

文章编号:1000-0550(2014)05-0873-11

长白山西麓泥炭灰分粒度特征及其环境意义^①

李楠楠^{1,2} 介冬梅^{1,2} 阳金秀^{1,2} 陈雪松^{1,2} 陈玉洁^{1,2} 胡楚天^{1,2} 乔志和³

(1.东北师范大学地理科学学院 长春 130024;2.国家环境保护湿地生态与植被恢复重点实验室 长春 130024;
3.大庆师范学院 黑龙江大庆 163712)

摘要 本文提取长白山西麓哈尼、孤山屯沼泽地晚更新世以来泥炭沉积中所含的高分辨率无机矿物颗粒信息,追溯泥炭灰分的物质来源、粒度组成特征及规律,进一步揭示本区泥炭灰分粒度的古环境意义。粒度分析结果表明,长白山西麓泥炭灰分颗粒粒径集中在1~350 μm,灰分组成以各类粉砂为主;本区泥炭灰分粒度分布概率累积曲线以二段式占多数,频率分布曲线呈现单峰(10~100 μm)、双峰型(10~100 μm,100~1 000 μm)特征,搬运方式以悬移和跃移为主。由于本区沼泽地地处湿润区,泥炭灰分的粒度组成主要受到流水动力变化的影响,沼泽地水文状况的变化引起了泥炭灰分粗细的变化。因而,长白山区沼泽地泥炭灰分的粗细主要指示夏季风强弱,可用于反演古降水的变化。晚更新世以来泥炭灰分粒度的变化曲线显示本区全新世9.2 ka,8 ka和5 ka存在干旱事件,古降水历史具有“干—湿—干”旋回。由于这些干旱事件与全新世几次著名的冷事件几乎同时出现,故推测本区古气候模式为冷干和暖湿组合。

关键词 长白山区 泥炭 粒度 沉积相 夏季风

第一作者简介 李楠楠 男 1991年出生 本科 沉积学与第四纪地质学 E-mail: linn719@nenu.edu.cn

通讯作者 介冬梅 女 教授 E-mail: jiedongmei@nenu.edu.cn

中图分类号 P534.63 P531 **文献标识码** A

0 引言

沉积物的粒度分析是较为传统的沉积环境研究手段,在古气候研究中已得到广泛应用,尤其在黄土^[1]、海洋^[2]、河流^[3,4]、湖泊^[5]沉积环境的判识及古气候恢复重建中取得了瞩目的研究成果。泥炭是湿地的重要组成部分,其通常发育在地势低洼处,在其形成过程中记录了大量的气候及环境变化信息^[6]。长白山西麓泥炭以其储量丰富、连续性强、沉积速率大等特点,吸引了研究者的广泛关注^[7]。在过去的几十年里,利用该区沼泽泥炭中的孢粉^[8]、植硅体^[9]、氨基酸^[10]、有壳变形虫^[11]、稳定同位素^[12]等进行了大量的全新世以来的古环境恢复与重建工作。然而针对东北地区泥炭灰分颗粒的物质来源、泥炭的沉积环境特点,尤其是泥炭灰分颗粒组成的古环境指示意义,学界至今没有形成统一的认识。本文拟提取东北长白山西麓哈尼、孤山屯沼泽地泥炭沉积中所含的高分辨率无机矿物颗粒信息,并结合¹⁴C测年手段,对泥炭剖面进行分析,以探寻泥炭灰分的物质来

源、粒度组成特征及规律,从而进一步揭示出泥炭灰分粒度组成的环境意义,以期为区域环境演化及泥炭地学研究提供参考。

1 区域概况

本文两个采样点均位于吉林省境内,哈尼(42°13.5' N,126°30.25' E)位于吉林省柳河县哈尼乡,孤山屯(42°18'22.1" N,126°16'57.7" E)位于吉林省辉南县,两地区平均海拔均低于1 000 m,泥炭发育在地势较低的积水洼地。两地均属于湿润的温带大陆性季风气候,年平均气温4℃~5℃,年平均降雨量8 00~9 00 mm,采样区内可以见到中、湿生植被,哈尼地区主要包括以黄花落叶松(*Larix olgensis*)为优势种的乔木层,以及以油桦(*Betula ovalifolia*)、蓝靛果忍冬(*Lonicer caerulea*)、甸杜(*Chamaedaphne calyculata*)等灌木群丛以及草本植物中苔草(*Carex* spp.)、小百花地榆(*Sanguisorba parviflora*)、灯心草(*Juncus* spp.)、水木贼(*Equisetum heleocharis*)、芦苇(*Phragmites australis*)等,而孤山屯地区主要包括山槐(*Albizia kalkora*)、油桦(*Betula ovalifolia*)等灌木群丛,水湿

^①国家自然科学基金(批准号:30870238,40971116)、环保行业公益基金(编号:201109067)、高校基本业务费资助前瞻性项目基金(编号:10JCXK010)与2012年度国家大学生创新性实验计划基金(编号:201210200089)联合资助
收稿日期:2013-07-15;收修改稿日期:2013-11-28



图1 哈尼、孤山屯泥炭地位置示意图

Fig.1 The location map of Hani Peatland and Gushantun Peatland

柳叶菜 (*Epilobium palustre*)、粗根老鹳草 (*Geranium dahuricum*)、苔草 (*Carex tristachya*)、三褶脉紫菀 (*Aster ageratoides*)、聚花风铃草 (*Campanula glomerata* L.)、柳叶绣线菊 (*Spiraea Salicifolia*)、千屈菜 (*Spiked Loosestrife*)、鸢尾 (*Iris tectorum*)、地耳草 (*Hypericum japonicum*) 等草本植物群丛。

2 实验方法

2.1 样品采集

在哈尼泥炭地、孤山屯泥炭地钻取了深度为 350 cm 和 750 cm 的泥炭样芯。现场按泥炭颜色、沉积特征等进行岩性描述,从顶部到底部哈尼泥炭样芯分为 8 层,孤山屯泥炭样芯分为 9 层,剖面描述如图 2 所示。样品采回后,采用 1 cm 间隔分样,并装入样品袋中备用。本文样品分析中,哈尼泥炭样品采用 2 cm 间隔取样,而孤山屯泥炭样品采用 10 cm 间隔取样分析。

2.2 年代序列

分别选取哈尼、孤山屯泥炭样芯 6 个和 9 个年代样品送往北京大学 AMS¹⁴C 年龄测定实验室进行放射性¹⁴C 年龄测定,测试结果如下表 1、表 2 所示。对所获年龄数据采用 Calib Rev6.0.1 程序^[13]校正至日历年龄 (2σ 校正结果)。将各剖面数据点进行线性

表 1 哈尼泥炭样品¹⁴C 年龄数据及沉积速率

Table 1 Carbon isotopic age and deposition rate for peat from Hani Peatland

| 层位/cm | ¹⁴ C 放射年龄 /a B.P. | 中值日历年龄 /cal.a B.P./2σ | 沉积速率 /mm · a ⁻¹ |
|---------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 75~76 | 3 040±35 | 3 263 | 0.231 |
| 124~125 | 4 785±35 | 5 518 | 0.217 |
| 184~185 | 7 045±40 | 7 885 | 0.253 |
| 258~259 | 8 435±40 | 9 470 | 0.467 |
| 310~311 | 11 285±45 | 13 188 | 0.140 |
| 349~350 | 13 280±50 | 16 317 | 0.125 |

