

# 南京老虎山黄土剖面中铷锶地球化学和磁化率与古气候变化的关系

李福春<sup>1</sup> 谢昌仁<sup>1</sup> 金章东<sup>2</sup> 潘根兴<sup>1</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095;  
2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

**摘要:**宁镇地区的下蜀黄土记录了古气候变化的丰富信息。作为中国北方风尘堆积的南部边缘相,下蜀黄土在全球环境变化研究中占有重要的地位。本文以 10 cm 间距系统分析了老虎山剖面的 Rb、Sr 含量和频率磁化率。结果显示,磁化率和 Rb 含量可以较好地指示东亚冬季风强度变化;Rb/Sr 比可以作为下蜀黄土化学风化强度的替代性指标;剖面的 Rb/Sr 比由下至上升高是南京地区 12 万年以来化学风化作用增强的结果。

**关键词:**铷锶地球化学;磁化率;黄土-古土壤;古气候变化;南京老虎山

**中图分类号:**P597<sup>+</sup>.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2003)01-0093-06

中国黄土是第四纪全球气候变化信息的重要载体之一。其研究方法包括生物学方法(蜗牛化石、孢粉组合等)、物理学方法(磁化率、粒度等)和化学方法。生物学指标和物理学指标的建立为中国黄土及古环境变化的深入研究做出了重大贡献。近些年来,地球化学方法在提取东亚冬、夏季风信息方面发挥了越来越重要的作用,发现了一些能够有效地反映化学风化强度的地球化学指标,如游离铁/全铁比值<sup>[1,2]</sup>、全氧化铁含量<sup>[3]</sup>、CaCO<sub>3</sub> 含量<sup>[4]</sup>、Rb/Sr<sup>[5,6]</sup>、<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr<sup>[7]</sup>、Fe/Mg<sup>[8]</sup>等。

与北方黄土相比,长江中下游地区的风成黄土在古气候学研究上具有独特的区位优势。它作为北方风尘堆积的南部边缘相和南方红土发育区的北界<sup>[9]</sup>,敏感地记录了东亚冬季风的影响范围,空间上的对比研究不仅可以使南方和北方古气候变化有机地联系起来,进而揭示不同时期季风进退的总体框架,而且有助于深刻认识冬、夏季风的循环过程和机制。宁镇地区的下蜀黄土记录了古气候变化的丰富信息,保存完好的剖面是研究古气候变化的理想场所。

长江中下游地区的下蜀黄土具有较长的研究历史,其风尘堆积的观点已被众多学者所接受,并使之成为研究长江中下游地区古环境变迁的重要对象。

前人对下蜀黄土的粒度<sup>[10]</sup>和磁化率<sup>[11-13]</sup>等物理学指标进行了探索,获得了一些重要的认识。然而,有关地球化学方面的信息还知之不多,仅见全氧化铁<sup>[3]</sup>和有机碳<sup>[4]</sup>及 CIA<sup>[15]</sup>等方面的研究报道。长江中下游地区温湿多雨,化学风化作用较强,这使某些环境信息有可能在风化成壤过程中丢失。因此,在利用下蜀黄土研究长江下游地区的古气候变化时,加强多指标的综合和对比研究非常必要。本文以老虎山黄土-古土壤剖面为例,研究 Rb、Sr 含量和 Rb/Sr 比以及磁化率作为古环境替代性指标的可能性。

## 1 采样和分析

老虎山下蜀黄土剖面位于南京市幕府山上元门附近(32°06'N, 118°46'E)。剖面厚度 12 m 左右(未到底),表面土质新鲜,层次比较清晰。第二层古土壤(S2)水平延伸,中间夹有厚度不大、风化程度较其他黄土层强的棕黄色黄土层。这一层古土壤在南京泰山新村剖面、许家村剖面、李家岗剖面以及句容县下蜀镇剖面等处均可见到<sup>[16]</sup>,因此,可以作为下蜀黄土区域性对比的标志层。剖面下伏基岩为奥陶系仑山组白云质灰岩。

