



· 综述 ·

## 工厂化循环水系统 (RAS) 养殖淡水鱼 异味物质的产生及去除研究进展

向 坤<sup>1,2</sup>, 孙浩峰<sup>1</sup>, 徐雨晴<sup>1</sup>, 裴洛伟<sup>1,3</sup>, 赵 建<sup>1</sup>, 叶章颖<sup>1,4\*</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058;

2. 青岛蓝谷鲲鹏海洋科技有限公司, 山东 青岛 266000;

3. 浙江奕湃科技有限公司, 浙江 杭州 310058;

4. 浙江大学海洋研究院, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 工厂化循环水养殖系统 (RAS) 作为一种先进的水产养殖技术, 通过精细化的系统管理和应用前沿工程技术, 实现了水资源的高效利用和饲料消耗的显著降低。尽管如此, 养殖过程中产生的代谢废物积累, 可能诱发严重的异味问题, 对养殖环境的稳定性和生产效率构成潜在威胁。本文综述了 RAS 系统中异味产生的机理, 并深入分析两种关键异味物质——土臭素 (GSM) 和 2-甲基异莰醇 (2-MIB) 的来源及其影响因素。此外, 本文系统性地回顾了 RAS 系统中异味去除技术的最新研究进展, 涵盖了生物、物理和化学处理等多种方法。通过全面比较这些技术在效率、成本、操作以及环境友好性等方面的优劣, 为 RAS 技术的进一步优化和应用提供理论依据和实践指导, 以期促进循环水养殖技术的可持续发展。

**关键词:** 循环水养殖系统; 土臭素; 2-甲基异莰醇; 异味去除; RAS 系统优化

**中图分类号:** S 959

**文献标志码:** A

在水产养殖中, 土腥味和霉味是常见的异味问题, 通常由萜类化合物引起。研究发现, 在水产饲料及芥末饼中已经确认了 7 种萜类化合物, 其中至少有 5 种可以在养殖鱼类体内检出。同样, 在浮游植物中发现的 11 种单萜烯类化合物中, 也有 3 种被检测到存在于养殖鱼类体内<sup>[1]</sup>。这些化合物在水产品中的积累不仅降低了其市场经济价值, 还对消费者健康构成潜在风险。特别是, 在工厂化循环水养殖系统 (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) 中, 环境因素对异味化合物的生成起到关键作用。由于 RAS 系统内水交换率的减少,

微生物代谢产生的化合物易于在水体中积聚, 并形成明显的异味<sup>[2]</sup>。生物膜和生物固体中含有大量的放线菌 (Actinomycetes) 和蓝藻 (Cyanobacteria), 这些微生物是异味化合物生成的主要生物来源<sup>[3]</sup>。此外, 鼓式过滤器和滴滤器已被确认为异味化合物主要积累场所<sup>[4]</sup>。其中, 土臭素 (geosmin, GSM) 和 2-甲基异莰醇 (2-methylisoborneol, 2-MIB) 是两种主要的异味化合物<sup>[5]</sup>。由于 GSM 和 2-MIB 的亲脂特性, 使其在鱼肉中迅速富集并积累于脂肪组织, 从而影响鱼类产品的口感与风味<sup>[6-8]</sup>。虽然 GSM 和 2-MIB 在低浓度下被认为无毒, 但由于其

收稿日期: 2024-08-09 修回日期: 2024-09-09

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFD2001700); 国家大宗淡水鱼产业技术体系 (CARS45-24); 浙江省重点研发计划 (2023C02050)

第一作者: 向坤 (照片), 从事设施水产养殖工程与智能装备研究, E-mail: alexkun@blue-song.com

通信作者: 叶章颖, 从事水产智能化养殖技术与装备研究, E-mail: yzyzju@zju.edu.cn



较差的生物降解性, 难以通过自然途径有效分解<sup>[9-10]</sup>, 对 RAS 的发展构成了挑战。

为了应对这些挑战, 研究人员开发了多种异味去除技术, 包括化学氧化<sup>[7, 11]</sup>、超声处理<sup>[12]</sup>以及微生物降解技术<sup>[13]</sup>。化学氧化方法利用臭氧或过氧化氢等强氧化剂, 有效降解水体中的异味化合物, 但可能产生对水质有潜在影响的副产物<sup>[14-17]</sup>。超声处理通过高频声波破坏微生物细胞壁, 减少异味化合物的生成, 但该技术需要较高的设备投资<sup>[12]</sup>。微生物降解技术则利用特定微生物对异味化合物进行分解, 具有环境友好性, 但其效果可能受限于微生物的生长条件和系统操作的稳定性<sup>[18-22]</sup>。因此, 本综述对循环水养殖系统中异味物质的生成机制进行了探讨, 深入研究了 GSM 和 2-MIB 的来源及其影响因素。同时, 全面总结了当前循环水养殖系统中异味去除技术的研究进展, 并评估了不同去除技术对循环水养殖系统经济性和生态性的潜在影响, 旨在为水产养殖业实现绿色发展和产业升级提供科学指导和技术支持。

## 1 RAS 中异味的起源

### 1.1 异味化合物产生及其微生物学机制

在传统池塘养殖系统中, 异味化合物通常与放线菌和蓝藻的活动有关。特别是在养分丰富、光照充足的户外池塘中, 蓝藻的增殖可能导致 GSM 和 2-MIB 的产生<sup>[23]</sup>。根据研究, 放线菌已被确认为水体异味化合物的主要生产<sup>[24]</sup>。Thaysen<sup>[25]</sup>于 1936 年首次在味道不佳的野生褐鳟 (*Salmo trutta*) 体内发现了放线菌, 并提出鱼类能够吸收放线菌代谢产生的次级代谢产物。在 RAS 中, 由于水体中富含营养物质, 生物膜的形成成为放线菌提供了一个理想的生长环境。这种环境不仅促进了放线菌的增殖, 也加速了 GSM 和 2-MIB 这两种常见异味化合物的生成。已有的研究表明, 放线菌在已识别的微生物群落中占据了约 50% 的比例<sup>[26]</sup>, 并且它们在 RAS 系统的各个部分均有广泛分布。放线菌被认定为 RAS 中异味化合物的主要生产<sup>[27]</sup>者, 从养殖虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*) 的 RAS 系统中分离出了四种放线菌, 这些细菌均能够产生 GSM<sup>[3]</sup>。此外, 还检测到了多种能够释放 GSM 的未培养细菌群<sup>[27]</sup>, 说明 RAS 中产生异味微生物的多样性。相关研究还揭示了 RAS 中异养菌的过度生长抑制了硝化过程, 这也可能是异味产生的

