

有壳变形虫群落组成及与环境因子的关系 ——以山西滹沱河湿地为例^{*}

王春玲, 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤,甄志磊^{**}

(山西农业大学城乡建设学院, 太谷 030801)

摘要: 滹沱河湿地是山西省重要的湿地资源, 对生物多样性的保护有至关重要的作用。有壳变形虫是一类生活在淡水生态系统中的原生动物, 对环境变化响应敏感, 是良好的环境生物指示剂。本研究主要对山西滹沱河流域 6 个湿地 52 个不同生境的沉积样品进行有壳变形虫物种组成及多样性分析, 通过对有壳变形虫和环境因子数据进行排序分析探讨影响有壳变形虫群落分布的关键环境因子。结果显示: 滹沱河湿地共记录有壳变形虫 20 种, 其中斜口三足虫 (*Trinema enchelys*)、顶足法帽虫 (*Phryganella acropodia*) 和线条三足虫 (*Trinema lineare*) 为优势种, 相对丰度分别为 23.4%、17.38%、13.48%。沉积物粒度和有机质含量对有壳变形虫的物种组成及多样性有显著影响, 砂粒含量越低、有机质含量越高, 有壳变形虫的丰富度和多样性就越高。CCA 排序结果表明硝态氮和 COD 是影响有壳变形虫种类组成和分布的关键环境因子, 解释量分别为 19.6% 和 17.3%, 而 pH 的解释量最小, 为 8.6%。本研究结果为山西湿地有壳变形虫的现代生态学研究提供借鉴, 为湿地多样性保护、管理和修复提供理论支撑。

关键词: 湿地; 有壳变形虫; 丰富度; 排序分析; 滹沱河湿地

Community composition of testate amoebae and its relationship with environmental factors—A case study of Hutuohe wetlands, Shanxi Province^{*}

Wang Chunling, Hu Jie, Zhao Xinyu, Wang Tingting, Gou Kuixian & Zhen Zhilei^{**}

(College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, P.R.China)

Abstract: Hutuohe wetland is an important wetland resource in Shanxi Province, and it plays a vital role in biodiversity protection. Testate amoebae are a type of protozoa living in freshwater ecosystems such as rivers, lakes, reservoirs, wetlands and other humid environments. They are sensitive to environment changes, so they can be used as biological indicator. This study investigated the community and diversity of testate amoebae of 52 samples in 6 different wetland habitats and discussed the key environment factors that strongly affect the distribution of testate amoebae by ordination analysis. The results showed that a total of 20 testate amoebae species belonging to 10 genera were identified. The dominant species are *Trinema enchelys*, *Phryganella acropodia* and *Trinema lineare*, the relative abundance of which is 23.4%, 17.38%, 13.48%, respectively. According to the testate amoebae community in different habitats, grain size and organic matter content of sediments have significant effects on testate amoebae community composition and diversity. The lower sand content and the higher organic matter content, the higher the community composition and diversity of testate amoebae. The canonical correspondence analysis (CCA) implies that nitrate nitrogen and COD can significantly affect testate amoebae community composition, the explanation of nitrate nitrogen and COD is 19.6% and 17.3%, respectively. Nevertheless, the 8.6% explanation of pH is smallest. The results can provide theoretical support and scientific basis for diversity protection, management and restoration of wetlands.

Keywords: Wetland; testate amoebae; richness; ordination analysis; Hutuohe wetlands

有壳变形虫是一类有壳的单细胞根足类原生动物, 主要在淡水环境如河流、湖泊、水库、沼泽等潮湿的

* 2021-09-23 收稿; 2021-11-03 收修改稿。

山西省自然科学基金项目(201801D121262)和山西农业大学科技创新基金项目(2015YJ21)联合资助。

** 通信作者; E-mail: zhencheng7666@163.com.

环境中生活,是淡水生态系统的重要组成成分^[1-5]. 有壳变形虫个体微小,一般在 20~250 μm 之间,壳体大部分是由自体分泌粘性有机物胶结周围砂粒等物质组成,具有良好的抗腐蚀性,对环境变化响应敏感,被认为是湿地生态、湖泊富营养化和酸化的非常重要的指标生物,在生态学研究中具有独特而重要的应用价值^[2,4-5]. 近年来有壳变形虫研究已经成为了国内外的研究热点,主要集中于对有壳变形虫的分类学^[6-12]、生态学^[12-22]、生物地理学^[23-25]和古生态学^[26-32]等方面的研究,国内学者对有壳变形虫的研究工作集中于东北泥炭地^[13,33-42]、长江流域湿地^[43]和云南湿地^[12,23-24,44]等地区,取得了显著的研究成果,但研究区域相对集中,缺乏对中国不同区域不同生境湿地有壳变形虫的生态学研究.

山西省属于高原性内陆地区,滹沱河作为山西的第二大河流,河流湿地对环境变化响应敏感,是水生生物多样性的主要载体,是现代生态学研究的理想场所^[45]. 研究学者在山西滹沱河湿地主要开展了植物相关的研究且集中于 2000—2006 年^[45-49],对其它生物的研究还基本处于空白状态,其中包括有壳变形虫,目前对该流域湿地生态系统缺乏系统的认识. 因此对山西滹沱河湿地有壳变形虫物种组成、多样性及与环境因子关系的研究是非常有意义的. 本研究以山西滹沱河流域湿地为研究对象,对有壳变形虫进行现代生态学研究,探讨有壳变形虫物种组成、多样性及与水环境因子的关系,为我国湿地有壳变形虫研究进行补充和完善,为山西河湖湿地生态环境管理保护和恢复提供理论支撑和科学依据.

1 研究方法

1.1 研究区

滹沱河是山西省的第二大河流,河流湿地是山西省重要的湿地类型. 滹沱河发源于山西省繁峙县横涧乡秦戏山桥儿沟,流经繁峙、代县、忻州、原平、定襄、五台、盂县出山西省境,山西省内流域面积 14284 km^2 ,长度 330 km ^[49]. 主要支流有阳武河、云中河、牧马河和清水河等,呈羽状排列. 流域湿地的土壤主要为冲积土、草甸土、沼泽土和盐渍土^[49].

滹沱河流域属于暖温带大陆性季风气候,夏季暖热多雨,冬季寒冷干燥. 年平均气温为 8.0~9.0°C,7 月最热,平均气温为 22.5~23.5°C,1 月最冷,平均气温为 -10.0~-9.0°C,年降水量 400~450 mm,7—8 月份降水量占全年的 53% 左右^[49].

