

文章编号: 1000-0585(2002)02-0201-09

辽南滨海黄土粒度环境信息高分辨率研究

李雪铭^{1,2}

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘要: 对辽南滨海黄土粒度研究证明, 滨海黄土是在第四纪冰期寒冷气候下的产物, 但是, 由于滨海黄土所处靠近沿海的地理位置使得这种黄土的形成机制具有独特性。冰期时渤海湾西岸海面下降出露的冲洪积物和海底砂是滨海黄土除西北内陆地区以外的另一重要物源, 搬运以风砂跃移方式进行。滨海黄土的粒度中包涵了丰富的有关渤海湾海面变化的信息。

辽南滨海黄土剖面中的粒度拟合值、 $2-3\Phi$ 粒级百分含量反映了渤海的海退、海侵过程和末次冰期蒙古高压的强弱, 这种变化与滨海黄土 3 个孢粉组合带所反映的古气候环境相吻合, 同邻近地区的海面升降变化和深海岩芯氧同位素阶段也存在良好的对应关系, 滨海黄土粒度的拟合度是本区古环境变化的重要的替代指标。

关键词: 滨海黄土; 粒度; 辽南

中图分类号: P931.6 **文献标识码:** A

环渤海湾的辽东半岛、庙岛群岛、胶东半岛黄土(我们称之为“滨海黄土”)堆积时受到当时欧亚大陆东部沿海自然地理环境的影响, 与内陆地区典型中国黄土相比有其独特性。近几年来, 对这种滨海黄土的研究日益得到重视^[1~3,5,6], 研究滨海黄土对于了解我国东部沿海, 特别是第四纪黄渤海陆架沙漠化过程及环境变化具有十分重要的实践意义。在自然界, 不同的沉积环境和沉积机制形成的沉积物具有各自的粒度分布。尽管研究环境变化手段多样^[4], 但沉积物粒度分布特征一直是区别沉积物类型、分析沉积作用机制、恢复沉积环境的最基本研究方法之一, 长期以来受到国内外沉积学家们的重视。特别是黄土的粒度是黄土环境高分辨率运用研究中较早、较为成功的古气候环境变化(特别是在指示亚洲冬季风强度方面)最重要的替代指标之一。本文主要根据辽南地区的滨海黄土粒度数据, 引入粒度拟合度概念, 运用因子分析方法, 结合滨海孢粉资料等其它手段试图探讨环渤海湾地区末次冰期以来古环境变化。

1 滨海黄土的粒度组成及成因

1.1 剖面地层

滨海黄土分布具有极为明显的坡向性, 主要披覆在面临渤海湾的低山丘陵的滨海地带、坡麓沟谷、低洼谷地及河流高阶地上, 而黄海一侧几乎未见分布(图 1)。辽东半岛南部地区的滨海黄土剖面出露多处, 平均厚度 3~15m。位于大连市夏家河子村砖厂附近

收稿日期: 2001-09-08; 修订日期: 2002-01-10

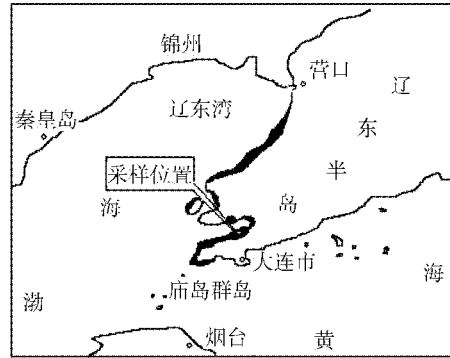
基金项目: 国家自然科学基金项目(40171009); 辽宁省教育厅高等学校科学研究项目(20042100)

作者简介: 李雪铭(1964-), 男, 江苏常熟人, 副教授, 博士研究生。主要从事地貌与第四纪教学与科研工作。

的海滨案子山山前坡麓的黄土剖面（图 2），出露厚度 8.5m，分上下二层，上层高 7.5m，呈灰黄色，结构疏松，多气孔，垂直节理发育，属于马兰黄土；下层高 1m，未见底，呈红棕色，质地均匀粘重，无层理，局部受铁锰侵染可见网状黑斑，与黄土高原黄土对应，属离石黄土。

