

## 全新世以来东北地区沼泽湿地发育过程及其对气候变化的响应<sup>\*</sup>

邢伟<sup>1,3</sup>, 鲍锟山<sup>2</sup>, 韩冬雪<sup>3</sup>, 王国平<sup>3</sup>

(1: 信阳师范学院地理科学学院, 信阳 464000)

(2: 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, 南京 210008)

(3: 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, 长春 130102)

**摘要:** 沼泽湿地是陆地生态系统的重要组成部分, 在维护区域环境稳定中起着重要作用。随着社会经济的发展, 人类活动导致湿地大面积退化和消失, 严重影响了区域生态安全; 恢复退化湿地已成为各国政府和学者关注的焦点。而了解历史时期沼泽湿地发育过程及影响因素则是建立合理湿地恢复目标的重要前提。东北地区是我国最大的沼泽湿地集中分布区, 其中 70% 的湿地面临不同程度的退化威胁; 但由于数据的缺乏, 东北地区沼泽湿地发育过程及其与气候变化的关系仍不清楚。基于此, 本研究系统分析了全新世以来东北地区沼泽湿地形成发育的动态变化过程, 并探讨了东北地区不同区域沼泽湿地的发育规律及其对气候变化的响应机理。研究发现东北地区沼泽湿地约从 12 ka (1 ka = 1000 cal.) 开始发育, 在距今 8.6 ka 以后开始广泛形成, 约有 35% 的沼泽湿地形成于全新世暖湿期 (8.0–4.0 ka); 而沼泽湿地发育的高峰期则集中在全新世晚期。这种发育趋势与全球北方主要区域沼泽湿地大规模发育趋势显著不同。古气候重建表明, 全新世早期东北地区气候温暖湿润, 处在有利于沼泽发育的时期, 促进了沼泽湿地的形成; 而在全新世晚期, 东北地区呈现冷湿的气候组合特征, 冷湿的气候条件不利于有机质的分解, 进而促进了沼泽湿地的大规模形成和发育。此外, 研究结果也表明全新世以来东北地区不同区域沼泽湿地发育的时间和规模呈现显著的空间差异, 而温度和降水则是影响不同区域沼泽湿地发育的最重要因素。本研究将为我国东北地区沼泽湿地的保护和恢复提供一定的理论和数据支持。

**关键词:** 沼泽湿地; 气候变化; 湿地发育; 全新世; 东北地区

## Holocene wetland developing history and its response to climate change in northeast China

XING Wei<sup>1,3</sup>, BAO Kunshan<sup>2</sup>, HAN Dongxue<sup>3</sup> & WANG Guoping<sup>3</sup>

(1: College of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, P. R. China)

(2: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(3: Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, P. R. China)

**Abstract:** Wetland is an important part of terrestrial ecosystem, which plays an important role in maintaining regional environmental stability. With the development of social economy, human activities have led to the wetland extensive degradation and disappearance, which has seriously affected regional ecological security. Restoring wetlands has become the focus of governments and scholars. Understanding the wetland development process and influencing factors in the historical period is an important precondition for establishing reasonable wetland restoration goal. Northeast China is the largest freshwater wetlands area in China, 70% of which are threatened by degradation. Due to the lack of data, the wetland development history and its response to climate change are still poorly documented and understood in this region. Based on this, we systematically analyzed the wetland evolution history in northeast China since the Holocene, and discussed the wetland initiation in different regions of northeast China and examine its links to climate changes during the Holocene. The results show that wetlands started to form at the beginning of the Holocene across north-

\* 国家自然科学基金项目(41907381)、国家重点研发计划项目(2016YFA0602301)、山东省水土保持与环境保育重点实验室开放基金项目(STKF201927)和信阳师范学院“南湖学者奖励计划”青年项目联合资助。2019-01-19 收稿; 2019-03-28 收修改稿。邢伟(1986 ~), 男, 博士, 讲师; E-mail: xingwei@xynu.edu.cn.

east China; wetlands began to develop in a large number after 8.6 ka (1 ka = 1000 cal.). Nearly 35% of wetlands were initiated in the Holocene optimum; and the majority of wetlands in northeast China were initiated by and developed during the late Holocene, which is very different from the timings for other major northern peatland regions. In the early Holocene, due to the high solar insolation and stronger East Asian monsoon intensity, the climate was warm and humid in northeast China, which promoted the wetlands initiation and development. During the late Holocene, the widespread peatland initiation might have been caused by the cool and moist climate patterns in this region, and this climate combination was not conducive to the decomposition of organic matter and promoted the large-scale wetland development. This pattern confirmed the hypothesis of accelerating initiation and growth of the northern wetlands during the late Holocene. In addition, the results also show that the optimum time and scale of the wetland initiation have shown significant spatial changes in different regions across northeast China since the Holocene, and the temperature and precipitation are the important factors affecting the wetland evolution in different regions. This study will provide some theoretical and data support for the wetland protection and restoration in northeast China in the future.

**Keywords:** Wetland; climate change; wetland development; Holocene; northeast China

沼泽湿地是陆地生态系统的重要组成部分,尽管全球沼泽湿地仅占陆地总面积的3%,却储存了三分之一的有机碳<sup>[1]</sup>,是陆地碳循环中重要的环节,对全球气候有着重要的影响<sup>[2]</sup>。而揭示沼泽湿地的形成发育过程、探讨湿地发育与气候变化间的响应关系,已成为国内外学者已共同关注的热点<sup>[3-5]</sup>。

研究表明,全球沼泽湿地主要形成于第四纪,特别是全新世这一重要时期;其形成和发育主要受区域气候因素的影响,其次受地质地貌、水文条件等方面控制<sup>[6]</sup>。沼泽湿地发育过程中包含了大量的古气候和古环境信息,在全球变化的研究中有着重要作用<sup>[7-8]</sup>。当前,国内外学者已开展了沼泽湿地形成发育方面的研究,如在阿拉斯加地区<sup>[4]</sup>、加拿大地区<sup>[9]</sup>、欧洲北部<sup>[10]</sup>、西西伯利亚地区<sup>[11]</sup>和东南亚地区<sup>[12]</sup>。上述研究为揭示全球不同区域沼泽湿地发育过程及其影响因素奠定了必要的基础。但以往的研究多集中在沼泽湿地分布丰富的区域,如北极和亚北极地区( $50^{\circ}\text{N} \sim 70^{\circ}\text{N}$ )和热带地区( $20^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$ )<sup>[2]</sup>;而关于温带地区沼泽湿地形成发育的研究却鲜有报道<sup>[13]</sup>。研究温带地区,特别是受季风影响的温带区域沼泽湿地形成发育的动态变化过程将有助于深入理解沼泽湿地对气候变化的响应<sup>[5]</sup>。

东北地区地处温带区域,受东亚季风的显著影响,是我国最大的沼泽湿地集中分布区<sup>[14]</sup>。全新世以来东北地区沼泽湿地广泛发育。当前,已有众多学者针对东北地区的沼泽湿地展开了相关的研究,但相关研究多集中在区域古环境和古气候重建<sup>[15-16]</sup>、沼泽湿地温室气体排放<sup>[17-18]</sup>等方面;而关于东北地区全新世以来沼泽湿地发育过程及其对气候变化响应的研究却鲜有报道。Zhao等对中国北方地区沼泽湿地发育过程做了相关的研究<sup>[5]</sup>,但作者并未单独对我国东北地区沼泽湿地的发育及其影响因素进行深入的探讨。然而不同区域气候、地形地貌和水文条件各不相同,沼泽湿地形成发育过程和影响因素也不尽相同<sup>[19]</sup>;中高纬度地区沼泽湿地,特别是温带区域沼泽湿地,一直被认为是响应气候变化的敏感区和预警区<sup>[5,13]</sup>。因此,以长时间尺度视角探讨东北地区沼泽湿地形成发育规律及其对气候变化的响应机理,将会为东亚季风影响区的沼泽湿地的发育、现状保护、湿地恢复和未来演变提供重要的科学依据和数据支持。

