

汪进秋, 谢远云, 康春国, 等. 中更新世以来的哈尔滨黄土物源变化——来自TIMA自动定量矿物的证据[J]. 中国沙漠, 2022, 42(5): 25–35.

中更新世以来的哈尔滨黄土物源变化 ——来自TIMA自动定量矿物的证据

汪进秋^{1a}, 谢远云^{1ab}, 康春国², 迟云平^{1ab}, 孙磊^{1a}, 吴鹏^{1a}, 魏振宇^{1a}

(1. 哈尔滨师范大学 a. 地理科学学院, b. 寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025; 2. 哈尔滨学院 地理与旅游学院, 黑龙江 哈尔滨 150086)

摘要: 黄土隐含丰富的古气候信息, 了解其物源变化对理解亚洲内陆干旱化、大气环流模式和亚洲季风演变至关重要。哈尔滨荒山剖面地层出露厚度大, 地层连续, 保存了松嫩平原最完整的黄土-古土壤序列。此外, 重矿物在河流源-汇研究中得到广泛应用, 但在风成沉积物中较少。定量矿物学方法分析速度快, 能在较短时间内获得大量数据。因此, 我们对哈尔滨黄土-古土壤序列进行TIMA (TESCAN Integrated Mineral Analyzer) 自动定量矿物分析及年代学 (OSL、ESR 和 ^{14}C) 测试, 以期了解哈尔滨黄土在冰期-间冰期时间尺度上的物源变化。结果表明: TIMA方法鉴别的矿物种类高于传统方法, 且TIMA定量的重矿物含量与传统方法相比存在一定的差异, 但两者揭示的重矿物组合基本一致。黄土-古土壤序列在15.1 m (234.2 ka) 上、下地层的20—63 μm 组分的铁板钛矿、闪石类、锆石、磷灰石、金红石、钛铁矿、铬铁矿、榍石、辉石以及重矿物特征指数 (ZTR 和 GZi) 等存在明显不同的变化特征; 然而, 除了铁板钛矿和独居石外, <20 μm 组分并没有表现出如此特征。黄土-古土壤序列上、下地层重矿物组成的差异指示了哈尔滨黄土物源的变化。15.1 m 以下, 哈尔滨黄土除了接受松嫩沙地的近源粉尘贡献外, 也有远源 (比如, 浑善达克和科尔沁沙地) 粉尘的贡献。随着干旱化气候的加剧, 松嫩沙地范围扩大, 使得15.1 m 以上黄土的远源贡献比例减少, 近源贡献显著增加。即增强的气候干旱化导致的松嫩沙地粉尘源区范围扩大, 是哈尔滨黄土物源发生变化的主要原因。

关键词: 哈尔滨; 黄土; 重矿物; TIMA 分析; 物源变化; 干旱化

文章编号: 1000-694X(2022)05-025-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00008

中图分类号: P531

文献标志码: A

0 引言

黄土是第四纪时期以风力搬运为主形成的土状堆积物, 蕴含丰富的古地质信息^[1]。黄土物源研究是解决亚洲粉尘来源和传输动力变化的重要环节^[2]。然而, 在冰期-间冰期时间尺度上黄土物源是否变化仍存在较大争议^[3-12]。对这个关键科学问题的理解对于古气候重建具有重要意义。

近年来, 中国东北地区黄土得到广泛关注, 大部分研究以赤峰黄土为主, 而对更高纬度的哈尔滨地区的黄土研究较少^[13]。哈尔滨黄土位于亚洲内陆干旱化进程的最东端, 是研究中国东北地区气候

干旱化的理想载体, 对其物源研究有助于解释该地区风尘堆积与构造-地貌-气候变化之间的耦合关系^[13]。基于地球化学、粒度以及同位素示踪的哈尔滨黄土物源研究结果表明, 其主要来自近源的松嫩沙地, 远源的浑善达克沙地和科尔沁沙地也提供了部分细颗粒组分^[13-14]。显著不同的哈尔滨黄土与现代尘暴同位素组成, 暗示了冰期-间冰期黄土物源的差异^[14], 但更为深入的研究尚未展开。

重矿物化学性质稳定, 耐腐蚀, 稳定性强, 在搬运迁移过程中易于保存, 能够较好地保留其矿物源区母岩的特征, 现已广泛应用于物源研究^[15-16]。然而, 传统重矿物鉴定方法存在耗时长、易受主观性

收稿日期: 2021-12-22; 改回日期: 2022-02-04

资助项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2020D009); 国家自然科学基金项目 (42171006, 41871013)

作者简介: 汪进秋 (1997—), 女, 黑龙江双鸭山人, 硕士研究生, 主要研究方向为第四纪地质与环境变化。E-mail: wangjinqiu82700@163.com

通信作者: 谢远云 (E-mail: xyy0451@hrbnu.edu.cn)

干扰等不足,因此一系列矿物自动化定量分析方法被广泛应用^[17]。TIMA(TESCAN Integrated Mineral Analyzer)是基于扫描电镜和能谱分析的岩石矿物分析系统,能够实现快速、自动化和定量的矿物学分析^[17-19],在判别沉积环境、物源分析和地层划分等方面得到广泛应用^[20-23]。因此,本文对哈尔滨黄土进行TIMA重矿物组成分析,探讨其物源是否发生变化,这对于解释松嫩平原地貌-气候-粉尘堆积之间的关系具有重要意义。

1 研究区概况

松嫩平原为燕山运动后形成的不对称盆地,南

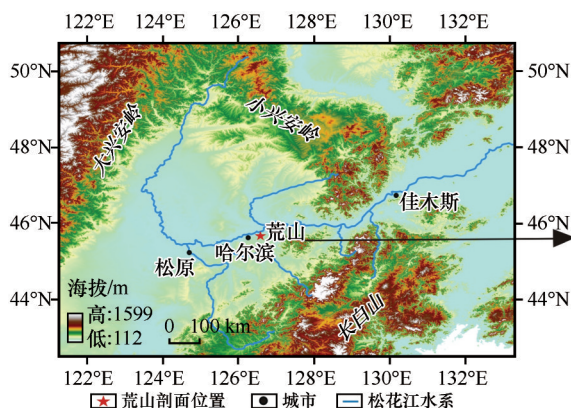


图1 哈尔滨荒山剖面位置

Fig.1 Location of the Huangshan profile in Harbin

2 材料与方法

2.1 剖面介绍与取样

哈尔滨荒山剖面(45°47′24.7″N,126°47′30.2″E)地层连续,出露厚度约为54 m,分为黄土-古土壤序列(0—29.9 m)和河湖相沉积(29.9—54 m)两部分。本文选择黄土-古土壤序列作为研究对象。

