

doi:10.3799/dqkx.2017.081

神农架大九湖泥炭湿地关键带监测进展

黄咸雨^{1,2},张志麒³,王红梅^{2,4},陈旭^{1,2},朱宗敏^{1,2},顾延生^{2,4},秦养民^{1,2},刘金铃^{1,2},汪迎春³

- 1.中国地质大学地球科学学院关键带演化实验室,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.神农架国家公园管理局,湖北神农架 442400
- 4.中国地质大学环境学院,湖北武汉 430074

摘要:关键带科学是当代地球科学的热点研究领域之一。国际上主要通过关键带监测来促进关键带科学的发展,服务于社会经济发展和生态保护。在我国,关键带研究与监测还处在起步的阶段。神农架大九湖湿地是中纬度地区少见的亚高山泥炭藓湿地,是丹江口水库最大入库河流堵河的源头之一,已被列入国际重要湿地名录,是开展泥炭湿地监测的优良场所。在10多年来系统的古气候与现代过程研究基础上,我们在大九湖部署了较为系统的监测体系,涵盖了关键带的各种要素,特别是生物、水体及温室气体等方面。在监测点的设置上,既考虑了泥炭湿地内部的空间变化,也考虑表层和深部之间的关联,还设置了河流和湖泊对照点。在监测技术上,部分实现了在线高频监测,大部分达到了野外现场测试的要求。本文将对前期的工作进行回顾总结,并对后续的努力方向进行展望。在前期工作的基础上,要逐步完善监测技术和监测设施,并聚焦于泥炭湿地关键带对气候变化(如干旱)的响应,评估气候变化对大九湖泥炭湿地生态功能的影响。加强与国内外同行的合作,在大九湖开展多学科交叉研究。在关键带系统监测的基础上,完善亚高山泥炭湿地关键带的理论认识,并建立合适的泥炭湿地关键带模型,为湿地保护和可持续发展服务。

关键词:关键带;关键带监测;神农架大九湖;泥炭湿地;碳循环;气候变化。

中图分类号:P90;P94

文章编号:1000-2383(2017)06-1026-13

收稿日期:2017-03-10

Overview on Critical Zone Observatory at Dajiuju Peatland, Shennongjia

Huang Xianyu^{1,2}, Zhang Zhiqi³, Wang Hongmei^{2,4}, Chen Xu^{1,2}, Zhu Zongmin^{1,2}, Gu Yansheng^{2,4}, Qin Yangmin^{1,2}, Liu Jinling^{1,2}, Wang Yingchun³

1. *Laboratory of Critical Zone Evolution, 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. *Shennongjia National Park Administration, Shennongjia 442400, China*
4. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

Abstract: Critical zone science is a novel discipline in earth sciences. International researchers investigate on this discipline mainly through critical zone observatory (CZO), with the aim to develop the framework of this discipline and to serve for economic development and ecological protection. In China, CZO studies have just been initiated. Shennongjia Dajiuju is a typical subalpine peatland, dominated by *Sphagnum*, in the middle latitude. This peatland is a head source of Duhe River, which finally drains into the Danjiangkou Reservoir. In 2013, Dajiuju peatland was listed as a Ramsar Wetlands site. With these merits, Dajiuju is a perfect place to monitor the peatland dynamics. Based on the over ten years' studies on paleoclimate and modern processes in Dajiuju, we initiated a CZO monitoring program in Dajiuju in the early 2014. This program considers all elements in the critical zone, with special attention to organisms, water and greenhouse gases. Monitoring points are established in the peatland and the surrounding lakes and rivers, to explore the relationship among wetlands. Within the peatland, both the surficial and deep

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41472308,41330103,41572325,41130207);中央高校科研专项基金(No.CUG150618);生物地质与环境地质国家重点实验室自主课题(No.GBL11612)。

作者简介:黄咸雨(1981—),男,副教授,主要从事泥炭地分子地球生物学研究。ORCID:0000-0001-6175-9158. E-mail: xyhuang@cug.edu.cn

引用格式: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.

processes are monitored. To date, most measurements were completed in the field, to eliminate the influence of sample storage. This paper presents both the progresses of our work and the outlooks for the CZO in Dajiuwu. In the near future, we should pay more attention to improvement of the monitoring techniques and facilities, and focus on responses of the carbon cycle to climate changes especially droughts, and evaluation of the influence of climate change and human activities on the ecosystem function of the subalpine wetland. In addition, collaborations with domestic and international researchers will be strengthened. The final objective is to fulfil the theory for subalpine peatland critical zone, and to build the model of peatland critical zone, and to serve for wetland protection and sustainable development.

Key words: critical zone; critical zone observatory; Dajiuwu basin of Shennongjia; carbon cycle; climate change.

1 关键带研究简介

受气候变化和人类活动的双重胁迫,地球表层自然系统正在承受着日益加重的压力。研究地球表层自然系统响应气候变化和人类活动的过程、机制,并预测未来的演化方向,是十分重要的科学问题。自2001年地球关键带概念的提出(NRC,2001),关键带研究就承载着重要的期望,被认为是21世纪地球科学的重要前沿领域之一。关键带科学对于环境保护和人类可持续发展都有着重要的意义(朱永官等,2015)。

关键带指的是地球的最表层,它被称为地球的皮肤(图1)。它的物理边界上自植物的冠层,下至含水层的底部(NRC,2001)。最近,White(2012)将关键带的下界约束为能够自由流动的淡水地下水,包括了极地和山地,不包括滨海地区。根据定义,关键带在垂直方向上表现出了明显的分层性,包含了大气层的底部、植被层、土壤层、非饱和的包气带和饱和含水层(NRC,2001)。在横向展布上,关键带表现出了高度的空间异质性,既有正地形区的剥蚀环境,也包括了负地形区的堆积环境,将流域内的地表过程耦合在一起(Banwart *et al.*,2012)。

关键带内部的作用过程主要分为物理过程、化学过程和生物过程(图2)。这些作用过程在不同层位间相互作用,特别是在层位之间的界面上。因此,需要加强关键带内部界面过程研究,如土气界面、风化锋面等,重视植物和微生物的作用。从定义来看,关键带是在传统意义上的风化壳的拓展,具有自然地理综合体的内涵,囊括了地表景观上的水、土、气、生、岩等多种要素,强调这些要素之间的相互作用。因此,不同于以往的单因素研究,关键带科学需要开展多学科综合研究(Giardino and Houser,2015)。关键带的研究范式主要有DPSIR模式(drivers-pressure-state-impact-response,驱动力—压力—状态—影响—响应;Banwart *et al.*,2012)和3M模式(填图—监测—建模;杨树锋和张翠光,2014)。前

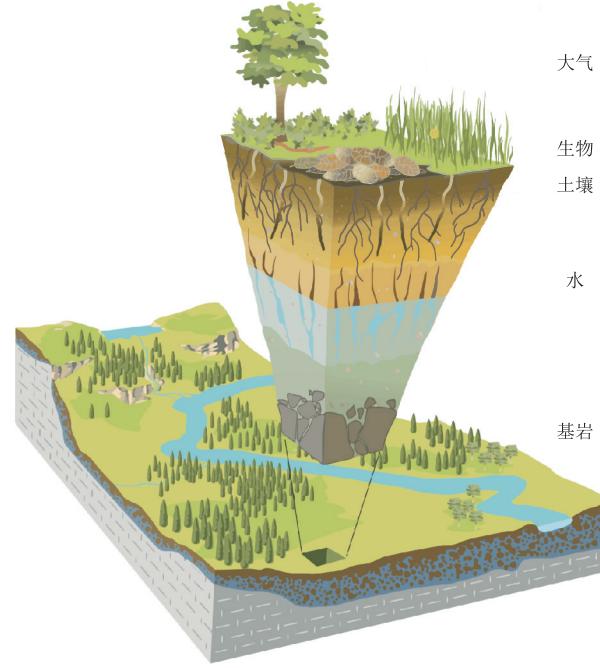


图1 关键带示意

Fig.1 Schematic map of critical zone
据 Chorover *et al.*(2007)修改

者以环境问题的因果链为主线,后者以循环上升的认识过程为主线(杨树锋和张翠光,2014)。

目前国际关键带研究关注的科学问题主要包括以下4个方面:(1)什么因素控制了关键带的属性和过程?(2)关键带的结构、物质的储存和流通过气候变化有何响应?(3)关键带结构、储存对土地利用变化如何响应?(4)对关键带的研究如何被用于增强弹性和可持续性,恢复生态系统(安培浚等,2016)。Giardino and Houser(2015)编著了第一本有关关键带科学的专著《Principles and Dynamics of the Critical Zone》。

