

大口黑鲈胚胎发育生物学零度和有效积温的研究

张猛,马逍,韩雨晴,王泽瑞,贾志霖,王磊,江红霞,于森,乔志刚

(河南师范大学 水产学院,河南 新乡 453007)

摘要:为研究大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)胚胎发育的生物学零度和有效积温,研究设置7个温度梯度,观察在不同温度下胚胎的发育速率,并计算胚胎发育的生物学零度和有效积温.结果表明:1)在实验温度范围内,随着温度的升高,胚胎的发育速率逐渐加快;2)通过直线回归法和直接最优法得出胚胎发育的生物学零度和有效积温分别为10.49℃、22.19 d·℃和10.60℃、21.99 d·℃,并分别建立了胚胎发育的有效积温预测式模型;3)根据胚胎发育的温度系数,得到大口黑鲈胚胎发育的适宜温度范围为20~30℃.

关键词:大口黑鲈;发育速率;生物学零度;有效积温

中图分类号:S961

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)01-0129-05

生物学零度是指生物生长发育的起始温度,有效积温是指在某一时间段内生物生长发育有效温度的总和.生物学零度和有效积温是体现温度变化对水产动物生长发育影响的重要参数,可为水产动物人工繁育的温度调控和发育历时提供重要参考^[1].目前关于生物学零度和有效积温的研究主要集中在植物和昆虫类等生物^[2-3],水产动物则在虾、蟹、贝等无脊椎动物中研究较多^[1,4],鱼类的相关研究报道较少.掌握鱼类的生物学零度和有效积温不仅可以深入了解其生长发育特征,还可以为人工育苗技术提供理论支持.

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)又名加州鲈,于20世纪80年代从北美地区引入我国台湾、广东等地^[5],因其生长速度快、养殖周期短等优点受到养殖户的青睐,到2022年大口黑鲈年产量达到80万t^[6].目前,关于大口黑鲈胚胎发育的研究主要集中在温度、孵化装置等对人工养殖繁育技术的影响上,其胚胎发育的生物学零度和有效积温相关研究尚未开展.为深入认识孵化水温对大口黑鲈胚胎发育速率的影响,了解大口黑鲈胚胎发育的适宜温度范围,本研究针对大口黑鲈胚胎发育的生物学零度和有效积温开展实验,以期为大口黑鲈人工繁育过程中胚胎发育的条件控制提供理论依据,促进我国大口黑鲈人工养殖产业进一步发展.

1 材料与方法

1.1 受精卵获取

实验于2023年6月在河南省济源市宏基鲟鳇养殖基地进行.挑选20组状态良好、体质健壮、体质量为(550.37±50.82)g的2龄成鱼作为亲鱼.雌雄分池培育,待其性腺发育成熟,每5m²水泥池中挑选2对亲鱼进行自然产卵,产卵温度为20~24℃.棕片作为卵附着物,受精完成后取出棕片,使用质量分数15%~20%的滑石粉悬浊液脱落受精卵,立即挑选透明完好的受精卵开展后续实验.

收稿日期:2024-04-03;**修回日期:**2024-05-19.

基金项目:国家自然科学基金(32102776);河南省重点研发与推广专项(242102110028).

作者简介(通信作者):张猛(1989—),男,河南桐柏人,河南师范大学讲师,博士,主要从事水产动物种质资源与种苗工程相关研究,E-mail:zhangmeng@htu.edu.cn.

引用本文:张猛,马逍,韩雨晴,等.大口黑鲈胚胎发育生物学零度和有效积温的研究[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(1):129-133.(Zhang Meng, Ma Xiao, Han Yuqing, et al. Biological zero temperature and effective accumulated temperature for embryonic development of *Micropterus salmoides* [J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2026, 54(1): 129-133. DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.04.03.0001.)

1.2 孵化温度设置

研究发现,当孵化温度为 16 ℃时胚胎不能正常生长发育;当孵化温度为 30 ℃时胚胎的孵化率降低、畸形率升高,严重影响了胚胎的正常发育.因此,实验设置 7 个孵化温度梯度(18、20、22、24、26、28、30 ℃),每个梯度 3 个平行,共计 21 个组.实验过程中在恒温培养箱进行控温孵化,水温变幅不超过0.3 ℃.

