

最近 2.5 Ma 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*

陈 骏^① 安芷生^② 刘连文^① 季峻峰^① 杨杰东^① 陈 曦^①

(^①南京大学表生地球化学研究所, 成矿作用国家重点实验室, 南京 210093; ^②中国科学院西安黄土
与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘要 系统地分析了陕西洛川黄土-古土壤剖面中酸不溶相的主要元素, 微量元素和 Sr 同位素组成, 发现一些具有特征的地球化学参数(如化学风化指数 CIA, Na/K, Rb/Sr 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 在剖面中呈规律性的分布和演化. 研究表明来源于亚洲内陆广大区域的黄土粉尘与上部陆壳相比明显地具有经受过 Na, Ca 化学风化的组成特点; 2.5 Ma 以来黄土源区的化学风化呈逐步减弱的趋势, 并与同一时期全球冰量逐步增长的趋势相吻合; 因此第四纪以来亚洲内陆地区的干旱化现象可能是全球气候变化的区域响应.

关键词 黄土源区 大陆风化 酸溶实验 干旱化 气候变冷

中国黄土是一种典型的第四纪大陆风成沉积物, 保存了距今约 2.5 Ma 连续的风尘堆积. 黄土高原的风尘起源于亚洲内陆^[1], 表现为大陆沉积物或大陆沉积岩的组成特点, 被认为代表了上部陆壳的平均化学成分^[2,3]. 因此, 我国黄土中粉尘的组成演化应该记录了过去东亚环境的变化, 并且可能反映了亚洲内陆的化学风化和气候变化的历史.

然而, 黄土和古土壤的形成经历了粉尘的产生、搬运、堆积和成壤等一系列复杂的过程, 原始粉尘已不同程度地遭受了后期的风化和改造. 因此, 了解这种风化历程, 评价后期改造的影响, 找出能够代表原始粉尘特征的信息是进行风尘演化历史研究的关键. 近年来, 已有不少的研究探讨了粉尘的源区风化和黄土高原经受的化学风化^[4-6], 发现黄土堆积以后经历的化学风化相对较弱, 表现为碳酸盐物质的淋滤和淀积, 而硅酸盐物质尚未受到明显的破坏改造. 这表明黄土和古土壤中去掉碳酸盐以后的剩余部分(酸不溶相)代表了原始粉尘中的稳定组分, 具有示踪源区的潜力^[7]. 本文系统地研究了洛川剖面 2.5 Ma 以来 38 层黄土和古土壤中酸不溶物的化学组成, 旨在: 1) 了解黄土物质与上部陆壳物质间的关系; 2) 研究黄土物质经历的化学风化过程; 3) 探讨用黄土高原粉尘化学组成演化示踪大陆风化和古气候变化的可能性.

1 样品采集加工与分析

样品采自陕西省洛川县城南黑木沟剖面(35°45' N, 109°25' E). 该剖面厚约 138 m, 由连续互层的 38 层黄土和古土壤构成, 从上往下可划分为晚更新世马兰黄土(L₁), 中更新世离石黄

2000-03-20 收稿, 2000-09-06 收修改稿

*国家重点基础研究专项经费(批准号: G1999043400), 国家杰出青年科学基金(批准号: 49725307)和教育博士点基金资助项目

土(S₁-L₁₅)和早更新世午城黄土(WS₁-WL₄)。每层黄土和古土壤层均取 1~3 个代表性样品进行分析。

黄土和古土壤样品经风干、剔除动植物碎片后进行酸溶实验,其方法是:在 105℃条件下烘干后,准确称取 8.000 g,放入 100 mL 烧杯中,加入 40 mL mol/L 醋酸(HAc)溶液,在室温下反应 2 h,然后再加入 40 mL mol/L HAc 溶液,继续反应 4 h,其间不断搅动。反应结束后,用离心法将酸溶物和酸不溶物分离。酸不溶物用去离子水洗涤、离心分离两次,最后在 105℃条件下烘干,称重,计算淋溶率,并在玛瑙研钵中磨至 200 目备用。已有的实验表明^[8],1 mol/L HAc 溶液可以完全溶解碳酸盐物质,而对硅酸盐等非碳酸盐物质的影响很小。因此,黄土和古土壤中的酸不溶物可视为去除碳酸盐以后的残余物。

酸不溶物经烘干研磨后,在南京大学现代分析中心 VF-320 型荧光光谱仪上测量主要元素和微量元素。测试结果经标样控制和对照实验,得出相对标准偏差为:对微量元素和 P, Mn 小于 5%,对其余常量元素小于 2%。酸不溶物的 Sr 同位素比值在南京大学现代分析中心 VG354 表面热电离同位素质谱仪上测定,标准化值为 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$,所用标样 NBS987 的测定值为: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.71034 \pm 4$ 。

