

中国一些地区温泉中天然气的地球化学特征及碳、氮同位素组成*

戴金星 戴春森** 宋 岩 廖永胜

(北京石油勘探开发科学研究院地质研究所, 北京 100083)

摘 要

中国一些地区温泉气的主要组分是 CO_2 或 N_2 , 烷烃气含量低或无, 同时含极微量的氮. 温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 主频率峰在 -20% 至 -22% , 说明温泉气的甲烷主要是无机成因的. 温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 主频率峰在 -4% 至 -8% , 反映温泉气的 CO_2 也主要是无机成因的. $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 CO_2 含量正相关, 其回归方程为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}(\%) \approx 0.966lg \text{CO}_2 - 6.354$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 N_2 含量负相关, 其回归方程为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}(\%) \approx -3.193 - 0.109 \text{N}_2$. 根据氮同位素组成特点, 可划分出幔源温泉气和壳源温泉气, 前者 $R/R_a > 1$, 后者 $R/R_a < 1$.

关键词 温泉气、地球化学、碳和氮同位素、回归方程

地球的脱气作用把地壳深部和地幔的无机成因的天然气, 运移到地表. 与火山活动、断裂作用和地震有成因关系的温泉, 往往是地球脱气作用的有利场所. 因此, 温泉是研究无机成因气的重要窗口之一. 但不是每个温泉都可取到有效的无机成因气的, 这是因为: (1) 有的温泉出气率很慢, 出气规模很小, 难于短时 (几个小时) 取到气样; (2) 由于人工开发利用热水, 有的甚至是钻井强度抽水, 使热水位大大下降, 并导致含有机成因气的地表水大量地、高速率地加入原始热水系统, 使原始热水中无机成因气的性质失真, 有的甚至某组分完全是地表水中溶解的气组分, 这是研究温泉气时值得注意的.

近几年来, 我们在云南、广东、湖南、海南、福建、江西、浙江、四川、河北、吉林和内蒙古 41 处温泉露头 (包括少部分地热井), 进行以天然气为目标的调查和取样, 为研究温泉气提供了许多科学信息. 本文在此基础上成文的.

气样以排水取气法用玻璃瓶取得, 用 Mat-251 测碳、氧同位素, 其误差为 $\pm 0.2\%$, 氮同位素用 VG-5400 测得.

表 1—4 是我国一些地区温泉气的组分和碳、氧、氮同位素组成. 根据此 4 个表, 可总结

1993-06-08 收稿, 1993-10-04 收修稿.

* 国家自然科学基金资助项目.

