

达氏鲟 *gdf11* 基因 cDNA 的克隆及组织表达特征分析

杜浩, 冷小茜, 张书环, 叶欢, 沈丽, 刘志刚, 陈细华, 危起伟

(中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业部淡水生物多样性保护重点实验室, 武汉 430223)

摘要: 本研究克隆了达氏鲟(*Acipenser dabryanus*) 生长转化因子 *gdf11* (growth differentiation factor 11) 基因 cDNA。达氏鲟 *gdf11* 基因 cDNA 序列全长 1 298 bp (不包括 Poly A), 开放阅读框为 1 191 bp, 编码 396 个氨基酸, 5 非编码区长 19 bp; 3 非编码区长 88 bp。通过 Signal P 软件预测含有 N 端 21aa 的信号肽。组织表达特征分析结果显示, *gdf11* 在 7 种组织中均有表达, 在眼和鳃中的表达量较高; 不同水流条件下, 鳃和心脏 *gdf11* 的表达量有显著性差异, 静水中鳃 *gdf11* 表达量是流水 (流速 27.0 ± 3.0 cm/s) 的 4.70 倍, 而心脏中的表达量是流水的 2.72 倍。这暗示了 *gdf11* 可能在呼吸代谢中发挥功能。

关键词: 达氏鲟(*Acipenser dabryanus*); *gdf11* 基因; 基因克隆; 组织表达特征

中图分类号: S917.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6907-(2017) 01-0030-05

DOI:10.13721/j.cnki.dsyy.2017.01.005

Cloning and expression pattern of *gdf11* cDNA in *Acipenser dabryanus*

DU Hao, LENG Xiao-qian, ZHANG Shu-huan, YE Huan, SHEN Li, LIU Zhi-gang, CHEN Xi-hua, WEI Qi-wei

(Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture, Wuhan 430223, China)

Abstract: The full-length cDNA of the *gdf11* (growth differentiation factor 11) gene from *Acipenser dabryanus* was cloned. The *gdf11* gene cDNA is 1 298 bp in size and has a 1 191 bp ORF (open reading frame) encoding a putative protein of 396 amino acid residues, and 5 and 3 non-coding region were 19 bp and 88 bp respectively. By Signal P prediction, it was found that *A. dabryanus gdf11* protein contained a 21 amino acid signal peptide. The RT-qPCR analysis showed that *gdf11* was existed in all the examined tissues, and it was expressed highly in the eyes and gills. Under different flow conditions, significant differences were found in the *gdf11* expression level of the gills and heart, the expression of *gdf11* gene in the gill and heart of *A. dabryanus* in the static water group is 4.70 times and 2.72 times of those in the flow enriched water group (27.0 ± 3.0 cm/s). These implied *gdf11* might have functions in the respiratory metabolism.

Key words: *Acipenser dabryanus*; *gdf11* gene; Gene cloning; Tissue expression pattern

gdf11 (growth differentiation factor 11) 是近年来发现的转化生长因子- β 超家族 (Transforming Growth Factor β superfamily, TGF- β) 成员, 被认为是脊椎动物中控制中轴骨形成的关键因子。通过基因敲除, Mcpherron 等^[1] 发现 *gdf11* 在哺乳动物前后轴特化的过程中起着重要作用。Gamer 等^[2] 已经证明爪蟾 *gdf11* 是轴中胚层和神经组织形成的关键诱导信号。目前, 有关 *gdf11* 基因在鱼类中的研究较少, 但其功能似乎更加多元化。斑马鱼 (*Danio rerio*) 中, *gdf11* 基因在精巢、卵巢、肌肉、脑和鳃

中都有表达, 且表达量相差不大^[3]。另外, 有研究证明, 斑马鱼 *gdf11* 基因在肝脏和胰腺的外分泌过程中起着重要作用^[4]。在金头鲷 (*Sparus aurata*) 中, *gdf11* 基因的表达较为广泛, 如脑、性腺、眼、脾、肾、鳃丝、肠、皮肤、心脏、肝、肌肉和垂体^[5]。

