

网络出版时间:2021-06-11 12:46 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2021.12.004
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210610.0838.005.html

尖裸鲤染色体核型分析及进化地位研究

马 凯^{1,3}, 佟广香^{1,3}, 张永泉^{1,3}, 张庆渔^{1,3}, 尹家胜^{1,3}, 牟振波², 匡友谊¹

(1 中国水产科学研究院 黑龙江水产研究所, 黑龙江 哈尔滨 150076; 2 西藏自治区农牧科学院 水产科学研究所, 西藏 拉萨 850002; 3 黑龙江省冷水性鱼类种质资源及增养殖重点开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076)

【摘要】【目的】对尖裸鲤(*Oxygymnocypris stewartii*)的染色体核型进行分析,为其进化生物学、种质标准制定及杂交育种亲本选择提供细胞遗传学依据。【方法】以西藏自治区农牧科学院水产科学研究所和中国水产科学研究院黑龙江水产研究所联合驯养的尖裸鲤为试验对象,取其头肾采用冷滴片法制备染色体标本,PI染色,荧光显微镜下拍照,使用Photoshop和曲线测量工具E-ruler对染色体进行测量和配对,获得染色体核型,并与已报道的19种(或亚种)裂腹鱼亚科鱼类的中部着丝粒染色体(m)+亚中部着丝粒染色体(sm)和亚端部着丝粒染色体(st)+端部着丝粒染色体(t)的数量比进行比对,分析尖裸鲤的进化地位。【结果】尖裸鲤染色体数目为 $2n=92$,核型公式为 $26m+28sm+20st+18t$,臂数(NF)=146,进化地位在裂腹鱼亚科中处于中等水平。【结论】明确了尖裸鲤的染色体核型和进化地位,其特化程度为高度特化等级。

【关键词】 尖裸鲤;染色体核型;裂腹鱼亚科;进化地位

【中图分类号】 S917.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2021)12-0028-06

Karyotype analysis and evolutionary status of *Oxygymnocypris stewartii*

MA Kai^{1,3}, TONG Guangxiang^{1,3}, ZHANG Yongquan^{1,3}, ZHANG Qingyu^{1,3},
YIN Jiasheng^{1,3}, MOU Zhenbo², KUANG Youyi¹

(1 Heilongjiang River Fishery Research Institute of Chinese Academy of Fishery Sciences, Harbin, Heilongjiang 150076, China;

2 Institute of Fisheries Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa, Tibet 850002, China;

3 Key Open Laboratory of Cold-Water Fish Germplasm Resources and Breeding of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjiang 150076, China)

Abstract: 【Objective】The karyotype of *Oxygymnocypris stewartii* was analyzed to provide cytogenetic basis for its development of evolutionary biology, germplasm standards and parental selection in cross breeding. 【Method】The head-kidney of *O. stewartii*, domesticated by Institute of Fisheries Science, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences and Heilongjiang River Fishery Research Institute of Chinese Academy of Fishery Sciences, was collected and cold drop method was used to prepare chromosome specimens. After PI staining and fluorescence microscopy, the software of Photoshop and curve measurement tool E-ruler were used to measure and pair chromosomes of *O. stewartii*, and the evolutionary status of *O. stewartii* was analyzed by comparing the chromosome ratios of metacentric chromosome (m)+submetacentric chromosome (sm) and subtermocentric chromosome (st)+telocentric chromosome (t) with 19 species (subspecies) of Schizothoracinae. 【Result】The chromosome number of *O. stewartii* was $2n=92$, the karyotype formula was $26m+28sm+20st+18t$, the arm number (NF)=146, and its evo-

【收稿日期】 2020-12-23

【基金项目】 农业财政专项“西藏重点水域渔业资源与环境调查”;中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD56)

【作者简介】 马 凯(1994—),男,河南正阳人,研究实习员,硕士,主要从事冷水性鱼类繁育技术研究。E-mail:makai@hrfri.ac.cn

【通信作者】 匡友谊(1980—),男,湖南祁东人,研究员,硕士,硕士生导师,主要从事鱼类基因组与分子育种研究。E-mail:kuangyouyi@hrfri.ac.cn

lutionary status in Schizothoracinae was middle level. 【Conclusion】 The karyotype of *O. stewartii* and its evolutionary status were determined, and the degree of specialization was high.

