关的亟需解决的重要问题之一^[11]。有学者对北京和天津的淡水养殖池塘调查后发现, 鱼体内普遍存在土腥味会直接影响销售及养殖户的收益^[12]。随着有关水产品土腥味研究的开展, Howgate^[13]提出土腥味物质主要成分是 GSM 和 2-MIB, 由于养殖过程中水产动物特别是淡水养殖品种对二者的吸收和富集, 使其体内出现土腥味。因此, 通常以 GSM 和 2-MIB 作为特征性物质进行土腥味的检测, 表 1 为循环水养殖系统 (recirculating aquaculture system, RAS) 中不同种类水产品体内 GSM 和 2-MIB 的检出值。

表 1 循环水系统中不同种类水产品体内土臭素和 2-甲基异茨醇的检出值

Tab. 1 Occurrence of geosmin and 2-methylisoborneol in different cultured fish species in recirculating aquaculture system

养殖品种 aquaculture species	GSM/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	2-MIB/ ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	养殖规格/kg breeding specification	检测方法 detection method	参考文献 reference
大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	0.26~0.51	0.55~0.99	0.639±0.750	固相微萃取-气相色谱	[14]
红点鲑 <i>Salvelinus alpinus</i>	0.7	0.008		固相微萃取-气相色谱	[15]
日本沼虾 <i>Macrobrachium nipponense</i>	78	ND		火焰离子化检测器-气相色谱	[16]
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	0.14~3.84	ND		固相微萃取-气相色谱	[17]
	0.1~2.4	0.01~0.55	0.308±0.720	固相微萃取-气相色谱	[18]
	1.0~7.2	ND	0.300±0.400	固相微萃取-气相色谱	[19]
	3~5	ND	0.197±0.001	固相微萃取-气相色谱	[20]
	0.05~0.38	0.01~0.05	0.147~0.151	固相微萃取-气相色谱	[21]
	0.07~0.37	0.01~0.03		固相微萃取-气相色谱	[22]
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	5~41	17~67		固相微萃取-气相色谱	[23]
鲇 <i>Silurus asotus</i>	1.712	29.85	0.110		[24]

注: ND. 未检测到, 下同

Notes: ND. not detected, the same below

2 水产品体内土腥味物质的来源与积累

2.1 土腥味物质的来源

水产品中的土腥味物质一般来自于捕捞前的养殖阶段和捕捞后的储存阶段^[25], 养殖阶段是影响水产品土腥味物质的重要时期。研究显示 GSM 和 2-MIB 两种异味物质主要产自浮游藻类和放线菌^[21, 26-28]。随着养殖密度增加、水体富营养化等原因, 导致池塘水华暴发, 以蓝藻为主, 其分泌的代谢物可能会造成水体异味的产生 (图 1)。微囊藻属 (*Microcystis*) 产生 β -环柠檬酸, 它是一种具有烟草味和霉味的物质, 会导致水体产生异味^[29]; 蓝绿藻产生的 β -环柠檬醛与 β -紫罗兰酮

均是异味物质产生的主要原因^[30]。此外, 养殖池塘和循环水养殖系统中无处不在的放线菌等细菌也会产生异味物质^[26, 31]。在水产品的储存阶段, 由于新鲜水产品含水量较高, 易引起微生物繁殖, 从而产生土腥味或腐败味^[32]; 此外, 大部分水产品都含有较高的多不饱和脂肪酸, 容易发生脂质氧化^[33], 当水产品储存时间过长或储存方式不当时, 也会产生土腥味和霉味。

浮游植物 针对水产养殖特别是池塘养殖模式, 有关土腥味和霉味来源的研究主要集中在蓝藻。早在 1977 年芬兰湾水域污染造成水产品出现异味时, 研究人员便发现蓝藻, 尤其是阿氏颤藻 (*Oscillatoria agardhii*) 是产生土腥味

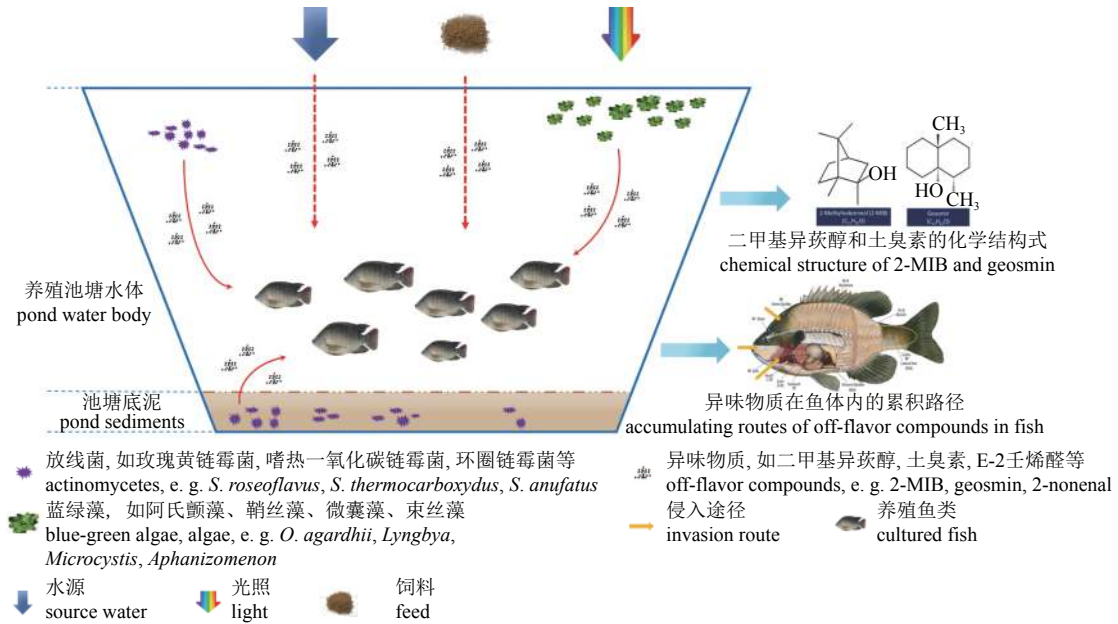


图1 池塘养殖过程中异味物质的来源及在鱼体内的积累

Fig. 1 Sources and accumulation of off-flavour compounds in aquatic animals during pond culture

物质的源头^[8]。随着研究的不断深入, 发现产生土腥味的蓝藻还包括鱼腥藻 (*Anabaena*)、鞘丝藻 (*Lyngbya*)、微囊藻和束丝藻 (*Aphanizomenon*) 等^[34]。此外, 有学者发现颤藻 (*Oscillatoria*) 可以分泌 2-MIB^[35], 部分硅藻 (*Bacillariophyta*) 和部分绿藻则可以分泌 GSM 和 2-MIB^[35]。徐盈等^[36] 曾对武汉东湖进行过调查研究, 发现东湖中席藻 (*Phormidiaceae*) 与放线菌是产生 2-MIB 的主要源头, 并且 2-MIB 浓度与放线菌生物量呈正相关。在对密云水库水体异味情况调查过程中, 发现水体中大量的蓝绿藻, 如颤藻、鱼腥藻, 以及颗粒直链藻 (*Melosira granulata*) 是产生异味的主要原因^[37]。表 2 汇总了相关文献中已发现的产 GSM 和 2-MIB 的藻类。

水产养殖过程中, 投喂过量饲料和动物粪便的积累都会造成养殖水体富营养化, 为蓝藻等浮游植物大量繁殖提供条件, 成为池塘养殖产生异味物质的主要原因^[51]。同时, 由藻类次生代谢产物所导致的水产品异味问题是一个严重且普遍存在的环境问题, 而对环境因子, 包括水体盐度、溶解氧、叶绿素等指标的检测是当前非常有效的手段, 可以判断出它们的变化与土腥味物质的关系^[52]。而由于盐度、碱度会对浮游生物产生影响, 池塘盐碱度的升高会降低浮游生物的生物量 (尤其是蓝藻) 和多样性指数^[53]。已有研究发现, 在盐碱水体中养殖的尼罗罗非

鱼 (*Oreochromis niloticus*) 土腥味显著低于淡水中养殖的罗非鱼^[54], 这是由于较高的盐碱度会抑制浮游植物的生长; 研究结果显示该池塘的优势种为硅藻门的小环藻 (*Cyclotella*), 而淡水池塘中优势种则为蓝藻门的鱼腥藻、小颤藻 (*O. tenuis*) 和微囊藻等。

