

大连西海岸低地沉积环境特征及对气候环境指示意义

马瑞丰¹, 张威², 刘亮²

1.鞍山师范学院地理科学系, 辽宁鞍山 114007

2.辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连 116029

摘要 【目的】高分辨率气候重建对于探讨区域气候环境演变与高质量发展具有重要意义, 辽东半岛沉积环境多样且复杂, 不同时期小区域沉积物的类型及层序特征研究较为缺乏, 该文旨在进一步研究辽东半岛多样的沉积环境并揭示出其古气候环境演化过程。【方法】通过对大连西海岸低地老渔窝 (LYW) 剖面进行 AMS¹⁴C 测年、岩性及地球化学元素分析, 揭示其沉积环境和气候演变过程。【结果】该套沉积由粉砂、砂及碎石为主组成, 记录了末次冰盛期末期到全新世中期 (18 815~6 802 cal. B.P.) 的沉积环境与气候演变信息。剖面中的主要化学成分是 SiO₂、Al₂O₃、K₂O 及 Fe₂O₃ (占比 90.34%); 元素含量从大到小依次为 SiO₂ > Al₂O₃ > K₂O > Fe₂O₃ > Na₂O > CaO > TiO₂ > MgO > P₂O₅ > MnO。研究区经历了干冷的冲积环境 (18.8 cal. ka B.P.~末次冰盛期末期) —稍暖湿的滨海潮间带环境 (18.8~16.0 cal. ka B.P.) —暖湿的滨海潮下带环境 (16.0~11.7 cal. ka B.P.) —最暖湿的滨海盐沼环境 (11.7~6.8 cal. ka B.P.) 和干冷的陆相流水环境 (6.8~0 cal. ka B.P.)。本套沉积响应了新仙女木事件和 8.0~9.0 cal. ka B.P.期间的短期快速气候事件并指示出 6.8 cal. ka B.P.前后本区处于最高海平面。【结论】研究为辽东半岛末次冰盛期末期后的气候重建工作, 尤其是大连西海岸沉积环境演变历史提供基础资料和信息。

关键词 地球化学; 沉积环境; 环境演化; 指示意义; 大连

第一作者简介 马瑞丰, 女, 1988 年出生, 博士, 副教授, 全球气候变化, E-mail: mrf1556@mail.asnc.edu.cn

通信作者 张威, 男, 教授, E-mail: zhangweilnu@163.com

中图分类号 文献标志码 A

0 引言

高分辨率的气候重建是全球气候变化研究的核心和热点。过去全球变化研究 (Past Global Changes, PAGES) 是国际地圈生物圈计划 (IGBP) 中的重要内容之一。沉积物记录因提供了连续且丰富的气候环境变化信息, 一直是研究古气候环境变化的关键载体。目前学者们已对多种沉积物, 如冰芯^[1-2]、深海沉积物^[3-4]、湖泊沉积物^[5]、泥炭沉积^[6]、黄土^[7]及石笋^[8-10]等进行了大量研究, 揭示出了地球气候变化的周期性规律和全球性短期快速气候变化事件^[11-12]。气候变化研究主要通过沉积物中的气候代用指标来实现, 学者们目前通过沉积物的岩性、色度、磁化率、粒度、地球化学元素、孢粉、微体古生物化石及同位素

收稿日期: 2024-01-17; 收修改稿日期: 2024-04-07

基金项目: 辽宁省特聘教授基金项目 (60618006); 辽宁省社会科学规划基金重点项目 (L20AKG001); 鞍山师范学院博士启动基金项目 (22b04) [Foundation: Distinguished Professor Foundation of Liaoning, No. 60618006; Liaoning Province Social Science Planning Fund Project, No. L20AKG001; Doctoral Scientific Startup Fund of Anshan Normal University, No. 22b04]

地球化学等经典指标^[13-14]来进行气候重建。随着科技的发展,气候重建的精度和手段都在不断提高,尤其是近些年发展的基于多种生物标志物的定量重建^[15],可与经典气候代用指标结合,更好地实现对气候信息的挖掘。

陈承惠等^[16]最早通过沉积物年代、岩性及孢粉组合将辽东半岛一万年以来的气候划分为普兰店期(早全新世,10.0~8.0 ka B.P.)、大孤山期(中全新世,8.0~2.5 ka B.P.)及庄河期(晚全新世,2.5~0 ka B.P.)并确定了其气候经历了干冷—湿热—干冷的演变过程。符文侠等^[17-18]对本区第四纪沉积、滨海地貌进行了详细的调查认为辽东半岛第四纪以来存在3次海侵事件:110.0~70.0 ka B.P.、40.0~25.0 ka B.P.和全新世海侵^[5],李雪铭^[19]从大连泡沉积中找到了辽南地区全新世高海平面的孢粉证据。史本恒^[20]通过对辽东半岛新石器时代诸文化遗存的分布范围及出土贝壳等遗物总结得到辽东半岛东港地区最大的海侵发生在6.5~5.0 ka B.P.,方晶等^[21]认为略早于5.8 ka B.P.。八岔沟地区达到全新世最高海平面,同时还对大孤山古溺谷平原沉积环境进行了复原研究^[22]。马瑞丰等^[23]重建了西泡地区自仙女木时期的古植被演化过程。众多的个案研究进一步揭示了辽东半岛气候环境变化细节。

辽东半岛长期受到间歇和差异性抬升,第四纪沉积物厚度较薄,沉积物类型主要包含湖沼相沉积(潟湖、淡水沼泽、泥炭)、海洋沉积物和坡积/洪冲积物3种^[24],多分布在丘陵间沟谷、河流两侧、河流入海口、海湾等区域^[17]。由于本区特有的沉积物发育特点,对不同小区域、不同时期沉积物的类型及层序特征进行辨别与分析,恢复其沉积环境演变历史,对于全面揭示本地气候演变细节具有很大意义^[24]。本文选取大连西海岸低地沉积剖面,通过AMS¹⁴C、岩性和地球化学元素来进行沉积环境分析和气候环境复原,以为辽东半岛末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM)末期后的气候重建工作提供基础资料和信息。