关键带的重要性以及关键带的特性使得关键带观测(critical zone observatories,简称CZO)成为关键带科学的一个非常重要的内容。在对自然地理条

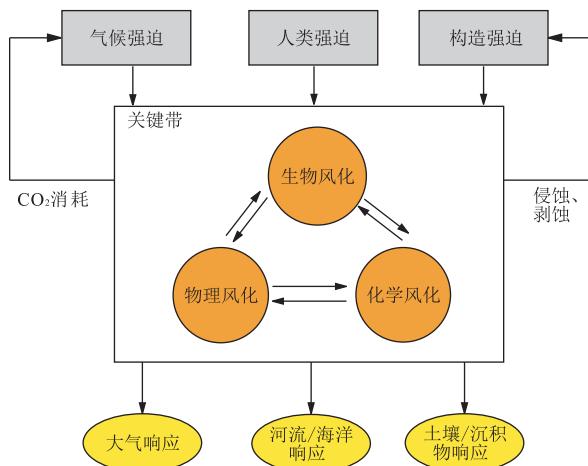


图 2 关键带过程与响应

Fig.2 Processes and responses in critical zone

据 Brantley *et al.*(2007)

件充分认识的基础上,选定某个区域(通常是某个小流域),利用多种方法和手段,获取关键带过程的数据.获取数据的方式既有微观尺度的传感器技术和测量技术,也有应用于较大面积的遥感技术.通过这些监测技术,获得关键带的实时变化信息.在此基础上,可以建立模型来预测关键带过程和功能对气候变化和人类活动的可能响应.

在关键带监测方面,美国走在了全球的前列.2007 年美国自然基金委启动了 CZO 计划,到目前为止,已经资助了 10 个关键带监测站点(有关这些站点的详细介绍请参考 <http://criticalzone.org/national/>).这些站点的设置,既考虑了单个站点的科学需求,还考虑站点之间的协作,组成不同的环境梯度(如岩性、气候、人类扰动梯度),完善对关键带结构、功能、演化等关键带科学基础领域的认识(Banwart *et al.*, 2013).紧跟着美国的步伐,欧盟也启动了专门的 CZO 站点,主要是根据土壤发育的不同阶段,资助了 4 个 CZO 站点(www.soiltrec.eu).此外,法国(Critex 计划,网址 <http://portailrbv.sedoo.fr>)和德国(Tereno 计划,网址 <http://teodoor.icg.kfa-juelich.de/overview-de>)等也有专门的关键带研究计划.据 2011 年 11 月在美国特拉华大学召开的国际 CZO 研讨会统计,国际上共有 87 处监测站点(Banwart *et al.*, 2013).由风化系统科学联合会(weathering system science consortium, 简称 WSSC)演变而来的国际关键带监测网络(critical zone exploration network, 简称 CZEN, 网址 www.czen.org)已成为国际 CZO 同行交流的平台,该网站会及时为注册会员推送关键带相关的研究信息.

与美国和欧盟相比,我国的关键带科学的研究还处在起步阶段.到目前为止,只有中国科学院鹰潭红壤试验站、普定喀斯特生态系统观测站加入了国际关键带监测网络.近些年来,越来越多的国内学者和研究机构开始重视关键带研究.2012 年 9 月,主题为“可持续发展的关键带监测”的第二届地球生物学国际会议在中国地质大学(武汉)召开.中科院地球化学研究所在 2014 年 5 月召开了关键带科学的研究论坛.2016 年,国家自然科学基金委员会启动了中英关键带国际合作研究,资助了 5 项合作研究(<http://www.nerc.ac.uk/research/funded/programmes/czo/news/awards/>).

2 泥炭湿地关键带

泥炭地是一类重要的关键带,不同于常规意义上的侵蚀型关键带,泥炭地是一种沉积型的关键带.其主要物质来源于湿地植物的凋落物,以及少量的大气沉降物、地下水带入的可溶成分和地表水泛滥带入的物质.

泥炭地富含有机质,且含水量高,使得此类关键带在碳储存、水源涵养、生物多样性保护等方面承担着重要的生态功能(Dise, 2009; Page and Baird, 2016; 邬钰等, 2016).虽然泥炭湿地只占全球陆地面积的 3%,但泥炭湿地却储存着全球土壤有机碳总量的 30% 以上,在数量上接近大气圈的总碳量(Gorham, 1991; Yu, 2011).它们通常发育在江河的源头地区,关系着水量和水质安全.此外,泥炭湿地还有着独特的生物多样性.从地质演化的角度来看,泥炭地在调节大气 CO₂ 和 CH₄ 浓度方面起着非常重要的作用(Yu *et al.*, 2010).鉴于此,开展泥炭湿地关键带研究,对于保护泥炭湿地的重要生态功能和可持续发展至关重要.

目前国际关键带监测网络中收录的站点不包含泥炭地,属于关键带监测的空白类型.实际上,在泥炭非常丰富的欧美地区,生态学家和古生态学家们已经开展了一些较大规模的泥炭监测研究计划,如美国的 SPRUCE 计划(Spruce and Peatland Responses Under Climatic and Environmental Change, 网址 <https://mnspruce.ornl.gov>),波兰的 Climpeat 计划(Lamentowicz *et al.*, 2016; 网址 <http://climpeat.pl/index.php>).这些较大规模的泥炭监测或模拟试验,主要是探索泥炭地生态系统如何响应变暖或变干,涉及的学科相对单一,因此还不能算是真正意义上的关键带监测.在我国,泥炭地主要

分布在东北地区和青藏高原东缘(赵魁义,1999),中科院相关研究所已经建立了三江平原沼泽湿地生态试验站、若尔盖高寒湿地生态研究站、海北高寒草甸生态系统研究站。这些生态研究站主要是围绕高寒湿地生态系统进行的观测研究。

在我国东部地区,现存的泥炭地相对零散,主要分布在一些亚高山地区的山间洼地,正在遭受毁林、泥炭藓采摘及气候变化等多种因素的干扰。这些山地泥炭地大多分布在江河的源头区域,对于保护水源和水质意义重大。从演化的角度来看,在近代大规模的人类扰动之前,我国东部地区应该分布着更大面积的泥炭地。从时间尺度来看,在相对寒冷的冰期条件下,亚热带地区的泥炭地应该在调节大气 CO₂ 浓度方面扮演着重要的角色(Zhao *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2016)。因此,迫切地需要开展东部地区泥炭地关键带监测,位于湖北省神农架林区西缘的大九湖泥炭地是开展泥炭地关键带监测与地质演化的好场所。

自 2005 年,本团队就在神农架大九湖开展研究工作。在早期,我们主要关注泥炭沉积记录的末次冰消期以来的气候环境信息。2008 年 10 月开始,我们开始部署泥炭地的监测工作。经过近 10 年的努力,特别是近 3 年来的系统现代过程研究,我们已在大九湖布置了较为系统的现代过程监测设备,获取了大量的第一手资料,也明确了一些科学问题。本文将对前期的工作进行回顾总结,并对后续的努力方向进行展望。

3 神农架大九湖关键带监测

3.1 大九湖的重要性

大九湖($31^{\circ}24'51''\sim31^{\circ}32'30''N, 109^{\circ}58'35''\sim110^{\circ}7'32'E$)位于神农架的西缘(图 3),处于湖北省和重庆市的交界处,和湖北省内的竹溪、竹山、房县以及重庆市的巫山、巫溪县接壤。大九湖是一个封闭的亚高山盆地,盆地内部海拔约 1 730 m。大九湖年均温 7.2 ℃,年均降雨量为 1 541 mm,年均相对湿度 >80%。盆地面积为 16 km²,其中现存的沼泽面积为 7.5 km²。盆地周边主要由震旦系下部的一套磨拉石建造组成,主要岩性为碳酸盐质砾岩、砂砾岩、碳酸盐质板岩、透镜状泥质白云岩、角砾状白云岩(赵志中和何培元,1997)。

大九湖的重要性体现在以下几个方面:

(1)大九湖是中纬度地区现存的最大的亚高山泥炭沼泽。《中国沼泽志》将其称为亚热带山地沼泽的典型代表。在大九湖,泥炭藓沼泽的面积较大(庹德政和刘胜祥,2006)。泥炭藓是北方泥炭地的重要建群物种,对于泥炭地水化学环境的形成及有机碳的积累至关重要(赵魁义,1999)。

(2)在大九湖盆地内,泥炭沼泽、天然河流及人工湖泊(历史时期应该存在天然湖泊)并存(图 4)。在小范围内,聚集了多种湿地类型(沼泽、湖泊和河流),是开展湿地关键带研究的良好场所。大九湖处在灰岩区,地表水体偏碱性(pH 接近 8),而泥炭沼

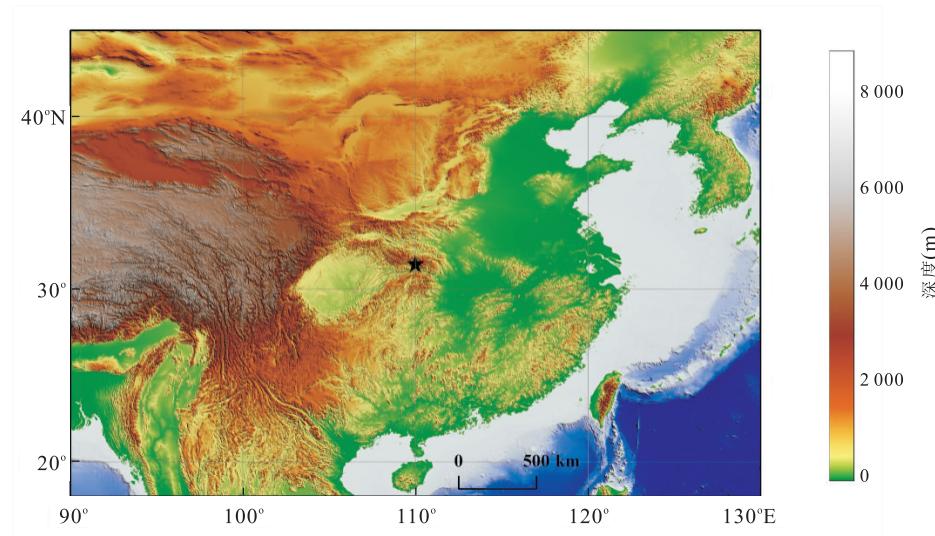


图 3 神农架大九湖地理位置

Fig.3 Location of the Dajiuju peatland, Shennongjia

图中星号标注;底图来自 <ftp://topex.ucsd.edu/pub/archive/srtm/>

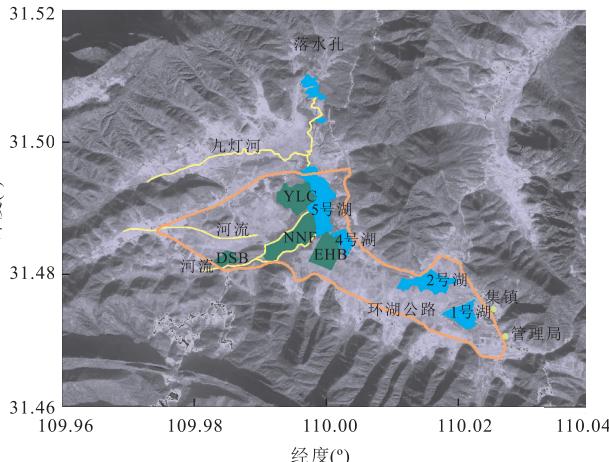


图 4 神农架大九湖盆地

Fig.4 Map of the Dajiuju basin, Shennongjia

底图来自大九湖湿地管理局提供的遥感图;YLC、NNF、EHB、DSB 等缩写代表保存状态相对好的泥炭沼泽斑块

泽水体 pH 偏酸性(pH 值为 4.0~5.5).如此显著的 pH 梯度为开展生物及生物地球化学循环对 pH 等水化学条件的响应提供了理想的研究场所.

(3)大九湖盆地汇聚的水资源,通过岩溶地下暗河,排放到堵河,成为堵河的重要源头之一.而堵河是南水北调中线工程丹江口水库的最大入库河流.因此,大九湖泥炭湿地对于维护丹江口水库的水质安全举足轻重.2013 年 10 月,大九湖被列入了国际重要湿地名录.

(4)自末次冰消期以来,大九湖盆地就开始泥炭堆积,厚度可达 3 m 以上.在沉积中心区,湖沼相沉积厚度有 40 m,沉积历史可能开始于 20 万年前(郑秋凤等,2014).泥炭沉积中植物残体丰富,适合用于加速器¹⁴C 测年.因此,大九湖泥炭沉积是长江中游地区难得的晚更新世以来古气候和古环境研究的优良材料(谢树成等,2015).同邻近区域的石笋相比,大九湖泥炭沉积非常适合开展晚更新世以来生态响应研究(黄咸雨和谢树成,2016).

在耕地面积非常稀少的鄂西山区,被称为高山草原的大九湖盆地也吸引了开发者的目光(何报寅,2007).到目前为止,大九湖已经遭受受了多次开发浪潮,从早期的中药种植到 20 世纪 90 年代种植反季节蔬菜.在蔡述明等湖北省政协领导的推动下,大九湖湿地的生态保护和恢复得到了省政府的重视,并于 2006 年 9 月被批准为湖北省的第一家国家湿地公园,2009 年 6 月建成开放(谭开甲等,2014),目前已经被纳入试点运行的神农架国家公园.在湿地公园建设过程中,建成 1 号至 9 号湖,后续还增加了多个人工湖.

从 2010 年开始,人工湖蓄水抬升了盆地内的地下水水位,对湿地生态系统造成了一定程度的影响.

3.2 大九湖研究历史

大九湖虽然地处偏远,但它早就吸引了大量研究者的关注.目前可查到的最早的研究是《神农架志》中记录的东北师范大学高凤岐等于 1979 年赴大九湖进行泥炭地碳储量研究(湖北省神农架地方志编纂委员会,1996).20 世纪 90 年代以来,来自中科院地理所、南京大学、兰州大学、南京师范大学、中山大学、中国地质大学(武汉)等多家单位的学者们对大九湖泥炭沉积中保存的孢粉进行了详细的研究,由此重建了该地区末次冰消期以来的植被和气候变化(李文漪等,1992;刘会平等,2001;朱诚等,2006; Zhao et al., 2007; 石敏等,2008; Zhu et al., 2010; Li et al., 2013; 郑秋凤等,2014; Xiao et al., 2015).除了孢粉,一些学者还在大九湖开展了地球化学研究(何报寅等,2003; 杨丽阳等,2009; 朱芸等,2009, 2013; He et al., 2015; Li et al., 2016; Zhang et al., 2016).

泥炭沉积具有很高的有机碳含量,非常适合开展生物—有机地球化学研究.2005 年,中国地质大学(武汉)分子地球生物学与全球变化研究团队就在大九湖获取了泥炭柱,开展了系统的泥炭沉积生物—有机地球化学研究(谢树成等,2015; 黄咸雨和谢树成,2016).在过去 10 多年,本团队发表了大量的与大九湖有关的研究论文,主要涉及以下 4 个方面:(1)泥炭脂类分布特征、早期成岩转化及控制条件研究(Huang et al., 2008, 2010, 2011a, 2011b, 2014a, 2015, 2016; Zhang et al., 2009; Wang et al., 2016; Zhang et al., 2017; Zheng and Huang, 2017);(2)利用泥炭脂类及其单体碳同位素组成重建过去 1 万 3 千年古气候历史(Huang et al., 2012, 2013a, 2013b, 2014a; Xie et al., 2013);(3)植被调查,硅藻和有壳变形虫组合对水位及水化学变化的响应(Qin et al., 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2016; Qin and Xie, 2011; 秦养民等, 2011, 2013; Chen et al., 2014, 2016; 罗涛等, 2015; 伦子健等, 2016);(4)泥炭微生物功能群及生态响应(刘乔等, 2013; Xiang et al., 2013; 杜明和盛桂莲, 2014; 向兴等, 2014; Gong et al., 2015).

