

# 入侵种福寿螺的养殖液对水环境及本地种铜锈环棱螺的影响

房苗<sup>1,2</sup> 徐猛<sup>1</sup> 罗渡<sup>1</sup> 顾党恩<sup>1</sup> 杨叶欣<sup>1</sup> 牟希东<sup>1</sup> 胡隐昌<sup>1</sup> 罗建仁<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>中国水产科学研究院珠江水产研究所, 农业部热带亚热带水产资源利用与养殖重点实验室, 广州 510380; <sup>2</sup>上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

**摘要** 以大藻(*Pistia stratiotes*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)和小竹节草(*Najas guadelupensis*)为福寿螺(*Pomacea canaliculata*)的食物, 养殖数量设置为0、2、4、8、16和32只, 分别在养殖的第1、3、5、7和9天测定养殖水体中的温度、pH、溶氧以及铵态氮、亚硝态氮、硝态氮、溶解性磷酸盐的浓度。在此基础上, 开展了福寿螺养殖液对福寿螺和铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)的胁迫实验。结果表明: 福寿螺的养殖数量和食物种类对养殖液中的溶氧、铵态氮、硝态氮和溶解性磷酸盐有极显著的影响( $P < 0.01$ ); 溶氧量随着养殖数量的增大和养殖时间的延长显著降低, 而铵态氮、硝态氮和溶解性磷酸盐的浓度显著升高( $P < 0.05$ ); 养殖液中亚硝态氮的含量只受养殖数量的显著影响( $P < 0.05$ ); 胁迫实验中, 福寿螺养殖液对铜锈环棱螺和福寿螺相对生长率和死亡率的影响存在显著差异( $P < 0.05$ ); 福寿螺表现为减速增长, 铜锈环棱螺表现为负增长, 并且养殖液浓度越高, 对铜锈环棱螺的致死效应越大。本研究表明, 福寿螺可以通过养殖液改变养殖水体的理化性质, 抑制铜锈环棱螺的生长, 并对其具有显著的致死效应, 这可能是导致福寿螺入侵的一个重要机制。本研究不仅丰富了入侵生态学的理论, 也为福寿螺的生态风险评估提供了实验基础。

**关键词** 福寿螺; 养殖液; 铜锈环棱螺; 生态影响; 入侵机制

**Impact of aquaculture liquid from invasive species apple snails (*Pomacea canaliculata*) on water quality and indigenous species *Bellamyia aeruginosa*.** FANG Miao<sup>1,2</sup>, XU Meng<sup>1</sup>, LUO Du<sup>1</sup>, GU Dang-en<sup>1</sup>, YANG Ye-xin<sup>1</sup>, MU Xi-dong<sup>1</sup>, HU Yin-chang<sup>1</sup>, LUO Jian-ren<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup> Pearl River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fishery Resource Application and Cultivation, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510380, China; <sup>2</sup> College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China).

**Abstract:** Using water lettuce (*Pistia stratiotes*), water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and southern naiad (*Najas guadelupensis*) as apple snails' (*Pomacea canaliculata*) food, we determined the temperature, pH, dissolved oxygen and the concentrations of ammonium nitrogen, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, and soluble phosphate of aquaculture liquid at 1, 3, 5, 7, 9 days when different number snails were bred (0, 2, 4, 8, 16, 32). Then, a manipulative experiment was carried out to test the effects of aquaculture liquid of apple snails on the growth and mortality of *Bellamyia aeruginosa* and *P. canaliculata*. It was found that apple snails' breeding numbers and types of feeding food had very significant influence on dissolved oxygen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and soluble phosphate ( $P < 0.01$ ). Dissolved oxygen was significantly decreased with the increase of breeding numbers and cultivation time, while the concentrations of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and dissolved phosphate increased significantly ( $P < 0.05$ ). The nitrite nitrogen concentration was significantly affected only by breeding numbers ( $P < 0.05$ ). In the

manipulative experiment, on base of relative growth and mortality rate, apple snails' aquaculture liquid had significantly different influence on *P. canaliculata* and *B. aeruginosa* ( $P < 0.05$ ); the growth rate of *P. canaliculata* decreased while *B. aeruginosa* had negative growth. Furthermore, the mortality rate of *B. aeruginosa* became greater with the increasing concentration of aquaculture liquid. This study indicates that apple snails can change the physical and chemical properties of breeding water quality through their aquaculture liquid. The aquaculture liquid of *P. canaliculata* can restrain the growth of *B. aeruginosa* and hasten its mortality, which may be an important invasive mechanism of apple snails. Our study not only enriches the theory of invasion ecology, but also possibly provides experimental basis for ecological risk assessment of apple snails.

**Key words:** *Pomacea canaliculata*; aquaculture liquid; *Bellamyia aeruginosa*; ecological influence; invasion mechanism.

生物入侵是 21 世纪五大全球性环境问题之一,入侵物种不仅影响着当地的物种多样性和生态系统功能(Simberloff *et al.*, 2013),而且也威胁着人类健康(McMichael *et al.*, 2000),甚至对入侵地造成严重的经济损失(Pimentel *et al.*, 2005; Xu *et al.*, 2006)。中国是遭受生物入侵最严重的国家之一,外来物种高达 520 种,每年经济损失 500 亿元(万方浩等, 2009)。福寿螺是一种原产于南美洲亚马逊河流域的淡水贝类软体动物,现已成为世界上危害生物多样性、农业生产(Cowie, 2002)和人类健康(Lv *et al.*, 2009)的 100 种恶性外来入侵物种之一,同时也是首批入侵中国 16 种危害较为严重的外来物种之一。因此,探明它的入侵机制,对开展行之有效的防控措施和客观准确的生态风险评估具有重要意义。

外来物种能否成功入侵,主要取决于物种自身的入侵力与生境的可入侵性(Alpert *et al.*, 2000),物种的入侵力取决于该物种自身的生物学特性,而生境的可入侵性则取决于入侵种与入侵地生物及非生物之间的相互作用。福寿螺与本地种相比,不仅具有食量大、食源广而杂、摄食能力和消化能力强的生理特性(Estebenet, 1995; 熊洪林等, 2013; 郭靖等, 2014)以及较强的环境抗逆性,如耐饥饿(Lach *et al.*, 2000)、耐高低温(Mochida, 1991; Wada *et al.*, 2007; 潘颖瑛等, 2008; 董胜张等, 2010; Wada *et al.*, 2011)、耐酸碱(方丽, 2008)、耐低氧、抗干旱(Mochida, 1991; Schnorbach, 1995; Yusa *et al.*, 2006; 湛江华等, 2011)、抗病害(邹纯彬, 1993; 吴鸾玉, 2007; Accorsi *et al.*, 2013);此外,其还具有生长速度快、繁殖能力强(徐建荣等, 2009b)、遗传多样性丰富的繁殖遗传特异性(Tamburi *et al.*, 2011)和快速感知天敌、积极防御的躲避防御响应机制(Carlsson *et al.*, 2004; Yoshie *et al.*, 2008),这些都可能是福寿螺的

