

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20220217

西藏 4 个盐湖卤虫卵的生物学测定值、营养组成和 孵化速率分析

邓洪刚, 解 伟, 高美荣, 杜国儒, 李 城, 隋丽英

(海洋资源化学与食品技术教育部重点实验室, 亚洲区域卤虫参考中心,
天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘 要: 卤虫(*Artemia*)是西藏盐湖的重要生物资源. 本研究旨在探究西藏 4 个盐湖卤虫卵的生物学特性, 为西藏卤虫卵在水产养殖中的有效应用提供参考. 本研究对 2019—2021 年采集的、经低温冷冻去休眠的西藏 4 个盐湖(其香错、班戈错、拉果错、当穹错)卤虫卵的生物学测定值、营养组成、角黄素含量和孵化速率进行分析. 结果表明:班戈错卤虫卵卵径最小($263.6\ \mu\text{m}$), 拉果错卤虫卵卵径最大($342.9\ \mu\text{m}$); 其香错 I 期无节幼体体长最小($519.6\ \mu\text{m}$), 拉果错 I 期无节幼体体长最大($601.1\ \mu\text{m}$). 拉果错卤虫卵中二十碳五烯酸(EPA)的含量最高($42.49\ \text{mg/g}$), 其香错卤虫卵中二十二碳六烯酸(DHA)含量最高($0.96\ \text{mg/g}$), 当穹错卤虫无节幼体中角黄素含量最高($1.68\ \text{mg/g}$). 4 个盐湖卤虫卵开始孵化的时间较晚, 达到较高孵化率所需时间较长(28 h), 4 个盐湖卤虫卵孵化同步性为 $13.7\sim 14.8\ \text{h}$. 综上所述, 西藏卤虫卵具有独特的生物学特性, 如较大的卵径和较大的 I 期无节幼体体长, 其香错、班戈错和拉果错卤虫卵含有较多的 EPA 和少量 DHA, 初孵无节幼体在使用时不需要额外的强化, 更适用于海水鱼虾幼苗以及特殊发育阶段苗种的培育.

关键词: 西藏卤虫; 生物学测定值; 营养组成; 角黄素; 孵化速率

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)03-0022-07

Analysis of Biometrics, Nutritional Composition and Hatching Rate of *Artemia* Cysts in Four Tibet Salt Lakes

DENG Honggang, XIE Wei, GAO Meirong, DU Guoru, LI Cheng, SUI Liying

(Key Laboratory of Marine Resource Chemistry and Food Technology (TUST), Ministry of Education,
Asian Regional Artemia Reference Center, College of Marine and Environmental Sciences,
Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: *Artemia* is the main biological resource with highly commercial value in Tibet salt lakes. The purpose of this study was to explore the biological characteristics of *Artemia* cysts in four salt lakes (i.e., Kyebxang Co, Bangkog Co, Laykor Co and Tangqung Co) in Tibet, and to provide reference for the effective application of *Artemia* cysts in Tibet in aquaculture. To this end, this study was conducted to determine the biometrics, nutritional composition, canthaxanthin content and hatching rate of *Artemia* cysts collected in four salt lakes in Tibet from 2019 to 2021, which were freezed to terminate diapause. The results showed that the cyst diameter of *Artemia* in Bangkog Co was the smallest ($263.6\ \mu\text{m}$) while the cyst diameter of Lagkor Co was the largest ($342.9\ \mu\text{m}$); Kyebxang Co had the the smallest length of Instar I nauplii ($519.6\ \mu\text{m}$) while that of Lagkor Co had $601.1\ \mu\text{m}$. The eicosapentaenoic acid (EPA) content of Lagkor Co *Artemia* cysts was found to have the highest ($42.49\ \text{mg/g}$), and the docosahexaenoic acid (DHA) content of Kyebxang Co cysts had the highest ($0.96\ \text{mg/g}$). The highest content of canthaxanthin in newly hatched *Artemia* nauplii in Tangqung Co was found the highest ($1.68\ \text{mg/g}$). The hatching time of cysts in four salt lakes was relatively late, and it took a longer time (28 h) to reach a

收稿日期: 2022-09-15; 修回日期: 2022-12-22

基金项目: 农业农村部渔业科技援藏项目“西藏卤虫资源调查研究项目”(125A0604)

作者简介: 邓洪刚(1997—), 男, 四川自贡人, 硕士研究生; 通信作者: 隋丽英, 教授, suily@tust.edu.cn

higher hatching rate. The hatching synchronization of *Artemia* cysts in four salt lakes was 13.7–14.8 h. In summary, *Artemia* cysts in Tibet salt lakes have unique biological characteristics, such as large cyst diameter and Instar I nauplii body length, which can meet palatability needs of larvae at special developmental stages. The cysts in Kyebxang Co, Bangkog Co and Lagkor Co contain higher EPA and a small amount of DHA making nauplii need no extra enrichment and therefore a preferable live feed for marine hatcheries.

