

DOI: 10.5846/stxb201411162267

管强, 刘吉平, 武海涛, 吕宪国, 卢明珠, 宋洋. 中国自然湿地螺类生态学研究进展. 生态学报, 2016, 36(9): - .

Guan Q, Liu J P, Wu H T, Lü X G, Lu M Z, Song Y. Research progress on the ecology of natural wetland snails (Mollusca: Gastropoda) in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(9): - .

中国自然湿地螺类生态学研究进展

管 强^{1,2}, 刘吉平¹, 武海涛^{2,*}, 吕宪国², 卢明珠^{2,3}, 宋 洋¹

1 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 四平 136000

2 中国科学院东北地理与农业生态研究所/湿地生态与环境重点实验室, 长春 130102

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 螺类是软体动物腹足纲的通称, 是湿地生态系统大型无脊椎动物的重要组成部分。湿地螺类在维持湿地生物多样性和复杂食物网结构, 保障湿地物质循环和能量流动等方面具有重要的生态功能。本文从基本组成、生活型、功能群方面归纳了螺类群落结构特征; 分析了螺类的时空分布格局; 重点讨论了影响螺类群落结构的温度、盐度、底质等非生物因子和植被、物种间影响等生物因子以及人类对螺类的影响; 概述了湿地演替过程中螺类群落的变化和螺类的环境指示功能。依据目前中国自然湿地螺类的研究特点和国际研究动态, 展望了未来我国螺类群落的生态学研究的重点。

关键词: 软体动物; 腹足纲; 自然湿地; 生态学; 环境因子

Research progress on the ecology of natural wetland snails (Mollusca: Gastropoda) in China

GUAN Qiang^{1,2}, LIU Jiping¹, WU Haitao^{2,*}, LÜ Xianguo², LU Mingzhu^{2,3}, SONG Yang¹

1 College of Tourist and Geoscience, Jilin Normal University, Siping 136000, China

2 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Snails are gastropod mollusks. They play an important ecological role in wetland ecosystems by maintaining biodiversity, food web complexity, material cycling, and energy flow. In this review, we summarized the community composition and population structural characteristics of wetland snails including their abundant species, life forms, and functional groups. We then performed a detailed analysis of the spatial and temporal distribution of snails. We also discussed the main ecological and environmental factors that influence snail community structure and distribution patterns, including abiotic factors (*e.g.*, temperature, salinity, and sediment), biological factors (*e.g.*, vegetation and interactions between species), and human influences. We summarized the snail community changes during wetland ecosystem succession and identified potential indicator functions with respect to the wetland environment. Based on current research on snails in the natural wetlands of China and other global studies, we discussed further research necessary to understand wetland snail ecology in China.

Key Words: mollusca; gastropod; natural wetland; ecology; environmental factors

基金项目: 国家自然科学基金(41371261, 41171047, 41071037); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-12); 吉林省科技发展计划项目(20140101004JC, 20130101097JC)

收稿日期: 2014-11-16; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wuhaitao@iga.ac.cn

湿地是介于陆地和水体系统之间的具有多种功能的特殊地理综合体和生态系统。湿地的水陆过渡性,决定了其是地球上最富生物多样性的生态景观之一^[1]。湿地丰富的生物多样性及其功能,是湿地备受关注的重要原因之一,也是国际湿地科学研究的重要内容^[2-3]。螺类是软体动物腹足纲的通称,在众多湿地类型中分布广泛,是湿地中最为典型和常见的无脊椎动物类群之一。螺类作为湿地生态系统的重要部分,对湿地水文情势、水质变化、植被组成和群落演替响应敏感,是湿地环境的良好指示生物;同时,作为湿地食物网的重要环节,可以直接取食植物、有机碎屑,同时又被其他高等动物(如水鸟、鱼类等)所取食,是湿地物质循环和能量流动的重要参与者。因此,湿地螺类一直受到国际湿地生态学和环境科学研究者的普遍关注^[4-5]。

我国是世界上湿地面积较大和湿地类型最为多样的国家之一。现有研究表明,我国自然湿地(沼泽地、泥炭地、江河、湖泊、海岸湿地等)和人工湿地(水田、沟渠、池塘等)广泛分布着多种螺类^[6]。现有研究不同程度的揭示了湿地螺类与湿地土壤、水文和植被等要素的关系、螺类对湿地演替和对人为干扰的响应等部分湿地螺类的生态功能。但目前湿地螺类研究还主要作为底栖动物的重要组成部分,分散在湿地底栖动物的众多研究中;对湿地螺类的专门系统研究还不多见^[7-8]。而且目前也缺少对我国众多分散的湿地螺类生态学相关研究的系统梳理和总结。基于以上,本文对我国目前自然湿地螺类生态研究进行综述,旨在总结湿地螺类的主要生态结构特征和典型生态功能;并结合目前研究动态,对未来我国湿地螺类研究提出展望。

1 自然湿地螺类群落组成和时空分布格局

1.1 自然湿地螺类组成

螺类分布于陆地和海洋中,遍及世界各地。全世界已经记载的约有 90000 种,其中生活在淡水中的较少,大约有 12000 种^[9]。螺类身体柔软,常有一个螺旋形的贝壳,头部发达,有口、眼及 1 或 2 对触角;足部亦发达,位于身体腹面。活动时,头和足都伸出壳口外。

1.1.1 优势种

螺类的优势种通常是那些个体数量多、生物量高、体积大、生活适应能力较强的种。不同地理区域和流域湿地螺类的优势类群有所不同(表 1)。全国尺度内主要优势种有:梨形环棱螺(*Bellamya purificata*)^[10-11]、铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)^[12-13]、光滑狭口螺(*Stenothyra glabra*)^[14]等。特定区域湿地中,螺类群落结构的优势种不是固定不变的,季节不同优势种也会发生变化;有的湿地区螺类优势种为多种。

1.1.2 生活型

生活型是生物适应不同环境或相同环境,在长期的进化过程中而表现出来的外部形态特征、生活习性等相异或相同,是不同物种对相同环境条件产生趋同适应的结果^[6]。腹足纲螺类生物群落可划分为淡水、河口、滨海 3 类,它们水平分布的异质性是由不同生境的水体盐度造成的^[15]。按照相对于底质表面的栖息位置,腹足纲螺类属于底上附着型^[16-18]。按沉积物特性湿地螺类又可分为:生活在淤泥、淤泥质勃土、勃土质淤泥、腐泥中的软底质生活类群;生活在砂地、砂质淤泥中的砂质底质生活类群;生活在基岩质潮间带、硬土层中硬底质生活类群^[19]。