参照黄土高原黄土-古土壤序列的命名原则,黄土层命名为L,古土壤层为S,自上而下依次命名为L1、S1、L2、S2、L3、S3,等等,但没有年代含义。哈尔滨黄土可以划分为5个黄土-古土壤旋回。S0(0—1.5 m),黑色现代土壤;L1(1.5—3 m),土黄色黄土;S1(3—6.15 m),灰褐色古土壤,泥砾结构,疏松破碎;L2(6.15—10.9 m),浅黄褐色黄土,见青灰色淤泥团块;S2(10.9—11.9 m),浅灰褐色古土壤;L3(11.9—15.1 m),黄褐色黄土,见铁染及青灰色淤泥团块;S3(15.1—16.8 m),灰褐色古土壤,泥砾结构发育,岩性破碎不成团;L4(16.8—20.3 m),黄褐

以隆起的松辽分水岭为界,北面与小兴安岭相连,西部与大兴安岭接壤,东邻张广才岭,形似菱形^[24]。受地质历史时期地壳抬升的影响,地势较高,海拔200—250 m。哈尔滨位于松嫩平原东北部,海拔较低,地势平坦。冬季在极地大陆冷气团的控制下漫长且寒冷,夏季受太平洋副热带热气团的影响短暂炎热。

哈尔滨荒山又称天恒山,属于哈尔滨道外区团结镇(图1),东部为丘陵,西部紧邻阿什河,位于松花江二级阶地上^[25]。荒山剖面记录着丰富的古气候和古人类活动信息,是中国东北地区具有代表性的第四纪剖面^[26]。



色黄土;S4(20.3—22.5 m),深灰褐色古土壤,白色沉积物发育;L5(22.5—25.95 m),黄土,垂直节理发育;S5(25.95—29.9 m),灰褐色古土壤,结构疏松,泥砾结构十分发育。

自上而下以50—60 cm间距进行取样,共获取53件黄土-古土壤样品用于重矿物分析。在剖面的顶部(0.3、0.7、1.1、1.3 m和3 m)用黑色塑料袋取各2 kg新鲜样品用于¹⁴C测年;在避光条件下把不锈钢管砸进清理好的剖面,在其上部(4.18、5.23 m和5.87 m)获取3件样品用于OSL测年,中部(28.6、30.2 m和30.8 m)获取3件样品用于ESR测年。

2.2 测试方法

2.2.1 年代学测试

采用标准石英单片再生计量法对样品进行OSL测年和ESR测年,具体测年方法见文献[27]。进行¹⁴C测年的5个样品首先用酸-碱-酸法进行前处理,后将处理好的样品装入石英管中并放入1根

银丝进行抽真空加热等过程收集二氧化碳,在石墨制备装置中将二氧化碳还原成石墨,生成的石墨约1 mg。将制备好的石墨和5个美国草酸Ⅱ标准、1个中国糖碳标准以及2个石墨本底送到北京大学重离子物理研究所进行测试,获得样品的¹⁴C年代,样品的年代校正采用牛津大学提供的校正软件,版本为OxCal v4.2^[28]。

2.2.2 TIMA重矿物测试

将获得的53件全样样品进行TIMA重矿物测试分析。样品在实验室自然风干后进行粗淘,然后将全样样品均匀倾倒在直径2.5 cm的环氧树脂靶上,为避免颗粒重叠,对样品靶进行抛光处理。将抛光好的样品靶外部镀一层导电碳涂层以便减少观测时产生的荷电,并增强二次电子或背散射电子信号,获得更好的信噪比。本研究选择高分辨率的解离分析点阵模式,获取BSE图和EDS数据。首先进行电流、BSE信号和ED信号的校准。校准完成后选择样品靶中需要分析测试的区域(包含所有颗粒)将其平均切割成由若干正方形区块;测试分析时以区块为单位,样品台自动位移,扫描完成一个区块后再移动到下一个区块开始扫描;在区块内,BSE拍照和EDS测试以预先设定好的像素参数进行逐点分析;测试完成后,TIMA软件自动拼合统计每个区块内获取的所有BSE图像和EDS数据。通过已获取的BSE图像和EDS数据确定颗粒边界,仪器通过计算将每个像素内的能谱数据在每个颗粒内相加,从而获得每个分析颗粒的能谱数据。依据能谱谱线及测试点元素含量与数据库中的标准或已有矿物能谱谱线和成分进行比对,从而确定该测试点矿物的种类和名称,最后通过离线软件提取<20 μm和20—63 μm粒级的重矿物数据,每个样品鉴定的颗粒数量平均为18 000颗,其中重矿物颗粒数平均10 000颗。将各样品中的轻矿物剔除,重新计算各样品的重矿物质量百分含量,最后得到各个样品的重矿物重量百分比。

2.2.3 传统重矿物测试

为了评估TIMA方法在黄土物源研究的可行性,在L2和S3各选取1件样品并在L4选取2件样品进行传统重矿物鉴定,测试工作在河北廊坊诚信地质服务公司完成。首先将样品进行烘干处理,放入清水中浸泡后,进行初步淘洗,利用三溴甲烷进行轻重矿物分离,分离出的重矿物用酒精反复冲洗

干净后,进行烘干称重,最后在双目镜和偏光镜进行重矿物种类鉴定,每个样品鉴定颗粒数均接近1 000粒。重矿物含量用质量分数表示^[29-31]。

2.2.4 主成分分析(PCA)

为了可视化重矿物数据比较,我们利用R语言provenance程序对重矿物组成进行了主成分分析(PCA)以体现样品间的亲缘关系^[32]。对象的距离越近,说明两者之间的相似性越大。

2.3 重矿物指数的定义与计算

稳定重矿物的质量比值能较好地反映物源特征,这些比值被定义为重矿物特征指数,如ZTR、ATi和GZi等^[33]:

$$ZTR = \text{锆石}\% + \text{电气石}\% + \text{金红石}\% \quad (1)$$

$$ATi = 100 \times \text{磷灰石}\% / (\text{磷灰石}\% + \text{电气石}\%) \quad (2)$$

$$GZi = 100 \times \text{石榴子石}\% / (\text{石榴子石}\% + \text{锆石}\%) \quad (3)$$

3 结果

利用已有的OSL和¹⁴C年龄数据通过线性内插的方法得出荒山剖面黄土-古土壤的底界年龄(约460 ka),由于ESR年龄数据存在潜在误差,故将其用来验证黄土的底界年龄,其值均小于500 ka(表1),证明了年代插值的准确性。由此利用线性内插法进一步计算荒山剖面各个层位的年龄,1.5 m处的年龄为9 ka,3 m处的年龄为25.5 ka,说明在1.5—3 m深度存在沉积间断,其他层位并不存在此现象。L3的底界(15.1 m)年龄为234.2 ka。