Key words: *Artemia* in Tibet; biometrics; nutritional composition; canthaxanthin; hatching rate

卤虫生存于盐湖、日晒盐场蒸发池等高盐水环境中, 其无节幼体是海水鱼类和甲壳类幼苗重要的活饵料^[1]。卤虫的品系特征(如卵的孵化质量、初孵无节幼体的大小和营养成分等)对其在水产育苗中的有效利用至关重要。西藏盐湖主要分布于那曲市和阿里地区, 海拔 4 000 ~ 4 500 m, 湖水分型多为碳酸盐型或硫酸盐型^[2]。20 世纪 90 年代以来, 西藏双湖县其香错和改则县拉果错的卤虫卵资源逐步得到商业化采收和加工利用。

1998—1999 年, 刘俊英等^[3–4]首次对西藏拉果错卤虫卵的生物学测定值和营养组成进行分析。2001 年, 刘凤岐等^[5]对西藏卤虫卵(卤虫卵来源盐湖未知)最适孵化温度进行分析。2003 年, Van Stappen 等^[6]研究分析青藏高原拉果错、帮错、博泽错、鲸鱼湖、海雁湖和措勤等卤虫卵的生物学测定值、脂肪酸组成和不同孵化液离子组成对孵化特性的影响。2006 年, 于秀玲等^[7]对西藏改则、双湖、尼玛和扬那蓬错等盐湖的卤虫卵生物学测定值和脂肪酸含量进行分析。2017—2019 年, 潘正军等^[8–9]研究了温度、盐度、光照和 pH 对西藏卤虫卵孵化率的影响。2018 年, 李炳乾等^[10]对西藏其香错卤虫卵的孵化条件进行研究。2022 年, 邢明威等^[11]对西藏其香错卤虫卵的生物学测定值、粗蛋白、粗脂肪和脂肪酸组分进行分析, 并肯定了其在凡纳滨对虾育苗中的积极效果。以上研究表明, 不同西藏盐湖卤虫卵具有不同的生物学特性, 并且同一盐湖、不同年份所采收加工的卤虫卵的生物学特性也

存在一定差异。除这些研究外, 还未见有关西藏其他盐湖卤虫卵生物学特性分析的研究。西藏具有较为丰富的盐湖卤虫资源, 有必要对西藏盐湖卤虫的生物学特性进行深入研究。

近年来, 由气候变化导致的盐湖水环境因子(如盐度和温度)的波动, 可能会对西藏卤虫卵生物学特性和营养组成造成影响。并且目前对具有开发潜力的西藏其他盐湖(如班戈错、当穹错)卤虫卵生物学特性的研究还未见报道。基于此, 本研究对采自 2019—2021 年的西藏其香错、班戈错、拉果错和当穹错 4 个盐湖卤虫卵的生物学测定值、营养组成和孵化速率进行分析, 并且对卤虫无节幼体的主要类胡萝卜素中的角黄素的含量进行测定。本研究结果将为西藏卤虫卵在水产养殖中的高效应用提供依据, 为西藏卤虫资源的可持续开发提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 卤虫卵样本及盐湖水水质信息

2019—2021 年, 在位于西藏那曲市和阿里地区的 4 个盐湖采集卤虫卵样本。4 个盐湖分别为其香错、班戈错、拉果错和当穹错, 它们的地理位置和水体物理化学信息见表 1。采集后的样本需要去除杂质并进行脱水, 脱水后在 -18 ℃ 进行冷冻去休眠处理, 以便用于后续分析。4 个盐湖湖水的盐度为 45 ~ 100, pH 为 8.5 ~ 9.5, 4 个盐湖均为碳酸盐型盐湖。

表 1 盐湖的地理位置和水体物理化学信息

Tab. 1 Geographical location of salt lakes and physical and chemical information of water body

盐湖	所属地区	经纬度	湖水盐度	湖水 pH	盐湖类型
其香错	那曲市双湖县	32°27'N, 89°58'E	45	9.5	碳酸盐型盐湖
班戈错	那曲市班戈县	31°42'N, 89°27'E	70	8.8	碳酸盐型盐湖
拉果错	阿里地区改则县	32°20'N, 84°30'E	45	8.5	碳酸盐型盐湖
当穹错	那曲市尼玛县	31°31'N, 86°42'E	100	8.6	碳酸盐型盐湖

1.2 卤虫水合卵径、脱壳卵径和无节幼体体长分析

卤虫卵在淡水中充气 1 h, 进行充分水合, 并用卢戈碘液进行固定, 用于测定水合卵卵径。用 NaClO 溶液去除卵壳, 将收集到的脱壳卵用清水彻底冲洗,

用卢戈碘液固定后用于测定脱壳卵卵径。卤虫卵在 28 ℃、盐度 30、pH = 8、光照强度 2 000 lx 和连续充气的条件下进行孵化, 孵化约 24 h 后收集 I 期无节幼体, 用卢戈碘液固定后在解剖镜(DM500, 德国

LEICA)下分别测量水合卵径、脱壳卵径和 I 期无节幼体体长(l),并计算平均卵壳厚度.

$$h_{CT} = (d_{HC} - d_{DC})/2 \tag{1}$$

式中: h_{CT} 为平均卵壳厚度, d_{HC} 为水合卵径, d_{DC} 为脱壳卵径.

1.3 卤虫脱壳卵粗蛋白、粗脂肪和脂肪酸含量分析

脱壳后的卤虫卵在 60℃烘箱内干燥 24 h,参照 GB/T 6432—2018《饲料中粗蛋白的测定 凯氏定氮法》,用凯氏定氮仪(2300-Kjeldahl,丹麦 FOSS)测定卤虫卵中的粗蛋白含量;参照 GB/T 6433—2006《饲料中粗脂肪的测定》,用索氏提取法测定卤虫卵中的粗脂肪含量;提取脂肪酸并甲酯化,采用内标法(C20:2n-6,美国 NU-CHEK PREP)用气相色谱仪(GC-2014,日本岛津)分析其脂肪酸甲酯的组成和含量^[12].

