

水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响

张先炳, 胡亚萍, 杨威, 李文杰, 杨胜发

(重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆市生态航道重点实验室, 重庆 400074)

摘要:水温是影响鱼类生命活动的重要生态学因子。综述水温对淡水温水性鱼类的影响,为鱼类资源的增殖和水体生物多样性保护提供参考。从繁殖、摄食生长、代谢速率、临界游泳能力、免疫功能5方面的鱼类生命活动进行综述。其中,水温对鱼类的繁殖和生长影响最大,当水温适宜时,多数淡水温水性鱼类的各项生理活动都能正常进行;但当水温超过临界温度时会导致机体内代谢紊乱、活动能力降低、甚至造成鱼类死亡,最终引起鱼类种群结构和数量分布的显著变化。鱼类的临界游泳能力和高强度运动之后的重复运动能力也会受到水温的影响;鱼类免疫应答受水温影响较大,水温严重不适会导致免疫防御机制紊乱。水温只是影响鱼类生存的生态因子之一,但在航道建设、河流生态修复、鱼类资源评估以及水生态系统保护过程中均占据不容忽视的地位。在河流开发以及水文调节过程中,要最大限度降低其对水温生态因子的影响。

关键词:水温;温水性淡水鱼类;生命活动;鱼类群落;河流生态

中图分类号:X131 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)04-0117-06

温度的变化对生物体有着至关重要的影响(Symons et al, 2018; Booth et al, 2013)。鱼类的体温与水温相差不会超过 1°C ,对水温变化的感应极为迅速和敏感,甚至可以感应到低至 0.03°C 的水温变化(Bartolini et al, 2015)。鱼类通过鳃和体表与外界水环境不断进行热量交换,因而无法保持体温恒定,季节性和昼夜间的水温波动都会影响鱼类的生存、生长、摄食、繁殖和发育等生命活动过程(彭期冬等, 2012; 邓吉河, 2019; 陶雨薇等, 2018)。如春夏季节鱼类一般喜栖于水体中上层,随着水温的逐渐下降,在秋冬季节游至深水处进行越冬(石妮, 2019);漂流性鱼的产卵集中在夜间或凌晨(黎明政等, 2011)。此外,水温升高会造成水体溶解氧浓度下降,致使浮游植物和动物的结构和数量发生改变,进而改变鱼类的生存环境(Hunt von Herbing, 2002; 龙华, 2005; Moriarty et al, 2020)。本文综述水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响,包括繁殖、摄食、生长及生存等方面的相关研究成果。

1 水温对鱼类繁殖的影响

鱼类繁殖受水温驱动,适宜的水温是鱼类性腺成熟的必要条件。性腺发育与鱼类的产卵季节有关,在春夏季节产卵的鱼类,性腺发育与水温呈正相关,水温越高,性腺发育越快,即积温达到产卵要求(沈忱, 2015; George et al, 2015; 雷欢等, 2017)。常见的温水性鱼产卵最低要求是 16°C ,如鲤和鲫等;“四大家鱼”产卵下限水温是 18°C ,低于 18°C 鱼类繁殖无法进行(陈永柏等, 2009; 周雪等, 2019)。而在秋冬季节产卵的鱼类,性腺成熟的条件取决于降温条件(曹俊, 2016),如中华鲟的产卵期处于降温过程,温度低于 20.6°C 才开始产卵(骆辉煌, 2013)。

水温对鱼卵胚体的顺利孵化影响极大,必须要有适宜的水温才能保证鱼卵的活性和正常发育,超过适宜的水温范围就会造成畸胎甚至胚胎死亡(游鑫, 2015; 王万良等, 2019);“四大家鱼”鱼卵胚胎能存活的水温是 $18\sim 30^{\circ}\text{C}$,适宜水温是 $22\sim 28^{\circ}\text{C}$,当水温低于或高于临界水温时,会导致胚胎发育停滞或死亡(许承双等, 2017);以鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)和草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)的鱼卵发育为例,鲢鱼卵在 16°C 时几乎全部死亡,最适水温为 23°C ,此时孵化率高达84%,当水温超过 30°C 后胚体无法孵化。此外,在 $18\sim 30^{\circ}\text{C}$ 水温范围内,胚体的整体发育时间随着水温的升高逐渐缩短,如鲢的孵化时间可由 18°C 的52 h缩短至 30°C

