

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020060803

山东仙境源黄土常量元素特征及其古气候环境意义

陈海涛^{1,2}, 孔凡彪³, 徐树建², 娄兆军⁴, 张军强⁵

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590
2. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 临沂 276000
3. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250014
4. 长岛县自然资源局, 烟台 265800
5. 临沂大学地质与古生物研究所, 临沂 276000

摘要:通过对南长山岛仙境源黄土的常量元素组成特征进行分析,结合风化判别指标和元素综合参数探讨了该黄土堆积过程中经历的化学风化强度与气候变化特征,并将其与砣矶岛黄土、平阴黄土以及洛川黄土-古土壤进行对比,结果表明:(1)仙境源黄土的主要化学成分为SiO₂、Al₂O₃和CaO,常量元素含量呈SiO₂>Al₂O₃>CaO>Fe₂O₃>K₂O>Na₂O>MgO>TiO₂>P₂O₅>MnO的组合特征;(2)仙境源黄土整体处于初等化学风化阶段,并在堆积过程中先后经历了5次暖湿与冷干的气候变化,该区气候环境与全球气候环境的变化之间存在较好的响应关系;(3)山东的粉尘物源和古气候环境总体上存在较高相似性,但因海陆位置与地形的影响使气候环境存在区域性的差异,而仙境源黄土与平阴黄土之间明显的差异表明二者粉尘物源存在差别;(4)对于仙境源黄土与洛川黄土-古土壤在元素组成与风化强度上存在的明显差异,我们认为主要是因粉尘的物源不同导致。

关键词:常量元素;化学风化;环境演变;山东黄土

中图分类号:P532 **文献标识码:**A

Geochemical characteristics of major elements and their paleoenvironmental significance of the Xianjingyuan loess in Shandong Province

CHEN Haitao^{1,2}, KONG Fanbiao³, XU Shujian², LOU Zhaojun⁴, ZHANG Junqiang⁵

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, China
3. School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China
4. Changdao County Natural Resources Bureau, Yantai 265800, China
5. Institute of Geology and Paleontology, Linyi University, Linyi 276000, China

Abstract: The loess deposited in the Miaodao Islands has great significance to the revealing of paleoclimatic and paleoenvironmental changes. In this study, we analyzed the compositional characteristics of the major elements of the Xianjingyuan loess on the Nanchangshan island. Combined with the chemical weathering indexes and integrated elemental parameters, we discussed in this paper the characteristics and intensity of chemical weathering and climate changes during the accumulation of Xianjingyuan loess. Also made are comparisons to the Tuoji loess, Pingyin loess and Luochuan loess-palaeosol. It is revealed that: (1) The Xianjingyuan loess is dominated by the major elements of SiO₂, Al₂O₃ and CaO, and the abundance of major elements are in an order of SiO₂>Al₂O₃>CaO>TFe₂O₃>K₂O>Na₂O>MgO>TiO₂>P₂O₅>MnO; (2) Chemical weathering indicators indicated that the Xianjingyuan loess was in an initial stage of chemical weathering; and the integrated element parameters suggest that the region had experienced five times of climatic change from warm and humid to cold and dry, and the climate environment of Xianjingyuan has a good response to the global climate environment; (3) The dust sources and the paleoclimate environment are highly similar to the loess found in Shandong Province, but the regional environment was effected by geographic location and topographic conditions, the obvious difference between Xianjingyuan loess and Pingyin loess suggest that there is difference in dust sources; (4) the

资助项目:国家自然科学基金项目“黄河三角洲地区硬质黏土层的成因及形成年代研究”(41977262),“晚第四纪山东风尘堆积中砾石层的年代、物源及其环境意义”(41472159)

作者简介:陈海涛(1995—),男,硕士研究生,研究方向为第四纪地质与环境演变, E-mail: chenhaitao0329@163.com

通讯作者:徐树建(1967—),男,教授,从事地貌与环境研究, E-mail: xushujian1697@163.com

收稿日期:2020-06-08; **改回日期:**2020-08-05. 文凤英编辑

difference between the major elements and chemical weathering in Xianjingyuan loess and Luochuan loess-palaeosol owes its origin to the difference of dust sources.

Key words: major elements; chemical weathering; environmental evolution; Shandong loess

黄土作为第四纪特定气候环境下形成的粉尘堆积,其蕴含着大气环境与沉积环境等信息,从而成为古气候环境研究的重要载体^[1-3]。黄土经历了粉尘物质的搬运、堆积以及堆积后的改造过程,而化学元素的迁移、富集以及重新组合等行为记录着整个过程中气候环境的变化信息,通过研究黄土地层中化学元素的含量变化与组合特征可以有效揭示化学风化强度与古气候环境的演变过程^[4-6],又因不同化学元素之间的化学行为在表生环境中存在着差异,因此元素含量与相关参数在一定程度上也被用来指示黄土粉尘的物源信息^[7-9]。元素地球化学作为黄土物源判别、化学风化强度及古气候环境演变分析的重要替代指标之一,在风尘堆积的研究中得到了广泛的应用^[10-15]。

山东位于我国现代季风区的东部,保存了大量的黄土地层。山东黄土蕴含着东亚地区季风演变与环境变化信息,对我国古气候环境演化的研究具有重要的意义^[16-19]。其中庙岛群岛作为山东黄土重要的分布区,其独特的海陆地理位置使该区黄土更完整地保存了中国东部季风区的环境演变信息。学者们对庙岛群岛展开的相关研究使我们对该区黄土的物源、成因以及环境意义有了较为整体认识,同时也表明了该区黄土存在的特殊性^[20-22],虽然对庙岛群岛黄土元素地球化学方面的研究有了初步的进展,但是相对于西北内陆以及南方等地区的研究而言仍较为薄弱^[23]。对此,本文在已有研究的