收稿日期:2002-08-22;改回日期:2002-12-10

基金项目:中国博士后科学基金项目(第 30 批)资助。

作者简介:李福春,男,1964 年生,博士,主要从事环境地球化学研究;E-mail:fchli@sina.com。

除表层(耕作层)外,笔者对剖面的露头部分进行了系统采样,采样间距 10 cm。剖面可以分成 6 个层次,包括 3 个古土壤层和 3 个黄土层。

样品自然风干后磨至 200 目,然后分别进行磁化率测试和 Rb、Sr 含量分析。频率磁化率测量在中国科学院地理与湖泊研究所完成,采用英国 Bartington 公司生产的 MS-2 磁化率仪进行测试,其分析误差 $\pm 1\%$ 。Rb 和 Sr 含量在南京大学现代分析中心采用日本岛津公司生产的 VP-320 型 X 射线荧光光谱仪进行测定,相对误差 $<1\%$ 。

## 2 分析结果

表 1 列出了 Rb、Sr 含量、Rb/Sr 比以及磁化率的统计结果。可以看出,古土壤中 Rb 平均含量

( $108.66 \times 10^{-6}$ )略高于黄土( $104.29 \times 10^{-6}$ ),而古土壤中 Sr 平均含量( $130.76 \times 10^{-6}$ )低于黄土( $137.09 \times 10^{-6}$ )。从整个剖面来看,Rb 含量变化范围较小( $98 \times 10^{-6} \sim 113 \times 10^{-6}$ ),平均  $107.25 \times 10^{-6}$ 。Sr 变化范围较大( $109 \times 10^{-6} \sim 164 \times 10^{-6}$ ),平均  $132.81 \times 10^{-6}$ ,标准差  $15.60 \times 10^{-6}$ ,变异系数达 11.71%,说明 Sr 含量明显地记录了化学风化作用的影响。

下蜀黄土的黄土层磁化率最低值  $56.5 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均  $143.69 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ;古土壤层最高  $175.5 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均  $148.48 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从磁化率的平均值来看,老虎山剖面黄土层高于下蜀黄土其他剖面(如李家岗、杨梅塘、向阳、镇江等),也高于北方的洛川剖面。古土壤层的磁化率平均值与下蜀黄土的其他剖面接近。

表 1 老虎山剖面黄土和古土壤 Rb、Sr 含量与磁化率

Table 1 Concentrations of Rb, Sr and magnetic susceptibility of loess and paleosols at the Laohushan profile

层位	样数	Bb( $10^{-6}$ )		Sr( $10^{-6}$ )		Rb/Sr		频率磁化率( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	
		范围	平均	范围	平均	范围	平均	范围	平均
S <sub>1</sub>	28	105~111	107.11	109~121	113.86	0.88~1.02	0.94	143.0~175.5	155.17
L <sub>1</sub>	12	98~108	103.67	115~136	120.08	0.76~0.93	0.87	112.8~154.7	140.97
S <sub>2</sub>	31	103~223	109.84	119~162	143.10	0.68~0.90	0.77	118.3~155.0	142.80
L <sub>2</sub>	5	98~104	100.00	135~140	136.80	0.71~0.74	0.73	56.5~96.6	68.6
S <sub>3</sub>	12	106~112	109.25	135~146	138.33	0.76~0.81	0.79	98.1~167.2	147.55
L <sub>3</sub>	17	103~110	106.00	139~164	149.18	0.66~0.79	0.71	157.5~184.0	167.70
S	71	103~113	108.66	109~162	130.76	0.68~1.02	0.84	98.1~175.5	148.48
L	34	98~110	104.29	115~164	137.09	0.66~0.93	0.77	56.5~184.0	143.69
合计	105	98~113	107.25	109~164	132.81	0.66~1.02	0.82	56.5~184.0	146.69
洛川 L <sup>[6]</sup>	177	76~115	97	140~213	184	0.41~0.82	0.53	20~143	60
洛川 S <sup>[6]</sup>	105	93~133	115	115~207	148	0.45~1.20	0.79	59~278	151

## 3 讨论和结论

精确的时间标尺是研究古气候变化的重要前提。长期以来,第四纪地质学家和土壤学家都在试图解决长江中下游地区黄土的堆积时代问题,先后尝试了热释光法<sup>[17]</sup>、电子自旋共振法<sup>[9,18]</sup>、光释光法<sup>[16]</sup>等。定年结果表明,下蜀黄土沉积时代为中更新世到晚更新世<sup>[9,16~18]</sup>。

