

新疆伊犁盆地昭苏黄土剖面稀土元素特征^①郭利成^{1 3 4}, 陈秀玲^{1 2}, 宋友桂², 贾丽敏¹

(1. 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, 福建师范大学地理科学学院, 福建 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, 陕西 西安 710075; 3. 中国科学院地质与
地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 对晚更新世以来, 伊犁地区与典型黄土高原地区黄土的稀土元素(REE)特征差异研究表明, 伊犁盆地黄土剖面的REE特征不仅在含量上与典型黄土区的相似, 分馏特征也基本相似, 呈斜“L”型的分布模式, 均发生轻、重稀土分异, 分布曲线为负斜线, 表现出中度的Eu负异常, Ce异常不明显, 意味着晚更新世以来, 不同地区黄土的物质来源具有一定的相似性。研究还发现, 伊犁地区与黄土高原地区的稀土元素特征存在细微差异, 昭苏黄土平均的稀土元素总量略高于昭苏古土壤平均值, 与典型黄土区不同, 这可能是由伊犁地区粉尘来源及其沉积环境的差异所致, 且晚更新世以来不同区域黄土剖面REE特征参数三角图解也证实了这点。

关键词: 晚更新世; 黄土剖面; 稀土元素; 黄土高原; 伊犁盆地; 新疆

冰量和冷高压控制下的北半球高纬度地区, 气候变化很可能通过西风带对中高纬度气候波动带来不同程度的影响⁽¹⁻⁶⁾, 但具体的影响机制需要更多的研究成果来揭示⁽⁷⁾。众所周知, 稀土元素(REE)在沉积作用过程中具有独特性⁽⁸⁾, 是沉积物形成和演变的良好指示剂⁽⁹⁻¹¹⁾, 在地质历史记录的提取及其气候环境意义的研究中倍受科学界的关注, 并广泛应用于黄土—古土壤的研究⁽¹²⁻²²⁾, 有效地解释了黄土的物源、成因及其环境意义, 进而推动了古环境重建研究。同时, 西风带控制下的中亚地处欧亚大陆黄土高原与欧洲黄土区之间, 其黄土沉积也是第四纪古环境重建的重要组成部分⁽²³⁻²⁸⁾, 对中亚内陆地区黄土的研究, 促进了青藏高原隆起⁽²⁹⁾、中亚沙漠演化⁽²⁹⁻³⁰⁾以及亚洲内陆干旱化⁽³¹⁻³²⁾的研究进程⁽²⁷⁾。由此可见, 研究中亚地区黄土沉积物的REE, 对揭示西风带与我国西北内陆地区气候变化的关系具有重要意义⁽³³⁾。

近年来, 部分学者对新疆伊犁盆地南缘的黄土进行了成因、分布、粒度、磁学特征等方面的研究^(27-28, 34-39), 初步建立了该地区古环境重建的理论和实践基础。但到目前为止, 在西风带控制下的我国西北内陆地区, 黄土REE特征及其环境意义的研究仍较薄弱, 余素华等⁽⁴⁰⁾初步分析了新疆地区第四

纪黄土稀土元素的地球化学特征及其分布模式与风尘堆积的相关性, 而当时样品量少(总计30个样品), 分析方法为仪器中子活化法(INAA), 没有详细探讨大气环流对该地区黄土堆积过程中古土壤和黄土的稀土元素特征差异。基于此, 本文选择新疆伊犁盆地黄土剖面, 利用微波消解ICP-MS质谱仪测试法进行REE含量测试, 分析其特征, 且与同期中国典型黄土区剖面的黄土—古土壤沉积段进行对比, 初步探讨了西风带控制下的伊犁黄土REE特征及其地球化学意义, 为揭示西风带对我国西北内陆地区气候变化的影响机制奠定理论基础。

1 研究区与剖面概况

伊犁盆地(78°10′~84°50′E, 42°30′~44°35′N)地处中亚内陆腹地, 其东部属中国新疆伊犁地区, 西部属哈萨克斯坦共和国。伊犁盆地在地质构造上系中国天山纬向构造带西段的一个开口向西的喇叭形中生代断陷盆地, 总体地势东高西低, 呈三山夹两盆的地貌格局, 分布有第四纪以来各类型陆相松散沉积物, 西侧为哈萨克斯坦的戈壁沙漠区(图1)。伊犁盆地属于大陆性中温带气候, 冬季为蒙古高压控制, 受北支西风气流影响; 夏季受印度热低压影响,

① 收稿日期: 2012-09-13; 修订日期: 2013-05-07
基金项目: 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(SKLLQG1103, SKLLQG1113); 国家自然科学基金项目(41172166)
作者简介: 郭利成(1988-), 男, 在读硕士, 主要从事第四纪地质环境研究。E-mail: guolicheng05@126.com
通讯作者: 陈秀玲。E-mail: xiulingchen@163.com

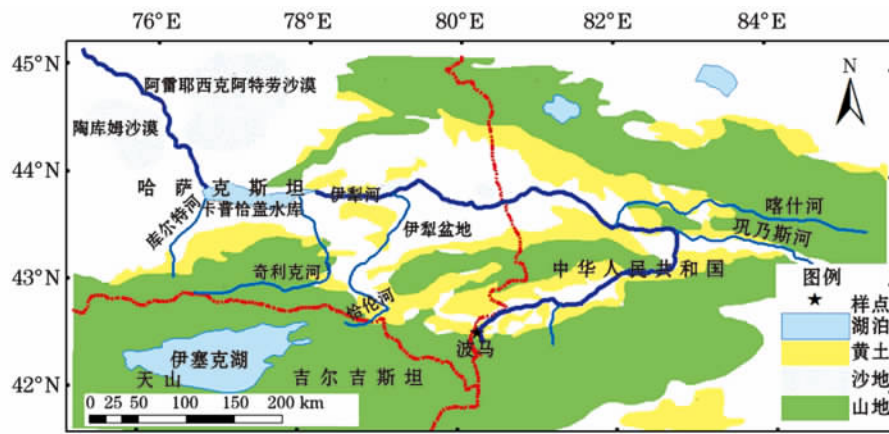


图1 采样点位置及伊犁地区地理环境状况(略改自文献[26])

Fig. 1 Distribution of sampling sites and the geographical environment of the Ili Basin

