

文章编号: 1000-0550(2012)02-0356-10

末次间冰期以来沙漠边缘黄土沉积的地球化学特征初探^①

于英鹏^{1,2} 汪海斌³ 刘现彬³

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院 上海 200241; 2. 兰州大学资源环境学院 兰州 730000;
3. 兰州大学西部环境与气候变化研究院 兰州 730000)

摘要 沙漠边缘地区黄土磁化率的增强机制与黄土高原地区有所不同,不宜用于夏季风强度变化的重建。所以,本文尝试将黄土高原地区常用的化学风化指标:化学蚀变指数(CIA)和Rb/Sr用于沙漠边缘地区白崖剖面夏季风演化的重建。结果显示,CIA可以较好地反映成壤作用,因而也可以较好地反映夏季风的变化,而Rb/Sr受源区因素和成壤因素共同作用,不能有效地指示夏季风的强度。同时,本文还选取了常见的反映粒度分选和冬季风变化的 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 和Zr/Rb,结果显示 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 和Zr/Rb能明确指示粒度分选作用和冬季风的变化。此外,Al-Ti-Zr三角图显示物源在不同时期存在一定的变化,在全新世和末次间冰期黄土物质混合较为均匀,表明风尘经历了较长距离的搬运和较为充分的混合过程;在末次冰期黄土物质混合程度存在明显分异,意味着部分时段物源可能较近。

关键词 沙漠边缘 黄土 地球化学 物质来源

第一作者简介 于英鹏 男 1985年出生 硕士研究生 环境变化 E-mail: ppy.lzu@163.com

中图分类号 P593 P931.6 **文献标识码** A

河西走廊东段祁连山北麓的山前地带覆盖有深厚的黄土沉积物,因地处青藏高原与西北内陆荒漠交汇处,所以该地黄土为揭示青藏高原隆升、区域气候变化以及沙漠演化历史提供了富有价值的记录^[1-3]。然而,沙漠边缘地区成壤作用导致磁化率增强的机制与黄土高原不同^[4-6],可能受控于包括成壤作用在内的多种因素^[7,8],因此,沙漠边缘黄土磁化率在恢复夏季风强度演化历史时存在缺陷。近年来,在黄土高原地区已经开展较多的地球化学方面的研究工作,有大量的地球化学指标用于古气候演化过程的重建。如,陈骏等认为黄土高原地区的Rb/Sr值能够反映风化强度,并与磁化率对比后认为Rb/Sr可以作为反映夏季风强度变化的指标^[9-11]。刘连文等根据Zr/Rb在不同粒径粉尘中的富集情况认为Zr/Rb值能够反映冬季风环流的变化,可以作为反映黄土高原冬季风变化的代用指标^[12];此外,通过对黄土沉积物中酸不溶物Fe、Mg的化学分析,刘连文等指出酸不溶物中Fe/Mg值能够指示风化成壤的强度^[13]。彭淑贞、郭正堂等通过对粒径小于50 μm的黄土颗粒与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的相关性分析,发现 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 可以准确的揭示冬季风的变化特征^[14]。靳鹤龄应用退碱系数($(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})/\text{Al}_2\text{O}_3$)、钠钙比($\text{Na}_2\text{O}/$

CaO)、硅铁铝率($\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$)等化学元素的综合参数来反映气候的变化^[15,16]。庞奖励则通过分析黄土中的Ba/Sr、Ba/Ca和Sr/Ca等发现Ba/Sr值对气候变化的反应十分灵敏,可作为很好的指示夏季风强度变化的代用指标^[17]。根据Si和Ti的迁移性及其分别在粉尘粗、细粒级中富集的特征,Liu等将 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 值(摩尔比)作为指示冬季风强度的指标,并应用于黄土高原冬季风变化的解释^[18];他们还将Nesbitt和Young定义的化学蚀变指数CIA用作夏季风强度的代用指标^[19]。郭正堂等根据元素的迁移特征应用化学风化指数(CIW)来揭示末次间冰期黄土高原夏季风的变化特征^[20]。上述指标具有反应灵敏、意义明确的优点,对于我们的气候重建工作具有参考意义。因而,本文选择了常用的地球化学指标(CIA、Rb/Sr、Zr/Rb、 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$)尝试着重建沙漠边缘地区季风演化历史并检验这些指标的可行性。

此外,相对黄土高原主体而言,祁连山北麓的黄土沉积无疑离物源更近,至少有两个潜在的物源离祁连山北麓的黄土沉积区很近。其一,北部的腾格里沙漠、巴丹吉林沙漠以及干盐湖构成了一个重要的物源^[2,21];其二,祁连山北麓山前洪积扇也是潜在的物源^[22,23]。因此该区黄土沉积对物源变化的响应有可

①国家自然科学基金青年基金项目(批准号:40801005)和西部环境变化国家创新研究群体科学基金项目(批准号:40721061)资助。
收稿日期:2010-12-20;收修稿日期:2011-06-29

能较黄土高原主体更加灵敏。因此, 本文还试图对物源在时间序列上的变化进行探讨。

1 材料与实验方法

本文选择位于甘肃省武威市张义镇白崖村的白崖剖面 (N37°32'E102°48', 海拔约 2 400 m) (图 1) 作为研究对象。该剖面南接祁连山, 北临腾格里沙漠, 距现代沙漠不足 50 km, 年均降水量约 105 mm, 年平均气温约 7.9°C, 属于干旱地区^[3]。剖面顶部为残余的全新世古土壤(S0) 厚约 1.4 m, L1 厚约 29 m (1.4 ~ 30.35 m), S1 厚约 5.15 m (30.35 ~ 35.50 m)。根据野外观察, S1 与 L2 之间有明显的界限, 表明 S1 底部经受一定的侵蚀作用。因此, 野外只观察到两层古土壤, 这可能与青藏高原东北缘在末次间冰期的构造抬升存在关联^[1]。野外样品采集从剖面顶部开始, 以 5 cm 为间隔连续采样, 共采集样品 730 个。其中 5 ~ 6 m 的样品在搬运中丢失, 实际共得 710 个样品。粒度由 Mastersizer 2000 激光粒度仪测得, 共测 710 个样品。取样品约 0.2 g 放入已清洗干净且带有编号的烧杯中, 加入浓度为 10% 的 H₂O₂ 并煮沸 (去除有机质), 待气泡减少至均匀沸腾时加入 10% HCl (去除碳酸盐), 继续煮至烧杯内无气泡产生, 停止加热, 加入蒸馏水直至烧杯满 (不能溢出), 静置 24 小时后用橡皮管抽去上层清水, 加入 (NaPO₃)₆ (六偏磷酸钠) 作为分散剂, 在超声波振荡器上振荡 7 分钟, 最后加入激光粒度仪中测量。化学元素含量在 Panalytical Magix PW2403 型 X 荧光光谱 (XRF) 仪上测得, 测量的标准差约为 2%。化学元素分析以 20 cm 为间隔, 共分析了 183 个样品, 实验过程见 Wang 等^[24]。所有实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