最近,赖忠平等<sup>[16]</sup>采用 DAYBREAK 1150 TL/OSL 自动测量仪对南京许家村剖面进行了红外光释光测定,获得了 10 个可靠年龄数据。许家村与老虎山直线距离不过 10 km,两剖面各主要层位的堆

积时间应该大体相同,因此,老虎山剖面的 S<sub>1</sub>、L<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 底界年龄大致分别为 10.1ka、71.5ka 和 77.1ka。L<sub>2</sub> 及其以下样品的信号接近饱和,只能通过计算获得其年龄的近似值。根据许家村剖面 S<sub>1</sub>、L<sub>1</sub> 厚度和年龄计算出的黄土堆积速率(在古土壤和黄土形成时期分别为 0.05 mm/a 和 0.10 mm/a)可以用来计算老虎山剖面各层位堆积的近似年龄。计算后得到 L<sub>2</sub>、S<sub>3</sub>、L<sub>3</sub> 的底部年龄分别为 77.6ka、101.6ka、118.6 ka。本文的采样间距为 10 cm,对于古土壤和黄土的时间分辨率分别为 2000 a 和 1000 a。

### 3.1 磁化率与冬季风强度

老虎山剖面的磁化率曲线(图 1-a)表明,古土

壤层的磁化率波动不大,大部分在  $150 \times 10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  左右。在磁化率曲线上对应古土壤的波峰不明显,但对应黄土层的波谷却十分显著(受到扰动的表土层除外)。它们分别对应着黄土层  $L_1$  和  $L_2$ ,但低值区范围小于黄土层的实际厚度,可能说明每一黄土层的顶部和底部都有不同程度的成壤作用。底部的黄土层( $L_3$ )没有在磁化率曲线上显示出对应的波谷,可能是因为该层位于剖面露头的最底部,长期浸水形成了新的自生磁颗粒。磁化率曲线表现出低幅高频的锯齿状波动,表明该区大的气候冷暖旋回中存在着较为频繁的小尺度气候冷暖波动。

在磁化率曲线的旋回波动中,峰值段对应的地层代表了较为温暖湿润的成壤时期,而谷值段对应的是较为干冷的风尘黄土堆积与较弱的成壤作用。土壤磁化率的高低与成土过程中产生的稳定单畴和超顺磁性颗粒呈极显著正相关,因此可以指示风化成壤作用的强度<sup>[19]</sup>。已有的研究证实,黄土和古土壤的磁化率信号的主要载体是非常细小( $<1 \mu\text{m}$ )的颗粒部分,其中磁铁矿和磁赤铁矿是磁化率的主要贡献者<sup>[20]</sup>。冬季风盛行时,堆积以较粗颗粒的粉尘为主,磁化率值较低;反之,堆积以较细颗粒粉尘为主,磁化率值较高。成壤作用强度与磁化率的关系中存在一个临界条件问题<sup>[20]</sup>:在土壤化程度较弱、古降雨量不大的情况下,随着土壤化作用增强,磁赤铁矿的

相对含量随之增加,磁化率增高;而当土壤磁化率达到一定程度后,磁赤铁矿可能被氧化而转变为更稳定的磁性矿物,使磁化率不再增长。这可能是老虎山剖面古土壤的磁化率普遍较高但峰值不明显的原因。由此可见,磁化率可以作为长江中下游地区黄土堆积时冬季风强度的指标,但若作为风化成壤强度的指标,则需要深入研究不同粒级的磁化率。

### 3.2 Rb 含量与冬季风强度

由图 1-b 可以看出,Rb 在整个剖面上的含量变化范围较小,最小  $98 \times 10^{-6}$ ,最大  $113 \times 10^{-6}$ ,平均值  $107.25 \times 10^{-6}$ ,标准差  $3.34 \times 10^{-6}$ ,变异系数仅 3.12%。业已证明,Rb 在风化成壤过程中几乎是不移动的<sup>[21]</sup>,因此其含量变化主要是粉尘中 Rb 初始含量的贡献。相对稳定的 Rb 含量说明,在最近 0.12 Ma 以来下蜀黄土的物质来源基本相同。老虎山剖面黄土层 Rb 含量( $104.29 \times 10^{-6}$ )高于洛川黄土( $97 \times 10^{-6}$ ),这与粒度南低北高的结论<sup>[9]</sup>相吻合。粒度细则粘土矿物含量高,使堆积物中 Rb 含量增高。