2 分析结果

黄土和古土壤酸不溶物的主要元素和微量元素部分分析结果列在表 1 和表 2 中。和上部陆壳(UCC)平均化学成分^[9]的对比表明,酸不溶物中绝大多数主要元素的分布特征与 UCC 十分相似(如图 1),其中 Si, Al, Fe, K, Mg, Mn 等元素的平均含量几乎和 UCC 相同,且变化范围十分狭窄。反映了黄土物质与广大的上部陆壳之间的成因联系。

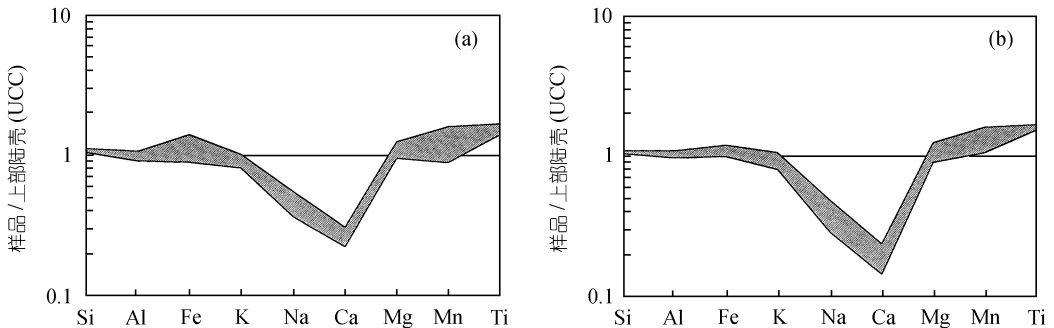


图 1 洛川剖面黄土(a)和古土壤(b)酸不溶相中主要元素的 UCC 标准化值分布图
阴影部分代表分布范围

值得注意的是,Na, Ca 含量与 UCC 相比具有明显的亏损特征。酸不溶物中 Na 的标准化值变化范围为 0.29~0.55, Ca 的标准化值为 0.14~0.30(图 1)。Na, Ca 明显偏离上部陆壳平均含量表明黄土沉积物可能遭受了大陆化学风化。

酸不溶物中微量元素的分布也和 UCC 特征相似。从图 2 中可以看出,不同时代的黄土和古土壤的酸不溶物中,除 Sr 而外绝大多数微量元素的含量均落在上部陆壳平均成分线附近。由于 Sr 与 Ca 地球化学性质相似,黄土沉积物中 Sr 的亏损进一步证明了古风尘曾经遭受了 Na, Ca 化学风化的特点。