鲟形目鱼类是现存起源最早的脊椎动物之一。达氏鲟 (*Acipenser dabryanus*) 隶属于鲟形目, 为我国特有种, 主要分布于金沙江下游和长江上游。目前关于达氏鲟的研究主要集中在养殖、繁殖、发育

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-09-29

资助项目: 公益性农业行业专项 (200903048); 国家自然科学基金青年基金项目 (31202003); 中国长江三峡集团公司科技环保项目

第一作者简介: 杜浩 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 专业方向为濒危鱼类保护。E-mail: duhao@yfi.ac.cn

通讯作者: 危起伟。E-mail: weiqw@yfi.ac.cn

及行为^[6-8], 生态评估^[9] 以及物种鉴定微卫星标记^[10] 方面。对达氏鲟功能基因的研究, 进行了 *dead end*^[11]、*vasa*^[12] 基因的表达特征和功能分析。本研究克隆了达氏鲟 *gdf11* 基因 cDNA 全长, 分析了其与其他脊椎动物 *gdf11* 的系统进化关系, 并研究了 *gdf11* 在不同组织中的表达特征。为进一步研究 *gdf11* 在脊椎动物中的功能机制奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 实验鱼

实验鱼取自长江水产研究所荆州中华鲟繁育基地人工孵化幼鱼, 选用常规养殖条件(微流水) 下 2 月龄达氏鲟分别取肝、心、脾、眼、肌肉、鳃和脑, 在液氮中速冻, 然后存放 -80 ℃ 冰箱。同时采集人工造流环境(流速 27.0 ± 3.0 cm/s)^[8] 中同龄达氏鲟相同组织。

1.2 RNA 提取及 SMART cDNA 合成

各种组织总 RNA 用 RNeasy Plus Mini Kit(Qia-gen) 提取, cDNA 合成采用 PrimeScript[®] RT reagent Kit With gDNA Eraser 试剂盒, 操作按照说明书进行。

取达氏鲟脑总 RNA, 按 Super SMART[®] PCR cDNA Synthesis Kit 操作手册的方法合成达氏鲟脑 SMART cDNA, -80 ℃ 保存备用。

1.3 达氏鲟 *gdf11* 基因的克隆

在 GenBank 数据库中搜寻已知物种的 *gdf11* 基

因的序列, 通过 Clustal X2 比对分析保守区, 然后运用 Primer Premier 5.0 和 Oligo 6.0 软件设计简并引物(表1), 以合成的达氏鲟脑 SMART cDNA 为模板进行 PCR 扩增。按照 peggy 等^[3] 的方法, 根据得到的达氏鲟 *gdf11* 基因扩增片段, 设计上下游特异引物(表1), 以达氏鲟脑 SMART cDNA 为模板, 分别与 RACE 引物进行 5 和 3RACE 扩增, 产物用 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测, 筛选阳性菌液送上海生工生物工程股份有限公司进行测序。

1.4 基因序列特征分析和同源性分析

将所得序列用 DNASTAR 软件拼接后, 得到达氏鲟 *gdf11* 基因的全长 cDNA 序列, 通过 BLAST 进行序列比对分析; 用 ORF Finder 进行开发阅读框的查找, 并推导其相应的氨基酸序列; 运用 ExPASy Molecular Biology Server 预测信号肽; DNA 和氨基酸序列同源性的比较采用 Clustal W 软件。

1.5 达氏鲟 *gdf11* 基因的表达特征分析

根据得到的达氏鲟 *gdf11* 基因的序列, 设计定量 PCR 引物 *Adgdf11* - qRT - F 和 *Adgdf11* - qRT - R, 以达氏鲟 *β-actin* 基因作为内参, 以不同组织的 cDNA 为模板进行 real-time PCR。PCR 反应程序为: 94 ℃ 预变性 3 min; 94 ℃ 变性 10 s, 57 ℃ 退火 30 s, 72 ℃ 延伸 30 s, 读板温度 77 ℃, 读板时间 5 s; 40 次循环, 做熔解曲线分析温度为 65 ~ 95 ℃。所有实验样品均重复 3 次。

