

云南勐野井钾矿区及周边泉水水化学特征及地表钾异常成因分析

伯英,曹养同,吕凤琳

中国地质科学院矿产资源研究所,自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京,100037

内容提要:勐野井钾盐矿位于云南省兰坪-思茅盆地的南部,是我国目前发现的唯一一个具有工业开采价值的固体钾盐矿床。本文对该矿区及周边泉水等的水化学特征和地表钾异常成因进行了探讨。研究区含盐地层分布广泛,盐泉出露较多,通过对地表泉水、泉水沉积物、水中逸出气体及垂直断裂的测线剖面样品等取样分析,可以捕捉地表钾异常信息,对于成钾机理研究和钾盐找矿都有着积极的作用。结合以往研究证实了勐野井矿区附近盐泉水具有I级异常显示。沿垂直于断裂方向的剖面采集的土壤样品中,钾及相关组分的峰值和谷值的出现有一定的规律性,认为各元素含量异常是由深部流体(水、气)沿断裂上升补给造成的。泉水稀有气体 He 主要为深部壳源,个别为幔源,推断研究区的大断裂可能切至深部地壳,个别深切到软流圈上部。泉水氢氧同位素和锶同位素组成研究表明,该区泉水具有深部补给特征,存在一定程度的水-岩反应,受火山岩的影响较大,氢氧同位素和矿物学研究表明,深部热液在勐野井钾盐矿床形成过程中起重要作用。本研究认为深部补给是勐野井矿区及周边地表钾异常形成的重要补给源,火山岩可能是重要的物质来源之一,而断裂带是其重要的控制因素。

关键词:钾盐;同位素;稀有气体;断裂;深部补给;勐野井

勐野井钾盐矿位于我国云南省兰坪-思茅盆地的南部。前人在兰坪-思茅盆地进行了大量的勘查和研究工作,有不少线索显示这个盆地具有找钾潜力,但是目前为止,仅在盆地南部发现我国唯一一个古代固体钾矿——勐野井钾盐矿。矿区盐岩分布面积 3 km^2 ,钾盐分布面积 2.8 km^2 (张嘉澍等,1980)。以往研究(Liu Chenglin et al., 2018)认为,思茅盆地其他凹地具有成钾条件和潜力,并圈定了找钾战略靶区,但找矿难度很大。

为了进一步扩大找矿,前人于20世纪60年代初到90年代中期在该地区开展了大量的地质、水文调查和研究工作,获得了丰富的数据资料和有用的线索,但仍然没有取得新的突破。主要原因在于,一方面,成钾规律还没有完全查清,同时,在勐野井钾盐矿成钾时代、物质来源等的认识上尚有争议,有古新世和晚白垩世两种观点(云南省地质矿产局,1986; Yuan Qin et al., 2013; Wang Licheng et al., 2015, 2018; Liu Chenglin et al., 2018),目前

多倾向于后者;另一方面,兰坪-思茅盆地受新生代板块碰撞作用影响,后期改造强烈(袁品泉,1980),加上隐伏矿埋深大,找矿难度大,在该区进一步扩大找钾困难重重。Yin Hanhui et al. (1990)认为,兰坪-思茅盆地中央的中轴构造带具有壳-幔规模的穿透性质,它是深源熔体和流体及部分成矿物质向浅部地壳运移的通道,为盆地内成岩、成矿作用提供了有利条件。Guan Ye et al. (2006)认为,思茅地区沿中轴构造带火山活动的出现使地温梯度增高,热动力增强,地下水大幅度增温和循环上升,大量成矿物质由地壳深部带到地表,为成矿提供了充足的物源和热源,形成矿产富集。

泉水的水化学特征对于了解含盐盆地盐类物质成因和找矿具有重要意义,盐泉水的物质来源有时与矿床的形成有关(Tornos, 2008; Cao Yangtong et al., 2010; Bo Ying et al., 2013)。勐野井钾盐矿区及周边地区泉水发育,本研究在以往兰坪-思茅盆地水化学研究(Bo Ying et al., 2014, 2015)的基

注:本文为国家自然科学基金青年基金项目(编号 41502080)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号 2011CB403007)联合资助的成果。
收稿日期:2021-02-04;改回日期:2021-03-26;网络发表日期:2021-06-03;责任编辑:潘静。
作者简介:伯英,女,1980年生。博士,副研究员,主要从事地球化学、含盐盆地水化学及地球化学找钾技术研究。E-mail: sunnybritney@hotmail.com。

引用本文:伯英,曹养同,吕凤琳. 2021. 云南勐野井钾矿区及周边泉水水化学特征及地表钾异常成因分析. 地质学报, 95(7): 2193~2204, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021190.
Bo Ying, Cao Yangtong, Lü Fenglin. 2021. Hydrochemical characteristics of spring water and genesis of surface potassium anomaly in the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas in Yunnan Province. Acta Geologica Sinica, 95(7): 2193~2204.

础上,结合断裂带流体深穿透理论(Bo Ying et al. , 2016),对勐野井钾盐矿及周边泉水等相关化学特征进一步研究,分析了地表钾异常成因,以期为认识勐野井钾盐矿成矿机理和扩大找矿提供有用的数据和理论支持。

1 地质背景

兰坪-思茅盆地处于滇西,地处澜沧江缝合线与东部金沙江缝合线之间,受澜沧江深断裂和金沙江-哀牢山深断裂的夹持,呈北西-南东向带状展布,其北部为昌都盆地,在南部与呵叻盆地毗邻(图 1)。该区地处中三叠世发展起来的一个陆内多旋回叠合盆地中,其形成演化与深部过程有密切的关系(Yin Hanhui et al. , 1990)。盆地内发育了巨厚的中、新生界沉积岩系,古近系零星出露于兰坪县、云龙县、拉井镇、师井、河西乡等地(曲一华等,1998),上白垩统一古新统含盐层分布广泛。

勐野井矿区内有两个含盐层位,即上白垩统曼宽河组下段及勐野井组,前者含石膏层,不含盐,钾盐矿床产于勐野井组内,钾盐层含 KCl 平均为 8.7%。矿区为一个四周被断裂围限的 NW 向向斜构造,北端发育了向西凸出的次级鼻状背斜,由于矿床在喜马拉雅期受强烈的构造挤压,推覆构造相当发育,含盐系多

不完整,岩层塑性变形严重(袁品泉,1980)。

2 样品采集和分析

于 2016 年和 2018 年,先后两次赴勐野井矿区及周边地区进行野外考察和样品采集(图 2),共采集泉水沉积物样品 10 件,水样 9 件,泉水中逸出气体样品 5 件。剖面土壤样品来自勐野井矿区(图 3 中的剖面 1 和剖面 2)。