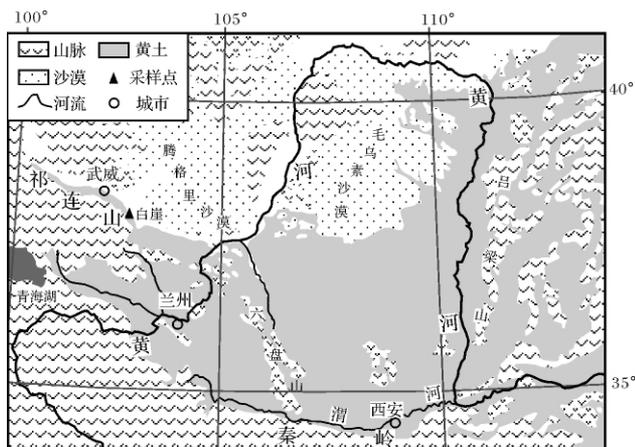


图 1 研究区位置及采样点

Fig. 1 Location of study region and sampling site

2 结果

2.1 常量元素含量特征

对于未测定的元素 XRF 仪以 CO₃ 给出, 白崖剖面 CO₃ 含量在 7.84% ~ 18.9% 之间, 平均为 12.50%。元素含量经公式 ($E_{校正} = E_{测量} / (1 - CO_3 / 100)$) 校正, 校正后, 样品中含量在 1% 以上的氧化物有 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、MgO、K₂O、Na₂O。整个剖面 SiO₂ 的含量在 55.98% ~ 66.49% 之间, 平均为 61.5%; Al₂O₃ 含量在 11.84% ~ 14.49% 之间, 平均为 13.21%; CaO 含量在 7.34% ~ 15.22% 之间, 平均为 10.25%; Fe₂O₃ 含量在 4.53% ~ 6.29% 之间, 平均为 5.46%; MgO 含量在 2.93% ~ 4.21% 之间, 平均为 3.63%; K₂O 含量在 2.41% ~ 2.97% 之间, 平均为 2.68%; Na₂O 含量在 2.08% ~ 2.96% 之间, 平均为 2.39%。其中 SiO₂、Al₂O₃、CaO 为主要的化学成分, 三种主要元素含量总和平均为 84.96%。样品中含量在 0.1% ~ 1% 的氧化物有 TiO₂、P₂O₅。TiO₂ 含量在 0.62% ~ 0.82% 之间, 平均为 0.75%。P₂O₅ 含量在 0.15% ~ 0.2 之间, 平均为 0.17%。

表 1 和 (图 2) 将白崖剖面经校正的常量元素氧化物与上陆壳 (UCC) 主要常量元素含量 (%) 进行了比较。

表 1 常量元素含量

Table 1 Content of major elements

| 常量元素 | UCC | S0 | L1 | S1 | CIA _{max} | CIA _{min} |
|--------------------------------|------|-------|-------|-------|--------------------|--------------------|
| SiO ₂ | 66 | 58.77 | 61.92 | 59.92 | 58.77 | 62.41 |
| TiO ₂ | 0.5 | 0.78 | 0.75 | 0.78 | 0.81 | 0.76 |
| Al ₂ O ₃ | 15.2 | 13.31 | 13.14 | 13.68 | 14.35 | 12.43 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.5 | 5.85 | 5.38 | 5.88 | 6.29 | 5.2 |
| MgO | 2.2 | 3.85 | 3.58 | 3.84 | 3.88 | 3.43 |
| CaO | 4.2 | 12.17 | 10.03 | 10.70 | 10.63 | 10.24 |
| Na ₂ O | 3.9 | 2.48 | 2.39 | 2.30 | 2.21 | 2.96 |
| K ₂ O | 3.4 | 2.58 | 2.68 | 2.73 | 2.88 | 2.41 |

UCC 的元素组成据文献 [25], S0, L1 和 S1 分别为对应地层的常量元素含量平均值, CIA_{max} 和 CIA_{min} 分别代表风化最大值和最小值对应的常量元素含量。

表 1 和图 2 显示, 白崖剖面中 SiO₂、Al₂O₃ 含量与 UCC 较接近, CaO 的含量相对 UCC 显著富集, MgO、TiO₂、Fe₂O₃ 相对 UCC 富集; Na₂O、K₂O 则相对 UCC 表现出较弱的亏损。Si 的化学性质相对稳定, 主要以氧化物的形式存在, 化学行为以迁移为主^[26-28]。L1 的 SiO₂ 平均含量较 S0、S1 高, 风化最弱时对应的

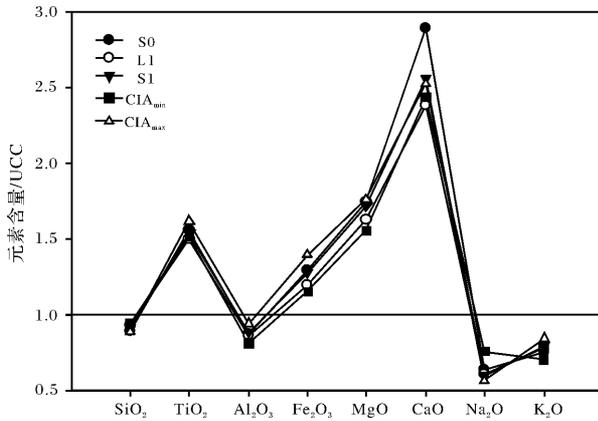


图2 白崖剖面常量元素与UCC比较
Fig. 2 Comparison of major elements between the Baiya loess section and the UCC

SiO₂值(62.41%)高于风化最强时的SiO₂含量(58.77%)(表1)。在S0、S1、CIA_{max}三个阶段,TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃值均高于相对应的L1和CIA_{min},说明在化学风化作用增强的时候,三种氧化物在土壤中趋于富集。不过,TiO₂的变化比Al₂O₃、Fe₂O₃复杂(表1),即L1的TiO₂含量比风化最弱点的TiO₂含量略低。Ca、Mg为较易迁移的元素,在黄土中多以碳酸盐的

