



引文格式: 晁海德, 韩生林, 安生婷, 等. 青海省水溶氦气资源现状及赋存特征[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 33–45.
DOI: 10.12401/j.nwg.2025003

Citation: CHAO Haide, HAN Shenglin, AN Shengting, et al. Current Status and Occurrence Characteristics of Water-soluble Helium Resources in Qinghai Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 33–45. DOI: 10.12401/j.nwg.2025003

青海省水溶氦气资源现状及赋存特征

晁海德^{1,2}, 韩生林³, 安生婷^{1,2}, 徐永锋^{1,2}, 巩志远^{1,2,*}, 李青^{1,2}, 谢菁^{1,2},
李吉庆^{1,2}, 蔡廷俊^{1,2}, 王琪玮^{1,2}

(1. 青海省第四地质勘查院, 青海 西宁 810029; 2. 青海省页岩气资源重点实验室, 青海 西宁 810029;
3. 青海九零六工程勘察设计院有限责任公司, 青海 西宁 810007)

摘要: 水溶氦气作为氦气藏的一种特殊赋存类型, 近年来逐步得到广泛关注。青海省地域广阔, 温泉等地下水资源丰富, 通过对温泉、冷泉、卤水的系统调查, 系统探究了水溶氦资源分布、含量、成因特征及其与温度、矿化度的关系。研究表明: 青海省水溶氦气资源的分布与侵入岩关系密切, 主要分布于柴达木盆地、共和盆地、玛多地区、南祁连盆地, 其中柴达木盆地水溶氦含量最大, 最高达 1.1%; 估算柴达木盆地、共和盆地、玛多地区、南祁连盆地生氦量, 分别为 $39.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3$; 水溶氦 R 值为 $0.42 \times 10^{-8} \sim 11.07 \times 10^{-8}$, R/Ra 为 0.003~0.068, 属典型壳源成因气; 氦含量与温度呈弱正相关关系、与矿化度呈正相关关系, 且水温大于 25℃ 的温泉及矿化度大于 1 g/l 的咸水是青海省水溶氦资源赋存的有利环境。

关键词: 水溶氦气; 资源现状; 赋存特征; 矿化度; 青海省

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0033-13

Current Status and Occurrence Characteristics of Water-soluble Helium Resources in Qinghai Province

CHAO Haide^{1,2}, HAN Shenglin³, AN Shengting^{1,2}, XU Yongfeng^{1,2}, GONG Zhiyuan^{1,2,*}, LI Qing^{1,2}, XIE Jing^{1,2},
LI Jiqing^{1,2}, CAI Tingjun^{1,2}, WANG Qiwei^{1,2}

(1. The Fourth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810029, Qinghai, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Resources of Qinghai Province, Xining 810029, Qinghai, China; 3. Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Xining 810007, Qinghai, China)

Abstract: As a special type of helium reservoir, water-soluble helium has gradually received widespread attention in recent years. Qinghai Province has a vast territory and abundant groundwater resources such as hot

收稿日期: 2023-10-21; 修回日期: 2024-12-31; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 青海省地质矿产勘查开发局地质勘查项目“青海省清洁能源靶区优选”(青地矿科[2020]61、青地矿科[2021]61)、(青地矿科[2022]32)、“柴达木盆地北缘全吉地块氦气形成地质条件及资源潜力评价资助”(青地矿科[2022]32)联合资助。

作者简介: 晁海德(1987–), 男, 高级工程师, 从事能源矿产勘查、研究工作。E-mail: 394262585@qq.com。

* 通讯作者: 巩志远(1987–), 男, 高级工程师, 从事能源矿产勘查、研究工作。E-mail: 359419280@qq.com。

springs. Through a systematic investigation of hot springs, cold springs, and brine, the distribution, content, genetic characteristics, and relationship with temperature and mineralization of water-soluble helium resources were systematically explored. Research has shown that the distribution of water-soluble helium resources in Qinghai Province is closely related to intrusive rocks, mainly distributed in the Qaidam Basin, Gonghe Basin, Maduo Region, and South Qilian Basin. Among them, the Qaidam Basin has the highest water-soluble helium content, up to 1.1%; Estimate the helium production in the Qaidam Basin, Gonghe Basin, Maduo Region, and South Qilian Basin, which are $39.49 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$, $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3$, and the R/Ra is 0.003~0.068, indicating a typical crustal origin gas; The helium content is weakly positively correlated with temperature and positively correlated with mineralization, and hot springs with water temperature greater than 25 °C and saline water with mineralization greater than 1 g/l are favorable environments for the occurrence of water-soluble helium resources in Qinghai Province.

Keywords: water-soluble helium; resource status; existence characteristics; salinity; Qinghai Province

氦气是一种在航天、核工业、医学等高科技领域广泛应用的分子半径小、沸点低的稀有资源(张文等, 2018; 秦胜飞等, 2021; 张哲等, 2022; 辛志源等, 2025; 李云波等, 2025)。前人研究显示, 氦气的赋存形式分为 3 种: ①地热田中赋存的水溶氦气。②与油气藏中伴生的游离氦气。③与非烃气藏伴生的游离氦气(卢雪梅, 2022)。现阶段, 由于气水分离的成本以及产气量的限制, 工业利用的氦气资源以天然气伴生气为主, 但随着近几年在渭河盆地、柴达木盆地、民和盆地以及辽宁、山东、浙江、广东等地的氦气成藏研究的深入(张云鹏等, 2016; 李玉宏等, 2018; 陶小晚等, 2019; 柳永刚等, 2020), 水溶氦气以其持久、连续的载体作用、运移作用在富氦气藏成藏过程中具有重要意义(秦胜飞等, 2022; 秦胜飞等, 2023; 高宇等, 2025), 其赋存条件、特征的研究也逐年引起重视。

青海省地处青藏高原东北部, 全省已知温泉 95 处, 分布于全省 8 个州、地、市。其中, 青南分布 32 处, 其余 63 处主要分布于西宁-民和盆地、木里盆地、共和盆地、柴达木盆地、化隆盆地以及八宝山盆地周边。温泉温度一般为 30 ~ 60 °C, 最高为共和南温泉, 达 98 °C。大量分布的温泉大大丰富了青海省旅游资源, 但对温泉中有益元素的含量、意义鲜有研究, 尤其是温泉中水溶氦气的研究极为薄弱, 笔者通过野外调查、水样采集、稀有气体组分及氦同位素测试等手段, 系统探讨了青海省水溶氦气资源现状、赋存特征及规律, 为青海省水溶氦气资源研究、勘探提供了科学依据。

青海省氦气资源评价工作起始于 2015 年前后, 柴北缘是主要研究区域, 共和盆地、全吉地区近两年

逐步开展调查工作。前人通过采集煤田钻孔井口样品、岩心解析样品, 在柴达木盆地北缘团鱼山、全吉山首次发现了壳源氦气。经与渭河盆地对比分析(李玉宏等, 2011; 韩伟等, 2014), 进一步明确了柴达木盆地马海气田、东坪气田富氦天然气成藏事实(吴颜雄等, 2014; 付锁堂等, 2015; 曾旭等, 2017; 伍劲等, 2017)。青海煤炭地质 105 勘探队在全吉山一带实施煤炭预查, 利用排水集气法对具有涌水、涌气现象的 ZK9-8 孔采集气样, 结果显示氦气含量高达 1.10%(张云鹏等, 2016; 杨振宁等, 2018), 证实了青海省水溶氦气资源赋存事实。晁海德等(2022)在柴达木盆地除全吉山以外的一里坪地区、大柴旦地区陆续发现水溶氦气资源, 其中碱石 1 井含氦量最高, 达 0.92%)。陈建洲等(2023)在共和盆地阿乙亥等温泉发现水溶氦气资源, 含量最高达 0.87%。相关研究结果指示出青海省水溶氦气资源前景良好。

