

东北哈尼泥炭腐殖化度古气候意义及区域对比

程胜高^{1,2}, 肖 河¹, 黄 庭¹, 周 莹¹, 胡忠霞¹, 刘晓彤¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)
环境评价研究所, 湖北 武汉 430074)

摘 要:不同地区泥炭腐殖化度指示的古气候意义存在着分歧。运用碱提取溶液吸光度法对东北哈尼泥炭腐殖化度进行测定, 结合¹⁴C 测年数据的年代框架, 对比东北哈尼、神农架大九湖、青藏高原红原、福建天湖山地区泥炭腐殖化度气候代用指标, 分析不同地区泥炭腐殖化度古气候意义异同的原因。结果表明:哈尼泥炭腐殖化度的古气候意义包含温度-湿度组合, 较高的腐殖化度指示气候温暖潮湿, 较低的腐殖化度指示气候干燥寒冷; 从哈尼、红原、大九湖、天湖山泥炭腐殖化度时间序列的对比可以得出, 虽然其古气候意义有所不同, 但其记录的中国全新世古气候环境演变趋势大体相同, 都反映了中国早全新世阶段的升温现象、中全新世的大暖期现象及晚全新世阶段的降温; 温度、湿度、季风、经纬度及地质地貌等因素都对泥炭腐殖化度有影响, 但水热条件是直接影响, 其他因素通过对水热条件的改变而间接影响腐殖化度; 阐述不同区域泥炭腐殖化度的古气候意义没有固定模式, 需结合当地的地理位置、地质地貌、年均气温、季风、降水、植被等情况进行具体分析。

关键词:泥炭; 腐殖化度; 碳、氧同位素; 全新世; 古气候; 时间序列; 冷事件; 东北

中图分类号:P532; X16

文献标志码:A

Paleoclimatic Significances of Peat Humification in Hani of Northeast China and Regional Comparison

CHENG Sheng-gao^{1,2}, XIAO He¹, HUANG Ting¹, ZHOU Ying¹, HU Zhong-xia¹, LIU Xiao-tong¹

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Institute of Environmental Assessment, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: There are different viewpoints on the paleoclimatic significances of peat humification in different regions. Alkali extracting solution absorbance method was used to measure the peat humification in Hani of Northeast China. Combined with ¹⁴C dating data for chronological framework, the proxy climate indicators of peat humification in Hani of Northeast China, Dajiuahu of Shennongjia, Hongyuan of Qinghai-Tibet Plateau and Tianhushan of Fujian were compared, and the reasons for similarities and differences on the paleoclimatic significance of peat humification in different regions were analyzed. The results show that the paleoclimatic significance of peat humification in Hani includes temperature-humidity combination, and the higher humification indicates warm and humid climate, the lower humification indicates dry and cold climate; according to the comparison of peat humification temporal series in Hani, Hongyuan, Dajiuahu and Tianhushan, although the paleoclimatic significances are different, but the evolution trends of Holocene paleoclimate environment recorded are almost the same; the

收稿日期:2013-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41072023)

作者简介:程胜高(1954-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,理学博士, E-mail:chengsg@cug.edu.cn.

records include warming in Early Holocene, megathermal in Middle Holocene and cooling in Late Holocene; the effects of temperature, humidity, monsoon, latitude and longitude and geological landform on peat humification are significant, but the hydrothermal conditions are direct, and the other factors are indirect; it is different to explain the paleoclimatic significances of peat humification in different regions, and the location, geological landform, average annual temperature, monsoon, precipitation and vegetation should be considered.

Key words: peat; humification; carbon and oxygen isotopes; Holocene; paleoclimate; temporal series; cold event; Northeast China

0 引 言

泥炭是不同分解程度的松软有机体堆积物,这种有机体主要是植物残体。泥炭沼泽植物死亡后受到各种生物化学作用,首先是复杂的有机质转变为简单的有机物质及 CO₂ 和水,然后这些物质再合成新的较复杂的有机物质圈,分解与合成这两个过程相互交替的进行着,制约着泥炭的形成与发育。因此,研究泥炭植物残体分解速率对了解泥炭的形成特点具有重要意义。泥炭地的形成和发展直接受水分和热量的控制。只有在一定水分和热量的配合下,泥炭沼泽才能得到旺盛发育。这种有利的水热组合条件主要取决于气候,其次是海陆分布以及地质、地貌和水文状况等因素。根据赵红艳等对哈尼地区泥炭分解沉积速率的研究可知,植物残体的分解是在一定环境条件下进行的,影响分解的主要因素是温度、湿度和酸度等^[1]。

泥炭腐殖化度是定量描述泥炭分解程度的指标,即泥炭中无定形腐殖质占样品干重的质量分数。泥炭腐殖化度和泥炭的分解速率有必然联系,泥炭分解越快,其腐殖化程度越高。影响泥炭分解速率

的因素(即温度、水分、酸度等)在一定程度上可以通过泥炭腐殖化度来表现,进而泥炭腐殖化度的波动与古气候变化存在一定关系:泥炭腐殖化度受温度、湿度控制,它们作为影响泥炭腐殖化度的主要因素,使得泥炭腐殖化度在一定程度上能反映气候的冷暖干湿。因此,腐殖化度在古气候演变及突变事件研究中被用作恢复古环境的气候代用指标。

在泥炭腐殖化度的研究方法上,1995 年之前国外主要侧重研究腐殖化度与湿度之间的联系^[2];之后,Chambers 等通过对苏格兰披盖式泥炭中孢粉与腐殖化度的研究确定了气候与腐殖化度之间存在某种关联,证实泥炭腐殖化度可以作为恢复古环境的代用指标^[3]。中国由王华等首次确立了泥炭腐殖化度作为古气候代用指标的地位^[4]。但国内外学者对泥炭腐殖化度的古气候意义有不同看法(表 1)。

由表 1 可知,国际上对泥炭腐殖化度的研究重点在将其与阿米巴虫、植物大化石等指标进行对比,涉及的气候因子仅限于地表环境湿度,并未涉及温度或温度-湿度组合对泥炭腐殖化度的影响。国内腐殖化度的研究范围较为广泛,对比指标较多,涉及的气候因子是温度-湿度组合,并且学者就泥炭腐殖

表 1 腐殖化度古气候意义的不同观点

Tab. 1 Different Views for Paleoclimatic Significance of Humification

| 文献来源 | 学者 | 研究地区 | 气候因子 | 对比指标 | 结论 |
|-----------|------------|----------------------------|-------------|------------------------------|-----------------------------------|
| [3] | Chambers 等 | 苏格兰南部披盖式沼泽 | 湿度 | 孢粉 | 腐殖化度低,指示气候较 |
| [5] | Langdon 等 | 苏格兰东南部 Temple Hill Moss 泥炭 | | 植物大化石、阿米巴原虫化石 | 湿润;腐殖化度高,指示 |
| [6] | Borgmark 等 | 瑞典中东部 | | 碳氮比、阿米巴原虫 | 气候较干燥;还可以用腐 |
| [7] | Blundell 等 | 爱尔兰地区 | | 植物大化石、有壳变形虫 | 殖化度推断水位深度 |
| [4] | 王华等 | 中国青藏高原东部四川红原泥炭 | 湿度-温度 组合 | 木里苔草纤维素 δ(¹³ C)值 | 腐殖化度高,指示气候温 |
| [8] | 马巧红等 | 中国雷州半岛北部 | | 有机质含量、烧失量 | 暖湿润;腐殖化度低,指 |
| [9] | 蔡颖等 | 中国新疆北部巴里坤湖 | | 有机质含量、TOC 值、自生碳酸盐 | 示干冷 |
| [10] | 尹茜等 | 中国浙江天目山千亩田 | | 烧失量 | 腐殖化度高,指示气候干 冷;腐殖化度低,指示气 候湿热 |
| [11]、[12] | 薛积彬等 | 中国南岭东部江西定南大湖 | | TOC 值、磁化率 | |
| [13] | 马春梅等 | 中国湖北神农架大九湖 | | 孢粉、有机质含量、TOC 值、Rb/Sr 值 | |
| [14] | 胡凡根等 | 中国福建屏南天湖山 | | 有机质 | |

