

文章编号: 1000-4734(2009)04-0496-06

## 云南腾冲地区地热流体的地球化学特征

刘虹<sup>1,2</sup>, 张国平<sup>1\*</sup>, 金志升<sup>1</sup>, 刘丛强<sup>1</sup>, 韩贵琳<sup>1</sup>, 李玲<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 对云南热海和瑞滇地区地热流体的地球化学特征进行了分析和探讨, 并据此评估了地热流体对环境的影响。结果显示, 研究区的碱性热泉中 K、Na、F、Cl、SiO<sub>2</sub> 的含量高, 而只存在于热海地区的酸性热泉中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mn、Fe 的含量高。热泉中 As、Sb 的含量范围分别在 43.6 ~ 687 μg/L 和 0.38 ~ 23.8 μg/L 之间。热泉中以 As(III) 为主, 占了总砷的 91%。地热流体中的 As、Sb 一部分被固定在泉华中, 而另一部分则释放到了环境中, 从而进入地下水和下游的田地中, 对当地居民的健康造成威胁。

**关键词:** 热泉; 地球化学行为; 热海; 瑞滇; 云南

**中图分类号:** P592; X142 **文献标识码:** A

**作者简介:** 刘虹, 女, 1981年生, 博士, 地球化学专业。E-mail: liuhong@mails.gyig.ac.cn

热泉水体中溶解固体总量(TDS)通常很高, 而TDS中常含有砷(As)、锑(Sb)等有毒元素<sup>[1,2]</sup>。这些热泉的释放, 不仅会影响周围的水体环境<sup>[3]</sup>, 还会威胁人们的健康<sup>[4,5]</sup>。位于中国西南地区的云南腾冲是著名的火山区, 在火山活动中形成了丰富的地热资源<sup>[6-8]</sup>, 其中包括著名的热海和瑞滇热泉区。

热泉对河流和地下水的污染现象在全球普遍存在, 然而对于热泉中As、Sb等有毒元素的关注却很少。不同形态的As、Sb, 其毒性有明显差异, 例如As(III)、Sb(III)的毒性就远比As(V)、Sb(V)的毒性强<sup>[9,10]</sup>。地热流体的还原性条件有利于As(III)的存在<sup>[11]</sup>, 从而加重了对环境的不利影响。

本研究分析了云南腾冲热海和瑞滇地区热泉中的常量元素和微量元素, 探讨了该区地热流体的地球化学特征, 并据此评估了热泉对该地区及周边环境的潜在威胁。

## 1 材料与方 法

于2005年11~12月在热海地区采集河水和热泉水样, 在瑞滇地区采集热泉水样(图1), 现场测定水样的pH、Eh和EC。水样用0.22 μm的硝酸纤维素滤膜(Millipore)过滤后, 盛装在经去离子水清洗并已烘干的聚乙烯瓶中。取部分已过滤的水样滴定HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>的含量。

水样中的常量元素用ICP-OES(Varian Vista MPX)测定, 阴离子含量采用离子色谱测定(Dionex ICS-90), 硅和微量元素采用ICP-MS(MicroMass Platform ICP)测定。

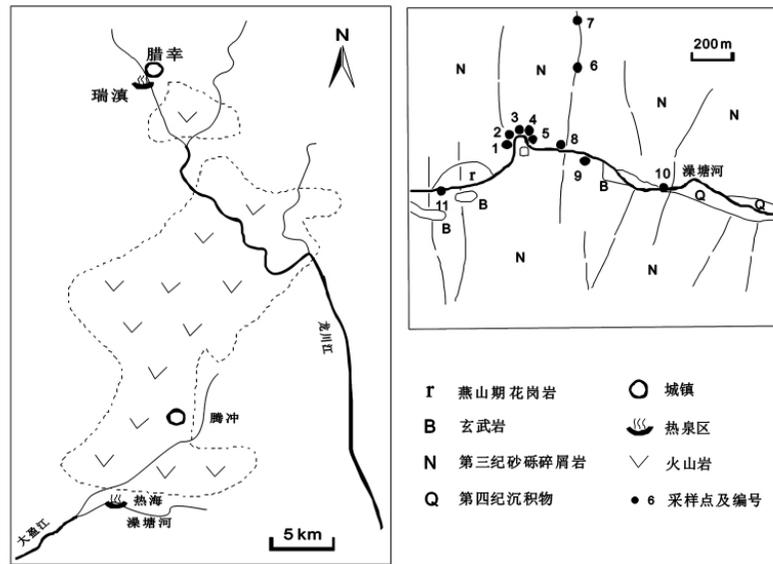
水样As形态分析: 以35.2 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>和4.8 mM K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>为流动相, 采用Hamilton PRP-X100色谱柱与ICP-MS联用(IC-ICP-MS), 7 min内将As的4种形态[As(III)、As(V)、甲基砷酸(MMA)和二甲基砷酸(DMA)]进行了分离和测定。