Rb 含量曲线与磁化率曲线非常相似,不同的是除两个明显的波谷外,还存在几个较小的波谷和波峰。其中,谷值段对应黄土层,而峰值段对应古土壤层。Rb 含量曲线与磁化率曲线相似说明,磁化率与 Rb 含量之间存在某种内在的联系,可能是:冰期时堆积的粉尘中粗颗粒矿物的比例较大,间冰期时

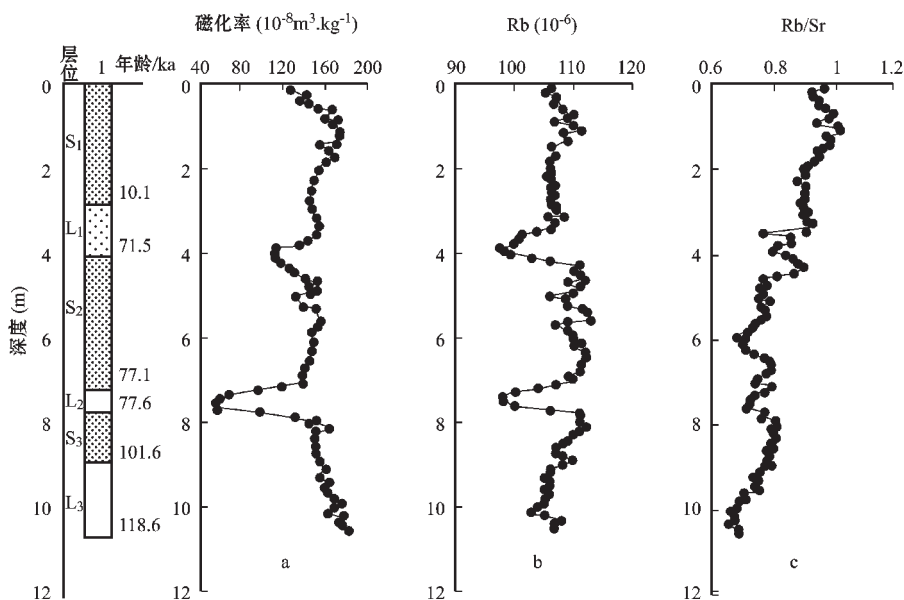


图 1 老虎山剖面磁化率、Rb 含量和 Rb/Sr 比值变化曲线

Fig. 1 Comparison of curves of magnetic susceptibility, Rb concentrations and Rb/Sr ratios of loess and paleosols at the Laohushan section

粉尘中以粘土矿物等细颗粒矿物为主。细颗粒矿物的磁化率值偏高而且一般富 Rb<sup>[21]</sup>。在 Rb 含量变化曲线上,除峰谷变化之外,还存在一些锯齿状的次级变化,表明它有可能是比磁化率更灵敏的冬季风强度的代用指标。在十几万年的时间跨度上,Rb 含量与磁化率之间总体上的相似性表明,Rb 含量变化指示了季风场强的变化,而且对古气候变化的反应可能比磁化率更灵敏。

由图 2 可以看出,黄土层的 Rb 含量变化相对较大,而古土壤层的 Rb 含量变化相对较小。在古土壤层内部,常常夹有弱风化的黄土母质层,黄土层中也存在很薄的古土壤夹层,这在 Rb 含量变化曲线上有敏感的反应。古土壤层的 Rb 含量均高于其下伏的黄土层,这主要是粉尘初始含量的贡献。不可否认,活动性元素的淋滤带出使 Rb 相对富集也可导致古土壤中 Rb 含量升高,但其与粉尘初始含量的贡献相比可能是微乎其微的。二者对 Rb 含量的相对贡献率有待于进一步研究。

粒度分选会导致冰期和间冰期粉尘堆积物的 Sr 初始含量出现差异,而在风化成壤过程中 Sr 又是可移动的元素,所以,判断粉尘的初始 Sr 含量与风化成壤作用对样品 Sr 含量的相对贡献率是比较困难的。

