

鲍锟山, 邢伟, 宋理洪, 等. 黑龙江就与湿地过去百年水位变化历史及驱动机制[J]. 第四纪研究, 2018, 38(4):000-000.

Bao Kunshan, Xing Wei, Song Lihong, et al. A 100-year history of water table change and driving mechanism in Heilongjiang River basin wetlands[J]. Quaternary Sciences, 38(4):000-000.

doi:10.11928/j.issn.1001-7410.2018.04.□

文章编号: 1001-7410(2018)04-□-16

黑龙江流域湿地过去百年水位变化历史及驱动机制^{*}

鲍锟山¹, 邢伟², 宋理洪³, 李鸿凯⁴, 刘汉向⁵, 王国平⁵

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 信阳师范学院地理科学学院, 河南 信阳 464000;
3. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 4. 东北师范大学地理科学学院泥炭沼泽研究所, 吉林 长春 130024; 5. 中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 吉林 长春 130102)

摘要: 在黑龙江流域上游图强、中游友好和下游洪河湿地采集3个典型泥炭剖面, 基于²¹⁰Pb/¹³⁷Cs法建立剖面年代学框架, 利用有壳变形虫指标, 借助转换函数法定量重建人类世以来流域湿地水位变化历史, 并探讨其可能的影响因素。研究发现, 黑龙江流域图强、友好和洪河湿地泥炭柱芯年代均涵盖人类世的时间尺度, 且不同区域湿地中有壳变形虫的物种组成呈现显著的空间差异。根据约束聚类结果, 黑龙江流域湿地水位变化可划分为3个阶段: 1) 人类世早期(1915年左右), 黑龙江流域湿地生境较为湿润, 有壳变形虫以喜湿物种为主, 如附石/泥炭藓截口虫(*Heleopera petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫(*Hyalosphenia papilio*)等, 但水位埋深逐渐增加, 湿地生境呈现变干的趋势。区域气候变化是影响湿地水位变化的主要因素。2) 1915~1990年左右, 黑龙江流域湿地水位变化呈现显著的空间差异, 图强湿地水位埋深显著降低, 喜湿物种增加, 以指示湿润生境的凤蝶茄壳虫(*Hyalosphenia papilio*)、针棘匣壳虫类(*Centropyxis aculeata* type)为主; 而友好和洪河湿地水位埋深逐渐增加, 湿地持续变干, 指示湿润环境的物种显著减少, 指示干燥环境的顶足法帽虫(*Phryganella acropodia*)、小匣三角嘴虫(*Trigonopyxis arcula*)、苔藓鳞盖虫(*Assulina muscorum*)丰度增大。图强和友好湿地因人类活动影响较弱, 区域气候变化仍然是湿地水位变化的主要驱动因素, 而洪河湿地水位则受人类活动的显著影响。3) 1990年以来, 黑龙江流域湿地水位变化因受人类活动的显著影响, 上游和中游湿地水位埋深增加, 湿地生境持续变干, 顶足法帽虫(*Phryganella acropodia*)、苔藓鳞盖虫(*Assulina muscorum*)和半空鳞盖虫(*Assulina seminulum*)占优势; 而下游湿地因农田开垦, 农田退水使其水位埋深呈现降低的趋势。黑龙江流域人类世以来湿地水位变化受区域气候变化和人类活动的共同影响, 在上、中和下游呈现出显著的空间差异。

关键词: 有壳变形虫; 人类世; 水位变化; 泥炭地; 东北地区

中图分类号: Q959.212, Q958, P941.78

文献标识码: A

0 引言

人类世是在人类活动引起的全球性生态问题这一背景下提出的, 强调人类活动也是一种重要的地质营力, 其对地球改造的程度与后果足以与传统意义上的地质营力(地震、造山运动等)产生的影响相匹敌^[1]。Crutzen等^[2]提议将18世纪下半叶, 即西方国家开始工业革命时作为全新世和人类世的界线。过去百年以来, 全球环境变化已经从全新世时期自然因素影响为主发展到以人类活动为主的人类

世(*Anthropocene*)时期^[3]。强烈的人类活动已经导致世界范围内的湖泊与湿地生态系统经历着前所未有的变化, 由此产生的一系列生态和环境问题受到各国政府和广大科研人员的普遍关注^[4~5]。

泥炭沼泽作为重要的陆地生态系统之一, 因其独特的形成原因和物理化学性质, 对气候变化和人类活动的响应非常敏感, 使其成为研究古气候和古环境的良好地质档案^[6]。近年来, 国内许多学者利用高山泥炭的腐殖化度^[7]、磁化率^[8]、粒度^[9]、孢粉^[9]和地球化学^[10]记录, 重建了过去中晚全新世以

2018-03-09 收稿, 2018-05-16 收修改稿

* 国家重点基础研究发展计划项目(批准号:2016YFA0602300)、国家自然科学基金项目(批准号:41661144004)和国家建设高水平大学公派研究生项目(批准号:201504910625)共同资助

第一作者简介: 鲍锟山, 男, 34岁, 副研究员, 湖沼沉积与环境演变研究, E-mail: ksbao@niglas.ac.cn

来的高分辨率的气候变化历史,也揭示了泥炭沼泽生态系统对气候变化的响应特征。而水文是泥炭沼泽发育和演替的重要驱动因子^[11],与区域夏季有效降水息息相关,而人类活动也可以极大地改变泥炭沼泽的本来面貌^[12]。因此,泥炭沼泽古水位成为近年来以泥炭作为信息载体研究古气候和古环境的重要参数。重建泥炭沼泽古水位变化,不仅可以揭示泥炭沼泽自身的发育和演化规律,还可以帮助我们进一步了解泥炭沼泽生态系统对全球气候变暖及人类活动的响应。

有壳变形虫(*Testate amoebae*)是一类单细胞原生动物,对环境变化反应敏感,近年来深受古环境研究青睐^[13~15]。在欧洲和北美亚高山泥炭地开展的大量研究表明,水位(Water table depth)或湿度(Moistures)是影响有壳变形虫分布的主要环境因子^[15~16]。不同的有壳变形虫对环境中水分的要求各不相同,某些有壳变形虫种类对地下水位具有十分狭小的忍耐区间(<4 cm),对水位变化十分敏感,随着泥炭沼泽深度的变化,有壳变形虫种类也呈现出显著的变化^[17~18]。所以可以建立现代有壳变形虫-地下水位转换函数模型,来定量重建历史时期高分辨率的古水位的变化曲线,该方法已经成功地应用在欧洲和北美亚高山泥炭地下水位重建研究中^[13,16]。通过构建有壳变形虫-水位转换函数模型,能够定量恢复泥炭地不同时间尺度古水位变化,有利于探讨泥炭地水位变化的气候意义^[13~15,19~21]。

黑龙江流域是东北亚最大的流域,横跨中国、俄罗斯和蒙古3个国家,中国部分占整个流域面积的48%,包括黑龙江省以及内蒙古和吉林省大部分地区,是我国泥炭沼泽的主要分布区^[22]。该地区气候严寒,自元朝之后才真正受中央管辖,但原住居民一直保持原始游猎生活,人类活动影响可追溯到鸦片战争(1840年)以后的森林大规模利用^[23]。随着流域内人类活动不断加强,森林覆盖率减少,流域内泥炭沼泽生态系统的管理和保护也日益受到学者的普遍关注。

本文根据已建立的东北地区泥炭地有壳变形虫-环境因子转换函数模型,尝试定量重建黑龙江流域(中国境内)沼泽湿地古水位变化,对比黑龙江上、中、下游湿地水位波动以探讨人类活动影响下区域环境的变化规律,从而为流域内湿地生态系统的保护和恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本文研究区位于中国境内的黑龙江流域南部区域(图1)。黑龙江流域位于亚洲东北部($41^{\circ}42' \sim 53^{\circ}33'N$, $115^{\circ}25' \sim 135^{\circ}02'E$),是南部的额尔古纳河和北部的石勒喀河流入中国黑龙江省漠河以西的洛古河附近汇合后称为黑龙江。在俄罗斯境内,有结雅河、布列亚河、阿姆贡河等支流注入;在中国

