

引用格式: 刘成林, 张亚雄, 王馨佩, 等. 中国与美国氦气地质条件和资源潜力对比及启示[J]. 世界石油工业, 2024, 31(2): 1-10.

LIU C L, ZHANG Y X, WANG X P, et al. Comparison and enlightenment of helium geological conditions and resource potential between China and the United States[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(2): 1-10.

中国与美国氦气地质条件和资源潜力对比及启示

刘成林^{1, 2}, 张亚雄³, 王馨佩^{1, 2}, 王海东^{1, 2}, 洪思婕^{1, 2}, 丁振刚^{1, 2},
陈践发^{1, 2}, 许诺³, 朱玉新⁴, 刘克胜⁵, 罗娜⁶, 李文研⁷

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油油气和新能源分公司, 北京 100007;
5. 中国石油长庆油气田公司第十二采油厂, 甘肃 庆阳 745400; 6. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 7. 中国石油青海油田公司勘探事业部, 甘肃 敦煌 736202)

摘要: 鉴于氦气资源的战略重要性、美国氦气资源条件的优越性及目前中国氦气供需矛盾的严峻性, 开展中国与美国氦气地质条件和资源潜力对比显得极为有意义。通过对比中国与美国氦气的地质条件、资源量和储量数据, 基于氦气产量历史数据, 结合全球氦气需求分析, 采用哈伯特模型、高斯模型和资源量-储量约束下的产量预测模型, 开展2023—2030年全球氦气产量预测, 为中国氦气勘探开发工作提供参考。分析结果: (1) 与美国所在的北美地台规模大且构造稳定相比, 中国地台规模小且经历多期构造演化, 中国氦气分布呈现点多、面广、类型多样的特点; (2) 尽管目前国内外对中国氦气的资源量有不同认识, 通过对中国与美国含氦天然气资源潜力的对比, 表明中国氦气资源丰富, 资源量将会随着对氦气勘探程度和认识程度的不断加深而动态增长; (3) 预测显示, 2023—2025年为中国氦气生产起步发展阶段, 2026—2030年为快速增长阶段; (4) 对中国氦气勘探开发的4点启示: 坚定中国氦气勘探开发的信心、提出并完善适合中国地质条件的氦气富集理论、加大研发氦气勘探开发技术、2030年前中国氦气供应来自国际和中国国内2个渠道。

关键词: 中国; 美国; 氦气; 地质条件; 资源潜力; 启示

中图分类号: TE122

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)02-0001-010 **DOI:** 10.20114/j.issn.1006-0030.20231207001

Comparison and enlightenment of helium geological conditions and resource potential between China and the United States

LIU Chenglin^{1, 2}, ZHANG Yaxiong³, WANG Xinpei^{1, 2}, WANG Haidong^{1, 2}, HONG Sijie^{1, 2}, DING Zhengang^{1, 2},
CHEN Jianfa^{1, 2}, XU Nuo³, ZHU Yuxin⁴, LIU Kesheng⁵, LUO Na⁶, LI Wenyan⁷

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China; 4. PetroChina Oil, Gas & New Energies Company, Beijing 100007, China;
5. The 12th Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Qingyang, Gansu 745400, China; 6. Petroleum Exploration and Production Research Institute, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China;
7. Exploration Division, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: Due to the strategic importance of helium resources, the superiority of helium resource conditions in the United States of America (USA), and the severity of current helium supply and demand contradiction in China, it is of great significance to conduct a comparison of helium geological conditions and resource potential between China and the USA. By comparing the geological conditions, resources, and reserves data of helium between China and the USA, based on historical helium production data and combined with global helium demand analysis, the Hubbert model, Gaussian model, and resource reserve constrained production prediction models are used to predict global, US, and China's helium production from 2023 to 2030, providing reference for China's helium exploration and development work. (1) Compared with the North American platform where the USA is located, the Chinese platform is relatively small and has undergone multiple stages of tectonic evolution. The distribution of helium in China shows the characteristics of "multiple points, wide areas, and diverse types".

收稿日期: 2023-12-07

修回日期: 2024-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目“富氦天然气成藏机制及氦资源分布预测技术”(2021YFA071900)

第一作者: 刘成林(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 从事天然气成藏和资源评价研究。E-mail: liucl@cup.edu.cn

(2) Although there are different understandings of China's helium resources both domestically and internationally, by comparing potential of natural gas resources containing helium between China and the USA, it is shown that China has abundant helium resources, and the amount of resources will dynamically increase with the deepening of exploration and understanding of helium. (3) The prediction shows that China's helium production is in the initial development stage from 2023 to 2025, and in the rapid growth stage from 2026 to 2030. (4) There are four enlightenments to China's helium exploration and development, strengthening China's confidence in helium exploration and development, proposing and improving helium enrichment theories suitable for China's geological conditions, increasing research and development of helium exploration and development technologies, and supplying helium from both international and domestic channels before 2030.

