

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

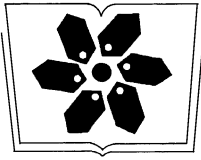
## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期      2012 年 3 月 (半月刊)

## 目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征 .....	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应 .....	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响 .....	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例 .....	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化 .....	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析 .....	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征 .....	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性 .....	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响 .....	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响 .....	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性 .....	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征 .....	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究 .....	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数 .....	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性 .....	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响 .....	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响 .....	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征 .....	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机腐熟度 .....	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析 .....	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素 .....	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究 .....	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响 .....	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力 .....	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法 .....	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹 .....	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例 .....	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例 .....	邓晓红, 徐中民 (1587)
<b>专论与综述</b>	
台风对森林的影响 .....	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展 .....	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展 .....	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义 .....	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展 .....	黎慧娟, 彭静静 (1633)
<b>问题讨论</b>	
锡林郭勒盟生态脆弱性 .....	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
<b>研究简报</b>	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布 .....	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



**封面图说:** 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011251676

赵本良, 章家恩, 罗明珠, 宋春秀. 福寿螺的过冷却研究. 生态学报, 2012, 32(5): 1538-1545.

Zhao B L, Zhang J E, Luo M Z, Song C X. Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1538-1545.

## 福寿螺的过冷却研究

赵本良<sup>1,2,3</sup>, 章家恩<sup>1,2,3,\*</sup>, 罗明珠<sup>1</sup>, 宋春秀<sup>1</sup>

(1. 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642; 2. 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642;  
3. 广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 福寿螺是 IUCN 认定的世界 100 种恶性外来入侵物种之一, 在华南地区已对水稻生产造成严重危害。福寿螺属于热带软体动物, 采用万用电表联接热敏电阻法研究了福寿螺在低温胁迫下的过冷却点, 并探讨了不同个体福寿螺在过冷却发生后的死亡率和体内组织损伤。结果表明: 1) 各种螺高的福寿螺冷却点均值为  $-6.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 范围在  $-6.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $-7.32\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 恢复最高体温均值为  $-4.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 范围在  $-3.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $-4.93\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 过冷却后维持时间均值为  $45.97\text{ min}$ , 范围在  $18.60\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $75.34\text{ min}$ ; 2) 福寿螺的过冷却点大小受螺高影响, 螺高  $35\text{ mm} \leq H < 45\text{ mm}$  的福寿螺过冷却点显著高于  $5\text{ mm} \leq H < 15\text{ mm}$ 、 $15\text{ mm} \leq H < 25\text{ mm}$ 、 $25\text{ mm} \leq H < 35\text{ mm}$  体型的福寿螺,  $5\text{—}35\text{ mm}$  螺高的福寿螺过冷却点变化稳定; 3) 福寿螺在发生过冷却阶段的死亡率在  $23.33\%$ — $36.67\%$  之间, 不同体型的福寿螺之间没有显著性差异; 4) 过冷却后福寿螺死亡率随暴露时间的延长而提高, 0 到 15 min 内由  $20.9\%$  提高到  $100\%$ , 过冷却后暴露时间对福寿螺死亡率影响较大; 5) 发生过冷却 15 min 后取出的福寿螺, 染色后其外套膜有少量红色出现, 而肾部和消化腺部未呈现明显红色, 低温胁迫已经对福寿螺组织造成了显著损伤。本研究结果对于进一步探索福寿螺的生态适应性、扩散北界及福寿螺的越冬机制有一定参考价值。

**关键词:** 福寿螺; 低温胁迫; 过冷却点; 死亡率; TTC

### Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*)

ZHAO Benliang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jia'en<sup>1,2,3,\*</sup>, LUO Mingzhu<sup>1</sup>, SONG Chunxiu<sup>1</sup>

1 Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangdong, Guangzhou 510642, China

2 Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Guangzhou 510642, China

3 Key Laboratory of Agro-ecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

**Abstract:** The golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) is considered one of the 100 worst invasive alien species by the Invasive Species Specialist Group of the International Union for Conservation of Nature. The golden apple snail was introduced into China around 1980 from South America for commercial purposes. However, it proved to be a failure on the market over the next few years. Consequently, golden apple snails were disposed of into rivers, canals and paddy fields. Since then, *P. canaliculata* has resulted in massive rice production losses in South China. Although *P. canaliculata* is a tropical mollusk species, its cold-hardiness has been reported recently in some studies. Supercooling point is an important index for reflecting the resistance of many creatures including mammals, insects and molluscs in low temperature environments. According to many studies, molluscs also exhibit diverse physiological responses to low temperature environments. However, no studies on supercooling points and physiological responses were performed on *P. canaliculata* from South China to low temperature stress. In this study, supercooling points of *P. canaliculata* from South China were

**基金项目:** 国家自然科学基金(30770403, 30900187, U1131006); 广东省科技计划项目(2007B020709007); 广东现代农业产业技术体系建设专项(粤农[2009]380号); 广东省高等学校高层次人才项目(粤教师函[2010]79号)

