



• 研究报告 •

有害植物孪花蓼菊扩张对西沙岛屿 陆生软体动物的影响

颜碧玥^{1,3,4} 佟富春² 况露辉^{1,3,4} 牟之建^{1,3,4} 吴文佳^{1,3}
蔡洪月^{1,4} 王 俊¹ 简曙光¹ 任 海¹ 刘占锋^{1,3*}

1 (中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室/中国科学院海岛与海岸带生态修复工程实验室,
中国科学院华南植物园, 广州 510650)
2 (华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642)
3 (南方海洋科学与工程广东实验室(广州), 广州 511458)
4 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 有害植物孪花蓼菊(*Wedelia biflora*)的扩张对我国西沙群岛原生植物群落结构和功能产生了深刻影响, 但陆生软体动物如何响应该扩张却未见报道。本文调查了西沙群岛永兴岛孪花蓼菊不同扩张程度下褐云玛瑙螺(*Achatina fulica*)、钻头螺科、坚齿螺科和拟阿勇蛞蝓科等主要陆生软体动物的残体分布情况, 测定了残体的分布密度和壳高、壳宽、壳重等可量化性状指标, 研究了孪花蓼菊扩张对陆生软体动物种群的影响。结果表明: (1) 随孪花蓼菊扩张程度增加, 钻头螺科和褐云玛瑙螺的种群密度增加, 坚齿螺科种群密度减小, 拟阿勇蛞蝓科种群密度出现先增加后减少的趋势; (2) 陆生软体动物类群的体型分布频率随孪花蓼菊扩张呈现不同的变化趋势, 褐云玛瑙螺较小个体数量增加, 其他陆生软体动物体型分布变化不明显或较大体型残体分布增加; (3) 孪花蓼菊扩张对褐云玛瑙螺体型特征产生抑制作用, 褐云玛瑙螺主要采用r策略来响应有害植物扩张的影响。综上, 有害植物孪花蓼菊在热带珊瑚岛屿植被中的扩张改变了陆生软体动物的形态、密度与种群结构, 不同的软体生物类群表现出不同响应策略, 在海岛有害生物的综合防治过程中应该引起足够重视。

关键词: 有害植物; 种群扩张; 褐云玛瑙螺; 种间互作; 热带珊瑚岛屿

The influence of harmful plant *Wedelia biflora* expansion on terrestrial mollusks in Xisha Islands

Biyue Yan^{1,3,4}, Fuchun Tong², Luhui Kuang^{1,3,4}, Zhijian Mou^{1,3,4}, Wenjia Wu^{1,3}, Hongyue Cai^{1,4}, Jun Wang¹, Shuguang Jian¹, Hai Ren¹, Zhanfeng Liu^{1,3*}

1 Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems / CAS Engineering Laboratory for Vegetation Ecosystem Restoration on Islands and Coastal Zones, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650
2 College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642
3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458
4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: It is well-documented that the expansion of *Wedelia biflora* profoundly impacts the structure and functions of the native plant community in the Xisha Islands, but the effects of this expansion on terrestrial mollusks remain unclear. In this study, we investigated the population density and shell features (e.g. height, width and mass) of the major groups of terrestrial mollusks: *Achatina fulica*, Subulinidae, Camaenidae and Aripphantidae. Mollusk conditions were assessed under different degrees of *W. biflora* expansion on Yongxing Island. Results showed: (1) As the coverage of *W. biflora* increased, the population density of *A. fulica* and

收稿日期: 2020-02-04; 接受日期: 2020-04-27

基金项目: 国家自然科学基金-广东联合基金重点项目(U1701246)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13020500)、广东省科技计划项目(2019B121201005)、军队后勤开放研究科研项目(AHJ8J003)和中国科学院青年创新促进会优秀会员项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liuzf@scbg.ac.cn

Subulinidae also increased, decreased for Camaenidae, and initially increased and then decreased for Aripphantidae. (2) Population density of *A. fulica* small-sized individuals increased at a disproportionately higher rate with *W. biflora* expansion, while the density of other body size remained unaltered. (3) *W. biflora* expansion inhibited certain shell features of *A. fulica*, which adopted an r strategy to cope with *W. biflora* expansion. In summary, the expansion of *W. biflora* on Yingxing Island altered the body sizes, population density and community structure of terrestrial mollusks. To cope with this expansion, different mollusks adopted different response strategies, a selective process which should be considered when managing the spread of invasive species.

Key words: harmful plant; population expansion; *Achatina fulica*; inter species interaction; tropical coral island

我国海域辽阔, 岛屿分布广泛, 是国家海洋战略资源开发的重要基础。热带珊瑚岛屿由于形成年代近, 没有形成真正意义上的土壤, 再加上极端的气候环境胁迫, 植被群落形成与发育通常比较缓慢(周厚诚等, 2001)。此外, 岛上植被群落结构简单, 极为脆弱, 易受外界干扰, 一旦退化或被破坏后极难恢复(任海等, 2019)。随着国家对海洋资源开发与保护的日益重视, 我国海岛生态系统保护也受到更多关注。考虑到其生境的独特性, 研究有害生物扩张对热带珊瑚岛屿的潜在影响不仅有助于丰富岛屿生态学理论, 也对防控岛屿生态系统有害生物具有指导意义。

李花虻蜚菊(*Wedelia biflora*)是菊科虻蜚菊属(*Wedelia*)的一种多年生阳性攀援草本植物, 原产于我国台湾、广东南部及其沿海岛屿、广西、云南等地, 在印度、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、日本和大洋洲也有分布。1947年张宏达教授在海岛植被调查中首次发现李花虻蜚菊在我国西沙群岛分布。该草常见于滨海沙地、路边、草地、林下或灌丛, 后被作为野生滨海沙生植物报道(邢福武等, 1993; 童毅等, 2013; 王清隆等, 2019), 但李花虻蜚菊迁入西沙群岛的过程尚无相关记载。在最近的对西沙群岛植被调查的过程中, 我们发现李花虻蜚菊开始向自然植被中快速扩张, 并能攀附在乔木林冠上生长, 表现出一定的“入侵”态势, 危害原生优势物种如抗风桐(*Pisonia grandis*)、海岸桐(*Guettarda speciosa*)、草海桐(*Scaevola sericea*)的生长, 导致原生植被的生物多样性减少和功能退化(任海等, 2017)。因此李花虻蜚菊被认定为西沙群岛的有害植物, 其快速扩张已威胁到岛屿生态系统的安全。