入侵策略。福寿螺这种较强的繁殖力、环境适应能力和取食能力,在其入侵过程中,终将与生态位相似的本地种在资源和空间上产生激烈的竞争,并最终占据优势地位,成为入侵种。在此过程中,势必会因食量大、繁殖快而产生大量的排泄物,排泄物可能通过改变局部水环境的理化性质和微生物群落的构成,而导致水质的恶化,影响本地种的生存。本地种铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)是中国最为常见的淡水底栖动物,具有较高的食用和开发利用价值(邓道贵等, 2005),与福寿螺具有相似的生态位,如果福寿螺与铜锈环棱螺对水环境胁迫的耐受性存在差异,那么福寿螺的养殖液可能对福寿螺与铜锈环棱螺的竞争关系产生重要的调节作用,进而使其自身获得更充分的生存空间和食物来源,这可能是福寿螺入侵的一个重要机制。研究表明,福寿螺的成功入侵,使菲律宾当地的一种可食用螺(*Pila luzonica*)的数量急剧下降;Trexler(2011)研究发现,本地螺佛罗里达苹果螺(*Pomacea paludosa*)在与福寿螺的竞争中明显处于劣势地位;甚至也有报道指出,福寿螺能以本地螺为食(Cowie, 1998; Kwong *et al.*, 2009)。这些研究涉及了福寿螺的入侵对水生动物的影响,但并没有给出更深层次的揭示,目前已知的是,福寿螺的养殖液水体呈酸性,总氮、总磷的含量随养殖时间的延长而增大,总细菌的数量显著增加(潘冬丽等, 2014)。本研究结合上述假设和自身野外调查的发现,探究福寿螺入侵的一种可能机制,旨在丰富入侵生态学的理论,也为了给福寿螺的生态风险评估提供实验基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

福寿螺养殖液的收集实验所用的螺全部来自人

工饲养,并且壳色光亮、壳体完好无损,大小为  $8.5 \pm 0.50$  g,统一饥饿处理 2 d。福寿螺养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺的胁迫实验中所用的福寿螺来自同一批次人工孵化的螺,养殖时间近 3 个月,铜锈环棱螺来自珠江水产研究所同一池塘,大小为  $1.42 \pm 0.10$  g。

### 1.2 养殖液的收集实验

福寿螺养殖数量设置为 0、2、4、8、16 和 32 只 6 个梯度,食物种类 3 种,分别为大藻 (*Pistia stratiotes*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*) 和小竹节草 (*Najas guadelupensis*)。实验开始时把螺按照预设养殖数量分别放入事先购买的塑料箱 ( $45 \text{ cm} \times 35 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ ) 中,加自来水至 20 L,每一养殖数量下喂一种食物,每一养殖数量-食物为一个实验单元,每个实验单元重复 3 次,共计  $6 \times 3 \times 3 = 54$  个实验单元。饲喂过程中,每天定时投喂足量食物并及时清理食物残渣,在养殖的第 1、3、5、7 和 9 天,分别测其养殖液中的水体温度、溶氧 (DO) 和 pH,同时采样,在实验室中测养殖液中无机氮磷含量 ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  和  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ )。

### 1.3 胁迫实验

从养殖液收集实验的每个实验单元中取出两份 2 L 的养殖液,分别放入两个 8 L 的塑料箱中,一个里面放入 1 只福寿螺,另一个放入 1 只铜锈环棱螺,组成两个新的实验单元,每个实验单元重复 5 次,共计  $5 \times 3 \times 2 \times 5 = 150$  个实验单元,设立对照组 (添加养殖液收集实验中福寿螺养殖数量为 0 的实验单元中的自来水),整个胁迫实验过程中,每天投喂适量小颗粒鱼饲料并及时清理剩余食物,分别记录福寿螺和铜锈环棱螺在胁迫第 5、15 和 25 天的生长和死亡情况。

### 1.4 测定方法

实验中螺的重量用电子天平称量 (精确到 0.01 g),溶氧 (DO) 和 pH 用上海三信仪表厂生产的 SX836 型 pH/溶解氧测量仪测得; $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  的测定用钼锑抗分光光度法, $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  的测定用紫外分光光度法, $\text{NO}_2^- \text{-N}$  的测定用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法。

$$\text{相对生长率}(\%) = [(m_1 - m_0) / m_0] \times 100\%$$

式中, $m_1$ 代表不同养殖天数下福寿螺或铜锈环棱螺的体质量, $m_0$ 指的是它们的起始体质量。

### 1.5 数据分析

采用重复测量方差分析 (repeated measures ANOVA) 检验福寿螺在饲喂不同食物下养殖液中理

化指标在不同养殖天数间的动态变化,分析福寿螺养殖液对两种螺相对生长率的影响;运用 Logistic 回归检验了福寿螺养殖液对两种螺的致死效应,统计分析采用 SPSS 18.0,  $\alpha = 0.05$  为显著水平,作图采用 SigmaPlot 12.5。

## 2 结果与分析

### 2.1 福寿螺养殖液中温度、溶氧和 pH 的动态

福寿螺养殖液的收集实验中,不同养殖天数间养殖液的温度存在显著差异 (图 1)。第 1 天和第 3 天都在  $30^\circ\text{C}$  以下,差异不显著;第 5 天突破  $30.5^\circ\text{C}$ ,显著差异于前 3 天;第 7 天出现最大值,与其他各天数间差异显著,第 9 天降至  $29^\circ\text{C}$  以下,显著低于其他天数。整个养殖液收集阶段,水温呈现出先升高后降低的趋势。

福寿螺养殖数量与所饲喂的食物种类对其养殖液中溶氧存在极显著的影响,它们之间的交互作用也对溶氧影响显著 (表 1, 图 2A、2B、2C)。不同食物、不同养殖数量下的溶氧在各天数间存在显著差异;其中饲喂大藻的福寿螺养殖液中的溶氧在第 9 天的 5 次测量中变化范围为 ( $0.24 \sim 4.36 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); 在第 1 天和第 3 天的测量中,养殖数量 16 和 32 只之间都没有显著差异 ( $P = 0.868, P = 0.054$ ),养殖数量 2 和 4 之间的溶氧在第 1 天的差异也不显著 ( $P = 0.079$ ); 在第 5、7、9 天各养殖数量之间差异极显著 ( $P = 0.003$ ); 在第 9 天,养殖数量为 32 只的养殖液中溶氧仅为  $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。饲喂凤眼莲的养殖液中溶氧变化范围为 ( $0.17 \sim 4.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ); 在第 3 天和第 5 天,养殖数量为 16 和 32 只中的溶氧差异均不显著 ( $P = 0.156, P = 0.692$ ); 在第 9 天,养殖数

