

doi:10.3799/dqkx.2013.018

“巫山黄土”的稀土元素特征与成因

张玉芬¹, 李长安^{2,3}, 邵磊³, 周耀¹, 刘引迪³

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 为了探讨“巫山黄土”的成因, 对剖面样品进行了稀土元素含量、稀土分布模式和稀土特征值计算分析. 结果表明: “巫山黄土”稀土元素特征与现代河流沉积物差别明显, 而与北方黄土及长江中下游的下蜀土却基本一致. 稀土分布模式与典型风尘沉积物相似, 物源判别函数得到的物源指数(*PI*)均与风积黄土的最为接近, 显示其风积成因的特点. “巫山黄土”稀土元素平均含量 216.39×10^{-6} 高于地壳平均值 178.0×10^{-6} 和两块中国黄土标样平均值 178.22×10^{-6} , 但与长江中下游镇江下蜀土样品的平均值 207.7×10^{-6} 比较接近. 样品的轻稀土较富集, 重稀土略有淋失, 轻重稀土比值为 8.62, Eu 呈较明显的负异常, Ce 异常不明显. 表明“巫山黄土”风尘沉积后经历了较北方黄土更为强烈的风化作用, 其形成环境与下蜀土比较接近.

关键词: “巫山黄土”; 稀土元素特征; 成因分析; 地球化学.

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2013)01-0181-07

收稿日期: 2012-04-10

REE Compositions of the “Wushan Loess” and Its Origin

ZHANG Yu-fen¹, LI Chang-an^{2,3}, SHAO Lei³, ZHOU Yao¹, LIU Yin-di³

1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The rare earth element (REE) compositions of the “Wushan Loess” are studied in order to decipher information on the genesis of the “Wushan Loess”. The REE patterns, concentrations and indices are used for the discussion. The results show that REE compositions of the “Wushan Loess” are quite different from those of the modern river sediments and similar to those of the Loess Plateau and the “Xiashu Loess” in the middle and lower Yangtze reaches. REE distribution patterns are similar to those of the typical eolian deposits. The index (*PI*) calculated by source discriminant function is similar to those of the eolian deposits, indicating the eolian origin. The average REE content (216.39×10^{-6}) is significantly higher to the average rate of the earth crust (178.0×10^{-6}), two samples from the Loess Plateau (178.22×10^{-6}), and fairly close to the average rate of the samples from the Xiashu loess in the middle and lower Yangtze reaches (207.7×10^{-6}). The light rare earth element (LREE) are relatively enriched, while the heavy rare earth element (HREE) are slightly missing. The ratios of LREE and HREE is 8.62. The element Eu negative anomaly is obvious; while the element Ce anomaly is not obvious. It indicates that “Wushan” loess has suffered more intense weathering than the Loess Plateau. The “Wushan Loess” formed under the same weathering conditions as the “Xiashu Loess”.

Key words: “Wushan loess”; rare earth element (REE); genesis; geochemistry.

“巫山黄土”是指分布于长江三峡一带的黄土状堆积, 黄土是晚新生代古气候研究的重要载体, 黄土的成因是古气候和古环境恢复的基础. “巫山黄土”

的成因自然成了许多学者研究的重要内容. 尽管“巫山黄土”的成因研究已达半个世纪之久, 但至今依然存在着风成和水成两种不同的观点(沈玉昌,

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40971008, 40771213); 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开放基金(No. SKLLQG0908)联合资助.