1 研究区概况

辽东半岛位于辽宁南部,该区自然条件优越,拥有本省最长的海岸线,兼具海洋性气候特色的温带大陆性季风气候(暖温带湿润、半湿润季风气候)。现代气候为春季多风,低温干燥,夏季则盛行东风及东南风,暖热湿润,秋季水热剧减,冬季盛行极地大陆气团,寒冷干燥。中生代(距今约2.5亿年~6500万年)的燕山运动造就了本区地貌的主要轮廓。华夏(NE)、新华夏(NNE)及NW向两组断裂对辽东半岛轮廓起到了主要的控制作用。辽东半岛在构造上位于新华夏第二巨型隆起带,郯庐断裂带北部东侧。出露地层以太古宙—古元古代地层为主,并广泛分布有岩浆岩、寒武系变质岩、混合岩、缺失或零星分布的寒武纪以后的地层。金州断裂带将半岛分成了东西两部分,东侧主要辽东山地,海拔多

在 200 m 以上，最高峰可达 1 000 m，而西侧主要是丘陵和平原。辽东半岛海岸呷湾更迭，蜿蜒曲折，滨岸地区主要是由前震旦系的结晶片麻岩、片麻岩、石灰岩、震旦系的石英岩、黏土板岩和混合花岗岩等组成的低山丘陵。中部海拔 600~800 m 的千山山脉构成了半岛的骨脊^[24]。老渔窝海岸低地位于辽东半岛南部大连西海岸（图 1），地貌系二级海蚀阶地前缘，岩性为古元古代侵入岩，中细粒黑云母花岗闪长岩大面积侵入钓鱼台组砂质页岩。上覆有全新世古潟湖相/古潮间带沉积及薄泥炭层。东南部为剥蚀丘陵山麓地带。

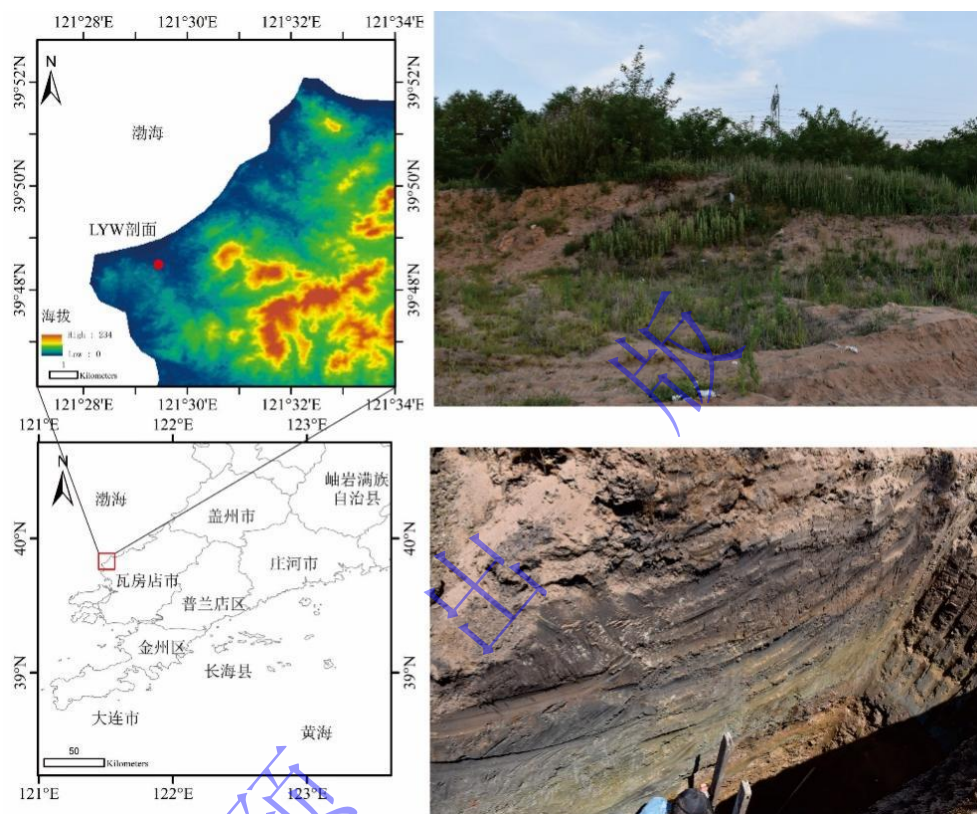


图 1 研究区位置及剖面图

Fig.1 Location of study site and the LYW profile

2 材料与amp;方法

2.1 材料采集

LYW 剖面（39°48'29.232" N，121°29'26.794" E）位于大连市瓦房店市红沿河镇老渔窝村，西北方向与渤海贯通，地面高程为 13 m，剖面总深度为 372 cm（图 1，2）。于 2019 年 6 月进行剖面挖掘、野外岩性描述及样品采集，以 2 cm 等间距连续采样，共采集了 186 块样品。样品采集过程中注意防止样品受到污染，将其采集后放置于自封袋中，标记好编号统一运回实验室。在实验室将样品置于牛皮纸上自然风干，然后过 2 mm 筛备用。