Key words: *Oxygymnocypris stewartii*; karyotype; Schizothoracinae; evolutionary status

尖裸鲤(*Oxygymnocypris stewartii*)属鲤形目(Cypriniformes)、鲤科(Cyprinidae)、裂腹鱼亚科(Schizothoracinae)、尖裸鲤属(*Oxygymnocypris*),俗称斯氏裸鲤鱼、拉萨白鱼^[1],为我国西藏特有珍稀鱼类。尖裸鲤分布范围狭窄,仅分布于海拔 3 600~4 300 m 的雅鲁藏布江中游及汇入该江段的各支流^[2],种群数量极易受到自然和人为因素影响。1981 年,曹文宣等^[3]根据鳞片和下咽齿等表型性状,将其归为裂腹鱼类三个特化程度等级中的高度特化等级,但缺少相应的细胞遗传学证据。

尖裸鲤肉质鲜美,市场需求巨大,为西藏重要经济鱼类之一,曾为当地渔民主要渔获对象^[4],但由于过度捕捞和生境破坏,其自然资源量急剧下降,先后被列入中国濒危动物红皮书和中国脊椎动物红色名录^[5-6]。为兼顾濒危物种保护和渔业资源开发利用,开展尖裸鲤的人工养殖技术研究,将其开发成养殖鱼类新品种是有效的解决途径,这样既可以避免大量捕捞野生个体又能满足市场需求。培育鱼类新品种首先需要制定种质标准,染色体是鱼类遗传物质的主要载体,其数目、长度、着丝粒位置、随体与次缢痕数目等统称为染色体核型^[7],核型分析不仅对研究鱼类演化规律、系统分类以及遗传育种等具有重要意义^[8],也是制定种质标准的重要资料。目前,关于尖裸鲤染色体核型的研究极少,仅见发表于 1989 和 1990 年的 2 篇文献^[9-10],但所报道的是同一份尖裸鲤染色体核型的研究结果,且由于早期拍照技术所限,获得的尖裸鲤染色体核型图谱非常模糊,也未提供详细的染色体长度、臂比等信息,无法应用于尖裸鲤种质标准编制、染色体形态特征测量等。为此,本研究以西藏自治区农牧科学院水产科学研究所和中国水产科学研究院黑龙江水产研究所联合驯养的尖裸鲤苗种为研究材料,对其进行染色体核型分析及进化地位研究,以期提供清晰可辨的尖裸鲤染色体核型图谱和染色体长度、臂比等详细数据信息,为尖裸鲤的进化生物学、人工养殖种质标准制定和杂交育种亲本选择提供细胞遗传学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

2 龄尖裸鲤雌雄各 4 尾,平均体长为(19.81±

1.57) cm,平均体质量为(51.35±10.12) g/尾,由西藏自治区农牧科学院水产科学研究所繁殖,中国水产科学研究院黑龙江水产研究所渤海冷水性鱼试验站养殖,运至实验室后于充气玻璃缸内暂养 5 d,水温控制在(17±0.5) °C,早晚各投喂 1 次。

1.2 方法

1.2.1 染色体标本制备 使用 35 mg/L 3-氨基苯甲酸乙酯甲磺酸(MS-222)将试验鱼麻醉后,参照林义浩^[11]的方法,按 10 μg/g 剂量胸腔注射胎牛血清溶解的植物血球凝集素(PHA),20 h 后按 1 μg/g 剂量胸腔注射 1×PBS 溶解的秋水仙素,4 h 后剪鳃放血,于超净工作台中取出头肾后用 7.5 g/L 生理盐水冲洗,然后用镊子于 7.5 g/L 生理盐水中将头肾组织磨碎,游离出单个细胞,静置 5 min 沉淀磨碎组织,取上清液于 15 mL 离心管中,4 °C 下 1 500 g 离心 6 min 收集细胞沉淀,加入 12 mL 5 g/L KCl 低渗液吹打均匀后,室温静置 45 min,1 500 g 离心 6 min 后加入 12 mL 卡诺氏固定液(V(甲醇):V(冰醋酸)=3:1)悬浮细胞,室温静置 30 min,1 500 g 离心 6 min。重复固定 2 次。采用冷滴片法制片,室温干燥,使用 1 μg/mL PI 避光染色 10 min,蒸馏水洗去残液后,室温避光晾干。

1.2.2 核型分析 使用 OLYMPUS 荧光显微镜观察染色体标本并拍照,每个个体选取 10 个以上分散较好的染色体中期分裂相进行计数,根据众数确定尖裸鲤染色体数目,选择 5 个清晰的染色体中期分裂相,根据耿龙武等^[12]的方法使用 E-ruler 和 Photoshop 进行核型分析。染色体分组依据 Levan 等^[13]的标准,根据其绝对长度、着丝粒位置等进行同源染色体配对^[12]。

1.2.3 进化地位分析 统计对比 19 种(或亚种)裂腹鱼亚科鱼类的染色体核型,按小島吉雄^[14]的理论,分析尖裸鲤在裂腹鱼亚科中的进化地位。

2 结果与分析

2.1 尖裸鲤的染色体数目

试验共观察了 104 个分散较好的尖裸鲤染色体中期分裂相,统计结果如图 1 所示。由图 1 可知染色体众数为 92,其出现频率为 44.23%,据此得出尖裸鲤 $2n=92$ 。

