

文章编号: 1000-0550(2013)03-0468-10

不同粒级组分碳酸盐与碳同位素分布特征 及其对风尘物源的指示意义^①

谢远云¹ 康春国² 孟杰¹ 郭令芬¹ 何葵¹

(1. 哈尔滨师范大学地理科学学院 哈尔滨 150025; 2. 哈尔滨学院地理系 哈尔滨 150086)

摘要 在科尔沁沙地采集沙地表土样品 16 组, 松嫩平原杜蒙沙地样品 15 组, 同期还收集了城市道路表土样品 10 组, 对各组样品进行粒度分级(全样、 $>63\ \mu\text{m}$ 、 $63\sim 30\ \mu\text{m}$ 、 $30\sim 11\ \mu\text{m}$ 和 $<11\ \mu\text{m}$), 分别测定碳酸盐含量和碳同位素组成。结果显示, 不同区域不同性质样品各粒级组分碳酸盐含量的变化幅度不同, 科尔沁沙地最小(0.8%), 其次为杜蒙沙地(1.9%), 道路表土最大(2.7%)。大部分杜蒙沙地样品(66.7%) 和小部分科尔沁沙地样品(37.5%) 以及全部道路表土样品的碳酸盐含量随粒度变细而增大, 且变化模式各不相同。碳酸盐含量随粒度变细而增高是非匀速的, 先是增幅较大($>63\ \mu\text{m}\rightarrow 63\sim 30\ \mu\text{m}\rightarrow 30\sim 11\ \mu\text{m}$), 后增幅较小($30\sim 11\ \mu\text{m}\rightarrow <11\ \mu\text{m}$)。沙地样品碳酸盐含量与粒度的关系并不限于随粒度变细而增大这一种, 风成砂和经历过强烈成壤作用改造的沙地样品中的碳酸盐含量与粒度的关系皆表现为随粒度变细而减小, 沉积物中碳酸盐含量随粒径变细而增高是否是一种普遍规律还需要更多区域的更多样品来检验。大部分沙地样品和道路表土样品不同粒级组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较小($<1.8\text{‰}$), 并表现出随粒度变细而趋于偏正的特征, 但变化幅度很小。杜蒙沙地和科尔沁沙地碳酸盐含量的地区差异性极不明显, 且各粒级组分碳酸盐含量的变化幅度大大超过了杜蒙沙地与科尔沁沙地的碳酸盐差异值, 不能作为区分杜蒙沙地和科尔沁沙地风尘源区的示踪指标; 而科尔沁沙地和杜蒙沙地碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在明显差异(在 $63\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级组分表现最为明显), 且不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别较小, 说明它是一个比碳酸盐含量更好的风尘源区示踪指标, 但是不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的差异会随离中国西部沙漠沙地风尘源区距离的加大或者风尘物质成壤作用的增强而变大, 增加其风尘源区示踪的复杂性。

关键词 碳酸盐 碳酸盐碳同位素 分粒级组分 科尔沁沙地 杜蒙沙地 风尘物源示踪

第一作者简介 谢远云 男 1971 年出生 教授 第四纪地质 E-mail: xyy0451@sina.com

中图分类号 P534.63 **文献标志码** A

地球化学在风尘物源示踪方面发挥着重要作用^[1-8], 但沉积物中的地球化学组成不仅受控于物源区, 而且与粒度分选作用有关。研究表明, 沙尘潜在源区、风尘沉积物和现代风尘中的碳酸盐含量^[9-13]及其碳同位素组成^[2]变化明显, 同时不同粒级的表土样品中碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本一致^[12], 且在风蚀、搬运和沉降过程中通常是不变的, 因此可以作为潜在的沙尘物源示踪指标^[2, 9-14]。目前用于风尘源区示踪的碳酸盐含量及其碳同位素组成分析主要是基于全粒级样品, 而碳酸盐矿物在风力分选过程中容易粉碎细化且不同粒级组分对风尘的贡献也不尽相同, 将沙尘源区的全粒级样品(粒度较粗) 与沙尘沉降物(粒度较细) 的直接对比显然是不妥的。因此, 在利用碳酸盐及其碳同位素组成等地球化学方法示踪沙

尘源区时, 除了深入系统调查广大潜在源区全粒级的物质组成外, 还应建立分粒级组分的物质特征, 并对地球化学指标在各粒级组分中的分布特征开展研究。

现有的对于碳酸盐及其碳同位素组成在各粒级组分中的分布规律的一些认识, 比如沙漠中的碳酸盐含量趋向于在细颗粒中有较高的值^[12]以及粒度的分选并不影响源区物质的碳酸盐碳同位素特征^[2, 12]等, 基本上限于中国西北沙漠地区的极少量样品。对于碳酸盐及其碳同位素特征在不同粒级组分中的分布规律的研究是碳酸盐及其碳同位素组成作为沙尘源区示踪剂的理论基础, 这需要对不同区域不同性质地表土及更多样品的深入研究。黄土高原黄土来源于青藏高原东北部沙漠和沙地^[1, 15]的黄土沙漠起源说给了我们一个启示: 科尔沁沙地和松嫩沙地是东北

^①国家自然科学基金项目(批准号: 41072259) 及黑龙江省自然科学基金项目(G201027) 资助
收稿日期: 2012-02-07; 收修改稿日期: 2012-07-12