将热泉泉华烘干, 碎至100目(0.15 mm)后, 准确称量20 mg置于聚四氟乙烯坩锅中, 加入1 mL HNO<sub>3</sub>和0.5 mL HF。将坩锅密封于不锈钢套中, 在170 °C的温度下加热12 h后取出。将坩锅中的溶液蒸干后, 加入1 mL HNO<sub>3</sub>并再次蒸干。所得残留物加入1 mL HNO<sub>3</sub>溶解后, 稀释到100 mL, 用上述水样的分析方法进行测定。

收稿日期: 2009-01-08

基金项目: 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划和中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-140)

\* 通讯作者, E-mail: guoping.zhang@tom.com



1. 鼓鸣泉; 2. 眼镜泉; 3. 珍珠泉; 4. 怀胎井左; 5. 怀胎井右; 6. 大滚锅;  
7. 老滚锅; 8. 蛤蟆嘴; 9. 水热爆炸; 10. 澡塘河 a; 11. 澡塘河 b

图 1 采样点示意图

Fig. 1. Sampling sites in the study field.

## 2 结果与讨论

### 2.1 热泉水的化学特征

热泉水及地表水的物理化学特征见表 1。在 9 个热泉水样中,珍珠泉(3 号样)的 pH 最低(3.5),而其它样品的 pH 都在 7.9 ~ 9.6 之间。

碱性热泉水的 EC 很高,其中 K、Na、F、Cl 和 SiO<sub>2</sub> 的含量分别为 53 ~ 147、140 ~ 325、14.3 ~ 40、303 ~ 759 和 188 ~ 700 mg/L。泉水的水化学类型为 Na-Cl-HCO<sub>3</sub> 型。和碱性泉水相比,酸性泉水的 K、Na、F、Cl 和 SiO<sub>2</sub> 的含量比较低,而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量却比较高(134 mg/L)。

表 1 泉水、河水的水化学参数及常量元素组成

Table 1. Basic features and major compositions of spring and river waters

采样点	类型	T/°C	pH	EC/(μS/cm)	Eh/mV	ρ <sub>B</sub> /(mg/L)										
						K	Na	Ca	Mg	F	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SiO <sub>2</sub>
热海地区																
鼓鸣泉	S	96	9.6	3390	-366	110	264	0.28	0.01	24.2	552	32.1	22.2	769	138	483
眼镜泉	S	94	9.4	3500	-371	113	276	0.24	0.01	30.4	582	32.1	23.6	842	120	524
珍珠泉	S	96	3.5	523	-30	13.7	13.0	1.71	0.04	2.26	38.1	32.3	134	N. D.	N. D.	153
怀胎井左	S	81	7.9	1939	-230	55.2	143	0.59	0.01	15.4	331	34.9	77.2	476	N. D.	304
怀胎井右	S	89.7	8.9	3260	-382	106	258	0.27	N. D.	29.3	585	32.7	20.5	817	102	491
大滚锅	S	97	8.8	4140	-227	147	325	0.20	N. D.	40.0	759	32.5	18.4	1171	66.0	700
老滚锅	S	91.6	8.9	1949	-355	53.1	152	0.93	0.04	16.6	325	N. D.	23.9	561	36.0	360
蛤蟆嘴	S	97	8.3	1842	-237	57.9	140	7.83	2.05	14.3	303	32.2	28.3	610	12.0	216
水热爆炸	S	41.6	8.1	1873	-157	53.0	144	8.04	0.45	14.9	313	33.1	41.4	622	N. D.	188
澡塘河 a	R	12.5	7.5	110	61	0.16	4.27	5.12	0.93	N. D.	15.7	37.7	12.1	48.8	N. D.	28.3
澡塘河 b	R	20.3	7.7	270	-97	2.54	12.5	5.34	0.93	2.81	46.8	39.5	13.5	97.6	N. D.	38.0
瑞滇地区																
洁明泉	S	79.3	8.2	1817	-96	39.2	154	4.91	6.48	15.6	181	N. D.	31.8	927	N. D.	160
供销社	S	74.9	8.5	1958	-23	42.9	165	4.91	6.25	17.3	200	N. D.	34.5	939	18.0	180