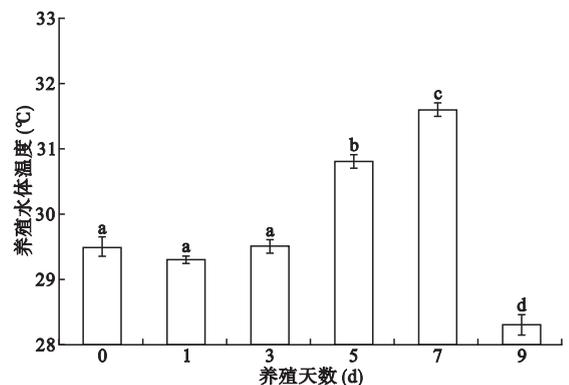


图 1 不同养殖天数下福寿螺养殖水体的温度变化  
Fig.1 Temperature variation of apple snails' aquaculture water in different breeding days

量 8 和 16 只, 16 和 32 只之间没有显著差异 ( $P=0.076, P=0.217$ ), 养殖数量 32 只中的溶氧仅为  $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。饲喂小竹节草的养殖液中溶氧变化为  $(0.18 \sim 3.73 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ ; 在第 3 天和第 9 天, 养殖数量 8 和 16 只之间的溶氧差异不显著 ( $P=0.231, P=0.628$ ); 在第 7 天, 养殖数量 16 和 32 只之间溶氧差异不显著 ( $P=0.782$ ); 在第 9 天, 养殖数量 32 只中的溶氧是  $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

饲喂大藻的福寿螺养殖液在养殖数量为 2、4 和 8 只时, 不同天数下的 pH 均大于 7, 呈弱碱性; 在养殖数量为 16 和 32 只时, 不同天数下均小于 7, 呈弱酸性。饲喂凤眼莲和小竹节草的福寿螺养殖液在养殖数量为 2 只时, 不同天数下的 pH 均大于 7, 呈弱碱性; 在养殖数量为 4、8、16 和 32 只时, 不同天数下均小于 7, 凤眼莲最低至 6.27, 小竹节草最低至 6.4, 呈弱酸性 (图 2D、2E、2F)。

## 2.2 福寿螺养殖液中无机氮磷的动态

### 2.2.1 福寿螺养殖液中铵态氮变化

福寿螺养殖液中铵态氮含量在不同食物种类和螺养殖数量下存在极显著差异, 且它们的交互作用也显著影响铵态氮的变化 (表 1)。福寿螺养殖液中铵态氮含量在不同养殖数量和养殖天数间呈现出不断升高的趋势。同一食物, 相同天数的铵态氮含量在不同养殖数量间存在显著差异; 同一食物, 福寿螺养殖数量为 2 和 4 只的养殖液中铵态氮含量在相同养殖天数间差异不显著, 而在养殖数量为 8、16 和 32 只间差异显著 (图 3A、3B、3C)。饲喂大藻的养殖液中铵态氮在相应养殖数量下第 1 天最低 ( $0.50 \sim 2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 第 9 天最高 ( $0.10 \sim 14.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。饲喂凤眼莲和小竹节草的最大值分别出现在养殖数量为 32 只的第 7 天和第 5 天, 大小分别为  $20.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $11.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

