

邹剑敏, 卢 奇, 桂 源, 等. 养殖水体及水产品中土臭素、二甲基异莰醇的变化特征及原因初步分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 232-238.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.028

养殖水体及水产品中土臭素、二甲基异莰醇的变化特征及原因初步分析

邹剑敏^{1,2,3}, 卢 奇⁴, 桂 源⁴, 钟立强⁵, 宋 超^{1,2,3,4}, 陈家长^{1,2,3,4}

(1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 江苏 无锡 214081; 2. 农业农村部水产品质量安全环境因子风险评估实验室(无锡), 江苏 无锡 214081; 3. 农业农村部水产品质量安全控制重点实验室, 北京 100141; 4. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081; 5. 江苏省淡水水产研究所, 江苏 南京 210017)

摘要: 为了探究水产品的种类和养殖时间对养殖水体及水产品中土臭素(GSM)和二甲基异莰醇(2-MIB)的影响, 本研究以无锡地区不同种类水产品和养殖水体为研究对象, 在5-10月份对养殖水体中 GSM 和 2-MIB 的质量浓度以及收获时水产品中 GSM 和 2-MIB 的含量进行检测。结果表明, 水产品种类和养殖时间的变化会在一定程度上影响养殖水体中 GSM 和 2-MIB 的质量浓度, 在不同水产品的养殖水体中, GSM、2-MIB 质量浓度随养殖时间推移呈现出不同的变化趋势。在水产品中仅检出 GSM, 其在虾蟹类、四大家鱼和罗非鱼中的含量分别为 0.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、0.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 0.94 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 生物浓缩系数分别为 40.10、71.68、27.07, 四大家鱼富集 GSM 能力最强, 说明水产品的种类会影响水产品中 GSM 的含量。

关键词: 养殖水体; 土臭素; 二甲基异莰醇; 水产品

中图分类号: S912 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0232-07

Preliminary analysis on the variation characteristics and causes of geosmin and 2-methylisoborneol in aquaculture water and aquatic products

ZOU Jian-min^{1,2,3}, LU Qi⁴, GUI Yuan⁴, ZHONG Li-qiang⁵, SONG Chao^{1,2,3,4}, CHEN Jia-zhang^{1,2,3,4}

(1. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Science, Wuxi 214081, China; 2. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Products on Environmental Factors (Wuxi), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China; 3. Key Laboratory of Control of Quality and Safety for Aquatic Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100141, China; 4. Wuxi Fishery College of Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China; 5. Jiangsu Institute of Freshwater Fisheries, Nanjing 210017, China)

Abstract: Some aquatic species and aquaculture water were collected in Wuxi to research the interaction between odor chemicals and aquaculture species. The levels of geosmin (GSM) and 2-methylisoborneol (2-MIB) in the samples

收稿日期: 2021-05-12

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-46); 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费资助项目(2021JBFM18); 国家自然科学基金项目(32002378)

作者简介: 邹剑敏(1994-), 男, 山东诸城人, 硕士, 研究实习员, 主要从事水产品质量安全与膳食风险评估研究。(E-mail) zou-jianming@ffrc.cn

通讯作者: 陈家长, (E-mail) chenjc@ffrc.cn; 宋 超, (E-mail) songc@ffrc.cn

were quantitatively analyzed. The results showed that the variety of aquatic products and the change of aquaculture time would affect the mass concentrations of GSM and 2-MIB in aquaculture water to some extent. In the aquaculture water with different aquatic species, the mass concentrations of GSM and 2-MIB showed different trends over time. Only GSM was detected in aquatic products, the contents in shrimps and crabs, four major Chinese carps and tilapia were 0.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 0.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 0.94

$\mu\text{g/kg}$, respectively. The four major Chinese carps had the strongest ability to enrich GSM, with the bioconcentration factors (BCF) of 71.68. This ability of shrimps and crabs (40.10) was next to it, and the tilapia (27.07) was the weakest. Aquatic species can affect GSM content in aquatic products.

