

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.599



# 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

秦养民<sup>1,2,3</sup>, 巩 静<sup>1</sup>, 顾延生<sup>2,3</sup>, 薛建涛<sup>1,2</sup>, 向成玉<sup>4</sup>, 吴未华<sup>4</sup>, 葛继稳<sup>2,3</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学环境学院, 湖北省湿地生态与环境恢复重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 湖北省二仙岩湿地自然保护区管理局, 湖北恩施 445000

**摘要:** 开展湿地的生态监测研究是理解当今气候变化背景下湿地的生态响应、动态演化和生态服务功能变化的有效途径,也是湿地保护、科学管理、合理规划和生态恢复的内在需求。以我国鄂西地区广泛分布的典型亚高山泥炭湿地为研究地点,以在湿地中大量生活且对环境变化敏感的环境指示生物——有壳变形虫为研究对象,采用了一种较新的泥炭湿地水位长期定点监测方法——“PVC印迹法”监测湿地水位的长期变化,调查了有壳变形虫的生物多样性、群落组合特征及其与水位等主要环境因子的响应关系,共记录到有壳变形虫 27 种和类群(type),隶属 14 个属。对有壳变形虫的群落组成与环境因子的关系排序分析显示,泥炭湿地的水位是有壳变形虫群落组成的主控环境因子,构建了有壳变形虫属种与水位的转换函数,该函数具有较好的预测和推导能力( $R^2=0.62$ ),为该地区泥炭湿地的古水位重建提供了现代过程的数据支持。

**关键词:** 有壳变形虫;泥炭地;监测;水位;转换函数;鄂西。

中图分类号: P641.6

文章编号: 1000-2383(2018)11-4036-10

收稿日期: 2017-05-08

## Ecological Monitoring and Environmental Significance of Testate Amoebae in Subalpine Peatlands in West Hubei Province, China

Qin Yangmin<sup>1,2,3</sup>, Gong Jing<sup>1</sup>, Gu Yansheng<sup>2,3</sup>, Xue Jiantao<sup>1,2</sup>, Xiang Chenyu<sup>4</sup>, Wu Weihua<sup>4</sup>, Ge Jiwen<sup>2,3</sup>

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution and Ecological Restoration, School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Administration of Erxianyan Wetland Reserve of Hubei Province, Enshi 445000, China

**Abstract:** Ecological monitoring is a key way to understand the processes and dynamics of the response, evolution and function of peatlands in the changing climate, and an internal need for protection, management and ecological restoration of wetlands ecosystem. Testate amoebae are a group of unicellular protists widely distributed in nearly all kinds of habitats, especially in Sphagnum peatlands, which have been widely used as environmental indicators for paleoecological change. PVC (discoloration of polyvinyl chloride) tape was used to monitoring the water level in peatland. Here, investigated the diversity and abundance of testate amoebae in the subalpine peatlands of West Hubei Province were investigated. A total of 27 species belonging to 14 genera were identified. The ordination by Redundancy analysis (RDA) implies that the moisture /hydrological conditions (indicated by depth to wa-

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.41502167,41330103,41572153)。

**作者简介:** 秦养民(1982-),男,博士,副教授,主要从事全球变化与生态响应、生态地理学的教学和研究工作。ORCID: 0000-0002-4827-3388。

E-mail: qinyangmin2005@163.com

**引用格式:** 秦养民,巩静,顾延生,等,2018.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,43(11): 4036-4045.

ter table, DWT) are the controlling factors of the testate amoeba community composition. A testate amoebae-based hydrological transfer function is developed, which can be used for the Holocene hydrological reconstruction in peatlands of the region.

**Key words:** testate amoebae; peatland; monitoring; depth to water table; transfer function; West Hubei Province.

## 0 引言

湿地生态系统具有涵养水源、生物多样性保护和生态安全等多种生态服务功能,为人类提供了维持生存发展的多种产品、环境和服务(Joosten and Clarke, 2002).然而,在气候变化和人类活动的双重作用下,一些地区的湿地面临着萎缩和退化的压力.开展湿地的生态监测研究不但可以为理解当今环境变化背景下湿地的响应规律提供数据资料,还是湿地保护、科学管理、合理规划和生态恢复的内在需求(安树青,2003;吕宪国,2008;Swindles *et al.*, 2016).在湿地生态监测研究中,除了传统的气象、水文、水质、植被、遥感、藻类、水生生物等手段和指标外,微生物已迅速发展成为一种生态和环境监测的有效工具,在泥炭湿地中大量生活的有壳变形虫便是其中重要的一类环境指示生物(顾延生等,2013;谢树成等,2013;向兴等,2014;Chen *et al.*, 2016;黄咸雨等,2017).

有壳变形虫(testate amoebae)是一类多起源的单细胞真核生物,基于形态学特征的传统分类学将有壳变形虫划分为原生生物界(Protista)、肉鞭门(Sarcomastigophora)、根足总纲(Rhizopoda),再根据其伪足的形态,将其划分为叶足纲(Lobosea)、丝足纲(Filosea)、网粒纲(Granuloreticulosea)(沈韞芬等,1990).最新的分子系统学研究方法将有壳变形虫划分为表壳目(Arcellinida)和鳞壳目(Euglyphida)(Lara *et al.*, 2008; Kosakyan *et al.*, 2016).有壳变形虫的壳体一般有1~2个开口,壳体内部包被一个细胞,该细胞可做变形运动,细胞突起形成伪足伸出壳口外运动和捕食(Meisterfeld, 2002).有壳变形虫的大小一般在20~250  $\mu\text{m}$ 之间,也有的个体较小,为5~10  $\mu\text{m}$ .有壳变形虫大多分布于淡水潮湿环境(如湖泊和泥炭湿地、土壤、农田等)、极端环境和一些滨海湿地中(秦养民等,2008;Mitchell *et al.*, 2008; Qin *et al.*, 2011; Barnett *et al.*, 2017).