TIMA方法检测出的重矿物共61种(图2),两个粒级组分(<20 μm和20—63 μm)重矿物均以钛铁矿(31.48%,28.30%)、赤铁矿(14.50%,12.33%)和帘石类(17.24%,21.79%)占绝对优势;闪石类(9.52%,8.69%)、电气石(6.19%,2.24%)、锆石(3.95%,8.80%)和榍石(3.66%,6.06%)次之;其他矿物(独居石、磷灰石和辉石等)含量较少(<1%)。尖晶石、重晶石和闪锌矿等仅在个别样品中出现。传统方法检测出的重矿物共15种,主要包括锆石、磷灰石、金红石、锐钛矿、白钛石、辉石、钛铁矿、赤褐铁矿和磁铁矿等。

TIMA鉴定的重矿物含量与传统方法相比存在显著的差异(表2),TIMA方法给出的大部分重矿物含量,包括磷灰石、金红石、白钛石、榍石、独居石、电气石和磁铁矿,显著偏高(表2);而锆石、石榴子石、帘石类和辉石偏低;两种方法给出的钛铁矿含

表 1 荒山剖面 OSL、ESR 和 ¹⁴C 测年结果

Table 1 OSL, ESR and ¹⁴C dating results of Huangshan profile in Harbin

样品号	深度/m	K/%	Th/ ^{10⁻⁶}	U/ ^{10⁻⁶}	含水率/%	剂量率/(Gy·ka ⁻¹)	等效剂量/Gy	OSL 年龄/ka	ESR 年龄/ka	¹⁴ C 年龄/a BP	树轮矫正年龄/cal a BP
OSL-1	4.18	2.45±0.05	12.7±0.2	3.1±0.55	11	4.2±0.2	146.6±6.3	35.0±2.8			
OSL-2	5.23	2.47±0.05	12.3±0.2	2.7±0.53	11	4.1±0.2	169.1±18.6	41.6±5.4			
OSL-3	5.87	2.41±0.05	12.7±0.2	3.±10.53	10	4.2±0.2	197.8±12.0	47.4±4.2			
ESR-1	28.6	3.22	12.5	2.13	18.5	3.51	1 698±139		484±40		
ESR-2	30.2	3.16	12.4	2.08	23.7	3.19	1 570±201		492±25		
ESR-3	30.8	3.02	12.1	2.17	36.4	2.52	1 248±78		495±31		
¹⁴ C-1	30									520±25	538±25
¹⁴ C-2	70									1 415±20	1 318±15
¹⁴ C-3	110									5 170±30	5 933±36
¹⁴ C-4	130									5 885±30	6 760±33
¹⁴ C-5	300									21 160±150	25 496±166

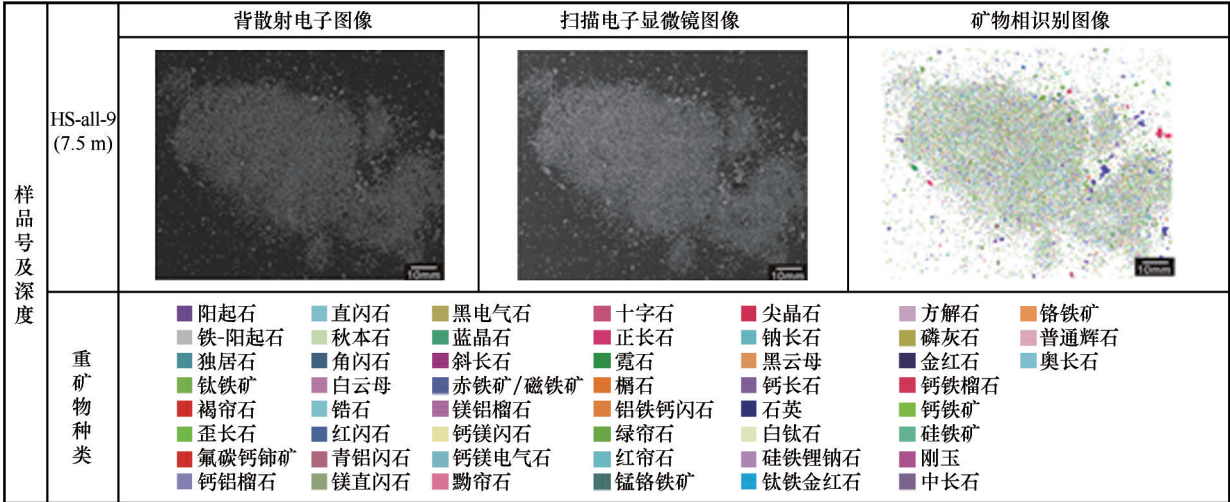


图 2 TIMA 方法鉴定的哈尔滨黄土矿物种类

Fig.2 Mineral types of Harbin loess identified by TIMA method

表 2 两种方法鉴定的重矿物种类及含量 (%)

Table 2 Types and contents (%) of heavy minerals identified by two methods

样品编号	方法	锆石	磷灰石	金红石	锐钛矿	白钛石	榍石	独居石	角闪石	电气石	石榴子石	绿帘石	辉石	钛铁矿	赤褐铁矿	磁铁矿
HS-all-10	传统	7.28	0.39	0.33	0.76	0.93	3.45	0.06	12.51	0.11	1.50	27.53	2.06	26.31	6.56	5.47
	TIMA	9.93	0.76	4.20	0.00	2.51	6.70	0.34	5.52	2.82	1.21	19.14	0.14	29.48	0.00	16.46
HS-all-26	传统	10.63	0.03	0.55	0.81	0.88	4.47	0.36	5.67	0.47	3.07	27.90	0.83	31.92	8.86	0.99
	TIMA	9.38	0.30	4.98	0.00	3.07	6.65	0.59	6.58	3.99	1.52	22.25	0.27	31.80	0.00	7.90
HS-all-31	传统	6.61	0.16	0.34	0.96	0.99	5.11	0.12	9.17	0.47	2.00	23.62	1.41	27.85	8.81	7.99
	TIMA	5.93	0.72	3.93	0.00	3.00	6.46	0.24	8.89	3.08	1.42	22.47	0.29	24.58	0.00	17.83
HS-all-36	传统	10.63	0.17	0.66	1.03	1.44	5.11	0.09	8.66	0.18	2.23	28.20	2.23	24.18	9.37	1.17
	TIMA	7.53	0.60	4.80	0.00	2.91	7.33	0.16	8.30	3.91	1.91	27.85	0.35	25.84	0.00	7.17