表 1 陕西洛川黄土沉积物酸不溶相中主要元素含量^{a)}

样品号	层位与岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ △	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	总和
93L50	L1黄土	68.19	13.64	4.58	2.62	2.03	1.22	2.12	0.05	0.15	0.71	4.43	99.74
93L821	S1古土壤	65.99	14.66	5.19	2.83	1.69	0.90	2.06	0.07	0.12	0.77	5.49	99.77
93L1180	L2黄土	67.34	14.06	4.56	3.00	1.90	1.12	2.21	0.06	0.14	0.79	4.59	99.77
93L1539	S2古土壤	63.87	15.51	5.36	3.14	1.43	0.76	2.33	0.08	0.10	0.78	6.61	99.97
93L1880	L3黄土	67.58	13.99	4.61	3.04	1.81	1.10	2.21	0.06	0.16	0.72	4.45	99.73
93L2101	S3古土壤	65.36	14.56	4.92	2.99	1.49	0.94	2.14	0.08	0.11	0.76	6.72	100.07
93L2360	L4黄土	67.68	13.73	4.39	2.95	1.81	1.04	2.16	0.06	0.14	0.73	4.78	99.47
93L2739	S4古土壤	65.88	14.37	4.70	3.04	1.56	0.86	1.92	0.08	0.11	0.76	5.79	99.07
93L3060	L5黄土	66.97	14.28	4.70	3.04	1.80	1.05	2.27	0.07	0.16	0.73	4.86	99.93
93L3421	S5古土壤	65.33	15.08	5.27	3.35	1.28	0.57	1.95	0.09	0.09	0.76	6.02	99.79
93L4100	L6黄土	67.45	14.22	4.66	3.08	1.76	1.01	2.27	0.07	0.15	0.72	4.74	100.13
93L4420	S6古土壤	65.02	15.10	5.13	3.15	1.29	0.75	2.21	0.09	0.11	0.74	5.69	99.28
93L4960	L8黄土	66.12	14.42	4.74	3.08	1.55	1.10	2.28	0.08	0.18	0.70	5.42	99.67
93L5161	S8古土壤	65.12	14.78	4.98	3.32	1.45	0.79	2.10	0.08	0.12	0.73	5.94	99.41
93L5460	L9黄土	67.69	13.44	4.42	2.96	1.81	1.03	2.09	0.06	0.17	0.69	5.03	99.39
93L6237	S9古土壤	64.57	15.09	5.25	3.34	1.53	0.77	2.30	0.09	0.09	0.76	6.27	100.06
93L6365	L10黄土	65.60	14.46	4.87	3.09	1.60	1.05	2.27	0.07	0.17	0.74	5.47	99.39
93L6385	S10古土壤	64.28	14.99	5.33	3.24	1.38	0.89	2.43	0.09	0.13	0.76	6.20	99.72
93L7170	L13黄土	67.92	13.78	4.48	3.00	1.67	0.91	2.20	0.07	0.13	0.73	5.21	100.10
93L7413	S13古土壤	65.68	14.70	5.04	3.26	1.31	0.77	2.16	0.09	0.11	0.76	5.64	99.52
93L7870	L15黄土	69.47	13.14	4.18	2.84	1.81	0.94	1.99	0.05	0.14	0.67	4.49	99.72
93L8826	WS1古土壤	63.92	15.48	5.54	3.32	1.26	0.95	2.60	0.09	0.13	0.77	5.75	99.81
93L9385	WL1黄土	65.22	14.58	5.13	3.12	1.45	0.96	2.43	0.07	0.14	0.75	5.90	99.75
93L10963	WS3古土壤	63.20	14.85	5.29	3.17	1.03	0.91	2.35	0.08	0.12	0.75	7.56	99.31
93L11755	WL3黄土	65.10	14.16	4.75	3.05	1.43	0.88	2.38	0.08	0.14	0.76	6.74	99.47
上部陆壳 ^[9]		66.00	15.20	5.00	3.40	3.90	4.20	2.20	0.06	0.50			
陆源页岩 ^[9]		62.80	18.90	7.22	3.70	1.20	1.30	2.20	0.11	1.00	0.16	6.00	

a) 仅列出部分样品的分析结果, 带△的样品全铁含量以 Fe₂O₃表示, 数据单位为%

表 2 陕西洛川黄土沉积物酸不溶相中微量元素含量($\times 10^{-6}$)^{a)}

样品号	层位与岩性	U	Th	Y	Zr	Ga	Rb	Sr	Ba	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V
93L395	L1黄土	3.8	14.7	26.7	240	18	119	138	440	29	82	15	41	47	94
93L821	S1古土壤	2.5	11.4	29.6	251	20	122	121	436	26	79	14	36	71	93
93L1180	L2黄土	5.7	12.4	23.9	265	17	113	142	426	24	80	14	33	84	92
93L1539	S2古土壤	3.3	13.3	30.1	265	16	113	124	427	30	81	13	40	75	95
93L1880	L3黄土	2.6	10.8	22.5	246	19	113	141	402	22	74	15	35	42	94
93L2101	S3古土壤	2.5	15.4	26.0	251	19	120	119	541	27	76	15	41	82	93
93L2360	L4黄土	2.9	16.2	23.0	240	17	114	132	429	24	82	14	37	75	95
93L2739	S4古土壤	2.5	13.9	27.2	238	18	128	118	448	32	78	16	41	60	100
93L3060	L5黄土	2.4	17.3	25.9	243	18	116	130	425	31	87	16	33	15	92
93L3421	S5古土壤	1.2	15.4	31.4	234	20	137	103	458	28	89	16	41	48	98
93L4100	L6黄土	2.6	15.3	24.4	247	16	112	133	389	22	77	15	34	38	93
93L4420	S6古土壤	3.4	11.0	28.3	246	17	124	116	414	28	79	16	39	48	103
93L4960	L8黄土	2.0	13.1	23.4	244	20	117	126	414	30	80	15	40	57	92
93L5161	S8古土壤	3.5	16.3	28.0	241	18	126	117	449	27	83	15	40	56	96
93L5460	L9黄土	2.5	10.5	23.6	259	16	107	135	411	19	70	12	33	54	90
93L6237	S9古土壤	4.2	11.5	28.4	237	20	132	121	437	27	90	17	43	53	102
93L6365	L10黄土	4.7	12.1	24.8	251	18	118	126	655	27	79	15	39	58	98
93L6385	S10古土壤	2.7	15.9	23.5	235	20	126	121	429	28	89	15	41	61	101
93L7170	L13黄土	3.9	13.2	24.8	230	17	127	116	446	26	90	17	43	43	102
93L7413	S13古土壤	3.0	14.3	27.7	228	20	129	109	715	33	89	18	44	62	107
93L7870	L15黄土	2.2	11.1	22.2	275	17	102	129	388	18	66	12	31	64	78
93L8826	WS1古土壤	2.1	12.3	23.8	234	16	120	110	415	34	77	17	41	56	98
93L9385	WL1黄土	3.7	14.2	24.6	243	20	115	116	411	29	79	16	42	67	100
93L10963	WS3古土壤	5.2	14.7	23.6	234	22	122	98	418	31	84	17	41	43	109
93L11755	WL3黄土	3.4	12.6	24.6	235	20	119	118	436	27	83	16	44	48	106
上部陆壳 ^[9]		2.8	10.7	22.0	190	17	112	350	550	25	71	10	20	35	60
陆源页岩 ^[9]		3.1	14.6	27.0	210	20	160	200	650	50	85	23	55	110	150

