

# 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

魏志强<sup>1</sup>, 钟巍<sup>1\*</sup>, 欧阳军<sup>1</sup>, 叶素素<sup>1</sup>, 商圣潭<sup>1</sup>,  
杨坤有<sup>1</sup>, 唐小雯<sup>1</sup>, 薛积彬<sup>1</sup>, Robert K BOOTH<sup>2</sup>

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; 2. 美国里海大学地球与环境科学系, 伯利恒 18015)

**摘要:** 基于南岭亚高山泥炭湿地在维持华南亚热带地区生态系统和区域水平衡中起关键作用, 且这一区域的生物因子-古水位定量重建的工作还未有系统展开的现状, 以南岭西部的湖南省大坪泥炭地为研究对象, 初步开展了该地区现代有壳变形虫的种类组成鉴定工作; 通过多元统计分析方法, 确定地下水位埋深(Water-Table Depth, WTD)是影响本地区有壳变形虫群落结构变化的主要环境因子, 并据此利用生物-环境因子转换函数模型, 初步构建了大坪现代泥炭湿地有壳变形虫-地下水位埋深的转换函数关系. 研究结果表明: 转换函数预测的地下水位埋深与实测地下水位埋深呈一定的相关性, 但受制于本次采用面积小、鉴定样本量较少和水位环境梯度较窄的条件下, 转换函数预测性能的精度还较低. 此次工作可为将来系统开展华南亚热带地区高山泥炭湿地的古水文定量重建工作奠定宝贵的基础数据.

**关键词:** 亚高山泥炭湿地; 有壳变形虫; 转换函数; 地下水位埋深

中图分类号: P91; P92      文献标志码: A      文章编号: 1000-5463(2019)03-0070-09

## 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

WEI Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHONG Wei<sup>1\*</sup>, OUYANG Jun<sup>1</sup>, YE Susu<sup>1</sup>, SHANG Shengtan<sup>1</sup>,  
YANG Kunyou<sup>1</sup>, TANG Xiaowen<sup>1</sup>, XUE Jibin<sup>1</sup>, Robert K BOOTH<sup>2</sup>

(1. School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;

2. Department of Earth and Environmental Science, Lehigh University, Bethlehem 18015, USA)

**Abstract:** Subalpine peatlands in Nanling Mountains play an important role in maintaining ecosystem and regional water balance in subtropical regions of South China. However, there is still no systematic investigation into the quantitative palaeoenvironment reconstructions in this area. A preliminary study of the distribution of the modern testate amoebae assemblage in Daping peatland in the western Nanling Mountains is conducted. A multivariate statistical analysis demonstrated that the water-table depth (WTD) was the main environmental factor for the testate amoeba community composition. Accordingly, testate amoeba-based transfer functions were developed using a variety of commonly used models. The results showed that all transfer function models performed similarly and produced similar reconstructions. However, the root mean square error of prediction (RMSEP) and coefficient of determination tested relatively poor performance of the transfer functions, which was likely due to the relatively small sampling area, insufficient sampling sites and short sampling gradient of water-table depth. A valuable data base can be provided for the further systematic research of the quantitative hydrological reconstructions in subalpine peatlands from subtropical regions of South China.

**Keywords:** subalpine peatland; testate amoebae; transfer function; water-table depth

收稿日期: 2018-10-31

《华南师范大学学报(自然科学版)》网址: <http://journal.scnu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571187, A1071137); 广东省自然科学基金项目(2014A030313435, S2011010003413)

\* 通信作者: 钟巍, 教授, Email: zhongwei@m.scnu.edu.cn.

泥炭地在地质时期长期扮演着碳汇角色,在全球碳循环及气候调节方面起着重要作用。近几十年,研究者尤其关注的科学问题是在全球变暖背景下,泥炭沼泽地是将持续扮演其碳汇功能,还是将转变为重要的碳排放源地<sup>[1-3]</sup>。相关研究表明:由气候变化引起的泥炭地地下水位变化对碳积累过程有重要影响<sup>[4-5]</sup>。因此,定量重建过去泥炭古水文变化不仅有助于泥炭湿地的古环境重建,也有助于更准确地评估泥炭地在未来气候变化和人类活动影响下的固碳潜力。而利用相关可靠模型构建生物指标和环境因子的转换函数关系则是实现古环境定量重建的有效手段。这种方法主要基于现代过程的研究基础,在有效验证代用生物指标和环境因子的相关关系后构建两者的转换函数,然后将此转换函数应用于代用生物指标的剖面数据,以此实现定量重建环境因子的演变历史<sup>[6-8]</sup>。

有壳变形虫(*testate amoebae*)是一种广泛分布于淡水潮湿环境中的陆生单细胞成壳原生动物,其形态稳定、生态幅窄小、生命周期短、对环境变化敏感,是古环境定量重建的有效代用指标<sup>[9-10]</sup>。在泥炭地,有壳变形虫主要生活于泥炭藓或其他植物茎叶表面的水膜中。现代生态学研究表明:泥炭地有壳变形虫的群落结构及其多样性主要受地表基质的湿润程度影响,与泥炭地表湿度(*moisture*)和地下水位埋深(*Water-Table Depth*,简称*WTD*)有密切关系<sup>[11-12]</sup>。

