



· 综述 ·

土臭素对淡水鱼品质的影响及控制策略研究进展

赵勇^{1,2,3*}, 王天艺¹, 李慷⁴, 潘迎捷^{1,2,3}, 刘海泉^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学, 农业农村部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室(上海), 上海 201306;

4. 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: 水产品味道鲜美, 营养丰富, 是人类摄取食物蛋白的重要来源。但以土腥味为代表的特殊异味在淡水养殖的鱼类中经常出现, 不但影响水产品的风味, 更降低了消费者的消费意愿, 制约着水产品养殖行业的稳定发展。而科学控制和预防水产品中的土腥味是保障水产品质量的重要手段, 对满足产业需求具有重要意义, 仍需深入研究。本文综述了水产品中以土腥味为典型代表的特殊异味, 探讨了以土臭素为代表的异味物质在水产品中造成土腥味的机理, 并结合目前控制土腥味的常用方法, 对未来水产品异味防控发展趋势进行展望, 以期消除水产品中的异味物质, 尤其是淡水养殖的水产品中存在的土腥味。

关键词: 淡水鱼; 土腥味; 土臭素; 控制措施

中图分类号: S 985; TS 254.1

文献标志码: A

随着经济水平的提高, 人们越来越注重饮食平衡, 对膳食的要求更加严苛, 而我国居民水产品消费量仍处于较低水平。2022年版居民膳食指南提倡我国居民应适当增加鱼虾类摄入量, 减少熏腌和深加工肉制品的摄入量, 并强调每周至少吃2次水产品。水产品是优质蛋白质的重要来源, 富含多不饱和脂肪酸, 营养价值丰富, 适量食用可以降低成年人患糖尿病的风险, 对婴幼儿的发育也有益处^[1-2]。水产品也是饮食的重要组成部分, 与畜禽肉类相比, 脂肪含量较低, 不仅有利于保护心血管健康, 还有更好的生态效益和经济性能^[3]。

中国地域辽阔, 江河湖泊等淡水资源丰富, 淡水鱼产量高, 主要有鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼

(*Ctenopharyngodon idella*)、鲤 (*Cyprinus carpio*)、鲫 (*Carassius auratus*)、鳊 (*Aristichthys nobilis*)、鲂 (*Megalobrama skolkovii*) 等7种淡水鱼养殖品种, 约占淡水鱼养殖总产量的80%^[4]。同时, 我国还是世界淡水鱼生产大国, 淡水鱼产量占世界总产量的60%以上。近年来我国淡水鱼产业发展迅速, 水产品产量逐年递增, 《2021中国渔业统计年鉴》统计数据显示, 2020年渔业总产值已达到27543.47亿元, 其中淡水捕捞产值403.94亿元, 淡水养殖产值6387.15亿元, 水产苗种产值692.74亿元。虽然我国渔业经济产值逐年增高, 但我国居民仍存在水产品消费不足的现象, 水产品摄入量远未达到膳食平衡的标准且城乡居民消费量差距过大^[5]。

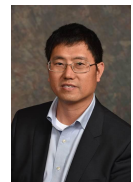
研究发现, 养殖条件及水质环境会影响淡水

收稿日期: 2022-10-03 修回日期: 2022-11-23

资助项目: 上海市科技兴农技术创新项目 [沪农科创字(2021)第3-1号]

通信作者: 赵勇(照片), 从事食品安全研究, E-mail: yzhao@shou.edu.cn;

刘海泉, 从事食品微生物研究, E-mail: hqliu@shou.edu.cn



养殖水产品的异味, 构成水产品风味的物质种类繁多, 往往是多种挥发性物质共同作用的结果, 其中土臭素 (geosmin, GSM) 和 2-甲基异莰醇 (2-methylisoborneol, MIB) 是导致土腥味的物质, 它们是由水体中一些藻类代谢产生的环醇类物质造成的^[6]。以土臭素为代表的异味物质会影响水产品的品质, 对水产品的消费产生大量负面影响, 导致其食用价值和经济价值降低, 制约水产品养殖行业的发展。

1 水产品中土腥味的来源

1.1 土腥味的产生

水产品中普遍存在着腥味和异味等特殊气味, 其中土腥味是淡水鱼中常见的一种异味。对淡水鱼气味产生影响的化合物主要有醛类、酮类、醇类、萜烯衍生物、烃类以及少量的呋喃、硫醚、萜类等^[7]。鱼腥味是鱼类固有的气味, 不同鱼类气味特征有所差异, 形成原因主要是氧化三甲胺的分解、脂肪酸的氧化分解, 以及其他一些酶促反应等^[8-10]。淡水鱼中的异味是多种气味的总称, 产生途径通常是异味物质在生物中的积累作用。以蓝藻为主的浮游植物和某些放线菌产生的土臭素和 MIB 是造成土腥味的主要原因^[11-13]。水中土臭素通常与 MIB 共同存在, MIB 具有浑浊的泥土味, 土臭素的味道则更像一种发霉的气味, 二者的含量在不同种群之间存在很大差异, 会影响淡水鱼的品质^[14-15]。由于水体污染和富营养化现象加剧, 导致水体土腥味现象愈加频繁和严重, 从而影响着渔业的发展。正常情况下水产品会吸收和富集养殖环境中的土臭素和 MIB, 导致土腥味的产生, 通过检测, 淡水鱼体内土臭素的含量比 MIB 更高、更普遍, 因此, 土臭素对土腥味的的影响要高于 MIB^[16]。淡水鱼的气味是不同气味的组合及其协同作用的结果, 土臭素是造成土腥味的主要化合物, 在较低浓度下便会破坏鱼类的感官品质^[17], 详见表 1。