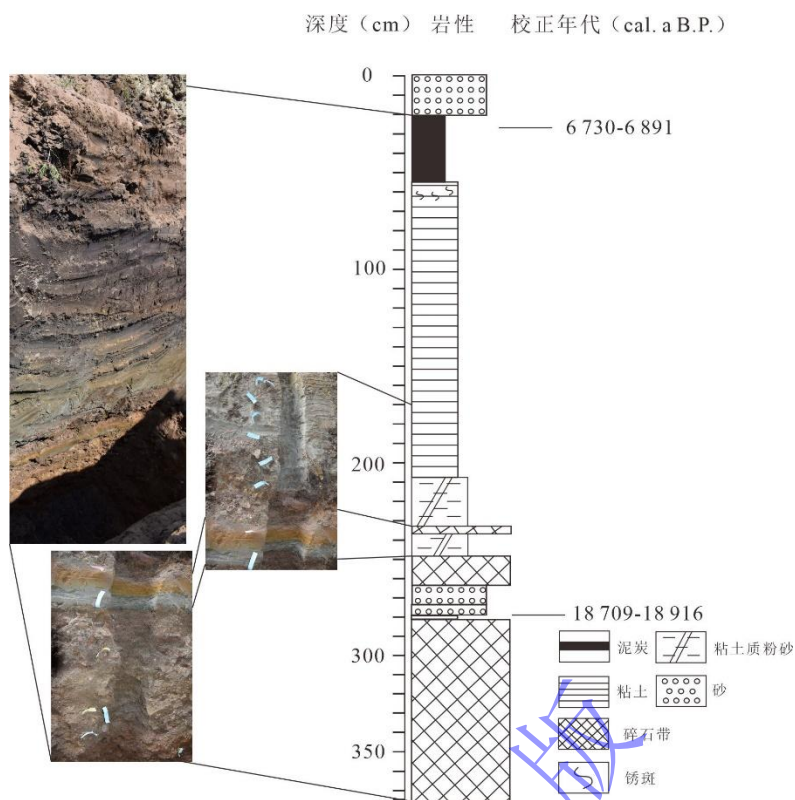


图2 LYW剖面岩性图

Fig.2 Lithology of the LYW profile

2.2 实验方法

2.2.1 年代

选取 28 cm 处泥炭表层及 278 cm 处全样有机质送美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测试，测试采用酸洗前处理法^[25]，测试数据使用 Calib7.1 经 Intcal13 曲线^[26]进行树轮年代校正。

2.2.2 地球化学元素测定

地球化学元素测定采用超细制样粉末压片法。具体步骤如下：首先称取 105 °C 烘干后的沉积物 10 g，放入研磨器研磨 30 s，将其研磨至纳米级粉末状，粉碎完样品烘干，混匀，称取约 5 g 样品放于模具中，通过 BP-1 型粉末压样机将其加压制成外径为 40 mm 内径为 32 mm 的试样，于样片背面写上编号，放入干燥器中待测。地球化学元素通过 X 射线荧光光谱仪 (Rigaku ZSX primus II wavelength-dispersive X-ray fluorescence (XRF) spectrometer) 进行测定，测定范围为 0~100%，测定误差低于 0.5%。

2.3 数据分析方法

采用化学蚀变指数 (chemical index of alteration, CIA)、退碱系数 (w)、淋溶系数 (Ba) 及残积系数 (Ki)^[27-28]来进行分析。元素比值计算公式及简要环境意义见表 1。

表 1 元素比公式及意义^[27-28]

Table 1 Formulas of molecular weathering ratios and chemical index of alteration^[27-28]

元素比值	公式	气候指代意义
CIA	$Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100 [CaO^* = CaO (CaO \leq Na_2O) ; CaO^* = Na_2O (CaO > Na_2O)]$	气候暖湿高值, 风化程度越高
w	$(Na_2O + CaO) / Al_2O_3$	气候暖湿低值、与 CIA 相反
Ba	$(Na_2O + CaO + K_2O) / Al_2O_3$	气候暖湿低值、与 CIA 相反
Ki	$(Fe_2O_3 + Al_2O_3) / (Na_2O + CaO + MgO)$	气候暖湿高值、与 CIA 一致

3 结果

3.1 岩性描述及年代

剖面沉积物(图 2、表 2)主要以粉砂、砂及碎石为主,表层 0~20 cm 为分选性较好的砂,20~54 cm 处含薄泥炭层,54~278 cm 为灰蓝色黏土和粉砂,278 cm 以下为红色花岗岩类碎石混杂沉积。选取 28 cm 处的泥炭进行 AMS¹⁴C 测定,得到其年代为 6 730~6 891 cal. B.P. (中值年代为 6 802 cal. B.P.),选取 278 cm 处蓝色黏土做全样有机质测年,得到其年代为 18 709~18 916 cal. B.P. (18 815 cal. B.P.) (表 3)。由此可见,此套沉积形成于 LGM 末期,记录了本区自 LGM 末期到全新世中期以来的海平面变化及气候信息。

表 2 LYW 剖面岩性描述

Table 2 Lithology description of the LYW profile

深度/cm	描述
0~20	浅黄色砂
20~52	黑色薄层泥炭
52~122	灰蓝色黏土,上部见锈染
122~206	浅灰色黏土,质地均匀底部见锈染
206~260	灰色粉砂质黏土,质地疏松且较粗,下部含大小不一的混杂状碎石
260~278	黄色砂,底部含有灰蓝色黏土夹层
278~372	红色碎石,剥蚀风化状,底部为花岗岩底板

表 3 AMS¹⁴C 年代数据

Table 3 AMS¹⁴C radiocarbon dating results

实验室编号	深度/cm	材料	$\delta^{13}C/‰$	测定年代/B.P.	2-Sigma range	矫正年代/cal B.P.
Beta-538748	28	泥炭	21.5	5 970±30	6 730~6 891	6 802
Beta-546035	278	全样有机质	22.1	15 560±40	18 709~18 916	18 815

辽宁地震局在此处(老渔窝村)测定了一个有机质[7 865±95 a (日历年为 8 509~8 992 cal. a B.P.,中值为 8 706 cal. a B.P.)]以及位于小孙屯的泥炭[5 840±85 a (日历年为 6 444~6 808 cal. a B.P.,中值为 6 649 cal. a B.P.)]及贝壳[11 085±120 a (日历年为 12 721~13 139 cal. a B.P.,中值为 12 940 cal. a B.P.)]^[29]。由此推断,该区约在 13 cal. ka B.P.前后,海水高潮线就可能达到小孙屯(小孙屯距离南部海岸最近为 780 m,在老渔窝南部 1 000 m 左右),此时研究区应为潮间带/潮下带环境。符文侠等在该区南部长兴岛八岔沟测定泥炭年代为 6

030±90 a (日历年为 6 774~6 992 cal. a B.P., 中值为 6 883 cal. a B.P.)^[30], 与本研究样品泥炭年代一致。