收稿日期: 2010-11-25; 修订日期: 2011-11-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jeanzh@scau.edu.cn

determined using a device composed of multimeter determination connected with thermistors. Moreover, mortalities and organ injuries to *P. canaliculata* of different shell heights during supercooling periods were studied. Results showed that the mean value of supercooling points of snails of different heights was  $-6.96^{\circ}\text{C}$ , ranging from  $-6.21^{\circ}\text{C}$  to  $-7.32^{\circ}\text{C}$ . The mean value of maximum body temperature in recovery stage was  $-4.07^{\circ}\text{C}$ , ranging from  $-3.07^{\circ}\text{C}$  to  $-4.93^{\circ}\text{C}$ ; the mean supercooling time of *P. canaliculata* of different heights was 45.97 min, ranging from 18.60 min to 75.34 min. Change in the supercooling point value correlated with the height of *P. canaliculata*, and the supercooling point of snails with a height of  $35\text{ mm} \leq H < 45\text{ mm}$  was significantly higher than those of snails with heights of  $5\text{ mm} \leq H < 15\text{ mm}$ ,  $15\text{ mm} \leq H < 25\text{ mm}$  and  $25\text{ mm} \leq H < 35\text{ mm}$ , respectively. It was concluded that the supercooling point of *P. canaliculata* whose height ranged from 5 to 35 mm was consistent to some extent. The mortality of *P. canaliculata* in the supercooling stage ranged from 23.33% to 36.67%, and there were no significant differences among mortalities of *P. canaliculata* of different heights. Mortality of *P. canaliculata* correlated with increased exposure time, and ranged from 20.9% to 100% in 15 min. This experiment showed that exposure time could greatly influence the mortality of *P. canaliculata*. Photographs of organs color-stained by 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TTC) showed a slight red staining on the mantle, which was not obvious on the digestive gland or the kidney of a dead snail, obtained after supercooling for 15 min. Low temperatures resulted in significant organ injury in *P. canaliculata*. Results obtained from this study will assist further investigation of the ecological adaptation, the northern limit to potential areas of invasion and the survival mechanism of *P. canaliculata* over winter.

**Key Words:** Golden apple snail; low temperature stress; supercooling point; mortality; TTC

福寿螺 (*Pomacea canaliculata*) 原产南美洲亚马逊河流域, 20 世纪 80 年代引入我国广东省养殖, 结果造成福寿螺大肆入侵稻田, 严重危害水稻生产<sup>[1-3]</sup>。福寿螺已被入侵种专家组 (ISSG) 认定为世界 100 种恶性外来入侵物种之一<sup>[4]</sup>, 国家环保总局亦将福寿螺列为首批入侵我国的 16 种外来物种的“黑名单”。福寿螺属于热带软体动物, 然而已有研究表明低温时福寿螺体内丙三醇、谷氨酰胺和肌肽含量明显提高<sup>[5-6]</sup>, 以度过逆境, 因此, 研究其在寒冷环境中的适应性有重要意义。过冷却是指变温动物体液温度下降到冰点以下而不结冰的现象, 是推测变温动物抗寒机制的重要标准之一<sup>[7-8]</sup>。目前过冷却点在昆虫耐寒性领域研究较多, 如研究发现松突圆蚧 (*Hemiberlesia pitysophila*) 的过冷却点呈现随纬度升高而逐渐降低的趋势<sup>[9]</sup>。花角蚜小蜂 (*Hymeloptera: Aphelinidae*) 成虫耐寒性具有明显的季节适应性, 降低过冷却点是增强其耐寒性的重要策略<sup>[10]</sup>。学者 Matsukura 等报道了入侵日本的福寿螺种群存在过冷却现象<sup>[11]</sup>, 福寿螺入侵我国近 30 a, 且在不断扩散中, 而目前国内尚未见福寿螺过冷却现象的研究。本文首次对入侵我国华南地区的福寿螺过冷却现象进行实验观测, 探讨其过冷却与致死率及组织损伤的相关性, 以为福寿螺的耐寒机制和其扩散风险研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

福寿螺于 2010 年 3 月在华南农业大学农场采集, 而后置于脱氯自来水中 3 d, 期间不喂食。用游标卡尺测量福寿螺壳高, 参照文献<sup>[12]</sup>按照壳高 ( $H$ ) 划分为 4 组,  $H_1: 5\text{ mm} \leq H < 15\text{ mm}$ 、 $H_2: 15\text{ mm} \leq H < 25\text{ mm}$ 、 $H_3: 25\text{ mm} \leq H < 35\text{ mm}$  和  $H_4: 35\text{ mm} \leq H < 45\text{ mm}$ 。电阻为 NTC 型负温热敏电阻器 (标准电阻 1 K $\Omega$ , 广州天河电子城), 万用表为 EXCEL DT9205A 型数字万用表, 低温环境采用冰箱 (海尔牌, BCD-196TC) 和恒温培养箱 (宁波莱福科技有限公司制造, PQX-450A-12H) 控制。

### 1.2 热敏电阻标准曲线的绘制

过冷却点的测量采用万用电表联接热敏电阻法, 实验原理同文献<sup>[13-14]</sup>。具体方法为将热敏电阻联接万用电表后 (量程为 20 K $\Omega$ ) 置于  $-20^{\circ}\text{C}$  冰箱中, 每 1 min 记录 1 次电阻值, 同时测定温度, 记录 1 h, 重复 6 次, 绘制热敏电阻的温度  $T$  和电阻  $R$  的标准曲线, 曲线按照热敏电阻的标准方程进行拟合<sup>[13]</sup>, 整个过程中温度由

