

不同升温速率对桡足类高起始致死温度的影响

江志兵^{1,3}, 曾江宁^{1,2}, 陈全震¹, 廖一波^{1,3}, 高爱根¹, 徐晓群¹, 寿鹿¹,
刘晶晶¹, 黄逸君¹

(1. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州, 310012; 2. 浙江大学环境与资源学院, 浙江 杭州, 310029; 3. 农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海, 200090)

摘要: 为探明升温速率对桡足类热忍受能力的影响, 并找出一个相对合适的升温速率作为其高起始致死温度 (upper incipient lethal temperature, UILT) 试验中的标准升温速率, 研究了中华哲水蚤 *Calanus sinicus*、真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta*、精致真刺水蚤 *Euchaeta concinna* 和背针胸刺水蚤 *Centropages dorsispinatus* 等 4 种桡足类在 $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 、 $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 和突然暴露等 4 个不同升温速率下的 UILT。结果表明, 同一种桡足类在不同升温速率下的热忍受能力存在较大的差异, 各种桡足类的 UILT 均在升温速率为 $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时最大, 高于或低于该升温速率, 其 UILT 都降低。因此, 建议桡足类 UILT 实验的标准升温速率为 $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在 $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的标准升温速率下, 各种桡足类的热忍受能力从强到弱依次为真刺唇角水蚤、背针胸刺水蚤、精致真刺水蚤、中华哲水蚤, 其 24h-UILT 分别为 31.0°C 、 29.6°C 、 29.1°C 和 27.7°C , 48h-UILT 分别为 30.1°C 、 29.5°C 、 28.6°C 和 27.3°C , 各种桡足类的热忍受能力间均有显著差异。

关键词: 高起始致死温度 (UILT); 升温速率; 桡足类; 热忍受能力; 温排水

中图分类号: Q178.1⁺1; X57 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)03-0087-06

Effect of heating rate on the upper incipient lethal temperature for copepods

JIANG Zhi-bing^{1,3}, ZENG Jiang-ning^{1,2}, CHEN Quan-zhen¹, LIAO Yi-bo^{1,3}, GAO Ai-gen¹, XU Xiao-qun¹,
SHOU Lu¹, LIU Jing-jing¹, HUANG Yi-jun¹

(1. Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012, China; 2. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 3. Key Laboratory of Marine and Estuarine and Fisheries, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China)

Abstract: To explore how heating rate influences the thermal tolerance of copepods and to recommend heating rate criteria during copepod upper incipient lethal temperature (UILT) tests, four copepod species (*Calanus sinicus*, *Labidocera euchaeta*, *Euchaeta concinna*, *Centropages dorsispinatus*) collected from the Yueqing Bay were studied in laboratory under different heating rates ($1^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$, $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, $1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, and abrupt exposure). The results showed that thermal tolerance of the same copepod species varied with heating rate, and all the experimental copepods decreased in number from a heating rate of $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ towards quicker or slower heating rates. Thus, the rate of $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ was considered as the standard heating rate for UILT experiments. In the trial conducted at $0.1^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, the 24h-UILT of *L. euchaeta*, *C. dorsispinatus*, *E. concinna* and *C. sinicus* were 31.0°C , 29.6°C , 29.1°C and 27.7°C , respectively; the 48h-UILT of *L. euchaeta*, *C. dorsispinatus*, *E. concinna* and *C. sinicus* were 30.1°C , 29.5°C , 28.6°C and 27.3°C , respectively. Differences of thermal sensitivity between these animals were all significant.