原因之一<sup>[28]</sup>。在明确异味化合物来源的前提下, 深入研究其生物学机制对于鉴别和去除 RAS 中的异味具有重要意义。利用定量聚合酶链反应 (qPCR) 技术, 已证实 GSM 和 2-MIB 是由放线菌在萜类合成酶的作用下释放的次级代谢产物<sup>[29]</sup>。同时, GSM 与吸水链霉菌 (*Streptomyces hygroscopicus*) 中的融合型倍半萜烯合成酶具有同源性, 这表明该合成酶可能首先产生一种萜类产物中间体, 随后进一步转化为 GSM<sup>[30]</sup>。研究发现, 生成 GSM 和 2-MIB 的两种主要中间体基因片段为 P450 基因及其相邻的萜烯合酶基因, 这些发现促进了与异味相关的基因检测方法的发展<sup>[31-32]</sup>。此外, 对水体中的萜类化合物进行的研究显示, 它们与链霉菌中萜类环化酶的编码信息和功能特征具有一致性, 表明链霉菌与萜环化酶在功能上具有相似性<sup>[33]</sup>。

相比于传统养殖方式, RAS 中产生异味化合物的来源单一。微滤机、生物滤池和热交换器等设备存在与 GSM 和 2-MIB 产生密切相关的细菌 (表 1)。通过使用专门设计的引物, 在链霉菌属中检测到 germacradienol/GSMsmin 合成酶 (GSMA) 的基因编码, 并在两种淡水 RAS 的沙滤器和生物过滤器中检测并量化了该基因多个副本。这些检测到的基因副本与链霉菌株产生 GSM 有关。这种方法能够在 GSM 积累到临界水平之前检测到极低数量的 GSMA 拷贝基因<sup>[34]</sup>。类似的, 利用相似方法获取了较少的 GSMA 拷贝基因, 证明了在 RAS 的生物过滤器和养殖池中存在产生 GSM 的细菌, 虽然含量很少但足以引起异味问题<sup>[35]</sup>。因此, 通过基因检测技术识别潜在异味及其产生环境, 并预测异味是一种值得进一步研究的方法。目前, RAS 系统内部已知的能够产生异味化合物的细菌序列及合成基因较少, 从而限制了检测工具开发, 这一定程度阻碍了 RAS 系统推广应用<sup>[36]</sup>。因此, 深入了解产生异味化合物的微生物及其分布与生物学特性, 对于开发有效的 RAS 异味检测与去除装备至关重要<sup>[35]</sup>。

### 1.2 RAS 系统中异味化合物的微生物来源及其环境影响因素

在 RAS 中, 异味化合物的识别与控制是保证养殖产品品质的关键环节。然而, 仅通过对细菌进行追踪存在一定的局限性, 因为这些异味化合物的产生是一个多因素影响的复杂过程。系统内

表 1 RAS 中产生 GSM 和 2-MIB 的菌

Tab. 1 Bacteria that produce GSM and 2-MIB in RAS

细菌 bacteria	养殖鱼种 species	GSM	2-MIB	方法 methods	位置 position	参考文献 reference
诺卡氏菌 Nocardiaceae	虹鳟 <i>O. mykiss</i>	是	未检测	分离	生物滤床	[3]
河流诺卡氏菌 <i>Nocardia fluvialis</i>					养殖池	
链霉菌 Streptomycetaceae					热交换器	
白色链霉菌 <i>Streptomyces albus</i>					鼓式过滤器	
链霉菌 Streptomycetaceae						
微囊藻属 <i>Microcystis</i>	虹鳟 <i>O. mykiss</i>	是	未检测	原位检测	生物滴滤器	[34]
纤维堆囊菌 <i>Sorangium cellulosum</i>						
放线菌 Actinomycetes	—	是	未分析	原位检测	移动床反应器	[35]
粘细菌 <i>myxo-spore</i>						
灰黄链霉菌 <i>S. griseus</i>	美洲红点鲑 <i>Salvelinus fontinalis</i>	是	未分析	原位检测	养殖水体	[36]
黄色粘球菌 <i>Myxococcus xanthus</i>						
堆囊菌 <i>S. cellulosum</i>						

注：“—”代表数据空缺；下同。

Notes: "—" represents missing data; the same below.

的微量元素、磷酸盐、硝酸盐以及溶解氧含量等因素均已被证实对 GSM 和 2-MIB 的生成具有显著影响。对吸水链霉菌的研究表明，不同的培养条件对 GSM 的产生具有重要影响。在培养基中添加醇类物质和复杂碳源，如纤维素二糖、甘油和甘露醇，能够促进异味化合物的生物合成，从而获得更高浓度的 GSM [37]。微量元素是否会影 响异味化合物的产生存在一定的争议。一项研究表明，钙、锌、铁和锰，能够抑制 GSM 的产生，而钾和磷酸盐则显示出促进作用 [38]。高磷含量对 RAS 系统中的 GSM 浓度具有显著影响，而 2-MIB 浓度则较低 [39]。在虹鳟饲料中添加不同浓度的磷对于异味化合物的产生具有促进作用，进一步证实了磷酸盐 (如磷酸二氢盐) 在 GSM 合成途径中的重要性 [39]。在对扩展青霉 (*Penicillium expansum*) 的研究中发现，添加铜 (例如硫酸铜) 能够提高 GSM 的产量，说明含铜化合物可能通过抑制细菌的呼吸作用，进而影响了 GSM 的合成，而其他微量元素如镁、铁、锌、锰、钴和镍对 GSM 的产生影响不大 [40]。此外，在有氧条件下，热羧链霉菌 (*S. thermocarboxyidus*) 和玫瑰黄链霉菌 (*S. coelicolor*) 产生的 GSM 和 2-MIB 的浓度显著高于

缺氧条件 [33]。这些结果强调了在设计和管理 RAS 时，对养殖过程中水质参数进行精细调控的重要性，通过优化水质条件和营养管理，可以有效控制异味化合物的产生。

## 2 异味化合物对鱼肉品质的影响

异味化合物 (如 GSM 与 2-MIB) 主要通过鱼鳃被动扩散进入血液 [41]，由于这些化合物是亲脂性的，具有较高的辛醇/水分配系数 (分别为 3.57 和 3.31)，因此它们会在血液中与脂肪组织结合，并在脂肪含量高的组织中积累 [42-43]。这种被动扩散过程是基于浓度梯度进行的，即水中的异味化合物浓度高于鱼体内时，化合物会通过鳃进入鱼体内。GSM 与 2-MIB 在鱼体内的分布主要受脂肪含量的影响，脂肪含量高的组织，如腹部脂肪和皮下脂肪，会积累更多的异味化合物 [44]。研究表明，脂肪含量高的鱼类如大西洋鲑 (*S. salar*) 和虹鳟在相同条件下比脂肪含量低的鱼类积累更多的异味化合物 [7, 45]。除了直接积累，GSM 在鱼体内还可能发生生物转化。GSM 在鱼肝脏中可以被转化为其他代谢产物，这可能影响其在鱼体内的分布和积累 [44]。此外，不同种类的鱼对异味化合物