基于此,我们从已发表论文、出版书刊和湿地调查报告等资料中,共收集、整理和自测了335个有基底年代数据的湿地沉积柱芯,并利用这些数据探讨全新世以来东北地区沼泽湿地形成发育过程及其对气候变化的响应。主要目的是:(1)利用最新的湿地基底年代数据分析全新世以来东北地区沼泽湿地形成发育的动态变化过程;(2)探讨东北地区不同区域沼泽湿地形成发育的时空动态变化及其影响因素;(3)阐明全新世以来气候变化对东北地区沼泽湿地形成发育的影响。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 数据来源

为了系统研究全新世以来东北地区沼泽湿地形成发育的动态变化过程及其对气候变化的响应,本文尽可能全面地从已发表论文、出版书刊以及中国地质调查局的湿地调查报告中收集有基底年代数据的湿地剖面。同时,2010—2015年在东北地区采集了一批沼泽湿地沉积剖面作为补充。最终,共收集和自测了335个有基底年代数据的湿地沉积柱芯(图1)。收集这些柱芯数据满足以下标准:(1)湿地柱芯样点位于东北地区

且沉积物泥炭剖面深度不少于 30 cm; (2) 湿地柱芯是连续的泥炭累积,且基底年代从泥炭与矿物质的交界面测定获取; (3) 湿地沉积柱芯基底年龄作为湿地开始发育的年龄。

此外,由于东北地区地域辽阔,不同区域植被类型、海拔高度、气候条件等都有较大的差异(表 1)。为了研究的便利,我们把东北地区划分为 5 大区域(图 1),即三江平原地区(SJP)、松辽平原地区(SLP)、长白山地区(CBM)、小兴安岭地区(LKM)和大兴安岭地区(GKM),进行全新世以来东北地区不同区域沼泽湿地形成功能变化过程研究。在综合集成分析时,我们将所获取的沼泽湿地柱芯的基底年代数据,统一使用 IntCal 13 数据集将基底年代校正为日历年(BP),置信区间为 95%<sup>[20]</sup>。同时,将基底年代以 200 年为区间计算沼泽地发育的频率<sup>[3-5]</sup>;并基于 200 年区间获取的沼泽湿地发育频率来计算沼泽湿地发育面积的百分比。

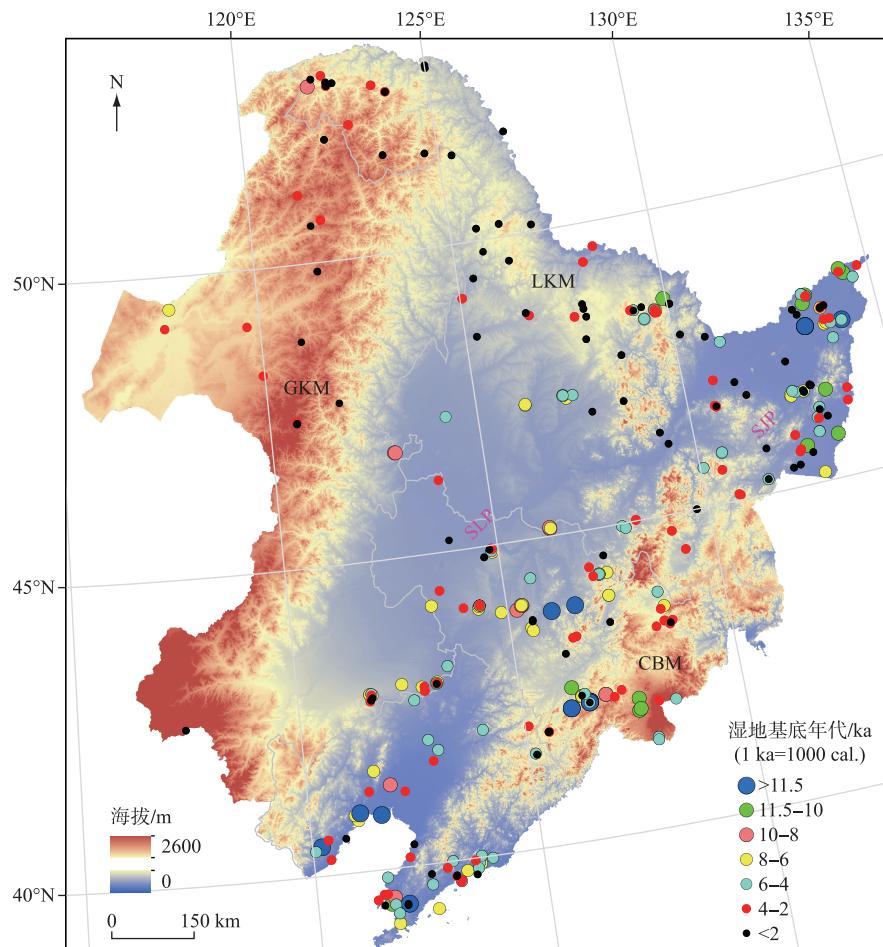


图 1 东北地区位置和样点分布

Fig.1 Location of northeast China and sampling sites distribution

## 1.2 样品采集和室内分析

根据泥炭矿调查报告和《中国沼泽志》<sup>[21]</sup>等资料,于 2010—2015 年在东北地区进行了沼泽湿地柱芯样品的补充采集工作。采样时主要选取未受人类活动扰动的湿地,利用 Wardenaar 泥炭采样器和荷兰产定深泥炭钻进行样品采集,并记录采样点的地理位置、海拔高度和剖面深度等。所有剖面在现场自上至下进行 1 cm 切割分层取样;同时将样品装入有编号的自封袋密封并带回实验室低温冷冻保存。采集的样品利用 AMS<sup>14</sup>C

测年技术在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室完成年代测定。

表 1 东北地区不同区域环境特征  
Tab.1 Main characteristic of the subregions in northeast China

区域	主要植被类型	海拔/m	纬度	年均温/℃	年降水量/mm
三江平原地区(SJP)	小叶章、漂筏苔草、毛果苔草、乌拉苔草等	45~80	43°~48°N	2.3~4.3	500~650
松辽平原地区(SLP)	芦苇、苔草、藨草、小叶章等	50~200	39°~46°N	1.8~9.4	400~500
长白山地区(CBM)	泥炭藓、笃斯越桔、长白落叶松等	600~2700	39°~46°N	2.0~5.0	600~1000
小兴安岭地区(LKM)	泥炭藓、兴安落叶松、毛苔草等	300~800	48°~51°N	-2.0~2.0	550~670
大兴安岭地区(GKM)	泥炭藓、兴安落叶松、笃斯越桔等	600~1400	43°~54°N	-4.7~2.8	250~300

## 2 结果

基于沼泽湿地基底年代数据,研究发现东北地区沼泽湿地在晚冰期(约 12 ka)开始发育;自 8.6 ka 以后,沼泽湿地形成发育速率有了稳步的增长;而沼泽湿地的发育高峰期则集中在全新世晚期(图 2a). 相反地,在过去几百年中,东北地区沼泽湿地发育速率显著降低(图 2a). 此外,研究结果表明东北地区沼泽湿地大约有 6.4% 在全新世早期(>8.6 ka)形成,20.3% 的沼泽湿地在 8.6~6.0 ka 形成;而至 4.2 ka 东北地区沼泽湿地发育面积也只占现在沼泽湿地总面积的 41.2%,高达 58.8% 的沼泽湿地则是在 4.2 ka 以后形成(图 2a).