1 地质背景

青海省地域辽阔, 前第四纪地层在青海省皆有不同面积的出露, 地层发育齐全, 但以元古代地层、古生代地层、中生代三叠纪地层、新生代古近纪地层、新近纪地层最为发育。青海省大地构造单元位于塔里木、华北、扬子等三大陆块交汇处, NWW 向、NW 向、近 EW 向的褶皱、断裂是主要构造形迹, NE 向和近 SN 向的褶皱、断裂次之, 除柴达木盆地外, 多密集成束分布。受新构造活动影响, 青海省祁连山、昆仑山、唐古拉山等强烈隆升, 分布其间的平原区相对下降, 形成了柴达木、祁连、南祁连、共和、西宁-民和、八

宝山、北羌塘等大小不同盆地, 沉积了巨厚的碎屑岩类, 是地下热水生成与赋存的有效热源及热储空间。

盆地周边均受深大断裂控制, 断裂深度大、延伸长, 大都深切地壳达到地幔, 成为深部热能上涌的通道。断陷盆地边缘多沿断裂带构成带状热储, 地热多出现在断层破碎带或不同方向断裂的交汇部位, 岩层本身的渗透机能相对较差, 裂隙水及破碎带导水是形成地下热水环流系统的关键, 在地形高差及相应的水力压差作用下形成隆起山地型地热资源。

2 样品采集及实验分析

共采集水样 73 件, 其中温泉(水温 $\geq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)水样 48 件, 冷泉(水温 $< 25\text{ }^{\circ}\text{C}$)水样 25 件。样品采集容器为双阀门真空玻璃瓶, 采样前在实验室将钢化玻璃瓶抽真空至系统内压力小于 0.13 Pa , 以便降低、消除系统残留气对样品的干扰。采样时先将双阀门真空玻璃瓶没入水体中 5 cm 以上, 打开下阀使水自行吸入至采样瓶内部并吸满后关闭下阀, 保证空气污染在 10^{-4} 级以下。样品采集完成后, 立即送往中国科学院西北生态环境资源所(西北生态环境资源所)稀有气体实验室完成稀有气体和同位素的检测, 检测时间不超过 30 天。

气体获取在实验室完成: 利用 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右的温度持续烘烤双阀密封的玻璃瓶 24 h 以上, 分析水样的气体抽提线和净化管道。在线取气针头在样品容器的橡胶垫中插入(但不插透), 在分析样品时抽真空, 以杜绝大气在检测环境中受到污染。当真空系统压力减小到 $1\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 以下时再进行抽样检测。在液态氮和冰水混合物恒温条件下, 用活性炭分别吸附和分离 3 种稀有气体(He、Ne、Ar), 并取适量的气体样品, 经 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 钛炉和室温 ZrAl 泵净化。各稀有气体组分分项进入质谱仪开始含量及同位素检测, 所测得的组分含量数据为气体体积分数。

Noblesse 稀有气体质谱仪是此次稀有气体测试的主要仪器, 其大于 700 的分辨率可以完全分离 $^3\text{He}+$ 和 $\text{HD}+$ 的峰值, $^3\text{He}+$ 信号正常情况下会高于 1 s^{-1} , 而 $\text{HD}+$ 拖尾的贡献相对较小, 因此不必校正 $\text{HD}+$ 对 $^3\text{He}+$ 的影响。所以笔者把大于 $1\text{ s}^{-1}\text{ }^3\text{He}$ 作为其数据的阻断值。检测样品前均经过同样流程的本底测定, 笔者检测采用的标准样品为: 兰州市皋兰山(海拔 $2\text{ }060\text{ m}$)山顶空气(AIR-LZ2007)。本项工作的本底值(单位: cm^3/g , STP)为: $^4\text{He}=2.46\times 10^{-10}$, $^{20}\text{Ne}=4.08\times 10^{-10}$, $^{40}\text{Ar}=$

1.39×10^{-8} , 各种稀有气体在这个底值中的同位素组成与空气值接近。

3 水溶氦气资源分布现状

现阶段缺乏水溶氦气藏标准的划分, 参照我国富氦天然气藏标准划分(陈悦等, 2023; 张驰等, 2023), 并考虑氦气在水中的难溶性, 笔者选择氦气含量 $\geq 0.05\%$ 为本次水溶氦气评价下限。

调查青海省冷水泉 19 个, 温泉 34 个, 油田采油井 4 个, 地热井 3 个, 卤水井 10 个以及玛多县地震断层泉 3 个, 样本遍及除海东市以外的所有省域。结果表明, 青海省水溶氦气资源主要分布于柴达木盆地, 共和盆地次之, 南祁连盆地、玛多地区少量(图 1)。

3.1 柴达木盆地及周边

柴达木盆地是青海省首个发现水溶氦气资源的沉积盆地, 氦含量 $0.000\text{ }30\%\sim 1.100\text{ }00\%$, 20 件样品中 8 件测试结果满足评价标准, 氦含量为 $0.068\text{ }70\%\sim 1.100\text{ }00\%$, 平均为 $0.572\text{ }10\%$ (表 1)。空间上集中分布于柴中断裂以北的—里坪拗陷、柴北缘隆起两片区域, 其特征是水溶氦气资源多处于活动型断裂与氦源岩—侏罗纪泥页岩(晁海德等, 2022)叠合区的有利构造环境内, 其中祁连山南缘断裂控制大柴旦温泉, 鄂东断裂—北 1 断裂—陵间断裂—埃南断裂控制早 ZK01、鄂 2 井、鸭 ZK0401 井、坪东断裂—柴中断裂控制 9-8 孔。

3.2 共和盆地及周边

共和盆地水溶氦含量为 $0.000\text{ }47\%\sim 0.867\text{ }17\%$, 19 件样品中 6 件测试结果满足评价标准, 氦含量为 $0.052\text{ }22\%\sim 0.867\text{ }17\%$, 平均为 $0.329\text{ }16\%$ (表 2), 表明共和盆地水溶氦富集较好。水溶氦资源空间上集中于盆地东缘的青海湖南缘断裂与多禾茂断裂叠合区域、盆地西南缘的哇洪山断裂与昆中断裂叠合区域, 地下热水是溶解氦气的良好溶剂和载体, 活动性构造及断裂、热源是主要的控制因素(陈建洲等, 2023)。

3.3 南祁连盆地及周边

南祁连盆地水溶氦含量为 $0.000\text{ }30\%\sim 0.054\text{ }90\%$, 6 件样品中 1 件测试结果满足评价标准, 氦含量为 $0.054\text{ }90\%$ (表 3)。含氦的甘子河温泉(Y31)属断裂构造性温泉, 受中祁连南缘断裂带、拉脊山北缘断裂带及其次级断裂控制。断裂构造作为地下热水上涌的

