



www.
geojournals.cn/georev

郯庐断裂带临沂段地热水溶性氦气的分布特征及成因分析

李兆营^{1, 2)}, 张建太^{1, 2)}, 李付全^{1, 2)}, 胡彩萍³⁾, 康鹏宇^{1, 2)},
肖丙建^{1, 2)}, 胡自远^{1, 2)}, 程龙^{1, 2)}, 周亮宇^{1, 2)}, 路晓平^{1, 2)}

1) 山东省第七地质矿产勘查院, 山东临沂, 276000;

2) 临沂市地质调查与研究院士工作站, 山东临沂, 276000;

3) 山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队, 济南, 250014

内容提要:绝大部分氦气矿藏赋存在油气矿藏中,对于地热井、温泉井中水溶性氦气的研究相对较少,郯庐断裂带(郯城—庐江断裂带)作为一条巨型走滑断裂,分布多处含氦气的地热井、温泉,而查明地热水中氦气的来源显得尤为重要。笔者等利用在郯庐断裂带临沂段地热井、温泉内氦气的样品分析结果,分析了郯庐断裂带临沂段地热井和温泉地下水中伴生气体氦含量、分布特征,探讨了地热水中氦气来源。结果显示:在郯庐断裂带临沂段地热水中首次发现8处明显氦含量高值点,以 15×10^{-6} 作为氦含量的背景值,高值点明显高于背景值11.1~1360.0倍,主要分布在郯庐断裂带内及两侧;氦同位素显示氦气主要来源于地壳,少量来源于地幔,幔源氦含量最高为10.75%,这不仅为郯庐断裂带深达地幔提供了证据,而且为地下热水的热源并非直接来源于地幔而是来源于深循环地温加热或放射性生热提供了依据。因此分析认为郯庐断裂带将地壳深部、基底岩体中U、Th等放射性元素衰变产生的大量气与热带到地表,运移过程中同时生成了部分氦气,从而形成了氦气资源、地热资源富集的特征。

关键词:氦气;地热;温泉;郯庐断裂带

氦气是一种无色、无味的惰性稀有气体,它既不能燃烧也不能助燃。目前,标准状态下氦气是已知元素中沸点和熔点最低的气体(张弛等,2023)。氦气是军事工业和高精产业发展不可替代的稀有战略性矿产资源。全球氦气资源分布较不均衡,供需紧张,氦气资源安全成为当前热点问题(Brown, 2019; Sivtsev et al., 2020; Mtili et al., 2021)。自然界中氦气主要来源于大气、地壳和地幔。一般来说,贫氦气藏中天然气藏中氦气含量普遍 $<0.05\%$,富氦天然气藏中氦气含量 $>0.1\%$,而天然气中的氦气含量 $>0.3\%$ 时,就具有较高的经济开发价值(陈践发等, 2021)。当前,工业生产利用的氦气主要是放射性成因的壳源氦(Zhang Wen et al., 2020; 李玉宏等, 2022a)。

近些年,中国的氦气供应主要依靠进口,资源勘

查与氦气综合利用手段研发相对滞后,资源安全形势不容乐观(陈福利等,2021;李玉宏等,2022a;何衍鑫等,2023),作为关键矿产资源,氦气资源的勘查研究为突破紧急状态下的“卡脖子”问题有着重要的意义。目前,中国对氦气资源的勘查开发较为滞后,评价与勘探程度尚处于起步阶段。国内将氦气作为独立资源勘探的研究多数停留来研究阶段(陈新军,2021;李玉宏等,2022a;张朝鲲等,2023),近些年成果逐渐丰富,资料研究表明,中国西部的塔里木盆地、柴达木盆地,中部的四川盆地、鄂尔多斯盆地以及东部的松辽盆地、渤海湾盆地等地区均已发现部分较好的富氦或高氦天然气藏(贺政阳等,2022;赵安坤等,2022;赵欢欢等,2023;闫博等,2023;陈悦等,2023),局部地区的地热井、温泉中也发现部分高含量氦气资源(邹勇军等,2022, Tyne et al.,

注:本文为临沂市城市地质调查项目(编号:SDGP371300202102000468)、山东省第七地质矿产勘查院院控科研基金资助项目(编号:QDKY202303)和临沂市科协资助项目(编号:2024kxz044)的成果。

收稿日期:2024-01-12;改回日期:2024-06-18;网络首发:2024-07-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.021

作者简介:作者简介:李兆营,男,1972年生,学士,正高级工程师,主要从事区域地质调查与找矿工作;Email:sdlyzy@163.com。通讯作者:张建太,男,1983年生,硕士,高级工程师,主要从事地热及地球物理勘探工作;Email:jiantai26@126.com。

2022)。

构造运动可以为气体的运移提供通道和聚集场所。郯庐断裂带作为中国东部一条巨型平移走滑断层,在山东省内形成沂南铜井金矿、五莲七宝山金铜矿等热液型矿产,也形成了汤头、松山、铜井等温泉,不仅为地热流体活动提供了空间,也为氦气的运移提供了良好的运移和储集场所。以往对郯庐断裂带临沂段地热、温泉的研究主要集中在地下水化学元素组成、水质分析等问题,很少研究其中的伴生气体,尤其是氦气。截止本次工作之前,山东省内尚未开展过地热水中伴生氦气勘查及其来源分析的研究。本次以郯庐断裂带临沂段为研究区,开展了氦气资源的调查工作,发现区内有明显氦含量高值点,而区内的氦气资源是如何产生的?又是如何分布的?这些问题对于探索氦气成藏尤为重要。

1 地质及地热背景

郯庐断裂带纵贯华北克拉通东部,在山东省内称为沂沭断裂带,南起郯城,北至渤海(图 1),由 4 条断裂组成,自东向西依次为昌邑—大店断裂(F1)、安丘—莒县断裂(F2)、沂水—汤头断裂(F3)、郯部—葛沟断裂(F4),断裂带深达地幔(张尚坤等,2021;朱裕振等,2022)。致使山东两侧地质构造、地貌迥然有别,断裂大致沿北北东向 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 延伸,南部收敛,北部发散(图 1),受 4 条断裂的切割,形成了“两堑夹一垒”的构造格局,两侧为地堑,中间隆起为地垒,南北两端为中新生代的凹陷。第四纪以来,沂沭断裂带内新构造运动强烈,形成了一系列逆掩断层。如断裂带内马陵山西麓的纪庄北西向新断裂,白垩纪砂页岩逆冲于第四纪之上,即是新构造运动的有力证据(严乐佳等,2014)。

沂沭断裂带是中国东部一条强震带,被称之为“旷古奇灾”的 1668 年郯城 8.5 级大地震(图 1)的震中即位于沂沭断裂带内。研究区处于沂沭断裂带与北西向断裂束相交的复合部位,是地热来源的有利构造部位,构造纵横交错,如图 1 中北西向的蒙山断裂(F5)、新泰—垛庄断裂(F6)、孙祖—铜冶店断裂(F7)、铜石—甘霖断裂(F8)、独角—梁丘断裂(F9)和苍尼断裂(F10),局部断裂活动强烈,切割深度大,在断裂交汇部位,深部构造裂隙较为发育,深部热水易沿断裂通道上升,为深层热水循环提供了良好的通道和储存场所,形成地热异常区。目前沂沭断裂带及其两侧已发现多处地热露头(王宏雷等,2018),如图 1 中的铜井(Tj)、松山(Ss)和汤头

(Tt)地热井。

工作区大地构造位置处于华北板块东南缘之鲁西隆起区东南缘地带,地质构造总体上是一个以新太古代变质侵入体及泰山岩群为基底,以古生代沉积盖层为主体,北东及东倾单斜构造,单斜构造单元中发育多组断裂构造,将其分割成相对独立的单斜断块。中生代发生强烈的构造活动,以断陷盆地沉积为主,并间歇发生中基性—酸性火山作用,后期爆发大规模的中基性火山活动,新生代以来以差异升降活动为主,断裂以张性活动为主,断陷盆地接受沉积。燕山期强烈构造活动,最终形成北北东、北西、近东西、近南北向四组断裂构造。