同时,研究结果也表明全新世以来东北地区不同区域沼泽湿地发育的时间和规模呈现出显著的空间差异(图 3). 在三江平原和长白山地区,沼泽湿地在全新世早期开始发育,发育高峰期分别集中在 5.5~1.0 和 7.6~1.0 ka,此后沼泽湿地发育速率逐渐降低. 在松辽平原地区,沼泽湿地大约在 10.0 ka 开始发育,发育高峰期则集中在 9.0~3.5 ka,并在 3.0 ka 后迅速降低;而在 1.5 ka 前后,松辽平原沼泽湿地停止发育. 在大兴安岭和小兴安岭地区,沼泽湿地则在中全新世后期开始发育,发育高峰期同样也集中在晚全新世;直至现在,大兴安岭和小兴安岭地区沼泽湿地仍在持续发育.

## 3 讨论

### 3.1 全新世以来东北地区沼泽湿地形成功能变化特征

沼泽湿地作为一种复杂的自然综合体,其形成和发育具有明显的时空变化规律. 基于基底年代数据,研究发现全新世以来东北地区沼泽湿地发育过程可以主要分为 3 个阶段,但发育高峰期主要集中在全新世晚期. 晚冰期(约 12 ka)东北地区沼泽湿地开始发育,但仅在局部发育,且发育速率缓慢(图 2a),年代较老的沼泽湿地仅在三江平原北部、长白山中部和辽宁南部沿海地区出现,如勤得利湿地、长白山哈尼湿地、辽南的普兰店湿地、庄河湿地等(图 1). 自 8.6 ka 以来,东北地区沼泽湿地发育速率有了稳步的增长,这一时期也成为本区沼泽湿地逐步扩展的时期,在三江平原、长白山和松辽平原等地区,沼泽湿地普遍开始发育. 而沼泽湿地大规模发育时期则集中在 4.2~1.0 ka(图 2a),即东北地区沼泽湿地大部分是在全新世晚期发育的,这种发育趋势与全球北方主要区域沼泽湿地大规模发育趋势显著不同(图 4).

Macdonald 等通过分析 1516 个泥炭基底年代数据,发现全球北方地区沼泽湿地发育速率在 11.0~9.0 ka 之间达到最大值<sup>[3]</sup>;而在阿拉斯加地区,Jones 等基于 284 个沼泽湿地基底年代数据,研究发现这一地区沼泽湿地发育开始于 18.0 ka,且全新世早期迅速发育,即 12.0~8.6 ka,并在 10.5 ka 出现发育高峰期(图 4);沼泽湿地大规模的发育伴随着太阳活动最强烈的时期,这表明温度变化与沼泽湿地发育有着密切的联系<sup>[4]</sup>. 在欧洲北部地区,Ruppel 等基于 295 个沼泽湿地基底年代数据,研究发现 10.0~8.0 ka 的窗口期是北欧地区沼泽湿地发育最为密集的阶段(图 4),即沼泽湿地大规模发育时期则也集中在全新世早期<sup>[10]</sup>. Smith

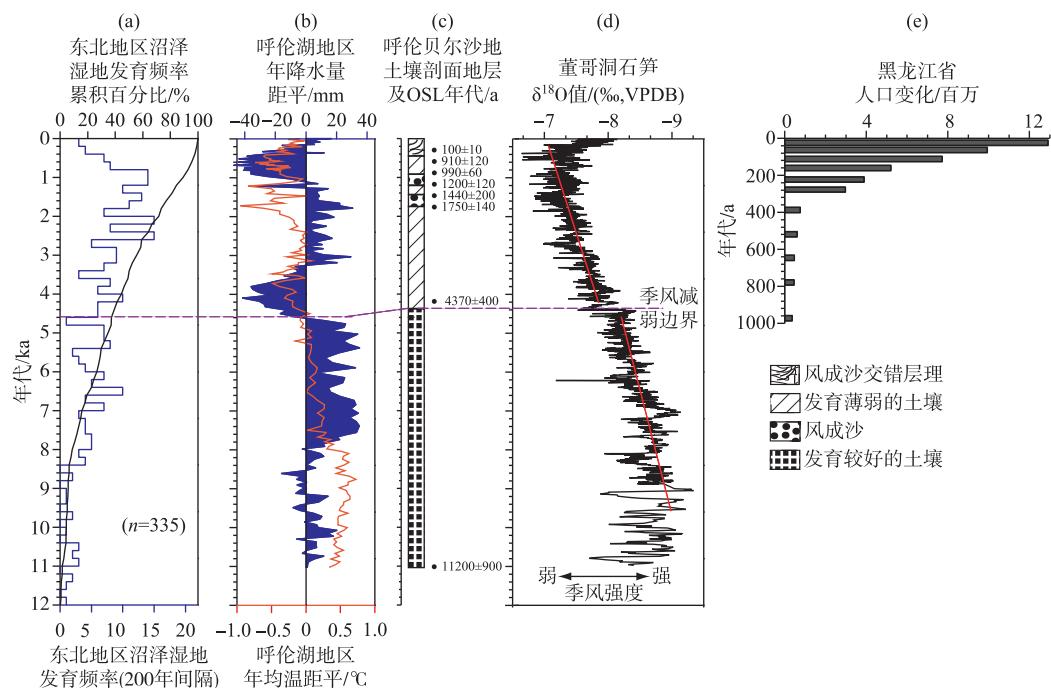


图2 东北沼泽湿地发育频率、气候影响及其他古环境记录的关系(紫色虚线指示东亚夏季风减弱事件):  
(a)全新世以来东北地区沼泽湿地发育频率(200年间隔,蓝色曲线),东北地区沼泽湿地发育累积面积  
(黑色曲线);(b)呼伦湖孢粉记录定量重建的年平均温度(红色曲线)和年平均降水量(蓝色阴影)  
的距平变化<sup>[22]</sup>;(c)呼伦贝尔沙地土壤发育剖面及OSL定年<sup>[23]</sup>;(d)董哥洞氧同位素指示的  
东亚夏季风强度变化(黑色曲线)<sup>[24]</sup>; (e)过去千年以来黑龙江省人口变化趋势

Fig.2 Northeast China's peatland initiation frequency, climate controls and correlations with other palaeorecords (The purple dotted line indicates the East Asian summer monsoon weakening event): (a) Frequency of wetland development in northeast China (200-year bins, blue curve) and cumulative percentages (black curve); (b) Reconstruction of annual temperature (red curve) and annual precipitation (blue area) anomalies from the Hulun Lake pollen records; (c) Soil development profile and OSL dating of Hulunbuir sandy land; (d) Oxygen isotope record at Dongge Cave, as a proxy of the intensity of the summer monsoon; (e) Historical population variation of Heilongjiang Province

