

文章编号: 1008 - 2786 - (2014)5 - 541 - 09

# 哈尼泥炭地 15 cal. ka B. P 来的古环境恢复与重建

阳金秀<sup>1,2</sup>, 李楠楠<sup>1,2</sup>, 介冬梅<sup>1,2\*</sup>, 陈雪松<sup>1,2</sup>, 胡楚天<sup>1,2</sup>, 陈玉洁<sup>1,2</sup>

(1. 东北师范大学地理科学学院, 吉林 长春 130024; 2. 国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室, 吉林 长春 130024)

**摘 要:** 以泥炭粒度作为古气候代用指标, 结合孢粉信息, 重建了 15 cal. ka B. P 以来哈尼地区的古气候, 完善了本区晚更新世以来的古环境演化过程。通过哈尼泥炭沉积物的粒度组成、粒度参数和粒度分布频率曲线等粒度特征, 发现哈尼泥炭剖面的粒度组成以粉砂和砂为主, 沉积物平均粒径由上至下逐渐变细, 泥炭灰分粒度频率分布以对称分布为主。通过与典型风成沉积、湖泊沉积和河流沉积的粒度频率分布曲线比较认为, 本区泥炭灰分粒度组成主要受流水动力影响, 其水流搬运强度介于湖相和河流相沉积之间, 故泥炭灰分的粒度信息可以用于指示夏季风强弱变化规律, 反演古气候变化。泥炭粒度分布数学分形结果发现分维值与泥炭灰分颗粒的分选系数呈正相关, 说明泥炭灰分的分维值也可有效反映沉积物颗粒级配和粗细及古气候演化。结合泥炭粒度分析结果和孢粉谱, 揭示了 15 cal. ka B. P 年来古气候的“冷干 - 温湿 - 冷湿 - 暖干”的变化过程, 并识别出新仙女木事件 (Younger Dryas) 以及 9.2 ka 和 8.2 ka 气候转冷事件。

**关键词:** 泥炭; 粒度; 分维值; 孢粉; 古环境

**中图分类号:** X144

**文献标志码:** A

泥炭剖面连续性好, 时间分辨率高, 古环境信息丰富, 是良好的古环境信息载体<sup>[1]</sup>。泥炭记录的环境演化信息是过去全球变化 (PAGES) 的重要研究领域之一<sup>[2]</sup>。国外泥炭研究已有一百多年的历史<sup>[3-7]</sup>, 国内的泥炭研究工作于 1958 年率先在东北地区展开<sup>[8]</sup>。目前泥炭古环境研究多采用孢粉<sup>[9-10]</sup>、植硅体<sup>[11-12]</sup>、有壳变形虫<sup>[13]</sup>、灰度分析<sup>[14]</sup>、同位素分析<sup>[15-17]</sup>等气候代用指标来恢复重建古气候、古环境, 针对泥炭无机矿物颗粒组成的研究则鲜见报道。

哈尼泥炭地作为东北地区重要泥炭地, 许多研究者在此开展了大量的研究工作。1993 年, 乔石英<sup>[18]</sup>初步描述了哈尼泥炭地的泥炭特征、成炭时代

和地质条件以及孢粉组合等, 其后崔美玲等<sup>[19]</sup>利用孢粉分析恢复了哈尼湖 5 000 a 来的古植被、古气候演化过程以及喻春霞等<sup>[10]</sup>利用孢粉信息恢复了哈尼湖 13.1 ~ 4.5 cal. ka B. P 古气候演化过程, 李鸿凯等<sup>[20]</sup>调查了长白山区哈尼、金川、圆池和赤池 4 个典型泥炭藓沼泽中有壳变形虫的种类组成特征, 洪冰等<sup>[21]</sup>利用哈尼泥炭纤维素  $\delta^{18}\text{O}$  曲线重现了 GISP2  $\delta^{18}\text{O}$  曲线所记录的气候变化事件。目前针对哈尼泥炭灰分矿物颗粒粒度信息的研究相对较少。泥炭地一般在谷地发育, 接收来自周围环境的碎屑物质, 当气候环境发生变化时, 泥炭灰分的粒度也会随之发生变化。因而笔者试图通过对长白山西麓哈尼泥炭地进行高分辨率的粒度特征分析, 建立粒度

**收稿日期** (Received date): 2013 - 12 - 15; **改回日期** (Accepted): 2014 - 04 - 02。

**基金项目** (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (30870238, 40971116); 环保行业公益项目 (201109067); 高校基本业务费资助前瞻性项目 (10JCXK010); 2012 年度国家大学生创新性实验计划基金资助项目 (201210200089)。[National Natural Science Foundation of China, No. 30870238; No. 40971116; Foundation for research and public service industry, Ministry of Environmental Protection, No. 201109067; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 10JCXK010; National Undergraduates Innovating Experimentation Project (2012), No. 201210200089.]

**作者简介** (Biography): 阳金秀 (1992 - ), 女, 本科, 主要从事自然地理学与第四纪地质学研究。[Yang Jinxiu (1992 - ), female, undergraduate, major in Physical geography and Quaternary geology.] E-mail: yangjx241@nenu.edu.cn

**\* 通信作者** (Corresponding author): 介冬梅 (1969 - ), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事第四纪环境演化研究。[Jie Dongmei, female, professor, mainly engaged in Quaternary environmental evolution.] E-mail: jiedongmei@nenu.edu.cn

特征时间变化序列,提取其中沉积物粒度信息来恢复哈尼地区所记录的季风强弱变化规律,并结合孢粉信息,恢复和重建该区域末次冰期以来的环境演化过程。

1 区域概况

哈尼泥炭地位于长白山西麓,吉林省柳河县凉水乡(图1)。该区域地貌类型为熔岩台地,起伏较小,是侵蚀形成的中低山。泥炭地发育在晚更新世南坪期火山喷发物堰塞形成的哈尼山间低洼谷地上,湖盆的南、北、西三面环山。哈尼泥炭地是哈尼湖泥炭沼泽化而形成的。该区域属于中温带大陆性山地季风气候,多年平均温度约为5.5~6℃,8月平均气温约为20℃,夏季东亚季风带来大量水汽,形成湿润多雨的气候,秋季温和凉爽,年平均降雨量约为757~930 mm。