3.2 地球化学元素特征

由表 4 可见, LYW 剖面中 SiO₂ (69.12%) 含量最高, 其次是 Al₂O₃ (13.32%)、K₂O (4.05%) 和 Fe₂O₃ (3.90%), 以上 4 个主量元素占整体元素含量的 90.34%。MgO、TiO₂、P₂O₅ 和 MnO 的含量为最低, 均不足 1%, 除此之外, CaO 和 Na₂O 的含量分别为 1.09% 和 1.61%。常量元素含量从大到小依次为 SiO₂>Al₂O₃>K₂O>Fe₂O₃>Na₂O>CaO>TiO₂>MgO>P₂O₅>MnO。LYW 剖面中 SiO₂ (4.03)、Al₂O₃ (1.90)、Fe₂O₃ (1.16) 的标准差较高, 表明其含量随气候波动出现较大变化, 对气候变化较为敏感。

表 4 沉积物元素质量分数描述性统计

Table 4 Descriptive statistics of the major elements in the sediment

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO
极小值/%	57.88	5.58	0.03	0.04	0.31	0.31	2.63	0.17	0.02	0.02
极大值/%	85.16	16.70	9.44	0.88	1.87	2.95	5.33	0.97	0.55	0.11
平均值/%	69.12	13.32	3.90	0.47	1.09	1.61	4.05	0.64	0.08	0.04
标准差	4.03	1.90	1.16	0.18	0.26	0.47	0.61	0.19	0.09	0.01

依据年代、岩性及元素个体随剖面深度变化趋势, 将整个剖面由下到上划分为 5 个沉积单元 U1~U5。整体而言, 从底部向上, SiO₂ 和 K₂O 含量整体增高 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、TiO₂ 含量整体降低。在 U3 中 10 种主量元素基本无变化, 其他 4 个沉积单元均有一定的波动 (图 3)。Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、TiO₂ 呈现大致相同的变化规律, 与 SiO₂、K₂O 的含量变化呈相反的趋势。P₂O₅ 及 MnO 变化不显著。

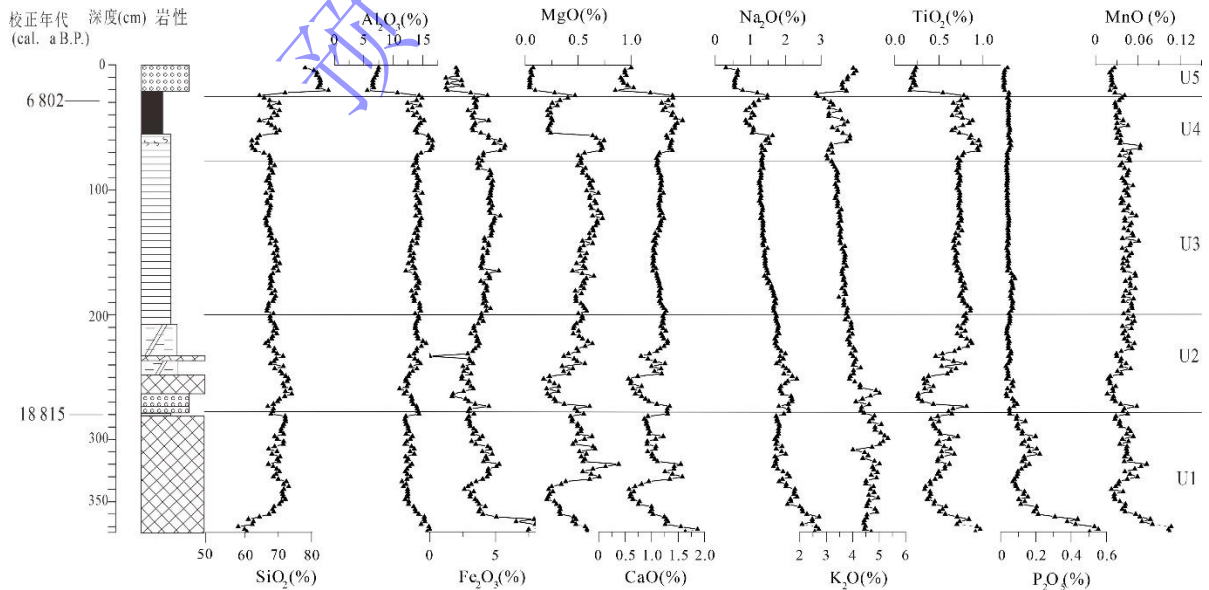


图 3 LYW 剖面主量元素含量随深度变化

Fig.3 Distribution of major elements along the depth in the LYW profile

4 讨论

4.1 元素比值环境意义及风化特征

元素比值通常用以提供沉积过程信息，从不同角度反映风化强度，是探讨气候环境变化的常用指标^[31]。

对于剖面的风化程度，CIA 反映了风化过程中长石转变为黏土矿物的程度，用于评价沉积物源区硅质碎屑沉积物的风化程度^[32]。一般而言，较温暖和较湿润的气候具有较高的风化程度（假设沉积后沉积物不受干扰），反之亦然。我们通常将 CIA 值 60 以下定义为低度化学风化，可反映源区在干冷的气候下发生的低度风化作用，60~80 为中度化学风化，80 以上为高度化学风化，可表明源区在湿润的热带和亚热带气候下经历的高强度化学风化^[33]。LYW 剖面 CIA 值介于 50~80，表明剖面整体处于低度化学风化到中度化学风化。CIA 值呈现出由下到上增加的趋势，然后在 0~20 cm 降低。表明其风化程度的变化趋势是逐渐增强后降低。