( $10 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$  逐步下降至 ( $-10 \pm 1$ ) $^{\circ}\text{C}$ , 获得的电阻和温度的标准方程为:

$$R = (7 \times 10^{-5}) e^{\frac{2871.62}{T-273.15}} \quad (1)$$

式中,  $T$  为温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ ,  $R$  为电阻, 单位为 $\Omega$ ,  $273.15^{\circ}\text{C}$  为热力学温标。

### 1.3 福寿螺的过冷却点和曲线测定

取上述 4 个级别的健康福寿螺进行测定, 每级别福寿螺 30 只。具体步骤为: 将福寿螺放置于滤纸干燥 24 h, 选择 1 只福寿螺, 按图 1 指示连接万用电表、热敏电阻及福寿螺, 热敏电阻粘附着于福寿螺壳表面, 将福寿螺置于冰箱内, 初始温度为  $10^{\circ}\text{C}$ , 每 1 min 记录 1 次电阻值, 持续记录直至电阻值恢复到突变前电阻, 而后再记录 10 min 的数据。

### 1.4 过冷却后福寿螺的死亡率观测

#### 1.4.1 不同螺高福寿螺过冷却阶段的死亡率观测

取上述 4 组的福寿螺进行测定, 每个级别 10 只, 重复 4 次。过冷却测定试验步骤同上, 在福寿螺发生过冷却时立刻将其取出 (即电阻值恢复至最高点时), 室温放置 10 min, 而后放入  $20^{\circ}\text{C}$  清水中 24 h 检查生存情况。福寿螺死亡的判定参考 Santos<sup>[15]</sup> 方法, 开扉活动的视为存活, 24 h 后未开扉活动的福寿螺, 刺激软体无反应、漂浮或悬浮于水中对刺激已无反应者记为死螺。

#### 1.4.2 不同过冷却时间下福寿螺的死亡率观测

按照过冷却发生时间 (0、2、5、10、15 min) 将福寿螺分组, 每组均由 H1、H2、H3、H4 等 4 个级别 3 只福寿螺组成, 每组共计 12 只, 重复 4 次。过冷却测定试验步骤同上, 在福寿螺发生过冷却时立刻计时 (即电阻值恢复至最高点时), 达到相应暴露时间后取出, 室温放置 10 min, 放入  $20^{\circ}\text{C}$  清水中 24 h 检查生存情况, 福寿螺死亡判定同上。

### 1.5 过冷却后福寿螺的组织损伤染色

分别解剖未经过过冷却处理的正常福寿螺 (对照) 和发生过冷却 15 min 后的福寿螺 (螺高 30 mm, 过冷却点  $-6.35^{\circ}\text{C}$ ), 弃去外壳后将其组织整体浸没于 0.1% 的 2,3,5-氯化三苯基四氮唑 (TTC) 溶液, 放入  $30^{\circ}\text{C}$  的恒温培养箱内保温 40 min, 而后用蒸馏水冲洗 2—3 次, 参照 Matsukura 的方法观察福寿螺各组织着色情况<sup>[11]</sup>。

### 1.6 数据分析

根据公式 (1), 将试验中记录的每一时间点的电阻值转换为温度值, 绘制福寿螺过冷却曲线。其中电阻值上升到一定数值后突然下降, 此时电阻值对应的温度, 即为福寿螺过冷却点。全部数据用 Excel 整理后, 采用 OriginPro 7.5 软件绘图, 差异显著性测验采用 SPSS 软件的邓肯新复极差法进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同福寿螺的过冷却曲线

分别从上述四组不同体型的福寿螺中任意取 3 只福寿螺, 绘制其体温随时间的变化曲线图 (图 2)。由图 2 可知, 福寿螺体温的变化趋势可以划分为 4 个阶段: (I) 体温逐渐下降, 此时热敏电阻的数值逐渐上升; (II) 体温下降到一定数值时迅速回升, 此时热敏电阻数值突然快速下降, 其原因是此时福寿螺发生了过冷却, 其体内潜热开始散发导致体表温度迅速上升, 影响热敏电阻的电阻值, 此时的温度即为过冷却点; (III) 温度缓慢下降, 重新回到突变前数值, 此时热敏电阻的电阻值逐渐上升, 直至重新上升到到初始水平, 表明福寿螺体内各组织逐渐发生结晶化, 体内潜热的散发完全; (IV) 福寿螺体温随外界温度继续下降, 此时热敏电阻值继续上升。4 组不同体型的福寿螺均表现出上述的 4 个阶段, 过冷却曲线变化趋势类似。

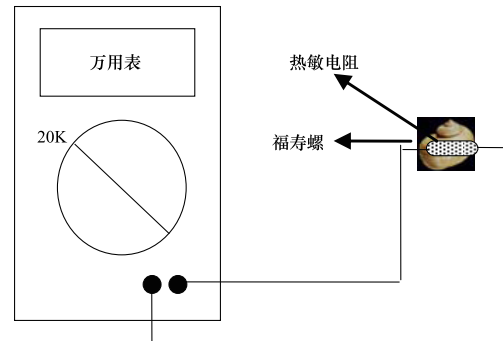


图 1 福寿螺过冷却点测定装置示意  
Fig. 1 Schematic diagram of determination device of supercooling point of golden apple snails

