

温度对福寿螺生物学特性的影响及高低温适应机制研究进展

杨倩倩 李迦南 赵星星 蒲佳佳 乔东东 俞晓平

TEMPERATURE ON BIOLOGICAL CHARACTERISTICS AND ADAPTIVE MECHANISMS OF THE APPLE SNAILS

YANG Qian-Qian, LI Jia-Nan, ZHAO Xing-Xing, PU Jia-Jia, QIAO Dong-Dong, YU Xiao-Ping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2022.2021.0224>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蓖麻籽提取液对福寿螺毒杀效果及作用机制

TOXICITY OF *RICINUS COMMUNIS* SEED EXTRACT AND ITS MECHANISM ON *POMACEA CANALICULATA*

水生生物学报. 2021, 45(2): 284–291 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.055>

嗜水气单胞菌*cpxRA*缺失株构建及生物学特性研究

CONSTRUCTION AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS ANALYSIS OF *CPXRA* MUTANT IN *AEROMONAS HYDROPHILA*

水生生物学报. 2018, 42(1): 1–10 <https://doi.org/10.7541/2018.001>

七鳃鳗*myd88*基因的生物学特性及其下游分子的表达模式分析

THE CLONING AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF *MYD88* IN LAMPREY AND THE EXPRESSION PATTERN OF ITS DOWNSTREAM PROTEINS

水生生物学报. 2018, 42(4): 690–697 <https://doi.org/10.7541/2018.085>

秦岭细鳞鲑代谢及低氧耐受能力对温度驯化的响应

THE METABOLISM AND HYPOXIA TOLERANCE OF *BRACHYMYSTAX LENOK TSINLINGENSIS* IN RELATION TO TEMPERATURE ACCLIMATION

水生生物学报. 2017, 41(1): 201–205 <https://doi.org/10.7541/2017.25>

不同规格拉萨裂腹鱼温度耐受性研究

THE STUDY ON THE TEMPERATURE TOLERANCE OF DIFFERENT SIZES OF *SCHIZOTHORAX WALTONI*

水生生物学报. 2020, 44(6): 1230–1238 <https://doi.org/10.7541/2020.143>

温度对4种大型海藻氮磷吸收效率及光合生理特性的影响

THE EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE ABSORPTION EFFICIENCY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS AND PHOTOSYNTHETIC PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS IN FOUR MACROALGAE SPECIES

水生生物学报. 2018, 42(5): 1050–1056 <https://doi.org/10.7541/2018.129>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

综述

doi: 10.7541/2022.2021.0224

温度对福寿螺生物学特性的影响及高低温适应机制研究进展

杨倩倩^{1*} 李迦南^{1*} 赵星星¹ 蒲佳佳¹ 乔东东² 俞晓平¹

(1. 中国计量大学, 浙江省生物计量及检验检疫技术重点实验室, 杭州 310018; 2. 中国湿地博物馆, 杭州 310013)

摘要: 在全球气候变化背景下, 福寿螺在我国及全球进一步扩散。极强的生态耐受力及快速适应力是福寿螺能够在入侵地区迅速扩散的重要原因。其中, 环境温度对福寿螺的生存、生长、发育及繁殖至关重要, 是影响福寿螺分布、扩散及暴发的重要因素之一。文章在综述温度耐受范围的基础上, 总结了福寿螺高低温适应的生理生化及分子机制, 并对从温度适应性角度揭示入侵机制的研究前景进行展望。当前, 福寿螺温度适应的生理生化机制研究主要针对化合物以及相关酶活性变化开展, 分子机制研究主要集中在HSP基因的表达差异上。在染色体水平基因组完成测序的基础上, 福寿螺快速适应性进化的生理生态耐受性机制和表型可塑性机制有待深入开展。

关键词: 温度耐受; 小分子化合物; 保护酶; 热休克蛋白; 生物入侵; 福寿螺

中图分类号: Q178.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2022)11-1754-07



福寿螺隶属于软体动物门Mollusca腹足纲Gastropoda新进腹足目Caenogastropoda瓶螺科Am-pullariidae福寿螺属Pomacea, 是原产于南美洲亚马孙流域的一类大型淡水螺^[1]。福寿螺最早于20世纪80年代作为食用螺经我国台湾引入亚洲各地养殖^[2], 但随着商业价值的降低, 被大量弃养或逃逸到田间^[3]。由于取食范围广、生长速度快、繁殖能力强, 并且具有极强的环境耐受力, 福寿螺能够在新生境成功定殖并快速扩散^[4], 当前已入侵亚洲、北美、欧洲及大洋洲的许多国家和地区, 严重威胁入侵地的农业生产、生物多样性及人民身体健康。作为我国首批公布的外来入侵物种之一, 福寿螺在过去40余年已在我国南方稻区广泛扩散。

环境温度影响生物的生存、生长、发育和繁殖, 是决定福寿螺地理分布范围的重要生态因子。温度相关的气候参数是用于预测福寿螺潜在扩散范围的主要参数之一^[5, 6]。Lei等^[5]基于物种分布模型(SDMs)分析表明最冷月份的最低温度是限制福寿螺在全球扩散的最关键气候变量, 预计在未来