注: S: 泉水; R: 河水; a: 上游点; b: 下游点; N. D.: 未检出(Mg < 0.01 mg/L; F < 0.3 mg/L; NO<sub>3</sub><sup>-</sup> < 0.1 mg/L)。

硫酸盐、高岭石、伊利石、方解石和蛋白石等热泉矿物在研究区都有发育<sup>[12]</sup>。由于水-岩相互作用,碱性泉水会使硅酸盐溶解,而酸性泉水则会使黄铁矿等硫化物溶解<sup>[13]</sup>,因此碱性的泉水中SiO<sub>2</sub>、Na和K的含量高,而酸性泉水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的含量高。热海地区的热泉水是碱性的,因此其中的SiO<sub>2</sub>、Na和K的含量都比较高,而珍珠泉水是酸性的,因此其中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的含量比较高。其它研究也表明,低pH的热泉水中硫酸盐的含量通常比较高<sup>[14,15]</sup>。

瑞滇的两个弱碱性(pH分别为8.2和8.5)热泉水中,K、Na、F、Cl和SiO<sub>2</sub>的含量也比较高(分别为39.2~42.9、154~165、15.6~17.3、81

~200 mg/L和160~180 mg/L)。与热海的热泉相比,瑞滇热泉水中Mg的含量更高(表1)。

## 2.2 热泉中As、Sb以及其它微量元素的特征

热泉以及河水中微量元素的含量见表2。从表中可以看出,在热海的碱性泉水中Ge、As、Rb、Sr、Sb、Cs和W的含量都比较高(含量分别在16.7~54.4、83.7~603、348~1136、17.6~76.9、2.92~23.8、178~843和21.6~74.5 μg/L之间),而酸性的珍珠热泉水中Mn和Fe的含量却比较高(分别为237和204 μg/L)。与热海地区的泉水相比,瑞滇泉水Mn的含量很低,甚至未检出,而Sr和Ba的含量却比较高。

表2 热泉和河水中微量元素的含量特征

Table 2. Trace element concentrations (μg/L) of spring and river waters

采样点	类型	Sc	Mn	Fe	Ge	As	Se	Rb	Sr	Sb	Cs	Ba	W
热海地区													
鼓鸣泉	S	164	3.65	0.37	48.8	526	5.97	1034	48.5	18.6	603	0.49	72.6
眼镜泉	S	207	6.06	0.78	54.4	590	5.82	1075	68.6	20.1	637	0.27	74.5
珍珠泉	S	85.5	237	204	3.60	43.6	N. D.	254	8.63	0.38	38.3	1.31	N. D.
怀胎井左	S	109	13.5	2.05	30.0	300	3.75	656	23.5	10.8	371	2.02	37.9
怀胎井右	S	174	6.02	0.72	53.3	603	6.49	1136	39.3	16.5	520	0.49	58.8
大滚锅	S	183	1.79	0.59	53.6	598	6.22	1128	56.1	23.8	843	0.62	93.3
老滚锅	S	92.0	96.8	5.82	16.7	193	1.19	348	17.9	4.76	178	0.48	21.6
蛤蟆嘴	S	57.1	44.7	0.86	18.3	83.7	1.61	432	76.9	2.92	280	8.48	30.1
水热爆炸	S	62.2	42.3	13.6	18.3	194	2.36	400	46.9	4.73	184	3.97	23.7
澡塘河 a	R	5.66	10.9	0.83	N. D.	N. D.	N. D.	3.15	12.6	N. D.	1.38	0.46	N. D.
澡塘河 b	R	17.4	15.5	2.35	1.59	8.06	N. D.	33.5	28.0	0.49	12.5	1.40	2.69
瑞滇地区													
洁明泉	S	60.2	N. D.	4.17	15.0	675	N. D.	235	274	6.73	401	59.8	68.0
供销社	S	68.6	N. D.	10.0	16.5	687	N. D.	261	294	5.96	415	54.0	75.6

