

养殖虹鳟体内土腥味物质分布及其与水质关系的研究*

韩 萃¹, 魏发奕¹, 李 丽^{1,2**}, 董双林^{1,2}, 高勤峰^{1,2}

(1.海水养殖教育部重点实验室(中国海洋大学), 山东 青岛 266003;

2.青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘 要: 为研究虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)体内土腥味物质的分布规律及其与养殖水质的关系, 本文比较了不同规格虹鳟以及虹鳟不同组织中的二甲基异茨醇(2-methylisoborneol, MIB)和土臭素(Geosmin, GSM)含量; 比较了养殖虹鳟、大西洋鲑(*Salmo salar*)和银鲑(*O. kisutch*)体内的 MIB 和 GSM 含量及其养殖环境的水质情况, 分析了鱼体内 MIB 和 GSM 含量与水质的相关性。研究表明, 虹鳟背肌中 MIB 和 GSM 含量随鱼体规格增大而升高; 虹鳟肝脏中 MIB 和 GSM 含量显著高于背肌和鱼皮($P < 0.05$), 鱼皮中 MIB 和 GSM 含量最低。相关性分析显示, 鱼体内 MIB 含量与水温、pH 呈显著正相关($P < 0.05$), GSM 含量与氨氮、溶解性活性磷及总磷显著正相关($P < 0.05$)。研究结果表明, 虹鳟体内土腥味物质的分布因鱼体规格和组织不同而异, 鱼体内的土腥味物质与水质有关。

关键词: 虹鳟; 二甲基异茨醇; 土臭素; 规格; 组织; 水质

中图分类号: S965.232

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)01-023-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190441

引用格式: 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(自然科学版), 2021, 51(1): 23-30.

HAN Cui, WEI Fa-Yi, LI Li, et al. The distribution of off-flavor compounds in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and their influence factors[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(1): 23-30.

鲑科鱼类富含长链不饱和脂肪酸、氨基酸、维生素等多种营养物质, 深受广大消费者青睐^[1-3]。随着中国鲑科鱼类市场需求量逐年上升, 鲑科鱼养殖产业逐渐兴起^[3]。虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)、大西洋鲑(*Salmo salar*)和银鲑(*O. kisutch*)是目前中国主要养殖的鲑科鱼种类, 其养殖模式以水库低温水养殖和循环水养殖为主, 其中绝大部分以淡水养殖, 少数以半咸水或海水养殖^[4]。然而, 低盐度养殖鱼类的异味问题对水产养殖业造成了巨大冲击^[5-6], 异味中又以土腥味最为严重。

目前认为水体中产生的土腥味物质有 5 种, 即土臭素(Geosmin, GSM)、二甲基异茨醇(2-methylisoborneol, MIB)、2-isobutyl-3-methoxy-pyrazine(IBMP)、2-isopropyl-3-methoxy-pyrazine(IPMP)、2,3,6-trichloroanisole(TCA), 其中以 GSM 和 MIB 最为常见^[7-8]。水环境中 GSM 和 MIB 的含量分别达到 9 和 4 ng · L⁻¹, 就能使水产品产生土腥味^[9]。鱼肉中 GSM 或 MIB 任一含量超过

0.7 μg · kg⁻¹, 这种鱼类就带有土腥味^[10]。

鱼类产生土腥味的原因通常是由于水体污染, 造成某些种类的浮游藻类和放线菌生长过剩, 不断产生和分泌异味物质到水中^[11], 进而渗透到鱼体中。因此, 水质是影响土腥味物质产生的关键因素。大量研究表明, 盐度、温度、光照、水中磷含量、总悬浮固体含量等均能显著影响土腥味物质的产生^[12-17]。另外, 有研究指出土腥味物质能在脂含量丰富的组织中积累, MIB 和 GSM 在鱼体中的分布可能因组织和规格不同而异^[18-19], 但目前鲜有这方面的研究。

本文比较了不同规格虹鳟和虹鳟不同组织中 GSM 和 MIB 含量, 研究土腥味物质在虹鳟体内的分布规律。另外比较了虹鳟、大西洋鲑和银鲑体内的 GSM 和 MIB 含量及其养殖水体水质, 分析了鱼体中 GSM 和 MIB 与水质因子的关系。以期发现土腥味物质在鲑科鱼体内的蓄积规律, 筛选出影响鲑科鱼体内土腥味含量的关键水质因子。本研究将为优化鲑科鱼类养殖模式以

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(201861028); 中国海洋大学-奥本大学水产养殖与环境科学联合研究中心项目; 国家重点研究发展计划项目(2019YFD0901000)资助

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (201861028); the Funds from the Ocean University of China-Auburn University Joint Center for Aquaculture and Environmental Sciences; the National Key Research and Development Projects (2019YFD0901000)

