

# 末次冰期以来松嫩盆地东部榆树 黄土堆积及其环境意义

殷志强<sup>1</sup> 秦小光<sup>2</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:**通过对松嫩盆地东部末次冰期以来榆树黄土剖面的粒度、磁化率等指标分析研究后认为:(1) 该地区的黄土至少于 4 万年前的末次冰期开始沉积, 沉积物类型为黄土与河流沙混合沉积, 粒度可有 4 个组分, 其中 46ka B.P. 以前主要是以第④组分为主导的水成河流沙, 46 ka B.P. 以后主要以第③组分为主的黄土粉尘。(2) 松嫩盆地东部的黄土粉尘主要来源于科尔沁、松嫩等西北广大沙地, 末次冰期是科尔沁等沙地大规模发育的时期。(3) 东北地区全新世气候演化可分成 5 个阶段: 10000 a B.P. 左右, 9000 a B.P. 左右, 6000 a B.P. 前后, 4500 a B.P. 左右, 2500 a B.P. 以后。

**关键词:**松嫩盆地; 黄土; 粒度特征; 环境意义

**中图分类号:** P534.63      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3657(2010)01-0212-11

## 1 黄土粒度、磁化率在古环境研究中的意义

中国黄土以其分布广泛、沉积连续、蕴含环境信息丰富而与深海沉积物、极地冰芯并称为全球变化研究的三大支柱。国内外学者运用地层学、地貌学、沉积学、土壤学、环境磁学、岩石学、矿物学、地球化学、古生物学等多学科的研究方法, 进行地层划分, 建立时间标尺, 分析气候指标, 提取环境信息, 探讨成因机制, 揭示了更新世甚至中新世以来气候变化的历史<sup>[1-13]</sup>。黄土粒度是黄土最重要的物理特性之一, 在古环境分析及气候重建等研究中占有十分重要的地位, 因其测定简单快速、物理意义明确、对气候变化反映敏感等优点而倍受研究人员青睐, 被广泛作为冬季风研究的替代性指标。指示东亚冬季风变迁的常用替代性指标主要有中值粒径(Md)、平均粒径、 $>30 \mu\text{m}$  粗颗粒百分含量<sup>[14]</sup>、 $>40 \mu\text{m}$  粗颗粒百分含量<sup>[15]</sup>等, 可见, 不同地区的粒度敏感指标可能不同。刘东生等<sup>[1]</sup>对中国黄河中游的 72 个马兰黄土样品的粒度分析表明, 自西北向东南方向依次为砂黄土带、

黄土带、粘化黄土带, 粒度逐渐变细。随着研究的深入, 丁仲礼等<sup>[15]</sup>对黄土高原中部的南北向大断面晚更新世黄土粒度系统分析后发现, 沙漠的进退是控制黄土沉积中粒度变化尤其是砂粒含量变化的一个重要指标, 并提出用风成沉积中砂粒百分含量的变化作为沙漠进退的一个代用指标, 建立了砂粒含量与沙漠距离的数学模型。孙东怀等<sup>[16-17]</sup>用 Weibull 分布作为黄土和河流沉积物的拟合函数, 对多成因的沉积物的粒度分布进行了多组分的分离。秦小光等<sup>[6, 18]</sup>研究发现风成成因的黄土主要由大气中的悬浮颗粒构成, 其存在粗、中、细 3 个组分, 表现为粒度直方图上的 3 个峰, 这 3 个组分是粉尘在搬运过程中动力选择的结果, 与风速、大气湍流强度和粉尘源区粒度分布有关。同时磁化率作为古气候的良好替代性指标得到了广泛的认识和应用, 其可以反映夏季风的强弱变化。研究表明, 中国黄土地层磁化率值与成壤作用呈现良好的正相关关系, 在经典的洛川和西峰黄土剖面中, 磁化率高值对应古土壤层, 低值则对应黄土层<sup>[19]</sup>。

研究人员通过对作为冬季风替代指标的黄土粒

收稿日期: 2009-04-18; 改回日期: 2009-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(40802089, 40472094, 40772212)资助。

作者简介: 殷志强, 男, 1980 年生, 硕士, 主要从事第四纪古环境研究; E-mail: yinzq@mail.cigem.gov.cn。

度、粉尘通量、碎屑石英粒度等,以及作为夏季风替代指标的磁化率、化学风化指数、碳酸盐含量等的研究表明,黄土-古土壤序列详细记录了亚洲季风形成和演化的历史<sup>[14-15,20-24]</sup>。黄土-古土壤序列所包含的古气候信息,为探索亚洲内陆干旱化的历史和进程、亚洲季风-沙漠系统的形成和演化、青藏高原的隆升和环境效应以及地球环境各圈层的相互作用等提供了重要的依据<sup>[15]</sup>。

笔者以中国东北地区的松嫩盆地东部的榆树黄土-沙剖面为研究对象,利用高分辨率激光粒度仪 MS2000 测试数据和磁化率仪 Bartington MS2 测试数据,采用图示与统计参数相结合的方法来讨论该剖面所反映的古气候信息以及末次冰期以来的区域地质环境演化历史。

## 2 样品和方法

### 2.1 研究区概况

松嫩盆地西临大兴安岭东麓的丘陵台地,北部和东部以小兴安岭和张广才岭外围的山麓、丘陵台地为界,南部是以松辽分水岭为主的隆起带。该盆地以周边的分水岭为界,包括盆地边缘的山区、低山丘陵区、山前倾斜平原、台地、平原和低平原<sup>[25-26]</sup>。西南部的大安-双辽深断裂,从白垩纪到中更新世的中晚期一直是中央拗陷的主轴。在早更新世、中更新世,盆地内两次形成的中央大湖均位于该构造轴上。中更新世晚期深断裂活动减弱,而 NW、EW 向的断裂活动加强,中央拗陷逐渐消失,中央大湖也随之收缩、消失<sup>[27-28]</sup>。松嫩盆地自晚更新世以来长期受气候冷暖波动、风沙侵袭,逐渐形成了冲-洪积物、冰碛物、风成砂和风成黄土等第四纪沉积物。其中风成黄土主要分布于盆地的东南部和东北部的吉林榆树、长春以及哈尔滨等地<sup>[29]</sup>。