区内地层发育较完善,整体表现为“两堑夹一垒”的构造格局(图 2),前人资料研究表明(李洪奎等,2013;张增奇等,2014),F4 与 F3 之间形成了潍坊断陷和郯城断陷,而在 F2 与 F1 两者之间则形成了安丘—莒县断陷,主要分布中生代白垩纪的王氏群、大盛群、青山群和莱阳群;汞丹山地垒作为断陷之间的隆起区,岩石主要为太古代泰山岩群。而在 F1 以东则分布着元古代沂水岩群和荆山群片麻岩。第四纪主要发育在沂河、沭河两侧及郯城以南的冲洪积平原区,厚度约为 0~45 m,岩石为冲积、冲洪积砂砾石层及残坡积薄层砂夹层,为第四系松散岩类孔隙水,不利于氦气的储集;“两堑”是主要的热储层,主要含水层为新近纪、白垩纪、侏罗纪和石炭纪的砾岩、砂岩和黏土岩及薄层泥灰岩等,地层上表现为白垩纪的王氏群、大盛群、青山群和莱阳群,地层最厚可达约 5000 m(图 2),这也是汤头温泉以及附近地热井的主要热储层和盖层,多个地热井里连井对比剖面如图 3,致密的岩石利于氦气的储集;底部为砂岩、页岩、泥岩和煤层等石炭、二叠纪地层,厚度约 450 m,可以作为良好的隔水层以及地热储集的良好盖层,也可能是氦气产生的良好层位(陈新军等,2023);而堑内深部有不同厚度的寒武纪、奥陶纪碳酸盐岩夹碎屑岩(图 2),是良好的热储层和含水层,在 F4 断裂西侧有较大面积出露,如在沂南铜井地区(王宏雷等,2018),其岩性以大理岩、灰岩为主,由于底部燕山期岩浆入侵,部分灰岩蚀变为大理岩、结晶灰岩,在其蚀变带内,岩溶裂隙发育,为地下水、氦气的储存提供了空间和运移通道,盖层岩性主要为闪长岩、闪长玢岩等侵入岩类;堑内最深处为老基底地层,岩性为土门群的页岩、砂岩和泰山岩群的花岗类岩石,其中花岗类岩石含有大量的 U、Th 等有效氦源岩(李玉宏等,2022b),为氦气的生成提

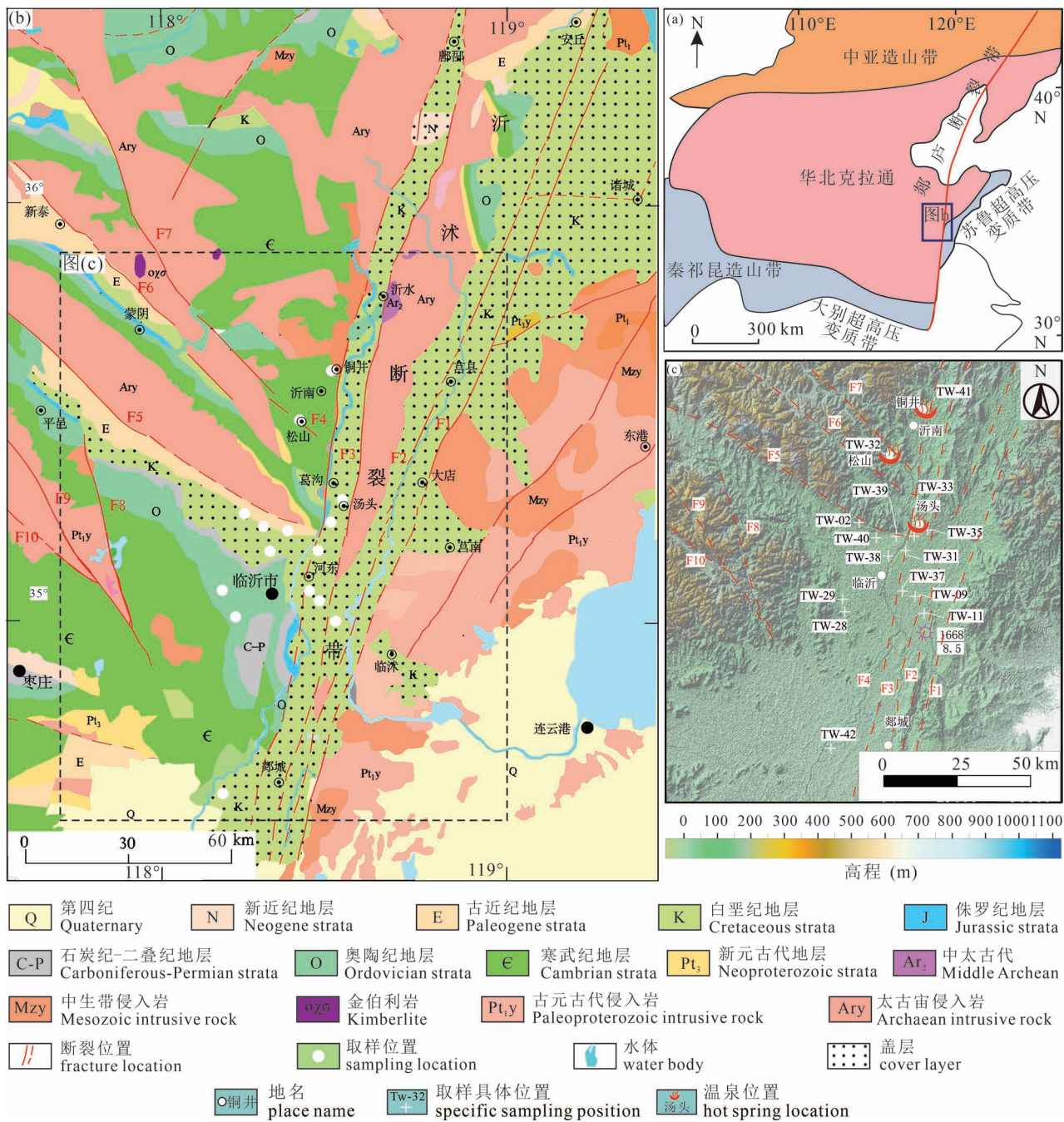


图1 郯庐断裂带临沂段区域地质图(据 Li Xiyao et al., 2018; 于学峰等,2022 修改)

Fig. 1 Regional geological map of Linyi section, Tancheng—Lujiang fault zone (modified from Li Xiyao et al., 2018; Yu Xuefeng et al., 2022&)

(a) 大地构造位置图; (b) 区域地质图; (c) 研究区取样位置图

(a) map of tectonic position; (b) regional geological map; (c) sampling location map of the study area

供了物质基础。郯庐断裂带多期活动为氦气运移提供了良好的通道,如图 1 中孙祖—铜冶店断裂(F7),在其附近形成了沂南松山温泉(王宏雷等,2018),它的热储层为断裂破碎带,震旦纪佟家庄组含砾砂岩、石英岩等,热储层厚度约 180 m,盖层为

寒武纪李官组石英砂岩、震旦纪佟家庄组页岩夹薄层灰岩,佟家庄组以深为花岗岩质老基底,是氦气、地热产生的主要来源。这些丰富的地层结构为氦气的生成、储藏和运移提供了原始条件。而地垒岩性为花岗岩岩石,具备了氦气生成物质基础,但其多为