1.2 粒度组成

在原先工作的基础上^[7]，对马兰黄土剖面加密采样，以 0.2m 的间隔共采集了 40 个黄土粒度样品，运用筛析法和日本产光透式离心粒度分析仪进行分析，结果见表 1（采用 Vdden-Wentworth 分类法和矩值法求取参数^[8]）。从表 1、表 2 中可知，本区黄土的粒度主要成分是细砂，平均含量达到了 53.70%，平均粒径 (x) 为 4.21Φ，标准差 (Md) 3.78，分选极差，完全不同于其它地区黄土，但类似于福建东南沿海的老红砂沉积^[9]，反映了本区滨海黄土的堆积环境和物源的差异性。



黄土分布区

图 1 辽东半岛滨海黄土分布略图和采样位置（据 [3] 修改）
Fig. 1 The sketch of loess distribution in Liaodong Peninsula

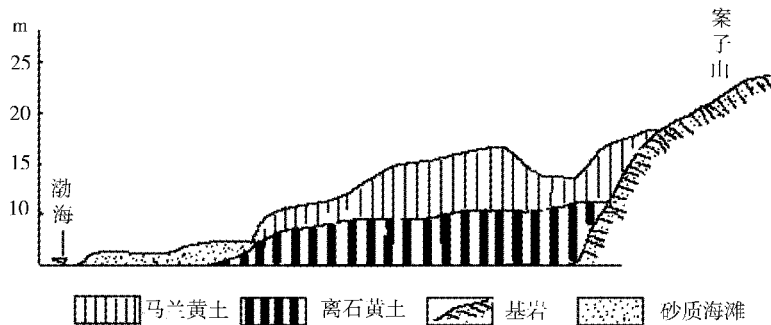


图 2 夏家河滨海黄土剖面示意图
Fig. 2 The profile of loess stratum at Xiajiahe, Dalian

表 1 辽南滨海黄土的粒度组成百分含量分布特征（粒径单位：Φ）
Tab. 1 Grain size distribution of seashore loess in south Liaoning (Φ)

粒径	砂			粉砂					粘土		X	δ
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	>10		
最大值	1.50	18.30	10.50	14.00	1.10	0.70	0.90	0.60	0.50	0.50	3.55	1.98
最小值	11.0	43.20	22.10	27.80	5.90	8.70	8.70	7.90	3.30	5.50	5.38	4.60
平均值	5.20	39.27	16.53	18.50	3.50	5.30	3.40	5.20	1.90	3.10	4.21	3.78

表 2 辽南滨海黄土的粒度组成百分含量分布与其它地区黄土比较 (粒径单位: Φ)
 Tab. 2 Comparison of loess grain size along south Liaoning seashore with other areas (Φ)

地区	中砂 <2	细砂 2 4	粉砂 4 9	粘土 >9	Md	X
辽南夏家河	5.20	53.70	35.90	5.00	3.85	4.21
山东蓬莱		14.55	58.65	26.70	5.41	
陕西洛川		4.82	76.77	18.41	6.00	6.64
庙岛群岛	1.17	24.74	58.77	18.41	4.60	5.54
兰州九州台		3.06	79.60	17.34	6.12	6.15
福建老红砂	19.60	38.23	27.97	14.20	3.39	

1.3 成因与物源分析

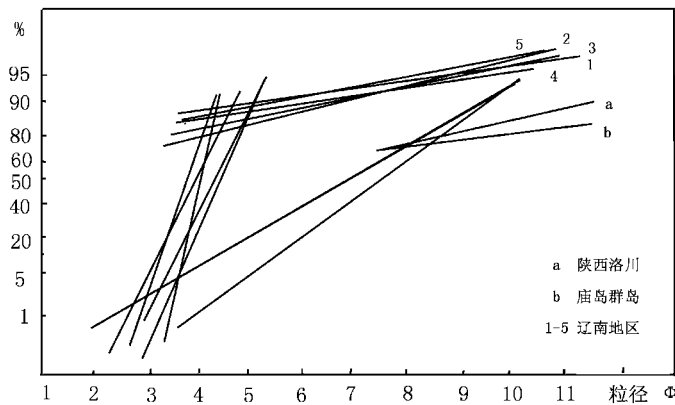


图 3 辽南滨海黄土与其它地区黄土粒度累积概率曲线

Fig. 3 The cumulative possibility curve of loess in south Liaoning and other areas