50年福寿螺的全球适生区将增加3.30%—10.30%, 包括在亚洲和北美洲向北部延伸, 在欧洲向东部延伸等。在原产地, 季节温度与海拔、土壤有机碳、降水量是决定福寿螺分布范围的环境变量^[6]; 在亚洲入侵地, 冬季低温是限制福寿螺持续向北扩散的关键因子^[7]。受全球气候变化影响, 福寿螺在全球的扩散趋势加剧。全球气候变暖将为福寿螺向我国北方地区进一步入侵提供有利条件^[5]。

当前至少有5种福寿螺从原产地引入到我国, 包括小管福寿螺*Pomacea canaliculata* (Lamarck, 1822)、斑点福寿螺*Pomacea maculata* (Perry, 1810)、隐秘福寿螺*Pomacea occulta* (Yang & Yu, 2019)、神秘福寿螺*Pomacea diffusa* (Reeve, 1856)和梯状福寿螺*Pomacea scalaris* (d'Orbigny, 1832)^[8]。小管福寿螺在我国的入侵范围最广, 在已报道的入侵地均有该物种分布^[9]; 斑点福寿螺集中分布在四川盆地、浙江及香港^[9, 10]; 隐秘福寿螺为近年来命名的新种, 已扩散至南方12省/市/区, 并在入侵地与小管福寿螺共同分布^[11, 12]。神秘福寿螺是水族贸易中

收稿日期: 2021-08-31; 修订日期: 2022-06-10

基金项目: 国家自然科学基金(32171668和31800462); 浙江省属高校基本科研业务费专项资金(2021YW06)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (32171668 and 31800462); Fundamental Research Funds for the Provincial Universities of Zhejiang (2021YW06)]

作者简介: 杨倩倩, 女, 博士, 副教授; 主要从事外来生物入侵机制及防控研究。E-mail: yqq@cjlu.edu.cn 李迦南, 女, 硕士; 主要从事福寿螺耐温机制研究。E-mail: 673977033@qq.com *共同第一作者

通信作者: 俞晓平, 男, 博士, 研究员; E-mail: yxp@cjlu.edu.cn

的常见宠物螺, 仅在斯里兰卡发现该物种的自然种群, 在我国尚无野外分布^[9]。梯状福寿螺仅分布在台湾南部, 被认为具有较小的生态危害^[2]。当前, 国内外对福寿螺入侵机制的研究主要以小管福寿螺为对象开展, 少量涉及斑点福寿螺^[13]。

1 温度对福寿螺生物学特性的影响

1.1 温度对福寿螺存活的影响

小管福寿螺的适生温度为25—30℃, 25℃时存活率最高, 达95.80%; 当温度为10—35℃时具有活动能力, 低于10℃或高于35℃时, 活动明显减少^[14]; 当温度持续低于10℃或高于35℃时, 小管福寿螺渐入冬眠或夏眠^[15, 16]。温度低于0℃或高于40℃时, 福寿螺被冻死或灼死^[17]; Matsukura等^[18]和Deaton等^[19]发现日本和美国地区的小管福寿螺和斑点福寿螺0℃时存活时间均不超过5d; 潘颖瑛等^[20]发现浙江的小管福寿螺42℃时最长能存活6d; 刘艳斌等^[21]发现广西的小管福寿螺45℃时可存活1d, 为最高存活温度记录。

Gamarra-Luques等^[22]对采自阿根廷的小管福寿螺研究表明, 当壳高25 mm时雌雄螺的生殖器解剖学和组织学特征均与成螺相同, 可交配受精。Wada等^[3]发现野外越冬的小管福寿螺以壳高<25 mm的个体为主, 表明幼螺的耐低温水平高于成螺。随冬季温度逐渐降低, 福寿螺可通过低温适应增强耐寒能力^[23]。Matsukura等^[18]针对小管福寿螺幼螺进行低温适应处理, 以每5d降低5℃的方式从25℃降至10℃并维持4周, 发现0℃下5d时未经低温适应的螺存活率为0, 而经低温适应的29只螺0℃下11d时仍有11只存活; 当温度降低至体内结冰的临界温度(约-7℃)时, 体内结冰的螺全部死亡, 而不结冰的存活率为41.70%, 表明福寿螺不耐冰冻。

不同地理种群和生境的福寿螺耐低温水平具有显著差异。对广州、鹰潭、宁波、雅安和黄冈地区的小管福寿螺低温处理表明, 我国已形成对低温耐受性不同的地理种群^[24]。Yoshida等^[25]比较了阿根廷北部和中部地区的小管福寿螺和斑点福寿螺对低温和干旱的耐受性, 发现两者经低温适应后均提升了耐低温水平; 斑点福寿螺池塘种群比湖泊种群表现出更高的耐低温和耐干旱水平。

1.2 温度对福寿螺生长发育的影响

不利温度对福寿螺生长发育的影响, 主要表现在降低摄食量和生长速度上。Seuffert等^[14]检测了水温对小管福寿螺最南部分布区(阿根廷南潘帕斯)种群的影响, 发现13—15℃时50%的个体不活动, 10—30℃时活动及取食时长随温度升高而增加,