表 1 达氏鲟 *gdf11* 基因克隆所用引物
Tab. 1 Sequences of the primers used for *gdf11* gene

引物名称	用途	引物序列 (5'-3')
Degenerate_ forward	Partial	GCTCCNAAYATYAGCMGRGA
Degenerate_ reverse	Partial	VAGCATGTTGATGGGNGACA
<i>Adgdf11</i> - 3RACE forward	RACE	ACTGCGACGAGCACTCCCTGGA
<i>Adgdf11</i> - 3RACE nested forward	RACE	CTGCTCCGGCCACTGCCAGTAC
<i>Adgdf11</i> - 5RACE reverse	RACE	GGACAAGGGGCTCCGGTTCTGA
<i>Adgdf11</i> - 5RACE nested reverse	RACE	CTGGAGCGGAGGGGCCTTG
<i>Adgdf11</i> - qF	RT - PCR	CTGCTTCTTCAAGTTCAACCCCAA
<i>Adgdf11</i> - qR	RT - PCR	GAGGTCAGTCCAGGTCGTTGC
Adβ - actin - F	Control	TTCACCACCACAGCCGAGAG
Adβ - actin - R	Control	AGGTCCTTACGGATGTCAACG
3 - AP	RACE	GGTATCAACGCAGAGTACTT
5 - AP	RACE	ATCAACGCAGAGTACGCGGG

2 结果

2.1 达氏鲟 *gdf11* 基因全长 cDNA 的克隆

根据 *gdf11* 基因家族保守的区域, 设计简并引物, 以达氏鲟脑 SMART ds cDNA 为模板, PCR 扩增得到了一个大小为 851 bp 的片段(图1)。将该片段克隆测序后, 通过 BLAST 进行同源搜索, 结果

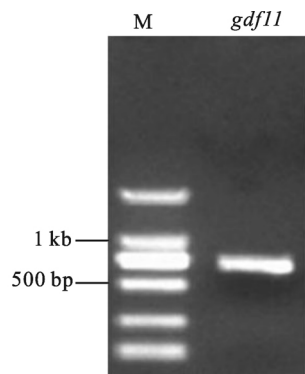


图1 达氏鲟 *gdf11* 基因保守片段的克隆

Fig. 1 Cloning of the conserved fragment of *gdf11* gene in *A. dabryanus* M, DNA Marker DL2000

证明为 *gdf11* 基因。然后根据扩增片段的序列, 设计 *gdf11* 基因特异引物, 通过 3RACE-PCR 的方法, 获得了达氏鲟 *gdf11* 基因 cDNA 序列的 3 端, 共 315 bp; 通过 5RACE-PCR, 获得了基因 cDNA 序列的 5 端, 共 343 bp(图2)。通过序列拼接, 得到了达氏鲟 *gdf11* 基因的全长 cDNA 序列。

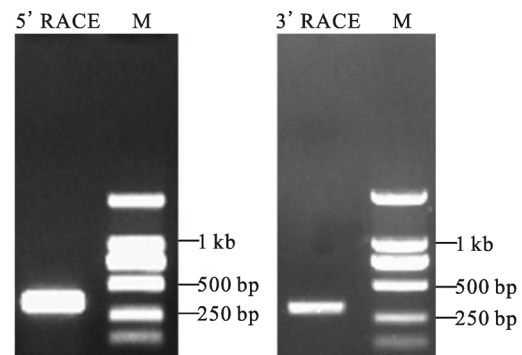


图2 达氏鲟 *gdf11* 基因 3 端和 5 端 cDNA 序列的克隆

Fig. 2 Cloning of the 3 and 5 end sequence of *gdf11* gene in *A. dabryanus* M, DNA Marker DL2000

