

## 青藏公路沿线地表渗漏气体地球化学特征及来源

黄华谷<sup>1,2</sup>, 罗敏<sup>2</sup>, 张鹏<sup>3</sup>, 吴青柏<sup>3</sup>, 陈多福<sup>2</sup>(1. 广东省地质调查院, 广东 广州 510080; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640;  
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 渗漏在地球表面是一种普遍的地质现象, 这些释放的温室气体不仅对全球气候变化和碳循环产生重要影响, 而且可以示踪其来源及构造活动信息。对青藏公路沿线地表渗漏气体的组分、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 碳同位素以及 He 同位素组成进行了分析, 结果显示该区渗漏气体主要有 N<sub>2</sub> 型和 CO<sub>2</sub> 型 2 类。N<sub>2</sub> 型渗漏气体主要分布在北麓河、布查湖和沱沱河东侧, N<sub>2</sub> 含量均超过 75%, CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 含量分别为 3.45%~20.91% 和 0~3.58%。CO<sub>2</sub> 型渗漏气体主要分布于二道沟南侧、沱沱河支流和唐古拉山兵站附近, CO<sub>2</sub> 含量均超过 96%。所分析的渗漏气体的 CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He 值、CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He 值、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值和  $\delta^{13}\text{C}_1$  值显示布查湖渗漏 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 均为生物成因, 无幔源 CO<sub>2</sub> 和 He; 北麓河和沱沱河东侧渗漏 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 可能均为非生物成因, 幔源 CO<sub>2</sub> 含量超过 50%; 二道沟南侧、沱沱河支流和唐古拉山兵站附近的 CO<sub>2</sub> 型气体中 CO<sub>2</sub> 主要为幔源无机成因, 其中唐古拉山兵站渗漏气体中还伴有幔源 CO<sub>2</sub> 还原形成的微量非生物成因 CH<sub>4</sub>。所有渗漏气体中 He 均是以壳源为主, 幔源 He 仅占 2.15%~5.66%。以上的结果表明研究区大量幔源无机 CO<sub>2</sub> 的释放, 可能与班公湖—怒江缝合带和可可西里—金沙江缝合带这 2 条深大断裂带以及藏北新生代火山活动有关, 但有限的幔源 He 输入可能与断裂带深部的开放性程度较低有关, 反映了该区处于挤压的构造环境和地壳增厚的地质背景, 或者是由于较高壳源放射性成因 He 的混入而“稀释”了幔源 He 所致。

关键词: 气体渗漏; 碳同位素; 氦同位素; 来源; 青藏高原

中图分类号: TE122.1<sup>+</sup>13 文献标志码: A 文章编号: 1672-1926(2014)06-0874-08引用格式: Huang Huagu, Luo Min, Zhang Peng, *et al.* Geochemistry and origins of gas discharging along Qinghai-Tibet Highway, northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 874-881. [黄华谷, 罗敏, 张鹏, 等. 青藏公路沿线地表渗漏气体地球化学特征及来源[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 874-881.]

## 0 引言

泥火山、温泉、麻坑和冷泉等宏观气体渗漏是地球表面一种广泛发育的地质现象<sup>[1-2]</sup>。渗漏气体的成分、含量及相关同位素对于油气和天然气水合物勘探、地震和岩浆活动监测以及温室气体环境效应的评估均有重要意义<sup>[3-7]</sup>。渗漏气体的碳、氮、氦同位素广泛用于研究气体的来源、成因、运移及区域壳

幔物质相互作用、大地构造和大地热流的示踪<sup>[8-13]</sup>。

青藏高原地表气体渗漏广泛发育, 以往的研究大多针对藏南和藏中地区热泉释放的气体。藏南羊八井及邻区的热泉气中的 He 呈现典型的壳幔混合特征, CO<sub>2</sub> 的  $\delta^{13}\text{C}$  特征显示其具有多源性<sup>[14]</sup>。西藏水热活动区大多数分布在班公湖—怒江缝合带以南地区, 渗漏气体主要为 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 型 2 类, 同时在噶尔县门士热泉首次检测到地幔 He 组分, 表明西

收稿日期: 2013-11-18; 修回日期: 2014-01-07.

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(编号: KZCX2-XB3-03); 中国科学院广州地球化学研究所“135”前沿领域项目(编号: Y234021001)联合资助.

作者简介: 黄华谷(1981-), 男, 广东化州人, 工程师, 博士, 主要从事沉积地球化学及矿产资源研究. E-mail: huanghg0203@163.com.

通讯作者: 陈多福(1962-), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事沉积地球化学和天然气水合物等研究. E-mail: cdf@gig.ac.cn.

藏地壳深处有地幔物质侵位<sup>[15]</sup>。藏南热泉气的 He 同位素可分出壳源和幔源 2 个区域,其界限位于雅鲁藏布江缝合带以北约 50~100km,推测印度大陆与亚洲大陆碰撞结合点正位于 2 个 He 域分界带<sup>[16]</sup>。然而,藏南活动热泉气体的 He 同位素指出这 2 个 He 域不是纬度上的分界,而是经度上的分界,在高原西部(89°E 以西)的印度与亚洲大陆碰撞较早,印度大陆板块可能已跨过雅鲁藏布江缝合带,而在高原东部(89°E 以东)可能主体并没有跨过雅鲁藏布江缝合带<sup>[17]</sup>。此外,对青藏公路沿线多年冻土区低空大气、渗漏气体、表层冻土沉积物、地下冰中的 CH<sub>4</sub> 含量进行了测定,发现托纠山、昆仑山口、雁石坪等地区存在明显的 CH<sub>4</sub> 异常,并认为可能与天然气水合物有关<sup>[18]</sup>。