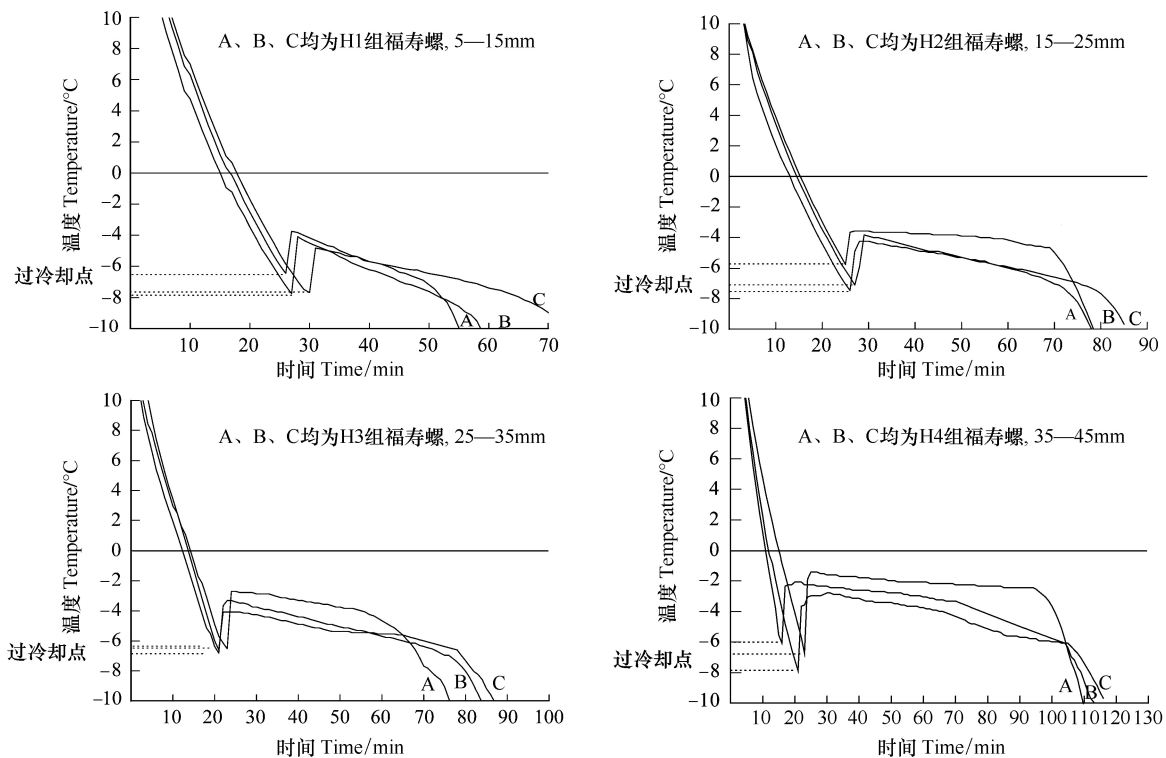


图2 福寿螺的过冷却曲线

Fig. 2 Curve of supercooling phenomenon of golden apple snails in a function of time

A、B、C 曲线分别代表随机选择的 3 只供试福寿螺,虚线指向温度轴上的数值为过冷却点

### 2.2 不同螺高福寿螺的过冷却点差异

由表 1 可知,各种螺高的福寿螺冷却点均值为 $-6.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,范围在 $-6.21\text{—} -7.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,福寿螺的过冷却点大小受其螺高的影响,螺高  $H4$  的福寿螺过冷却点显著高于其他 3 种体型,而螺高为  $H1$ 、 $H2$  和  $H3$  福寿螺的过冷点之间没有显著差异,表明  $5\text{—}35\text{ mm}$  螺高 ( $H1$  至  $H4$ ) 的福寿螺过冷却点变化较稳定,过冷却点有随螺高增大而升高的趋势。过冷却后恢复的最高体温以超大型福寿螺最高,其次为  $H3$  和  $H2$  螺高的福寿螺,  $H1$  螺高的福寿螺最低,不同螺高福寿螺恢复的最高体温随着螺高的增大而升高,其均值为 $-4.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,范围在 $-3.07\text{—} -4.93\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。不同螺高福寿螺发生过冷却后维持的时间均存在显著差异,福寿螺随着其螺高增大而延长,  $H4$  螺高福寿螺的过冷却后维持时间分别为  $H1$ 、 $H2$  和  $H3$  的 4.05、1.85 和 1.50 倍,总体上福寿螺的过冷却后维持时间均值为  $45.97\text{ min}$ ,范围在  $18.60\text{ min—}75.34\text{ min}$ 。

表 1 不同螺高福寿螺的过冷却点、恢复体温及过冷却时间

Table 1 Supercooling point, maximum body temperature in recovery and supercooling duration of different sizes of golden apple snails

螺高 Height /mm	过冷却点 Supercooling point/ $^{\circ}\text{C}$	恢复最高体温 Maximum body temperature in recovery/ $^{\circ}\text{C}$	过冷却时间 Supercooling duration /min
$5\leq H1 < 15$	$-7.32\pm 0.70\text{a}$	$-4.93\pm 0.97\text{a}$	$18.60\pm 6.62\text{a}$
$15\leq H2 < 25$	$-7.25\pm 0.88\text{a}$	$-4.22\pm 0.95\text{b}$	$40.67\pm 9.44\text{b}$
$25\leq H3 < 35$	$-6.99\pm 0.83\text{a}$	$-4.04\pm 1.18\text{b}$	$50.27\pm 6.21\text{c}$
$35\leq H4 < 45$	$-6.21\pm 0.99\text{b}$	$-3.07\pm 0.75\text{c}$	$75.34\pm 9.66\text{d}$