1.2 野外样品采集

本研究主要在滹沱河流域的孤山水库(GS:39°16'5"N, 113°50'41"E)、下茹越水库(XRY:39°11'53"N, 113°22'19"E)、沱阳村(TY:39°7'15"N, 113°5'44"E)、界河铺(JHP:38°37'44"N, 112°43'55"E)、滹沱河 1 号桥(1#:38°38'14"N, 112°44'17"E) 和 2 号桥(2#:38°36'59"N, 112°44'38"E) 进行样品采集,具体的采样点位置见图 1. 沿着水位梯度进行沉积样品的采集,采自表层 3 cm 样品 2~3 个,将其混合成 1 个样品装入自封袋中,做好标记带回实验室以待分析,共采集 52 个沉积样品(其中 GS:12 个样品;XRY:3 个样品;TY:5 个样品;JHP:3 个样品;1#:16 个样品;2#:13 个样品),采样过程中记录每个采样点的经度、纬度和海拔高度. 采集沉积样品的同时使用聚乙烯瓶采集水样品,每个样品采集 1 L,共采集 47 个水样,做好标记带回实验室在 4°C 条件下冷藏保存,同时测量每个采样点的水位(WL)并进行记录.

1.3 有壳变形虫的提取与鉴定

有壳变形虫的提取主要参考 Booth 等的方法^[50],具体步骤如下:首先取约 3~5 g 土壤样品放入干净的盛有蒸馏水的烧杯(200 mL)中,用干净的玻璃棒轻轻搅拌 10 min 以使有壳虫从基质中分离出来,然后过 300 和 20 μm 的筛子去除掉大颗粒、微粒和矿物碎屑,将 20~300 μm 之间的有壳变形虫壳体冲洗到 50 mL 离心管中,用蒸馏水定容到 50 mL. 在 200X-400X 显微镜下进行鉴定和计数,每个样品至少要鉴定 150 个壳体. 若有壳变形虫壳体较少,则至少需要鉴定 6 个载玻片^[5, 50],本研究所有样品均鉴定大于 6 个载玻片. 有壳变形虫的种类鉴定和命名主要参考 Charman^[5] 和杨军等^[10-11]已发表的文献及网站 <https://www.arcella.nl>.

1.4 水样品及沉积样品理化指标测定

将水样品进行过滤除去杂质后用于测定水质指标,每个指标数据重复测定 3 次,取平均值作为测定值. 其中 pH 值用玻璃电极法测定;电导率(EC)用电导率仪测定;总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、总磷(TP)浓度采用 SMARCHEM 450 全自动间断化学分析仪测定;化学需氧量(COD)采用重铬酸钾标准法测定;氨氮(NH_3 -N)

浓度采用纳氏比色法测定。

取一份沉积样品使用 H_2O_2 和 HCl 处理分别去除有机物和碳酸盐后, 使用马尔文 Mastersizer 3000 激光粒度仪进行粒度测定。另一份沉积样品风干过 100 目 ($150 \mu m$) 筛, 用 HCl 去除无机碳后使用德国耶拿 multi C/N 仪进行总有机碳 (TOC) 测定, 乘以系数 1.724 得到有机质含量^[51]。

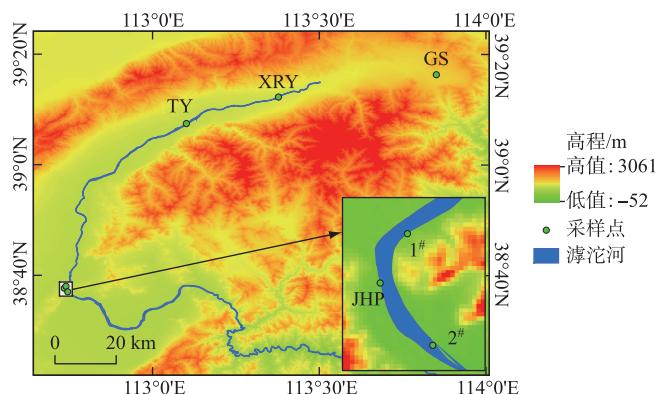


图 1 漏沱河湿地采样点分布

Fig.1 Location of sampling sites in Hutuohe wetlands

1.5 数据统计分析

本研究使用 Excel 软件对统计的有壳变形虫种类和个体数量数据进行丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数计算。Shannon-Wiener 多样性指数的计算公式如下^[37]：

$$H' = -\sum P_i \cdot \ln P_i \quad (1)$$

式中, P_i 为第 i 个物种的丰度。

使用 CANOCO 软件对有壳变形虫物种数据和环境因子数据进行非度量多维尺度分析 (non-metric multidimensional scaling, NMDS)、除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 和典型对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 等排序分析。本研究仅对 41 个含有壳变形虫的沉积样品进行排序分析, 排序过程中对物种数据进行对数转换, 对稀有种进行降权处理, 环境因子数据不进行转换。

2 研究结果

2.1 有壳变形虫种类组成及多样性

本研究 6 个不同生境的 52 个土壤样品中共鉴定有壳变形虫 20 种, 隶属于 7 科 10 属, 有壳变形虫种类、丰度和频数见表 1。本研究鉴定的有壳变形虫均为其它研究中的常见种, 但整体来看, 样品中壳体数较少, 特别是沱阳和界河铺湿地样品中的壳体较少。其中相对丰度大于 3% 的物种有斜口三足虫、顶足法帽虫、砂壳虫、线条三足虫、小匣三角嘴虫、网匣壳虫和半球表壳虫, 其中斜口三足虫的相对丰度最大, 为 23.4%。而盘状表壳虫、弯凸表壳虫、卵圆隐砂壳虫、明亮砂壳虫 (*Difflugia lucida*)、收音截口虫、小茄壳虫、凤蝶茄壳虫、亚黄茄壳虫和平直三足虫物种的相对丰度则不足 1%。本研究中没有一种有壳变形虫物种在全部样品中出现, 各样品中出现频数最多的为顶足法帽虫, 在 16 个样品中出现; 盘状表壳虫、弯凸表壳虫、明亮砂壳虫、凤蝶茄壳虫和小茄壳虫 5 个物种仅在一个样品中出现。泥炭地常见种苔藓鳞盖虫 (*Assulina muscorum*) 和半空鳞盖虫 (*Assulina seminulum*) 在本研究中没有记录, 说明有些有壳变形虫物种只在特种湿地生境中生存。本研究中各采样点的有壳变形虫物种丰富度和多样性呈现明显的差异 (表 2), 其中孤山水库和漏沱河 2 号桥湿地的有壳变形虫物种丰富度和多样性较高, 而沱阳、界河铺和下茹越湿地的有壳变形虫物种丰富度和多样性则较低。