收稿日期: 2019-12-30; 修订日期: 2020-03-10

作者简介: 韩 萃(1993-), 女, 博士生。E-mail: hancui999@126.com

** 通讯作者: E-mail: L_li@ouc.edu.cn

及提升养殖鱼类品质提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

在甘肃某养殖场采集 4 种规格 ((351.00 ± 11.27) 、 $(1\ 216.67 \pm 57.74)$ 、 $(1\ 650.00 \pm 50.00)$ 和 $(3\ 050.00 \pm 86.60)$ g) 虹鳟各 3 尾。另外分别于 2018 年 7 月在甘肃、山东烟台和山东东营采集虹鳟、大西洋鲑和银鲑各 6 尾,甘肃养殖场采用天然水库网箱养殖方式,山东烟台和山东东营养殖场采用循环水系统养殖方式。投喂饲料均为鲑鳟成鱼配合饲料 6.0 (北京汉业科技有限公司)。采集的鱼类样本经 MS-222 麻醉后,测定其体长和体重,然后取其背肌、肝脏和鱼皮组织用真空袋密封 ($21\text{ cm} \times 23\text{ cm}$, HandheldVac, 中国),置于干冰中运回中国海洋大学养殖生态实验室后,于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。

取 1 L 水样加入 HgCl_2 固定,每个采样点 3 个重复,置于干冰中运回实验室后迅速测定水质指标。

1.2 水质及脂含量测定

养殖用水的温度 (T)、溶解氧 (DO)、pH 和盐度值

均采用 YSI-6920 多参数水质分析仪 (Yellow Springs Instruments, USA) 进行现场测定。

水样化冻后,将 500 mL 过滤后用于测定总氨氮 (TAN)、亚硝氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、溶解性有机碳 (DOC) 和溶解性活性磷 (SRP) 等水质指标^[20],总氨氮用靛酚蓝法测定、亚硝酸盐用格里斯试剂分光光度法测定、硝酸盐用氨基磺酸紫外分光光度法测定、溶解活性磷用钼蓝法测定、溶解性有机碳用总有机碳分析仪 (Multi N/C 2100S, AnalyticJena) 测定。未经过滤的 500 mL 水样用于测定总氮 (TN)、总磷 (TP) 和总悬浮物 (TSS),TN 和 TP 用过硫酸钾消化法测定^[20],TSS 用重量法测定 (GB11901-89)。

取部分背肌样品,经冷冻干燥,研磨成粉后,采用索氏抽提法测定其脂含量^[21],剩余背肌样品用于测定土腥味物质。

1.3 土腥味物质分析

1.3.1 土腥味物质提取 采用微波蒸馏装置 (见图 1) 提取鱼组织中的土腥味物质:微波加热功率为 350 W,氮气流速为 $70\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。氮气将气化的异味物质带出,经冷凝装置对其冷凝液化后,收集馏分。

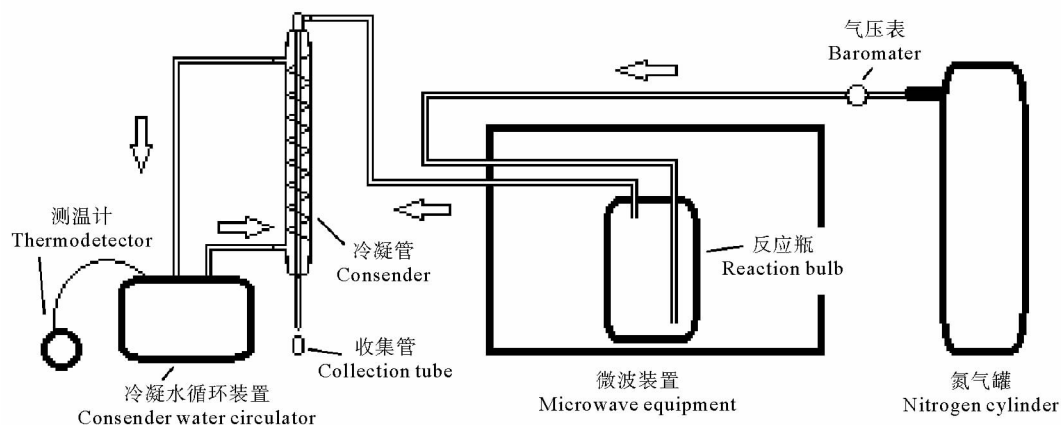


图 1 微波蒸馏装置示意图

Fig.1 Sketch map of experiment apparatus for microwave mediated distillation

取 10 mL 馏分于 20 mL 顶空瓶 (美国 Agilent 公司) 中,再加入 3 g NaCl 和微型磁力搅拌子,立即用带 PTFE 涂层硅橡胶垫的瓶盖密封。将顶空瓶置于加热磁力搅拌台 (IKA® RCT basic 加热型磁力搅拌器,德国 IKA 公司) 上,将 50/30 DVB/CAR/PDMS 萃取头 (美国 Supelco 公司) 插入瓶内顶空吸附,搅拌速度 $1\ 500\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 萃取 45 min。随后取出萃取头迅速插入气相色谱-质谱仪 (美国 Agilent 公司) 进样口,进行气相色谱-质谱 (GC-MS) 联用分析。

1.3.2 土腥味物质测定 GC-MS 联用使用的色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱 (美国 Agilent 公司, $30\text{ mm} \times 0.25\text{ mm} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$); 采用不分流进样,进样口温度

$250\text{ }^{\circ}\text{C}$,热解析 15 min;程序升温:初温 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 2 min,以 $8\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,保持 10 min;载气:He;流量: $0.8\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,不分流;质谱条件:离子源温度 $230\text{ }^{\circ}\text{C}$,传输线温度 $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。数据采集: TIC (Total Ion Chromatograms, 总离子流色谱图); EIC (Extract Ion Chromatograms, 选择离子色谱图), GSM 和 2-MIB 的定量特征离子质荷比 m/z 分别为 112 和 95。