的积累能力不同。研究表明, 肉食性鱼类如电鳗 (*Malapterurus electricus*) 和草食性鱼类如草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 在相同的养殖系统中积累的 GSM 浓度较低, 而底栖或以摄食浮游生物为主的鱼类积累的浓度较高<sup>[46]</sup>。此外, 鱼的大小也会影响异味化合物的积累, 较大的鱼通常积累更多的异味化合物<sup>[43]</sup>。养殖水体中的异味化合物浓度、温度和水质等环境条件也会影响异味化合物在鱼体内的积累。研究表明, 水温升高会加速异味化合物的积累, 而清洁的水体有助于减少异味化合物的积累<sup>[45]</sup>。在探讨水产养殖产品中的异味问题时, 鱼体内的异味化合物与 n-3 多不饱和脂肪酸 (n-3 polyunsaturated fatty acids, n-3 PUFAs) 含量之间的关系引起了广泛关注。研究发现, 2-MIB 和 GSM 这两种常见的异味化合物的浓度, 可能与肌肉组织中不饱和脂肪酸的含量和组成比例存在一定的关联性<sup>[47]</sup>。具体而言, GSM 水平的降低与 n-3 PUFAs 所占比例的增加密切相关, 这

表明增加脂肪酸的含量可能是降低异味的关键因素<sup>[48-49]</sup>。在 RAS 中, 杂交鳊 (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) 体内单不饱和脂肪酸 (monounsaturated fatty acids, MUFA) 的含量增加, 而 n-3 PUFAs 的含量却有所减少, 这种脂肪酸组成的不平衡导致了 GSM 水平的增加<sup>[50]</sup>。

GSM 和 2-MIB 均为浓度依赖的强效呈味物质, 对鱼肉的感官品质和市场价值具有显著的负面影响。研究表明, GSM 和 2-MIB 在鱼肉中的感官阈值分别为 0.9 和 0.7 ng/g<sup>[51]</sup>。在养殖系统中, GSM 和 2-MIB 的浓度普遍显著高于上述感官阈值, 仅有少数系统中的浓度低于这些阈值<sup>[52]</sup>。不同研究者对水和淡水鱼中 GSM 和 2-MIB 的人类感官阈值进行了研究 (表 2)。当水体中 2-MIB 和 GSM 的浓度同时高于 15 ng/L 时, 便足以引起鱼类的异味问题<sup>[58]</sup>。此外, 2-MIB 浓度单独高于 18 ng/L, 也可能产生异味<sup>[9]</sup>。

表 2 水和几种淡水鱼 GSM 和 2-MIB 的人类感官阈值

Tab. 2 Human sensory thresholds for GSM and 2-MIB of water and several freshwater fish

种类/物种 species	感官阈值(GSM)/(μg/kg) sensory threshold	感官阈值(2-MIB)/(μg/kg) sensory threshold	参考文献 references
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	0.04~0.50	>0.90	[2, 5]
湖红点鲑 <i>S. namaycush</i>	1.50	—	[9]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	6.60~36.30	—	[53]
澳洲肺鱼 <i>Neoceratodus forsteri</i>	0.74	—	[54]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	0.90	—	
斑点叉尾鲷 <i>Ictalurus punctatus</i>	—	0.70	
墨瑞鳉 <i>Maccullochella peelii</i>	0.06~0.90	—	[49, 55]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	0.90	0.60	[48, 56]
淡水 freshwater	0.02~0.20	0.02~0.05	[57]

尽管在鱼肉中检测到的 GSM 和 2-MIB 水平通常低于 1 μg/kg, 但这一浓度足以超过人类的感官阈值, 导致鱼肉出现土味或霉味, 影响消费者的接受度<sup>[59]</sup>。在英国的土质跑道中养殖的虹鳟中检测到了迄今为止报道的最高 GSM 浓度<sup>[60]</sup>。在泰国网箱中养殖的尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 中 2-MIB 的水平显著高于在巴西养殖的尼罗罗非鱼, 而 GSM 水平则相似<sup>[61]</sup>。这些研究结果揭示了水和鱼肉中 GSM 和 2-MIB 水平的显著差异, 反映了实际养殖过程中鱼体内 GSM 和 2-MIB 水平可能受自然因素的影响<sup>[41]</sup>。RAS 系统中不同养殖鱼类体内的 GSM 和 2-MIB 平均含量显著高于

养殖水体 (表 3)。

这一现象揭示了 RAS 系统中存在 GSM 和 2-MIB 的蓄积效应。RAS 由于其高度集约化的生产方式, 系统的投入和对环境的控制要求较高, 相应的, 这也带来了更高的经济投入和经营风险。特别是 RAS 中的净化系统, 其去除异味化合物的效率和稳定性是确保实现高密度养殖向高质量和可持续发展转型的关键。迄今为止, 对于水产养殖中异味问题所带来的经济影响尚未进行过系统性的研究<sup>[64]</sup>。然而, 受异味问题影响的鱼类产业已经遭受了损失。以北美的抚仙鳊 (*Silurus grahami*) 产业为例, 据估算, 由于品质下降, 每千克

表 3 RAS 中水和养殖鱼类的 GSM 和 2-MIB 平均含量

Tab. 3 Average GSM and 2-MIB contents of water and farmed fish in RAS

品种 species	养殖水体/(ng/L) aquatic water		鱼体/( $\mu\text{g/L}$ ) fish		参考文献 references
	GSM	2-MIB	GSM	2-MIB	
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	7~29	132.0 $\pm$ 13.2	0.2~0.3	0.09 $\pm$ 0.03	[2]
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	NA	NA	0.26~0.51	0.55~0.90	[5]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	1~3	1~14	0.05~0.38	0.01~0.05	[14]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	5~70	1~7	0.07~0.37	0.01~0.03	[14]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	NA	NA	0.14~3.84	ND	[34]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	2~15	ND	3~5	ND	[39]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	6.6~36.1	3.2~28.5	0.1~2.4	0.01~0.55	[53]
大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	NA	NA	5~41	17~67	[62]
白鲟 <i>Psephurus gladius</i>	NA	NA	675~1 177	26~35	[62]
湖红点鲑 <i>S. namaycush</i>	30.5	1	0.7	0.008	[63]

注: NA 表示未分析, ND 表示未检测。

Notes: NA means not analyzed, ND means not detected.