** 南京大学地球科学系, 南京 210008.

出该区温泉气组分、碳和氮同位素各自的特征、相互间的配置规律, 以及各组分气的成因。

表1 我国一些地区温泉气组分及同位素组成

取 样 地 点	气 主 要 组 分 (%)						PDB(‰)			氮 同 位 素	
	N ₂	CO ₂	CH ₄	Ar	He	H ₂	$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	$\delta^{18}\text{O}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/R _a
云南省腾冲县小滚锅温泉	0.31	99.09	0.50	0.088	0.014		-20.58	-1.18	-8.55	$(4.72 \pm 0.16) \times 10^{-6}$	3.37
云南省腾冲县大滚锅温泉	1.24	97.35	1.35		0.042		-19.48	-1.99	-9.14	$(4.56 \pm 0.15) \times 10^{-6}$	3.26
云南省腾冲县珍珠泉		99.92	0.08				-21.18	-3.32	-8.72	$(4.68 \pm 0.17) \times 10^{-6}$	3.34
云南省腾冲县怀胎井温泉	3.20	96.66	0.13				-20.97	-3.24	-8.21	$(5.32 \pm 0.20) \times 10^{-6}$	3.80
云南省腾冲县澡塘河	I	2.61	96.00	0.396	0.060	0.0043	0.0023	-29.289	-6.3		
	II	2.54	96.81	0.345	0.072	0.0051	0.0026	-19.945	-1.9		$(4.00 \pm 0.16) \times 10^{-6}$
	III	2.17	96.94	0.024	0.062	0.0047	0.0020		-2.3		
								-16.16 ^{a)}	-3.49 ^{a)}		4.0×10^{-6} ^{a)}
云南省腾冲县黄瓜箐温泉	0.63	98.51	0.86				-20.51	-2.29	-9.23	$(6.21 \pm 0.21) \times 10^{-6}$	4.44
云南省腾冲县叠水河冷泉(23.8℃)	3.09	96.82	0.01	0.066	0.016		-29.99	-1.29	-8.29	$(6.29 \pm 0.21) \times 10^{-6}$	4.49
云南省腾冲县和顺乡矿泉	2.15	97.81	0.01	0.023	0.0096		-32.69	-5.78	-9.63	$(4.71 \pm 0.16) \times 10^{-6}$	3.36
吉林省长白山天池温泉(1)	0.65	98.62	0.64	0.08	0.002		-36.24	-6.02	-9.14		
吉林省长白山天池温泉(3)		99.64	0.29	0.06	0.01		-24.04	-5.81	-8.95	$(1.67 \pm 0.07) \times 10^{-6}$	1.19

a) 徐 胜提供。

表2 我国一些地区温泉和地热井中天然气组分及同位素组成

取 样 地 点	气 主 要 组 分 (%)						PDB(‰)		氮 同 位 素	
	N ₂	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	Ar	He	δ ¹³ C ₁	δ ¹³ C _{CO₂}	³ He/ ⁴ He	R/R _a
云南省弥渡县石咀温泉	87.58	11.99	0.43		未分析		-28.40	-8.87	5.63×10 ⁻⁷	0.40
云南省元江温泉	86.03	7.40	6.54	0.02			-50.32	-11.26	未 分 析	
云南省安宁县天下第一汤(安宁温泉)	94.745	3.039			0.995	0.143		-14.67	(3.49±0.17)×10 ⁻⁸	0.025
云南省弥勒弥3	94.83	3.84	0.35		0.90	0.077		-12.48	(3.14±0.19)×10 ⁻⁸	0.022
云南省盘溪盘3	93.88	5.23			0.70	0.19		-16.34	(1.56±0.22)×10 ⁻⁸	0.011
湖南省汝城热水温泉	97.55	0.75	0.38		1.48	0.24			(9.47±0.37)×10 ⁻⁸	0.07
湖南省宁乡灰汤温泉	96.88	2.92			0.20			-25.41	(6.58±0.50)×10 ⁻⁸	0.47
广东省丰顺邓屋地热站(II)	95.71	3.19			1.03	0.070		-11.19	(1.159±0.09)×10 ⁻⁶	0.83
江西省崇仁马鞍坪温泉	54.53	29.69			0.032	0.0056		-7.30	(7.96±0.3)×10 ⁻⁷	0.57
浙江省泰顺承天温泉	98.86	0.40	0.15		0.13	0.44		-10.10	(3.38±0.9)×10 ⁻⁷	0.24
内蒙古克什克腾旗热水镇温泉(1)	97.84	0.19	0.26		1.05	0.66	-22.74	-16.05	(8.33±0.09)×10 ⁻⁸	0.06
内蒙古克什克腾旗热水镇温泉(2)	97.80	0.12	0.23		1.12	0.73	-21.76	-18.22	未 分 析	
海南省兴隆农场	99.82	0.03	0.15		未分析					
广东省丰顺丰良(I)	95.64	3.77	0.58	0.01			-51.16	-12.38		
广东省丰顺丰良(II)	98.59	1.29	0.12				-50.53	-10.46		
福建省地震局福州水化站 Z111-6 孔	96.31	2.23			1.41	0.049			(3.99±0.15)×10 ⁻⁷	0.28
福建省地震局漳州水化站地震 1 号孔	84.32	13.66	0.19	0.025	1.67	0.13			(6.77±0.20)×10 ⁻⁷	0.48