图1 哈尼泥炭剖面地理位置

Fig.1 The location of Hani peatland

2 研究方法过程

2.1 野外采样与样品处理

野外使用手动式泥炭取样器采集350 cm深的泥炭样芯,并记录样芯的颜色和沉积特征。样地海拔890 m,整个剖面连续性较好,样芯表层10 cm为草根层,底部为灰绿色黏泥(表1)。将冷冻保存的泥炭样芯取出后放置在阴凉处24 h以上使其温度达到室温,根据剖面样芯采集时记录的样芯性质选取了10个样品,送至北京大学进行AMS<sup>14</sup>C测年。从10 cm向下对泥炭样芯进行取样,自上而下以2 cm间隔取样,分割好的样品将进行样品预处理和粒

度分析。

表1 哈尼泥炭剖面描述

Table 1 Section description of the Hani peatland

采样地	地层深度	剖面描述
泥炭剖面描述	0~10 cm	草根层
	10~75 cm	含少量泥质的棕褐色泥炭层
	75~155 cm	褐黑色的泥炭层
	155~189 cm	褐黑色的泥炭层,泥质增多
	189~197 cm	含黏泥的黑蓝色泥炭层
	197~210 cm	褐黑色的泥炭层
	210~250 cm	弱分解含泥的褐黑色泥炭层
	250~258 cm	含泥沙的褐黑色泥炭层
	258~281 cm	黑色泥炭层
	281~309 cm	含粉细沙泥质的褐黑色泥炭层
	309~350 cm	灰绿色黏泥层

2.2 粒度分析

1. 将分割好的样芯放置于恒温干燥箱中,温度控制在60℃左右,烘干至恒重;
2. 将烘干后的样品倒入坩埚中,在550℃的马弗炉中灼烧4 h左右,直至除尽样品的有机质,得到泥炭灰分;
3. 取适量的灰分至15 mL PVC管,加入10%稀盐酸10 mL,以除去碳酸钙等胶结物,然后加蒸馏水洗至中性;
4. 将10 mL 0.05 mol/L的六偏磷酸钠加入样品中,并使用超声波振荡仪处理7~10 min,使样品得以充分分散,准备上机测试;
5. 利用Microtrac S3500激光粒度分析仪,对处理好的样品进行测定,得出并收集实验数据。Microtrac S3500激光粒度分析仪的测量范围为0.02~2 000 μm,重复测量误差<1%。

3 结果分析与讨论

3.1 剖面年代序列建立及沉积速率分析

北京大学AMS<sup>14</sup>C年代学实验室对哈尼泥炭剖面的10个样品进行AMS<sup>14</sup>C测年,得到较为精确的年代数据(表2)。该剖面年代数据经过Calib Rev6.0.1程序<sup>[22]</sup>校正,采用线性回归,建立地层深度与校正年代的线性回归方程为 $y = 45.589x - 785.38$ ,其中 $x$ 表示剖面深度(cm), $y$ 表示日历年龄(a), $R^2 = 0.9624$ ,相关性较好,因而可以通过线性

内插获得其他地层的年代数据,其剖面底部年龄约为距今 15 000 a。

表2 哈尼泥炭剖面的测年数据  
Table 2 Aging data of the peat profile

采样点及地层深度 /cm	<sup>14</sup> C 测年数据 /(a B. P.)	中值日历年龄 /(cal. a B. P.)	沉积速率 /(mm/a)
哈尼 24 ~ 25	2 585 ± 40	2 727	0.09
哈尼 75 ~ 76	3 040 ± 35	3 263	0.95
哈尼 124 ~ 125	4 785 ± 35	5 518	0.22
哈尼 155 ~ 156	5 235 ± 35	5 981	0.67
哈尼 184 ~ 185	7 045 ± 40	7 885	0.15
哈尼 196 ~ 197	8 245 ± 40	9 217	0.09
哈尼 258 ~ 259	8 435 ± 40	9 470	2.45
哈尼 310 ~ 311	11 285 ± 45	13 188	0.14
哈尼 349 ~ 350	13 280 ± 50	16 317	0.12

本文测得该哈尼泥炭剖面的沉积速率大约为 0.22 mm/a,而赵红艳等<sup>[23]</sup>测得哈尼泥炭地基底沉积速率为 1.09 mm/a,与其相比,该采样点平均沉积速率偏小。但该剖面不同深度沉积速率相差较大(表2)。在 259 ~ 197 cm(8 435 ~ 8 245 a B. P),沉积速率达到整个剖面最大值,约为 2.45 mm/a,这一时期气候温暖湿润,降水丰富,周围环境带来了丰富的碎屑沉积物特别是较粗的物质,使得这一时期泥炭剖面的沉积速率明显加快;而在 197 ~ 185 cm(8 245 ~ 7 045 a B. P)泥炭沉积速率却明显降低,约为 0.09 mm/a,这也很好地记录了全新世大暖期中的冷事件。25 cm 以上(2 585 a B. P 至今)泥炭沉积速率也为 0.09 mm/a,是整个剖面沉积速率最小的阶段,也小于同一时期敦化泥炭地、抚松松江河懒汉窝高河滩的沉积速率,这一时期该地气候转暖但湿度较低,夏季风减弱,降水减少,地表径流带来的无机颗粒减少。同时根据柴岫<sup>[24]</sup>、白燕等人<sup>[25]</sup>对泥炭植物残体分解速率影响因素的研究结果,推测这一时期泥炭温度和含水量都适合泥炭中植物残体分解,分解速率较快,植物残体沉积较少,影响了沉积速率。在 76 ~ 25 cm(3 040 ~ 2 585 a B. P),泥炭沉积相对前一时期迅速加快,沉积速率达到了 0.95 mm/a,接近于赵红艳等测得的哈尼泥炭基底的平均速率,但高于该样点的平均速率。

