

西风区末次冰期以来昭苏黄土剖面微量元素分布特征及其环境意义

李传想^{1,2,3,4}, 宋友桂²

- (1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
2. 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, 西安 710075;
3. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过对新疆伊犁昭苏黄土剖面微量元素和粒度的测定分析, 并与黄土高原黄土进行对比, 揭示了西风区末次冰期以来黄土微量元素地球化学变化特征, 探讨了其古气候意义。分析结果表明, 伊犁黄土除 Sr 和 Cr 元素出现富集外, 其他微量元素含量与黄土高原总体具有较好的相似性, 可能表明末次冰期以来伊犁黄土形成环境较黄土高原干旱; 伊犁黄土除 Sr、Zn、Co 和 Ni 元素含量分布变化比黄土高原稍大外, 其他微量元素变化均比黄土高原小的多, 可能意味着末次冰期以来伊犁地区环境变化幅度总体较黄土高原小的多。此外, 研究结果还表明, 伊犁黄土 Zr 元素主要赋存在粒径 $>20\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒中, 暗示着黄土中锆石组分主要赋存于这种粗颗粒组分中; 该剖面微量元素在风化成壤过程中, 其迁移性由强至弱依次为 $\text{Zr} > \text{Y} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Ga} > \text{Rb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{Th} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{U}$, 均出现不同程度的富集, 富集率均较低且变化幅度较小, 可能指示末次冰期以来伊犁黄土沉积环境较为干旱且波动变化较小。

关键词: 西风区; 伊犁黄土; 微量元素; 地球化学; 古环境

中图分类号: P595; P532 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-9901(2014)02-0056-11

The characteristics of distribution of trace elements and their paleoclimatic implications at the Zhaosu Loess Section in Westerly Area since the Last Glacial Period

LI Chuan-xiang^{1,2,3,4}, SONG You-gui¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on trace elements and grain size analysis of Zhaosu loess from Yili basin in Xinjiang, the authors reveal trace element variation characteristics in the westerly zone since the last glacial period, and discuss its palaeoclimatic significance. The results show that the content of other trace elements with the exception of the enrichment of Sr and Cr elements in the Ili loess have a better consistency with the Chinese Loess Plateau, which may indicate that the environment of the Ili loess formation was more arid than that of the Chinese Loess Plateau since the Last Glacial Period. The changes in distribution of contents of Sr, Zn, Co and Ni elements are slightly larger than that of the Chinese Loess Plateau, and the rest much smaller than it, which suggest that the

收稿日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172166, 41290250); 国家重点基础研究规划项目 (2013CB955904)

通讯作者: 宋友桂, E-mail: syg@ieecas.cn

range of environmental change in the Ili region since the Last Glacial Period was much smaller than the Chinese Loess Plateau. In addition, the results also imply that the Zr element of the Ili loess mainly contained in the coarse grain size $>20\ \mu\text{m}$, which may indicate zircon components of the Ili loess dominatedly enrich in this kind of coarse particle size. In the process of weathering and pedogenesis, the trace elements migration intensity of Ili loess in the order from strong to weak was $\text{Zr} > \text{Y} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Ga} > \text{Rb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{Th} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{U}$, which there exist different degrees of enrichment, and small changes in the lower level of enrichment, suggesting that the environment was more arid and less fluctuating when the Ili loess deposited.

Key words: Westerly area; Ili loess; trace elements; geochemistry; palaeoenvironment

黄土中含有多种微量元素, 由于其性质和行为差异, 在地球化学过程中会发生淋失或富集, 记录了大量的地质作用信息, 因此引起人们广泛关注。表生环境下黄土元素的分布、赋存、迁移和配比规律, 除受元素本身活动性不同的影响外, 同时还受风化、迁移和沉积环境变化等而产生地球化学行为的差异(刘英俊等, 1984; 靳鹤龄, 2003)。在相同区域, 沉积物物源相对固定, 微量元素的存在形式及性质基本相同的条件下, 其含量的变化主要受控于气候环境的变化。因此, 可利用黄土中某些微量元素的时、空分布变化特征作为气候变化的代用指标, 来恢复古气候、古环境的变化规律(文启忠, 1989; 刁桂仪和潘景瑜, 1996)。近年来, 前人利用黄土微量元素指标在物源示踪及重建古气候方面的研究已取得不少成果(刁桂仪和文启忠, 1979; 文启忠等, 1979; 陈骏和汪永进, 1999; 庞奖励等, 2001a; 刘连文等, 2002; Chen et al, 2006), 但这些研究主要集中于受东亚季风控制的黄土高原黄土分布区。

伊犁盆地地处研究程度较高的中国黄土高原和欧洲两大黄土区之间, 该区风成黄土研究对揭示亚洲内陆干旱化、北半球粉尘来源、古西风环流和全球气候环境变化具有重要意义(宋友桂等, 2010a)。然而, 目前的研究尽管从年代学(李传想和宋友桂, 2011a; Feng et al, 2011; E et al, 2012; Song et al, 2012; Yang et al, 2014)、沉积学(叶玮, 2001; 史正涛, 2002; 李传想和宋友桂, 2012; 李传想等, 2012a)、矿物学(叶玮, 2000; 曾蒙秀和宋友桂, 2013)、孢粉学(Li et al, 2011; Zhao et al, 2013)和环境磁学(Song et al, 2008, 2010; 宋友桂等, 2010b; 李传想和宋友桂, 2011b; Chen et al, 2012; Liu et al, 2012; 李传想等, 2013; Jia et al, 2013)等不同方面做了不少有意义的探索, 但其元素地球化学方面研究仍比较薄

弱(李传想和宋友桂, 2011c; Zhang et al, 2013; 李金婵等, 2014), 系统的微量元素研究更少。此外, 先前对伊犁黄土为数不多的常量元素地球化学研究结果表明常量元素及相关参数对气候环境变化反映并不敏感(张文翔等, 2011; 李传想等, 2012b)。因此, 查明伊犁黄土微量元素地球化学特征, 遴选出有效的古环境代用指标, 揭示其所蕴藏的古环境变化信息, 对认识和理解干旱-半干旱区环境演化具有重要意义。本文通过对伊犁盆地昭苏波马剖面黄土微量元素的测试分析, 并与黄土高原的研究结果相对比, 探讨了末次冰期以来伊犁黄土微量元素地球化学分布特征及其古环境意义。