进入末次冰期以来,盆地西部由于气候干冷,湖泊干枯,土地开始出现大面积的沙化,逐渐形成了科尔沁、松嫩等沙地,原来的湖泊沼泽湿地逐渐盐碱化,形成了盐碱地。在冬季风影响下,盆地的东部黄土-风成沙开始交替沉积。从全新世开始,气候进入温湿适宜期,科尔沁、松嫩和呼伦贝尔沙地等经历了多次气候波动,在沙地形成了多层古土壤<sup>[30-31]</sup>。近百年来,该地区人类活动逐渐加剧,生态环境不断恶化<sup>[32]</sup>。

### 2.2 样品采集

笔者以松嫩盆地东南部、第二松花江右岸的榆

树市五棵树南城子大东沟 (44°43'N,126°12'E) 黄土-沙剖面为研究对象(图 1),该剖面位于科尔沁沙地、松嫩沙地等的下风方向。取样深度为 3.05 m,共取样品 73 个,均进行了粒度和磁化率测试,其中 0~0.4 m 为 2 cm 间隔取样,取样 20 个;0.4~3.05 m 为 5 cm 间隔取样,取样 53 个。样品编号从顶部向下依次为 YS-1 至 YS-73。光释光年龄样品 2 个,分别位于 0.3~0.4 m 和 1.9~2.0 m 处,对应的年龄分别为 (6.6±0.7) ka B.P. 和 (41.4±7.2) ka B.P.。利用线性插值法估算距地表 2.2 m 和 3.1 m 处的地层年龄分别为 (46±1.2) ka B.P. 和 (65±1.2) ka B.P.,可见松嫩盆地东部的黄土至少于末次冰期开始沉积。

### 2.3 粒度测试与组分分离方法

样品粒度分析在中国科学院地质与地球物理研究所粒度分析实验室完成。前处理采用了较彻底的前处理方法<sup>[6,8,18]</sup>,然后用 Mastersiz2000 型激光粒度仪测试。该仪器测量范围是 0.02~2 000 μm,优点为测试精度高(误差<1%)、所需样品量少,数据连续、可靠、间隔划分细,能够全面分析粒度的细微特征,对测试数据进行整理和分析后可绘制出每一粒度组分的百分含量图、频率曲线图、粒度众数分布曲线图等。

沉积物粒度组分分布特征曲线中每一组分均属于对数正态分布类型<sup>[18,32-35]</sup>。因此笔者采用了正态分布函数对样品各组分进行了数学分离。用设定的分布函数对实测数据以各粒级的粒径为自变量,以该粒级的百分含量为分布函数值,以拟合权重残差最小为目标对样品进行了粒度频率曲线拟合,拟合误差均控制在 3% 以内(图 2)。并计算了样品中每个组分粒径的平均值、标准差、百分含量等粒度参数,从而将混合样品的各组分完全分离出来。对于多个组分组成的对数正态分布函数,其分布函数<sup>[35]</sup>应为:

$$F(\lg x) = \sum_{i=1}^n C_i \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i} e^{-\frac{(\lg x - \lg \alpha_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (1)$$

公式 (1)  $\alpha_i$  和  $\sigma_i$  分别为样品第  $i$  组分粒径的平均值和标准差, $C_i$  为第  $i$  组分百分含量占全样品的百分比。

根据大量现代环境表土样品分析,笔者确定一般细粒沉积物存在 4 个典型组分,如图 2。将其粒度组分从左至右依次标示为①②③④,分别命名为第①组分(Mode)、第②组分(Mode)、第③组分(Mode)、第④组分(Mode),表示为 1M、2M、3M、4M。其中:

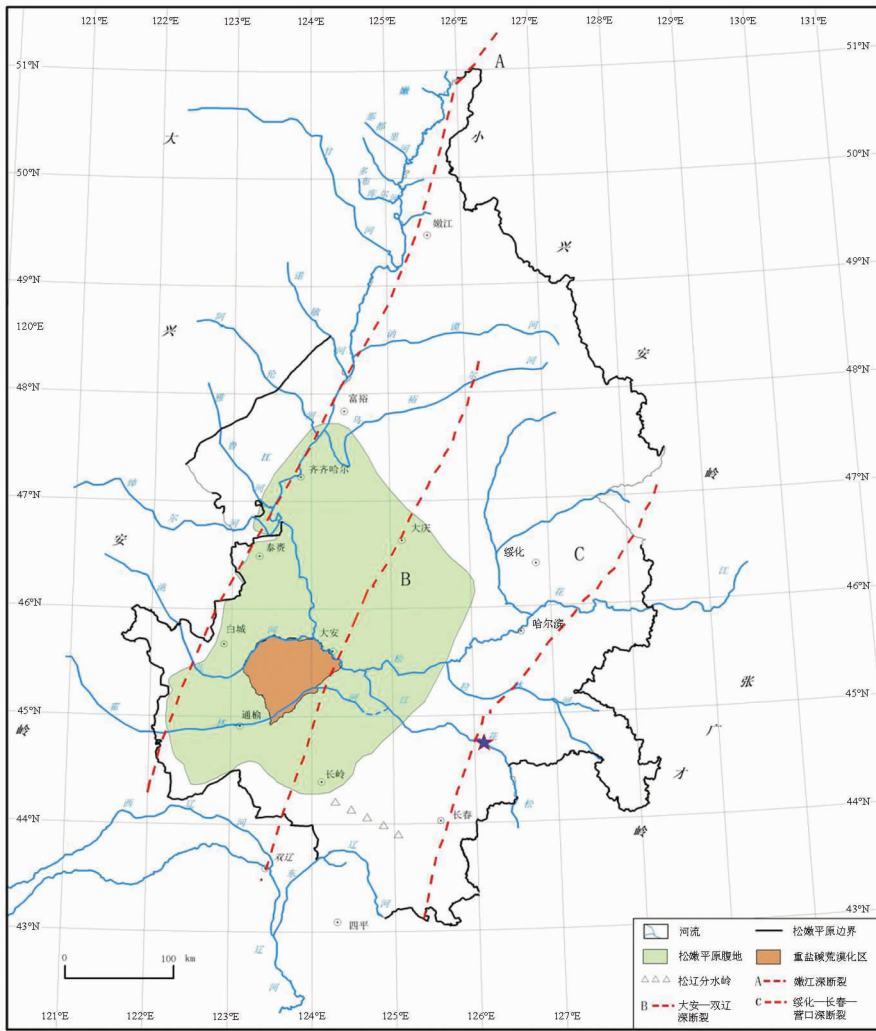


图 1 松嫩盆地环境地质略图(★为黄土剖面位置)

