

## 中国东南沿海日本鳗鲡幼体的发育时相及其迁徙路径分析

郭弘艺<sup>1</sup>, 魏凯<sup>1,2</sup>, 唐文乔<sup>1\*</sup>, 李辉华<sup>1</sup>, 谢正丽<sup>1</sup>, 刘东<sup>1</sup>, 刘至治<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学鱼类研究室, 水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306;

2. 北京市水生野生动物救治中心, 北京 102100)

**摘要:** 对2008年1—3月采自中国广东至江苏沿海9个河口的534尾日本鳗鲡幼体鉴定发育时相, 分析了其中104尾玻璃鳗的日龄、柳叶鳗龄和抵岸龄。结果显示, 中国大陆东南沿海玻璃鳗的柳叶鳗龄平均为102 (90~112) d, 并呈现出地域性的从南至北逐步增大的趋势。Scheffe's 多重比较可将9个群体按柳叶鳗龄的大小归为3个组, 南部的新会和汕头归为第1组; 中间的福清、宁德、温州、台州归为第2组; 北面的慈溪、九段沙和大丰归为第3组。同样, 群体的R-聚类和个体的Q-聚类分析也显示出与上述分组相一致的结果。研究表明, 从产卵场随北赤道洋流迁徙至菲律宾东北部并进入黑潮接近中国东南沿海的柳叶鳗, 分成3个群体迁徙。变态最早的进入了南方的水域, 抵达广东沿海; 变态较早的进入了中部的东海水域, 抵达闽浙沿海; 变态最晚的则被送到长江口及其以北的沿海河口。结果还显示, 最北部大丰的平均柳叶鳗龄[(106.00±3.22) d]比最南部新会的平均柳叶鳗龄[(91.87±1.36) d]大14.13 d, 其与黑潮流速(约96 km/d)的乘积(1 350 km)同两地的距离大致相等, 研究表明, 我国沿海的玻璃鳗在柳叶鳗阶段是随着黑潮暖流自南向北被动地迁移。

**关键词:** 日本鳗鲡; 柳叶鳗龄; 玻璃鳗; 变态; 耳石; 迁徙路径

**中图分类号:** Q 954.4; S 917.4

**文献标志码:** A

日本鳗鲡 (*Anguilla japonica*) 是一种具有重要经济价值的降海洄游性鱼类(catadromous fish), 分布于中国、日本以及韩国等东南亚地区<sup>[1-5]</sup>, 其产卵场位于 Mariana 岛附近海域(15°N, 140°E)<sup>[1-3]</sup>, 刚孵化的仔鳗酷似柳叶状, 被称为柳叶鳗(leptocephalus), 顺着北赤道洋流及黑潮向西北方向移动, 经4~5个月的海上漂游抵达大陆棚区, 然后变态成线状且透明的玻璃鳗(glass eel)。玻璃鳗被淡水吸引进入河口, 体表色素细胞逐渐发育, 成为线鳗(elver)。在河川成长的阶段称黄鳗(yellow eel), 接近成熟时变态为银鳗(silver eel), 降河洄游到海洋产卵<sup>[4-11]</sup>。但近年依据耳石 Sr/Ca 比的研究结果表明, 除上述典型的淡水型洄游习性以外, 日本鳗鲡也存在着河口型和海洋型生活史类型<sup>[12-15]</sup>。

中国是鳗苗捕捞和成鳗养殖产量最高的国家, 日本鳗鲡幼体阶段的生活史特征也一直受到我国学者的关注。李城华<sup>[16]</sup>对日本鳗鲡幼体耳石日生长轮的形成功能和机制和中国大陆沿岸几个群体的白仔鳗日龄, 李勃等<sup>[17]</sup>对辽东半岛白仔鳗日龄及其产卵期, 解玉浩等<sup>[18]</sup>对中国沿海河口地区的鳗苗日龄和孵化时间等都进行过研究。Tzeng 等<sup>[6]</sup>对日本鳗幼体的耳石微结构作过深入分析, 并对中国的大陆与台湾, 日本和韩国等6个河口的日本鳗幼体变态龄和迁徙行径进行过一些探讨。本实验是在前期对中国东南沿海幼鳗日龄和孵化时间所做分析的基础上<sup>[19]</sup>, 进一步研究其在各个变态期的地域性日龄分布, 通过多元分析探讨幼鳗在中国沿海的迁徙路径, 为探明其早期生活史特征提供基础资料。

收稿日期: 2012-02-09 修回日期: 2012-04-18

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201203065); 上海海洋大学博士启动基金(B-8812-10-0001-0193); 国家自然科学基金项目(30771650); 上海市科委重点项目(08391910200); 上海市重点学科建设项目(S30701)

通讯作者: 唐文乔, E-mail:wqtang@shou.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 样本采集

2008年1—3月,在广东新会(*St.1*, 潭江口)和汕头(*St.2*, 榕江口),福建福清(*St.3*, 闽江口)和宁德(*St.4*, 霍童溪口),浙江温州(*St.5*, 瓯江口),台州(*St.6*, 灵江口)和慈溪(*St.7*, 钱塘江口),上海九段沙(*St.8*, 长江口),江苏大丰(*St.9*)等中国南部和东部沿海9个采样点(图1),从当地用定置张网捕捞鳗苗的渔船上采集日本鳗鲡幼鳗,共计534尾。装入50 cm×30 cm 双层封口保鲜袋内,用冰块保存,放入泡沫箱中带回实验室,用数显卡尺测量鱼体全长,精确至0.01 mm(表1)。

