

江西沟1号风成剖面地球化学元素特征及古环境意义

杨 龙^{1,2}, 孙永娟², 鄂崇毅^{1,2}, 赵亚娟¹, 吕顺昌¹

(1. 青海师范大学青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要:通过对江西沟风成沉积剖面的地球化学分析,并结合OSL年代、粒度和磁化率数据,探讨了末次冰消期以来青海湖南岸气候的演变。剖面常量元素氧化物含量呈 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 变化特征,常量元素氧化物及化学元素综合参数与地层有较好的对应性。不同的环境指标对气候变化的敏感性不同,总体上看,地球化学元素的敏感性高,全新世以来粒度和磁化率的变幅较小,即使在全新世大暖期,其值变化都很小。地球化学元素记录所反映的气候变化过程如下。I. 末次冰消期~12 ka BP, 13.2 ka BP前总体上呈相对温暖状态,可能受B/A暖期的影响,13.2~12 ka BP气候不断向干冷方向发展,寒冷程度不断加剧并在12 ka BP达到最强,可能反映出12 ka BP左右的新仙女木事件;II. 12~9 ka BP,气候呈波动回升状态,暖湿程度呈增加趋势,表现出温凉的气候变化特征;III. 9~4.5 ka BP,气候温暖湿润,与全新世大暖期相对应,该阶段水热组合达到最佳,但存在阶段性的变化;IV. 4.5~2 ka BP,气候总体向冷干方向转变,3 ka BP前变化幅度较小,气候较温暖湿润,3~2 ka BP气候凉偏干。

关键词:青海湖;地球化学元素;江西沟剖面;末次冰消期;环境演变

中图分类号: P532

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2016)02-0044-10

1 引言

青海湖岸边广泛堆积的风成沉积(黄土及风成砂)独立地记录了青海湖地区晚第四纪以来的环境变化^[1]。根据前人对青海湖地区风成沉积年代学的研究成果,基本可以确定青海湖地区的风成沉积是在冰盛期后期开始堆积的^[2-4],广泛的沙丘固定和黄土开始发育主要是从末次冰消期开始^[5-6],末次冰消期与早全新世期间为青海湖地区乃至整个青藏高原地区风成沉积物快速沉积期^[7]。然而以往工作集中于青海湖地区风成沉积物的年代学问题,基于环境指标重建的环境演变记录较少,而且不

同剖面重建的环境演变记录存在较大的差异。陈发虎等^[8]根据¹⁴C测年数据和粒度、孢粉等环境代用指标对青海湖南岸哈拉力黄土古土壤剖面进行了研究,得出10 300~8 500 a、7 000~3 500 a和2 800~2 000 a 3个气候温湿阶段,7.0~3.5 ka BP是青海湖区全新世气候最宜期。赵存法等^[9]通过4个OSL年龄结合地层和多个环境代用指标对青海湖南岸的黑马河剖面研究发现,14~9 ka BP间气候前期相对冷干,后期转为凉干;9~2.5 ka BP间气候呈暖湿状态。还有研究^[10]选择了青海湖南岸黑马河有绝对年代控制的全新世黄土剖面,利用CaCO₃、CaO、MgO和Sr元素组分以及氧、碳同位素等较为可靠的地球化学指标,探讨了全新世

收稿日期:2016-01-09;修回日期:2016-01-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41361047,41302150);中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金(Y460301055)资助

作者简介:杨 龙(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为第四纪地质学与全球变化。

通信作者:孙永娟。Email:yjsun@isl.ac.cn。

黄土堆积过程中的气候环境演变,得出 11.2 ~ 9 ka BP 间气候很快转向温湿方向;9 ~ 7.3 ka BP气候达到一定高温后有一个朝冷干方向的转变,表征湖区全新世气候的波动;7.3 ~ 4.5 ka BP 气候表现出温湿的特征,黄土风化成土作用较强;4.5 ~ 2.8 ka BP呈现出一种暖而干的气候环境,黄土化学风化作用变弱。尚媛等^[11]对青海湖湖东沙地风成沉积剖面 KTS 的化学元素特征进行研究,发现青海湖区 12.5 ka BP前该区气候寒冷干燥;12.5 ~ 11.9 ka BP气候向暖转变;11.9 ~ 8.0 ka BP 气候冷暖波动频繁;8.0 ~ 2.6 ka BP是一较长的暖湿期;2.6 ka BP 至今,气候以干冷为主,与现代气候相近。曾方明等^[1]对青海湖东岸风成沉积剖面 ZYC 常量元素组成及主要的化学风化指标的研究,揭示了风成沉积过程中化学风化强度变化特征,得出在距今 ~5 ka 时,风化指标显示化学风化作用最强,可能记录了青海湖区暖湿的气候特征。

本文中的 JXG1 剖面在之前的研究中,粒度、色度和磁化率等环境指标敏感性较低^[12],因此基于以上常规指标揭示的该区环境演变特征可能存在较大的不确定性。地球化学方法作为风尘堆积研究中的重要方法之一,在揭示化学风化过程、研究古气候演化规律以及物质来源示踪方面得到广泛的应用。风成沉积物地球化学元素的迁移和富集与化学过程密切相关,而风化过程又受沉积物或者沉积时的气候环境影响,因此对地球化学元素的分析可揭示当时土壤化学风化特征及气候环境的变化。本文将通过对 JXG1 剖面常量元素的测试与分析,结合已有的 OSL 年代和粒度数据,探讨末次冰消期以来风成沉积记录的青海湖南岸气候环境变化。