基础上对长岛县仙境源黄土的常量元素的组成特征进行了分析,同时通过与洛川黄土-古土壤^[10]及山东其他黄土剖面^[24]常量元素之间的对比来探讨其在粉尘物源和风化强度之间存在的差异性,并结合化学元素综合参数提取了仙境源黄土堆积过程中气候环境的演变信息。

1 材料与方法

1.1 剖面概况与样品采集

仙境源剖面(37°55′51.7″N、120°44′47.3″E)位于山东省烟台市长岛县南长山岛东部王沟村,海拔46.7 m,剖面厚度约500 cm,未见底(图1)。该区为暖温带季风气候,降水集中,雨热同期,夏季盛行东南风,冬季以西北风为主。基于野外观察沉积物颜色、岩性、沉积结构特征和层间接触关系等,该剖面自上而下可划分为:表土层(0~40 cm),暗灰棕色,结构疏松多孔,含有较多的植物根系,受流水和生物扰动明显;黄土层(40~280 cm),浅黄色粉砂质土,质地均匀,较疏松,垂直节理明显;古土壤层(280~340 cm),灰褐色粉砂质黏土,结构较为紧密,团粒结构比较明显;黄土层(340~370 cm),黄色粉砂质土,质地均匀,较疏松;古土壤层(370~390 cm),灰褐色粉砂质黏土,土壤团粒结构较为明显;黄土层(390~430 cm),黄色粉砂质土,质地均匀,有少量

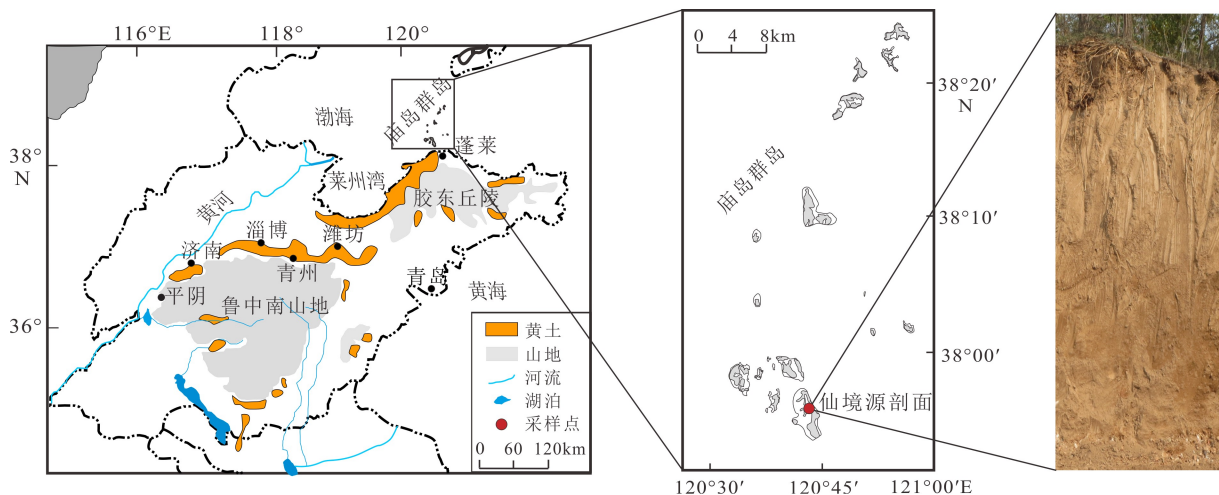


图1 仙境源剖面地理位置^[24]

Fig.1 Location of the Xianjingyuan loess section, Shanong Province^[24]

孔隙;古土壤层(430~460 cm),灰褐色粉砂质黏土,结构紧实,土壤团粒结构较明显;黄土层(460~500 cm),黄色粉砂质土,质地均匀。通过对仙境源剖面地层年代的研究,结果表明该剖面为晚更新世以来的黄土沉积^[25],本文根据该剖面的地层特征,在其40~490 cm深度范围内共采集了27个地球化学样品用于常量元素测试。

1.2 研究方法

常量元素的测试在中科院广州地化所同位素地球化学重点实验室采用Rigaku 100e型X荧光光谱分析(XRF)完成,其具体过程为:样品在玛瑙研钵内研磨至200目以下,取约2 g样品置于105 °C的烘箱4 h,取出后置于干燥器中保存;称取1~1.2 g烘干的样品于瓷坩埚中,放入高温炉内煅烧3 h后取出,待其冷却后称样品与坩埚的总量;然后称0.53~0.58 g烧失后保留的样品于塑料瓶中,再称8倍的Li₂B₄O₇溶胶于塑料瓶中,盖好,震荡,使样品与溶胶混匀,加1滴2%LiBr-1%NH₄I混合助熔剂于XRF的专用铂金坩埚中,倒入混合样品,以数滴去离子水冲洗塑料杯,溶液倒入铂金坩埚,熔融制成玻璃饼用以测定常量元素。

2 结果分析

2.1 仙境源黄土常量元素组成特征

由仙境源黄土剖面常量元素测试结果(表1)可知,样品中主要常量元素组合特征为SiO₂、Al₂O₃、CaO、TFe₂O₃、K₂O、Na₂O、MgO,其中SiO₂含量最多,为61.56%~69.88%,平均含量为65.47%;Al₂O₃的含量为11.26%~13.02%,平均含量为11.81%;

CaO的含量为4.42%~7.48%,平均含量为6.00%;TFe₂O₃(TFe₂O₃=Fe₂O₃+FeO)的含量为3.51%~4.37%,平均含量为3.78%;K₂O的含量为2.06%~2.30%,平均含量为2.17%;Na₂O的含量为1.61%~1.85%,平均含量为1.75%;MgO的含量为1.00%~1.66%,平均含量为1.47%;而TiO₂、P₂O₅、MnO的含量平均值分别为0.67%、0.08%与0.07%,含量较少;仙境源黄土中氧化物平均含量依次为SiO₂>Al₂O₃>CaO>TFe₂O₃>K₂O>Na₂O>MgO>TiO₂>P₂O₅>MnO,其中SiO₂、Al₂O₃和CaO的平均含量之和为83.23%。

