

# 中国东北部沙地重矿物组成及沙源分析

谢 静<sup>①②\*</sup> 丁仲礼<sup>①</sup>

(① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ② 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 通过对中国东北部呼伦贝尔、科尔沁和浑善达克沙地末次冰盛期(LGM)以来沙样的重矿物组合和碎屑石榴石、电气石化学组成分析, 发现 3 个沙地的重矿物组合主要为石榴石、钛铁矿和绿帘石以及少量的角闪石和磁铁矿等. 石榴石组成以高 Mg 的 A 型石榴石为主(平均含量 58%), 还有少量的 B 型石榴石. 电气石则以富 Mg 的电气石为主, 也含有少量富 Fe 的电气石. 与蒙古国中南部和塔里木中部沙样重矿物组成进行对比, 表明 3 个沙地的沙源为中亚造山带中的显生宙岩石和华北克拉通北部太古代-古元古代基底岩石. 为现代沙是 LGM 沙翻新而来这一论点提供了一些直接的证据. 3 个沙地与塔克拉玛干沙漠在重矿物组成上的差异表明, 中国西部干旱区的沙源对东部沙地的贡献很小.

**关键词** 重矿物 源区 中国东北部 石榴石 电气石

中国北方沙漠主要分布在 35°~50°N 和 75°~125°E 之间的内陆地区, 它西与中亚干旱区相接, 北与外蒙干旱区毗邻, 从而成为一个东西走向的全球最大的中纬温带内陆干旱区的重要组成部分. 中国北方沙漠带被南北延伸的贺兰山分为两部分, 西部沙漠年降水小于 200 mm, 广泛分布有活动沙丘. 贺兰山以东的呼伦贝尔、科尔沁和浑善达克沙地, 地处半干旱地带, 年降水为 200~500 mm, 以固定、半固定沙丘为主. 中国东北部沙漠中许多剖面的地层和光释光年龄表明<sup>[1-3]</sup>, 在末次冰盛期(LGM), 这些沙漠的东界和南界相对于全新世适宜期(HO)分别向东向南扩张了几百至上千公里, 而中国北方的西部大沙漠在 LGM 和 HO 时一直存在活动沙丘. 这似乎暗示冰期时, 中国东北部沙漠有可能是西部和北部大沙漠不断扩展的产物. 考虑到从蒙古国到中国沿下风向依次分布着戈壁、沙地和黄土的格局, 这个模式似乎有其合理性. 但有的学者研究后认为<sup>[4-7]</sup>, 呼伦贝尔、科尔沁和浑善达克的沙源主要为下伏松散堆积物.

由于沙源确定在研究沙漠形成演化上有重要意义, 因而有必要利用合适的手段, 深入开展此方面的工作.

研究沉积物的来源, 重矿物是较精确灵敏的指示剂. 通过对重矿物组合的分析及其与可能源区的对比, 可以定性地给出源区的位置和源区岩石的组成特征. 尽管重矿物组成从源区风化、搬运到沉积区的过程所遇到的一系列物理和化学变化都有可能在一定程度上改变源区信息<sup>[8,9]</sup>, 但是, 结合某些特定重矿物的化学成分研究, 可以避免这个问题, 同时还可以提供样品内不同源区混合的情况, 从而获得更详细的源区岩石组成信息<sup>[10]</sup>. 对源区组成研究特别有用的重矿物种类相当多, 如: 石榴石<sup>[11]</sup>、电气石<sup>[12]</sup>、辉石<sup>[13]</sup>、角闪石<sup>[14]</sup>、钛铁矿<sup>[15,16]</sup>、磁铁矿<sup>[17]</sup>、锆石<sup>[18]</sup>、尖晶石<sup>[19]</sup>等. 本文通过对中国东北部 3 个沙地 LGM 以来沙漠样品的重矿物组合及石榴石和电气石的化学组成分析, 目的是确定这三个沙地的源区位置及估计不同源区的相对贡献程度. 我们同时将