表 1 有壳变形虫种类组成、相对丰度和频数

Tab.1 The species composition, relative abundance and frequency of testate amoebae taxa

编号	种类	相对				相对	
		丰度/ %	频数	编号	种类	丰度/ %	频数
1	盘状表壳虫(<i>Arcella discoides</i>)	0.35	1	12	明亮砂壳虫(<i>Difflugia lucida</i>)	0.35	12
2	弯凸表壳虫(<i>Arcella gibbosa</i>)	0.35	1	13	砂壳虫(<i>Difflugia</i> sp.)	16.67	13
3	半球表壳虫(<i>Arcella hemisphaerica</i>)	3.90	8	14	收音截口虫(<i>Heleopera sylvatica</i>)	0.71	14
4	表壳虫(<i>Arcella</i> sp.)	0.71	2	15	小茄壳虫(<i>Hyalosphenia minuta</i>)	0.35	15
5	针棘匣壳虫类(<i>Centropyxis aculeata</i> type)	1.06	2	16	凤蝶壳虫(<i>Hyalosphenia papilio</i>)	0.35	16
6	网匣壳虫类(<i>Centropyxis cassis</i> type)	4.61	10	17	亚黄茄壳虫(<i>Hyalosphenia subflava</i>)	0.71	17
7	片口匣壳虫类(<i>Centropyxis platystoma</i> type)	1.77	3	18	顶足法帽虫(<i>Phryganella acropodia</i>)	17.38	18
8	宽口圆壳虫(<i>Cyclopyxis eurystoma</i>)	1.77	5	19	小匣三角嘴虫(<i>Trigonopyxis arcula</i>)	6.74	19
9	小口圆壳虫(<i>Cyclopyxis kahli</i>)	2.84	5	20	平直三足虫(<i>Trinema complanatum</i>)	0.71	20
10	卵圆隐砂壳虫(<i>Cryptodifflugia oviformis</i>)	0.71	2	21	斜口三足虫(<i>Trinema enchelys</i>)	23.40	21
11	尖顶砂壳虫类(<i>Difflugia acuminata</i> type)	1.06	3	22	线条三足虫(<i>Trinema lineare</i>)	13.48	22

2.2 滹沱河有壳变形虫空间分布特征

对滹沱河流域所有采样点有壳变形虫进行了 NMDS 分析(图 2). 从 NMDS 排序图中看出, 孤山水库、沱阳、下茹越、滹沱河 1 号桥和 2 号桥 6 个采样区域的样点分布各不相同, 部分采样点在排序图上有重叠, 表明采样点之间具有相似的有壳变形虫物种组成, 但重叠样点并不多, 说明本研究各采样点的有壳变形虫物种组成相似性较弱, 存在明显的差异. 界河铺和下茹越的采样点在排序图中相对比较集中, 距离较近, 表明采样点之间具有相似的生境类型. 滹沱河 1 号桥的采样点主要分布在排序图的左侧, 2 号桥的采样点分布相对分散, 孤山水库采样点则集中分布在排序图的下侧, 样点在排序图上的分布反映出不同生境下的有壳变形虫群落结构有差异.

2.3 有壳变形虫和水环境因子间的关系

为探讨滹沱河流域有壳变形虫和水环境因子之间的关系, 首先使用 CANOCO 软件对有壳变形虫物种数据进行 DCA 排序分析(表 3). 根据 DCA 排序结果分析的梯度长度值判断采用单峰模型还是线性模型, 若 DCA 排序 4 个轴中最大梯度长度>4, 选择单峰模型; 若<3, 则选择线性模型; 若介于 3~4 之间, 则 2 种模型均可使用. 从表 3 中可以看出, 4 个轴中最大特征值为 8.312, 大于 4, 因此选用单峰模型 CCA 对有壳变形虫数据和环境因子数据进行排序分析.

滹沱河湿地有壳变形虫和环境因子 CCA 排序分析结果见表 4 和图 3. 表 4 显示第 1 轴对物种变化及物种—环境因子变化的解释量最大, 分别为 8.2% 和 31.9%, 明显高于其它

3 个排序轴, 因此第 1 排序轴可以反映有壳变形虫群落和环境关系的主要特征. 前 4 轴对物种变化的解释量为 20.0%, 对物种—环境因子变化的解释量为 77.4%. 从 CCA 排序图可以看出, COD、NH₃-N 和 NO₃-N 线段较长, 且与轴 1 的夹角相对较小, 表明这 3 个环境因子对有壳变形虫群落分布有显著影响; 而 TN 和 pH 与轴 1

表 2 有壳变形虫物种丰富度和多样性指数

Tab.2 Species richness and diversity index of testate amoebae

样地名称	物种丰富度	H'		
		GS	12	2.25
XRY	2			0.61
TY	1			0.35
JHP	1			0.29
1 [#]	7			1.27
2 [#]	18			2.28

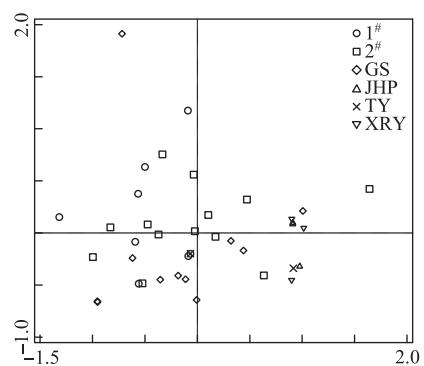


图 2 滹沱河湿地采样点 NMDS 排序图

Fig.2 Sample ordination plot of NMDS of Hutohe wetlands

表3 有壳变形虫数据的 DCA 分析结果
Tab.3 Results of DCA for testate amoebae

	轴1	轴2	轴3	轴4
特征值	0.813	0.552	0.341	0.235
梯度长度	8.312	4.362	3.501	3.122
累计物种变化百分比/%	13.5	22.7	28.4	32.4
总特征值		5.999		

表4 有壳变形虫与环境因子数据的 CCA 分析结果
Tab.4 Results of CCA for testate amoebae species and environment factors

	轴1	轴2	轴3	轴4
特征值	0.551	0.354	0.230	0.201
物种-环境关系	0.861	0.757	0.754	0.734
累计物种变化百分比/%	8.2	13.5	17.0	20.0
累计物种-环境关系变化百分比/%	31.9	52.4	65.8	77.4
总特征值		6.680		