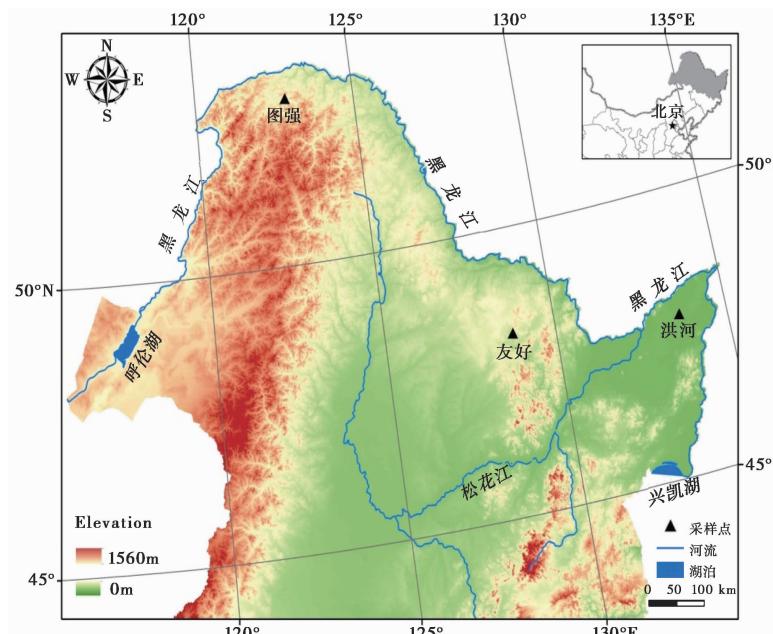


图1 研究区地理位置和采样信息

Fig. 1 Location of sampling sites in our study area

境内有松花江、乌苏里江等支流。以南源额尔古纳河上游的可鲁伦河为正源, 黑龙江流域总长度达5498 km, 流域面积达 $1.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[24]。该流域属于寒温带与温带季风气候, 年平均气温在-8~6℃, 1月平均气温-28.5℃, 7月平均气温19.5℃, 年降水量在250~800 mm, 主要集中在东部沿海地带^[25]。黑龙江上游样地表层以泥炭藓(*Sphagnum*)为主, 灌木层主要有兴安落叶松(*Larix gemelinii*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)、狭叶杜香(*Ledum palustre var. Angustrum*)等, 草本层以苔草(*Carex rigescens*)为主; 黑龙江中游样地表层以泥炭藓(*Sphagnum*)为主, 灌木层主要有兴安落叶松(*L. gemelinii*)、狭叶杜香(*L. palustre var. Angustrum*)等, 草本层以蕨囊苔草(*Carex lehmanii*)为主; 黑龙江下游样地表层主要以小叶章(*Calamagrostis angustifolia*)、漂筏苔草(*Carex pseudocuraica*)、乌拉苔草(*Carex meyeriana*)等为主。流域内地貌类型多样, 西部为山地、高原, 中部为平原, 北部和东南有山地和平原。河流、湖泊遍布, 湿地面积大, 相对集中地分布于北部大、小兴安岭山地和西部的松嫩平原及东部的三江平原, 其他地区只有零星分布。近30年来流域内多年均温呈升高趋势, 平均降水量则在波动中呈减少态势, 再加上人为活动影响, 流域内发生了森林生态系统退化、湿地萎缩、冻土层退缩、土地沙化等生态环境问题^[26]。

1.2 样品采集

采样点分别位于黑龙江流域上游大兴安岭图强湿地(TQ)、中游小兴安岭友好湿地(YH)和下游三江平原洪河湿地(HH)(图1和表1)。图强和友好的采样工作于2015年9月进行, 采样时先将取样点表面修剪整齐, 在表面做20 cm×20 cm的长方形标记, 用刀沿边缘下切, 根据实际情况确定每次的切割深度。小心的取出样品, 标记好垂直方向, 然后按垂直方向从上往下1 cm间距分样。洪河的采样工作于2013年8月进行, 利用俄罗斯定深泥炭钻进行泥炭柱芯样品的采集, 并在现场进行1 cm间隔取样。将样品放置到标有编号的自封袋内, 带

回实验室置于4℃的冰箱中保存。TQ取样40个, YH取样50个, HH取样50个。

1.3 基本理化指标和年代分析

沼泽湿地沉积物干容重、有机质和年代测定主要在中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室完成。对于新采集的样品, 其干容重利用环刀法测定。将采集的样品放满固定体积的铝盒内, 随后将样品放入105℃恒温烘干12 h后, 然后称重, 得出样品干容重。为保证数据的准确性, 在样品放入时要避免压实。干容重测完之后, 将105℃恒温烘干12 h的样品放在马弗炉中在550℃完全燃烧4 h, 使灰烬灼烧至恒重为止, 从而得到每个层位湿地沉积物的烧矢量^[27]。干容重和烧矢量测定时要保证操作顺序且同时进行。

湿地剖面年代测定采用²¹⁰Pb/¹³⁷Cs测年法。测量前将样品自然风干, 用玛瑙研钵磨细过200目筛以保证样品的均一性, 并105℃下烘24 h至恒重, 取约5~10 g样品转移到离心管, 密封后静置三周以使核素达到平衡, 之后对样品中²¹⁰Pb、²²⁶Ra和¹³⁷Cs的比活度进行测量。为保证充分的计数, 样品测量时间为24 h。放射性核素的测量仪器为美国AMETEK公司生产的高纯锗伽玛谱仪。利用²¹⁰Pb放射性剖面的恒定补给速率模型(CRS)并参考¹³⁷Cs的计年时标建立泥炭剖面深度-年代框架。

1.4 有壳变形虫样品处理与鉴定

湿地剖面中有壳变形虫样品的提取按照文献[28]推荐的标准方法。具体方法为: 1) 将泥炭样品按序号各取2 cm³置于250 ml的烧杯中, 用蒸馏水浸泡12 h以上, 期间不定期用玻璃棒搅拌, 然后反复冲洗, 以使有壳变形虫壳体从基质中分离出来; 2) 用蒸馏水冲洗样品并过300 μm孔径筛, 去除粗粒杂质, 再将筛下的样品过10 μm孔径筛, 筛除细粒杂质, 从而筛选出10~300 μm的部分; 3) 将10 μm孔径筛上的样品用蒸馏水缓慢冲洗并转入15 ml离心管, 将离心管置于离心机, 在离心机上以3000 rpm离心5 min, 倒出上层清液; 4) 将每

表1 采样点信息表

Table 1 Sample information of the study region

区域	剖面名称	经纬度	深度	切割	海拔	pH	主要植物种群
上游	大兴安岭图强(TQ)	52°56'N, 122°51'E	40 cm	1 cm	580 m	4.5~5.2	泥炭藓、兴安落叶松、笃斯越桔等
中游	小兴安岭友好(YH)	48°10'N, 128°45'E	50 cm	1 cm	460 m	4.7~5.2	泥炭藓、兴安落叶松、蕨囊苔草等
下游	三江平原洪河(HH)	47°47'N, 133°37'E	50 cm	1 cm	130 m	5.3~5.9	小叶章、漂筏苔草、毛苔草、乌拉苔草等

个离心完毕的样品中分别加入一粒石松孢子作为外源计数标记，并滴入适量甘油密封保存于4℃条件下，以备制作薄片观察、鉴定。

有壳变形虫种类鉴定依据 Ogden 和 Hedley^[29]、Charman 等^[18]的著作。鉴定时，将制作好的玻片放在生物显微镜下放大200倍观察，并逐行或逐列扫描，鉴定、统计玻片上所有有壳变形虫，个别物种需要放大400倍鉴定，每个样品累计观察不少于150个壳体，若个别样品壳体浓度较低，则至少观察6个玻片；同时计数外源的石松孢子数量，用于估算样品有壳变形虫丰度。

1.5 数据处理

根据有壳变形虫鉴定统计结果，计算黑龙江流域湿地剖面各有壳变形虫物种的相对丰度，并利用已建立的中国东北地区泥炭地有壳变形虫-水位转换函数进行研究区泥炭剖面古水位定量重建。加权平均(Weighted Averaging，简称 WA)、加权平均偏最小二乘(Weighted Averaging Partial Least Squares，简称 WA-PLS)和最大似然(Maximum Likelihood，简称 ML)是应用最为广泛的有壳变形虫-水位转换模型^[13~14, 16, 19, 30]。应用这些模型得出水位埋深重建结果后对其进行显著性检验。利用 Coniss 约束聚类分析，划分泥炭剖面水位变化阶段。

2 结果

2.1 湿地柱芯沉积年代

通过测定²¹⁰Pb的放射性比活度，利用恒定放射

性通量模式(CRS)，辅以¹³⁷Cs时标校正方法，建立湿地沉积层年代序列。图强和洪河湿地泥炭剖面²¹⁰Pb放射性比活度已经报道^[31~32]，它们与友好剖面的放射性结果都总结在图2中。¹³⁷Cs分子扩散作用不足以改变其在沉积物柱芯垂直剖面上的峰值位置，基于²¹⁰Pb放射性比活度的CRS模型，辅以¹³⁷Cs垂直剖面峰值的时标，初步建立了各泥炭剖面的年代深度序列(图2)。黑龙江流域上、中、下游3个湿地剖面底部年龄分别为1895年、1893年和1894年，3个剖面年代均涵盖了近百年的时间尺度，记录了人类世以来的环境变化历史。

2.2 湿地剖面基本理化性质

黑龙江流域上、中、下游湿地剖面有机质和干容重随剖面深度的变化特征如图3所示。不同区域湿地剖面有机质和干容重差别较大。图强和洪河湿地剖面干容重变化分别为0.06~0.61 g/cm³和0.10~0.20 g/cm³，平均干容重为0.26 g/cm³和0.15 g/cm³，随着剖面深度的增加，干容重呈现出增大的趋势。友好湿地剖面干容重变化范围较大，在0.40~0.96 g/cm³之间，平均干容重为0.74 g/cm³。图强和洪河湿地剖面有机质含量变化分别为52.7%~96.3%和70.9%~88.6%；随着剖面深度的增加，湿地有机质含量呈现出减小的趋势。友好湿地剖面有机质含量较小，在13.5%~28.6%之间。

