

化学蚀变指数指示古气候变化的适用性探讨

赵占仑^{1,2}, 温小浩³, 汤连生^{1,2}, 李保生^{3,4}, 牛东风³, 孟洁³, 杨庆江³

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东珠海 519082

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275

3. 华南师范大学地理科学学院, 广州 510631

4. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075

摘要 腾格里沙漠南缘土门剖面末次冰消期层段由3层沙丘砂、2层湖相沉积、2层古土壤和5层黄土构成, 对各沉积相进行了年代学研究及主量元素含量测试, 确定该层段为末次冰消期, 计算了各沉积相CIA指数, 结果显示CIA指数由大到小依次为沙丘砂>黄土>古土壤>湖相沉积。通过对比, 发现CIA指示的各沉积相化学风化作用强度(气候环境)与已有粒度成分指示的该时期气候变化研究结论相矛盾, 通过对该矛盾现象的深入研究和探讨, 得到以下认识: 1) 研究层段的古土壤、湖相沉积、黄土的沉积物质可能来源于土门剖面东南一侧的黄土高原, 沙丘砂沉积物质受北侧的腾格里沙漠沙丘砂强烈影响, 各沉积相的物源化学元素存在差别使得不同沉积相CIA指数的对比存在先天性不足; 2) 土门剖面所处的低洼地形会产生汇水作用, 使易迁移的钙、钠、钾等元素随降水迁移而汇聚于此, 对不同沉积相的CIA值产生干扰, 导致CIA指数偏小, 其不能反映真实化学风化作用强度; 3) 应用CIA指数作为古气候变化的替代指标需综合考虑沉积相物源差异及沉积环境的影响, CIA指数用于指示古气候变化存在一定的适用性问题。

关键词 土门剖面; 主量元素; CIA指数; 物源; 古气候变化

第一作者简介 赵占仑, 男, 1990年出生, 博士研究生, 大地构造学, E-mail: 928002815@qq.com

通信作者 汤连生, 教授, E-mail: eestls@mail.sysu.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

气候条件与地质营力的差异作用会形成不同的沉积物, 矿物与元素的迁移、富集以及重新组合反映了沉积物与其所处环境之间的关系, 这些沉积物既拥有原岩的组成特征又记录了所处地区的气候环境, 这是通过元素地球化学方法研究古气候变化历史的理论依据^[1-2]。化学蚀变指数(Chemical index of alteration, CIA)作为判别源岩区化学风化程度的指标而被提出, 主要反映的是硅酸盐(主要是长石矿物)的风化程度^[3-4]。化学蚀变指数反映的沉积物化学风化程度与温湿度的密切关系使其作为气候敏感性指标被广泛用于古气候变化的研究, Goldberg *et al.*^[5]通过巴西巴拉那河盆地二叠纪沉积地层的化学蚀变指数研究了该地层古气候变化, 认为CIA是衡量温湿度条件的有效手段; 王自强等^[6]对宜昌三斗坪地区南华系碎屑岩的CIA指数进行了研究, 发现该地区南华纪地层自老到新经历了冰期干燥寒冷—间冰期温暖

湿润—冰期干燥寒冷的沉积环境变化过程; 孙娇鹏等^[7]通过对欧龙布鲁克地块新元古代碎屑岩沉积CIA指数的研究, 认为该地区在新元古代的气候经历了由寒冷逐渐转暖的变化过程, 并且首次从CIA指数角度证实研究区新元古代早期的极端寒冷气候; 陈旸等^[8]通过对甘肃西峰红黏土样品的地球化学研究, CIA指数揭示了红黏土风化程度高于第四纪的黄土—古土壤, 反映出上新世以来黄土高原气候由相对温暖湿润向第四纪寒冷干燥逐渐演化的趋势。同时, CIA也被广泛应用于第四纪气候变化的研究; 陈骏等^[9]系统地分析了陕西洛川黄土—古土壤剖面酸不溶相的主量元素, 通过化学风化指数CIA、Na/K等在剖面中呈规律性的分布和演化, 揭示了2.5 Ma以来黄土源区的化学风化呈逐步减弱的趋势, 与同一时期全球冰量逐步增长气候越发干冷的趋势相吻合; 吴艳宏等^[10]研究了可可西里苟仁错湖湖泊沉积物元素地球化学特征, 通过CIA指数等指标揭示了该地区1400 AD以来经历了多次冷暖气候波动; 徐树建

收稿日期: 2017-01-06; 收修改稿日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572277); 广东省自然科学基金项目(2015A030313118) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41572277; Natural Science Foundation of Guangdong Province, China, No.2015A030313118]

等^[11]以山东平阴黄土为研究对象,通过剖面各层位 CIA 指数的波动特征,指出该地区末次冰期以来黄土风化强度自剖面下部往上逐渐变弱,气候越发干冷。此外,对西宁黄土^[12],灵台黄土^[13],巫山黄土^[14]等的研究也说明 CIA 指数具有指示气候变化的意义。

尽管 CIA 指数在古气候研究中得到广泛应用,但其存也存在一定的局限性。Eynatten *et al.*^[15]的研究发现,碎屑沉积物在产生过程中元素组成受物理与化学过程控制,物理风化过程产生的粗细颗粒会对沉积物的矿物组成产生影响(粒度效应),造成粗细颗粒中不同元素的富集,使得 CIA 等化学风化指数不能指示其真实的化学风化程度;Borges *et al.*^[16]在研究青藏高原东部和俄罗斯远东河床沉积物物源及风化作用时,发现沉积作用的不断循环以及对前一个沉积旋回物质的继承性,会对化学风化指标的应用产生较大影响;Garzanti *et al.*^[17]认为悬浮筛选以及选择性夹带等水力学作用,会对沉积物中的元素组成产生较大影响,进而 CIA 等化学风化指标失去了指示化学风化程度的意义;Bugge *et al.*^[18]认为准确地将硅酸盐中的 CaO 与碳酸盐,磷酸盐中的 CaO 区分开是十分困难的,这也是导致风化指标不能反映真实化学风化程度的原因之一;此外,各种成岩作用,如不稳定矿物的分解、碳酸盐的矿物的沉淀以及沉积后 K₂O 的富集作用等也会对化学风化指标的正确性产生较大干扰^[4-5,19]。

综上所述,化学蚀变指数(CIA)在揭示沉积地层化学风化程度进而研究气候变化方面已得到广泛应

用,但也存在诸多干扰其指示意义的因素和条件,其在研究气候变化方面的应用是存在一定的适用性问题的。同一剖面的不同沉积相在堆积过程中因作用条件存在差异,可能会受到不同干扰因素的影响(如物源差异、粒度效应、碳酸盐沉积、水动力等),是否化学蚀变指数(CIA)能够指示同一剖面出现的不同沉积相的相对化学风化强度,进而揭示该地区古沉积环境及气候变化?该问题值得研究与探讨。笔者在研究位于甘肃省古浪县土门镇的一处黄土—古土壤—湖相沉积—沙丘砂沉积旋回的地球化学特征时,发现该剖面末次冰消期层段各沉积相的 CIA 指数与各沉积相粒度成分揭示的该时期气候变化^[20]相矛盾,怀疑 CIA 指数应用在不同沉积相指示气候变化时存在一定的适用性,故撰写此文探讨化学蚀变指数在不同沉积相中的适用性问题。

