

doi:10.3799/dqkx.2017.538

丰宁黄土—古土壤剖面常量元素地球化学特征

毛欣¹, 刘林敬¹, 李长安^{2*}, 张玉芬³, 赵红梅¹, 毕志伟¹, 姜高磊¹

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘要: 丰宁滦河上游的河谷地带有多处黄土堆积, 由于该地区黄土分布零星、厚度较小, 在以往的研究中却很少引起人们的关注, 然而该地区黄土堆积是河北坝上地区环境演化和气候变化的重要地质记录。为了探讨该地区黄土的成因、物源以及化学风化强度, 选取代表性的黄土—古土壤剖面 77 个样品进行了常量元素分析, 并与已知典型风成堆积物的地球化学元素特征进行对比。结果表明: (1) 丰宁剖面的主要常量元素 (SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3) 之和以及 UCC (Upper Continental Crust) 标准化曲线均与典型风成堆积物具有较好的相似性, 表明丰宁黄土和古土壤为风成成因; (2) 丰宁黄土处于初等化学风化阶段, 古土壤则进入了中等化学风化阶段。与典型风成堆积物相比, 化学风化强度序列为: 宣城风成红土 >> 西峰红黏土、镇江下蜀土 > 丰宁古土壤、洛川古土壤 > 洛川黄土 > 丰宁黄土; (3) 常量元素迁移特征表明丰宁黄土和古土壤的化学风化已完成了早期去 Na、Ca 阶段, 并进入到了中期去 K 阶段; (4) 丰宁黄土、古土壤的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与洛川黄土、洛川古土壤、镇江下蜀土、西峰红黏土较为接近, 表明这些风成堆积物可能具有相似的源区。而 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值小于其他风成堆积物, 指示丰宁剖面具有其他物源。

关键词: 丰宁黄土—古土壤; 成因; 化学风化强度; 元素迁移; 物源; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2017)10-1750-10

收稿日期: 2016-12-29

Elemental Composition Features of Loess-Paleosol Profile in Fengning, Hebei Province

Mao Xin¹, Liu Linjing¹, Li Chang'an^{2*}, Zhang Yufen³, Zhao Hongmei¹, Bi Zhiwei¹, Jiang Gaolei¹

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The loess deposited in the upper reaches of the Luanhe River valley is an important geological record of past palaeoclimate and palaeoenvironment in the Bashang Plateau of Hebei Province. Due to the scattered distribution and small thickness of the loess in this region, it has attracted little attention in previous studies. In order to discuss the genesis, provenance and chemical weathering intensity of loess in this region, the elemental composition analysis of 77 samples from typical loess-paleosol profile was carried out and compared with known typical aeolian deposits. The results show that: (1) The sum of major elements (SiO_2 , Al_2O_3 and Fe_2O_3) and UCC (Upper Continental Crust)-normalized patterns of Fengning profile are similar to those of typical aeolian deposits, indicating that Fengning loess and paleosol were aeolian; (2) Fengning loess underwent weak chemical weathering and paleosol underwent moderate chemical weathering. Compared with the typical aeolian deposits, the sequence of chemical weathering intensity is as follows: Xuancheng aeolian red earth >> Xifeng red clay and Zhenjiang Xiashu loess > Fengning paleosol and Luochuan paleosol > Luochuan loess > Fengning loess; (3) The migration feature of major elements reveal that Fengning loess and paleosol finished the primary process of chemical weathering characterized by leaching of Ca and Na, and almost reached the secondary process characterized by leaching of K; (4) The scatter diagram of $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ are similar to that of Luochuan loess, Luochuan paleosol, Zhenjiang Xiashu loess and Xifeng red

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41602194); 中国地质科学院基本科研业务费专项 (No. YWF201411)。

作者简介: 毛欣 (1989-), 男, 研究实习员, 主要从事第四纪环境演变方面的研究。ORCID: 0000-0001-7384-590X。

E-mail: maoxin.ihg@hotmail.com

* **通讯作者:** 李长安, ORCID: 0000-0002-7401-0725. E-mail: chanli@cug.edu.cn

引用格式: 毛欣, 刘林敬, 李长安, 等. 2017. 丰宁黄土—古土壤剖面常量元素地球化学特征. 地球科学, 42(10): 1750-1759.

clay, indicating that these aeolian deposits might have the same source. The ratio of TiO_2/Al_2O_3 is less than that of other aeolian deposits, indicating that Fengning loess and paleosol have other source.

Key words: Fengning loess-paleosol; genesis; chemical weathering intensity; element migration; provenance; geochemistry.

黄土具有分布广泛、沉积连续、年代可靠的特点,是研究全球过去气候变化的良好载体(刘东生, 1997).黄土高原是中国黄土分布最连续、厚度最大的区域,因此受到了国内外学者的广泛关注,并且各个方面都取得了丰硕的成果(An *et al.*, 1991; Sun, 2002; Sun *et al.*, 2006),例如利用黄土高原的黄土—古土壤序列来重建第四纪气候变化与内陆干旱化历史变迁等(An *et al.*, 1990; Guo *et al.*, 2002).由于全球气候变化又受到区域气候变迁的影响,近年来,除黄土高原以外的风成堆积物也逐渐成为热点研究内容,如新疆地区黄土(Fang *et al.*, 2002)、长江中下游地区下蜀土(Chen *et al.*, 2008)、皖南地区风成红土(李徐生等, 1999)、长江上游地区巫山黄土(李长安等, 2013)以及东北地区黄土(魏传义等, 2015)等.丰宁滦河上游的河谷地带有多处黄土堆积,由于该地区黄土分布零星、厚度较小,在以往的研究中很少引起人们的关注.然而该地区地处内蒙古高原—燕山山地—华北平原的过渡带,是我国农牧交错带的重要组成部分,具有典型的气候环境敏感性和生态脆弱性,因此对该地区黄土地层的研究对于认识区域气候环境演化及其对全球气候变化的响应具有重要意义.

2015 年野外考察期间,我们在丰宁土城镇境内的河谷地带发现了一套沉积连续、具有明显黄土—古土壤序列的堆积剖面,对于这套黄土剖面的成因和物质来源尚不清楚.由于这套黄土剖面位于滦河上游的河谷盆地内,其成因一方面可能为冲积成因,

即滦河将成土物质搬运堆积而成;而另一方面则可能与中国北方典型黄土一样同为风成成因.如果为风成成因,那么其物源可能与黄土同源,也可能为近源堆积.地球化学元素作为一种常用指标,被很好地应用于黄土成因和物源等方面的研究中(曾方明等, 2014).风尘堆积物中的主要化学成分基本一致,且与地壳平均化学成分相似(刘东生, 1985),因此通过与典型风成堆积物中地球化学元素特征进行对比,可以判断其成因.同时沉积物中某些稳定元素在风化、搬运和沉积阶段通常保留了其沉积母岩的信息,因此可以利用元素比值来判别其物源(Hao *et al.*, 2010).丰宁剖面具有明显的黄土—古土壤序列,说明其在堆积后遭受了不同程度的风化和改造,剖面化学风化程度的研究对于揭示该地区气候环境变化具有重要意义.