图 3 为黄土累积概率曲线, 本区黄土的截点在 80% (4.0Φ) 处。一般来说, 以空气悬浮方式搬运的颗粒粒径在 $4\sim 6.5\Phi$ 。D. A. Gillette 等^[10] 和 J. D. Iversen 等^[11] 的研究认为风沙搬运的颗粒在空气中长距离不与地面接触 (空气悬浮搬运) 其粒径应小于 4.3Φ 。辽南滨海黄土中小于截点 4.0Φ 部分应属地面跃移和滚动搬运堆积, 搬运距离不会太远, 物源较近。对比福建东南沿海的老红砂沉积过程, 辽南滨海黄土主要以近源物质为主。

根据前人研究和我们早期分析, 在晚更新世, 渤海湾西北岸虽然几经冷暖、干湿变化, 但仍以冲洪积相为主的陆地沉积环境, 末次冰期时, 渤海全部露出, 成为由海相沉积环境变成以湖泊沉积为主的陆相环境, 在辽西沿岸则位于渤海平原的边缘, 由于侵蚀基准面下降, 入海河流作用加强, 水体挟带的泥沙、砾石沉积在平原, 形成冲洪积扇、冲洪积平原和古河口三角洲地貌, 如渤海湾西岸大凌河口南河圈附近 CK33 孔剖面在 56.66—86.50m 和 107.33~121.38m 处 (晚更新世晚期) 堆积巨厚的含有毕克卷转虫变种 (*Ammonia becaii* var) 等较丰富的有孔虫的亚砂土、粉细砂、中粗砂海陆过渡相和河床相沉积物^[12]。日本学者成漱敏朗研究了日本群岛附近的以中沙为主要成分的风沙层也认为这种风沙层的主要物源是冰期时海平面下降期间出露于水面的海成砂^[13]。我们可以发现辽西、渤海湾西北部的冲洪积相砂砾层→大连地区风沙沉积 (细砂、粗粉砂)→庙岛群岛北部黄

土堆积（细砂、粉砂为主）→鲁中地区黄土基本上处于北北西向的冬季风带上，冰期时出露的这些冲洪积相砂砾层中的细砂、粉细砂等在强劲的冬季风作用下主要以跃移、跳移的搬运方式与来自内陆地区的粉尘混合沉积在外围地区远堆积下来。符合张明书等人对中国海岸带晚更新世风成沉积分区中有关对风沙、风尘沉积的匹配关系^[14]。本区黄土的细粒部分的物源除来自西北内陆外，黄土中 $<4\Phi$ 的粗颗粒部分可能源于低海面时渤海海域周围，冰期时出露的辽西、渤海湾西北部的入海河流形成的冲洪积相砂砾层形成本区黄土粗粒部分的主要物源之一。对本区黄土中的石英砂颗粒表面进行的 SEM 扫描研究结果^[15]，黄土中含有的毕克卷转虫等有孔虫种类与辽西、渤海湾西北部物源区的冲洪积相砂砾层含有的有孔虫种类相似性支持了这一观点。

2 黄土粒度分布变化与风动力特征

2.1 粒度分布对应分析研究

内陆中国黄土平均粒径等粒度参数反映了风力搬运介质的作用能量的大小，是反映黄土堆积环境的一个重要指标，尤其是在提高古气候环境分辨率上，黄土粒度参数具有出色的“表现”，如：马兰黄土自西北向东南变细（沙黄土带、黄土带和粘黄土带）的黄土的风成学说；黄土粒度变化的周期性与地球轨道变化的周期相对应；黄土粒度的变化作为冬季风变化的一个替代性指标；粒径平均值或中值和方差变化提示冰期黄土中的 Heinrich 型气候节拍；黄土粒度变化可以和格陵兰冰岩芯记录的 Dansgaard-Oeschger 旋回对比；黄土砂粒百分含量的空间变化与沙漠—黄土演变过程中耦合关系； $>63\mu\text{m}$ 黄土粗颗粒百分含量辨析出末次间冰期中的强沙尘暴事件^[16~20]等等。但对于这种分选极差、物源并非惟一的滨海黄土，平均粒径值不是一个反映古气候风动力变化的理想指标。笔者（1992）运用主成分方法分析研究过这种滨海黄土的粒度—古气候机制关系，取得较好的效果^[7]。本文试图在此基础上，运用因子对应分析方法进一步讨论这种关系，因为该方法全面考虑了样品和因子之间的关系，充分利用了样品粒度分布粒级所包含的风动力搬运的信息^[21]。