化度的古气候意义解释也存在很大分歧。

以洪业汤、于学峰、钟巍为代表的在青藏高原东部、雷州半岛北部、新疆巴里坤湖的研究认为：腐殖化度高，指示气候温暖湿润；腐殖化度低，指示气候干冷^[4,9,15-16]。他们证实在温暖气候条件下，植物初级生产力提高，能够提供较多的植物残体进行腐解，同时也提高了微生物的分解能力，二者的综合作用使泥炭中的无定形碳质量分数增高（即腐殖化度增高）；反之，在干冷气候条件下，不仅植物初级生产力减弱，提供腐解的植物残体较少，而且微生物分解能力也减弱，导致泥炭中无定形腐殖质质量分数降低（即泥炭的腐殖化度降低）。

以马春梅、朱诚为代表的在神农架、浙江千亩田的研究，对腐殖化度代用指标指示古气候意义的阐释完全相反^[10,13]。他们认为：腐殖化度高，指示气候干冷；腐殖化度低，指示气候湿热。这是因为在干燥气候条件下，沼泽处于氧化环境，微生物活动强烈，从而使植物残体分解得更彻底，腐殖化程度就会增大；而温暖的水涝环境降低了微生物的活动，减缓了植物残体的分解，使腐殖化程度降低。

因此，有必要对中国东北哈尼泥炭地这一气候变化敏感的区域重新进行泥炭腐殖化度的研究。笔者通过对中国东北哈尼地区泥炭腐殖化度的测定，并结合植物纤维素碳、氧同位素指标进行对比分析，得出哈尼泥炭腐殖化度代表的古气候意义；再对比红原、大九湖、天湖山泥炭地腐殖化度指标，探讨不同地区腐殖化度古气候意义异同的原因。

1 泥炭腐殖化度古气候意义

哈尼泥炭地(42°13'N,126°31'E)位于吉林省柳河县哈尼乡，地处长白山高峰的西麓与龙岗山脉中部，海拔高度约 900 m(图 1)。哈尼泥炭堆积于全新世，通体剖面厚度达到 9.6 m，其沉积过程贯穿整个全新世；特别是上层泥炭，堆积速度高，提供了高分辨率的气候记录。自晚全新世以来，本区泥炭沉积比较连续，受人类干扰较小，高分辨率地记录了古植被、古气候和古环境变化的详细信息。

泥炭样品来自于哈尼泥炭地中部(42°12'50"N, 126°31'05"E)，采样深度达到 9 m。将所采泥炭芯每 5 cm 间隔现场切样密封保存后，立刻运回实验室进行样品分析。根据泥炭的颜色、质量、组成可以划分泥炭的地层。泥炭芯中地层的变化(图 2)可以显示出泥炭沉积地的气候变化^[17-19]。利用¹⁴C 测年技术对所采集的泥炭样品进行测定可以获得相应的年代

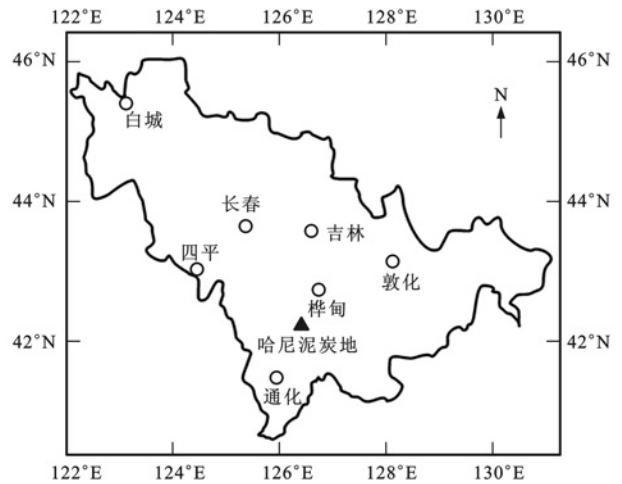


图 1 哈尼泥炭地地理位置

Fig. 1 Location of Hani Peatland

| 校正年龄/ a BP | AMS ¹⁴ C 年龄/a BP | 测年点 位/cm | 深度/ cm | 岩性 柱 | 泥炭岩性描述 |
|---------------|--------------------------------|-------------|-----------|---------|------------|
| | | | 0 | | 草根 |
| | | | | | 浅褐色泥炭 |
| | | | 100 | | 褐色泥炭 |
| 722 | 807±40 | 80 ● | | | |
| 1 292 | 1 380±88 | 135 ● | | | |
| | | | 200 | | 深褐色泥炭 |
| 2 673 | 2 455±46 | 200 ● | | | |
| | | | 300 | | 浅褐色泥炭 |
| | | | 400 | | 深褐色泥炭 |
| 5 383 | 2 674±53 | 350 ● | | | |
| | | | 500 | | 深褐色泥炭 |
| 8 171 | 7 354±63 | 495 ● | | | |
| 8 412 | 7 658±64 | 570 ● | | | |
| 9 337 | 8 352±76 | 600 ● | | | |
| 10 745 | 9 604±80 | 625 ● | 600 | | 含火山灰的深褐色泥炭 |
| | | | 700 | | 深褐色泥炭 |
| 11 643 | 10 102±80 | 740 ● | | | |
| 12 336 | 10 399±89 | 745 ● | | | |
| | | | 800 | | 黑褐色泥炭 |
| 12 356 | 10 446±91 | 780 ● | | | |
| 13 135 | 11 122±90 | 820 ● | | | |
| 14 440 | 11 930±172 | 900 ● | 900 | | 灰绿色黏土 |