1 温泉气的组分特征

1.1 CO₂ 或 N₂ 是温泉气的主要组分

对某温泉气而言, CO₂ 或 N₂ 是此增彼减, 或彼增此减, 以一种为主要组分。CO₂ 含量最高者达 99.92%(云南省腾冲珍珠泉)。一般火山期后地区的温泉(腾冲地区和长白山区) 中天然

表 3 云南一些温泉气的气组分及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值(上官志冠、张培仁, 1990)

取 样 地 点	气的主要组分(%)						$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ (‰, PDB)
	N_2	CO_2	CH_4	Ar	He	H_2	
下关温泉	11.12	81.30		0.16	0.0005	0.0030	-6.7
南涧碱坝温泉	14.65	76.51		0.18	0.0007	0.0520	-8.3
巍山热水塘温泉	15.54	79.89	0.08	0.20	0.0005	0.0009	-7.8
剑川后甸温泉	46.92	38.70		0.59	0.0270	0.0030	-6.4
洱源洱城温泉	7.29	84.11	0.12	0.10	0.0005	0.0033	-3.5
洱源牛街温泉	2.77	89.40	0.39	0.06	0.0005	0.0213	-3.3
洱源九台温泉	29.30	58.46	3.14	0.39	0.0035	0.0046	-4.2
洱源江干温泉	27.47	68.44	4.09				-3.88
弥渡高孟营温泉	71.68	14.74	0.48	0.93	0.0118	0.0279	-10.7
鹤庆姜寅温泉	89.50	8.64	0.88	1.06	0.1500	0.0046	-7.4

表 4 四川省甘孜县拖坝镇温泉气组分和同位素组成

样 品 编 号	气 组 分 (%)							PDB(‰)			氮 同 位 素	
	N_2	CO_2	CH_4	H_2S	Ar	He	H_2	$\delta^{13}\text{C}_1$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$	$\delta^{18}\text{O}$	$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/R_s
江泉 1	2.72	93.00	3.64		0.038	微	0.602	-24.94	-2.92	-14.62	$(7.00 \pm 0.20) \times 10^{-7}$	0.50
江泉 2	2.20	94.53	3.16		0.032	0.008	0.070	-26.60	-2.46	-8.58	$(4.99 \pm 0.14) \times 10^{-7}$	0.36
C	1.88	96.72	1.32		0.066	0.001	0.013	-25.01	-3.59	-8.96		
E	0.22	98.72	0.90		0.045	0.001	0.114	-23.84	-4.77	-10.41		
G		98.60	1.07	0.020	0.020	微	0.110	-24.82	-4.20	-8.84	$(5.38 \pm 0.16) \times 10^{-7}$	0.38

气的 CO_2 含量很高(表 1), 均在 96% 以上. 活动断裂及其附近的地震频繁发生地区温泉气的 CO_2 含量也相当高(表 3, 表 4), 从 9—99%, 绝大部分在 60% 以上, 例如: 滇西北地区活动断裂带温泉气^[1] 和甘孜地区活动断裂温泉气. 开发利用的温泉和地热井中的天然气, CO_2 含量低, 从 0.03—29.69%, 一般含量小于 5%, 但 N_2 的含量却很高, 从 54.53—99.82%, 绝大多数在 86% 以上.

由图 1(a) 可见, 温泉气的 CO_2 含量 0—5% 的样品占 31%, 95—100% 的样品占 28%. 由图 1(b) 可见, 温泉气的 N_2 含量与 CO_2 的频率相似, 含量 0—5% 的样品占 32.5%, 95—100% 的样品占 25%.

1.2 烷烃气含量低或无

在 44 个气样中含有烷烃气的 36 个, 主要是含少量甲烷, 含量最高的为 6.54%, 大部分含量在 0.5% 以下或无. 由图 1(c) 可见, 温泉气含甲烷在 0.5% 以下的占 65.7%.

