

青藏高原远源西风粉尘与黄土堆积*

张小曳^① 沈志宝^② 张光宇^① 陈拓^① 柳海燕^②

(^① 中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710054; ^② 中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

摘要 青藏高原海拔 4 800 m 处 28 种大气微量与稀土元素的分析表明, 采集的大气气溶胶粒子主要由高原局地粉尘 (70%) 和远源高空西风粉尘 (25%) 组成. 结合中国沙漠数据, 应用矿物粉尘的主组成元素 Al, Fe, Mg 和 Sc 建立的粉尘源区示踪系统分辨出: 黄土高原中部末次冰期旋回风成黄土来自非中国沙漠的远源西风粉尘远小于近源沙漠的贡献.

关键词 大气微量元素 元素示踪 远源西风粉尘 黄土堆积

尽管对黄土堆积序列所记录的长期气候变化已有许多研究^[1,2], 而对黄土的物源区却一直讨论至今. 在东亚冬季风环流的主要作用下, 中国北方沙漠和戈壁被认为是黄土高原黄土的一个主要源区^[3-9]. 由高空西风携带的非中国沙漠的远源粉尘传输至我国也可能沉降到近地面层, 混同低层近源沙漠粉尘改变方向由偏北的冬季风搬运至黄土高原. 本文拟利用在青藏高原采集的气溶胶样品, 通过大气微量及稀土元素分析, 调查青藏高原大气气溶胶特征, 提取对流层中层远源西风矿物粉尘信息, 结合中国北方沙漠 12 个样点的已有数据^[7], 建立示踪近源中国沙漠与远源西风粉尘的元素示踪系统, 在黄土高原中部末次冰期旋回风成黄土中定量分辨各自输入份额.

1 实验方法

从 1993 年 9 月至 1994 年 5 月, 使用大容量单级 GMW-2310 型采样器 (迈阿密大学, 美国) 在青藏高原昆仑山和唐古拉山之间的伍道梁 (35.2° N, 93.1° E), 海拔 4800 m, 采集了 49 组气溶胶样品, 采样高度距地面 10 m, 时间: 5 ~ 24 h, 流量: 14 m³/h.

样品被分解, 制成 1% HNO₃ 溶液后, 在中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室, 用电感耦合等离子体-质谱 (ICP-MS) 测定了其中 Al, Ce, Co, Cs, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Mg, Mn, Na, Nb, Nd, Pr, Rb, Sc, Sm, Sr, Tb, Tn, Ti, Tm 和 Yb 共 28 种微量及稀土元素的质量浓度 (ng/m³), 测定结果经国家土壤及岩石标准参考物质 GSS-2, GSS-6^[8] 总计 40 个平行样品验证其精密性 (变异系数 < 10%) 及准确性 (变异系数 < 20%) 良好.

1995-10-12 收稿, 1995-11-20 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目

2 结果与讨论

2.1 青藏高原气溶胶粒子的化学组成

青藏高原气溶胶粒子中 28 种元素浓度的测得值见表 1, 其中包括矿物粉尘的 7 种主组成元素 Al, Fe, Mg, Mn, Na, Ti, Sc 及 14 种稀土元素. Al 的平均浓度 ($6\,300\text{ ng/m}^3$) 约相当于非尘暴期间黄土高原南缘年平均值 ($11\,000\text{ ng/m}^3$) 的 60%^[9], 及高粉尘季节中国沙漠 12 个样点平均浓度 ($22\,000\text{ ng/m}^3$) 的 29%^[7], 若考虑黄土高原及沙漠尘暴粉尘的贡献, 青藏高原大气中 Al 的浓度将相对更低. 以矿物粉尘中 Al 占 8% 重量百分比计^[10], 青藏高原矿物粉尘含量约相当于 80 mg/m^3 . 矿物粉尘的 7 种主要元素约占所测 28 种元素总和的 82%, 表明这些元素对认识矿物粉尘作用较大.

