

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019042901

# 辽南地区金州西团瓢湖沼相沉积物粒度化学特征及环境意义

张威, 成然, 马瑞丰, 麻浩男, 葛润泽, 孙波, 赵贺

辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

**摘要:**湖泊沉积物以其沉积速率快、连续性好、分辨率高等特性成为研究历史时期气候变化的理想载体。辽东半岛南部处于亚欧大陆东岸, 保留多处典型的湖相沉积。以辽南地区金州西团瓢湖沼相沉积物为研究载体, 通过野外调查与室内粒度、化学元素、烧失量、电导率实验相结合的方法, 探讨了该区域的环境变化。结果表明: 研究区沉积期气候经历了寒冷干燥 (15.64~30.81 kaBP) - 寒冷干旱 (10.36~15.64 kaBP) - 温暖干旱 (5.77~10.36 kaBP) - 温暖湿润 (0.90~5.77 kaBP) - 温凉干旱 (0.90 kaBP 至今) 5 个阶段, 结合地球化学指标的对比分析, 初步认为端元 1 可能指示东亚季风及坡面流水带来的细颗粒沉积物, 端元 2 可能代表动力较低的弱水流沉积物, 端元 3 则可能代表动力较强的冲洪积物。

**关键词:**湖相沉积; 粒度; 端元分析; 辽南地区

中图分类号: P534.63 文献标识码: A

## Grain-size and chemical characteristics of the lacustrine deposits from the Xi Tuanpiao profile in Jinzhou, southern Liaoning province and their environmental significances

ZHANG Wei, CHENG Ran, MA Ruifeng, MA Haonan, GE Runze, SUN Bo, ZHAO He

School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

**Abstract:** Lake deposits are ideal carriers for study of climate changes in history due to their high deposition rate, good continuity and high resolution. The southern part of Liaodong peninsula lies on the east coast of the Eurasian continent, and some typical Quaternary lacustrine deposits are well preserved there. In this paper, the lacustrine sediments from the western Jinzhou, southern Liaoning province were taken as the research carriers for reconstruction of environmental changes. Field investigation is carried out together with laboratory testing for particle size, chemical composition, ignition loss and electrical conductivity. The results show that the study area has suffered a climate change from cold and drought (30.81~15.64 kaBP) to cold and drought (15.64~10.36 kaBP) to warm and drought (10.36~5.77 kaBP) to warm and humid (5.77~0.90 kaBP) and to cool and drought (0.90 kaBP until now). Combined with the comparative study of geochemical indicators, it is preliminarily believed that the EM1 may indicate the fine particles carried into the lake by wind and flowing water, the EM2 represent a kind of weak fluvial sediments, and the EM3 a strong alluvium deposits.

**Key words:** lacustrine; grain size; end member analysis; Southern Liaoning

辽南地区作为海陆交互地带, 受来自陆地和海洋的双重气候变化影响。该地区的湖泊沉积物序列连续, 是研究历史时期气候变化的理想载体。20 世纪 70 年代, 中国科学院贵阳地球化学研究所对辽南地区普兰店湖相沉积进行研究, 通过孢粉分析与<sup>14</sup>C 测年讨论了全新世以来的气候变化, 早全新世 (10.0~8.0 kaBP) 气候总体温和干燥; 中全新世 (8.0~2.5 kaBP) 前期气候温暖湿润, 后期温暖较干燥; 晚全新世 (2.5 kaBP 至今) 气温偏凉, 前期湿润,

后期干燥<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代, 李雪铭对辽南大莲泡湖相沉积进行研究, 通过孢粉与粒度分析恢复了区内全新世以来的气候演化, 所得到的结论与中国科学院贵阳地化所基本一致<sup>[2]</sup>。虽然不同的学者对研究区全新世的气候变化特征进行了初步研究, 但是时间尺度比较短。对于晚更新世以来的气候环境变化研究成果较少, 且绝大多数根据陆架黄土, 采用一些比较传统的环境替代性指标对环境变化进行研究<sup>[3-4]</sup>, 分辨率并不高, 尤其是对粒度与化学数

资助项目: 国家自然科学基金“他念他翁山中段晚第四纪冰川地貌演化过程与环境重建研究”(41671005)

作者简介: 张威 (1969—), 男, 博士, 教授, 从事环境与灾害地貌研究, E-mail: zhangweilnu@163.com

收稿日期: 2019-04-29; 改回日期: 2019-10-16. 文凤英编辑

据的处理方面,分析方法和手段比较单一。因此,本文在详细野外调查的基础上,对辽南地区保存完整的西团瓢湖相沉积剖面进行高分辨率采样,采用端元模型对湖相沉积物的粒度变化特征进行深入分析,并结合粒度参数以及地球化学元素 CIA、烧失量、电导率等指标,探讨研究区晚更新世末期以来的环境演化特征。

## 1 研究区概况

研究区位于辽东半岛南部,地貌表现为中央高、东西两侧低(图1)。区内由孢子崖向斜、付家村-七顶山背斜和西团瓢向斜组成一个北西向复向斜构造。研究区出露地层有震旦系灰岩、泥质灰岩、石英岩,古生界寒武系云母砂岩、页岩、灰岩,奥陶系硅质灰岩、白云质灰岩。本区属于暖温带亚湿润气候区,西临渤海,受海洋性气候影响大,年平均气温 10.1℃,年降水量 660 mm<sup>[5]</sup>。西团瓢剖面位于辽宁省大连市金州区西团瓢村,处于由大西山、七顶山及大东山围成的盆地中(图2)。盆地东侧为三十里堡河,该河从东南流向西北,穿盆而过,注入渤海湾。盆地南部剥蚀发育了多条沟谷,出山口后均汇入湖盆<sup>[2]</sup>。剖面距离渤海约 10.36 km,距离黄海约 36.29 km。大莲泡位于西团瓢西南部 2 km 处,同处于山间湖盆中,发育了约 3 m 厚的松散沉积物。下层(1.65~3 m),为黄棕色亚黏土层,以坡面

沟谷冲积为主,大莲泡湖沼处于初始阶段,孢粉数量较少,且多为耐寒冷干旱的花粉,说明当时气候恶劣,植被稀疏,雨水冲刷坡面携带碎屑物进入湖盆;中层(0.85~1.65 m),为黑褐色黏土层,富含有机质,早期坡面沟谷冲积作用减少,以湖泊沉积为主,环境稳定,沉积了大量细颗粒物,有大量阔叶树种及水生植物的花粉,推断此阶段处于全新世温暖湿润期,但有一段出现大量盐生蒿属的孢粉,与海水侵入湖盆有关;上层(地表至 0.85 m 处)为黄棕色粉砂层,下段为草炭层,<sup>14</sup>C 年代测定为 667±100a,以河流作用为主,草本植物花粉增加,水生植物减少,标志气候又逐渐恶劣,湖盆变浅,最终干涸消失<sup>[2]</sup>。

## 2 资料和方法

### 2.1 剖面特征

西团瓢剖面(39°14'54.32"N、121°43'39.61"E)位于辽宁省大连市金州区西团瓢村(图3)。剖面厚 354 cm,根据岩性特征将剖面划为 8 个地层单元,剖面岩性特征描述如下:

- (1) 0~24 cm, 现代生草层, 富含植物根系;
- (2) 24~74 cm, 粉—中砂层, 由深棕色过渡至浅棕色, 夹有灰白色黏土条带, 较疏松;
- (3) 74~136 cm, 泥炭层, 由棕黑色过度到黑色, 紧实, 富含植物残体;