在国际上,有壳变形虫已经被广泛用于恢复泥炭地的古水文条件。欧洲、美洲、新西兰等地都已分别建立了适合各自研究区域的泥炭地有壳变形虫-地下水位埋深转换函数,且利用转换函数进行了大量的区域环境变化和泥炭地古水文定量重建工作<sup>[6-7,13-14]</sup>。虽然绝大多数有壳变形虫在不同地区表现出相似的水位偏好,但由于各地理区域气候环境、生态类型的差异以及有壳变形虫群落结构组合的不同,各地区所建立的转换函数模型可能只适用于特定范围。比如,CHARMAN等<sup>[6]</sup>将欧洲转换函数与WOODLAND等<sup>[15]</sup>建立的英国转换函数相对比发现:使用欧洲转换函数来推测英国泥炭地水文变化的效果较好,使用英国转换函数来推测欧洲较大范围内的泥炭地水文变化效果却不尽理想;AMESBURY等<sup>[16]</sup>扩大了欧洲数据的采集,发现欧洲转换函数与英国转换函数的结果并无太大区别;

TURNER等<sup>[17]</sup>分别使用英格兰北部、爱尔兰北部和ACCROTELM项目的3个转换函数对英格兰北部泥炭地古水位进行重建,结果表明:尽管3个转换函数反演的古水位总体变化趋势较一致,但在反演的精度上还是存在一定的差异。因此,考虑到泥炭地具体地理位置、气候背景和地质地形条件等差异,大部分学者认为需要谨慎或者避免选择其他地区的有壳变形虫-地下水位埋深转换函数模型库来推导本区的古水位变化<sup>[6,16]</sup>。在我国,利用泥炭沼泽有壳变形虫反演古水文变化研究起步较晚,目前主要集中于东北及长江中下游泥炭湿地<sup>[18-24]</sup>,在具有稀有性和独特性的亚热带低纬高山泥炭湿地的研究相对缺乏。

南岭亚高山泥炭湿地生物多样性丰富,在维持华南亚热带地区生态系统、气候调节和区域水平衡方面起着重要作用,具有极高的生态学和古气候学研究价值。本文选取位于南岭西部的湖南省大坪泥炭地为研究对象,初步开展了该地区现代有壳变形虫的多样性和生态学特征的研究工作,尝试利用相关函数模型建立现代泥炭地有壳变形虫与环境因子的转换函数关系,拟为将来系统开展华南亚热带地区泥炭古水文定量重建工作及研究碳积累动态机制提供第一手数据资料。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域与样品采集

大坪泥炭地(约 $26^{\circ}10'N$ , $110^{\circ}07'E$ )位于南岭西部城步苗族自治县南山牧场境内(图1)。该地区海拔约为1620m,属中亚热带山地气候,年均降水量约为2000mm,年均气温约为 $10.9^{\circ}C$ ,干湿季明显。大坪泥炭地主要形成和发育于以火成岩的黑云母花岗岩、二长花岗岩和角闪花岗岩等风化壳为基底的宽谷洼地<sup>[25]</sup>。由于降雨量大、蒸发量小、雾日较多,形成温凉湿润的气候条件,植物残体分解缓慢,沼泽植物丛生,泥炭埋藏厚达1m以上且储藏量超过100000m<sup>3</sup>,该研究区域至今地表过湿或积水,泥炭仍在积累<sup>[26]</sup>。盆地中心为灯芯草、知风草和鼠尾草等占优势的泥炭沼泽,局部有芦苇及泥炭藓。

在2017年5月,根据大坪泥炭地水文梯度,沿剖面线选择不同生境作为现代泥炭藓取样点,用

GPS 记录每个取样点的地理位置,采集 23 个取样点用于有壳变形虫的处理和分析(图 2)。取样步骤为:(1)将泥炭藓顶部修剪齐整,去除顶部约 1~2 cm 的绿色部分,留下 3~8 cm 的棕色部分,将其装入密封袋,运回实验室冷冻保存;(2)现场测量取样地附近地下水位埋深,在每个样品点 30 cm 附近向下挖一小洞,等待 2~3 h,待地下水位平衡稳定后用卷尺测量洞内水位距表面的深度,将其设为地下水位埋深(WTD);(3)取相邻表层泥炭藓,用力挤压释出其水分,采用 PHBJ-260 型便携式 pH 计量仪测量释出水的 pH 值。

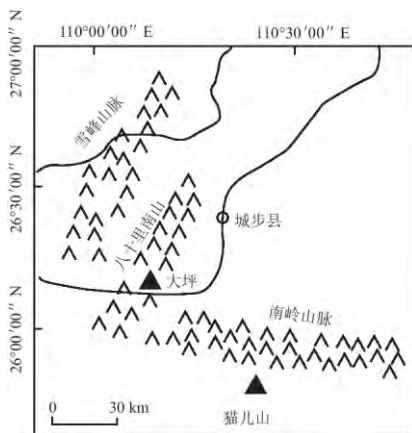


图 1 湖南省大坪泥炭地的具体地理位置

Figure 1 The geographical location of Daping peatland in Hunan Province

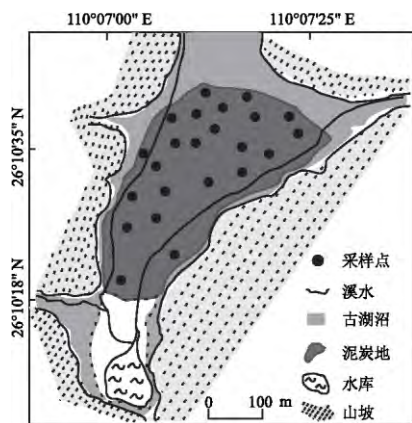


图 2 湖南省大坪泥炭地的地貌草图及表层泥炭点采样位置  
Figure 2 The geomorphological sketch and peatland sampling sites of Daping peatland in Hunan Province