鱼的潜在损失可能超过 15%<sup>[65]</sup>。此外, 有报道指出, 在欧盟, 仅 2015 年因异味问题导致的经济损失就高达 800 万欧元以上<sup>[64]</sup>。这些数据反映出异味问题对水产养殖业的负面影响, 也强调了开发和应用高效净化设备以去除或减少异味化合物的必要性。

### 3 控制 RAS 中异味的方法

#### 3.1 RAS 中 GSM 和 MIB 降解菌的研究现状

在 RAS 中, 生物絮凝剂和污泥在异味物质的降解与去除方面发挥着重要作用。通过吸附和生物降解的协同作用, 过滤器在去除 GSM 和 2-MIB 方面表现出显著效果<sup>[66]</sup>。数值模型分析显示, 在稳态条件下, 生物降解在 2-MIB 去除中占据主导地位, 其贡献率高达 99%<sup>[13]</sup>。进一步的研究表明, RAS 固体废物产生的生物絮凝物在去除 GSM 和 2-MIB 方面具有高达 90% 以上的吸附去除率, 但随着时间的推移, 生物絮团的去除效率会显著下降<sup>[67]</sup>。从 RAS 消化池中分离出的三种细菌, 包括贪噬菌 (*Variovorax* sp.)、丛毛单胞菌 (*Comamonas* sp.) 和红球菌 (*Rhodococcus* sp.), 均能降解 GSM 和 2-MIB, 且这些细菌在好氧和缺氧条件下均能将 GSM 或 2-MIB 作为唯一的碳源生长<sup>[68]</sup>。在红球菌中检测到异味降解酶的基因 (细胞色素 P-450 cam), 并通过宏基因组学分析进一步证实了 RAS 系统中各部分存在 GSM 和 2-MIB 降解的能力<sup>[13]</sup>。表 4 汇总了在 RAS 养殖环境中发现的 GSM 和

2-MIB 降解菌的研究成果。尽管目前对 RAS 中 GSM 和 2-MIB 降解菌的研究尚处于起始阶段, 但已有的研究成果已为后续的深入研究奠定了基础。这些发现不仅丰富了对 RAS 系统中异味降解机制的认识, 而且为生物处理技术在水产养殖业中的应用提供了明确的发展方向。

#### 3.2 高效净化技术在 RAS 中的应用与成本效益分析

鱼类在销售前净化暂养是去除异味的常规方法, 是确保其达到销售标准、维持高品质的关键措施。关于过水净化机制及其在商业养殖中的潜在价值, 已有大量研究进行了深入探讨。表 5 详细列出了 RAS 系统中不同鱼类的净化所需时间。净化时间的长短对产品的销售和生产成本均具有显著影响。

多项研究指出, RAS 中鱼类异味的去除周期通常为 10~15 d, 过长的净化时间可能导致鱼体重的下降。针对墨瑞鳟的净化研究显示, 经过 2 周 (体重下降 4.1%) 和 4 周 (体重下降 9.1%) 的净化处理后, 鱼体重有显著差异, 但味道方面并无明显区别<sup>[55]</sup>。对于含有较低 GSM 和 2-MIB 浓度的大西洋鲑, 无论是在循环水还是流动水系统中, 均需经过 10~15 d 的净化, 才能将鱼肉中的 GSM 和 2-MIB 含量降至可接受的阈值以下, 其中净化 10 d 和 20 d 分别导致体重下降 4.3% 和 5.8%<sup>[2]</sup>。过短的净化周期可能无法确保产品达到理想条件, 而净化周期过长则会增加生产成本。因此, 近年来,

表 4 养殖环境中存在的生物降解菌

Tab. 4 Biodegradable bacteria present in aquaculture habitats

菌种 bacteria	异味化合物 odorous compound	范围/(ng/L) range	来源 source	参考文献 references
红球菌 <i>Rhodococcus</i> sp.	GSM 和 2-MIB	5 000~0.25 × 10 <sup>6</sup>	RAS	[68]
贪噬菌属 <i>Variovorax Paradoxus</i>				
丛毛单胞菌 <i>Comamonas</i>				
假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	2-MIB	NA	生物滤池	[69]
肠杆菌属 <i>Enterobacter</i>				
球状细菌 <i>coccus</i>	2-MIB	515~4.2×10 <sup>6</sup>	生物滤池	[70]
黄杆菌 <i>Flavobacterium</i> sp.				
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>				
假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>				
恶臭假单胞菌G1 <i>P. putida</i>	2-MIB	0.125~0.5×10 <sup>6</sup>	活性污泥、土壤、湖水	[71]
赤红球菌 <i>R. ruber</i>				
弗氏红球菌 <i>R. wratislaviensis</i>				
阿拉斯加鞘氨醇盒菌 <i>Shingopyxis alaskensis</i>	GSM	40~20×10 <sup>6</sup>	砂滤器	[72]
芋新鞘氨醇菌 <i>Novosphingobium</i>				
维氏假单胞菌 <i>P. mosselii</i>				
阿拉斯加鞘氨醇盒菌 <i>S. alaskensis</i>	GSM	100~1 000	砂滤器	[73]
金黄杆菌 <i>Chryseobacterium</i>	GSM	560~2×10 <sup>6</sup>	活性炭滤器	[74]
根瘤菌 <i>Rhizobium</i>				
嗜麦芽寡养单胞菌 <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>				
假单胞菌 <i>Pseudomonas</i>	GSM	9.4×10 <sup>6</sup>	活性污泥	[75]
弗氏红球菌 <i>R. wratislaviensis</i>				
动胶菌样申氏菌 <i>Shinella zoogloeoides</i>	2-MIB	20×10 <sup>3</sup>	砂滤器	[76]
黄杆菌属 <i>Flavobacterium</i>				
短杆菌属 <i>Brevibacterium</i>				

表 5 RAS 中鱼的净化时间研究

Tab. 5 Study on the purification time of fish in RAS

鱼种 species	初始浓度/(μg/kg) initial concentrations		净化时间/h clarification period	减重/% lose weight	净化后浓度/(μg/kg) purified concentrations		净化系统 purification systems	参考文献 references
	GSM	2-MIB			GSM	2-MIB		
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	0.2~0.3	0.09±0.03	360	5.3	0.01	0.02	溢流道	[2]
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	0.26~0.51	0.55~0.99	240	—	0.07~0.26	0.09~0.36	循环水, 养殖池	[5]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	1.68	—	36	—	0.90	—	溢流道	[51]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	2.98	—	60	—	0.90	—	溢流道	[51]
虹鳟 <i>O. mykiss</i>	5.25	—	120	—	0.90	—	溢流道	[51]
墨瑞鳕 <i>M. peeltii</i>	—	—	336	4	<0.06	—	溢流道	[55]
欧洲鳗鲡 <i>A. anguilla</i>	13~19	—	192	1.44	9.50~13.00	—	溢流道	[77]
大西洋鲑 <i>S. salar</i>	—	—	144	2.1	<0.01	—	AOP氧化, 静水池	[78]