为南支西风控制,故高空一年四季均盛行西风^[30]。年平均气温 $2.6 \sim 10.4^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $200 \sim 550\text{ mm}$,受盆地开口向西和东、南、北三面环山的特殊地形影响,区内降水空间分布不均,东多西少,山区多平原少。以荒漠草原到干草原的地带性植被为主,地带性土壤主要为灰钙土和栗钙土。

新疆伊犁盆地昭苏黄土剖面 (42.69°N , 80.25°E , 1875 m) 位于昭苏县西南 90 km 的 74 团场(波马)地处特克斯河的河流阶地上(图1)。剖面总厚度 6.9 m ,由一组黄土与古土壤层组成,剖面底部为河流砾石层,根据 ^{14}C 和光释光测年外推,黄土底部年龄约为 82 ka BP ^[27],主要为末次冰期以来的沉积。本文选取 $0 \sim 6.5\text{ m}$ 段黄土—古土壤进行 REE 含量分析,其 6.5 m 处年龄约为 74 ka ^[27],以晚更新世黄土——马兰黄土为主。为了对比伊犁黄土剖面与末次冰期以来中国典型黄土区黄土—古土壤沉积层的 REE 特征异同,本研究收集了陕西省洛川县坡头村黄土—古土壤剖面^[16]中马兰黄土(L1)和剖面第一层古土壤(S1)、武都教场坝黄土剖面^[15]中黄土(S1以上)、武威黄羊镇张家大庄黄土剖面^[17]中 G01(古土壤)和 G02(黄土)、中国黄土高原^[20]东部南北向的 8 个黄土剖面中 L1 和 S1 地层(榆林、乌普、延长、伊川、黄龙、白水、蒲城和渭南),其平均值在本文中代表黄土高原。所收集的数据均来自末次冰期以来的地层,晚更新世以来黄土沉积环境存在一定差异,与新疆伊犁盆地昭苏黄土剖面具有很好的可比性。

2 采样与室内分析

自上而下于新疆伊犁盆地昭苏黄土剖面段的不同层位,以 10 cm 为采样间距,共采集 63 个样品。

室内分析方法为自主设计,称微波消解 ICP-MS 质谱仪测试法,具体过程:样品在常温下自然风干后,去除粗砂、细砾和植物根系等杂质,用玛瑙研钵研磨,过 200 目筛后供 REE 测量;准确称取 0.1000 g 样品于高压溶样罐 Teflon 内罐,加电子级混合酸 ($\text{HNO}_3:\text{HCl}:\text{HF} = 6:2:2$) 10 mL ,放入陶瓷外罐中进行微波消解,取出后加入少量 HClO_4 , 120°C 蒸干至湿盐状,冷却后用去离子水定容于 50 mL 容量瓶中待测;采用美国 X-SERIES II 型 ICP-MS 质谱仪测试待测样品的 REE 含量。整个实验过程均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,所测结果经标样控制(回收率 $90\% \sim 97\%$),且重复测样后相对标准差(relative standard deviation, RSD)均小于 3% ,所用水为电阻率达 $18.2\text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ 的去离子水,塑料器皿或 Teflon 器皿使用前均在 $(5+1)\text{ HNO}_3$ 中充分浸泡 24 h ,用去离子水洗净。

3 数据计算

3.1 REE 常用指标与异常特征值计算

REE 的几个常用指标计算: ΣREE 稀土元素总量(未包括元素 Y); LREE (从 La 到 Eu),轻稀土元素总量; HREE (从 Gd 到 Lu),重稀土元素总量; LREE/HREE 轻重稀土元素的比值,指示稀土元素分异程度; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 均为各稀土元素经球粒陨石标准化后的丰度值比,反映轻稀土与重稀土的分异程度; $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 则分别指示轻稀土和重稀土内部分异的状况。

REE 异常特征: REE 一般具有 $+3$ 价,但氧化环境中, Ce^{3+} 易被氧化为 Ce^{4+} ; 还原环境中, Eu^{3+} 易被还原为 Eu^{2+} ,导致在岩石形成和演化过程中 Ce、Eu

出现异常(亏损或富集)的现象。 δEu 和 δCe 值的计算公式⁽⁷⁾如下:

$$\delta\text{Eu} = \frac{\text{Eu}_N}{\text{Eu}^*} = \frac{\text{Eu}_N}{\sqrt{\text{Sm}_N \times \text{Gd}_N}}$$

$$\delta\text{Ce} = \frac{\text{Ce}_N}{\text{Ce}^*} = \frac{\text{Ce}_N}{\sqrt{\text{La}_N \times \text{Pr}_N}}$$

其中,如果 δCe 或 δEu 值大于 1 表示 Ce 或 Eu 出现正异常,元素富集,反之是负异常,元素亏损⁽⁷⁾。

3.2 REE 分布模式

已有研究表明⁽⁴¹⁾,当样品采用等离子体光谱分析时,鉴于该方法具有高灵敏度等特点,建议采用 Masuda 等⁽⁴²⁾提出的 6 个 Leedy 球粒陨石平均值(表 1)。该球粒陨石数据是采用质谱同位素稀释法测定,且以同种离子源的方法测得的数据进行标准化,所得 REE 分布模式更加准确。本文样品均经过 ICP-MS 质谱仪测得其 REE 含量,且所收集的晚更新世以来的黄土剖面中 REE 含量测定方法为离子体发射光谱法、电感耦合等离子体质谱法等高灵敏度微量元素测试方法,为了更准确地比较 REE 分布模式,本文对涉及的剖面段数据均采用表 1 的球粒陨石标准值进行标准化处理,应用 Origin 8.5 软件做出各剖面段的 REE 分布模式。

表 1 球粒陨石标准值

Tab. 1 Standard parameters of chondrite /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

REE	标准值	REE	标准值
La	0.315	Tb	0.047 3
Ce	0.813	Dy	0.325
Pr	0.115	Ho	0.072 3
Nd	0.597	Er	0.213
Sm	0.192	Tm	0.033 3
Eu	0.072 2	Yb	0.208
Gd	0.259	Lu	0.032 3

