

中国不同类型断裂带的地幔脱气 与深部地质构造特征*

陶明信^{①**} 徐永昌^① 史宝光^① 蒋忠惕^② 沈 平^① 李晓斌^① 孙明良^①

(①中国科学院兰州地质研究所, 气体地球化学重点实验室, 兰州 730000; ②国土资源部实物地质资料中心, 三河 065201)

摘要 以氦同位素为主, 辅以 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 和 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 及 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 等指标, 结合地质构造等资料, 对中国大陆不同类型断裂带的地幔脱气及其深部地质构造特征进行了综合示踪研究. 据此识别并划分出 4 种具代表性的断裂带: (1) 伸展性构造环境中的岩石圈断裂, 地壳厚度小, 具低 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ -高R值和低 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ -高R值体系, 以幔源流体为主, 地幔脱气作用最强, 以郯庐断裂带为代表; (2) 强烈挤压构造环境中的岩石圈断裂或俯冲带, 如班公湖-怒江断裂带, 地壳巨厚, R/Ra值为0.43~1.13, 幔源氦约占总氦的5%~14%, 地幔脱气作用较弱; (3) 造山带山前(盆缘)深断裂带, R值为 10^{-7} 量级, $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值为 $10^9\sim 10^{10}$, $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值为 $10^6\sim 10^8$, 具微弱的地幔脱气作用; (4) 造山带内壳层断裂带, 如窑街F₁₉等断裂带, 具有高 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值-低R值(10^{-8})和高 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值-低R值体系, 无明显的地幔脱气作用. 研究表明: 大型深断裂带是地幔脱气的主要构造通道; 控制地幔脱气强度的主要因素为断裂深度、构造环境性质和地壳厚度; 地幔脱气作用强度可反映断裂带的深度及其深部构造状态, 而气体地球化学示踪则可成为其研究的新的途径; 地球深部热流体上侵活动可能是深大断裂带形成演化的动力源之一; 山前断裂带是深部构造活动方式和壳幔结构转换的部位, 对于认识造山带和盆地的形成机理有重要科学意义.

关键词 断裂带 地幔脱气 深部构造 $^3\text{He}/^4\text{He}$ $\text{CO}_2/^3\text{He}$ $\text{CH}_4/^3\text{He}$

大型断裂带对各种地质作用与过程(如沉积、岩浆、变质、成矿、构造应力场、构造变形乃至地质体的运动与地震等)起着控制与调整作用, 是解决有关地质问题, 特别是区域乃至全球构造的关键所在, 因

之具有特殊的地质构造意义, 故是构造地质学乃至地质学的主要研究领域之一. 就断裂构造研究而言, 除其变形、力学性质、运动和成因特征外, 切割深度及其活动性是其另一个重要的研究内容. 目前, 研究

2004-02-09 收稿, 2004-08-09 收修改稿

* 国家“973”计划(批准号: 2002CB211701)、国家自然科学基金(批准号: 40372065)资助项目

** E-mail: lmiao@ns.lzb.ac.cn

断裂带仍然以地表地质方法为主,对于断裂带切割深度的研究则主要借助于地球物理方法,但有时也存在多解性.而对于断裂带的深部状态(如开启性、封闭性及活动性等)就更难以了解.因此,有关断裂带的切割深度与深部状态是一个研究难度较大的课题,但深部地质与壳幔演化又是地质学向“纵深”发展的必然研究领域,而这些问题往往与深大断裂带联系在一起.

固体地球内部含有大量气体,且是最活跃、最易运移的物质组份,尤其是地幔中的气体或挥发份发生脱气作用而运移到壳内或地表.此种幔源气体不仅包含着丰富的地幔乃至原始地球的地球化学信息,而且由于其脱气并运移上升是在一定的构造条件下发生的,故有可能反映深部的地质构造问题,如断裂深度、开启性、活动性和壳幔的连通性乃至区域地球动力学环境等,从而可为这一领域的研究提供有科学价值的信息和新的研究途径.目前,涉及断裂带地幔气体的研究虽有报道,例如Kennedy 等对北美圣安德烈斯断裂带的研究^[1],但从地幔脱气程度研究断裂带深度,特别是其深部状态尚未见有专题性的文献报道,是一个新的研究思路与途径.

本文根据这一思路与认识,从断裂带气体的地球化学组成特征,特别是从氦同位素示踪的角度,探讨有关断裂带的深度、深部状态与地幔脱气等相关问题.

地幔气体进入地壳后,必然被壳源气体混染或复合,故在近地表采集的气体样品或为壳源气体,或为壳幔两源的复合气体.因此,从了解断裂带的深度及其壳幔连通程度等特征的角度,主要是研究断裂带及其附近的气体样品中是否含幔源气体及其多寡.

壳源和上地幔源氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值(样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值亦可标示为R值,大气值标示为 R_a 值)相差达3个数量级,其端员值分别为 2×10^{-8} 和 1.1×10^{-5} ,下地幔或OIB型则较上地幔或MORB型更高,已获得的最高值为 5.18×10^{-5} ^[1-3].而氦为惰性化学元素,一般只考虑其物理过程而不涉及复杂的化学过程,故氦同位素

是判识幔源气体最灵敏的地球化学示踪指标.氩是另一种惰性元素.就壳源氩而言,其 ^{40}Ar 具有年代积累效应,即随气源岩时代变老, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值增大^[4].对上地幔的氩同位素组成尚有不同认识,但主导性的认识是其具有高 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值,可达28000^[5],代表下地幔(或OIB型)样品的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值多介于4000~12000^[6].因之,地幔与时代较老的地壳岩石中的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值有一定的重叠范围.对此需具体分析,综合判识,特别是结合氩同位素综合判识,效果更为理想.即上地幔气体一般具有高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 体系,而壳源气具有低的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值则随源岩时代而变化.此外, CO_2 是断裂带气体中的主要组分之一,其碳同位素组成也是判识气体成因与来源的常用地球化学指标,但影响碳同位素组成与变化的因素很多,故具有多解性^[7],与稀有气体同位素等地球化学指标结合进行综合判识则更具科学性^[8].

地壳上部构造的形态虽然纷繁,但最基本的是2种相互对立发展的构造单元——造山带(正向构造)和构造盆地(负向构造).就中国大陆而言,除上述2种基本构造单元类型外,在板块碰撞作用下于中、新生代大范围隆升而形成的青藏高原,不仅是中国,而且是全球范围内的一个特殊构造单元.因此,本文选择青藏高原地质意义重大并具代表性的两条构造缝合带(具体后述)之一的班公湖-怒江断裂带、天山等造山带与相邻盆地(代表2种基本构造单元)之间的有关断裂带、东部裂谷盆地区最重要的郯庐及吴川-四会等断裂带和造山带内部的窑街 F_{19} 等断裂带,代表不同构造单元区不同类型的断裂带,以氦同位素示踪为主,结合其它相关地球化学指标,研究其地幔脱气特征与深部地质构造状态及相关问题.