作者简介: 张玉芬(1957—), 女, 教授, 博士, 主要从事环境地球物理等方面的教学与研究. E-mail: zhyfcug@163.com

1965;刘兴诗,1981;谢明,1991;张芸等,2001;柯于义等,2007;王建明等,2009;李长安等,2010;张玉芬等,2010).导致分歧的原因,一是与剖面的典型性有关,另一方面与研究方法有关.最近,笔者在三峡地区进行第四纪地质调查时,在新的巫山县城南和奉节紫阳城各发现一处出露良好的黄土剖面,特别是巫山县城南剖面(图 1).剖面厚度达 15 m,从出露条件和厚度来看这是迄今为止“巫山黄土”研究最理想的剖面.稀土元素(rare earth element, REE)在沉积过程中地球化学行为具有独特性,其含量、分布模式和特征比值等常被用于沉积环境、物质来源、成因和风化强度等地质问题的研究(文启忠等,1984;张虎才,1996;刁桂仪和文启忠,2000;彭淑贞和郭正堂,2000;杨元根等,2000;曹军骥等,2001;韩吟文和马振东,2003;李福春等,2004;叶玮等,2008).本文在以往研究的基础上,通过稀土元素的特征分析,探讨“巫山黄土”的成因.

1 “巫山黄土”的沉积特征

“巫山黄土”分布于云阳—秭归的长江三峡河谷区.受地形影响呈零星点状分布,厚度常依其地貌位置的不同而差异较大,且受强烈的边坡地质作用出露较差.前人所研究的“巫山黄土”剖面大都厚度较小,出露不够完整.寻找沉积连续、厚度大并且出露完整的剖面,对“巫山黄土”的研究至关重要.近年,随着移民搬迁和新城建设,暴露出一些新的黄土剖面.本文所研究的“巫山黄土”剖面位于巫山新县城客运港附近的长江左岸(图 1)(张玉芬等,2010),该剖面为一建筑工地人工新开挖的露头剖面,厚达

15 m,剖面不但新鲜,且顶底清楚,出露完整.剖面的岩性较均一,主要由褐黄色和黄色的粉砂和砂质粘土组成,含有少量的钙质结核;剖面无层理,垂直节理发育,大孔隙明显.前期的粒度分析研究表明,其粒度组成以粉砂占优势(45.3%~69.4%),粘粒含量为(20.0%~32.2%),粒度频率曲线多表现为不对称的双峰和多峰,与典型风尘沉积物相似,显示风积成因.粒度参数的 C-M、L-M、A-M 图等粒度象分析及结构参数散点图与现代河流沉积物差别明显,而与长江中下游分布的下蜀土却基本一致(李长安等,2010).

2 样品的采集和测试

对该剖面从上到下,以 10 cm 间隔连续取样,共采集地球化学样品 146 组.室内根据岩性变化特征不等间距送测了 73 件常量元素、25 件微量元素和稀土元素.样品测试过程:首先将样品在常温下自然风干,然后将每件约重 5 g 的样品分别置于玛瑙研钵中研磨.再用 200 目分析筛筛选后供测试.样品测试工作由国土资源部合肥矿产资源监督检测中心完成,使用仪器分别为 X 射线荧光光谱仪、等离子体质谱仪和等离子体光谱仪.所测结果经标样控制,相对标准偏差在 10%~15% 左右.本文主要对 25 件样品的稀土元素特征进行讨论.

3 结果分析

3.1 稀土元素特征

(1)稀土元素丰度.表 1 为“巫山黄土”与不同沉积类型地质体稀土元素丰度比较结果,由表 1 可见,“巫山黄土”稀土元素总量($\sum\text{REE}$)介于(192.56~253.82) $\times 10^{-6}$ 之间,平均 216.39×10^{-6} ,高于地壳平均值 178.0×10^{-6} (黎彤和倪守斌,1990)、武都黄土的平均值 184.77×10^{-6} (张虎才,1996)、洛川黄土的平均值 160.74×10^{-6} (陈骏等,1996)和中国黄土标样的平均值 178.22×10^{-6} (陈德潜和陈刚,1990;叶玮等,2008),而与长江中下游风积成因下蜀土的稀土元素的丰度值 207.7×10^{-6} 比较接近(李徐生等,2006).并且轻稀土 $\sum\text{LREE}$ 、重稀土 $\sum\text{HREE}$ 也均高于北方黄土,表明“巫山黄土”无论是轻稀土元素(LREE)还是重稀土元素(HREE)均较北方风尘黄土更为富集,但较“巫山黄土”分布

