•研究报告•

南洞庭湖区软体动物物种多样性 评估及保护对策

刘振元^{1,3} 孟星亮¹ 李正飞¹ 张君倩¹ 徐靖² 银森录² 谢志才^{1*}

1 (中国科学院水生生物研究所水生生物多样性与资源研究保护中心, 武汉 430072)

2 (中国环境科学研究院国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

3 (中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 洞庭湖孕育和维持了较高和独特的软体动物多样性。尽管有关该湖软体动物的调查较多, 但多分散于各文献中。本文结合文献调研和现场调查(2013–2018年), 系统评估了南洞庭湖区软体动物物种多样性, 解析驱动群落格局演变的关键因子, 并提出合理的保护对策。共记录2纲5目14科33属87种(腹足纲41种, 双壳纲46种), 其中本调查记录54种, 隶属于2纲5目12科31属, 包括腹足纲22种, 双壳纲32种。评估结果显示处于近危和受威胁等级物种21种, 包括腹足纲4种和双壳纲17种。调查区域软体动物平均密度和生物量分别为173.1 ind./m²和279.3 g/m²。优势种为河蚬(*Corbicula fluminea*)、大沼螺(*Parafossarulus eximius*)、铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、卵河螺(*Rivularia ovum*)。基于距离的冗余分析(distance-based redundancy analysis, dbRDA)结果显示, 局域环境因子(底质类型、水深、pH、总溶解固体和总磷)制约软体动物的群落变异。另外, 区域内的人类活动(如商业采砂、建坝和沿岸土地利用、过度捕捞和非法电捕等)亦深刻影响软体动物的生存。这些人类干扰已导致软体动物物种多样性显著下降, 可能造成一些特有物种的局域性灭绝。为了恢复和保护软体动物物种多样性和资源, 应采取一系列对策, 包括管控合法的挖沙业和取缔非法挖沙业、禁止过度捕捞和非法电捕、维持水文的自然节律、恢复沿岸自然湖滨带和控制点源和面源污染物排入等。我们呼吁尽快在南洞庭湖区建立软体动物国家级自然保护区, 以保护该湖区(可能是整个洞庭湖)残存的软体动物物种多样性和特有性。

关键词: 软体动物; 南洞庭湖区; 物种多样性评估; 保护对策

Diversity assessment and protection strategies for the mollusk community in the southern Dongting Lake

Zhenyuan Liu^{1,3}, Xingliang Meng¹, Zhengfei Li¹, Junqian Zhang¹, Jing Xu², Senlu Yin², Zhicai Xie^{1*}

1 Center for Aquatic Biodiversity and Resource Conservation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072

2 State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: Being the second largest freshwater lake in China, the Dongting Lake supports high biodiversity of endemic mollusks. Although surveys concerning mollusk diversity in this region are plentiful, there is no comprehensive resource for cataloging their diversity. Here, we carried out a comprehensive mollusk diversity assessment in the southern Dongting Lake and identified potential factors driving the observed community patterns, based on combined historical datasets and a five-year field survey (2013–2018). We identified a total of 87 species (Gastropoda: 41 species and Bivalvia: 46 species) belonging to 5 orders, 14 families, 33 genera. Fifty-four species (Gastropoda: 22 species and Bivalvia: 32 species) of mollusks were found, belonging to 5 orders, 12 families, 31 genera. Twenty-one species were in vulnerable condition

收稿日期: 2019-09-14; 接受日期: 2019-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(41571495)、生态环境部生物多样性专项(2017HB2096001006)、中科院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-3-2)和水生所特色项目

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhcxie@ihb.ac.cn

(Gastropoda: 4 species and Bivalvia: 17 species). Dominant species were *Corbicula fluminea*, *Parafossarulus eximius*, *Bellamya aeruginosa*, *Rivularia ovum*. Distance-based redundancy analysis (dbRDA) shows that some local physical (substrate and water depth) and chemical (pH, total dissolved solid and total phosphate) factors seemed to regulate mollusk community. Additionally, human activities in the region (such as commercial sand-mining industry, dam construction and coastal land use, overfishing and illegal electric fishing) also have a profound impact on the survival of mollusk. More importantly, anthropogenic pressures have caused a dramatic decline in mollusk diversity in recent decades, possibly leading to local extinction of some previously recorded endemic species. To protect the lake's mollusk diversity, a series of strategies and practices should be taken by local authorities and the public. These practices could include control and regulation of the illegal sand-mining industry, a ban on overfishing and illegal electric fishing, maintaining the naturally hydrology, recovery of natural riparian zones, and control the discharge of point source and non-point source pollutants. We argued that a mollusk-based reserve should be established to protect mollusk diversity and endemism of the benthos, and possibly the lake as a whole.

Key words: mollusk; southern Dongting Lake; species diversity assessment; protection strategies

长江中下游湖泊孕育有丰富的软体动物物种多样性。历史上曾记录软体动物110种(腹足纲10科56种, 双壳纲5科54种), 主要分布于通江湖泊(鄱阳湖和洞庭湖)(吴小平等, 2000; 胡自强等, 2004; 舒凤月等, 2009, 2014)。作为底栖动物的重要类群, 软体动物是群落食物网的基本环节之一。许多软体动物生命周期较长、移动能力弱、对环境变化敏感, 其群落结构在遭受到外界环境变化后易发生改变(陈其羽等, 1975; 李德亮等, 2011; 杜丽娜等, 2012)。近年来, 由于大型水利工程建设、商业采砂、过度捕捞、水体污染等人类活动的加剧(李倩, 2005^①; 钟振宇, 2010; 孟星亮, 2016), 软体动物资源量和多样性正面临严重威胁(徐亮, 2013)。

南洞庭湖区位于洞庭湖的西南部, 包括万子湖和东南湖两大湖区及航道, 约占洞庭湖总面积的33.5% (邵国生, 1989)。季节性的水文情势使得该湖区拥有多样的生态类型和较高的生境异质性(王苏民和窦鸿身, 1998)。有关整个洞庭湖区软体动物资源调查已开展较多工作, 如胡自强(1933)和张玺等(1965)分别对洞庭湖及周围水体腹足纲和双壳纲作过调查, 也有部分学者结合底栖动物调查记录一些软体动物物种(舒凤月等, 2014; 孟星亮, 2016; 王丑明等, 2016; Pan et al, 2017; Cai et al, 2018)。但针对南洞庭湖区软体动物的专项调查较少(江辉等, 2007; 许宝红等, 2009), 且已有的调查采样时间较早, 并未对软体动物物种现状进行濒危评估, 难以全面反