Keywords: China; the United States; helium; geological conditions; resource potential; enlightenment

0 引言

氦气是一种广泛应用于科技和工业领域的惰性气体,作为现代高科技产业无可替代的关键元素,氦气是全球重要的战略资源,其战略地位得到多个国家的高度重视,全球氦气资源主要集中在美国、阿尔及利亚和俄罗斯等少数国家^[1]。自2018年美国内政部(Department of the Interior, DOI)发布关键矿产名单以来,澳大利亚、加拿大分别于2019年、2021年公布了关键矿产资源清单,其中都包含氦气。虽然2020年欧盟将氦气移出其关键矿产名单,但鉴于氦气供应的高集中度,欧盟表示将继续关注全球氦气资源和产业动态。从氦气具有的特殊用途、不可替代性,以及全球供需现状可知,中国氦气安全形势十分严峻,若不采取相关措施,未来将会受到更大的制约。

美国从20世纪20年代开始,开展氦气资源评价^[2-4]。中国天然气提氦工业起步较晚,氦气资源对外依存度极高,进口氦气的渠道和来源地又极为集中和有限,严重制约了中国高科技产业发展创新,对国家安全、经济发展造成一定影响^[5-7]。含氦天然气的成藏条件与常规天然气既有相同特征,又具有其独特性,氦气的成因、来源、运移富集机理与常规天然气(烃类气体)有明显差异^[8]。在绝大多数天然气藏中氦的含量低于0.05%,一般称之为贫氦气藏,而将氦含量大于0.1%的天然气藏称为富氦天然气藏^[1]。沉积盆地中天然气藏的氦气含量与大地构造背景、基底岩石和上覆沉积盖层的时代具有密切关系^[9-10]。已有研究表明,中国与美国含氦天然气的地质背景、富集条件、资源分布特征有异同点^[11-26]。根据烃类天然气成藏理论,考虑氦气的无机成因特点,结合对近期中国国家重点研

发项目的深入研究,本文对比分析中国与美国含氦天然气的地质条件、资源量、储量及产量等,为中国含氦天然气勘探开发提出建议。

1 氦气地质条件对比

目前,世界上已发现的绝大部分富氦天然气田主要分布在基底花岗岩发育的克拉通内部或周边,克拉通时代越古老,氦气田的氦气丰度越高^[27]。

1.1 美国

美国国内氦气产量多数来自于中部和落基山地区,氦气探明储量来自11个州大约104个氦气田(见表1、图1),其中大多分布在横跨堪萨斯州、俄克拉荷马州和德克萨斯州的胡果顿—潘汉德(Hugoton-Panhandle)气田、堪萨斯州的巴拿马(Panoma)气田、俄克拉荷马州的凯斯(Keyes)气田、德克萨斯州的潘汉德西(Panhandle West)气田和克里夫赛德(Cliffside)气田,以及怀俄明州的莱利山脊(Riley Ridge)气田^[27]。

根据地质条件与氦气运聚过程,美国氦气可分为3种聚集模式:(1)克拉通古隆起基底花岗岩供氦气-烃类伴生型。该模式氦气含量较高,储量大,典型气田如胡果顿—潘汉德气田、凯斯气田、巴拿马气田及克里夫赛德气田。(2)克拉通边缘活动带前基底花岗岩供氦气-二氧化碳伴生型。该模式氦气含量高、储量较大,典型气田如莱利山脊气田、圣约翰圆顶(St John's Dome)气田。(3)克拉通边缘活动带基底花岗岩供氦气-氮气伴生型。该模式氦气含量高、储量较大,典型气田如兰德巴特(Rands Butte)气田、哈利圆顶(Harley Dome)气田。美国主要含氦天然气田地质条件及氦气含量、储量数据见表1。

表1 中国与美国典型含氦天然气田地质条件对比^[28-35]Tab.1 Comparison of geological conditions of typical Helium gas fields between China and the United States^[28-35]