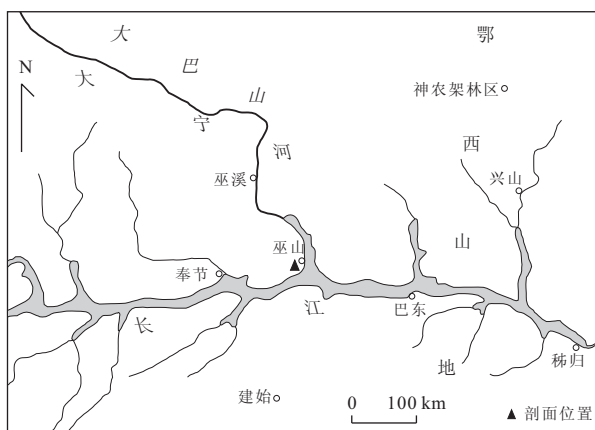


图 1 研究剖面位置

Fig. 1 The geography and section position of the research area

表1 “巫山黄土”与不同沉积类型地质体稀土元素丰度比较(10^{-6})Table 1 The contents of rare earth elements for different sediments(10^{-6})

地质体	网纹红土	地壳均值	黄土标样	镇江下蜀土	武都黄土	洛川黄土	巫山黄土
La	37.60	39.00	36.00	43.71	39.70	35.43	43.32
Ce	84.90	43.00	75.20	84.04	78.30	62.37	82.18
Pr	7.93	5.70	8.65	10.41	8.18	8.10	10.26
Nd	28.90	26.00	32.00	38.34	34.50	30.20	48.81
Sm	5.00	6.70	6.30	7.43	5.97	5.80	7.86
Eu	0.91	1.20	1.16	1.47	1.10	1.15	1.44
Gd	3.96	6.70	5.40	6.37	4.77	5.37	6.89
Tb	0.65	1.20	0.84	0.90	0.82	0.82	1.11
Dy	3.37	4.10	5.19	6.31	4.93	4.53	5.98
Ho	0.74	1.40	0.98	1.31	1.06	0.96	1.20
Er	2.14	2.70	2.85	3.42	2.47	2.65	3.25
Tm	0.42	0.25	0.42	0.49	0.38	0.44	0.54
Yb	2.57	2.70	2.79	3.08	2.29	2.52	3.08
Lu	0.41	0.82	0.40	0.46	0.30	0.39	0.48
Σ REE	179.57	178.00	178.22	207.70	184.77	160.74	216.39
Σ LREE	193.20	121.60	159.31	185.40	167.75	143.05	193.37
Σ HREE	18.40	19.87	18.87	22.35	17.02	17.68	22.54

数据来源:网纹红土、地壳均值、黄土标样(黎彤和倪守斌,1990;叶玮等,2008);武都黄土(张虎才,1996);洛川黄土(陈骏等,1996);镇江下蜀土(李徐生等,2006);“巫山黄土”为本文测试数据(25个样品平均值)。

表2 “巫山黄土”与不同沉积类型地质体稀土元素特征值

Table 2 Rare earth element ratios of Wushan Loess and the other sediments

不同环境沉积物	δ Ce	δ Eu	$(La/Yb)_N$	$(Gd/Yb)_N$	$(Eu/Sm)_N$	$(Nd/Yb)_N$	$(Nd/Lu)_N$	$(La/Lu)_N$	Σ LREE/ Σ HREE
巫山黄土	0.96	0.60	10.13	1.85	0.48	5.77	5.53	9.67	8.62
洛川黄土	0.90	0.63	10.07	1.76	0.52	4.36	4.25	9.82	8.09
镇江下蜀土	0.97	0.65	10.18	1.71	0.52	4.53	4.53	10.18	8.31
黄土高原马兰黄土	1.1	0.66	8.64	1.47	0.52	3.75	3.57	8.22	8.05
华南网纹红土	1.21	0.63	10.49	1.27	0.48	4.09	3.83	9.83	11.59
洞庭湖网纹红土	1.25	0.69	10.69	1.28	0.57	3.69	3.42	9.90	10.50
黄土标样	1.04	0.58	9.26	1.75	0.49	4.18	4.35	9.65	8.44
长江河漫滩	0.83	0.76	14.77		0.24	5.02	5.02	14.76	10.79