收稿日期: 2020-04-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42007213); 重庆市人社局留学归国人员创新启动项目; 重庆市教育委员会高校创新研究群体项目。

作者简介: 张先炳, 1985年生, 男, 博士/副教授, 主要从事鱼类资源保护及生境修复技术研究。E-mail: zhangxb11@qq.com

通信作者: 杨威, 研究方向为鱼类资源保护及生境修复。E-mail: sj-yangwei@163.com

的18 h。根据试验数据(郭永灿,1982),将鲢和草鱼鱼卵孵化所需要的时间与水温进行拟合得到式①和式②(y 为胚胎发育所需的时间,h; x 为水温, $^{\circ}\text{C}$),该公式的普遍适用性需要进一步验证。

$$y_{\text{草鱼}} = 7.50 + 390.03e^{-0.11x} \quad (R^2 = 0.9961) \quad \text{①}$$

$$y_{\text{鲢}} = 9.15 + 530.76e^{-0.14x} \quad (R^2 = 0.9957) \quad \text{②}$$

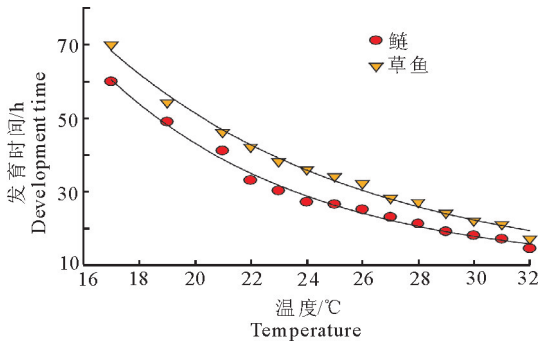


图1 水温对鲢和草鱼胚胎发育时长的影响
(数据来源于郭永灿,1982)

Fig.1 Effect of temperature on the embryonic development time of bighead carp and grass carp

2 水温对鱼类摄食和生长的影响

鱼类生长主要取决于摄食程度和对食物的转化率(Wang et al,2009),体现在对营养物质和能量的利用率上,在适宜的水温内,鱼类对食物的吸收和消化同水温呈正比(陈松波,2004)。仔鱼的摄食能力与卵黄囊的利用率有关,张晓华等(1999)研究鳊仔鱼(*Siniperca chuatsi*)发现,在19.5~30 $^{\circ}\text{C}$,卵黄囊的利用率随水温的升高而增大,且仔鱼的生长速度在28 $^{\circ}\text{C}$ 时达最高;在成鱼期,水温为22~30 $^{\circ}\text{C}$,草鱼对小浮萍的摄食一直呈上升趋势(张亚辉等,2018),水温上升提高了鱼机体内的代谢水平,消化酶活性增强,消化速度加快,从而增进摄食(彭静,2015)。

鱼类最适生长水温与最大摄食率水温之间通常存在一定的偏差(吕为群和袁明哲,2017),如施氏鲟(*Acipenser schrencki* Brandt)幼鱼的最适生长水温为21.53 $^{\circ}\text{C}$,而最大摄食率时水温为22.33 $^{\circ}\text{C}$ (李大鹏等,2005)。鱼类的生长是从食物中摄取营养物质,从而转化成能量,外界食物充足时,水温升高,摄食率随之增大;但当水温超过最适生长温度时,鱼类的摄食率仍会持续增加,直至达到最大摄食率,此时鱼类运动所耗能量的比例将提高,而用于生长的能量比例降低,鱼类的生长率开始下降(Killen et al,2014;Aidos et al,2020)。

3 水温对鱼类代谢率的影响

水温会对鱼类的代谢产生直接或者间接影响(Bar & Radde,2009),这与鱼类体内消化酶的活性、呼吸频率、氧气输送和利用等3个方面相关,代谢水平会随着温度的升高不断增强,但温度过高亦会导致代谢率下降(况莉和谢小军,2001;Luo & Xie,2008;Zeng et al,2010;苏艳莉,2015)。

(1)消化酶活性随温度升高而增强,体内各种组织器官活性增强,鱼类活动、摄食强度就会随之增大,代谢亦随之增强(谢一荣和吴锐全,2005;Pang et al,2010;Bowyer et al,2012)。淡水温水性鱼类生存的环境水温一般不会超过35 $^{\circ}\text{C}$,无法达到消化酶的最适温度。嘉陵江鲇(*Silurus asotus*)的淀粉酶最适水温40~44 $^{\circ}\text{C}$,蛋白酶最适水温36~40 $^{\circ}\text{C}$,脂肪酶最适水温36 $^{\circ}\text{C}$ (向泉等,2013)。