我们在对西沙群岛的永兴岛陆生软体动物群落进行调查时, 也发现了隶属于玛瑙螺科的外来物

种褐云玛瑙螺(*Achatina fulica*)的入侵。褐云玛瑙螺又被称为非洲大蜗牛, 原产于非洲东部, 适宜生活在湿度大、气候温暖、植被覆盖度高的低海拔地区(尹淦镠, 1965)。褐云玛瑙螺自20世纪初传入我国, 在广东、广西、海南、云南、福建及港澳台地区均有分布(杞桑, 1985; 陈德牛和张卫红, 2004; 郭靖等, 2015), 在农业生产、植物病虫害和生态环境等方面产生一系列危害(李萍等, 2008; Bhattacharyya et al, 2014)。西沙群岛位于热带地区, 气候温暖潮湿, 全年气温均在褐云玛瑙螺的发育零点温度以上, 加之部分岛屿植被覆盖度较高, 非常适宜褐云玛瑙螺种群定殖(周卫川等, 2001; 王森浩等, 2019)。

陆生软体动物的栖息环境依赖于植物群落(陈德牛等, 1997), 新的植物扩张可通过改变本土生态系统的初级生产力与凋落物, 影响陆生软体动物的种群动态和群落组成(Anderson et al, 2007; Podrouzkova et al, 2015)。例如, 外来植物印第安凤仙花(*Impatiens glandulifera*)的凋落物比本土植物凋落物的氮含量低, 使偏好高氮凋落物的蜗牛种群丰富度和多度下降(Horáčková et al, 2014)。外来物种入侵还能够改变地表凋落物覆盖情况、土壤微气候和养分, 从而影响陆生软体动物群落结构(Ruckli et al, 2013)。但目前关于有害植物李花虻蜚菊扩张如何影响热带珊瑚岛屿的陆生软体动物种群, 尚缺乏基本的调查和针对性的研究(Wu et al, 2007)。软体动物残体的平均密度较特定时间点观测到的生活软体动物数量更能反映某一地点的种群密度(Anderson et al, 2007); 残体的形态、年龄大小可以反映生存环境质量(周卫川, 2006; Kistner & Dybdahl, 2013)。本文通过调查永兴岛李花虻蜚菊不同扩张程度下陆生软体动物群落残体分布情况, 旨在探究有害植物扩张对岛屿陆生软体动物的影响, 为热带珊瑚岛屿

有害生物的防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在我国南海西沙群岛东北部的永兴岛(16°50′ N, 112°20′ E)开展。永兴岛属于热带海洋性季风气候: 年降水量为1,500 mm左右, 年均温为27℃, 年平均相对湿度77.4%; 干湿季分明, 12月至次年5月为干季, 6–11月为湿季(徐贝贝等, 2018)。永兴岛面积为2.6 km², 占西沙群岛总面积的34.2%。岛屿主体由珊瑚的骨骼堆积形成, 成岛时期大约为中全新世晚期, 属于典型的珊瑚岛屿^①。珊瑚砂土属于碱性土, 主要由石灰土和海滨盐土构成(王瑞等, 2011), 为富磷高钙土壤, 有机质和土壤全氮含量分别介于5%–10%和0.4%–0.6% (龚子同等, 2013)。由于地质形成年代近、岛屿面积较小、土壤养分缺乏和海风盐雾胁迫等原因, 永兴岛形成了独特的珊瑚岛森林植被, 而不是热带雨林或热带季雨林。岛上植物群落分布特点是: 从岛屿外围向内部, 植被覆盖度和植株高度逐渐增加, 呈现从藤本、草本、灌木再过渡到乔木的分布格局(王森浩等, 2019)。李花蓼菊多分布于滨海沙地、路边和草地, 最新的调查发现李花蓼菊开始向岛上自然植被快速扩张(图1a)。李花蓼菊攀附在乔木和灌木冠层生长, 与原生优势植物竞争资源, 并抑制其生长。陆生软体动物生长发育时, 外壳的生长需要摄取一定的钙质(陈德牛等, 1997; Pearce & Örstan, 2006), 珊瑚岛屿上的磷质石灰土为蜗牛壳的形成提供了丰富的钙质, 繁茂的植被为陆生软体动物提供了适宜的生境与丰富的食物(图1b)。

1.2 样地设置与样品采集

在研究区内根据李花蓼菊的覆盖程度划分其扩张程度: 原生植被样地, 仅有本地植物生长而无李花蓼菊; 轻度扩张样地, 李花蓼菊盖度小于20%; 重度扩张样地, 李花蓼菊盖度大于40%。这三种类型的样地植被生长良好、土壤基质相同, 并且物种组成相似。每种扩张类型样地随机选择5个5 m × 5 m的样方进行调查, 共计15个样方, 样地间间隔大于50 m。陆生软体动物的调查参照周勇和翟友成(1985)和陈德牛等(1997)的方法。2018年4



图1 西沙群岛永兴岛植物群落中的李花蓼菊(a)和陆生软体动物(b)

Fig. 1 The occurrence of *Wedelia biflora* (a) and terrestrial mollusks (b) in the plant community in Yongxing Island, Xisha Islands

月, 在各样方内随机抛掷30 cm × 30 cm的采样框, 然后收集采样框内的陆生软体动物残体, 装入自封袋后带回实验室进行物种鉴定、计数和形态指标测量。

1.3 分类鉴定与形态指标测量

采集到的陆生软体动物残体经过清洗晾干后, 参照《中国土壤动物检索图鉴》(尹文英, 1998)进行分类鉴定和计数。采用游标卡尺测量(精确到0.01 mm)壳高(shell height, 指壳顶到底唇下缘的垂直最大距离)和壳宽(shell width, 指垂直于壳轴的贝壳最大宽度)。残体壳重(shell mass)用电子分析天平进行测定(精确到0.0001 g) (朱挺兵等, 2013)。参考周卫川(2006)的方法对采集到的褐云玛瑙螺残体进行螺层数统计, 并划分发育阶段: 幼螺(螺层 ≤ 3.5)、生长螺(4 ≤ 螺层 ≤ 5.5)和成螺(螺层 ≥ 6)。

