

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.072>



## 三峡巫山黄土 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪

张玉芬<sup>1</sup>, 李长安<sup>2,3</sup>, 李启文<sup>2</sup>, 贾明明<sup>2</sup>, 李亚伟<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学流域关键带演化湖北省重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 巫山黄土作为中国南方黄土的重要组成部分, 弄清该区的物源将为破译这一宝贵沉积记录提供重要的环境信息. 对巫山黄土剖面进行了系统取样和 Sr-Nd 同位素分析, 并与黄土高原同期黄土及近源的河流沉积物等进行了比较. 结果表明, 巫山黄土的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化范围为 0.717 411~0.719 163, 平均值为 0.717 998, 与黄土高原末次冰期黄土的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值(变化范围为 0.718 235~0.719 673, 平均值为 0.718 623)几乎一致; 巫山黄土  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值在 -10.1~-11.7 之间, 平均值为 -11.4, 明显与长江上游现代河漫滩沉积物  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值(-5.9~-7.2)差别较大, 而与黄土高原黄土  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值(-9.2~-11.3)接近. 研究结果表明巫山黄土的粉尘主要为北方输入, 与黄土高原黄土同源. 据此认为, 巫山黄土的形成并不是因为冰期导致三峡地区干旱河滩干涸暴露而引发粉尘近源堆积, 这与近年来长江下游下蜀黄土的研究结果有所不同.

**关键词:** 巫山黄土; Sr-Nd 同位素; 黄土高原; 物源示踪; 地球化学.

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2020)03-960-08

收稿日期: 2019-03-03

## Sr-Nd Isotopic Composition and Provenance Tracing of Wushan Loess, Three Gorges, Yangtze River

Zhang Yufen<sup>1</sup>, Li Chang'an<sup>2,3</sup>, Li Qiwen<sup>2</sup>, Jia Mingming<sup>2</sup>, Li Yawei<sup>2</sup>

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

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Hubei Key Laboratory of Critical Zone Evolution, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** As one of the most important elements of the loess in southern China, the provenance of “Wushan Loess” can provide crucial environmental information to deciphering valuable sedimentary record in the area. Based on previous studies, we have collected samples from “Wushan Loess” profile and carried out Sr-Nd isotope analysis, and compared with sediments synchronous to Loess Plateau and fluvial sediments with nearby provenance. The results show that the variation range of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of “Wushan Loess” is 0.717 411–0.719 163 with an average value of 0.717 998, which is almost identical with the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values of Loess Plateau during the last glacial period (variation range is 0.718 235 to 0.719 673, average is 0.718 623). The value of  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  of “Wushan Loess” loess ranges from -10.1 to -11.7 with an average value of -11.4, which is quite different from the value of  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  (-5.9 to -7.2) of modern floodplain sediments in the upper reaches of the Yangtze River, is close to that of Loess Plateau (-9.2 to -11.3). Our research shows that the dust of “Wushan Loess” is mainly imported from the north and is homologous to the loess of Loess Plateau. Therefore, we believe that “Wushan Loess” is not formed by stockpiling dust from the drying up tributaries in Three Gorges area due to the glacial period, which is different from the research result of “Xiashu Loess” in the lower

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos.41877292, 41672355, 41671011); 中国地质大学(武汉)“地学长江计划”(No. CUGCJ1801).

**作者简介:** 张玉芬(1957-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事环境地质与环境地球物理方面的教学和研究. ORCID: 0000-0002-8940-3265. E-mail: zhyfug@163.com

**引用格式:** 张玉芬, 李长安, 李启文, 等, 2020. 三峡巫山黄土 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪. 地球科学, 45(3):960-967.

reaches of the Yangtze River in recent years.

**Key words:** Wushan Loess; Sr-Nd isotopic; Loess Plateau; provenance tracing; geochemistry.

## 0 引言

大气粉尘对海陆生态系统的影响日益受到古全球变化研究者的重视(安芷生等,2017).黄土是古大气粉尘活动的记录,其物源研究对解释其传播机理、认识过去的大气环流模式,有着极其重要的意义.黄土除了在半干旱区分布外,在我国干旱区和湿润区的河谷地区均有分布,开展这些地区黄土的物质来源和传输动力研究,有助于全面认识我国古大气环流格局,深入理解粉尘源区干旱化和冬季风—西风的活动范围和强度.长江流域是中国风成黄土的南界,查明其潜在物源及古风场特征,具有重要的科学意义.关于长江下游的下蜀黄土的物源已有较深入的研究(郑祥民和严钦尚,1995;郑祥民,1999;李徐生等,2006; Hao *et al.*, 2010; Qiao *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014; 徐洪阳等, 2016; Li *et al.*, 2017),而长江上游巫山黄土的物源研究尚属空白.