与上陆壳UCC^[26]相比(表1,图2),仙境源黄土中SiO₂的含量与UCC较为接近,CaO的含量较为富集,而Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、Na₂O和K₂O的含量相对亏损,其中Na₂O含量的亏损较为明显,元素含量的变化与化学风化过程中碱金属元素易淋溶迁移、稳定元素相对富集有关^[27];与洛川黄土^[10]相比,除CaO表现为明显富集、Na₂O含量比较接近以外,其他元素均呈现亏损特征;与洛川古土壤^[10]相比,仙境源黄土中SiO₂、Na₂O的含量较为富集,而其他元素含量均呈不同程度的亏损;与山东平阴黄土^[24]相比,除了MgO含量较为接近之外,其他元素含量均呈不同程度的亏损,其中SiO₂与CaO的亏损比较明显;而与同区域内砭矶岛黄土^[23]的常量元素之间的差异并不明显,其中仙境源黄土中SiO₂、K₂O和Na₂O的含量较砭矶岛略有亏损,而Al₂O₃、TFe₂O₃与CaO相对于砭矶岛黄土略有富集且CaO富集程度较为明显。

2.2 仙境源黄土化学风化强度判别

化学蚀变系数(CIA=[Al₂O₃/(Al₂O₃+CaO*+Na₂O+K₂O)]×100)指示长石风化黏土矿物的程度,是衡量沉积物风化作用的代用指标^[28-29],式中的CaO*为

表1 仙境源黄土与砭矶岛黄土、平阴黄土、洛川黄土-古土壤的常量元素含量

Table 1 Major elements contents of Xiangjiangyuan loess, Tuoji loess, Pingyin loess and Luochuan loess-paleoal

样品名称		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	%
仙境源黄土 (n=27)	最大	69.88	13.02	4.37	2.30	1.85	7.48	1.66	0.07	0.73	0.11	
	最小	61.56	11.26	3.51	2.06	1.61	4.42	1.00	0.06	0.62	0.06	
	平均	65.47	11.81	3.78	2.17	1.75	6.00	1.47	0.07	0.67	0.08	
砭矶岛黄土 ^[23] (n=13)	平均	66.95	11.63	3.76	2.23	1.87	4.94	1.56	0.07	0.69	0.10	
平阴黄土 ^[24] (n=70)	平均	69.28	11.94	4.00	2.68	2.27	7.76	1.44	-	-	-	
洛川黄土 ^[10] (n=13)	平均	67.10	13.99	4.62	2.99	1.73	1.03	2.22	0.07	0.72	0.15	
洛川古土壤 ^[10] (n=12)	平均	64.85	14.93	5.17	3.18	1.39	0.82	2.21	0.08	0.76	0.11	
UCC ^[26]	平均	66.00	15.20	5.00	3.40	3.90	4.20	2.20	0.07	0.68	0.50	

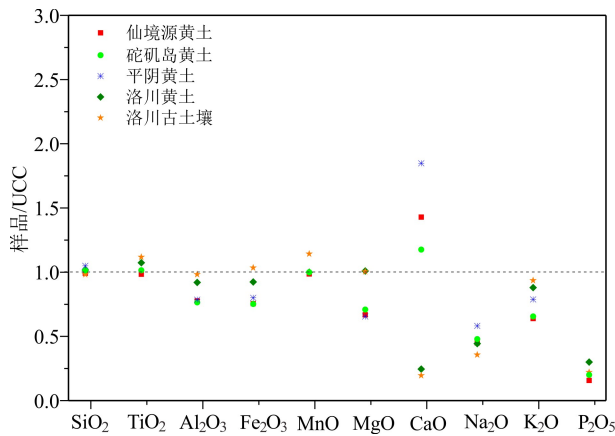


图2 仙境源黄土与砭矶岛黄土、平阴黄土、洛川黄土-古土壤常量元素的UCC标准化对比

Fig.2 UCC normalized pattern of major elements of the Xiangjiangyuan loess and its comparison with Tuoji loess, Pingyin loess and Luochuan loess-paleoal

硅酸盐相,对其计算采用 McLennan^[30]的方法。根据CIA值的范围可以将风化强度划分为4个阶段,分别为未受化学风化阶段(CIA<50)、寒冷干燥气候条件下的初等化学风化阶段(50<CIA<65)、温暖湿润气候条件下的中等化学风化阶段(65<CIA<85)和炎热潮湿的强烈化学风化阶段(85<CIA<100)^[11]。其中,上陆壳UCC^[26](CIA为47.92)处于未受化学风化阶段;洛川黄土^[10](CIA为63.73)处于寒冷干燥气候条件下的初等化学风化阶段;洛川古土壤^[10](CIA为67.36)处于温暖湿润气候条件下的中等化学风化阶段;平阴黄土^[24](CIA为53.67)与砭矶岛黄土^[23](CIA为57.59)均处于初等化学风化阶段(图3)。仙境源黄土的CIA值的变化范围为57.64~62.22,平均值为59.21,表明仙境源黄土也处于初等化学风化作用阶段,其中仙境源黄土与砭矶岛黄土的CIA值分布较为集中,而平阴黄土的CIA值分布比较分散,虽然部分CIA值接近或者高于仙境源黄土,但CIA值主要还是集中分布在低于仙境源黄土的一侧。各黄土剖面经历的化学风化强度依次为上陆壳(UCC)<平阴黄土<砭矶岛黄土<仙境源黄土<洛川黄土<洛川古土壤。

因不同矿物之间的风化速率不同,且斜长石的风化速率远大于钾长石,因此Na/K比值可通过衡量样品中斜长石风化程度近而来表示化学风化程度,该比值与风化程度成反比^[31]。由图3可知,仙境源黄土样品中的Na/K比值分布较为集中,并且与CIA指数之间大致呈现为负相关性;同时,仙境源黄土中的Na/K比值与砭矶岛黄土较为接近;平阴黄土的Na/K比值较为分散,虽然部分样品的Na/K