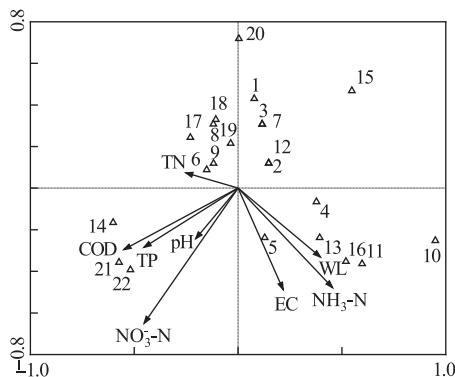


图3 漢沱河湿地有壳变形虫与水环境因子的 CCA 排序图
(△表示有壳变形虫种类编号,详见表1)

Fig.3 Ordination plot of CCA between testate amoebae species and environment factors in Hutuohe wetlands

均超V类,且超标很多;TP浓度都很低,均为III类或优于III类水质;pH都处于6~9之间;NH₃-N浓度均<0.15 mg/L,均未超I类水质。通过对比分析,本研究所调查的汉沱河水体中的TN和COD超标严重,属于营养过剩,导致有壳变形虫物种数量相较于中营养及富营养的泥炭湿地的种类少。

本研究6个采样区域之间有壳变形虫物种丰富度和多样性存在较大的差异(表2),这主要与沉积介质有关。孤山水库湿地和汉沱河2号桥的沉积物为壤土,有机质含量较高,分别为34.10和24.28 g/kg(表7),适合有壳变形虫生存,有壳变形虫物种丰富度和多样性都较高。界河铺采样点的沉积物为壤质砂土,有机质含量最低(3.85 g/kg)(表7),有壳变形虫的物种丰富度和多样性指数均为最低,说明壤质砂土最不利于有壳变形虫生存。下茹越水库、沱阳和汉沱河1号桥采样点沉积物为砂质壤土,有机质含量相对壤土较低,有壳变形虫的丰富度和多样性指数也相对较低,说明砂质壤土也不适合有壳变形虫的生存,该研究结果与前

的夹角较小且线段较短,表明TN和pH对有壳变形虫群落分布没有明显的影响。因此根据不同的环境因子对有壳变形虫群落分布的解释量按重要性从大到小依次排序为:NO₃⁻-N>COD>NH₃-N>WL>EC>TN>TP>pH,其中NO₃⁻-N的解释量最大,为19.6%,其次为COD,解释量为17.3%,解释量最小的环境因子为pH,为8.6%.

3 讨论

3.1 漉沱河湿地有壳变形虫

本研究鉴定的漉沱河湿地有壳变形虫物种为20种,隶属于7科10属,均为其它国内外研究中的常见种,但有壳变形虫物种数相较于中国其它湿地物种种类较少(表5),分析导致产生这种现象的原因主要有3点。其一为本研究设置的采样区域包含的生境类型差异不是很大,采集的样本量相对较少,因此鉴定的有壳变形虫物种数量相对较少。其二为本研究采用的有壳变形虫鉴定依据主要为Charman等^[5]的文献和其它一些学者发表文献中的图谱^[10, 33, 37],采用了相对保守的分类方法,仅在光学显微镜下清晰可见且具有明显的鉴定特征时才被记录。在显微镜下进行鉴定时对有壳变形虫形态特征相似的物种进行合并,命名为“type”^[52]。该合并鉴定统计方法目前被很多研究学者认可,这样也便于不同区域研究结果进行对比分析,但会导致鉴定的有壳变形虫物种数量变少。其三为各研究区域湿地所处的营养状态不同,贫营养状态基本不会产生有壳变形虫,中营养及富营养状态有壳变形虫数量最大,营养过剩不利于有壳变形虫的生长繁殖,因此数量也较少^[1, 12, 53]。本研究漉沱河湿地水质指标见表6,参照地表水环境质量标准限值,孤山水库、下茹越水库和1号桥COD值均大于40 mg/L,属于V类水以外,2号桥采样点的水质为V类水,界河铺和沱阳的水质为IV类水;所有采样点的TN浓度

表 5 不同地区有壳变形虫物种数对比
Tab.5 Comparison of testate amoebae species number in different regions

样地名称	采样点	物种数
长白山区典型泥炭沼泽 ^[13]	哈尼、金川、圆池、赤池	33
小兴安岭泥炭藓泥炭地 ^[35]	汤北、汤洪岭	55
三江平原泥炭沼泽 ^[37]	洪河自然保护区及周边湿地	47
鄂西亚高山泥炭地 ^[54]	湖北七姊妹山、二仙岩	27
神农架大九湖沼泽泥炭地 ^[17]	大九湖	36
南岭亚高山泥炭地 ^[52]	湖南省大坪	19
云南高原湖泊 ^[12]	泸沽湖、程海、洱海、滇池、阳宗海、抚仙湖、星云湖、杞麓湖、异龙湖	94
云南西北横断山区 ^[44]	池塘、小溪、湖泊、河流、泉水、沟渠	151

表 6 滹沱河湿地水质指标
Tab.6 Water quality indexes of Hutuoh wetlands

采样点	NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	NH ₃ -N/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	COD/(mg/L)	pH	EC/(\mu S/cm)
GS	0.084	0.031	11.696	0.809	57.059	8.491	413.139
XRY	0.106	0.045	10.335	0.067	52.025	8.658	435.333
TY	0.067	0.095	14.280	0.115	25.066	8.160	440.667
JHP	0.117	0.086	12.014	0.073	26.005	7.963	324.833
1 [#]	0.073	0.079	11.907	0.099	40.666	8.049	297.000
2 [#]	0.086	0.082	11.444	0.080	33.459	7.977	356.848

表 7 滹沱河湿地沉积物指标(平均值)
Tab.7 Sediment indexes of Hutuoh wetlands (mean value)

采样点	黏粒(<0.002 mm, %)	粉砂(0.02~0.002 mm, %)	砂粒(2~0.02 mm, %)	沉积物质地	有机质/(g/kg)
GS	10.82	35.55	53.64	壤土	34.10
XRY	5.88	23.82	70.31	砂质壤土	8.14
TY	4.28	24.01	71.72	砂质壤土	13.81
JHP	0.00	3.75	96.24	壤质砂土	3.85
1 [#]	5.24	21.19	73.57	砂质壤土	15.25
2 [#]	9.21	36.01	54.79	壤土	24.28

人的研究结果一致^[15]. 通过有壳变形虫多样性与环境因子相关性分析得出, 有壳变形虫多样性与有机质呈显著正相关关系($R=0.904$), 与砂粒呈显著负相关关系($R=-0.831$) (表 8). 因此, 滹沱河湿地沉积物质地和有机质含量对有壳变形虫的物种丰富度和多样性有显著影响, 砂粒含量越低, 有机质含量越高, 有壳变形虫的丰富度和多样性越高.