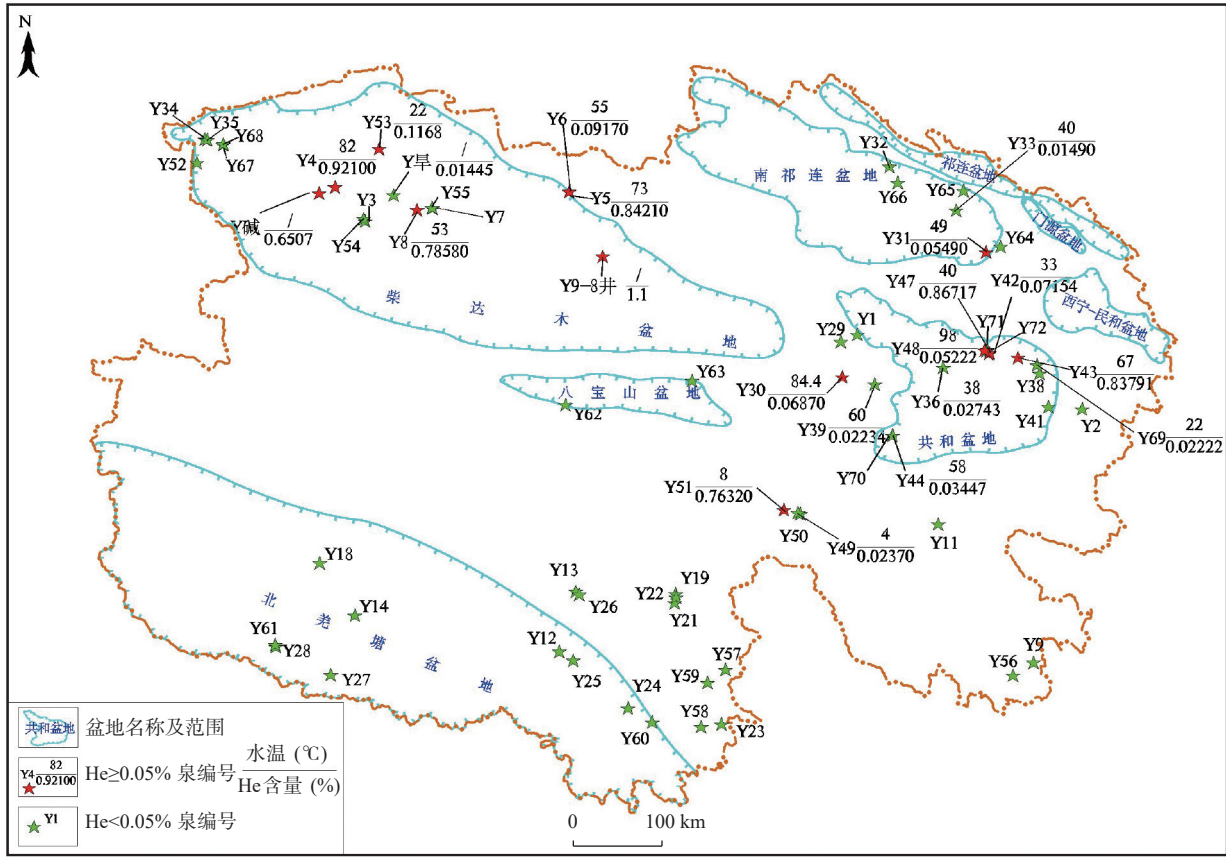


图1 青海省水溶氦气资源分布图

Fig. 1 Distribution map of water soluble helium resources in Qinghai Province

表 1 柴达木盆地水溶氦气资源含量特征

Tab. 1 Characteristics of water soluble helium resource content in the Chaidamu Basin

样品号	泉水性质	位置	水温(℃)	氦含量(%)	氖含量(%)	氩含量(%)	是否达到评价标准
Y5	温泉	大柴旦温泉山庄	73	0.842 10	0.078 20	0.945 60	是
Y6	温泉	大柴旦温泉山庄	55	0.091 70	0.002 29	0.825 30	是
Y29	温泉	都兰县果木村	65.6	0.002 10	0.000 12	0.001 30	否
Y30	温泉	都兰县热水乡东部	84.4	0.068 70	0.001 15	0.034 35	是
Y52	冷泉	茫崖市艾肯泉	19	0.000 40	0.000 00	0.480 00	否
Y63	冷泉	博鲁克斯坦河	20	0.000 30	0.000 00	0.000 20	否
Y34	采油井	茫崖市七个泉油田	30	0.004 30	0.002 15	0.430 00	否
Y35	采油井	茫崖市七个泉油田	25	0.004 30	0.002 45	0.560 00	否
Y67	采油井	茫崖市花土沟油田	20	0.001 50	0.000 40	0.170 00	否
Y68	采油井	茫崖市花土沟油田	20	0.002 40	0.000 10	0.266 40	否
Y3	卤水井	落雁山	49	0.007 70	0.001 93	0.770 00	否
Y4	卤水井	花土沟一里坪	82	0.921 00	0.001 84	0.987 50	是
Y7	卤水井	西台巴嘎雅乌	66	0.000 30	0.000 01	0.360 00	否
Y8	卤水井	西台巴嘎雅乌	53	0.785 80	0.075 00	0.834 50	是
Y53	卤水井	冷湖镇俄博梁	22	0.116 80	0.000 13	0.215 60	是
Y53	卤水井	落雁山	13	0.000 30	0.000 00	0.360 00	否
Y55	卤水井	西台巴嘎雅乌	23	0.000 30	0.000 00	0.300 00	否
Y旱	卤水井	旱ZK01	/	0.014 45	0.001 3 62	/	否
Y碱	卤水井	碱石山-11井	/	0.650 70	/	/	是
Y9-8	卤水井	全吉山9-8孔	/	1.100 00	/	/	是

表 2 共和盆地水溶氦气资源含量特征

Tab. 2 Characteristics of water soluble helium resource content in the Gonghe Basin

样品号	泉水性质	位置	水温(℃)	氦含量(%)	氖含量(%)	氩含量(%)	是否满足 评价标准
Y1	温泉	乌兰县巴硬格莉沟	40	0.000 70	0.000 04	0.420 00	否
Y36	地热井	共和县塘格木镇	38	0.027 43	/	/	否
Y37	地热井	共和县塘格木镇	38	0.028 67	/	/	否
Y38	温泉	贵德扎仓寺	93.00	0.000 53	0.001 76	0.568 96	否
Y39	温泉	兴海桑持沟	60.00	0.022 34	0.002 45	0.186 98	否
Y40	温泉	兴海桑持沟	61.00	0.024 33	0.001 26	0.003 10	否
Y41	温泉	贵德新街	62.00	0.000 88	0.002 17	0.461 95	否
Y42	温泉	共和谢玛龙哇	33.00	0.071 54	0.001 94	0.967 95	是
Y43	温泉	共和曲乃亥	67.00	0.837 91	0.002 06	1.036 06	是
Y44	温泉	兴海温泉乡	58.00	0.034 47	0.002 40	0.804 84	否
Y45	温泉	兴海温泉乡	62.00	0.055 44	0.002 07	0.519 61	是
Y46	温泉	共和阿乙亥	38.00	0.090 68	0.002 15	0.820 73	是
Y47	温泉	共和阿乙亥	40.00	0.867 17	0.002 08	0.744 65	是
Y48	地热井	共和南	98.00	0.052 22	0.003 00	0.963 33	是
Y69	地热井	贵德罗汉堂	22	0.022 22	0.003 00	0.869 43	否
Y70	冷泉	兴海温泉乡	10	0.008 28	0.002 44	0.775 07	否
Y71	冷泉	共和恰不恰	10	0.005 24	0.002 53	0.577 18	否
Y72	冷泉	共和下塔买村	23	0.000 56	0.001 94	0.514 34	否
Y73	冷泉	共和下塔买村	23	0.000 47	0.001 70	0.593 78	否

表 3 南祁连盆地水溶氦气资源含量特征

Tab. 3 Characteristics of water soluble helium resource content in the South Qilian Basin

样品号	泉水类型	位置	水温(℃)	氦含量(%)	氖含量(%)	氩含量(%)	是否满足 评价标准
Y31	温泉	刚察县达玉村	49.33	0.054 90	0.006 86	1.098 00	是
Y32	温泉	天峻县木里镇	31	0.000 30	0.000 10	0.165 00	否
Y33	温泉	热水镇北西10千米处	40	0.014 90	0.000 75	0.447 00	否
Y64	冷泉	刚察县达玉村	6	0.000 40	0.000 02	0.000 01	否
Y65	冷泉	刚察县默勒镇	21	0.004 20	0.000 20	0.002 50	否
Y66	冷泉	江仓煤业有限公司南8千米处	18	0.001 30	0.000 07	0.000 57	否

良好通道,区内以NW向、NWW的压扭性断裂为主,伴生的NE向、NNE向、NNW向张扭性断裂次之,两组断裂交汇部位是控制区内热水局部富集分布的关键地段。

3.4 玛多地区

2021年5月22日,玛多县发生震源深度17 km的7.4级地震,震后共调查出活动断裂5条,地裂缝653条,喷砂冒水点1 237个(周保等, 2023),冒水现象

集中分布于野马滩至黄河乡附近的黑河河谷、多石峡河谷两侧。笔者于震后第一时间采集水样3件,均有氦气显示,其中Y51样品氦含量高达0.763 20%,远超评价标准(表4)。对比青南大片区域泉水贫氦特征,黄河乡沿线冒水点富氦明显是受地震断裂控制。

