

文章编号: 0258-7106(2014)05-1081-10

青海西部尕斯库勒盐湖沉积物中铀和钍 地球化学特征探讨*

叶传永^{1,2}, 王志明³, 郝伟林^{3,4}, 林效宾^{3,4}, 韩军^{3,4}, 郑绵平^{1,2}

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037;

2 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心, 北京 100037; 3 核工业北京地质研究院, 北京 100029;

4 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029)

摘要 文章以柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖沉积物为研究对象, 通过对钻孔沉积物和地表沉积物中铀和钍含量的研究, 探讨了盐湖沉积物中铀和钍的地球化学特征。分析表明, 钻孔沉积物中铀和钍之间存在明显的正相关关系。在横向上, 随地表取样点逐渐远离湖表卤水, 沉积物中铀和钍的含量先增高后又急剧降低, 且受补给水铀含量影响大; 在纵向上, 同一个晶间卤水层或者碎屑物沉积层内铀含量垂直分异明显, 铀含量随深度增加而递增。就沉积物中铀和钍的赋存形式而言, 2/3 的铀被黏土质点吸附, 1/3 的铀夹杂在盐类矿物中; 而 90% 以上的钍被黏土质点吸附, 10% 以下的钍夹杂在盐类矿物中。干盐滩中毛细蒸发和淋滤等化学沉积分异作用造成盐湖沉积中心的沉积物铀含量相对较高。

关键词 地球化学; 沉积物; 铀和钍; 化学沉积分异作用; 尕斯库勒盐湖

中图分类号: P619.14; P619.13; P619.211

文献标志码: A

Geochemical characteristics of uranium and thorium in sediments from Gasikule Salt Lake in western Qinghai Province

YE ChuanYong^{1,2}, WANG ZhiMing³, HAO WeiLin^{3,4}, LIN XiaoBin^{3,4}, HAN Jun^{3,4}
and ZHENG MianPing^{1,2}

(1 MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Research and Development Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China; 3 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 4 Key Laboratory of Uranium Resources Exploration and Evaluation Technology of CNNC, Beijing 100029, China)

Abstract

In order to explore the geochemical behavior of uranium/thorium in salt lake's sediments, the authors studied the concentrations of uranium and thorium in drill holes and surface sediments of the Gasikule Salt Lake located on the western margin of Qinghai Province. The results reveal that uranium concentrations exhibit a positive correlation with thorium concentrations in sediments. With the distance from the surface brine, uranium and thorium values of sediments increase and then decrease rapidly in horizon, deeply impacted by the supplemental water. Vertically, uranium concentrations in debris deposition are higher than the values of the evaporite period. Moreover, vertical differentiation of uranium concentrations is obvious in a crystal brine layer or debris

* 本文得到核能开发科研技术研究项目“含铀盐湖铀富集条件和资源评价与开发技术研究(编号:地HY230)”资助

第一作者简介 叶传永, 男, 1984年生, 博士后, 主要从事盐湖矿产普查、勘探和水文地质研究。Email: chuanyongye@163.com

收稿日期 2014-07-12; 改回日期 2014-08-15。苏杭编辑。

layer and increases with the depth. The average uranium concentration in pure salts (halite, epsomite, gypsum) is $1.02 \mu\text{g/g}$, which is approximately one third of that of the sediments. Therefore, two thirds of uranium in sediments was absorbed by clay while one third of uranium was mixed with saline minerals. However, more than 90 percent of thorium in sediments was absorbed by clay while less than 10 percent of thorium was mingled with saline minerals. Chemical sedimentary differentiation in playa such as capillary evaporation and leaching was significant for uranium enrichment in sediments.

Key words: geochemistry, sediments, uranium and thorium, chemical sedimentary differentiation, Gasikule Salt Lake

沉积物中化学元素的集散是一个十分复杂的地质过程,控制和影响因素很多。一般而言,沉积物的化学成分受4个方面因素的影响:原岩的物质组成;原岩在源区的风化作用;沉积物在搬运迁移中的分选作用;沉积后的化学风化、成岩和变质作用(Sawyer, 1986; Bauluz et al., 2000; Price et al., 2003; Huang et al., 2009; Bowen et al., 2013; Zhang et al., 2014; 陈骏等, 2004)。在不同沉积环境下,沉积物的化学元素组成有所不同,元素含量的变化在一定程度上则可以反映沉积环境的变化信息。目前许多研究成果表明,在影响岩石元素组成的诸多因素中,与盆地古地理、古气候条件密切相关的湖(海)盆水体的物理化学条件(包括温度、盐度、 E_h 值、pH值和深度等参数)是元素、特别是微量元素集散的重要控制因素之一(Nesbitt, 1979; Nesbitt et al., 1982; 1984; 1996; 张文翔, 2009)。沉积作用中铀的地球化学特点,主要取决于其本身的化学性质。但表生环境的物理作用、化学作用、生物作用、自然地理和地质构造等因素,对其也有重要影响。

在陆相沉积阶段发生物理、化学和生物沉积时,铀的各种沉淀剂,如有机质、黏土、磷酸盐及各种胶体物质也随着沉淀。铀虽然能被这些物质吸附和还原,并产生局部富集,但总的趋向是分散。因为在陆地上,碎屑物的搬运和沉淀是在地壳表面富氧的条件下进行的。大气圈丰富的游离氧将+4价铀氧化为+6价铀,从而使铀迁移分散,不利于其沉淀富集。在风化壳中,母岩风化分解后,由于流水的冲刷作用,部分铀转移到水溶液中。因此,经过搬运和沉淀所形成的碎屑沉积物中铀含量比母岩低。在土壤形成过程中,铀可以形成易溶的铀酰有机化合物而被地表水带出,也能因吸附或形成难溶化合物而沉淀。但是,各种气候条件下形成的不同类型土壤含铀量都不高,一般为 $2\sim 4 \text{ mg/L}$,接近或稍低于母岩中铀的含量。当流水进入河漫滩、沼泽和湖泊时,流速减

慢,其中的机械悬浮物和胶体悬浮物以及被悬浮物吸附和搬运的铀发生沉淀。由于吸附或局部还原作用,沉积物中铀的含量可能增高。但由于水中铀含量很低(一般低于 10^{-7} g/L),在这个阶段一般不会形成铀矿床(王剑峰, 1986)。