1 土门剖面末次冰消期层段概述及实验材料与方法

1.1 土门剖面末次冰消期层段概述

研究剖面(以下称为土门剖面)位于甘肃省武威市古浪县土门镇的大土沟,地理坐标为:37°38' N, 103°09' E,地貌为南部祁连山支脉的山前倾斜平原与腾格里沙漠南缘过渡的沟壑区,土门剖面顶部海拔 1 730 m^[20](图 1)。据古浪县气象资料^[21]:该地区年气温 4.9℃,最冷最热分别出现在 1 月与 7 月,月均气温分别为 -9.8℃与 17.5℃,极端气温分别为

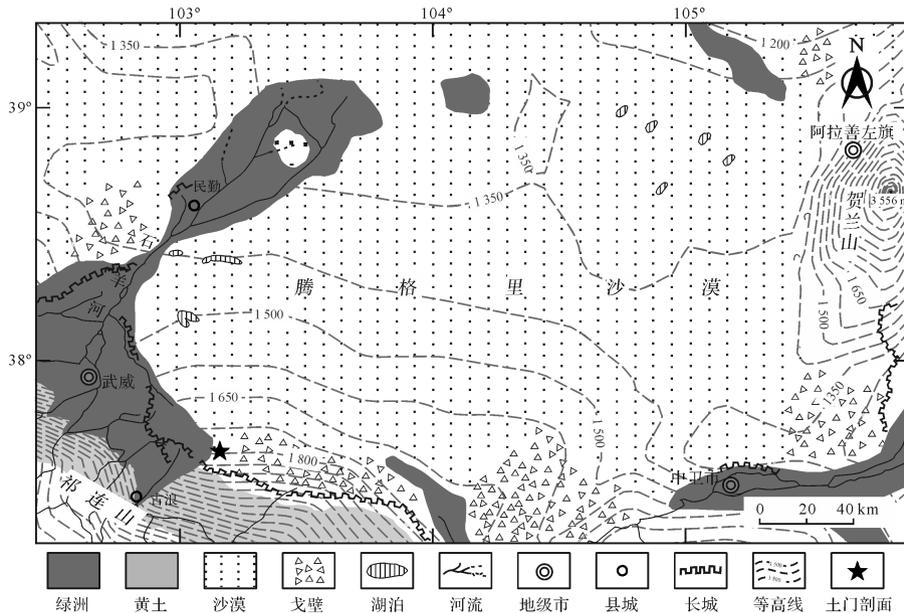


图 1 土门剖面位置示意图

Fig.1 The sketch-map of location of Tumen section

均-26.4℃与33℃;年均降水307mm,且集中于4~10月,年均蒸发2800mm。该地受东亚季风环境影响明显,冬季受东亚冬季风控制,风沙天气频繁,夏季受东亚夏季风控制,降水较多,易出现集中降水现象。

土门剖面出露总厚度约32m。本文涉及的末次冰消期层段——LDS(the Last Deglaciation Segment,以下简称“LDS”)位于剖面深度7.36~9.02m处,地层为41FD-52L(图2);3层风成沙丘砂,以灰黄色粉砂质极细砂为主,松散,无层理,厚8~30cm不等,分布于剖面7.38~7.44m(41FD)、7.52~7.71m(43FD)、7.86~8.17m(46FD);2层湖相沉积,以浅灰黄色—青灰色极细砂质粉砂为主,略显水平层理,紧实,厚6~36cm,分布于剖面8.33~8.39m(48LS)、8.62~8.94m(51LS);2层古土壤,母质为湖相或黄土,以浅棕色黏土质粉砂为主,质地较黏重,厚10~12cm,分布于剖面7.77~7.87m(45S)、8.50~8.60m(50S);5层黄土,浅灰黄色,粉砂为主,分选较均匀,块状,厚4~14cm,分布于剖面7.46~7.50m(42L)、7.73~7.75m(44L)、8.19~8.31m(47L)、8.41~8.48m(49L)、8.98~9.02m(52L)。

1.2 实验方法

对7.36~9.02m深度地层及以上相关层位(35L)进行了年代学研究,共采集¹⁴C同位素测年样品5个,测年实验由美国BETA实验室完成,年代数据采用Calib.7.0^[22]中IntCal13程序进行校正,误差

为±2σ。

对LDS以2cm间距采集83个样品,使用偏振能量色散X射线荧光光谱仪(型号:Epsilon 5)测试硅、铝、铁、钙、钾、钠、镁和钛8种主量元素,结果以氧化物表示。试样制备过程如下:1)每个样品(共83个)分别取50g低温(40℃)烘干,去除水分后过孔径2mm筛滤掉杂物;2)将试样放入振动磨样机(ZHM-1A型)研磨90s,研磨结束将样品过200目(<74μm)筛去除大颗粒;3)从研磨并筛分好的样品中取6.0g样品以硼酸镶边垫底,使用压样机在30T压力下压制30s,制作成直径3.2cm圆饼后放入偏振能量色散X射线荧光光谱仪中进行测试。测试仪器校正曲线使用27个国家土壤成分分析标准物质(GSS2-GSS28)、6个水系沉积物成分分析标准物质(GSD2a、GSD7a、GSD9-GSD12)和6个岩石成分分析标准物质(GSR1-GSR6)。实验过程中加入GSS17标准样品进行控制,实验误差±5%^[23]。

2 结果分析

2.1 年代测试结果

5个AMS¹⁴C样品测试结果标示在图2之上。剖面深度6.84m(35L底部)和7.48m(42L底部)的年代分别为9960±200cal a B.P.和11900±170cal a B.P.,据此按沉积速率(0.034m/a)可推算得41LD顶部即深度7.38m处年龄为11600cal a B.P.;深度

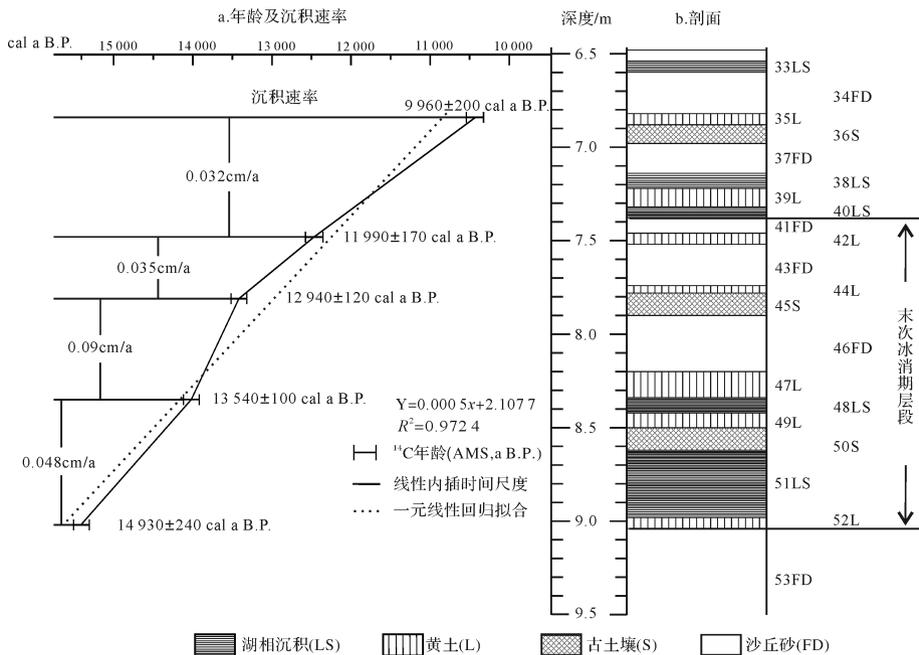


图2 土门剖面 LDS 及相关地层层序、年代及堆积速率

Fig.2 The sequence, age and accumulation rate of the last deglaciation and related layers of Tumen section