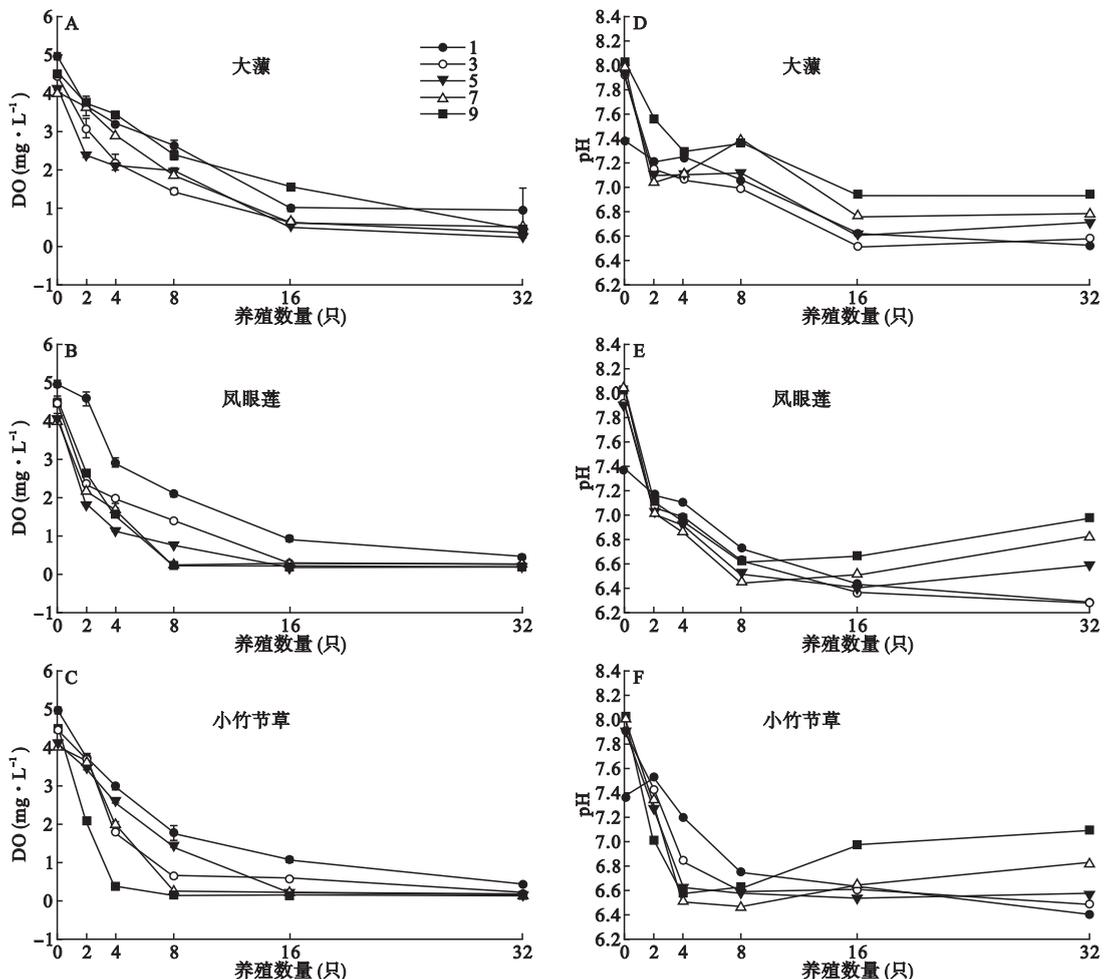


图 2 福寿螺养殖液中溶氧和 pH 的变化

Fig.2 Variation of dissolved oxygen and pH in apple snails' aquaculture liquid

A、D 表示以大藻为食源时, 福寿螺养殖液中溶氧和 pH 在不同天数间的动态变化; B、E 表示以凤眼莲为食源时, 福寿螺养殖液中溶氧和 pH 在不同天数间的动态变化; C、F 表示以小竹节草为食源时, 福寿螺养殖液中溶氧和 pH 在不同天数间的动态变化。

表 1 福寿螺养殖液中溶氧、无机氮磷和福寿螺与铜锈环棱螺相对生长率的重复测量方差分析

Table 1 Repeated measures ANOVA for dissolved oxygen, inorganic nitrogen, phosphorus in apple snails' aquaculture liquid and relative growth rate of *Pomacea canaliculata* and *Bellamya aeruginosa*

参数	变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
溶氧	食物种类	33.722	2	16.861	1505.456	0.000
	螺养殖数量	236.521	4	59.130	5279.494	0.000
	食物种类 × 螺养殖数量	27.461	8	3.433	306.486	0.000
铵态氮	食物种类	70.953	2	35.477	30.239	0.000
	螺养殖数量	2152.430	4	538.108	458.671	0.000
	食物种类 × 螺养殖数量	210.423	8	26.303	22.420	0.000
亚硝态氮	食物种类	0.021	2	0.010	2.335	0.114
	螺养殖数量	14.143	4	3.536	794.591	0.000
	食物种类 × 螺养殖数量	1.255	8	0.157	35.242	0.000
硝态氮	食物种类	1.713	2	0.857	26.787	0.000
	螺养殖数量	350.059	4	87.515	2736.761	0.000
	食物种类 × 螺养殖数量	4.234	8	0.529	16.552	0.000
溶解性磷酸盐	食物种类	53.958	2	26.979	167.742	0.000
	螺养殖数量	304.053	4	76.013	472.609	0.000
	食物种类 × 螺养殖数量	20.974	8	2.622	16.300	0.000
相对生长率	食物种类	0.005	2	0.003	0.517	0.598
	螺种类	1.933	1	1.933	378.382	0.000
	螺养殖数量	0.187	5	0.037	7.320	0.000
	食物种类 × 螺种类	0.031	2	0.015	3.002	0.053
	食物种类 × 螺养殖数量	0.035	10	0.003	0.684	0.738
	螺养殖数量 × 螺种类	0.103	5	0.021	4.015	0.002
	食物种类 × 螺养殖数量 × 螺种类	0.046	10	0.005	0.902	0.533

**2.2.2 福寿螺养殖液中亚硝态氮变化** 福寿螺养殖液中亚硝态氮含量在不同福寿螺养殖数量下存在极显著的差异,食物种类对其含量没有显著的影响,但食物种类与螺养殖数量的交互作用对其影响显著(表 1)。福寿螺养殖液中的亚硝态氮含量在养殖数量为 2 和 4 只时,相同天数间差异不显著,而在养殖数量为 8、16 和 32 只间差异显著。饲喂大藻的养殖液在养殖数量为 8 只,第 9 天时,亚硝态氮含量出现最大值  $1.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,随着养殖数量升高呈先升高后降低的变化趋势。饲喂风眼莲和小竹节草的福寿螺养殖液在养殖数量为 32 只,第 9 天时,出现最大值,分别为  $1.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,整体随着养殖数量升高呈上升趋势(图 3D、3E、3F)。

**2.2.3 福寿螺养殖液中硝态氮变化** 福寿螺养殖液中硝态氮含量在不同食物和螺养殖数量下存在极显著的差异,它们的交互作用对其含量也有显著的影响(表 1)。随着养殖天数和福寿螺养殖数量的增加,养殖液中硝态氮的含量整体呈上升趋势。饲喂大藻和小竹节草的养殖液中硝态氮含量在养殖数量为 2 和 4 只时,相同养殖天数间差异不显著,其他各养殖数量,相同天数间差异显著。饲喂风眼莲的养殖液中硝态氮在养殖数量为 2 和 4 只时,养殖第 1、

3、5 天间的含量差异显著,第 7 天与第 9 天,差异不显著。在第 9 天,饲喂大藻、风眼莲和小竹节草的养殖液中硝态氮含量随养殖数量的变化范围分别为  $(0.59 \sim 3.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ 、 $(0.25 \sim 4.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$  和  $(0.17 \sim 4.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1})$ ,养殖数量 32 只中硝态氮含量分别是养殖数量 2 只中的 6.15 倍、18 倍和 28.35 倍(图 3G、3H、3I)。

**2.2.4 福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐变化** 福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐含量在不同食物和螺养殖数量下存在极显著的差异,它们的交互作用对其含量也存在显著影响(表 1)。福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐在养殖数量为 2 和 4 只,养殖的第 3、5、7 和 9 天间的差异均不显著;饲喂的 3 种食物中,均随着螺的养殖数量和养殖天数的增加而增大(图 4),溶解性磷酸盐含量均在第 9 天、养殖数量为 32 只的养殖液中出现最大值,分别为  $5.56$ 、 $9.36$  和  $8.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

**2.3 福寿螺养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺的影响**  
**2.3.1 福寿螺养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺相对生长率的影响** 福寿螺与铜锈环棱螺的相对生长率受它们的种属差异和养殖液浓度的抑制作用显著,并且也受到养殖液浓度与螺种类的交互作用的显著影响,但与饲喂何种食物所得的养殖液的影响不显