### 3.3 Rb/Sr 比与化学风化

图 1-c 显示,古土壤层在 Rb/Sr 分布曲线上对应波峰,黄土层则对应波谷,表明 Rb/Sr 比与风化成壤作用强度有关。每一层古土壤均比下伏黄土层之 Rb/Sr 比要大(图 3),例如 S<sub>1</sub> 比 L<sub>1</sub> 大,S<sub>2</sub> 比 L<sub>2</sub> 大等等,这说明古土壤是其下伏的黄土层经风化成壤

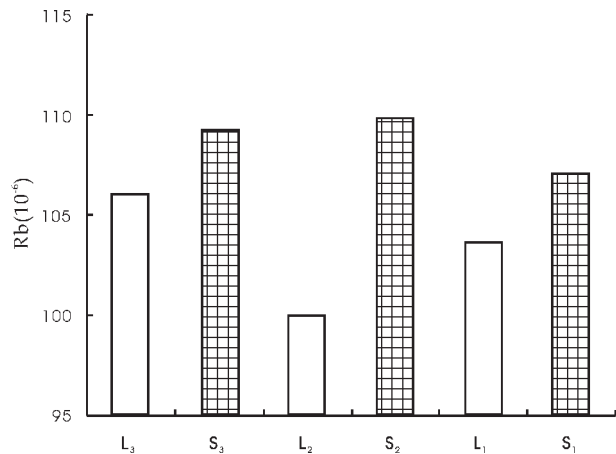


图 2 老虎山剖面黄土和古土壤 Rb 平均含量对比

Fig. 2 Diagram of Rb concentrations in loess and paleosols at the Laohushan section

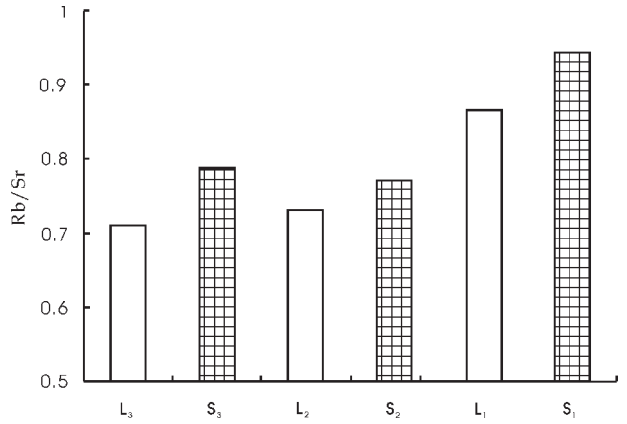


图 3 老虎山剖面黄土和古土壤 Rb/Sr 比值

Fig. 3 Diagram of the Rb/Sr ratio in loess and paleosols at the Laohushan section

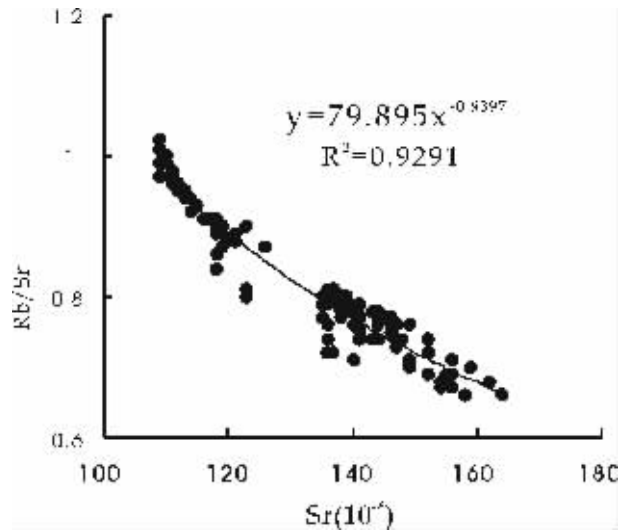


图 4 老虎山剖面 Rb/Sr 比值与 Sr 含量负相关关系

Fig. 4 Negative correlation between the Rb/Sr ratios and Sr concentrations in loess and paleosols at the Laohushan section

作用形成的。

老虎山剖面的 Rb/Sr 深度分布曲线与磁化率分布曲线对比(图 1-a、c)可以看出,它们具有相近的峰谷变化,但相位和幅度不完全一致,而且磁化率曲线的次级峰谷变化不如 Rb/Sr 比明显,说明 Rb/Sr 比记录的夏季风变化信息比磁化率曲线更丰富。