2.2 达氏鲟 *gdf11* 基因 cDNA 序列特征

达氏鲟 *gdf11* 基因的 cDNA 序列全长 1 298 bp (不包括 Poly A), 开放阅读框为 1 191 bp, 编码

396 个氨基酸, 5 非编码区长 19 bp; 3 非编码区长 88 bp(图3)。通过 Signal P 软件预测含有 N 端 21aa 的信号肽。

```

1
20  ATGCCCAAGTCTAACTTTTCCTGTGTCTGATGTGCTTATCTCATTTGGGATTGTCAGAGAGCGAC
    M P K S N F S L C L M L L I S L G L S E S D
86  GAGCCGAGCTTACCCAGCCGAGGACCTACCCGTGCCGCGCGGAGAGAGGGATCCACGCGAGCC
    E P S L P Q P Q D L P V P P R R E G S T A A
152 GCGGGGCTGCTGGTCTGATGCCGAGGAGCCCGCTGCCAGGAGTGCCCGCGTGCATGTGGAGGGAG
    G G L L V D A E E P A A Q E C P A C M W R E
218 CACAGCAAAGTCTGAGGCTGGAAACCATCAAGTCCAGATCTGAGCAAAGTCAAGCAA
    H S K V L R L E T I K S Q I L S K L R L K Q
284 GCGCCCAACATCAGCCGGGAAGTGGCCAACAGCTGTGCCCCAAGGCCCTCCGCTCCAGCAACTT
    A P N I S R E V A N Q L L P K A P P L Q Q L
350 CTGGACCACAGGACTTCCAGGGGACGCGTCTTGCAAGAGGACTTGATGGAAGAGACGAGTAC
    L D H Q D F Q G D A S L Q E D L M E E D E Y
416 CACGCCACACCGAGACCGTTCATCACCATGGCTTCAGAACCGGAGCCCCTGTCCAGGTGGAGGGC
    H A T T E T V I T M A S E P E P L V Q V E G
482 AAACCCAGCTGCTTCTTCAAGTTCACCCCAAGATCATGTTACCAAGGTGCTGAAGCGCAG
    K P S C C F F K F N P K I M F T K V L K A Q
548 CTGTGGGTGTACCTGCGGCGCTGCAGAAGACCTCCACGGTGTACCTGCAGATCTCGGGTCAAG
    L W V Y L R P L Q K T S T V Y L Q I L R L K
614 CCCGTACCGAGGAGGGCAGCCGGCACATCCGGATCCGCTCCCTGAAGATCGAGCTGAAGTCCGCG
    P V T E E G S R H I R I R S L K I E L N S R
680 GCGGCCACTGGCAGGACATCGACTTCAAGCAGCTGCTGCAGAACTGGTTCAAGCAGCCGACACC
    A G H W Q S I D F K H V L Q N W F K Q P H T
746 AACTGGGGGATCGACATCAACGCTTCGACGAGGGCGGCAAGACCTGGCAGTGACCTCCCTGGGA
    N W G I D I N A F D E G G N D L A V T S L G
812 CCAGGGGAGGAGGGGCTGCAACCGTTCTTGGAGGTGAAGGTGATGGAGACGTGGAAGCGTTGCGCA
    P G E E G L Q P F L E V K V M E T S K R S R
878 CGCAACCTGGGCTGGACTGCGACGAGCACTCCCTGGAGTCCCGCTGCTGCCGCTACCCGCTCACC
    R N L G L D C D E H S L E S R C C R Y P L T
944 GTGACTTCGAGGCGTTCGGCTGGGACTGGATCATCGCGCCCAAGAGATACAAAGCCAACTACTGC
    V D F E A F G W D W I I A P K R Y K A N Y C
1010 TCCGGCCAGTGCGAGTACATGTTTCATGCAGAAGTACCCACACCCACCTGGTGCAACACGCCAAC
    S G Q C E Y M F M Q K Y P H T H L V Q H A N
1076 CCTCGGGGCTCTGCCGACCGTGTGCACCCCAACCAAGATGCGCCATCAACATGCTGTACTTT
    P R G S A G P C C T P T K M S P I N M L Y F
1142 AACGACAAGCAGCAAATCATCCAGGGAAGATCCAGGCAATGGTGGTGGACCGCTGTGGGTGCTCC
    N D A K Q Q I I H G K I P G M V V D R C G C S
1208 TAAAACTTACAACCCCTCTACACCCACACCCACCCCGGTACCGTCCCGACCAAGAAGCTC
    *
1274 TACTACAGTATTAAATCTCAGCCTTAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
  