1.4 数据处理与作图

数据分析采用SPSS 20.0软件(SPSS Inc., Chicago, USA)完成。采用双因素方差分析检验李花蓼菊扩张和软体动物类群的交互作用对残体密度、壳高、壳宽和壳重的影响, 单因素方差分析中的Welch近似F检验和Dunnnett's T3多重比较检验各指

① 唐杉 (2009) 我国南海热带珊瑚礁岛屿生物多样性研究. 硕士学位论文, 中国科学技术大学, 合肥。

标在不同扩张程度之间的差异。采用 GraphPad Prism 8.0 软件(GraphPad software, Inc., USA)制图。

2 结果

2.1 陆生软体动物群落组成

在研究区内共采集到 776 个陆生软体动物残体(图 2a), 由于鉴定水平限制, 除玛瑙螺科的褐云玛瑙螺鉴定至种, 其他软体动物残体仅分类至科, 分别隶属于钻头螺科、坚齿螺科和拟阿勇蛞蝓科 3 个科。其中拟阿勇蛞蝓科残体数量最多, 占总残体数的 53.06%; 其次为褐云玛瑙螺, 占总残体数的 28.99%。钻头螺科和坚齿螺科数量较少。

褐云玛瑙螺、钻头螺科、坚齿螺科和拟阿勇蛞蝓科的软体动物在各调查样地内占总体的比例在不同孪花蓼扩张程度的样地间表现出一定的差异。如图 2b 所示, 随孪花蓼扩张程度增加, 褐云玛瑙螺和钻头螺科残体占比逐渐增加, 坚齿螺科呈现减少趋势, 拟阿勇蛞蝓科残体的占比呈现先增大后减小的趋势。在原生植被样地、轻度扩张样地和重度扩张样地中, 褐云玛瑙螺残体数分别占各样地残体总数的 19.70%、27.30% 和 40.00%; 钻头螺科分别占各样地残体总数的 4.93%、6.90% 和 21.78%; 坚齿螺科分别占残体总数的 16.75%、4.31% 和 3.11%; 拟阿勇蛞蝓科分别占残体总数的 58.62%、61.49% 和 35.11%。

2.2 陆生软体动物密度

如图 3a, e, i, m 所示, 褐云玛瑙螺、钻头螺科、

坚齿螺科和拟阿勇蛞蝓科的残体密度在不同扩张程度的样地间的差异没有达到统计学显著水平($P > 0.05$), 扩张程度与类群的交互作用的影响也不显著(表 1, $P > 0.05$), 残体密度的差异主要体现在类群间(表 1, $P < 0.001$)。随着孪花蓼扩张程度的增加, 钻头螺科的残体密度逐渐增加, 坚齿螺科的残体密度随之降低, 褐云玛瑙螺和拟阿勇蛞蝓科残体密度表现出随孪花蓼扩张程度增加先增加后减少的趋势。褐云玛瑙螺残体密度表现为: 轻度扩张样地 > 重度扩张样地 > 原生植被样地; 拟阿勇蛞蝓科残体密度表现为: 轻度扩张样地 > 原生植被样地 > 重度扩张样地。

2.3 陆生软体动物形态特征

双因素方差分析结果表明, 孪花蓼扩张程度整体上对软体动物残体的壳高、壳宽和壳重没有显著影响(表 1, $P > 0.05$), 但是扩张程度与类群的交互作用对软体动物残体壳高、壳宽和壳重影响显著(表 1, $P < 0.001$)。原生植被样地中褐云玛瑙螺残体的壳高(图 3b, $P < 0.001$)、壳宽(图 3c, $P < 0.001$)和壳重(图 3d, $P = 0.004$)显著大于孪花蓼扩张的样地, 且随扩张程度增加而减小, 但在轻度扩张和重度扩张样地之间差异不显著。重度扩张样地内的钻头螺科残体的壳高(图 3f, $P < 0.001$)和壳宽(图 3g, $P = 0.004$)显著大于轻度扩张样地, 壳重无显著差异(图 3h, $P > 0.05$)。坚齿螺科残体的壳高随扩张程度的增加而显著增加(图 3j, $P < 0.001$), 壳宽无明显的变化趋势(图 3k, $P > 0.05$), 壳重在重度扩张样地中

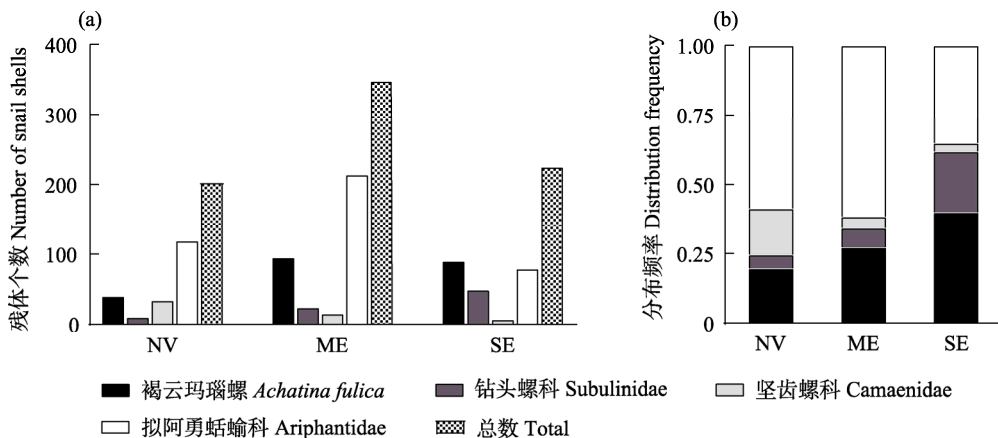


图 2 陆生软体动物在孪花蓼不同扩张程度样地的残体数量(a)和分布频率(b)。NV: 原生植被样地; ME: 轻度扩张样地; SE: 重度扩张样地。

Fig. 2 The shell number (a) and distribution frequency (b) of terrestrial mollusks in the sampling plots with different abundance of *Wedelia biflora*. NV, Native vegetation sample plot; ME, Mild expansion sample plot; SE, Severe expansion sample plot.

