

滇池大型无脊椎动物的群落演变与成因分析

王丑明^{1,2}, 谢志才^{1,*}, 宋立荣¹, 肖邦定¹, 李根保¹, 李林¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 该文综合滇池大型无脊椎动物的历史资料, 并结合 2009—2010 年的现场调查数据, 对其群落演替进行了研究, 并对群落衰退的成因进行了探讨。物种数下降明显, 由 20 世纪 80 年代的 57 种降为现在的 32 种, 群落的物种损失率高达 44%。其中软体动物损失率高达 75%; 其次是水生昆虫 (39%)。滇池全湖底栖动物密度为 1776 ind/m² (其中寡毛类 1706 ind/m²; 摇蚊科 68 ind/m²)。近 20 年滇池全湖底栖动物的丰度比较发现, 寡毛类的密度和生物量呈一种先急剧上升, 而后明显下降的过程, 而摇蚊科的密度和生物量呈现出减少的趋势。寡毛类中的耐污种相对丰度增加, 如霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 成为绝对优势种, 其平均相对丰度达到了 74.1%。摇蚊科相对丰度减少, 以前广泛分布的异腹鳃摇蚊 (*Einfeldia* sp.) 基本消失, 取而代之的是羽摇蚊 (*Chironomus plumosus*)、细长摇蚊 (*Ch. attenuatus*)、中国长足摇蚊 (*Tanytus chinensis*) 等耐污种; 软体动物种类变得单一, 许多高原湖泊特有的软体动物均已消失, 螺蛳 (*Margarya melanioides*)、牟氏螺蛳 (*M. mondi*)、光肋螺蛳 (*M. mansugi*) 在 2009 年被世界自然保护联盟列入了极危物种, 滇池圆田螺 (*Cipangopaludina dianchiensis*) 也被列入了濒危物种。滇池的 Shannon-Wiener 多样性指数显著降低, 尤其是草海物种多样性从 20 世纪 50 年代的 2.70 降到现在的 0.30。半个多世纪以来总氮、总磷与物种数和多样性呈现显著负相关。底栖动物群落衰退的成因主要是生境破坏、水质恶化、蓝藻爆发、沉水植物消失、种质库匮乏等。

关键词: 滇池; 大型无脊椎动物; 群落演变; 成因分析

中图分类号: Q959.1(74); Q958.1; X174(74) 文献标志码: A 文章编号: 0254-5853-(2011)02-0212-10

Dianchi Lake macroinvertebrate community succession trends and retrogressive analysis

WANG Chou-Ming^{1,2}, XIE Zhi-Cai^{1,*}, SONG Li-Rong¹, XIAO Bang-Ding¹, LI Gen-Bao¹, LI Lin¹

(1. Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Historical records and data from yield surveys conducted in 2009 and 2010 were used to investigate macroinvertebrate community succession trends in Dianchi Lake. Species richness has declined from 57 in the 1980s to 32 in 2010, representing a species loss of 44%. Among the major benthic groups, the highest rate of loss was recorded for mollusks (75%) and aquatic insects (39%). Surveys in 2009 and 2010 across the lake revealed that the total density was 1776 ind/m², comprising oligochaetes (1706 ind/m²) and chironomids (68 ind/m²). Over a nearly twenty-year span (1992 – 2010), the density and biomass of oligochaetes first increased sharply (1992 – 2002) and then declined gradually (2002 – 2010). Further, chironomids have decreased gradually while the proportion of abundant species has increased. *Limnodrilus hoffmeisteri* became the sole dominant species with an average relative abundance of 74.1%. Cosmopolitan species, such as *Einfeldia* sp., disappeared across the lake; instead, tolerant species such as *Chironomus plumosus*, *Ch. attenuatus* and *Tanytus chinensis* became the common. Mollusk community structure has become simpler and many native species have gone extinct. Species of concern include *Margarya melanioides*, *M. mondi*, *M. mansugi* and *Cipangopaludina dianchiensis*, all rated as critically endangered by the IUCN. We found that the Shannon-Wiener index declined in Dianchi Lake, particularly in Caohai Lake, from 2.70 in the 1950s to 0.30 in 2009 and 2010. Species richness and biodiversity was significantly negative correlated with total phosphorus and total nitrogen. Factors responsible for the benthic community retrogression described here include habitat destruction, lowering of water quality, outbreaks of

收稿日期: 2010-09-06; 接受日期: 2010-12-05

基金项目: 国家科技重大专项水体污染的控制与治理(2008ZX07102-005, 2008ZX07105-004); 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-426)和淡水生态与生物技术国家重点实验室(2009FB16)联合资助

*通讯作者 (Corresponding author), E-mail: zhcxie@ihb.ac.cn

第一作者简介: 王丑明(1984—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事底栖动物生态学研究

blue-green algae, extinction of submerged plants and lack of germplasm resources.

Key words: Dianchi Lake; Macroinvertebrate; Community succession; Retrogressive analysis

滇池系云贵高原上的一个大型浅水湖泊, 滇池底栖动物的现状令人堪忧。近几十年来, 随着湖区经济的快速发展和人口的急剧增长, 人类对其自然资源的开发不断加剧, 使其生态环境逐渐恶化, 富营养化进程加剧, 水质呈不断下降趋势, 草海和外海都是劣 V 类水体, 呈严重富营养化状态。为此, 国家将滇池污染治理列为全国重点治理的“三河三湖”之一 (Zhe, 2002)。富营养化影响底栖动物群落结构和多样性 (Gong et al, 2001); 有机物的增加会导致淤积、底质改变、缺氧。这些都影响一些底栖动物的分布 (Graneli & Solander, 1988)。近年来, 滇池大量物种消失, 耐污种成为了优势种, 整个生态系统出现了危机。滇池水环境退化与物种多样性丧失呈双向恶化效应, 物种多样性重建是滇池生态恢复的重要指标 (Luo et al, 2006)。本文根据作者在 2009—2010 年对滇池全湖底栖动物的调查研究结果, 结合以往历次研究资料, 分析了半个多世纪以来滇池底栖动物群落结构的变化及其所指示的湖泊环境演变, 阐明人类活动对底栖生物群落结构的影响及其机理, 从而为科学利用和保护滇池提供依据。

1 研究区域概况

滇池属金沙江水系, 包括草海和外海两部分, 为昆明市所辖, 位于 $24^{\circ}40' \sim 25^{\circ}02'N$ 、 $102^{\circ}37' \sim 102^{\circ}48'E$ 之间, 湖面高程 1 885 m; 湖体南北最长 39 km, 东西最宽 12.5 km, 最窄 2.44 km, 湖岸线长 151.2 km, 湖面面积 298.4 km^2 , 平均水深 4.1 m, 最大水深 8 m, 水容量约 12.9 亿立方米 (海拔为 1 886.5 m), 属于高原构造型亚热带石灰岩富营养型湖 (Yang & Yang, 1985)。滇池呈南北向分布, 湖体略呈弓形, 弓背向东, 东北部有一天然沙堤, 长约 4 km, 将滇池分为南北两部分, 称为外海和草海 (图 1)。