由图 3 还可以看出,不论是古土壤层还是黄土层, Rb/Sr 比都有由老到新增大的趋势,这说明 0.12Ma 以来长江下游地区化学风化逐渐加强。

风化剖面中 Rb/Sr 分离是由 Rb、Sr 地球化学行为为差别造成的。Rb 和 Sr 都是典型的分散元素,在



自然界中极少形成独立矿物,主要是以类质同象的形式存在于造岩矿物中。Rb的离子半径(0.147 nm)与K(0.133 nm)相近,主要分散在含钾矿物(如白云母、黑云母和钾长石等)中,而Sr的离子半径(0.113 nm)与Ca(0.099 nm)相近,所以Sr主要赋存在含钙矿物(如斜长石、角闪石、辉石和碳酸盐矿物等)中。黄土和古土壤中Rb、Sr含量主要由风源区粉尘的初始值和成壤作用造成的Rb、Sr含量变化两部分构成。冬季风强度变化导致的粉尘粒度差异在一定程度上改变着矿物组成,从而影响粉尘的Rb和Sr初始含量。在冰期,冬季风吹扬并堆积以石英、长石以及碳酸盐矿物等粗颗粒为主的粉尘,它们具有较低的Rb含量、较高的Sr含量和较低的磁化率;在间冰期,堆积以细颗粒(如Rb含量较高的粘土矿物)为主的粉尘<sup>[22]</sup>。即间冰期形成的粉尘堆积比冰期形成的粉尘堆积具有略高的Rb/Sr比值。

黄土和古土壤中Rb/Sr比的大小主要取决于Sr的淋滤程度。在表生环境下,矿物的风化顺序一般为:方解石→橄榄石→基性斜长石→辉石→角闪石→酸性斜长石→黑云母→钾长石→白云母→石英<sup>[23]</sup>,即含Rb矿物比含Sr矿物抗化学风化。在风化过程中,Rb与粘土矿物具有强亲和性,易被粘土矿物吸附而保留在原地或近距离迁移。Sr主要以游离态形式被地表水或地下水带走。化学风化作用造成Rb和Sr的分离,导致残留部分的Rb/Sr比值升高。也就是说,成壤作用使古土壤Rb/Sr比值在原来较高的基础上进一步升高。Rb/Sr—Sr含量之间具有极好的负相关关系(图4)有力地证明了Rb保持基本稳定而Sr被淋滤的特点。Chen等<sup>[21]</sup>的研究结果为我们提供了重要的实验依据:在风化成壤过程中,20%~40%的Sr可被酸溶,而可移动的酸溶Rb几乎可以忽略不计。

老虎山剖面黄土和古土壤Rb/Sr比(平均0.77和0.84)都高于洛川剖面(0.53和0.79),这一方面说明老虎山剖面化学风化强于洛川。

通过对老虎山剖面Rb、Sr含量、Rb/Sr比以及磁化率曲线的研究,笔者得出以下主要认识:

1)磁化率可以指示冬季风强度变化,但对老虎山剖面来说,对成壤强度的指示意义尚不清楚,在对不同粒级的磁化率进行系统研究后才有可能得出可靠的结论;

2)Rb含量与磁化率曲线有相同的峰谷变化,也可以作为冬季风强度的代用指标;