1.3 胚胎发育观察

每组取 20 枚刚受精的同批受精卵于 2 L 烧杯中孵化,孵化期间溶解氧为 6.4~6.8 mg · L⁻¹、pH 为 7.10~7.35.每隔 15 min 显微镜检胚胎发育情况,以 50%胚胎孵化破膜的时间记为胚胎发育历时.

1.4 数据计算与处理

1.4.1 胚胎发育速率与孵化温度关系拟合

将各温度条件下的胚胎发育历时(N)转换为相对应的发育速率 $V(V=1/N)$,使用统计软件 SPSS Statistics 拟合发育速率(V)与孵化温度(T)至少 3 种回归曲线模型,最后选择 R^2 和 F 值最大的模型作为最佳拟合模型^[7].

1.4.2 胚胎发育的生物学零度和有效积温

根据有效积温法则,采用直线回归法和直接最优法,分别计算大口黑鲈胚胎发育的生物学零度(℃)和有效积温($d \cdot ^\circ C$),详见附录表 S1.

1.4.3 胚胎发育的温度系数(Q_{10})

胚胎发育的温度系数计算公式如下: $Q_{10}=(H_a/H_b)^{10/(T_b-T_a)}$. 式中, Q_{10} 值代表孵化温度每升高 10 ℃时胚胎发育速率加快的倍数, H_a 为孵化温度在 T_a (18、20、22、24、26 和 28 ℃)下对应的孵化历时, H_b 为孵化温度在 T_b (20、22、24、26、28 和 30 ℃)下对应的孵化历时($b>a$).

1.5 数据分析

使用 SPSS Statistics 26.0 和 GraphPad prism 9.3.0 对各组数据进行分析并作图,方差分析采用单因素方差 One-Way ANOVA 方法,数据的呈现形式为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 大口黑鲈胚胎发育速率与孵化温度的关系

在本实验温度范围内,所有组的大口黑鲈胚胎均能够孵化破膜.其发育速率与孵化温度呈极显著正相关($P<0.001$,图 1),30 ℃时发育速率达到最大值($0.875\ 4\pm0.048\ 4\ d^{-1}$)、为 18 ℃的 2.63 倍.

分别对胚胎发育速率和孵化温度进行线性、二次函数、幂函数和 s 函数拟合分析,发现 4 种回归模型的 R^2 值均大于 0.987 0, P 均小于 0.001 (图 2).其中,S 函数回归方程的 R^2 值(0.993 5)和 F 值(2 884.755 0)均为最大,幂函数回归方程的 R^2 值(0.987 1)最小,二次函数回归方程的 F 值(851.562 0)最小,说明 S 函数拟合模型为最佳拟合模型(见附录表 S2).

2.2 大口黑鲈胚胎发育的生物学零度和有效积温

将大口黑鲈胚胎发育速率和孵化温度分别代入直线回归法和直接最优法公式分别计算相应的生物学零

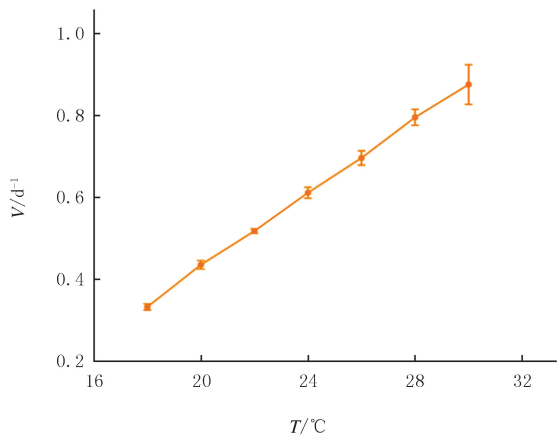


图1 大口黑鲈胚胎发育速率(V)与孵化温度(T)的关系
Fig.1 Relationship between embryonic development rate(V) and hatching temperature(T) of largemouth bass

度、有效积温及其方差(附录表 S3).通过直线回归法计算出的生物学零度和有效积温分别为 10.49 ℃ 和 22.19 d·℃,有效积温预测式为 $N/(d\cdot^{\circ}\text{C})=(22.19\pm0.27)/[(T/^{\circ}\text{C})-(10.49\pm0.17)]$,回归方程为 $T/^{\circ}\text{C}=22.19(V/d^{-1})+10.49$,生物学零度和有效积温的变异系数分别为 0.016 4 和 0.012 2.通过直线最优法计算出的生物学零度和有效积温分别为 10.60 ℃ 和 21.99 d·℃,有效积温预测式为 $N/(d\cdot^{\circ}\text{C})=(21.99\pm0.29)/[(T/^{\circ}\text{C})-(10.60\pm0.18)]$,回归方程为 $T/^{\circ}\text{C}=21.99(V/d^{-1})+10.60$,生物学零度和有效积温的变异系数分别为 0.017 1 和 0.013 0.

