

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200224002

http://www.yykxjz.cn/

秦少宗, 冷小茜, 罗江, 杜浩, 刘志刚, 乔新美, 熊伟, 危起伟. 中华鲟幼鱼渗透调节器官组织结构在海水条件下的适应性调整. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 82–89

QIN S Z, LENG X Q, LUO J, DU H, LIU Z G, QIAO X M, XIONG W, WEI Q W. Adaptive adjustment of osmotic organ structure of juvenile Chinese sturgeon in seawater conditions. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 82–89

中华鲟幼鱼渗透调节器官组织结构 在海水条件下的适应性调整*

秦少宗^{1,2} 冷小茜² 罗江² 杜浩²
刘志刚² 乔新美² 熊伟² 危起伟^{1,2①}

(1. 西南大学生命科学学院 重庆 400715; 2. 中国水产科学研究院长江水产研究所
农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室 湖北 武汉 430223)

摘要 本研究以淡水养殖中华鲟(*Acipenser sinensis*)幼鱼为研究对象,采用连续升盐的方式实施海水驯化实验,对驯化过程中不同盐度下中华鲟幼鱼渗透调节器官鳃、肾和肠组织结构进行比较研究,以期了解各器官在渗透调节过程中的适应性变化。结果显示,中华鲟幼鱼在海水条件下存活率达100%;海水驯化过程中,随着盐度的升高,中华鲟幼鱼鳃小片宽度显著减小($P<0.05$),相邻鳃小片间距、泌氯细胞直径显著增加($P<0.05$),表明中华鲟幼鱼从淡水环境逐渐向海水环境适应过程中,通过改变鳃小片宽度及相邻间距,加快机体与外界水氧交换量,增加泌氯细胞大小,提高细胞代谢水平,以应对海水环境的高渗透压。同时,中华鲟幼鱼肾小球长径在海水驯化过程中显著减小($P<0.05$),同时数量也略有减少,表明中华鲟幼鱼通过降低肾脏的滤过功能减少机体水分丧失,以适应外界环境渗透压的变化。肠道组织结构未观察到明显变化。研究表明,中华鲟幼鱼具有较强的海水适应能力,渗透调节器官主要通过改变鳃小片宽度和间距、泌氯细胞大小及肾小球大小和数量来适应海水盐度变化。

关键词 中华鲟; 渗透调节; 组织结构; 海水条件

中图分类号 Q174 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)04-0082-08

中华鲟(*Acipenser sinensis*)是一种典型的大型溯河生殖洄游型鱼类,国家一级保护动物(Wei *et al.*, 1997; 庄平等, 1999; 李罗新等, 2011)。受人类活动的影响,20世纪后期,中华鲟自然种群规模急剧缩小,并连续多年出现繁殖中断的现象(吴金明等, 2017)。在自然生态环境短期改善困难的前提下,迁地保护成为中华鲟物种资源延续的主要途径。中华鲟的养殖以及全人工繁殖技术的突破,实现了淡水人工环境下中

华鲟种群的自我维持(郭柏福等, 2011; 危起伟等, 2013)。目前,中华鲟的保种养殖均以淡水为主,长期的淡水环境使中华鲟面临性成熟个体比例低、繁殖力下降和后代患病比例升高等诸多问题(危起伟等, 2013; 张书环等, 2017; 罗江等, 2020)。为避免纯淡水圈养环境中中华鲟长期保种的不利影响,探索中华鲟“陆—海—陆”养殖模式成为国家新的重要决策。

水体盐度对鱼类,尤其是海洋鱼类和洄游鱼类的

* 中国水产科学研究院基本科研业务费(2019ZD03; 2020TD08) [This work was supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2019ZD03; 2020TD08)]. 秦少宗, E-mail: qinshaoz691@126.com

① 通讯作者: 危起伟, 研究员, E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

收稿日期: 2020-02-24, 收修改稿日期: 2020-04-10

影响不容忽视(Bœuf *et al.*, 2001)。水体盐度的改变迫使鱼类自身通过一系列生理变化来调节体内外的渗透压平衡, 进而影响鱼类的存活、生长和繁殖(Hirose *et al.*, 2003)。鱼类渗透调节主要通过鳃、肾、肠等器官来完成(McCormick *et al.*, 2006), 是一个牵扯到组织(鳃、肾、肠)、细胞(泌氯细胞)、酶(Na^+ - K^+ -ATPase)、激素(皮质醇、生长激素、催乳素等)和相关基因(胰岛素样生长因子 I 和催乳素 I 等)等协同作用的复杂过程(何绪刚, 2008; 刘珊等, 2011; 张晨捷等, 2013)。无论是淡水硬骨鱼的高渗调节还是海水硬骨鱼的低渗调节, 鳃和肾在对 Na^+ 和 Cl^- 进行着不断的吸收或排出, 从而维持机体的水盐平衡, 使机体处于稳态。除了鳃和肾脏外, 某些鱼类的肠具有泌盐功能(林浩然, 2011)。对鱼类渗透调节过程中生理生化的研究, 主要是观察鳃(鳃丝和泌氯细胞)和肾脏等渗透调节器官的形态变化、 Na^+ / K^+ -ATPase 活性和血清(浆)的渗透压、离子浓度和激素浓度的变化(崔文晓等, 2017)。