形式存在^[26]。在我国北方干旱半干旱地区研究表明:土壤发育时CaO和MgO的含量相对减少(除淀积层),而在风沙和黄土堆积时期其含量相对增加^[27-28]。但是白崖剖面中CaO和MgO含量在对应于风化较强的时段富集,如S0、S1发育的时段,而在风化较弱的在L1阶段的含量却相对减少,这与黄土高原内部CaO和MgO的迁移变化情况形成反差^[27-29]。一方面,说明在整体风化强度不高的情况下,白崖剖面CaO和MgO的淋溶是极其有限的;另一方面,可能暗示了在干旱的源区碳酸盐表聚作用在暖湿期增强,从而导致沉积区黄土中碳酸盐含量也随之增加。值得注意的是,CaO含量比MgO含量表现出更复杂的变化规律,即S0、L1以及S1的CaO含量不在风化最弱点对应的CaO含量和风化最强点对应的CaO含量之间,意味着除了风化淋溶作用,源区物质的化学组成可能是更为重要的控制因素。从化学风化弱的CIA_{min}到化学风化强的CIA_{max}过程中,K₂O逐渐富集,而Na₂O逐渐亏损(图2),但本研究剖面中的K₂O、Na₂O均相对UCC出现微弱亏损。综观白崖剖面,随着风化作用的增强,脱Na富Fe、Mg是较为显著的变化特征。Ca的变化规律不清。

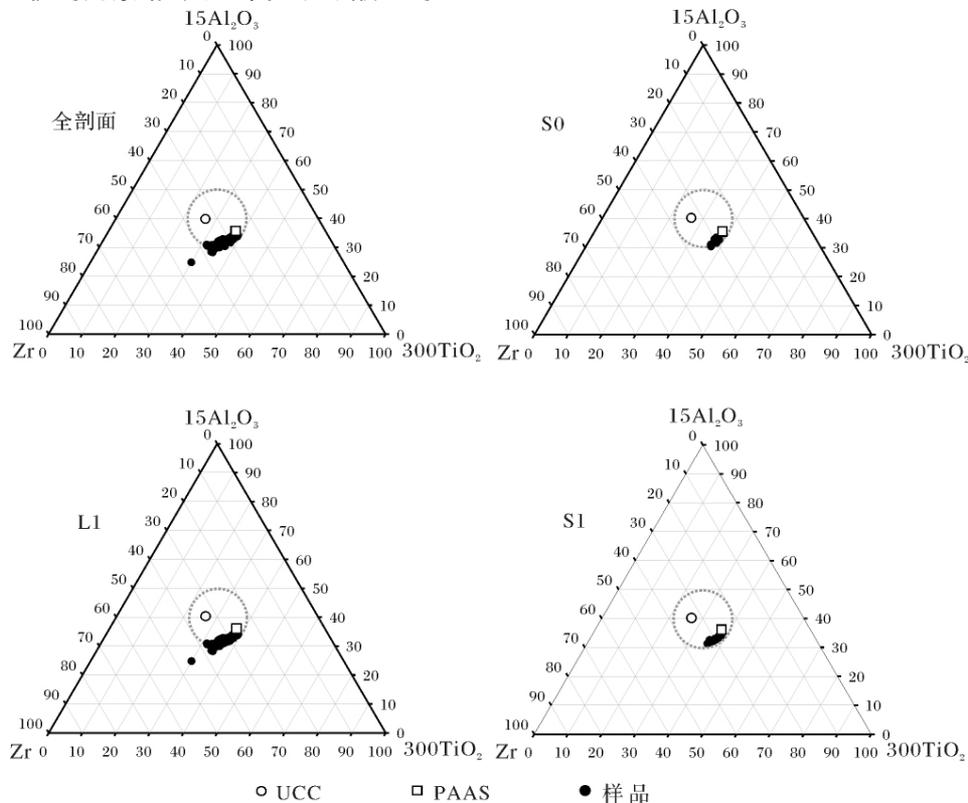


图3 白崖剖面Al—Ti—Zr三角图

Fig. 3 Ternary diagram of Al—Ti—Zr in the Baiya loess section

2.2 稳定元素 Al—Ti—Zr 组合特征

在各种元素中,Al、Ti、Zr 通常被认为是风化中最稳定的元素。Al、Ti、Zr 的含量会随着易溶元素的淋失而发生改变,但沉积物中 Al、Ti、Zr 含量的相对比例特征能够从源区物质中继承下来,很少发生改变。因此,在沉积作用经历了风化、搬运,不同来源物质的混合以及分选等过程的前提下^[30],Al—Ti—Zr 三角图可以反映物源的变化^[31]。图3中以三角形重心为圆心画圆(虚线圆),圆心代表沉积物 Al—Ti—Zr 平均值所在点。通过分析样品中 Al—Ti—Zr 散点分布情况,认为 Al—Ti—Zr 散点离圆心越近,分布越集中,表示物质的混合越好;相反,Al—Ti—Zr 散点离圆心较远,分布较分散,表明物质混合较差。据此可以判断古气候演化及源区变迁问题。图3显示在 S0 和 S1 阶段 Al—Ti—Zr 分布与上陆壳(UCC)和后太古代澳洲页岩(PAAS)^[25]比较接近,在 L1 阶段 Al—Ti—Zr 分布则出现了显著的分异,一部分 Al—Ti—Zr 散点离 UCC 和 PAAS 较近,另一部分散点则离 UCC 和 PAAS 较远。

2.3 化学风化特征

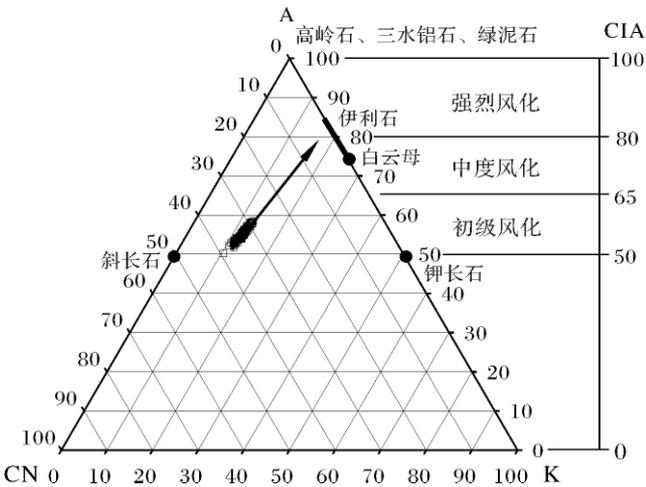


图4 白崖剖面 A—CN—K 图(风化阶段划分据文献[19])