1 地理背景

伊犁地区地处中国天山纬向构造带的西部, 西邻中亚戈壁沙漠区。研究区在地貌轮廓上为向西开敞的喇叭形, 地势东高西低。据气象统计资料研究表明, 伊犁地区高空一年四季都盛行西风(叶玮, 2001); 冬季主要受北支西风气流影响, 夏季南支西风水北跃控制。伊犁河自东向西流经盆地最终注入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖, 上游有三大支流, 即: 特克斯河、喀什河及巩乃斯河, 均有2~4级阶地发育, 黄土主要堆积在河流阶地上及其低山丘陵区、山麓斜坡和沙漠边缘, 厚度从数米到两百多米不等(Song et al, 2014)。由于特殊的地形组合影响, 南侧的天山阻挡了南来的塔克拉玛干沙漠干热气流, 北侧天山节制北来的北冰洋寒流的袭击, 西面敞开, 可以充分接纳来自大西洋的湿润气流, 在亚洲大陆内部腹地形成较湿润的温带大陆性半干旱气候, 降水充沛(李江风等, 2000), 但是区内降水分布很不均匀, 约为250~1000 mm, 东多西少、山地多平原少, 山地和高山区中山带可达500~1000 mm。本区年平

均气温为 2.6~9.2℃, 7 月平均气温 14~23℃, 1 月为 -6.8~-12℃ (李江风等, 2000)。随着由西向东海拔高度与水热条件的变化, 植被逐渐由荒漠草原变为干草原, 东部植被组成中蒿属减少, 而禾本科的针茅增多; 土壤则先由灰钙土变为栗钙土, 后栗钙土又渐被暗栗钙土和黑钙土代替。

2 剖面地层与样品采集

伊犁昭苏波马剖面 (ZSP) (80.25°E, 42.69°N) 位于伊犁哈萨克自治州昭苏县西南 90 km 的波马镇, 处于盆地南缘伊犁河上游支流特克斯河的第二级阶地上, 海拔 1875 m (图 1)。整个剖面从上至下可划分为 S_0 (0~0.9 m)、 L_1L_1 (0.9~2.3 m)、

L_1S_1 (2.3~5.2 m)、 L_1L_2 (5.2~6.5 m) 和 S_1 (6.5~6.9 m) 共 5 个地层单元。该剖面由黄色或者浅色黄土与褐色或者红色古土壤 (含弱发育古土壤) 相互叠置构成, 无侵蚀间断。其中, 弱发育古土壤层 L_1S_1 和红色古土壤层 S_1 分别含有虫孔和蜗牛化石, 黄土层 L_1L_1 含有较多直径 0.1~0.5 cm 的钙结核。整个剖面出露厚度 6.85 m, 下部出露 S_1 顶部, 以下为河流砾石层。在剖面距顶部 3 m、4 m、5 m 和 6 m 处采集 4 个光释光测年样品, 根据释光年代的结果外推该剖面黄土底部年龄为 73.2 ka BP (Song et al, 2012), 主要系末次冰期以来的黄土沉积。粒度测试以 5 cm 间距采集了 138 个粉末样品; 以 15 cm 间距进行元素分析取样, 地层过渡段进行加密采集, 共分析微量元素样品 56 个。

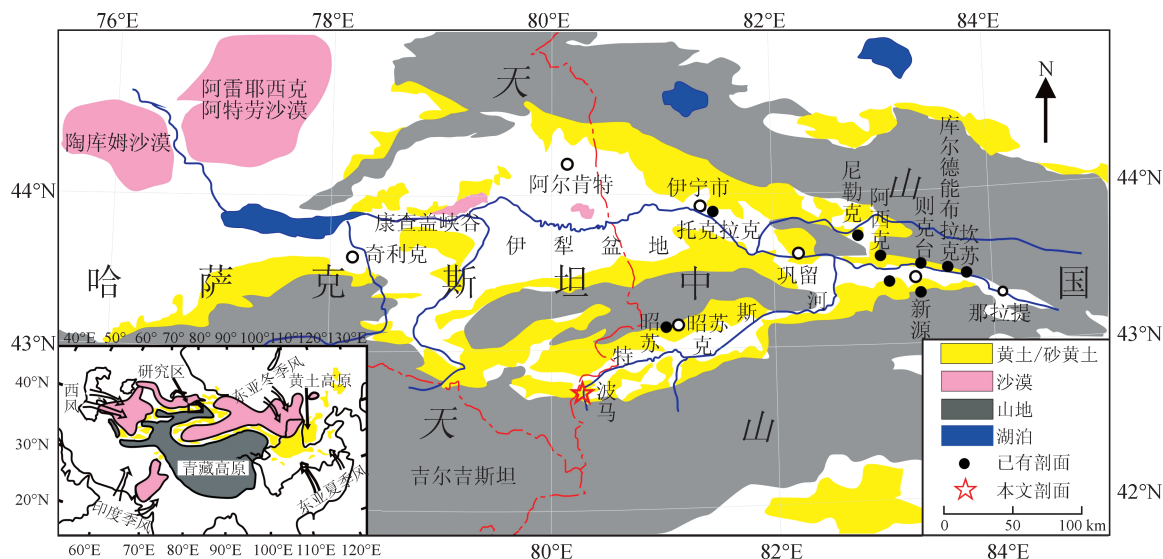


图 1 采样点位置及伊犁地区地理环境状况图 (据宋友桂和史正涛 (2010) 图修改)

Fig.1 The map showing the site of sampling and the geographical environment of Ili region (Modified from Song and Shi, 2010)

3 实验方法

元素分析每个样品取 5 g, 在恒温 60℃ 下烘干 24 h 后, 做过 200 目筛 (约 74 μm) 的前处理。以硼酸作固定剂, 在 SL201 型半自动压样机上以 29 TN 的压力压成圆饼状。在荷兰帕纳科公司 PW4400 型 X 射线荧光光谱仪上测试, 微量元素相对标准偏差 <5%。样品粒度分析采用英国 Malvern 公司 Mastersizer2000 型激光粒度仪, 前处理加入 10% H_2O 和 10% HCl 充分反应, 去除样品中有机质和碳酸盐, 再加入 10 mL 30% 的分散剂六偏磷酸钠溶液以便颗粒充分分散。以上测试分析均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。

4 实验结果

表 1 和图 2 为伊犁 ZSP 剖面 14 种微量元素的分析结果。可以看出, 伊犁 ZSP 剖面黄土同种微量元素的最大值、最小值、平均值在所有层位之间差异均较小, 微量元素含量变化与地层 S_0 、 L_1L_1 、 L_1S_1 、 L_1L_2 和 S_1 并没有统一的对比关系, 与黄土高原有明显区别 (张健等, 2004; 庞奖励等, 2001a)。从整个剖面来看, 黄土和古土壤微量元素含量之间差异很小: U、Th、Y、Zr、Ga、Rb、Sr、Ba、Cu、Zn、Co、Ni、Cr 和 V 在剖面古土壤层中平均含量分别较黄土层高 6.82%、3.73%、

-1.38%、-3.64%、0.90%、1.60%、-0.81%、2.56%、2.52%、4.18%、4.84%、1.99%、0.27%、0.56%。图 3 为伊犁 ZSP 剖面黄土和古土壤样品微量元素平均值的对比, 从中也可看出所有微量元素均落在斜率为 1 的直线上, 两者微量元素含量