表 2 孤山屯泥炭样品¹⁴C 年龄数据及沉积速率

Table 2 Carbon isotopic age and deposition rate for peat from Gushantun Peatland

| 层位/cm | ¹⁴ C 放射年龄 /a B.P. | 中值日历年龄 /cal.a B.P./2σ | 沉积速率 /mm · a ⁻¹ |
|---------|---------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 66~67 | 935±50 | 853 | 0.780 |
| 147~148 | 2 140±90 | 2 130 | 0.634 |
| 178~179 | 2 795±50 | 2 898 | 0.404 |
| 273~274 | 3 930±60 | 4 366 | 0.647 |
| 361~362 | 5 375±90 | 6 184 | 0.484 |
| 410~411 | 6 250±80 | 7 192 | 0.486 |
| 462~463 | 7 685±80 | 8 474 | 0.406 |
| 578~579 | 9 270±80 | 10 454 | 0.586 |
| 748~749 | 11 165±100 | 13 051 | 0.655 |

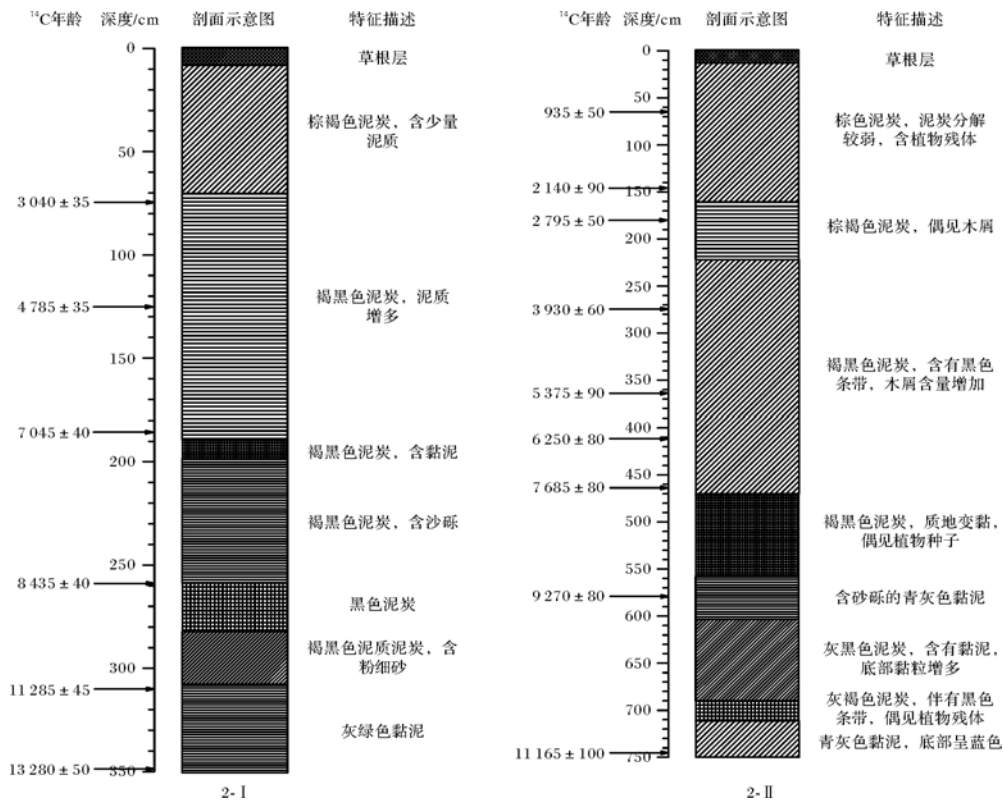


图 2 长白山西麓泥炭剖面示意图(2- I 为哈尼泥炭,2- II 为孤山屯泥炭)

Fig.2 Peat profile introduction in the west foothill of Changbai Mountain (2- I for Hani Peat, 2- II for Gushantun Peat)

回归,得到泥炭样品年代与深度关系。哈尼泥炭线性回归方程为 $y = 44.236x - 333$, 其中相关系数 $r = 0.9814$, F 检验值为 104.68;孤山屯泥炭数据回归方程为 $y = 18.428x - 430.632$, 其中相关系数 $r = 0.999$, F 检验值为 2 351.696, 各方程中 y 表示日历年龄(a), x 表示采样深度(cm)。统计结果可以看出,线性拟合结果较好,其余剖面年龄可通过线性内插而获得。

2.3 分析测试

本次实验处理样品包括除草根层外所获得的泥炭样品,共取得哈尼泥炭样品 151 个(部分层位样品缺失),孤山屯泥炭样品 74 个。粒度分析测试采用的是美国 MICROTRAC 公司生产的 Microtrac S3500 激光粒度分析仪,其测试范围为 0.02~2 800 μm ,重复测量误差小于 1%。具体的实验流程如下:

(1) 将泥炭样品烘干至恒重,测量并记录泥炭干重。

(2) 将 1 中所得样品经马弗炉 550℃ 加热,高温灼烧 4 h,待冷却后称重。

(3) 将所获泥炭样品转至 15 mL PVC 管,加入 10%的稀盐酸 10 mL,充分反应至不再产生气泡为止,目的是除去其中的钙质胶结物。

将 3 中所得样品加蒸馏水洗涤 3~4 次,经 pH 测试接近中性后再向其中加入 0.05 mol/L 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 10 mL,将样品置于超声波振荡器中振荡 7 min,上机测试。

3 结果分析与讨论

本文参照国家海洋局粒度分类标准(1975年)^[14]选择 4ϕ (63 μm) 和 8ϕ (4 μm) 作为砂/粉砂和粉砂/黏土的分界,得到哈尼、孤山屯泥炭灰分粒度组成如下图 3 所示。按照林克分类法^[15]并结合我国《石油天然气行业标准碎屑岩粒度分析方法》相关命名准则^[16]对沉积物进行命名,两个泥炭的泥炭灰分组成主要包括粉砂质砂、含砂粉砂、含黏土粉砂、砂质粉砂、粉砂等类型,各类型沉积物百分含量如图 4 所示。结合图 3,4 结果可以看出,两个泥炭的灰分组成以各类粉砂为主。

3.1 泥炭灰分粒度组成及分布

沉积物的粒度组成特征是判别沉积作用方式的手段之一,通过各粒级沉积物组成可以推断沉积物的来源^[17,18]。粒度分析结果表明,长白山西麓泥炭灰分粒径分布主要集中在 1~350 μm ,灰分颗粒组成比