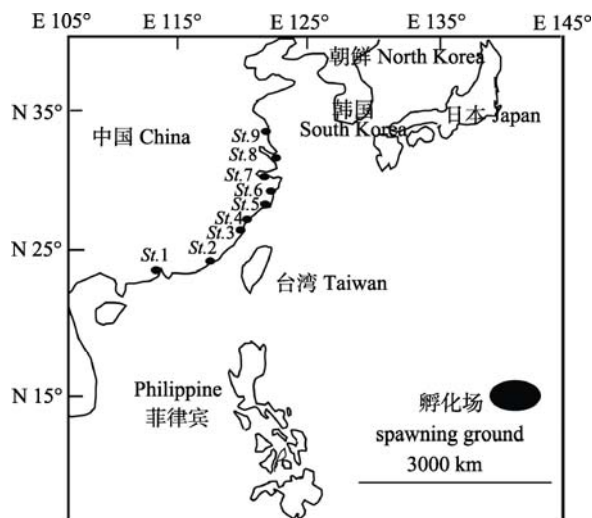


图1 幼鳗采样点分布

*St.1*.新会; *St.2*.汕头; *St.3*.福清; *St.4*.宁德; *St.5*.温州; *St.6*.台州; *St.7*.慈溪; *St.8*.九段沙; *St.9*.大丰。

Fig. 1 Distribution of sampling sites of larval eels

*St.1*.Xinhui; *St.2*.Shantou; *St.3*.Fuqing; *St.4*.Ningde; *St.5*.Wenzhou; *St.6*.Taizhou; *St.7*.Cixi; *St.8*.Jiuduansha; *St.9*.Dafeng.

### 1.2 玻璃鳗发育时相的鉴定

幼鳗所处的发育时相,参照文献[20]的方法对体表色素的分布特征进行鉴定。玻璃鳗为幼鳗抵达沿岸的最初阶段,包含色素期  $V_A$  和  $V_B$  期。 $V_A$  期为柳叶鳗变态已完成,体型转化为流线型,除尾柄有少许色素外,全身各部分无色素沉积;  $V_B$  期为头部出现色素点,除头部、尾柄有少许色素外,背部、体侧等处均无色素沉积。随着接触淡水时间的增加,玻璃鳗体表色素逐渐沿着整个背部沉积,转变为线鳗( $VI_{A1}$ ~ $VI_B$  期),  $VI_B$  期幼鳗色素沉积已完成,体表完全失去玻璃样的透明。

为精确比较各群体幼鳗抵岸龄间的差异,实验只选取玻璃鳗阶段的幼体(即  $V_A$  和  $V_B$  期)进行日龄、柳叶鳗龄和抵岸龄分析。这里的日龄是指玻璃鳗自孵化至捕获时的发育时间( $d$ ),柳叶鳗龄是指受精卵孵化至变态开始前整个柳叶鳗阶段的时间( $d$ ),抵岸龄是指自柳叶鳗开始变态至玻璃鳗被捕获时的发育时间( $d$ )。

### 1.3 日轮计数和日龄鉴定

从耳囊中取出矢耳石,清洗干净后,环氧树脂包埋固定。用2000目砂纸打磨直至可见清晰的耳石核心,超声波清洗耳石磨片,干燥后在 OLYMPUS BX-41 显微镜下观察矢耳石的微结构(图2)。沿耳石长轴测量耳石原基至边缘的最大距离即耳石最长半径(maximum otolith radius,  $R_t$ ),计数该距离内的日轮数,即日龄  $T_t$ 。

沿耳石最长半径,变态标志轮(metamorphosis check, MC)将耳石最长半径分为2部分,分别代表玻璃鳗不同的生活史阶段:1)耳石原基至变态标志轮的距离( $R_m$ )即为孵化至变态前的柳叶鳗阶段,该距离内的日轮数为柳叶鳗龄( $T_m$ );2)变态标志轮至边缘的距离( $R_{t-m}$ )为变态开始到迁徙至河口被捕获时的玻璃鳗阶段,该距离内的日轮数即为抵岸龄( $T_{t-m}$ )(图3)。

由2名具备耳石日轮计数经验的研究人员分别对日龄、柳叶鳗龄和抵岸龄作独立鉴定,当两人误差小于2%时,取均值。误差大于2%时,重新计数,并由第3者补充核对,直至三者的误差小于2%,取均值。

因在卵黄囊阶段耳石中心有5d左右的日轮尚未沉积<sup>[5-7]</sup>,故计数得到的日龄  $T_t$ 、柳叶鳗  $T_m$  均需加5d,以矫正日龄和柳叶鳗龄,但抵岸龄  $T_{t-m}$  不变。

### 1.4 数据分析

各采样点的玻璃鳗龄、柳叶鳗龄和抵岸龄进行方差齐性检验和 Scheffe's 多重比较<sup>[21]</sup>。以各采样点玻璃鳗的平均日龄、柳叶鳗龄和抵岸龄为变量,通过  $R$ -聚类方法对采样点进行聚类,以每尾玻璃鳗的日龄和柳叶鳗龄为变量,用  $Q$ -聚类方法对个体进行聚类。聚类分析均采用离差平方和法(Ward's method),利用欧氏距离(euclidean distance)对各采集点进行归类。数据均采用 Microsoft Excel 2007 软件和 SPSS 16.0 统计软件进行统计。

表 1 幼鳗的采集地点、采集时间、分析尾数、全长和色素阶段  
**Tab. 1 Sampling sites, sampling date, analysis individuals, total length and pigmentation stages of larval eels**

采样点 sampling site	采样时间 sampling date	尾数 number	全长/mm total length		色素阶段期/% pigmentation stage			
			range	mean±SD	V <sub>A</sub>	V <sub>B</sub>	VI <sub>A1</sub>	VI <sub>A2</sub>
新会 St.1	2008-02-20	57	50.29~59.16	54.30±2.04		22.8	61.4	15.8
汕头 St.2	2008-01-23	77	50.74~60.07	54.89±2.06	27.3	67.5	5.2	
福清 St.3	2008-02-20	78	50.36~62.34	56.11±2.30	65.4	34.6		
宁德 St.4	2008-02-22	52	49.42~61.14	54.98±2.16	28.8	71.2		
温州 St.5	2008-02-27	50	51.19~59.32	54.88±2.01	28.0	72.0		
台州 St.6	2008-02-25	53	47.40~57.89	53.20±2.34	39.6	60.4		
慈溪 St.7	2008-01-26	45	50.55~57.38	54.01±1.63	57.8	42.2		
九段沙 St.8	2008-01-25	66	50.21~58.73	54.06±1.68	34.8	65.2		
大丰 St.9	2008-03-11	56	48.02~63.48	54.81±2.73	3.6	80.4	16.0	