4 结果

4.1 伊犁盆地和典型黄土区黄土剖面段中 REE 平均含量

由表 2 可知 ZSP(昭苏剖面段平均)、ZSS(昭苏古土壤平均)、ZSL(昭苏黄土平均)的 ΣREE 分别为 $173.34 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $170.68 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $174.86 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,很明显 ZSL 的 ΣREE 高于 ZSS,且 ZSP、ZSS、ZSL 中 LREE 均显著高于 HREE,占其 ΣREE 的比例分别为 89.37%、89.42%、89.34%,即 LREE 相对富集, HREE 相对亏损。ZSP、ZSS、ZSL 中 La 到 Lu 各元素平均值均接近,但 ZSP 中 La、Ce、Nd 占其 ΣREE 百分比分别为 21.13%、42.23%、16.62%,为含量最多的 3 个元素,且 ZSL 中各元素平均值均略高于 ZSS。

表 2 晚更新世以来不同区域黄土剖面 REE 平均含量

Tab. 2 Contents of rare earth elements in loess profiles in different areas since the Epipleistocene /($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

样品	昭苏			武都	武威			黄土高原			洛川		
	ZSP	ZSS	ZSL	WDL [*]	WWP	WWS [*]	WWL [*]	CLPP	CLPS	CLPL	LCP	LCS	LCL
La	36.63	36.33	36.79	39.70	39.10	40.70	37.50	36.35	37.00	35.70	37.62	39.80	35.43
Ce	73.20	71.89	73.95	78.30	60.35	52.50	68.20	72.70	74.00	71.40	66.63	70.90	62.37
Pr	8.69	8.57	8.76	8.18	8.54	9.04	8.04	8.30	8.39	8.21	8.43	8.76	8.10
Nd	28.80	28.35	29.06	34.50	31.90	34.50	29.30	31.90	32.80	31.00	32.25	34.30	30.20
Sm	6.26	6.15	6.32	5.97	5.99	6.07	5.90	6.53	6.66	6.39	6.12	6.43	5.80
Eu	1.34	1.32	1.35	1.10	1.40	1.33	1.46	1.35	1.38	1.31	1.23	1.30	1.15
Gd	5.90	5.79	5.96	4.77	4.88	5.04	4.71	6.11	6.31	5.90	4.90	4.43	5.37
Tb	0.90	0.89	0.91	0.82	0.86	0.91	0.80	0.90	0.92	0.87	0.87	0.93	0.82
Dy	4.69	4.59	4.75	4.93	5.65	5.58	5.71	5.33	5.48	5.17	4.83	5.13	4.53
Ho	0.92	0.90	0.93	1.06	1.14	1.16	1.12	1.08	1.10	1.06	1.03	1.09	0.96
Er	2.64	2.58	2.67	2.74	3.13	3.20	3.05	3.42	3.28	3.56	2.50	2.35	2.65
Tm	0.39	0.38	0.39	0.38	0.45	0.44	0.46	0.47	0.48	0.45	0.45	0.46	0.44
Yb	2.60	2.54	2.64	2.29	2.88	2.88	2.88	3.14	3.28	3.00	2.71	2.89	2.52
Lu	0.39	0.38	0.39	0.38	0.45	0.45	0.44	0.46	0.48	0.44	0.42	0.44	0.39
LREE	154.91	152.63	156.23	167.75	147.27	144.14	150.40	157.12	160.23	154.01	152.27	161.49	143.06
HREE	18.42	18.05	18.64	17.37	19.42	19.66	19.17	20.89	21.33	20.45	17.71	17.74	17.68
ΣREE	173.34	170.68	174.86	185.12	166.69	163.80	169.57	178.01	181.56	174.46	169.98	179.23	160.74

WDL: 武都全剖面黄土平均; WWS、WWL: 武威古土壤平均、武威黄土平均。

对比晚更新世以来各剖面数据可知,ZSL 的 ΣREE 、HREE、LREE 略高于 ZSS,与武威黄土剖面段表现出一致规律,但 LCL(洛川黄土平均)和 CLPL(中国黄土高原黄土平均)的 ΣREE 、HREE、LREE 均分别略高于 LCS(洛川古土壤平均)和 CLPS(中国黄土高原古土壤平均);而古土壤的 La 到 Lu 各元素平均值差和黄土的差异很复杂,ZSL 中 REE 分量平均值均略高于 ZSS,LCS 和 CLPS 的 La 到 Sm 各元素平均值略高于 LCL 和 CLPL,其余地区黄土剖面段古土壤与黄土 REE 分量平均值差异表现出复杂变化;ZSP 的 ΣREE 高于 WWP(武威剖面段平均)和 LCP(洛川剖面段平均),但低于 CLPP(中国黄土高原 8 个剖面段平均),由西到东(新疆、甘肃、陕西) ΣREE 先略微降低后升高,即晚更新世以来总体表现出上升趋势(图 2)。然而,昭苏、武都、武威、黄土高原、洛川剖面段 LREE 相对富集,HREE 相对亏损,La、Ce、Nd 为含量最多的 3 个元素。

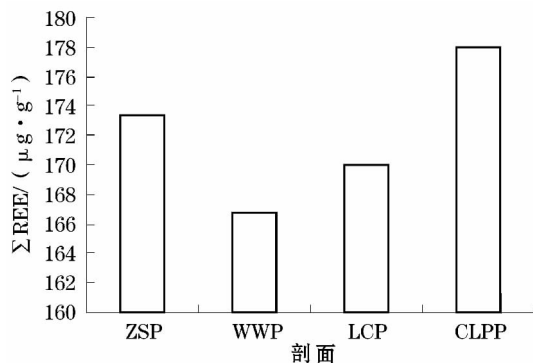


图 2 晚更新世以来不同区域黄土剖面 REE 总量的趋势分布

Fig. 2 Trend distribution of the total contents of rare earth elements in loess profiles in different areas since the Epileistocene

4.2 伊犁盆地和典型黄土区黄土剖面中 REE 分布模式

基于本文所涉及剖面段的 REE 测试方法,方便在统一的模式下比较晚更新世以来黄土沉积过程中 REE 的总体特征,本文采用表 1 中的球粒陨石 REE 平均值除样品中对应的 REE 平均值,获得晚更新世以来不同区域黄土剖面(图 3c)、古土壤(图 3a)和黄土(图 3b) REE 分布模式。从图 3 可以看出,晚更新世以来不同区域黄土剖面、古土壤和黄土的 REE 分布模式有着很好的相似性,各曲线几乎平行,各稀土元素的分馏特征基本相似,呈