1.4 数据分析

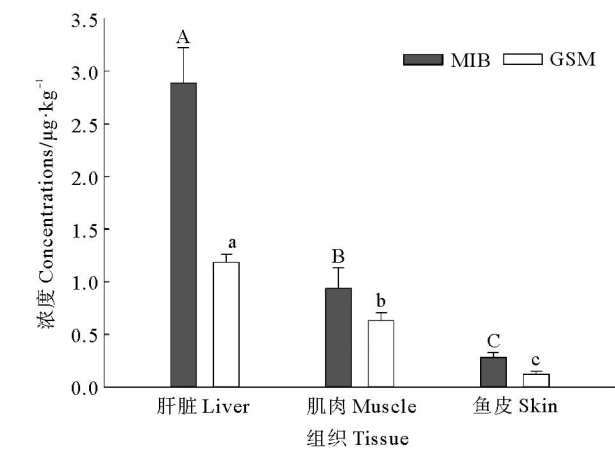
数据以平均值士标准差 ($\bar{X} \pm \text{SD}$) 表示。采用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验方法分别进行数据的正态分布检验和方差齐性检验。若符合正态分布

且方差齐,组间差异采用 ANOVA 单因素方差及 Turkey 多重比较法进行分析。相关性分析采用 Pearson 分析方法,显著水平 $P<0.05$ 。所有分析均由 SPSS 19.0 软件实现。

2 结果

2.1 虹鳟不同组织中的土腥味物质含量差异

虹鳟不同组织中的 MIB 和 GSM 含量见图 2。在肝脏、肌肉和鱼皮中,MIB 含量较 GSM 高。MIB 和 GSM 在肝脏中积累最多,其次是肌肉,最后是鱼皮,经差异分析得出,肝脏、肌肉和鱼皮中 MIB 和 GSM 含量存在显著差异($P<0.05$)。MIB 在肝脏、肌肉和鱼皮中的含量分别为 (2.89 ± 0.34) 、 (0.94 ± 0.20) 和 $(0.28\pm0.05)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。GSM 在肝脏、肌肉和鱼皮中的含量分别为 (1.18 ± 0.08) 、 (0.63 ± 0.08) 和 $(0.12\pm0.03)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。



(不同大写字母表示 MIB 含量在虹鳟不同组织间差异显著 $P<0.05$,不同小写字母表示 GSM 含量在虹鳟不同组织间差异显著 $P<0.05$ 。Different capital letters indicate that the concentration of MIB varies significantly among different tissues of rainbow trout $P<0.05$,while different lower-case letters indicate that the concentration of GSM varies significantly among different tissues of rainbow trout $P<0.05$.)

图 2 虹鳟不同组织中 MIB 和 GSM 的含量

Fig.2 The concentrations of MIB, GSM in different tissue of rainbow trout

2.2 不同规格虹鳟体内土腥味物质含量比较

如表 1 所示,不同规格的虹鳟,其体重、体长及脂含量存在显著差异($P<0.05$),此外,随着虹鳟规格增大,其背肌脂含量增高。

不同规格虹鳟背肌中 MIB 和 GSM 含量如图 3 所示,两种物质含量均随规格增加而升高,不同规格虹鳟体内两种物质含量差异及其显著(MIB: $P=0.003$; GSM: $P=0.002$),虹鳟体内两种物质含量均是规格 C 和 D 的显著高于规格 A 的($P<0.05$),规格 B 与其他

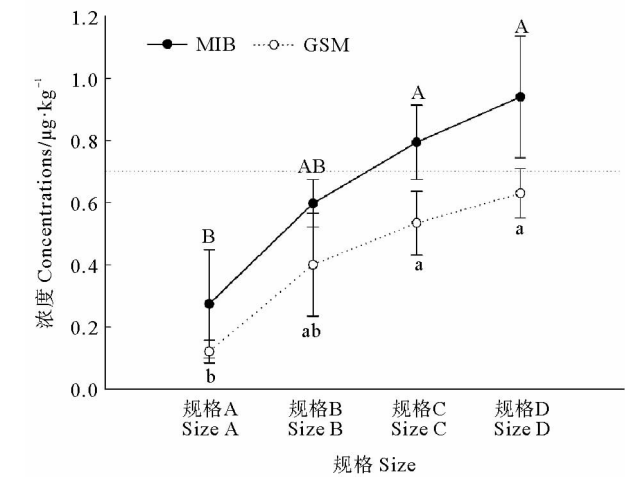
规格无显著差异($P>0.05$)。另外,4 个规格的虹鳟背肌中均是 MIB 含量高于 GSM 含量,规格 C 和 D 的虹鳟背肌中 MIB 含量超过了 $0.7\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别达到了 (0.79 ± 0.12) 和 $(0.94\pm0.20)\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。4 个规格的虹鳟背肌中 GSM 含量均低于 $0.7\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 1 不同规格虹鳟的体重、体长及脂含量

Table 1 The length, weight, and fat content of different sizes rainbow trout

规格 Sizes	体重 Weight/g	体长 Length/cm	脂含量 Fat content/%
规格 A Sizes A	351.00 ± 11.27^d	27.50 ± 0.87^d	4.13 ± 0.58^c
规格 B Sizes B	$1\ 216.67\pm57.74^c$	42.50 ± 1.80^c	5.16 ± 0.19^{bc}
规格 C Sizes C	$1\ 650.00\pm50.00^b$	46.00 ± 0.87^b	7.98 ± 0.58^b
规格 D Sizes D	$3\ 050.00\pm86.60^a$	55.83 ± 0.76^a	13.23 ± 1.09^a
P	<0.001	<0.001	<0.001

注:不同字母表示不同规格间差异显著, $P<0.05$ 。
Note: Different letters represent significant difference among different sizes, $P<0.05$.