映南洞庭湖区软体动物资源现状, 因此有必要开展进一步的工作, 为南洞庭湖区软体动物保护提供理论支持。本研究的主要目的是: (1)探明南洞庭湖区软体动物群落结构和多样性现状; (2)结合南洞庭湖区软体动物历史数据和现场调查数据, 评估软体动物濒危状况; (3)分析影响软体动物分布和生存的关键环境因子, 以期软体动物的保护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域和站位布设

南洞庭湖区(112°18'15"–112°56'15" E, 28°36'15"–29°03'45" N)总面积917 km², 海拔范围为29–33.5 m, 属于典型的亚热带湿润型气候, 年均水温17.1℃, 东南湖站多年平均监测水位为30.1 m。湖区水位4月开始上涨至8月进入丰水期, 10月开始下降至翌年3月进入枯水期(袁玉洁, 2017; <http://yzt.hnswkcy.com:9090/#/>)。近年来, 南洞庭湖区遭受商业采砂影响较为严重, 2013年9月沅江市曾公开拍卖东南湖区域(面积5.2 km²) 10年的采砂权, 自白沙渡向西到杨阁老区域, 也陆续出现小型采砂船盗采(孟星亮, 2016)。采砂船的持续开采作业, 导致水体浊度上升、湖底地形改变。此外, 三峡工程运行后, 洞庭湖水文情势发生较大变化, 再加上南洞庭湖区沿岸造纸厂、农药厂的影响, 湖区富营养化与水体污染现象日益加剧(李广源, 2005^②; 曾春芳等, 2007; 孟星亮, 2016; Meng et al, 2018)。为探究该湖区软体动物现状, 本研究在南洞庭湖区共选取6个典型站位进行定量采集, 分别为杨阁老(YGL)、东南湖1[#]

① 李倩 (2005) 三峡工程对洞庭湖生态环境的影响. 硕士学位论文, 湖南大学, 长沙.

② 李广源 (2005) 三峡工程运行后对洞庭湖水体污染及水环境容量的影响研究. 硕士学位论文, 河海大学, 常州.

图1 南洞庭湖区软体动物采样点分布图

Fig. 1 Sample sites of mollusk in the southern Dongting Lake

(DNH-1[#])、东南湖2[#] (DNH-2[#])、白沙渡(BSD)、资江口(ZJK)、万子湖(WZH)(图1), 其中杨阁老、东南湖2[#]站位处于湖区西部, 该站位遭受人类活动影响相对较小, 主要受周围来水影响, 水体有机质丰富且底质以硬淤泥为主, 附近洲滩较多使得其生境异质性较高; 东南湖1[#]站位主要受采砂干扰影响; 白沙渡、资江口和万子湖站位主要遭受生活和工业水污染影响。定性采集则为整个南洞庭湖区。

1.2 样品采集与处理

本研究使用改良的拖网、彼得逊采泥器和抄网等工具于2013–2018年共开展8次软体动物采集工作。定量采集使用改良的拖网(长 × 宽: 2.5 m × 1.2 m), 每个站位拖行200 m, 拖行面积为240 m²。具体方法是将拖网置入水底, 借助手持GPS记录船只拖行距离, 呈“十”字形拖行两个重复后将标本汇合在一起, 依据拖行距离(宽度 × 拖行距离)折算出每平方米软体动物的密度和生物量。此外, 为保证采样的充分性, 在每个采样站位附近使用彼得逊采泥器(面积1/16 m²)采集2–3个重复样, 之后将采泥器数据和拖网数据进行合并, 表征每个站位的软体动物密度和生物量。在现场对采集到的部分标本进行鉴定、测量、称重和拍照后, 其中一部分标本置入500 mL广口瓶中, 采用酒精固定后带回实验室

保存, 剩余部分仍放回湖泊中。样品鉴定主要参照《中国经济动物: 淡水软体动物》(刘月英等, 1979)、《浙江动物志: 淡水软体动物》(蔡如星, 1991)、《湘江水生动物志》(曹英华等, 2012)。此外, 使用抄网采集水草区等小生境中的软体动物。

1.3 水质理化指标测定

使用YSI多参水质分析仪现场测定水温、电导率、溶解氧等水体物理指标。水体透明度、水深分别用Secchi盘、水深仪测定。依据《水和废水监测分析方法(第四版)》(国家环境保护总局, 2002), 采集水面下30 cm处水质样品500 mL, 使用浓硫酸固定后(pH < 2)带回实验室, 测定总氮、硝态氮、氨氮、总磷、正磷酸盐。采用简易吸管法(USDA Pipette Method)测定底泥颗粒直径, 并参照Kettler等(2001), 将其划分为砾石(2.0–4.0 mm)、粗砂(0.5–1.9 mm)、中砂(0.25–0.49 mm)、细砂(0.05–0.24 mm)、淤泥(0.002–0.049 mm)、粘土(< 0.002 mm)。

1.4 历史数据收集

查阅相关文献获取南洞庭湖区软体动物历史分布信息(胡自强, 1933; 张玺等, 1965; 吴小平等, 2000; 江辉等, 2007; 舒凤月等, 2009, 2014; 许宝红等, 2009; 汪星等, 2012; 张屹等, 2015; 王丑明等, 2016; 孟星亮, 2016)。