有壳变形虫在泥炭湿地生态系统中是一类重要的环境监测工具,它们的数量巨大、生态幅窄、生命周期短,对环境变化敏感.有壳变形虫的壳体是由自体分泌的粘性有机物胶结周围矿物颗粒或硅藻等组成,具有不易被破坏和溶蚀等特点,因此在泥炭湿地

的酸性环境中,大多数含有钙质壳体的环境指示生物很难存活或保存下来,而有壳变形虫的壳体却能够在沉积物中保存下来,这些特点使得有壳变形虫在湿地的生态监测和古气候重建研究中得到广泛应用,成为湿地古环境重建信息的重要载体(Charman *et al.*, 2000; Mitchell *et al.*, 2008; Qin *et al.*, 2011).通过开展泥炭湿地的现代生态调查,建立有壳变形虫的属种与水位的转换函数模型,结合湿地钻孔沉积物中的有壳变形虫化石遗存和年代学资料,便可以重建湿地的古水位变化,该方法在全球的泥炭湿地生态监测和古气候重建研究中已得到了广泛应用,近年来陆续构建了一些地区性、区域性和较大空间尺度的有壳变形虫和湿地水位的转换函数(Mitchell *et al.*, 1999; Booth, 2001; Markel *et al.*, 2010; Payne *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2013; Swindles *et al.*, 2014; Lamentowicz *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015; Amesbury *et al.*, 2016; van Bellen *et al.*, 2017).在我国的长江中下游地区(秦养民等, 2013; Qin *et al.*, 2016a)、小兴安岭、三江平原和长白山区陆续开展了有壳变形虫的生态调查工作(李鸿凯等,2009;宋理洪等 2015; Li *et al.*, 2015; Qin *et al.*, 2017),发现并描述了几个有壳变形虫的新物种和中国新纪录种(Qin *et al.*, 2008, 2016b;李鸿凯等,2010;秦养民等,2011; Bobrov *et al.*, 2015),分别建立了2个地区性的有壳变形虫属种与水位的转换函数模型(Qin *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2015),这些工作的开展推动了湿地古水位重建研究的进程.

本文以鄂西广泛发育的亚高山泥炭藓湿地为研究地点,开展了有壳变形虫的生态监测研究,旨在查明有壳变形虫的属种组合对湿地的环境变化,尤其是对水位波动的响应规律,为湿地的动态监测、科学管理和环境变化研究等方面提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于湖北省恩施土家族自治州的七姊妹山和二仙岩亚高山泥炭地,海拔在1450~1600 m之间,气候冷湿,降雨量大,是典型的亚高山

泥炭湿地.除了二仙岩湿地面积较大外,大多数湿地在山间小盆地或坡地的低洼处发育,多呈较小面积的斑块分布(秦养民等,2013).湿地的主要植被为泥炭藓,是湿地的优势植物类型,其次为红穗苔草,此外还分布有皱缩藓和金发藓等常见泥炭沼泽植物,偶见有灯芯草、拂子茅和细叶水芹等草本植物,在湿地的边缘区,少量分布有分株紫萁、虎杖和锐齿槲栎等植物.

## 1.2 湿地的生态监测

湿地的生态监测是在 2010 年 7 月和 2011 年 7 月分两次开展的.2010 年 7 月在二仙岩和七姊妹山共选择了 4 个泥炭湿地作为野外监测地点,按照微地形地貌、植被类型和干湿度等环境梯度选择监测点,共设置了 28 个监测点.每个样点采集泥炭藓植物上部 0~5 cm 用于有壳变形虫分析,同时在采集地挖一个小孔用于测量水位(记为 DWT-2010)、pH、电导率等环境数据.

为了监测湿地水位的长期变化,本研究尝试选择了一种较新的湿地水位监测技术——“PVC 印迹法(Discoloration of polyvinyl chloride tape,简称为 PVC”(Bragazza, 1996; Booth *et al.*, 2005; Amesbury *et al.*, 2013),将贴有 PVC 胶带的木桩插入每个监测点的泥炭沉积物中,经过几个月后,长期处于还原环境中的 PVC 会变色,从而记录下这一段时间水位的位置.PVC 着色的原因目前尚不清楚,一种可能的原因是 PVC 沉浸在湿地的还原条件下,水中的硫化物(如硫化氢)可与 PVC 发生反应而使其变色(Navrátílová and Hájek, 2005; Schnitchen *et al.*, 2006; Markel *et al.*, 2010).在 2011 年 7 月作者返回监测样地,找到了 24 个带有 PVC 的监测点,将湿地中各监测点的木桩取出,测量其上 PVC 记录的水位最高值(记为 DWT-PVC),现场再次测量小孔中的水位(记为 DWT-2011),将 2010 年和 2011 年夏季 2 次监测的水位取平均值(记为 DWT-Average).

## 1.3 样品处理和分析

将野外获取的泥炭藓样品带回实验室后,置于 4 °C 的冰箱中保存.按照泥炭湿地有壳变形虫处理的标准方法,分选出介于 15~300  $\mu\text{m}$  的有壳变形虫.取泥炭藓 3~5 g 放入烧杯,加入 100 mL 蒸馏水,煮沸约 10 min,加热过程中用玻璃棒轻轻搅拌.煮沸后的样品分别过 300  $\mu\text{m}$  和 15  $\mu\text{m}$  孔径的铜筛,将 15  $\mu\text{m}$  筛中残留的部分冲洗入离心管中,加入 2 滴 5% 的番红溶液染色,在 3 000 r/min 转速下离心 2~3 min,弃去上浮液,离心管底部的部分用于有壳

变形虫分析.有壳变形虫的观察、形态鉴定和统计利用 200~400 倍双目显微镜完成,属种鉴定主要依据壳体大小、形状、表面纹饰、壳口的位置以及壳体成分等形态特征,主要参考泥炭地有壳变形虫的分类方面的资料(沈韞芬等,1990; Charman *et al.*, 2000; Meisterfeld, 2002).