Key words: aquaculture water; geosmin; 2-methylisoborneol; aquatic products

淡水水产品倍受消费者喜爱,2009 年中国淡水池塘养殖总产量为 1.55×10^7 t,2018 年增至 2.21×10^7 t^[1]。随着人民生活水平的提高,水产品质量逐渐成为人们关注的焦点,淡水水产品的土腥味便是人们重视的问题之一。土腥味问题的存在,会直接影响消费者对于水产品的购买体验,给整个养殖、加工、销售产业链带来损失。水产品土腥味是由于土腥味物质在水产动物体内累积导致的,土腥味物质由多种化学物质构成,种类繁多,以土臭素(GSM)、二甲基异茨醇(2-MIB)为主^[2]。鱼类等水产品中土腥味物质主要来源于养殖水体的浮游藻类和部分放线菌^[3-6]。池塘养殖过程中,由于养殖密度过大、饵料残余过多等问题导致水体富营养化,从而引发池塘水华,以蓝藻为主的浮游藻类疯长,使得养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度升高,水体和水产品产生土腥味。在捕捞后,不合适的储存方式也会导致土腥味物质的产生^[7]。

关于养殖阶段土腥味物质在水产品中的积累,主要是水产动物自身通过鱼鳃、鱼皮吸收以及摄食藻类等过程富集水体中的土腥味物质^[8]。水产动物的种类、规格、脂肪含量^[9-10]以及养殖水体温度^[9-11]等因素均会对水产动物积累水体中的土腥味物质造成影响。其中,鱼类脂肪含量的增加有利于鱼体积累水体中的土腥味物质。有研究表明,高脂肪含量的鱼体中土腥味物质含量远高于低脂肪含量的鱼体,高脂肪含量鱼体对 2-MIB 的积累能力高出低脂肪含量鱼体 3 倍以上^[7]。此外,鱼体规格和土腥味物质积累能力也呈正相关。养殖水体温度对水产动物积累土腥味物质的影响是间接性的,主要通过作用于水产动物自身代谢影响水产动物对 GSM 和 2-MIB 的吸收与代谢^[12]。

本研究拟对无锡地区主要水产品养殖水体中土腥味物质 GSM 和 2-MIB 的质量浓度进行测定,同时使用固相微萃取结合气相色谱质谱分析仪(GC-MS)测定相应水产品中 GSM 和 2-MIB 的含量,探究养殖水体中主要土腥味物质质量浓度与养殖时间、养殖种类之间的关系,以期控制养殖水体中的土

