

黄河鲤早期生长非线性回归分析

赵晓进^{1,2}, 多甜², 韩霄帆³, 吕云飞¹

(1. 郑州工商学院 经济管理学院, 郑州 451400;

2. 河南师范大学 水产学院, 河南 新乡 453007; 3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 研究黄河鲤(*Cyprinus carpio var.*)早期异速生长, 探讨黄河鲤的早期生长规律. 通过 SPSS 统计软件建立 Logistic 曲线拟合和 Logistic 非线性拟合 2 种非线性回归模型. 模型中日龄为解释变量, 黄河鲤仔鱼的全长、体宽和眼径为被解释变量. 结果表明, Logistic 曲线的拟合度较低, $R^2=0.979$; Logistic 非线性回归模型的拟合度最高, $R^2=0.991$. 根据模型计算出黄河鲤的早期生长拐点在第 7 d. 讨论了黄河鲤异速生长模型的理论意义和应用价值.

关键词: 黄河鲤鱼; 早期发育; 形态; Logistic 回归

中图分类号: S965.117

文献标志码: A

黄河鲤(*Cyprinus carpio var.*)原产于黄河水域, 是我国华北地区的主要淡水养殖品种^[1]. 其肉质细腻、口感鲜美、鳞片金色、尾常为红色、体型呈梭状, 体长/体高 >3 , 尾柄长/尾柄高约等于 1^[2]. 黄河鲤生存能力极强, 养殖水域宽广. 与其他鲤鱼品种比较, 它的肌肉中脂肪含量较低(5.0 g/100 g), 蛋白质含量较高^[2]. 多年来许多学者对黄河鲤的解剖生理学和性别决定机制等进行了研究^[3,4]. 但是由于受到时间和空间分布的影响, 其研究速度较为缓慢. 尤其是对黄河鲤早期生长发育研究资料较少. 本文结合文献资料和研究进展, 通过非线性回归分析, 探讨黄河鲤早期生长发育的规律, 为黄河鲤早期生长的科学养殖及资源开发利用提供基本资料.

1 材料与方 法

所选用的黄河鲤的仔鱼取自河南师范大学水产学院水产养殖基地, 取材时间为 2016 年 6 月初, 试验用鱼从出卵开始持续观察 20 d.

试验设计: 每隔 1 d 从试验水体中随机取出同批次 9 尾黄河鲤仔鱼进行测量, 每个性状重复测量 3 次, 取其均值. 根据相关资料选择变量测量^[5,6]. 选择变量体长、体宽、体高和眼径长(单位: mm). 精确度: 0.01 mm. 为减少误差, 数据测量由本文第一作者独立完成. 测量变量见图 1.

采用 SPSS 22.0 统计软件进行描述性统计^[6]. 非线性回归选择 Logistic 和 Logistic 非线性拟合模型. 日龄为解释变量; 全长、体宽和眼径长均为被解释变量. a, b, c 为回归参数. 决定系数(R^2)作为曲线拟合优劣标准. 利用资料公式和统计软件算出黄河鲤的早期生长的拐点值^[7].

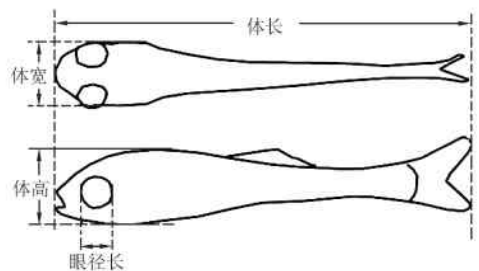


图 1 黄河鲤早期生长有关变量的测量图(15D)

收稿日期: 2017-09-10; **修回日期:** 2018-04-05.

基金项目: 河南省高等学校重点资助项目(18A180020); 河南省重点科技攻关项目(172102310721).

作者简介(通信作者): 赵晓进(1957-), 男, 山东聊城人, 河南师范大学教授, 博士, 主要从事鱼类形态学研究, E-mail: zxj_6119@163.com.

2 结 果

黄河鲤早期生长过程描述性统计结果见表 1.

