

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0106

WU Yongqiu, WANG Lihui, DU Shisong, et al. Effect of sediments grain-size on geochemical characteristics and mineral composition in typical areas of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1140-1149. [伍永秋, 王立辉, 杜世松, 等. 青藏高原典型地区沉积物地球化学特征与矿物组成的粒度效应[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1140-1149.]

青藏高原典型地区沉积物地球化学特征 与矿物组成的粒度效应

伍永秋¹, 王立辉¹, 杜世松², 李静芸¹, 申玉龙¹

(1. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004; 2. 北京师范大学 地理科学学部
防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 地表松散沉积物中不同粒级的颗粒蕴含着不同的信息, 这种差异与其物质来源、搬运和沉积过程中的分选作用以及沉积后的风化作用等有关。因此, 可根据沉积物中不同粒级颗粒地球化学特征与矿物组成的差异, 进行沉积物物源追踪或沉积环境重建。选择青藏高原在气候和地貌方面具有典型意义的柴达木盆地、错那湖、雅鲁藏布江流域作为研究区, 分别采集了这几个地区的沙丘沙、黄土、湖积物、冲积物、洪积物、残坡积物等地表松散沉积物样品, 用干筛法将沉积物样品分为两个部分, 粗颗粒部分粒径范围为 $\geq 75 \sim 500 \mu\text{m}$, 细颗粒部分粒径 $< 75 \mu\text{m}$ 。对上述粗、细颗粒分别进行稀土与微量元素、Sr-Nd同位素、轻矿物组成的实验室分析测试, 并对沉积物中粗、细颗粒的测试结果采用古典多维尺度方法进行相似性分析。结果表明: 青藏高原松散沉积物中粗、细颗粒在轻矿物组成、微量和稀土元素含量、稀土特征、元素参数等方面存在差异; 细颗粒部分蕴含了更多的环境信息, 富含容易受化学风化影响的黏土矿物以及硬度较小、容易被磨蚀的方解石等矿物。在物源示踪中不同气候区的沉积物细颗粒不宜进行直接比较, 应根据样品的粒度分布情况优先选择合适的粗颗粒组分进行物源示踪。

关键词: 青藏高原; 地球化学特征; 矿物组成; 粒度效应

中图分类号: P931 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1140-10

0 引言

地表松散沉积物的地球化学与矿物组成与物质来源、沉积后的风化作用有关, 受到搬运和沉积分选作用的影响, 沉积物不同粒级的地球化学与矿物组成存在差异, 这种差异被称为“粒度效应”。Chen等^[1]对北方10个主要沙漠和沙地的细粒级的Nd-Sr同位素进行了系统研究, 观察到不同沙漠具有不同的Nd-Sr同位素特征。Biscaye等^[2]将沉积物的Sr-Nd等同位素进行对比, 来确定沉积物的来源地。Ding等^[3]利用地球化学元素来进行物源示踪。Ferrat等^[4]将柴达木盆地与腾格里沙漠的沉积物的地球化学元素进行对比, 发现其地球化学元素特征

相似, 推测其物源区可能为同一个。因此, 可以根据沉积物的地球化学特征对沉积物的源区进行示踪研究。

Dong等^[5]运用Sr-Nd同位素示踪的方法, 对青藏高原沉积物进行分析, 结果表明在青藏高原的粉尘物质主要来源于高原上的干旱和半干旱沙漠及表层土壤, 在当前的气候条件下中亚的风尘不容易传输到青藏高原腹地。Dong等^[6]还将青藏高原、塔克拉玛干和柴达木三个地区的沉积物的Sr-Nd同位素组成和沉积物进行比较, 结果显示这三个地区的沉积物同位素特征不一致, 青藏高原上的冰川和积雪中的粉尘与附近流域沉积物的同位素特征相似, 对研究青藏高原地区大范围的粉尘输送和气候研

收稿日期: 2022-05-27; 修订日期: 2022-08-03

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0306)资助

作者简介: 伍永秋, 教授, 主要从事环境演变、水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: wuyongqiu@zjnu.edu.cn

通信作者: 王立辉, 硕士研究生, 主要从事风沙活动研究. E-mail: 1660265202@qq.com

究具有重要意义。Wei 等^[7]将北半球不同区域沉积物的 Sr-Nd 同位素特征进行分析,发现青藏高原是高原东部冰川、黄土高原、中国南海、日本、格陵兰岛这些地区的重要尘埃来源,并可能对全球风尘循环产生重要影响。

但不同粒级的成分所包含的信息不尽相同,在进行过去环境重建或物源示踪时,往往需要区别对待。研究表明,沉积物不同粒级组分的地球化学特征不同,可能反映了它们的物质来源不同^[8-10]。塔克拉玛干沙漠粗颗粒($\geq 250 \mu\text{m}$)与细颗粒($< 53 \mu\text{m}$)的微量元素与稀土元素(REE)含量存在显著差异^[8]。鄂尔多斯高原不同粒级风成沙的稀土元素与微量元素分布模式不同,粗颗粒($\geq 75 \mu\text{m}$)主要来源于区域内部砂岩的风化,而细颗粒($< 75 \mu\text{m}$)的 REE 及其他一些稳定微量元素的分布与黄河河沙中的细颗粒组分($< 75 \mu\text{m}$)中的元素分布相似^[10]。新疆伊犁河谷风成沙-古土壤沉积剖面中的常量元素明显受粒度的影响,表征剖面化学风化程度的指标化学蚀变指数 CIA、Rb/Sr 随粒级增大数值逐渐变小,Na₂O/K₂O、K₂O/Al₂O₃、Na₂O/Al₂O₃ 随粒级增加逐渐升高^[11]。哈尔滨城市道路表土不同粒级微量和稀土元素分布特征的研究表明,细颗粒中 REE 含量略有增加^[12]。

一般来说,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值随着粒级的变化而变化,而 Nd 同位素随粒级的变化波动很小或几乎与粒度无关^[13-16]。Sun^[17-18]选用 $< 20 \mu\text{m}$ 的颗粒来探讨黄土的物质来源,但 Chen 等^[1]选用了 $< 75 \mu\text{m}$ 作为粒度上限对黄土与潜在物源的 Sr-Nd 同位素组成进行对比研究,将中国的主要戈壁和沙漠分为 3 个大的区域,认为黄土高原的典型黄土可能最终来源于青藏高原北部^[1,19-20]。

