

淇河鲫早期生长非线性回归分析

多甜, 王凤产, 赵晓进

(河南师范大学 水产学院, 河南 新乡 453007)

摘要:采用 SPSS 软件 Logistic 曲线拟合、Logistic 非线性拟合和 Asymptotic 渐进回归 3 种模型对淇河鲫早期生长规律进行研究. 结果表明: Logistic 曲线拟合度较低 ($R^2 = 0.885$); 非线性渐进回归模型拟合度最高 ($R^2 = 0.982$). 根据模型计算出的早期生长拐点为出生后第 5 周. 淇河鲫早期生长与其他一些鱼类生长模式相似, 但也具有自身独特的生长模式. 探讨了淇河鲫早期生长模式的生物学意义, 为淇河鲫科学养殖、增殖和资源保护提供理论参数.

关键词:淇河鲫; 早期生长; 形态特征; 非线性回归

中图分类号: S965.117

文献标志码: A

淇河鲫 (*Carassius auratus* in Qihe river) 属鲤形目 (Cypriniformes), 鲤科 (Cyprinidae), 鲫属 (*Carassius Jarocki*), 产于豫北的淇河, 故称淇河鲫. 是河南省特有的名贵优质鱼种. 淇河鲫与普通鲫不同, 鳞色略呈金黄, 体型丰满, 脊背厚度约为普通鲫的 2 倍, 又被称为“双背鲫鱼”, 其生长速度快, 为罕见的天然三倍体鱼类. 其研究价值及经济价值都非常高^[1-3]. 对淇河鲫的研究始于上世纪 70 年代. 淇河鲫研究和开发较早, 但是发展速度缓慢^[4]. 本文对淇河鲫早期生长发育模型进行研究, 探讨其早期生长发育特征, 以期提供淇河鲫早期生长发育的基础资料.

1 材料与方 法

实验用鱼来自河南省淇县淇河鲫原种场, 在河南师范大学水产学院水产养殖基地人工养殖驯化, 近交繁育. 淇河鲫鱼在形态等方面与普通鲫相比有明显的差异. 淇河鲫的鱼背厚, 普通鲫的鱼背薄; 淇河鲫的鱼背要比普通鲫的鱼背高; 普通鲫的性别比是 4:1, 而淇河鲫是 9:1; 另外在营养成分上淇河鲫的蛋白质含量比普通鲫的要高一些^[3]. 仔稚鱼养殖环境为河南师范大学水产养殖基地标准养殖容器, 直径 1 m, 水深 1 m. 养殖期间每天换水 1/2, 不间断充气. 饲料选择鳖料 (厦门嘉康有限公司产). 投喂方式为仔鱼体长 5 mm 时先投放碎料, 日投喂次数为 5~6 次, 当鱼体长达到 20 mm 左右时投喂粒径 1.5 mm 的颗粒饲料, 直到稚鱼培育结束. 取材时间为 2013 年 5 月至 12 月.

实验设计: 每隔 1 周从实验水池中随机取 3 尾进行测量, 每个性状重复测量 3 次, 取其均值. 持续测量 25 周. 根据相关资料选择变量^[5], 精确度: 0.01 mm. 变量包括全长、体宽和体高. 为减少误差, 数据测量由本文作者独立完成.

选择 Logistic 和 Asymptotic 非线性拟合模型^[6]. 模型中周龄为自变量. 全长、体宽和体高分别为因变量. a, b, c 为回归参数. 用决定系数 R^2 值作为曲线拟合优劣的标准, 根据回归模型求出早期生长的拐点值^[7-8].

采用 SPSS 22.0 统计软件进行描述性统计、曲线拟合和非线性拟合^[6].

收稿日期: 2016-05-04; 修回日期: 2016-10-10.

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究计划项目 (132300410136) 资助; 河南师范大学博士科研启动课题自助 (5102109179103).

作者简介: 多甜 (1993 -), 女, 河南郑州人, 河南师范大学在读硕士研究生; 研究方向为水产动物病原学, E-mail: 15237355832@163.com.

通信作者: 赵晓进 (1957 -), 男, 河南师范大学教授, 博士, 研究方向: 水产养殖学, E-mail: zxj_6119@163.com.

2 结果

淇河鲫早期生长形态变量描述性统计见表1.一周龄全长均值为(8.70±0.08) mm.经过25周的生长,全长均值达(66.40±2.70) mm.3个形态变量与周龄的关系呈非线性关系.拟合模型汇总和参数估计值见表2.