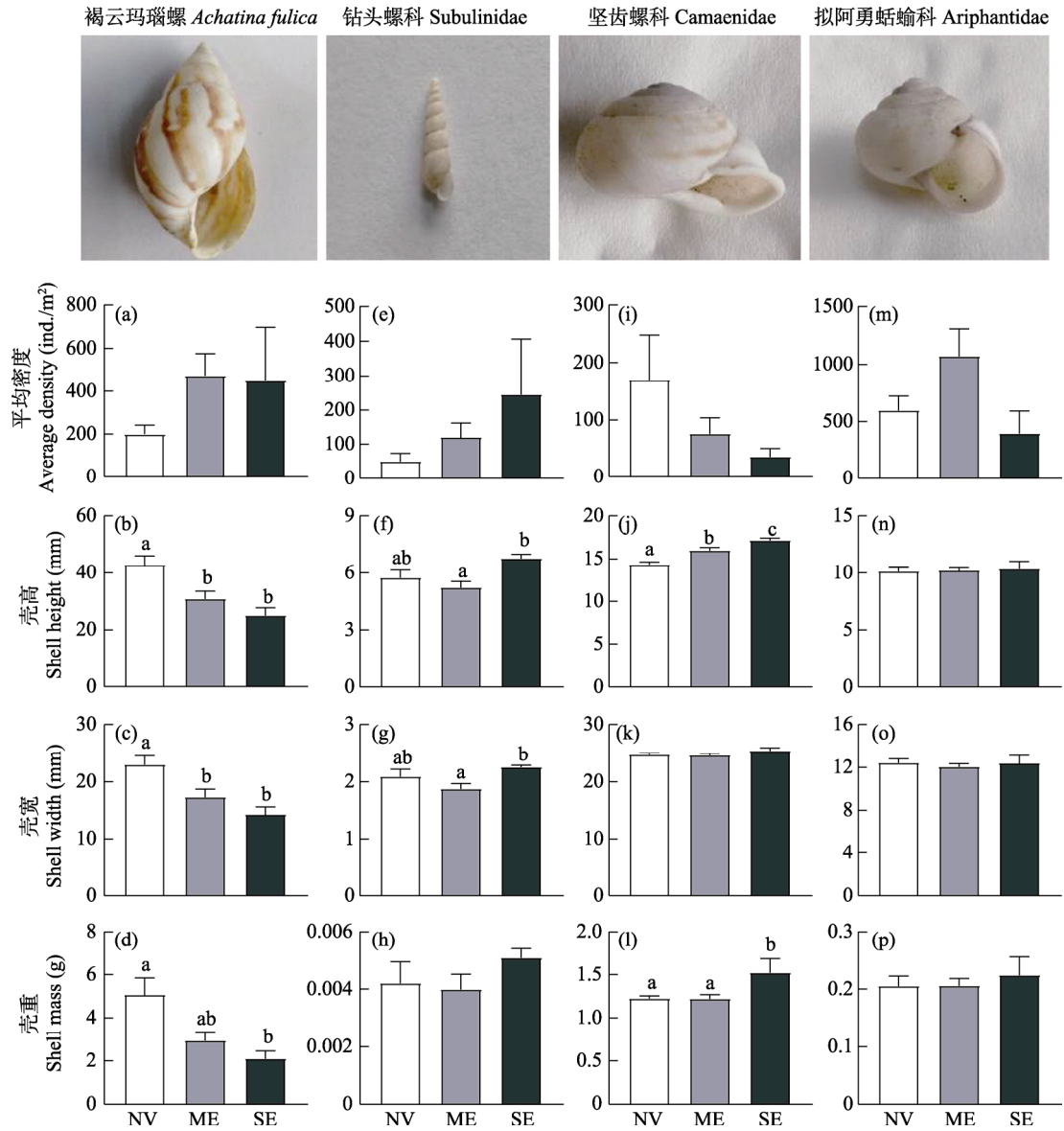


图3 李花薊菊扩张对陆生软体动物密度与形态指标的影响(平均值 ± 标准误), 不同小写字母代表不同扩张程度样地之间差异显著。a-d: 褐云玛瑙螺; e-h: 钻头螺科; i-l: 坚齿螺科; m-p: 拟阿勇蛞蝓科。NV: 原生植被样地; ME: 轻度扩张样地; SE: 重度扩张样地。

Fig. 3 Effect of *Wedelia biflora* abundance on the density and morphological properties of terrestrial mollusks (Mean ± SE). Columns with different letters indicate significant differences among plots of different *Wedelia biflora* abundance ($P < 0.05$). a-d, *Achatina fulica*; e-h, Subulinidae; i-l, Camaenidae; m-p, Ariphantidae. NV, Native vegetation sample plot; ME, Mild expansion sample plot; SE, Severe expansion sample plot.

表1 李花薊菊扩张程度、软体动物类群及两者交互作用对陆生软体动物残体密度、壳高、壳宽和壳重的影响
Table 1 Effects of *Wedelia biflora* abundance, mollusk taxa and their interaction on the density, shell height, shell width, and shell weight of mollusk

解释变量 Explaining variable	密度 Density	壳高 Shell height	壳宽 Shell width	壳重 Shell mass
扩张 Expansion	2.1 (0.136)	1.6 (0.206)	1.9 (0.151)	2.4 (0.095)
类群 Taxa	12.1 (<0.001)	109.6 (<0.001)	94.9 (<0.001)	77.9 (<0.001)
扩张 × 类群 Expansion × Taxa	2.2 (0.061)	5.3 (<0.001)	3.9 (0.001)	5.5 (<0.001)

括号外数值为F值, 括号内数值为P值。The figures outside the brackets are F-value and those in the brackets are P-value.