Key words: upper incipient lethal temperature (UILT); heating rate; *Calanus sinicus*; *Labidocera euchaeta*; *Euchaeta con-*

收稿日期: 2008-01-14; 修订日期: 2008-05-08. 刘学东编辑

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB428903); 科技部社会公益研究专项资金项目(2004DIB3J087); 国家海洋局青年科学基金(2008113); 海洋公益性行业科研专项经费项目资助(200805069); 国家专项(908-02-04-0, 908-ZC-II-04); 国家海洋局专项(No. 2011914); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JT0806, JG0921)

作者简介: 江志兵(1983—), 男, 浙江省温岭市人, 研究实习员, 主要从事海洋生物研究, E-mail: jzb1217@126.com

通讯作者: 陈全震, 研究员. E-mail: chenqz6509@126.com

致谢: 浙江省海洋水产养殖研究所清江试验场谢起浪、柴雪良、郑金和、李晓勇、张炯明、胡利华、肖国强、邵鑫兵、闫茂仓、陆荣茂和董迎辉等在实验过程中给予了很多的帮助, 谨表谢忱!

cinna; *Centropages dorsispinatus*; thermal tolerance; thermal discharge

生物体热忍受能力实验是热生物学领域研究中的普遍方法,通过热效应实验可以研究全球气候变暖(如 El Nino 现象)和其他人为因素(如电厂等工业冷却水排放)等造成的升温现象对水生生物的影响^[1-5]。热效应实验确定水生生物的热限制值(Thermal limits)一般有两种方法:1) 将生物体从某一适应温度以一定的升温速率升温至实验温度或突然暴露于实验温度,在一定暴露时间(12、24、48、96 和 168h 等)内生物体死亡率达到 50% 时的温度值,称之为高起始致死温度值(upper incipient lethal temperature, UILT)^[2,4-6]; 2) 将试验生物体以一定的升温速率升温至实验生物出现一定的症状(如身体失去平衡、丧失游泳能力、死亡等)时的温度值,称之为最大热临界值(critical thermal maximum, CTMax)^[2,7-10]。后者由于实验便于操作、所需生物个体数少、得到数据较快等优点而在热效应实验中得到广泛应用^[11]。但前者可以给水生生物提供较长的时间以适应长期的热胁迫,较后者更为真实地模拟生物体在自然环境中遭受到各种长期的热胁迫^[9-10],在生态学研究上显得更为有意义^[12]。然而无论是哪种方法,确定生物体的 UILT 和 CTMax 都涉及升温速率这一问题。

许多学者曾就不同升温速率对鱼类热忍受能力的影响展开研究^[3,9,13-16],并对鱼类热效应实验的升温速率加以规范^[9,11,13-14]。有关桡足类热忍受能力的报道也较多^[1,4,5,17],但没有就不同升温速率对桡足类 UILT 的影响进行研究。此外,研究不同升温速率下桡足类的 UILT 在评价滨海热(核)电厂冷却系统升温 and 温排水对桡足类影响时也有较大的实际意义。为弄清升温速率和桡足类热忍受能力间的关系,并找出一个相对合适的升温速率作为桡足类 UILT 研究中的标准升温速率(为不同桡足类热忍受能力的比较提供一个升温速率标准),本文研究了中华哲水蚤 *Calanus sinicus*、真刺唇角水蚤 *Labidocera euchaeta*、精致真刺水蚤 *Euchaeta concinna* 和背针胸刺水蚤 *Centropages dorsispinatus* 等 4 种桡足类在 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和突然暴露等 4 个不同升温速率下的 UILT。

1 材料与方法

1.1 桡足类的采集及暂养

实验用桡足类于春季(2007 年 4—5 月)采自浙江

省乐清湾海域(28°19'N, 121°09'E),表层自然海水温度均为 20℃。现场用 505μm 网筛在表层采集浮游动物后带回实验室,于 2000L 玻璃缸暂养,然后挑选出中华哲水蚤、真刺唇角水蚤、精致真刺水蚤和背针胸刺水蚤,于 50L 水族箱中暂养 2d(水温 20.0 ± 0.2 ℃)。期间隔 12h 投喂适量等鞭金藻 *Isochrysis galbana*,隔 24h 清除已经死亡的桡足类个体、粪便及其他污物,并换水 2/3。由于真刺唇角水蚤成体属肉食性为主的杂食性^[18],隔 12h 还要投喂适量小型桡足类如小拟哲水蚤 *Paracalanus parvus* 和针刺拟哲水蚤 *Paracalanus aculeatus* 等。日光灯控制光照,光强 $500 \pm 50 \text{ lux}$,光暗比 16 h : 8 h。