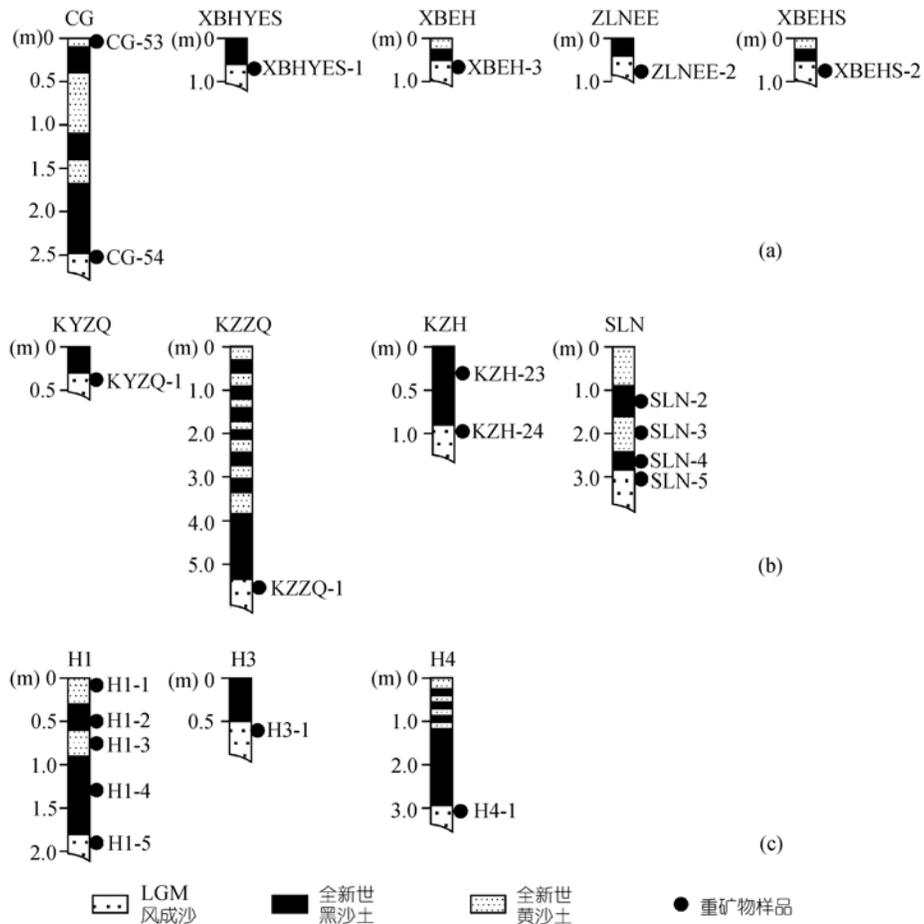


图 2 中国东北部 3 个沙地剖面柱状图  
(a) 呼伦贝尔沙地; (b) 科尔沁沙地; (c) 浑善达克沙地

表 1 中国东北部 3 个沙地和蒙古国、塔里木中部样品重矿物组合分析结果(个数%)<sup>a)</sup>

采样地点	样品	辉石	角闪石	绿帘石	黝帘石	钛铁矿	磁铁矿	石榴石
呼伦贝尔	5 个沙样	1~3(2)	6~10(8)	14~20(18)	0~3(1)	13~27(20)	0.9~5(2)	25~40(31)
呼伦贝尔	XBHYES-1	5	30	13	0	24	1	8
科尔沁	8 个沙样	0~3(1)	3~14(6)	10~32(22)	0~1(0.5)	7~18(12)	0~3(0.5)	22~60(41)
浑善达克	7 个沙样	0.7~12(5)	2~7(3)	12~47(23)	0~3(1)	6~30(16)	1~11(8)	19~49(32)
蒙古国	EEDT-1	9	45	15	1	8	9	1
蒙古国	2 个沙样	2~3(2)	2~4(3)	14~16(15)	0.3(0.3)	14~18(16)	27~44(35)	9~17(13)
塔里木	TZ-1	8	15	16	0.3	12	9	11

采样地点	样品	楣石	蓝晶石/ 红柱石/ 矽线石	十字石	锆石	电气石	金红石	其他
呼伦贝尔	5 个沙样	6~8(7)	0~0.7(0.4)	0~0.7(0.1)	3~9(6)	1~3(2)	2~6(4)	0~0.7(0.4)
呼伦贝尔	XBHYES-1	9	0.3	0.3	6	1	1	0.3
科尔沁	8 个沙样	1~10(6)	0.3~2(0.9)	0.3~1(0.8)	1~7(3)	0~3(1)	3~6(4)	0~1(0.3)
浑善达克	7 个沙样	2~4(3.5)	0~2(1)	0~1(0.6)	1~6(2)	0~2(1)	2~9(4)	0~2(1)
蒙古国	EEDT-1	8	0	0	0.7	0	0.7	1
蒙古国	2 个沙样	2~7(4)	0~1(0.5)	0~2(1)	0~2(1)	1~2(1)	5~6(6)	1~2(1)
塔里木	TZ-1	5	0	0	3	1	2	0

a) 深灰色阴影代表主要组成重矿物, 浅灰色阴影代表次要组成重矿物, 其余代表微量组成重矿物。括号内为样品的平均值

的重矿物(表 1)主要有绿帘石、钛铁矿、磁铁矿、石榴石和角闪石,与 3 个沙地相比,其石榴石含量降低,而角闪石和磁铁矿含量增加。由此推测蒙古国沙样和 XBHYES-1 样品与 3 个沙地的源区组成不同,它们可能来源于低级变质岩和镁铁质岩浆岩,少量来源于长英质岩浆岩,而变质程度较高的变质基底岩石减少。