量基本一致。要重矿物百分含量和特征指数在 15.1 m (234.2 ka)
两个粒级组分(20—63 μm 和<20 μm)中的主上、下地层具有显著不同的变化特征(图 3)。

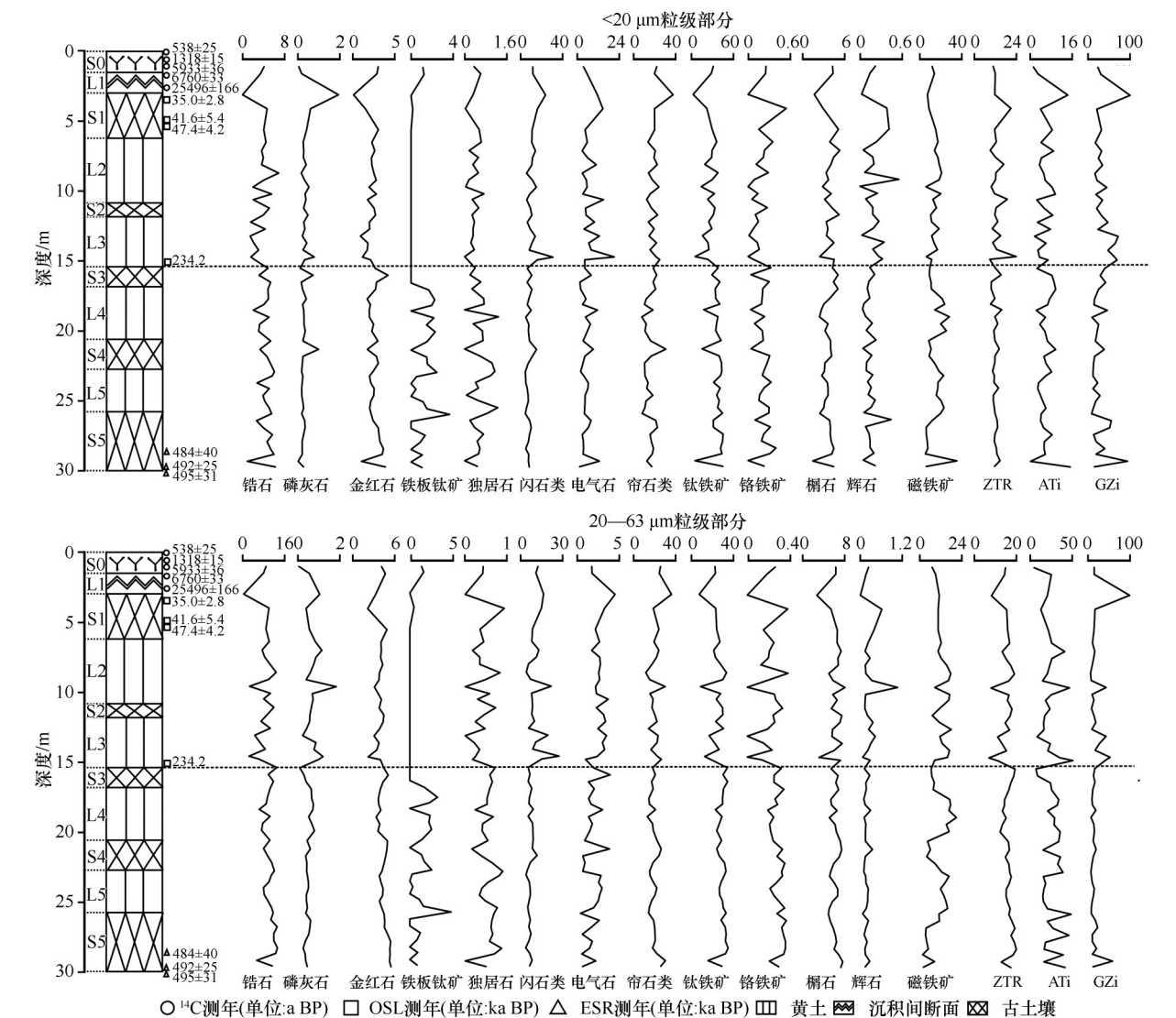


图 3 荒山剖面主要重矿物含量(单位:%)和特征指数随深度变化曲线
Fig.3 Variation curve of main heavy mineral content (unit:%) and characteristics indexes with depth in Huangshan section

将 15.1 m (234.2 ka) 上、下地层的样品的所有重矿物(除偶见矿物)包括锆石、磷灰石、金红石、硅铁矿、白钛石、榍石、独居石、闪石类、电气石、石榴石类、帘石类、辉石、蓝晶石、钛铁矿、铁磁矿物和铁板钛矿作为初始变量进行主成分分析,结果表明哈尔滨黄土上、下地层相似性较弱(图 4)。

4 讨论

4.1 TIMA 方法在物源分析方面的可行性

传统光学方法在岩石形态和结构方面具有独特优势,能够对矿物进行定性分析但无法进行定量

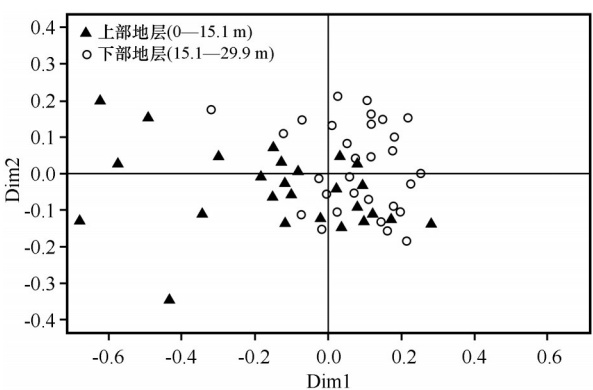


图 4 哈尔滨黄土上、下部地层 PCA 物源判别图解
Fig.4 PCA provenance discrimination of the upper and lower strata in Harbin loess

分析。同一矿物由于鉴定人员以及鉴定环境和时间的差异也会有不同的矿物鉴定结果^[34]。为最大程度减小人为误差,矿物自动识别方法被逐渐应用。目前,基于扫描电子显微镜(SEM)和X射线能量色散谱仪(EDS)相结合的重矿物识别方法(如TIMA和QEMSCAN),被用于分析岩石的矿物种类、微观结构和化学成分等方面^[17]。