关于优化净化条件以缩短净化时间的研究日益增多。研究表明, 温度和运动对 GSM 的去除具有显著影响。例如, 通过强迫欧洲鳗鲡在净化期间进

行游动, 可以显著缩短其所需的净化时间。相关实验结果表明, 欧洲鳗鲡游动能够提高其耗氧量, 进而促进 GSM 的排泄<sup>[77]</sup>。此外, 欧洲鳗鲡体内的

异味化合物可能以代谢物的形式通过被动扩散排出, 证明了通过增加水的更新率, 可以降低 GSM 的含量<sup>[79]</sup>。对于虹鳟, 研究发现其体内 GSM 含量的变化呈现先升后降的趋势, 这表明虹鳟体内可能存在 GSM 生物转化的诱导机制<sup>[44]</sup>。此外, 净化周期的长短主要受到所采用方法的影响。考虑到 RAS 相较于其他水产养殖系统具有更高的可控性, 因此在 RAS 中进行鱼类净化更为可行且有效。在半商业规模的淡水 RAS 养殖系统中, 对大西洋鲑进行异味去除的研究表明, 不配备生物滤器的净化系统同样能够有效地去除异味<sup>[5]</sup>。综合应用机械、生物、化学和物理净化技术, 可以显著提升水质, 进而有效去除水中的 GSM 和 2-MIB。例如, 消毒处理、温度调节以及水流控制等操作, 在 RAS 中更易于执行和优化。激子高级氧化过程 (exciton advanced oxidation, eAOP<sup>®</sup>) 作为一种净化技术, 已被证实去除商业大西洋鲑 RAS 系统中的 GSM 和 2-MIB 方面, 比传统净化方式的效率提高了 60%<sup>[78]</sup>。然而, 该方法虽然在去除效率上具有优势, 但同时也伴随着额外的操作成本。此外, 为了有效去除鱼类排泄物中的异味化合物, 常采取将鱼暂养在新鲜且清洁的水中。具体操作中, 鱼类在净化过程的初期, 即第 1 天, 采用 100% 至 200% 的高换水率, 以迅速稀释和清除水中的污染物。随后, 在接下来的 3~4 d 中, 每天维持 25% 的换水率, 以持续保持水质的清洁和稳定。然而, 这种高换水率的暂养方法虽然对提高水质和去除异味有效, 但同时也带来了清水资源的大量需求。这种需求的增加直接导致了成本的上升, 包括水资源的获取、处理和循环利用的成本。据研究估计, 异味去除的年成本可能为 1 000 万~6 000 万美元<sup>[65]</sup>。因此, 探索更为高效的净化方法, 以减少水资源的消耗和体重下降带来的商业损失, 是目前研究的重要方向。

### 3.3 RAS 中异味的理化去除

当前, RAS 中异味去除技术的研究主要集中在活性炭、臭氧、电化学处理以及超声波等方法。研究表明, 在低有机质条件下, 不同过滤装置对水中 2-MIB 和 GSM 的去除效果显著。特别是, 通过 MIEX 工艺去除有机质后, 活性炭对 2-MIB 的吸附能力显著增强<sup>[80]</sup>。然而, 在高浓度天然有机物 (NOM) 的养殖水体中, 体积较小的 NOM 分子可能会抢占活性炭粉末的吸附位点, 从而削弱

活性炭对异味化合物的吸附能力<sup>[81]</sup>。进一步的研究表明, NOM 与 2-MIB 在活性炭颗粒内部区域的吸附位点上存在竞争关系, 这种竞争显著降低了活性炭对 2-MIB 的吸附效果<sup>[82]</sup>。臭氧氧化技术在有机化合物的去除中具有广泛的应用前景, 通过优化该技术可以改善净化系统的水质条件, 从而更有效地去除异味化合物<sup>[15]</sup>。此外, 高剂量臭氧与紫外线联合使用对 RAS 水中的 GSM 和 2-MIB 具有显著的去除效果<sup>[3]</sup>。紫外光辅助光电化学方法在降解水体中的 2-MIB 和 GSM 方面表现出较高的有效性, 研究发现, 与单独使用紫外光化学或电化学方法相比, 紫外光辅助光电化学方法在 25 min 内可以将 GSM 和 2-MIB 的降解率分别提高至 96% 和 95%<sup>[83]</sup>。此外, 超声波水处理技术在去除 RAS 系统中的 GSM 和 2-MIB 方面具有显著优势。与高级氧化工艺或吸附工艺等替代策略相比, 高频超声波对养殖水体异味的去除效果更佳, 且对水质负荷的依赖性极低, 能够显著提高 RAS 养殖水体中 GSM 和 2-MIB 的去除率<sup>[12]</sup>。

表 6 对 RAS 中去除 GSM 和 2-MIB 的净化方法进行了详细的描述和比较, 揭示了现有技术去除这些异味物质方面存在的局限性, 指出了开发更高效净化技术的必要性。

活性炭作为一种传统的吸附剂, 尽管在去除异味方面具有一定的效果, 但其应用受限于高成本和难以复用的问题<sup>[88-89]</sup>。为了提高去除效率, 研究人员探索了多种替代技术, 包括不同催化剂辅助的紫外线 (UV) 辐射、臭氧氧化以及高级氧化工艺 (AOPs) 等<sup>[84]</sup>。发现臭氧与过氧化氢的联合使用在提高 2-MIB 和 GSM 去除效率方面表现出显著效果<sup>[90]</sup>。AOPs 依赖于高活性的羟基自由基, 这些自由基能够非选择性地氧化具有丰富电子的有机化合物<sup>[85]</sup>。尽管氧化过程在水产养殖中应用广泛, 但研究表明, 不足的氧化剂量难以有效去除 GSM 和 2-MIB<sup>[14]</sup>。紫外光催化二氧化钛 (UV-TiO<sub>2</sub>) 作为一种 AOP, 已被研究用于氧化痕量有机化合物<sup>[87]</sup>。在间歇式反应器中, 将 TiO<sub>2</sub> 作为浆料使用时, UV-TiO<sub>2</sub> 光催化能够氧化高达 99% 的 GSM 和 2-MIB<sup>[9]</sup>。虽然 TiO<sub>2</sub> 催化剂在 RAS 中显示出较高的去除率, 但其应用需要高催化剂负载, 并且必须注意催化剂残留可能对养殖鱼类造成损伤<sup>[87]</sup>。目前, 各种单一方法均有其固有的不足之处, 而将多种技术联合应用以提高去除效率的策略尚未见广泛报道。因此, 未来的研究需要进一步探索