2 材料与方法

2.1 数据来源

数据来源于滇池大型底栖动物的历史资料 (Zhang, 1948; Zhang & Qi, 1949; Zhang & Wu, 1983; Wang, 1985; Wang et al, 2007; Luo et al, 2006), 以及

本次的调查结果。滇池历年的理化指标自 1985 年及以后来源于《云南省环境状况公报》, 1985 年以前的理化指标据参考文献: Yu et al, 2000; Li, 1963。本次调查共设 30 个采样点, 其中外海 24 个, 草海 6 个 (图 1)。底栖动物的采集使用 0.0625 m^2 的改良彼得生采样器, 软体动物的采集主要使用三角拖网。动物标本的鉴定据参考文献: Epler, 2001; Brinkhurst, 1986; Liu et al, 1979。

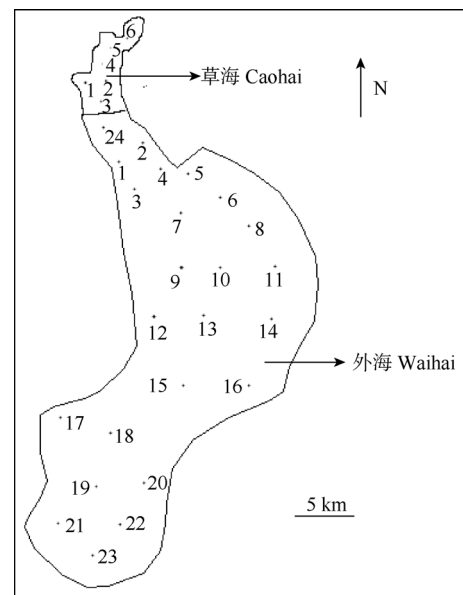


图 1 2009—2010 年滇池大型无脊椎动物采样点分布图
Fig. 1 The sampling stations of macroinvertebrates in Dianchi Lake in 2009-2010

2.2 数据处理

底栖动物的物种多样性的计算采用 Shannon-Wiener 指数计算底栖动物的多样性。具体计算采用 Excel 软件和 biodiversity tool 工具进行。统计分析用 SPSS 软件, 群落结构及其与环境关系采用线性回归进行分析。物种损失率的计算公式为 $P = (S - S_i) / S_i$, 式中 S 为本次调查的物种数, S_i 为 i 年前的物种数。Shannon-Wiener 多样性指数, 即 $H = -\sum \{ (n_i / N) \ln (n_i / N) \}$ 。式中 N 为总密度, n_i 为物种 i 的密度。

3 结果与分析

3.1 群落结构的演变

3.1.1 物种数 自 20 世纪 70 年代以来, 滇池共记

录大型无脊椎动物 85 种, 隶属于 3 门 6 纲 28 科(附表 1)。20 世纪 40 年代记录 51 种, 70 年代 33 种, 80 年代 57 种, 90 年代 21 种, 2002 年 13 种。从 20 世纪 40 年代到 80 年代总体上呈现出一种稳定的趋势, 可是从 20 世纪 80 年代到现在显著降低(图 2)。

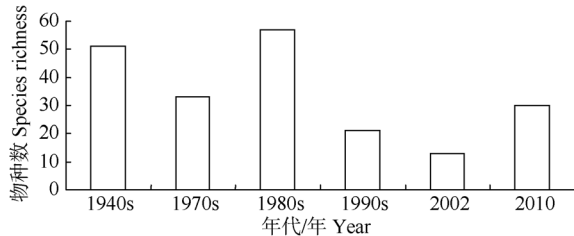


图 2 半个多世纪滇池大型底栖动物物种丰度的比较
Fig. 2 Comparison of species richness of macroinvertebrate in Dianchi Lake across half a century

2009—2010 年共记录到大型底栖动物 32 种, 隶属 3 门 4 纲 9 科 26 属(附表 1)。其中寡毛纲 10 种, 昆虫纲 14 种, 软体动物 6 种, 蛭纲 1 种, 甲壳纲 1 种。其中百陶溪毛蚓 (*Patamoethrix bedoti*) 为滇池首次发现。与 20 世纪 80 年代相比, 本次调查表明滇池大型无脊椎动物群落的物种损失率高达 44%。其中软体动物损失率高达 75%, 其次是水生昆虫 (39%)。滇池所存物种主要由极度耐污的寡毛类——霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、正颤蚓 (*Tubifex tubifex*)、苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*) 和摇蚊科幼虫——羽摇蚊 (*Chironomus plumosus*)、细长摇蚊 (*Ch. attenuatus*) 等组成, 高原湖泊特有的软体动物中除螺蛳 (*Margarya melanioides*)、牟氏螺蛳 (*M. mondi*)、光肋螺蛳 (*M. mansugi*)、滇池圆田螺 (*Cipangopaludina dianchiensis*) 外均消失殆尽。

3.1.2 优势类群 寡毛类物种数增加, 由 20 世纪 70 年代在全湖广泛分布的 1 种(苏氏尾鳃蚓)增加到现在的 10 种, 其中霍甫水丝蚓为绝对优势种, 平均相对丰度达到了 74.1%, 其平均密度为 $1\,502\text{ ind/m}^2$, 占总密度的 85.7%; 其次为正颤蚓, 其平均相对丰度为 9.3%, 而苏氏尾鳃蚓的平均相对丰度只有 4.2%。在水生昆虫中, 摇蚊科的种类增加明显, 由 20 世纪 80 年代的 4 种增加到现在的 12 种, 但是在水生昆虫中其他类群的种类渐趋消亡, 以前广泛分布的水甲科 (*Halipilidae*)、鼓甲科 (*Gyrinidae*)、水龟虫科 (*Hydrophilidae*)、仰游蝽科 (*Notonectidae*) 等的种类现在已没有发现。Wang (1985) 在 1982—1983 年的调查中发现, 在全湖广泛分布的摇蚊科

只有羽摇蚊, 另外异腹鳃摇蚊 (*Einfeldia* sp.) 也有广泛分布。在本次调查中发现全湖的绝对优势种仍为羽摇蚊, 其平均相对丰度为 2.7%, 平均密度为 31 ind/m^2 , 占总密度的 1.7%。另外细长摇蚊、中国长足摇蚊 (*Tanypus chinensis*) 也较多, 可是却没有发现在 20 世纪 80 年代分布广泛的异腹鳃摇蚊。