数据来源:华南网纹红土、黄土标样、长江河漫滩(黎彤和倪守斌,1990;叶玮等,2008);洛川黄土(陈骏等,1996);镇江下蜀土(李徐生等,2006);洞庭湖网纹红土(毛龙江等,2008);黄土高原马兰黄土(吴明清等,1991)。

更为偏南的华南网纹红土的稀土元素总量(Σ REE)却小于“巫山黄土”,产生这种现象的原因估计与样品的采集和测试有关,因为华南网纹红土的轻重稀土比值是大于“巫山黄土”的(表2),这与华南网纹红土所经历的风化作用较“巫山黄土”更为强烈是一致的。

(2)稀土元素分布模式.图2为“巫山黄土”、黄土高原马兰黄土(吴明清等,1991)、洛川黄土(陈骏等,1996)以及长江中下游下蜀土(李徐生等,2006)样品经球粒状陨石(Sun and McDonough,1989)归一化后的稀土元素分布模式图,由图2可见,“巫山黄土”剖面样品之间的稀土分馏情况是同步的,不同样品的稀土分布模式曲线几乎重合.并且“巫山黄土”与北方风尘沉积和长江中下游下蜀土的稀土分

布模式都非常相似,球粒陨石标准化后的REE分布曲线彼此近于平行,形态相似,呈“V”型.分布曲线均为负斜率, $La \sim Eu$ 曲线较陡, $Eu \sim Lu$ 曲线较为平缓.均为LREE相对HREE富集, Eu 呈较明显的负异常,25件样品的 δEu 值均小于1,其平均值为0.6; Ce 也为负异常,但异常不明显.统计表明:在25件样品中 δCe 值小于1的有18件,4件值近似为1,只有3件值大于1.

(3)稀土元素特征值.表2列出了“巫山黄土”剖面稀土元素的特征参数与不同沉积类型沉积物稀土元素特征参数的比较,由表1和表2可知,“巫山黄土”的LREE/HREE、 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Lu)_N$ 、 $(Eu/Sm)_N$ 等特征值均与风尘沉积的(洛川黄土、镇江下蜀土和黄土标样)比较接近,而与长江河漫滩沉积差

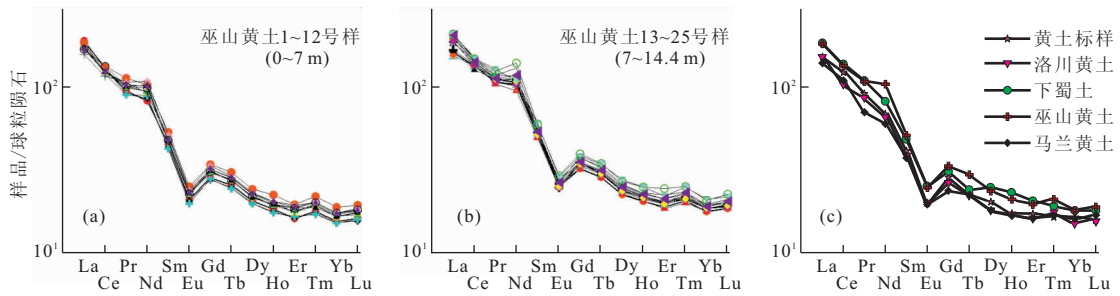


图 2 “巫山黄土”稀土元素分布模式(a,b) 及与黄土高原黄土的比较(c)

Fig. 2 Comparison between Wushan Loess in Wushan (a,b) and the loess in the Loess Plateau in REE distribution pattern (c)