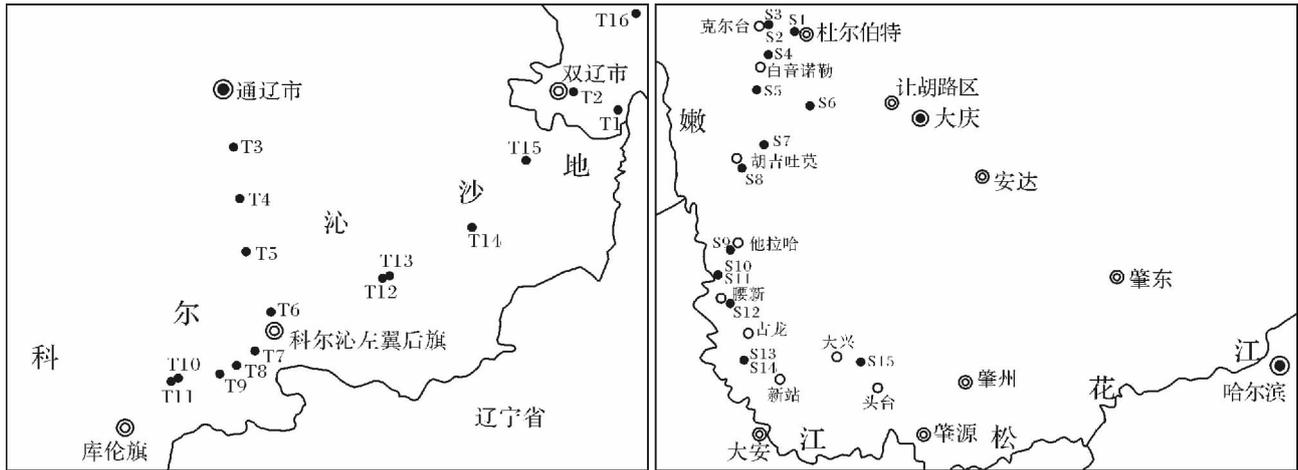


图1 研究区及采样点位置

Fig. 1 Sketch map of the study area and sampling sites

平原中东部沙尘天气的潜在物源区^[16]。为此,我们选择在科尔沁沙地和松嫩沙地分别采集沙地地表土样品,同时还收集了城市道路表土样品,分别将这些样品分成不同粒径组分,分析各粒径组分中碳酸盐及其碳同位素组成的分布特征,并在此基础上讨论了碳酸盐及其碳同位素组成对沙尘物源的指示意义。

1 材料与方法

2011年6—8月,分别对内蒙古通辽科尔沁沙地和松嫩平原黑龙江杜蒙(杜尔伯特蒙古族自治县,简称杜蒙)沙地进行了考察,采集科尔沁沙地地表土样品16组(样品编号为T1、T2、…、T16)杜蒙沙地样品15组(样品编号为S1、S2、…、S15)。沙地样品的岩性都是极细砂—细砂。其中科尔沁沙地样品覆盖了从通辽市往南延伸到科左后旗和库伦旗的科尔沁沙地的大部分,而杜蒙沙地样品则覆盖了从杜蒙县城—新店林场—他拉哈镇—大兴乡的杜蒙沙地的绝大部分(图1),因此,获取的沙地样品具有广泛性和较高的代表性。另外,同期还收集了哈尔滨城市道路松散裸土样品10组(样品编号为H1、H2、…、H10),样品基本覆盖哈尔滨各个城区。

考虑到风尘中 $70\ \mu\text{m}$ 和 $20\ \mu\text{m}$ 分别是悬浮载荷上限和短期悬浮与长期悬浮之界限^[17],将样品依次过250目($63\ \mu\text{m}$)、500目($30\ \mu\text{m}$)和1300目($11\ \mu\text{m}$)的标准分样筛,取得 $>63\ \mu\text{m}$ 、 $63\sim 30\ \mu\text{m}$ 、 $30\sim 11\ \mu\text{m}$ 、 $<11\ \mu\text{m}$ 以及全样等各个粒径范围的样品。利用激光粒度分析仪测试随机的分粒级样品,分别重复测试3次,3次测试所得的样品粒度数据与筛网记

录的粒级区间吻合良好,说明粒径提取效果较好。以上共得到200个分粒级的样品。对所有分粒级样品进行碳酸盐和碳氧同位素的测定。利用滴定法测量样品中的碳酸盐含量,碳酸盐稳定同位素分析采用磷酸法,在MAT-252质谱仪中完成碳、氧同位素比值的测定。在中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室完成所有样品的测试。

2 结果与讨论

2.1 碳酸盐含量在不同粒径组分中的分布特征

表1和图2给出了碳酸盐在各粒径组分中的分布特征。对于同一组样品各粒径组分中碳酸盐含量的变化幅度,道路表土变化幅度最大,为 $0.9\% \sim 4.5\%$ (2.7% ,平均值,下同),其次为杜蒙沙地,变化幅度为 $0.3\% \sim 4.8\%$ (1.9%),科尔沁沙地的T3样品变化幅度达到 12.3% ,T6样品的变化幅度为 6.8% ,其它样品的变化幅度为 $0.1\% \sim 2.2\%$ (0.8%)。进一步观察各粒径组分中碳酸盐含量的变化趋势发现,66.7%的杜蒙沙地样品和37.5%的科尔沁沙地样品以及全部道路表土样品中的碳酸盐含量有随粒度变细而增高的趋势(图2),但上升变化的模式不尽相同:上升的起点大部分是在全样组分,少部分是在 $63\sim 30\ \mu\text{m}$ 或 $>63\ \mu\text{m}$ 组分;上升的终点在 $30\sim 11\ \mu\text{m}$ 或 $<11\ \mu\text{m}$ 粒径组分;道路表土上升的起点是在全样或 $>63\ \mu\text{m}$ 组分,上升变化的终点都是 $<11\ \mu\text{m}$ 粒径组分。碳酸盐含量随粒度变细而增高的趋势并不是匀速的,粒度从“ $>63\ \mu\text{m}$ ”→“ $63\sim 30\ \mu\text{m}$ ”→“ $30\sim 11\ \mu\text{m}$ ”逐渐变细过程中,碳酸盐含量增大的幅度较

大,而从“30~11 μm ”→“<11 μm ”变细过程中,碳酸盐含量增大的幅度较小。显示出碳酸盐在“>63 μm ”、“63~30 μm ”和“30~11 μm ”各粒级组分中的分布有明显差异,而“30~11 μm ”组分与“<11 μm ”组分碳酸盐含量相近。对比全样与其它粒级组分的关系可知,大部分样品的全样中的碳酸盐含量最低,且与“>63 μm ”含量相近。

松嫩沙地的部分样品(占33.3%)和科尔沁沙地的大部分样品(占62.5%)中的碳酸盐含量随粒度的变化还表现出其它关系:部分样品(如松嫩沙地的S7样品和科尔沁沙地的T1和T11样品)的碳酸盐含量随粒度的变细而降低,更多样品的碳酸盐含量与粒度的变化无任何相关关系。