(2)鱼类的呼吸频率和耗氧率与温度呈正相关,水温升高,鱼体新陈代谢旺盛,体内氧化过程增强,气体交换更加频繁,代谢速率增加,从而增强摄食能力和活动能力(Zhang et al,2010)。

(3)温度影响鱼体内氧的运输和释放,温度升高时,血红蛋白对氧的亲合力降低,从而促进了血液中氧合血红蛋白的解离。温度升高会促进能量提供主体——线粒体内的酶促反应过程,提高鱼类代谢强度(庞旭,2010)。但是当温度超过适宜温度之外时,鱼类机体内部各种机理活动就会减缓甚至停止代谢,耗氧率下降,酶类活性失效,超过鱼类忍受范围时则会死亡(曾令清,2008)。

4 水温对鱼类临界游泳能力的影响

游泳能力是鱼类生存的关键因素之一,直接影响到鱼类的捕食、避敌和繁殖等,而鱼类的临界游泳能力亦会受到水温影响(房敏等,2013;蒋清等,2016)。鱼类临界游泳能力与水温呈“线性”或“钟型”关系(Lee,2003;Zeng et al,2009;Pang et al,2013):(1)水温升高,水的粘稠度逐渐减小,则鱼类在高温水中游泳比在低温水中所受的阻力小;(2)鱼体肌肉组织的输出功率发生改变,高温下肌细胞线粒体功能增强,包括线粒体数量、内峭构造的改变、呼吸酶活性和细胞膜流动性的增加等方面;(3)不同温度下鱼体肌肉组织中运动代谢底物的水平也不尽相同,主要包括ATP、磷酸肌酸和葡萄糖等物质含量变化(Guderley,2004;Mclean et al,2007;Peng et al,2014;Lagesson et al,2019)。

水温会影响鱼类高强度运动之后的重复运动能力(Pang et al, 2015),主要是恢复时间及恢复程度。低温时鱼类临界游泳能力约 1 h 能够完全恢复,而在高温条件下,其恢复能力显著下降(Lyon et al, 2008; 庞旭, 2014; Zhou, 2019)。鱼类在高强度运动时,机体必然会通过加快呼吸和加速内环境与水体的交换以满足代谢时物质和能量的需求(曾令清等, 2011),高温时水体中溶解氧含量的降低会加强鱼类的无氧呼吸,会导致鱼体内离子的大量流失,甚至造成离子失衡等而无法达到最佳游泳能力(Jain, 2003; MacNutt et al, 2004; He et al, 2015; 袁喜等, 2018)。

5 水温对鱼类免疫功能的影响

鱼类作为低等脊椎动物仍具有完整的特异性免疫和非特异性免疫能力(Morvan et al, 1998; Whyte, 2007),非特异性免疫等同于鱼类的固有免疫应答反应,适宜温度范围广,而特异性免疫则限于较高温度(Alcorn et al, 2002; 覃川杰等, 2011)。鱼体的免疫系统主要由免疫应答和免疫功能组成(Morvan et al, 1997)。其中,免疫应答受水温影响较大,低温时抗体的生成会受到抑制,防御能力丧失;但若在接触低温前,鱼体曾在适宜的温度范围内生存过并已经产生过抗体,则低温环境不会对其产生影响,产生的抗体仍能保持活性(翁朝红和谢仰杰, 2001; 李海波等, 2013)。

水温严重不适会导致免疫防御机制紊乱(张媛媛和宋理平, 2018),此时机体内的氧自由基(Reactive oxygen species, ROS)会过多累积,破坏生物膜,机体将作出免疫应答生成抗氧化系统,如酶类氧化剂超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和非酶类氧化剂、微量还原型谷胱甘肽(glutathione, GSH)和维生素 C 等来调整自身的免疫能力(孙永旭等, 2019)。白海文(2012)得出施氏鲟肝脏内 T-SOD 和 CAT 活性在 24℃ 最高,血清中 T-SOD 和 CAT 活性分别在 21℃ 和 18℃ 达最高,此类物质含量的变化会促进鱼类机体免疫能力的恢复。