鉴于此,本文以丰宁地区这套具有明显黄土—古土壤序列的剖面为研究对象,通过对该剖面的地球化学元素记录,结合前人对洛川黄土、洛川古土壤、镇江下蜀土、西峰红黏土以及安徽宣城风成红土地球化学元素的研究结果,对丰宁剖面的成因、物源以及化学风化强度等方面进行探讨.

1 研究剖面及特征

研究区地处滦河上游河谷盆地之中,属低山丘陵地带,地势由南向北增高,平均海拔 1 020 m(图 1b).气候属于半湿润半干旱季风型高原山地气候,

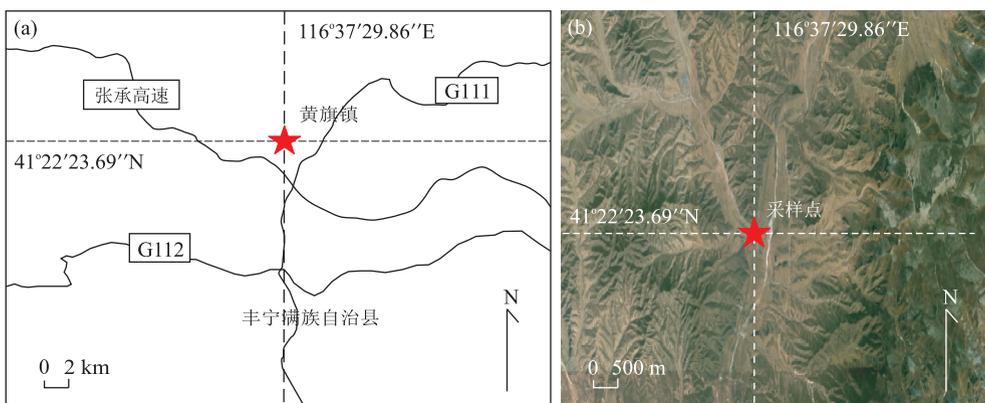


图 1 丰宁剖面地理位置(a)和地貌位置(b)

Fig.1 Regional location (a) and geomorphic location (b) of the Fengning profile

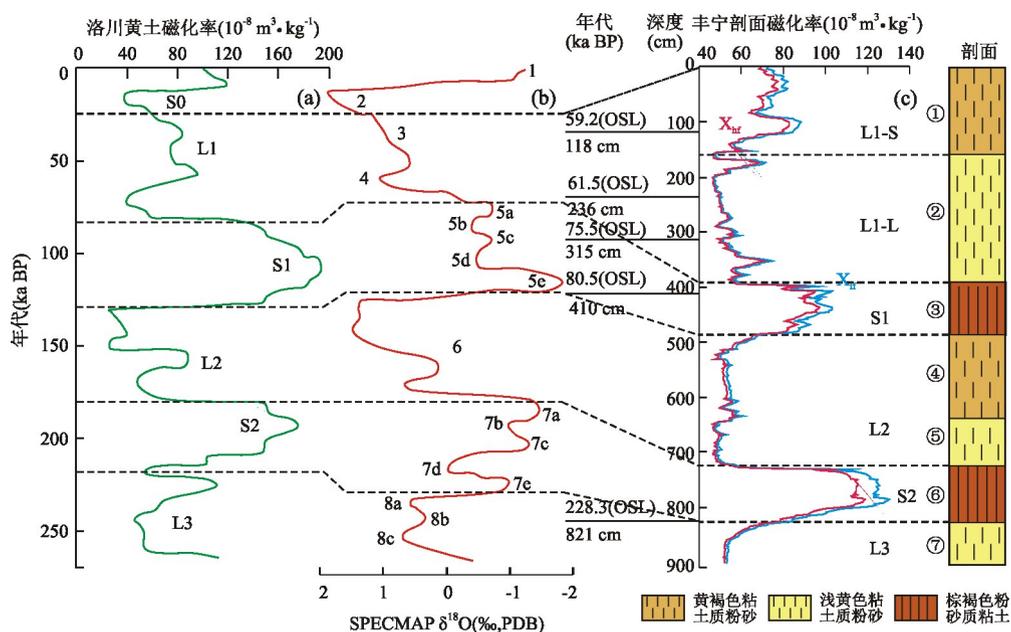


图 2 丰宁剖面磁化率曲线(c)与洛川黄土磁化率(a)、深海氧同位素曲线(b)的对比

Fig.2 The variations of magnetic susceptibility in the Fengning profile (c) compared with that of loess in Luochuan (a) and the $\delta^{18}\text{O}$ from SPECMAP (b)

图 a 据 Heller and Liu(1982);图 b 据 Martinson *et al.*(1987);图 c 中蓝色和红色曲线分别代表低频磁化率 X_{lf} 和高频磁化率 X_{hf}

表 1 丰宁剖面光释光(OSL)测年结果

Table 1 Optically Stimulated Luminescence (OSL) dating in the Fengning profile

样品编号	埋深(m)	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	K(%)	ED(Gy)	D_y (Gy/ka)	含水量(%)	年龄(ka)
FN1-1	1.18	1.71	8.92	1.84	192.36 \pm 7.02	3.25 \pm 0.13	16.44	59.2 \pm 3.2
FN1-2	2.36	1.52	8.00	1.94	203.51 \pm 2.36	3.31 \pm 0.13	9.33	61.5 \pm 2.6
FN1-3	3.15	1.75	8.35	1.97	255.48 \pm 8.61	3.38 \pm 0.14	11.81	75.5 \pm 4.0
FN1-4	4.10	2.21	11.51	2.03	305.14 \pm 9.30	3.79 \pm 0.15	15.47	80.5 \pm 4.0
FN2-4	8.21	1.67	8.73	2.08	787.34 \pm 13.73	3.45 \pm 0.14	11.61	228.3 \pm 10.0

注:ED 为等效剂量(equivalent dosimeter); D_y 为年剂量(yearly dosimeter)。

年平均气温 5.5 °C, 年降水 400~500 mm. 丰宁剖面位于河北省丰宁满族自治县县城北部 30 km 处的土城镇境内(41°22'23.69"N, 116°37'29.86"E; 图 1a), 为修路新开挖的露头剖面. 该剖面厚约 22 m, 出露完整, 具有明显的黄土-古土壤序列. 本文选取有光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)年龄点控制的 0~9 m 剖面作为研究对象, 根据剖面沉积物的颜色、岩性等特征, 自上而下将剖面分为 7 层(图 2c). 层①为褐黄色粘土质粉砂, 结构较密实, 可见现代植物根系; 层②为灰黄色粘土质粉砂, 纵向节理发育; 层③为棕褐色粉砂质粘土, 呈团块状分布, 见植物根系及根痕, 铁锰薄膜较发育; 层④为黄褐色粘土质粉砂, 结构疏松, 有清晰的较密集裂隙发育, 底部见 CaCO_3 结核层; 层⑤为灰黄色粘土质粉砂, 结构疏松; 层⑥为棕褐色粉砂质粘土, 成团块状分布, 底部见 CaCO_3 结核层; 层⑦为灰黄色粘土质粉砂, 结构疏松. 笔者根据野

外观测可以初步判断层①、层②、层④、层⑤和层⑦为黄土层, 其中层①为黄土中弱发育的古土壤层; 层③和层⑥为古土壤层.