1.5 数据分析

采用相对密度确定软体动物优势种(薛涛涛等, 2019), 公式为:

$$Ri = ni / N \times 100\% \quad (1)$$

其中, ni 为第 i 种的密度, N 为总密度, Ri 为第 i 种的相对密度, 定义 $Ri \geq 5\%$ 为优势种。

使用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较各站位环境指标间是否存在显著差异。为提高数据的正态性和方差齐性, 所有水体环境因子(pH除外)与生物数据进行 $\log(x + 1)$ 转化, 颗粒直径数据采用开平方根转化(孟星亮, 2016)。使用相似性检验ANOSIM比较各站位群落结构的空間异质性。利用基于距离的冗余分析(distance-based redundancy analysis, dbRDA)甄别影响南洞庭湖区软体动物的环境因子: 首先利用前选函数(forward selection)对南洞庭湖区18个环境因子进行筛选, 最后选出关键环境因子($P < 0.10$)进入dbRDA模型(Jiang et al, 2013)。单因素方差分析在SPSS 19.0中完成, ANOSIM、dbRDA在PRIMER 6 & PERMANOVA + 中完成。

2 结果

2.1 环境状况

单因素方差分析结果显示, 各站位的水深、底质类型间存在显著差异($P < 0.05$)。水温年均值为 $19.36 \pm 8.07^\circ\text{C}$, 溶解氧为 $7.87 \pm 2.57 \text{ mg/L}$, 水深为 $4.39 \pm 2.46 \text{ m}$ 。其中杨阁老和万子湖水深低于其他站位, 均值为 2.72 m ; 东南湖2[#]和资江口站位氮营养盐含量(总氮)偏高, 白沙渡口站位磷营养盐(总磷)含量最高。采砂区东南湖1[#]站位与其他站位明显不同, 表现在水温、电导率、水深最高, 溶解氧、总氮、氨氮、总磷和正磷酸盐均最低。在底质类型方面, 杨阁老、东南湖2[#]、白沙渡、万子湖站位淤泥和粘土所占比例最高, 东南湖1[#]站位中砂和细砂、粘土比例较高, 而资江口站位则以中砂和细砂为主(表1)。

2.2 物种组成

本次调查共采集到软体动物54种, 隶属于2纲5目12科31属, 其中腹足纲22种, 双壳纲32种, 中国特有种36种(占本次调查总物种数的66.7%)。结合 历

表1 南洞庭湖区各站位的环境参数

Table 1 Environmental parameters of each station in the southern Dongting Lake

	杨阁老 YGL	东南湖2 [#] DNH-2 [#]	白沙渡 BSD	东南湖1 [#] DNH-1 [#]	资江口 ZJK	万子湖 WZH	<i>P</i>
水温 Water temperature ($^\circ\text{C}$)	17.84 ± 9.26	18.03 ± 8.40	20.90 ± 7.35	22.20 ± 8.14	21.17 ± 7.35	17.76 ± 9.15	0.794
电导率 Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	213.24 ± 58.93	204.64 ± 46.96	209.41 ± 37.87	222.70 ± 53.13	218.25 ± 37.98	207.74 ± 47.34	0.981
溶解氧 Dissolved oxygen (mg/L)	8.20 ± 3.13	8.22 ± 2.58	7.64 ± 2.16	6.62 ± 2.11	7.56 ± 2.66	8.39 ± 2.97	0.929
pH	8.27 ± 0.37	8.25 ± 0.32	8.25 ± 0.34	8.25 ± 0.32	8.32 ± 0.24	8.26 ± 0.37	0.999
水深 Water depth (m)	2.68 ± 1.06	5.06 ± 3.13	6.03 ± 1.87	6.38 ± 3.22	4.33 ± 0.98	2.78 ± 1.61	< 0.01
透明度 Transparency (m)	0.55 ± 0.17	0.44 ± 0.14	0.60 ± 0.12	0.45 ± 0.09	0.44 ± 0.17	0.49 ± 0.21	0.294
总溶解固体 Total dissolved solid (TDS, mg/L)	0.16 ± 0.02	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.16 ± 0.02	0.606
总氮 Total nitrogen (mg/L)	1.88 ± 0.47	1.99 ± 0.42	1.59 ± 0.58	1.51 ± 0.13	1.96 ± 0.57	1.90 ± 0.69	0.463
硝态氮 Nitrate nitrogen (mg/L)	1.25 ± 0.44	1.49 ± 0.30	1.50 ± 0.20	1.30 ± 0.21	1.38 ± 0.28	1.35 ± 0.43	0.634
氨氮 Ammonia nitrogen (mg/L)	0.48 ± 0.42	0.40 ± 0.34	0.31 ± 0.30	0.21 ± 0.16	0.48 ± 0.47	0.46 ± 0.39	0.516
总磷 Total phosphate (mg/L)	0.18 ± 0.10	0.17 ± 0.08	0.26 ± 0.33	0.10 ± 0.03	0.19 ± 0.28	0.17 ± 0.09	0.822
正磷酸盐 Phosphate (mg/L)	0.10 ± 0.07	0.08 ± 0.05	0.12 ± 0.09	0.06 ± 0.07	0.11 ± 0.09	0.10 ± 0.07	0.774
砾石 Gravel (%)	0.06	0.02	0.08	0.94	0.13	0.30	< 0.01
粗砂 Coarse sand (%)	1.28	1.75	0.43	4.23	0.45	8.34	< 0.01
中砂 Medium sand (%)	0.23	0.83	0.16	37.50	32.10	0.90	< 0.01
细砂 Fine sand (%)	10.69	3.87	9.79	17.21	58.65	18.85	< 0.01
淤泥 Silt (%)	30.69	40.83	25.70	16.20	0.00	21.49	< 0.01
粘土 Clay (%)	57.06	52.69	63.84	23.91	8.67	50.12	< 0.01

史文献, 南洞庭湖共记录软体动物2纲5目14科33属87种(附录1)。与历史记录86种(腹足纲41种和双壳纲45种)相比, 本次调查未采集到的物种有33种(包括腹足纲19种和双壳纲14种), 包括田螺科(8种)和蚌科(12种); 新增加的物种为翼鳞皮蚌(*Lepidodesma aligera*)。

从空间分布看, 杨阁老和东南湖2[#]物种数最多, 均采集到32种, 其次为万子湖和白沙渡, 资江口和东南湖1[#]最低。从各类群看, 腹足纲在万子湖、杨阁老和东南湖2[#]所占比例较高; 而双壳纲则主要分布在东南湖2[#]、杨阁老、白沙渡(表2)。