1.1.3 功能群

功能群就是具有相似的结构特征或相同生态功能的底栖动物的组合^[20]。功能群的划分可以减小生态系统的复杂性。依据底栖动物功能群的划分,即:浮游生物食者、植食者、肉食者、杂食者、碎屑食者,螺类包含浮游生物食者、植食者、碎屑食者三种功能群^[21-26]。袁兴中等^[21]在长江口底栖动物功能群划分中认为这些类群中的每一种可能属于 3 种不同运动能力,即:运动、半运动、固着;又依据摄食方法划分为用颚摄食、用触手摄食及除前述二者之外的其它摄食机制,据此,湿地螺类可划分为半运动表层食碎屑者(如,泥螺 *Bullacta exarata*)、半运动植食者(如光滑狭口螺)和半运动食悬浮物者(如缢拟沼螺 *Assiminea latericea*)。目前对螺类功能群的研究集中主要在长江口、胶州湾、杭州湾和黄河三角洲等海岸湿地区。

1.2 自然湿地螺类的时空分布格局

我国地域辽阔、地理环境复杂,气候条件多样。拥有众多的江、河、湖泊、沼泽等天然湿地资源和延续 18

000km 的海岸线,湿地螺类的种类、数量和结构也各不相同。对自然湿地螺类的研究,目前分为不同区系间的生物地理尺度、同一区系内的不同水体尺度、以及同一水体不同栖息生境尺度等三个层次^[27]。

目前,我国各大流域,螺类资源都有所研究(表 1)。其中,长江流域螺类分布格局研究比较深入^[12],新疆流域、青藏流域、甘、蒙流域的研究鲜有报道。2012 年以来,笔者开展了东北地区典型沼泽湿地螺类生态研究,发现盘螺属(*Valvata*)、圆田螺属(*Cipangopaludina*)、多脉扁螺属(*Polypylis*)、隔扁螺属(*Segmentina*)、萝卜螺属(*Radix*)等为东北典型沼泽湿地的优势种(未发表)。

表 1 我国各流域典型自然湿地螺类种类数和优势种
Table 1 Snail species number and dominant species of natural wetland in main basins of China

流域 Basin	研究地 Wetland Site	科数 Family	种数 Species	优势种 Dominant species	参考文献 Reference
黑龙江流域	1.松花江流域下游		8	黑龙江短沟蜷 <i>Semisulcospira amurensis</i>	[28]
Heilongjiang river Basin	2.扎龙湿地		16	中华圆田螺 <i>Cipangopaludina cahayensis</i>	[29]
黄、淮、海、辽流域	1.胶州湾浅海岸湿地	16	24		[30]
Huang-Huai-Hai-Liao River Basin	2.淮河干流	4	7	铜锈环棱螺	[12]
长江流域	1.长江流域	12	213		[8]
Yangtze River Basin	2.长江口九段沙湿地			光滑狭口螺	[14]
	3.洞庭湖及其周围	5	27	方形环棱螺 <i>Bellamya quadrata</i> 、铜锈环棱螺等	[16]
	4.崇明岛潮间带	7	11	萁拟沼螺 <i>Assiminea violacea</i> 等	[31]
	5.湘江衡阳段	6	30	梨形环棱螺等	[11]
东南诸河流域	1.温州湾灵昆岛	5	7		[32]
Basins of Southeastern China	2.西溪湿地	6	9	梨形环棱螺	[10]
华南诸河流域	1.台山川山群岛	26	59		[33]
Basins of Southern China	3.硃洲岛潮间带	33	91	双带木盾桑椹螺 <i>Clypeomorus bifasciatus</i> 等	[34]
	4.上川岛潮间带	14	44	渔舟蜃螺 <i>Nerita albicilla</i> 等	[35]
	5.雷州半岛红树林湿地	14	44	黑口滨螺 <i>Littoraria melanostoma</i> 等	[36]
西南诸河流域	1.武陵山地区	8	41	河螺属 <i>Rivularia Heude</i> 等	[37]
Basins of Southwestern China	2.云南省淡水湿地	10	124	似瓶圆田螺 <i>CipangopaludinaLecythoides</i> 等	[38]

腹足纲螺类在同一水体不同湿地生境分布也有明显差异。微观上潮间带的沉积粒径差异(岩石岸、砾石滩、沙滩、泥沙滩等)^[35]和小生境,宏观上不同植被类型(裸地、红树林、海三棱藨草、芦苇、互花米草等^[17]、海岸湿地的高潮区、中潮区、低潮区和潮下带^[39],螺类群落的种类、数量分布存在差异^[40]。

湿地螺类的组成和分布,还具有明显的年际和季节动态差异,这与其栖息环境的温度、盐度、底质等生态因子紧密相关,一般表现为,春、夏季种数最多,而秋、冬季较少;生物量则表现为春、夏季生物量缓慢上升,秋季达到最高值^[41-42]。螺类平均生物密度相对复杂,并不与生物量的变化同步,峰值可能出现在不同的季节,受湿地底质条件、植被组成和湿地水文情势等多因素的影响^[12,42-43]。腹足纲螺类在夏季 5、6 月的繁殖,往往导致其分布密度最大,随着幼体的生长,螺类的生物量在秋季也达到最高^[43]。在没有冰期的区域,螺类种数和生物量夏季也常常高于冬季^[44]。

2 自然湿地螺类群落的主要影响因子

2.1 非生物环境因子

影响湿地螺类群落的非生物因素包括:温度^[45-48]、盐度^[49-50]、光照^[51]、pH^[52]、底质^[53]、水文^[12,53-54]、污染物(包括氮、磷和重金属等污染)^[55-59]等。自然状态下,通常是多个非生物因素共同对螺类产生综合的影响^[45]。

湿地螺类正常的生长、繁殖和取食活动,都需要适合的温度范围。在一定温度范围内,螺类的月增重、母

螺产仔数量^[46]、螺卵孵出时间^[56]、营养盐的释放速率^[48]均与温度存在正相关关系。

盐分对螺类群落结构也具有显著影响。海岸咸水湿地和内陆盐碱湿地中绝大部分为耐盐螺类。黄河三角洲湿地螺类分类单元数、个体百分数与盐度均呈显著负相关^[49]。而内陆淡水湿地中大多数则为不耐盐或者耐盐度较低的螺类。