## 1.2 有壳变形虫提取与鉴定

有壳变形虫样品提取方法<sup>[27]</sup>具体为:(1)每个表层样品取 3~4 cm<sup>3</sup>,将其置于烧杯中,加入 1 片石松孢子作为外源计数标记,蒸馏水浸泡并煮沸

10 min,同时用玻璃棒轻轻搅拌;(2)溶液分别过 300 μm 和 15 μm 孔径标准筛,分别去除粗粒杂质和细粒杂质,保留 15~300 μm 部分;(3)将样品移至离心管中,在离心机上以 2 000 r/min 转速离心 4 min;(4)去除离心管中上清液部分,在管内加入 2 滴体积分数为 5% 的番红精,将染色后的样品移至小瓶后加入甘油数滴保存。制作好的玻片在 200x 或者 400x 显微镜下鉴定和计数。每个样品至少统计 120 个壳体,每种壳体的丰度用其占样品总壳体数的百分比表示。有壳变形虫的种类鉴定和命名主要依据文献[7]和文献[28]。样品的前处理与鉴定工作在美国里海大学地球与环境科学系古生态实验室完成。

## 1.3 数据处理

首先,建立环境变量数据库和有壳变形虫物种数据库。环境变量数据库主要包括 2 个环境因子(地下水位埋深和 pH),物种数据库为样品内各有壳变形虫物种的组成变化。本文的物种数据为物种的相对丰度。

其次,使用排序分析法研究有壳变形虫的群落结构与环境因子之间的关系,确定本研究区影响有壳变形虫物种组成变化的关键性环境因子。本文使用非度量多维排序法(Non-metric Multidimensional Scaling,简称 NMDS),该方法基于非线性模型,不假设潜在物种会沿特定环境梯度组分分布,克服了传统线性模型(如主成分分析 PCA(Principal Component Analysis),主坐标分析 PCoA(Principal Co-ordinates Analysis))的缺点,可充分反映生态学资料的非线性结构<sup>[7,29]</sup>。在排序分析之前,首先对数据进行平方根转换,以降低样品中出现次数较少的有壳变形虫种类对排序结果的影响。结合 envfit 函数功能,检验环境因子的显著性。NMDS 排序和 envfit 函数检验在 RStudio 工作空间使用 R“Vegan”程序包完成<sup>[30]</sup>。

最后,在 Rstudio 工作空间中使用 R“Rjoja”程序包,选用相关模型构建有壳变形虫与关键环境因子转换函数的关系。本文选用最为广泛使用的 3 种转换函数模型:典型回归加权平均(Weighted Averaging Classical Deshrinking,WA\_Cla);加权平均偏最小二乘法(Weighted Averaging Partial Least Squares,WAPLS);最大似然法(Maximum Likelihood,ML)。模型模拟的结果采用 Leave-one-out(也称 jack-knifing)进行交

叉验证。同时,根据预测均方根误差(Root Mean Square Error of Prediction, RMSEP)、预测值与实测值相关系数的平方( $R^2$ )评价模型预测性能。RMSEP 越小,  $R^2$  越大, 则模型的预测性能越好<sup>[12]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大坪泥炭地有壳变形虫的种类组成

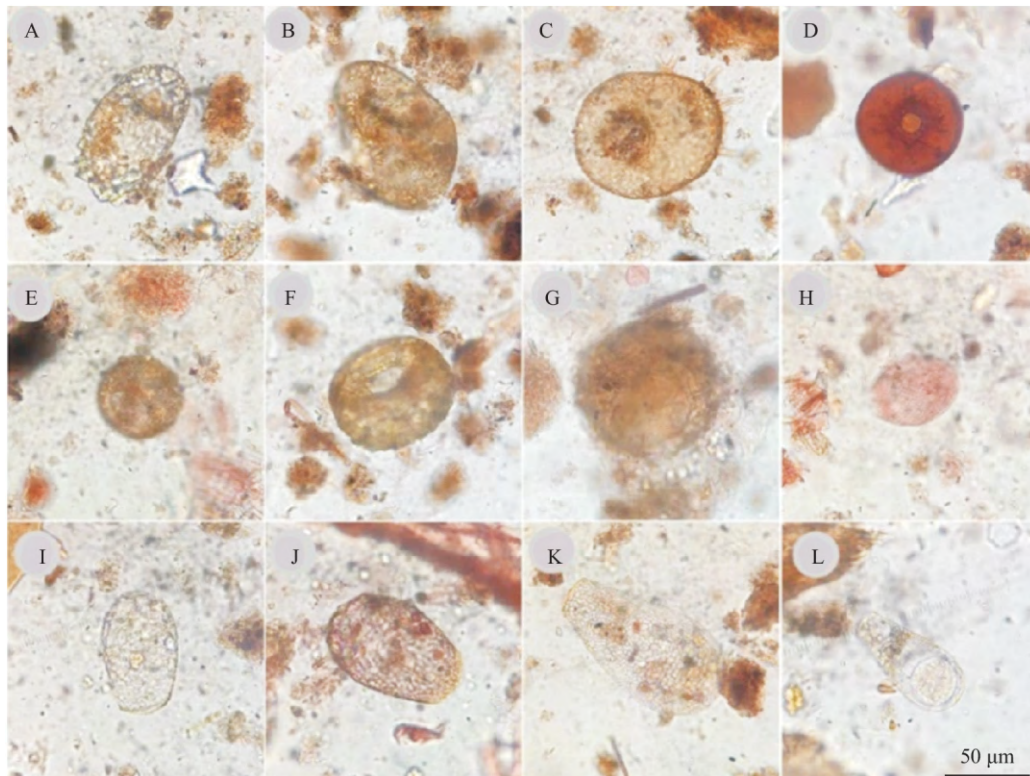
本研究 23 个样品中共记录有壳变形虫 19 种, 壳体总数为 3 675 个; 平均每个样品记录约 10 种, 160 个壳体。有壳变形虫种类及其相对丰度特征见表 1。所有物种均为其他研究<sup>[6-7, 13-14, 16]</sup>中的常见种类(图 3) 其中, 网匣壳虫(*Centropyxis cassis* type)、壳圆壳虫(*Cyclopyxisar celloides* type) 和片口匣壳虫(*Cyclopyxis platystoma* type) 的相对丰度最高, 均大于 20%。而荆棘匣壳虫(*Centropyxis aculeate* type)、无棘匣壳虫(*Centropyxis ecornis* type)、圆口圆壳虫(*Cyclopyxis kahli*)、球形砂壳虫(*Diffflugia globulosa* type)、鳃颌