沉积物物源示踪是一个非常复杂的科学问题.大量研究表明,地球化学是沉积物物源示踪的有效手段之一,特别是Sr、Nd同位素因其稳定性好、受后期风化作用影响较小,已成为风尘物源研究的重要手段(Sun, 2005, 2008; Chen *et al.*, 2007; Chen and Li, 2011).很多学者已成功运用此手段对风尘沉积物进行了物源示踪研究(Bory *et al.*,

2003; Kanayama *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2010; Miyamoto *et al.*, 2010).本文对巫山黄土Sr-Nd同位素的组成及特征进行分析,并将其与黄土高原黄土及长江河流沉积物等可能源区的物质成分对比,以探讨巫山黄土的物质来源及其区域环境意义.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本文研究的巫山黄土剖面位于巫山县客运港附近的长江左岸(31°04'N, 109°53'E)(张玉芬等, 2010).剖面厚度约15.4 m,主要由黄色、褐黄色的粉砂和粉砂质粘土组成,依据野外观察从上至下可分为4层:①0~1.0 m为耕植土层;②1.0~7.5 m为棕黄色黄土层,岩性为粉砂或粉砂质粘土,质地均一,钙质结核较发育,疏松多孔,垂直节理发育;③7.5~10.1 m为褐黄色古土壤层,为粉砂质粘土,底部含少量钙质结核;④10.1~15.4 m为棕黄色黄土层,岩性为粉质粘土,主要特征与②层相近,未见底(图1).黄土剖面上部耕作层与下部沉积易混入局部坡积物.因此,笔者只对该剖面地表以下2~13 m处的新鲜面,以近等间距采集Sr-Nd同位素样品10件,具体采样情况及剖面岩性柱状图见图2.

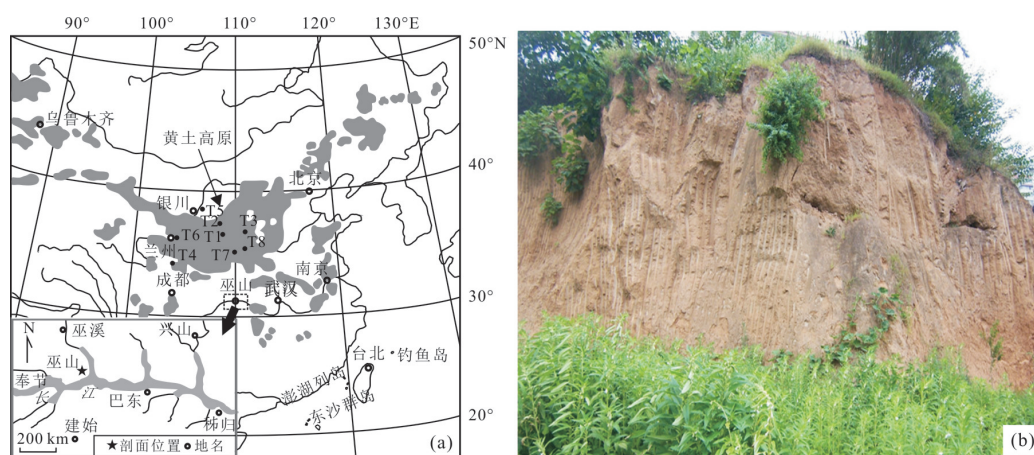


图1 中国黄土分布(a)和巫山黄土剖面(b)

Fig.1 Sketch map showing loess distribution in China (a) and the "Wushan Loess" profile (b)

T1~T8代表黄土高原典型黄土剖面位置

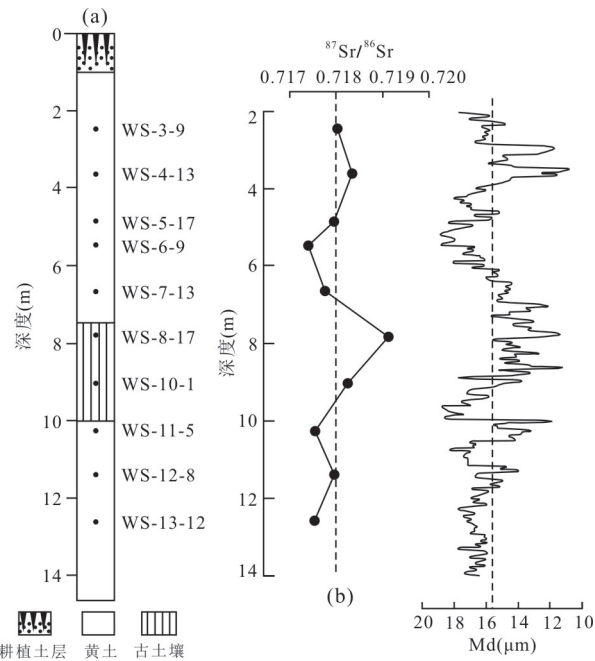


图2 巫山剖面岩性柱状图(a)和酸不溶物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与中值粒径(Md)的变化(b)

Fig.2 Stratigraphic histogram (a) and variations of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of residues and median grain size(Md)(b) of "Wushan Loess" profile