1 样品采集与测试方法

天然气样品用钢瓶采集,温泉气样品用盐水瓶采集.氦同位素在VG-5400稀有气体质谱计上进行测试,以大气为标样;氩同位素用MAT-271微量气体质谱计及ZHT1301质谱计测试;气体组分含量用MAT-271微量气体质谱计和HP5890 II型气相色谱仪进行测试.

2 断裂带的基本地质构造特征与地幔脱气的氦同位素示踪

2.1 班公湖-怒江断裂带

班公湖-怒江断裂带位于羌塘地块和拉萨(冈底斯)地块之间, 普遍认为是青藏地区意义非常重大的两条构造缝合带之一(另一条为雅鲁藏布江构造缝合带), 故也称为班公湖-怒江缝合带^[9,10]。在班公湖-怒江断裂带中段, 沿其北主边界断裂, 发育一近E-W向的大型温(气)泉带。本文所研究温泉气样品采自西藏自治区双湖县境内的该温泉带, 约E89°~90°范围内(图 1)。

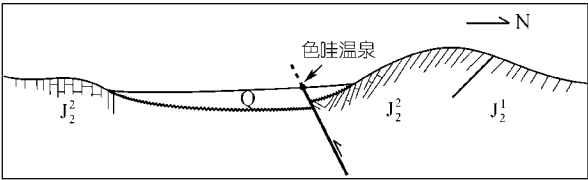


图 1 班公湖-怒江断裂带横剖面及温泉位置

经测试, 气样的组分含量(V%)为: CO₂, 93.77; N₂, 5.41; O₂, 0.318; CH₄, 0.066; He, 0.0001; Ar, 0.0968; Kr, 0.00005; Xe, 0.00002, 表明所喷出气体为含N₂及其他微量组分的高浓度CO₂气体。样品的³He/⁴He(即R)值的分布范围为 6.03×10⁻⁷~1.58×10⁻⁶, 其中 4 个样品的 R 值分布范围为 (6.03~8.68) × 10⁻⁷, R/R_a 值为 0.43~0.62; 2 个样品的 R 值为 (1.22~1.58) × 10⁻⁶, R/R_a 值为 0.87 和 1.13, 均介于幔源值和壳源值之间(表 1)。DM1 号样品的 R 值(1.58×10⁻⁶)大于 R_a 值, 确切无疑的显示含有幔源氦。根据壳源和上地幔源氦同位素的两端复合模式

表 1 班公湖-怒江断裂带温泉气氦同位素组成

编号	采样点	³ He/ ⁴ He/×10 ⁻⁷	R/R _a
DM1	多玛	15.8	1.13
DM2	多玛	7.58	0.54
SB1	索布查	12.2	0.87
SB2	索布查	7.68	0.55
BL1	巴岭	6.03	0.43
BL2	巴岭	8.68	0.62

$$\text{He}_{\text{幔}}(\%) = \frac{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{样品}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}}{(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{幔}} - (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{壳}}} \times 100$$

估算, 其中幔源氦约占总氦的 5%~14%, 即表明本区沿班公湖-怒江断裂带逸出的气体中普遍含有幔源挥发份。

据地球物理研究, 该区上地幔顶部在班公湖-怒江断裂带附近被突然错断, 其南侧拉萨(冈底斯)地块北缘通过该断裂带插入羌塘块体之下而发生莫霍面叠置的现象, 并在断裂带处, 莫霍界面被错断或形成约 10 km 厚的台阶(图 2), 在研究区附近 (安多) 也存在类似的错断^[11]。而断裂带北侧的整个羌塘地区相对于其南侧地区, 莫霍面上隆约 4~6 km^[12]。沿该断裂带还发育超基性岩带和变质岩带, 有关的地质地球物理资料表明班公湖-怒江断裂带为一条岩石圈断裂带。

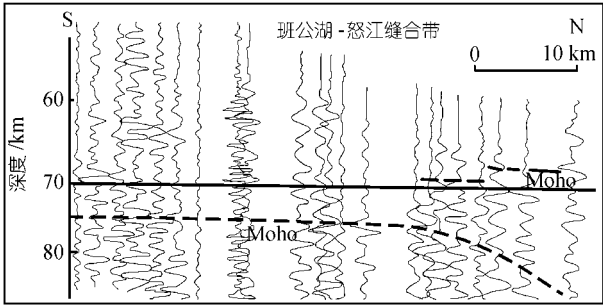


图 2 班公湖-怒江断裂带两侧莫霍界面的反射波和壳幔结构(据文献^[11])

前述氦同位素示踪结果表明, 班公湖-怒江断裂带和地幔具有连通性, 现今仍然在持续发生地幔脱气作用。但幔源氦仅占总氦的 10% 左右, 而氦气在整个气体中的浓度也很低(10⁻⁶), 表明该断裂带的开启程度较低而地幔脱气作用较弱。结合区域地质构造背景分析, 这正是由于该区地壳巨厚(断裂带南侧地区一般厚 74 km, 最厚处超过 80 km, 断裂带北侧的羌塘区厚 68 km 左右^[10,12])而该断裂带又为挤压俯冲缝合带, 从而导致断裂带的开启性与壳幔连通程度变低, 因而仅发生微弱的地幔脱气作用。这与地质地球物理资料相吻合, 即表明该断裂带为一条连通地幔, 但开启性程度较低的岩石圈断裂。

从该断裂带的形成演化历史看,其发育和主要活动时期为侏罗纪.除沉积学方面的证据外,该断裂带中段安多-江措变质角闪石的年龄为 179 Ma,安多片岩的变质年龄为 172 Ma^[9],表明其主要活动期在侏罗纪.这也从一个侧面说明为什么整个青藏高原在新生代的构造活动很强烈,而羌塘地块的构造变形却较弱^[11].即其动力来自南侧,强烈的水平方向的挤压构造活动和大规模的壳层缩短主要发生在班公湖-怒江断裂带以南的地区,而由于其南侧的壳块沿此断裂带插入北侧(羌塘)壳块之下,故断裂带北侧地区则以整体隆升为主.同时也表明,该断裂带在中生代则是一条分隔不同构造单元的重要边界构造.