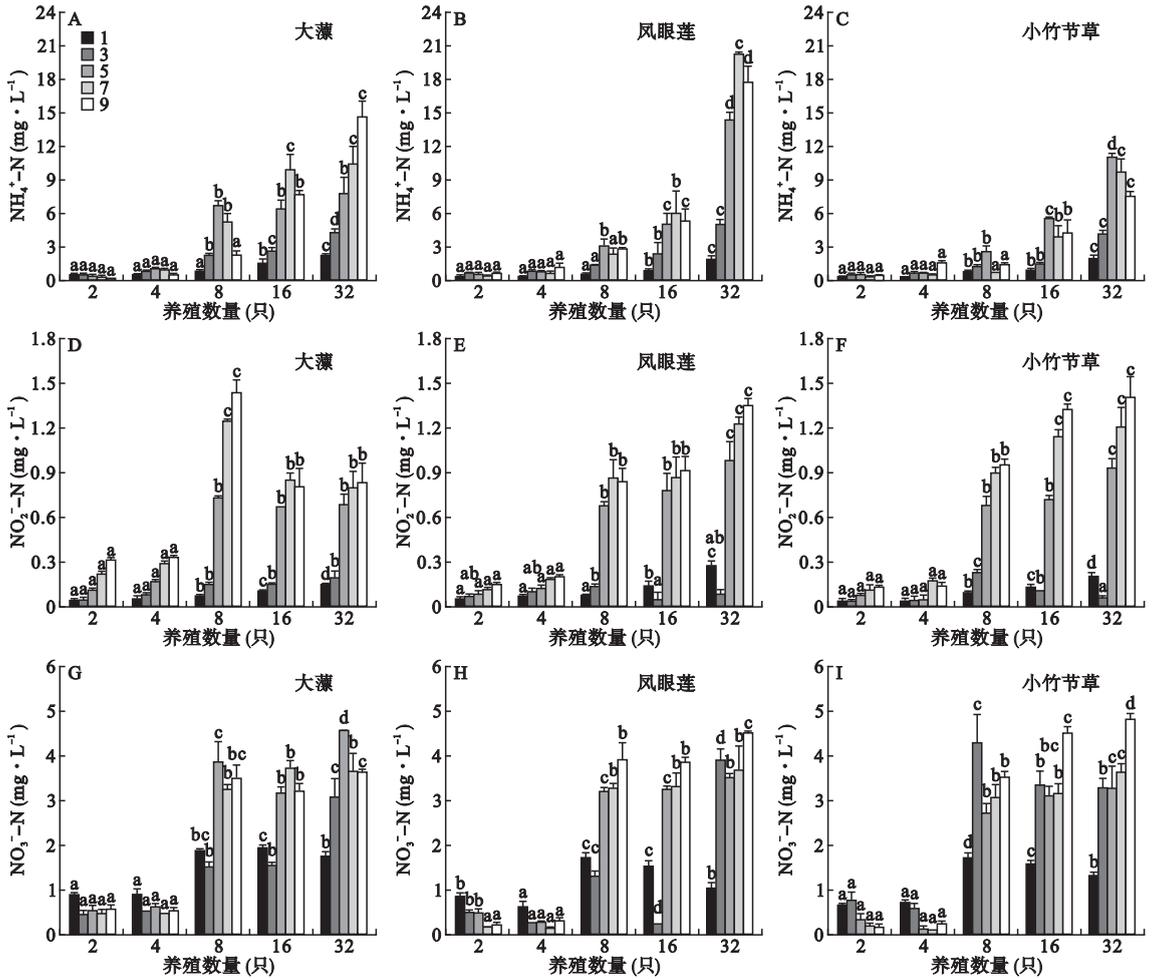


图3 福寿螺养殖液中无机氮素的变化

Fig.3 Variation of inorganic nitrogen forms in apple snails' aquaculture liquid

A、D、G表示以大藻为食源,福寿螺养殖液中铵态氮、亚硝态氮和硝态氮在不同养殖天数间的变化;B、E、H表示以凤眼莲为食源,福寿螺养殖液中铵态氮、亚硝态氮和硝态氮在不同养殖天数间的变化;C、F、I表示以小竹节草为食源,福寿螺养殖液中铵态氮、亚硝态氮和硝态氮在不同养殖天数间的变化;不同小写字母表示在同一食物,相同天数下,不同养殖数量间各种N素差异显著。

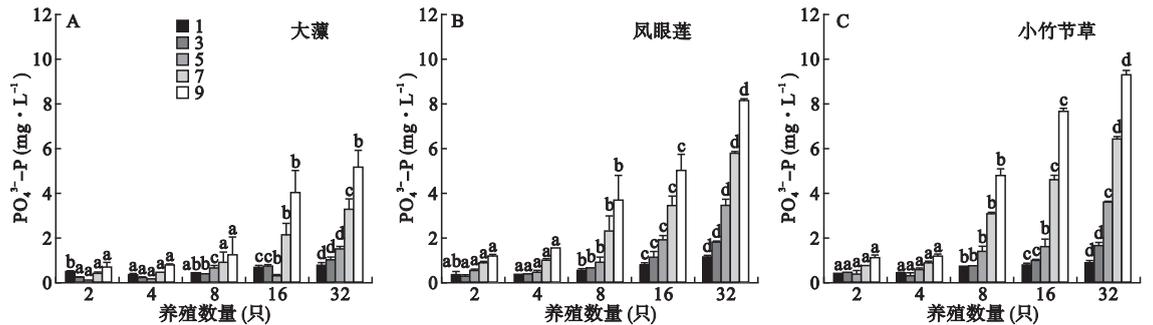


图4 福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐的变化

Fig.4 Variation of soluble phosphate in apple snails' aquaculture liquid

A表示以大藻为食源,福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐在不同养殖天数间的变化;B表示以凤眼莲为食源,福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐在不同养殖天数间的变化;C表示以小竹节草为食源,福寿螺养殖液中溶解性磷酸盐在不同养殖天数间的变化;不同小写字母表示在同一食物,相同天数下,不同养殖数量间溶解性磷酸盐差异显著。