以表 1 中滨海黄土的各粒级为因子，各粒级的粒度重量百分含量为样本值，形成 10×40 矩阵进行上机计算。粒度分布数据对应分析的特征值（ λ ）表明：前 2 个特征值的累积百分比已达 90.67%，基本代表了原始数据所含的粒度分布变化信息。

F1 因子基本代表了 $2\sim 3\Phi$ 粒级，因子载荷值最大（正数），是 F1 因子的端元元素，F2 因子代表 $9\sim 10\Phi$ ，因子载荷值最大（负数），属于粘土粒级，是 F2 因子的端元元素。对应分析结果表明，滨海黄土的粒度分布仅可用这两个粒级基本可说明， $2\sim 3\Phi$ 位于粒度分布的粗端，因此它是控制粒度分布粗粒级的控制因素，显然属于滨海黄土以地面滚动和跃移方式搬运最敏感的粒级，它在剖面中的含量变化幅度较大，自 18.3%~43.2%。风积物的某一粒级的输沙量同风速存在 3 次方正比例关系，据吴正研究， $2\sim 3.4\Phi$ 粒级的启动临界风速大于 5 米/秒^[22]，我们可以依据 $2\sim 3\Phi$ 粒级的百分含量对应 F1 因子的样本载荷值在剖面上的变化（图 4）推测滨海黄土堆积过程中起启动临界风速大于 5 米/秒的风速变化，进而导出黄土形成时期末次冰期蒙古高压的强弱，达到反映古气候变化的目的。从图 4 中看出， $2\sim 3\Phi$ 粒级百分含量及对应于 F1 因子样本载荷值的出现两个高值区表明马兰期滨海黄土堆积过程中存在着二个平均起启动风速大于 5 米/秒的大风时期，一个出现在黄土堆积的早期，一个在堆积的晚期，在这种大风时期，表明从蒙古冷高压中吹出的风力

变得强盛，末次冰期蒙古冷高压得到加强并南扩。

9~10 ϕ 位于滨海黄土粒度分布的细端，它是粒度分布细粒级的控制因素，应属空气悬浮方式搬运，是来源于西北内陆的粉尘。但由于其在剖面中的平均百分含量仅 1.6%，变化幅度为 0.5%~3.3%，特征值贡献仅为 6.56%，总体来说，在组成滨海黄土的粒子上居于次要地位，是滨海黄土次要物质来源。

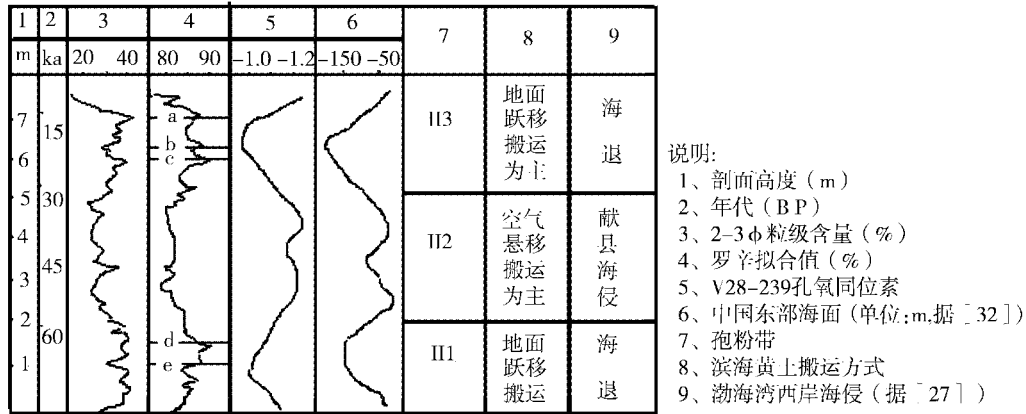


图 4 辽南滨海黄土粒度变化反映的古环境变化

Fig. 4 The palaeoclimate changes reflected by loess grain size in south Liaoning

2.2 粒度分布拟合度研究

黄土粒度分布与物源 (或搬运距离) 关系是黄土研究中的薄弱环节, 本文引入粒度成熟度 (maturity) 概念, 粒度成熟度是指粒度组成符合高斯 (Gauss) 正态和罗辛 (Rosin), 分布的程度。颗粒碎屑经过不同介质的搬运之后, 特别是比较单一而又稳定的介质搬运, 如流水作用、风力或海洋的作用等, 在粒度分布上, 一般是遵循正态分布 (Gauss law), 而未经过搬运的自然碎屑物, 如火山物、风化残积物等, 其粒度分布却遵循自然压碎的罗辛分布律 (Rosin law), 但是随着搬运距离的加大, 逐渐使其分布偏离罗辛分布律, 而更接近正态分布。根据国内外发表的粒度分布研究文献, 大都偏重正态分布研究, 缺少非正态分布的研究, 特别是应用于黄土粒度领域, 更为罕见。