青藏高原是世界上最高的高原,有地球第三极之称,其地表过程以侵蚀为主,可能是其周边地区,比如黄土高原沉积物的源区;但同时青藏高原内部也有多种类型的沉积物^[21],其沉积物也具有粒度效应。作者曾对雅鲁藏布江流域、柴达木盆地的微量元素和稀土元素的粒度效应进行过一些讨论^[22-23]。本文将在此基础上结合沉积物轻矿物和 Sr-Nd 同位素进行更全面的探讨,以期对利用不同粒级颗粒所包含的信息探讨风沙物质来源提供依据。

1 研究区与方法

青藏高原位于我国西南部,在国境内的面积约

$2.58 \times 10^6 \text{ km}^2$,平均海拔超过 $4\,500 \text{ m}$ ^[24]。高原上纵横延展着很多高耸的山脉,除了东南部的横断山脉近似南北走向外,其余山脉都是近东西走向。这些巨大的山脉之间镶嵌分布着地势较为平坦宽阔的宽谷和盆地。高原具有与同纬度其他地区不同的气候特征,其东南部相对暖湿,西北部相对冷干。高原东南部墨脱县的多年平均降水量超过 $4\,000 \text{ mm}$,而在高原北部柴达木盆地内的冷湖地区年平均降水不足 20 mm ^[25]。在西风环流和高原地势共同影响下,高原大部分地区的年平均风速超过 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大风日数(瞬时风速 $\geq 17.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)在 50 天以上,主要出现在冬春季节,为风沙活动提供了充足的动力。

1.1 研究区概况

青藏高原松散沉积物分布面积占高原总面积的近一半^[21],主要包括残坡积物、洪积物、湖积物、冲积物和风沙沉积物等,由此形成的沙漠化土地面积约 $39.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,占高原总面积的 15.1% ^[26]。本文选取高原南部雅鲁藏布江宽谷、高原东北部柴达木盆地和高原中部错那湖东岸作为典型区,对其不同沉积物的粗、细颗粒分别进行地球化学与矿物分析。选择这三个典型区主要基于以下考虑:①其分别位于青藏高原的三种气候模态,即季风区、西风区和过渡区,在气候方面具有代表意义;②这三个典型区代表了青藏高原有丰富松散沉积物的三种典型的地貌类型(图 1),即大江大河宽谷、盆地和湖泊。

1.1.1 雅鲁藏布江流域

雅鲁藏布江(以下简称雅江)是西藏自治区最长的河流,在中国境内全长 $2\,057 \text{ km}$,流域面积约 $24 \times 10^4 \text{ km}^2$,整个流域的平均海拔超过 $4\,000 \text{ m}$ 。雅江自西向东横贯西藏南部,从上游至下游分为高原温带半干旱气候—高原温带半湿润气候—高原温带湿润气候—亚热带湿润气候^[27]。雅江河谷宽窄相间分布呈串珠状,自上而下主要包括马泉河宽谷、日喀则宽谷、山南宽谷和米林宽谷。流域内冲积物和风成沉积物分布广泛,主要集中在宽谷段及支流汇入主流处^[28]。流域上游至下游气温和降水量总体呈逐渐上升和增加的趋势,而风速则呈下降的趋势。

1.1.2 柴达木盆地

柴达木盆地位于青藏高原东北部,面积约为 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$,内流区的面积约为 $27.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地内的平均海拔约为 $2\,800 \text{ m}$,四周被高达 $4\,000 \text{ m}$ 以



(a) 雅鲁藏布江上游马泉河宽谷及河滩上的沙丘

(b) 柴达木盆地山前洪积扇

(c) 错那湖、东岸沙地及青藏铁路

图1 青藏高原沉积典型区景观

Fig. 1 Landscape of typical sedimentary areas of Qinghai-Tibet Plateau: sand dunes on the wide valley and river bank of the Maquan River in the upper reaches of the Yarlung Zangbo River (a), flood fan on the foot of the mountains in the Qaidam Basin (b) and Co Nag Lake, east coast sands and Qinghai-Tibet Railway (c)

上的阿尔金山、祁连山以及昆仑山等山系环绕。柴达木盆地具有明显的环状特征,从盆地中心的盐湖-沼泽,到沙丘,再到山前洪积扇上的戈壁,以及盆地边缘的丘陵,最后上升到盆地周边的山地。盆地常年受西风环流控制,冬春季节盛行强烈的西风和西北风,其引发的沙尘暴等沙尘天气主要出现在每年的3—5月^[29]。柴达木盆地西部分布着约 $3.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的雅丹地貌,是我国面积最大的雅丹群^[30]。

1.1.3 错那湖流域

错那湖位于高原腹地,属于高原亚寒带半湿润季风气候,冬季受西风环流的影响降水量少;夏季受印度季风控制带来较多降水^[31]。该区多年平均风速为 $4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,每年的大风日数($\geq 17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)超过150天,错那湖东岸风沙活动强烈,冬春季节大面积的湖滩和河床裸露,在大风作用下,湖泊东岸形成大面积的沙质沙漠化土地。错那湖东岸是青藏铁路沿线风沙灾害最严重的路段之一。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查与样品采集

在上述三个典型区进行了野外调查和采样,样品的分布位置具体见图2。在雅江流域共采集42个地表松散沉积物样品,包括沙丘沙20个、砂黄土3个、冲积物10个、洪积物7个、残坡积物2个。在柴达木盆地内共采集48个地表松散沉积物样品进行分析,包括沙丘沙15个、冲积物10个、洪积物15个、湖积物7个、残积物1个。在错那湖周边共采集53个地表松散沉积物样品,包括沙丘沙21个、冲积物11个、湖积物3个、洪积物6个、残积物8个、坡积物4个,主要分布在错那湖的东岸和北岸。

1.2.2 室内样品分析测试

用干筛法将沉积物样品分为 $<75 \mu\text{m}$ 和 $\geq 75 \sim 500 \mu\text{m}$ 两个部分,前者称为细颗粒,后者称为粗颗粒