2 材料与方法

JXG1 (36°35'2"N, 100°17'41"E, 3313 m a. s. l) 黄土剖面位于青海湖南岸的江西沟乡,高出湖面拔湖约 118 m。根据江西沟气象站 1974 ~ 1996 年气象观测记录,多年均气温约 0.7 °C, 年降水量 417.3 mm, 全年盛行南风, 年平均风

速 3.4 m/s, 属于高原亚寒带半湿润气候区。剖面北距青海湖约 4.5 km, 地貌上位于青海湖南岸湖滨平原与青海南山的山前丘陵交接处, 一条源于青海南山自南向北注入青海湖的常年小河的出山口, JXG1 在小河的西侧。

JXG1 剖面出露约 5 m, 植被为西北针茅、短花针茅草原。自地表至深度 40 cm 为高山草原植被覆盖下的现代砂质土壤层, 含较多草根, 40 ~ 90 cm 为暗棕色古土壤层, 较为致密, 呈团块状; 90 ~ 160 cm 为砂质黄土; 160 cm 以下为风成砂堆积, 厚约 4 m, 未到底。

JXG1 为典型的风成沉积剖面, 由于该剖面年代前人做了大量工作, 故直接采用已发表年代结果^[6, 12]。环境指标样品以 2 cm 间隔采集, JXG1 剖面自表层 20 cm 至 184 cm 共采集指标样 82 个(表层 20 cm 植物根系密集, 扰动很大, 未采样), 共测得的元素样品 35 个。

地球化学元素测定由中国科学院青海盐湖研究所实验室完成, 采用粉末压片法制样, 首先将风干样品碾磨至 200 目以下, 称取 4 g 于 105 °C 下烘干后放入制样模具, 用硼酸镶边嵌底, 在 30 t 压力下形成镶边外径为 32 mm 的圆形样片, 测试仪器为荷兰帕纳科公司生产的顺序式波长色散型 X 射线荧光光谱仪, 元素测定误差 < 5%。

3 结果与分析

3.1 常量元素的分布特征及古环境指示意义

地层中的主要化学元素为 Si、Al、Fe、Ca、Mg、K、Na, 且多以氧化物的形式存在, JXG1 剖面的常量化学元素的氧化物主要包括 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、MgO、CaO 共 7 种。其中 SiO₂ 含量最高, 范围为 47.09% ~ 56%, 平均值为 51.46%; 其次为 Al₂O₃ 和 CaO, 含量范围分别为 9.67% ~ 12.55% 和 3.61% ~ 13.13%, 平均值分布为 9.67% 和 3.61%; 再次为 Fe₂O₃、MgO 和 K₂O, 含量范围分别为 3.13% ~ 4.77%、2.19% ~ 3.67% 和 1.92% ~ 2.43%, 平均值分别为 3.92%、2.72% 和 2.18%; Na₂O 含量最低, 范围为 1.29% ~ 1.84%, 平均值为

1.49%。上述元素氧化物含量在不同地层单元中表现出明显的差异。 SiO_2 含量在风成砂中最大,砂质黄土层中最小; Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量在砂质黄土中最小,在古土壤层和砂质土壤层中相对较大; CaO 含量在砂质黄土中最大,在砂质土壤层 CaO 和 MgO 含量都最小,但 MgO 含量的最大值不是出现在砂质黄土层而出现在风成砂层; K_2O 含量在砂质土壤层最大,在砂质黄土中最小; Na_2O 含量在风成砂中最大,而在砂质土壤层中最小。 CaO 在所有已测常量元素中的变化幅度最大, Na_2O 含量的变化幅度最小。通过对各地层单元的氧化物含量的分析,可以发现

除砂质黄土层呈 $\text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 的变化特征,其它地层单元均表现出 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 的特征,与共和盆地 DQ 剖面地层元素含量的变化表现出一定的差异性。全剖面表现出 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO}$ 的变化特征,在黄土层和古土壤层表现出 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O}$ 不同的变化特征,也有别于黄土高原古土壤的 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O}$ 和黄土 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O}$ 的变化特征。

表 1 江西沟 1 号剖面常量元素氧化物在剖面的分布情况

Table 1 Distribution of main chemical element oxides in different sediment section of the JXG1 profile		%						
		SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	MgO	K_2O	Na_2O
全剖面	最大值	56	12.55	13.13	4.77	3.67	2.43	1.84
	最小值	47.09	9.67	3.61	3.13	2.19	1.92	1.29
	平均值	51.46	11.07	8.33	3.92	2.72	2.18	1.49
砂质土壤层	最大值	55.39	12.55	6.29	4.64	2.46	2.43	1.47
	最小值	48.26	10.10	4.49	3.66	2.19	1.95	1.29
	平均值	52.83	11.68	5.25	4.34	2.35	2.30	1.40
古土壤层	最大值	56.00	12.51	10.71	4.77	2.50	2.42	1.57
	最小值	48.20	10.08	3.61	3.70	2.29	2.04	1.34
	平均值	52.38	11.42	6.88	4.28	2.41	2.25	1.46
砂质黄土	最大值	51.35	11.15	13.13	3.79	3.67	2.18	1.61
	最小值	47.09	9.67	9.56	3.13	2.44	1.92	1.37
	平均值	49.23	10.46	11.02	3.53	3.00	2.06	1.46
风成砂	最大值	54.65	11.32	9.14	3.73	3.48	2.20	1.84
	最小值	51.84	10.77	8.25	3.35	3.01	2.13	1.62
	平均值	53.04	11.04	8.72	3.53	3.22	2.17	1.72