(不同大写字母表示 MIB 含量在不同规格虹鳟体内差异显著 $P<0.05$,不同小写字母表示 GSM 含量在不同规格虹鳟体内差异显著 $P<0.05$ 。Different capital letters indicate that the concentration of MIB varies significantly among different sizes of rainbow trout $P<0.05$,while different lower-case letters indicate that the concentration of GSM varies significantly among different sizes of rainbow trout $P<0.05$.)

图 3 不同规格虹鳟肌肉中 MIB 和 GSM 含量

Fig.3 The concentrations of MIB, GSM in muscle of different sizes of rainbow trout

经相关性分析发现,虹鳟背肌中的 MIB 和 GSM 含量与虹鳟体重、体长及脂含量呈显著正相关关系($P < 0.05$, 见表 2)。虹鳟背肌中的 MIB 和 GSM 与虹鳟体重的相关系数分别为 0.84 和 0.84,与虹鳟体长的相关系数分别为 0.89 和 0.86,与虹鳟背肌脂含量的相关系数分别为 0.80 和 0.76。

表 2 虹鳟体内 MIB 和 GSM 含量与虹鳟体重、体长及脂含量的相关性分析

Table 2 The correlation analysis between the concentrations of MIB, GSM and the length, weight and fat content of rainbow trout

相关系数 Correlation coefficient	体重 Weight	体长 Length	脂含量 Fat content
MIB	0.84 *	0.89 *	0.80 *
GSM	0.84 *	0.86 *	0.76 *

注: * 表示相关性显著, $P < 0.05$ 。

Note: * represent significant correlation, $P < 0.05$.

2.3 鱼体内土腥味物质含量与水质的关系

2.3.1 不同种类鲑科鱼体内土腥味含量 银鲑、虹鳟和大西洋鲑背肌中 MIB 和 GSM 含量如图 4 所示。虹鳟体内的 MIB 含量显著高于银鲑和大西洋鲑体内的($P < 0.01$),达到了 $0.73 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。银鲑和大西洋鲑背肌中 MIB 含量无显著差异, $P > 0.05$ 。GSM 的含量排列顺序为:银鲑>虹鳟>大西洋鲑,银鲑、虹鳟和大西洋鲑体内 GSM 的含量分别达到了 4.58、0.48 和 $0.02 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,种类间 GSM 含量差异极其显著($P < 0.01$)。

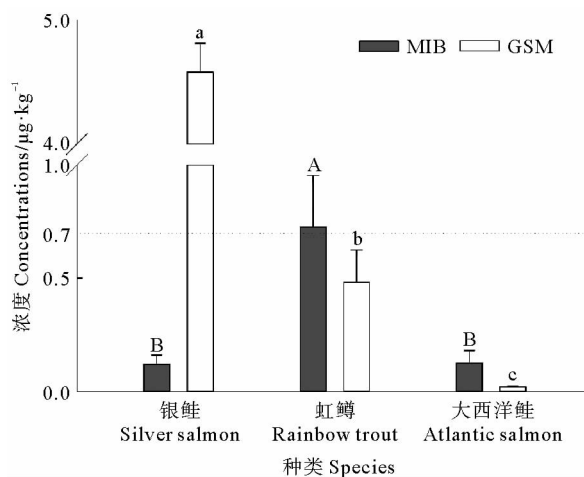
表 3 不同种类鲑科鱼养殖用水水质

Table 3 The water quality of the water cultured different salmonid species

水质 Water quality	银鲑养殖用水 Water cultured silver salmon	虹鳟养殖用水 Water cultured rainbow trout	大西洋鲑养殖用水 Water cultured Atlantic salmon	P
温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	16.7 ± 0.2^b	20.3 ± 0.2^a	15.3 ± 0.2^c	< 0.001
pH	7.50 ± 0.01^b	8.46 ± 0.01^a	6.85 ± 0.01^c	< 0.001
盐度 Salinity	15.0 ± 0.4^b	0.2 ± 0.4^c	30.1 ± 0.4^a	< 0.001
溶解氧 Dissolved oxygen/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	11.00 ± 0.3^b	6.96 ± 0.3^c	12.05 ± 0.3^a	< 0.001
氨氮 Total ammonia nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.51 ± 0.01^a	0.00 ± 0.00^c	0.18 ± 0.00^b	< 0.001
硝氮 Nitrate nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.17 ± 0.01^c	2.09 ± 0.01^b	3.43 ± 0.07^a	< 0.001
亚硝氮 Nitrite nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.10 ± 0.01^c	0.15 ± 0.00^b	0.21 ± 0.01^a	< 0.001
活性磷 Soluble reactive phosphorus/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.99 ± 0.07^a	0.03 ± 0.01^b	0.06 ± 0.00^b	< 0.001
总磷 Total phosphorus/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.15 ± 0.08^a	0.17 ± 0.04^c	0.49 ± 0.24^b	< 0.001
总氮 Total nitrogen/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.93 ± 0.01^c	5.44 ± 0.22^b	7.57 ± 0.41^a	< 0.001
总悬浮物固体 Total suspended solids/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.05 ± 0.01^b	0.01 ± 0.00^c	0.14 ± 0.01^a	< 0.001

