doi:10.7515/JEE201402007

新疆伊犁河谷沙漠沉积不同粒径组分的地球化学元素分布特征

李金婵[1,2]，陈秀玲[1,2]，贾丽敏[1,2]，李志忠[1,2]
（1. 福建师范大学 地理科学学院，福建省湿润亚热带山地生态省部共建国家重点实验室培育基地，福州 350007；
2. 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：本文通过对伊犁河谷西部塔克尔莫乎尔沙漠内的可克达拉（TKP）剖面典型层位样品的不同粒级组分地球化学元素分析，探究西风环流控制的沙漠沉积区元素特征和化学风化指标在不同粒级组分中的分布特征。研究结果表明 TKP 剖面 Na 和 Sr 元素趋向于在粗粒级中富集；Fe、Mg、Al、Rb 元素趋向于细粒级中富集，K 元素含量随粒径增大先升高再降低，16~32 μm 粒级处出现谷值；Ti 元素含量与粒度关系不明确。CIA、Rb/Sr 随粒级增大逐渐降低，Na_2O/Al_2O_3、Na_2O/K_2O、K_2O/Al_2O_3 随粒级增大逐渐升高。TKP 剖面地球化学元素和比值在 <2 μm、2~16 μm、16~32 μm 细粒级组分不同粒级间变化较为剧烈，32~63 μm、63~125 μm、>125 μm 粗粒级组分变化则不明显，而且粗粒级组分在剖面中的变化也比较稳定。剖面整体风化程度较弱，因此这种现象可能是物源不统一造成的，为塔克尔莫乎尔沙漠具有物源多样性特点的观点提供了地球化学元素方面的证据。

关键词：不同粒级；主量元素；Rb/Sr 比值；物质来源；塔克尔莫乎尔沙漠
中图分类号：P595　**文献标志码：**A　**文章编号：**1674-9901(2014)02-0102-09

The distribution of geochemical elements in different grain-size fractions of desert sediments in Ili Valley of Xinjiang, China

LI Jin-chan[1,2], CHEN Xiu-ling[1,2], JIA Li-min[1,2], LI Zhi-zhong[1,2]
(1. Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and Fujian Province Funded), School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: Previous studies have found that there is correlation between the distribution of minerals in whole rock samples and grain size, which makes great influence on chemical weathering proxies. Therefore the influence of grain size should be taken into consideration when using geochemical proxies. In this study, we analyze geochemical elements of representative samples in Kekdala section (TKP) in Takelmukul Desert, Ili valley, Xinjiang and explore the distribution character of geochemical elements among different grain size fractions in westerly region. The results show that the concentrations of Na and Sr increase as the enlargement of size fraction, while Fe, Mg, Al, and Rb concentrations show the opposite phenomenon. K concentration decreases at first and then increases with the grain size increasing, and the lowest value exists in size 16~32 μm. CIA, Na_2O/Al_2O_3, Na_2O/K_2O, K_2O/Al_2O_3 and Rb/Sr vary regularly with grain-size changing. The distribution character indicates that the chemical weathering proxies above considerably depend on grain size in westerly region and need carefully used.

收稿日期：2014-02-17
基金项目：国家自然科学基金项目（41302149，41172166）；黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金（SKLLQG1103，SKLLQG1113）；中科院科技创新交叉与合作团队资助项目；福建省科技计划项目公益类项目（K3-296）
通讯作者：陈秀玲，E-mail: xiulingchen@163.com

Most of the element concentration and ratios of TKP section change fiercely in fine size (<2 μm, 2~16 μm, 16~32 μm) and slightly in coarse size (32~63 μm, 63~125 μm, >125 μm). All of these afford new proof to tell us that the TKP sand sediment has various source areas.

Key words: different grain size fractions; major element; Rb and Sr; material source; Takermohuer Desert

利用元素在表生环境中的地球化学行为提取沉积物中的古环境信息是第四纪环境研究的一个重要手段，在过去的 20 多年中得到了广泛的应用，并取得了丰硕的成果（Gallet et al，1996；Yang et al，2004；梁美艳等，2006；Hao et al，2010；乔彦松等，2010；杜青松，2011）。这些研究通常是建立在全岩化学分析的结果上，然而黄土沉积物分粒级的元素分析表明由于风力分选、物质来源、矿物组成等因素使得沉积物中的多种元素在剖面变化上与粒度高度相关，模糊了风化作用对元素迁移的影响（Yang et al，2006；熊尚发等，2008）。目前，有关化学地球化学指标粒度效应的研究仍然相对较少，而对西风环流控制下的中亚干旱区相关研究则更是少之又少，这在很大程度上影响了地球化学指标对古气候变化探讨的可靠性，因而急需对不同粒级组分中的地球化学特征展开详细的对比研究，明确其粒度控制效应，以期能够更为准确地解译第四纪环境演变信息。塔克尔莫乎尔沙漠位于新疆伊犁河谷的西部，常年深受西风环流控制，区域内广分布的沙漠沉积真实地记录了亚洲内陆在第四纪时期的环境演变过程，因而受到了许多学者的青睐，对此区域的沉积序列开展了稀土元素、粒度分析、磁化率、微量元素等方面的研究，初步重建了该区域近 4 ka 以来的气候演变过程（李志忠等，2010；陈秀玲等，2010，2013；靳建辉等，2010，2011；姜修洋等，2011）。本文在上述研究的基础上，也选择了塔克尔莫乎尔沙漠内的可克达拉（TKP）风成沙－古土壤沉积序列为研究对象，系统开展典型层位样品不同粒径组分的地球化学元素分析，揭示其在不同粒级组分中的分布特征，以及常用的地球风化指标受粒度效应的影响程度，以期为西风环流区风沙－古土壤沉积序列元素迁移的古气候重建提供更为准确的资料。