放线菌 放线菌是具有分支状菌丝体的革兰氏阳性菌, 兼性厌氧菌, 是广泛存在于土壤和水体中的优势微生物类群^[55]。众多研究者通过实验证实, 放线菌是产生异味物质的一个主要来源, 尤其是链霉菌属 (*Streptomyces*), 常常与 GSM 和 2-MIB 的产生有关, 表 3 总结了产生 GSM 和 2-MIB 的放线菌种类。

20 世纪初期, Thaysen^[59] 首次发现生活在富含放线菌水体中的大西洋鲑含有异味, 同时发现放线菌产生的不溶于水的有机化合物很快就会被鱼体所吸收。Gerber 等^[58] 从多种放线菌的发酵液中提取到了相同的 GSM, 并确认其是使土壤产生特征性气味的物质; 随后又在放线菌培养物中分离出另一种异味物质 2-MIB。研究人员从养殖水体中分离得到了两株产生异味物质的放线菌, 玫瑰黄链霉菌 (*S. roseoflavus*) 和嗜热一氧化碳链霉菌 (*S. thermocarboxydus*), 发现这两种放线菌在好氧和厌氧条件下均可产生 GSM 和 2-MIB^[56]。但也有研究认为, 放线菌在天然水体和养殖水体中分泌异味物质的能力没有显著差

表 2 产土臭素和 2-甲基异茨醇的藻类品种

Tab. 2 Algae producing geosmin and 2-methylisoborneol

藻株 algae species	异味物质 odorous metabolite	产地 origin	参考文献 reference
颤藻属 <i>Oscillatoria</i>			
泥生颤藻 <i>O. limosa</i>	GSM	河流/西班牙	[38]
泥生颤藻 <i>O. limosa</i>	2-MIB	美国	[39]
泥生颤藻 <i>O. limosa</i>	GSM	河流/荷兰	[40]
弱细颤藻 <i>O. tenuis</i>	2-MIB	日本	[41]
铜色颤藻 <i>O. chalybea</i>	2-MIB	水库/以色列	
美丽颤藻 <i>O. perornata</i>	2-MIB	鱼塘/美国	[42]
微囊藻属 <i>Microcystis</i>			
水华微囊藻 <i>Microcystis flos-aquae</i>	GSM, 2-MIB	养鱼池/中国	[3]
铜绿微囊藻 <i>M. aeruginosa</i>	GSM, 2-MIB	水库/中国	[3]
席藻属 <i>Phormidium</i>			
纤细席藻 <i>P. tenue</i>	GSM	湖泊/日本	[43]
拟鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i>	2-MIB	水库/美国	[44]
鱼腥藻 <i>Anabaena</i>			
鱼腥藻属 <i>Anabaena</i> sp.	GSM	河流/澳大利亚	[45]
螺旋鱼腥藻 <i>A. spiralis</i>	GSM	鲇塘/美国	[46]
卷曲鱼腥藻 <i>A. circinalis</i>	GSM	河流/澳大利亚	[47]
单丝鱼腥藻 <i>A. solitaria</i>	GSM	中国台湾	[48]
其他藻属 other algae species			
水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flosaquae</i>	GSM	鱼塘/日本	[49]
藓生束藻 <i>Symploca muscorum</i>	GSM	养鱼池/日本	[50]

表 3 产土臭素和 2-甲基异茨醇的放线菌种类

Tab. 3 Geosmin and 2-methylisoborneol-producing actinomycetes reported in different studies

微生物种类 microorganism	养殖品种 culture species	土臭素 geosmin	二甲基异茨醇 2-MIB	参考文献 reference
环圈链霉菌 <i>S. anulatus</i>	美洲红点鲑 <i>S. fontinalis</i>	是	NA	[26]
玫瑰黄链霉菌 <i>S. roseoflavus</i>	莫桑比克罗非鱼 <i>O. mossambicus</i>	是	是	[56]
嗜热一氧化碳链霉菌 <i>S. thermocarboxydus</i>	虹鳟 <i>O. mykiss</i>	是	ND	[57]
灰色链霉菌 <i>S. griseus</i>		是	ND	[58]
白色链霉菌 <i>S. albidoflavus</i>		是	ND	[57]
黄灰链霉菌 <i>S. flavogriseus</i>				
粘球菌 <i>Myxococcus xanthus</i>				

注: NA. 未分析

Notes: NA. not analyzed

异^[60]。造成这一结果可能是由于实验方法的原因,无法分离出放线菌,或者分离出的放线菌不具备产生土腥味物质的能力,或者是产生土腥味

物质的其他物种将放线菌掩盖了。因此,需要在一定的实验条件下对放线菌产生土腥味物质的能力进行验证,为今后土腥味的去除提供更

多的理论依据。

其他来源 除蓝藻与放线菌外, 学者发现金黄色葡萄球菌 (*Stigmatella aurantiaca*)、黄褐粘球菌 (*M. fulvus*) 和链状软骨霉菌 (*Chondromyces catenulatus*) 也能够产生土腥味物质, 如金黄色葡萄球菌与黄褐粘球菌均可产生 GSM^[61]。此外, Tucker^[62] 提出鱼体内的土腥味物质一部分可能来源于食物中的某些化合物, 它们通过胃肠道被水产动物所吸收。对于人工养殖的水产动物来说, 饲料可能也是造成土腥味的的原因之一, 饲料的组成成分在配制前后可能会产生一些异味物质, 被鱼虾摄食之后, 导致体内土腥味物质的积累^[25]。

2.2 土腥味物质的积累

水体中的土腥味化学物质被鱼鳃、皮肤吸收, 或随着摄食藻类进入鱼体内, 从而在体内产生累积, 这是一个被动吸收的过程^[63](图 1)。鱼鳃是吸收异味物质的主要部位, 因为它特殊的结构和功能增强了土腥味物质在水和血液之间的扩散; 吸收往往只需几分钟, 而清除则长达数天^[64]。土腥味化合物在鳃部被吸收后, 通过血液运输至高血流量的组织, 之后被重新分配并累积到富含脂肪的组织中^[65]。影响土腥味物质吸收速率的主要因素有化合物的气味强度、化合物在水中的浓度和化合物之间的协同作用^[62]。因此, 受养殖过程中水体交换程度和样品采集时间的影响, 水体中土腥味物质的含量不能完全反映该水产品中土腥味物质的浓度^[66]。此外, 水产品的大小、脂肪含量^[13, 62]和养殖水体温度^[13, 67]等因素都会影响土腥味物质在水产品中的积累。

土腥味物质在鱼肉中的积累程度与鱼肉脂肪含量成正比。在含有土腥味物质的养殖水体中, 高脂肪 (>2.5%) 含量的鱼体内土腥味物质的含量远高于低脂肪 (<2.0%) 含量的鱼; 24 h 急性试验结果显示, 高脂鱼对 2-MIB 的积累能力是低脂鱼的 3 倍以上^[25]。鱼体大小也影响土腥味物

质的积累, 且呈正相关。Johnsen 等^[65]证实, 将 0.5 kg 的斑点叉尾鲴置于 0.5 μg/L 的 2-MIB 水溶液中, 2 h 内便会出现土腥味; 若持续暴露, 24 h 以内 2-MIB 浓度就会达到平衡。水温往往是通过鱼类代谢的影响, 间接影响鱼类对 2-MIB 的吸收速率^[68]。升温会提高鱼鳃的通气速率, 促进鱼对 GSM 和 2-MIB 的吸收与代谢^[13, 69]。

3 土腥味物质的检测方法

GSM 和 2-MIB 的检测方法分为感官分析法和仪器分析法。感官分析法被认为是最直接、最简便的方法, 但是不能达到定量检测的目的, 也无法多次重复实验结果, 因此该方法具有局限性; 而仪器分析法可以达到准确定量。

3.1 土腥味物质的特征

GSM 和 2-MIB 均属于天然烯萜醇类化学物质, 属于亲脂类, 具有叔醇结构^[70], 因此具备抗氧化的能力, 属半挥发性, 微溶于水。低浓度的 2-MIB 溶液有独特的霉味, 但高浓度溶液则呈现明显的樟脑味^[71], GSM 具有泥土的味道, 即使二者浓度较低也会对水产品风味造成很大的影响。人类对这两种物质的敏感性并不具有统一性, 常因为环境不同而产生差异, 水中的 2-MIB 和 GSM 嗅阈值分别为 5~10 和 1~10 ng/L^[72], 两种土腥味物质在鱼肉中的嗅觉阈值分别为 0.6 和 0.9 μg/kg^[71, 73]。表 4 列举了 GSM 和 2-MIB 的物理性质^[74]。