已有的分粒级实验表明^[8]黄土碳酸盐的细粒级富集因子最大可达到4。塔克拉玛干沙漠的2个分

粒级样品的结果显示^[12]粒径越细碳酸盐含量越高,且最大粒级与最小粒级组分中碳酸盐含量差可达11%左右。这次对科尔沁沙地和杜蒙沙地的分粒级碳酸盐含量测试结果显示,这些沙地中的碳酸盐含量普遍偏低,基本上都集中在3.0%~4.0%范围内,相比较中国西部沙漠沙地而言,各粒级组分碳酸盐含量的变化幅度小,科尔沁沙地为0.8%,杜蒙沙地为1.9%,道路表土为2.7%;而且揭示的碳酸盐含量随粒度变化而表现出来的分布特征与已有的研究结果也存在一些差异:塔克拉玛干沙漠的全部样品中的碳酸盐含量随粒径变细而增大,变化模式是一种从起点(最粗粒级)到终点(最细粒级)的直通式线性上升的模式^[12],而科尔沁沙地和杜蒙沙地只有部分样品中的碳酸盐含量随粒度变细而增大,大部分沙地样品碳酸盐含量随粒度的变化还表现出其它复杂关系。道

表1 科尔沁沙地和杜蒙沙地土碳酸盐含量(%)和碳同位素组成(‰)

Table 1 Carbonate and carbon isotopic composition in Horqin sandy land and Dumeng sandy land

样品	碳酸盐/%					碳酸盐碳同位素/‰				
	全样	>63 μm	63~30 μm	30~11 μm	<11 μm	全样	>63 μm	63~30 μm	30~11 μm	<11 μm
T1	3.1	3.4	3.3	3.1	2.9	-	-	-	-	-
T2	3.0	3.1	3.4	4.4	4.3	-	-	-	-	-
T3	3.3	3.1	8.6	14.9	15.4	-	-	-	-0.77	-0.86
T4	3.1	3.0	3.8	-	-	-	-	-	-	-
T5	3.4	3.1	4.3	5.2	5.3	-7.76	-7.81	-7.69	-7.38	-7.26
T7	3.4	3.1	3.5	3.5	3.1	-	-	-	-	-
T8	3.3	3.1	3.4	3.3	3.1	-	-	-	-	-
T9	3.0	3.1	3.3	3.3	3.1	-	-	-	-	-
T11	3.3	3.5	3.3	-	3.1	-	-	-	-	-
T12	3.1	3.1	3.3	3.0	3.4	-	-	-	-	-
T13	3.1	3.0	3.0	-	3.1	-	-	-	-	-
T14	3.1	3.5	3.4	4.0	4.7	-8.21	-8.16	-8.09	-7.98	-7.94
T15	3.3	3.5	3.5	3.8	4.0	-	-	-	-	-
T16	4.0	4.0	3.5	-	5.0	-7.71	-7.68	-7.69	-7.78	-
S1	3.0	3.3	4.3	4.2	3.8	-	-	-15.81	-10.4	-
S2	3.0	3.1	3.8	6.5	6.8	-12.97	-12.91	-12.48	-11.9	-11.2
S3	3.0	3.0	4.0	7.1	7.6	-	-	-	-7.75	-8.17
S4	3.0	3.1	6.3	5.6	6.3	-	-	-8.17	-9.96	-9.06
S5	3.4	3.5	4.5	8.2	8.2	-9.02	-8.96	-8.91	-7.67	-7.28
S6	3.3	3.3	3.5	5.3	6.2	-9.01	-8.90	-8.71	-8.34	-7.62
S7	3.8	3.6	3.6	-	3.3	-	-	-	-	-
S8	3.3	3.4	3.5	3.6	3.4	-	-	-	-	-
S9	4.3	3.5	5.2	5.9	6.1	-11.21	-11.46	-11.06	-8.26	-7.37
S10	5.1	3.8	3.8	4.6	4.0	-	-	-	-	-
S11	3.8	4.0	3.5	3.8	4.0	-	-	-	-	-
S12	3.6	3.0	3.0	3.3	3.3	-	-	-	-	-
S13	3.1	3.4	3.5	3.5	3.0	-	-	-	-	-
S14	3.1	3.3	3.3	3.4	3.1	-	-	-	-	-
S15	3.8	3.6	3.8	3.3	3.8	-	-	-	-	-

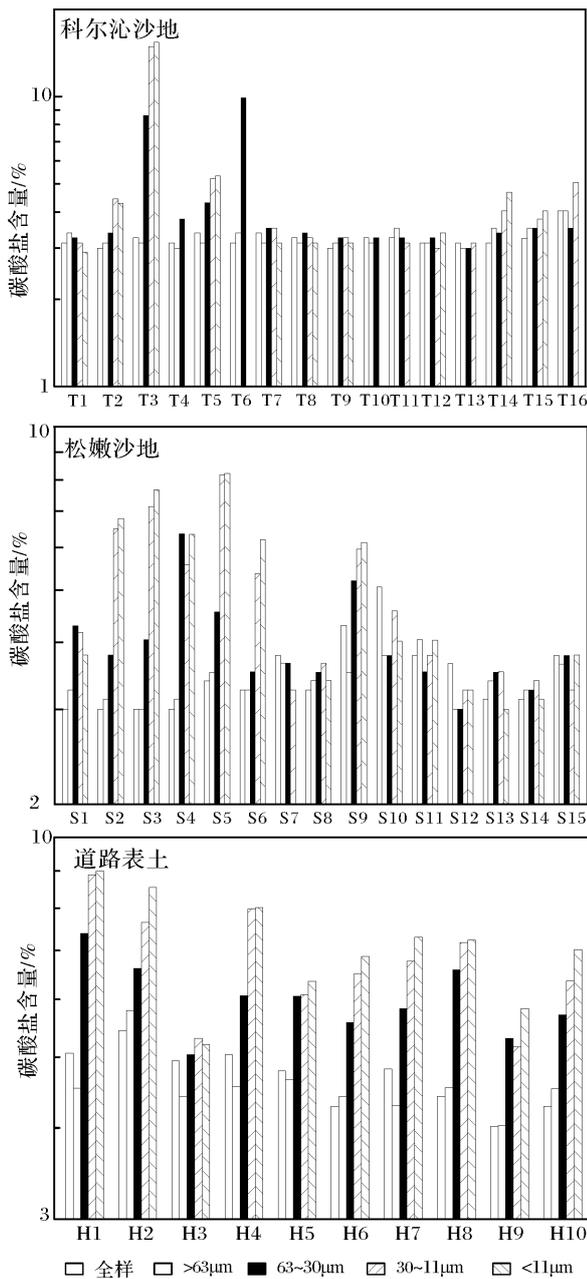


图2 不同粒径组分中的碳酸盐含量变化

Fig. 2 Carbonate content in different grain-sized fractions

路表土之所以全部表现为随粒度变细碳酸盐含量愈高的特征,估计与人为产生的建筑粉尘等细颗粒污染物的加入有关,而这些细颗粒的污染粉尘有较高的碳酸盐含量。中国西部沙漠或沙地样品的分粒级实验还需要更多的样品来检验碳酸盐含量随粒径变细而增高是否是一种普遍规律。