青藏高原北部平均海拔超过 5 000m,由于自然条件恶劣,有关气体渗漏方面的研究程度较低。本文首次对藏北的羌塘盆地及其邻区 6 个气体渗漏区进行野外地质考察和采样,并测定气体组分、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 碳同位素及 He 同位素组成,旨在对渗漏气体的类型及来源进行探讨。

## 1 地质背景与样品采集

羌塘盆地位于青藏高原中北部,面积为 18.5 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。在大地构造上,盆地处于特提斯构造域东段,南北边界分别以班公湖—怒江缝合带和可可西里—金沙江缝合带为界,是在前古生界结晶基底和古生界褶皱基底之上发育起来的中生界海相沉积为主的一个残留盆地<sup>[20]</sup>。盆地演化先后经历了中元古代—早古生代基底阶段、三叠纪—侏罗纪前陆盆地阶段和白垩纪以来盆地隆升遭受剥蚀改造阶段<sup>[21-22]</sup>。

对羌塘盆地及其邻区 6 个气体渗漏点进行了地质考察和气体样品的采集(图 1),获得了 6 个气体样品。采样使用圆柱状特制玻璃瓶,两端各有一个磨砂双通活塞开关,首先用手动真空泵将玻璃瓶和导管内的空气抽净,再将漏斗倒扣在渗漏气泡之上,用真空泵将气体收集在预先抽真空的特制玻璃瓶中。具体采样方法见文献<sup>[23]</sup>。采集好的气体样品送至中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心进行分析测试。

天然气组分是用装配有火焰离子和热导检测器的 HP5890 II 气相色谱仪测定。色谱条件:内径 3mm,柱长 2.4mm 的 MS 分子筛;内径 0.076mm,长为 4m 的 GDX-502 色谱柱;柱温:从 30℃ (3.7min)升至 160℃;升温速率:70℃/min;柱前压:

200KPa;载气:He 和 Ar;进样口温度:120℃;TCD 和 FID 检测器温度为:180℃;进样量:1mL。对于大多数组分,检测限平均为 10<sup>-6</sup>~10<sup>-9</sup>,主要组分的精度在±5%以内。CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 碳同位素用连续流稳定同位素比率质谱仪完成,仪器型号:美国 Thermo-Fisher Scientific 生产的 Finnigan Delta plus XP,该仪器由 HP6890 气相色谱、燃烧/转换炉、接口和 DeltaPlusXP 质谱计组成。色谱条件:采用 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 色谱柱;进口分流比 1:1;进样口温度 50℃;流量 10mL/min,恒流;升温程序:从 30℃ (5min)升至 200℃ (3min),升温速率为 15℃/min。碳同位素分析误差为±0.2‰。氦同位素测定使用仪器是 MM5400 质谱计(英国 Micromass 公司生产),分析标样为采自兰州市皋兰山顶的大气。本文工作的热本底(1 600℃)为 (cm<sup>3</sup>, STP):<sup>4</sup>He=2.46 × 10<sup>10</sup>,<sup>20</sup>Ne=4.08 × 10<sup>10</sup>。所有的分析结果均进行了标准校正和热本底校正,详细实验方法可参考文献<sup>[25]</sup>。

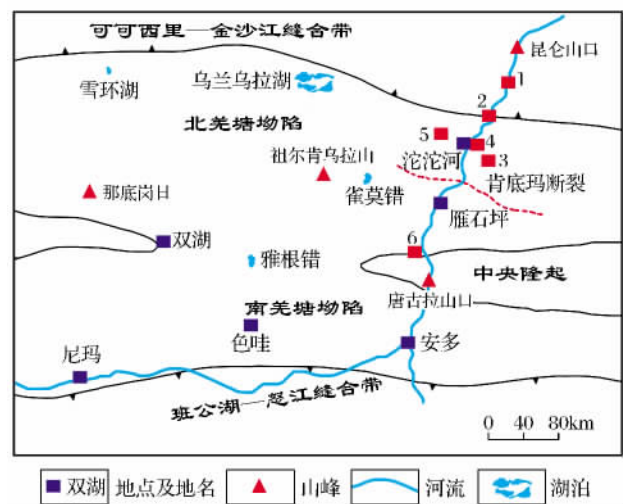


图 1 羌塘盆地一级构造单元和样品采集点

(据文献<sup>[24]</sup>修改)

Fig. 1 Tectonic units of Qiangtang Basin and the distribution of the investigated gas emission sites

(modified from reference<sup>[24]</sup>)

1 为北麓河(E92°56'19.8", N34°49'44.8", 海拔 4 633m); 2 为二道沟南侧(E92°44'51.5", N34°35'37.7", 海拔 4 620m); 3 为布查湖(E92°40'54.1", N34°03'05.4", 海拔 4 483m); 4 为沱沱河东侧(E92°33'45.0", N34°12'10.1", 海拔 4 518m); 5 为沱沱河支流(E92°07'30.8", N34°18'46.6", 海拔 4 585m); 6 为唐古拉兵站附近(E91°51'04.3", N33°08'30.6", 海拔 4 901m)

## 2 结果

### 2.1 气体组成及碳同位素

北麓河气体渗漏区距格尔木约 300km,在中国

科学院寒区旱区工程与环境研究所北麓河基地前的青藏公路旁的小湖泊中,采集气体的单个喷口渗流量小,但连续渗漏,渗漏口直径约 1cm。该处渗漏气体成分包括  $N_2$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$  和  $C_3H_8$ ,其中  $N_2$

的体积含量为 82.59%,  $CO_2$  的体积含量为 13.80%,  $CH_4$  的体积含量为 3.58%,  $C_2H_6$  和  $C_3H_8$  的体积含量极少,  $\delta^{13}C_1$  值为  $-28.3\%$ ,  $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为  $-8.4\%$ (表 1)。

表 1 青藏公路沿线地表渗漏气体组分以及碳和氦同位素组成

Table 1 Gas compositions and their carbon and helium isotopic ratios along Qinghai-Tibet Highway