3.2 剖面沉积物粒度特征

3.2.1 剖面沉积物粒度组成及参数特征

哈尼泥炭地是哈尼湖泥炭沼泽化形成的,地表常年积水,且附近有哈尼河流经,因此泥炭灰分粒度组成主要受流水动力影响。哈尼泥炭地地处湿润区,属于山地季风气候,雨季降水集中且多暴雨,坡面流水和沟谷流水发育,剥蚀和搬运能力增强,多携带较粗颗粒至泥炭地,使得 100 ~ 1 000 μm 的跃移质含量增加。伴随雨季的结束,降水减少,地表水贫乏,流水搬运能力减弱,100 ~ 1 000 μm 的跃移质减少,10 ~ 100 μm 悬移质则相应增多。除此以外,丰水年本区泥炭发育也可能受到了哈尼河影响,沉积物粒度频率分布曲线表现出双峰特征,偏态为正,即主要粒度向粗粒部分集中<sup>[26]</sup>,粗颗粒增多,因此剖面沉积物颗粒的粒度粗细变化可相应地指示气候的干湿(或降水的多寡)变化。哈尼泥炭灰分粒度分析结果表明,该剖面灰分粒度组成以粉砂和砂为主,含有少量粘土,不含砾,因此本文选取了砂、粉砂和粘土的百分含量来进行粒度组成特征分析(图2)。剖面粒级组成:粉砂平均含量最高为 66.71%;其次砂(>63 μm)的平均含量为 28.04%;粘土(<4 μm)的平均含量较小,为 5.24%。该剖面粉砂含量与粘土含量在整个剖面的垂直分布趋势一致,与砂的含量变化趋势相反,剖面粒径从上至下逐渐变细,尽管整个剖面中粘土含量较小,但其波动比较明显,整个剖面从上至下大致呈现 4 处明显尖峰,分别在 76 ~ 77 cm(2.7 cal. ka B. P)、134 ~ 135 cm(5.3 cal. ka B. P)、254 ~ 255 cm(10.8 cal. ka B. P)和 314 ~ 315 cm(13.6 cal. ka B. P)。在这些层段粘土含量明显增多,沉积物粒径明显变小,在 314 ~ 315 cm 处粘土甚至含量达到 15.81%。

此外,本文还选择了 4 个重要的粒度参数(图2),其分别是平均粒径( $Mz$ )、偏态( $Ski$ )、峰态( $kg$ )和标准差( $\sigma_1$ )。剖面沉积物的平均粒径自上而下明显变细,波动幅度较大。整个剖面平均粒径为 5.05Φ。在 238 cm 处出现明显转折,238 cm 以上平均粒径明显大于下部,且 238 cm 以上平均粒径波动幅度大于下部,说明这一时期气候明显变湿润,降水增多,地表径流发育,携带较多粗颗粒物至该地。粒度分布以对称分布形式为主( $-0.1 < Ski < 0.1$ ),以细偏形式为辅,仅在个别层段出现粗偏形式(172 ~ 173 cm、228 ~ 229 cm、334 ~ 335 cm)。峰态以常峰态( $0.9 < kg < 1.11$ )为主即正态分布为主,伴有少数的平峰态( $0.67 < kg < 0.9$ )。根据标准差分析认为剖面大部分层段分选差( $1.0\Phi < \sigma_1 < 2.0\Phi$ ),

少数分选很差( $2.0\Phi < \sigma_1 < 4.0\Phi$ )。

沉积物粒度频率分布曲线能直观地显示不同层位沉积物各粒级的相对含量及变化趋势。粒度频率分布曲线的峰的个数可反映不同沉积作用的动力形式,单峰态反映物质搬运动力性质单一,双峰或多峰态则揭示出沉积物形成是多种动力混合作用的结果。哈尼泥炭样芯的粒度频率分布曲线以对称分布的单峰为主(图3(a)),且从剖面底部至上层出现明显的细偏,部分层段出现以粗颗粒为主导的双峰态(图3(b)),说明这些层段的气候发生了明显变化,受到多种动力混合作用。对比孙东怀等<sup>[27]</sup>对中国黄土粒度的双峰分布、王国平等<sup>[28]</sup>对半干旱区沼泽研究,发现该剖面的双峰分布与两者均存在明显

差异,黄土粒度的双峰和半干旱区沼泽沉积物粒度的双峰峰值均在  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,而哈尼泥炭地以粗颗粒为主,峰值一般在  $1\,000 \mu\text{m}$  附近(图3(b)),推测其原因可能是该地属于中温带大陆性季风气候,受夏季风的影响,降水丰沛,与干旱地区存在区域差异,夏季降水集中,地表径流发育,带来大量粗颗粒物。对比张平等<sup>[29]</sup>稳定湖相沉积物的研究、殷志强等<sup>[30]</sup>对我国北方部分地区湖泊和河流沉积物粒度多组分分布特征的研究结果,图3(a)中的湖心沉积物和湖滨沉积物,分别代表所受水动力条件最弱和最强时沉积物粒度频率分布曲线;对比发现,该剖面单峰态的峰值介于湖心沉积和湖滨沉积环境之间(图3(a)),大致在  $10 \sim 100 \mu\text{m}$ ,峰值波动较小,介

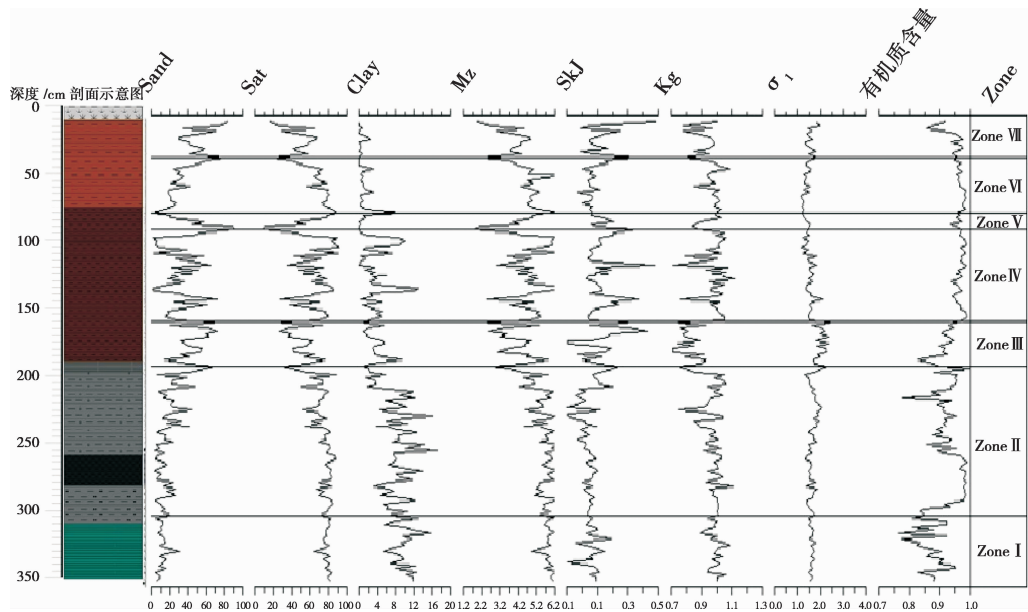


图2 哈尼泥炭剖面粒度组成特征随时间变化曲线及有序分割

Fig. 2 Variation of grain-size parameters with time and orderly division of Hani peatland