等利用226个泥炭基底年代数据分析了西西伯利亚泥炭地发育的动态变化<sup>[11]</sup>,发现该地区泥炭地发育高峰期也集中在全新世早期,即在11.0—7.0 ka时达到最大值(图4).在热带地区,特别是东南亚地区,Yu等研究发现其泥炭地开始发育在20 ka以前<sup>[2]</sup>,远早于北方沼泽湿地开始发育的时期,但发育高峰期则集中在8.0—4.0 ka,随后发育速率逐渐减小(图4);而在南美巴塔哥尼亚地区,Yu等基于54个泥炭基底年代数据,研究发现南美地区泥炭地大多在10.0 ka以前发育<sup>[2]</sup>,但大规模发育时期则集中在17.0—13.5 ka(图4).在中国北方地区,Zhao等研究发现沼泽湿地大规模发育时期同样也主要集中在全新世早期<sup>[5]</sup>,但在东北地区,全新世早期沼泽湿地却鲜有发育(图2).由此可见,东北地区沼泽湿地与全球其他地区沼泽湿地发育高峰期呈现显著差异.

已有研究表明,全球北方地区沼泽湿地发育高峰期对应于最佳的气候组合条件,即沼泽湿地发育受到温度和降水的限制,其中亚洲地区降水受到季风的影响<sup>[2,5]</sup>.在全新世早期,太阳辐射达到最低值;与此同时董哥洞 $\delta^{18}\text{O}$ 也处于峰值(图2d)<sup>[24]</sup>,这表明太阳辐射和季风强度影响了沼泽湿地的发育.但东北地区沼泽湿地大规模发育时期却呈现完全相反的趋势,即沼泽湿地发育高峰期并不对应着高的太阳辐射和强的夏季

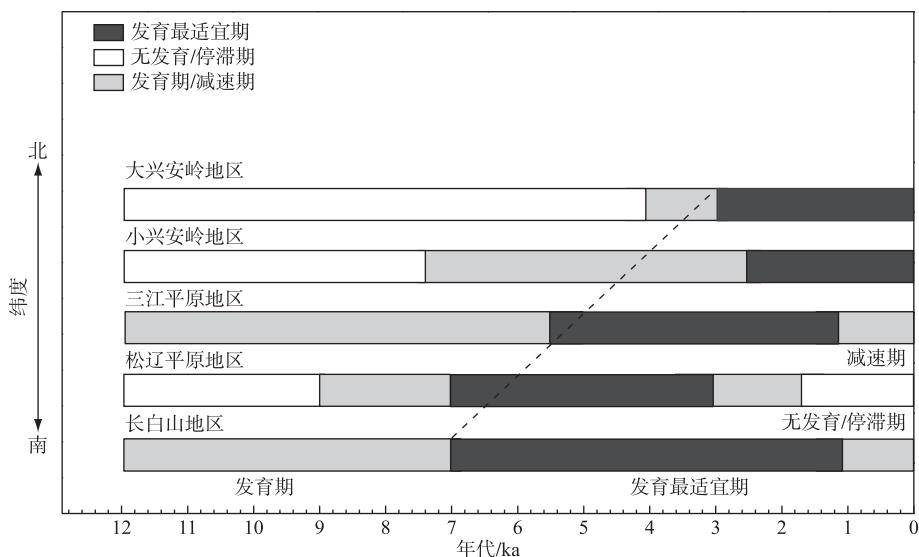


图 3 全新世以来东北地区不同区域沼泽湿地发育的时空动态变化  
(5个区域由南至北按纬度排列,虚线代表了东北地区沼泽湿地的形成发育的主要时期)

Fig.3 Temporal and spatial dynamics of wetland evolution process in different regions of Northeast China since the Holocene (The five regions are arranged by latitude from south to north, and the dotted line represents the main period of wetland evolution in Northeast China)

风活动(图 2a). 此外,在过去几个世纪东北地区沼泽湿地发育速率显著降低(图 2a),这可能是由于人类活动加剧导致的(图 2e)<sup>[25-26]</sup>. 考古表明距今 2.0 ka 左右,黑龙江地区已有至少 10 种文化遗存先后存在,且铁器已普遍使用<sup>[27]</sup>;从 0.3 ka 至今,农业生产、森林砍伐、沼泽开垦和泥炭矿开采等人类活动加剧,使得研究区沼泽湿地发育频率显著降低. 因此,人类活动与沼泽湿地的发育有着重要的影响关系(图 2e).

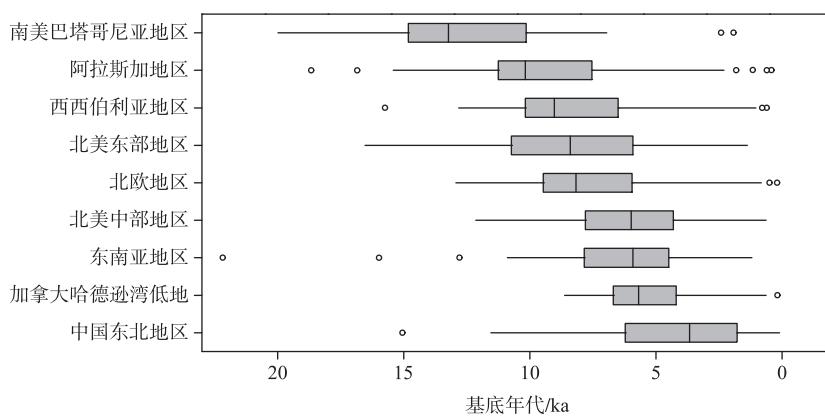


图 4 全球不同区域沼泽湿地发育年龄分布(箱形宽度表示上、下四分位数;中心线表示中位数;胡须线值不超过四分位范围的 1.5 倍;观测到仍在发育的沼泽湿地用圆圈表示)

Fig.4 Distributions of calibrated ages of peat initiation in selected geographical regions (Box widths indicate upper and lower quartiles; centerlines indicate medians. Whiskers extend to values no further than 1.5 times the interquartile range beyond the upper and lower quartiles; remaining observations are indicated by open circles)

### 3.2 全新世以来气候变化对东北地区沼泽湿地形成发育的影响

沼泽湿地是介于水体和陆地之间的过渡生态系统,它的自然形成过程是在区域气候、水文、地质地貌、植被等自然因素综合作用下完成的<sup>[14]</sup>。上世纪末期,众多学者认为地质地貌和区域水文特征等因素对沼泽湿地形成发育起着至关重要的作用;但随着研究的不断深入,特别是关于全新世以来古气候和古环境的定量重建,气候因素逐渐被认识到是影响沼泽湿地形成发育不可或缺的一个重要因素<sup>[6,8,12]</sup>。东北地区沼泽湿地在全新世早期开始发育,但发育高峰期却集中在全新世晚期,这种发育趋势与全球北方主要区域沼泽湿地大规模发育趋势显著不同(图4);其原因可能是由东北地区沼泽湿地所处位置及区域气候特征与其他湿地分布区的差异导致的。

与全球北方主要区域沼泽湿地所处位置相比,东北地区位于全球北方沼泽湿地分布的南缘,且处于东亚季风显著影响的区域,全新世以来气候变化剧烈<sup>[28-29]</sup>。呼伦湖沉积记录<sup>[22]</sup>和四海龙湾沉积记录<sup>[28]</sup>揭示了东北地区全新世气候在千年尺度上经历了从早、中全新世较为暖湿,到晚全新世相对冷湿的长期变化过程,并在百年尺度上呈现频繁波动的特征(图2b);这些变化对沼泽湿地的形成发育产生了深刻的影响。