泉水、泉水沉积物及剖面土壤样品化学组分分析由国家地质实验测试中心完成,测试项目包括泉水样品 32 项主微量元素,泉水沉积物和土壤样品 62 项主微量元素,部分结果见表 1,表 4 和表 6。锶同位素分析由中国地质科学院地质研究所完成,氢氧同位素组成测试由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成,泉水中气体化学组成、稀有气体和碳同位素组成分析由中国科学院兰州地质所气体地球化学重点实验室完成。泉水沉积物衍射分析由中国地质科学院矿产资源研究所完成。水样化学组分和同位素分析方法见 Bo Ying et al. (2013, 2015);稀有气体同位素分析方法依据 LDB03-01—94(稀有气体同位素质谱峰高比检测方法),检测仪器为 MM5400 质谱计,详见 Ye Xianren et al. (2007)和 Cao Chunhui et al. (2018);气体化学组

表 1 勐野井矿区及周边地区水样主量和微量组分含量

Table 1 Content of major and minor components for spring water samples collected from the Mengyejing deposit and its surrounding areas

序号	样品编号	样品类型	水温(℃)	K(mg/L)	Na(mg/L)	Ca(mg/L)	Mg(mg/L)	Cl(mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	TDS(g/L)	K×10 ³ /Cl	K×10 ³ /Σ盐	水化学类型
1	20160421-MYJ-W1	盐泉	<20	367	20310	530	211	31515	1572	342	54.676	11.65	6.71	硫酸镁亚型
2	20160421-MYJ-W2	山泉水	<20	0.16	2.63	20.8	4.67	2.66	11.2	80.7	0.082	60.15	1.95	硫酸钠亚型
3	20160422-ZD-W1	温泉水	38	4.39	343	211	56.2	380	562	530	1.822	11.55	2.41	硫酸钠亚型
4	20160422-ZD-W2	温泉水	40	4.16	328	204	55.3	386	536	513	1.770	10.78	2.35	硫酸钠亚型
5	20160422-EGZ-W1	温泉水	40	9.63	536	187	34.9	366	869	422	2.214	26.31	4.35	硫酸钠亚型
6	20160423-MKL-W1	温泉水	51	10.4	754	104	14.0	837	278	613	2.304	12.43	4.51	碳酸盐型
7	20160423-DSJ-W1	温泉水	50	17.8	503	325	58.2	96.5	1301	716	2.660	184.46	6.69	硫酸钠亚型
8	20160424-MK-W1	温泉水	69	28.6	3302	474	52.1	5311	1096	323	10.425	5.39	2.74	硫酸钠亚型
9	20160424-HKWQ-W1	温泉水	48	15.8	2026	254	34.5	2999	630	592	6.255	5.27	2.53	硫酸钠亚型
序号	样品编号	样品类型	水温(℃)	Br(μg/L)	B(mg/L)	Sr(μg/L)	Li(μg/L)	I(μg/L)	Si(mg/L)	Zn(μg/L)	Cd(μg/L)	Pb(μg/L)	Cu(μg/L)	Cr(μg/L)
1	20160421-MYJ-W1	盐泉	<20	8819	<2	12417	<200	<200	4.27	<200	<200	<400	1705	<2000
2	20160421-MYJ-W2	山泉水	<20	<20	0.02	53.5	1.19	<1	6.91	<1	<1	<2	<2	<10
3	20160422-ZD-W1	温泉水	38	90.6	0.08	2566	55.9	1.14	17.4	1.81	<1	<2	6.7	29.4
4	20160422-ZD-W2	温泉水	40	97.0	0.06	2730	61.0	1.60	16.6	2.42	<1	<2	2.69	35.3
5	20160422-EGZ-W1	温泉水	40	146	0.73	3726	210	14.2	12.6	5.81	<1	<2	12.2	23.1
6	20160423-MKL-W1	温泉水	51	287	0.70	3380	305	10.7	22.5	5.66	<5	<10	<10	<50
7	20160423-DSJ-W1	温泉水	50	47.5	0.44	5110	152	2.53	20.6	4.79	<1	<2	3.16	40.2
8	20160424-MK-W1	温泉水	69	1837	1.25	21394	1390	<50	14.4	<50	<50	<100	<100	<500
9	20160424-HKWQ-W1	温泉水	48	527	0.79	10547	509	<10	17.3	<10	<10	<20	42.6	<100



早在 20 世纪 70 年代,云南省地质局钾盐地质

0.7091~0.7134(图 5),1 号、8 号、9 号三件矿化度相对较高的水样的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值均低于 0.710,揭示了泉水有深部来源补给。本研究所采集的泉水样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 范围为 0.7091~0.7134(图 5),1 号、8 号、9 号三件矿化度相对较高的水样的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值均低于 0.710,揭示了泉水有深部来源补给。1 号、8 号、9 号三件水样具有低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和高 Sr 的特点;除了 2 号山泉水外,其余泉水均具有较高的 Sr/Ca 比值;Sr 与 Ca,Sr 与 SO₄²⁻ 均具有较好的正相关关系。参考有关 Sr 物源指标(Chaudhuri et al.,1992;Ni Si et al.,2006),认为 Sr 的来源受火山岩的影响较大。

本研究所采集的泉水稀有气体同位素组成结果表明(表 3):5 件气体样品中,4 件具有较低的³He/⁴He(R_a)值,主要为壳源;1 件具有高于大气的³He/⁴He(R_a)值,有明显的幔源特征(图 6)。

中国西部新疆塔里木盆地油田天然气、库车盆地地下卤水中气体(Bo Ying et al.,2012)、河西走廊温泉水气体(Zhao Xia et al.,2007)中的 He 具有壳源特征,腾冲地区温泉水气体以及中国东部的郯庐断裂带两侧含油气盆地天然气中的 He 具有幔源特征(Shangguan Zhiguan et al.,1997,2000;Tao

Mingxin et al.,1996)。此外,兰坪-思茅盆地泉水逸出气体中 He 多为壳源显示(Bo Ying et al.,2015),个别为幔源显示(表 3 中 DSJ-Q1,大树脚温泉;2012 和 2016 年分别采集两件样品分析,R/R_a 值均大于 1),推测该区断裂可能已经深切到软流圈的上部。

表 3 勐野井矿区及周边地区泉水中稀有气体同位素分析结果

Table 3 Analytical results of noble gas isotopic compositions for spring water samples from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas						
样品 编号	³ He/ ⁴ He(R _a)	²⁰ Ne/ ²² Ne	²¹ Ne/ ²² Ne	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁸ Ar/ ³⁶ Ar	⁴ He/ ²⁰ Ne
ZD-Q1	0.10493	9.89770	0.027	306.4	0.178	14.792
DSJ-Q1	1.32933	10.44740	0.028	302.6	0.195	30.483
MKL-Q1	0.42394	9.90378	0.029	304.4	0.183	22.767
MK-Q1	0.41715	9.77749	0.029	295.4	0.176	5.745
HKWQ-Q1	0.12162	9.60794	0.028	301.4	0.186	2.587

3.4 泉水沉积物化学组成和矿物组成分析

10 件泉水沉积物样品主量和微量组分化学组分、衍射分析结果表明(表 4、5),石英、方解石和文石是泉水沉积物中的主要成分,同时部分伴有少量石膏、绿泥石和伊利石,个别伴有钾长石和钠长石。对主量组分和部分微量组分进行了聚类分析(图 7),可以看出 CaO 和 CO₂ 归为一类,然后与 S 归为