1　剖面概况与研究方法

1.1　剖面概况

塔克尔莫乎尔沙漠（又名霍城沙漠）位于伊犁河谷的西部，是伊犁河流域面积最大的固定、半固定沙漠（陈秀玲等，2013）。可克达拉剖面（简称 TKP）位于沙漠腹地霍城至 63 团公路北侧，地理坐标 43°58'13"N，80°32'39"E，顶部海拔 605 m，采样点地图见图 1（李志忠等，2010）。整个剖面（见图 2）从地表到底部共 360 cm（未见底），表层为现代风沙层，疏松，多植物根系。剖面主体为 10 层古风沙层和 10 层古土壤、弱古土壤层。古风沙层有青灰色沙层、淡棕色粉沙质－细沙层、灰棕色沙质粘土层等，古土壤层包含灰褐色腐殖质薄层、灰黑色粉沙质弱发育古土壤层。根据光释光（OSL）测年和沉积相研究表明剖面为晚全新世以来的连续沉积，底部年龄为 3.7 ka（李志忠等，2010）。

1.2　研究方法

根据已有的关于 TKP 剖面的稀土元素、粒度分析、磁化率、微量元素等的相关研究结果，本文选取了 40 cm（细沙）、60 cm（极细沙）、80 m（古土壤）、140 cm（极细沙）、180 cm（古土壤）、280 cm（细沙）和 320 cm（弱成古土壤）共七个典型层位样品的进行分粒级实验。TKP 剖面的粒度研究表明，该剖面以 <63 μm 的粉沙和 63~125 μm 的极细砂为主（凌智永，2010）。肯尼思 • 派伊（1991）认为大多数长距离搬运的粉尘是由 <16 μm 的颗粒组成，而粘土矿物多为 <2 μm 颗粒。因此本文将 TKP 剖面样品分为 <2 μm、2~16 μm、16~32 μm、32~63 μm、63~125 μm、>125 μm 六个粒级。>125 μm、63~125 μm 和 32~63 μm 粗粒级组分采用筛分法获得，16~32 μm，2~16 μm 和 <2 μm 细粒级组分采用沉降法提取。分粒级实验在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完成。

粒度分级实验所获固体样品用玛瑙研钵研磨至 200 目。称取样品置于聚四氟乙烯罐中，加入 HNO_3、HF、$HClO_4$ 混合酸，置于防腐罐内消解待测。Rb、Sr 元素采用美国 X-Serie Ⅱ型 ICP-MS 质谱仪测试。以上实验在福建师范大学湿润亚热带山地生态省部共建教育部重点实验室完成。主量元素采用 Prodigy-H 型的 ICP-OES 光谱仪测试，该实验在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升实验室完成。

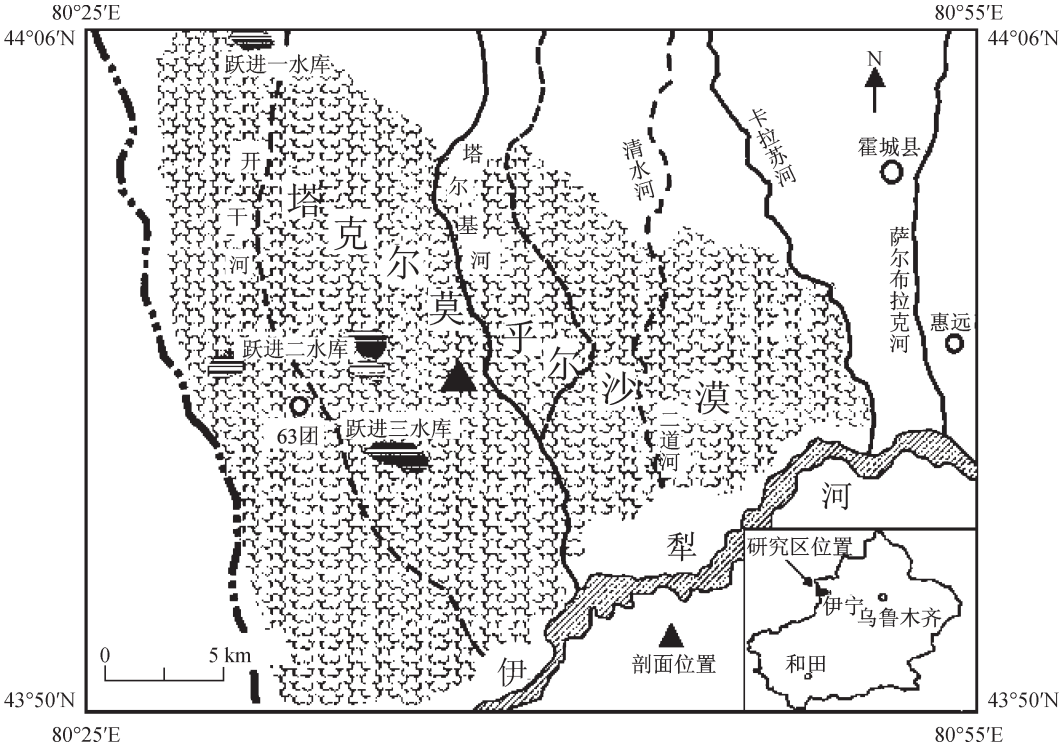

图 1 塔克尔莫乎尔沙漠地理位置及采样点（引自李志忠等，2010）
Fig.1 The location of Takermohuer desert and the sampling point（Li et al，2010）