```

图3 达氏鲟 *gdf11* 基因全长 cDNA 序列及其推导的氨基酸序列

Fig. 3 Nucleotide sequence of *gdf11* in *A. dabryanus* and its deduced amino acids sequence.

下划线的氨基酸为信号肽; 起始密码子、终止密码子和加尾信号为粗体。

2.3 达氏鲟 *gdf11* 基因的生物信息学分析

在 NCBI 和 Ensembl 上搜索其他物种 *gdf11* 的氨基酸序列, 通过比对分析发现, 脊椎动物的 *gdf11* 非常保守, 都含有一个潜在的蛋白水解位点 RSPP。另外, 还有 9 个非常保守的半胱氨酸残基(图4), 而

且达氏鲟 *gdf11* 与其他物种该基因编码的氨基酸序列的一致性较高, 依次是腔棘鱼(88%)、青鳉(88%)、金头鲷(88%)、红鳍东方鲀(87%)、三刺鱼(87%)、绿河豚(86%)、斑马鱼(86%)、绿海龟(77%)、人(70%)和小鼠(70%)。

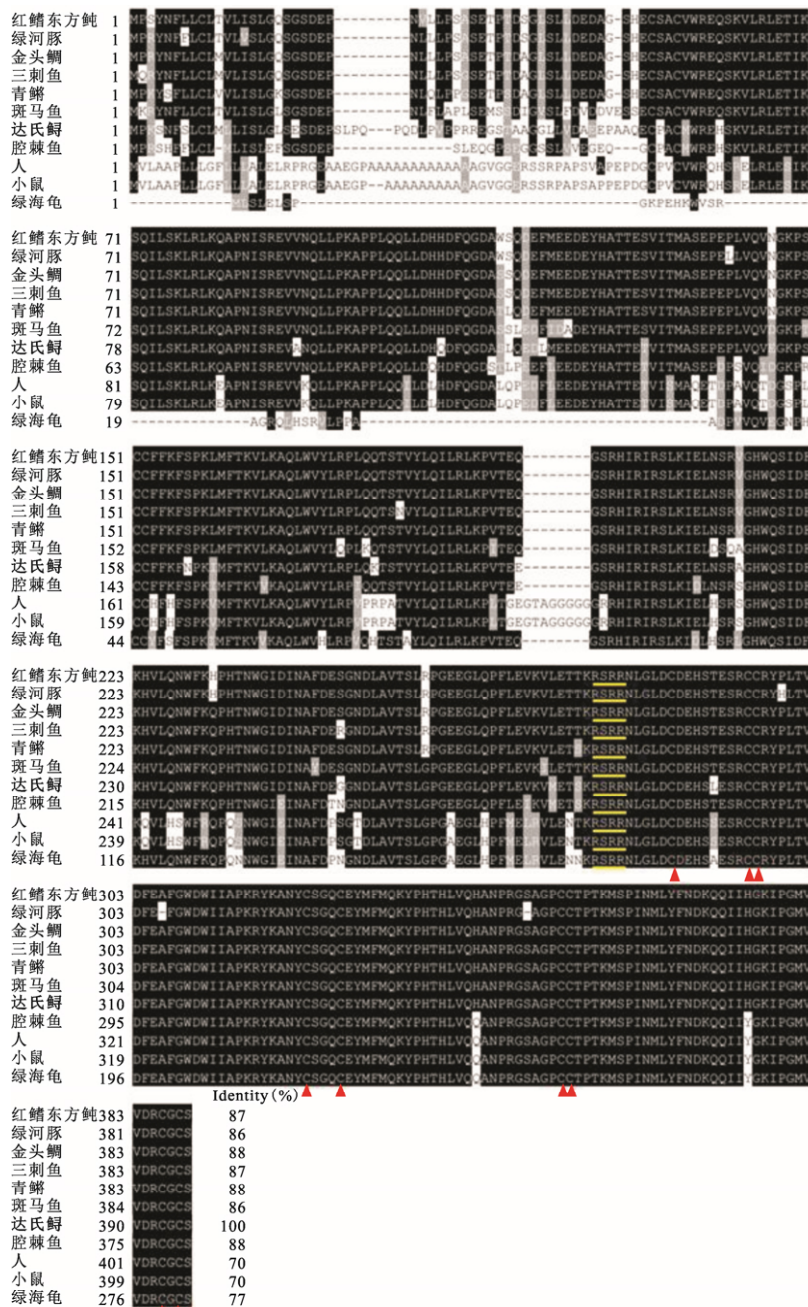


图4 达氏鲟及其他物种 *gdf11* 基因编码氨基酸序列的多重比对

Fig. 4 Multiple amino acids alignments of the *gdf11*

黄线处为潜在的蛋白酶水解位点, 红色三角处为半胱氨酸

2.4 达氏鲟 *gdf11* 在不同组织中的表达特征

为了分析 *gdf11* 的组织表达特异性, 我们取常规养殖条件下达氏鲟 8 种不同组织 cDNA 为模板,