作者在前人研究的基础上,对尕斯库勒盐湖卤水与沉积物中铀的分布及富集机理进行了系统研究,其中,沉积物孢粉组合与铀分布关系、卤水水化学特征、沉积特征等部分结果已经发表(叶传永等, 2013a; 2013b; 2014)。本文主要阐述铀、钍元素在尕斯库勒盐湖第四纪沉积物以及钻孔沉积物中的分布特征,初步揭示不同类型介质中铀和钍的迁移和富集规律,对于了解该区盐湖的微量元素富集机理有重要的理论意义。

1 研究区概况

尕斯库勒盐湖位于青藏高原柴达木盆地西部,地理坐标为 $N 37^{\circ}57' \sim 38^{\circ}11'$, $E 91^{\circ}40' \sim 90^{\circ}10'$,属于山间断块深盆构造湖(郑绵平等, 1989)。盐湖北部为阿哈堤山,属阿尔金山系,最高峰阿卡腾能山海拔 4790 m ;东北部为油砂山,走向NW,海拔一般为 $3200\sim 3600 \text{ m}$,主峰高 3835 m ;东部为东柴山丘陵;南为祁漫塔格山,属昆仑山系,山体走向NWW,海拔一般为 $4000\sim 4500 \text{ m}$,主峰高 5684 m ,其上终年积雪并发育有现代冰川(图1)。周边及盐湖区出露的地层有新元古界震旦系、下古生界(未细分)、泥盆系、石炭系、三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系、第四系(袁亚娟等, 2011; 黄麟等, 2007; 张彭熹, 1987)。该盐湖地下水主要为南部祁漫塔格山(富铀)、西部泉集河(铁木里克河、卡里木塔河、赛斯克雅河、托斯克雅河)和北部阿哈堤山地表径流渗透补给。卡里木塔河、铁木里克河、赛斯克雅河为季节性河流,托斯克雅河为常年性河流。其中,卡里木塔

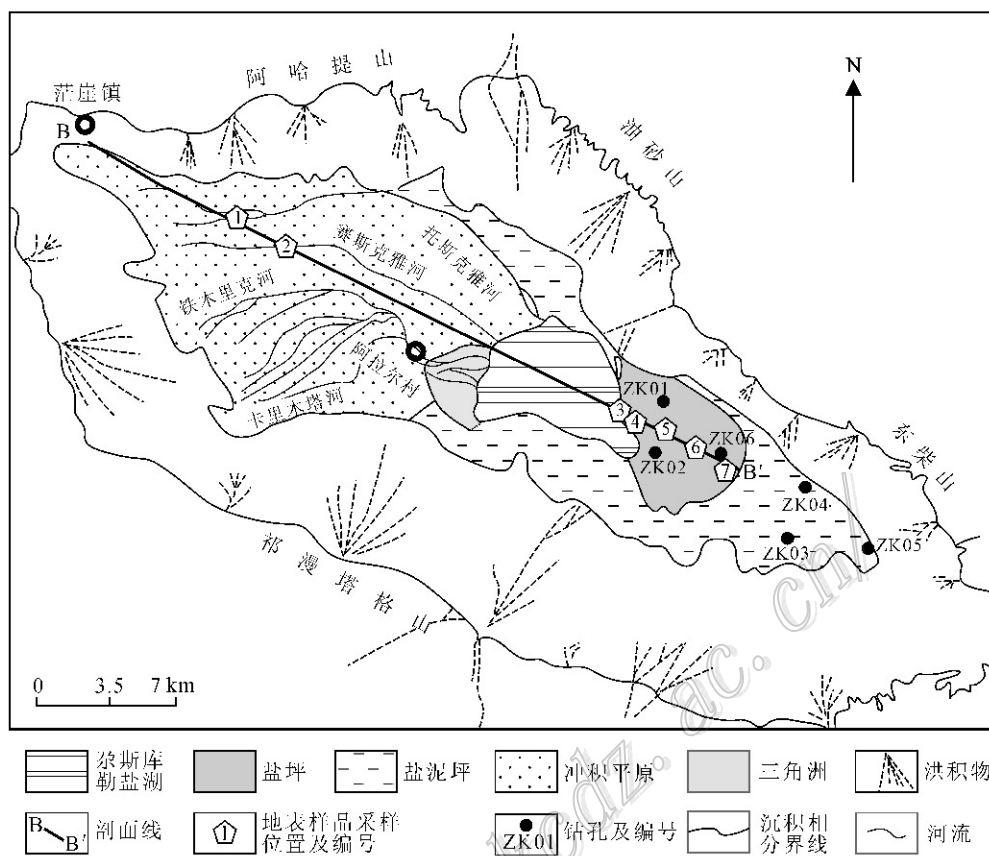


图 1 尕斯库勒盐湖钻孔和地表沉积物采样点分布图(底图改自刘成林等, 2013)

Fig. 1 Positions of drill holes and distribution of surface sediments sampling sites (modified after Liu et al., 2013)

河和铁木里克河在阿拉尔村汇集形成阿拉尔河,阿拉尔河为常年性河流。湖区为典型的内陆干旱气候,表现为干燥多风、降雨稀少、蒸发强烈和昼夜温差大的特征。湖盆内年降水量 13.4 mm;年蒸发量为 2929.6 mm,是年降水量的 220 倍左右,最大风速可达 40 m/s,风向主要为 NW 向和 NNW 向(黄麟等, 2007)。

该区以往铀矿地质工作程度很低,只有黄麒等(2007)在《柴达木盆地盐湖演化与古气候波动》一书中提到尕斯库勒盐湖各类水体中铀的含量和湖水铀

来源,以及二机部西北地勘局 213 大队在该盐湖北边的油砂山和七个泉地区做了一些工作。

2 样品采集与分析结果

2010 年本项目组在尕斯库勒盐湖东部干盐滩实施 6 个钻孔(图 1),其基本信息见表 1。钻孔岩芯样品原则上以 2 m 为单位间隔取样,基本信息见表 2。当遇到有较厚盐类层位时适当加密取样(共取得 20 个加

表 1 尕斯库勒盐湖 6 个钻孔基本信息
Table 1 Basic information of six drill holes in the Gasikule Salt Lake

