

雨养泥炭沼泽古水文定量重建的代用指标

—有壳肉足虫化石记录的应用与进展*

张欣利^{①*}, 贾继红^{②*}, 周静^②

①中国科学院资源环境科学信息中心, 兰州 730000

②兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

摘要 有壳肉足虫是由壳体包裹细胞质的单细胞原生动动物, 由于它种类多、对雨养泥炭沼泽水文变化反应敏感且其壳体易于保存, 成为一种雨养泥炭沼泽古水文定量重建的代用指标。本文主要阐述了现代雨养泥炭沼泽有壳肉足虫-环境变量数据库建立的方法和具体步骤, 及该指标在古水文及古气候重建上的应用和研究进展。在欧美为主的地区进行的许多研究发现, 利用有壳肉足虫恢复的地下水位记录不仅与其它 BSW 指标(如植物大化石和腐殖化度)记录变化有很好的一致性, 而且它与其它陆地古气候指标、冰芯指标、海洋指标及太阳辐射指标等都存在良好的对应关系, 这些充分证实有壳肉足虫是一种雨养泥炭沼泽古水文的有效代用指标, 其重建的地下水位记录能够很好反映区域古气候的变化。然而截至目前, 有壳肉足虫分类学研究、现代生态模拟等方面所存在的问题仍是其应用研究的阻碍, 相信随着这些问题的逐步解决, 有壳肉足虫在雨养泥炭沼泽古水文及古气候重建上将发挥更大的作用。我国在该领域研究尚未开展, 存在较好的研究潜力, 而且其成果可以对我国泥炭地的生态管理、开发利用提供科学指导依据。

主题词 有壳肉足虫 雨养泥炭沼泽 古水文 地下水位 古气候 全新世

1 前言

泥炭沼泽作为古环境地质载体之一, 它的多种组成和性质都存储着古气候信息, 其中, 孢粉^[1,2]、植物大化石^[3,4]、腐殖化度^[5,6]、动物残体^[7,8]、稳定同位素^[9-11]及脂类化合物^[12-14]等一系列生物、物理及化学指标在国内外都已用作重建古气候的代用指标。这些指标在重建泥炭地古环境中都起到重要的作用, 但是目前它们本身还存在或多或少的问题, 甚至有些指标还停留在定性或半定量化水平。比如孢粉是重建泥炭地植被历史的良好代用指标, 结合植物大化石分析可以得到更精确的泥炭地植被变化历史。但是, 目前它们埋藏学研究还不完善, 尤其是对孢粉是代表当地植被还是区域植被还不完全清楚; 氧、碳、氢同位素虽然已成功在泥炭地古气候研究中开展, 但是它们研究起步较晚, 对其机制还没彻底清楚。有壳肉足虫分析的出现, 可以弥补以上一些不足, 同时满足了当前全新世环境研究定量水平的要求。因此, 近几年有壳肉足虫在重建泥炭地古水文上的重要性已引起学术界广泛关注和使用。随着该领域深入研究已充分证实, 有壳肉足虫不仅是泥炭地古水文重建的良好代用指标, 也是古气候良好指示器。因此本文以上世纪 90 年代以来研究成果为基础, 对有壳肉足虫在雨养泥炭沼泽环境变化中的主要应用和研究进展作扼要的介绍。

有壳肉足虫 (testate amoebae) 是一种原生动物门 (Protozoa) 肉鞭动物亚门 (Sarcomastigophora) 肉足总纲 (Sarcodina) 根足亚纲 (Rhizopoda) 单细胞生物 (图 1)^[15]。有壳肉足虫广泛分布在河口、湖泊、河流、湿地、土壤及沼泽等环境, 一般大小有 20 μm —250 μm 。在泥炭地, 有壳肉足虫生活在地表泥炭藓

第一作者简介: 张欣利 男 42 岁 副研 石油与天然气地质专业, e-mail: zhangxl@llas.ac.cn
*国家自然科学基金项目(批准号: 40471137)、

和维管束植物的叶、茎表面水膜内。它们在各种泥炭地中都可以生存，尤其在雨养泥炭沼泽潮湿的泥炭土中可以达到每平方米 1.6×10^7 个，且一般每 4 cm^2 样品可有 15 种有壳肉足虫。有壳肉足虫生命周期非常短，且不同种类对环境因子表现出不同的生态幅，因此能够迅速地响应周边环境变化。雨养泥炭沼泽主要受大气降水补给，表面水流动缓慢且流动范围有限，所以地表湿度成为雨养泥炭沼泽里有壳肉足虫群落分布的主控影响因子。在植被生长季节里，有壳肉足虫大量繁殖后代，一旦气候条件变差（如冬季或夏季的临时性干燥），它们就将身体包在囊内甚至死亡。在它们死后，壳体化石能够随同沉积物质基本保留在原处。壳体在沉积物中保存较好，易于提取，能鉴别到种，且现代化石有壳肉足虫群落种类重叠性比较高，所以利用有壳肉足虫种类组合变化可以得到雨养泥炭沼泽古水文绝对值。