3.3 监测规划

自 2014 年开始,本团队就在大九湖部署系统的关键带监测.到目前为止,已经初步建立了较为完善的监测体系(图 5).在监测内容上,考虑了关键带的

主要要素,重点关注水文、温室气体及生物变化。

在监测点设置上,既考虑面上的变化,又考虑深度上的变化(图 6).从 Google Earth 地图(图 6)可以看出,大九湖沼泽核心区被一些树林分割开,形成了不同的区块.核心区以外、靠近山边的很多地方,之前都有农业耕种,只是近几年为了保护而退耕还湿地,其植被组成和核心区仍有一定的差别.考虑这些因素,面上的监测点设置在靠近养鹿场区块和靠近 4 号湖,前者代表受人类扰动相对较弱的泥炭沼泽,共设计了 11 个监测点,立牌并做了护栏;后者代表沼泽—湖泊过渡的沼泽,在洪水时期被湖水淹没,而在干季和养鹿场区块的性质接近,共设计了 4 个监测点.此外,在盆地内自然河流(靠近娘娘坟景点)汇入盆地的入口、5 号湖出水口(盆地内水的主要流出点)设置了参照点.为了探究泥炭沼泽表层和深部之间的物质交换,在 15 个泥炭监测点中根据年均水位的差异,选择了 6 个点设置了深度监测设备(各设置 7 个监测层位).在这些深度监测点,安装了土壤溶液取样器(荷兰 Rhizon 公司产品,取样区是高分子多孔材料,孔径为 $0.2 \mu\text{m}$).安装成功后,可以在较长一段时间内无扰动的收集不同深度的泥炭孔隙水,

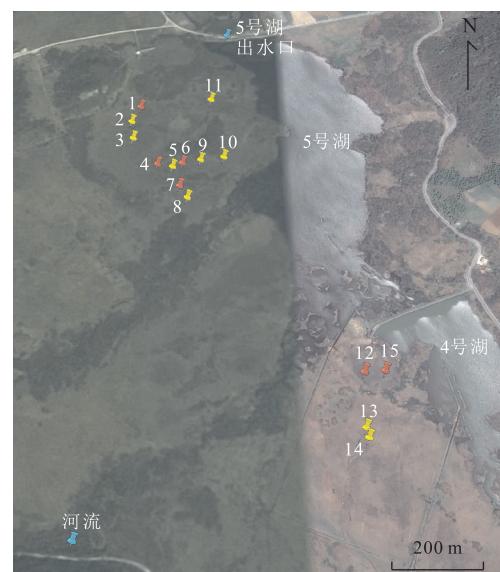


图 6 监测点分布

Fig.6 Distribution of monitoring points in Dajihu
底图来自 Google Earth;15 个泥炭监测点(其中 1,4,6,7,12,15 号点布置了深部土壤孔隙水取样品),1 个河流监测点,1 个湖水监测点

用于水化学、营养盐及与碳相关的分析.

在监测频次上,尽量做到原位在线监测.受技术本身及经费的限制,目前只有部分监测内容达到了上述要求.例如,我们已经在沼泽地安装了近 20 只电容式水位计(新西兰 Oddsey 公司产品),采集 1~2 h 间隔的水位变化信息.在现场安装了自计式雨量筒、大气温度湿度记录仪,获取高频的降雨量、大气温湿度数据,还安装了土壤温湿度记录仪、湖水水位记录仪.对于暂时无法做到在线的监测项目,我们尽量在野外现场进行分析测试.对于水化学和营养盐,利用美国哈希公司的便携式多参数水质仪和便携式分光光度计,在野外现场快速进行测定,减少因样品运输保存过程中造成的影响.对于泥炭湿地非常重要的温室气体监测,我们购置了美国 LGR 公司的超便携式温室气体分析仪及北京里加公司设计的土壤呼吸室,在野外现场监测 CO_2 和 CH_4 通量的变化.利用 LGR 公司的便携式 CO_2 碳同位素分析仪,可以在特定时段现场测试 CO_2 的碳同位素组成.中国地质大学(武汉)环境学院还在大九湖安装了涡度相关通量塔.其他的一些项目,我们尽量减少运输和储存时间,回到实验室后,尽快进行分析测试.例如,对于可溶有机碳样品,运回实验室后保存在 4 °C 冰箱中,并尽快进行浓度、紫外可见吸光、荧光光谱及碳同位素分析.

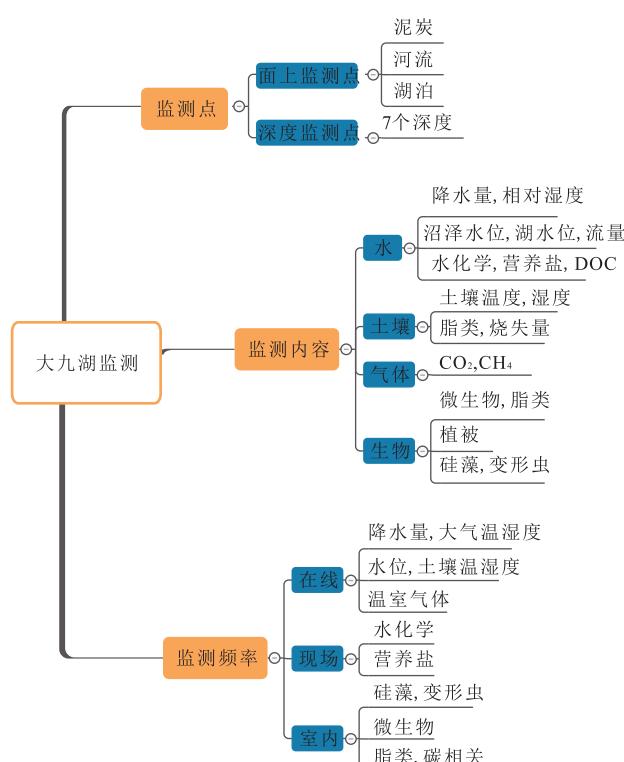


图 5 神农架大九湖泥炭湿地监测框架示意

Fig.5 Schematic map of the monitoring framework in Dajihu, Shennongjia

除了这些环境参数的在线或离线测试,我们团队还在室内开展了多方面的研究工作,包括生物体及表层泥炭中脂类分布特征及单体碳与氢同位素组成、微体古生物(主要是有壳变形虫、硅藻)、元素地球化学(主要关注汞与甲基汞)以及分子微生物学研究(主要关注重要微生物功能群的时空分布特征及其介导的 C、N 循环和微生物与植物的相互作用)。

3.4 主要进展

3.4.1 环境条件监测进展 到目前为止,我们已经获得了大量的第一手监测资料,主要有沼泽水位的变化(2010 年以来)、大气温度湿度(2012 年以来)、降雨量(2014 年以来)、湿地土壤温湿度(2014 年以来)、沼泽孔隙水及湖水水化学(pH 、氧化还原电位、电导率和溶解氧)和营养盐(硝酸盐、磷酸盐和亚铁)(2014 年以来)。下面举例说明。

水位是泥炭沼泽的一项非常重要的水文要素,沼泽水位的波动可以显著地影响表层泥炭的通气程度及氧化还原电位,进而控制着微生物介导的生物地球化学过程。我们的监测显示,大九湖沼泽水位能够很灵敏地响应降雨的变化,该认识为基于泥炭沉积的古水文重建奠定了坚实的基础。在 2014 年 7 月梅雨结束后,湖北多地发生了严重的气象干旱。在大九湖表现为沼泽水位的显著下降,在部分点位,沼泽水位下降了 20~30 cm。在 2014 年 8 月初,出现了一次明显的降雨,沼泽水位又很快恢复到正常水平(图 7)。

前文已经讲过大九湖盆地内存在着显著的 pH 梯度。我们在 2015 年 7 月开展的面上调查显示,酸性的沼泽地和碱性的天然河、人工湖并存(图 8)。在沼泽和河流、湖泊交接的区域, pH 等水化学条件的显著差别,有可能驱动着泥炭地和周边水体之间的物质和能量交换过程,值得深入关注。

在大九湖盆地,环境条件的变化还表现在深度剖面上的变化。以 pH 和亚铁为例,我们的监测显示出,不同深度上水化学存在着差异,亚铁离子的浓度也表现出深度差异(图 9)。这些水化学和离子的深度表现,可以提供表层和深度在物质交换(特别是碳)方面的重要信息。不同水文模态(干旱、暴雨)下,深部和表层之间的关联值得关注。