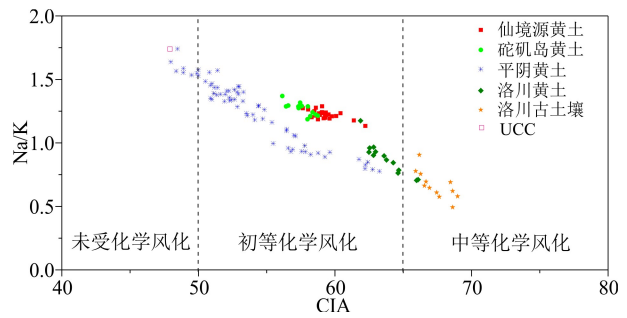


图3 仙境源黄土与砭矶岛黄土、平阴黄土、洛川黄土-古土壤化学风化参数CIA与Na/K关系散点图

Fig.3 The scatter diagram of CIA and Na/K molar ratio of Xiangjiangyuan loess, Tuoji loess, Pingyin loess and Luochuan loess-paleoal

比值低于仙境源黄土并达到了与洛川黄土相当的程度,但Na/K比值总体仍高于仙境源黄土;而洛川黄土与洛川古土壤的Na/K比值均低于仙境源黄土。可以看出,上陆壳(UCC)、平阴黄土、砭矶岛黄土、仙境源黄土、洛川黄土、洛川古土壤的Na/K比值总体呈现为逐渐减小的变化趋势,与CIA指数呈现出的化学风化强度变化规律较为一致。

A-CN-K(Al₂O₃-CaO*+Na₂O-K₂O)三角模型图可以反映剖面地层的化学风化趋势^[28,32]。将仙境源黄土数据点投到A-CN-K三角模型图上可以看出(图4),仙境源黄土的数据点也大致与CN-A连线平行,表明剖面中的斜长石先开始风化解, Ca、Na流失,其中,仙境源黄土与砭矶岛黄土分布较为集中且重复性较高;平阴黄土的数据样点也呈现较为分散的特点,虽有部分样品数据呈现的风化强度高于仙境

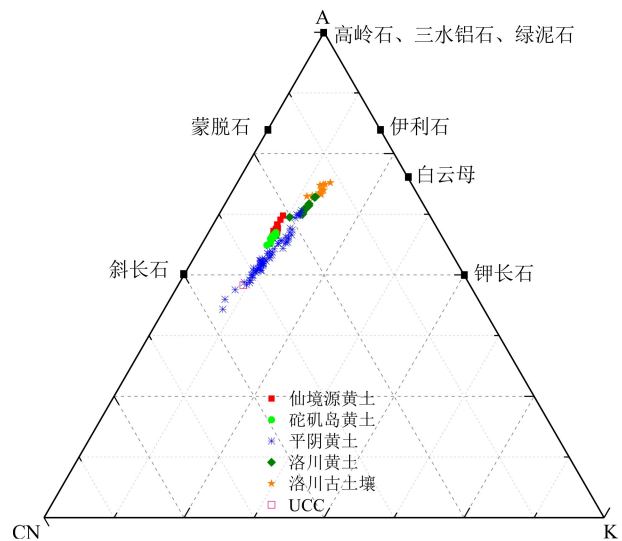


图4 仙境源黄土与砭矶岛黄土、平阴黄土、洛川黄土-古土壤的A-CN-K三角图

Fig.4 A-CN-K diagram of Xiangjiangyuan loess, Pingyin loess and Luochuan loess-paleoal

源黄土, 但总体仍集中分布于风化强度弱于仙境源黄土的一侧; 而仙境源黄土中虽然也有部分样点达到了风化强度与洛川黄土相近的位置, 但总体仍弱于洛川黄土; 各黄土中 Ca、Na 的流失程度大致呈现为平阴黄土 < 砣矶岛黄土 < 仙境源黄土 < 洛川黄土 < 洛川古土壤, 说明风化强度逐渐增加, 与 CIA 指数和 Na/K 比值呈现出的变化特征较为相似。

3 讨论

3.1 仙境源黄土常量元素揭示的粉尘物源与环境差异

虽然黄土堆积后的风化过程会使化学元素发生迁移与富集等化学行为^[26, 28], 但通过各黄土经历的化学风化强度可知, 除洛川古土壤达到了中等化学风化强度以外, 仙境源黄土、砣矶岛黄土、平阴黄土与洛川黄土均经历了初等化学风化阶段, 从而使化学元素受堆积后的影响较小而较好地保留了粉尘源区的信息。而在黄土常量元素中, Si、Al、Ti 多存在于稳定矿物中, 在搬运与风化过程中受外界因素的影响较小, 不易流失^[33-34]; 同时 Fe 元素在风化过程中多为价态之间的转变, 没有明显的迁移行为^[16, 33, 35], 因此本文选用 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 以及 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 散点图来对各剖面的粉尘物源进行分析。可以看出(图 5), 仙境源与洛川两个黄土样品在 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 散点图中的分布区域存在较为明显的差异, 表明其在粉尘物源之间的不同; 因此我们认为, 仙境源黄土与洛川黄土-古土壤在元素组成上存在的差异以及在水热条件较好条件下风化强度却低于洛川黄土-古土壤的特征主要是因为粉尘