3.2 感官分析

感官分析法可以用来评价鱼肉中土腥味物质的含量等级, 根据 ISO 13301^[75] 标准的要求, 评审团由专业评审员或受过培训的人员组成。但感官分析难以准确划分异味的类型, 而且无法测定低于异味阈值 (threshold odor number, TON) 的异味化合物 (表 5)。随着新型感官分析技术的发展, 气味轮廓分析技术^[35] 成为广泛鉴定异味

表 4 土臭素和 2-甲基异莰醇的物理性质

Tab. 4 Physical properties of geosmin and 2-methylisoborneol

名称 name	分子式 molecular formula	溶解度/(mg/L) solubility	沸点/°C boiling point	水体中嗅阈值/(ng/L) sensory thresholds in water
土臭素 geosmin	C ₁₂ H ₂₂ O	150.2	165.2	1~10
二甲基异莰醇 2-MIB	C ₁₁ H ₂₂ O	194.5	196.7	5~10

表 5 不同水产品中土臭素和 2-甲基异茨醇的感官阈值

Tab. 5 Sensory thresholds of geosmin and 2-methylisoborneol in different fish species

水产动物 aquatic animal	土臭素/($\mu\text{g}/\text{kg}$) geosmin	二甲基异茨醇/($\mu\text{g}/\text{kg}$) 2-MIB	参考文献 reference
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	0.90	0.60	[73]
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	0.044~0.50	>0.90	[14, 76]
鲟 <i>S. asotus</i>	0.25~0.50	0.10~0.20	[77]
尖吻鲈 <i>Lates calcarifer</i>	0.74	ND	[78]
墨瑞鳕 <i>Macullochella peelii</i>	0.06~0.90	ND	[79]

成分的一种方法。该方法要求小组成员在 4 人以上,评价之前要进行专业培训,然后每位成员根据异味轮状图所区分出的气味类型对样品特征性气味和强弱进行评判。一般认为,感官分析法简单、易操作,但由于个人的味觉特点的差异,主观性很强,容易出现味觉疲劳,所以结果具有不确定性。随着检测技术的发展,更多先进仪器的应用,使得仪器检测更加客观、准确、快速。

3.3 仪器分析

目前检测土腥味物质常采用气相色谱技术(GC)或气相色谱-质谱联用技术(GC-MS),由于水体或鱼体内土腥味物质都是痕量存在的,对样品中土腥味物质进行浓缩、富集等一系列前处理显得尤为重要。常见的前处理方法主要包括闭环捕集法(CLSA)、开环捕集法(OLSA)、液-液萃取法(LLD)、搅拌棒吸附法(SBSE)、微波蒸馏提取法(MAD-SE)、固相微萃取法(SPME)、顶空固相微萃取法(HSPME)和吹扫捕集法(P & T)等^[3, 6, 74, 80](表 6)。

固相微萃取 微波蒸馏-固相微萃取-气质联用技术目前是较为成熟的检测土腥味物质的方法,其中固相微萃取是一种灵敏、简便、无需溶剂的前处理技术^[92-94],该技术将样品中需要分析的物质直接提取到涂有聚合物吸附剂的石英纤维上,吸附完成后将固相微萃取头放置在气相色谱进样口进行解析测定^[95]。近年来,它被广泛应用于食品、环境和生物医学领域中挥发性化合物的分析,对水产品土腥味的检测有较好的效果^[96-98]。Grimm 等^[77]运用微波蒸馏-固相微萃取-气质联用法对斑点叉尾鲷进行土腥味物质的含量分析,GSM 与 2-MIB 的检出限分别为 0.25 和 0.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。Rubio 等^[23]参考 Grimm 等^[77]的

方法,操作过程相同,对相关参数进行了优化,测定了大口黑鲈与白鲟(*Psephurus gladius*)肌肉中的 GSM 与 2-MIB 含量,二者检出限均为 0.001 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。王国超等^[84]运用该方法检测罗非鱼,得出 GSM 与 2-MIB 的检出限分别为 0.044 和 0.095 $\mu\text{g}/\text{kg}$,加标回收率分别为 42.7% 和 61.9%。薛勇等^[86]运用该方法进行鳙(*Aristichthys nobilis*)体内土腥味物质的检测,也得到了较好的实验结果。

微波蒸馏-吹扫捕集 微波蒸馏-吹扫捕集前处理方法,主要由微波蒸馏完成样品的初级提取,之后通过吹扫捕集对提取液进一步收集和浓缩。Salemi 等^[99]研究表明,该方法对土腥味物质的富集效率高、取样量少且操作自动化程度高,能够保证样品不被污染。张凯^[87]参照 Salemi 等^[99]的方法对微波蒸馏-吹扫捕集-气质联用方法进行了优化,GSM 和 2-MIB 的检测限分别达到 2.89 和 2.28 ng/L ,二者的加标回收率也分别达到了 81%~112% 和 85%~96%。为了提高富集效率,常常使用氯化钠作为提取溶剂,通过向样品中加入强电解质,利用“盐效应”降低化合物在溶液中的溶解度,从而提高土腥味物质的挥发程度^[100];但由于氯化钠溶液易结晶,常常会造成仪器的堵塞,因此氯化钠溶液浓度的选择至关重要。仪器检测实现了对实验样品更加准确的定性定量测量,而且检测下限较低,对感官分析法的不足之处进行了弥补,但由于目前仪器运行还存在不稳定、成本高等不足,仪器检测方法仍需完善。

4 土腥味物质的去除与防控

4.1 物理、化学去除法

目前关于 GSM 与 2-MIB 的来源逐渐明确,但对土腥味物质的控制效果依旧受到养殖品种、

表 6 常见的土腥味物质检测前处理方法

Tab. 6 Pretreatment methods for detection of earthy flavor materials in aquatic products

前处理方法 pre-treatment methods	水产品种类 culture species	检出限/($\mu\text{g}/\text{kg}$) limit of detection	加标回收率/% recovery rate	优点 advantage	缺点 disadvantage
微波蒸馏 microwave distillation	斑点叉尾鲷 ^[81] <i>I. punctatus</i>	GSM (-), 2-MIB (5)	GSM (-), 2-MIB (56±4)	操作步骤简单	对于土腥味物质等挥发性较强的有机物, 富集效果较差
	斑点叉尾鲷 ^[82] <i>I. punctatus</i>	GSM (-), 2-MIB (5.9)	GSM (-), 2-MIB (-)		
	鲟 ^[69] <i>S. asotus</i>	GSM (0.01), 2-MIB (0.01)	GSM (57), 2-MIB (60)		
微波蒸馏-固相微萃取 microwave distillation- solid phase microextraction	鲟 ^[83] <i>S. asotus</i>	GSM (0.008), 2-MIB (0.043)	GSM (30.4±5.3), 2-MIB (81.4±5.4)	能够充分、快速地提取鱼体内的挥发性成分; 无需有机溶剂, 无需浓缩	萃取头价格较为昂贵, 且使用寿命较短
	斑点叉尾鲷 ^[77] <i>I. punctatus</i>	GSM (0.25), 2-MIB (0.1)	GSM (-), 2-MIB (-)		
	虹鳟 ^[21] <i>O. mykiss</i>	GSM (<0.075), 2-MIB (<0.075)	GSM (-), 2-MIB (-)		
	莫桑比克罗非鱼 ^[84] <i>O. mossambicus</i>	GSM (0.044), 2-MIB (0.095)	GSM (42.7), 2-MIB (61.9)		
	鲢 ^[85] <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	GSM (1.37), 2-MIB (1.83)	GSM (63.9), 2-MIB (53.5)		
	鳙 ^[86] <i>A. nobilis</i>	GSM (0.0054), 2-MIB (-)	GSM (57), 2-MIB (-)		
微波蒸馏-吹扫捕集 microwave distillation-purge-and-trap	莫桑比克罗非鱼 ^[87] <i>O. mossambicus</i>	GSM (2.89 ng/L), 2-MIB (2.28 ng/L)	GSM (81~112), 2-MIB (85~96)	仪器自动进样, 无需有机溶剂, 节约时间, 保证实验样品不会污染	提取溶剂氯化钠浓度过高, 会造成仪器堵塞
	莫桑比克罗非鱼 ^[51] <i>O. mossambicus</i>	GSM (-), 2-MIB (3.2~36.66)	GSM (87.3~98.2), 2-MIB (89.9~103.8)		
	太湖、巢湖和鄱阳湖中的淡水鱼 ^[88] freshwater fishes from Taihu Lake, Chaohu Lake, and Poyang Lake	GSM (0.02), 2-MIB (0.02)	GSM (102.3±6.3), 2-MIB (85.4±1.8)		
搅拌吸附 stir the adsorption	大西洋鲑 ^[2] <i>S. salar</i>	GSM (0.001), 2-MIB (0.0003)	GSM (62.0~89.9), 2-MIB (74.8~83.1)	无需有机溶剂	实验检出限较低, 仪器价格较贵
动态顶空萃取 dynamic headspace extraction	虹鳟 ^[18, 89] <i>O. mykiss</i>	GSM (<0.1), 2-MIB (<0.1)	GSM (-), 2-MIB (-)	可进行连续气相萃取, 主要用于挥发性物质检测	样品基质会干扰分析结果, 吸附和解吸过程可能出现样品组分丢失
真空蒸馏-溶剂萃取 vacuum distillation - solvent extraction	虹鳟 ^[90] <i>O. mykiss</i>	GSM (0.06), 2-MIB (0.06)	GSM (55±8.3), 2-MIB (55±8.3)	操作步骤简单, 回收率较高	
微波辅助-蒸馏开环装置 microwave assisted - distillation open loop device	莫桑比克罗非鱼 ^[91] <i>O. mossambicus</i>	GSM (-), 2-MIB (-)	GSM (-), 2-MIB (-)		