6 结语

水利工程建设和航道开发在造福人类的同时也对鱼类栖息生境造成了负面影响,同时河道水文过程的改变也影响了水生生物的繁殖发育、行为活动和分布情况等(柏海霞等, 2014; 王珂等, 2019)。如

三峡水库运行后,库区的水温较原河道呈现出明显的“滞温”现象,鱼类产卵规模和产卵次数发生改变(郭文献等, 2011),鱼类数量和质量总体呈现出下降的趋势(Audzijonyte et al, 2020; Baudron et al, 2014),且鱼类的种群组成也发生了明显的变化。

水温是河流生态保护的关键因素之一,不仅影响鱼类生命活动的各阶段,亦会影响鱼类食物来源之一的浮游植物,并最终影响着水生生态系统的物质循环和能量流动、生态系统结构以及功能(王锦旗等, 2020; Zhang, 2016; Graham & Harrod, 2009)。因此,在河流开发以及水文调节过程中,要最大限度降低其对水温生态因子的影响(王祥等, 2020; 许可等, 2009),借鉴水温方面的研究成果(Honsey et al, 2018),如大型水库采用表层水泄流的措施来降低下游水温的变动幅度,进而促进鱼类资源的增殖,保护水体生物多样性(Wang et al, 2017)。

参考文献

- 白海文, 2012. 温度对施氏鲟幼鱼生长、消化及免疫功能影响的研究[D]. 上海: 上海海洋大学: 30-43.
- 柏海霞, 彭期冬, 李翀, 等, 2014. 长江四大家鱼产卵场地形及其自然繁殖水动力条件研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 12(3): 249-257.
- 曹俊, 2016. 水温过程对中华鲟自然繁殖的影响[D]. 武汉: 湖北工业大学: 12-14.
- 陈松波, 2004. 不同温度条件下鲤鱼摄食节律与呼吸代谢的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学: 20-30.
- 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等, 2009. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志, 30(2): 130-133.
- 邓吉河, 2019. 浅谈水温与鱼类的关系[J]. 黑龙江水产, (1): 25-27.
- 房敏, 蔡露, 高勇, 等, 2013. 温度对鲢幼鱼游泳能力及耗氧率的影响[J]. 水生态学杂志, 34(3): 49-53.
- 郭文献, 王鸿翔, 徐建新, 等, 2011. 三峡水库对下游重要鱼类产卵期生态水文情势影响研究[J]. 水力发电学报, 30(3): 22-38.
- 郭永灿, 1982. 水温对鲢鱼、草鱼胚胎发育的影响[J]. 淡水渔业, (3): 35-40.
- 蒋清, 黄应平, 袁喜, 等, 2016. 不同温度下重复疲劳运动对鲢幼鱼游泳能力及代谢率的影响[J]. 水生态学杂志, 37(6): 89-94.
- 况莉, 谢小军, 2001. 温度对饥饿状态下南方鲇幼鱼氨氮排泄的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), (1): 45-50.
- 雷欢, 陈锋, 黄道明, 2017. 水温对鱼类的生态效应及水库温变对鱼类的影响[J]. 环境影响评价, 39(4): 36-39.
- 黎明政, 段中华, 姜伟, 等, 2011. 长江干流不同江段鱼卵及仔