螺类对 pH 值也存在耐受范围, pH 过低或过高都会引起螺类的死亡。例如, 梨形环棱螺在 pH 值 4.0—9.4 都能正常生存, 但喜好偏酸性环境, 最适 PH 范围为 6.0—7.8^[46]。螺类分类单元数、个体百分数与 pH 呈正相关关系。螺类对 pH 最敏感的是螺壳。螺壳的主要成分是碳酸钙。酸性环境使钙离子大量流出, 碳酸钙的构造变得粗糙, 粘合松脆。而由于部分螺类有厣(如, 铜锈环棱螺)则可以忍受较低酸性环境(pH4.5—6.0), 而无厣螺类(如, 椎实螺科)则对 pH4.5—5.0 水环境反应明显^[52]。

湿地底质是影响湿地螺类群落结构的重要环境因子之一, 包括底质的粒径、颗粒间隙、密实性、表面构造、异质性和稳定程度等^[53]。河流湿地中卵石河床、基岩河床、淤泥质河床、沙质河床和潮间带湿地中岩石海岸、砾石滩、沙滩和泥沙滩研究^[34], 都表明底质类型显著影响螺类的种类和数量。

影响螺类结构和格局的水文条件, 包括湿地干湿交替、水深、径流量、流速、汛期、冰期和水位梯度等。有厣螺类在阴凉干燥处可存活数天, 螺的耐旱性实验表明当失水接近 25% 时均存活, 复水后仍具有很强的生命活力, 若失水超过 30% 试验螺开始逐渐死亡^[46]。在河流软体动物的研究中发现, 软体动物的种群和数量随着不同河段、河道宽度、河道深度和水流速度变化, 自上游至下游, 随着河道深度与宽度的增加, 软体动物种类的数量亦呈现逐渐增多的趋势^[12]。随着水体的加深, 光线的透射降低, 软体动物的种类和数量将急剧减少^[51]。钉螺(*Oncomelania*)是水陆两栖物种, 水位对于钉螺分布有着密切的联系, 水面线上下是钉螺分布的主要区域, 因此水位的涨落对于钉螺分布有着直接的影响^[54]。而钉螺在潮湿土壤表面产卵, 土壤含水量过高或过低都会影响钉螺产卵^[47]。

螺类对污染物有不同的适应能力, 并对污染环境有不同的反应。螺类会对环境中重金属产生富集作用, 袁维佳^[60]对上海市郊区的研究中发现螺蛳体内的重金属浓度是水体中数千倍至数十万倍。螺蛳对铜和锌的富集程度最高, 对铅的富集较弱, 对铬、镉和镍的富集较差^[55, 60]。螺类自身营养释放会增加水体中氨氮与磷酸盐^[56-57]。而营养盐的释放可加速生态系统物质循环速率, 引起水体营养水平的升高^[61]。在螺类-水生植物系统试验中, 加入营养物质氮(N)和磷(P)可提高螺类的密度和丰度^[62]。梨形环棱螺对 TN、NH₄⁺-N、悬浮物去除效果显著, 除 NH₄⁺-N 外, 去除率均随密度的增加而增大^[63-64]。而在巢湖富营养化调查中, 环棱螺生物量与总氮 TN、硝态氮 NO₃⁻-N、总磷 TP 和溶解性磷 PO₄⁻-P 浓度呈显著负相关^[65]。可以看出螺类喜好营养物质(N、P), 自身可以释放营养盐, 但是可以去除水体或者沉积物本身的 TN、TP。而其他污染如: 石油污染^[49]、废水排放^[59]均会对腹足螺类种类和数量产生影响。基于 GIS 平台, 可将螺类丰度、功能摄食类群、生物多样性和污染生物指数(BI)等运用 Kriging 插值法得到空间分布格局图, 也直观地反映出该地区底栖动物的分布情况与污染状况^[66]。

2.2 生物环境因子

目前, 国内该领域集中于螺类与水生植物的关系研究。螺类的营养盐释放对沉水植物^[67]和藻类植物^[68]均可产生有利影响。李宽意^[69]指出低密度椭圆萝卜螺(*Radix swinhoi*)(优先取食附生生物)促进了苦草生长, 存在互利关系; 而高密度则会牧食苦草, 显著抑制了植物生长。以藻类为食的铜锈环棱螺能够一定程度地消除附生藻类对苦草的不利影响^[67], 促进了枯草生长, 螺草互利。螺类牧食蓝藻, 积累的毒素(MCs)会对螺类产生不利影响, 并在食物链中传播^[70]。

外来植物的入侵会对螺类群落结构产生影响^[71]。海岸湿地互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)入侵后, 部分湿地螺类数量减少; 且随着时间的延长, 互花米草消减波浪、促淤造陆, 使无法在光滩生长的螺类死亡^[72]。

2.3 人类活动对自然湿地螺类的影响

人类活动对螺类的干扰, 主要包括工程建设、污染物排放、人为捕捞养殖、外来物种入侵等。我国目前对

滩涂围垦研究较多,研究表明围垦时间长短和围垦方式的不同螺类群落结构和分布差异明显^[18,73]。工程建设导致的湿地污染,会改变湿地螺类赖以生存的湿地生境,改变湿地螺类的组成^[20]。目前研究多关注群落结构变化,而缺少对影响机制的研究。

近几年来随着全球化速度加快,通过贸易和旅行而引起的外来物种入侵数量增加^[74]。外来物种入侵直接或间接降低湿地生态系统的生物多样性与功能^[75]。湿地植物入侵会通过改变湿地生境要素的变化,引起螺类群落结构的改变。同时,螺类入侵也会对入侵地的湿地环境和土著种类构成威胁。目前国内外研究外来物种则主要是互花米草^[71]和苹果螺 *Planorbis corneus* (又名大瓶螺、福寿螺)^[76-77]的生态影响研究。互花米草入侵形成的湿地环境对底栖动物是否产生影响,目前尚无一致结论。苹果螺成功入侵后,水体的浊度、总氮、总磷等含量随着养殖时间的延长而增大,可能会导致水体富营养化和水质恶化等环境问题^[78]。同源入侵植物对螺类是否毒杀或抑制取食,在缓解和消除螺类入侵影响方面具有研究价值^[79]。

3 自然湿地螺类群落演替和主要生态功能

3.1 自然湿地螺类群落演替

目前国内对湿地演替过程中螺类群落结构变化的研究较少,且包含在底栖动物群落结构变化中。在长江口九段沙盐沼湿地演替的不同阶段,螺类的种类和数量差异明显,螺类数量芦苇—互花米草阶段最多,盐渍藻类阶段最少^[80]。简东^[81]对红水河干流梯级运行后底栖动物的演替的研究中指出底栖动物的群落演替受不同环境因子的影响,而静水型螺类比重增加,流水型螺类数量明显下降。