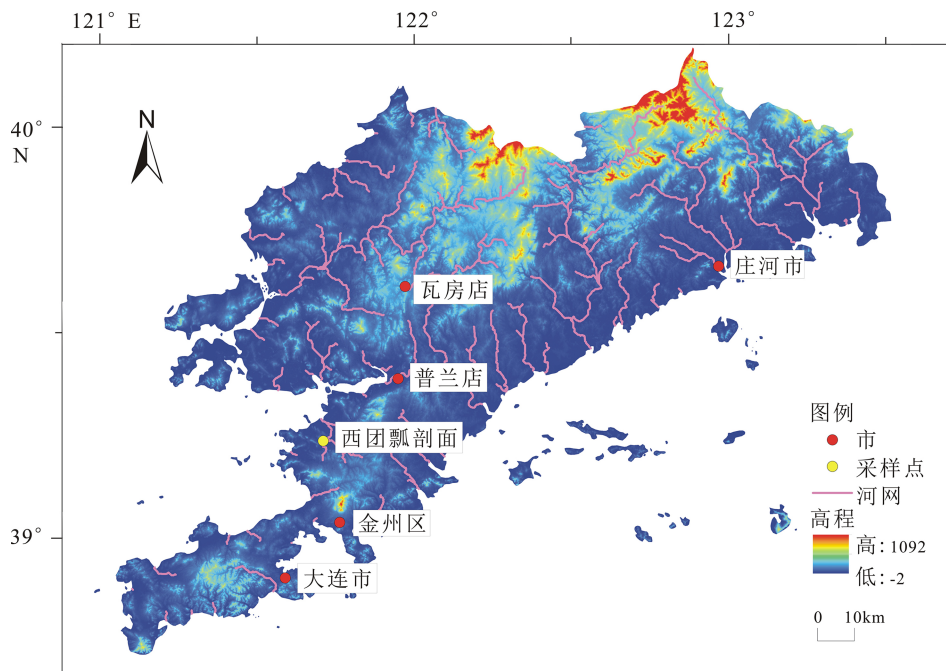


图1 研究区和采样点位置图

Fig.1 Sampling site location in study area

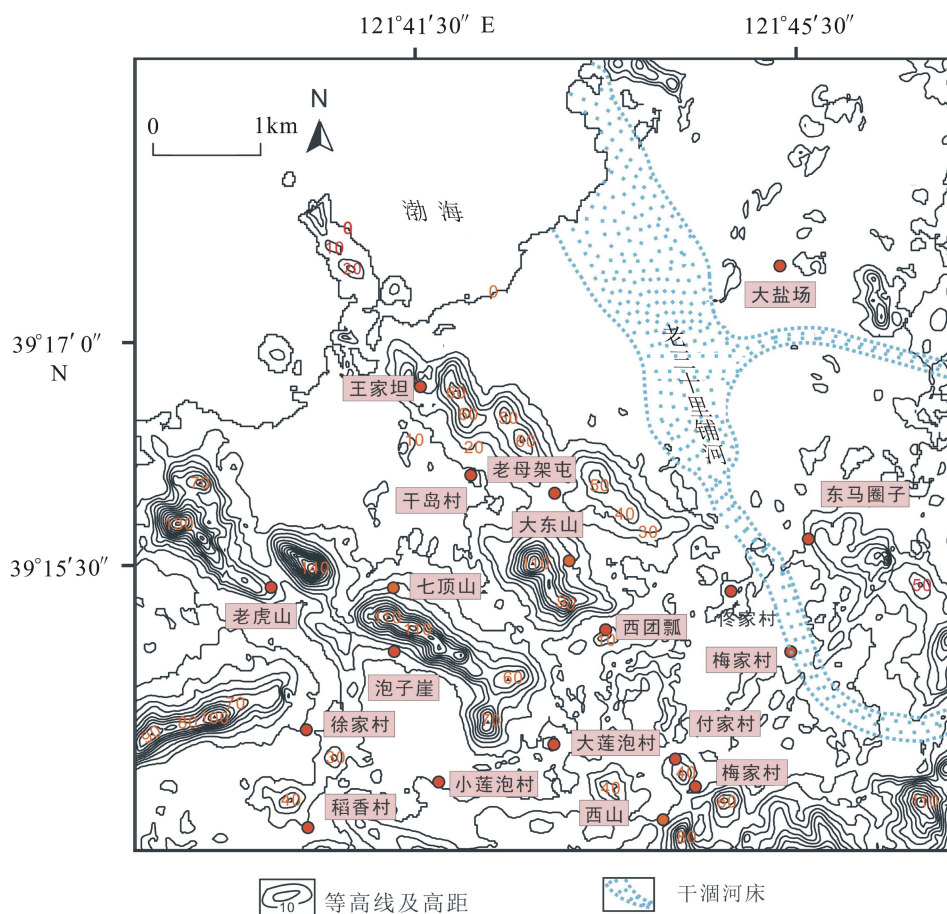


图 2 研究区地形图

Fig.2 Topographic map of study area

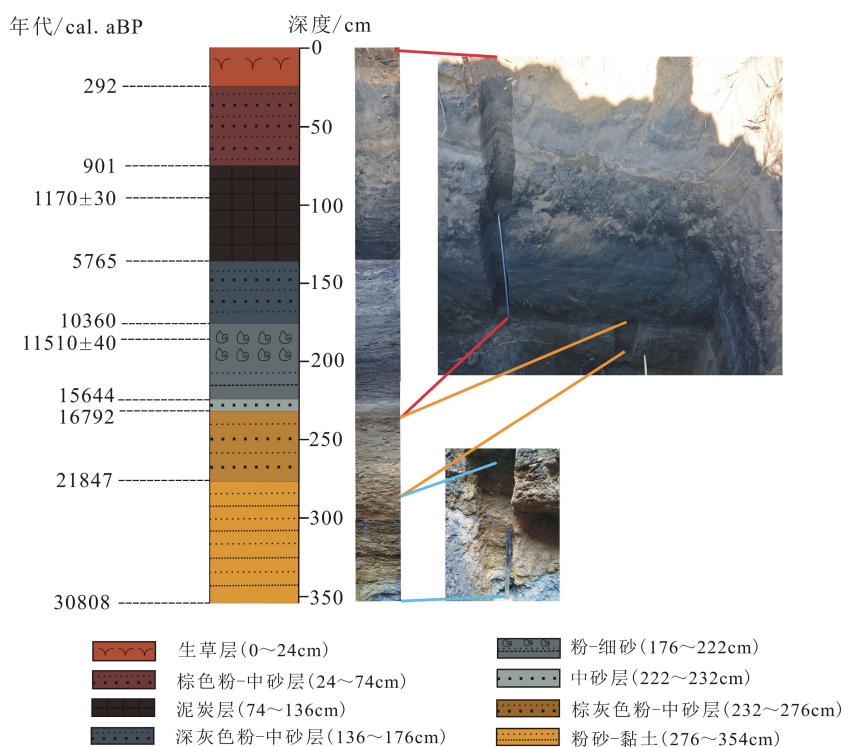


图 3 西团瓢剖面照片和岩性柱状图

Fig.3 Photographs and lithologic histogram of the Xi Tuanyuan profile



(4) 136~176 cm, 粉—中砂层, 深灰色, 夹浅灰色黏土条带, 较紧实;

(5) 176~222 cm, 粉—细砂层, 浅灰色, 212 cm 以上可见螺壳;

(6) 222~232 cm, 中砂层, 灰白色, 有黄色锈斑, 较疏松;

(7) 232~276 cm, 粉—中砂层, 棕灰色, 夹杂黄色锈斑及黏土条, 偶有白色钙结核, 较紧实;

(8) 276~354 cm, 粉砂—黏土层, 棕黄色, 有黄色锈斑, 夹有灰色黏土条; 下部为灰色大石块。

在剖面每个层位进行样品采集, 每隔 2 cm 采集一个样品, 共采集样品 177 个。

## 2.2 实验方法

粒度测试使用 LS13320 激光衍射粒度仪, 粒级以 Krumbein 粒级( $\varphi$ )表示, 转换公式为  $\varphi = -\log_2 d$ , 其中  $d$  为粒级(mm)。

化学元素测试使用日本理学公司生产的 ZSX Prinmus II 型 X 射线荧光光谱仪。测试了样品中元素所对应的氧化物的含量。

烧失量测量: 先将样品在 110 °C 下烘干 1 h 以去除水分, 再用精度为 0.000 1 g 的电子秤称取 1 g 样品, 使用 550 °C 马沸炉燃烧 4 h, 冷却后称重。

黏土混浊水电导率测量: 先将样品在 110 °C 下烘干 48 h, 再将样品研磨至 31 目以下, 称取 10 g 放入烧杯中, 加入 120 mL 蒸馏水。搅拌 3 min, 静置 1 h 后开始测量。仪器为 DDS-320 型电导率仪。以上实验均在辽宁师范大学实验中心完成。

$^{14}\text{C}$  年代样品为 96 cm 深处的植物残体和 186 cm 深处的螺壳, 利用加速器质谱仪测定, 在美国 Beta 实验室完成。测定的年代分别为  $1\ 170 \pm 30$  cal.aBP、 $11\ 510 \pm 40$  cal.aBP。0~96 cm 的沉积速率为 8.20 mm/a, 96~186 cm 的沉积速率为 0.87 mm/a。底部 354 cm 处的年代推测为 30 808 cal.aBP。其他各层位年代如图 3 所示。

## 2.3 分析方法

### 2.3.1 粒度特征

沉积物粒度特征通过粒度组成特征、频率曲线特征、粒度统计参数特征来表达, 其中统计参数包括平均粒径、中值粒径、标准偏差、偏态和峰态, 以上参数计算采用图解法<sup>[6]</sup>, 对各参数的分级以及定性描述术语参照卢连战的分级标准<sup>[7]</sup>。

### 2.3.2 端元分析

沉积物是由多种沉积动力因素共同作用的结

果, 因此将不同沉积动力过程分解出来可以更有效地反演物质来源及沉积过程。端元分析模型主要用于对沉积物粒度数据进行组分分离<sup>[8]</sup>, 在识别和分析沉积物各动力组分中得到广泛应用<sup>[9-10]</sup>。Weltje 结合前人的研究, 归纳出了端元分析模型, 并提出了动力组分(Dynamic Population)这一概念。端元分析模型的目的就在于从沉积物的粒度数据中提取出与动力组分相对应的端元(End Member, 简称 EM)。