- 鱼漂流特征昼夜变化的初步分析[J].长江流域资源与环境,20(8): 957-962.
- 李海波,李月红,吉尚雷,等,2013.几种环境因素对鱼类免疫机能的影响[J].中国水产,(9): 60-61.
- 李大鹏,庄平,严安生,等,2005.施氏鲟幼鱼摄食和生长的最适水温[J].中国水产科学,12(3): 294-299.
- 骆辉煌,2013.中华鲟繁殖的关键环境因子及适宜性研究[D].北京:中国水利水电科学研究院:34-44.
- 龙华,2005.温度对鱼类生存的影响[J].中山大学学报(自然科学版),(S1): 254-257.
- 吕为群,袁明哲,2017.温度变化对鱼类行为影响的研究进展[J].上海海洋大学学报,26(6): 828-835.
- 庞旭,2014.基于温度变化的鱼类生理生态(热耐受、代谢及游泳)响应研究[D].重庆:重庆大学:35-48.
- 庞旭,2010.温度对南方鲇幼鱼代谢对策的影响[D].重庆:重庆师范大学:21.
- 彭期冬,廖文根,李翀,等,2012.三峡工程蓄水以来对长江中游四大家鱼自然繁殖影响研究[J].四川大学学报(工程科学版),44(S2): 228-232.
- 彭静,2015.温度驯化和(或)摄食对鳊鱼幼鱼热耐受、游泳能力及生长性能的影响[D].重庆:重庆师范大学:3-5.
- 石妮,2019.长江重庆段四大家鱼国家级水产种质资源保护区鱼类时空分布特征的研究[D].重庆:重庆师范大学:30-31.
- 沈忱,2015.长江上游鱼类保护区生态环境需水研究[D].北京:清华大学:91-93.
- 苏艳莉,2015.环境温度对鱼类的影响及预防研究[J].农技服务,32(7): 191-192,181.
- 孙永旭,董宏标,王文豪,等,2019.温度对大口黑鲈幼鱼不同组织抗氧化能力及免疫相关蛋白表达的影响[J].生态科学,38(3): 18-25.
- 覃川杰,杨川,陈昌福,2011.水温对鱼类免疫活动的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),39(5): 129-133.
- 陶雨薇,王远坤,王栋,等,2018.三峡水库坝下水温变化及其对鱼类产卵影响[J].水力发电学报,37(10): 48-55.
- 王锦旗,宋玉芝,黄进,2020.水温升高对水体性质及水生生物的影响研究进展[J].水生态学杂志,41(1): 100-109.
- 王珂,周雪,陈大庆,等,2019.四大家鱼自然繁殖对水文过程的响应关系研究[J].淡水渔业,49(1): 66-70.
- 王万良,张怵怵,周建设,等,2019.不同水温对亚东鲑幼鱼生长及存活的影响[J].水产科技情报,46(1): 24-27.
- 王祥,鲍正风,舒卫民,等,2020.面向运行约束的三峡水库生态调度研究[J].中国农村水利水电,(1): 39-47.
- 翁朝红,谢仰杰,2001.环境因素对鱼类免疫功能的影响[J].集美大学学报(自然科学版),6(2): 184-189.
- 许承双,艾志强,肖鸣,2017.影响长江四大家鱼自然繁殖的因素研究现状[J].三峡大学学报(自然科学版),39(4): 27-30,59.
- 许可,周建中,顾然,等,2009.基于流域生物资源保护的水库生态调度[J].水生态学杂志,30(2): 134-138.
- 谢一荣,吴锐全,2005.鱼类消化酶研究及其在水产养殖中的应用[J].广东饲料,(2): 15-18.
- 向泉,周兴华,陈建,等,2013.温度对嘉陵江鲈消化酶活性影响的研究[J].西南大学学报(自然科学版),35(11): 67-73.
- 游鑫,2015.温度对黄颡鱼性腺分化、性激素及早期生长的影响[D].武汉:华中农业大学:32-37.
- 袁喜,黄应平,郭文韬,等,2018.温度和重复运动对中华鲟游泳行为的影响[J].水生态学杂志,39(1): 63-68.
- 曾令清,2008.温度对南方鲇幼鱼游泳能力和静止代谢率的影响[D].重庆:重庆师范大学:19-20.
- 曾令清,张耀光,付世建,等,2011.双向急性变温对南方鲇幼鱼静止耗氧率和临界游泳速度的影响[J].水生生物学报,35(2): 276-282.
- 张晓华,苏锦祥,殷名称,1999.不同温度条件对鳊仔鱼摄食和生长发育的影响[J].水产学报,23(1): 91-94.
- 张亚辉,龚江,梁杰锋,等,2018.体重和温度对草鱼摄食小浮萍的影响[J].水生态学杂志,39(1): 56-62.
- 张媛媛,宋理平,2018.鱼类免疫系统的研究进展[J].河北渔业,(2): 49-56.
- Aidos L, Cafiso A, Bertotto D, et al, 2020. How different rearing temperatures affect growth and stress status of Siberian sturgeon *Acipenser baerii* larvae[J]. Journal of Fish Biology.
- Alcorn S W, Murray A L, Pascho R J, et al, 2002. Effects of rearing temperature on immune functions in sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) [J]. Fish & Shellfish Immunology, 12(4): 303-334.
- Audzijonyte A, Richards S A, Stuart-Smith R D, et al, 2020. Fish body sizes change with temperature but not all species shrink with warming[J]. Nature Ecology & Evolution, 4(6): 1-6.
- Bartolini T, Butail S, Porfiri M, 2015. Temperature influences sociality and activity of freshwater fish[J]. Environmental Biology of Fishes, 98(3): 825-832.
- Bar N S, Radde N, 2009. Long-term prediction of fish growth under varying ambient temperature using a multiscale dynamic model[J]. BMC Systems Biology, 3(1): 107.
- Booth D J, Poulos D E, Poole J, et al, 2013. Growth and temperature relationships for juvenile fish species in seagrass beds: implications of climate change[J]. Journal of Fish Biology, 84(1): 231-236.
- Baudron A R, Needle C L, Rijnsdorp A D, et al, 2014. Warming temperatures and smaller body sizes: synchronous changes in growth of North Sea fishes[J]. Global Change