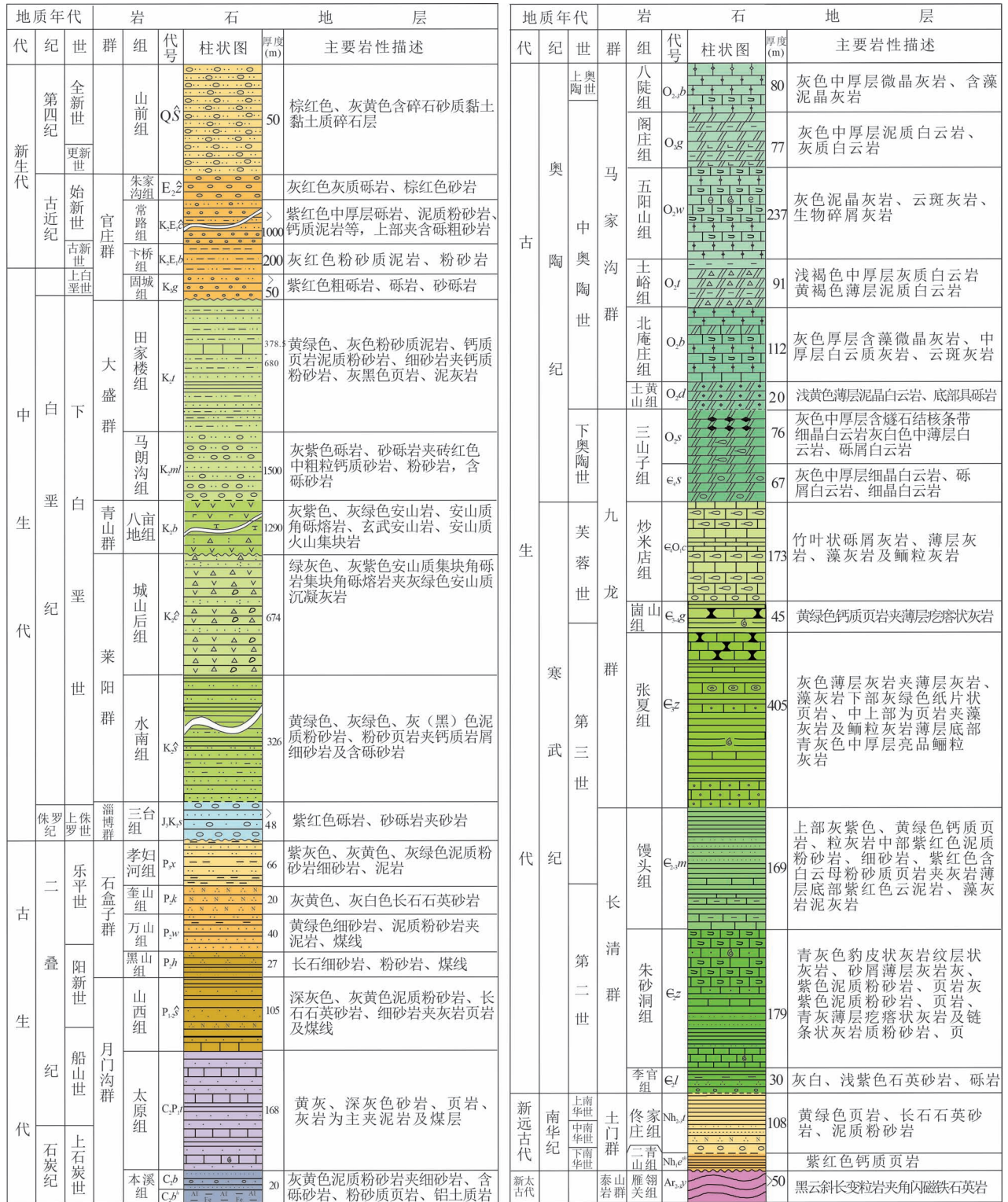


图 2 郯庐断裂带临沂地区综合地层柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic histogram of Linyi area, Tancheng—Lujiang fault zone

开放环境, 不利于氮气的储集。

2 方法与数据

本次在郯庐断裂带临沂段在地下水中采集地下

水样品 15 件, 调查范围在临沂市北至沂南铜井, 南至郯城新村, 取样位置见图 3b, 其采集分析如下。

2.1 样品采集

因氮气在大气中丰度极低, 任何与空气接触都

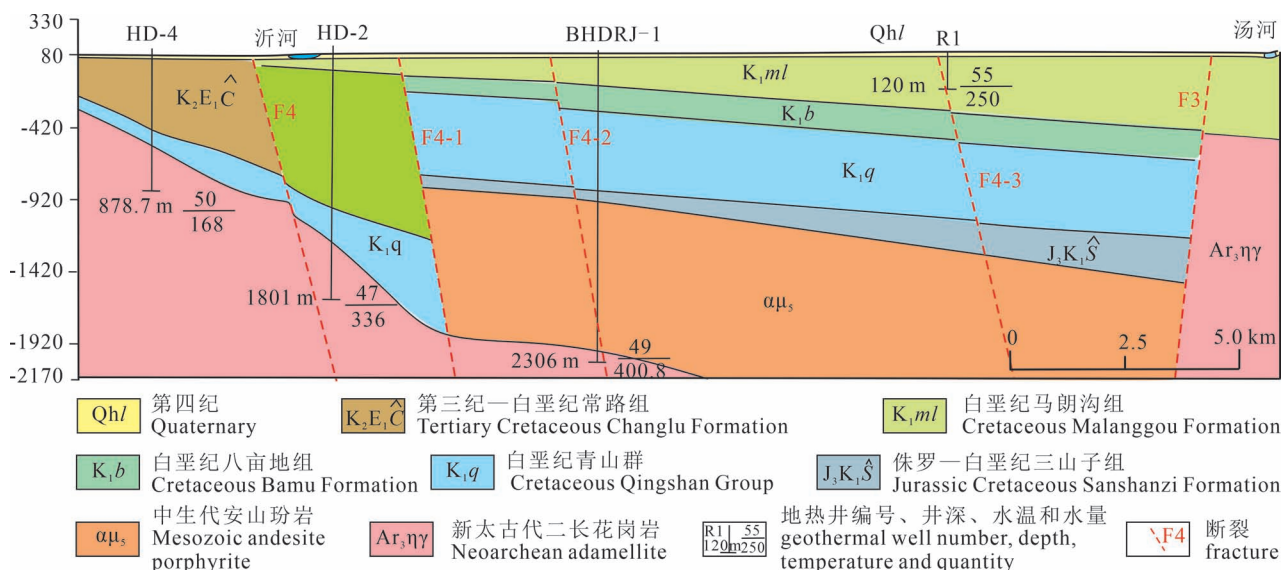


图3 郯庐断裂带临沂地区地热井连井剖面示意图(据山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队, 2015^①修改)

Fig. 3 Schematic diagram of geothermal well connection profile in Linyi area, Tanlu fault zone (modified from the 7th Geological Brigade of Shandong Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, 2015^{#①})

会对测试结果产生重大影响,因此无外来干扰的取样工作尤为重要。取样时,首先将地热井或温泉中地下水用导管抽取至地表,抽取时长为30 min,待水质稳定后将导管跟取样容器(一端为入口,另外一端为出口)密闭相连,冲洗容器2 min后,同时关闭取样容器的入口和出口,瓶中不能残留气体,并将取样容器入口和出口蜡封。

2.2 样品分析测试

样品分析测试由中国地质科学院水文地质环境地质研究所和中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心完成,包括氦含量和同位素比值等项目。采用气相色谱法分析,实验仪器为气相色谱(GC9560型),实验方法为气相色谱法;氦同位素比值旨在获取温泉气体中氦同位素组成特征,检测依据为《稀有气体同位素质谱峰比检测方法》(LDB03012016),测试仪器为No-blesse稀有气体同位素比值质谱仪。

在实验室中,样品铜管安装在全金属超高压(超高真空)系统上,该系统专门用于提取、纯化和分离稀有气体。样品中的大多数反应性气体(碳氢化合物、 H_2S 、 CO_2 和 CO 等)通过钛海绵和吸气剂的组合分解并从系统中去除,而对惰性气体没有影响。去除反应气体后,惰性气体混合物(He 、 Ne 、 Ar 、 Kr 和 Xe)在进入惰性气体质量规范进行分析之前,使用一系列低温捕集器进行分离(Karolyt et al., 2019; Byrne et al., 2021)。在每次样品运行之前,

按照与待检样品测量相同的程序分析已知量的空气标准品,并且每个样品的稀有气体元素丰度是在按标样校正后计算的。

3 分析结果

3.1 地下水 He 分析

本次分析了He的含量以及同位素比值,依据前人研究(Porcelli & Ballentine, 2002; Gonnermann & Mukhopadhyay, 2007)开展计算,结果如图4a和表1,分析结果如下:

(1)有7件样品氦含量值普遍偏低,均位于郯部—葛沟断裂西侧约18~25 km,井深约150 m,其中TW-02、TW-38和TW-39,基岩为中生代火山岩,含量值分别为 6.6×10^{-6} 、 4.3×10^{-6} 、 16.8×10^{-6} ;TW-28和TW-29基岩为古生代灰岩,含量值分别为 8.8×10^{-6} 和 13.2×10^{-6} ,附近无深大断裂;而TW-09和TW-37值分别为 32.6×10^{-6} 和 23.1×10^{-6} ,He含量值略高于其余5件样品,取样位置位于沂沭断裂带内,在郯部—葛沟断裂和沂水—汤头断裂之间,井深均低于200 m,初步推断与断裂带有关。大气中氦含量丰度约为 5.24×10^{-6} (Pinti et al., 2000),该7件样品经求平均值为 15×10^{-6} ,虽然样品件数不多,但是在沂沭断裂带内和远离沂沭断裂带均有取样,可以作为区内无特殊地质条件下的氦含量背景值,为分析其他样品提供了对比的依据。

(2)有8件样品He含量较高(图4a),其中4件

表 1 郯庐断裂带临沂地区地下水 He 含量和同位素比值结果分析表
 Table 1 Analysis of Helium content and isotope ratio of groundwater in Linyi area, Tancheng—Lujiang fault zone

编号	He ($\times 10^{-6}$)	$n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$ ($\times 10^{-7}$)	Err ($\times 10^{-9}$)	R/Ra	$n(^4\text{He})/n(^{20}\text{Ne})$	幔源氦 比例 (%)	来源
TW-02	6.6	7.7	32.0	0.55			
TW-09	32.6	3.1	11.0	0.22	1.55	2.64	壳幔混合
TW-11	634.9	12	36.0	0.86	13.59	10.75	壳幔混合
TW-28	8.8	7.2	31.0	0.51			
TW-29	13.2	5.7	19.0	0.41			
TW-31	9750.9	2.8	6.7	0.20	250.24	2.37	壳幔混合
TW-32	20399.3	0.98	3.0	0.07	743.17	0.71	壳源
TW-33	5434.1	3.9	14.0	0.28	183.30	3.37	壳幔混合
TW-35	4548	4.8	9.8	0.34	187.02	4.19	壳幔混合
TW-37	23.1	5.0	13.0	0.36	1.07	4.37	壳幔混合
TW-38	4.3	6.6	31.0	0.47			
TW-39	16.8	3.3	15.0	0.24			
TW-40	1253.5	0.59	5.2	0.04	48.53	0.36	壳源
TW-41	322.9	2.4	4.2	0.17	12.57	2.00	壳幔混合
TW-42	166.5	1.0	2.5	0.07	5.52	0.73	壳源