2 样品采集和测试

采样时去除剖面表层土, 自上而下以 2 cm 间隔连续取样, 9 m 的剖面共采集样品 450 件. 室内根据岩性变化特征不等间距送测了地球化学元素样品 77 件, 磁化率样品 378 件以及光释光(OSL)年龄样品 5 件.

地球化学元素测试在南京师范大学完成. 采用荷兰帕纳科(PANalytica)XRF(X Ray Fluorescence)光谱仪进行主要常量元素测试. 具体操作步骤为: 取 5 g 烘干的样品, 研磨至 200 目以下, 用硼酸做辅助, 压制成片后进行测定, 测量误差低于 10%.

表 2 丰宁黄土和古土壤常量元素含量(%)及其与其他风成堆积物的比较

Table 2 The element contents (%) of the Fengning profile and other aeolian dust deposits

采样位置		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	CIA
丰宁黄土 n=63	最大值	64.38	14.05	5.41	2.54	1.88	9.46	2.40	0.07	0.43	0.06	67.34
	最小值	45.99	9.67	3.52	1.96	1.25	1.02	1.46	0.04	0.31	0.02	53.59
	平均值	54.33	11.79	4.46	2.23	1.55	4.90	1.96	0.06	0.36	0.04	61.00
丰宁古土壤 n=14	最大值	61.39	14.77	5.46	2.41	1.35	3.60	2.07	0.07	0.42	0.04	70.68
	最小值	55.75	12.47	4.55	2.22	1.09	1.06	1.61	0.04	0.37	0.02	65.97
	平均值	59.10	13.49	5.15	2.31	1.21	1.69	1.86	0.06	0.41	0.03	67.56
洛川黄土 n=12	平均值	66.40	14.20	4.81	3.01	1.66	1.02	2.29	0.07	0.73	0.15	63.73
洛川古土壤 n=13	平均值	65.18	14.79	5.12	3.15	1.41	0.83	2.21	0.08	0.75	0.11	67.36
镇江下蜀土 n=54	平均值	68.07	13.32	5.30	2.35	0.92	1.00	1.61	0.09	0.81	0.18	70.45
西峰红黏土 n=5	平均值	63.75	15.05	5.28	3.00	1.16	0.90	2.89	0.08	0.76	0.15	69.11
宣城风成红土 n=64	平均值	68.77	13.71	6.52	1.38	0.14	0.11	0.54	0.04	1.06	0.06	87.55
上陆壳(UCC)	平均值	66.00	15.20	5.00	3.40	3.90	4.20	2.20	0.06	0.50	0.50	47.92
陆源页岩	平均值	62.80	18.90	7.22	3.70	1.20	1.30	2.20	0.11	0.16	1.00	70.36

磁化率测试在中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室完成,采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪进行测试.所有样品烘干后,在不损害自然颗粒的前提下,用玛瑙研钵磨至粉末状,装入 10 cm³ 无磁性圆柱形聚乙烯盒内,压实,称重,然后进行测量.每个样品测量 2 次,取其平均值.

光释光测年(OSL)在中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室完成,采用仪器为 Daybreak 2200(美国)光释光仪.测年结果见表 1.

3 结果与讨论

3.1 丰宁剖面黄土—古土壤序列的建立

洛川黄土—古土壤序列及其磁化率曲线可与深海氧同位素曲线进行很好的对比,因而可以借用洛川黄土—古土壤序列的磁化率曲线以及深海氧同位素阶段的平均年龄标记相应的黄土和古土壤年龄(安芷生等,1989).丰宁剖面中低频磁化率与高频磁化率变化幅度较大,其波动范围分别为 $46.42 \times 10^{-8} \sim 130.14 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $46.28 \times 10^{-8} \sim 118.64 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $68.76 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $65.57 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$.磁化率曲线峰谷波动旋回规律比较明显,具有 2 个明显的峰值段、1 个次峰值段和 3 个低值段.峰谷态势的变化与野外岩性地层划分具有很好一致性,即磁化率峰值段对应于剖面古土壤层,谷值段对应于剖面黄土层(图 2c).

笔者通过对比丰宁剖面和洛川剖面的磁化率曲线变化特征可以看出,除 S0 古土壤层和 L1 上部黄土层缺失外,丰宁剖面的磁化率峰谷波动旋回与洛

川黄土—古土壤序列(L1 中一下部、S1、L2、S2 和 L3 顶部)完全吻合(图 2a,2c),即磁化率曲线 2 个峰值段对应于 S1 和 S2 古土壤层,指示该时期气候温湿;3 个谷值段对应于 L1-L、L2 和 L3 黄土相应层位,指示该时期气候干冷.丰宁剖面磁化率曲线反映的暖湿/干冷气候变化同样可以和深海氧同位素曲线进行很好的气候地层对比.L1、L2、L3 黄土层和 S1、S2 古土壤层可与深海氧同位素阶段 3~8 对应,其中 L1 划分为一层弱发育的古土壤(L1-S)和一层黄土(L1-L)分别可与氧同位素阶段 3 和 4 对比(图 2b,2c).

丰宁剖面 5 个光释光(OSL)样品的等效剂量值均采用细颗粒简单多片再生法获得,用饱和指数方法进行拟合,样品生长曲线没有发生明显饱和,说明测年结果可信度较高.测年结果显示 L1-S 层底部(118 cm)年龄为 $59.2 \pm 3.2 \text{ ka BP}$,L1-L 层中部(236 cm 和 315 cm)两个年龄分别为 $61.5 \pm 2.6 \text{ ka BP}$ 和 $75.5 \pm 4.0 \text{ ka BP}$,S1 层顶部(410 cm)年龄为 $80.5 \pm 4.0 \text{ ka BP}$ 以及 S2 层底部(821 cm)年龄为 $228.3 \pm 10.0 \text{ ka BP}$ (表 1),这与洛川剖面对应的黄土层 L1 和古土壤层 S1、S2 以及深海氧同位素阶段的时间标尺也基本吻合.因此,丰宁剖面对应地层自下而上依次为 L3、S2、L2、S1、L1-L 和 L1-S.