目前, 关于中华鲟幼鱼渗透调节器官的组织结构变化特点的研究主要集中于特定盐度下鳃上皮泌氯细胞的特征(吴贝贝, 2014; 李伟, 2014; 刘娟娟等, 2015; 赵峰等, 2016)。本研究利用海水驯化阶段的不同盐度条件, 分析中华鲟幼鱼鳃、肾和肠等渗透调节器官组织结构的适应性调整, 旨在为中华鲟海水适应过程渗透调节机制的研究提供更多的组织学资料, 为中华鲟的海水保种养殖积累基础生物学数据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与条件

实验鱼来源于中国水产科学研究院长江水产研究所荆州太湖中华鲟繁育基地提供的2017年人工繁殖的150尾中华鲟子二代幼鱼。实验在浙江省舟山市水产研究所基地进行。挑选摄食正常、健壮活泼、规格均匀的个体, 平均体重为(5.1±1.1) kg/尾, 平均全长为(100.6±6.5) cm/尾的中华鲟幼鱼进行实验。实验养殖前, 将中华鲟幼鱼放至6.0 m×6.0 m×1.5 m的混凝土水池中驯化1周。实验期间, 每天的换水量不低于总水量的50%。连续曝气, 溶解氧为8.5~9.5 mg/L, 水温为17.0℃~18.2℃。实验所用饲料为天马牌中华鲟专用配合饲料。实验期间每天08:00和18:00按照体重的0.5%进行投喂, 投喂结束后, 将残饵及时捞出。

1.2 实验方法

将实验鱼随机分为2组(淡水组和海水组), 每组3个重复, 每个重复25尾鱼, 放至混凝土水池中养

殖。当地的海水盐度为25, 根据中华鲟在盐度为0~25均能长时间生存的报道(Zhao *et al.*, 2011), 本研究海水组养殖水体海化过程按照盐度每天升高1, 盐度从0升至25, 当升至9、17、25三个盐度时各稳定5 d。

每组分别在0、9、17、25四个盐度稳定期随机抽取3尾实验鱼, 取其鳃、肾和肠组织, 用中性组织固定液(4%多聚甲醛)进行固定, 12 h后换1次固定液, 固定24 h后转入70%的酒精中保存。将组织样品进行梯度酒精脱水, 二甲苯透化, 石蜡包埋, Leica RM2235切片机制片, 厚度为4 μm, 进行苏木精-伊红(HE)染色, 用Leica DM5000 B拍照并进行图像分析。

1.3 数据处理

每次取样前统计每组死亡鱼尾数, 计算存活率。使用Leica Application Suite Version 4.12.0图像软件对鳃丝显微结构中的鳃小片宽度、鳃小片间距、泌氯细胞直径和肾小球长径进行测量。使用Excel 2010软件对数据进行统计分析, 采用SPSS 19.0软件对实验数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 使用Duncan法进行组间多重比较, 显著性水平设为0.05, 实验结果用平均值±标准差(Mean±SD)表示。

2 结果

2.1 盐度适应过程中中华鲟幼鱼的存活率

如表1所示, 海水组中华鲟在4个盐度采样点采样前均未出现死亡, 存活率为100%; 淡水组除在盐度为9时1尾鱼死亡(体型过瘦), 其他采样点均未出现死亡现象。

表1 不同盐度下中华鲟幼鱼的存活率
Tab.1 Survival rate of juvenile *A. sinensis* at different salinities

盐度 Salinity	存活率 Survival rate/%	
	海水组 Seawater group	淡水组 Freshwater group
0	100	100
9	100	99
17	100	100
25	100	100

2.2 盐度对中华鲟幼鱼鳃丝组织结构的影响

由图1可见, 中华鲟幼鱼鳃丝布满扁平的鳃小片。鳃小片由扁平细胞、柱细胞、血细胞和泌氯细胞组成, 细胞饱满, 排列紧密。扁平细胞位于鳃小片外侧, 呈上、下2层分布。柱细胞位于呼吸细胞之间起

支持作用。泌氯细胞主要分布在鳃小片基部和瓣间区域,少量分布在鳃小片上。由表2可知,随着盐度的升高,鳃小片宽度逐渐变小。0盐度组鳃小片宽度最大,且显著大于其他盐度组($P<0.05$);相邻鳃小片间距随盐度的升高逐渐变大,0盐度组鳃小片间距最小,且显著小于其他盐度组($P<0.05$)。鳃小片基部为复层上皮,其间分布有黏液细胞和泌氯细胞。泌氯细胞呈圆形或椭圆形,细胞核位于中央。泌氯细胞主要分布在鳃丝上,鳃小片上也有少量分布。随盐度升高,泌氯细胞直径变大,数量也略有增多,其中,25盐度组泌氯细胞直径最大,显著大于其他盐度组($P<0.05$)。

2.3 盐度对中华鲟幼鱼肾组织结构的影响

由图2可知,中华鲟幼鱼肾组织主要由许多肾小体和肾小管组成,肾小体由外侧的肾小囊和内部毛细血管盘曲而成的肾小球组成。与25盐度组相比,0盐度组肾组织结构充实,肾小管粗壮,而25盐度组肾小管数量减少,管径也略有缩小,但无显著差异。由表3可知,随盐度的升高,肾小球长径逐渐变小,同时数量也略有减少;0盐度组的肾小球长径最大,且显著大于其他盐度组($P<0.05$);25盐度组的肾小球长径最小,且显著小于其他盐度组($P<0.05$)。