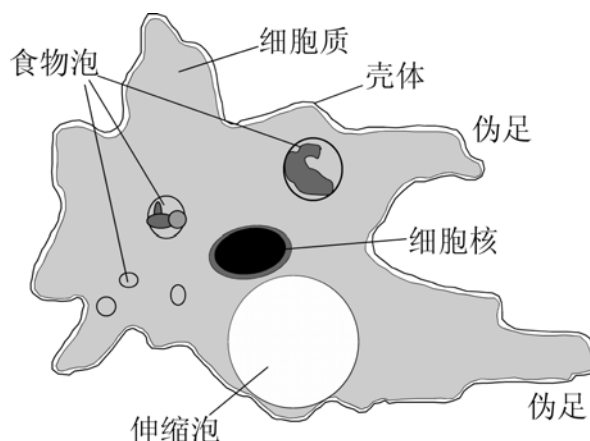


图 1 有壳肉足虫结构图

Fig. 1 The structure of testate amoebae

2 现代有壳肉足虫—环境变量数据库

建立一个完整的现代有壳肉足虫—环境变量数据库，是利用有壳肉足虫资料定量研究古水文和古气候变化最为重要的先决条件。

2.1 野外现代生态调查

进行现代雨养泥炭沼泽野外生态调查，主要包括有壳肉足虫表面样品的采集及各种环境变量的测量，主要步骤如下：

- (1) 在所研究区域里找 10 个左右的沼泽，在每个泥炭地选取 10-15 个表面潮湿状况不同的地点（如：从泥炭侵蚀边缘到中心地下水位从浅变深的地点），钻取约 30cm 表样芯。
- (2) 在每个沼泽，用百分丰度记录植被，鉴定所有维管植物和苔藓植物到种水平。以上最好拍照备案。
- (3) 钻取短芯：用一个直径为 11cm 尖锐钢管筒标记采样点，然后用剪刀把表面植物须根剪断，之后把钢管筒垂直推入沼泽中约 30cm 深处。除去表面生长的维管植物绿新梢和泥炭藓或其他藓类的茎叶，而保留并采集剩余的直立藓类杆和其它根，留作分析。样品底部物质应该已经分解，且压缩为泥炭。根据泥炭形成的群落，所采截面多半是样品的 1-10cm 部分；切去泥炭底部丢弃。因此，样品是绿色有生组织下面的表面植物残余物，但在这上面它变成确切棕色泥炭，因此棕色植物组织仍然是直立习性。
- (4) 在每个岩芯点记录该地的 pH、传导率和沼泽水温，采水样作离子测定 (Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} 和 Mg^{2+})。

- (5) 记录地下水位：在每个泥炭地的 10-15 地点钻芯后，放入一个滤水管，待地下水位约 1 小时稳定后，用“测钟”法测量地下水位，当天记录水位若干次，其平均值就为地下水位深度。
- (6) 实验室工作：将泥炭芯均分两半，一半称重，放烘箱 105°C 置 8 小时使其变干，再次称重计算体积密度和百分湿度。从另一半中取 4-5cm³ 样品，称重、准备数有壳肉足虫。

2.2 有壳肉足虫的提取和鉴定

有效提取出雨养泥炭沼泽沉积物中有壳肉足虫是该研究的基础，目前国际上已形成较规范的有壳肉足虫提取鉴定方法，可简要归纳如下：

- (1) 沿泥炭岩芯按 1cm 间距各取 4-5cm³ (约 1g) 的泥炭样品，将其放在装有约 75ml 蒸馏水的烧杯里煮沸约 10min (或更长时间)，以便使壳体从泥炭中分离出来。
- (2) 将溶液过 500μm、250μm 筛，去除大颗粒，最后用 20μm 滤纸过滤，将大于 20μm 的样品放入装有蒸馏水的试管中，在 3000 rpm 转速下离心 3 分钟，后装入 5ml 小瓶里，最后用 0.5ml 甘油滴在上面。
- (3) 用碱性藏红溶液对样品染色，制作玻片，在 200× 和 400× 显微镜下对有壳肉足虫进行鉴定和计数，数到至少 150 个壳体。

2.3 环境变量转换函数的推导

在野外调查工作及有壳肉足虫室内提取鉴定完成后，用 CANOCO 软件中正对应分析 (CCA) 对有壳肉足虫群落、环境变量及主要植物种类进行整理和分析 (图 2)^[16]，找出对有壳肉足虫分布有独立影响的环境变量 (如地下水位或 % 湿度)，删除那些受其他环境变量所制约、对有壳肉足虫分布基本上没有独立影响的环境变量。然后用 CALIBRATE 软件^[17] 对四种回归模型 (加权平均 WA，耐度降权—加权平均 WA-ToI、加权平均—偏最小二乘法 WA-PLS，偏最小二乘法 PLS) 进行转换函数运行，且用 jack-knifing 进行误差检验。初步分析后，删除那些误导分析结果的有壳肉足虫种类，再次对模型进行转换函数运行，最终构建出相应的环境变量最佳转换函数模型。