1.2 桡足类在不同升温速率下的 UILT 实验

实验方法参考文献[1, 5]。将桡足类从驯化水体中转移至 1L 烧杯中暂养,然后从暂养烧杯中随机选取 20 个体质健壮的成体桡足类放入盛 400ml 二次砂滤水的 500ml 烧杯中(在实验过程中对烧杯进行微充气),适应 10min 后以 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 的升温速率匀速水浴升温。当烧杯内水体水温升至各设定温度梯度时,将烧杯转移至预先升温到设定温度的水族箱里水浴恒温 48h。 0.1 和 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温组的试验方法如 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 升温组。另外,还有一个升温速率实验是将 20 个桡足类从 20℃ 的驯化温度突然转移至预先加热到设定温度的二次砂滤水中(突然暴露)水浴恒温 48h。各种桡足类在不同升温速率下的设定温度梯度见表 1。每个升温速率实验温度组均设 3 次重复,对照组的操作程序如上,但并不加热。在达到设定温度后 1、2、4、8、16、24、36 和 48h 时观察桡足类死亡情况,用吸管及时清除污物和死亡个体,并记录死亡个数。以滴管口轻微吹打桡足类,15s 内无任何反应为 UILT 实验死亡标准。期间投喂适量等鞭金藻,其中真刺唇角水蚤同时投喂适量小型桡足类如小拟哲水蚤和针刺拟哲水蚤等。日光灯控制光照,光强 $500 \pm 50 \text{ lux}$,光暗比 16h : 8h。试验期间自然水温 20.0 ± 0.2 ℃,pH 值 8.0 ± 0.1 ,盐度 22.5 ± 0.5 。

1.3 数据分析

计算各温度梯度下持续暴露 24、48h 时各种桡足类的死亡率。当对照组出现死亡时,各温度组的死亡百分数按以下公式进行校正:

$$P = (P' - C) / (1 - C)$$

式中, P' 为观察死亡百分数; C 为对照组死亡百分数;

表 1 各种实验桡足类在不同升温速率下的设定温度梯度
Tab. 1 Scheduled temperature gradients of experimental copepod species under different heating rates

种类	温度梯度/			
	1 ·h ⁻¹	0.1 ·min ⁻¹	1 ·min ⁻¹	突然暴露
中华哲水蚤 ^① <i>C. sinicus</i>	26.0—29.0	26.5—29.0	26.0—29.0	26.0—29.0
真刺唇角水蚤 ^② <i>L. euchaeta</i>	28.5—34.5	28.5—34.5	28.5—34.5	28.5—34.5
精致真刺水蚤 ^① <i>E. concinna</i>	27.5—30.0	27.5—30.0	27.0—30.0	27.0—30.0
背针胸刺水蚤 ^② <i>C. dorsispinatus</i>	26.5—32.5	26.5—33.5	26.5—32.5	26.5—32.5

注：① 表示以 0.5 ·h⁻¹ 为升温梯度；② 表示以 1.0 ·h⁻¹ 为升温梯度。

P 为校正后的死亡百分数。用 SPSS13.0 软件按概率单位法计算各种桡足类在不同升温速率下的 24、48h 时的 UILT(24h-UILT 和 48h-UILT)及其 95%置信限。若两个 UILT 的 95%置信限不重合，则有显著差异，反之，则无显著差异。

2 结果

2.1 暴露时间对桡足类 UILT 的影响

实验桡足类在各升温速率下的 UILT(24h-UILT 和 48h-UILT)均随暴露时间延长而降低(图 1—图 4)，除背针胸刺水蚤在各升温速率下的 24h-UILT 与 48h-UILT 间无显著差异外(95%置信限重合)，其余各种桡足类在各升温速率下的 24h-UILT 均显著高于 48h-UILT(95%置信限不重合)。