表1 淇河鲫早期生长有关变量的描述性统计

周龄/周	全长			体宽			体高		
	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围	均值	标准差	范围
2	8.70	0.08	8.60-8.84	1.35	0.01	1.33-1.36	1.75	0.12	1.57-1.80
5	31.07	1.81	29.57-33.53	7.08	0.53	6.39-7.49	8.40	0.70	7.8-9.35
10	53.56	2.17	51.54-56.31	9.99	0.79	9.16-10.94	15.60	0.87	14.60-16.70
15	59.82	2.05	58.24-62.55	10.71	0.35	10.35-11.18	17.90	0.56	17.44-18.62
20	65.19	2.33	59.77-67.48	11.38	0.82	10.41-11.38	19.7	0.73	18.8-20.85
25	66.44	2.70	64.07-68.84	12.10	0.71	10.94-12.85	21.14	2.08	18.36-22.90

表2 全长、体宽和体高与周龄的曲线拟合模型汇总和参数

因变量	函数	R^2	F	df1	df2	P	常数	a	b	c
全长	三Ω	0.985	466.388	3	21	0.000	-4.740	10.362	-0.555	0.010
	对数	0.966	644.151	1	23	0.000	2.026	21.323		
	二次	0.956	237.044	2	22	0.000	5.525	6.042	-0.147	
	幂	0.911	234.250	1	23	0.000	10.246	0.649		
	Logistic	0.885	176.841	1	23	0.000	0.048	0.828		
	S型	0.867	149.910	1	23	0.000	4.222	-2.557		
	倒数	0.717	58.141	1	23	0.000	62.876	-75.868		
	复合	0.612	36.340	1	23	0.000	20.321	1.064		
	增长	0.612	36.340	1	23	0.000	3.012	0.062		
	指数	0.612	36.340	1	23	0.000	20.321	0.062		
体宽	三次	0.962	177.011	3	21	0.000	-0.876	1.852	-0.103	0.002
	对数	0.951	450.085	1	23	0.000	0.216	3.798		
	二次	0.917	121.433	2	22	0.000	1.335	0.952	-0.021	
	幂	0.879	166.526	1	23	0.000	1.640	0.682		
	Logistic	0.850	130.417	1	23	0.000	0.332	0.821		
	S型	0.848	128.683	1	23	0.000	2.493	-2.718		
	倒数	0.720	59.287	1	23	0.000	11.084	-13.405		
	复合	0.595	33.857	1	23	0.000	3.518	1.065		
	增长	0.595	33.857	1	23	0.000	1.258	0.063		
	指数	0.595	33.857	1	23	0.000	3.518	0.063		
体高	三次	0.974	264.520	3	21	0.000	-1.252	1.307	-0.068	0.001
	对数	0.944	387.647	1	23	0.000	-0.353	2.699		
	二次	0.941	175.649	2	22	0.000	0.102	0.756	-0.018	
	幂	0.877	163.371	1	23	0.000	0.795	0.795		
	S型	0.823	107.146	1	23	0.000	2.095	-3.125		
	Logistic	0.815	101.094	1	23	0.000	0.464	0.847		
	倒数	0.699	53.345	1	23	0.000	7.354	-9.418		
	复合	0.587	32.654	1	23	0.000	1.949	1.075		
	增长	0.587	32.654	1	23	0.000	0.667	0.073		
	指数	0.587	32.654	1	23	0.000	1.949	0.073		

SPSS的10个曲线拟合模型明显分为3个类别.第一组主要包括3个模型,分别是三次函数、对数函数和二次函数拟合模型. R^2 都大于0.95.3次拟合模型在3个形态变量的拟合模型中都是最佳拟合模型, R^2 值最大.第二组主要包括3个模型,分别是幂函数、Logistic函数和S型函数,拟合效果中等, R^2 都大于0.80.剩下的4个模型为第三组,分别是倒数、复合、增长和指数函数, R^2 值都小于0.80,拟合效果相对较差.

3个形态变量与周龄的回归拟合整体上效果比较接近,下面以全长和周龄回归为例来分析探讨.全长

(y)和周龄(x)的三次函数拟合模型为: $y = -4.740 + 10.362x - 0.555x^2 + 0.010x^3$.

为了比较不同函数的拟合效果,采用第二组中的 Logistic 回归方程与非线性回归方程进行对比.

由表 3 可知,3 种生长模型的拟合程度都比较高,其中 Asymptotic 渐进拟合效果最好($R^2 = 0.982$), Logistic 曲线拟合效果相对较低($R^2 = 0.885$). 根据拟合模型的函数表达式计算拐点周龄. 结果显示非线性渐进拟合与 Logistic 非线性拟合模型非常接近,与 Logistic 曲线拟合有较大差异.