塔里木中部沙样的重矿物组合与 3 个沙地样品也有较大的差别,主要由绿帘石、角闪石、钛铁矿、磁铁矿组成,含少量的石榴石和辉石,反映塔里木沙样源区岩石主要为低级变质岩、岩浆侵入岩和火山岩以及少量的高级变质基底岩石。

### 3.2 碎屑石榴石化学组成

石榴石有 6 个端元组分,分别为镁铝榴石(Pyrope)、铁铝榴石(Almandine)、锰铝榴石(Spessartine)、钙铝榴石(Grossular)、钙铁榴石(Andradite)和水钙铝榴石(Hydrogrossular)。它们存在于许多种类的变质岩中,也存在于一些花岗岩、伟晶岩、酸性火山岩和金伯利岩中<sup>[21]</sup>。在不同种类的含石榴石的岩石中,石榴石的组成也非常不同,因此,它在沉积物源区确定中具有很大的潜力。

在本研究中,所有石榴石化学成分分析都在颗粒核部进行。条件试验表明,颗粒核部和边部的成分差别很小,它与颗粒间的变化相比几乎可以忽略不计。另外,Fe<sup>3+</sup>的估算根据 Droop 方法<sup>[21]</sup>,端元组分的计算采用 Deer 等<sup>[22]</sup>的方法。在镁铝榴石-铁铝榴石+锰铝榴石-钙铝榴石+钙铁榴石三角图中(图 3),可以看出,3 个沙地样品的碎屑石榴石组分变化非常大,表明它们是多种岩石的混合产物。Morton 等<sup>[23]</sup>将碎屑石榴石组成按照其不同来源划分为 3 种类型。其中,A 型石榴石含有较低的 Ca、Mn 和较高的 Mg,这种石榴石主要来源于高级(麻粒岩相)副变质岩和紫苏花岗岩,但是紫苏花岗岩是石榴石含量相对较少的岩石,因此,A 型石榴石主要还是来源于高级麻粒岩相的副变质岩;B 型石榴石含有较低的 Mg 和变化较大的 Ca 和 Mn 含量,它们是典型的变沉积岩来源,其变质程度一般达到或低于角闪岩相,低于 A 型的副变质岩的变质程度。B 型石榴石也可来源于酸性到中性的片麻岩和花岗岩,但其石榴石一般含有非常高的 Fe 和 Mn(>90%),且石榴石丰度较低,因此 B 型石榴石大部分还是来源于低级—中级变质程度的副变质岩。

C 型石榴石有较高的 Ca 和 Mg,一般来源于高级片麻岩地体,特别是高级基性片麻岩和榴辉岩。C 型石榴石也可以来源于超基性岩,如橄榄岩和辉石岩,但是这些岩石中的 C 型石榴石趋向于有非常高的 Mg 含量,在三角图中镁铝榴石的含量通常>60%。因此,C 型石榴石可以根据 Mg 含量将基性和超基性片麻岩源区进行区分。

图 3 将每个样品的各个颗粒组成点在 Morton 三角图中,图 4 则将它们相对丰度标出。可以看出,3 个沙地样品(除 XBHYES-1 外)的碎屑石榴石主要由高镁低钙的 A 型组成,含少量的 B 型石榴石,而 C 型石榴石几乎不存在,表明其主要来自高级麻粒岩相的副变质岩,少量来自中低级变质的副变质岩和酸性到中性的片麻岩或花岗岩。蒙古国的 3 个样品和呼伦贝尔沙地样品 XBHYES-1 的石榴石主要由 B 型低镁石榴石组成,与 3 个沙地样品相比,它们含有较少量的 A 型石榴石,表明它们的源区主要由中低级副变质岩和酸性到中性的片麻岩、花岗岩组成,仅含少量的较高变质程度的副变质岩。塔里木中部的沙样含较多 B 型石榴石,同时含有少量的 C 型石榴石,而 A 型石榴石则更少,指示其源区主要为中、低级副变质岩和少量的高级变质基性片麻岩。