2.2 升温速率对桡足类 UILT 的影响

各种实验桡足类的 UILT 均在升温速率为 0.1 ·min⁻¹ 时最大，高于或低于该升温速率，其 UILT 都降低，在突然暴露时最低，在升温速率为 1 ·h⁻¹ 和 1 ·min⁻¹ 时，UILT 居中(图 1—图 4)。

图 1 表明中华哲水蚤在 0.1 ·min⁻¹ 升温速率下

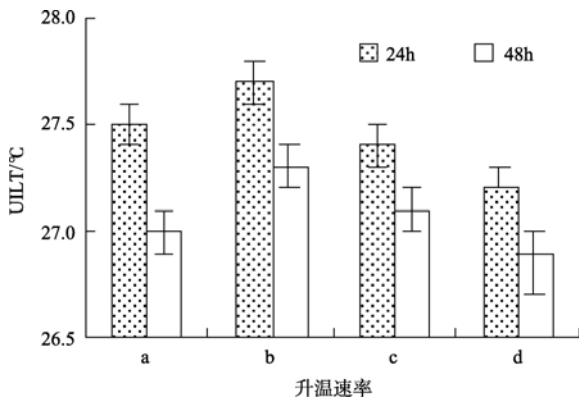


图 1 中华哲水蚤在不同升温速率下的 24h-UILT 和 48h-UILT
a、b、c 和 d 分别表示 1 ·h⁻¹、0.1 ·min⁻¹、1 ·min⁻¹ 和突然暴露；误差线表示 95%置信限
Fig. 1 24h-UILT and 48h-UILT of *C. sinicus* under different heating rates

的 24h-UILT 显著高于 1 ·min⁻¹ 和突然暴露升温速率下的 24h-UILT，但与其 1 ·h⁻¹ 升温速率下的 24h-UILT 无显著差异。0.1 ·min⁻¹ 升温速率下的 48h-UILT 显著高于 1 ·h⁻¹ 和突然暴露升温速率下的 48h-UILT，但与其 1 ·min⁻¹ 升温速率下的 48h-UILT 间无显著差异。

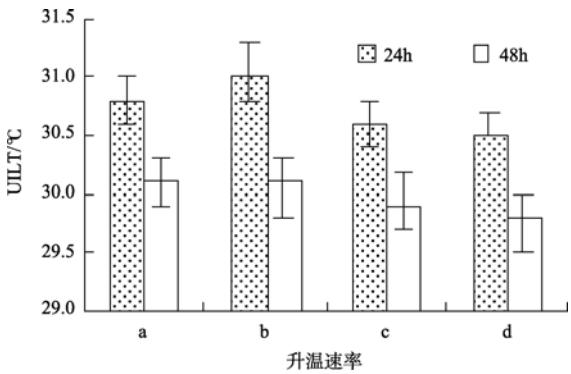


图 2 真刺唇角水蚤在不同升温速率下的 24h-UILT 和 48h-UILT
a、b、c 和 d 分别表示 1 ·h⁻¹、0.1 ·min⁻¹、1 ·min⁻¹ 和突然暴露；误差线表示 95%置信限
Fig. 2 24h-UILT and 48h-UILT of *L. euchaeta* under different heating rates

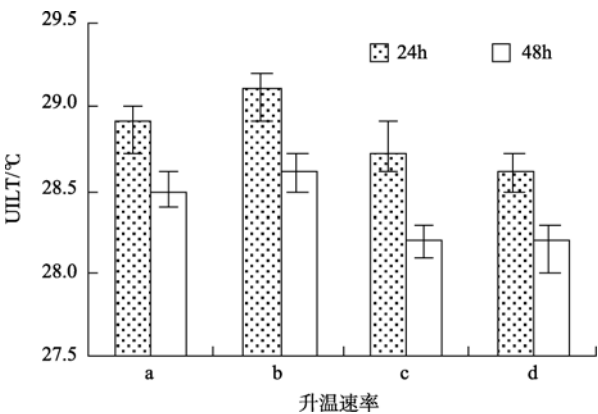


图 3 精致真刺水蚤在不同升温速率下的 24h-UILT 和 48h-UILT
a、b、c 和 d 分别表示 1 ·h⁻¹、0.1 ·min⁻¹、1 ·min⁻¹ 和突然暴露；误差线表示 95%置信限
Fig. 3 24h-UILT and 48h-UILT of *E. concinna* under different heating rates