a) 仅列出部分样品的分析结果

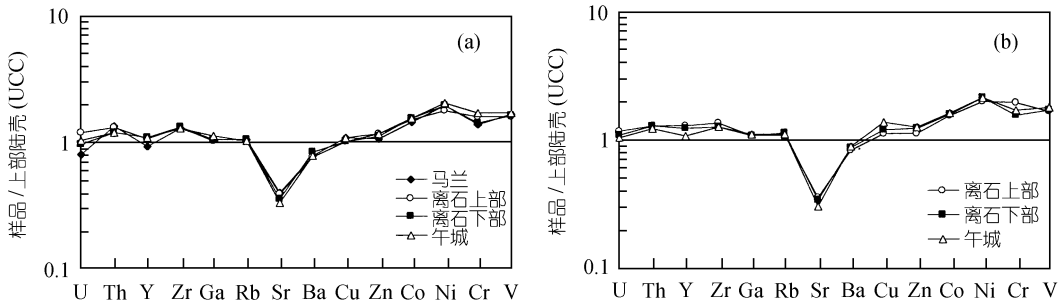


图 2 洛川剖面黄土(a)和古土壤(b)酸不溶相中微量元素平均含量的 UCC 标准化值分布图

人们早就认识到黄土有可能是一种代表了上部陆壳的样品. Taylor 等人^[2]认为黄土去除碳酸盐以后的组成(约等于酸不溶相)与上部陆壳平均成分相似. 文启忠等人^[3]通过对黄土高原马兰黄土的大面积取样分析, 提出可以用黄土的平均化学成分来代表大陆上部地壳的平均化学组成. 实际上, 无论是黄土或古土壤全岩, 还是其中的酸不溶相都和 UCC 有一定的差别(见图 1). 通过对大陆化学风化型式和元素在地球表层系统中活动性顺序的分析可以看出, 黄土中的酸不溶相应代表了暴露在地表并经过了 Na-Ca 化学风化的上部陆壳.

3 结果讨论

3.1 风尘的大陆风化特征

已有的资料表明, 上部陆壳主要由斜长石和钾长石构成(约占矿物总量的 50%以上)^[10]. 同

时, 由于长石属于易风化的不稳定矿物^[11], 因此, 在大气圈、水圈和生物圈的直接作用下, 大陆风化是地球表层系统中最活跃的地质作用之一. 根据质量平衡原理, 长石淋溶实验和矿物稳定性的热力学计算, Nesbitt 等人^[10]提出大陆化学风化趋势预测的 A-CN-K 三角模型图^[10](见图 3).

从该模型中可以看出, 大陆风化的早期阶段以斜长石的风化为标志, 风化产物以伊利石, 蒙脱石和高岭石为特征, 风化趋势线(图 3, 实线箭头)准平行于 A-CN 连线, 典型的大陆化学风化产物-陆源页岩的组成点即位于该风化趋势线上. 同时, 由于河流溶质代表了大陆风化过程中的可溶组分, 其组成点落在风化趋势线的反向延长线上(图 3, 虚线箭头). 当风化趋势点抵达 A-K 连线, 表明风化剖面中斜长石全部消失, 风化作用进入以钾长石和伊利石风化为标志的中级阶段,