腥味物质质量浓度,改善水产品品质以及保障食用安全奠定研究基础。

1 材料与方法

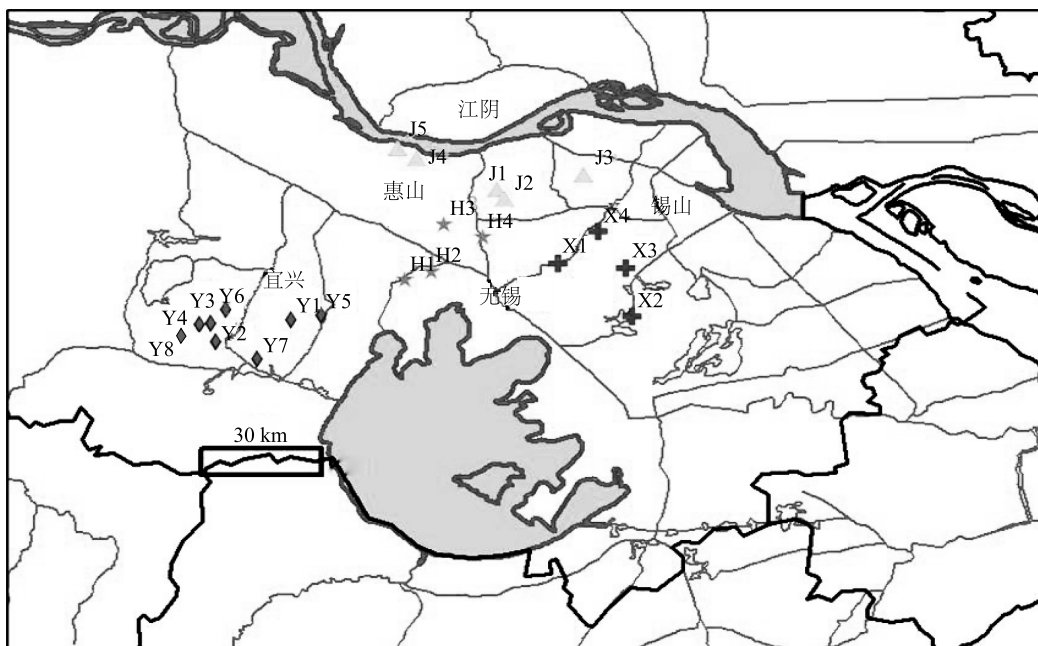
1.1 样品采集

本试验在无锡地区共设置 21 个(宜兴市 8 个、江阴市 5 个、锡山区 4 个、惠山区 4 个)养殖水体采样点,在 21 个采样点中共采集了 27 个养殖池塘的样品,具体分布情况见图 1。样品采集时间为 5 月至 10 月(5、6 月份为养殖初期,7、8 月份为养殖中期,9、10 月份为养殖后期),在采样期间每月进行一次水样采集,共计 6 次,水产品样品于 10 月份进行采集,仅采集一次。水样采集于玻璃采样瓶中,顶部不留气泡,保存在 4℃ 冷藏冰箱中,并于采样后 48 h 内完成测定。水产品采样时,为保证样品具有代表性,每种水产品均选择规格适中且达到上市要求的样品。采样后,取可食用部分用锡箔纸包裹,冷冻保存于-18℃ 冰箱中,检测前解冻并制成匀浆。

1.2 样品前处理

1.2.1 水样 参考 Zhu 等^[13]的方法,按照水盐比 5:1 的比例将 2 g 氯化钠加入待测水样中,定容到 10 ml,定容后移入顶空固相微萃取 15 ml 小瓶中,加入磁力搅拌子,放置于磁力搅拌器上,设置搅拌速度 1 200 r/min,温度控制在 60℃,萃取时间 30 min,结束后立即将萃取纤维插进气相质谱进样口进行解吸,然后进行 GC-MS 分析。

1.2.2 水产品样品 准确称取 10 g 水产品样品匀浆,置于圆底蒸馏烧瓶中,加入 10 ml 纯水并混匀。然后进行微波蒸馏,于尾部玻璃瓶中加入 200 ml 纯水,并置于冰水浴中。用微波炉进行加热,载气为氮气,控制流速为 60 ml/min,冷凝循环水温度控制在 5℃ 以下,微波功率控制在 400 W,蒸馏时间 6 min。蒸馏结束后用纯水冲洗蛇形冷凝管,达到完全收集附着在管壁上的目标物的目的。最后用 250 ml 容量瓶对终端玻璃瓶中收集的溶液进行定容。收集的溶液按材料与方法 1.2.1 中水样前处理的方法进行分析,再经换算得到水产品中 GSM 和 2-MIB 的含量。



X1、X2、X3、X4 为锡山区采样点;H1、H2、H3、H4 为惠山区采样点;J1、J2、J3、J4、J5 为江阴市采样点;Y1、Y2、Y3、Y4、Y5、Y6、Y7、Y8 为宜兴市采样点。

图 1 采样点分布图

Fig.1 Distribution map of sampling points

1.3 GC-MS 分析条件

1.3.1 色谱分析 色谱分析条件为:DB-5MS 色谱柱(30.00 m×0.25 mm×0.50 μm)。升温程序:起始温度 50 ℃,保持 1 min,以 10 ℃/min 的速率升温至 200 ℃,保持 1 min,以 20 ℃/min 的速率升温至 220 ℃,保持 1 min。进样模式为不分流,进样口温度 250 ℃,进样口压力为 52.54 kPa,总流量为 44 ml/min,载气为氦气(He)。

1.3.2 质谱分析 质谱分析条件为:电子电离源(EI),离子化能量为 70 eV,离子源温度为 230 ℃,MS 四极杆温度为 150 ℃,传输线温度为 250 ℃,溶剂延迟 5 min,扫描模式选择离子检测(表 1)。

表 1 土臭素(GSM)和二甲基异茨醇(2-MIB)的离子检测参数

Table 1 Ion detection parameters of geosmin(GSM) and 2-methylisoborneol(2-MIB)

化合物	保留时间 (min)	定性离子 (m/z)	定量离子 (m/z)
土臭素	12.303	112, 125	112
二甲基异茨醇	9.184	95, 108, 135	95