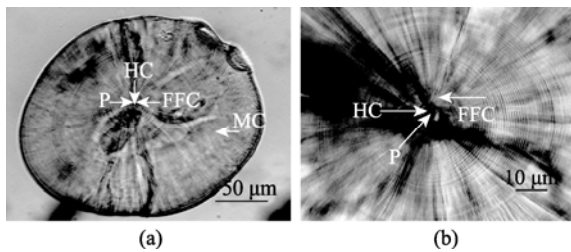


图 2 矢耳石形态特征

P. 耳石原基; HC. 孵化轮; FFC. 初次摄食轮; MC. 变态轮。

Fig. 2 Morphological character of sagitta

P. primordium; HC. hatch check; FFC. first feeding check; MC. metamorphosis check.

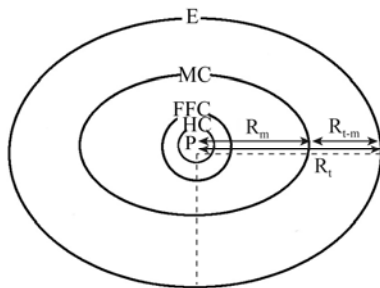


图 3 耳石测量示意图

R<sub>m</sub>. 耳石原基至变态标志轮的距离; R<sub>t</sub>. 耳石原基至耳石边缘的距离; R<sub>t-m</sub>. 耳石变态标志轮至耳石边缘的距离。

Fig. 3 Schematic diagram of radii measurements of sagitta  
 R<sub>m</sub>. distance from the primordium to the metamorphosis check (MC); R<sub>t</sub>. distance from the primordium to the otolith edge(E); R<sub>t-m</sub>. distance from the MC to the E.

## 2 结果

### 2.1 不同群体幼鳗的体长和色素期分布

534 尾幼鳗全长为 47.40~63.48 mm, 平均 (54.66±2.27) mm。各群体的平均全长在 (53.20±

2.34)~(56.11±2.30) mm(表 1)。其中以福清的最大, 台州的最小, 这两个群体与其他各群体之间有极显著差异(*t*-test, *P*<0.001), 其余各群体间幼鳗全长无显著差异(*t*-test, *P*>0.05)。

对全部 534 尾幼鳗作了色素期的鉴定(表 1)。其中, 最南部的新会和汕头幼鳗分别包含 V<sub>B</sub>~VI<sub>A2</sub> 和 V<sub>A</sub>~VI<sub>A1</sub>, 最北面的大丰幼鳗为 V<sub>A</sub>~VI<sub>A1</sub>, 其余各采样点的色素期均仅为 V<sub>A</sub>~V<sub>B</sub>。Pearson 相关分析表明, 幼鳗的体表色素发育期与其全长呈显著的负相关(*r*=-0.110, *P*=0.011<0.05), 即幼鳗全长随色素发育期的进展而呈现递减的趋势(图 4)。

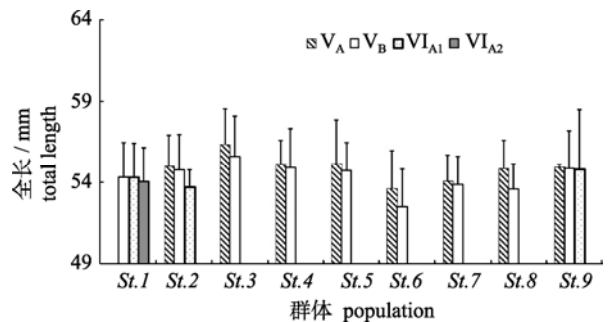


图 4 各群体幼鳗全长与体表色素期的关系

Fig. 4 Relation between total length and pigmentation stages in the larval eels from nine populations

### 2.2 不同群体玻璃鳗耳石半径分布

能准确鉴定日轮、处于 V<sub>A</sub> 和 V<sub>B</sub> 期的 104 尾玻璃鳗耳石原基至变态标志轮的距离 R<sub>m</sub>、变态轮至耳石边缘的距离 R<sub>t-m</sub> 和耳石最长半径 R<sub>t</sub> 的数值列于表 2。可见, R<sub>m</sub> 均值为(100.53±8.99)(St.2)~

表 2 各群体玻璃鳗耳石平均半径  
Tab. 2 *Sagitta* radii (mean±SD) of glass eels of nine populations

群体 population	尾数 <i>N</i>	半径/ $\mu\text{m}$ radii		
		$R_m$	$R_{t-m}$	$R_t$
新会 <i>St.1</i>	8	107.00±4.33	45.32±3.86	152.32±6.60
汕头 <i>St.2</i>	11	100.53±8.99	46.60±5.30	147.12±8.35
福清 <i>St.3</i>	14	108.21±8.17	46.65±3.40	153.91±9.37
宁德 <i>St.4</i>	11	106.45±7.45	49.78±4.92	156.23±6.74
温州 <i>St.5</i>	7	106.29±6.32	48.27±4.13	154.56±7.62
台州 <i>St.6</i>	12	107.16±8.46	49.15±3.69	156.31±8.13
慈溪 <i>St.7</i>	14	104.82±6.83	50.99±4.33	155.74±8.50
九段沙 <i>St.8</i>	15	103.00±6.49	53.28±6.12	156.28±7.24
大丰 <i>St.9</i>	12	109.82±5.85	51.79±5.85	161.61±9.55