2.3 有壳变形虫剖面变化和古水位定量重建

大兴安岭图强和小兴安岭友好湿地有壳变形虫

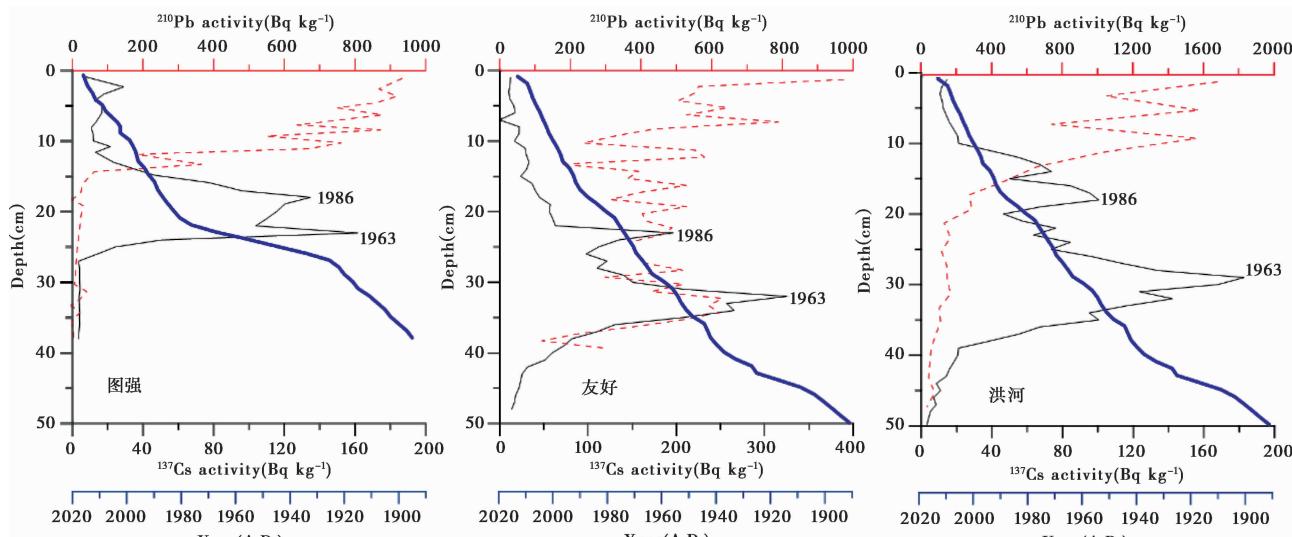


图2 湿地剖面深度-年代模型(洪河的年代见文献[31]，图强的年代见文献[32])

Fig. 2 Depth-age model of peat profile(Honghe age after reference [31], Tuqiang age after reference [32])

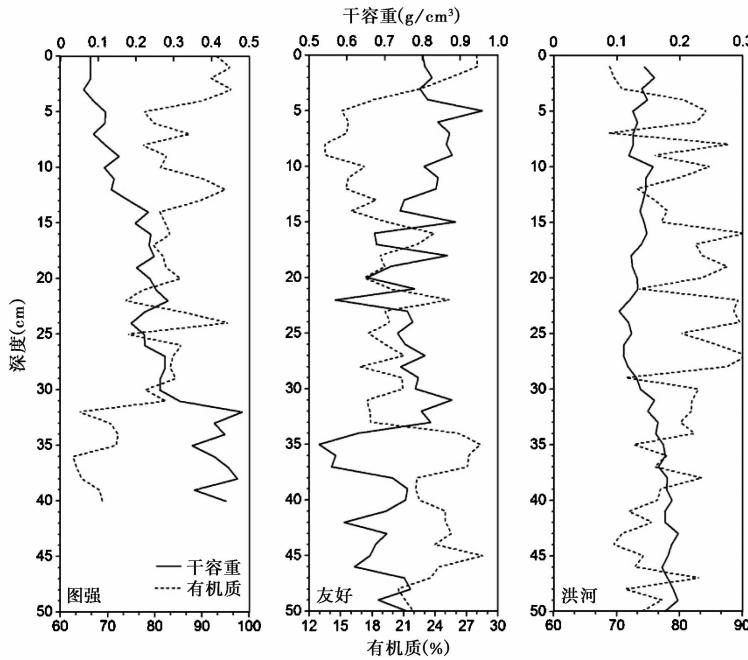


图 3 湿地剖面干容重和烧矢量

Fig. 3 Dry bulk density and loss on ignition of wetland profile

化石见图 4。

图强湿地剖面的有壳变形虫图谱见图 5, 典型有壳虫如附录图版所示。40 个样品中共计观察有壳变形虫 42 种。主要种类包括苔藓鳞盖虫 (*Assulina muscorum*)、半空鳞盖虫 (*Assulina seminulum*)、凤蝶茄壳虫 (*Hyalosphenia papilio*)、附石/泥炭藓截口虫 (*Heleopera petricola/sphagni*)、片口匣壳虫类 (*Centropyxis platystoma* type)、表圆壳虫 (*Cyclopyxis arcelloides*)、顶足法帽虫 (*Phryganella acropodia*)、染色梨壳虫 (*Nebela tincta*)、军梨壳虫 (*Nebela militaris*)、颈梨壳虫 (*Nebela collaris*) 等。从剖面变化来看, 图强湿地剖面上部以喜干种类为主, 染色梨壳虫 (*Nebela tincta*)、顶足法帽虫 (*Phryganella acropodia*) 等相对丰度较高, 这些种类自 20 cm 开始减少甚至消失。相应地, 一些喜湿种类如凤蝶茄壳虫 (*Hyalosphenia papilio*)、附石/泥炭藓截口虫 (*Heleopera petricola/sphagni*)、苔藓鳞盖虫 (*Assulina muscorum*) 的相对丰度逐渐升高。

友好湿地剖面的有壳变形虫图谱见图 6。50 个样品中有壳变形虫共计 28 种。主要种类包括苔藓鳞盖虫 (*Assulina muscorum*)、小口圆壳虫 (*Cyclopyxis kahli*)、附石/泥炭藓截口虫 (*Heleopera petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫 (*Hyalosphenia papilio*)、顶足法帽虫 (*Phryganella acropodia*)、小匣三角嘴虫 (*Trigonopyxis arcula*) 等。从剖面变化来

看, 友好泥炭剖面上部以喜湿种类为主, 附石/泥炭藓截口虫 (*Heleopera petricola/sphagni*)、苔藓鳞盖虫 (*Assulina muscorum*)、片口匣壳虫类 (*Centropyxis platystoma* type) 等相对丰度较高。

洪河湿地剖面的有壳变形虫图谱见图 7。在泥炭剖面上部 50 厘米的样品中获得了足够数量的有壳变形虫壳体 (>150), 共获得有壳变形虫 35 种。剖面记录的优势物种有针棘匣壳虫 (*Centropyxis aculeata* type)、网匣壳虫 (*Centropyxis cassis* type)、片口匣壳虫 (*Centropyxis platystoma* type) 和表圆壳虫 (*Cyclopyxis arcelloides* type); 绝大部分的物种出现频次和丰度都相对较低(图 7)。整个剖面中, 湿润环境指示物种针棘匣壳虫 (*Centropyxis aculeata* type) 丰度相对较高、而干旱环境指示物种顶足法帽虫 (*Phryganella acropodia*) 丰度相对较低。根据湿地剖面有壳变形虫的物种组合, 通过有壳变形虫-水位转换函数模型重建了黑龙江流域上、中、下游 3 个湿地剖面的水位埋深的初步变化规律(图 8); 并对重建结果进行了显著性检验。结果表明, WA 模型的重建结果最为显著。因此, 选择 WA 模型对黑龙江流域湿地水位埋深进行重建。3 个剖面的古水位均呈现了显著的变化, 且重建结果均大致可分为 3 个阶段(图 5~8): 图强湿地剖面 33 cm 以下, 水位埋深值较大, 约为 20 cm, 湿地水位较低; 此后水位逐渐上升, 13 cm 以上水位埋深



图4 大兴安岭图强和小兴安岭友好湿地有壳变形虫化石图版

图中比例尺代表长度为 10 μm

Fig. 4 Shell amoeba pictures of Tuqiang wetland in Daxing'anling Mountain and Youhao wetland in Xiaoxing'anling Mountain. The scale bar represents 10 μm

逐渐变大，到表层达到最高，水位埋深值达到28 cm。友好湿地剖面41 cm以下，水位埋深约为22 cm；随后水位埋深值减小，在35 cm处逐渐增大，水位下降；23 cm以上，水位埋深也呈现增大