图 2 哈尼泥炭地层与定年

Fig. 2 Stratigraphy and Dating of Hani Peatland

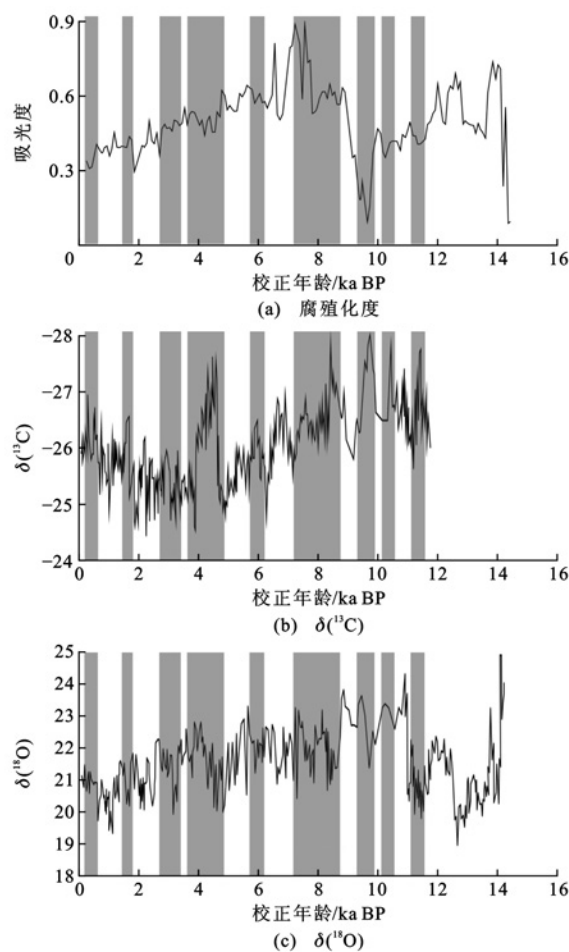
序列。¹⁴C 测年的材料来自于泥炭样品中的植物残留物，共选出泥炭样品 13 个，按 Hong 等所述方法提取泥炭植物纤维素进行¹⁴C 年龄的测定^[20]。泥炭测年数据由日本筑波国家环境研究所 AMS 实验室

测试,通过 CALIB4.3 软件获得 ^{14}C 的校正年龄^[21]。根据野外采集的泥炭芯,绘制并整理出哈尼泥炭层综合柱状图(图2),其剖面岩性特征随深度变化描述如下:0~25 cm 为现代植被层,有大量活的根系,主要为苔草以及少量芦苇,分解度低;25~66 cm 为浅褐色泥炭层,植物残体以苔草根为主,少量植物活根系,分解度低;66~126 cm 为褐色泥炭层,植物残体以草本为主,含有少量木本残体,分解度低;126~246 cm 为深褐色泥炭层,植物残体以草本为主,含少量木本残体,分解度低;246~316 cm 为浅褐色泥炭层,植物残体以草本为主,含有少量泥炭藓,分解度高;316~600 cm 为深褐色泥炭层,植物残体包含草本与木本,含有泥炭藓,分解度高;600~625 cm 为含有火山灰的深褐色泥炭层,分解度低;625~726 cm 为深褐色泥炭层,植物残体包含草本与木本,含有泥炭藓,分解度高;726~890 cm 为黑褐色泥炭,植物残体包含草本与木本,含有泥炭藓,分解度高;890~900 cm 为灰绿色黏土,含有少量泥炭。

运用碱提取法^[22]进行哈尼泥炭腐殖化度的测定。根据哈尼泥炭地的自然条件,测定方法有所改变,主要是修改了从提取液中分离出腐殖酸的方法和重新选择确定吸光度值的最适合波长。试验主要步骤为:将泥炭样品研磨成粉末后过 60 目筛(0.280 mm),混合均匀;然后,精确称取泥炭样品 0.200 g,放入 250 mL 烧杯中,同时精确称量 0.400 g 的 NaOH,放在烧杯中溶解,并放入 100 mL 容量瓶中定容;将所配的溶液倒入盛有泥炭样品的烧杯中充分溶解;将上述泥炭溶液放在电炉上大火加热至沸腾(约 10 min),待溶液沸腾后将电炉热量关小,温和加热溶液 1 h,从而使泥炭中的腐植酸充分溶解;待加热完成后,自然冷却,将烧杯中的水加至 150 mL,并放在 250 mL 的容量瓶中定容并混合均匀;分 2 次取 10 mL 上述溶液放在 2 个 10 mL 的离心管中离心 20 min,取上清液 2 mL,放在 10 mL 比色管中定容至刻度线,摇晃均匀;以超纯水为参照物,用 Shimadzu UV-VIS-3000 type 分光光度计测定泥炭样品中的碱提取物在 540 nm 波长下溶液的吸光度值;最后,以该吸光度值来表征泥炭腐殖化度。

为探讨哈尼地区泥炭腐殖化度指示的古气候意义,将腐殖化度时间序列曲线与洪业汤等在同一地区研究得出植物纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 、 $\delta(^{18}\text{O})$ 时间序列进行对比(图3)^[23-25]。

据洪业汤等的研究,东北长白山地区碳、氧同位素的古气候意义如下^[23-25]:植物纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 值可



灰色部分对应发生在北大西洋的冷事件时间区间

图3 哈尼泥炭腐殖化度与纤维素碳、氧同位素对比

Fig. 3 Comparison of Peat Humification, Cellulose Carbon and Oxygen Isotopes in Hani

指示气候的湿度或降水变化, $\delta(^{13}\text{C})$ 值较高则降水较多(湿度较高), $\delta(^{13}\text{C})$ 值较低则降水较少(湿度较低); $\delta(^{18}\text{O})$ 值可指示温度效应,即与温度成正相关关系, $\delta(^{18}\text{O})$ 高值期解释为温暖期,而 $\delta(^{18}\text{O})$ 低值期则对应寒冷期。

从泥炭腐殖化度与纤维素 $\delta(^{18}\text{O})$ 值对比图发现:在 12.8~14.0 ka,纤维素 $\delta(^{18}\text{O})$ 值呈下降趋势,同期泥炭腐殖化度值也在下降,反映了温度的下降,紧接着近千年时段内,二者都有不同幅度的上升,反映了温度的上升;在 9.7~12.0 ka,纤维素 $\delta(^{18}\text{O})$ 值整体呈下降趋势,泥炭腐殖化度曲线也呈明显下降趋势,其中 11.2~11.5 ka 内,两者都有短暂时期的上升,但二者上升幅度有显著差异,纤维素 $\delta(^{18}\text{O})$ 值急剧升高,而泥炭腐殖化度只有小幅上升,虽然反映的温度变化方式相同,但是其对温度变化的响应程度不同;在 0~7.3 ka,两者整体上均呈下降趋势。由此可见,泥炭腐殖化度大体与纤维素 $\delta(^{18}\text{O})$ 值变

化趋势相同,能反映古环境的温度变化:腐殖化度高,指示气候温暖;腐殖化度低,指示气候寒冷。

从泥炭腐殖化度曲线与纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 值对比图发现:在 9.7~11.5 ka,纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 值虽有波动,但整体呈下降趋势,表明气候偏干燥,而同一时期内泥炭腐殖化度呈小幅波动的下降趋势,两者的波动趋势相同;在 6.7~8.4 ka,纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 值缓慢上升,反映气候偏湿润,此时期的腐殖化度值明显上升;在 4.8~6.5 ka,两者均在小幅度内波动,且变化趋势相同;在 0~3.8 ka,纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 值呈下降趋势,表明气候偏干燥,而泥炭腐殖化度也呈下降趋势。由此可见,泥炭腐殖化度与纤维素 $\delta(^{13}\text{C})$ 值变化趋势大体成正相关关系,能反映区域湿度变化:腐殖化度高,指示气候湿润;腐殖化度低,指示气候干燥。