Fig. 4 A—CN—K diagram of the Baiya loess section

化学蚀变指数 [$CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) \times 100$] 是量度源区以及沉积区的化学风化程度的代用指标^[19],式中主成分均指摩尔数,CaO* 表示硅酸盐中的 CaO。因而,CIA 主要反映的是硅酸盐(主要是长石矿物)的风化,由于不存在元素迁移后再淀积的情况,故能很好地反映沉积物形成时的化学风化情况,因而在化学风化研究中得到了广泛的应用^[19,32]。图4直观地表示出沉积物的风化程

度(A—CN—K 中的 A 值实际上就是 CIA) 和风化趋势。可以看出,白崖剖面的 CIA 值分布在 50~60 之间(图4),处于风化的初级阶段。由斜长石—钾长石连线出发,随着风化作用的增强,风化的趋势(图4中箭头所指方向)指向伊利石,这与黄土高原主体地区的化学风化特征一致^[33]。

3 讨论

3.1 气候变化与物源变迁

在图3中,我们已经观察到一个现象,在土壤发育的时段,如 S0 和 S1 发育的时段,Al—Ti—Zr 散点较为集中,与三角形的重心(碎屑沉积物的 Al—Ti—Zr 平均值)和 PAAS 的 Al—Ti—Zr 值距离较近;而在黄土堆积盛行的时段,如 L1 沉积时段,Al—Ti—Zr 散点相对较分散,有部分点离三角形重心(碎屑沉积物的 Al—Ti—Zr 平均值)和 PAAS 的 Al—Ti—Zr 值距离较远。这一现象表明,在 S0 和 S1 发育时段,风尘的混合更为均一,而在 L1 堆积时段,风尘的混合程度存在较显著的分异。进一步而言,气候可能影响着风尘的搬运—沉积的混合过程。具体而言,在夏季风强盛的时期,季风控制的降水锋面往西往北推进,沙漠收缩,土壤在黄土堆积区的发育普遍增强。沙漠的收缩意味着物源的远离,因而,在源区和沉积区之间,风尘进行搬运—沉积,再搬运—沉积的循环过程有可能增多,最终沉积的风尘的混合度更为均一。在夏季风衰退的时期,季风控制的降水锋面往南回撤,造成沙漠—黄土过渡带上植被覆盖度降低,沙漠扩张,因而沉积区普遍沉积弱风化的黄土。沙漠的扩张,意味着物源的逼近,因而,沉积区可能更多地接收了近源的物质,即搬运—沉积,再搬运—沉积的循环过程的频次会相对减少,最终沉积的风尘混合程度可能表现的不够均一。总而言之,气候变得湿润的时候,物源开始变远;反之,则物源变近,这与前人的研究^[34]是一致的。

3.2 地球化学指标的气候指示意义

前人在利用地球化学指标重建古气候方面的研究已取得不少成果^[9-18,20,26-29,35,36],如前所述,因磁化率在沙漠边缘区的增强机制并非仅依赖于成壤作用,所以对其进行气候解译存在不确定性,本研究中的磁化率也存在类似的问题。鉴于此,本文选择了两个常见的风化指标 CIA、Rb/Sr 试图用于夏季风演化历史的重建。同时,选择了 SiO_2/TiO_2 和 Zr/Rb 这两个常用指标作为候选的冬季风指标。

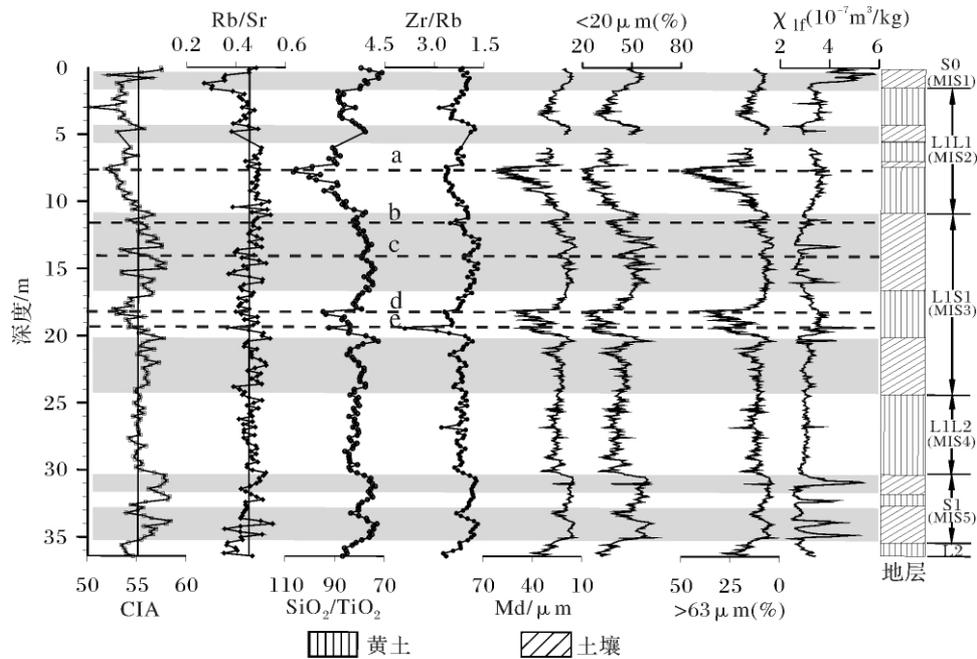


图5 白崖剖面气候代用指标比较

Fig. 5 Comparison of climatic proxies in the Baiya loess section

图5显示CIA的高值与各土壤层有较好的对应关系,可见CIA对成壤强度的反映是比较可靠的。研究区属季风影响区,因而,反映风化成壤作用的CIA可以作为夏季风强度的指标。在黄土高原地区,Rb/Sr是也是一个常用夏季风代用指标。不过,Rb/Sr在白崖剖面地层波动平缓,不能很好地指示白崖剖面成壤作用的发生。不仅如此,在MIS3晚期和MIS5时段部分土壤(L1S1的上部土壤层和S1的下部土壤层)的Rb/Sr值较平均值(实线)还略偏低(图5);此外,MIS2与MIS4的Rb/Sr并未表现为显著的低值。只有全新世的Rb/Sr值可以相对较好地反映成壤作用。这说明,除了风化作用之外,还有其它因素参与塑造Rb/Sr的变化。 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 、Zr/Rb的变化与粒度具有较好的一致性,在全新世、MIS3以及MIS5都表现为低值,而在MIS2和MIS4则为高值。对于粒度事件的响应,Zr/Rb的变幅比 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 显著,如(图5)中的b、c事件,通过曲线对比,还可以发现Zr/Rb与 $<20\ \mu\text{m}$ 颗粒含量的变化更接近,如a事件二者均较平缓,e事件则较突出。 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 则与 $>63\ \mu\text{m}$ 颗粒含量(跃移组分)的变化更相像。如a事件二者都较突出,b、c事件二者的变幅则相对较小。