常量元素氧化物含量在剖面垂直方向上表现出明显的差异, SiO_2 含量在 160 cm 以下的值较大,向上呈单一的减少趋势,在 130 cm 处出现低谷,130 cm 以上呈缓慢波动上升态势,在 90 ~ 40 cm 之间呈波动增加趋势,并出现峰值,40 cm 以上减小至次一级低值,之后再开始增加。从图 1 SiO_2 含量的变化曲线可以看出, SiO_2 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 Na_2O 含量曲线的相似性大,相关系数分别为 0.933、0.762、

0.925 和 0.561,而与 CaO 和 MgO 变化曲线呈现出负相关性,与 CaO 含量表现出显著相关,相关系数为 -0.858。 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 曲线的变化大致相同,两者相关系数为 0.906,在 160 cm 以下呈平缓增加趋势,增加的幅度很小,在 160 ~ 90 cm 的变化特征与 SiO_2 相似,但其波动的幅度相对小一些,在 90 ~ 40 cm 之间 Al_2O_3 与 SiO_2 的变化特征相似, Fe_2O_3 含量平缓波动增加至剖面最大值(54 cm),40 cm 以上两者的含量与

SiO₂ 含量变化特征相似。CaO 和 MgO 含量的变化与其它几个氧化物含量的变化表现出明显的差异性,CaO 含量变化与 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和K₂O变化表现出相反的变化趋势,其相关系数分别为 - 0. 858、- 0. 892、- 0. 898 和 -0. 875,而 MgO 与 SiO₂、Al₂O₃ 和 K₂O 的相似性很小,而与 Fe₂O₃、Na₂O 和 CaO 含量表现出一定的相关性,相关性不是很显著,其系数分别为 -0. 523、0. 544 和 0. 423。在 160 cm 以下都呈平缓的线性增加趋势,在 160 ~ 90 cm 先增加至剖面的最大值,之后 CaO 在波动中减小,MgO 呈平缓的下降趋势,且在 90 ~ 40 cm 含量总体上保持不变状态,只出现了一个次一级的谷值,在 40 cm 以上其含量明显出现谷值,其谷值为全剖面的最低值。K₂O 含量在 160 cm 以下是在微小的波动中增加,呈现出低频率、低幅度的特征,在 160 ~ 90 cm 表现出明显的谷值并达到剖面的最小值,波动幅度较 160 cm 有所增大,90 ~ 40 cm 峰谷旋回波动,波动频率达到剖面最大,但最大或最小并未出现在该层,40 cm 以上呈低频高幅波动特征,在刚开始出现最大值(38 cm)之后减小至出现次一级谷值。K₂O 含量变化除与 MgO 和 N₂O 外,与其它常量元素的氧化物都有很强的相关性。Na₂O 含量在 160 cm

以下跟 SiO₂ 含量的变化相似,不同的是 Na₂O 从全剖面最大值向上逐渐减小,在 160 ~ 90 cm 有明显的谷值,但并没达到剖面的最小值,在 90 ~ 40 cm 表现出波动性中增加,呈现高频低幅的波动特征,40 cm 以上呈缓慢波动降低的趋势,出现全剖面的最小值之后有所回升,其波动的幅度在所有的曲线中是最小的,Na₂O 含量变化只与 SiO₂ 和 MgO 有一定的相关性。

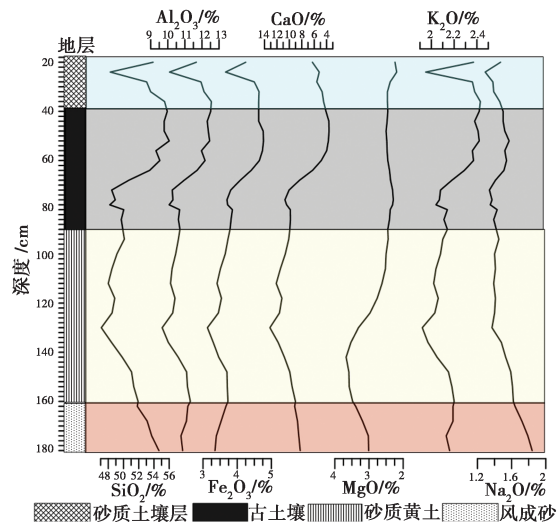


图1 JXG1 号剖面常量元素氧化物随地层深度的变化
Fig. 1 Variations of major chemical element oxides content with depth in JXG1 profile

表 2 JXG1 号剖面地球化学元素参数变化
Table 2 Variation of the geochemical elements parameters in JXG1 profile