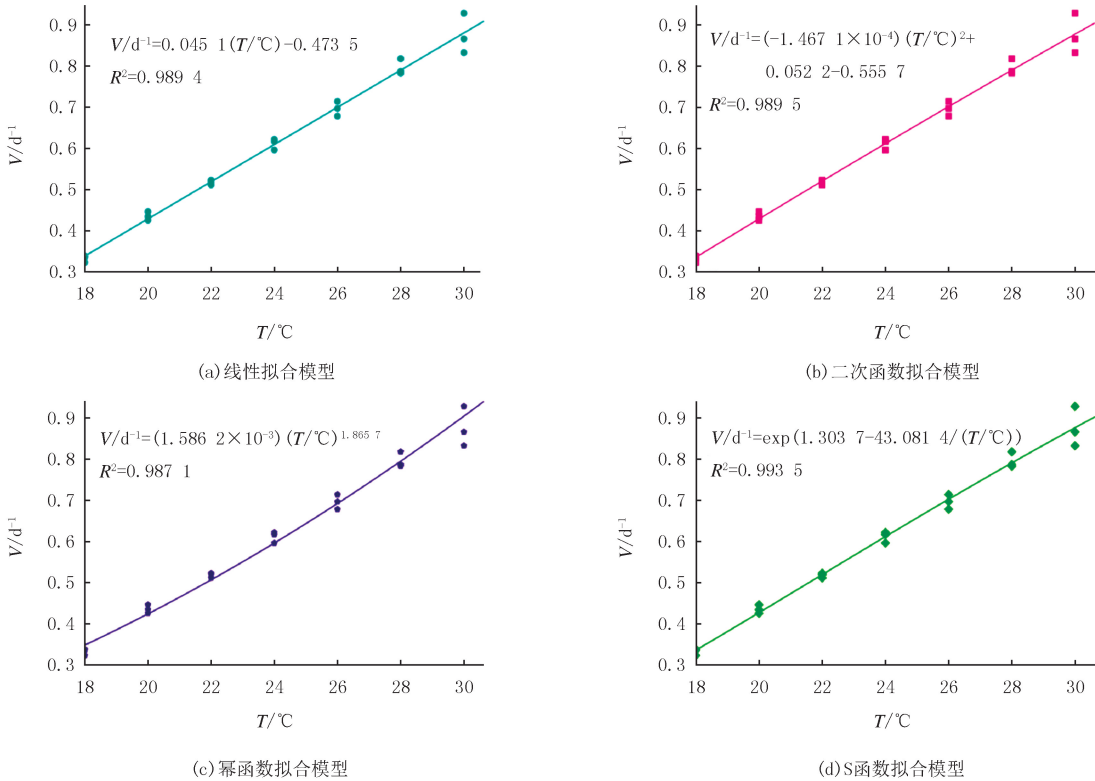


图2 发育速率(V)与孵化温度(T)的4种拟合曲线

Fig.2 Four fitting curves of development rate(V) and incubation temperature(T)

2.3 大口黑鲈胚胎发育的温度系数

将不同孵化温度 and 对应温度下的孵化历时分别带入温度系数计算公式,结果发现:当 a 确定时,温度系数随 b 的增大而减小;当 b 确定时,温度系数亦随 a 的增大而减小.当 $a=20$ 、 $b=30$ 时 Q_{10} 最接近于 2(2.006 5)(附录表 S4).