Al_2O_3 在风化过程中相对稳定，而 CaO 和 Na_2O 化学性质活泼，容易发生迁移，后者加和与前者的比值为 w 。 w 低值对应高的风化程度和湿润的沉积环境，反之气候较为干旱^[34]。 Ba 反映土壤淋溶作用强弱及气候干湿变化^[35]，与 w 对气候的指示意义一致。 Ki 反应稳定性元素 Fe、Al 相对富集或残积的程度^[36-37]，与风化成壤强度成正比。剖面从下到上 w 和 Ba 值由 U1（0.41 和 0.80）的高值逐渐降低到 U4（0.30~0.56）的低值，表明了活泼元素淋溶迁移逐渐增强，气候逐渐暖湿； Ki 由 U1（2.42）的低值逐渐增加到 U4（3.13）的高值，表明了稳定性元素 Fe 和 Al 的相对富集和残积程度降低，同样指示了气候的逐渐暖湿趋势。由于沉积物表层为耕作层，可能受到人类活动的影响，导致元素出现异常， w 、 Ba 和 Ki 值出现指示异常。4 个元素比值均指示出研究区环境由干冷到暖湿再到干冷的变化趋势（表 5、图 4）。

表 5 LYW 剖面元素比值变化

Table 5 Changes of ratio of elements for the LYW profile

沉积单元	项目	CIA	w	Ba	Ki
U1	最小值	55.77	0.35	0.72	1.95
	最大值	60.89	0.51	0.87	2.74
	平均值	57.76	0.41	0.80	2.42
	标准差	1.26	0.04	0.03	0.18
U2	最小值	55.31	0.33	0.60	2.30
	最大值	65.41	0.42	0.85	2.84
	平均值	59.97	0.37	0.73	2.56
	标准差	2.86	0.02	0.07	0.11
U3	最小值	62.10	0.29	0.54	2.56
	最大值	67.82	0.37	0.68	3.00
	平均值	65.30	0.32	0.60	2.84
	标准差	1.54	0.02	0.04	0.10
U4	最小值	64.79	0.28	0.47	2.78
	最大值	71.31	0.35	0.63	3.65
	平均值	67.69	0.30	0.56	3.13
	标准差	1.72	0.02	0.04	0.24
U5	最小值	54.11	0.22	0.79	3.09
	最大值	58.10	0.33	0.93	4.86
	平均值	55.34	0.28	0.86	4.01
	标准差	1.07	0.03	0.03	0.50

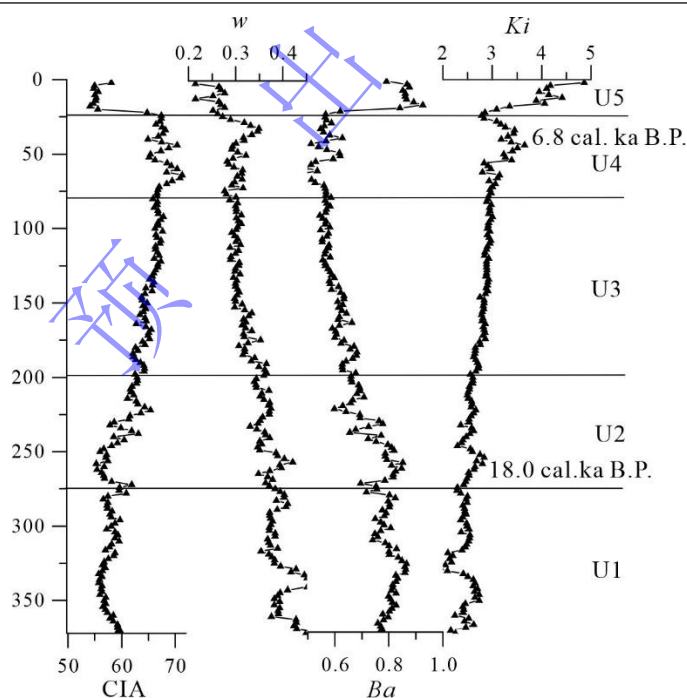


图 4 元素比值垂直分布图

Fig.4 Ratio of elements along the profile depth

4.2 沉积环境与气候演化过程

依据剖面岩性、年代、常量元素、元素比值变化特征结合古里雅冰芯 $\delta^{18}O$ 曲线^[38]和渤海南部相对海平面重建高度曲线^[39], 将 LYW 剖面所记录的 18.8 cal. ka B.P. 以来的气候环

境划分为如下 5 个阶段（图 5）。

阶段 I（372~278 cm，18.8 cal. ka B.P.~LGM 末期），此阶段的沉积物主要由冲积物组成，SiO₂ 含量较低，CIA 值（57.76）最低，显示为低度化学风化。同时，*w* 和 *Ba* 的峰值，*Ki* 的低值均存在于此阶段，整体反映了气候干冷的特点。此时期处于 LGM 末期，北半球中纬度地区气温普遍下降 10 °C~15 °C^[40]，渤海重建相对海平面高度低于现代海平面^[38]，古里雅冰芯 δ¹⁸O 曲线处于最低值（-20‰），同时最新研究显示，在此阶段，青藏高原松属适生区分布面积也缩减到最小^[41]。

阶段 II（278~200 cm，18.8~16.0 cal. ka B.P.），此阶段含有黄色砂和灰色粉砂并含有碎石，结合岩性及前人研究成果^[29]推测其为滨海环境，参考研究区现代平均潮差（1.5~2 m）情况，推测其可能为潮间带。CIA 值（59.97）和 *Ki* 值在波动中增大，*w* 和 *Ba* 值在波动中减小，表明沉积体系的不稳定，同时气候总体向暖湿转变。具体而言，此阶段是一个气候相对于 LGM 稍转暖湿但不稳定的阶段。结合渤海相对海平面重建曲线^[38]，此时重建的相对海平面高度开始缓慢升高，到 15.8 cal. ka B.P.时达到了 0.6 m。古里雅冰芯 δ¹⁸O 值处于增大趋势，我国太原盆地在此阶段也由寒冷干旱转为温凉偏湿^[42]。