对于我们的研究而言,尽管与传统光学鉴定方法相比,TIMA方法能检测出高达61种(包括帘石类、闪石类和石榴石类等)的矿物相,但TIMA鉴定的重矿物含量与传统方法相比存在显著的差异(表2)。TIMA方法不能有效区分金红石和锐钛矿,系统将其统一识别为金红石,是导致金红石含量显著偏高的主要原因。TIMA方法也不能区分赤铁矿/褐铁矿和磁铁矿,系统将赤铁矿/褐铁矿以及其他磁性矿物统一识别为磁铁矿,结果导致磁铁矿的含量偏高。但是,TIMA方法在识别其他同质矿物方面具有绝对优势,根据化学元素含量,可以准确区分不同类型的石榴石(钙铝榴石、钙镁榴石、镁铝榴石和铁铝榴石)和闪石类(红闪石、直闪石和角闪石)等。

综上所述,TIMA方法的优点为分析快、一次性获取的信息量更大,能够实现定量分析,提高了物源分析的准确性,并可以提供丰富的信息,如BSE图、相图和元素图,有助于区分样品内部和样品之间的变化^[17]。近年来,TIMA方法应用范围逐步扩大,结合其与传统方法在矿物种类和含量等方面的共性,表明其可用于黄土物源变化研究。

值得指出的是,已有的源-汇物源研究将岩芯TIMA重矿物数据与物源人工重矿物数据进行对比^[35],然而,鉴于TIMA和人工方法在重矿物组成上的明显差异,我们认为,这两种方法的重矿物数据不宜进行对比。尽管如此,在源-汇系统中,TIMA数据之间的对比是可行的。例如,对于本研究,尽管重矿物含量不同,但两种方法揭示的优势矿物相同,均为钛铁矿、帘石类和闪石类,表明两种方法均能有效地揭示重矿物组成。

4.2 哈尔滨黄土物源变化及成因机制

粉尘的粒度特征可以有效指示粉尘的搬运方式,一般以20 μm 为界^[36-37]。<20 μm 的颗粒组分,在西风环流的作用下一旦从地面被吹起,就会分散在较大的空间范围内,搬运距离可达几百甚至几千米,20—63 μm 的颗粒组分由低空季风环流产生,

可被地表风以短期悬浮的方式搬运几百千米,通常在下风向近距离堆积形成黄土^[38]。因此<20 μm 的细颗粒组分通常来自较远的物源区,而20—63 μm 的粗颗粒被认为来自邻近的粉尘源区^[39]。

黄土的重矿物特征能够有效指示物源变化,可以根据重矿物含量及组合变化特征进行判断^[40-43]。哈尔滨黄土20—63 μm 粒级组分重矿物含量在15.1 m(234.2 ka)上、下部地层存在明显差别(图3),如铁板钛矿、闪石类、锆石、磷灰石、金红石、钛铁矿、铬铁矿、榍石和辉石等。上部地层(0—15.1 m)的铁板钛矿、锆石、金红石、钛铁矿、铬铁矿和榍石含量明显低于下部地层(15.1—29.9 m),而闪石类、磷灰石和辉石含量则显著高于下部地层。此外,上、下部地层的重矿物组合也存在着差别,上部地层重矿物组合为帘石类+钛铁矿+赤铁矿+闪石类,下部重矿物组合为钛铁矿+帘石类+赤铁矿+锆石。值得注意的是,除了铁板钛矿和独居石以外,<20 μm 粒级组分重矿物特征在上、下地层之间并没有表现出明显的变化(图3)。20—63 μm 粒级组分显著的重矿物组成差异可能指示了黄土物源的变化,而<20 μm 粒级组分经过长距离搬运,粉尘得到充分混合,对物源变化的敏感性不如20—63 μm 粒级组分。

重矿物的特征指数可有效减弱自然因素对矿物组成的影响,是物源变化的敏感指标^[44-46],ZTR指数代表矿物成熟度,其空间分布可以指示矿物在运输过程中所遭受的风化和剥蚀的强度,ZTR指数越大说明搬运的距离越远,遭受的风化和剥蚀作用越强,另外,ZTR指数减少的方向和物源方向一致;作为沉积物物源变化的替代指标,ATi指数和GZi指数分别反映了沉积物中磷灰石的风化程度以及石榴子石的稳定性^[47]。磷灰石的稳定性较差,为不稳定矿物,石榴石为中等稳定矿物,它们对沉积物在运输过程中经历的风化作用较敏感,随着搬运距离的增加,不稳定矿物含量大幅度降低,锆石和电气石等稳定矿物含量增加^[47]。20—63 μm 粒级组分重矿物特征指数(ZTR和GZi)在上、下部地层变化趋势存在较大差别(图3),下部地层的ZTR指数(16.0%)大于上部地层(14.0%);而上部地层的GZi指数(23.5%)显著大于下部地层(15.1%)。这种特征指数的差异进一步指示了上、下部地层物源的不同。<20 μm 粒级组分重矿物特征指数在上、下部地层波动趋势变化不明显。

风化作用对物源研究影响较大,为排除风化作用对重矿物特征的影响,本文拟采用稳定系数(W)作为矿物风化强度的指标。 W =不稳定矿物/稳定重矿物, W 值的变化反映了黄土经历风化作用后的稳定程度。 W 值越大,不稳定矿物含量相对较高,稳定矿物含量较低,指示风化作用越弱,相反, W 值越小,指示风化作用强度越大^[33]。上段地层的 W 值为0.6,下段地层的 W 值为0.4。这一特征表明上、下部地层经历的风化作用强度相差较小,所以风化作用并不是导致两组地层重矿物特征变化的主要因素,而物源变化是导致其重矿物特征变化的关键。

目前降维统计学方法已广泛应用于物源研究中,本文为确定黄土上、下部地层物源是否发生变化,对所有样品进行主成分分析(PCA),在PCA图解(图4)中二者距离相差较远,相关性较小,很好地证明了哈尔滨黄土上、下部物源不同。