综上所述,哈尼地区泥炭腐殖化度能同时反映温度与湿度的变化:腐殖化度高,指示气候温暖湿润;腐殖化度低,指示气候干燥寒冷。

2 泥炭腐殖化度区域对比

国外学者研究泥炭腐殖化度涉及的气候因子仅限于地表环境湿度,并未涉及温度或温度-湿度组合对泥炭腐殖化度的影响。世界各国由于地理地域上的差异形成了各自的温度、湿度大幅度变化范围,不宜将其与中国的泥炭腐殖化度古气候意义进行对比。因此,为研究中国泥炭腐殖化度古气候意义的差异,可以将气候变化敏感的哈尼地区泥炭腐殖化度的古气候意义与腐殖化度代用指标研究较为成熟的青藏高原红原泥炭地^[26]、湖北神农架大九湖泥炭地^[27]、福建北部天湖山泥炭地^[28]进行对比。

2.1 泥炭沼泽产出环境特征

2.1.1 东北长白山地区哈尼泥炭沼泽

哈尼泥炭沼泽隶属吉林省柳河县凉水乡,海拔高度为 882~900 m,是典型的熔岩堰塞湖成因类型,其泥炭层平均厚度约为 4.6 m,最厚处超过 9.6 m。哈尼泥炭地属于中温带大陆性山地季风气候,气温常年偏低,年均 2.5℃~3.6℃,霜期约 250 d。本区受季风影响,年平均风速 2.8 m·s⁻¹;pH 值较高,为 4.5~6.0,有利于沼泽发育;水源主要是地下水和降水补给;年均降水量 743 mm。

哈尼地区植被属于温带红松针阔叶混交林,植物群落具有明显的分带性^[29]。其中心部位为苔草-泥炭藓,并伴生有棉花莎草、细叶杜香、杜斯等,木本植物稀少;外围林木较密集,为长白落叶松-油桦-修氏苔草群落,两者之间是呈渐变的过渡性植物群落。

外环带沿沼泽边缘出现的为长白落叶松-油桦-修氏苔草群落;第 2 带为油桦-芦苇-泥炭藓沼泽、松树、桦树,地表常年积水 10~30 cm;第 3 带沼泽分布于哈尼沼泽体中部(即第 2 带沼泽的内侧),是第 2 带沼泽未经破坏前的原始沼泽景观。

2.1.2 青藏高原东北部若尔盖高原红原泥炭地

红原泥炭地位于青藏高原东南缘的红原-若尔盖平坦高原区的红原丘状高原,海拔约 3 400 m,属大陆性高原寒温带季风气候,春秋短促,长冬无夏,热量低;干湿季节分明,雨热同期;日照长,太阳辐射强。1 月为最冷月,平均为 -10.3℃,最热为 7 月,平均气温为 10.9℃,年平均降水量为 753 mm。

本区丘陵和山地主要生长草甸,兼有针叶林。土壤以亚高山草甸土为主。河谷平原、宽谷则主要为木里苔草等沼泽植被,发育以沼泽土为主的土类。

2.1.3 湖北神农架大九湖泥炭地

大九湖泥炭地是位于湖北神农架西端的山间盆地,属亚高山沼泽,面积约 16 km²,海拔 1 700 m。其地处北亚热带,海拔较高,气候湿冷,年平均温度 7.4℃,夏季最高温度为 17.1℃,冬季最低温度为 -2.4℃。年降水量约 1 500 mm,年雨日天数为 150~200 d,降水丰富且分布均匀,相对湿度超过 80%,无霜期短(只有 144 d)。大九湖地区溪流、小河在中途消失于石灰岩中。由于盆地封闭,无其他排水通道,而喀斯特洞穴又不能通畅排水,因而地下水水位普遍较高。

盆地周围山地植被主要属于神农架温性针叶林、落叶阔叶林带,植被类型主要有茅栗、亮叶桦、漆树、米心水青冈、巴山松、巴山冷杉及山地草甸。面向盆地的山坡主要为落叶阔叶林带,其中以山毛榉科为优势,林下有成片箭竹及大量蕨类植物。盆地内植被以草甸和沼泽为主。

2.1.4 福建北部天湖山泥炭地

天湖山泥炭地位于福建省宁德市屏南县东南部,海拔 1 180 m,属于中亚热带季风气候区,年均气温为 14.6℃~17.1℃。泥炭剖面属亚热带亚高山山间盆地沼泽泥炭,隶属于霍童流域,周围没有河流汇入,降水主要来源于大气降水。年均降水量超过 1 800 mm,水资源丰富,年相对湿度 81%。

天湖山泥炭地周围保存着完好的天然林植被及典型的中亚热带常绿阔叶林,土壤类型以红壤为主,泥炭地主要为山地泥炭沼泽土。

2.1.5 小 结

将以上 4 个区域的地理位置、气候类型、地面高

程、生长的植物、水源补给、pH 值、泥炭厚度、地貌类型、植被类型、年均气温、年均降水量、泥炭腐殖化度古气候意义等信息列入表中,可以更直观地体现不同研究区域的环境特征(表 2)。

表 2 哈尼、大九湖、红原、天湖山区域环境对比

| Tab. 2 Regional Environment Comparison of Hani, Dajiuhu, Hongyuan and Tianhushan Areas | | | | |
|--|---------------------------|------------------|---------------------------|------------------|
| 泥炭地类型 | 长白山哈尼 | 青藏高原红原 | 湖北神农架大九湖 | 福建天湖山 |
| 经纬度 | 42°13'N,126°31'E | 32°46'N,102°30'E | 31°29'N,109°59'E | 26°49'N,119°30'E |
| 地理位置 | 中国东北 | 中国西部 | 中国东部 | 中国东南 |
| 气候类型 | 中温带大陆性山地季风气候 | 大陆性高原寒温带季风型气候 | 北亚热带季风气候 | 亚热带湿润季风气候 |
| 地面高程/m | 882~900 | 3 466 | 1 700~1 760 | 1 180 |
| 生长的植物 | 苔草、芦苇、泥炭藓、油桦、杜香等 | 苔草、藏嵩草 | 苔草、刺子莞、金发藓、泥炭藓等 | 壳斗科的常绿属 |
| 水源补给 | 地表水与部分大气降水 | 地表水与部分大气降水 | 主要为大气降水、地下水 | 大气降水 |
| pH 值 | 4.5~5.5 | 6.0~7.0 | — | — |
| 泥炭厚度/m | 9.00 | 4.95 | 2.97 | 1.92 |
| 地貌类型 | 堰塞湖 | 山地高原过渡地形 | 北亚热带亚高山湿地 | 亚热带亚高山山间盆地 |
| 植被类型 | 针阔叶林 | 针叶林 | 落叶阔叶林、温性针叶林 | 中亚热带常绿阔叶林 |
| 年均气温/℃ | 3.03 | 1.10 | 7.40 | 15.80 |
| 年均降水量/mm | 743.3 | 753.0 | 1 528.4 | 1 800.0 |
| 泥炭腐殖化度古气候意义 | 腐殖化度高,指示气候暖湿;腐殖化度低,指示气候干冷 | | 腐殖化度高,指示气候干冷;腐殖化度低,指示气候暖湿 | |

注:“—”表示未找到数据。

2.2 泥炭腐殖化度时间序列对比

将哈尼泥炭腐殖化度的测定结果和¹⁴C 测年得到的哈尼地区泥炭腐殖化度时间序列与其他研究者得到的腐殖化度时间序列进行对比(图 4)。试验中对哈尼泥炭吸光度的测定使用的是 400 nm 波长光,与王华等在红原泥炭测试中相同^[4],而马春梅在吸光度测试中使用的是 540 nm 波长光^[13]。从图 4 可以看出,虽然使用的是相同波长,哈尼泥炭腐殖化度的变化范围(0.1~0.9)远大于红原泥炭(0.12~0.42),而大九湖与天湖山的吸光度值变化范围相差不大,分别为 0.01~0.49、0.03~0.35。由此可见,不同波长测得的吸光度值表征的腐殖化度在数值上有区别。由于泥炭的碱提取物在 350~700 nm 波长范围内测得的吸光度是由高频到低频单调减少吸收,无论选取哪个波长都能反映腐殖化度的变化,因此,可以从吸光度的变化趋势来进行讨论。