的趋势，但总体变化范围不大。洪河湿地剖面41 cm以下，水位埋深值较大，约为22 cm，湿地水位较低；41~15 cm水位是先减小后增大的波动变化，变化频率和幅度都较小；15 cm以上水位埋深

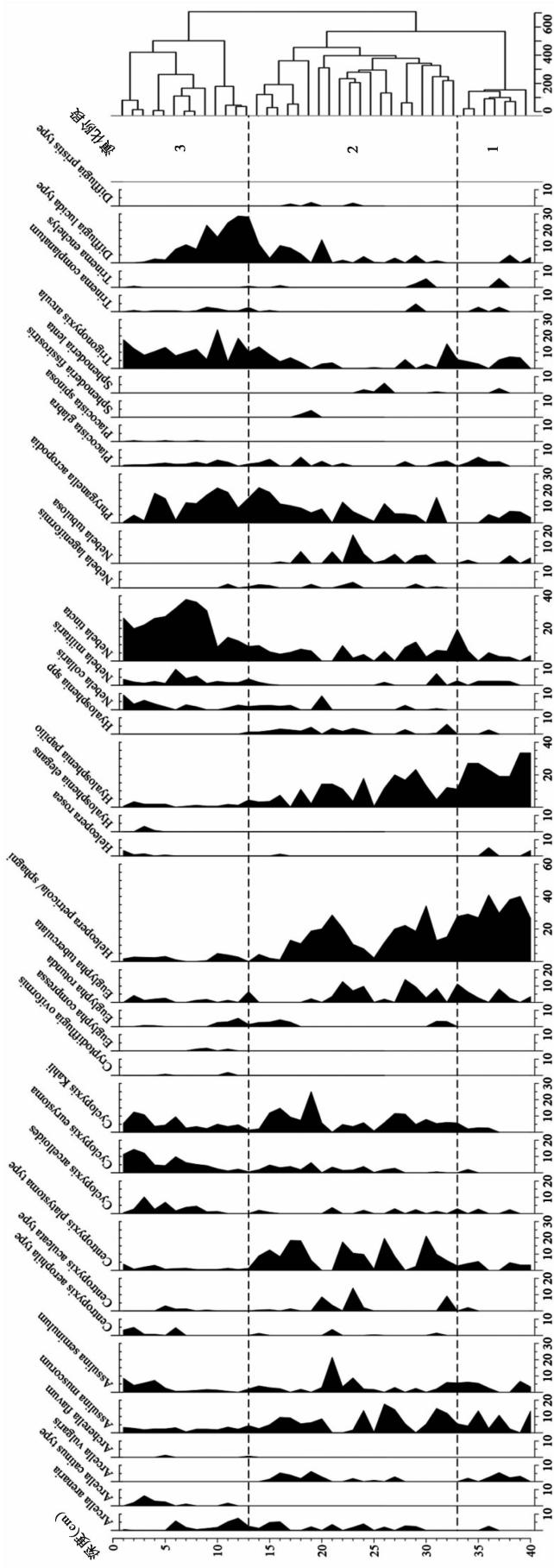


图 5 图强湿地剖面有壳变形虫百分含量
根据约束聚类结果, 剖面变化划分为 3 个阶段, 用虚线表示
expressed in dotted lines according to the result of constrained clustering

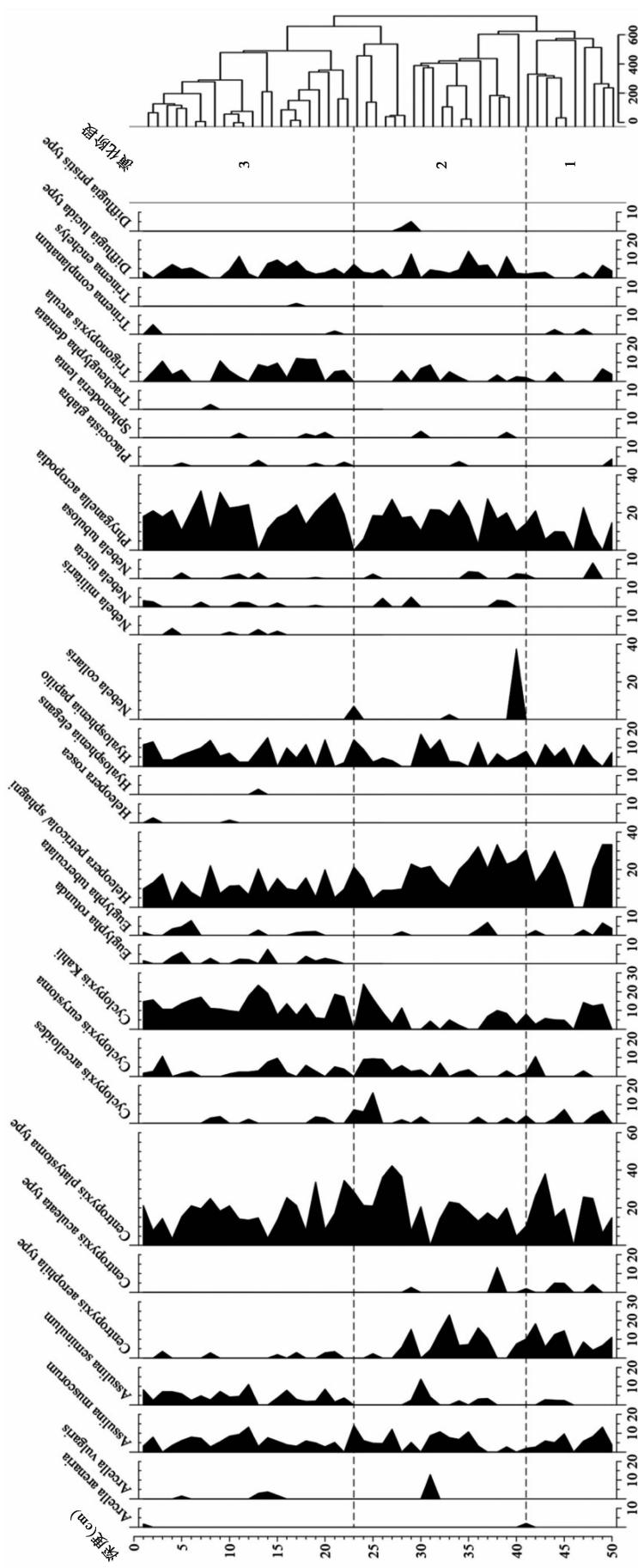


图 6 友好湿地剖面有壳变形虫百分含量
根据约束聚类结果,剖面变化划分3个阶段,用虚线表示

Fig. 6 Percentage data of testate amoebae in Youhao wetland profile. Wetland profile is divided into three phases, expressed in dotted lines according to the result of constrained clustering