## 1.4 数据处理方法

排序是一种研究生物群落与环境因子相关性的常用生态统计学方法,将环境因子按照其对生物群落组成影响的权重进行排序,在排序图中将环境因子用带有箭头的线段表示,线段的长度越长且与排序轴的夹角越小表明其与生物群落的关系越密切.本研究首先将不同时段监测的环境因子(水位)与有壳变形虫群落数据进行了除趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA),获取的梯度长度小于 2 个标准离差单元,因此选用线性的冗余分析(redundancy analysis, RDA)(张恩楼等,2006; Yang *et al.*, 2008),获得的 RDA 排序结果用物种与环境因子的二维图来表示,数据分析之前将物种数据转换成百分含量,冗余排序分析用 Canoco 4.5 软件完成.

转换函数是一种广泛应用于生态学和古环境重建研究的一种定量或半定量的统计学方法(Birks, 1995;董旭辉等,2006;张恩楼等,2006;陈建徽等,2009),能够建立物种与主控环境因子之间的定量响应关系,计算现代物种在环境梯度上的最适值和耐受值,从而为古环境的定量重建提供现代生态学的数据支持(Yang *et al.*, 2008; Lü *et al.*, 2011).常见的转换函数方法有加权平均模型(weighted averaging, WA)、WA-Tol 模型、WA-PLS 模型、WMAT 模型和 ML 模型等,一般用“跟靴法(Boostrapped)”或“刀割法(Jack-knife)”对模型进行检验,最佳转换函数模型的选择主要根据模型预测值与观察值之间有最高的相关系数、最低的平均偏差和最大偏差值,以及最低的推导误差(张恩楼等,2006; Yang *et al.*, 2008; Qin *et al.*, 2013).转换函数的构建用 C2 软件完成.

## 2 结果与讨论

### 2.1 湿地的水位监测

本研究在 2010 年夏季设置了 28 个监测点,2011 年的研究中获得 24 个带有 PVC 胶带的木桩,其余 4 根 PVC 监测点没有找到.将 2010 年、2011

表 1 全球泥炭湿地水位监测的 PVC 记录

Table 1 Global records of water table depth monitoring by PVC tape in different peatlands

采样点位置	设置的 PVC 数量	有效的 PVC 数量	PVC 记录与实测水位的相关系数	研究地区	参考文献
湖北恩施	28	24	0.630	长江中游	本研究
威斯康星	97	71	0.840	美国北部	Booth <i>et al.</i> , 2005
美国中东部	369	369	0.680	美国中东部	Booth <i>et al.</i> , 2008
北卡罗莱纳	42	37	0.550	美国东部	Booth <i>et al.</i> , 2008
阿尔卑斯山	80	48	0.920	意大利北部	Bragazza, 1996
阿拉斯加	128	18	0.830	北美洲西北	Markel <i>et al.</i> , 2010
阿拉斯加	121	0	无数据	北美洲西北	Payne <i>et al.</i> , 2006
苏格兰西南	34	34	0.960	英国中北部	Belyea, 1999
捷克南部	49	49	0.938	捷克南部	Navrátilová and Hájek, 2005
喀尔巴阡山	110	42	0.850	中欧东部	Schnitchen <i>et al.</i> , 2006
加拿大东部	101	62	0.930	加拿大东部	Amesbury <i>et al.</i> , 2013

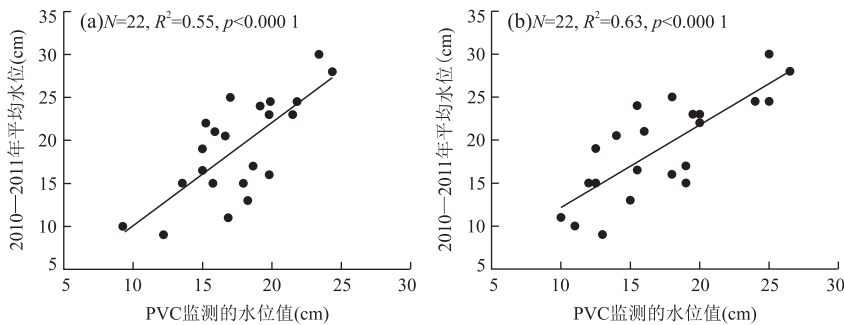


图 1 2010—2011 年监测的平均水位(a)、2011 年监测水位值(b)与 PVC 记录的水位值的线性回归关系

Fig.1 The linear regression of values between averaging water table depth in 2010 and 2011 with PVC tape recorded data (a); the linear regression of water table depth between data in 2011 and PVC records (b)

年监测的水位值及其平均值和 PVC 记录的水位值进行了线性回归分析,发现 2010 年与 2011 年二次监测的水位平均值和 PVC 记录的水位值的相关系数为 0.55,2011 年监测的水位值和 PVC 记录的水位值的相关系数为 0.63,二者相关性较高,说明 PVC 值在一定程度上反映了泥炭地水位的变化情况(表 1,图 1)。

利用 PVC 印迹法监测湿地的水位已在全球开展了许多研究,大多数结果显示 PVC 监测的湿地水位与仪器记录的年均水位之间有较好的相关系数(表 1)。例如在苏格兰西南部、阿尔卑斯山南麓、捷克以及加拿大东部等地的泥炭湿地,实际监测的水位值与 PVC 记录的水位值之间的相关系数都在 0.9 以上,很好地说明了“PVC 印迹法”在记录泥炭湿地水位长期变化的可靠性。在个别泥炭地水位监测中,尽管 PVC 记录的水位值与实时监测的水位值在数值上有一定偏差,但记录的水位波动趋势基本一致。这些研究表明 PVC 法能够较好地记录湿地水位的长期变化,是现代泥炭湿地生态水文监测的一个有效工具。