3.2 元素含量特征及其分布模式

表 2 为丰宁黄土、古土壤与洛川黄土(陈骏等,1997)、洛川古土壤(陈骏等,1997)、镇江下蜀土(Chen *et al.*, 2008)、西峰晚第三纪红黏土(陈旻等,2001)、宣城风成红土(李徐生等,1999)以及上部陆壳(Upper Continental Crust, UCC)和陆源页岩(Taylor and McLennan, 1985)的常量元素平均组成含量比较结果.由表 2 可见,丰宁剖面中常量元素

的组成均变化不大,表明其具有高度的一致性。丰宁黄土中主要常量元素为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 , 平均含量分别为 54.33%、11.79%、4.90% 和 4.46%, 四者的平均含量之和可达 75.47%; 古土壤中 CaO 含量相对较低, 常量元素以 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 为主, 平均含量分别为 59.1%、13.49% 和 5.15%, 三者的平均含量之和可达 77.74%。一般而言, 黄土中 CaO 主要以碳酸钙的形式存在, 在温湿的条件下, 碳酸钙溶解; 而在干冷的条件下, 碳酸钙生成(文启忠, 1989)。因此气候差异可能是丰宁黄土和古土壤层中 CaO 含量差异的主要原因。笔者通过对比丰宁黄土、古土壤和表 2 列出的不同地区典型风成堆积物常量元素的平均化学组成可知, 丰宁黄土和古土壤的化学组成类似于这些典型风成堆积物, 且主要化学成分(SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3)之和与这些风成堆积物均接近, 表明丰宁黄土和古土壤为风成因。

图 3 为丰宁黄土和古土壤及其他风成堆积物的 UCC 标准化曲线分布图。由图 3 可知, 虽然丰宁黄土中 Na、P 元素和古土壤中 Na、P、Ca 元素与 UCC 相比表现出明显的亏损特征, 但是从整体看, 大部分元素的分布曲线靠近 UCC 分布曲线, 且近于平坦线型, 这表明丰宁黄土和古土壤来源于上陆壳, 并经过充分混合。Na、Ca 和 P 元素的亏损可能是大陆化学风化的效应。通过与其他典型风成堆积物常量元素 UCC 标准化后结果对比可知, UCC 标准化后的丰宁黄土和古土壤与这些典型风成堆积物具有较好的相似性, 这同时佐证了丰宁黄土和古土壤为风成因。值得注意的是, 不同地区风成堆积物相似程度不是完全相同的。由图 3 可见, 丰宁黄土和古土壤与洛川黄土、洛川古土壤、镇江下蜀土以及西峰红黏土之间 UCC 标准化曲线相似程度较高, 而宣城风成

红土明显区别于以上风成堆积物, 表现出更显著的 K、Na、Ca、Mg、Mn、P 的亏损(图 3), 其原因可能由于他们所处的地理位置、物质来源以及后期所经历的化学风化作用不同导致的。

3.3 化学风化特征

3.3.1 化学风化强度 在研究沉积物所受的化学风化程度时, 常采用地球化学元素比值来进行判别, 化学风化指数 CIA 和 Na/K 比值是目前判断化学风化程度的常用指标(Nesbitt and Young, 1982; 陈旸等, 2001)。其中 CIA 的计算公式为 $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$, 式中各氧化物均为分子摩尔数(m), CaO^* 为硅酸盐矿物中的摩尔含量(不包括碳酸盐和磷酸盐中的 CaO 含量)。由于硅酸盐中的 CaO 与 Na_2O 通常是等比例存在, 因此当 $m(\text{CaO})$ 大于 $m(\text{Na}_2\text{O})$ 时, 则 $m(\text{CaO}^*)$ 等于 $m(\text{Na}_2\text{O})$, 反之则 $m(\text{CaO}^*)$ 等于 $m(\text{CaO})$ (McLennan, 1993)。本文中所有 CaO^* 摩尔数的计算都据此方法获得。

丰宁黄土 CIA 值介于 53.59~67.34, 平均值为 61; 古土壤 CIA 值介于 65.97~70.68, 平均值为 67.56(表 2)。与典型风成堆积物、上陆壳(UCC)和陆源页岩相比, 丰宁黄土和古土壤的 CIA 平均值远高于上陆壳(UCC)的 47.92, 明显小于西峰红黏土的 69.11、陆源页岩的 70.36 以及镇江下蜀土的 70.45, 远小于宣城风成红土的 87.33。丰宁黄土的 CIA 值低于洛川黄土的 63.73, 古土壤的 CIA 值与洛川古土壤的 67.36 非常接近(表 2)。由上述分析可以判定以上几种典型风成堆积物及 UCC 和陆源页岩的风化强度序列为: 宣城风成红土 >> 西峰红黏土、陆源页岩、镇江下蜀土 > 丰宁古土壤、洛川古土壤 > 洛川黄土 > 丰宁黄土 >> 上陆壳(UCC)。

由图 4a 可以看出丰宁剖面样品的 CIA 值与 Na/K 比值呈明显的负相关关系(相关系数 $R^2 = -0.9338$, $n = 73$), 即 CIA 值越大, Na/K 比值越小; 反之 CIA 值越小, Na/K 比值越大。一般而言, CIA 值为 50~65, 指示初等化学风化程度, 气候条件为寒冷、干燥; CIA 值为 65~85, 指示中等化学风化程度, 气候条件为温暖、湿润; CIA 值为 85~100, 指示强烈化学风化程度, 气候条件为炎热、潮湿(Bauluz *et al.*, 2000)。图 4a 中 CIA 值与 Na/K 比值均显示上陆壳(UCC)基本属于未受风化的初始状态; 丰宁黄土和洛川黄土基本都处于初等化学风化阶段; 丰宁古土壤以及洛川古土壤、西峰红黏土、镇江下蜀土和陆源页岩都进入了中等化学风化阶

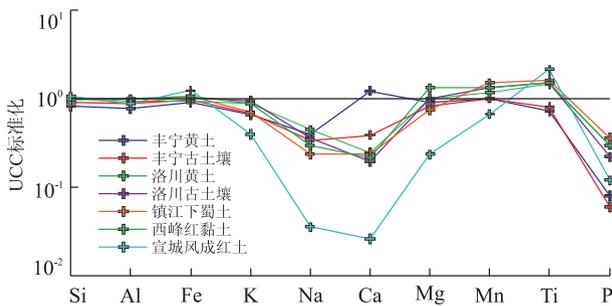


图 3 丰宁黄土和古土壤及其与其他风成堆积物常量元素的 UCC 标准化曲线分布模式

Fig.3 UCC-normalized pattern of elements of the Fengning profile and other aeolian dust deposits