2 结果与讨论

2.1 各粒级组分元素分布特征

如表 1、图 3 所示，Na_2O 和 Sr 含量随着粒级增大逐渐升高；Fe_2O_3、MgO 和 Al_2O_3 含量随着粒级增大降低，并且 Fe_2O_3、MgO 在不同粒级组分中的变化是同步的；K_2O 含量随着粒级增大先降低再升高，16~32 μm 粒级组分含量最低；TiO_2 含量粒级增大先升高再降低，16~32 μm 粒级组分含量最高；Rb 元素含量随粒级增大逐渐减小，从 16~32 μm 开始随粒级增大又有轻微升高态势。化学蚀变指数（CIA，解释见表 1）和 Rb/Sr 随着粒级增大而减小；Na_2O/K_2O、Na_2O/Al_2O_3 和 K_2O/Al_2O_3 比值随粒级增大而增大；元素含量和元素比值在不同粒级组分中的分配具有在 <2 μm、2~16 μm、16~32 μm 细粒级组分变化幅度较大，在 32~63 μm、63~125 μm、>125 μm 粗粒级组分变化相对平缓的特征剖面内部 2~16 μm 组分变化最为剧烈；除了 Sr 元素以外其他指标 16~32 μm、32~63 μm、63~125 μm、>125 μm 粗粒级组分在剖面中变化较小；除了 Sr 元素和 Rb/Sr 以外其他指标 <2 μm 组分在剖面中的变化也相对较小。

2.2 控制因素初探

富 Na 和 K 的碎屑矿物中长石占了主要的比重，长石极易于化学风化却难于物理风化（Liu et al，2001；谢远云等，2012；曾蒙秀等，2013）因此趋向于粗颗粒中富集，造成了 TKP 剖面 Na 和 K 的粗粒级富集。但是 K 是粘土矿物伊利石的主要成分，而且 K 离子半径大于 Na 离子，土壤有机质、细颗粒组分等都会对 K 产生积聚作用（赵锦慧等，2004；刘安娜等，2006），因此 TKP 剖面中细粒级组分中也有 K_2O 富集。含 Fe、Mg 元素的非碳酸盐矿物主要是绿泥石、蛭石和少量的角闪石、辉石、黑云母等，这些矿物易于发生物理风化，因而细颗粒中含量较高。TKP 剖面 Fe、Mg 元素细粒级中富集的特征即是这些矿物在不同粒级中分配的结果。TKP 剖面 Fe_2O_3 和 MgO 在不同粒级组分中的分布规律相似，可能是因为风力分选过程中铁镁硅酸盐中 Fe 和 Mg 元素一起搬运，没有产生分离（刘连文等，2001）。Al 在风化过程中属于惰性（略可迁移）元素（李天杰等，2010），并且粘土矿物中多含 Al 元素，因此在细粒级中会有明显富集。Ti 元素主要来源于富钛矿物（如金红石、锐钛矿等）这些矿物在碎屑沉积物中很常见，是源区重矿物的一部分（Yang et al，2006），不同粒级富钛矿物含量的具有复杂性，因此 TKP 剖面 TiO_2 含量随粒级变化规律性不明显。Rb 元素

和 K 元素性质类似，易于赋存在含 K 矿物中，其离子半径较大易被粘土矿物吸附，在风化成壤过程中淋溶迁移量非常有限（曾艳等，2011），因此 TKP 剖面 Rb 与 K 的分配特征比较相似。Sr 和 Ca 性质类似，易于赋存在含 Ca 矿物中，相对于 Rb 其离子半径小容易以游离态的形式被迁移（赵锦慧等，2004）。因而在剖面中变化较为剧烈。而 Sr 元素含量随着粒级增大含量逐渐升高，则与含 Ca 矿物在不同粒级组分中的分配有关。

