

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2018040301

# 粒度端元揭示的芝罘剖面末次间冰期—末次冰期气候环境变化特征

黎武标<sup>1,2</sup>,李志文<sup>1,2</sup>,王志刚<sup>1,2</sup>,马泽源<sup>1</sup>,王珍珍<sup>1</sup>,梁丽婵<sup>1</sup>

1.东华理工大学地球科学学院,南昌 330013

2.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013

**摘要:**山东半岛北部芝罘剖面末次间冰期—末次冰期(124.9~62.85kaBP)层段由砂黄土、黄土、古土壤叠覆堆积组成。为获取反映该地区气候变化的环境敏感粒组,应用端元分析模型对粒度数据进行反演,得出4个粒度端元。各端元在垂直方向上呈现出有规律的峰谷变化,结合平均粒径及测年结果,认为CEM1与CEM2主要反映了末次间冰期间冰阶夏季风强盛,气候暖湿,古土壤发育的沉积环境;CEM3反映了末次间冰期冰阶冬季风短暂增强,气候相对干冷,黄土发育的沉积环境;CEM4反映了末次冰期强冬季风主导下黄土堆积速率加快,成壤作用弱的沉积环境。各端元揭示的冷暖气候振荡,与朝那黄土磁化率指示的夏季风强弱、西峰黄土 $>32\mu\text{m}$ 粒组指示的冬季风强弱以及渤海底栖有孔虫记录的沿岸海侵/海退事件具有较高的同步性。

**关键词:**粒度;端元分析;古气候;芝罘剖面;末次间冰期;末次冰期

**中图分类号:**P534.63      **文献标识码:**A

**Climatic environment changes during the last interglacial-glacial cycle in Zhifu loess section: Revealed by grain-size end-member algorithm**

LI Wubiao<sup>1,2</sup>, LI Zhiwen<sup>1,2</sup>, WANG Zhigang<sup>1,2</sup>, MA Zeyuan<sup>1</sup>, WANG Zhenzhen<sup>1</sup>, LIANG Lichan<sup>1</sup>

1.School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2.State Key Laboratory Nuclear Resources and Environment, Nanchang 330013, China

**Abstract:**The last interglacial-glacial Zhifu loess section on the northern Shandong Peninsula is mainly composed of sandy loess, loess and palaeosol. Grain-size analysis suggest that silty sand dominate the loess (74.95%), followed by the clay (10.05%) and very fine sand (9.57%). In terms of mean grain size, paleosoil is finer than sandy loess with loess in between. End-member algorithm is used in the study of grain size composition of the Zhifu section. Four clustering end members (CEM) are recognized. Based on the clustering end member frequency curves and optical stimulated luminescence dating results, it is concluded that CEM1 and CEM2 represent the strong summer monsoon and warm summer climate respectively during the MIS5e, MIS5c and MIS5a periods; CEM3 represents the environment during the MIS5d and MIS5b periods with intensified winter monsoon and relatively cold climate; while the CEM4 represents the extremely strong winter monsoon environment during the MIS4 period. These fluctuations show a strong coherence with the magnetic susceptibility of the Loess Plateau and intensity of the winter monsoon indicated by the content of grains  $>32\mu\text{m}$  in the Xifeng loess section, as well as the transgression/regression events along the Bohai Bay recorded by benthic foraminifera.

**Key words:** grain-size; end-member algorithm; paleoenvironment; the Zhifu Section; last interglacial; last glacial

沉积物的粒度是重建古气候的常用指标,其保存了物源<sup>[1]</sup>、搬运动力<sup>[2]</sup>与沉积环境<sup>[3-7]</sup>等多方面的

信息,但地质历史时期的沉积物普遍具有多成因组分混合的特点<sup>[8]</sup>,全体的粒组只能近似地作为沉积

**资助项目:**国家自然科学基金项目“山东半岛北部海岸晚第四纪风沙沉积的时代划分与季风环境演变”(41201006),“南暖温带-北亚热带晚第四纪不成熟风纹层的地质时代、形成机制与季风环境演变”(41571007);核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地(东华理工大学)开放基金项目(NRE1507)

**作者简介:**黎武标(1992—),男,硕士研究生,研究方向为第四纪环境演变,E-mail:liwbill@163.com

**通讯作者:**李志文(1982—),男,副教授,主要从事地貌与第四纪地质学相关研究,E-mail:lizw1982@163.com

**收稿日期:**2018-04-03;**改回日期:**2018-07-09. 蔡秋蓉编辑

环境的代用指标<sup>[9]</sup>。因此,对环境敏感粒组的提取显得尤为重要。目前,提取环境敏感粒组的方法主要有 Weibull 函数法<sup>[10]</sup>、主成分分析法<sup>[11]</sup>、粒级—标准偏差法<sup>[6,9]</sup>和端元模型法<sup>[12-15]</sup>等。其中,粒度端元模型在陆架浅海地区反演沉积物搬运动力、揭示沉降规律和恢复古水环境等方面取得了大量成果<sup>[15,16]</sup>。

山东半岛北海岸地区海陆交汇,对气候变化响应十分敏感,区内广泛分布的黄土-古土壤沉积序列物源复杂,是第四纪以来东亚冬夏季风盛衰和渤海海平面升降的重要地质记录。为获取该地具有定量特征的、高分辨率气候记录,前人从粒度<sup>[5]</sup>、铷锶比<sup>[17]</sup>、有孔虫化石<sup>[18]</sup>、孢粉<sup>[19]</sup>、磁化率<sup>[20]</sup>、<sup>14</sup>C、TL<sup>[21]</sup>以及 OSL<sup>[22]</sup>等指标和测年手段对山东地区黄土-古土壤做了大量的工作,但关于沉积物环境敏感粒组的研究<sup>[5,23]</sup>起步较晚,缺乏使用其他数学方法来捕捉更高分辨率的气候信息。端元分析模型是识别多组分沉积物来源和查明搬运方式的有效工具,在古环境重建中得到广泛的应用<sup>[15]</sup>。对此,本文选择烟台市芝罘岛由砂黄土-黄土-古土壤等沉积相组成的沉积序列进行工作,在运用分层聚类端元模型提取环境敏感粒组的基础上,结合年代结果与粒度参数,揭示各端元的变化规律以及它们指示的古气候意义,并与深海氧同位素<sup>[24]</sup>、朝那黄土<sup>[25]</sup>、西峰黄土<sup>[26]</sup>和渤海底栖有孔虫<sup>[27]</sup>为载体的气候代用指标进行比对,以期探讨晚更新世黄渤海南岸地区在北半球气候变化中的响应情况。

## 1 研究区概况与地层划分

芝罘岛位于山东半岛北海岸,其岩层为太古代的芝罘系,主要是各种石英片麻岩、黑灰色云母钾长石片麻岩和长石英变质岩等<sup>[28]</sup>。岛内地势西北高东南低,北岸砾滩广布,南岸以泥滩为主<sup>[29]</sup>。气候类型为暖温带季风型湿润气候,多年平均降水量为 651.9mm,年均气温 12.7℃,年均风速 4~6m/s,冬春季多偏北风,夏秋季多偏南风。植被属暖温带落叶阔叶林,主要乔木类型有刺槐林、黑松林、杨树林和竹林等,灌丛有杜鹃和鹅耳枥等。地带性土壤以棕壤和褐土为主(烟台市志,1994),采样点表层为棕壤。