图 3 数据来源同表 2

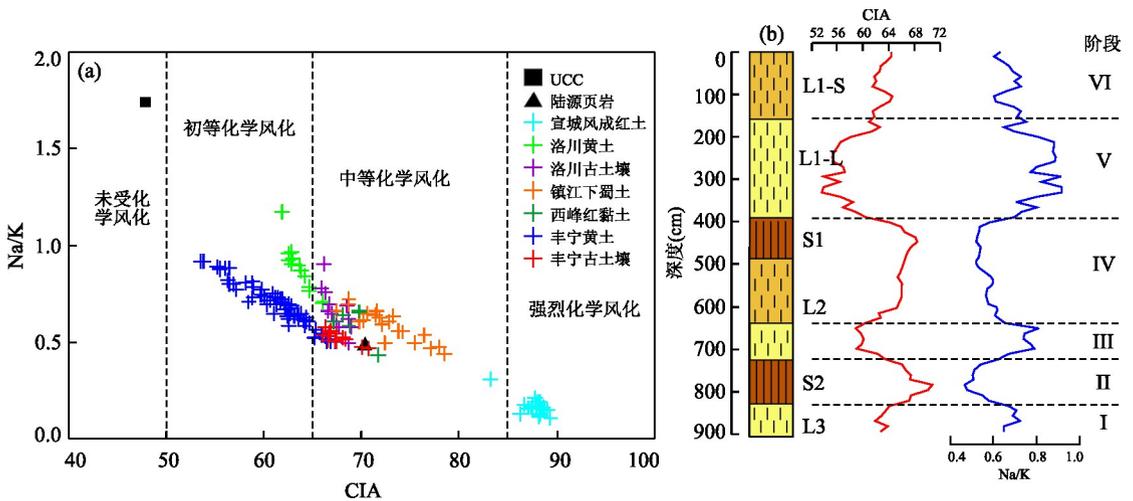


图 4 丰宁黄土和古土壤及其与其他风成堆积物的化学风化参数 CIA、Na/K 关系散点图(a)、丰宁剖面 CIA、Na/K 曲线变化特征(b)
Fig.4 Scatter diagram of CIA vs. Na/K molar ratio of the Fengning profile and other aeolian dust deposits (a), and variation of CIA and Na/K in Fengning profile (b)

图 4 数据来源同表 2

段.值得注意的是,丰宁剖面 Na/K 比值与其他风成剖面相比存在着明显差异,具体表现为其比值偏低,且负相关斜率偏小.斜长石中富含 Na,钾长石中富含 K,Na/K 比值整体偏低可能是由于丰宁剖面中斜长石数量较少导致的,比值减小趋势随风化程度增大而逐渐变缓则说明剖面中钾长石也开始风化.

丰宁剖面 CIA 值与 Na/K 比值在地层中表现出相同的规律性,根据其变化可以划分为 6 个阶段(图 4b):第 I 阶段(900~820 cm)、第 III 阶段(730~650 cm)和第 V 阶段(400~150 cm)分别对应于 L3 顶部、L2 下部和 L1-L 黄土层,该时期 CIA 值相对较低,Na/K 比值相对较高,表明这些阶段所遭受的化学风化程度较弱.第 II 阶段(820~730 cm)、第 IV 阶段(650~400 cm)和第 VI 阶段(150~0 cm)分别对应于 S2、S1 和 L2 上部、L1-S,该时期 CIA 呈现高值,Na/K 呈现低值,表明这些阶段所遭受的化学风化程度较强.通过将 CIA、Na/K 与磁化率进行对比可以发现(图 2c,4b),在第 I 阶段、第 II 阶段、第 III 阶段、第 V 阶段和第 VI 阶段三者的变化趋势均表现出较好一致性,指示这些阶段化学风化强度主要受黄土堆积时期和古土壤发育时期气候条件的影响.但是在第 IV 阶段(L2 上部)CIA、Na/K 与磁化率差异较大,CIA 和 Na/K 指示该时期风化程度较强,而磁化率指示气候较为干冷.这种差异的原因可能是由于 S1 古土壤发育时期的降水影响到了 L2 上部易淋溶元素的淋失,活动性元素的迁移导致了 L2 上部较高的 CIA 值和较低的 Na/K 比值,但没有对

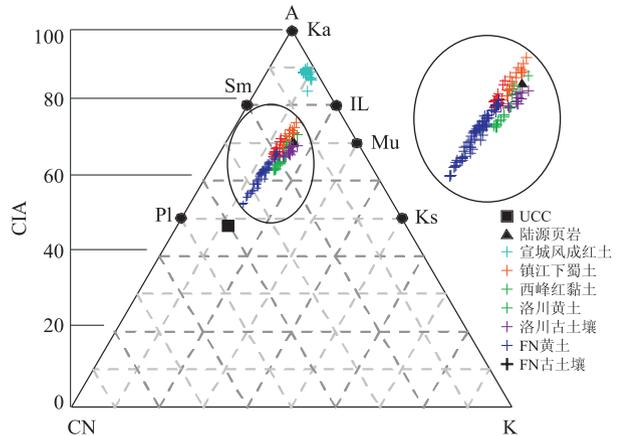


图 5 丰宁黄土和古土壤及其与其他风成堆积物的 A-CN-K 化学风化趋势
Fig.5 A-CN-K ternary diagram of the Fengning profile and other aeolian dust deposits
图 5 数据来源同表 2;A=Al₂O₃; CN=CaO* + Na₂O; K=K₂O

磁化率产生明显的影响.

A-CN-K(Al₂O₃-CaO* + Na₂O-K₂O)三角模型图能够较为直观地反映剖面地层的化学风化趋势(Nesbitt and Yong, 1982).从丰宁黄土、古土壤以及典型风成堆积物在 A-CN-K 三角模型图的分布特征可以看出(图 5),除宣城风成红土外,丰宁黄土和古土壤与其他风成堆积物的数据点均分布在 Pl-Ks 基线上,并与上陆壳→陆源页岩化学风化趋势线和 A-CN 线大致平行,靠近斜长石一侧,而远离钾长石一侧.陆源页岩代表典型的上陆壳(UCC)最初的风化产物,上陆壳指向陆源页岩的方向指示了大陆

早期的风化趋势.丰宁黄土、古土壤和这些典型风成堆积物的风化趋势平行于上陆壳→陆源页岩化学风化趋势线,表明其成分来源于广泛的上陆壳.风化趋势与 A-CN 连线平行指示了斜长石的初级风化阶段(李徐生等,2007),斜长石的分解会导致 Ca、Na 流失.图 5 显示 Ca、Na 的丢失率从小到大依次为丰宁黄土、洛川黄土、丰宁古土壤、洛川古土壤、西峰红黏土和镇江下蜀土.