国家	气田名称	天然气类型	氦气含量及储量数据	所属盆地及构造背景	氦源岩	储盖组合	聚集模式
美国	胡果顿—潘汉德气田	富氢烃类气	氦气平均含量0.49%、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比0.14~0.26、氦气探明储量 $154 \times 10^8 \text{ m}^3$	阿纳达科盆地、克拉通盆地古隆起	古元古代—中元古代(1.8~1.3 Ga)基底花岗岩	储层为二叠系Wolfcamp统的Chase组、Council Grove组碳酸盐岩；盖层为Chase组厚层膏岩层	
	凯斯气田	富氢烃类气	氦气平均含量1.96%	阿纳达科盆地、克拉通盆地内部隆起带	基底花岗岩	储层为下石炭统Morrow组砂岩	克拉通古隆起基底花岗岩供氦气-烃类伴生型
	巴拿马气田	富氢烃类气	氦气平均含量0.42%	阿纳达科盆地、克拉通盆地内部隆起带	基底花岗岩	储层为二叠系Wolfcampian组白云岩	
	克里夫赛德气田	富氢烃类气	氦气平均含量1.73%	潘汉德盆地、克拉通盆地内部隆起带	基底花岗岩	储层为二叠系Wichita Albany、Wolf Campbed组白云岩；盖层为Panhandlelime组膏岩	
	圣约翰圆顶气田	富氦二氧化碳气	氦气平均含量0.73%、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比0.394~0.455	霍尔布鲁克盆地、克拉通盆地边缘活动带的断背斜	前寒武系结晶基底	储层为二叠系Supai组、盖层为不透水硬石膏	克拉通边缘活动带前基底花岗岩供氦气-二氧化碳伴生型
	莱利山脊气田	富氦二氧化碳气	氦气含量0.3%~2.7%、氦气探明储量 $13.9 \times 10^8 \text{ m}^3$	大绿河盆地、克拉通盆地活动断裂带	前寒武系结晶基底	储层为下石炭统Madison组灰岩	
	兰德巴特气田	富氢氮气	氦气平均含量0.52%、氦气探明储量 $4.81 \times 10^8 \text{ m}^3$	大绿河盆地、克拉通盆地边缘活动断裂带	前寒武系结晶基底	储层为下石炭统Madison组灰岩	克拉通边缘活动带基底花岗岩供氦气-氮气伴生型
	哈利圆顶气田	富氢氮气	氦气平均含量3.62%	帕拉朵克斯盆地、克拉通盆地隆起	基底花岗岩、下元古界片麻岩和片岩、中元古界深成火成岩	储层为侏罗系San Rafael组Entrada砂岩	
	威远气田	富氢烃类气	氦气含量0.12%~0.34%、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比2.9、氦气探明储量 $93.98 \times 10^8 \text{ m}^3$	四川盆地乐山—龙女寺古隆起核部的穹隆背斜	前震旦系花岗岩、寒武系筇竹寺组黑色页岩	储层为震旦系灯影组白云岩；盖层为下寒武统筇竹寺组泥页岩	
	东胜气田	富氢烃类气	氦气平均含量0.133%、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比1~10、氦气探明储量 $2.44 \times 10^8 \text{ m}^3$	鄂尔多斯盆地伊盟隆起	基底花岗岩、石炭系—二叠系煤和暗色泥岩	储层为二叠系山西组和下石盒子组碎屑砂岩；盖层为石千峰组厚层泥岩	克拉通古隆起基底及沉积层多元供氦气-烃类伴生型
中国	庆阳气田	富氢烃类气	氦气平均含量0.125%	鄂尔多斯盆地中央古隆起	基底花岗岩、石炭系—二叠系煤、暗色泥岩、铝土岩	储层为二叠系太原组、山西组和下石盒子组碎屑砂岩；盖层为石千峰组厚层泥岩	
	和田河气田	富氢烃类气	氦气平均含量0.32%、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比9.8、氦气探明储量 $1.96 \times 10^8 \text{ m}^3$	塔里木盆地巴楚隆起南缘玛扎塔格构造带	中元古界花岗岩、寒武系暗色泥岩	储层为石炭系生屑灰岩段及奥陶系潜山碳酸盐岩；盖层为石炭系含膏泥岩	
	金秋气田	富氢烃类气	氦气含量0.05%~0.1%，平均值0.071%	四川盆地川中平缓褶皱带和川北低平褶皱带的过渡区域	三叠系须家河组煤系、侏罗系暗色泥岩	储层为侏罗系砂岩；盖层为侏罗系泥岩	克拉通斜坡沉积岩供氦气-烃类伴生型
	神木气田	富氢烃类气	氦气平均含量0.054%	鄂尔多斯盆地伊陕斜坡	石炭系—二叠系煤和暗色泥岩	储层为二叠系山西组和下石盒子组碎屑砂岩；盖层为石千峰组厚层泥岩	

表1 (续)

国家	气田名称	天然气类型	氦气含量及储量数据	所属盆地及构造背景	氦源岩	储盖组合	聚集模式
中国	花沟气田	富氦氮气	氦气含量2.08%~3.08%	渤海湾盆地济阳坳陷、东营凹陷西南与惠民凹陷东南结合部位的断鼻带	壳幔复合源氦气	储层为新近系明化镇组砂岩；盖层为明化镇组泥岩	裂谷壳幔复合供氦气-氮气伴生型
	黄桥气田	富氦二氧化碳气	氦气含量0.013%~1.06%，最高达1.34%	下扬子板块苏北盆地南京凹陷东北端的黄桥复向斜带	幔源二氧化碳、氮气、氦气、高自然伽玛砂层放射性成因的氦气、二叠统栖霞组灰岩变质成因的二氧化碳	储层为新近系下盐城组二段砂岩；盖层为下盐城组泥岩	裂谷壳幔复合供氦气-二氧化碳伴生型



图1 美国主要含氦天然气田分布

Fig.1 Distribution of major helium-bearing natural gas fields in the United States

数据来源: USGS 2018 Minerals Yearbook-Helium

1.2 中国

目前,中国在中部地区的四川、鄂尔多斯等盆地,西部地区的塔里木、柴达木等盆地,东部地区的松辽、海拉尔、苏北、渤海湾等盆地,南方地区的三水盆地等区域已发现富氦、高氦天然气藏,部分地区在地热井、温泉中也有氦气资源量发现。

勘探实践表明,中国具有富氦、高氦天然气藏的形成条件,目前已发现的氦气富集模式主要分为4种:(1)克拉通古隆起基底及沉积层多元供氦气-烃类伴生型。该模式氦气含量较高,资源量大,典型气田如威远气田、和田河气田、东胜气田、庆阳气田。(2)克拉通斜坡沉积岩供氦气-烃类伴生型。该模式氦气含量较高,资源量较大,典型气田如金秋气田、神木气田。(3)裂谷壳幔复合供氦气-氮气伴生型。该模式氦气含量高,资源量较大,典型气田如花沟气田。(4)裂谷壳幔复合供氦气-二氧化碳伴生型。该模式氦气含量高,资源量较大,典型气田如黄桥气田。中国主要含氦天然气田地质条件及氦气含量、资源量数据见表1。