表 6 RAS 中各种异味净化方法的优缺点

Tab. 6 Advantages and disadvantages of various odor purification methods in RAS

去除方法 removal methods	优点 advantages	缺点 disadvantages	参考文献 references
臭氧配合紫外去除法 ozone-assisted ultraviolet removal method	去除率高, 可规避臭氧的毒害作用	成本较高, 对有机物含量高的水体效果不佳	[3]
超声波 ultrasonic	水质负荷对去除效率的影响极低	可能改变鱼类的行为	[12]
臭氧氧化 ozonation	去除效率高	产生影响水产动物健康的副产物	[15]
激子高级氧化 exciton advanced oxidation (eAOP <sup>®</sup> )	显著缩短去除时间, 不受有机质影响	成本高昂	[78]
活性炭 activated carbon	去除效果好	需要量大, 可复用性低, 成本高, 易受有机物的影响	[82]
紫外线辐射 ultraviolet radiation	去除效率高	剂量不足, 去除效果不佳	[84]
高级氧化工艺 advanced oxidation process (AOP)	去除效率高	产生影响水产动物健康的副产物	[85]
UV-TiO <sub>2</sub>	去除效果好	产生影响水产动物健康的副产物, 残留的纳米颗粒可能影响水产养殖健康	[86-87]
生物去除 bioremoval	效果良好	对水产动物健康方面缺乏数据参考	—

和开发综合技术方案, 以实现更高效、经济、环保的异味净化效果。

#### 4 展望

RAS 作为水产养殖业的一项关键技术, 其在提升养殖效率与节约资源方面发挥着重要作用。然而, 伴随而来的异味问题, 尤其是 GSM 和 2-MIB 的积累, 已成为制约 RAS 技术进一步发展的主要障碍。为了有效解决这一问题, 科研工作者已经探索并提出了多种潜在的异味去除技术, 包括高级氧化技术、光催化电解、纳米气泡技术、新型吸附材料以及微生物降解方法等。这些技术在实验室规模的研究中已经展现出良好的去除效果, 然而在实际应用于 RAS 时仍面临着经济性和技术可行性方面的问题和挑战。

①探索成本效益高的替代技术以及开发新型吸附材料和筛选高效的 GSM 与 2-MIB 降解微生物, 对于 RAS 系统的可持续发展具有重要意义。这些领域的研究不仅能够为 RAS 提供更为经济的异味控制方案, 也将推动相关技术的创新与应用。

②基于生理学的深入研究, 例如鱼类肝脏对 GSM 的转运机制, 以及 2-MIB 代谢产物的分析和相关酶活性的研究, 对于揭示异味物质在鱼类体内的代谢途径具有关键作用。这些研究的深化将有助于开发更为精准的异味控制策略。

③在商业化 RAS 系统的背景下, 由于其规模较大且经济回报期望高, 对 GSM 和 2-MIB 的控制要求更为严格。因此, 针对不同工艺条件下这两种物质的去除效率进行研究, 对于揭示商业 RAS 系统中异味产生的机理及其控制方法具有重要价值。这不仅有助于优化 RAS 工艺, 也是实现其经济效益最大化的关键。

④尽管全自动化技术在 RAS 中的应用日益广泛, 但考虑到其长期运行的经济负担, 寻求更为经济、高效且环境友好的异味去除技术显得尤为重要。利用微生物进行水质净化和异味去除, 以其低成本、稳定性以及对环境的低影响, 展现出良好的应用前景。未来的研究应当着重于开发此类技术, 以促进 RAS 技术的可持续发展, 并满足市场对高品质水产品日益增长的需求。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

#### 参考文献 (References):

- [1] Podduturi R, Petersen M A, Mahmud S, *et al.* Potential contribution of fish feed and phytoplankton to the content of volatile terpenes in cultured pangasius (*Pangasianodon hypophthalmus*) and tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(18): 3730-3736.
- [2] Burr G S, Wolters W R, Schrader K K, *et al.* Impact of 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries



- deputation 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.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 李冲炜, 邹攀, 杨兆光, 等. 天然水体中两种主要异嗅物质的来源及迁移转化研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2016, 36(2): 74-80.
- Li C W, Zou P, Yang Z G, *et al.* Resource, migration & transformation of two main off-flavor compounds in natural water[J]. *Journal of Microbiology*, 2016, 36(2): 74-80 (in Chinese).
- [ 6 ] Schrader K K, Green B W, Perschbacher P W. Development of phytoplankton communities and common off-flavors in a biofloc technology system used for the culture of channel catfish (*Ictalurus punctatus*)[J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 45(3): 118-126.
- [ 7 ] Lindholm-Lehto P C, Vielma J, Pakkanen H, *et al.* Depuration of geosmin-and 2-methylisoborneol-induced off-flavors in recirculating aquaculture system (RAS) farmed European whitefish *Coregonus lavaretus*[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 56(10): 4585-4594.
- [ 8 ] 刘利平, 李慷, 闫莉. 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 [J]. *水产学报*, 2021, 45(5): 813-829.
- Liu L P, Li K, Yan L. Sources, determination, prevention and elimination of off-flavour compounds in aquatic animals[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(5): 813-829 (in Chinese).
- [ 9 ] Lindholm - Lehto P C, Vielma J. Controlling of geosmin and 2 - methylisoborneol induced off - flavours in recirculating aquaculture system farmed fish-a review[J]. *Aquaculture Research*, 2019, 50(1): 9-28.
- [10] Hathurusingha P I, Davey K R. Experimental validation of a time-dependent model for chemical taste taint accumulation as geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (MIB) in commercial RAS farmed barramundi (*Lates calcarifer*)[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 340: 17-27.
- [11] Lindholm-Lehto P C, Suurnäkki S, Pulkkinen J T, *et al.* Effect of peracetic acid on levels of geosmin, 2-methylisoborneol, and their potential producers in a recirculating aquaculture system for rearing rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Aquacultural Engineering*, 2019, 85: 56-64.
- [12] 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.
- [13] Azaria S, Nir S, van Rijn J. Combined adsorption and degradation of the off-flavor compound 2-methylisoborneol in sludge derived from a recirculating aquaculture system[J]. *Chemosphere*, 2017, 169: 69-77.
- [14] 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.
- [15] Davidson J, Good C, Welsh C, *et al.* The effects of ozone and water exchange rates on water quality and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* performance in replicated water recirculating systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(3): 80-96.
- [16] Kutschera K, Börnick H, Worch E. Photoinitiated oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by irradiation with 254 nm and 185 nm UV light[J]. *Water Research*, 2009, 43(8): 2224-2232.
- [17] Ho L, Newcombe G, Croué J P. Influence of the character of NOM on the ozonation of MIB and geosmin[J]. *Water Research*, 2002, 36(3): 511-518.
- [18] Silvey J K G, Roach A W. Studies on microbiotic cycles in surface waters[J]. *Journal AWWA*, 1964, 56(1): 60-72.
- [19] Narayan L V, III W J N. Biological control: isolation and bacterial oxidation of the taste - and - odor compound geosmin[J]. *Journal AWWA*, 1974, 66(9): 532-536.
- [20] 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.
- [21] Ho L, Hoefel D, Bock F, *et al.* Biodegradation rates of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin through sand fil-