利用 PVC 印迹法开展现代泥炭湿地的生态监测应当注意一些问题:该方法记录的水位时间长度为一年以内,一般为 11 个月,如果监测时间太短,PVC 可能不会发生颜色变化而不能反映水位的高度,时间太久则可能全部变成黑色而覆盖前期的水位痕迹;PVC 装置在野外容易由于洪灾、冰冻、动物或人类活动等因素被破坏或丢失,例如在阿拉斯加的湿地监测研究中,PVC 装置丢失比较多(Payne *et al.*, 2006; Markel *et al.*, 2010),因此要求装置尽可能的牢固和隐蔽;不同颜色的 PVC 装置在监测中对水位记录也有一定差异,一般认为红色的 PVC 记录效果较好(Booth *et al.*, 2008);此外,PVC 对水位的敏感性在不同湿地类型可能有一定差异,例如在受地下水影响明显的矿养型泥炭湿地与主要受大气降水补给的雨养型泥炭湿地,PVC 监测水位的准确性差异较大(Schnitchen *et al.*, 2006),此外,在水文波动幅度很大的监测点或常年水位较高的湿地中心地带,其记录的水位值可能不准确或无记录(Booth *et al.*, 2008; Markel *et al.*, 2010)。这些特点要求研究者在选择监测点时一定要注意充分体现

空间异质性,同时要注意多设置一些重复组,在安装 PVC 装置时,材料的品牌、规格、颜色和批次等尽可能统一(Markel *et al.*, 2010).如果条件允许,可以安装几个自动水位计用于检验和校正 PVC 记录的水位值.在利用 PVC 监测的水位值与生物属种组合数据构建转换函数时,要考虑各监测点的湿地类型、植被和水文状况等特点,与利用实时监测水位构建的转换函数进行对比,从而更好地服务于湿地的生态监测和古气候重建.

## 2.2 有壳变形虫的物种组成及指示种

对 2010 年采集的 28 个泥炭藓样品进行了处理,经观察、鉴定和统计,共发现有壳变形虫 14 属 27 种或类群(图 2).其中,种类最多的 6 个属分别为:梨壳虫属(*Nebela*)、磷壳虫属(*Euglypha*)、匣壳虫属(*Centropyxis*)、磷盖虫属(*Assulina*)、截口虫属(*Heleopera*)和三足虫属(*Trinema*),这 6 个属占到了全部物种数的 70.3%,其余的 8 个属均属于单属单种(图 2).有壳变形虫的优势种是苔藓磷盖虫(*Assulina muscorum*),其次是半空磷盖虫(*Assulina seminulum*)、暖昧蛹壳虫(*Corythion dubium*)、长圆磷壳虫(*Euglypha rounda type*)和硅针磷壳虫(*Euglypha strigosa type*)等.

全球泥炭湿地开展的大量生态监测研究表明,有壳变形虫对湿地的含水量或水位梯度变化敏感,已经查明其干旱和湿润指示种在不同的泥炭地对湿地的干湿指示方面具有较好的一致性和稳定性(Mitchell *et al.*, 1999; Booth, 2001; Markel *et al.*, 2010; Payne *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2013; Swindles *et al.*, 2014; Lamentowicz *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015; Amesbury *et al.*, 2016; van Bellen *et al.*, 2017).在我国的长江中下游地区(秦养民等,

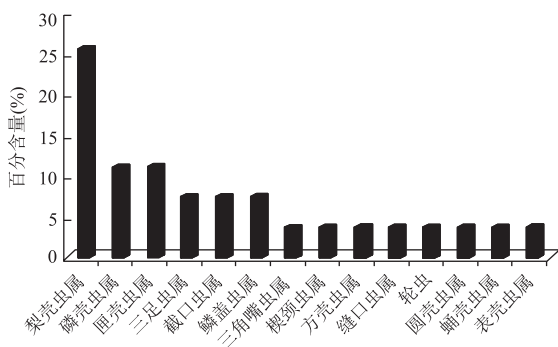


图 2 鄂西泥炭湿地有壳变形虫各属所占比例

Fig.2 Genus proportion of testate amoebae in peatlands near West Hubei Province, China

2013; Qin *et al.*, 2016a),相对喜干的物种有苔藓磷盖虫(*Assulina muscorum*)、半空磷盖虫(*Assulina seminulum*)、暖昧蛹壳虫(*Corythion dubium*);相对喜湿的物种有结节磷壳虫(*Euglypha tuberculata type*)、网匣壳虫(*Centropyxis cassis type*)、片口匣壳虫(*Centropyxis platystoma type*)等,这些都是具有代表性的环境指示种,反映出水位的梯度变化特征.

从有壳变形虫的物种组成来看,*Nebela* 属所占的比例最高,该属的大多数物种一般分布在中等湿润的环境中,主要是在泥炭湿地中水位较高的位置或泥炭藓丘中部或藓丘之间的低洼地带,但是又不像 *Difflugia*, *Centropyxis* 或 *Quadrucella* 属的个体那样分布在水位很高或覆盖地表的水洼、池塘或湖泊环境,也不像 *Trigonopyxis*, *Lineara*, *Corythion* 和 *Plagiopyxis* 属的个体那样生活在水位很深、相对干旱的泥炭藓丘的顶端或土壤环境中.在本研究中,*Nebela* 属的优势地位以及干旱、湿润指示种共存的情况反映了本次生态调查中的样点设置较为全面地反映了湿地的水位(湿度)梯度,有壳变形虫的干湿属种组合也从微观尺度上表明了湿地这一介于水域和陆地之间的生态系统类型的过渡性特征.

## 2.3 有壳变形虫群落组成对水位梯度的响应

对采集的 28 个样点的 27 种有壳变形虫物种数据和监测的环境数据进行了冗余分析(RDA),结果显示,物种与环境关系图中的排序轴 1 和轴 2 共解释了 88.7%的信息,其中第 1 排序轴解释了累积物种—环境变化的 76.7%(表 2),其解释份额明显高于其他 3 个排序轴,因此反映了有壳变形虫群落和环境关系的主要特征.在 RDA 排序图中,2010 年监测的水位值(DWT-2010)与轴 1 的夹角较小,且线段长度较长,表明 2010 年的水位对有壳变形虫的群落分布有明显的影 响(图 3).同时,2011 年水位值(DWT-2011)、2010 年和 2011 年的平均水位(Average DWT)与轴 1 的夹角也较小,说明监测的这些水位梯度与有壳变形虫的群落组成之间的关系