注: (-). 无相关数据

Notes: (-). no available data

养殖环境以及在水产动物体内的富集时间等多方面因素的影响^[6]。因此, 对土腥味物质的产生源头进行控制, 可以有效解决水产品土腥味问题。

一些水产品在上市前通常选择进行清水暂

养, 以减少体内的土腥味物质^[21], 但停止投喂和转运会导致水产动物体质量下降。Plameri 等^[79]研究发现, 循环水养殖的墨瑞鳕经清水暂养后上市, 会使鱼体平均体质量下降为初始体质量的 6%~14%; 而清水养殖所需时长主要取决于鱼

体中 GSM 和 2-MIB 的浓度, 与鱼体脂肪含量密切相关^[101]。因为鱼类的代谢活动会受环境温度的影响, 因此净化时长与养殖水温也有关系^[102]。研究显示, 小规格的斑点叉尾鲷在温水中暂养 3 d 便可清除体内的 2-MIB^[87], 理想状态下去除鱼体内的土腥味需要 60 h^[65, 67, 103]; 脂肪含量较高的鱼在低于 10 °C 水中, 需要 1 周或更长时间^[87]。因为 GSM 和 2-MIB 具有疏水性结构, 通常也用活性炭作为吸附剂进行去除^[104]。虽然活性炭去除效果较好, 但使用过程中也会吸附池塘中的天然有机物质, 从而大大降低活性炭的吸附能力。而沸石吸附法虽对土腥味物质的吸附选择性较高, 但由于成本过高, 也无法应用于实际生产^[105]。此外, 也有学者使用电化水设备或超声波设备进行鱼体土腥味的去除, 但由于设备成本的原因, 还未得到广泛的应用^[106]。

因为溶解性臭氧 (O₃) 可以催化分解形成羟基自由基 (·OH), 而·OH 具有强氧化性, 进而氧化 GSM 和 2-MIB^[107]; 因此, 该方法已经被广泛用于市政饮用水中 GSM 和 2-MIB 的处理。当 O₃ 剂量达到 2 mg/L 时, 水源中 GSM 和 2-MIB 的去除率可以达到 80%~95%; 但如果水体中不存在天然有机物, O₃ 便无法产生·OH, 去除效率将大打折扣, 即便 O₃ 剂量达到 8 mg/L, 去除率仍不到 30%^[108]。虽然在循环水养殖系统中使用“低剂量”的 O₃ 可以改善水质^[109], 但并无证据表明低剂量可以去除土腥味物质; 若使用较高剂量的 O₃ 去除 GSM 和 2-MIB, 则有可能对养殖对象产生毒副作用。

4.2 生物防控法

目前应用较多的生物防控方法是微生物降解^[55], 可以有效降低水中及鱼体内的异味物质; 与物理和化学方法相比, 该方法更加绿色、环保。C、H、O 作为 GSM 和 2-MIB 的组成元素, 其可以被微生物合成利用作为细胞组分, 或彻底被分解成二氧化碳和水^[110], 此类细菌在整个异味物质去除过程中至关重要。目前已报道有芽孢杆菌属 (*Bacillus* spp.)^[111-112]、假单胞菌属 (*Pseudomonas* spp.)^[113]、肠杆菌属 (*Enterobacter* spp.)、黄杆菌属 (*Flavobacterium* spp.)^[112]、金黄杆菌属 (*Chryseobacterium* spp.)、寡营养单胞菌属 (*Stenotrophomonas* spp.)^[114]、甲基杆菌属 (*Methylobacterium* spp.)^[115] 等能够参与异味物质的降解过程。以

GSM 为唯一有机碳源时, 某些细菌可以实现正常代谢^[114-115], 2-MIB 也有相似的结果^[116]。GSM 与 2-MIB 可以作为有机碳源的浓度通常在毫克级别 (mg/L), 仅仅被微生物作为一级基质维持物质和能量代谢, 并不能对土腥味物质进行分解^[110]。在实际污染水体中, GSM 和 2-MIB 浓度通常在微克级别 (μg/L), 水中微生物降解有机碳的浓度在数百微克量级; 因此, 运用生物法去除土腥味物质常常被微生物作为二级基质进行分解利用^[117]。

然而, 微生物降解水中 GSM 与 2-MIB 的完整途径依旧不清晰, 研究人员发现微生物降解 GSM 的部分中间产物所涉及的反应类型包括脱氧反应和氧化反应^[118], 但并未揭示具体的转化过程。另一部分学者则认为微生物降解 GSM 的过程与环己醇的氧化过程类似, 即通过一步步的氧化, 最终由内酯水解形成二元酸^[119]。对微生物降解 2-MIB 的完整途径目前仍存在不同观点, 部分研究人员发现了其降解的中间产物^[120-121], 但也未曾揭示详细过程; 其他研究人员则认为微生物降解 2-MIB 的过程与樟脑类似^[110], 将一株樟脑降解菌 (*Pseudomonas pulida*) 的 Cam 操纵子转移到大肠杆菌中, 随后发现大肠杆菌出现了降解 2-MIB 的能力^[122]。早在 1988 年, Sumitomo^[123] 报道了从慢砂过滤器中发现的一株具有降解异味物质的酵母菌, 随后成功地从该酵母菌中分离出一株降解 2-MIB 的假丝酵母菌。目前应用较多的降解菌为芽孢杆菌属的枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 和蜡状芽孢杆菌 (*B. cereus*), 已被证明可以有效降解水中的土腥味物质^[111, 117]。Silvey 等^[124] 发现蜡状芽孢杆菌可以降解 81% 的 GSM, 接种芽孢杆菌的生物膜反应器对浓度为 600 ng/L 的 2-MIB 降解率达到 90%^[125], 但尚不清楚降解途径。徐立蒲等^[55] 在夏季向鱼池投放生物制剂 (光合细菌), 经过 20~30 d 养殖后, 发现团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 和草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 体内的土腥味明显减少。此外, 向养鱼池中投放生物制剂 (EM 菌) 可以达到防止鱼类产生土腥味的效果, 同时还可以促进鱼类摄食, 减少鱼类发病^[55]。研究表明, 生物滤池也被证明是可以去除 2-MIB 和 GSM 的有效方法^[118, 126], 通过在滤料表面接种 GSM 和 2-MIB 降解菌形成生物滤膜, 进而去除异味物质。滤料主要包括多孔陶粒、无烟煤、砂粒和颗粒活性

炭等^[127-128]。目前, 颗粒活性炭因具有较大的比表面积以及大量孔隙有利于微生物附着的优点, 在生产中使用较多^[110], 通过比较生物陶粒和颗粒活性炭, 发现颗粒活性炭的去除效果显著高于生物陶粒^[129]。