- ters and in bioreactors[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(11): 2210-2218.
- [22] Ho L, Sawade E, Newcombe G. Biological treatment options for cyanobacteria metabolite removal—a review[J]. *Water Research*, 2012, 46(5): 1536-1548.
- [23] Jüttner F. Physiology and biochemistry of odorous compounds from freshwater cyanobacteria and algae[J]. *Water Science and Technology*, 1995, 31(11): 69-78.
- [24] Lanciotti E, Santini C, Lupi E, *et al.* Actinomycetes, cyanobacteria and algae causing tastes and odours in water of the River Arno used for the water supply of Florence[J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 2003, 52(7): 489-500.
- [25] Thaysen A C, Pentelow F T K. 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.
- [26] Azaria S, van Rijn J. Off-flavor compounds in recirculating aquaculture systems (RAS): production and removal processes[J]. *Aquacultural Engineering*, 2018, 83: 57-64.
- [27] Clercin N A, Druschel G K. Influence of environmental factors on the production of MIB and geosmin metabolites by bacteria in a eutrophic reservoir[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(7): 5413-5430.
- [28] Rurangwa E, Verdegem M C J. Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2015, 7(2): 117-130.
- [29] Devi A, Chiu Y T, Hsueh H T, *et al.* Quantitative PCR based detection system for cyanobacterial geosmin/2-methylisoborneol (2-MIB) events in drinking water sources: current status and challenges[J]. *Water Research*, 2021, 188: 116478.
- [30] Sakuda S, Isogai A, Matsumoto S, *et al.* Isolation and structure of isobutyrylleucanacidin produced by *Streptomyces halstedii*[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1987, 51(10): 2841-2842.
- [31] Ludwig F, Medger A, Börnick H, *et al.* Identification and expression analyses of putative sesquiterpene synthase genes in *Phormidium* sp. and prevalence of *geoA*-like genes in a drinking water reservoir[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73(21): 6988-6993.
- [32] Dittmann E, Gugger M, Sivonen K, *et al.* Natural product biosynthetic diversity and comparative genomics of the cyanobacteria[J]. *Trends in Microbiology*, 2015, 23(10): 642-652.
- [33] Wang C M, Cane D E. Biochemistry and molecular genetics of the biosynthesis of the earthy odorant methylisoborneol in *Streptomyces coelicolor*[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2008, 130(28): 8908-8909.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 王旭冰. 养殖美国红鱼微生物去腥技术研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2010: 87-89.
- Wang X B. Study on the deodorization technic of microbe in *Sciaenops ocellatus*[D]. Ningbo: Ningbo University, 2010: 87-89 (in Chinese).
- [38] Saadoun I M K, Schrader K K, Blevins W T. Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *Anabaena* SP.[J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1209-1218.
- [39] 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.
- [40] Judet-Correia D, Bensoussan M, Charpentier C, *et al.* Influence of temperature, copper and CO<sub>2</sub> on spore counts and geosmin production by *Penicillium expansum*[J]. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2013, 19(1): 81-86.
- [41] Abd El-Hack M E, El-Saadony M T, Elbestawy A R, *et al.* Undesirable odour substances (geosmin and 2-methylisoborneol) in water environment: sources, impacts and removal strategies[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 178: 113579.
- [42] Clark K E, Gobas F A P C, Mackay D. Model of organic chemical uptake and clearance by fish from food and water[J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, 24(8): 1203-1213.
- [43] 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.
- [44] Schram E, Schrama J W, van Kooten T, *et al.* Experimental validation of geosmin uptake in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Waldbaum) suggests biotransformation[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(2): 668-675.
- [45] 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.
- [46] Papp Z G, Kerepeczki É, Pekár F, *et al.* Natural origins of off-flavours in fish related to feeding habits[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(5): 301-309.
- [47] Josephson D B, Lindsay R C, Stuiber D A. Volatile compounds characterizing the aroma of fresh Atlantic and Pacific oysters[J]. *Journal of Food Science*, 1985, 50(1): 5-9.
- [48] Lindholm-Lehto P, Koskela J, Leskinen H, *et al.* Off-flavors and lipid components in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) reared in RAS: differences in families of low and high lipid contents[J]. *Aquaculture*, 2022, 559: 738418.
- [49] Moretto J A, Freitas P N N, Souza J P, *et al.* Off-flavors in aquacultured fish: origins and implications for consumers[J]. *Fishes*, 2022, 7(1): 34.
- [50] Phetsang H, Panpipat W, Panya A, *et al.* Chemical characteristics and volatile compounds profiles in different muscle part of the farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*)[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(1): 310-322.
- [51] 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, *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Aquaculture*, 2005, 245(1-4): 89-99.
- [52] Vallod D, Cravedi J P, Hillenweck A, *et al.* Analysis of the off-flavor risk in carp production in ponds in Dombes and Forez (France)[J]. *Aquaculture International*, 2007, 15(3): 287-298.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Lindholm-Lehto P C, Kiuru T, Hannelin P. Control of off-flavor compounds in a full-scale recirculating aquaculture system rearing rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Journal of Applied Aquaculture*, 2022, 34(2): 469-488.
- [57] Dietrich A M, Burlingame G A. A review: the challenge, consensus, and confusion of describing odors and tastes in drinking water[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 135061.
- [58] Hathurusingha P I, Davey K R. A predictive model for taste taint accumulation in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) farmed-fish—demonstrated with geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (MIB)[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 291: 242-249.
- [59] Gutierrez R, Whangchai N, Sompong U, *et al.* Off-flavour in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in an integrated pond-cage culture system[J]. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 2013, 7(Special Issue): S1-S13.
- [60] 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.
- [61] Lukassen M B, de Jonge N, Bjerregaard S M, *et al.* Microbial production of the off-flavor geosmin in tilapia production in Brazilian water reservoirs: importance of bacteria in the intestine and other fish-associated environments[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 2447.
- [62] Tucker C S, Schrader K K. Off - flavors in pond - grown ictalurid catfish: causes and management options[J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2020, 51(1): 7-92.
- [63] 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.
- [64] Noguera P M, Egiddi M, Södergren J, *et al.* More than just geosmin and 2-methylisoborneol? Off-flavours associated with recirculating aquaculture systems[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2024, 16(4): 2034-2063.
- [65] Tucker C S. Off-flavor problems in aquaculture[J]. *Reviews in Fisheries Science*, 2000, 8(1): 45-88.
- [66] 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.
- [67] Ma N N, Luo G Z, Tan H X, *et al.* Removal of geosmin and 2-methylisoborneol by bioflocs produced with aquaculture waste[J]. *Aquaculture International*, 2016, 24(1): 345-356.
- [68] Guttman L, van Rijn J. Isolation of bacteria capable of growth with 2-methylisoborneol and geosmin as the sole carbon and energy sources[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(2): 363-370.
- [69] Tanaka A, Oritani T, Uehara F, *et al.* Biodegradation of a musty odour component, 2-methylisoborneol[J]. *Water Research*, 1996, 30(3): 759-761.
- [70] 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.
- [71] Eaton R W, Sandusky P. Biotransformations of 2-methylisoborneol by camphor-degrading bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(3): 583-588.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] Eaton R W, Sandusky P. Biotransformations of (+/-)-geosmin by terpene-degrading bacteria[J]. *Biodegradation*, 2010, 21(1): 71-79.
- [76] Du K, Liu J, Zhou B H, *et al.* Isolation of bacteria capable of removing 2-methylisoborneol and effect of cometabolism carbon on biodegradation[J]. *Environmental Engineering Research*, 2016, 21(3): 256-264.
- [77] 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.
- [78] Kropp R, Summerfelt S T, Woolever K, *et al.* A novel advanced oxidation process (AOP) that rapidly removes geosmin and 2-methylisoborneol (MIB) from water and significantly reduces depuration times in Atlantic salmon *Salmo salar* RAS aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2022, 97: 102240.
- [79] Schram E, van Kooten T, van de Heul J W, *et al.* Geosmin depuration from European eel (*Anguilla anguilla*) is not affected by the water renewal rate of depuration tanks[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(9): 4646-4655.
- [80] Drikas M, Dixon M, Morran J. Removal of MIB and geosmin using granular activated carbon with and without MIEX pre-treatment[J]. *Water Research*, 2009, 43(20): 5151-5159.
- [81] Zoschke K, Engel C, Börnick H, *et al.* Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto powdered activated carbon at non-equilibrium conditions: influence of NOM and process modelling[J]. *Water Research*, 2011, 45(15): 4544-4550.
- [82] Matsui Y, Yoshida T, Nakao S, *et al.* Characteristics of competitive adsorption between 2-methylisoborneol and natural organic matter on superfine and conventionally sized powdered activated carbons[J]. *Water Research*, 2012, 46(15): 4741-4749.
- [83] Huang X L, Wang S, Wang G X, *et al.* Kinetic and mechanistic investigation of geosmin and 2-methylisoborneol degradation using UV-assisted photoelectrochemical[J]. *Chemosphere*, 2022, 290: 133325.
- [84] Srinivasan R, Sorial G A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: a critical review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(1): 1-13.
- [85] Raj R, Tripathi A, Das S, *et al.* Removal of caffeine from wastewater using electrochemical advanced oxidation process: a mini review[J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2021, 4: 100129.
- [86] Rodriguez-Gonzalez L, Pettit S L, Zhao W, *et al.* Oxida-