土腥味的形成比较复杂, 在不同水产品或同一种水产品不同部位的分布均有所不同, 土臭素有主要 2 种途径进入鱼体内。一种方式是直接吸收环境中的土臭素, 当藻类产生土臭素并释放到养殖水体中时, 土臭素被鱼的鳃、皮肤等器官吸收, 再进入到富含脂质的鱼肉组织内^[28]。另一种方式是间接捕食产生土臭素的动植物, 通过鱼类

摄食藻类等物质进入到体内, 该过程中土臭素等异味物质会先进入内脏, 再进入鱼肉组织, 因此鱼肉含有的异味物质低于鱼皮和内脏^[29] (图 1)。由于土腥味与鱼类脂肪有很强的相关性, 在皮下含脂丰富的组织中土腥味最为明显, 因此鱼体“腹部”土腥味较重, “尾部”与“鳍部”土腥味较低^[30]。鱼类肠道黏膜层和消化液中含有蓝藻 (Cyanobacteria)、放线菌 (Actinomycetota) 等可大量产生土臭素的微生物, 在消化蓝藻和其他浮游植物的过程中, 肠道系统中的酶和胃部较低的 pH 值可能促进了细胞内土臭素的分解和释放^[31]。Lukassen 等^[31]还发现水体、食糜、鱼类肠道、皮肤中产土臭素细菌的组成比例高度相似, 产土臭素细菌最多的部位是食糜, 其次是肠道黏膜和背鳍。肠道黏膜内细菌产生的土臭素如果全部被鱼吸收, 能够占鱼体内土臭素含量的 26.8%~47.6%。鱼的肠道黏膜层和消化液存在着异味, 表明鱼类消化吸收产土臭素的蓝藻、放线菌会导致土臭素在鱼肉中的积累, 同时肠道内产生的部分土臭素会随着鱼类的代谢活动排出体外^[32]。近年来研究证明, 水产品肠道吸收土臭素是导致土腥味产生的重要原因之一, 但目前水产品主要以哪种方式吸收富集土臭素还未明确, 因此在未来研究中土腥味形成机理仍需深入研究。

1.2 影响土臭素产生的因素

土腥味物质具有亲脂性, 易被鱼的体表吸收, 且土臭素能够通过体液循环, 从皮肤、消化道积累到皮下脂肪组织中, 由于个体体内的酶体系和脂肪组成不同, 土臭素含量存在差异, 根据鱼类脂肪含量的不同, 可以推测出淡水鱼体内土臭素的含量与养殖季节、运动量、饵料营养等因素有关^[33-34]。有研究表明, 鱼类的代谢活动、鱼类脂质的含量与季节有关, 土臭素的含量随之受到影响^[35]。藻类等产生土臭素是由于其存在编码土臭素合成酶的单一基因, 产土臭素的藻类对较低温度 (<20 °C) 有较好的适应能力, 对强光敏感, 藻类产生土臭素的含量与生物量的比值随光照强度变化, 二者具有很好的相关性^[34, 36]。当放线菌与蓝藻一起培养时, 放线菌会产生更多的土臭素^[37]。土臭素的浓度与水温 and 气温呈负相关, 水中土臭素浓度冬季明显高于夏季, 且冬季原水浓度高于《渔业水质标准》(GB 5749—2006)^[38], 因此富营养化是影响淡水中味道和气味合成的最重要因素,

表 1 影响鱼肉气味的主要化合物

Tab. 1 Main compounds affecting the odor of fish

气味类别 odor category	化合物名称 compound name	化学结构式 chemical structural formula	产生原因 cause	气味阈值/($\mu\text{g}/\text{kg}$) threshold value	参考文献 references
鱼腥味 fish odour	己醛 hexanal		亚油酸氧化	4.50	[18-20]
	庚醛 heptanal		多不饱和脂肪酸氧化	2.80	[19-21]
	辛醛 octanal		油酸、亚油酸氧化	0.59	[19-20]
	壬醛 nonanal		氨基酸代谢	1.10	[18, 22]
	4-庚烯醛 (Z)-4-heptenal		油酸、亚油酸氧化	4.20	[23]
	(E,E)-2,4-庚二烯醛 (E,E)-2,4-heptadienal		油酸、亚油酸氧化	15.40	[19, 22]
	(E,E)-2,4-癸二烯醛 (E,E)-2,4-decadienal		油酸、亚油酸氧化	0.07	[23]
	2,3-丁二酮 2,3-butanedione		脂质氧化、氨基酸代谢	0.06	[23]
	1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol		多不饱和脂肪酸氧化	1.50	[18]
	土腥味 earthy odor	土臭素 geosmin		藻类和微生物的代谢产物	0.03
2-甲基异茨醇 2-methylisoborneol			藻类和微生物的代谢产物	0.01	[18, 24-25]
其他异味 abnormal flavour	2-异丙基-3-甲基吡嗪 2-isobutyl-3-methoxypyrazine		微生物副产物	0.002	[24, 26]
	2-乙基呋喃 2-ethylfuran		亚油酸氧化	2.30	[22, 27]
	吲哚 1H-idole		氨基酸脱羧后, 进一步分解	0.03	[23]