具有较好的一致性。从图 4 可以看出, 与上部陆壳 (UCC) 平均化学成分的对比如表明, 伊犁黄土微量元素分布曲线近于平坦线型且靠近 UCC 分布曲线, 表明伊犁黄土与 UCC 的化学组成比较接近。

表 1 伊犁 ZSP 剖面微量元素含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 及其与黄土高原风成沉积物的对比
Table 1 The trace element contents ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) of the ZSP section in the Ili region and their comparison with those of eolian deposits in the Chinese Loess Plateau

层位	样品数	分布	U	Th	Y	Zr	Ga	Rb	Sr	Ba	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V
S ₀	8	最小值	2.50	11.10	24.4	208.6	14.60	87.3	206.60	526.90	26.60	63.10	9.80	22.20	73.60	94.10
		最大值	3.81	14.56	27.3	228.3	16.10	104.2	351.00	596.00	32.40	93.80	14.50	34.50	92.70	99.30
		平均值	2.98	13.25	25.61	218.73	15.64	94.09	280.54	568.25	28.44	71.54	13.08	31.19	79.14	96.15
		CV (%)	16.24	8.13	3.26	3.62	3.00	5.16	18.98	4.14	6.43	13.74	11.42	12.46	9.02	1.66
L ₁ L ₁	11	最小值	2.20	11.10	23.8	202.4	14.90	87.8	296.00	539.50	24.80	62.20	9.60	24.40	75.10	93.20
		最大值	3.73	14.81	28.2	237	15.90	97.1	348.10	613.60	30.90	75.10	14.60	33.60	89.10	101.10
		平均值	2.82	13.00	25.87	220.01	15.57	93.11	327.01	568.98	27.47	67.81	12.17	30.13	79.23	96.41
		CV (%)	14.55	8.60	4.52	4.65	2.32	2.97	6.09	3.96	6.25	6.67	13.71	11.54	6.76	2.82
L ₁ S ₁	23	最小值	2.40	11.50	22.2	170.2	15.10	85.7	282.8	521.00	25.90	63.00	9.30	25.00	68.50	88.50
		最大值	4.31	14.57	26.5	207.4	17.00	102.3	334.1	626.60	31.70	87.70	15.40	34.50	9.20	104.70
		平均值	3.28	12.94	25.13	196.1	16.13	97.15	310.26	569.01	28.78	73.79	12.90	31.36	79.51	99.38
		CV (%)	13.44	7.29	3.63	4.56	2.99	3.25	4.57	4.59	4.21	7.18	15.33	10.91	7.54	3.87
L ₁ L ₂	11	最小值	2.30	10.20	24.4	182.30	15.70	94.1	256.40	495.20	24.80	68.30	9.80	25.60	74.50	93.90
		最大值	3.71	13.59	27	225.30	17.20	100.6	300.70	572.50	30.50	80.70	14.40	34.44	86.00	106.70
		平均值	3.12	12.12	25.61	203.41	16.36	97.21	277.93	541.88	28.41	72.68	12.46	30.95	79.29	99.83
		CV (%)	15.10	9.08	3.12	5.64	3.14	2.04	5.71	3.94	6.33	6.38	12.75	10.67	5.33	3.50
S ₁	3	最小值	2.50	13.20	26.3	217.8	15.50	99.4	270.60	558.30	27.90	69.80	9.10	25.10	75.70	96.40
		最大值	3.34	13.50	27.2	231.1	16.10	100.5	275.30	593.00	28.60	78.80	14.90	32.00	85.80	101.90
		平均值	2.86	13.37	26.73	225.33	15.87	100.07	273.67	578.13	28.12	72.90	12.57	29.40	80.10	99.93
		CV (%)	15.13	1.15	1.69	3.03	2.03	0.59	0.97	3.09	1.34	7.01	24.36	12.76	6.46	3.07
洛川黄土	13	最小值	2.00	10.50	22.2	230	16.00	102.00	116.00	388.00	18.00	66.00	12.00	31.00	15.00	78.00
		最大值	5.70	17.30	26.70	275.00	20.00	127.00	142.00	655.00	31.00	90.00	17.00	44.00	84.00	106.00
		平均值	3.26	13.35	24.15	247.92	17.92	114.75	130.5	436.31	25.23	79.15	14.77	37.31	53.23	94.31
		CV (%)	33.08	15.73	5.51	5.18	8.04	5.51	6.27	15.62	16.43	8.15	10.03	11.86	33.23	7.14
洛川古土壤	12	最小值	1.20	11.00	23.5	228.00	16.00	113.00	98.00	414.00	26.00	76.00	13.00	36.00	43.00	93.00
		最大值	5.20	16.30	31.4	265.00	22.00	137.00	124.00	715.00	34.00	90.00	18.00	44.00	82.00	109.00
		平均值	3.01	13.78	27.64	242.09	18.83	125.18	116.27	465.58	29.25	82.83	15.75	40.67	59.58	99.58
		CV (%)	34.24	13.53	8.86	4.50	9.83	5.20	5.48	18.38	9.12	6.34	9.03	4.84	19.54	5.15

注: CV 为变异系数; 洛川黄土、古土壤的原始数据来源于文献 (陈骏等, 2001a)

5 讨论

5.1 微量元素分布及其环境指示意义

从表 1 伊犁 ZSP 剖面 S₀、L₁L₁、L₁S₁、L₁L₂ 和 S₁ 各地层变异系数来看, 除 U、Co、Ni 及 S₀ 层 Sr、Zn 超过 10% 外, 其他微量元素均在 0.58%~9.07%, 其中仅 S₁ 层 Co 元素变异系数超过 20% (24.36%), 说明伊犁 ZSP 剖面各层微量元素含量变化相对较小。从整个剖面来看, 黄土和古土壤各微量元素变异系数差异均小于 5%。从图 3 伊

犁黄土和古土壤层微量元素含量也可以看出, 两者具有较好的一致性, 可能意味着末次冰期以来伊犁黄土和古土壤形成时的环境变化差异较小, 两者所经历的风化成壤作用程度基本相同; 这与伊犁黄土和古土壤均经历了低等强度的化学风化作用且风化分异作用不明显 (李传想和宋友桂, 2011c) 相一致。与黄土高原相比, 除伊犁 ZSP 黄土剖面 Sr、Zn、Co 和 Ni 微量元素含量变异系数增幅分别比黄土高原大 23.85%、11.47%、39.10%、28.38% 外,

U、Th、Y、Zr、Ga、Rb、Ba、Cu、Cr 和 V 元素分别比黄土高原小 110.45%、135.17%、130.67%、16.98%、208.84%、90.34%、349.31%、175.60%、226.60%、103.04%，表明伊犁黄土微量元素组成比较均一，其含量分布变化远小于黄土高原。但与黄土高原典型风成沉积物相比（图 4），伊犁