1.4 卤虫无节幼体角黄素含量分析

收集湿质量约 1 g 的 I 期卤虫无节幼体(每个样品 3 个平行).用 $V(\text{氯仿}):V(\text{甲醇})=1:2$ 的混合物提取色素,35℃条件下用旋转蒸发仪(RV10,德国 IKA)浓缩.用氮气吹干后,用 1 mL 甲醇溶解色素提取物后备用^[13].以甲醇为溶剂配制含 0.005、0.01、0.02、0.1、0.2 g/L 角黄素(北京盛世康普化工技术研究院)的标准工作溶液.采用 C18 色谱柱(5.6 μm , 4.6 mm $\times$ 250 mm,日本岛津),柱温 25℃,流动相为 $V(\text{甲醇}):V(\text{乙腈})=9:1$ 的混合物,进样量 10 μL ,流量 1 mL/min^[14],于 477 nm 处测定吸收峰面积.以角黄素的质量浓度为横坐标,以对应的色谱峰面积为纵坐标制作角黄素标准曲线,根据样品峰面积计算得到角黄素含量.

1.5 孵化速率及孵化同步性测定

将 2 g 卤虫卵加入含有 1 L 稀释卤水(盐度为 30)的孵化管中,孵化条件同 1.2 节.每隔 4 h 使用 24 孔板(每孔取样 50 μL ,共 1.2 mL)采样一次,每组 3 个平行,在显微镜(DM500,德国 LEICA)下观察并记录无节幼体、伞状幼体和未孵化卵(胚胎)的数量,计算孵化率^[12].以最高孵化率为 100%,计算每个采样时间点的相对孵化率.针对相对孵化率,采用二元二次方程拟合计算 10%和 90%无节幼体的孵出时间,并计算孵化同步性^[12].

$$t_s = t_{90} - t_{10} \tag{2}$$

式中: t_s 为孵化同步性, t_{10} 、 t_{90} 分别为 10%和 90%无节幼体的孵出时间.

1.6 数据统计学分析

使用 SPSS 25.0 软件对实验结果进行统计分析,使用单因素方差分析和 Duncan's 多重比较对实验数据进行检验.

2 结 果

2.1 卤虫卵和 I 期无节幼体生物学测定值

4 个盐湖卤虫卵和 I 期无节幼体的生物学测定值见表 2.西藏 4 个盐湖卤虫卵水合卵径和脱壳卵径分别在 263.6~342.9 μm 和 248.5~315.5 μm ,I 期无节幼体体长为 519.6~601.1 μm .其中,拉果错卤虫卵水合卵径、脱壳卵径和 I 期无节幼体体长值最大,显著高于其他组($P<0.05$).当穹错卤虫卵卵壳厚度最小(4.1 μm),拉果错卤虫卵卵壳厚度最大(13.7 μm).

表 2 4 个盐湖卤虫卵和 I 期无节幼体的生物学测定值($n=100$)
Tab. 2 Biometrics of *Artemia* cysts and instar I nauplii from four salt lakes ($n=100$)

盐湖	$d_{HC}/\mu\text{m}$	$d_{DC}/\mu\text{m}$	$h_{CT}/\mu\text{m}$	$l/\mu\text{m}$
其香错	282.9 ± 17.1^c	257.9 ± 17.4^c	12.5	519.6 ± 49.7^d
班戈错	263.6 ± 22.7^d	248.5 ± 21.3^d	7.6	540.7 ± 38.8^c
拉果错	342.9 ± 18.8^a	315.5 ± 22.9^a	13.7	601.1 ± 59.3^a
当穹错	294.2 ± 18.0^b	286.1 ± 15.3^b	4.1	580.7 ± 56.1^b

注:同列数据上标的不同字母表示组间存在显著性差异($P<0.05$)

2.2 卤虫脱壳卵粗蛋白、粗脂肪和脂肪酸含量

4 个盐湖卤虫脱壳卵粗蛋白和粗脂肪含量见表 3,脱壳卵脂肪酸含量见表 4.西藏卤虫卵粗蛋白质量分数为 51.87%~57.29% (基于干质量,下同),粗脂肪质量分数为 18.02%~22.11%.在脂肪酸水平上,拉果错卤虫卵二十碳五烯酸(EPA, C20:5n-3)含量最高,为 42.49 mg/g, C16:1(n-7)和 C18:1(n-9)含量分别为 54.86 mg/g 和 20.34 mg/g,也明显高于其他盐湖

卤虫卵,且高不饱和脂肪酸(HUFA, C 原子数 ≥ 20 , $n\geq 3$)以及总脂肪酸含量最高,分别为 47.47 mg/g 和 217.98 mg/g.其香错卤虫卵二十二碳六烯酸(DHA, C22:6n-3)含量最高(0.96 mg/g),并且 C18:1(n-7)含量在 4 组中最高(55.07 mg/g).当穹错卤虫卵 EPA 含量最低(10.05 mg/g),未检测出 DHA,但 C18:3(n-3)和多不饱和脂肪酸(PUFA, C 原子数 ≥ 18 , $n\geq 2$)含量最高,分别为 44.67 mg/g 和 75.23 mg/g.