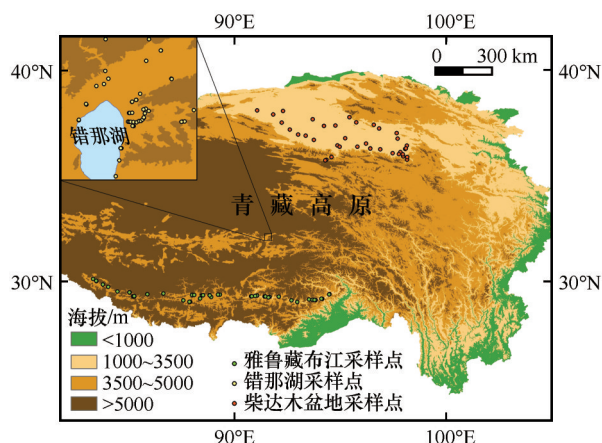


图2 研究区采样点分布

Fig. 2 Distribution of sampling sites in the study area

粒,在实验室分别进行稀土与微量元素、Sr-Nd同位素、轻矿物组成的实验室分析测试。并对获得的数据运用多元统计分析方法之多维尺度分析,探讨沉积物样品之间的元素组成和矿物组成的相似度。本文选择 $75 \mu\text{m}$ 作为粗、细颗粒划分的界线主要基于以下考虑:① $<75 \mu\text{m}$ 的颗粒在大风条件下趋向于悬移,其中 $<20 \mu\text{m}$ 的颗粒甚至能够进入到高层大气,从而被远距离搬运;②前人的研究表明Nd同位素不受粒度的影响,但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 在 $<75 \mu\text{m}$ 的粒级中的变率要远小于其在 $<20 \mu\text{m}$ 颗粒中的变率;③前人在黄土以及现代降尘等粉尘物质的物源示踪研究中大量选用 $<75 \mu\text{m}$ 的沉积物颗粒作为潜在物质来源的示踪对象^[22]。

(1) 稀土和微量元素测试

沉积物样品的微量元素(包括稀土元素)含量测定在核工业北京地质研究院完成,测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)。Rh作为分析过程的内标元素,样品的消解是用 HNO_3 (1:1,指 HNO_3 与水的体积比,下同)和HF在高温高压条件

下进行的,具体步骤参照 Yang 等^[8]的前处理过程。主要包括以下 4 个步骤:①将 1 mL 的 HF 和 0.5 mL 的 HNO₃(1:1)加入到密闭的聚四氟乙烯的溶样器的内罐中,密封,在(185±5) °C 的条件下加热 24 h,并在加热过程中不断进行超声震荡以分解硅酸盐以及其他盐类;②加入 1 mL 的 HF 和 0.5 mL 的 HNO₃(1:1)以及 1 滴 H₂MnO₄到溶样器中,密封,并在加热板上继续加热 7 天从而进一步溶解硅酸盐、氟化物以及锆石;③冷却后再加入 2 mL 的 HNO₃(1:1)并加热蒸至近干来进一步溶解氟化物;④最后再次加入 2 mL 的 HNO₃(1:1)以确保没有残渣剩余,并将溶液转移至洁净的烧瓶中,并加入 1% 的 HNO₃定容至 50 mL,摇匀后的溶液直接用于 ICP-MS 测定。每 50 个样品为一个批次,分别加入 5 个平行样和 2 个标准土样进行质量控制。稀土元素分析的不确定性(相对标准偏差)低于±1%,其他微量元素低于±5%。

(2) 铷锶同位素测试

沉积物样品先用 0.5 mol·L⁻¹ 的醋酸溶液淋滤掉碳酸盐成分,主要包括方解石和白云石^[32],碾磨至 200 目以下以备 Nd-Sr 同位素分析。Nd-Sr 同位素的测试是在核工业北京地质研究院完成的,测试仪器为表面热电离固体质谱仪(TIMS)。样品具体的消解和测试步骤是按照 Chen 等^[1]的实验过程。首先准确称取 100 mg 粉末样品置于低压密闭溶样罐中,加入适量的 ⁸⁷Rb-⁸⁴Sr 和 ¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 混合稀释剂并用混合酸(HF+HNO₃+HClO₄)在高温条件下完全溶解^[33]。待样品完全溶解后,蒸干,加入 6 mol·L⁻¹ 的盐酸转为氯化物蒸干,用 0.5 mol·L⁻¹ 的盐酸溶液溶解,离心分离,清液保留待用^[34]。Rb-Sr 和 REE 的分离和纯化是在装有 2 mL AG 50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱内进行的,而 Sm 和 Nd 的分离和纯化是在石英交换柱内用 1 mL P507 型萃淋树脂为交换介质完成的^[33]。Sr 同位素比值测定采用 Ta 金属带和 Ta-HF 作为发射剂,而 Nd 同位素比值测定采用双 Re 金属带形式^[33]。质量分馏 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的结果用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.119400 校正,标准样品 NBS987 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 测量结果为 0.710250±7(2σ)。¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 的比值结果用 ¹⁴⁴Nd/¹⁴⁶Nd=0.721900 进行校正,标准样品 JMC 的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测量结果为 0.512109±3(2σ)。整个实验流程空白样的 Sr 小于 1 ng,而 Nd 则小于 50 pg。

(3) 轻矿物含量测试

轻矿物组成是在中国科学院地质与地球物质

研究所测试完成的,测试仪器为日本理学 D/MAX-2400 型 X 射线衍射仪。具体的分析条件为 Cu 靶,扫描范围 3°~65°,采样步长 0.02°(2θ)扫描速度 4°(2θ)·min⁻¹,电压为 40 kV,电流为 60 mA。实验步骤:①样品制备。取适量样品在磨样机上研磨至 300 目以下的粉末。将标准样品座放在平板玻璃板上,将粉末样品放入样品座中间的方孔中,填满,将方孔中的粉末样品压实。该制样法一般情况下,偏心误差较小、择优取向性较轻。②在前述提到的实验条件下对粉晶样品进行 X 射线衍射分析。③数据分析。本研究中的沉积物样品的轻矿物组成是半定量的结果,但足以反映沉积物的基本特征。

2 结果与分析

2.1 稀土及微量元素组成的粒度效应

测试结果表明,柴达木盆地和雅鲁藏布江流域沉积物的细颗粒富集稀土元素以及测试的大多数微量元素。图 3 所示的是基于欧式距离构建的柴达木盆地 48 个地表沉积物粗颗粒和细颗粒,以 43 个稀土和微量元素含量作为指标的距离矩阵,采用古典多维尺度分析方法,对柴达木盆地松散沉积物的相似性进行分析,其拟合度指标是 Stress 和 RSQ。其中,Stress 值越小越好,一般在 0.2 以内为最佳,RSQ 值越接近于 1 越好,一般在 0.6 以上可以接受^[35-36]。本研究模型在二维空间上的 Kruskal 应力 Stress 和决定系数 RSQ 分别为 0.168 和 0.932,其拟