1.4 数据分析

试验所得数据通过 SPSS 23.0 软件进行单因素

ANOVA 检验,用平均值±标准差的形式表示统计结果,并进行显著性分析。图、表用 Excel 工具制作。

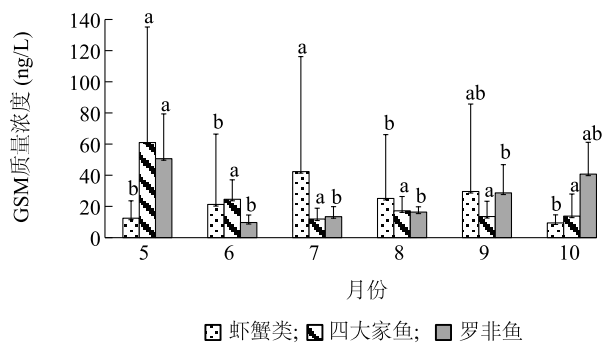
2 结果与分析

2.1 水样检测结果

将 27 个池塘根据养殖水产品种类分为 3 大类,即虾蟹类、四大家鱼[青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)、鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙鱼(*Aristichthys nobilis*)]和罗非鱼。3 种类型的养殖水体中 GSM 和 2-MIB 的质量浓度测定结果(图 2、图 3)表明,5~7 月份 3 类养殖水体中均未检出 2-MIB,而 GSM 则在整个采样期均有检出。在检出的样品中,GSM 的质量浓度为 9.45~60.99 ng/L,而 2-MIB 的质量浓度为 1.74~108.46 ng/L。

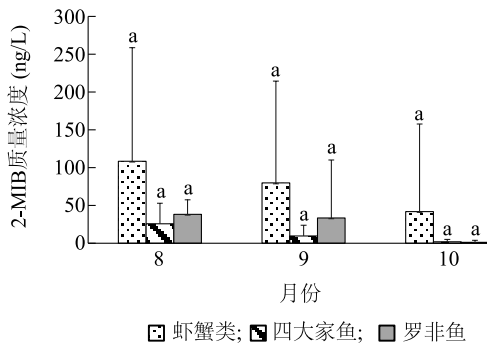
2.2 养殖水体中 GSM 质量浓度与养殖时间、养殖种类之间的关系

图 2 显示,在 5 月份到 10 月份,虾蟹类养殖水体中 GSM 质量浓度总体呈现先升高后降低的趋势,在 7 月份达到最高,GSM 质量浓度为 42.36 ng/L;在四大家鱼养殖水体中,GSM 质量浓度先降低然后保持较低水平;在罗非鱼养殖水体中,GSM 质量浓



同一养殖水体不同月份间不同小写字母表示土臭素质量浓度差异显著 ($P<0.05$)。

图2 3类养殖水体5-10月份土臭素(GSM)质量浓度的变化
Fig.2 Changes of GSM concentration in three types of aquaculture water from May to October



同一养殖水体不同月份间不同小写字母表示二甲基苄醇质量浓度差异显著 ($P<0.05$)。

图3 3类养殖水体8-10月份二甲基苄醇(2-MIB)质量浓度的变化
Fig.3 Changes of 2-MIB concentration in three types of aquaculture water from August to October

度则呈现从高到低再到高的趋势。人类能够感受到GSM土腥味的嗅觉阈值在4.00 ng/L至10.00 ng/L之间^[14],本研究所有养殖水体中GSM的质量浓度除6月份的罗非鱼(9.68 ng/L)和10月份的虾蟹类(9.45 ng/L)外,其他均高于10.00 ng/L。

对同一月份不同养殖水体中检出的GSM质量浓度进行显著性分析,发现5月份的虾蟹类和四大家鱼养殖水体中GSM质量浓度存在显著差异 ($P<0.05$),即四大家鱼养殖水体中GSM质量浓度显著高于虾蟹类养殖水体 ($P<0.05$);在7-9月份,虾蟹类养殖水体中GSM质量浓度高于四大家鱼和罗非鱼;在10月份,罗非鱼养殖水体中GSM的质量浓度高于虾蟹类和四大家鱼 ($P<0.05$)。

2.3 养殖水体中2-MIB质量浓度与养殖时间、养殖种类之间的关系

图3显示,仅在8月、9月、10月的部分池塘中检出了2-MIB,5月、6月、7月的各类养殖水体中均未检出2-MIB。根据8-10月份的检测结果,3类养殖水体中2-MIB的质量浓度均呈现逐月降低的趋势,均在8月份达到最高值;在8-10月份,虾蟹类养殖水体中2-MIB的质量浓度高于四大家鱼和罗非鱼,但对同一月份不同养殖水体中检出的2-MIB质量浓度进行显著性分析,发现三者之间却不存在显著性差异。