		CIA	Rb/Sr	钠钾比	Zr/CaO	硅铁铝率	残积系数	退碱系数
全剖面	最大值	62. 13	0. 54	0. 85	70. 31	3. 84	2. 25	4. 63
	最小值	37. 06	0. 16	0. 58	13. 86	3. 20	0. 72	1. 08
	平均值	48. 63	0. 35	0. 68	30. 88	3. 44	1. 31	2. 62
砂质土壤层	最大值	59. 96	0. 54	0. 66	54. 28	3. 51	2. 04	1. 83
	最小值	53. 53	0. 48	0. 58	36. 8	3. 20	1. 59	1. 29
	平均值	56. 59	0. 53	0. 61	44. 54	3. 31	1. 79	1. 55
古土壤	最大值	62. 13	0. 54	0. 67	70. 31	3. 49	2. 25	3. 26
	最小值	42. 13	0. 35	0. 62	18. 18	3. 23	0. 97	1. 08
	平均值	52. 55	0. 45	0. 65	40. 88	3. 35	1. 60	2. 04
砂质黄土	最大值	45. 51	0. 34	0. 75	21. 13	3. 68	1. 05	4. 63
	最小值	37. 06	0. 16	0. 66	13. 86	3. 44	0. 72	2. 99
	平均值	41. 88	0. 23	0. 71	17. 48	3. 52	0. 91	3. 56
风成砂	最大值	47. 02	0. 26	0. 85	24. 87	3. 84	1. 09	3. 03
	最小值	46. 27	0. 20	0. 74	21. 55	3. 45	1. 05	2. 85
	平均值	46. 69	0. 23	0. 79	23. 37	3. 64	1. 07	2. 96

上述诸常量元素氧化物在地层中的活动强弱顺序不同,表现出 $K_2O > Na_2O > CaO > MgO > SiO_2 > Fe_2O_3 > Al_2O_3$, 含量垂向变化表征了不同地层单元元素的相对富集或淋失。一般情况下, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 在黄土中偏低, 古土壤中高; CaO 、 Na_2O 、 MgO 等低价氧化物在黄土中为高值, 古土壤中为低值, 说明古土壤是黄土在温湿气候条件下经风化成壤作用后形成的, 气候越温湿, 成壤作用越强, 母质中盐基遭淋失, 铁、铝等高价氧化物相对富集^[13]。K 和 Na 是性质极活泼的元素, 在化学风化过程中, 最先析出, 在化学分异过程中, 最后沉淀。但风化过程中两者迁移能力存在差异, 暖湿气候条件下, Na 最容易产生淋溶迁移^[14]。K 分布于硅酸盐矿物中, 被风化后, 易受粘粒吸附, 表现为相对富集^[15], 地层中 K_2O 与 Na_2O 含量的变化可能受到生物过程及粘粒组分吸附的影响^[16], 这种影响对剖面表土及古土壤层中的元素相对富集有一定的作用, 古土壤层中两者含量相对较大, 但 K_2O 的最大值出现在表层砂质土壤层, Na_2O 的最大值出现在风成砂中, 也可能是 SiO_2 等组分在古土壤中的增加使这种作用相对减弱。因此, K_2O 和 Na_2O 在地层中含量增加反映气候湿润, 降水多, 剖面古土壤中 K_2O 含量高于砂质黄土和风成砂, 而 Na_2O 含量没有明显体现出这种变化规律。Ca、Mg 属于碱土金属, 是化学性质中等活泼或较强的元素, 在化学风化过程中, 析出在 K、Na 之后, Al、Fe 之前。从气候条件分析, 相对湿润的气候条件下, Ca、Mg 才被较多的淋溶迁移, 即过渡性气候特别是半干燥气候条件下, CaO 、 MgO 富集最为有利^[17]。因此, 剖面砂质黄土层中 CaO 、 MgO 含量表现出明显的高值, 而在古土壤层则为低值。Si 的化学性质相对稳定, 但较 Al、Fe 性质活泼, 在温湿条件下, 先于 Al、Fe 淋失; 相反, 在干冷气候条件下, 化学作用相对较弱, Si 相对富集。因此, 地层中 SiO_2 含量的增减可视气候干冷、暖湿的波动指标^[18]。 SiO_2 主要来源于硅酸盐矿物的分解, 其含量主要取决于硅酸盐矿物风化作用^[16]。 SiO_2 含量虽在整个剖面中波动相对其它氧化物较明显, 高值和低值并不一定与黄土和古土壤相对应, 有时甚至相反^[13]。JXG1

剖面中 SiO_2 含量在黄土和古土壤中表现出相反的变化趋势, 这可能是因为气候暖湿时, 土壤粒间溶液 pH 值降低, 碳酸钙被溶解生成重碳酸钙, 被水溶液带走, 硅酸盐在原地保留; 相反, 气候干冷时, 土壤粒间溶液的 pH 值增高, 碳酸钙生成, 而硅酸盐生成 $HSiO_4^-$ 离子被水溶液带走^[19]。Al、Fe 化学性质相似且比较稳定, 在化学风化过程中最后析出, 潮湿气候条件下化学风化强烈, 水介质酸性较强, 沉积物中其它易溶元素淋失, 造成 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 的富集, 反之 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 含量降低, 其反映的气候意义与 SiO_2 相反^[20]。故古土壤层中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量明显高于砂质黄土和风成砂中的含量。

3.2 地球化学元素参数及其指征意义

地球化学元素综合参数可以克服单一元素对环境响应的不确定性^[21], 能够更好地反映沉积物的化学风化程度。一般来说, 气候越湿润, 成壤作用就越强烈, 母质成分遭受淋失、氧化, 使 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 等高价氧化物相对富集。因此, 剖面氧化物比值变化可间接表征古气候变化^[22]。化学元素综合参数作为环境代用指标在古气候研究中得到了广泛的应用。本文主要选择以下几个参数进行分析(图 2)。