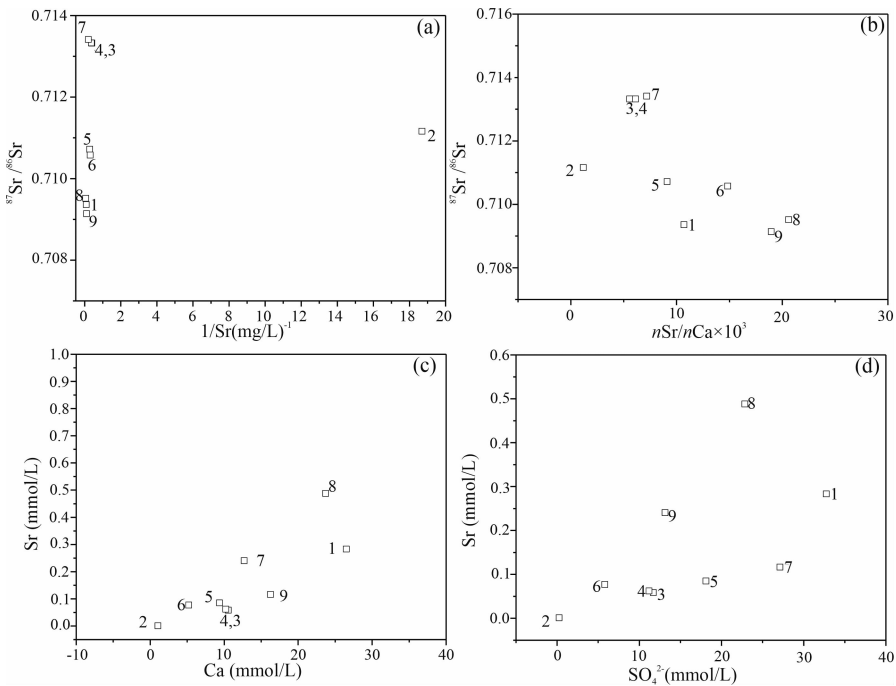


图 5 勐野井矿区及周边地区泉水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 1/Sr 及其他相关关系图

Fig. 5 A binary diagram of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr versus 1/Sr and other concerned diagrams for spring water samples from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas
nSr/nCa—Sr 和 Ca 的当量浓度比值;图中 1~9 与表 1 中样品序号对应

nSr/nCa represents the equivalence concentration ratio of Sr to Ca;Nos. 1~9 correspond to those in Table 1

一大类,与方解石、文石以及石膏的存在有关。其余组分的聚类关系也与矿物组成密切相关。

3.5 泉水沉积物稀土元素分布特征

泉水沉积物稀土元素(REE)总量范围为 7.35~174.52 μg/g(表 6),变化范围较大。以球粒陨石标准化数据(Boynton,1984)对泉水沉积物样品进行标准化,并绘制了稀土元素分布模式图(图 8),总体上呈现一定的规律性。ΣREE 变化范围为 7.35