分别扩增 *gdf11* 和 β -actin 基因进行 Real-time PCR 分析。结果表明, 达氏鲟 *gdf11* 基因在所检测组织中均有表达。其中, 在眼和鳃中的表达量较

高,接着依次为脑、肝、肌肉和脾(图5)。

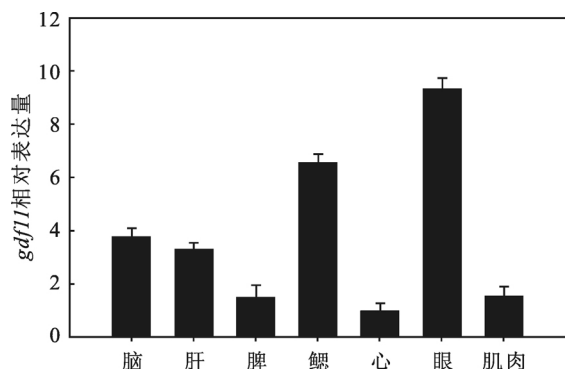


图5 达氏鲟 *gdf11* 基因的组织表达特征

Fig. 5 Analysis of the expression pattern of *gdf11* in *A. dabryanus*

2.5 静水和流水作用下达氏鲟 *gdf11* 基因的表达情况

静水和流水对达氏鲟 *gdf11* 基因 mRNA 表达的影响如图 6 所示。由图可知,在肌肉、脑和肝中,静水和流水对达氏鲟 *gdf11* 基因 mRNA 的表达几乎没有影响。然而,在心和鳃中,静水和流水对达氏鲟 *gdf11* 基因 mRNA 的表达的影响较大。在静水中,鳃中 *gdf11* 基因 mRNA 的表达量是流水中的 4.70 倍,而心脏中 *gdf11* 基因 mRNA 的表达量是流水中的 2.72 倍(图6)。

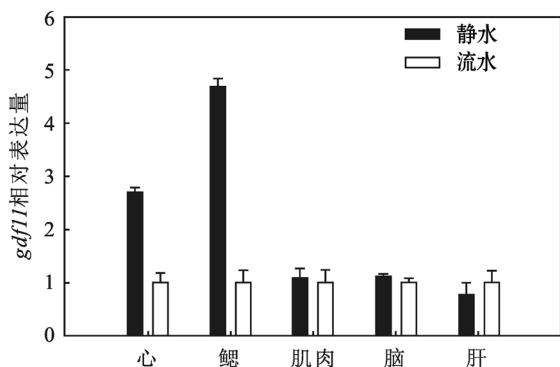


图6 静水和流水养殖组中达氏鲟 *gdf11* 基因 mRNA 的表达差异

Fig. 6 Differential expression of *Adgdf11* in static and flowing water
C, 静水组; V, 流水组。