砂壳虫(*Diffflugia pristis* type)、结节鳞壳虫(*Euglypha tuberculata* type)、顶足法帽虫(*Phryganella acropodia* type)、拟砂壳虫属(*Pseudo diffflugia* spp) 及对称方壳虫(*Quadrullella symmetrica*) 的相对丰度最低, 均小于 1%。从样品出现的记录来看: 碗状表壳虫(*Arcella catinus* type)、网匣壳虫(*Centropyxis cassis* type)、壳圆壳虫(*Cyclopyxisar celloides* type) 和片口匣壳虫(*Cyclopyxis platystoma* type) 的出现频数最高, 在所有 23 个样品中均有记录; 鳃颌砂壳虫(*Diffflugia pristis* type) 和拟砂壳虫属(*Pseudo diffflugia* spp) 的出现频数最低, 只在 4 个样品中有所记录。而在欧洲和北美典型雨养型泥炭沼泽中非常常见的双孔穴虫属 *Amphitrema flavum* 和 *Amphitrema wrightianum* 在本研究中未有记录。值得注意的是, 梨壳虫、对称方壳虫和砂壳虫等矿养型指示种类<sup>[28, 31]</sup> 在此次研究中也出现, 表明大坪泥炭的营养状况可能受矿质水源补给影响, 此区域可能仍处于矿养型阶段或矿养型向雨养型过渡阶段, 而并非典型的雨养型泥炭沼泽。

表 1 大坪泥炭湿地有壳变形虫的种类组成变化及相对丰度特征

Table 1 The variation and relative abundance of testate amoebae taxa in Daping peatland

物种名	壳体数/个	相对丰度/%	样品出现记录/个
碗状表壳虫( <i>Arcella catinus</i> type)	287	8.18	23
苔藓鳞盖虫( <i>Assulina muscorum</i> )	393	10.95	21
半空鳞盖虫( <i>Assulina seminulum</i> )	52	1.55	5
荆棘匣壳虫( <i>Centropyxis aculeate</i> type)	32	0.91	8
网匣壳虫( <i>Centropyxis cassis</i> type)	792	21.64	23
无棘匣壳虫( <i>Centropyxis ecornis</i> type)	17	0.42	5
壳圆壳虫( <i>Cyclopyxisar celloides</i> type)	877	22.88	23
圆口圆壳虫( <i>Cyclopyxis kahli</i> )	30	0.76	9
片口匣壳虫( <i>Cyclopyxis platystoma</i> type)	729	20.39	23
球形砂壳虫( <i>Diffflugia globulosa</i> type)	16	0.39	5
长圆砂壳虫( <i>Diffflugia oblonga</i> type)	54	1.55	9
鳃颌砂壳虫( <i>Diffflugia pristis</i> type)	13	0.41	4
结节鳞壳虫( <i>Euglypha tuberculata</i> type)	24	0.58	6
狭颈宿轮虫( <i>Habrotrocha angusticollis</i> )	133	2.53	17
截口虫属( <i>Heleopera</i> spp)	86	2.45	20
梨壳虫属( <i>Nebela</i> spp)	81	2.36	13
顶足法帽虫( <i>Phryganella acropodia</i> type)	38	0.91	6
拟砂壳虫属( <i>Pseudo diffflugia</i> spp)	13	0.38	4
对称方壳虫( <i>Quadrullella symmetrica</i> )	28	0.75	11



A: 片口匣壳虫 (*Cyclopyxis platystoma* type); B: 网匣壳虫 (*Centropyxis cassis* type); C: 针棘匣壳虫 (*Centropyxis aculeate* type); D: 碗状表壳虫 (*Arcella catinus* type); E: 表圆壳虫 (*Cyclopyxis celloides* type); F: 圆口圆壳虫 (*Cyclopyxis kahli*); G: 球形砂壳虫 (*Diffflugia globulosa* type); H: 苔藓鳞盖虫 (*Assulina muscorum*); I、J: 截口虫属 (*Heleopera* spp); K: 梨壳虫属 (*Nebela* spp); L: 对称方壳虫 (*Quadrullella symmetrica*)

图 3 大坪泥炭湿地相关有壳变形虫的显微镜照片

Figure 3 Light microscopy pictures of some testate amoebae taxa from Daping peatland