软体动物方面, 20 世纪 70 年代和 80 年代的物种数差别不大, 大约有 24 种 (Zhang & Wu, 1983; Wang, 1985)。可是本次调查只发现 6 种。根据 1997 年 Huang et al (1997) 对滇池的调查, 湖中软体动物十分丰富, 瓣鳃类除无齿蚌 (*Anodonta* sp.) 和河砚 (*Corbicula fluminea*) 外, 尚有凝菱珠蚌 (*Rhombunopsis* sp.)、相珠蚌 (*Unionia* sp.) 等, 可是在本次调查中却只发现无齿蚌一种。软体动物的方格短沟蜷 (*Semisulcospira cancellata*) 过去报道在滇池中有很大的群体数量, 但这次只采到螺壳, 也属于绝迹或即将绝迹的种类。Wang (1985) 在 1982—1983 年对滇池进行的调查中发现软体动物中的腹足类有 19 种, 可是在 2009 年的调查中却只发现 5 种, 扁卷螺科 (*Planorbidae*) 只采到空壳, 以前广泛分布的特有种云南萝卜螺 (*Radix yunnanensis*) 在此次调查中未发现, 高原湖泊特有的软体动物如螺蛳、牟氏螺蛳、光肋螺蛳在 2009 年被世界自然保护联盟 (IUCN) 列入了极危物种 (critically endangered, CR), 滇池圆田螺也被列入了濒危物种 (endangered, EN) (<http://www.iucnredlist.org>)。

3.1.3 密度和生物量 由于缺乏滇池软体动物的定量数据, 本节主要分析寡毛类和摇蚊科现存量的演变趋势(图 3)。20 世纪 90 年代初底栖动物的丰度还相对较少, 平均密度和生物量分别为 696 ind/m^2 和 14.13 g/m^2 , 其中寡毛类密度和生物量分别为 138 ind/m^2 和 6.78 g/m^2 (分别占总丰度的 19.8% 和 48%), 摇蚊科密度和生物量分别为 558 ind/m^2 和 7.35 g/m^2 (80.2% 和 52%)。而 2002 年底栖动物的丰度达到峰值, 其密度和生物量分别为 $5\,017\text{ ind/m}^2$ 和 22.2 g/m^2 , 其中寡毛类密度和生物量分别为 $4\,609\text{ ind/m}^2$ 和 18.02 g/m^2 (分别占总丰度的 91.9% 和 81.2%), 摇蚊科密度和生物量分别为 408 ind/m^2 和 4.18 g/m^2 (分别占总丰度的 8.1% 和 8.8%)。本次一年的调查结果, 显示滇池全湖底栖动物密度和生物量分别为 $1\,776\text{ ind/m}^2$ 和 3.43 g/m^2 , 其中寡毛类密度和生物量分别为 $1\,706\text{ ind/m}^2$ 和 2.83 g/m^2 (分

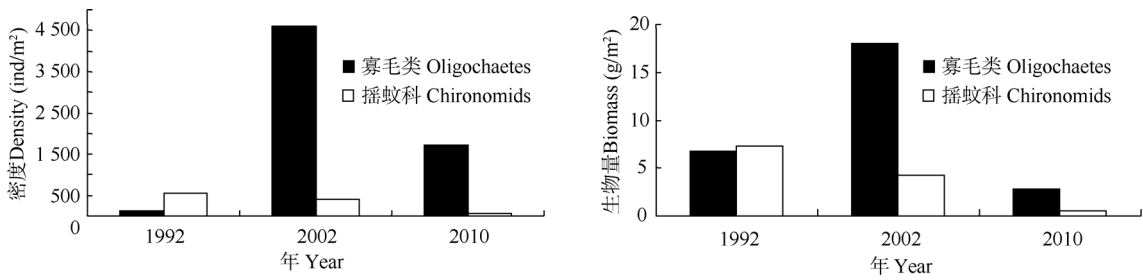


图 3 近 20 年滇池大型底栖动物主要类群丰度的比较

Fig. 3 Comparison of abundance of main macroinvertebrate groups in Dianchi Lake across nearly twenty-year span

别占总丰度的 96.1%和 82.6%)，摇蚊科密度和生物量分别为 68 ind/m²和 0.60 g/m² (分别占总丰度的 3.8%和 17.4%)。

3.1.4 物种多样性 如图 4 所示，滇池草海、外海的物种多样性有逐渐恶化的趋势，尤其是草海，物种多样性指数 (Shannon-Wiener index) 从 20 世纪 50 年代的 2.70 下降到 2010 年的 0.30，滇池外海的物种多样性指数也由 20 世纪 60 年代的 1.08 降到 2010 年的 0.67。

3.2 群落结构与水质的关系

结合半个多世纪以来滇池外海的总氮 (TN)、总磷 (TP)，分别与物种数和 Shannon-Wiener 多样性指数进行分析，发现它们彼此都呈显著负相关 (图 5)。

4 讨论

4.1 滇池大型无脊椎动物的演变

1948 和 1949 两年张玺等曾报道无脊椎动物 51

种，包括 4 种海绵动物 (*Spongilla carteri*, *Spongilla* sp., *Eplydatia fluyiatilia* 和 *Efydatia robusta*) 和 2 种腔肠动物 (*Hydra vividis* 和 *Hydra vulgari*)。方格短沟蜷在滇池中也有很大的群体数量，椎实螺科 (Lymnaeidae) 的云南萝卜螺在全湖普遍分布，滇池中螺蛳属 (*Margarya*) 有 6 种，其他螺类 10 种 (Zhang, 1948; Zhang & Qi, 1949)。在 1977 年的调查中，只有 33 种，且淡水海绵动物、腔肠动物已绝