2.4 水产品中GSM和2-MIB的含量及其生物浓缩系数

在10月收获时,对27个采样池塘收获的水产品进行GSM、2-MIB含量检测。实际获得26份样品的检测数据,所有样品均检出GSM,但2-MIB均未检出。表2显示,罗非鱼中GSM含量高于虾蟹类和四大家鱼,含量平均值为0.94 $\mu\text{g/kg}$;人类对于水产品中GSM的嗅觉阈值为0.60 $\mu\text{g/kg}$,虾蟹类的GSM含量平均值为0.45 $\mu\text{g/kg}$,低于阈值,四大家鱼和罗非鱼中GSM含量平均值高于阈值。

根据10月份养殖水体中GSM的质量浓度和水产品中GSM的含量,计算3类水产品中GSM的生物浓缩系数。表2显示,四大家鱼对GSM的富集效果高于虾蟹类和罗非鱼,这可能是因为四大家鱼本身体积较大,与水体接触面积更大。3类水产品中并未检出2-MIB,所以3类水产品对于2-MIB的生物浓缩系数为0。说明GSM为该地区水产品中土腥味物质的主要来源。

此外,由于螃蟹独特的生理结构以及蟹黄独特的风味,本试验单独比较了蟹肉和蟹黄中GSM的含量,发现蟹黄中GSM含量平均值为0.54 $\mu\text{g/kg}$,而蟹肉中则为0.49 $\mu\text{g/kg}$,蟹黄中GSM含量略高于蟹肉,但两者均未超出人类对于水产品中GSM的嗅觉阈值。

表2 10月份水产品中GSM含量和养殖水体中GSM质量浓度
Table 2 GSM content in aquatic products and GSM mass concentration in aquaculture water in October

水产品类型	水产品中GSM含量平均值($\mu\text{g/kg}$)	养殖水体中GSM质量浓度平均值(ng/L)	生物浓缩系数
虾蟹类	0.45 \pm 0.23	9.45 \pm 5.18	40.10
四大家鱼	0.62 \pm 0.24	13.79 \pm 14.23	71.68
罗非鱼	0.94 \pm 0.10	40.78 \pm 20.39	27.07

3 讨论

3.1 养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度与养殖时间的关系

许多学者对养殖时间与养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度的关系进行了探究,并得到了一些结论。例如 Westerhoof 等^[15]对于水库的研究,发现 2-MIB 在天气炎热时有增加的趋势;周梦海等^[16]在探究罗非鱼养殖模式与养殖水体中异味物质质量浓度的关系时指出,8 月份养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度达到最高。随着养殖时间的推移,养殖水体中异味物质质量浓度会发生改变,水体中土腥味物质质量浓度变化与养殖时间变化有着一定的联系,这种联系实际上是由于季节和气候变化影响外部环境,以及养殖过程中累积的残余饵料所导致的。在一般的池塘中,随着养殖时间的增加,尤其进入夏季后,温度升高以及饵料残余等原因极易导致水质环境变差,蓝藻等浮游植物增加。Tung 等^[17]研究发现,中国台湾 Feng-Shen 水库中 2-MIB 的质量浓度与水温显著相关。此外,Uwins 等^[18]在对 Hinze 水库进行研究时,发现 GSM 的质量浓度与温度有正相关性。作为 GSM 和 2-MIB 的主要产源,蓝藻的增加必然使得养殖水体土腥味等异味加重^[19]。

3.2 养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度与养殖种类的关系

在本试验中,不同种类水产品的养殖水体中,土腥味物质 GSM 和 2-MIB 的质量浓度均存在不同程度的差异。在四大家鱼和罗非鱼养殖水体中,GSM 和 2-MIB 的质量浓度变化则随养殖时间的增加而呈现不同状态。在四大家鱼养殖水体中,GSM 质量浓度先降低然后保持较低水平;在罗非鱼养殖水体中,GSM 质量浓度整体呈现先降低后升高的状态;在四大家鱼和罗非鱼养殖水体中 2-MIB 质量浓度自 8 月份到 10 月份均呈持续下降状态。对其原因进行分析,可能是在一开始投放鱼苗前,池塘本身藻类含量处于较高水平,放入鱼苗后,以鲢鳙为主的滤食性鱼类会摄食水中的藻类^[20],从而导致水体中藻类减少,GSM 和 2-MIB 的质量浓度下降,而后随着鱼类生长,由于罗非鱼不具有四大家鱼类滤食性的特点,因此罗非鱼养殖水体中藻类仍会随养殖时间增加而增加,从而导致 GSM 质量浓度上升,而在四大家鱼养殖水体中则处于相对稳定状态。