而非温度^[39]。水体富营养化程度与土腥味产生存在正相关性, 鱼体在生长过程中会积累养殖环境中的藻类或细菌所产生的代谢废物^[40]。

Saadoun 等^[41]与 Oh 等^[42]指出水生环境中的磷和氮的存在是导致蓝藻产生土腥味的主要因素, 其中土臭素的生产更依赖于磷。由酶引起的脂质降解和类胡萝卜素转化也能导致异味物质产生。另外, 鱼在形成腥味的同时还形成了苦味肽, 进一步导致味苦。将鱼置于含土臭素的水箱中, 随着时间的推移, 鱼体内土臭素浓度增加, 水中土臭素浓度减少^[43]。因此土腥味的形成与外部环境相关, 养殖环境的水质条件能够间接影响鱼体内异味物质的形成。

1.3 土臭素的检测方法

土臭素的检测方法主要分为感官分析法和仪器分析法。感官评价具有直接、简便等优点, 是早期评价水产品土腥味的主要方法。感官分析法通常由数名经过专业训练的感官评定员对水产品异味常见指标进行打分, 但该方法主观性较强, 难以准确划分异味类型, 具有局限性^[44]。随着科学技术的发展, 更多先进仪器的应用促进了检测技术的发展, 与感官分析法相比仪器分析更加快速、准确。在仪器分析中, 土臭素的检测通常是通过前处理提取和富集异味物质, 再用气相色谱质谱联用进行测定。不同提取和富集异味物质的前处理方法对土臭素的检测效果有着明显影响,