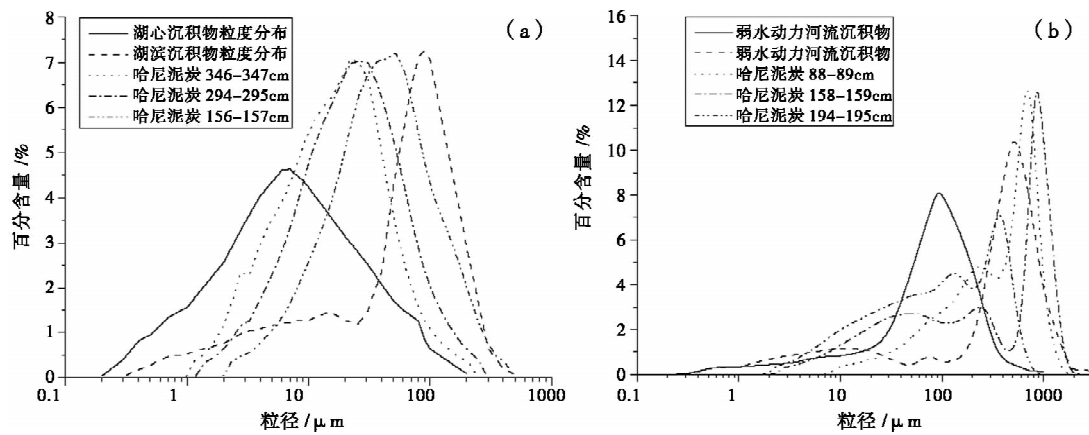


图3 沉积物粒度频率分布曲线

Fig. 3 Frequency curve of sediment grain-size

于湖心沉积物和湖滨沉积物水动力强度之间,相对稳定,指示该地主要受湖水作用,此时夏季风势力较弱,为旱季或枯水年时,气候相对干旱。双峰的主峰值在1 000 μm 附近,颗粒偏粗,介于河流弱动力和强动力之间,类似于河流沉积物频率分布曲线,而次峰值在 10 ~ 100 μm,接近湖泊沉积物粒度频率曲线,因此该地流水动力搬运强度介于湖泊和河流之间。结合该地地貌和水文特征,推测该剖面的双峰反映这一时期夏季风势力较强,为雨季或丰水年,降水丰富,该地受湖水和坡面沟谷流水甚至季节性洪水和河水的混合作用,出现双峰或多峰且粒径偏粗。

3.2.2 剖面沉积物粒度分维值

随着分形理论在碎体分形性质研究中的广泛应用,前人利用各种统计关系来描述碎体的大小和频率分布,较常用的是幂指数关系<sup>[31]</sup>。本文也利用该方法计算哈尼泥炭粒度分维值并利用 SPSS 软件对原始数据做标准化处理,然后进行相关分析,得出分选系数和分维值之间的相关系数矩阵(表 3)。从相关分析的结果可以看出,分维值与分选系数的相关系数  $r=0.419$ ,  $p$  值 = 0.000,在  $\alpha=0.01$  水平显著相关,即分选系数和分维值线性关系很密切。

根据分形理论,本文对哈尼泥炭灰分粒度的分选系数和粒度分维值进行线性回归,得到两者之间的关系(图 4)。由图中的线性关系可知,分选系数与分维值成正相关,即分选系数越大,分选越差,分维值越大。

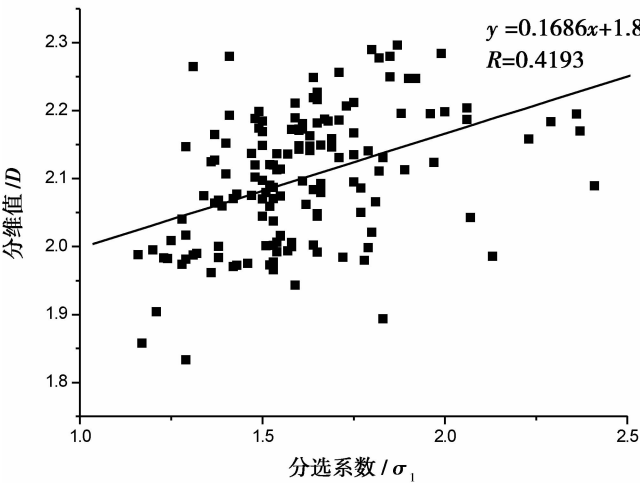


图 4 沉积物分维值与分选系数关系图  
Fig.4 Fractal dimensions vs sorting coefficient

表 3 沉积物粒度分维值与分选系数的相关性分析  
Table 3 Relative analysis of grain - size fractal dimensions and sorting coefficient of sediment

	相关性	分选系数	分维值
分选系数	Pearson 相关性	1	0.419
	显著性(双侧)		0.000
	N	147	147
分维值	Pearson 相关性	0.419	1
	显著性(双侧)	0.000	
	N	147	147

注:在 0.01 水平(双侧)上显著相关

哈尼泥炭剖面的沉积物粒度分维值的平均值为 2.10,参考已有研究成果,发现哈尼泥炭粒度分维值较小,分选相对较好。本文采用有序分割将整个剖面分为 3 个阶段(图 5)。第 III 阶段:在 15 ~ 8.1 cal. ka B. P (195 ~ 347 cm),气候变化相对较小,哈尼泥炭地的物质来源比较稳定,沉积物粒径相对集中,分选较好。第 II 阶段:在 8.1 ~ 6.3 cal. ka B. P (158 ~ 195 cm),这一时期是气候的重要转折点,气候转暖,冬季风势力减弱,夏季风势力增强,温度升高,加之夏季风带来充沛的降水,地表径流发育,从周围地区带来较多粗颗粒物质在哈尼泥炭地沉积,同时气候转暖变湿,哈尼泥炭地的自生矿物也迅速分解成粒径较小的次生矿物,使得沉积物粒度分布向两端延伸,使粒级分配更加合理<sup>[32]</sup>,但是由于粒级