2.3 优势种

南洞庭湖区优势种为河蚬(*Corbicula fluminea*)、大沼螺(*Parafossarulus eximius*)、铜锈环棱螺(*Bellamyia aeruginosa*)、卵河螺(*Rivularia ovum*) (表3)。其中河蚬是各站位的共同优势种。万子湖和资江口站位优势种以河螺属(*Rivularia*)和河蚬为主,

杨阁老、东南湖2[#]、白沙渡站位主要优势种为大沼螺和河蚬, 东南湖1[#]站位优势种为河蚬和卵河螺。

2.4 密度和生物量

南洞庭湖区软体动物平均密度和生物量分别为173.1 ind./m²和279.3 g/m²。ANOSIM结果表明, 各站位软体动物群落结构差异显著(Global $R = 0.081$, $P = 0.032$), 密度和生物量均顺着水流的方向由西向东逐渐减少。其中, 密度在杨阁老和东南湖2[#]最高, 分别为297.9 ind./m²和291.8 ind./m², 而资江口最低(46.8 ind./m²); 生物量在东南湖2[#]最高(434.6 g/m²), 东南湖1[#]站位最低(103.5 g/m²)。从各类群来看, 东南湖1[#]、杨阁老和东南湖2[#]的双壳纲相对密度达50%以上, 资江口和万子湖站位腹足纲相对密度和生物量均较高(图2)。

2.5 濒危状况评估

依据舒凤月(2009)和IUCN (2018)的评估结果, 南洞庭湖区处于近危和受威胁等级的软体动物有

表2 南洞庭湖区各站位软体动物物种数
Table 2 Specie richness of mollusk of each station in the southern Dongting Lake

	杨阁老 YGL	东南湖2 [#] DNH-2 [#]	白沙渡 BSD	东南湖1 [#] DNH-1 [#]	资江口 ZJK	万子湖 WZH	其他区域 Other region
田螺科 Viviparidae	6	7	5	2	2	6	5
豆螺科 Bithyniidae	3	1	3	3	3	5	2
肋鳃科 Pleuroseridae	2	1	1	1	1	2	2
椎实螺科 Lymnaeidae	2	1	0	0	0	1	2
膀胱螺科 Physidae	0	0	0	0	0	0	1
扁鳃螺科 Planorbidae	2	3	0	0	1	1	3
瓶螺科 Pilaidae	0	0	0	0	0	0	1
蚌科 Unionidae	14	16	12	5	6	10	18
截蛭科 Solecurtidae	0	1	0	0	1	0	1
蚬科 Corbiculidae	1	1	1	1	1	1	1
球蚬科 Sphaeriidae	1	0	0	0	0	0	1
贻贝科 Mytilidae	1	1	0	1	0	1	1
总计 Total	32	32	22	13	15	27	38

表3 南洞庭湖区及各站位软体动物优势种的密度(ind./m²)
Table 3 The density of dominant species of mollusk in each station and the southern Dongting Lake (ind./m²)

	全湖区 Whole lake	杨阁老 YGL	东南湖2 [#] DNH-2 [#]	白沙渡 BSD	东南湖1 [#] DNH-1 [#]	资江口 ZJK	万子湖 WZH
铜锈环棱螺 <i>Bellamyia aeruginosa</i>	42.3	41.5				33.5	92.4
长河螺 <i>Rivularia elongate</i>			58.0			131.0	122.5
卵河螺 <i>Rivularia ovum</i>	31.4				28.41	158.9	
双龙骨河螺 <i>Rivularia bicarinata</i>							90.3
大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	76.9	75.9	187.4	79.0			
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	72.4	324.1	365.4	174.8	109.71	213.4	106.9

图2 南洞庭湖区各站位软体动物的密度和生物量

Fig. 2 The density and biomass of mollusk of each station in the southern Dongting Lake

21种, 占总物种数的38.9%。其中腹足纲4种, 分别为耳河螺(*Rivularia auriculata*)、卵河螺、双龙骨河螺(*Rivularia bicarinata*)、格氏短沟蜷(*Semisulcospira gredleri*); 双壳纲17种均为蚌科物种。此外, 采集到的中国淡水蛭(*Novaculina chinensis*)、翼鳞皮蚌、尖锄蚌(*Ptychorhynchus pfisteri*)等中国特有种缺乏相关濒危状况资料, 今后应着重关注。

2.6 与环境因子的关系

基于前选函数对18个环境因子进行相关性分析, dbRDA结果表明, pH、水深、底质类型(淤泥、粗砂)、总磷、溶解氧、总溶解固体是制约软体动物分布的关键环境因子($P < 0.1$) (表4, 图3), 共解释了环境-物种变异的18.1%, 其中前两轴分别拟合了39.3%、22.1%的环境变量和物种数据, 分别解释了11.6%、6.5%的环境-物种变异。

3 讨论

3.1 软体动物物种多样性及评估

长江中下游湖泊是世界上淡水贝类最为丰富

表4 制约南洞庭湖区软体动物群落结构的环境因子

Table 4 Environmental factors that restrict the structure of mollusk community in the southern Dongting Lake

环境参数 Environmental parameters	校正 R^2 Adj R^2	F	P
pH	0.033	2.395	0.013
水深 Water depth (m)	0.064	2.344	0.015
淤泥 Silt (%)	0.089	2.088	0.042
总磷 Total phosphate (TP, mg/L)	0.108	1.796	0.074
总溶解固体 Total dissolved solid (TDS, mg/L)	0.129	1.905	0.055
粗砂 Coarse sand (%)	0.151	1.896	0.065
溶解氧 Dissolved oxygen (DO, mg/L)	0.217	1.735	0.080

的地区之一(吴小平, 1998; 舒凤月, 2009; Bogatov & Prozorova, 2013)。洞庭湖流域软体动物资源丰富, 共记录软体动物106种(孟星亮, 2016), 这与其独特的环境条件有关: 首先, 洞庭湖流域水面宽阔, 不仅为淡水软体动物免遭冰川的袭击提供了良好的避难所, 而且稳定的自然环境也有利于特有种的形成(舒凤月, 2009; 王丑明等, 2016; 邢圆等, 2019), 如洞庭湖孕育有我国特有属河螺属及蚌科的鳞皮