### 2.3 不同螺高福寿螺过冷却阶段的死亡率

图 3 描述了不同体型的福寿螺在发生过冷却后的死亡率,总体上福寿螺的死亡率在  $23.33\%\text{—}36.67\%$

之间,表明过冷却后的短时间内福寿螺对低温有一定耐受性。但不同体型的福寿螺之间没有显著性差异,福寿螺在过冷却发生时对低温的耐受性与螺高的相关性不大,说明过冷却现象的发生对不同体型的福寿螺均有相当程度的保护作用。

#### 2.4 不同过冷却时间下福寿螺的死亡率

图4描述了发生过冷却后不同暴露时间下福寿螺的死亡率,福寿螺的死亡率随着暴露时间的延长而提高,在15 min内,由刚发生过冷却时(0 min)的死亡率20.9%提高到100%,发生过冷却后暴露时间对福寿螺的死亡有显著影响,说明过冷却后福寿螺对温度的胁迫处于敏感时期。进一步分析表明,过冷却后暴露时间和福寿螺的死亡之间有着显著的正相关关系,达到极显著水平( $P < 0.01$ ),相关系数  $r = 0.840$ 。

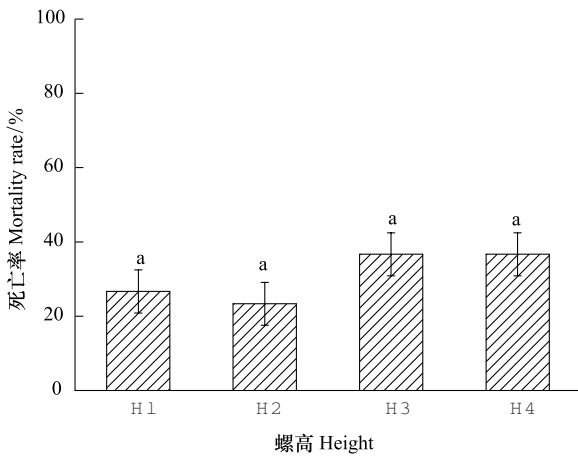


图3 过冷却后不同体型福寿螺的死亡率

Fig. 3 Mortality ratios of different sizes of golden apple snails after supercooling

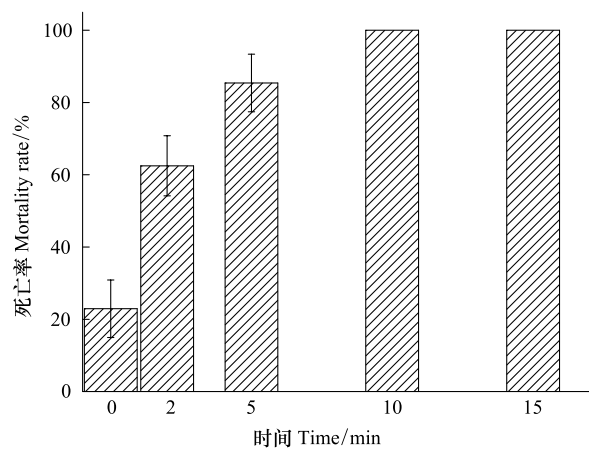


图4 过冷却后不同暴露时间下福寿螺的死亡率

Fig. 4 Mortality of the golden apple snails under different exposure time after supercooling

#### 2.5 过冷却后福寿螺组织损伤的 TTC 染色

图5是过冷却后福寿螺组织损伤的TTC染色图片,由图5可知,正常福寿螺组织经过TTC染色40 min后,外套膜和肾部均有红色出现,而消化腺未出现明显红色。发生过冷却15 min后取出的福寿螺,染色后其外套膜有少量红色出现,而肾部和消化腺部未呈现明显红色,表明过冷却后的低温胁迫已经对福寿螺外套膜和肾部组织造成了显著损伤。

### 3 讨论

过冷却现象指的是变温动物在外界温度下降过程出现的对自身体温调节的防御反应,其生理机制是动物的体液发生过冷却以避免结冰造成的伤害。目前过冷却点的研究多集中在昆虫领域,昆虫的抗寒性与其过冷却点密切相关,过冷却点成为界定其耐寒性强弱的重要指标之一<sup>[8,16-17]</sup>。入侵我国华南地区的福寿螺属于热带软体动物,本研究中测得的福寿螺过冷却点平均为 $-6.96^{\circ}\text{C}$ ,范围在 $-6.24$ — $-7.32^{\circ}\text{C}$ 之间,首次证实了入侵我国华南地区的福寿螺的过冷却点存在,且表明其对低温具有防御机制,在一定程度上存在着北向扩散的生态风险。