黄土微量元素除 Sr 和 Cr 含量分别富集 58.67% 和 28.98% 外，其他微量元素总体具有较好的相似性。在两研究区各微量元素含量基本一致的条件下，微量元素的分布存在这么大的差异可能是后期环境改造所致，可能暗示着末次冰期以来伊犁地区环境变化幅度总体较黄土高原小的多。

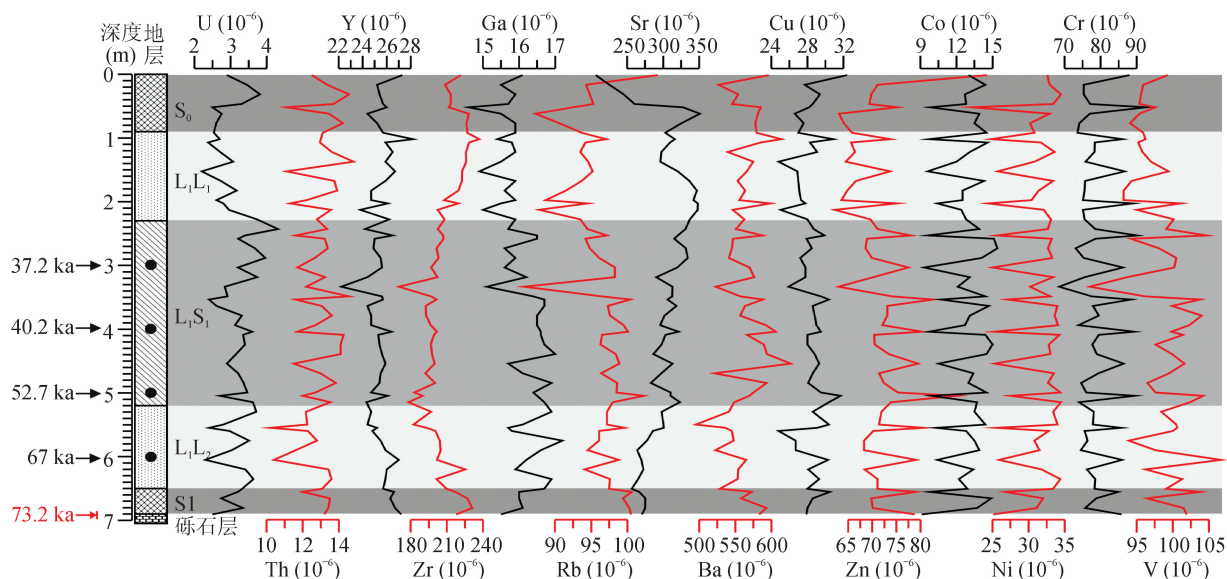


图2 伊犁 ZSP 剖面微量元素含量垂相变化

黄土层 L_1 包括 L_{1L1} 、 L_{1S1} 、 L_{1L2}

Fig.2 Distributions of the trace elements contents of the ZSP section in the Ili region

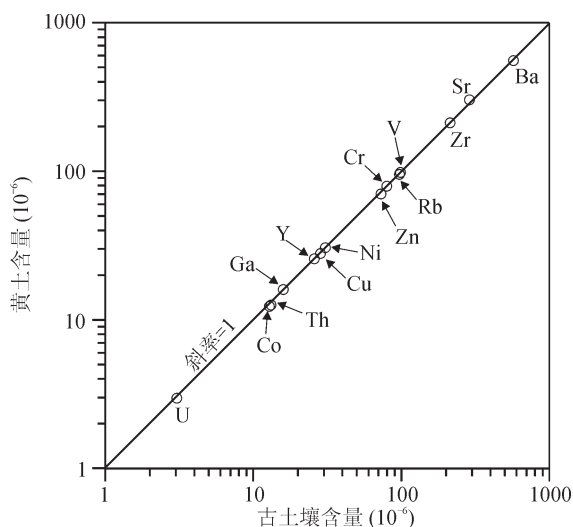


图3 伊犁 ZSP 黄土和古土壤微量元素含量的比较

Fig. 3 Comparison of trace elements contents between loess and paleosol at the ZSP section in the Ili region

在风化成壤过程中，湿润的酸性淋溶条件导致 Sr^{2+} 较容易以游离态的形式随土壤溶液或地表水发生迁移，地层中大量的 Sr 被淋溶（庞奖励等，2001b），而干旱且无植被覆盖的条件

则会阻止 Sr 的迁移，强烈的蒸发亦导致了 Sr 的地球化学积聚（邢光熹等，2003）。伊犁黄土 Sr 元素含量较黄土高原高的情况下，其分布变异系数较黄土高原小，可能是由于伊犁地区末次冰期以来相对干旱，Sr 元素被淋溶发生迁移造成的重新分异作用不明显所致。与此同时，伊犁黄土中 Sr 元素与上地壳平均值具有较好的一致性（图 4），也表明其没有发生淋失或者仅仅有很少淋失，这与伊犁塔勒德黄土研究结果具有较好的一致性（张文翔等，2011）。暗示着末次冰期以来伊犁黄土形成环境较黄土高原干旱。此外，有研究证实 Cr 是化学性质较稳定的过渡族元素，属湿润气候型元素（黄汝昌，1982），在干冷气候条件下，活性降低，淋失减少；而在暖湿气候条件下，易于随溶液迁移。伊犁黄土中 Cr 元素较黄土高原的富集也印证了伊犁黄土形成环境较黄土高原干冷。有研究证实，在古土壤层中 Zn、Ni、Co 元素的含量出现峰值，发生这种元素富集的原因主要是由于粘土对元素的吸附作用造成的（李艳华，2011；张健等，

2004), 而对于伊犁 ZSP 剖面不同层位 Zn、Ni 和 Co 微量元素含量波动比黄土高原稍大, 这可能与伊犁 ZSP 剖面粘土含量较黄土高原稍高(李传想等, 2012a), 从而发生粘土对 Zn、Co 和 Ni 微量元素的差异吸附作用所致。

5.2 微量元素的相关性

根据伊犁 ZSP 黄土样品的微量元素含量及 >20 μm 粒度含量进行相关性分析(表 2), 发现伊犁昭苏剖面中 Th 与 Ni、Co 相关系数分别为 0.680、-0.611; Y 与 Zr、Cr 相关系数分别为 0.607、0.602; Rb 与 Cu、Zn、V 相关系数分别为