## 1.2 测试方法

风尘物质 Sr-Nd 同位素组成主要由物源区物质所决定。前人研究认为, 风尘物质在搬运、堆积及成壤过程中所遭受的粒度分选及风化成壤作用对其 Nd 同位素组成无明显影响, 而对其 Sr 同位素组成有较大影响(Chen *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2009)。一系列酸淋洗实验证明, 选用弱醋酸(0.5 mol/L)淋洗, 可以有效地去除黄土在风化成壤阶段形成的次生方解石, 但对酸不溶物中的硅酸盐 Sr 比值的影响可忽略不计(Sun, 2005), 这样消除了风化成壤作用对 Sr 同位素的影响。同时, 本次研究的剖面垂向上沉积物粒度组成较均一(中值粒径主体介于 12~18  $\mu\text{m}$ ) (李长安等, 2010), 可以认为粒度分选效应对 Sr 同位素组成影响很小。因此, 本文使用弱酸淋洗全岩样品, 测试的酸不溶物 Sr-Nd 同位素组成能反映巫山黄土源区物质本身的特征。

实验前处理首先将黄土样研磨, 对全岩样品采用 0.5 mol/L 醋酸浸泡 4 h 以溶解方解石。丢弃清液后, 将酸不溶物烘干, 研磨至 200 目, 分为 2 份。最后分别测试其 Sr 和 Nd 同位素组成。样品测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 测试仪器为 Thermo-

Finnigan 公司生产的 Triton Ti 型热电离同位素质谱仪(TIMS)。本次实验对 SRM NBS987 Sr 同位素标样的测试值为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\ 254 \pm 0.000\ 008$  ( $2\sigma$  外部标准偏差,  $n=22$ ), Sr 同位素的标准化值为  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\ 209$ ; 对 La Jolla Nd 同位素标样的测试值为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511\ 847 \pm 0.000\ 003$  ( $2\sigma$  外部标准偏差,  $n=25$ ), Nd 同位素的标准化值为  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721\ 900$ 。采用  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512\ 638$  计算  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 巫山剖面 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化特征

巫山剖面样品酸不溶物 10 个样品的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  测试结果如表 1 所示, 样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的变化范围在 0.717 411~0.719 163 之间, 平均值为 0.717 998; 整体特征是  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的变化范围较窄, 各样品的值差别不大, 具有较好的均一性。图 2 显示了巫山剖面样品酸不溶物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值与中值粒径(median grain size, 简称为 Md) 随深度的变化, 可以看出酸不溶物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  和 Md 的变化具有一定的反相关特点, 表现为粗颗粒比例较高的黄土具有较低的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值, 而细颗粒比例较高的古土壤具有较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值。前人对北方黄土—古土壤的酸不溶物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的测定结果表明, 较细粒度部分 ( $<5\ \mu\text{m}$ ) 的比例越高,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值越高(Chen *et al.*, 2007); 这主要是由于古土壤和黄土粘土矿物含量的不同。

黄土和古土壤的粒度分布被认为是冬季风强度变化的良好指标(刘东生等, 1985)。巫山剖面酸不溶物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  与中值粒径 Md 分布显示的反相关关系以及整体变化幅度较小, 表明巫山黄土粉尘的物源区是基本稳定的, 沉积物酸不溶物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值的变化可能主要受控于冬季风强弱的变化。

### 2.2 关于巫山黄土物源的讨论

巫山黄土的潜在物源主要有远源和近源 2 个方面: 远源即从北方吹来, 与黄土高原黄土同源; 近源就是由长江河谷的沉积物吹扬堆积。现基于 Sr、Nd 同位素特征将巫山黄土与可能源区对比如下。

**2.2.1 巫山黄土与黄土高原黄土对比** 考虑到不同时期黄土物源的差异, 本文采取同期黄土的对比。已有的研究表明, 巫山黄土形成于晚更新世末次冰期(刘兴诗, 1983; 柯于义等, 2007; 马舒慧和彭红霞, 2018), 大致与黄土高原的马兰期黄土同期。同