表 1 青藏高原气溶胶样品中测定的及 APCA^{a)} 估测的微量元素浓度

| | 浓度/ $\text{ng} \cdot \text{m}^3$ (1993 年 9 月 ~ 1994 年 5 月, $n=49$) | | | | | | | 公因子 方差 |
|----|---|-------|----------------|---------------|-----------|------------|------------|-----------|
| | 测得的 | | 估算的各因 子贡献总和 | 各因子平均值 (% 总量) | | | | |
| | 范围 | 平均值 | | 因子 1 | 因子 2 | 因子 3 | 因子 4 | |
| Al | 730 ~ 17 200 | 6300 | 6 200 | 1 900(30) | 380(6.1) | 3 900(63) | 81(1.3) | 0.95 |
| Ce | 0.03 ~ 45 | 11 | 10 | 6.9(66) | 1.2(11) | 2.3(22) | 0.05(0.46) | 0.96 |
| Co | 0.05 ~ 15 | 3.8 | 3.3 | 1.9(56) | 0.39(12) | 1.0(32) | 0.02(0.66) | 0.80 |
| Cs | 0.13 ~ 6.1 | 1.4 | 1.4 | 0.86(61) | 0.12(8.8) | 0.43(30) | 0.01(0.63) | 0.95 |
| Dy | 0.05 ~ 1.7 | 0.64 | 0.39 | 0.15(38) | 0.20(52) | 0.04(10) | 0.00(0.20) | 0.70 |
| Er | 0.01 ~ 3.3 | 0.51 | 0.47 | 0.04(9.4) | 0.35(74) | 0.08(16) | 0.00(0.34) | 0.93 |
| Eu | 0.00 ~ 0.65 | 0.23 | 0.08 | 0.07(81) | 0.01(10) | — (—) | — (—) | 0.62 |
| Fe | 620 ~ 10 000 | 4 100 | 3 400 | 990(29) | 240(7.1) | 2100(62) | 43(1.3) | 0.88 |
| Gd | 0.01 ~ 3.1 | 0.73 | 0.66 | 0.20(30) | 0.34(52) | 0.11(17) | 0.00(0.36) | 0.87 |
| Hf | 0.02 ~ 2.4 | 0.64 | 0.39 | 0.14(37) | 0.31(80) | — (—) | — (—) | 0.91 |
| Ho | 0.02 ~ 1.0 | 0.33 | 0.15 | 0.12(80) | 0.06(40) | — (—) | — (—) | 0.89 |
| La | 0.50 ~ 20 | 5.4 | 4.8 | 3.2(67) | 0.44(9.0) | 1.1(24) | 0.02(0.49) | 0.96 |
| Lu | 0.01 ~ 1.4 | 0.17 | 0.15 | — (—) | 0.14(99) | 0.00(2.0) | 0.00(0.04) | 0.92 |
| Mg | 170 ~ 4 600 | 1 600 | 1 500 | 340(23) | 56(3.7) | 1 000(67) | 22(1.4) | 0.94 |
| Mn | 7.9 ~ 200 | 66 | 60 | 19(32) | 8.1(13) | 32(54) | 0.67(1.1) | 0.89 |
| Na | 73 ~ 7 400 | 2 500 | 2 200 | — (—) | — (—) | 2 300(100) | 47(2.2) | 0.72 |
| Nb | 0.15 ~ 6.8 | 1.7 | 1.7 | 0.89(53) | 0.24(14) | 0.54(32) | 0.01(0.67) | 0.93 |
| Nd | 0.53 ~ 19 | 5.0 | 13 | 2.7(21) | 1.1(8.3) | 8.9(69) | 0.19(1.4) | 0.93 |
| Pr | 0.13 ~ 3.9 | 1.1 | 0.96 | 0.62(64) | 0.16(17) | 0.18(19) | 0.00(0.39) | 0.96 |
| Rb | 0.29 ~ 130 | 25 | 10 | 1.6(15) | 3.5(33) | 5.2(50) | 0.11(1.04) | 0.91 |
| Sc | 0.10 ~ 10 | 2.1 | 0.25 | 0.07(28) | 0.14(56) | 0.04(16) | 0.00(0.33) | 0.80 |
| Sm | 0.01 ~ 4.4 | 1.1 | 1.0 | 0.29(28) | 0.49(47) | 0.26(25) | 0.01(0.51) | 0.86 |
| Sr | 2.7 ~ 570 | 88 | 96 | 62(65) | 16(16) | 18(19) | 0.37(0.39) | 0.84 |
| Tb | 0.00 ~ 1.2 | 0.15 | 0.16 | 0.02(13) | 0.12(73) | 0.02(13) | 0.00(0.27) | 0.89 |
| Th | 0.15 ~ 6.6 | 1.6 | 1.5 | 0.99(67) | 0.24(16) | 0.25(17) | 0.01(0.35) | 0.88 |
| Ti | 38 ~ 960 | 310 | 280 | 89(32) | 10(3.6) | 180(64) | 3.7(1.34) | 0.92 |
| Tm | 0.00 ~ 1.4 | 0.14 | 0.14 | 0.01(6.4) | 0.14(99) | — (—) | — (—) | 0.96 |
| Yb | 0.02 ~ 5.8 | 0.66 | 0.72 | 0.05(7.1) | 0.62(86) | 0.05(6.8) | 0.00(0.14) | 0.93 |