表 1 黄河鲤仔鱼形态变量描述性统计(单位:mm)

日龄/d	体长		体宽		体高		眼径高	
	均值±标准差	极值	均值±标准差	极值	均值±标准差	极值	均值±标准差	极值
1	5.35±0.35	0.66	0.46±0.06	0.12	0.85±0.11	0.19	0.35±0.07	0.12
2	5.50±0.55	1.09	0.53±0.13	0.25	0.97±0.30	0.59	0.39±0.02	0.03
3	6.30±0.42	0.81	0.58±0.06	0.11	1.01±0.18	0.36	0.40±0.02	0.03
4	6.73±0.56	1.13	0.66±0.14	0.26	1.05±0.13	0.26	0.45±0.03	0.05
5	8.07±0.27	0.51	0.74±0.11	0.21	1.18±0.35	0.50	0.53±0.06	0.11
6	8.16±0.16	0.33	0.78±0.11	0.22	1.30±0.16	0.29	0.54±0.04	0.07
7	8.27±0.32	0.58	0.86±0.18	0.26	1.34±0.33	0.46	0.58±0.04	0.06
8	9.62±0.82	1.60	0.95±0.11	0.16	1.37±0.13	0.23	0.61±0.10	0.19
9	9.76±1.93	3.84	1.10±0.06	0.08	1.42±0.33	0.65	0.61±0.04	0.06
10	10.32±1.42	2.63	1.13±0.14	0.20	1.49±0.06	0.12	0.63±0.06	0.08
11	10.35±1.12	1.59	1.16±0.14	0.20	1.57±0.22	0.42	0.65±0.08	0.11
12	10.86±2.02	3.99	1.21±0.20	0.28	1.62±0.35	0.62	0.68±0.07	0.10
13	11.11±1.00	2.01	1.23±0.14	0.20	1.66±0.33	0.46	0.70±0.16	0.30
14	11.45±0.05	0.10	1.27±0.17	0.24	1.68±0.28	0.50	0.73±0.03	0.05
15	11.67±1.01	2.01	1.30±0.17	0.24	1.72±0.05	0.07	0.78±0.13	0.23
16	11.80±1.53	3.01	1.34±0.61	1.09	1.79±0.23	0.32	0.81±0.13	0.25
17	11.85±1.02	2.03	1.39±0.49	0.87	1.88±0.22	0.44	0.83±0.03	0.04
18	11.89±0.63	1.13	1.44±0.33	0.64	1.91±0.26	0.46	0.83±0.04	0.06
19	11.92±1.17	2.19	1.47±0.37	0.52	2.13±0.03	0.04	0.87±0.06	0.08
20	12.11±1.10	2.21	1.50±0.28	0.39	2.40±0.38	0.54	0.90±0.11	0.21

结果表明黄河鲤早期生长的 4 个体型变量具有共同的发育特征,表现在随着日龄的增加呈非线性增长.体宽和体高变化规律极为相似,因此这里选取体长、体宽和眼径长进行曲线拟合.

用 SPSS 22.0 统计软件对原始数据进行曲线拟合.曲线拟合模型汇总和参数估计值见表 2.以体长与日龄拟合模型为例,SPSS 的 11 个曲线回归模型可又分为 3 个级别.

(1)第 1 级别中有 4 个函数模型,分别是二次函数、三次函数、Logistic 函数和幂函数,决定系数 >0.95 .

(2)第 2 级别包括了 5 个函数方程,分别是对数、线性、复合、增长和指数函数,它们的拟合效果次之,决定系数位于 0.95 和 0.80 之间;

(3)第 3 个级别包括了 2 个模型,分别是 S 形和倒数函数,它们的决定系数 <0.80 ,拟合效果相对来说是最低的.

三次拟合模型: $y = -4.338 + 0.725x - 0.012x^2 + 0.000x^3$.

x 是解释变量, y 是被解释变量.决定系数是 0.992.为了比较不同异速生长模型的拟合效果和计算出早期生长的拐点.本研究从上述多个模型中选择 Logistic 曲线估计与 Logistic 非线性回归模型进行拟合比较.2 种异速生长模型拟合效果比较见表 3.拟合曲线和残差分析见图 2.结果显示采用 Logistic 的非线性拟合效果较好,决定系数=0.991.Logistic 曲线拟合效果相对较低,决定系数=0.979.根据 2 个模型表达式可以计算出因变量的预测值和早期生长拐点.

Logistic 曲线拟合模型: $\hat{y} = 1/(1/u + ab^x) = 1/(1/13.0 + 0.121 \times 0.849x)$

Logistic 非线性回归模型: $\hat{y} = u/[1 + \exp(a - bx)] = 12.473/[1 + \exp(0.586 - 0.207x)]$

3 讨 论

黄河鲤的早期发育具有明显的非线性的函数模式,同以往的相关文献资料所描述的鱼类的早期生长模式大体一致^[7-8],但是因鱼的种类和分布不同而有所不同,仔鱼需要适应复杂多变的水体环境,需提高自身的摄食、躲避敌害能力^[5].

通过比较 Logistic 曲线拟合与 Logistic 非线性回归模型,Logistic 非线性回归模型能更好地反映了黄河鲤早期生长规律,决定系数=0.991.本文研究结果丰富了黄河鲤仔鱼发育期的基础研究,为黄河鲤选苗育种、增养殖和资源保护提供理论参考依据.