表 3 4 个盐湖卤虫脱壳卵粗蛋白和粗脂肪含量

Tab. 3 Crude protein content and crude fat content of the decapsulated *Artemia* cysts from four salt lakes

盐湖	w(粗蛋白)/%	w(粗脂肪)/%
其香错	57.29	21.71
班戈错	54.91	18.14
拉果错	51.87	22.11
当穹错	54.34	18.02

表 4 4 个盐湖卤虫脱壳卵脂肪酸含量

Tab. 4 Fatty acid profile of the decapsulated *Artemia* cysts from four salt lakes

脂肪酸种类	含量/(mg·g ⁻¹)			
	其香错	班戈错	拉果错	当穹错
C14:0	2.95	1.58	2.05	0.77
C14:1 (n-5)	1.06	0.91	1.10	0.71
C15:0	0.31	0.33	0.52	0.29
C15:1 (n-5)	0.30	0.33	0.49	—
C16:0	14.96	13.24	20.37	12.81
C16:1 (n-7)	16.07	27.25	54.86	10.62
C17:0	1.45	1.56	2.00	1.53
C17:1 (n-7)	0.71	0.74	1.03	0.58
C18:0	4.88	5.53	7.34	5.36
C18:1 (n-7)	55.07	24.08	42.31	37.48
C18:1 (n-9)	—	14.05	20.34	13.13
C18:2 (n-6)	13.43	3.88	5.78	13.13
C18:3 (n-3)	13.30	7.70	6.71	44.67
C18:3 (n-6)	7.46	2.48	3.33	5.54
C20:0	0.28	0.79	0.44	—
C20:1 (n-9)	1.52	1.55	1.04	0.62
C21:0	0.18	0.92	0.19	0.37
C20:4 (n-6), ARA	2.81	1.75	4.41	1.84
C20:5 (n-3), EPA	27.18	26.21	42.49	10.05
C22:0	0.26	0.26	0.25	—
C22:1	0.11	0.48	0.13	0.32
C22:2	0.20	0.10	0.23	—
C23:0	—	0.04	—	—
C22:6 (n-3), DHA	0.96	0.30	0.57	—
C24:0	—	0.38	—	—
总 PUFA	65.34	42.42	63.52	75.23
总 HUFA	30.95	28.26	47.47	11.89
总脂肪酸	165.45	136.44	217.98	159.82

注: 表中“—”表示未检出。PUFA 为多不饱和脂肪酸; HUFA 为高不饱和脂肪酸; ARA 为二十碳四烯酸; DHA 为二十二碳六烯酸; EPA 为二十碳五烯酸

2.3 卤虫无节幼体角黄素含量

4 个盐湖卤虫无节幼体的角黄素含量如图 1 所示, 图中数据柱上的不同字母表示组间存在显著差异 ($P < 0.05$)。4 个盐湖卤虫无节幼体中角黄素含量具有一定差异: 当穹错卤虫无节幼体的角黄素含量最高, 为 $(1.68 \pm 0.17) \text{ mg/g}$, 显著高于其香错和拉果错卤虫无节幼体 ($P < 0.05$), 但与班戈错卤虫角黄素含量差异不显著 ($P > 0.05$); 拉果错无节幼体的角黄素

含量最低, 为 $(0.84 \pm 0.03) \text{ mg/g}$ 。

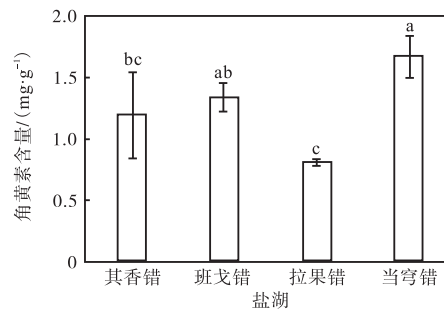


图 1 4 个盐湖卤虫无节幼体的角黄素含量

Fig. 1 Canthaxanthin content in *Artemia* nauplii from four salt lakes

2.4 卤虫卵的孵化速率

4 个盐湖卤虫卵在 28°C 、盐度 30 条件下的相对孵化率如图 2 所示, 卤虫卵孵化同步性数据见表 5。

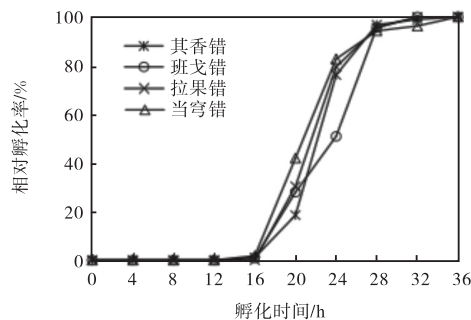
图 2 4 个盐湖卤虫卵在 28°C 、盐度 30 条件下的相对孵化率Fig. 2 Relative hatching rates of *Artemia* cysts from four origins at 28°C , salinity 30

表 5 卤虫卵孵化同步性

Tab. 5 Hatching synchronization of *Artemia* cysts

盐湖	拟合方程	t_{10}/h	t_{90}/h	t_s/h
其香错	$y = -0.1116x^2 + 10.481x - 124.22 (R^2 = 0.8979)$	15.3	30.1	14.8
班戈错	$y = 0.136x^2 - 0.6386x - 18.315 (R^2 = 0.9632)$	17.0	30.7	13.7
拉果错	$y = -0.1603x^2 + 12.63x - 143.24 (R^2 = 0.9137)$	15.0	29.5	14.5
当穹错	$y = -0.1781x^2 + 13.38x - 147.6 (R^2 = 0.9352)$	14.6	28.8	14.2