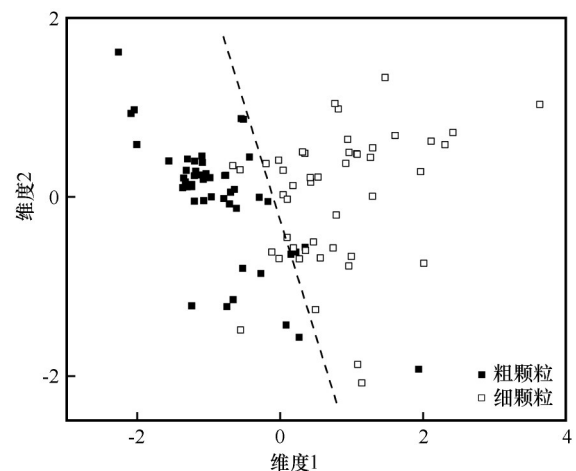


图3 柴达木盆地沉积物粗细颗粒的元素组成多维尺度分析结果散点图

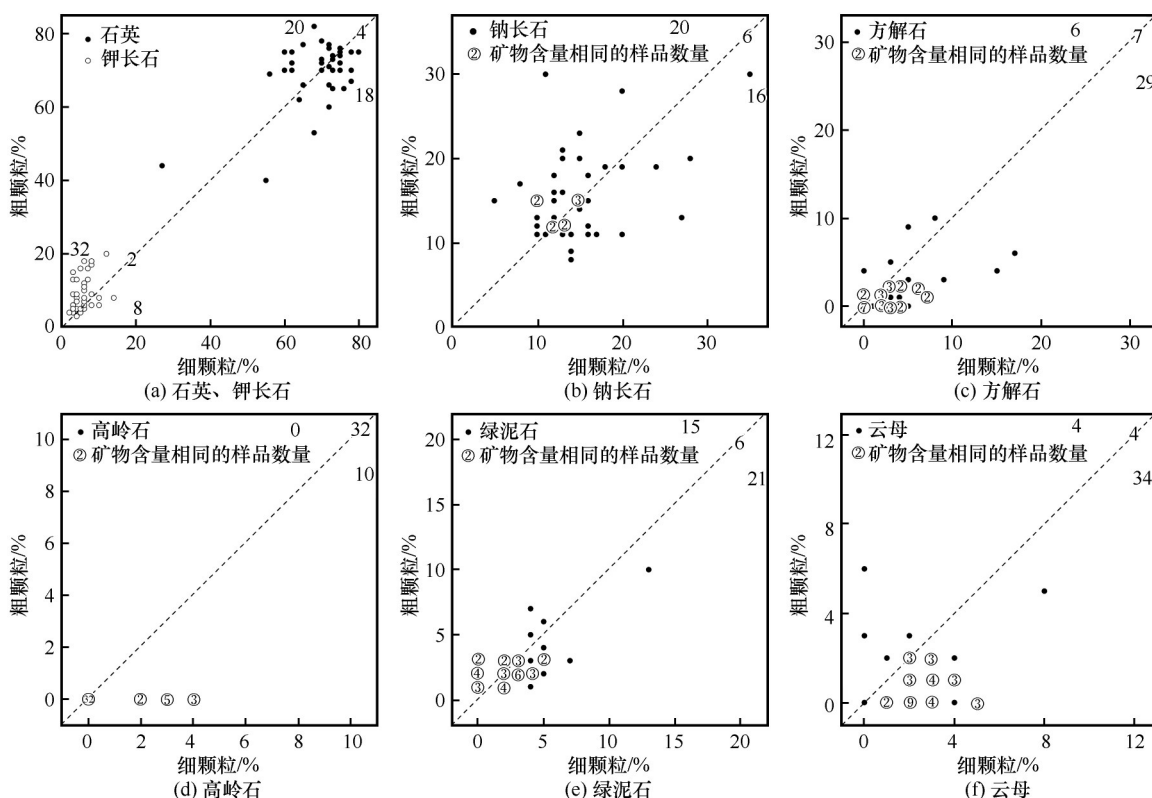
Fig. 3 Scatter plot of the results of multidimensional scale analysis of the elemental composition of coarse and fine particles of sediments in the Qaidam Basin

合效果较好。从图3中可知,粗颗粒与细颗粒之间具有非常明显的界线,反映了粗细颗粒之间稀土和微量元素组成的显著差异。其粗、细颗粒的元素分布模式图显示,细颗粒中富集了稀土和微量元素^[22]。雅鲁藏布江流域元素组成的多维尺度分析,以及稀土元素特征参数分析,显示了类似的结果^[23]。综上所述,两个典型区的沉积物的粗颗粒与细颗粒都具有显著的稀土及微量元素组成差异,研究结果能够相互佐证。

2.2 轻矿物组成的粒度效应

本文对雅江流域沉积物上述两个粗、细颗粒组

分的轻矿物组成进行了对比研究,结果表明主要矿物石英和钠长石在粗颗粒和细颗粒中的含量差异不大(图4)。钾长石则主要在粗颗粒中富集,在总共42个沉积物样品中有32个样品其粗颗粒的钾长石含量高于细颗粒。而沉积物的细颗粒则显著富集方解石和云母,这是因为这两种矿物的硬度较小,在搬运过程中极易因为机械磨损变小从而在细颗粒中富集。此外,绿泥石和高岭石等黏土矿物也在细颗粒中有一定程度的富集,特别是高岭石只在部分细颗粒中出现,反映了化学风化对沉积物的细颗粒组分有非常明显的影响。



注: 图中虚线上的数字表示矿物粗、细颗粒百分比相等的样品数量, 虚线左边数字表示粗颗粒的百分比大于细颗粒的百分比的样品数量, 虚线右边数字表示细颗粒的百分比大于粗颗粒的百分比的样品数量

图4 雅鲁藏布江流域沉积物不同粒级的轻矿物含量对比散点图

Fig. 4 Comparative scatter plot of light mineral content of different grain classes in Yarlung Zangbo River basin sediments (The numbers on the dotted line in the figure indicate the number of samples with equal percentages of coarse and fine particles of minerals, the numbers on the left of the dotted line indicate the number of samples where the percentage of coarse particles is greater than the percentage of fine particles, and the numbers on the right of the dotted line represent the number of samples where the percentage of fine particles is greater than the percentage of coarse particles)

图5所示的是基于欧式距离构建的雅江流域42个地表沉积物粗颗粒和细颗粒,以7个轻矿物含量作为指标的距离矩阵,采用古典多维尺度分析方法对雅江流域松散沉积物的相似性进行分析,模型在二维空间上的 Kruskal 应力 Stress 和决定系数 RSQ

分别为0.169和0.923,这表明本模型的拟合效果较好。从图5中可知,粗颗粒与细颗粒之间具有非常明显的界线,表明粗细颗粒之间轻矿物组成的显著差异,这与上面根据沉积物不同粒级的轻矿物组成进行对比得到的结论是一致的(图4)。沉积物不同