母岩的成分、地形、排水条件和气候在化学风化过程中起着重要的作用.由前文可知,丰宁黄土、古土壤和这些风成堆积物均来源于广泛的上陆壳,因此母岩成分对化学风化差异影响较小.前文所列的剖面一般都位于岗地上,地形和排水条件较为一致,这不会造成较大的化学风化差异(李徐生等,1999).因此,气候可能是这些风成堆积剖面化学风化差异的主要影响因素.安徽宣城地区、镇江地区、西峰和洛川地区、丰宁地区分别属于中亚热带季风气候、北亚热带季风气候、暖温带季风气候以及中温带季风气候.从现代的气候状况来看,不同气候带季风区的年均温度和年均降水量均存在着较大差异,气候温湿程度从安徽宣城地区→镇江地区→西峰和洛川地区→丰宁地区依次减弱,这很好地对应于化学风化强度从宣城风成红土→镇江下蜀土→洛川黄土→丰宁黄土依次减弱,温湿程度的差异导致了各地区风成堆积剖面化学风化强度的不同.但是值得注意的是,西峰和洛川虽然同属于同一季风气候区,但西峰红黏土与洛川剖面风化强度显著不同,反而与镇江晚第四纪下蜀土剖面非常接近,这可能由于西峰地区晚第三纪到第四纪气候发生过显著的变化,晚第三纪气候与镇江晚第四纪的气候较为类似,为北亚热带温暖

湿润气候.丰宁古土壤和洛川古土壤化学风化程度相近,表明丰宁古土壤发育时期,气候温湿程度明显增强,与洛川古土壤发育时期的气候条件较为接近.

3.3.2 元素的活动性与迁移顺序 在化学风化过程中,活动性元素容易淋失,而稳定性元素相对富集,从而难以辨认化学风化过程中元素真实的地球化学行为.元素的变化率是以某一种稳定性元素作为参照,来计算其他元素的变化率,常用来反映元素的迁移和富集程度(Nesbitt, 1979).其计算公式为: $\Delta(\%) = [(X_s/I_s)/(X_p/I_p) - 1] \times 100$.式中 X_s 和 I_s 分别代表样品中元素和参比元素的含量; X_p 、 I_p 为上述元素在原始母质中的含量.若 $\Delta < 0$, 元素相对参比元素迁出;反之则元素相对富集.丰宁剖面中 L1-L 黄土层 CIA 平均值为 57.55, 化学风化程度最弱,因此本文选择该层可近似代表风化母质,选择稳定元素 Al 作为参比元素(图 6).

从图 6 可以看出,丰宁剖面中除 Fe 和 Ti 元素外,其余常量元素 Δ 值均小于 0%, 表明大部分元素相对于 Al 都发生了迁移.在丰宁黄土中, Ca、P、Mg、Na 和 Mn 元素 Δ 绝对值大于 10%, 表明这些元素发生了显著的迁移; Si 和 K 元素 Δ 绝对值小于 10%, 表明这些元素也发生了一定的迁移,但分异不明显; Fe 和 Ti 元素的 Δ 值略大于 0%, 表现出轻微富集的特征.根据丰宁黄土中常量元素的 Δ 值可以大致确定其迁移能力为: $Ca > P > Mg > Na > Mn > K > Si > Al > Ti > Fe$.在丰宁古土壤中,各个元素的迁移程度明显高于丰宁黄土,除 Ca、P、Mg、Na 和 Mn 元素外, K 元素 Δ 绝对值也大于 10%, 只有 Si 元素 Δ 绝对值小于 10%.根据丰宁古土壤中常量元素的 Δ 值可以大致确定其迁移能力为: $Ca > P > Na > Mg > Mn > K > Si >$

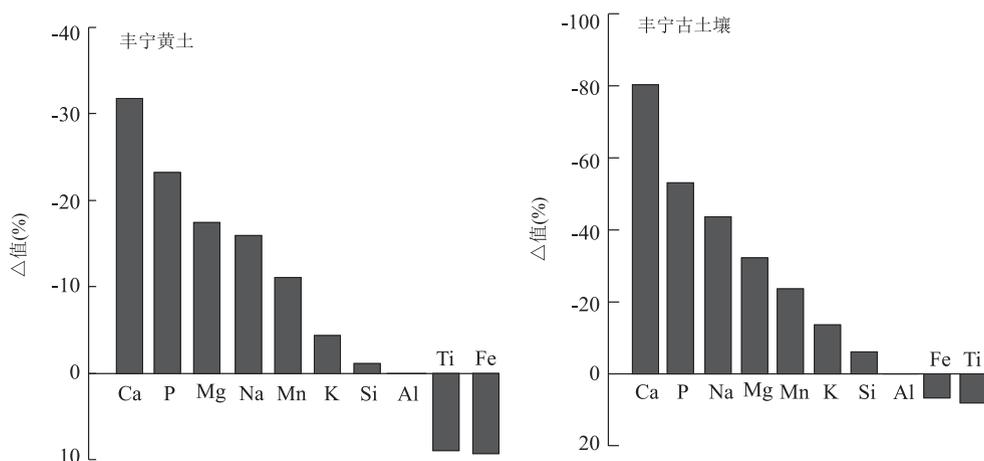


图 6 丰宁剖面常量元素相对于 Al 元素的迁移率

Fig.6 Migration ratio of elements of the Fengning profile

$Al > Fe > Ti$.在此序列中,Fe 元素本身并未发生迁移,它们的变化主要体现在 Fe^{2+} 转化为 Fe^{3+} .化学风化阶段一般划分为 3 个阶段:早期去 Na、Ca 阶段、中期去 K 阶段和晚期去 Si 阶段(Nesbitt and Markovics, 1980).从丰宁剖面的常量元素迁移结果来看,丰宁黄土和古土壤的化学风化已完成了早期去 Na、Ca 的阶段,并进入到了中期去 K 阶段.

3.4 丰宁黄土—古土壤物源判别分析

沉积物的某些元素化学性质较为稳定,保留了沉积母岩的信息,从而可以用于物源示踪研究(Sun, 2002; Hao *et al.*, 2010).Ti 和 Al 元素相对稳定,在化学风化过程中淋溶程度较弱,且不同岩石中 Ti 元素含量差别较大,因此 TiO_2/Al_2O_3 可作为有效的物源示踪指标.K 元素主要赋存于钾长石中,钾长石只有在强烈风化程度下才能发生蚀变,故对于初等风化程度的丰宁黄土和中等风化程度的丰宁古土壤而言, K_2O/Al_2O_3 也是一个物源判别的有效指标.Fe 元素化学性质也相对稳定,而且会随着沉积物粒度的不同而发生变化,因而 Fe_2O_3/Al_2O_3 也是一个良好的物源“指示器”.前人也常用这些比值来对风尘堆积的源区进行示踪(Sheldon and Tabor, 2009; Hao *et al.*, 2010; 曾方明, 2016),例如, Hao *et al.* (2010) 通过对比黄土高原黄土和中国南方黄土的 TiO_2/Al_2O_3 、 K_2O/Al_2O_3 比值发现,南方黄土的 TiO_2/Al_2O_3 比值明显较高,而 K_2O/Al_2O_3 比值明显较低,从而认为亚洲内陆沙漠不是南方黄土的主要来源.