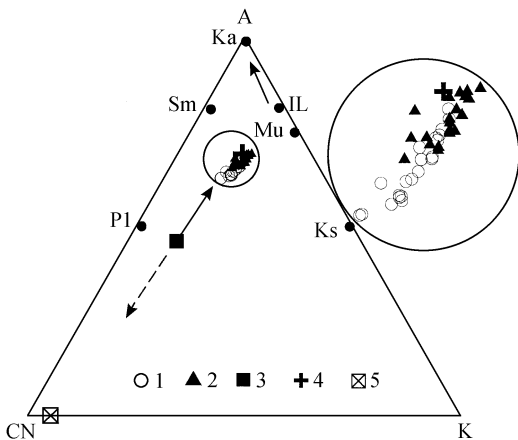


图 3 洛川剖面黄土和古土壤酸不溶物化学组成 A-CN-K 三角图

实线箭头代表大陆化学风化趋势, 虚线箭头代表风化趋势的反向延长线. A = Al₂O₃, CN = CaO + Na₂O, K = K₂O. Ka = 高岭石, Sm = 蒙脱石, IL = 伊利石, Mu = 白云母, Pl = 斜长石, Ks = 钾长石. 1. 黄土酸不溶物, 2. 古土壤酸不溶物, 3. 上部陆壳平均值(据 Taylor 等人^[9]), 4. 陆源页岩(据 Taylor 等人^[9]), 5. 全球河流平均值(据 Nesbitt 等人^[11])

风化趋势线(图 3, 短实线箭头)平行于 A-K 连线. 在大陆风化的晚期阶段, 风化产物的组成落在 A 点附近, 风化产物以高岭石-三水铝石-石英-铁氧化物组合为特征. 这种化学风化趋势模型已经在不同地区和各种母质的风化剖面中得到验证^[10].

将洛川剖面黄土和古土壤酸不溶相分析结果投在 A-CN-K 三角图中(图 3), 可以看出这些组成点集中分布在 UCC 的风化趋势线上. 这一特征一方面反映了黄土和古土壤物质组成的高度均一性, 另一方面也证明了黄土风尘起源于广大的上部陆壳的可能性. 从图 3 中还可看出, 酸不溶物的组成与 UCC 有明显的差别, 而与陆源页岩的平均化学成分相近似, 反映了黄土中的酸不溶相已经历了大陆化学风化, 相当于 UCC 的风化产物. 此外, 这些组成点在风化趋势线上分布的位置表明, 酸不溶物经历的化学风化尚处在大陆风化的早期阶段, 且有古土壤中的酸不溶相经历的化学风化比黄土中的略强的特点.

3.2 风尘源区的化学风化

如果黄土中的酸不溶物代表了大陆风化的产物, 那么, 了解这种风化作用是在黄土高原发生的, 还是在粉尘源区形成的具有重要意义. Gu 等人^[5]曾采用 U, Th, Be 同位素地球化学方法探索了这一问题, 并且认识到粉尘源区化学风化的重要性.

黄土是富含碳酸盐的粉尘堆积物. 在冰期干冷的气候条件下黄土经历了较弱的化学风化, 主要表现为碳酸盐的部分淋失和重新沉淀. 热力学计算表明, 在这种条件下形成的风化溶液有较高的 Na^+/H^+ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{H}^+$ 比值, 这种溶液没有能力使长石、云母等碎屑矿物风化^[10]. 因此, 黄土中的酸不溶相应代表了堆积前粉尘的物质组成特点.

黄土中的古土壤夹层则是在间冰期温湿的气候条件下形成的并经历了稍强的化学风化. 虽然其中的碳酸盐已大部分淋失或淋失殆尽(如 S_5 古土壤), 但是已有的证据表明这种风化仍未引起硅酸盐部分的变化^[6]. 通过比较古土壤和黄土中酸不溶相化学组成可以进一步证明这一点. 方法是假设古土壤是在黄土母质的基础上形成的, 并且选择在风化过程中保持稳定的元素 Al 作参照, 计算其他元素相对于 Al 的变化特征. 结果表明(图 4), 古土壤酸不溶相中各个主要元素和微量元素与黄土相比并未发生明显的亏损和富集, 古土壤中的酸不溶相并未遭受到明显的化学风化, 基本保持了粉尘堆积时的特点.

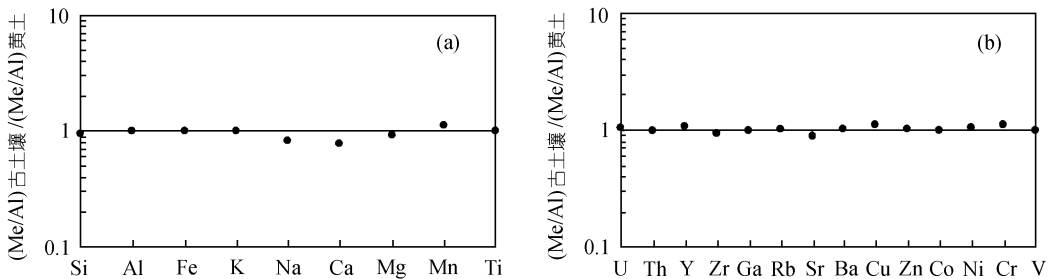


图 4 洛川剖面黄土和古土壤酸不溶物中各元素相对于 Al 的比值变化
反映古土壤与黄土中元素分布特征的相似性. (a)常量元素; (b)微量元素

由此可见, 黄土和古土壤酸不溶相中所保留的大陆风化的信息是在粉尘源区形成的. 由于粉尘源区代表了包括高原以西和以北的广大沙漠地区^[1], 因此, 通过对酸不溶相中化学风化特点的分析, 可以了解这一地区古气候和古环境的变化历史.