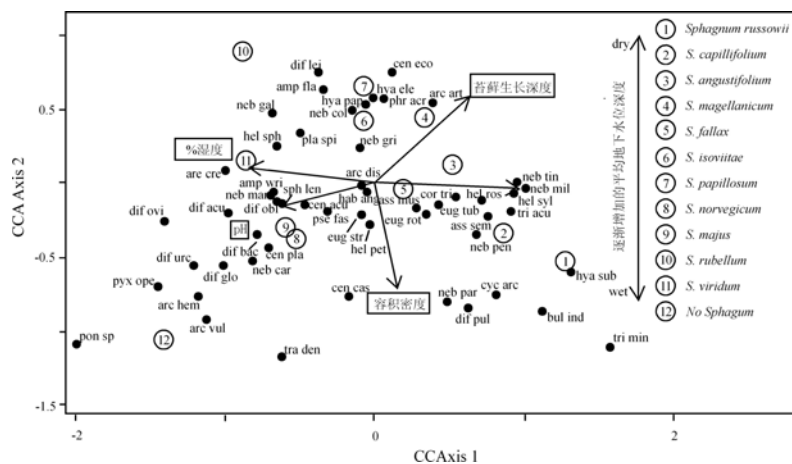


图 2 有壳肉足虫与环境变量正对应分析结果

Fig. 2 CCA ordination of testate amoebae and environmental variables in the calibration dataset (n = 139)

实心圆点代表有壳肉足虫种类；数字代表泥炭藓种类沿地下水位深度梯度相对应位置的苔藓种类

Filled circles represent modern testate amoebae samples; the numbering of the *Sphagnum* species corresponds to the position of the

Sphagnum species along a water table depth gradient

研究表明湿地生境中水文因素的底土层潮湿条件（即地下水位和湿度）是有壳肉足虫群落分布的主要控制因子^[16,18-20]。而鉴于实践中泥炭地地下水位较土壤湿度更容易重复测量，平均每年水位值都可以得到，所以地下水位观察记录的时间也较土壤湿度通常要早。因此，在泥炭地古水文重建研究也就用恢复的地下水位深度变化代表古水文情况。

目前，在英国已建立了完整的有壳肉足虫—环境变量现代数据库。但是有壳肉足虫种类、其对水文变化响应等都存在一定的区域差异，势必会影响古水文重建的精确性。因此各地学者分别就本地情况建立了不同的数据库，如2002年Booth^[16]在美国密歇根州，2003年Wilmshurst等^[21]在新西兰，2006年Payne等^[22]在美国阿拉斯加州中南部分别建立了现代有壳肉足虫—环境变量数据库。

3 有壳肉足虫在雨养泥炭沼泽古水文研究中的应用

3.1 雨养泥炭地地下水位重建

20世纪90年代在加拿大安大略省^[19,23]和纽芬兰省^[24]、英国^[25,18]、芬兰^[26,27]、新西兰^[28]以及瑞士至法国的侏罗纪山脉地区^[29]等地都开展了泥炭地有壳肉足虫的现代生态研究，探索了利用有壳肉足虫重建泥炭地古水文的方法。

1994年Warner和Charman^[30]首次使用简单加权平均法重建了加拿大安大略省西北部Emo沼泽的地下水位变化。1998年Woodland等^[18]对WA、WA-ToI、WA-PLS和PLS四种回归模型在沼泽年均地下水位及百分湿度的定量重建能力进行了对比，利用WA和WA-ToI转换函数成功的定量重建了英格兰西北部坎布里亚郡Bolton Fell沼泽地下水位和土壤含水量的变化状况。这标志着雨养泥炭沼泽古水文定量重建真正的开始。

在英格兰和苏格兰地区进行了很多中晚全新世泥炭地古水文研究，其中有单一指标有壳肉足虫重建的水文记录，也有结合其它泥炭水文指标（如植物大化石、腐殖化度）综合重建的古水文记录^[3,31-38]。为避免单一指标的缺陷，在古水文重建中以上三种指标通常综合应用，以确保得到更可信的泥炭地古水文记录。

其中，Chiverrell^[31]对英格兰东北部May Moss多个短泥炭芯（即晚全新世以来）的有壳肉足虫、植物大化石及腐殖化度三项雨养沼泽地表潮湿（BSW）重建指标进行的对比研究，有壳肉足虫恢复的地下水位记录与其余两项指标记录变化比较一致，而且沼泽内相邻点其水文变化在时间上具有同步性。

Hendong等^[32]在北英格兰3个泥炭地的8个泥炭芯进行了有壳肉足虫地下水位重建研究发现，该区域无论沼泽内相邻点还是沼泽之间的BSW变化都具有相似性，而且气候是BSW变化的主要驱动力。

Charman等^[39]首次将沼泽地下水位同石笋记录进行对比，发现两者存在稳定相关性。而且该记录同GISP2冰量积累上也存在一致性。

近200年来的有壳肉足虫重建的水位记录与仪器测量水位记录及气候资料的对比分析也证实，广阔区域的泥炭地BSW是由区域气候变化引起的^[40,41]。

Langdon等^[42]利用植物大化石、有壳肉足虫和腐殖化度三种指标对苏格兰东南部Temple Hill Moss 7500年古气候进行了重建，在6650、5850、5300、4500、3850、3400、2800-2450和250-150 cal.BP都有主要湿度变化期，它们对6800BP、4200BP、2800BP、1400BP普遍存在的冷湿事件有着很好的响应。由于该研究中有壳肉足虫较其余指标采样精度相对低，未能很好表现气候的波动，尤其近千年记录对中世纪暖期、小冰期未能很好响应。