3.5 其他区域

除上述区域外,在八宝山盆地、北羌塘盆地及其周边16个温泉、8个冷泉采集水样29件,氦含量

表 4 玛多地区水溶氦气资源含量特征

Tab. 4 Characteristics of water soluble helium resource content in Maduo Region

样品号	泉水性质	位置	水温(℃)	氦含量(%)	氖含量(%)	氩含量(%)	是否满足评价标准
Y49	地震断层泉	玛多县黄河乡	4	0.023 70	0.001 58	0.185 00	是
Y50	地震断层泉	玛多县黄河乡	8	0.001 10	0.000 31	0.120 00	否
Y51	地震断层泉	玛多县黄河乡	8	0.763 20	0.001 91	0.875 00	是

0.034 04%~0.005 40%, 平均为 0.001 17%(表 5), 远低于评价标准。

4 赋存特征

4.1 分布特征

张文等(2018)将氦源岩定义为富含铀钍、大量生成和排出氦气的岩石, 结合氦气生成原理, 氦气生成

的关键在于氦源岩中铀钍值的大小以及其 α 衰变周期。前人研究显示, 青海省各盆地与氦气生成相关的岩石包括盆地周缘花岗岩体、盆地内部隐伏磁性体及铀钍含量较高的中生代、新生代地层等(Tissot et al., 1984; 张文等, 2018)。Brown 等(2010)、张雪(2015)指出, 花岗岩、页岩生氦强度较强, 砂岩、碳酸盐岩相对较弱, 花岗岩是氦气藏形成、富集不可或缺的主力氦源岩。对比青海省水溶氦气资源分布图(图 1)和青海

表 5 其他地区水溶氦气资源含量特征

Tab. 5 Characteristics of water-soluble helium resource content in other regions

样品号	泉水性质	位置	水温(℃)	氦含量(%)	氖含量(%)	氩含量(%)
Y2	温泉	同仁市兰采乡	61	0.003 60	0.001 03	0.360 00
Y9	温泉	班玛县红军温泉	87.8	0.000 20	0.000 01	0.000 10
Y10	温泉	班玛县红军温泉	78	0.001 00	0.000 05	0.090 00
Y11	温泉	玛沁县大武镇东倾沟	25	0.002 30	0.000 11	0.230 00
Y12	温泉	杂多县然者杂哇切吉沟	29.3	0.003 70	0.000 18	0.370 00
Y13	温泉	治多县贡萨寺	29	0.002 40	0.000 11	0.240 00
Y14	温泉	格尔木市当曲中游	38	0.000 50	0.000 02	0.000 01
Y15	温泉	格尔木市当曲中游	38	0.000 20	0.000 01	0.000 00
Y16	温泉	格尔木市当曲中游	38	0.000 10	0.000 00	0.000 40
Y17	温泉	格尔木市当曲中游	38	0.000 30	0.000 01	0.001 20
Y18	温泉	青藏公路90道班	26.4	0.001 70	0.000 08	0.000 85
Y19	温泉	称多县赛柴沟	35	0.000 20	0.000 01	0.000 00
Y20	温泉	称多县赛柴沟	36	0.000 20	0.000 01	0.000 13
Y21	温泉	称多县细曲沟	42	0.000 20	0.000 01	0.000 11
Y22	温泉	称多县扎朵乡	44	0.001 80	0.000 09	1.800 00
Y23	温泉	玉树市东南你那龙沟	57.5	0.000 30	0.000 01	0.000 01
Y24	温泉	玉树州囊谦县觉拉乡	34	0.000 80	0.000 04	0.000 02
Y25	温泉	玉树杂多县扎沟	31	0.000 80	0.000 04	0.000 02
Y26	温泉	治多县西南	29	0.004 60	0.000 23	0.002 50
Y27	温泉	格尔木市萨底赛保(沱沱河以南)	25	0.000 20	0.000 01	0.000 00
Y28	温泉	青藏公路103道班	61	0.000 60	0.000 03	0.000 01
Y56	冷泉	班玛县俄昂俄加沟	13	0.000 84	0.000 03	0.840 00
Y57	冷泉	称多县直门达北	24	0.005 40	0.000 26	0.540 00
Y58	冷泉	玉树市得窝陇巴南山	9	0.000 30	0.000 01	0.000 01
Y59	冷泉	玉树市东南查盖得勒	24	0.000 50	0.000 02	0.000 01
Y60	冷泉	玉树市西南G214国道边	7	0.000 00	0.000 00	0.000 00
Y61	冷泉	青藏公路104道班	14	0.000 30	0.000 01	0.000 01
Y62	冷泉	格尔木市温泉水库秀沟	10	0.000 70	0.000 03	0.840 00
Y63	冷泉	博鲁克斯坦河	20	0.000 30	0.000 01	0.000 16

省侵入岩分布示意图(图2), 水溶氦气资源均分布于柴达木盆地、共和盆地、南祁连盆地附近, 青南大片区域未见, 这一特征印证了花岗岩是氦气资源形成不可或缺的源岩。

4.2 成因特征

因成因相异, 氦气有 ^3He 和 ^4He 等两种同位素, 其中 ^3He 基本是元素合成时所形成的原始核素, 而 ^4He 则主要是由U、Th等放射性元素经过 α 衰变所形成的产物。因此, ^3He 、 ^4He 因其成因的不同成为判别氦气来源的重要参数(张健等, 2023; 司庆红等, 2023)。不同成因的氦气所赋存的地质体也是不同的, 由此按来源又可分为幔源氦、大气源氦和壳源氦, 该分类目前应用最广。一般以 $R=\omega(^3\text{He})/\omega(^4\text{He})$ 代表氦的来源, R 值为 1.4×10^{-6} 、 2×10^{-8} 和 1.1×10^{-5} 时, 分别代表大气来源、地壳来源、地幔来源的同位素特征值。也常用样品(R)和大气(R_a)的氦同位素比值来表示样品中氦气来源特征, 即 $R/R_a=(\omega(^3\text{He})/\omega(^4\text{He}))_{\text{样品}}/(1.4\times 10^{-6})$, 当 $R/R_a>1$ 时, 表示样品中幔源氦份额大于12%; 当 R/R_a

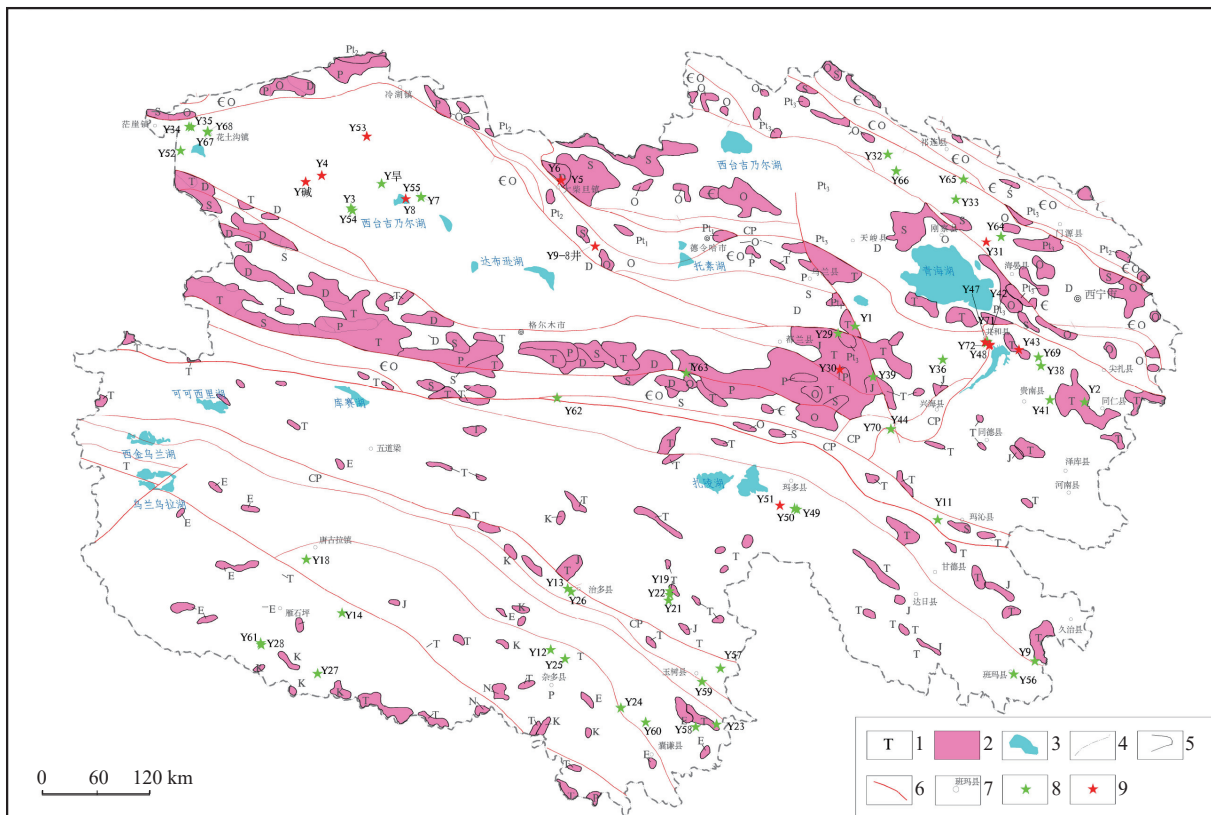
$R_a>0.1$ 时, 幔源氦份额大于1.2%; 当 $R/R_a<0.1$ 时, 认为样品中氦基本来自壳源(余琪祥等, 2013; 张云鹏等, 2016; 李玉宏等, 2018; 韩元红等, 2022)。按公式(1)(Stuart et al., 1995; 徐永昌, 1997; 张明升等, 2014; 张雪, 2015; 李玉宏等, 2017)可以知道样品中壳源和幔源所占份额。