本文的研究剖面位于西口村(37°37'4"N、121°21'44"E)(图 1),剖面顶部海拔约 17m,厚约 6m,呈西北—东南走向。本文研究的层位深度为 72~498cm,根据土壤颗粒、性状及地层接触关系,自上而下分为 8 个层位:

ZF1 混杂堆积层—耕作层。土壤呈暗黑色,长有低矮植被,土中含较多腐殖质和未腐烂枯枝落叶,人为痕迹明显,松散,厚约 37cm;

ZF2 砂黄土层。浅褐色,含中砂的极细砂质粉砂,较松散,含有较少的植物根系,厚约 35cm;

ZF3 砂黄土-黄土层。褐色,含黏土的极细砂—中砂质粉砂,无明显层理,较紧实,厚 56cm;

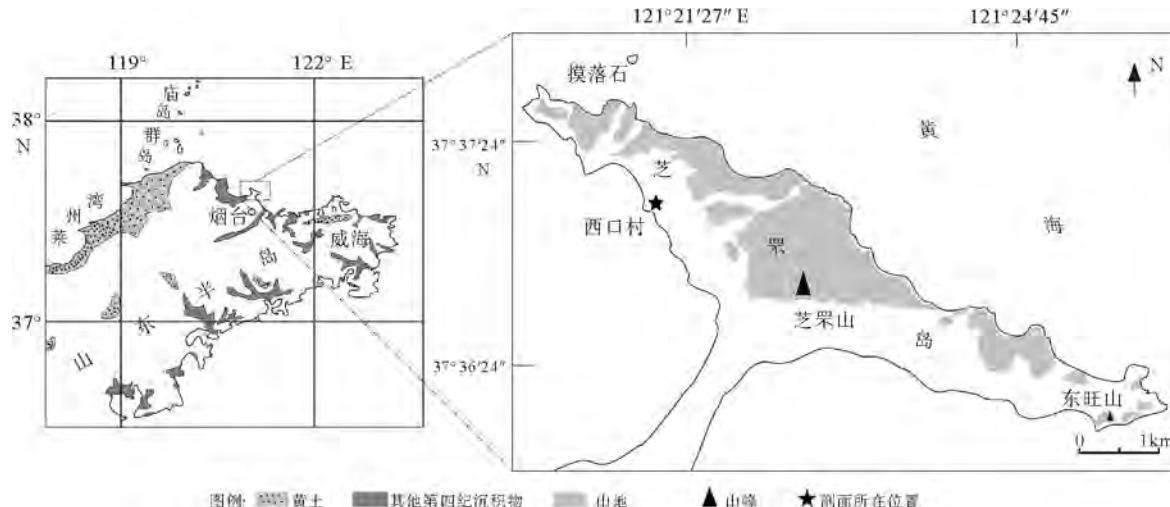


图 1 芝罘剖面地理位置

Fig.1 Location of the Zhifu section

ZF4 古土壤层。红褐色,含极细砂的黏土质粉砂,有较多的黑色铁锰胶膜,偶见砾石,厚 68cm;

ZF5 黄土层。黄土赭色,含黏土的极细砂质粉砂,偶见铁锰胶膜垂直分布,厚 56cm;

ZF6 古土壤层。亮棕色,含极细砂的黏土质粉砂,紧实,厚 66cm;

ZF7 黄土层。暗棕色,含黏土的极细砂质粉砂,含少量铁锰斑点,紧实,厚 52cm;

ZF8 古土壤层。棕色,含极细砂的黏土质粉砂,含较多铁锰斑点,砾石层相间分布,紧实,厚 124cm,未见底。

## 2 材料与实验方法

### 2.1 年代测试

共采集 6 个光释光(OSL)样品,其中 4 个在中国科学院青海盐湖研究所完成测试,2 个由中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室测定,测试方法为简单多片再生法(SMAR)。

### 2.2 粒度测试

以 2cm 为间距连续采样,共采集 213 个样品,粒度测试在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成,测试仪器为英国 Malvern 公司产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪,检测范围是 0.02 ~ 2000 $\mu\text{m}$ ,重复测量误差小于 2%。测试前对样品进行前处理,过程如下:将自然风干未经研磨的样品均匀混合后称取约 10g,加入 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 去除有机物,待无气泡产生,加热蒸发残余 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,冷却后加入 10% HCl 去除碳酸盐,静置过夜后倒出上清液,加入纯水中和溶液。测试前再加入适量(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 使样品充分分散,用吸管吸取样品在超声波中震荡

10min 再测试,每个样品均测试 3 次求其算术平均值。本文根据乌登-温特沃斯粒级分类标准(Udden-Wentworth scale),将粒度组分为黏土(<2 $\mu\text{m}$ )、粉砂(2~63 $\mu\text{m}$ )、极细砂(63~125 $\mu\text{m}$ )、细砂(125~250 $\mu\text{m}$ )和中-粗砂(>250 $\mu\text{m}$ ),并采用福克和沃德<sup>[30]</sup>(Folk & Ward)图解法公式进行 Mz、 $\sigma$ 、Sk、Kg 等粒度参数计算。

### 2.3 粒度端元分析方法

根据 Zhang X 等(2017)建立的分层聚类端元分析模型(Hierarchical Clustering Endmember Modeling Analysis,CEMMA),在 Matlab 环境下对芝罘剖面粒度数据进行非负矩阵等运算。CEMMA 对查明多成因混杂沉积组分的成因与来源具有显著的效果。当集聚系数大幅度变化时,该变化的“节点”可作为端元(clustering endmember, CEM)的最优数量<sup>[31]</sup>。计算结果显示:端元数为 4 时(图 2),集聚系数变化幅度最大,被划分成两个不同的集群。该“节点”表明了端元的最佳数量为 4,并分别命名为 CEM1、CEM2、CEM3、CEM4。

## 3 结果分析

### 3.1 年代学结果

芝罘剖面 OSL 年代测试结果列于表 1,根据年代结果与采样深度,绘制了年代随深度变化的关系图(图 3),二者具有良好的线性关系, R 为 0.9904,说明不同深度的地层年代与层序的新老关系基本吻合,无地层倒置。其中,ZF8 底部测年结果为(124.9 ± 9.7) kaBP,参考深海氧同位素阶段的研究结果<sup>[24]</sup>,对应末次间冰期(MIS5e)早期。ZF3 顶部测年结果为(62.85 ± 6.94) kaBP,对应末次间冰期(MIS4)