类型	北麓河	二道沟南侧	布查湖	沱沱河东侧	沱沱河支流	唐古拉兵站附近
$N_2/\%$	82.59	0.00	95.50	78.79	0.00	3.12
$CO_2/\%$	13.80	99.97	3.84	20.91	>99.99	96.77
$CH_4/\%$	3.58	0.03	0.64	0.30	0.00	0.11
$C_2H_6/\%$	0.02	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
$C_3H_8/\%$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
$\delta^{13}C_1/\%$	-28.3	—	-29.7	—	—	-27.7
$\delta^{13}C_2/\%$	—	—	-18.0	—	—	—
$\delta^{13}C_{CO_2}/\%$	-8.4	-4.8	-15.9	-5.5	-7.7	-4.5
$^4He/^{20}Ne$	7.47	2.50	34.55	0.52	1.52	1.14
$(^3He/^4He)/(\times 10^{-6})$	0.43	0.84	0.07	1.00	0.61	0.61
R/Ra	0.31	0.60	0.05	0.72	0.44	0.44
Rc/Ra	0.28	0.50	0.04	0.27	0.29	0.22
幔源 He/ $\%$	2.86	5.66	0.00	2.77	2.97	2.15
$(CO_2/^3He)/(\times 10^{10})$	0.23	0.36	98.27	0.24	0.54	0.079
$(CH_4/^3He)/(\times 10^8)$	0.59	—	59.41	0.34	—	0.12
地幔/ $\%$	65.2	41.6	0.0	62.5	27.7	100.0
碳酸盐岩/ $\%$	20.9	51.4	43.6	32.7	52.6	0.0
沉积有机质/ $\%$	13.9	7.0	56.4	4.8	19.7	0.0

注:R 为样品  $^3He/^4He$  值;Ra 为空气  $^3He/^4He$  值,  $1.40 \times 10^{-6}$ ;Rc 为空气校正后  $^3He/^4He$  值;“—”为未测定

二道沟南侧气体渗漏区距离格尔木约 365km,为位于二道沟南约 6km 的青藏公路旁和日那池曲河河漫滩,气体多为连续渗漏,采样渗漏口直径小于 2cm,渗漏气体(G2)中  $CO_2$  体积含量为 99.97%, $CH_4$  体积含量非常低,其中  $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为  $-4.8\%$ (表 1)。

布查湖渗漏区距沱沱河约 48km,渗漏持续强烈,一些渗漏口有泥浆喷出,采样渗漏口直径约为 1~5cm,渗漏气体(G3)中  $N_2$  体积含量为 95.50%, $CO_2$  体积含量为 3.84%, $CH_4$  体积含量为 0.64% 以及极少量的  $C_2H_6$ ,其中  $\delta^{13}C_1$  值为  $-29.7\%$ , $\delta^{13}C_2$  值为  $-18\%$ , $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为  $-15.9\%$ (表 1)。

沱沱河东侧气体渗漏区距沱沱河约 6km,气体连续渗漏,采样渗漏口直径约为 3~5cm,渗漏气体(G4)成分包括  $N_2$ 、 $CO_2$  和  $CH_4$ ,其体积含量分别为 78.79%、20.91% 和 0.3%,其中  $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为  $-5.5\%$ (表 1)。

沱沱河支流气体渗漏区距沱沱河约 50km,位于沱沱河二级支流冬多曲和扎木曲交汇处附近,在

至少 3km 长的河道中成片大量发育,采集样渗漏口直径为 1~3cm,渗漏气体(G5)中  $CO_2$  体积含量接近 100%,其  $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为  $-7.7\%$ (表 1)。

唐古拉山兵站气体渗漏区位于唐古拉山兵站附近的青藏铁路西北侧,距青藏公路约 3km 的半山腰,在边长为 30~50m 的三角形区域内发育多达 100 个渗漏口,气体和水连续强烈喷发,水温为 38~40℃,喷口周围多有黄灰色和浅黄色钙华沉积,采样渗漏口直径多为 1~5cm,渗漏气体(G6)几乎为纯  $CO_2$  气体,其体积含量为 96.77%, $N_2$  体积含量仅为 3.12%, $CH_4$  体积含量仅为 0.11%, $\delta^{13}C_1$  值为  $-27.7\%$ , $\delta^{13}C_{CO_2}$  值为  $-4.5\%$ (表 1)。

## 2.2 He 同位素组成

分析的 6 个渗漏气体样品  $^3He/^4He$  值介于  $(0.07 \sim 1.00) \times 10^{-6}$  之间,R/Ra 值介于  $(0.05 \sim 0.72)$  之间(表 1)。由于采集的渗漏气体中可能会不同程度混入大气组分,假定样品中  $^{20}Ne$  全部来自大气,可用  $^4He/^{20}Ne$  值对样品  $^3He/^4He$  值进行校

正:  $(^3\text{He}/^4\text{He})_c = [(^3\text{He}/^4\text{He})_s - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{air}} \times r] / (1-r)$ , 其中  $r = (^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_{\text{air}} / (^4\text{He}/^{20}\text{Ne})_s$ , 下标  $c$  表示校正后的值,  $s$  表示测量值,  $\text{air}$  表示空气值<sup>[26]</sup>。校正后 $^3\text{He}/^4\text{He}$  值变化范围变小,  $R_c/R_a$  值介于 0.04~0.50 范围内(表 1)。

### 3 讨论

#### 3.1 气体类型

渗漏天然气主要可分为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{CH}_4$  等 3 类<sup>[3]</sup>。羌塘盆地及其邻区的渗漏气体成分主要为  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$ , 一些渗漏气体含有少量  $\text{CH}_4$  及微量  $\text{C}_2\text{H}_6$  和  $\text{C}_3\text{H}_8$ 。其中二道沟、沱沱河支流和唐古拉山兵站附近 3 个区的渗漏气体  $\text{CO}_2$  超过 96.77%, 为典型  $\text{CO}_2$  型气体渗漏。北麓河、布查湖和沱沱河东侧 3 处渗漏气体中  $\text{N}_2$  含量为 78.79%~96.55%, 呈现典型  $\text{N}_2$  型气体渗漏(图 2)。