哈尔滨黄土的物源主要来自近源的松嫩沙地以及远源的浑善达克沙地和科尔沁沙地^[13]。将东北沙地与哈尔滨黄土传统方法鉴别的重矿物特征对比发

现,上部地层表现出与松嫩沙地部分重矿物平均百分含量和重矿物组合有相近或相同的特征。例如,上部地层的锆石、金红石、白钛石、榍石、独居石、电气石和石榴子石含量与松嫩沙地相差较小(表3),稳定重矿物组合也与松嫩沙地相似,但与浑善达克沙地和科尔沁沙地的重矿物特征相似性较弱,只有锆石和白钛石含量与远源沙地的含量较为接近。而下部地层与远源沙地有相近的重矿物特征,浑善达克沙地的金红石、辉石、钛铁矿和赤褐铁矿含量与下部地层差别较小,下部地层的锆石、白钛石、独居石和角闪石与浑善达克沙地和科尔沁沙地重矿物含量差异较小,与松嫩沙地相比差别较大(表3),重矿物组合也与浑善达克沙地相同,为钛铁矿+绿帘石+赤褐铁矿+锆石,与科尔沁沙地的重矿物组合较为相似。所以,下部地层哈尔滨黄土除了接受松嫩沙地的贡献外,也有浑善达克沙地和科尔沁沙地的远源粉尘贡献,而上部地层黄土物源主要来自松嫩沙地,远源沙地的贡献较少。因此,哈尔滨黄土物源变化反映了远、近源区的相对粉尘贡献的变化。

表3 哈尔滨黄土与东北沙地重矿物含量(%)对比

Table 3 Comparison of heavy mineral content (%) between Harbin loess and northeast sandy land

采样点	锆石	磷灰石	金红石	锐钛矿	白钛石	榍石	独居石	角闪石	电气石	石榴子石	绿帘石	辉石	钛铁矿	赤褐铁矿	磁铁矿	磁钛铁矿
上部地层	7.30	0.40	0.30	0.80	0.90	3.50	0.10	12.50	0.10	1.50	27.60	2.10	26.30	6.60	5.50	0.00
松嫩沙地	6.70	1.40	0.70	0.20	0.80	3.70	0.10	17.90	0.40	1.30	23.20	0.70	11.70	13.70	12.70	0.00
浑善达克沙地	9.70	1.30	1.00	1.00	0.90	0.80	0.60	8.70	3.40	6.40	11.00	9.20	21.10	3.60	6.60	9.20
科尔沁沙地	7.10	1.90	2.50	1.40	0.70	1.90	0.80	7.20	1.90	12.80	17.90	9.40	23.60	5.40	0.10	0.00
下部地层	9.30	0.10	0.50	0.90	1.10	4.90	0.20	7.80	0.40	2.40	26.60	1.50	28.00	9.00	3.40	0.00

粉尘搬运的大气环流模式主要包括冬季风和西风环流两种方式,西风环流被认为是细颗粒粉尘搬运的主要营力^[48]。第四纪期间大气环流整体呈现西风环流减弱,冬季风环流增强的趋势^[33]。在松嫩平原干旱化程度增强之前,由于松嫩沙地的规模尚小,不足以完全控制哈尔滨黄土的物源,而浑善达克和科尔沁沙地的远源粉尘可以通过高空西风环流以及近地表的冬季风搬运至哈尔滨,从而导致哈尔滨黄土的下部地层有更多比例的远源粉尘贡献。

黄土堆积的出现代表着部分区域或全球气候干旱化的开始^[49]。自上新世以来,亚洲内陆干旱化有一种急剧向东扩展的趋势^[50],作为亚洲内陆干旱化向东扩展最前端的哈尔滨黄土,其粒度(>63

μm)、Sr同位素和Rb/Sr比值表明,自—0.46 Ma(哈尔滨黄土的底界年龄)以来,其源区呈现出长期的干旱化趋势^[51]。松嫩沙地作为哈尔滨黄土的主要源区,其形成与松嫩平原干旱化密切相关。松嫩平原干旱化过程受全球冰量增加、区域构造和水系演化的共同控制^[52]。中更新世时期,松辽分水岭逐步抬升使松嫩湖盆水系发生调整,松嫩古湖逐渐趋于干涸^[53],同时在全球气候变冷的背景下,裸露在地表的湖床沉积物被加强的冬季风搬运为黄土提供了部分粉尘颗粒。因此,234.2 ka以来,随着松嫩平原干旱化程度的加强,松嫩沙地面积逐渐扩大,在增强的冬季风作用下,为哈尔滨黄土上段地层提供更多的粉尘颗粒。干旱化程度的加剧促使粉尘源区范围扩展的现象也在邻区黄土研究中得到证实。

川西甘孜黄土剖面的古土壤化学风化程度在250 ka显著降低,且C₄植被也发生了扩张,印证了中国干旱区环境在250 ka出现重大变化这一推测^[54]。前人对北京黄土的研究发现,黄土粒度在250 ka左右发生了突变,粗颗粒组分数目明显增加,指示其源区范围在250 ka左右发生了明显扩张,结合太平洋西部粉尘通量在0.3 Ma前后突然增加的现象,进一步说明该时期中国北部地区存在着显著的干旱化加剧事件^[55]。综上所述,气候干旱化加剧导致松嫩沙地粉尘源区范围扩大,是哈尔滨黄土物源发生变化的主要原因。

在气候干旱化的背景下,哈尔滨黄土物源在冰期-间冰期是否发生改变,一直是黄土物源研究的热点内容。黄土是冰期的产物,而古土壤是间冰期的产物,黄土物源可能由于受到冰期-间冰期地表风向和强度变化的影响而产生规律性的周期变化^[56]。间冰期夏季风加强带来了大量降水和密集的植被覆盖,粉尘源区向西撤退;相比之下,冰期冬季风加强导致降水减少,裸露的河床和湖床面积增大,植被覆盖稀疏,使粉尘源区向东扩展^[57]。哈尔滨黄土-古土壤序列在L3/S3之间发生了物源变化,似乎表明在L3-S3旋回内,冰期与间冰期物源发生了变化。但在上、下地层范围内,并没有体现出黄土与古土壤明显的物源差异。分别作为S3和S2的成土母质,L4和L3并没有分别体现出与S3和S2的物源差异。因此,现有的数据尚不能清晰显示哈尔滨黄土在冰期-间冰期时间尺度上物源是否发生明显变化。

5 结论

TIMA方法在重矿物鉴定种类、大样本分析和识别效率上具有绝对优势,然而在识别一些同质多象矿物(如:TiO₂族多晶型矿物、赤铁矿/褐铁矿和磁铁矿)上表现欠佳。TIMA和传统方法在识别的重矿物组成上存在一定差异,但揭示的重矿物组合(钛铁矿、帘石类和闪石类)基本一致,表明两种方法均能有效地揭示哈尔滨黄土的重矿物组成。

哈尔滨黄土-古土壤序列20—63 μm组分的重矿物含量和优势矿物组合在15.1 m(234.2 ka)上下地层存在显著差异,具体表现在上部地层(0—15.1 m)的铁板钛矿、锆石、金红石、钛铁矿、铬铁矿和榍石含量明显低于下部地层(15.1—29.9 m),而闪石类、