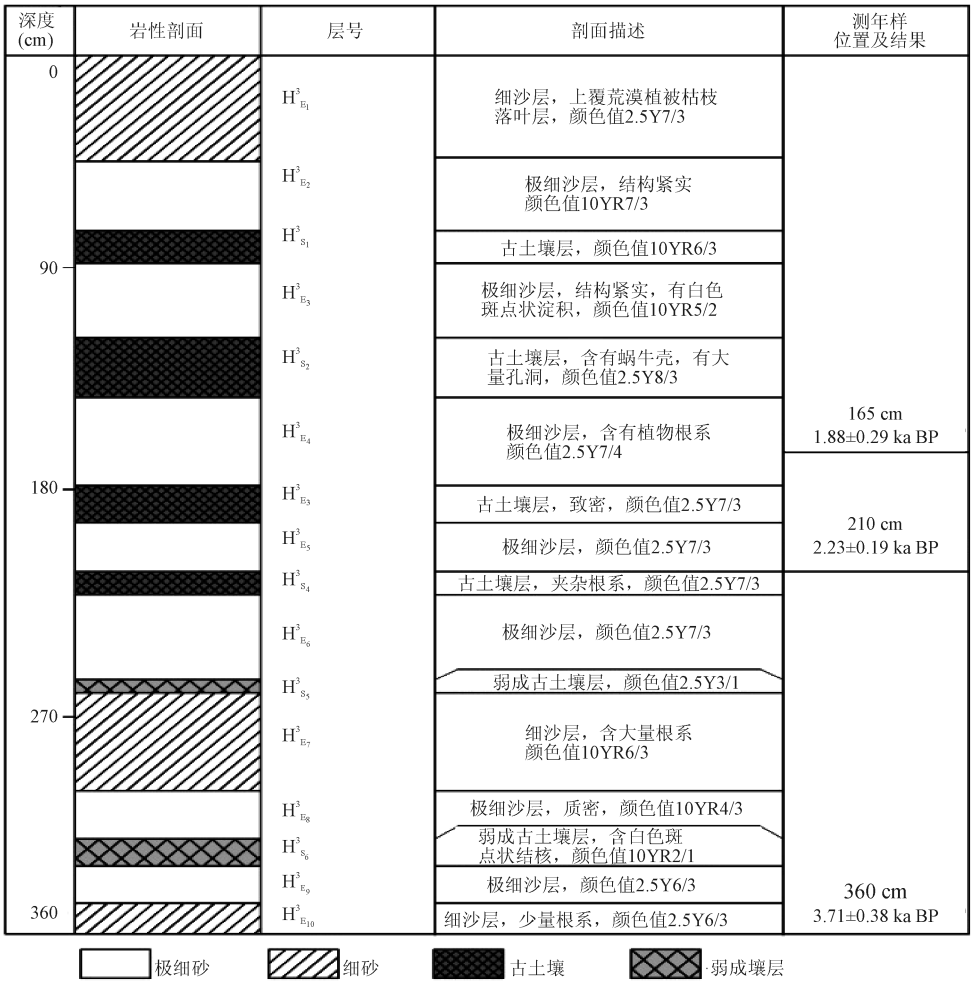

图 2　可克达拉剖面综合柱状图（引自靳建辉等，2010）
Fig.2　Comprehensive column of TKP section（Jin et al，2010）

不同元素比值通常可以消除影响化学元素迁移的多种复杂原因，并可以指示元素的相对富集程度和沉积环境特征，因此常常用元素比值作为气候环境代用指标来衡量化学风化程度（赵锦慧等，2004；刘维明等，2008；熊尚发等，2008；李传想等，2012）。化学风化指标常用风化过程中不活动元素（如 Al、Rb）和活动元素（如 Na、Sr 等）的比值构成。化学蚀变指数 CIA 是常用的表征化学风化程度的指标，可以有效地指示沉积物中长石风化成粘土矿物的程度（乔彦松等，2012）。Na_2O/K_2O 值是衡量样品中斜长石风化程度的指标，风化剖面中的 Na_2O/K_2O 值与风化程度呈反比（Liu et al，2001；乔彦松等，2010）。Na_2O/Al_2O_3、K_2O/Al_2O_3 通常用于反映风化过程中 Na 和 K 相对于 Al 的迁移程度。而 TKP 剖面 CIA、Rb/Sr 随粒级增加逐渐降低，Na_2O/K_2O、K_2O/Al_2O_3、Na_2O/Al_2O_3 随粒级增大逐渐升高，五个代用指标都和粒度有较好的相关性，因此全岩样品分析时使用 CIA 指示剖面化学风化程度会受到粒度组成的影响。K_2O/Al_2O_3 在 <32 μm 的细粒级组分几乎没有变化，K 和 Al 没有发生有效地分离，反映了 TKP 剖面风化程度较弱。上述讨论表明赋存于不同粒级组分

的矿物类型及含量是控制元素及其比值特征的决定性因素。尽管古气候是促使母岩矿物分解和转化的重要原因，但是母岩类型、沉积分选和不同来源物质的输入和沉积相变迁都会造成沉积物中不同粒级组分中矿物类型和含量的差异。沉积物中不同粒级组分中矿物类型和含量对元素控制所起到的“粒度效应”使得元素特征在物源和沉积环境稳定条件下，气候变迁和沉积物粒度变化耦合条件下才能准确反映古气候变迁。

表 1 TKP 剖面不同粒级地球化学元素分布特征

Table 1 Distribution of geochemistry elements in different grain size fractions in TKP section