表 4 勐野井矿区及周边泉水沉积物化学组分分析结果

Table 4 Contents of major and minor components for spring sediments from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas																	
序号	样品编号	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	K ₂ O (%)	K%	K/Rb	TFe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	CO ₂ (%)	S (%)	LOI (%)	Li (μg/g)
1	20160423MKL-G1	41.65	9.95	15.36	2.30	1.91	192.58	4.98	1.38	0.01	0.33	0.06	0.48	13.14	1.82	19.06	46.0
2	20160423DSJ-G1	28.59	3.51	20.18	0.74	0.61	194.32	12.26	0.48	0.11	0.42	0.23	0.19	16.02	0.15	31.84	36.9
3	20160423DSJ-G2	5.07	0.95	40.66	0.34	0.28	243.21	1.20	0.31	0.01	0.53	0.13	0.06	32.61	1.08	45.94	7.26
4	20160423DSJ-G3	63.49	13.27	2.55	2.87	2.38	186.05	7.60	1.98	0.04	1.01	0.12	0.66	1.99	0.013	5.65	53.6
5	20160423DSJ-G4	30.26	4.59	28.05	0.90	0.75	173.68	2.51	0.86	0.01	0.73	0.06	0.25	22.21	1.49	27.58	20.6
6	20160424MK-G1	2.93	0.27	33.71	0.08	0.07	146.22	17.88	0.40	0.05	1.72	0.02	0.02	24.86	0.65	33.47	7.97
7	20160424MK-G2	7.10	0.68	5.35	0.26	0.22	222.19	50.27	0.19	0.03	2.17	0.07	0.05	1.65	0.14	13.81	10.4
8	20160424HKWQ-G1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.81	0.13	—	28.2
9	20160424HKWQ-G2	52.61	5.11	14.18	1.06	0.88	200.82	2.26	1.37	0.03	1.61	0.05	0.35	10.41	2.43	16.16	41.2
10	20160424HKWQ-G3	28.55	5.20	23.97	1.38	1.15	221.92	9.30	0.88	0.01	0.45	0.15	0.27	19.87	0.41	28.76	22.7
序号	样品编号	Be (μg/g)	Cr (μg/g)	Mn (μg/g)	Co (μg/g)	Ni (μg/g)	Cu (μg/g)	Zn (μg/g)	Ga (μg/g)	Rb (μg/g)	Sr (μg/g)	Mo (μg/g)	Cd (μg/g)	In (μg/g)	Cs (μg/g)	Ba (μg/g)	Tl (μg/g)
1	20160423MKL-G1	4.91	70.6	77.0	16.0	71.0	7.87	45.7	13.0	99.1	1075	22.6	0.14	0.06	12.9	320	4.80
2	20160423DSJ-G1	14.9	20.6	884	8.82	17.1	51.7	145	5.50	31.6	726	3.55	0.19	0.05	22.9	245	2.53
3	20160423DSJ-G2	2.93	8.10	59.3	3.23	21.4	1.50	9.16	1.32	11.6	3175	0.90	<0.05	<0.05	1.68	86.2	0.19
4	20160423DSJ-G3	4.33	84.3	324	11.8	31.9	27.1	63.7	18.0	128	129	0.91	<0.05	0.08	42.1	344	0.67
5	20160423DSJ-G4	4.02	39.1	123	8.08	39.6	4.74	23.4	5.95	43.0	1806	3.35	0.06	<0.05	5.38	172	1.17
6	20160424MK-G1	11.2	3.04	379	12.5	8.85	4.67	162	0.45	4.54	2314	0.71	0.09	0.14	1.45	118	0.66
7	20160424MK-G2	23.9	4.51	291	20.3	11.6	35.1	387	1.33	9.71	1401	1.55	0.23	0.35	2.99	207	1.58
8	20160424HKWQ-G1	13.1	45.3	158	4.92	17.4	21.0	40.6	9.16	71.1	363	2.10	<0.05	0.11	19.2	143	0.38
9	20160424HKWQ-G2	1.07	39.8	207	5.41	13.0	14.6	22.6	5.56	43.8	1594	1.64	0.08	<0.05	13.8	177	0.29
10	20160424HKWQ-G3	11.5	37.1	92.6	6.39	30.9	6.03	24.40	6.92	51.6	1561	3.25	<0.05	<0.05	6.00	184	0.46
序号	样品编号	Pb (μg/g)	Bi (μg/g)	Th (μg/g)	U (μg/g)	Nb (μg/g)	Ta (μg/g)	Zr (μg/g)	Hf (μg/g)	Sn (μg/g)	Sb (μg/g)	Ti (μg/g)	W (μg/g)	As (μg/g)	V (μg/g)	La (μg/g)	Ce (μg/g)
1	20160423MKL-G1	6.60	0.24	10.3	4.26	10.1	0.81	121	3.90	2.46	1.82	2862	1.68	335	85.1	25.3	64.0
2	20160423DSJ-G1	17.3	0.24	3.70	0.93	3.98	0.35	102	3.10	0.91	110	1080.00	2.84	8637	33.3	10.2	24.8
3	20160423DSJ-G2	1.33	<0.05	0.86	1.68	1.08	0.15	15.5	0.51	0.33	0.27	306	0.22	662	9.23	2.74	6.60
4	20160423DSJ-G3	17.5	0.36	14.4	2.94	12.7	1.14	230	7.11	2.98	11.7	3957	3.73	3404	88.8	35.1	70.3
5	20160423DSJ-G4	3.11	0.10	4.68	2.57	4.61	0.39	87.8	2.87	1.10	1.10	1470	0.74	143	39.0	12.4	28.1
6	20160424MK-G1	2.58	<0.05	0.25	0.34	0.35	0.05	4.47	0.14	0.16	45.1	84.8	0.28	41680	2.63	0.75	1.94
7	20160424MK-G2	8.64	<0.05	0.72	0.76	0.82	0.07	10.3	0.33	0.22	115	248	0.62	106600	5.74	1.59	4.43
8	20160424HKWQ-G1	11.2	0.17	5.80	1.48	6.39	0.47	98.7	3.09	1.52	56.0	2119	11.1	27280	64.1	13.1	26.7
9	20160424HKWQ-G2	9.32	0.14	5.64	1.89	5.93	0.47	191	6.17	1.11	2.73	1916	1.06	592	43.1	17.8	39.9
10	20160424HKWQ-G3	4.68	0.12	5.19	1.98	5.33	0.46	62.9	2.09	1.30	1.34	1618	1.30	4601	43.7	16.0	39.4
序号	样品编号	Pr (μg/g)	Nd (μg/g)	Sm (μg/g)	Eu (μg/g)	Gd (μg/g)	Tb (μg/g)	Dy (μg/g)	Ho (μg/g)	Er (μg/g)	Tm (μg/g)	Yb (μg/g)	Lu (μg/g)	Sc (μg/g)	Y (μg/g)		
1	20160423MKL-G1	7.12	26.3	5.82	1.28	5.54	1.07	4.77	0.98	2.64	0.42	2.35	0.43	11.9	28.3		
2	20160423DSJ-G1	3.20	12.4	3.89	1.10	5.46	1.20	5.85	1.22	3.06	0.44	2.20	0.39	6.54	40.2		
3	20160423DSJ-G2	0.74	2.76	0.78	0.18	0.91	0.18	0.73	0.15	0.38	0.06	0.31	0.06	1.79	4.95		
4	20160423DSJ-G3	9.27	32.7	6.38	1.17	5.81	1.10	5.10	1.11	3.11	0.51	2.85	0.52	13.9	31.7		
5	20160423DSJ-G4	3.34	11.5	2.51	0.55	2.48	0.48	2.37	0.49	1.40	0.22	1.23	0.23	5.34	14.8		
6	20160424MK-G1	0.27	1.18	0.54	0.16	0.78	0.18	0.80	0.17	0.36	0.05	0.22	<0.05	0.69	6.61		
7	20160424MK-G2	0.61	2.81	1.38	0.49	2.39	0.52	2.26	0.45	1.10	0.13	0.63	0.11	1.32	18.3		
8	20160424HKWQ-G1	3.70	13.8	5.21	1.47	6.56	1.34	6.14	1.15	3.07	0.43	2.29	0.40	8.53	37.2		
9	20160424HKWQ-G2	4.50	14.5	2.61	0.52	2.18	0.44	2.17	0.46	1.36	0.22	1.34	0.25	5.08	13.1		
10	20160424HKWQ-G3	4.44	16.3	4.51	1.07	4.77	0.92	4.05	0.79	2.06	0.31	1.77	0.33	6.70	22.3		

注:“—”表示未检出。

表 5 勐野井矿区及周边泉水沉积物 XRD 分析结果 (%)

Table 5 XRD analytical results (%) for spring sediments from the Mengyejing deposit and its surrounding areas											
序号	样品编号	样品特征	石英	方解石	文石	石膏	绿泥石	伊利石	钾长石	钠长石	非晶相
1	20160423MKL-G1	水清,小水池中,有少量气泡冒出,池中有黄色沉淀	44.8	1.9	19.5	—	10.3	23.5	—	—	少量
2	20160423DSJ-G1	红棕色,水池出口外侧沉积物	57	43	—	—	—	—	—	—	少量
3	20160423DSJ-G2	黄绿色,取自池边水面上,最上层硬质,黄色	—	—	88.4	11.6	—	—	—	—	—
4	20160423DSJ-G3	池底沉积物,黑色淤泥	86.3	6.7	—	—	—	—	—	7	少量
5	20160423DSJ-G4	池边碎屑	32.7	24.7	25.1	8	—	9.4	—	—	—
6	20160424MK-G1	大水池外出水口水渠边沉积物,浅红棕色	—	100	—	—	—	—	—	—	大量
7	20160424MK-G2	池内圈和外圈之间水中沉积物,深红棕色	—	—	—	—	—	—	—	—	全部
8	20160424HKWQ-G1	小水湾上游水中沉积物,红棕色,颗粒细	100	—	—	—	—	—	—	—	大量
9	20160424HKWQ-G2	水湾处岸边盐壳(竖直的较高的一侧)	67.7	5.1	—	18	—	—	9.2	—	—
10	20160424HKWQ-G3	上游水中沉积物和砂砾混合物,红棕色	32.7	8.2	33.7	—	—	25.4	—	—	少量