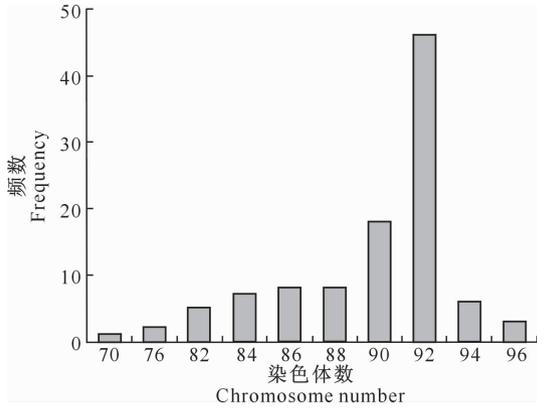


图 1 尖裸鲤染色体数统计

Fig. 1 Chromosome number of *O. stewartii*

2.2 尖裸鲤的染色体核型

对尖裸鲤染色体核型进行比较分析,未见性别差异。选取5个清晰的染色体中期分裂相(图2),

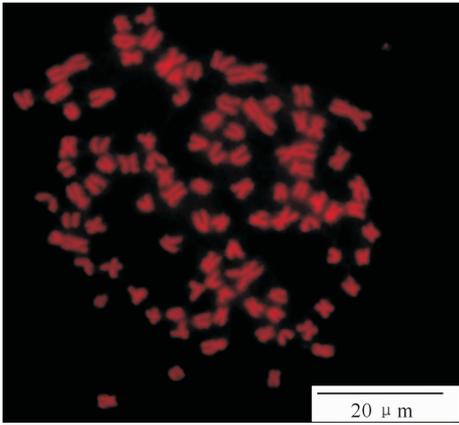
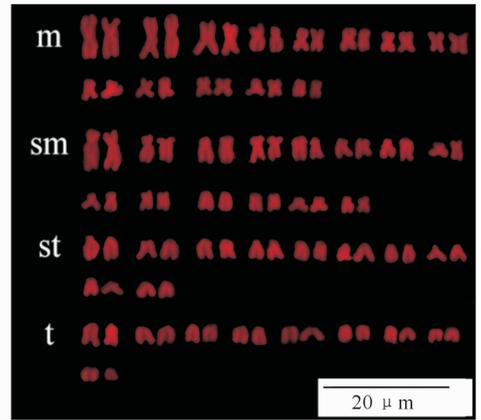


图 2 尖裸鲤染色体中期分裂相

Fig. 2 Metaphase chromosome of *O. stewartii*

依据标尺使用 E-ruler 软件进行测量后,统计每条染色体的绝对长度和臂比,并根据染色体绝对长度和形态特征等对其进行同源染色体配对,配对结果如图 3 所示。依据臂比结果将尖裸鲤染色体分为中部着丝粒染色体(m)、亚中部着丝粒染色体(sm)、亚端部着丝粒染色体(st)和端部着丝粒染色体(t)4组,每组所包含的染色体数目分别为 26, 28, 20 和 18 条,因此得出尖裸鲤核型公式为: $26m + 28sm + 20st + 18t$, 臂数(NF)=146。由表 1 统计结果可知,尖裸鲤染色体平均长度表现为 m 型 > sm 型 > st 型 > t 型,分别为 (2.9883 ± 1.1605) , (2.5539 ± 0.5424) , (2.0249 ± 0.2867) 和 $(1.8093 \pm 0.3706) \mu\text{m}$, m 和 sm 型染色体中分别有 2 对及 1 对长度较大的染色体。



m. 中部着丝粒染色体; sm. 亚中部着丝粒染色体;
st. 亚端部着丝粒染色体; t. 端部着丝粒染色体

m. Metacentric chromosome; sm. Submetacentric chromosome;
st. Subtelocentric chromosome; t. Telocentric chromosome