湖泊沉积物一般由多个不同时期的动力组分混合而成, 根据端元分析模型, 粒度数据集  $X$  可以用多个端元成分的数据集  $B$  的线性组合来表示:

$$X = MB \quad (1)$$

其中,  $X(m \times n)$  为沉积物样品粒度的矩阵,  $M(m \times k)$  为端元含量的混合矩阵,  $B(k \times n)$  为端元粒度的矩阵 ( $m$ : 样品总数,  $n$ : 粒级总数,  $k$ : 端元总数)

由于沉积物搬运过程的特殊性以及在采集样品和进行实验时可能出现的误差, 一般很难得到符合公式(1)的完美混合矩阵, 因此矩阵由两部分组成, 即完美混合矩阵  $X'$  和误差矩阵  $E$ <sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned} X' &= X - E \\ X' &= MB \\ X &= MB + E \end{aligned} \quad (2)$$

本文采用 Peterson 改进后的端元分析模型<sup>[12]</sup>, 在 Matlab 软件中运行端元计算程序, 导入粒级数据, 并假定端元数在 1~10 之间。端元数越大, 粒级复相关系数  $R^2$  越接近于 1,  $R^2$  在 0.8 以上表示端元数基本满足拟合的要求。为了便于分离出沉积物的动力组分, 端元分析尽量以端元数为少的原则进行, 因此本文最终选择 3 个端元对该组粒度数据进行分析(图 4)。

## 3 结果分析

### 3.1 粒度组成特征

按照吴正的粒度分级标准<sup>[13]</sup>, 将沉积物粒径分为 6 个等级: 黏土: 0~4  $\mu\text{m}$ , 粉砂: 4~63  $\mu\text{m}$ , 极细砂: 63~125  $\mu\text{m}$ , 细砂: 125~250  $\mu\text{m}$ , 中砂: 250~500  $\mu\text{m}$ , 粗砂: >500  $\mu\text{m}$ 。按照这个标准, 对西团瓢湖沼相沉积物粒度组成特征进行分析, 结果如图 5 所示。

从粒度组成图中可以看出, 整个剖面粗砂含量最少, 平均值仅为 4.4%, 极细砂含量次之, 粉砂含量最高, 平均值达到 43.4%。不同层位沉积物的粒级组成存在一定差异。0~24 cm 的现代生草层以中



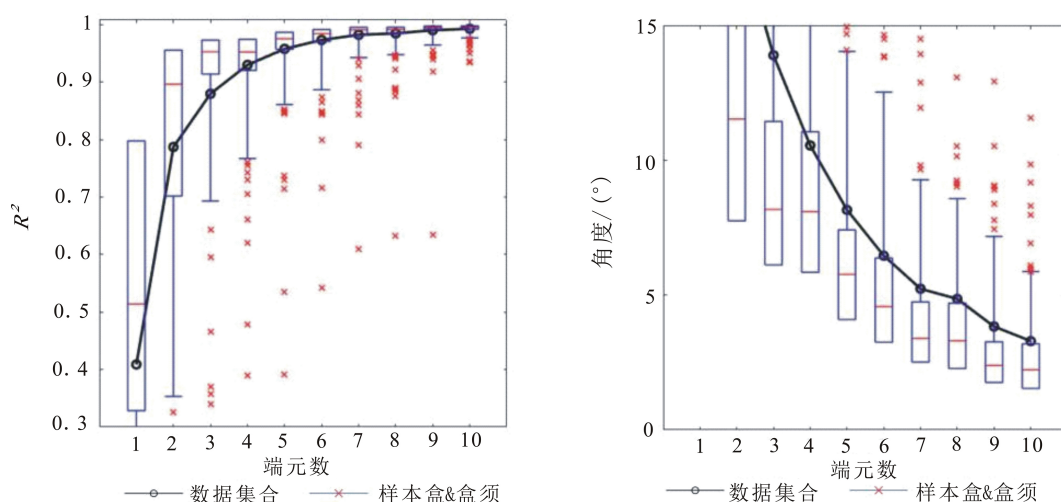


图 4 端元线性相关 (a) 和角度离差 (b)

Fig.4 Linear correlation of end members (a) and angular dispersion (b)

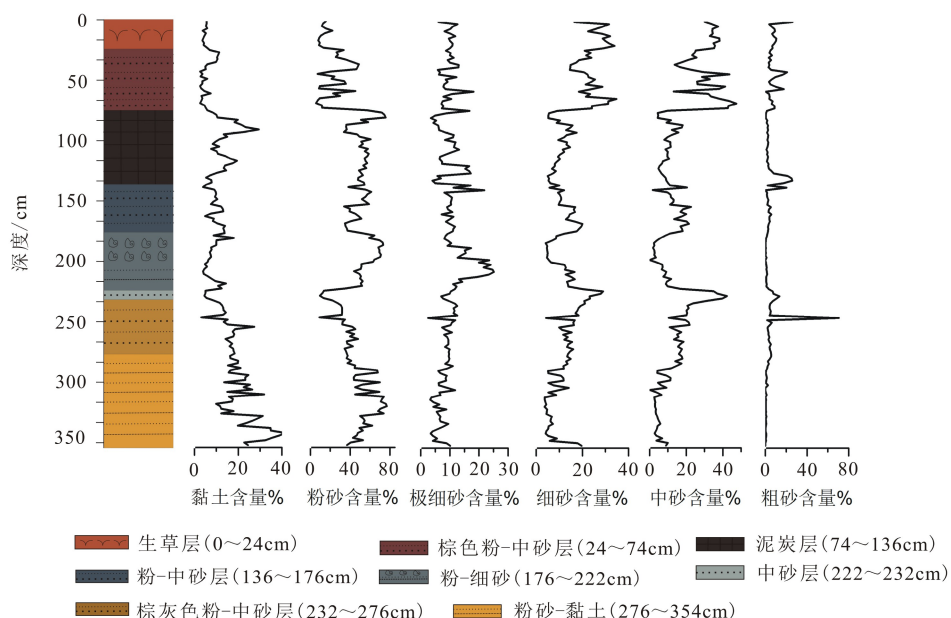


图 5 西团瓢剖面粒度组成

Fig.5 The composition of the grain size of the Xi Tuanpiao profile

砂和细砂含量为主, 平均含量分别为 34.98% 和 28.24%; 24~74 cm 沉积物以中砂和粉砂为主, 平均含量分别为 29.97% 和 25.48%, 该层沉积物粒度组分随深度变化的幅度较大。与上一层相比, 74~136 cm 的泥炭层的粉砂和黏土明显增加, 粉砂含量由 25.48% 增加到 53.77%, 黏土含量由 5.51% 增加到 14.26%。136~176 cm 的沉积物以粉砂和中砂为主, 平均含量分别为 46.56% 和 15.33%。黏土与粗砂含量比泥炭层偏低。176~222 cm 沉积物以粉砂和极细砂为主, 平均含量分别为 59.54% 和 15.75%, 其中粉砂的平均含量为整个剖面的最大值。222~232 cm 的沉积物以中砂和细砂为主, 平均含

量分别为 35.30% 和 24.70%, 黏土含量仅为 0.50%, 是整个剖面的最低值。232~276 cm 的沉积物与上一层位相比颗粒较细, 以粉砂和中砂为主, 平均含量分别为 34.42% 和 18.30%。276~354 cm 的沉积物以粉砂和黏土为主, 平均含量分别为 46.73% 和 23.00%, 其中黏土组分的平均含量比其他层位的黏土含量都高, 粗砂含量极少, 仅为 0.61%。

### 3.2 频率曲线特征

频率曲线的横坐标一般用沉积物的粒径区间来表示, 而纵坐标用不同粒径区间的体积百分比表示。频率曲线呈现的粒度特征可以直接反映当时

的沉积环境。峰值个数越多,代表着沉积环境越复杂,曲线只有一个峰意味着沉积环境比较稳定,水动力条件单一。曲线出现两个及以上峰表示沉积环境不稳定。沉积时期的水动力条件会关系到峰值分布的区间,如果峰值处于较粗的粒度区间,则表示水动力条件较强,如果峰值处于较细的粒度区间,则表示水动力条件较弱。

如图6所示,剖面沉积物的粒度频率分布曲线整体以单峰和双峰为主,峰值主要出现在 $2\Phi$ 附近,另有一部分双峰曲线的峰值出现在 $2\Phi$ 、 $5\Phi$ 和 $7\Phi$ 附近,可见沉积环境不稳定。由图5所示, $0\sim 24$ 、 $24\sim 74$ 、 $222\sim 232$ 、 $232\sim 276$  cm的沉积物粒度频率分布曲线以单峰为主,且峰值出现在 $2\Phi$ 附近,说明在这些阶段湖泊沉积环境稳定,且水动力较强,其中 $24\sim 74$ 和 $232\sim 276$  cm的频率曲线出现弱峰,说明在这两个阶段沉积环境出现一定波动。 $176\sim 222$  cm的频率曲线呈现单双峰交杂的情况,峰值主要集中在 $5\Phi$ 附近,还有部分双峰峰值集中在 $2\Phi$ 和 $7\Phi$ 附近,说明此时期沉积环境不稳定,且水动力较弱,呈现低能。 $74\sim 136$ 、 $136\sim 176$ 和 $276\sim 354$  cm的频率曲线以双峰为主,且交错繁复,峰值大致出现在 $2\Phi$ 和 $5\sim 7\Phi$ 附近,说明这两个阶段沉积环境复杂,水动力强弱交替。