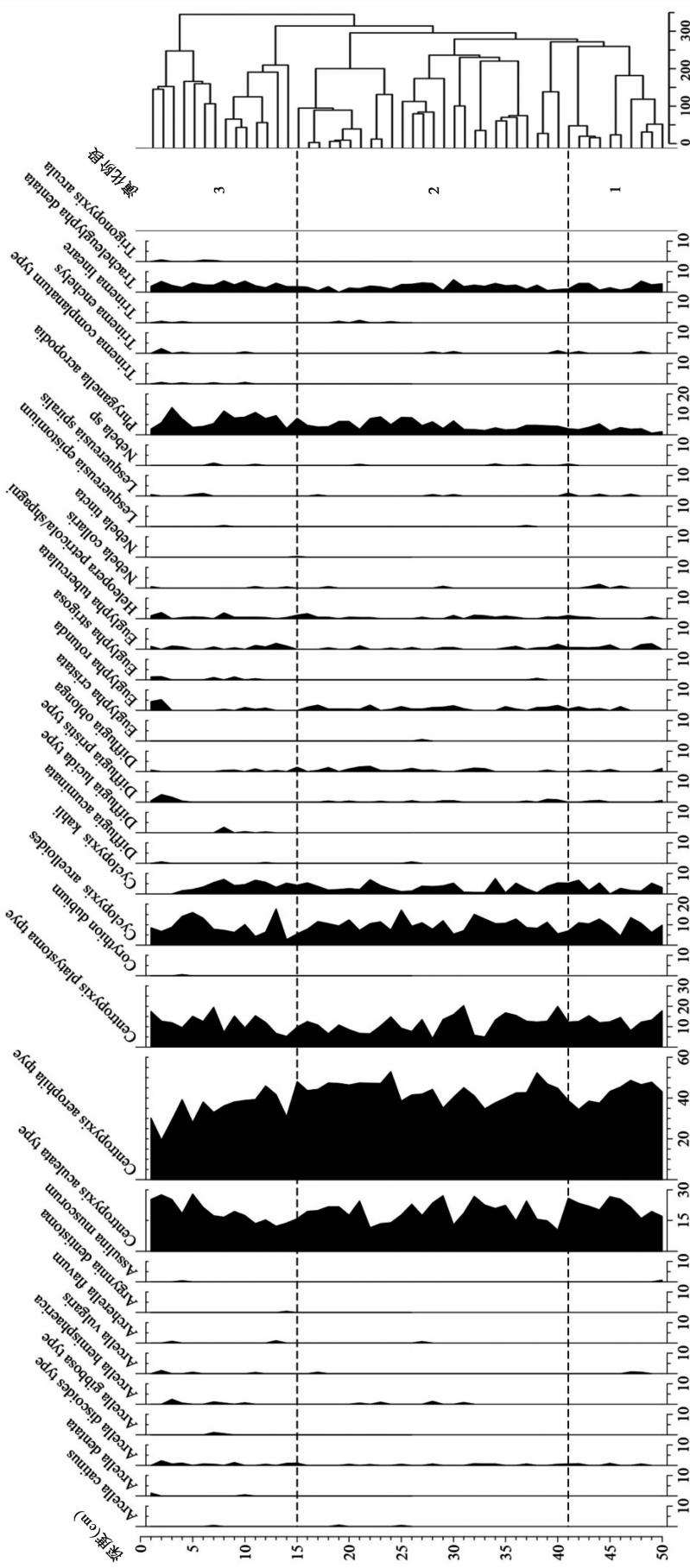


图 7 洪河湿地剖面有壳变形虫百分含量

根据约束聚类结果, 剖面变化划分为 3 个阶段, 用虚线表示
Fig. 7 Percentage data of testate amoebae in Honghe wetland profile. Wetland profile is divided into three phases,
expressed in dotted lines according to the result of constrained clustering

持续减小, 到表层降至最低, 水位埋深值为 16 cm, 湿地水位较高。

2.4 湿地生境及水位变化过程

基于湿地沉积层年代框架, 根据黑龙江流域湿地剖面有壳变形虫的种类、数量和组合特征, 按照约束聚类结果、结合重建的古水位, 可将黑龙江流域湿地近百年来水位变化大致划分 3 个阶段(图 8), 并分别对其进行了物种丰度-水位埋深关系响应分析。

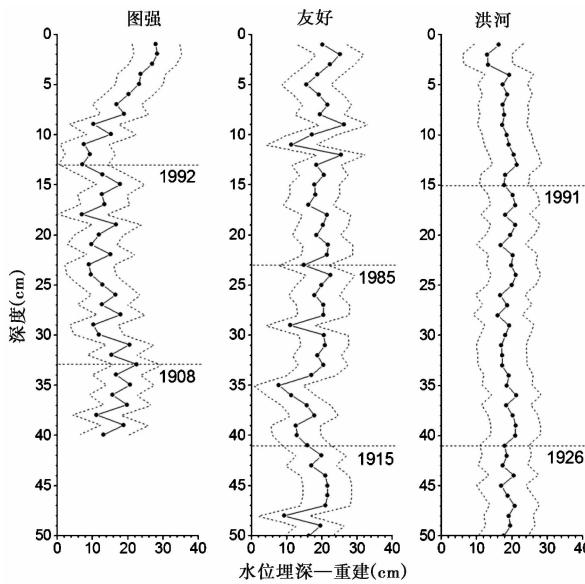


图 8 湿地水位埋深-剖面深度曲线

水位埋深由 WA 模型获得, SEP(Standard error of prediction)用点划线表示; 根据约束聚类结果, 剖面水位变化分 3 个阶段, 用虚线表示
Fig. 8 Depth to water table-depth curve of wetland profile. Depth to water table is inferred from WA model with SEP(Standard error of prediction) expressed in dotted lines. Water table changes of wetland profile are divided into three phases, expressed in dotted lines according to the result of constrained clustering

(1) 图强湿地

第一阶段: 40~33 cm, 这一阶段水位埋深逐渐增大, 即湿地水位在下降, 水位埋深自 11 cm 增大至 23 cm, 水位变化幅度较大, 这说明此阶段有壳变形虫的生境是由湿润逐渐变为干燥。指示湿润环境的针棘匣壳虫类(*C. aculeata* type)少量分布; 指示较湿润环境的附石/泥炭藓截口虫(*H. petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫(*H. papilio*)数量逐渐减少; 指示干燥环境的顶足法帽虫(*P. acropodia*)、军梨壳虫(*N. militaris*)、苔藓鳞盖虫(*A. muscorum*)、半空鳞盖虫(*A. seminulum*)、小

匣三角嘴虫(*T. arcula*)等开始广泛出现。

第二阶段: 33~13 cm, 这一阶段水位埋深逐渐减小, 即湿地水位在上升, 说明此阶段有壳变形虫生境是由干燥逐渐变为湿润。从有壳变形虫物种组合来看, 以指示较湿润生境的附石/泥炭藓截口虫(*H. petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫(*H. papilio*)、针棘匣壳虫类(*C. aculeata* type)为主, 而苔藓鳞盖虫(*A. muscorum*)等种类显著减少。

第三阶段: 13~0 cm, 水位埋深逐渐增大, 生境变干。指示湿润生境的附石/泥炭藓截口虫(*H. petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫(*H. papilio*)等种类显著减少甚至消失; 指示干燥环境的顶足法帽虫(*P. acropodia*)、军梨壳虫(*N. militaris*)、染色梨壳虫(*N. tincta*)、小匣三角嘴虫(*T. arcula*)等种类显著增加。

(2) 友好湿地

第一阶段: 50~41 cm, 水位埋深约为 22 cm, 水位埋深变化幅度都较小, 从有壳变形虫物种组合来看, 以指示较湿润生境的附石/泥炭藓截口虫(*H. petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫(*H. papilio*)为主; 指示干燥环境的顶足法帽虫(*P. acropodia*)、旋匣壳虫类(*C. aerophila* type)、苔藓鳞盖虫(*A. muscorum*)等物种的丰富逐渐增加。

第二阶段: 41~23 cm, 水位埋深先减小后增大, 总趋势是增大, 即水位是在下降, 水位埋深从最小值 8 cm 增大到最大值 23 cm, 水位埋深变化的频率和幅度都比较大, 这说明此阶段有壳变形虫的生境是由湿润逐渐变为干燥。指示较干生境的顶足法帽虫(*P. acropodia*)、小匣三角嘴虫(*T. arcula*)、旋匣壳虫类(*C. aerophila* type)等物种丰度大幅增加; 而附石/泥炭藓截口虫(*H. petricola/sphagni*)等种类显著减少。

第三阶段: 23~0 cm, 这一阶段水位埋深波动变化并不明显, 生境较干, 指示较湿润生境的附石/泥炭藓截口虫(*H. petricola/sphagni*)、凤蝶茄壳虫(*H. papilio*)显著减少, 而顶足法帽虫(*P. acropodia*)、小匣三角嘴虫(*T. arcula*)、小口圆壳虫(*C. kahli*)、苔藓鳞盖虫(*A. muscorum*)、半空鳞盖虫(*A. seminulum*)的丰度大幅增加。

(3) 洪河湿地

第一阶段: 50~41 cm, 水位埋深先减小后增大, 总趋势基本保持不变, 水位埋深在 20 cm 左右。说明此阶段有壳变形虫生境较湿润, 环境稳定。指示湿润环境的针棘匣壳虫类(*C. aculeata* type)大量

分布, 指示干燥环境的顶足法帽虫 (*P. acropodia*)、旋匣壳虫类 (*C. aerophlia* type) 等物种逐渐减少。

第二阶段: 41~15 cm, 这一阶段水位埋深先增大后减小, 总趋势是增大, 即水位是在下降。指示湿润环境的针棘匣壳虫类 (*C. aculeata* type) 逐渐减少, 指示干燥环境的顶足法帽虫 (*P. acropodia*)、旋匣壳虫类 (*C. aerophila* type)、小口圆壳虫 (*C. kahli*) 大量分布。

第三阶段: 15~0 cm, 水位埋深先增大后减小, 总趋势是减小, 即水位是在上升, 这说明此阶段有壳变形虫的生境是由干燥逐渐变为湿润。指示湿润环境的针棘匣壳虫类 (*C. aculeata* type) 显著增加; 指示干燥环境的小口圆壳虫 (*C. kahli*)、旋匣壳虫类 (*C. aerophila* type) 等物种逐渐减少。

3 讨论

3.1 人类世以来黑龙江流域湿地水位变化历史比较

利用湿地沉积物中有壳变形虫化石记录, 通过转换函数等方法重建了黑龙江流域不同区域湿地生境水位埋深的初步变化规律。黑龙江流域 3 个湿地剖面因其所处地理位置的不同, 人类世以来湿地水位变化呈现显著的空间差异(图 8)。

图强湿地位于大兴安岭山区和黑龙江上游, 水位变化较大。由底层至 33 cm 左右 (1895~1908 年), 水位埋深自 11 cm 升高至 23 cm, 水位埋深逐渐增大, 湿地环境呈现变干的趋势; 由 33~13 cm (1908~1992 年), 湿地水位埋深又逐渐变小, 在 25 cm 左右, 湿地水位埋深显著减小, 湿地生境由干燥往湿润的环境转变; 由 13 cm 至顶层 (1992~2015 年), 湿地水位埋深显著增加, 图强湿地生境呈现变干的趋势。整个柱芯水位变化显示了区域气候干湿交替的变化规律, 这种变化趋势与已有的大兴安岭地区湿地古水位重建结果相似^[21]。