图 3 尖裸鲤染色体核型

Fig. 3 Karyotypes of *O. stewartii*

表 1 尖裸鲤染色体类型、绝对长度和臂比

Table 1 Type, absolute length and arm ratio of *O. stewartii*

编号 No.	类型 Type	绝对长度/ μm Absolute length	臂比/% Arm ratio	编号 No.	类型 Type	绝对长度/ μm Absolute length	臂比/% Arm ratio
1	m	5.7319 ± 0.2034	1.1419	47	sm	1.9281 ± 0.0684	1.7273
2	m	5.1936 ± 0.1843	1.2907	48	sm	1.9531 ± 0.0693	1.8821
3	m	5.6030 ± 0.1988	1.3285	49	sm	1.8404 ± 0.0653	1.8706
4	m	5.3674 ± 0.1904	1.3347	50	sm	1.7447 ± 0.0619	1.7222
5	m	4.4961 ± 0.1595	1.1589	51	sm	1.7668 ± 0.0627	2.1482
6	m	4.0484 ± 0.1436	1.3048	52	sm	1.7646 ± 0.0626	2.1572
7	m	3.3001 ± 0.1171	1.4102	53	sm	1.8927 ± 0.0672	2.1848
8	m	3.2125 ± 0.1140	1.4087	54	sm	1.5620 ± 0.0554	2.0174
9	m	2.8914 ± 0.1026	1.0483	55	st	2.8892 ± 0.1025	3.8009
10	m	2.7161 ± 0.0964	1.2430	56	st	2.6314 ± 0.0934	4.0971
11	m	2.7397 ± 0.0972	1.1200	57	st	2.3456 ± 0.0832	3.0276
12	m	2.6174 ± 0.0929	1.0442	58	st	2.2845 ± 0.0811	3.0797

表 1(续) Continued table 1

编号 No.	类型 Type	绝对长度/ μm Absolute length	臂比/% Arm ratio	编号 No.	类型 Type	绝对长度/ μm Absolute length	臂比/% Arm ratio
13	m	2.607 1 \pm 0.092 5	1.285 5	59	st	2.373 6 \pm 0.084 2	6.217 2
14	m	2.618 9 \pm 0.092 9	1.120 8	60	st	2.216 8 \pm 0.078 7	5.920 8
15	m	2.724 9 \pm 0.096 7	1.132 0	61	st	2.305 9 \pm 0.081 8	3.035 0
16	m	2.472 3 \pm 0.087 7	1.084 9	62	st	2.035 6 \pm 0.072 2	3.390 3
17	m	2.455 4 \pm 0.087 1	1.198 5	63	st	1.992 1 \pm 0.070 7	3.546 0
18	m	2.534 2 \pm 0.089 9	1.048 7	64	st	2.193 2 \pm 0.077 8	3.580 6
19	m	2.401 6 \pm 0.085 2	1.261 5	65	st	2.037 8 \pm 0.072 3	3.211 4
20	m	2.314 7 \pm 0.082 1	1.041 6	66	st	2.141 6 \pm 0.076 0	3.448 8
21	m	2.187 3 \pm 0.077 6	1.371 2	67	st	2.006 9 \pm 0.071 2	3.357 4
22	m	2.197 6 \pm 0.078 0	1.634 5	68	st	2.157 1 \pm 0.076 5	3.306 2
23	m	2.170 4 \pm 0.077 0	1.078 7	69	st	1.847 8 \pm 0.065 6	4.893 0
24	m	2.149 7 \pm 0.076 3	1.007 4	70	st	1.816 1 \pm 0.064 4	4.835 0
25	m	2.014 2 \pm 0.071 5	1.193 4	71	st	1.858 1 \pm 0.065 9	3.584 7
26	m	1.917 0 \pm 0.068 0	1.294 0	72	st	1.799 2 \pm 0.063 8	3.897 2
27	sm	5.305 5 \pm 0.188 2	1.818 6	73	st	1.739 5 \pm 0.061 7	3.877 8
28	sm	5.128 0 \pm 0.181 9	1.744 0	74	st	1.850 7 \pm 0.065 7	3.390 1
29	sm	3.649 9 \pm 0.129 5	1.706 6	75	t	2.682 2 \pm 0.095 2	11.822 7
30	sm	3.195 5 \pm 0.113 4	1.832 1	76	t	2.634 3 \pm 0.093 5	12.646 6
31	sm	3.175 6 \pm 0.112 7	2.118 4	77	t	2.101 9 \pm 0.074 6	8.496 6
32	sm	3.064 4 \pm 0.108 7	2.247 2	78	t	2.238 1 \pm 0.079 4	9.113 6
33	sm	3.188 9 \pm 0.113 1	1.844 8	79	t	2.218 2 \pm 0.078 7	∞
34	sm	2.951 8 \pm 0.104 7	1.716 6	80	t	2.034 9 \pm 0.072 2	∞
35	sm	2.733 8 \pm 0.097 0	1.814 4	81	t	1.995 8 \pm 0.070 8	∞
36	sm	2.423 7 \pm 0.086 0	1.738 7	82	t	2.028 2 \pm 0.072 0	∞
37	sm	2.434 8 \pm 0.086 4	2.393 8	83	t	1.833 1 \pm 0.065 0	∞
38	sm	2.336 8 \pm 0.082 9	2.283 5	84	t	1.802 1 \pm 0.063 9	∞
39	sm	2.406 0 \pm 0.085 4	1.900 0	85	t	1.852 9 \pm 0.065 7	∞
40	sm	2.335 3 \pm 0.082 9	1.944 0	86	t	1.930 3 \pm 0.068 5	∞
41	sm	2.153 4 \pm 0.076 4	1.744 6	87	t	1.679 9 \pm 0.059 6	∞
42	sm	2.254 3 \pm 0.080 0	1.735 2	88	t	1.575 3 \pm 0.055 9	∞
43	sm	2.110 7 \pm 0.074 9	1.734 9	89	t	1.507 5 \pm 0.053 5	∞
44	sm	2.084 9 \pm 0.074 0	1.841 9	90	t	1.480 3 \pm 0.052 5	∞
45	sm	2.115 1 \pm 0.075 0	1.978 3	91	t	1.353 6 \pm 0.048 0	∞
46	sm	2.006 9 \pm 0.071 2	2.072 3	92	t	1.427 3 \pm 0.050 6	∞