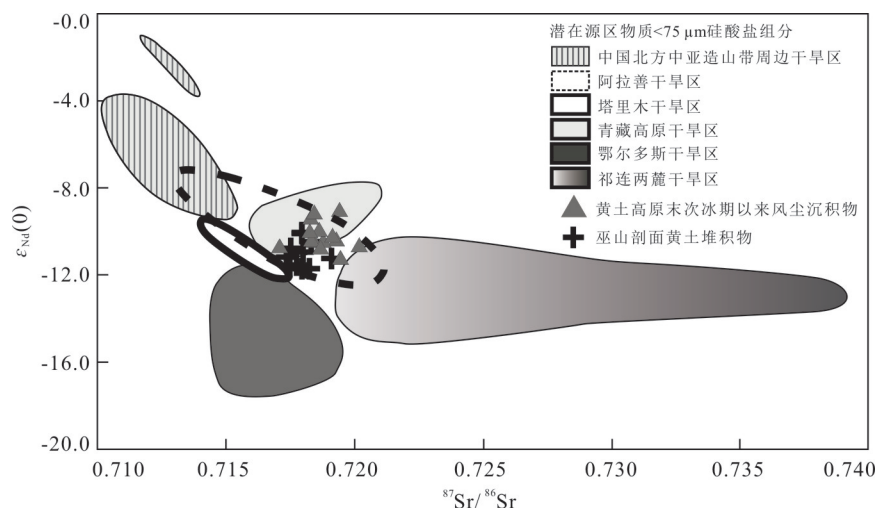


图 3 黄土高原典型黄土剖面及巫山剖面沉积物酸不溶物 Sr-Nd 同位素组成

Fig.3 The Sr-Nd isotopic composition of residues of typical loess profiles in the CLP and “Wushan Loess”

底图据李高军(2010)修改,典型黄土剖面数据来源于文献(Nakano *et al.*, 2004; Yokoo *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2009;李高军,2010)

表 1 巫山剖面样品酸不溶物 Sr-Nd 同位素数据

Table 1 Results of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  of residues of the “Wushan Loess” profile

样品号	深度 (m)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$2\sigma$ ( $10^{-6}$ )	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$2\sigma$ ( $10^{-6}$ )	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$
WS-3-9	2.45	0.718 035	8	0.512 081	8	-10.9
WS-4-13	3.65	0.718 355	3	0.512 099	2	-10.5
WS-5-17	4.85	0.717 958	7	0.512 119	3	-10.1
WS-6-9	5.45	0.717 411	9	0.512 062	6	-11.2
WS-7-13	6.65	0.717 770	4	0.512 046	5	-11.5
WS-8-17	7.85	0.719 163	4	0.512 063	6	-11.2
WS-10-1	9.05	0.718 253	5	0.512 037	3	-11.7
WS-11-5	10.25	0.717 549	4	0.512 083	6	-10.8
WS-12-8	11.40	0.717 964	6	0.512 047	7	-11.5
WS-13-12	12.60	0.717 520	7	0.512 045	5	-11.6
平均值		0.717 998	6	0.512 068	5	-11.4

注: Sr 同位素标准化值  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375\ 209$ , Nd 同位素标准化值  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\ 900$ ; 标准偏差:  $\pm 2\sigma_m$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)=[(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{sample}}/(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}-1]\times 10^4$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512\ 638$ .

时,巫山黄土的粒度也与马兰期黄土相当(李长安等, 2010),两者具有可比性。

为了进行两者的对比,笔者收集了黄土高原末次冰期典型黄土剖面样品的 Sr-Nd 同位素数据(表 2),并将这些黄土的物源分析结果与巫山黄土样品 Sr-Nd 同位素数据绘制了 Sr-Nd 同位素二维散点图(交汇图)(图 3)。分析图 3 可知:(1)黄土高原末次冰期以来的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值介于 0.718 235~0.719 673 之间,平均值为 0.718 623;巫山黄土剖面样品  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化范围为 0.717 411~0.719 163,平均值为

0.717 998,两者数据差别非常小,几乎相同。(2)黄土高原黄土  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值变化范围为 -9.2~-11.3,平均值为 -10.3;巫山黄土  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值在 -10.1~-11.7 之间,平均值为 -11.4(表 1 和表 2)。(3)与前人圈定的北方黄土潜在物源区 Sr-Nd 同位素分区对比,无论是黄土高原黄土还是巫山黄土, Sr-Nd 同位素数据点均落在阿拉善干旱区以内。

上述特征表明,巫山黄土应该与黄土高原末次冰期黄土是同源的。

**2.2.2 巫山黄土与长江河流沉积物对比** 巫山黄土分布于三峡长江河谷内,长江产生的大量松散沉积物也可能是其潜在的粉尘物源。李长安等(2010)通过粒度特征方面的研究和张玉芬等(2010, 2014)通过磁组构以及地球化学角度的研究均表明巫山黄土为风积成因,但个别层位受到过水流作用的影响;张芸等(2001)认为巫山黄土下部为原始风尘堆积,而上层为被水流搬运过的次生黄土;柯于义等(2007)从工程学角度研究认为巫山黄土属于经水流搬运再次沉积形成的次生黄土。那么,长江冲积物是否也是巫山黄土的物源呢?对此有必要将巫山黄土与长江河流沉积物进行对比。

笔者曾对长江上游现代河漫滩细粒沉积物的 Sr-Nd 同位素组成进行研究,结果表明长江宜宾至三峡河段干流河漫滩样品  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值为 -5.9~-7.2(邵磊等, 2014),明显有别于巫山黄土的  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值(-10.1~-11.7)。为了进行更加全面和客观的比较,笔者收集了前人报道的长江沉积物 Sr-Nd 同位素数据。图 4 是巫山黄土与前人有关长江干流现代

表 2 前人报道的黄土高原黄土酸不溶物 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Sr and Nd isotopic compositions of acid insoluble residues from the CLP from the previous studies