钻孔编号	坐标		孔深/m	取芯率/%	固样数量/个
	东经	北纬			
ZK01	90°53'25.2"	38°07'19.4"	37.16	81.31	9
ZK02	90°53'28.1"	38°05'37.3"	46.00	90.11	26
ZK03	90°56'30.6"	38°02'45.4"	24.25	85.24	12
ZK04	90°58'06.9"	38°05'41.5"	25.59	88.28	14
ZK05	90°59'57.4"	38°02'55.5"	7.10	90.85	3
ZK06	90°56'18.5"	38°05'07.6"	102.69	83.98	53

密样品,包括 11 个石盐样品、4 个石膏样品、5 个泻利盐样品),这些盐类样品通常夹杂有灰色或黑色碎屑物质或泥质。同时,也采集了地表样品约 1 kg,带回实验室做分析测试。

表 2 钻孔样品基本信息

Table 2 Basic information of all samples from drill holes

钻孔	序号	编号	深度/m	样品描述	$w(U)/\mu\text{g/g}$	$w(\text{Th})/\mu\text{g/g}$	U/Th
ZK01	1	CG-1-1	13.03	白色黏土质含石盐的泻利盐	1.09	0.60	1.82
	2	CG-1-2	15.11	白色石盐	1.58	0.43	3.66
	3	CG-1-3	17.65	白色石盐	4.26	1.47	2.90
	4	CG-1-4	19.90	白色石盐	2.28	3.03	0.75
	5	CG-1-5	20.30	土色黏土	8.11	6.17	1.31
	6	CG-1-6	26.97	土灰色石盐质黏土	1.54	4.88	0.32
	7	CG-1-7	28.47	灰色黏土	1.10	3.24	0.34
	8	CG-1-8	28.73	褐色黏土	2.46	5.36	0.46
	9	CG-1-9	34.23	灰褐色石盐质黏土	6.01	15.50	0.39
ZK02	10	CG-2-1	2.53	土色含石盐的黏土	2.27	2.78	0.82
	11	CG-2-2	3.15	土色含石盐的黏土	1.63	2.81	0.58
	12	CG-2-3	5.00	灰色含黏土的石盐	1.35	1.23	1.10
	13	CG-2-4	6.90	灰色含石盐的泻利盐	0.71	0.63	1.13
	14	CG-2-5	8.05	灰色黏土质石盐	1.41	1.28	1.10
	15	CG-2-6	10.85	灰黑色含石盐的泻利盐	1.42	0.83	1.71
	16	CG-2-7	13.05	白色石盐	1.33	1.07	1.24
	17	CG-2-8	14.90	灰色黏土	1.96	1.32	1.48
	18	CG-2-9	16.99	灰色含石盐的泻利盐	1.05	1.00	1.05
	19	CG-2-10	18.38	灰色含石盐的黏土	4.04	6.01	0.67
	20	CG-2-11	20.25	土色黏土	1.78	2.56	0.70
	21	CG-2-12	22.61	土色黏土	10.70	7.77	1.38
	22	CG-2-13	23.74	灰白色含黏土的石盐	5.19	8.00	0.65
	23	CG-2-14	25.30	土色黏土	10.10	15.30	0.66
	24	CG-2-15	25.90	灰色黏土	4.30	9.70	0.44
	25	CG-2-16	28.91	土色粉砂	2.99	5.19	0.58
	26	CG-2-17	0.78	土色黏土	2.17	5.10	0.43
	27	CG-2-18	32.06	灰色黏土	2.42	8.16	0.30
	28	CG-2-19	33.44	土色黏土	4.77	7.46	0.64
	29	CG-2-20	36.41	灰黑色黏土	3.96	2.78	1.42
	30	CG-2-21	37.65	灰色黏土	3.57	2.11	1.69
	31	CG-2-22	38.83	土色含石盐的黏土	3.90	1.97	1.98
	32	CG-2-23	40.44	白色泥膏岩	1.97	2.25	0.88
	33	CG-2-24	42.42	灰白色含石盐的泻利盐	0.75	0.36	2.09
	34	CG-2-25	44.90	土色黏土	2.98	3.56	0.84
	35	CG-2-26	45.59	灰白色含黏土的石盐	0.33	0.28	1.17
ZK03	36	CG-3-1	1.35	土黄色黏土质石盐	2.31	1.95	1.18
	37	CG-3-2	3.43	土黄色黏土质石盐	0.42	0.34	1.22
	38	CG-3-3	5.03	土黄色黏土质石盐	0.60	1.02	0.59
	39	CG-3-4	7.24	土色含石盐的黏土	1.21	0.85	1.43
	40	CG-3-5	8.52	土色黏土	14.50	7.67	1.89
	41	CG-3-6	11.05	土黄色黏土	1.77	4.80	0.37
	42	CG-3-7	12.90	土黄色黏土	6.57	18.80	0.35
	43	CG-3-8	14.775	土黄色黏土	5.75	17.00	0.34
	44	CG-3-9	16.73	土黄色黏土	13.40	15.70	0.85