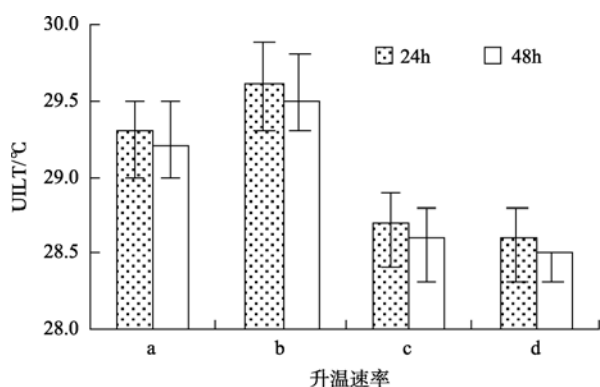


图 4 背针胸刺水蚤在不同升温速率下的 24h-UILT 和 48h-UILT

a、b、c 和 d 分别表示 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 、 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和突然暴露；误差线表示 95% 置信限

Fig. 4 24h-UILT and 48h-UILT of *C. dorsispinatus* under different heating rates.

图 2 表明真刺唇角水蚤除在 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率下的 24h-UILT 与突然暴露下的 24h-UILT 间有显著差异外，与其余升温速率下的 24h-UILT 间无显著差异。在各升温速率下的 48h-UILT 间无显著差异。

图 3 表明精致真刺水蚤在 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 与 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率下的 24h-UILT 间无显著差异，但 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率下的 24h-UILT 显著高于突然暴露下的 24h-UILT。 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 升温速率下的 48h-UILT 显著高于 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和突然暴露升温速率下的 48h-UILT； $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 与 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 升温速率下的 UILT 间无显著差异； $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和突然暴露下的 UILT 间无显著差异。

图 4 表明背针胸刺水蚤在 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 升温速率下的 UILT 显著高于 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和突然暴露升温速率下的 UILT； $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 升温速率下的 UILT 间无显著差异； $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 和突然暴露升温速率下的 UILT 间无显著差异。

2.3 桡足类 UILT 的种类差异

在相同升温速率下，各种桡足类的 UILT 从高到低均依次为真刺唇角水蚤、背针胸刺水蚤、精致真刺水蚤、中华哲水蚤(图 1—4)。如在 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速率下，真刺唇角水蚤、背针胸刺水蚤、精致真刺水蚤、中华哲水蚤的 24h-UILT 分别为 31.0、29.6、29.1、27.7，48h-UILT 分别为 30.1、29.5、29.0、28.0，各种桡足类的 UILT 间均存在显著差异。

3 讨论

国内外一些研究表明，升温速率对鱼类 CTMax

和 UILT 有较大影响，同一种鱼类在不同升温速率下其热忍受能力存在较大的差异^[3,9,13-16]。Kivivuori 等^[6]研究大型溞 *Daphnia magna* 在不同升温速率下的热忍受能力有较大差异。本实验中，同一种桡足类在不同升温速率下的热忍受能力也存在较大差异(图 1—4)。