注: S: 泉水; R: 河水; a: 上游点; b: 下游点; N. D.: 未检出(Mn、Ge、As、Sb和W < 0.01 μg/L; Se < 0.05 μg/L)。

土壤、地表水以及地下水中As、Sb等有毒元素是研究的热点<sup>[16,17]</sup>。在热海和瑞滇地区的泉水中都有大量的As,其含量明显高于世界卫生组织规定的10 μg/L的安全浓度<sup>[18]</sup>,而大多数样品中Sb的含量也高于欧盟规定的5 μg/L的安全浓度<sup>[19]</sup>。

热海地区9个热泉水的EC和各元素含量之间的相关系数见表3。从表中可以看出,EC与K、Na、F、Cl、SiO<sub>2</sub>、Sc、Ge、As、Rb、Sb、Cs和W的含量之间有明显的正相关关系( $r > 0.83$ )。这可能说明了As和Sb与其它元素具有相似的释放机理。此外,As和Sb的与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mn和Fe具有明显的负相关关系( $r = -0.51 \sim -0.72$ ),这说明了As、Sb与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mn和Fe在热泉水中可能具有不同的释放机理。

研究区的所有热泉中As的含量远高于Sb的含量,因此As的形态分析非常重要。热泉中As一般有As(III)、As(V)、MMA和DMA 4种形态,各种As形态的毒性都有差异,例如亚砷酸盐的毒性比砷酸盐高60倍,有机砷的毒性明显弱于无机砷<sup>[9]</sup>。为了进一步了解As对热海和瑞滇地区的环境影响,本研究对砷的4种形态进行了分析。结果如图2所示,泉水中只有无机砷的存在,As(III)在所有样品中都有存在(除了水热爆炸泉)。泉水中以As(III)为主,特别是热海地区的眼镜泉、怀胎井泉(左)、大滚锅及瑞滇的洁明泉中,As(III)在总砷中的比例分别高达73%、91%、79%和64%。As(III)的大量存在加剧了对当地居民健康的威胁。

表 3 热泉水的 EC 和各元素间的相关系数(  $n = 9$  )

Table 3. Correlation coefficients of EC and some elements in hot spring waters(  $n = 9$  )

	EC	K	Na	Ca	F	Cl	SO <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Sc	Mn	Fe	Ge	As	Rb	Sr	Sb	Cs	Ba
K	0.99																	
Na	0.998	0.99																
Ca	-0.44	-0.44	-0.41															
F	0.98	0.98	0.98	-0.44														
Cl	0.99	0.99	0.99	-0.42	0.99													
SO <sub>4</sub>	-0.77	-0.73	-0.81	0.003	-0.75	-0.78												
SiO <sub>2</sub>	0.94	0.95	0.93	-0.65	0.96	0.94	-0.63											
Sc	0.85	0.85	0.83	-0.75	0.83	0.83	-0.42	0.89										
Mn	-0.81	-0.76	-0.83	0.09	-0.76	-0.82	0.80	-0.62	-0.52									
Fe	-0.67	-0.61	-0.71	-0.02	-0.64	-0.69	0.89	-0.50	-0.31	0.93								
Ge	0.96	0.95	0.95	-0.55	0.92	0.94	-0.64	0.90	0.92	-0.79	-0.59							
As	0.94	0.93	0.93	-0.62	0.91	0.93	-0.59	0.91	0.95	-0.72	-0.52	0.99						
Rb	0.93	0.93	0.92	-0.58	0.90	0.92	-0.57	0.89	0.93	-0.73	-0.50	0.99	0.98					
Sr	0.56	0.57	0.57	0.36	0.53	0.54	-0.66	0.34	0.27	-0.64	-0.57	0.48	0.36	0.44				
Sb	0.96	0.96	0.94	-0.61	0.93	0.94	-0.56	0.95	0.94	-0.72	-0.51	0.97	0.97	0.97	0.41			
Cs	0.96	0.98	0.95	-0.50	0.95	0.96	-0.62	0.94	0.87	-0.75	-0.56	0.95	0.92	0.94	0.54	0.98		
Ba	-0.40	-0.38	-0.38	0.88	-0.39	-0.38	0.002	-0.58	-0.69	0.02	-0.09	-0.47	-0.60	-0.48	0.45	-0.55	-0.38	
W	0.98	0.98	0.97	-0.48	0.95	0.97	-0.67	0.94	0.87	-0.78	-0.59	0.96	0.93	0.94	0.57	0.98	0.995	-0.38