全新世早期,东北地区沼泽湿地开始发育,但有仅少量分布在三江平原、长白山及沿海地区(图1)。在全新世早期,太阳辐射达到峰值且夏季风也处于全新世以来的最强盛时期(图2d),导致较高的温度和丰沛的降水。古气候重建发现,由于东北地区地处中温带,全新世早期其气候特征整体处于逐渐升温的阶段<sup>[22,28]</sup>,温暖湿润的气候条件,促进了植被生长;同时由于水体沼泽化过程活跃,使其处在有利于沼泽发育的时期(图2a)。早全新世时期湿地发育模式在其他地区也有体现,如阿拉斯加<sup>[4]</sup>和西西伯利亚<sup>[11]</sup>等地区(图4)。但由于东北地区特殊的地形和较为温暖湿润的气候条件,导致湿地发育面积较小(图2a)。如在全新世早期,三江平原地区受新构造运动的影响导致的地表大面积沉降以及河道变迁等因素的影响,地下水位较高,使得雨水在相对平坦的冲积平原聚集<sup>[30]</sup>,高的地表水位使得湿地植被难以生长,因此不利于沼泽湿地的形成<sup>[27]</sup>;而松辽平原在全新世早期处于风沙干旱期<sup>[31]</sup>,气候冷干,沼泽湿地尚未发育。相比于平原地区,全新世早期东北地区沼泽湿地仅在南部气候较为温暖的长白山地区的沟谷中少量出现。因此,东北地区仅有6.6%的沼泽湿地在全新世早期形成(图2a)。

进入全新世中期(约8.4—4.2 ka),东北地区沼泽湿地发育速率有了稳步的增长,沼泽湿地开始广泛发育,约有35%的湿地在这一期形成发育(图2a)。全新世中期是气候适宜期<sup>[32]</sup>;其中7.2—6.0 ka是大暖期稳定的暖湿阶段,其温度和降水可能高出大暖期中任何一个时期<sup>[33]</sup>。在温暖湿润的气候环境条件下,植被生产力高,因此全新世中期的气候有益于沼泽湿地的发育和累积。长白山地区二龙湾玛珥湖孢粉记录显示这一时期的植被类型为落叶阔叶林,指示了温暖湿润的气候条件<sup>[34]</sup>;呼伦湖的孢粉记录研究显示10.0—8.2 ka针叶林逐步演替为落叶阔叶林,为升温阶段,8.2—4.5 ka落叶阔叶林进一步发展,气候温暖湿润<sup>[22]</sup>(图2b);呼伦贝尔沙地出现发育较好的古土壤(图2c),风沙活动区所占有的面积较先前和现代都小<sup>[23,31]</sup>,这也指示了当时湿润的环境。温暖湿润的气候条件,使得长白山地区降水增加,雨水在沟谷中聚焦且森林积水较深,具备了形成沼泽湿地的基本条件;沟谷中的积水增加,促使大量的沼泽湿地通过森林沼泽化形成<sup>[35]</sup>。在三江平原地区,勤得利泥炭剖面孢粉记录显示木本植物花粉数量较多,指示当时为温性阔叶林发展期;且在浅水湖沼中生长着水木贼、双星藻等,草本植物多为苔草属、莎草科、香蒲和芦苇<sup>[27]</sup>,表明低洼地湖沼广布,水体沼泽化过程活跃,处在有利于沼泽发育时期。科尔沁沙地沙丘孢粉及化学记录显示这一时期松辽平原地区气候相对暖湿,地表景观为暖温性疏林草原<sup>[36]</sup>。在暖湿的环境下,湖泊、泡子广泛发育,中全新世早期前段为沼泽孕育期,在后半段,湖泊、泡子及河漫滩洼地发生水体沼泽化过程,沼泽湿地大面积发育。而小兴安岭地区孢粉记录重建也反映这一期气候相对较为暖湿,沼泽面积扩大,地点增多,但多分布于部分谷地及坡麓有地下水补给的区域<sup>[37]</sup>。因此,可以推断草甸沼泽化以及森林沼泽化分别为平原沼泽湿地和沟谷沼泽湿地在这一时期主要的发育表现形式。

相比于全新世早期和中期,东北地区大部分沼泽湿地(58.8%)形成于全新世晚期,即距今约4.2 ka以后(图2a)。这是因为在4.37 ka后,经过全新世季风活动最强烈时期,全新世暖期结束,全球气候进入了新冰河时期的冷期<sup>[38]</sup>。这一时期,三江平原和松辽平原地区沼泽湿地发育速率显著增加;而在大小兴安岭地区,沼泽湿地在距今3.4 ka左右开始逐渐形成并广泛发育。随着太阳辐射活动和东亚夏季风强度的减弱(图2d),

全新世晚期东北地区降水量持续减少,气候变得干燥寒冷。古气候重建也表明东北地区进入了一个冷干的气候阶段<sup>[28-29]</sup>。哈尼泥炭地纤维素中δ<sup>18</sup>O在4.0 ka后持续降低,显示温度在晚全新世不断降低<sup>[35]</sup>,二龙湾孢粉组合显示3.8—1.4 ka针叶类乔木占优势,生及水生草本消失,表明气候冷干<sup>[34]</sup>;伊图里河冰楔中δ<sup>18</sup>O和δD记录也表明温度显著降低<sup>[39]</sup>;而松嫩平原科尔沁地区沙地古土壤粒度和地球化学记录也印证了这一降温趋势<sup>[36]</sup>。冷干的气候导致积水区地表水位下降并逐渐形成沼泽湿地。虽然全新世晚期东北地区气候呈现冷干的变化模式,但湿度变化较小,整体仍呈现冷湿的气候特点<sup>[22,40]</sup>。而这种冷湿的气候组合不利于沼泽湿地有机质的分解,从而进一步促进了东北地区沼泽湿地形成和发育(图2a)。全新世晚期,三江平原地区洪河和申家店泥炭地中植物残体记录重建发现以水木贼为代表的水生植被消失以及沼生植被增加的现象,表明这两处湿地均由水体演替到沼泽湿地<sup>[16,41]</sup>;因此推断全新世晚期冷湿地气候条件有利于沼泽湿地通过水体沼泽化过程形成。东北地区沼泽湿地在晚全新世大规模发育的情形也印证了全新世晚期也存在沼泽湿地大规模发育的假设;冷湿的气候组合特征促进沼泽湿地的发育也表明由太阳辐射活动减弱导致的气候变冷对沼泽湿地发育的影响是复杂的<sup>[42]</sup>,而东北地区沼泽湿地晚全新世大规模的发育除了受太阳辐射活动的影响外,也因其所处的季风区位置,受东亚夏季风活动影响。

### 3.3 全新世以来东北地区不同区域沼泽湿地发育的时空动态变化特征

东北地区沼泽湿地大多形成于全新世时期,但东北地区不同区域因其海拔高度、地形地貌和气候等条件的不同(表1),导致不同区域沼泽湿地形成发育的时间和规模呈现出显著的空间差异(图3)。