3.3 风尘演化的地球化学标志

图 5 中列出了洛川黄土-古土壤剖面中 2.5 Ma 以来 4 种地球化学参数的深度分布, 其中 CIA 值是 Nesbitt 等人^[12]提出的一种化学风化指数, 表示为 $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + K_2O + Na_2O)] \times 100$, 其中 CaO 为硅酸盐矿物中的摩尔含量. 这个参数可以有效地指示样品中长石风化成粘土矿物的程度, 与样品中粘土矿物/长石比值呈正比. 从图 5 中可以看出, 洛川剖面中 CIA 值具有从下至上逐步降低的趋势, 反映了黄土风尘源区化学风化程度在逐步减弱. 在总体降低的趋势上, CIA 值的分布同时呈现冰期、间冰期旋回特征, 表现为冰期 CIA 值低, 化学风化弱; 间冰期 CIA 值高, 化学风化相对较强. 洛川剖面 CIA 值分布曲线的另一个显著特点是在早更新世午城黄土中该参数呈高值、低幅波动, 而在中、晚更新世样品中表现为高频高幅振荡的特点, 指示了早更新世黄土高原及其源区具有相对稳定的气候环境和较强的大陆化学风化特点.

Na/K 比是衡量样品中斜长石风化程度的指标. 由于斜长石的风化速率远大于钾长石, 因此, 风化剖面中 Na/K 比与其风化程度呈反比^[11]. 从图 5 中可以看出, 洛川剖面中 Na/K 比的变

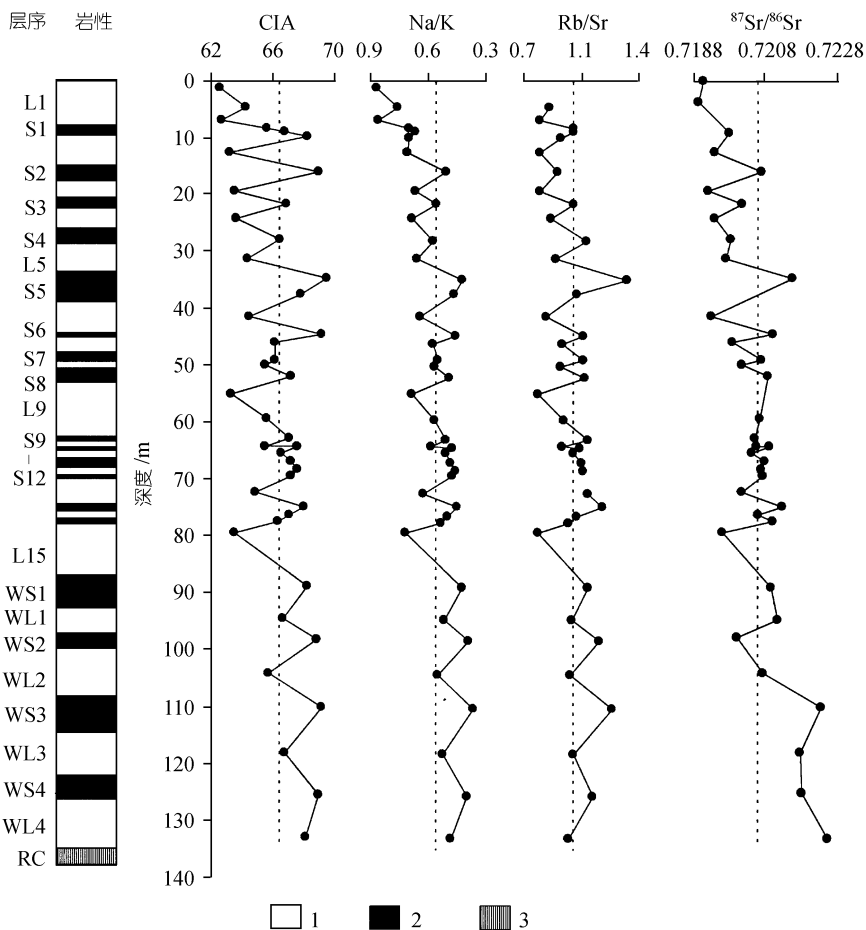


图 5 洛川剖面黄土和古土壤酸不溶相中 CIA, Na/K, Rb/Sr 和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 参数分布图
注意剖面中从下往上的规律性变化, 虚线代表平均值. 1. 黄土; 2. 古土壤; 3. 红粘土