瑞滇地区的洁明泉和供销社泉中 As 的含量都很高,特别是洁明泉的泉水中,As(III) 占总砷的 64%(图 2)。这两个热泉都位于腊幸村的中心,它们的排放,对当地居民的健康具有潜在的威胁,因此对于热泉的研究是非常重要的。关于热泉对人体健康的威胁将在 2.4 节中进行探讨。

### 2.3 泉华中 As、Sb 的特征

热海地区热泉泉华中 As、Sb 的含量(表 4) 远高于地壳中 As 的平均含量(As: 1.8 mg/kg<sup>[20]</sup>; Sb: 0.2 ~ 0.3 mg/kg<sup>[21]</sup>)。热泉周围的泉华可以将泉水中 As、Sb 的固定,但泉华中并没有诸如雌黄、雄黄和黄锑矿等矿物的存在。

一般认为 As、Sb 具有相似的地球化学行为<sup>[22]</sup>,但本研究中的结果表明,热海和瑞滇地区热泉中 As、Sb 在沉积过程中的行为有差异。在热海的热泉水中 As、Sb 具有很好的正相关关系( $r = 0.97$   $n = 9$ ),而在泉华中却显示了负相关关系( $r = -0.40$   $n = 4$ )。这可能说明了热泉泉水中的 As、Sb 在沉积过程中具有不同的物理化学行为。泉华和泉水中 As 的相关系数为 -0.44 ( $n = 4$ ),而两介质中 Sb 的相关系数为 0.76 ( $n = 4$ ),也表明了 As、Sb 在沉积过程中具有不同的行为机理。蛤蟆嘴热泉(8 号样)泉水和泉华中 As 的负相关关系最为明显,其泉水中 As 的含量比较低(83.7 μg/kg),而泉华中 As 的含量却很高(196 mg/kg)。

在新西兰 Taupo 火山区的热泉的研究也表明,As、Sb 在泉水中具有相似的含量变化规律,但在泉华中随着 Sb 含量升高,As 的含量呈降低的趋势<sup>[23]</sup>。As、Sb 在沉积过程中的行为机理需要进一步的研究。

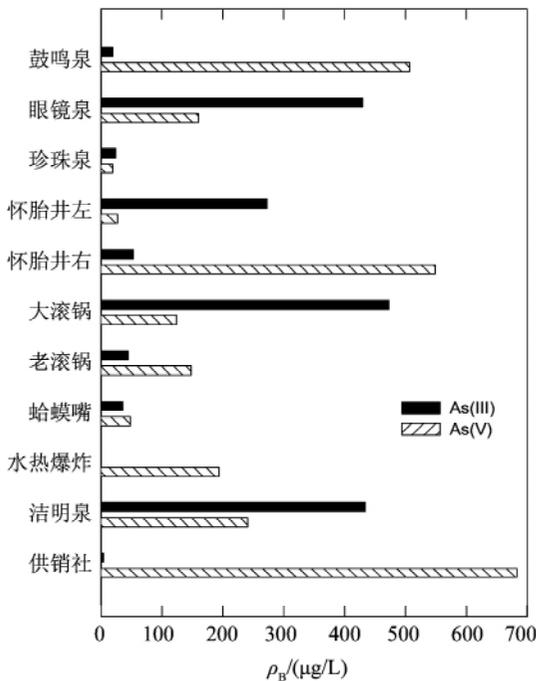


图 2 As 热泉中 As(III) 和 As(V) 的含量特征

Fig. 2. Concentrations of As(III) and As(V) in the Rehai and Ruidian hot spring waters.