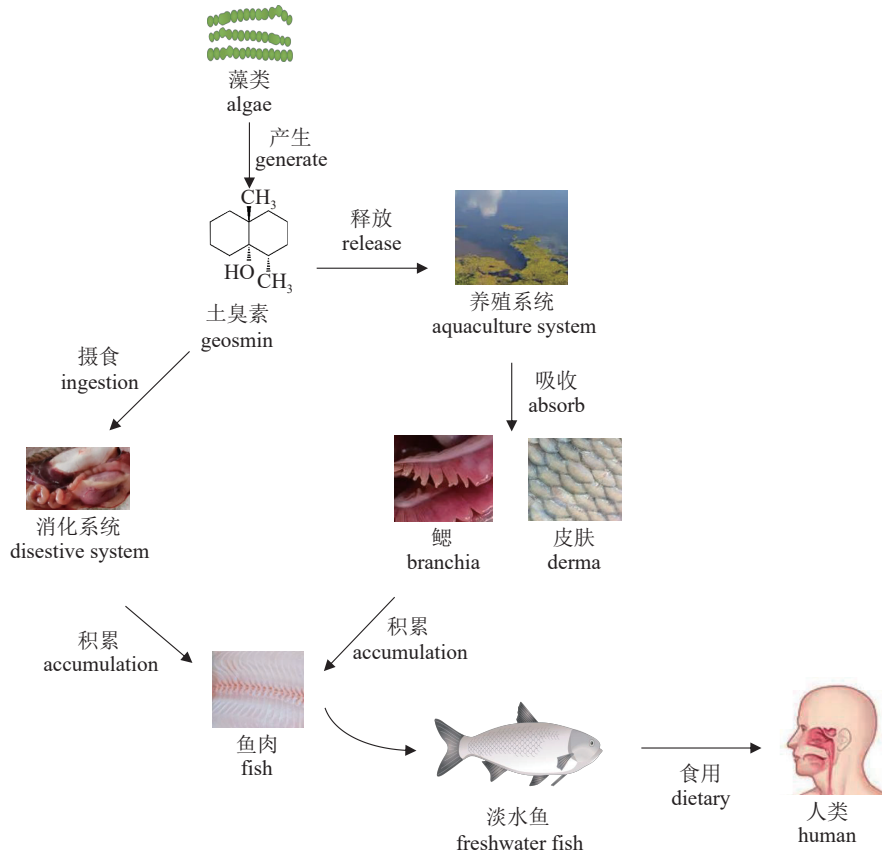


图1 土臭素进入鱼体的两种途径

Fig. 1 Two ways for geosmin to enter fish body

常见的前处理方法：液-液萃取法 (LLD)、固相微萃取法 (SPME)、微波蒸馏提取法 (MAD-SE) 和吹扫捕集法 (PT) 等。

目前，固相微萃取-气相色谱质谱联用法被广泛应用于检测水产品中的土腥味物质。固相微萃取具有灵敏、快速、简便等优点，能较好地检测水产品土腥味物质^[45]。由于鱼肉中土腥味一般痕量存在，在测定过程中一般需要提取富集。微波蒸馏法是一种常用的前处理方法，能够充分且快速地提取鱼体内的土腥味化合物，近年来广泛应用于水产品中土臭素和 MIB 的检测。Schrader 等^[46]优化微波蒸馏参数，测定了循环水养殖系统中大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 和白鲟 (*Psephurus gladius*) 的土臭素与 MIB 含量，检测限均达到 0.001 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。王国超等^[47]通过微波蒸馏-固相微萃取-气相色谱质谱联用方法测定罗非鱼肉中的土腥味物质，测得罗非鱼肉中土臭素和 2-甲基异莰醇的含量分别为 4.97、1.21 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，回收率分别为 42.7%、61.9%。薛勇等^[48]通过微波蒸馏前处理测得鳙鱼肉中土味素平均含量为 5.4 $\mu\text{g}/\text{L}$ ，测定方法

的加标回收率为 57%。微波蒸馏-固相微萃取-气相色谱质谱联用法能够有效检测土腥味物质，但该方法成本较高，仪器运行不稳定，检测方法仍需完善。

2 水产品中土臭素的控制

2.1 养殖过程中土腥味的防控

国内淡水养殖渔业仍然是一个高度多样化的行业，通常在池塘、湖泊和沿海水域设置网箱进行养殖^[49]。循环水养殖系统 (RAS) 是一种复杂的用于养殖鱼类的多室系统 (图 2)，可以通过浓缩未食用的饲料和鱼类排泄物，从而保持水质的优质，更好地控制硝化过程，增加产量，提高系统管理者的盈利能力，而养殖过程中土臭素的积累仍是需要解决的问题^[50]。在鱼类密度较高的养殖系统中，排泄出的土臭素会在水中积累，并且可能被重新吸收，及时更换净化池的水对鱼类体内土臭素的清除有显著影响，因此加强净化池的水体交换率是一种有效的方式^[51]。但 RAS 对生产系统的营养

状态存在着一些负面影响, 如导致水温升高和有机负荷增加, 可能会导致浮游植物群落结构的改变。夏季养殖系统中总悬浮物和营养物浓度的增加使浮游植物群落从硅藻转变为蓝藻, 从而导致

土臭素含量上升^[52]。近年来, 利用好氧异养菌在混合悬浮条件下将鱼类废物中的无机氮转化为微型物质已被深入研究。该方法是通过接种细菌, 重复利用鱼粪中的氮, 去除培养水中的土臭素。

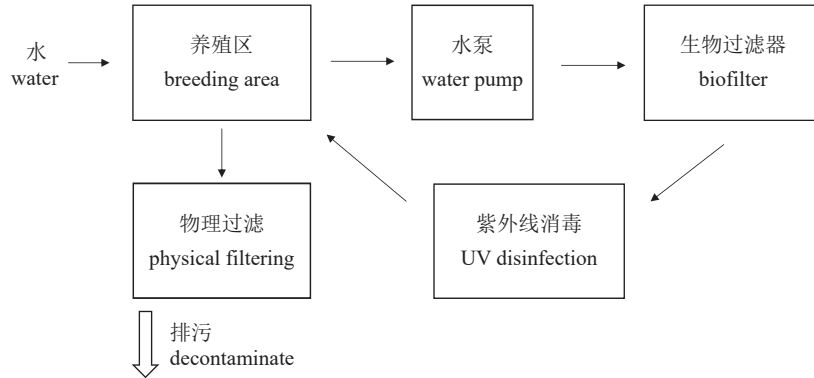


图 2 循环水养殖系统示意图

Fig. 2 Diagram of recirculating aquaculture system

除了循环水养殖系统以外, 人工湿地养殖系统也是一种非常有潜力的养殖系统。人工湿地可以通过管理蓝藻水华, 调整浮游植物群落的分类组成, 并将池塘水保持在相对较低的营养状态来控制池水中土臭素的浓度, 是解决水产养殖中异味问题的一种有效方法^[53]。因此, 良好的养殖环境对水产品的质量安全尤为重要, 在养殖、销售过程中仍需加强对水产品的监控, 保障水产品品质安全。

2.2 流水暂养对水产品土腥味的影响

我国居民主要摄入的水产品有鲜活水产品和冷冻品、半成品及熟制干制品等。由于消费习惯等原因, 我国淡水鱼以生鲜形式销售为主, 为了改良鱼肉品质和风味, 降低土腥味的影响, 上市之前会对鱼进行 7~15 d 的禁食暂养^[54-55]。土臭素在鱼体中的存在形式是动态的、可逆的, 并且可以通过鳃自由地在鱼和水之间扩散。一些养殖产业利用这一机制, 在收获前将鱼置于不含土臭素的水中, 进行禁食暂养, 对鱼进行净化处理, 直到鱼体内土臭素浓度降至低于其感官检测限^[56]。据 Jia 等^[57] 研究, 有些水产品短期养殖过程中脂肪、酶等含量的变化受饲养方式及性别的影响。净化时间主要取决于鱼体组织中土臭素的浓度, 这与鱼的脂肪含量高度相关, 净化过程中鱼类的代谢活动也可能影响净化所需的时间。在饲料中添加酵母能显著降低鱼体肝脏中的脂肪含量、肝糖原含量和肝胰腺体细胞指数, 保护肝脏和肠