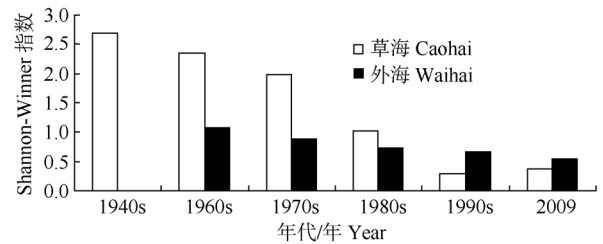


图 4 滇池大型底栖动物多样性的比较

Fig. 4 Comparison of Shannon-Wiener value of macroinvertebrate in Dianchi Lake

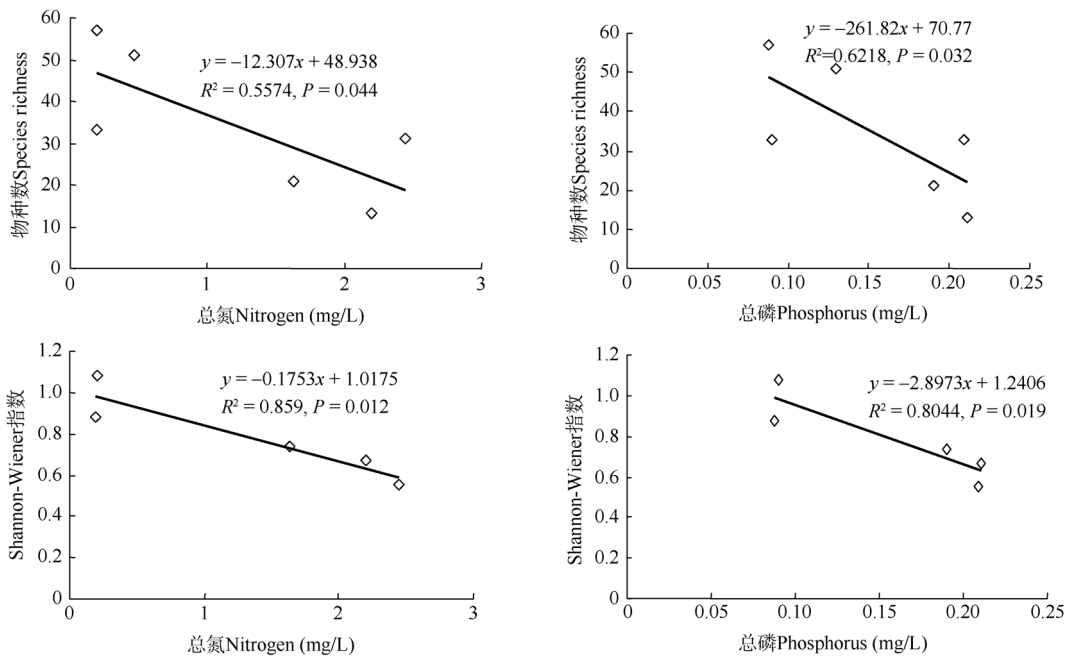


图 5 半个多世纪以来滇池物种数和多样性与总氮和总磷的关系

Fig. 5 The relationship between TN, TP and biodiversity, species richness of macroinvertebrate in Dianchi Lake across half a century

迹, 云南萝卜螺除在深水区可以采到标本外很难见到, 螺蛳属只发现两种, 黑螺科 (*Melaniidae*) 的方格短沟蜷已经很难采到 (Zhang & Wu, 1983)。1982—1983 年的调查共发现滇池的底栖动物有 57 种 (Wang, 1985)。从这次调查中可以看出, 滇池无脊椎动物的类组成已发生了较大变化。软体动物曾报道共 55 种, 这次调查只采到 24 种, 种类和数量明显减少, 其中以田螺科、黑螺科最为显著, 许多种类趋向消亡; 在节肢动物中日本沼虾 (*Macrobrachium nipponense*)、羽摇蚊、卵形沼梭成为全湖浅水区的优势种类; 寡毛类变化不大, 优势种仍为苏氏尾鳃蚓。1995 年的调查中共采到底栖动物 21 种, 其中环节动物 4 种, 节肢动物 5 种, 软体动物 12 种 (大部分为空螺壳), 优势类群主要为摇蚊幼虫和寡毛类, 结构趋向单一化 (Luo et al, 2006)。2001—2002 年王丽珍等根据滇池 6 次采样的定量分析鉴定结果, 共获得底栖动物 5 科 9 属 13 种, 其中环节动物 2 科 4 属 7 种, 摇蚊科幼虫 4 属 4 种, 甲壳动物 1 种 (Wang et al, 2007)。

物种数从 20 世纪 40 年代到 80 年代总体上呈现出一种稳定的趋势, 本次调查的物种数要比上世纪 90 年代和 2002 年多, 主要是本次调查更为全面, 种类鉴定也更为准确。总体上从 20 世纪 80 年代到现在物种数有降低的趋势, 原因可能是滇池水质自 20 世纪 80 年代以来逐渐恶化 (Liu, 1999), 滇池水环境退化与区域内物种多样性的丧失呈双向恶化的趋势 (Luo et al, 2006)。一般底栖动物多样性与总氮 (TN)、总磷 (TP) 呈负相关 (Chen et al, 1980; Gong, 2002)。近半个世纪对滇池大型无脊椎动物的研究表明, 寡毛类的物种数和丰度都有很大的增加, 增加的主要为一些耐污种, 如霍甫水丝蚓、正颤蚓等。水生昆虫中除了摇蚊科的种类数增加外, 其他科的种类渐趋消亡。摇蚊科也主要增加了一些耐污种, 如丰度仅次于羽摇蚊的细长摇蚊、中国长足摇蚊等。软体动物的种类数明显减少, 特有的云南萝卜螺消失, 高原湖泊特有的螺蛳属的几个种和滇池圆田螺都处于极危状态。

近 20 年滇池全湖底栖动物的丰度演替显示, 寡毛类的密度和生物量呈一种先急剧上升, 而后明显下降的过程, 而摇蚊科的密度和生物量呈现一种减少的趋势。随着湖泊富营养化进程的加剧, 寡毛类和摇蚊科对此作出了两种不同的响应。底质可能是决定大型底栖底栖动物群落结构最重要的因素

(Beisel et al, 1998)。一般地, 底栖动物的现存量与底质的稳定性和有机质含量有密切关系 (Barmuta, 1989; Quinn & Hickey, 1994)。底质的有机物主要来自于浮游藻类、大型水生植物、动物及陆地植被, 滇池的蓝藻爆发、水生植物死亡等大大增加了底质的有机物。2009—2010 一年的采样情况也发现滇池的底泥主要为黑色的富含有机质的淤泥。相比有机物较少的底质, 寡毛类在富含有机物的淤泥底质中的数目要多一些 (Sauter & Gude, 1996), 但是有机物过于丰富的底质中缺氧, 底栖动物的丰度将明显下降 (Graneli & Solander, 1988)。而摇蚊科的耐污能力要差一些, 遭受有机污染的水体中, 底质环境的溶氧常处于相对较低水平, 这对于生活在这种环境中的底栖动物来说, 溶氧明显地成为它们的限制因子, 多数种类因不适应这种环境而逐渐消失, 摇蚊科幼虫和寡毛类成为优势类群, 当缺氧变得更为严峻时, 寡毛类成为唯一的优势类群, 如果长时间的缺氧, 底栖动物将完全消失 (Famme & Knudsen, 1985; Milbrink, 1994)。

4.2 大型无脊椎动物衰退的成因

4.2.1 生境破坏 环湖自然湿地不仅对入湖前的污水起到净化作用, 对湖内水生植被的恢复也具有重要作用 (Li et al, 2003)。滇池经过 70 年代的“围海造田”, 造成大规模湿地被破坏, 据不完全统计, 围海造田共使滇池水面减少 21.8 km²。80 年代和 90 年代又沿滇池修筑起了 124 km 长的防护堤, 使滇池外海沿岸带天然湿地系统被毁, 滇池丧失了沿岸带所特有的生境多样性。一般认为, 沿岸带底栖动物较深水带有更高的多样性、现存量和生产力 (Chen et al, 1980)。沿岸带是水陆生态交错带的一种类型, 是指相邻的陆地生态系统与水域生态系统之间的过渡带 (Yin, 1995), 历来是人类活动最集中的场所, 也是地球上最脆弱的湿地生态系统之一。湖滨带的功能主要表现为湖滨水陆交错带内生物或非生物因素的相互作用, 对交错带内能量流动和物质循环的调节 (Zhao et al, 2008)。