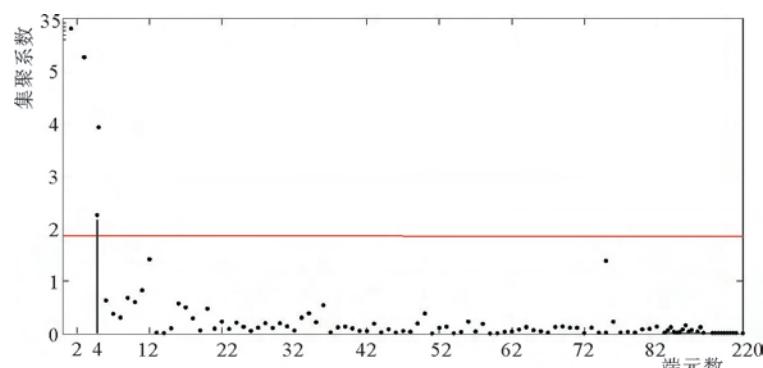


图 2 集聚系数与端元的相关关系

Fig.2 Correlation between agglomeration coefficients and clusters

中期。因此,芝罘剖面(ZF3—ZF8)为末次间冰期—冰期时期沉积。在此基础上,采用分段式沉积速率内插方法建立芝罘剖面层段的年代框架。

### 3.2 粒度测试结果

#### 3.2.1 沉积物的粒度组成

芝罘剖面以粉砂为主(表2)(变化范围和平均值为59.06%~83.98%、74.95%),黏土次之

(6.87%~14.35%、10.05%),亦含有较多的极细砂(3.21%~16.06%、9.57%)和中-粗砂(0~8.03%、2.21%),细砂含量最少(0~10.25%、1.75%)。不同的沉积相中,各粒级百分含量波动较大。古土壤的黏粒(11.92%)与粉砂(76.75%)含量均高于剖面平均值,细砂(1.35%)与中粗砂(0.63%)含量则低于平均值。砂黄土的极细砂和细砂含量相对较高,黏土(8.05%)与粉砂(68.89%)含量最低。

表1 芝罘剖面OSL年代的测定结果及其参数

Table 1 OSL ages of Zhifu section and their dating parameters

野外编号	$U/10^{-6}$	$Th/10^{-6}$	K/%	深度/m	年剂量/(Gy/ka)	等效剂量/Gy	实测结果/ka
ZF3 顶	2.02	12.20	2.08	0.72	4.06	$255.46 \pm 11.95$	$62.85 \pm 6.94$
ZF3 底	2.05	12.00	2.24	1.28	4.47	$313.66 \pm 29.71$	$70.18 \pm 9.67$
ZF4 底	0.700	3.390	2.700	1.89	$3.12 \pm 0.24$	$260.1 \pm 5.9$	$83.4 \pm 6.6$
ZF6 顶	2.490	11.700	2.080	2.63	$3.44 \pm 0.24$	$325.8 \pm 18.4$	$94.7 \pm 8.5$
ZF8 顶	1.320	6.780	1.780	3.91	$2.72 \pm 0.20$	$322.1 \pm 10.0$	$118.5 \pm 9.3$
ZF8 底	1.660	7.440	2.030	4.96	$2.55 \pm 0.19$	$318.5 \pm 9.1$	$124.9 \pm 9.7$

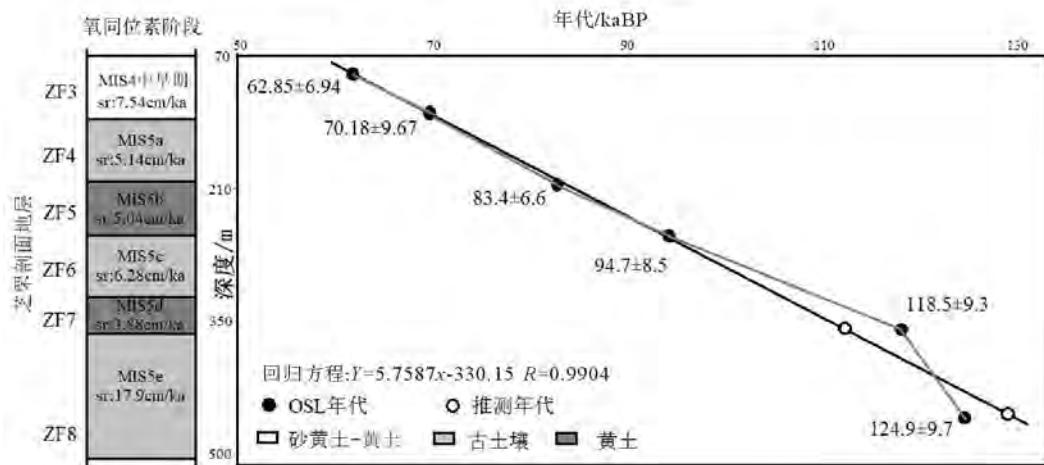


图3 芝罘剖面末次冰期—末次间冰期的地层序列与深度-年代框架

Fig.3 The stratigraphic sequence and age-depth relationship of the Zhifu section during the last glacial-interglacial periods

#### 3.2.2 沉积物的粒度参数

芝罘剖面的平均粒径为4.86~6.13 $\Phi$ ,平均值为5.77 $\Phi$ 。分选值为1.79~2.86,属分选较差-分选差等级。偏度为-0.16~0.37,大部分属正偏,仅有个别为负偏和近对称。峰态为0.78~1.19,平均值为0.91,属平坦。各沉积相的比较中,古土壤的平均粒径和分选值( $6.06\Phi$ 、2.47)>黄土( $5.83\Phi$ 、2.01)>砂黄土—黄土( $5.09\Phi$ 、1.95),表明古土壤粒度最细,分选差;黄土粒度居中,分选较差;砂黄土—黄土最粗,分选相对较好。

### 3.3 端元分析结果

端元粒度频率分布曲线与各沉积相及剖面平均粒度频率分布曲线形态相近。各端元频率分布曲线主峰粒级逐渐增大(图4b),分选逐渐变好。其中,CEM1呈双峰分布,鞍部不明显,峰态平坦,粒级范围较大,分选较差,众数粒级不明显,为3~8 $\mu$ m,多属黏土-细粉砂。CEM2和CEM3均为单峰分布,峰态尖锐,粒级含量集中于粗粉砂-极细砂,二者曲线形态近似,众数粒级分别为56 $\mu$ m(粗粉砂)和80 $\mu$ m

(极细砂)。CEM4为双峰分布,主峰众数粒级为 $112.468\mu\text{m}$ ,次峰为 $400\mu\text{m}$ ,粒级主要集中于极细砂-细砂。

各端元的频率分布随深度的变化见图5,其取

值范围为 $0\sim100\%$ 。可以看到,4个端元的相对含量在垂直方向上差异较大。CEM1在ZF3、ZF5和ZF7中为谷值(平均值分别为 $3.3\%、2.1\%、1.9\%$ ),在ZF4、ZF6和ZF8中为峰值(平均值分别为 $55.7\%、$

表2 芝罘剖面不同沉积相的粒度参数、粒级含量和CEM值

Table 2 The grain size distribution parameters and CEM of sedimentary types in Zhifu section