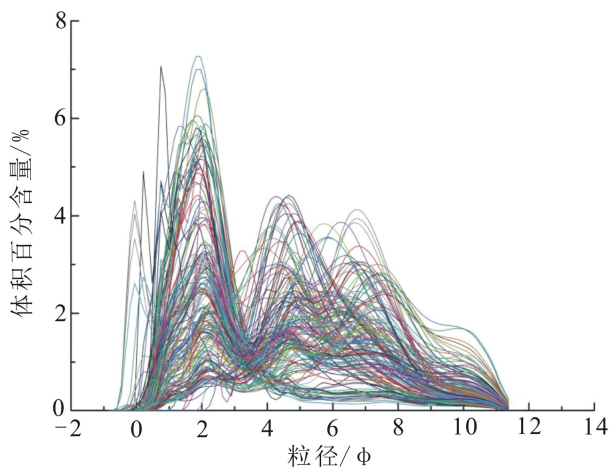


图6 西团瓢剖面粒度频率分布曲线

Fig.6 Drain-size distribution of the Xi Tuanpiao profile

### 3.3 粒度统计参数特征

沉积物粒度特征除了通过频率分布曲线表达,还可用平均粒径、标准偏差、偏态和峰态等参数进行分析。不同参数表示的沉积意义各不相同,同时各参数之间相互关联,因此通过对粒度参数进行分析可以更好地推断沉积环境。

如图7所示,金州西团瓢剖面的平均粒径为

$0.70\sim 7.30\Phi$ ,且波动明显。现代生草层( $0\sim 24$  cm)平均粒径最大,平均值为 $2.53\Phi$ ;中砂层( $222\sim 232$  cm)次之,平均值为 $2.81\Phi$ ;粉—中砂层( $24\sim 74$  cm)居于其后,平均值为 $3.14\Phi$ ;之后平均粒径由大到小的层位依次是粉—中砂层( $232\sim 276$  cm)、粉—中砂层( $136\sim 176$  cm)、粉—细砂层( $176\sim 222$  cm)、泥炭层( $74\sim 136$  cm),平均粒径的平均值分别为: $4.32$ 、 $4.43$ 、 $4.86$ 、 $4.99\Phi$ 。粉砂—黏土层( $276\sim 354$  cm)最小,平均值为 $5.88\Phi$ 。

剖面沉积物粒度的分选系数范围为 $1.15\sim 3.11$ ,数值越大,代表分选效果越差。根据图解法对分选系数等级的定性描述可知,该剖面整体处于分选较差到分选差的程度,但是不同层位的分选程度不同,可进行剖面内部比较。现代生草层( $0\sim 24$  cm)的分选系数平均值为 $1.89$ ,与其他层位相比,分选效果最好;粉—细砂层( $176\sim 222$  cm)次之,分选系数平均值为 $1.95$ ;中砂层( $222\sim 232$  cm)居于其后,分选系数平均值为 $2.01$ ;之后分选效果由好变差的层位依次是粉—中砂层( $24\sim 74$  cm)、粉—中砂层( $136\sim 176$  cm)、粉砂—黏土层( $276\sim 354$  cm)、泥炭层( $74\sim 136$  cm),分选系数依次是 $2.05$ 、 $2.46$ 、 $2.48$ 、 $2.54$ ;粉—中砂层( $232\sim 276$  cm)分选效果最差,分选系数平均值为 $2.79$ 。

剖面整体偏态值为 $-0.29\sim 0.74$ ,平均值为 $0.13$ ,剖面整体表现为正偏态,沉积物颗粒较粗,分选较差,沉积时期水动力较强且不稳定;不同层位偏态值不同,可进行内部比较。中砂层( $222\sim 232$  cm)偏态值最大,现代生草层( $0\sim 24$  cm)次之,粉—中砂层( $24\sim 74$  cm)位于其后,平均值分别为 $0.49$ 、 $0.48$ 、 $0.39$ ,这3个层位的偏态特征都定性描述为极正偏。粉—中砂层( $232\sim 276$  cm)、粉—细砂层( $176\sim 222$  cm)的偏态值的平均值分别为 $0.26$ 、 $0.1$ ,这两个层位的偏态特征描述为正偏。泥炭层( $74\sim 136$  cm)、粉—中砂层( $136\sim 176$  cm)、粉砂—黏土层( $276\sim 354$  cm)的偏态值平均值分别为 $-0.07$ 、 $0.09$ 、 $-0.08$ ,这3个层位的偏态特征描述为近对称。

整个剖面的峰态值为 $0.63\sim 2.15$ ,平均值为 $1.06$ ,西团瓢剖面的峰态多表现为中等宽度,说明沉积物粒径较为集中,沉积时期的水动力条件总体表现为中能。粉—中砂层( $136\sim 176$  cm)峰态值最小,其平均值为 $0.82$ ,定性描述为平坦;泥炭层( $74\sim 136$  cm)、粉砂—黏土层( $276\sim 354$  cm)、粉—细砂层( $176\sim 222$  cm)峰态值的平均值分别为 $0.91$ 、 $0.99$ 、 $1.1$ ,这3个层位的峰态特征为中等宽度;粉—中砂层( $24\sim 74$  cm)峰态值的平均值为 $1.23$ ,峰态特

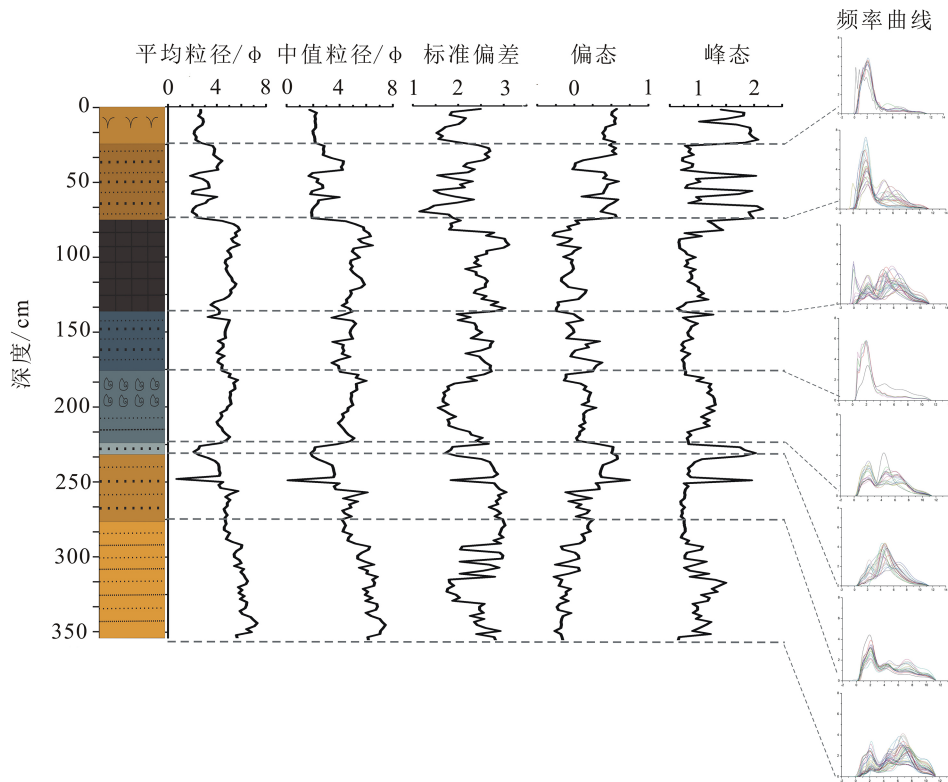


图 7 西团瓢剖面粒度特征曲线对比

Fig.7 Comparison diagram of profile particle size characteristic curve of the Xi Tuanpiao profile

征描述为尖锐;中砂层(222~232 cm)、现代生草层(0~24 cm)、粉—中砂层(232~276 cm)峰态值的平均值分别为 1.65、1.74、1.85,峰态特征描述为很尖锐。