高于30℃时活动率下降。刘艳斌等^[21]对广西种群的小管福寿螺开展5—45℃时的摄食率研究, 发现幼螺和成螺摄食率分别在30℃和35℃时达最高, 幼螺最大摄食率是成螺的7倍; 低于15℃时摄食量明显减少, 低于12℃或高于43℃时停止摄食。

温度过低或过高均会降低福寿螺的生长速度。15—30℃时, 小管福寿螺的生长速率随着温度的升高而上升^[26]; 低于15℃或高于30℃时, 生长速率显著降低^[15]。潘颖瑛等^[20]统计了温度处理下小管福寿螺幼螺的生长速率, 发现30—42℃时生长缓慢且随温度升高生长速率下降, 低温15℃时可见缓慢生长, 但6—12℃时生长基本停止。Seuffert等^[26]研究了温度与小管福寿螺幼螺的生长速率和存活率的关系, 发现25℃和30℃时生长速率较快, 但存活率随温度升高而降低; 15℃和20℃时存活率为100%, 但生长速率较慢。

1.3 温度对福寿螺繁殖的影响

温度对福寿螺繁殖的影响主要包括交配和产卵行为以及卵孵化率。当温度低于15℃或高于35℃时, 小管福寿螺的交配活动明显减少, 雌螺停止产卵^[16]。Seuffert等^[26]发现25℃是小管福寿螺卵发育及孵化的最适温度, 15—35℃时卵均能够正常发育和孵化, 当温度低于15℃或高于35℃时, 卵不能正常孵化。

1.4 福寿螺的过冷却点

变温动物在外界温度降低过程中, 体液温度降低到冰点以下而不结冰以降低结冰造成的损伤, 这一现象称为过冷却现象^[27]。过冷却点是动物的体液开始结冰时的温度, 是测定变温动物耐寒性的重要指标之一^[18, 27]。过冷却点测定在福寿螺抗寒性机制研究中具有重要作用^[18, 28]。

不同体型和性别的福寿螺的过冷却点具有差异。赵本良等^[28]采用万用电表联接热敏电阻法检测壳高5—45 mm的小管福寿螺的过冷却点, 表明过冷却点为-7.32—-6.21℃, 呈随螺高的增大而升高的趋势。郭靖等^[29]针对中大螺测定表明, 雌雄性福寿螺的过冷却点分别为-7.50—-6.50℃和-7.00—-5.50℃, 均值分别为-6.83℃和-6.26℃; 雌螺的过冷却点显著低于雄螺, 表明雌螺较耐低温。这与越冬种群中, 雌螺比雄螺存活率高的结论相一致^[30]。

2 福寿螺温度适应的生理生化机制

福寿螺耐低温能力的增强与体内糖、脂代谢产物的积累和含水量的调节有关, 并可通过调节抗氧化酶及相关代谢酶的活性提升耐温水平。

2.1 小分子化合物

低温能够引起福寿螺体内的小分子化合物, 如

自由水、结合水、甘油、葡萄糖和糖原等的含量变化^[30, 31]。Matsukura等^[31]发现在冬季前随着外界温度降低, 野外种群小管福寿螺体内的葡萄糖和糖原含量减少, 甘油含量增多; 实验室种群经低温适应后, 外套膜和肾脏的葡萄糖含量、腹足和肝胰腺的甘油含量明显升高, 腹足和肾脏的糖原含量降低, 小分子化合物的含量变化可能与糖脂代谢途径的改变有关, 并在耐低温中发挥重要作用。Guo等^[30]研究了低温-干旱处理下雌雄性小管福寿螺体内小分子化合物的含量变化, 结果表明在低温-干旱适应过程中, 雌螺的结合水和甘油含量高于雄螺, 而自由水含量低于雄螺, 表明雌螺比雄螺更能适应耐低温-干旱环境, 使得雌螺比雄螺更容易越冬。

2.2 蛋白酶

抗氧化酶 低温和高温能够诱导生物体内产生过量的活性氧自由基(ROS), 破坏机体的分子结构和功能, 导致代谢紊乱^[32]。抗氧化酶能够消除过量的ROS, 达到保护细胞的作用。因此, 抗氧化酶的活性变化能够反映出机体ROS的代谢及组织氧化损伤情况, 对判断免疫防御能力及健康状况具有重要参考价值^[33]。

Liu等^[34]通过转录组数据分析了不同温度下小管福寿螺抗氧化酶基因的表达模式, 发现在10℃和37℃时不同组织的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)和过氧化物氧化还原酶(PRX)基因的表达水平均升高。陈炼等^[33]针对小管福寿螺在15℃和36℃温度条件下分别处理72h, 发现高低温处理过程中鳃与肝胰腺中的SOD、CAT和GSH-Px酶活性及丙二醛含量均先升高后降低, 并在72h时恢复正常水平, 抗氧化物酶活性在鳃中的变化快于在肝胰腺中的变化, 表明温度引起的氧化应激具有组织特异性。