Fig.1 Sketch map of environmental geology of the Songnen Basin (★ indicating the location of loess section)

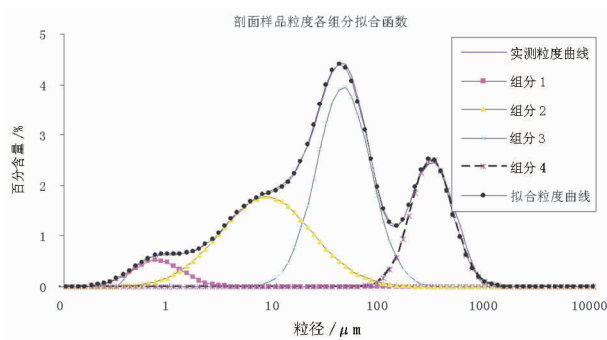


图 2 样品粒度各组分拟合图

Fig.2 Multimodal grain size distribution characteristics of samples

1M 中值粒径范围: $<1 \mu m$ , 是黄土粒度的细粒悬浮组分; 2M 中值粒径范围:  $1 \sim 10 \mu m$ , 是黄土粒度的中粒悬浮组分; 3M 中值粒径范围:  $10 \sim 70 \mu m$ , 是黄土粒度的粗粒悬浮组分; 4M 中值粒径范围:  $150 \sim 700 \mu m$ , 属于河流沙的跳跃和滚动组分。

### 3 剖面粒度特征与古环境分析

#### 3.1 粒度特征分析

将整个剖面样品的粒度分布特征按沉积序列作图(将曲线特征极其相似的样品取代表数据)。发现样品的粒度曲线分布特征在 YS-57(即距地表 2.2 m 处)处发生明显变化, 样品中值粒径从上到下由细变

粗(图 3-a),结合野外考察结果,现将该剖面的粒度特征分析以 2.2 m 为界,分为 3 部分讨论:

I 2.2~0 m:以风成黄土的粗粒悬浮组分(即第③组分)占主导优势,其中值粒径为 30~40 μm,河流沙的跳跃与滚动组分(即第④组分)含量较低。

剖面上部黄土组分占主导优势暗示末次冰期,尤其是 46 kaB.P. 以来该地区沉积了大量的黄土粉尘;而河流沙组分百分含量很低,表明这段时间以来黄土接受风力改造的程度较高。从 2.2~0 m 粗粒河流沙组分逐渐减少、风成黄土逐渐增加,可能暗示了该地区接受风力改造的程度逐步增强。

II 3.05~2.2 m:以河流沙的跳跃组分(即第④组分)为优势组分,其中值粒径在 150~700 μm,风成黄土的悬浮组分含量很低。

剖面 3.05~2.2 m 为第二松花江边河流沙的水成沉积物,该段剖面沉积物以水成的河流沙组分占主导优势,接受风力改造的程度有限。2.2 m 处可能有一次构造事件将河漫滩河流沙抬升到距今河床 100 多米的高度,才使河流沙暴露于空气中接受风力改造,并在其上部(0~2.2 m)堆积了一定的黄土

悬浮粉尘。

III 过渡部分(2.2 m)同时具有黄土与下伏河流沙相叠加的粒度分布特征,是水成河流沙沉积物接受风力改造和黄土粉尘堆积综合叠加的结果。三段剖面样品粒度曲线分布特征对比见图 3-b。根据公式(1),4 个组分的中值粒径、标准差、百分含量数据见表 1。该结果与图 2 中组分划分结果完全一致。

### 3.2 黄土剖面反映的古环境变化

#### 1) 磁化率曲线的变化特征

根据实验结果,该剖面沉积物样品的低频磁化率值为  $23.06 \times 10^{-8} \sim 147.01 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,平均值为  $85.70 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,频率磁化率最大值出现于 YS-71 (2.95m)(图 4)。从磁化率曲线可以看出,低频磁化率曲线在 YS-30(0.90 m)-YS-73(3.05 m)比较平稳,呈现小幅度的高低振荡,唯有 YS-71(2.95 m)处磁化率异常。而 YS-30 (0.9 m) -YS-14(0.28 m)低频磁化率开始大幅度升高,0.28~0 m 磁化率开始波动但波动范围不大。