友好湿地位于小兴安岭山区和黑龙江中游, 湿地水位变化幅度和频率较大。由底层至 41 cm 左右 (1893~1915 年), 湿地水位平均埋深为 19 cm, 且水位埋深逐渐增大, 指示湿地环境呈现变干的趋势; 由 41~25 cm (1915~1985 年), 水位埋深呈现为减小后增大的趋势, 但整体趋势为增大, 水位埋深变化的频率和幅度都比较大, 湿地生境呈现持续变干的趋势; 由 25 cm 至顶层 (1985~2015 年), 湿地水位埋深变化幅度不大, 但整体仍呈现增大的趋势, 却湿地生境逐渐变干。但 Li 等^[30]在小兴安岭

地区的研究结果却与本研究的变化趋势呈现较大差异, 可能是因为不同区域因气候差异或局部地势不同的两个湿地沉积样品中的有壳变形虫群落组成都有显著的差异, 从而使得重建结果显著不同^[33]。

洪河湿地位于三江平原地区和黑龙江下游, 为平原型淡水沼泽湿地, 水位相对稳定, 因而变化幅度没有大兴安岭地区和小兴安岭地区的湿地水位变化幅度大, 但是也存在高水位-低水位的交替演变规律。由底部到 41 cm 左右 (1894~1926 年), 水位埋深逐渐增大, 但变化趋势并不明显, 指示湿地生境仍为较湿润的环境, 但已开始变干; 由 41~15 cm 左右 (1926~1991 年), 水位埋深表现出先增大后减小再增大的趋势, 水位变化频率较大, 但水增埋深整体仍呈现出增大的趋势, 湿地生境进一步变干; 由 15 cm 至顶层 (1991~2013 年), 湿地水位埋深又表现为先增大后减小的趋势, 而 5 cm 至表层, 水位埋深是表现为持续减小的态势, 说明湿地生境转化为湿润的环境。Song 等^[34]在三江平原利用有壳变形虫重建的湿地水位也表现出相近的趋势, 即在底部, 湿地水位埋深快速升高, 随后处于平稳波动期, 湿地水位埋深缓慢增大, 至表层时湿地水位又逐渐降低。

基于上述分析发现, 黑龙江流域上游、中游和下游的湿地水位变化在人类世以来具有显著的空间差异性(图 8)。在人类世早期, 黑龙江流域湿地水位埋深均呈现增大的趋势, 区域变化较为一致; 随后不同区域湿地水位埋深呈现出显著的空间差异, 黑龙江上游湿地水位埋深显著减少, 指示湿地生境由干燥往湿润的环境转变; 而黑龙江中游和下游湿地水位埋深逐渐增加, 指示湿地生境呈现变干的趋势; 而距今约 20 年来, 黑龙江流域湿地水位埋深变化差异更为明显, 上游湿地水位埋深显著增加, 中游湿地水位埋深也逐渐增加, 但幅度较小, 下游湿地水位埋深显著减小。人类世以来黑龙江流域湿地水位埋深呈现显著的空间差异性, 这可能是由于不同湿地因所处地理位置不同, 湿地涵养水源的能力不同, 以及对气候变化和人类活动的响应存在差异导致的^[14]。

3.2 人类世以来黑龙江流域湿地水位历史变化的驱动机制

明确湿地水位变化的驱动因子是利用重建的古水位解释区域气候变化或人类活动影响的前提^[13~14]。本研究发现黑龙江上游湿地水位变化与

中游和下游湿地水位变化有显著的区别。图强湿地在人类世早期湿地生境呈现变干的趋势,而区域气候重建的结果发现这一时期处于小冰期末期气温持续降低且降水量偏小^[35~36],使得湿地水分来源显著减少,湿地生境呈现变干的趋势。而基于树轮的气候重建结果发现,自1920年以来,大兴安岭北部地区气温逐渐升高且降水量也逐渐增多^[36~37],古水位重建结果表明这一时期湿地水位埋深值显著变小,水位上升,指示生境变湿。同时,这一时期因人类活动的影响较弱^[38],湿地水位埋深受人类活动的影响并不显著。而基于有壳变形虫指标重建邻近区域湿地剖面水位埋深与大兴安岭气象站的气温、降水数据对比发现,这一时期重建水位埋深与大兴安岭夏季均温之间具有显著的相关性^[39],故夏季均温可能是该地区水位变化的主要气候驱动因子。而北英格兰Walton Moss泥炭地植物残体、腐殖化度记录与Talkin Tarn摇蚊记录的研究也表明百年尺度上夏季温度是沼泽表面湿度变化的主要驱动因素^[40];此外,Schoning等^[41]对比了瑞典泥炭地重建的古水位与器测记录,也发现湿地水位埋深变化主要与年均温显著相关。而近20年以来,黑龙江上游湿地水位埋深显著增大,水位下降,指示湿地生境由湿润向干燥方向转变。而基于大兴安岭地区黑炭^[32]的重建结果发现随着社会经济的发展,人类活动的影响显著增强,湿地垦殖、泥炭开采、放牧、火烧等人为活动,使得黑龙江上游湿地水位显著降低。排除人为因素的影响,对于黑龙江上游湿地来说,引起湿地水位变化的直接因素应该是有效降水,直接反应为温度。本区处于东部季风区,降水主要受季风特别是夏季风影响显著^[18],夏季高温多雨。所以基于有壳变形虫指标重建的古水位主要受夏季均温影响,能够体现出本区的冷热程度。这表明夏季均温可能是黑龙江上游地区历史水位变化的主要动力。

研究表明,黑龙江中游湿地在人类世早期湿地生境同样也呈现变干的趋势(图8);但基于树轮重建临近的小兴安岭地区五营地区的温度表明这一时期温度逐渐降低^[42],而邻近区域降水重建结果表明此时期降水量减少,但整体变化幅度并不明显。说明在人类世早期,黑龙江中游地区湿地水位变化主要受气候变化的影响。而自1915年以来,湿地水位显著降低,在1938年又显著升高,而树轮重建结果表明这一时期温度有了显著的升高且降水量增加^[42],使得水位埋深减小,湿地生境呈现湿润的环境;但随后区域温度又显著降低直至1987年^[42],

且近50年以来该区域降水量降低^[43],使得湿地水位埋深增大,湿地生境呈现变干的趋势。而近20年以来,友好湿地水位埋深呈现缓慢增大的趋势,湿地生境持续变干。这是因为研究区位于亚洲面积最大、保存最完整的红松原始森林地区^[44],受到外界的人为干扰较小,这可能是其变化不是很明显的主要原因。虽然近20年来,全球气候变化导致东北地区温度明显升高,降雨量增加,但地面温度升高造成的蒸散量的增加^[42,45],使得该区域湿地水源补给减少,水位埋深增大,湿地生境持续变干。

黑龙江下游湿地在人类世早期湿地生境同样表现为变干的趋势(图8)。基于树轮重建的长白山北部地区温度和降水发现,这一时期温度较低且降水量偏小,但整形变化幅度不大^[46~47]。说明在人类世早期,黑龙江下游地区湿地水位变化同样主要受气候变化的影响。自1926年以来,洪河湿地水位埋深呈现高水位-低水位的交替演变规律,但整体上仍呈现增大的趋势,湿地生境持续变干。这一方面是由于过去60年以来三江平原地区降水量持续降低^[48],而近现代以来,随着极端气候事件频发以及人类活动加剧,使得湿地被开垦为农田^[49],湿地垦殖、泥炭开采、放牧、火烧等人类活动都会直接或间接影响湿地水位变化。使得湿地水位埋深增加,湿地生境持续变干。在2000年左右,由于国家对粮食需要的增大,三江平原地区湿地被大面积垦殖,而洪河湿地四周均被农田包围,农田退水被大量排入湿地^[50],使得湿地水位埋深减小,导致湿地生境呈现湿润的环境。因此,人类世以来黑龙江流域上、中、下游湿地水位呈现显著的空间差异,且导致这种差异的原因在不同地区的驱动机制不尽相同。受人类活动影响较小的区域,其湿地水位变化主要受气候变化的影响;位于受人类活动扰动剧烈的区,其湿地水位变化的影响因素则更为复杂,但人为活动的影响力起着决定性作用。

4 结论

本文对黑龙江流域上游大兴安岭图强湿地、中游小兴安岭友好湿地和下游三江平原洪河湿地采集的3根²¹⁰Pb定年后的泥炭柱芯,进行了高精度的有壳变形虫化石鉴定和统计分析。借助前人建立的东北地区湿地有壳虫-水位转换函数,定量重建了过去百年来黑龙江流域湿地水位变化历史,初步探讨了上、中和下游湿地水位变化差异及驱动机制。