		<2 μm	2~16 μm	16~32 μm	32~63 μm	63~125 μm	>125 μm
	平均值	0.65	1.56	2.17	2.37	2.59	2.78
Na_2O(%)	范围	0.61~0.71	1.28~1.89	2.00~2.26	2.25~2.49	2.42~2.69	2.64~2.92
	变异系数	6.65	14.8	4.66	3.51	3.31	3.84
	平均值	3.42	2.65	2.20	2.28	2.45	2.74
K_2O(%)	范围	3.27~3.58	2.51~3.01	2.01~2.37	2.21~2.34	2.40~2.48	2.65~3.1
	变异系数	3.23	8.24	5.02	3.39	2.50	2.25
	平均值	7.29	4.90	3.89	3.42	3.21	2.05
Fe_2O_3(%)	范围	6.82~7.53	4.45~5.88	3.52~4.32	3.18~3.83	3.13~3.29	1.90~2.38
	变异系数	7.15	10.73	8.91	6.90	2.13	6.38
	平均值	4.05	3.10	2.47	2.30	1.97	1.16
MgO(%)	范围	3.83~4.47	2.86~3.42	1.39~1.67	1.31~1.51	1.16~1.29	0.62~0.87
	变异系数	5.16	10.22	8.24	5.34	1.94	8.78
	平均值	16.29	12.64	10.84	10.86	11.21	11.10
Al_2O_3(%)	范围	15.56~17.19	11.96~14.42	10.17~11.55	10.50~11.26	10.57~11.37	10.82~11.44
	变异系数	3.57	7.46	3.78	2.61	2.67	1.73
	平均值	0.51	0.68	0.71	0.55	0.51	0.32
TiO_2(%)	范围	0.50~0.55	0.58~0.78	0.65~0.76	0.43~0.63	0.48~0.55	0.25~0.49
	变异系数	3.65	11.29	6.03	11.57	4.84	26.40
	平均值	162.86	119.03	85.53	87.26	95.90	104.17
Rb($\mu g \cdot g^{-1}$)	范围	150.60~170.00	98.08~141.50	79.21~93.81	79.97~93.79	91.37~101.20	99.71~111.10
	变异系数	3.96	11.18	6.01	6.49	3.75	4.40
	平均值	172.46	222.40	246.33	251.61	249.93	225.63
Sr($\mu g \cdot g^{-1}$)	范围	111.70~252.00	167.40~284.10	211.70~286.80	222.00~283.00	221.20~275.60	205.70~241.00
	变异系数	29.26	18.05	11.99	8.44	7.23	5.37
	平均值	73.56	61.20	53.20	51.38	50.03	47.82
CIA	最小值	72.51~75.24	56.72~65.85	51.38~55.43	50.49~53.13	49.72~50.32	47.00~48.27
	变异系数	1.16	5.17	2.77	1.66	0.43	0.88
	平均值	0.23	0.23	0.22	0.23	0.24	0.27
K_2O/Al_2O_3	最小值	0.21~0.24	0.22~0.23	0.22~0.23	0.22~0.24	0.23~0.25	0.26~0.28
	变异系数	4.02	2.00	2.13	2.53	2.60	2.40
	平均值	0.07	0.21	0.33	0.36	0.38	0.41
Na_2O/Al_2O_3	最小值	0.06~0.07	0.15~0.27	0.29~0.37	0.33~0.38	0.38~0.39	0.40~0.43
	变异系数	7.14	21.19	7.90	4.11	1.10	2.51
	平均值	0.29	0.90	1.50	1.57	1.60	1.54
Na_2O/K_2O	最小值	0.27~0.32	0.64~1.23	1.32~1.70	1.48~1.66	1.52~1.69	1.46~1.64
	变异系数	6.51	22.57	8.54	4.20	3.11	4.24
	平均值	1.03	0.56	0.36	0.35	0.39	0.47
Rb/Sr	最小值	0.60~1.46	0.43~0.86	0.29~0.41	0.30~0.42	0.34~0.46	0.42~0.51
	变异系数	29.65	24.98	12.96	13.52	10.20	6.02

注：化学蚀变指数（$CIA=Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+K_2O+Na_2O)\times 100\%$）（Nesbitt and Yong，1982），CaO* 为硅酸盐矿物中的摩尔含量。由于硅酸盐中的 CaO 和 Na_2O 以 1:1 的比例存在，因此，McLennan（1993）认为，当 $mCaO>mNa_2O$ 时，可认为 $mCaO^*=mNa_2O$；而 $mCaO<mNa_2O$ 时则 $mCaO^*=mCaO$，本文 CIA 计算采用 McLennan（1993）的方法。