本研究中15—25 mm福寿螺的过冷却点为 $(-7.25 \pm 0.88)^{\circ}\text{C}$ ,与日本研究的12.5—17.5 mm的未经过寒冷驯化的福寿螺过冷却点 $(-7.1 \pm 1.5)^{\circ}\text{C}$ 差别不大<sup>[11]</sup>,表明入侵我国华南地区的福寿螺对寒冷胁迫的响应可能和日本的类似。过冷却点常受体型大小影响,体型越大其过冷却能力往往较弱,如研究发现外壳直径超过20 mm的*Helix pomatia*、*Cornu aspersum*和*Arianta arbustorum*的过冷却点分别为 $-6^{\circ}\text{C}$ 、 $-5^{\circ}\text{C}$ 和 $-1$ — $-9^{\circ}\text{C}$ ,而外壳直径低于5 mm的*Anguispira alternata*、*Discus cronkhitei*、*Gastrocopta armifera*、*Vallonia perspectiva*过冷却点分别为 $-18.4^{\circ}\text{C}$ 、 $-24.1^{\circ}\text{C}$ 和 $-15.4^{\circ}\text{C}$ ,明显低于前者,其过冷却能力反而较强<sup>[18-21]</sup>。本研究中亦发现H4(35—45 mm)螺高的福寿螺过冷却点显著高于5至35 mm的福寿螺,同时,福寿螺的过冷却能力在一定体型

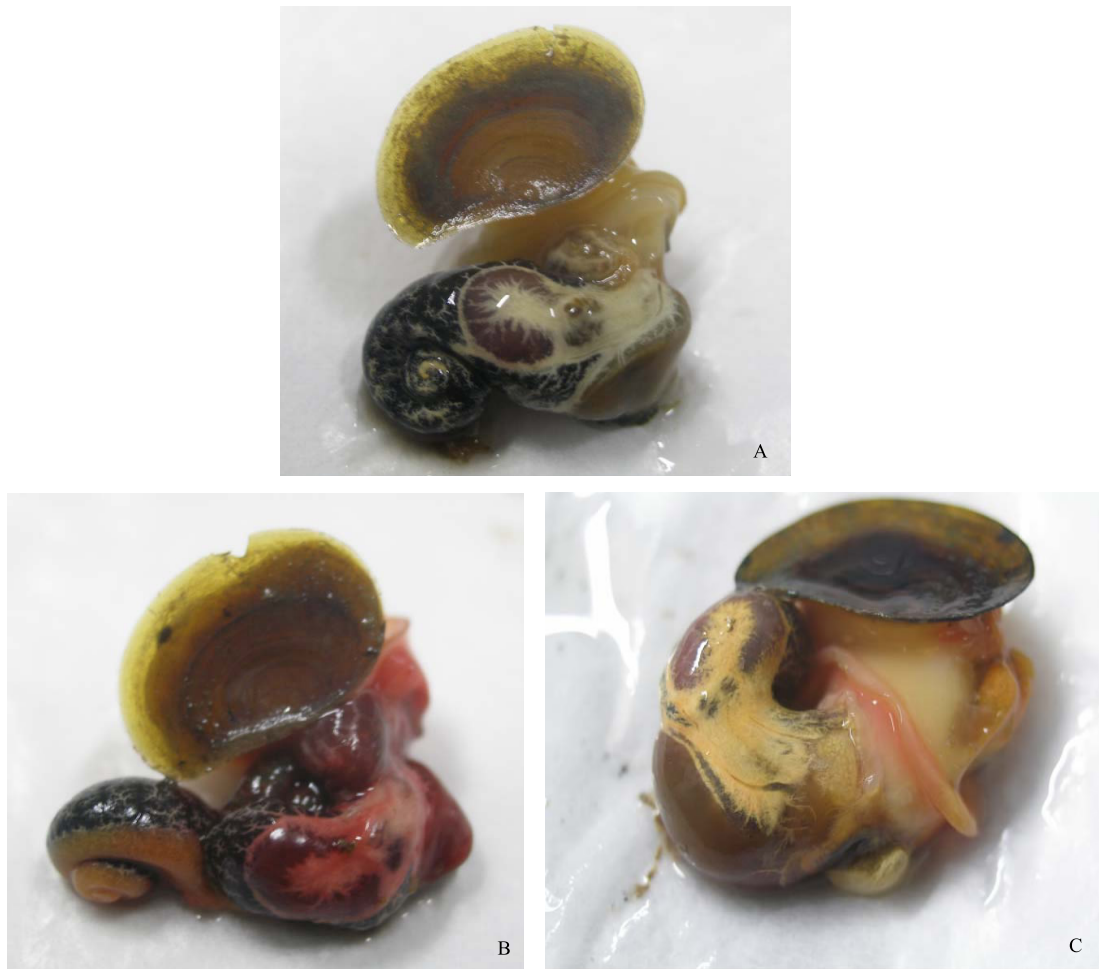


图5 过冷却后福寿螺的组织损伤

Fig. 5 Photos of coloring of *Pomacea canaliculata* organs stained by TTC

(A) 正常未发生过冷却的福寿螺组织,未进行 TTC 染色;(B) 正常未发生过冷却后福寿螺组织,进行 TTC 染色 40 min,其中外套膜、肾部组织观察到红色,消化腺部分未观察明显红色;(C) 发生过冷却 15 min 后福寿螺组织 TTC 染色 40 min,其中外套膜有少量红色,肾部组织和消化腺组织均未出现明显红色