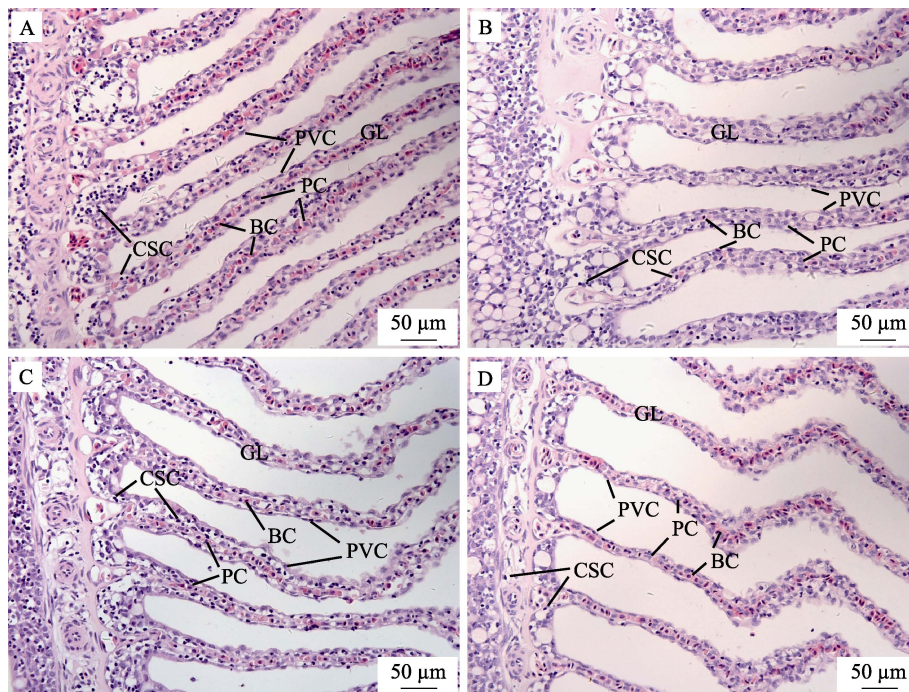


图1 不同盐度下中华鲟幼鱼鳃丝组织切片(HE)

Fig.1 Histologic section of gill filaments of juvenile *A. sinensis* at different salinities

A: 盐度0; B: 盐度9; C: 盐度17; D: 盐度25

BC: 血细胞; CSC: 泌氯细胞; GL: 鳃小片; PC: 柱细胞; PVC: 扁平上皮细胞

A: 0 salinity; B: 9 salinity; C: 17 salinity; D: 25 salinity

BC: Blood cell; CSC: Chloride secreting cell; GL: Gill lamellae; PC: Pillar cell; PVC: Pavement cell

表2 不同盐度对中华鲟幼鱼鳃丝显微结构的影响

Tab.2 Effects of different salinities on microstructure of gill in juvenile *A. sinensis*

盐度 Salinity	鳃小片宽度 Breadth of gill lamella/ μm	鳃小片间距 Spacing of gill lamella/ μm	泌氯细胞直径 Chloride cells diameter/ μm
0	41.97 \pm 8.67 ^a	33.65 \pm 9.60 ^a	5.86 \pm 0.67 ^a
9	33.65 \pm 9.29 ^b	41.45 \pm 11.71 ^b	5.91 \pm 0.74 ^a
17	31.87 \pm 6.43 ^{bc}	42.94 \pm 6.87 ^b	6.04 \pm 0.79 ^a
25	28.61 \pm 4.96 ^c	43.75 \pm 9.13 ^b	6.63 \pm 0.79 ^b

注: 同列数据不同上标字母表示组间差异显著($P<0.05$)。下同

Note: Different superscripts in the same column denote significant differences between groups ($P<0.05$). The same as below

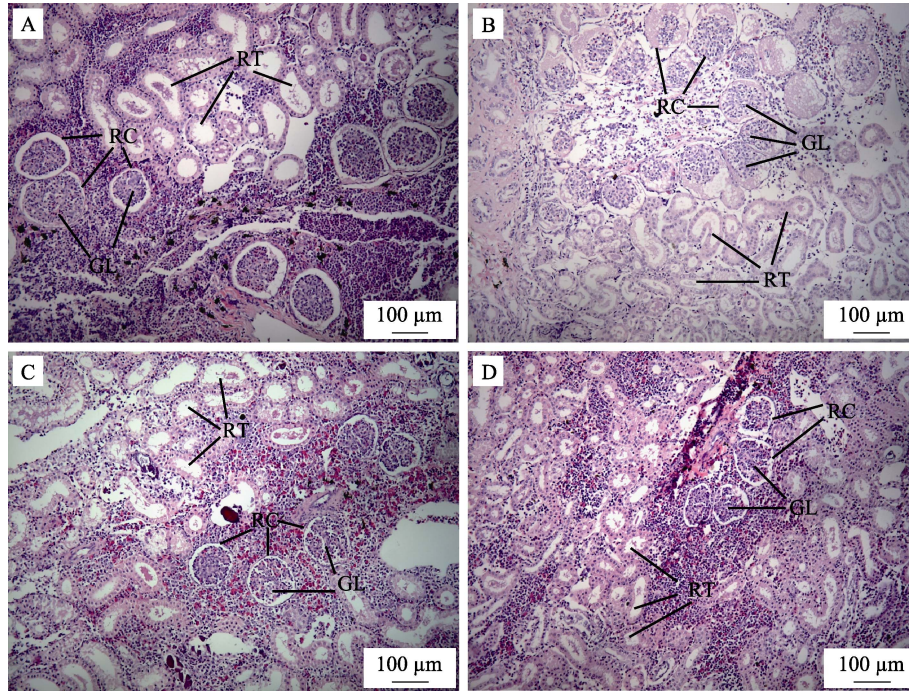


图 2 不同盐度下中华鲟幼鱼肾组织切片(HE)