1.3 氦含量低微

含量从微量至 0.73%, 频率峰在 0—0.1% (图 1(d)). 25 个气样的平均含量为 0.114%, 比工业品位 0.05%^[2] 高.

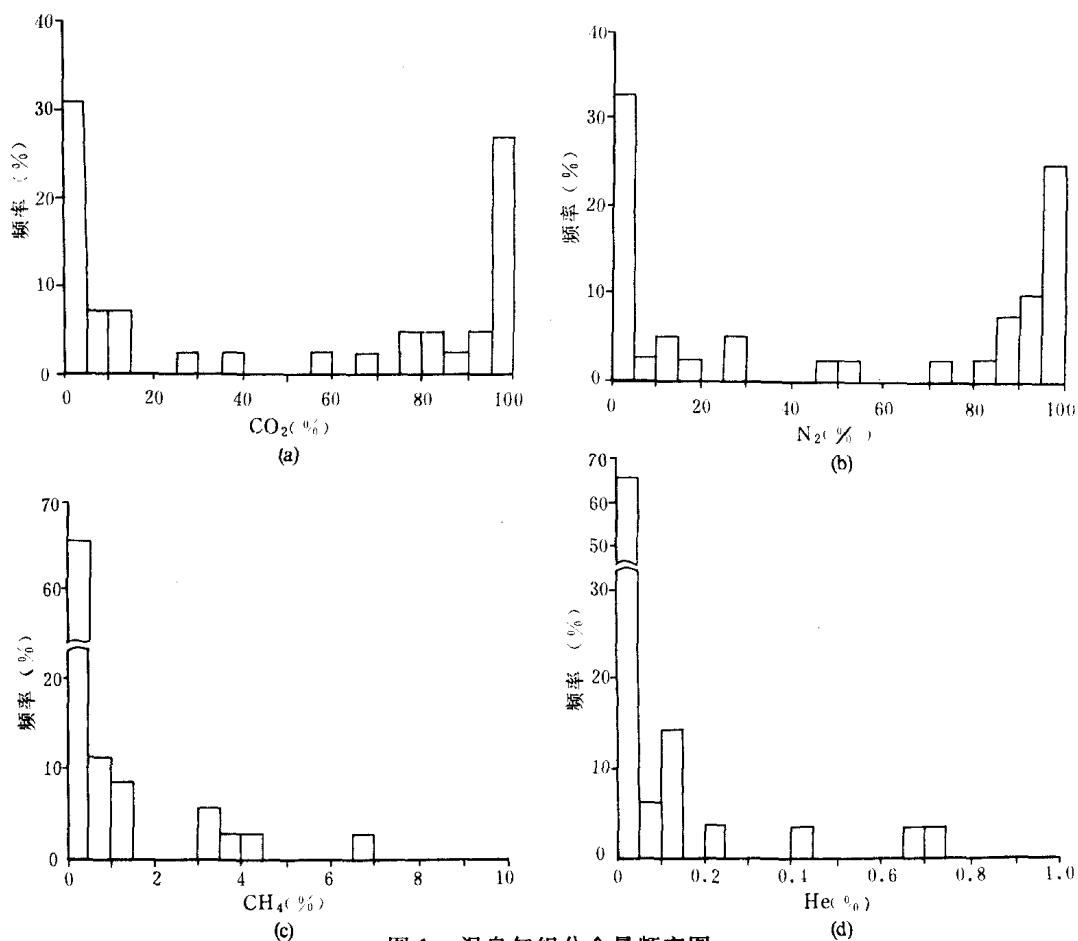
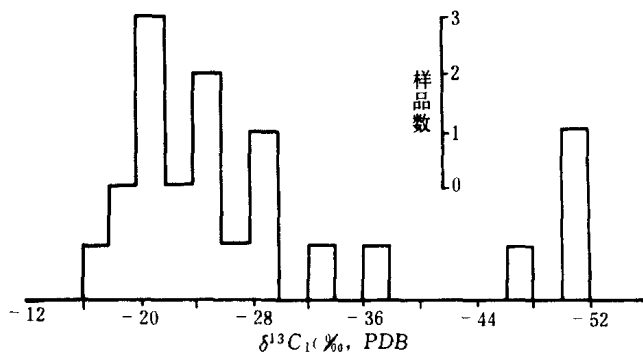