自从 20 世纪 70 年代以来,生态学家已经开始关注海岸湿地生态系统中不同干扰类型群落的动态恢复过程^[82],不同生态恢复阶段螺类种类以及优势度存在差异^[83]。并且不同生态修复工程区中梨形环棱螺的密度表明了生境间密度差异^[84]。目前湿地生态系统恢复中螺类的研究主要是不同湿地恢复阶段群落数量以及生物量方面^[83],螺类个体较大,通常会对湿地恢复过程有所影响,目前螺类在湿地恢复过程中的功能则很少应用。

3.2 自然湿地螺类的主要生态功能

3.2.1 生态服务功能

螺类的生态服务功能主要表现在维持生物多样性和净化水体等。国内对螺类生态功能的研究处于起步阶段,研究内容大多是定性的,定量性研究较少。螺类作为重要的底栖动物资源大部分在食物链中处于第二营养级,在湿地生态系统复杂的食物网中有着重要地位。螺类和其他生物之间形成了复杂的食物网。螺类食性多样,可以取食植物、原生动物和有机碎屑^[85-86],同时螺类是鱼类、蟹类(如, *Eriocheir sinensis* Edwards)^[87]、水鸟(如,黑鹳 *Ciconia nigra* 等)^[88]等的重要食物来源。而且,螺类也是水蛭、线虫、摇蚊、螨类、吸虫等生物的宿主,它们寄生在螺类体内。目前,国内对螺类群落结构和生物多样性的研究大多包含在底栖动物或者软体动物中,这样可以更好的研究湿地生态系统健康和湿地生物在湿地生态系统中的功能,但螺类的单独报道较少。

湿地螺类还可以有效调节水生植物的多样性,,目前研究主要包括螺类(椭圆萝卜螺)牧食损害对人工构建的沉水植物群落结构的影响^[57],植食性螺类与水生植物之间的互利关系^[70],椭圆萝卜螺在三种不同沉水植物中的单位消耗量、不同各体大小对苦草的单位消耗量以及椭圆萝卜螺的营养释放量^[89]。不同量的营养物可以影响螺类-附着藻-沉水植物系统,并且螺类是这个系统的关键调控因子^[67]。

螺类可用于湿地生态系统修复中,如在净化水体、控制水体藻类植物大量繁殖^[69]、对大型植物食性取向^[90-91]等方面。螺类可以取食藻类植物、降低水体透明度^[48],显著去除水体中铵盐、硝酸盐、亚硝酸盐、降低污染物浓度、富集重金属^[55,60,92-93],有利于改善水体环境^[94]。在水中增加螺类放养量,可以补充底栖动物资源,增加系统稳定性,促进物质循环,达到净化水质的目的^[95]。并且在富营养湖泊的生态恢复与治理过程中,通过引进大型软体动物种群来延缓富营养化进程、促进湖泊生态恢复是较为常见的生态操纵措施之一^[48,95]。

3.2.2 环境指示功能

指示物种可以指示非生物条件和生态过程的变化。螺类是湿地生态系统的重要组成部分,它们对环境变化比较敏感,其在湿地水体中的丰富度、类群组成、耐污种的比例以及不同功能摄食类群的结构特征等都可以反应出水质的的好坏。我国基于螺类的水质评价开始于 20 世纪 70 年代。邓道贵^[65]对巢湖研究得出,西湖区环棱螺的密度和生物量明显低于处于较低富营养水平的东湖区,且富营养化程度越高的水域其密度越低。刘俊^[51]采用螺类和双壳纲多样性对花垣河进行水质评价,同时用水质化学监测方法验证了软体动物对花垣河水质生物监测结果准确性。作为河流健康评价指标之一,大型无脊椎动物完整性指数(B-IBI)中螺类群落是一个重要生物指标^[96]。螺类耐污值方面的研究起步较晚,大多是借鉴美国等已有的耐污值,王建国^[97]和王备新^[98]采用 Lenat^[99]耐污值算法,获得了我国螺类不同分类单元的耐污值(膀胱螺属耐污值最高为 8.5,短沟蜷属放逸短沟蜷,最低为 2.3)。马陶武^[100]在依据底栖动物总分类单元数、(甲壳动物+软体动物)分类单元数、%(甲壳动物+软体动物)、%腹足纲、%直接收集者、Goodnight-Whitley 指数和 Hilsenhoff 生物指数等 7 个底栖动物生物指数来评价太湖水质,并且提出了一个由 4 级区分标准构成的综合生物指数,用于评价太湖不同区域的水质分异状况。对于古气候,内齿螺科(*Endodontidae*)的某种螺(*Discus macclintocki*)在美国中西部的出现确定了前冰原的存在^[53]。

4 国际研究重点和我国研究展望

螺类是湿地生态系统中大型水生无脊椎动物的重要生物组成,是维持湿地生态系统正常结构和功能不可缺少的组成部分。但我国湿地无脊椎动物研究与湿地植物、水鸟等其他湿地要素相比,研究相对薄弱。而湿地螺类的专门和集中研究相对更少,许多相关研究和领域还处于起步阶段。结合国际相关研究热点和我国研究现实需求,今后我国应加强湿地螺类生态学方面的研究。优先研究的领域包括:

4.1 湿地螺类多样性基础调查和不同类型自然湿地螺类研究

湿地螺类多样性及其结构特征,仍是国际湿地螺类研究的主要内容^[2,4]。20 世纪 50 年代以来,我国开展了一系列湿地螺类资源的研究,并取得了许多珍贵的资料,但整体上基础性研究工作仍十分薄弱。现有研究区域分布不平衡,东部海岸带湿地和长江流域淡水湿地螺类研究较多,西北内陆湿地研究稀少。湿地类型上,典型河流和湖泊湿地、海岸滩涂湿地螺类研究较多,而沼泽湿地螺类研究不足。湿地作为水陆交替的过渡生态系统,同时拥有水生和陆生无脊椎动物;目前研究主要集中在水生螺类的研究,对湿地地区陆生螺类的关注不足。国内采用的湿地螺类的分类资料过于陈旧,缺少最新成果的系统总结和发表,不利于湿地螺类生态学的研究。因此,今后应适时开展全国范围内的湿地螺类多样性资源的系统基础调查,构建湿地螺类资源数据库;加强湿地螺类分类学和生物学研究,需要尽快开展和完成湿地螺类 DNA 库建设;加强不同区域、不同类型湿地中螺类组成、结构和分布格局研究。