9.02 m (52L 底部) 的年代为 $14\ 930 \pm 240$ cal a. B. P.^[20]。显然,41FD-52L 层段的年代与格陵兰冰芯的末次冰消期年代 15 070~11 650 a. B.P. 相近^[24]。

2.2 主量元素测试结果

土门剖面 LDS 的 8 种主量元素氧化物(表 1)中以 SiO₂ 的百分含量最高,分布于 41.43%~67.72%,平均值为 54.73%;其次为 Al₂O₃,百分含量为 10.17%~14.46%,平均值为 11.96%;第三为 CaO,百分含量为 3.75%~9.17%,平均值为 6.20%;第四为 TFe(Fe₂O₃+FeO),百分含量为 3.30%~6.50%,平均值为 4.85%;其余元素氧化物 K₂O、MgO、Na₂O、Ti₂O 百分含量依次降低,分布范围分别为 2.18%~3.16%、1.50%~3.83%、1.46%~2.43%、0.36%~0.68%,平均值分别为 2.63%、2.53%、1.92% 和 0.51%。

表 1 LDS 不同沉积相的主量元素氧化物含量(%)

Table 1 Concentrations of major element oxides in different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation (%)

沉积相	编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
沙丘砂	41FD-01	63.76	11.09	4.30	4.58	2.05	2.32	1.68	0.47
	41FD-02	63.64	11.12	4.40	4.47	2.01	2.33	1.62	0.46
	41FD-03	63.37	10.84	4.20	4.28	1.97	2.24	1.60	0.42
	41FD-04	63.53	10.93	4.30	4.20	1.95	2.27	1.58	0.42
	43FD-01	63.66	10.41	3.80	4.25	1.78	2.38	1.63	0.45
	43FD-02	65.38	10.21	3.40	3.83	1.62	2.28	1.54	0.38
	43FD-03	66.77	10.17	3.30	3.75	1.50	2.29	1.53	0.37
	43FD-04	63.22	10.65	4.10	4.34	1.84	2.34	1.62	0.36
	43FD-05	63.35	10.68	4.00	4.41	1.89	2.35	1.74	0.40
	43FD-06	64.60	10.52	3.50	3.92	1.72	2.32	1.58	0.39
	43FD-07	63.99	10.40	3.50	3.97	1.80	2.31	1.51	0.38
	43FD-08	64.01	10.56	3.60	4.31	1.73	2.36	1.60	0.41
	43FD-09	62.84	10.67	3.70	4.37	1.87	2.38	1.61	0.43
	43FD-10	63.51	10.70	3.80	4.43	1.86	2.39	1.64	0.43
	43FD-11	64.18	10.46	3.50	4.08	1.67	2.31	1.53	0.39
46FD-01	62.13	11.25	4.70	4.75	2.15	2.31	1.65	0.46	
46FD-02	64.37	10.62	3.70	4.25	1.84	2.37	1.58	0.44	
46FD-03	66.44	10.51	3.50	4.10	1.60	2.24	1.47	0.40	
46FD-04	66.23	10.42	3.60	4.16	1.63	2.25	1.48	0.40	
46FD-05	63.14	10.71	4.20	4.59	1.95	2.35	1.64	0.45	
46FD-06	63.89	10.65	3.80	4.31	1.77	2.28	1.47	0.43	
46FD-07	67.31	10.28	3.30	3.77	1.51	2.18	1.46	0.38	
46FD-08	67.72	10.31	3.30	3.78	1.53	2.19	1.50	0.37	
46FD-09	63.05	10.69	4.10	4.63	1.86	2.40	1.66	0.47	
46FD-10	63.41	10.67	4.00	4.51	1.94	2.37	1.64	0.44	
46FD-11	65.96	10.21	3.60	4.15	1.69	2.30	1.51	0.41	
46FD-12	63.53	11.19	4.10	4.56	1.91	2.38	1.69	0.46	
46FD-13	63.80	11.08	4.20	4.58	1.92	2.39	1.65	0.46	
46FD-14	65.74	10.98	3.70	4.14	1.74	2.24	1.48	0.47	
46FD-15	62.77	11.12	4.40	4.76	2.02	2.45	1.68	0.48	
均值		64.31	10.67	3.85	4.21	1.81	2.31	1.59	0.42

沉积相	编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
黄土	42L-01	52.10	12.25	4.90	6.68	2.42	2.73	1.97	0.52
	42L-02	53.77	12.09	4.80	5.97	2.43	2.64	1.94	0.51
	42L-03	51.43	12.95	5.10	5.61	2.84	2.83	2.06	0.56
	44L-01	52.78	12.36	5.10	6.79	3.01	2.52	1.91	0.53
	44L-02	53.04	12.41	5.20	6.67	2.98	2.50	1.95	0.54
	47L-01	55.83	11.32	4.90	6.06	2.21	2.63	1.89	0.49
	47L-02	53.42	12.19	5.10	6.53	2.05	2.67	1.96	0.53
	47L-03	53.62	12.07	5.00	6.61	2.67	2.64	1.94	0.51
	47L-04	52.91	12.18	5.10	6.79	2.60	2.69	1.98	0.53
	47L-05	55.40	11.33	4.70	6.06	2.01	2.51	1.95	0.53
	47L-06	53.54	11.87	4.80	6.65	2.35	2.53	1.89	0.49
	47L-07	54.77	11.62	4.50	6.58	2.46	2.51	1.78	0.50
	49L-01	55.72	11.67	4.60	5.86	2.31	2.54	1.97	0.51
	49L-02	53.18	12.36	4.90	7.05	2.63	2.78	2.01	0.54
	49L-03	52.37	12.18	4.90	6.32	2.66	2.76	2.03	0.54
49L-04	54.18	11.81	4.70	6.64	2.31	2.62	1.96	0.49	
52L-01	52.75	12.56	4.90	6.26	2.58	2.62	1.98	0.48	
52L-02	49.84	12.78	5.20	7.55	2.94	2.76	1.94	0.53	
52L-03	52.39	12.62	4.90	6.97	2.75	2.64	2.00	0.48	
均值		53.31	12.14	4.91	6.50	2.54	2.64	1.98	0.52
古土壤	45S-02	51.70	12.74	5.40	6.92	3.08	2.82	2.04	0.55
	45S-03	51.97	12.23	5.30	6.88	2.95	2.84	2.00	0.56
	45S-04	52.88	11.88	5.20	6.01	2.86	2.80	2.00	0.52
	45S-05	52.68	12.29	5.20	6.29	2.72	2.82	2.06	0.52
	45S-06	50.01	12.28	5.40	6.90	2.87	2.93	2.17	0.55
	50S-01	45.18	13.82	5.60	7.22	3.13	2.89	2.24	0.60
	50S-02	42.94	14.01	5.80	8.12	3.54	2.99	2.35	0.62
	50S-03	41.43	14.46	6.50	9.14	3.83	3.16	2.43	0.68
	50S-04	43.71	13.84	6.00	8.30	3.46	2.96	2.33	0.63
	50S-05	43.31	14.13	6.30	9.17	3.59	3.12	2.38	0.67
50S-06	45.96	13.77	5.70	7.88	3.23	2.86	2.34	0.60	
均值		47.36	13.22	5.66	7.54	3.21	2.93	2.21	0.59
湖相沉积	48LS-01	49.09	12.79	5.70	7.31	2.86	2.88	2.06	0.57
	48LS-02	48.15	12.96	5.60	7.79	2.99	2.95	2.14	0.59
	48LS-03	48.36	13.13	5.40	7.81	2.86	2.79	2.06	0.58
	48LS-04	46.76	13.33	5.90	7.35	3.11	2.91	2.20	0.59
	51LS-01	47.52	12.53	5.50	7.63	3.06	2.79	2.18	0.59
	51LS-02	48.16	12.75	5.60	7.59	3.19	2.84	2.13	0.54
	51LS-03	47.28	13.13	5.50	7.97	3.17	2.87	2.11	0.58
	51LS-04	44.46	13.05	5.70	8.62	3.19	2.97	2.34	0.62
	51LS-05	43.02	13.11	6.20	8.74	3.49	3.07	2.38	0.65
	51LS-06	43.29	13.23	6.20	8.41	3.56	3.05	2.38	0.65
	51LS-07	44.33	13.09	5.90	8.13	3.22	2.96	2.17	0.60
	51LS-08	44.99	13.12	6.10	8.15	3.24	3.01	2.31	0.64
	51LS-09	44.96	13.11	6.10	8.13	3.31	2.99	2.26	0.61
	51LS-10	45.55	12.83	5.80	8.22	3.15	2.93	2.28	0.56
	51LS-11	45.96	12.53	5.70	7.52	3.08	2.79	2.25	0.56
	51LS-12	46.57	12.92	5.60	8.01	3.21	3.06	2.30	0.59
	51LS-13	44.41	13.08	6.00	7.69	3.33	2.97	2.26	0.60
	51LS-14	46.83	12.78	5.60	7.99	3.07	2.87	2.14	0.60
51LS-15	47.43	12.61	5.50	8.24	2.99	2.82	2.26	0.58	
51LS-16	52.12	12.13	5.00	7.25	2.79	2.70	2.09	0.54	
51LS-17	50.40	12.39	5.30	7.59	2.94	2.77	2.13	0.57	
51LS-18	48.81	12.81	5.70	6.56	3.24	2.99	2.22	0.61	
均值		46.74	12.88	5.71	7.85	3.14	2.91	2.21	0.60