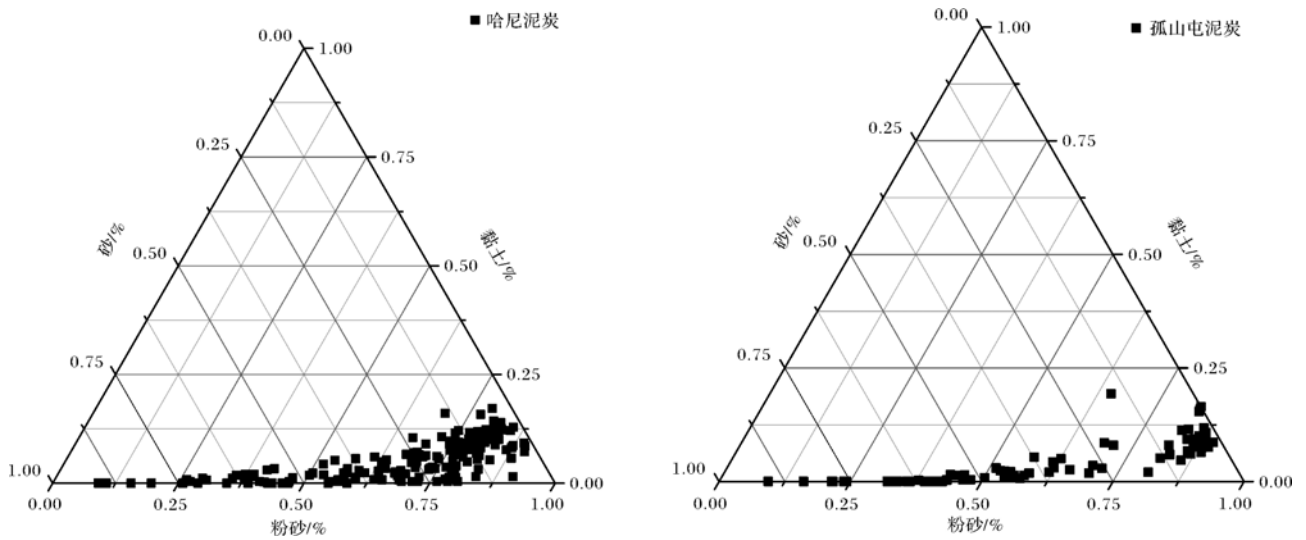


图 3 长白山西麓泥炭灰分粒度三组分图

Fig.3 Ternary diagram of peat ash in the west foothill of Changbai Mountain

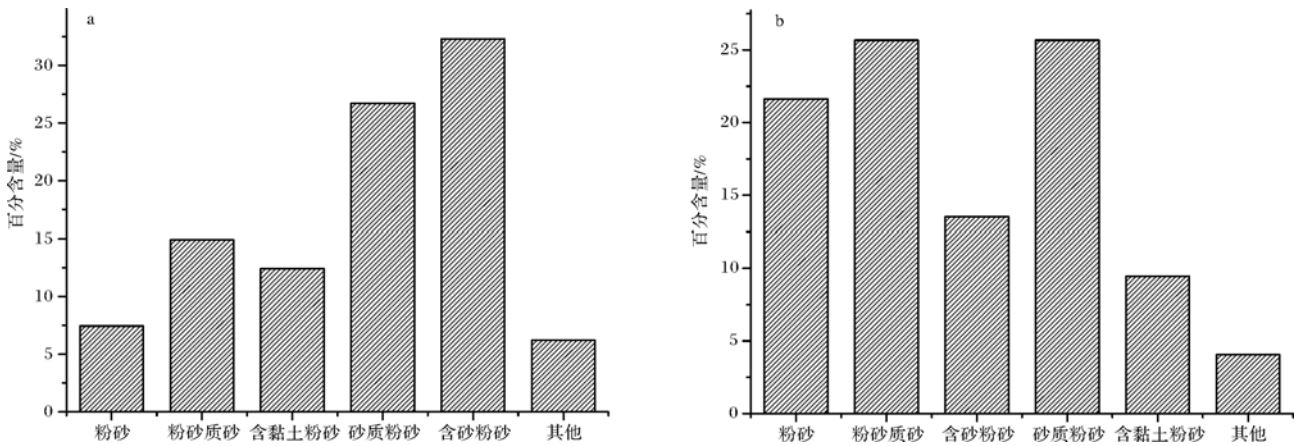


图 4 长白山西麓泥炭灰分的沉积组成及其百分含量(a 图为哈尼泥炭;b 图为孤山屯泥炭)

Fig.4 Sedimentary types and their percentages of peat ash in Changbai Mountain Area (a. Hani peat; b. Gushantun peat)

典型的风成堆积要粗。频率分布曲线呈现出单峰(10~100 μm)、双峰型(10~100 μm,100~1 000 μm)特征(图 5)。由于沼泽地终年为水覆盖,泥炭灰分的粒度组成主要受到流水动力大小的影响。雨季,随着降水量或降水频次的增加,地表径流携带着粗颗粒进入沼泽地,形成了 100~1 000 μm 跃移质总体(众数粒径为 300 μm),跃移质的搬运,一般需要足够的水量和水流速度,结合沼泽地地貌、水文特征,推测跃移质由坡面径流或沟谷流水,甚至是季节性洪水带来。随着雨季的结束,沼泽地水位变低,水流趋于稳定。此时水流主要携带 10~100 μm 的颗粒进入沼泽地沉积,而形成主要由悬移质组成 10~100 μm 粒度总体(众数粒径 30 μm)。因而,雨季持续时间的长短,雨量的大小对泥炭沉积中粗颗粒的多少具有显著影响。

沉积物概率累积曲线可以很好地体现沉积物的搬运方式^[17],本区泥炭灰分粒度分布概率累积曲线主要包括三种类型:一段式、二段式和三段式(图 6),其中以二段式占多数。一段式表示灰分以中细颗粒物组成为主,悬移颗粒总体占多数,直线倾角在 40°~50°之间,表明搬运或牵引动力较为稳定,可能为远距离传输或水下环境为主^[19];二段式揭示灰分的粒度组成由悬移质和跃移质混合而成,截点在 1~4 φ 之间变化,截点较大范围的波动暗示着沉积物搬运的动力源动力大小的波动,暗示并非稳定的水下环境。三段式中可以看出悬移质在 5~6 φ 间有截点,推测其可能是受到坡面流水搬运和沟谷流水搬运共同作用的体现,三段式部分样品较粗,含有推移质,具有河流相特征^[17]。