化与 CIA 参数的变化特征相反, 表现为从早到晚呈周期性增高, 同样指示了 2.5 Ma 以来黄土源区大陆风化逐渐降低的特点. 尤其是午城黄土和古土壤中 Na/K 比值显著偏低, 进一步证明早更新世粉尘化学风化程度较高的特征.

Rb/Sr 比是另一个较常用的指示化学风化程度的指标^[13]. 由于 Rb 主要赋存在较稳定的含 K 矿物中, 而 Sr 主要赋存在易风化的含 Ca 的矿物中, 因此, 随着含 Ca 矿物的风化和 Sr 的迁出, 必然造成风化壳 Rb/Sr 比的提高. 图 5 中 Rb/Sr 比曲线的变化形式与 CIA 值的变化特征十分吻合, 同样反映了 2.5 Ma 以来黄土粉尘源区化学风化程度逐渐减弱的现象.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是又一个极好的指示源区地球化学特征的参数. 研究表明, 在沉积盆地和风化剖面中, 硅酸盐沉积物中的 Sr 不与水体发生同位素交换与平衡, 从而能够保留源区或母岩的同位素组成特点, 具有较强的示踪源区的功能^[13]. 因此, 沉积物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化实际上取决于源区矿物组成的变化, 尤其是取决于一类高 Sr 含量低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的含 Ca 矿物(如斜长石, 角闪石)和一类低 Sr 含量高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的含 K 矿物(如云母、伊利石)的相对含量. 很明显, 在化学风化作用增强的条件下, 随着含 Ca 矿物的解体和 Sr 的迁出, 风化残留物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值将逐步提高. 于是, 在母质相同的前提下, 风化产物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值可以指示化学风化程度. 我们对洛川剖面酸不溶物中 Sr 同位素的研究结果(详见另文)表明黄土粉尘源区的化学风化程度确实具有从早至晚逐步降低的特点. 如图 5 所示, 剖面中酸不溶物 Sr 同位素比值在总体上呈下降趋势, 从 2.5 Ma 前的 0.72267 下降至全新世的 0.71907, 下降了 360×10^{-5} . 其中以早更新世黄土和古土壤酸不溶物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为最高(平均 0.72145), 反映了这一时期黄土粉尘源区化学风化作用明显增强.

综上所述, 洛川黄土-古土壤酸不溶物中, 4 种地球化学参数一致地指示了 2.5 Ma 以来黄土风尘源区的化学风化发生了明显的变化. 地壳的化学风化程度是由多种因素控制的, 在母质和地形相似的前提下, 气候尤其是降雨量是决定风化程度的主要因素. 在暖湿的条件下, 植被发育, 矿物的风化速度提高, 化学风化程度增强. 反之则风化程度减弱. 因此, 洛川剖面中这些地球化学参数的变化实际上是对古气候变化的响应, 指示了我国北方和中亚地区在第四纪逐步干旱化的趋势.

十分有意义的是我国黄土高原的这些地球化学记录与深海沉积物的氧同位素组成具有同步变化的特点(见图 6), 反映了我国北方第四纪区域性的气候变化有可能是受全球大陆冰量增加的总趋势控制的, 证明了新生代以来亚洲内陆的逐步干旱化与全球气候系统的耦合性^[14].

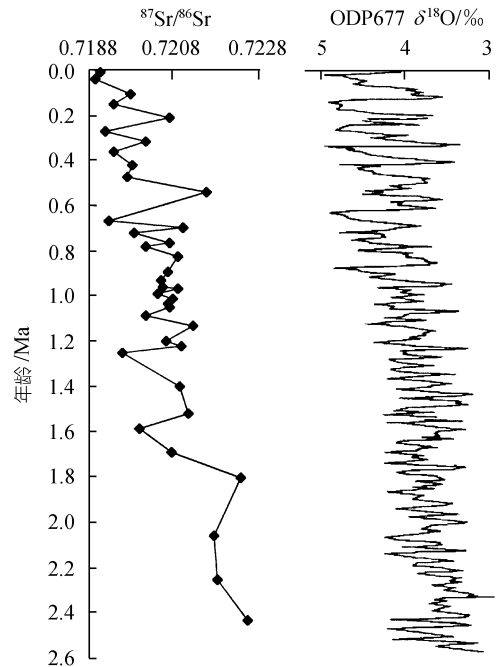


图 6 2.5 Ma 以来黄土和古土壤酸不溶物中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分布曲线与深海有孔虫 $\delta^{18}\text{O}$ 演化曲线^[15]的比较