养殖水体中的 GSM 和 2-MIB 主要由藻类等浮游生物产生,水体中藻类的数量将直接影响 GSM 和 2-MIB 的质量浓度。在养殖不同种类的水产动物时,水产动物本身会对水体中藻类造成影响。在鲢鳙为主的四大家鱼养殖水体中,当养殖鱼达到一定规模时,水体中 GSM 和 2-MIB 的质量浓度较低。虾蟹类和罗非鱼养殖水体中藻类的数量在养殖过程中受影响较小,其原因可能是虾蟹和罗非鱼主要是摄食人工投喂的饲料,不会主动摄食水体中的藻类。申玉春等^[21]在研究凡纳滨对虾的食物结构时发现,养殖结束后,其约 97.29% 的生长能量源于人工投喂饲料,藻类和浮游动物等天然饵料仅在养殖前期发挥作用。张硕等^[22]研究中国对虾后也发现,其约 61.6% 的能量源于人工配合饲料。

3.3 养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度与水产品中 GSM、2-MIB 含量之间的关系

不同水产品对 GSM 和 2-MIB 的富集能力是不同的。在养殖中期(7、8 月份),虾蟹类养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度高于四大家鱼养殖水体和罗非鱼养殖水体,7、8 月份虾蟹类养殖水体中 GSM 质量浓度平均值为 33.76 ng/L,8 月份虾蟹类养殖水体中 2-MIB 质量浓度为 108.46 ng/L,但 10 月份收获时虾蟹类水产品中异味物质含量低于四大家鱼和罗非鱼水产品。这可能是因为鱼鳃的独特性,鱼鳃是富集土腥味物质的主要部位,由于鱼鳃的特殊结构,能够增强水体中土腥味物质向鱼体血液中扩散,吸收时间极短,而清除则需要数天时间^[23]。Peter 等^[24]的研究结果证实,斑点叉尾鲟在 0.5 $\mu\text{g/L}$ 的 2-MIB 水溶液中仅需 2 h 便会出现土腥味。虾蟹类为甲壳动物,不具有鱼类的鱼鳃、鱼皮和鳞片,使得虾蟹类富集土腥味物质的能力较弱。

水产品土腥味的产生主要源于水体环境的影响,水体环境中的 GSM 和 2-MIB 等土腥味物质在水产动物体内的累积则主要通过鱼鳃、鱼皮吸收,或随摄食藻类进入鱼体,是一个被动吸收过程^[8]。水体中的 GSM 和 2-MIB 是水产品中 GSM 和 2-MIB 主要来源,所以养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度与水产品中 GSM、2-MIB 含量存在一定的相关性。在本研究中,四大家鱼拥有最高的生物浓缩系数,这意味着四大家鱼能在 GSM 质量浓度较低的养殖水体中积累更多的 GSM,这与徐立蒲等^[25]学者在研究淡水鱼池中土腥异味物质时得出的结论类似。水产品中的

GSM、2-MIB 含量变化与养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度变化不同步,这种不同步可能是由 GSM 和 2-MIB 性质决定的,GSM 和 2-MIB 能在脂肪含量丰富的组织中累积和富集,并且很难代谢出去,即使是在清水中,也需要数天乃至数十天才会出现显著降低^[26-28]。不同规格的水产品,其脂肪含量会影响土腥味物质的积累^[9-10]。此外,GSM 和 2-MIB 在水产动物体内的富集,也会导致养殖水体中 GSM、2-MIB 质量浓度的下降。