表 3 “巫山黄土”成因判别结果

Table 3 Distinguish Result on Origin of Wushan Loess

	1 组		2 组		3 组		4 组		5 组		6 组	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
	洛川黄土	长江河漫滩	镇江下蜀土	长江河漫滩	马兰黄土	长江河漫滩	华南网纹红土	长江河漫滩	洞庭网纹红土	长江河漫滩	黄土标样	长江河漫滩
<i>PI</i>	0.24	0.76	0.22	0.78	0.40	0.60	0.44	0.56	0.50	0.50	0.21	0.79

注:表中 D1 和 D2 分别代表端元 1 和端元 2; *PI* 为物源指数值.

别比较明显(叶玮等,2008). 分析“巫山黄土”25 件样品的 δEu 和 δCe 参数值发现,无论是黄土层还是古土壤化比较明显的层,样品的 δEu 和 δCe 参数值变化都不大,尤其是 δEu 值,25 件样品的值变化在 0.57~0.62 之间. 另外,“巫山黄土”剖面中所有样品均表现出中度的 Eu 负异常(δEu 的均值为 0.60)和轻微的 Ce 负异常(δCe 的均值为 0.96),且与风积成因的镇江下蜀土的 δEu 和 δCe 参数值(δEu 和 δCe 的均值分别为 0.65 和 0.97)最为接近,而与长江河漫滩的 δEu 和 δCe 参数值(δEu 和 δCe 的均值分别为 0.76 和 0.83)相差较大,但是与北方的洛川黄土比较接近. 表明“巫山黄土”具有风积成因的特点.

仔细比较还可发现,“巫山黄土”的 $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 、 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Lu)_N$ 、 $(Eu/Sm)_N$ 等特征值均略小于华南和洞庭湖网纹红土的值,表明华南和洞庭湖的网纹红土的轻重稀土元素间的分馏以及重稀土元素间的分馏均要更明显一些,这与华南和洞庭湖网纹红土所处的地理位置较“巫山黄土”更为偏南,所经历过更强的风化作用有关. 一般认为,在风化过程中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,而轻稀土则被粘土优先吸附,使轻、重稀土发生分异,轻稀土相对富集,重稀土亏损(李徐生等,2006). 风化成土作用越强, $\Sigma LREE/\Sigma HREE$ 比值(分馏系数)越大.

3.2 “巫山黄土”成因判别分析

为了进一步确定“巫山黄土”与黄土高原黄土、

长江中下游下蜀土等风积沉积稀土特征的相似性,进而分析巫山黄土的成因. 本文参照杨守业等(2000)对苏北滨海平原元素的研究方法和叶玮等(2008)对华南网纹红土稀土特征研究方法,使用判别函数进行判别分析. 选用“巫山黄土”与网纹红土、黄土高原黄土、长江中下游下蜀土和长江河漫滩沉积物的部分稀土元素含量、比值参数(表 2 数据),利用以下公式计算了物源指数 *PI*.

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^n |C_{ix} - C_{i1}| / range(i)}{\sum_{i=1}^n |C_{ix} - C_{i1}| / range(i) + \sum_{i=1}^n |C_{ix} - C_{i2}| / range(i)}$$

式中, *x* 表示待判沉积物; *i* 表示元素或元素之比; C_{i1} 、 C_{i2} 分别表示端元沉积物 1 与端元沉积物 2 中 *i* 平均含量; $range(i)$ 表示沉积物中元素 *i* 含量极差; *n* 为分析元素的个数. 计算结果可以反映沉积物之间化学成分的接近程度. *PI* 介于 0~1 之间,以 0.5 作为分界, *PI* 小于 0.5 表明待判别沉积物与端元沉积物 1 化学组成相近;反之,则与端元 2 接近.