- Biology, 20(4): 1023 - 1031.
- Bowyer J N, Qin J G, Adams L R, et al 2012. The response of digestive enzyme activities and gut histology in yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) to dietary fish oil substitution at different temperatures[J]. *Aquaculture*, 368 - 369: 19 - 28.
- Guderley H, 2004. Locomotor performance and muscle metabolic capacities: impact of temperature and energetic status[J]. *Comp biochem physiol b biochem mol biol*, 139(3): 371 - 382.
- George A E, Chapman D C, Deters J E, et al, 2015. Effects of sediment burial on grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (Valenciennes, 1844), eggs[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 31(6): 1120 - 1126.
- Graham C T, Harrod C, 2009. Implications of climate change for the fishes of the British Isles[J]. *Journal of Fish Biology*, 74(6): 1143 - 1205.
- He W, Cao Z D, Fu S J, 2015. Effect of temperature on hypoxia tolerance and its underlying biochemical mechanism in two juvenile cyprinids exhibiting distinct hypoxia sensitivities[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 187: 232 - 241.
- Honsey A E, Venturelli P A, Lester N P, 2018. Bioenergetic and limnological foundations for using degree-days derived from air temperatures to describe fish growth[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76(4): 657 - 669.
- Hunt von Herbing I, 2002. Effects of temperature on larval fish swimming performance: the importance of physics to physiology[J]. *Journal of Fish Biology*, 61(4): 865 - 876.
- Jain K E, 2003. Influence of seasonal temperature on the repeat swimming performance of rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Journal of Experimental Biology*, 206(20): 3569 - 3579.
- Killen, Shaun S, Murray Humphries, 2014. Growth trajectory influences temperature preference in fish through an effect on metabolic rate[J]. *Journal of Animal Ecology*, 83(6): 1513 - 1522.
- Lagesson A, Saaristo M, Brodin T, et al, 2019. Fish on steroids: temperature-dependent effects of 17 β -trenbolone on predator escape, boldness, and exploratory behaviors[J]. *Environmental Pollution*, 245: 243 - 252.
- Lee C G, 2003. The effect of temperature on swimming performance and oxygen consumption in adult sockeye (*Oncorhynchus nerka*) and coho (*O. kisutch*) salmon stocks[J]. *Journal of Experimental Biology*, 206(18): 3239 - 3251.
- Luo Y P, Xie X J, 2008. Effects of temperature on specific dynamic action of the southern catfish *Silurus meridionalis* [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 149: 150 - 156.
- Lyon J P, Ryan T J, Scroggie M P, 2008. Effects of temperature on the fast-start swimming performance of an Australian freshwater fish[J]. *Ecology of Freshwater Fish*, 17(1), 184 - 188.
- Mclean L, Young I S, Doherty M K, et al, 2007. Global Cooling: Cold acclimation and the expression of soluble proteins in carp skeletal muscle[J]. *Proteomics*, 7(15): 2667 - 2681.
- Moriarty M, Murray A G, Berx B, et al, 2020. Modelling temperature and fish biomass data to predict annual Scottish farmed salmon, *Salmo salar* L. losses: development of an early warning tool[J]. *Preventive Veterinary Medicine*, 178, 104985.
- Morvan C L, Clerton P, Deschaux P, et al, 1997. Effects of environmental temperature on macrophage activities in carp[J]. *Fish Shellfish Immunol*, 7(3): 209 - 212.
- Morvan C L, Troutaud D, Deschaux P, 1998. Differential effects of temperature on specific and nonspecific immune defences in fish[J]. *Journal of Experimental Biology*, 201(Pt 2): 165 - 168.
- Macnutt M J, Hinch S G, Farrell A P, et al, 2004. The effect of temperature and acclimation period on repeat swimming performance in cutthroat trout[J]. *Journal of Fish Biology*, 65(2): 342 - 353.
- Pang X, Cao Z D, Peng J L, et al, 2010. The effects of feeding on the swimming performance and metabolic response of juvenile southern catfish, *Silurus meridionalis*, acclimated at different temperatures[J]. *Comp biochem physiol a mol integr physiol*, 155(2): 253 - 258.
- Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, et al, 2013. The effects of temperature and exercise training on swimming performance in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Journal of Comparative Physiology B Biochemical Systemic & Environmental Physiology*, 183(1): 99 - 108.
- Pang X, Yuan X Z, Cao Z D, et al, 2015. The effect of temperature on repeat swimming performance in juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Fish Physiology & Biochemistry*, 41(1): 19 - 29.
- Peng J, Cao Z D, Fu S J, 2014. The effects of constant and diel-fluctuating temperature acclimation on the thermal tolerance, swimming capacity, specific dynamic action and growth performance of juvenile Chinese bream[J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molec*