在 $100 \times 10^{-6} \sim 1300 \times 10^{-6}$, 编号分别为 TW-11、TW-40、TW-41、TW-42, 均分布在沂沭断裂带内或者两侧 (图 5a), 需要注意的是, TW-11 位于沂沭断裂带内, 其 He 含量为 634.9×10^{-6} , 在等值线上有明显的倾向性弯曲, 具体位置位于沂水—汤头断裂和安丘—莒县断裂之间, 该值较高可能与沂沭断裂带有关; 另外 3 件样品含量 $4000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$, 编号分别为 TW-31、TW-33 和 TW-35, 均位于河东区汤头地热田内; 而含量最高 1 件样品编号为 TW-32, 位于沂南

县松山温泉, 该温泉勘查时井深 280 m, 水温 51°C , 本次调查 He 含量为 20399×10^{-6} 。TW-31、TW-32、TW-33 和 TW-35 样品 He 含量值明显高于其他样品, 为明显的 He 异常。这些高值点形成了郯庐断裂带西侧为中心的圈闭, 指示着区内可能有一定的氦气资源。

(3) 氦通常存在于空气中, 浓度低, 无工业意义, $n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$ 典型值为 1.4×10^{-6} (Mamyrin et al., 1984; 张明升等, 2014), 作为基准值用 Ra 表

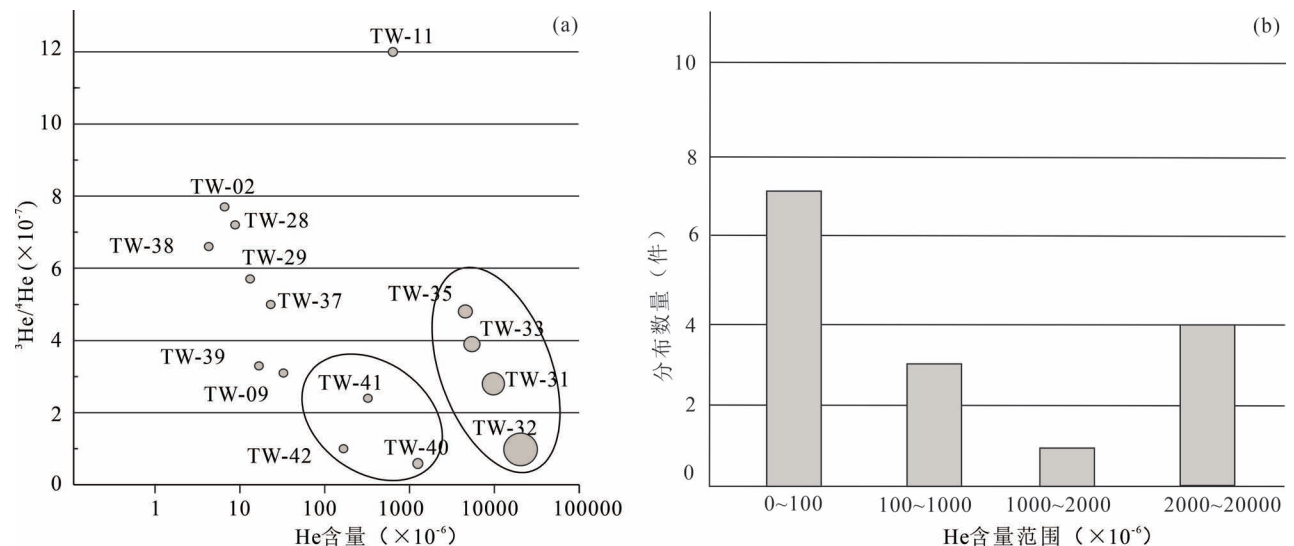


图 4 郯庐断裂带临沂地区地下水 He 含量和比值分析图 (a) (圆圈大小代表数值大小); 地下水氦含量频率分布图 (b)
 Fig. 4 Helium content and ratio analysis chart (a) (the size of the circle represents the size of the numerical value); frequency distribution map of helium content (b) of groundwater in Linyi area, Tancheng—Lujiang fault zone

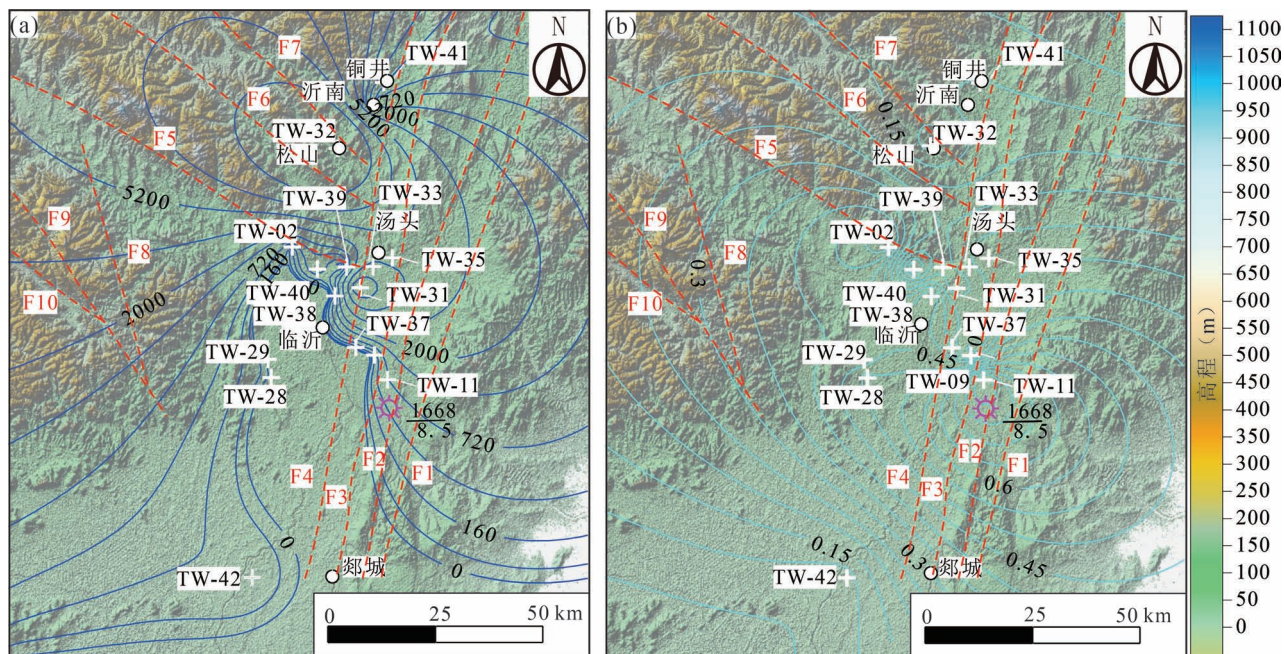


图5 郯庐断裂带临沂地区地下水 He 含量等值线图 (a); 地下水氦气 R/Ra 等值线图 (b)

Fig. 5 Contour map of helium content (a); helium R/Ra isoline map (b) of groundwater in Linyi area, Tanlu fault zone

示。一般以 $R = n(^3\text{He})/n(^4\text{He})$ 代表氦的来源。其中, $R/Ra = 1$ 时为大气氦, $R/Ra = 6 \sim 9$ 为典型幔源氦, $R/Ra < 0.1$, 认为壳源氦, $0.1 < R/Ra < 1$, 则认为壳幔混合来源, 这种分类模式是目前认可度高的模式(徐永昌, 1997, 张明升等, 2014; 李玉宏等, 2018)。 ^4He 是由富 U、Th 等的岩体或地层通过放射性衰变而产生, ^3He 来源于地幔, 一般是深大断裂带沟通地幔而产生, 幔源氦的含量通常采用二元复合模式计算(张明升等, 2014; 邹勇军等, 2022)。分析结果可见图 5b, R/Ra 高值点主要在沂沭断裂带内以及蒙山断裂(F5)的南部, TW-32、TW-40 和 TW-42 的 R/Ra 值低于 0.1, 具有较高的 $n(^4\text{He})/n(^{20}\text{Ne})$ (大于 5) (图 6), 属于壳源(幔源含量低于 1%), 其余显示为壳幔混合源, 幔源氦含量为 2% ~ 10.75% (除部分 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} < 1$, Sano et al., 1985; 管芦峰等, 2023), 尤其值得一述的是 TW-11 的 R/Ra 最高, 与其他样品差异明显(图 6), 幔源含量为最高的 10.75%, 而此样品位于沂沭断裂带的中间位置。因此可以推断区内地下水来源主要为壳源, 间接说明了地热来源并非直接来自于地幔, 而是地壳深部热源的传导热, 地下水无法进行更深层的深循环加热, 主要依靠地温梯度增温和深部热传导来提高热储温度。