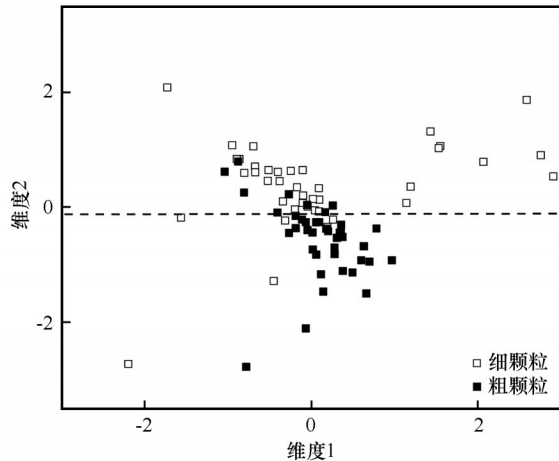


图5 雅鲁藏布江流域沉积物不同粒级的轻矿物含量组成多维尺度分析结果散点图

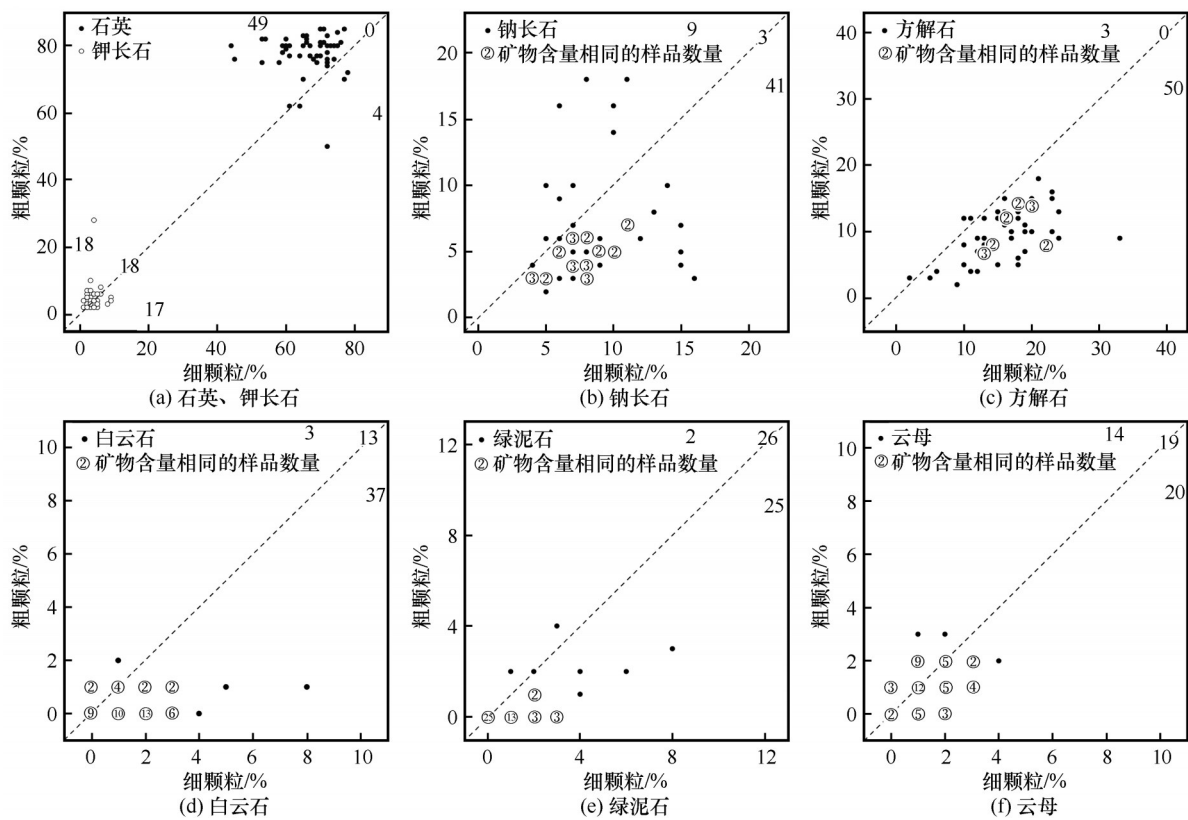
Fig. 5 Scatter plot of the results of multidimensional scale analysis of the composition of light mineral content of different grain sizes in the sediments of the Yarlung Zangbo River basin

粒级组分的轻矿物组成明显不同。

错那湖流域沉积物不同粒级的轻矿物组成对比结果表明(图6),主要矿物石英明显在粗颗粒中富集。钾长石和云母则在粗颗粒和细颗粒中的含量差异不大,其中钾长石在粗颗粒中的平均含量略高于细颗粒,而云母在细颗粒中的平均含量略高一些。而细颗粒则显著富集钠长石、方解石、白云石和绿泥石,这是因为方解石和白云石矿物的硬度较小,在搬运过程中极易因为机械磨蚀从而在细颗粒中富集。此外,斜长石和绿泥石等矿物在细颗粒中的富集反映了化学风化对沉积物的细颗粒组分有非常明显的影响。

2.3 Sr-Nd 同位素组成的粒度效应

选择柴达木盆地 27 个样品的粗颗粒组分,13 个样品的细颗粒组分进行了 Sr-Nd 同位素组成分析,结果如图 7 所示,细颗粒的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 范围为



注：图中虚线上的数字表示矿物粗、细颗粒百分比相等的样品数量，虚线左边数字表示粗颗粒的百分比大于细颗粒的百分比的样品数量，虚线右边数字表示细颗粒的百分比大于粗颗粒的百分比的样品数量

图6 错那湖流域沉积物不同粒级的轻矿物含量对比散点图

Fig. 6 Comparative scatter plot of light mineral content of different grain classes in Co Nag Lake basin (The numbers on the dotted line in the figure indicate the number of samples with equal percentages of coarse and fine particles of minerals, the numbers on the left of the dotted line indicate the number of samples where the percentage of coarse particles is greater than the percentage of fine particles, and the numbers on the right of the dotted line represent the number of samples where the percentage of fine particles is greater than the percentage of coarse particles)