Fig.2 Kidney histologic sections of juvenile *A. sinensis* at different salinities

A: 0 盐度; B: 9 盐度; C: 17 盐度; D: 25 盐度; GL: 肾小球; RC: 肾小囊; RT: 肾小管
 A: 0 salinity ; B: 9 salinity ; C: 17 salinity ; D: 25 salinity ;
 GL: Glomerulus; RC: Renal capsule; RT: Renal tubule

表 3 不同盐度对中华鲟幼鱼肾小球长径的影响

Tab.3 Effects of different salinities on kidney glomerular long-diameter of juvenile *A. sinensis*

盐度 Salinity	肾小球长径 Glomerular long-diameter/ μm
0	121.03 \pm 21.70 ^a
9	92.27 \pm 14.16 ^b
17	86.26 \pm 15.74 ^b
25	77.78 \pm 14.75 ^c

2.4 盐度对中华鲟幼鱼肠组织结构的影响

由图 3 可见, 中华鲟幼鱼肠道从里到外由黏膜层、黏膜下层、肌层和浆膜组成。黏膜层从里到外由固有层、单层柱状上皮细胞和杯状细胞构成。单层柱状上皮细胞呈条纹状, 从固有层向外延伸。在 0、9、17 和 25 四个盐度时, 肠道内部形状完整, 肠黏膜形态结构未发生明显变化。

3 讨论

3.1 盐度对中华鲟幼鱼耐盐性、存活率和渗透调节的影响

鱼类的生存和生长面临着众多的环境因素, 比如

温度、盐度和饵料等。其中, 盐度是影响鱼类生存生长和生理性能的主要环境因素之一(Bœuf *et al*, 2001; 张梦淇等, 2016; 张春禄等, 2017)。为了解盐度对水产养殖鱼类的影响, 人们进行了许多鱼类海水驯化养殖的研究。研究表明, 众多鱼类具有广泛的耐盐性, 比如, 中华乌塘鳢(*Bostrychus sinensis*)的耐盐性是5~35 (Zhang *et al*, 2017), 金鲳(*Trachinotus ovatus*)的耐盐性是5~35 (Liu *et al*, 2019), 大西洋比目鱼(*Hippoglossus hippoglossus* L.)的耐盐性是15~32 (Imstrand *et al*, 2008)。在本研究中, 中华鲟幼鱼在盐度0~25均能存活, 且存活率为100%, 这和李伟(2014)对于人工繁殖的中华鲟幼鱼仍具有盐度适应性的研究结果一致。此外, 在盐度驯化过程中, 随着盐度的升高, 海水组中华鲟幼鱼血清渗透压和主要离子(Na^+ 和 Cl^-)均出现先升高后保持稳定的现象(未发表), 说明中华鲟幼鱼具有良好的渗透调节能力, 能较好地适应海水变化, 这也与中华鲟的海洋生活史相一致。因此, 确定广盐性鱼类养殖的最佳盐度范围和能承受的盐度波动范围, 对于制定合适的盐度养殖范围非常重要。

3.2 盐度对中华鲟幼鱼鳃组织结构的影响

鳃是鱼类的第一道渗透调节线, 它确保机体进行等渗调节, 在应对外界环境变化中发挥着重要的作用

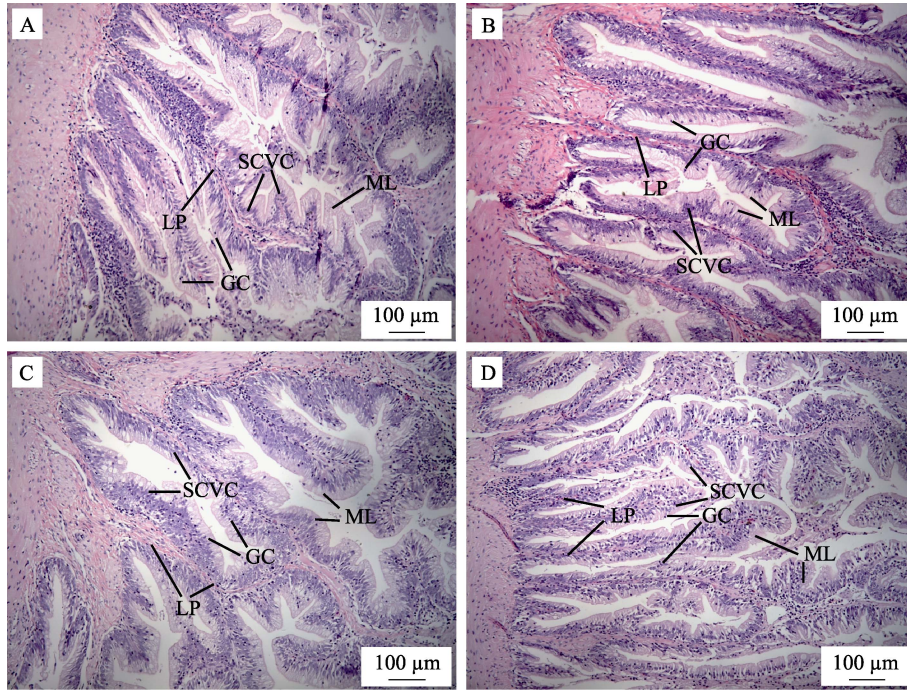


图3 不同盐度下中华鲟幼鱼肠组织切片(HE)