### 3.3 碎屑电气石化学组成

电气石是一种在许多岩石类型中常见的副矿物。电气石存在于各种变质程度的变质岩、花岗侵入岩、细晶岩、伟晶岩和热液蚀变带。在地表环境下,属于抗风化和抗磨蚀的极稳定矿物,因此,在沉积物中较常见。电气石有一个宽广的化学组成范围,根据化学组成可以划分为两个连续的固熔体序列,即锂电气石(Al-Li-端元)-黑电气石(Fe-端元)序列和黑电气石-镁电气石/钙镁电气石(Mg-端元)序列。含有较多的 Al、Li 和 Fe 的电气石一般存在于花岗岩和伟晶岩中,而含有较高 Mg 的电气石一般存在于变沉积岩和交代岩石中<sup>[12]</sup>。

3 个沙地和蒙古国沙样的电气石组成(图 5)较相近,大部分电气石来源于变泥质岩、变碎屑岩、富 Fe<sup>3+</sup>的石英-电气石岩和钙质硅酸盐岩;少量来源于贫锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩。而塔里木沙样的电气石组成与它们差别较大,电气石几乎都来源于变泥质岩和变碎屑岩,而来源于花岗岩的电气石几乎没有。

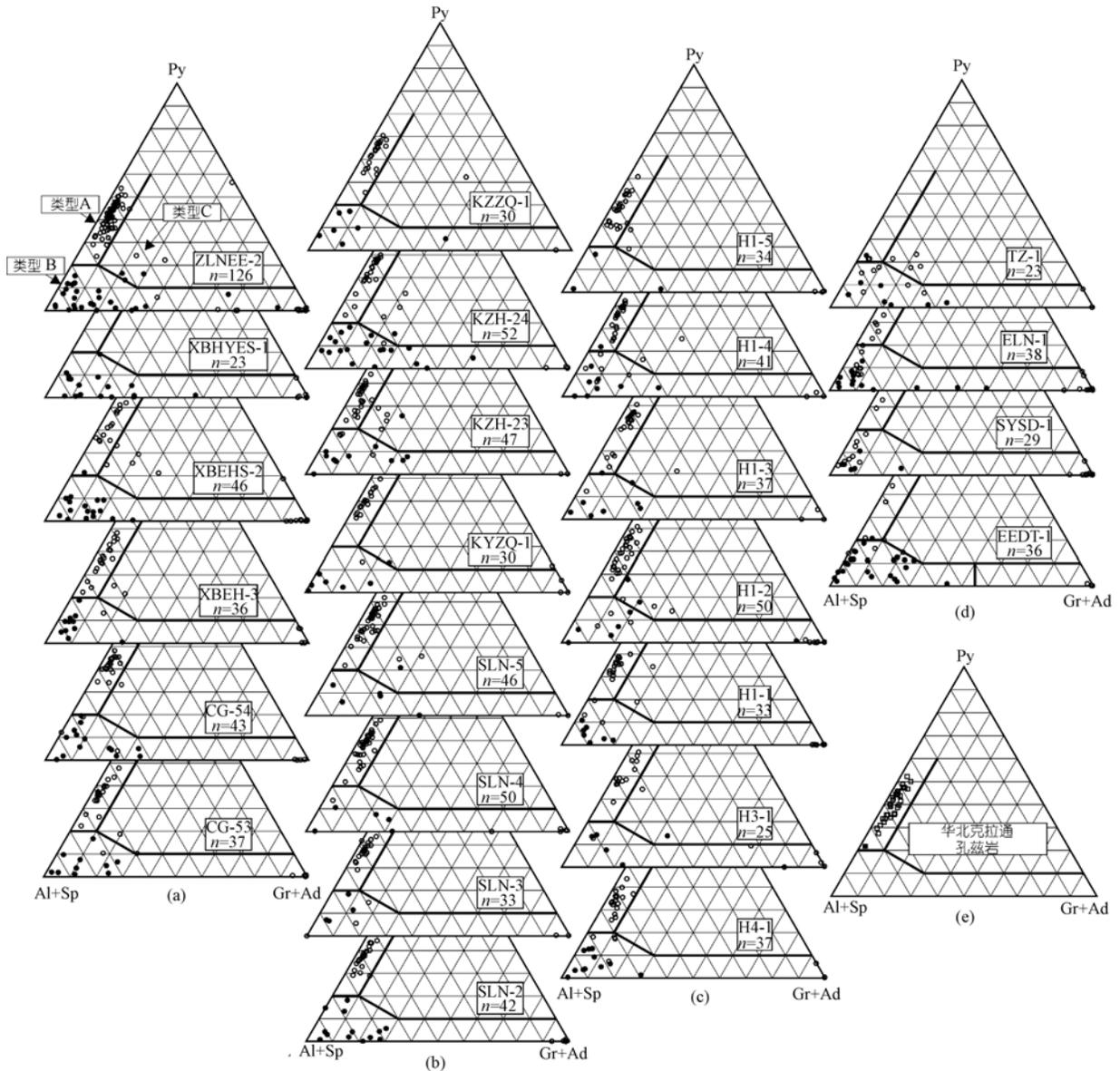


图 3 中国东北部 3 个沙地、蒙古国和塔里木样品的碎屑石榴石组成三角图

(a) 呼伦贝尔沙地; (b) 科尔沁沙地; (c) 浑善达克沙地; (d) 蒙古国和塔里木沙样; (e) 华北克拉通孔兹岩。Al 铁铝榴石, Sp 锰铝榴石, Gr 钙榴石, Ad 钙铁榴石, Py 镁铝榴石。●表示  $Sp > 5\%$ , ○表示  $Sp < 5\%$

### 4 讨论和结论

以上分析结果表明, 3 个沙地沙样(除 XBHYES-1 外)的重矿物组合、碎屑石榴石和电气石化学组成均有相同的特征, 说明它们的源区岩石组成非常相似, 即主要来自麻粒岩相的副变质岩和中低级副变质岩, 少量来自酸性到中性的片麻岩、高级变质的基性片麻岩和花岗岩。这三个沙地南部为华北克拉通, 北部为中亚造山带(图 1), 从地理位置上看, 两者可能为重要的沙源。由于经历了不同的构造岩浆历史, 两者又