由于黄土磁化率能够指示东亚夏季风的相对强弱变化,磁化率高则指示东亚夏季风强盛和气候湿

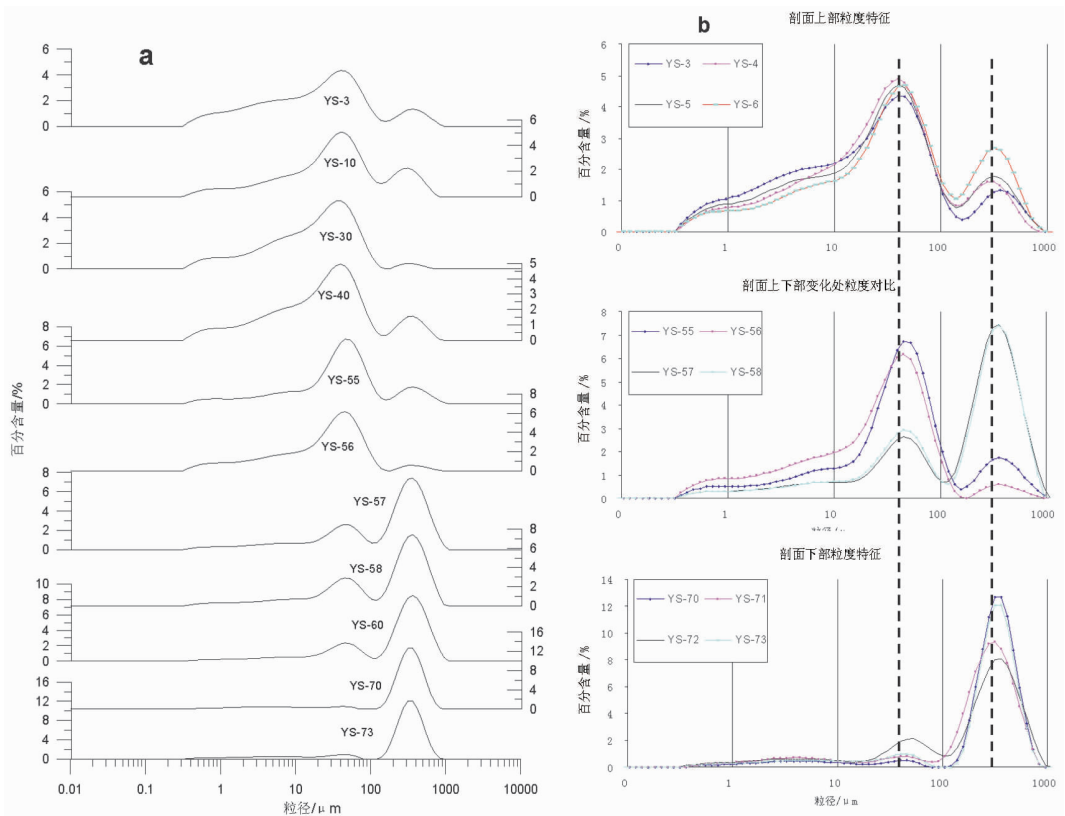


图 3 样品粒度特征分布图(a—变化趋势;b—对比)

Fig.3 Multimodal grain size distribution characteristics of samples (a—variation trend;b—contrast)



表1 榆树剖面沉积物粒度各组分参数

Table 1 Parameters of multimodal grain size in Yushu loess section

编号	1M			2M			3M			4M		
	Md	$\sigma$	%	Md	$\sigma$	%	Md	$\sigma$	%	Md	$\sigma$	%
YS-3	0.80	3.75	6.50	5.76	7.50	38.5	40.8	4.50	45.00	370.1	3.00	10.0
YS-4	0.81	3.75	5.50	6.52	7.00	30.0	38.6	4.75	53.25	309.4	2.75	11.3
YS-5	0.76	3.75	5.50	5.53	7.25	31.0	39.7	4.50	49.00	322.4	3.25	14.5
YS-6	0.73	3.75	5.00	6.01	6.75	24.0	41.9	4.50	50.25	313.7	3.00	20.8
YS-55	0.84	4.25	5.50	7.80	6.25	19.25	46.80	3.75	62.00	391.0	3.00	13.3
YS-56	0.83	4.25	7.75	7.28	7.00	30.50	43.10	4.00	57.75	391.1	2.75	4.0
YS-57	0.76	3.75	2.00	7.39	8.00	13.25	48.12	3.75	22.75	360.0	3.25	62.0
YS-58	0.71	3.75	2.25	8.60	8.25	14.25	46.81	3.50	23.00	350.2	3.25	60.5
YS-70	0.64	3.50	0.50	4.25	7.75	9.25	41.91	2.50	3.00	331.3	2.75	87.3
YS-71	0.64	3.25	1.00	3.97	6.75	12.00	39.11	2.75	5.25	309.2	3.50	81.8
YS-72	0.61	3.50	1.25	4.03	8.25	13.25	50.85	3.50	17.75	345.4	3.25	67.8
YS-73	0.60	2.75	0.75	5.53	10.00	13.50	43.69	2.75	5.50	326.9	2.50	80.3

注: Md—中值粒径,  $\sigma$ —标准差, %—百分含量。

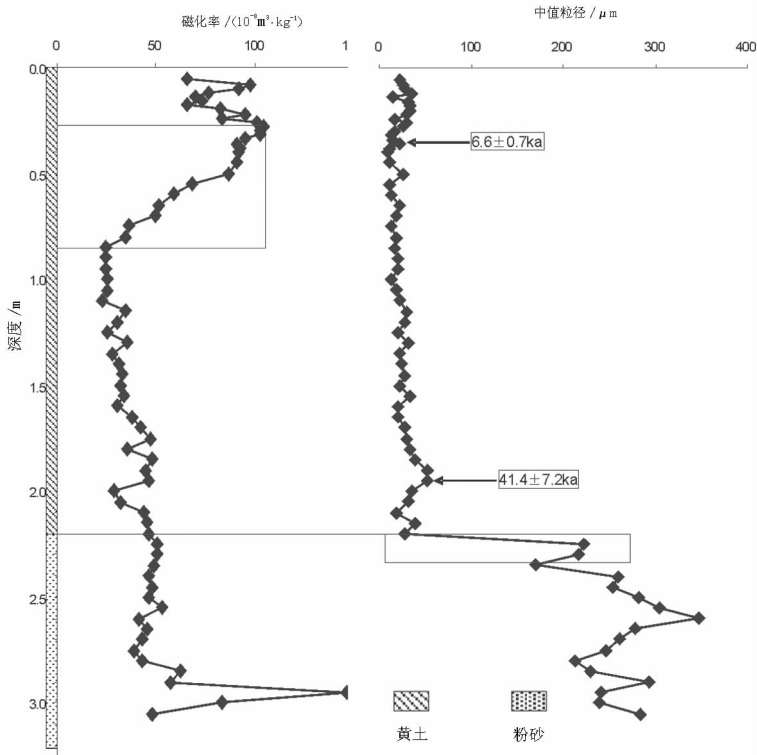


图4 样品磁化率、中值粒径分布图

Fig.4 Magnetic susceptibility and median grain size distribution of samples

热,气温相对较高;磁化率低则指示东亚夏季风弱和气候干冷,气温相对较低<sup>[9]</sup>。从剖面底部 2.2 m 到 0.85 m 处磁化率曲线总体呈下降趋势,可能指示气候逐渐向冷干方向变化,夏季风逐渐减弱,温度随之降低;0.85~0.3 m 磁化率曲线迅速升高,表明 16 ka B.P.以后气候逐渐由干冷向温暖湿润转变,夏季风

增强,气温回升,植被、泥炭沉积和古土壤发育。0.3~0 m 磁化率曲线开始反复波动,可能指示近 3000 a 以来该地区气候反复波动,即气候呈现冷干—暖湿—冷干的变化过程,松嫩盆地东部气温普遍开始下降,植被有所退化,降水明显减少,升温导致蒸发量加大,风沙发育,沙化加剧,出现风沙堆积,成为现代的