a) 总矩阵取样准确度: 0.85

2.2 青藏高原气溶胶粒子的来源

对49组青藏高原样品中28种元素作绝对主分量分析(APCA)解析出4个因子,结果仍列于表1。APCA分析过程详见文献[9,11]。较高的总矩阵取样准确度和公因子方差,以及由APCA估算的各因子贡献总和同测得值之间的基本一致,表明绝大部分元素对因子的良好拟合,多数情况下变量中只有很小一部分残留而难以解释。

因子1主要载荷有Ce, Cs, La, Ho, Nd, Pr, Sr和Th等稀土及微量元素,粉尘7元素也占不小比例;因子2则主要由另一部分稀土及微量元素控制,它们包括:Dy, Er, Gd, Hf, Lu, Sm, Tb, Tm, Yb;因子3的主要载荷元素是矿物粉尘的主组成元素Al, Fe, Mg, Mn, Na, Ti;因子4上各种元素均无明显负载(表1)。

计算全样中各种元素以Al为参比的相对地壳岩石平均含量^[10]的富集因子($EF_{地壳} = (X/Al)_{大气} / (X/Al)_{地壳}$),结果显示测定的28种元素所代表的混合气溶胶粒子主要由矿物粉尘组成,因为其 $EF_{地壳}$ 值通常小于5,只有Cs大于5但仍小于10(图1)。因子1的负载元素其 $EF_{地壳}$ 值也通常小于5,只有Sr, Cs稍大于5,表明因子1所代表的粒子其来源类似于地壳岩石的平均状况(图1)。因子2的载荷元素其 $EF_{地壳}$ 值均处在10~80之间,指示出非地壳源粒子的存在(图1)。因子3上各负载元素除Nd之外的富集因子值均小于5,也表明其代表的粒子源于地壳岩石的风化(图1)。因子4粒子同因子3非常类似,但因其上各种元素含量不超过总量的3%,其对气溶胶混合体的贡献似可忽略(图1,表1)。矿物粉尘7元素在全样及各因子上的 $EF_{地壳}$ 均接近1,而各因子上 $EF_{地壳}$ 值的变化多体现在其他微量与稀土元素上,表明所收集的青藏高原大气气溶胶中,各种来源注入大气的粒子其主要化学差异发生在稀土等元素上。