表 2 鄂西高山泥炭湿地有壳变形虫与水位 RDA 分析结果  
Table 2 Redundancy analysis (RDA) results of testate amoeba communities and water table depth from subalpine peatlands in West Hubei, China

排序轴	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.21	0.03	0.03	0.23
物种—环境因子关系	0.84	0.55	0.57	0
累积物种—环境变化百分比(%)	76.7	88.7	100	0

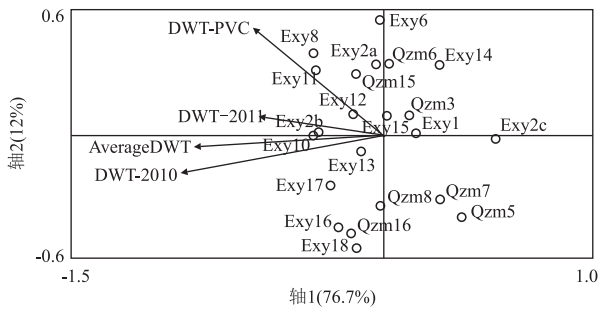


图 3 冗余分析显示鄂西高山泥炭湿地有壳变形虫群落与水位的关系

Fig.3 Redundancy analysis (RDA) showing the relationship between testate amoeba communities and depth to water table in peatlands in West Hubei Province, China

密切.但是,PVC记录的水位值(DWT-PVC)与轴1的夹角较大,线段长度也较短,说明PVC记录的水位与有壳变形虫的群落组成的关系不显著.综合分析RDA排序图,2010年7月监测的水位值与有壳变形虫的群落组成的关系最为密切( $p=0.002$ ),这是因为用于排序分析的有壳变形虫物种数据是2010年7月在监测水位时同时采集的,因而更好地反映了监测时的湿地水位状况.

不同时间段监测的水位值与有壳变形虫群落之间的关系尽管有一定差异,但是都反映出湿地的水位对有壳变形虫群落组成的控制作用.在北美东部泥炭湿地的监测研究也显示,尽管湿地的水位和有壳变形虫的群落组成都表现出一定的季节性变化,但是水位始终是影响有壳变形虫群落组成最重要的环境因子(Warner *et al.*, 2007; Sullivan and Booth, 2011),体现了湿地的水位这一环境因子对有壳变形虫群落组成的重要性.

### 2.4 物种与水位的转换函数模型

鄂西泥炭湿地的研究表明,湿地的水位与有壳变形虫的群落组成的关系十分密切,因此建立了2010年监测的水位(DWT-2010)和PVC记录的水位值与有壳变形虫群落组合数据的转换函数.经多个转换函数模型运算结果的比较,发现偏最小二乘法的加权平均模型(WAPLS)提供了较小的推导误差(RMSEP)和最高的观测与预测值的相关系数(图4).分析发现2010年监测的水位值与有壳变形虫群落的转换函数较好,实际观测值与模型预测值之间的相关系数较高( $R^2=0.62$ ),而PVC记录的水位值与有壳变形虫群落的转换函数并不理想,其观测值和预测值的相关系数较低( $R^2=0.24$ )(图4).由于其他时间段监测的水位值与有壳变形虫群落的转换函数均不理想,因此没有在文中展示.

建立水位-有壳变形虫群落转换函数模型是实现古环境重建的关键,是实现定性化到量化研究的关键途径之一.本研究用2010年监测的水位值和有壳变形虫群落之间构建的转换函数(图4a),与全球其他地区泥炭地水位转换函数相比(Mitchell *et al.*, 1999; Payne *et al.*, 2006; Booth *et al.*, 2008; Markel *et al.*, 2010; Swindles *et al.*, 2014; Lamentowicz *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015; Amesbury *et al.*, 2016),该转换函数的结果比较理想,具有较好的推导能力和预测能力,可以应用于该地区泥炭地的古水位重建.但是,基于PVC法记录的水位值构建的转换函数表现出较低的推导能力(图4b),这可能是因为PVC记录的是监测时间内水位的平均变化情况,而采集的有壳变形虫样品代表了采集时的生物组成,因此二者之间的相关性相对较

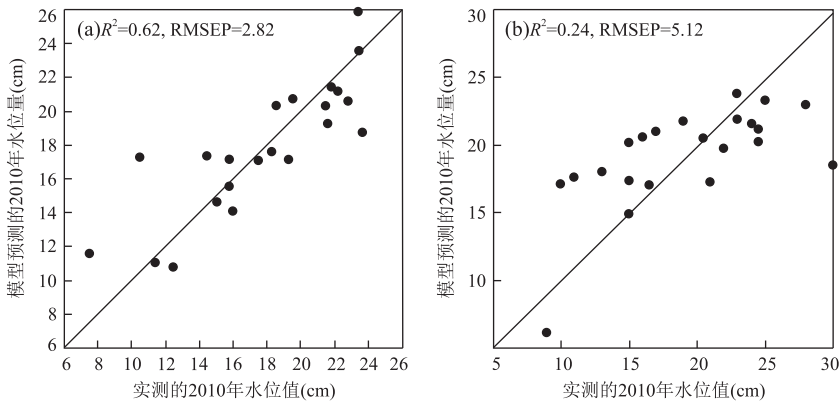


图 4 2010 年监测的水位值(a)以及 PVC 记录的水位值(b)与有壳变形虫群落构建的转换函数模型

Fig.4 Hydrological transfer function development for water table depth in 2010 (a), and PVC records (b) with testate amoeba communities

低.这在其他地区的 PVC 记录的水位转换函数研究中也得到了验证(Schnitche *et al.*, 2006; Booth *et al.*, 2008; Markel *et al.*, 2010; Amesbury *et al.*, 2013),由 PVC 记录的水位值构建的转换函数,其推导能力普遍低于观测时水位的构建转换函数.

### 3 结论和展望

我国长江中游地区是全球生物多样性分布的热点地区(Global, 2000)之一,也是我国生态保护的关键地区(张恩楼等,2006; Zhu *et al.*, 2010).鄂西广泛分布的亚高山泥炭湿地在区域生态安全、水资源供给和生物多样性保护等方面发挥着重要作用,开展这些泥炭湿地的长期监测可以为全球变化和区域响应研究以及应对气候变化的政策制定等方面提供宝贵资料.