小管福寿螺在冬眠-觉醒周期中, 肝胰腺中SOD活性没有显著变化而CAT活性在冬眠期显著下降并在觉醒期恢复; 肾脏中的SOD活性在觉醒30min时短暂下降而CAT活性在觉醒30min及24h时均显著下降; 腹足中SOD和CAT变化均不显著^[35]。此外, 小管福寿螺在夏眠-觉醒周期中各组织中SOD和CAT活性均无明显变化^[36]。这表明福寿螺在冬眠及夏眠过程中可通过维持抗氧化酶的基础水平抵御氧化应激的影响。

代谢途径相关酶 经低温适应后, 0℃处理可使小管福寿螺肝胰腺中的甘油激酶和甘油-3-磷酸脱氢酶基因的表达量显著升高, Na^+/K^+ -ATP酶基因的表达量显著下降^[37]。此外, 基于转录组数据分析我国广东和湖南地区小管福寿螺的耐低温差异,

表明与能量代谢相关的糖原合成酶基因上调、6-磷酸葡萄糖脱氢酶和二酰基甘油激酶基因下调, 与氨基酸代谢相关的丙酮酸脱氢酶激酶和谷氨酰胺合成酶基因下调, 与细胞膜代谢相关的肌醇-3-磷脂合成酶基因下调等^[38]。

3 福寿螺温度适应的分子机制

3.1 福寿螺HSPs的表达调控

福寿螺温度适应的分子机制主要集中于热休克蛋白(Heat shock proteins, HSPs)基因的表达调控研究, 涉及HSP90、HSP70、HSP60和HSP40基因家族成员^[39-42]。福寿螺不同HSP基因的表达量表现出明显的组织特异性。例如, 小管福寿螺在正常条件下HSP90在腹足和肾脏中的表达水平较高, HSP70在肝胰腺中的表达水平显著高于其他组织, HSP40的表达水平在肝胰腺中最高而在肾脏中最低^[41, 42]。

Zheng等^[39]从小管福寿螺中克隆鉴定了第一个HSP基因HSC70(Heat shock cognate 70), 高温下该基因在肝胰腺、鳃、肾脏和腹足中的表达量显著升高, 而低温下在肝胰腺、肾脏和腹足中的表达量无显著变化, 表明HSC70可能在高温下的生理过程中发挥重要作用。Xu等^[41]克隆鉴定了小管福寿螺的HSP90、HSP70和HSP60基因, 其中HSP90和HSP70是响应高温的关键基因, 高温下HSP90在腹足和鳃中的表达量及HSP70在鳃、肾脏和腹足中的表达量均显著升高, HSP60在各组织中的表达量变化不显著; 3个HSP基因在低温下的表达量变化均不显著。Song等^[40]基于HSP70表达差异揭示了雌雄性小管福寿螺的耐温差异, 高温下雌螺和雄螺腹足中HSP70的表达量分别在48h和12h时最高, 且雌螺中的表达量是雄螺的1.60倍, 表明雄螺比雌螺更容易受到高温的影响, 而在低温下雌螺和雄螺的表达差异不显著。Xu等^[42]从小管福寿螺中克隆了首个小分子热休克蛋白基因HSP40, 不同组织中的HSP40在低温下显著上调而在高温下变化不显著。

3.2 温度适应的组学研究

近年来, 随着高通量测序技术及分子生物学技术的快速发展, 蛋白质组、基因组和转录组等在福寿螺入侵机制研究中陆续开展。

Mu等^[43]发现小管福寿螺比近缘的非入侵种神秘福寿螺具有更强的耐高温能力, 通过比较蛋白质组分析在急性高温下(37℃, 3h)从小管福寿螺和神秘福寿螺中分别鉴定出27个和23个差异表达蛋白; 在慢性高温下(35℃, 3 weeks)从两种螺中分别鉴定出58个和118个差异表达蛋白, 许多与受损分子的修复、泛素化功能失调及储备能量的利用有关; 在

高温处理下仅神秘福寿螺从糖代谢向脂代谢转变。此外, Sun等^[44]通过小管福寿螺夏眠周期中比较蛋白质组学研究表明, 短期夏眠(3d)中仅有9个差异表达蛋白, 其中2个免疫相关蛋白表达上调; 长期夏眠(45d)相比短期夏眠, 有31个上调蛋白和16个下调蛋白, 其中糖代谢相关的淀粉酶和1, 4-葡聚糖酶、脂质合成相关的磷脂酶下调, 脂代谢相关的低密度脂蛋白受体蛋白、脂质蛋白受体、抗氧化蛋白、铁蛋白和嘌呤合成蛋白等上调, 表明长期夏眠期间增加了脂质消耗及抗氧化防御需求。

Liu等^[34]针对我国深圳种群的小管福寿螺进行了全基因组测序, 并注释了13个HSP70、6个HSP90、7个HSP40和11个热休克转录因子(Heat shock factors, HSFs), 表明福寿螺HSP基因家族成员及热休克转录因子均是多拷贝的; 通过对肝胰腺、鳃、肾脏、卵巢和睾丸等组织的转录组分析表明, 高低温能够显著诱导HSP90和HSFs基因的表达。Sun等^[45]测序了原产地阿根廷种群的小管福寿螺、斑点福寿螺、非洲螺*Lanistes nyassanus* (Dohrn, 1865)和大羊角螺*Marisa cornuarietis* (Linnaeus, 1758)4种瓶螺的全基因组, 比较基因组学研究发现4种瓶螺共有28个基因家族发生明显扩张, 包括具有化学感应功能的G蛋白偶联受体基因家族和纤维素酶基因家族等, 表明瓶螺科物种在进化过程中形成了对环境的高敏感度及对植物纤维素的强消化力。