利用以上三种指标重建的高分辨率的苏格兰东北Tore Hill Moss古气候的研究表明，2800年来存在七个显著湿润期，三个显著干旱期，对2800BP、1400BP冷湿事件，中世纪暖期及小冰期都有很好的响应，而且有壳肉足虫数据周期分析得到的560年与北大西洋深海流（NADW）550年周期相近^[43]。

同样，重建的纽芬兰Nordan's Pond Bog 8500年来气候记录表明，有14个明显的BSW增加期，其中在

8270、7500 cal. BP的转变分别与 8400 cal. BP 和 7500-6900 cal. BP的两次大湖向北大西洋注入淡水相对应，这些淡水扰乱了北大西洋温盐环流，最终导致区域变凉。将这三种指标叠加的BSW记录与太阳辐射代用指标（ ^{14}C 和 ^{10}Be ）及北大西洋冰筏记录对比发现，在早晚全新世（8500- 6000 和 2700 cal. BP-现在），BSW与北大西洋冰筏及以上两种宇宙射线同位素之间有很好的相关性。这些相关性表明在全新世太阳辐射对纽芬兰东部的气候有着持久稳固的影响，即太阳辐射降低时，BSW会增加(图 3)^[44]。

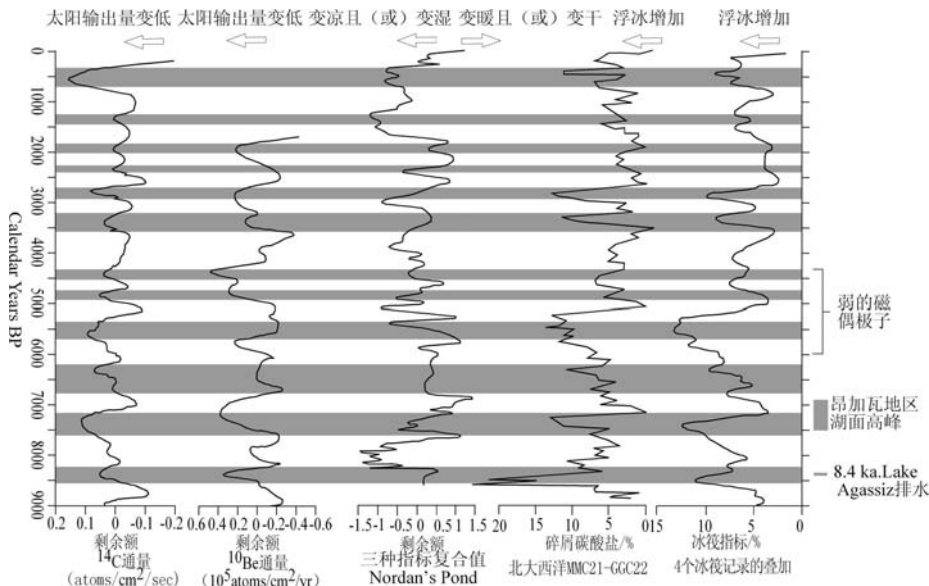


图 3 Nordan's Pond沼泽表面湿度记录和宇宙射线同位素 ^{14}C 和 ^{10}Be 和北大西洋MC21-GGC22 岩芯、四个岩芯叠加的浮冰碎屑物质的对比

Fig. 3 Comparison of the bog surface wetness of Nordan's Pond bog with the flux reconstructions for the cosmogenic isotopes ^{14}C and ^{10}Be and with the ice rafted debris records from cores MC21-GGC22 and a stack of four cores from the Atlantic Ocean

近十几年，在英国利用有壳肉足虫恢复雨养泥炭沼泽地下水位的的研究很多，Charman等^[45]对其中 12 个有代表性研究记录进行的整理分析，同样发现英国北部大的湿润期与欧洲中部湖面升高、北大西洋气候变化和太阳辐射之间有较好的相关性，证实太阳辐射是欧洲西北部水文变化的驱动力。

近年来，在俄罗斯^[46]、美国密歇根州^[16,47,48]、波兰^[49,50]、爱尔兰^[51]和瑞典^[41]等地也陆续开展了泥炭地有壳肉足虫生态研究及古水文重建，重建得泥炭地地下水位与其它记录也有很好的相关性。

上述雨养泥炭沼泽全新世古水文、古气候重建研究充分证实有壳肉足虫已成为雨养泥炭沼泽高分辨率古气候重建非常有效的重要指标之一。

Booth等^[52] 利用有壳肉足虫对密歇根州一个非雨养泥炭沼泽重建了 5100 年来的古气候，不仅能够恢复千年和亚百年尺度上的气候变化，还能重建高频、低幅的气候变化，这使得有壳肉足虫研究的应用范围得到扩展。