物源的不同。

通过仙境源黄土与平阴黄土的样品在 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 散点图中的分布可以看出, 二者之间有着较高的重合区域, 结合化学组成与化学风化强度之间呈现出的相似性, 说明山东内陆黄土与庙岛黄土具有相似的粉尘物源与气候环境背景; 但对于平阴黄土的风化强度总体较弱于仙境源黄土, 我们认为是因平阴剖面位于鲁中南山地, 仙境源剖面位于庙岛岛屿, 地理位置的不同使两个地区受到的海陆作用之间存在差异, 进而使气候产生了区域性的差异; 而对于平阴黄土中的各风化判别指标、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 样品点的分布均呈现出较为分散的分布特征, 对此我们认为可能与其粉尘的物质来源有关, 即平阴黄土除了有末次冰期时期莱州湾裸露地层的粉尘物质以外, 还可能接受了黄泛平原的近源物质^[18, 24], 这一点在平阴黄土 SiO_2 与 Na_2O 等粗粒度效应的元素含量较高的特征中也有体现^[24]。此外, 对于平阴黄土中出现部分样品的风化强度较强于仙境源黄土并达到与洛川黄土相似的强度, 结合平阴黄土的样品点在 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 的散点图中与洛川黄土之间的重合区域相对较多, 对此我们推测平阴黄土可能比仙境源黄土更易接受来自西北内陆的粉尘物质。

仙境源黄土与砣矶岛黄土在化学元素组成与风化强度之间呈现为较高的相似性, 并且两个剖面在 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 散点图中的分布比较集中且重合度较高, 从而表明了同区域内的仙境源与砣矶岛黄土在粉尘物源与区域环境上的一致性; 而在粉尘物源与区域环境相似的背景下, 砣矶岛黄土的化学风化强度总体略低于仙境源黄土。通过野外基础调查我们发现, 砣矶岛剖面堆积位置为山地且较为孤立, 而仙境源剖面

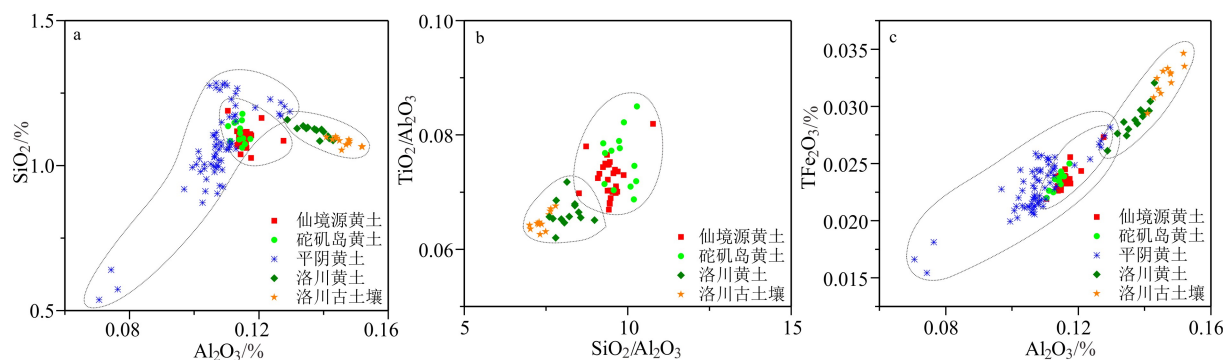


图 5 各黄土剖面 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (a), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) 及 $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (c) 散点图

Fig. 5 Plots of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (a), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) and $\text{TFe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ (c) of Xiangjiangyuan loess, Tuoji loess, Pingyin loess and Luochuan loess-paleoal

堆积位置基本为山间盆地,对此我们认为其可能因两个剖面所在地形之间的差异使水、热条件发生变化,进而对风化强度产生了影响。

3.2 仙境源黄土化学元素综合参数对古气候环境的指示意义

由于单个化学元素并不能很好地指示气候环境的变化,因此化学元素综合参数在黄土古气候研究中得到了较为广泛的应用^[6,36]。其中,残积系数 $(Al_2O_3+Fe_2O_3)/(CaO+MgO+Na_2O)$ 指示着风化淋溶作用的强弱,当Al、Fe残积较多时,系数值增加,表明气候暖湿^[37];退碱系数 $(Na_2O+CaO)/Al_2O_3$ 指示着化学元素的淋溶迁移,因Na、Ca化学性质较活泼,易迁移,而Al相对稳定,因此当气候暖湿时,该系数值减小^[38];化学风化淋溶系数 $(Na_2O+CaO+K_2O)/Al_2O_3$ 指示着黄土中活动组分与惰性组分间的消长关系,当气候湿润时,土壤的淋溶作用越强,该系数值对应减小^[39]。因此,本文通过采用以上三种化学元素综合参数并结合Na/K值与CIA指数,来对仙境源黄土堆积过程中环境演变信息进行综合分析。

仙境源黄土的堆积过程主要经历了MIS5、MIS4、MIS3与MIS2四个阶段^[25](图6)。在MIS5阶段内,CIA指数与残积系数总体较高并在MIS5a时期出现了最高峰值(其年代大致为81.43 ka),退碱系数、淋溶系数与Na/K值偏小并对应出现了最低谷值,表明该阶段内的风化淋溶与风化成壤作用较强,气候较为暖湿,整体与中国东亚季风区MIS5时期的

暖湿气候之间存在着良好的对应关系^[40],并且水热条件在MIS5a时期达到了最佳^[41-42];同时MIS5a也对应为海平面的上升时期^[43-44],此时仙境源黄土中的粗粒组分含量减小,细粒组分含量增加^[25]。在MIS4阶段内,残积系数减小且出现最低谷值,退碱系数与淋溶系数增大并出现最高峰值,同时Na/K比值增加,CIA指数减小,表明该阶段内的风化淋溶与风化作用较弱,气候环境呈现为干冷特征;同时该阶段的海平面较低^[44],仙境源黄土中的粗粒组分含量增加^[25]。在MIS3阶段内的残积系数与CIA指数相对于MIS4阶段有所增加,但比MIS5阶段要小;退碱系数、淋溶系数与Na/K比值相对于MIS4阶段有所减小,但总体上大于MIS5阶段;表明MIS3阶段内的风化淋溶作用与风化成壤作用虽相对于MIS4阶段有所增强,但仍较弱于MIS5阶段。而风化淋溶与化学风化该阶段的MIS3a(其年代大致为28~41 ka)和MIS3c(其年代大致为52~58 ka)两个时期较强,在MIS3b(其年代大致为41~52 ka)时期减弱的变化过程与MIS3弱暖期阶段的全球温度变化过程较为一致^[45];进一步结合仙境源黄土粒度组分含量与MIS3阶段海平面的波动变化^[44-45]我们认为,仙境源黄土细粒级组分含量增加、化学风化增强同样与海平面的上升时期存在着对应关系。MIS2阶段内的各指标均出现明显的阶段性变化,我们对其做了进一步的阶段性划分,在深度170~280 cm范围内残积系数与CIA指数明显减小并呈现为低值的波动变化,退碱系数、淋溶系数与Na/K