图3 南洞庭湖区环境因子与软体动物dbRDA图

Fig. 3 Distance-based redundancy analysis (dbRDA) of mollusk and environmental factors in the southern Dongting Lake

蚌属(*Lepidodesma*)。其次,江湖联通及沅水、澧水携带的细有机颗粒为软体动物带来丰富的食物资源(徐亮, 2013; Pan et al, 2017),同时季节性的水文情势动态导致水位的丰—枯水期变化,河床栖息地类型丰富,为软体动物创造了适宜的生存条件(熊六凤等, 2011; 张铭华等, 2013; 袁玉洁, 2017)。西部区域湖岸线曲折,河湖交错,生境异质性较高,水体有机质营养丰富,适合软体动物的生存,如杨阁老、东南湖2[#]和白沙渡站位软体动物物种多样性最高,在该区域采集到中国特有种高顶鳞皮蚌(*Lepidodesma languilati*)、翼鳞皮蚌、绢丝尖丽蚌(*Aculamprotula fibrosa*)、鱼尾楔蚌(*Cuneopsis pisciculus*)。第三,流水的冲刷使得西部区域底质以硬淤泥为主,这种底质特别适合丽蚌属(*Lamprotula*)和蛭蚌属(*Solenia*)的物种生存,这可能是该站位蚌类多样性高的主要原因(Meng et al, 2018)。

对比历史资料发现,软体动物呈现物种数降低、优势类群以腹足类和小型双壳类河蚌为主趋势。评估结果表明,有21种处于近危和受威胁等级,包括4种腹足纲和17种双壳纲,如河螺属、格氏短沟蜷及蚌科的物种。与此同时,一些中国特有蚌类调

查期间却始终未采集到,如金黄雕刻蚌(*Parreysia aurora*)、三角尖嵴蚌(*Acuticosta trisulcata triangula*)、巴氏丽蚌(*Lamprotula bazini*)等。尽管目前南洞庭湖区软体动物资源仍较为丰富,但总体来看资源状况不容乐观,尤其是蚌类资源衰退趋势明显,表现在物种数降低及受威胁比例增高。由于蚌类生活史的特殊性,资源遭破坏后恢复力较弱(欧阳珊等, 2011; 杨丽敏等, 2019),因此更需加大保护力度。

3.2 致危因素

dbRDA结果显示,底质类型、水深、pH值、总溶解固体、溶解氧和总磷为制约软体动物群落变异的环境因子,而区域内的人类活动(如商业采砂、水体污染、大型水利工程建设、过度捕捞和非法电捕等)亦深刻影响软体动物的生存。已有研究指出商业采砂是威胁软体动物生存的重大人类干扰(熊六凤等, 2011; 杨丽敏等, 2019),采砂活动可通过改变底质组成、导致泥沙悬浮和降低透明度、挖深河床而间接影响软体动物生物量(Jong et al, 2015; Abdelhady et al, 2019)。本研究结果也表明,布设在采砂区的东南湖1[#]站位物种组成最为单一,平均生物量只有103.5 g/m²。采砂破坏底质造成细砂和粗砂含量升高,引起的泥沙悬浮和较低透明度不仅抑制水体生产者光合作用产氧的能力^①,还会导致双壳类鳃和外套腔阻塞从而使得生长受到影响(刘俊和胡自强, 2007)。采砂干扰加深河床深度,东南湖1[#]站位水深最高,平均水深达到6.33 m,不少研究证实随水深增加,软体动物种群数量趋于降低,这可能与水体溶氧量和食物减少有关^②。对于河蚬来说,有报道其最适宜生活在砂质底质环境中(蔡炜等, 2010)。我们测定的底质类型结果显示采砂区中砂和细砂比例最高,推测这可能是河蚬在该站位为绝对优势种的重要原因。

污水排放不仅仅表现在营养盐含量增加,污水中未处理的有毒物质也可能直接影响软体动物生存(Du et al, 2011; 熊六凤, 2011; 杨丽敏等, 2019)。尽管白沙渡站位的物种多样性相对较高,但主要优势种是耐污值较高的大沼螺和河蚬。我们的结果显示

① 朱光敏 (2009) 水体浊度和低光条件对沉水植物生长的影响. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.

② 刘俊 (2006) 湘江软体动物多样性研究. 硕士学位论文, 湖南师范大学, 长沙.

总磷是影响该湖区软体动物的关键因子,这与其他研究结果一致(龚志军等,2001)。白沙渡站沿岸造纸厂及农药厂污水集中排放,造成营养盐释放导致水体污染,该站位测定的总磷营养盐达到0.26 mg/L。另外,我们在野外调查时关注到南洞庭湖区过度捕捞和电捕鱼活动较为猖獗,大功率的拖螺船每天可以吸取数千公斤的螺蚌,而电捕鱼对水生生物造成更大的破坏,直接导致水底生物的死亡。

江湖关系的改变也会给软体动物带来不利影响(Pan et al, 2017)。2003年三峡大坝蓄水改变了洞庭湖水动力及水文循环,导致秋季长江水位快速消退,进而引起水体下泄和水域面积缩小(王婷等, 2017),形成的裸露滩涂造成迁移能力弱的软体动物大量死亡。此外,蚌科的幼虫阶段需要寄生在鱼类体表(杨丽敏等, 2019)。水利设施建设、电捕鱼等活动阻碍鱼类洄游和分布,中断了蚌类生活史,也是软体动物资源下降的一个重要原因(张铭华等, 2013)。