道内稳态, 增强抗氧化能力^[58]。由于鱼类的代谢活动, 养殖水体中土臭素的增加可能源于鱼的释放, 并且淡水鱼中土臭素含量与鱼体的大小呈正相关^[59]。将鱼体内的土臭素含量降到感官阈值以下所需的天数以及净化率与鱼类种类、初始土臭素浓度和水中土臭素的含量有关^[60]。多数研究表明, 鱼体内土臭素的去除大多需要 7~15 d。从养殖场净化鱼类体内的土臭素, 能够有效地将鱼肉中的土臭素含量降至大多数消费者接受的阈值以下的水平, 并提高鱼的整体感官质量。

至今, 销售前将鱼移至清洁无异味的清水中暂养一段时间来清除异味仍然是水产养殖中唯一可靠的消除异味的方法。然而暂养过程会耗费大量洁净水资源, 同时费时费力, 水资源缺乏的地区难以实施^[61]。综上所述, 人们仍在寻找低成本的替代技术, 以期防止或去除异味化合物。

2.3 加工过程中常用的去腥方式

鱼类的营养价值丰富, 除作为生鲜出售外还多用于食品加工。为了除去土腥味, 提升淡水鱼产品的品质, 加工过程中常采用各种脱腥方式(表 2)。工业上应用脱腥的方法很多, 主要有物理脱腥方法、化学脱腥方法和生物脱腥方法 3 大类^[69-70]。土臭素结构类似于生物可降解的脂环醇和酮, 可通过与环己醇类似的途径被生物降解, 因此使用生物过滤工艺除去这些异味化合物是一种具有潜力的方式^[68]。土臭素在水中难以去除, Xie 等^[65] 使用紫外线/过硫酸盐工艺降解土臭素,

分析发现, pH 值对土臭素的降解虽然没有直接影响, 但由于磷酸氢和磷酸二氢的清除作用不同, 在磷酸盐缓冲液的作用下, 土臭素在酸性条件下降解更快。在水中, 臭氧 (O₃) 可以通过直接或间接地与氢氧根离子 (OH⁻) 相互作用生成羟基自由基 (OH[•]) 来氧化土臭素, 但其去除鱼肉中异味化合物的效果有限^[66-67]。Liu 等^[67] 发明了 electro-peroxone (E-peroxone) 水处理技术, 并与常规臭氧氧

化对比, 验证了 E-peroxone 水处理技术能够提高土臭素的去除率。粉末活性炭等吸附剂可吸附引起味道和气味的化合物和其他污染物, 然后通过沉淀或过滤将其与活性炭一起去除, 因此, 使用吸附剂也是去除土臭素及其他可吸附化合物的一种重要方式^[69-71]。超声波处理也是一种潜在的处理工艺, 高频超声 (850 kHz) 能够显著降低异味化合物的含量^[61]。

表 2 淡水鱼加工中土臭素的去除方法

Tab. 2 Removal of geosmin from freshwater fish

方法 method	原理 principle	优点 advantages	缺点 disadvantages	参考文献 reference	
改善养殖环境 improving the aquaculture environment	禁食暂养	将鱼体内的土臭素排泄到水中	提高水产品感官品质	成本高、耗时长	[56, 60]
后期脱腥处理 post treatment to remove fishy odor	吸附法	微孔或纳米孔结构的吸附作用	成本低、操作简单	只作用于鱼体表面	[62-63]
	超声波处理	空化效应、诱导热解	稳定、高频超声(850 kHz)能够有效去除土腥物质	耗能高	[61]
	酸碱处理法	酸变性或碱变性	碱法效果较好, 能够除去大部分土腥味	对鱼肉蛋白产生影响	[64]
	高级氧化技术	氧化降解	净化时间短	对鱼类可能有害	[65-66]
	臭氧处理	氧化作用	安全性高	降低鱼肉中异味化合物效果有限	[67]
微生物法	对土臭素进行降解	安全性高、操作简单	机理不够明确, 降解速率研究有限	[68]	

如今, 水产品异味去除有诸多方法可供选择, 各类脱腥技术各具优缺点。单一去腥技术往往难以实现高效的异味脱除, 需要多种技术结合, 但目前复合去腥技术研究不够完善, 仍需更加深入的调查和研究。

3 展望

随着居民生活水平的不断提升, 消费观念正在从“吃得饱”向“吃得好”、“吃得更健康”转变, 消费者对水产品的品质要求愈发严格。大多数的去腥方式会对肉质造成影响, 破坏鱼肉蛋白, 引起风味和色泽的改变, 去腥方式的选择对淡水鱼品质有着重要的影响。养殖水产品中土腥味等异味物质的改善, 主要通过养殖环节减控措施、流通暂养环节吊水暂养措施、加工消费环节改良措施等方面对水产品品质进行提升。

未来水产品养殖仍需围绕池塘生态调控养殖技术, 开展养殖系统中饲料等投入物质及其浮游植物、沉积物和微生物等影响土腥味异味物质的研究, 控制土臭素、2-甲基异莰醇等关键土腥味、异味物质产生。在流通过程中可通过吊水暂养技