通过前面的分析,我们认为CIA具有明确的化学风化指示意义,可以作为东亚夏季风强度的指标。 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 和Zr/Rb的变化与粒度的变化对应关系较

好,而且相关分析表明,Zr/Rb和 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 与中值粒径(Md)具有很好的相关关系(Zr/Rb和 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 与中值粒径(Md)的相关系数分别为0.824和0.907)。因而, $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 和Zr/Rb可以作为冬季风强度的代用指标。另外,由于 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 与联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标($>63\ \mu\text{m}$ 的颗粒含量)具有更好的对应关系^[37](图5)。因此, $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 也适合作为联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的地球化学指标。值得关注的是,图6中Zr/Rb和 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 与CIA呈较好负相关(相关系数分别为-0.575和-0.657)。这暗示了夏季风强度变化一定程度上影响风尘沉积物粒度的变化,主要影响机制为:当夏季风强盛时,腾格里沙漠南缘北退,沙漠面积缩小,物源区相对变远,导致风尘沉积物的颗粒变细;相反,当夏季风衰退时,沙漠边缘南进,沙漠面积扩张,物源区相对沉积区较近,风尘沉积物的颗粒变粗。

相对CIA而言,Rb/Sr的指示意义不是十分明确,因而不宜作为夏季风强度的代用指标。根据Rb、Sr元素物理和化学的赋存形式,一般认为黄土地层中Rb/Sr主要受源区粉尘的物质的化学组成、搬运分选作用和风化成壤强度的影响^[9]。Rb/Sr在白崖剖面的变化并非与成壤强度完全对应,仅在一些时段Rb/Sr的峰值与CIA的峰值存在对应。例如,全剖面Rb/Sr值与CIA呈正相关关系($r = 0.4$),但是在

MIS2 二者的相关系数仅为 0.161(图 6)。这说明,在离干旱物源区更近的白崖剖面的 Rb/Sr 除了受控于风化作用外,还受控于其它因素,即搬运分选作用或(和)源区粉尘物质的化学组成。风尘沉积物中粗颗粒含量常用来反映冬季风的强弱变化即风力的搬运分选作用^[38],Rb/Sr 值与 Md 的相关系数为 0(图 6),这暗示了搬运分选过程对 Rb/Sr 的影响可以忽略。因而,源区粉尘物质的化学组成对 Rb/Sr 值变化具有重要的决定作用。

图 7 中 Rb、Sr 在 I、II、III(灰色矩形框)段呈现相同的变化趋势,即二者在风化程度相对较强的时候均增加,由此可见,Rb/Sr 的异常主要是 Sr 增加造成的。由于 Sr 与 Ca 离子半径、电位等地球化学参数相近,因而 Sr 的迁移规律与 Ca 相似^[39]。可以通过以下两个方面来解释:1)降水增加,导致 Sr 从高地向低地汇集^[40-41],冲积扇、河床、干盐湖等潜在物源中 Sr 的含量因而增加,所以黄土堆积时 Sr 的含量也相应增加,Rb/Sr 值相对降低;2)潜在的物源多属于干旱

区,在地下水位足够高的情况下,强烈的蒸发作用会使易溶盐因毛细效应产生表聚现象^[42],Sr、Ca 等易溶盐的含量在地下水位较高的情况下因表聚作用增高,从而降低了物源区的 Rb/Sr 值。事实上,我们从图 5 可以观察到 Rb/Sr 与 CIA 在 MIS5 和 MIS3 虽然在整体趋势上相反,但是峰、谷存在对应关系。这说明在整体风化强度较低(初级风化)的情况下,源区的 Rb/Sr 信号较为显著。因此,在风化程度较低的沙漠边缘地区,Rb/Sr 值不能同黄土高原地区一样很好地指示风化程度,因为它包含了较为显著的物源湿度信号。

4 结论

通过对腾格里沙漠西南缘白崖剖面常量元素地球化学特征的初步分析,可以得出以下两点认识:

- (1) 末次间冰期以来白崖剖面的黄土物源存在变化,气候湿润的时候,物源较远;反之,物源较近。
- (2) 白崖剖面的化学风化处于初级阶段,CIA 是

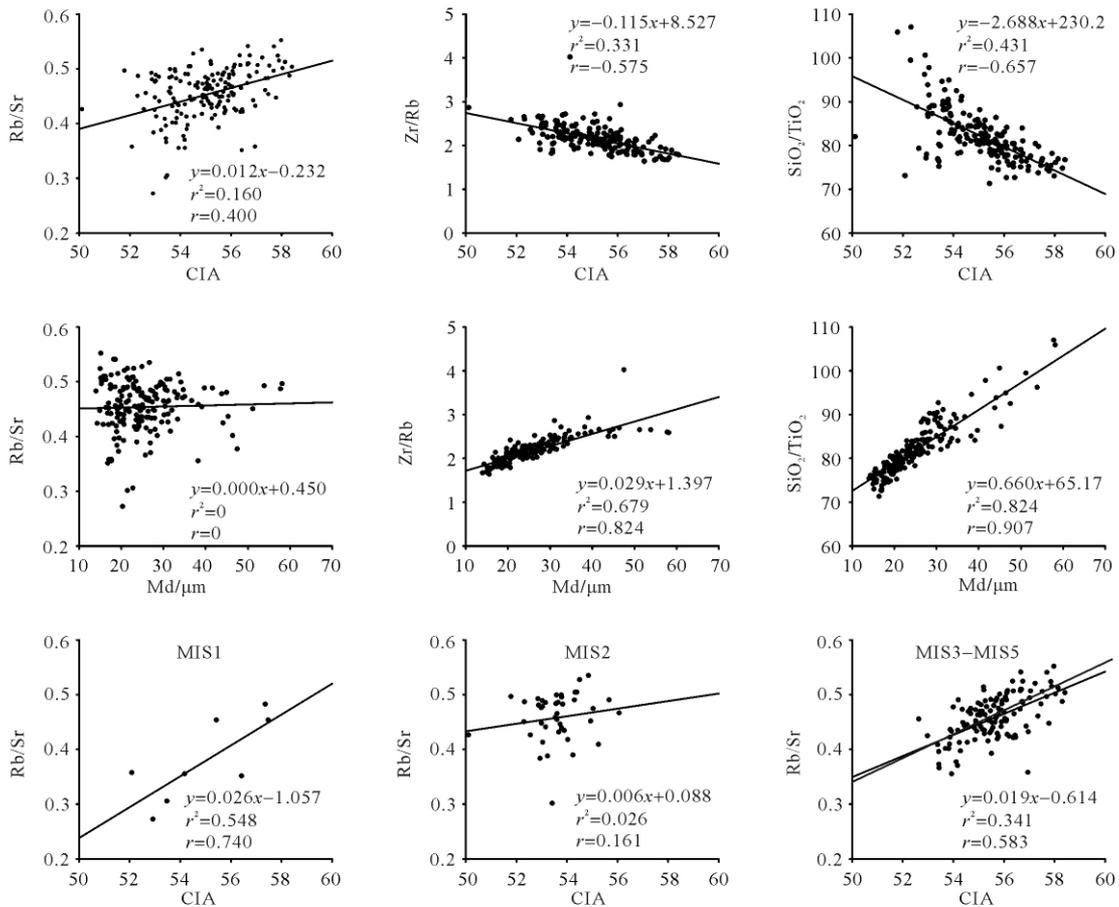


图 6 气候代用指标的相关性
Fig. 6 Relation of climatic proxies

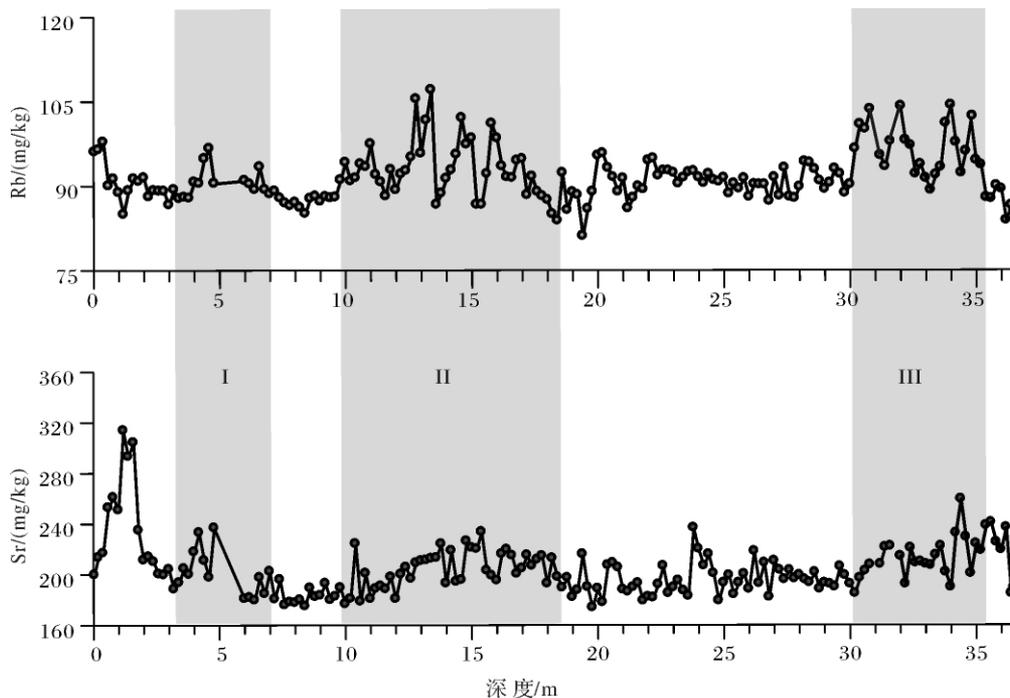


图7 Rb、Sr 随剖面深度的变化
Fig.7 Rb、Sr Variations with depth

较好的夏季风代用指标,而 Rb/Sr 的意义较复杂,它叠加了源区湿度的信号,不宜直接用于指示夏季风的强度变化。 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 和 Zr/Rb 与粒度有较好的对应关系,是良好的指示冬季风强度变化的代用指标,此外 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 也可反映物源距离的变化。

参考文献 (References)

- 1 潘保田, 邬光剑, 王义祥, 等. 祁连山东段沙沟河阶地的年代与成因[J]. 科学通报, 2000, 45(24): 2669-2675 [Pan Baotian, Wu Guangjian, Wang Yixiang, et al. The age and causes of Shagou River terraces in Eastern Qilian Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(24): 2669-2675]
- 2 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: 自然科学版, 1998, 34(4): 157-164 [Zhang Huicai. The REE of Wuwei Loess in south vicinity of Tengger desert and a model for Loess Accumulation [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1998, 34(4): 157-164]
- 3 吴海斌, 郭正堂, 方小敏, 等. 250kaBP 前后中国北方干旱区的扩张及其原因[J]. 科学通报, 2002, 47(17): 1341-1346 [Wu Haibin, Guo Zhengtang, Fang Xiaomin, et al. The expansion and reasons of arid region in Northern China around 250 kaBP [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(17): 1341-1346]
- 4 Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, Robinson S G, et al. Partly pedogenic origin of magnetic variations in Chinese loess [J]. Nature, 1990, 346: 737-739
- 5 Maher B A, Thompson R. Mineral magnetic record of the Chinese loess and paleosols [J]. Geology, 1991, 19: 3-6
- 6 Liu Qingsong, Deng Chenglong, Torrent J, et al. Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess [J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(3-4): 368-385
- 7 孙继敏, 丁仲礼. 浅议中国黄土磁化率的物理意义 [J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 88-93 [Sun Jinmin, Ding Zhongli. Preliminary studying on the physical mechanism of magnetic susceptibility of Chinese Loess [J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(4): 88-93]
- 8 管清玉. 末次冰期旋回气候高度不稳定性研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2006 [Guan Qingyu. A study of the highly unstable climate in Last Glacial Cycle [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006]
- 9 陈骏, 汪永进, 陈旸, 等. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义 [J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259-266 [Chen Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, et al. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 259-266]
- 10 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): 488-504 [Chen Jun, An Zhisheng, Wang Yongjin, et al. The Rb/Sr distribution and ancient monsoon changes in Luochuan section recently 800 ka [J]. Science in China: Series D, 1998, 28(6): 488-504]
- 11 陈骏, 汪永进, 季俊峰, 等. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义 [J]. 第四纪研究, 1999, (4): 350-356 [Chen Jun, Wang Yongjin, Ji Junfeng, et al. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luochuan, Shaanxi Province [J]. Quaternary Sciences, 1999, (4): 350-356]