著(表1)。相同天数下,福寿螺的相对生长率整体均随着福寿螺养殖液浓度的升高而降低,且相对生

长率均为正值(图5A、5B、5C);铜锈环棱螺的相对生长率在不同养殖液浓度和不同胁迫天数间几乎均

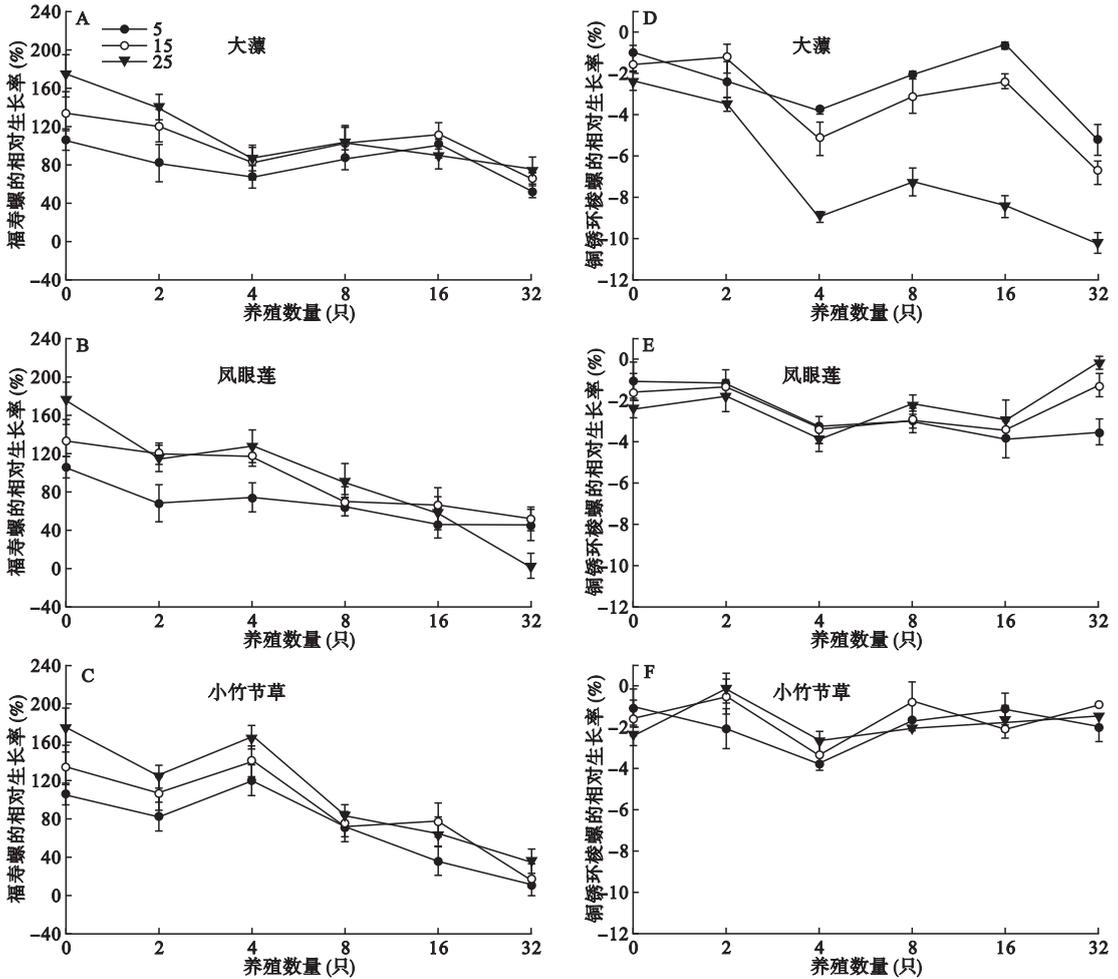


图 5 不同浓度的福寿螺养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺相对生长率的影响  
 Fig.5 Effects of different concentration apple snails' aquaculture liquid on relative growth rate of *Pomacea canaliculata* and *Bellamya aeruginosa*

为负值,饲喂大藻的福寿螺养殖液中铜锈环棱螺的相对生长率随浓度的升高而波动较大,各胁迫天数间的差异相对较大(图 5D),而饲喂凤眼莲和小竹节草的福寿螺养殖液中铜锈环棱螺的相对生长率随浓度的升高变化相对不大(图 5E、5F)。

**2.3.2 福寿螺养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺的致死效应** 采用逻辑斯蒂回归检验了不同食物、不同养殖数量下福寿螺养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺的致死效应。结果发现,养殖液对福寿螺与铜锈环棱螺的致死效应存在极显著差异( $\chi^2 = 6.688, d.f. = 1, P = 0.01$ ),并且这种差异受养殖液浓度的影响显著( $\chi^2 = 10.737, d.f. = 4, P = 0.03$ ),但与何种食物饲喂所得的养殖液没有显著关系( $\chi^2 = 1.633, d.f. = 2, P = 0.442$ )。福寿螺养殖液在第 5 天时对福寿螺与铜锈环棱螺的致死率为零,在第 15、25 天时对福寿螺的致死率随养殖液浓度的升高呈降低趋势,对铜

表 2 福寿螺养殖液对福寿螺和铜锈环棱螺的致死效应  
 Table 2 Lethal effects of apple snails' aquaculture liquid on *Pomacea canaliculata* and *Bellamya aeruginosa*

螺的种类	天数 (d)	不同养殖数量下福寿螺与铜锈环棱螺的累积致死率 (%)					
		0 只	2 只	4 只	8 只	16 只	32 只
福寿螺	5	0	0	0	0	0	0
	15	0	0.61	1.50	3.65	8.60	18.92
	25	0	1.27	2.00	3.14	4.91	7.59
铜锈环棱螺	5	0	0	0	0	0	0
	15	0	2.51	6.01	13.69	28.25	49.43
	25	0	12.50	18.51	26.54	36.49	47.75

锈环棱螺的致死率呈上升趋势(表 2)。

### 3 讨论

温度、溶氧和 pH 作为重要的环境因子,可以直接或间接调节水环境的理化性质和微生物的群落构成,影响水生生物的生长发育、繁殖和存活等(王银

东等,2005)。福寿螺和铜锈环棱螺在温度、溶氧和pH方面的耐受能力差异较大。有研究表明,福寿螺幼螺在36℃的高温下处理21天仍有50%的存活率,在6℃的低温下可存活2~7d(潘颖璞等,2008),福寿螺成螺可通过发达的腹足爬行至深水区或躲藏至阴凉处,甚至可进行夏眠来应对高温,也可躲入泥中进行冬眠来应对低温;本地种铜锈环棱螺的最适生长温度为25℃,温度对其摄食率、消化率和吸收效率影响较大(孙陆宇等,2012),铜锈环棱螺可以通过冬眠来应对低温,由于两种螺种属的差异和生活环境的不同,在低温条件下,铜锈环棱螺更具有生存优势(曹正光等,1998),这可能就是福寿螺不能继续向北扩散的原因之一。有报道指出,福寿螺外套腔内有栉鳃,且部分外套腔特化成肺囊,造就了其两栖的特性(Andrews,1965),因而福寿螺在溶氧趋于0时仍能存活;铜锈环棱螺仅通过瓣腮进行呼吸,且运动能力较弱,当局部水环境发生变化时,不能快速应对,这可能就是铜锈环棱螺喜欢攀附在池塘壁上和喜欢栖息于草型湖泊中的原因。有研究表明,福寿螺在偏酸或偏碱的环境中都能生存,甚至在pH为2.5和pH为11.5的强酸强碱环境中,仍能存活4~8d(方丽,2008);铜锈环棱螺在pH为5~6时,体重和体长增长缓慢,pH为5时,增长率几乎为零,pH为3时,几小时内便死亡(刘保元,1993)。