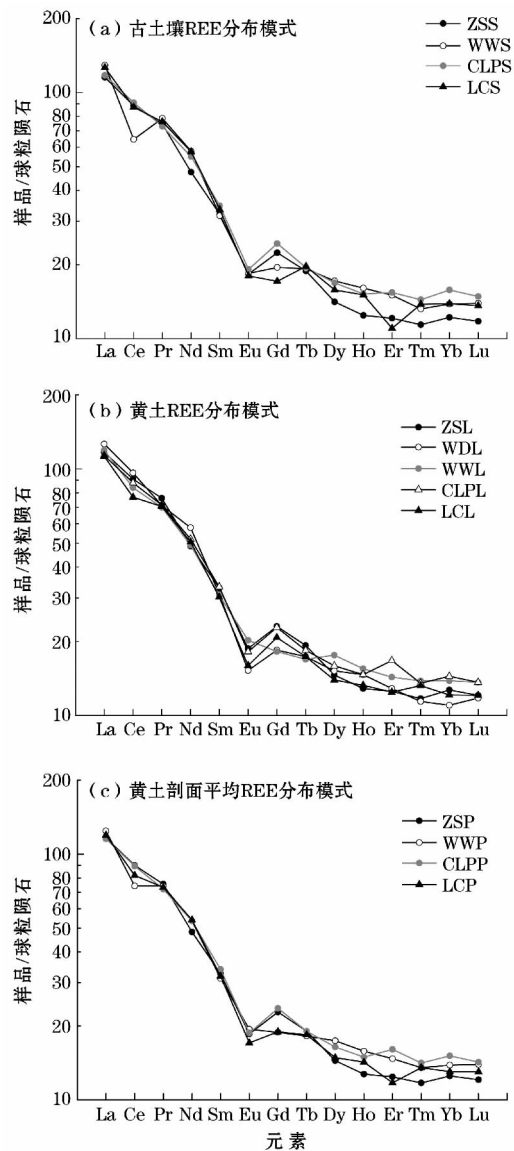


图 3 晚更新世以来不同区域黄土剖面 REE 分布模式

Fig. 3 Distribution patterns of rare earth elements in loess profiles in different areas since the Epileistocene

斜“L”型,分布曲线为负斜线,LREE 相对富集,HREE 相对亏损,La—Eu 曲线较陡,Gd—Lu 曲线平缓,Eu 表现出中度的负异常,Ce 异常不明显,相对于标准球粒陨石,发现 La、Ce、Pr 较高,是 LREE 相对富集的主要贡献者。

4.3 伊犁盆地和典型黄土区黄土剖面中 REE 特征

通过表 1 中的球粒陨石标准化与 REE 常用指标及异常特征值计算,结果如表 3 所示。ZSP、ZSS、ZSL 的 LREE/HREE、Eu/Sm、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 、 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 均基本一致,与晚更新世以来不同区域黄土剖面、古土壤和黄土接近,但 ZSL 的 LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 显著低于 WDL。其中,轻、重稀土分异导致 LREE 富集、LREE/HREE、

表 3 晚更新世以来不同区域黄土剖面 REE 特征值

Tab. 3 Eigenvalues of rare earth elements in loess profiles in different areas since the Epipleistocene

REE 特征值	ZSP	ZSS	ZSL	WDL	WWP	WWS	WWL	CLPP	CLPS	CLPL	LCP	LCS	LCL
LREE/HREE	8.41	8.45	8.38	9.66	7.59	7.33	7.85	7.52	7.51	7.53	8.60	9.10	8.09
Eu/Sm	0.21	0.21	0.21	0.18	0.23	0.22	0.25	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20
(La/Yb) _N	9.30	9.44	9.20	11.45	8.96	9.33	8.60	7.64	7.45	7.86	9.17	9.09	9.28
(La/Lu) _N	9.63	9.80	9.67	10.71	8.91	9.27	8.74	8.10	7.90	8.32	9.18	9.28	9.32
(La/Sm) _N	3.57	3.60	3.55	4.05	3.98	4.09	3.87	3.39	3.39	3.41	3.75	3.77	3.72
(Gd/Yb) _N	1.82	1.83	1.81	1.67	1.36	1.41	1.31	1.56	1.54	1.58	1.45	1.23	1.71
δEu	0.68	0.68	0.68	0.64	0.80	0.74	0.86	0.66	0.66	0.66	0.69	0.75	0.64
δCe	0.96	0.95	0.96	1.02	0.77	0.64	0.92	0.98	0.98	0.98	0.88	0.89	0.86

(La/Yb)_N、(La/Lu)_N 比值较大,而 (La/Sm)_N 高于 (Gd/Yb)_N,表明轻稀土间较重稀土间的分异强。ZSP、ZSS、ZSL 的 δEu 均为 0.68,表现中度负异常,其中 ZSL 的 δEu 和 WDL、CLPL、LCL 相近,但均略低于 WWL; ZSS 和 CLPS 的 δEu 也略低于 WWS、LCS。昭苏、武都、武威、黄土高原、洛川的剖面段,黄土和古土壤的 δCe 基本一致,接近 1,基本上没有出现异常。δEu、δCe 与图 3 所示,晚更新世以来,不同区域黄土剖面 REE 分布模式所反映的 Eu 表现出中度的负异常,Ce 异常不明显,规律一致。

5 讨论

5.1 伊犁盆地和晚更新世以来典型黄土区黄土剖面 REE 特征及其环境意义

晚更新世以来,ZSP、ZSS、ZSL 的 REE 含量、分配模式以及特征参数与同期中国典型黄土区基本相似,均发生轻、重稀土分异,LREE 富集,LREE/HREE、(La/Yb)_N、(La/Lu)_N 比值较大,(La/Sm)_N 高于 (Gd/Yb)_N,轻稀土间的分异较重稀土间强, Eu/Sm 接近沉降大气悬浮物^[43],分布模式呈斜“L”型,分馏特征基本相似,分布曲线为负斜线,Eu 表现出中度负异常,Ce 异常不明显,意味着晚更新世以来不同地区黄土的物质来源具有一定的相似性,即源区物质在大气高度混合后沉降^[17]。