注:“—”表示未检出。

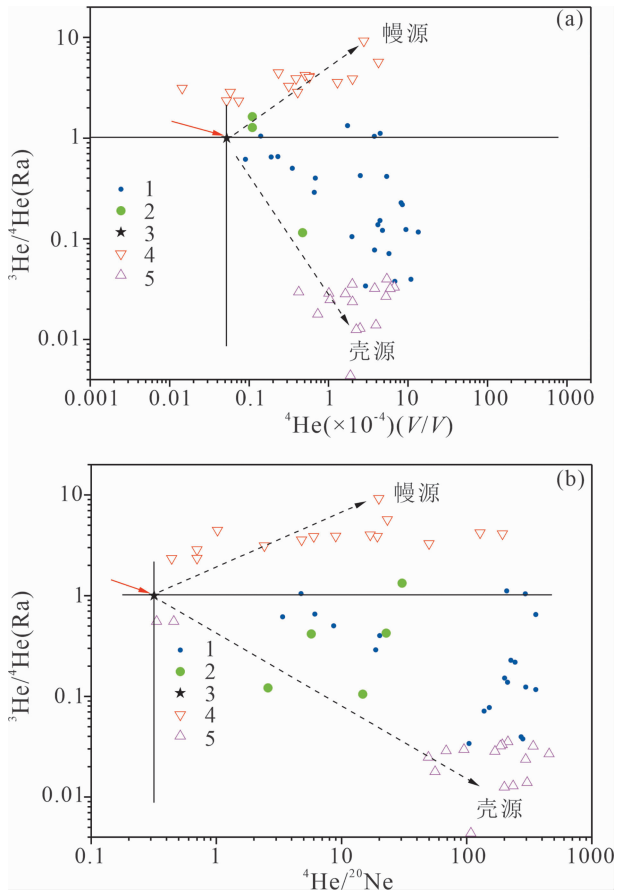


图 6 勐野井矿区及周边地区泉水中稀有气体同位素组成
Fig. 6 Diagrams for noble gas isotopic composition of springs from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas 1—2012 年采集的兰坪-思茅盆地盐泉/温泉气(据 Bo Ying et al., 2015); 2—本研究 2016 年采集的泉水中气体; 3—空气; 4—腾冲温泉气(据 Shangguan Zhiguan et al., 1997, 2000); 5—塔木盆地天然气(据 Bo Ying et al., 2012)
1—Gas samples from saline or warm spring water in the Lanping-Simao basin, collected in 2012 (after Bo Ying et al., 2015); 2—gas samples from spring water, collected in 2016; 3—air; 4—gas samples from warm spring water in Tengchong, Yunnan (after Shangguan Zhiguan et al., 1997, 2000); 5—natural gas samples from the Tarim basin (after Bo Ying et al., 2012)

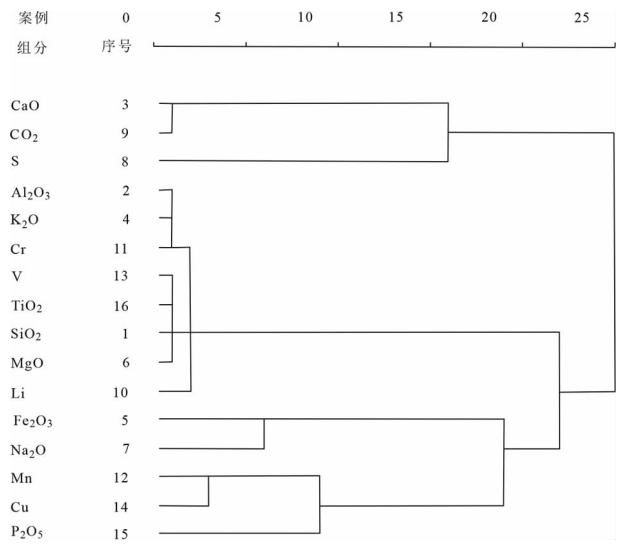


图 7 勐野井矿区及周边地区泉水沉积物化学组分聚类分析结果
Fig. 7 Results of cluster analysis of chemical components in spring sediments from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas

~174.52 $\mu\text{g/g}$,轻稀土变化范围为 4.84~154.92 $\mu\text{g/g}$,重稀土变化范围为 2.51~20.95 $\mu\text{g/g}$,LREE/HREE 为 1.52~9.74,(La/Yb)_N 为 1.70~8.96, δ_{Eu} 范围为 0.91~1.13。部分样品(1、3、4、5、9)轻重稀土分异明显,稀土元素分配曲线为右倾型, δ_{Eu} 值范围为 0.59~0.69,呈明显的负异常,另一部分 δ_{Eu} 值范围 0.71~0.82,呈中度负异常。轻稀土富集且铕负异常,揭示了源岩为火山岩(Zhou Zhenheng et al., 2000)。对稀土总量 REE 与 La/Yb 比值进行投影(图 9),部分泉水沉积物样品(1、4、5、9、10)数据落在花岗岩和碱性玄武岩交汇区,进一步证实泉水的化学组分可能与火山岩有密切关系。

3.6 剖面土壤样品元素分布特征

对自勐野井矿区沿垂直断裂方向的剖面 1 采集

表 6 勐野井矿区及周边稀土元素含量及相关数据

Table 6 Contents of rare earth elements(REE)and concerned dada for spring sediments from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE	(La/Sm) _N	(La/Yb) _N	(Gd/Yb) _N	δ _{Eu}	δ _{Ce}
	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)	(μg/g)						
1	25.30	64.00	7.12	26.30	5.82	1.28	5.54	1.07	4.77	0.98	2.64	2.35	0.43	147.60	7.30	2.73	7.26	1.90	0.69	1.13
2	10.20	24.80	3.20	12.40	3.89	1.10	5.46	1.20	5.85	1.22	3.06	2.20	0.39	74.97	2.87	1.65	3.13	2.00	0.73	1.04
3	2.74	6.60	0.74	2.76	0.78	0.18	0.91	0.18	0.73	0.15	0.38	0.31	0.06	16.52	5.07	2.21	5.96	2.37	0.65	1.10
4	35.10	70.30	9.27	32.70	6.38	1.17	5.81	1.10	5.10	1.11	3.11	2.85	0.52	174.52	7.90	3.46	8.30	1.65	0.59	0.92
5	12.40	28.10	3.34	11.50	2.51	0.55	2.48	0.48	2.37	0.49	1.40	1.23	0.23	67.08	6.73	3.11	6.80	1.63	0.67	1.03
6	0.75	1.94	0.27	1.18	0.54	0.16	0.78	0.18	0.80	0.17	0.36	0.22	<0.05	7.35	1.93	0.87	2.30	2.86	0.75	1.04
7	1.59	4.43	0.61	2.81	1.38	0.49	2.39	0.52	2.26	0.45	1.10	0.63	0.11	18.77	1.52	0.72	1.70	3.06	0.82	1.08
8	13.10	26.70	3.70	13.80	5.21	1.47	6.56	1.34	6.14	1.15	3.07	2.29	0.40	84.93	3.05	1.58	3.86	2.31	0.77	0.91
9	17.80	39.90	4.50	14.50	2.61	0.52	2.18	0.44	2.17	0.46	1.36	1.34	0.25	88.03	9.74	4.29	8.96	1.31	0.67	1.05
10	16.00	39.40	4.44	16.30	4.51	1.07	4.77	0.92	4.05	0.79	2.06	1.77	0.33	96.41	5.56	2.23	6.09	2.17	0.71	1.11