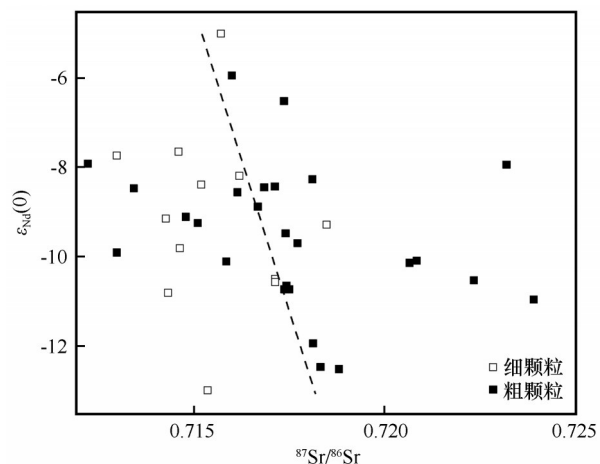


图7 柴达木盆地沉积物粗细粒级Sr-Nd同位素分布
Fig. 7 Sr-Nd isotopic compositions for the coarse- and fine-grained fractions of the sediments in the Qaidam Basin

0.712112~0.718495, 均值为0.715270; 而粗颗粒的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 范围为0.711764~0.723899, 均值为0.717354^[22], 由图7可知同一样品的粗颗粒的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 高于细颗粒。细颗粒的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 范围为-12.97~-8.54, 均值为-10.57, 而粗颗粒的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 范围为-12.50~-4.99, 均值为-8.84, 同一样品的粗颗粒的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 值也同样高于细颗粒。

3 讨论

3.1 粗、细颗粒的地球化学特征与矿物组成差异明显

柴达木盆地48个沉积物样品两个粒级稀土和微量元素含量的多维尺度分析结果(图3)表明, 粗、细颗粒具有显著的差异, 雅鲁藏布江流域具有类似的特点^[23], 两个典型区的研究结果能够相互验证, 本质是它们的矿物组成存在差异。

雅江流域和错那湖沉积物两个粒级的轻矿物组成情况也证实了这一点(图4、图6), 细颗粒相比于粗颗粒更富集绿泥石和高岭石等黏土矿物, 特别是高岭石只在部分样品的细颗粒中出现。综合对比雅江流域和错那湖流域沉积物不同粒级的轻矿物组成, 可以发现, 这两个典型区的研究结果有相同点也有不同点, 相同点是二者的细颗粒都富集硬度较小的矿物(方解石、云母等)和黏土矿物(绿泥石、高岭石等), 而不同之处则是雅江流域沉积物的粗颗粒富集钾长石, 而错那湖流域沉积物的粗颗粒则富集石英, 这两者的差异可能是由于为沉积物提供物质来源的山脉剥蚀区的地质背景不同。

柴达木盆地Sr-Nd同位素组成分析表明(图7),

同一沙丘沙的粗、细颗粒的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 有差异, 其比值粗颗粒高于细颗粒。中国北方沙丘沙7个粒级Sr-Nd同位素的研究表明鄂尔多斯沙漠沙丘沙 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值随着粒径减小而增加, 而腾格里和古尔班通古特沙漠沙丘的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化则随粒径减小而减小^[37]。也就是说, 沉积物的Sr同位素组成受粒度控制, 但没有一致性的变化规律。本文研究沙丘沙的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与腾格里和古尔班通古特沙漠沙丘的变化具有相似的规律。

Nd同位素组成在腾格里和古尔班通古特沙漠的不同粒级沙丘沙中没有明显区别, 各粒级组分有相同的物质源区, Nd同位素组成在鄂尔多斯沙漠 $\geq 100\ \mu\text{m}$ 和 $<100\ \mu\text{m}$ 的沙丘沙颗粒中明显不同, 这两个粒级的沙丘沙颗粒被认为具有不同的源区或物源组合^[37]。对中国北方沙漠-黄土过渡带晚第四纪滴哨沟湾剖面风成和河湖相沉积的研究表明沉积物 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 在两个粒级中的变化没有明显的规律, 有些样品的粗细粒级之间具有相似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$, 而另一些样品的粗细颗粒则存在明显的Nd同位素特征的差异, 认为原因是这些样品的粗细颗粒具有不同的源区^[38]。对河流和海洋沉积物不同粒级Sr-Nd同位素的研究表明 $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ 在不同粒级中没有明显变化^[39-41]。

综上所述, 沉积物的Sr同位素组成受粒度控制, 但没有一致性的变化规律, 而Nd同位素组成基本只与物源有关, 因此在进行沉积物物源示踪分析时, 应用Nd同位素数据获得的信息较为可信, 选取相同粒级进行对比研究时Sr同位素数据可以充当辅助角色。

3.2 细颗粒的环境意义

如前所述, 沉积物的稀土和微量元素组成以及轻矿物组成与粒度关系密切, 雅江流域沉积物细颗粒的稀土元素分布曲线以及特征参数比对应的粗颗粒更分散^[23]。由于高原独特的地貌格局, 雅江流域从上游至中游下段的气候条件变化很大, 上游是以冷干为主要特征的高原温带草原气候, 而中游则为高原温带半湿润气候^[27], 降水量从流域下游至上游方向逐渐减少。在4个宽谷段中, 年平均气温从上游至下游逐渐上升。由于气候条件的差异, 流域不同宽谷区地表沉积物受到的化学风化程度具有一定的差异, 这种影响对细颗粒的作用相比于粗颗粒更大一些, 使得不同气候区的细颗粒更分散, 地球化学特征差异更大, 这反映了细颗粒可能蕴含有

更多的环境信息。

错那湖流域沉积物细颗粒相比于粗颗粒更富集绿泥石和高岭石等黏土矿物,特别是高岭石只在部分样品的细颗粒中出现(图6)。柴达木盆地沉积物细颗粒的稀土元素分布曲线以及特征参数同样比对应的粗颗粒更分散一些^[22],也是对上述讨论的一种佐证,表明沉积物的细颗粒组分相比于粗颗粒蕴含着更多的环境信息。总的来看,沉积物的细颗粒富含容易受化学风化影响的黏土矿物以及硬度较小容易被磨蚀的方解石等矿物,这表明沉积物的细颗粒组分相比于粗颗粒蕴含着更多的环境信息。

4 结论

综上所述,沉积物的细颗粒部分蕴含了更多的环境信息,容易受到化学风化的影响,在物源示踪中不同气候区的沉积物细颗粒不宜进行直接比较,应根据样品的粒度分布情况优先选择合适的粗颗粒组分进行物源示踪。考虑到沙质沙漠化土地的主要粒级,结合不同粒级颗粒的运动方式,沙质沙漠化土地的物源示踪分析可主要基于粗颗粒($\geq 75 \sim 500 \mu\text{m}$)进行。

致谢: 崔之久先生是本文第一作者走上科研道路的引路人,30年前在崔先生指导下从昆仑山垭口盆地走上了青藏高原,此后科研工作基本没有离开高原。作者感触最深的就是先生是一位纯粹的科学家,对大自然充满好奇,并持之以恒地不断探索,绝少功利之心。先生在耄耋之年仍几乎每年上青藏高原进行野外工作。2019年先生86岁高龄之际,感觉体力已不如前,但尚有科学问题萦绕在心,因此邀约几位学生共赴青藏高原东部岷江源地区,将自己所思和学生进行了交流,希望相关工作能持续不断开展下去。本人有幸参加了这次野外,当时相约两年后再上高原,可惜受新冠疫情影响,2021年的高原野外没能成行,希望以后还有机会。先生对科学的执着追求是我们后辈学习的榜样!