3.4.2 关键带演化研究进展 前期我们对 2005 年采集的 ZK-3 进行了系统的研究,包括孢粉组合、脂类及单体碳同位素。在高分辨率的 AMS ^{14}C 年代数据的基础上,我们重建了长江中游地区过去 1 万 3 千年来的古气候变化,详情请参考谢树成等(2015)。取得的主要进展概况为:

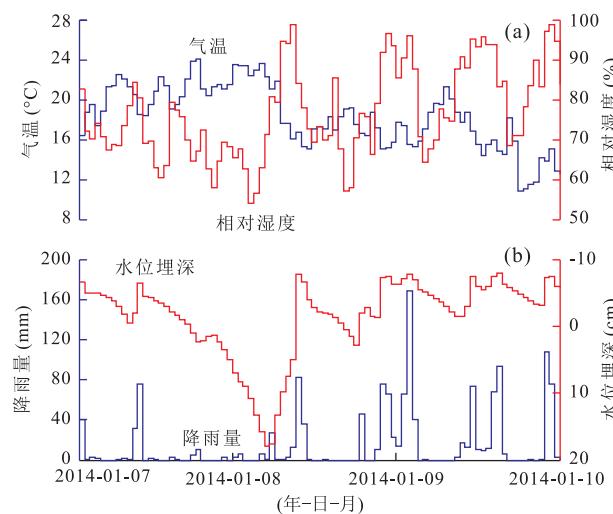


图 7 2014 年 7 月 1 日—2014 年 9 月 30 日环境参数的日均变化

Fig.7 Variations of daily air temperature, the relative humidity, precipitation and the depth to water level in Dajiuuh during 1st July to 30th September in 2014
a.蓝色指示气温,红色指示大气相对湿度;b.蓝色指示大气降水量,红色指示沼泽水位埋深;降雨量数据来自神农架九大湖气象站

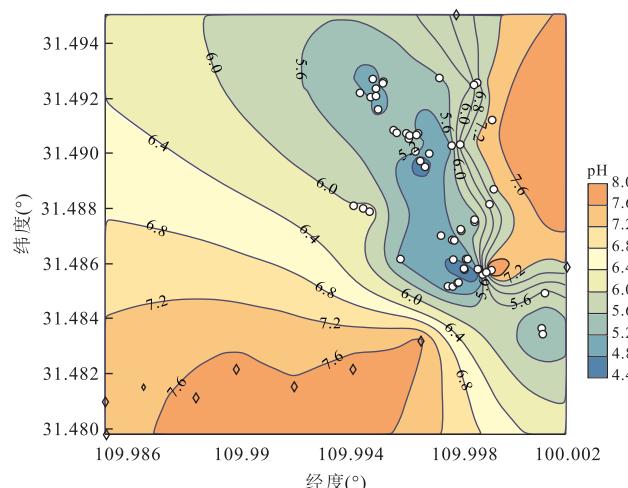


图 8 2015 年 7 月大九湖湿地 pH 等值线分布

Fig.8 Contour map of water pH in Dajiuuh in July 2015
图中圆形代表泥炭,右下方的菱形代表河流,左上和左中的两处菱形代表 5 号和 4 号湖

(1)在详实的现代过程研究基础上,我们创建了新的古温度指标 BNA_{15} (Huang *et al.*, 2013a)、古水文指标藿类通量 (Xie *et al.*, 2013) 和陆源三萜烯芳构化指数 (Huang *et al.*, 2013b),从而在同一根沉积柱中实现了古温度和古水文信号的分离。

(2)在构建的独立古温度和古水文记录的基础上,我们探讨了长江中游地区全新世的水热配置模

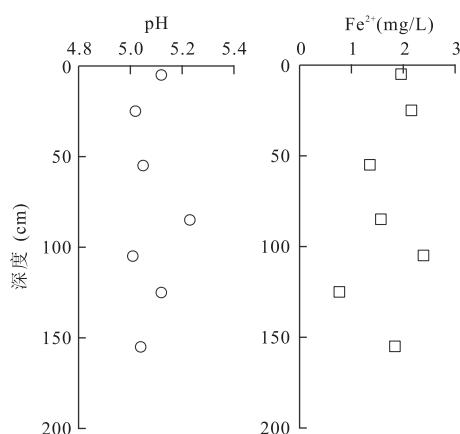


图 9 2016 年 7 月深度剖面上孔隙水 pH、 Fe^{2+} 浓度变化
(单个监测点数据)

Fig.9 Vertical profiles of pore water pH and Fe^{2+} concentration in Dajihu in July 2016

式。结果显示,当气温由一种模态向另一种模态转变时(如由偏凉的早全新世向温暖的中全新世转变、温暖的中全新世向偏冷的晚全新世转变),长江中游地区的古水文条件呈现出显著的波动。该认识对于预测未来的气候变化有着重要的指示意义。相关成果被纳入《第三次国家气候变化评估报告》。

(3)利用构建的全新世古水文变化记录,探讨了古水文变化对湖北地区新石器文化变迁的影响。不同于我国北方,湖北地区新石器文化的变迁主要发生在气候湿润、洪水多发的阶段。

3.5 关注的科学问题

在系统监测的基础上,我们专注于以下科学问题:

(1)泥炭地碳循环如何响应气候变化(特别是干旱事件)。除了关注常规的温室气体(主要是 CO_2 和 CH_4),我们重点关注泥炭地碳的横向迁移,即以可溶有机碳和颗粒有机碳形式从泥炭地流入周边的河流的量,以及他们对泥炭地碳平衡的重要性。在这些方面,已经开始探索可溶有机碳的 ^{14}C 含量分析,以及正在计划开展的单分子 ^{14}C 分析,利用放射性碳同位素来揭示气候变化背景下泥炭地老碳的稳定性。同时,我们还加强分子生物学和生物有机地球化学的紧密结合,揭示碳动态响应气候变化的分子机制。

(2)关注泥炭地生态系统对气候变化和人类活动的响应,主要是从微体古生物(有壳变形虫和硅藻)、泥炭藓的角度来开展。

(3)泥炭地演化与气候变化。近些年来,我们还在大九湖钻取了其他泥炭柱。目前正在对 ZK-5 进行系统的脂类单体碳和氢同位素组成研究,试图揭示出泥炭地演化过程中,泥炭地碳生物地球化学过程

是如何响应气候的干湿变化。2016 年 9 月,我们在大九湖盆地养鹿场附近开展了钻探工作,获取了一支 32 m 的岩心和多支 18 m 的岩心。目前我们正在开展年代学的研究,试图把大九湖古气候和古环境的研究延伸到 5 万年或更长,利用我们团队成员熟悉的多种研究手段,探讨盆地内关键带演化和气候变化之间的关系,评估大九湖泥炭地在末次冰期气候条件下的碳循环过程。

4 结语

虽然经过多年的努力,我们已经在大九湖初步建立了较为系统的监测体系,获取了大量的第一手数据,但监测工作还有很大的提升空间。后续需要努力获取更多的经费资助,吸引更多的人员进入大九湖开展研究工作。在今后 5~10 年,我们努力在监测设施建设及监测技术方面有较大的提升:

(1)在监测设施建设上,首先要尽快建立木栈桥,减少监测人员走动对泥炭地的扰动。其次,要尽快建立一些规模化的设施,来模拟泥炭湿地对气候变化的响应。全球变暖已经得到了科学界的广泛共识。变暖如何影响泥炭湿地的固碳能力,将是一个重要的科学问题。欧洲科学家在泥炭地开展了被动增温(利用开口式培养箱),探讨增温 2 ℃ 条件下,泥炭地碳循环的响应(Lamentowicz *et al.*, 2016)。根据 IPCC(政府间气候变化专业委员会, Intergovernmental Panel on Climate Change)的预测,在全球变暖的背景下,很多地区都会呈现变干的态势。可以开展中型模拟水位的降低,探讨泥炭地的生态响应过程及机理(Mulot *et al.*, 2015)。

(2)引入新的监测技术,例如无人机。目前国际上用无人机来监测泥炭湿地植被分布、微地貌等是研究热点(Lehmann *et al.*, 2016)。迫切需要加强水文学、土壤物理化学方面的监测与研究(Rezanezhad *et al.*, 2016)。要尽快落实在线监测数据的远程传输,以及监测数据的数据库建设。

(3)需要加强泥炭湿地关键带模型的研究工作。对于关键带模型的研究还很薄弱(杨树锋和张翠光, 2014),目前国际上还只发布了一款二维的模型(Giannakis *et al.*, 2017),很多工作还需要完善。