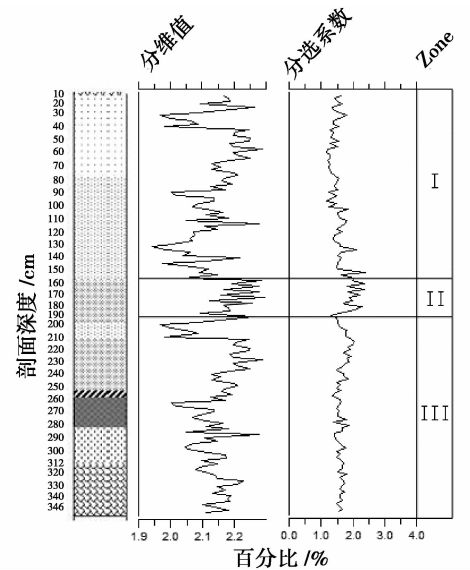


图 5 根据分选系数与分维值划分不同阶段  
Fig.5 Division of fractal dimensions and sorting coefficient

分布趋于分散,分选系数变大,分选变差,分维值波动增大;第 I 阶段:在 6.3 cal. ka B. P 至今(16 ~ 157 cm),分选系数开始变小,相对前两个阶段,沉积物粒径更加集中,分选较好。说明这一时期沉积物来源单一,比较稳定且粒径大小比较一致,分维值也相对较小,波动幅度较小。

### 3.3 粒度记录的古气候信息

本文根据哈尼泥炭整个剖面的粒度参数进行有序分割,并结合孢粉分析结果,哈尼地区末次冰期以来的古气候演化大致分为 7 个阶段(图 3)。

1. 阶段 I: 15 ~ 12.6 cal. ka B. P (295 ~ 347 cm)。这一时段砂的平均含量相对较低且波动幅度相对较小,平均含量约为 12.26%,是整个剖面含砂量最少的时段,粉砂的平均含量约为 78.1%,粘土含量相对较高,约为 9.62%。各粒级百分含量分布曲线呈现细偏(如图 3(a)),说明此时哈尼泥炭地气候干旱,主要受湖水作用,沉积物颗粒较细。同时这一时段草本花粉含量很高,其中以莎草科为主;乔灌木花粉和针叶花粉次之,其中喜冷湿的云杉属、冷杉属花粉含量也比较高;阔叶花粉含量是整个剖面最低的(图 6)。说明该时段为哈尼地区的寒冷时期,其中在 12.6 cal. ka B. P 处,含砂量最低,记录了末次冰消期中著名的新仙女木事件(Younger Dryas),在约 12.6 cal. ka B. P 时是本次变冷事件温度最低点。推测该时期哈尼地区主要是冷干气候。

2. 阶段 II: 12.6 ~ 8.3 cal. ka B. P (199 ~ 295 cm)。该时段砂的含量波动上升,继新仙女木事件(YD)后,含砂量突然增大后,又突然减少,在 270 cm(11.5 cal. ka B. P)达到最小值,其含砂量约为 3.85%,是新仙女木事件后又一次变冷事件,因而以 11.5 cal. ka B. P 作为全新世开始时间较为合理。在 270 cm (11.5 cal. ka B. P) 之后含砂量波动上升,在 209 cm(8.7 cal. ka B. P)处达到最高值约为

47.94%,且波动幅度加大,变化频率加快,平均含量约为 17.16%,粉砂平均含量有所下降,约为 74.68%,粘土平均含量也下降为 8.14%。一般认为冬季风较弱,夏季风较强时,降水增多,地表径流发育,侵蚀和搬运能力强,能将更多粗颗粒物搬至湖盆,沉积物粒径增大,反之,粒径较小<sup>[33-38]</sup>。因而,推测该时段哈尼地区夏季风势力增强,温度有所上升,降水量增加,带来粒径较大的颗粒物在该地堆积(如图 3(b))。这一时期,不同种类植物孢粉含量变化也比较明显,进行有序聚类时,被划分为三个时段:在 270 ~ 290 cm(12.4 ~ 11.5 cal. ka B. P),阔叶花粉含量和乔灌木花粉含量迅速增加,而针叶花粉和草本花粉含量有所减少,云杉属冷杉属明显减少;在 230 ~ 270 cm(9.7 ~ 11.5 cal. ka B. P),阔叶花粉和乔灌木花粉含量继续增加,在 230 cm(9.7 cal. ka B. P)处阔叶花粉含量达到最大值;在 220 cm(9.2 cal. ka B. P)处,出现转折,针叶花粉和乔灌木花粉含量达到最大值,说明这一时期气候有变干的趋势,但其并不影响气候变暖的大背景。由此说明这一时段温度上升,水分增加,气候温和湿润。同时分析发现 211 cm(8.8 cal. ka B. P)处的测年数据时,发现有些异常,196 cm(8.2 cal. ka B. P)处的年代数据,与 258 cm(11 cal. ka B. P)处年代数据比较接近,泥炭在约 250 a 间堆积了 60 cm,即沉积速率约为 2.4 mm/a,远超出整个剖面的平均值 0.23 mm/a,记录到早全新世温度异常的“8.2 ka”事件。

3. 阶段 III: 8.3 ~ 6.4 cal. ka B. P (157 ~ 199 cm)。该时段砂的平均含量显著增多,约为 47.7%,其最高含砂量在 165 cm(6.7 cal. ka B. P)处达到 72.8%,粉砂含量明显下降,约为 48.9%,粘土含量也下降为 3.2%。无论是粒度组成特征还是分维值都反映这一时段温度呈下降趋势,但阔叶花粉含量依然很高,说明这一时期湿度较高,为凉湿气候。