Fig.3 Intestinal histologic sections of juvenile *A. sinensis* at different salinities

A: 0 盐度; B: 9 盐度; C: 17 盐度; D: 25 盐度;

GC: 杯状细胞; LP: 固有层; ML: 黏膜层; SCVC: 单层柱状上皮细胞

A: 0 salinity; B: 9 salinity; C: 17 salinity; D: 25 salinity;

GC: Goblet cells; LP: Lamina propria; ML: Mucous layer; SCVC: Simple columnar epithelial cell

(El-Leithy *et al*, 2019)。在本研究中,中华鲟幼鱼在淡水和低盐度组,鳃小叶较宽,这可能有利于增大与水体的接触面积,便于从水中吸收无机盐离子来适应低渗环境(温久福等, 2020);在高盐度组,鳃小叶变窄且相邻间距变宽,这可能是由于外界水环境的渗透压升高,鱼体渗透调节所消耗的能量、耗氧量均增加,间距变宽有利于经过鳃丝的水量增加,从而使机体与外界的水氧交换加快(刘龙龙等, 2019)。这与姜明等(1998)对于蓝非鲫[*Oreochromis Aureus (Steindachner)*]的研究结果相似。本研究中,从0~9盐度组,无论是鳃小叶宽度还是鳃小叶间距都出现了显著差异,而从9~25盐度组,二者均有变化但差异不显著,这与中华鲟幼鱼从淡水转移到高盐度环境适应过程中血清渗透压和主要离子(Na^+ 和 Cl^-)会出现迅速的调整期和稳定期的报道相一致(Zhao *et al*, 2011)。在硬骨鱼类中,鳃上皮泌氯细胞在渗透调节过程中起重要作用,其内部含丰富的线粒体和大量的 $\text{Na}^+-\text{K}^+-\text{ATPase}$,为离子的跨膜主动运输提供能量(刘珊等, 2011),泌氯细胞的数量、分布、形态及参与盐分泌的离子转运蛋白的表达水平可随水体盐度做出适应性改变(Amiri *et al*, 2018)。吴贝贝(2014)研究表明,20盐度组中华

鲟幼鱼鳃丝和鳃小片上的泌氯细胞数量相对于淡水组均有所增加,同时盐度组泌氯细胞的面积也大于淡水组。另外,在史氏鲟(*Acipenser schrenckii*)(侯俊利等, 2006)和纳氏鲟(*Acipenser naccarii*)(Carmona *et al*, 2004)也观察到相似的结果。本研究中,随着盐度的增加,中华鲟幼鱼泌氯细胞也出现了直径变大、数量也略有增加的现象,可能是外界渗透压升高导致泌氯细胞的功能加强、细胞代谢水平也得到提高(姜明等, 1998)。本研究中,中华鲟幼鱼从淡水环境转移到海水环境,鳃为最先做出反应的器官。在低盐度时,无论是鳃小叶宽度还是其间距均做出了显著的适应性变化;在高盐度时,只进行了稳定性调整,说明中华鲟的渗透调节机制在低盐度时就被激活,体现了中华鲟对海水变化具有极强的适应能力。

3.3 盐度对中华鲟幼鱼肾脏组织结构的影响

肾脏是鱼类第二重要的渗透调节器官,参与维持渗透稳态,并在排出和消除二价离子和过量离子中起着积极的作用(El-Leithy *et al*, 2019)。鱼类机体面临的外界盐度从淡水、低盐度到高盐度所出现的结构变化,主要与水体的渗透压密切相关(于娜等, 2012)。

当外界水体盐度发生变化, 鱼类面临着低渗或者高渗环境时, 鱼体为维持机体内的水盐稳态平衡, 必须进行相应的渗透调节, 并能在组织结构上观察到与之相应的变化。Krayushkina 等(2001)对溯河洄游型海洋鲟鱼渗透调节的研究中发现, 随着外界环境中盐度的升高, 短吻鲟(*Acipenser brevirostrum*)和大西洋鲟(*Acipenser oxyrinchus*)肾脏的肾小球长径逐渐变小。本研究结果与之前的研究相似, 在淡水和低盐度环境中, 因鱼体渗透压高于外界水体渗透压, 进入到鱼体内的大量水分需要通过肾脏排出, 因而肾组织较发达, 肾小体数目多。高盐度则相反, 外界水体的渗透压高于鱼体, 鱼体出现失水现象, 需要大量吞咽海水补充水分, 过多的 NaCl 通过鳃排出体外, 肾组织机能负担减少, 肾脏的滤过率降低, 长此以往, 肾脏开始退化, 肾小球开始变小、数量减少, 肾小管也出现减少的现象。当盐度变化超过鱼类自身的渗透调节范围时, 便可能产生器质性或功能性损伤(王晓杰等, 2006)。而中华鲟幼鱼在海水适应过程中, 肾组织结构的相应变化并未产生结构性损伤, 可能和自身的洄游性相关。