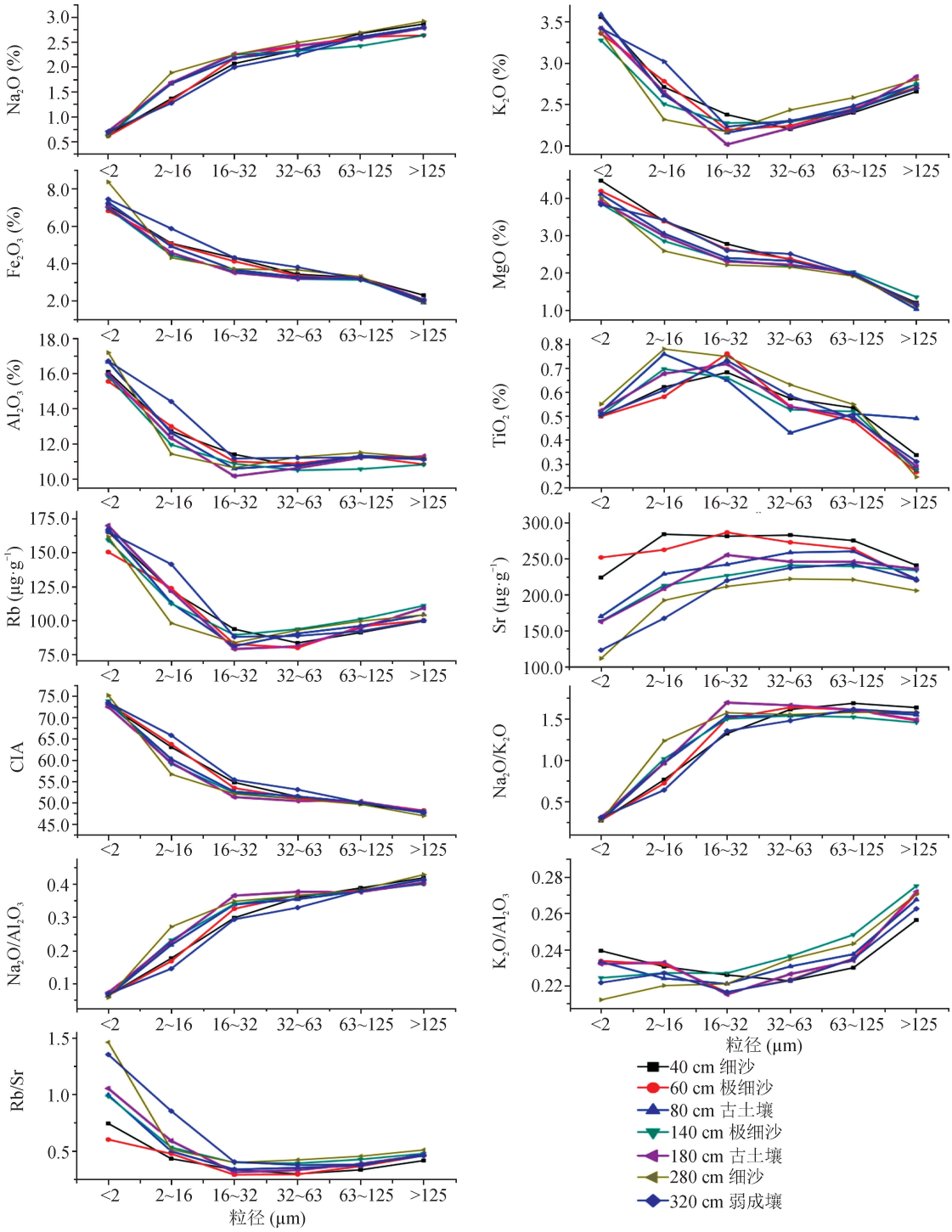

图 3　元素在不同粒级组分中的分布特征

Fig.3　Distribution of geochemistry elements in different grain size fractions in TKP section

TKP 剖面地球化学元素分析发现，各地球化学元素含量和比值在 <2 μm、2~16 μm、16~32 μm 细粒级组分变化较为剧烈；32~63 μm、63~125 μm、>125 μm 粗粒级组分中的变化则不明显。凌智永（2010）和李志忠等（2010）关于 TKP 剖面的粒度分析研究发现，剖面古土壤、弱成古土壤、极细砂层粒度频率曲线均为双峰曲线，而且剖面的分选系数较大，频率曲线不对称，认为剖面可能是风力远源搬运沉积和下伏水成冲击沙的产物。陈炼彪（1980）关于塔克尔莫乎尔沙漠研究认为古代河流冲积物和伊犁盆地强劲的西风都会对沙漠的形成造成影响。李志忠等（2010）研究认为塔克尔莫乎尔沙漠风成沙具有物源多样性的特点，伊犁河阶地下伏第四纪晚期到全新世近现代

冲积物，北部山前堆积物，西侧毗邻的中亚沙漠粉尘都可能是其物源。叶玮等（1998）研究认为伊犁地区 <15 μm 的细粒级组分应该属于远距离悬浮粒组和次生粒组，而 >15 μm 的粗粒级组分则应该近距离悬浮粒组和尘暴搬运的大气粉尘组成的粗粒组。由于 TKP 剖面整体以粉沙、细沙为主，风化成壤作用较弱，剖面的这种地球化学元素在 <16 μm 细颗粒组分中变化明显，在 >32 μm 的粗颗粒组分中变化平缓的特征可能更多暗示了 TKP 剖面物源的不统一。杨石岭等对黄土高原黄土的研究（Yang et al，2006），发现 <5 μm 组分变化剧烈，而 >16 μm 组分变化相对平缓，这可能是由于 TKP 剖面距离物源区更近，也可能是由于 TKP 剖面和黄土高原黄土物源不同。

对比元素在 TKP 剖面中的变化，发现 2~16 μm 组分在剖面中变化最为剧烈，>32 μm 粗粒级组分在剖面内变化较小。肯尼思 • 派伊（1991）研究认为大多数长距离搬运的粉尘均由 <16 μm 的颗粒组成，“地方性”颗粒比一般较长距离搬运的粉尘颗粒要粗的多，但是“地方性”粉尘的粒度分布强烈的接受着源区物质粒度的控制。因此 TKP 剖面 >32 μm 粗粒级组分可能以“地方性”颗粒为主，而且来源比较稳定。该粒级组分对剖面记录气候信息上贡献也较少。鹿化煜和安芷生（1998）对黄土高原的研究认为细颗粒的含量变化与风化成壤作用相关，但是 TKP 剖面 2~16 μm 组分在剖面中的变化要远比 <2 μm 组分剧烈。因此 2~16 μm 组分可能是长距离搬运的颗粒和近源“地方性”颗粒的混合，剖面中的的变化记录的更多是其物源的变化同时也有区域的气候信息。

3 结论

（1）TKP 剖面分粒级化学元素分析结果表明，Na 和 Sr 元素趋向于在粗粒级中富集，Fe、Mg、Al、Rb 元素趋向于细粒级中富集，K 元素随粒径变化呈现先降低再升高的态势，16~32 μm 粒级出现谷值。Ti 元素含量与粒度关系不明确。CIA 随粒度增加逐渐降低，Na_2O/Al_2O_3、Na_2O/K_2O、K_2O/Al_2O_3、Rb/Sr 随粒度增加均呈现出了明显的逐渐减小的规律。说明在西风沉积区元素含量及常用化学风化指标都明显受到沉积物粒度的影响，使用时需谨慎。