续表 2-1
Count. Table 2-1

钻孔	序号	编号	深度/m	样品描述	$w(\text{U})/\mu\text{g/g}$	$w(\text{Th})/\mu\text{g/g}$	U/Th
ZK03	45	CG-3-10	18.45	土黄色黏土	5.00	17.60	0.28
	46	CG-3-11	19.98	土黄色黏土	4.80	14.90	0.32
	47	CG-3-12	24.05	土黄色黏土	2.17	11.50	0.19
ZK04	48	CG-4-1	1.10	土色黏土质石盐	0.49	0.76	0.64
	49	CG-4-2	2.83	土色黏土质石盐	1.27	0.91	1.39
	50	CG-4-3	3.80	土色黏土质石盐	1.46	0.71	2.07
	51	CG-4-4	5.60	土色黏土质石盐	0.43	0.50	0.86
	52	CG-4-5	7.00	土黄色黏土质石盐	0.62	0.36	1.74
	53	CG-4-6	9.22	土黄色黏土质石盐	1.01	0.51	1.98
	54	CG-4-7	10.77	灰白色石盐	3.26	2.01	1.62
	55	CG-4-8	13.34	白色含泻利盐的石盐	0.30	0.25	1.19
	56	CG-4-9	15.17	白色含泻利盐的石盐	0.91	0.67	1.36
	57	CG-4-10	17.90	灰白色含泥膏岩的石盐	0.57	0.41	1.38
	58	CG-4-11	19.29	白色石盐	0.81	0.45	1.82
	59	CG-4-12	21.22	白色石膏	0.67	0.48	1.39
	60	CG-4-13	23.57	白色石膏	4.87	2.98	1.63
61	G-4-14	24.74	土色黏土	3.74	3.44	1.09	
ZK05	62	CG-5-1	0.725	灰黑色黏土	2.40	7.73	0.31
	63	CG-5-2	3.875	灰黑色黏土	1.73	7.22	0.24
	64	CG-5-3	7.025	灰黑色黏土	1.92	8.03	0.24
ZK06	65	S ₆ -G01	0.73	土黄色黏土质石盐	2.01	3.13	0.64
	66	S ₆ -G02	1.93	浅灰色含石盐的黏土	0.45	0.28	1.60
	67	S ₆ -G03	3.29	土黄色石盐质黏土	3.44	2.40	1.43
	68	S ₆ -G05	5.93	灰色含泻利盐的石盐	2.71	1.15	2.36
	69	S ₆ -G06	7.65	土色泻利盐质石盐	0.95	0.62	1.54
	70	S ₆ -G07	8.64	灰白色石盐	1.30	0.78	1.67
	71	S ₆ -G08	11.25	灰白色含泻利盐的石盐	0.58	0.24	2.36
	72	S ₆ -G09	12.79	灰白色含泻利盐的石盐	1.10	0.56	1.96
	73	S ₆ -G10	15.08	白色含泻利盐的石盐	0.97	0.20	4.96
	74	S ₆ -G11	6.38	白色石盐	0.19	0.05	3.46
	75	S ₆ -G12	17.63	白色泻利盐质石盐	0.33	0.13	2.57
	76	S ₆ -G13	19.20	白色含泻利盐的石盐	0.28	0.08	3.53
	77	S ₆ -G14	21.15	白色石盐	2.01	1.18	1.70
	78	S ₆ -G15	23.11	灰色含泻利盐黏土的石盐	2.54	1.43	1.78
	79	S ₆ -G16	24.16	灰色含石盐的黏土	6.09	4.51	1.35
	80	S ₆ -G17	25.40	土色石盐质黏土	2.88	4.86	0.59
	81	S ₆ -G18	29.55	灰白色含黏土泻利盐的石盐	0.83	1.23	0.68
82	S ₆ -G19	31.41	灰白色含泻利盐的石盐	0.34	0.43	0.79	
83	S ₆ -G20	33.85	土色黏土泻利盐质石盐	0.70	0.59	1.19	
84	S ₆ -G21	34.73	白色石盐	0.67	0.87	0.76	
85	S ₆ -G22	36.56	土色含石盐的黏土	8.25	2.17	3.80	
86	S ₆ -G23	39.97	土色含石盐的黏土	2.21	3.69	0.60	
87	S ₆ -G24	41.71	土色含石盐的黏土	1.60	2.30	0.70	
88	S ₆ -G25	43.22	土色黏土	2.52	9.64	0.26	
89	S ₆ -G26	44.93	土色石盐质黏土	8.11	10.60	0.77	
90	S ₆ -G27	46.73	白色石盐	3.50	4.41	0.79	
91	S ₆ -G28	49.68	白色泻利盐质石盐	1.56	4.26	0.37	
92	S ₆ -G29	53.25	黑色石盐质淤泥	9.87	6.16	1.60	
93	S ₆ -G30	55.29	白色石盐	1.66	2.63	0.63	

续表 2-2
Count. Table 2-2

钻孔	序号	编号	深度/m	样品描述	$w(U)/\mu\text{g/g}$	$w(\text{Th})/\mu\text{g/g}$	U/Th
ZK06	94	S ₆ -G31	56.88	灰色石盐质黏土	6.16	4.46	1.38
	95	S ₆ -G32	59.94	灰白色含黏土和泻利盐的石盐	1.61	1.83	0.88
	96	S ₆ -G33	62.66	灰白色淤泥质石盐	3.30	0.43	7.69
	97	S ₆ -G34	63.46	黑色淤泥质石盐	4.63	0.88	5.29
	98	S ₆ -G35	66.73	黑色淤泥和粉砂质石盐	5.19	1.39	3.73
	99	S ₆ -G36	68.47	灰褐色石盐和粉砂质淤泥	7.49	1.24	6.04
	100	S ₆ -G37	71.23	灰黑色石膏质黏土	8.53	3.18	2.68
	101	S ₆ -G38	69.51	灰褐色含淤泥的石盐	5.40	1.24	4.35
	102	S ₆ -G39	71.80	土色粉砂质黏土	2.60	6.07	0.43
	103	S ₆ -G40	73.15	土色粉砂质黏土	3.35	8.50	0.39
	104	S ₆ -G41	75.73	土色粉砂质黏土	3.41	11.40	0.30
	105	S ₆ -G42	78.76	土色粉砂质黏土	3.06	9.51	0.32
	106	S ₆ -G43	79.99	土色粉砂质黏土	3.67	9.66	0.38
	107	S ₆ -G44	80.31	土色粉砂质黏土	4.02	7.57	0.53
	108	S ₆ -G45	82.68	土色粉砂质黏土	3.81	6.56	0.58
	109	S ₆ -G46	87.90	土色粉砂质黏土	4.11	13.80	0.30
	110	S ₆ -G47	89.72	土色粉砂质黏土	5.44	12.30	0.44
111	S ₆ -G48	91.80	土色粉砂质黏土	2.68	9.83	0.27	
112	S ₆ -G49	92.14	土色粉砂质黏土	4.19	13.20	0.32	
113	S ₆ -G50	94.29	土色黏土	3.74	14.20	0.26	
114	S ₆ -G51	96.12	土色黏土	11.40	11.90	0.96	
115	S ₆ -G52	98.05	褐色淤泥质黏土	11.90	12.60	0.94	
116	S ₆ -G53	100.52	褐色淤泥质黏土	15.80	9.87	1.60	
117	S ₆ -G54	102.59	土色黏土	6.90	11.60	0.59	