养殖模式和池塘底泥可直接影响水产品的养殖环境。近年来研究人员分别以不同的养殖模式为依托, 分析了水产动物体内土腥味物质与养殖模式的关系, 例如池塘纯投料养殖、综合养殖(鱼猪混养)、水库养殖、鱼菜共生养殖、池塘配备底排污系统养殖和鱼菜共生系统+底排污养殖等。通过比较罗非鱼的不同养殖模式, 发现 GSM 和 2-MIB 的含量分布均为水库最低, 精养池塘次之, 鱼猪立体养殖池塘最高^[51]。张凯等^[130]发现采用鱼菜共生+底排污养殖模式进行罗非鱼养殖, 罗非鱼肌肉中土腥味物质含量最低, 2-MIB 和 GSM 分别为 (0.31±0.02)和 (0.53±0.042) μg/kg。综合以上结果, 水库养殖土腥味含量较低的原因是由于水库养殖面积较大, 水体流动性较好, 残饵、粪便不易堆积, 不易孳生产生异味的细菌; 综合养殖模式中土腥味物质含量较高, 是由于家禽和猪的粪便中含有较高水平的营养物质, 导致水体产生不同程度的富营养化, 蓝藻等藻类大量繁殖, 为水产动物体内土腥味物质的积累提供了契机。而池塘底排污系统可以及时将淤泥排出, 防止水质恶化, 同时系统中的植物吸收了水体中的氮磷, 达到了抑制蓝绿藻生长的效果^[131]。

目前对水产品土腥味物质的产生来源、影响因素、侵入途径以及消除均有了一定程度的认识。然而, 对土腥味物质产生机理的认识仍较为模糊, 且检测手段和防控去除方法有待完善, 土腥味问题一定程度上仍将制约淡水养殖业的发展。因此, 有关土腥味物质的防控、去除技术亟需大力研发, 包括微生物调控技术在内的池塘生态调控将是重点研发的方向。

参考文献 (References):

- [1] 孙海文. 中国渔业发展的战略选择[J]. 中国渔业经济, 2009, 27(5): 49-52.
Sun H W. The strategic choice of Chinese fishery development[J]. Chinese Fisheries Economics, 2009, 27(5): 49-52(in Chinese).
- [2] Ruan E D, Aalhus J L, Summerfelt S T, *et al.* Determination of off-flavor compounds, 2-methylisoborneol and geosmin, in salmon fillets using stir bar sorptive extraction-thermal desorption coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, 1321: 133-136.
- [3] 徐立蒲. 鱼池中二甲基异茨醇和土臭味素的含量、来源及产生影响因素的研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
Xu L P. Concentrations and sources of 2-MIB & geosmin in freshwater fishponds and the influencing factors[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009 (in Chinese).
- [4] 冯启超, 毕延刚, 董天威. 简析2019年中国水产品进出口贸易情况[J]. 中国水产, 2020(4): 38-41.
Feng Q CH, Bi Y G, Dong T W. Brief analysis of the import and export trade of Chinese aquatic products in 2019[J]. *China Fishery*, 2020(4): 38-41(in Chinese).
- [5] 洪伟, 周春霞, 洪鹏志, 等. 水产品腥臭物质的形成及脱腥技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(8): 386-389, 399.
Hong W, Zhou C X, Hong P Z, *et al.* Research progress in the formation and deodorization technology of fishy odor for aquatic product[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(8): 386-389, 399(in Chinese).
- [6] 王国超, 李来好, 郝淑贤, 等. 水产品腥臭物质形成机理及相关检测分析技术的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 401-404, 409.
Wang G C, Li L H, Hao S X, *et al.* Research progress in the mechanism of odor compounds in aquatic product and some relative techniques of detection and analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(5): 401-404, 409(in Chinese).
- [7] 翁丽萍, 陈飞东, 李峰, 等. 国内外淡水产品腥臭物质及脱腥技术研究进展[J]. 食品工业, 2014, 35(5): 195-200.
Weng L P, Chen F D, Li F, *et al.* Research on progress in the formation and deodorization technology of fishy odor for freshwater product at home and abroad[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(5): 195-200(in Chinese).
- [8] Persson P E. The source of muddy odor in bream (*Abramis brama*) from the Porvoo Sea Area (Gulf of

- Finland][J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1979, 36(8): 883-890.
- [9] Whitfield F B. Biological origins of off-flavours in fish and crustaceans[J]. *Water Science & Technology*, 1999, 40(6): 265-272.
- [10] Hanson T R. Economic impact of off-flavor to the U. S. catfish industry[M]/Schrader K, Rimando A. off-Flavors in aquaculture. Washington, D. C: American Chemical Society, 2003: 13-29.
- [11] Tucker C S, Schrader K K. Off - flavors in pond - grown ictalurid catfish: causes and management options[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2019, 51(1): 7-92.
- [12] 徐立浦, 赵文, 熊邦喜, 等. 淡水鱼池土腥异味物质含量与浮游藻类和放线菌生物量的关系[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 2872-2879.
Xu L P, Zhao W, Xiong B X, *et al.* The relationship between concentration of odorous compounds and biomass of phytoplankton and actinomycetes in freshwater fish ponds of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2872-2879(in Chinese).
- [13] Howgate P. Tainting of farmed fish by geosmin and 2-methyl-iso-borneol: a review of sensory aspects and of uptake/depuration[J]. *Aquaculture*, 2004, 234(1-4): 155-181.
- [14] Davidson J, Schrader K, Ruan E, *et al.* Evaluation of depuration procedures to mitigate the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol from Atlantic salmon *Salmo salar* raised to market-size in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 61: 27-34.
- [15] Houle S, Schrader K K, Le François N R, *et al.* Geosmin causes off-flavour in arctic charr in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquaculture Research*, 2011, 42(3): 360-365.
- [16] Lovell R T, Broce D. Cause of musty flavor in pond-cultured penaeid shrimp[J]. *Aquaculture*, 1985, 50(1-2): 169-174.
- [17] Auffret M, Yergeau É, Pilote A, *et al.* Impact of water quality on the bacterial populations and off-flavours in recirculating aquaculture systems[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, 84(2): 235-247.
- [18] Petersen M A, Hyldig G, Strobel B W, *et al.* Chemical and sensory quantification of geosmin and 2-methylisoborneol in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) from recirculated aquacultures in relation to concentrations in basin water[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(23): 12561-12568.
- [19] Robertson R F, Hammond A, Jauncey K, *et al.* An investigation into the occurrence of geosmin responsible for earthy-musty taints in UK farmed rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Aquaculture*, 2006, 259(1-4): 153-163.
- [20] Sarker P, Pilote A, Auffret M, *et al.* Reducing geosmin off-flavor compounds and waste outputs through dietary phosphorus management in rainbow trout aquaculture[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2014, 6(1): 105-117.
- [21] Schrader K K, Davidson J W, Rimando A M, *et al.* Evaluation of ozonation on levels of the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol in water and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* from recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43(2): 46-50.
- [22] Schrader 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.
- [23] Schrader K K, Rubio S A, Piedrahita R H, *et al.* Geosmin and 2-methylisoborneol cause off-flavors in cultured largemouth bass and white sturgeon reared in recirculating-water systems[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2005, 67(3): 177-180.
- [24] Schrader K K, Tucker C S, Brown T W, *et al.* Earthy and musty off-flavor episodes in catfish split-pond aquaculture systems[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2018, 80(1): 26-41.
- [25] 李德亮, 张婷. 鱼体异味的产生原因与控制方法研究进展[J]. *现代农业科技*, 2011(5): 318-319.
Li D L, Zhang T. Advances in the production cause and control methods of off-flavor in fish[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011(5): 318-319(in Chinese).
- [26] Auffret M, Pilote A, Proulx É, *et al.* Establishment of a