样品号	地点	样品	酸淋洗	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	ε <sub>Nd</sub> (0)	参考文献
T1	西峰	S0	醋酸淋洗处理	0.719 260	0.512 106	-10.4	李高军, 2010
T1	西峰	L1	醋酸淋洗处理	0.718 417	0.512 164	-9.2	Yang <i>et al.</i> , 2009
T1	西峰	L1	醋酸淋洗处理	0.718 640	0.512 085	-10.8	李高军, 2010
T2	环县	S0	醋酸淋洗处理	0.718 627	0.512 127	-10.0	李高军, 2010
T2	环县	L1	醋酸淋洗处理	0.718 316	0.512 092	-10.4	Yang <i>et al.</i> , 2009
T2	环县	L1	醋酸淋洗处理	0.718 193	0.512 088	-10.7	李高军, 2010
T3	洛川	S0	醋酸淋洗处理	0.718 378	0.512 106	-10.4	李高军, 2010
T3	洛川	L1	醋酸淋洗处理	0.718 613	0.512 101	-10.5	李高军, 2010
T3	洛川	L1	醋酸淋洗处理	0.718 258	0.512 126	-10.0	Yang <i>et al.</i> , 2009
T4	腊子口	浅层黄土	醋酸淋洗处理	0.718 235	0.512 121	-10.1	Yang <i>et al.</i> , 2009
T5	银川	浅层黄土	醋酸淋洗处理	0.718 810	0.512 100	-10.5	Yokoo <i>et al.</i> , 2004
T6	兰州	浅层黄土	醋酸淋洗处理	0.719 440	0.512 060	-11.3	Yokoo <i>et al.</i> , 2004
T6	兰州	浅层黄土	醋酸淋洗处理	0.717 111	0.512 086	-10.8	Nakano <i>et al.</i> , 2004
T7	西安	浅层黄土	醋酸淋洗处理	0.718 320	0.512 150	-9.4	Yokoo <i>et al.</i> , 2004
T8	渭南	S0	醋酸淋洗处理	0.720 191	0.512 092	-10.7	李高军, 2010
T8	渭南	L1	醋酸淋洗处理	0.719 155	0.512 109	-10.3	李高军, 2010
平均值				0.718 623	0.512 107	-10.3	

注: Sr 同位素标准化值 <sup>88</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=8.375 209, Nd 同位素标准化值 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.721 900; 标准偏差: ±2σ<sub>m</sub>. ε<sub>Nd</sub>(0)=[(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>sample</sub>/(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub>-1]×10<sup>4</sup>, (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>CHUR</sub>=0.512 638.

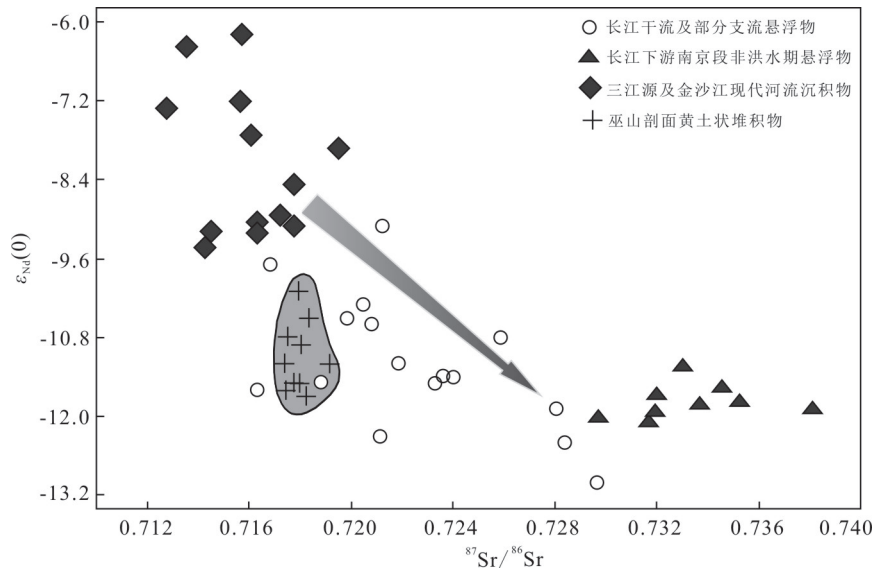


图 4 长江流域现代河流沉积物与巫山剖面黄土状堆积物 Sr-Nd 同位素组成对比

Fig. 4 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr versus ε<sub>Nd</sub>(0) diagram of the Yangtze River sediments and loess samples of the “Wushan Loess” profile. 长江干流及部分支流悬浮物(酸不溶物)数据引自文献(Yang *et al.*, 2007; 邵磊等, 2014); 三江源地区河流及金沙江沉积物(酸不溶物)数据引自文献(Wu *et al.*, 2010; 茅昌平等, 2011)

河流沉积物及水中悬浮物的 Sr-Nd 同位素组成对比图, 显示巫山黄土与长江上游金沙江明显落在不同的区域; 巫山黄土与长江干流悬浮物虽在 ε<sub>Nd</sub>(0) 值域部分一致, 但在 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 值域却有很大的不同, 而

大部分悬浮物也只有三峡以下才有可能沉积. 目前未见有自东向西(自长江下游向上游)的风力搬运和沉积的报道. 由此可见, 长江冲积物不应该是巫山黄土的主要物源.