表4 泉华中 As 和 Sb 的含量( mg/kg)  
Table 4. Concentration of total As and Sb  
in sinter deposits ( mg/kg)

采样点	As	Sb
鼓鸣泉	72.6	31.0
眼镜泉	104	13.8
珍珠泉	80.4	4.41
蛤蟆嘴	196	8.94

## 2.4 热泉对环境潜在的影响

热海地区的各热泉最终都汇入澡塘河,使澡塘河的化学性质发生了明显的变化。在热泉下游的河水中, K、Na、F、Cl、SiO<sub>2</sub>、Ge、As、Rb、Sb、Cs 和 W 的含量都明显升高,而由于热泉中 Ca、Mg、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量较低,因此河水中相应离子含量变化不大。

瑞滇的两个热泉水中 As 的含量都很高: 洁明泉为 675 μg/L, 供销社热泉为 687 μg/L。洁明泉中以 As(III) 为主(占总砷的 64%), 而供销社热泉的流量大(约 15 L/s), 因此两热泉对当地的水质都会造成严重的影响。这些受热泉影响的地表

水、地下水被当地居民饮用后,都会对人体的健康造成伤害。此外,这些受热泉影响的水体被用于农业灌溉后,其中的 As 会在农作物中累积,对人、畜的健康也有潜在的威胁。相关的研究亟待进一步的深入。

## 3 结 论

由于水-岩相互作用的影响,导致了热海和瑞滇的碱性热泉中 K、Na、F、Cl 和 SiO<sub>2</sub> 的含量高,而酸性热泉中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mn 和 Fe 的含量高。

热泉中 As、Sb 对环境的影响值得重视。特别是 As 的含量高,且在一些热泉中都是以 As(III) 为主,因此更应该加强对它的研究。热泉中的 As、Sb,虽然有一部分被固定在了泉华中,但是大部分的 As、Sb 都进入了环境中,对地表水、地下水和土壤都造成了污染。

在瑞滇地区的热泉中含有大量的 As、Sb,这些泉水的外泄,不仅会污染饮用水源—地下水,进入地表水并用于灌溉后,还会在农产品中形成残留,被饮用和食用后都会对人体的健康造成伤害。

## 参 考 文 献:

- [1] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. *Appl Geochem*, 2002, 17: 517-568.
- [2] Brown K L, Simmons S F. Precious metals in high temperature geothermal systems in New Zealand [J]. *Geothermics*, 2003, 32: 619-625.
- [3] Mroczek E K. Contributions of arsenic and chloride from the Kawerau geothermal field to the Tarawera River, New Zealand [J]. *Geothermics*, 2005, 34: 218-233.
- [4] Webster J G. The source of arsenic (and other elements) in the Marbel-Matingao river catchment, Mindanao, Philippines [J]. *Geothermics*, 1999, 28: 95-111.
- [5] Robinson B, Duwig C, Bolan N, et al. Uptake of arsenic by New Zealand watercress (*Lepidium sativum*) [J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 301: 67-73.
- [6] 高清武, 范树全. 腾冲现代火山活动区地热流体的地球化学特征 [J]. *西安地质学院学报*, 1992, 14(3): 40-44.
- [7] 徐青, 李翠华, 汪缙安, 等. 云南地热资源—以腾冲地区为重点进行解剖 [J]. *地质地球化学*, 1997, (4): 77-84.
- [8] Du J, Liu C-Q, Fu B, et al. Variations of geothermometry and chemical-isotopic compositions of hot spring fluids in the Rehai geothermal field, southwestern China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, 142: 243-261.
- [9] Ferguson, J F, Gavis J. A review of the arsenic cycle in natural waters [J]. *Water Research*, 1972, 6: 1259-1274.
- [10] De Gregori I, Quiroz W, Pinochet H, et al. Simultaneous speciation analysis of Sb(III), Sb(V) and (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>SbCl<sub>2</sub> by high performance liquid chromatography-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry detection (HPLC-HG-AFS): Application to antimony speciation in sea water [J]. *Journal of Chromatography*, 2005, 1091: 94-101.
- [11] Langner W, Jackson C R, McDermott T R, Inskip W P. Rapid oxidation of arsenite in a hot spring ecosystem, Yellowstone National Park [J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 3302-3309.
- [12] Zhu M, Tong W. Surface hydrothermal minerals and their distribution in the Tengchong geothermal area, China [J]. *Geothermics*, 1987, 16: 181-195.
- [13] 张宝政, 陈琦. 地质学原理 [M]. 北京: 地质出版社, 1983: 64-65.
- [14] Aiuppa A, Carapezza M L, Parello F. Fluid geochemistry of the San Vicente geothermal field (El Salvador) [J]. *Geothermics*, 1997, 26: 83-97.