为了判别结果的客观可靠,将“巫山黄土”作为待判沉积物,将洛川黄土、长江中下游的镇江下蜀土、马兰黄土、华南网纹红土、洞庭湖网纹红土、黄土标样依次分别作为端元沉积物 1,将长江河漫滩沉积物作为端元沉积物 2,计算出了他们的物源指数 *PI* 值,计算结果示于表 3. 从表 3 中可见,除洞庭湖网纹红土与长江河漫滩这组(表 3 中第 5 组)端元组

合计算出的 PI 值均为 0.5, 没有得到明确的判断结果外, 其他所有风积成因的物源指数 PI 值均小于长江河漫滩的 PI 值, 说明“巫山黄土”与风尘沉积的相似性大于水成沉积物, 表明了“巫山黄土”具有风积成因的特点。

从表 3 中还可以看到, 判别结果虽然显示出“巫山黄土”与风成黄土的稀土特征最为相似(PI 值均小于 0.5), 但与不同地区、不同黄土剖面沉积物的相似程度却并不完全相同。这为今后进一步研究“巫山黄土”的物源提供了可能和思路。

4 结论与讨论

稀土元素(REE)作为示踪元素在各种岩石的成因、物源、演化及形成环境等方面均具有重要意义。通过对“巫山黄土”剖面中稀土元素含量和分布特征的研究, 得到如下结论:

(1)“巫山黄土”剖面 25 件样品的稀土元素分布模式曲线差异不大, 并与北方黄土和长江中下游下蜀土非常相似, 分布曲线均为负斜率, $La \sim Eu$ 曲线较陡, $Eu \sim Lu$ 曲线较为平缓。这些特征为“巫山黄土”的风积成因提供了地球化学证据。并揭示了“巫山黄土”的物质来源区可能是一个广泛而开放的空间范围, “巫山黄土”粉尘颗粒在搬运过程中经过了高度的混合。

(2)“巫山黄土”的各种稀土元素特征值与风尘沉积物相似, 而与长江河漫滩沉积物差别比较明显。判别分析结果显示, “巫山黄土”与北方黄土、长江中下游镇江下蜀土和黄土标样的相似性大于长江河漫滩沉积物, 表明“巫山黄土”沉积类型为风积成因。

(3)“巫山黄土”稀土元素总量($\sum REE$)介于 $(192.56 \sim 253.82) \times 10^{-6}$ 之间, 平均 216.39×10^{-6} , 其 REE 绝对丰度明显高于黄土高原黄土和地壳平均值 178.0×10^{-6} , 这主要与“巫山黄土”所处的地理位置较黄土高原偏南, 随着风力的减弱和湿热化程度的增高, “巫山黄土”中粘粒组分含量也有所增高, 故对稀土元素(REE)特别是轻稀土元素(LREE)产生一定的吸附作用有关。

(4)“巫山黄土”的稀土元素特征值或比值主要继承了原始物质的特征, 粉尘物质堆积后虽经过了较北方黄土较为强烈的风化成土作用, 使得无论是轻稀土元素(LREE)还是重稀土元素(HREE)均较北方风尘黄土富集。轻重稀土间的分异较北方黄土也有所增强, 但总体来说化学风化对“巫山黄土”剖

面 REE 的分馏作用并不十分显著, 没有产生明显的 Ce 和 Eu 再分馏。因为“巫山黄土”剖面中古土壤化比较明显的层与黄土层样品的 REE 组成差异并不是很大, 并且“巫山黄土”轻重稀土比值($\sum LREE / \sum HREE$)与北方黄土高原黄土、地壳平均值差异都不大。

致谢: 论文在成文过程中得到马振东教授的指导和帮助。研究生王节涛、江华军、孙习林、罗昊参加了野外样品的采集和室内样品的整理工作, 在此一并表示致谢!