4 展望

经过国内外学者20余年的努力, 有关温度对福寿螺生物学特性的影响及适应机制研究取得一定进展。福寿螺的温度适应及内在机制研究成果, 对于福寿螺的田间监测、风险预警等提供了重要支撑。例如, 利用福寿螺在冬季低温下不能越冬的特性, 韩国曾在水稻移栽7d后引入福寿螺幼螺用于防控稻田杂草, 但福寿螺的低温适应性及逐渐向北扩散的现象已引发韩国环境部的密切关注^[46]。当前, 福寿螺高低温适应的机制研究主要集中在生理生化机制及分子机制两方面。耐温的生理生化机制研究主要针对代谢化合物及酶活性变化开展, 其中许多化合物与响应杀螺剂作用所产生的化合物相同^[47]; 分子机制研究主要集中在HSP基因表达差异上。随着高通量测序技术和分子生物学技术的快速发展, 相关分子机制研究有待深入开展。例如, 福寿螺HSP基因表达差异研究主要针对一个或几个基因, 这些基因是通过与近缘种的同源比对、设计引物和扩增克隆获得。然而, 小管福寿螺的全基因组中注释出多拷贝的HSP基因家族成员, 有待

从全基因组对HSP基因家族进行系统鉴定, 并深入分析不同HSP在温度适应中的作用。Wang等^[48]从入侵昆虫烟粉虱*Bemisia tabaci* (Gennadius, 1889)基因组中鉴定出3个HSP90、17个HSP70、1个HSP60和5个sHSP基因, 并明确了HSP基因家族中与温度适应密切相关的关键基因, 揭示出同一HSP基因家族的不同成员在温度适应中的作用不同。

长期以来的分类鉴定难题严重制约了对福寿螺生物学、生态学及入侵危害的准确认识。近年来基于分子与形态特征结合分析, 从世界入侵性福寿螺中鉴别出小管福寿螺、斑点福寿螺与隐秘福寿螺3个种^[8, 11, 49]。然而, 已有的福寿螺耐温机制研究主要针对小管福寿螺开展, 早期研究的对象可能由于未准确鉴定而被归并为小管福寿螺。为准确判断不同福寿螺物种的扩散范围, 有必要开展种间耐温差异比较研究。例如, 小管福寿螺比斑点福寿螺具有较高的耐低温水平, 在日本低温北部地区仅分布有小管福寿螺, 而斑点福寿螺分布于中部及南部且种群比例随纬度升高而逐渐降低^[50]。此外, 福寿螺种间存在复杂的渐渗杂交, 在原产地及入侵地均检测到渐渗杂交种群, 且入侵地杂交种的比例比原产地高, 这可能是由于入侵过程中杂交更密集发生^[12, 50, 51]。种间杂交能够提升基因变异进而提升种群适合度, 促进外来物种的入侵扩散^[52]。然而, 福寿螺种间杂交产生的进化效应对温度适应产生怎样的影响, 仍有待深入研究揭示。

在气候变化背景下, 外来物种通过生理适应、生态位空间拓展、改变种间互作关系等途径减少环境因素的制约, 从而影响进化及入侵进程并改变入侵种的地理分布格局, 促进生物入侵^[53, 54]。早期以气温与福寿螺世代数量为参数构建模型结合GIS绘图, 预测2020年小管福寿螺在我国最北将扩散至约31°N。然而, 2019年的田间调查表明福寿螺最北分布区已达32.43°N的江苏省泰州市^[55]。在全球气候变化下, 福寿螺在全球进一步扩散, 其快速适应性进化的生理生态耐受性机制及表型可塑性机制研究仍有待深入开展。在染色体水平基因组测序的基础上, 结合多组学分析及遗传操作技术的综合应用, 福寿螺对温度的适应机制研究将逐渐深入, 并将为理解福寿螺的扩散规律及制定科学的防控措施提供理论指导。

参考文献:

- [1] Cowie R H, Hayes K A, Strong E E, *et al.* Non-native Apple Snails: Systematics, Distribution, Invasion History and Reasons for Introduction [M]//Joshi R C, Cowie R H,