4.2 湿地螺类生态演替对环境变化的响应与适应研究

湿地螺类作为湿地无脊椎动物的主要类群,目前我国螺类的研究大多融合于底栖动物的群落研究中,对螺类的专门研究较少。生态研究多停留在生态组成和分布上,对机理性研究较少^[101-102]。目前,还缺少湿地螺类群落结构随湿地系统退化或恢复等演替的生态响应研究。加强湿地螺类与湿地植被、水文和土壤等众多要素的相互作用关系和机理研究,明确湿地螺类随湿地系统变化的演替特征和环境指示意义;开展湿地螺类生物学和环境学研究,加强湿地螺类对人为干扰、环境变化的生态响应和适应机制研究;加强湿地螺类演替动态研究,深入湿地系统恢复、演化等过程与螺类群落结构动态之间的对应关系研究;以及物理因子、化学因子、生物因子、人为干扰及综合因子等湿地环境因子与湿地螺类的相互影响研究尚存在不完善之处^[45]。

4.3 湿地螺类典型生态过程和功能研究

湿地螺类最重要的生态功能是维持湿地生物多样性。国外对螺类的生态过程和功能研究较全面和深入。主要研究重点包括,螺类和固着生物之间的相互影响^[63,103-104],不同营养条件(C、N、P 的比例)下螺类和不同

固着生物之间的化学计量研究^[62,102,105],不同个体大小和组合的入侵螺类对大型植物和固着生物的影响^[106],水禽取食螺类的定量化研究^[101,107]等方面。湿地螺类可以显著吸收某些污染物净化湿地水体和环境,但是也会向湿地中排放营养物质引起局部富营养化。美国、加拿大等环保部门已经广泛采用底栖大型无脊椎动物进行水质的生物学评价,并且制定了多个基于底栖动物的水质评价标准方法,研究污染环境的生物指示和污染物净化机制等,其中,湿地螺类是重要物种类群^[98]。目前,我国部分研究关注了湿地螺类对湿地初级生产力和湿地净化功能的影响^[28,55-57]。但湿地螺类作为湿地复杂食物网的重要一环,其许多功能及其内部的生态过程还鲜为人知。目前的研究对螺类在物质循环和能量流动中的参与作用研究较少,螺类的物质循环在整个生物地球化学循环的水循环、气体型循环和沉积型循环中都有参与,而螺类的能量流动研究应该在种群、食物链和生态系统三个层次上进行。今后要加强湿地螺类与湿地植物、鱼类和水鸟等的食物链关系和在湿地物质循环中作用的研究。

4.4 湿地螺类对湿地水文情势的响应

水是湿地最重要的环境因子,水文条件是影响螺类群落的主要因子^[10]。湿地螺类与湿地水文情势的关系研究,是揭示湿地螺类分布格局及其机制的关键。例如,国际已有研究表明,河流洪泛平原湿地螺类组成,与湿地和河流的连接度(Connectivity Parameter)紧密相关,随着水文连通性的增加,大个体腹足类比例减少,而强烈钙化和有某种贝壳(*globolose*)的螺类数量增加;而水文孤立的湿地中螺类以抗干燥,偏食高等植物和偏爱少阴栖息地的螺类为主^[108]。同时,临时性和永久性湿地^[109],不同水文周期的永久性湿地^[110]中腹足纲螺类群落结构的差异也非常显著。此方面,我国已经开展了部分研究,但有待深入和加强。长江流域研究中,发现洪水可以扩大螺类的栖息地 2.6—2.7 倍^[111]。今后要需从全流域的尺度出发^[112],开展流域内不同空间尺度的螺类生态研究;加强洪泛平原螺类群落结构及其对周期性洪泛的生态响应。由于湿地水文的巨大波动性,今后要开展长时间尺度的湿地螺类研究^[113-114]。

4.5 湿地螺类的保护和合理开发利用

腹足纲螺类是湿地生态系统底栖动物的重要组成部分。人类对螺类群落结构的影响或者自然条件的恶化使得螺类的生境受到影响,螺类的种类和数量受到影响。有证据表明中国高原湖泊的腹足类动物数量减少^[115]。在生态文明的基础上,对螺类资源进行保护和合理开发利用显得尤为重要,有助于维持湿地生态系统生物多样性。要保护好湿地螺类资源,首先要加强湿地水资源管理,对水量和水体污染物进行控制,并对已经污染的湿地进行恢复。将流域和系统生态学原理应用于濒危螺类的保护中^[116],来确保种类的延续。重视外来入侵湿地螺类的监测和防控,有效减少外来种对土著螺类的影响。限制对可食用螺类的捕捞力度,实现可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [2] Batzer D P, Cooper R, Wissinger S A. Wetland Animal Ecology // Batzer D P, Sharitz R R, eds. Ecology of Freshwater and Estuarine Wetlands. California: University of California Press, 2006.
- [3] 吕宪国. 湿地科学研究进展及研究方向. 中国科学院院刊, 2002, 17(3): 170-172.
- [4] Christian A D, Harris J L. An introduction to directions in freshwater mollusk conservation: molecules to ecosystems. Journal of the North American Benthological Society, 2008, 27(2): 345-348.
- [5] Ruehl C B, Trexler J C. Comparison of snail density, standing stock, and body size between Caribbean karst wetlands and other freshwater ecosystems. Hydrobiologia, 2011, 665(1): 1-13.
- [6] 胡知渊, 鲍毅新, 程宏毅, 张龙龙, 葛宝明. 中国自然湿地底栖动物生态学研究进展. 生态学杂志, 2009, 28(5): 959-968.
- [7] 刘毅, 王瑁, 王文卿, 卢昌义. 中国红树林区的耳螺. 生物多样性, 2011, 19(6): 723-728.
- [8] 舒凤月, 王海军, 崔永德, 王洪铸. 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, 2014, 38(1): 19-26.
- [9] 刘月英, 张文珍, 王跃先. 中国经济动物志-淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.
- [10] 陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 王莹莹, 陶敏, 何京, 唐龙. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2013, 33