样品在核工业北京地质研究院分析测试中心用 Finnigan MAT 制造的 HR-ICP-MS (lementI) 分析完成。将自然风干后过 200 目的 50 mg 粉末置于 Teflon 烧瓶中, 分别用 HNO₃ 和 HF 溶解 2 d 后加入 HClO₄ 进一步溶解。蒸干后用 5% 的 HNO₃ 溶液将样品稀释到 50 mL, 做微量元素分析。分析过程中同时测定 2 个 GBW 系列标样, 分析误差 < 5%。详细分析测试流程可参考电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 方法通则 (DZ/T0223-2001) 和 Qi 等 (2000)。

3 铀、钍含量分布特征

3.1 钻孔沉积物的铀、钍含量

钻孔沉积物岩性主要为含粉砂的中粗粒石盐和含粉砂的淤泥、黏土互层, 韵律变化频繁。总体趋势是从钻孔顶部至底部, 碎屑层比例增大, 蒸发岩层比例减小。钻孔 ZK01~ZK06 的岩性详细描述见叶传永等 (2013a; 2014)。

从表 3 可以看出, 在钻孔沉积物共 117 个样品中, $w(U)$ 介于 0.19~15.80 $\mu\text{g/g}$, 变化范围较大, 平均为 3.37 $\mu\text{g/g}$; 与沉积岩中黏土岩和页岩的平均含量相近 (陈骏等, 2004)。 $w(U)$ 最高值和最低值均分布在 ZK06 孔, 平均值最高的为 ZK03 孔, 达到 4.87 $\mu\text{g/g}$, 钻孔沉积物 $w(U)$ 平均值由低到高的顺序为: ZK04 < ZK05 < ZK02 < ZK01 < ZK06 < ZK03。

钻孔沉积物 $w(\text{Th})$ 分布范围为 0.05~18.80 $\mu\text{g/g}$, 平均为 4.66 $\mu\text{g/g}$, 比沉积岩中黏土岩和页岩的平均含量稍低。 $w(\text{Th})$ 最小值分布在 ZK06 孔, 而最大值分布在 ZK03 孔, 平均值最高的为 ZK03 孔, 达到 9.34 $\mu\text{g/g}$, 钻孔沉积物 $w(\text{Th})$ 由低到高的顺序为: ZK04 < ZK02 < ZK01 < ZK06 < ZK05 < ZK03。U/Th 值的分布范围为 0.19~7.69, 平均值为 1.08, U/Th 最小值分布在 ZK03 孔, 最大值出现在 ZK06 孔, 钻孔沉积物中 U/Th 值由低到高的顺序为: ZK05 < ZK03 < ZK02 < ZK01 < ZK04 < ZK06。钻孔沉积物 $w(U)$ 和 $w(\text{Th})$ 之间存在明显的正相关关系 (图 2)。

表 3 尕斯库勒盐湖 6 个钻孔沉积物中 $w(U)$ 、 $w(Th)$ 和 U/Th 的分析数据

Table 3 Uranium concentrations, thorium concentrations and U/Th ratios in sediments of six drill holes

钻孔编号	样品数/个	$w(U)/\mu\text{g/g}$			$w(Th)/\mu\text{g/g}$			U/Th		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
ZK01	9	1.09	8.11	3.16	0.43	15.50	4.52	0.32	3.66	1.33
ZK02	26	0.33	10.70	3.04	0.28	15.30	3.90	0.30	2.09	1.03
ZK03	12	0.42	14.50	4.87	0.34	18.80	9.34	0.19	1.89	0.75
ZK04	14	0.30	4.87	1.46	0.25	3.44	1.03	0.64	2.07	1.44
ZK05	3	1.73	2.40	2.02	7.22	8.03	7.66	0.24	0.31	0.26
ZK06	53	0.19	15.80	3.81	0.05	14.20	4.79	0.26	7.69	1.64

表 4 尕斯库勒盐湖钻孔盐类沉积物 U、Th 和 U/Th 的分析数据

Table 4 Uranium concentrations, thorium concentrations and U/Th ratios in saline sediments of drill holes

序号	钻孔编号	样品编号	深度/m	$w(B)/\mu\text{g/g}$		U/Th
				U	Th	
1	ZK01	SY-1-1	13.03	0.166	0.084	1.976
2	ZK01	SY-1-2	19.90	0.080	0.035	2.286
3	ZK02	SY-2-1	13.05	0.061	0.033	1.848
4	ZK02	SY-2-2	20.25	0.392	0.063	6.222
5	ZK02	SY-2-3	42.42	0.043	0.015	2.867
6	ZK02	SY-2-4	45.59	0.042	0.302	0.139
7	ZK03	SY-3-1	0.07	0.362	0.293	1.235
8	ZK04	SY-4-1	19.29	0.065	0.017	3.824
9	ZK06	SY-6-1	11.25	0.075	0.041	1.829
10	ZK06	SY-6-2	15.08	0.090	0.028	3.214
11	ZK06	SY-6-3	16.38	0.041	0.016	2.563
12	ZK01	XY-1-1	15.58	0.219	0.037	5.919
13	ZK01	XY-1-2	34.23	1.140	2.220	0.514
14	ZK02	XY-2-1	6.90	0.140	0.078	1.795
15	ZK02	XY-2-2	14.90	1.130	0.558	2.025
16	ZK04	XY-4-1	1.10	0.253	0.224	1.129
17	ZK02	SG-2-1	13.05	0.677	0.371	1.825
18	ZK02	SG-2-2	25.30	12.600	2.170	5.806
19	ZK04	SG-4-1	17.90	1.240	0.662	1.873
20	ZK04	SG-4-2	21.22	1.600	0.642	2.492

注：序号 1~11 为石盐；12~16 为泻利盐；17~20 为石膏。

3.2 盐类沉积物铀、钍含量特征

在钻孔沉积物样品采集过程中，特别关注盐类的采集。在 6 个钻孔中，共采集得到石盐和泻利盐、石膏 3 种盐类沉积物。需要说明的是，由于盐类孔隙大，导致采集到的盐类通常夹杂有灰色或黑色碎屑物质或泥质，对分析测试结果有一定影响。盐类的 $w(U)$ 、 $w(Th)$ 、 U/Th 值变化特征如表 4 所示。

石盐中 $w(U)$ 为 0.041~0.392 $\mu\text{g/g}$ ，平均值为 0.129 $\mu\text{g/g}$ ； $w(Th)$ 为 0.015~0.302 $\mu\text{g/g}$ ，平均值