- Sebastian L S (Eds.), *Biology and Management of Invasive Apple Snails*. Muñoz, Nueva Ecija: the Philippine Rice Research Institute, 2017: 3-32.
- [2] Wu J Y, Wu Y T, Li M C, *et al.* Reproduction and juvenile growth of the invasive apple snails *Pomacea canaliculata* and *P. scalaris* (Gastropoda: Ampullariidae) in Taiwan [J]. *Zoological Studies*, 2011, **50**(1): 61-68.
- [3] Wada T, Ichinose K, Yusa Y, *et al.* Decrease in density of the apple snail *Pomacea canaliculata* (Lamarck) (Gastropoda: Ampullariidae) in paddy fields after crop rotation with soybean, and its population growth during the crop season [J]. *Applied Entomology and Zoology*, 2004, **39**(3): 367-372.
- [4] Yu X P, Wada T, Li Z F, *et al.* Occurrence of golden apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck), in paddy fields and its management [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2001, **13**(5): 247-252. [俞晓平, 和田节, 李中方, 等. 稻田福寿螺的发生和治理 [J]. *浙江农业学报*, 2001, **13**(5): 247-252.]
- [5] Lei J, Chen L, Li H. Using ensemble forecasting to examine how climate change promotes worldwide invasion of the golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189**(8): 404.
- [6] Seuffert M E, Martín P R. Exceeding its own limits: range expansion in Argentina of the globally invasive apple snail *Pomacea canaliculata* [J]. *Hydrobiologia*, 2021, **848**(2): 385-401.
- [7] Matsukura K, Izumi Y, Yoshida K, *et al.* Cold tolerance of invasive freshwater snails, *Pomacea canaliculata*, *P. maculata*, and their hybrids helps explain their different distributions [J]. *Freshwater Biology*, 2016, **61**(1): 80-87.
- [8] Yang Q Q, Yu X P. A new species of apple snail in the genus *Pomacea* (Gastropoda: Caenogastropoda: Ampullariidae) [J]. *Zoological Studies*, 2019(58): e13.
- [9] Yang Q Q, Liu S W, He C, *et al.* Distribution and the origin of invasive apple snails, *Pomacea canaliculata* and *P. maculata* (Gastropoda: Ampullariidae) in China [J]. *Scientific Reports*, 2018(8): 1185.
- [10] Yang Q Q, Ip J C-H, Zhao X X, *et al.* Molecular analysis revealed three morphologically similar species of non-native apple snails and their patterns of distribution in freshwater wetlands of Hong Kong [J]. *Diversity and Distribution*, 2021. DOI: 10.1111/ddi.13443
- [11] Yang Q, Liu S, He C, *et al.* Invisible apple snail invasions: importance of continued vigilance and rigorous taxonomic assessments [J]. *Pest Management Science*, 2019, **75**(5): 1277-1286.
- [12] Yang Q Q, He C, Liu G F, *et al.* Introgressive hybridization between two non-native apple snails in China: widespread hybridization and homogenization in egg morphology [J]. *Pest Management Science*, 2020, **76**(12): 4231-4239.
- [13] Hayes K A, Burks R L, Castro-Vazquez A, *et al.* Insights from an integrated view of the biology of apple snails (Caenogastropoda: Ampullariidae) [J]. *Malacologia*, 2015, **58**(1-2): 245-302.
- [14] Seuffert M E, Burela S, Martín P R. Influence of water temperature on the activity of the freshwater snail *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda: Ampullariidae) at its southernmost limit (Southern Pampas, Argentina) [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2010, **35**(2): 77-84.
- [15] Wada T, Yoshida K. Burrowing by the apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck); daily periodicity and factors affecting burrowing [J]. *Kyushu Plant Protection Research*, 2000(46): 88-93.
- [16] Stevens A J, Welch Z C, Darby P C, *et al.* Temperature effects on Florida applesnail activity: implications for snail kite foraging success and distribution [J]. *Wildlife Society Bulletin*, 2002, **30**(1): 75-81.
- [17] Zhou W C, Wu Y F, Yang J Q. Viability of the ampullaria snail in China [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2003, **18**(1): 25-28. [周卫川, 吴宇芬, 杨佳琪. 福寿螺在中国的适生性研究 [J]. *福建农业学报*, 2003, **18**(1): 25-28.]
- [18] Matsukura K, Tsumuki H, Izumi Y, *et al.* Physiological response to low temperature in the freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae) [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2009, **212**(Pt 16): 2558-2563.
- [19] Deaton L E, Schmidt W, Leblanc B, *et al.* Physiology of the invasive apple snail *Pomacea maculata*: tolerance to low temperatures [J]. *Journal of Shellfish Research*, 2016, **35**(1): 207-210.
- [20] Pan Y Y, Dong S Z, Yu X P. Effects of temperature stress on development, feeding and survival of the apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck) [J]. *Journal of Plant Protection*, 2008, **35**(3): 239-244. [潘颖瑛, 董胜张, 俞晓平. 温度胁迫对福寿螺生长、摄食及存活的影响 [J]. *植物保护学报*, 2008, **35**(3): 239-244.]
- [21] Liu Y B, Han W, Xian Z H. Effect of different temperatures on growth, development and feeding of *Pomacea canaliculata* [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2011, **42**(8): 901-905. [刘艳斌, 韩微, 贤振华. 温度对福寿螺生长发育及摄食的影响 [J]. *南方农业学报*, 2011, **42**(8): 901-905.]
- [22] Gamarra-Luques C, Giraud-Billoud M, Castro-Vazquez A. Reproductive organogenesis in the apple snail *Pomacea canaliculata* (Lamarck, 1822), with reference to the effects of xenobiotics [J]. *Journal of Molluscan Studies*, 2013, **79**(2): 147-162.
- [23] Wada T, Matsukura K. Seasonal changes in cold hardiness of the invasive freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck) (Gastropoda: Ampullariidae) [J]. *Malacologia*, 2007, **49**(2): 383-392.
- [24] Qin Z, Wu R S, Zhang J, *et al.* Survivorship of geogra-