具有非常不同的岩石组合。华北克拉通北缘主要由早太古代到古元古代基底和上覆的未变质的中元古代到新生代盖层序列组成。华北克拉通基底岩石包括英云闪长岩-奥长花斑岩-花岗闪长岩(TTG)质片麻岩, 花岗岩, 紫苏花岗岩, 混合岩, 角闪岩, 绿片岩, 泥质片岩, 富Al的片麻岩(榴英硅线变质岩), 条带状铁组分(BIF), 钙质硅酸盐岩和大理岩[24,25]。而中亚造山带则是一个非常复杂的包括岛弧、增生组合、蛇绿岩和被动大陆边缘的构造带, 分布大量的古生代和

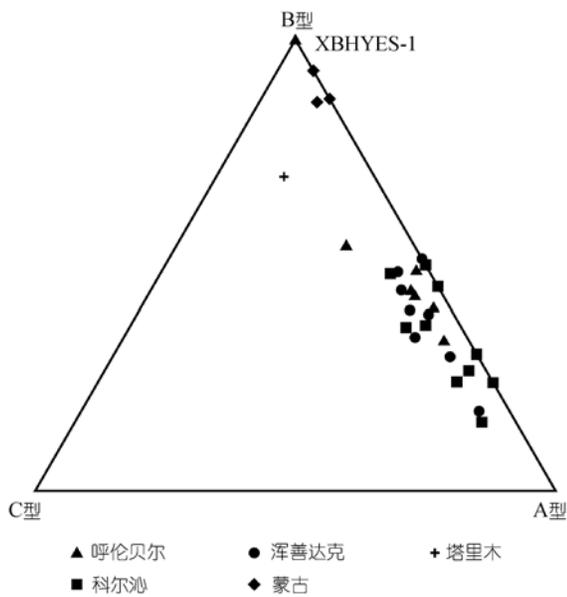


图 4 中国东北部 3 个沙地、蒙古国和塔里木中部样品的 A, B 和 C 型石榴石相对丰度图

中生代岩浆岩<sup>[26,27]</sup>, 太古代和古元古代的基底岩石很少或几乎没有. 3 个沙地源区的麻粒岩相副变质岩和高级变质的基性片麻岩可能主要来源于华北克拉通的基底岩石, 而中低级副变质岩和酸性到中性的片麻岩则可能主要来源于中亚造山带. 华北克拉通北缘西段分布有大量的麻粒岩相副变质岩-孔兹岩系, 形成东西延伸的早前寒武纪孔兹岩系-麻粒岩-紫苏(斜长)花岗岩带. 此带东起晋冀蒙边境, 西到宁夏境内, 东西延伸 600 余公里, 南北宽 100~200 km, 其中以东端内蒙古集宁及晋冀相邻地区最为典型. 在辽东和吉南地区的集安群和宽甸群中也广泛发育富含矽线石和石榴石的片麻岩, 其岩性组合和孔兹岩系相似<sup>[28]</sup>. 收集前人对于华北克拉通北部孔兹岩系中石榴石组成的测量结果<sup>[29-31]</sup>, 对比发现与 3 个沙地沙样中的 A 型石榴石组成一致(图 3(e)), 因此, 可以认为 3 个沙地的 A 型石榴石主要来源于华北克拉通北缘的孔兹岩系.