中国内陆黄土是第四纪冰期干冷环境下风成堆积作用而成, 滨海黄土是内陆黄土同期同环境的产物, 粉尘物质自西北内陆被长距离搬运而至, 远离源区, 属于成熟度较高的沉积物, 这一形成机制决定了它更加接近高斯分布规律。但是, 这种滨海黄土在搬运和堆积过程中由于接受了许多地面跃移和滚动搬运方式带来的来自冰期渤海湾西部、辽西海域近源物质, 一旦与粉尘混合堆积, 粒度分布就会破坏高斯分布而转向罗辛分布。因此, 如果滨海黄土粒度分布出现偏向罗辛分布规律时表明本区黄土的堆积作用的机制发生了新的变化, 当然这种变化受到沉积时古气候风力变化的控制。我们根据此原理计算滨海黄土堆积的作粒度分布拟合度以达到正确确定它们形成的机理。本文采用我们已取得较好运用效果^[23]的 R. Schleyer 的拟合度^[24]计算方法分别计算滨海黄土粒度高斯和罗辛分布拟合值。

根据拟合值计算数据结果, 绘制成拟合值在剖面上的变化曲线 (图 4), 从图 4 中可看出, 滨海黄土粒度分布的拟合度变化具有一定的规律性, 上段出现罗辛分布, 中段为高

斯分布, 这与粒度分布对应因子分析结果具有较好的相关性。

值得注意的是从粒度分布拟合度变化可看出, 在整个剖面上, 罗辛分布拟合度出现了 5 次高拟合值, 其值远高于高斯拟合值 (表 3), 这些罗辛分布高拟合度值主要出现在滨海黄土的下部和上部, 在剖面中部细粒层中没有发现。5 次高值出现的时代依次约在 16、20、22、62、68Ka. B. P. (图 4), 滨海黄土的下部和上部是滨海黄土的以近源物质为主的堆积期, 从所处的年代看, 表明当时正处于末次冰期的早期和晚期, 气候极其寒冷, 渤海湾海底完全出露成陆, 期间出现了 5 次强劲的冬季风强盛期, 吹蚀了渤海湾海底物质, 近距离以地面跃移搬运方式堆积下来。显然, 这 5 次强风堆积期是末次冰期中的极冷事件, 根据它们所处的大致的年代看, a、b 极冷事件似乎可以与 H1、H2 事件对比, d 或 e 极冷事件可以与 H6 事件对比^[25]。

表 3 五个滨海黄土粒度拟合值

Tab. 3 5 values of Goodness-of-fit of grain size of seashore loess

次序	推算年代 (Ka. B. P.)	罗辛分布拟合度 (%)	高斯分布拟合度 (%)
a	16	92.30	78.38
b	20	89.20	78.20
c	22	92.50	88.23
d	62	89.12	79.80
e	68	88.24	76.90

3 滨海黄土的孢粉——古气候环境分析

黄龙尾饮牛洼滨海黄土剖面位于夏家河剖面西北方向 10 公里处, 两剖面的地层、地貌部位具有较好的相似性, 我们曾对此作了孢粉采样分析, 自下往上大致可划分为二个孢粉带^[5]:

I 带: 孢粉含量较少, 该带底部主要以草本植物蒿、藜等占绝对优势; 向上木本植物含量增加, 并出现落叶阔叶树榆, 反映出森林草原景观。从地层岩性看, 该带仍属于离石黄土晚期堆积。

II 带: 位于剖面上部, 整个剖面的孢粉含量基本上多集中于该带中, 主要以草本植物蒿、藜、菊科为主, 含有少量松, 从该带所含的孢粉种类和数量以及位处的时代为末次冰期马兰期黄土堆积, 该带可进一步细分为 3 个亚带。