笔者将丰宁黄土和古土壤的 K_2O/Al_2O_3 、 Fe_2O_3/Al_2O_3 和 TiO_2/Al_2O_3 比值投入到散点图中,并与典型风成堆积物进行对比(图 7).由图 7 可

知,宣城风成红土的 K_2O/Al_2O_3 、 TiO_2/Al_2O_3 和 Fe_2O_3/Al_2O_3 比值的数据点主要分布区域明显区别于其他风成堆积物,表明宣城风成红土与这些风成堆积物并非同源物质.丰宁黄土和古土壤、洛川黄土、洛川古土壤、镇江下蜀土和西峰红黏土的 K_2O/Al_2O_3 和 Fe_2O_3/Al_2O_3 比值总体上较为接近,这不仅为丰宁黄土和古土壤的风成成因提供了佐证,同时也反映了这些风成堆积物具有相似的源区.然而值得注意的是,丰宁黄土和古土壤的 TiO_2/Al_2O_3 比值明显小于其他风成堆积物,表明其可能有其他的物质来源.丰宁剖面位于滦河上游河谷盆地中,多大风天气,4 月份平均风速可达 5 m/s,盛行西风(邱维理等, 2005).因此,经强风搬运的当地河流阶地、河漫滩上出露的冲积物可能为丰宁黄土和古土壤提供部分物源.滦河口区沉积物的平均 TiO_2/Al_2O_3 比值为 0.03,十分接近于丰宁黄土和古土壤的 TiO_2/Al_2O_3 比值,这为此观点提供了佐证(周福根, 1983).此外,前人调查结果显示,丰宁河谷地带普遍发育的风沙层也是由滦河冲积物的砂质组分构成(邱维理等, 2005).黄土物源研究是一个复杂的科学问题,常量元素较难准确地示踪出中国北方风尘堆积及其潜在源区的细微差别(Chen and Li, 2011),本文常量元素的分析仅仅对丰宁黄土和古土壤物源进行了初步的探讨,有待后续开展同位素等大量的研究工作.

4 结论

(1) 丰宁剖面磁化率曲线与洛川黄土—古土壤

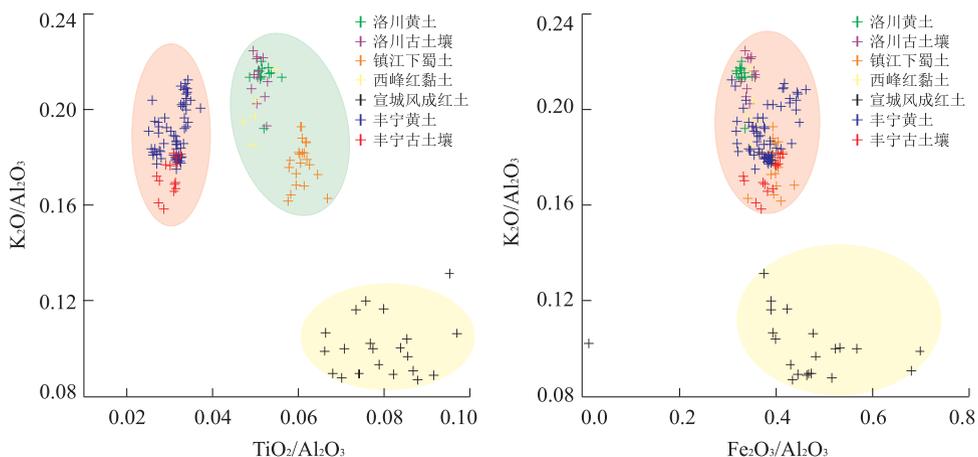


图 7 丰宁黄土和古土壤及其与其他风成堆积物的 K_2O/Al_2O_3 、 TiO_2/Al_2O_3 和 Fe_2O_3/Al_2O_3 比值散点图

序列以及深海沉积氧同位素均存在可比的一致性。结合 OSL 测年结果,磁化率 3 个谷值段分别对应 L1、L2 和 L3 黄土层,2 个峰值段分别对应 S1 和 S2 古土壤层。

(2) 丰宁黄土主要常量元素以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 为主;古土壤以 SiO_2 、 Al_2O 和 Fe_2O_3 为主。剖面中 SiO_2 、 Al_2O 和 Fe_2O_3 平均含量之和与其他地区典型风成堆积物非常接近。经 UCC 标准化后的丰宁黄土和古土壤的元素曲线同样与其他地区典型风成堆积物有较好的相似性。以上特征表明丰宁黄土和古土壤为风成成因。

(3) 丰宁黄土处于初等化学风化阶段,古土壤进入了中等化学风化阶段。结合其他地区典型风成堆积物的化学风化强度,其序列由强到弱为:宣城风成红土 >> 西峰红黏土、镇江下蜀土 > 丰宁古土壤、洛川古土壤 > 洛川黄土 > 丰宁黄土。

(4) 常量元素迁移特征表明丰宁黄土的化学风化已完成了早期去 Na、Ca 的阶段,并进入了中期去 K 阶段。

(5) 丰宁黄土、古土壤的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值与洛川黄土、洛川古土壤、镇江下蜀土、西峰红黏土较为接近,表明这些风成堆积物具有相似的源区。而 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值区别于其他风成堆积物,指示丰宁剖面具有其他物源。

致谢:刘畅、李玉梅和宋姝瑶参与了野外样品的采集,审稿专家对本文提出了建设性的修改意见,在此一并感谢!

References

An, Z. S., Kukla, G., Liu, T. S., 1989. Loess Stratigraphy in Luochuan of China. *Quaternary Sciences*, (2): 155–168 (in Chinese with English abstract).

An, Z. S., Kukla, G. J., Porter, S. C., et al., 1991. Magnetic Susceptibility Evidence of Monsoon Variation on the Loess Plateau of Central China during the Last 130 000 Years. *Quaternary Research*, 36 (1): 29–36. doi: 10.1016/0033-5894(91)90015-W

An, Z. S., Liu, T., Lu, Y. C., et al., 1990. The Long-Term Paleomonsoon Variation Recorded by the Loess-Paleosol Sequence in Central China. *Quaternary International*, 7: 91–95. doi: 10.1016/1040-6182(90)90042-3

Bauluz, B., Mayayo, M. J., Fernandez-Nieto, C., et al., 2000. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic Siliciclastic Rocks from the Iberian Range (NE Spain): Implications for Source-Area Weathering, Sorting, Provenance, and

Tectonic Setting. *Chemical Geology*, 168(1): 135–150. doi: 10.1016/S0009-2541(00)00192-3

Chen, J., Ji, J. F., Qiu, G., et al., 1997. The Geochemistry Study on Chemical Weathering Intensity in Luochuan, Shaanxi Province. *Science China Earth Sciences*, 27(6): 531–536 (in Chinese).