(109.82±5.85)  $\mu\text{m}$ (*St.9*),  $R_{t-m}$  均值为 (45.32±3.86) (*St.1*)~(53.28±6.12)  $\mu\text{m}$ (*St.8*), 而  $R_t$  均值则为 (147.12±8.35) (*St.2*)~(161.61±9.55)  $\mu\text{m}$ (*St.9*)。分析表明,  $R_m$  在各群体间无显著差异( $t$ -test,  $P=0.164>0.05$ ), 但  $R_{t-m}$ ( $t$ -test,  $P=0.026<0.05$ )和  $R_t$ ( $t$ -test,  $P=0.031<0.05$ )在各群体间均有显著差异。

2.3 不同群体柳叶鳗龄、抵岸龄和玻璃鳗龄分布

对玻璃鳗各发育时相的日轮计数结果显示, 中国东南部沿海各群体的柳叶鳗龄均值为 102 (90~112) d, 呈现出从南至北逐步增大的趋势, 大丰 *St.9* (106.00±3.22) d 比新会 *St.1* (91.87±1.36) d 增加了 14.13 d(图 5-a), 但平均抵岸龄却无明显的自南至北的一致性递增趋势(图 5-b)。玻璃鳗日龄也具有与柳叶鳗龄一样的地域性变化趋势, 最北部的大丰 *St.9* [(141.75±5.66) d]较最南部的 *St.1* [(127.00±2.73) d]大 14.75 d(图 5-c)。ANOVA 分析显示, 日龄和柳叶鳗龄在各群体间均存在极显著差异( $P=0.000<0.001$ ), 但抵岸龄间并无显著差异( $P=0.366>0.05$ )。

Scheffe's 多重比较显示(表 3), 可将玻璃鳗 9 个群体的柳叶鳗龄归为 3 个组, 南方的新会 *St.1* 和汕头 *St.2* 归为第 1 组, 中部的福清 *St.3*、宁德 *St.4*、温州 *St.5*、台州 *St.6* 归为第 2 组, 北部的慈溪 *St.7*、九段沙 *St.8* 和大丰 *St.9* 归为第 3 组。9 个群体的抵岸龄仅被归为 1 组。根据日龄也可将玻璃鳗 9 个群体可归为 3 个组, 但组间有部分重叠(表 3)。

2.4 各发育时相日龄的聚类分析

群体间的  $R$ -聚类 以 9 个玻璃鳗群体的柳叶鳗龄、抵岸龄和日龄的平均数为变量, 分别对采样点进行  $R$ -聚类分析, 9 个群体的柳叶鳗龄被明显地聚为 3 类, 南部的 2 个点、中部的 4 个点和

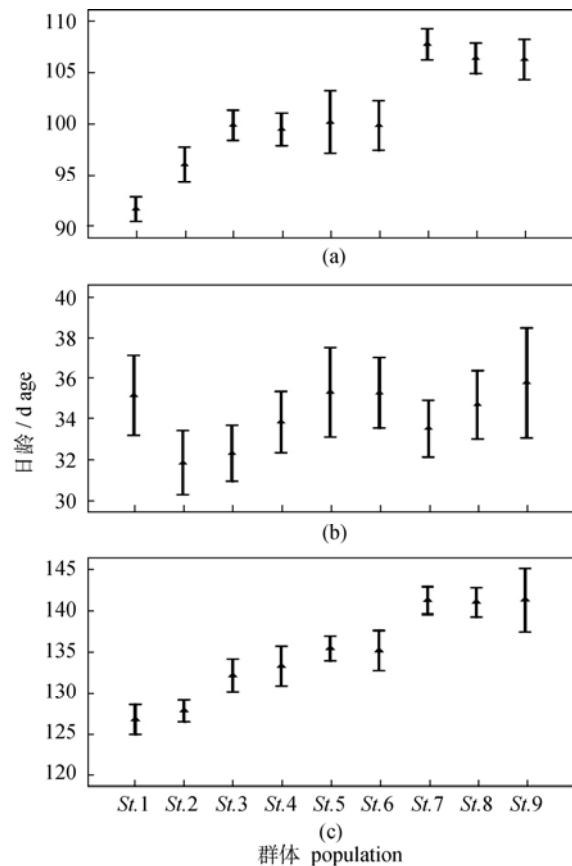


图 5 玻璃鳗各群体柳叶鳗龄(a)、抵岸龄(b) 和日龄(c)的地理分布趋势

Tab. 5 Geographic cline in (a) age of leptocephali, (b) age between metamorphosis to arrival at estuaries and (c) age of glass eels arrival at estuaries

北部的 3 个点各聚为一类(图 6-a)。9 个群体的抵岸龄虽可聚为两类, 但没有规律性的南北组合(图 6-b)。与柳叶鳗龄的聚类结果类似, 9 个群体的玻璃鳗日龄也可聚为 3 类, 且具有规律性的南北组合(图 6-c)。

所有个体的  $Q$ -聚类 以柳叶鳗龄为变量对

所有 104 尾个体进行 *Q*-聚类分析(图 7), 全部个体

表 3 各群体柳叶鳗龄、抵岸龄和日龄的 Scheffe's 多重比较分组结果

Tab. 3 Homogeneity test for (A) age of leptocephali, (B) age between metamorphosis to arrival at estuaries, and (C) age of glass eels arriving at estuaries