0.664、0.809、0.685; Cu 与 Zn 相关系数为 0.742; Co 与 Ni、Cr 相关系数分别为 0.859、-0.751; Ni 与 Cr 相关系数为 -0.784; 均具有显著的相关性。Zr 元素与 >20 μm 粒度含量具有较好的正相关性 ($R^2=0.715$), 与 <20 μm 粒度含量具有显著的反相关性 ($R^2=0.714$), 这说明 Zr 元素主要包含在粒径 >20 μm 粒度粗颗粒中, <20 μm 粒度中含量较少。此外, 有研究证实 Zr 主要赋存于锆石中 (Chen et al, 1999), 可能表明伊犁黄土中锆石组分主要赋存于 >20 μm 粒度粗颗粒中, 这与黄土高原锆石粒径分布的研究结果基本一致(熊尚发等, 2008; 孙博亚等, 2011)。

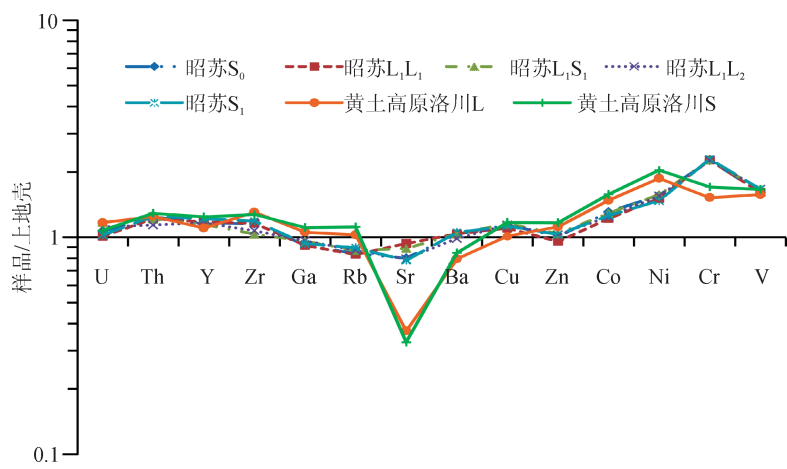


图 4 伊犁 ZSP 黄土剖面微量元素的 UCC 标准化
Fig.4 UCC-normalized pattern of trace elements of the ZSP loess section in the Ili region

表 2 伊犁 ZSP 剖面黄土-古土壤序列微量元素含量、粒度相关系数
Table 2 Related coefficients of trace element and particle size at the ZSP section in the Ili region

微量元素	U	Th	Y	Zr	Ga	Rb	Sr	Ba	Cu	Zn	Co	Ni	Cr	V	M	N
U	1															
Th	0.363	1														
Y	-0.248	-0.177	1													
Zr	-0.261	0.200	0.607	1												
Ga	0.336	0.165	-0.011	-0.357	1											
Rb	0.079	-0.214	0.507	-0.127	0.487	1										
Sr	-0.101	-0.090	-0.322	-0.086	-0.275	-0.482	1									
Ba	-0.169	-0.053	0.458	0.356	0.003	0.309	0.124	1								
Cu	-0.002	-0.215	0.399	-0.146	0.341	0.664	-0.267	0.234	1							
Zn	-0.116	-0.504	0.470	-0.198	0.209	0.809	-0.31	0.363	0.742	1						
Co	0.315	0.611	-0.427	-0.071	0.318	-0.233	-0.07	-0.373	-0.210	-0.516	1					
Ni	0.470	0.680	-0.472	-0.192	0.398	-0.151	-0.19	-0.463	-0.143	-0.453	0.859	1				
Cr	-0.345	-0.611	0.602	0.117	-0.107	0.489	0.01	0.464	0.510	0.771	-0.751	-0.784	1			
V	-0.001	-0.406	0.380	-0.231	0.294	0.685	-0.12	0.221	0.513	0.668	-0.397	-0.288	0.564	1		
M	0.163	-0.169	-0.180	-0.714	0.349	0.415	-0.053	-0.127	0.532	0.489	-0.037	0.109	0.146	0.428	1	
N	-0.164	0.169	0.181	0.715	-0.349	-0.416	0.051	0.125	-0.531	-0.489	0.037	-0.109	-0.145	-0.429	-0.999	1

注: M、N 分别代表 <20 μm 和 >20 μm 黄土粒径组分含量, 相关系数为 $p<0.05$ 水平上的显著性

从伊犁 ZSP 剖面黄土微量元素 Ba-Rb-Sr、Cr-Co-Th 和 Cr-Co-Zr 三角图中可以看出, 这些元素分布比较集中, 说明这些元素相关性极显著(图 5)。其中, 在 Ba-Rb-Sr 三角图中, 剖面中所有样品 3 种元素分布点的集中分布于右下角, 表明 Ba、Rb、Sr 三者中 Ba 的影响力最大, 而 Sr 影响力最小; 在 Cr-Co-Th 三角图中, 剖面样品 3 种元

素的分布点集中分布于右下角, 表明 Cr、Co、Th 三者中 Cr 的影响力最大, 而 Th 影响力最小; 在 Cr-Co-Zr 三角图中, 剖面样品 3 种元素集中分布于左下角, 表明 Cr、Co、Zr 三者中影响较大的是 Zr 元素, Co 元素影响最小。综上可知, 伊犁昭苏黄土微量元素 Ba、Cr、Zr 分布较集中, 影响力相对较大。

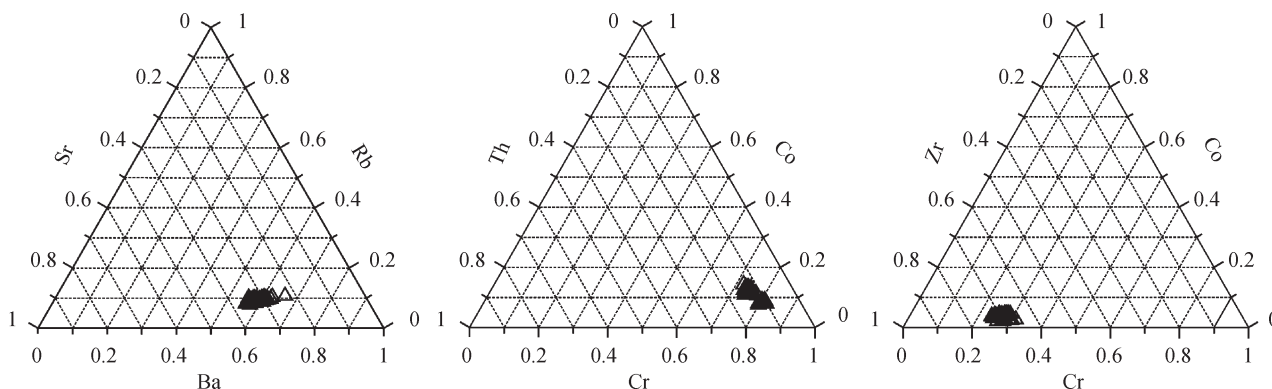


图 5 伊犁 ZSP 黄土剖面 Ba-Rb-Sr、Cr-Co-Th 和 Cr-Co-Zr 三角图

Fig.5 Triangle diagram of Ba-Rb-Sr, Cr-Co-Th and Cr-Co-Zr at the ZSP loess section in the Ili region