但进一步分析数据发现,ΣREE 在同一剖面的古土壤和黄土间存在细微差异,如受西风带控制下的新疆伊犁盆地黄土剖面 ZSL 的 ΣREE 略高于 ZSS,与河西走廊的武威黄土剖面表现出一致性规律,但黄土高原的洛川及其东部地区黄土剖面 LCL 和 CLPL 的 ΣREE 却略高于 LCS 和 CLPS。刁桂仪等^[18]曾对渭南黄土剖面中的稀土元素进行研究后发现,黄土高原黄土剖面中古土壤比黄土层 ΣREE 的表观丰度高,这是由于古土壤层中碳酸盐遭到强

烈淋滤而导致 REE 的相对富集,但李徐生等^[22]对镇江下蜀黄土稀土元素地球化学特征研究表明,成土过程中稀土元素淋失可能导致古土壤层的稀土含量低于黄土层。新疆伊犁黄土剖面中古土壤发育程度均很弱^[28,44],古土壤层中碳酸盐淋失或成土过程中稀土元素淋失难以解释该剖面中黄土层 ΣREE 高于古土壤层。Song 等^[27]对伊犁黄土的磁学性质及其与黄土高原对比发现,伊犁黄土磁化率增强以风速论模式(阿拉斯加或西伯利亚黄土成土模式)为主导,成壤作用产生的细粒超顺磁体对磁化率的贡献非常有限;Liu 等^[45]对末次间冰期以来伊犁塔勒德黄土剖面的磁学性质研究发现,黄土磁化率高于古土壤,黄土颗粒也粗于古土壤,主要与风速论模式和弱的成土作用有关。这就暗示了晚更新世以来,新疆伊犁黄土剖面黄土堆积期以末次冰期为主,东亚冬季风加强,在西风带的控制下,其黄土和古土壤表现出复杂的物理化学变化。基于此,虽然新疆伊犁黄土物质来源和典型黄土区相似,但该剖面黄土层 ΣREE 高于古土壤层,与典型黄土区不同的原因可能是:新疆伊犁黄土剖面位于西北内陆区常年受西风带控制下,晚更新世以来高空环流加强时(黄土堆积期),黄土搬运能力加强,大量指示近源组分的较粗和粗颗粒沉积在该区,高空气流所带来的细粒组分含量相对减少,当环流减弱时(古土壤发育期)细粒组分含量增加,粗粒组分含量减少^[46];同时,伊犁盆地黄土形成于较干冷、化学风化弱的环境^[28],碳酸盐类矿物较多,易与 +3 价的 REE 形成络合物,尤其是 HREE。因此,在古土壤发育期,颗粒较细,相同体积时,表面积大,吸附 REE 强,此时水热条件也相对黄土堆积期好,碳酸盐类矿物淋溶导致 REE 相对富集,但黄土堆积期,近源组分的沉积,带来风化成壤或者碎屑作用形成稀土-碳酸盐络合物,一方面降低了古土壤层 REE 含量,另一方面却增加黄土层 REE 含量,结果很可能引起 ZSL 的

ΣREE 略高于 ZSS。

同时,由西北内陆地区到黄土高原区的黄土剖面中, ΣREE 有增加的趋势(图 2),很可能是西北内陆地区干燥气候条件不利于稀土元素分馏作用,导致黄土剖面 ΣREE 偏低;而东部季风区湿热气候条件下稀土元素可以被活化而进一步分异有关^[6],即黄土堆积过程中,东部季风区由于生物气候环境影响,黏化作用增强,REE 含量相对略高。值得一提的是,ZSL 的 LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 显著低于 WDL,武都黄土剖面受印度季风和东亚季风影响^[13],酸性淋溶作用更强,黏粒吸附更多的轻稀土,而重稀土较轻稀土更易在溶液中形成重碳酸盐和有机络合物,优先被溶解迁移,导致其 LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 偏高, LREE 富集作用更为强烈,武都黄土剖面形成环境较干旱区黄土剖面湿润。因此,REE 的含量和特征对黄土沉积区环境差异也十分敏感。

5.2 新疆伊犁黄土剖面中 REE 特征参数的图解分析

数据的平均值常掩盖了其原始的差异性,为了消除这一差异,Chen 等^[16]分离了样品中相同或相对稳定部分与容易产生变化的可变部分,即利用化学淋溶的方法,通过酸溶和酸不溶相的 REE 特征来分析黄土的源区特征,但由于黄土源区的物质组成是多变的,这一方法失去了其实际的可行性;张虎才^[15]利用 REE 参数的三角图解很好地解释了黄土高原物质来源的组成特征及其发育模式;刘永生等^[47]也利用 REE 参数的三角图解,从干旱、半干旱地区 REE 的分析中提取源区信息。因此,本文欲通过 δEu 、 δCe 、 LREE/HREE 及其平均值差的绝对值构成的三角图,进一步分析晚更新世以来伊犁盆地黄土与典型黄土地区黄土的源区特征差异。

从图 4 可以看出,晚更新世以来伊犁盆地与典型黄土区黄土样品分布在一个狭长的范围内或者一个点内,说明了 δEu 和 δCe 的离散性较小,相对稳定,但 LREE/HREE 与其平均值差的绝对值变化大,且古土壤与黄土之间的 LREE/HREE 和其平均值差的绝对值变化在 WD(武都)和 CLP(中国黄土高原)较大,WW(武威)和 LC(洛川)较小,ZS(昭苏)中有微小变化,其中 LC 位于黄土高原中部,而本文 CLP 位于黄土高原东部,冬夏季风和距离源区远近的差异导致 LREE/HREE 与其平均值差的绝对值变化不同。图 4 很明显地表明了不同黄土区轻重稀土

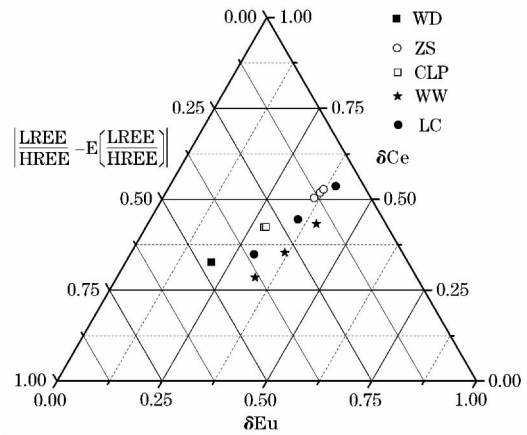


图 4 晚更新世以来不同区域黄土剖面 REE 特征参数三角图解

Fig. 4 The triangle diagram for the characteristic parameters of rare earth elements in loess profiles in different areas since the Epipleistocene