3.2 样品统计分析

氦气资源的调查通常通过氦含量来评价, 它是

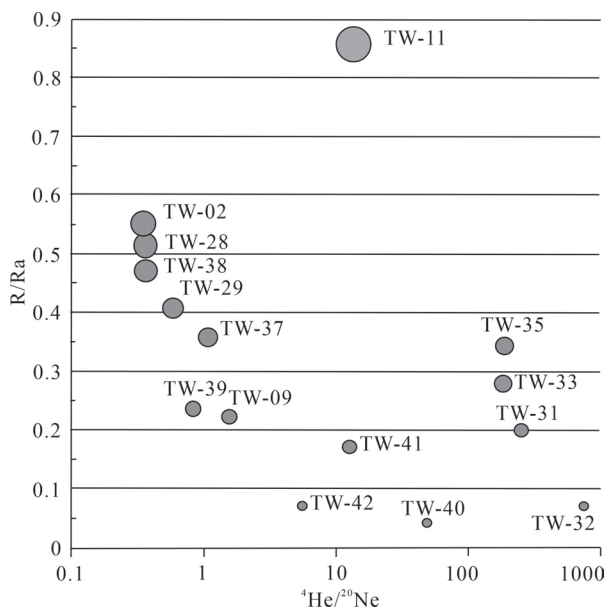


图6 郯庐断裂带临沂地区 R/Ra 与 $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 关系图

Fig. 6 Relationship between R/Ra and $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ in Linyi area, Tanlu fault zone

评价自然界中氦气富集程度的首要技术指标(李玉宏等, 2018)。笔者等对采集的 15 件地下水样品分析结果进行了统计(图 4b, 图 5a), 7 件样品含量平均值为 15×10^{-6} , 可以作为背景值; 其余 8 件样品含量高, 其中 4 件样品氦含量在 $(100 \sim 2000) \times 10^{-6}$, 4 件样品氦含量在 $(2000 \sim 20000) \times 10^{-6}$, 均位于沂沭

断裂带内地热井或附近地热井,且高值均在铜井地热田、松山地热田以及汤头地热田内,占样品总数的 53.3%。因此,区内地热井中氦含量均高于背景值,表明郯庐断裂带临沂段温泉伴生气体氦气富集程度较高,尤其是在 TW-31、TW-32、TW-33 和 TW-35 等地,均在以往确定的地热田内,表现出较好的资源前景和研究价值。

4 讨论

根据前人本次工作成果,探讨了区内氦气的成因模式(图 7),徐永昌等(1990)认为含幔源氦的地区均分布于华夏裂谷系东侧的郯庐断裂带及其附近,了解郯庐断裂带的深部特征,对于我们认识区内幔源氦的富集是有着重要意义。郯庐断裂带为整体左行平移走滑断层,大量学者对于郯庐断裂带深度的研究主要为地震等物探方法开展过研究,朱峪振等(2022)利用 MT 剖面,在研究区北部沂水县诸葛镇至五莲县获得了 50 km 以浅的地壳结构,发现郯部—葛沟断裂和沂水—汤头断裂均深切地幔;张尚坤等(2021)在研究区以外的北部沂南县靳家桥至莒县寨里河开展了深反射地震剖面,反演获得了沂沭断裂带岩石圈精细结构,认为沂水—汤头断裂深达地幔,郯部—葛沟断裂切割地壳深大约 28 km;结合前人认识,泗水—临沂—连云港密度结构剖面表明存在穿过地壳的深断裂(马杏垣等,1991;刘保金等,2015;Wang Xin et al., 2022),通过多种方法的反演,认为郯庐断裂带中南段深部为形似玫瑰花的“花状”构造,其根部深达地幔(图 7a),而反演结果

大致,区分了上中下地壳,其中沉积层厚度约为 0~6 km,上地壳厚度约为 10~15 km,中地壳厚度约为 8~10 km,下地壳厚度约为 5~10 km,莫霍面深度约为 30.5~33 km,地表也较好的显示了“两壑夹一垒”的构造格局,也反应了断裂断距信息,这些断裂为氦气的运移提供了通道。

地震控制着地壳氦脱气(Caracausi et al., 2023),安丘—莒县断裂(F2)为活动性断裂(张鹏等,2019;疏鹏等,2023),地震事件频发(严乐佳等,2014),也有结果显示,郯庐断裂带深部结构对地幔脱气有控制作用(管芦峰等,2023),本次试验结果中 TW-11 距离安丘—莒县断裂约 4 km(图 7),He 含量为 634.9×10^{-6} ,幔源 He 含量在统计结果中值最高,为 10.75%,与远离沂沭断裂带的 TW-28 和 TW-29 以及沂沭断裂带内的 TW-09 相比(可反应区内背景值),呈现出明显的 He 异常,可表现为两种含义:①地震事件的频发为 He 脱气到地表提供了通道,也可以作为断裂活动性的依据之一;②幔源氦的高含量可以作为沂沭断裂带沟通地幔的依据之一,而明显高于郯部—葛沟断裂附近温泉内的 He 含量,也为安丘—莒县断裂为沂沭断裂带主要构造应力部位依据之一。

板块碰撞环境下也会造成深源 He 强烈释放(Zhang Maoliang et al., 2022),研究区内汤头以南至郯城段,地面第四纪地层覆盖,此处郯庐断裂带的郯部—葛沟断裂和沂水—汤头断裂为隐伏断裂,但并无明确的证据证明是否深达地幔,而本次在该处的 TW31、TW33、TW35 和 TW37 的 R/Ra 值均较小

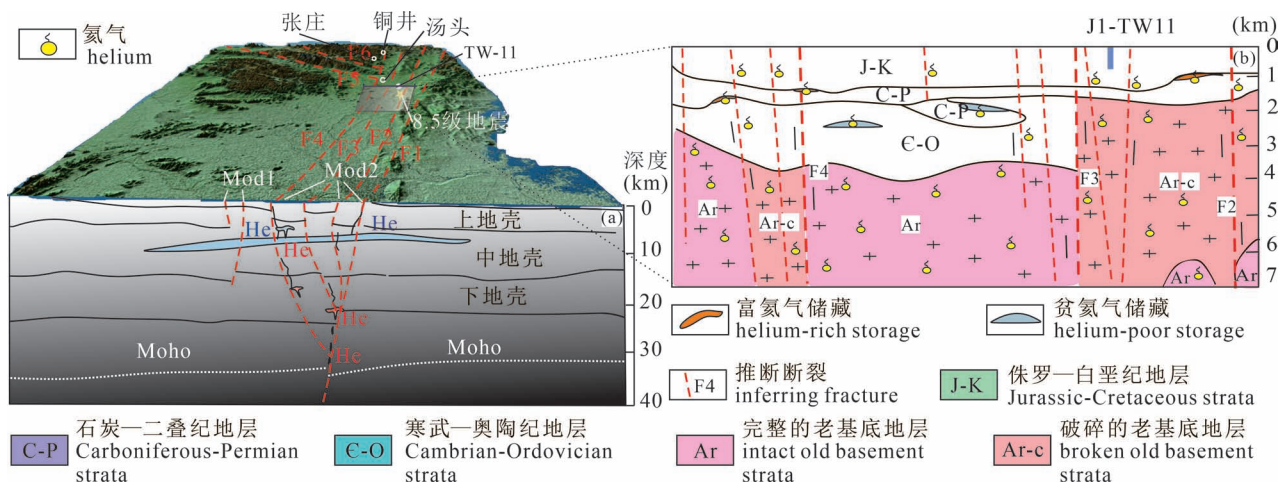


图 7 郯庐断裂带氦气脱气的成因模型图(刘保金等,2015;Wang Xin et al., 2022;李兆营等,2023)

Fig. 7 Genetic model of helium degassing in the Tanlu Fault zone

(图6),因此其He组成多数为 ^4He ,但仍有少量 ^3He 来源于地幔,如图7中蓝色He表示地壳氦;红色He代表地幔氦;蓝色条带表示氦气可能富集部位,因此推断该处的郯部—葛沟断裂或沂水—汤头断裂深部可以沟通地幔,郯庐断裂带为地幔脱气时形成的气体运移至地表储集提供了良好通道。