5.3 微量元素的活动性与迁移特征

微量元素在伊犁 ZSP 黄土剖面中的变化显示了它们的地球化学特征不同, 体现了它们的相对活动性。要了解某一元素在风化成壤过程中真正的地球化学行为, 通常用某一种稳定性元素作为参照, 计算样品中其他元素的变化率, 来获知元素的迁移与富集程度(陈骏和季峻峰, 1997)。Zr 在化学风化过程中非常稳定, 通常被作为稳定元素来衡量其他元素的迁移情况(Hutton, 1977), 因此, 本文利用 Zr 元素作为参照, 计算伊犁黄土中其他元素的变化率来获得微量元素的相对活动性。

计算公式为: $\Delta(\%) = [(X_s/I_s)/(X_p/I_p) - 1] \times 100\%$ 。式中 X_s 、 I_s 代表样品中元素 X 和参比元素 I 的含量; X_p 、 I_p 为上述元素在原始母质中的含量。若 $\Delta < 0$, 则反映元素 X 相对参比元素易迁出, 活动性强; 若 $\Delta > 0$, 反映元素 X 相对富集, 活动性弱(陈骏和季峻峰, 1997)。选择剖面中通常认为风化相对较弱的 L_1 层(不含弱发育古土壤)近似代表风化母质, 计算剖面微量元素含量的变化率百分数。

考虑风成黄土具有较一致的粉尘源区, 导致

黄土剖面中化学元素分异除与黄土母质中的矿物成分、粒度有关外(庞奖励等, 2001a), 主要外部原因还有由于其沉积以后气候环境变化引起的生物地球化学循环过程的改变(刘东生, 1985; 文启忠, 1989; 陈骏等, 2001b)。计算结果如图 6 所示, 伊犁黄土微量元素的迁移性由强至弱依次为: $Zr > Y > Sr > Cr > V > Ga > Rb > Ni > Cu > Ba > Th > Zn > Co > U$, 此序列中从左至右元素的相对富集程度依次增加。一般被认为容易发生淋失的 Sr 元素, 其与 Zr 元素相比, 并没有发生淋失而出现少量富集(富集率为 1.76%), 这与在伊犁其他剖面黄土研究结果相一致(张文翔等, 2011); 此外, 对在表生环境中的地球化学行为类似于 Sr 的 Ca 元素的研究显示 ZSP 剖面黄土 CaO 含量也呈现富集的特征(李传想等, 2012b), 表明末次冰期以来伊犁昭苏黄土沉积环境可能相对干旱。但各微量元素富集率除 U(6.49%) 和 Co(5.27%) 超过 5% 外, 其他微量元素均为 1%~5% (图 6)。虽然伊犁昭苏黄土微量元素均以淀积富集为主, 出现不同程度的富集, 但富集率均较低且变化幅度较小, 也可以表明末次冰期以来伊犁黄土沉积环境较为干旱且波动变化较小。

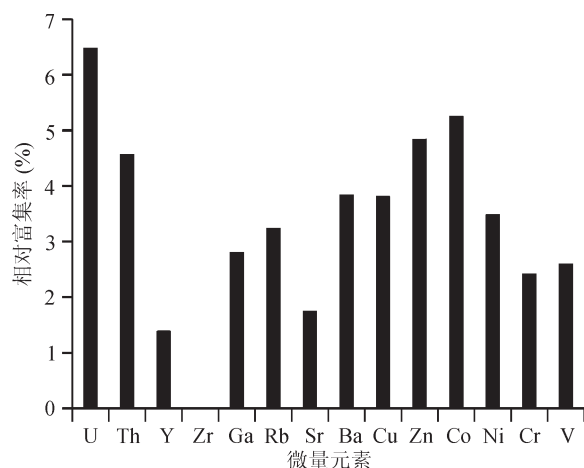


图6 伊犁 ZSP 剖面黄土微量元素相对于 Zr 元素的迁移率
Fig.6 Migration ratio of trace elements calculated relative to stable element Zr at the Zhaosu loess section in the Ili region

6 结论

(1) 从含量来看, 伊犁黄土的微量元素除 Sr 和 Cr 出现富集外, 其他微量元素与黄土高原总体具有较好的相似性, 可能暗示着末次冰期以来伊犁黄土和古土壤所经历的化学风化成壤程度基本相同, 其形成环境较黄土高原干旱。

(2) 从变异系数来看, 微量元素在伊犁黄土和古土壤层中含量分布变化差异较小; 两研究区各微量元素含量基本一致, 但伊犁昭苏剖面除 Sr、Zn、Co 和 Ni 微量元素含量分布变化比黄土高原稍大外, 其他微量元素变化均比黄土高原小的多, 可能表明末次冰期以来伊犁黄土和古土壤形成时的环境变化差异较小, 其环境变化幅度总体较黄土高原小的多。

(3) 微量元素含量与粒度的相关性分析结果表明, 伊犁黄土中 Zr 元素主要包含在粒径 $>20\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒中, 黄土中锆石组分主要赋存于这种粗颗粒组分中。伊犁昭苏剖面 Ba-Rb-Sr、Cr-Co-Th 和 Cr-Co-Zr 三角图表明, Ba、Cr、Zr 元素分布较集中, 影响力相对较大。

(4) 伊犁黄土风化过程中, 微量元素的迁移性由强至弱依次为 $\text{Zr} > \text{Y} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Ga} > \text{Rb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{Th} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{U}$ 。虽然各微量元素均出现不同程度的富集, 但富集率均较低且变化幅度较小, 可能表明末次冰期以来伊犁黄土沉积环境较为干旱且波动变化较小。

参考文献

陈 骏, 安芷生, 刘连文. 2001a. 最近 2.5 Ma 以来黄土高原

风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化 [J]. *中国科学: D 辑*, 31(2): 136-145. [Chen J, An Z S, Liu L W. 2001a. Variations in chemical compositions of the eolian dust in Chinese Loess Plateau over the past 2.5 Ma and chemical weathering in the Asian inland [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 31(2): 136-145.]

陈 骏, 汪永进, 陈 旸, 等. 2001b. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义 [J]. *地质学报*, 75(2): 259-266. [Chen J, Wang Y J, Chen Y, et al. 2001b. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese Loess and its implications for palaeomonsoon climate [J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 259-266.]

陈 骏, 季峻峰. 1997. 陕西洛川黄土化学风化程度的地球化学研究 [J]. *中国科学: D 辑*, 27(6): 531-536. [Chen J, Ji J F. 1997. Geochemical research on chemical weathering of Luochuan loess [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 27(6): 531-536.]