(4)在 ZK-5 及 2016 年 9 月获取的多支深钻的基础上,开展泥炭湿地关键带的地质演化研究,探索更长时间尺度上泥炭关键带与气候之间的关系,完善亚高山泥炭湿地关键带的理论认识。

神农架大九湖泥炭湿地是开展泥炭地关键带监测的理想场所。在坚实的前期研究基础之上,我们近些年已在大九湖部署了较为系统的监测体系,涵盖了关键带的各种要素,特别是生物、水体及温室气体等方面。在监测点的设置上,既考虑了泥炭湿地内部的空间变化,也考虑表层和深部之间的关联,还设置了河流和湖泊对照点。在监测技术上,部分实现了在线高频监测,大部分达到了野外现场测试的要求。今后要想办法让更多的监测内容实现在线监测并做到数据远程传输。在前期工作的基础上,要逐步完善监测技术和监测设施,并聚焦于泥炭湿地关键带对气候变化(如干旱)的响应,评估气候变化对大九湖泥炭湿地生态功能的影响。加强与国内外同行的合作,在大九湖开展多学科交叉研究。在系统的关键带监测的基础上,完善亚高山泥炭湿地关键带的理论认识,并建立合适的泥炭湿地关键带模型,为湿地保护和可持续发展服务。

致谢:长期以来,中国地质大学(武汉)的很多老师参与了大九湖的监测工作或对监测提供了指导(殷鸿福院士,谢树成教授,黄俊华教授,郑敏副教授,闭向阳副教授,程丹丹副教授,李辉副教授,黄春菊教授,袁松虎教授,张利华副教授,严森副教授)。很多研究生参加了监测工作,特别是下列同学:薛建涛,王锐诚,高宇,张一鸣,赵炳炎,曾令晗,宋青伟,王东香。对他们的帮助表示由衷的感谢。感谢中国地质大学(武汉)青年科技协会组织的青年地学长江论坛,为我们提供了展示研究工作的机会。

References

- An, P. J., Zhang, Z. Q., Wang, L. W., 2016. Review of Earth Critical Zone Research. *Advances in Earth Science*, 31 (12): 1228—1234 (in Chinese with English abstract).
- Banwart, S., Menon, M., Bernasconi, S. M., et al., 2012. Soil Processes and Functions across an International Network of Critical Zone Observatories: Introduction to Experimental Methods and Initial Results. *Comptes Rendus Geoscience*, 344 (11—12): 758—772. doi: 10.1016/j.crte.2012.10.007
- Banwart, S. A., Chorover, J., Gaillardet, J., et al., 2013. Sustaining Earth's Critical Zone Basic Science and Interdisciplinary Solutions for Global Challenges. The University of Sheffield, United Kingdom.
- Brantley, S. L., Goldhaber, M. B., Ragnarsdottir, K. V., 2007. Crossing Disciplines and Scales to Understand the Critical Zone. *Elements*, 3(5): 307—314. doi: 10.2113/gselements.3.5.307
- 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 Environment*, 568: 137—146. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.015
- Chen, X., Qin, Y. M., Stevenson, M. A., et al., 2014. Diatom Communities along pH and Hydrological Gradients in Three Montane Mires, Central China. *Ecological Indicators*, 45: 123—129. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.04.016
- Chorover, J., Kretzschmar, R., Garcia-Pichel, F., et al., 2007. Soil Biogeochemical Processes within the Critical Zone. *Elements*, 3(5): 321—326. doi: 10.2113/gselements.3.5.321
- Committee of the China's Third Assessment Report on Climate Changes, 2015. China's Third Assessment Report on Climate Changes. Science Press, Beijing, 262—264 (in Chinese).
- Dise, N. B., 2009. Peatland Response to Global Change. *Science*, 326 (5954): 810—811. doi: 10.1126/science.1174268
- Du, M., Sheng, G. L., 2014. RAPD Marker Analysis of Genetic Diversity of Sphagnum in Dajiuwu Wetland, Shennongjia. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Science)*, 48(5): 717—721 (in Chinese with English abstract).
- Editorial Committee of Shennongjia Annals, 1996. Shennongjia Annals. Hubei Science and Technology Press, Wuhan (in Chinese).
- Giannakis, G. V., Nikolaidis, N. P., Valstar, J., et al., 2017. Integrated Critical Zone Model (1D-ICZ): A Tool for Dynamic Simulation of Soil Functions and Soil Structure. *Advances in Agronomy*, 142: 277—314.
- Giardino, J. R., Houser, C., 2015. Principles and Dynamics of the Critical Zone. Elsevier, Amsterdam.
- Gong, L. F., Wang, H. N., Xiang, X., et al., 2015. pH Shaping the Composition of *sqhC*-Containing Bacterial Communities. *Geomicrobiology Journal*, 32(5): 433—444. doi: 10.1080/01490451.2014.950363
- Gorham, E., 1991. Northern Peatlands: Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming. *Ecological Applications*, 1(2): 182—195. doi: 10.2307/1941811
- He, B. Y., 2007. Paleoenvironmental Record in the Dajiuwu Peat Deposit, Shennongjia. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- He, B. Y., Zhang, S., Cai, S. M., 2003. Climatic Changes Recorded in Peat from the Dajiu Lake Basin in Shennongjia since the Last 2 600 Years. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1): 1—10. doi: 10.1016/j.mg.2003.03.001