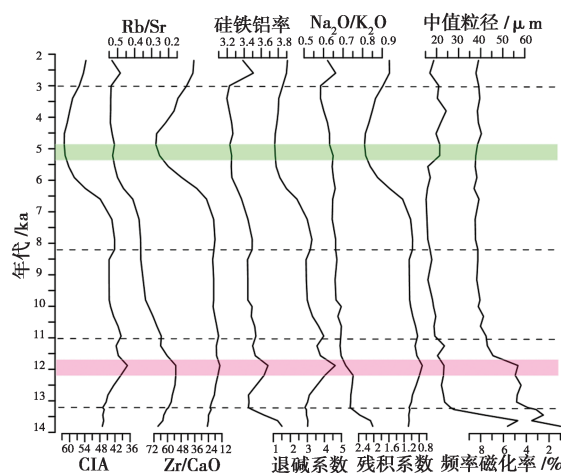


图 2 JXG1 号剖面地球化学元素参数随年代变化

Fig. 2 Variations of geochemical element parameters with years in JXG1 profile

化学风化指数 $[(CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)) \times 100$ 主要用来反映沉积物风化过程中矿物的蚀变程度, 石英、云母、长

石等是黄土中主要的矿物类型,石英抗风化,长石则较容易受到风化作用的影响,化学风化指数的升高指示矿物化学风化程度的增强^[23]。剖面化学风化指数(CIA)总体变化于37~62之间,波动幅度较大。由于与东亚季风区的气温和降水的差异明显,剖面化学风化指数的均值较小,指示了研究区剖面化学风化程度总体较弱。CIA的变化趋势与地层成壤强度基本一致,砂质黄土层中CIA值表现最小,古土壤中最大,表层的砂质土壤层相对较大,表明成壤过程中古土壤层的化学风化作用最强,砂质土壤层次之,黄土层最小。

Rb/Sr 值 已有研究表明,Rb和Sr都是典型的分散元素,主要以类质同象的形式存在于造岩矿物中。Rb的离子半径与K相近,主要分散在含钾矿物中,而Sr的离子半径与Ca相近,主要赋存在含钙矿物中^[24]。由于富铷的含钾矿物比富锶的含钙矿物稳定,因此在化学风化过程中Sr的活动性比Rb强,从而造成风化剖面中Rb和Sr的分离^[25]。Rb/Sr与Sr含量之间具有极好的负相关性,相关系数为-0.942,可能表明在淋溶过程中Rb与粘土具有强亲和性而Sr易于淋失^[24]。Sr主要受风化成壤强度控制,Sr含量的高低也可以反映成壤过程中的化学风化强度。即在气候冷干、风化成壤作用较弱的条件下,表现为相对高值;气候温湿、风化成壤作用较强时,Sr极易淋失并相对亏损,表现为相对低值^[26]。剖面中Sr含量在砂质黄土中表现为高值,在古土壤中表现为相对低值。黄土高原黄土—古土壤序列Rb/Sr研究表明,末次间冰期—冰期以来黄土中Rb/Sr值的变化与磁化率变化具有相似性,Rb/Sr值可作为东亚夏季风环流强度的替代性指标^[27]。剖面Rb/Sr值跟化学风化指数CIA变化趋势相似,相关系数为0.862,最大值出现在古土壤层,在砂质黄土层表现出最小值。剖面黄土和古土壤Rb/Sr比值(0.23和0.45)均低于洛川剖面(0.53和0.75)^[25],这表明剖面黄土和古土壤风化淋溶强度较黄土高原弱。

Zr/CaO 比值 Zr主要赋存在重矿物如锆石中,在风化过程中非常稳定,而CaO含量则易受到气候干湿变化影响而发生迁移与富集,

特别是黄土高原西部地区降水量变化对CaO含量变化有至关重要的影响,因此Zr/CaO变化实质上反映的是区域降水量的变化^[28],本文可以看作是降水量或湿度变化的指标。Zr/CaO变化于13.86~70.31之间,平均值为30.88,古土壤中该值最大,表层砂质土壤层次之,砂质黄土中最小。其波动幅度是几个化学元素参数中最大的,其含量变化趋势与CIA和Rb/Sr有极强的相似性,相关系数分别为0.969和0.832。

硅铁铝率 $[\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)]$ 由于Si与Al、Fe元素活动性强弱不同,Si较Al、Fe活泼,在干旱气候条件下,由于硅淋失较少而其值较大;在湿润气候条件下,由于硅淋失较多,铁、铝则相对富集,导致硅铁铝率值减小,其比值可用于反映地层沉积物的淋溶状况。硅铁铝率常用来反映地表沉积物的化学风化程度和气候状况,其值随温湿程度的加剧和风化程度的加深而减小^[29]。其值在该剖面风成砂中最大,在古土壤中较小,与上述CIA、Rb/Sr和Zr/CaO含量变化呈现出明显的负相关关系,相关系数为-0.755、-0.801和-0.737。这说明该指标可以用来衡量关系到温度和湿度的亚洲夏季风强度的变化^[14]。

退碱系数 $\text{Be}^{[17]}[(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3]$ 该系数利用沉积物中 Na_2O 和CaO相对于 Al_2O_3 淋溶程度进行相对湿度状况及风化程度的判断^[30],在地层沉积物风化过程中, Al_2O_3 化学性质相对稳定,淋失量较小, Na_2O 和CaO等碱金属与碱土金属元素的化合物则随降水的增多和温度的升高淋失程度不断增大^[26]。因此,退碱系数低值对应湿润的沉积环境,退碱系数值减小表明 Na_2O 和CaO淋失较多而 Al_2O_3 相对富集,气候向温暖湿润方向转变;相反,退碱系数值增大表明 Na_2O 和CaO较少,气候转向干冷方向。剖面地层发育的古土壤中其值较小,在砂质黄土层中表现为最大。退碱系数值与硅铁铝率值的变化具有相似趋势,相关系数为0.796,与CIA、Rb/Sr和Zr/CaO值表现出相反的变化趋势,相关系数分别为-0.982、-0.905和-0.925,可以看出相关性极强。