3)Rb/Sr比的变化反映了化学风化强度的变化,它可以作为夏季风场强度变化的替代性指标。

4)Rb/Sr比由剖面的下部到上部有比较明显的增大趋势,说明0.12 Ma以来南京地区化学风化作用逐渐增强。

## 参考文献(References):

- [1] Guo Z, Liu T, Guiot J, et al. High frequency pulses of East Asian monsoon climate in the last two glaciations: Link with the North Atlantic [J]. *Climate Dynamics*, 1996, 12:701~709.
- [2] 郝青振,郭正堂. 1.2Ma以来黄土-古土壤序列风化成壤强度的定量研究与东亚夏季风演化[J]. *中国科学(D辑)*,2001,31(6):520~528.  
Hao Qingzhen, Guo Zhengtang. Quantification of the intensity of weathering pedogenesis of the loess-paleosol series over the last 1.2 Ma and evolution of the East Asian summer monsoon [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (6):522~528 (in Chinese).
- [3] 李小平,夏应菲,杨浩. 安徽宣城第四纪红土剖面的全氧化铁含量及其古气候意义[J]. *江苏地质*,1998,22(3):182~185.  
Li Xiaoping, Xia Yingfei, Yanghao. Total iron oxide content at the Quaternary red soil section at Xuancheng, Anhui and its paleoclimatic significance [J]. *Jiangsu Geology*, 1998,22 (3):182~185 (in Chinese with English abstract).
- [4] 刘丛强,张劲,李春来. 黄土中CaCO<sub>3</sub>含量及其Sr同位素组成变化与古气候波动记录[J]. *科学通报*,1999,44(10):1088~1092.  
Liu Congqiang, Zhangjin, Li Chunlai. CaCO<sub>3</sub> content and variation in Sr isotopic composition in loess and records of paleoclimatic fluctuations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (10):1088~1092 (in Chinese).
- [5] Gallet S, Jahn B M, Toril M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-paleosol sequence, China, and paleoclimate implication [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133:67~75.
- [6] 陈骏,安芷生,汪永进,等. 最近800ka洛川黄土剖面中Rb/Sr分布和古季风变迁[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(6):498~504.  
Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, et al. Rb/Sr distribution and paleomonsoon variation in the Luochuan loess in the last 800 ka [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(6):498~504 (in Chinese).
- [7] Yang J, Chen J, An Z et al. Variations in <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios of calcites in Chinese loess: a proxy for chemical weathering associated with the East Asian summer monsoon [J]. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 2000, 157:151~159.
- [8] 刘连文,陈骏,王洪涛,等. 一个不受分选作用影响的化学风化指标:黄土酸不溶物中Fe/Mg值[J]. *科学通报*,2001,46:578~581.  
Liu Lianwen, Chen Jun, Wang Hongtao, et al. A proxy of chemical weathering free from the influence of sorting: Fe/Mg value in acid-insoluble substances of loess [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46:578~581 (in Chinese).
- [9] 杨达源,韩辉友,周旅复,等. 安徽宣城地区中晚更新世风成堆积与环境变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*,1991,11(2):97~104.