图1 温泉气组分含量频率图

2 温泉气的碳同位素组成

2.1 甲烷的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_1$)

$\delta^{13}\text{C}_1$ 值从 -16.16% 至 -51.16% (表1—4). $\delta^{13}\text{C}_1$ 主频率段在 -20% 至 -26% , 主频率峰在 -20% 至 -22% (图2), 这与 Faure^[3] 指出绝大多数地热区 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值在 -20% 至 -30% 不谋而合. 戴金星^[4] 认为除高成熟和过成熟的极少数煤型甲烷外, 凡 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值大于 -30% 的是无机成因甲烷. 上述温泉所在处无煤系存在, 因此, 处在 $\delta^{13}\text{C}_1$ 主频率段温泉气的甲烷是无机成因的. 但也有少部分温泉中的甲烷是有机成因的, 例如: 丰顺丰良(I), (II) 甲烷和云南省沅江温泉甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值均小于 -50% (表2), 比无机成因 $\delta^{13}\text{C}_1$ 最轻值 -39% ^[4] 的

图2 温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 频率图

都轻,这些有机成因甲烷是从温泉外运移来的.吉林省长白山温泉(1)甲烷的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -36.24% (表1),纯从数值分析属于有机成因似乎合理,但结合温泉周边地质条件,与长白山温泉(3)甲烷的相似,故十分可能也是无机成因的,因为小部分无机(内生)成因的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值最轻可为 -39% [5]. 由图2可见,多数温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值偏重,在无机成因的范畴之内.

2.2 二氧化碳的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)

温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值从 -1.18% 至 -25.41% (表1—4),上官志冠等[1,6]和高文学等[7]测得滇西北地区活动断裂带上温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值,也在此区间值内. 根据这些成果编制了温泉

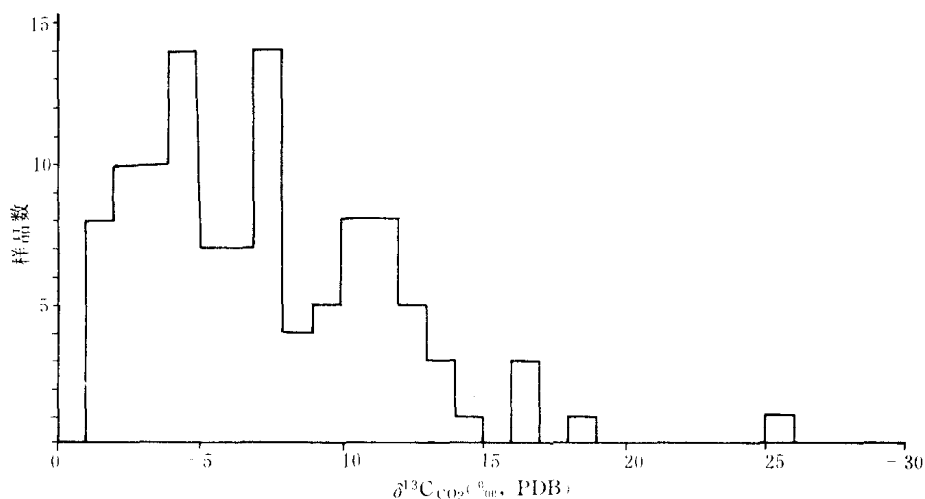


图3 温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值频率图

气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值频率图(图3),由图3看出温泉气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值绝大多数大于 -12% ,主频率段在 -1% 至 -8% ,主频率峰总体在 -4% 至 -8% ,基本上与我国二氧化碳 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 频率图(图4)