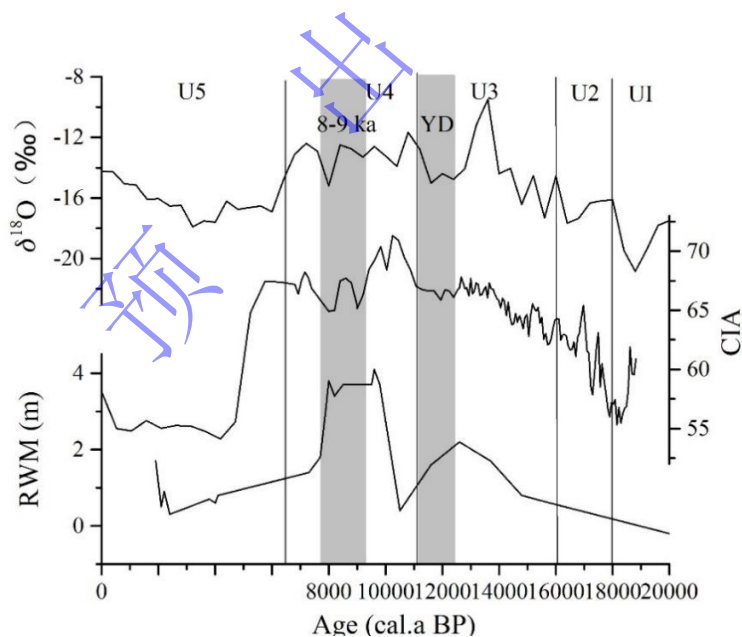


图 5 古里雅冰芯 δ¹⁸O 曲线、LYW 剖面 CIA 年代变化曲线和渤海南部相对海平面重建高度曲线^[14]

Fig.5 chemical index of alteration (CIA) value curves for the LYW profile with ages, curves of reconstructed sea level height of the southern Bohai Sea^[14], and curves of Guliya ice core δ¹⁸O^[14]

阶段 III（200~78 cm，16.0~11.7 cal. ka B.P.），此阶段岩性为较均质的蓝灰色粉砂，粉砂及砂。总体而言，CIA 和 *Ki* 值保持稳定的增大趋势，*w* 和 *Ba* 值保持稳定的减小趋势，推测其为滨海潮下带环境，气候为总体温暖湿润，但在 U3 后期，由于新仙女木事件

(Younger Dryas, YD) 的存在, 包含 CIA 在内的各曲线均指示出了此次气候突变现象的发生。相对海平面在此阶段的 12.6 cal. ka B.P. 达到 2.2 m, 随着 YD 事件的到来, 海平面转为下降。

阶段 IV (78~20 cm, 11.7~6.8 cal. ka B.P.), 此阶段岩性为上部含有薄层泥炭, 下部为黑灰色粉砂/黏土, 并含有锈染。泥炭部分以粉砂为主, 推测其沉积环境主要由滨海潮下带向滨海盐沼环境转变, 泥炭下部岩性表现出了氧化与还原环境作用的特征, 说明其经历多次暴露与淹没过程。CIA 值处于整个剖面最高值, w 和 Ba 值继续减小, Ki 值继续增大。CIA 曲线在此阶段对应了两次小幅度降低, 反推其年代约为 8.0~9.0 cal. ka B.P. 时期, 与此同时, 古里雅冰芯 $\delta^{18}O$ 和相对海平面高度曲线均有波动, 此变化可能受 8.0~9.0 cal. ka B.P. 期间的短期快速气候事件的影响, 在此短暂的气候事件过后达到气候最适宜期和最高海平面 (6.8 cal. ka B.P.), 与方晶^[21]和符文侠^[30]在长兴岛八岔沟关于最高海平面年代的结论一致。受到阶段 III 后期 YD 事件的影响, 此阶段重建相对海平面高度在 10.5 cal. ka B.P. 降到最低为 0.4 m, 随后继续保持增长, 在 9.6 cal. ka B.P. 时达到峰值 4.1 m, 此后保持在较高海平面水平上直到 7.7 cal. ka B.P. 后陡降至 1.8 m。此阶段同时对应了陈承惠早期提出的普兰店期和大孤山期, 即早中全新世, 为冰后期最温暖湿润的气候最适宜期^[16]。

阶段 V (20~0 cm, 6.8~0 cal. ka B.P.), 此阶段岩性主要为砂, SiO_2 含量最高, 依据现场调查剖面附近存在有古河道, 推测为全新世气候最适宜期海平面降低后河流发育, 使得此处由滨海盐沼环境转变为陆相为主的沉积环境。此阶段 CIA 值降到最低, 相对海平面曲线和古里雅冰芯 $\delta^{18}O$ 值均显示降低, 气候转为干冷。同时, 陆相流水环境可能侵蚀掉了一部分表层泥炭物质导致 6.8 cal. ka B.P. 之后的沉积记录不清晰, 由此高海平面的停留时间间隔和 6.8 cal. ka B.P. 之后的沉积记录是不完整的。剖面表层受人类建设及耕作活动影响, 对 K、Na 及 Ca 等元素影响较大, 导致此阶段主量元素及元素比值的环境指示意义失效。

5 结论

本文对大连西海岸低地 LYW 沉积剖面常量元素及其元素比值变化特征进行了分析, 结合 AMS¹⁴C 年代、岩性来探讨研究区沉积环境和气候环境演化过程。该研究为辽东半岛 LGM 末期气候重建工作, 尤其是大连西海岸区域沉积环境和气候演变历史提供了基础资料和信息。

LYW 剖面以粉砂、砂及碎石为主, 记录了 LGM 末期到全新世中期 (18 815~6 802 cal. B.P.) 的沉积环境与气候演变信息。剖面主要化学成分是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 及 Fe_2O_3 (占

比 90.34%)，含量从大到小依次为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{TiO}_2 > \text{MgO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ 。

本区主要经历了干冷的冲积环境 (372~278 cm, 18.8 cal. ka B.P. ~LGM 末期) —稍暖湿的滨海潮间带环境 (278~200 cm, 18.8~16.0 cal. ka B.P.) —暖湿的滨海潮下带环境 (200~78 cm, 16.0~11.7 cal. ka B.P.) —最暖湿的滨海盐沼环境 (78~20 cm, 11.7~6.8 cal. ka B.P.) 和干冷的陆相流水环境 (20~0 cm, 6.8~0 cal. ka B.P.) 这一系列过程。识别到了 YD 和 8.0~9.0 cal. ka B.P.期间的短期快速气候事件，并进一步验证了在 6.8 cal. ka B.P.前后，研究区处于最高海平面。

参考文献 (References)