- ular & Integrative Physiology, 176: 32 - 40.
- Symons C C, Schulhof M A, Cavalheri H B, et al, 2018. Antagonistic effects of temperature and dissolved organic carbon on fish growth in California mountain lakes[J]. *Oecologia*, 189(1): 231 - 241.
- Wang N, Xu X, Kestemont P, 2009. Effect of temperature and feeding frequency on growth performances, feed efficiency and body composition of pikeperch juveniles (*Sander lucioperca*) [J]. *Aquaculture*, 289(1 - 2): 70 - 73.
- Wang T, Gao X, Jakovlić I, et al, 2017. Life tables and elasticity analyses of Yangtze River fish species with implications for conservation and management [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27(1): 257 - 266.
- Whyte S K, 2007. The innate immune response of finfish - a review of current knowledge [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 23(6): 1127 - 1151.
- Zhou L Y, Fu S J, Fu C, et al, 2019. Effects of acclimation temperature on the thermal tolerance, hypoxia tolerance and swimming performance of two endangered fish species in China. [J]. *Journal of comparative physiology. B, Biochemical, systemic, and environmental physiology*, 189(2): 237 - 247.
- Zeng L Q, Zhang Y G, Cao Z D, et al, 2010. Effect of temperature on excess post-exercise oxygen consumption in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) following exhaustive exercise [J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology*, 153(2): 125 - 130.
- Zeng L Q, Cao Z D, Fu S J, et al, 2009. Effect of temperature on swimming performance in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis*) [J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology*, 153(2): 125 - 130.
- Zhang H, Wu J M, Wang C Y, et al, 2016. River temperature variations and potential effects on fish in a typical Yangtze River reach: Implications for management [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 14(4): 553 - 567.
- Zhang W, Cao Z D, Peng J L, et al, 2010. The effects of dissolved oxygen level on the metabolic interaction between digestion and locomotion in juvenile southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen) [J]. *Comparative Biochemistry & Physiology Part A Molecular & Integrative Physiology*, 157(3): 212 - 219.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

Effect of Water Temperature on the Life Activities of Temperate Freshwater Fish

ZHANG Xian-bing, HU Ya-ping, YANG Wei, LI Wen-jie, YANG Sheng-fa

(Chongqing Jiaotong University, National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing Key Laboratory of Ecological Waterway, Chongqing 400074, P.R.China)

Abstract: Water temperature is a fundamental ecological factor affecting all life activities of fish. In this paper, the effects of water temperature on reproduction, feeding, growth, metabolism, swimming capacity and immune response of temperate freshwater fishes are reviewed. Water temperature has the greatest impact on fish reproduction and growth. The physiological activities of temperate freshwater fish operate normally when the temperature is within a suitable temperature range. However, exceeding water temperature thresholds results in metabolic disorders that diminish capacity to perform life activities and can be fatal, with the potential to significantly alter fish populations. Water temperature is just one of the ecological factors affecting fish survival, but it plays a crucial role in waterway construction, ecological restoration, fish resource assessment and protection of aquatic ecosystems. Alteration of water temperature should be minimized during development of river resources or regulation of river hydrology.

Key words: water temperature; temperate freshwater fishes; life activities; fish populations; river ecology