半干旱型气候,这与前人的研究成果是一致的<sup>[36-40]</sup>。

## 2) 粒度各组分百分含量变化特征

为进一步分析剖面粒度分布特征所反映的古环境变化,利用粒度组分分离方法<sup>[33-34]</sup>,笔者对剖面所有样品进行了粒度组分分离,分离后 4 个组分的百分含量分布曲线见图 5。

由图 5 粒度各组分百分含量分析,在 2.2~0 m (46 ka B.P.~0 ka B.P.) 内 4 个组分均呈现反复波动的趋势,但第①②③与第④粒度组分百分含量在 2.2~3.05 m 差异明显,属于黄土粉尘的 3 个粗、中、细悬浮组分百分含量均呈增加趋势,而属于河流沙的跳跃和滚动组分(第④组分)百分含量则明显下降。由于黄土粒度第③组分百分含量可以反映源区距离的变化<sup>[18,34]</sup>,第③组分百分含量高反映黄土源区距离则近,反之则远。根据这一规律,可以推测,距今 46 ka B.P.~65 ka B.P. 时期,该地区黄土粉尘百分含量逐渐增加,暗示源区沙漠逐渐逼近,而其源区很可能是西部的科尔沁沙地、松嫩沙地、呼伦贝尔沙地以及蒙古国及西伯利亚沙漠、戈壁等地,因此,可以说末次冰期是科尔沁、松嫩沙地等大规模发育的时期。样品各组分百分含量在 46 ka B.P.(2.2 m) 处发生突

变,整个样品的中值粒径在 2.2 m 处也突然变细,综合对沉积相的野外考察,可以推测在 46 ka B.P. 有一次地质构造事件,将原本属于河流沉积物的河流沙抬升暴露出地面,开始接受风力改造,源区沙漠小幅波动中相对稳定,但大趋势上有逐渐退缩迹象。最近 3000 a 以来,该地区环境恶化,黄土与河流沙混合沉积,反映出气候不稳定特点,此现象在科尔沁和东北其他地方均可见。

## 4 松嫩盆地全新世环境演变

末次冰期极盛期结束后,便进入了全新世,气候逐渐变暖。全新世早期(11 000~7500 a B.P.),松嫩盆地受到蒙古高压的控制,北风和西北风仍然强劲,形成风沙流,使晚更新世形成的沙丘开始活化。冰雪融化,水系发育,河流径流量增大,逐渐形成了冲-洪积物,沉积层中出现了泥炭。榆树剖面反映 3000 a B.P. 以后气候逐渐恶化、波动增加、干旱化程度加剧,与该地区其他剖面所反映的古环境特征(气候变冷、泥炭增加、风沙加强等)相一致。

综合前人资料<sup>[36-48]</sup>和本文研究成果,笔者将该地区及周边地区全新世以来古环境变化指标进行了对比分析,图 6 是全新世各类沉积物记录的古气候变化对比图。研究发现东北地区全新世气候演化可分成 5 个阶段:

第一阶段:末次盛冰期结束后,伴随全球增温,气候进入冰消期,但本区这时气候、气温仍然偏低,导致湿度大,蒸发小,湖泊水位高,湖面大,并持续到全新世早期,形成了早期的泥炭沉积,在西部各沙地相继发育了古土壤层。

第二阶段:9000 a B.P. 左右开始各地迅速升温,但降水可能没有显著增加,东部和北部由于降水量较丰沛,植被发育较好,很快就进入高温适宜期,而西部由于降水较少,升温导致蒸发量加大,造成湖面水位下降,沙化加剧。

第三阶段:6000 a B.P. 前后,气温维持高温,同时降水显著增加,东部长白山、北部小兴安岭、三江等地继续保持较好的森林植被生长,北部平原区开始出现大面积森林覆盖,黑土地开始形成。而西部不仅出现高湖面,而且在沙地广泛形成古土壤层。5000 a B.P. 左右的降温事件可能造成了长白山泥炭的加快积累,为本区气候最为适宜的时期。

第四阶段:在 4500 a B.P. 左右以后,各地气温普

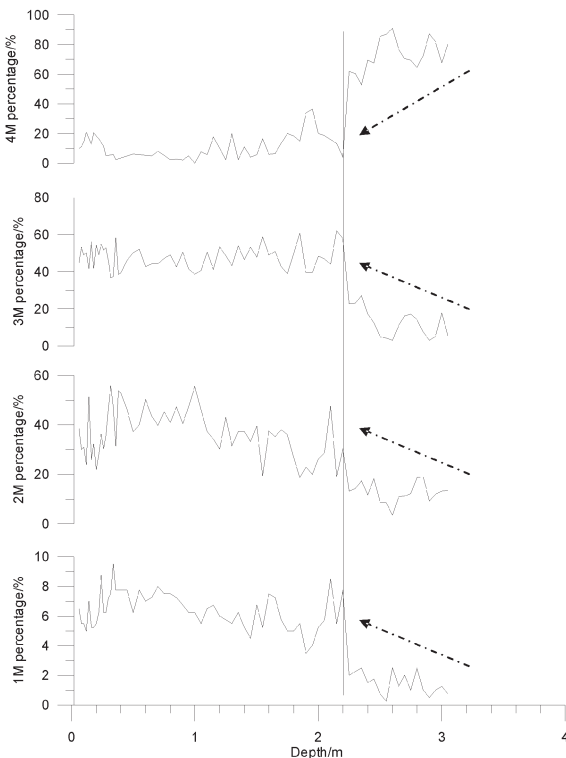


图 5 样品各组分百分含量图

Fig.5 Multimodal percentage of samples



遍开始下降,东部植被有所退化,以降温为特点。而西部沙地湖面下降,出现风沙堆积。湖面下降,晚期可能由于蒸发量的减少,使得有效湿度较大,沙区又发育了一期古土壤。

第五阶段:大约 2500 a B.P.以后,不仅气温较低,降水也明显减少,东部以冷湿为特点,而西部湖面下降、风沙发育,成为半干旱气候。这个时期还存在着明显的百年尺度气候波动,中世纪温暖期和小冰期都有显示,距今约 1000 年前的半湿润气候形成了西部沙地古土壤层和湿地泥炭层。