群体 population	尾数 number	日龄/d age	组别 homogeneous group		
(A) 柳叶鳗龄 age of leptocephali			1	2	3
新会 St.1	8	91.87±1.36	+		
汕头 St.2	11	96.00±2.83	+		
宁德 St.4	11	99.45±2.66		+	
台州 St.6	12	99.83±4.22		+	
福清 St.3	14	99.86±2.77		+	
温州 St.5	7	100.14±4.02		+	
大丰 St.9	12	106.00±3.22			+
九段沙 St. 8	15	106.33±2.87			+
慈溪 St.7	14	107.71±2.87			+
组内显著性 significance			0.288	0.282	0.988
(B) 抵岸龄 age from metamorphosis to estuaries				1	
汕头 St.2	11	31.82±2.60		+	
福清 St.3	14	32.29±2.56		+	
慈溪 St.7	14	33.50±2.59		+	
宁德 St.4	11	33.82±2.48		+	
九段沙 St. 8	15	34.67±3.27		+	
台州 St.6	12	35.25±3.02		+	
温州 St.5	7	35.29±2.93		+	
新会 St.1	8	35.44±2.79		+	
大丰 St.9	12	35.67±4.36		+	
组内显著性 significance				0.366	
(C) 日龄 age of glass eels			1	2	3
新会 St.1	8	127.00±2.73	+		
汕头 St.2	11	127.82±1.40	+	+	
福清 St.3	14	132.14±2.71	+	+	
宁德 St.4	11	133.27±4.50	+	+	
台州 St.6	12	135.17±4.24		+	+
温州 St.5	7	135.43±1.99		+	+
九段沙 St. 8	15	141.00±3.40			+
慈溪 St.7	14	141.21±3.09			+
大丰 St.9	12	141.75±5.66			+
组内显著性 significance			0.22	0.053	0.057

可被分为 3 类, 其中第 1 类均由慈溪 St.7、九段沙 St.8 和大丰 St.9 群体构成; 第 3 类 82.6% 的个体采自新会 St.1 和汕头 St.2; 第 2 类 76.9% 的个体采自 St.3、St.4、St.5 和 St.6。这一聚类结果, 有 84.6% 的个体与依据采样点所得的聚类结果(图 6)相一致。

以抵岸龄为变量对 104 尾个体进行的 *Q*-聚类分析, 所得聚类图无法按地域进行归类。以玻璃鳗

日龄为变量进行的 *Q*-聚类分析, 所得结果也可将 104 尾个体分为 3 类, 第 1 类 83.9% 由慈溪 St.7、九段沙 St.8 和大丰 St.9 群体构成; 第 3 类 57.6% 个体属于新会 St.1 和汕头 St.2 群体; 第 2 类 70.0% 个体为福清 St.3、宁德 St.4、温州 St.5 和台州 St.6 群体, 这与以柳叶鳗龄为变量的 *Q*-聚类分析结果相似。

### 3 讨论

#### 3.1 玻璃鳗不同群体的发育时相

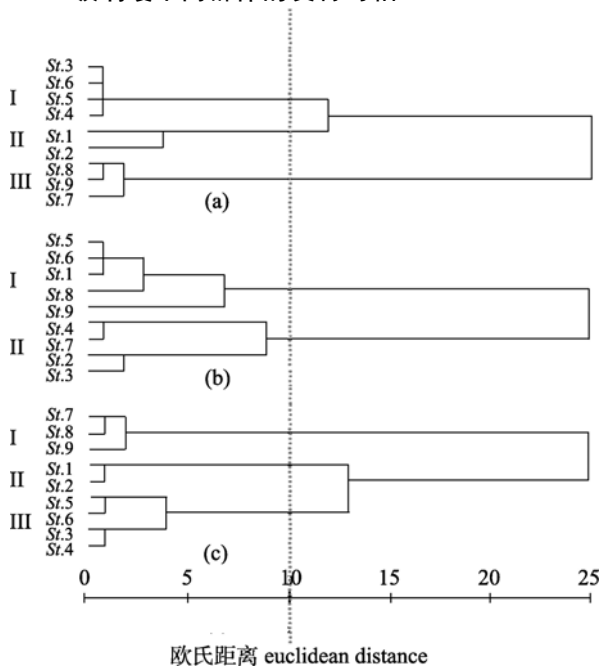


图 6 基于玻璃鳗各发育阶段平均日龄数据的 9 个群体 R-聚类分析树形图

(a) 据柳叶鳗龄聚类; (b) 据抵岸龄聚类; (c) 据玻璃鳗日龄聚类。

Fig. 6 R-cluster dendrogram of nine populations of glass eels based on average daily ages.

(a) age of leptocephali, (b) age between metamorphosis to arrival at estuaries, (c) age of glass eels arriving at estuaries.

新月夜产卵<sup>[2-3]</sup>。刚孵化的柳叶鳗自产卵场随北赤道洋流和黑潮暖流向西北方向移动,发育到一定体长之后,脱离黑潮暖流,顺着沿岸流抵达河口水域,变态成为玻璃鳗。柳叶鳗的变态即发生在离开黑潮进入沿岸水域期间<sup>[8]</sup>。

Arai 等<sup>[4]</sup>采用扫描电镜分析玻璃鳗的耳石微结构,同时用 X 射线电子探针分析耳石的锶钙比值变化,发现柳叶鳗变态开始时,耳石日轮的间距明显增大,同时伴随着锶钙比值的急剧下降,并将该点定为柳叶鳗变态起始的标志(MC)(图 8)。Tsukamoto 等<sup>[13]</sup>也将计数 MC 标志之前的日轮数作为柳叶鳗龄,本研究也采用这一标志。

当柳叶鳗变态完成时,耳石日轮的间距又会突然变窄,这也可作为柳叶鳗日龄的标志<sup>[5-7]</sup>。但这时的柳叶鳗龄实际包括了柳叶鳗本身的日龄和变态所经历的时间。已有研究表明,柳叶鳗变态的过程一般要持续 20~40 d<sup>[4]</sup>。

研究表明,柳叶鳗开始变态的时间,韩国沿海

已有资料证实,日本鳗鲡大多在 4—11 月间的

的玻璃鳗需要 128~136 d<sup>[5,8]</sup>,日本沿海的需要 110~149 d<sup>[5,9]</sup>,台湾沿海的需要 85~97 d<sup>[10]</sup>。本研究结果显示,中国大陆东南沿海玻璃鳗的平均柳叶鳗龄为 102 (90~112) d,比韩国和日本的都要小,但比台湾的要大。Tzeng 等<sup>[6-7]</sup>发现,中国大陆和台湾的柳叶鳗变态后的平均日龄为 100~138 d,扣除变态过程,这与本研究结果相吻合。