### 2.3 巫山黄土的物源及古环境意义

巫山黄土的 Sr-Nd 同位素物源示踪分析表明,其粉尘物质主要源于北方的输入,并非来自于长江冲积物的吹扬堆积.这有什么古环境意义呢?一般来说,黄土堆积依赖于干旱化的“荒漠母亲”提供充足的粉尘物源,同时也离不开“冬季风父亲”的搬运输送(郭正堂,2017).对于像巫山黄土这样有一定厚度的黄土的形成至少需要2个最基本条件,一是存在较大规模的风尘源区;二是具有足够强劲的搬运风力(Tsoar and Pye, 1987; Guo *et al.*, 2002; 郭正堂,2017).由于巫山黄土不是近源,说明当时三峡地区并没有干旱到使大量河滩地干涸暴露而成为黄土堆积的粉尘源地.这与近年来长江下游下蜀黄土研究结果——因江淮地区干旱化引发粉尘近源堆积(Hao *et al.*, 2010; Qiao *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2017),有所不同.巫山黄土与长江下游下蜀黄土同处在亚热带东南季风气候控制区,这种区域环境的差异是否与西南季风或古西风对该区的影响有关(Zhang *et al.*, 2018),值得进一步深入研究.

从物源分析结果来看,巫山黄土的形成可能是北方沙漠干旱化程度增加和冬季风加强导致了沙尘南侵的结果.亚洲内陆沙漠的粉尘排放和传输,受到大区域不同类型的大气循环和沉积作用控制.东亚冬季风的低空风带是中国黄土沉积物向南传输的主要动力,黄土高原黄土的物质来自上风向的阿拉善干旱区很好地反映了这个事实.深海  $\delta^{18}\text{O}$  记录末次冰期全球冰量出现了显著的上升(Dansgaard, 1993),这使得北方高纬地区的持续变冷形成了西伯利亚高压气团,导致了北方干旱化加剧和冬季季风的加强.Tsoar and Pye (1987)通过实验证明  $<20\ \mu\text{m}$  的组分可以在空中悬浮较长时间,并被风力搬运较高的高度和较长的距离.中国南方的巫山黄土与黄土高原黄土的 Sr-Nd 同位素组成十分接近,这表明两者具有一致的物源.指示在长时间干冷的冰期条件下,北部干旱区戈壁沙漠盛行西北向风,急剧加强的冬季风有能力将相当量的北方粉尘物质向南传输到更广阔的区域,甚至越过了海拔  $>2\ 000\ \text{m}$  的秦岭山脉,在相对低洼的长江河谷地带沉积下来.长江流域三峡河谷地区的巫山黄土的形成可能是对区域上晚更新世气候转变的响应.

## 3 结论

(1)巫山黄土沉积物的酸不溶物 Sr-Nd 同位素组成分别为:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值变化范围为 0.717 411~0.719 163,平均值为 0.717 998;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值介于 0.512 037~0.512 119 之间,平均值为 0.512 068,对应的  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$  值变化范围为  $-10.1\sim-11.7$ ,平均值为  $-11.4$ .

(2)通过对比与巫山黄土最有可能的物源(长江冲积物和北方黄土)的 Sr-Nd 同位素组成,发现巫山黄土与黄土高原黄土的 Sr-Nd 同位素特征相同,而与长江上游河段河漫滩沉积物的 Sr-Nd 同位素特征相左,从而认为巫山黄土的主要粉尘由北方输入.

(3)物源分析的结果表明,巫山黄土的形成并不是因为当时三峡地区的干旱化,使大片河滩地干涸暴露而成为黄土堆积的粉尘源地.这与近年来长江下游下蜀黄土的研究结果——因江淮地区干旱化引发粉尘近源堆积,有所不同.

值得说明的是,黄土的物源研究是一个非常复杂的科学问题,本文结论仅仅是依据 Sr-Nd 同位素特征分析得出的,还有待其他证据的证实.

致谢:研究生王节涛、邵磊、江华军、孙习林、罗昊、田单参加了野外样品的采集和室内样品的整理工作,在此一并表示感谢!