References

- Cao, J. J., Zhang, X. Y., Wang, D., et al., 2001. REE Geochemistry of Late Cenozoic Eolian Sediments and the Paleoclimate Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(1): 97—102 (in Chinese with English abstract).
- Chen, D. Q., Chen, G., 1990. Practical REE Geochemistry. Metallurgical Industry Press, Beijing, 223—242 (in Chinese).
- Chen, J., Wang, H. T., Lu, H. Y., 1996. 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. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 61—72 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J., Ji, J. F., Qiu, G., et al., 1997. Geochemistry of the Chemical Weathering of the Loess in Luochuan, Shaanxi Province. *Science in China (Series D)*, 27(6): 531—536 (in Chinese).
- Diao, G. Y., Wen, Q. Z., 2000. Rare Earth Elements of the Weinan Loess Sections. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(4): 57—61 (in Chinese with English abstract).
- Han, Y. W., Ma, Z. D., 2003. Geochemistry. Geology Press, Beijing, 189—197 (in Chinese).
- Ke, Y. Y., Yin, H. G., Guo, F., et al., 2007. “Wushan Loess” Genesis Research in the Three Gorges. *Yangtze River*, 38(9): 72—76 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. A., Zhang, Y. F., Yuan, S. Y., et al., 2010. Grain Size Characteristics and Origin of the “Wushan Loess” at Wushan Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 879—884 (in Chinese with English abstract).
- Li, F. C., Pan, G. X., Xie, C. R., et al., 2004. REE Distribution of Different Grain Groups of Xiashu Loess-Paleosol

- in Nanjing. *Quaternary Sciences*, 24(4): 477—478 (in Chinese with English abstract).
- Li, T., Ni, S. B., 1990. Abundance of Chemical Elements in the Earth and Crust. Geology Press, Beijing (in Chinese).
- Li, X. S., Han, Z. Y., Yang, D. Y., et al., 2006. REE Geochemistry of Xiashu Loess in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 43(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. S., 1981. The Division of the Late Quaternary at Sichuan Basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 58—60 (in Chinese).
- Mao, L. J., Mo, D. W., Yang, J. H., et al., 2008. Rare Earth Element Geochemistry of Reticulate Red Clay around Dongting Lake. *Environmental Chemistry*, 27(2): 222—225 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. Z., Guo, Z. T., 2000. A Preliminary Study on REE of the Late Tertiary Laterite in Xifeng Area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 20(2): 39—43 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Y. C., 1965. Valley Landform of Upper Yangtze River. Science Press, Beijing, 97—146 (in Chinese).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., London, 313—345.
- Wang, J. M., Wang, Y., Wang, J. L., 2009. Research on Granular Characteristics of Quaternary Deposit in Wushan County. *Yangtze River*, 40(13): 13—15 (in Chinese with English abstract).
- Wen, Q. Z., Yu, S. H., Sun, F. Q., et al., 1984. Rare Earth Elements of the Loess in Luochuan Section, Shaanxi Province. *Geochimica*, 13(2): 126—133 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. Q., Wen, Q. Z., Pan, J. Y., et al., 1991. Rare Earth Elements of the Malan Loess in the Middle Reaches of the Yellow River. *Chinese Science Bulletin*, 36(5): 366—369 (in Chinese).
- Xie, M., 1991. Loess Deposits in the Three-Gorge Area of the Changjiang (Yangtze) River. *Geochimica*, (3): 293—300 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. Y., Li, C. X., Zhang, J. Q., 2000. Palaeo Geographic Evolution of Coastal Plain and Provenance Study of Postglacial Sediments in Southern Jiangsu Province. *Journal of Palaeo Geographic*, 2(2): 65—72 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. G., Liu, C. Q., Yuan, K. N., et al., 2000. Laterite Formation Process in Southern China and Its Rare Earth Element Geochemistry. *Quaternary Sciences*, 20(5): 469—480 (in Chinese with English abstract).
- Ye, W., Yang, L. H., Zhu, L. D., et al., 2008. Characteristics and Origin of Rare Earth Elements of Vermicular Red Earth in Middle Sub-Tropic Zone. *Scientia Geographica Sinica*, 28(1): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. C., 1996. A Study on Rare Earth Wudu Loess. *Geochimica*, 25(6): 545—550 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Shao, L., et al., 2010. Magnetic Fabric Characteristics and Implications for Its Origin of “Wushan Loess”. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 885—890 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Zhu, C., Zhang, Q., et al., 2001. Sedimentary Environmental and Eolian Deposits in Past 3 000 a in Danning Valley of the Three Gorges of the Yangtze River. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(4): 83—88 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹军骥, 张小曳, 王丹, 等, 2001. 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. *海洋地质与第四纪地质*, 21(1): 97—102.
- 陈德潜, 陈刚, 1990. 实用稀土元素地球化学. 北京: 冶金工业出版社.
- 陈骏, 王洪涛, 鹿化煜, 1996. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其他微量元素的化学淋滤研究. *地质学报*, 70(1): 61—72.
- 刁桂仪, 文启忠, 2000. 渭南黄土剖面中的稀土元素. *海洋地质与第四纪地质*, 20(4): 57—61.
- 韩吟文, 马振东, 2003. 地球化学. 北京: 地质出版社.
- 柯于义, 尹华刚, 郭峰, 等, 2007. 三峡库区“巫山黄土”成因研究. *人民长江*, 38(9): 72—76.
- 李长安, 张玉芬, 袁胜元, 等, 2010. “巫山黄土”粒度特征及其对成因的指示. *地球科学——中国地质大学学报*, 35(5): 879—884.
- 李福春, 潘根兴, 谢昌仁, 等, 2004. 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. *第四纪研究*, 24(4): 477—478.
- 黎彤, 倪守斌, 1990. 地球和地壳的化学元素丰度. 北京: 地质出版社.
- 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等, 2006. 镇江下蜀黄土的稀土元素地球化学特征研究. *土壤学报*, 43(1): 1—7.
- 刘兴诗, 1981. 四川盆地晚第四系的划分. *成都理工大学学报*