- nary Geology*, 23(2): 109—115 (in Chinese with English abstract).
- He, Y.X., Zhao, C., Zheng, Z., et al., 2015. Peatland Evolution and Associated Environmental Changes in Central China over the Past 40 000 Years. *Quaternary Research*, 84(2): 255—261. doi: 10.1016/j.yqres.2015.06.004
- Huang, X.Y., Meyers, P.A., Yu, J.X., et al., 2012. Moisture Conditions during the Younger Dryas and the Early Holocene in the Middle Reaches of the Yangtze River, Central China. *The Holocene*, 22(12): 1473—1479. doi: 10.1177/0959683612450202
- Huang, X.Y., Meyers, P.A., Jia, C.L., et al., 2013a. Paleotemperature Variability in Central China during the Last 13 ka Recorded by a Novel Microbial Lipid Proxy in the Dajiuju Peat Deposit. *The Holocene*, 23(8): 1123—1129. doi: 10.1177/0959683613483617
- Huang, X.Y., Xue, J.T., Wang, X.X., et al., 2013b. Paleoclimate Influence on Early Diagenesis of Plant Triterpenes in the Dajiuju Peatland, Central China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 123: 106—119. doi: 10.1016/j.gca.2013.09.017
- Huang, X.Y., Meyers, P.A., Wu, W.C., et al., 2011a. Significance of Long Chain Iso and Anteiso Monomethyl Alkanes in the Lamiaceae (Mint Family). *Organic Geochemistry*, 42(2): 156—165. doi: 10.1016/j.orggeochem.2010.11.008
- Huang, X.Y., Wang, C.F., Wiesenberg, G.L.B., et al., 2011b. Lipid Composition of Roots and Leaves in the Herbal Plant Community from the Dajiuju Peatland, Central China. *Geochemical Journal*, 45(5): 365—373.
- Huang, X.Y., Meyers, P.A., Xue, J.T., et al., 2015. Environmental Factors Affecting the Low Temperature Isomerization of Homohopanes in Acidic Peat Deposits, Central China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 154: 212—228. doi: 10.1016/j.gca.2015.01.031
- Huang, X.Y., Meyers, P.A., Xue, J.T., et al., 2016. Paleoclimate Significance of *n*-Alkane Molecular Distributions and $\delta^2\text{H}$ Values in Surface Peats across the Monsoon Region of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 461: 77—86. doi: 10.1016/j.palaeo.2016.08.011
- Huang, X.Y., Meyers, P.A., Xue, J.T., et al., 2014a. Cryptic Abundance of Long-Chain Iso and Anteiso Alkanes in the Dajiuju Peat Deposit, Central China. *Organic Geochemistry*, 66: 137—139. doi: 10.1016/j.orggeochem.2013.11.011
- Huang, X.Y., Xue, J.T., Meyers, P.A., et al., 2014b. Hydrologic Influence on $\delta^{13}\text{C}$ Variations in Long-Chain *n*-Alkanes in the Dajiuju Peatland, Central China. *Organic Geochemistry*, 69: 114—119.
- Huang, X.Y., Wang, C.F., Xue, J.T., et al., 2010. Occurrence of Diploptene in Moss Species from the Dajiuju Peatland in Southern China. *Organic Geochemistry*, 41(3): 321—324. doi: 10.1016/j.orggeochem.2009.09.008
- Huang, X.Y., Xie, S.C., 2016. An Overview of the Molecular Paleoclimate in Peat Deposits. *Quaternary Sciences*, 36(3): 666—675 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X.Y., Xie, S.C., Zhang, C.L., et al., 2008. Distribution of Aliphatic Des-A-Triterpenoids in the Dajiuju Peat Deposit, Southern China. *Organic Geochemistry*, 39(12): 1765—1771. doi: 10.1016/j.orggeochem.2008.08.002
- Lamentowicz, M., Słowińska, S., Słowiński, M., et al., 2016. Combing Short-Term Manipulative Experiments with Long-Term Palaeoecological Investigations at High Resolution to Assess the Response of Sphagnum Peatlands to Drought, Fire and Warming. *Mires and Peat*, 18, article 20: 1—17
- Lehmann, J., Münchberger, W., Knoth, C., et al., 2016. High-Resolution Classification of South Patagonian Peat Bog Microforms Reveals Potential Gaps in Up-Scaled CH_4 Fluxes by Use of Unmanned Aerial System (UAS) and CIR Imagery. *Remote Sensing*, 8(3): 173. doi: 10.3390/rs8030173
- Li, J., Zheng, Z., Huang, K.Y., et al., 2013. Vegetation Changes during the Past 40 000 Years in Central China from a Long Fossil Record. *Quaternary International*, 310: 221—226. doi: 10.1016/j.quaint.2012.01.009
- Li, W.Y., Liu, G.X., Zhou, M.M., 1992. The Vegetation and Climate of Holocene Hypsithermal in Northern Hubei Province, In: Shi, Y.F., Kong, Z.C., eds., *The Climates and Environments of Holocene Megathermal in China*. China Ocean Press, Beijing, 94—99 (in Chinese).
- Li, Y.P., Ma, C.M., Zhou, B., et al., 2016. Environmental Processes Derived from Peatland Geochemistry since the Last Deglaciation in Dajiuju, Shennongjia, Central China. *Boreas*, 45(3): 423—438. doi: 10.1111/bor.12168
- Liu, H.P., Tang, X.C., Sun, D.H., et al., 2001. Palynofloras of the Dajiuju Basin in Shennongjia Mountains during the Last 12.5 ka. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 18(1): 101—109 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., Wang, H.M., Gong, L.F., et al., 2013. Symbiotic Bacterial Community of *Sphagnum palustre* in Dajiuju Peatland, Hubei, P.R. China. *Quaternary Sciences*, 33(1): 79—87 (in Chinese with English abstract).
- Lun, Z.J., Gu, Y.S., Liu, H.Y., et al., 2016. Phytolith Records in the Surface Soils of Dajiuju Wetland and Their Envir-

- ronmental Significance, Shenongjia Mountains. *Quaternary Sciences*, 36(3):656—665 (in Chinese with English abstract).
- Luo, T., Lun, Z.J., Gu, Y.S., et al., 2015. Plant Community Survey and Ecological Protection of Dajiuju Wetlands in Shennongjia Area. *Wetland Science*, 13(2):153—160 (in Chinese with English abstract).
- Mulot, M., Villard, A., Varidel, D., et al., 2015. A Mesocosm Approach to Study the Response of Sphagnum Peatlands to Hydrological Changes: Setup, Optimisation and Performance. *Mires and Peat*, 16, article9:1—12.
- NRC, 2001. Basic Research Opportunities in the Earth Sciences. National Academies Press, Washington, D. C., 35—45.
- Page, S.E., Baird, A.J., 2016. Peatlands and Global Change: Response and Resilience. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1):35—57. doi: 10.1146/annurev-environ-110615-085520
- Qin, Y.M., Man, B.Y., Kosakyan, A., et al., 2016. *Nebelajihuensis nov. sp.* (Amoebozoa; Arcellinida; Hyalosphaeniidae): A New Member of the *Nebelasaccifera-equicalceus-ansata* Group Described from Sphagnum Peatlands in South-Central China. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 63(5): 558—566. doi: 10.1111/jeu.12300
- 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. doi: 10.1007/s10933-013-9726-6
- Qin, Y.M., Payne, R.J., Gu, Y.S., et al., 2012. Ecology of Testate Amoebae in Dajiuju Peatland of Shennongjia Mountains, China, in Relation to Hydrology. *Frontiers of Earth Science*, 6(1):57—65. doi: 10.1007/s11707-012-0307-1
- 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., Wang, J.X., Xie, S.C., et al., 2010. Morphological Variation and Habitat Selection of Testate Amoebae in Dajiuju Peatland, Central China. *Journal of Earth Science*, 21(S1): 253—256. doi: 10.1007/s12583-010-0228-4
- Qin, Y.M., Xie, S.C., 2011. Moss-Dwelling Testate Amoebae and Their Community in Dajiuju Peatland of Shennongjia Mountains, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 26(1): 3—9. doi: 10.1080/02705060.2011.553810
- Qin, Y.M., Xie, S.C., Gu, Y.S., et al., 2008. Pontigulasiapan-gulostomanov.Spec., a New Testate Amoeba from the Peatland of Shennongjia Mountains, China. *Acta Protozoologica*, 47(2):155—160.
- 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. doi: 10.1016/j.ejop.2010.09.004
- 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 Paleoecology of China, with Particular Reference to Genus Argynnia Vucetich. *Quaternary Sciences*, 36(6):1060—1067 (in Chinese with English abstract).
- Rezanezhad, F., Price, J.S., Quinton, W.L., et al., 2016. Structure of Peat Soils and Implications for Water Storage, Flow and Solute Transport: A Review Update for Geochimists. *Chemical Geology*, 429: 75—84. doi: 10.1016/j.chemgeo.2016.03.010
- Shi, M., Yu, J.X., Gu, Y.S., et al., 2008. Climate Changes in Interim of Late Pleistocene and Holocene in Dajiuju Basin of Shennongjia, Hubei Province: Evidence from Pollen. *Geological Science and Technology Information*, 27(6):24—28 (in Chinese with English abstract).
- Tan, K.J., Zhou, X.Q., Zhang, Z.Q., 2014. Development and Protection of Dajiuju Wetland, Shennongjia. *Hubei Forestry Science and Technology*, 43(1):52—55 (in Chinese).
- Tuo, D.Z., Liu, S.X., 2006. Wetlands of Hubei Province. Hubei Science and Technology Press, Wuhan, 48—50 (in Chinese).
- Wang, X.X., Huang, X.Y., Sachse, D., et al., 2016. Comparisons of Lipid Molecular and Carbon Isotopic Compositions in Two Particle-Size Fractions from Surface Peat and Their Implications for Lipid Preservation. *Environmental Earth Sciences*, 75(15): 1142. doi: 10.1007/s12665-016-5960-3
- White, T., 2012. Special Focus: The US Critical Zone Observatories. *Int. Innovation Environment*, (8):108—127.
- Wu, Y., Xiang, W., Fu, X.F., 2016. Effect of Phenolic Acids Derived from Peatland on Surface Behavior of Iron and Its Significance: A Case Study in Hani Peatland. *Earth Science*, 41(4): 683—691 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, W., Wan, X., Yan, S., et al., 2013. Inhibitory Effects of Drought Induced Acidification on Phenol Oxidase Activities in Sphagnum-Dominated Peatland. *Biogeochem-*