与已有文献<sup>[6, 15-16, 20-21, 23]</sup>相比,大坪泥炭表层有壳变形虫所记录的种类相对较少,主要原因为:(1) 采样面积及研究的样本量较少、所覆盖的范围较小。此次研究只选择了 1 个泥炭地作为取样区域,使用 23 个样本点进行鉴定,相较于国内外其他学者多年的积累,还有很大的差距。(2) 本研究采用了文献[28]、[7]的相对保守的种类鉴定方案,有壳变形虫壳体只有在光学显微镜下清晰可见而且具有显著的鉴定特征时才被采用,且对很多在镜下壳体形态特征相似、生态指示意义相近的有壳变形虫进行了合并,并将其命名为“type”。比如将 *Diffflugia oblonga*、*Diffflugia bacillifera*、*Diffflugia rubescens* 合并为 *Diffflugia oblonga* type 将 *Euglypha strigosa* 和 *Euglypha cristata* 合并为 *Euglypha strigosa* type。这是一种相对统一的鉴定标准,可使不同的研究区域所获得的数据具有类比性,因而也可使得各区域所构建的转换函数具有更大范围的适用性。这种方案虽然会导致在镜下观测记录到的有壳变形虫物种数量变少,但对于古环境因子的定量重建工作来说,这

样的合并在国际上还是被广泛使用的<sup>[16, 32]</sup>。有壳变形虫属于微体生物,易随水、空气、风以及候鸟迁徙等扩散,尽管有少数种类的分布有一定的地理局限性<sup>[16]</sup>,但大部分种类属世界广布种,不受地理屏障影响。大坪泥炭地所记录的有壳变形虫种类都是世界范围内研究中比较常见的物种,这些生物种类的环境指示意义也比较类似,说明使用有壳变形虫作为生物指标研究大坪泥炭地水文环境变化是可行的。

## 2.2 大坪泥炭地有壳变形虫的主要环境影响因子

明确生物与环境因子之间关系,确定影响本研究区生物物种组成变化的关键性环境因子是构建转换函数的基本前提。有研究<sup>[6-7]</sup>表明:地下水位埋深、泥炭湿度和 pH 是影响泥炭地有壳变形虫的群落结构及其丰度的最主要环境因子,而地下水位埋深是唯一在所有有壳变形虫转换函数研究中被选择为目标变量的环境因子,应用有壳变形虫进行古水位重建工作也是该研究最深入的领域<sup>[14, 16, 32]</sup>。由于表层泥炭湿度易受短期天气条件影响,将其作为指示泥炭湿

润程度的指标,稳定性远不如地下水位埋深<sup>[18]</sup>。pH 则被认为是影响有壳变形虫种类仅次于泥炭湿润程度的另外一个重要环境因子,在某些地区还可能是最主要的影响因子<sup>[7,18,33]</sup>。本文对大坪泥炭地有壳变形虫的物种和环境变量做 NMDS 分析并结合 envfit 函数进行显著性检验,结果(图 4)显示:第一排序轴(NMDS1)和第二排序轴(NMDS2)分别解释了 57%和 15%的物种-环境关系信息。各环境变量与排序轴的关系(表 2)显示:地下水位埋深与第二排序轴显著正相关( $R^2 = 0.377, P < 0.01$ ),表明第二排序轴主要反映水位特征;pH 与第一排序轴呈弱正相关( $R^2 = 0.114, P < 0.05$ ),表明第一排序轴可能与 pH 相关,但相关性较弱。地下水位埋深所代表箭头的长度远远大于 pH 所代表箭头的长度,说明本研究区域地下水位埋深对有壳变形虫群落结构的影响比 pH 对物种组成的影响大(图 4)。这一结果与世界绝大部分地区开展的相关研究结果<sup>[7,16]</sup>一致。

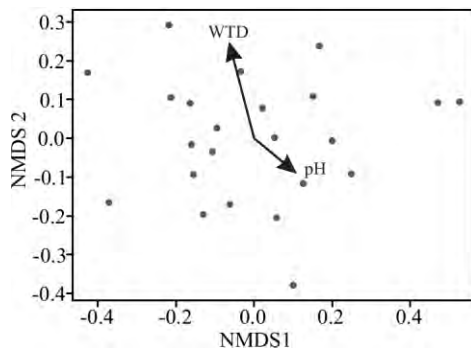


图 4 样品点和环境变量的非度量多维度(NMDS)排序分析结果

Figure 4 The results of NMDS ordination analysis of samples and environmental variables

表 2 经 envfit 函数检验的 NMDS 排序分析统计结果

Table 2 The ordination statistic from NMDS and envfit functions

环境变量	第一排序轴 (NMDS1)	第二排序轴 (NMDS2)	$R^2$	显著性
地下水位埋深	-0.249	0.968	0.377	$P < 0.01$
pH	0.767	-0.641	0.114	$P < 0.05$

注:  $P$  值显著性检验基于 999 次置换检验。

### 2.3 构建大坪泥炭地有壳变形虫-环境因子转换函数

通过现代生态学研究构建生物-环境变量转换

函数模型,是进行过去环境变化定量研究的目标,也是未来环境变化预测的前提。理论上,在一定研究区域内,只要生物分布反映某个环境梯度,并且通过了显著性检验,就可以进行生物与该环境因子的转换函数推导<sup>[18,34]</sup>。大坪泥炭地的地下水位埋深对有壳变形虫种类组成变化的贡献大,可以初步尝试利用相关模型进行有壳变形虫-地下水位埋深转换函数的构建。大坪泥炭地实测地下水位埋深采用瞬时测量值,并非年平均水位值。虽然地下水位埋深可能易受当地季节性水位变化以及极端天气条件影响(台风、暴雨或炎热干旱等),一些学者也曾质疑采用瞬时测量值是否可真实反映有壳变形虫与当地实际水文变化的关系<sup>[7,35]</sup>,但相关研究<sup>[7,17]</sup>通过尝试使用年平均水位值与瞬时测量值分别建立转换函数模型进行对比,发现模拟预测效果基本相似,并无太大差异,认为采样方案是按实时水位环境梯度设置,采样时间基本在同一时间段内完成,因此实验结果是可信的。出于经济、效率和实用性的考虑,目前世界上绝大部分地区的研究都还是采用瞬时测量地下水位埋深<sup>[6,16]</sup>。