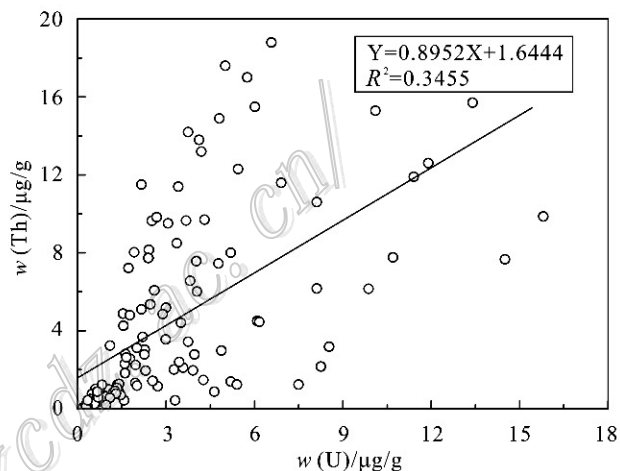


图 2 尕斯库勒盐湖钻孔沉积物 U 和 Th 相关关系图
Fig. 2 Relationship between uranium and thorium in sediments of the drill holes

为 0.084 $\mu\text{g/g}$ ； U/Th 值为 0.139~6.222，平均值为 2.546。泻利盐中 $w(U)$ 、 $w(Th)$ 、 U/Th 平均值分别为 0.576 $\mu\text{g/g}$ 、0.623 $\mu\text{g/g}$ 、2.276；而石膏中 $w(U)$ 、 $w(Th)$ 、 U/Th 平均值分别为 4.029 $\mu\text{g/g}$ 、0.961 $\mu\text{g/g}$ 、2.999。因此，从石盐到泻利盐再到石膏， $w(U)$ 、 $w(Th)$ 、 U/Th 值都是逐渐增加的。而且，盐类沉积物中的 U/Th 值变化范围大，介于 0.139~6.222，平均值为 2.569，远大于钻孔沉积物的 1.08。

4 分析与讨论

4.1 铀、钍含量横向变化特征

结合钻孔位置图(图 1)，将各个钻孔与湖表的距离考虑在内，各钻孔沉积物 $w(U)$ 、 $w(Th)$ 、 U/Th 值随湖表卤水距离变化特征如图 3 所示。随各钻孔(地表取样点)逐渐远离湖表卤水， $w(U)$ 先增高后又急剧降低； $w(Th)$ 与 $w(U)$ 变化类似，先增高后又降

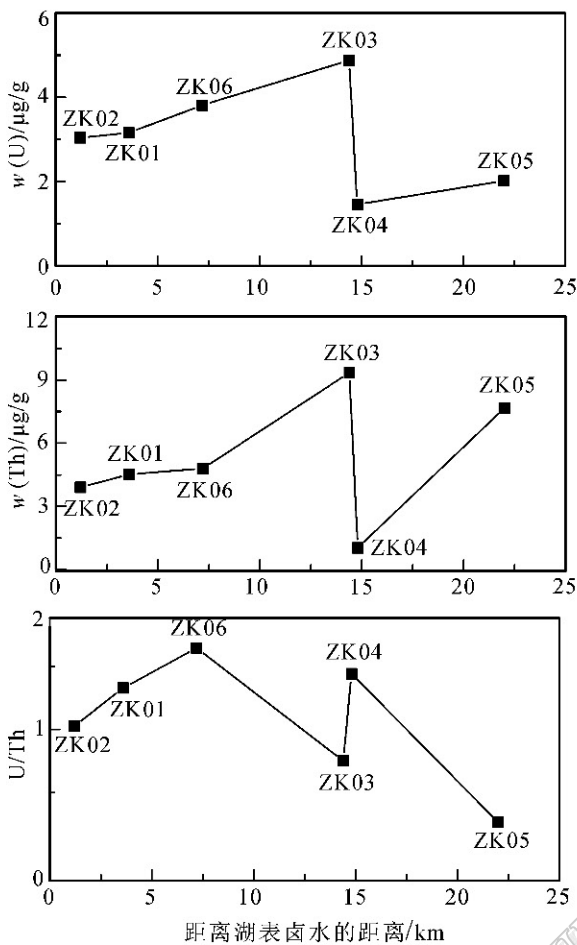


图3 奈斯库勒盐湖各钻孔 $w(U)$ 、 $w(\text{Th})$ 、 U/Th 值随湖表卤水距离的变化

Fig. 3 Variation of uranium and thorium concentrations in sediments of the drill holes with the distance from the superficial brine

低,到了ZK05钻孔又升高。 U/Th 值虽然有震荡变化,除了ZK05孔之外,其余钻孔沉积物 U/Th 值在1左右。

4.2 铀含量纵向变化特征

各个钻孔沉积物中铀含量纵向变化如图4所示,有以下几个特征:①各钻孔沉积物中均含有一定数量的铀,但是各孔之间的差别较大,少者 $0.19 \mu\text{g/g}$,多者可达 $15.80 \mu\text{g/g}$,相差数百倍,大多数钻孔沉积物中铀含量相差不大。②铀含量相对高值主要分布在碎屑沉积期,而蒸发岩沉积期的铀含量相对较低,此现象表明化学沉积期铀存在于卤水中,与卤水蒸发实验中铀在卤水和蒸发岩中分布规律一致。③低铀含量钻孔ZK01和ZK02距离补给淡水源比较近,而高铀钻孔远离淡水补给源且盐类沉积较厚,与卤水中铀含量变化类似。④同一个晶

间卤水层或者碎屑物沉积层内铀含量垂直分异明显,铀含量随深度增加而递增。

4.3 铀、钍在沉积物中的存在形式

铀在地质体中的存在形式决定于铀元素的原子结构和性质,并受外界物理化学条件的影响。铀的存在形式有以下3种:铀矿物、类质同象、分散吸附形式。其中,分散吸附形式是铀在各种岩石和矿物中最普遍的一种存在形式,分散吸附的铀主要呈离子状态分布在矿物的结晶水、液体包裹体和粒间溶液中;或被吸附在矿物晶体表面、解理面、裂隙面上;或被有机物质、沥青质吸附和吸收(王剑峰,1986;张祖还等,1984)。