蒙古国中南部沙样主要来源于中亚造山带的中低级副变质岩和酸性到中性片麻岩和花岗岩, 华北克拉通基底的岩石贡献很少或几乎没有. 蒙古国中南部沙样的 A 型石榴石的平均含量只有 10%, 大大低于 3 个沙地的平均含量(58%). 从蒙古国中南部到中国东北部 3 个沙地, 在西北-东南方向上, 石榴石组成有一系统变化, 即由主要来源于中亚造山带的 B 型石

榴石为主逐渐变化为主要来源于华北克拉通的 A 型石榴石为主(图 4).

塔里木中部的沙样与 3 个沙地样品的重矿物特征差别较大, 其源区含有更多的中低级副变质岩和高级变质的基性片麻岩. 表明贺兰山以西的大沙漠塔克拉玛干沙漠与东部的固定、半固定沙地的源区不相同, 塔克拉玛干沙漠可能主要来源于塔里木盆地北部天山山脉、南部的昆仑山脉少量来源于塔里木地块基底岩石.

考虑到中亚造山带位于 3 个沙地的北部, 而且沿着下风向从西北到东南石榴石组成有一个逐渐混合的梯度变化, 因此, 来源于中亚造山带的物质可能是通过季风搬运的. 而对于来源于华北克拉通物质的搬运途径则可能有不同的解释, 就浑善达克和科尔沁沙地而言, 由于它们距离华北克拉通北缘较近, 现在存在从华北克拉通北部山区流经这两个沙地的水流系统, 所以华北克拉通物质可能是通过流水直接搬运到这两个沙地. 而呼伦贝尔沙地距离华北克拉通北缘大约有 700~800 km, 现今地表也没有从华北克拉通北缘流经该沙地的河流系统, 因此, 推测某地质历史时期华北克拉通物质向北搬运, 经过沉积物再循环搬运到呼伦贝尔沙地. 对于沙漠物质搬运的具体途径还需要与可能的中间搬运产物进行对比研究, 才能详细厘定中间的搬运过程.

呼伦贝尔样品 XBHYES-1 与其他沙地样品相比, 重矿物特征差别较大, 可能是由于该样品靠近克鲁伦河, 克鲁伦河主要发育并流经中亚造山带中生代和中生代岩浆弧和俯冲-增生地层, 因此, 该样品与蒙古国中南部沙样具有相似的源区岩石特征.

Sun 等<sup>[1]</sup>通过野外地层观察, 认为中国东部沙地现代流沙主要是由于过度的人类活动导致全新世黑垆土被破坏, 使得 LGM 沙层翻新而成的. 我们在每个沙地都选择了一个 LGM 以来的剖面进行测定, 结果表明 LGM 和现代沙具有相似的重矿物组合特征和碎屑石榴石、电气石化学组成, 因此, LGM 和现代沙具有相同的源区特征, 为现代沙是由 LGM 沙翻新而成提供了一些直接的证据.

通过对浑善达克、科尔沁、呼伦贝尔沙地和蒙古国中南部、塔里木中部 LGM 以来的沙样的碎屑重矿物组合、石榴石和电气石化学组成对比研究, 可以得到以下主要结论:

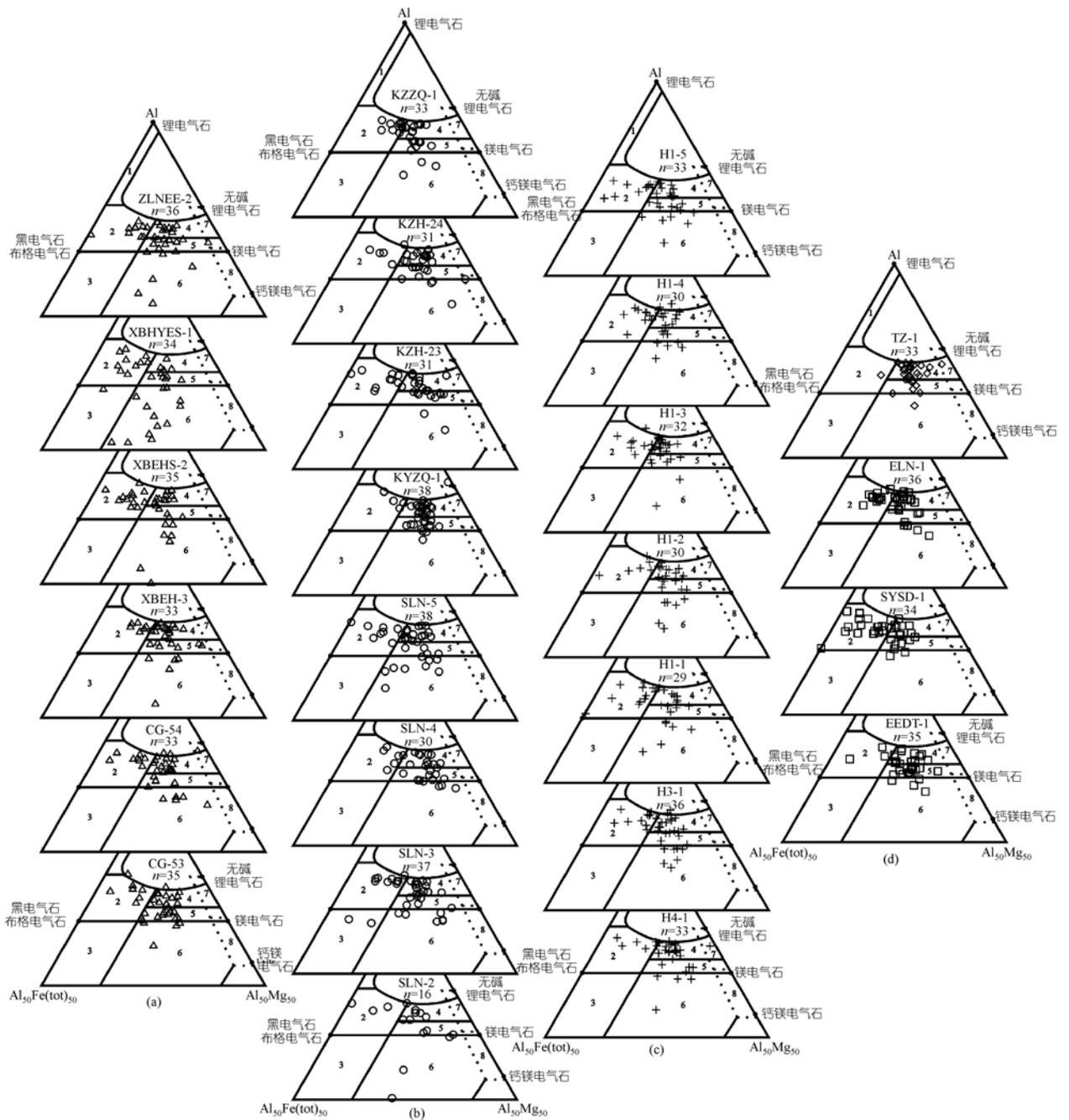


图 5 中国东北部 3 个沙地、蒙古国和塔里木中部样品的碎屑电气石组成的 Al-Fe-Mg 三角图

(a) 呼伦贝尔沙地; (b) 科尔沁沙地; (c) 浑善达克沙地; (d) 蒙古国和塔里木沙样。电气石组成划分根据 Henry 等<sup>[12]</sup>。1. 富锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩; 2. 贫锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩; 3. 热液蚀变的花岗岩; 4. 铝质的变泥质岩和变碎屑岩; 5. 贫铝的变泥质岩和变碎屑岩; 6. 富 Fe<sup>3+</sup> 的石英-电气石岩、钙质硅酸盐岩和变泥质岩; 7. 贫钙的变超基性岩和富铬、钒的变沉积岩; 8. 变碳酸岩和变辉石岩

(1) 3 个沙地源区岩石组成主要为麻粒岩相的副变质岩和中低级副变质岩, 还有少量的酸性到中性片麻岩、高级变质的基性片麻岩和花岗岩。主要来自中亚造山带中的显生宙高山和华北克拉通北部的变质基底岩石。