在新仙女木事件之后的早全新世升温阶段,哈尼泥炭与红原泥炭的腐殖化度呈上升趋势,大九湖腐殖化度呈明显下降趋势,天湖山腐殖化度变化虽不如前三者明显,但总体上其吸光度值也在下降;在中全新世暖期阶段,哈尼与红原泥炭腐殖化度虽有波动,但整体均保持在一个较高水平,而大九湖与天湖山腐殖化度在较低水平波动;在晚全新世降温期,

哈尼及红原泥炭腐殖化度呈明显下降趋势,大九湖泥炭腐殖化度呈小范围波动,在 1.0~2.5 ka 还出现上升趋势,天湖山腐殖化度波动剧烈,呈明显上升趋势。通过中国全新世的气候变化趋势可以看出,哈尼与红原泥炭腐殖化度的变化趋势大体相同,大九湖与天湖山泥炭腐殖化度的变化趋势相同,且它们的古气候意义相反。前两者的古气候意义为:高腐殖化度指示气候暖湿,低腐殖化度指示气候干冷。而后两者的古气候意义为:高腐殖化度指示气候干冷,低腐殖化度指示气候暖湿。

根据不同地区泥炭腐殖化度时间序列对比图,结合全新世中国古气候演化过程,可以总结中国不同地区泥炭地腐殖化度在不同阶段的变化趋势(表 3)。

表 3 泥炭地腐殖化度变化趋势区域对比

| Tab. 3 Regional Comparison of Changes of Peatland Humification | | | | |
|--|--------|--------|------------|--------------|
| 泥炭地 | 长白山哈尼 | 青藏高原红原 | 神农架大九湖 | 福建天湖山 |
| 早全新世升温阶段 | 上升趋势 | 上升趋势 | 下降趋势 | 变化不明显,微弱下降趋势 |
| 中全新世暖期阶段 | 较高水平波动 | 较高水平波动 | 低水平波动 | 低水平波动 |
| 晚全新世降温阶段 | 明显下降趋势 | 明显下降趋势 | 小范围波动,上升趋势 | 剧烈波动,上升趋势 |

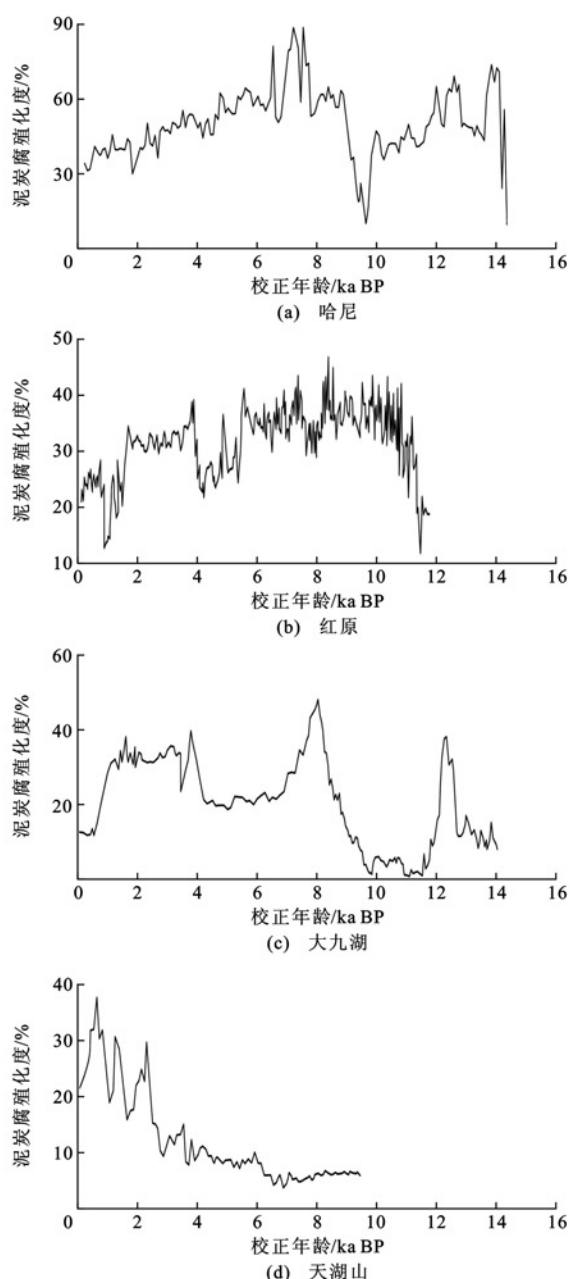


图4 泥炭地腐殖化度时间序列对比

Fig. 4 Comparison of Temporal Series of Peatland Humification

通过中国全新世气候变化总体趋势,可以很明显地看出不同地区泥炭腐殖化度在不同阶段的变化趋势的异同。另处,典型的气候突变事件也可以用来说明不同地区泥炭腐殖化度古气候意义的异同。全新世发生了9次大范围的寒冷事件,已经从古里雅冰芯、敦德冰芯、北大西洋冰芯及其他泥炭地气候代用指标中发现对寒冷事件的响应。笔者以影响范围最大、最具代表性的“8.2 ka 事件”和“4.2 ka 事件”来对比分析。在8.2 ka 前后的哈尼及红原泥炭腐殖化度曲线中,能观察到下降趋势,大九湖泥炭腐

殖化度曲线在8.1 ka 处有一个全新世范围内的极高值,天湖山曲线在晚全新世阶段的波动幅度非常小,但也能看到一个相对高值。由此可见,4 个地区泥炭腐殖化度曲线对“8.2 ka 事件”均有响应,大九湖的响应最为强烈,其他三者次之。同理分析“4.2 ka 事件”,哈尼、红原、天湖山泥炭腐殖化度在4.2 ka 时间段均有极值峰,但大九湖泥炭腐殖化度在4.3 ka 之后持续上升,直到3.8 ka 才出现极高值,峰值时间推迟了300~400 年。由此可见,不同地区的同一泥炭气候代用指标对同一事件的响应存在差异。

综上所述,中国学者对泥炭腐殖化度古气候意义的不同解释都是合理的,产生这种现象的原因是不同地区泥炭地的泥炭类型、组成成因等都存在差异。因此,在讨论腐殖化度的古气候意义时,要对不同地区分别加以说明。

3 泥炭腐殖化度古气候意义异同成因

3.1 影响泥炭腐殖化度的因素

泥炭腐殖化度的测定原理是基于泥炭中腐殖酸比例随泥炭分解程度而变化的规律,因此,泥炭分解程度的影响因素均可作为影响腐殖化度的因素。泥炭能沉积的关键在于植物的生长量与死亡后分解量之间的对比关系。温度、湿度、地质地貌、水文、植物类型都会引起植物生长量的变化,微生物种类和数量、水热条件、土壤酸碱度、植物残体抗分解能力及有机质组成等会影响植物残体的分解量。综合可知,能影响植物生长量和微生物分解残体的因素都会对泥炭腐殖化度程度造成一定的影响,但最主要的还是水热条件。在土温为20℃~30℃、湿度为60%~80%时,微生物活动能力最强;水热状况低于或高于上述水平时,微生物活动能力逐渐减弱。