盐湖沉积物中未见铀矿物或含铀矿物,因此沉积物中存在铀矿物和类质同象形式铀的可能性很小,只能以分散吸附形式存在。结合盐湖本身的性质,铀在盐湖沉积物中存在形式主要有2种:一为黏土质点吸附形态;二为蒸发岩类矿物夹杂形态。盐类(石盐、泻利盐、石膏)中 $w(U)$ 和 $w(\text{Th})$ 的平均值分别为 $1.02 \mu\text{g/g}$ 和 $0.394 \mu\text{g/g}$,而钻孔沉积物中 $w(U)$ 和 $w(\text{Th})$ 的平均值分别为 $3.37 \mu\text{g/g}$ 和 $4.66 \mu\text{g/g}$ 。盐类中的铀约为沉积物中铀含量的1/3,而钍约为沉积物的10%。可大致估算,该盐湖沉积物中2/3的铀被黏土质点吸附,1/3的铀夹杂在盐类矿物中;而沉积物中90%以上的钍被黏土质点吸附,10%以下的钍夹杂在盐类矿物中。

4.4 铀在沉积物中的迁移与富集

该盐湖从蚀源区到湖区的径流过程包括地下径流和地表径流。地下径流分为潜水和深部水2种型式,前者主要赋存于盐沼带和干盐滩中,后者形成于古近纪地层的深循环水。地表径流主要是指河水径流,河水在流动过程中与迳流区潜水发生交换,在丰水期河水补给地下水,枯水期地下水补给河水,经过化学沉积分异作用的地下水将要影响河水的化学成分,使河水在径流途中也发生与潜水相同的变化。该盐湖边缘河流大部分是泉集河,在形成地表径流之前已经发生过潜水的化学沉积分异作用。

根据野外实际情况,选取该盐湖近东西向剖面线B-B',采集沉积物并做分析,分析结果见表5,采样点位见图1。

结果显示,从西往东,铀含量最高点为位于卤水表面东侧的GSn11-5,从该点开始,向东、西2个方向依次降低。分析其原因,可能是沉积相的化学沉积分异作用,即毛细蒸发与淋滤作用形成的(魏新俊

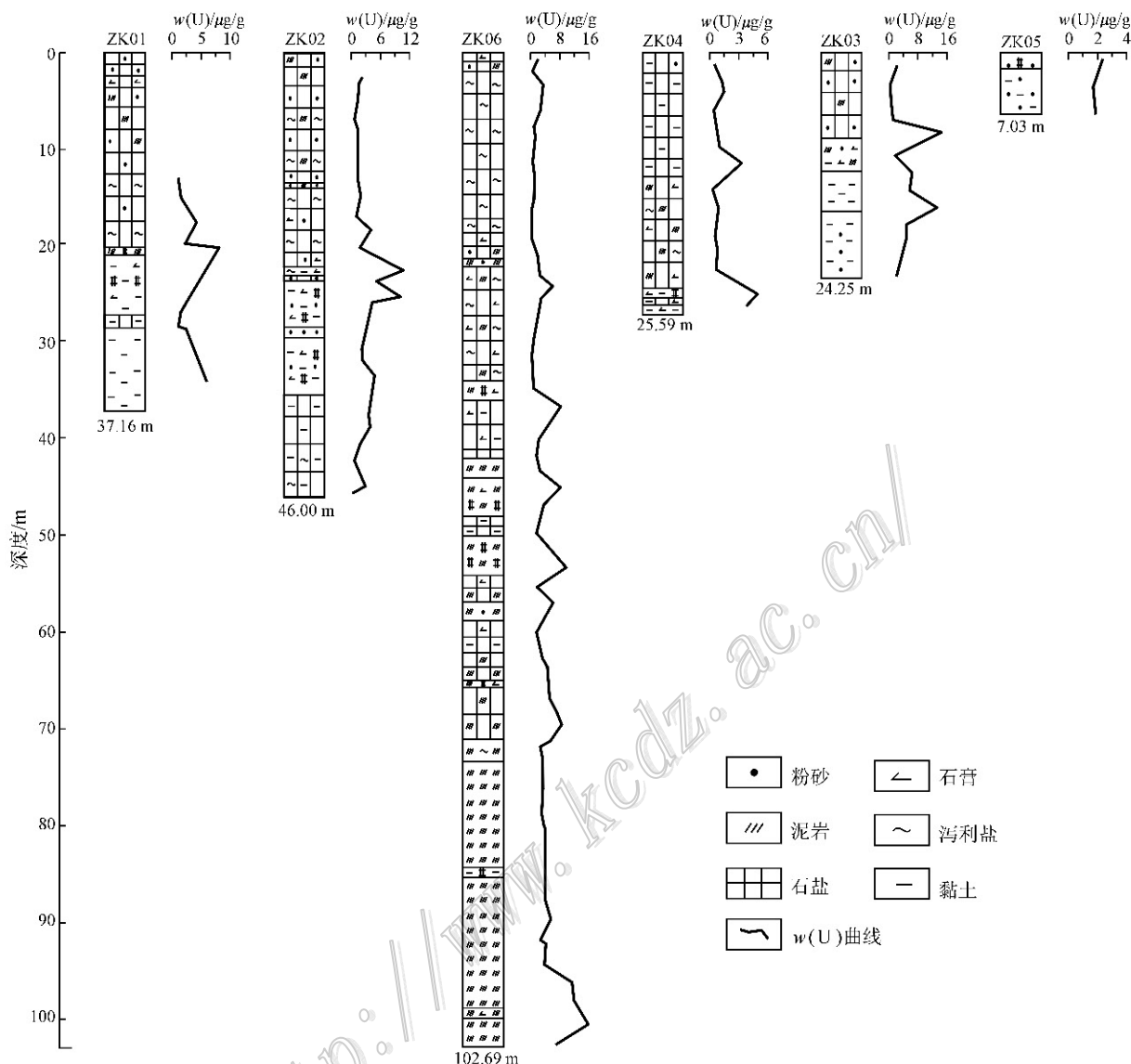


图 4 杂斯库勒盐湖钻孔沉积物中铀的分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of uranium in the sedimentary profile

表 5 杂斯库勒盐湖 B-B' 剖面固样铀含量

Table 5 Uranium concentrations in sediments along B-B' profile

样品编号	图 1 中对应的点号	岩性	沉积环境	w(U)/μg/g
HTG11-9-2	1	灰白色粉砂泥	湖沼	5.83
HTG11-9-1	2	灰白色砂泥	湖沼	3.56
GSn11-4	3	含泥的石盐	干盐滩	6.41
GSn11-5	4	含泥的石盐	干盐滩	6.71
GSn11-6	5	含泥的石盐	干盐滩	2.32
GSQZ11-13-1	6	含泥的石盐	干盐滩	2.30
GY10-23-2	7	细粒石盐	干盐滩	1.75