## 5 结 论

通过对松嫩盆地东部末次冰期以来黄土剖面的研究,本文主要取得了以下初步认识:

(1)该地区的黄土至少于 4 万年前的末次冰期开始沉积,46 ka B.P.左右有一次构造抬升活动。沉积物类型为黄土与河流沙混合沉积,粒度可有 4 个组分,其中 46 ka B.P.以前主要是以第④组分为主导的水成河流沙,46 ka B.P.以后主要以第③组分为主导的黄土粉尘。

(2)松嫩盆地东部的黄土粉尘主要来源于科尔沁、松嫩等西北沙地,末次冰期是科尔沁、松嫩等沙地大规模发育的时期。最近 3000 a 以来,该地区环境恶化,黄土与河流沙混合沉积,气候不稳定性增加,此现象在科尔沁沙地和东北等其他地方均可见。

(3)东北地区全新世气候演化可分成 5 个阶段:10000 a B.P. 左右,9000 a B.P. 左右,6000 a B.P.前后,4500 a B.P.左右,2500 a B.P.以后。

## 参考文献(References):

[1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社, 1985:191-207.  
Liu Tungsheng. Loess and Environment [M]. Beijing: Science Press, 1985:191-207(in Chinese).

[2] 鹿化煜, 安芷生. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义 [J]. 中国科学(D 辑), 1998, 28(3):278-283.  
Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of loess-paleosol deposit in Chinese Loess Plateau[J]. Science in China (Series D), 1998, 28(3):278-283(in Chinese with English abstract).

[3] An Z S, Kutzbach J E, Prell W, et al. Evolution of Asian monsoons and phased up lift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times[J]. Nature, 2001, 411: 62-66.

[4] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z. Onset of Asian desertification by 22Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. Nature, 2002, 416(14):159-163.

[5] Pan B T, Burbank D, Wang Y X. A 900ky record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China [J]. Geology, 2003, 30 (11):957-960.

[6] 秦小光, 蔡炳贵, 刘东生. 氧同位素第 3 阶段时期东亚季风区大气湍流特征[J]. 第四纪研究, 2003, 23(1):31-40.  
Qin Xiaoguang, Cai Bingui, Liu Tungsheng. Characteristics of atmospheric turbulence in the eastern Asian monsoon area during MIS 3[J]. Quaternary Science, 2003, 23(1):31-40(in Chinese with English abstract).

[7] 岳乐平, 杨利荣, 李智佩. 西北地区干枯湖床沉积粒度组成与东亚沙尘天气[J]. 沉积学报, 2004, 22 (2):325-331.  
Yue Leping, Yang Lirong, Li Zhipei. Grain-size distribution of the sediments of dry lake bed in the northwest of China and sand dust weather in East Asia [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22 (2): 325-331 (in Chinese with English abstract).

[8] 鹿化煜, 安芷生. 洛川黄土粒度组成的古气候意义 [J]. 科学通报, 1997, 42(1):66-69.  
Lu Huayu, An Zhisheng. Paleoclimatic significance of grain size of Luochuan Loess deposit in Chinese Loess Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42 (1):66-69 (in Chinese with English abstract).

[9] 谢远云, 张序强, 何葵, 等. 青藏高原东北缘黄土粒度组成及物质来源分析[J]. 中国地质, 2002, 30(3):317-321.  
Xie Yuanyun, Zhang Xuqiang, He Kui, et al. Grain-size distribution and material source analysis of loess on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geology in China, 2002, 30(3):317-321(in Chinese with English abstract).

[10] 李福春, 谢昌仁, 金章东, 等. 南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学和磁化率与古气候变化的关系 [J]. 中国地质, 2003, 30(1): 93-98.  
Li Fuchun, Xie Changren, Jin Zhangdong, et al. Rubidium and strontium geochemistry in the Laohushan loess section, Nanjing, and relation between magnetic susceptibility and paleoclimatic change[J]. Geology in China, 2003, 30(1):93-98(in Chinese with English abstract).

[11] 谢远云, 李长安, 周嘉, 等. 陇西民和黄土 CaCO<sub>3</sub> 和有机碳总量的含量变化及其气候指标的局限性 [J]. 中国地质, 2003, 30(1): 99-104.  
Xie Yuanyun, Li Chang'an, Zhou Jia, et al. Variations of the CaCO<sub>3</sub> and total organic carbon contents in the Minhe loess and their limitations as climatic proxies[J]. Geology in China, 2003, 30 (1):99-104(in Chinese with English abstract).

[12] 谢远云, 李长安, 张序强, 等. 青藏高原东北缘黄土的气候演化与高原隆生的耦合[J]. 中国地质, 2003, 30(4):436-441.  
Xie Yuanyun, Li Chang'an, Zhang Xuqiang, et al. Climatic evolution of loess on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and its coupling with plateau uplift [J]. Geology in China, 2003, 30(4):436-441(in Chinese with English abstract).

[13] 辛良杰. 张夏黄土组成特征及其成因分析 [J]. 中国地质, 2005, 32(1):55-61.