II 1 带: 孢粉含量丰富带, 本带含有丰富的植物孢粉, 菊、蒿、藜、禾本科等草木植物占绝对优势, 含量在 80% 以上, 仍有遗留的榆、栎等木本植物花粉。

II 2 带: 孢粉含量贫乏带, 本带孢粉较少, 仅见少量的松、杜鹃花、木樨科、藜等。

II 3 带: 孢粉含量丰富带, 本带孢粉含量为整个剖面之最。植物花粉主要为早生的松、蒿等禾本科为主, 还有部分湿生的香蒲、水龙骨科, 以及水生环境下的环纹藻等。

4 辽南末次冰期以来古环境变化

根据对滨海黄土古地磁、热释光、¹⁴C 测年年龄资料^[3,6], 推算滨海黄土平均沉积速率, 并参考 Porter 等人工作^[26], 以深海氧同位素阶段 4 与阶段 5 界限作为夏家河滨海黄土剖面中马兰期黄土的底界, 将剖面高度转换为年代坐标, 建立起以粒度分布拟合度数

值、 $2\sim 3\Phi$ 百分含量为替代指标的基本时序变化框架，结合孢粉分析资料，将辽南地区末次冰期分为3个古气候变化及环境变化阶段（图4）。

1、早期阶段 相当于剖面下部的F1因子载荷的高值段，对应于粒度分布 $2\sim 3\Phi$ 的高含量段，表明风砂地面跃移搬运活动十分强烈，是滨海黄土的以近源物质为主的堆积期。约在69000~60000年前发生海退，当时海岸线相当于现黄海50米等深线，此时渤海基本为陆相环境^[27,28]，从相当II1带孢粉看，尽管还遗留前间冰期榆等木本植物花粉，但从草本的藜、蒿等占绝对优势看已进入末次冰期，蒙古高压强盛，春冬两季由其带来的强劲的西北风吹蚀渤海海底砂主要经地面跃移和滚动的方式搬运，在迎风坡的山麓和谷地中形成了粒径偏粗的黄土层下部（粗粒层），由于大量粗粒物质的参与，滨海黄土粒度分布偏离了原来的高斯分布，趋向于罗辛分布。

2、中期阶段 相当于剖面下部的F1因子载荷的低值段，对应于粒度中 $2\sim 3\phi$ 的低含量段， $2\sim 3\Phi$ 低含量的出现，表明形成滨海黄土的强烈的风砂搬运作用减弱。根据滨海黄土沉积速率推算，黄土细粒层堆积时代相当于本次冰期的亚间冰期，气候转暖，海平面上升，渤海西岸发生了献县海侵，形成了H3（早期）和H2（晚期）两层海相层^[29]；渤海处于20~30米的浅海环境^[27,28]；下辽河平原等地发生海侵^[35]。海底砂被覆盖，滨海黄土物源范围缩小，粗粒物质来源减少。黄土堆积主要来源是以从内陆悬浮方式搬运而来的粉砂和粘土，黄土细粒部分含量明显上升形成了滨海黄土的细粒层，由于黄土主要物源地由近源变成远源（来自西部内陆），滨海黄土粒度得到较为充分的分选，使得滨海黄土粒度分布再次从罗辛分布偏向高斯分布。

3、晚期阶段 相当于剖面下部的F1因子载荷的高值段，对应于粒度分布中 $2\sim 3\Phi$ 的高含量段，表明滨海黄土开始了新的堆积期。据测定大连庙西和牧城役等地的黄土剖面顶部热释光测定为距今22000年左右，正处于末次冰期的盛期，渤海中庙岛群岛、山东半岛蓬莱地区的马兰黄土，甚至长江中下游地区的下蜀黄土也主要形成于这个时期，从II3带孢粉以松、蒿、藜等耐干旱植物为主看整个北方地区处于极度寒冷干燥的气候环境，从蒙古岸高压吹出的西北风增强，在黄土高原北沿见到风成沙夹在黄土中^[30]，马兰黄土上层粒度变粗^[31]。此阶段中国东部海岸线向外推出约500~600公里^[32]，华南沿海等地古环境也发生重大变化^[36]渤海出露成陆，生活着披毛犀、猛犸象动物群，湖泊、沼泽点缀在渤海海底平原^[33,34]，大量的渤海湾西部海底砂又成为滨海黄土的一个主要的物源，在湖泊、沼泽边缘生长的香蒲、水龙骨科等湿生植物孢粉及干涸湖泊中的环纹藻在强劲的西北风吹蚀下进入风沙流中与挟带的砂粒一起以地面跃移和滚动方式搬运堆积形成了上部粗粒层， $2\sim 3\Phi$ 含量达到最高，由于没有充分的混合，来自两个物源地的黄土堆积形成的粒度分布没有成熟，造成高斯分布拟合度变小，罗辛分布拟合度增大。