注:m.中部着丝粒染色体;sm.亚中部着丝粒染色体;st.亚端部着丝粒染色体;t.端部着丝粒染色体。

Note:m. Metacentric chromosome;sm. Submetacentric chromosome;st. Subterocentric chromosome;t. Telocentric chromosome

2.3 尖裸鲤的进化地位

统计已经发表的 19 种(或亚种)裂腹鱼亚科鱼类染色体核型(表 2)发现,尖裸鲤亚端部和端部着丝粒染色体数目平均占比为 40.22%,低于齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)^[15]和巨须裂腹鱼

(*Schizothorax macropogon*)^[16]等,高于骨唇黄河鱼(*Chuanichia labiosa*)^[10]、佩枯湖裸鲤(*Gymnocypris dobula*)^[17]和黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)^[10]等,进化地位在裂腹鱼亚科中处于中等水平。

表 2 19 种(亚种)裂腹鱼亚科鱼类的染色体核型

Table 2 Karyotypes of 19 species (subspecies) of Schizothoracinae

种类 Species	类群等级 Level	2n	核型公式 Karyotype formula	臂数 Arm number	(m+sm)/ 2n/%	(st+t)/ 2n/%	文献 References
裂腹鱼 <i>Schizothorax</i> sp	p	148	50m+28sm+70st-t	226	52.70	47.30	[18]
重口裂腹鱼 <i>S. davidi</i>	p	98	20m+34sm+24st+20t	152	55.10	44.90	[15]
齐口裂腹鱼 <i>S. prenanti</i>	p	148	28m+40sm+36st+44t	216	45.95	54.05	[15]
昆明裂腹鱼 <i>S. grahami</i>	p	148	52m+30sm+66st-t	230	55.41	44.59	[18]
大理裂腹鱼 <i>S. daliensis</i>	p	148	48m+30sm+70st-t	226	52.70	47.30	[18]
巨须裂腹鱼 <i>S. macropogon</i>	p	102	20m+28sm+22st+16t	134	47.06	52.94	[16]

表 2(续) Continued table 2

种类 Species	类群等级 Level	2n	核型公式 Karyotype formula	臂数 Arm number	(m+sm)/ 2n/%	(st+t)/ 2n/%	文献 References
拉萨裂腹鱼 <i>S. waltoni</i>	p	92	26m+28sm+22st+16t	146	58.70	41.30	[9]
		112	26m+24sm+28st+34t	162	44.64	55.36	[16]
异齿裂腹鱼 <i>S. oconnori</i>	p	92	30m+26sm+20st+16t	148	60.87	39.13	[9]
		106	24m+26sm+30st+25t	155	47.20	52.80	[16]
重唇鱼 <i>Diplychus</i> sp	s	98	28m+32sm+38st-t	158	61.22	38.78	[18]
骨唇黄河鱼 <i>C. labiosa</i>	h	92	32m+26sm+18st+16t	150	63.04	36.96	[10]
扁咽齿鱼 <i>P. extremus</i>	h	90	24m+30sm+20st+16t	144	60.00	40.00	[10]
佩枯湖裸鲤 <i>G. dobula</i>	h	66	32m+10sm+4st+20t	108	63.64	36.36	[17]
高原裸鲤 <i>G. waddellii</i>	h	94	24m+14sm+22st+34t	132	40.43	59.57	[16]
青海湖裸鲤 <i>G. przewalskii</i>	h	92	32m+22sm+24st+14t	128	58.70	41.30	[19]
花斑裸鲤 <i>G. eckloni</i>	h	94	26m+28sm+22st+18t	148	57.45	42.55	[10]
黄河裸裂尻鱼 <i>S. pylzovi</i>	h	92	32m+26sm+20st+14t	150	63.04	36.96	[10]
尖裸鲤 <i>O. stewartii</i>	h	92	26m+30sm+22st+14t	148	60.87	39.13	[9]
		92	26m+28sm+20st+18t	146	58.70	41.30	本研究 This study
拉萨裸裂尻鱼指名亚种 <i>S. y. younghusbandii</i>	h	90	26m+30sm+20st+16t	148	60.87	39.13	[9]
		94	22m+8sm+46st+18t	124	31.91	68.09	[16]
拉萨裸裂尻鱼喜马拉雅亚种 <i>S. y. himalayaensis</i>	h	88	40m+16sm+12st+20t	144	63.64	36.36	[17]

注:p. 原始类群;s. 特化类群;h. 高度特化类群。

Note:p. Primitive group;s. Specialized group;h. Highly specialized group.