沉积相	全剖面	砂黄土—黄土	黄土	古土壤
黏土/%	变化范围	6.87~14.35	7.31~11.34	6.87~12.59
	平均值	10.05	8.05	8.66
粉砂/%	变化范围	59.06~83.98	59.06~77.48	61.11~80.43
	平均值	74.95	68.89	71.86
极细砂/%	变化范围	3.21~16.06	6.32~15.44	3.21~16.02
	平均值	9.57	11.32	8.42
细砂/%	变化范围	0~10.25	5.32~10.25	2.22~9.87
	平均值	1.75	9.74	7.63
中粗砂/%	变化范围	0~8.03	0.08~7.31	2.37~8.03
	平均值	2.21	2.63	1.23
$Mz/\Phi$	变化范围	4.86~6.13	4.86~5.85	5.63~6.09
	平均值	5.77	5.09	5.83
$\sigma$	变化范围	1.79~2.86	1.79~2.31	1.89~2.31
	平均值	2.05	1.95	2.01
Sk	变化范围	-0.16~0.37	-0.16~0.21	0.02~0.37
	平均值	0.14	0.04	0.19
Kg	变化范围	0.78~1.19	0.89~1.19	0.78~0.84
	平均值	0.91	1.06	0.82
CEM1/%	平均值	/	1.1	16.6
CEM2/%	平均值	/	8	11.5
CEM3/%	平均值	/	7.1	66.6
CEM4/%	平均值	/	83.8	5.3

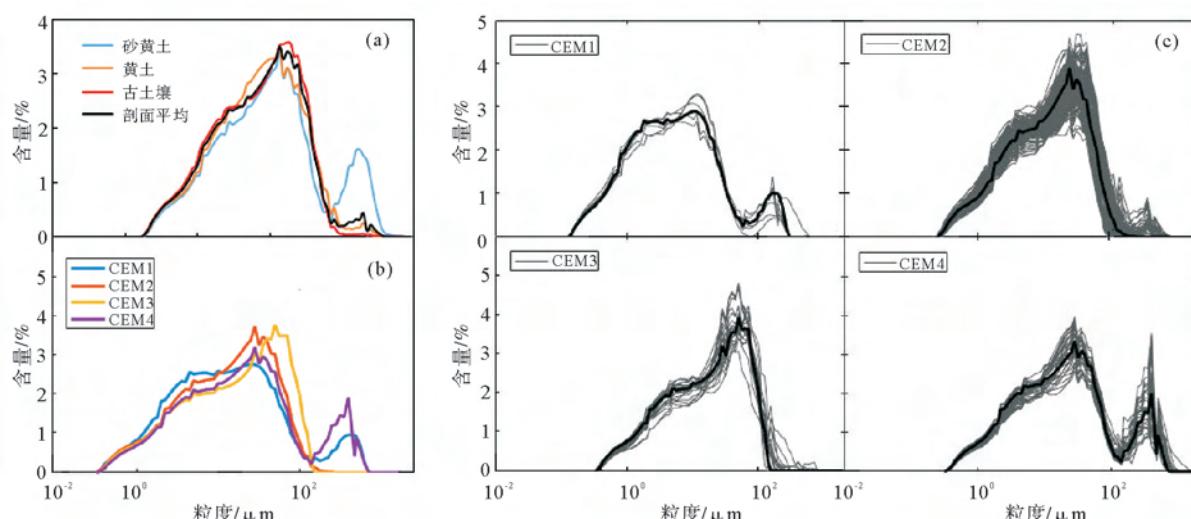


图4 芝罘剖面各沉积相频率分布曲线(a)和端元频率分布曲线(b,c)

Fig.4 The facies frequency curve (a) and endmember frequency curves (b,c) of the Zhifu loess section

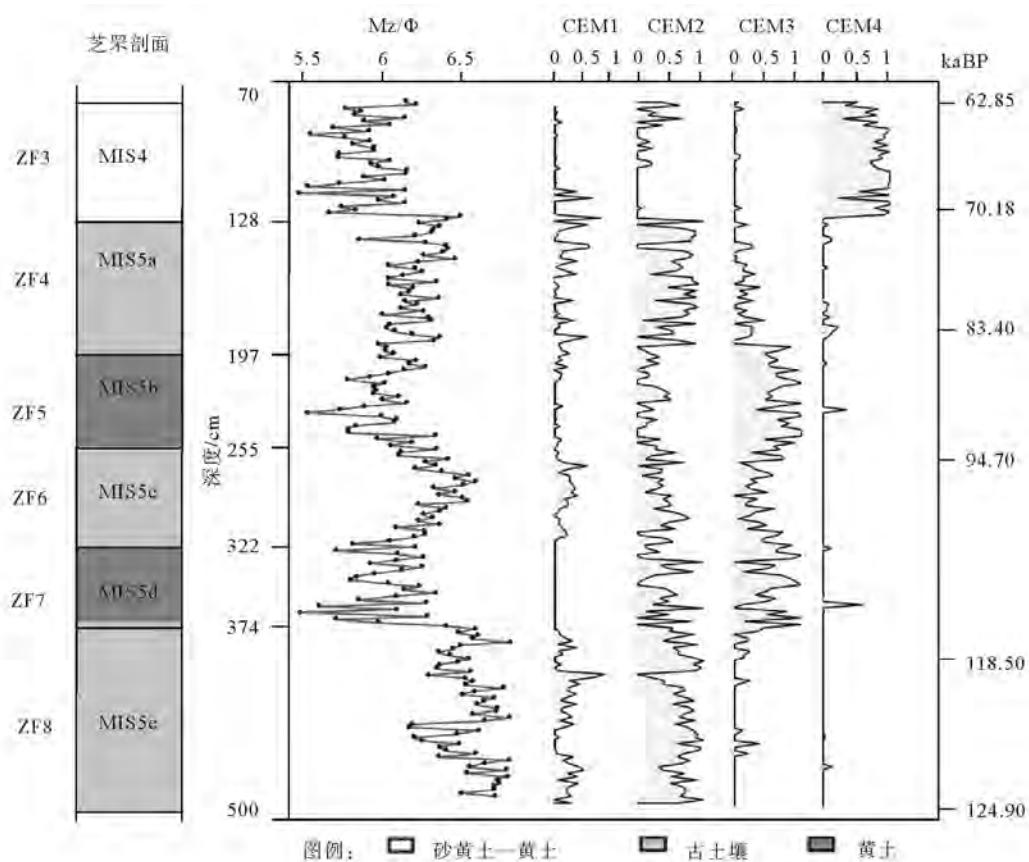


图5 芝罘剖面平均粒径与CEM随深度变化

Fig.5 Meane grain size and CEM variation with depth in Zhifu section

27.9%、49.4%),与剖面的Mz变化有较好的对应,二者相关系数R为0.6659。CEM2在ZF4和ZF8中占主导地位,平均值分别为73%和66%。CEM3在ZF5和ZF7中处于高值,平均值分别为62%和60%。CEM2与CEM3在地层中的相对含量呈现良好的负相关关系,相关系数R为-0.5651。CEM4除在ZF3中表现出高值以外(平均值为79%),其余层位均为低值或零值。