### 3.4 端元分析结果

通过端元分析分离出的 3 个端元的粒级频率分布曲线图可以看出,各端元呈现的不同粒级的频率分布曲线均为单峰。根据各自的曲线形态特征,结合各深度地层中各端元组分的含量(图 8)以及其他气候指标综合判断各端元所代表的沉积动力特征。从端元 1 到端元 3 主体粒级粒径由小变大,其中端元 1 的平均粒径为 7.49 μm,众数为 9 μm 左右,属于粉砂,分选性最差,峰态最平坦,可能代表风成沉积和流水携带的入湖细颗粒;端元 2 的平均粒径为 38.02 μm,众数为 40 μm 左右,属于粉砂,分选水平最好,接近正态分布,与端元 1 相比峰态略尖锐,可能代表弱水流沉积;端元 3 的平均粒径最大,为 195.23 μm,众数为 300 μm 左右,属于中砂,分选水平居中,峰度值最大(表 1),可能属于冲洪积相沉积,水动力较强。从端元组分的含量上可以看出,端元 1 与端元 2、3 大致呈相反的趋势,随着地层的加深,端元 1 的含量呈现波动上升的趋势,端元 2 与端元 3 组分含量随着地层的加深都呈现波动下降

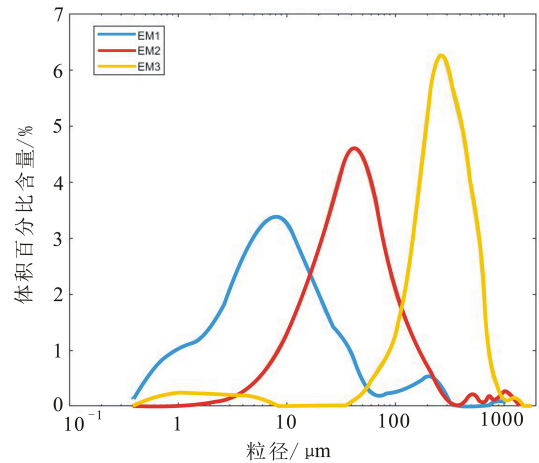


图 8 西团瓢剖面各端元频率分布曲线

Fig.8 Frequency distribution curves of each end member in the Xi Tuanpiao profile

表 1 西团瓢剖面各端元粒度参数特征  
Table 1 The end member parameters characteristic of The Xi Tuanpiao profile

	平均粒径/μm	分选系数	偏度	峰度
端元1	7.49	3.85	0.55	3.95
端元2	38.02	2.62	0.21	4.08
端元3	195.23	3.67	-2.85	11.67



的趋势。由图9可以看出,端元1与化学蚀变指数(CIA)较为对应。化学蚀变指数(CIA)是利用常量元素判断化学风化程度的指标,可以有效指示长石风化黏土矿物的程度,CIA值越大意味着风化程度越强,CIA值在50~65之间表示干冷的气候条件导致的低等化学风化程度;CIA值在65~85之间表示暖湿的气候条件导致的中等化学风化程度。金州西团瓢剖面沉积物CIA值的平均值为63.31,属于中等偏低的化学风化程度<sup>[14-16]</sup>。

烧失量表示在高温条件下,样品损失的部分占总质量的百分比。烧失量值越大表示样品中有机质含量越高。湖泊沉积物中的有机质含量可以有效地指示湖区气候环境特征,湿润的环境是有机质富集的重要条件,高温和寒冷都有助于有机质的积累<sup>[17]</sup>。金州西团瓢剖面有机质含量的平均值为13.61%,剖面内部各层位之间又存在差别,可进一步对比。

端元1是细颗粒组分,在现代生草层(0~24 cm)及向泥炭过渡的地层(24~74 cm)中含量较少,在泥炭层(74~136 cm)含量较多,在含有螺壳的湖泊沉积层(136~222 cm)中逐渐减少至最低。但随着地层的加深(222~354 cm),在3.08~1.68 kaBP端元1的含量逐渐增加至最高,此阶段气温低,降水少,风力强劲,由东亚季风带来的西北内陆地区的细颗粒组分较多。同时少量大气降水形成动力较弱的坡面径流,携带山区细颗粒进入湖泊,因此端元1可能指示风成沉积及坡面流水携带的细颗粒沉积,由于不同矿物抗风化能力的差异性,使得沉积物总体上粒径变小,差异性变大,分选性变大;端元2可能指示弱水流沉积,沉积物粒径较粗,分选较好。弱水流沉积指代由坡面径流与沟谷水流携带

流入湖泊的偏粗颗粒沉积物。随着地层的加深(0~232 cm),端元2含量逐渐增加,在186~232 cm(1.68~1.15 kaBP)富集。此阶段为气候由干冷向暖湿的过渡时期,降水量逐渐增大,西团瓢剖面属于山前平原,位于七顶山东南部,历史时期由于坡面流水作用,接收来自山区的偏粗颗粒沉积物;端元3可能指示水动力较强的冲洪积相沉积,分选较差。

### 3.5 剖面沉积环境

辽南大莲泡与西团瓢同处于由大西山、七顶山、大东山组成的山间小盆地,三十里堡河居于盆地东侧,由东南向西北穿盆而过,注入渤海湾。通过孢粉分析发现,大莲泡1.10~1.70 m的湖沼相沉积物中的淡水水生植物孢粉被盐生蒿属植物孢粉代替,但该段沉积物中还存在淡水螺壳,说明此层沉积物形成时可能受到海水的影响,但是没有大规模海水入侵。从区域地理环境看,研究区三面环山,有入海河流流经此地,在全新世高海面时期,海水涨潮时可能溯古河道东进影响研究区淡水湖体的环境<sup>[2]</sup>。全新世以来,辽东半岛的海陆分布有过明显的变迁,在约10 000~5 000 aBP前是海侵时期,北黄海海岸线向陆地延伸5~15 km,5 000 aBP以来是海退时期,海岸线呈波浪式地向海洋方向移动<sup>[1, 18]</sup>。

黏土混浊水电导率值(以下简称EC)与溶液中的硫酸根离子及硫酸盐的含量成正比<sup>[19]</sup>,沉积环境从海相过渡到陆相,沉积物中硫化物的含量会逐渐减少。日本学者将黏土混浊水电导率与硅藻组合进行对比,总结出陆相沉积物的EC值小于0.6 mS/cm,海陆过渡相沉积物的EC值为0.6~1.5 mS/cm,海相沉积物的EC值大于1.5 mS/cm<sup>[20]</sup>。在海岸带沉积物

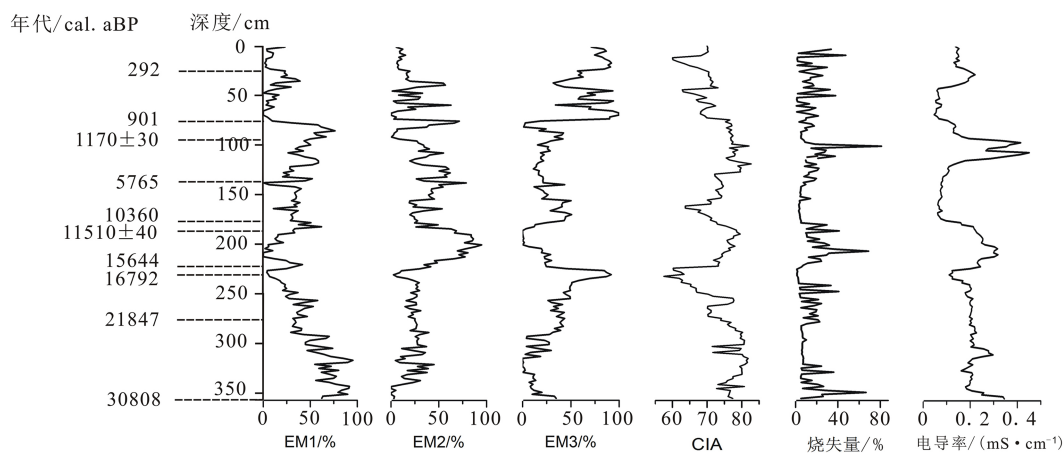


图9 西团瓢剖面粒度端元组分、化学蚀变指数、烧失量及电导率的垂向变化特征

Fig.9 The change of each end member content, CIA, loss on ignition and electric conductivity in depth of the Xi Tuanpiao profile

形成初期,水体中的硫酸根离子由细菌活动被还原成硫化氢,并与铁结合形成黄铁矿。海岸线退缩,黄铁矿依然被作为稳定的物质保存在沉积物中<sup>[21-23]</sup>。近年来,多位学者通过黏土混浊水电导率划分辽东半岛的大洋河平原、八岔沟平原、大清河平原以及下辽河平原的海陆相沉积<sup>[24-28]</sup>。金州西团瓢沉积物测得的电导率值最大为0.451 mS/cm,远小于0.6 mS/cm(见图9)。结合前人的研究,在西团瓢剖面沉积时期,海水曾由三十里堡河上溯,但影响范围与持续时间都不甚长远,因此该剖面为可能短暂受海水影响的淡水湖沉积物。