3 讨论

3.1 尖裸鲤的染色体核型

染色体多样性在鱼类中比较常见,如分布于西辽河和洞庭湖的鲢(*Silurus asotus*)^[20-21],分布于洞庭湖和鄱阳湖的黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[22-23]及分布于洞庭湖和嘉陵江的大鳍鱮(*Mystus macropterus*)^[24-25],在长期的地理隔离中,不同群体的遗传信息发生改变,进而产生染色体多样性。裂腹鱼亚科鱼类常生存于条件恶劣、多变的高原地区,拉萨裂腹鱼(*Schizothorax waltoni*)、异齿裂腹鱼(*Schizothorax oconnori*)以及拉萨裸裂尻鱼指名亚种(*Schizothorax younghusbandii younghusbandii*)^[9,16]的不同群体也存在染色体多样性,以便更好地适应各自不同的生存环境。迄今为止,只有两位学者对尖裸鲤核型有过报道,余先觉等^[9]于1989年首先报道了尖裸鲤 $2n=92$,臂数(NF)=148,核型为 $26m+30sm+22st+14t$;余祥勇等^[10]于1990年发表了该结果的核型图谱。本研究得出的尖裸鲤染色体数目与两位学者所报道的结果契合,均为 $2n=92$,但染色体分组结果和臂数略有差异。原因可能是由于早期拍照图片不清晰导致的测量误差,使臂比的统计结果出现偏差,从而影响了染色体的分组结果;也可能是本研究采集的尖裸鲤亲本在地域或遗传因素的影响下,染色体核型发生了改变。

3.2 尖裸鲤的进化地位

染色体与鱼类的演化程度具有一致性^[23],小岛吉雄^[14]认为鱼类进化越高等,其染色体越收敛,表现为中部和亚中部着丝粒染色体数目趋于减少,而亚端部和端部着丝粒染色体数目趋于增多,比较显示尖裸鲤进化地位处于裂腹鱼亚科中等水平。李树深等^[26]研究认为,不同鱼类在同一分类阶元下,具有较多中部和亚中部着丝粒染色体的种类是特化类群;具有较多亚端部和端部着丝粒染色体的种类是原始类群。在分类阶元限定为裂腹鱼亚科的情况下,尖裸鲤中部和亚中部着丝粒染色体平均占比较高,与裸鲤属4种鱼类处于同一水平,高于裂腹鱼属的8种鱼类,表明其与裸鲤属鱼类相同,均属于高度特化等级,这与曹文宣等^[3]通过表观形态划分的特化等级结果相符,也从细胞遗传学角度为其论断提供了依据。根据尖裸鲤的染色体核型,推测其进化过程可能是裂腹鱼亚科中某一原始类群在演化过程中端部和亚端部着丝粒染色体通过着丝点融合方式^[27],导致中部和亚中部着丝粒染色体占比增加,进而演化形成现存的尖裸鲤,这一演化机制也在对大鳞鲃(*Barbus capito*)^[12]和何氏细鲃(*Leptobarbus hoeveni*)^[28]的研究中得到了证实。