参考文献(References):

- [1] Chen Jun, Li Gaojun, Yang Jiedong, et al. Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: implications for the provenances of Asian dust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(15): 3904-3914.
- [2] Biscaye P E, Grousset F E, Revel M, et al. Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C12): 26765-26781.
- [3] Ding Zhongli, Sun Jimin, Yang Shiling, 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]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(6): 901-913.
- [4] Ferrat M, Weiss D J, Strekopytov S, et al. Improved provenance tracing of Asian dust sources using rare earth elements and selected trace elements for palaeomonsoon studies on the eastern Tibetan Plateau [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(21): 6374-6399.
- [5] Dong Zhiwen, Brahney J, Kang Shichang, et al. Aeolian dust transport, cycle and influences in high-elevation cryosphere of the Tibetan Plateau region: new evidences from alpine snow and ice[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 211: 10348.
- [6] Dong Zhiwen, Kang Shichang, Qin Dahe, et al. Provenance of cryoconite deposited on the glaciers of the Tibetan Plateau: new insights from Nd-Sr isotopic composition and size distribution [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(12): 7371-7382.
- [7] Wei Ting, Brahney J, Dong Zhiwen, et al. Hf-Nd-Sr isotopic composition of the Tibetan Plateau dust as a fingerprint for regional to hemispherical transport[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(14): 10121-10132.
- [8] Yang Xiaoping, Zhu Bingqi, White P D. Provenance of aeolian sediment in the Taklamakan Desert of western China, inferred from REE and major-elemental data [J]. *Quaternary International*, 2007, 175(1): 71-85.
- [9] Liu Ziting, Yang Xiaoping. Geochemical-geomorphological evidence for the provenance of aeolian sands and sedimentary environments in the Hunshandake Sandy Land, eastern Inner Mongolia, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(3): 871-884.
- [10] Rao Wenbo, Tan Hongbing, Jiang Sanyuan, et al. Trace element and REE geochemistry of fine- and coarse-grained sands in the Ordos deserts and links with sediments in surrounding areas [J]. *Chemie der Erde: Geochemistry*, 2011, 71(2): 155-170.
- [11] Li Jinchuan, Chen Xiuling, Jia Limin, et al. The distribution of geochemical elements in different grain-size fractions of desert sediments in Ili Valley of Xinjiang, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 2014, 5(2): 102-110. [李金婣, 陈秀玲, 贾丽敏, 等. 新疆伊犁河谷沙漠沉积不同粒径组分的地球化学元素分布特征[J]. *地球环境学报*, 2014, 5(2): 102-110.]
- [12] Xie Yuanyun, Meng Jie, Guo Lingfen, et al. The distribution of trace elements in different grain-size fractions inferred from road surface soils in Harbin City, Heilongjiang Province [J]. *Geology in China*, 2013, 40(2): 629-635. [谢远云, 孟杰, 郭令芬, 等. 哈尔滨城市道路表土记录的痕量元素在不同粒级中的分布特征[J]. *中国地质*, 2013, 40(2): 629-635.]
- [13] Delmonte B, Basile D I, Petit J R, et al. Comparing the Epica and Vostok dust records during the last 220,000 years: stratigraphical correlation and provenance in glacial periods [J]. *Earth-Science Reviews*, 2004, 66(1): 63-87.
- [14] Grousset F E, Biscaye P E, Revel M, et al. Antarctic (Dome C) ice-core dust at 18 k. y. B. P.: isotopic constraints on origins [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 111(1): 175-182.
- [15] Rao Wenbo, Yang Jiedong, Chen Jun, et al. Sr-Nd isotope geochemistry of eolian dust of the arid-semiarid areas in China: implications for loess provenance and monsoon evolution [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(12): 1401-1412. [饶文波, 杨杰东, 陈骏, 等. 中国干旱-半干旱区风沙物质的 Sr, Nd 同位素地球化学: 对黄土来源和季风演变的指示[J]. 科