磷灰石和辉石含量则显著高于下部地层。上部地层重矿物组合为帘石类+钛铁矿+赤铁矿+闪石类,而下部重矿物组合为钛铁矿+帘石类+赤铁矿+锆石。重矿物特征指数(ZTR和GZi)和PCA分析的差异进一步指示了上、下部地层的物源不同。经过长途搬运充分均匀混合的<20 μm组分没有明显反映出上下地层物源的差异。

哈尔滨黄土下部地层除了接受松嫩沙地的贡献外,也有浑善达克沙地和科尔沁沙地的远源粉尘贡献。然而,随着松嫩平原干旱化程度不断增强,松嫩沙地面积逐渐扩大,在增强的冬季风作用下,松嫩沙地为哈尔滨黄土上段地层提供了更多的粉尘颗粒,远源贡献显著减少。逐渐增强的气候干旱化是哈尔滨黄土物源变化的根本原因。

致谢: TIMA重矿物实验得到河北廊坊诚信地质公司的张晏子、李鹏和王根涛的大力支持,传统重矿物实验得到了张佩莹、李鹏和张云丹的帮助,研究生刘硕、张瑞和孙杨参加了部分取样工作,研究生赵倩、李思琪、李秋杭、徐园园、孙建华、侯心茹、冷宇坤和魏春艳参与了实验室样品处理工作,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] Xie Y Y, Kang C G, Chi Y P, et al. The loess deposits in North-east China: the linkage of loess accumulation and geomorphic-climatic features at the easternmost edge of the Eurasian loess belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 181: 103914.
- [3] Nie J, Peng W, Moller A, et al. Provenance of the upper Miocene-Pliocene Red Clay deposits of the Chinese loess plateau[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2014, 407: 35–47.
- [4] Kapp P, Pullen A, Pelletier J D, et al. From dust to dust: quaternary wind erosion of the Mu Us Desert and Loess Plateau[J]. *Geology*, 2015, 43(9): 253–259.
- [5] 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(4/5): 4–10.
- [6] 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(2): 175–183.
- [7] Xiao G, Zong K, Li G, et al. Spatial and glacial-interglacial variations in provenance of the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(20): 20715.
- [8] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 159–163.
- [9] Lu H Y, Yi S W, Xu Z W, et al. Chinese deserts and sand fields

- in Last Glacial Maximum and Holocene Optimum[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(23): 2775–2783.
- [10] 万琳琪, 朱丽东, 彭淑贞, 等. 鲁中山地北麓黄土-古土壤黏土矿物组成及古环境意义[J]. 第四纪研究, 2020, 40(6): 1522–1530.
- [11] Sun J M. Provenance of loess material and formation of loess deposits on the Chinese Loess Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203(3): 845–859.
- [12] Sun J M. 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.
- [13] 杜慧荣, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨黄土的粒度与地球化学特征及其对粉尘物源的指示[J]. 中国沙漠, 2020, 40(1): 64–76.
- [14] 谢远云, 孙磊, 康春国, 等. 松嫩沙地 Sr–Nd 同位素组成特征[J]. 沉积学报, 2020, 38(4): 771–780.
- [15] 张诚. 阿拉善沙漠风积砂重矿物组成及物源分析[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- [16] 王嘉新, 谢远云, 康春国, 等. 哈尔滨荒山岩芯重矿物特征对松花江第四纪水系演化的指示[J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 79–94.
- [17] 陈倩, 宋文磊, 杨金昆, 等. 矿物自动定量分析系统的基本原理及其在岩矿研究中的应用: 以捷克泰思肯公司TIMA为例[J]. 矿床地质, 2021, 40(2): 345–368.
- [18] HrsTka T, GOTTLieb P, Skála R, et al. Automated mineralogy and petrology-applications of TESCAN Integrated Mineral Analyzer (TIMA) [J]. Journal of Geosciences, 2018, 63(1): 47–63.
- [19] 谢小敏, 李利, 袁秋云, 等. 应用TIMA分析技术研究Alum页岩有机质和黄铁矿粒度分布及沉积环境特征[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 50–60.
- [20] Haberlah D, Williams M A J, Halverson G, et al. Loess and floods: high-resolution multi-proxy data of Last Glacial Maximum (LGM) slackwater deposition in the Flinders Ranges, semi-arid South Australia [J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(19): 2673–2693.
- [21] Martin R S, Mather T A, Pyle D M, et al. Composition-resolved Size Distributions of Volcanic Aerosols in the Mt. Etna Plumes [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008, 113: D17211.
- [22] Speirs J C, McGowan H A, Neil D T. Polar eolian sand transport: grain characteristics determined by an automated scanning electron microscope (QEMSCAN & reg) [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2008, 40(4): 731–743.
- [23] Meyer M C, Austin P, Tropper P. Quantitative evaluation of mineral grains using automated SEM-EDS analysis and its application potential in optically stimulated luminescence dating [J]. Radiation Measurements, 2013, 58: 1–11.
- [24] 吴鹏, 谢远云, 康春国, 等. 早更新世晚期松花江水系袭夺: 地球化学和沉积学记录[J]. 地质学报, 2020, 94(10): 3144–3160.
- [25] 王璟璐. 松花江哈尔滨段阶地的研究[J]. 地理科学, 1993(1): 87–90.
- [26] 王永, 董进, 杨劲松. 哈尔滨荒山剖面第四纪地层研究[J]. 地球科学, 2020, 45(7): 2662–2672.
- [27] 张月馨, 迟云平, 谢远云, 等. 中更新世以来哈尔滨黄土有机碳同位素组成及其古气候意义[J]. 地球学报, 2020, 41(4): 525–534.
- [28] 尹金辉, 郑勇刚, 刘粤霞. 古地震¹⁴C年龄的日历年代校正[J]. 地震地质, 2005(4): 678–688.
- [29] 中国地质科学院地矿所. 砂矿物鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 1977: 58–63.
- [30] 沈丽琪. 沉积岩重矿物研究中的几个重要概念及其应用[J]. 中国科学B辑, 1985(1): 70–78.
- [31] 马婉仙. 重砂测量与分析[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [32] Vermeesch P. Multi-sample comparison of detrital age distributions[J]. Chemical Geology, 2013, 341(2): 140–146.
- [33] 康春国, 李长安, 谢远云, 等. 哈尔滨地区风尘黄土重矿物特征及物源分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 43–51.
- [34] Zhang X J, Pease V, Omma J, et al. Provenance of Late Carboniferous to Jurassic sandstones for southern Taimyr, Arctic Russia: a comparison of heavy mineral analysis by optical and QEMSCAN methods [J]. Sedimentary Geology, 2015, 329: 166–176.
- [35] Zhu B, Zeng Z. Heavy mineral compositions of sediments in the southern Okinawa Trough and their provenance-tracing implication[J]. Minerals, 2021, 11(11): 1191.
- [36] Crouvi O, Amit R, Enzel Y, et al. Sand dunes as a major proximal dust source for late Pleistocene loess in the Negev Desert, Israel[J]. Quaternary Research, 2008, 70(2): 275–282.
- [37] Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation[J]. Sedimentology, 1987, 34(1): 139–153.
- [38] Sun D H. Monsoon and westerly circulation changes recorded in the late Cenozoic aeolian sequences of Northern China[J]. Global & Planetary Change, 2004, 41(1): 63–80.
- [39] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Bimodal grain-size distribution of Chinese loess, and its palaeoclimatic implications [J]. Catena, 2004, 55(3): 325–340.
- [40] 林洪, 李凤杰, 李磊, 等. 柴达木盆地北缘古近系重矿物特征及物源分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(4): 532–541.
- [41] 何苗, 姜勇, 张恒, 等. 准噶尔盆地西北缘三叠系重矿物特征及其物源指示意义[J]. 地质论评, 2019, 65(2): 464–476.
- [42] Sevastjanova I, Hall R, Alderton D. A detrital heavy mineral viewpoint on sediment provenance and tropical weathering in SE Asia[J]. Sedimentary Geology, 2012, 280: 179–194.
- [43] 陈心怡, 黄奇瑜, 邵磊. 福建闽江和九龙江现代沉积物重矿物特征及其物源意义[J]. 古地理论, 2018, 20(4): 637–650.
- [44] 李伟歌. 滇东南中三叠世富宁皈朝盆地物源分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [45] 康春国, 李长安, 王节涛, 等. 江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示[J]. 地球科学(中国地质大学学报),