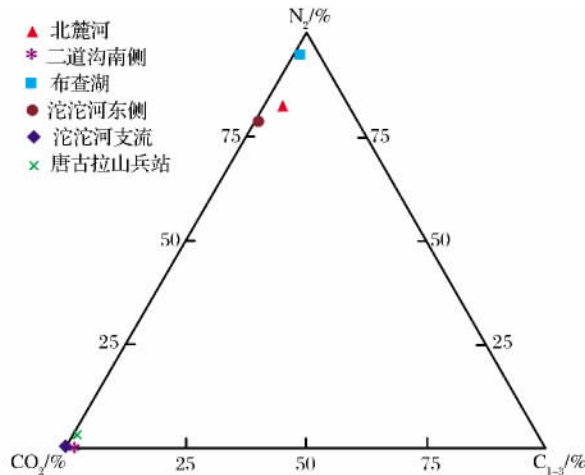


图 2 青藏公路沿线地表渗漏气体的类型

Fig. 2 Types of gas discharging along Qinghai-Tibet Highway

#### 3.2 气体来源

$\text{CO}_2$  是渗漏天然气最常见组分, 生物成因  $\text{CO}_2$  主要为有机质或烃类物质降解生成, 非生物成因  $\text{CO}_2$  主要包括碳酸盐岩在高温作用下变质形成和伴随地下岩浆活动释放出来的幔源  $\text{CO}_2$ <sup>[27]</sup>。一般认为生物成因  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值小于  $-10\text{‰}$ , 非生物成因  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值大于  $-8\text{‰}$ <sup>[28]</sup>。其中与 MORB 有关幔源  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $(-6.5 \pm 2)\text{‰}$ <sup>[29]</sup>。

布查湖渗漏气体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值为  $-15.9\text{‰}$ (表 1), 为生物成因  $\text{CO}_2$ 。北麓河、二道沟兵站南侧、沱沱河东侧和支流、唐古拉山兵站附近渗漏气体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值  $(-4.5\text{‰} \sim -8.4\text{‰})$  均落在与 MORB 有关的幔源  $\text{CO}_2$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值范围内, 推测其为与幔源流体有关的

非生物成因  $\text{CO}_2$ 。同时, 二道沟兵站南侧、沱沱河支流和唐古拉山兵站附近渗漏气体的  $\text{CO}_2$  含量均大于 90%, 与报导的非生物成因  $\text{CO}_2$  含量常大于 60% 的结果一致<sup>[30]</sup>。

同时,  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值也是示踪流体来源的重要地球化学指标<sup>[31-32]</sup>。研究区气体样品的  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值变化范围达 3 个数量级, 显示除了布查湖渗漏气体中  $\text{CO}_2$  之外, 其余渗漏点气体样品均分布在幔源流体  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值范围内(图 3)。但也不能排除少量壳源  $\text{CO}_2$  的混入, 尤其是  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值分布在壳幔边界附近的沱沱河支流的渗漏气体样品。唐古拉山兵站渗漏点气体  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值略低于地幔流体  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值, 由于该区发育典型热泉, 且有丰富的钙华沉积, 故推测可能是由于  $\text{CO}_2$  沉淀导致部分  $\text{CO}_2$  丢失。而北麓河和沱沱河东侧渗漏气体大量  $\text{N}_2$  “稀释”了  $\text{CO}_2$ , 但并没改变幔源  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值特征(图 3)。

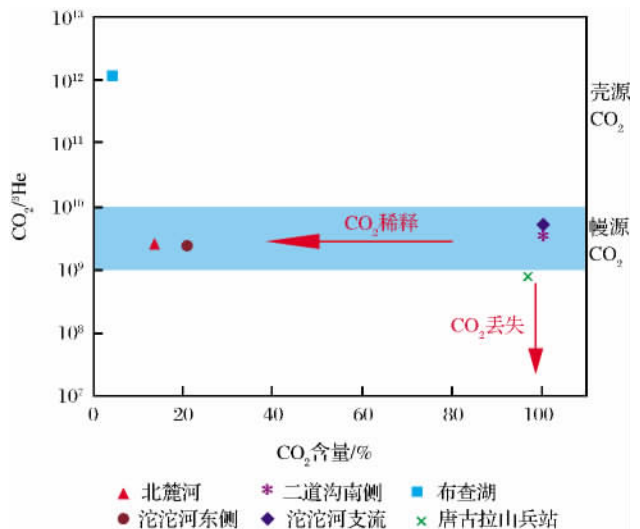


图 3 羌塘盆地及其邻区地表渗漏气体  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  与  $\text{CO}_2$  含量关系(蓝色部分代表幔源  $\text{CO}_2$  的  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值范围<sup>[33]</sup>)

Fig. 3 Plot of  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  against  $\text{CO}_2$  volume for all of the gas samples studied(The shade region highlights the range of  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  values of magmatic samples<sup>[33]</sup>)