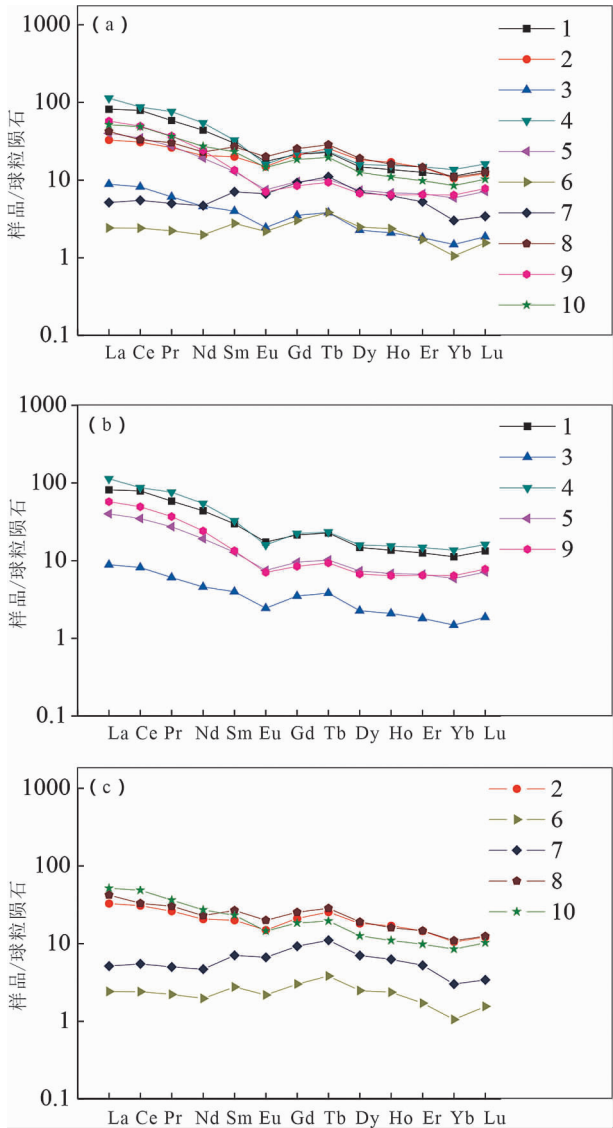


图 8 勐野井矿区及周边泉水沉积物中稀土元素分配曲线(编号 1~10 与表 5 和表 6 中的样品编号对应)
Fig. 8 REE distribution curve for spring sediments from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas (Nos. 1~10 correspond to those in Table 5 and Table 6)

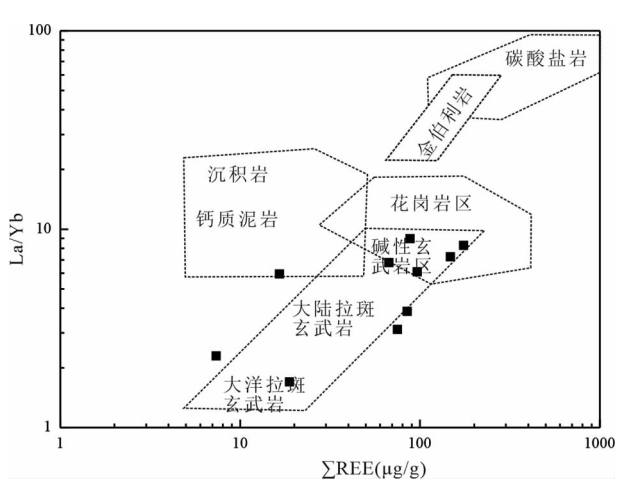


图 9 勐野井矿区及周边泉水沉积物 REE 与 La/Yb 比值分布
Fig. 9 A binary diagram of REE versus La/Yb for the spring sediments from the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas

的 10 件土壤沉积物样品中的 60 余项化学组分进行了分析测试,并将分析结果投图(图 10)。由图 10 可见,化学元素的分布有一定的规律性,K、Fe、Al、Ni、As、W、Sb、Be、Rb、Ba、La、Ce、Nd 等化学元素在 5 号样点的位置出现峰值,还有部分元素在 8 号样点出现峰值,而 Si、Cl、Zr 等在 5 号样点的位置出现最低值,另有部分元素在 3 号或 9 号样点出现低值。从上述结果看,沿垂直断裂的剖面取样分析,有利于识别钾等元素的异常,这些异常可能是流体(水、气)通过断裂将地层深部的含矿层信息带到地表的結果。

3.7 综合分析

打钻是寻找隐伏钾盐矿的最有效、最直接的方法,但是由于其成本过高,不能随意实施钻探工程。利用地球化学方法辅助识别异常,可以大大降低找矿成本。受强烈的后期改造作用影响,目前思茅地

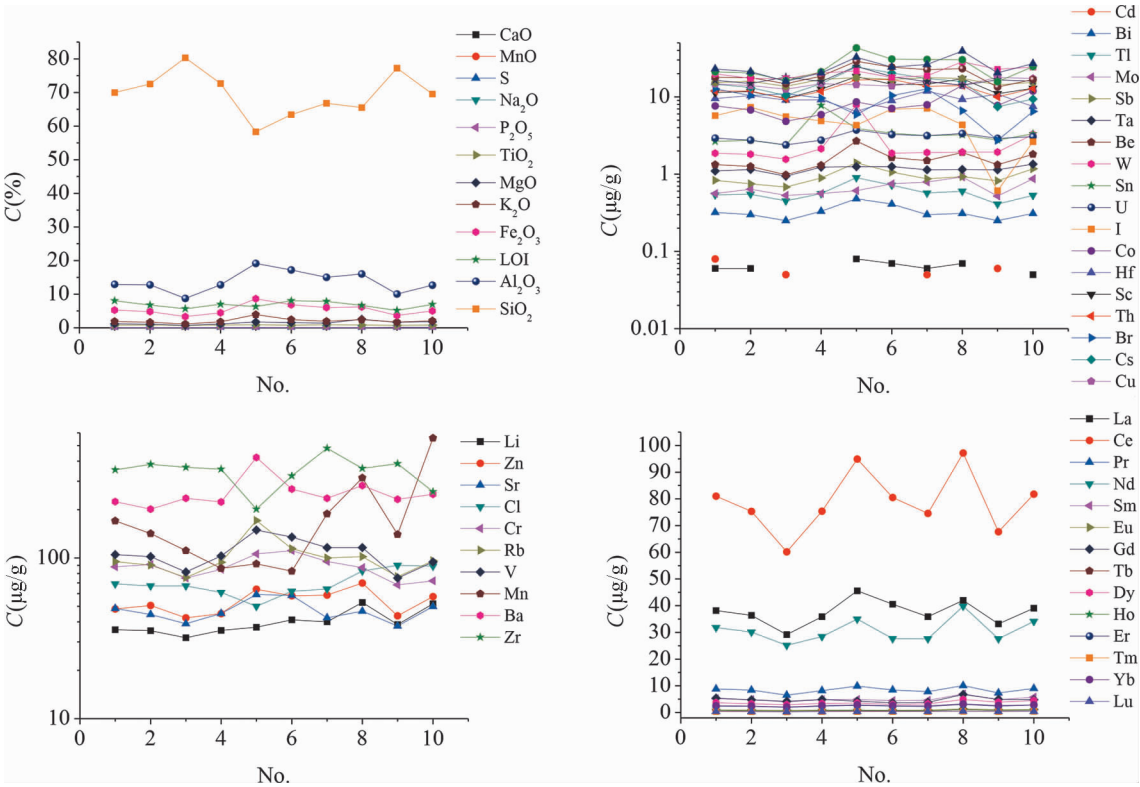


图 10 勐野井矿区剖面 1 化学元素分布图

Fig. 10 The content distribution of chemical components in soil samples from profile one in the Mengyejing potash deposit area