通过对比可知,美国和中国氦气资源的共性特点是氦气地质条件较好,资源潜力大,同时美国和中国在氦气地质条件方面又各有自身特点。美国氦气地质条件的主要特点:(1)美国所在的北美地台规模大、构造稳定。(2)氦气田规模大、丰度高。(3)以壳源氦气为主,氦气主要与烃类伴生。(4)氦气富集类型相对简单,以克拉通古隆起基底花岗岩供氦气-烃类伴生型为主。中国氦气地质条件的主要特点:(1)中国的华北、塔里木、扬子地台规模较小,地史上经历加里东、海西、印支、燕山、喜山多个构造旋回。(2)氦气田分布呈现点多、面广、类型多样,氦气藏规模较小、丰度偏低但数量多。(3)氦气平面上分布广,从东部地区至西部地区、北部地区至南部地区;层系上分布广,从元古界、古生界、中生界至新生界。(4)氦气赋存于常规气、致密气、页岩气、煤层气、水溶气中。(5)中西部构造稳定区以壳源氦气为主,氦气主要与烃类伴生;东部构造岩浆活动区以壳幔源氦气为主,氦气主要与氮气、二氧化碳非烃类伴生。(6)氦气富集类型较多,有克拉通古隆起基底及沉积层多元供氦气-烃类伴生型、克拉通沉积岩供氦气-烃类伴生型、裂谷壳

幔复合供氦气-氮气伴生型、裂谷壳幔复合供氦气-二氧化碳伴生型等。

2 氦气资源量、储量对比

根据美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)2023年发布的数据,截至2022年年底,全球氦气资源量 $489 \times 10^8 \text{ m}^3$,氦气储量 $144.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ (见表2)^[36]。

中国可利用的氦气资源量应在 $47 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,主要分布在塔里木、鄂尔多斯、四川、柴达木等盆地^[37]。在中国氦气资源量方面,中美评价结果差异较大,主要原因是二者的评价范围、方法与参数、资源量内涵等有较大差别。

表2 主要国家氦气资源量、储量比较^[36]
Tab.2 Comparison of helium resource and reserve in major countries^[36]

地区/国家	资源量/ 10^8 m^3	储量/ 10^8 m^3
美国	207	85.61
中国	11	-
卡塔尔	101	-
阿尔及利亚	82	18
俄罗斯	68	17
澳大利亚	-	-
加拿大	20	-
波兰	-	24
南非	-	-
其他国家	-	-
全球	489	144.61

3 氦气产量和需求量对比及预测

3.1 历史与现状

自2013年以来,全球氦气年产量总体平稳。受美国氦气产量下降的影响,2014年全球氦气年产量同比下降 $0.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,其后至2022年,全球氦气年产量相对稳定,年产量值在 $1.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上下波动。2013—2022年,全球氦气累计产量持续稳定增长,累计生产氦气 $16.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ (见图2)。2013—2022年,美国氦气年产量大体呈现缓慢下降趋势,其中仅在

2017年有一次年产量的上升,之后继续处于下降趋势。2013—2022年,美国累计生产氦气 $9.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ (见图3)。美国在氦气产量供应和开采利用方面发挥着重要作用,美国氦气产量下降对全球氦气产量有重大影响。中国天然气提氦工业起步较晚,在20世纪70年代才建立起第一套提氦装置,目前中国氦气产量总体处于较低水平。2013—2022年,中国氦气年产量持续增长,累计生产氦气 $373 \times 10^4 \text{ m}^3$ (见图4)。

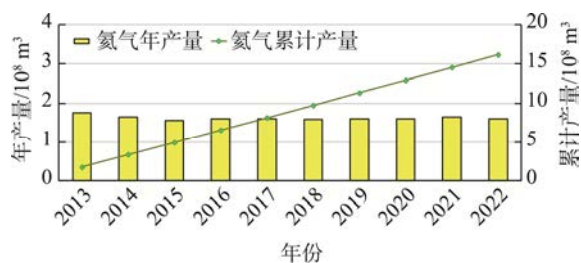


图2 2013—2022年全球氦气年产量和累计产量

Fig.2 Global annual and cumulative helium production from 2013 to 2022

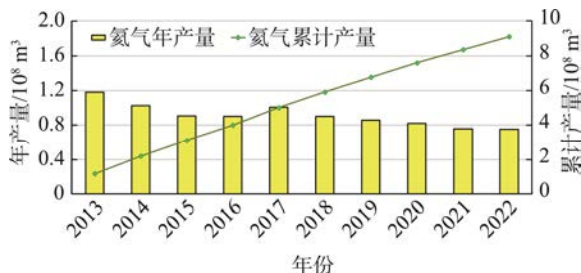


图3 2013—2022年美国氦气年产量和累计产量

Fig.3 Annual and cumulative helium production in the United States from 2013 to 2022