另外,腐殖化度测定的是泥炭中腐殖质的质量分数。周莉等认为大气成分、气候因子、植被类型、微生物活动以及土壤沉积物的理化参数等条件都可能成为影响腐殖质形成和发育的因素^[30]。腐殖质的组成和性质受生物气候条件影响,但其最主要的影响因素是水热条件。土壤腐殖质的积累、组成和性质特征,能够反映一定的气候和水热等成土条件。腐殖化度随腐殖质的增加而增大,因此,水热条件是影响泥炭腐殖化度的最主要因素。

总之,能影响泥炭腐殖化度的因素包括水热条件、植被类型、地质地貌、水文等,其中最主要的因素是水热条件。因此,泥炭腐殖化度可在一定程度上反映气候的冷暖干湿变化,同时,可以从上述典型的

影响因素探讨腐殖化度区域差异的可能性成因。

3.2 区域泥炭腐殖化度异同的成因

3.2.1 经纬度带状特征及地面高程

由于海洋与陆地对太阳辐射的吸收与反射有明显差异,使得不同经纬度地区出现带状分布的规律,导致由沿海向内陆呈有经度地带性规律的变化。这也决定了泥炭沼泽的分布特性及其分解度。地形因素也对泥炭的分布及其分解程度有影响。地表高低起伏及其岩性的差异,对水热因子有再分配的作用,使得水热组合分布更加复杂化。气温随着高度的上升而下降(一般每升高 100 m 气温下降 0.6 °C),降水随着高度的上升而增多(在不超过最大降水高度范围内)。经纬度及地面高程对泥炭腐殖化度的影响表现在其对水热条件的影响方面。

红原与大九湖泥炭地位于中国地形第二阶梯内,红原泥炭地临近第一、二阶梯分界线,地面高程为 3 466 m,大九湖泥炭地临近第二、三阶梯分界线,高程约 1 750 m;哈尼与天湖山泥炭地位于第三阶梯内,地面高程分别为 900、1 180 m。哈尼位于中纬度,天湖山处于低纬度,而红原和大九湖则居于两者之间,因此,红原地区年均气温在四者中最低,天湖山最高。哈尼泥炭地因纬度高于大九湖,所以年均气温低于大九湖。

3.2.2 温度

作为影响泥炭沼泽最主要的气候因素,温度对植物的生长量及生长速度、微生物的繁殖及活动强度都有影响,因此,它可以影响植物死亡后的分解速度,并与大气湿度一起控制泥炭堆积的强度。较低的土温和气温不利于植物生长,也不利于植物残体分解。当气候寒冷时,温度过低,使得植物体的增长量非常小,同时微生物活动极其微弱,植物残体分解速率缓慢,此时泥炭积累较小;反之,在气候温度较高的条件下,不但植物的增长量大,而且微生物繁殖快,微生物活动非常活跃,使植物残体分解速率加快,此时泥炭累积较大。在热带地区,植物生长量大,但由于温度高,微生物分解强烈,泥炭累积亦受到限制,因此,不同的热量带内,植物生长速度、种类及其增长量不同,植物残体的堆积量亦不相同。

天湖山临近热带,年均气温较高,有利于植物的生长发育,为泥炭累积提供了大量的植物残体。同时,该区微生物活动强烈,繁殖速度较快,植物残体分解作用强烈,泥炭的积累也受限,导致区域腐殖化度较低。大九湖年均气温较为适中,四季分明,夏季植物生长茂盛,具有很强的季节性。红原泥炭

地因地处高原,年均气温较低,不利于植被生长。哈尼年均气温介于红原与大九湖之间,四季分明,季节性较强。

3.2.3 湿度

湿度同温度一样,对植物的生长和微生物的活动有影响,从而影响泥炭腐殖化度。研究表明^[10]:在土温为 20 °C~30 °C、湿度达到 60%~80%时,微生物活动能力最强;当水热条件低于或高于上述水平时,微生物活动能力则逐渐减弱。一般情况下,湿度沿高纬度向低纬度增大,从沿海向内陆减少。除了考虑大气降水外,地下水及植物蒸发的影响也不容忽视,它们共同决定湿度的变化。

哈尼与红原泥炭地的降水量在同一水平,均在 700~800 mm 之间;大九湖年均降水量多于前两者,在 1 500~1 600 mm 范围内;天湖山年均降水量最高,达到 1 800 mm。除大气降水外,红原地区由于常年低温,冰雪充足,消融的冰雪使泥炭地地表水富足,有利于植物的生长;大九湖泥炭地岩溶发育丰富,提供了丰富的地下水;天湖山泥炭地水主要来自季风作用的大气降水补给;哈尼泥炭地为堰塞湖地貌类型,也能给予丰富的地表水。

3.2.4 其他因素

(1)地质地貌:地质地貌是形成泥炭沼泽的基本因素。由于地表的起伏变化,引起水热组合条件发生复杂的变化,同时,构造运动影响地面水文地质。

(2)pH 值:好氧菌或厌氧菌都适合在中性或微碱性(pH 值为 7~8)条件下活动;而在其他情况下,无论 pH 值增大或减小对微生物活动均不利,即对植物分解不利^[31]。一般土壤的 pH 值与大气降水量呈负相关关系。降水量越多,土壤 pH 值越小,微生物活动受到抑制;降水量越少,土壤 pH 值越大,也不利于微生物活动。因此,在少雨或多雨的地区,有机物的分解强度均较弱,有利于泥炭的形成和积累。由此可见,pH 值也对泥炭腐殖化度有影响。

(3)植物:植物种类的不同影响着泥炭有机体的增长量及其死亡后残体的堆积方式;不同种类植物残体分解速率及抗分解能力也有所不同。不同地区的植物有所不同,因此,其对腐殖化度的影响也不同。

3.3 综合因素分析

泥炭腐殖化度反映泥炭的分解程度。当泥炭沉积大于其分解量时,泥炭沉积。无论是植物的生长还是微生物的分解,均与气候等因素有关,因此,泥炭腐殖化度能反映气候的干湿冷暖。此外,地形、水文、季风、太阳活动等都会对泥炭的沉积产生影响。

以中国地形条件来看,东部地区以暖湿气候为主,受夏季风控制,西部内陆盆地以干旱气候为主,中部高原是受冬夏季风消长变化影响最为显著的地区^[32]。在调查青藏高原泥炭地中发现,由印度西南季风带来的湿暖气流是青藏高原大面积泥炭形成的重要因素之一^[33]。青藏高原总体背景较为寒冷,处在印度洋水汽输送带影响下的红原泥炭地,年均气温 1.1℃,年均降水量 753 mm,因此,土壤微生物对植物残体的分解能力比较弱,这也是红原泥炭累积的原因。同时,该区土壤微生物的活动对气候变化的响应较灵敏。当气候偏干冷时,植物初级生产力减弱,提供的植物残体分解量减少,同时微生物的分解能力相应减弱,两方面综合作用使泥炭发育较弱,腐殖化度降低。当印度西南季风增强时,红原地区气候较暖湿,促进了植物的生长发育,提供了较多的植物残体,同时也提高了微生物的分解能力,两方面的综合作用使泥炭腐殖化度增高。