- (9): 2803-2815.
- [11] 刘俊, 胡自强. 湘江中游江段软体动物的种类组成及其多样性. 生态学报, 2007, 27(3): 1153-1160.
- [12] 丁建华, 周立志, 邓道贵, 金显文. 淮河干流软体动物群落结构及其与环境因子的关系. 水生生物学报, 2013, 37(2): 367-375.
- [13] 胡自强. 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, 1993, 16(1): 80-86.
- [14] 张玉平, 由文辉, 焦俊鹏. 长江口九段沙湿地底栖动物群落研究. 上海水产大学学报, 2006, 15(2): 169-172.
- [15] 彭逸生, 孙红斌, 谢荣如, 谢钊毅, 钟志强, 陈桂珠. 海丰鸟类自然保护区大型底栖动物群落特征. 生态环境, 2008, 17(3): 1163-1169.
- [16] 范航清, 何斌源, 韦受庆. 海岸红树林地沙丘移动对林内大型底栖动物的影响. 生态学报, 2000, 20(5): 722-727.
- [17] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 盐沼植物对大型底栖动物群落的影响. 生态学报, 2007, 27(11): 4387-4393.
- [18] 袁兴中. 河口潮滩湿地底栖动物群落的生态学研究. 上海: 华东师范大学, 2001.
- [19] 陆健健. 河口生态学. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [20] 李欢欢, 鲍毅新, 胡知渊, 葛宝明. 杭州湾南岸大桥建设区域潮间带大型底栖动物功能群及营养等级的季节动态. 动物学报, 2007, 53(6): 1011-1023.
- [21] 袁兴中, 陆健健, 刘红. 长江口底栖动物功能群分布格局及其变化. 生态学报, 2002, 22(12): 2054-2062.
- [22] 朱晓君, 陆健健. 长江口九段沙潮间带底栖动物的功能群. 动物学研究, 2003, 24(5): 355-361.
- [23] 鲍毅新, 胡知渊, 李欢欢, 葛宝明, 程宏毅. 灵昆东滩围垦区内外大型底栖动物季节变化和功能群的比较. 动物学报, 2008, 54(3): 416-427.
- [24] 刘立杰. 黄河三角洲湿地大型底栖动物时空变化规律及其功能群研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [25] 辛俊宏, 任一平, 徐宾铎, 张崇良, 薛莹, 纪毓鹏. 胶州湾西北部潮滩湿地大型底栖动物功能群. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1885-1892.
- [26] 吕巍巍, 马长安, 余骥, 田伟, 袁晓, 赵云龙. 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6825-6833.
- [27] 张海洋, 武大勇, 王赵明, 孙然好, 陈利顶. 不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响. 生态学报, 2014, 34(5): 1253-1263.
- [28] 刘录三, 李中宇, 孟伟, 郑丙辉, 胡显安. 松花江下游底栖动物群落结构与水质生物学评价. 环境科学研究, 2007, 20(3): 81-86.
- [29] 刘曼红, 于洪贤, 刘茂奇, 郭杰伟. 扎龙湿地春季大型底栖动物群落结构与水质生物评价. 东北林业大学学报, 2011, 39(8): 73-76.
- [30] 李宝泉, 李新正, 王洪法, 张宝琳. 胶州湾大型底栖软体动物物种多样性研究. 生物多样性, 2006, 14(2): 136-144.
- [31] 安传光, 赵云龙, 林凌, 李嘉尧, 崔丽丽, 马春艳. 崇明岛潮间带夏季大型底栖动物多样性. 生态学报, 2008, 28(2): 577-586.
- [32] 鲍毅新, 葛宝明, 郑祥, 程宏毅, 胡一中. 温州湾灵昆岛东滩潮间带大型底栖动物群落的季节动态. 水生生物学报, 2007, 31(3): 437-444.
- [33] 刘景旋. 台山川山群岛沿岸软体动物名录 I. 腹足纲 (Gastropoda). 生态科学, 1994, (1): 106-108.
- [34] 林炜, 唐以杰, 萧东鹏, 蔡伟强. 碓洲岛潮间带软体动物分布和区系研究. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2002, (3): 68-73.
- [35] 唐以杰, 林炜, 崔雪文, 钟诚, 陈明旺, 杜晓捷. 广东上川岛潮间带软体动物的分布. 动物学杂志, 2004, 39(3): 60-67.
- [36] 韩维栋, 蔡英亚, 刘劲科, 劳赞, 栗志民, 罗远谋. 雷州半岛红树林海区的软体动物. 湛江海洋大学学报, 2003, 23(1): 1-7.
- [37] 刘月英, 张文珍, 王耀先, 段毅豪. 武陵山地区的淡水软体动物. 动物学报, 1992, 38(4): 359-371.
- [38] 张迺光, 郝天锡, 吴春云, 陈元晓, 张闻, 李京昆, 张彦. 云南省淡水腹足类的初步调查. 海洋科学集刊, 1997, (39): 15-26.
- [39] 刘玉, 杨翼, 张文亮, 董树刚, 徐海龙, 王园君. 湄洲湾潮间带大型底栖动物群落结构和多样性特征. 湿地科学, 2013, 12(2): 148-154.
- [40] 卓异, 蔡立哲, 郭涛, 傅素晶, 陈昕韡, 吴辰. 泉州湾埭埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布. 生态学报, 2014, 34(5): 1244-1252.
- [41] 张焕君, 李凡, 丛日翔, 丛旭日, 任中华, 吕振波. 黄河口海域无脊椎动物群落结构及其变化. 中国水产科学, 2014, 21(4): 800-809.
- [42] 李宝泉, 李新正, 于海燕, 王洪法, 王金宝, 徐凤山, 张宝琳. 胶州湾底栖软体动物与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 2005, 36(3): 193-198.
- [43] Amyot J P, Downing J A. Seasonal variation in vertical and horizontal movement of the freshwater bivalve *Elliptio complanata* (Mollusca: Unionidae). *Freshwater Biology*, 1997, 37(2): 345-354.
- [44] 蔡立哲, 黄玉山, 谭凤仪. 香港红树林区软体动物生态研究. 海洋科学集刊, 1997, (39): 103-114.
- [45] 任海庆, 袁兴中, 刘红, 张跃伟, 周上博. 环境因子对河流底栖无脊椎动物群落结构的影响. 生态学报, 2015, 35(10): 1-12.
- [46] 曹正光, 蒋忻坡. 几种环境因子对梨形环棱螺的影响. 上海水产大学学报, 1998, 7(3): 200-205.
- [47] 陈柳燕, 徐兴建, 杨先祥, 吕桂阳. 三峡建坝后江汉平原土壤含水量及气温对钉螺生态的影响. 中国血吸虫病防治杂志, 2002, 14(4): 258-260.
- [48] 白秀玲, 谷孝鸿, 张钰. 太湖螺类的实验生态学研究—以环棱螺为例. 湖泊科学, 2006, 18(6): 649-654.
- [49] 陈凯, 肖能文, 王备新, 李俊生. 黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响. 生态学报, 2012, 32(6):

1970-1978.