3.2 影响有壳变形虫群落分布的关键环境因子

探究生物物种与环境因子之间的关系找出关键环境因子, 是建立生物—环境因子转换函数的基础. 目前国内外很多学者对湿地有壳变形虫与环境因子关系进行了很多研究^[34,43,55], 找出影响有壳变形虫物种组成及分布的关键环境因子, 并建立有壳变形虫—环境因子转换函数^[33,52,56-57], 进而定量重建泥炭地古水位^[26,28-30]. 国内外关于有壳变形虫的现代生态学研究得出水位埋深、泥炭湿度和 pH 是影响有壳变形虫物种组成及分布的主要环境因子, 其中水位埋深又是最关键的环境因子^[36,52,54]. 本研究结果表明, 影响滹沱河湿地有壳变形虫物种组成及分布的环境因子重要性排序为: NO₃⁻-N > COD > NH₃-N > WL > EC > TN > TP > pH, 其中

表 8 沉积物中有壳变形虫多样性指数与环境因子之间的关系

Tab.8 The relationships between testate amoebae biodiversity and environment factors of sediment samples

	多样性指数	黏粒	粉砂	砂粒	有机质
多样性指数	1				
黏粒	0.886 *	1			
粉砂	0.807	0.967 **	1		
砂粒	-0.831 *	-0.981 **	-0.998 **	1	
有机质	0.904 *	0.912 *	0.857 *	-0.876 *	1

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

NO_3^- -N 的解释量最大为 19.6%, 为关键环境影响因子, 其次为 COD 和 NH_3 -N, 水位在 8 个环境因子中排列第 4, 解释量为 11.2%, 而 pH 的解释量最小为 8.6%, 该研究结果与前人对泥炭地有壳变形虫研究结果不一致^[33,41,52], 但与神农架大九湖的研究结果相似^[17], 表明对于不同类型的湿地(如河流湿地、湖泊湿地和沼泽湿地), 影响其有壳变形虫物种群落分布的关键环境因子不同, 另一原因可能与人类活动有关.

本研究 6 个采样区域周围都有农作物种植, 作物种植过程中施用化肥和农药等产品, 会对水体中氮、磷和有机污染物的含量产生影响, 进而影响湿地生态系统组成及功能. 化肥和农药的使用使得水体 TN 和 COD 含量超标严重, 进而影响有壳变形虫的物种组成及分布. 值得思考的是, 虽然 TN 浓度较高, 但 NH_3 -N 和 NO_3^- -N 浓度较低, CCA 排序结果显示对滹沱河湿地有壳变形虫物种变化解释量最大的为 NO_3^- -N (19.6%), 其次为 NH_3 -N (15.4%), 而 TN 的解释量则相对较低, 为 8.9%, 产生这一结果的原因尚不清楚, 还需要进一步的研究和讨论.

4 结论与展望

本研究对滹沱河湿地有壳变形虫物种组成及与环境因子关系进行初步研究, 结果显示有壳变形虫均为国内外研究中的常见种, 但种类数量相对较少, 为 20 种, 其中优势种为斜口三足虫、顶足法帽虫和线条三足虫; 沉积物质地和有机质含量对有壳变形虫物种组成及多样性有显著影响; NO_3^- -N 和 COD 是影响有壳变形虫种类组成和分布的关键环境因子, 本研究结果可为将来山西不同类型湿地有壳变形虫现代生态学研究提供借鉴.

目前对山西不同类型湿地的有壳变形虫现代生态学研究还非常缺乏, 本研究虽然取得了一定的结果, 但还存在一些问题, 未来可以加强以下方面的研究: 在山西扩大对不同类型的湿地的采样范围及采样点, 加强有壳变形虫现代生态学研究; 增加环境因子, 如土壤元素、矿物和重金属等物质组成对有壳变形虫群落组成及分布的影响, 并找出关键环境影响因子, 进而为湿地多样性保护、湿地管理和修复等方面提供有效的指示信息.

5 附录

附图 I 见电子版(DOI: 10.18307/2022.0420).