由表1可以看出,LDS不同沉积相氧化物含量存在明显差异,阐述如下:SiO₂含量在沙丘砂中最高,在黄土、古土壤和湖相沉积中相对于沙丘砂显著降低(达11%~17.57%),在后三者中黄土含量最高,古土壤和湖相沉积含量接近。Al₂O₃、CaO、TFe、K₂O、MgO、Na₂O、Ti₂O含量在沙丘砂中相对较低,而在黄土、古土壤和湖相沉积中相对较高。其中,古土壤和湖相中Al₂O₃等7种氧化物含量接近(如其平均值显示的那样)但又高于黄土(表1)。

2.3 LDS不同沉积相的物源追踪

图3显示,LDS的古土壤、湖相沉积、黄土的主量元素分布形态与蓟县黄土、西峰黄土、武威黄土的分布模式极为相似,而LDS沙丘砂主量元素的分布模式明显有别于LDS其余3种沉积相,各主量元素百分含量介于蓟县黄土、西峰黄土、武威黄土与腾格里沙漠现代沙丘砂主量元素含量的过度带。LDS的古土壤、湖相沉积、黄土以及蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土、武威黄土SiO₂含量相对UCC明显亏损,LDS沙丘砂SiO₂含量与UCC接近,腾格里沙漠现代沙丘砂SiO₂含量相对UCC明显富集;LDS各沉积相、蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土、武威黄土、腾格里沙漠现代沙丘砂Al₂O₃含量相对UCC明显亏损,腾格里沙漠现代沙丘砂亏损最多,LDS沙丘砂次之,其余含量接近;LDS古土壤及湖相沉积TFe的含量较UCC轻度富集,LDS黄土、蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土、武威黄土TFe含量与UCC接近,LDS沙丘砂与腾格里沙漠现代沙丘砂相对UCC显著亏损;LDS的古土壤、湖相、黄土、蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土、武威黄土的CaO含量相对UCC显著富集,这可能是因测量时未进行醋酸前处理,样品中含有较多碳酸盐所致,LDS

沙丘砂CaO含量与UCC接近,说明LDS沙丘砂在堆积过程中没有太多碳酸盐矿物的聚集,腾格里沙漠现代沙丘砂CaO含量相对UCC显著亏损;LDS各沉积相、蓟县黄土、西峰黄土、武威黄土以及腾格里沙漠现代沙丘砂的K₂O、Na₂O含量相对UCC均表现亏损。

LDS古土壤、LDS黄土、LDS湖相沉积、蓟县黄土、西峰黄土、武威黄土等的主量元素含量分布形态的相似性似乎暗示着LDS古土壤、LDS黄土、LDS湖相沉积物质来源相似,并且这三种沉积相与其东南方向的蓟县黄土、西峰黄土存在密切联系,可能沉积物质源于这些地区;而LDS沙丘砂主量元素含量分布形态与LDS其余三种沉积相的明显差别及其在图3中的所处位置,似乎可以判断其物质来源有别于LDS其余三种沉积相,并且与其西北一侧的腾格里沙漠存在联系。

为进一步证实上述推断,绘制了用于追踪物源的K₂O/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃散点图,由图4可以判断,LDS沙丘砂与LDS古土壤、湖相沉积、黄土明显存在物质来源的差异;LDS古土壤、湖相沉积、黄土三者图4中分布区域重合,表明三者有着相似的物质来源;同时LDS古土壤、湖相沉积、黄土与蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土的散点位置接近,表明这些沉积相存在物质来源上的密切联系,似乎可以认为LDS古土壤、湖相沉积、黄土的物质来自其东南方向的黄土高原。

3 化学风化程度判别

3.1 CIA指数和Na/K值

化学蚀变系数(CIA)可以指示长石风化黏土矿物的程度,是衡量沉积物来源物质的风化作用和沉

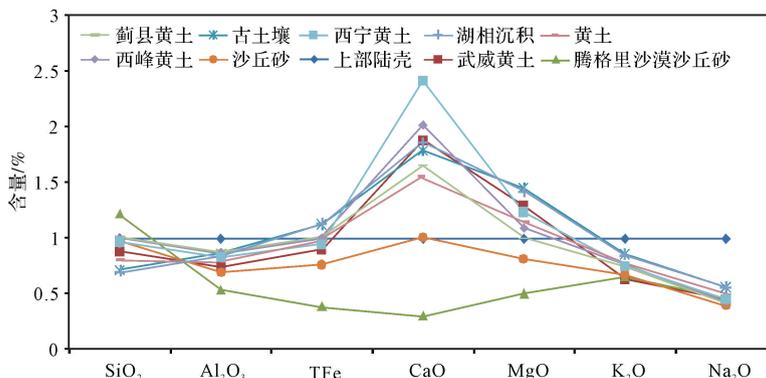


图3 LDS不同沉积相、西宁黄土^[12]、蓟县黄土^[12]、西峰黄土^[12]、武威黄土^[25]、腾格里沙漠现代沙丘砂^[26]与上部陆壳(UCC)^[27]主量元素特征的对比

Fig.3 Comparison among major element contents of the different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation, Xining loess, Wuwei loess, Jixian loess, Xifeng loess, modern dune sand of Tengger desert and the UCC