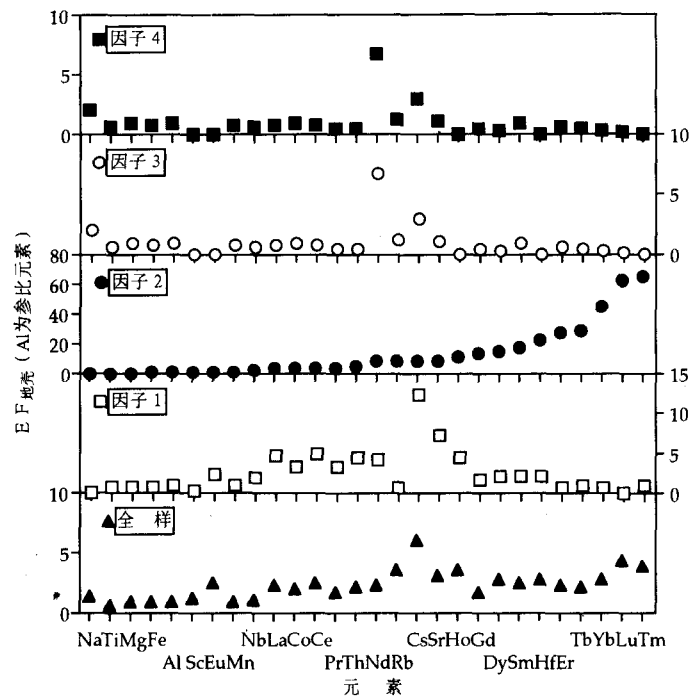


图1 伍道梁气溶胶样品全样及各因子中28种元素相对地壳岩石平均含量的富集因子

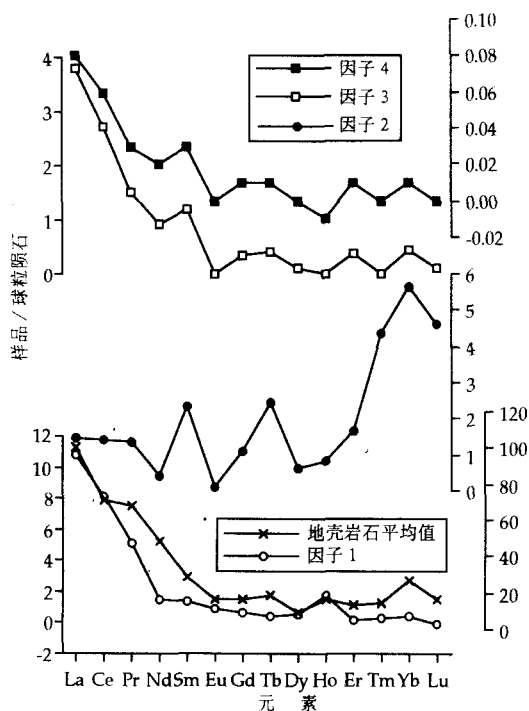


图 2 伍道梁气溶胶样品各因子及地壳的稀土元素分布模式

通过计算 49 组样品中各因子上 28 种元素浓度总和占估算出的 28 种总和浓度的比例, 显示出高空西风粉尘(因子 1)占整体气溶胶含量的平均值约为 25%, 高原局地粉尘(因子 3 和 4)相应的比例是 70%, 非地壳源粉尘(因子 2)只占总量的 5.2%。

2.3 矿物粉尘的 4 元素示踪系统

大气矿物粉尘包含所有元素, 没有独特的示踪元素对应于特定的源地。但由于不同源地地表土壤或岩石的矿物组成不同, 有理由相信至少某些元素的组配特征随着源地的不同而有所差异。获取可示踪的元素源区特征其关键是寻找正确的元素, 并使用合适的统计手段。过多元素的选择会增加示踪系统的噪音, 最佳方法是选用示踪能量最大的少数元素构成示踪系统。

元素及衍生的源区元素特征在用于一个粉尘示踪系统之前必须满足几项条件, 既元素必须是源于地壳物质且源区排放稳定, 并经均匀采样与准确测定; 不同源区的元素特征应能统计分辨, 并在粉尘传输过程中维持可分辨的特点。

在 28 种元素浓度总量与单个元素浓度之间作逐步回归分析, 结果显示 Al, Fe, Na, Mg, Ti, Mn 和 Sc, 是与总浓度最相关元素。由于 28 种元素所反映的气溶胶主要由矿物粉尘组成(前已讨论), 以上结果证明这些元素是本试验示踪大气粉尘能量较大的 7 种元素。笔者则试图只利用其中 4 种元素(Al, Mg, Fe, Sc), 并结合作者已完成的中国沙漠源区数据^[7] 建立一元素示踪系统。这是因为富集因子的分析表明这 4 种元素是最少受到其他源影响的地壳元素(图 1), 就 ICP-MS 分析而言, 其测定的不确定性也较小。Na, Ti 和 Mn 虽然也是较好的示踪

为进一步确定各因子代表的粉尘粒子来源, 各因子上稀土元素的分布模式见图 2。同地壳岩石的平均状况相比, 因子 1 的分布模式最为类似。因子 3 和 4 稍有差异, 因子 2 的差异最大。笔者认为因子 1 更具有地壳岩石风化的平均特点, 其反映的是大范围、远源、高空西风搬运的矿物粉尘粒子经充分混合后的状况。因子 3 和 4 粒子虽然仍为粉尘粒子, 但来源稍异于地壳岩石的平均状况, 笔者认为其代表的可能是青藏高原局地源向大气排放的粉尘。因子 2 无论从哪方面看, 均可认为代表的是非地壳源粒子的排放。