3.3 保护对策

泛滥的商业采砂活动、水体污染、大型水利设施建设等人类干扰正严重威胁着软体动物资源。此外,过度捕捞和电捕鱼等因素亦影响软体动物生存。这些人为因素通过直接作用于软体动物本身或破坏其生存的栖息地,导致软体动物多样性下降。针对此,建议相关部门管控合法的挖沙业,取缔非法挖沙业,禁止在软体动物资源丰富的地区进行采砂活动;严格排查重大排污口,严格阻止工业废水和生活污水排入湖区;针对部分濒危特有软体动物(如丽蚌属),开展种群基础生物学和生态学研究及蚌类寄主鱼人工繁殖投放;维持自然水文节律,修复沿岸植被区;建立南洞庭湖区软体动物保护区,并且制定相关宣传政策,提高当地渔民软体动物保护意识,限制电捕鱼的行为。此外,对物种进行有效评估是进行生物多样性保护至关重要的一步(Cardoso et al, 2011)。IUCN关于我国软体动物濒危状况的记录不够全面和系统,仅能查询到部分物种的濒危信息,舒凤月等(2009)曾系统地长江中下游湖泊软体动物进行过评估,但随着人类干扰强度的增大及部分濒危种的消失,当时的记录只能在一定程度上反映软体动物的生存状况,因此十分有必

要对该湖区乃至长江中下游湖泊软体动物进行新一轮全面和系统的调查与评估,以揭示当前软体动物的生存现状。

致谢:感谢中国环境科学研究院李俊生研究员、中国科学院水生生物研究所张鄂研究员和刘国祥研究员在课题立项和实施过程中给予的帮助。感谢中国科学院水生生物研究所的蒋小明和王军博士、湖南省沅江市渔政站、汉寿县渔政站和汉寿县渔民袁国光同志在野外采集和室内工作中给予的支持和帮助。

参考文献

- Abdelhady AA, Khalil MM, Ismail E, Fan J, Zhang SR, Xiao JL (2019) Water chemistry and substrate type as major determinants of molluscan feeding habit and life-mode in lagoon sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 220, 120–130.
- Bogatov VV, Prozorova LA (2013) Taxonomy and diversity of freshwater bivalve mollusks (*Bivalvia*) of China (based on analysis of the catalog by He and Zhuang). *Biology Bulletin*, 44, 922–940.
- Cai RX (1991) Fauna of Zhejiang: Freshwater Mollusks. Zhejiang Science and Technology Press, Hangzhou. (in Chinese) [蔡如星 (1991) 浙江动物志: 淡水软体动物. 浙江科学技术出版社, 杭州.]
- Cai W, Cai YJ, Gong ZJ, Qin BQ (2010) Temporal and spatial patterns of *Corbicula fluminea* in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 22, 714–722. (in Chinese with English abstract) [蔡伟, 蔡永久, 龚志军, 秦伯强 (2010) 太湖河蚬时空格局. 湖泊科学, 22, 714–722.]
- Cai YJ, Zhang M, Xu J, Heino J (2018) Geographical gradients in the biodiversity of Chinese freshwater molluscs: Implications for conservation. *Diversity & Distributions*, 24, 485–496.
- Cao YH, Liao FC, Wu YA (2012) Fauna of Xiangjiang Aquatic. Hunan Science and Technology Press, Changsha. (in Chinese) [曹英华, 廖伏初, 伍远安 (2012) 湘江水生动物志. 湖南科学技术出版社, 长沙.]
- Cardoso P, Borges PV, Triantis KA (2011) Adapting the IUCN Red List criteria for invertebrates. *Biological Conservation*, 144, 2432–2440.
- Chen QY, Liang YL, Song GB, Wang SD (1975) On ecological distributions and population densities of mollusca in Lake Tunghu, Wuchang. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 5, 371–379. (in Chinese with English abstract) [陈其羽, 梁彦龄, 宋贵保, 王士达 (1975) 武昌东湖软体动物的生态分布及种群密度. 水生生物学报, 5, 371–379.]
- Du LN, Chen XY, Yang JX, Aldridge D (2012) A survey of