## References

- An, Z. S., Sun, Y. B., Cai, Y. J., et al., 2017. Asian Monsoon Change and Its Links to Global Climate. *Journal of Earth Environment*, 8(1):1-5 (in Chinese with English abstract).
- Bory, A. J. M., Biscaye, P. E., Grousset, F. E., 2003. Two Distinct Seasonal Asian Source Regions for Mineral Dust Deposited in Greenland (North GRIP). *Geophysical Research Letters*, 30(4): 1-16. <https://doi.org/10.1029/2002gl016446>
- Chen, J., Li, G. J., 2011. Geochemical Studies on the Source Region of Asian Dust. *Science China Earth Sciences*, 54(9): 1279-1301. <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4269-z>
- Chen, J., Li, G. J., Yang, J. D., et al., 2007. Nd and Sr Isotopic Characteristics of Chinese Deserts: Implications for the Provenances of Asian Dust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): 3904-3914. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.033>

- Dansgaard, W., Johnsen, S. J., Clausen, H. B., et al., 1993. Evidence for General Instability of Past Climate from a 250-kyr Ice-Core Record. *Nature*, 364(6434): 218–220. <https://doi.org/10.1038/364218a0>
- Guo, Z. T., 2017. Loess Plateau Attests to the Onsets of Monsoon and Deserts. *Scientia Sinica Terrae*, 47(4): 421–437 (in Chinese).
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416(6877): 159–163. <https://doi.org/10.1038/416159a>
- 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. *Quaternary Science Reviews*, 29(23–24): 3317–3326. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.08.004>
- Kanayama, S., Yabuki, S., Zeng, F. J., et al., 2005. Size-Dependent Geochemical Characteristics of Asian Dust. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83A107–120. <https://doi.org/10.2151/jmsj.83a.107>
- Ke, Y. Y., Yin, H. G., Guo, F., et al., 2007. Genetic Research of 'Wushan Loess' in TGP Reservoir Area. *Yangtze River*, 38(9): 72–73, 76 (in Chinese).
- Lee, M. K., Lee, Y. I., Yi, H. I., 2010. Provenances of Atmospheric Dust over Korea from Sr-Nd Isotopes and Rare Earth Elements in Early 2006. *Atmospheric Environment*, 44(20): 2401–2414. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.010>
- 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*, 35(5): 879–884 (in Chinese with English abstract).
- Li, G., Chen, J., Ji, J., et al., 2009. Natural and Anthropogenic Sources of East Asian Dust. *Geology*, 37(8): 727–730. <https://doi.org/10.1130/g30031a.1>
- Li, G. J., 2010. Trace the Source Regions of East Asia Dust Using Geochemical Tools (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Li, X. S., Han, Z. Y., Lu, H. Y., et al., 2017. Onset of Xiashu Loess Deposition in Southern China by 0.9 Ma and Its Implications for Regional Aridification. *Science China Earth Sciences*, 61(3): 256–269. <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9134-2>
- 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, D. S., An, Z. S., Zheng, H. H., 1985. Loess and Environment. Science Press, Beijing, 191–208 (in Chinese).
- Liu, F., Li, G. J., Chen, J., 2014. U-Pb Ages of Zircon Grains Reveal a Proximal Dust Source of the Xiashu Loess, Lower Yangtze River Region, China. *Chinese Science Bulletin*, 59(20): 2391–2395. <https://doi.org/10.1007/s11434-014-0318-2>
- Liu, X. S., 1983. Quaternary System of the Sichuan Basin. Sichuan Science and Technology Publishing House, Chengdu, 95–97 (in Chinese).
- Ma, S. H., Peng, H. X., 2018. Distribution and Paleoclimate Implication of Microbial Tetraether Lipids in Wushan Loess. *Earth Science*, 43(11): 4018–4026 (in Chinese with English abstract).
- Mao, C. P., Chen, J., Yuan, X. Y., et al., 2011. Seasonal Variations in the Sr-Nd Isotopic Compositions of Suspended Particulate Matter in the Lower Changjiang River. *Chinese Science Bulletin*, 56(31): 2591–2598 (in Chinese).
- Miyamoto, T., Hamamoto, R., Yanagi, T., 2010. Sr and Nd Isotope Compositions of Atmospheric Mineral Dust at the Summit of Mt. Sefuri, North Kyushu, Southwest Japan: A Marker of the Dust Provenance and Seasonal Variability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(5): 1471–1484. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.12.002>
- Nakano, T., Yokoo, Y., Nishikawa, M., et al., 2004. Regional Sr-Nd Isotopic Ratios of Soil Minerals in Northern China as Asian Dust Fingerprints. *Atmospheric Environment*, 38(19): 3061–3067. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.016>
- Qiao, Y. S., Hao, Q. Z., Peng, S. S., et al., 2011. Geochemical Characteristics of the Eolian Deposits in Southern China, and Their Implications for Provenance and Weathering Intensity. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 308(3–4): 513–523. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.06.003>
- Shao, L., Li, C. A., Zhang, Y. F., et al., 2014. Sr-Nd Isotopic Compositions of the Upper Yangtze River Sediments: Implications for Tracing Sediment Sources. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(2): 290–295 (in Chinese with English abstract).
- Sun, J. M., 2005. Nd and Sr Isotopic Variations in Chinese Eolian Deposits during the Past 8 Ma: Implications for Provenance Change. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(2): 454–466. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.09.019>
- Sun, Y. B., Tada, R., Chen, J., et al., 2008. Tracing the Provenance of Fine-Grained Dust Deposited on the Central Chinese Loess Plateau. *Geophysical Research Letters*, 35