在长白山地区,沼泽湿地约从12.0 ka就已经开始发育;但长白山地区沼泽湿地发育高峰期则集中在8.0—1.0 ka(图3)。这一时期该地区的沟谷、古河道、堰塞湖、火山口湖和熔岩台地上,沼泽湿地广泛发育。长白山地区金川泥炭剖面<sup>[40]</sup>和哈尼泥炭剖面<sup>[35]</sup>中纤维素的碳氧同位素记录,以及二龙湾玛珥湖的孢粉记录<sup>[34]</sup>和哈尼泥炭剖面的生物标志物记录<sup>[15]</sup>共同显示9.0—4.8 ka长白山地区气候温暖湿润,有利于植被的生长,促进了湿地的发育;而4.8—1.8 ka期间长白山地区气候呈现冷暖交替的波动变化,但该时期整体仍偏湿,有利于沼泽湿地的发育。

在三江平原地区,沼泽湿地在12.0 ka也已开始发育,且经历了与长白山地区沼泽湿地相似的发育过程;但与长白山地区相比,沼泽湿地发育高峰期持续时间相对较短(图3)。三江平原地区沼泽湿地大规模发育时期集中在5.5—1.0 ka,这要比长白山和松辽平原地区沼泽湿地开始广泛发育时间推迟了约1.5 ka,这在以往的研究中也被证实<sup>[27]</sup>;究其原因可能与区域气候和地形地貌有关。在全新世早期,勤得利泥炭剖面的孢粉记录显示这一时期气候温暖湿润,水体沼泽化过程活跃,有利于沼泽湿地的发育<sup>[27]</sup>。此后,三江平原地区气候持续变暖,推断当时年平均气温比现今高约2~3℃<sup>[43]</sup>,温暖湿润的气候为本地区沼泽湿地进一步发育提供了有利条件(图3)。同时,由于三江平原地区地势平坦,河网密布<sup>[14]</sup>,在距今5.0—6.0 ka,海平面上升到冰后期最大高度,接近现在海平面的高度<sup>[44-45]</sup>;这使得终极剥蚀基准面提高,河流排水不畅的情况愈加严重,地表大量积水。受上述环境因素的影响,沼泽湿地分布范围进一步扩大。这一时期沼泽湿地的发育也从原来局限于地势低洼地区向广阔的河漫滩蔓延,水体沼泽化过程活跃;三江平原地区开始进入沼泽湿地发育高峰期(图3)。而在全新世晚期,古气候重建证明三江平原地区气候逐渐变得寒冷干燥,但仍呈现冷偏湿的气候组合特点<sup>[46]</sup>;冷湿的气候组合不利于有机质分解,使得三江平原地区沼泽湿地发育进入旺盛期。而过去几百年以来,三江平原地区沼泽湿地发育速率显著降低(图3),这可能是由人类活动加剧造成的(图2e),如农田垦殖、泥炭矿开采等。

而在松辽平原地区,沼泽湿地约在10.0 ka开始发育,发育高峰期则集中在7.0—3.0 ka(图3)。在全新世早期,虽然气候开始向暖湿方向发展,但松辽平原地区仍处于风沙干旱期,气候寒冷干燥不利于沼泽湿地的形成和发育<sup>[31]</sup>。随着气候进一步转暖变湿,大约在10.0 ka松辽平原地区沼泽湿地开始发育;在暖湿的环境下,湖泊、泡子广泛发育,河漫滩洼地发生水体沼泽化过程形成沼泽湿地。古气候重建表明,在距今7.0—3.5 ka,科尔沁沙地土壤粒度和地球化学记录显示松辽平原地区气候温暖湿润<sup>[36]</sup>,这与沼泽湿地大规模发育时期相一致(图3);而西辽河平原泥炭剖面的孢粉记录也指示这一时期为温暖湿润的气候组合模式<sup>[31]</sup>。在距今约6.8 ka以后,松辽平原地区进入沼泽湿地发育高峰期;其时间上要晚于三江平原地区,这与中全新世东北平原气候普遍转为暖湿的区域环境变化有关,当时三江平原正处于沼泽旺盛发育期(图3)。但在距今

2.8 ka 以后,松辽平原地区沼泽湿地发育速率开始降低,其时间要远早于长白山和三江平原地区(图 3)。古气候重建表明,3.0 ka 前后西辽河平原泥炭剖面的孢粉记录显示乔木植物松属花粉含量上升,栎属下降;而蒿属花粉增加,且藜科花粉间断后又开始出现<sup>[31]</sup>。这表明生长蒿属草本植物的半固定沙丘面积比原来扩大,流动沙丘开始发展;进而指示了该地区气候变化总趋势向干方向发展,冷干的气候组合模式限制了沼泽湿地的发育。此外,研究发现在松辽平原地区沼泽湿地基底年代小于 1.6 ka 的数量很少,这表明在 1.6 ka 以后沼泽湿地发育停滞或显著下降;而在长白山和三江平原地区,沼泽湿地仍然大规模发育(图 3),这可能是受区域气候和地貌的影响。在全新世晚期的后期阶段,由于太阳辐射活动和东亚夏季风强度的持续减弱,松辽平原地区气候持续变干,风沙活动进入快速发展时期,导致大部分的地区被风沙掩埋<sup>[47]</sup>;而松辽平原地区强烈的蒸发使得地表越来越干燥,进一步限制了沼泽湿地的发育。

大兴安岭和小兴安岭位于我国寒温带地区,地处欧亚大陆和北美大陆泥炭藓泥炭地分布的南缘<sup>[14]</sup>。小兴安岭地区沼泽湿地大约在 8.0 ka 开始发育,而发育高峰期则集中在全新世晚期(图 3),这说明在小兴安岭地区在 8.0 ka 之前很少有湿地发育。小兴安岭地区的孢粉记录组合显示其针叶树花粉减少,阔叶树花粉增多<sup>[48]</sup>;推断当时处在全新世大暖期的起始阶段,时间约为 8.3 ka,且气候开始向暖湿方向发展,暖湿的气候组合模式有利于沼泽湿地发育。此外,剖面中粘土矿物组合有大量水解作用生成的蒙脱石,反映当时有些区域地表积水或过湿<sup>[48]</sup>;剖面中植物残体鉴定发现有松、桦等木本植物和棉花莎草植物残体,这说明该区域沼泽湿地起源于森林沼泽化过程,通常表现为泥炭藓的生长。而在距今 7.6—3.2 ka,该地区泥炭剖面孢粉组合指示这一时期湿生、沼生草本植物花粉数量显著高于其他孢粉带,这表明气候较温暖湿润,且年均温高于现今 1~2℃;气候逐步转湿变暖<sup>[37]</sup>,沼泽湿地也进一步发育和扩展(图 3),沼泽湿地面积扩大。在全新世晚期,小兴安岭地区气候呈现出冷湿地气候组合特征,这也促进了泥炭藓的生长和沼泽湿地向贫营养沼泽发展<sup>[37,48]</sup>,小兴安岭地区沼泽湿地进入发育高峰期(图 3);而这一时期泥炭藓在北美大陆也大规模生长发育<sup>[49]</sup>。大兴安岭地区是东北地区沼泽湿地发育最晚的一个区域,这可能与其高纬度和高海拔以及全新世气候变暖迟后有关。研究结果表明,大兴安岭地区大部分沼泽湿地的基底年代要小于 4.0 ka;而在 3.0 ka 之后,大兴安岭地区开始向冷湿方向转变<sup>[22,39,50]</sup>,沼泽湿地大规模发育,且在短时期内由富营养沼泽向贫营养沼泽发育转变,这与小兴安岭地区沼泽湿地的发育模式基本一致(图 3)。