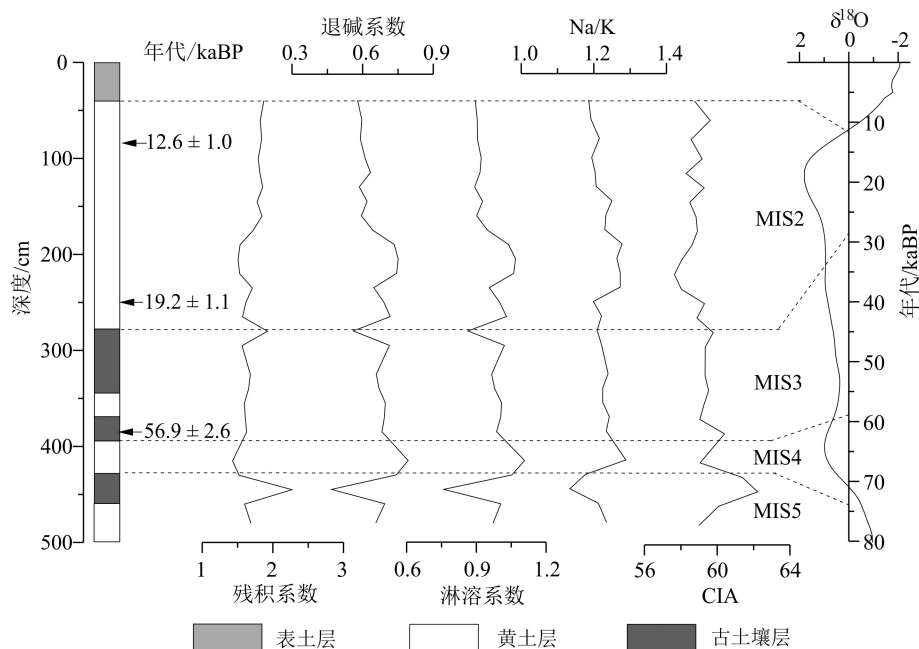


图6 仙境源黄土剖面元素综合参数深度变化图

Fig.6 Variation of integrated element parameters of Xianjingyuan loess

比值出现增加且呈现为高值的波动变化, 表明该阶段内的化学淋溶作用与风化作用均比较弱, 与末次冰盛期的干冷气候存在对应关系; 同时该时期内的海平面迅速下降^[44], 仙境源黄土中的粗粒组分含量与沉积速率均出现增加的变化^[25]。40~170 cm 范围内的残积系数相对于冰盛期有所增加、退减系数与淋溶系数出现减小, 且均趋于平稳的波动变化, 表明在该时期的化学淋溶作用相对于阶段早期有所增强, 气候由干旱转向湿润的变化; Na/K 比值呈现出减小的变化趋势, 但 CIA 指数却呈现出明显的波动变化。通过推测 CIA 指数波动峰值与谷值的年代将其大致划分为 5 个阶段并与气候事件进行对比后发现, CIA 指数增加阶段 1(年代范围为 15.12~14.54 ka)大致与 Meindorf 间冰段存在着对应关系; 而后的减小阶段 2(年代范围为 14.54~13.96 ka)大致对应着 OD 冷事件发生时期; 增加阶段 3(年代范围为 13.96~13.37 ka)大致与 B/A(Bølling 和 Allerød)的快速升温阶段相对应; 随后出现的减小波动 4(年代范围为 13.37~12.60 ka)则对应着 YD 冷事件发生时期; 最后的 CIA 指数增加阶段 5(年代范围为 12.60~11.82 ka)则对应为 YD 事件后期的温度快速回升阶段^[46-48], 对此我们认为, 仙境源黄土的化学风化强度在末次冰消期出现的波动变化是对该时期冷暖气候事件的区域性响应。

4 结论

(1) 仙境源黄土中常量元素以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 CaO 为主, 常量元素含量呈现为 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ 的组合特征。

(2) CIA 指数、Na/K 比值以及 A-CN-K 三角形模型结果显示仙境源黄土处于初等化学风化阶段; 并通过化学综合参数进一步表明, 仙境源黄土从 MIS5 到 MIS2 阶段的堆积过程中大致经历了 5 次暖湿-干冷的变化, 其中在 MIS5 阶段气候最为暖湿, 风化强度最强, MIS2 阶段的末次冰盛期气候最为干冷, 风化强度最弱, 以及在 MIS2 阶段末次冰消期内气候变化的不稳定初步表明仙境源黄土记录的气候环境变化是对全球气候变化的区域性响应, 并在堆积过程中受到海平面升降的影响。

(3) 仙境源黄土与砣矶岛黄土以及平阴黄土的常量元素组成和化学风化强度对比表明, 山东黄土的粉尘物源与气候环境总体存在着较高的相似性, 但其之间的差异表明了海陆位置与地形的影响使

气候存在区域性的差异, 而仙境源黄土与平阴黄土之间的明显差异除了因气候的影响以外, 也受到粉尘物质来源的影响, 进一步体现了山东黄土物质来源与成因复杂性的特点; 而对于仙境源黄土与洛川黄土-古土壤之间存在的差异性, 我们认为主要是因二者的粉尘物质来源不同。

参考文献 (References)