## 4 讨论

古土壤层和黄土层是正地形气下环境的关键证据之一<sup>[32]</sup>。我国风尘堆积的古土壤大多为“加积型土壤”<sup>[33]</sup>,是季节交替下沉积和成壤作用同步进行的产物,代表了一个沉积暂时停止或沉积速度小于成土作用时期。因此,芝罘剖面中的古土壤是指示夏季风进退的有力证据,而交替发育的黄土层物源复杂,既有自亚洲内陆由西北气流搬运来的远源物质;又有冰期时裸露的河漫滩和陆架松散沉积物等

组成的近源物质<sup>[34,35]</sup>,可用来研究冰期冬季风演化和黄渤海海平面变化。因而,芝罘剖面黄土-古土壤序列记录了该地区轨道尺度的冰期一间冰期气候冷暖旋回。

### 4.1 CEM1与CEM2指示的环境气候

CEM1众数粒级为3~8μm,表示的沉积物类型主要是黏土质粉砂和粉砂质黏土。CEM2众数粒径为56μm,属粗粉砂。二者高值所在的区间ZF3、ZF5和ZF7分别对应MIS5a、MIS5c和MIS5e时期(图5),均为末次间冰期的间冰阶。这些层位中黏土(11.92%)和粉砂(76.75%)含量属各层位最高,表明沉积物颗粒较细。CEM1和CEM2与这些层位具有良好的对应关系以及它们较细的粒度特征表明,其可能指示MIS5a、MIS5c和MIS5e时期芝罘剖面古土壤发育的环境气候。

前人的研究表明,黄土-古土壤中细颗粒物质来源有3个:一是单独被风搬运;二是由大颗粒“挟持”而来;三是沉降后受成壤作用影响形成的次生组分<sup>[36]</sup>,是夏季风的替代指标<sup>[37]</sup>。末次间冰期时期

夏季风强盛,最北界可达乌兰巴托至马鬃山、安西一线<sup>[38]</sup>,西风带随夏季风推进而北移,西北细颗粒物质难以通过高空西风达到此处。暖湿气候下丰富的降水和土壤生物活动频繁,促进风化作用。母岩在各种风化作用下崩解破碎,继之有生物化学作用,土壤发生学过程得以进行,颗粒细化,形成细颗粒组分(CEM1与CEM2),因此,认为其可以指示温暖的气候环境。另外,间冰阶时期沉积速率较快(图3),根据物源越近沉积速率越快的规律<sup>[5]</sup>,说明该时期近源物质贡献大于远源物质。CEM1和CEM2组分具有较好的正相关关系( $R = 0.504$ ),亦可认为CEM1与CEM2是同一成因下的产物。当然,这也需要来自生物化石、孢粉等更多指标的深入研究。

对比邻近地区:蓬莱林格庄剖面末次间冰期敏感粒组为 $56.23\sim63.10\mu\text{m}$ <sup>[22]</sup>,属短距离搬运物质,与CEM2代表的粒级较一致,表明该组分为近源物质。埠西剖面夏季风敏感粒级为 $2.51\sim8.91\mu\text{m}$ <sup>[5]</sup>、砣矶岛的大口北黄土剖面为 $5\sim10\mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>,表明CEM1组分是风化成壤过程的产物。

#### 4.2 CEM3指示的气候环境

CEM3表示含黏土的极细砂质粗粉砂,在剖面中存在两个相对高值区,分别是ZF5和ZF7层位,含量为 $43.2\%\sim81.7\%$ ,平均值为 $54.8\%$ 。在研究区东北方的蔡家沟剖面和石峁剖面的S<sub>1</sub>中夹有两层黄土,其测年结果显示在约120和 $100\sim95\text{kaBP}$ 出现短暂的冬季风增强阶段<sup>[39]</sup>,该时间恰为ZF5和ZF7的沉积时间。两个层位中黏土含量较低(8.66%),而粗粉砂—极细砂(CEM3)富集,反映此时夏季风萎缩,冬季风相对强盛,近源较粗物质沉积速率加快,后期受到成土作用弱,细颗粒物质(CEM1和CEM2)少。因此,CEM3可能指示了该区域末次间冰期冰阶(MIS5b和MIS5d)东亚冬季风增强的气候事件。但其在冬季风主导的MIS4阶段(对应ZF3层位)含量多为0,对此存疑,具体原因有待进一步研究。

#### 4.3 CEM4指示的气候环境

CEM4仅在ZF3中为高值区,表示的沉积物类型为含细砂—极细砂的粗粉砂,众数粒径为 $112.468\mu\text{m}$ ,表明砂含量是该沉积时期中一个重要的环境指标。平均粒径显示该层位粒度较粗,并不符合中国黄土颗粒自西北向东南逐渐变细的规律<sup>[40]</sup>,说明其具有区域性。通过对比,该地MIS4阶段的冬季风敏感粒组( $112.468\mu\text{m}$ )粗于内陆黄土

高原(约 $100\mu\text{m}$ )<sup>[41]</sup>和埠西地区( $>50.12\mu\text{m}$ )<sup>[5]</sup>。另外,渤海底栖有孔虫记录了在约 $71.2\text{kaBP}$ 期间,渤海湾有多次强风暴事件,搬运的平均粒径为 $5\sim5.5\Phi$ <sup>[34]</sup>,与该层位的平均粒径( $5.09\Phi$ )吻合。因此,CEM4可能是该地区末次冰期极强冬季风或强风暴的替代性指标。

综上,造成这一区域的环境敏感粒组(CEM1—4)在不同地层变化的主要原因是物源变化与沉积后成壤作用的强弱<sup>[41]</sup>,而这又直接反映了东亚冬夏季风的盛衰,表现为:CEM1与CEM2的高值指示末次间冰期间冰阶强盛夏季风主导下温暖湿润的区域环境气候(图6);CEM3的高值指示末次间冰期冰阶夏季风相对衰弱、冬季风增加的区域环境气候;CEM4的高值指示末次冰期强盛冬季风主导下寒冷干燥的区域环境气候。可以看出,研究区域内在轨道尺度上经历了6次冷暖气候振荡,即1次干冷时期( $62.85\sim70.18\text{kaBP}$ )、3次暖湿时期( $70.18\sim83.4$ 、 $94.7\sim105.2$ 和 $118.5\sim124.9\text{kaBP}$ )和2次较干冷时期( $83.4\sim94.7$ 和 $105.2\sim118.5\text{kaBP}$ ),在MIS5阶段呈现三暖峰夹两冷谷,且暖湿气候持续时间长于干冷气候。