- 12 刘连文,陈骏,陈旻,等. 最近 130Ka 以来黄土中 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义[J]. 科学通报, 2002, 47(9): 702-706 [Liu Lianwen, Chen Jun, Chen Yang, *et al.* The Zr/Rb value change and its implications on the winter wind from loess in the last 130 ka[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(9): 702-706]
- 13 刘连文,陈骏,王洪涛,等. 一个不受风力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(4): 578-582 [Liu Lianwen, Chen Jun, Wang Hongtao, *et al.* A sorting not influence by wind from the chemical weathering indices: Fe/Mg values in acid-insoluble material from the loess [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(4): 578-582]
- 14 彭淑贞,郭正堂. 风尘堆积中 SiO₂/Al₂O₃ 值与粒度的关系及其对东亚冬季风的指示意义[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(增刊): 209-214 [Peng Shuzhen, Guo Zhengtang. The relationship of SiO₂/Al₂O₃ values and grain size in eolian deposits and the implications for East Asian winter monsoon [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(Suppl): 209-214]
- 15 靳鹤龄,苏志珠,孙忠. 浑善达克沙地全新世中晚期地层化学元素特征及其气候变化[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 366-371 [Jin Heling, Su Zhizhu, Sun Zhong. Characters of chemical elements in strata of Middle and Late Holocene in Hunshandake Desert and the indicated climatic changes[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(4): 366-371]
- 16 靳鹤龄,李明启,苏志珠,等. 萨拉乌苏河流域地层沉积时代及其反映的气候变化[J]. 地质学报, 2007, 81(3): 307-315 [Jin Heling, Li Mingqi, Su Zhizhu, *et al.* Sedimentary age of strata in the Salawusu River Basin and climatic changing[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(3): 307-315]
- 17 庞奖励,黄春长,刘安娜,等. 黄土高原南部全新世黄土—古土壤序列若干元素分布特征及意义[J]. 第四纪研究, 2007, (3): 357-364 [Pang Jiangli, Huang Chunchang, Liu Anna, *et al.* Ba/Sr and Rb/Sr ratio of Holocene loess-palaeosol sequences and its significance in South Loess Plateau China[J]. Quaternary Sciences, 2007, (3): 357-364]
- 18 Liu T S, Guo Z T, Liu J Q, *et al.* Variation of eastern Asian monsoon over the last 140 000 years [J]. Bulletin Societ Geologique France, 1995, 166: 221-229
- 19 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299: 715-717
- 20 Guo Z T, Liu T S, 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
- 21 张虎才,马玉贞,彭金兰,等. 距今 42~18ka 腾格里沙漠古湖泊及古环境[J]. 科学通报, 2002, 47(24): 1847-1857 [Zhang Hucan, Ma Yuzhen, Peng Jinlan, *et al.* Ancient lake and the environment in Tengger Desert between 42-18 kaBP [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(24): 1847-1857]
- 22 Derbyshire E, Meng X M & Kemp R A. Provenance, transport and characteristics of modern Aeolian dust in western Gansu Province, China, and interpretation of the Quaternary loess record [J]. Journal of Arid Environments, 1998, 39: 497-516
- 23 Guan Q Y, Pan B T, Gao H S, *et al.* Geochemical evidence of the Chinese loess provenance during the Late Pleistocene [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2009, 270(1-2): 53-58
- 24 Wang H B, Liu L Y, Feng Z D. Spatiotemporal variations of Zr/Rb ratio in three last interglacial paleosol profiles across the Chinese Loess Plateau and its implications for climatic interpretation [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(9): 1413-1422
- 25 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Blackwell, Oxford, 1985: 9-56
- 26 文启忠 等. 中国黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 36-114 [Wen Qizhong, *et al.* Geochemistry of Chinese Loess [M]. Beijing: Science Press, 1989: 36-114]
- 27 文启忠. 黄土剖面中氧化物的比值和相对淋溶、积聚值在地质上的意义[J]. 地球化学, 1981, 12(4): 381-387 [Wen Qizhong. Ratios of oxides and relative values of weathering leaching or accumulation in Luochuan loess section, Shaanxi province and their geological significance [J]. Geochimica, 1981, 12(4): 381-387]
- 28 文启忠,刁桂仪,贾蓉芬,等. 黄土剖面中古气候变化的地球化学记录[J]. 第四纪研究, 1995, 6(3): 223-231 [Wen Qizhong, Diao Guiyi, Jia Rongfen, *et al.* Geochemical records of paleoclimate change in loess sections [J]. Quaternary Sciences, 1995, 6(3): 223-231]
- 29 余素华,文启忠,张士三,等. 中国西北地区晚第四纪黄土中镁铝地球化学与古气候意义[J]. 沉积学报, 1994, 12(1): 112-116 [Yu Suhua, Wen Qizhong, Zhang Shisan, *et al.* The geochemistry and paleoclimate significance of magnesium and aluminium in loess of Late Quaternary in northwestern China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(1): 112-116]
- 30 Sawyer E. The influence of source rock type chemical weathering and sorting on the geochemistry of clastic sediments from the Quetico Metasedimentary Belt, Superior Province [J]. Chemical Geology, 1986, 55: 77-95
- 31 Garcia D, Fontiellas M, Moutte J. Sedimentary fractionations between Al, Ti and Zr and the genesis of strongly Peraluminous Granites [J]. Journal of Geology, 1994, 102: 411-422
- 32 陈骏,安芷生,刘连文,等. 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[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(2): 136-145 [Chen Jun, An Zhisheng, Liu Lianwen, *et al.* The changes in chemical composition of dust from the Loess Plateau and chemical weathering Asian inland since the last 2.5 Ma [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(2): 136-145]
- 33 梁美艳,郭正堂,顾兆炎. 中新世风尘堆积的地球化学特征及其与上新世和第四纪风尘堆积的比较[J]. 第四纪研究, 2006, 26(4): 657-664 [Liang Meiyuan, Guo Zhengtang, Gu Zhaoyan. Geochemical characteristics of the Miocene eolian deposits and comparison with the Pliocene and Quaternary eolian deposits [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(4): 657-664]
- 34 Yang S L, Ding Z L. Advance-retreat history of the East-Asian summer monsoon rainfall belt over northern China during the last two glacial interglacial cycles [J]. Earth and Planetary Science Letters,