3 讨论

3.1 温度对大口黑鲈胚胎发育速率的影响

鱼类属于变温动物,温度对鱼类胚胎的发育速率起着至关重要的作用.在斑鳅(*Siniperca scherzeri*)^[8]、四川华鳊(*Sinibrama taeniatus*)^[9]和拉萨裸裂尻鱼(*Schizopygopsis younghusbandi*)^[10]等水产动物的胚胎发育相关研究发现,胚胎发育速率和孵化温度显著正相关.本研究发现,在 18~30 ℃ 的温度范围内,大口黑鲈胚胎均可孵化破膜,且胚胎发育速率与孵化温度呈显著正相关关系,与上述水产动物相关研究结果一致.此外,本研究胚胎发育速率和孵化温度进行拟合分析发现,4 种回归模拟中 S 函数的 R^2 值和 F 值均为最高,说明该方程的拟合度最好,可用于指导实践.

3.2 大口黑鲈胚胎发育的生物学零度和有效积温

在水产养殖中,有效积温是反映鱼类生长发育情况的重要指标之一,该指标反映了鱼类在目前成长阶段

下发育情况和孵化温度的线性关系^[11].不同水产动物胚胎发育对应的有效积温和生物学零度差异较大,如暗纹东方鲀(*Takifugu obscurus*)^[11]的生物学零度和有效积温为 7.60 ℃和 78.91 d·℃;中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)^[1]的生物学零度和有效积温为 6.91 ℃和 274.18 d·℃.本研究利用直线回归法和直接最优法计算得出大口黑鲈胚胎发育的生物学零度和有效积温分别为 10.49 ℃、22.19 d·℃和 10.60 ℃、21.99 d·℃;两种方法计算得到的生物学零度和有效积温差值很小,但直线回归法对应的生物学零度和有效积温变异系数均最小,故认为直线回归法结果比直接最优法精确度更高.目前,鲈形目,甚至鱼类胚胎发育的生物学零度和有效积温相关研究极少,难以为本研究提供参考和佐证.将本实验直线回归法的预测公式应用到其他大口黑鲈胚胎发育的相关报道,可为本研究结果准确性提供验证.刘文生等^[12]研究发现在大口黑鲈孵化平均温度为 18.74 ℃时,孵化历时为 2.78 d,运用预测公式计算得到的孵化历时范围为 2.60~2.78 d.可见本实验所得到有效积温预测公式是相对准确的,能够用于大口黑鲈的生产实践和相关研究.

3.3 大口黑鲈胚胎发育的适宜温度范围

温度系数是评价某一温度范围内温度变化影响胚胎发育速率的重要指标.温度系数越接近 2 表明该温度范围越适宜胚胎的发育,反之表明温度越偏离适宜的温度范围,影响发育速率.通过计算胚胎发育温度系数,发现当 $a=20, b=30$ 时, Q_{10} 最接近 2,故在理论上认为大口黑鲈胚胎发育的适宜温度为 20~30 ℃.而肖善势等^[13]对大口黑鲈的研究结果指出,适宜大口黑鲈受精卵的孵化温度为 24~26 ℃,比本研究的结果范围更小.这是由于其结合了孵化率、出苗率和畸形率等对温度的影响进行综合分析,而本实验旨在研究大口黑鲈胚胎发育生物学零度和有效积温.

4 结 论

本研究通过比较不同温度条件下的胚胎发育情况,发现胚胎发育速率与孵化温度之间呈极显著正相关关系.并通过拟合分析,发现 S 函数回归模拟的准确性最好,可用于指导实践.进一步地,通过公式计算、比较,发现直线回归法得到的生物学零度(10.49 ℃)和有效积温(22.19 d·℃)精确度更好,并用其他大口黑鲈胚胎发育的研究数据进行了验证.此外,研究发现大口黑鲈胚胎孵化的适宜温度范围理论上为 20~30 ℃,但在生产中应结合孵化率、畸形率等因素进行综合分析.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.04.03.0001).

参 考 文 献

[1] 王璞,马旭洲,温旭.中华绒螯蟹胚后发育生物学零度及其有效积温[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2019,45(4):500-505.
WANG P,MA X Z,WEN X.Biological zero temperature and effective accumulated temperature of postembryonic development of Chinese mitten crab(*Eriocheir sinensis*)[J].Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences),2019,45(4):500-505.

[2] 谷晓行,杨成都,李昊泊,等.高温胁迫对棉铃虫齿唇姬蜂胚胎发育的影响[J].河南农业大学学报,2025,59(2):276-284.
GU X H,YANG C D,LI H B,et al.Effects of high temperature stress on embryonic development of *Campoletis chloridae*[J].Journal of Henan Agricultural University,2025,59(2):276-284.