- molluscan compositions in four plateau lakes, Northwest Yunnan, China. *Journal of Hydroecology*, 33, 44–49. (in Chinese with English abstract) [杜丽娜, 陈小勇, 杨君兴, Aldridge D (2012) 滇西北四大高原湖泊软体动物现状调查. *水生生态学杂志*, 33, 44–49.]
- Du LN, Li Y, Chen XY, Yang JX (2011) Effect of eutrophication on molluscan community composition in the Lake Dianchi (China, Yunnan). *Limnologia*, 41, 213–219.
- Gong ZJ, Xie P, Tang HJ, Wang SD (2001) The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 25, 210–216. (in Chinese with English abstract) [龚志军, 谢平, 唐汇娟, 王仕达 (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, 210–216.]
- Hu ZQ (1933) Snails of Dongtinghu Lake and its surrounding main waters. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 16, 80–86. (in Chinese with English abstract) [胡自强 (1933) 洞庭湖及其周围主要水域的螺类. *湖南师范大学自然科学学报*, 16, 80–86.]
- Hu ZQ, Yang HM, Hu SF (2004) Bivalvia mollusca in the Changsha Section of Xiang River. *Chinese Journal of Zoology*, 39, 81–83. (in Chinese with English abstract) [胡自强, 杨海明, 胡少锋 (2004) 湘江长沙段的双壳类软体动物. *动物学杂志*, 39, 81–83.]
- International Union for Conservation of Nature (IUCN) (2018) IUCN Red List of Threatened Species. <https://www.iucnredlist.org/search?query=Cipangopaludina%20chinensis&searchType=species>. (accessed on 2019-08-02)
- Jiang H, Xiao KY, Yu JB, Zou FY, She SM, Peng ZN, Liu JG (2007) Investigation on mollusca resources of Southern Dongting Lake in Yuanjiang City. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 33, 205–207. (in Chinese with English abstract) [江辉, 肖克宇, 余建波, 邹飞跃, 余曙明, 彭正宁, 刘建刚 (2007) 沅江南洞庭湖软体动物资源初步调查. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 33, 205–207.]
- Jiang XM, Xie ZC, Chen YF (2013) Longitudinal patterns of macroinvertebrate communities in relation to environmental factors in a Tibetan-Plateau river system. *Quaternary International*, 304, 107–114.
- Jong MD, Baptist MJ, Lindeboom HJ, Hoekstra P (2015) Short-term impact of deep sand extraction and ecosystem-based landscaping on macrozoobenthos and sediment characteristics. *Marine Pollution Bulletin*, 97, 294–308.
- Kettler TA, Doran JW, Gilbert TL (2001) Simplified method for soil particle-size determination to accompany soil-quality analyses. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 849–852.
- Li DL, Zhang T, Yu JB, Mao XW, Wang HQ, Chen KJ, Liu AM, Li ZJ, Xiao TY (2011) Temporal and spatial distributional patterns of mollusca in a typical aquacultural lake—Datonghu. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 35, 946–954. (in Chinese with English abstract) [李德亮, 张婷, 余建波, 毛小伟, 王红权, 陈开健, 刘安民, 李祖军, 肖调义 (2011) 典型养殖湖泊大通湖软体动物的时空分布格局. *水生生物学报*, 35, 946–954.]
- Liu J, Hu ZQ (2007) The species composition and diversity of mollusca in the middle reaches of Xiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 1153–1160. (in Chinese with English abstract) [刘俊, 胡自强 (2007) 湘江中游江段软体动物的种类组成及其多样性. *生态学报*, 27, 1153–1160.]
- Liu YY, Zhang WZ, Wang YX, Wang EY (1979) *Economic Fauna of China: Freshwater Mollusk*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义 (1979) *中国经济动物: 淡水软体动物*. 科学出版社, 北京.]
- Meng XL (2016) Impacts of Sand-Mining Industry on Macrozoobenthos in the Dongting Lake. PhD dissertation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [孟星亮 (2016) 采砂业对洞庭湖大型底栖动物影响的研究. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉.]
- Meng XL, Jiang XM, Li ZF, Wang J, Cooper K, Xie ZC (2018) Responses of macroinvertebrates and local environment to short-term commercial sand dredging practices in a flood-plain lake. *Science of the Total Environment*, 631/632, 1350–1359.
- Ouyang S, Qi T, Xiao JZ, Xu L, Han YY, Wu XP (2011) Species diversity and abundance of freshwater mollusks in the middle reaches of Gan River and the surrounding branches. *Journal of Nanchang University (Engineering & Technology Edition)*, 33, 1–6. (in Chinese with English abstract) [欧阳珊, 祁涛, 肖晋志, 徐亮, 韩莹莹, 吴小平 (2011) 赣江中游及支流的淡水贝类多样性和丰度. *南昌大学学报(工科版)*, 33, 1–6.]
- Pan BZ, Wang HJ, Li ZW, Xuan B, Liang XM, Wang HZ (2017) Macroinvertebrate assemblages in relation to environments in the Dongting Lake, with implications for ecological management of river-connected lakes affected by dam construction. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36, 914–920.
- Shao GS (1989) Application of macrozoobenthos in water quality of polluted zone in South Dongtinghu Lake. *Environmental Science*, 10, 77–82. (in Chinese) [邵国生 (1989) 底栖动物在南洞庭湖沿岸污染带水质评价中的应用. *环境科学*, 10, 77–82.]
- Shu FY (2009) Anatomical Characters for Taxonomy of Hygrophila (Gastropoda: Pulmonata) and Diversity Patterns of Freshwater Mollusca in China. PhD dissertation, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. (in Chinese with English abstract) [舒凤月 (2009) 沼肺螺类的解剖学分类特征及中国淡水贝类的多样性格局. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉.]
- Shu FY, Wang HJ, Cui YD, Wang HZ (2014) Diversity and distribution pattern of freshwater molluscs in the Yangtze River Basin. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 38, 19–26. (in Chinese with English abstract) [舒凤月, 王海军, 崔永德,

王洪铸 (2014) 长江流域淡水软体动物物种多样性及其分布格局. 水生生物学报, 38, 19–26.]