本研究所分析的幼鳗为抵达沿岸的最初阶段,即色素期为 V<sub>A</sub> 和 V<sub>B</sub> 期的玻璃鳗,所得的日龄为 136(124~152) d。这比韩国沿海(平均日龄 182~191 d)<sup>[5,8]</sup>和日本沿海(平均日龄 153~222 d)<sup>[5,9-11]</sup>的玻璃鳗群体均要小,但与中国大陆和台湾玻璃鳗群体(平均日龄 122~178.3 d)的其他研究结果比较接近<sup>[5-7,16-19]</sup>。有些早期的研究没有分析玻璃鳗所处的具体发育时相,可能是玻璃鳗和线鳗的混合样本,所得日龄比较分散。

#### 3.2 中国东南沿海玻璃鳗的迁徙路径

现有的生态追踪调查认为,日本鳗鲡仅有 Mariana Island 西侧(15°N, 140°E)这一产卵场<sup>[1-3]</sup>。微卫星、RAPD 和线粒体 D-loop 分析也表明,不同地域、同一年份的玻璃鳗群体也没有显著的遗传分化,显示它们同属一个群体<sup>[22-23]</sup>。受精卵孵化后,柳叶鳗随着北赤道洋流迁徙至菲律宾东部,随后进入黑潮,并随着黑潮的分支被输送到不同的河口<sup>[24]</sup>。Nitani 等<sup>[25]</sup>发现,日本本州与台湾南端相距 2 000 km,而两地的玻璃鳗在柳叶鳗龄时的差异为 22 d 左右,黑潮的平均流速大约是 96 km/d。由于黑潮流速与柳叶鳗龄差相乘的数值接近两地间的距离,因此黑潮被认为在日本鳗幼体的迁徙过程中起着重要作用<sup>[5-7]</sup>。柳叶鳗在随黑潮迁徙的过程中,变态时间较早者进入南方水域,变态较晚的则被输送到北方水域。

本研究显示,中国东南沿海玻璃鳗群体在柳叶鳗龄间存在差异,呈现出地域性的从南至北逐步增大的趋势。Scheffe's 多重比较可将 9 个群体归为 3 个组,柳叶鳗龄最小的新会 St.1 和汕头 St.2 归为第 1 组;中间的福清 St.3、宁德 St.4、温州 St.5、台州 St.6 归为第 2 组;柳叶鳗龄最大的慈溪 St.7、九段沙 St.8 和大丰 St.9 归为第 3 组。同样,群体的

*R*-聚类和个体的 *Q*-聚类分析均显示出与上述分组相一致的结果。这表明, 随北赤道洋流迁徙至菲律宾东北部并进入黑潮接近中国东南沿海的柳叶鳎,

分成 3 个群体进行迁徙。发育最快、变态最早的随着黑潮南海分支, 进入了南方水域, 抵达广东的沿海河口; 发育较快、变态较早的随着黑潮台湾东北

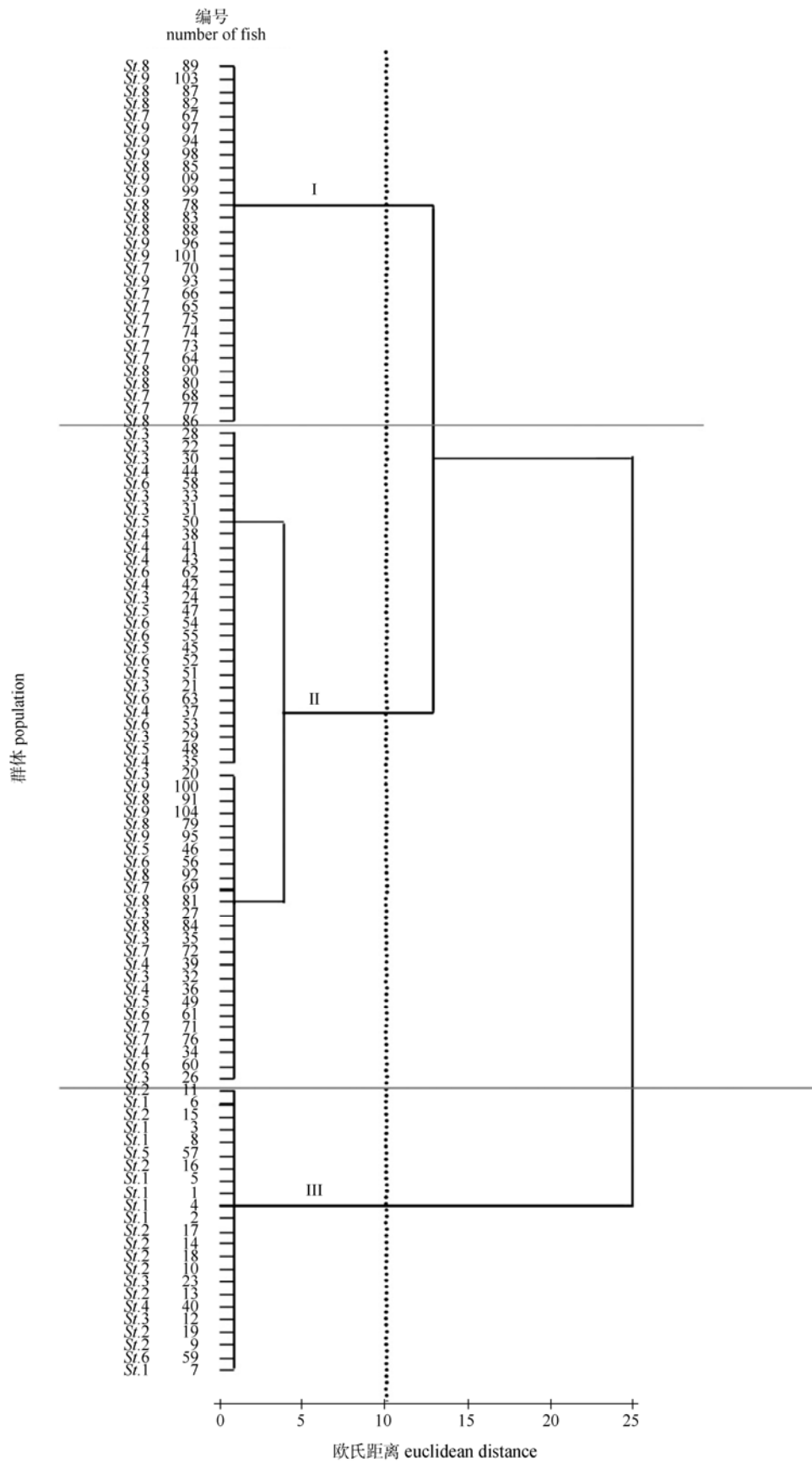


图 7 基于柳叶鳗龄的全部个体的 Q-聚类分析树形图  
Fig. 7 Q-cluster dendrogram of every individuality based on age of leptocephali