- [1] Stuiver M, Braziunas T F, Grootes P M, et al. Is there evidence for solar forcing of climate in the GISP2 oxygen isotope record?[J]. *Quaternary Research*, 1997, 48(3): 259-266.
- [2] Yang M X, Yao T D, Wang H J, et al. Climatic oscillations over the past 120 kyr recorded in the Guliya ice core, China[J]. *Quaternary International*, 2006, 154-155: 11-18.
- [3] Antonioli F, Ferranti L, Fontana A, et al. Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines[J]. *Quaternary International*, 2009, 206(1/2): 102-133.
- [4] Syromyatnikov K V, Levitan M A, Kuzmina T G, et al. Geochemistry of sediments of the Holocene transgressive sequences of the Kara Sea[J]. *Geochemistry International*, 2017, 55(6): 503-520.
- [5] Giaime M, Salem A, Wang Y N, et al. Holocene evolution and signature of environmental change of the Burullus lagoon (Nile Delta) deciphered from a long sediment record[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 590: 110861.
- [6] Ma L S, Gao C Y, Kattal G R, et al. Evidence of Holocene water level changes inferred from diatoms and the evolution of the Honghe peatland on the Sanjiang Plain of northeast China[J]. *Quaternary International*, 2018, 476: 82-94.
- [7] Deng C L, Shaw J, Liu Q S, et al. Mineral magnetic variation of the Jingbian loess/paleosol sequence in the northern Loess Plateau of China: Implications for Quaternary development of Asian aridification and cooling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(1/2): 248-259.
- [8] Liu J B, Chen J H, Zhang X J, et al. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 148: 194-208.
- [9] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge cave, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 71-86.
- [10] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years[J]. *Nature*, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [11] Emiliani C. Pleistocene paleotemperatures[J]. *Science*, 1970, 168(3933): 822-825.
- [12] O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core[J]. *Science*, 1995, 270(5244): 1962-1964.
- [13] Sun Q L, Zhou J, Shen J, et al. Environmental characteristics of Mid-Holocene recorded by lacustrine sediments from Lake Daihai, north environment sensitive zone, China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(9): 968-981.
- [14] Liu X X, Vandenberghe J, An Z S, et al. Grain size of Lake Qinghai sediments: Implications for riverine input and Holocene monsoon variability[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 449: 41-51.
- [15] 王明达, 梁洁, 侯居峙, 等. 青藏高原湖泊表层沉积物 GDGTs 分布特征及其影响因素[J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 2016, 46 (2): 167-183. [Wang Mingda, Liang Jie, Hou Juzhi, et al. Distribution of GDGTs in lake surface sediments on the

- Tibetan Plateau and its influencing factors[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2016, 46(2): 167-183.]
- [16] 中国科学院贵阳地球化学研究所第四纪孢粉组, C¹⁴组. 辽宁省南部一万年来自然环境的演变[J]. *中国科学 (D辑): 地球科学*, 1977 (6): 603-614. [Quaternary Sporopollen Formation, Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Group C¹⁴. Evolution of the natural environment in the southern Liaoning province during 10,000 years[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 1977(6): 603-614.]
- [17] 符文侠, 王玉广, 刘国海. 辽宁沿海泥炭堆积与全新世海面变化[J]. *黄渤海海洋*, 1995, 13 (2): 23-32. [Fu Wenxia, Wang Yuguang, Liu Guohai. Peat accumulation and sea level changes in Holocene along the coast of Liaoning[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1995, 13(2): 23-32.]
- [18] 符文侠, 何宝林, 孙试斌, 等. 晚更新世末期以来辽东半岛东部滨海沉积相与沉积环境的探讨[J]. *地理科学*, 1987, 7 (1): 29-34. [Fu Wenxia, He Baolin, Sun Shibin, et al. An approach to the facies and environment of the littoral deposits in the east Liaodong Peninsula since the late stage of the Late Pleistocene[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1987, 7(1): 29-34.]
- [19] 李雪铭. 辽南大莲泡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.]
- [20] 史本恒. 辽东半岛全新世最大海侵的考古学观察[J]. *四川文物*, 2006 (6): 37-41. [Shi Benheng. Archaeological discovery of the largest palaeogeographical transgression in Liaodong Peninsula[J]. *Sichuan Cultural Relics*, 2006(6): 37-41.]
- [21] 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.]
- [22] 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.]
- [23] 马瑞丰, 张威, 金培红, 等. 辽宁南部金州地区距今 13.5 ka 以来古植被古气候变化[J]. *第四纪研究*, 2021, 41 (1): 43-50. [Ma Rui Feng, Zhang Wei, Jin Peihong, et al. Palaeo-vegetation and palaeo-climate changes since 13.5 cal. ka B.P. in Jinzhou, southern of Liaoning province[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(1): 43-50.]
- [24] 张威, 马瑞丰, 刘亮, 等. 辽东半岛全新世沉积物记录的古气候变化研究进展[J]. *沉积学报*, 2022, 40 (5): 1355-1366. [Zhang Wei, Ma Rui Feng, Liu Liang, et al. Research progress on Palaeoclimate change from Holocene sediment records in Liaodong Peninsula[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(5): 1355-1366.]
- [25] Hatté C, Morvan J, Noury C, et al. Is classical acid-alkali-acid treatment responsible for contamination? An alternative proposition[J]. *Radiocarbon*, 2001, 43(2A): 177-182.
- [26] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [27] Küçükuysal C, Yavuz N. Multi-proxy records of Quaternary fluvio-lacustrine sediments around Lakes Eymir and Mogan, Ankara (Central Anatolia, Turkey)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(16): 587.
- [28] Sheldon N D, Tabor J N. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 95(1/2): 1-52.
- [29] 钟以章, 高常波. 辽东半岛全新世海平面变化及近 5000 年来的地壳运动[J]. *海洋科学*, 1988, 12 (1): 4-8. [Zhong Yizhang, Gao Changbo. Sea level changes in the Holocene and crustal movement in the past 5000 years in the Liaodong Peninsula[J]. *Marine Sciences*, 1988, 12(1): 4-8.]
- [30] 符文侠, 焦亚宁, 魏成凯. 从海积地貌和沉积特征看辽东半岛南部沿岸全新世海水入侵趋势[J]. *海洋湖沼通报*, 1985 (3): 37-41. [Fu Wenxia, Jiao Yaning, Wei Chengkai. Understanding the trend of the Holocene transgression through the characteristic of the marine dipositional configuration and sedimentation on the Southwest coast in the Liaodong Peninsula[J]. *Transactions of*