2.2 天山造山带南、北山前断裂带

天山山脉为横亘新疆及西亚的一条近东西向巨型造山带,博格达构造带则是(北)天山造山带的一部分,位于乌鲁木齐以东,准噶尔盆地与吐-哈盆地之间.在博格达南、北山前,分别发育一系列向山外逆冲的叠瓦状冲断层或推覆构造,构成造山带与沉积盆地之间的构造过渡带^[13,14].

2.2.1 博格达构造带北侧山前(甘河子)断裂带

甘河子断裂带(约在 E88°10′~89°区间,大体沿

N44°05′一线分布)是博格达山北坡山前发育的一条主要的推覆断裂带^[14],以较缓的角度南倾而切入博格达山之下(图 3).在该断裂带发现B2032 井和北 16 井中天然气的³He/⁴He值较其他井(为 10⁻⁸量级)高出 1 个数量级,分别为 2.72×10⁻⁷和 4.23×10⁻⁷,R/Ra值分别为 0.19 和 0.30.这 2 口井的天然气的组分均为烃类气体(分别为 94.77%和 99.57%),且B2032 井气样的 He含量也较一般气井偏高,达 0.0137%(表 2).B2032 井(图 3 中的台 3 井附近)正位于甘河子主断裂带上(该区段也称五梁山断裂带^[14,15],图 3),北 16 井则位于主断裂带北侧的三台分支断裂带上.

2.2.2 博格达造山带南侧(吐哈盆地北缘)山前断裂带

博格达造山带南侧为吐哈盆地,在两者的交接部位发育一近东西向的区域断裂带,由一系列逆断层组成,延长约 400 km,具有多期活动的特点.特别是在部分地段发现分别倾向南、北而逆冲方向相反的两种叠瓦状断裂构造在剖面上交互叠加发育,除表明具有不同的运动学与动力学演变史外,还表明不同时代形成的断裂在剖面上相互勾通而形成组合型深断裂带^[13].表 2 中所列红台 2 井即位于这一断裂带附近的一条北东向断裂上^[15].该井天然气以CH₄为

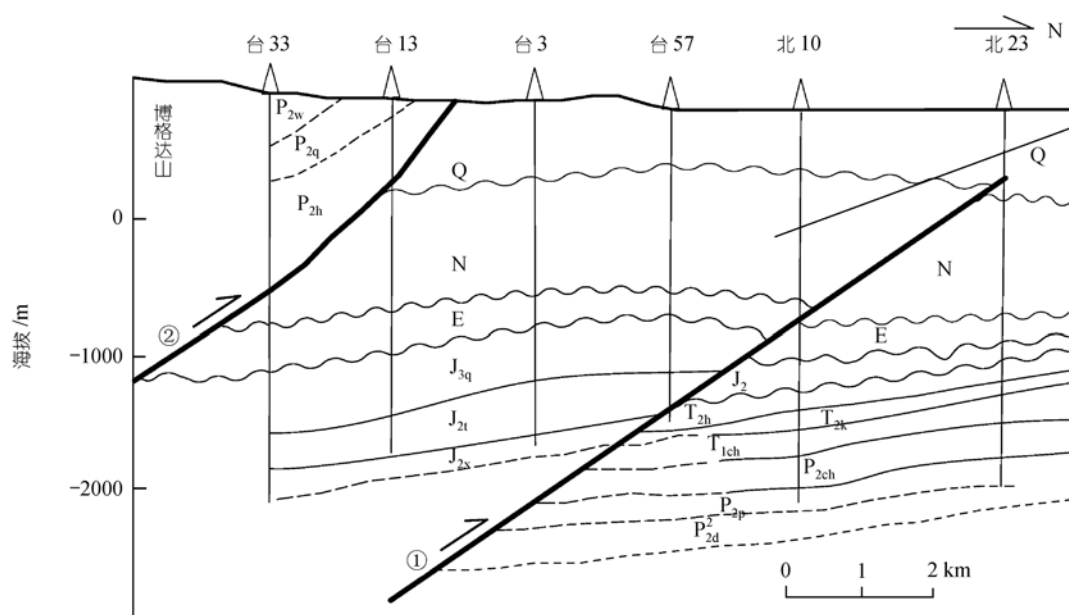


图 3 博格达山北坡(甘河子-三台)构造横剖面图(据文献^[14]修改)

①五梁山断裂带; ②阜康断裂带

表 2 西北与东部某些断裂带的气体地球化学组成特征

井号	CH ₄ /%	CO ₂ /%	N ₂ /%	He/%	Ar/%	$\frac{{}^3\text{He}}{{}^4\text{He}}/\times 10^{-7}$	$\frac{\text{CH}_4}{{}^3\text{He}}/\times 10^7$	$\frac{\text{CH}_2}{{}^3\text{He}}/\times 10^7$	$\frac{\text{R}}{\text{Ra}}$	$\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{36}\text{Ar}}$
B2032	87.25	0.038	4.93	0.0137		2.72	2340	1.02	0.19	
北 16	91.69				0.0283	4.23			0.30	592
红台 2	85.47	0.11	3.36	0.0693	0.0056	1.64	752	0.968	0.12	571
沙参 2	87.09	0.4	0.01		0.0142	2.13			0.15	1735
沙 7	82.84	3.2			0.0126	2.19			0.16	2334
LN33-1	71.34	0.62	4.62	0.022		1.07	3030	26.3	0.076	930
5153	87.33	6.13				3.15			0.22	
807	98.99				0.0416	1.24			0.09	1674
车 32	99.32				0.0896	1.30			0.09	476
红 60	95.49				0.036	5.40			0.38	1125
夏 40	81.54	3.44	0.01		0.0463	1.86			0.13	725
港 151	1.17	98.61	0.19	0.04		50.7	0.577	48.8	3.62	
万 5	0.52	99.48	0.5	0.08		63	0.103	19.7	4.50	
乾 4-01	48.43	15.89		0.0554		55.5	15.8	5.21	3.96	6803
乾 8-05	44.43	22.98	26.17	0.0779		60.7	9.41	4.87	4.34	6289
闵 7	67.16	0.55	23.12	0.096		17.5	39.98	0.327	1.25	573
水深 24	0.25	99.48	0.25	0.25		63.9	0.0156	6.23	4.56	1360
水深 3	65.23	15.6	13.42	0.259		57.2	4.4	1.05	4.09	793
窑 122	9.41	85.09	5.5	0.0041		0.392	5890	53200	0.028	
獐 8	4.63	87.38	7.66	0.00245		0.22	8590	162000	0.016	
W-9	86.7	1.58	11.1	0.03	0.0045	0.442	6540	119	0.03	
D-6	73.56	0.36	25.38	0.034	0.0012	0.312	6930	33.9	0.02	