陈 骏, 汪永进. 1999. 陕西洛川黄土剖面的 Rb/Sr 值及其气候地层学意义 [J]. *第四纪研究*, 29(4): 350-356. [Chen J, Wang Y J, Ji J F, et al. 1999. Rb/Sr variations and its climatic stratigraphical significance of a loess-paleosol profile from Luochuan, Shaanxi Province [J]. *Quaternary Sciences*, 29(4): 350-356.]

刁桂仪, 潘景瑜. 1996. 黄河中游马兰黄土中若干微量元素的平均含量及相关性研究 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 16(2): 85-92. [Diao G Y, Pan J Y. 1996. Study on the average contents and correlativity of trace elements in Malan Loess from the middle reaches of the Yellow River [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 16(2): 85-92.]

刁桂仪, 文启忠. 1979. 第四纪沉积物中的微量元素 [J]. *地质地球化学*, (5): 62-66. [Diao G Y, Wen Q Z. 1979. The trace elements of Quaternary sediments [J]. *Geology-geochemistry*, (5): 62-66.]

黄汝昌. 1982. 陆相沉积中古气候演变及元素的迁移、聚集和演化 [M]// 中国科学院兰州地质研究所. 中国科学院兰州地质研究所集刊. 北京: 科学出版社. [Huang R C. 1982. Paleo-climate evolution and elements transfer, assemblage and evolution in terrestrial sediments [M]// Lanzhou Geology Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Collection of Lanzhou Geology Research Institute, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press.]

- 靳鹤龄. 2003. 塔克拉玛干沙漠形成演化与气候变化 [D]. 北京: 中国科学院研究生院. [Jin H L. 2003. The formation and evolution of the Taklimakan desert and climate change [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences.]
- 李传想, 宋友桂. 2011a. 粒度年龄模型在伊犁黄土地层定年中的初步应用 [J]. *地球环境学报*, 2(5): 613–618. [Li C X, Song Y G. 2011a. Application of grain-size age models on Zhaosu loess stratigraphy in Ili region[J]. *Journal of Earth Environment*, 2(5): 613–618.]
- 李传想, 宋友桂. 2011b. 新疆伊犁黄土磁化率增强机制差异性分析 [J]. *地球学报*, 32(1): 80–86. [Li C X, Song Y G. 2011b. Differences in magnetic susceptibility enhancement in Ili Loess, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 80–86.]
- 李传想, 宋友桂. 2011c. 新疆伊犁黄土化学风化特征及其控制因素 [J]. *高校地质学报*, 17(4): 611–619. [Li C X, Song Y G. 2011c. Chemical weathering characteristics and controlling factors of the Ili Loess, Xinjiang [J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(4): 611–619.]
- 李传想, 宋友桂. 2012. 新疆伊犁黄土和古土壤形成环境的差异性分析 [J]. *中国沙漠*, 32(5): 1256–1262. [Li C X, Song Y G. 2012. Differences in the formation environment of loess and paleosol in Ili Region, Xinjiang, China [J]. *Journal of Desert Research*, 32(5): 1256–1262.]
- 李传想, 宋友桂, 强小科. 2013. 伊犁风成黄土不同组分对磁化率的影响 [J]. *地球物理学进展*, 28(2): 747–753. [Li C X, Song Y G, Qiang X K. 2013. Effects of different components on magnetic susceptibility of the Ili eolian loess [J]. *Progress in Physics*, 28(2): 747–753.]
- 李传想, 宋友桂, 王乐民. 2012a. 伊犁盆地黄土分布、年代及粉尘来源分析 [J]. *地球与环境*, 40(3): 314–320. [Li C X, Song Y G, Wang L M. 2012b. Distribution, age and dust sources of loess in the Ili Basin [J]. *Earth and environment*, 40(3): 314–320.]
- 李传想, 宋友桂, 王乐民. 2012b. 新疆伊犁黄土元素地球化学特征及古环境意义 [J]. *新疆地质*, 30(1): 103–108. [Li C X, Song Y G, Wang L M. 2012a. Geochemical characteristics and paleoenvironmental significance of the loess in the Ili Region, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 30(1): 103–108.]
- 李江凤, 袁玉江, 由希尧. 2000. 树木年轮水文学研究与应用 [M]. 北京: 科学出版社. [Li J F, Yuan Y J, You X Y. 2000. Research and application of tree ring hydrology [M]. Beijing: Science Press.]
- 李金婵, 陈秀玲, 贾丽敏, 等. 2014. 新疆伊犁河谷沙漠沉积不同粒径地球化学元素分布特征 [J]. *地球环境学报*, 5(2): 102–110. [Li J C, Chen X L, Jia L M, et al. 2014. The distribution of geochemical elements in different grain-size fractions of desert sediments in Ili Valley of Xinjiang, China [J]. *Journal of Earth Environment*, 5(2): 102–110.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu T S. 1985. Loess and environment [M]. Beijing: Science and Technology Press.]
- 刘连文, 陈 骏, 陈 旸, 等. 2002. 最近 130 ka 以来黄土中 Zr/Rb 值变化及其对冬季风的指示意义 [J]. *科学通报*, 47(9): 702–706. [Liu L W, Chen J, Chen Y, et al. 2002. The Zr/Rb value change and its implications on the winter wind form loess in the last 130 ka [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(9): 702–706.]
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社. [Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al. 1984. Geochemical characteristics of elements [M]. Beijing: Science Press.]
- 庞奖励, 黄春长, 张占平. 2001a. 陕西五里铺黄土微量元素组成与全新世气候不稳定性研究 [J]. *中国沙漠*, 21(2): 151–156. [Pang J L, Huang C C, Zhang Z P. 2001b. Pb, Cu, Zn, Cd, Mn element and climatic change in loess-paleosol profile at Qishan, Shaanxi Province [J]. *Journal of Desert Research*, 21(2): 151–156.]
- 庞奖励, 黄春长, 张占平. 2001b. 陕西岐山黄土剖面 Rb, Sr 组成与高分辨率气候变化 [J]. *沉积学报*, 19(4): 637–641. [Pang J L, Huang C C, Zhang Z P. 2001a. Rb、Sr Elements and High Resolution Climatic Records in the Loess-Paleosol Profile at Qishan, Shannxi [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4): 637–641.]
- 史正涛. 2002. 天山黄土和西北内陆干旱化 [D]. 兰州: 兰州大学. [Shi Z T. 2002. Loess in Tianshan Mountains and its implication of drying and desertification in Xingjiang, northwest China [D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- 宋友桂, 史正涛. 2010. 伊犁盆地黄土分布和组成特征 [J]. *地理科学*, 31(2): 267–272. [Song Y G, Shi Z T. 2010. Distribution and compositions of loess sediments in Yili Basin, central Asia [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 31(2):