显著大于其他样地(图3i, $P = 0.010$)。拟阿勇蛞蝓科的残体壳高、壳宽和壳重在三种扩张程度的样地中均无显著差异(图3n, o, p, $P > 0.05$)。

2.4 陆生软体动物大小分布频率

由于陆生软体动物残体的三种形态参数的分布频率变化趋势相近, 因此本研究采用壳高的分布频率来反映不同扩张程度的样地内陆生软体动物

历史累积个体大小分布频率变化情况。从图4中可以看出, 随扩张程度增加, 褐云玛瑙螺从大体型向小体型转变, 大体型个体分布频率下降, 而小体型个体数目占总个体数分布频率上升。与褐云玛瑙螺残体的变化趋势相反, 坚齿螺科、拟阿勇蛞蝓科大体型个体分布频率随扩张程度的增加而增加, 钻头螺科的变化趋势不明显。

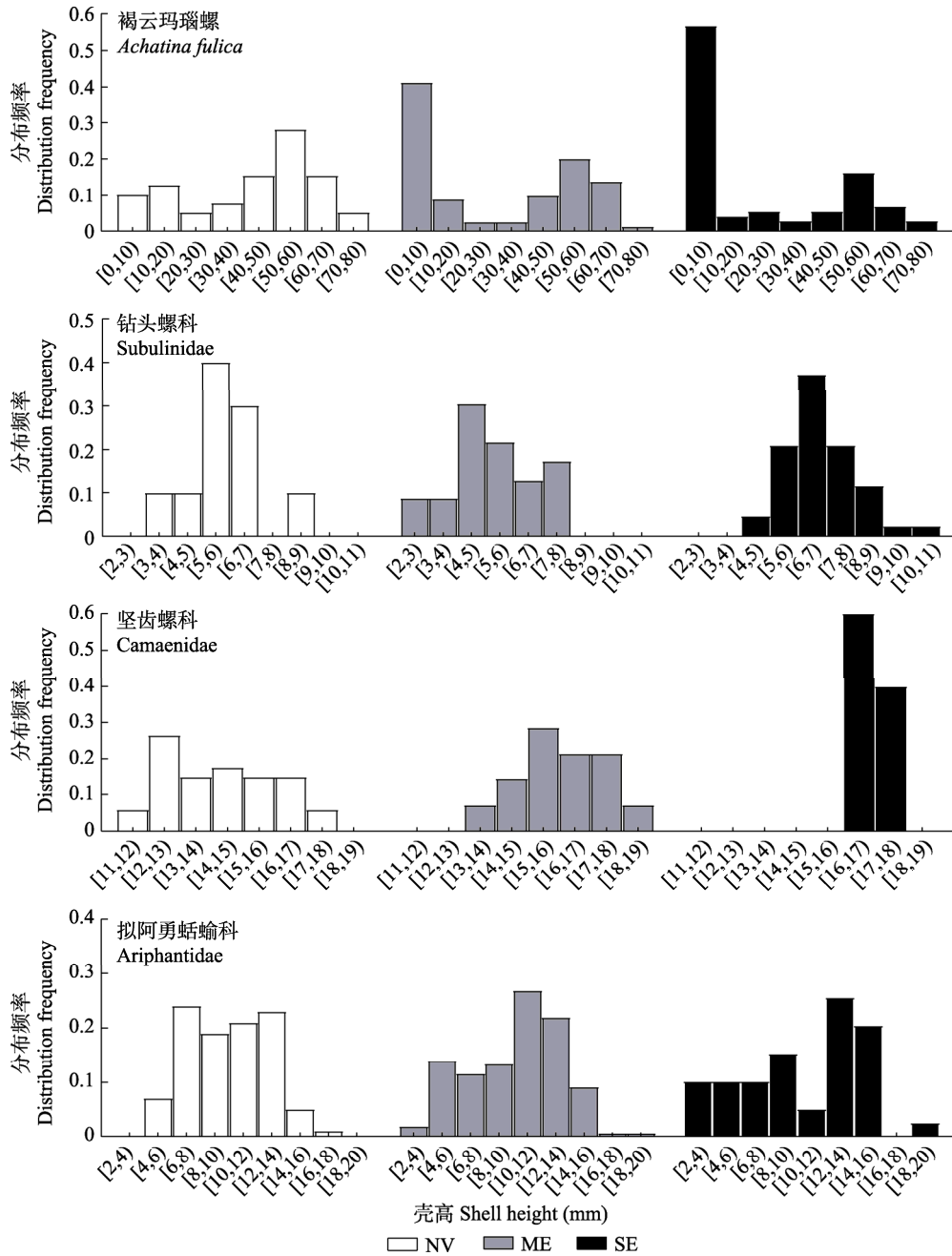


图4 孪花虻蜥菊扩张对陆生软体动物体型分布频率的影响。NV: 原生植被样地; ME: 轻度扩张样地; SE: 重度扩张样地。
Fig. 4 Effect of *Wedelia biflora* abundance on body morphological properties of the terrestrial mollusks. NV, Native vegetation sample plot; ME, Mild expansion sample plot; SE, Severe expansion sample plot.

3 讨论

植物为地上及地下的生物提供栖息环境和食物,并能够通过分泌次生代谢产物调节生物间的相互关系。外来植物入侵能够改变生境微环境和土壤资源水平,影响土壤生物群落结构(Gerber et al, 2008; McCary et al, 2016)。有研究表明外来植物入侵可以显著降低(Horáčková et al, 2014)或增加(Stoll et al, 2012; Ruckli et al, 2013)本地蜗牛的生物量和多样性。考虑到有害植物的扩张与外来植物入侵过程非常相似,我们推测有害植物李花蓼菊快速扩张可能会通过改变土壤环境、食物输入和次生代谢产物等(Utz et al, 2018),进而影响陆生软体动物的群落结构、种群密度、形态特征和适应策略。本文的研究结果表明,陆生软体动物的残体密度和形态特征主要受有害植物李花蓼菊扩张程度和陆生软体动物类群交互作用的影响,响应方式在外来物种和本土物种之间表现出明显分异。

在李花蓼菊扩张样地内外来物种褐云玛瑙螺残体密度大于原生植被样地,残体占采集的总残体百分比随着李花蓼菊扩张程度增加而增加,这表示李花蓼菊的扩张不仅没有导致褐云玛瑙螺种群中个体数目的抑制和衰退,反而刺激了其种群中个体数目的增长。本地物种钻头螺科软体动物的密度和占总残体百分比表现出与褐云玛瑙螺类似的响应,也随李花蓼菊扩张程度增加而增加。我们在调查中发现李花蓼菊扩张以后其凋落物在地表的积累明显增加,分解过程减慢,这为钻头螺科软体动物提供了地表遮蔽和缝隙等生活环境,有利于其种群的发展(陈德牛和高家祥, 1987; 杜莉, 2015^①)。而坚齿螺科软体动物的种群密度随李花蓼菊扩张程度增加表现出降低的趋势,这可能与植物组织和凋落物中的次生代谢产物产生的低适口性和毒性相关(曾坤玉等, 2008; Horáčková et al, 2014; 邢树文等, 2015)。随着李花蓼菊扩张程度的增加,本地类群拟阿勇蛞蝓科软体动物的密度表现出先增加后降低的趋势。李花蓼菊扩张初期形成的阴湿环境和较好的养分供应适宜喜欢栖息于阴暗潮湿、多腐殖质环境的拟阿勇蛞蝓科软体动物生存(陈元晓等, 1997; Ruckli et al, 2013)。但是随着