范围内变化稳定,而后随其体型增大而减弱。本研究中过冷却后恢复最高体温随福寿螺体型增大而增加,*H4* (35—45 mm) 螺高福寿螺的恢复最高体温比 *H1* (5—15 mm) 福寿螺高 1.86 °C,可能的原因是较大的福寿螺在发生过冷却时体内释放热量较多,使其在短时间内体温恢复较高。

过冷却维持时间亦呈现随着体型增大而增加的现象,35—45 mm 的福寿螺过冷却后维持时间已经超过 1 h,结合过冷却后 10 min 后福寿螺死亡率 100% 可知,虽然体温未恢复到初始温度,但福寿螺已经死亡,可能的原因是体温逐步恢复到突变前的过程实际上是福寿螺体液已经开始结冰的阶段,在此过程中死亡已经发生。大个体的福寿螺组织结冰需要的时间较长,其过冷却维持时间高于小个体。相似的现象已有报道,如外壳直径为 20—26 mm 的 *Arianta arborustorum* 可在过冷却后体内结冰的短暂时间内存活,在体内水分 80% 结冰后开始死亡<sup>[20]</sup>。另外,本研究中过冷却后立刻取出的福寿螺的死亡率仅为 20%,此时福寿螺体液的结冰过程或被打断,体内组织损伤较弱,使得死亡率较低,过冷却现象的发生对福寿螺具有一定的保护作用。

TTC 是一种脂溶性光敏感复合物,可以用来染色检测哺乳动物组织的缺血梗塞,其与正常组织中的脱氢酶反应产生红色脂溶性甲月替而呈红色<sup>[22-23]</sup>,如果组织内脱氢酶活性下降会影响其正常反应而呈白色。福寿螺作为热带软体动物,低温易对其组织造成伤害,然而目前尚未有将 TTC 用于福寿螺组织损伤染色的相关报道。本研究通过 TTC 染色发现,相比正常福寿螺组织,过冷却后福寿螺外套膜、肾部组织和消化腺组织未



出现明显红色,表明该部分组织在低温胁迫中受到损伤,Matsukura<sup>[11]</sup>等用台盼蓝进行了福寿螺低温胁迫后组织损伤的染色,发现福寿螺的外套膜、肾部组织和消化腺组织在低温时受到损伤,与本研究结果类似。

#### 4 结论

1)福寿螺属于热带软体动物,但也存在过冷却现象。本研究中测得其过冷却点为 $-6.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,说明福寿螺的过冷却防御机制有利于其适应低温环境,该指标对研究其生态适应性和扩散北界有一定参考价值。

2)福寿螺过冷却现象和个体死亡之间存在一定的相关关系,但受到其体型、暴露时间等因素影响,进一步探索二者关系可为小生境内福寿螺的越冬机制提供一定理论依据。

#### References:

- [ 1 ] Halwart M. The golden apple snail *Pomacea canaliculata* in Asian rice farming systems: present impact and future threat. *International Journal of Pest Management*, 1994, 40(2): 199-206.
- [ 2 ] Naylor R L. Invasions in agriculture: assessing the cost of the golden apple snail in Asia. *Ambio*, 1996, 25(7): 443-448.
- [ 3 ] Zhou W C, Wu Y F, Yang J Q. Viability of the *ampullaria* snail in China. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 18(1): 25-28.
- [ 4 ] ISSG, Invasive species specialist group. The World Conservation Union. [2005-4-13]. <http://www.issg.org/database/species/ecology.asp?si=135&fr=1&sts=&lang=EN>.
- [ 5 ] Wada T, Matsukura K. Seasonal changes in cold hardiness of the invasive freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Lamarek) (Gastropoda: Ampullariidae). *Malacologia*, 2007, 49(2): 383-392.
- [ 6 ] Matsukura K, Tsumuki H, Izumi Y, Wada T. Changes in chemical components in the freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae), in relation to the development of its cold hardiness. *Cryobiology*, 2008, 56(2): 131-137.
- [ 7 ] Jing X H, Kang L. Overview and evaluation of research methodology for insect cold hardiness. *Entomological Knowledge*, 2004, 40(1): 7-10.
- [ 8 ] Jing X H, Kang L. Research progress in insect cold hardiness. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2202-2207.
- [ 9 ] Zhong J H, Zhang F P, Jiang B F, Chen J H. Cold tolerance of the pine armored scale *Hemiberlesia pitysophila* (Homoptera: Diaspididae) in different regions. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 117-122.
- [ 10 ] Zhang F P, Zhong J H, Jiang B F, Liang G H, Su J, Ren Y Y. Seasonal variation in cold tolerance of *Coccobius azumai* Tachikawa (Hymenoptera: Aphelinidae), a parasitoid of pine armored scale introduced from Japan. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 4604-4612.
- [ 11 ] Matsukura K, Tsumuki H, Izumi Y, Wada T. Physiological response to low temperature in the freshwater apple snail, *Pomacea canaliculata* (Gastropoda: Ampullariidae). *Journal of Experimental Biology*, 2009, 212(16): 2558-2563.
- [ 12 ] Zhao B L, Zhang J E, Cheng C G, Luo M Z, Song C X. Study on the toxic effect of calcium oxide on *Pomacea canaliculata*. *Ecology and Environment*, 2010, 19(12): 2916-2921.
- [ 13 ] Qin Y C, Yang J C. A new simple method to test insect super-cooling point. *Entomological Knowledge*, 2000, 47(4): 236-238.
- [ 14 ] Zhuang J L, Zhao G M, Zhou Y B, Peng W X, Jiang Q W. Study on supercooling ability of *Oncomelania* snails in lab. *Chinese Journal of Schistosomiasis Control*, 2006, 18(5): 329-333.
- [ 15 ] dos Santos J A A, Tomassini T C B, Xavier D C D, Ribeiro I M, da Silva M T G, de Moraes Filho Z B. Molluscicidal activity of *Physalis angulata* L. extracts and fractions on *Biomphalaria tenagophila* (d'Orbigny, 1835) under laboratory conditions. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 2003, 98(3): 425-428.
- [ 16 ] Zhao Z W, Huang Y P. The mechanisms of regulation and control of insect diapause. *Journal of Shanxi University: Nature Science*, 1995, 18(1): 105-118.
- [ 17 ] Han R D, Sun X G, Xu Y Y, Zhang W G. The biochemical mechanism of cold-hardiness in overwintering larva of *Dendrolimus spectabilis* Butler (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1352-1356.
- [ 18 ] Riddle W A. Cold hardiness in the woodland snail, *Anguispira alternata* (Say) (Endodontidae). *Journal of Thermal Biology*, 1981, 6(3): 117-120.
- [ 19 ] Riddle W A, Miller V J. Cold-hardiness in several species of land snails. *Journal of Thermal Biology*, 1988, 13(4): 163-167.
- [ 20 ] Ansart A, Vernon P. Cold hardiness in molluscs. *Acta Oecologica*, 2003, 24(2): 95-102.
- [ 21 ] Ansart A, Vernon P, Daguzan J. Freezing tolerance versus freezing susceptibility in the land snail *Helix aspersa* (Gastropoda: Helicidae). *Cryo Letters*, 2001, 22(3): 183-190.