$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比 表生环境中的Na、K元素

可溶性盐类的地球化学行为具有一定差异,Na 在湿润气候条件下更容易受到淋溶迁移^[31];K 元素更容易固定在硅酸盐矿物晶格中,也易被粘土吸附。因此,富含 Na 元素的斜长石风化速率远高于钾长石,故 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值可以用来反映风化强度^[32]。剖面 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值变化与地层的对应关系较好,在整个剖面上呈波动减小的趋势,表明风化程度越来越强,但波动幅度变化很小。在风成砂中最大,砂质土壤层中最小,古土壤低于砂质黄土层,指示古土壤中的化学风化程度高于黄土层。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值变化与硅铁铝率和退碱系数表现出一定的相似变化趋势,而与 CIA、Rb/Sr 和 Zr/CaO 变化呈一定的负相关变化趋势。

残积系数 $K_i^{[30]}[(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO})]$ 该系数利用元素之间活泼性差异进行沉积物淋溶程度的判断。一般干旱气候条件下 CaO、MgO、 Na_2O 相对富集,而 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 相对较小,表明地层中沉积物的淋溶程度较弱,残积系数表现为较小值。温湿的气候条件下,Al、Fe 富集,Ca、Mg 等淋失,地层沉积物淋溶程度强,残积系数表现为最大值。残积系数与退碱系数表现为明显的相反变化趋势,相关系数为 -0.966 ,而与 CIA、Rb/Sr 和 Zr/CaO 变化趋势一致。

4 讨论与分析

根据 JXG1 剖面已有的 OSL 年代、粒度和磁化率数据,结合沉积地层、主要常量元素氧化物含量和地球化学元素参数的变化特征,可将青海湖南岸末次冰消期以来的气候环境演变为以下几个阶段。

I. 末次冰消期 ~ 12 ka BP 剖面堆积风成砂及砂质黄土,此时青海湖应处于冰川消退的寒冷期,颗粒的中值粒径明显较上层粗,磁化率表现出最小值。 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 等氧化物含量偏低,CIA、Rb/Sr、Zr/CaO 和残积系数在整体呈逐渐减小的趋势,而硅铁铝率和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 呈波动递减,退碱系数表现出缓慢增加的态势。该阶段气候处在较寒冷干燥的状态,东亚夏季风表现较弱,化学风化程度较低,降水量少,沉

积物淋溶程度弱。气候冷干程度不断加强,在 12 ka BP 左右达到最强,可能对应于新仙女木冷事件,与江西沟黄土红度和青海湖 QH2000 红度指标记录的 YD 冷事件具有一致性^[12],青海湖湖东风成剖面的地球化学元素研究也记录了 12 ka 左右的冷事件^[11]。以 13.2 ka BP 为界可以将该阶段的气候变化状况分为两个段,13.2 ka BP 以前 CIA、Rb/Sr、Zr/CaO 和残积系数几乎表现出不变的状况,而硅铁铝率和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值呈减小趋势,表明在 13.2 ka BP 气候有向暖湿条件转变的趋势,但是气候的变化并不明显。而在 13.2 ka BP 之后呈现一致的向寒冷干燥转变的趋势。

II. 12 $\sim$ 9 ka BP 地层发育砂质黄土,颗粒粒径呈波动减小的趋势,磁化率呈波动增加态势,表明冬季风有所减弱,尤其进入全新世以来中值粒径和磁化率波动幅度很小,这说明不同的环境指标对气候变化以及气候事件的响应程度存在差异性。Rb/Sr 呈波动上升反映了东亚夏季风有缓慢增强的趋势。常量元素氧化物除 CaO 和 MgO 表现出减小的趋势外,其它的氧化物含量都表现出波动增加的趋势,但其含量总体较小。CIA、Zr/CaO、残积系数呈波动增加的趋势,硅铁铝率、退碱系数和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 呈波动减小的趋势,在 11 ka BP 呈峰值或谷值。该阶段气温开始回暖,气候向温暖湿润方向转变,夏季风增强,降水量增加,沉积物淋溶和化学风化程度增加,表现出温凉的气候变化特征。

III. 9 $\sim$ 4.5 ka BP 剖面发育古土壤,说明该阶段气候温暖湿润。颗粒粒径表现出最小值,磁化率呈最大值。元素氧化物 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 和 Na_2O 呈现出较大值,变幅最大,谷峰明显。而 CaO 和 MgO 表现出最小值。从 CIA、Rb/Sr、Zr/CaO、残积系数的波动快速增加,硅铁铝率、退碱系数和 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 波动降低,说明了该阶段气候整体上温暖湿润,与全新世大暖期对应,但存在阶段性的变化。各元素氧化物在 8.2 ka BP (80 cm 处) 都呈现出峰值或谷值的变化趋势,反映出了一次寒冷事件,在几个化学元素综合参数的变化中,也一定程度上反映此寒冷事件,但较 12 ka BP 左右的冷事件,降温的幅度要小,如 CIA、硅铁铝率、退碱系