- Yang Dayuan, Han Huiyou, Zhou Lufu, et al. Middle-late Pleistocene eolian deposits and environmental change in the Xuancheng area, Anhui [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1991, 11 (2): 97~104 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 等. 皖南第四纪风尘堆积序列粒度特征及其意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1997, 17(4): 73~81.  
Li Xusheng, Yang Dayuan, Lu Huayue, et al. Grain size characteristics of Quaternary eolian dust accumulation sequences in southern Anhui and their significance [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1997, 17 (4): 73~81 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李徐生, 杨达源, 韩辉友. 皖南风尘堆积-古土壤序列磁化率初步研究[J]. *安徽师范大学学报(自然科学版)*, 1998, 21(1): 64~69.  
Li Xusheng, Yang Dayuan, Han Huiyou. Preliminary study on the magnetic susceptibility of the eolian dust accumulation-paleosol sequences in southern Anhui [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science edition)*, 1998, 21 (1): 64~69 (in Chinese).
- [12] 胡雪峰, 龚子同. 土壤磁化率—作为一种气候指标的局限性[J]. *土壤*, 1999, 31(1): 39~42.  
Hu Xuefeng, Gong Zitong. Soil magnetic susceptibility—Its restriction as a climatic proxy [J]. *Soil*, 1999, 31 (1): 39~42 (in Chinese).
- [13] 张建军, 杨达源, 陈曰友, 等. 长江中下游地区下蜀黄土磁化率曲线与环境变迁[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 18~21.  
Zhang Jianjun, Yang Dayuan, Chen Yueyou et al. Study on the magnetic susceptibility of the Xiashu loess and the paleoenvironment changes in the middle and lower Changjiang River [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 18(1): 18~21 (in Chinese with English abstract).
- [14] 杨浩, 李小平, 赵其国, 等. 宣城风积-红土系列剖面有机碳同位素的特征及意义[J]. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 177~182.  
Yang Hao, Li Xiaoping, Zhao Qiguo, et al. Organic carbon isotope characteristics and significance of the eolian sediment-red soil sequence at Xuancheng, Anhui [J]. *Acta Pedologica*, 1995, 32 (supplement): 177~182 (in Chinese).
- [15] 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学记录[J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 402~406.  
Yang Shouye, Li Congxian, Li Xusheng, et al. Geochemical records of chemical weathering of the Xiashu Loess in the lower reaches of the Changjiang River [J]. *Geochimica*, 2001, 30 (4): 401~406 (in Chinese with English abstract).
- [16] 赖忠平, 周杰, 夏应菲, 等. 南京下蜀黄土红外释光测年[J]. *自然科学进展*, 2001, 11(2): 203~207.  
Lai Zhongping, Zhou Jie, Xia Yingfei, et al. Infrared thermoluminescent dating of the Xiashu loess in Nanjing [J]. *Progress in Natural Science*, 2001, 11 (2): 203~207 (in Chinese).
- [17] 黄姜依, 方家骅, 邵家骥, 等. 南京下蜀黄土沉积时代的研究[J]. *地质论评*, 1988, 34(3): 240~247.  
Huang Jiangong, Fang Jiahua, Shao Jiayi, et al. Age of deposition of the Xiashu loess in Nanjiang [J]. *Geological Review*, 1988, 34 (3): 240~247 (in Chinese with English abstract).
- [18] 杨浩, 赵其国, 李小平, 等. 安徽宣城风成沉积-红土系列剖面ESR年代学研究[J]. *土壤学报*, 1995, 32(增刊): 293~300.  
Yang Hao, Zhao Qiguo, Li Xiaoping et al. ESR chronological study of the eolian sediment-red soil sequence at Xuancheng, Anhui [J]. *Acta Pedologica*, 1995, 32 (supplement): 293~300 (in Chinese).
- [19] 卢升高, 俞劲炎, 章明奎, 等. 长江中下游第四纪沉积物发育土壤磁性增强的环境磁学机制[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 336~340  
Lu Shenggao, Yu Jingyan, Zhang Mingkui, et al. Environmental magnetism of magnetic enhancement for soils formed on Quaternary sediments in Yangtze River valley. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 18 (3): 336~340 (in Chinese with English abstract).
- [20] 郭斌, 朱日祥, 白立新, 等. 黄土沉积物的岩石磁学特征与土壤化作用的关系[J]. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(5): 377~385.  
Guo Bin, Zhu Rixiang, Bai Lixin, et al. Relation between the rock magnetic features of loess sediments and pedogenesis [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (5): 377~385 (in Chinese).
- [21] Chen J, An Z, John Head. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of Central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 1999, 51 : 215~219.
- [22] Chen J, Ji J, Yang J, et al. Use of rubidium to date loess and paleosols of the Luochuan sequence, Central China [J]. *Quaternary Research*, 2000, 54: 198~205.
- [23] Nesbitt H W, Wilson R E. Recent chemical weathering of basalts [J]. *American Journal Sciences*, 1992, 292: 740~777.

## Rubidium and strontium geochemistry in the Laohushan loess section, Nanjing, and relation between magnetic susceptibility and paleoclimatic change

LI Fu-chun<sup>1</sup>, XIE Chang-ren<sup>1</sup>, JIN Zhang-dong<sup>2</sup>, PAN Gen-xing<sup>1</sup>

(1 Faculty of Resources and Environment Science, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, Jiangsu, China

2 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

**Abstract:** The Xiashu loess in the Nanjing-Zhenjiang area records abundant information of the paleoclimatic change. The Xiashu loess, as a facies at the southern margin of eolian and dusty accumulations in northern China, occupies an important position in the study of the global environmental change. The authors systematically analyzed the Rb and Sr concentrations and magnetic susceptibility at the Laohushan section at 10 cm intervals. The results show that the Rb concentration and magnetic susceptibility may better indicate the variations in intensity of the East Asian monsoon and that the Rb/Sr ratio may server as a substitute proxy for chemical weathering of the Xiashu loess. The increase of the Rb/Sr ratio at the section from below upward is the result of intensification of chemical weathering over the last 120 ka.

**Key words:** rubidium and strontium geochemistry; magnetic susceptibility; loess; paleosol; paleoclimatic change; Laohushan, Nanjing