本研究利用 3 种不同模型建立有壳变形虫-地下水位埋深转换函数。经 Leave-one-out 交叉检验可以发现:典型回归加权平均模拟的误差最大( $RMSEP = 3.47$ ),但其回归系数也最大( $Jack\_R^2 = 0.22$ ) (图 5);加权平均偏最小二乘法的模拟误差最小( $RMSEP = 2.66$ ),回归系数( $Jack\_R^2 = 0.18$ )居于其他 2 个转换函数之间(图 6);而最大似然法的模拟误差居于其他 2 个转换函数之间( $RMSEP = 3.35$ ),其回归系数最小( $Jack\_R^2 = 0.15$ ) (图 7)。总体上,3 种转换函数模型的性能虽有差别,但差异不大。大坪现代有壳变形虫-水位转换函数模型所预测的地下水位埋深与实测地下水位埋深虽然呈一定的相关性,但与国内外其他研究结果<sup>[13-24]</sup>相比,两者相关性比较小,这可能与本研究仅限于 1 个研究区且样本量不足有关,也说明转换函数模型优化的空间还很大。

此外,与瑞典<sup>[36]</sup>、欧洲<sup>[6]</sup>、泛欧大陆<sup>[16]</sup>、南美巴塔哥尼亚<sup>[37]</sup>、北美<sup>[7]</sup>和英国<sup>[17]</sup>等研究区域的比较结果(图 8)显示:大坪样品采样量较少,采样地下水位埋深的环境梯度较窄,这可能也是导致本研究转换函数模型的  $RMSEP$  结果显示较小的一个重要原因。

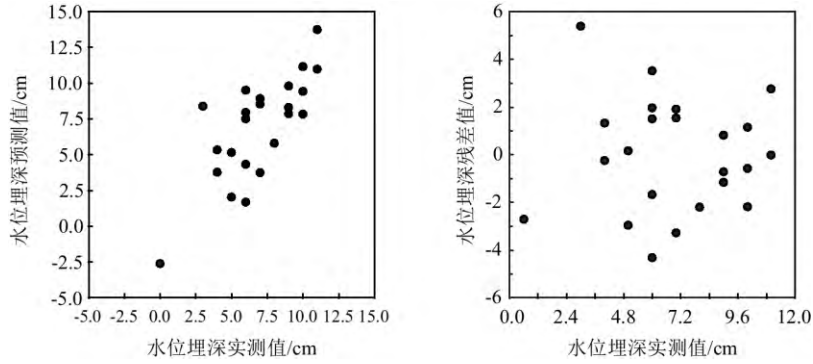


图 5 典型回归加权平均转换函数模型

Figure 5 The transfer function model of weighted averaging classical deshrinking

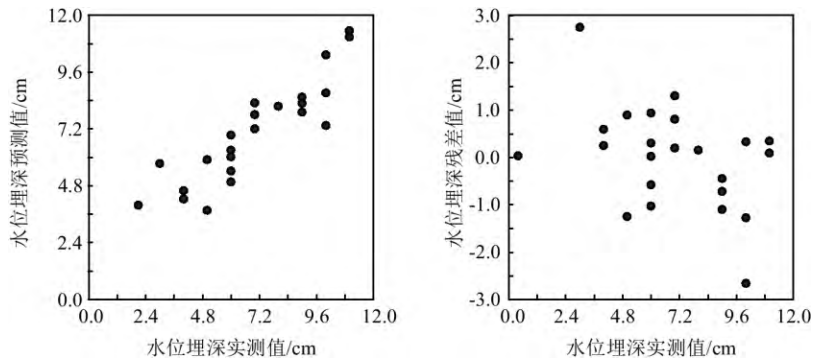


图 6 加权平均偏最小二乘法转换函数模型

Figure 6 The transfer function model of weighted averaging Partial Least Squares

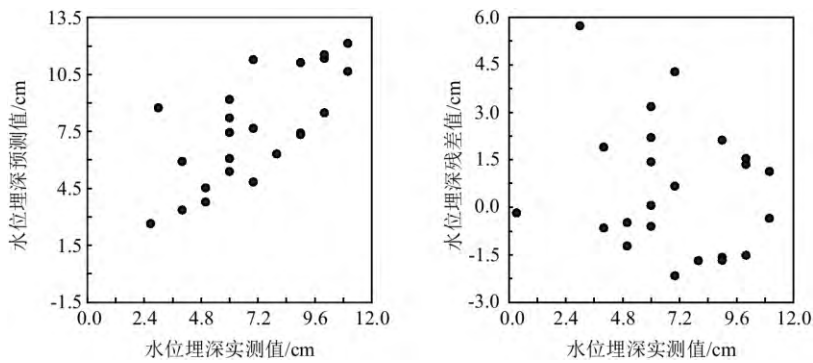


图 7 最大似然法转换函数模型

Figure 7 The transfer function model of maximum likelihood

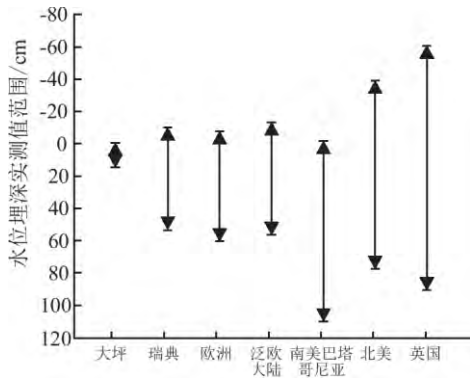


图 8 大坪泥炭地与世界其他泥炭地的地下水位埋深实测值范围比较

Figure 8 Comparison of the ranges of observed WTD between Daping peatland and worldwide peatland research results