- [15] Sepúlveda F, Dorsch K, Lahsen A, et al. Chemical and isotopic composition of geothermal discharges from the Puyehue-Cordón Caulle area (40.5°S), Southern Chile [J]. *Geothermics*, 2004, 33: 655-673.
- [16] Nimick D A, Moore J N, Dalby C E, et al. The fate of geothermal arsenic in the Madison and Missouri Rivers, Montana and Wyoming [J]. *Water Resources Research*, 1998, 34: 3051-3067.
- [17] Koch I, Feldmann J, Wang L, et al. Arsenic in the Meager Creek hot springs environment, British Columbia, Canada [J]. *The Science of the Total Environment*, 1999, 236: 101-117.
- [18] WHO. Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 1: Recommendations [M]. 2nd ed. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1993.
- [19] Council of the European Union. Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption [J]. *Official Journal L 330*, 05/12/1998, 32-54.
- [20] Greenwood N N, Earnshaw A. *Chemistry of the Elements* [M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 1984: 1542.
- [21] Fowler B A, Goering P L. Antimony [A]. Merian E. Metals and their Compounds in the Environment [M]. Weinheim, New York, Basel, Cambridge: VCH, 1991: 743.
- [22] Murciego A M, Sanchez A G, Gonzalez M A R, et al. Antimony distribution and mobility in topsoils and plants (Cytisus striatus, Cistus ladanifer and Dittrichia viscosa) from polluted Sb-mining areas in Extremadura (Spain) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145: 15-21.
- [23] McKenzie E J, Brown K L, Cady S L, et al. Trace metal chemistry and silicification of microorganisms in geothermal sinter, Taupo volcanic zone, New Zealand [J]. *Geothermics*, 2001, 30: 483-502.

## Geochemical characteristics of geothermal fluid in Tengchong Area, Yunnan Province, China

LIU Hong<sup>1,2</sup>, Zhang Guo-ping<sup>1</sup>, JIN Zhi-sheng<sup>1</sup>, Liu Cong-qiang<sup>1</sup>, HAN Gui-lin<sup>1</sup>, LI Ling<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The geochemical characteristics of the hot spring waters in the Rehai and Ruidian geothermal fields, Tengchong County, Yunnan Province, China, were described and their possible environmental impact was assessed. The results show that the alkaline spring waters contain high levels of K, Na, F, Cl, and SiO<sub>2</sub>, whereas the only acidic spring water in Rehai geothermal field contains high levels of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mn and Fe. As and Sb in the spring waters are in the ranges of 43.6-687 μg/L and 0.38-23.8 μg/L, respectively. As(III) occurs in most spring waters, and the fraction of As(III) is up to 91% of total As. Fractions of geothermal As and Sb are trapped in the sinter deposits while most of them enter the environment. The diffusion of As and Sb into groundwater and downstreams in crop fields constitutes a threat to the health of the local population.

**Key words:** Hot springs; Geochemistry; Rehai geothermal field; Ruidian geothermal field; Yunnan