#### 4.4 芝罘剖面末次间冰期—末次冰期气候演变的区域响应

鉴于各CEM的峰谷变化能较好的反映研究区域内环境气候,将其分别与朝那黄土—古土壤磁化率<sup>[25]</sup>、西峰黄土中 $>32\mu\text{m}$ 颗粒含量<sup>[26]</sup>、渤海BH08孔底栖有孔虫<sup>[27]</sup>和深海氧同位素<sup>[24]</sup>进行比对。其中,西峰黄土中 $>32\mu\text{m}$ 粒度组分为冬季风敏感粒组,它的增加反映了冬季风主导下的大范围寒冷时期;成壤作用是导致磁化率发生变化的主要因素,其高值反映出沉积物中磁铁矿含量丰富、成壤作用强烈;渤海底栖有孔虫含量记录了海平面升降的情况,是研究黄渤海海侵/海退的基础资料。

CEM4在ZF3含量为72.9%,曲线表现为峰值,与同期朝那黄土磁化率<sup>[25]</sup>的谷值、西峰黄土 $>32\mu\text{m}$ 颗粒含量<sup>[26]</sup>和渤海底栖有孔虫数量<sup>[27]</sup>的峰值有良好的对应(图6)。朝那黄土中磁赤铁矿含量降低与西峰黄土中 $>32\mu\text{m}$ 粒组的增加,均反映了冬季风主导下的大范围寒冷时期。在黄渤海地区,对应玉木冰期早期成山头海退期( $70\sim60\text{kaBP}$ ),古海岸线在今 $80\sim100\text{m}$ 等深线附近<sup>[42]</sup>,陆架出水成陆,海底松散沉积物裸露,被西北风吹扬在海岸带东侧堆积,形成蓬莱—庙岛一带特殊的海陆相砂质黄土<sup>[43]</sup>。其主要以近源物质组成,颗粒比内陆黄土

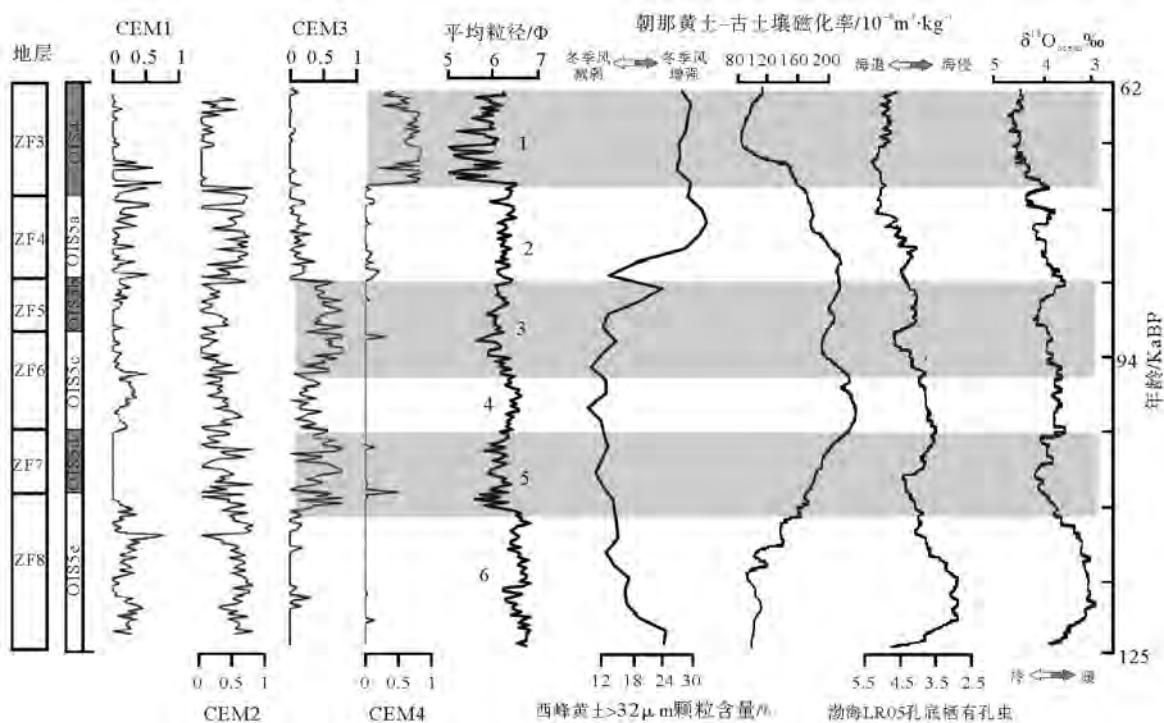


图6 深海氧同位素  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ocean}} \text{\%}$ <sup>[24]</sup>、渤海 LR05 孔底栖有孔虫<sup>[27]</sup>、朝那黄土-古土壤磁化率  $10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[25]</sup>、西峰黄土中  $>32 \mu\text{m}$  颗粒含量<sup>[26]</sup>与芝罘剖面平均粒径、CEM1、CEM2、CEM3 和 CEM4 比较

Fig.6 Correlation of mean size, CEM1, CEM2, CEM3 and CEM4 from the ZhiFu section with deep ocean  $\delta^{18}\text{O}$  variations<sup>[24]</sup>、benthic foraminifera in the LR05 hole of Bohai Sea<sup>[27]</sup>、magnetic susceptibility in Chaona section<sup>[25]</sup> and content of  $>32 \mu\text{m}$  particles in Xifeng loess section<sup>[26]</sup>

粗,与 CEM4 所代表的含细砂-极细砂的粉砂相似。

CEM1 与 CEM2 在 ZF4、ZF6 和 ZF8 的含量均高于全剖面平均值,曲线形态上为高峰,对应渤海底栖有孔虫数量的谷值,该时期为里斯-玉木间冰期灵山岛海侵期<sup>[42,44]</sup>(80、100 和 120kaBP)。两者的消长关系说明黄渤海海面上升时,土层中有孔虫化石减少,风力沉积作用减弱,暖湿气候下成壤作用占主导地位,以 CEM1 和 CEM2 为代表的细颗粒组分增加,形成古土壤层。

CEM3 在 ZF5 和 ZF7 中的含量高于全剖面平均值,曲线形态上为高峰,对应渤海底栖有孔虫数量的次峰,表示的是夏季风衰弱下相对寒冷时期。该时期冬季风有所增强,较粗颗粒以跃动式或滚动式运动,行程较近,遇地形阻挡在渤海东南缘沉降,成壤作用弱化,细颗粒组分减少,形成较薄的黄土层。

因此,芝罘剖面末次间冰期—末次冰期黄土-古土壤沉积序列受东亚冬夏季风格局影响,远源与近源物质交替混杂,各 CEM 值是探讨该区域气候变化的有效指标。

## 5 结论

(1) 芝罘剖面可分为 MIS5 和 MIS4 两个阶段。其中, MIS5 又可划分为 MIS5e (118.5 ~ 124.9kaBP)、MIS5d (105.2 ~ 118.5kaBP)、MIS5c (94.7 ~ 105.2kaBP)、MIS5b (83.4 ~ 94.7kaBP) 和 MIS5a (70.18 ~ 83.4kaBP) 5 个亚阶段;

(2) 粒度分析结果显示剖面沉积物以粉砂为主 (74.95%), 黏土 (10.05%) 和极细砂 (9.57%) 次之, 其余为细砂-粗砂 (3.98%), 平均粒径为 5.77Φ, 分选系数为 2.05, 具有区域特征;