4 结 论

无锡地区虾蟹类、四大家鱼、罗非鱼的养殖水体中土腥味物质以 GSM 为主,在整个养殖周期(5-10 月份)均被检出,2-MIB 仅在 8-10 月份检出。水产品的种类和养殖时间的变化会在一定程度上影响养殖水体中 GSM 和 2-MIB 的质量浓度,在不同水产品的养殖水体中,GSM、2-MIB 质量浓度随时间推移呈现出不同的变化趋势。在收获的水产品中,本试验只检出了 GSM,虾蟹类、四大家鱼和罗非鱼中 GSM 含量分别为 0.45 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、0.62 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 0.94 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。虾蟹类、四大家鱼和罗非鱼的生物浓缩系数分别为 40.10、71.68、27.07,四大家鱼对 GSM 的富集能力最强,说明水产品的种类会影响水产品中 GSM 的含量。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.中国渔业统计年鉴 2019[M].北京:中国农业出版社,2019.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] AUFFRET M, PILPTE A, PROULX E, 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.
- [5] GUTTMAN L, RIJN J V. 2-Methylisoborneol and geosmin uptake by organic sludge derived from a recirculating aquaculture system[J]. Water Research, 2009, 43(2): 474-480.
- [6] LEE J, RAI P K, JEON Y J, et al. The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water[J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 252-262.
- [7] 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.
- [8] WHITFIELD F B. Biological origins of off-flavours in fish and crustaceans[J]. Water Science & Technology, 1999, 40(6): 265-272.
- [9] HOWGATE P. Tainting of farmed fish by geosmin and 2-methylisoborneol: a review of sensory aspects and of uptake/deposition[J]. Aquaculture, 2004, 234(1/4): 155-181.
- [10] TUCKER S C. Off-flavor problems in aquaculture[J]. Reviews in Fisheries Science, 2010, 8(1): 45-88.
- [11] 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, 2010, 27(1): 15-20.
- [12] LLOYD S W, GRIMM C C. Analysis of 2-methylisoborneol and geosmin in catfish by microwave distillation-solid-phase microextraction[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(1): 164-169.
- [13] ZHU M, AVILES F J, GONYE E D, et al. Microwave mediated distillation with solid-phase microextraction: determination of off-flavors, geosmin and methylisoborneol, in catfish tissue[J]. Journal of Chromatography A, 1999, 833(2): 223-230.
- [14] 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.
- [15] WESTERHOOF P, RODRIGUEA- HANDEZ M, BAKER L, et al. Seasonal occurrence and degradation of 2-methylisoborneol in water supply reservoirs[J]. Water Research, 2005, 39(20): 4899-4912.
- [16] 周梦海. 我国罗非鱼不同养殖模式的异味物质含量分布[D]. 上海:上海海洋大学, 2015.
- [17] TUNG S C, LIN T F, YANG F C, et al. Seasonal change and correlation with environmental parameters for 2-MIB in Feng-Shen Reservoir, Taiwan [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2008, 145(1/3): 407-416.
- [18] UWINS H K, TEASDALE P, STRATTION H. A case study investigating the occurrence of geosmin and 2-methylisoborneol (MIB) in the surface waters of the Hinze Dam, Gold Coast, Australia[J]. Water Science & Technology, 2007, 55(5): 231-238.
- [19] 唐 利. 藻类和蓝细菌产生臭味的作用机制及其控制方法[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 26-31.
- [20] 吴 锋,赵建成,陈小刚,等. 生物操纵理论在浅水湖泊治理应用中的现状与展望[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(6): 158-160.
- [21] 申玉春,齐 明,朱春华,等. 凡纳滨对虾不同生长阶段食物组成结构的研究[J]. 广东海洋大学学报, 2010, 30(1): 44-49.
- [22] 张 硕,董双林,王 芳. 人工配合饲料与天然饵料对中国对虾生长贡献的研究[J]. 中国水产科学, 2001, 8(3): 54-58.

- [23] PERSSON P E. Uptake and release of environmentally occurring odorous compounds by fish. A review[J]. Water Research, 1984, 18(10): 1263-1271.
- [24] PETER B J, STEVEN W L. 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.
- [25] 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.
- [26] 朱健明,蔡春芳,杨 超,等. 阳澄西湖水质与鲢土腥异味相关性研究[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(2): 88-94.
- [27] 韩 萃,魏发奕,李 丽,等. 养殖虹鳟体内土腥味物质分布及其与水质关系的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2021, 51(1): 23-30.
- [28] BURR G S, WOLRERS 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.

(责任编辑:王 妮)