术, 结合多营养级混养技术、内循环生态净化技术以及智能监控手段, 进一步降低或消除土腥味等异味物质, 提升水产品品质。同时, 加工消费过程中需要加强水产品增效提质研究, 建立智能化设备、质量标准, 通过加工工艺开发完善营养因子、开发典型预制调理水产品, 并实现废弃物生态循环利用。因此, 需要把握水产品“养殖-流通-加工”各方面特点, 深化土臭素等异味物质的研究, 做到科学去除土腥味等异味物质。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Djuricic I D, Mazic S D, Kotur-stevuljevic J M, *et al.* Long-chain n-3 polyunsaturated fatty acid dietary recommendations are moderately efficient in optimizing their status in healthy middle-aged subjects with low fish consumption: a cross-over study[J]. *Nutrition Research*, 2014, 34(3): 210-218.
- [2] Djuricic I, Calder P C. Beneficial outcomes of omega-6 and omega-3 polyunsaturated fatty acids on human

- health: an update for 2021[J]. *Nutrients*, 2021, 13(7): 2421.
- [3] 赵明军, 孙慧武, 王宇光, 等. 基于居民营养需求的中长期水产品供给与消费研究 [J]. *中国渔业经济*, 2019, 37(6): 1-14.
Zhao M J, Sun H W, Wang Y G, *et al.* Study on the supply and consumption of aquatic products in the medium and long term based on the national nutrition demand[J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2019, 37(6): 1-14 (in Chinese).
- [4] 万鹏, 赵竣威, 朱明, 等. 基于改进 Res Net50 模型的大宗淡水鱼种类识别方法 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 159-168.
Wan P, Zhao J W, Zhu M, *et al.* Freshwater fish species identification method based on improved Res Net50 model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12): 159-168 (in Chinese).
- [5] 王宇光, 赵明军, 赵蕾. 居民膳食平衡目标下我国水产品消费研究 [J]. *中国水产*, 2021(10): 48-50.
Wang Y G, Zhao M J, Zhao L. Study on aquatic product consumption in China under the target of balanced diet[J]. *China Fisheries*, 2021(10): 48-50 (in Chinese).
- [6] Liu Y, Huang Y Z, Wang Z M, *et al.* Recent advances in fishy odour in aquatic fish products, from formation to control[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2021, 56(10): 4959-4969.
- [7] Lu Q, Liu F F, Bao J Q. Volatile components of American silver carp analyzed by electronic nose and MMSE-GC-MS-O[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, 43(11): e13006.
- [8] 董婧琪, 王圆圆, 闫保国, 等. 水产品腥味物质形成机理与脱腥技术研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(5): 189-194.
Dong J Q, Wang Y Y, Yan B G, *et al.* Progress in research on the formation mechanism of and deodorization technology for fishy substances in aquatic products[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(5): 189-194 (in Chinese).
- [9] 洪伟, 周春霞, 洪鹏志, 等. 水产品腥味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).
- [10] 张晶晶, 梁萍, 施文正, 等. 不同冷藏期鲳鱼及草鱼气味变化分析 [J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 31-36.
Zhang J J, Liang P, Shi W Z, *et al.* Changes in volatile compounds of pomfret and grass carp during different storage periods[J]. *Food Science*, 2016, 37(20): 31-36 (in Chinese).
- [11] Suurnäkki S, Gomez-Saez G V, Rantala-Ylinen A, *et al.* Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds[J]. *Water Research*, 2015, 68: 56-66.
- [12] 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.
- [13] Mustapha S, Tijani J O, Ndamitso M M, *et al.* A critical review on geosmin and 2-methylisoborneol in water: sources, effects, detection, and removal techniques[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(4): 204.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Guo Q Y, Yu J W, Zhao Y Y, *et al.* Identification of fishy odor causing compounds produced by *Ochromonas* sp. and *Cryptomonas ovate* with gas chromatography-olfactometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 671: 149-156.
- [18] Phetsang H, Panpipat W, Panya A, *et al.* Occurrence and development of off-odor compounds in farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*)