的分异性在各地区存在细微差异,反映了黄土堆积过程中受不同的环境和不同的源区影响,支持了黄土是来自不同源区的物质在大气环流作用下混合均匀的风成沉积物^[13,15],新疆伊犁盆地黄土受近源和远源组分差异及其沉积环境差异的影响,其 REE 含量和特征与同期中国典型黄土区黄土存在细微差异也得到了证实。

6 结论

(1) 晚更新世以来,伊犁昭苏黄土的 REE 含量和分布模式与同期中国典型黄土区黄土剖面接近或类似,说明相同时期不同地区黄土的物质来源具有一定的相似性。

(2) 通过对新疆伊犁黄土和典型黄土区黄土 REE 特征分析发现,新疆伊犁黄土区受西风带控制,晚更新世以来高空环流的不稳定性,导致其黄土和古土壤形成时期近源和远源组分不同,沉积环境也不同,二者综合作用很有可能引起 ZSL 的 ΣREE 略高于 ZSS。

(3) 晚更新世以来,从西北至东部黄土剖面的 ΣREE 有增加趋势,ZSL 的 LREE/HREE 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 显著低于 WDL,说明了黄土沉积环境可能对 REE 的含量和特征产生影响。

(4) δEu 、 δCe 、 LREE/HREE 及其平均值差的绝对值构成的三角图特征,进一步证实了新疆伊犁盆地黄土剖面近源和远源组分的差异及其沉积环境的

差异均会影响 REE 含量和特征,从而造成其与同期中国典型黄土区存在细微的差异。

参考文献(References):

- (1) Anderson P M ,Barnosky C W ,Bartlein P J ,et al. Climatic changes of the last 18 000 years: Observations and model simulations (J). *Science* ,1988 ,241:1 043 -1 052.
- (2) 于革,王苏民. 欧亚大陆湖泊记录和两万年来大气环流变化 (J). *第四纪研究* ,1998 ,18(4):360 -367. (Yu Ge ,Wang Sum-in. Eurasian lake-level records and changes in patterns of atmospheric circulations during the last 20 000 years (J). *Quaternary Sciences* ,1998 ,18(4):360 -367.)
- (3) 丁仲礼,刘东生. 晚更新世东亚古季风变化动力机制的概念模型 (J). *科学通报* ,1998 ,43(2):122 -132. (Ding Zhongli ,Liu Dongsheng. Forcing mechanisms for East-Asia monsoon variations during the late Pleistocene (J). *Chinese Science Bulletin* ,1998 ,43(2):122 -132.)
- (4) 龚道溢,王绍武. 北半球冬季纬向平均环流的结构及对我国气候的影响 (J). *地理科学* 2001 ,21(2):108 -112. (Gong Daoyi ,Wang Shaowu. Structure of the zonal-mean circulation over the northern hemisphere and its impact on climate of China in winter (J). *Scientia Geographica Sinica* 2001 ,21(2):108 -112.)
- (5) 李珊珊,张明军,李忠勤,等. 1960—2009 年中国天山现代冰川末端变化特征 (J). *干旱区研究* ,2013 ,30(2):211 -218. (Li Shanshan ,Zhang Mingjun ,Li Zhongqin ,et al. Variation of glacier terminuses in the Tianshan Mountains ,China ,during the period of 1960 -2009 (J). *Arid Zone Research* 2013 ,30(2):211 -218.)
- (6) 钱莉,方锋,杨永龙,等. 河西走廊东部冰雹的气候特征及天气特征 (J). *干旱区研究* ,2013 ,30(1):50 -55. (Qian Li ,Fang Feng ,Yang Yonglong ,et al. Analysis on hail and weather characteristics in the east Hexi Corridor ,Gansu Province (J). *Arid Zone Research* 2013 ,30(1):50 -55.)
- (7) 屈文军,张小曳,王丹,等. 西风带研究的重要意义 (J). *海洋地质与第四纪地质* ,2004 ,24(1):125 -132. (Qu Wenjun ,Zhang Xiaoye ,Wang Dan ,et al. The important significance of westerly wind study (J). *Marine Geology & Quaternary Geology* ,2004 ,24(1):125 -132.)
- (8) 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. (Zhang Hucai. *Superficial Elemental Geochemistry and Theoretical Principles* (M). Lanzhou: Lanzhou University Press ,1997)
- (9) 王中刚,于学元,赵振华,等. 稀土元素地球化学 (M). 北京: 科学出版社,1989. (Wang Zhonggang ,Yu Xueyuan ,Zhao Zhenhua ,et al. *The Geochemistry of Rare Earth Elements* (M). Beijing: Science Press ,1989.)
- (10) 刘东生. 黄土与环境 (M). 北京: 科学出版社,1985. (Liu Dongsheng. *Loess and Environment* (M). Beijing: Science Press ,1985.)
- (11) Henderson P. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements (J). *Rare Earth Element Geochemistry* ,1984 ,2:1 -32.
- (12) 文启忠,余素华,顾雄飞,等. 黄土中稀土元素的初步探讨 (J). *地球化学* ,1981 ,10(2):151 -157. (Wen Qizhong ,Yu Suhua ,Gu Xiongfei ,et al. A preliminary investigation of REE in loess (J). *Geochimica* ,1981 ,10(2):151 -157.)
- (13) 文启忠,余素华,孙福庆,等. 陕西洛川剖面的稀土元素 (J). *地球化学* ,1984 ,13(2):126 -133. (Wen Qizhong ,Yu Suhua ,Sun Fuqing ,et al. Rare earth elements in Luochuan loess section ,Shaanxi Province (J). *Geochimica* ,1984 ,13(2):126 -133.)
- (14) 吴明清,文启忠,潘景瑜,等. 黄河中游地区马兰黄土的稀土元素 (J). *科学通报* ,1991 ,36(5):366 -369. (Wu Mingqing ,Wen Qizhong ,Pan Jingyu ,et al. Rare earth elements of Malan loess in middle reaches of the Yellow River (J). *Chinese Science Bulletin* ,1991 ,36(5):366 -369.)
- (15) 张虎才. 武都黄土剖面稀土元素研究 (J). *地球化学* ,1996 ,25(6):545 -550. (Zhang Hucai. A study on REE of Wudu loess (J). *Geochimica* ,1996 ,25(6):545 -550.)
- (16) Chen J ,Wang H T ,Lu H Y. Behaviors of REE and other trace elements during pedological weathering-evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Luochuan section in central China (J). *Acta Geologica Sinica* ,1996 ,9(3):290 -302.
- (17) 张虎才. 腾格里沙漠南缘武威黄土稀土元素及黄土沉积模式 (J). *兰州大学学报: 自然科学版* ,1998 ,34(4):157 -164. (Zhang Hucai. The REE of Wuwei Loess at south vicinity of Tengger Desert and a model for loess accumulation (J). *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences* ,1998 ,34(4):157 -164.)
- (18) 刁桂仪,文启忠. 渭南黄土剖面中的稀土元素 (J). *海洋地质与第四纪地质* ,2000 ,20(4):57 -61. (Diao Guiyi ,Wen Qizhong. Rare earth elements in the Weinan loess section (J). *Marine Geology & Quaternary Geology* 2000 ,20(4):57 -61.)
- (19) 曹军骥,张小曳,王丹,等. 晚新生代风尘沉积的稀土元素地球化学特征及其古气候意义 (J). *海洋地质与第四纪地质* ,2001 ,21(1):97 -102. (Cao Junji ,Zhang Xiaoye ,Wang Dan ,et al. REE geochemistry of late Cenozoic eolian sediments and the paleoclimate significance (J). *Marine Geology & Quaternary Geology* ,2001 ,21(1):97 -102.)
- (20) Ding Z L ,Sun J M ,Yang S L ,et al. Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin ,source provenance and paleoclimate change (J). *Geochim Cosmochim Acta* 2001 ,65(6):901 -913.
- (21) 李福春,潘根兴,谢昌仁,等. 南京下蜀黄土—古土壤剖面的不同粒组稀土元素地球化学分布 (J). *第四纪研究* ,2004 ,24(4):477 -478. (Li Fuchun ,Pan Genxing ,Xie Changren ,et al. The geochemical distribution of rare earth elements of different grain groups in Xiashu loess-paleosol section ,Nanjing (J). *Quaternary Sciences* 2004 ,24(4):477 -478.)
- (22) 李徐生,韩志勇,杨达源,等. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化