- 2009, 34(3): 419–427.
- [46] 许苗苗, 魏晓椿, 杨蓉, 等. 重矿物分析物源示踪方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(2): 154–171.
- [47] Zhang C, Li Z L, Chen Q J. Provenance of eolian sands in the Ulan Buh Desert, northwestern China, revealed by heavy mineral assemblages[J]. *Catena*, 2020, 193: 104624.
- [48] 孙东怀, 鹿化煜. 晚新生代黄土高原风尘序列的粒度和沉积速率与中国北方大气环流演变[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 251–262.
- [49] 孙有斌, 安芷生. 晚新近纪亚洲内陆的干旱化趋势[J]. 地学前缘, 2002(2): 285–286.
- [50] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stepwise expansion of desert environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(1/2): 45–55.
- [51] Wu P, Xie Y Y, Chi Y P, et al. Loess accumulation in Harbin with implications for late Quaternary aridification in the Songnen Plain, Northeast China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2021, 570(1): 110365.
- [52] 赵倩, 谢远云, 郝冬梅, 等. 松嫩平原中更新世以来气候干旱化: 来自哈尔滨黄土记录[J]. 沉积学报, 2021, doi: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.054.
- [53] 王庆, 杨景春. 松辽分水岭东段白土山组成因与时代[J]. 地层学杂志, 1995, 19(4): 287–290.
- [54] 史正涛, 方小敏, 宋友桂, 等. 天山北坡黄土记录的中更新世以来干旱化过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 109–114.
- [55] 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 北京邻区 1.2 Ma 以来黄土沉积及其对东部沙漠扩张的指示[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 70–76.
- [56] 陈骏, 李高军. 亚洲风尘系统地球化学示踪研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(9): 1211–1232.
- [57] Xie Y Y, Liu L, Kang C G, et al. Sr-Nd isotopic characteristics of the northeast sandy land, China and their implications for tracing sources of regional dust [J]. *Catena*, 184: 104303–104303.

Changing provenance of Harbin loess since the Middle Pleistocene: evidence from TIMA automated quantification of minerals

Wang Jinqui^{1a}, Xie Yuanyun^{1ab}, Kang Chunguo², Chi Yunping^{1ab}, Sun Lei^{1a}, Wu Peng^{1a}, Wei Zhenyu^{1a}

(1. a. College of Geographic Science / b. Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China; 2. School of Geography and Tourism, Harbin University, Harbin 150086, China)

Abstract: Loess contains abundant paleoclimatic information, and an understanding of its provenance variability is essential for understanding the climate aridification of inland Asia, atmospheric circulation patterns, and the evolution of the Asian monsoon. The large outcrop thickness and stratigraphic continuousness of Harbin Huangshan section, preserve the most complete loess-paleosol sequence in the Songnen Plain. Heavy minerals are widely used in river source-to-sink studies, but are relatively rare in aeolian sediments. Quantitative mineralogical methods are fast in analysis and can obtain a large amount of data in a relatively short time. Therefore, the TIMA (TESCAN Integrated Mineral Analyzer) automated quantitative mineral analysis and chronological tests (OSL, ESR and ¹⁴C) were performed on the Harbin loess-paleosol sequences with a view to understanding provenance change on glacial-interglacial time scale. The results showed that the mineral species identified by the TIMA method were higher than conventional method. Despite some differences in the identification results of the two methods, the revealed heavy mineral assemblages are basically the same. The loess-paleosol sequence is characterized by distinctly different variations of pseudobrookite, amphibole, zircon, apatite, rutile, ilmenite, chromite, titanite, pyroxene and heavy mineral characterization indices (e.g., ZTR and GZi) in the 20–63 μm fraction of the upper and lower strata at 15.1 m (~234.2 ka). However, the <20 μm fraction does not exhibit such characteristics, with the exception of pseudobrookite and monazite. Differences in the heavy mineral composition of the upper and lower horizons of the loess-paleosol sequence are indicative of changes in the provenance of the Harbin loess. Below 15.1 m, Harbin loess not only receives the contribution of near-source dust from Songnen Sandy Land, but also has the contribution of dust from distant sources (i.e., Onqin Daga Sandy Land and Horqin Sandy Land). With the intensification of aridification climate, the expansion of the extent of Songnen Sandy Land has led to a decrease in the proportion of distant source contribution and a significant increase in the near source contribution of loess accumulation above 15.1 m. In other words, the expansion of the dust source area of the Songnen Sand Land due to enhanced climatic aridification is the main reason for the provenance change of the Harbin loess.

Key words: Harbin; loess; heavy minerals; TIMA analysis; provenance change; aridification