- [1] 刘东生, 安芷生, 郑洪汉. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. [LIU Tungsheng, AN Zhisheng, ZHENG Honghan. Loess and Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985.]
- [2] 周家兴, 于娟, 杨丽君, 等. 铜川地区早中全新世黄土沉积特征及其古气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(1): 160-166. [ZHOU Jiaying, YU Juan, YANG Lijun, et al. Sedimentary characteristics of the Early and Middle Holocene loess in Tongchuan area and their implications for paleoclimate [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(1): 160-166.]
- [3] Smalley I, Marković S B. Controls on the nature of loess particles and the formation of loess deposits [J]. *Quaternary International*, 2019, 502: 160-164.
- [4] 王攀, 张培新, 杨振京, 等. 靖边黄土剖面记录的末次冰期以来的气候变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(3): 162-170. [WANG Pan, ZHANG Peixin, YANG Zhenjing, et al. Climate change since the last glacial stage recorded in Jingbian loess section [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(3): 162-170.]
- [5] Liu B, Jin H L, Sun Z, et al. Geochemical weathering of Aeolian sand and its palaeoclimatic implications in the Mu Us Desert, northern China, since the Late Holocene [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(5): 647-659.
- [6] 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(2): 279-291.]
- [7] 凌超豪, 张智, 贾玉连, 等. 元素地球化学揭示的长江中下游下蜀黄土物源及其环境意义[J]. 地层学杂志, 2018, 42(3): 328-335. [LING Chaohao, ZHANG Zhi, JIA Yulian, et al. Geochemical evidence for provenance of Xiashu loess in the middle and lower reaches of the Yangtze river and its environmental implication [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2018, 42(3): 328-335.]
- [8] 赵万苍, 刘连文, 陈骏, 等. 中国沙漠元素地球化学区域特征及其对黄土物源的指示意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 62(9): 1428-1440. [ZHAO Wancang, LIU Lianwen, CHEN Jun, et al. Geochemical characterization of major elements in desert sediments and implications for the Chinese loess source [J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(9): 1428-1440.]
- [9] 杜慧荣, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨黄土的粒度与地球化学特征及其对粉尘物源的指示[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 64-76. [DU

- Huirong, XIE Yuanyun, KANG Chunguo, et al. Grain-size and geochemical compositions of the Harbin loess deposits and their implications for eolian dust provenances [J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 64-76.]
- [10] 陈骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近2.5Ma以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(2): 136-145. [CHEN Jun, AN Zhisheng, LIU Lianwen, et al. Variations in chemical compositions of the Aelion dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5Ma and chemical weathering in Asian island [J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(2): 136-145.]
- [11] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀黄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.]
- [12] 张玉芬, 邵磊, 熊德强. “巫山黄土”元素地球化学特征及成因和物源意义[J]. *沉积学报*, 2014, 31(1): 78-84. [ZHANG Yufen, SHAO Lei, XIONG Deqiang. Elemental compositions of the "Wushan Loess": implications for origin and sediment source [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 31(1): 78-84.]
- [13] Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(23-24): 3317-3326.
- [14] Xiong S F, Ding Z L, Zhu Y J, et al. A ~6 Ma chemical weathering history, the grain size dependence of chemical weathering intensity, and its implications for provenance change of the Chinese loess-red clay deposit [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15-16): 1911-1922.
- [15] Xie Y Y, Kang C G, Chi Y P, et al. The loess deposits in northeast China: The linkage of loess accumulation and geomorphic-climatic features at the easternmost edge of the Eurasian loess belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 181: 103914.
- [16] Tian S C, Sun J M, Lü L X, et al. Optically stimulated luminescence dating of late Quaternary loess deposits in the coastal region of North China: Provenance and paleoclimatic implications [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019, 218: 160-177.
- [17] 黎武标, 李志文, 王志刚, 等. 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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 177-187. [LI Wubiao, LI Zhiwen, WANG Zhigang, et al. Climatic environment changes during the last interglacial-glacial cycle in Zhifu loess section: Revealed by grain-size end-member algorithm [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 177-187.]
- [18] 刘乐军, 李培英, 王永吉. 鲁中黄土粒度特征及其成因探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 81-86. [LIU Lejun, LI Peiying, WANG Yongji. The Grain-size properties and genesis of the loess in central Shandong Province [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(1): 81-86.]
- [19] 张祖陆, 辛良杰, 聂晓红. 山东地区黄土研究综述[J]. *地理科学*, 2004, 24(6): 746-752. [ZHANG Zulu, XIN Liangjie, NIE Xiaohong. A summary of loessial researches in Shandong [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(6): 746-752.]
- [20] 曹家欣, 李培英, 石宁. 山东庙岛群岛的黄土[J]. *中国科学: B辑*, 1988, 31(1): 120-127. [CAO Jiixin, LI Peiying, SHI Ning. Study on the loess of Miaodao islands in Shandong province [J]. *Scientia China (Series B)*, 1988, 31(1): 120-127.]
- [21] 于洪军. 中国东部陆架黄土成因的新探索[J]. *第四纪研究*, 1999, 7(4): 367-372. [YU Hongjun. A new exploration on the origin of loess in the shelf area of the Eastern China seas [J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 7(4): 367-372.]
- [22] 王萧风, 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 CaCO₃ from loess sediments of Changdao in Shandong [J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2007, 19(4): 133-138.]
- [23] Xu S J, Kong F B, Jia G J, et al. An integrated OSL chronology, sedimentology and geochemical approach to loess deposits from Tuoji Island, Shandong Province: Implications for the late quaternary paleoenvironment in East China [J]. *Aeolian Research*, 2018, 31: 105-116.
- [24] 徐树建, 倪志超, 丁新潮. 山东平阴黄土剖面常量元素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(2): 353-359. [XU Shujian, NI Zhichao, DING Xinchao. Geochemical characteristics of major elements of the Pingyin loess in Shandong Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(2): 353-359.]
- [25] Xu S J, Ding X C, Yu L P, et al. Palaeoclimatic implications of Aeolian sediments on the Miaodao Islands, Bohai Sea, East China, based on OSL dating and proxies [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 259-266.
- [26] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust Its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell, 1985.
- [27] 路硕, 尹功明, 宋为娟, 等. 合肥下蜀土地球化学特征及其古气候意义[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 428-439. [LU Shuo, YIN Gongming, SONG Weijuan, et al. Geochemical characteristics and paleoclimate implications of Hefei Xiashu loess [J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(3): 428-439.]
- [28] Nesbit 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.
- [29] Qiao Y S, Hao Q Z, Peng S S, et al. Geochemical characteristics of the eolian deposits in southern China, and their implications for provenance and weathering intensity [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, 308(3-4): 511-523.
- [30] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.
- [31] 张威, 董应巍, 于洋, 等. 辽南黄土化学风化特点及其环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 163-171. [ZHANG Wei, DONG Yingwei, YU Yang, et al. Chemical weathering of the loess in the south of Liaoning Province and its implications for environmental change [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 163-171.]
- [32] Bugge B, Glaser B, Hambach U, et al. An evaluation of geochemical