3.4 盐度对中华鲟幼鱼肠组织结构的影响

鳃和肾脏作为主要的渗透调节器官, 参与鱼类机体的渗透调节过程, 不同鱼类肠道参与渗透调节的程度也不一样。广盐性鱼类进入海水后, 大量吞饮海水时吸收的 NaCl 主要通过鳃上皮的泌氯细胞排出体外(林浩然, 2011), 加之肾脏对 Na⁺和 Cl⁻的重吸收, 肠道的参与程度大大降低。但某些鱼类的肠道明显参与到渗透调节过程中。低盐度时, 肠道对于 Na⁺和 Cl⁻的吸收处于可调节范围内; 当处于高盐度时, 由于超过了鳃和肾脏自身的调节能力, 大量的 Na⁺和 Cl⁻进入肠道中, 超出肠道的吸收范围, 高盐度就会对肠道组织产生结构性的影响。Rodríguez 等(2002)对西伯利亚鲟(*Acipenser baerii*)渗透调节的研究中发现, 暴露于高盐度时, 肠黏膜出现脱落, 核上细胞质空泡化。本研究中, 随着盐度的升高, 中华鲟幼鱼肠组织结构未观察到明显变化, 说明肠道在中华鲟幼鱼渗透调节过程中的参与程度较低, 但在高盐条件下仍能保持正常的组织结构, 进一步说明了中华鲟幼鱼对海水变化具有较强的适应能力。本研究表明, 淡水养殖中华鲟幼鱼具有较强的海水适应能力, 渗透调节器官主要通过改变鳃小片宽度和间距、泌氯细胞大小及肾小球大小和数量来适应海水盐度变化, 进而保证在海水环境中的生存能力。研究结果可为深入研究中华鲟海水适应渗透调节机制提供组织学资料。

参 考 文 献

- AMIRI B M, XU E G, KUPSCO A, *et al.* The effect of chlorpyrifos on salinity acclimation of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquatic Toxicology*, 2018, 195: 97-102
- BŒUF G, PAYAN P. Review: How should salinity influence fish growth? *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 2001, 130(4): 411-423
- CARMONA R, GARCÍA-GALLEGO M, SANZ A, *et al.* Chloride cells and pavement cells in gill epithelia of *Acipenser naccarii*: Ultrastructural modifications in seawater-acclimated specimens. *Journal of Fish Biology*, 2004, 64(2): 553-566
- CUI W X, MA A J, HUANG Z H, *et al.* Effects of salinity stress on the mRNA expression of PRL and Na⁺-K⁺-ATPase $\alpha 1$ of turbot (*Scophthalmus maximus*). *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(6): 32-40 [崔文晓, 马爱军, 黄智慧, 等. 大菱鲂 (*Scophthalmus maximus*) PRL 基因、Na⁺-K⁺-ATPase $\alpha 1$ 基因对盐度胁迫的响应. *渔业科学进展*, 2017, 38(6): 32-40]
- EL-LEITHY A A A, HEMEDA S A, NABY W S H A E, *et al.* Optimum salinity for Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) growth and mRNA transcripts of ion-regulation, inflammatory, stress- and immune-related genes. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2019, 45(2): 1217-1232
- GUO B F, CHANG J B, XIAO H, *et al.* The reproductive biology of first filial generation of *Acipenser sinensis* growing up in the freshwater environment. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2011, 35(6): 940-945 [郭柏福, 常剑波, 肖慧, 等. 中华鲟初次全人工繁殖的特性研究. *水生生物学报*, 2011, 35(6): 940-945]
- HE X G. Study on the osmotic physiology and salinity preference of Chinese sturgeon during seawater adaptation. Doctoral Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2008, 4-13 [何绪刚. 中华鲟海水适应过程中生理变化及盐度选择行为研究. 华中农业大学博士研究生学位论文, 2008, 4-13]
- HIROSE S, KANEKO T, NAITO N, *et al.* Molecular biology of major components of chloride cells. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B Biochemistry and Molecular Biology*, 2003, 136(4): 593-620
- HOU J L, CHEN L Q, ZHUANG P, *et al.* Structural changes of chloride cells in gills epithelia of juvenile *Acipenser schrenckii* acclimated to various salinities. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(3): 316-322 [侯俊利, 陈立侨, 庄平, 等. 不同盐度驯化下施氏鲟幼鱼鳃泌氯细胞结构的变化. *水产学报*, 2006, 30(3): 316-322]
- IMSLAND A K, GÚSTAVSSON A, GUNNARSSON S, *et al.* Effects of reduced salinities on growth, feed conversion efficiency and blood physiology of juvenile Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus* L.). *Aquaculture*, 2008, 274(2/3/4): 254-259
- JIANG M, RU S G, LIU X Y, *et al.* Preliminary study on the change of structure of chloride cell of gill of *Oreochromis Aureus* (*Steindachner*) under different salinities. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(4): 603-608 [姜明, 汝少国, 刘晓云, 等. 不同盐度下蓝非鲫鳃泌氯细胞的结