数、残积系数等。8.2~5 ka BP 呈一个持续的升温过程,表明一个时间较长的暖湿期,并在5 ka BP 水热组合达到峰值,在5~4.5 ka BP 各元素参数呈基本不变或微小减小的趋势。较上两阶段表现出明显的夏季风增强、气温升高、降水量增加、沉积物淋溶和风化程度加强的变化特征。陈发虎等^[8]在青海湖南岸黄土剖面研究中表明全新世气候适宜期在7~3.5 ka BP 间;赵存法等^[9]对青海湖南岸的黑马河剖面研究表明,在9~2.5 ka BP 间气候呈暖湿状态。两者与本文的研究结果具有一致性。

IV. 4.5~2 ka BP 地层主要发育砂质土壤层,颗粒粒径总体上较上一阶段偏粗,磁化率有微小的减少趋势。常量元素氧化物 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 有先递减后增加的趋势, CaO 呈增加的趋势,总体上向冷干方向发展,存在一定的波动性变化。地球化学元素参数 CIA、 Rb/Sr 、 Zr/CaO 、残积系数呈递减的趋势,而铁硅铝率、退碱系数和 $\text{Na}_2\text{O/K}_2\text{O}$ 在3 ka BP 前变化较小,之后开始增加明显,表明3 ka BP 以来气候冷干程度有所加剧,在2.6 ka BP 处表现出峰值或谷值。该阶段的冷干程度都较 I 和 II 阶段弱,4.5~3 ka BP 间,气候较温暖湿润,3~2 ka BP 气候凉偏干。这与 Lu 等^[5]对青海湖周边6个风成剖面研究的结果相对应,明显记录了在晚全新世约4~3 ka 间存在一个较长的湿润期。

5 结 论

JXG1 剖面常量元素氧化物含量分析显示, SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 在地层中含量较高,平均值高于8%,而 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 在剖面中依次递减,平均值低于4%,呈 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ 变化特征。砂质黄土层表现出一定的差异性, CaO 含量超过了 Al_2O_3 含量。剖面总体氧化物含量的变化与共和盆地和黄土高原古土壤层和黄土层含量的变化都存在一定的差异性。常量元素氧化物及化学元素综合参数的较大值和较小值与砂质黄土层或古土壤层有较好的对应性。不同的环境指标对气候变化的敏感性存在差异,在全新世以

前中值粒径和磁化率的敏感性较高,而地球化学元素的变化在各阶段都较明显,尤其在古土壤发育的9~4.5 ka BP 阶段,地球化学元素的敏感性达到了最高。粒度和磁化率自全新世以来对环境变化的敏感性都较低,即使在全新世大暖期,其值变化幅度也很小。

地球化学元素变化所反映的青海湖南岸末次冰消期以来的环境变化如下。

I. 末次冰消期~12 ka BP,13.2 ka BP 以前总体上呈相对温暖状态,可能与 B/A 暖期有一定的关联性。13.2~12 ka BP 气候不断向干冷方向发展,寒冷程度不断加剧并在12 ka BP 达到最强,可能反映出12 ka BP 冷事件对当地气候的影响。II. 12~9 ka BP,气候呈波动回升状态,温湿程度呈增加的趋势,表现出温凉的气候变化特征。III. 9~4.5 ka BP,气候温暖湿润,与全新世大暖期相对应,在该阶段水热组合达到最佳,但存在阶段性的变化。在一定程度上反映出了8.2 ka BP 冷事件。IV. 4.5~2 ka BP,气候总体向冷干方向转变,3 ka BP 前变化幅度较小,气候较温暖湿润,3~2 ka BP 气候凉偏干。

参考文献:

- [1] 曾方明,刘向军,叶秀深,等. 青海湖种羊场风成沉积的常量元素组成及其化学风化指示[J]. 盐湖研究,2015,23(1):1-2.
- [2] 陈克造, Bowler J M, Kelts K. 四万年来青藏高原的气候变迁[J]. 第四纪研究,1990,10(1):21-32.
- [3] Porter S C, Singhvi A, An Z S, et al. Luminescence age and palaeoenvironmental implication of a late Pleistocene ground wedge on the northeastern Tibetan Plateau [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2001,12(2):203-210.
- [4] Rhode D, Ma H Z, Madsen D B, et al. Paleoenvironmental and archaeological investigation at Qinghai Lake, western China: Geomorphic and chronometric evidence of lake level history[J]. Quaternary International, 2010,218(s1-2):29-44.
- [5] Lu H Y, Zhao C F, Mason J, et al. Holocene climatic changes revealed by aeolian deposits from the Qinghai Lake area (northeastern Qinghai-Tibetan Plateau) and possible forcing mechanisms[J]. Holocene, 2011,21(2):297-304.
- [6] Liu X J, Lai Z P, Yu L P, et al. Luminescence chronology of aeolian deposits from the Qinghai Lake area in the North-