样品分析结果显示,有4件地下水He含量超过了 4000×10^{-6} (图4a),分别为TW-32、TW-33、TW-35和TW-31,远高于区内 15×10^{-6} 的背景值,此4件样品位于沂沭断裂带内或两侧,初步认为有较好的成矿前景。区内He异常成因划分大致可分为两大类,①表1中显示TW-32、TW-40和TW-42的R/Ra值较低(小于0.1), $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 大于5,这三处地热井均位于郯部—葛沟断裂西侧2~12km,幔源含量低于1%,其中TW-32位于F7断裂附近,TW-40未同意F5断裂南侧,这两处断裂均为正断层,深部为TTG+GMS(李洪奎等,2013),这些花岗质的岩石为氦气的产生提供了物质基础,形成壳源He,如图7中Mod1,成因来源推测为地壳内的放射性元素衰变产生,代表地区为松山地热田;②与以上相比,TW-11位于沂水—汤头断裂(正断层)和莒县—断裂(正断层)中间位置,其R/Ra值最高为0.86, $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ 为13.59,表现出最高的幔源He含量(10.75%),这些高He含量的地热井均位于正断层附近,虽然其侵入岩分布不清晰(覆盖严重),但正断层特征的指向性可能为后期工作提供方向;③表1中其余样品显示为壳幔混合源,主要集中在郯部—葛沟断裂(F4)两侧的地热田内,如图5中Mod2,代表地区为汤头地热田,幔源氦含量约2%~6%,幔源氦含量高,来源于地壳的放射性衰变以及地幔的 ^3He ;④氦气在岩石中的封闭结果显示(李玉宏等,2022b),在27~250℃范围内花岗岩中富U、Th矿物对 ^4He 部分封存,当高于250℃时, ^4He 不封存。假定地面温度16℃,以每100m地温梯度3℃计算,在7800m深度时,温度将达到250℃, ^4He 可以完全释放,因此推测在深度约为7800m时,而李兆营等(2023)在研究区内开展了密集台站背景噪声处理工作,如图7b,获得了研究区内浅地表的地质结构,在地壳内除深部约8km即为富含U、Th的花岗质岩石外,其上覆地层为较厚的寒武—奥陶纪地层(图2),浅部为侏罗白垩纪碎屑岩和沉积厚度较薄的石炭—二叠纪地层,这些都可以成为深部氦气向上逃逸的阻挡(盖层),形成氦气储集,由此推广至图7a中蓝色条带,这组成了氦气地壳成因的“源—储—盖”模式。

因此分析认为,太平洋板块的北向俯冲,导致华北板块和扬子板块碰撞形成了郯庐断裂带,多期构造运动导致郯庐断裂带内构造复杂,状如戚风蛋糕疏松多孔(Cheng Anran et al., 2023),氦气沿构造形成的空隙传播,尤其是安丘—莒县断裂,目前仍为活动性断裂,也为深部He持续上升至地表提供了通道,而TW-11(距离安丘—莒县断裂很近)幔源氦明显高于其他样品,结合其他样品结果,认为区内He多来源于地壳,幔源He的形成可能与郯庐断裂带有关。

5 结论

笔者等利用在郯庐断裂带临沂段的地热井、温泉内He的样品分析结果,探讨郯庐断裂带中段地热井、温泉地下水、伴生气体的氦含量、分布特征以及来源。结果表明:

(1)在郯庐断裂带临沂段地热井(或温泉)中发现了氦含量高值点,最高值为2.04%,区内He含量背景值为 15×10^{-6} ,8件样品He含量高于背景值11.1~1360.0倍,这在山东省内属于首次发现,为进一步开展氦资源勘查提供了重要依据和研究方向;

(2)研究区内He同位素比值显示其来源主要为壳源型,少量来源于地幔,由此揭示区内地下热水的热源主要为地下水深循环地温加热或放射性生热,并非直接来源于地幔的地热水,破碎的断裂带为He脱气并上升至地表提供了通道;

(3)高He含量值样品多分布在断裂带内或者断裂带两侧的三大地热田内(铜井地热田、松山地热田和汤头地热田),沂沭断裂带将地壳深部大量的气、热带到地表,此外岩体中含有的U、Th等放射性元素衰变也产生大量的气与热,运移过程中伴随了部分氦气,从而形成了研究区氦气资源、地热资源富集的特征。

致谢:感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所、中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心的分析测试,感谢中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心曹春辉高级工程师的指导与帮助,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

注 释 / Note

①山东省地质矿产勘查开发局第七地质大队. 2015. 山东省临沂市河东区BHDRJ-1井地热资源勘查报告. 内部报告.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese)

with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈福利, 李欣, 闫林, 王少军, 李锦, 李薇薇, 邵艳伟. 2021. 中国氦气资源特征与氦资源勘查储备战略. 中国地球物理学会. 合肥: 首届全国矿产勘查大会论文集: 638~652.

陈践发, 刘凯旋, 董劭伟, 汪华, 罗冰, 戴鑫. 2021. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景. 天然气地球科学, 32(10): 1436~1449.

陈新军, 丁一, 易晶晶, 陈刚. 2023. 氦气资源的分类、特征及富集主控因素分析. 石油实验地质, 45(1): 41~48.

陈新军. 2021. 典型富氦区资源特征及开发利用前景分析——以中国石化油气矿业权区为例. 中国国土资源经济, 34(4): 84~88.

陈悦, 陶士振, 杨怡青. 2023. 中国氦气地球化学特征、聚集规律与前景展望. 中国矿业大学学报, 52(1): 145~167.

管芦峰, 刘伟, 曹春辉, 张茂亮, 徐胜, 郑国东, Yuji Sano. 2023. 郯庐断裂带流体中氦的来源、空间分布及地质意义. 地球化学, 52(5): 570~581.

何衍鑫, 田伟, 闫博, 李强, 王磊, 齐磊. 2023. 塔里木盆地生氢模拟及其意义. 地质论评, 69(S1): 111~112.

贺政阳, 杨国军, 周俊林, 李玉宏, 张文, 何文发, 郑斌, 韩伟, 马尚伟. 2022. 柴达木盆地北缘天然气中氦气富集规律与远景区预测. 西北地质, 55(4): 45~60.

李洪奎, 杨永波, 耿科, 曹丽丽. 2013. 山东重大基础地质问题研究进展. 岩石学报, 29(2): 594~606.

李玉宏, 李济远, 周俊林, 吕鹏瑞, 张强, 张宇轩, 贺政阳. 2022a. 国内外氦气资源勘探发现状及其对中国的启示. 西北地质, 55(3): 233~240.

李玉宏, 张文, 袁炳强, 韩伟, 陈高潮, 张林. 2018. 渭河新生代盆地基底组成及其油气地质意义. 西安科技大学学报, 38(6): 966~974.

李玉宏, 张文, 周俊林, 李济远, 张云鹏. 2022b. 花岗岩在氦气成藏中的双重作用: 氦源与储集. 西北地质, 55(4): 95~102.

李兆营, 李付全, 张建太, 焦永鑫. 2023. 郯庐断裂带破坏华北克拉通可能形成氦气矿藏. 中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集: 85~86.

刘保金, 鄆少英, 姬计法, 石金虎, 谭雅丽, 李怡青. 2015. 郯庐断裂带中南段的岩石圈精细结构. 地球物理学报, 58(5): 1610~1621.

马杏垣, 刘昌铨, 刘国栋. 1991. 江苏响水至内蒙古满都拉地学断面. 地质学报, 65(3): 199~215.

疏鹏, 徐锡伟, 鄆少英, 刘保金, 李康, Tapponnier P, 邓小娟, 陈桂华, 夏暖, 许洪泰, 秦晶晶, 何付兵, 马严, 郑荣章. 2023. 板泉拉分盆地沉积—构造演化及其对郯庐断裂带新生代晚期右旋走滑运动的响应. 中国科学: 地球科学, 53(4): 784~805.

王宏雷, 祝丽媛. 2018. 临沂市温泉(井)成热机制分析及找热方向研究. 山东国土资源, 34(10): 99~105.

徐永昌, 沈平, 陶明信, 孙明良. 1990. 幔源氦的工业储聚和郯庐大断裂带. 科学通报, 35(12): 932~935.

徐永昌. 1997. 天然气中氦同位素分布及构造环境. 地学前缘, 4(3~4): 185~190.

闫博, 李强, 何衍鑫, 田伟, 王磊, 齐磊. 2023. 基于类比法的塔里木盆地氦气资源评价. 地质论评, 69(S1): 435~436.

严乐佳, 朱光, 林少泽, 赵田. 2014. 沂沭断裂带新构造活动规律与机制. 中国科学: 地球科学, 44(7): 1452~1467.

于学峰, 李大鹏, 单伟, 李增胜, 耿科, 舒磊, 孙雨沁, 宋英昕.