（2）TKP 剖面各地球化学元素含量和比值在 <2 μm、2~16 μm、16~32 μm 细粒级组分变化剧烈；32~63 μm、63~125 μm、>125 μm 粗粒级组分中的变化不明显，而且剖面中变化也比较稳定。TKP 剖面整体风化成壤作用较弱，这一特征可能是 TKP 剖面物源不统一造成的。为塔克尔莫乎尔沙漠具有物源多样性特点的观点提供了地球化学元素上的证据。

参考文献

陈炼彪 . 1980. 塔克尔穆库尔沙漠成因的探讨 [J]. *新疆林业* , (2): 62−64. [Chen L B. 1980. A study on causes of Takermohuer Desert [J]. *Forestry of Xinjiang*, (2): 62−64.]

陈秀玲 , 李志忠 , 凌智永 , 等 . 2010. 新疆伊犁河谷晚全新世以来的风砂沉积与环境演化 [J]. *海洋地质与第四纪地质* , 2010, 30(6): 35−42. [Chen X L, Li Z Z, Ling Z Y, et al. 2010. Holocene aeolian deposits and environmental evolution in Yili Valley, Xinjiang [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(6): 35−42.]

陈秀玲 , 李志忠 , 贾丽敏 , 等 . 2013. 新疆伊犁可克达拉剖面的稀土元素沉积特征及其环境意义 [J]. *第四纪研究* , 33(2): 368−375. [Chen X L, Li Z Z, Jia L M, et al. 2013. Rare earth element characteristics of desert sediments in Ili Valley and their environmental implication [J]. *Quaternary Sciences*, 33(2): 368−375.]

杜青松 . 2011. 黄土高原黄土 − 古土壤序列古气候代用指标综述 [J]. *西北地质* , 44(2): 177−185. [Du Q S. 2011. Research on Loess-paleosol sequence paleclimatic proxies in Loess Plateau [J]. *Northwestern Geology*, 44(2): 177−185.]

姜修洋 , 李志忠 , 陈秀玲 , 等 . 2011. 新疆伊犁河谷风沙沉积晚全新世孢粉记录及气候变化 [J]. *中国沙漠* , 31(4): 855−861. [Jiang X Y, Li Z Z, Chen X L, et al. 2011. Late Holocene climate and environment changes inferred from pollen recorded in Takelmukul Desert in Yili Valley of Xinjiang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 31(4): 855−861.]

靳建辉 , 李志忠 , 陈秀玲 , 等 . 2010. 新疆伊犁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* , 12(6): 675−684. [Jin J H, Li Z Z, Chen X L, et al. 2010. Major elements in Aeolian sediments of the Late Holocene in Yili Valley and their climatic implications [J]. *Journal of Paleogeography*, 12(6): 675−684.]

靳建辉 , 李志忠 , 陈秀玲 , 等 . 2011. 新疆伊犁塔克尔莫乎尔沙漠全新世晚期沉积微量元素反映的古气候变化 [J]. *沉积学报* , 29(2): 336–345. [Jin J H, Li Z Z, Chen X L, et al. 2011. Paleoclimatic significance of geochemical elements from Takermohur Desert, Xinjiang since Late Holocene [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(2): 336–345.]

肯尼思 • 派伊 . 1987. 风飏粉尘及粉尘沉积物 [M]. 台益和 , 译 . 北京 : 海洋出版社 . [Kenneth P. 1991. Aeolian dust and deposits [M]. Tai Y H, translated. Beijing: China Ocean Press.]

梁美艳 , 郭正堂 , 顾兆炎 . 2006. 中新世风尘堆积的地球化学特征及其与上新世和第四纪风尘堆积的比较 [J]. *第四纪研究* , 26(4): 657–664. [Liang M Y, Guo Z T, Gu Z Y. 2006. Geochemical characteristics of the Miocene eolian deposits and comparison with the Pliocene and Quaternary eolian deposits [J]. *Quaternary Sciences*, 26(4): 657–664.]

李传想 , 宋友桂 , 王乐民 . 2012. 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* , 30(1): 103–108. [Li C X, Song Y G, Wang L M. 2012. Geochemical characteristics and paleoen-vironmental significance of the loess in the Ili Region, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 30(1): 103–108.]

李天杰 , 赵　烨 , 张科利 , 等 . 2010. 土壤地理学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 . [Li T J, Zhao Y, Zhang K L, et al. 2010. Soil geography [M]. Beijing: Higher Education Press.]

李志忠 , 凌智永 , 陈秀玲 , 等 . 2010. 新疆伊犁河谷晚全新世风沙沉积粒度旋回与气候变化 [J]. *地理科学* , 30(4): 613–619. [Li Z Z, Ling Z Y, Chen X L, et al. 2010. Late Holocene climate changes revealed by grain-size cycles in Takemukul Desert in Yili of Xinjiang [J]. *Scientia Geographica Sninca*, 30(4): 613–619.]

凌智永 . 2010. 塔克尔莫乎尔沙漠晚全新世环境演变研究 [D]. 乌鲁木齐 : 新疆师范大学 . [Ling Z Y. 2010. A study of environmental changes in Takermohuer Desert during Late Holocence [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University.]