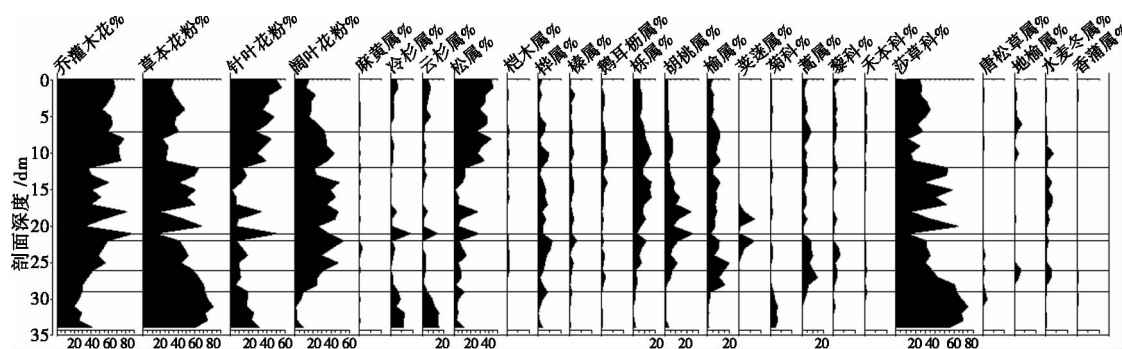


图 6 哈尼泥炭剖面中孢粉百分含量图谱

Fig. 6 The percentage of pollen in Hani peatland profiles



4. 阶段 IV: 6.3 ~ 3.2 cal. ka B. P (89 ~ 157 cm)。这一时期出现了更大幅度的波动,砂的平均含量较前一时期有下降的趋势,约为 31.46%,粉砂的平均含量有所增加,约为 64.77%,但在 89 cm (3.2 cal. ka B. P) 处,砂的含量约为 91%,而在 94 cm ~ 98 cm (3.7 ~ 3.5 cal. ka B. P) 时,砂的含量急剧下降到低于 6%,最小含砂量有的不到 2%,说明该时期气候变化幅度较大,且温度下降,这与全新世的冷事件 IRD4 和 4.2 ka 事件有关,从孢粉含量来看,也符合这一寒冷期。这一时期,针叶花粉和乔灌木花粉含量开始增加,松属花粉含量迅速增加,草本花粉含量有所减少,说明湿度有所增加。

5. 阶段 V: 3.24 ~ 2.88 cal. ka B. P (81 ~ 89 cm)。这一阶段平均含砂量为 70.5%,粉砂平均含量为 29.4%。在 89 cm 处砂的含量达到整个剖面的最大值,占了 90.93%。这一段仅在 85 cm 处存在粘土,含量为 0.36%。

6. 阶段 VI: 2.88 ~ 1.24 cal. ka B. P (45 ~ 81 cm)。哈尼泥炭地这一时期砂的平均含量在 23.37% 左右,粉砂含量在 75.12% 左右。相对前一时期砂的含量继续下降,记录了一段相对寒冷干燥的时期。

7. 阶段 VII: 1.24 cal. ka B. P 至今 (14 ~ 45 cm)。该时段砂的平均含量为 51% 左右,粉砂的平均含量为 43% 左右,粘土含量较低,此阶段砂的平均含量开始上升,表明温度开始升高,而这一时期也恰是中世纪暖期。然而,草本植物花粉在本时期相对增加,阔叶花粉含量也较低。因而这一时期温度有上升的趋势,但降水减少,湿度降低。

## 4 结论

1. 通过对哈尼泥炭地粒度特征的分析,并结合已有的孢粉研究,发现位于长白山西麓的哈尼泥炭地旱季或枯水年时,该地主要受湖水作用,雨季或丰水年时受湖水和坡面沟谷流水甚至季节性河流和河流的混合作用,流水搬运强度介于河流和湖泊之间,且在夏季风较强时,沉积物粒径偏粗,而当冬季风较强时,沉积物粒径偏细。整个剖面未发现典型的风成堆积物,说明在地质历史时期,长白山西麓鲜有风成物质搬运堆积至此。

2. 分维计算发现分维值与分选系数相关性密切,且成正相关。分选的好坏也受水动力强度的影

响。哈尼泥炭地沉积物粒径集中,分选较好,分维值较小。同时分维值可以反映沉积物颗粒的级配和粗细。沉积物粒度若外来物质粒径差异较大或气候暖湿时自生矿物分解成较小颗粒,使得粒度分布向两端延展,级配更加合理,但分选变差,分维值变大。

3. 根据哈尼泥炭粒度组成特征,分维值以及孢粉分析结果,总体上哈尼地区从 15 cal. ka B. P 以来大致经历了“冷干-温湿-冷湿-暖干”的变化过程。

**致谢:** 实验过程中卫江伟同学给予帮助,成文过程中得到刘洪妍、刘利丹博士的帮助,在此深表谢忱!

## 参考文献 (References)

- [1] Yu Xuefeng, Zhou Weijian, Lars G. Franzen, et al. The Holocene in Eastern Qinghai - Tibet Plateau in winter and summer monsoon change high-resolution peat record corresponding [J]. Science in China; Series D, Earth Sciences, 2006, 36 (2): 182 - 187 [于雪峰, 周卫健, Lars G. Franzen, 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: 地球科学, 2006, 36 (2): 182 - 187]
- [2] Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang Feng, et al. Environmental records of laminated sediments in different scales recorded by grain-size [J]. Science in China; Series D, Earth Science, 2003, 33 (6): 563 - 568 [陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间长度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例 [J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33 (6): 563 - 568]
- [3] Aaby B. Cyclic climatic variations in climate over the past 5, 500 yr reflected in raised bogs [J]. Nature, 1976, 26 (3): 281 - 284
- [4] Chambers F M, C harm an D J. Holocene environmental change: contributions from the peatland arch-ive [J]. The Holocene, 2004, 14 (1): 1 - 6
- [5] Charman D J, Hendon D, Packman S. Multiproxy surface wetness records from replicate cores on an ombrotrophic mire: implications for Holocene palaeo climate records [J]. Journal of Quaternary Science, 1999, 14 (5): 451 - 463
- [6] Booth R K, Jackson S T. A high-resolution record of late - Holocene moisture variability from a Michigan raised bog, USA [J]. The Holocene, 2003, 13 (6): 863 - 876
- [7] Bao Kunshan, Jia Lin, Lu Xianguo. Grain-size Characteristics of Sediment in Daniugou Peatland in Changbai Mountains, Northeast China; Implications for Atmospheric Dust Deposition [J]. Chin. Geogra. Sci., 2010, 20 (6): 498 - 505
- [8] Zhao Hongyan, Wang Shenzhong, Bai Yan, et al. Advance in Chinese peat geoscience in recent ten years [J]. Advance in earth science, 2002, 17 (6): 848 - 854 [赵红艳, 王升忠, 白燕, 等. 近 10 年来我国泥炭地学的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2002, 17 (6): 848 - 854]
- [9] Liu Jinling. Vegetational and climatic changes at Gushantun Bog in Jilin, NE China Since 13,000 Y. B. P [J]. Acta Palaeontologica