注: P 值表示组间差异显著性。 $P < 0.05$, 表明组间差异显著; $P > 0.05$, 表明组间差异不显著。不同字母表示水质因子在不同水体差异显著, $P < 0.05$; 相同字母表示水质因子在不同水体差异不显著, $P > 0.05$ 。

Note: P value represent the significant difference among different groups. $P < 0.05$ indicate significant difference among different groups; $P > 0.05$ indicate no significant difference among different groups. Different letters represent significant difference of water quality factors in different water, $P < 0.05$; Same letters represent no significant difference of water quality factors in different water, $P > 0.05$.



(不同大写字母表示 MIB 含量在不同种类间差异显著 $P < 0.05$, 不同小写字母表示 GSM 含量在不同种类间差异显著 $P < 0.05$ 。Different capital letters indicate that the concentration of MIB varies significantly in different species $P < 0.05$, while different lower-case letters indicate that the concentration of GSM varies significantly in different species $P < 0.05$.)

图 4 不同种类鲑科鱼类背肌中 2-MIB 和 GSM 的含量

Fig.4 The concentrations of GSM and 2-MIB in the muscle of different salmonid species

2.3.2 不同养殖水体水质比较 本文比较了 3 种鲑科鱼类养殖水体的水质,如表 3 所示。3 种鲑科鱼养殖水体中温度、pH 及溶解氧的范围分别为 $15.3 \sim 20.3^{\circ}\text{C}$ 、 $6.85 \sim 8.46$ 、 $6.96 \sim 12.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中,虹鳟养殖用水水温最高、溶解氧含量最低,分别为 20.3°C 和 $6.96 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。虹鳟、银鲑和大西洋鲑的养殖用水分别为淡水、半咸水及海水,盐度分别为 0.2、15.0 和 30.1。氨氮、活性磷及总磷在银鲑养殖用水中最高,硝氮、

亚硝氮、总氮及总悬浮物固体含量在大西洋鲑养殖用水中最高,分别为 $3.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $7.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经差异分析,所有水质指标在 3 种鲑科鱼类养殖水体间均存在显著差异 ($P < 0.01$)。

2.3.3 鱼体内土腥味物质含量与水质的相关性 对鲑科鱼体内的土腥味物质(MIB 和 GSM)与水质因子进行 Pearson 相关性分析,结果表明,鱼体中 MIB 含量与水温及 pH 呈显著正相关(见表 4, $P < 0.05$),与盐度、溶解氧、氨氮、总磷及总悬浮物固体呈显著负相关($P < 0.05$)。鱼体中 GSM 含量与氨氮、活性磷及总磷呈显著正相关($P < 0.05$),与亚硝氮、硝氮及总氮呈显著负相关($P < 0.05$)。

表 4 鱼体 MIB 和 GSM 含量与水质的相关性分析

Table 4 The correlation analysis between the water quality parameters and the concentration of MIB, GSM in fish

相关系数 Correlation coefficient	MIB	GSM
温度 Temperature	0.88*	-0.12
pH	0.85*	-0.54
盐度 Salinity	-0.78*	-0.15
溶解氧 Dissolved oxygen	-0.90*	0.20
氨氮 Total ammonia nitrogen	-0.69*	0.90*
硝氮 Nitrate nitrogen	0.09	-0.95*
亚硝氮 Nitrite nitrogen	-0.11	-0.86*
活性磷 Soluble reactive phosphorus	-0.46	0.99*
总磷 Total phosphorus	-0.64*	0.89*
总氮 Total nitrogen	-0.10	-0.87*
总悬浮物固体 Total suspended solids	-0.63*	-0.38

注: * 表示显著相关, $P < 0.05$ 。

Note: * Represent significant correlation, $P < 0.05$.

3 讨论

3.1 鲑科鱼类土腥味物质含量

近几年,养殖鲑科鱼类的土腥味问题时常被报道。本文测得虹鳟体内 MIB 含量和银鲑体内 GSM 含量分别为 (0.73 ± 0.22) 和 $(4.58 \pm 0.23) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,超出了人类感官阈值 $0.7 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。国外许多学者也对养殖鲑科鱼的土腥味问题进行了研究,根据已发表数据,鲑科鱼体内 MIB 和 GSM 的含量范围为 $0 \sim 0.99 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.1 \sim 7.2 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[14,22],部分鱼类有明显的土腥味。由此看来,土腥味问题在鲑科鱼养殖业中普遍存在。因此,研究影响鱼类土腥味产生及分布的因素对鱼类土腥味控制有实际参考价值。