表 3 全长与周龄的 3 种生长曲线拟合模型和参数

非线性拟合方程	R^2	a	b	c	拐点全长/mm	拐点周龄/周	表达式
Logistic 曲线	0.885	72.000	0.048	0.828	36.0	6.56	$y = 1 / (1 / a + b * (c * x))$
Logistic 非线性	0.969	64.407	1.934	0.384	32.2	4.97	$y = a / (1 + \exp(b - c * x))$
Asymptotic 非线性	0.982	68.800	-74.783	-0.157	34.4	4.95	$y = a + b * \exp(c * x)$

为了直观比较不同模型的拟合效果,分别对 Logistic 曲线拟合和 Asymptotic 渐进拟合两个模型绘制散点图. 原始观测值、Logistic 曲线拟合和非线性渐进拟合三者的比较见图 1(左). 当早期生长大于 15 周龄时,两个模型的预测效果基本接近,当小于 15 周龄时,则两个模型的预测差异较大,特别是在 5~10 周. 显然 Logistic 曲线拟合残差较大,Asymptotic 渐进拟合效果较好. 两个模型残差的比较见图 1(右). 生长早期,全长小于 60 mm 时两个模型的残差误差较大. 整体上非线性渐进拟合的残差预测值控制在 ± 5 mm 之内,而 Logistic 曲线拟合的残差预测值超过 ± 10 mm.

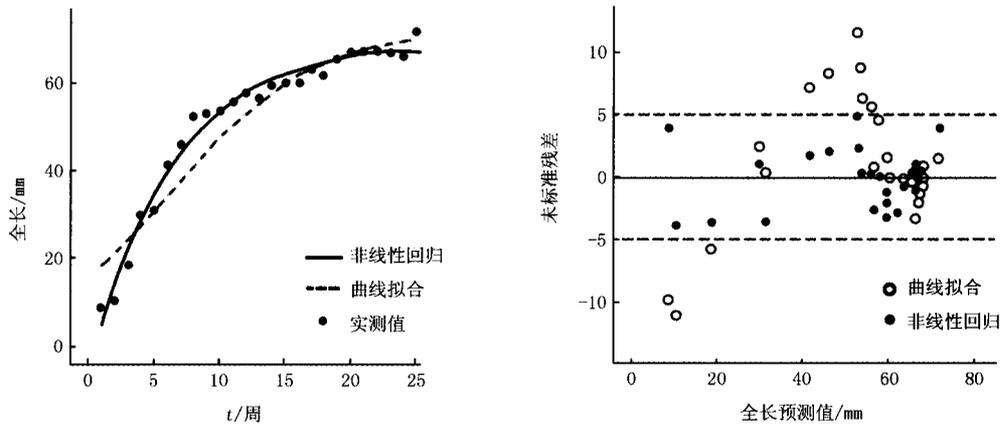


图 1 Logistic 曲线拟合与 Asymptotic 渐进回归模型预测效果比较

3 讨论

在鱼类早期生长发育阶段,仔稚鱼的一些形态特征会出现快速的正异速生长,经历了一段时间后,生长速度开始变慢,出现明显的生长拐点模式. 许多文献资料都证明了这一点^[9-10].

本研究采用 3 种常用的非线性回归方程对淇河鲫全长进行拟合,目的是比较不同方程的拟合效果. 结果显示采用 SPSS 的 Logistic 曲线拟合决定系数较小($R^2 = 0.885$);采用非线性渐进回归方程效果最好($R^2 = 0.982$). 该模型在其他一些物种中也得到了广泛的应用^[11-12]. 三次函数拟合模型虽然拟合程度较高,但是由于模型复杂,计算拐点困难,实际工作中应用较少^[13].

非线性渐进回归模型判断拐点应该出现在第 5 周左右(见表 3). 这一时期生长速率最快. 根据 Logistic 曲线模型计算出来的拐点是在 6.5 周左右,两种模型差别较大. 选择生长拐点为第 5 周较为合适,因为 2 种非线性拟合效果要优于 Logistic 曲线拟合效果. 由于视觉、运动、消化等器官不断发育,功能不断完善,此时仔鱼摄食旺盛,生长迅速^[2-3],故其全长、体宽和体高等形态变量的生长率均急剧升高,尤其是全长的生长要明显高于其他测量指标. 有资料报道淇河鲫体长为体厚的 4.8~5.5 倍,可能与淇河鲫全长、体宽和体高的优先发育有关^[1]. 10 周之后 3 个形态变量的生长率明显降低,并维持在一个较低的水平,这时大部分幼鱼器官组织结构均已发育完成,但鱼体仍在持续不断地生长. 研究表明淇河鲫与普通鲫一样是典型的杂食性鱼类. 淇

河鲫在水中几乎全年摄食,冬季以动物性食物为主,其他季节以植物性食物为主^[1]。

研究鱼类早期生长模式的方法很多,如,常用有三次函数^[13]、幂函数^[9]、Logistic 曲线拟合^[8]。不同的方法拟合度不同,这里选择3种非线性拟合模型进行比较,结果显示非线性拟合模型有明显的优势。