5 结论

辽南滨海黄土粒度研究证明，滨海黄土是在第四纪冰期寒冷气候下的产物，与内陆典型中国黄土属同期堆积。但是，由于滨海黄土所处靠近沿海的地理位置使得这种黄土的形成机制具有独特性。冰期时渤海湾西岸海面下降出露的冲洪积物质和海底物质是滨海黄土的另一重要物源，经风力以跃移方式搬运。因此，滨海黄土的粒度包涵了丰富的有关渤海海面变化的信息，滨海黄土粒度的拟合度是本区古环境变化的重要的替代指标。

辽南滨海黄土剖面中的拟合度值、 $2\sim 3\Phi$ 粒级百分含量反映了末次冰期蒙古高压强弱和渤海的海退、海侵过程。这种变化与滨海黄土 3 个孢粉组合带所反映的古气候环境相吻合, 同邻近地区的海面变化和深海岩芯氧同位素阶段也存在良好的对应关系。

Heinich 事件在滨海黄土粒度罗辛分布拟合值上有所记录, 罗辛分布拟合值出现 5 次高值, 这些高值事件全部出现于末次冰期早期和晚期的渤海海退阶段, 是末次冰期中的极冷事件。但由于受年代时序精度限制, 与 Heinich 事件准确对比有一定的难度, 有待今后进一步探索。

参考文献:

- [1] 曹家欣, 李培英. 山东庙岛群岛的黄土. 中国科学(B辑), 1987, **17**(10): 1116~1123.
- [2] 李雪铭. 辽东半岛南部地区滨海黄土的沉积特征. 海洋科学, 2001, **25**(1): 32~36.
- [3] 吕金福, 李志民. 辽东半岛黄土及其沉积环境. 地理科学, 1990, **10**(2): 97~106.
- [4] 李克让, 陈育峰. 中国全球气候变化影响研究方法的进展. 地理研究, 1999, **18**(2): 14~23.
- [5] 李雪铭. 辽东半岛南部一滨海黄土剖面的孢粉分析及环境意义. 海洋科学, 1995, (2): 54~57.
- [6] 焦亚宁, 魏成凯. 辽东半岛黄土的初步研究. 地理科学, 1987, **7**(3): 231~236.
- [7] 李雪铭. 辽南滨海黄土的粒度分析占气候环境. 海洋科学, 1991, (2): 33~37.
- [8] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用. 北京: 地质出版社, 1978, 3~10.
- [9] 曾从盛, 陈居成, 吴幼恭. 闽东南沿海老红砂与晚第四纪环境演变. 中国沙漠, 1999, **19**(2): 23~30.
- [10] Gillette D A, *et al.* Threshold velocities for input soil particles into the air by desert soils. J. Geophys. Res., 1980, **85**(c10): 5624~5630.
- [11] Iversen J D, *et al.* Saltation threshold on earth Mars and Venus, 1982, Sed. 29: 111~119.
- [12] 符文侠. 辽西滨岸地貌发育特征与古地理环境的探讨. 黄渤海海洋, 1989, **7**(3): 27~33.
- [13] 广州地理研究所地貌第四纪研究室(译). 海平面. 北京: 科学出版社, 1986, 265~269.
- [14] 张明书, 等. 中国海岸带晚更新世风成沉积分区、序列特征及其气候—环境意义. 第四纪研究, 1996, (1): 31~41.
- [15] 牟尚智, 李雪铭, 刘世斌. 大连滨海黄土堆积物中石英颗粒表面结构特征及其环境意义. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1989, (3): 57~61.
- [16] 郭正堂, 刘东生, 等. 最后两个冰期黄土记录的 Heinrich 型气候节拍. 第四纪研究, 1996, (1): 132~138.
- [17] 丁仲礼, 任建璋, 等. 晚更新世季风—沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题. 中国科学(D辑), 1996, **26**(5): 385~391.
- [18] 丁仲礼, 孙继敏, 等. 联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标. 中国科学, 1999, **29**(1): 82~87.
- [19] 戴雪荣, 李占均, 俞立中, 等. 末次间冰期甘肃沙尘暴演化历史的黄土记录分析. 地理学报, 1999, 54: .
- [20] 吴锡浩, 等. 中原邱山黄土及最近 200ka 构造运动与气候变化. 中国科学(D), 1999, **29**(1): .
- [21] 余金生, 李裕伟. 地质因子分析. 北京: 地质出版社, 1985. 77~90.
- [22] 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. 20~67.
- [23] 牟尚智, 李雪铭. R. schleyer 理想高斯和罗辛分布拟合曲线及其在别混杂堆积上的运用. 见: 中国西部第四纪冰川与环境. 北京: 科学出版社, 1991. 312~316.
- [24] Schleyer R. The goodness-of-fit to ideal Gauss and Rosin distributions: a new grain-size parameter. J. Sed. Petro., 1987, **57**: 870~880.
- [25] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. Quaternary Research, 1988, **29**: 142~152.
- [26] Porter S C, An Z S. Correlation between climatic events in the North Atlantic and China during the last glaciation. Nature, 1995, **375**: 305~308.
- [27] 赵松龄, 张宏才. 渤海地区近 20 万年以来的海面变化. 海洋科学, 1978, **9**(3): 10~14.
- [28] 王靖泰, 汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化. 地理学报, 1980, **35**(4): 299~311.
- [29] 庄振业, 许卫东, 刘东生, 等. 渤海南部 S3 孔晚第四纪海相地层的划分及环境演变. 海洋地质与第四纪地质, 1999, **19**(2).