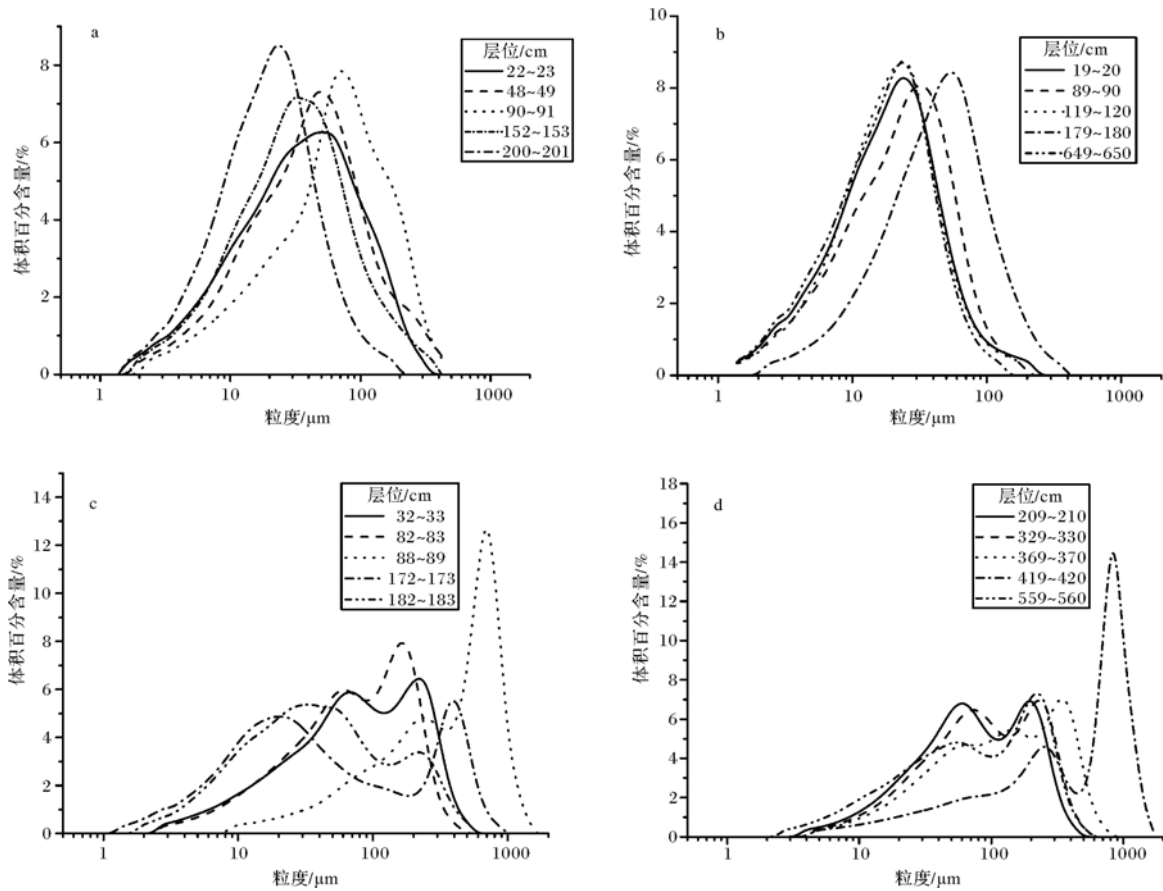


图 5 长白山西麓泥炭灰分粒度频率分布曲线

a. 哈尼泥炭粒度组成单峰分布; b. 孤山屯泥炭粒度组成单峰分布; c. 哈尼泥炭粒度组成双峰分布; d. 孤山屯泥炭双峰分布

Fig.5 The grain-size frequency distribution curves of peat ash

a. unimodal distribution in Hani peat; b. unimodal distribution in Gushantun peat; c. bimodal distribution in Hani peat; d. bimodal distribution in Gushantun peat

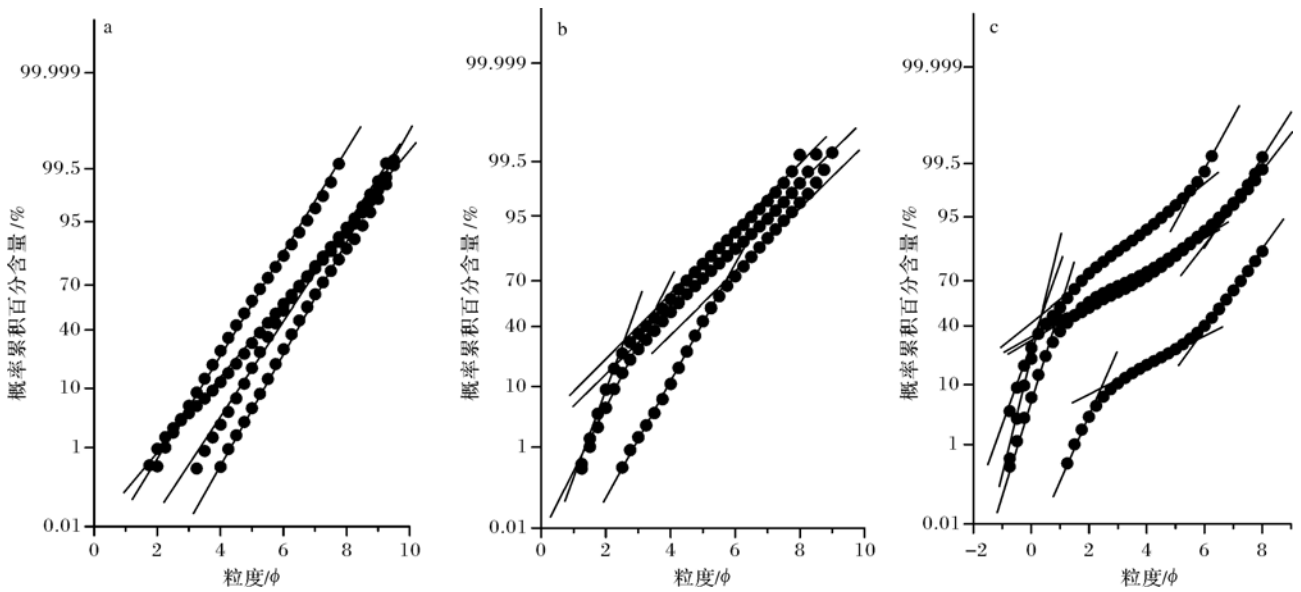


图 6 长白山西麓泥炭灰分粒度组成概率累积曲线图(a.一段式;b.二段式;c.三段式)

Fig.6 Probability cumulative curves of peat ash content

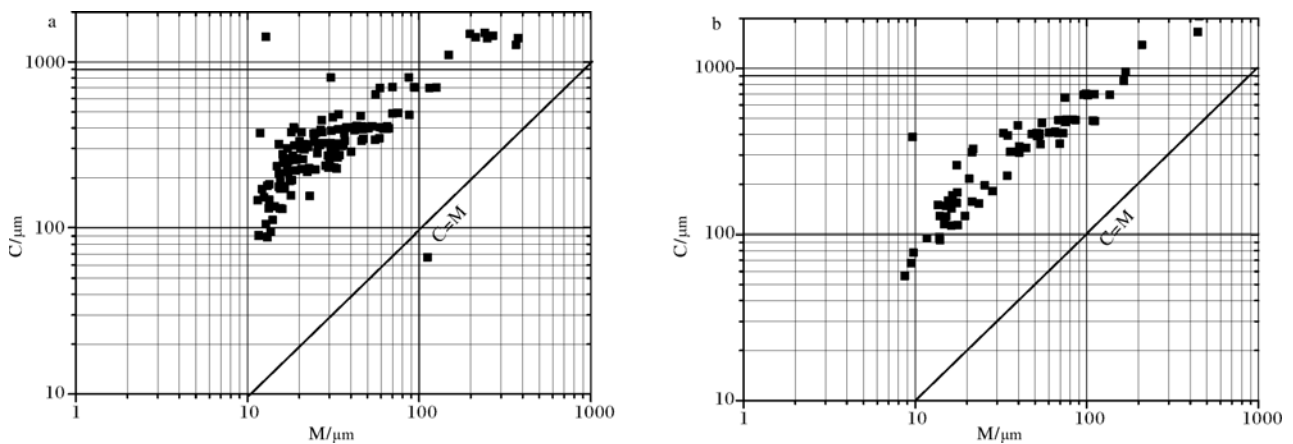


图7 长白山西麓泥炭灰分粒度组成 C-M 图(a.哈尼泥炭;b.孤山屯泥炭)