- [50] Kefford B J, Nuggeoda D. No evidence for a critical salinity threshold for growth and reproduction in the freshwater snail *Physa acuta*. *Environmental Pollution*, 2005, 134(3): 377-383.
- [51] 刘俊, 朱允华, 胡南, 吴彦琼, 胡劲松, 郑济芳. 花垣河软体动物多样性调查和水质评价. *中国环境监测*, 2009, 25(3): 73-76.
- [52] 刘保元. 酸性水对淡水螺类存活、生长与繁殖的影响. *应用生态学报*, 1993, 4(3): 313-318.
- [53] 段学花, 王兆印, 徐梦珍. 底栖动物与河流生态评价. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [54] 孔丽娜. 水位变化对洲滩钉螺生境影响研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2011.
- [55] 李丽娜, 陈振楼, 许世远, 毕春娟. 铜锌铅铬镍重金属在长江口滨岸带软体动物体内的富集. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2005, (3): 65-70.
- [56] 李宽意, 刘正文, 杨宏伟, 李娟, 李传红. 牧食损害对伊乐藻(*Elodea nuttallii*)生长的影响. *生态学报*, 2007, 27(10): 4209-4213.
- [57] 李宽意, 刘正文, 李传红, 刘桂民, 杨宏伟. 螺类牧食损害对沉水植物群落结构的调节. *海洋与湖沼*, 2007, 38(6): 576-580.
- [58] 段波, 李斌峰, 刘若思, 童晓立. 广东横石水河流域溪流大型底栖动物漂流的昼夜节律. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1084-1090.
- [59] Misra S, Kundu R. Seasonal variations in population dynamics of key intertidal molluscs at two contrasting locations. *Aquatic Ecology*, 2005, 39(3): 315-324.
- [60] 袁维佳, 俞膺浩, 谷瑗, 陈虹. 螺蛳对重金属元素的富集作用. *上海师范大学学报: 自然科学版*, 2000, 29(3): 73-79.
- [61] Lombardo P, Cooke G D. Consumption and preference of selected food types by two freshwater gastropod species. *Archiv für Hydrobiologie*, 2002, 155(4): 667-685.
- [62] Liess A, Hillebrand H. Role of nutrient supply in grazer-periphyton interactions; reciprocal influences of periphyton and grazer nutrient stoichiometry. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(3): 632-642.
- [63] Hann B J, Mundy C J, Goldsborough L G. Snail-periphyton interactions in a prairie lacustrine wetland. *Hydrobiologia*, 2001, 457(1/3): 167-175.
- [64] 赵峰, 谢从新, 张念, 吕元蛟, 李瑞娇. 不同密度梨形环棱螺对养殖池塘水质及沉积物氮、磷释放的影响. *水生态学杂志*, 2014, 35(2): 32-38.
- [65] 邓道贵, 李洪远, 胡万明, 周琼, 过龙根. 巢湖富营养化对河蚬和环棱螺分布及种群密度影响. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1502-1506.
- [66] 谢志才, 马凯, 叶麟, 陈静, 蔡庆华. 保安湖大型底栖动物结构与分布格局研究. *水生生物学报*, 2007, 31(2): 174-183.
- [67] 操瑜, 张昭, 尹黎燕, 刘帆, 常锋毅, 李伟. 磷的不同动态变化对模拟湖泊生态系统中附草螺类的影响. *水生态学杂志*, 2011, 32(3): 32-37.
- [68] 吴攀, 邓建明, 秦伯强, 马健荣, 张运林. 水温和营养盐增加对太湖冬、春季藻类生长的影响. *环境科学研究*, 2013, 26(10): 1064-1071.
- [69] 李宽意, 文明章, 杨宏伟, 李艳敏, 刘正文. “螺-草”的互利关系. *生态学报*, 2007, 27(12): 5427-5432.
- [70] Lance E, Briant L, Carpentier A, Acou A, Marion L, Bormans M, Gérard C. Impact of toxic cyanobacteria on gastropods and microcystin accumulation in a eutrophic lake (Grand-Lieu, France) with special reference to *Physa* (= *Physella*) *acuta*. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(17): 3560-3568.
- [71] 陈中义, 付萃长, 王海毅, 李博, 吴纪华, 陈家宽. 互花米草入侵东滩盐沼对大型底栖无脊椎动物群落的影响. *湿地科学*, 2005, 3(1): 1-7.
- [72] 仇乐, 刘金娥, 陈建琴, 王国祥, 常青. 互花米草扩张对江苏海滨湿地大型底栖动物的影响. *海洋科学*, 2010, 34(8): 50-55.
- [73] 葛宝明, 鲍毅新, 郑祥. 围垦滩涂不同生境冬季大型底栖动物群落结构. *动物学研究*, 2005, 26(1): 47-54.
- [74] McNeely J A. *The Great Reshuffling: Human Dimensions of Invasive Alien Species*[D]. Cambridge: IUCN, 2001.
- [75] 王备新, 杨莲芳. 大型底栖无脊椎动物水质快速生物评价的研究进展. *南京农业大学学报*, 2001, 24(4): 107-111.
- [76] Qiu J W, Kwong K L. Effects of macrophytes on feeding and life-history traits of the invasive apple snail *Pomacea canaliculata*. *Freshwater Biology*, 2009, 54(8): 1720-1730.
- [77] Horgan F G, Stuart A M, Kudavidanage E P. Impact of invasive apple snails on the functioning and services of natural and managed wetlands. *Acta Oecologica*, 2014, 54: 90-100.
- [78] 潘冬丽, 张家辉, 龙俊, 章家恩, 赵本良, 罗明珠. 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*, 2014, 22(1): 58-62.
- [79] 曾坤玉, 胡飞, 陈玉芬, 陈建军, 孔垂华. 四种与福寿螺(*Ampullaria gigas*)同源地入侵植物的杀螺效果. *生态学报*, 2008, 28(1): 260-266.
- [80] 杨泽华, 童春富, 陆健健. 长江口湿地三个演替阶段大型底栖动物群落特征. *动物学研究*, 2006, 27(4): 411-418.
- [81] 简东, 黄道明, 常秀岭, 张庆, 谢山, 谢文星, 杨汉运. 红水河干流梯级运行后底栖动物的演替. *水生态学杂志*, 2010, 3(6): 12-18.
- [82] 章飞军, 童春富, 谢志发, 刘文亮, 高伟, 陆健健. 长江口潮间带大型底栖动物群落演替. *生态学报*, 2007, 27(12): 4944-4952.
- [83] 唐以杰, 方展强, 钟燕婷, 张再旺, 陈康, 安东, 杨雄邦, 廖宝文. 不同生态恢复阶段无瓣海桑人工林湿地中大型底栖动物群落的演替.

生态学报, 2012, 32(10): 3160-3169.