## 4 讨论

### 4.1 沉积物粒度与化学指标纵向变化及其环境意义

0~24 cm(0.29 kaBP至今),颗粒物相对较粗,以中砂和细砂含量为主,平均含量分别为34.98%和28.24%;粗砂的平均含量为9.28%。平均粒径范围为2.13~2.91 $\Phi$ ,平均值为2.53 $\Phi$ 。分选系数为1.13~2.49,平均值为1.89,在整个剖面中属于分选较好的一层。偏态值为0.38~0.57,平均值约为0.48,为极正偏,说明沉积物以粗粒级为主。峰态值的平均值为1.74,很尖锐。粒度频率分布曲线以单峰为主,而且峰值出现在2 $\Phi$ 附近。总的来说,此阶段沉积环境稳定。CIA指数为64.32%,指示中等偏低的化学风化程度。烧失量为14.27%,高于剖面整体的平均值,由于地表生长着大片芦苇,根系很深,使得该层有机质含量偏高。此阶段气候偏凉偏干。

24~74 cm(0.29~0.90 kaBP)沉积物以中砂和粉砂为主,平均含量分别为29.97%和25.48%,该层沉积物粒度组分随深度变化的幅度较大。平均粒径为1.85~4.42 $\Phi$ ,平均值为3.14 $\Phi$ 。分选系数为1.15~2.70,平均值为2.05,分选效果属于中等水平。偏态值为-0.02~0.60,平均值约为0.39,极正偏。表面沉积物大多为粗颗粒,分选水平较差。峰态值为0.70~2.15,平均值为1.23,尖锐。粒度频率分布曲线以单峰为主,且峰值出现在2 $\Phi$ 附近,但部分样品出现弱峰,说明此阶段沉积环境不稳定。CIA指数为66.43%,表示中等水平的化学风化程度;烧失量为12.53%,略低于剖面整体平均值,说明该时期气温偏凉,降水偏少。

与上一层相比,74~136 cm(0.90~5.77 kaBP)的泥炭层的粉砂和黏土明显增加,粉砂含量由25.48%增加到53.77%,黏土含量由5.51%增加到14.26%。

分选系数为1.80~3.11,平均值为2.54,分选水平较差。峰态值的平均值为0.91,中等宽度(正态)。频率曲线以双峰为主,且交错繁复,峰值大致出现在2 $\Phi$ 和5~7 $\Phi$ 附近,总体来看,这个阶段沉积环境复杂,水动力强弱交替。CIA指数为71.67%,表示中等偏高的化学风化程度;烧失量为17.37%,该层是泥炭层,由植物腐化形成,说明沉积时期的气候温暖湿润,适宜于植物的生长。

136~176 cm(5.77~10.36 kaBP)的沉积物大多为粉砂和中砂,平均含量分别为46.56%和15.33%。黏土与粗砂含量比泥炭层偏低。平均粒径范围为3.27~5.03 $\Phi$ ,平均值为4.43 $\Phi$ 。分选系数为1.97~2.76,平均值为2.46,分选水平较差。峰态值为0.70~1.27,平均值为0.82,峰态平坦。与上层相似,频率曲线以双峰为主,且交错繁复,峰值大致出现在2 $\Phi$ 和5~7 $\Phi$ 附近,说明此阶段沉积环境复杂,水动力强弱交替。CIA指数最大为72.26%,表示中等偏高的化学风化程度,烧失量为5.74%,说明此阶段气候温暖但降水量偏低。

176~222 cm(10.36~15.64 kaBP)沉积物多为粉砂和极细砂,平均含量分别为59.54%和15.75%,其中粉砂的平均含量为整个剖面的最大值。平均粒径为3.99~5.69 $\Phi$ ,平均值为4.86 $\Phi$ 。分选系数为1.56~2.56,平均值为1.95。分选效果要比上两层好。偏态值为-0.14~0.29,平均值约为0.10,为正偏,分选程度略差。峰态值为0.77~1.31,平均值为1.10,峰态为中等(正态)。频率曲线呈现单双峰交杂的情况,峰值主要集中在5 $\Phi$ 附近,还有部分双峰峰值集中在2和7 $\Phi$ 附近。总的来看,此时期沉积环境不稳定。CIA指数最小为37.37%,属于低等化学风化程度;烧失量为21.60%,这是因为该层沉积了大量螺壳,导致该层有机质含量高。由此说明此阶段气候寒冷干旱。

222~232 cm(15.64~16.79 kaBP)的沉积物大多为中砂和细砂,平均含量分别为35.30%和24.70%,黏土含量仅为0.50%,是整个剖面的最低值。平均粒径为2.12~4.32 $\Phi$ 。分选系数平均值为2.01。偏态值为0.31~0.58,平均值约为0.49,极正偏,说明沉积物以粗颗粒为主,分选水平较差。峰态值为0.83~2.02,平均值为1.65,峰态很尖锐。沉积物粒度频率分布曲线以单峰为主,且峰值出现在2 $\Phi$ 附近。综上所述,该阶段湖泊沉积环境稳定。CIA指数的平均值为68.85%,指示中等化学风化水平;烧失量为2.22%,该层有机质含量为整个剖面的最低值。说明此阶段气候条件不适宜动植物的生长,呈

现寒冷干旱的状态。

232~276 cm(16.79~21.85 kaBP)的沉积物与上一层位相比颗粒较细,以粉砂和中砂为主,平均含量分别为34.42%和18.30%。平均粒径为0.72~5.72 $\Phi$ ,平均值为4.32 $\Phi$ 。分选系数为1.84~3.06,平均值为2.79,此阶段分选系数跨度大,且平均值比其他层位都大,分选效果差。偏态值为-0.12~0.74,平均值为0.26,正偏,与上层相比,沉积物颗粒总体偏细,分选水平较差。峰态值为0.69~1.96,平均值为1.85,峰态很尖锐。沉积物粒度频率分布曲线以单峰为主,但少量样品出现弱峰,说明在这个阶段沉积环境不稳定,出现波动。CIA指数为65.95%,表示中等化学风化程度;烧失量为12.87%,低于剖面整体平均值,说明此阶段气候条件不适宜动植物的生长,呈现寒冷干旱的状态。

276~354 cm(21.85~30.81 kaBP)的沉积物仍以细颗粒(粉砂和黏土)组分为主,平均含量分别为46.73%和23.00%,其中黏土组分的平均含量比其他层位都高,粗砂含量极少,仅为0.61%。平均粒径为4.60~7.30 $\Phi$ ,平均值为5.88 $\Phi$ 。分选系数为1.75~3.03,平均值为2.48。偏态值为-0.27~0.22,平均值约为-0.08,近对称,与上层相比,分选水平较好。峰态值的平均值为0.99,峰态中等(正态)。频率曲线以双峰为主,且交错繁复,峰值大致出现在2和5~7 $\Phi$ 附近。综上说明此阶段沉积环境复杂,水动力强弱交替。CIA指数64.68%,指示中等偏低的化学风化水平;烧失量为12.31%,数值偏低,表示气候条件不适于生物生存,呈现寒冷干旱的状态。

#### 4.2 三个端元所指示的环境意义

端元1组分在地层中的变化趋势与CIA指数的变化趋势相近,说明端元1的组分特征可能代表了东亚季风的动力强度,由季风带来的温湿变化导致沉积物风化程度的变化,使得矿物颗粒总体变小。此外,少量大气降水形成动力较弱的坡面径流,携带山区细颗粒进入湖泊。276~354 cm沉积层端元1含量最大,平均值为63.00%,CIA指数的平均值为64.68%,说明这个阶段气候较干旱。

端元2组分在各地层中所占的比重偏少,整体平均值为29.99%。该组分的平均粒径较端元1偏大,为38.02  $\mu\text{m}$ ,众数值也在此附近,分选效果最好,端元频率分布曲线接近正态分布。176~222 cm沉积层中端元2组分含量最大,平均值为64.09%,CIA值最小,平均值为37.37%。该层沉积物颗粒较细,以粉砂为主,并有螺壳出现。结合上文分析可

知,该层水动力较弱,呈现低能。由此说明,端元2可能指示弱水流沉积,以此组分为主导的沉积时期气候偏寒冷干燥,化学风化能力弱。

端元3组分的平均粒径最大,为195.23  $\mu\text{m}$ ,在24~76 cm和232~276 cm沉积层中含量较多,平均值分别为66.43%和49.36%,这两层的CIA平均值分别为67.19%和65.95%,说明气候偏温暖湿润,降水量丰富。由上文分析可知,这两层沉积物颗粒以中砂为主,沉积时期水动力较强。由此说明,端元3可能指示冲洪积物,以此组分为主导的沉积时期气候温暖湿润,化学风化能力较强。

#### 4.3 剖面年代序列

西团瓢剖面中存在典型的泥炭层和完整的螺壳,有机质含量很高,因此采用 $^{14}\text{C}$ 测年。测年材料分别选取96 cm深处的植物残体与186 cm深处的螺壳,测得年龄分别为1 170 $\pm$ 30、11 510 $\pm$ 40 cal.aBP,利用线性内插、外推的方法计算出各层位年代。分别为292、901、5 765、10 360、15 644、16 792、21 847、30 808 cal.aBP。0~96 cm的沉积速率为8.20 mm/a,96~354 cm的沉积速率为0.87 mm/a。虽然顶部(24~74 cm)与底部(232 cm以下)的岩性较为一致,但是其沉积过程不同。顶部沉积物的组分以端元3为主,冲洪积过程水动力大,携带物质多,单位时间内沉积层厚,因此沉积速率大。底部沉积物的组分以端元1为主,风成沉积过程动力小,携带物质少且颗粒细小,单位时间内沉积层薄,沉积速率小。