- Oceanology and Limnology, 1985(3): 37-41.]
- [31] Wang G, Wang Y L, Wei Z F, et al. Geochemical records of Qionghai Lake sediments in southwestern China linked to Late Quaternary climate changes[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2020, 560: 109902.
- [32] Roddaz M, Viers J, Brusset S, et al. Controls on weathering and provenance in the Amazonian Foreland Basin: Insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments[J]. Chemical Geology, 2006, 226(1/2): 31-65.
- [33] Borges J, Huh Y. Petrography and chemistry of the bed sediments of the Red River in China and Vietnam: Provenance and chemical weathering[J]. Sedimentary Geology, 2007, 194(3/4): 155-168.
- [34] 周家兴, 吴利杰, 于娟, 等. 铜川地区 11.4~1.5 ka B.P.期间黄土地球化学风化特征及其古气候意义[J]. 地球与环境, 2019, 47 (1): 64-73. [Zhou Jiaying, Wu Lijie, Yu Juan, et al. Characteristics of geochemical weathering of loess in the Tongchuan area during 11.4-1.5 ka B.P. and its paleoclimatic implications[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 64-73.]
- [35] 陈玉美, 舒强, 张茂恒, 等. 南京下蜀黄土记录的 250~100 ka 期间的环境演化信息[J]. 地质科技情报, 2014, 33 (6): 55-59, 77. [Chen Yumei, Shu Qiang, Zhang Maoheng, et al. Environmental evolution information recorded in the Xiashu loess (250-100 ka) in Nanjing, China[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(6): 55-59, 77.]
- [36] 毛沛妮, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J]. 地理学报, 2017, 72 (2): 279-291. [Mao Peini, Pang Jiangli, Huang Chunchang, et al. Chemical weathering characteristics and regional comparative study of the loess deposits in the upper Hanjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (02): 279-291]
- [37] 胡梦琪, 庄静, 孙文丽, 等. 青藏高原东北部全新世常量元素地球化学特征及环境演变[J]. 中国沙漠, 2023, 43 (2): 11-20. [Hu Mengjun, Zhuang Jing, Sun Wenli, et al. Geochemical characteristics of major elements and environmental evolution in the Holocene in the northeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2): 11-20.]
- [38] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core[J]. Science, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [39] Yi L, Yu H J, Ortiz J D, et al. A reconstruction of Late Pleistocene relative sea level in the South Bohai Sea, China, based on sediment grain-size analysis[J]. Sedimentary Geology, 2012: 281: 88-100.
- [40] Jouzel J, Hoffmann G, Parrenin F, et al. Atmospheric oxygen 18 and sea-level changes[J]. Quaternary Science Reviews, 2002, 21(1/2/3): 307-314.
- [41] 陈鸿明, 侯光良, 文德卓玛, 等. 末次冰盛期与全新世青藏高原松属植被分布及其演变[J]. 第四纪研究, 2023, 43 (5): 1211-1224. [Chen Hongming, Hou Guangliang, Wende Zhuoma, et al. Distribution and evolution of *Pinus* spp. vegetation in the Tibetan Plateau during the Last Glacial Maximum and Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2023, 43(5): 1211-1224.]
- [42] 付晓芬. 太原盆地 20ka 以来孢粉组合与古环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [Fu Xiaofen. Sporollen assemblages and palaeoenvironmental evolution since 20ka BP in Taiyuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.]

Sedimentary Environment and Its Significance to Paleoclimate in the West Coast of Dalian Lowland

MA RuiFeng¹, ZHANG Wei², LIU Liang²

1. School of Geographic Sciences, Anshan Normal University, Anshan, Liaoning 114007, China

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

Abstract: [Objective] The high-resolution climate reconstruction of Liaodong Peninsula is important for exploring the evolution of regional climate environment and high-quality development. The sedimentary environment of the Liaodong Peninsula is diverse and complex, studies on the types and sequence characteristics of sediments in different periods in small areas is lack. The aim of this study is to reconstruct the sedimentary environment and climate history by studying the sediments of the west coast of Dalian. [Methods] By analyzing AMS¹⁴C dating, lithology, and geochemical elements of the Laoyuwo (LYW) section to reveal the evolution of sedimentary environment and paleoclimate of the region. [Results and Discussions] The sediment is mainly composed of sand, silt, and gravel, which recorded sedimentary environment and paleoclimate evolution information from the Last Glacial Maximum (LGM) to the Middle Holocene (18815–6802 cal.BP). The main chemical components in the profile are SiO₂, Al₂O₃, K₂O, and Fe₂O₃, the total content of which is 90.34%. The contents of major elements from large to small are SiO₂ > Al₂O₃ > K₂O > Fe₂O₃ > Na₂O > CaO > TiO₂ > MgO > P₂O₅ > MnO. The sedimentary records shows that the region experienced a dry and cold alluvial (18.8 cal.ka BP – late LGM), slightly warm and humid coastal intertidal (18.8–16.0 cal.ka BP), warm and humid coastal subtidal (18.8–16.0 aal.ka bp), warm and humid coastal subtidal (16.0–11.7 cal.ka BP), warmest and wettest coastal salt marsh (11.7–6.8 cal.ka BP), and dry and cold fluvial environment (6.8–0 cal.ka BP). The highest sea level around 6.8 cal.ka BP and the rapid climatic events during Younger Dryas (DY) and 8.0–9.0 ka are also responses in the sediment. [Conclusions] This study provides basic data and information for the Holocene climate reconstruction of Liaodong Peninsula, particularly for the sedimentary environment evolution history of the west coast of Dalian.

Key words: geochemical; sedimentary environment; environmental evolution; indicating significance; Dalian city