- 学特征研究 (J). 土壤学报, 2006, 43(1): 1-7. (Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Dayuan, et al. REE geochemistry of Xiashu loess in Zhengjiang, Jiangsu Province (J). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 1-7.)
- (23) Ding Z L, Ranov V, Yang S L, et al. The loess record in southern Tajikistan and correlation with Chinese loess (J). Earth and Planetary Science Letters, 2002, 200(3): 387-400.
- (24) Dodonov A E. Loess of central Asia (J). GeoJournal, 1991, 24(2): 185-194.
- (25) Dodonov A E, Sadchikova T A, Sedov S N, et al. Multidisciplinary approach for paleoenvironmental reconstruction in loess-paleosol studies of the Darai Kalon section, Southern Tajikistan (J). Quaternary International, 2006, 152/153: 48-58.
- (26) Machalett B, Oches E A, Frechen M, et al. Aeolian dust dynamics in central Asia during the Pleistocene: Driven by the long-term migration, seasonality and permanency of the Asiatic polar front (J). Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2008, 9: 1-22.
- (27) Song Y G, Shi Z T, Fang X M, et al. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau (J). Science in China Series D: Earth Sciences, 2010, 53(3): 419-431.
- (28) 宋友桂, 史正涛. 伊犁盆地黄土分布与组成特征 (J). 地理科学, 2010, 30(2): 267-272. (Song Yougui, Shi Zhengtao. Distribution and compositions of loess sediments in Ili Basin, central Asia (J). Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 267-272.)
- (29) Fang X M, Lü L Q, Yang S L, et al. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in west China (J). Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 45(4): 289-299.
- (30) 史正涛, 宋友桂, 安芷生. 天山黄土记录的古尔班通古特沙漠形成演化 (J). 中国沙漠, 2006, 26(5): 675-679. (Shi Zhengtao, Song Yougui, An Zhisheng. Evolution of Gurbantunggut desert recorded by Tianshan loess (J). Journal of Desert Research, 2006, 26(5): 675-679.)
- (31) 史正涛, 方小敏, 宋友桂, 等. 天山北坡黄土记录的中更新世以来干旱化过程 (J). 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 109-114. (Shi Zhengtao, Fang Xiaomin, Song Yougui, et al. Loess sediments in the north slope of Tianshan Mountains and its indication of desertification since middle Pleistocene (J). Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(3): 109-114.)
- (32) 方小敏, 史正涛, 杨胜利, 等. 天山黄土和古尔班通古特沙漠发育及北疆干旱化 (J). 科学通报, 2002, 47(7): 540-545. (Fang Xiaomin, Shi Zhengtao, Yang Shengli, et al. Loess in the Tianshan and its implications for the development of the Gurbantunggut Desert and drying of northern Xinjiang (J). Chinese Science Bulletin, 2002, 47(7): 540-545.)
- (33) 叶玮. 新疆伊犁地区黄土矿物特征与沉积环境 (J). 干旱区研究, 2000, 14(7): 1-10. (Ye Wei. The mineral characteristics of loess and depositing environment in Ili area, Xinjiang (J). Arid Zone Research, 2000, 14(7): 1-10.)
- (34) 叶玮. 新疆伊犁地区自然环境特点与黄土形成环境 (J). 干旱区地理, 1999, 22(3): 9-16. (Ye Wei. Characteristics of physical environment and conditions of loess formation in Ili area, Xinjiang (J). Arid Land Geography, 1999, 22(3): 9-16.)
- (35) 叶玮. 新疆西风区黄土沉积特征与古气候 (M). 北京: 海洋出版社, 2001: 1-180. (Ye Wei. Loess Sedimentary Characteristics and Paleoclimate in Westerly Zone, Xinjiang (M). Beijing: Marine Press, 2001: 1-180.)
- (36) 叶玮, 桑长青, 赵兴有. 新疆黄土分布规律及粉尘来源 (J). 中国沙漠, 2003, 25(3): 514-520. (Ye Wei, Sang Changqing, Zhao Xingyou. Spatial-temporal distribution of loess and source of dust in Xinjiang (J). Journal of Desert Research, 2003, 25(3): 514-520.)
- (37) 史正涛. 天山黄土与西北内陆干旱化 (D). 兰州: 兰州大学, 2002: 1-187. (Shi Zhengtao. Loess in Tianshan and Aridification in the Northwest China (D). Lanzhou: Lanzhou University, 2002: 1-187.)
- (38) 史正涛, 董铭, 方小敏. 伊犁盆地晚更新世黄土-古土壤磁化率特征 (J). 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(2): 7-10. (Shi Zhengtao, Dong Ming, Fang Xiaomin. The characteristics of later Pleistocene loess-paleosol magnetic susceptibility in Ili Basin (J). Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2007, 43(2): 7-10.)
- (39) 史正涛, 董铭, 方小敏. 天山黄土粒度特征及粉尘来源 (J). 云南师范大学学报, 2007, 27(3): 55-57. (Shi Zhengtao, Dong Ming, Fang Xiaomin. Characteristics of loess grain size and source of dust in Tianshan, China (J). Journal of Yunnan Normal University, 2007, 27(3): 55-57.)
- (40) 余素华, 文启忠. 新疆地区黄土中稀土元素地球化学特征 (J). 干旱区地理, 1994, 17(2): 75-82. (Yu Suhua, Wen Qizhong. Geochemical character of rare earth elements in loess of Xinjiang region, China (J). Arid Land Geography, 1994, 17(2): 75-82.)
- (41) 赵志根. 不同球粒陨石平均值对稀土元素参数的影响 (J). 标准化报道, 2000, 21(3): 15-16. (Zhao Zhigen. Effect of different chondrite on the parameter of rare earth elements (J). Reporting of Standardization, 2000, 21(3): 15-16.)
- (42) Masuda A, Nakamura N, Tanaka T. Fine structures of mutually normalized rare earth patterns of chondrites (J). Geochimica et Cosmochimica Acta, 1973, 37(2): 239-248.
- (43) 文启忠, 余素华. 沉积过程中的稀土元素 (J). 地质地球化学, 1979(5): 55-61. (Wen Qizhong, Yu Shuhua. Rare earth elements in the process of deposition (J). Geology-Geochemistry, 1979(5): 55-61.)
- (44) 李传想, 宋友桂, 千琳勃, 等. 中亚昭苏黄土剖面粒度记录的末次冰期以来气候变化历史 (J). 沉积学报, 2011, 29(6): 1170-1179. (Li Chuanxiang, Song Yougui, Qian Linbo, et al. History of climate change recorded by grain size at the Zhaosu loess section in the central Asia since the last glacial period (J). Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1170-1179.)