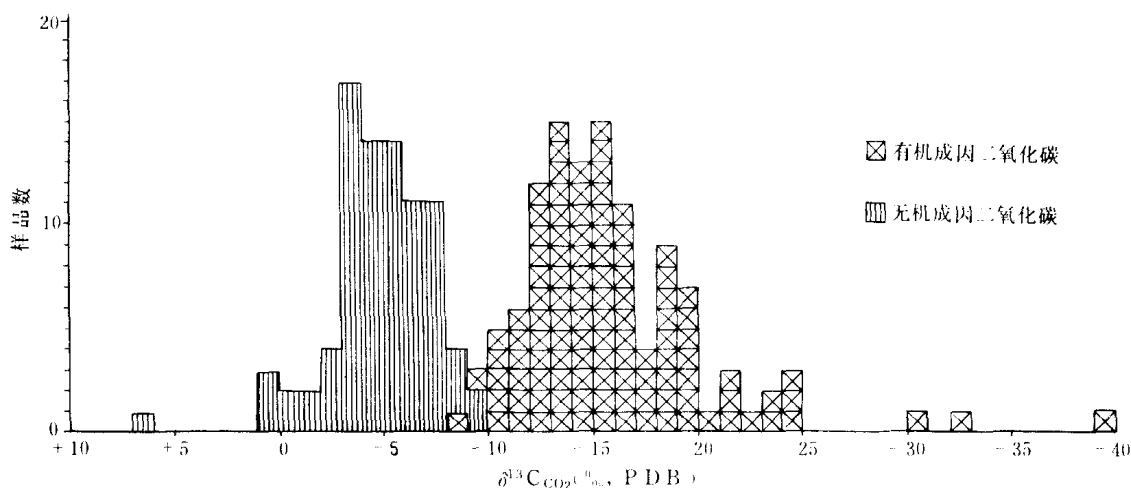


图4 中国天然气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值频率图

戴金星, 1989, 修改

的无机成因的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 主频率段为 -3% 至 -8% 的重叠,可见温泉的二氧化碳大部分属无机成因。大部分温泉气的二氧化碳是无机成因,这是因为许多温泉形成与分布,一是同活动的深大断裂有关^[9];二是在壳内存在熔融物质的莫霍面埋藏浅的火山发育区(腾冲地区)^[9]。因此,温泉就成为考察地球深部(地幔等)脱气作用的有利窗口。

由于 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大于 -8% 的为无机成因的二氧化碳;当 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值小于 -10% 的是有机成因的二氧化碳^[9]。因此,温泉气中也存在部分有机成因的二氧化碳(表2),其是由外运移来的。

从总体上说,温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与二氧化碳的含量呈正相关关系,而与氮的含量呈负相关关系。图5是温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 CO_2 含量关系图,显示了两者的正相关,可回归出两者曲线和回归方程:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}(\text{‰}) \approx 0.966 \lg \text{CO}_2 - 6.354, r = 0.82.$$

图6是温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 N_2 含量关系图,显示了两者的负相关,并可作出

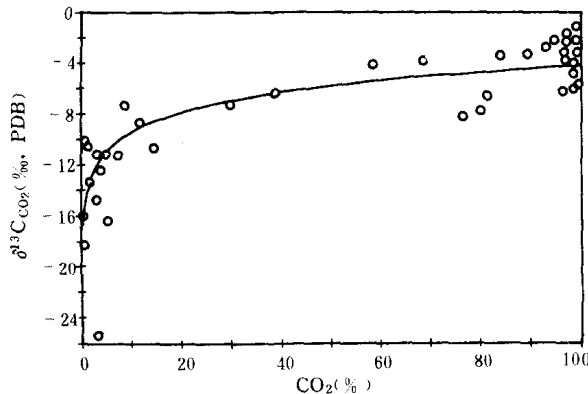


图5 温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 CO_2 含量关系图

回归线和回归方程:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}(\text{‰}) \approx -3.193 - 0.109 \text{N}_2, r = 0.82.$$