- [84] 沈忱, 刘茂松, 徐驰, 汤浩, 王磊, 黄成. 太湖湖滨生态修复区大型底栖动物群落结构及梯度分布. 生态学报, 2012, 31(5): 1186-1193.
- [85] 段晓姣. 生态沟渠中梨形环棱螺的食性及食物选择的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [86] Canepuccia A D, Escapa M, Daleo P, Alberti J, Botto F, Iribarne O O. Positive interactions of the smooth cordgrass *Spartina alterniflora* on the mud snail *Heleobia australis*, in South Western Atlantic salt marshes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 353(2): 180-190.
- [87] 许巧情, 王洪铸, 张世萍. 河蟹过度放养对湖泊底栖动物群落的影响. 水生生物学报, 2003, 27(1): 41-46.
- [88] 鲍伟东, 罗小勇, 孟志涛, 彭宝明, 李飞, 沈成. 北京地区黑鹈越冬期的取食行为. 动物学杂志, 2006, 41(5): 57-61.
- [89] Li K Y, Liu Z W, Hu Y H, Yang H W. Snail herbivory on submerged macrophytes and nutrient release: implications for macrophyte management. *Ecological Engineering*, 2009, 35(11): 1664-1667.
- [90] Burlakova L E, Karatayev A Y, Padilla D K, Cartwright L D, Hollas D N. Wetland restoration and invasive species: apple snail (*Pomacea insularum*) feeding on native and invasive aquatic plants. *Restoration Ecology*, 2009, 17(3): 433-440.
- [91] Wang Z Y, Pei Y S. Ecological risk resulting from invasive species: a lesson from riparian wetland rehabilitation. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1798-1808.
- [92] Penha-Lopes G, Bartolini F, Limbu S, Cannicci S, Mgaya Y, Kristensen E, Paula J. Ecosystem engineering potential of the gastropod *Terebralia palustris* (Linnaeus, 1767) in mangrove wastewater wetlands-A controlled mesocosm experiment. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1): 258-266.
- [93] Cohen T, Que Hee S S, Ambrose R F. Trace metals in fish and invertebrates of three California coastal wetlands. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42(3): 224-232.
- [94] 屈铭志, 屈云芳, 任文伟, 王宇翔, 吴千红. 铜锈环棱螺控制微囊藻水华的机理研究. 复旦学报: 自然科学版, 2010, 49(3): 301-308, 395-395.
- [95] 刘保元, 邱东茹, 吴振斌. 富营养浅湖水生植被重建对底栖动物的影响. 应用与环境生物学报, 1997, 3(4): 323-327.
- [96] 王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流的 B-IBI 评价. 生态学报, 2009, 29(12): 6672-6680.
- [97] 王建国, 黄恢柏, 杨明旭, 唐振华, 赵凤霞. 庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价. 应用与环境生物学报, 2003, 9(3): 279-284.
- [98] 王备新, 杨逢芳. 我国东部底栖无脊椎动物主要分类单元耐污值. 生态学报, 2004, 24(12): 2768-2775.
- [99] Lenat D R. A biotic index for the southeastern United States: derivation and list of tolerance values, with criteria for assigning water-quality ratings. *Journal of the North American Benthological Society*, 1993, 12(3): 279-290.
- [100] 马陶武, 黄清辉, 王海, 王子健, 王春霞, 黄圣彪. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立. 生态学报, 2008, 28(3): 1192-1200.
- [101] Anders N R, Churchyard T, Hiddink J G. Predation of the shelduck *Tadorna tadorna* on the mud snail *Hydrobia ulvae*. *Aquatic Ecology*, 2009, 43(4): 1193-1199.
- [102] Liess A, Kahlert M. Gastropod grazers affect periphyton nutrient stoichiometry by changing benthic algal taxonomy and through differential nutrient uptake. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(2): 283-293.
- [103] Sommer U. Reversal of density dependence of juvenile *Littorina littorea* (Gastropoda) growth in response to periphyton nutrient status. *Journal of Sea Research*, 2001, 45(2): 95-103.
- [104] Poirier A M T, Cattaneo A, Hudon C. Benthic cyanobacteria and filamentous chlorophytes affect macroinvertebrate assemblages in a large fluvial lake. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(2): 737-749.
- [105] Cui J G, Shan B Q, Tang W Z. Effect of periphyton community structure on heavy metal accumulation in mystery snail (*Cipangopaludina chinensis*): A case study of the Bai River, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(10): 1723-1730.
- [106] Carlsson N O L, Brönmark C. Size-dependent effects of an invasive herbivorous snail (*Pomacea canaliculata*) on macrophytes and periphyton in Asian wetlands. *Freshwater Biology*, 2006, 51(4): 695-704.
- [107] Cheverie A V, Hamilton D J, Coffin M R S, Barbeau M A. Effects of shorebird predation and snail abundance on an intertidal mudflat community. *Journal of Sea Research*, 2014, 92: 102-114.
- [108] Reckendorfer W, Baranyi C, Funk A, Schiemer F. Floodplain restoration by reinforcing hydrological connectivity: expected effects on aquatic mollusc communities. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(3): 474-484.
- [109] Silver C A, Vamosi S M, Bayley S E. Temporary and permanent wetland macroinvertebrate communities: phylogenetic structure through time. *Acta Oecologica*, 2012, 39: 1-10.

- [110] Turner A M, Montgomery S L. Hydroperiod, predators and the distribution of physid snails across the freshwater habitat gradient. *Freshwater Biology*, 2009, 54(6): 1189-1201.
- [111] Wu X H, Zhang S Q, Xu X J, Huang Y X, Steinmann P, Utzinger J, Wang J P, Xu J, Zheng J, Zhou X N. Effect of floods on the transmission of schistosomiasis in the Yangtze River valley, People's Republic of China. *Parasitology International*, 2008, 57(3): 271-276.
- [112] Gray D, Harding J S. Braided river benthic diversity at multiple spatial scales: a hierarchical analysis of β diversity in complex floodplain systems. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(3): 537-551.
- [113] Darby P C, Bennetts R E, Percival H F. Dry down impacts on apple snail (*Pomacea paludosa*) demography: implications for wetland water management. *Wetlands*, 2008, 28(1): 204-214.
- [114] Gérard C. Consequences of a drought on freshwater gastropod and trematode communities. *Hydrobiologia*, 2001, 459(1/3): 9-18.
- [115] Song Z Y, Zhang J Q, Jiang X M, Wang C M, Xie Z C. Population structure of an endemic gastropod in Chinese plateau lakes: evidence for population decline. *Freshwater Science*, 2013, 32(2): 450-461.
- [116] Niggebrugge K, Durance I, Watson A M, Leuven R S E W, Ormerod S J. Applying landscape ecology to conservation biology: spatially explicit analysis reveals dispersal limits on threatened wetland gastropods. *Biological Conservation*, 2007, 139(3/4): 286-296.