#### 4.4 区域对比

辽东半岛位于东部季风气候区,前人对中国东北地区晚更新世以来古气候研究多以泥炭孢粉研究为主,并结合TOC、TN、干密度、含水量及干燥度等指标获得了晚更新世以来的气候演化信息。吉林二龙湾玛珥湖记录的气候演化过程自晚更新世以来可分为8个阶段<sup>[29]</sup>,辽宁省南部普兰店剖面记录的气候自全新世以来划分了3个阶段<sup>[1]</sup>,辽宁省南部大莲泡剖面记录了全新世以来该区的沉积环境演变以及气候演化过程<sup>[2]</sup>。本文将西团瓢剖面记录的气候演化过程划分了5个阶段,现将3个剖面记录的气候演化过程作以下对比,如图10。

15.64~30.81 kaBP,西团瓢剖面沉积层以细颗粒为主,CIA指数多指示中等的化学风化水平,烧失量整体偏低,表示有机质含量较少,说明此阶段气温低,降水量少,沉积动力较弱,气候条件整体呈



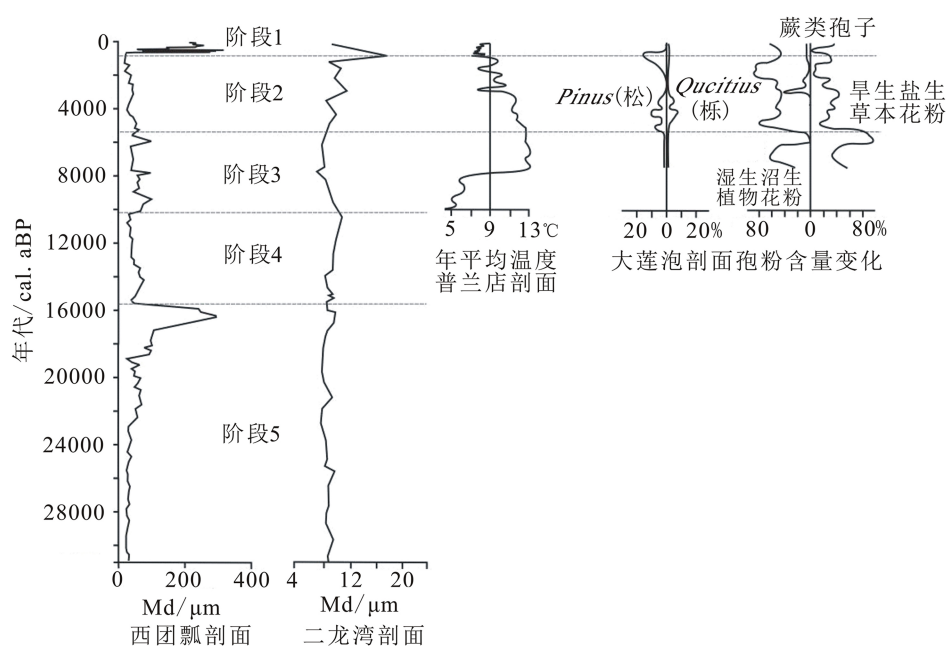


图10 西团瓢与二龙湾<sup>[29]</sup>、普兰店<sup>[1]</sup>、大莲泡<sup>[2]</sup>环境指标变化曲线对比图

Fig.10 Comparison of environmental index change curves of Xi tuanpiao, Er longwan<sup>[29]</sup>, Pu landian<sup>[1]</sup> and Da lianpao<sup>[2]</sup>

现寒冷和干旱的状态,但是,在 16.79~15.64 kaBP,沉积物颗粒变粗,说明经历了短暂的降水激增的过程。二龙湾植被以冷杉、云杉等针叶林和草本植物为主,沉积物颗粒细,TOC、TN 含量下降,含水量低、干密度大,气候寒冷干旱,不利于植物生长;在植被稀疏的状态下,少量的雨水冲刷坡面携带较细的碎屑物进入湖盆,同时伴有东亚季风带来的西北内陆地区的细颗粒组分,这一时期湖盆内的沉积物整体偏细。

10.36~15.64 kaBP,西团瓢沉积层以细颗粒为主,CIA 指数指示低等化学风化程度,烧失量为 21.60%,这是因为该层沉积了大量螺壳,导致该层有机质含量高。由此说明此阶段气候寒冷干燥。二龙湾在 16.1~11.2 kaBP 植被仍以针叶林和草本植物为主,气候寒冷干旱。这一时期出现淡水螺壳且沉积物颗粒偏细,说明坡面径流作用减少,湖泊处于相对稳定的环境。

5.77~10.36 kaBP,西团瓢的沉积物以细颗粒为主,CIA 指数表示中等偏高的化学风化程度,烧失量低于剖面平均水平。说明此阶段气候温暖但降水量偏少。普兰店剖面在 10.0~8.0 kaBP 榆和桦等阔叶树种发展起来,植被为针阔混交林,年均温度较低,湿润度稍差,气候总体温和干燥。与西团瓢剖面较为一致。同一时期大莲泡剖面的沉积物也为灰色粉砂层,从孢粉分析看,植物孢粉种类少,且多为耐寒耐旱的植物花粉。据此可推测湖盆当时依然受末次冰期的影响,温度较低,集中性的降水

冲刷山体,形成沟谷泥石流携带碎屑物进入湖盆。此阶段海岸线向内陆延伸,海水上溯三十里堡河影响湖盆水质,致使植物种类减少,多生长盐生蒿属。

0.90~5.77 kaBP,西团瓢沉积物以细颗粒为主,CIA 指数指示中等偏高的化学风化程度;烧失量为剖面各层位的最高值,该层是泥炭层,由植物腐化形成,说明沉积时期的气候温暖湿润,适宜于植物的生长。二龙湾的植被类型以落叶阔叶林为主,TOC、TOC/TN 处于高值,含水量上升,气候整体表现为温暖湿润。此时,湖盆内水草丰美,植被繁茂,水体平静,坡面冲刷逐渐消失,沉积物主要由河流携带进入湖盆内,粗颗粒物来源减少,湖内沉积了大量细粒物质。

0.90 kaBP 至今,西团瓢沉积物颗粒相对较粗,CIA 指数表示中等偏低的化学风化程度,烧失量略低于剖面整体平均值,而且目前湖泊处于干涸的状态。说明该时期气温偏凉,降水偏少。二龙湾在 1.7 kaBP 至今,区内再次出现针叶林,草本植物增加,孢粉浓度下降,气候向凉、干的方向发展。普兰店在晚全新世时期生长针阔混交林,0.7 kaBP 至今,气候呈温凉偏干的状态。此阶段,早期大莲泡剖面中水生植物孢粉减少,草本植物孢粉增加,说明水体逐渐减少,湖盆处于萎缩的状态。晚期,草本植物与水生植物孢粉都几近消失,植被稀疏,坡面冲刷作用又得到加强,冲洪积物比重增多。后期加上人类活动的影响,湖体逐渐萎缩干涸。

## 5 结论

(1) 15.64~30.81 kaBP, 222~354 cm 沉积层以细颗粒为主, CIA 指数多指示中等的化学风化水平, 烧失量整体偏低, 表示有机质含量较少, 说明此阶段气温低, 降水量少, 沉积动力较小, 气候条件整体呈现寒冷和较干旱的状态。

(2) 10.36~15.64 kaBP, 176~222 cm 沉积层以细颗粒为主, CIA 指数指示低等化学风化程度; 烧失量为 21.60%, 这是因为该层沉积了大量螺壳, 导致该层有机质含量高。由此说明此阶段气候寒冷干燥。

(3) 5.77~10.36 kaBP, 136~176 cm 的沉积物大多为粉砂和中砂, CIA 指数表示中等偏高的化学风化程度, 烧失量低于剖面平均水平。说明此阶段气候温暖但降水量偏少。

(4) 0.90~5.77 kaBP, 74~136 cm 沉积物以细颗粒为主, CIA 指数指示中等偏高的化学风化程度; 烧失量为剖面各层位的最高值, 该层是泥炭层, 由植物腐化形成, 说明沉积时期的气候温暖湿润, 适宜于植物的生长。

(5) 0.90 kaBP 至今, 西团瓢沉积物颗粒相对较粗, CIA 指数表示中等偏低的化学风化程度, 烧失量略低于剖面整体平均值, 而且目前湖泊处于干涸的状态。说明该时期气温偏凉, 降水偏少。