- 267-272.]
- 宋友桂,史正涛,方小敏,等. 2010a. 伊犁黄土的磁学性质及其与黄土高原对比[J]. *中国科学:地球科学*, 40(1): 61-72. [Song Y G, Shi Z T, Fang X M, et al. 2010. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau [J]. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 40(1): 61-72.]
- 宋友桂, NIE Jun-sheng, 史正涛, 等. 2010b. 天山黄土磁化率增强机制初步研究[J]. *地球环境学报*, 1(1): 66-72. [Song Y G, Nie J S, Shi Z T, et al. 2010. A preliminary study of magnetic enhancement mechanisms of the Tianshan Loess [J]. *Journal of Earth Environment*, 1(2): 66-72.]
- 孙博亚, 张云翔, 弓虎军, 等. 2011. 洛川黄土碎屑锆石的粒度特征及其古气候意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 40(1): 119-126. [Sun B Y, Zhang Y X, Gong H J, et al. 2011. The grain size of the detrital zircon of Luochuan and its paleoclimate implication [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 40(1): 119-126.]
- 文启忠. 1989. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社. [Wen Q Z. 1989. Geochemistry of chinese loess [M]. Beijing: Science Press.]
- 文启忠, 燕金寿, 刁桂仪, 等. 1979. 黄土改造过程中微量元素的变化[J]. *地球化学*, (2): 145-155. [Wen Q Z, Yan J S, Diao G Y. 1979. The trace elements variation in the process of loess transformation [J]. *Geochemical*, (2): 145-155.]
- 邢光熹, 朱建国. 2003. 土壤微量元素和稀土元素化学[M]. 北京: 科学出版社. [Xing G X, Zhu J G. 2003. The chemistry of trace elements and rare elements in soil [M]. Beijing: Science Press.]
- 熊尚发, 朱园健, 周茹, 等. 2008. 白水黄土-红粘土化学风化强度的剖面特征与粒度效应[J]. *第四纪研究*, 28(5): 812-821. [Xiong S F, Zhu Y J, Zhou R, et al. 2008. Chemical weathering intensity and its grain-size dependence for the loess-red clay deposit of the Baishui Section, Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 28(5): 812-821.]
- 叶玮. 2000. 新疆伊犁地区黄土矿物特征与沉积环境[J]. *干旱区研究*, 17(4): 1-10. [Ye W. 2000. The mineral characteristics of loess and depositing environment in Yili Area, Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 17(4): 1-10.]
- 叶玮. 2001. 新疆西风区黄土沉积特征与古气候[M]. 北京: 海洋出版社. [Ye W. 2001. The characteristics and paleoclimate of loess deposits in westerly area [M]. Beijing: Ocean Press.]
- 张健, 赵景波, 杜娟, 等. 2004. 西安临潼白庙剖面全新世黄土与环境变化[J]. *干旱区研究*, 21(2): 117-121. [Zhang J, Zhao J B, Du J, et al. 2004. Study on the relationship between Holocene loess at Baimiao profile and environment change in Lin tong region, Xi'an [J]. *Arid Zone Research*, 21(2): 117-121.]
- 张文翔, 史正涛, 张虎才, 等. 2011. 中国西风区伊犁盆地塔勒德黄土-古土壤元素地球化学特征及环境意义[J]. *第四纪研究*, 31(5): 812-821. [Zhang W X, Shi Z T, Zhang H C, et al. 2011. Geochemical characteristics and environmental significance of Talede loess-paleosol sequences of Ili Basin in central Asia [J]. *Quaternary Sciences*, 31(5): 812-821.]
- 曾蒙秀, 宋友桂. 2013. 新疆伊犁昭苏黄土剖面中的矿物组成及其风化意义[J]. *地质论评*, 59(3): 575-586. [Zeng M X, Song Y G. 2013. Mineral composition and their weathering significance of Zhaosu loess-paleosol sequence in the Ili Basin, Xinjiang [J]. *Geological Review*, 59(3): 575-586.]
- Chen J, An Z S, Head J. 1999. Variation of Rb/Sr ratios in the loess-paleosol sequences of central China during the last 130,000 years and their implications for monsoon paleoclimatology [J]. *Quaternary Research*, 51(3): 215-219.
- Chen J, Chen Y, Liu L W, et al. 2006. Zr/Rb ratio in the Chinese loess sequences and its implication for changes in the East Asian winter monsoon strength [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(6): 1471-1482.
- Chen Q, Liu X M, Heller F, et al. 2012. Susceptibility variations of multiple origins of loess from the Ily Basin (NW China) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(15): 1844-1855.
- E C Y, Lai Z P, Sun Y J, et al. 2012. A luminescence dating study of loess deposits from the Yili River basin in western China [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 50-55.
- Feng Z D, Ran M, Yang Q L, et al. 2011. Stratigraphies and chronologies of late Quaternary loess-paleosol sequences in the core area of the central Asian arid zone [J]. *Quaternary international*, 240(1): 156-166.
- Hutton J. 1977. Titanium and zirconium minerals [M]// Dixon

- J B, Weed S B. Minerals in soil environments. Madison: Soil Science Society of America, 673.
- Jia J, Xia D S, Wang B, et al. 2013. The investigation of magnetic susceptibility variation mechanism of Tien Mountains modern loess: Pedogenic or wind intensity model? [J]. *Quaternary International*, 296: 141–148.
- Li X Q, Zhao K L, Dodson J, et al. 2011. Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: new evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(23): 3457–3466.
- Liu Y, Shi Z T, Deng C L, et al. 2012. Mineral magnetic investigation of the Talede loess-paleosol sequence since the last interglacial in the Yili Basin in the Asian interior [J]. *Geophysical Journal International*, 190(1): 267–277.
- Song Y G, Chen X L, Qian L B, et al. 2014. Distribution and composition of loess sediments in the Ili Basin, Central Asia [J]. *Quaternary International*, 334–335: 61–73.
- Song Y G, Li C X, Zhao J D, et al. 2012. A combined luminescence and radiocarbon dating study of the Ili loess, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 10: 2–7.
- Song Y G, Shi Z T, Fang X M, et al. 2010. Loess magnetic properties in the Ili Basin and their correlation with the Chinese Loess Plateau [J]. *Science China Earth Sciences*, 53(3): 419–431.
- Song Y G, Shi Z T, Dong H M, et al. 2008. Loess magnetic susceptibility in Central Asia and its paleoclimatic significance [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2: 1227–1230.
- Yang S L, Forman S L, Song Y G, et al. 2014. Evaluating OSL-SAR protocols for dating quartz grains from the loess in Ili Basin, Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 20: 78–88.
- Zhang W X, Shi Z T, Chen G J, et al. 2013. Geochemical characteristics and environmental significance of Talede loess-paleosol sequences of Ili Basin in Central Asia [J]. *Environmental Earth Sciences*, 70: 1–12.
- Zhao K L, Li X Q, Dodson J, et al. 2013. Climate instability during the last deglaciation in central Asia, reconstructed by pollen data from Yili Valley, NW China [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 189: 8–17.