此外, 对于判别  $\text{CO}_2$  来源, 若假定  $\text{CO}_2$  只来源于沉积有机质(S)、地幔(M)和碳酸盐岩(L) 3 个端元, 用以下 3 个方程可以分别计算这 3 个端元所占的相对比例(f)<sup>[29]</sup>:

$$(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_m = f_M(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_M + f_L(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_L + f_S(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_S;$$

$$1/(^{12}\text{C}/^3\text{He})_m = f_M/(^{12}\text{C}/^3\text{He})_M + f_L/(^{12}\text{C}/^3\text{He})_L +$$



$$f_s / ({}^{12}\text{C}/{}^3\text{He})_s;$$

$$f_M + f_L + f_s = 1$$

取地幔、碳酸盐岩和沉积有机质来源的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值分别为  $-6.5\%$ 、 $0$  和  $-30\%$ ； ${}^{12}\text{C}/{}^3\text{He}$  值分别为  $1.5 \times 10^9$ 、 $1 \times 10^{13}$  和  $1 \times 10^{13}$ 。计算结果显示布查湖渗漏气体中不含幔源  $\text{CO}_2$ ，且沉积有机质来源的  $\text{CO}_2$  比例超过  $50\%$ （表 1），由于渗漏气体中还含有少量  $\text{CH}_4$ ，故认为该渗漏点  $\text{CO}_2$  可能主要来源于  $\text{CH}_4$  氧化或有机质降解。其他渗漏点的气体中均含有幔源  $\text{CO}_2$ （表 1），尤其是唐古拉山兵站附近渗漏点气体中  $\text{CO}_2$  均来自地幔，这与用  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  值和  $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$  值推测结果一致。

$\text{CH}_4$  是渗漏天然气中另一常见组分，大多数沉积盆地中形成的生物成因  $\text{CH}_4$  主要包括微生物成因和热成因  $\text{CH}_4$  2 类<sup>[34-36]</sup>；非生物成因  $\text{CH}_4$  在全球范围的含量比生物成因  $\text{CH}_4$  含量低的多，而具有经济价值的非生物成因  $\text{CH}_4$  油气藏更是少之又少<sup>[37-39]</sup>。通常认为非生物成因  $\text{CH}_4$  碳同位素值一般大于  $-30\%$ <sup>[37,40]</sup>，但也有学者提出非生物成因  $\text{CH}_4$  碳同位素上限值为  $-20\%$ <sup>[41-42]</sup> 或  $-25\%$ <sup>[43]</sup>，而且，最近的研究发现水岩作用反应生成的非生物成因  $\text{CH}_4$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值可达  $-57\%$ ，这是过去普遍认为是生物成因  $\text{CH}_4$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值特征<sup>[44-46]</sup>。因此， $\text{CH}_4$  碳同位素值不能作为划分天然气成因的绝对标准，还应根据其他地球化学指标综合判别。幔源流体  $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$  值通常为  $10^5 \sim 10^7$  数量级；壳源流体的  $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$  值可达  $10^8 \sim 10^{11}$  数量级<sup>[37,47]</sup>。北麓河、沱沱河东侧和唐古拉山兵站附近渗漏点气体中的  $\text{CH}_4/{}^3\text{He}$  值分别为  $5.9 \times 10^7$ 、 $3.4 \times 10^7$  和  $1.2 \times 10^7$ ，推测  $\text{CH}_4$  主要为幔源成因。同时  $\text{CH}_4$  的  $\delta^{13}\text{C}$  值与气体中幔源 He 的相对含量呈正相关（表 1），进一步表明可能有幔源  $\text{CH}_4$  输入。

He 是化学性质不活泼的惰性气体，但具有很强的扩散能力，地壳 He 一旦被矿物析出就很容易在岩石中扩散，向岩石孔隙和裂缝中聚集，之后可进入地下水和大气圈中<sup>[48]</sup>。天然气  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  值主要由大气 He、放射性元素（如  ${}^{238}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{232}\text{Th}$ ）经  $\alpha$  衰变的壳源 He（ ${}^4\text{He}$ ），以及地幔 He（ ${}^3\text{He}$ ）3 个端元组成<sup>[49-50]</sup>。气体样品  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  值与  ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$  值的关系（图 4）显示羌塘盆地及邻区渗漏气体主要落在大气和地壳 2 个端元的混合线附近，表明该区渗漏气体 He 以壳源为主。同时，根据壳源和幔源 He 同位素的两端复合模式可以计算幔源 He 相对比

例<sup>[51]</sup>： $\text{He} = [({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_s - ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_c] / [({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_m - ({}^3\text{He}/{}^4\text{He})_c]$ ，其中， $\text{He}(\%)$  为幔源 He 所占比例，下标 s 表示测量值，c 表示地壳 R/Ra 值（ $-0.05$ ），m 表示地幔 R/Ra 值（ $-8$ ）<sup>[52]</sup>。计算结果显示研究区所有气体样品 He 均以壳源为主，其中布查湖渗漏气体中 He 几乎全来自地壳，而北麓河、沱沱河南侧和支流以及唐古拉山兵站附近的渗漏气体有  $2.15\% \sim 2.97\%$  幔源 He 混入（表 1），幔源 He 比例最高出现在二道沟兵站南侧的渗漏气体中（可达  $5.66\%$ ），可能与该采样点临近可可西里—金沙江缝合带有关，深大断裂为幔源流体向浅层地壳运移的通道，导致渗漏气体中含有相对较高的幔源 He，但明显低于藏南和滇西南地区渗漏气体幔源 He 的比例<sup>[15,53]</sup>，可能是由于研究区内断裂带深部的开放性程度较低，反映了该区处于挤压构造环境和地壳增厚的地质背景<sup>[54]</sup>，或者是由于该区壳源放射成因 He 的混入比例较高，“稀释”了幔源 He 而致。