- Xin Liangjie. Characteristics of the composition of the Zhangxia loess and its origin [J]. *Geology in China*, 2005, 32 (1):55-61 (in Chinese with English abstract).
- [14] 汪海滨, 陈发虎, 张家武. 黄土高原西部地区黄土粒度的环境指示意义[J]. *中国沙漠*, 2002, 22(1):21-26.  
Wang haibin, Chen Fahu, Zhang Jiawu. Environmental significance of grain size of loess-paleosol sequence in western part of Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(1):21-26(in Chinese with English abstract).
- [15] 丁仲礼, 孙继敏, 刘东生. 联系沙漠-黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. *中国科学(D辑)*, 1999, 42(2):146-152.  
Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentological proxy indicator linking changes in loess and deserts in the Quaternary[J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42(2):146-152 (in Chinese).
- [16] 孙东怀, 鹿化煜, David Red. 中国黄土粒度双峰分布及古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 18 (3):327-335.  
Sun Donghuai, Lu Huayu, David Red. Bimode grain -size distribution of Loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (3):327-335 (in Chinese with English abstract).
- [17] 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3):269-276.  
Sun Donghuai, An Zhisheng, Su Ruixia. Mathematics method and its application of Grain -size distribution of paleo -environment sediments[J]. *Progress in Natural Sciences*, 2001, 11(3):269-276(in Chinese with English abstract).
- [18] 秦小光, 吴金水, 蔡炳贵. 全新世时期北京-张家口地区与黄土高原地区风成系统的差异[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4):430-436.  
Qin Xiaoguang, Wu Jinshui, Cai Bingui. The difference between dust-transporting wind systems of Beijing-Zhangjiakou area and the loess plateau since the LGM [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24 (4):430-436(in Chinese with English abstract).
- [19] 刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(3):210-216  
Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng, et al. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 210-216 (in Chinese with English abstract).
- [20] Xiao J L, Porter S C, An Z S. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the Loess Plateau of central China during the last 130,000yr [J]. *Quaternary Research*, 1995, 43: 22-29.
- [21] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L. Stacked 2.6 Ma grain size record from the Chinese Loess based on five section and correlation with the deep-sea  $\delta^{18}\text{O}$  record[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 725-756.
- [22] Qin X G, Cai B G, Liu T S. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60 000 years before present [J]. *Journal of Geophysics Research*, 2005, 110(10): 1029.
- [23] Qin X G, Mu Y, Ning B, et al. Climate effect of dust aerosol in southern Chinese Loess Plateau over the last 140,000 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 36(10):2707-2711.
- [24] 徐树建, 潘保田, 李琼, 等. 陇西盆地末次冰期黄土粒度特征及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4):306-307.  
Xu Shujian, Pan Baotian, Li Qiong, et al. Environmental significance and characteristics of grain size of the loess in Longxi basin during the last glacial period [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4):306-307 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张殿发, 林年丰. 松嫩平原生态地质环境变迁构造-气候旋回机制探讨[J]. *世界地质*, 2000, 19(1):73-74.  
Zhang Dianfa, Lin Nianfeng. A preliminary study on the neotectonism and climate cycle mechanism of environment evolvement in the Songnen Plain since the Quaternary [J]. *World Geology*, 2000, 19(1):73-74 (in Chinese with English abstract).
- [26] 林年丰, 汤洁. 松嫩平原环境演变与土地盐碱化、荒漠化的成因分析[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(4):474-477.  
Lin Nianfeng, Tang Jie. Study on the environment evolution and the analysis of causes to land salinization and desertification in Songnen plain [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25 (4):474-477 (in Chinese with English abstract).
- [27] 孙广友. 松嫩平原中部第四纪地壳运动与平原发育——兼论松嫩平原分水岭的形成[C]//“东北平原第四纪自然环境形成与演化”课题组编. *中国东北平原第四纪自然环境形成与演化*. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 1991:44-50.  
Sun Guangyou. Quaternary diastrophic movement and the development of the middle of Songnen plain with the study on its watershed's formation [C]// “The Formation and Evolvement of Quaternary Natural Environment in Northeast Plain of China” Workgroup ed. *The Formation and Evolvement of Quaternary Natural Environment in Northeast Plain of China*. Harbin: Harbin Publishing House, 1991:44-50(in Chinese).
- [28] 李取生, 邓伟, 钱贞国. 松嫩平原西部盐沼的形成与演化 [J]. *地理科学*, 2000, 20(4):362-367.  
Li Qusheng, Den Wei, Qian Zhengguo. Study on the formation and changes of saline-alkaline mire in Songnen Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20(4):362-367 (in Chinese with English abstract).
- [29] 吴锡浩, 浦庆余, 钱方. 松辽平原第四纪磁性地层的初步研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1984, 4(2):1-12.  
Wu Xihao, Pu Yuqing, Qian Fang. Preliminary study on the Quaternary magnetostratigraphy of the Songliao plain in north-east China[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1984, 4(2):1-12 (in Chinese with English abstract).
- [30] 裘善文, 夏玉梅, 任佩芳. 松嫩平原更新世地层及其沉积环境研究[C]//“东北平原第四纪自然环境形成与演化”课题组编. *中国东北平原第四纪自然环境形成与演化*. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 1991:1-11.  
Qiu Shanwen, Xia Yumei, Ren Peifang. Study on the