[3] 马梦然,曹鹤,申家轩,等.云南派姬小蜂的发育起点温度和有效积温[J].植物保护,2020,46(3):194-197.
MA M R,CAO H,SHEN J X,et al.Threshold temperature and effective accumulated temperature of *Pediobius yunnanensis* Liao[J].Plant Protection,2020,46(3):194-197.

[4] 赵雯,车宗豪,刘括,等.日本海神蛤(*Panopea japonica*)性腺发育生物学零度及有效积温研究[J].海洋科学,2022,46(10):78-84.
ZHAO W,CHE Z H,LIU K,et al.Biological zero degree and effective accumulated temperature of the geoduck clam *Panopea japonica* [J].Marine Sciences,2022,46(10):78-84.

[5] BAI J J,LUTZ-CARRILLO D J,QUAN Y C,et al.Taxonomic status and genetic diversity of cultured largemouth bass *Micropterus salmoides* in China[J].Aquaculture,2008,278(1/2/3/4):27-30.

[6] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会编制.中国渔业统计年鉴-2023[M].北京:中国农业出版社,2023.

[7] 周卓,段景攀,韩丽,等.温度对不同发育时期落叶松尺蠖(*Erannis ankeraria*)的影响[J].生态学报,2021,40(7):2194-2200.
ZHOU Z,DUAN J P,HAN L,et al.Effects of temperature on *Erannis ankeraria* at different developmental stages[J].Chinese Journal of Ecology,2021,40(7):2194-2200.

[8] 胡振禧,黄洪贵,吴妹英,等.温度对斑鳊胚胎发育的影响[J].淡水渔业,2014,44(3):104-107.
HU Z X,HUANG H G,WU M Y,et al.Effects of temperature on the embryonic development of *Siniperca scherzeri* [J].Freshwater Fisheries,2014,44(3):104-107.

[9] 王亚利,解崇友,尹敏,等.温度对四川华鲮胚胎发育的影响[J].水产科学,2020,39(1):79-87.
WANG Y L,XIE C Y,YIN M,et al.Effect of temperature on embryonic development of *Sinibrama taeniatus* [J].Fisheries Science,2020,39(1):79-87.

[10] 刘艳超,范丽卿,何文佳,等.温度对拉萨裸裂尻鱼胚胎发育的影响[J].高原农业,2019,3(2):168-175.
LIU Y C,FAN L Q,HE W J,et al.The effect of temperature on the embryonic development of *Schizopygopsis younghusbandi* [J].Journal of Plateau Agriculture,2019,3(2):168-175.

[11] 李尹鑫.基于有效积温模型的暗纹东方鲀胚胎孵化周期调控方法研究[D].上海:上海海洋大学,2023.

[12] 刘文生,林焯坤,彭锐民.加州鲈鱼胚胎及幼鱼发育的研究[J].华南农业大学学报,1995,16(2):5-11.
LIU W S,LIN Z K,PENG R M.A study on the embryonic and larval development of *Micropterus salmoides* [J].Journal of South China Agricultural University,1995,16(2):5-11.

[13] 肖善势,张爱菊,罗伟,等.水温 and 孵化装置对大口黑鲈优鲈 3 号受精卵孵化的影响[J].浙江农业科学,2021,62(4):792-794.
XIAO S S,ZHANG A J,LUO W,et al.Effects of water temperature and hatching machine on hatching rate of *Micropterus salmoides* Youlu No.3[J].Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2021,62(4):792-794.

Biological zero temperature and effective accumulated temperature
for embryonic development of *Micropterus salmoides*

Zhang Meng, Ma Xiao, Han Yuqing, Wang Zerui, Jia Zhilin,
Wang Lei, Jiang Hongxia, Yu Miao, Qiao Zhigang

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

Abstract: In order to study the biological zero temperature and effective accumulated temperature of embryonic development of *Micropterus salmoides*, seven temperature gradients were set up in this study. The development rate of embryos at different temperatures, and the biological zero and effective accumulated temperature of embryonic development were calculated. The results showed that: 1) In the experimental temperature range, with the increase of temperature, the development rate of embryos gradually accelerated; 2) The biological zero and effective accumulated temperature of embryo development were determined to be 10.49 °C, 22.19 d · °C and 10.60 °C, 21.99 d · °C respectively through linear regression method and direct optimization method, and the effective accumulated temperature prediction model of embryo development was established respectively. 3) According to the temperature coefficient of embryonic development, the suitable temperature range for embryonic development of largemouth bass was 20-30 °C.