- (45) Liu Y ,Shi Z T ,Deng C L ,et al. Mineral magnetic investigation of the Taledo loess-palaeosol sequence since the last interglacial in the Ili Basin in the Asian interior (J). *Geophysical Journal International* 2012 ,190(1) : 267 - 277.
- (46) 李传想,宋友桂. 新疆伊犁黄土化学风化特征及其控制因素 (J). *高校地质学报* ,2011 ,17(4) : 611 - 619. (Li Chuanxiang , Song Yougui. Chemical weathering characteristics and controlling factors of the Ili loess ,Xinjiang (J). *Geological Journal of China Universities* 2011 ,17(4) : 611 - 619.)
- (47) 刘永生,杨小平,周哲,等. 浑善达克沙地及其毗邻地区稀土元素与物源分析 (J). *第四纪研究* 2003 23(4) : 456. (Liu Yongsheng ,Yang Xiaoping ,Zhou Zhe ,et al. Rare earth elements and provenance analysis of Otindag Sandy Land and its adjoining areas (J). *Quaternary Sciences* 2003 23(4) : 456.)

Characteristics of Rare Earth Elements in Loess Profiles in the Ili Basin , Xinjiang

GUO Li-cheng^{1 3 4} , CHEN Xiu-ling^{1 2} , SONG You-gui² , JIA Li-min¹

(1. Fujian Province Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology , College of Geographical Sciences , Fujian Normal University , Fuzhou 350007 , Fujian , China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology , Institute of Earth Environment , Chinese Academy of Sciences , Xi'an 710075 , Shaanxi , China; 3. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment , Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China; 4. University of Chinese Academy of Science , Beijing 100049 , China)

Abstract: Studies on the relations between the Asian aridification and the climate fluctuation in the northern hemisphere and the reconstruction of palaeoenvironment in arid region in north China have attracted extensive global attention in recent years , and more effective means are needed to be applied to reveal the specific mechanisms of them. As we all known , rare earth elements (REE) with similar chemical properties and little changes during weathering transportation and diagenesis are widely used as the trace elements in studying the provenances of various sediments. REE characteristics are closely related to environmental change , so that REE can record the environment evolution in detail. Consequently , REE are widely used as the important indicators in studying paleoclimate. However , few studies on the characteristics and environmental significance of REE in loess in northwest inland area of China were carried out. The characteristics of rare earth elements in loess profiles in the Ili Basin and those in typical loess areas since the Epipleistocene were analyzed and compared. The results revealed that the average content of REE in loess profiles in the Ili Basin was similar to that in the typical loess profiles , and the REE distribution was in an inclined “L-shaped” pattern. The main fractional characteristics were similar and characterized by LREE-enrichment and HREE-depletion , the distribution curves were negative oblique lines , and Eu performed a negative anomaly , but the anomaly of Ce was not obvious. Therefore , these loess profiles had the common characteristics , and loess was possibly originated from same sources. However , there were a few differences of the characteristics of REE in the loess profiles in different areas since the Epipleistocene , which was related to the existence of proximal sources of loess profiles in the Ili Basin , different sedimentation environment , and instability of upper air circulation.

Key words: Epipleistocene; loess profile; rare earth element; the Loess Plateau; Ili Basin; Xinjiang