- 构变化. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(4): 603–608]
- KRAYUSHKINA L S, GERASIMOV A A, SMIRNOV A V. Hypoosmotic regulation in anadromous marine sturgeon, with special reference to the structure and function of their kidneys and gill chloride cells. *Doklady Biological Sciences*, 2001, 378: 201–202
- LI L X, ZHANG H, WEI Q E, *et al.* Occurrence time and amount variation of juvenile Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis* at Xupu, Changshu section of Yangtze River after closure of Three Gorges Dam. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(3): 611–618 [李罗新, 张辉, 危起伟, 等. 长江常熟溆浦段中华鲟幼鱼出现时间与数量变动. 中国水产科学, 2011, 18(3): 611–618]
- LI W. Mechanisms of salinity effects on growth performance and isosmotic point calculation in anadromous fish, Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*). Doctoral Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2014, 23–36 [李伟. 盐度对中华鲟生长的影响机制及中华鲟的等渗点分析. 华中农业大学博士研究生学位论文, 2014, 23–36]
- LIN H R. Fish physiology. Guangzhou: Sun Yat-Sen University Press, 2011, 193–221 [林浩然. 鱼类生理学. 广州: 中山大学出版社, 2011, 193–221]
- LIU B, GUO H Y, ZHU K C, *et al.* Growth, physiological, and molecular responses of golden pompano *Trachinotus ovatus* (Linnaeus, 1758) reared at different salinities. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2019, 45: 1879–1893
- LIU J J, WANG J S, ZHAO X, *et al.* Microstructure changes in the gill epithelia of second filial *Acipenser sinensis* juvenile acclimated to various salinities for different time. *Journal of Hydroecology*, 2015, 26(1): 60–65 [刘娟娟, 王京树, 赵珣, 等. 不同盐度和驯养时间中华鲟二代幼鱼鳃的显微结构变化. 水生生态学杂志, 2015, 26(1): 60–65]
- LIU L L, LUO M, CHEN F X, *et al.* Effects of salinity on growth, and gill and kidney histological structures of juvenile pearl gentian grouper. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(4): 505–510 [刘龙龙, 罗鸣, 陈傅晓, 等. 盐度对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长及鳃肾组织学结构的影响. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 505–510]
- LIU S, LI B, ZHANG C F, *et al.* Research advance on osmoregulation in teleost fish. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(20): 12239–12242, 12245 [刘珊, 李冰, 张成锋, 等. 硬骨鱼类渗透调控的研究进展. 安徽农业科学, 2011, 39(20): 12239–12242, 12245]
- LUO J, DU H, WEI Q W, *et al.* Reproductive biology of an artificial population of endangered Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*). *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(3): 269–276 [罗江, 杜浩, 危起伟, 等. 濒危中华鲟人工群体的繁殖生物学. 中国水产科学, 2020, 27(3): 269–276]
- MCCORMICK S D, BRADSHAW D. Hormonal control of salt and water balance in vertebrates. *General and Comparative Endocrinology*, 2006, 147(1): 3–8
- RODRÍGUEZ A, GALLARDO M A, GISBERT E, *et al.* Osmoregulation in juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*). *Fish Physiology and Biochemistry*, 2002, 26(4): 345–354
- WANG X J, ZHANG X M, JIANG M. Salinity stress on the ultrastructure of gill, head kidney and spleen of rockfish (*Sebastes schlegeli*). *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(S): 85–90 [王晓杰, 张秀梅, 姜明. 盐度胁迫对许氏平鲷鳃、头肾、脾脏超微结构的影响. 中国海洋大学学报, 2006, 36(S): 85–90]
- WEI Q W, KE F N, ZHANG J M, *et al.* Biology, fisheries, and conservation of sturgeons and paddlefish in China. *Environmental Biology of Fishes*, 1997, 48(1/2/3/4): 241–255
- WEI Q W, LI L X, DU H, *et al.* Research on technology for controlled propagation of cultured Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*). *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 1–11 [危起伟, 李罗新, 杜浩, 等. 中华鲟全人工繁殖技术研究. 中国水产科学, 2013, 20(1): 1–11]
- WEN J F, LAN J N, CAO M, *et al.* Effects of salinity on the histological structure of the gills, spleen, and muscle in *Lateolabrax maculatus* juveniles. *Progress in Fishery Sciences*, 2020, 41(1): 112–118 [温久福, 蓝军南, 曹明, 等. 盐度对花鲈幼鱼鳃、脾及肌肉组织结构的影响. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 112–118]
- WU B B. The morphological structure and variation in salinity adaptability of chloride cells on the gills of juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) in Yangtze estuary. Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2014, 14–21 [吴贝贝. 长江口中华鲟幼鱼鳃氯细胞的形态结构及盐度适应性变化. 上海海洋大学硕士研究生学位论文, 2014, 14–21]
- WU J M, WANG C Y, ZHANG S H, *et al.* From continuous to occasional: Small-scale natural reproduction of Chinese sturgeon occurred in the Gezhouba spawning ground, Yichang, China. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 425–431 [吴金明, 王成友, 张书环, 等. 从连续到偶发: 中华鲟在葛洲坝下发生小规模自然繁殖. 中国水产科学, 2017, 24(3): 425–431]
- YU N, LI J E, OU Y J, *et al.* Structural changes in gill and kidney of juvenile grey mullet under different salinity. *Ecological Science*, 2012, 31(4): 424–428 [于娜, 李加儿, 区又君, 等. 不同盐度下鲈鱼幼鱼鳃和肾组织结构变化. 生态科学, 2012, 31(4): 424–428]
- ZHANG C J, SHI Z H, WANG J G, *et al.* On salinity-related effects on osmoregulation mechanism in marine teleost. *Marine Fisheries*, 2013, 35(1): 108–116 [张晨捷, 施兆鸿, 王建钢, 等. 盐度影响海水硬骨鱼类渗透压调节机理的研究与展望. 海洋渔业, 2013, 35(1): 108–116]
- ZHANG C L, CHEN C, LI Y L, *et al.* Effects of salinity on the survival and feeding of *Centropristis striata* larvae. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(2): 77–82 [张春禄, 陈超, 李炎璐, 等. 盐度对条纹锯鲷 (*Centropristis striata*) 仔鱼的活力、开口、摄食的影响. 渔业科学进展, 2017, 38(2): 77–82]
- ZHANG M Q, CHEN C, LI Y L, *et al.* Effects of salinity on the hatching of the fertilized eggs of *Epinephelus moara* (♀) × *Epinephelus lanceolatus* (♂) and the observation of the morphological development of larvae, juvenile and young fish. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(4): 81–89 [张梦淇, 陈超, 李炎璐, 等. 盐度对云纹石斑鱼 (*Epinephelus moara* ♀) × 鞍带石斑鱼 (*Epinephelus lanceolatus* ♂) 受精卵孵化的影响及杂交仔稚幼鱼形态发育观察. 渔业科学进展, 2016, 37(4): 81–89]
- ZHANG S H, NIE P, SHU S W, *et al.* Mycobacteriosis in