本次研究发现的有壳变形虫种类比较丰富,构建的生物属种与水位的转换函数具有较好的推导能力( $R^2=0.62$ ),充分说明有壳变形虫与湿地的水位这一关键环境因子之间具有稳定的相关性,为下一步湿地的古水位重建提供了现代过程的证据.PVC 印迹技术是湿地水位变化的长期监测的一个有效手段,但仍有一定的局限性,需要考虑从提高分辨率和灵敏性等方面完善该监测技术,并与自动水位记录仪配合应用于泥炭湿地水位的长期监测.

致谢:本研究受国家自然科学基金青年基金(41502167)“长江中游泥炭湿地有壳变形虫生态学与全新世古水位重建”项目的支持,感谢张千帆、张泽和王翰林等同学在野外采样和实验室样品处理方面提供的帮助!

### References

Amesbury, M.J., Mallon, G., Charman, D.J., et al., 2013. Statistical Testing of a New Testate Amoeba-Based Transfer Function for Water-Table Depth Reconstruction on Ombrotrophic Peatlands in North-Eastern Canada and Maine, United States. *Journal of Quaternary Science*, 28(1):27–39. <https://doi.org/10.1002/jqs.2584>

Amesbury, M.J., Swindles, G. T., Bobrov, A., et al., 2016. Development of a New Pan-European Testate Amoeba Transfer Function for Reconstructing Peatland Palaeohydrology. *Quaternary Science Reviews*, 152:132–151.

An, S. Q., 2003. Wetland Ecoengineering. Chemical Industry Press, Beijing, 528 (in Chinese).

Barnett, R.L., Newton, T.L., Charman, D.J., et al., 2017. Salt-

Marsh Testate Amoebae as Precise and Widespread Indicators of Sea-Level Change. *Earth-Science Reviews*, 164:193–207.

Belyea, L.R., 1999. A Novel Indicator of Reducing Conditions and Water-Table Depth in Mires. *Functional Ecology*, 13(3):431–434. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00333.x>

Birks, H. J. B., 1995. Quantitative Palaeoenvironmental Reconstructions. In: Maddy, D., Brew, J.S., eds., Statistical Modelling of Quaternary Science Data, Technical Guide 5. Quaternary Research Association, Cambridge, 161–254.

Bobrov, A., Qin, Y.M., Wilkinson, D.M., 2015. Latitudinal Diversity Gradients in Free-Living Microorganisms—Hoogenraadia a Key Genus in Testate Amoebae Biogeography. *Acta Protozoologica*, 54:1–8. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.1999.00333.x>

Booth, R. K., 2001. Ecology of Testate Amoebae (Protozoa) in Two Lake Superior Coastal Wetlands: Implications for Paleocology and Environmental Monitoring. *Wetlands*, 21(4):564–576. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2001\)0212.0.co;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2001)0212.0.co;2)

Booth, R. K., Hotchkiss, S. C., Wilcox, D. A., 2005. Discoloration of Polyvinyl Chloride (PVC) Tape as a Proxy for Water-Table Depth in Peatlands: Validation and Assessment of Seasonal Variability. *Functional Ecology*, 19(6):1040–1047. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01048.x>

Booth, R. K., Sullivan, M. E., Sousa, V. A., 2008. Ecology of Testate Amoebae in a North Carolina Pocosin and Their Potential Use as Environmental and Paleoenvironmental Indicators. *Écoscience*, 15(2):277–289. <https://doi.org/10.2980/15-2-3111>

Bragazza, L., 1996. Pelimitation of the Aerobic Peat Layer in a Sphagnum Mire on the Southern Alps. *Oecologia Montana*, 5(1):41–46.

Charman, D.J., Hendon, D., Woodland, W.A., 2000. The Identification of Testate Amoebae (Protozoa; Rhizopoda) in Peats: Quaternary Research Association, Technical Guide No.9. Quaternary Research Association, London.

Chen, J.H., Chen, F.H., Zhang, E.L., et al., 2009. A 1 000-Year Chironomid-Based Salinity Reconstruction from Varved Sediments of Sugan Lake, Qaidam Basin, Arid Northwest China, and Its Palaeoclimatic Significance. *Chinese Science Bulletin*, 54(20):3127–3135 (in Chinese).

Chen, X., Bu, Z.J., Stevenson, M.A., et al., 2016. Variations in Diatom Communities at Genus and Species Levels in Peatlands (Central China) Linked to Microhabitats and Environmental Factors. *Science of the Total Environ-*