端元分析模型根据粒度数据能够有效地提取出沉积物动力组分对应的端元。本文将西团瓢剖面沉积物粒度组分分为 3 个端元: 端元 1 可能指示风成沉积及坡面流水携带的细颗粒沉积, 端元 2 可能代表动力较低的弱水流沉积物, 端元 3 则可能代表动力较强的冲洪积物。由此可见, 沉积物质在沉积过程中往往是多种动力因素综合的结果, 通过对沉积物中多动力组分的分离, 可以有效地判断各组分所代表的沉积动力的变化特征。

## 参考文献 (References)

- [1] 中国科学院贵阳地球化学研究所第四纪孢粉组, <sup>14</sup>C 组. 辽宁省南部一万年来自然环境的演变[J]. 中国科学, 1977(6): 603-614. [Quaternary Palynology Group and <sup>14</sup>C Group, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Evolution of natural environment in southern Liaoning province over 10 000 years [J]. China Science, 1977(6): 603-614.]
- [2] 李雪铭. 辽南大连泡沉积物的沉积特征及古环境变化[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 80-84. [LI Xueming. Sedimentary characteristics of the Dalianpao sediment in Southern Liaoning and its paleoenvironment changes [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(1): 80-84.]
- [3] 张威, 郭善莉, 李永化, 等. 辽东半岛黄土粒度分维特征及其环境意义[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 79-86. [ZHANG Wei, GUO Shanli, LI Yonghua, et al. Grain-size fractal dimension of loess and its environmental significance in the Peninsula of east Liaoning [J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 79-86.]
- [4] 李丽. 大连地区滨海黄土古环境信息研究[D]. 辽宁师范大学硕士学位论文, 2009. [LI Li. Study on paleoenvironmental information of coastal loess in Dalian area [D]. Master Dissertation of Liaoning Normal University, 2009.]
- [5] 商翎, 张志斌, 高飞, 等. 人类工程活动的生态环境效应——以大连市金州区七顶山乡一带生态环境演变为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(1): 21-25. [SHANG Ling, ZHANG Zhibin, GAO Fei, et al. Eco-environmental effects of the mankind engineering activities——Qidingshan area of Jinzhou district, Dalian city [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, 17(1): 21-25.]
- [6] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar[Texas]: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [7] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(6): 54-60. [LU Lianzhan, SHI Zhengtao. Analysis for sediment grain size parameters of connotations and calculation method [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(6): 54-60.]
- [8] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem [J]. Mathematical Geology, 1997, 29(4): 503-549.
- [9] Vandenberghe J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 121: 18-30.
- [10] Bouma A H. Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: applicability and dangers [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 137-143.
- [11] 张宝方. 南海北部陆坡区更新世以来沉积物粒度特征及沉积环境演化[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2015. [ZHANG Baofang. Grain size distribution and sedimentary environment evolution in northern South China Sea slope since Pleistocene [D]. Master Dissertation of Ocean university of China, 2015.]
- [12] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2015, 16(12): 4494-4506.
- [13] 吴正, 等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 196-200. [WU Zheng, et al. Geomorphology of Wind-Drift Sands and Their Controlled Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2003: 196-200.]
- [14] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [15] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1174-1184. [LI Xusheng,

- HAN Zhiyong, YANG Shouye, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62 (11): 1174-1184.]
- [16] 陈璐, 鲁瑞洁, 刘小楝, 等. 萨拉乌苏河流域全新世气候变化的元素地球化学记录[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53 (3): 308-315. [CHEN Lu, LU Ruijie, LIU Xiaokang, et al. Holocene climate changes recorded by elemental geochemistry in the Salawusu River Region [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2017, 53 (3): 308-315.]
- [17] 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋. 烧失量数值波动对北京地区过去气候和环境的特征响应[J]. *生态学报*, 1998, 18 (4): 343-347. [ZHANG Jiahua, KONG Zhaochen, DU Naiqiu. The response of loss-on-ignition range to past climate and environment in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18 (4): 343-347.]
- [18] 符文侠, 李光天, 魏成凯, 等. 辽东半岛东部晚第四纪海面变迁[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20 (3): 252-262. [FU Wenxia, LI Guangtian, WEI Chengkai, et al. Late Quaternary shoreline migration along the eastern coast of Liaodong Peninsula [J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1989, 20 (3): 252-262.]
- [19] 方晶, 杨永强, 马宏伟, 等. 辽东半岛大孤山古湖谷平原沉积环境的复原——基于岩心黏土混浊水电导率和pH值以及硅藻组合[J]. 海洋学报, 2012, 34 (6): 133-141. [FANG Jing, YANG Yongqiang, MA Hongwei, et al. Edimentary environmental analysis based on the electric conductivity and pH of stirred clayed drilling cores in water and diatom recovered from the old drowned valley plain in The Dagu Mountain, Liaodong Peninsula in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34 (6): 133-141.]
- [20] 内園立男, 森勇一. 濃尾平野南部ボーリングコアの粘土混濁水の電気伝導度およびpH測定に基づく堆積環境の推定[J]. *第四紀研究*, 2004, 43 (5): 375-382. [Uchizono Tatu, Mori Yuichi. Sedimentary environmental analysis based on electric conductivity and pH of stirred clayey drilling cores into water recovered from the southern part of Nobi Plain, Central Japan [J]. *The Quaternary Research*, 2004, 43 (5): 375-382.]
- [21] 横山卓雄. 電気伝導度測定法[C]//日本第四紀研究協会. 第四紀試料分析法(2). 东京: 东京大学出版社, 1993: 109-118. [YO KO YAMA Takuo. Mensuration of electric conductivity[C]//Japan Association for Quaternary Research. A Handbook of Quaternary Research (2). Tokyo: University of Tokyo Press, 1993: 109-118.]
- [22] Berner R A. Sedimentary pyrite formation [J]. *American Journal of Science*, 1970, 268: 1-23.
- [23] 中井信之, 太田友子, 藤沢寛, 等. 堆積物コアの炭素同位体比, C/N比およびFeS<sub>2</sub>含有量からみた名古屋港周辺の高気候, 古海水準変動[J]. *第四紀研究*, 1982, 21 (3): 169-177. [Nobuyuki nakai, Tomoko ota, Kan fujisawa, et al. From the carbon isotope ratio, C/N ratio and FeS<sub>2</sub> content of the sediment core, the paleoclimate and the paleosea level changes around Nagoya port [J]. *The Quaternary Research*, 1982, 21 (3): 169-177.]
- [24] 刘翀, 方晶, 王福, 等. 沉积物粘土混浊水电导率与pH值相关性研究——以渤海湾西岸平原XZ、MD钻孔为例[J]. *第四紀研究*, 2015, 35 (2): 319-325. [LIU Chong, FANG Jing, WANG Fu, et al. The correlation between electric conductivity and pH of the STICS-water: A case study of cores XZ and MD on the plain of west Bohai Bay [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35 (2): 319-325.]
- [25] 方晶, 胡克, 杨永强, 等. 辽东半岛长兴岛八岔沟古泻湖型泥炭的形成及全新世最高海平面[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39 (3): 461-469. [FANG Jing, HU Ke, YANG Yongqiang, et al. Paleoenvironments of Holocene Lagoon Peat and the Highest Sea-Level in Bachagou, Changxing Island, Liaodong Peninsula [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39 (3): 461-469.]
- [26] 方晶, 王福, 肖美美, 等. 岩芯EC、pH、泥分含量和有孔虫丰度对沉积环境的判读——以渤海湾西岸CZ61孔为例[J]. *第四紀研究*, 2016, 36 (6): 1523-1526. [FANG Jing, WANG Fu, XIAO Meimei, et al. Analysis of paleoenvironment based on EC, pH, mud content and foraminifera numbers: Taking drilled core CZ61 collected from west coast of Bohai Bay as examples [J]. *Quaternary Sciences*, 2016, 36 (6): 1523-1526.]
- [27] 方晶, 王福, 方雨婷, 等. 钻孔岩心黏土混浊水电导率、黄铁矿、pH相关性分析及其在古沉积环境复原的应用: 以渤海湾西岸平原DC01孔为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2018, 48 (4): 1154-1164. [FANG Jing, WANG Fu, FANG Yuting, et al. Correlation analysis of conductivity (EC), w(FeS<sub>2</sub>), pH of drilled clay water and its application in paleo-environment restoration: A case study of DC01 core on west plain of Bohai Bay [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2018, 48 (4): 1154-1164.]
- [28] 刘素巧, 方晶, 胡克, 等. 辽东半岛大清河海岸平原全新世海陆变迁——基于黏土混浊水电导率的研究[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28 (4): 465-472. [LIU Suqiao, FANG Jing, HU Ke, et al. Sea-land change during Holocene in the Daqing River coastal plain of Liaodong peninsula: Study on conductivity of the pore water in clayey sediments [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28 (4): 465-472.]
- [29] 刘玉英. 晚更新世晚期以来二龙湾玛珥湖植被与环境演化研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2009. [LIU Yuying. Vegetation and environment history of Erlongwan Maar Lake since the late stage of Late Pleistocene [D]. Doctor Dissertation of Jilin University, 2009.]