- cultured F₂ generation Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) and relevant blood physiological and biochemical indices. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(1): 136–145 [张书环, 聂品, 舒少武, 等. 子二代中华鲟分枝杆菌感染及血液生理生化指标的变化. *中国水产科学*, 2017, 24(1): 136–145]
- ZHANG Y T, HUANG S, QIU H T, *et al.* Optimal salinity for rearing Chinese black sleeper (*Bostrychus sinensis*) fry. *Aquaculture*, 2017, 476: 37–43
- ZHAO F, QU L, ZHUANG P, *et al.* Salinity tolerance as well as osmotic and ionic regulation in juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis* gray, 1835) exposed to different salinities. *Journal of Applied Ichthyology*, 2011, 27(2): 231–234
- ZHAO F, YANG G, ZHANG T, *et al.* Characters of morphology, distribution and quantity of branchial chloride cells of juvenile *Acipenser sinensis* acclimated in freshwater and brackish water. *Marine Fisheries*, 2016, 38(1): 35–41 [赵峰, 杨刚, 张涛, 等. 淡水和半咸水条件下中华鲟幼鱼鳃上皮泌氯细胞的形态特征与数量分布. *海洋渔业*, 2016, 38(1): 35–41]
- ZHUANG P, ZHANG L Z, ZHANG T, *et al.* Effects of delaying first feeding time on the survival and growth of larval Chinese sturgeon, *Acipenser sinensis*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1999, 23(6): 560–565 [庄平, 章龙珍, 张涛, 等. 中华鲟鱼仔鱼初次摄食时间与存活及生长的关系. *水生生物学学报*, 1999, 23(6): 560–565]

(编辑 马瑾艳)

Adaptive Adjustment of Osmotic Organ Structure of Juvenile Chinese Sturgeon in Seawater Conditions

QIN Shaozong^{1,2}, LENG Xiaoqian², LUO Jiang², DU Hao²,
LIU Zhigang², QIAO Xinmei², XIONG Wei², WEI Qiwei^{1,2①}

(1. School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract The “land-sea-land” breeding pattern has become an important strategy for the rearing of Chinese sturgeon. In this study, juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) in freshwater culture were utilized as the research object and an acclimation experiment was performed using continuous saltwater rearing conditions. To understand the adaptability changes of organs during osmoregulation, a comparative study was conducted on the structure of the gills, kidneys, and intestinal tissues of juvenile Chinese sturgeon grown in different salinities during seawater acclimation. The results showed that the survival rate of juvenile Chinese sturgeon in the seawater was 100%. During seawater acclimation, the breadth of the gill lamella significantly decreased ($P<0.05$), whereas the spacing of the gill lamella and chloride cell diameter significantly increased ($P<0.05$), suggesting that these juvenile Chinese sturgeon from a freshwater environment gradually adapted to a seawater environment by changing their gill lamella breadth and the space between the adjacent gill lamella, sped up their body and oxygen exchange capacity with the outside water conditions, and increased the chloride secretory cell sizes to improve the level of cell metabolism to cope in a water environment with high osmotic pressure. The glomerular diameter of the juvenile Chinese sturgeon decreased during seawater acclimation ($P<0.05$), and the number of glomerular decreased slightly; therefore, the juvenile Chinese sturgeon decreased the loss of body water by reducing the filtration function of their kidneys to adapt to the changes in osmotic pressure of the external environment. However, no obvious changes were observed in the intestinal tissue structure. The results showed that the juvenile Chinese sturgeon had strong seawater adaptability and osmotic adjustment of organs that adapted to the changes in seawater salinity by changing the breadth and spacing of their gill lamella, the size of the chlorine secretory cells, and the size and number of the glomerular.

Key words Chinese sturgeon; Osmoregulation; Organization structure; Seawater conditions

① Corresponding author: WEI Qiwei, E-mail: weiqw@yfi.ac.cn