等, 1993): ①毛细蒸发作用, 毛细蒸发是指潜卤水通过盐滩表面孔隙、裂隙、孔洞上升至毛细管水上界

面蒸发沉淀的现象。由于潜水位的变化, 毛细管水上界面可以在盐滩表面, 也可以在盐滩内部。毛细蒸发作用不但在毛细带形成盐类沉积, 而且使晶间卤水发生结晶作用, 导致卤水进一步浓缩且铀含量增大, 卤水中的铀分配至沉积物, 导致沉积物中铀含量增大。②淋滤作用, 包括垂向淋滤作用和侧向溶滤作用。垂向淋滤作用是指当干盐滩区出现大气降水或潜水面出现升降变化时易溶组分在垂向上被选择性溶解的现象。侧向溶滤作用是指水体向沉积中心运移时选择性溶解的现象, 这种作用是同时进行的。在每次淡水补给过程中, 在这两种溶滤作用下, 铀即向沉积中心位移一段距离, 结果使铀在湖区内部

低洼区域卤水中聚集沉淀,即化学沉积分异作用。由该盐湖沉积特征研究(叶传永等,2014)可知,该盐湖干盐滩的沉积中心位于现代卤水表面东部的干盐滩附近,刚好与B-B'剖面 $w(U)$ 最高点(GSn11-5)相对应。

因此,干盐滩中毛细蒸发和淋滤作用等的化学沉积分异作用对沉积物中铀的富集具有十分重要的意义。

5 结论

(1) 钻孔沉积物中 $w(Th)$ 的分布比 $w(U)$ 均匀,且 $w(U)$ 和 $w(Th)$ 之间存在明显的正相关关系。

(2) 在横向上,随着距离湖表卤水越远,沉积物中 $w(U)$ 和 $w(Th)$ 先增高后又急剧降低,且受补给水影响大;在纵向上,同一个晶间卤水层或者碎屑物沉积层内 $w(U)$ 垂直分异明显, $w(U)$ 随深度增加而递增。

(3) 就沉积物铀和钍存在形式而言,2/3的铀被黏土质点吸附,1/3的铀夹杂在盐类矿物中;而沉积物中90%以上的钍被黏土质点吸附,10%以下的钍夹杂在盐类矿物中。

(4) 干盐滩中毛细蒸发和淋滤作用等的化学沉积分异作用造成盐湖沉积中心的沉积物 $w(U)$ 比其他地方高。

参考文献/References

陈 骏,王鹤年. 2004. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 432页.

黄 麒,韩凤清. 2007. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动[M]. 北京: 科学出版社. 207页.

刘成林,曹养同,杨海军,焦鹏程,顾乔元. 2013. 库车前陆盆地古近纪-新近纪盐湖环境变迁及其成钾效应探讨[J]. 地球学报, 34(5): 547-558.

王剑峰. 1986. 铀地球化学教程[M]. 北京: 原子能出版社. 572页.

魏新俊,邵长铎,王弼力. 1993. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究[M]. 北京: 地质出版社. 197页.

叶传永,王志明,赵世勤,郝伟林,韩 军,林效宾. 2013a. 青海尕斯库勒盐湖沉积物孢粉组合特征与铀分布关系初探[J]. 地质论评, 59(3): 479-488.

叶传永,王志明,赵世勤,郝伟林,林效宾,韩 军. 2013b. 青海省尕斯库勒盐湖卤水水化学特征初步研究[J]. 盐湖研究, 21(1): 14-23.

叶传永,王志明,赵世勤,郝伟林,林效宾,韩 军. 2014. 柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖 280 ka 以来沉积特征[J]. 沉积学报, 32(1): 85-92.

袁亚娟,夏 斌,吕宝凤. 2011. 柴达木盆地断裂组合特征及油气成藏意义[J]. 断块油气田, 18(2): 212-216.

张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社. 235页.

张文翔. 2009. 表生元素在湖相沉积中的地球化学分异及环境演化(博士论文)[D]. 导师: 张虎才. 甘肃: 兰州大学. 1-10.

张祖还,赵懿英,章邦桐. 1984. 铀地球化学[M]. 北京: 原子能出版社. 403页.

郑绵平,向 军,魏新俊,郑 元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 1-189.

Bauluz B, Mayayo M J, Fernandez-Nieto C and Lopez J M G. 2000. Geochemistry of Precambrian and Paleozoic siliciclastic rocks from the Iberian Range (NE Spain): Implications for source-area weathering, sorting, provenance, and tectonic setting[J]. Chemical Geology, 168: 135-150.

Bowen B B, Story S, Oboh-Ikuenobe F and Benison K C. 2013. Differences in regolith weathering history at an acid and neutral saline lake on the Archean Yilgarn Craton and implications for acid brine evolution[J]. Chemical Geology, 356: 126-140.

Huang X, Sillanpää M, Gjessing E T and Vogt R D. 2009. Water quality in the Tibetan Plateau: Major ions and trace elements in the headwaters of four major Asian rivers[J]. Science of the Total Environment, 407: 6242-6254.

Nesbitt H W. 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite[J]. Nature, 279: 206-210.

Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 299: 715-717.

Nesbitt H W and Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1523-1534.

Nesbitt H W and Young G M. 1996. Petrogenesis of sediments in the absence of chemical weathering: Effects of abrasion and sorting on bulk composition and mineralogy[J]. Sedimentology, 43: 341-358.

Price J R and Velbel M A. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks[J]. Chemical Geology, 202: 379-416.

Qi L, Hu J and Conrad G D. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Talanta, 51(3): 507-513.

Sawyer E W. 1986. The influence of source rock type, chemical weathering and sorting on the geochemistry of clastic sediments from the quaternary sedimentary belt superior province Canada[J]. Chemical Geology, 55: 77-95.

Zhang Y Y, Pe-Piper G and Piper D J W. 2014. Sediment geochemistry as a provenance indicator: Unravelling the cryptic signatures of poly-cyclic sources, climate change, tectonism and volcanism[J]. Sedimentology, 61: 383-410.