升温速率不仅影响实验生物适应升温所需的时间，而且影响实验生物暴露于致死温度下的暴露时间^[19]，该暴露时间包括升温期间的暴露时间以及升温至设定温度的持续暴露时间(24h 和 48h)。升温速率越快，暴露时间越短，反之升温速率越慢，暴露时间则越长。升温速率越快，可能会对实验生物产生热冲击^[20-21]，而且有可能使实验生物体温滞后于水温的改变^[22]，使得出的 UILT 低于其实际的热忍受极限值^[11]。升温速率稍慢，可以给实验生物提供相对较长的时间以适应温度的改变^[22]，但若升温速率太慢，暴露时间太长，也可能导致生物体的热忍受能力下降^[19,23]。实验中暴露时间越长，桡足类的死亡率上升，UILT 越低。可见，桡足类对高温的忍受能力随暴露时间延长而逐渐减弱。因此生物体在一定升温速率下能够在最短的时间内完全适应温度的改变，就可能获得对升温的最大热忍受值^[19]。

本实验中，各种桡足类的 UILT 在升温速率为 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 时最高，此后随升温速率增加或减小而降低，在突然暴露时最低(图 1—4)。桡足类在 $1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率和突然暴露的快升温条件下其热忍受能力较 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率时低，原因可能是在该升温速率下桡足类不能较好的适应温度的快速改变(可能形成热冲击)。桡足类在 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 的慢升温条件下，其热忍受能力仍较 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率下差，可能是因为 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 升温速率较 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率慢很多，使得桡足类在 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 的慢升温条件下的暴露时间较 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 升温速率的暴露时间长很多。一旦桡足类在接近、甚至达到其致死温度的高温下暴露，其代谢能力和能量消耗等会降低^[24]，生理状况可能较常温下差，对高温的热忍受能力可能减弱。暴露时间越长，对桡足类伤害就越大，从而导致桡足类在较慢的升温速率($1 \cdot \text{h}^{-1}$)下时其热忍受能力降低。据本研究的结果，各种桡足类在升温速率为 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 时最大，因此可以认为桡足类在该升温速率下能较好地适应温度的改变，得到其最大的热忍受值。

有学者认为确定鱼类的热忍受极限值需要建立快速升温速率标准，如 Becker 等^[9]及 Cox^[13]认为鱼

类的升温速率标准为 $0.3 \cdot \text{min}^{-1}$, 而 Elliot 和 Elliot^[14]与 Lutterschmidt 和 Hutchison^[11]认为鱼类的升温速率标准应为 $1 \cdot \text{h}^{-1}$ 。他们认为在该升温速率下, 时间相对较快, 避免实验鱼类适应温度的改变, 而且同时有足够的时间避免鱼体温度滞后于水体温度的改变^[3,7]。但鱼类热效应实验中所谓的标准升温速率($0.3 \cdot \text{min}^{-1}$ 或 $1 \cdot \text{h}^{-1}$), 其实可能并不科学, 因为不同种类的鱼类间个体差异较大, 在标准升温速率下, 个体相对较大的鱼类其体温的改变可能滞后于水温的改变, 而个体相对较小的鱼类则可能不会出现这种情况^[12], 这样就有可能导致实验测得个体相对较大的鱼类热忍受极限值高于其真实值, 从而影响各种鱼类间热忍受能力比较的结果^[11,13,15]。因此, 在鱼类热效应实验中很难对其升温速率加以规范并建立升温速率的标准。而桡足类则不同, 其个体较鱼类小很多, 一般仅为 $1\text{—}4\text{mm}$ ^[25], 种类间的个体差异相对较小, 在相对较快的升温速率下, 不会出现类似于鱼体温度改变滞后水温改变的现象^[6,17]。因此, 可以对桡足类热效应实验中的升温速率加以规范, 建立升温速率标准。本实验中, 各种桡足类的热忍受极限值均在 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 时最大, 高于或低于该升温速率, 其热忍受极限值都降低。因此, 建议桡足类热效应实验的标准升温速率为 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 。

生物的耐热性是物种在生态环境作用下, 长期选择、进化的结果, 不同生物体对环境温度的耐受范围各不相同, 表现为种类的差异性。如实验中, 在 $0.1 \cdot \text{min}^{-1}$ 标准升温速率下, 各种桡足类的热忍受