黄土沉积物年龄按 Kukla 等人^[16]的方法计算. 注意两者从早到晚演化趋势的一致性

4 结论

近年来,有关黄土母质——粉尘化学成分随时间演化的研究均基于全岩化学分析的结果^[17,18]。由于黄土和古土壤不等于原始粉尘,因此全岩分析结果不可避免地包含了粉尘堆积后的成壤信息。本文通过对比黄土和古土壤中耐风化的稳定组分——酸不溶物的元素和同位素组成,探讨粉尘源区地球化学特征,得出如下主要认识:

(1) 黄土和古土壤中去除碳酸盐以后的残余相(酸不溶相)的化学组成与上部陆壳平均成分相比具有一定的差异性,其中在表生环境中极不稳定的元素 Ca, Na, Sr 含量明显地表现为亏损的特点,其他的主要元素和微量元素含量都与上部陆壳相当,反映了黄土高原的风尘与广大的上部陆壳成分之间的成因联系。

(2) 黄土和古土壤酸不溶相中元素的分布特征表明黄土粉尘中的硅酸盐物质已经经历了去 Ca, Na 阶段的化学风化,而且这种风化作用最可能是在风尘源区——亚洲内陆地区发生的,代表了源区大陆风化的程度。

(3) 黄土和古土壤酸不溶相中一系列地球化学参数(化学风化指数 CIA, Na/K, Rb/Sr, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)一致地指示了 2.5 Ma 以来黄土高原风尘源区的化学风化程度向着逐步减弱的方向演化。这一演化趋势与全球冰量逐步增加的趋势十分吻合,反映了在晚新生代全球气候逐步变冷的大趋势控制下,亚洲内陆的古气候向着逐步干旱化的方向发展。

(4) 由于黄土和古土壤中的酸不溶相代表了粉尘中的稳定组分,保留了源区的化学风化特征,因此酸不溶相地球化学研究对于揭示大陆地壳的风化历史,和对于认识全球变化的区域响应过程均具有很大的潜力。

致谢 野外工作中得到中国科学院西安黄土与第四纪地质国家重点实验室鹿化煜博士的帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Zhang X, Zhang G, Zhu G, et al. Elemental tracers for Chinese source dust. *Science in China, Series D*, 1996, 39(5): 512~521
- 2 Taylor S R, McLennan S M, McCulloch M T. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal model ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1983, 47: 1897~1905
- 3 文启忠, 刁桂仪, 潘景瑜, 等. 黄土高原黄土的平均化学成分与地壳克拉克值的类比. *土壤学报*, 1996, 33(3): 225~231
- 4 陈 骏, 季峻峰, 仇 纲, 等. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(6): 531~536
- 5 Gu Z Y, Liu T S, Guo Z T, et al. Weathering histories of Chinese loess deposits based on uranium and thorium series nuclides and cosmogenic ¹⁰Be. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61: 5221~5231
- 6 Han J, Fyfe W S, Longstaffe F T. Climatic implications of the S5 paleosol complex on the Southernmost Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 1998, 50: 21~33
- 7 陈 骏, 王洪涛, 鹿化煜. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其它微量元素的化学淋滤研究. *地质学报*, 1996, 70(1): 61~72
- 8 Quade J, Chivas A R, McCulloch M T. Strontium and carbon isotope tracer and origins of soil carbonate in South Australia and Victoria. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1995, 113: 103~117
- 9 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 1985. 277
- 10 Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 1523~1534

- 11 Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44: 1659~1666
- 12 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299: 715~717
- 13 Dasch E J. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, 33: 1521~1552
- 14 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性. *第四纪研究*, 1998, (3): 194~203
- 15 Shackleton N J, Berger A, Peltier W R. An alternative astronomical calibration of the low Pleistocene time scale based on ODP site 677. *Royal Society of Edinburgh Transactions*, 1990, 81: 251~261
- 16 Kukla G, Heller F, Liu X M, et al. Pleistocene climates in China dated by magnetic susceptibility. *Geology*, 1988, 16: 811~814
- 17 Gallet S, Jahn B M, Lanoê B V, et al. Loess geochemistry and its implications for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 156: 157~172
- 18 顾兆炎, 丁仲礼, 熊尚发, 等. 灵台红粘土和黄土——古土壤序列的地球化学演化. *第四纪研究*, 1999, (4): 357~365