Chen, J., Li, G., 2011. Geochemical Studies on the Source Region of Asian Dust. *Science China Earth Sciences*, 54 (9): 1279–1301. doi: 10.1007/s11430-011-4269-z

Chen, Y., Chen, J., Liu, L. W., 2001. Chemical Composition and Characterization of Chemical Weathering of Late Tertiary Red Clay in Xifeng, Gansu Province. *Journal of Geomechanics*, 7 (2): 167–175 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y., Li, X., Han, Z., et al., 2008. Chemical Weathering Intensity and Element Migration Features of the Xiashu Loess Profile in Zhenjiang, Jiangsu Province. *Journal of Geographical Sciences*, 18 (3): 341–352. doi: 10.1007/s11442-008-0341-9

Fang, X., Shi, Z., Yang, S., et al., 2002. Loess in the Tian Shan and Its Implications for the Development of the Gurbantunggut Desert and Drying of Northern Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 47 (16): 1381–1387. doi: 10.1360/02tb9305

Guo, Z., Ruddiman, W. F., Hao, Q., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416 (6877): 159–163. doi: 10.1038/416159a

Hao, Q., Guo, Z., Qiao, Y., et al., 2010. Geochemical Evidence for the Provenance of Middle Pleistocene Loess Deposits in Southern China. *Quaternary Science Reviews*, 29 (23): 3317–3326.

Heller, F., Liu, T. S., 1982. Magnetostratigraphical Dating of Loess Deposits in China. *Letters to Nature*, 300 (2): 431–433. doi: 10.1038/300431a0

Li, C. A., Zhang, Y. F., Xiong, D. Q., et al., 2013. Major Element Compositions of the “Wushan Loess”. *Earth Science*, 38 (5): 916–922 (in Chinese with English abstract).

Li, X. S., Han, Z. Y., Yang, S. Y., et al., 2007. Chemical Weathering Intensity and Element Migration Feature of the Xiashu Loess Profile in Zhenjiang. *Acta Geographica Sinica*, 62 (11): 1174–1184 (in Chinese with English abstract).

Li, X. S., Yang, D. Y., Lu, H. Y., 1999. Oxide-Geochemistry Features and Paleoclimatic Record of the Aeolian-Dust Depositional Sequence in Southern Anhui. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 19(4): 75–82 (in Chinese with English abstract).

- Liu, D. S., 1985. *Loess and Environment*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, D. S., 1997. *Quaternary Environment*. Science Press, Beijing, 189—239 (in Chinese).
- Martinson, D. G., Pisias, N. G., Hays, J. D., et al., 1987. Age Dating and the Orbital Theory of the Ice Ages: Development of a High-Resolution 0 to 300 000-Years Chronostratigraphy. *Quaternary Research*, 27(1): 1—29. doi: 10.1016/0033-5894(87)90046-9
- McLennan, S. M., 1993. Weathering and Global Denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295—303.
- Nesbitt, H. W., 1979. Mobility and Fractionation of Rare Earth Elements during Weathering of a Granodiorite. *Nature*, 279: 206—210. doi: 10.1038/279206a0
- Nesbitt, H. W., Markovics, G., 1980. Chemical Processes Affecting Alkalis and Alkaline Earths during Continental Weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1659—1666. doi: 10.1016/0016-7037(80)90218-5
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299: 21. doi: 10.1038/299715a0
- Qiu, W. L., Li, R. Q., Zhu, N., et al., 2005. Aeolian Sand Activities at Fengning, Hebei Province during Holocene and Their Influence on Ancient Culture. *Quaternary Sciences*, 25(6): 729—740 (in Chinese with English abstract).
- Sheldon, N. D., Tabor, N. J., 2009. Quantitative Paleoenvironmental and Paleoclimatic Reconstruction Using Paleosols. *Earth-Science Reviews*, 95(1): 1—52. doi: 10.1016/j.earscirev.2009.03.004
- Sun, J., 2002. Provenance of Loess Material and Formation of Loess Deposits on the Chinese Loess Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 203(3): 845—859. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00921-4
- Sun, Y., Clemens, S. C., An, Z., et al., 2006. Astronomical Timescale and Palaeoclimatic Implication of Stacked 3.6 Myr Monsoon Records from the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 25(1): 33—48. doi: 10.1016/j.quascirev.2005.07.005
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, London, 277.
- Wei, C. Y., Li, C. A., Kang, C. G., et al., 2015. Grain-Size Characteristics and Genesis of the Huangshan Loess in Songnen Plain Area. *Earth Science*, 40(12): 1945—1954 (in Chinese with English abstract).
- Wen, Q. Z., 1989. *Geochemistry of Loess in China*. Science Press, Beijing, 23—63 (in Chinese).
- Zeng, F. M., 2016. Provenance of the Late Quaternary Loess Deposit in the Qinghai Lake Region. *Earth Science*, 41(1): 131—138 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, F. M., Xiang, S. Y., Liu, X. J., et al., 2014. Progress in Tracing Provenance of Eolian Deposits in Chinese Loess Plateau. *Earth Science*, 39(2): 125—140 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, F. G., 1983. The Relations between Element Distribution in Sediments and Environments in Luanhe Estuary. *Marine Science Bulletin*, 2(2): 60—70 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安芷生, Kukla, G., 刘东生, 1989. 洛川黄土地层学. 第四纪研究, (2): 155—168.
- 陈骏, 季峻峰, 仇纲, 等, 1997. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究. 中国科学: 地球科学, 27(6): 531—536.
- 陈昶, 陈骏, 刘连文, 2001. 甘肃西峰晚第三纪红粘土的化学组成及化学风化特征. 地质力学学报, 7(2): 167—175.
- 李长安, 张玉芬, 熊德强, 等, 2013. “巫山黄土”常量元素地球化学特征. 地球科学, 38(5): 916—922.
- 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等, 2007. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征. 地理学报, 62(11): 1174—1184.
- 李徐生, 杨达源, 鹿化煜, 1999. 皖南风尘堆积序列氧化物地球化学特征与古气候记录. 海洋地质与第四纪地质, 19(4): 75—82.
- 刘东生, 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社.
- 刘东生, 1997. 第四纪环境. 北京: 科学出版社, 189—239.
- 邱维理, 李容全, 朱楠, 等, 2005. 河北省丰宁地区全新世风沙活动及其对古文化的影响. 第四纪研究, 25(6): 729—740.
- 魏传义, 李长安, 康春国, 等, 2015. 哈尔滨黄山黄土粒度特征及其对成因的指示. 地球科学, 40(12): 1945—1954.
- 文启忠, 1989. 中国黄土地球化学. 北京: 科学出版社, 23—63.
- 曾方明, 2016. 青海湖地区晚第四纪黄土的物质来源. 地球科学, 41(1): 131—138.
- 曾方明, 向树元, 刘向军, 等, 2014. 黄土高原风尘堆积物源研究进展. 地球科学, 39(2): 125—140.
- 周福根, 1983. 滦河口区沉积物中元素的分布和环境的关系. 海洋通报, 2(2): 60—70.