### 3 结论与展望

本文对位于南岭西部亚高山泥炭湿地的湖南大坪泥炭地现代有壳变形虫的种类组成及环境变量作了初步调查研究, 研究结果显示: 23 个样品中共记录到有壳变形虫 19 种, 且均为国内外常见的研究种类. NMDS 排序分析法结果表明: 地下水位埋深和 pH 对本研究区域有壳变形虫群落结构变化均有影响. 据此, 初步构建了该地区现代泥炭湿地有壳变形虫-地下水位埋深转换函数关系. 但由于本次采样面积及研究的样本量较少、所覆盖的范围较小、水位环境梯度较窄, 函数模型的反演精度还

比较低,暂时还不具备区域数据模型的代表性。此次工作可为将来系统研究华南亚热带地区高山泥炭湿地有壳变形虫的群落组成变化及其影响因子、开展定量重建泥炭湿地古水文变化工作和研究碳积累机制变化提供第一手资料。

目前,我国华南地区泥炭沼泽地大多分布在亚高山地区,对这些区域的现代有壳变形虫与环境参数间的相互关系研究还非常缺乏,泥炭地的地下水位测量历史数据也十分稀少,后续研究需要加强以下方面的工作:(1)在该区域寻找更多的泥炭地,扩大采样面积和增加样本量鉴定,加强现代有壳变形虫的生物地理学和生态学研究,为开展沉积物的古环境定量重建工作提供更多的基础数据;(2)泥炭地的水位变化与气候环境之间的关系很复杂,二者并非简单的线性关系,需要结合更多指示泥炭地湿润程度的常用指标,比如植物大化石、孢粉和腐殖化度等,综合应用于古水文环境的重建,以实现指标间相互验证、提高转换函数模型的可信度;(3)增加对研究区的土壤元素、矿物组成和雨水化学元素等的系统实验工作;(4)加强实时监测泥炭地的地下水位埋深变化的工作,可借鉴欧洲近年来开展的相关工作<sup>[36]</sup>,包括实时监测地下水位埋深的日变化、月变化、季度变化和年际变化等,对有壳变形虫-地下水位埋深转换函数模型实行精确化验证,以达到更加准确的定量重建效果。

#### 参考文献:

- [1] ROULET N T, LAFLEUR P M, RICHARD P J, et al. Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland [J]. *Global Change Biology* 2007, 13(2): 397-411.
- [2] MCGUIRE A D, ANDERSON L G, CHRISTENSEN T R, et al. Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change [J]. *Ecological Monographs* 2009, 79(4): 523-555.
- [3] DOMMAIN R, COUWENBERG J, GLASER P H, et al. Carbon storage and release in Indonesian peatlands since the last deglaciation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 97: 1-32.
- [4] BUNBURY J, FINKELSTEIN S A, BOLLMANN J, et al. Holocene hydro-climatic change and effects on carbon accumulation inferred from a peat bog in the Attawapiskat River watershed, Hudson Bay Lowlands, Canada [J]. *Quaternary Research* 2012, 78(2): 275-284.
- [5] KLEIN E S, BOOTH R K, YU Z C, et al. Hydrology-mediated differential response of carbon accumulation to late Holocene climate change at two peatlands in Southcentral Alaska [J]. *Quaternary Science Reviews* 2013, 64(2): 61-75.
- [6] CHARMAN D J, BLUNDELL A, ACCROTELM Members. A new European testate amoebae transfer function for palaeohydrological reconstruction on ombrotrophic peatlands [J]. *Journal of Quaternary Science* 2007, 22(3): 209-221.
- [7] BOOTH R K. Testate amoebae as proxies for mean annual water-table depth in Sphagnum-dominated peatlands of North America [J]. *Journal of Quaternary Science* 2008, 23(1): 43-57.
- [8] 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 [J]. *地理科学* 2013, 33(8): 1022-1028.  
LI H K, LI W W, PU Y B, et al. Building transfer functions between testate amoeba and environmental variables with 'rioja' package [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(8): 1022-1028.
- [9] CHARMAN D J. Biostratigraphic and palaeoenvironmental applications of testate amoebae [J]. *Quaternary Science Reviews* 2001, 20(16): 1753-1764.
- [10] MITCHELL E A D, CHARMAN D J, WARNER B G. Testate amoebae analysis in ecological and paleoecological studies of wetlands: past, present and future [J]. *Biodiversity and Conservation* 2008, 17(9): 2115-2137.
- [11] WARNER 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(3): 270-279.
- [12] 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 [D]. 长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2015.  
SONG L H. Biodiversity of testate amoebae and their indicator role in palaeohydrological reconstruction in peatland in Sanjiang Plain [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences 2015.
- [13] 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]. *The Holocene* 2003, 13(1): 61-72.
- [14] SWINDLES G T, CHARMAN D J, ROE H M, et al. Environmental controls on peatland testate amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in the North of Ireland: implications for Holocene palaeoclimate studies [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2009, 42(1): 123-140.
- [15] WOODLAND W A, CHARMAN D J, SIMS P C. Quantitative estimates of water tables and soil moisture in Holocene peatlands from testate amoebae [J]. *The Holocene* 1998, 8(3): 261-273.
- [16] AMESBURY M J, SWINDLES G T, BOBROV A A, et al.