4.2.2 水质恶化 随着工农业发展和城镇建设的扩大, 滇池周边大量工业废水和城市生活污水以及农药、化肥流入滇池。城市污水的排入大大促进了水域的富营养化, 水功能基本丧失 (Liu, 1997)。营养物质的丰度, 尤其是氮和磷的浓度, 半个多世纪以来总氮升高了近 6 倍, 而总磷也升高了 1.6 倍多。高浓度的氮和磷能够对水生植物、藻类和大型

底栖动物群落产生明显的影响 (Lair et al, 1998)。本文的分析也表明大型底栖动物的多样性与水体中总氮、总磷均呈负相关。武汉东湖近 20—30 年由于生活污水流入和发展养渔业的影响, 底栖动物从 113 种减到 26 种, 其中以毛翅目和软体动物种类的消失更甚, 而霍甫水丝蚓的密度呈现快速增长的趋势 (Gong, 2002)。

4.2.3 蓝藻爆发 水体超富营养化导致蓝藻的大爆发, 每遇到夏季适宜的水温、充足的阳光, 蓝藻等得到呈数量级疯长的最佳条件, 水面便会在很短时间里出现大片“绿潮”, 生态平衡遭受严重破坏。滇池水体流动性差, 全年的大部分时间滇池水温都处在蓝藻适宜温度范围内。昆明充足的阳光照射、丰富的地热为滇池藻类等植物旺盛繁殖创造了良好条件 (Fang, 2010)。蓝藻爆发不仅能降低水体透明度, 减少光线进入, 而且可以消耗水中的溶解氧, 当蓝藻大量繁殖时, 水中的溶解氧浓度也迅速降低, 造成鱼虾、螺蛳等水生生物的死亡, 底栖动物除了耐污种外很难存活。

4.2.4 水下森林消失 作为水生生态系统中的初级生产者之一——沉水植物能调节水生生态系统的物质循环速度, 增加水体生物多样性, 控制藻类, 增强水体稳定性, 从而有效提高水质 (Zhao et al, 2006)。在 20 世纪 60 年代, 滇池沉水植物众多, 其中盖度最大的为海菜花群落、马来眼子菜群落、狐尾藻群落、菹齿眼子菜群落和芦苇群落, 占整个盖度的 70% 以上 (Qu & Li, 1983)。而到了 1996 年, 群落结构迅速简化和退化, 原来的优势物种如海菜花、轮藻等已绝迹, 只剩下耐污的凤眼莲群落、喜旱莲子草群落和水葫芦群落 (Yu et al, 2000)。滇池

沉水植物的覆盖率从 20 世纪 50 年代的 90% 下降到 2000 年的 1.8% (Gong et al, 2009)。高等水生植物为底栖动物提供了丰富的食物来源、更多的栖息地, 使其生境更趋多样化, 而高度的空间异质性不仅为底栖动物带来更多的摄食、繁殖和活动场所, 而且更有利于躲避捕食动物的捕食、以及逃避风、水流等对其造成的危害 (Newman, 1991)。因此, 滇池沉水植物的消失也是底栖动物衰退的重要原因。

4.2.5 种质库的匮乏 滇池是一个相对封闭的湖泊系统, 只有一条螳螂川经普渡河与金沙江连通, 经过很多年的隔绝尽管形成了一些特有种, 如软体动物中的螺蛳、滇池圆田螺, 但由于这些年严重的污染, 造成了很多特有种的灭绝, 再加之进入滇池的很多河流如盘龙江、大清河等都流经昆明主城区, 也遭受了严重的污染。因此, 滇池四周底栖动物的种质资源库相对贫乏。而且底栖动物的自然迁移速率, 特别是摇蚊科成虫一般只能在空气中生存 7 天左右, 较远的种质资源库通过空气传播亦难于抵达, 而水栖寡毛类 (特别是仙女虫科) 的迁移能力较弱。因此, 滇池底栖动物的种质资源库是极其匮乏的。

从滇池无脊椎动物群落结构历史变迁这一个侧面可以看出, 湖泊污染的速度越来越快, 湖泊治理任重而道远。滇池污染不过 20 年的时间, 可是要把它恢复到以前的样子, 需要更多的时间。因此, 我们要引以为鉴, 每个人都要有环保意识, 不能再让其他的湖泊走“先污染、后治理”的路子。

致谢: 感谢中国科学院水生生物研究所滇池野外工作站在滇池采样中提供的便利, 此外对滇池生态研究所潘珉提供部分滇池水体历年理化指标也深表谢意。

参考文献:

- Beisel JN, Usseglio-Polatera P, Thomas S, Moreteau JC. 1998. Stream community structure in relation to spatial variation: The influence of mesohabitat characteristics [J]. *Hydrobiologia*, **389**: 73-88.
- Barmuta LA. 1989. Habitat patchiness and macrobenthic community structure in an upland stream in temperate Victoria, Australia [J]. *Fresh Biol* **21** (2): 223-236.
- Brinkhurst RO. 1986. Guide to the Freshwater Aquatic Microdrile Oligochaetes of North America [M]. Canada: Department of Fisheries and Oceans
- Chen QY, Liang YL, Wu TH. 1980. Studies on community structure and dynamics of zoobenthos in Lake Donghu, Wuhan [J]. *Stud Hydrobiol Sin*, **7**: 41-56. [陈其羽, 梁彦龄, 吴天惠. 1980. 武汉东湖底栖动物群落结构和动态的研究. 水生生物学集刊, **7**: 41-56.]
- Epler JH. 2001. Identification Manual for the Larval Chironomidae of North and south Carolina [M]. America: North Carolina Department of Environment and Natural Resources Division of Water Quality.
- Famme P, Knudsen J. 1985. Anoxic survival, growth and reproduction by the freshwater annelid, *Tubifex* sp., demonstrated using a new simple anoxic chemostat [J]. *Comp Biochem Physiol: Part A: Physiology*, **81** (2): 251-253.
- Fang HY. 2010. Brief talk on reasons of blue algae bloom in Dianchi lake[J]. *Environ Sci Sur*, **29** (1): 74-75. [方红云. 2010. 浅析滇池蓝藻暴发原因. 环境科学导刊, **29** (1): 74-75.]
- Gong ZJ. 2002. Studies on the Macrozoobenthos Ecology of Shallow Lake in the Middle River of Yangtze [D]. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan. [龚志军. 2002. 长江中游浅水湖泊大