大九湖与天湖山均属于亚热带季风气候,天湖山年均气温 15.8℃,远高于青藏高原与长白山哈尼地区。只要温度未高到妨碍植物生长的程度,则起决定性作用的就不是气候条件而是水文及季风条件。天湖山年相对湿度 81%,气候较湿润,且受到夏季风的强烈影响。温暖环境使植被发育茂盛,提供了大量植物残体进行腐解,但当气温较高时,夏季风带来的湿润海风提高了天湖山地区湿度,温暖的水涝环境使微生物活动降低,植物残体分解能力下降,从而使腐殖化度降低;当温度较低时,夏季风减弱,湿度降低,沼泽处于氧化环境,微生物活动增强,植物残体分解加强,从而使腐殖化度增大。

大九湖虽也属于亚热带季风气候,但年均气温为 7.4℃,四季变化明显,冷热交替变化,与青藏高原的常年低温和福建天湖山的常年高温相异。由于所处的地理位置,大九湖泥炭地除了受到东亚冬季风控制,还受包括太平洋季风和印度洋在内的东亚夏季风制约。总体来说,大九湖泥炭地基础温度较高,地下水位变化大,当气候偏干冷时,地表有效湿度较小,有利于植物生长和微生物分解,使腐殖化度升高;当气候较暖湿时,潮湿环境及较高的地下水位使泥炭处于还原环境,微生物分解作用降低,腐殖化度下降。

哈尼泥炭地属于中温带季风气候,年均气温为 3.03℃,年降水量 743.3 mm,受太平洋夏季风和东亚冬季风影响强烈,当出现暖湿气候组合时,植物生产力提高,提供较多的植物残体供分解,同时微生物

分解能力提高,综合作用使泥炭中无定形腐殖质质量分数增高,即腐殖化度增高;反之,在干冷气候条件下,植物生产力减少,植物残体较少,微生物在寒冷干燥的气候中分解力降低,使得腐殖化度减小。

由于泥炭形成的水热条件区域差异,腐殖化度的指示意义没有固定模式,需要结合剖面岩性特征、地理位置、季风等指标进行解释。无论外部因素的异同,植物残体量及微生物分解能力的组合才是决定腐殖化度意义的关键。因此,分析不同地区泥炭腐殖化度古气候意义时,重要的是要了解该地的年均气温、年降水量、是否有地下水补给、受季风影响情况及地形,分析气候和季风的变化对植物生长发育和微生物分解的影响,抓住植物残体量和微生物分解能力这两个关键点,就容易分析出该泥炭地腐殖化度的古气候意义。

4 结 语

(1)哈尼泥炭腐殖化度的古气候意义包含温度-湿度组合:较高的腐殖化度指示气候温暖潮湿;较低的腐殖化度指示气候干燥寒冷。

(2)从哈尼、红原、大九湖、天湖山泥炭腐殖化度时间序列对比可以得出,虽然其古气候意义有所不同,但其记录的中国全新世古气候环境演变趋势大体相同,都反映了中国早全新世阶段的升温现象、中全新世的大暖期现象及晚全新世阶段的降温。同时,通过对全新世 9 次冷事件的响应程度的分析,可见不同地区同一泥炭气候代用指标对同一事件的响应存在差异。

(3)温度、湿度、季风、经纬度及地质地貌等因素都对泥炭腐殖化度有影响,但水热条件是直接影响因素,其他因素通过对水热条件的改变而间接影响腐殖化度。

(4)阐述不同区域泥炭腐殖化度的古气候意义没有固定模式,需结合当地的地理位置、地质地貌、年均气温、季风、降水、植被等情况进行具体分析。

参考文献:

References:

- [1] 赵红艳,冷雪天,王升忠.长白山地泥炭分布、沉积速率与全新世气候变化[J].山地学报,2002,20(5): 513-518.
ZHAO Hong-yan, LENG Xue-tian, WANG Sheng-zhong. Distribution, Accumulation Rate of Peat in the Changbaishan Mountains and Climate Change in Holocene[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20(5):

- 513-518.
- [2] 周莹,程胜高,黄庭,等.泥炭腐殖化度的测定方法研究[J].安全与环境工程,2014,21(2):1-4.
ZHOU Ying, CHENG Sheng-gao, HUANG Ting, et al. Analysis on Determinations Methods for Peat Humification[J]. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(2): 1-4.
- [3] CHAMBERS F M, BARBER K E, MADDY D, et al. A 5 500-year Proxy-climate and Vegetation Record from Blanket Mire at Talla Moss, Borders, Scotland[J]. The Holocene, 1997, 7(4): 391-399.
- [4] 王华,洪业汤,朱咏煊,等.红原泥炭腐殖化度记录的全新世气候变化[J].地质地球化学,2003,31(2): 51-56.
WANG Hua, HONG Ye-tang, ZHU Yong-xuan, et al. The Peat Humification Records of Holocene Climate Change in Hongyuan Region[J]. Geology-geochemistry, 2003, 31(2): 51-56.
- [5] LANGDON P G, BARBER K E, HUGHES P D M. A 7 500-year Peat-based Palaeoclimatic Reconstruction and Evidence for an 1 100-year Cyclicity in Bog Surface Wetness from Temple Hill Moss, Pentland Hills, Southeast Scotland[J]. Quaternary Science Reviews, 2003, 22(2/3/4): 259-274.
- [6] BORGMARK A, SCHONING K. A Comparative Study of Peat Proxies from Two Eastern Central Swedish Bogs and Their Relation to Meteorological Data[J]. Journal of Quaternary Science, 2006, 21(2): 109-114.
- [7] BLUNDELL A, CHARMAN D J, BARBER K. Multi-proxy Late Holocene Peat Records from Ireland: Towards a Regional Palaeoclimate Curve[J]. Journal of Quaternary Science, 2008, 23(1): 59-71.
- [8] 马巧红,钟巍,薛积彬,等.晚更新世晚期以来雷州半岛北部泥炭腐殖化度的古气候意义[J].热带地理, 2008, 28(6): 498-503.
MA Qiao-hong, ZHONG Wei, XUE Ji-bin, et al. Paleoclimatic Significance of the Peat Humification Degree in Northern Leizhou Peninsula Since the Late Pleistocene[J]. Tropical Geography, 2008, 28(6): 498-503.
- [9] 蔡颖,钟巍,薛积彬,等.干旱区湖泊沉积物腐殖化度的古气候指示意义——以新疆巴里坤湖为例[J].湖泊科学,2009,21(1):69-76.
CAI Ying, ZHONG Wei, XUE Ji-bin, et al. The Indicative Significance of Paleoclimate as Indicated by Humification of Lacustrine Sediment—A Case on Lake Barkol, Northeastern Xinjiang[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(1): 69-76.
- [10] 尹茜,朱诚,马春梅,等.天目山千亩田泥炭腐殖化度记录的中全新世气候变化[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(6):117-122.
YIN Qian, ZHU Cheng, MA Chun-mei, et al. Holocene Climate Change Recorded in Peat Humification in Tianmu Mountain Region[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(6): 117-122.
- [11] 薛积彬,钟巍,彭晓莹,等.南岭东部大湖泥炭沉积记录的古气候[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(5):105-113.
XUE Ji-bin, ZHONG Wei, PENG Xiao-ying, et al. Paleoclimate Significance for the Past 12 ka BP Revealed by Dahu Peat Record in the Eastern South Mountain[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(5): 105-113.
- [12] 郑琰明,钟巍,薛积彬,等.南岭东部江西定南大湖湖沼沉积特征研究[J].华南师范大学学报:自然科学版,2008(2):129-135.
ZHENG Yan-ming, ZHONG Wei, XUE Ji-bin, et al. Sedimentary Characteristics of Dahu Lacustrine-swamp at Dingnan, Jiangxi Province, Eastern Nanling Mountains[J]. Journal of South China Normal University: Natural Science Edition, 2008(2): 129-135.
- [13] 马春梅,朱诚,郑朝贵,等.中国东部山地泥炭高分辨率腐殖化度记录的晚冰期以来气候变化[J].中国科学:D辑,2008,38(9):1078-1091.
MA Chun-mei, ZHU Cheng, ZHENG Chao-gui, et al. Climate Changes in East China Since the Late-glacial Inferred from High-resolution Mountain Peat Humification Records[J]. Science in China: Series D, 2008, 38(9): 1078-1091.
- [14] 胡凡根,李志忠,姜修洋,等.福建屏南天湖山泥炭腐殖化度记录的早全新世以来气候变化[J].亚热带资源与环境学报,2011,6(3):31-39.
HU Fan-gen, LI Zhi-zhong, JIANG Xiu-yang, et al. Holocene Climate Change Recorded in Peat Humification on Tianhu Mountain in Northern Fujian Province[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2011, 6(3): 31-39.
- [15] 于学峰,周卫健,FRANZEN L G,等.青藏高原东部全新世冬夏季风变化的高分辨率泥炭记录[J].中国科学: D辑,2006,36(2):182-187.
YU Xue-feng, ZHOU Wei-jian, FRANZEN L G, et al. High-resolution Peat Records for Holocene Monsoon History in the Eastern Tibetan Plateau[J]. Science in China: Series D, 2006, 36(2): 182-187.
- [16] 钟巍,薛积彬,甄治国,等.雷州半岛北部晚更新世晚期气候环境变化的泥炭沉积记录[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(6):97-104.