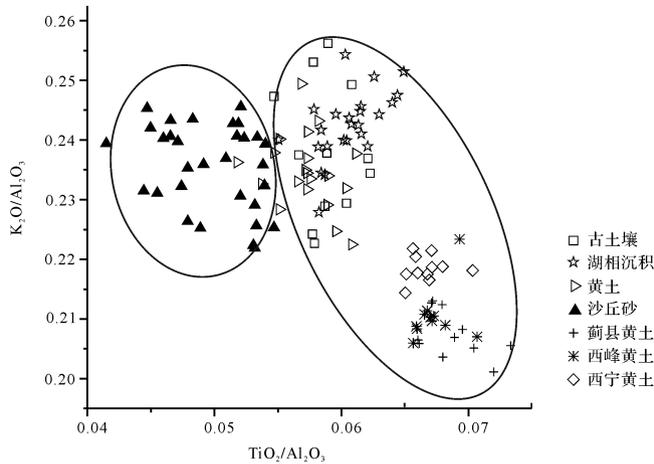


图4 LDS各沉积相与西宁黄土、蓟县黄土、西峰黄土 K_2O/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3 散点图

Fig.4 The scatter diagram of K_2O/Al_2O_3 - TiO_2/Al_2O_3 in different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation, Xining loess, Jixian loess, Xifeng loess

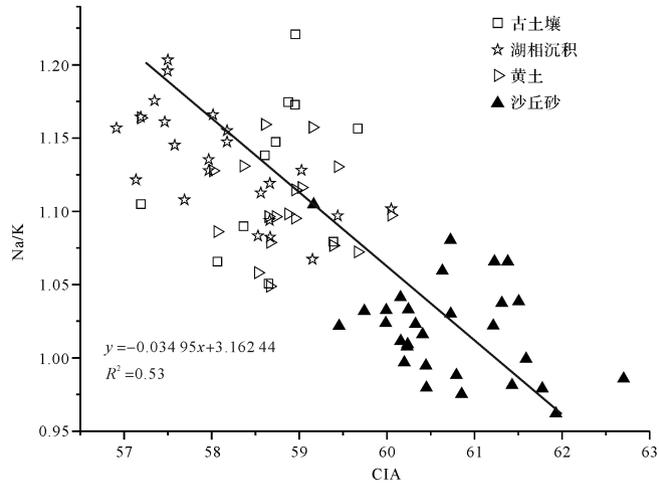


图5 LDS不同沉积相 CIA-Na/K 散点图

Fig.5 The scatter diagram of CIA-Na/K in different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation

积后风化作用的代用指标^[3,28-30], $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$ (式中氧化物为分子摩尔数, CaO^* 为硅酸盐中的含量, 采用 McLennan 提出的方法修正), 其主要反映硅酸盐的风化, 若不存在元素迁移后再次沉积的情况, 其可以很好地反映沉积物形成时的化学风化情况^[11]。

Na/K (Na, K 分别为氧化物摩尔分子数) 值可以很好指示风化物质中斜长石的分解程度^[28-29]。

研究发现 LDS 不同沉积相的 CIA 值分布范围为 56.91~62.70, 沿剖面变化如图 7 所示, LDS 湖相沉积 CIA 指数分布范围为: 56.91~60.05, 均值为: 58.15; LDS 古土壤分布范围为: 57.19~59.67, 均值为: 58.66; 黄土分布范围为: 58.23~60.62, 均值为: 59.46; LDS 沙丘砂分布范围为: 59.46~62.70, 均值为: 60.70。各沉积相平均 CIA 指数依次为沙丘砂>黄土>古土壤>湖相沉积, 若从 CIA 指数数值上看, 全部沉积相的风化程度变化不大, 均处于低等风化阶段。同时, LDS 各沉积相的 Na/K 大小依次为湖相沉积>古土壤>黄土>沙丘砂, 指示各沉积相的风化强度依次增加, 如图 5 所示, Na/K 与 CIA 指数呈现负相关关系 ($R^2=0.53$), 与 CIA 指数所指示的化学风化强度相吻合。

3.2 A-CN-K 三角图解

Nesbitt 和 Young 提出了大陆风化趋势预测的 A-CN-K (Al_2O_3 - CaO^* + Na_2O - K_2O) 三角模型图, 用来反映沉积物化学风化趋势及主矿物成分变化^[18]。

如图 6 所示, LDS 各沉积相与西宁黄土、武威黄土在 A-CN-K 三角图解上位置较接近, 而蓟县黄土、西峰黄土较 LDS 各沉积相长石矿物风化程度有所增强, 腾格里沙漠现代沙丘砂与上述沉积相分布位置有所差别, 风化程度相对偏低。LDS 各沉积相、蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土、武威黄土、腾格里沙漠现代沙丘砂处于去 K, Na 的同一风化路径上, 与典型大陆风化趋势一致^[18], 其物质源于广阔的上部陆壳, 在搬运与沉积过程中逐渐风化。LDS 各沉积相的数据点大致与 CN-A 连线平行, Na, Ca 的含量减少, K 及 Al 含量基本不变, 说明斜长石开始风化分解, Ca, Na 淋滤迁移, 钾长石含量相对稳定^[11]。整体而言, LDS 各沉积相靠近 UCC, 说明其整体风化强度较弱, 但进一步比较发现, LDS 各沉积相中沙丘砂距离 UCC 最远, 黄土次之, 古土壤第三, 湖相沉积最靠近 UCC, 西峰黄土、武威黄土与 LDS 黄土位置近乎重合, 蓟县黄土、西峰黄土距离 UCC 最远, 腾格里沙漠现代沙丘砂最靠近 UCC。三角图解似乎可以说明, LDS 各沉积相、西宁黄土、武威黄土、腾格里沙漠现代沙丘砂均处于较低的风化强度, 但也存在差别, 蓟县黄土>西峰黄土>LDS 沙丘砂>LDS 黄土>武威黄土>LDS 古土壤>LDS 湖相沉积>腾格里沙漠现代沙丘砂。

4 讨论

研究表明, CIA 指数在指示风化强度的同时可作为气候变化的替代指标: 上部陆壳 UCC 的 CIA 平均值为 47.92, 处于基本未受风化的阶段^[27]; 伊犁盆地黄土^[30]、西宁黄土、西峰黄土^[12] CIA 平均值分别为

53.84、59.39、61.45 指示其处于寒冷干燥气候条件下的低等风化阶段;而辽南周家沟黄土^[31]、西峰红黏土^[8]、洛川古土壤^[9] CIA 平均值分别为 66.09、69.11、67.36 指示其处于温暖、湿润条件下中等风化阶段;宣城风成红土^[32] CIA 平均值为 88.78 指示其处于炎热潮湿气候环境下强烈的高等风化。可见, CIA 值越大其指示的气候条件越相对温暖湿润,反之则相对寒冷干燥。

据 LDS 各沉积相的粒度组成研究结果^[20],如图 7 所示,平均粒径由大到小依次为 LDS 沙丘砂>LDS 黄土>LDS 古土壤>LDS 湖相沉积,指示 LDS 沙丘砂主要是受冬季风控制的寒冷干燥气候条件下沙漠扩张形成的沉积相,而 LDS 黄土、古土壤、湖相沉积则主要是受夏季风控制的相对温暖湿润的气候条件下形成的沉积相。基于上述对 CIA 指示气候环境的认识及本文对 LDS 各沉积相 CIA 指数研究的结果,本