4 个盐湖卤虫卵均从孵化至 16 h 时开始检测到有无节幼体孵出, 16 ~ 28 h 为快速孵化期。孵化至 24 h 时, 其香错、拉果错和当穹错卤虫卵相对孵化率为 76.1% ~ 82.7%, 班戈错为 50.9%。孵化至 28 h 时, 4 个盐湖卤虫卵相对孵化率较高 (95% 左右)。根据每个时间点的相对孵化率绘制曲线并进行拟合, 计算后可以得出 t_{10} 和 t_{90} , 进而可以求得孵化同步性。4 个盐湖

卤虫卵的孵化同步性在 13.7 ~ 14.8 h 之间. 因此, 西藏卤虫卵孵化需要更长的时间 (28 h), 孵化速率较慢.

3 讨 论

到目前为止, 世界上已经发现 7 种两性卤虫和许多种孤雌生殖卤虫. 20 世纪 90 年代, Abatzopoulos 等^[15]应用卵和无节幼体的生物特征、成虫的形态特征、遗传、等位基因和 DNA 分析以及与已知卤虫品系的杂交测试等方法, 将拉果错的卤虫种群鉴定为 *Artemia tibetiana*. 然而, 通过线粒体 COI 基因和 12S-16S rRNA 基因的分子标记, 以及线粒体基因组测序, 西藏不同盐湖的卤虫种群已经出现了一定程度的分化. 西藏盐湖卤虫是否存在亚种或隐存种, 以及本研究所涉及的 4 个西藏盐湖卤虫的种属关系还有待进一步研究.

3.1 西藏卤虫卵的特征

同一产地不同批次卤虫卵卵径保持相对恒定, 且无节幼体体长和能量等生物学特征也与卵径高度相关, 因此根据卤虫卵的这些生物学特性可以区分不同产地 (品系) 的卤虫^[16]. 本研究结果表明, 西藏盐湖卤虫水合卵径和 I 期无节幼体体长均大于美国大盐湖 GSL 卤虫卵 (均值分别为 245.1 μm 和 438.9 μm) 和中国渤海湾塘沽卤虫卵 (均值分别为 273.7 μm 和 446.2 μm)^[17]. 拉果错卤虫卵比报道的鲸鱼湖卤虫卵更大, 但两者的 I 期无节幼体体长相似 (分别为 601.1 μm 和 607.1 μm)^[6], 后者是迄今报道的最大的卤虫无节幼体. 藏北盐湖大部分位于海拔 4 400 m 以上的高海拔地区, 紫外线辐射强, 年平均气温低 (夏季平均气温为 16.9 $^{\circ}\text{C}$, 冬季平均气温为 -21.3 $^{\circ}\text{C}$), 气温日变化大^[2]. 一般而言, 生活在高纬度寒冷气候中的生物往往比生活在低纬度地区的生物体型更大^[18], 如南美洲太平洋沿岸卤虫成虫的体型有随着纬度的增加而增大的趋势^[19], 淡水桡足类^[20]、枝角类^[21]和轮虫^[22-23]等其他水生浮游动物有同样的现象. 本研究中西藏卤虫的卵径和 I 期无节幼体体长均较大, 这可能与西藏卤虫的品系特征以及青藏高原独特的地理环境条件有关.

3.2 西藏卤虫无节幼体的角黄素含量

角黄素是卤虫中的主要类胡萝卜素^[16]. Tsushima 等^[24]发现大盐湖卤虫卵中角黄素占总类胡萝卜素的 97.5%, 但初孵无节幼体中角黄素的含量还未见报道. 补充角黄素可以促进虹鳟鱼^[25-27]和鲑鱼^[28-29]肌

肉的色素沉积, 并提升虹鳟鱼卵^[25]的色素含量. 本研究中 4 个盐湖卤虫 I 期无节幼体角黄素含量具有一定的差异, 当穹错卤虫无节幼体的角黄素含量最高, 为 $(1.68 \pm 0.17) \text{ mg/g}$, 而拉果错卤虫无节幼体的角黄素含量最低, 为 $(0.80 \pm 0.03) \text{ mg/g}$, 推测角黄素含量的差异可能与卤虫种群遗传背景和环境有关.