各因子得分对 28 种元素浓度总和的相关分析结果(图 3)显示, 因子 3 的相关系数达 $r^2=0.58$, 因子 1 为 $r^2=0.38$, 而因子 2 和因子 4 几乎不相关。由于 28 种元素浓度总和基本代表了气溶胶粒子的整体含量, 上述结果表明, 青藏高原大气中气溶胶主要由远源高空西风粉尘和高原局地粉尘组成。通

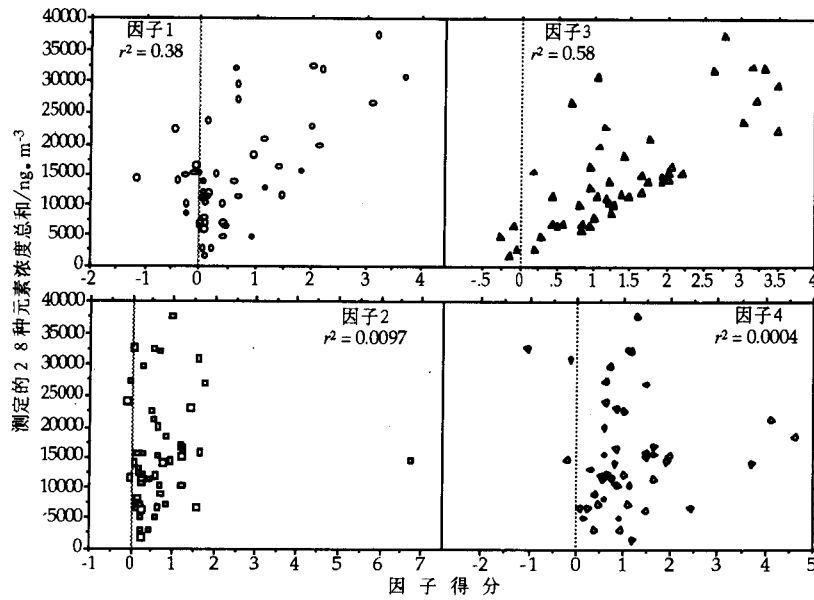


图 3 伍道梁气溶胶样品各因子得分与 28 种元素浓度总和的相关分析结果

元素,但因在黄土相应数据分析中缺少或测定不确定性偏大^[12],故不选入该示踪系统. 而其他纯地壳源元素 Eu, La, Co, Ce, Pr, Th, Nd, Rb(图 1) 因其含量偏低,测定的不确定性相对较大,而元素如: Cs, Sr, Ho, Gd, Dy, Sm, Hf, Er, Tb, Yb, Lu 和 Tm, 因有非地壳源的影响而均不予考虑(图 1).

本示踪系统设计以 4 种元素对 Al 的比值表征源区特征,使用比值的目的是使诸如使粉尘粘聚、清除等气象因素及粉尘排放量差异归一化,以使不同时期、不同传输过程中粉尘源区特征维持不变^[13]. Al 作为参比元素是因为它在不同源区矿物粉尘中含量比例相近,比值不会倾斜于某一特定源区. 为定量解析出混合粉尘不同来源的贡献程度,使用了一个化学元素平衡式(CEB)^[14,15],它的实质是在目标元素与源区特征之间作多元线性回归:

$$C_i = \sum_{j=1}^p X_{ij} S_j, \quad (1)$$

C_i 是样品中元素 i 以 Al 为标尺的浓度, X_{ij} 是第 j 个源区特征中 i 元素相应数据, S_j 是源区 j 的强度,或称源区系数, p 是假定的源区特征总数.