2022. 鲁西归来庄金矿田燕山期金成矿系统及成矿模式. 地质力学学报, 28(5): 821~841.

张朝颀, 弓明月, 田伟, 何衍鑫, 朱东亚, 王磊. 2024. 氦气资源的盖层特征探究——以塔里木盆地为例. 地质论评, 70(3): 1192~1204.

张驰, 关平, 张济华, 宋丹丹, 任嘉豪. 2023. 中国氦气资源分区特征与成藏模式. 天然气地球科学, 34(4): 656~671.

张明升. 2014. 渭河盆地氦气成藏特征初步研究. 导师: 张金功. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1~99.

张鹏, 张媛媛, 李丽梅, 蒋新, 孟科. 2019. 郯庐断裂带安丘—莒县断裂江苏段全新世活动的新证据. 地震地质, 41(3): 576~586.

张尚坤, 罗文强, 于学峰, 田京祥, 唐璐璐, 陈军, 杨斌, 杜圣贤, 刘凤臣, 符康林. 2021. 基于深反射地震剖面的沂沭断裂带岩石圈精细结构. 地质学报, 95(11): 3192~3204.

张增奇, 张成基, 王世进, 刘书才, 王来明, 杜圣贤, 宋志勇, 张尚坤, 杨恩秀, 程光锁, 刘凤臣, 陈军, 陈诚. 2014. 山东省地层侵入岩构造单元划分对比意见. 山东国土资源, 30(3): 1~23.

赵安坤, 王东, 时志强, 程锦翔, 王启宇, 何江林, 李龙, 雷子慧. 2022. 四川盆地及周缘地区氦气资源调查研究进展与未来工作方向. 西北地质, 55(4): 74~84.

赵欢欢, 梁慨慷, 魏志福, 王永莉, 曹春辉. 2023. 松辽盆地富氦气藏差异性富集规律及有利区预测. 天然气地球科学, 34(4): 628~646.

朱裕振, 强建科, 李强, 沈立军, 贾金荣. 2023. 基于地球物理反演结果对沂沭断裂带中段深部结构再认识. 地质论评, 69(1): 113~122.

邹勇军, 肖富强, 章双龙, 李玉宏. 2022. 江西省温泉伴生气氦含量特征及其成因分析. 西北地质, 55(4): 85~94.

Brown A. 2019. Origin of helium and nitrogen in the Panhandle - Hugoton field of Texas, Oklahoma, and Kansas, United States. AAPG Bulletin, 103(2): 369~403.

Byrne D J, Broadley M W, Halldórsson S A, Ranta E, Ricci A, Tyne R L, Stefánsson A, Ballentine C J, Barry P H. 2021. The use of noble gas isotopes to trace subsurface boiling temperatures in Icelandic geothermal systems. Earth and Planetary Science Letters, 560: 116805.

Caracausi A, Buttitta D, Picozzi M, Paternoster M, Stabile T A. 2022. Earthquakes control the impulsive nature of crustal helium degassing to the atmosphere. Communications Earth & Environment, 3: 224.

Chen Fuli, Li Xin, Yan Lin, Wang Shaojun, Li Jin, Li Weiwei, Shao Yanwei. 2021#. Characteristics of China's helium resources and its exploration and reserve strategy. Proceedings of the First National Mineral Exploration Conference, Chinese Geophysical Society: 638~652.

Chen Jianfa, Liu Kaixuan, Dong Qingwei, Wang Hua, Luo Bing, Dai Xin. 2021#. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China. Natural Gas Geoscience, 32(10): 1436~1449.

Chen Xinjun, Ding Yi, Yi Jingjing, Chen Gang. 2023#. Classified characteristics of helium gas resources and controlling factors for the enrichment. Petroleum Geology & Experiment, 45(1): 41~48.

Chen Xinjun. 2021#. Analysis of resource characteristics and exploitation foreground of typical helium rich areas—a case study of sinopec's oil and gas mining right area. Natural Resource Economics of China, 34(4): 84~88.

- Chen Yue, Tao Shizhen, Yang Yiqing. 2023&. Geochemistry characteristics, accumulation regularity and development prospect of helium in China. *Journal of China University of Mining & Technology*, 52(1): 145~167.
- Cheng Anran, Sherwood Lollar B, Gluyas J G, Ballentine C J. 2023. Primary N₂ - He gas field formation in intracratonic sedimentary basins. *Nature*, 615: 94~99.
- Gonnermann H M, Mukhopadhyay S. 2007. Non-equilibrium degassing and a primordial source for helium in ocean-island volcanism. *Nature*, 449: 1037~1040.
- Guan Lufeng, Liu Wei, Cao Chunhui, Zhang Maoliang, Xu Sheng, Zheng Guodong, Sano Y. 2023&. Origin, spatial distribution, and geological implications of helium in fluids from the Tan-Lu fault zone. *Geochimica*, 52(5): 570~581.
- He Yanxin, Tian Wei, Yan Bo, Li Qiang, Wang Lei, Qi Lei. 2023&. Simulation of helium generation in Tarim Basin and its significance. *Geological Review*, 69(S1): 111~112.
- He Zhengyang, Yang Guojun, Zhou Junlin, Li Yuhong, Zhang Wen, He Wenfa, Zheng Bin, Han Wei, Ma Shangwei. 2022&. Helium enrichment law and predication of prospective areas of the North Qaidam Basin. *Northwestern Geology*, 55(4): 45~60.
- Karolyt R, Johnson G, Györe D, Serno S, Flude S, Stuart F M, Chivas A R, Boyce A, Gilfillan S M V. 2019. Tracing the migration of mantle CO₂ in gas fields and mineral water springs in south-east Australia using noble gas and stable isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 259: 109~128.
- Li Hongkui, Yang Yongbo, Geng Ke, Cao Lili. 2013&. Research progress on major basic geological problems in Shandong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 594~606.
- Li Xiya, Li Sanzhong, Suo Yanhui, Somerville I D, Huang Feng, Liu Xin, Wang Pengcheng, Han Zhixin, Jin Lijie. 2018. Early Cretaceous diabases, lamprophyres and andesites—dacites in western Shandong, North China Craton: Implications for local delamination and Paleo-Pacific slab rollback. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 426~444.
- Li Yuhong, Li Jiyan, Zhou Junlin, Lü Pengrui, Zhang Qiang, Zhang Yuxuan, He Zhengyang. 2022a&. Exploration and development status of world helium resources and its implications for China. *Northwestern Geology*, 55(3): 233~240.
- Li Yuhong, Zhang Wen, Yuan Bingqiang, Han Wei, Chen Gaochao, Zhang Lin. 2018&. Basement composition for Weihe Cenozoic Basin and its petroleum geological significance. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 38(6): 966~974.
- Li Yuhong, Zhang Wen, Zhou Junlin, Li Jiyan, Zhang Yunpeng. 2022b&. Dual contribution of granites in helium accumulation: Source and reservoir. *Northwestern Geology*, 55(4): 95~102.
- Li Zhaoqing, Li Fuquan, Zhang Jiantai, Jiao Yongxin. 2023#. The Tanlu fault zone may destroy the North China Craton and form a helium deposit. The professional committee of deposit geochemistry of China Mineral and Rock Geochemistry Society, the abstract of the tenth national symposium on metallogenic theory and prospecting methods; 85~86.
- Liu Baojin, Feng Shaoying, Ji Jifa, Shi Jinhu, Tan Yali, Li Yiqing. 2015&. Fine lithosphere structure beneath the middle—southern segment of the Tan-Lu fault zone. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(5): 1610~1621.
- Ma Xingyuan, Liu Changquan, Liu Guodong. 1991#. Xiangshui (Jiangsu province) to Mandal (Nei Monggol) geoscience transect. *Acta Geological Sinica*, 65(3): 199~215.
- Mamyrin B A, Tolstikhin I N. 1984. Helium isotopes in seawater. In: *Helium Isotopes in Nature*. Amsterdam: Elsevier; 193~202.
- Mili K M, Byrne D J, Tyne R L, Kazimoto E O, Kimani C N, Kasanzu C H, Hillemonds D J, Ballentine C J, Barry P H. 2021. The origin of high helium concentrations in the gas fields of southwestern Tanzania. *Chemical Geology*, 585: 120542.
- Pinti D L, Marty B. 2000. Noble gases in oil and gas fields; origins and processes. *Fluids and Basin Evolution*. Mineral Soc Can Short Course, 28: 160~196.
- Porcelli D, Ballentine C J. 2002. Models for distribution of terrestrial noble gases and evolution of the atmosphere. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 47(1): 411~480.
- Sano Y, Wakita H. 1985. Geographical distribution of 3He/4He ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B10): 8729~8741.
- Shu Peng, Xu Xiwei, Feng Shaoying, Liu Baojin, Li Kang, Tapponnier P, Deng Xiaojuan, Chen Guihua, Xia Nuan, Xu Hongtai, Qin Jingjing, He Fubing, Ma Yan, Zheng Rongzhang. 2023&. Sedimentary and tectonic evolution of the Banquan pull-apart basin and implications for late Cenozoic dextral strike-slip movement of the Tanlu Fault Zone. *Scientia Sinica (Terrae)*, 53(4): 784~805.
- Sivtsev A I, Aleksandrov A R, Petrov D M. 2020. Means to solve the problems of the development of helium resources in eastern Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 459(4): 042097.
- Tyne R L, Barry P H, Cheng A, Hillemonds D J, Kim J H, McIntosh J C, Ballentine C J. 2022. Basin architecture controls on the chemical evolution and 4He distribution of groundwater in the Paradox Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 589: 117580.
- Wang Honglei, Zhu Liyuan. 2018&. Analysis on heat forming mechanism and study on heat finding direction of hot springs(wells) in Linyi city. *Shandong Land and Resources*, 34(10): 99~105.
- Wang Xin, Zhang Jingfa, Fu Pingjie, Gao Min. 2015&. Deep structures of Yishu fault zone derived from gravity data. *Seismology and Geology*, 37(3): 731~747.
- Xu Yongchang, Shen Ping, Tao Mingxin, Sun Mingliang. 1990#. Industrial accumulation of mantle-derived helium and the Tan-Lu fault zone. *Chinese Science Bulletin*, 35(12): 932~935.
- Xu Yongchang. 1997&. Helium isotope distribution of natural gasses and its structural setting. *Earth Science Frontiers*, 4(3~4): 185~190.
- Yan Bo, Li Qiang, He Yanxin, Tian Wei, Wang Lei, Qi Lei. 2023&. Evaluation of helium resources in Tarim Basin based on analogy. *Geological Review*, 69(S1): 435~436.
- Yan Lejia, Zhu Guang, Lin Shaoze, Zhao Tian. 2014&. Neotectonic activity and formation mechanism of the Yishu Fault Zone. *Scientia Sinica (Terrae)*, 44(7): 1452~1467.
- Yu Xuefeng, Li Dapeng, Shan Wei, Li Zengsheng, Geng Ke, Shu Lei, Sun Yuqin, Song Yingxin. 2022&. Yanshanian gold metallogenic system and metallogenic model of the Guilaizhuang gold ore field, western Shandong. *Journal of Geomechanics*, 28(5): 821~841.
- Zhang Chaokun, Gong Mingyue, Tian Wei, He Yanxin, Zhu Dongya, Wang Lei. 2024&. Characteristics of capping and sealing of helium