$$\text{幔源氦}(\%) = \frac{\left(\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}\right)_{\text{样}} - \left(\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}\right)_{\text{壳}}}{\left(\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}\right)_{\text{幔}} - \left(\frac{^3\text{He}}{^4\text{He}}\right)_{\text{壳}}} \times 100\% \quad (1)$$

统计青海省内23件水溶氦同位素样品, R 值为 $0.42\times 10^{-8}\sim 11.07\times 10^{-8}$, R/R_a 在0.003~0.068, 属典型壳源型成因(表6)。如不同区域水溶氦气成因分析图所示(图3), 柴达木盆地、共和盆地、南祁连盆地水溶氦气 R 值基本为 $1\times 10^{-8}\sim 0.1\times 10^{-8}$, R/R_a 多小于0.1, 表明青海省各盆地水溶氦气基本为壳源型氦气, 幔源氦混入少, 占比仅0.02%~0.83%。

4.3 含量特征

如前所述, 青海省水溶氦气资源分布于柴达木盆



1. 侵入岩时代; 2. 中酸性侵入岩; 3. 湖泊; 4. 省界; 5. 侵入岩界线; 6. 断裂构造; 7. 地理点;
8. 达到评价标准的采样点; 9. 未达评价标准的采样点

图2 青海省侵入岩及样品分布图

Fig. 2 Distribution map of intrusive rocks and samples in Qinghai province

表 6 氦气同位素特征及幔源氦占比表

Tab. 6 Characteristics of helium isotopes and the proportion of helium from mantle sources

地区	样品号	氦含量(%)	R/Ra		³ He/ ⁴ He(10 ⁻⁸)		幔源氦占比(%)	来源
			比值	平均值	比值	平均值		
柴达木盆地	Y30	0.068 70	0.041		5.68		0.34	壳源
	Y4	0.921 00	0.030		4.21		0.20	壳源
	Y53	0.116 80	0.010	0.030	1.95	4.29	0.00	壳源
	Y早	0.014 45	0.050		6.59		0.42	壳源, 少量幔源
	Y9-8	1.100 00	0.020		3.00		0.09	壳源
	Y36	0.027 43	0.030		4.23		0.20	壳源
	Y37	0.028 67	0.028		3.92		0.17	壳源
	Y39	0.022 34	0.008		1.19		0.07	壳源
	Y40	0.024 33	0.023		3.21		0.11	壳源
	Y41	0.000 88	0.068		9.58		0.69	壳源, 少量幔源
共和盆地	Y42	0.071 54	0.020		2.74		0.07	壳源
	Y43	0.837 91	0.003		0.42		0.14	壳源
	Y44	0.034 47	0.023		3.26		0.11	壳源
	Y45	0.055 44	0.033	0.056	5.26	7.93	0.30	壳源
	Y46	0.090 68	0.012		1.74		0.02	壳源
	Y47	0.867 17	0.018		2.52		0.05	壳源
	Y48	0.052 22	0.013		1.84		0.01	壳源
	Y69	0.022 22	0.013		1.84		0.01	壳源
	Y70	0.008 28	0.009		1.25		0.07	壳源
	Y71	0.005 24	0.079		11.07		0.83	壳源, 少量幔源
南祁连盆地	Y72	0.000 56	0.041		5.80		0.35	壳源
	Y73	0.000 47	0.007		0.99		0.09	壳源
	Y31	0.054 90	0.05	0.050	7.09	7.09	0.46	壳源, 少量幔源

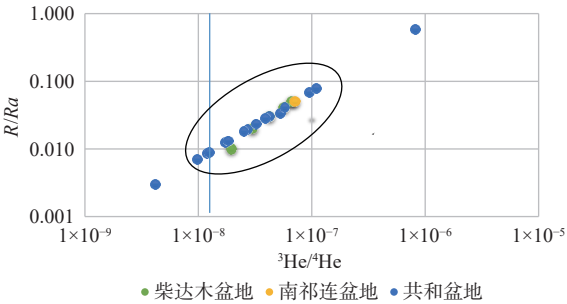


图3 不同区域水溶氦气成因分析图

Fig. 3 Genetic analysis of water-soluble helium in different regions

地、共和盆地、南祁连盆地和玛多地区。按平均含量分析,玛多地区水溶氦含量最大(平均为 0.763 20%) (图 4),柴达木盆地次之(平均为 0.572 10%),共和盆地较低(平均为 0.329 16%),南祁连盆地最低(平均含量 0.054 90%),而青南大片区域基本不存在水溶氦资源。但考虑样本均一性、代表性,笔者认为柴达木盆地水溶氦含量最高,达 1.100 00%,共和盆地、玛多地

区次之,南祁连盆地最低。

青海省水溶氦气主要为壳源氦,氦主要为 ²³⁵U、²³²Th 经 α 衰变产生,因此利用铀钍衰变形成氦提出的公式②、公式③对不同区域壳源氦生成量进行估算。

$$V_u = \frac{156.88}{235}(e^{\lambda t} - 1) \cdot v \cdot \rho \cdot x \tag{2}$$

$$V_{Th} = \frac{134.47}{232}(e^{\lambda t} - 1) \cdot v \cdot \rho \cdot y \tag{3}$$

式中,λ 分别为 9.848 5×10⁻¹⁰(a⁻¹)、4.947 5×10⁻¹⁰(a⁻¹);t 为氦源岩的形成的绝对年龄(a);v 为氦源岩的体积(km³);ρ 为氦源岩的密度(g/cm³);x 为氦源岩中的含量(10⁻⁶);y 为氦源岩中钍的含量(10⁻⁶)。

由公式(2)、公式(3)计算得出(表 7):柴达木盆地生氦量最大,为 39.49×10⁸ m³;共和盆地、南祁连盆地次之,为 2.16×10⁸ m³、1.90×10⁸ m³;玛多地区最小,为 1.46×10⁸ m³。不难看出,不同区域生氦量与水溶氦气含量非完全正相关关系,这与水溶氦气藏特殊的气水置换机理相关,除初始生氦量外,温度、矿化度等也