3.3 西藏卤虫卵的 HUFA 含量

卤虫卵的营养组成 (如粗蛋白、粗脂肪和脂肪酸等) 及其代谢产物在不同品系或同一品系不同批次之间具有一定的差异. 与美国大盐湖和中国渤海湾卤虫卵相比, 西藏其香错、拉果错和班戈错卤虫卵 EPA 和 DHA 含量较高, HUFA 含量为 28.26 ~ 47.47 mg/g, 而大盐湖 HUFA 含量仅为 5.01 mg/g, 当穹错卤虫卵并未与其他 3 个盐湖呈现出相同的结果, 其 EPA 含量 (10.05 mg/g) 和 HUFA 含量 (11.89 mg/g) 与渤海湾卤虫卵的 EPA 含量 (14.96 mg/g) 和 HUFA 含量 (17.65 mg/g) 相似^[11]. 卤虫卵的营养组成与卤虫所摄食的饵料 (如单细胞藻类、细菌和古菌等) 的营养成分差异有关^[30-33]. 不同卤虫种群的脂肪酸组成和含量受物种^[32,34-35]和饵料营养^[30,36]的影响, 当投喂 HUFA 含量高的饵料时, 卤虫 HUFA 含量也更高^[30,36-37]. 但是, 关于西藏盐湖微生物组成及其 HUFA 含量的信息十分有限. 与其他 3 个盐湖卤虫卵相比, 当穹错卤虫卵 HUFA 含量较低, 这可能与该盐湖引进外源 HUFA 含量低的卤虫品系^[38]以及湖中饵料微生物营养缺乏有关. 除了品系和饵料因素外, 西藏卤虫卵 HUFA 含量高还可能与高原强烈的紫外线辐射和极低的水温有关. 缪锦来等^[39]发现增强 UV-B 紫外线辐射可以增加 4 种南极冰藻中 PUFA 的含量. Skerratt 等^[40]指出, UV-B 辐射使南极棕囊藻 (*Phaeocystis antarctica*) PUFA 的比例增加. 因此, 强烈的紫外线辐射可能会增加西藏盐湖微生物中 PUFA 的含量, 从而通过食物吸收促进 HUFA 在西藏卤虫体内的转化和积累. 此外, 卤虫对脂肪酸的代谢也会影响 HUFA 的含量. 动物的脂肪酸代谢与温度有关, 温度升高会提高脂肪酸的代谢率^[41]. 随着温度的升高, 卤虫 HUFA 的代谢速率变得更快^[42-43]. 因此, 可以推测西藏盐湖较低的温度可能会降低西藏卤虫的脂肪酸代谢率, 从而导致卤虫体内 HUFA 的积累. 然而, 西藏卤虫较高的 HUFA 含量是否与低温下较低的 HUFA 代谢有关还有待研究.

卤虫中较高的 HUFA 含量以及 DHA/EPA 比有利于鱼和虾幼体的存活和生长发育^[1,44-45]. 本课题组

前期研究发现, 用其香错初孵无节幼体投喂凡纳滨对虾幼虾^[11]和杂交石斑鱼幼体^[46], 与其他品系的卤虫相比, 其香错卤虫表现出良好的育苗效果, 显著提升苗种对氨氮胁迫和弧菌攻毒的抵抗力。同时西藏卤虫卵^[4,6-7]和无节幼体^[11,46]富含 HUFA, 收获时无节幼体与卵壳分离较好, 且收获后不需要进行 HUFA 强化, 可直接投喂, 能很好地满足海水鱼类、甲壳类苗种以及发育后期阶段苗种的营养需求。

3.4 西藏卤虫卵的孵化特性

卤虫卵的孵化率和孵化同步性能够显著影响其市场价格。孵化同步性好的卵能在较短的时间内产出较多大小均匀的无节幼体, 育苗场倾向于使用在 24 h 内孵化率达到最高且孵化同步性好的卤虫卵^[14]。优质卤虫卵的孵化同步性 t_s 应小于 8 h, t_s 超过 10 h 则被认为孵化同步性较差^[12]。本研究表明, 其香错、班戈错、拉果错和当穹错的卤虫卵孵化率较高, 孵化时间较长(28 h), 其孵化同步性 t_s 为 13.7~14.8 h, 说明西藏卤虫卵孵化同步性较差, 孵化结束晚, 孵化速率慢, 孵化具有滞后性。

4 结 语

西藏盐湖卤虫具有较大的卵径和 I 期无节幼体体长; 其香错、班戈错和拉果错卤虫卵营养价值较高, 尤其富含 EPA, 以及少量 DHA。其香错、班戈错、拉果错和当穹错卤虫卵孵化率较高, 但 4 个盐湖卤虫卵孵化时间长, 孵化结束晚, 孵化同步性较差。其香错、班戈错和拉果错卤虫卵具有 HUFA 含量高的优点, 孵化后可直接投喂, 不需要额外的强化, 因此更适用于海水鱼虾幼苗的培育; 而相对较大的初孵卤虫无节幼体也能更好地满足发育后期的水产苗种对饵料适口性的需求。今后需要对西藏盐湖卤虫资源量及其品系特性开展深入的考察和研究, 进一步探究西藏卤虫卵的加工工艺和最适孵化条件, 以期生产高质量的西藏卤虫卵, 可持续地开发和利用西藏卤虫资源。

参考文献:

- [1] SORGELOOS P, DHERT P, CANDREVA P. Use of the brine shrimp, *Artemia* spp., in marine fish larviculture[J]. Aquaculture, 2001, 200(1/2): 147-159.
- [2] 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 415.
- [3] 刘俊英, 郑绵平, 罗健. 西藏拉果错卤虫: I. 生物学特征[J]. 湖泊科学, 1998(2): 92-96.
- [4] 刘俊英, 罗健, 郑绵平. 西藏拉果错卤虫: 2. 营养成分[J]. 湖泊科学, 1999(3): 283-288.
- [5] 刘凤岐, 纪炳纯, 李晖, 等. 西藏卤虫卵最适孵化温度的研究[J]. 动物科学与动物医学, 2001, 19(5): 26-28.
- [6] VAN STAPPEN G, SUI L Y, XIN N H, et al. Characterisation of high-altitude *Artemia* populations from the Qinghai-Tibet Plateau, PR China[M]//DUMONT H J. Aquatic biodiversity: a celebratory volume in honour of Henri J. Dumont. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003: 179-192.
- [7] 于秀玲, 辛乃宏. 四种西藏卤虫卵的生物学特性分析[J]. 海湖盐与化工, 2006, 35(1): 25-26.
- [8] 潘正军, 朱传坤, 许虹, 等. 温度、盐度对西藏卤虫卵孵化率的影响[J]. 水产养殖, 2017, 38(10): 24-27.
- [9] 潘正军, 沈丹, 茆佳, 等. 光照强度和 pH 对西藏卤虫孵化率的影响[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2019, 48(2): 159-161.
- [10] 李炳乾, 刘洪岩, 张云泽, 等. 西藏双湖卤虫卵孵化条件的研究[J]. 盐科学与化工, 2018, 47(6): 37-39.
- [11] 邢明威, 邓洪刚, 高美荣, 等. 不同产地卤虫幼体对凡纳滨对虾仔虾生长、肌肉组分和抗胁迫能力的影响[J]. 中国水产科学, 2022, 29(1): 70-78.
- [12] 杜东东, 高美荣, 张波, 等. 哈萨克斯坦和俄罗斯主要盐湖卤虫卵生物学和营养学特性分析[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(3): 57-62.
- [13] LU W L, XU Q, LI R C, et al. Growth and pigmentation of halophilic archaea *Haloarcula* isolated from salt-ponds[J]. Marine science bulletin, 2017, 19(1): 76-84.
- [14] DA SILVA F O, TRAMONTE V L C G, PARISENTI J, et al. *Litopenaeus vannamei* muscle carotenoids versus astaxanthin: a comparison of antioxidant activity and in vitro protective effects against lipid peroxidation[J]. Food bioscience, 2015, 9: 12-19.
- [15] ABATZOPOULOS T J, ZHANG B, SORGELOOS P. *Artemia tibetiana*: preliminary characterization of a new *Artemia* species found in Tibet (People's Republic of China). International Study on *Artemia*. LIX [J]. International journal of salt lake research, 1998, 7: 41-44.
- [16] BAERT P, BOSTEELS T, SORGELOOS P. Manual on the production and use of live food for aquaculture[M]. Rome: FAO, 1996.
- [17] 隋丽英, 王娇. 不同品系卤虫卵的生物学测定值和营养组成分析[J]. 天津科技大学学报, 2014, 29(1): 46-50.
- [18] ATKINSON D, SIBLY R M. Why are organisms usually bigger in colder environments? Making sense of a life