(1) 基于²¹⁰Pb和¹³⁷Cs测年法建立了黑龙江流域

上、中、下游3处湿地的年代学标尺, 其中图强湿地底部年龄为1895年, 友好湿地剖面底部年龄为1893年, 洪河湿地剖面底部年龄为1894年。3处湿地年代均涵盖了人类世以来的时间尺度。

(2) 图强湿地40个样品中共观察有壳变形虫42种, 友好湿地50个样品中共观察有壳变形虫28种, 洪河湿地50个样品中共观察有壳变形虫35种。不同区域有壳变形虫的优势种呈现空间差异。三个湿地剖面的主要的优势物种包括苔藓鳞盖虫(*Assulina muscorum*)、凤蝶茄壳虫(*Hyalosphenia papilio*)、附石/泥炭藓截口虫(*Heleopera petricola/sphagni*)、针棘匣壳虫(*Centropyxis aculeata* type)、片口匣壳虫类(*Centropyxis platystoma* type)、顶足法帽虫(*Phryganella acropodia*)等。

(3) 利用东北地区泥炭地有壳变形虫-水位转换函数定量重建了黑龙江流域湿地人类世以来的水位变化历史, 根据统计检验达到显著性水平的WA模型重建结果, 具体可划分为3个阶段: 在人类世早期(约1915年左右), 受人类活动干扰较少, 气温降低和降水量减少使得黑龙江流域湿地水位埋深值逐渐增大, 水位逐渐下降, 湿地生境呈现变干的趋势。随后, 图强湿地水位埋深显著减小, 而友好湿地和洪河湿地水位埋深却逐渐增大。图强湿地和友好湿地因受人类活动影响较弱, 区域气候变化成为影响湿地水位变化的主要因素; 而洪河湿地则由于受人类活动的显著影响, 使得湿地水位埋深增大。近20年来, 黑龙江流域湿地水位变化则主要受控于人类活动的影响。

致谢: 非常感谢朱忠秋对有壳变形虫鉴定的大力帮助; 感谢审稿专家和编辑部杨美芳老师建设性的修改意见。

参考文献(References):

- [1] 刘学, 张志强, 郑军卫, 等. 关于人类世问题研究的讨论[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5):640-649.
Liu Xue, Zhang Zhiqiang, Zheng Junwei, et al. Discussion on the anthropocene research[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(5):640-649.
- [2] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[J]. Science, 1990, 250(4988):1669-1678.
- [3] Crutzen P, Stoermer E. The anthropocene [J]. Global Change Newsletter, 2000, 41:17-18.
- [4] Rockstrom J, Steffen W, Noone, et al. A safe operating space for humanity[J]. Nature, 2009, 461(7263):472-475.

- [5] 孙立广, 杨仲康. 人类世生态地质学研究方法及应用研究[J]. 沉积学报, 2017, 35(5):958-967.
Sun Ligang, Yang Zhongkang. New research methods and their applications in anthropocene ecogeology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5):958-967.
- [6] 鲍锟山, 赵红梅, 于晓菲, 等. 大气环境变化的泥炭地质档案[J]. 地质论评, 2011, 57(2):234-242.
Bao Kunshan, Zhao Hongmei, Yu Xiaofei, et al. Atmospheric environmental changes records from peat bogs: A review [J]. Geological Review, 2011, 57(2):234-242.
- [7] 牛蕊, 周立民, 孟庆浩, 等. 贵州草海南屯泥炭记录的中全新世以来的气候变化[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6):1357-1369.
Niu Rui, Zhou Limin, Meng Qinghao, et al. The paleoclimate variations of the Nantun peat in the Caohai area since the Middle Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(6):1357-1369.
- [8] 周云鹏, 胡忠行, 张曼, 等. 浙江望东垟亚高山沼泽泥炭磁性特征及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6):1348-1356.
Zhou Yunpeng, Hu Zhongxing, Zhang Man, et al. Magnetic properties of the Wangdongyang subalpine peatland in Zhejiang Province, Eastern China and its paleoenvironmental implications [J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(6):1348-1356.
- [9] 李亮, 马春梅, 鹿化煜, 等. 江西中部玉华山沼泽泥炭记录的过去两千年气候变化初步研究[J]. 第四纪研究, 2017, 37(3):548-559.
Li Liang, Ma Chunmei, Lu Huayu, et al. A preliminary study of the climate change since 2 ka archived by a peat core from Yuhua Mountain in the middle Jiangxi Province[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(3):548-559.
- [10] 王庆锋, 金会军, 吴青柏, 等. 距今约6000年以来青藏高原东北部黄河源区冻结泥炭沉积记录的气候演化[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2):402-415.
Wang Qingfeng, Jin Huijun, Wu Qingbai, et al. Climatic evolution since 6 cal ka B.P. recorded by frozen peat deposits in the source area of the Yellow River, northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2017, 37(2):402-415.
- [11] Charman D J, Amesbury M J, Hinchliffe W, et al. Drivers of Holocene peatland accumulation across a climate gradient in northeastern North America [J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 121:110-119.
- [12] Liu H X, Gao C Y, Wei C F, et al. Evaluating the timing of the start of the Anthropocene from Northeast China: Applications of stratigraphic indicators [J]. Ecological Indicators, 2018, 84:738-747.
- [13] Charman D J, Blundell A, Members A. A new European testate amoebae transfer function for palaeohydrological reconstruction on ombrotrophic peatlands[J]. Journal of Quaternary Sciences, 2007, 22(3):209-221.
- [14] Turner T E, Swindles G T, Roucoux K H. Late Holocene eco-hydrological and carbon dynamics of a UK raised bog: Impact of human activity and climate change [J]. Quaternary Science

- Reviews, 2014, 84(465):65–85.
- [15] Loisel J, Garneau M. Late Holocene paleoecohydrology and carbon accumulation estimates from two boreal peat bogs in eastern Canada: Potential and limits of multi-proxy archive [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 291(3–4):493–533.
- [16] Amesbury M J, Swindles G T, Gabka M. Development of a new pan-European testate amoeba transfer function for reconstructing peatland palaeohydrology[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 152:132–151.
- [17] 秦养民, 谢树成, 顾延生, 等. 第四纪环境重建的良好代用指标——有壳变形虫记录与古生态学研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(8):803–812.
- Qin Yangmin, Xie Shucheng, Gu Yansheng, et al. An excellent indicator for Quaternary paleoenvironmental reconstructions—Advances in the study of testate amoebae[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(8):803–812.
- [18] Charman D J, Hendon D, Woodland W A. The identification of testate amoebae (protozoa: Rhizopoda) in peats. QRA Technical guide No. 9 [M]. London: Quaternary Research Association, 2000:1–147.
- [19] 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 of paleohydrological reconstruction[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2013, 50(3):319–330.
- [20] Zhang H, Amesbury M J, Ronkainen T, et al. Testate amoeba as palaeohydrological indicators in the permafrost peatlands of northeast European Russia and Finnish Lapland [J]. *Journal of Quaternary Sciences*, 2017, 32(7):976–988.
- [21] 李帅, 李鸿凯, 王升忠, 等. 基于有壳变形虫的大兴安岭洛古河泥炭沼泽古水位定量重建[J]. 第四纪研究, 2017, 37(6):1403–1411.
- Li Shuai, Li Hongkai, Wang Shengzhong, et al. The quantitative reconstruction of the paleowater table of Luoguhe peatland in Daxinganling Mountains based on testate amoebae assemblages[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6):1403–1411.
- [22] Xing W, Bao K S, Gallego-Sala A V, et al. Climate controls on carbon accumulation in peatlands of Northeast China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115(9):78–88.
- [23] Zhao C, Li X Q, Zhou X Y, et al. Holocene vegetation succession and responses to climate change in the northern sector of Northeast China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(7):1390–1400.
- [24] 戴长雷, 王思聪, 李治军, 等. 黑龙江流域水文地理研究综述[J]. 地理学报, 2015, 70(11):1823–1834.
- Dai Changlei, Wang Sicong, Li Zhijun, et al. Review on hydrological geography in Heilongjiang River basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11):1823–1834.
- [25] 于灵雪, 张树文, 贯丛, 等. 黑龙江流域积雪覆盖时空变化遥感监测[J]. 应用生态学报, 2014, 25(9):2521–2528.
- Yu Lingxue, Zhang Shuwen, Guan Cong, et al. Monitoring on spatial and temporal changes of snow cover in the Heilongjiang basin based on remote sensing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(9):2521–2528.
- [26] 易卿, 程彦培, 张健康, 等. 气候变化对黑龙江-阿穆尔河流域的生态环境影响[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5):90–103.
- Yi Qing, Cheng Yanpei, Zhang Jiankang, et al. Impact of climatic change on ecological environment of Heilongjiang-Amur River Basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(5):90–103.
- [27] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(1):101–110.
- [28] Booth R K, Lamentowicz M, Charman D J. Reparation and analysis of testate amoebae in peatland paleoenvironmental studies [J]. *Mire & Peat*, 2010, 7(2):1–7.
- [29] Ogden C G, Hedley R H. *An Atlas of Freshwater Testate Amoebae*. London: British Museum (Natural History) and Oxford University Press, 1980.
- [30] Li H K, Wang S Z, Zhao H Y. 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.
- [31] Bao K, Zhao H, Xing W, et al. Carbon accumulation in temperate wetlands of Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2011, 75(6):2386–2397.
- [32] Gao C Y, He J B, Cong J X, et al. Impact of forest fires generated black carbon deposition fluxes in Great Hinggan Mountains (China) [J]. *Land Degradation and Development*, 2017, doi: 10.1002/ldr.2837.
- [33] Niinemets E, Pensa M, Charman D J. Analysis of fossil testate amoebae in Selosoo Bog, Estonia: Local variability and implication for palaeoecological reconstructions in peatlands [J]. *Boreas*, 2011, 40(2):367–378.
- [34] Song L, Li H, Wang K, 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.
- [35] 吕姗姗, 王晓春. 大兴安岭北部阿里河樟子松年轮气候响应及冬季降水重建[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 2014, 46(2):110–116.
- Lu Shanna, Wang Xiaochun. Growth climate response and winter precipitation reconstruction of *Pinus Sylvestris* var. *Mongolica* in Ali River of Greater Khingan Range [J]. *Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 46(2):110–116.
- [36] Zhao H Y, Gong L J, Qu H H, et al. The climate change variations in the northern Greater Khingan Mountains during the past centuries [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(50):585–602.
- [37] Qu H H, Zhao H Y, Gong L J. Climate data inversion for typical areas in northern of Greater Khingan Range for the last 300 years [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(2):