- Shu FY, Wang HJ, Pan BZ, Liu XQ, Wang HZ (2009) Assessment of species status of mollusca in the Mid-lower Yangtze Lakes. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 33, 1051–1058. (in Chinese with English abstract) [舒凤月, 王海军, 潘保柱, 刘学勤, 王洪铸 (2009) 长江中下游湖泊贝类物种濒危状况评估. 水生生物学报, 33, 1051–1058.]
- State Environmental Protection Administration (2002) The Water and Wastewater Monitoring Analysis Method, 4th edn. China Environmental Science Press, Beijing. (in Chinese) [国家环境保护总局 (2002) 水和废水监测分析方法(第四版). 中国环境科学出版社, 北京.]
- Wang CM, Zhang Y, Shi HH, Li LQ, Huang DZ, Tian Q, Chen X, Gong Z, Li H (2016) Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality in Lake Dongting, China. *Journal of Lake Sciences*, 28, 395–404. (in Chinese with English abstract) [王丑明, 张屹, 石慧华, 李立强, 黄代中, 田琪, 陈翔, 龚正, 李虹 (2016) 洞庭湖大型底栖动物群落结构和水质评价. 湖泊科学, 28, 395–404.]
- Wang SM, Dou HS (1998) *Lakes in China*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [王苏民, 窦鸿身 (1998) 中国湖泊志. 科学出版社, 北京.]
- Wang T, Wang K, Wang LJ, Tian ZB, Huang W, Jiang X (2017) Impacts of the Three Gorges Dam operation on water environment and eutrophication of Dongting Lake: A review. *Research of Environmental Sciences*, 31, 15–24. (in Chinese with English abstract) [王婷, 王坤, 王丽婧, 田泽斌, 黄威, 姜霞 (2017) 三峡工程运行对洞庭湖水环境及富营养化风险影响评述. 环境科学研究, 31, 15–24.]
- Wang X, Zheng BH, Liu LS, Wang LJ, Li LQ, Huang DZ (2012) Correlation analysis of macroinvertebrate composition and environmental factors of typical sections in Dongting Lake. *China Environmental Science*, 32, 2237–2244. (in Chinese with English abstract) [汪星, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 李利强, 黄代中 (2012) 洞庭湖典型断面底栖动物组成及其与环境因子的相关分析. 中国环境科学, 32, 2237–2244.]
- Wu XP (1998) The Research of Freshwater Mollusca in Mid-lower Yangtze River. (in Chinese with English abstract) [吴小平 (1998) 长江中下游淡水贝类的研究. 博士学位论文, 中国科学院水生生物研究所, 武汉.]
- Wu XP, Liang YL, Wang HZ, Xie ZC, Ouyang S (2000) Distribution and species diversity of freshwater mollusca of lakes along mid-lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, 12, 111–118. (in Chinese with English abstract) [吴小平, 梁彦龄, 王洪铸, 谢志才, 欧阳珊 (2000) 长江中下游湖泊淡水贝类的分布及物种多样性. 湖泊科学, 12, 111–118.]
- Xing Y, Wu XP, Ouyang S, Zhang JQ, Xu J, Yin SL, Xie ZC (2019) Assessment of macrobenthos biodiversity and potential human-induced stressors in the Ganjiang River system. *Biodiversity Science*, 27, 648–657. (in Chinese with English abstract) [邢圆, 吴小平, 欧阳珊, 张君倩, 徐靖, 银森录, 谢志才 (2019) 赣江水系大型底栖动物多样性与胁迫因子初探. 生物多样性, 27, 648–657.]
- Xiong LF (2011) Resource Status, Diversity Patterns of Freshwater Mussels in Poyanghu Lake and Its Response to the Different Environmental Factors. PhD dissertation, Nanchang University, Nanchang. (in Chinese with English abstract) [熊六凤 (2011) 鄱阳湖区淡水蚌类资源现状、多样性格局及其对不同环境因子的响应. 博士学位论文, 南昌大学, 南昌.]
- Xiong LF, Ouyang S, Chen TH, Qi T, Wu XP (2011) Diversity patterns of freshwater mussels in Poyang Lake. *Journal of Nanchang University (Natural Science)*, 35, 288–295. (in Chinese with English abstract) [熊六凤, 欧阳珊, 陈堂华, 祁涛, 吴小平 (2011) 鄱阳湖区淡水蚌类多样性格局. 南昌大学学报(理科版), 35, 288–295.]
- Xu BH, Xiao TY, Su JM, Jiang H, Ge XK (2009) Genetic diversity based on RAPD of the fifteen wild freshwater mussel species in South Dongting Lake. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 35, 88–91. (in Chinese with English abstract) [许宝红, 肖调义, 苏建明, 江辉, 葛熹凯 (2009) 南洞庭湖15种野生蚌类遗传多样性分析. 湖南农业大学学报(自然科学版), 35, 88–91.]
- Xu L (2013) Species Diversity of Freshwater Mussels in Poyang Lake and Five Rivers of Jiangxi Province and Its Response to Changing Water Level. PhD dissertation, Nanchang University, Nanchang. (in Chinese with English abstract) [徐亮 (2013) 江西鄱阳湖及“五河”干流淡水贝类多样性格局及对水位变化的响应. 博士学位论文, 南昌大学, 南昌.]
- Xue TT, Liu XJ, Wu RW, Ouyang S, Wu XP (2019) Standing stock and spatial distribution pattern of unionids in Lake Taihu, China. *Journal of Lake Sciences*, 31, 202–210. (in Chinese with English abstract) [薛涛涛, 刘雄军, 武瑞文, 欧阳珊, 吴小平 (2019) 太湖蚌类现存量及空间分布格局. 湖泊科学, 31, 202–210.]
- Yang LM, Liu XJ, Xu Y, Li K, Zhou Y, Wu XP, Ouyang S (2019) Species diversity and assessment of freshwater molluscs in the Gan River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28, 928–938. (in Chinese with English abstract) [杨丽敏, 刘雄军, 徐阳, 李科, 周宇, 吴小平, 欧阳珊 (2019) 赣江流域淡水贝类物种多样性及评估. 长江流域资源与环境, 28, 928–938.]
- Yuan YJ (2017) Research on the Evolution of Hydrological Regimes and Wetland Conservation in Dongting Lake under the Changing Environment. PhD dissertation, Hunan University, Changsha. (in Chinese with English abstract) [袁玉洁 (2017) 变化环境下洞庭湖水文情势的演变及湿地保护研究. 博士学位论文, 湖南大学, 长沙.]
- Zeng CF, Huang XR, Li XL (2007) Plankton resources investigation in the lake South Dongtinghu. *Current Fishery*, (1), 24–26. (in Chinese with English abstract) [曾春芳, 黄

- 向荣, 李小玲 (2007) 南洞庭湖浮游生物资源调查. 现代水产, (1), 24–26.]
- Zhang X, Li SC, Liu YY (1965) Bivalves (mollusca) of Tung-ting Lake and its surrounding waters, Hunan Province, China. *Acta Zoologica Sinica*, 17, 197–216. (in Chinese with English abstract) [张玺, 李世成, 刘月英 (1965) 洞庭湖及其周围水域的双壳类软体动物. 动物学报, 17, 197–216.]
- Zhang MH, Xu L, Xie GL, Liu YB, Liu XM, Song SC, Ouyang S, Wu XP (2013) Species diversity, distribution and conservation of freshwater mollusk in Poyang Lake basin. *Marine Sciences*, 37, 114–124. (in Chinese with English abstract) [张铭华, 徐亮, 谢广龙, 刘益搏, 刘息冕, 宋世超, 欧阳珊, 吴小平 (2013) 鄱阳湖流域淡水贝类物种多样性、分布与保护. 海洋科学, 37, 114–124.]
- Zhang Y, Wang CM, Shi HH, Li LQ, Huang DZ, Tian Q, Chen X (2015) Macrobenthic community succession during last thirty years in Dongting Lake. *Ecology and Environment*, 24, 1348–1353. (in Chinese with English abstract) [张屹, 王丑明, 石慧华, 李立强, 黄代中, 田琪, 陈翔 (2015) 洞庭湖近30年大型底栖动物的群落演变. 生态环境学报, 24, 1348–1353.]
- Zhong ZY (2010) Ecological Health and Safety Assessment in the Dongting Lake. PhD dissertation, Central South University, Changsha. (in Chinese with English abstract) [钟振宇 (2010) 洞庭湖生态健康与安全评价研究. 博士学位论文, 中南大学, 长沙.]
- (责任编辑: 王洪铸 责任编辑: 闫文杰)

附录 Supplementary Material

附录1 南洞庭湖区软体动物名录

Appendix 1 The list of mollusk in the southern Dongting Lake
<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2019287-1.pdf>