- real-time PCR method for quantification of geosmin-producing *Streptomyces* spp. in recirculating aquaculture systems[J]. *Water Research*, 2011, 45(20): 6753-6762.
- [27] Guttman L, Van Rijn J. 2-Methylisoborneol and geosmin uptake by organic sludge derived from a recirculating aquaculture system[J]. *Water Research*, 2009, 43(2): 474-480.
- [28] Jechan, Lee, Prabhat, *et al.* The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 252-262.
- [29] Arii S, Tsuji K, Tomita K, *et al.* Cyanobacterial blue color formation during lysis under natural conditions[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(8): 2667-2675.
- [30] Tomita K, Hasegawa M, Arii S, *et al.* Characteristic oxidation behavior of β -cyclocitral from the cyanobacterium *Microcystis*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(12): 11998-12006.
- [31] Lukassen M B, Saunders A M, Sindilariu P D, *et al.* Quantification of novel geosmin-producing bacteria in aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 2017, 479: 304-310.
- [32] Ólafsdóttir G, Kristbergsson K. Electronic-Nose Technology: application for quality evaluation in the fish industry[M]. US: Springer, 2006.
- [33] Tao L. Oxidation of polyunsaturated fatty acids and its impact on food quality and human health[J]. *Advances in Food Technology and Nutritional Sciences*, 2015, 1(6): 135-142.
- [34] Smith J L, Boyer G L, Zimba P V. A review of cyanobacterial odorous and bioactive metabolites: impacts and management alternatives in aquaculture[J]. *Aquaculture*, 2008, 280(1-4): 5-20.
- [35] 李林. 淡水水体中藻源异味化合物的分布、动态变化与降解研究 [D]. 武汉: 中国科学院研究生院 (水生生物研究所), 2005.
- Li L. Distribution, dynamics and degradation of algae-producing odorous compounds in the freshwater bodies[D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Hydrobiology), 2005 (in Chinese).
- [36] 徐盈, 黎雯, 吴文忠, 等. 东湖富营养水体中藻菌异味性次生代谢产物的研究[J]. *生态学报*, 1999, 19(2): 212-216.
- Xu Y, Li W, Wu W Z, *et al.* Study on aquatic off-flavors in eutrophic Donghu lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 212-216(in Chinese).
- [37] 原媛, 汪善全, 竺建荣, 等. 密云水库微生物相变化对水质及嗅味的影响[J]. *环境科学研究*, 2007, 20(6): 8-13.
- Yu Y, Wang S Q, Lan J R, *et al.* Investigation on the impact of microbial community on off-flavor of raw water in Miyun reservoir[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(6): 8-13(in Chinese).
- [38] Vilalta E, Guasch H, Muñoz I, *et al.* Nuisance odours produced by benthic cyanobacteria in a Mediterranean river[J]. *Water Science & Technology*, 2004, 49(9): 25-31.
- [39] Bafford R A, Seagull R W, Chung S Y, *et al.* Intracellular localization of the taste/odor metabolite 2-methylisoborneol in *Oscillatoria limosa* (Cyanophyta)[J]. *Journal of Phycology*, 1993, 29(1): 91-95.
- [40] Van Breemen L W C A, Dits J S, Ketelaars H A M. Production and reduction of geosmin and 2-methylisoborneol during storage of river water in deep reservoirs[J]. *Water Science & Technology*, 1992, 25(2): 233-240.
- [41] Negoro T, Ando M, Ichikawa N. Blue-green algae in lake Biwa which produce earthy-musty odors[J]. *Water Science & Technology*, 1988, 20(8-9): 117-123.
- [42] Tellez M R, Schrader K K, Kobaisy M. Volatile components of the cyanobacterium *Oscillatoria perornata* (Skuja)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(12): 5989-5992.
- [43] Sugiura N, Nishimura O, Inamori Y, *et al.* Grazing characteristics of musty-odor-compound-producing *Phormidium tenue* by a microflagellate, *Monas guttula*[J]. *Water Research*, 1997, 31(11): 2792-2796.
- [44] Taylor W D, Losee R F, Torobin M. Early warning and management of surface water taste-and-odor events[M]. American Water Works Research Foundation, Denver, CP. 2006, 237.
- [45] Saadoun I M K, Schrader K K, Blevins W T. Environmental and nutritional factors affecting geosmin syn-

- thesis by *Anabaena* sp.[J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1209-1218.
- [46] Zimba P V, Grimm C C, Dionigi C P, *et al.* Phytoplankton community structure, biomass, and off-flavor: pond size relationships in Louisiana catfish ponds[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2001, 32(1): 96-104.
- [47] Matsumoto A, Tsuchiya Y. Earthy-musty odor-producing cyanophytes isolated from five water areas in Tokyo[J]. *Water Science and Technology*, 1988, 20(8-9): 179-183.
- [48] Bowmer K H, Padovan A, Oliver R L, *et al.* Physiology of geosmin production by *Anabaena circinalis* isolated from the Murrumbidgee River, Australia[J]. *Water Science & Technology*, 1992, 25(2): 259-267.
- [49] Wu J T, Ma P I, Chou T L. Variation of geosmin content in *Anabaena* cells and its relation to nitrogen utilization[J]. *Archives of Microbiology*, 1991, 157(1): 66-69.
- [50] Tabachek J A L, Yurkowski M. Isolation and identification of blue-green algae producing muddy odor metabolites, geosmin, and 2-methylisoborneol, in Saline lakes in manitoba[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1976, 33(1): 25-35.
- [51] 周梦海, 李慷, 张文博, 等. 不同养殖模式下罗非鱼养殖水体异味物质的含量及其变化[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(4): 528-533.
- Zhou M H, Li K, Zhang W B, *et al.* Concentration and variations of odor substances geosmin and 2-methylisoborneol in different tilapia culture waters in south China[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(4): 528-533(in Chinese).
- [52] 殷守仁, 徐立蒲. 淡水浮游藻类与鱼体异味关系的初步研究[J]. *大连水产学院学报*, 2003, 18(2): 156-157.
- Yin S R, Xu L P. A preliminary study on the relationship between freshwater algae and the off-flavor in fishes[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2003, 18(2): 156-157(in Chinese).
- [53] 申屠青春, 董双林, 赵文, 等. 盐度、碱度对浮游生物和水化因子的影响[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 449-454.
- Shentu Q C, Dong S L, Zhao W, *et al.* Effects of salinity and alkalinity on plankton and water chemical factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 449-454(in Chinese).
- [54] 程亚美, 赵金良, 唐首杰, 等. 盐碱水和淡水养殖模式下尼罗罗非鱼肌肉品质比较[J]. *河南农业科学*, 2019, 48(4): 125-134.
- Cheng Y M, Zhao J L, Tang S J, *et al.* Comparison on meat quality of Nile tilapia cultured in saline-alkaline water and freshwater culture modes[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(4): 125-134(in Chinese).
- [55] 徐立蒲, 潘勇, 曹欢, 等. 渔业水体中土腥异味物质的研究进展[J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(6): 528-534.
- Xu L P, Pan Y, Cao H, *et al.* The current research status of odorous compounds in fishery waters[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2010, 25(6): 528-534(in Chinese).
- [56] Guttman L, Van Rijn J. Identification of conditions underlying production of geosmin and 2-methylisoborneol in a recirculating system[J]. *Aquaculture*, 2008, 279(1-4): 85-91.
- [57] Schrader K K, Summerfelt S T. Distribution of off-flavor compounds and isolation of geosmin-producing bacteria in a series of water recirculating systems for rainbow trout culture[J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2010, 72(1): 1-9.
- [58] Gerber N N, Lechevalier H A. Geosmin, an earthy-smelling substance isolated from actinomycetes[J]. *Applied Microbiology*, 1965, 13(6): 935-938.
- [59] Thaysen A C. The origin of an earthy or muddy taint in fish. I. The nature and isolation of the taint[J]. *Annals of Applied Biology*, 1936, 23(1): 99-104.
- [60] Cross T. Aquatic actinomycetes: a critical survey of the occurrence, growth and role of actinomycetes in aquatic habitats[J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1981, 50(3): 397-423.
- [61] Yamamoto Y, Tanaka K, Komori N. Volatile compounds excreted by myxobacteria isolated from lake water and sediments[J]. *Japanese Journal of Limnology*, 1994, 55(4): 241-245.
- [62] Tucker S C. Off-flavor problems in aquaculture[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2000, 8(1): 45-88.
- [63] Whitfield F B. Biological origins of off-flavours in fish