应维华等^[9]根据 $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值确定湘西桑植-石门复向斜中温泉气高含氮(91.83—94.80%),氮是大气成因的。这是由于大气溶于地表水,地表水沿着断裂等渗流入地下运移。在运移过程中大气中氧随运移距离增大而由氧化作用耗尽,而氮则随运移距离增大含量相对增加,与此同时,水中溶解碳同位素偏轻的有机成因的 CO_2 (土壤和浅层沉积由细菌生物化学作用,每年形成有机成因 CO_2 达 $13.5 \times 10^{10}\text{t}$)也随之增加。因此,当温泉气中 N_2 含量变大,相应地碳同位素轻的有机成因 CO_2 的影响增大,此可能是导致温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值与 N_2 含量呈负相关的最重要的因素。

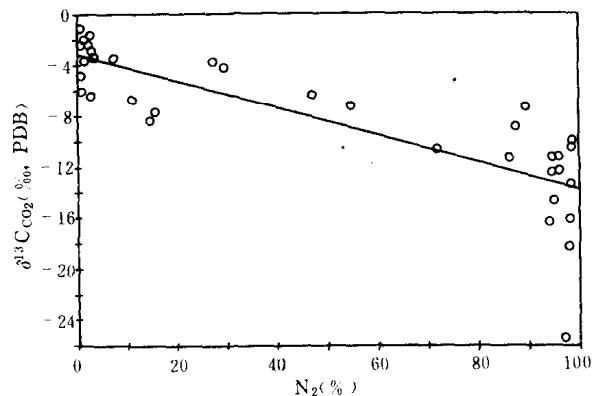


图6 温泉气的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值和 N_2 含量关系图

3 温泉气的氮同位素组成

氮是稀有气体之一,它和整个稀有气体一样只有无机成因。地球的氮有三种来源:大气氮、壳源氮和幔源氮,它们的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 表征值分别为 1.4×10^{-6} , 2.0×10^{-8} 和 1.1×10^{-5} ^[10],并常以 R_a (大气 $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.4 \times 10^{-6}$) 与 R (某样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$) 比值,即 R/R_a 来表示氮同位素的特征。 $R/R_a < 1$ 是壳源氮的特征,而 $R/R_a > 1$ 则说明有幔源氮(^3He)的加入。

表1是第四纪有火山活动的腾冲地区和长白山地区温泉气,其 R/R_a 均大于1, R/R_a 变化区

间值为 1.19—4.49, 可称为幔源温泉气, 表示了均有不等量幔源氦的加入, 说明这些死火山或休眠火山地区, 在火山活动期后, 仍有开启的联系着幔源的通道, 使温泉气不断有条件获得地幔脱气作用产物的 He. R/R_a 大于 1 的温泉气的 CO_2 含量均极高, 即在 95% 以上, 二氧化碳是无机成因的.

除 R/R_a 大于 1 的幔源温泉气外, 还有一类温泉气 R/R_a 小于 1 (表 2, 表 4), R/R_a 变化区间值从 0.011—0.83, 可称为壳源温泉气, 这类温泉气的氦是壳源成因. 壳源温泉气又可分为两种: 一种是低二氧化碳壳源温泉气, CO_2 含量在 30% 以下, 多数在 15% 以下, 并是以有机成因二氧化碳为主; 另一种是高二氧化碳壳源温泉气, CO_2 含量在 90% 以上, 二氧化碳是无机成因的 (表 4).

4 温泉天然气的组合类型

以温泉气的组分含量为主, 宋 岩等^[1]对我国东部温泉气的组合类型及其成因进行过研讨, 并分出三种类型: (1) 以二氧化碳为主的温泉气, 二氧化碳含量高, 二氧化碳碳同位素组成重, 即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值分布在 -1% 至 -7% 区间内; (2) 以氮气为主的温泉气, 氮是空气成因的, 而伴生的少量二氧化碳为有机成因; (3) 以甲烷为主的温泉气, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值 -53.1% 至 -65.1% , 是生物气.