## 4 结论

通过系统分析全新世以来东北地区沼泽湿地形成发育的动态变化过程及其影响因素,得出以下结论:

- 1) 东北地区沼泽湿地自全新世早期开始发育,但发育高峰期却集中在全新世晚期,这种发育趋势与全球北方主要区域沼泽湿地大规模发育趋势显著不同。
- 2) 全新世早期,由于太阳辐射活动和东亚夏季风强度处于全新世以来的峰值,东北地区气候处于逐渐升温阶段,温暖湿润的气候促进了沼泽湿地的发育;随后东北地区沼泽湿地发育速率有了稳步增加。而全新世晚期,东北地区向冷湿方向发展,冷湿地气候组合模式不利于有机质的分解,进而促进了沼泽湿地的大规模形成和发育,这也印证了晚全新世时期也存在沼泽湿地大规模发育的假设。
- 3) 东北地区不同区域沼泽湿地发育的时间和规模呈现出显著的空间差异,这是由不同区域气候条件、地貌类型等因素造成的。

致谢:样品采集得到中国科学院东北地理与农业生态研究所张振卿副研究员、高传宇助理研究员和赵海洋博士的帮助;年代测定得到中国科学院地球环境研究所于学峰研究员的帮助;烧失量和干容重的测定得到中国科学院东北地理与农业生态研究所张玉霞工程师和赵海洋博士的帮助,在此深表感谢。

## 5 参考文献

- [1] Gorham E. Northern Peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1991, 1(2): 182-195. DOI: 10.2307/1941811.
- [2] Yu ZC, Loisel J, Brosseau DP et al. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(13): 1-5. DOI: 10.1029/2010GL043584.

- [ 3 ] Macdonald GM, Beilman DW, Kremenetski KV *et al.* Rapid early development of circumarctic peatlands and atmospheric CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> variations. *Science*, 2006, **314**(5797) : 285-288. DOI: 10.1126/science.1131722.
- [ 4 ] Jones MC, Yu ZC. Rapid deglacial and early Holocene expansion of peatlands in Alaska. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, **107**(16) : 7347-7352. DOI: 10.1073/pnas.0911387107.
- [ 5 ] Zhao Y, Yu ZC, Tang Y *et al.* Peatland initiation and carbon accumulation in China over the last 50,000 years. *Earth Science Reviews*, 2014, **128**(1) : 139-146. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.11.003.
- [ 6 ] Yu ZC, Beilman DW, Jones MC. Sensitivity of northern peatland carbon dynamics to Holocene climate change. *Carbon Cycling in Northern Peatlands*, 2009, **84**(1) : 55-69. DOI: 10.1029/2008GM000822.
- [ 7 ] Yu ZC, Loisel J, Charman DJ *et al.* Holocene peatland carbon dynamics in the circum-Arctic region: An introduction. *The Holocene*, 2014, **24**(9) : 1021-1027. DOI: 10.1177/0959683614540730.
- [ 8 ] Morris PJ, Swindles GT, Valdes PJ *et al.* Global peatland initiation driven by regionally asynchronous warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, **115**(19) : 4851-4856. DOI: 10.1073/pnas.1717838115.
- [ 9 ] Camill P, Umbanhowar Jr CE, Geiss C *et al.* The initiation and development of small peat-forming ecosystems adjacent to lakes in the north central Canadian low arctic during the Holocene. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122**(7) : 1672-1688. DOI: 10.1002/2016JGG003662.
- [ 10 ] Ruppel M, Välimäki M, Virtanen T *et al.* Postglacial spatiotemporal peatland initiation and lateral expansion dynamics in North America and Northern Europe. *The Holocene*, 2013, **23**(11) : 1596-1606. DOI: 10.1177/0959683613499053.
- [ 11 ] Smith L, Macdonald G, Velichko A *et al.* Siberian peatlands a net carbon sink and global methane source since the early Holocene. *Science*, 2004, **303**(5656) : 353-356. DOI: 10.1126/science.1090553.
- [ 12 ] Dommain R, Couwenberg J, Joosten H. Development and carbon sequestration of tropical peat domes in south-east Asia: links to post-glacial sea-level changes and Holocene climate variability. *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**(8) : 999-1010. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.01.018.
- [ 13 ] Cai SS, Yu ZC. Response of a warm temperate peatland to Holocene climate change in northeastern Pennsylvania. *Quaternary Research*, 2011, **75**(20) : 531-540. DOI: 10.1016/j.yqres.2011.01.003.
- [ 14 ] Lv XG ed. Wetland ecosystem study in China. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2008. [吕宪国. 中国湿地与湿地研究. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2008.]
- [ 15 ] Zhou WJ, Zheng YH, Meyers PA *et al.* Postglacial climate-change record in biomarker lipid compositions of the Hani peat sequence, Northeastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, **294**(1) : 37-46. DOI: 10.1016/j.epsl.2010.02.035.
- [ 16 ] Liu HX, Yu XF, Gao CY *et al.* A 4000-yr multi-proxy record of Holocene hydrology and vegetation from a peatland in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Quaternary International*, 2017, **436**(A) : 28-36. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.12.028.
- [ 17 ] Guo YD, Song CC, Wang LL *et al.* Concentrations, sources, and export of dissolved CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> in rivers of the permafrost wetlands, northeast China. *Ecological Engineering*, 2016, **90** : 491-497. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.10.004.
- [ 18 ] Cui Q, Song CC, Wang XW *et al.* Effects of warming on N<sub>2</sub>O fluxes in a boreal peatland of Permafrost region, Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2018, **616/617** : 427-434. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.246.
- [ 19 ] Wang M, Chen H, Wu N *et al.* Carbon dynamics of peatlands in China during the Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 2014, **99**(1) : 34-41. DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.06.004.
- [ 20 ] Reimer PJ, Bard E, Bayliss A *et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, **55**(4) : 1869-1887. DOI: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16947.
- [ 21 ] Zhao KY ed. Mires in China. Beijing: Science Press, 1999. [赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [ 22 ] Wen RL, Xiao JL, Chang Z *et al.* Holocene precipitation and temperature variations in the East Asian monsoonal margin from pollen data from Hulun Lake in northeastern Inner Mongolia, China. *Boreas*, 2010, **39**(1) : 262-272. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2009.00125.x.
- [ 23 ] Li SH, Chen YY, Li B *et al.* OSL dating of sediments from deserts in northern China. *Quaternary Geochronology*, 2007, **2**(1/2/3/4) : 23-28. DOI: 10.1016/j.quageo.2006.05.034.
- [ 24 ] Dykoski CA, Edwards RL, Cheng H *et al.* A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**(1/2) : 71-86. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.01.036.