扩张程度增加,资源的限制程度增加,外来物种褐云玛瑙螺在资源竞争方面表现出更强的优势(Raut & Barker, 2002; Lima et al, 2020),导致拟阿勇蛞蝓科物种的种群受到抑制,种群密度降低。

李花蓼菊扩张对陆生软体动物的影响也表现在残体的形态特征方面,主要受植物扩张和软体动物类群相互作用的影响。李花蓼菊扩张初期对3个本地软体动物类群平均体型和分布频率变化趋势影响不明显或倾向向较大个体方向发展。李花蓼菊扩张提供的适宜环境条件使钻头螺科软体动物体型变大,这与Baur和Raboud (1988)和Anderson等 (2007)的研究结果一致,体型较大的成年蜗牛可以产生更多的子代,促进后代种群增长。坚齿螺科软体动物体型随李花蓼菊扩张程度增加而变大,在分布频率上呈现中小体型个体数量减少,但在重度扩张样地内仅发现大体型残体个体。这表明李花蓼菊重度扩张时,成年坚齿螺科软体动物可能在留下子代前死亡,或子代无法正常孵化。与本地物种相比,外来物种褐云玛瑙螺残体形态特征对李花蓼菊扩张的响应表现出相反的趋势,壳高、壳宽和壳重等形态指标随着扩张程度的增加而降低。褐云玛瑙螺体型减小可能与李花蓼菊扩张引起地表温度、湿度变化,土壤有机质和其他微量元素(如钙、镁、钾)含量减少有关(Goodfriend, 1986; Bhattacharyya et al, 2014)。

我们调查发现褐云玛瑙螺的残体体型范围较大,壳高介于4.04 mm至73.54 mm之间,属于大型螺类(Pearce & Örstan, 2006; 杜莉, 2015^①)。随李花蓼菊扩张程度增加,褐云玛瑙螺个体体型的分布频率向小体型个体方向转移:褐云玛瑙螺小体型残体(壳高: 0–10 mm)分布频率大量增加,而大体型残体(壳高: 60–80 mm)分布频率则明显减少。李花蓼菊扩张也改变了褐云玛瑙螺种群的生长阶段构成,当褐云玛瑙螺生长至58 mm,螺层6层左右后,可视为具有繁殖能力的个体(杞桑, 1985)。从残体壳高的分布频率(图4)和根据螺层划分的生长阶段的分布频率来看(图5),随李花蓼菊扩张程度增加,褐云玛瑙螺在幼螺时期死亡的比率增加,减少了生长期阶段的个体分布频率,但成螺的分布频率大于原生植被样地中成螺的分布频率,意味着在李花蓼菊扩张样地中有更大比例的褐云玛瑙螺成长为具有繁殖能力的成螺(Sidelnikov & Stepanov, 2000)。褐云

① 杜莉 (2015) 中国钻头螺总科(Subulinoidea)的比较形态学与分类. 硕士学位论文, 南京大学, 南京.

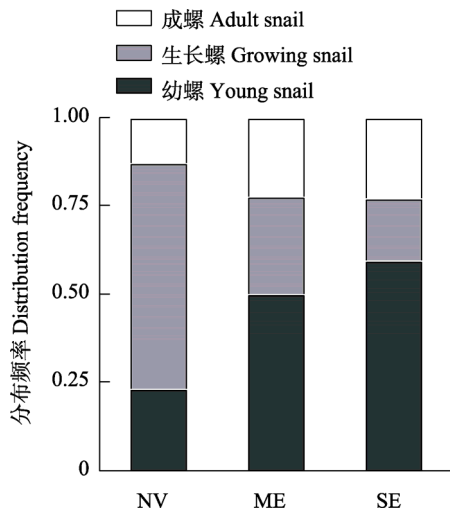


图5 不同生长阶段褐云玛瑙螺在孪花蓼蓟菊不同扩张程度样地的分布频率。NV: 原生植被样地; ME: 轻度扩张样地; SE: 重度扩张样地。

Fig. 5 The distribution frequency of the growth stage of *Achatina fulica* in the plots of a different abundance of *Wedelia biflora*. NV, Native vegetation sample plot; ME, Mild expansion sample plot; SE, Severe expansion sample plot.

玛瑙螺的种群在受到孪花蓼蓟菊扩张的干扰后, 为了应对土壤养分的缺乏或孪花蓼蓟菊植物体中次生代谢产物的毒性作用, 具有繁殖能力的褐云玛瑙螺产出大量螺卵, 进而繁育后代和维持种群, 表明褐云玛瑙螺采用r对策来响应有害植物的扩张 (Bhattacharyya et al, 2014)。

尽管我们的研究发现孪花蓼蓟菊扩张影响陆地软体生物的种群密度和形态特征, 但是由于实验设计定位于调查研究, 再加上已有相关文献的缺乏, 使得我们无法从因果关系的角度在机理上进行更为深入地探讨。今后需要通过针对性的实验设计和全面的数据观测来深入研究有害生物孪花蓼蓟菊扩张影响陆生软体动物的生态学机制。

参考文献

Anderson TK, Weaver KF, Guralnick RP (2007) Variation in adult shell morphology and life-history traits in the land snail *Oreohelix cooperi* in relation to biotic and abiotic factors. *Journal of Molluscan Studies*, 73, 129–137.

Baur B, Raboud C (1988) Life history of the land snail *Arianta arbustorum* along an altitudinal gradient. *Journal of Animal Ecology*, 57, 71–87.

Bhattacharyya B, Das M, Mishra H, Nath DJ, Bhagawati S (2014) Bioecology and management of giant African snail, *Achatina fulica* (Bowdich). *International Journal of Plant Protection*, 7, 476–481.