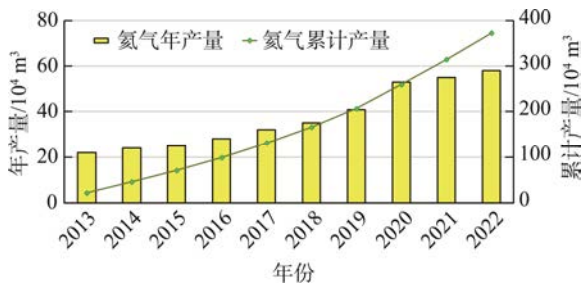


图4 2013—2022年中国氦气年产量和累计产量

Fig.4 Annual and cumulative helium production in China from 2013 to 2022

2011年,全球氦气市场需求 $1.75 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中亚洲(占比27%)超越欧洲(占比21%),成为全球第

二大市场。2017年,全球氦气市场需求 $1.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中亚洲需求 $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3$,接近需求最大的美国市场($0.54 \times 10^8 \text{ m}^3$)。2020年,全球氦气市场需求 $2.27 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

中国一直是氦气消费大国,2016—2021年期间中国氦气年消费量均在 $0.18 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。2022年,中国氦气消费量 $2.240 \times 10^4 \text{ m}^3$,进口量 $2.217 \times 10^4 \text{ m}^3$,对外依存度高达92%。从产销平衡角度来看,中国自有氦气产量是远远不足的,需要从卡塔尔、美国、澳大利亚等氦气产量大国大批量进口氦气。

3.2 未来预测

基于氦气地质条件和资源潜力,根据2013—2022年中国和美国氦气历史产量和需求量的规模曲线,利用哈伯特模型、高斯模型和资源量-储量约束下的产量预测模型等不同方法,对2023—2030年全球、美国和中国的氦气产量和需求进行分析预测。

近10年来,全球氦气年产量基本保持较平稳趋势,但近年来由于美国氦气年产量的下降,导致全球氦气年产量略有所减少。相比其他方法,高斯模型对全球氦气产量历史阶段数据的预测值与实际值吻合度较高,本文采用高斯模型对全球氦气产量进行分析预测。预测结果表明,2023—2030年,全球氦气产量将呈现缓慢上涨趋势,2030年全球氦气年产量将达到 $1.81 \times 10^8 \text{ m}^3$,2013—2030年全球将累计生产氦气 $30.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ (见图5)。美国氦气产量近年来正在经历逐年下降的阶段,预计中国将是未来的氦气产量大国,同时卡塔尔等国家的氦气产量也将逐年增加,这不仅可以弥补美国氦气产量下降带来的影响,同时也将满足日渐增加的全球氦气需求增长。

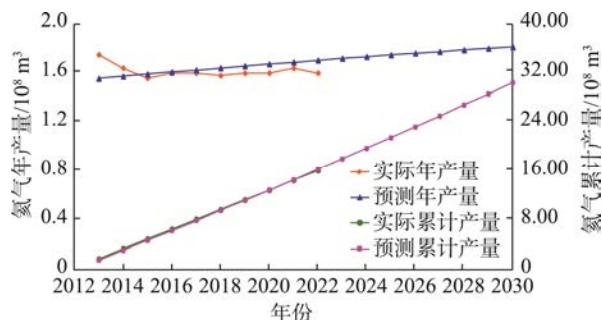


图5 全球氦气年产量和累计产量的高斯模型预测结果

Fig.5 Gauss model predictions of global annual and cumulative helium production

美国作为氦气资源大国，其氦气储量和产量在全球均占有绝对优势，但近年来美国氦气产量较之前略有下降。相比其他方法，哈伯特模型对美国氦气产量历史阶段数据的预测值与实际值吻合度较高，本文采用哈伯特模型对美国氦气产量进行分析预测。预测结果表明，美国氦气产量将继续呈现下降趋势，预计2030年氦气年产量 $0.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2013—2030年美国将累计生产氦气 $14.61 \times 10^8 \text{ m}^3$ （见图6）。

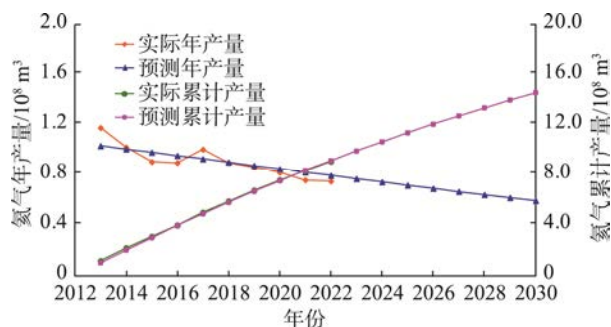


图6 美国氦气年产量和累计产量的哈伯特模型预测结果
Fig.6 Hubbert model predictions of annual and cumulative helium production in the United States

氦气作为高新技术产业发展和影响国家安全的战略性稀有气体资源，中国一直在着力加强对氦气勘探开发的投入，开展关键技术装备攻关研究，近年来发现多个含氦气田并投入生产。目前，中国已建成四川盆地威远气田、塔里木盆地阿克莫木气田及和田河气田等氦气生产基地。基于中国2013—2022年氦气产量数据，采用资源量-储量约束下的产量预测模型对未来中国氦气产量进行预测，中国2023—2030年氦气产量将经历2个发展阶段：（1）2023—2025年起步发展阶段。由于氦气勘探开发的建产期长，开发设施建成投入大，该阶段中国氦气产量增速较慢，预计2025年中国氦气年产量 $800 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，2013—2025年将累计生产氦气 $1300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。（2）2026—2030年快速增长阶段。随着中国氦气勘探开发技术逐步发展成熟，已探明的含氦气田持续投入开发，中国氦气产量将得以大幅提升。预计2030年中国氦气年产量 $1600 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，2013—2030年将累计生产氦气 $7400 \times 10^4 \text{ m}^3$ （见图7）。