3 讨论

本研究克隆了鲟形目鱼类达氏鲟的 *gdf11* 基因 cDNA,通过达氏鲟 *gdf11* 与其他脊椎动物 *gdf11* 蛋白的氨基酸序列比对,发现该基因十分保守。在 N

端都含有一个 21aa 的信号肽,同时都存在着一个潜在的蛋白水解位点;另外, *gdf11* 蛋白 C 端的氨基酸序列非常保守,相似性能达到 90%,并且还含有 9 个非常保守的半胱氨酸残基。这些结果表明,在进化过程中,该基因十分保守。

组织表达特征分析结果显示, *gdf11* 在眼,脑和肌肉均有表达,这与其他脊椎动物的表达模式类似,表明该基因功能上的保守性。此外,我们发现 *gdf11* 在鳃中也有较高的表达量,为了进一步验证达氏鲟 *gdf11* 是否与呼吸代谢功能有关,我们设计了不同流速的养殖水体,分析达氏鲟在不同水流条件下 *gdf11* 的表达差异,结果显示鳃和心脏 *gdf11* 的表达量出现显著性差异 ($P < 0.05$),静水中鳃 *gdf11* 基因 mRNA 的表达量是流水的 4.70 倍,而心脏中的表达量是流水的 2.72 倍。上述结果暗示达氏鲟 *gdf11* 很可能与心和鳃的呼吸和代谢功能有关,它们决定着氧气、能量输送。前期实验观察到水流组肌肉有氧代谢酶在流水组中显著高于静水组,流水组的静止耗氧率反而显著低于静水组(杜浩,未发表数据),推断流水组达氏鲟心、鳃对氧气的运输功能得到加强,从而抑制了 *gdf11* 基因的表达。鱼类的心脏和呼吸系统在水流训练情况下功能得到加强已经被一些研究证明^[13]。大鳞大马哈鱼在水流训练中心脏指数如,心搏量增加、心率加快^[14]。与之相适应的是血液循环加速、呼吸频率加快,鳃组织的气体流量增加。本研究结果也可推断, *gdf11* 基因对于心、鳃功能方面同样表现为负调控效应,流水组 *gdf11* 表达量的降低,促进了达氏鲟能量运输,代谢能力加强,从而使总体的能量消耗多于静水组。但该方面的具体功能机制仍需要进一步研究。

参考文献:

- [1] McPherron A C, Lawler A M, Lee S J. Regulation of anterior/posterior patterning of the axial skeleton by growth/differentiation factor 11 [J]. Nat Genet, 1999, 22(3): 260-264.
- [2] Gamer L W, Wolfman N M, Celeste A J, et al. A novel BMP expressed in developing mouse limb, spinal cord, and tail bud is a potent mesoderm inducer in *Xenopus* embryos [J]. Dev Biol, 1999, 208(1): 222-232.
- [3] Peggy R, Steven B, Dimitar B, et al. The isolation, characterization, and expression of a novel *gdf11* gene and a second myostatin form in zebrafish, *Danio rerio* [J]. Comp Biochem Physiol b - Biochem Mol Biol, 2005, 141(2): 218-230.