主, 烃类含量达 96.3%, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值为 1.64×10^{-7} , 而且 He 的含量高达 0.0693%, 超过了其工业品位(0.05%), 为目前所知西北区 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值达到 10^{-7} 量级而含量又达到工业品位的 1 口气井(表 2)。

2.2.3 南天山山前(塔里木盆地北缘)断裂带

塔里木盆地北缘与南天山山前地带, 发育一系列近 EW 向并向南(盆内)逆冲推覆的大型断裂带, 其中轮台断裂为这一大型断裂带前缘的主要构造成分。轮台断裂东起库勒(约 E86°05′, N41°40′)以近东西向延长约 320 km, 断面北倾, 呈上陡下缓的铲状, 其上盘往南推覆的水平距离达 3.5 km, 垂直断距达 4000 m^[16]。位于轮台大断裂带(雅克拉背斜构造)上的沙参 2 井和沙 7 井(图 4), 其储层为寒武-奥陶系, 天然气的 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值为 2.13×10^{-7} 和 2.19×10^{-7} , R/Ra 为 0.15 和 0.16; ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 值分别为 1735 和 2334, 是该盆地中目前所获得的 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 值中的最高值。位于雅克拉背斜北东方向的轮台县之南 30 多千米的 LN33-1

井侏罗系储层中天然气的 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值为 1.07×10^{-7} , R/Ra 为 0.076; ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 值为 930(表 2)。该井靠近阿克库木(轮南)断裂带, 而且该区还发育一系列大型南倾逆冲断裂带^[16,17]。相比较, 塔中构造区产于奥陶系天然气(塔中 1 井)的 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ 值仅为 923, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值为 4.6×10^{-8} ^[4], 具有典型的壳源特征, 而与上述各井天然气具有明显的差别, 也反证了沙参 2 井、沙 7 井和 LN33-1 井天然气中有幔源氦等气体的加入。

2.3 克拉玛依大断裂带

在新疆西准噶尔造山带与准噶尔盆地西北缘之间的地带发育一 NE 向的大型断裂带, 地球物理与钻探资料证实其为一大型推覆构造带, 全长约 250 km。推覆体自西准噶尔造山带向盆内逆掩推覆, 水平推覆距离达 20~30 km, 并在推覆体之下形成了受其控制的油气藏。该断裂带自北东而南西由乌夏(夏红北)断裂、克乌断裂和红车断裂三部分组成, 其实质是自

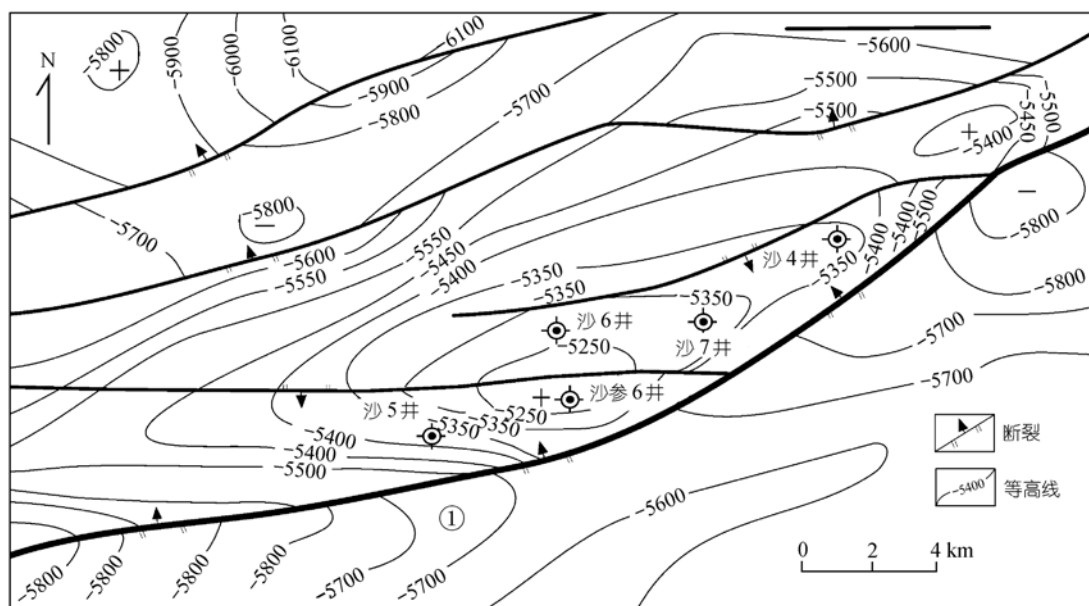


图 4 轮台断裂带与雅克拉AnMz侵蚀面构造等高线图(据文献[16]修改)

①轮台断裂带

西向盆地内推覆的 3 个舌形推覆体的前锋线, 总体称为克拉玛依大断裂带[18]。该大断裂带与西准噶尔造山带山前发育的达尔布特大断裂带具有密切的成因关系, 即其约在 11000 m 深处逐渐收敛而交汇为同一条深断裂并变陡, 而在近地表形成放射状低角度($0^{\circ}\sim 5^{\circ}$)的分支断裂和相应的一系列叠置推覆体(图 5)。沿克拉玛依大断裂带, 发现 5153 井、807 井、车 32 井、红 60 井和夏 40 井等 5 口井中天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的分布范围为 $(1.24\sim 5.4)\times 10^{-7}$, R/R_a 为 0.09~0.38。其中南段红山咀红 60 井天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值最高, 为 5.4×10^{-7} , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值也明显偏高, 达 1125; 位于断裂带中段的 807 井天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.24×10^{-7} , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 1674, 相对于石炭-二叠系生源岩层明显偏高, 即具有相对高的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 体系(表 2), 进一步证明含有幔源气体。

2.4 郯庐断裂带

郯庐断裂带是亚洲东部滨太平洋地区的一条巨型断裂构造系, 由 4~5 条主干断裂组成, 与太平洋东岸北美大陆边缘的圣安德烈斯断裂系(the San Andreas Fault System)相对应, 均与太平洋板块的形成

与演化有密切关系。有关郯庐断裂带, 前人在地质构造方面做过大量的工作, 研究程度相当高。对包括郯庐断裂带在内的中国东部地区的幔源和无机成因气体也已做了相当多的研究工作[8,19,20]。在此基础上, 本文仅扼要探讨郯庐断裂带的地幔脱气特征及相关问题。