【参考文献】

[1] 孙海成,吕晓楠,佟广香,等. 尖裸鲤实时荧光定量 PCR 内参

- 基因的筛选 [J]. 大连海洋大学学报, 2019, 34(3): 370-375.
- Sun H C, Lü X N, Tong G X, et al. Screening of reference genes for real-time quantitative PCR in Stewart's naked high-Asian-carp *Oxygymnocypris stewartii* [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 34(3): 370-375.
- [2] 西藏自治区水产局. 西藏鱼类及其资源 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- Fishery Bureau of Tibet Autonomous Region. Fishes and their resources in Tibet [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995.
- [3] 曹文宣, 陈宜瑜, 武云飞, 等. 裂腹鱼类的起源和演化及其与青藏高原隆起的关系 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 118-130.
- Cao W X, Chen Y Y, Wu Y F, et al. The origin and evolution of *Schizothoracinae* and its relationship with the uplift of the Qinghai Tibet Plateau [M]. Beijing: Science Press, 1981: 118-130.
- [4] 霍 斌. 尖裸鲤个体生物学和种群动态学研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2014: 115-116.
- Huo B. Study on the biology and population dynamics of *Oxygymnocypris stewartii* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014: 115-116.
- [5] 乐佩琪, 陈宜瑜. 中国濒危动物红皮书 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 158-159.
- Yue P Q, Chen Y Y. China red data book of endangered animals [M]. Beijing: Science Press, 1998: 158-159.
- [6] 蒋志刚, 江建平, 王跃招, 等. 中国脊椎动物红色名录 [J]. 生物多样性, 2016, 24(5): 501-551, 615.
- Jiang Z G, Jiang J P, Wang Y Z, et al. Red list of China's vertebrates [J]. Biodiversity Science, 2016, 24(5): 501-551, 615.
- [7] 汪堃仁, 薛绍白, 柳惠图. 细胞生物学 [M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1998.
- Wang K R, Xue S B, Liu H T. Cell biology [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1998.
- [8] 周伯春, 舒 琥, 刘 锋, 等. 3 种海产经济鱼类的染色体组型研究 [J]. 水产科学, 2009, 28(6): 325-328.
- Zhou B C, Shu H, Liu F, et al. Karyotypes in three marine important fish species [J]. Fisheries Science, 2009, 28(6): 325-328.
- [9] 余先觉, 周 瞰, 李渝成, 等. 中国淡水鱼类染色体 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 152-153.
- Yu X J, Zhou T, Li Y C, et al. Chromosomes of Chinese freshwater fishes [M]. Beijing: Science Press, 1989: 152-153.
- [10] 余祥勇, 李渝成, 周 瞰. 中国鲤科鱼类染色体组型研究: 8 种裂腹鱼亚科鱼类核型研究 [J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1990(2): 97-104.
- Yu X Y, Li Y C, Zhou T. Karyotype of Chinese *Cyprinio* fishes-karyotype study of eight *Schizothoracinae* [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 1990(2): 97-104.
- [11] 林义浩. 快速获得大量鱼类肾细胞中期分裂相的 PHA 体内注射法 [J]. 水产学报, 1982, 6(3): 201-208.
- Lin Y H. A PHA injection method *in vivo* for the rapid obtaintment of large numbers of metaphase figures from kidney cells of teleosts [J]. Journal of Fisheries of China, 1982, 6(3): 201-208.
- [12] 耿龙武, 姜海峰, 徐 伟. 两种方法分析大鳞鲃染色体核型的比较研究 [J]. 水产学报, 2018, 42(3): 334-344.
- Geng L W, Jiang H F, Xu W. Comparative study on the karyotype of chromosome of *Barbus capito* with two methods [J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(3): 334-344.
- [13] Levan A, Fredga K, Sandberg A A. Nomenclature for centromeric position on chromosomes [J]. Hereditas, 1964, 52(2): 201-220.
- [14] 小島吉雄. 鱼类细胞遗传学 [M]. 林义浩, 译. 广州: 广东科学技术出版社, 1990: 8-33.
- Oshima Y. Cytogenetics of fish [M]. Lin Y H, Trans. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1990: 8-33.
- [15] 李渝成, 李 康, 桂建芳, 等. 中国鲤科鱼类染色体组型的研究 XI: 裂腹鱼亚科二种鱼和鲃亚科三种鱼的染色体组型 [J]. 水生生物学报, 1987, 11(2): 184-186, 195-197.
- Li Y C, Li K, Gui J F, et al. Studies on the karyotypes of Chinese *Cyprinio* fishes XI: Karyotypes of two species of *Schizothoracinae* and three species of *Gobiobotinae* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1987, 11(2): 184-186, 195-197.
- [16] 武云飞, 康 斌, 门 强, 等. 西藏鱼类染色体多样性的研究 [J]. 动物学研究, 1999, 20(4): 3-5.
- Wu Y F, Kang B, Men Q, et al. Chromosome diversity of Tibetan fishes [J]. Zoological Research, 1999, 20(4): 3-5.
- [17] Wu C Z, Wu Y F, Lei Y L. Studies on the karyotypes of four species of fishes from the Mount Qomolangma Region in China [C]//Li D S. Proceedings of the international symposium on aquaculture. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1996: 95-103.
- [18] 管瑞光, 刘万国, 宋 峥. 裂腹鱼亚科中的四倍体-六倍体相互关系 [J]. 遗传学报, 1985, 12(2): 137-142, 167-168.
- Zan R G, Liu W G, Song Z. Tetraploid-hexaploid relationship in *Schizothoracinae* [J]. Journal of Genetics and Genomics, 1985, 12(2): 137-142, 167-168.
- [19] 同学春, 史建全, 孙效文, 等. 青海湖裸鲤的核型研究 [J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(5): 645-648.
- Yan X C, Shi J Q, Sun X W, et al. Study on the karyotype of *Gymnocypris przewalskii* [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(5): 645-648.
- [20] 温海深, 张永春, 王 亮, 等. 西辽河鲌鱼染色体组型研究 [J]. 哲里木畜牧学院学报, 1999, 9(2): 11-14.
- Wen H S, Zhang Y C, Wang L, et al. Study on karyotype of catfish in Xiliao river [J]. Journal of Zhelimu Animal Husbandry College, 1999, 9(2): 11-14.
- [21] 韩 庆, 秦 杰, 席在星. 洞庭湖土鲮染色体核型分析 [J]. 水产科学, 2009, 28(8): 462-464.
- Han Q, Qin J, Xi Z X. Analysis of the chromosome karyotype of catfish (*Silurus asotus*) in Dongting Lake [J]. Fisheries Science, 2009, 28(8): 462-464.