- history puzzle[J]. Trends in ecology & evolution, 1997, 12(6): 235–239.
- [19] GAJARDO G, COLIHUEQUE N, PARRAGUEZ M, et al. International study on *Artemia* LVIII. Morphologic differentiation and reproductive isolation of *Artemia* populations from South America[J]. International journal of salt lake research, 1998, 7(2): 133–151.
- [20] VILLALOBOS L, ZUNIGA L. Latitudinal gradient and morphological variability of copepods in Chile: *Boeckella gracilipes* Daday[J]. Internationale vereinigung für theoretische und angewandte limnologie: verhandlungen, 1991, 24(5): 2834–2838.
- [21] GILLOOLY J F, DODSON S I. Latitudinal patterns in the size distribution and seasonal dynamics of new world, freshwater cladocerans[J]. Limnology and oceanography, 2000, 45(1): 22–30.
- [22] STELZER C P. Phenotypic plasticity of body size at different temperatures in a planktonic rotifer: mechanisms and adaptive significance[J]. Functional ecology, 2002, 16(6): 835–841.
- [23] WALCZYŃSKA A, LABECKA A M, SOBCZYK M, et al. The temperature-size rule in *Lecane inermis* (Rotifera) is adaptive and driven by nuclei size adjustment to temperature and oxygen combinations[J]. Journal of thermal biology, 2015, 54: 78–85.
- [24] TSUSHIMA M, MATSUNO T. Z-carotenoids in cysts of brine shrimp, *Artemia franciscana*[J]. Fisheries science, 1999, 65(1): 173–174.
- [25] HARRIS L E. Effects of a broodfish diet fortified with canthaxanthin on female fecundity and egg color[J]. Aquaculture, 1984, 43(1/2/3): 179–183.
- [26] CHOUBERT G, STOREBAKKEN T. Dose response to astaxanthin and canthaxanthin pigmentation of rainbow trout fed various dietary carotenoid concentrations[J]. Aquaculture, 1989, 81(1): 69–77.
- [27] CHOUBERT G, HEINRICH O. Carotenoid pigments of the green alga *Haematococcus pluvialis*: assay on rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, pigmentation in comparison with synthetic astaxanthin and canthaxanthin[J]. Aquaculture, 1993, 112(2/3): 217–226.
- [28] BUTTLE L G, CRAMPTON V O, WILLIAMS P D. The effect of feed pigment type on flesh pigment deposition and colour in farmed Atlantic salmon, *Salmo salar* L.[J]. Aquaculture research, 2001, 32(2): 103–111.
- [29] BAKER R T M, PFEIFFER A M, SCHÖNER F J, et al. Pigmenting efficacy of astaxanthin and canthaxanthin in fresh-water reared Atlantic salmon, *Salmo salar*[J]. Animal feed science and technology, 2002, 99(1/2/3/4): 97–106.
- [30] ZHUKOVA N V, IMBS A B, YI L F. Diet-induced changes in lipid and fatty acid composition of *Artemia salina*[J]. Comparative biochemistry and physiology part B: biochemistry and molecular biology, 1998, 120(3): 499–506.
- [31] TOI H T, BOECKX P, SORGELOOS P, et al. Bacteria contribute to *Artemia* nutrition in algae-limited conditions: a laboratory study[J]. Aquaculture, 2013, 388: 1–7.
- [32] PEYKARAN M A N, VAHABZADEH H, SEIDGAR M, et al. Proximate composition and fatty acids profiles of *Artemia* cysts, and nauplii from different geographical regions of Iran[J]. Iranian journal of fisheries sciences, 2014, 13(3): 761–775.
- [33] TURCIHAN G, TURGAY E, YARDIMCI R E, et al. The effect of feeding with different microalgae on survival, growth, and fatty acid composition of *Artemia franciscana* metanauplii and on predominant bacterial species of the rearing water[J]. Aquaculture international, 2021, 29(5): 2223–2241.
- [34] RUIZ O, AMAT F, NAVARRO J C. A comparative study of the fatty acid profile of *Artemia franciscana* and *A. persimilis* cultured at mesocosm scale[J]. Journal of experimental marine biology and ecology, 2008, 354(1): 9–16.
- [35] NACEUR H B, ROMDHAN M S, STAPPEN G V. Potential use of fatty acid profile for *Artemia* spp. discrimination[J]. Inland water biology, 2020, 13: 434–444.
- [36] NAVARRO J C, AMAT F. Effect of algal diets on the fatty acid composition of brine shrimp, *Artemia* sp., cysts[J]. Aquaculture, 1992, 101(3/4): 223–227.
- [37] HINCHCLIFFE P R, RILEY J P. The effect of diet on the component fatty-acid composition of *Artemia salina*[J]. Journal of the marine biological association of the United Kingdom, 1972, 52(1): 203–211.
- [38] 贾沁贤, 刘喜方, 王洪平, 等. 西藏盐湖生物与生态资源及其开发利用[J]. 科技导报, 2017, 35(12): 19–26.
- [39] 缪锦来, 阚光锋, 姜英辉, 等. 4种南极冰藻的生化组成对 UV-B 辐射增强的响应[J]. 海洋科学, 2004, 28(9): 26–31.
- [40] SKERRATT J H, DAVIDSON A D, NICHOLS P D, et al. Effect of UV-B on lipid content of three antarctic marine phytoplankton[J]. Phytochemistry, 1998, 49(4): 999–1007.

- [6] 徐国英,卢军,薛劲鲁. 基于 CFD 的汽车迎面会车过程气动干扰特性仿真研究[J]. 测试技术学报, 2010, 24(6): 502-506.
- [7] 王靖宇,惠政,于旭涛,等. 会车瞬态气动特性对操纵稳定性的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2016, 30(11): 7-11.
- [8] 范鹏飞. 厢式货车与客车会车过程的气动特性研究[D]. 济南:山东大学, 2018.
- [9] 唐洪涛,陈广厚,苗秀奇,等. 基于 CFD 的超车过程车辆气动特性研究[J]. 天津科技大学学报, 2019, 34(3): 68-75.
- [10] 唐洪涛,杨峻程,张祥,等. 基于 CFD 的双道超车过程气动特性分析[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(3): 254-266.
- [11] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京:北京大学出版社, 2011.
- [12] 谷正气,杨滨徽,龚旭,等. 会车瞬态气动特性分析与研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 27-31.

责任编辑:周建军

(上接第 28 页)

- [41] CLARKE A, FRASER K P P. Why does metabolism scale with temperature?[J]. Functional ecology, 2004, 18(2): 243-251.
- [42] EVJEMO J O, COUTTEAU P, OLSEN Y, et al. The stability of docosahexaenoic acid in two *Artemia* species following enrichment and subsequent starvation[J]. Aquaculture, 1997, 155(1/2/3/4): 135-148.
- [43] ESTEVEZ A, MCEVOY L A, BELL J G, et al. Effects of temperature and starvation time on the pattern and rate of loss of essential fatty acids in *Artemia* nauplii previously enriched using arachidonic acid and eicosapentaenoic acid-rich emulsions[J]. Aquaculture, 1998, 165(3/4): 295-311.
- [44] ZUO R T, AI Q H, MAI K S, et al. Effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, nonspecific immunity, expression of some immune related genes and disease resistance of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) following natural infestation of parasites (*Cryptocaryon irritans*) [J]. Fish & shellfish immunology, 2012, 32(2): 249-258.
- [45] JIN M, LU Y, YUAN Y, et al. Regulation of growth, antioxidant capacity, fatty acid profiles, hematological characteristics and expression of lipid related genes by different dietary n-3 highly unsaturated fatty acids in juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*) [J]. Aquaculture, 2017, 471: 55-65.
- [46] 刘晓翠,邓洪刚,于学权,等. 不同产地卤虫幼体对云龙石斑鱼幼苗生长和抗胁迫能力的影响[J]. 天津科技大学学报, 2022, 37(2): 18-23.

责任编辑:周建军