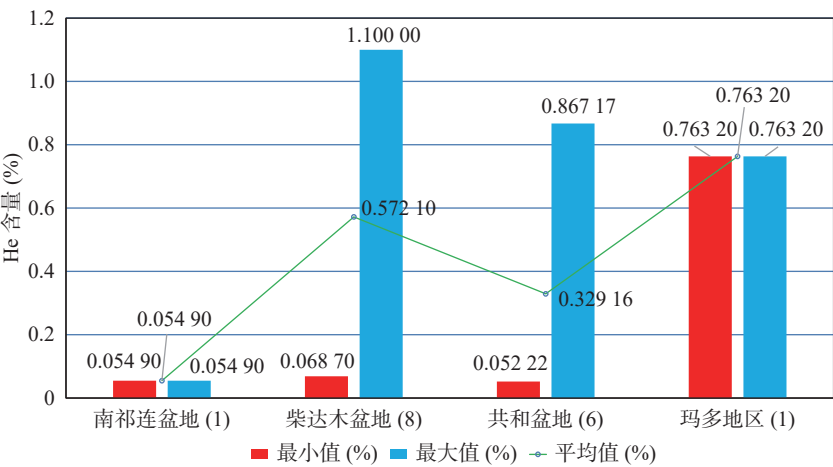


图4 不同区域水溶氦氮含量对比图

Fig. 4 Comparison chart of water soluble helium and helium content in different regions

表 7 水溶氦气生氦量计算表

Tab. 7 Calculation table for helium production from water-soluble helium gas

地区	地层/岩性	年龄 (Ma)	U(10 ⁻⁶)	Th(10 ⁻⁶)	面积 (km ²)	高度加深度 或厚度(km)	体积 (km ³)	密度 (g/cm ³)	生氦量 (10 ⁸ m ³)
柴达木盆地	/	/	/	/	/	/	/	/	39.49 ^①
南祁连盆地	泥盆纪 花岗岩	400	19.60	14.50	1 165.00	0.80	932.00	2.50	1.90
玛多地区	三叠纪巴颜喀拉群	220	12.90	10.93	2 821.00	0.80	2 256.80	2.30	1.46
共和盆地	印支期中酸性侵入岩	236	17.08 ^②	30.65 ^②	875.26	1.90	1 662.99	2.50	2.16

注：①引自晁海德等(2022)；②引自陈建洲等(2023)。

是影响载体含氮量的重要因素之一。柴达木盆地生氮量、氮含量均为最高,是花岗岩、烃源岩多源供氮(晁海德, 2022)及相对高的矿化度共同作用的结果;共和盆地氮源岩(干热岩)较高的温度(陈建洲, 2023)是其生氮量中等而氮含量较高的关键;玛多地区生氮量较低而氮含量较高是地震引起幔源氮混入的直观

指示。

4.4 与温度的关系

达到评价标准的 16 件样品中, 12 件样品温度大于 25 ℃, 两件样品小于 25 ℃, 两件样品未采集温度数据(表 8)。考虑 Y51 样品受地震影响的相对瞬时性, 不代表样品采集区的水溶氮含量背景值, 研究区实际

表 8 满足评价标准的样品氮含量、温度统计表

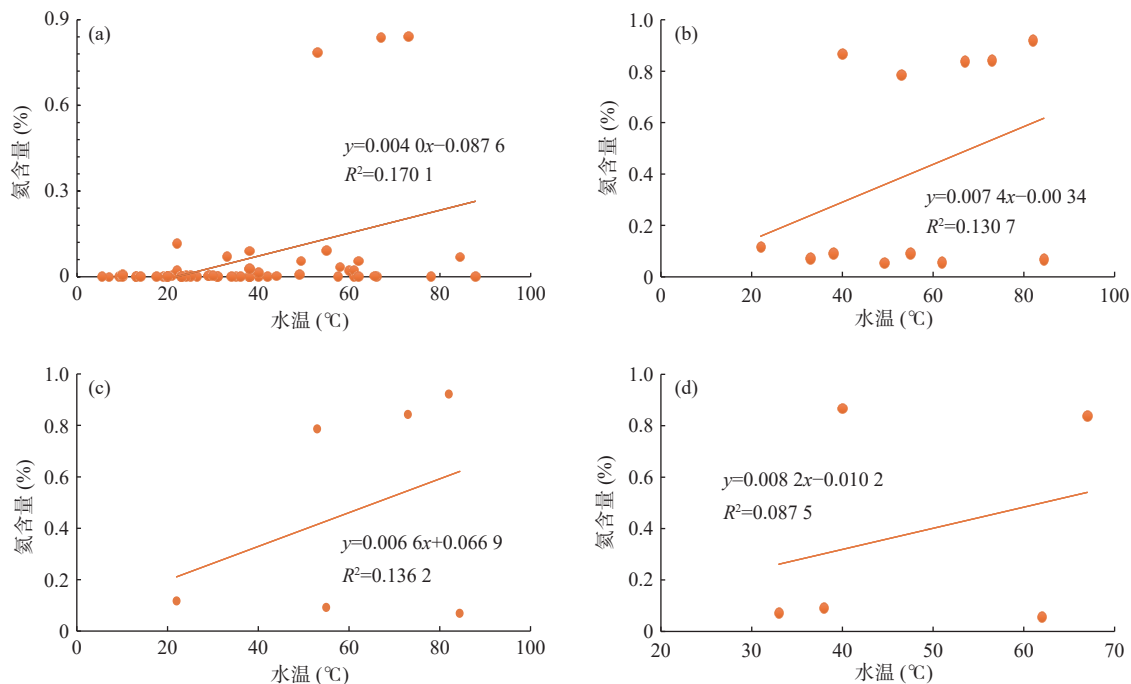
Tab. 8 Statistical table for helium content and temperature of samples that meete valuation criteria

样品号	水温(℃)	氮含量(%)	样品号	水温(℃)	氮含量(%)
Y4	82	0.921 00	Y45	62.00	0.055 44
Y5	73	0.842 10	Y46	38.00	0.090 68
Y6	55	0.091 70	Y47	40.00	0.867 17
Y8	53	0.785 80	Y48	98.00	0.052 22
Y30	84.4	0.068 70	Y51	8	0.763 20
Y31	49.33	0.054 90	Y53	22	0.116 80
Y42	33.00	0.071 54	Y碱	/	0.650 70
Y43	67.00	0.837 91	Y9-8	/	1.100 00

只有 1 件冷泉样品氦含量达到评价标准(Y53)。表明青海省水溶氦气资源基本赋存于水温大于 25 ℃ 的温泉(卤水)中,冷泉中极少赋存。

分别对比所有样品、达到评价标准样品以及不同

区域氦气含量与水温相关图(图 5):青海省水溶氦气藏氦含量与温度呈弱正相关关系,但这一特征明显与二氧化碳、甲烷等气体在水中溶解度随温度升高而降低的特征相异。



a. 所有数据氦含量与水温相关图; b. 达到评价标准样品氦含量与水温相关图;
c. 柴达木盆地氦含量与水温相关图; d. 共和盆地氦含量与水温相关图

图5 氦气含量与水温相关图

Fig. 5 Correlation chart between helium content and water temperature

4.5 与矿化度的关系

王沐众等(2016)、张书林等(2021))研究显示,气体在水中的溶解度除了与气体性质、压强、温度有关外,也与水的矿化度相关。分别统计有矿化度数据的全部样品(19 组)、达到评价标准样品(3 组)以及不同区域