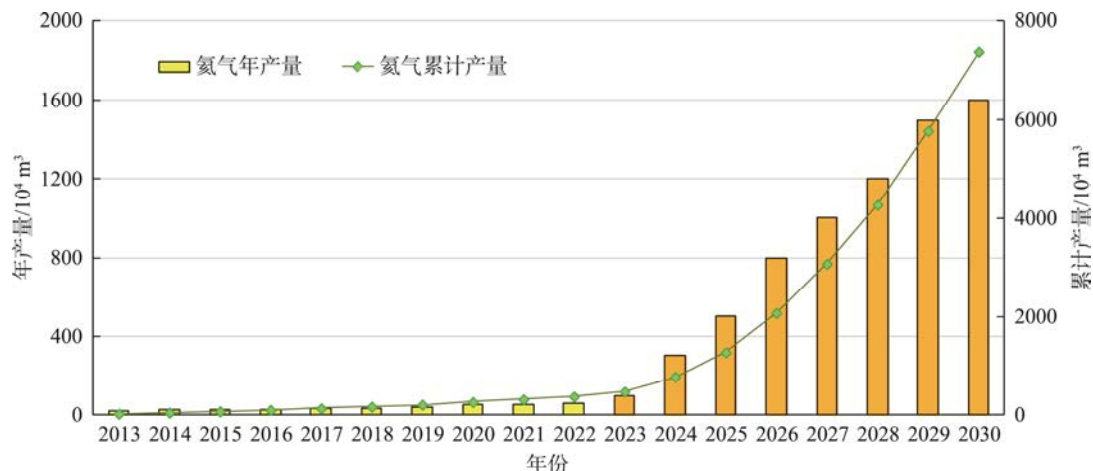


图7 中国氦气产量预测结果
Fig.7 Prediction of helium production in China

在氦气需求方面，预计全球氦气需求量每年将以5%的速度增长，到2030年全球氦气需求或将达到 $3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中，欧洲和美国市场的占比将继续下降，亚太地区氦气需求旺盛，预计年增长率5%~6%，美国约55%的氦气将出口至亚洲地区。根据全球氦气产量缓慢增长的预测结果，而未来需求量增幅过快，将导致世界氦气整体呈现供不应求的局面。随着即将到来的世界氦气供需格局快速变化，为满足中国氦气需求量的不断加大，中国必须加大氦气勘探开

发力度，争取早日实现氦气供需平衡、自给自足。

4 对中国氦气勘探开发的启示

4.1 坚定中国氦气勘探开发的信心

由于勘探时间短、资料基础有限，目前国内外对中国氦气的资源量有不同认识，美国地质调查局评价结果为 $11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，中国学者初步评价结果近 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，差异非常大。通过对中国与美国含氦

天然气资源潜力的对比,表明中国氦气资源丰富,资源认识规律也显示中国氦气资源量将会随着对氦气勘探程度和认识程度的不断加深而动态增长。坚定氦气勘探的信心,持续投入勘探工作量,发现和探明更多的高氦和富氦气田并及时投入开发,是中国氦气需求保障的资源基础。

4.2 亟需适合中国地质条件的氦气富集理论

与美国所在的北美地台规模大、构造稳定相比,中国三大地台规模小、经历多期构造演化,氦气分布呈现点多、面广、类型多样的特点,使氦气勘探发现过程更加曲折、更加漫长,亟需提出并逐步完善克拉通古隆起基底及沉积层多元供氦气-烃类伴生型、克拉通沉积岩供氦气-烃类伴生型、裂谷壳幔复合供氦气-氮气伴生型、裂谷壳幔复合供氦气-二氧化碳伴生型等适合中国地质条件的氦气富集理论,加大力度寻找与天然气伴生的氦气资源。此外,还需要以氦气为主体,提出氦气生成-运移-聚集的无机气富集理论,为扭转中国氦气资源极度依靠进口的局面提供关键的理论依据和支撑。

4.3 亟需氦气勘探开发技术研发

氦气具有分子量小、活动性强、“惰性”、不容易被发现等特点,中国需要对重力、磁法、电法、化探、地震、钻井、录井、测井、测试、实验室分析测试等勘探技术和水平井、大型水力压裂等开发技术进行攻关。目前,在国家、石油公司的科研项目支持下,中国在氦气检测、运移物理模拟、分子动力学数值模拟等实验室分析测试技术研发方面,已取得较大进展。随着大数据、人工智能等现代科学技术日渐成熟并应用到多个工业领域,应及时将该类技术引入到氦气勘探开发领域,提高氦气勘探效率,推进氦气勘探开发进程。

4.4 2030年前中国氦气供应来自2个渠道

目前,中国92%的氦气来自进口,中国对氦气资源的需求仍将不断增长,在2030年前中国氦气供应将依赖国际和国内2个渠道。国际上,美国在全球氦气市场上拥有绝对话语权,在美国对氦气实施保护、储备、限制和禁运等措施的影响下,中国氦气供需矛盾凸显,保障氦气安全稳定进口显得尤为重要。立足国际形势和中国资源现状,中国的氦气生产中长期规划将分2步走,2023—2025年为起步发展阶段,2026—2030年为快速增长阶段。从长远