- Development of a new pan-European testate amoeba transfer function for reconstructing peatland palaeohydrology [J]. *Quaternary Science Reviews* 2016 ,152: 132–151.
- [17] TURNER T E ,SWINDLES G T ,CHARMAN D J ,et al. Comparing regional and supra-regional transfer functions for palaeohydrological reconstruction from Holocene peatlands [J]. *Palaeogeography ,Palaeoclimatology ,Palaeoecology* 2013 ,369( 1) : 395–408.
- [18] 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 [J]. *第四纪研究* ,2009 ,29( 4) : 817–824.
- LI H K ,BO Z J ,WANG S Z ,et al. Environmental implications of the modern testate amoebae in the peatlands in Changbai Mountains [J]. *Quaternary Sciences* ,2009 ,29( 4) : 817–824.
- [19] QIN Y M ,XIE S C ,SMITH H G ,et al. Diversity ,distribution and biogeography of testate amoebae in China: implications for ecological studies in Asia [J]. *European Journal of Protistology* 2011 ,47( 1) : 1–9.
- [20] QIN Y M ,PAYNE R J ,GU Y ,et al. Ecology of testate amoebae in Dajihu peatland of Shennongjia Mountains , China ,in relation to hydrology [J]. *Frontiers of Earth Science* 2012 ,6( 1) : 57–65.
- [21] QIN Y M ,MITCHELL E A D ,LAMENTOWICZ M ,et al. Ecology of testate amoebae in peatlands of central China and development of a transfer function for paleohydrological reconstruction [J]. *Journal of Paleolimnology* , 2013 ,50( 3) : 319–330.
- [22] SONG L H ,LI H K ,WANG K H ,et al. Ecology of testate amoebae and their potential use as palaeohydrologic indicators from peatland in Sanjiang Plain ,Northeast China [J]. *Frontiers of Earth Science* 2014 ,8( 4) : 564–572.
- [23] LI H K ,WANG S Z ,ZHAO H Y ,et al. A testate amoebae transfer function from Sphagnum-dominated peatlands in the Lesser Khingan Mountains ,NE China [J]. *Journal of Paleolimnology* 2015 ,54( 2/3) : 189–203.
- [24] SONG L H ,LI H K ,WANG K H ,et al. Seasonal dynamics in the community structure and trophic structure of testate amoebae inhabiting the Sanjiang peatlands ,Northeast China [J]. *European Journal of Protistology* ,2018 , 63: 51–61.
- [25] ZHONG W ,WEI Z Q ,SHANG S T ,et al. A 15 400-year record of environmental magnetic variations in sub-alpine lake sediments from the western Nanling Mountains in South China: implications for palaeoenvironmental changes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences* 2018 ,154: 82–92.
- [26] ZHONG W ,CAO J Y ,XUE J B ,et al. Last deglacial and Holocene vegetation evolution and climate variability in the subalpine western Nanling Mountains in South China [J]. *The Holocene* 2015 ,25( 8) : 1330–1340.
- [27] BOOTH R K ,LAMENTOWICZ M ,CHARMAN D J. Preparation and analysis of testate amoebae in peatland paleoenvironmental studies [J]. *Mires and Peat* ,2010 ,7( 2) : 1–7.
- [28] CHARMAN D J ,HENDON D ,WOODLAND W A. The identification of testate amoebae ( Protozoa: Rhizopoda) in peats [M]. London: Quaternary Research Association , 2000.
- [29] CLARKE K R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure [J]. *Australian Journal of Ecology* ,1993 ,18( 1) : 117–143.
- [30] OKSANEN J. Vegan: an introduction to ordination [M/OL]//R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna ,Austria [s. n. ] ,2017: 1–12( 2017–12–01) [2018–10–10]. <https://cran.r-project.org/web/packages/vegan/vignettes/intro-vegan.pdf>.
- [31] 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 [J]. *湿地科学* 2010 ,8( 3) : 249–255.
- LI H K ,WANG S Z ,BO Z J ,et al. The testate amoebae in sphagnum peatlands in Changbai Mountains [J]. *Wetland Science* 2010 ,8( 3) : 249–255.
- [32] MITCHELL E A D ,LAMENTOWICZ M ,PAYNE R J ,et al. Effect of taxonomic resolution on ecological and palaeoecological inference—a test using testate amoeba water table depth transfer functions [J]. *Quaternary Science Reviews* 2014 ,91( 3) : 62–69.
- [33] LIU B ,BOOTH R K ,ESCOBAR J ,et al. Ecology and palaeoenvironmental application of testate amoebae in peatlands of the high-elevation Colombian páramo [J]. *Quaternary Research* 2019 ,92: 1–119.
- [34] BIRKS H J B. Quantitative palaeoenvironmental reconstruction [M]. London: Quaternary Research Association ,1995.
- [35] BOBROV A A ,CHARMAN D J ,WARNER B G. Ecology of testate amoebae ( Protozoa: Rhizopoda) on peatlands in western Russia with special attention to niche separation in closely related taxa [J]. *Protist* ,1999 ,150( 2) : 125–136.
- [36] SWINDLES G T ,HOLDEN J ,RABY C L ,et al. Testing peatland water-table depth transfer functions using high-resolution hydrological monitoring data [J]. *Quaternary Science Reviews* 2015 ,120: 107–117.
- [37] VAN BELLEN S ,MAUQUOY D ,PAYNE R J ,et al. Testate amoebae as a proxy for reconstructing Holocene water table dynamics in southern Patagonian peat bogs [J]. *Journal of Quaternary Science* 2014 ,29( 5) : 463–474.

【责任编辑: 庄晓琼 责任校对: 庄晓琼 英文审校: 程杰】