文献[12]采集的塔克拉玛干沙漠样品是典型的风成砂,揭示的是典型风成砂中的碳酸盐含量随粒度的变细而增大的分布特征。杜蒙沙地 S7 样品来自新

店林场和敖林乡交接处的五马沙坨固定风成沙丘, T11 样品来自通辽科左后旗至库伦旗的塔敏查干沙漠流动沙丘。这两个风成砂样品都有共同的特征:明显的“松散状”构造,即砂粒呈分散状,“净砂”结构,“杂基”(即泥质成分)含量特少。这两个风成砂样品中的碳酸盐含量与粒度的关系皆表现为随粒度变细而减小,与文献[4]揭示的特征相反。东北平原西部沙地风成砂中的碳酸盐含量随粒度变细而减小的特征是否具有普遍性还需要更多风成砂样品的检验。科尔沁沙地 T1 样品为棕红黄色,黄色色调浓,带红色色调,有白色丝状物存在,估计为生物改造产物,样品的“团聚”性好,砂粒常聚集成团粒状,反映砂粒粘性好。杜蒙沙地的 S1 样品具有同样特征。显然 T1 和 S1 样品经过了强烈的成壤作用改造,导致碳酸盐组分的淋滤,且随粒度变细而趋于降低的分布特征,这与黄土—古土壤序列中的古土壤碳酸盐的分布特征一致。

2.2 碳酸盐碳同位素组成在不同粒径组分中的分布特征

科尔沁沙地和杜蒙沙地碳酸盐含量太少,很多样品未能测出碳同位素值,结果见表1和图3。对于不同粒径组分中碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布:科尔沁沙地 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围很小,在 $0.1\text{‰} \sim 0.55\text{‰}$ (0.31‰) 之间,表现出高度的稳定性;杜蒙沙地 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围稍大, S1 和 S9 样品不同粒径组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值达 5.41‰ 和 4.09‰ ,其它样品不同粒径组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围均小于 1.8‰ ,在 $0.42\text{‰} \sim 1.79\text{‰}$ (1.3‰) 之间;道路表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $0.7\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$ (1.8‰),绝大部分样品不同粒径组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围小于 1.51‰ 。从碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值与粒度的关系看,杜蒙沙地和科尔沁沙地的绝大部分样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出随粒度变细而趋于偏正的特征,但变化幅度很小。地表土也有一半样品表现出相同的变化趋势。

研究显示^[12],塔克拉玛干沙漠的两个风成砂样品不同粒径组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别表现为随着样品粒径变细, $\delta^{13}\text{C}$ 值呈微弱的上升和下降趋势。黄土高原不同粒径黄土—古土壤中碳酸盐碳同位素组成的研究显示^[18],绝大部分样品的“ $>45\ \mu\text{m}$ ”组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小,“ $2 \sim 45\ \mu\text{m}$ ”组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大,显示 $\delta^{13}\text{C}$ 值随粒度的变细而上升的趋势。黄土—古土壤序列的碳酸盐含量研究显示^[19],黄土层中碳酸盐含量高,碳酸盐碳同位素偏正;古土壤层

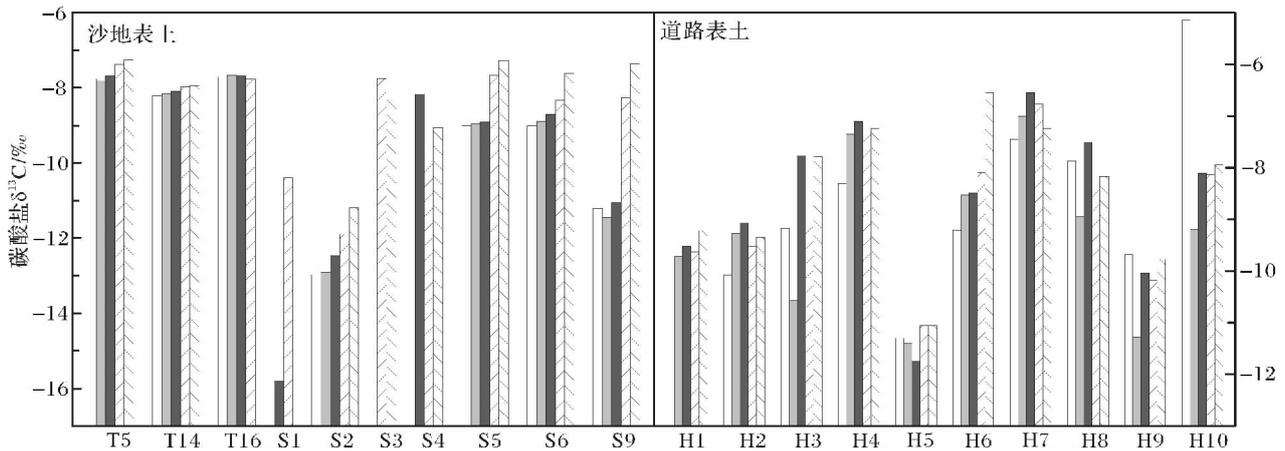


图3 沙地和道路表土不同粒级组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成变化

Fig. 3 Carbon isotopic composition of different size fractions in sandland and road surface soils

中碳酸盐含量低,碳酸盐碳同位素偏负。说明碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值随碳酸盐含量增加而增加,这已经得到研究证实^[20]。而前文所述,碳酸盐含量总体上存在随粒度变细而增大的趋势,可推断碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值与粒度的关系总体上也会表现为随粒度变细而增大,这与本文实验数据反映的不同粒级组分中碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布特征一致。然而,据文启忠的研究^[19],末次冰期 L_1 黄土层中的粗颗粒 ($>5\ \mu\text{m}$) 碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于细颗粒 ($<5\ \mu\text{m}$) 的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值。尽管如此,宏观上讲,沉积物的碳酸盐碳同位素组成有随粒度变细而偏正的趋势,只是偏正的幅度不同而已。