Chen DN, Gao JX (1987) A new species of land snails from China (Stylommatophora: Subulinidae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 12, 20–22. (in Chinese with English abstract) [陈德牛, 高家祥 (1987) 中国陆生贝类一新种(柄眼目: 钻螺科). *动物分类学报*, 22, 20–22.]

Chen DN, Yang LL, Zhang GQ (1997) Species diversity of terrestrial mollusks in different habitats in Xishuangbanna tropical forest region. *Chinese Biodiversity*, 5, 5–13. (in Chinese with English abstract) [陈德牛, 杨龙龙, 张国庆 (1997) 西双版纳热带森林地区不同生境陆生软体动物多样性研究. *生物多样性*, 5, 5–13.]

Chen DN, Zhang WH (2004) An alien species—*Achatina fulica* Ferussac (African giant snail). *Bulletin of Biology*, 39(6), 15–16. (in Chinese) [陈德牛, 张卫红 (2004) 外来物种褐云玛瑙螺(非洲大蜗牛). *生物学通报*, 39(6), 15–16.]

Chen YX, Chen DN, Zhang GQ (1997) A new species of land snail from China (Pulmonata: Stylomma: Ariophantidae). *Acta Zootaxonomica Sinica*, 22, 19–22. (in Chinese with English abstract) [陈元晓, 陈德牛, 张国庆 (1997) 中国陆生贝类一新种(肺螺亚纲: 柄眼目: 拟阿勇蛞蝓科). *动物分类学报*, 22, 19–22.]

Gerber E, Krebs C, Murrell C, Moretti M, Rocklin R, Schaffner U (2008) Exotic invasive knotweeds (*Fallopia* spp.) negatively affect native plant and invertebrate assemblages in European riparian habitats. *Biological Conservation*, 141, 646–654.

Gong ZT, Zhang GL, Yang F (2013) Soils and the soil ecosystem in the South China Sea Island. *Ecology and Environmental Sciences*, 22, 183–188. (in Chinese with English abstract) [龚子同, 张甘霖, 杨飞 (2013) 南海诸岛的土壤及其生态系统特征. *生态环境学报*, 22, 183–188.]

Goodfriend GA (1986) Variation in land-snail shell form and size and its causes: A review. *Systematic Zoology*, 35, 204–223.

Guo J, Zhang JE, Wu RS, Zhao BL, Yang HR (2015) Overview and perspective on the current research status for the giant snail *Achatina fulica* in China. *Journal of Southern Agriculture*, 46, 626–630. (in Chinese with English abstract) [郭靖, 章家恩, 吴睿珊, 赵本良, 杨慧荣 (2015) 非洲大蜗牛在中国的研究现状及展望. *南方农业学报*, 46, 626–630.]

Horáčková J, Juříčková L, Šizling AL, Jarošík V, Pyšek P (2014) Invasiveness does not predict impact: Response of native land snail communities to plant invasions in riparian habitats. *PLoS ONE*, 9, e108296.

Kistner EJ, Dybdahl MF (2013) Adaptive responses and invasion: The role of plasticity and evolution in snail shell morphology. *Ecology and Evolution*, 3, 424–436.

Li P, Huang XD, Li Y, Li WY, Huang HP, Yang XL (2008) Occurrence and control of African giant snail in Yunnan Province. *Plant Quarantine*, 22, 189–190. (in Chinese) [李

萍, 黄新动, 李燕, 李文跃, 黄汉培, 杨秀兰 (2008) 非洲大蜗牛在云南的发生规律及防治方法. 植物检疫, 22, 189–190.]