- ment, 568:137—146.
- Dong, X. H., Yang, X. D., Wang, R., 2006. Diatom Indicative Species of Eutrophication of the Lakes in the Middle and Lower Reach Regions of Yangtze River. *China Environmental Science*, 26(5): 570—574 (in Chinese with English abstract).
- Gu, Y. S., Li, K. J., Qin, Y. M., et al., 2013. Impact of Human Activity on the Evolution of the Ecological Environment of Jiangnan Lake Group in the Historical Period, Central China. *Earth Science*, 38 (Suppl. 1): 133—144 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X. Y., Zhang, Z. Q., Wang, H. M., et al., 2017. Overview on Critical Zone Observatory at Dajihu Peatland, Shennongjia. *Earth Science*, 42(6): 1026—1038 (in Chinese with English abstract).
- Joosten, H., Clarke, D., 2002. Wise Use of Mires and Peatlands. International Mire Conversation Group and International Peat Society, Saarijärven Offset Oy, Saarijärvi, Finland, 304.
- Kosakyan, A., Goma, F., Lara, E., et al., 2016. Current and Future Perspectives on the Systematics, Taxonomy and Nomenclature of Testate Amoebae. *European Journal of Protistology*, 55: 105—117. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2016.02.001>
- Lamentowicz, M., Gałka, M., Lamentowicz, L., et al., 2015. Reconstructing Climate Change and Ombrotrophic Bog Development during the Last 4 000 Years in Northern Poland Using Biotic Proxies, Stable Isotopes and Trait-Based Approach. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 418: 261—277.
- Lara, E., Heger, T. J., Ekelund, F., et al., 2008. Ribosomal RNA Genes Challenge the Monophyly of the Hyalospheniidae (Amoebozoa: Arcellinida). *Protist*, 159 (2): 165—176. <https://doi.org/10.1016/j.protis.2007.09.003>
- Li, H. K., Bu, Z. J., Wang, S. Z., et al., 2009. Environmental Implications of the Modern Testate Amoebae in the Peatlands in Changbai Mountains. *Quaternary Sciences*, 29(4): 817—824 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Wang, S. Z., Bu, Z. J., et al., 2010. The Testate Amoebae in Sphagnum Peatlands in Changbai Mountains. *Wetland Science*, 8(3): 249—255 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. K., Wang, S. Z., Zhao, H. Y., et al., 2015. A Testate Amoebae Transfer Function from Sphagnum-Dominated Peatlands in the Lesser Khingan Mountains, NE China. *Journal of Paleolimnology*, 54 (2—3): 189—203. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Lü, H. Y., Wu, N. Q., Liu, K. B., et al., 2011. Modern Pollen Distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the Development of Transfer Functions for Reconstructing Holocene Environmental Changes. *Quaternary Science Reviews*, 30(7/8): 947—966. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.01.008>
- Lü, X. G., 2008. Study on Wetland and Wetland in China. Hebei Science and Technology Press, Shijiazhuang, 922 (in Chinese).
- Markel, E. R., Booth, R. K., Qin, Y. M., 2010. Testate Amoebae and  $\delta^{13}\text{C}$  of Sphagnum as Surface-Moisture Proxies in Alaskan Peatlands. *The Holocene*, 20(3): 463—475. <https://doi.org/10.1177/0959683609354303>
- Meisterfeld, R., 2002. Order Arcellinida Kent, 1 880. Testate Amoebae with Filopodia. In: Lee, J. J., Leedale, G. F., Bradbury, P., eds., An Illustrated Guide to the Protozoa. Allen Press, Lawrence, Kansas, 827—860.
- Mitchell, E. A. D., Buttler, A. J., Warner, B. G., et al., 1999. Ecology of Testate Amoebae (Protozoa: Rhizopoda) in Sphagnum Peatlands in the Jura Mountains, Switzerland and France. *Écoscience*, 6(4): 565—576. <https://doi.org/10.1080/11956860.1999.11682555>
- Mitchell, E. A. D., Charman, D. J., Warner, B. G., 2008. Testate Amoebae Analysis in Ecological and Paleoecological Studies of Wetlands: Past, Present and Future. *Biodiversity and Conservation*, 17(9): 2115—2137. <https://doi.org/10.1007/s10531-007-9221-3>
- Navrátilová, J., Hájek, M., 2005. Recording Relative Water Table Depth Using PVC Tape Discolouration: Advantages and Constraints in Fens. *Applied Vegetation Science*, 8(1): 21—26. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109x.2005.tb00625.x>
- Payne, R. J., Telford, R. J., Blackford, J. J., 2012. Testing Peatland Testate Amoeba Transfer Functions: Appropriate Methods for Clustered Training-Sets. *Holocene*, 22: 819—825. <https://doi.org/10.1177/0959683611430412>
- Payne, R. J., Kishaba, K., Blackford, J. J., et al., 2006. Ecology of Testate Amoebae (Protista) in South-Central Alaska Peatlands: Building Transfer-Function Models for Paleoenvironmental Studies. *The Holocene*, 16: 403—414. <https://doi.org/10.1191/0959683606hl936rp>
- Qin, Y. M., Zhang, W. J., Li, H. K., et al., 2011. Note on the Taxonomy of Testate Amoebae and Their Applications in Ecology and Palaeoecology of China, with Particular Reference to Genus *Argygnia* Vucetich, 1974. *Quaternary Sciences*, 31(6): 1060—1066 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y. M., Payne, R., Yang, X. D., et al., 2016a. Testate Amoebae as Indicators of Water Quality and Contamination in Shallow Lakes of the Middle and Lower Yangtze Plain. *Environmental Earth Sciences*, 75(7): 1—11.