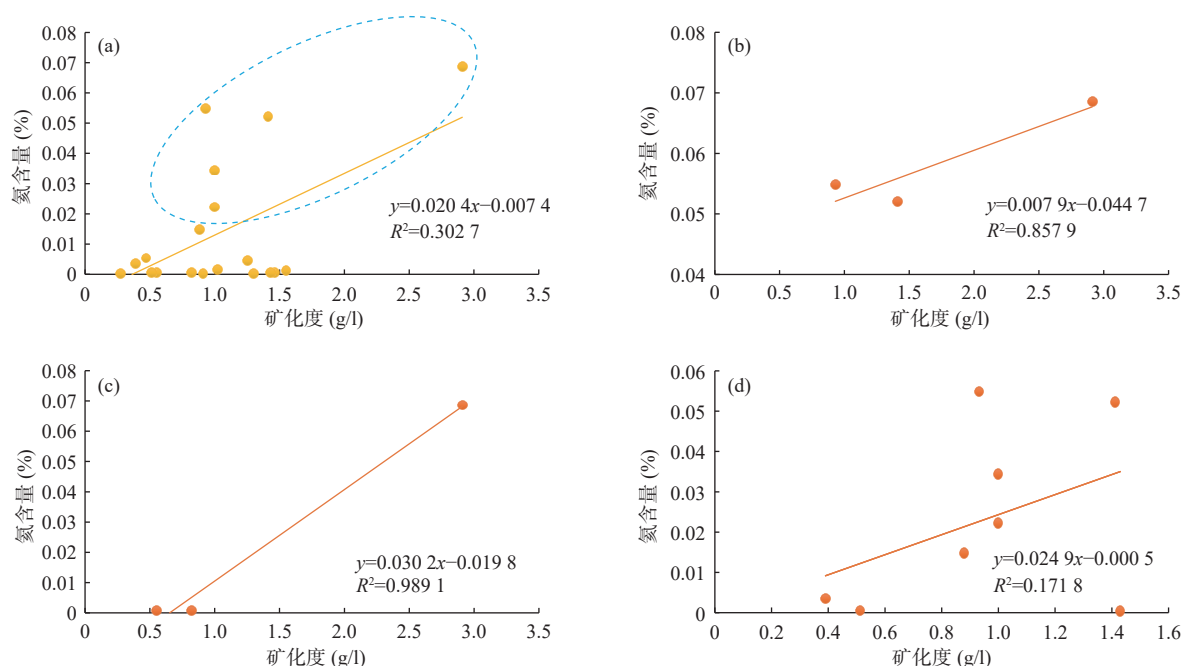
(柴达木盆地 3 组,共和盆地 8 组)数据(表 9),发现氦气在水中的溶解度均随着矿化度的增大而升高,满足评价的水溶氦资源基本赋存在矿化度大于 1 g/l 的水中(图 6)。表明氦气在淡水中极难溶解,在微咸水、咸水、卤水中的溶解度较高,这一特征与水中甲烷溶解度随矿

表 9 氦含量、矿化度统计表

Tab. 9 Statistical table of helium content and mineralization

样品号	氦含量 (%)	矿化度 (g/l)	样品号	氦含量 (%)	矿化度 (g/l)
Y1	0.000 70	0.55	Y38	0.000 53	1.43
Y2	0.003 60	0.39	Y39	0.022 34	1.00
Y9	0.000 20	0.91	Y44	0.034 47	1.00
Y18	0.001 70	1.02	Y48	0.052 22	1.41
Y23	0.000 30	1.30	Y57	0.005 40	0.47
Y26	0.004 60	1.25	Y62	0.000 70	0.82
Y28	0.000 60	1.46	Y64	0.000 40	0.27
Y30	0.068 70	2.91	Y66	0.001 30	1.55
Y31	0.054 90	0.93	Y72	0.000 56	0.51
Y33	0.014 90	0.88			

注:矿化度数据源于马兴华等(2012)。



a. 所有数据氦含量与矿化度相关图; b. 达到评价标准样品氦含量与矿化度相关图;
c. 柴达木盆地氦含量与矿化度相关图; d. 共和盆地氦含量与矿化度相关图

图6 氦气含量与矿化度相关图

Fig. 6 Correlation chart between helium content and mineralization degree

化度先升高后降低的特征相异(王沐众等, 2016)。

5 结论

(1) 青海省水溶氦气资源主要分布于柴达木盆地, 共和盆地次之, 南祁连盆地、玛多地区少量。其中, 柴达木盆地水溶氦含量最大, 共和盆地、玛多地区次之, 南祁连盆地最低, 而青南大片区域基本不存在水溶氦资源, 这与青南地区侵入岩不甚发育的地质特征相吻合。

(2) 柴达木盆地、共和盆地、南祁连盆地水溶氦气 R 值和 R/Ra 值分别为 0.42×10^{-8} 、 11.07×10^{-8} 和 $0.003 \sim 0.068$, 属典型的壳源型氦气。

(3) 估算柴达木盆地、共和盆地、南祁连盆地、玛多地区生氦量, 分别为 $39.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.90 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $1.46 \times 10^8 \text{ m}^3$, 且不同区域生氦量与氦含量不具正相关关系。

(4) 温度、矿化度是影响水溶氦含量的因素之一, 其中氦含量与温度呈弱正相关关系, 与矿化度呈正相关关系, 且水温大于 25°C 的温泉及矿化度大于 1 g/l 的咸水是青海省水溶氦资源赋存的环境。

致谢: 中国科学院西北生态环境资源研究院王

国仓专家、青海省第五地质勘查院王瑾高级工程师在氦气组分分析、赋存规律研究方面给予指导、帮助, 在此表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- 晁海德, 陈建洲, 王国仓, 等. 柴达木盆地水溶氦气资源的发现及富集机理[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 61-73.
- CHAO Haide, CHEN Jianzhou, WANG Guocang, et al. Discovery and Enrichment Mechanism of Water Soluble Helium Resources in Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 61-73.
- 陈建洲, 谢菁, 刘立波, 等. 青海共和盆地与干热岩体相关氦气成藏条件浅析[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(3): 460-468.
- CHEN Jianzhou, XIE Jing, LIU Libo, et al. Analysis of helium accumulation conditions related to dry-hot rock mass in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 460-468.
- 陈悦, 陶士振, 杨怡青. 中国氦气地球化学特征、聚集规律与前景展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(1): 145-167.
- CHEN Yue, TAO Shizhen, YANG Yiqing. Geochemistry characteristics, accumulation regularity and development prospect of helium in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(1): 145-167.
- 付锁堂, 马达德, 陈琰, 等. 柴达木盆地阿尔金山前东段天然气