- tion of off flavor compounds in recirculating aquaculture systems using UV-TiO<sub>2</sub> photocatalysis[J]. *Aquaculture*, 2019, 502: 32-39.
- [87] Pettit S L, Rodriguez-Gonzalez L, Michaels J T, *et al.* Parameters influencing the photocatalytic degradation of geosmin and 2-methylisoborneol utilizing immobilized TiO<sub>2</sub>[J]. *Catalysis Letters*, 2014, 144: 1460-1465.
- [88] Bamuza-Pemu E E, Chirwa E M. Photocatalytic degradation of geosmin: reaction pathway analysis[J]. *Water SA*, 2012, 38(5): 689-696.
- [89] 周日安, 张苏燕, 郑仕, 等. 活性炭去除水中的 2-甲基异茨醇和土臭素的优化试验研究 [J]. *城镇供水*, 2023(1): 65-68.
- Zhou R A, Zhang S Y, Zheng S, *et al.* Study on the removal of 2-methylisoborneol and geosmin from water by activated carbon[J]. *City and Town Water Supply*, 2023(1): 65-68 (in Chinese).
- [90] Peng J Y, Wang Q Y, Li Z B, *et al.* Pilot testing and engineering application of O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process for 2-methylisoborneol and geosmin removal in drinking water treatment[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 60: 105140.

## Advances in the production and removal of off-flavors in Recirculating Aquaculture Systems (RAS) for the cultivation of freshwater fish

XIANG Kun<sup>1,2</sup>, SUN Haofeng<sup>1</sup>, XU Yuqing<sup>1</sup>, PEI Luwei<sup>1,3</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>, YE Zhangying<sup>1,4\*</sup>

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. Qingdao Blue Valley Kumpeng Marine Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

3. Zhejiang Yipai Technology Co., Ltd., Hangzhou 310058, China;

4. Ocean Academy, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** Recirculating Aquaculture Systems (RAS), as an advanced aquaculture technology, achieve efficient utilization of water resources and a significant reduction in feed consumption through meticulous system management and the application of cutting-edge engineering techniques. Despite these advancements, the accumulation of metabolic waste generated during the cultivation process may trigger severe odor issues, posing a potential threat to the stability of the cultivation environment and production efficiency. This review comprehensively examines the mechanisms of odor generation in RAS systems and provides an in-depth analysis of the origins and influencing factors of two key odor-causing substances-geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (2-MIB). Furthermore, this paper systematically reviews the latest research progress in odor removal technologies within RAS systems, covering a variety of methods including biological, physical, and chemical treatments. By thoroughly comparing the advantages and disadvantages of these technologies in terms of efficiency, cost, ease of operation and environmental friendliness, this article aims to provide a theoretical basis and practical guidance for the further optimization and application of RAS technology, with the expectation of promoting the sustainable development of recirculating water aquaculture technology.

**Key words:** Recirculating Aquaculture Systems (RAS); geosmin; 2-methylisoborneol; odor removal; RAS system optimization

**Corresponding author:** YE Zhangying. E-mail: [zyzju@zju.edu.cn](mailto:zyzju@zju.edu.cn)

**Funding projects:** National Key R & D Program of China (2022YFD2001700); National Modern Agriculture Industrial Technology System Special Project-the National Technology System for Conventional Freshwater Fish Industries (CARS45-24); Key Program of Science and Technology of Zhejiang Province (2023C02050)