- phic *Pomacea canaliculata* populations in responses to cold acclimation [J]. *Ecology and Evolution*, 2020, **10**(8): 3715-3726.
- [25] Yoshida K, Matsukura K, Cazzaniga N J, *et al.* Tolerance to low temperature and desiccation in two invasive apple snails, *Pomacea canaliculata* and *P. maculata* (Caenogastropoda: Ampullariidae), collected in their original distribution area (northern and central Argentina) [J]. *Journal of Molluscan Studies*, 2014, **80**(1): 62-66.
- [26] Seuffert M E, Martín P R. Thermal limits for the establishment and growth of populations of the invasive apple snail *Pomacea canaliculata* [J]. *Biological Invasions*, 2017, **19**(4): 1169-1180.
- [27] Jing X H, Kang L. Research progress in insect cold hardiness [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(12): 2202-2207. [景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性研究 [J]. *生态学报*, 2002, **22**(12): 2202-2207.]
- [28] Zhao B, Zhang J, Luo M, *et al.* Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(5): 1538-1545. [赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等. 福寿螺的过冷却研究 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(5): 1538-1545.]
- [29] Guo J, Xu W B, Zhang J E, *et al.* Gender differences of *Pomacea canaliculata* in cold tolerance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(6): 1791-1798. [郭靖, 徐武兵, 章家恩, 等. 雌雄福寿螺耐寒能力的差异 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(6): 1791-1798.]
- [30] Guo J, Xu W, Martín P R, *et al.* Sex differences in cold hardiness and desiccation tolerance of invasive apple snails in South China [J]. *Malacologia*, 2019, **62**(2): 215-224.
- [31] Matsukura K, Tsumuki H, Izumi Y, *et al.* Changes in chemical components in the freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae), in relation to the development of its cold hardiness [J]. *Cryobiology*, 2008, **56**(2): 131-137.
- [32] Martínez-Álvarez R M, Morales A E, Sanz A. Antioxidant defenses in fish: Biotic and abiotic factors [J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2005(15): 75-88.
- [33] Chen L, Wu T, Chen Y, *et al.* Effects of temperature stress on antioxidase activity and malondialdehyde in *Pomacea canaliculata* [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2019, **54**(5): 727-735. [陈炼, 邬婷, 陈燊, 等. 温度对福寿螺抗氧化酶活性和丙二醛含量的影响 [J]. *动物学杂志*, 2019, **54**(5): 727-735.]
- [34] Liu C, Zhang Y, Ren Y, *et al.* The genome of the golden apple snail *Pomacea canaliculata* provides insight into stress tolerance and invasive adaptation [J]. *GigaScience*, 2018, **7**(9): gyl101.
- [35] Giraud-Billoud M, Castro-Vazquez A, Campoy-Diaz A D, *et al.* Tolerance to hypometabolism and arousal induced by hibernation in the apple snail *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda, Ampullariidae) [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology*, 2018(224): 129-137.
- [36] Giraud-Billoud M, Vega I A, Tosi M E, *et al.* Antioxidant and molecular chaperone defences during estivation and arousal in the South American apple snail *Pomacea canaliculata* [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2013, **216**(Pt 4): 614-622.
- [37] Liu G, Yang Q, Lin H, *et al.* Differential gene expression in *Pomacea canaliculata* (Mollusca: Gastropoda) under low temperature condition [J]. *Journal of Molluscan Studies*, 2018, **84**(4): 397-403.
- [38] Liu J, Sun Z, Wang Z, *et al.* A comparative transcriptomics approach to analyzing the differences in cold resistance in *Pomacea canaliculata* between Guangdong and Hunan [J]. *Journal of Immunology Research*, 2020(2020): 8025140.
- [39] Zheng G, Dong S, Hou Y, *et al.* Molecular characteristics of HSC70 gene and its expression in the golden apple snails, *Pomacea canaliculata* (Mollusca: Gastropoda) [J]. *Aquaculture*, 2012(358/359): 41-49.
- [40] Song H M, Mu X D, Gu D E, *et al.* Molecular characteristics of the HSP70 gene and its differential expression in female and male golden apple snails (*Pomacea canaliculata*) under temperature stimulation [J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2014, **19**(4): 579-589.
- [41] Xu Y, Zheng G, Dong S, *et al.* Molecular cloning, characterization and expression analysis of HSP60, HSP70 and HSP90 in the golden apple snail, *Pomacea canaliculata* [J]. *Fish and Shellfish Immunology*, 2014, **41**(2): 643-653.
- [42] Xu Y, Zheng G, Liu G, *et al.* Molecular cloning, characterization of *Pomacea canaliculata* HSP40 and its expression analysis under temperature change [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2019(81): 59-65.
- [43] Mu H, Sun J, Fang L, *et al.* Genetic basis of differential heat resistance between two species of congeneric freshwater snails: insights from quantitative proteomics and base substitution rate analysis [J]. *Journal of Proteome Research*, 2015, **14**(10): 4296-4308.
- [44] Sun J, Mu H, Zhang H, *et al.* Understanding the regulation of estivation in a freshwater snail through iTRAQ-based comparative proteomics [J]. *Journal of Proteome Research*, 2013, **12**(11): 5271-5280.
- [45] Sun J, Mu H, Ip J C-H, *et al.* Signatures of divergence, invasiveness, and terrestrialization revealed by four apple snail genomes [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2019, **36**(7): 1507-1520.
- [46] Lee T G, Oh K C. Golden Apple Snail in Korea [M]// Joshi R C, Sebastian L S (Eds.), *Global advances in ecology and management of golden apple snails*. Muñoz, Nueva Ecija: the Philippine Rice Research Institute, 2006: 169-179.
- [47] Wang C J, Xu C L, Ma J, *et al.* Toxicity of *Ricinus communis* seed extract and its mechanism on *Pomacea canaliculata* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, **45**(2):