- 学通报, 2006, 51(4): 378-386.]
- [16] Smith J, Vance D, Kemp R A, et al. Isotopic constraints on the source of Argentinian loess: with implications for atmospheric circulation and the provenance of Antarctic dust during recent glacial maxima[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212(1/2): 181-196.
- [17] Sun Jimin. Nd and Sr isotopic variations in Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: implications for provenance change [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240 (2): 454-466.
- [18] Sun Jimin. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 203(3/4): 845-859.
- [19] Li Gaojun, Chen Jun, Ji Junfeng, et al. Natural and anthropogenic sources of East Asian dust[J]. *Geology*, 2009, 37(8): 727-730.
- [20] Yang Jiedong, Li Gaojun, Rao Wenbo, et al. Isotopic evidences for provenance of East Asian dust[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(29): 4481-4490.
- [21] Wu Yongqiu, Tang Lihua, Du Shisong, et al. Map of surface material composition distribution on the Qinghai-Tibet Plateau (1:2.5 million)[CM]. Xi'an: Xi'an Map Press, 2018. [伍永秋, 谭利华, 杜世松, 等. 青藏高原地表物质组成分布图(1:250万)[CM]. 西安: 西安地图出版社, 2018.]
- [22] Du Shisong, Wu Yongqiu, Tan Lihua. Geochemical evidence for the provenance of aeolian deposits in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau[J]. *Aeolian Research*, 2018, 32: 60-70.
- [23] Du Shisong, Wu Yongqiu, Tan Lihua, et al. Geochemical characteristics of fine and coarse fractions of sediments in the Yarlung Zangbo River basin (southern Tibet, China)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77: 337.
- [24] Zhang Yili, Li Bingyuan, Liu Linshan, et al. Redetermine the region and boundaries of Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(6): 1543-1553. [张懿锂, 李炳元, 刘林山, 等. 再论青藏高原范围[J]. *地理研究*, 2021, 40(6): 1543-1553.]
- [25] Li Qing. Analysis of the modern process of land desertification in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2016. [李庆. 青藏高原土地沙漠化现代过程分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2016.]
- [26] Wu Yongqiu, Zhang Chunlai, Du Shisong, et al. The past and future of aeolian desertification on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *IEEE Spectrum*, 2017(9): 82-83. [伍永秋, 张春来, 杜世松, 等. 青藏高原沙漠化的过去与未来[J]. *科技纵览*, 2017(9): 82-83.]
- [27] Yang Ping, Li Sen, Wei Xinghu, et al. Tibetan atlas of physical geography and aeolian desertification[M]. Beijing: Science Press, 2013. [杨萍, 李森, 魏兴琥, 等. 西藏综合自然与沙漠化地图集[M]. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [28] Shen Weishou, Li Haidong, Sun Ming, et al. Dynamics of aeolian sandy land in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China from 1975 to 2008 [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 86/87: 37-44.
- [29] Yu Lupeng, Lai Zhongping, An Ping. OSL chronology of paleodunes in the middle and southwestern Qaidam Basin, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(2): 453-462. [于禄鹏, 赖忠平, 安萍. 柴达木盆地中部与西南部古沙丘的光释光年代学研究[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 453-462.]
- [30] Kapp P, Pelletier J D, Rohrmann A, et al. Wind erosion in the Qaidam Basin, Central Asia: implications for tectonics, paleoclimate, and the source of the Loess Plateau[J]. *GSA Today*, 2011, 21(4): 4-10.
- [31] Huang Wenmin, Wu Yongqiu, Pan Meihui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of the Amdo Profile in Tibet, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(2): 349-357. [黄文敏, 伍永秋, 潘美慧, 等. 西藏安多剖面沉积物粒度特征及环境意义[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 349-357.]
- [32] Yang Jiedong, Chen Jun, Tao Xiancong, et al. Sr isotope ratios of acid-leached loess residues from Luochuan, China: a tracer of continental weathering intensity over the past 2.5 Ma [J]. *Geochemical Journal*, 2001, 35(6): 397-402.
- [33] Li Wenxia. Geochemical characteristics and tectonic environments of the Yarlung Zangbo ophiolites in Xigaze, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013. [李文霞. 西藏日喀则地区雅鲁藏布蛇绿岩地球化学及构造环境研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.]
- [34] Zhao Haijie, Mao Jingwen, Xiang Junfeng, et al. Mineralogy and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of quartz diorite in Tonglushan deposit, Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(3): 768-784. [赵海杰, 毛景文, 向君峰, 等. 湖北铜绿山矿床石英闪长岩的矿物学及Sr-Nd-Pb同位素特征[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 768-784.]
- [35] Nerur S P, Rasheed A A, Natarajan V. The intellectual structure of the strategic management field: an author co-citation analysis [J]. *Strategic Management Journal*, 2008, 29(3): 319-336.
- [36] Meyer J M, Heath A C, Eaves L J. Using multidimensional scaling on data from pairs of relatives to explore the dimensionality of categorical multifactorial traits[J]. *Genetic Epidemiology*, 1992, 9(2): 87-107.
- [37] Rao Wenbo, Chen Jun, Yang Jiedong, et al. Sr-Nd isotopic characteristics of different particle-size fractions of eolian sands in the deserts of northern China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15(2): 159-164. [饶文波, 陈骏, 杨杰东, 等. 中国北方沙漠风成沙不同粒级组分的Sr-Nd同位素特征[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(2): 159-164.]
- [38] Rao Wenbo, Chen Jun, Tan Hongbing, et al. Nd-Sr isotopic and REE geochemical compositions of late Quaternary deposits in the desert-loess transition, north-central China: implications for their provenance and past wind systems[J]. *Quaternary International*, 2014, 334/335: 197-212.
- [39] Goldstein S L, O'Nions R K, Hamilton P J. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1984, 70 (2): 221-236.
- [40] Tütken T, Eisenhauer A, Wiegand B, et al. Glacial-interglacial cycles in Sr and Nd isotopic composition of Arctic marine sediments triggered by the Svalbard/Barents Sea ice sheet [J]. *Marine Geology*, 2002, 182(3): 351-372.
- [41] Meyer I, Davies G R, Stuut J W, et al. Grain size control on Sr-Nd isotope provenance studies and impact on paleoclimate reconstructions: an example from deep-sea sediments offshore NW Africa[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2011, 12(3): Q3005.

Effect of sediments grain-size on geochemical characteristics and mineral composition in typical areas of the Qinghai-Tibet Plateau

WU Yongqiu¹, WANG Lihui¹, DU Shisong², LI Jingyun¹, SHEN Yulong¹

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China;

2. MOE Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Faculty of Geographical Science,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Different information is contained in fine or coarse among earth surface loose sediments. These differences were caused by the sources of the sediments, processes of transport and deposition of the sediments, and the weathering of sediments after they deposited. We can trace the sources of the sediments, or reconstruct the past environment of study area by the different information. Tracing sources of aeolian sediment is key to reconstructing earth surface processes in arid areas and interpreting the paleoenvironmental significance of aeolian sequences. The Qaidam Basin, Co Nag Lake, and Yarlung Zangbo River in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP) were chosen as our study area because of their important significances both in climate and landform. Loose sediment samples, including aeolian dune sand, loess, lacustrine deposits, fluvial sediments, proluvium, and eluvium-deluvium, were collected from the three areas. The sediment samples were separated into two parts by dry sieving: a coarse part with grain size between 75 and 500 μm , and a fine part less than 75 μm in grain size. Laboratory measurements of rare earth elements, trace elements, and Sr-Nd isotopic composition were made. Multi-dimensional scaling (MDS) represents the proximity of data (e. g. measures of similarity, closeness, relatedness) as distances among points in a multidimensional (typically two-dimensional) space. We calculated the Euclidean distance of every two samples in our samples and then applied classical MDS model to fit the data. The results show that the coarse and fine particles of sediment samples, the loose sediments in our study areas, QTP, differ in light mineral composition, trace and rare earth element composition. Compared to the coarse particles, the fine particles are rich in clay minerals that are easily affected by chemical weathering, and minerals with low hardness such as calcite, which is easily to be abraded. The fine part of the sediment contains more environmental information, suggesting that the fine part cannot be directly compared between different climate zones for provenance identification. To trace sediment sources, using the coarse part based on the grain-size distribution of the targeted sediment would be more appropriate.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; geochemical characteristics; mineral composition; grain-size effect

(责任编辑：董志文)