- ZHONG Wei, XUE Ji-bin, ZHEN Zhi-guo, et al. The Climatic Changes During Late Pleistocene Indicated by Peat Deposit in the North Leizhou Peninsula [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2007, 27(6):97-104.
- [17] SCHRODER C, THIELE A, WANG S Z, et al. Hanimire—A Percolation Mire in Northeast China [J]. *Peatlands International*, 2007(2):21-24.
- [18] HONG B, LIU C Q, LIN Q H, et al. Temperature Evolution from the $\delta^{18}\text{O}$ Record of Hani Peat, Northeast China, in the Last 14 000 Years [J]. *Science in China; Series D*, 2009, 52(7):952-964.
- [19] SEKI O, MEYERS P A, KAWAMURA K, et al. Hydrogen Isotopic Ratios of Plant Wax *n*-alkanes in a Peat Bog Deposited in Northeast China During the Last 16 kyr [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6):671-677.
- [20] HONG Y T, HONG B, LIN Q H, et al. Synchronous Climate Anomalies in the Western North Pacific and North Atlantic Regions During the Last 14 000 Years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(9/10):840-849.
- [21] STUIVER M, REIMER P J, BARD E, et al. INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24 000 cal BP [J]. *Radiocarbon*, 1998, 40(3):1041-1083.
- [22] BLACKFORD J J, CHAMBERS F M. Determining the Degree of Peat Decomposition for Peat-based Palaeoclimatic Studies [J]. *International Peat Journal*, 1993(5):7-24.
- [23] 洪业汤, 刘东生, 姜洪波, 等. 太阳辐射驱动气候变化的泥炭氧同位素证据 [J]. *中国科学: D 辑*, 1999, 29(6):527-531.
- HONG Ye-tang, LIU Dong-sheng, JIANG Hong-bo, et al. Evidence for Solar Forcing of Climate Variation from $\delta^{18}\text{O}$ of Peat Cellulose [J]. *Science in China; Series D*, 1999, 29(6):527-531.
- [24] 洪业汤, 洪冰, 林庆华, 等. 过去 5 000 年西太平洋副热带高压活动的泥炭纤维素碳同位素记录 [J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5):485-492.
- HONG Ye-tang, HONG Bing, LIN Qing-hua, et al. Subtropical High Activity of Western Pacific Ocean During the Last 5 000 Years Recorded in Isotope Time Series of Peat Bog [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5):485-492.
- [25] HONG Y T, WANG Z G, JIANG H B, et al. A 6 000-year Record of Changes in Drought and Precipitation in Northeastern China Based on a $\delta^{13}\text{C}$ Time Series from Peat Cellulose [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185(1/2):111-119.
- [26] 王华. 青藏高原全新世气候变化研究进展 [J]. *贵州工业大学学报: 自然科学版*, 2003, 32(2):98-102.
- WANG Hua. Advance in Study on the Holocene Climate Fluctuations in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition*, 2003, 32(2):98-102.
- [27] 马春梅, 朱诚, 郑朝贵, 等. 晚冰期以来神农架大九湖泥炭高分辨率气候变化的地球化学记录研究 [J]. *科学通报*, 2008, 53(增 1):26-37.
- MA Chun-mei, ZHU Cheng, ZHENG Chao-gui, et al. High-resolution Geochemistry Records of Climate Changes Since Late-glacial from Dajiuhu Peat in Shennongjia Mountains, Central China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(S1):26-37.
- [28] 张辉, 李志忠, 姜修洋, 等. 福建北部天湖山全新世泥炭古气候记录的初步研究 [J]. *宁夏大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(1):120-124.
- ZHANG Hui, LI Zhi-zhong, JIANG Xiu-yang, et al. Paleo-climate Significance for Nearly 10 ka BP Revealed by Tianhushan Peat Record in the Northern Fujian [J]. *Journal of Ningxia University: Natural Science Edition*, 2012, 33(1):120-124.
- [29] 乔石英. 长白山西麓哈尼泥炭沼泽初探 [J]. *地理科学*, 1993, 13(3):279-287.
- QIAO Shi-ying. A Preliminary Study on Hani Peat-mire in the West Part of the Changbai Mountain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1993, 13(3):279-287.
- [30] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(1):99-105.
- ZHOU Li, LI Bao-guo, ZHOU Guang-sheng. Advances in Controlling Factors of Soil Organic Carbon [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1):99-105.
- [31] 王瑞杰. 基于 MapInfo 平台的中国泥炭资源分布规律 [D]. 大连: 辽宁师范大学, 2003.
- WANG Rui-jie. Distribution Rule of Peat Resources in China Based on the MapInfo Platform [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2003.
- [32] 李智佩, 岳乐平, 郭莉, 等. 全新世气候变化与中国北方沙漠化 [J]. *西北地质*, 2007, 40(3):1-29.
- LI Zhi-pei, YUE Le-ping, GUO Li, et al. Holocene Climate Change and Desertification in Northern China [J]. *Northwestern Geology*, 2007, 40(3):1-29.
- [33] 孙鸿烈. 青藏高原的形成演化 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.
- SUN Hong-lie. Formation and Evolution of Tibetan Plateau [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1996.