- 型底栖动物的生态学研究. 武汉: 中国科学院水生生物研究所.]
- Gong ZJ, Li YL, Shen J, Xie P. 2009. Diatom community succession in the recent history of a eutrophic Yunnan Plateau lake, Lake Dianchi, in subtropical China [J]. *Limnology*, **10** (3) : 247-253.
- Gong ZJ, Xie P, Tang HJ, Wang SD. 2001. The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, **25** (3) : 210-216. [龚志军, 谢平, 唐汇娟, 王士达. 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** (3) : 210-216.]
- Graneli W, Solander D. 1988. Influence of aquatic macrophytes on phosphorus cycling in lakes [J]. *Hydrobiologia*, **70**: 245-266.
- Huang BY, Zhou XD, Zhang QG, Chen YX. 1997. Distribution and environment of the *Anodonta* in Dianchi lake of Yunnan Province [J]. *Stud Mar Sin*, **39**: 133-135. [黄宝玉, 周晓丹, 张道光, 陈元晓. 1997. 云南滇池无齿蚌的分布与环境. 海洋科学集刊, **39**: 133-135.]
- Lair N, Reyes-Marchant P, Jacquet V. 1998. Phytoplankton, ciliate and rotifer development at two stations in the Middle Loire River (France), during a period of low water flow [J]. *Ann Limno: Int J Lim*, **34** (1) : 35-48.
- Li SH. 1963. Plateau lake survey in Yunnan Province [J]. *Oceanol Limnol Sin*, **5** (2) : 87-114. [黎尚豪. 1963. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, **5** (2) : 87-114.]
- Li YM, Peng YA, Wang YC, Xu J. 2003. The pollution feature of Dianchi lake and its control countermeasure [J]. *Yunnan Geographic Environ Res*, **15** (4) : 32-38. [李益敏, 彭永岸, 王玉朝, 徐旌. 2003. 滇池污染特征及治理对策, 云南地理环境研究, **15** (4) : 32-38.]
- Liu HL. 1997. Series of technologies for water environmental treatment in Caohai, Dianchi, Yunnan Province [J]. *Res Environ Sci*, **10** (1) : 1-6. [刘鸿亮. 1997. 治理滇池草海水环境的成套技术. 环境科学研究, **10** (1) : 1-6.]
- Liu LP. 1999. Characteristics of blue algal bloom in Dianchi Lake and analysis on its cause [J]. *Res Environ Sci*, **12** (5) : 36-37. [刘丽萍. 1999. 滇池水华特征及成因分析. 环境科学研究, **12** (5) : 36-37.]
- Liu YY, Zhang WZ, Wang YX, Wang EY. 1979. China Economic Fauna: Freshwater Mollusks [M]. Beijing: Science Press. [刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义. 1979. 中国经济动物志: 淡水软体动物. 北京: 科学出版社.]
- Luo MB, Duan CQ, Shen XQ, Yang L. 2006. Environmental degradation and loss of species diversity in Dianchi Lake [J]. *Mar Fish*, **28** (1) : 71-78. [罗民波, 段昌群, 沈新强, 杨良. 2006. 滇池水环境退化与区域内物种多样性的丧失. 海洋渔业, **28** (1) : 71-78.]
- Milbrink G. 1994. Oligochaetes and water pollution in two deep Norwegian lakes [J]. *Hydrobiologia*, **278**: 213-222.
- Newman RM. 1991. Herbivory and detritivory on freshwater macrophytes by invertebrates: A review [J]. *North Amer Benthol Soc*, **10**: 89-114.
- Qu ZX, Li H. 1983. Dianchi Lake plant communities and pollution [M]// Dianchi lake Pollution and Hydrobios. Kunming: Yunnan People Publishing House, 7-15. [曲仲湘, 李恒. 1983. 滇池植物群落和污染. 滇池污染与水生生物. 昆明: 云南人民出版社, 7-15.]
- Quinn JM, Hickey CW. 1994. Hydraulic parameters and benthic invertebrate distributions in two gravel-bed New-zealand rivers [J]. *Fresh Biol*, **32** (3) : 489-500.
- Sauter G, Gude H. 1996. Influence of grain size on the distribution of tubificid oligochaete species [J]. *Hydrobiologia*, **334**: 97-101.
- Wang LZ. 1985. A research of macroinvertebrates in Yunnan Dianchi Lake [J]. *J Yunnan Univ: Nat Sci ed*, **7**: 73-83. [王丽珍. 1985. 滇池的大型无脊椎动物. 云南大学学报: 自然科学版, **7**: 73-83.]
- Wang LZ, Liu YD, Chen L, Xiao BD, Liu JT, Wu QL. 2007. Benthic macroinvertebrate communities in Dianchi lake Yunnan and assessment of its water [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, **31** (4) : 590-593. [王丽珍, 刘永定, 陈亮, 肖邦定, 刘剑彤, 吴庆龙. 2007. 滇池底栖无脊椎动物群落结构及水质评价. 水生生物学报, **31** (4) : 590-593.]
- Wang LZ, Xu XQ, Zhou WB, Xiao H. 2002. A study on the zoobenthos in Macunwan and Haidongwan region of Dianchi Lake Yunnan [J]. *J Yunnan Univ Nat Sci ed*, **24** (2) : 134-139. [王丽珍, 徐小清, 周文博. 2002. 云南滇池马村湾、海东湾底栖动物本底调查研究. 云南大学学报: 自然科学版, **24** (2) : 134-139.]
- Yang YG, Yang GH. 1985. An outline of physical geography of the Yunnan Dianchi lake [J]. *J Yunnan Univ: Nat Sci ed*, **7**: 1-5. [杨一光, 杨桂华. 1985. 滇池自然地理概要. 云南大学学报: 自然科学版, **7**: 1-5.]
- Yin CQ. 1995. The ecological function, protection and utilization of land/inland water ecotones [J]. *Acta Ecol Sin*, **5** (3) : 331-335. [尹澄清. 1995. 内陆-水陆交错带的生态功能及其保护与开发前景. 生态学报, **5** (3) : 331-335.]
- Yu GY, Liu YD, Qiu CQ, Xu XQ. 2000. Macrophyte succession in Dianchi lake and relations with the environment [J]. *J Lake Sci*, **12** (1) : 73-80. [余国营, 刘永定, 丘昌强, 徐小清. 2000. 滇池水生植物演替及其与水环境变化研究. 湖泊科学, **12** (1) : 73-80.]
- Zhang QG, Wu TS. 1983. Dianchi lake pollution and aquatic invertebrate investigation [M]//Dianchi Lake Pollution and Hydrobios. Kunming: Yunnan people publishing house, 31-37. [张道光, 吴天生. 1983. 滇池污染与水生无脊椎动物的调查[M]. 滇池污染与水生生物. 昆明: 云南人民出版社, 31-37.]
- Zhang X. 1948. The research on Kunming lake and its animals [J]. *Contrib Instit Zool, Natl Acad Peiping*, **4**: 11-24. [张玺. 1948. 云南昆明湖湖泊及其动物的研究. 北平研究院动物研究所集刊, **4**: 11-24.]
- Zhang X, Qi ZY. 1949. Yunnan freshwater mollusks and its new species [J]. *Contrib Inst Zool, Natl Acad Peiping*, **5** (5) : 219-220. [张玺, 齐钟彦. 1949. 云南淡水软体动物及其新种. 北平研究院动物研究所集刊, **5** (5) : 219-220.]
- Zhao GY, Li WJ, Li MR, Cui WH, Chen AS, Chang YD. 2008. Current ecological situation and ecological restoration measures in lakeside zone of Erhai Lake [J]. *Anhui Agri Sci Bull*, **14** (17) : 89-92. [赵果元, 李文杰, 李默然, 崔卫华, 陈安生, 常永第. 2008. 洱海湖滨带的生态现状与修复措施. 安徽农学通报, **14** (17) : 89-92.]
- Zhao HC, Wang SR, Jin XC, Yan CZ, Liu JH. 2006. Effect of different forms of phosphorus on growth and physiological activity of *Hydrilla verticillata* [J]. *Chn J Appl Environ Biol*, **12** (3) : 342-347. [赵海超, 王圣瑞, 金相灿, 颜昌宙, 刘景辉. 2006. 不同形态磷对黑藻生长和生理特性的影响. 应用与环境生物学报, **12** (3) : 342-347.]
- Zhe YM. 2002. Eutrophication of Dianchi and its trend and treatment [J]. *Yunnan Environ Sci*. **25** (1) : 35-38. [栢元蒙. 2002. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策. 云南环境科学, **25** (1) : 35-38.]