从以上不同区域不同性质表土碳酸盐及其 $\delta^{13}\text{C}$ 在不同粒级组分中的变化幅度来看,科尔沁沙地的碳酸盐和 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化幅度最小,其次为杜蒙沙地,最大的是城市道路表土。这种变化规律一方面与其物质来源有关:科尔沁沙地的物质来源相对简单,主要是风成砂^[16],故碳酸盐及其 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围较小,杜蒙沙地的物质来源相对复杂,既有冲积砂也有风成砂,甚至是混合成因的^[16],结果碳酸盐及其 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围稍宽,而城市道路表土的物质来源更为广泛,既有自然降尘,更有工业和生活等人为来源,导致其碳酸盐及其 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围最宽;其二可能也与其粒度大小有关:科尔沁沙地的粒度要明显高于杜蒙沙地, $<11\ \mu\text{m}$ 的细颗粒组分含量仅为 3.93%,远小于杜蒙沙地的 19.38% (数据未发表)。

2.3 碳酸盐及碳同位素组成在不同粒级组分中的变化对风尘源区示踪的指示

地球化学指标示踪沙尘物源一般来说需要满足以下几个条件:(1)不同粉尘源区地球化学存在明显

差异^[3,8,12~14,21,22];(2)不同粒级组分地球化学基本一致^[2,3,12,14,21,22];(3)对于稳定同位素而言,在输送过程中不发生同位素分馏作用^[2,14]。源区物质的地球化学差异性,是风尘物源地球化学示踪的基础^[8],地球化学示踪指标在各源区之间存在明显差异,说明地球化学具有较强的区域性,根据地球化学的差异性,可以将风尘源区进行分区划分为不同区域,然后对比风尘物质与不同分区的地球化学特征,揭示风尘与源区的物质关联性,从而完成风尘系统地球化学示踪。稳定同位素在输送过程中不发生同位素分馏作用,说明能保持高度的稳定性,稳定同位素携带的源区信息不会因为长距离的输送而发生改变。

不同粒级组分地球化学基本一致表明风蚀时风力的分选不会影响源区物质及风尘物质的地球化学特征。然而地球化学在不同粒级组分中的明显差异,给其作为风尘源区示踪工具的地位带来挑战,它给溯源示踪带来的不利影响主要体现在以下几方面:

(1)影响源区物质地球化学特征的稳定性。源区物质经过长期的风蚀作用,由于风力分选原因,细颗粒不断被风蚀离开物源区,地表趋于粗化,可供远程搬运的粉砂及粘土日趋减少,风尘源区处于细粒物质缺乏状态。如果不同粒级组分的地球化学存在明显差异,则风尘源区地表物质在粗颗粒不断聚集、细颗粒不断转移的动态过程中,其地球化学特征也呈现动态变化,从而影响源区物质的地球化学稳定性。

(2)增加地球化学源区示踪的复杂性,并影响其可靠性。通过对比风尘物质与潜在源区的地球化学特征,揭示风尘与源区之间的物质关联性,备受风尘物源示踪研究者的青睐,是示踪风尘沉积物和现代风

尘物源最主要的地球化学手段。然而,风尘物质在扬起和搬运过程中,受地表状况、风力大小和风力分选等问题的影响,各源区向风尘物质提供的粒径组分也不尽相同,且无法确定各源区分别向风尘物质提供的是哪一粒级的组分,用潜在源区的哪一个粒径组分与风尘物质的相应粒径组分进行对比便成为风尘源区研究的难点。一般做法是选用潜在源区的全样或者主观地选用某一粒径组分与风尘物质进行对比^[21]。由于不同粒径组分的地球化学组成也不同,在无法确定源区向风尘物质提供的是哪一粒级组分的情况下,就主观选用潜在源区的全样或者某一粒径组分与风尘物质进行对比,如此建立的风尘与源区之间的物质关联性及其圈定的源区必然是不可靠的。严格上讲,只有源区向风尘物质提供的特定粒径组分的对比才是真实的风尘物质与源区物质的地球化学关联对比。地球化学在不同粒径组分中的差异越大,全样或主观选用的某一粒径组分与真实粒径组分(由源区提供给风尘物质的特定粒径组分)的差异也越大,通过全样或主观选用的某一粒径组分与风尘物质的对比而界定的风尘源区的可靠性就越低,地球化学源区示踪的复杂性也就越大。如果不同粒径组分地球化学基本一致,研究者可以选用任一粒径组分进行风尘物质与源区物质对比。同时,当地球化学在不同粒径组分中的差异比较明显,甚至超过了各潜在源区地球化学的差异值,这将降低不同粉尘源区地球化学的差异性,使得各源区物质的地球化学趋于均一化,地球化学作为源区示踪指标的可靠性将大大降低,甚至毫无意义。

中国粉尘源区表土碳酸盐含量在空间上大致呈现自西向东逐渐减低的趋势^[12,14,19]的事实表明各粉尘源区表土碳酸盐含量具有明显的差异和区域性特征,这对于利用碳酸盐进行源区示踪研究是个有利因素。从本次研究来看,杜蒙沙地碳酸盐含量仅高于科尔沁沙地0.3%左右,地区差异性极不显著,显然不利于源区示踪。其次,各粒径组分碳酸盐含量的变化幅度,科尔沁沙地为0.8%,杜蒙沙地为1.9%,均大大超过了杜蒙沙地与科尔沁沙地的碳酸盐差异值(0.3%)。其它研究也有类似情况,比如塔克拉玛干沙漠不同粒径组分碳酸盐含量变化幅度(11%)与塔克拉玛干沙漠的平均值(11.84%)接近。显示出不同粒径组分中碳酸盐含量存在明显差异,如前所述,这会利用碳酸盐示踪风尘物源增加复杂性,并给其作为风尘源区示踪工具的地位带来挑战。