3.2 有壳肉足虫研究存在的问题及其前景

上述已展示有壳肉足虫在定量重建泥炭地古水文和古气候上具有很大的优势，但是目前该领域研究也存在不少潜在问题，因此在未来该领域不断深入发展的同时，我们也要在以下各个方面加大研究力度。

- (1) 现代模拟的质量。泥炭地现代生态数据质量需要提高，建立更完善的有壳肉足虫-环境变量数据库，以便更准确的反映环境因子与有壳肉足虫组合关系，得出更精确的泥炭地古水文、古气候变化记

录。

- (2) 泥炭类型和环境指标的范围。到目前为止，所有的工作主要集中在 BSW 重建上，其他方面（如 pH）转换函数及重建应该得到进一步的发展。
- (3) 有壳肉足虫分类系统。其分类系统还没成熟，今后利用新技术（如小亚基核蛋白体 RNA）提高鉴别水平，通过对有壳肉足虫分析对比修订其分类群，建立分类群与系统演化的关系，使其分类越来越接近自然分类。
- (4) 有壳肉足虫鉴定水平。目前古水文重建研究中，有壳肉足虫化石鉴定主要还是在显微镜下盖玻片定向鉴定，由于缺乏灵活性，限制了其分类的精度。

相信随着上述各个领域研究的深入进行，会逐渐解决当前有壳肉足虫在古水文及古气候研究中存在的潜在问题，从而促使该领域研究得到长足发展。

有壳肉足虫除了用在泥炭地古水文、古气候重建外，它在其它领域也得到发展。如，利用有壳肉足虫研究成果，可以对现代泥炭地恢复进行监测和生态管理^[53~55]；它也是湖泊古环境研究的辅导工具，是湖泊污染和温度的指示剂；在盐沼和海平面变化方面，有壳肉足虫可作海平面指标硅藻类和孔虫类的辅助指标^[56]；甚至在考古方面也进行了尝试^[57]。

4 中国有壳肉足虫研究进展

我国对有壳肉足虫研究起步很晚，对淡水和土壤有壳肉足虫的工作分别始于 1925 年和 1983 年^[58,59]。截至目前，国内对有壳肉足虫研究仅限于局部地区其分类及现在生态研究上^[60~62]，而作为古环境、古气候替代指标的研究目前仅限于通过有壳肉足虫的分布与种类识别海相、陆相和海陆过渡相的沉积^[63~65]，所以我国开展泥炭地有壳肉足虫在环境重建研究方面具有很大的潜力。但是我国雨养泥炭沼泽储量少且分布具有区域性，对国内有壳肉足虫地理分布及其与环境间的相互关系等基础研究还非常薄弱，泥炭地地下水现代仪器测量历史也比较短，这些都限制了该指标在中国泥炭地的广泛应用。

尽管存在诸多困难，但有壳肉足虫对泥炭地古水文学重建研究可以促进我国古气候重建研究的进展，而且利用有壳肉足虫的生态研究，对我国泥炭地的生态管理、开发利用上也有很好的指导意义。

致谢 本文受国家自然科学基金项目(批准号: 40471137)。利物浦大学地理系 Richard Chiverrell 教授和中国科学院水生生物研究所杨军博士提供了部分资料及提出了宝贵的意见，谨此致谢。

参考文献 (References)

1. 唐领余, 沈才明. 青藏高原全新世花粉记录 [J]. 微体古生物学报, 1996, 13(4): 407 ~ 422. [Tang Lingyu, Shen Caiming. Holocene pollen records of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Micropalaeontol Sinica December*, 1996, 13(4): 407 ~ 422.]
2. 夏玉梅, 汪佩芳. 密山杨林 3 000 多年来气候变化的泥炭记录 [J]. 地理研究, 2000, 19 (1): 53 ~59. [Xia Yumei, Wang Peifang. Peat record of climate change since 3000 years in Yangmu, Mishan region [J]. *Geographical research*, 2000, 19 (1): 53 ~59.]
3. Hughes P D M, Mauquoy D, Barber K E *et al.* Mire-development pathways and palaeoclimatic records from a full Holocene peat archive at Walton Moss, Cumbria, England [J]. *Holocene*, 2000, 10: 465 ~ 479
4. Well C E, Wheeler B D. Evidence for possible climatic forcing of late-Holocene vegetation changes in Norfolk Broadland floodplain mires, UK [J]. *Holocene*, 1999, 9: 595 ~ 608
5. 王华, 洪业汤, 朱永焯等. 红原泥炭腐殖化度记录的全新世气候变化 [J]. 地质地球化学, 2003, 31 (2) : 51 ~ 56 . [Wang