本研究发现,在福寿螺养殖液的收集阶段,养殖水体温度在28~32℃,这一温度范围是福寿螺摄食、生长的适宜温度,因此不再考虑各养殖天数间水温差异对福寿螺养殖液浓度的影响;整个实验过程中水温在30℃左右,在胁迫实验阶段,这一温度不适宜于铜锈环棱螺的摄食和生长,这可能就是两种螺相对生长率差异显著的原因之一。3种食物和5个福寿螺养殖数量对养殖液中溶氧含量的影响差异显著,一方面可能是由于福寿螺对3种食物的取食偏好和消化吸收等方面存在差异以及随着福寿螺养殖数量的增大,用于摄食和消化等方面的耗氧增多;另一方面可能是由于养殖液中有机物的含量随着养殖天数的延长而增加,导致养殖水体中微生物总量的增加,微生物分解有机物消耗养殖水体中大量的溶解氧,这可能就是溶氧含量很低的主要原因;两种螺呼吸系统和运动能力的差异可能是导致在实验中相对生长率差异显著的又一重要原因。随着福寿螺养殖数量的增加,不论饲喂何种食物,养殖液都呈弱

酸性,虽不至于对铜锈环棱螺有急性的致死效应,但却不利于其生长和繁殖,这也可能就是在野外福寿螺比较密集的地方,铜锈环棱螺的数量较少甚至为零的原因之一。较高的水温,偏低的溶氧,酸性的水质都不利于铜锈环棱螺的摄食、生长和繁殖,致使其出现负增长,甚至死亡,最终导致铜锈环棱螺种群的衰退,而环境耐受性强的福寿螺获得更多的资源和空间用于扩大种群,这可能是福寿螺的入侵策略之一。

本研究还发现,福寿螺养殖液中无机氮磷含量受饲喂的食物种类和福寿螺的养殖数量的影响显著。究其原因可能是因为各食物间的干物质和营养元素含量不同,福寿螺对其取食产生了选择偏爱性;也可能是由于福寿螺的消化酶活性较高,各种酶之间存在协同作用(罗明珠等,2015),对食物的消化吸收程度不同,导致养殖液中氮磷的含量不同;同时福寿螺喜欢取食干物质和含氮量较高的食物,尤其喜欢先取食植物较幼嫩的部分(Wong,2010);这些可能就是福寿螺取食量大、生长速度快,繁殖能力强和容易造成水质恶化的主要原因。本研究发现,福寿螺养殖液中无机氮磷的含量远远超出了导致水体富营养化的水平,且在养殖的第9天,养殖数量为8、16和32只时,养殖水体变得浑浊、发黑、发臭,溶氧趋近于零,水质已经严重恶化。这与章家恩等(2010)的研究结果相一致;与Carlsson(2004,2006)在湿地系统中,福寿螺的取食会导致水体由“澄清态”变为“浑浊态”和福寿螺取食大量水生植物,容易导致水体富营养化,造成水质下降的研究相类似;但与Fang等(2010)的福寿螺对水体营养盐影响的研究存在差异。究其原因可能是,因为前者是室内控制实验,后者是野外实验,且两报道实验所用福寿螺存在规格和养殖数量的差异。水质恶化的水体中,福寿螺具有较强的耐污性,而铜锈环棱螺,虽有报道称其具有净化水质的作用,但需要的螺数量大并且需要大型水生植物的配合。究其原因,一方面可能是,铜锈环棱螺的去污能力有限和污水中夜晚溶氧较低,需要有水生植物白天产的氧用于呼吸;另一方面,铜锈环棱螺的繁殖需要把卵产在水草或水生植物上,因此在福寿螺比较密集的地方和藻型湖泊不适宜铜锈环棱螺的生存和种群的扩大。有研究表明,富营养化水体中,环棱螺的种群数量随总氮、硝态氮、总磷和溶解性磷浓度的升高而降低(邓道贵等,2005);底栖动物的种类和物种多样性与水体污染程度呈负相关关系(龚志军等,2001;熊金林

等,2003);细菌数目随营养化水平的增加而增大,细菌群落多样性随水体营养水平增加而降低(冯胜等,2007)。因此可以推断,福寿螺与铜锈环棱螺的相对生长率和致死率之间存在的显著差异,说明福寿螺的确可以通过其养殖液使养殖水体恶化,导致铜锈环棱螺的死亡,而使自己获得更多的空间和资源,这一发现可能就是福寿螺的入侵机制之一。

后续的研究将从以下几个方面展开:第一,探究养殖液中到底是哪一种或几种成分对铜锈环棱螺产生显著的致死效应;第二,探究铜锈环棱螺对微生物的抗性,尤其是对酵母菌等真菌的抗性;第三,进行系统的野外调查,在福寿螺重灾区,重点调查福寿螺与铜锈环棱螺的种群数量,同一生境下,水生植物种类、水体的理化性质和大尺度下,温度对两种螺地理分布的影响。

#### 参考文献

曹正光,蒋忻坡. 1998. 几种环境因子对梨形环棱螺的影响. 上海水产大学学报, **7**(3): 200-205.

湛江华,姚冬明,刘芳睿,等. 2011. 福寿螺卵和幼螺抗逆性的初步研究. 浙江农业科学, (4): 902-905.

邓道贵,李洪远,李洪远,等. 2005. 巢湖富营养化对河蚬和环棱螺分布及种群养殖数量影响. 应用生态学报, **16**(8): 1502-1506.

董胜张,白旭,潘颖瑛,等. 2010. 温度胁迫对我国不同地理种群福寿螺生长及存活的影响. 湖北农业科学, **49**(11): 2878-2882.

方丽. 2008. 南方稻田福寿螺种群发生动态及其生态控制研究(硕士学位论文). 广州:华南农业大学.

冯胜,秦伯强,高光. 2007. 细菌群落结构对水体富营养化的响应. 环境科学学报, **27**(11): 1823-1829.

龚志军,谢平,唐汇涓,等. 2001. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. 水生生物学报, **25**(3): 210-216.

郭靖,章家恩. 2014. 福寿螺入侵机制的研究进展. 生态学杂志, **33**(3): 806-815.

刘保元. 1993. 酸性水对淡水螺类存活、生长与繁殖的影响. 应用生态学报, **4**(3): 313-318.

罗明珠,章家恩,胡九龙,等. 2015. 福寿螺和田螺的消化酶活性比较研究. 生态学报, **35**(11): 1828-1832.

潘冬丽,张家辉,龙俊,等. 2014. 福寿螺对水体环境与水体微生物的影响. 中国生态农业学报, **22**(1): 58-62.