3.2 MIB 和 GSM 在虹鳟体内的分布规律

水体中的土腥味物质能通过鱼鳃、体表和肠上皮细胞进入鱼体内^[19],在富含脂质的组织如鱼皮和内脏中富集^[19]。本文比较了虹鳟背肌、肝脏以及鱼皮中 MIB 和 GSM 的含量,发现两种异味物质均在虹鳟肝脏中积累最多,肝脏中的 MIB 的含量是背肌中的 3 倍,鱼皮中的 10 倍。肝脏中 GSM 的含量是背肌中的 2 倍,鱼皮中的 10 倍。因此,MIB 和 GSM 在鱼体中的分布因组织不同而异,相比于肌肉和鱼皮组织,肝脏能积累更多的土腥味物质。目前鲜有对鱼类不同组织中土腥味物质含量比较及其蓄积机制的研究,因此不同组织对土腥味物质的富集途径还不清楚。

本实验测得养殖在相同水体中的虹鳟,规格越大,背肌中 MIB 和 GSM 含量也越高。有研究表明,GSM 和 MIB 属于亲脂性化合物,能在脂肪中积累^[23],GSM 和 MIB 在鱼体内的富集能力取决于鱼体脂肪含量。本文测定了不同规格的虹鳟肌肉脂含量,表明脂含量随规格增加而上升,相关性分析得出虹鳟背肌脂含量与 MIB 和 GSM 含量显著正相关。相似的是,Yarnpakdee 等^[19]也发现脂含量较高的鱼体肌肉中 MIB 和 GSM 含量也较高,尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)和斑点胡子鲶(*Clarias macrocephalus*)腹部肌肉脂肪较背部肌肉丰富,腹部肌肉中 GSM 和 MIB 的含量要高于背部肌肉中的。因此,脂含量较高的鱼体内会富集更多的 GSM 和 MIB。

鱼体中的土腥味物质主要源于水环境。Petersen 等^[24]研究了水体中 MIB 和 GSM 与虹鳟体内的 MIB 和 GSM 关系,指出水中的 GSM 超过 $20 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,96% 的鱼有强烈的土腥味,低于 $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,18% 的鱼有强烈的土腥味。Petersen 等^[24]建议为确保虹鳟的风味品质,其养殖水体中 GSM 和 MIB 的含量之和不能超过 $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。本文得出结论,鱼体脂含量能影响鱼体土腥味物质的富集,因此,在养殖脂含量较高的鱼类时,要求养殖水体中土腥味物质的含量要更低。

3.3 鱼体背肌土腥味物质含量与水质的关系

MIB 和 GSM 是萜类化合物,主要由蓝绿藻和放线菌类产生^[12,25]。已有大量研究指出了放线菌和蓝藻合成 MIB 和 GSM 的途径^[25-29]。因此,控制养殖水体中蓝藻和放线菌的数量是解决土腥味问题的关键,而养殖水体中微生物群落结构与功能与水质息息相关。

本文中相关性分析得出鱼体内 MIB 含量与水温及 pH 呈显著正相关关系。大量研究表明温度会显著影响产生 MIB 微生物的代谢^[14-16,30-33]。弱碱(pH 为 8~9)条件能促进某些颤藻释放异味物质^[34-35]。本文测得虹鳟养殖水体也偏弱碱性(pH=8.46)。因此温度超过 20°C 和偏弱碱性的环境可能促进了某些产 MIB 的蓝

藻或放线菌的生长和代谢,导致产生大量的 MIB 渗透到鱼体中。本文中相关性研究表明鱼体内 GSM 含量与养殖水体中的氨氮、总磷和溶解性活性磷浓度呈显著正相关。朱健明等^[36]研究发现鲢体内 GSM 含量与总磷浓度存在显著相关性。Dzialowski 等^[17]研究也指出溶解性活性磷的含量是影响 GSM 产生的重要决定因素。因此,养殖水体中的氨氮和磷可能为某些产生 GSM 的微生物提供了营养条件^[37-39],从而导致产生大量的 GSM 被鱼体吸收,使鱼体产生较重土腥味。

目前认为减少鱼体土腥味的方法有两种:第一种是将带有土腥味的鱼转移至不含土腥味物质的净水中养殖^[36,40]。朱健明等^[36]研究表明将土腥异味较重的鲢在清水中净化 32 d 可有效改善其体内土腥味。大西洋鲑在净水中养殖 10 d,鱼肉中的土腥味物质含量显著降低^[40]。第二种方法是原位移除养殖水体中土腥味物质^[36,40]。有研究表明^[41],枯草芽孢杆菌和蜡状芽孢杆菌作为水产养殖中的益生菌,能有效降解 GSM 和 2-MIB。另外,枯草芽孢杆菌能有效降低水体中的氨氮、硝氮、亚硝氮浓度以及水体 pH,其胞外酶还能分解水体和底泥中的有机质,具有水质净化作用^[41-42]。因此,对于本文中自然水库网箱养殖的鲑科鱼,可以采用净水养殖方式减少鱼体土腥味。对于循环水系统养殖的鲑科鱼,可以在生物过滤器上接种一些 GSM 和 2-MIB 降解菌,以改善水质同时去除水体中 GSM 和 2-MIB。