184–191.

- [38] 胡海清, 赵致奎, 王晓春, 等. 基于树轮火疤塔河蒙克山樟子松林火灾频度分析[J]. 生态学报, 2010, 30(23):6372–6379.
Hu Haiqing, Zhao Zhikui, Wang Xiaochun, et al. Fire history of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) forests in Mengkeshan of Tahe, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23):6372–6379.
- [39] 朱忠秋. 基于有壳变形虫的大兴安岭泥炭地水位定量重建[D]. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2015:1–120.
Zhu Zhongqiu. Peatlands Hydrological Quantitative Reconstruction Based on Testate Amoebae in Daxing'an Moutains [D]. Changchun: Master's Thesis of Northeast Normal University, 2015: 1~120
- [40] Barber K E, Langdon P G. Water drivers the peat based palaeoclimate record? A critical test using multi proxy climate records from Northern Britain [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(25–28):3318–3327.
- [41] Schoning K, Charman D J, Wastegaard S. Reconstructed water tables from two ombrotrophic mires in eastern central Sweden compared with instrumental meteorological data [J]. *The Holocene*, 2005, 15(1):111–118.
- [42] 尹红, 郭品文, 刘洪滨, 等. 利用树轮重建小兴安岭五营 1796 年以来的温度变化[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 18–23.
Yin Hong, Guo Pinwen, Liu Hongbin, et al. Reconstruction of the october mean temperature since 1796 at Wuying from tree ring data [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(1):18–23.
- [43] 孙鹏飞, 程春香, 王淑华. 小兴安岭五营林区近 49 a 降水特征及趋势分析[J]. 黑龙江气象, 2007,(4):39–43.
Sun Pengfei, Cheng Chunxiang, Wang Shuhua. Analysis of the precipitation characteristic and trend of the Wuying forest area during the past 50 year in the Lesser Khingan Mountains [J]. *Journal of Heilongjiang Meteorology*, 2007,(4):39–43.
- [44] 及莹. 黑龙江红松年轮气候响应及与变暖关系探讨[D]. 哈尔滨: 东北林业大学硕士学位论文, 2010.
Ji Ying. Climate-growth relationships of Korean pine in Heilongjiang and their potential for global warming [D]. Harbin: Master's thesis of Northeast Forestry University, 2010.
- [45] 姚启超, 王晓春, 肖兴威. 小兴安岭红皮云杉年轮-气候关系及其衰退原因[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7):1935–1944.
Yao Qichao, Wang Xiaochun, Xiao Xingwei. Climate-growth relationships of *Picea koraiensis* and causes of its recent decline in Xiaoxing'an Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7):1935–1944.
- [46] 张寒松, 韩士杰, 李玉文, 等. 利用树木年轮宽度资料重建长白山地区 240 年来降水量的变化[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12):1924–1929.
Zhang Hansong, Han Shijie, Li Yuwen, et al. Reconstruction of temporal variations of precipitation in Changbai Mountains area over past 240 years by using tree-ring width data [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12):1924–1929.
- [47] 王蔚蔚, 张军辉, 戴冠华, 等. 利用树木年轮宽度资料重建长白山地区过去 240 年秋季气温的变化[J]. 生态学杂志, 2012, 31(4):787–793.
Wang Weiwei, Zhang Junhui, Dai Guanhua, et al. Variation of autumn temperature over the past 240 years in Changbai Mountains of Northeast China: A reconstruction with tree-ring record [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(4):787–793.
- [48] 邢贞相, 闫丹丹, 刘美鑫, 等. 三江平原近 60 年降水量时空变异特征分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(11):337–344.
Xing Zhenxiang, Yan Dandan, Liu Meixin, et al. Spatial-temporal variability analysis of annual precipitation in Sanjiang Plain in recent sixty years [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):337–344.
- [49] Xing W, Guo W Y, Liang H W, et al. Holocene peatland initiation and carbon storage in temperate peatlands of the Sanjiang Plain, Northeast China [J]. *The Holocene*, 2016, 26(1):70–79.
- [50] 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 等. 1954~2005 年三江平原沼泽湿地农田化过程研究[J]. 湿地科学, 2009, 7(3):208–217.
Wang Zongming, Song Kaishan, Liu Dianwei, et al. Process of land conversion from marsh into cropland in the Sanjiang Plain, during 1954–2005 [J]. *Wetland Science*, 2009, 7(3):208–217.

A 100-YEAR HISTORY OF WATER TABLE CHANGE AND DRIVING MECHANISM IN HEILONGJIANG RIVER BASIN WETLANDS

Bao Kunshan¹, Xing Wei², Song Lihong³, Li Hongkai⁴, Liu Hanxiang⁵, Wang Guoping⁵

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu; 2. School of Geographical Science, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan; 3. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou; 4. Institute for Peat and Mire, School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, Jilin; 5. Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin)

Abstract

In this study, three typical peat cores were collected from Tuqiang (TQ) of Great Hinggan Mountain, Youhao (YH) of Small Hinggan Mountain and Honghe (HH) of Sanjiang Plain wetlands, in the upper, middle and lower streams of Heilongjiang River basin (HRB) of Northeast China. The peat cores were around 50 cm in length and were dated back 100 years by ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs techniques. A high-resolution analysis of Testate amoebae was conducted using a sieving procedure with *Lycopodium* spore addition. Based on a built paleohydrology transfer function in northeast China, the 100-year history of water level change was reconstructed in HRB wetlands, and the possible affecting factors were also discussed. Results showed that the ages of the TQ, YH and HH cores covered the time scale of the Anthropocene. In the different areas of the upper, middle and lower streams, there were significant spatial differences in the Testate amoebae species. The constrained clustering results showed that the history of water level change in HRB wetlands could be divided to three periods: 1) the early Anthropocene (approximately 1915), the wetland habitat was relatively humid and the Testate amoebae were dominant with the “humid” species, e.g., *Heleopera petricola/sphagni*, *Hyalosphenia papilio*. However, the depth to water table (DWT) gradually increased, indicating a drought trend of the wetland habitat. In this period, the regional climate change would be the controlling factor of wetland water table. 2) During 1915–1990, the variations of wetland water levels showed significant difference in the upper, middle and lower streams. At TQ wetland, the decreasing DWT indicated an increasing humid habitat, and the “humid” species like *Hyalosphenia papilio* and *Centropyxis aculeata* type increased. However, at YH and HH wetlands, the DWT increased and the habitat became drier. The “humid” species significantly decreased and the “arid” species including *Phryganella acropodia*, *Trigonopyxis arcula*, *Assulina muscorum* increased. Due to the weak anthropogenic influence, the regional climate change was still the main driver to the water table variation in TQ and YH wetlands. The significant influence of human activities would be the main driver to the water table variation in HH wetland. 3) Since 1990, there was an increasing anthropogenic impacts on the water table change throughout the HRB wetlands. The DWT increased in the upper and middle streams, indicating a drying habitat in TQ and YH wetlands. The dominant species of Testate amoebae were *Phryganella acropodia*, *Assulina muscorum* and *Assulina seminulum*. In HH wetland, the DWT became lower, probably due to the input of agricultural excess irrigation. In the past century, the water table change in HRB wetlands was controlled by regional climate change and the human being’s activities, and suggested a significant spatial difference in the upper, middle and lower streams.

Key words: Testate amoebae; Anthropocene; water table change; peatland; Northeast China