沿郯庐断裂带及其两侧, 发现一批气井中, He 的浓度很高($>0.05\%$), $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值达 10^{-6} ($R>R_a$), 其中幔源 He 约占总 He 的 40%~50% 甚至更高。并且一般 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值也显著偏高, 如乾 4-01 井和乾 8-05 井该值高达 6803 和 6289, 而其 ^{40}Ar 值相对于其气源岩 ^{40}Ar 值明显过剩, 即以具高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ - $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 体系为特征(表 2)。这些气井多为高含 CO_2 气井(藏), CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要集中在 $-3.4\text{‰}\sim -4.6\text{‰}$, 具有幔源 CO_2 的特征。即沿郯庐断裂带及其附近的气藏中普遍含 He, Ar 和 CO_2 等幔源挥发份气体(表 2)。

除天然气外, 在郯庐断裂带山东-安徽段采集的 3 个温泉气样中也明显含有幔源氦。其中位于山东蓬莱市郊的温石汤温泉, 水温 50°C , 有大量气泡涌出, 气样的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 5.86×10^{-7} , R/R_a 为 0.42; 位于山东栖霞的艾山汤温泉(地面水温 50°C)亦有大量气泡

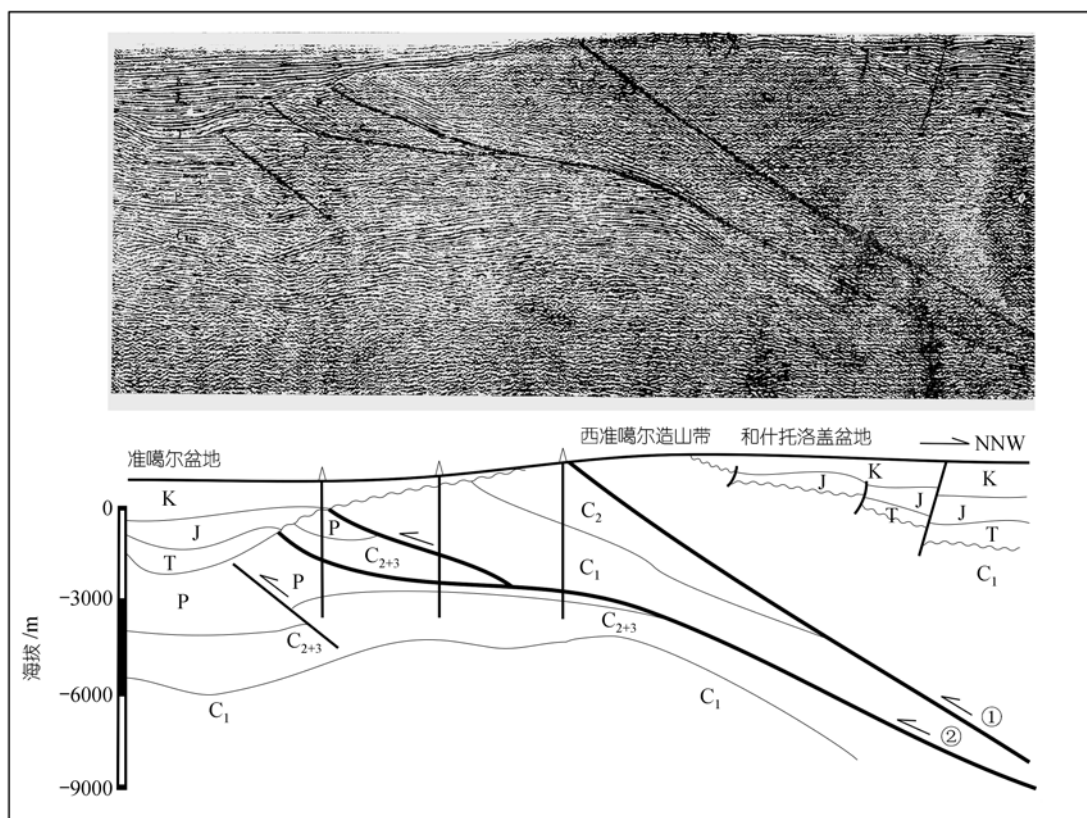


图5 克拉玛依断裂带和达尔布特断裂带地震与地质横剖面组合特征(据文献[18])

①达尔布特断裂带; ②克拉玛依断裂带

涌出, 气体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 3.48×10^{-7} , R/R_a 为 0.25; 位于安徽巢湖市东北的泮汤温泉(安徽省地矿局疗养所内)的出地面水温为 56°C , 温泉气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.6×10^{-6} , R/R_a 为 1.14, 样品 R 值高于大气值 R_a 。虽然温泉气样在地表易受大气氮的污染, 但大气中氮的浓度很低, 仅约 5×10^{-6} , 比地球内部流体的氮浓度一般低 2~3 个数量级(如表 2), 故对温泉气的氮同位素组成影响很小, 而泮汤温泉气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高于大气值, 进一步表明明确含有幔源氮(约占总氮的 10%)。以上 3 个温泉均位于郯庐断裂带内, 表明郯庐断裂带现今仍在发生地幔脱气作用而处于活动状态。

2.5 吴川-四会断裂带与阳江-从化断裂带

阳江-从化断裂带位于广州西侧, 再向西则为吴川-四会断裂带, 两者沿NNE向近于平行延伸, 皆为长期活动的大断裂带[21]。夹持于这 2 条断裂带之间的三水小型盆地内, 一批气井中天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值均

很高, 为 $(1.72 \sim 6.39) \times 10^{-6}$, 是目前所知中国东部天然气 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值较高的分布区。其中水深 24 井天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高达 6.39×10^{-6} , 水深 44 井高达 6.36×10^{-6} , 水深 3 井达 5.72×10^{-6} 。幔源氮在总氮中可高达 58%, 而且He的含量也异常高, 其中有 5 口井的He含量高达 0.11%~0.259%, 远超过了He的工业品位(0.05%) (表 2)。

三水盆地内部发育一系列受吴川-四会断裂带和阳江-从化断裂带控制的低序次断裂构造[22], 在这些断裂交叉部位, 形成了很多火山口, 以玄武岩类为主的火山岩非常发育[21]。这表明盆地内次级断裂与区域性的吴川-四会断裂带和阳江-从化断裂带相沟通而切割深度很大, 以至于大量的深源气液物质到达地表。

2.6 窑街 F_{19} 断裂带和宝积山断裂带

2.6.1 窑街 F_{19} 断裂带

窑街 F_{19} 断裂带位于中祁连造山带内部甘青交接

地区, 呈NNW向延伸约 20 km, 为窑街煤田的东部边界断裂带. 该断裂带具长期活动特征, 早期表现为挤压逆断层, 到侏罗纪演变为伸展性断裂^[23]. 在该断裂带及相邻数百米范围内的中侏罗统煤层中含大量 CO_2 浓度高达 85%~97% 的气体, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $(2.2\sim 3.92)\times 10^{-8}$, R/R_a 为 0.016 和 0.028 (窑 122 和獐 8 号样品, 表 2), 具典型的壳源特征值.