- [30] 董光荣,李保生. 鄂尔多斯高原的第四纪古风沙. 地理学报,1983,38(4):341~347.
- [31] 安芷生,卢滨涛. 华北晚更新世马兰期黄土气候地层划分. 科学通报,1983,28(4):228~231.
- [32] 任美镔. 记现实主义原则在海洋地质学中的运用. 海洋学报,1980,(2):94~111.
- [33] 黄庆福,苍树溪. 从动物群化石看渤海晚第四纪古环境演变史. 海洋地质与第四纪地质,1985,5(3):27~38.
- [34] 徐家声. 最末一次冰期的黄海—黄海占地理若干新资料的获得及研究. 中国科学,1981,(5):605~613.
- [35] 符文侠. 下辽河平原和辽东半岛海岸带晚更新世以来的海侵. 地理研究,1988,7(2):73~80.
- [36] 杨达源,等. 晚更新世晚期冰期鼎盛时期华南沿海地区的古环境. 地理研究,1989,8(4):72~78.

Research of high resolution on grain size of seashore loess and environmental information in south Liaoning Province

LI Xue-ming^{1,2}

(1. Department of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116022, China;

2. Department of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: Research on grain size of seashore loess in Liaodong Peninsula indicates that kind of loess was the product of frigid climate in Quaternary ice age. Due to geographical locations adjacent to coastal zone, the loess has distinctive formation process compared with loess in other areas. Divulged alluvium and sands of Bohai seabed in the last glacial period constitute another important material source of this loess which are transported by sand saltation mode. Grain size of this seashore loess bears a great deal of formation about changes of Bohai sea level.

Sedimentary process of this seashore loess is controlled by two factors, which are wind power and Bohai sea level's fluctuation in the last glacial period. Wind deposits derived from adjacent source of materials make grain size distribution of this loess from normal to abnormal. Goodness-of-fit of grain size distribution and $2-3\Phi$ size percentage content reflect history of transgression and regression of Bohai Sea and strong and weak Mongolian high pressure of the last glaciation. These changes are identical with paleo-environment reflected by spore-pollen assemblage, and also corresponding to sea level changes in the neighbouring areas and stage of $\delta^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Goodness-of-fit of seashore loess grain size distribution is a major substitutional index of paleo-environmental changes.

Heinich events are recorded in Rosin's grain size distribution. There are 5 high values of goodness-of-fit of Rosin's grain size distribution in profile of this seashore loess. These events of high values occurred in transgression period of Bohai Sea during early and later phase of the last glacial period, and are records of extreme cool events which occurred during the last glacial period. It is difficult to compare these events with Heinich events due to limitations of precision of chronological orders.

Key words: seashore loess; grain size; south Liaoning province