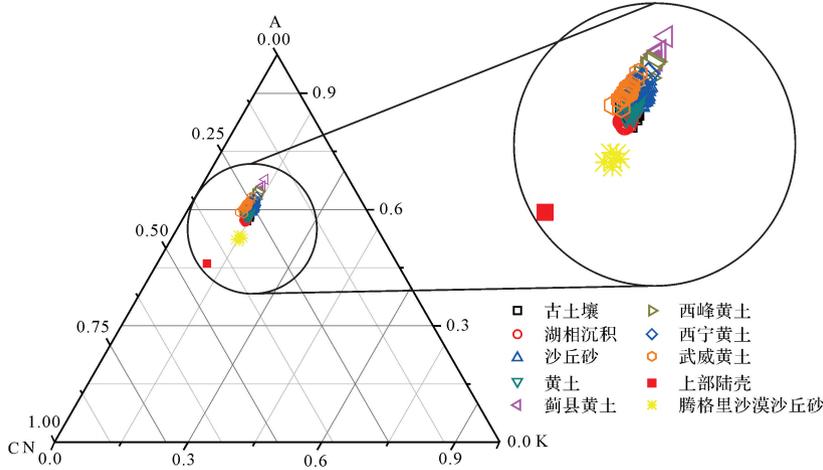


图 6 LDS 各沉积相与蓟县黄土、西峰黄土、西宁黄土、武威黄土、上部陆壳及腾格里沙漠现代沙丘砂 A-CN-K 三角图解
 Fig.6 Triangle diagram of A-CN-K of the different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation, Xining loess, Wuwei loess, Jixian loess, Xifeng loess, dune sand of Tengger desert and the UCC

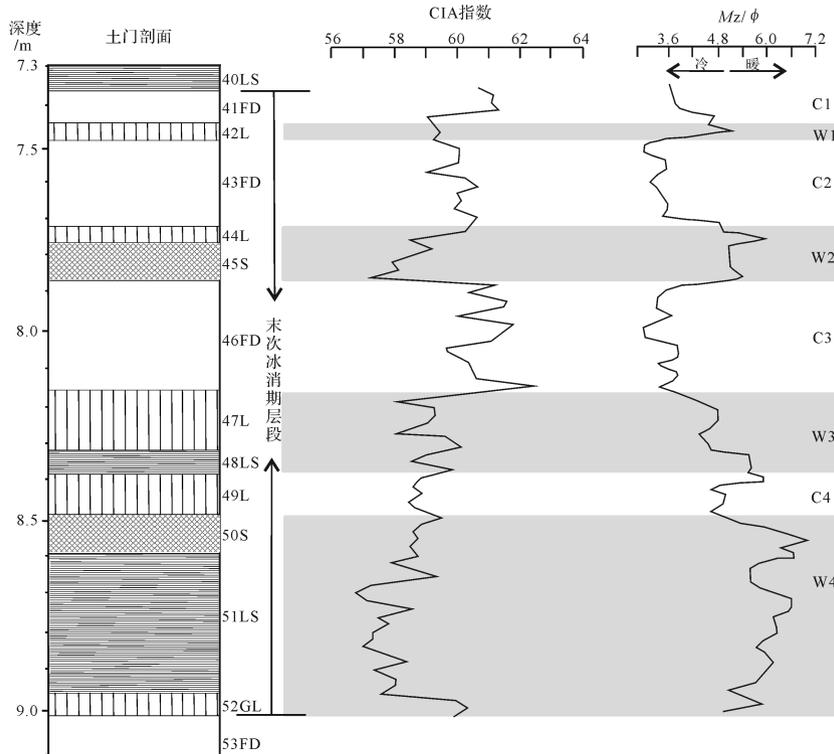


图 7 LDS 各沉积相的 CIA 指数与平均粒径 (Mz/ϕ) 指示的气候变化^[20] 对比图

Fig.7 The comparison between CIA of the different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation with the climate change indicated by the average size (Mz/ϕ)

研究得到的 LDS 各沉积相的 CIA 值与各沉积相平均粒径所代表的气候环境呈现矛盾现象。

4.1 物质来源的影响

据已有研究结果^[20]及本文 3.3 节对其物质成分的分析,认为造成上述矛盾的原因之一为:LDS 中沙丘砂主要是末次冰消期偏北的冬季风搬运其北部腾格里沙漠的沉积物堆积而成,而 LDS 的古土壤、湖相沉积、黄土则主要是由偏南的夏季风搬运黄土高原的沉积物堆积而成,沉积物质的来源的不同,导致不同沉积相在堆积初始阶段主量元素便存在差异,所以不同物源的不同沉积相计算的 CIA 指数失去了对比的前提,CIA 应用在不同物源的沉积相用来指示气候变化是存在先天性的不足的。

为探究 LDS 各沉积相的 CIA 指数与各沉积相形成气候环境矛盾的现象,做了 CIA 与 CaO 的散点图。如图 8 所示,LDS 各沉积相中 CaO 与 CIA 呈现负相关关系($R^2 = 0.58$),随着 CaO 含量的增加 CIA 值逐渐减小。究其原因,可能是由于实验样品未做醋酸前处理,样品中的碳酸盐矿物对 CIA 值产生了影响。由图 3 可知,LDS 的古土壤、湖相沉积、黄土、蓟县黄土、武威黄土等的 CaO 相对 UCC 富集程度很高,而 LDS 沙丘砂则与 UCC 持平。LDS 不同沉积相南北物源区的碳酸盐矿物含量的差异可能是造成 CIA 值与实际气候环境矛盾的原因之一。

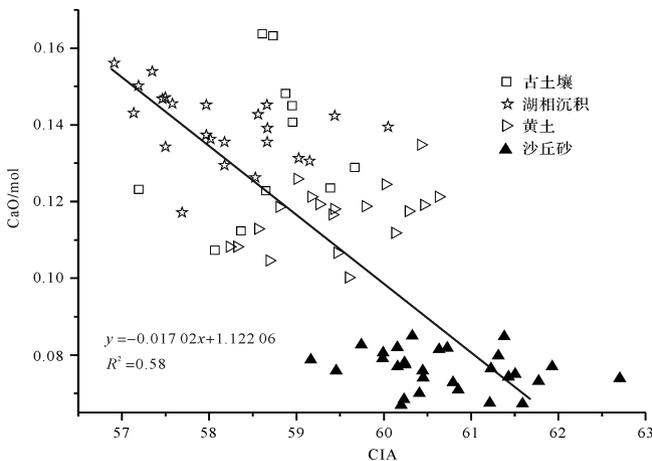


图 8 LDS 各沉积相 CaO-CIA 散点图

Fig.8 The scatter diagram of CaO-CIA in different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation

4.2 沉积环境的影响

为进一步探讨 CIA 指数与沉积相形成的气候环境产生矛盾的原因,做了直接参与 CIA 值计算的 Na_2O 、 K_2O 、 CaO^* 、 Al_2O_3 与 CIA 的对比图。如图 9 所

示,LDS 不同沉积相的 Na_2O 、 K_2O 、 CaO^* 均与 CIA 值呈现负相关关系(R^2 分别为 0.71、0.68、0.71),而 Al_2O_3 与 CIA 相关性较差。由此可以判断,CIA 值大小主要由各沉积相中的 Na_2O 、 K_2O 、 CaO^* 的含量控制,结合 CIA 与 CaO 的负相关关系(图 8),可以判断 CIA 值大小变化主要受易迁移元素钙、钠、钾的影响。研究表明,自晚更新世以来土门剖面地貌上处于南部祁连山支脉的山前倾斜平原与腾格里沙漠南缘过渡的沟壑区^[21],地势相对低洼(如图 1 所示)周围高地的降水易汇聚于此。当夏季风增强,降水相应增加,水携带着周围高地易迁移的钙、钠、钾等元素汇聚于此,造成了 LDS 湖相、古土壤、黄土中 Na_2O 、 K_2O 、CaO 的相对富集;当沉积沙丘砂时, Na_2O 、 K_2O 、CaO 因降水汇聚作用减弱也是造成其相对较低含量的原因之一,所以地形也是造成研究中 CIA 指数与地层实际形成的气候环境存在矛盾的重要原因。