表 2 体长、体宽和眼径与日龄拟合模型和回归系数

因变量	函数	系数	卡方检验	P 值	a	b	c	d
体长	二次	0.991	900.060	0.000	4.201	0.795	-0.020	
	三次	0.991	583.164	0.000	4.338	0.725	-0.012	0.00E+00
	Logistic	0.979	822.203	0.000	0.121	0.849		
	幂	0.965	500.662	0.000	4.698	0.325		
	对数	0.947	322.597	0.000	3.845	2.744		
	线性	0.919	204.382	0.000	5.754	0.371		
	复合	0.867	117.675	0.000	5.995	1.043		
	增长	0.867	117.675	0.000	1.791	0.042		
	指数	0.867	117.675	0.000	5.995	0.042		
	S	0.709	43.889	0.000	2.418	-1.014		
	倒数	0.637	31.648	0.000	11.126	-8.186		
体宽	二次	0.992	1 085.365	0.000	0.341	0.091	-0.002	
	三次	0.992	684.973	0.000	0.349	0.087	-0.001	-1.47E-05
	Logistic	0.990	1 846.195	0.000	1.818	0.835		
	幂	0.971	597.993	0.000	0.389	0.444		
	线性	0.969	563.531	0.000	0.470	0.056		
	对数	0.923	217.238	0.000	0.218	0.396		
	复合	0.913	187.957	0.000	0.536	1.061		
	增长	0.913	187.957	0.000	-0.624	0.059		
	指数	0.913	187.957	0.000	0.536	0.059		
	S	0.693	40.597	0.000	0.241	-1.363		
	倒数	0.579	24.788	0.000	1.260	-1.139		
眼径长	三次	0.991	577.010	0.000	0.294	0.051	-0.002	5.89E-05
	二次	0.988	694.452	0.000	0.325	0.035	0.000	
	线性	0.984	1 097.454	0.000	0.352	0.028		
	Logistic	0.980	903.967	0.000	2.083	0.874		
	幂	0.959	425.986	0.000	0.304	0.337		
	复合	0.945	311.804	0.000	0.384	1.047		
	增长	0.945	311.804	0.000	-0.958	0.046		
	指数	0.945	311.804	0.000	0.384	0.046		
	对数	0.905	172.333	0.000	0.233	0.194		
	S	0.666	35.890	0.000	-0.292	-1.021		
	倒数	0.563	23.210	0.000	0.744	-0.557		

表3 全长与日龄的生长曲线拟合与非线性回归模型比较

回归方程	R^2	u	a	b	全长拐点/mm	日龄拐点/mm	函数表达式
Logistic 曲线拟合	0.979	13.000	0.121	0.849	8.715	7.45	$y = 1/(1/u + ab^x)$
Logistic 非线性拟合	0.991	12.473	0.586	0.207	8.898	7.47	$y = u/[1 + \exp(a - bx)]$

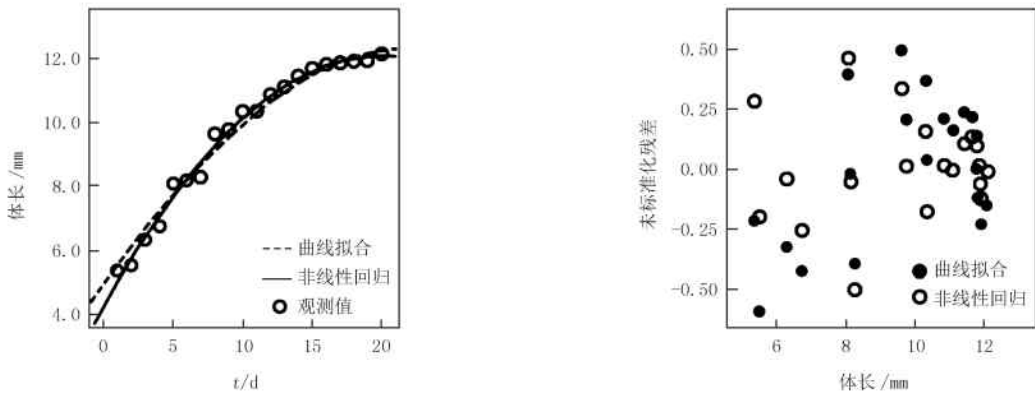


图2 Logistic 曲线拟合模型与 Logistic 非线性回归模型预测效果比较

异速生长研究发现,4个形态变量中生长速度最快的是全长($b=0.37$),眼径生长速度较慢($b=0.028$).许多文献资料均证明一些鱼类的早期生长都有这样的规律^[8,9].对比其他资料可以发现不同的鱼类其早期生长模式明显不同^[9].本研究发现黄河鲤早期发育(前20 d中),前5 d长速较快;第5 d时尾鳍近截形,尾鳍鳍条开始形成,背鳍微显;后15 d发育相对减缓;第15 d时背鳍、胸鳍、腹鳍和尾鳍基本分化完毕.整体来看20 d内全长变化6.77 mm,整体生长并不是很快,分析原因可能为养殖环境,例如水温、溶氧和饵料营养不适或饵料营养搭配不当.