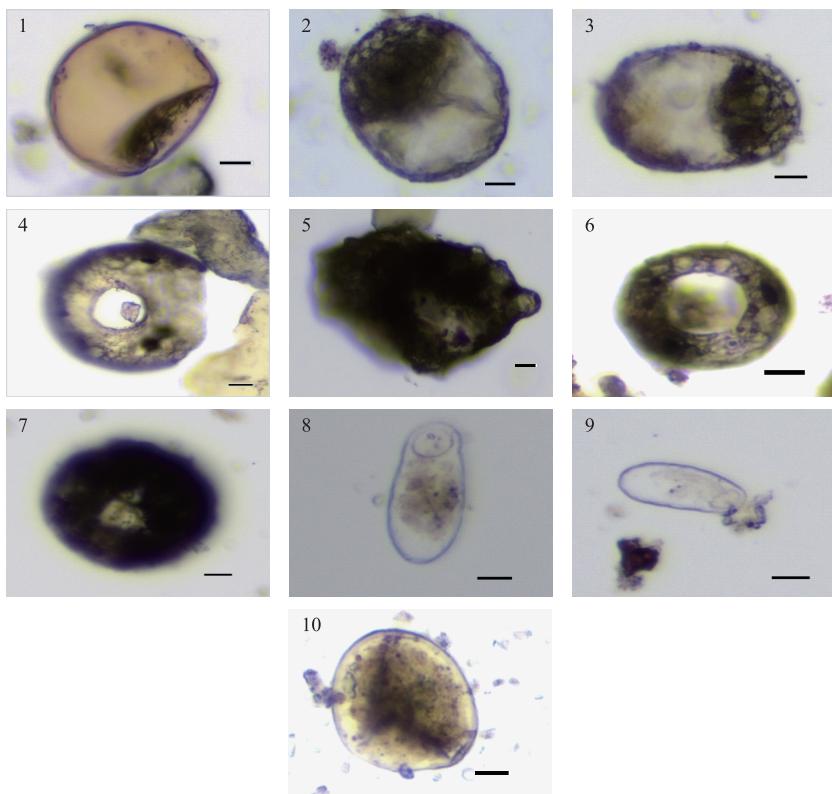
6 参考文献

- [1] Wang PX, Min QB. On the paleoenvironmental significance of Thecamoebians in the Quaternary studies of China. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1987, 4(4): 345-349, 447. [汪品先, 闵秋宝. 有壳变形虫在我国第四纪古环境研究中的意义. 微体古生物学报, 1987, 4(4): 345-349, 447.]
- [2] Qin YM, Xie SC, Gu YS et al. An excellent indicator for quaternary paleoenvironmental reconstructions—Advances in the study of Testate Amoebae(Thecamoebians, Arcellacean). *Advances in Earth Science*, 2008, 23(8): 803-812. [秦养民, 谢树成, 顾延生等. 第四纪环境重建的良好代用指标——有壳变形虫记录与古生态学研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(8): 803-812.]
- [3] Xie SC, Huang XY, Yang H et al. An overview on microbial proxies for the reconstruction of past global environmental

- change. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(1) : 1-19.[谢树成, 黄咸雨, 杨欢等. 示踪全球环境变化的微生物代用指标. 第四纪研究, 2013, **33**(1) : 1-19.]
- [4] Mitchell EAD, Charman DJ, Warner BG. Testate amoebae analysis in ecological and paleoecological studies of wetlands: Past, present and future. *Biodiversity and Conservation*, 2008, **17**(9) : 2115-2137. DOI:10.1007/s10531-007-9221-3.
- [5] Charman DJ, Hendon D, Woodland WA. The identification of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in peats: Quaternary Research Association Technical Guide No. 9. London: Quaternary Research Association, 2000: 1-147.
- [6] McKeown MM, Mitchell EAD, Amesbury MJ *et al*. The testate amoebae of New Zealand: A checklist, identification key and assessment of biogeographic patterns. *European Journal of Protistology*, 2021, **81**: 125789. DOI:10.1016/j.ejop.2021.125789.
- [7] Payne RJ, Mitchell EAD. How many is enough? Determining optimal count totals for ecological and palaeoecological studies of testate amoebae. *Journal of Paleolimnology*, 2009, **42**(4) : 483-495. DOI:10.1007/s10933-008-9299-y.
- [8] Gong J, Xu YR, Xue JT *et al*. Morphological characters and ecogeographical significance of testate amoebae *Nebela jiuhuensis*. *Quaternary Sciences*, 2018, **38**(4) : 1050-1056.[巩静, 许元韧, 薛建涛等. 九湖梨壳虫(*Nebela jiuhuensis*)的形态特征及其生态地理学意义. 第四纪研究, 2018, **38**(4) : 1050-1056.]
- [9] Qin YM, Zhang WJ, Li HK *et al*. Note on the taxonomy of testate amoebae and their applications in ecology and palaeo-ecology of China, with particular reference to genus *Argynnia* Vucetich, 1974. *Quaternary Sciences*, 2011, **31**(6) : 1060-1066.[秦养民, 张文静, 李鸿凯等. 中国有壳变形虫 *Argynnia* (Vucetich, 1974) 属的修订及若干环境重建问题探讨. 第四纪研究, 2011, **31**(6) : 1060-1066.]
- [10] Yang J. Taxonomy and ecology of freshwater testate amoebae from China[Dissertation]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006.[杨军. 中国淡水有壳肉足虫分类与生态学研究[学位论文]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2006.]
- [11] Yang J, Feng WS, Miao W. A taxonomic catalogue of freshwater and soil testacea in China with a discussion of their faunal similarity. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, **28**(4) : 426-433.[杨军, 冯伟松, 缪炜. 中国淡水与土壤有壳肉足虫最新分类名录及其区系分析. 水生生物学报, 2004, **28**(4) : 426-433.]
- [12] Yang J, Zhang WJ, Feng WS *et al*. Freshwater testate amoebae of nine Yunnan plateau lakes, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, **20**(4) : 743-750. DOI:10.1080/02705060.2005.9664798.
- [13] Li HK, Wang SZ, Bu ZJ *et al*. The testate amoebae in *Sphagnum* peatlands in Changbai mountains. *Wetland Science*, 2010, **8**(3) : 249-255.[李鸿凯, 王升忠, 卜兆君等. 长白山区典型泥炭藓沼泽的有壳变形虫. 湿地科学, 2010, **8**(3) : 249-255.]
- [14] Qin YM, Xie SC. Moss-dwelling testate amoebae and their community in Dajihu peatland of Shennongjia Mountains, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2011, **26**(1) : 3-9. DOI:10.1080/02705060.2011.553810.
- [15] Bobrov A, Mazei YR, Chernyshov V *et al*. Testate amoebae communities from some freshwater and soil habitats in China (Hubei and Shandong Provinces). *Frontiers of Earth Science*, 2012, **6**(1) : 1-9. DOI:10.1007/s11707-012-0310-6.
- [16] Mazei Y, Malysheva EA, Lapteva EM *et al*. The role of the floodplain gradient in structuring of testate amoebae communities in the Ilych River. *Biology Bulletin*, 2012, **39**(4) : 368-374. DOI:10.1134/S1062359012040061.
- [17] Qin YM, Payne RJ, Gu YS *et al*. Ecology of testate amoebae in Dajihu peatland of Shennongjia Mountains, China, in relation to hydrology. *Frontiers of Earth Science*, 2012, **6**(1) : 57-65. DOI:10.1007/s11707-012-0307-1.
- [18] Song LH, Li HK, Wang KH *et al*. Seasonal dynamics in the community structure and trophic structure of testate amoebae inhabiting the Sanjiang peatlands, Northeast China. *European Journal of Protistology*, 2018, **63**: 51-61. DOI:10.1016/j.ejop.2018.01.005.
- [19] Wang WP, Ren KX, Chen HH *et al*. Seven-year dynamics of testate *Amoeba* communities driven more by stochastic than deterministic processes in two subtropical reservoirs. *Water Research*, 2020, **185**: 116232. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116232.
- [20] Song LH, Chang L, Zhang SQ *et al*. Warming threatens the microbial communities in middle-high latitude peatland: Evidence from testate amoebae. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, **153**: 108105. DOI:10.1016/j.soilbio.2020.108105.
- [21] Qin YM, Puppe D, Zhang LH *et al*. How does *Sphagnum* growing affect testate *Amoeba* communities and corresponding protozoic Si pools results from field analyses in SW China. *Microbial Ecology*, 2021, **82**(2) : 459-469. DOI:10.1007/s00248-020-01668-6.
- [22] Qin YM, Payne R, Yang XD *et al*. Testate amoebae as indicators of water quality and contamination in shallow lakes of the Middle and Lower Yangtze Plain. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(7) : 1-11. DOI:10.1007/s12665-016-5442-7.
- [23] Yang J, Zhang WJ, Feng WS *et al*. Geographical distribution of testate amoebae in Tibet and northwestern Yunnan and