本文将根据温泉气组分含量、碳和氮同位素组成及其相互配置关系, 对温泉气进行组合类型划分.

4.1 二氧化碳幔源温泉气

此类型气特点是: (1) 二氧化碳含量在 96% 及其以上 (表 1), 二氧化碳同位素重, 即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值从 -1.18% 至 -6.30% , 是无机成因的, 主要来自幔源; (2) R/R_a 均大于 1, 有不等数量幔源 ^3He 的加入, 例如: 我国腾冲地区大部分温泉气; (3) 有微量甲烷或无, 含量从 0—1.35%. 温泉气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -16% 至 -36% , 绝大部分 $> -30\%$ (-16% 至 -30%), 是无机成因的甲烷.

综上所述, 二氧化碳幔源温泉气, 从整体上来说属于幔源无机成因气, 是地幔脱气的产物.

4.2 二氧化碳壳源温泉气

此类型气特点是: (1) 二氧化碳含量很高, 在 93% 及其以上. 二氧化碳同位素重, 即 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值从 -2.46% 至 -4.77% (表 4), 是无机成因的, 为碳酸盐岩的岩石化学作用形成的; (2) R/R_a 均小于 1, 具有壳源氦的特征. 例如: 我国四川甘孜拖坝镇温泉气; (3) 有少量甲烷, 含量从 1—4% 左右, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值为 -23% 至 -27% 左右, 它可能是岩石化学成因的 CO_2 和氢气反应形成的无机成因的甲烷¹⁾.

综上所述, 二氧化碳壳源温泉气, 从整体上来说属于壳源无机成因气, 主要是地壳中岩石化学作用和放射性蜕变作用的产物.

4.3 高氮低二氧化碳温泉气

此类型气特点是: (1) 氮含量很高, 绝大部分在 85% 以上, 主要是来自大气成因氮 (表 2);

1) 戴金星等著, 中国东部无机成因气及其气藏形成条件, 科学出版社, 待出版.

(2) 二氧化碳含量低,个别含量最高的也不超过 30%,通常在 5% 以下。二氧化碳有两种成因:其一,大部分是有机成因,它的含量,在 10% 以下,通常在 5% 以下, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值在 -10.10% 至 -25.41% ;其二,个别是无机成因,它的含量相对较高,在 10—30% 之间, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值在 -7.30% 至 -8.87% ; (3) 含有少量甲烷或无,含量从 0—6.54%。甲烷有两种成因:其一,无机成因,甲烷含量相对低, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值从 -21.76% 至 -28.40% ;其二,有机成因,甲烷含量相对高些, $\delta^{13}\text{C}_1$ 值从 -50.32% 至 -51.16% 。

综上所述,高氮低二氧化碳温泉气,从整体上来说,主要是属于大气来源的无机成因气。

参 考 文 献

- [1] 上官志冠、张培仁,滇西北地区活动断裂,地震出版社,北京,1990, 156—169.
- [2] Якуцени, В. П., Наука, Ленинград, 1984, 80—84.
- [3] Faure, G., 同位素地质学原理 (潘曦兰、乔广生译), 科学出版社, 北京, 1988, 310—312.
- [4] 戴金星, 中国科学, B 辑, 1992, (2): 183—193.
- [5] Зорькин, Л. М., Старобинец, И. С., Стадник, Е. В., Недра, Москва, 1984, 150—164.
- [6] 上官志冠、张仲禄,现代地壳运动研究(5),地震出版社,北京,1991, 87—95.
- [7] 高文学、邱纯一、李桂茹等,现代地壳运动研究(5),地震出版社,北京,1991, 77—86.
- [8] 丁国瑜主编,中国岩石圈动力学概论,地震出版社,北京,1991, 67—71.
- [9] 应维华、黄良汉,石油与天然气地质,1989, 10(2): 170—181.
- [10] 徐永昌,沉积学报,1992, 10(3): 57—69.
- [11] 宋 岩、戴金星,天然气地球科学,1991, 2(5): 199—202.