Keywords: *Micropterus salmoides*; development rate; biological zero temperature; effective accumulated temperature

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

附 录

表 S1 计算与优化方法

Tab. S1 Calculation and optimization methods

名称	公式	备注
有效积温法则	$K = N(T - C)$	K 为有效积温, N 为发育所需时间, T 为发育期间平均温度, C 为生物学零度.
直线回归法	$C = \frac{\sum V^2 \sum T - \sum V \sum VT}{n \sum V^2 - (\sum V)^2}$ $K = \frac{n \sum VT - \sum V \sum T}{n \sum V^2 - (\sum V)^2}$	C 、 K 、 T 同上, V 为发育速率, n 为数据组数, 本实验温度梯度数为 7.
直接最优法	$C = \frac{\sum_{i=1}^n T_i N_i^2 - \bar{N} \sum_{i=1}^n T_i N_i}{\sum_{i=1}^n N_i^2 - n \bar{N}^2}$ $K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^1 K_i$	C 、 K 、 n 同上, T_i 为不同孵化温度, N_i 和 K_i 分别为 T_i 对应的胚胎发育历时和有效积温.
标准差	$S_c = \sqrt{\frac{\sum (T - T')^2}{(n - 2)} [\frac{1}{n} + \frac{V^2}{\sum (V - \bar{V})^2}]}$ $S_k = \sqrt{\frac{\sum (T - T')^2}{(n - 2) \sum (V - \bar{V})^2}}$	T 、 V 、 n 同上, T' 为理论温度, S_c 和 S_k 为生物学零度和有效积温的标准差.
有效积温预测模型	$N = (K \pm S_k)[T - (C \pm S_c)]$	N 、 K 、 T 、 C 、 S_c 、 S_k 同上.

表 S2 大口黑鲈胚胎发育速率(V)与孵化温度(T)的回归模型

Tab. S1 Regression model of embryonic development rate(V) and hatching temperature(T) of largemouth bass

回归模型	回归方程	R^2	F
线性函数	$V/d^{-1} = 0.045\ 1(T/^{\circ}C) - 0.473\ 5$	0.989\ 4	177\ 6.192\ 8
二次函数	$V/d^{-1} = (-1.467\ 1 \times 10^{-4})(T/^{\circ}C)^2 + 0.052\ 2(T/^{\circ}C) - 0.555\ 7$	0.989\ 5	851.562\ 0
幂函数	$V/d^{-1} = (1.586\ 2 \times 10^{-3})(T/^{\circ}C)^{1.865\ 7}$	0.987\ 1	1\ 456.892\ 0
S函数	$V/d^{-1} = \exp(1.303\ 7 - 43.081\ 4/(T/^{\circ}C))$	0.993\ 5	2\ 884.755\ 0

表 S3 大口黑鲈胚胎发育的生物学零度(C)和有效积温(K)

Tab. S2 Biological zero temperature(C) and effective accumulated temperature(K) of embryonic development of largemouth bass

生物学参数	直线回归法	直接最优法
生物学零度 $C/^{\circ}\text{C}$	10.49 ± 0.17	10.60 ± 0.18
有效积温 $K/(\text{d} \cdot ^{\circ}\text{C})$	22.19 ± 0.27	21.99 ± 0.29
C 的变异系数	0.016 4	0.017 1
K 的变异系数	0.012 2	0.013 0
回归方程	$T = 22.19V + 10.48$	$T = 21.99V + 10.60$

表 S4 大口黑鲈胚胎发育各温度范围的 Q_{10}

Tab. S3 Q_{10} of embryonic development of largemouth bass in different temperature ranges

$T_a/^{\circ}\text{C}$	$T_b/^{\circ}\text{C}$					
	20	22	24	26	28	30
18	3.846 4	3.027 7	2.759 5	2.517 2	2.391 8	2.236 3
20		2.383 2	2.337 3	2.185 4	2.124 0	2.006 5
22			2.292 3	2.092 7	2.044 0	1.922 0
24				1.910 5	1.930 1	1.812 4
26					1.949 9	1.765 2
28						1.598 0