- [22] Cole D J, Drummond J C, Ghazal E A, Shapiro H M. A reversible component of cerebral injury as identified by the histochemical stain 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride (TTC). *Acta Neuropathologica*, 1990, 80(2): 152-155.
- [23] Tu Y, Yao M, Chen B W, Li Y M. Comparative studies on different concentration of triphenyltetrazolium chloride staining for identification of stroke lesions in hypertensive rats. *Acta Academiae Medicine CPAF*, 2008, 17(1): 30-32.

#### 参考文献:

- [3] 周卫川, 吴宇芬, 杨佳琪. 福寿螺在中国的适生性研究. *福建农业学报*, 2003, 18(1): 25-28.
- [7] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性的测定与评价方法. *昆虫知识*, 2004, 40(1): 7-10.
- [8] 景晓红, 康乐. 昆虫耐寒性研究. *生态学报*, 2002, 22(12): 2201-2207.
- [9] 钟景辉, 张飞萍, 江宝福, 陈家骅. 不同地区松突圆蚧耐寒性的研究. *中国生态农业学报*. 2010, 18(1): 117-122.
- [10] 张飞萍, 钟景辉, 江宝福, 梁光红, 苏军, 任媛媛. 引进天敌花角蚜小蜂成虫耐寒性的季节变化. *生态学报*, 2009, 29(9): 4604-4612.
- [12] 赵本良, 章家恩, 成朝刚, 罗明珠, 宋春秀. 生石灰对福寿螺的毒性效应研究. *生态环境学报*, 2010, 12(16): 2916-2921.
- [13] 秦玉川, 杨建才. 一种便携式测定昆虫过冷却点的方法. *昆虫知识*, 2000, 47(4): 236-238.
- [14] 庄建林, 赵根明, 周艺彪, 彭文祥, 姜庆五. 钉螺过冷却现象的实验研究. *中国血吸虫病防治杂志*, 2006, 18(5): 329-333.
- [16] 赵章武, 黄永平. 昆虫滞育及其调控机制. *山西大学学报: 自然科学版*, 1995, 18(1): 105-118.
- [17] 韩瑞东, 孙绪良, 许永玉, 张卫光. 赤松毛虫越冬幼虫生物物质变化与抗寒性的关系. *生态学报*, 2005, 25(6): 1352-1356.
- [23] 涂悦, 姚旻, 陈炳伟, 李玉明. 不同浓度 TTC 染色对高血压性脑卒中病灶面积的评估. *武警医学院学报*, 2008, 17(1): 30-32.

# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

## CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake ..... CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets .....  
..... ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular  
mycorrhizal fungi ..... YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert  
area ..... CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks .....  
..... ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated  
broadleaved mixed forest ..... LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau,  
China ..... XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth .....  
..... WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland .....  
..... HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants .....  
..... ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou ...  
..... WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats .....  
..... ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature .....  
..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River .....  
..... MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves .....  
..... HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission fluxes from double-  
cropping paddy field ..... TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert .....  
..... ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir .....  
..... NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids .....  
..... LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon  
and nitrogen isotope analysis ..... LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ..... ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) .....  
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* .....  
..... CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae) .....  
..... ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island .....  
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing ..... WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province .....  
..... FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river  
basin ..... DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests ..... LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems .....  
..... ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species .....  
..... XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters .....  
..... YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms .....  
..... LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China ..... XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica .....  
..... LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元