- and crustaceans[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(6): 265-272.
- [64] Persson P E. Uptake and release of environmentally occurring odorous compounds by fish. A review[J]. *Water Research*, 1984, 18(10): 1263-1271.
- [65] Johnsen P B, Lloyd S W. Influence of fat content on uptake and depuration of the off-flavor 2-methylisoborneol by channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1992, 49(11): 2406-2411.
- [66] Azaria S, Van Rijn J. Off-flavor compounds in recirculating aquaculture systems (RAS): production and removal processes[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 83: 57-64.
- [67] Johnsen P B, Lloyd S W, Vinyard B T, *et al.* Effects of temperature on the uptake and depuration of 2-methylisoborneol (MIB) in channel catfish *Ictalurus punctatus*[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1996, 27(1): 15-20.
- [68] Dionigi C P, Bett K L, Johnsen P B, *et al.* Variation in channel catfish *Ictalurus punctatus* flavor quality and its quality control implications[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 1998, 29(2): 140-154.
- [69] Lloyd S W, Grimm C C. Analysis of 2-methylisoborneol and geosmin in catfish by microwave distillation-solid-phase microextraction[J]. *J Agric Food Chem*, 1999, 47(1): 164-169.
- [70] Giglio S, Jiang J, Saint C P, *et al.* Isolation and characterization of the gene associated with geosmin production in cyanobacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(21): 8027-8032.
- [71] Persson P E. Sensory properties and analysis of two muddy odour compounds, geosmin and 2-methylisoborneol, in water and fish[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 1113-1118.
- [72] Young W F, Horth H, Crane R, *et al.* Taste and odour threshold concentrations of potential potable water contaminants[J]. *Water Research*, 1996, 30(2): 331-340.
- [73] Robertson R F, Jauncey K, Beveridge M C M, *et al.* Depuration rates and the sensory threshold concentration of geosmin responsible for earthy-musty taint in rainbow trout, *Onchorhynchus mykiss*[J]. *Aquaculture*, 2005, 245(1-4): 89-99.
- [74] 杨玉平, 熊光权, 程薇, 等. 水产品异味物质形成机理、检测及去除技术研究进展[J]. *食品科学*, 2009, 30(23): 533-538.
- Yang Y P, Xiong G Q, Cheng W, *et al.* Review on formation mechanism, analysis and removal technologies of fishy off-odor[J]. *Food Science*, 2009, 30(23): 533-538(in Chinese).
- [75] ISO. ISO 13301-2018 Sensory analysis — Methodology—General guidance for measuring odour, flavour and taste detection thresholds by a three-alternative forced-choice (3-AFC) procedure[S]. International Organization for Standardization, Switzerland, 2002.
- [76] Burr G S, Wolters W R, Schrader K K, *et al.* Impact of depuration of earthy-musty off-flavors on fillet quality of Atlantic salmon, *Salmo salar*, cultured in a recirculating aquaculture system[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 50: 28-36.
- [77] Grimm C C, Lloyd S W, Zimba P V. Instrumental versus sensory detection of off-flavors in farm-raised channel catfish[J]. *Aquaculture*, 2004, 236(1-4): 309-319.
- [78] Jones B, Fuller S, Carton A G. Earthy-muddy tainting of cultured barramundi linked to geosmin in tropical northern Australia[J]. *Aquaculture Environment Interactions*, 2013, 3(2): 117-124.
- [79] Palmeri G, Turchini G M, Marriott P J, *et al.* Biometric, nutritional and sensory characteristic modifications in farmed Murray cod (*Maccullochella peelii peelii*) during the purging process[J]. *Aquaculture*, 2009, 287(3-4): 354-360.
- [80] 宋立荣, 李林, 陈伟, 等. 水体异味及其藻源次生代谢产物研究进展[J]. *水生生物学报*, 2004, 28(4): 434-439.
- Song L R, Li L, Chen W, *et al.* Research progress on the off-flavours and secondary metabolites of algae in the aquatic environment[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(4): 434-439(in Chinese).
- [81] Martin J F, Thomas H F, Bennett L W. Musty odor in chronically off-flavored channel catfish: isolation of 2-methylenebornane and 2-methyl-2-bornene[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988, 36(6): 1257-1260.
- [82] Martin J F, McCoy C P, Greenleaf W, *et al.* Analysis of

- 2-methylisoborneol in water, mud, and channel catfish (*Ictalurus punctatus*) from commercial culture ponds in mississippi[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1987, 44(4): 909-912.
- [83] Grimm C C, Lloyd S W, Batista R, *et al.* Using microwave distillation-solid-phase microextraction — gas chromatography—mass spectrometry for analyzing fish tissue[J]. *Journal of Chromatographic Science*, 2000, 38(7): 289-296.
- [84] 王国超, 李来好, 郝淑贤, 等. 罗非鱼肉中土臭素和2-甲基异茨醇的测定[J]. *食品科学*, 2011, 32(22): 188-191.
- Wang G C, Li L H, Hao S X, *et al.* Determination of geosmin and 2-methylisoborneol in tilapia meat[J]. *Food Science*, 2011, 32(22): 188-191(in Chinese).
- [85] 付湘晋, 党亚丽, 许时婴, 等. 白鲢鱼土霉味物质的检测与脱除[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(8): 152-155.
- Fu X J, Dang Y L, Xu S Y, *et al.* The determination and deodorizing of earthy flavor of silver carp[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2010, 36(8): 152-155(in Chinese).
- [86] 薛勇, 王超, 于刚, 等. 鳙鱼肉中土腥味物质的测定方法[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(5): 1094-1100.
- Xue Y, Wang C, Yu G, *et al.* Determination of earthy-musty odorous compound in bighead carp meat[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(5): 1094-1100(in Chinese).
- [87] 张凯. 不同系统对养殖水体和罗非鱼肌肉异味物质含量的影响 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
- Zhang K. Impact of different cultivation systems on the accumulation of off-flavor compounds in tilapia flesh[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017 (in Chinese).
- [88] Deng X W, Xie P, Qi M, *et al.* Microwave-assisted purge-and-trap extraction device coupled with gas chromatography and mass spectrometry for the determination of five predominant odors in sediment, fish tissues, and algal cells[J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, 1219: 75-82.
- [89] Green-Petersen D, Hyldig G, Jacobsen C, *et al.* Influence of dietary lipid and protein sources on the sensory quality of organic rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) after ice storage[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2014, 23(4): 333-346.
- [90] Yurkowski M, Tabachek J A L. Identification, analysis, and removal of geosmin from muddy-flavored trout[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1974, 31(12): 1851-1858.
- [91] 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).
- [92] Duan C, Shen Z, Wu D, *et al.* Recent developments in solid-phase microextraction: the effect of algae changes on tilapia odor and its preliminary discussion phase microextraction for on-site sampling and sample preparation[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2011, 30(10): 1568-1574.
- [93] Spietelun A, Kloskowski A, Chrzanowski W, *et al.* Understanding solid-phase microextraction: key factors influencing the extraction process and trends in improving the technique[J]. *Chemical Reviews*, 2013, 113(3): 1667-1685.
- [94] Spietelun A, Pilarczyk M, Kloskowski A, *et al.* Polyethylene glycol-coated solid-phase microextraction fibres for the extraction of polar analytes—a review[J]. *Talanta*, 2011, 87: 1-7.
- [95] 崔雁娜, 徐磊, 周冬仁, 等. 水产品中土臭味素和2-甲基异冰片及其检测技术研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(24): 339-345, 352.
- Cui Y N, Xu L, Zhou D R, *et al.* Progress in the development of methods to determine geosmin and 2-methylisoborneol in aquatic products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(24): 339-345, 352(in Chinese).
- [96] Kataoka H, Saito K. Recent advances in SPME techniques in biomedical analysis[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2011, 54(5): 926-950.
- [97] Popiel S, Sankowska M. Determination of chemical warfare agents and related compounds in environmental samples by solid-phase microextraction with gas chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, 1218(47): 8457-8479.
- [98] Lindholm-Lehto P C, Vielma J, Pakkanen H, *et al.* 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- Depuration of geosmin- and 2-methylisoborneol-induced off-flavors in recirculating aquaculture system (RAS) farmed European whitefish coregonus lavaretus[J]. *Journal of Food Science & Technology Mysore*, 2019, 56: 4585-4594.
- [99] Salemi A, Lacorte S, Bagheri H, *et al.* Automated trace determination of earthy-musty odorous compounds in water samples by on-line purge-and-trap-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Journal of Chromatography A*, 2006, 1136(2): 170-175.
- [100] 李林, 宋立荣, 甘南琴, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱测定水中异味化合物[J]. *分析化学*, 2005, 33(8): 1058-1062.
- Li L, Song L R, Gan N Q, *et al.* Determination of odorous compounds in water by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2005, 33(8): 1058-1062(in Chinese).
- [101] Palmeri G, Turchini G M, Caprino F, *et al.* Biometric, nutritional and sensory changes in intensively farmed Murray cod (*Maccullochella peelii peelii*, Mitchell) following different purging times[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(4): 1605-1615.
- [102] Schram E, Schrama J, Kusters K, *et al.* Effects of exercise and temperature on geosmin excretion by European eel (*Anguilla anguilla*)[J]. *Aquaculture*, 2016, 451: 390-395.
- [103] Schlenk D, Perkins E J, Hawkins W B. Effect of ethanol, clofibrac acid and temperature on the uptake and elimination of 2-methylisoborneol in channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. *Fish Physiology & Biochemistry*, 1999, 21(2): 173-178.
- [104] Cook D, Newcombe G, Sztajn bok P. The application of powdered activated carbon for mib and geosmin removal: predicting pac doses in four raw waters[J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1325-1333.
- [105] 马念念, 罗国芝, 谭洪新, 等. 养殖水中土腥异味物质——土臭素和二甲基异冰片去除方法[J]. *中国水产*, 2014(12): 72-74.
- Ma N N, Luo G Z, Tan H X, *et al.* Method for removing earthy smell odor substance in breeding water-Geosmin and 2-Methylisoborneol[J]. *China Fisheries*, 2014(12): 72-74(in Chinese).
- [106] Nam-koong H, Schroeder J P, Petrick G, *et al.* Removal of the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol from recirculating aquaculture system water by ultrasonically induced cavitation[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 70: 73-80.
- [107] Peter A, Von Gunten U. Oxidation kinetics of selected taste and odor compounds during ozonation of drinking water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(2): 626-631.
- [108] Atasi K Z, Chen T, Huddieston J I, *et al.* Factor screening for ozonating the taste- and odor-causing compounds in source water at detroit, USA[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(6): 115-122.
- [109] Summerfelt S T, Sharrer M J, Tsukuda S M, *et al.* Process requirements for achieving full-flow disinfection of recirculating water using ozonation and UV irradiation[J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 40(1): 17-27.
- [110] 韩正双, 韩宏大, 闫慧敏, 等. 生物法去除水中土臭素和2-甲基异茨醇的研究进展[J]. *供水技术*, 2016, 10(3): 7-12.
- Han Z S, Han H D, Yan H M, *et al.* Review on the biological process for removing geosmin and 2-methylisoborneol from source water[J]. *Water Technology*, 2016, 10(3): 7-12(in Chinese).
- [111] 马念念, 罗国芝, 谭洪新, 等. 枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性[J]. *环境科学*, 2015, 36(4): 1379-1384.
- Ma N N, Luo G Z, Tan H X, *et al.* Kinetic characteristics of degradation of geosmin and 2-methylisoborneol by *Bacillus subtilis*[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4): 1379-1384(in Chinese).
- [112] Elhadi S L N, Huck P M, Slawson R M. Factors affecting the removal of geosmin and MIB in drinking water biofilters[J]. *Journal AWWA*, 2006, 98(8): 108-119.
- [113] Hoefel D, Ho L, Aunkofer W, *et al.* Cooperative biodegradation of geosmin by a consortium comprising three gram-negative bacteria isolated from the biofilm of a sand filter column[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2006, 43(4): 417-423.
- [114] Zhou B H, Yuan R F, Shi C H, *et al.* Biodegradation of geosmin in drinking water by novel bacteria isolated from biologically active carbon[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(5): 816-823.