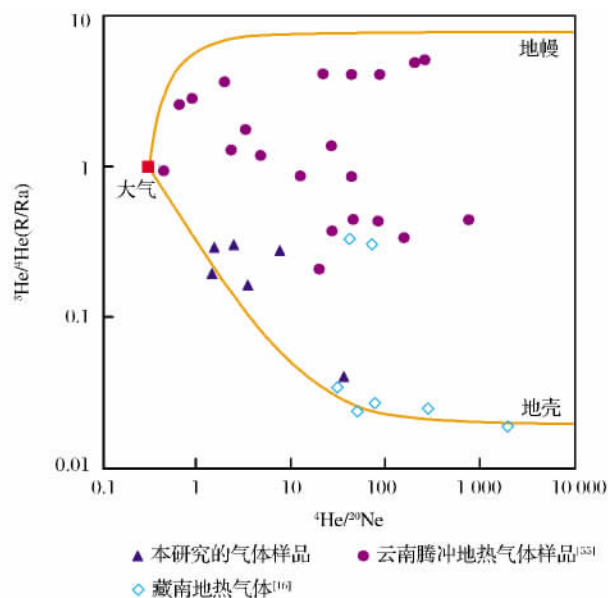


图 4 羌塘盆地及其邻区地表渗漏气体样品的  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  与  ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$  的关系

Fig. 4  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  vs.  ${}^4\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$  plot for the gas samples in this study and other places in China  
图中大气与地壳端元、大气与地幔端元混合线据文献<sup>[16]</sup>

## 4 结论

尽管已有研究表明羌塘盆地是青藏高原最具油气和天然气水合物资源勘探前景的沉积盆地<sup>[57-62]</sup>，但我们在地表渗漏气体中并未发现明显烃类气体渗漏的痕迹。北麓河、二道沟南侧、沱沱河东侧、沱沱

河支流、唐古拉山兵站附近渗漏点的气体中至少有一部分  $\text{CO}_2$  来自地幔,其中唐古拉山兵站附近的渗漏气体中几乎所有  $\text{CO}_2$  都是幔源成因,这与藏南大多数地热气体中  $\text{CO}_2$  的来源一致。同时该渗漏点气体中含有微量  $\text{CH}_4$  可能是来自非生物  $\text{CO}_2$  的还原而形成。只有布查湖渗漏气体中  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  是生物成因。研究区内大量释放的幔源  $\text{CO}_2$  可能与区域性深大断裂(班公湖—怒江断裂带和可可西里—金沙江断裂带)以及藏北新生代火山活动有关,而渗漏气体中有限的幔源 He 输入,可能指示了断裂带深部的开放性程度较低,反映了该区处于挤压构造环境和地壳增厚的地质背景中。

致谢:感谢成都理工大学伊海生教授提供的帮助及审稿人提出的修改意见。

#### 参考文献 (References):

- [1] Judd A, Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact of Geology, Biology and the Marine Environment[M]. London: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Etiope G, Feyzullayevb A, Baciuc C. Terrestrial methane seeps and mud volcanoes: A global perspective of gas origin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(3): 333-344.
- [3] Yang T F. Recent progress in the application of gas geochemistry: Examples from Taiwan and the 9th international gas geochemistry conference[J]. Geofluids, 2008, 8(4): 219-229.
- [4] Bräuer K, Kämpf H, Strauch G. Earthquake swarms in non-volcanic regions: What fluids have to say[J]. Geophys Research Letters, 2009, 36(17): 307-314.
- [5] Etiope G, Klusman R. Geologic emissions of methane to the atmosphere[J]. Chemosphere, 2002, 49(8): 777-789.
- [6] Yang T F. Regional and tectonic application of gas/fluid geochemistry[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 65: 82-95.
- [7] Yang T F, Hilton D, Italiano F, et al. Applications of fluid and gas geochemistry for geohazards investigation[J]. Applied Geochemistry, 2010, 25(4): 503-504.
- [8] Battania A, Sarda P, Prinz H. Basin scale natural gas source, migration and trapping traced by noble gases and major elements: The Pakistan Indus basin[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 181(1/2): 229-249.
- [9] Xu Yongchan, Liu Wenhui, Shen Ping. An important branch of gas geochemistry: Noble gas geochemistry[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(3): 157-166. [徐永昌, 刘文汇, 沈平. 等. 天然气地球化学的重要分支——稀有气体地球化学[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 157-166.]
- [10] Xu Yongchan, Shen Ping, Liu Wenhui, et al. He, Ar, and carbon compound derived from mantle-mantle: Derived geochemistry of natural gas of Eastern China[J]. Science in China: Series D, 1996, 26(2): 187-192. [徐永昌, 沈平, 刘文汇, 等. 东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学——幔源挥发份中的氦、氩及碳化合物[J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26(2): 187-192.]
- [11] Holland G, Ballentine C J. Seawater subduction controls the heavy noble gas composition of the mantle[J]. Nature, 2006, 441(7090): 186-191.
- [12] Lollar B S, Ballentine C. Insights into deep carbon derived from noble gases[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(8): 543-547.
- [13] Yang T F, Marty B, Hilton D R, et al. Geochemical applications of noble gases[J]. Chemical Geology, 2009, 266(1): 1-3.
- [14] Yokoyama T, Nakai S, Wakita H. Helium and carbon isotopic compositions of hot spring gases in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1999, 88(1/2): 99-107.
- [15] Zhao Ping, Xie Ejun, Duo Ji, et al. Geochemical characteristics of geothermal gases and their geological implications in Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 539-550. [赵平, 谢鄂军, 多吉, et al. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 539-550.]
- [16] Hoke L, Lamb S, Hilton D R, et al. Southern limit of mantle-derived geothermal helium emissions in Tibet: Implications for lithospheric structure[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 180(3/4): 297-308.
- [17] Hou Zengqian, Li Zhenqing. Possible location for underthrusting front of the Indus Continent: Constraints from helium isotope of the geothermal gas in Southern Tibet and Eastern Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 4: 482-493. [侯增谦, 李振清. 印度大陆俯冲前缘的可能位置: 来自藏南和藏东活动热泉气体 He 同位素约束[J]. 地质学报, 2004, 4: 482-493.]
- [18] Lu Zhenquan, Wu Bihao, Rao Zhu, et al. Geological and geochemical anomalies of gas hydrate in permafrost zones along the Qinghai-Tibet Railway, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(8): 1029-1040. [卢振权, 吴必豪, 饶竹, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1029-1040.]
- [19] Wang Chengshan, Yin Haisheng. Geological Evolution and Gas Potential Evaluation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001. [王成善, 伊海生. 羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 2001.]
- [20] Huang Jijun. Tectonic characteristics and evolution of the Qiangtang Basin[J]. Regional Geology of China, 2001, 20(2): 178-186. [黄继钧. 藏北羌塘盆地构造特征及演化[J]. 中国区域地质, 2001, 20(2): 178-186.]
- [21] Li Cai, He Zhonghua, Yang Deming. The problems of geological tectonics in the Qiangtang area[J]. World Geology, 1996, 15(3): 18-23.
- [22] Kapp P, Yin A, Manning C E, et al. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. Tectonics, 2003, 22(4): 1701-1725.
- [23] Lee H F, Yang T F, Lan T F, et al. Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan[J]. Journal of Volcanology and Geothermal