看,保持氦气产量快速增长是保障中国氦气持续稳定供应的基石。

5 结论

(1) 中国和美国氦气地质条件较好,资源潜力大,但各有特点。美国所在的北美地台规模大、构造稳定;氦气田规模大、丰度高;以壳源氦气为主,氦气主要与烃类伴生;氦气富集类型相对简单,以克拉通古隆起基底花岗岩供氦气-烃类伴生型为主。而中国的地台规模小且经历多个构造旋回,氦气田分布呈现“点多、面广、类型多样”的特点。

(2) 尽管目前国内外对中国氦气的资源量有不同认识,通过对中国与美国含氦天然气资源潜力的对比,表明中国氦气资源丰富,资源量将会随着对氦气勘探程度和认识程度的不断加深而动态增长。预测显示,中国氦气生产2023—2025年为起步发展阶段,2026—2030年为快速增长阶段。

(3) 对中国氦气勘探开发的4点启示:中国氦气资源丰富,坚定氦气勘探开发的信心;地台规模小且构造旋回多,亟需适合中国地质条件的氦气富集理论;鉴于氦气的自身特点和人工智能等现代科技的快速发展,亟需氦气勘探开发技术研发;2030年前中国氦气供应来自国际和国内2个渠道。

参考文献:

- [1] 陈践发,刘凯旋,董勃伟,等. 天然气中氦资源研究现状及我国氦资源前景[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(10): 1436-1449.
CHEN J F, LIU K X, DONG Q W, et al. Research status of helium resources in natural gas and prospects of helium resources in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(10): 1436-1449.
- [2] PIERCE A P, GOTT G B, MYTTON J W. Uranium and helium in the Panhandle gas field Texas, and adjacent areas[R]. U.S. Geological Survey Professional Paper 454-G, 1964: 1-57.
- [3] OZIMA M, IGARASHI G. The primordial noble gases in the Earth: a key constraint on Earth evolution models[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2000, 176(2): 219-232.
- [4] 刘成林,丁振刚,陈践发,等. 鄂尔多斯盆地氦源岩特征及生氦潜力[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1546-1554.
LIU C L, DING Z G, CHEN J F, et al. Characteristics and helium-generating potential of helium source rocks in the

- Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1546-1554.
- [5] 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 Z, WANG C Y, WANG Q C, et al. Development prospects of China's helium market[J]. *Petroleum and New Energy*, 2022, 34(1): 36-41.
- [6] BRADSHAW A M, HAMACHER T. Nuclear fusion and the helium supply problem[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2013, 88(9-10): 2694-2697.
- [7] 王晓锋, 刘文汇, 李晓斌, 等. 氦气资源的形成聚集与中国氦资源前景[C]//中国矿物岩石地球化学学会第17届学术年会论文摘要集, 2019: 1154-1155.
- WANG X F, LIU W H, LI X B, et al. The Formation and accumulation of helium resources and the prospects of helium resources in China[C]//Summary Collection of Papers at the 17th Academic Annual Conference of Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2019: 1154-1155.
- [8] BROWN A. Origin of helium and nitrogen in the Panhandle-Hugoton field of Texas, Oklahoma, and Kansas, United States[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(2): 369-403.
- [9] DIVEENA D. Helium: Exploration methodology for a strategic resource[Z]. 2017.
- [10] FAIRHURST B, EWING T, KINDSAY B. West Texas (Permian) super basin, United States: Tectonics, structural development, sedimentation, petroleum systems, and hydrocarbon reserves[J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(6): 1099-1147.
- [11] 常兴浩, 宋凯. 巴什托构造石炭系小海子组高氦气藏成藏机理浅析[J]. *天然气工业*, 1997, 17(2): 18-20.
- CHANG X H, SONG K. Analysis of reservoir-forming mechanism of high-helium pool in the carboniferous of Xiaohaizi formation of Bashitou structure[J]. *Natural Gas Industry*, 1997, 17(2): 18-20.
- [12] 冯子辉, 霍秋立, 王雪. 松辽盆地北部氦气成藏特征研究[J]. *天然气工业*, 2001, 21(5): 2-12.
- FENG Z H, HUO Q L, WANG X. A study of helium reservoir formation characteristics in the north part of Songliao Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(5): 2-12.
- [13] 曹忠祥, 车燕, 李军亮, 等. 济阳拗陷花沟地区高含He气藏成藏分析[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(4): 395-399.
- CAO Z X, CHE Y, LI J L, et al. Accumulation analysis on a helium-enriched gas reservoir in Huagou area, the Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(4): 395-399.
- [14] 王平在, 李明生, 王江. 海拉尔盆地乌尔逊含氦二氧化碳气藏石油地质特征及勘探前景[J]. *特种油气藏*, 2003(6): 9-12.
- WANG P Z, LI M S, WANG J. Petroleum geology and exploration potential of Wuerxun helium-bearing CO₂ gas reservoir in Hailaer Basin[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2003(6): 9-12.
- [15] 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(5): 473-480.
- DAI J X. Pool-forming periods and gas sources of Weiyuan gas field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(5): 473-480.
- [16] 刘全有, 戴金星, 金之钧, 等. 塔里木盆地前陆区和台盆区天然气的地球化学特征及成因[J]. *地质学报*, 2009, 83(1): 107-114.
- LIU Q Y, DAI J X, JIN Z J, et al. Geochemistry and genesis of natural gas in the foreland and platform of the Tarim Basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 2009, 83(1): 107-114.
- [17] 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): 215-221.
- YU Q X, SHI Z, WANG D G, et al. Analysis on helium enrichment characteristics and reservoir forming conditions in northwest Tarim Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(4): 215-221.
- [18] 魏国齐, 王东良, 王晓波, 等. 四川盆地高石梯—磨溪大气田稀有气体特征[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 533-538.
- WEI G Q, WANG D L, WANG X B, et al. Characteristics of noble gases in the large Gaoshiti-Moxi gas field in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 533-538.
- [19] 薛华锋, 杨春, 陶士振, 等. 松辽盆地火山岩储层天然气藏He同位素组成累积效应[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(1): 109-115.
- XUE H F, YANG C, TAO S Z, et al. Accumulative effect of helium isotope in gas volcanic reservoir in Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(1): 109-115.
- [20] 作宗涛, 刘兴旺, 李孝甫, 等. 稀有气体同位素在四川盆地元坝气藏气源对比中的应用[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(7): 1072-1077.
- WU Z T, LIU X W, LI X F, et al. The application of noble gas isotope in gas-source correlation of Yuanba reservoir, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(7): 1072-1077.
- [21] 马明, 范桥辉. 常规天然气伴生氦气成藏条件: 以柴达木盆地北缘地区为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(4): 587-600.
- MA M, FAN Q H. Accumulation conditions of helium in natural conventional gas reservoir: Case study of the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(4): 587-600.
- [22] 张晓宝, 周飞, 曹占元, 等. 柴达木盆地东坪氦工业气田发现及氦气来源和勘探前景[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(11): 1585-1592.
- ZHANG X B, ZHOU F, CAO Z Y, et al. Finding of Dongping economic helium gas field in the Qaidam Basin,