采用非线性回归的主要问题之一是设置初始参数^[14]。本研究根据周龄与全长散点图的变化趋势,推测这条曲线符合非线性渐进回归模型,表达式为: $y = a + be^{cx}$ 。初始参数满足条件: $a > 0, b < 0, c < 0$ ^[6,14]。这里的初始参数可以根据 SPSS 曲线拟合中 Logistic 方程拟合结果的参数来直接使用。 $a = 72$ (淇河鲫早期全长生长的上限), $b = -0.05, c = -0.8$ 。

本文通过对淇河鲫早期生长发育研究,显示体形变量具有明显的非线性生长特点,与许多资料报道的鱼类生长模式相似^[15],但是也具有自身独特的生长模式。主要表现在生长拐点不同和曲线形状不同,推测主要与遗传概貌和水质环境有关。另外在早期生长过程中投喂的饲料、投喂方式和生长季节对仔稚鱼的生长有着较大的影响。不管是哪种模式,都与早期几个重要器官的快速发育有关,提高自身的摄食能力、躲避敌害,以适应复杂多变的水体环境。采用3种非线性模型对淇河鲫早期生长曲线进行拟合,其中非线性渐进回归模型拟合度最高, $R^2 = 0.982$,具有明显的实用价值。根据该模型计算出的拐点周龄为第5周。本研究可为淇河鲫选苗育种、增殖和资源保护提供理论参数。

参 考 文 献

- [1] 李学军,刘洋洋.淇河鲫研究进展与开发策略[J].淡水渔业,2012,42(2):93-96.
- [2] 单元勋,瞿薇芬.河南淇河鲫(*Carassius auratus*)的生物学[J].河南师范大学学报(自然科学版),1985(3):53-62.
- [3] 孙兴旺.淇河鲫的生物学特性[J].淡水渔业,1986,2:22-34.
- [4] 王阅雯.淇河鲫鱼形态学和 RAPD 标记遗传多样性研究[D].新乡:河南师范大学,2010.
- [5] 胡凤霞,胡海洋,田华香,等.淇河鲫鱼形态学两性异形研究[J].水产科学,2016,35(1):43-48.
- [6] 李昕,张明明.SPSS22.0 统计分析从入门到精通[M].北京:电子工业出版社,2015,203-213.
- [7] 高小强,洪磊,刘志峰,等.美洲鲈仔稚鱼异速生长模式研究[J].水生生物学报,2015,39(3):638-641.
- [8] 戴国俊,王金玉,杨建生,等.应用统计软件 SPSS 拟合生长曲线方程[J].畜牧与兽医,2006,38(9):28-30.
- [9] 何勇风,吴兴兵,朱永久,等.鲈鱼仔鱼的异速生长模式[J].动物学杂志,2013,48(1):8-12.
- [10] 马境,章龙珍,庄平,等.施氏鲟仔鱼发育及异速生长模型[J].应用生态学报,2007,18(12):2875-2882.
- [11] 曹忻,赵有璋.无角陶赛特羔羊的生长发育模型[J].甘肃农业大学学报,2006,2(4):15-19.
- [12] 马发顺,梁秀丽,李进萍.海兰褐蛋鸡早期生长模型的拟合分析[J].甘肃农业大学学报,2014,6(2):38-41.
- [13] 贾瑞锦,陈超,李炎璐,等.条纹锯鲈(*Centropristis striata*)仔、稚、幼鱼形态发育的异速生长模式[J].渔业科学进展,2014,35(5):128-133.
- [14] 董江水.应用 SPSS 软件拟合 Logistics 曲线研究[J].金陵科技学院学报,2007,23(1):21-24.
- [15] 詹金绵,王炳谦,谷伟,等.不同虹鲟品系异速生长的比较分析[J].上海交通大学学报,2015,33(1):59-63.

Nonlinear regression analysis on early growth pattern of *Carassius auratus* in Qihe River

Duo Tian, Wang Fengchan, Zhao Xiaojin

(College of Fisheries, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to study early growth pattern of *Carassius auratus* in Qihe River, 3 regression models (Logistic curve fitting, Logistic nonlinear regression and Asymptotic regression) were derived from the morphometric measurements. SPSS (Version 22.0) was used for statistical analysis. The results showed that 3 growth models could all well-fit the early growth of *Carassius auratus* in Qihe River ($R^2 > 0.88$), while the nonlinear asymptotic regression had the best effects on fitting ($R^2 = 0.982$). According to this model, the turning point of the early growth was about 5 weeks. The early growth of *Carassius auratus* in Qihe River has some similar growth patterns when compared with many of some other fishes, while it also has its own unique ones. This paper explored the biological significance of early growth of *Carassius auratus* in Qihe River and provided theoretical parameters for scientifically cultural, aquaculture and resource protection.

Keywords: *Carassius auratus* in Qihe River; morphometric character; early growth; nonlinear regression