2.6.2 宝积山断裂带

宝积山断裂带位于甘肃白银-靖远地区的北祁连造山带东段内部, 为一条呈NW向延伸数十千米的推覆断裂带. 在该断裂带切过的宝积山煤田中侏罗统煤层内采集的W-9 和D-6 煤层气样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $(3.12\sim 4.42)\times 10^{-8}$, R/R_a 为 0.02 和 0.03 (表 2), 亦为典型的壳源特征.

以上氦同位素示踪结果显示, 这 2 条处于造山带内且规模较小的断裂带无幔源挥发份, 可能为深度不太大的壳内断裂而与造山带山前断裂带有明显差异.

3 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ 综合指标体系示踪

除氦、氩等同位素外, 气体组分与氦等同位素的含量比值, 如 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 和 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 等, 也是流体来源与成因示踪的重要地球化学指标. 对全球范围内有关样品的测试与研究表明, 幔源流体中 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值的分布范围为 $10^8\sim 10^{10}$ 数量级, $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值为 $10^5\sim 10^7$ 数量级; 壳源流体的 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值则远高于地幔值, 达 $10^{10}\sim 10^{12}$ 数量级, $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值分布于 $10^8\sim 10^{11}$ 范围, 也显著高于幔源值^[24~27].

学术界也采用 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ -R (即 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值; 或用 R/R_a) 和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ -R 综合指标体系进行流体示踪研究. 例如 Poreda 等^[28] 研究并认为, 壳源流体以具有高 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值 (10^{12})-低 R 值 (10^{-8}) 和高 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值-低 R 值为特征; 幔源流体以具有低而较离散的 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值 ($0\sim 10^9$)-高 R 值 ($0.6\text{ Ra}\sim 3.9\text{ Ra}$) 和低 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值 ($10^9\sim 10^{10}$)-高 R 值为特征.

从本文所研究的部分样品数据 (表 2) 分析, 中国

东部沿郯庐断裂带和吴川-四会断裂带与阳江-从化断裂带所产气体的 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值为 $10^5\sim 10^7$ 量级, $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值为 $10^7\sim 10^8$ 量级, R 值为 10^{-6} 量级, 即具有以幔源流体为主的特征 (图 6, 7).

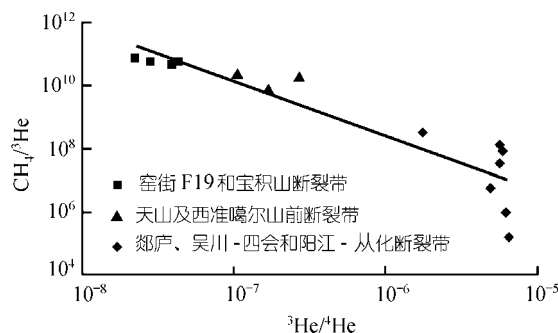


图 6 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值体系图

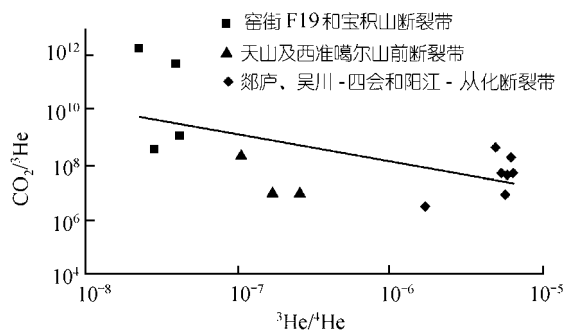


图 7 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ - $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值体系图

天山造山带山前断裂带所产部分气体样品 (红台 2 井、LN33-1 井和 B2032 井) 的 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值为 $10^9\sim 10^{10}$ 量级, 明显高于典型幔源值, 基本在壳源流体值的范围而略偏低; $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值为 $10^6\sim 10^8$ 量级, 其最低值为 9.68×10^6 (红台 2 井), 接近 10^7 , 基本在幔源流体值的范围; 其 R 值均为 10^{-7} 量级, 即在 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ -R 和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ -R 体系中, 介于幔源和壳源值之间而偏壳源值一侧 (表 2, 图 6, 7). 此特征与实际具体情况基本相吻合. 即可做这样的解释: 该区气体为以生物成因 CH_4 为主, 混有少量以 He 为代表, 可能还包括部分 Ar 及 CO_2 等幔源气体的两源复合气体.

而处于造山带内的窑街 F₁₉ 断裂带的窑 122 和獐 8 号样品的 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值为 $(5.89\sim 8.59)\times 10^{10}$, $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值

1) 陶明信, 马锦龙, 金之钧. 地球内部流体的气体地球化学示踪方法与综合判识指标体系. 2004

为 5.32×10^{11} 和 1.62×10^{12} (表 3), 均为典型的壳源流体特征值; 宝积山断裂带的 W-97-9 和 D-6 样品的 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值为 $(6.54 \sim 6.93) \times 10^{10}$, 亦为典型壳源值, 但其 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值为 1.19×10^9 和 3.39×10^8 , 相对于壳源值偏低。结合样品产出的地质条件分析, 其原因主要是由于煤层中的气体主要以吸附状态存在, 当随着煤层开采而压力逐渐降低时, 分子量小的组分, 如 CH_4 优先解吸, CO_2 则相对难以解吸并滞后^[29]。因此, 相对于其原始吸附态气体, 井下排放孔解吸排出气体的 CO_2 含量降低 (估计可低 1 个数量级左右, 因为 CO_2 和 N_2 在煤层气中通常都是含量仅次于烃类的主组分, 而 D-6 样品的 CO_2 含量仅 0.36% 而明显偏低), 从而导致 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值相应降低; 又由于宝积山煤层气以 CH_4 为主, 解吸分馏作用对 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 比值影响显著, 而窑街为高浓度 CO_2 气, 解吸排出气体的 CO_2 含量变化不大。结合以上两地区 R 值均为 10^{-8} 量级的壳源特征值综合分析, 应属纯壳源气体。在 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ -R 值和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ -R 值体系图中, 其与东部郯庐等断裂带有显著区别, 与天山山前断裂带也有明显差异 (见表 2, 图 6, 7)。

4 讨论与认识

根据上述地球化学示踪指标特征, 结合实际地质构造等资料, 对以上各断裂带进行进一步的综合对比分析, 讨论与认识如下:

(1) 如前所述, 壳源氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 10^{-8} 量级 (端员值为 2×10^{-8}), 上地幔源氦的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 端员值为 1.1×10^{-5} , 下地幔源则更高。从图 8 中可进一步直观