表 2 中国粉尘主要源区的元素特征^{a)}

| | X/Al | | |
|------------------------|-------------------|------------------|------------------|
| | 中国西北部沙漠 (n=32) | 中国北部沙漠 (n=58) | 远源西风粉尘 (n=49) |
| Al | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Fe | 0.83 | 0.52 | 0.24 |
| Mg | 0.19 | 0.24 | 0.13 |
| Sc($\times 10^{-4}$) | 2.7 | 3.4 | 1.4 |

a) 几何平均值 Al:ng/m³, 中国西北部沙漠 = 23 000, 中国北部沙漠 = 19 000 远源西风粉尘 = 370(重数值)

表 3 中国粉尘源区元素特征的费歇判别结果^{a)}

| 源区 | 均差 | p 值 |
|----------|------|-------|
| 中国西北部沙漠 | 0.16 | 0.03 |
| — 远源西风粉尘 | | |
| 中国北部沙漠 | 0.10 | 0.003 |
| — 远源西风粉尘 | | |
| 中国西北部沙漠 | 0.06 | 0.003 |
| — 中国北部沙漠 | | |

a) 置信水平: 5%

表 2 给出了中国粉尘主要源区由 4 种地壳元素所反映的特征值, 中国西北部沙漠包括塔克拉玛干沙漠和河西走廊西端的数据. 中国北部沙漠是指包括巴丹吉林、乌兰布和、库布齐、腾格里、毛乌素及河西走廊在内的内蒙古北部及黄土高原西北缘沙漠的综合状况^[7].

为消除不同沙漠样点之间粉尘传输的影响, 12 个沙漠样点特征采用含量频率分布的重数值, 源区特征是样点特征的几何平均值^[7]. 远源西风粉尘特征值也使用了重数值, 以进一步消除非远源西风粉尘对元素特征的干扰.

不同源区的元素特征必须统计可区分, 才能最后用于示踪系统, 为此采用了费歇线性显著性差异判别方法, 以评价不同源区特征之间的可分辨性, 结果显示 3 个中国粉尘的主要源区其元素特征存在显著性差异(表 3).

源区范围大, 且经大气充分混合的远源高空西风粉尘, 其源区特征有理由被认为在末次冰期旋回期间维持基本不变, 又鉴于此时期黄土高原风成黄土的最大再改造量不超过其总量的 10%^[12], 且中国现代沙漠的格局在晚更新世就已经形成^[16], 作者可推断以元素比值为特征的沙漠源区特征应维持不变, 建立的 4 元素示踪系统应应用于黄土高原中部末次冰期旋回的黄土堆积序列, 以定量分辨远源西风粉尘与近源沙漠粉尘的不同贡献.

源区特征和黄土高原中部洛川、黑木沟剖面末次冰期旋回的黄土 - 古土壤中元素数据之间 CEB 分析结果列于表 4. 其中不同层位黄土、古土壤中元素数据由间隔 10 cm(时间分辨率

表 4 不同粉尘源区对末次冰期旋回黄土高原中部风成黄土中地壳元素的贡献

| | 源区强度 | 源区贡献 | Al | Fe | Mg | Sc | 平均/% |
|---------|------|------------|-----|-----|------|------|------|
| | | 洛川, 黑木沟 S0 | | | | | |
| 中国西北部沙漠 | 0.01 | % 中国西北部沙漠 | 1.0 | 1.7 | 0.71 | 1.5 | 1.2 |
| 中国北部沙漠 | 0.91 | % 中国北部沙漠 | 91 | 96 | 82 | 100 | 92 |
| 远源西风粉尘 | 0.08 | % 远源西风粉尘 | 8.0 | 3.8 | 3.8 | 0.60 | 4.0 |
| | | % 其余来源 | | | | | 2.6 |
| | | L1-LL1 | | | | | |
| 中国西北部沙漠 | 0.49 | % 中国西北部沙漠 | 49 | 56 | 28 | 49 | 46 |
| 中国北部沙漠 | 0.47 | % 中国北部沙漠 | 47 | 34 | 34 | 59 | 43 |
| 远源西风粉尘 | 0.04 | % 远源西风粉尘 | 4.0 | 1.3 | 1.5 | 0.21 | 1.8 |
| | | % 其余来源 | | | | | 9.3 |
| | | L1-SS1 | | | | | |
| 中国西北部沙漠 | 0.37 | % 中国西北部沙漠 | 37 | 45 | 22 | 40 | 36 |
| 中国北部沙漠 | 0.60 | % 中国北部沙漠 | 60 | 46 | 44 | 82 | 58 |
| 远源西风粉尘 | 0.03 | % 远源西风粉尘 | 3.0 | 1.0 | 1.1 | 0.17 | 1.3 |
| | | % 其余来源 | | | | | 4.8 |
| | | L1-LL2 | | | | | |
| 中国西北部沙漠 | 0.39 | % 中国西北部沙漠 | 39 | 47 | 22 | 41 | 37 |
| 中国北部沙漠 | 0.57 | % 中国北部沙漠 | 57 | 43 | 40 | 75 | 54 |
| 远源西风粉尘 | 0.04 | % 远源西风粉尘 | 4.0 | 1.4 | 1.5 | 0.22 | 1.8 |
| | | % 其余来源 | | | | | 7.7 |
| | | S1 | | | | | |
| 中国西北部沙漠 | 0.97 | % 中国西北部沙漠 | 97 | 91 | 60 | 79 | 82 |
| 中国北部沙漠 | | % 中国北部沙漠 | | | | | |
| 远源西风粉尘 | | % 远源西风粉尘 | | | | | |
| | | % 其余来源 | | | | | 18 |