- weathering indices in loess-paleosol studies [J]. *Quaternary International*, 2011, 240(1-2): 12-21.
- [33] Yang S L, Ding F, Ding Z L. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(7): 1695-1709.
- [34] 梁敏豪, 杨胜利, 成婷, 等. 青藏高原东部黄土沉积元素地球化学示踪[J]. 沉积学报, 2018, 36(5): 927-936. [LIANG Minhao, YANG Shengli, CHENG Ting, et al. Geochemical evidence for the provenance of loess deposits in the Eastern Tibetan Plateau [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(5): 927-936.]
- [35] 刁桂仪, 文启忠. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列[J]. 地质地球化学, 1999, 27(1): 21-26. [DIAO Guiyi, WEN Qizhong. The migration series of major elements during loess pedogenesis [J]. *Geology-Geochemistry*, 1999, 27(1): 21-26.]
- [36] 李传想, 宋友桂, 王乐民. 新疆伊犁黄土元素地球化学特征及古环境意义[J]. *新疆地质*, 2012, 30(1): 103-108. [LI Chuanxiang, SONG Yougui, WANG Lemin. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of the loess in the Ili Region, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 2012, 30(1): 103-108.]
- [37] 张文翔, 史正涛, 张虎才, 等. 中国西风区伊犁盆地塔勒德黄土-古土壤元素地球化学特征及环境意义[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 812-821. [ZHANG Wenxiang, SHI Zhengtao, ZHANG Hucui, et al. Geochemical characteristics and environmental significance of the Taledo loess-paleosol sequence in Westerly Area of China [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 812-821.]
- [38] 胡梦珺, 杨爱丽, 张文丽. 常量元素氧化物含量及其比值揭示的中晚全新世以来玛曲高原的环境演变[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 313-321. [HU Mengjun, YANG Aili, ZHANG Wenli. Environmental evolution since the Middle-Late Holocene in the Maqu Plateau reflected by constant element oxides content and ratios [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(2): 313-321.]
- [39] 赵锦慧, 王丹, 鹿化煜, 等. 西宁地区黄土地球化学元素所揭示的古气候变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(5): 104-108. [ZHAO Jinhui, WANG Dan, LU Huayu, et al. Variations of geochemical elements in Xining loess deposit and the Paleoclimatic implications [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(5): 104-108.]
- [40] 雒聪文, 马玉贞, 王凯, 等. 东亚地区MIS 5时期孢粉记录的植被与气候研究进展[J]. *地理科学进展*, 2019, 34(5): 540-551. [LUO Congwen, MA Yuzhen, WANG Kai, et al. Vegetation and climate inferred from pollen record in East Asian region during MIS 5: A review [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 540-551.]
- [41] 肖景义, 陈建强, 许哲平, 等. 邯郸地区晚更新世以来植被波动特征及其对气候变化的响应[J]. 沉积学报, 2010, 28(6): 1206-1212. [XIAO Jingyi, Chen Jianqiang, XU Zheping, et al. Characteristics of vegetation fluctuation as well as consequent impact on climate since late Pleistocene in Handan area, Hebei [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1206-1212.]
- [42] 李玉嵩, 陈建强, 赵硕, 等. 唐山地区晚更新世以来的孢粉组合特征及其与邻区的对比[J]. *地球学报*, 2011, 32(2): 178-188. [LI Yusong, CHEN Jianqiang, ZHAO Shuo, et al. Sporepollen assemblages in Tangshan area since late Pleistocene with a correlation to those in adjacent areas [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(2): 178-188.]
- [43] 李小燕, 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 Zhengquan, 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.]
- [44] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(4-5): 318-331.
- [45] 仇建东, 刘健, 白伟明. 深海氧同位素第3阶段古气候: 海平面变化研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(11): 12-16. [QIU Jiandong, LIU Jian, BAI Weiming. Progress of the studies of paleoclimate and sea level changes in the marine oxygen isotope stage 3 [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(11): 12-16.]
- [46] 皱建军, 石学法, 刘焱光, 等. 末次冰期以来日本海陆源沉积的地球化学记录及其对海平面和气候变化的响应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 75-86. [ZOU Jianjun, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Geochemical record of terrigenous sediments from the sea of Japan since Last Glacial and its response to sea level and climate change [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 75-86.]
- [47] 伍婧, 刘强, 储国强, 等. 晚冰期大兴安岭植被气候变化的气孔器记录[J]. *科学通报*, 2016, 61(36): 3940-3945. [WU Jing, LIU Qiang, CHU Guoqiang, et al. Vegetation history and climate change recorded by stomata evidence during the late glacial in the Great Khingan Mountain Region, Northeastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(36): 3940-3945.]
- [48] 管清玉, 潘保田, 高红山, 等. 两高分辨率黄土剖面末次冰消期气候事件的差异探讨[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 177-181. [GUAN Qingyu, PAN Baotian, GAO Hongshan, et al. Discuss on difference of climate change events recorded in two high-resolution loess sections in last deglaciation [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 177-181.]