- Sinica, 1989, 28 (4): 495 – 509 [刘金陵. 长白山区孤山屯沼泽地 13000 年以来的植被和气候变化 [J]. 古生物学报, 1989, 28 (4): 495 – 511]
- [10] Yu Chunxia, Luo Yunli, Sun Xiangjun. A High-resolution pollen records from Ha' Ni lake, Ji Lin, northeast China showing climates between 13.1 cal. ka B. P and 4.5 cal. ka B. P [J]. Quaternary Science, 2008, 28 (5): 929 – 937 [喻春霞, 罗运利, 孙湘君. 吉林柳河哈尼湖 13.1 ~ 4.5 cal. ka B. P 古气候演化的高分辨率孢粉记录 [J]. 第四纪研究, 2008, 28 (5): 929 – 937]
- [11] Chen Lingfang, Guo Jianqiu, Gu Yansheng, et al. Characteristics of Phytolith Assemblages of Quaternary in Sangda Region of Lhasa, Tibet [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28 (3): 402 – 406 [陈陵康, 郭建秋, 顾延生, 等. 西藏拉萨桑达地区第四纪植硅体组合特征 [J]. 地理科学, 2008, 28 (3): 402 – 406]
- [12] Jie Dongmei, Ge Yong, Guo Jixun, et al. Response of Phytolith in Leymus chinensis to the Simulation of Global Warming and Nitrogen Deposition on Songnen Grassland, China [J]. Environmental Science, 2010, 31 (8): 1708 – 1715 [介冬梅, 葛勇, 郭继勋, 等. 中国松嫩草原羊草植硅体对全球变暖和氮沉降模拟的响应研究 [J]. 环境科学, 2010, 31 (8): 1708 – 1715]
- [13] Qin Yangmin, Xie Shucheng, Gu Yansheng, et al. An Excellent Indicator for Quaternary Paleoenvironmental Reconstructions Advances in the Study of Testate Amoebae (The camoebians, Arcellacean) Advances in earth science [J]. Advance in earth science, 2008, 23 (8): 803 – 812 [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]
- [14] Yu Xuefeng, Zhou Weijian, Shi Jiangfeng. A Convenient method for peat humification determination: grayscale [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25 (1): 133 – 136 [于学峰, 周卫建, 史江峰. 度量泥炭腐殖化度的一种简便方法: 泥炭灰度 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25 (1): 133 – 136]
- [15] Hong Yetang, Jiang Hongbo, Tao Faxiang, et al. The  $\delta^{18}\text{O}$  records of Jinchuan peatland in recent 5ka [J]. Science in China: Series D, 1997, 27 (6): 525 – 530 [洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5ka 温度的金川泥炭  $\delta^{18}\text{O}$  记录 [J]. 中国科学 D 辑, 1997, 27 (6): 525 – 530]
- [16] Wang Jinquan, Liu Jinling. The records of Amino Acids and Organic carbon isotope for holocene megathermal in Chang Baishan area [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2001, 18 (4): 392 – 397 [王金权, 刘金陵. 长白山区全新世大暖期的氨基酸和碳同位素记录 [J]. 微体古生物学报, 2001, 18 (4): 392 – 397]
- [17] Zhang Xinrong, Fang Shi, Hu Ke, et al. Paleo-climate analysis of the geochemical element records in the Late Holocene peat deposits of Dunhua Basin' NE China [J]. Arid Land Geograph, 2011, 34 (5): 726 – 732 [张新荣, 方石, 胡克, 等. 敦化盆地晚全新世泥炭沉积中化学元素记录的古气候分析 [J]. 干旱区地理, 2011, 34 (5): 726 – 732]
- [18] Qiao Shiyong. Discuss on peat mire in the west of Changbaishan Mountains [J]. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13 (3): 279 – 287 [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]
- [19] Cui Meiling, Luo Yunli, Sun Xiangjun. Paleovegetational and paleo-climatic changes in HaNi lake, JiLin since 5 ka B. P [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26 (5): 118 – 122 [崔美玲, 罗运利, 孙湘君. 吉林哈尼湖钻孔 5000 年以来的古植被气候变化指示 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26: 118 – 122]
- [20] Li Hongkai, Chen Xu, Wang Shenzhong, et al. Discovery of *Trigonopyxis arcuata* in Hani Mire and Its Implication in Paleoenvironmental Reconstruction [J]. Wetland Science, 2008, 6 (1): 75 – 79 [李鸿凯, 陈旭, 王升忠, 等. 小匣三角嘴虫 (*Trigonopyxis arcuata*) 壳体在哈尼泥炭地的发现及其环境意义 [J]. 湿地科学, 2008, 6 (1): 75 – 79]
- [21] Hong Bing, Liu Congqiang, Lin Qinghua, et al. Temperature evolution from the  $\delta^{18}\text{O}$  record of Hani peat, Northeast China, in the last 14000 years [J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, [洪冰, 刘丛强, 林庆华, 等. 哈尼泥炭  $\delta^{18}\text{O}$  记录的去 14000 年温度演变 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39 (5): 626 – 637]
- [22] Stuiver M, Reimer P J. Extended  $^{14}\text{C}$  database and revised CALIB radiocarbon calibration program [J]. Radiocarbon, 1993, 35: 215 – 230
- [23] Zhao Hongyan, Leng Xuetian, Wang Shengzhong. Distribution, accumulation rate of peat in the Chang – Baishan Mountains and climate change in Holocene [J]. Mountain Research, 2002, 20 (5): 513 – 518 [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]
- [24] Chai Xiu. Peatland [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1 – 7 [柴岫. 泥炭地学 [M]. 北京: 地质出版社, 1990: 1 – 7]
- [25] Bai Yan, Zhang Xiaoping, Bambalov H H. On the decomposition speed of plant residue of peat [J]. Journal of Northeast Normal University, 1997, 3: 112 – 117 [白燕, 张晓萍, H. H. 班巴洛夫. 泥炭植物残体分解速率的研究 [J]. 东北师范大学报: 自然科学版, 1997, 3: 112 – 116]
- [26] Reinecke H E, Synge I B. Terrigenous clastic sedimentary environment [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1979: 222 – 261 [H. E. 赖内克 (西德), I. B 辛格 (印度). 陆源碎屑沉积环境 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1979: 222 – 261]
- [27] Sun Donghuai, Lu Huayu, David Rea, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate implication [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18 (3): 327 – 334 [孙东怀, 鹿化煜, David Rea, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义 [J]. 沉积学报, 2000, 18 (3): 327 – 334]
- [28] Wang Guoping, Liu Jingshuang, Tang Jie. Characteristics and environmental significance of the granularity of swampy sediment in Semi-arid Areas [J]. Arid Zone Research, 2003, 20 (3): 211 – 216 [王国平, 刘景双, 汤洁. 半干旱区沼泽沉积物粒度特征及其环境意义 [J]. 干旱区研究, 2003, 20 (3): 211 – 216]
- [29] Zhang Ping, Song Chunhui, Yang Yongbiao, et al. The significance and establishment of discriminant function with grain size of stable lacustrine sediment and Eolian Loess [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26 (3): 500 – 507 [张平, 宋春辉, 杨用彪, 等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义 [J]. 沉积学报, 2008, 26 (3): 500 – 507]