能力从强到弱依次为真刺唇角水蚤、背针胸刺水蚤、精致真刺水蚤、中华哲水蚤, 且各个种类的热忍受能力间均存在显著差异。中华哲水蚤属暖温性近岸类群, 是适应于偏低温的是暖温带种^[26], 在春季成为东海桡足类中的优势种^[27], 耐热性最差。精致真刺水蚤属暖水种, 是秋冬季东海桡足类的第一优势种^[28], 耐热性相对较强。背针胸刺水蚤属咸淡水区的低盐高温优势种, 在夏季优势度较高^[27], 耐热性较强。而真刺唇角水蚤则属暖水性近岸类群, 适应于高温海区, 一年四季均为东海的桡足类优势种^[27], 耐热性最强。

此外, 研究不同升温速率下桡足类的 UILT 在评价滨海热(核)电厂冷却系统升温 and 温排水对桡足类影响时也有较大的实际意义。冷却水在经过直流冷却系统后出水口水温将提高 $6\text{—}12$ ^[29-30], 由于冷却系统设计可能各不相同^[31], 进入冷却系统的冷却水的升温速率也可能各不相同。且滨海热(核)电厂所在的海域也各不相同, 从电厂出水口排出的温排水与其周围水体的交换速率也各不相同。由于桡足类通常漂浮于海水的表层, 其环境选择和回避能力较差, 受海流、潮流和风浪等外力的作用, 容易从自然水温水域逐渐漂移到高增温区内^[32]。这就有可能导致电厂附近的桡足类遭受到不同升温速率下的热胁迫。根据本实验的研究结果显示升温速率是影响桡足类热忍受能力的一个重要因素, 不同升温速率下, 桡足类的热忍受能力不尽相同。因此, 在模拟或评价电厂温排水升温对桡足类的影响时还要考虑到升温速率这一重要因素。

参考文献

- [1] LAHDES E. Acute thermal tolerance of two Antarctic copepods, *Calanoides acutus* and *Calanus propinquus*[J]. Journal of Thermal Biology, 1995, 20 (1-2): 75-78.
- [2] 蔡泽平, 陈浩如, 金启增, 等. 热废水对大亚湾三种经济鱼类热效应的研究[J]. 热带海洋, 1999, 18(2): 12-19.
- [3] MORA C, MAYA M F. Effect of the rate of temperature increase of the dynamic method on the heat tolerance of fishes[J]. Journal of Thermal Biology, 2006, 31: 337-341.
- [4] 廖一波, 陈全震, 曾江宁, 等. 海洋桡足类的热耐受性[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 449-452.
- [5] 江志兵, 曾江宁, 陈全震, 等. 滨海电厂冷却水余热和余氯对中华哲水蚤的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1401-1406.
- [6] KIVIVUORI L A, LAHEDS E O. How to measure the thermal death of Daphnia? A comparison of different heat tests and effects of heat injury[J]. Journal of Thermal Biology, 1996, 21(5-6): 305-311.
- [7] FANGUE N A, BENNETT W A. Thermal tolerance responses of laboratory acclimated and seasonally acclimated Atlantic stingray *Dasyatis sabina*[J]. Copeia, 2003, 2: 315-325.
- [8] HUTCHISON V H. Factors influencing thermal tolerance of individual organisms[C]. ESCH G W, McFARLANE R. Symposium Series of the National Technical Information Service. VA: Springfield, 1976, 10-26.
- [9] BECKER C D, GENOWAY R G. Evaluation of the critical thermal maximum for determining thermal tolerance of freshwater fish[J]. Environmental Biology of Fishes, 1979, 4: 245-256.
- [10] SELONG J H, MCMAHON T E, ZALE A V, et al. Effect of