4 结语

MIB 和 GSM 在虹鳟鱼体内的富集程度与鱼体自身条件有关,虹鳟规格越大,脂含量越高,土腥味越严重。MIB 和 GSM 在虹鳟不同组织内的含量为肝脏>背肌>鱼皮。水温和 pH 是影响虹鳟体内 MIB 产生的主要环境因子,氨氮和磷是影响虹鳟体内 GSM 含量的主要环境因子。对于本文中鲑科鱼的土腥味问题,可以采用净水养殖和添加能降解土腥味物质的益生菌两种方法解决。

参考文献:

- [1] Bell J G, Mcghee F, Campbell P J, et al. Rapeseed oil as an alternative to marine fish oil in diets of post-smolt Atlantic salmon (*Salmo salar*): Changes in flesh fatty acid composition and effectiveness of subsequent fish oil "wash out"[J]. *Aquaculture*, 2003, 218: 515-528.
- [2] Gregory M K, Collins R O, Tocher D R, et al. Nutritional regulation of long-chain PUFA biosynthetic genes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *British Journal of Nutrition*, 2016, 115: 1721-1729.
- [3] 刘骋跃. 低温和海水驯化对几种鲑鳟鱼类血液学指标和磷脂脂肪酸组成的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018.

- Liu Chengyue. Effects of Low Temperature and Seawater Acclimation on Hematological Indexes and Phospholipids Fatty Acid Composition of Salmonidae[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2018.
- [4] 史鲲鹏. 几种鲑科鱼类的耐高温能力比较及其耐高温机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018.
- Shi Kunpeng. Comparison of the Thermal Tolerance Ability and the Thermal Resistance Mechanism of Salmonidae[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2018.
- [5] 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.
- [6] M Z, Niu Y, Xie P, et al. Off-flavor compounds from decaying cyanobacterial blooms of Lake Taihu[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25: 495-501.
- [7] Elhadi S L N, Huck P M, Slawson R M. Determination of system losses of geosmin and MIB in bench-scale filtration apparatus[J]. *Water Quality Research Journal of Canada (Canadian Association)*, 2004, 39: 207-212.
- [8] Suffet I, Khiari D, Bruchet A. The drinking water taste and odor wheel for the millennium: Beyond geosmin and 2-methylisoborneol[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 40(6): 1-13.
- [9] Watson S B, Brownlee B, Satchwill T, et al. Quantitative analysis of trace levels of geosmin and MIB in source and drinking water using headspace SPME[J]. *Water Research*, 2000, 34: 2818-2828.
- [10] 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.
- [11] 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: 434-439.
- Song Lirong, Li Lin, Chen Wei, et al. Research progress on the off-flavours and secondary metabolites of algae in the aquatic environment[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28: 434-439.
- [12] 徐立蒲, 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, 7: 2872-2879.
- Xu Lipu, Zhao Wen, Xiong Bangxi, 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, 7: 2872-2879.
- [13] Liang Mengqing, Wang Shiwen, Wang Jialin, et al. Comparison of flavor components in shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured in sea water and low salinity water[J]. *Fisheries Science*, 2008, 74 (5): 1173-1179.
- [14] 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: 153-163.
- [15] Robin J, Cravedi J P, Hillenweck A, et al. Off flavor characterization and origin in French trout farming[J]. *Aquaculture*, 2006, 260: 128-138.
- [16] Srinivasan R, Sorial G A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methylisoborneol and geosmin in drinking water: A critical review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23 (1): 1-13.