刘安娜 , 庞奖励 , 黄长春 , 等 . 2006. 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*, 35(4): 453–458. [Liu A N, Pang J L，Huang C C, et al. 2006. Element distributions of Zhuanglang Holocene loess-paleosol sequence, Gansu Province and its significance [J]. *Geochimica*, 35(4): 453–458.]

刘维明 , 杨胜利 , 方小敏 , 等 . 2008. 中国西北主要粉尘源区地表物质的常量元素分析 [J]. *中国沙漠* , 28(4): 642–647. [Liu W M, Yang S L, Fang X M, et al. 2008. Major elemental characteristics of the major dust source regions in Northwest China [J]. *Journal of Desert Research*, 28(4): 642–647.]

鹿化煜 , 安芷生 . 1998. 黄土高原黄土粒度组成的古气候意义 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 28(3): 278–283. [Lu H Y, An Z S. 1998. The grain size of China Loess Plateau and its paleoclimate implication [J]. *Science in China (Series D)*, 28(3): 278–283.]

乔彦松 , 赵志中 , 王　燕 , 等 . 2010. 川西甘孜黄土–古土壤序列的地球化学演化特征及其古气候意义 [J]. *科学通报* , 55(3): 255–260. [Qiao Y S, Zhao Z Z, Wang Y, et al. 2009. Variations of geochemical compositions and the paleoclimatic significance of loess-soil sequence from Ganzi County of western Sichuan Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 4697– 4703.]

谢远云 , 孟　杰 , 郭令芬 , 等 . 2012. 地球化学组成在不同粒级中的分布特征——以哈尔滨城市道路表土为例 [J]. *地理科学* , 32(11): 1397–1403. [Xie Y Y, Meng J, et al. 2012. The distribution of geochemical composition in different grain-size fractions: A case study of road surface in Harbin City [J]. *Scientia Geographica Sninca*, 32(11): 1397–1403.]

熊尚发 , 朱园健 , 周　茹 , 等 . 2008. 白水黄土–红粘土化学风化强度的剖面特征与粒度效应 [J]. *第四纪研究* , 28(5): 812–821. [Xiong S F, Zhu Y J, Zhou R, et al. 2008. Chemical weathering intensity and its grain-size dependence for the loess-red clay deposit of the Baishui Section, Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 28(5): 812–821.]

叶　玮 , 靳鹤龄 , 赵兴有，等 . 1998. 新疆伊犁地区黄土的粒度特征与物质来源 [J]. *干旱区地理* , 21(4): 1–8. [Ye W, Jin H L, Zhao X Y, et al. 1998. Depositional features and material sources of loess in Yili region, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 21(4): 1–8.]

叶　玮 . 2001. 新疆西风区黄土沉积特征与古气候 [M]. 北京 : 海洋出版社 , 95–97. [Ye W. 2001. The loess deposition features and paleoclimate in westerly region of Xinjiang [M]. Beijing: China Ocean Press, 95–97.]

叶 玮 , 矢吹真代 , 赵兴有 . 2005. 中国西风区与季风区黄土沉积特征对比研究 [J]. *干旱区地理* , 28(6): 781–794. [Ye W, Sadayo Y, Zhao X Y. 2005. Comparison of the sedimentary features of loess between the westerly and monsoon regions in China [J]. *Arid Land Geography*, 28(6): 781–794.]

曾蒙秀 , 宋友桂 . 2013. 新疆伊犁昭苏黄土剖面中的矿物组成及其风化意义 [J]. *地质评论* , 59(3): 575–586. [Zeng M X, Song Y G. 2013.Mineral composition and their weathering significance of Zhaosu Loess-Paleosol sequence in the Ili Basin, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 59(3): 575–586.]

曾 艳 , 陈敬安 , 朱正杰 , 等 . 2011. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值在古气候 – 古环境研究中的应用与展望 [J]. *地球科学进展* , 26(8): 805–810. [Zeng Y, Chen J A, Zhu Z J, et al. 2011. Advance and prospective of Rb/Sr ratios in lake sediments as an index of paleclimate/paleoenvironment [J]. *Advance in Earth Science*, 26(8): 805–810.]

赵锦慧 , 王 丹 , 樊宝生 , 等 . 2004. 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* , 33(5): 495–500. [Zhao J H, Wang D, Fan B S, et al. 2004. Geochemical characteristics of the loess deposit at Yan’an and its implication to changes of East Asia summer monsoon during the past 130 ka [J]. *Geochimica*, 33(5): 495–500.]

Gallet S, Jahn B M, Masayuki T. 1996. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China and paleoclimatic implications [J]. *Chemical Geology*, 133: 67–88.

Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, et al. 2010. Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 29: 3317–3326.

Liu L W, Chen J, Wang H T, et al. 2001. A chemical index of weathering without effect of wind sorting: Fe/Mg ratios in the acid-insoluble phases of loess deposits [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(16): 1384 –1387.

Nesbitt H W, Yong G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 299: 715–717.

Yang S L, Li C X, Yang D Y, et al. 2004. Chemical weathering of the loess deposits in the lower Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications [J]. *Quaternary International*, 117: 27–34.

Yang S L, Ding F, Ding Z L. 2006. Pleistocene chemical weathering history of Asian arid and semi-arid regions recorded in loess deposits of China and Tajikistan [J]. *Geochimical et Cosmochimica Acta*, 70: 1695–1709.