- muscle during refrigerated storage: chemical and volatile analysis[J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1841.
- [19] Chen D K, Chen X, Chen H, *et al.* Identification of odor volatile compounds and deodorization of *Paphia undulata* enzymatic hydrolysate[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2016, 15(6): 1101-1110.
- [20] 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 and Technology*, 2022, 57(1): 310-322.
- [21] Guan W L, Ren X C, Li Y J, *et al.* The beneficial effects of grape seed, sage and oregano extracts on the quality and volatile flavor component of hairtail fish balls during cold storage at 4 °C[J]. *LWT*, 2019, 101: 25-31.
- [22] Zhou X X, Chong Y Q, Ding Y T, *et al.* Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, e-nose and sensory evaluation[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 205-213.
- [23] Mahmoud M A A, Buettner A. Characterisation of aroma-active and off-odour compounds in German rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Part II: case of fish meat and skin from earthen-ponds farming[J]. *Food Chemistry*, 2017, 232: 841-849.
- [24] Kaziur W, Salemi A, Jochmann M A, *et al.* Automated determination of picogram-per-liter level of water taste and odor compounds using solid-phase microextraction arrow coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2019, 411(12): 2653-2662.
- [25] Tian L L, Han F, Fodjo E K, *et al.* An effective and efficient sample preparation method for 2-methyl-isoborneol and geosmin in fish and their analysis by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2021, 2021: 9980212.
- [26] Jové P, Pareras A, De Nadal R, *et al.* Development and optimization of a quantitative analysis of main odorants causing off flavours in cork stoppers using headspace solid-phase microextraction gas chromatography tandem mass spectrometry[J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2021, 56(5): e4728.
- [27] Giri A, Osako K, Ohshima T. Identification and characterisation of headspace volatiles of fish *miso*, a Japanese fish meat based fermented paste, with special emphasis on effect of fish species and meat washing[J]. *Food Chemistry*, 2010, 120(2): 621-631.
- [28] 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.
- [29] 王国超, 李来好, 郝淑贤, 等. 水产品腥味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).
- [30] Percival S, Drabsch P, Glencross B. Determining factors affecting muddy-flavour taint in farmed barramundi, *Lates calcarifer*[J]. *Aquaculture*, 2008, 284(1-4): 136-143.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Wu A J, Wang Y D, Friese K, *et al.* Spatial and seasonal distribution of 2-methylisoborneol in a large eutrophic shallow lake, China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2021, 232(9): 387.
- [34] Shen Q Y, Wang Q, Miao H C, *et al.* Temperature affects growth, geosmin/2-methylisoborneol production, and gene expression in two cyanobacterial species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(8): 12017-12026.
- [35] Bušová M, Kouřimská L, Tuček M. Fatty acids profile, atherogenic and thrombogenic indices in freshwater fish common carp (*Cyprinus carpio*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) from market chain[J]. *Central European Journal of Public Health*, 2020, 28(4): 313-319.
- [36] Wang Z J, Li R H. Effects of light and temperature on

- the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucraïnica* (cyanobacteria)[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, 58: 219-226.
- [37] Liato V, Aïder M. Geosmin as a source of the earthy-musty smell in fruits, vegetables and water: origins, impact on foods and water, and review of the removing techniques[J]. *Chemosphere*, 2017, 181: 9-18.
- [38] 国家环境保护局. 渔业水质标准: GB 11607—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.
- Environmental Protection Agency. Water quality standard for fisheries: GB 11607-1989 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1990 (in Chinese).
- [39] Wang R, Li D, Jin C X, *et al.* Seasonal occurrence and species specificity of fishy and musty odor in Huajiang Reservoir in winter, China[J]. *Water Resources and Industry*, 2015, 11: 13-26.
- [40] 王宾, 胡凯, 齐茜, 等. 活体鱼土腥味物质及去除研究进展 [J]. 现代农业研究, 2021, 27(2): 129-130.
- Wang B, Hu K, Qi Q, *et al.* Research progress of living fish odour substances and removal[J]. *Modern Agriculture Research*, 2021, 27(2): 129-130 (in Chinese).
- [41] 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.
- [42] Oh H S, Lee C S, Srivastava A, *et al.* Effects of environmental factors on cyanobacterial production of odorous compounds: geosmin and 2-methylisoborneol[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2017, 27(7): 1316-1323.
- [43] 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.
- [44] 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).
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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).
- [48] 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).
- [49] Cao L, Naylor R, Henriksson P, *et al.* China's aquaculture and the world's wild fisheries[J]. *Science*, 2015, 347(6218): 133-135.
- [50] 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.
- [51] Schram E, Kwadijk C, Blom E, *et al.* Interactive effects of temperature and water exchange of depuration tanks on geosmin excretion by Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 535: 736358.
- [52] Robin J, Cravedi J P, Hillenweck A, *et al.* Off flavor characterization and origin in French trout farming[J]. *Aquaculture*, 2006, 260(1-4): 128-138.
- [53] Zhong F, Gao Y N, Yu T, *et al.* The management of undesirable cyanobacteria blooms in channel catfish ponds using a constructed wetland: contribution to the control of off-flavor occurrences[J]. *Water Research*, 2011, 45(19): 6479-6488.
- [54] 鈕晓艳, 李湃, 李海蓝, 等. 加州鲈禁食暂养过程中肌肉水分与质构特性相关性分析 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 45-50.