- Hua, Hong Yetang, Zhu Yongxuan *et al.* The peat humification records of Holocene climate change in Hongyuan region [J]. *Geology-Geochemistry*, 2003, 31 (2): 51 ~ 56.]
6. Aaby B. Cyclic climatic variations over the past 5500 years reflected in raised bogs [J]. *Nature*, 1976, 263: 281 ~ 284
 7. Lavoie C, Elias S A, Filion L. A 7000-year record of insect communities from a peatland environment, southern Quebec [J]. *Écoscience*, 1997, 4: 394 ~ 403
 8. Lavoie C, Elias S A, Payette S. Holocene fossil beetles from a treeline peatland in subarctic Quebec [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1997, 75: 227 ~ 236
 9. Hong Y T, Jiang H B, Liu T S *et al.* Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year delta O-18 time-series of Chinese peat cellulose [J]. *Holocene*, 2000, 10: 1 ~ 7
 10. White J W C, Ciais P, Figge R A *et al.* A high-resolution record of atmospheric CO₂ content from carbon isotopes in peat [J]. *Nature*, 1994, 387: 153 ~ 156
 11. Dupont L M. Temperature and rainfall variation in the Holocene based on comparative palaeoecology and isotope geology of a hummock and a hollow (Boutangerveen, the Netherlands) [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1985, 48: 71 ~ 159
 12. Xie S C, Evershed R P. Peat molecular fossils recording palaeoclimatic change and organism replacement [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 46 (20): 1749 ~ 1752
 13. Nott C J, Xie S. N-alkane distributions in ombrotrophic mires as indicators of vegetation change related to climatic variations [J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31: 231 ~ 235
 14. Nichols J E, Booth, R K, Jackson S T *et al.* Paleohydrologic reconstruction based on *n*-alkane distributions in ombrotrophic peat [J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(11): 1505 ~ 1513
 15. 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[J]. 水生生物学报, 2004, 28 (4): 426 ~ 437. [Yang Jun, Feng Weisong, Xiao Wei. A taxonomic catalogue of freshwater and soil testacea in China with a discussion of their faunal similarity [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28 (4): 426 ~ 437.]
 16. Booth R K. Testate amoebae as paleoindicators of surface-moisture changes on Michigan peatlands: modern ecology and hydrological calibration [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2002, 28: 329 ~ 348
 17. Juggins S. CALIBRATE Version 0.82. University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, UK. 1998
 18. Woodland W A, Charman D J, Sims P C. Quantitative estimates of water tables and soil moisture in Holocene peatlands from testate amoebae [J]. *Holocene*, 1998, 8: 261~274
 19. Charman D J, Warner B G. Relationship between testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) and microenvironmental parameters on a forested peatland in northeastern Ontario [J]. *Canadian Journal of Zoology*, 1992, 70: 2474 ~ 2482
 20. Mitchell E A D, Buttler A J, Warner B G *et al.* Ecology of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in Sphagnum peatlands in the Jura mountains, Switzerland and France [J]. *Ecoscience*, 1999, 6: 565 ~ 576.
 21. Wilmshurst J M, Wiser S K, Charman D J. Reconstructing Holocene water tables in New Zealand using testate amoebae: differential preservation of tests and implications for the use of transfer functions [J]. *Holocene*, 2003, 13: 61 ~ 72
 22. Payne R J, Kishaba K, Blackford J *et al.* Ecology of testate amoebae (protista) in south-central Alaska peatlands: Building transfer – function models for palaeoenvironmental studies [J]. *Holocene*, 2006, 16(3): 403 ~ 414
 23. Wanner B G, Charman D J. Holocene soil moisture changes on a peatland in northwestern Ontario based on fossil testate amoebae (Protozoa) analysis [J]. *Boreas*, 1994, 23: 270 ~ 279
 24. Charman D J, Warner B G. The ecology of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in oceanic peatlands in Newfoundland, Canada: modelling hydrological relationships for palaeoenvironmental reconstruction [J]. *Écoscience*, 1997, 4: 555 ~ 562
 25. Woodland W A. *Holocene palaeohydrology from testate amoebae analysis: developing a model for British peatlands*. Unpublished PhD thesis, University of Plymouth, 1996
 26. Tolonen K, Warner B G, Vasander H. Ecology of Testaceans (Protozoa: Rhizopoda) in mires in southern Finland: I. Autecology [J]. *Archiv für Protistenkunde*, 1992, 142: 119 ~ 138
 27. Tolonen K, Warner B G, Vasander H. Ecology of testaceans (Protozoa Rhizopoda) in mires of southern Finland: II. Multivariate