- [115] Xue Q, Shimizu K, Sakharkar M K, *et al.* Geosmin degradation by seasonal biofilm from a biological treatment facility[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(3): 700-707.
- [116] Lauderdale C V, Aldrich H C, Lindner A S. Isolation and characterization of a bacterium capable of removing taste- and odor-causing 2-methylisoborneol from water[J]. *Water Research*, 2004, 38(19): 4135-4142.
- [117] Namkung E, Rittmann B E. Removal of taste- and odor-causing compounds by biofilms grown on humic substances[J]. *Journal AWWA*, 1987, 79(7): 107-112.
- [118] Eaton R W, Sandusky P. Biotransformations of (+/-)-geosmin by terpene-degrading bacteria[J]. *Biodegradation*, 2010, 21(1): 71-79.
- [119] Ho L, Hoefel D, Bock F, *et al.* Biodegradation rates of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin through sand filters and in bioreactors[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(11): 2210-2218.
- [120] Schumann R, Pendleton P. Dehydration products of 2-methylisoborneol[J]. *Water Research*, 1997, 31(5): 1243-1246.
- [121] Yuan R F, Zhou B H, Shi C H, *et al.* Biodegradation of 2-methylisoborneol by bacteria enriched from biological activated carbon[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, 6(5): 701-710.
- [122] Oikawa E, Shimizu A, Ishibashi Y. 2-methylisoborneol degradation by the *cam* operon from *Pseudomonas putida* PpG1[J]. *Water Science & Technology*, 1995, 31(11): 79-86.
- [123] Sumitomo H. Odor decomposition by the yeast *Candida*[J]. *Water Science & Technology*, 1988, 20(8-9): 157-162.
- [124] Silvey J K G, Henley D E, Hoehn B, *et al.* Musty-earthy odors and their biological control[C]//Proceedings of the AWWA Conference on Water Quality Control. Atlanta: AWWA, 1975: 1-17.
- [125] Ishida H, Miyaji Y. Biodegradation of 2-methylisoborneol by oligotrophic bacterium isolated from a eutrophied lake[J]. *Water Science & Technology*, 1992, 25(2): 269-276.
- [126] Mcdowall B, Hoefel D, Newcombe G, *et al.* Enhancing the biofiltration of geosmin by seeding sand filter columns with a consortium of geosmin-degrading bacteria[J]. *Water Research*, 2009, 43(2): 433-440.
- [127] Nerenberg R, Rittmann B E, Soucie W J. Ozone/biofiltration for removing MIB AND GEOSMIN[J]. *Journal AWWA*, 2000, 92(12): 85-95.
- [128] Persson F, Heinicke G, Hedberg T, *et al.* Removal of geosmin and MIB by biofiltration-an investigation discriminating between adsorption and biodegradation[J]. *Environmental Technology*, 2007, 28(1): 95-104.
- [129] 吴媛媛, 杨宁宁, 邓超, 等. 去除致嗅物质的不同填料曝气生物滤池的启动特性与去除效果比较[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(3): 335-341.
- Wu Y Y, Yang N N, Deng C, *et al.* Comparison of start-up characteristics and odorant removal efficiencies of biological aerated filters different in filling[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(3): 335-341(in Chinese).
- [130] 张凯, 刘利平, 陈桃英, 等. 罗非鱼不同养殖系统对产出效果及异味物质含量的影响[J]. *中国水产科学*, 2018, 25(1): 108-115.
- Zhang K, Liu L P, Chen T Y, *et al.* Variations in output and the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol in different tilapia cultivation systems[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2018, 25(1): 108-115(in Chinese).
- [131] 邱东茹, 吴振斌, 况琪军, 等. 不同生活型大型植物对浮游植物群落的影响[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(6): 22-27.
- Qiu D R, Wu Z B, Kuang Q J, *et al.* Effects of aquatic macrophytes of various life form on phytoplankton[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(6): 22-27(in Chinese).

Sources, determination, prevention and elimination of off-flavour compounds in aquatic animals

LIU Liping^{1,2,3*}, LI Kang^{1,2,3}, YAN Li¹

(1. *Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

3. *National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)*

Abstract: The off-flavor has always been one of the main factors affecting the quality and consumption behavior of aquatic products, which has long plagued aquaculture-related industries. Carrying out researches on the source, accumulation, detection, and prevention and control methods of off-flavour substances geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) in aquatic animals is of great significance for improving the quality. This paper reviewed the sources of off-flavor compounds, including actinomycetes and cyanobacteria, then illustrated the accumulation pathway of off-flavor during culture as well. Recently, there have been different detecting methods to evaluate the content of off-flavor compounds in aquatic products. This review compared the physical, chemical and biological treatments to control the off-flavor problem, and in particular, the microbial control and ecological pond management methods are the most promising ways. This review summarized the relevant information to date and provides insights to improve quality of aquatic products and how biological treatment options can be implemented in treatment of off-flavor.

Key words: off-flavor; aquatic product quality; accumulation; detection; elimination

Corresponding author: LIU Liping. E-mail: lp-liu@shou.edu.cn

Funding projects: Key Projects of Developing Agriculture by Science and Technology in Shanghai (2018: 2-12); National Key Research and Development Project (2019YFD0900303); China-ASEAN Maritime Cooperation Fund; China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2018M641984)