- Qin, Y. M., Man, B. Y., Kosakyan, A., et al., et al., 2016b. *Nebela Jiuhuensis* nov. Sp. (Amoebozoa; Arcellinida; Hyalospheniidae): A New Member of the Nebela Sac-cifera-Equicalceus-Ansata Group Described from Sphagnum Peatlands in South-Central China. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 63(5): 558–566.
- Qin, Y. M., Mitchell, E. A. D., Lamentowicz, M., et al., 2013. Ecology of Testate Amoebae in Peatlands of Central China and Development of a Transfer Function for Palaeohydrological Reconstruction. *Journal of Paleolimnology*, 50(3): 319–330. <https://doi.org/10.1007/s10933-013-9726-6>
- Qin, Y. M., Payne, R., Gu, Y. S., et al., 2017. Short-Term Response of Testate Amoebae to Wildfire. *Applied Soil Ecology*, 116: 64–69.
- Qin, Y. M., Xie, S. C., Smith, H. G., et al., 2011. Diversity, Distribution and Biogeography of Testate Amoebae in China: Implications for Ecological Studies in Asia. *European Journal of Protistology*, 47(1): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2010.09.004>
- Qin, Y. M., Xie, S. C., Swindles, G. T., et al., 2008. *Pentagonia Zhangduensis* nov. spec. (Lobosea, Arcellinida), a New Freshwater Species from China. *European Journal of Protistology*, 44(4): 287–290. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2008.03.001>
- Qin, Y. M., Wang, H. L., Zhang, Q. F., et al., 2013. Response of Testate Amoebae Community to Water Chemistry in Peatlands near the Middle Reach of Yangtze River. *Quaternary Sciences*, 33(1): 26–33 (in Chinese with English abstract).
- Qin, Y. M., Xie, S. C., Gu, Y. S., et al., 2008. An Excellent Indicator for Quaternary Paleoenvironmental Reconstructions—Advances in the Study of Testate Amoebae (Thecamoebians, Arcellacean). *Advances in Earth Science*, 23(8): 803–812 (in Chinese with English abstract).
- Schnitchen, C., Charman, D. J., Magyari, E., et al., 2006. Reconstructing Hydrological Variability from Testate Amoebae Analysis in Carpathian Peatlands. *Journal of Paleolimnology*, 36(1): 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10933-006-0001-y>
- Shen, Y. F., Zhang, Z. S., Gong, X. J., et al., 1990. Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota. China Architecture and Building Press, Beijing, 381–398 (in Chinese).
- Song, L. H., Yan, X. M., Wang, K. H., et al., 2015. Nitrogen Input Altered Testate Amoebae Community in Peatland of Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(2): 563–569 (in Chinese with English abstract).
- Sullivan, M. E., Booth, R. K., 2011. The Potential Influence of Short-Term Environmental Variability on the Composition of Testate Amoeba Communities in Sphagnum Peatlands. *Microbial Ecology*, 62(1): 80–93. <https://doi.org/10.1007/s00248-011-9875-y>
- Swindles, G. T., Morris, P. J., Wheeler, J., et al., 2016. Resilience of Peatland Ecosystem Services over Millennial Timescales: Evidence from a Degraded British Bog. *Journal of Ecology*, 104(3): 621–636. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12565>
- Swindles, G. T., Reczuga, M., Lamentowicz, M., et al., 2014. Ecology of Testate Amoebae in an Amazonian Peatland and Development of a Transfer Function for Palaeohydrological Reconstruction. *Microbial Ecology*, 68(2): 284–298. <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0378-5>
- van Bellen, S., Mauquoy, D., Payne, R. J., et al., 2017. An Alternative Approach to Transfer Functions? Testing the Performance of a Functional Trait-Based Model for Testate Amoebae. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 468: 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.12.005>
- Warner, B. G., Asada, T., Quinn, N. P., 2007. Seasonal Influences on the Ecology of Testate Amoebae (Protozoa) in a Small Sphagnum Peatland in Southern Ontario, Canada. *Microbial Ecology*, 54(1): 91–100. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9176-z>
- Xiang, X., Wang, H. M., Gong, L. F., et al., 2013. Vertical Variations and Associated Ecological Function of Bacterial Communities from *Sphagnum* to Underlying Sediments in Dajiuhu Peatland. *Science China: Earth Sciences*, 44(6): 1244–1252 (in Chinese).
- Xie, S. C., Huang, X. Y., Yang, H., et al., 2013. An Overview on Microbial Proxies for the Reconstruction of Past Global Environmental Change. *Quaternary Sciences*, 33(1): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. D., Anderson, N. J., Dong, X. H., et al., 2008. Surface Sediment Diatom Assemblages and Epilimnetic Total Phosphorus in Large, Shallow Lakes of the Yangtze Floodplain: Their Relationships and Implications for Assessing Long-Term Eutrophication. *Freshwater Biology*, 53(7): 1273–1290. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2007.01921.x>
- Zhang, E. L., Bedford, A., Jones, R., et al., 2006. Quantitative Model Research of Typical Chironomid Subfossils-Total Phosphorus of the Lakes in the Middle and Lower Reach Regions of Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 51(11): 1318–1325 (in Chinese).
- Zhu, C., Ma, C. M., Yu, S. Y., et al., 2010. A Detailed Pollen

Record of Vegetation and Climate Changes in Central China during the Past 16 000 Years. *Boreas*, 39(1): 69—76. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2009.00098.x>

## 附中文参考文献

- 安树青, 2003. 湿地生态工程. 北京: 化学工业出版社, 528.
- 陈建徽, 陈发虎, 张恩楼, 等, 2009. 柴达木盆地苏干湖年纹层岩芯摇蚊记录的去 1 000 年干旱区湿度变化及其意义. *科学通报*, 54(20): 3127—3135.
- 董旭辉, 羊向东, 王荣, 2006. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种. *中国环境科学*, 26(5): 570—574.
- 顾延生, 李颀家, 秦养民, 等, 2013. 历史时期以来人类活动与江汉湖群生态环境演变. *地球科学*, 38(增刊 1): 133—144.
- 黄咸雨, 张志麒, 王红梅, 等, 2017. 神农架大九湖泥炭湿地关键带监测进展. *地球科学*, 42(6): 1026—1038.
- 李鸿凯, 卜兆君, 王升忠, 等, 2009. 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*, 29(4): 817—824.
- 李鸿凯, 王升忠, 卜兆君, 等, 2010. 长白山区典型泥炭藓沼泽的有壳变形虫. *湿地科学*, 8(3): 249—255.
- 吕宪国, 2008. 中国湿地与湿地研究. 石家庄: 河北科学技术出版社, 922.

- 秦养民, 王翰林, 张千帆, 等, 2013. 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*, 33(1): 26—33.
- 秦养民, 谢树成, 顾延生, 等, 2008. 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*, 23(8): 803—812.
- 秦养民, 张文静, 李鸿凯, 等, 2011. 中国有壳变形虫 *Argyria* (Vucetich, 1974) 属的修订及若干环境重建问题探讨. *第四纪研究*, 31(6): 1060—1066.
- 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等, 1990. 微型生物监测新技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 381—398.
- 宋理洪, 闫修民, 王可洪, 等, 2015. 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*, 26(2): 563—569.
- 向兴, 王红梅, 龚林锋, 等, 2014. 细菌群落在神农架大九湖泥炭藓与表层沉积物的垂向变化及其生态意义. *中国科学: 地球科学*, 44(6): 1244—1252.
- 谢树成, 黄咸雨, 杨欢, 等, 2013. 示踪全球环境变化的微生物代用指标. *第四纪研究*, 33(1): 1—19.
- 张恩楼, Bedford, A., Jones, R., 等, 2006. 长江中下游地区典型湖泊摇蚊亚化石—湖水总磷定量模型研究. *科学通报*, 51(11): 1318—1325.