- (1): 1—5. <https://doi.org/10.1029/2007gl031672>
- Tsoar, H., Pye, K., 1987. Dust Transport and the Question of Desert Loess Formation. *Sedimentology*, 34(1): 139—153. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00566.x>
- Wu, W. H., Xu, S. J., Yang, J. D., et al., 2010. Isotopic Characteristics of River Sediments on the Tibetan Plateau. *Chemical Geology*, 269(3—4): 406—413. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.10.015>
- Xu, H. Y., Zheng, X. M., Zhou, L. M., et al., 2016. Characteristics of Quartz Grains of the Xiashu Loess in Zhoujiasan Nanjing and Its Provenance Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(6): 1176—1186 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. D., Li, G. J., Rao, W. B., et al., 2009. Isotopic Evidence for Provenance of East Asian Dust. *Atmospheric Environment*, 43(29): 4481—4490. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.06.035>
- Yang, S. Y., Jiang, S. Y., Ling, H. F., et al., 2007. Sr-Nd Isotopic Compositions of the Changjiang Sediments: Implications for Tracing Sediment Sources. *Science China Earth Sciences*, 50(10): 1556—1565. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0052-6>
- Yokoo, Y., Nakano, T., Nishikawa, M., et al., 2004. Mineralogical Variation of Sr-Nd Isotopic and Elemental Compositions in Loess and Desert Sand from the Central Loess Plateau in China as a Provenance Tracer of Wet and Dry Deposition in the Northwestern Pacific. *Chemical Geology*, 204(1—2): 45—62. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.11.004>
- Zhang, H. B., Griffiths, M. L., Chiang, J. C. H., et al., 2018. East Asian Hydroclimate Modulated by the Position of the Westerlies during Termination I. *Science*, 362(6414): 580—583. <https://doi.org/10.1126/science.aat9393>
- Zhang, Y., Zhu, C., Zhang, Q., et al., 2001. Sedimentary Environment and Eolian Deposits in Past 3 000 Years in Daning Valley of the Three Gorges of the Yangtze River. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(4): 83—88 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. G., Shao, L., et al., 2010. Magnetic Fabric Characteristics and Implications for Its Origin of "Wushan Loess". *Earth Science*, 35(5): 885—890 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Shao, L., Xiong, D. Q., et al., 2014. Elemental Compositions of the "Wushan Loess": Implications for Origin and Sediment Source. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(1): 78—84 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X. M., 1999. Aeolian Sediments and Environment in Yangtze River Delta and the Adjacent Coastal Ocean. East China Normal University Press, Shanghai (in Chinese).
- Zheng, X. M., Yan, Q. S., 1995. Aeolian Loess Deposition during the Last Glacial Period in the Northern Jiangsu Plain of the Yangtze Delta and Western Areas of the Yellow Sea and the East China Sea. *Quaternary Sciences*, 3: 258—266 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 安芷生, 孙有斌, 蔡演军, 等, 2017. 亚洲季风变迁与全球气候的联系. *地球环境学报*, 8(1): 1—5.
- 郭正堂, 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来. *中国科学: 地球科学*, 47(4): 421—437.
- 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—73, 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*, 35(5): 879—884.
- 李高军, 2010. 东亚风尘物源地球化学示踪研究(博士学位论文). 南京: 南京大学.
- 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.
- 刘东生, 安芷生, 郑洪汉, 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 191—208.
- 刘兴诗, 1983. 四川盆地的第四系. 成都: 四川科学技术出版社, 95—97.
- 马舒慧, 彭红霞, 2018. 巫山黄土微生物四醚膜脂分布特征及其古气候意义. *地球科学*, 43(11): 4018—4026.
- 茅昌平, 陈骏, 袁旭音, 等, 2011. 长江下游悬浮物Sr-Nd同位素组成的季节性变化与物源示踪. *科学通报*, 56(31): 2591—2598.
- 邵磊, 李长安, 张玉芬, 等, 2014. 长江上游水系沉积物铽—钆同位素组成及物源示踪. *沉积学报*, 32(2): 290—295.
- 徐洪阳, 郑祥民, 周立旻, 等, 2016. 南京周家山下蜀黄土石英颗粒特征及其物源意义. *沉积学报*, 34(6): 1176—1186.
- 张芸, 朱诚, 张强, 等, 2001. 长江三峡大宁河流域3000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.
- 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*, 35(5): 885—890.
- 张玉芬, 邵磊, 熊德强, 等, 2014. “巫山黄土”元素地球化学特征及成因和物源意义. *沉积学报*, 32(1): 78—84.
- 郑祥民, 1999. 长江三角洲及海域风尘沉积与环境. 上海: 华东师范大学出版社.
- 郑祥民, 严钦尚, 1995. 末次冰期苏北平原和东延海区的风尘黄土沉积. *第四纪研究*, 3: 258—266.