研究已经证明,碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成在风蚀、搬运和沉降过程中不发生或不明显发生同位素分馏作用^[2],且不同风尘源区碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在明显差异^[2,12],使得利用风尘碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值示踪源区成为可能。对于全样、 $>63\ \mu\text{m}$ 、 $63\sim 30\ \mu\text{m}$ 、 $30\sim 11\ \mu\text{m}$ 和 $<11\ \mu\text{m}$ 粒径组分,科尔沁沙地的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值比杜蒙沙地分别偏正2.7‰、2.7‰、3.1‰、1.5‰和0.9‰,平均偏正2‰。差异值为2‰能不能说明科尔沁沙地和杜蒙沙地碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成就存在明显差异?或者说碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值是否具有较强的区域性?研究表明^[2,12],中国西部沙漠沙地表土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成在空间上表现出较强的区域性:塔克拉玛干沙漠0.70‰,古尔班通古特沙漠-3.38‰,库姆塔格沙漠2.15‰,巴丹吉林沙漠-0.22‰,河西走廊戈壁-0.16‰,腾格里沙漠-2.59‰,乌兰布和沙漠-2.7‰,毛乌素沙漠-3.57‰,内蒙古中部干草原地区-6.96‰。不仅如此,中国黄土高原黄土(L_1)碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成自西(北)向东(南)也表现出较强的区域性:兰州黄土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-1.35‰^[23],会宁黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-2.48‰^[24],榆林黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-4.2‰^[25],志县黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-4.43‰^[24],洛川黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.03‰^[26],渭南黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.16‰^[24],西安黄土 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-6.93‰^[26]。上述区域表土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的差别大都小于2‰,据此,可以认为科尔沁沙地和杜蒙沙地碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在明显差异,这有利于碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的风尘源区追踪。

对于碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成在不同粒径组分中的差异,松嫩沙地7组样品中有5组小于1.8‰,科尔沁沙地全部样品小于0.5‰,地表土10组样品中有7组小于1.51‰。研究认为^[2],不同粒径组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别小于2‰属于正常变动范围,不会影响风尘源区示踪研究。不会影响源区示踪的不同粒径组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的正常变动幅度的多少,一方面取决于测量精度,另一方面也要考虑到不同属性风尘物质的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 差异值的大小。现在碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 分析精度均在 $\pm 0.1\%$ 左右,显然不会对不同粒径组分 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的分布有影响。气候干燥的现代沙漠源区风成砂碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 范围在-3.6‰~2.1‰,黄土高原现代表土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 约为-7‰~-8‰^[2,12];兰州黄土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为-1.855‰,古土壤平均值为-4.336‰^[23];陕西榆林 L_1 黄土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为-4.2‰, S_1 古土壤为-7.9‰^[25];洛川 L_1 黄

土碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -6.28‰ , S1 古土壤为 -8.54‰ ^[19]。上述不同属性地质体碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的差值均明显大于 2‰ , 因此认为不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别小于 2‰ 不会影响风尘源区示踪, 与文献 [2] 的观点一致。但是, 不同区域表土样品的不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异值有较大差别, 例如, 塔克拉玛干沙漠的两个风成砂样品不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差别很小, 在 0.5‰ 以内^[12]; 杜蒙沙地的两个样品和地表土的三个样品的不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 的差值可达 $3\text{‰} \sim 5\text{‰}$ 外, 包括科尔沁沙地在内的其它所有样品的差值均在 2‰ 以内; 洛川黄土末次冰期 L₁ 黄土层中的 $>5\ \mu\text{m}$ 组分与 $<5\ \mu\text{m}$ 组分的差值在 2.34‰ ^[19]; 环县 S₁ 古土壤 $>45\ \mu\text{m}$ 组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $2 \sim 45\ \mu\text{m}$ 组分的差值最大达 7.4‰ ^[18]; 洛川古土壤 $>45\ \mu\text{m}$ 组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $<2\ \mu\text{m}$ 及 $2 \sim 45\ \mu\text{m}$ 组分的差值最大达 9‰ 左右^[18]。随着离中国西部沙漠沙地风尘源区距离的加大或者风尘物质的成壤作用的增强, 不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异变大, 给风尘源区示踪带来的复杂性也得到加强。

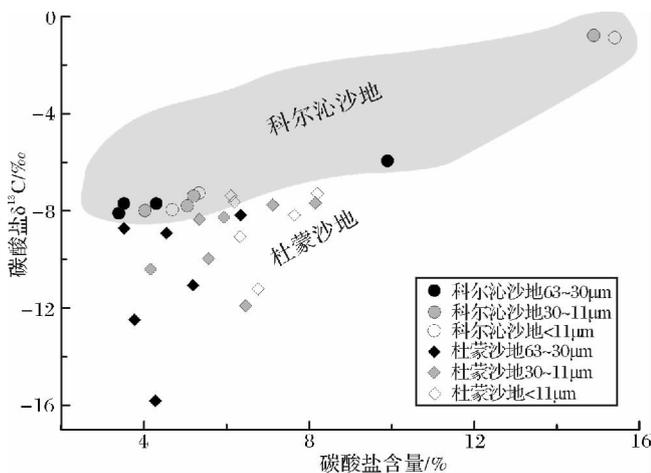


图4 科尔沁沙地与杜蒙沙地不同粒级组分碳酸盐含量与碳酸盐碳同位素对比

Fig. 4 Carbonate and carbon isotopic composition in different size fractions

图4给出了科尔沁沙地与杜蒙沙地碳酸盐含量与碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值的关系, 可以看出, 两潜在源区的碳酸盐含量差别不大, 而碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在较明显差异, 且在 $63 \sim 30\ \mu\text{m}$ 组分之间的差别最大, $<11\ \mu\text{m}$ 组分之间的差别最小。 $<11\ \mu\text{m}$ 组分代表正常情况下均存在的粉尘, 为远距离悬浮搬运^[17, 27, 28], 由于在搬运过程中经过充分混合, 已变得十分均匀, 其

碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的地区差异性不明显; 而 $63 \sim 30\ \mu\text{m}$ 组分为短期悬浮组分, 搬运距离较短, 其碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成代表了原始粉尘源区信息, 地区差异性明显。科尔沁沙地与杜蒙沙地的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的地区差异性在 $63 \sim 30\ \mu\text{m}$ 组分表现最为明显, 这意味着在风尘物源追踪中, 可以用 $63 \sim 30\ \mu\text{m}$ 组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成来代表风尘潜在源区的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成, 这不同于已有的用 $<72\ \mu\text{m}$ 或 $<63\ \mu\text{m}$ 组分来标识潜在源区的地球化学组成^[5, 8] 与风尘物质进行物质组成对比。

综上所述, 杜蒙沙地和科尔沁沙地碳酸盐含量的地区差异性极不明显, 且各粒级组分碳酸盐含量的变化幅度远超过了杜蒙沙地与科尔沁沙地的碳酸盐差异值, 不能作为区分杜蒙沙地和科尔沁沙地风尘源区的示踪指标。科尔沁沙地和杜蒙沙地碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在明显差异 (在 $63 \sim 30\ \mu\text{m}$ 组分表现最为明显), 且不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别较小, 这对碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的风尘源区追踪有利。需要注意的是, 风尘物质碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值携带的源区信息随着离中国西部沙漠沙地风尘源区距离的加大或者风尘物质的成壤作用的增强而不断减弱, 会增加其源区示踪的复杂性。