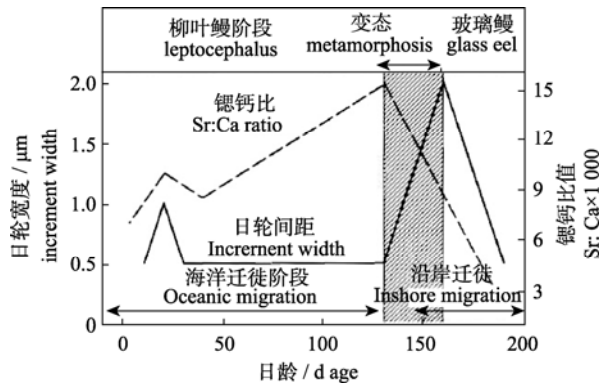


图 8 日本鳗鲡早期耳石日轮宽度和 Sr:Ca 变化模式图(引自 Arai 等<sup>[4]</sup>)

Fig. 8 Patterns of change of otolith increment widths and Sr:Ca ratio in the early life history of the Japanese eel(cited from Arai et al<sup>[4]</sup>)

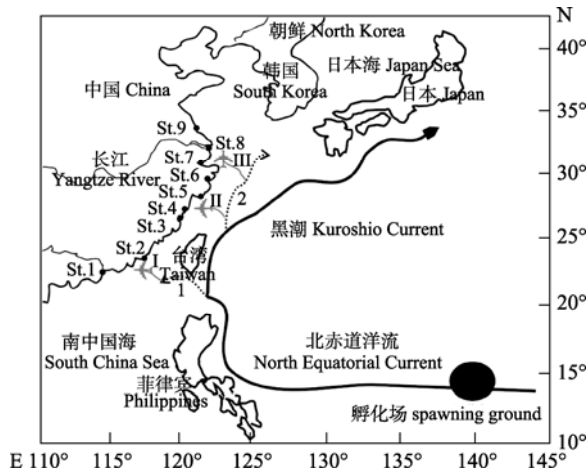


图 9 中国东南沿海玻璃鳗随黑潮及其分支迁移的可能路径

1. 黑潮南海分支; 2. 黑潮台湾东北海域分支; I, II, III. 玻璃鳗的 3 条迁徙路径。

Fig. 9 The possibility migration route of larvae eels with Kuroshio Current and its branches to the Chinese southeast estuaries

1, 2. the branches of Kuroshio Current; I, II, III. three types migration route of larvae eels in southeast coastal estuaries of China.

海域分支进入了中部的东海水域, 抵达闽浙的沿海河口; 发育最慢, 变态最晚的, 则被送到长江口及其以北的沿海河口(图 9)。

本研究表明, 最北部大丰的柳叶鳗龄[(106.00±3.22) d]比最南部新会的柳叶鳗龄[(91.87±1.36) d]平均大 14.13 d, 其与黑潮流速的乘积所得的值大约为 1350 km, 这与新会到大丰的距离大致相等。这一结果也表明, 我国沿海的玻璃鳗是在柳叶鳗阶段随着黑潮暖流自南向北被动地迁移。

参考文献:

- [1] Tsukamoto K. Discovery of the spawning area for Japanese eel[J]. Nature, 1992, 356(6372): 789-791.
- [2] Tsukamoto K. Oceanic biology: spawning of eels near a seamount[J]. Nature, 2006, 439(7079): 929.
- [3] Tsukamoto K, Otake T, Mochioka N, et al. Seamounts, new moon and eel spawning: the search for the spawning site of the Japanese eel[J]. Environmental Biology of Fishes, 2003, 66 (3): 221-229.
- [4] Arai T, Otake T, Tsukamoto K. Drastic changes in otolith microstructure and microchemistry accompanying the onset of metamorphosis in the Japanese eel *Anguilla japonica*[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, 161: 17-22.
- [5] Cheng P W, Tzeng W N. Timing of metamorphosis and estuarine arrival across the dispersal range of the Japanese eel *Anguilla japonica*[J]. Marine Ecology Progress Series, 1996, 131: 87-96.
- [6] Tzeng W N, Tsai Y C. Otolith microstructure and daily age of *Anguilla japonica* elvers from the estuaries of Taiwan with reference to unit stock and larval migration [J]. Journal of Fish Biology, 1992, 40(6): 845-857.
- [7] Tzeng W N. Relationship between growth rate and age at recruitment of *Anguilla japonica* elvers in a Taiwan estuaries inferred from otolith growth increments[J]. Marine Biology, 1990, 107(1): 75-81.
- [8] Moon H T. The early life history of eel *Anguilla japonica* determined by otolith microstructure and catch date of glass eels[D]. Chungnam National University.
- [9] Tabeta O, Tanaka K, Yamada J, et al. Aspects of the early life history of the Japanese eel *Anguilla japonica* determined from otolith microstructure[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1987, 53(10): 1727-1734.
- [10] Tsukamoto K, Umezawa A. Early life history and oceanic migration of the eel *Anguilla japonica*[J]. La Mer, 1990, 28(4): 188-198.
- [11] Tsukamoto K. Recruitment mechanism of the eel, *Anguilla japonica*, to the Japanese coast [J]. Journal of Fish Biology, 1990, 36(5): 659-671.
- [12] Tsukamoto K, Nakai I, Tesch W V. Do all freshwater eels migrate?[J]. Nature, 1998, 396(6712): 635-636.
- [13] Tsukamoto K, Arai T. Facultative catadromy of the eel *Anguilla japonica* between freshwater and seawater habitats[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, 220: 265-276.
- [14] Chino N, Arai T. Relative contribution of migratory type on the reproduction of migrating silver eels, *Anguilla japonica*, collected off Shikoku Island, Japan[J]. Marine Biology, 2009, 156(4): 661-668.
- [15] Guo H Y, Zheng Y, Tang W Q, et al. Behavioral migration diversity of the Yangtze River Japanese eel, *Anguilla japonica*, based on otolith Sr/Ca ratios[J]. Zoological Research, 2011, 32(4): 442-445.
- [16] 李城华. 日本鳗鲡补充群体的日龄, 全长, 出生时间及耳石生长的变化[J]. 海洋学报, 1998, 20(4): 107-113.