(3) 采用端元分析模型得出指示芝罘剖面 OIS5—OIS4 时期气候更替的 4 个端元,其在剖面呈现出明显的峰谷变化,揭示出 OIS5e、OIS5c 和 OIS5a 为温暖期; OIS5d、OIS5b 和 OIS4 为寒冷期,在轨道尺度上经历了 6 次气候冷暖振荡。这些冷暖阶段与朝那黄土磁化率指示的夏季风盛衰、西峰黄土  $>32 \mu\text{m}$  粒组指示的冬季风变化以及渤海底栖有孔虫记录的渤海湾沿岸海侵、海退事件具有较高的同步性。

## 参考文献(References)

- [1] 董欣欣,杨石岭,唐自华,等.基于黄土粒度估算粉尘源区-沉积区距离的新方法[J].中国科学:地球科学,2016,46(10):1406-1412.[DONG Xinxin, YANG Shiling, TANG Zihua, et al. A grain-size-based model for dust source-to-sink distance reconstruction: A case study from Chinese loess (in Chinese)[J]. *Scientia Sinica Terra*, 2016, 46(10): 1406-1412.]
- [2] 王斌,曾琳,赵万苍,等.对黄土高原风尘搬运动力与沉积控制因素的新认识[J].中国沙漠,2017,37(2):237-246.[WANG Bin, ZENG Lin, ZHAO Wancang, et al. A new progress of the transport dynamics and the accumulation factors of the aeolian dust in Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Deserts Research*, 2017, 37(2): 237-246.]
- [3] Sun M, Zhang X, Tian M, et al. Loess deposits since early Pleistocene in northeast China and implications for desert evolution in east China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 155(2):164-173.
- [4] Sun D H, Zhang Y B, Yan F H, et al. Magnetostratigraphic and paleoenvironmental records for a Late Cenozoic sedimentary sequence from Lanzhou, Northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 76 (2011): 106-116.
- [5] 徐树建,丁新潮,倪志超.山东埠西黄土剖面沉积特征及古气候环境意义[J].地理学报,2014,69(11):1707-1717.[XU Shujian, DING Xinchao, NI Zhichao. The sedimentary characteristics of Buxi Loess profile in Shandong Province and their paleoclimatic and paleoenvironment significance[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(11): 1707-1717.]
- [6] 李腾飞,李金凤,鲁瑞洁,等.青海湖东岸沙地风成沉积物粒度敏感组分及其古气候意义[J].中国沙漠,2017,37(5):878-884.[LI Tengfei, LI Jinfeng, LU Ruijie, et al. Extraction of grain-size components with environmentally sensitivity of aeolian sediments in eastern shore of Qinghai Lake and their paleoclimatic implications [J]. *Journal of Deserts Research*, 2017, 37(5): 878-884.]
- [7] 王琳栋,杨太保,梁焯,等.会宁地区全新世黄土沉积粒度特征及其古气候意义[J].干旱区研究,2016,33(6):1150-1156.[WANG Lindong, YANG Taibao, LIANG Ye, et al. Grain size characteristics in the loess-paleosol at Huining Section and its signification to paleoclimate during Holocene[J]. *Arid Zone Research*, 2016, 33(6): 1150-1156.]
- [8] 陈洪云,孙有斌.黄土高原风尘沉积的物质来源研究:回顾与展望[J].第四纪研究,2008,28(5):892-900.[CHEN Hongyun, SUN Youbin. Study on provenance of eolian dust deposits on the Chinses Loess Plateau: Retrospects and prospects[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(5): 892-900.]
- [9] 何继山,梁杏,李静,等.天津滨海平原区深孔沉积物环境敏感粒度提取及其意义[J].地球科学,2015,40(7):1215-1225.[HE Jishan, LIANG Xi, LI Jing, et al. Environmentally sensitive grain-size extraction of deep hole sediment from Tianjin coastal plain and its significance[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(7): 1215-1225.]
- [10] 周烨,蒋富清,南青云,等.奄美三角盆地晚更新世以来碎屑沉积物粒度特征及其物源和古气候意义[J].地球科学进展,2016,31 (3): 298-309.[ZHOU Ye, JIANG Fuqing, NAN Qinyun, et al. Grain-size distribution of detrital sediment in the AmamiSankaku Basin since late Pleistocene and its provenance and paleoclimate implications[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(3): 298-309.]
- [11] 葛本伟,刘安娜.天山北麓黄土沉积的光释光年代学及环境敏感粒度组分研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):110-116.[GE Benwei, LIU Anna. Optically stimulated luminescence dating and analysis of environmentally sensitive grain-size component of Loess in the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 110-116.]
- [12] Zhang X N, Zhou A F, Xie H C, et al. Unmixing grain-size distributions in lake sediments: a new method of endmember modeling using hierarchical clustering[J]. *Quaternary Research*, 2017:1-9.
- [13] Weltje G J, Prins M A, Muddled or mixed? Inferring paleoclimate from size distributions of deep-sea clastics[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162:39-62.
- [14] Yu S Y, Steven M. Colman, Li L X. BEMMA: A hierarchical bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions[J]. *Math Geosci*, 2016, 48:723-741.
- [15] 张晓东,季阳,杨作升,等.南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J].中国科学:地球科学,2015,45 (10): 1515-1523.[ ZHANG Xiaodong, JI Yang, YANG Zuosheng, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(10): 1515-1523.]
- [16] 赵松,常凤鸣,李铁刚,等.粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用[J].海洋地质与第四纪地质,2017,37(3):187-196.[ZHAO Song, CHANG Fengming, LI Tiegang, et al. The application of grain-size end member algorithm to paleoenvironmental reconstruction on inner shelf of East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 187-196.]
- [17] 李志文,李保生,孙丽,等.柳夼剖面末次冰期层段Rb/Sr的不稳定变化及其揭示的气候特征[J].热带地理,2015,35(4): 592-600.[ LI Zhiwen, LI Baosheng, SUN Li, et al. Climatic characteristics indicated by the variations of Rb/Sr in the Liukuang Section during the Last Glacial Period [J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(4): 592-600.]
- [18] 程振波,傅命佐,鞠小华.渤海海峡和辽东半岛海岸带黄土中的古生物化石的地质意义[J].海洋地质与第四纪地质,1996, 16(1):85-94. [CHENG Zhenbo, FU Mingzuo, JU Xiaohua. Geological significance of paleontological fossils in coastal loess in the Bohai Strait and Liaodong Peninsula[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(1): 85-94.]
- [19] 刘恩峰,张祖陆,沈吉.莱州湾南岸滨海平原晚更新世以来古环境演变的孢粉记录[J].古地理学报,2004,6(1):78-84.