3 结论

(1) 不同区域不同性质样品中的碳酸盐含量在不同粒级组分中的变化幅度不同, 科尔沁沙地为 0.8% , 杜蒙沙地为 1.9% , 道路表土为 2.7% 。大部分沙地样品和全部道路表土样品的碳酸盐含量有随粒度变细而增高的趋势。碳酸盐含量随粒度变细而增高的趋势并不是匀速的, 先是增幅较大, 后增幅较小, 显示出碳酸盐在 “ $>63\ \mu\text{m}$ ”、“ $63 \sim 30\ \mu\text{m}$ ” 和 “ $30 \sim 11\ \mu\text{m}$ ” 各粒级组分中的分布差异明显, 而 “ $30 \sim 11\ \mu\text{m}$ ” 组分与 “ $<11\ \mu\text{m}$ ” 组分碳酸盐含量相近。全样中的碳酸盐含量最低并与 “ $>63\ \mu\text{m}$ 组分” 含量相近。

(2) 科尔沁沙地和杜蒙沙地的碳酸盐与粒度的关系并不仅仅只有随粒度变细而增大这一种, 仍有部分样品表现出其它复杂关系, 风成砂和经历过强烈成壤作用改造的沙地样品中的碳酸盐含量与粒度的关系皆表现为随粒度变细而减小, 沉积物中碳酸盐含量随粒径变细而增高是否是一种普遍规律还需要更多的样品来检验。

(3) 大部分沙地样品和道路表土样品不同粒级

组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较小($<1.8\%$), 且碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出随粒度变细而趋于偏正的特征, 但变化幅度很小。

(4) 杜蒙沙地和科尔沁沙地碳酸盐含量的地区差异性极不明显, 且各粒级组分碳酸盐含量的变化幅度大大超过了杜蒙沙地与科尔沁沙地的碳酸盐差异值, 不能作为区分杜蒙沙地和科尔沁沙地风尘源区的示踪指标。科尔沁沙地和杜蒙沙地碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在明显差异, 且不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别较小, 说明它是一个比碳酸盐含量更好的风尘源区追踪指标。

(5) 科尔沁沙地与杜蒙沙地的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成在 $63 \sim 30 \mu\text{m}$ 粒级组分存在明显差异, 这意味着在风尘物源追踪中, 可以用 $63 \sim 30 \mu\text{m}$ 组分的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成来代表风尘潜在源区的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成。但是不同粒级组分碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的差异会随离中国西部沙漠沙地风尘源区距离的加大或者风尘物质成壤作用的增强而变大, 增加其风尘源区示踪的复杂性。

致谢 碳酸盐含量及其碳同位素组成由中国科学院地球环境研究所的孙有斌研究员完成, 张红和谢雨希参加了部分野外取样工作, 在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau [J]. *Earth Planet Science Letters*, 2002, 203: 845-859
- Cao J J, Wang Y Q, Zhang X Y, *et al.* Analysis of carbon isotopes in airborne carbonate and implications for aeolian sources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1637-1641
- Rao W B, Yang J D, Chen J, *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, doi: 10. 1007/s11434-006-2008-1
- Chen J, Li G J, Yang J D, *et al.* Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71: 3904-3914
- Yang X P, Liu Y S, Li C Z, *et al.* Rare earth elements of Aeolian depositions in Northern China and their implications for determining the provenance of dust storms in Beijing [J]. *Geomorphology*, 2007, 87: 365-377
- Sun J M, Zhu X K. Temporal variations in Pb isotopes and trace element concentrations within Chinese eolian deposits during the past 8 Ma: Implications for provenance change [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 290: 438-447
- Hao Q Z, Guo Z T, Qiao Y S, *et al.* Geochemical evidence for the provenance of middle Pleistocene loess deposits in southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 3317-3326
- Chen J, Li G J. Geochemical studies on the source region of Asian dust [J]. *China Earth Science*, 2011, 54: 1279-1301, doi: 10. 1007/s11430-011-4269-z
- Li G, Chen J, Chen Y, *et al.* Dolomite as a tracer for the source regions of Asian dust [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheric*, 2007, 112: D17201, doi: 10.1029/2007JD008676
- Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R, *et al.* Characteristics of carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of northern China soil and dust aerosol and its application to tracing dust sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 2631-2642
- Shi Z B, Shao L T, Jones T P, *et al.* Microscopy and mineralogy of airborne particles collected during severe dust storm episodes in Beijing, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheric*, 2005, 110: D01303, doi: 10.1029/2004JD005073
- 王亚强, 曹军骥, 张小曳, 等. 中国粉尘源区表土碳酸盐含量与碳氧同位素组成 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(1): 113-117 [Wang Yaqiang, Cao Junji, Zhang Xiaoye, *et al.* Carbonate content and carbon and oxygen isotopic composition of surface soil in the dust source regions of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology* 2004, 24(1): 113-117]
- 张焱, 董旭辉. 碳酸盐碳测定在沙尘暴源地识别中的应用 [J]. *中国环境监测*, 2002, 18(2): 11-14 [Zhang Ting, Dong Xuhui. Carbonate carbon measurement in sand storm and dust storm source identification [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002, 18(2): 11-14]
- 谢远云, 孟杰, 郭令芬, 等. 哈尔滨沙尘沉降物碳酸盐及其碳同位素特征 [J]. *地理与地理信息科学*, 2010, 26(5): 63-67 [Xie Yuanyun, Meng Jie, Guo Linfeng, *et al.* Carbonate and carbon isotope characteristics in Harbin sand-dust fallouts [J]. *Geography and Geo-Information Science* 2010, 26(5): 63-67]
- Sun J M. Source regions and formation of the loess sediments on the high mountain regions of northwestern China [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58(3): 341-351
- 裘善文. 中国东北西部沙地与沙漠化 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-293 [Qiu Shanwen. *Sandy Land and Desertification in West of Northeast China* [M]. Beijing: Science Press 2008: 1-293]
- Pye K. Aeolian dust and dust deposits [M]. London: Academic Press, 1987: 1-256
- 盛雪芬, 陈骏, 杨杰东, 等. 不同粒级黄土—古土壤中碳酸盐碳氧稳定同位素组成及其古环境意义 [J]. *地球化学*, 2002, 31(2): 105-112 [Sheng Xuefen, Chen Jun, Yang Jiedong, *et al.* Carbon and oxygen isotopic composition of carbonate in different grain size fractions from loess-paleosol sequences, China [J]. *Geochimica* 2002, 31(2): 105-112]
- 文启忠. 中国黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-284 [Wen Qizhong. *Geochemistry of Loess in China* [M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-284]
- 顾兆炎, 刘荣谟, 刘禹. 黄土—古土壤碳酸盐稳定同位素组成与古环境的关系 [C] // 刘东生, 安芷生. 黄土·第四纪地质·全球