- 284-291. [王蝉娟, 徐成龙, 马俊, 等. 蓖麻籽提取液对福寿螺毒杀效果及作用机制 [J]. *水生生物学报*, 2021, **45**(2): 284-291.]
- [48] Wang X R, Wang C, Ban F X, *et al.* Genome-wide identification and characterization of HSP gene superfamily in whitefly (*Bemisia tabaci*) and expression profiling analysis under temperature stress [J]. *Insect Science*, 2019, **26**(1): 44-57.
- [49] Hayes K A, Cowie R H, Thiengo S C, *et al.* Comparing apples with apples: clarifying the identities of two highly invasive Neotropical Ampullariidae (Caenogastropoda) [J]. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 2012, **166**(4): 723-753.
- [50] Matsukura K, Okuda M, Cazzaniga N J, *et al.* Genetic exchange between two freshwater apple snails, *Pomacea canaliculata* and *Pomacea maculata* invading East and Southeast Asia [J]. *Biological Invasions*, 2013, **15**(9): 2039-2048.
- [51] Glasheen P M, Burks R L, Campos S R, *et al.* First evidence of introgressive hybridization of apple snails (*Pomacea* spp.) in their native range [J]. *Journal of Molluscan Studies*, 2020, **86**(2): 96-103.
- [52] Pfennig K S, Kelly A L, Pierce A A. Hybridization as a facilitator of species range expansion [J]. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, **283**(1839): 20161329.
- [53] Sorte C J B, Ibáñez I, Blumenthal D M, *et al.* Poised to prosper? A cross-system comparison of climate change effects on native and non-native species performance [J]. *Ecology Letters*, 2013, **16**(2): 261-270.
- [54] Zhang Z, Capinha C, Karger D N, *et al.* Impacts of climate change on geographical distributions of invasive ascidians [J]. *Marine Environmental Research*, 2020(159): 104993.
- [55] Ji X M, Wang A X, Fang L C, *et al.* Investigation on the distribution of apple snail (*Pomacea canaliculata*) in the lower reaches of Yangtze River in China [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, **59**(22): 111-116. [戢小梅, 王爱新, 方林川, 等. 中国长江下游地区福寿螺分布现状考察 [J]. *湖北农业科学*, 2020, **59**(22): 111-116.]

TEMPERATURE ON BIOLOGICAL CHARACTERISTICS AND ADAPTIVE MECHANISMS OF THE APPLE SNAILS

YANG Qian-Qian¹, LI Jia-Nan¹, ZHAO Xing-Xing¹, PU Jia-Jia¹, QIAO Dong-Dong² and YU Xiao-Ping¹

(1. Provincial Key Laboratory of Bio-metrology and Inspection & Quarantine of Zhejiang, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. National Wetland Museum of China, Hangzhou 310013, China)

Abstract: Apple snails from the family Ampullariidae are large freshwater gastropods that are native to South, North and Central America. Some ampullariids, mainly from the genus *Pomacea* have been introduced out of their native areas, and subsequently caused serious damage to the freshwater habitats in such as Asia. The strong resistance and rapid adaptation to ecological stressors play key roles for the rapid spread and outbreak of the *Pomacea* species in their non-native ranges. With the efforts from researchers both in China and abroad, the invasive mechanisms on the resistance to various ecological factors of apple snails have been extensively investigated. Among which, the mechanisms on tolerance to cold and hot temperatures have brought the most research interests. Environmental temperature is crucial for the survival, growth, development, and reproduction of apple snails that serves as one of the key factors affecting their geographic distribution. We reviewed the ranges of survival temperature of both *Pomacea canaliculata* (Lamarck, 1822) and *Pomacea maculata* Perry, 1810, because both the species were the most widely distributed and economically important ones. Based on which, we summarized the physiological, biochemical, and molecular mechanisms in adaptive to high and low temperatures of *P. canaliculata* and *P. maculata*. The physiological and biochemical mechanisms on adaption to temperature of apple snails have currently focused on changes of the chemical compounds and enzyme activities. While the molecular mechanisms have mainly focused on the expression differences of several heat shock proteins. The chromosome level genomes of *P. canaliculata* has been sequenced in 2018, which will promote the ecological adaptive mechanisms of apple snails with the application of advanced genetic manipulation techniques.

Key words: Temperature tolerance; Small molecular compound; Protective enzyme; Heat shock proteins; Biological invasion; Apple snails