- eastern Qinghai-Tibetan Plateau and its palaeoenvironmental implications [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10 (7): 37–43.
- [7] Stauch G. Geomorphological and palaeoclimate dynamics recorded by the formation of aeolian archives on the Tibetan Plateau [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 393–408.
- [8] 陈发虎, 汪世兰, 张维信, 等. 青海湖南岸全新世黄土剖面、气候信息及湖面升降探讨 [J]. *地理科学*, 1991, 11 (1): 77–82.
- [9] 赵存法, 鹿化煜, 周亚利, 等. 青海湖地区冰消期以来气候变化的黄土记录 [J]. *高校地质学报*, 2009, 15 (1): 135–140.
- [10] 周笃珩, 马海州, 高东林, 等. 青海湖南岸全新世黄土地球化学特征及气候环境意义 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24 (2): 144–148.
- [11] 尚媛, 鲁瑞洁, 贾飞飞, 等. 青海湖湖东风成剖面化学元素特征及其环境指示意义 [J]. *中国沙漠*, 33 (2): 463–468.
- [12] 鄂崇毅, 曹广超, 侯光良, 等. 青海湖江西沟黄土记录的环境演变 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33 (4): 193–200.
- [13] 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): 103–106.
- [14] 刘冰, 靳鹤龄, 孙忠, 等. 青藏高原东北部共和盆地风成沉积地球化学特征及其揭示的气候变化 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27 (7): 788–799.
- [15] 刘安娜, 庞奖励, 黄春长, 等. 甘肃庄浪全新世黄土—古土壤序列元素分布特征及意义 [J]. *地球化学*, 2006, 35 (4): 453–458.
- [16] 靳建辉, 李志忠, 陈秀玲, 等. 新疆伊犁河谷晚全新世风沙沉积主量元素特征及其气候意义 [J]. *古地理学报*, 2010, 12 (6): 675–684.
- [17] 赵锦慧, 王丹, 樊保生. 延安地区黄土堆积的地球化学特征与最近 13 万年东亚夏季风气候的波动 [J]. *地球化学*, 2004, 33 (5): 495–500.
- [18] Vital H, Stattegger K. Major and trace element of stream sediments from the lowermost Amazon River [J]. *Chemical Geology*, 2000, 168 (s1–2): 151–168.
- [19] 张虎才. 元素表生地球化学特征及理论基础 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1997: 1–2.
- [20] 黄汝昌. 陆相沉积中古气候演变及元素的迁移、聚集和演化 [C]//中国科学院兰州地质研究所所刊. 北京: 科学出版社, 1982: 137–160.
- [21] 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.
- [22] 文启忠, 刁桂仪, 贾蓉芬, 等. 黄土剖面中古气候变化的地球化学记录 [J]. *第四纪研究*, 1995, 8 (3): 223–231.
- [23] 郭正堂, 刘东生, 吴乃琴, 等. 最后两个冰期黄土中记录的 Heinrich 型气候节拍 [J]. *第四纪研究*, 1996, 16 (1): 21–30.
- [24] Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep sea sediments and sedimentary rocks [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1969, 33 (12): 1521–1552.
- [25] 陈骏, 安芷生, 汪永进, 等. 最近 800 ka 洛川剖面中 Rb/Sr 分布和古季风变迁 [J]. *中国科学 D 辑*, 1998, 28 (6): 498–504.
- [26] 弋双文, 鹿化煜, 周亚利, 等. 晚第四纪科尔沁黄土堆积的 Rb–Sr 地球化学特征及古气候变化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33 (2): 132–133.
- [27] Chen J, An Z S, Head J. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51 (3): 215–219.
- [28] Tan H, Ma H, Zhang X, *et al.* Typical geo-chemical elements in Loess deposit in the northeastern Tibetan plateau and its Paleoclimatic implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80 (1): 110–117.
- [29] 靳鹤龄, 苏志珠, 孙忠. 浑善达克沙地全新世中晚期地层化学元素特征及其气候变化 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23 (4): 366–371.
- [30] 李冠华, 夏敦胜, 柳加波, 等. 新疆塔城黄土沉积常量地球化学元素特征及其环境意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33 (4): 187–188.
- [31] Liu C Q. A geochemical study of loess and desert and in northern China; Implication for continental crust weathering and composition [J]. *Chemical Geology*, 1993, 106 (3–4): 359–374.
- [32] 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究 [J]. *地球化学*, 2001, 30 (4): 402–406.

Geochemical Element Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Aeolian Sediments in JXG1 Section

YANG Long¹, SUN Yong-Juan², E Chong-Yi^{1,2}, ZHAO Ya-Juan¹, LV Shun-Chang¹

(1. Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Processes of Qinghai Province,

Qinghai Normal University, Xining, 810000, China;

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China)

Abstract: The climatic change since the Last deglaciation period was reconstructed based on the analysis of geochemical characteristics of the aeolian deposits profile in JXG1, southern shore of Qinghai Lake, combined with the OSL chronology, grain size and magnetic susceptibility data. The order of major element oxides content is $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, and major element oxides and the chemical elements integrated parameter have a better correspondence with stratum. Different environmental indicators have different degree of sensitivity to climate change, on the whole, geochemical elements have high sensitivity, the change range of particle size and magnetic susceptibility is smaller since Holocene, the variety of their value is very small even during the Holocene warm period. The climatic change based on the records of geochemical elements indicates that: I. During the last deglaciation – 12 ka BP, the climate was relatively warm in general before 13.2 ka BP, possibly affected by B/A period. The dry and cold climate continuously developed during 13.2 ~ 12 ka BP and coldness reached the strongest in 12 ka BP, implying the Younger Dryas event around 12 ka BP; II. In 12 ~ 9 ka BP: The climate rise with fluctuations and the warm and humid degree present an increasing trend, indicating warm and cool characteristics of climate variation; III. In 9 ~ 4.5 ka BP: The climate was warm and moist, corresponding to the Holocene optimum period, hydrothermal combination achieved the best during this period, but it has phase changes; IV. In 4.5 ~ 2 ka BP: The climate turned to the cold and dry direction in general, the variation width is smaller and the climate is relatively warm and humid, the cool and dry climate dominated the region during 3 ~ 2 ka BP.

Key words: Qinghai Lake; Geochemical elements; JXG1 section; Last deglaciation; Environmental change