- Research, 2008, 178(4): 624-635.
- [24] Xia Guoqing. The Meter-scale Sedimentary Cycles and Its Forming Mechanisms of Middle Jurassic Xiali Formation in Eastern Qiangtang Basin, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009. [夏国清. 羌塘盆地东部中侏罗统夏里组米级旋回及成因机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.]
- [25] Ye Xianren, Tai Mingxin, Yu Chuanao, *et al.* Helium and neon isotopic compositions in the ophiolites from the Yarlung Zangbo River, Southwestern China: The information from deep mantle[J]. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2007, 50(6): 801-812.
- [26] Poreda R, Craig H. Helium isotope ratios in circum-Pacific volcanic arcs[J]. Nature, 1989, 338(6215): 473-478.
- [27] Wycherley H, Fleet A, Shaw H. Some observations on the origins of large volumes of carbon dioxide accumulations in sedimentary basins[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16(6): 489-494.
- [28] Song Yan, Xu Yongchang. Origin and identification of natural gases[J]. Petroleum Exploration And Development, 2005, 32(4): 24-29. [宋岩, 徐永昌. 天然气成因类型及其鉴别[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 24-29.]
- [29] Sano Y, Marty B. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs[J]. Chemical Geology, 1995, 119(1): 265-274.
- [30] Dai Jinxing, Song Yan, Dai Chunsen, *et al.* The Bases and Identification of Abiogenic Natural Gases[M]. Beijing: Science Press, 1995. [戴金星, 宋岩, 戴春森, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [31] Crossey L J, Karlstrom K E, Springer A E, *et al.* Degassing of mantle-derived CO<sub>2</sub> and He from springs in the southern Colorado Plateau region—Neotectonic connections and implications for groundwater systems[J]. Geological Society of American Bulletin, 2009, 121(7/8): 1034-1053.
- [32] Sherwood L B, Ballentine C, Onions R. The fate of mantle-derived carbon in a continental sedimentary basin: integration of CH<sub>4</sub> relationships and stable isotope signatures[J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1997, 61(11): 2295-2307.
- [33] Gilfillan S, Ballentine C J, Holland G, *et al.* The noble gas geochemistry of natural CO<sub>2</sub> gas reservoirs from the Colorado Plateau and Rocky Mountain provinces, USA[J]. Geochim et Cosmochim Acta, 2008, 72(4): 1174-1198.
- [34] Schell M. Multiple origins of methane in the earth[J]. Chemical Geology, 1988, 71(1): 1-10.
- [35] Welhan J A. Origins of methane in hydrothermal systems[J]. Chemical Geology, 1988, 71(1): 183-198.
- [36] Whiticar M J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 291-314.
- [37] Dai Jinxing, Yang Shufeng, Chen Hanlin, *et al.* Geochemistry and occurrence of inorganic gas accumulations in Chinese sedimentary basins[J]. Organic Geochemistry, 2005, 36(12): 1664-1688.
- [38] Etiope G, Lollar B S. Abiotic methane on earth[J]. Reviews of Geophysics, 2013, 51(2): 276-299.
- [39] Jin Zhijun, Zhang Liuping, Wang Yang, *et al.* Using carbon, hydrogen and helium isotopes to unravel the origin of hydrocarbons in the Wujiaweizi area of the Songliao Basin, China[J]. Episodes, 2009, 32(1): 67-76.
- [40] Dai Jinxing. Composition characteristics and origin of carbon isotope of Liuhuangtang natural gas in Tengchong County, Yunnan Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(12): 1027-1050.
- [41] Liu Wenhui, Xu Yongchang. Types of natural gases and their signals[J]. Acta sedimentologica Sinica, 1996, 14(1): 110-116. [刘文汇, 徐永昌. 天然气成因类型及判别标志[J]. 沉积学报, 1996, 14(1): 110-116.]
- [42] Liu Wenhui, Liu Quanyou, Xu Yongchang, *et al.* The gaining and applying of data in natural gas geochemistry study[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(1): 21-29. [刘文汇, 刘全有, 徐永昌, 等. 天然气地球化学数据的获取及应用[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(1): 21-29.]
- [43] Jenden P D, Kaplan I R, Hilton D R, *et al.* Abiogenic hydrocarbons and mantle helium in oil and gas fields[C]// Howell D G. The Future of Energy Gases. Reston, Virginia: US Geological Survey, 1993: 31-5.
- [44] McCollom T M, Lollar B S, Lacrampe C G, *et al.* The influence of carbon source on abiotic organic synthesis and carbon isotope fractionation under hydrothermal conditions [J]. Geochim et Cosmochim Acta, 2010, 74(9): 2717-2740.
- [45] McCollom T M, Seewald J S. Carbon isotope composition of organic compounds produced by abiotic synthesis under hydrothermal conditions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 243(1): 74-84.
- [46] Taran Y A, Kliger G A, Cienfuegos E, *et al.* Carbon and hydrogen isotopic compositions of products of open-system catalytic hydrogenation of CO<sub>2</sub>: Implications for abiogenic hydrocarbons in Earth's crust[J]. Geochim et Cosmochim Acta, 2010, 74(21): 6112-6125.
- [47] Giggenbach W F, Sano Y, Wakita H. Isotopic composition of helium, and CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> contents in gases produced along the New Zealand part of a convergent plate boundary[J]. Geochim et Cosmochim Acta, 1993, 57(14): 3427-3455.
- [48] Ozima Minoru, Podosek Frank. Noble Gas Geochemistry[M]. London: Cambridge University Press, 2002.
- [49] Oxburgh E, ONions R, Hill R. Helium isotopes in sedimentary basins[J]. Nature, 1986, 324: 632-635.
- [50] Porcelli D, Ballentine C, Wieler R. An overview of noble gas geochemistry and cosmochemistry[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47(1): 1-19.
- [51] Andrews J. The isotopic composition of radiogenic helium and its use to study groundwater movement in confined aquifers[J]. Chemical Geology, 1985, 49(3): 339-351.
- [52] Xu Yongchang. Helium isotope distribution of natural gasses and its structural setting[J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4