区地表盐泉出露较 20 世纪 70 年代少得多,在该区利用水化学方法找钾受到一定的限制。但是,通过借鉴前人研究资料而拟定的异常判别指标,可以快速有效地帮助识别水化学异常。泉水氢氧同位素组成,锶同位素组成,泉水中稀有气体同位素组成和泉水沉积物化学组成在物质来源研究方面具有重要的指示意义,是水化学异常成因分析的重要技术手段。沿垂直断裂的方向采集剖面土壤样品,通过对地表钾异常的识别,推测地层深部的含矿信息,为找钾靶区圈定和钻进部署提供更多依据。

4 结论

- (1)研究区地表沉积物各元素含量异常可能与深部流体(水、气)沿断裂上升补给有关,流体(泉水、气等)是钾等元素由深部上升到地表的载体,断裂是深部流体上升到地表的通道。
- (2)深部补给是勐野井矿区及周边地表钾异常形成的一个重要补给源,火山岩可能是其重要的物源之一,而受断裂是异常形成的重要控制因素。
- (3)找矿指标方面,矿化度大于 3 g/L 的盐卤水是比较有研究价值的,K/∑盐和 $K \times 10^3 / Cl$ 这两个指标对异常值的判别具有较重要的意义,如果水中

$K / \sum \text{盐} > 2.5$ 或 $K \times 10^3 / Cl > 4.4$,建议列为异常点,作进一步分析。

致谢:感谢国家地质实验测试中心邓月金老师、中国地质科学院地质研究所唐索寒老师和中国地质科学院矿产资源研究所张增杰老师、韩景仪老师在样品分析测试方面给予的帮助!同时,对参与稿件审阅和修改的审稿专家及编辑表示衷心的感谢!

注 释

- ① 云南省地矿局 814 队. 1994. 云南省第二轮钾盐成矿远景区划报告. 云南富民.
- ② 云南省地质局钾盐地质科研队. 1979. 云南思茅盆地钾盐水文地球化学研究及找钾预测.
- ③ 《云南江城勐野井钾盐矿区区域地质图》(内部资料).

References

Bo Ying, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, Cao Yangtong. 2013. Hydrochemical characteristics and controlling factors for waters' chemical composition in the Tarim Basin, western China. *Geochemistry*, 73(3): 343~356.

Bo Ying, Liu Chenglin, Cao Yangtong. 2016. Fault belt geochemical deep-penetration theories and techniques for potassium prospecting. *Mineral Deposits*, 35(6): 1281~1292 (in Chinese with English abstract).

Bo Ying, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Ye Xianren. 2012. The mantle source noble gas from underground brine of the Lop Nur in Xinjiang and its scientific significance. *Geology in China*, (4): 978~984 (in Chinese with English abstract).

Bo Ying, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, Wang Licheng. 2014.