- Lima MG, Augusto RD, Pinheiro J, Thiengo SC (2020) Physiology and immunity of the invasive giant African snail, *Achatina (Lissachatina) fulica*, intermediate host of *Angiostrongylus cantonensis*. Developmental and Comparative Immunology, 105, 103579.
- McCary MA, Mores R, Farfan MA, Wise DH (2016) Invasive plants have different effects on trophic structure of green and brown food webs in terrestrial ecosystems: A meta-analysis. Ecology Letters, 19, 328–335.
- Pearce TA, Örstan A (2006) Terrestrial gastropoda. In: The Mollusks: A Guide to Their Study, Collection, and Preservation (eds Sturm C, Pearce TA, Valdés A), pp. 261–285. American Malacological Society, Arlington.
- Podrouzkova S, Janovsky Z, Horackova J, Jurickova L (2015) Do snails eat exotic plant species invading river floodplains? Journal of Molluscan Studies, 81, 139–146.
- Qi S (1985) Ecological studies on the African giant snail (*Achatina fulica* Ferussac). Chinese Journal of Ecology, (5), 15–18. (in Chinese with English abstract) [杞桑 (1985) 褐云玛瑙螺的生态研究. 生态学杂志, (5), 15–18.]
- Raut SK, Barker GM (2002) *Achatina fulica* Bowdich and other Achatinidae as pests in tropical agriculture. In: Molluscs as Crop Pests (ed. Barker GM), pp. 55–114. CABI, Wallingford.
- Ren H, Jian SG, Zhang QM, Wang FG, Shen T, Wang J (2017) Plants and vegetation on South China Sea Islands. Ecology and Environmental Sciences, 26, 1639–1648. (in Chinese with English abstract) [任海, 简曙光, 张倩媚, 王发国, 沈彤, 王俊 (2017) 中国南海诸岛的植物和植被现状. 生态环境学报, 26, 1639–1648.]
- Ren H, Liu Q, Li LH, Liu ZF (2019) Introduction of Restoration Ecology, 3rd edn. Science Press, Beijing. (in Chinese) [任海, 刘庆, 李凌浩, 刘占锋 (2019) 恢复生态学导论 (第三版). 科学出版社, 北京.]
- Ruckli R, Rusterholz HP, Baur B (2013) Invasion of *Impatiens glandulifera* affects terrestrial gastropods by altering microclimate. Acta Oecologia, 47, 16–23.
- Sidelnikov AP, Stepanov IL (2000) Influence of population density on growth and regenerative capacity of the snail *Achatina fulica*. Biology Bulletin of the Russian Academy of Sciences, 27, 438–444.
- Stoll P, Gatzsch K, Rusterholz HP, Baur B (2012) Response of plant and gastropod species to knotweed invasion. Basic and Applied Ecology, 13, 232–240.
- Tong Y, Jian SG, Chen Q, Li YL, Xing FW (2013) Vascular plant diversity of the Paracel Islands, China. Biodiversity Science, 21, 364–374. (in Chinese with English abstract) [童毅, 简曙光, 陈权, 李玉玲, 邢福武 (2013) 中国西沙群岛植物多样性. 生物多样性, 21, 364–374.]
- Utz RM, Pearce TA, Lewis DL, Mannino JC (2018) Elevated native terrestrial snail abundance and diversity in association with an invasive understory shrub, *Berberis thunbergii*, in a North American deciduous forest. Acta Oecologica, 86, 66–71.
- Wang QL, Tang H, Wang ZN (2019) Investigation and evaluation of plant resources diversity of Xisha Islands, China. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 39(8), 40–52. (in Chinese with English abstract) [王清隆, 汤欢, 王祝年 (2019) 西沙群岛植物资源多样性调查与评价. 热带农业科学, 39(8), 40–52.]
- Wang R, Tang WH, Song YM, Zhou SC (2011) Analysis on quality status and characteristics of soil environment in Xisha Islands. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 39, 5837–5840. (in Chinese with English abstract) [王瑞, 唐文浩, 宋玉梅, 周石池 (2011) 西沙群岛土壤环境质量状况及特征分析. 安徽农业科学, 39, 5837–5840.]
- Wang SH, Zhu YJ, Wang YF, Mao P, Liu N, Jian SG, Zhu LW, Liu H, Zhang W (2019) Effect of vegetation types on soil physicochemical property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 27, 383–390. (in Chinese with English abstract) [王森浩, 朱怡静, 王玉芳, 毛鹏, 刘楠, 简曙光, 朱丽薇, 刘慧, 张炜 (2019) 西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响. 热带亚热带植物学报, 27, 383–390.]
- Wu SP, Hwang CC, Huang HM, Chang HW, Lin YS, Lee PF (2007) Land molluscan fauna of the Dongsha Island with twenty new recorded species. Taiwaniana, 52, 145–151.
- Xing FW, Wu DL, Li ZX, Ye HG, Chen BH (1993) Investigation of plant resources in Xisha Islands. Journal of Plant Resources and Environment, 2(3), 1–6. (in Chinese with English abstract) [邢福武, 吴德邻, 李泽贤, 叶华谷, 陈炳辉 (1993) 西沙群岛植物资源调查. 植物资源与环境学报, 2(3), 1–6.]
- Xing SW, Zhu H, Zha GC, Wu RH, Chen P, Pan H, Lin YF (2015) Effects of prevention and control of extracting solution from four invasive plants on *Achatina fulica*. Acta Oecologica Sinica, 35, 3067–3075. (in Chinese with English abstract) [邢树文, 朱慧, 查广才, 吴荣浩, 陈萍, 潘瀚, 林银芳 (2015) 四种入侵植物提取液对褐云玛瑙螺的防控效果. 生态学报, 35, 3067–3075.]
- Xu BB, Liu N, Ren H, Wang XH, Liu N, Jian SG (2018) Stress resistance biological characteristics of *Scaevola sericea* in Paracel Islands. Guihaia, 38, 1277–1285. (in Chinese with English abstract) [徐贝贝, 刘楠, 任海, 王馨慧, 刘念, 简曙光 (2018) 西沙群岛草海桐的抗逆生物学特性. 广西植物, 38, 1277–1285.]
- Yin GL (1965) Observation on the living habits of *Achatina fulica*. Chinese Journal of Zoology, (1), 42–43. (in Chinese) [尹淦镠 (1965) 褐云玛瑙螺生活习性的观察. 动物学杂志, (1), 42–43.]
- Yin WY (1998) Pictorial Keys to Soil Animals of China. Science Press, Beijing. (in Chinese) [尹文英 (1998) 中国土壤动物检索图鉴. 科学出版社, 北京.]

- Zeng KY, Hu F, Chen YF, Chen JJ, Kong CH (2008) Effects of four invasive plants with the same origin area of *Ampullaria gigas* (golden snail) on its behaviors and killing activity. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 260–266. (in Chinese with English abstract) [曾坤玉, 胡飞, 陈玉芬, 陈建军, 孔垂华 (2008) 四种与福寿螺(*Ampullaria gigas*)同源地扩张植物的杀螺效果. *生态学报*, 28, 260–266.]
- Zhou HC, Ren H, Peng SL (2001) Community dynamics during the process of vegetation restoration on Nan'ao Island, Guangdong. *Acta Phytoecologica Sinica*, 25, 298–305. (in Chinese with English abstract) [周厚诚, 任海, 彭少麟 (2001) 广东南澳岛植被恢复过程中的群落动态研究. *植物生态学报*, 25, 298–305.]
- Zhou WC (2006) A study on the biology of the African giant snail population. *Plant Protection*, 32(2), 86–88. (in Chinese) [周卫川 (2006) 非洲大蜗牛种群生物学研究. *植物保护*, 32(2), 86–88.]
- Zhou WC, Wu YF, Cai JF, Zhan KR (2001) Developmental zero and effective accumulated temperature of African giant snail. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 16(3), 25–27. (in Chinese with English abstract) [周卫川, 吴宇芬, 蔡金发, 詹开瑞 (2001) 褐云玛瑙螺发育零点和有效积温的研究. *福建农业学报*, 16(3), 25–27.]
- Zhou Y, Zhai YC (1985) Study on spatial distribution pattern and sampling technique of snail. *Plant Protection*, 11(5), 22–23. (in Chinese) [周勇, 翟友成 (1985) 蜗牛空间分布型及抽样技术的研究. *植物保护*, 11(5), 22–23.]
- Zhu TB, Zhang LH, Cheng QW, Li W, Zhang TL (2013) A preliminary study on the shape and shell strength of four kinds of snails in Liangzi Lake, Hubei Province. *Journal of Hydroecology*, 34(5), 91–95. (in Chinese with English abstract) [朱挺兵, 张丽红, 程庆武, 李为, 张堂林 (2013) 湖北梁子湖四种螺的形态与壳强度初步研究. *水生态学杂志*, 34(5), 91–95.]

(责任编辑: 万方浩 责任编辑: 闫文杰)