对黄河鲤早期生长过程用 Logistic 曲线拟合与 Logistic 非线性回归模型进行了对比.结果显示 Logistic 非线性回归模型能够很好地展现黄河鲤鱼的早期生长规律,也更具有一定的应用价值.根据 Logistic 曲线拟合模型和 Logistic 非线性回归模型得出的早期生长拐点值,均是在接近第8 d的时间(表3).

结果显示二次和三次拟合模型也符合黄河鲤的早期生长发育的规律,但是回归公式复杂,生长拐点计算困难等,二次和三次函数在实际工作中应用较少^[10].

模型比较和残差分析.(1)Logistic 非线性 $R^2=0.991$, Logistic 曲线拟合 $R^2=0.979$,说明 Logistic 非线性的拟合效果比 Logistic 曲线的拟合效果更佳.(2)两个模型的残差分析显示,在黄河鲤早期,日龄在10 d之前或体长小于10 mm时曲线拟合残差较大,表明观测值与理论预测值差异较大;10 d之后生长趋于稳定,未标准化残差较小,见图2;(3)整体上,非线性 logistic 拟合的残差预测值控制在 ± 0.5 mm之内,而 Logistic 曲线拟合的个别残差值超过 ± 0.5 mm.

在动物早期生长发育阶段,一些形态特征会出现快速的正异速生长,Logistic 非线性的拟合能较好地反映动物早期生长规律,该模型在其他一些物种中也得到了广泛的应用.许多文献资料都证明了这一点^[10-11].

本研究时间较短,这里只对黄河鲤早期发育前20 d进行了观测与分析.由于研究天数较短,黄河鲤早期发育整体规律难以发现,而且不能深入探讨生长曲线拐点意义,下一步可以用周龄或月龄进行研究,以期对黄河鲤早期生长发育做出更为全面的认识.

参 考 文 献

- [1] 胡灿灿,王磊,王宇峰,等.黄河鲤早期胚胎观察与研究[J].河南水产,2015(4):20-22.
- [2] 王兵兵,孙海坤,孙建富,等.不同地域黄河鲤、建鲤肌肉生化组成的比较研究[J].水产科学,2015(9):540-545.
- [3] 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):8-15.
- [4] 贾永芳,张弯弯,张瑞华,等.黄河鲤性别决定时间和相关基因表达研究[J].水生生物学报,2016,40(6):1121-1126.

- [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] 多甜,王凤产,赵晓进.淇河鲫早期生长非线性回归分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2017,45(1):61-64.
- [7] 高小强,洪磊,刘志峰,等.美洲鲌仔稚鱼异速生长模式研究[J].水生生物学报,2015,39(3):638-641.
- [8] 何勇凤,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.
- [9] 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.
- [10] 贾瑞锦,陈超,李炎璐,等.条纹锯鳈(*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.
- [11] 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.
- [12] 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.

Early allometric growth of the *Cyprinus carpio var. haematopterus*

Zhao Xiaojin^{1,2}, Duo Tian², Han Xiaofan³, Lü Yunfei¹

(1.School of Economics and Management,Zhengzhou Technology and Business University,
Zhengzhou 451400,China;2.College of Fisheries,Henan Normal University,Xinxiang 453007,China;
3.School of Earth Sciences and Resources,China University of Geosciences,Beijing 100083,China)

Abstract: In this study, the early growth of the *Cyprinus carpio var.* was analyzed by using regression analysis. Logistic curve fitting model and Logistic nonlinear fitting model developed by SPSS statistical software were used to explore the growth regularity in the carp and compare the differences between the carp. In these models, the full-length, body width and eye diameter of the larvae of the *Cyprinus carpio var.* were chosen as explained variables; day-age was the explanatory variable. It is found that the fitting degree of Logistic curve is relatively low, $R^2=0.979$; and the nonlinear regression model fitting degree is the highest, $R^2=0.991$. In this study, according to the model, the early growth inflection point of the carp appeared in the seventh day. This paper puts forward the practical significance and application of these models and the inflection point.

Keywords: *Cyprinus carpio var.*; early growth; character; Logistic regression

[责任编辑 王凤产]