- [17] 李勃, 解玉浩, 刘义新. 鳗鲡幼鱼耳石日轮的研究[J]. 动物学研究, 1992, 24(4): 345–349.
- [18] 解玉浩, 李勃, 富丽静, 等. 中国沿海河口地区鳗苗群体结构的研究[J]. 中国水产科学, 1997, 4(5): 33–38.
- [19] 郭弘艺, 魏凯, 谢正丽, 等. 中国东南沿海日本鳗鲡幼体的日龄及其孵化时间[J]. 水产学报, 2011, 35(7): 1050–1057.
- [20] Tesch F W. The eel[M]//Biology and management of anguillid eels. London: Chapman & Hall, 1977.
- [21] Sokal R R, Rohlf F J. Biometry[M]. San Francisco: WH Freeman, 1981.
- [22] 龚小玲, 李思发, 王成辉. 长江口日本鳗鲡群体遗传多样性 RAPD 初步分析[J]. 上海水产大学学报, 2007, 16(3): 201–206.
- [23] 任圣杰. 花鳗鲡微卫星标记的筛选和日本鳗鲡群体遗传结构的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011:18–38.
- [24] Zenimoto K, Kitagawa T, Miyazaki S, *et al.* The effects of seasonal and interannual variability of oceanic structure in the western Pacific North equatorial current on larval transport of the Japanese eel, *Anguilla japonica* [J]. Journal of Fish Biology, 2009, 74(9): 1878–1890.
- [25] Nitani H. Beginning of the Kuroshio[M]. Tokyo: University of Tokyo Press, 1972:129–163.
- [26] 郑小童, 刘秦玉, 胡海波, 等. 琉球群岛以东的西边界流与东海黑潮流量时空特征的研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(1): 1–9.

## Developmental stages and migratory routes of larvae Japanese eel from southeast coastal estuaries of China

GUO Hong-yi<sup>1</sup>, WEI Kai<sup>1,2</sup>, TANG Wen-qiao<sup>1\*</sup>, LI Hui-hua<sup>1</sup>, XIE Zheng-li<sup>1</sup>, LIU Dong<sup>1</sup>, LIU Zhi-zhi<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Ichthyology, Shanghai Ocean University, Ministry of Education Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai 201306, China;  
2. The Saving Center for Aquatic Animals in Beijing, Beijing 102100, China)

**Abstract:** A total of 534 larvae of *Anguilla japonica* were collected from 9 estuaries in Guangdong, Fujian, Zhejiang, Shanghai and Jiangsu, China, during Jan. -Mar. of 2008. Their pigmentation stages were determined according to the distribution of pigments on the body surface. The age of leptocephali at metamorphosis ( $T_m$ ), time between metamorphosis to arrival at estuaries ( $T_{t-m}$ ), and age of glass eels ( $T_t$ ) arriving at the 9 sites were counted according to the number of daily growth increments in the sagitta. The mean  $T_m$  was 102 d (90 d to 112 d) and progressively increased from south to north. The homogeneity tests for  $T_t$ ,  $T_m$  and  $T_{t-m}$  among nine estuaries were conducted by Scheffe's multiple comparison method. According to sampling location and  $T_m$  value, leptocephali were divided into three homogeneous groups. Group I was located in two southern sampling sites (Xinhui and Shantou) and had the lowest  $T_m$ . In contrast, group III in the 3 northern sampling sites (Jiuduansha, Cixi, Dafeng) had the highest  $T_m$ . Group II were in the four mid-sites (Fuqing, Ningde, Wenzhou, Taizhou). Similar result was acquired by *R*-cluster dendrogram of nine sampling sites and *Q*-cluster dendrogram of every sample based on  $T_m$ . These results indicated that the leptocephalus might migrate in three populations along the North Equatorial Current from their spawning ground to the northeastern continental shelf waters of Philippines, to Kuroshi Current and then to the estuaries of China for metamorphosis. The fast-growing leptocephali metamorphosed earlier, and migrated to the southern estuaries and then entered into Guangdong coastal rivers, while the slow-growing ones metamorphosed later, migrated to the Changjiang estuary and the northern estuaries of the range. The remaining leptocephali migrated to the middle coastal waters of East China Sea. The difference of leptocephali metamorphosis age between Xinhui [(91.87±1.36) d] and Dafeng [(106.00±3.22) d] was 14.13 d. If the leptocephali were drifted by the Kuroshio Current at a velocity of 96 km/d, the dispersal distance of the leptocephali for 14.03 d would be 1 350 km, approximately equal to the distance between Xinhui and Dafeng. These results suggest that glass eel of Chinese estuaries was passively transported by the Kuroshi Current from the south to north at their leptocephali stage.

**Key words:** *Anguilla japonica*; age of leptocephali; glass eels; metamorphosis; otolith; migratory routes

**Corresponding author:** TANG Wen-qiao. E-mail: wqtang@shou.edu.cn