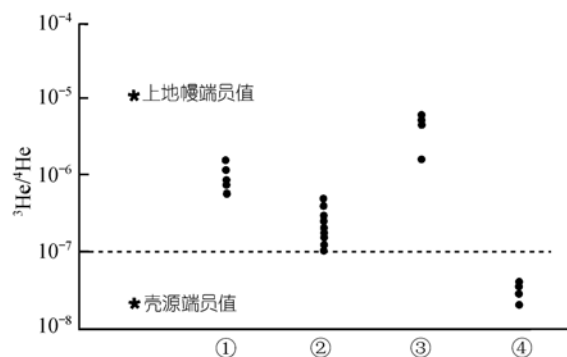


图 8 各断裂带气体样品 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值的分布特征

①班公湖-怒江断裂带; ②天山及西准噶尔山前断裂带; ③郯庐、吴川-四会和阳江-从化断裂带; ④窑街 F_{19} 和宝积山断裂带

地看出, 除窑街 F_{19} 断裂带和宝积山断裂带的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 10^{-8} 量级, 属典型壳源值外, 其它大型断裂带的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 量级, 介于壳源值和幔源值之间, 表明都不同程度的含有幔源氦或幔源挥发份。且各大构造区断裂带 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 和 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值也具有和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值相似或近于对应的分布变化特征, 反映了相同的气体来源和地幔脱气的示踪结果, 而不同构造区断裂带之间则有较明显的差异。

(2) 班公湖-怒江断裂带现今仍发生明显的地幔脱气作用, 显示其与地幔相连通而其深度达到上地幔, 为一条岩石圈深断裂带; 但气样中幔源氦大约仅占总氦的 5%~14%, 反映该断裂带深部的开启性程度较低, 而封闭性程度相对较高, 这从另一个侧面反映了其处于强烈挤压的构造动力学环境和地壳巨厚的地质背景。同时也表明, 该断裂带在中生代则是一条分隔不同构造单元的重要边界构造而起着重要的地质构造作用。与此相比, 该区雅鲁藏布江构造缝合带蛇绿岩带中辉绿岩的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 平均值高达 31.57 Ra, 具有地幔柱或 OIB 型源区的特征^[30], 也表明发育幔源物质。

(3) 天山及西准噶尔造山带山前各有关断裂带具有以壳源气体为主体, 含有少量幔源气体的地球化学特征。结合西北区各主要含油气盆地内部天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值均为 10^{-8} 级的特征进一步分析, 造山带与盆缘之间的主断裂可能切入或接近上地幔, 但同样因强烈挤压的构造动力学环境及地壳厚度较大 (约 48 km^[12]), 地幔脱气作用相当弱。特别需要进一步讨论的是, 就西北区现有资料而言, 为什么仅限于此种构造部位 (山前地带) 的断裂发生较明显的地幔脱气作用, 而盆地内部乃至造山带内部断裂无地幔脱气作用? 这可能反映了盆地和造山带的形成演化的直接控制因素是其下部的壳幔结构或某种深部构造活动, 在壳幔结构或深部构造活动方式发生显著差异甚至构造转换的部位易于形成超壳或深断裂; 或者, 在此种断裂带两侧由于壳幔结构或深部构造活动方式的迥然不同, 故在地壳上部形成了两种相互对立发展的构造单元——造山带和构造盆地。如果这种推测分析具有一定的客观性, 则对于重新审视造山带和盆地的形成机理及其相互关系有相当重要的科学启迪

意义, 对山前断裂带的深部特征, 形成机理与地质构造功能则需要深入的研究与认识.

(4) 郯庐断裂带和吴川-四会断裂带与阳江-从化断裂带不仅其 $\text{CH}_4/^3\text{He}$ 值和 $\text{CO}_2/^3\text{He}$ 值具有幔源特征, 而且 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值很高, 幔源氦占总氦的约 40%~58%, 显示了强烈的幔源脱气作用和断裂深度达上地幔, 且其开启性和壳幔连通程度均很高的特征. 综合地球物理资料也表明, 郯庐断裂带切穿地壳而到达壳幔边界^[31], 谢舜克等认为, 吴川-四会断裂带在 380 Ma 之前属于武夷块和扬子块的板块边界构造, 在 135~85 Ma 期间, 其与郯庐断裂带连通, 为太平洋构造域和扬子-特提斯构造域的分界构造^[32,33]. 中国东部在中新生代总体上处于裂谷伸展性构造动力学环境, 地幔上隆, 地壳减薄, 深断裂发育, 幔源岩浆活动强烈. 这也应是该区发生强烈幔源脱气的大区域的地质构造环境与条件. 中国东部有史料记载的 7 级以上的大地震多发生在郯庐断裂带及其附近, 如山东郯城-莒县 8.5 级大地震. 这也表明郯庐断裂带是一条仍在强烈活动并发生强烈地幔源脱气作用的活动断裂带.

(5) 处于造山带内的窑街 F_{10} 和宝积山断裂带无幔源挥发份而与造山带山前断裂带有明显差异. 但这尚不能证明造山带内规模更大的断裂带也无地幔脱气作用.

(6) 以上初步研究结果表明, 大型断裂带是地球深部脱气的主要构造通道. 已有的研究结果也表明, 在中国中部的克拉通稳定区和西北各盆地内部无幔源氦的显示^[34]. 由此可以认为, 中国大陆的地幔脱气作用主要沿深大断裂带进行, 即使以深源火山方式发生的地幔脱气, 也多沿深大断裂带分布, 如中国东部新生代沿郯庐等断裂带的大规模基性火山活动^[8].

(7) Poreda 等^[28]曾研究了北自勘察加半岛东南侧, 南至新西兰沿西太平洋俯冲带产出的天然气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 10^{-7} ~ 10^{-6} 量级 (R/R_a 值为 0.19~3.5), 认为是幔源 He 与壳源 He 混合的结果; Kennedy 等^[1]曾研究了著名的圣安德烈斯断层系的流体, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 0.12 R_a ~4.0 R_a , 含幔源 He 约 1%~50%. 参考以上资料, 综合对比分析本文图 6~8 中的各构造区断裂带的气体地球化学分布特征及其所反映的地幔脱气作用, 显示以中国东部郯庐等断裂带所处的裂谷区为代表

的伸展性构造环境是地幔脱气作用最强烈的构造区之一(洋中脊和热点区可能也是地幔脱气作用最强烈的构造区); 班公湖-怒江缝合带和西太平洋俯冲带这类处于强烈挤压构造环境的岩石圈断裂带是地幔脱气作用强度次于裂谷区, 也可能次于圣安德烈斯断层所代表的剪切构造环境中巨型平移或转换断层的另一类断裂带; 不属于俯冲带或板块边界断裂构造的造山带山前断裂带具有微弱的地幔脱气作用.