- (3/4):189-194. [徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4):189-194.]
- [53] Shen Lichen, Yuan Daoxian, Ding Tiping, *et al.* Distributing inhomogeneity of helium isotope of CO<sub>2</sub> degasification point and its geotectogenesis in southwest of China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4):475-487. [沈立成, 袁道先, 丁梯平, 等. 中国西南地区 CO<sub>2</sub> 释放点的 He 同位素分布不均一性及大地构造成因[J]. 地质学报, 2007, 81(4):475-487.]
- [54] Zhao W, Zhao X, Shi D, *et al.* Progress in the study of deep profiles of Tibet and the Himalayas (indepth)[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2004, 78(4):931-939.
- [55] Xu S, Nakai S, Wakita H, *et al.* Carbon and noble gas isotopes in the Tengchong volcanic geothermal area, Yunnan, southwestern China [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2004, 78(5):1122-1135.
- [56] Craig H, Lupton J, Horibe Y. A mantle helium component in circum-Pacific volcanic gases; Hakone, the Marianas, and Mt. Lassen, in *Terrestrial Rare Gases [M]*//Proceedings of the US-Japan Seminar on Rare Gas Abundance and Isotopic Constraints on the Origin and Evolution of the Earth's Atmosphere. Tokyo: Center for Academic Publications Japan, 1978:3-16.
- [57] Chen D, Wang M, Xia B. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1):179-187.
- [58] Ding W, Wan H, Zhang Y, *et al.* Characteristics of the Middle Jurassic marine source rocks and prediction of favorable source rock kitchens in the Qiangtang Basin of Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66(8):63-72.
- [59] Fu X, Wang J, Zeng Y, *et al.* Concentrations and modes of occurrence of platinum group elements in the Shengli River oil shale, northern Tibet, China [J]. *Fuel*, 2010, 89(12):3623-3629.
- [60] He J, Wang J, Fu X, *et al.* Assessing the conditions favorable for the occurrence of gas hydrate in the Tuonamu area Qiangtang Basin, Qinghai-Tibetan, China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2012, 53(1):11-18.
- [61] Nan Zhengbing, Zhang Yanling, Li Yongtie, *et al.* Key controlling factors of hydrocarbon accumulation in the Qiangtang Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(3):469-473. [南征兵, 张艳玲, 李永铁, 等. 羌塘盆地油气成藏主控因素分析[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3):469-473.]
- [62] Fu X, Wang J, Tan F, *et al.* Gas hydrate formation and accumulation potential in the Qiangtang Basin, northern Tibet, China [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 73(9):186-194.

## Geochemistry and Origins of Gas Discharging Along Qinghai-Tibet Highway, Northern Qinghai-Tibet Plateau

HUANG Hua-gu<sup>1,2</sup>, LUO Min<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>3</sup>, WU Qing-bai<sup>3</sup>, CHEN Duo-fu<sup>2</sup>

(1. *Guangdong Geologic Survey Institute, Guangzhou 510080, China*; 2. *Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*;  
3. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

**Abstract:** CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> play a significant role in the global climate change and carbon circulation and can be used to monitor their origin and tectonic activity. In this paper, we carried out investigations on the gas compositions, carbon isotope ratios of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, and He isotope compositions from the Qiangtang Basin and its adjacent areas. Our results show gas samples from Beiluhe, Bucha Lake, and eastern Tuotuo River are N<sub>2</sub>-rich with N<sub>2</sub> over 75%. The contents of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> are only 3.45%-20.91% and 0-3.58%, respectively. CO<sub>2</sub>/<sup>3</sup>He and CH<sub>4</sub>/<sup>3</sup>He and carbon isotopic values of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> suggest that both CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> from Bucha Lake are biotic without mantle-derived CO<sub>2</sub> and He, whereas those of Beiluhe and eastern Tuotuo River are abiogenic. Southern Erdaogou Depot, branch of Tuotuo River, and Tanggula Mountain Depot are enriched in CO<sub>2</sub> with more than 96%. The CO<sub>2</sub> was at least partially originated from mantle, trace amount of CH<sub>4</sub> was abiogenic and derived from mantle-derived CO<sub>2</sub>; He was primarily originated from crust with only 2.15%-5.66% of mantle-derived origin. These results show that the emitting of large quantity of mantle-derived CO<sub>2</sub> is likely to be ascribed to the presence of Bangong Lake-Nujiang River, Hoh Xil-Jinsha River sutures and the Cenozoic volcanism in northern Tibet. Nevertheless, the estimated small fraction of mantle-derived He may result from the low opening degree at the bottom of fault zones and possibly reflect a geological setting of strong extrusion and an increase in crustal thickness.

**Key words:** Gas emission; Carbon isotope; Helium isotope; Origin; Qinghai-Tibet Plateau