- 勘探[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(6): 1-13.
- FU Suotang, MA Dade, CHEN Yan, et al. Natural Gas Exploration in Eastern Segment of Alkin Piedmont, Northern Qaidam Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(6): 1-13.
- 韩伟, 李玉宏, 卢进才, 等. 陕西渭河盆地富氦天然气异常的影响因素[J]. 地质通报, 2014, 33(11): 1836-1841.
- HAN Wei, LI Yuhong, LU Jincai, et al. The factors responsible for the unusual content of helium-rich natural gas in the Weihe Basin, Shaanxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(11): 1836-1841.
- 高宇, 刘全有, 朱东亚, 等. 稀有气体示踪地质流体及氦气富集研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(6): 84-95.
- GAO Yu, LIU Quanyou, ZHU Dongya, et al. Advances in research on noble gas as tracers of geofluids and helium enrichment[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 84-95.
- 韩元红, 罗厚勇, 薛宇泽, 等. 渭河盆地地热水伴生天然气成因及氦气富集机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(2): 277-287.
- HAN Yuanhong, LUO Houyong, XUE Yuze, et al. Genesis and helium enrichment mechanism of geothermal water-associated gas in Weihe Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(2): 277-287.
- 李玉宏, 卢进才, 李金超, 等. 渭河盆地天然气成因特征及其意义[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2011, 26(5): 11-16.
- LI Yuhong, LU Jincai, LI Jinchao, et al. Genetic characteristics of the natural gas in Weihe Basin and its significance[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition)*, 2011, 26(5): 11-16.
- 李玉宏, 张文, 王利, 等. 壳源氦气成藏问题及成藏模式[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(4): 565-572.
- LI Yuhong, ZHANG Wen, WANG Li, et al. Several issues in the accumulation of crust-derived helium and the accumulation model[J]. *Journal of Xi'an University of science and Technology*, 2017, 37(4): 565-572.
- 李玉宏, 周俊林, 张文, 等. 渭河盆地氦气成藏条件与资源前景[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 6-10.
- 柳永刚, 张翔, 刘子锐, 等. 甘肃省首个高品位氦气盆地的发现及勘探前景[J]. 甘肃地质, 2020, 29(3): 29-36.
- LIU Yonggang, ZHANG Xiang, LIU Zirui, et al. The First Discovery and Exploration Prospect of High Grade Helium Basin in Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, 2020, 29(3): 29-36.
- 李云波, 王成涛, 宋爱育, 等. 我国富氦盆地成藏模式对煤系氦气富集和勘探的启示[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(6): 22-47.
- LI Yunbo, WANG Chengtao, SONG Dangyu, et al. Implications of helium accumulation models in helium-rich basins in China for the enrichment and exploration of helium in coal measures[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 22-47.
- 卢雪梅. 氦气成藏机制研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 封 2.
- 马兴华, 李积成, 谢继香, 等. 青海省综合水文地质图说明书[R]. 青海省水文地质工程地质勘察院, 2012.
- 秦胜飞, 李济远. 世界氦气供需现状及发展趋势[J]. 石油知识, 2021(5): 44-45.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan. Current situation and development trend of helium supply and demand in the world[J]. *Petroleum Knowledge*, 2021(5): 44-45.
- 秦胜飞, 李济远, 梁传国, 等. 中国中西部富氦气藏氦气富集机理——古老地层水脱氦富集[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1203-1217.
- QIN Shengfei, LI Jiyuan, LIANG Chuanguo, et al. Helium enrichment mechanism of helium rich gas reservoirs in central and western China: Degassing and accumulation from old formation water[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(8): 1203-1217.
- 秦胜飞, 周国晓, 李济远, 等. 氦气与氮气富集耦合作用及其重要意义[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1981-1992.
- QIN Shengfei, ZHOU Guoxiao, LI Jiyuan, et al. The coupling effect of helium and nitrogen enrichment and its significance[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(11): 1981-1992.
- 司庆红, 曾威, 刘行, 等. 临汾-运城盆地氦气富集要素及成藏条件[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 129-141.
- SI Qinghong, ZENG Wei, LIU Xing, et al. Analysis of Helium Enrichment Factors and Reservoir Forming Conditions in Linfen-Yuncheng Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 129-141.
- 陶小晚, 李建忠, 赵力彬, 等. 我国氦气资源现状及首个特大型富氦储量的发现: 和田河气田[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 1024-1041.
- TAO Xiaowan, LI Jianzhong, ZHAO Libin, et al. Helium Resources and Discovery of First Supergiant Helium Reserve in China: Hetianhe Gas Field[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 1024-1041.
- 王沐众, 牛永斌, 王保玉. 矿化度对甲烷溶解度影响的探讨[J]. 煤炭技术, 2016, 35(1): 178-180.
- WANG Muzhong, NIU Yunbin, WANG Baoyu. Discussion about Relationship between Water's Salinity and Methane's Solubility[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(1): 178-180.
- 吴颜雄, 马达德, 刘君林, 等. 柴西地区基岩油藏形成的石油地质条件分析[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1689-1696.
- WU Yanxiong, MA Dade, LIU Junlin, et al. Geological Conditions of Basement Oil Pools in Western Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(11): 1689-1696.
- 伍劲, 高先志, 马达德, 等. 柴达木盆地东坪地区基岩风化壳特征[J]. 现代地质, 2017, 31(1): 129-141.
- WU Jin, GAO Xianzhi, MA Dade, et al. Characteristics of the Base-

- ment Weathering Crust in Dongping Area, Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 2017, 31(1): 129–141.
- 辛志源, 陈践发, 王杰, 等. 川东南地区不同构造样式页岩气中氦气差异富集机理[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 70–83.
- XIN Zhiyuan, CHEN Jianfa, WANG Jie, et al. Mechanisms underlying differential helium enrichment in shale gas of varying structural styles in the southeastern Sichuan Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 70–83.
- 徐永昌. 天然气中氦同位素分布及构造环境[J]. *地质前缘*, 1997, 4(3–4): 185–190.
- XU Yongchang. Helium isotope distribution and tectonic environment in natural gas[J]. *Geoscience Frontiers*, 1997, 4(3–4): 185–190.
- 杨振宁, 李永红, 刘文进, 等. 柴达木盆地北缘全吉山地区氦气形成地质条件及资源远景分析[J]. *中国煤炭地质*, 2018, 30(6): 64–70.
- YANG Zhenning, LI Yonghong, LIU Wenjin, et al. Geological Conditions of Helium Formation and Resource Prospect Analysis in Quanjishan Area, Northern Qaidam Basin[J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(6): 64–70.
- 余琪祥, 史政, 王登高, 等. 塔里木盆地西北部氦气富集特征与成藏条件分析[J]. *西北地质*, 2013, 46(4): 215–222.
- YU Qixiang, SHI Zheng, WANG Denggao, et al. Analysis on Helium Enrichment Characteristics and Reservoir Forming Conditions in Northwest Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 215–222.
- 张弛, 关平, 张济华, 等. 中国氦气资源分区特征与成藏模式[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(4): 656–671.
- ZHANG Chi, GUAN Pin, ZHANG Jihua, et al. Zoning characteristics of helium resources and helium accumulation model in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 656–671.
- 张健, 张海华, 贺君玲, 等. 东北地区氦气成藏条件与资源前景分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 117–128.
- ZHANG Jian, ZHANG Haihua, HE Junling, et al. Analysis of Helium Accumulation Conditions and Resource Prospect in Northeast China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 117–128.
- 张明升, 张金功, 张建坤, 等. 氦气成藏研究进展[J]. *地下水*, 2014(3): 189–191.
- ZHANG Mingsheng, ZHANG Jingong, ZHANG Jiankun, et al. Research progress of helium gas accumulation[J]. *Groundwater*, 2014(3): 189–191.
- 张书林, 刘永茜, 孟涛. 不同矿化度水对煤的甲烷解吸影响的试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(7): 110–117.
- ZHANG Shulin, LIU Yongqian, MENG Tao. Experimental study on influence of water with different salinity on methane desorption performance of coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(7): 110–117.
- 张文, 李玉宏, 王利, 等. 渭河盆地氦气成藏条件分析及资源量预测[J]. *天然气地球科学*, 2018, 29(2): 236–244.
- ZHANG Wen, LI Yuhong, WANG Li, et al. The analysis of helium accumulation conditions and prediction of helium resource in Weihe Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(2): 236–244.
- 张雪. 渭河盆地天然气及氦气成藏条件与资源量预测[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- ZHANG Xue. Accumulation Conditions and Resource Prediction of Nature Gas and Helium Gas in Weihe Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- 张云鹏, 李玉宏, 卢进才, 等. 柴达木盆地北缘富氦天然气的发现-兼议成藏地质条件[J]. *地质通报*, 2016, 35(2): 364–371.
- ZHANG Yunpeng, LI Yuhong, LU Jincai, et al. The discovery and origin of helium-rich gas on the northern margin of the Qaidam Basin. *Geological Bulletin of China*[J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(2): 364–371.
- 张哲, 王春燕, 王秋晨, 等. 中国氦气市场发展前景展望[J]. *油气与新能源*, 2022, 34(1): 36–41.
- ZHANG Zhe, WANG Chunyan, WANG Qiuchen, et al. Development Prospects of China's Helium Market[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(1): 36–41.
- 周保, 李五福, 董福辰, 等. 青海省玛多县“5·22 M s7.4地震”地表破裂与次生灾害发育特征[J]. *地质通报*, 2023, 42(1): 84–91.
- ZHOU Bao, LI Wufu, DONG Fuchen, et al. The development characteristics of surface fracture and secondary hazards at 5·22 M s7.4 earthquake in Maduo County, Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 84–91.
- 曾旭, 田继先, 杨桂茹, 等. 柴北缘侏罗纪凹陷结构特征及石油地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(5): 54–63.
- ZENG Xu, TIAN Jixian, YANG Guiru, et al. Structure characteristics and petroleum geological significance of Jurassic sags at the northern margin of Qaidam Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(5): 54–63.
- Brown A A. Formation of high Helium gases: a guide for explorationists[C]. AAPG convention, New Orleans, Louisiana. USA, 2010.
- Stuart F M, Burnard P G, Taylor R P. Resolving mantle and crustal contributions to ancient hydrothermal fluids: He-Arisotopes in fluid inclusions from Dae Hwa W—Mo mineralization, South Korea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(22): 4663–4673.
- Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence: A New Approach to Oil and Gas Exploration[M]. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer Verlag, 1984, 1G538.