- 变化(第三集). 北京: 科学出版社, 1992: 55-61 [Gu Zhaoyan, Liu Rongmo, Liu Yu. Carbon isotopic composition of carbonate in loess-paleosol and paleoenvironment [C] // Liu D S, An Z S. Loess • Quaternary Geology • Global Change (Vol. 3). Beijing: Science Press, 1992: 55-61]
- 21 杨杰东, 陈骏, 饶文波, 等. 中国沙漠的同位素分区特征[J]. 地球化学, 2007, 36(5): 516-524 [Yang Jiedong, Chen Jun, Rao Wenbo, *et al.* Isotopic partition characteristics of Chinese deserts [J]. *Geochimica*, 2007, 36(5): 516-524]
- 22 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 [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]
- 23 陈发虎, 张维信. 甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 1-149 [Chen Fahu, Zhang Weixin. Quaternary Glacier and Loess Stratigraphy in Gansu-Qinghai Area [J]. Beijing: Science Press, 1990: 1-149]
- 24 刘东生. 第四纪环境[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 189-239 [Liu D S, *et al.* Loess and Environments [M]. Beijing: Science Press, 1985: 191-208]
- 25 李春园, 王先彬, 文启彬, 等. 黄土沉积物中碳酸盐的碳氧同位素组成特征与古气候[J]. 中国科学: B辑, 1995, 25(3): 318-323 [Li Chunyuan, Wang Xianbin, Wen Qibin, *et al.* The relationship between carbon and oxygen isotopic composition characteristics of carbonates in loess sediments and paleoclimate [J]. *Science in China: Series B*, 1995, 25(3): 318-323]
- 26 林本海, 刘荣谟, 安芷生, 等. 最近130ka西安和洛川黄土稳定同位素的初步研究[C] // 刘东生, 安芷生 主编. 黄土 • 第四纪地质 • 全球变化论文集(四). 北京: 科学出版社, 1996: 82-89 [Lin Benhai, Liu Rongmo, An Zhisheng, *et al.* A preliminary study on stable isotopic composition in Xi'an and Luo chuan loess during the last 130 ka [C] // Liu D S, An Z S. Loess • Quaternary Geology • Global Change (Vol. 4). Beijing: Science Press, 1996: 82-89]
- 27 Patterson E M, Gillette D A. Commonalities in measured size distribution for aerosols having a soil-derived component [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82: 2074-2082
- 28 孙东怀, 鹿化煜, David Rea, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(3): 327-335 [Sun Donghuai, Lu Huayu, David Rea, *et al.* Bimodal grain-size distribution of Chinese loess and its paleoclimate implication [J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000, 18(3): 327-335]

Distributional Characteristics of Carbonate and Carbon Isotopic Compositions in Different Grain-size Fractions and Their Implications for Dust Provenance

XIE Yuan-yun¹ KUANG Chun-guo² MENG Jie¹ GUO Lin-feng¹ HE Kui¹

(1. College of Geographic Science, Harbin Normal University, Harbin 150025;

2. Geography Department, Harbin Institute, Harbin 150086)

Abstract: Carbonate and its carbon isotopes have the potential for distinguishing dust provenance, and but the differences for carbonate and carbon isotopes in different grain-size fractions significantly affect accuracy for identifying dust provenance. Therefore, the study for distribution characteristic of carbonate and carbon isotopes in different grain-size fractions is theory base of dust provenance trace with use of carbonate and carbon isotopes. Samples of sandy land have been collected from horqin sandy land and dumeng sandy land in songnen plain, at one time, samples also are collected from city road loose bare soils. These samples are separated into five different grain size fractions, i. e. bulk sample, $>63 \mu\text{m}$, $63 \sim 30 \mu\text{m}$, $30 \sim 11 \mu\text{m}$, and $<11 \mu\text{m}$. Then, carbonate volume and carbon isotopic compositions of these samples are measured, respectively. The results show that the varied range of carbonate volume of different grain size fractions in horqin sandy land and dumeng sandy land are fairly minor, although carbonate volume of most samples raise with decreasing grain size, but relations between carbonate volume and grain size are not only a relations that carbonate volume becomes high with decreasing grain size, but also have other much complex relations. The carbonate volume of all road loose bare soils increases with decreasing grain size, and might be caused by join of fine grain-sized pollutants such as construction dust. The carbonate volumes of full fractions are similar to that of the $>63 \mu\text{m}$ fraction. It is believed that the carbonate volume of eolian sand and sand-land samples undergoing transform of violent pedogenesis decreases with decreasing size of sample particles. The varied scopes of carbon isotopic compo-

sitions of different grain size fractions of most samples in dumeng sandy land and road loose bare soils and all samples in Horqin sandy land are fairly minor, and express the characteristics of increase with decreasing grain size, but the varied changes are very slight. The carbonate volumes are not a good dust source region tracer indicator of distinguishing between dumeng sandy land and Horqin sandy land because of not very obvious regional differences of carbonate volumes between dumeng sandy land and Horqin sandy land, and of variations of carbonate volumes in different grain size fractions that is much higher than the different value of carbonate volumes between dumeng sandy land and horqin sandy land. However, there exist the obvious differences between carbon isotopic compositions in dumeng sandy land and Horqin sandy land (63 ~ 30 μm grain fraction, specifically), and the differences of $\delta^{13}\text{C}$ compositions in different grain size fractions are very slight, showing carbonate carbon isotopic compositions in dust fallouts is a better tracing index for indicating eolian dust provenance than carbonate contents. However, the diversity of carbonate carbon isotope compositions in different grain-size fractions maybe increase with increasing distance of dust source regions in west desert and sandy land in China to dust deposit regions, which increase its complexity for identifying dust provenance.

Key words: carbonate; carbonate carbon isotopic compositions; different size fractions; horqin sandy land; dumeng sandy land; eolian dust provenance tracing