- [17] Dzialowski A R, Smith V H, Huggins D G, et al. Development of predictive models for geosmin-related taste and odor in Kansas, USA, drinking water reservoirs[J]. Water Research, 2009, 43 (11): 2829-2840.
- [18] Bai Ziwei. Determination of Geosmin and 2-methylisoborneol in Fish Using In-vivo Solid Phase Microextraction[M]. Waterloo: University of Waterloo, 2012.
- [19] Yarnpakdee, Suthasinee, Benjakul, 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(1): 210-216.
- [20] 蒋雯雯, 柳婷婷, 董双林, 等. 冷水鱼循环水养殖系统生物滤池成熟过程及低温氮降解菌的分离与鉴定[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 86-95.
- Jiang Wenwen, Liu Tingting, Ding Shuanglin, et al. Maturity process of biofilters in a recirculating aquaculture system reaching cold-water fish and isolation and identification of low-temperature nitrogen degradation bacteria[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(3): 86-95.
- [21] 蒋湘辉, 骆小年, 金广海, 等. 不同蛋白质和脂肪水平饲料对拉氏鲮幼鱼生长、体成分和免疫力的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(3): 238-245.
- Jiang Xianghui, Luo Xiaonian, Jin Guanghai, et al. Effects of different protein and lipid Level diets on growth, body composition and immunity of juvenile *Phoxinus lagowskii*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(3): 238-245.
- [22] 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.
- [23] Howgate P. Tainting of farmed fish by geosmin and 2-methylisoborneol: A review of sensory aspects and of uptake/depuration[J]. Aquaculture, 2004, 234: 155-181.
- [24] 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.
- [25] 顾兆俊, 朱浩, 刘兴国, 等. 去除鱼类土腥味养殖系统的构建技术研究[J]. 水产养殖, 2014, 10(35): 33-36.
- Gu Zhaojun, Zhu Hao, Liu Xingguo, et al. Remove the earthy taste fish breeding system building technical research[J]. Journal of Aquaculture, 2014, 10(35): 33-36.
- [26] 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.
- [27] 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: 8027-8032.
- [28] Wang Z, Xu Y, Shao J, et al. Genes associated with 2-methylisoborneol biosynthesis in cyanobacteria: Isolation, characterization, and expression in response to light[J]. Plos One, 2011, 6 (4): e18665.
- [29] Komatsu M, Tsuda M, Ōmura S, et al. Identification and functional analysis of genes controlling biosynthesis of 2-methylisoborneol[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105: 7422.
- [30] Schrader K K, Harries M D, Page P N. Temperature effects on biomass, geosmin, and 2-methylisoborneol production and cellular activity by *Nocardia* spp. and *Streptomyces* spp. isolated from rainbow trout recirculating aquaculture systems[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2015, 42(5): 759-767.
- [31] Medsker L L, Jenkins D, Thomas J F. Odorous compounds in natural waters[J]. Environmental Science & Technology, 1968, 6(8): 461-463.
- [32] Oh Hyung Seok, Chang Soo Lee, Srivastava Ankita, 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.
- [33] 张婷. 产土霉异味蓝藻的生态学调查及其生理学特性的研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2008.
- Zhang Ting. Ecological Investigation and Physiological Characteristics of Earthy-musty Odor-producing Cyanobacteria[D]. Wuhan: Institution of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [34] 乐文健. 汾河水库突发嗅味污染的应急处理研究[M]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
- Le Wenjian. Study on the Emergent Treatment of Sudden Taste and Odor Pollution in Fenhe Reservoir[M]. Xi'an: Xi'an University of Architecture Technology, 2012.
- [35] 朱厚亚, 刘波, 张凌云, 等. pH 值和光照强度对颤藻生长及产嗅特征的影响[J]. 中国给水排水, 2019, 35(7): 77-85.
- Zhu Houya, Liu Bo, Zhang Lingyun, et al. Effects of pH and light intensity on growth and odorous compounds production characteristics of *Oscillatoria*[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(7): 77-85.
- [36] 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.
- Zhu Jian-ming, Cai Chun-fang, Yang Chao, et al. Effect of water quality on earthy-musty off-flavor in *Hypophthalmichthys molitrix* from Yangcheng West Lake[J]. Journal of Hydroecology, 2015, 36(2): 88-94.
- [37] Muro-Pastor M I, Florencio F J. Regulation of ammonium assimilation in cyanobacteria[J]. Plant Physiology and Biochemistry (Paris), 2003, 41(6-7): 595-603.
- [38] 吴凯, 李正魁, 冯露露, 等. 水华蓝藻上浮特征与机理的试验研究[J]. 生态环境学报, 2011, 1: 141-146.
- Wu Kai, Li Zhengkui, Feng Lulu, et al. Floating characteristics and mechanism about water-blooms cyanobacteria[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 1: 141-146.
- [39] Schrader K K. Effects of relevant ammonium chloride concentrations on biomass and off-flavor compound production by *Streptomyces luridiscabiei* originating from a recirculating aquaculture system[J]. Journal of Applied Aquaculture, 2019, 31: 1-6.
- [40] Gary S B, William R W, Kevin K S, 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.

- [41] 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 Niannian, Luo Guozhi, Tan Hongxin, et al. Kinetic characteristics of degradation of geosmin and 2-methylisoborneol by *Bacillus subtilis*[J]. Environmental Science, 2015, 36(4): 1379-1384.
- [42] 张峰峰, 谢凤行, 赵玉洁, 等. 枯草芽孢杆菌水质净化作用的研究[J]. 华北农学报, 2009, 24(4): 218-221.
Zhang Feng-feng, Xie Feng-xing, Zhao Yu-jie, et al. Effect of *Bacillus subtilis* on purification of aquaculture wastewater[J]. Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, 24(4): 218-221.

The Distribution of Off-Flavor Compounds in Farmed Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Their Influence Factors

HAN Cui¹, WEI Fa-Yi¹, LI Li^{1,2}, DONG Shuang-Lin^{1,2}, GAO Qin-Feng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mariculture(Ocean University of China), Ministry of Education, Qingdao 266003, China; 2. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: In order to demonstrate the distribution of the earthy-musty off-flavor compounds in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and the correlation relationship between water quality and the concentrations of 2-methylisoborneol (MIB) and geosmin (GSM) in fish, this study is to compare the concentration of MIB and GSM among different sizes of rainbow trout and their different tissues. The water quality and concentrations of MIB and GSM in rainbow trout, Atlantic salmon (*Salmo salar*) and silver salmon (*O. kisutch*) are also compared. The results show that the concentrations of MIB and GSM in the muscle of rainbow trout increase with the size of the fish; The concentrations of MIB and GSM in liver are significantly higher than those in muscle and skin, and the concentrations of MIB and GSM in skin are the lowest. The correlation analysis demonstrates that the concentration of MIB is significantly and positively correlates with water temperature and pH ($P < 0.05$), and the concentration of GSM is significantly and positively correlates with the concentrations of total ammonium nitrogen, soluble reactive phosphorus and total phosphorus in water ($P < 0.05$). This study demonstrates that the distribution of off-flavor compounds is different among tissues and different sizes of rainbow trout. Moreover, the off-flavor compounds in fish are related to water quality.

Key words: rainbow trout; 2-Methylisoborneol; geosmin; sizes; tissue; water quality

责任编辑 朱宝象