- [25] Li XQ, Zhao HL, Yan MH et al. Fire ariations and relationship among fire and vegetation and climate during Holocene at Sanjiang Plain, Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(2) : 177-182. [李小强, 赵宏丽, 闫敏华等. 东北三江平原全新世火演化及其与植被和气候的关系. 地理科学, 2005, **25**(2) : 177-182.]
- [26] Wang ZM, Song KS, Liu DW et al. Process of land conversion from marsh to cropland in the Sanjiang Plain during 1954-2005. *Wetland Science*, 2009, **7**(3) : 208-217. [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. 湿地科学, 2009, **7**(3) : 208-217.]
- [27] Yang YX, Wang SY. Study on mire development and paleoenvironment change since 8.0ka B.P. in the Northern part of the Sanjiang Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, **23**(1) : 32-38. [杨永兴, 王世岩. 8.0ka B.P.以来三江平原北部沼泽发育和古环境演变研究. 地理科学, 2003, **23**(1) : 32-38.]
- [28] Stebich M, Rehfeld K, Schlutz F et al. Holocene vegetation and climate dynamics of NE China based on the pollen record from Sihailongwan Maar Lake. *Quaternary Science Reviews*, 2015, **124**(9) : 275-289. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.07.021.
- [29] Zheng YH, Pancost RD, Naafs BD et al. Transition from a warm and dry to a cold and wet climate in NE China across the Holocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, **493**(7) : 36-46. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.04.019.
- [30] Qiu SW, Sun GY, Xia YM. Formation and evolvement of marshes in the middle-east of the Sanjiang Plain. *Wetland Science*, 2008, **6**(2) : 148-160. [裘善文, 孙广友, 夏玉梅. 三江平原中东部沼泽湿地形成及其演化趋势的探讨. 湿地科学, 2008, **6**(2) : 148-160.]
- [31] Yang YX, Huang XC, Wang SY et al. Study on the mire development and palaeogeographical environment change since the early period of the holocene in the east part of the Xiliaohe Plain. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, **21**(3) : 242-249. [杨永兴, 黄锡畴, 王世岩等. 西辽河平原东部沼泽发育与中全新世早期以来古环境演变. 地理科学, 2001, **21**(3) : 242-249.]
- [32] Zhao Y, Yu Z, Zhao W. Holocene vegetation and climate histories in the eastern Tibetan Plateau: controls by insolation-driven temperature or monsoon-derived precipitation changes? *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**(9/10) : 1173-1184. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.02.006.
- [33] Chen JH, Rao ZG, Liu JB et al. On the timing of the East Asian summer monsoon maximum during the Holocene—Does the speleothem oxygen isotope record reflect monsoon rainfall variability? *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2016, **59**(12) : 2328-2338. DOI: 10.1007/s11430-015-5500-5.
- [34] You HT, Liu JQ. High-resolution climate evolution derived from the sediment records of Erlongwan Maar Lake since 14 ka BP. *Science Bulletin*, 2012, **35**(10) : 1-7. DOI: 10.1007/s11434-012-5244-6.
- [35] Hong B, Liu C, Lin Q et al. Temperature evolution from the  $\delta^{18}\text{O}$  record of Hani peat, Northeast China, in the last 14000 years. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2009, **52**(7) : 952-964. DOI: 10.1007/s11430-009-0086-z.
- [36] Liu B, Jin HL, Sun Z. Desert evolution and climate change in the Horqin sandy land in middle and late Holocene. *Journal of Desert Research*, 2013, **33**(1) : 77-86. [刘冰, 靳鹤龄, 孙忠. 中晚全新世科尔沁沙地演化与气候变化. 中国沙漠, 2013, **33**(1) : 77-86.]
- [37] Yang YX. Study on formation and development of forest swamp and paleoenvironment change since the Holocene in the east part of the Xiaoxinganling mountains. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 2003, **34**(1) : 74-82. [杨永兴. 小兴安岭东部全新世森林沼泽形成, 发育与古环境演变. 海洋与湖沼, 2003, **34**(1) : 74-82.]
- [38] Kaufman DS, Ager TA, Anderson NJ et al. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180 W). *Quaternary Science Reviews*, 2004, **23**(6) : 529-560. DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.09.007.
- [39] Yang SZ, Jin HJ.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  records of inactive ice wedge in Yitulihe, Northeastern China and their paleoclimatic implications. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2010, **40**(12) : 1710-1717. DOI: 10.1007/s11430-010-4029-5. [杨思忠, 金会军. 大兴安岭伊图里河地区的冰楔冰氢, 氧同位素记录及其反映的古温度变化. 中国科学: D辑: 地球科学, 2010, **40**(12) : 1710-1717.]
- [40] Hong Y, Wang Z, Jiang H et al. A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeast China based on  $\delta^{13}\text{C}$  time series from peat cellulose. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, **185**(2) : 111-119. DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00367-8.
- [41] Wang CL, Zhao HY, Wang GP. Vegetation development and water level changes in Shenjiadian peatland in Sanjiang Plain, Northeast China. *Chinese Geographical Science*, 2015, **25**(4) : 451-461. DOI: 10.1007/s11769-015-0768-8.

- [42] Korhola A, Ruppel M, Seppä H *et al.* The importance of northern peatland expansion to the late-Holocene rise of atmospheric methane. *Quaternary Science Reviews*, 2010, **29**(5/6) : 611-617. DOI: 10.1016/j.quascirev.2009.12.010.
- [43] Yang YX. Study on the relationship between mire development and palaeogeographical environment changes since the late period of the late Pleistocene in the Sanjiang Plain. *Oceanologia and Limnologia Sinica*, 1990, **21**(1) : 27-38. [杨永兴. 三江平原沼泽发育与晚更新世末期以来古地理环境演变的研究. 海洋与湖沼, 1990, **21**(1) : 27-38.]
- [44] Saito Y, Katayama H, Ikehara K *et al.* Transgressive and highstand systems tracts and post-glacial transgression, the East China Sea. *Sedimentary Geology*, 1998, **122**(1/2/3/4) : 217-232. DOI: 10.1016/S0037-0738(98)00107-9.
- [45] Steinke S, Kienast M, Hanebuth T. On the significance of sea-level variations and shelf paleo-morphology in governing sedimentation in the southern South China Sea during the last deglaciation. *Marine Geology*, 2003, **201**(1/2/3) : 179-206. DOI: 10.1016/S0025-3227(03)00216-0.
- [46] Zhang ZQ, Liu KB, Bianchette TA *et al.* The mid-Holocene decline of the East Asian summer monsoon indicated by a lake-to-wetland transition in Sanjiang Plain, Northeast China. *The Holocene*, 2018, **28** (2) : 246-253. DOI: 10.1177/0959683617721321.
- [47] Makohonienko M, Kitagawa H, Naruse T *et al.* Late-Holocene natural and anthropogenic vegetation changes in the Dongbei Pingyuan (Manchurian Plain), northeastern China. *Quaternary International*, 2004, **123**(4) : 71-88. DOI: 10.1016/j.quaint.2004.02.010.
- [48] Yang YX, Wang SY. Study on mire development and palaeoenvironment change since 9.0 ka B.P. in the east part of the Xiaoxinganling Mountains. *Journal of Mountain Science*, 2002, **20**(2) : 129-134. [杨永兴, 王世岩. 小兴安岭东部9.0 ka B.P.以来沼泽发育与古环境演变研究. 山地学报, 2002, **20**(2) : 129-134.]
- [49] Gajewski K, Viau A, Sawada M *et al.* Sphagnum peatland distribution in North America and Eurasia during the past 21,000 years. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(2) : 297-310. DOI: 10.1029/2000GB001286.
- [50] Zhao C, Li XQ, Zhou XY *et al.* Holocene vegetation succession and responses to climate change in the northern sector of Northeast China. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2016, **59**(7) : 1390-1400. DOI: 10.1007/s11430-015-5239-5247.