- Chinese Journal of Fisheries, 2007, 20(1): 69-73.
- [26] Czerniejewski P, Wawrzyniak W. Fecundity of vendace, *Coregonus albula* (L.), from several lakes in Western Pomerania [J]. Archives of Polish Fisheries, 2008, 16(2): 135-146.
- [27] 李培伦, 王继隆, 鲁万桥, 等. 兴凯湖大银鱼个体繁殖力研究 [J]. 湿地科学, 2020, 18(5): 525-531.
Li P L, Wang J L, Lu W Q, et al. Individual fecundity of *Protosalanx chinensis* in Xingkai Lake [J]. Wetland Science, 2020, 18(5): 525-531.
- [28] 霍堂斌, 郑文军, 李耕, 等. 双台子河口刀鲚个体生殖力 [J]. 水产学杂志, 2016, 29(6): 31-36.
Huo T B, Zheng W J, Li G, et al. Individual fecundity of taper-
- tail anchovy *Coilia nasus* from Shuangtaizi Estuary [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2016, 29(6): 31-36.
- [29] 张呈祥, 徐钢春, 顾若波, 等. 澄湖似刺编鲌个体繁殖力的研究 [J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(5): 615-621.
Zhang C X, Xu G C, Gu R B, et al. Fecundity of *Paracanthobrama guichenoti* in Lake Cheng [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2010, 19(5): 615-621.
- [30] 金洪宇, 李雷, 金星, 等. 西藏雅鲁藏布江下游黄斑褶鲌的个体繁殖力研究 [J]. 水产科学, 2020, 39(5): 744-751.
Jin H Y, Li L, Jin X, et al. Fecundity of *Pseudecheneis sulcatus* in downstream of Yarlung Zangbo River in Xizang [J]. Fisheries Science, 2020, 39(5): 744-751.

(上接第 33 页)

- [22] 刘良国, 邹万生, 杨春英, 等. 洞庭湖水系黄颡鱼的形态差异及染色体组型 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(29): 17939-17941.
Liu L G, Zou W S, Yang C Y, et al. Morphological difference and karyotype of *Pelteobagrus fulvidraco* in Dongting Lake water systems [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(29): 17939-17941.
- [23] 毛慧玲, 葛欣琦, 刘佳丽, 等. 鄱阳湖黄颡鱼染色体核型分析及进化地位探讨 [J]. 江西农业大学学报, 2012, 34(6): 1222-1225.
Mao H L, Ge X Q, Liu J L, et al. Karyotype analysis of *Pelteobagrus fulvidraco* in Poyang Lake and discussion of its evolutionary position [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2012, 34(6): 1222-1225.
- [24] 文永彬, 史怡雪, 刘良国, 等. 洞庭湖水系 3 种鲮科鱼的染色体核型分析 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41(12): 235-238.
Wen Y B, Shi Y X, Liu L G, et al. Karyotypes analysis of three kinds of Bagrid fishes in Dongting Lake water system [J].
- Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41(12): 235-238.
- [25] 马跃岗, 张峰, 牟平, 等. 嘉临江大鳍鲮染色体组型分析 [J]. 现代农业科技, 2013(2): 260-261.
Ma Y G, Zhang F, Mu P, et al. Analysis the karyotype of *Mystus macropterus* Bleeker in the Jialin River [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(2): 260-261.
- [26] 李树深. 鱼类细胞分类学 [J]. 生物科学动态, 1981(2): 8-15.
Li S S. Cytotaxonomy of fish [J]. Bioscience Trends, 1981(2): 8-15.
- [27] 周震. 2 种虾虎鱼染色体的核型分析 [J]. 南方水产, 2010, 6(4): 72-76.
Zhou C. Karyotype analysis of chromosome of 2 *Gobioid species* [J]. South China Fisheries Science, 2010, 6(4): 72-76.
- [28] 朱新平, 邬国民, 胡红, 等. 何氏细鲃鱼染色体组型 [J]. 遗传, 1990, 12(3): 20-21, 51.
Zhu X P, Wu G M, Hu H, et al. The karyotype of *Leptobarbus hoeveni* bleeker [J]. Hereditas, 1990, 12(3): 20-21, 51.