综上所述,认为 LDS 各沉积相形成气候环境与 CIA 指数的矛盾关系可以得到如下解释:首先,构成 LDS 四种沉积相的物质来源存在差别,源自黄土高原的沉积物的钙、钠、钾含量相对较高,LDS 的古土壤、湖相沉积、黄土对物源区的物质成分有了较好的继承(图 3),LDS 沙丘砂主量元素对物源区主量元素也有较好的继承性;其次,剖面所处位置地形的影响,由于 LDS 古土壤、湖相沉积、黄土物源本身高含量的 Na_2O 、 K_2O 、CaO 加上夏季风控制作用下降水携带 Na_2O 、 K_2O 、CaO 等易迁移元素的汇聚作用,造成了古土壤、湖相沉积、黄土的 Na_2O 、 K_2O 、CaO 富集,使得 CIA 相对偏低,而 LDS 沙丘砂则由于物源的低 Na_2O 、 K_2O 、CaO 含量及不强的降水汇聚作用,造成其 Na_2O 、 K_2O 、CaO 含量偏低,从而使 CIA 偏高。从这个角度出发,认为 LDS 古土壤、湖相沉积、黄土的 CIA 值并不能代表其真实的风化程度。

CIA 指数应用在不同沉积相指示风化程度(进一步指示气候变化)是存在一定的适用性问题的,物源物质的化学元素成分差异,沉积环境的不同会对 CIA 值造成较强烈的影响,故在应用 CIA 作为古气候替代指标时应综合考虑上述因素对指示结果的影响。

5 结论

土门剖面末次冰消期层段(LDS)的各沉积相 CIA 指数从大到小依次为 LDS 沙丘砂 > LDS 黄土 > LDS 古土壤 > LDS 湖相沉积,其 CIA 指示的各沉积相风化作用强度(气候环境)与已有的研究结论是矛盾

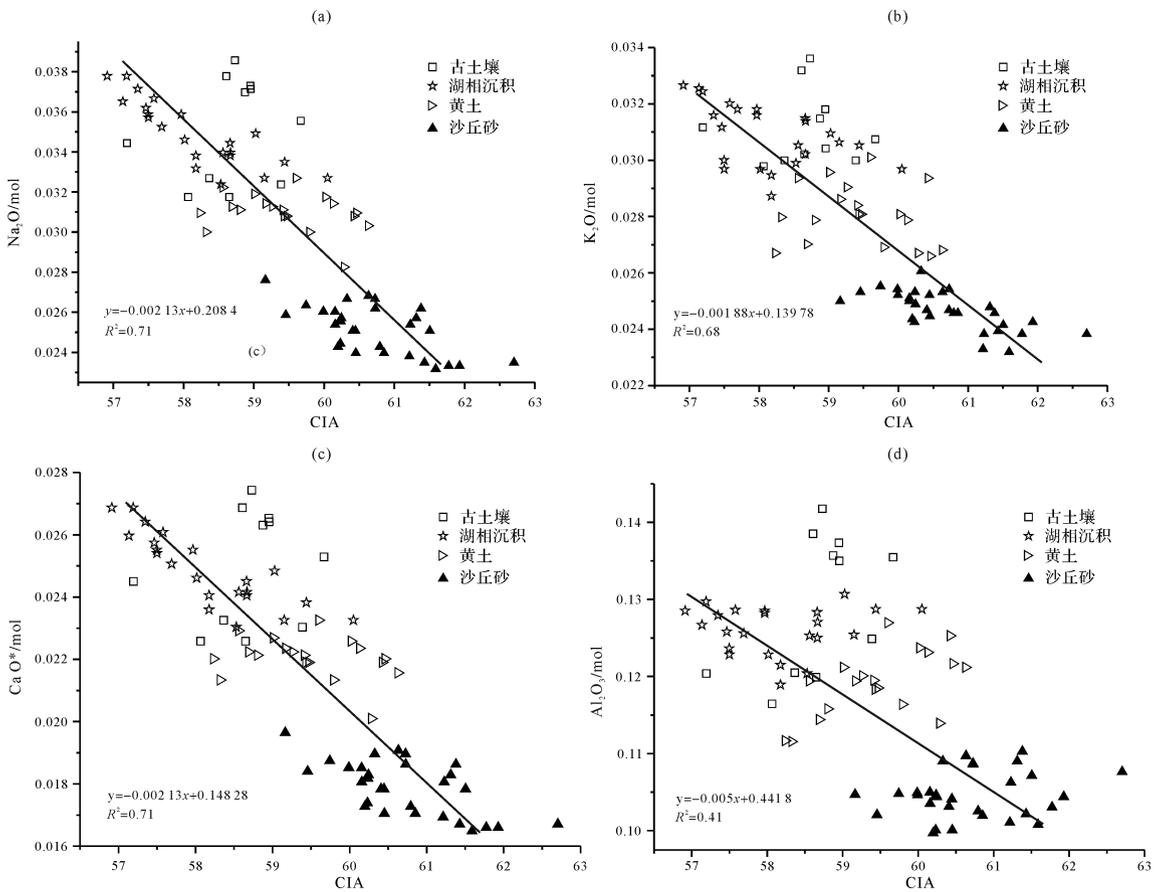


图9 LDS各沉积相 CIA- Na_2O (a)、CIA- K_2O (b)、CIA- CaO^* (c)、CIA- Al_2O_3 (d)散点图

Fig.9 The scatter diagram of CIA- Na_2O (a), CIA- K_2O (b), CIA- CaO^* (c), CIA- Al_2O_3 (d) in different sedimentary facies of the Tumen section during the last deglaciation

的,通过对 CIA 在不同沉积相的适用性的探讨可以得到以下结论:

(1) LDS 古土壤、湖相沉积、黄土的沉积物质可能来源于土门剖面东南一侧的黄土高原,LDS 沙丘砂物质源受西北侧的腾格里沙漠强烈影响,LDS 各沉积相的物源化学元素存在差别,从而使得不同沉积相 CIA 指数的对比存在先天性不足。

(2) 土门剖面所在位置的低洼地形会产生降水汇聚作用,使易迁移的钙、钠、钾等元素随降水迁移而汇聚于此,对不同沉积相的 CIA 指数产生干扰,导致 CIA 值偏小,其不能反映真实风化作用强度。

(3) 应用 CIA 指数作为古气候变化的替代指标需综合考虑沉积相物源差异及沉积环境的影响,CIA 指数在用于指示古气候变化中存在一定的适用性问题。

参考文献 (References)

[1] 李徐生,杨达源,鹿化煜. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质,1999,19(4): 75-

82. [Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayu. Oxide-geochemistry features and paleoclimatic record of the aeolian-dust depositional sequence in southern Anhui[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1999, 19(4): 75-82.]

[2] Chen Y Y, Li X S, Han Z Y, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang, Jiangsu province [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 341-352.

[3] Nesbitt H M, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.

[4] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. Geology, 1995, 23(10): 921-924.

[5] Goldberg K, Humayun M. The applicability of the Chemical Index of Alteration as a paleoclimatic indicator: An example from the Permian of the Parana Basin, Brazil[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 293(1/2): 175-183.