- temperature on growth and survival of bull trout, with application of an improved method for determining thermal tolerance in fishes[J]. Transactions of American Fisheries Society, 2001, 130: 1026–1037.
- [11] LUTTERSCHMIDT W L, HUTCHISON V H. The critical thermal maximum: history and critique[J]. Canadian of Journal of Zoology, 1997, 75: 1561–1574.
- [12] FRY F E J. Responses of vertebrate poikilotherms to temperature[M]. ROSE A H. Thermobiology. NY: Academic Press, 1967: 375–409.
- [13] COX D K. Effect of three heating rates on the critical thermal maximum of bluegill[M]. GIBBONS J W, SHARTIZ R R. Thermal Ecology. Savannah, GA: US Atomic Energy Commission, 1974: 158–163.
- [14] ELLIOT J M, ELLIOT J A. The effect of the rate of the temperature increase on the critical thermal maximum for parr of Atlantic salmon and brown trout[J]. Journal of Fish Biology, 1995, 47: 917–919.
- [15] GALBREATH P F, ADAMS N D, MARTIN T H. Influence of heating rate on measurement of time to thermal maximum in trout[J]. Aquaculture, 2004, 241: 587–599.
- [16] 马胜伟, 沈鑫绿, 沈新强. 水温对不同鱼类的急性致死效应[J]. 海洋渔业, 2005, 27(4): 298–303.
- [17] GONZÁLEZ J G. Critical thermal maxima and upper lethal temperatures for the calanoid copepods *Acartia tonsa* and *A. clausi*. [J] Marine Biology, 1974, 27(3): 219–223.
- [18] 杨纪明, 李红玲. 渤海真刺唇角水蚤摄食的初步研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 299–303.
- [19] COCKING A W. The effect of high temperature on roach (*Rutilus rutilus*). II: The effect of temperature increasing at a known constant rate[J]. The Journal of Experimental Biology, 1959, 36: 217–226.
- [20] BARKER S C, TOWNSEND D W, HACUNDA J S. Mortalities of Atlantic hearing, *Clupea h. harengus*, smooth flounder, *Liopsetta putnami*, and rainbow smelt, *Osmerus mordax*, larvae expose to acute thermal shock[J]. Fishery Bulletin, 1981, 79: 198–200.
- [21] HUTCHISON V H, MURPHY K. Behavioral thermoregulation in the salamander *Necturus maculosus* after heat shock[J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 1985, 82A: 391–394.
- [22] HUTCHISON V H. Critical thermal maxima in salamanders[J]. Physiological Zoology, 1961, 34: 92–125.
- [23] BEITINGER T L, BENNETT W A, MCCAULEY. Temperature tolerances of North American fishes exposed to dynamic changes in temperature[J]. Environmental Biology of Fishes, 2000, 58: 237–275.
- [24] 陈丽华, 陈钢, 李少菁, 等. 温盐度对厦门港春季主要桡足类呼吸率影响的实验[J]. 台湾海峡, 2001, 20(增刊): 184–189.
- [25] 郑重, 李少菁, 许振祖. 海洋浮游生物学[M]. 北京: 海洋出版社. 1984.
- [26] 黄加祺, 郑重. 温度和盐度对厦门港几种桡足类存活率的影响[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(2): 161–167.
- [27] 徐兆礼, 沈新强, 马胜伟. 春、夏季长江口临近水域浮游动物优势种的生态特征[J]. 海洋科学, 2005, 29(1): 13–19.
- [28] 徐兆礼. 东海精致真刺水蚤 (*Euchaeta concinna*) 种群生态特征[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(2): 97–104.
- [29] BAMBER R N. The influence of rising background temperature on the effects of marine thermal effluents[J]. Journal of Thermal Biology, 1995, 20(1–2): 105–110.
- [30] JIANG Z B, ZENG J N, CHEN Q Z, *et al.* Tolerance of copepods to short-term thermal stress caused by coastal power stations[J]. Journal of Thermal Biology, 2008, 33(7): 419–423.
- [31] MELTON B R, SERVISS G M. Florida Power Corporation-Anclote Power Plant entrainment survival of zooplankton[J]. Environmental Science and Policy, 2000, 3(supplement 1): 233–248.
- [32] JIANG Z B, ZENG J N, CHEN Q Z, *et al.* Potential impact of rising seawater temperature on copepods due to coastal power plants in subtropical areas[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2009, 368: 196–201.