(2) 3 个沙地与塔克拉玛干沙漠具不同的源区。东部的沙地并非来源于西部的大沙漠。

(3) 现代沙与 LGM 沙具有相同的源区组成特征, 为现代沙可能是 LGM 沙翻新而成的提供了一些直接的证据。

**致谢** 重矿物电子探针测试工作得到了中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验徐平、毛騫和马玉光高级工程师的大量指导与帮助, 审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- Sun J M, Ding Z L, Liu D S. Desert distributions during the glacial maximum and climatic optimum: example of China. *Episodes*, 1998, 21(1): 28—31
- Li S H, Sun J M, Zhao H. Optical dating of dune sands in the north-eastern deserts of China. *Paleogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2002, 181(4): 419—429[DOI]
- 鹿化煜, 周亚利, Mason J, 等. 中国北方晚第四纪气候变化的沙漠与黄土记录——以光释光年代为基础的直接对比. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 888—894
- 李孝泽, 董光荣. 浑善达克沙地的形成时代与成因初步研究. *中国沙漠*, 1998, 18(1): 16—21
- 杨志荣, 宋春青. 论浑善达克沙地的形成与演变. 见: 北京师范大学地理系, 编. 中国北方资源开发与环境研究. 北京: 海洋出版社, 1992. 47—52
- 裘善文. 试论科尔沁沙地的形成与演变. *地理科学*, 1989, 9(4): 317—328
- 韩广, 张桂芳, 杨文斌. 呼伦贝尔沙地沙丘砂来源的定量分析-逐步判别分析(SDA)在粒度分析方面的应用. *地理学报*, 2004, 59(2): 189—196
- Morton A C. Heavy minerals in provenance studies. In: Zuffa G G, ed. *Provenance of Arenites*. Dordrecht: D Reidel Publishing Company, 1985. 249—277[DOI]
- Morton A C, Johnsson M J. Factors influencing the composition of detrital heavy mineral suites in Holocene sands of the Apure River drainage basin, Venezuela. In: Johnsson M J, Basu A, eds. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. Geological Society of America Special Paper, Vol 284. Boulder: The Geological Society of America Incorporation, 1993. 171—185
- Morton A C. Geochemical studies of detrital heavy minerals and their application to provenance research. In: Morton A C, Todd S P, Haughton P D W, eds. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. Geological Society Special Publication, No 57. London: The Geological Society Publishing House, 1991. 31—45
- Morton A C. A new approach to provenance studies—electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea. *Sedimentology*, 1985, 32(4): 553—566
- Henry D J, Guidotti C V. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. *Am Miner*, 1985, 70(1): 1—15
- Cawood P A. Modal composition and detrital clinopyroxene geochemistry of lithic sandstones from the New England Fold Belt (East Australia): a Paleozoic forearc terrane. *Geol Soc Am Bull*, 1983, 94(10): 1199—1214[DOI]
- Morton A C. Heavy minerals from Paleogene sediments, Deep Sea Drilling Project Leg 81: their bearing on stratigraphy, sediment provenance and the evolution of the North Atlantic. In: Roberts D G, Schnitker D, eds. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 81. Washington D C: U S Government Printing Office, 1984. 653—661
- Grisby J D. Chemical fingerprinting in detrital ilmenite: a viable alternative in provenance research? *J Sediment Res*, 1991, 62(2): 331—337
- Basu A, Molinaroli E. Reliability and application of detrital opaque Fe-Ti oxide minerals in provenance determination. In: Morton A C, Todd S P, Haughton P D W, eds. *Developments in Sedimentary Provenance Studies*. Geological Society Special Publication, No 57. London: The Geological Society Publishing House, 1991. 55—65
- Grisby J D. Detrital magnetite as a provenance indicator. *J Sediment Res*, 1990, 60(6): 940—951
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. *Contrib Mineral Petr*, 2002, 143(5): 602—622
- Frost B R. Stability of oxide minerals in metamorphic rocks. In: Lindsley D H, ed. *Oxide Minerals: Petrologic and Magnetic Significance*. Reviews in Mineralogy, Vol 25. Washington D C: The Mineralogical Society of America, 1991. 469—487
- 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 1980. 1—107
- Droop G T R. A general equation for estimating Fe<sup>3+</sup> concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineral Mag*, 1987, 51(3): 431—435[DOI]
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. *An Introduction to The Rock-forming Minerals*. London: Longman Group Ltd, 1992. 31—45
- Morton A C, Whitham A G, Fanning C M. Provenance of Late Cretaceous to Paleocene submarine fan sandstones in the Norwegian Sea: integration of heavy mineral, mineral chemical and zircon age data. *Sediment Geol*, 2005, 182(1-4): 3—28[DOI]
- Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, et al. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: field occurrence, petrography Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precambrian Res*, 1987, 34(3-4): 311—346[DOI]
- Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China. *Precambrian Res*, 1996, 78(1-3): 79—94[DOI]
- Sengor A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 1993, 364(6435): 299—307[DOI]
- Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. *J Asian Earth Sci*, 2002, 21(1): 87—110[DOI]
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来. 中国北方前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 1996. 1—276
- 阎月华, 郭敬辉, 刘文军. 华北麻粒岩相带变质矿物石榴石及其与单斜辉石平衡共生关系的研究. *岩石学报*, 1998, 14(4): 471—480
- 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 中国早前寒武纪麻粒岩. 北京: 地质出版社, 1992. 16—31
- 卢良兆, 靳是琴, 徐学纯, 等. 内蒙古东南部早前寒武纪孔兹岩系成因及其含矿性. 吉林: 吉林科学技术出版社, 1992. 80—106