Fig.7 C-M graph of peat ash in Changbai Mountain area (a. Hani Peat; b. Gushantun Peat)

表3 沉积物沉积环境判别公式

Table 3 The discriminant formula for distinguishing different sediment environment

| 判别函数 | 可以区别的沉积环境 | 计算公式 | 临界值 |
|------|-----------|---|---|
| ① | 风成与海滩 | $Y = -3.5688 Mz + 3.7016 \sigma_1^2 - 2.0766 Ski + 3.1175 Kg$ | $Y_{\text{风成}} < -2.7411 < Y_{\text{海滩}}$ |
| ② | 浅海与冲积(河流) | $Y = 0.2852 Mz - 8.7064 \sigma_1^2 - 4.8932 Ski + 0.0482 Kg$ | $Y_{\text{冲积}} < -7.4190 < Y_{\text{浅海}}$ |

3.2 沉积物粒度组成 C-M 图

C-M 图可反映沉积物的搬运方式。其中 C 是指含量 1% 的粒径值, M 即中位数, 含量 50% 的粒径值。长白山西麓泥炭灰分粒度组成 C-M 图如图 7 所示, 由图 7 可知, 两泥炭地灰分颗粒的搬运方式为递变悬浮或均匀悬浮^[17], 有些粗粒颗粒甚至出现滚动搬运, 并不完全同于典型河流或湖泊沉积物搬运特征, 从另一个角度揭示出, 沼泽地流水动力条件介于河流与湖泊之间, 与泛滥平原相近。

3.3 沉积环境讨论

判别分析是一种常用的数理统计方法, 其在粒度分析中常被应用于区别不同的沉积环境^[20,21], 因而通过经验公式, 建立判别函数探讨泥炭灰分颗粒来源是可行的方法之一。本文通过如下公式进行判断(表 3)。

其中 Mz , σ_1 , Ski , Kg 分别表示平均粒径、标准差、偏度、峰态。计算结果表明, 利用函数①判别结果显示泥炭沉积物组成以风成为主, 而利用函数②判别结果显示, 泥炭沉积主要为冲积环境, 如三角洲等。上述结果至少可以说明两点: 一是长白山泥炭分布在湿润区, 年降水量在 800 mm 以上, 大规模的风沙活动在长白山区少有记录, 因而泥炭形成过程中的无机矿物颗粒主要由地表径流携带的近源物质组成, 流水动力的强弱决定了泥炭灰分的粗细, 但泥炭沉积中一些

细粒沉积物(10 μm 以下)也可能与远源风尘活动有关; 另一方面也证实原有经验判别函数可能存在某些局限性。本文并非孤证, 张洪岩等人在研究图们江河口沉积物时就发现利用上述两个判别函数判断图们江河口沉积物的沉积环境时, 两个判别函数分别给出其为风成和河流相沉积^[3]。于雪峰等曾对红原泥炭灰分进行粒度分析并证明红原泥炭灰分为风力成因^[22], 而本文结果则认为长白山区泥炭灰分主要为流水搬运, 由此可见不同区域泥炭灰分来源、成因并不相同, 具有明显的区域性。因此, 今后在判断不同区域泥炭灰分的物质来源及沉积环境时, 应结合更多的研究手段如扫描电镜、X 衍射分析、元素分析等。

3.4 泥炭灰分的古环境意义

前文指出, 泥炭灰分颗粒的粗细与流水动力的强弱有着密切联系。现代沉积学观点也认为, 湿润期或夏季风强盛期, 降雨增多, 水量增加, 水动力增强, 水流剥蚀、搬运、沉积的颗粒粒径相对较粗, 而在干早期或冬季风强盛期, 降水减少, 流水搬运能力减弱, 沉积物颗粒粒径也相应变细^[23,24]。因此, 借助泥炭灰分粒度组成可以反演出区域古降水历史与相关的气候事件。

3.4.1 指示不同时期古降水强度变化

本区处于东亚季风区, 深受季风影响, 降雨量及

降雨频次对沉积物颗粒的粗细有显著影响。降雨量大的年份地表径流发育,流水动力强,沉积物颗粒组成相对较粗,降雨量少的年份沉积物颗粒组成则较细,因而可借助本区泥炭灰分颗粒的粗细反演古降水变化历程。选取泥炭灰分颗粒的平均粒径 M_z 和粗颗粒($>32 \mu\text{m}$)百分含量变化绘制成图 8。由图 8 可看出,两个剖面反映的干湿变化状况可划分为三个时期,降水历史经历了“干—湿—干”的演化历程,但是各阶段持续时间稍有不同,此有可能是测年误差所致。结合有序聚类结果,将长白山西麓泥炭灰分反映的古降水历史划分为三个时期:

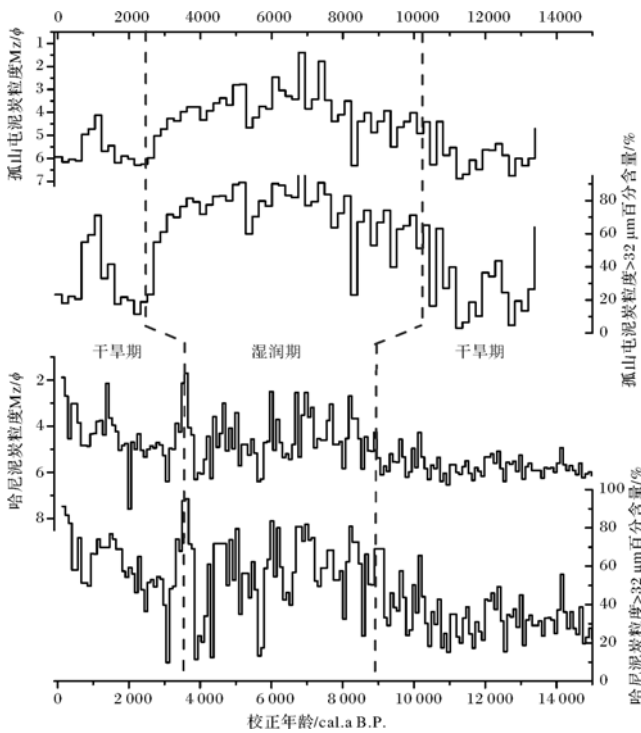


图 8 长白山西麓泥炭灰分平均粒径和粗颗粒百分含量变化曲线
Fig.8 Mean particle size and coarse particle percentages of peat ash

I 干旱期(哈尼 15 000~8 890 cal.a B.P.,孤山屯 13 400~10 248 cal.a B.P.);这一时期两个剖面泥炭灰分颗粒平均粒径相对较细,约 5~6 ϕ ,粗颗粒($>32 \mu\text{m}$ 颗粒)百分含量在 20%~40%波动变化,总的来说气候干燥。

II 湿润期(哈尼 8 890~3 405 cal.a B.P.,孤山屯 10 248~2 508 cal.a B.P.);进入全新世,泥炭灰分颗粒平均粒径 M_z 增大,粗颗粒百分含量明显增多,出现了降水增多、水动力加强等东亚夏季风增强的现象,持续到 2.5~3.4 ka 结束,这一时期泥炭灰分颗粒平均粒径增加至 3~4 ϕ ,粗颗粒百分含量增加至 60%