- their relationships with climate. *Hydrobiologia*, 2006, **559**(1): 297-304. DOI: 10.1007/s10750-005-9400-8.
- [24] Yang J, Zhang WJ, Shen YF. Relationships between testate amoebae assemblages (Protozoa) and geographic factors in Yunnan plateau lakes, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2009, **24**(3): 437-443. DOI: 10.1080/02705060.2009.9664316.
- [25] Qin YM, Xie SC, Smith HG et al. Diversity, distribution and biogeography of testate amoebae in China: Implications for ecological studies in Asia. *European Journal of Protistology*, 2011, **47**(1): 1-9. DOI: 10.1016/j.ejop.2010.09.004.
- [26] Li YM, Li HK, Dong YM. Quantitative reconstruction of the water table changes during the last 2000 years from laolike peatland, Changbai mountains. *Quaternary Sciences*, 2020, **40**(5): 1170-1179. [李艳梅, 李鸿凯, 董彦民. 长白山老里克泥炭地过去2000年以来古水位定量重建. 第四纪研究, 2020, **40**(5): 1170-1179.]
- [27] Bysouth D, Finkelstein SA. Linking testate *Amoeba* assemblages to paleohydrology and ecosystem function in Holocene peat records from the Hudson Bay Lowlands, Ontario, Canada. *The Holocene*, 2021, **31**(3): 457-468. DOI: 10.1177/0959683620972792.
- [28] Qin YM, Zhang LH, Swindles GT et al. A ~40-year paleoenvironmental record from the Swan Oxbow, Yangtze River, China, inferred from testate amoebae and sedimentary pigments. *Journal of Paleolimnology*, 2021, **66**(1): 29-40. DOI: 10.1007/s10933-021-00183-z.
- [29] Liu YF, Li HK, Zhao HY et al. The variations of surface wetness recorded by multi-proxies in Yuanchi peatland of the Changbai Mountains from 1962 to 2008. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2): 477-485. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202102.008. [刘玉芳, 李鸿凯, 赵红艳等. 多指标记录的1962—2008年长白山园池泥炭地地表湿度变化. 应用生态学报, 2021, **32**(2): 477-485.]
- [30] Li S. Environmental changes during last 1500 years in Johnville Peatland, Quebec, Canada [Dissertation]. Changchun: Northeast Normal University, 2018. [李帅. 加拿大魁北克省Johnville泥炭地1500年来的环境变化[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2018.]
- [31] Payne RJ, Babeshko KV, van Bellen S et al. Significance testing testate *Amoeba* water table reconstructions. *Quaternary Science Reviews*, 2016, **138**: 131-135. DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.01.030.
- [32] Qin YM, Li HK, Mazei YR et al. Developing a continental-scale testate *Amoeba* hydrological transfer function for Asian peatlands. *Quaternary Science Reviews*, 2021, **258**: 106868. DOI: 10.1016/j.quascirev.2021.106868.
- [33] Li HK. Development testate amoeba-based transfer functions of environmental variable in peatlands in the Changbai Mountains of Northeast China [Dissertation]. Xi'an: Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, 2009. [李鸿凯. 长白山区泥炭地有壳变形虫-环境因子转换函数模型研究[学位论文]. 西安: 中国科学院地球环境研究所, 2009.]
- [34] Li HK, Bu ZJ, Wang SZ et al. Environmental implications of the modern testate amoebae in the peatlands in Changbai Mountains. *Quaternary Sciences*, 2009, **29**(4): 817-824. [李鸿凯, 卜兆君, 王升忠等. 长白山区泥炭地现代有壳变形虫环境意义探讨. 第四纪研究, 2009, **29**(4): 817-824.]
- [35] Jiao WJ. Development testate amoebae-environment variable transfer function in sphagnum-dominated peatlands in Xiaoxing'an Moutains, Northeast China [Dissertation]. Changchun: Northeast Normal University, 2012. [焦文建. 小兴安岭泥炭藓泥炭地有壳变形虫-环境因子转换函数模型研究[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2012.]
- [36] Li HK, Li WW, Pu YB et al. Building transfer functions between testate *Amoeba* and environmental variables with 'rioja' Package. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, **33**(8): 1022-1028. [李鸿凯, 李微微, 蒲有宝等. 应用rioja软件包建立有壳变形虫-环境因子转换函数. 地理科学, 2013, **33**(8): 1022-1028.]
- [37] Song LH. Biodiversity of testate amoebae and their indicating role in palaeohydrological reconstruction in peatlan in Sanjiang Plain [Dissertation]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015. [宋理洪. 三江平原泥炭沼泽有壳变形虫多样性及其在古水位重建中的作用[学位论文]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2015.]
- [38] Song LH, Yan XM, Wang KH et al. Nitrogen input altered testate amoebae community in peatland of Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(2): 563-569. DOI: 10.13287/j.1001-9332.20141203.008. [宋理洪, 闫修民, 王可洪等. 外源氮输入改变三江平原泥炭沼泽有壳变形虫群落结构. 应用生态学报, 2015, **26**(2): 563-569.]
- [39] Zhang SP. Multi-proxy record of water level variability from three high-altitude peatlands in Changbai Mountains [Dissertation]. Changchun: Northeast Normal University, 2015. [张思鹏. 多指标记录的长白山高海拔泥炭地表面干湿变化[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2015.]
- [40] Zhu ZQ. Peatlands hydrological quantitative reconstruction based on testate amoebae in Daxing'an Mountains