(8) 以上资料及讨论表明, 断裂深度、构造动力学环境性质和地壳厚度是控制地幔脱气作用强度的主要因素. 反之, 地幔脱气作用强度可反映断裂带的深度、开启性、活动性及壳幔连通程度等深部构造环境与状态特征. 而气体地球化学示踪则可成为研究断裂带深度及其深部构造状态的新的途径.

(9) 从地球深部脱气特征和一般的物理化学常识分析, 包括地幔挥发份在内的处于高温高压状态的深部热流体上侵, 不仅可通过各种物理化学过程, 使其邻近岩石弱化, 而且可促进断裂带的进一步发育和活动. 由此可以认为, 包括地幔脱气作用在内的地球深部热流体的上侵活动是深大断裂带形成演化的动力源之一, 而深大断裂带的形成演化则不仅仅限于一般意义上的构造运动或机械作用.

参 考 文 献

- Kennedy B M, Kharaka Y K, Evans W C, et al. Mantle fluids in the San Andreas Fault System, California. *Science*, 1997, 278(14): 1278~1280
- Manyrin B A, Tolstikhin L N. Helium Isotopes in Nature. Elsevier Amsterdam, 1984, 175~179
- Hilton D R, Gronvold K, Macpherson C G, et al. Exheme $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in northwest Iceland constraining the common component in mantle plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 173(1-2): 53~60[DOI]
- Xu Y C, Shen P, Liu W H, Tao M X. Geochemistry of Noble Gases in Natural Gases, Beijing: Science Press, 1996. 108~137
- Matsuda J. The $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ratio of the Undepleted Mantle: A re-evaluation. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(15): 1937~1940[DOI]
- Poreda R J, Farley K A. Rare gases in Samoan xenoliths. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 113: 129~144[DOI]
- 陶明信, 徐永昌, 陈发源. 窑街煤田 CO_2 气浓度与 $\delta^{13}\text{C}$ 值空间变化的构造地球化学特征. *科学通报*, 1995, 36(12): 921~923
- 陶明信, 徐永昌, 沈平, 等. 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*, 1996,

- 26(6): 531~536
- 9 崔军文, 朱红, 武长得, 等. 青藏高原岩石圈变形及其动力学. 地质专报, 第17号. 北京: 地质出版社, 1992. 49~62
- 10 张中杰, 李英康, 王光杰, 等. 藏北地壳东西向结构与“下凹”莫霍西——来自宽角反射剖面的启示. 中国科学, D辑, 2001, 31(11): 881~888[摘要][PDF]
- 11 熊绍柏, 刘宏兵. 青藏高原西部的地壳结构. 科学通报, 1997, 42(12): 1309~1311
- 12 腾吉文, 曾融生, 闫雅芬, 等. 东亚大陆及周边海域Moho界面深度分布和基本构造格局. 中国科学, D辑, 2002, 32(2): 89~100[摘要][PDF]
- 13 陶明信. 吐哈盆地构造环境分析——兼论大陆板内盆地与造山带的成因关系. 沉积学报, 1994, 12(4): 40~50
- 14 伍致中. 准噶尔盆地东部地区油气聚集特征及勘探建议. 新疆石油地质, 1989, 10(4): 15~21
- 15 陶明信, 徐永昌, 陈践发, 等. 中国煤型气区的构造环境、典型气藏及勘探方向——II. 沉积学报, 1999, 17(4): 620~626
- 16 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相油气田. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992. 35~50
- 17 丁道桂, 汤良杰. 塔里木盆地形成与演化. 南京: 河海大学出版社, 1996. 257~261
- 18 尤绮妹. 准噶尔盆地西北缘推复构造研究. 新疆石油地质, 1983, 4(1): 6~16
- 19 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 幔源氮的工业储聚和郯庐大断裂带. 科学通报, 1990, 35(12): 932~935
- 20 戴金星, 宋岩, 戴春生, 等. 中国东部无机成因气及其气藏形成条件. 北京: 科学出版社, 1995. 1~210
- 21 唐忠驭. 三水盆地沉积、构造特征与油气田分布规律. 新疆石油地质, 1986, 7(2): 10~17
- 22 陈键荣. 广东三水盆地构造形式及其与油气的关系初步分析. 石油地质文集——区域地质评价. 北京: 地质出版社, 1981. 165~172
- 23 陶明信, 陈发源, 徐永昌. 窑街F₁₉断裂带地质构造特征与演化分析. 中国煤田地质, 1995, 7(3): 12~16
- 24 Marty B, Zimmermann L. Volatiles (He, C, N, Ar) in mid-ocean ridge basalts: Assessment of shallow-level fractionation and characterization of source composition. Geochim Cosmochim Acta, 1999, 63(21): 3619~3633[DOI]
- 25 Giggenbach W F. Isotopic composition of helium and CO₂ and CH₄ contents in gases produced along the New Zealand part of a convergent plate boundary. Geochim Cosmochim Acta, 1993, 57: 3427~3455[DOI]
- 26 Jean-Baptiste P, Charlou J L, Stievenard M, et al. Helium and methane measurements in hydrothermal fluids from the mid-Atlantic ridge: The Snake pit site at 23°N. Earth Planet Sci Lett, 1991, 106: 17~28[DOI]
- 27 Pinti D L, Marty B. Noble gas in crude oils from the Paris Basin, France: Implications for the origin of fluids and constraints on oil-water-gas interactions. Geochim Cosmochim Acta, 1995, 59: 3389~3404[DOI]
- 28 Poreda R J, Jeffrey A W, Kaplan I R, et al. Magmatic helium in subduction-zone natural gases. Chem Geol, 1988, 71: 199~210[DOI]
- 29 艾鲁尼 T 著. 唐修义, 等译. 煤矿瓦斯动力现象的预测和预防. 北京: 煤炭工业出版社, 1992. 71~111
- 30 吴茂炳, 叶先仁, 刘春燕, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩中地幔柱型岩浆作用. 地质通报, 2003, 22(9): 670~674
- 31 陈沪生. 下扬子地区 HQ-13 线的综合地球物理调查及其地质意义. 石油与天然气地质, 1998, 9(3): 211~221
- 32 谢奎克, 张禹慎. 华南大陆深部探测与综合研究. 地球学报, 1995, 16(4): 349~353
- 33 谢奎克, 姜月华. 华南地壳演化过程及其构造格架. 成都理工学院学报, 1998, 25(2): 153~161
- 34 徐永昌, 沈平, 陶明信, 等. 中国含油气盆地天然气中氮同位素分布. 科学通报, 1994, 39(16): 1505~1508