- analysis [J]. *Archiv für Protistenkunde*, 1994, 144: 97 ~ 112
28. Charman D J. Modelling hydrological relationships of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) on New Zealand peatlands [J]. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 1997, 27: 465 ~ 483
 29. Mitchell E A D, Buttler A J, Warner B G *et al.* Ecology of testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in Sphagnum peatlands in the Jura mountains, Switzerland and France [J]. *Ecoscience*, 1999, 6: 565 ~ 576
 30. Wanner M, Meisterfeld R. Effects of some environmental factors on the shell morphology of testate amoebas (Rhizopoda, Protozoa) [J]. *European Journal of Protistology*, 1994, 30: 191 ~ 195
 31. Chiverrell R C. A proxy record of late Holocene climate change from May Moss, northeast England [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16: 9 ~ 29.
 32. Hendon D, Charman D J, Kent M. Palaeohydrological records derived from testate amoebae analysis from peatlands in northern England: within-site variability, between-site comparability and palaeoclimatic implications [J]. *Holocene*, 2001, 11: 127 ~ 148
 33. Charman D J, Hendon D. Long-term changes in soil water tables over the past 4500 years: relationships with climate and North Atlantic atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. *Climatic Change*, 2000, 47: 45 ~ 59
 34. Ellis C J, Tallis J H. Climatic control of blanket mire development at Kentra Moss, north-west Scotland [J]. *Journal of Ecology*, 2000, 88: 869 ~ 889
 35. Barber K E, Battarbee R W, Brooks S J *et al.* Proxy records of climate change in the UK over the last two millennia: documented change and sedimentary records from lakes and bogs [J]. *Journal of the Geological Society*, 1999, 156: 369 ~ 380
 36. Charman D J, Hendon D, Packman S. Multiproxy surface wetness records from replicate cores on an ombrotrophic mire: implications for Holocene palaeoclimate records [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1999, 14: 451 ~ 463
 37. Mauquoy D, Barber K E. A replicated 3000 yr proxy-climate record from Coom Rigg Moss and Felecia Moss, the Border Mires, northern England [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1999, 14: 263 ~ 275
 38. Barber K E, Dumayne-Peaty L, Hughes P D M *et al.* Replicability and variability of the recent macrofossil and proxy-climate record from raised bogs: field stratigraphy and macrofossil data from Bolton Fell Moss and Walton Moss, Cumbria, England [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1998, 13: 515 ~ 528
 39. Charman D J, Brown A D, Hendon D *et al.* Testing the relationship between Holocene peatland palaeoclimate reconstructions and instrumental data at two European sites [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 137 ~ 143
 40. Charman D J, Brown A D, Hendon D *et al.* Testing the relationship between Holocene peatland palaeoclimate reconstructions and instrumental data at two European sites [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 137 ~ 143
 41. Schoning K, Charman D J, Wastegård S. Reconstructed water tables from two ombrotrophic mires in eastern central Sweden compared with instrumental meteorological data [J]. *Holocene*, 2005, 15 (1): 111~ 118
 42. Langdon P G, Barber K E, Hughes P D M. A 7500-year peat-based palaeoclimatic reconstruction and evidence for an 1100-year cyclicity in bog surface wetness from Temple Hill Moss, Pentland Hills, southeast Scotland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 259 ~ 274
 43. Blundell A, Barber K E. A 2800-year palaeoclimatic record from Tore Hill Moss, Strathspey, Scotland: the need for a multi-proxy approach to peat-based climate reconstructions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10-11): 1261 ~ 1277
 44. Hughes P D M, Blundell A, Charman D J *et al.* An 8500 cal. year multi-proxy climate record from a bog in eastern Newfoundland: contributions of meltwater discharge and solar forcing [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(11-12): 1208 ~ 1227
 45. Charman D J, Blundell A, Chicherrell R *et al.* Compilation of non-annually resolved Holocene proxy climate records: stacked Holocene peatland palaeo-water table reconstructions from northern Britain [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(3-4): 336~350
 46. Bobrov A A, Andreev A A, Schirrmeister L *et al.* Testate amoebae (Protozoa: Testacealobosea and Testaceafilosea) as bioindicators in the Late Quaternary deposits of the Bykovsky Peninsula, Laptev Sea, Russia [J]. *Palaeogeography*,

Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 209: 165 ~ 181

47. Booth R K, Jackson S T. A high-resolution record of late Holocene moisture variability from a Michigan raised bog [J]. *Holocene*, 2003, 13: 865 ~ 878
48. Booth R K, Michael Notaro, Stephen T J *et al.* Widespread drought episodes in the western Great Lakes region during the past 2000 years: Geographic extent and potential mechanisms [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 242: 415 ~ 427
49. Lamentowicz M, Mitchell E A D. The Ecology of Testate Amoebae (Protists) in Sphagnum in North-western Poland in Relation to Peatland Ecology [J]. *Microbial ecology*, 2005, 50(1): 48 ~ 63
50. Lamentowicz M, Mitchell E A D. Testate amoebae (protists) as palaeoenvironmental indicators in peatlands [J]. *Polish Geological Institute Special Papers*, 2005, 16: 58 ~ 64
51. Caseldine C, Gearey B. A multiproxy approach to reconstructing surface wetness changes and prehistoric bog bursts in a raised mire system at Derryville Bog, Co. Tipperary, Ireland [J]. *Holocene*, 2005, 15 (4): 585 ~ 601
52. Booth R K, Jackson S T, Gray C E D. Paleocology and high-resolution paleohydrology of a kettle peatland in upper Michigan [J]. *Quaternary Research*, 2004, 61: 1 ~ 13
53. Foissner W. Protozoa as bioindicators in agroecosystems, with emphasis on farming practices, biocides, and biodiversity [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1997, 63 (2 ~ 3): 93 ~ 103
54. Hendon D, Charman D J. High-resolution peatland water-table changes for the past 200 years: The influence of climate and implications for management [J]. *Holocene*, 2004, 14 (1): 125 ~ 134
55. Davis S R, Wilkinson D M. The conservation management value of testate amoebae as 'restoration' indicators: Speculations based on two damaged raised mires in northwest England [J]. *Holocene*, 2004, 14 (1): 135 ~ 143
56. Roland W, Gehrels W R, Roe H M *et al.* Foraminifera, testate amoebae and diatoms as sea-level indicators in UK saltmarshes: A quantitative multiproxy approach [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16 (3): 201 ~ 220
57. Benjamin R. Gearey, Christopher J. Caseldine. Archaeological applications of testate amoebae analyses: a case study from Derryville, Co. Tipperary, Ireland [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2006, 33 (1): 49 ~ 55
58. Wang C C. Study of the protozoa of Nanking, Part I [J]. *Contributions from the Biological Laboratory of the Science Society of China*, 1925, 1(3): 1~ 60
59. 崔振东. 长白山森林生态系统土壤原生动物初步研究[J]. 森林生态系统研究, 1983, 3: 144 ~ 153. [Cui Zhendong. A preliminary study on soil protozoas in forest ecosystems on Northern slope of Changbai Mountain [J]. *Research of Forest Ecosystem*, 1983, 3: 144 ~ 153.]
60. Yang J, Zhang W, Feng W *et al.* Testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) from northwest Yunnan, China [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(3): 583 ~ 590
61. Yang J, Meisterfeld R, Zhang W J *et al.* *Diffflugia mulanensis* nov. spec., a freshwater testate amoeba from Lake Mulan, China [J]. *European Journal of Protistology*, 2005, 41: 269 ~ 275
62. Leng X T, Wang S Z, Zhao H Y *et al.* Composition, physiochemical properties and water-chemistry environment analysis on the oligotrophic peat [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22 (2) : 114 ~ 11
63. 赵泉鸿, 韩道华. 江苏省微山湖西区第四纪晚期的海陆过渡相化石群及其意义[A]. 汪品先等. 海洋微体古生物论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1980, 120 ~ 129. [Zhao Q, Han D. Discovery of a late Quaternary brackishwater fauna in the region west of the Weishanhu Lake, Jiangsu Province. In[A]. Wang P *et al.*, Papers on Marine Micropaleontology[C]. Ocean Press, Beijing, 1980, 120 ~ 129.]
64. 汪品先, 顾尚勇. 下辽河平原第四纪海进[A]. 汪品先等. 海洋微体古生物论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 1980, 130 ~ 139. [Wang P, Gu S. Quaternary transgressions in the lower Liao River plain, Liaoning Province. In[A]. Wang P *et al.*, Papers on Marine Micropaleontology[C]. Ocean Press, Beijing, 1980, 130-139.]
65. 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[J]. 微体古生物学报, 1987, 4(4): 345 ~ 349. [Wang P, Min Q. On the paleoenvironmental significance of thecamoebians in the Quaternary studies of China [J]. *Acta Micropaleontologica*

**A POWERFUL INDICATOR FOR QUANTITATIVE
RECONSTRUCTION OF OMBROTROPHIC MIRES PALAEOHYDROLOGY
— ADVANCES IN THE STUDY OF FOSSIL TESTATE AMOEBAE**

Zhang Xinli^①, Jia Jihong^②, Zhou Jing^②

① *Resources Environmental Science Information Center of Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China*

② *National Key Laboratory of the West Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*

Abstract

According to chemical conditions, peatlands usually defines three types: minerotrophic, ombrotrophic and transition. Nutrients of **ombrotrophic** mires mainly come from precipitation. Because surface water in the mires moves quite slowly, most of deposits remain their formative sets. There are a number of testate amoebae on ombrotrophic mires, which are single-celled organisms in which the cytoplasm is enclosed within an external shell. Studies of their ecology show that assemblages are principally determined by moisture status but are also influenced by nutrient status and especially by pH levels. Testate amoebae provide an additional technique and have ability to quantitatively reconstruct water table depths.

The paper introduces the method and steps of building up a large quality modern dataset of surface sediment samples and associated environmental variables on ombrotrophic mires, which is precondition of reconstruction of palaeohydrology, and then reviews existing and recently developed application of testate amoebae analysis to reconstruct palaeohydrology of ombrotrophic mires. In Europe and North America, many researches have found that the records of water table levels on ombrotrophic mires based on testate amoebae analysis agree well with bog surface wetness (BSW) from plant macrofossils and humification analysis, and are also correlated with the ice rafted debris (IRD) record in the North Atlantic Ocean and cosmogenic isotope flux. The results indicate that testate amoebae are sensitive indicators for paleohydrology, and water table reconstructions from testate amoebae can provide a new source of palaeoclimate data for temperate oceanic regions with ombrotrophic mires.

In China, little progress has been made now in the utilization of testate amoebae for reconstruction of palaeohydrology. Obviously, there are potentials to use testate amoebae in the peatlands of China as an indicator for environment, and the researches are useful scientific guidance for the ecological management and the exploitation of the peatlands in China.

Key words ombrotrophic mires, testate amoebae, palaeohydrology, water tables, palaeoclimate, Holocene