- [Dissertation]. Changchun: Northeast Normal University, 2015.[朱忠秋. 基于有壳变形虫的大兴安岭泥炭地水位定量重建[学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2015.]
- [41] Li S, Li HK, Wang SZ et al. The quantitative reconstruction of the paleo-water table of Luoguhe peatland in Daxing'an Mountains based on testate amoebae assemblages. *Quaternary Sciences*, 2017, **37**: 1403-1411. [李帅, 李鸿凯, 王升忠等. 基于有壳变形虫的大兴安岭洛古河泥炭沼泽古水位定量重建. 第四纪研究, 2017, **37**: 1403-1411.]
- [42] Bao KS, Xing W, Song LH et al. A 100-year history of water level change and driving mechanism in Heilongjiang River basin wetlands. *Quaternary Sciences*, 2018, **38**(4) : 981-995. [鲍锟山, 邢伟, 宋理洪等. 黑龙江流域湿地过去百年水位变化历史及驱动机制. 第四纪研究, 2018, **38**(4) : 981-995.]
- [43] Qin YM, Wang HL, Zhang QF et al. Response of testate amoebae community to water chemistry in peatlands near the middle reach of Yangtze River. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(1) : 26-33. [秦养民, 王翰林, 张千帆等. 长江中游泥炭湿地有壳变形虫空间分布及其对水化学因子的响应. 第四纪研究, 2013, **33**(1) : 26-33.]
- [44] Yang J, Zhang WJ, Feng WS et al. Testate amoebae (Protozoa; Rhizopoda) from northwest Yunnan, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, **20**(3) : 583-590. DOI:10.1080/02705060.2005.9664774.
- [45] Wu DL. Study on ecology of wetland vegetation in Hutuo river vally, Shanxi [Dissertation]. Taiyuan: Shanxi University, 2003. [吴东丽. 山西滹沱河流域湿地植被生态学研究[学位论文]. 太原: 山西大学, 2003.]
- [46] Zhang F, Gao CL, Shangguan TL et al. A study on the biomass of *Typha angustifolia* communities in hutuo rivers wetlands, Shanxi. *Journal of Shanxi University: Natural Science Edition*, 2000, **23**(4) : 347-349. [张峰, 高翠莲, 上官铁梁等. 滹沱河湿地狭叶香蒲群落生物量研究. 山西大学学报: 自然科学版, 2000, **23**(4) : 347-349.]
- [47] Shangguan TL, Zhang F, Zhang J. A preliminary study on type, utilization and protection of wetland vegetations hutuo river valley, Shanxi. *Agro-Environmental Protection*, 2001, **20**(1) : 59-61. [上官铁梁, 张金屯, 张峰. 滹沱河流域湿地植被类型及保护利用对策. 农业环境保护, 2001, **20**(1) : 59-61.]
- [48] Wang GH, Zhang F, Shangguan LT et al. A study on the biomass of *Carex dispalata* community in flood plain grassland of Hutuo rivers, Shanxi. *Grassland of China*, 2003, **25**(5) : 23-26. [王桂花, 张峰, 上官铁梁等. 滹沱河河漫滩草地苔草群落生物量研究. 中国草地学报, 2003, **25**(5) : 23-26.]
- [49] Wu DL, Shangguan TL, Zhang J et al. Species diversity of wetland vegetation in hutuo river valley. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2006, **42**(2) : 195-199. [吴东丽, 上官铁梁, 张金屯等. 滹沱河流域湿地植被的物种多样性研究. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2006, **42**(2) : 195-199.]
- [50] Booth RK, Lamentowicz M, Charman DJ. Preparation and analysis of testate amoebae in peatland paleoenvironmental studies. *Mires and Peat*, 2010, **7**(2) : 1-7. DOI: 10.4067/S0716-078X2007000300008.
- [51] Wen ZH. Methodology of soil organic matter after biochar application [Dissertation]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020. [温志豪. 施用生物炭后土壤有机质含量的测定方法研究[学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2020.]
- [52] Wei ZQ, Zhong W, Ouyang J et al. A preliminary study of environmental implications of the modern testate Amoeba from subalpine peatlands in the western nanling mountains: A case study of daping peatland in Hunan Province. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2019, **51**(3) : 70-78. DOI:10.6054/j.jscnun.2019047. [魏志强, 钟巍, 欧阳军等. 南岭亚高山泥炭地现代有壳变形虫环境指示意义的初步研究——以湖南省大坪泥炭地为例. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2019, **51**(3) : 70-78.]
- [53] Ju LH, Yang J, Liu LM et al. Diversity and distribution of freshwater testate amoebae (protozoa) along latitudinal and trophic gradients in China. *Microbial Ecology*, 2014, **68**(4) : 657-670. DOI:10.1007/s00248-014-0442-1.
- [54] Qin YM, Gong J, Gu YS et al. Ecological monitoring and environmental significance of Testate Amoebae in subalpine peatlands in West Hubei Provine, China. *Earth Science*, 2018, **43**(11) : 4036-4045. DOI: 10.3799/dqkx.2018.599. [秦养民, 巩静, 顾延生等. 鄂西亚高山泥炭地有壳变形虫生态监测及对水位的指示意义. 地球科学, 2018, **43**(11) : 4036-4045.]
- [55] Qin YM, Fournier B, Lara E et al. Relationships between testate Amoeba communities and water quality in Lake Donghu, a large alkaline lake in Wuhan, China. *Frontiers of Earth Science*, 2013, **7**(2) : 182-190. DOI:10.1007/s11707-013-0352-4.
- [56] Qin YM, Mitchell EAD, Lamentowicz M et al. Ecology of testate amoebae in peatlands of central China and development of a transfer function for paleohydrological reconstruction. *Journal of Paleolimnology*, 2013, **50**(3) : 319-330. DOI: 10.1007/s10933-013-9726-6.
- [57] de Ndayishimiye JC, Ju LH, Li HK et al. Temperature transfer functions based on freshwater testate amoebae from China. *European Journal of Protistology*, 2019, **69** : 152-164. DOI:10.1016/j.ejop.2019.03.003.



附图 I 本文记录的部分有壳变形虫种类(1. 半球表壳虫(*Arcella hemisphaerica*) ;
 2. 网匣壳虫(*Centropyxis cassis* type);3. 片口匣壳虫(*Centropyxis platystoma* type);
 4. 小口圆壳虫(*Cyclopyxis Kahli*);5. 尖顶砂壳虫(*Diffugia acuminate* type);
 6. 顶足法帽虫(*Phryganella acropodia*);7.小匣三角嘴虫(*Trigonopyxis arcula*);
 8. 斜口三足虫(*Trinema enchelys*);9. 线条三足虫(*Trinema lineare*);
 10. 亚黄茄壳虫(*Hyalosphenia subflava*). 图中比例尺代表 10 μm .)

Attached Fig. I Some species of shelled amoeba recorded in this paper