- (自然科学版), (4): 58—60.
- 毛龙江, 莫多闻, 杨兢红, 等, 2008. 环洞庭湖地区网纹红土中稀土元素的地球化学特征. 环境化学, 27(2): 222—225.
- 彭淑贞, 郭正堂, 2000. 西峰地区晚第三纪红土稀土元素的初步研究. 海洋地质与第四纪地质, 20(2): 39—43.
- 沈玉昌, 1965. 长江上游河谷地貌. 上海: 科学出版社, 97—146.
- 王建明, 王勇, 王建力, 2009. 巫山第四纪沉积物粒度特征研究. 人民长江, 40(13): 13—15.
- 文启忠, 余素华, 孙福庆, 等, 1984. 陕西洛川剖面的稀土元素. 地球化学, 13(2): 126—133.
- 吴明清, 文启忠, 潘景瑜, 等, 1991. 黄河中游地区马兰黄土的稀土元素. 科学通报, 36(5): 366—369.
- 谢明, 1991. 长江三峡地区的黄土状堆积物. 地球化学, (3): 293—300.
- 杨守业, 李从先, 张家强, 2000. 苏北滨海平原冰后期古地理演化与沉积物物源研究. 古地理学报, 2(2): 65—72.
- 杨元根, 刘丛强, 袁可能, 等, 2000. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学. 第四纪研究, 20(5): 469—480.
- 叶玮, 杨立辉, 朱丽东, 等, 2008. 中亚热带网纹红土的稀土元素特征与成因分析. 地理科学, 28(1): 40—44.
- 张虎才, 1996. 武都黄土剖面稀土元素研究. 地球化学, 25(6): 545—550.
- 张玉芬, 李长安, 邵磊, 等, 2010. “巫山黄土”的磁组构特征及成因. 地球科学——中国地质大学学报, 35(5): 885—890.
- 张芸, 朱诚, 张强, 等, 2001. 长江三峡大宁河流域 3 000 年来的沉积环境和风尘堆积. 海洋地质与第四纪地质, 21(4): 83—88.