- 2008, 274(3-4): 499-510
- 35 陈渭南,高尚玉,孙忠. 毛乌素沙地全新世地层化学元素特点及其古气候意义[J]. 中国沙漠, 1994, 14(1): 22-30 [Chen Weinan, Gao Shangyu, Sunzhong. On the Holocene geochemical landscape characteristics and its paleoclimatic meaning, MU US Sand Sea [J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(1): 22-30]
- 36 赵锦慧,王丹,樊宝生,等. 延安地区黄土堆积的地球化学特征与最近13万年东亚夏季风气候的波动[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 495-500 [Zhao Jinhui, Wangdan, Fan Baosheng, et al. Geochemical characteristics of the loess deposit at Yan'an and its implication to changes of East Asia summer monsoon during the past 130 ka [J]. Geochimica, 2004, 33(5): 495-500]
- 37 丁仲礼,孙继敏,刘东生. 联系沙漠—黄土演变过程中耦合关系的沉积学指标[J]. 中国科学: D辑, 1999, 29(1): 82-87 [Ding Zhongli, Sun Jimin, Liu Dongsheng. A sedimentary indicator contact the coupling during evolution of Desert-Loess deposition [J]. Science in China: Series D, 1999, 29(1): 82-87]
- 38 刘连文,陈骏,季峻峰,等. 陕西洛川黄土的粒度分维值及其意义[J]. 高校地质学报, 1999, 5(4): 412-417 [Liu Lianwen, Chen Jun, Ji Junfeng, et al. Grain-size fractal dimension of loess-paleosol and its significance [J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5(4): 412-417]
- 39 刘连文,陈骏,陈旸,等. 黄土的连续提取实验及 Rb/Sr 值意义[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 65-70 [Liu Lianwen, Chen Jun, Chen Yang, et al. Sequential extraction procedure of loess and paleosol and the implications of Rb/Sr ratios [J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 65-70]
- 40 金章东,张恩楼. 湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候意义[J]. 科学技术与工程, 2002, 2(3): 20-22 [Jin Zhangdong, Zhang Enlou. Paleoclimate implication of Rb/Sr ratios from lake sediments [J]. Science Technology and Engineering, 2002, 2(3): 20-22]
- 41 刘宇飞,李保生,杨艺,等. 末次间冰期我国半干旱盆地 Rb、Sr 的迁移聚集规律与环境演化——以沙拉乌苏河流域米浪沟湾剖面研究结果为例[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 341-344 [Liu Yufei, Li Baosheng, Yang Yi, et al. Moving and accumulating law of Rb, Sr with environment evolving in semiarid basin of China during the Last Interglacial: Reflected by study result on Milangouwan stratigraphic section in the Salawusu River Valley [J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(3): 341-344]
- 42 李生宇,雷加强,徐新文,等. 流动沙漠地区灌溉林地盐结皮层特征的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 41-49 [Li Shengyu, Lei Jiaqiang, Xu Xinwen, et al. Characteristics of salt crust layers in the forests irrigated with saline water in mobile desert [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 41-49]

Geochemical Characteristics of Loess Deposition since Last Interglacial at Desert Margin and Its Provenance and Climatic Implications

YU Ying-peng^{1,2} WANG Hai-bin³ LIU Xian-bin³

(1. College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241;

2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000;

3. Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: The loess deposition at desert margin holds a good archive of climatic change as such area is sensitive to variations of Asian Monsoon. However, due to the complexity of magnetic enhancement mechanism in loess at desert margin, magnetic susceptibility is not suitable for summer monsoon reconstruction. In this paper, we investigated the geochemical characteristics of loess deposition since last interglacial at desert margin and try to screen good geochemical indicators of weathering and sorting of loess deposition at desert margin. In doing so, we investigated a loess site at Baiya which is located 50 km south to Tengger Desert. The Baiya loess section in this study consists of S0, L1 and S1, corresponding to the Holocene, the last glacial, and the last interglacial respectively. 730 samples were collected from this section. All of them were subjected to magnetic measurement using Bartington MS2B and grain size analysis using Malvern Mastersizer 2000. 183 samples were subjected to chemical elements determination using X-ray fluorescence (XRF) analysis on Panalytical Magix PW2403 spectroscope. All the lab works were carried out at the Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University.

The geochemical results from the whole section show that the content of SiO₂, Al₂O₃ is close to that of UCC, the content of CaO, MgO, TiO₂, Fe₂O₃ was enriched relative to that of UCC; the content of Na₂O, K₂O was depleted relative to that of UCC. As the chemical weathering strengthened, the striking phenomenon of elements behavior of this section is the depletion of sodium and the enrichment of iron and magnesium. However, the behavior of calcium was

equivocal, which is probably caused by weak leaching in deposition area and strong evaporating-induced ascending of Ca in source area. Generally, the chemical weathering in the study area is weak and on its initial weathering stage as expressed by the low chemical index of alteration (CIA) which spanned from 50 to 60.

Four frequently-used geochemical indicators were tested in current study, e. g., CIA, the ratio of Rb to Sr (Rb/Sr), the molar ratio of SiO₂ to TiO₂ (SiO₂/TiO₂), and the ratio of Zr to Rb (Zr/Rb). CIA is sensitive to reflect the weathering and the pedogenesis, and thus can be used as a proxy of Asian Summer Monsoon strength. The Rb/Sr is a good indicator of chemical weathering when it was applied in the main body of the Chinese loess Plateau. However, it didn't work well at Baiya section. We assumed that the problem is mainly caused by the behavior of Sr. That is, under warmer and wetter climate, more Sr was washed into source area, strong evaporation induced ascending of Sr to surface soil with the capillary force, leading to the decrease of Rb/Sr. When such source material was transported to the deposition area, the post-depositional Rb/Sr didn't increase significantly because of relatively weaker leaching at desert margin. In short, the ultimate Rb/Sr at Baiya section contained both weathering signal and source material signal, and it was not suitable for reconstructing summer monsoon variations. The other two geochemical indicators, SiO₂/TiO₂ and Zr/Rb closely follow the variation of grain sizes, and they are positively correlated to the median grain size (the coefficient *r* is 0.907, 0.824, respectively), thus, they can be used as indicators of winter monsoon intensity. In addition, SiO₂/TiO₂ and Zr/Rb are negatively correlated to CIA (the coefficient *r* is -0.657, -0.575 respectively), suggesting summer monsoon is also an important factor affecting the grain size variation through modulating the expansion and contraction of desert.

In current study, we also aimed to examine the provenance of loess material at different climatic stages. Al, Ti, Zr is the most stable element during chemical weathering. Their individual content might change in response to the chemical weathering; however, the ratios of Al-Ti-Zr can be inherited from the source area as they are very stable. We thus used the ternary diagram of 15Al₂O₃, Zr, and 300TiO₂ to trace the potential change of provenance (source material and/or source region). The Al-Ti-Zr ternary diagrams showed that loess deposition during the the Holocene and the Last Interglacial period (So and S1) was well mixed while the loess deposition during the Last Glacial (L1) was not homogeneously mixed. We suggested that the dust has experienced long distance transport and more thorough mixing processes during interglacial period while the source material didn't undergo thorough mixing processes during glacial period as the source was probably getting closer.

Key words desert margin; loess; geochemical indicators; material sources