- Hydrochemical characteristics and potassium-prospecting indicators of Lanping-Simao Basin, Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 33 (5): 1031 ~ 1044 (in Chinese with English abstract).
- Bo Ying, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, Wang Licheng. 2015. Chemical and isotopic characteristics and origin of spring waters in the Lanping-Simao Basin, Yunnan, southwestern China. *Geochemistry*, 75(3): 287~300.
- Boynont W V. 1984. Cosmochemistry of therare earth elements; meteorite studies. *Developments in Geochemistry*, 2: 63~114.
- Cao Chunhui, Zhang Mingjie, Tang Qingyan, Yang Yang, Lv Zonggang, Zhang Tongwei, Chen Chang, Yang Hui, Li Liwu. 2018. Noble gas isotopic variations and geological implication of Longmaxi shale gas in Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 89(1): 38~46.
- Cao Yangtong, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Xuan Zhiqiang, Chen Yongzhi. 2010. Relationship between surface copper mineralization and salt dome system in Kuqa Basin. *Mineral Deposits*, 29(3): 553~562 (in Chinese with English abstract).
- Chaudhuri S, Clauer N. 1992. Isotopic Compositions of dissolved strontium and neodymium in continental surface and shallow subsurface waters. *Isotopic Signatures and Sedimentary Records-Lecture Notes in Earth Sciences*, 43: 467~495.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702~1703.
- Gao Xiang, Fang Qinfang, Yao Wei, Peng Qiang, Dong Juan, Qin Hong, Di Yingwei. 2013. Genesis of themengyejing potash deposit in Lanping-Simao basin, Yunnan: indication from the components of the deposit. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 529~346.
- Guan Ye, Wang Anjian, Li Mingwu, Cao Dianhua, Liu Junlai. 2006. Characteristics of the middle axial tectonic belt in the Lanping-Simao Basin, western Yunnan, and its research significance. *Geology in China*, 33(4): 832~841 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, Zhao Yanjun, Cao Yangtong, Fang Xiaomin, Shen Lijian, Wu Chihua, Lv Fenglin, DingTing. 2018. The Mesozoic-Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China: implications for potash formation. *Ore Geology Reviews*, 102: 406~425.
- Nisi B, Vaselli O, Bucciati A, Perini G, Minissale A, Montegrossi G, Tassi F. 2006. Strontium isotope composition of the Arno River Valley waters (Tuscany Italy) as a natural tracer of water-rock interaction and mixing processes. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25(S1): 273.
- Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun. 1994. Potash deposit. Beijing: Geological Publishing House, 148 ~ 243 (in Chinese without English abstract).
- Shangguan Zhiguan, Bai Chunhua. 2000. Release characteristics of modern mantle-derived magmatic gas in Rehai, Tengchong. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 30(4): 407~414 (in Chinese without English abstract).
- Shangguan Zhiguan, Zheng Yaqin, Dong Jichuan. 1997. Source of gas escaping from Heaven Lake. *Science in China (Series D)*, 27(40): 318~324 (in Chinese without English abstract).
- Shen Lijian, Liu Chenglin, Zhao Jianxin, Feng Yuexing, Wang Licheng, Zhou Jiayi. 2017. The remarking of the Mengyejing potash deposit in Yunnan, China: evidence from Rb-Sr isotopic systematics. *Ore Geology Reviews*, 89: 876~886.
- Tao Mingxin, Xu Yongchang, Shen Ping, Liu Wenhui. 1996. Tectonic and geochemical characteristics and accumulation conditions of mantle-derived gas in the accumulation zones in eastern China. *Science in China (Series D)*, 26(6): 531~536 (in Chinese without English abstract).
- Tornos F, Heinrich C A. 2008. Shale basins, sulfur-deficient ore brines and the formation of exhalative base metal deposits. *Chemical Geology*, 247: 195~207.
- Wang Licheng, Liu Chenglin, Fei Mingming, Shen Lijian, Zhang Hua, Zhao Yanjun. 2015. First SHRIMP U-Pb zircon ages of the potash-bearing Mengyejing Formation, Simao Basin, southwestern Yunnan, China. *Cretaceous Research*, 52: 238~250.
- Wang Licheng, Liu Chenglin, Shen Lijian, Bo Ying. 2018. Research advances in potash forming of the Simao basin, eastern Tethyan realm. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1707~1723.
- Ye Xianren, Tao Mingxin, Yu Chuanao, Zhang Mingjie. 2007. Helium and neon isotopic compositions in the ophiolites from the Yarlung Zangbo River, southwestern China: the formation from deep mantle. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 50: 801~812.
- Yin Hanhui. 1990. Deep Processes and Mantle-Crust compound Mineralization in the evolution of the Lanping-Simao Mesozoic-Cenozoic Diwa Basin in western Yunnan, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 14(2): 113~124 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Qin, Qin Zhanjie, Wei Haicheng, Sheng Shurong, Shan Fashou. 2013. The Ore-forming Age and palaeoenvironment of the Mengyejing formation in Jiangcheng, Yunnan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 631~637 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xia, Chen Jiansheng, Rao Wenbo, Dong Haizhou, Sheng Xuefen, Su Zhiguo, Chen Liang. 2007. Indication of Helium isotope from groundwater in the Hexi Corridor Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(4): 563~569 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenheng, Xiang Caiying, Jiang Chaosong. 2000. Geochemistry of the rare earth and trace elements in the volcanic rocks in Tengchong, China. *Journal of Seismological Research*, 23(2):215~230 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 伯英, 刘成林, 曹养同. 2016. 断裂带地球化学深穿透理论与方法在钾盐找矿中的应用. *矿床地质*, 35(6): 1281~1292.
- 伯英, 刘成林, 焦鹏程, 叶先仁. 2012. 罗布泊地下卤水中幔源稀有气体及其意义. *中国地质*, (4): 978~984.
- 伯英, 刘成林, 赵艳军, 王立成. 2014. 兰坪—思茅盆地水化学特征及找钾指标探讨. *矿床地质*, 33(5): 1031~1044.
- 曹养同, 刘成林, 焦鹏程, 宣之强, 陈永志. 2010. 库车盆地铜矿化与盐丘系统的关系. *矿床地质*, 29 (3): 553~562
- 高翔, 方勤方, 姚薇, 彭强, 董娟, 秦红, 邸迎伟. 2013. 云南兰坪—思茅盆地勐野井钾盐矿床物质组分对成因的指示. *地球学报*, 34(5): 529~346.
- 管焯, 王安建, 李朋武, 曹殿华, 刘俊来. 2006. 云南兰坪—思茅盆地中轴构造带的特征及其研究意义. *中国地质*, 33(4): 832~841.
- 钱自强, 曲一华, 刘群. 1994. 钾盐矿床. 北京: 地质出版, 148~243.
- 曲一华, 袁品泉, 帅开业, 张瑛, 蔡克勤, 贾疏源, 陈朝德. 1998. 兰坪—思茅盆地钾盐成矿规律及预测. 北京: 地质出版社.
- 上官志冠, 郑雅琴, 董继川. 1997. 长白山天池火山地热点逸出气体的物质来源. *中国科学(D辑)*, 27(40): 318~324.
- 上官志冠和白春华. 2000. 腾冲热海地区现代幔源岩浆气体释放特征. *中国科学(D辑)*, 30(4): 407~414.
- 陶明昌, 徐永昌, 沈平, 刘文汇. 1996. 中国东部幔源气藏聚集带的大地构造与地球化学特征及成藏条件. *中国科学(D辑)*, 26 (6): 531~536.
- 王立成, 刘成林, 沈立建, 伯英. 2018. 东特提斯域思茅盆地钾盐成矿研究进展. *地质学报*, 92(8): 1707~1723.
- 尹汉辉. 1990. 云南兰坪—思茅地洼盆地演化的深部因素及幔—壳复合成矿作用. *大地构造与成矿学*, 14(2): 113~124.
- 袁品泉. 1980. 云南思茅盆地盐类矿床特征及成钾条件的初步认识. 云南思茅地区钾盐地质研究论文集. 云南: 云南省地质局, 8~37.

袁秦, 秦占杰, 魏海成, 盛淑蓉, 山发寿. 2013. 云南江城勐野井组钾盐成矿时代及其古环境研究. 地球学报, 34(5): 631~637.
云南省地质矿产局. 1986. 云南思茅盐矿地质. 北京: 地质出版社.
赵霞, 陈建生, 饶文波, 董海洲, 盛雪芬, 苏治国, 陈亮. 2007. 河西走廊盆地地下水的氮同位素指示. 地质学报, 81(4): 563

~569.
张嘉澍, 李官贤. 1980. 云南江城勐野井钾盐矿床地质特征. 云南思茅地区钾盐地质研究论文集. 云南: 云南省地质局, 38~44.
周真恒, 向才英, 姜朝松. 2000. 腾冲火山岩稀土和微量元素地球化学研究. 地震研究, 23(2): 215~230.

Hydrochemical characteristics of spring water and genesis of surface potassium anomaly in the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas in Yunnan Province

BO Ying*, CAO Yangtong, LÜ Fenglin

MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

* Corresponding author: sunnybritney@hotmail.com

Abstract

This paper examines the chemical characteristics of spring water and surface sediments in the Mengyejing potash deposit and its surrounding areas, and discusses the genesis of the surface potassium anomaly in the study area. The Mengyejing potash deposit is located in the south of the Lanping-Simao basin in the Yunnan Province, southwestern China. It is until now the only solid potash deposit with industrial mining value in China. Spring water and sediment samples, as well as gas samples from the springs were collected from the study area for chemical and isotopic analysis. Since the salt-bearing strata are widely distributed in the study area, anomaly information can be effectively captured by means of careful surface sample collection, an important factor in the study of the mechanism of potash deposit formation and potassium prospecting. Combined with previous hydrochemical studies, it is proved that the salt spring water in the Mengyejing deposit shows grade I anomaly. The peak and valley values of potassium and concerned components in soil samples from the two profiles perpendicular to the fracture direction show certain regularity. It is inferred that the surface anomalies are somehow related to the recharge of deep fluid (water and gas) along the faults. Noble gas isotopic compositions reveal that the major faults in the study areas may cut deep into the crust and some even into the upper asthenosphere. Hydrogen, oxygen and strontium isotopic compositions of spring water show that the spring water in the study area has deep recharge and water-rock reactions. Additionally, hydrogen and oxygen isotopic composition and mineralogical evidence indicate that deep fluid may play an important role in the formation of the Mengyejing potash deposit. It is inferred that the deep recharge may be an important source for the surface potassium anomaly in the potash deposit, with the volcanic rocks as one of the important material sources, and the fault belts as the controlling factor.

Key words: potassium; isotope; noble gas; fault; deep recharge; Mengyejing