- reservoir—a case study of Tarim Basin. *Geological Review*, 70(3): 1192~1204.
- Zhang Chi, Guan Ping, Zhang Jihua, Song Dandan, Ren Jiahao. 2023&. Zoning characteristics of helium resources and helium accumulation model in China. *Natural Gas Geoscience*, 34(4): 656~671.
- Zhang Maoliang, Liu Wei, Guan Lufeng, Takahata N, Sano Y, Li Ying, Zhou Xiaocheng, Chen Zhi, Cao Chunhui, Zhang Lihong, Lang Yunchao, Liu Congqiang, Xu Sheng. 2022. First estimates of hydrothermal helium fluxes in continental collision settings: Insights from the southeast Tibetan Plateau margin. *Journal of Geology*, 49(11): e98228.
- Zhang Mingsheng. 2014&. The Preliminary Analysis of Helium Reservoir Forming Characteristics In Weihe Basin. Tutor: Zhang Jingong. Xi'an: Northwestern University Master's Dissertation; 1~99.
- Zhang Peng, Zhang Yuanyuan, Li Limei, Jiang Xin, Meng Ke. 2019&. New evidences of Holocene activity in the Jiangsu segment of Anqiu—Juxian fault of the tanlu fault zone. *Seismology and Geology*, 41(3): 576~586.
- Zhang Shangkun, Luo Wenqiang, Yu Xuefeng, Tian Jingxiang, Tang Lulu, Chen Jun, Yang Bin, Du Shengxian, Liu Fengchen, Wu Kanglin. 2021&. Research on fine lithospheric structure of Yishu fault zone based on deep reflection seismic profile. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3192~3204.
- Zhang Zengqi, Zhang Chengji, Wang Shijin, Liu Shucai, Wang Laiming, Du Shengxian, Song Zhiyong, Zhang Shangkun, Yang Enxiu, Cheng Guangsuo, Liu Fengchen, Chen Jun, Chen Cheng. 2014&. Views on classification and contrast of tectonic units in strata in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 30(3): 1~23.
- Zhao Ankun, Wang Dong, Shi Zhiqiang, Cheng Jinxiang, Wang Qiyu, He Jianglin, Li Long, Lei Zihui. 2022&. Exploration status and helium resource potential of the helium-bearing natural gas field in Sichuan Basin and its surrounding areas. *Northwestern Geology*, 55(4): 74~84.
- Zhao Huanhuan, Liang Kaikang, Wei Zhifu, Wang Yongli, Cao Chunhui. 2023&. Differential enrichment of helium-rich gas reservoirs in Songliao Basin and favorable area forecast. *Natural Gas Geoscience*, 34(4): 628~646.
- Zhu Yuzhen, Qiang Jianke, Li Qiang, Shen Lijun, Jia Jinrong. 2023&. Understanding of deep structure of Yishu fault zone based on three-dimensional gravity inversion model. *Geological Review*, 69(1): 113~122.
- Zou Yongjun, Xiao Fuqiang, Zhang Shuanglong, Li Yuhong. 2022&. Characteristics and causes of helium content in hot spring associated gas of Jiangxi Province. *Northwestern Geology*, 55(4): 85~94.

Distribution characteristics and genetic analysis of geothermal water-soluble helium in the Linyi section of the Tanlu fault zone

LI Zhaoying^{1, 2)}, ZHANG Jiantai^{1, 2)}, LI Fuquan^{1, 2)}, HU Caiping³⁾, KANG Pengyu^{1, 2)}, XIAO Bingjian^{1, 2)}, HU Ziyuan^{1, 2)}, CHENG Long^{1, 2)}, ZHOU Liangyu^{1, 2)}, LU Xiaoping^{1, 2)}

- 1) *The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi, Shandong, 276000;*
- 2) *Academician Workstation for Geological Survey and Research in Linyi City, Linyi, Shandong, 276000;*
- 3) *801 Hydrological geological engineering Geological Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Jinan, 250014*

Objectives: The overwhelming majority of helium reserves are found in oil and gas deposits, with limited research conducted on water-soluble helium in geothermal wells and hot spring wells. As a giant strike-slip fault, the Tancheng—Lujjiang Fault Zone is distributed in multiple geothermal wells and hot springs containing helium. Consequently, it is particularly important to identify the source of helium gas in geothermal water.

Methods: In this article, the helium content and distribution characteristics of associated gas in geothermal Wells and hot springs groundwater in Linyi section of Tanlu fault zone are analyzed based on the helium sample analysis results, and the helium source in geothermal water is discussed.

Results: The results show that 8 obvious high-value points of helium content were found for the first time in the geothermal water of the Linyi section of the TanLu fault zone. With 15×10^{-6} as the background value of helium content, the high value points were obviously 11.1 to 1360.0 times higher than the background value, which mainly distributed within and on both sides of the TanLu fault zone; Helium isotopes show that helium gas mainly comes from the crust, a small amount comes from the mantle. The highest helium content in the mantle source is 10.75%. This not only provides evidence for the Tanlu fault zone reaching deep into the mantle, but also provides the source of geothermal water is not directly from the mantle but from deep circulation geothermal heating or radioactive heating.

Conclusions: The decay of radioactive elements such as U and Th in the deep crust and basement rock masses

in the Tanlu Fault Zone generated a large amount of gas, which was to the surface along with tropical gases. During the migration process, some helium gas was also generated, resulting in the enrichment of helium and geothermal resources.

Keywords: helium; geothermal; hot spring; Tanlu Fault zone

Acknowledgements: Thanks to the support of Linyi City Geological Survey Project (No. SDGP371300202102000468), Institute-controlled Scientific Research Fund (No. QDKY202303) and Linyi Association for Science and Technology (No. 2024kxz044).

First author: LI Zhaoying, male, born in 1972, senior engineer, is mainly engaged in regional geological survey and mineral exploration work; Email: sdlylzy@163.com

Corresponding author: ZHANG Jiantai, male, born in 1983, senior engineer, is mainly engaged in geothermal and geophysical exploration work; Email: jiantai26@126.com

Manuscript received on: 2024-01-12; Accepted on: 2024-06-18; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.021

Edited by: LIU Zhiqiang