约为千年)样品的整体浓度值平均而得^[12]。从三源区粉尘对4种元素贡献的平均结果可知全新世中国北部沙地控制着粉尘向黄土高原的输入(92%),L1-LL1阶段中国西北及北部沙漠对黄土的贡献大致相当(分别为46%,43%);而L1-SS1和L1-LL2阶段粉尘仍主要源于中国北方的沙漠。而在末次间冰期输入黄土高原的粉尘则主要来自中国西北部沙漠的贡献,其比例达82%。有趣的是,黄土高原风成黄土中来自远源西风的输入比例,其范围只是1.3%~4.0%,表明中国北方沙漠是黄土的最主要源区、高空西风搬运的远源物质对黄土的贡献似可忽略。黄土所记录的过去大气环流变迁,可能不易从远源西风的物质交换中提取信息。

致谢 中国科学院青藏高原考察基地,沙坡头开放站协助了作者的采样工作。刘小东、张德二同志对本文提出了许多宝贵意见,作者谨此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 刘东生. 黄土与环境. 北京:海洋出版社,1985. 191~322
- 2 An Z S, Liu T S, Lu Y C *et al.* The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in central China. *Quaternary International*, 1990, 718: 91~95
- 3 刘东生. 中国的黄土堆积. 北京:科学出版社,1965
- 4 卢演畴. 中国黄土物质来源的初步探讨-石粉英砂颗粒表面结构的电子显微镜研究. *地球化学*, 1974, (1): 47~53
- 5 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. *中国科学*, B辑, 1984, (3): 278~288
- 6 Zhang X Y, An Z S, Liu T *et al.* Study on three dust storms in China-source characterization of atmospheric trace element and transport process of mineral aerosol particles. *Chinese Science Bulletin*, 1992, 37: 11, 940~945
- 7 Zhang X Y, An Z S. Distribution and transport of atmospheric elements over dust source regions of China. *Sci Repts SC/BEJ 2.2.A*, UNESCO, 1995, 9~41
- 8 GSS. Preparation of geochemical standard reference samples (GSR1-6, GSS1-8, GSD9-12). National Bureau of Chemical Exploration Analysis. P R China, 1984
- 9 Zhang X Y, Arimoto R, An Z *et al.* Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: concentrations, sources and atmospheric deposition on the Loess Plateau. *Atmos Envir*, 1993, 27A(13): 2051~2067
- 10 Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochim Cosmochim Acta*, 1964, 28: 1273~1285
- 11 Thurston G D, Spengler J D. A quantitative assessment of source contributions to inhalable particulate matter pollution in metropolitan Boston. *Atmos Envir*, 1985, 19: 9~25
- 12 Zhang X Y, Arimoto R, An Z *et al.* Late Quaternary records of the atmospheric input of eolian dust to the Center of the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 1994, 41: 35~43
- 13 Zhang X Y, Arimoto R, Zhang D *et al.* Atmospheric transport of wind-blown mineral particles in dust storm over northwestern China. *Scientia Geologica Sinica*, Supplementary Issue (1), 1995, 135~151
- 14 Fredlander S K. Chemical element balance method applied to dichotomous sampler data. *Envir Sci Technol*, 1973, 7: 235~240
- 15 Dzuby T G. Chemical element balances and identification of air pollution sources. *Acad Sci*, 1980, 338: 126~126
- 16 董光荣,王贵勇,陈惠忠等. 中国沙漠形成、演化与青藏高原隆升的关系. 见:青藏高原与全球变化研讨会论文集. 北京:气象出版社,1995. 13~29