[6] 王自强,尹崇玉,高林志,等. 宜昌三斗坪地区南华系化学蚀变指数特征及南华系划分、对比的讨论[J]. 地质论评,2006,52

- (5):577-585. [Wang Ziqiang, Yin Chongyu, Gao Linzhi, et al. The character of the chemical index of alteration and discussion of subdivision and correlation of the Nanhua system in Yichang area [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 577-585.]
- [7] 孙娇鹏,陈世悦,彭渊,等. 欧龙布鲁克地块新元古代早期冰川事件:来自 CIA 指数的证据[J]. *地质论评*,2016,62(1):29-36. [Sun Jiaopeng, Chen Shiyue, Peng Yuan, et al. Early Neoproterozoic glacier event in Oulongbuluke block: Evidence from CIA index [J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 29-36.]
- [8] 陈畅,陈骏,刘连文. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征[J]. *地质力学学报*,2001,7(2):167-175. [Chen Yang, Chen Jun, Liu Lianwen. Chemical composition and characterization of chemical weathering of late Tertiary red clay in Xifeng, Gansu province[J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(2): 167-175.]
- [9] 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:地球科学*, 2001,31(2):136-145. [Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, et al. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 31(2): 136-145.]
- [10] 吴艳宏,李世杰,夏威夷. 可可西里荷仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义[J]. *地球科学与环境学报*,2004,26(3):64-68. [Wu Yanhong, Li Shijie, Xia Weilan. Element geochemistry of lake sediment from Gourenco Lake, Kekexili, Qinghai-Xizang plateau and its significance for climate variation[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26(3): 64-68.]
- [11] 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.]
- [12] Jahn B M, Gallet S, Han J M. Geochemistry of the Xining, Xifeng and Jixian sections, Loess Plateau of China: eolian dust provenance and paleosol evolution during the last 140 ka[J]. *Chemical Geology*, 2001, 178(1/2/3/4): 71-94.
- [13] 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.
- [14] 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*,2014,32(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, 32(1): 78-84.]
- [15] von Eynatten H, Tolosana-Delgado R, Karius V. Sediment generation in modern glacial settings: Grain-size and source-rock control on sediment composition[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 280: 80-92.
- [16] Borges J B, Huh Y, Moon S, et al. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East[J]. *Chemical Geology*, 2008, 254(1/2): 52-72.
- [17] Garzanti E, Andó S, France-Lanord C, et al. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 2. Suspended-load silt (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302(1/2): 107-120.
- [18] Buggle 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.
- [19] Morton A C, Hallsworth C. Chapter 7 stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis[J]. *Developments in Sedimentology*, 2007, 58: 215-245.
- [20] 孟洁,温小浩,李保生,等. 腾格里沙漠南缘土门剖面末次冰消期层段粒度特征及其反映的古气候[J]. *海洋地质与第四纪地质*,2016,36(1):165-176. [Meng Jie, Wen Xiaohao, Li Baosheng, et al. Grain-size distribution along the Tumen section of southern Tengger Desert, northwestern China and its paleoclimatic implications during the last deglacial[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(1): 165-176.]
- [21] 古浪县地方志编辑委员会. 古浪县志[M]. 兰州:甘肃文化出版社,2000:45-142. [Committees of Gulang County Chorography. *Gulang chorography*[M]. Lanzhou: Gansu Culture Press, 2000: 45-142.]
- [22] Stuiver M, Reimer P, Braziunas T. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples [J]. *Radiocarbon*, 1998, 40(3): 1127-1151.
- [23] 孟洁,温小浩,李保生,等. 腾格里沙漠南缘末次间冰期 5e 亚段的微量元素特征及其反映的古气候[J]. *中国沙漠*,2015,35(3):592-601. [Meng Jie, Wen Xiaohao, Li Baosheng, et al. Trace element characteristics and indicative paleoclimate during Marine Isotope Stage 5e (MIS5e) in the southern Tengger Desert, northwestern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(3): 592-601.]
- [24] Karpuz N K, Jansen E A. A high-resolution diatom record of the last deglaciation from the SE Norwegian Sea: Documentation of rapid climatic changes [J]. *Paleoceanography*, 1992, 7(4): 499-520.
- [25] 张虎才,李吉均,马玉贞,等. 腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征[J]. *沉积学报*,1997,15(4):153-158. [Zhang Hucai, Li Jijun, Ma Yuzhen, et al. A study on elemental geochemical characters of the Wuwei loess section in the south vicinity of Tengger Desert [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(4): 153-158.]
- [26] 李恩菊. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究 [D]. 西安:陕西师范大学,2011:126-131. [Li Enju. Comparative study on the characters of sediment in Badain Jaran Desert and Tengger Desert [D]. Xi'an: Shanxi Normal University, 2011: 126-131.]
- [27] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition

- and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[J]. *Journal of Geology*, 1985, 94(4): 632-633.
- [28] 张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 等. 泾河下游古洪水滞流沉积物地球化学特征研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 900-908. [Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. Geochemical characteristics of the Holocene flood slackwater deposits in the lower reaches of the Jinghe River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 900-908.]
- [29] 郭媛媛, 莫多闻, 毛龙江, 等. 澧阳平原岩板岩剖面地球化学特征与风化强度研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(3): 335-341. [Guo Yuanyuan, Mo Duowen, Mao Longjiang, et al. Geochemical characteristics and weathering intensity of the Yanbandang profile in Liyang Plain, the middle reach of the Changjiang River[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(3): 335-341.]
- [30] Song Y G, Chen X L, Qian L B, et al. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia[J]. *Quaternary International*, 2014, 334-335: 61-73.
- [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(5): 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(5): 163-171.]
- [32] Hong H L, Wang C W, Zeng K F, et al. Geochemical constraints on provenance of the mid-Pleistocene red earth sediments in subtropical China[J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 290: 97-108.

Applicability of Chemical Alteration Index to Indication of Paleoclimate Change by Different Sedimentary Facies

ZHAO ZhanLun^{1,2}, WEN Xiaohao³, TANG LianSheng^{1,2}, LI BaoSheng^{3,4}, NIU DongFeng³, MENG Jie³, YANG QingJiang³

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-set (Zhongshan) University, Zhuhai, Guangdong 519082, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Processes, Guangzhou 510275, China

3. School of Geographical Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

4. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China

Abstract: In the southern part of the Tengger Desert, the last glacial dissolution stratum of its Tumen profile consists of three layers of dune sand, two layers of lacustrine sediments, two layers of paleosol and five layers of sand loess. Through the chronological study of the sedimentary facies and testing of the main elements, the results define the stratum attributes to the last glacial dissolution stratum; once all the CIAs calculated, the order of CIA index appears as sand dune > loess > paleosol > lacustrine sediments from the largest to the smallest. By contrast, it is found that the weathering intensity (climatic environment) of all the sedimentary facies indicated by CIA is in contradiction with the research conclusion that the granularity indicates the climate change in this period. With a deep study and discussion of the contradiction phenomenon, the following conclusions are obtained: 1) The sedimentary material of the paleosol, lacustrine sediments and loess may originate from the Loess Plateau, on the southeast side of the soil door section. The provenance of sand dune is strongly influenced by the dune sand from the Tengger Desert in the north. The differences of the chemical elements of sedimentary facies make the comparison between the CIA index of different sedimentary facies congenitally deficient. 2) The low-lying topography where the soil door section locates at will produce water-catching effect, so that the migratory elements such as calcium, sodium, potassium and others will migrate with the precipitation of water to the surface of the sedimentary facies and the CIA indexes of different sedimentary facies are influenced to be too small to reflect the true weathering intensity. 3) The application of CIA indexes as a surrogate indicator of palaeoclimate change shall comprehensively consider the sedimentary facies provenance differences and the effect of the sedimentary environment; hence, the CIA index has limited application in indicating the paleoclimatic change.

Key words: Tumen section; main elements; CIA index; provenance; paleoclimatic change