潘颖瑛,董胜张,俞晓平. 2008. 温度胁迫对福寿螺生长、摄食及存活的影响. 植物保护学报, **35**(3): 239-244.

孙陆宇,温晓蔓,禹娜,等. 2012. 温度和盐度对中华圆田螺和铜锈环棱螺标准代谢的影响. 中国水产科学, **19**(2): 275-282.

万方浩,郭建英,张峰. 2009. 中国生物入侵研究. 北京:科学出版社.

王银东,熊邦喜,陈才保,等. 2005. 环境因子对底栖动物生命活动的影响. 浙江海洋学院学报:自然科学版, **24**(3): 60-64, 87.

吴鸾玉. 2007. 杀螺剂对螺类的影响和福寿螺抗菌活性物质的研究(硕士学位论文). 福州:福建师范大学.

熊洪林,张娅,陈麟,等. 2013. 福寿螺消化系统的性别差异及摄食行为观察. 重庆师范大学学报:自然科学版, **30**(4): 22-25.

熊金林,梅兴国,胡传林. 2003. 不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较. 湖泊科学, **15**(2): 160-168.

徐建荣,韩晓磊,张磊. 2009b. 不同地区福寿螺繁殖力比较. 湖北农业科学, **48**(12): 3105-3107.

章家恩,赵本良,罗明珠,等. 2010. 外来生物福寿螺入侵的生态风险及其评价探讨. 佛山科学技术学院学报:自然科学版, **28**(5): 1-6.

邹纯彬. 1993. 螺类感染蠕虫幼虫后的病理损害. 动物学杂志, **28**(1): 54-58.

Accorsi A, Bucci L, Eguileor M, et al. 2013. Comparative analysis of circulating hemocytes of the freshwater snail *Pomacea canaliculata*. *Fish & Shellfish Immunology*, **34**: 1260-1268.

Alpert P, Bone E, Holzapfel C. 2000. Invasiveness, invasibility and the role of environmental stress in the spread of non-native plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **3**: 52-66.

Andrews EB. 1965. The functional anatomy of the mantle cavity, kidney and blood system of some pilid gastropods (Prosobranchia). *Journal of Zoology*, **146**: 70-94.

Carlsson N, Kestrup A, Martensson M, et al. 2004. Lethal and non-lethal effects of multiple indigenous predators on the invasive golden apple snail (*Pomacea canaliculata*). *Freshwater Biology*, **49**: 1269-1279.

Carlsson NOL, Brönmark C. 2006. Size-dependent effects of an invasive herbivorous snail (*Pomacea canaliculata*) on macrophytes and periphyton in Asian wetlands. *Freshwater Biology*, **51**: 695-704.

Cowie RH. 1998. Patterns of introduction of non-indigenous non-marine snails and slugs in the Hawaiian Islands. *Biodiversity & Conservation*, **7**: 349-368.

Cowie RH. 2002. Apple Snails (Ampullariidae) as Agricultural Pests: Their Biology, Impacts and Management. Wallingford UK: CABI Publishing.

Estebenet AL. 1995. Food and feeding in *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae). *The Eliger*, **38**: 277-283.

Fang L, Wong PK, Lin L, et al. 2010. Impact of invasive apple snails in Hong Kong on wetland macrophytes, nutrients, phytoplankton and filamentous algae. *Freshwater Biology*, **55**: 1191-1204.

Kwong KL, Chan RKY, Qiu JW. 2009. The potential of the invasive snail *Pomacea canaliculata* as a predator of various life-stages of five species of freshwater snails. *Malacologia*, **51**: 343-356.

Lach L, Britton DK, Rundell RJ, et al. 2000. Food preference

- and reproductive plasticity in an invasive freshwater snail. *Biological Invasions*, **2**: 279–288.
- Lv S, Zhang Y, Liu HX, *et al.* 2009. Invasive snails and an emerging infectious disease: Results from the first national survey on *Angiostrongylus cantonensis* in China. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, **3**: e368.
- McMichael AJ, Beaglehole R. 2000. The changing global context of public health. *The Lancet*, **356**: 495–499.
- Mochida O. 1991. Spread of freshwater Pomacea snails (Piliidae, Mollusca) from Argentina to Asia. *Micronesica*, **3**: 51–62.
- Pimentel D, Zuniga R, Morrison D. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, **52**: 273–288.
- Schnorrbach HJ. 1995. The golden apple snail (*Pomacea canaliculata* Lamarck), an increasingly important pest in rice and methods of control with Bayluscid. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer*, **48**: 313–346.
- Simberloff D, Martin JL, Genovesi P, *et al.* 2013. Impacts of biological invasions: What's what and the way forward. *Trends in Ecology & Evolution*, **28**: 58–66.
- Tamburi NE, Martín PR. 2011. Effects of food availability on reproductive output, offspring quality and reproductive efficiency in the apple snail *Pomacea canaliculata*. *Biological Invasions*, **13**: 2351–2360.
- Trexler CM. 2011. Biology, Ecology and Control of the Invasive Channeled Apple Snail, *Pomacea canaliculata*. Florida: University of Central Florida Orlando.
- Wada T, Matsukura K. 2007. Seasonal changes in cold hardiness of the invasive freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarck) (Gastropoda: Ampullariidae). *Malacologia*, **49**: 383–392.
- Wada T, Matsukura K. 2011. Linkage of cold hardiness with desiccation tolerance in the invasive freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda: Ampullariidae). *Journal of Molluscan Studies*, **77**: 149–153.
- Wong PK, Liang Y, Liu NY, *et al.* 2010. Palatability of macrophytes to the invasive freshwater snail *Pomacea canaliculata*: Differential effects of multiple plant traits. *Freshwater Biology*, **55**: 2023–2031.
- Xu H, Ding H, Li M, *et al.* 2006. The distribution and economic losses of alien species invasion to China. *Biological Invasions*, **8**: 1495–1500.
- Yoshie H, Yusa Y. 2008. Effects of predation on the exotic freshwater snail *Pomacea canaliculata* (Caenogastropoda: Ampullariidae) by the indigenous turtle *Chinemys reevesii* (Testudines: Geoemydidae). *Applied Entomology and Zoology*, **43**: 475–482.
- Yusa Y, Wada T, Takahashi S. 2006. Effects of dormant duration, body size, self-burial and water condition on the long-term survival of the apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae). *Applied Entomology and Zoology*, **41**: 627–632.

---

作者简介 房苗,男,1989年生,硕士研究生,主要研究方向为水生生物入侵生态学。E-mail: fangmiao1989@163.com  
责任编辑 李凤芹

---