- aggradational environment of Pleistocene stratum in Songnen plain [C]// “The Formation and Evolvement of Quaternary Natural Environment in Northeast Plain of China” Workgrouped. The Formation and Evolvement of Quaternary Natural Environment in Northeast Plain of China [M]. Harbin:Harbin Publishing House, 1991:1-11(in Chinese).
- [31] 夏玉梅, 汪佩芳. 松嫩平原晚第三纪—更新世孢粉组合及古植被与古气候的研究[J]. 地理学报, 1987, 42(2):166-173.  
Xia Yumei, Wang Peifang. The paleobotany and paleoclimate in the Songnen plain: a study on the late tertiary—pleistocene spore pollen assemblages[J]. Acta Geographica Sinica, 1987, 42(2):166-173 (in Chinese with English abstract).
- [32] 刘嘉麒. 东北地区水土资源配置、生态环境建设及其可持续发展战略研究—自然历史卷[M].北京: 科学出版社, 2006, 3-4.  
Liu Jiaqi. The Allocation of Water and Soil Resources, ecological Environment and its Sustainable Development Strategy Research—Natural History Volumes in Northeast China[M]. Beijing:Science Press, 2006, 3-4(in Chinese).
- [33] 殷志强, 秦小光, 吴金水. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(2):334-342.  
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Wu Jingshui. The multimodal grain-size distribution characteristics and its formation mechanism of lake sediments[J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(2):334-342 (in Chinese with English abstract).
- [34] 殷志强, 秦小光, 李玉梅, 等. 源区距离对黄土粒度多组分分布特征的影响[J]. 中国地质, 2008, 35(5):1037-1042.  
Yin Zhiqiang, Qin Xiaoguang, Li Yumei, et al. Influence of the dust source distance on the multimodal grain-size distribution characteristics of loess [J]. Geology in China, 2008, 35 (5):1037-1042 (in Chinese with English abstract).
- [35] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中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)343-348.  
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):343-348 (in Chinese with English abstract).
- [36] 叶永英, 严富华, 麦学舜. 东北三江平原几个钻孔剖面的孢粉组合分析及其意义[J]. 地质科学, 1983, 3:259-164.  
Ye Yongying, Yan Fuhua, Mai Xueshun. The sporo-pollen assemblages in three well logs from three-river plain, northeast China and their geological significance [J]. Chinese Journal of Geology, 1983, 3:259-164 (in Chinese with English abstract).
- [37] 马学慧, 夏玉梅, 王瑞山. 我国泥炭形成时期的探讨 [J]. 地理研究, 1987, 6(1):31-41.  
Ma Xuehui, Xia Yumei, Wang Ruishan. A study of the peat-forming periods in China [J]. Geographical Research, 1987, 6(1): 31-41 (in Chinese with English abstract).
- [38] 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):495-509.  
Liu Jinling. Vegetation and climatic changes at Gushantun bog in Jilin, northeast China since 13000 a. B. P. [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1989, 28(4):495-509 (in Chinese with English abstract).
- [39] 朱士光. 历史时期我国东北地区的植被变迁[J]. 中国历史地理论丛, 1992, 4:105-119.  
Zhu Shiguang. Vegetation changes of historical period in northeastern China [J]. Collections of Essays on Chinese Historical Geography, 1992, 4:105-119 (in Chinese with English abstract).
- [40] Ren G Y, Zhang L S. A preliminary mapped summary of Holocene pollen data for Northeast China [J]. Quaternary Science Review, 1998, 17:669-688.
- [41] 冷雪天, 王升忠, 王树生. 关于高位泥炭形成时代的研究 [J]. 东北师范大学报(自然科学版), 1997, 3:104-107.  
Leng Xuetian, Wang Shengzhong, Wang Shusheng. On the forming time of high-level peat [J]. Journal of Northeast Normal University (natural science edition), 1997, 3:104-107 (in Chinese with English abstract).
- [42] 李永化, 尹怀宁, 张小咏, 等. 东北地区 5000a.B.P.~4700a.B.P.左右的降温事件及对考古文化的影响 [J]. 云南地理环境研究, 2003, 15(1):12-15.  
Li Yonghua, Yin Huaining, Zhang Xiaoyong, et al. Temperature drop at about 5000 a.B.P.~4700 a.B.P. in northeast of China and effect on archaeological culture [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2003, 15 (1):12-15 (in Chinese with English abstract).
- [43] 裘善文, 李取生, 夏玉梅. 东北平原西部沙地古土壤与全新世环境变迁[J]. 第四纪研究, 1992, 3:224-227.  
Qiu Shanwen, Li Qusheng, Xia Yumei. Paleosols of sandy lands and environmental changes in the western plain of northeast China during Holocene [J]. Quaternary Sciences, 1992, 3:224-227 (in Chinese with English abstract).
- [44] 宋海远, 夏玉梅. 三江平原古冰丘泥炭地[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1):76-77.  
Song Haiyuan, Xia Yumei. Fossil-pingo lake peatlands in the Sanjiang Plain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1):76-77 (in Chinese with English abstract).
- [45] 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[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(1):74-78.  
Yang Yongxing. Study on formation and development of forest swamp and paleo-environment change since the Holocene in the east part of the Xiaoxinganling mountains [J]. Oceanologia Environmental Limnologia Sinica, 2003, 34(1):74-78 (in Chinese with English abstract).
- [46] 张振克, 王苏民. 13 ka 以来呼伦湖湖面波动与泥炭发育、风沙—古土壤序列的比较及其古气候意义 [J]. 干旱区资源与环境, 2000, 14(3):56-59.  
Zhang Zhenke, Wang Sumin. Paleoclimate significance of lake level fluctuation, peat development and eolian sand-paleo-soil series in Hulun lake area during past 13 ka [J]. Journal of arid land

- resources and environment, 2000, 14 (3):56-59 (in Chinese with English abstract).
- [47] 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 Hongyan, Leng Xuetian, Wang Shengzhong. Distribution, accumulation rate of peat in the Changbaishan Mountains and climate change in Holocene [J]. Journal of Mountain Research, 2002, 20(5):513-518 (in Chinese with English abstract).
- [48] 许清海, 王子惠, 徐全洪, 等. 长白山岳桦林带泥炭沼泽抱粉分析及其意义[J]. 地理科学, 1994, 14(2):186-191
- Xu Qinghai, Wang Zihui, Xu Quanhong, et al. Pollen analysis of peat marsh in birch forest, the Chang Bai Mountains and the significance [J]. Scientia Geographica Sinica, 1994, 14(2):186-191 (in Chinese with English abstract).

## The Yushu loess deposition in eastern Songnen Basin since the last glacial period and its environmental significance

YIN Zhi-qiang<sup>1</sup>, QIN Xiao-guang<sup>2</sup>

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Magnetic susceptibility and grain-size distribution of the loess-river sand profile in eastern Songnen plain of northeastern China since the last glacial period were analyzed, and the paleo-environmental history of this region was investigated. The results demonstrate that: 1) the loess deposition of eastern Songnen plain occurred at least 46 ka B.P., i.e., at the last glacial period. There exist four modes of grain size distribution of sediments, which have been mixed with loess and river sand. The mode of river sand sediments (④) was dominant at 46 ka B.P., and the mode of loess dust (③) was dominant after 46 ka B.P. In the past 3000 years, the climate became drier and more deserts were activated in the eastern part of Songnen basin; 2) the loess dust of eastern Songnen basin mainly came from the Keerqin desert, the Songnen desert and other large deserts in northwest areas, and the Keerqin desert was extensively developed in the last glacial period; 3) there was a tectonic movement 40 ka B.P. in Songnen basin, and after this movement, loess dust was deposited in Yushu area with the development of the keerqin desert; 4) the climate evolution of northeastern China in Holocene can be divided into five stages, being respectively about 10000 a B.P., some 9000 a B.P., around 6000 a B.P., 4500 a B.P. and 2500 a B.P. in age.

**Key words:** Songnen plain; loess deposition; grain-size distribution characteristics; environmental significance

**About the first author:** YIN Zhi-qiang, male, born in 1980, master, mainly engages in the study of Quaternary geology; E-mail: yinzq@mail.cigem.gov.cn.