- and exploration prospect[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(11): 1585-1592.
- [23] 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 W, LI Y H, WANG L, 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.
- [24] 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 X. Accumulation conditions and resource prediction of nature gas and helium gas in Weihe Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [25] National Minerals Information Center. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook[Z]. 2018.
- [26] YAKUTSENI V P. World helium resources and the perspectives of helium industry development[J]. *Neftegazovaya Geologiya Teoriya I Praktika*, 2014, 9(1): 27-36.
- [27] BRENNAN S T, RIVERA J L, VARELA B A, et al. National assessment of helium resources within known natural gas reservoirs[J]. 2021. DOI:10.3133/sir20215085.
- [28] USGS. National helium dataset web map[EB/OL]. [2023-12-19]. <https://eerscmap.usgs.gov/heapp/>.
- [29] 刘凯旋, 陈践发, 付晓, 等. 威远气田富氦天然气分布规律及控制因素探讨[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(4): 12-21.
LIU K X, CHEN J F, FU R, et al. Discussion on distribution law and controlling factors of helium-rich natural gas in Weiyuan gas field[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2022, 46(4): 12-21.
- [30] 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 X W, LI J Z, ZHAO L B, et al. Helium resources and discovery of first supergiant helium reserve in China: Hetianhe gas field[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 1024-1041.
- [31] 何发岐, 王付斌, 王杰, 等. 鄂尔多斯盆地东胜气田氦气分布规律及特大型富氦气田的发现[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(1): 1-10.
HE F Q, WANG F B, WANG J, et al. Helium distribution of Dongsheng gas field and discovery of a super large helium-rich gas field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(1): 1-10.
- [32] 顾延景, 张保涛, 李孝军, 等. 济阳拗陷花沟地区氦气成藏控制因素探讨: 以花501井为例[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 257-266.
GU Y J, ZHANG B T, LI X J, et al. Discussion on helium resource accumulation mechanism in Huagou Area of Jiyang Depression: Taking well Hua 501 as an example[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 257-266.
- [33] 王杰, 刘文汇, 秦建中, 等. 苏北盆地黄桥CO₂气田成因特征及成藏机制[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(6): 826-834.
WANG J, LIU W H, QIN J Z, et al. Reservoir forming mechanism and origin characteristics in Huangqiao carbon dioxide gas field, north Jiangsu Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(6): 826-834.
- [34] USGS. U.S. Geological survey mineral commodity summaries 2023 data release[EB/OL]. [2023-12-19]. <https://doi.org/10.5066/P9WCYUI6>.
- [35] PACHECO N, ALI S F. Helium resources of the United States, 2007[J]. 2008.
- [36] USGS. Mineral commodity summaries 2023[EB/OL]. [2023-12-19]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023.pdf>.
- [37] 陈福利, 李欣, 闫林, 等. 中国氦气资源特征与氦资源勘查储备战略[C]//中国地球物理学会首届全国矿产勘查大会论文集, 2021: 638-652.
CHEN F L, LI X, YAN L, et al. Helium resources, exploration and reserve strategy in China[C]// *Proceedings of the First National Mineral Exploration Conference of the Chinese Geophysical Society*, 2021: 638-652.

(编辑: 王环 王克楠)