- [LIU Enfeng, ZHANG Zulu, SHEN Ji. Spore-pollen records of environmental change on south coast plain of Laizhou Bay since the Late Pleistocene[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1):78-84.]
- [20] 王箫风,郑祥民,许健,等.山东长岛黄土沉积物的磁性与碳酸盐特征及其环境意义初探[J].*云南地理环境研究*,2007,19(4):133-138.[WANG Xiaofeng, ZHENG Xiangmin, XU Jian, et al. The primary research on magnetic measurements and CaCO<sub>3</sub> from loess sediments of Changdao in Shandong[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19 (4): 133-138.]
- [21] 彭淑贞,朱丽君,肖国桥,等.山东青州黄土的地层年代及其物质来源研究[J].*干旱区地理*,2010,33(6):947-953.[PENG Shuzhen, ZHU Lijun, XIAO Guoqiao, et al. Magnetostratigraphy and provenance of the Qingzhou Loess in Shandong Province[J]. *Arid Land Geography*, 2010,33(6):947-953.]
- [22] 徐树建,王涛.蓬莱黄土剖面光释光年代学及其沉积特征研究[J].*中国沙漠*,2011,31(2):295-301.[XU Shujian, WANG Tao. Optically stimulated luminescence dating and sedimentary characteristics of loess section at Penglai in Shandong Province[J]. *Journal of Deserts Research*, 2011,31(2):295-301.]
- [23] 丁新潮,曹文,徐树建,等.山东砣矶岛大口北黄土剖面的沉积特征及其古环境意义[J].*干旱区资源与环境*,2016,30(10):192-197.[DING Xinchao, CAO Wen, XU Shujian, et al. The sedimentary characteristics of Dakoubei loess profile in Tuoji island and their paleoenvironment significance[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30 (10) : 192-197.]
- [24] Grootes P M, Stulver M, Whlte J W C, et al. Comparison of oxygen isotope records from the GISP2 and GRIP Greenland ice cores[J]. *Nature*, 1993,366:552-554.
- [25] Wang Q S, Song Y G, Zhao Z J, et al. Color characteristics of Chinese loess and its paleoclimatic significance during the last glacial - interglacial cycle[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*,2016,116 :132-138.
- [26] Guo Z T, A Berger, Yin Q Z, et al. Strong asymmetry of hemispheric climates during MIS-13 inferred from correlating China loess and Antarctica ice records[J]. *Climate of the Past*,2009,5:21-31.
- [27] 李小艳,赵泉鸿,姚政权,等.渤海百万年以来的海侵记录;BH08孔有孔虫和介形类证据[J].*海洋地质与第四纪地质*,2015,35(6):93-108.[LI Xiaoyan, ZHAO Quanhong, YAO Zhenquan, et al. Transgressive records of last million years in the Bohai Sea, China: Evidence from foraminifera and ostracoda of Core BH08[J]. *Marine Geology&Quaternary Geology*, 2015,35(6):93-108.]
- [28] 蔡爱智.论芝罘连岛沙坝的形成[J].*海洋与湖沼*,1987,9(1):1-14.[CAI Aizhi. On the formation of Zhifu Tombolo[J]. *Oceanologic et Limnologic Sinica*, 1987,9(1):1-14.]
- [29] 邢秀臣,杜国云,魏新华,等.芝罘岛北岸海湾砾滩侵蚀研究[J],*湖沼海洋通报*,2009(1):73-78.[XING Xiuchen, DU Guoyun, WEI Xinhua, et al. The erosion of gravel beaches in northern coast of Zhifu Island[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2009(1):73-78.]
- [30] Folk R L, Ward W C. Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameter[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*,1957(27):3-27.
- [31] Salvador S, Chan P. Determining the number of clusters/segments in hierarchical clustering/segmentation algorithms[J]. In: *Proceedings 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, Boca Raton, FL, 2004: 576-584.
- [32] 郭正堂.黄土高原见证季风和荒漠的由来[J].*中国科学:地球科学*,2017,47,(4):421-437.[ GUO Zhengtang. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts (in Chinese)[J]. *Scientia Sinica Terra*, 2017,47(4): 421-437.]
- [33] 朱显模.我国黄土性沉积物中的古土壤[J].*第四纪研究*,1965,4:9-19.[ZHU Xianmo. Paleosol in the Loess sediments of China[J]. *Quaternary Sciences*,1965,4:9-19.]
- [34] 曹家欣,李培英,石宁.山东庙岛群岛的黄土[J].*中国科学(B辑)*,1987,10(10):1117-1122.[CAO Jiaxin, LI Peiying, SHI Ning. Loess of Miaodao Islands in Shandong Province[J]. *Science China(Series B)*, 1987,10(10):1117-1122.]
- [35] Du S H, Li B S, Chen M H, et al. Paleotempestology evidence recorded by eolian deposition in the Bohai Sea coastal zone during the last interglacial period[J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 78-83.
- [36] 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):327-335. [ 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):327-335.]
- [37] 管清玉,潘保田,高红山.等.粘粒含量—夏季风的良好替代指标[J].*干旱区资源与环境*,2004,18(8):17-19. [GUAN Yu-qing, PAN Baotian, GAO Hongshan, et al. A good proxy of east Asian monsoon-fine grain size[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2004,18(8):17-19.]
- [38] 董光荣,靳鹤龄,陈惠忠.末次间冰期以来沙漠—黄土边界带移动与气候变化 [J].*第四纪研究*,1997,17 (2): 158-167.[ DONG Guangrong, JIN Heling, CHEN Huizhong. Desert-loess boundary belt shift and climatic change since the Last Interglacial period[J]. *Quaternary Sciences*, 1997,17(2):158-167.]
- [39] 孙继敏,丁仲礼,刘东生,等.末次间冰期以来沙漠—黄土边界带的环境演变[J].*第四纪研究*,1995,15(2):117-122.[SUN Jimin, DING Zhongli, LIU Dongsheng, et al. Environmental changes in the desert-loess transitional zone of north china since beginning of the last interglacial[J]. *Quaternary Sciences*, 1995,15(2):117-122.]
- [40] Bian C W, Jiang W S, Richard J, et al. The suspended sediment concentration distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Oceanic and Coastal Sea Research*, 2013, 12 (3): 345-354.
- [41] 徐树建,潘保田,高红山,等.末次间冰期-冰期旋回黄土环境敏感粒度组分的提取及意义[J].*土壤学报*,2006,43(2):183-189.[XU Shujian, PAN Baotian, GAO Hongshan, et al. A-

- nalysis of grain-size populations with environmentally sensitive components of loess during the Last Interglacial-glacial cycle and their implications[J].Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(2):183-189.]
- [42] 刘厚敏,吴世迎,王永吉.黄海晚第四纪沉积[M].北京:海洋出版社,1987.[LIU Houmin, WU Shiying, WANG Yongjie. Late Quaternary Sediments in the Yellow Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1987.]
- [43] 刘东生.黄土与环境[M].北京:科学出版社,1985.[LIU Dongsheng. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [44] 姚政权,石学法.渤海湾沿岸第四纪海侵研究进展[J].海洋地质前沿,2015,31(2):9-16.[YAO Zhengquan, SHI Xuefa. A review of Quaternary transgression researches along the Bohai Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2015,31(2):9-16.]