- Zu X Y, Li P, Li H L, *et al.* Correlation analysis between moisture and texture in muscles of *Micropterus salmoides* during fasting temporary cultivation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(13): 45-50 (in Chinese).
- [55] Day R D, Tibbetts I R, Secor S M. Physiological responses to short-term fasting among herbivorous, omnivorous, and carnivorous fishes[J]. *Journal of Comparative Physiology B: Biochemical, Systems, and Environmental Physiology*, 2014, 184(4): 497-512.
- [56] Schram E, Kwadijk C, Hofman A, *et al.* Effect of feeding during off-flavour depuration on geosmin excretion by Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 531: 735883.
- [57] Jia Y D, Wang Z Y, Li M Y, *et al.* Altered hepatic glycolysis, lipogenesis, and blood biochemistry of tiger puffer (*Takifugu rubripes*) under two different culture systems[J]. *Aquaculture*, 2020, 528: 735532.
- [58] Feng Z D, Zhong Y F, He G L, *et al.* Yeast culture improved the growth performance, liver function, intestinal barrier and microbiota of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed high-starch diet[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022, 120: 706-715.
- [59] 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.
- [60] Podduturi R, Petersen M A, Vestergaard M, *et al.* Case study on depuration of RAS-produced pikeperch (*Sander lucioperca*) for removal of geosmin and other volatile organic compounds (VOCs) and its impact on sensory quality[J]. *Aquaculture*, 2021, 530: 735754.
- [61] Nam-Koong H, Schroeder J P, Petrick G, *et al.* Removal of the off-flavor compounds geosmin and 2-methyl-isoborneol from recirculating aquaculture system water by ultrasonically induced cavitation[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 70: 73-80.
- [62] Wee L H, Janssens N, Vercammen J, *et al.* Stable TiO₂-USY zeolite composite coatings for efficient adsorptive and photocatalytic elimination of geosmin from water[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(5): 2258-2264.
- [63] Ghasemi Z, Sourinejad I, Kazemian H, *et al.* Application of zeolites in aquaculture industry: a review[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(1): 75-95.
- [64] Yarnpakdee S, Benjakul S, Penjamras P, *et al.* Chemical compositions and muddy flavour/odour of protein hydrolysate from Nile tilapia and broadhead catfish mince and protein isolate[J]. *Food Chemistry*, 2014, 142: 210-216.
- [65] Xie P C, Ma J, Liu W, *et al.* Removal of 2-MIB and geosmin using UV/persulfate: contributions of hydroxyl and sulfate radicals[J]. *Water Research*, 2015, 69: 223-233.
- [66] Zhang T, Xue Y, Li Z J, *et al.* Effects of ozone on the removal of geosmin and the physicochemical properties of fish meat from bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 16-23.
- [67] Liu C K, Li W X, Lin B Y, *et al.* Effects of ozone water rinsing on protein oxidation, color, and aroma characteristics of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(10): e15811.
- [68] Podduturi R, Petersen M A, Vestergaard M, *et al.* Geosmin fluctuations and potential hotspots for elevated levels in recirculated aquaculture system (RAS): a case study from pikeperch (*Sizostedion lucioperca*) production in Denmark[J]. *Aquaculture*, 2020, 514: 734501.
- [69] 伍瑞祥, 吴涛. 淡水鱼土腥味物质及脱腥技术研究进展 [J]. 长江大学学报 (自然科学版), 2011, 8(10): 253-256.
- Wu R X, Wu T. Research progress of freshwater fish earthy substances and deodorization technology[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2011, 8(10): 253-256 (in Chinese).
- [70] 胡苑, 施文正, 卢瑛. 鱼类腥味脱除技术研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 282-287.
- Hu Y, Shi W Z, Lu Y. Recent advances on deodorization technology of fishy odors[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(5): 282-287 (in Chinese).
- [71] Yao W K, Qu Q Y, Von Gunten U, *et al.* Comparison of methylisoborneol and geosmin abatement in surface water by conventional ozonation and an electro-peroxone process[J]. *Water Research*, 2017, 108: 373-382.

Research progress of analysis and control strategy of geosmin affecting the quality of freshwater fish

ZHAO Yong^{1,2,3*}, WANG Tianyi¹, LI Kang⁴, PAN Yingjie^{1,2,3}, LIU Haiquan^{1,2,3*}

(1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic-Product Processing & Preservation, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Product on Storage and Preservation (Shanghai), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

4. National Demonstration Center for Experimental Teaching of Aquatic Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aquatic products are delicious and nutritious, and are an important source of food protein for human intake. However, the distinct odor represented by the fishy smell in freshwater aquaculture often occurs, which not only affects the flavor of aquatic products, but also reduces the consumer's willingness to consume them and restricts the stable development of the aquaculture industry. The scientific control and prevention of earthy odor in aquatic products is an important means to ensure the quality of aquatic products, which is important for meeting the needs of the industry and still needs to be studied in depth. This paper reviews the special odor in aquatic products with earthy odor as a typical representative, and discusses the mechanism of odor substances in aquatic products causing odors like the earth odor. It is now generally accepted that water quality conditions in the aquaculture environment indirectly affect the formation of odor substances, and various water quality indicators have a significant impact on the fishy odor of aquatic products. Most removal methods affect meat quality, destroy the protein of aquatic products, and cause changes in flavor and color. By improving the culture environment and reducing 2-Methylisoborneol (MIB) and geosmin (GSM) in aquatic products, the production of earth odor can be reduced at the source, which is one of the main methods to control earth odor in aquatic products, but this method is often costly. Therefore, in order to improve the economic efficiency of aquatic products, to solve the problem of fishy smell in freshwater farmed aquatic products, it is necessary to address the characteristics of various aspects of aquatic products breeding, distribution and processing, and make comprehensive use of various deodorization methods to achieve the deodorization effect.

Key words: freshwater fish; earthy odor; geosmin; control measures

Corresponding authors: ZHAO Yong. E-mail: yzhao@shou.edu.cn;

LIU Haiquan. E-mail: hqliu@shou.edu.cn

Funding projects: Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China (2021-3-1)