附表 1 滇池大型无脊椎动物物种名录
Appendix 1 List of macroinvertebrate occurred in Dianchi Lake

		1976-1979	1982-1983	2001-2002	2009-2010
环节动物门	Annelida				
蛭纲	Hirudinea				
宽体金线蛭	<i>Whitmania pigra</i>	+	+		+
宽身舌蛭	<i>Glossiphonia lata</i>		+		
淡色舌蛭	<i>G. weberi</i>		+		
寡毛纲	Oligochaeta				
带丝蚓科	Lumbriculidae				
夹杂带丝蚓	<i>Lumbriculus variegatus</i>			+	
仙女虫科	Naididae				
指鳃尾盘虫	<i>Dero digitata</i>				+
吻盲虫一种	<i>Pristina</i> sp.				+
颤蚓科	Tubificidae				
多毛管水蚓	<i>Aulodrilus plurisetia</i>				+
苏氏尾鳃蚓	<i>Branchiura sowerbyi</i>	+	+	+	+
坦氏泔蚓	<i>Ilyodrilus templetoni</i>				+
霍甫水丝蚓	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>		+	+	+
克拉伯水丝蚓	<i>L. claparedianus</i>			+	+
巨毛水丝蚓	<i>L. grandisetosus</i>				+
奥特开水丝蚓	<i>L. udekemianus</i>		+	+	
瑞士水丝蚓	<i>L. helveticus</i>			+	
百陶溪毛蚓	<i>Patamothrix bedoti</i>				+
正颤蚓	<i>Tubifex tubifex</i>			+	+
节肢动物门	Arthropoda				
甲壳纲	Crustacea				
细足米虾	<i>Caridina niloticagracilipes</i>		+		
日本沼虾	<i>Macrobrachium nipponense</i>	+	+	+	+
秀丽白虾	<i>Palaemon modestus</i>	+	+		
中华小长臂虾	<i>Palaemonetes sinensis</i>	+	+		
昆虫纲	Insecta				
负子虫科	Belostomatidae				
负子虫	<i>Sphaeroderma japonicum</i>	+	+		+
田鳖	<i>Belostoma deyrollii</i>		+		
摇蚊科	Chironomidae				
羽摇蚊	<i>Chironomus plumosus</i>		+	+	+
细长摇蚊	<i>Ch. attenuatus</i>			+	+
暗黑摇蚊	<i>Ch. lugubris</i>		+		
双叉摇蚊一种	<i>Dicrotendipes</i> sp.				+
异腹腮摇蚊	<i>Einfeldia insolita</i>		+		
侧叶雕翅摇蚊	<i>Glyptotendipes lobiferus</i>		+		+
小摇蚊一种	<i>Microchironomus</i> sp.				+
直突摇蚊一种	<i>Orthocladius</i> sp.				+
拟长跗摇蚊一种	<i>Paratanytarsus</i> sp.				+
花纹前突摇蚊	<i>Procladius choreus</i>			+	+

(to be continued)

(continued)

		1976-1979	1982-1983	2001-2002	2009-2010
多足摇蚊一种	<i>Polypedilum</i> sp.				+
长足摇蚊一种	<i>Tanytus concavus</i>				+
长足摇蚊一种	<i>T. stellatus</i>				+
中国长足摇蚊	<i>T. chinensis</i>			+	+
虻科	Coenagrionidae				
豆娘稚虫	<i>Lestes</i> sp.		+		
划蝽科	Corixidae				
小风船虫	<i>Corixa substriata</i>		+		
气球虫	<i>Sigara sbustriata</i>		+		
龙虱科	Dytiscidae				
泽劳	<i>Cybister tnpunctatus</i>		+		
龙虱	<i>C.</i> sp.	+	+		
三点龙虱	<i>C. tripunctatus</i>	+			
龟蝽科	Gerridae				
水龟	<i>Gorris</i> sp.	+	+		+
鼓甲科	Gyrinidae				
大鼓甲	<i>Dineutus orientalis</i>		+		
水甲科	Haliplidae				
小头水甲	<i>Haliplus sauteri</i>		+		
水甲	<i>Haliplus</i> sp.		+		
卵形沼梭	<i>Haliplus ovalis</i>		+		
水龟虫科	Hydrophilidae				
水龟虫	<i>Hydrophilus acuminatus</i>	+	+		
蜻科	Libellulidae				
蜻蜓稚虫	<i>Crocothemis</i> sp.	+	+		
狼蛛科	Lycosidae				
水狼蛛	<i>Pirata</i> sp.		+		
红娘华科	Nepidae				
水斧	<i>Kanatra chinensis</i>		+		
红娘华	<i>Laccotrephes japonensis</i>	+	+		
蠓蝽	<i>Ranatra braehyusa</i>	+			
仰游蝽科	Notonectidae				
松藻虫	<i>Notonecta triguttata</i>	+	+		
溪蟹科	Potamonidae				
美丽拟溪蟹	<i>Endymion parapotamon</i>	+	+		
软体动物门	Mollusca				
瓣鳃纲	Lamellibranchia				
蜆科	Cobculidae				
河蜆	<i>Cobicula fluminea</i>	+	+		
刻蚊蜆	<i>C. largillierti</i>	+	+		
滇池蜆	<i>C. fenouilliana</i>	+			
蚌科	Unionidae				
背角无齿蚌	<i>Anodonta woodiana woodiana</i>	+	+		
圆背角无齿蚌	<i>A. woodiana pacifica</i>	+	+		