- [30] Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, et al. The multimodal grain-size distribution characteristics of loess, desert, lake and river sediments in some areas of northern China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(2): 344 – 351 [殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 我国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(2): 344 – 351]
- [31] Bai Chunguang, Wang Jian. A new grain-size index: grain-size fractal dimension of sediment and its environmental significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 234 – 239 [柏春广, 王建. 一种新的粒度指标——沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 234 – 239]
- [32] Chen Zhuitian, Zhuang Jinli, Zhou Chuanxin. Analysis for fractal dimension of granularity of weathered residual granite[J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 2005, 19(2): 69 – 71 [陈追田, 庄金利, 周传新. 花岗岩风化残积物粒度分维特征分析[J]. *岩土工程技术*, 2005, 19(2): 67 – 71]
- [33] Xie Yuanyun, Li Chang'an, Wang Qiuliang, et al. Paleo-precipitation evolution over 6ka B. P in Jianghan plain: records from grain size of Jiang Ling section sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 119 – 124 [谢远云, 李长安, 王秋良, 等. 江汉平原 6000 年以来的古降水变化: 江陵剖面沉积物粒度记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 119 – 124]
- [34] Wang Xiaoli, Pan Baotian, Wang Junping. The environment information recorded on the grain size of loess in Fenwei river basin since 250 ka[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2006, 42(6): 6 – 11 [王小莉, 潘福田, 王均平. 汾渭盆地 250 ka B. P 以来黄土粒度记录的环境信息[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(6): 6 – 11]
- [35] Liu Dongyan, Li Weiran, Peng Shasha, et al. Current application of grain size analysis in Chinese Loess Paleoclimatic study[J]. *Periodical of Ocean university of China*, 2010, 40(2): 79 – 84 [刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎, 等. 粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(2): 79 – 84]
- [36] Zhao Qiang, Wang Nai'ang, Cheng Hongyi. Grain-size characteristics of Qingtu lake sediments and its paleoenvironment explanation[J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(1): 1 – 5 [赵强, 王乃昂, 程弘毅. 青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(1): 1 – 5]
- [37] Gao Shu. Grain size trend analysis: principle applicability[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 826 – 836 [高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 826 – 836]
- [38] Yu Xuefeng, Zhou Weijian, Liu Xiaoqing, et al. Grain size characteristics of the Holocene Peat sediment in eastern Tibetan Plateau and its Paleoclimatic Significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(6): 864 – 869 [于学峰, 周卫健, 刘晓清, 等. 青藏高原东部全新世泥炭灰分的粒度特征及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2006, 24(6): 864 – 869]

## The Environmental Reconstruction of Hani Peatland since 15 cal. ka B. P

YANG Jinxiu<sup>1,2</sup>, LI Nannan<sup>1,2</sup>, JIE Dongmei<sup>1,2\*</sup>, CHEN Xuesong<sup>1,2</sup>, HU Chutian<sup>1,2</sup>, CHEN Yujie<sup>1,2</sup>

(1. School of Geography, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

2. Key laboratory for Wetland Ecology and Vegetation Restoration of State Environmental Protection Ministry, Changchun 130024, China)

**Abstract:** Based on the grain-size of peat as the climate index, combining Pollen information, the paleo-climate at Hani area during the 15 cal. ka B. P is reconstructed and environment evolution is improved since late Pleistocene. The distribution of sediments grain-size, the parameters of sediments grain-size and the characteristics of grain-size frequency curves are analyzed, The results show that ash of Hani peat is dominated by silt and sand and the grain-size of sediments is tapering from top to bottom, the grain-size distribution is symmetrical distribution. Based on the analysis of the characteristics of grain-size frequency curves of typical Wind sediment, lake sediment and fluvial sediment grain size, this paper argues that peat deposits in this area between lake sediment and fluvial sediment and peat ash particle size was mainly affected by water power, So the peat ash can be used to indicate the summer monsoon and can be used for rebuilding the evolution of paleo-climate. The results of the grain-size fractal dimensions show that they are positive correlation between fractal dimensions and sorting coefficient of sediment and the fractal dimensions can also effectively reflect the grain distribution and paleo-climate evolution. Combining the grain size and Pollen information, reveals that paleoclimate were cold-dry, humidity-cold, cold-wet, warm-dry from 15 cal. ka B. P, and recognizes Younger Dryas, 9.2 ka and 8.2 ka drought events.

**Key words:** Peat; grain-size; fractal dimensions; Pollen; Holocene