~80%。从时间上看,同我国东北地区全新世大暖期相当^[25],尤其在 8~3 ka,孤山屯剖面泥炭灰分粗颗粒含量高于 80%,出现了全新世气候适宜期。

III 干旱期(哈尼 3 405 cal.a B.P.至今,孤山屯 2 508 cal.a B.P.至今),晚全新世以来,气候逐步转干,沉积物平均粒径变小,粗颗粒百分含量下降,气候再次变得干燥,推测其很有可能是受到新冰期气候转冷的影响。

整体看来,泥炭灰分粒度特征可以很好的反映出古环境变迁过程中的干湿变化状况,可以作为古降水或夏季风强弱变化的代用指标。

3.4.2 用于区域对比与干旱事件响应研究

依据泥炭灰分粒度信息反演的古降水历史表明:15~11 ka,泥炭灰分颗粒较为细小,粗颗粒含量较低,气候相对干燥。利用孢粉气候转换函数^[26]恢复哈尼、孤山屯古降水历史(孢粉分析数据取自参考文献^[8,27,28])也反映出剖面底部相对干旱,年降水量不超过 700 mm,周卫健等在研究糜地湾剖面湖沼泥炭时得出同时期西部季风边缘区为森林草原,气候相对干旱^[29],大布苏湖湖泊沉积物碳酸盐含量在本时期迅速上升达到峰值 9.82%(图 9),表明同时期气温偏高、气候干旱,湖面高度下降^[30]。在 12~11 ka,两区泥炭灰分平均粒径出现明显减小、粗颗粒百分含量降低,表明本区降水减少,流水动力减弱,推测这一事件很有可能是新仙女木事件在本区域的反映。洪冰等人利用哈尼泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 恢复本区 14 ka 来古温度变化表明,在 12.9~11.7 ka 泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 明显降低,是该剖面温度的最低值,并认为这一时期本区发生了新仙女木事件^[12]。哈尼地区孢粉分析结果也表明,这一时期地层中花粉以云冷杉属为主,气候寒冷^[28]。可见,12~11 ka 应为气候冷干期,尽管如此,本阶段气候也出现过短暂的转湿,孤山屯泥炭灰分颗粒记录 12.5~12 ka 泥炭灰分粒度稍有转粗,降水量增加,说明可能存在有持续百年的相对湿度阶段(相当于阿勒罗德暖期)。

全新世中早期的气候湿润期是整个剖面中气候最适宜的时期,贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线也记录了本时期的湿润气候,本时期石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻(图 9),石笋生长速率增加,暗示气候转湿,夏季风活动加强^[31];江西大湖孢粉资料表明同时期太湖地区桤木属(*Alnus*)花粉百分含量下降,森林为中亚热带常绿阔叶林,年降雨量高于当前水平^[32]。金川泥炭剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 结果也反映出了 5~3 ka 为气候湿润期^[33]。古

降水曲线反映出了全新世中期湿润的气候特点,这一时期年降水量多超过 800 mm,个别时期降水量甚至超过 1 000 mm(图 9)。综合季风区各地研究结果及长白山西麓泥炭灰分粒度特征,本文发现中全新世东亚季风区夏季风活动增强,气候湿润,大暖期东亚季风区水热搭配适宜。大暖期结束后,进入了全新世晚期的相对干燥时期,黄土磁化率出现了迅速降低(图 9)^[34],在此背景下,1.3~0.9 ka 出现了短暂湿润期,该期约同竺可桢发现的唐朝至宋初我国北方可以种植梅树的气候适宜期相对应^[35]。

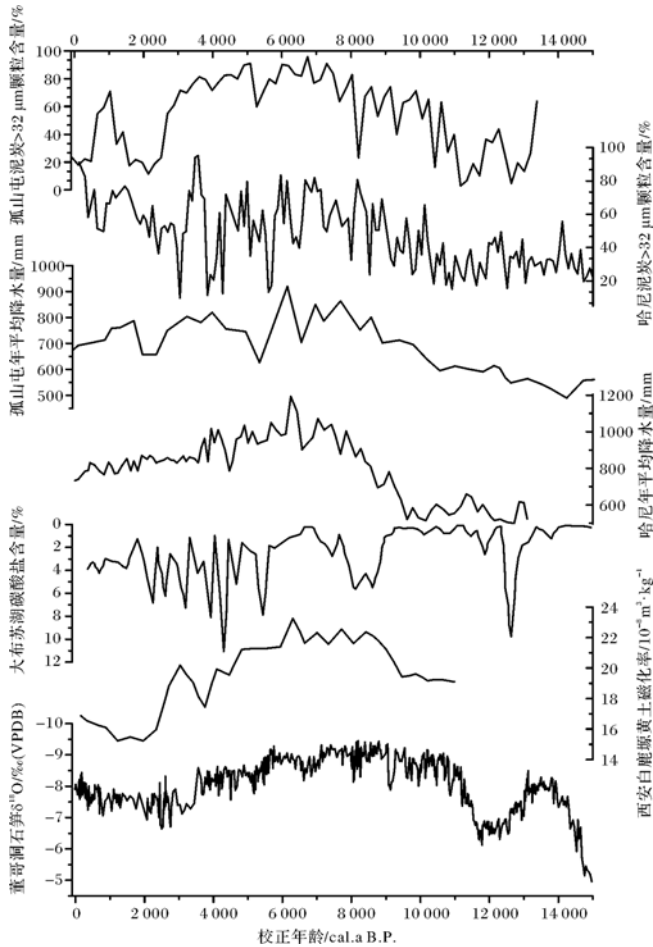


图9 长白山西麓泥炭灰分粗颗粒含量与东亚季风区夏季风代用指标综合对比

注:古降水量计算公式据参考文献[26];孢粉数据分别据参考文献[8,27,28];大布苏湖碳酸盐含量据参考文献[30];西安白鹿原磁化率变化曲线据参考文献[34];贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线据参考文献[31]。

Fig.9 Comparison between coarse particle content in peat ash and other Asian Summer Monsoon indicators in the Monsoon Area

除此以外,长白山西麓泥炭灰分颗粒也揭示出本区古降水演化中存在若干次气候干旱事件,最典型的

是 9.2 ka, 8 ka 和 5 ka 干旱事件,两个泥炭剖面灰分粒度分析结果都表明这些时期沉积物突然转细,持续百年后转粗,古降雨量在相应时期也出现了减少(图 9)。其中 9.2 ka 事件在贵州石笋中有清晰的记录,这一时期贵州董哥洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 突然变重,变化幅度为 1.4‰,表明季风减弱,降水减少^[31], Mayewski 等人也通过全球多个记录表明 9~8 ka 存在明显的气候波动事件^[36], Gupta 等人认为上述气候转干时期存在季风减弱事件^[37];大布苏湖碳酸盐含量(图 9)证明 8 ka, 5 ka 存在气候转干事件^[30],黄土高原全新世黄土剖面揭示出 6~5 ka 为全新世最干旱时期^[38],青藏高原花粉表明 6~4.9 ka 存在百年尺度的干旱事件^[39]。以上气候干旱事件又恰恰与全新世著名的若干次降温事件密切相关^[40],推测出气候变化过程中干冷、暖湿应是同步变化的。