(下转第 41 页)

- [22] Botstein D , White R L , Skolnick M , et al. Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms [J] . Am J Hum Genet , 1980 , 32(3) : 314 – 331.
- [23] 季维智, 宿兵. 遗传多样性研究的原理与方法 [M] . 杭州: 浙江科学技术出版社, 1999.
- [24] Sophie Hubert D H. Linkage maps of microsatellite DNA markers for the pacific oyster *crassostrea gigas* [J] . Genetics , 2004 , 168 (1) : 351 – 362.
- [25] Cordeiro G M , Maguire T L , Edwards K J , et al. Optimisation of a microsatellite enrichment technique in *Saccharum* spp [J] . Plant Mol Biol Rep , 1999 , 17(3) : 225 – 229.
- [26] Thorpe J P. The molecular clock hypothesis: biochemical evolution , genetic differentiation and systematics [J] . Annual Rev Ecol Systematics , 2003 , 13(4) : 139 – 168.
- [27] Sunnucks P. Efficient genetic markers for population biology [J] . Trends in Ecology & Evolution , 2000 , 15(15) : 199 – 203.
- [28] Wright S. Evolution and the genetics of populations [M] . Variability within and among natural populations. Chicago: University of Chicago Press , 1978.
- [29] Boivin T , Bouvier J C , Beslay D , et al. Variability in diapause propensity within populations of a temperate insect species: interactions between insecticide resistance genes and photoperiodism [J] . Biol J Linn Soc , 2004 , 83(3) : 341 – 351.
- [30] Crawford A M , Littlepohn R P. The use of DNA marker in deciding conservation priorities in sheep and other livestock [J] . Anim Genet Resour Inf , 1998 , 23(1) : 21 – 26.
- (责任编辑: 张潇嵒)

(上接第 34 页)

- [4] Farooq M , Sulochana K N , Pan X , et al. Histone deacetylase 3 (hdac3) is specifically required for liver development in zebrafish [J] . Dev Biol , 2008 , 317(1) : 336 – 353.
- [5] Bruria F , Elena O. Growth/differentiation factor – 11: an evolutionary conserved growth factor in vertebrates [J] . Dev Genes Evol , 2010 , 220(5 – 6) : 129 – 137.
- [6] 龚全, 刘亚, 杜军, 等. 达氏鲟全人工繁殖技术研究 [J] . 西南农业学报 , 2013 , 26(4) : 1710 – 1714.
- [7] 史玲玲, 危起伟, 柴毅, 等. 达氏鲟视网膜早期发育及其相关机能 [J] . 中国水产科学 , 2013 , 20(5) : 958 – 967.
- [8] Du H , Wei Q W , Xie X , et al. Improving swimming capacity of juvenile Dabry' s sturgeon (*Acipenser dabryanus* Dumeril , 1869) in current – enriched culture tanks [J] . J Appl Ichthyol , 2014 , 30 (6) : 1445 – 1450.
- [9] Zhang H , Wei Q W , H Du , et al. Present status and risk for extinction of the Dabry' s sturgeon (*Acipenser dabryanus*) in the Yangtze River watershed: a concern for intensified rehabilitation needs [J] . J Appl Ichthyol , 2011 , 27(2) : 181 – 185.
- [10] Que Y F , Xu D M , Shao K , et al. Identification and characterization of seventeen novel microsatellite markers for Dabry' s sturgeon (*Acipenser dabryanus*) [J] . J Genet , 2014 , 93(2) : 62 – 65.
- [11] 杨晓鸽, 岳华梅, 叶欢, 等. 达氏鲟 *dead end* 基因的分离鉴定及功能初探 [C] . 2015 , 年中国水产学会学术年会论文摘要集, 2015.
- [12] Ye H , Yue H M , Yang X G , et al. Identification and sexually dimorphic expression of vasa isoforms in Dabry' s sturgeon (*Acipenser dabryanus*) , and functional analysis of vasa 3' – untranslated region [J] . Cell Tissue Res , 2016 , 366(1) : 203 – 218.
- [13] Gamperl A K , Farrell A P. Cardiac plasticity in fishes: environmental influences and intraspecific differences [J] . J Exp Biol , 2004 , 207(Pt 15) : 2539 – 2550.
- [14] Gallagher P E , Thorarensen H , Kiessling A , et al. Effects of high intensity exercise training on cardiovascular function , oxygen uptake , internal oxygen transport and osmotic balance in chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) during critical speed swimming [J] . J Exp Biol , 2001 , 204(16) : 2861 – 2872.
- (责任编辑: 张潇嵒)