- istry, 116(1—3): 293—301. doi: 10.1007/s10533-013-9859-8
- 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 Dajiuju Peatland. *Science China: Earth Sciences*, 57(5): 1013—1020. doi: 10.1007/s11430-013-4752-9
- Xiao, J. Y., Xiao, X. Y., Zhang, M. H., et al., 2015. Late Pleistocene Montane Vegetation and Climate History from the Dajiuju Basin in the Western Hubei Province of Central China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 222: 22—32. doi: 10.1016/j.revpalbo.2015.08.001
- Xie, S., Evershed, R. P., Huang, X., et al., 2013. Concordant Monsoon-Driven Postglacial Hydrological Changes in Peat and Stalagmite Records and Their Impacts on Prehistoric Cultures in Central China. *Geology*, 41(8): 827—830. doi: 10.1130/g34318.1
- Xie, S. C., Hu, C. Y., Gu, Y. S., et al., 2015. Paleohydrological Variation since 13 ka B.P. in Middle Yangtze Region. *Earth Science*, 40(2): 198—205 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Lan, J. H., Sheng, E. G., et al., 2016. Tropical/Subtropical Peatland Development and Global CH₄ during the Last Glaciation. *Scientific Reports*, 6(1): 30431. doi: 10.1038/srep30431
- Yang, J. F., Zhang, C. G., 2014. Earth's Critical Zone: A Holistic Framework for Geo-Environmental Researches. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 41(3): 98—104, 110 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. Y., Wu, Y., Huang, J. H., et al., 2009. Lignin Characteristics in a Peat Core of Lake Dajiu. *Geochimica*, 38(2): 133—139 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z., 2011. Holocene Carbon Flux Histories of the World's Peatlands: Global Carbon-Cycle Implications. *The Holocene*, 21(5): 761—774. doi: 10.1177/0959683610386982
- Yu, Z. C., Loisel, J., Brosseau, D. P., et al., 2010. Global Peatland Dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 37(13): L13402. doi: 10.1029/2010gl043584
- Zhang, W. C., Yan, H., Cheng, P., et al., 2016. Peatland Development and Climate Changes in the Dajiuju Basin, Central China, over the Last 14 100 Years. *Quaternary International*, 425: 273—281. doi: 10.1016/j.quaint.2016.06.039
- Zhang, Y. M., Zheng, M., Meyers, P. A., et al., 2017. Impact of Early Diagenesis on Distributions of Sphagnum n-Alkanes in Peatlands of the Monsoon Region of China. *Organic Geochemistry*, 105: 13—19. doi: 10.1016/j.orggeochem.2016.12.007
- Zhang, Z., Wang, C. F., Qiu, X., et al., 2009. Occurrence of Highly Abundant Bacterial Hopanoids in Dajiuju Peatland, Central China. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(3): 320—326. doi: 10.1007/s11707-009-0039-z
- Zhao, K. Y., 1999. *China Marsh*. Science Press, Beijing, 408—410 (in Chinese).
- Zhao, Y., Höller, A., Yu, Z. C., 2007. Late Holocene Natural and Human-Induced Environmental Change Reconstructed from Peat Records in Eastern Central China. *Radiocarbon*, 49(2): 789—798. doi: 10.1017/s0033822200042661
- Zhao, Y., Yu, Z. C., Tang, Y., et al., 2014. Peatland Initiation and Carbon Accumulation in China over the Last 50 000 Years. *Earth-Science Reviews*, 128: 139—146. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.11.003
- Zhao, Z. Z., He, P. Y., 1997. *Quaternary Glacial and Environment in Shennongjia*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zheng, L., Huang, X., 2017. Occurrence of a Tetraaromatic Hopane in the Late Holocene Peat Deposit, Central China. *Organic Geochemistry*, 106: 25—29.
- Zheng, Q. F., Zhang, M. H., Li, J. J., et al., 2014. The Climate and Environment Change of Shennongjia Area Recorded in the Core of Dajiuju Basin since the Late Middle Pleistocene. *Geographical Research*, 33(6): 1167—1177 (in Chinese with English abstract).
- 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. doi: 10.1111/j.1502-3885.2009.00098.x
- Zhu, C., Ma, C. M., Zhang, W. Q., et al., 2006. Pollen Record from Dajiuju Basin of Shennongjia and Environmental Changes since 15.753 ka B.P.. *Quaternary Sciences*, 26(5): 814—826 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y., Chen, Y., Zhao, Z. J., et al., 2009. Record of Environmental Change by α -Cellulose $\delta^{13}\text{C}$ of Sphagnum Peat at Shennongjia, 1 000—4 000 a BP. *Chinese Science Bulletin*, 54(20): 3108—3116 (in Chinese).
- Zhu, Y., Zhao, Z. J., Chen, Y., et al., 2013. Record of Environmental and Millennial-Scale Climatic Changes during MIS3 by Peat at Shennongjia. *Quaternary Sciences*, 33(1): 155—166 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. G., Li, G., Zhang, G. L., et al., 2015. Soil Security: From Earth's Critical Zone to Ecosystem Services. *Acta Geographica Sinica*, 70(12): 1859—1869 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安培浚,张志强,王立伟,2016.地球关键带的研究进展.地球科学进展,31(12):1228—1234.
- 第三次国家气候变化评估报告编委会,2015.北京:第三次国家气候变化评估报告,262—264.
- 杜明,盛桂莲,2014.神农架大九湖湿地泥炭藓遗传多样性 RAPD 研究.华中师范大学学报(自然科学版),48(5):717—721.
- 何报寅,2007.神农架大九湖泥炭的环境变化记录.武汉:中国地质大学出版社.
- 何报寅,张穗,蔡述明,2003.近 2 600 年神农架大九湖泥炭的气候变化记录.海洋地质与第四纪地质,23(2):109—115.
- 湖北省神农架林区地方志编纂委员会,1996.神农架志.武汉:湖北科学技术出版社.
- 黄咸雨,谢树成,2016.泥炭沉积分子古气候研究进展.第四纪研究,36(3):666—675.
- 李文漪,刘光琇,周明明,1992.湖北西部全新世温暖期植被与气候.见:施雅风,孔昭宸.北京:中国全新世大暖期气候与环境.海洋出版社,94—99.
- 刘会平,唐晓春,孙东怀,等,2001.神农架大九湖 12.5 ka B.P.以来的孢粉与植被序列.微体古生物学报,18(1):101—109.
- 刘乔,王红梅,龚林锋,等,2013.湖北神农架大九湖泥炭地泥炭藓共生细菌群落分析.第四纪研究,33(1):79—87.
- 伦子健,顾延生,刘红叶,等,2016.神农架大九湖湿地表土植物硅体记录及其环境意义.第四纪研究,36(3):656—665.
- 罗涛,伦子健,顾延生,等,2015.神农架大九湖湿地植物群落调查与生态保护研究.湿地科学,13(2):153—160.
- 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,张文静,李鸿凯,等,2011.中国有壳变形虫 *Argynnia* 属的修订及其若干环境重建问题探讨.第四纪研究,36(6):1060—1067.
- 石敏,喻建新,顾延生,等,2008.神农架大九湖晚更新世与全新世之交的气候变化——来自孢粉的信息.地质科技情报,27(6):24—28.
- 谭开甲,周晓庆,张志麒,2014.神农架大九湖湿地开发与保护.湖北林业科技,43(1):52—55.
- 庹德政,刘胜祥,2006.湖北湿地.武汉:湖北科学技术出版社,48—50.
- 邬钰,向武,傅先芳,等,2016.东北哈尼泥炭沼泽中酚酸的组成、酚铁相互作用及其环境意义.地球科学,41(4):683—691.
- 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,胡超涌,顾延生,等,2015.最近 13 ka 以来长江中游古水文变化.地球科学,40(2):198—205.
- 杨建锋,张翠光,2014.地球关键带:地质环境研究的新框架.水文地质工程地质,41(3):98—104,110.
- 杨丽阳,吴莹,黄俊华,等,2009.大九湖泥炭柱样的木质素特征.地球化学,38(2):133—139.
- 赵魁义,1999.中国沼泽志.北京:科学出版社,408—410.
- 赵志中,何培元,1997.神农架第四纪冰期与环境.北京:地质出版社.
- 郑秋凤,张茂恒,李吉均,等,2014.大九湖钻孔记录的神农架地区中更新世晚期以来的气候环境变化.地理研究,33(6):1167—1177.
- 朱诚,马春梅,张文卿,等,2006.神农架大九湖 15.753 ka B.P.以来的孢粉记录和环境演变.第四纪研究,26(5):814—826.
- 朱芸,陈晔,赵志军,等,2009.神农架大九湖泥炭藓泥炭 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 1 000~4 000 a B.P.间环境变化.科学通报,54(20):3108—3116.
- 朱芸,赵志军,陈晔,等,2013.神农架泥炭记录的 MIS3 阶段环境变化及千年尺度气候波动.第四纪研究,33(1):155—166.
- 朱永官,李刚,张甘霖,等,2015.土壤安全:从地球关键带到生态系统服务.地理学报,70(12):1859—1869.