4 结论

长白山西麓沼泽地泥炭灰分粒径在 1~350 μm , 沉积物类型以粉砂质为主,泥炭灰分的粒度频率分布主要包括单峰型和双峰型曲线,表明了泥炭灰分沉积动力的差异。

东北长白山区泥炭灰分的粗细主要受到水动力条件的影响:枯水期进入沼泽地沉积的颗粒物以悬移质为主,形成 10~100 μm 粒度总体;丰水期流水搬运能力增强,出现了 100~1 000 μm 跃移质总体。

利用泥炭灰分颗粒粗细变化曲线恢复本区的古降水历史经历了“干—湿—干”的演化历程,该结果可与东北地区及东亚季风区研究成果形成很好对比,表明泥炭灰分颗粒粗细可作为本区域反演古降水历史、研究古夏季风强弱变化的代用指标。

长白山西麓泥炭灰分粒度分析结果印证了全新世存在的 9.2 ka, 8 ka 和 5 ka 气候干旱事件,这些干旱气候事件均可与重要的气候冷事件相对应,可能说明了本区气候变化过程中冷干、暖湿的搭配特征。

致谢 王楠同学帮助绘制部分图件,卫江伟同学在实验处理中给予帮助,成文过程中得到刘利丹博士,郭梅娥、刘洪妍、卢美娇硕士的帮助,审稿专家为本文提出建设性意见及建议,在此谨致谢忱!

参考文献 (References)

- 1 刘东生,等. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985 [Liu Tungsheng, et al. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985]

- 2 胡邦琦,杨作升,赵美训,等. 南黄海中部泥质区 7200 年以来东亚冬季风变化的沉积记录[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2012,42(10):1568-1581 [Hu Bangqi, Yang Zuosheng, Zhao Meixun, *et al.* Grain size records reveal variability of the East Asian Winter Monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area[J]. China Science(Seri. D): Earth Science, 2012, 42(10): 1568-1581]
- 3 张洪岩,王锡魁,隋维国,等. 图们江河口沼泽沉积物的粒度特征及碎屑源分析[J]. 世界地质,2006,25(2):147-159 [Zhang Hongyan, Wang Xikui, Sui Weiguo, *et al.* Analysis on grain-size characteristics and fragment sources of deposits in swamps near debouchment of Tumen River[J]. Global Geology, 2006, 25(2): 147-159]
- 4 郑国璋,岳乐平,何军锋,等. 疏勒河下游安西古沼泽全新世沉积物粒度特征及其古气候环境意义[J]. 沉积学报,2006,24(5):733-739 [Zheng Guozhang, Yue Leping, He Junfeng, *et al.* Grain-size characteristics of the sediments at palaeoswamp in Anxi County in downstream of Shulehe River during Holocene and its paleoclimatic significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(5): 733-739]
- 5 王心源,张广胜,张恩楼,等. 巢湖湖泊沉积记录的早-中全新世环境演化研究[J]. 科学通报,2008,53(增刊 I):132-138 [Wang Xinyuan, Zhang Guangsheng, Zhang Enlou, *et al.* Research on early-middle Holocene environment evolution from the records of sediment in Chaohu Lake [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(Suppl. I): 132-138]
- 6 殷书柏,吕宪国. “泥炭气候成因说”的探讨[J]. 地理科学,2006,26(3):321-326 [Yin Shubai, Lü Xianguo. Discussion on "the theory on climate cause of peat forming" [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(3): 321-326]
- 7 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,2002,20:513-518 [Zhao Hongyan, Leng Xuetian, Wang Shengzhong. Distribution, accumulation rate of peat in the Changbaishan Mountains and climate change in Holocene[J]. Journal of Mountain Science, 2002, 20: 513-518]
- 8 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,1989,28:495-509 [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: 495-509]
- 9 李荣麟,介冬梅,刘艳萍,等. 东北长白山区北部虎山泥炭剖面植硅体的环境指示意义[J]. 微体古生物学报,2011,28:329-336 [Li Ronglin, Jie Dongmei, Liu Yanpin, *et al.* Phytolith as an environment indicator of Hushan peat section from northern region in Changbai Mountain[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2011, 28: 329-336]
- 10 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,2001,18:392-398 [Wang Jinqun, Liu Jinling. The records of amino acids and organic carbon isotope for Holocene megathermal in Changbaishan area[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2001, 18: 392-398]
- 11 李鸿凯,卜兆君,王升忠,等. 长白山区泥炭地现代有壳变形虫环境意义探讨[J]. 第四纪研究,2009,29(4):817-824 [Li Hongkai, Bu Zhaojun, Wang Shengzhong, *et al.* Environmental implications of the modern testate amoebae in the peatlands in Changbai Mountains [J]. Quaternary Sciences, 2009, 29(4): 817-824]
- 12 洪冰,刘丛强,林庆华,等. 哈尼泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的过去 14000 年温度演变[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2009,39:626-637 [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 China(Seri. D): Earth Science, 2009, 39: 626-637]
- 13 Stuiver M, and Reimer, P J. Extended ^{14}C database and revised CALIB radiocarbon calibration program[J]. Radiocarbon, 1993, 35: 215-230
- 14 国家海洋局. 海洋调查规范(第四分册——海洋地质调查)[M]. 北京:海洋出版社,1975:9-88 [State Oceanic Administration. Specifications for Oceanographic Survey (volume 4: Marine Geologic Survey)[M]. Beijing: Ocean Press, 1975: 9-88]
- 15 Link A G. Textural classification of sediments [J]. Sedimentology, 1966, 7(3): 249-254
- 16 SY/T 5434—1999,中华人民共和国石油天然气行业标准:碎屑岩粒度分析方法[S] [State Petroleum and Chemical Industry. Standards of petroleum and natural gas industry of the People's Republic of China, Method of grain-size analysis of clastic rocks[S]]
- 17 成都地质学院陕北队编. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社,1978 [Chengdu College of Geology, Shanbei team. Sedimentary Rock (Material) Particle-size Analysis and Its Application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978]
- 18 肖景义,陈建强,孙刚,等. 河北邯郸 HZ-S 孔第四纪沉积物粒度特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(1):54-59 [Xiao Jingyi, Chen Jianqiang, Sun Gang, *et al.* Grain-size characteristics of HZ-S Core Quaternary sediments in Handan City, Hebei province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(1): 54-59]
- 19 雷国良,张虎才,张文翔,等. 柴达木盆地察尔汗古湖贝壳堤剖面粒度特征及其沉积环境[J]. 沉积学报,2007,25(2):274-281 [Lei Guoliang, Zhang Hucui, Zhang Wenxiang, *et al.* Characteristics of grain-size and sedimentation of shell bar section in salt Lake Qarhan, Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 274-281]
- 20 黄臻,王建力,王勇. 长江三峡巫山第四纪沉积物粒度分布特征[J]. 热带地理,2010,30(1):30-39 [Huang Zhen, Wang Jianli, Wang Yong. Grain-size features of Quaternary sediments in Changjiang Three Gorge Reservoir of the Wushan area[J]. Tropical Geography, 2010, 30(1): 30-39]
- 21 李敬卫,乔彦松,王燕,等. 江西九江红土堆积的粒度特征及成因研究[J]. 地质力学学报,2009,15(1):95-103 [Li Jingwei, Qiao Yansong, Wang Yan, *et al.* Aeolian origin of the red earth formation in Jiujiang city of Jiangxi province, China: Evidence from grain-size analysis[J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(1): 95-103]
- 22 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,2006,12(6):864-869 [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, 12(6): 864-869]
- 23 Lerman A. Lakes—Chemistry, Geology, Physics [M]. Berlin:

- Springer-Verlag, 1978
- 24 孙永传,李惠生. 碎屑岩沉积相和沉积环境[M]. 北京:地质出版社,1986[Sun Yongchuan, Li Huisheng. *Clastic Sedimentary Facies and Sedimentary Environment* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986]
 - 25 施雅风. 中国全新世大暖期气候与环境[M]. 北京:海洋出版社, 1992 [Shi Yafeng. *The Holocene Megathermal Climate and Environment in China*[M]. Beijing: Ocean Press, 1992]
 - 26 宋长青,吕厚远,孙湘君. 中国北方花粉—气候因子转换函数建立及应用[J]. 科学通报, 1997, 42: 2182-2185 [Song Changqing, Lü Houyuan, Sun Xiangjun. Construction of pollen-climate factor transfer function and its application in North China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42: 2182-2185]
 - 27 崔美玲,罗运利,孙湘君. 吉林哈尼湖钻孔 5 000 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(5): 117-122 [Cui Meiling, Luo Yunli, Sun Xiangjun. Paleovegetational and paleoclimatic changes in Ha'ni Lake, Jilin since 5 ka B.P.[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(5): 117-122]
 - 28 喻春霞,罗运利,孙湘君. 吉林柳河哈尼湖 13.1~4.15ka 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): 929-938 [Yu Chunxia, Luo Yunli, Sun Xiangjun. A high-resolution pollen records from Ha'ni Lake, Jilin, Northeast China showing climate changes between 13.1 cal.ka B.P. and 4.5 cal.ka B.P.[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 929-938]
 - 29 周卫建,李小强,董光荣,等. 新仙女木期沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录——东亚季风气候颤动的实例[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 1996, 26(2): 118-124 [Zhou Weijian, Li Xiaoqiang, Dong Guangrong, *et al.* High-resolution peat record from the desert-loess transitional belt during the Younger Dryas Interval; An example of East Asian monsoon climatic fluctuations[J]. *Science China(Seri. D): Earth Science*, 1996, 26(2): 118-124]
 - 30 沈吉,吴瑞金,羊向东,等. 大布苏湖沉积剖面碳酸盐含量、氧同位素特征的古气候意义[J]. 湖泊科学, 1997, 9(3): 217-222 [Shen Ji, Wu Ruijin, Yang Xiangdong, *et al.* Paleoclimatic change inferred from $\delta^{18}\text{O}$ and carbonate content of the section in Dabusu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(3): 217-222]
 - 31 Dykoskia C A, Edwardsa R L, Cheng H, *et al.* A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 71-86
 - 32 萧家仪,吕海波,周卫健,等. 末次盛冰期以来江西大湖孢粉植被与环境演变[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2007, 37(6): 789-797 [Xiao Jiayi, Lü Haibo, Zhou Weijian, *et al.* Evolution of vegetation and climate since the last glacial maximum recorded at Dahu peat site, South China [J]. *Science China (Seri. D): Earth Science*, 2007, 37(6): 789-797]
 - 33 王志国. 吉林金川泥炭纤维素稳定碳同位素组成序列与东北季风区五千多年来的环境变迁[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(1): 52-54 [Wang Zhiguo. Reconstruction of past 5 000-year humidity changes of Northeast China using $\delta^{13}\text{C}$ values of peat cellulose in Jinchuan region, Jilin province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1998, 17(1): 52-54]
 - 34 李秉成,雷祥义,李正泽,等. 西安白鹿塬全新世黄土剖面磁化率的古气候特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2): 115-121 [Li Bingcheng, Lei Xiangyi, Li Zhengze, *et al.* Paleoclimate character of susceptibility of Holocene Loess section in Xi'an Bailuyuan[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 115-121]
 - 35 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学(B辑), 1973(2): 226-256 [Zhu Kezhen. Preliminary study on climate change over last 5000 years in China[J]. *Science China(Seri. B)*, 1973(2): 226-256]
 - 36 Mayewski, P A, Rohling E E, Stager J C, *et al.* Holocene climate variability[J]. *Quaternary Research*, 2004, 62(3): 243-255
 - 37 Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean[J]. *Nature*, 421: 354-357
 - 38 贾耀锋,庞奖励. 关中盆地东部李湾剖面全新世高分辨率气候研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(3): 39-43 [Jia Yaofeng, Pang Jiangli. The high resolution of the Holocene climatic study in Liwan profile in eastern Guanzhong Basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2003, 17(3): 39-43]
 - 39 唐领余,沈才明,李春海,等. 花粉记录的青藏高原中部中全新世以来植被与环境[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2009, 39(5): 615-625 [Tang Lingyu, Shen Caiming, Li Chunhai, *et al.* Pollen-inferred vegetation and environmental changes in the central Tibetan Plateau since 8200 yr BP [J]. *Science China(Seri. D): Earth Science*, 2009, 39(5): 615-625]
 - 40 Johnsen S, Dahl-Jensen D, Gundestrup N S, *et al.* Oxygen isotope and palaeotemperature records from six Greenland ice-core stations: Camp Century, Dye3, GRIP, GISP2, Renland and North GRIP [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16(4): 299-307

Grain-size Characteristics and Environmental Significance of Peat Ash in the West Foothill of Changbai Mountain

LI Nan-nan^{1,2} JIE Dong-mei^{1,2} YANG Jin-xiu^{1,2} CHEN Xue-song^{1,2}
CHEN Yu-jie^{1,2} HU Chu-tian^{1,2} QIAO Zhi-he³

(1. School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024;

2. Key Laboratory for Wetland Ecology and Vegetation Restoration, Ministry of Environmental Protection, Changchun 130024;

3. Daqing Normal University, Daqing, Heilongjiang 163712)

Abstract: In order to recognize the provenances, granularity characteristics of peat ash, and further reveal the paleo-environmental significance of peat ash. Two peat cores in Hani and Gushantun Peat-land in the west foothill of Changbai Mountain are collected. The results of grain size analysis show that the dominant size of peat ash is 1~350 μm . Which means peat ash is mainly composed of different kinds of silt. What is more, the majority probability cumulative curves for particle size distribution are with two sections. At the same time, frequency distribution curves show unimodal type (10~100 μm), bimodal type (10~100 μm , 100~1 000 μm). These show that the transportation ways of peat ash is suspension and saltation. And the grain sizes changed with the hydrologic condition in the peat land. In the dry season, the water power is weak and the peat ash content is relatively fine. But in the wet season, surface runoff carries the coarse particle into the swamp and deposits. Therefore, the peat ash can be used for rebuilding the evolution of paleo-precipitation and it can be a proxy for the summer monsoon. In addition, 9.2 ka, 8ka and 5ka drought events in Holocene are recognized from the grain size changing curve and the curve also reveals a "dry - wet - dry" cycle in the precipitation history. Because these events correspond to the famous cold events, so we may draw the conclusion that dry and cold, warm and wet may be matched in the process of climate change.

Key words: Changbai Mountain area; peat; grain-size; sedimentary facies; summer monsoon