(to be continued)

(continued)

		1976-1979	1982-1983	2001-2002	2009-2010
椭圆背角无齿蚌	<i>A. woodiana elliptica</i>		+		
无齿蚌一种	<i>Anodonta</i> sp.	+			+
腹足纲	Gastropoda				
椎实螺科	Lymnacidae				
椭圆萝卜螺	<i>Radix swinhoe</i>		+		+
云南萝卜螺	<i>R. yunnanensis</i>	+	+		
耳萝卜螺	<i>R. auricularia</i>	+	+		
卵萝卜螺	<i>R. ovata</i>		+		
折叠萝卜螺	<i>R. plicatula</i>		+		
黑螺科	Melaniidae				
美丽短沟蜷	<i>Semisulcospira dulcis</i>	+	+		
粗短沟蜷	<i>S. iuflata</i>	+	+		
伏雅短沟蜷	<i>S. lauta</i>	+	+		
短沟蜷一种	<i>S.</i> sp.	+			
扁卷螺科	Planorbidae				
凸旋螺	<i>Cyraulox convexiusculus</i>		+		
大脐圆扁螺	<i>Hippeutis umbilicalis</i>		+		
肋螺科	Pleuroceridae				
沼地螺一种	<i>Paludomus</i> sp.	+			
田螺科	Viviparidae				
滇池圆田螺	<i>Cipangopaludina dianchiensis</i>				+
中国圆田螺	<i>G. chinensis</i>	+	+		
中华圆田螺	<i>G. cathayensis</i>	+	+		
膨胀圆田螺	<i>G. ampullacea</i>	+	+		
球圆田螺	<i>G. ampulliformis</i>		+		
螺蛳	<i>Margarya melanioides</i>	+	+	+	+
牟氏螺蛳	<i>M. argarya mondi</i>	+	+		+
光肋螺蛳	<i>M. mansugi</i>				+
长螺蛳	<i>M. elongata</i>		+		
乳顶螺蛳	<i>M. tropidophora</i>		+		
纹沼螺	<i>Parafossarulus striatuaus</i>		+		

“+”表示出现过的物种 (occured taxa)。

ZOOLOGICAL RESEARCH: Notice to Authors

- 1. ZOOLOGICAL RESEARCH** deals with all aspects of zoology. Papers on molecular biology and evolution, developmental biology, experimental embryology, biochemistry, physiology, neurobiology, immunology, pathology, genetics, ecology and ethology of animals are especially highlighted. The journal publishes bimonthly peer-reviewed original articles, review articles, research reports, and notes. Papers in English are warmly welcomed.
- The journal is distributed both home and abroad, and papers are published in either Chinese or English. The journal can be viewed through address: <http://www.zoores.ac.cn/> or <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>.
- The submission of a paper for publication indicates that it must not have been published, accepted for publication, or be under consideration for publication wholly or partially elsewhere in any language, i.e. the copyright is transferred from the author to the publisher upon acceptance. Authors may use their article elsewhere after publication provided that prior permission is obtained from the publisher. The authors are responsible for obtaining permission to reproduce copyright material from other sources.
- Manuscripts and all editorial correspondence compiled with Word document should be e-mailed to zoores@mail.kiz.ac.cn or submitted to <http://www.zoores.ac.cn/>, or by a regular mail to the Editorial Office of Zoological Research, Kunming Institute of Zoology, the Chinese Academy of Sciences, 32 Jiaochang Donglu, Kunming, Yunnan 650223, P. R. China. Tel: +86 871 5199026, Fax: +86 871 5191823.
- Title** of the paper and the author's names as well as the full address of the corresponding author (detailed address and email address) should appear on the title page. Funding sources should follow as a footnote.
- Each paper should be preceded by an **abstract** of no more than 300 words, which summarizes materials and methods, main results, and conclusions.
- About five **key words** for indexing should be provided immediately below the abstract.
- Headings and subheadings should be listed as "1" (**Materials and Methods**), "1.1", "1.1.1", "1.2", "2" (**Results**), "2.1", "3" (**Discussion**), etc.
- Introduction** should summarize the rationale and give a concise background. Use references to provide the most salient background rather than an exhaustive review.
- Materials and methods** provide technical information to allow the fieldwork or experiments to be repeated. Describe new methods or modifications and identify unusual instruments and procedures in detail.
- Results** emphasize or summarize only important observations. Simple data may be set forth in the text without the need of tables and figures.
- Discussion** should deal with the interpretation of your results. Focus the discussion on your results. Emphasize any new and important aspects and relate your results to other studies. End with a brief conclusion.
- Acknowledgment(s)** may briefly include ① contributors that do not warrant authorship; ② technical help; and ③ material support.
- Tables and figures** must be numbered consecutively by Arabic numerals. The captions to illustrations can be bonded with the tables, and the figure legends should be separated from the illustration. Only good drawings and original photographs (ideally as JPEGs or TIFF) suitable for reproduction can be accepted. Actual enlarging multiples or the length unit (bar, in μm or nm) should be marked in photos produced by microscopy. Three-line tables (no vertical line appeared) are requested.
- References** to the literature are indicated in the text in the form of "(author's name and year of publication)", e.g. "(Luan et al, 2002)". Listed references should be complete in all details. The full list should be collected and typed at the end of the paper and arranged alphabetically by authors and chronologically for each author as shown below (if originally published in Chinese, followed by the Chinese correspondents).
 - 15.1 For Journal [J]
Luan YX, Xie RD, Yin WY. 2002. Preliminary study on phylogeny of *Diplura* [J]. *Zool Res*, **23**(2): 149-154.
 - 15.2 For Monographer [M] or Collective works [C]
Gwinner A. 1990. Bird Migration: Physiology and Ecophysiology [M]. Berlin: Springer.
 - 15.3 For a piece in monographer or collective works
Fa JE. 1991. Provisioning of Barbary macaques on the rock of Gibraltar[M] //Box HO. Primate Responses to Environmental Change. London: Chapman and Hall. 137-154.
- The corresponding author is invited to return the revision within three months after receiving the reviewers' comments and send the proof back as soon as possible (within three days).
- All issues concerned the manuscript should abide by ethnics rules and Uniform Requirements for Manuscripts Submitted to Biomedical Journals produced by International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE).