



引文格式: 蔡鑫磊, 李谦益, 张阳, 等. 渭河盆地固市凹陷华州探区新近纪构造运动与沉积作用耦合关系及其对氦气成藏的控制[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 11–23. DOI: 10.12401/j.nwg.2024130

Citation: CAI Xinlei, LI Qianyi, ZHANG Yang, et al. Coupling Relationship between Neogene Tectonism and Sedimentation and Its Controlling of Helium Accumulation in Huazhou Exploration Area, Gushi Sag, Weihe Basin[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 11–23. DOI: 10.12401/j.nwg.2024130

渭河盆地固市凹陷华州探区新近纪构造运动与沉积作用耦合关系及其对氦气成藏的控制

蔡鑫磊¹, 李谦益^{1,*}, 张阳¹, 张国强¹, 李正¹, 范明璞¹, 王宝文², 李萌瑶¹

(1. 陕西燃气集团有限公司, 陕西 西安 710016; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119)

摘要: 氦气是广泛应用于高新技术产业的稀缺性资源, 而中国氦气供应长期依赖进口。渭河盆地固市凹陷华州探区氦气成藏地质条件优越, 是氦气勘探的有利区带。氦气探井钻探成果表明, 断裂体系和有利储集相带的空间展布与相互配置关系是氦气富集成藏的关键, 对新近纪构造运动与沉积作用耦合关系开展研究, 将有助于进一步查明区内断裂活动规律与沉积相空间展布特征, 对于明确氦气资源勘探部署具有重要意义。结合邻区已积累的多种低温热年代学数据, 区内钻井、录井、测井、岩心、地震及 C-He 同位素值等资料综合分析结果显示, 秦岭造山带新近纪以来的多阶段快速隆升事件导致研究区断陷作用加剧, 发育秦岭北缘深大断裂并伴生有一系列次级断层, 为深部氦气及烃类载体气向上运移提供有利的运移通道; 蓝田-灞河组下段的巨厚砾岩层是上新世时期秦岭造山带快速隆升的沉积响应结果, 以发育扇三角洲扇根亚相为主, 而上段岩性主要为砂岩、砂质泥岩及泥岩互层, 发育扇中-扇缘沉积亚相。蓝田-灞河组层段所采气样的 C、He 同位素特征显示, 研究区内发育有煤型甲烷气且氦气来源以壳源为主; 张家坡期主要以发育浅湖相沉积体系为特征, 薄层砂岩体有望成为氦气成藏的有利储集相带。张家坡组发育的厚层泥岩被认为是区内有利的生物气烃源岩层段及区域重要盖层, 自下而上可构成完整的氦气成藏生运储盖组合, 可作为氦气勘探的重要区带。

关键词: 渭河盆地; 固市凹陷; 华州探区; 构造运动; 沉积特征; 氦气成藏

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)05-0011-13

Coupling Relationship between Neogene Tectonism and Sedimentation and Its Controlling of Helium Accumulation in Huazhou Exploration Area, Gushi Sag, Weihe Basin

CAI Xinlei¹, LI Qianyi^{1,*}, ZHANG Yang¹, ZHANG Guoqiang¹, LI Zheng¹, FAN Mingpu¹, WANG Baowen², LI Mengyao¹

(1. Shaanxi Gas Group Co., Ltd, Xi'an 710016, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2025-01-25; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 深地国家科技重大专项“盆地边缘天然氦富集与探测(SQ2025AAA060128)、陕西省地质勘查基金项目“陕西省华州-华阴地区地热水及氦气普查”(陕地勘金字[2021]38号)联合资助。

作者简介: 蔡鑫磊(1969-), 男, 正高级会计师, 博士, 主要从事氦气勘探及矿产经济研究。E-mail: caixinleiwh@163.com。

*通讯作者: 李谦益(1969-), 男, 正高级工程师, 主要从事氦气勘探地质研究及项目管理工作。E-mail: liqy624@vip.sina.com。

Abstract: Helium is a rare resource and is widely used in the high-tech field. However, the helium supply in China heavily depends on imports. The Huazhou exploration area of Gushi Sag in Weihe basin is a favorable area for helium exploration, which has superior geological conditions for helium accumulation. The drilling results of helium exploration well indicate that the spatial distribution and mutual configuration relationship of the fault systems and favorable reservoir zones are the key to helium-rich gas accumulation. Clarifying the coupling relationship between Neogene tectonism and sedimentation will help to further ascertain the regularity of fault activity and characteristics of the spatial distribution of sedimentary facies of the study area, which is of great significance for clearing the exploration and deployment of helium resource. Combining with the various low-temperature thermochronology data accumulated of the adjacent area, this study conducts a comprehensive analysis of drilling logging, well logging, core samples, seismic, and carbon and helium isotope data. The results indicate that the multiple rapid uplift events of the Qinling orogenic belt aggravated the faulted effect and produced a series of secondary faults developed by deep major faults of the northern margin of Qinling Mountains, which can provide favorable migration channels for the upward migration of the deep helium and hydrocarbon carrier gas. The thick conglomerate layer of the lower Lantian-Bahe Formation is the sedimentary response of the rapid uplift of Qinling orogenic belt, and the Formation mainly developed the fan-delta root subfacies. The lithology of the upper Lantian-Bahe Formation is mainly characterized by the interbeds of sandstone, sandy mudstone, and mudstone, and the Formation mainly developed the middle and marginal sub-facies. Moreover, the carbon and helium isotope values of gas samples from Lantian-Bahe Formation indicate that coal-type methane gas is developed in this area and the helium is mainly the type of crustal source. Zhangjiapo Formation is mainly characterized by lacustrine facies, and the thin sandstone bodies in the Formation can be expected to be favorable facies zone for helium accumulation. The thick-bedded mudstone developed in the Zhangjiapo Formation is considered to be a favorable source rock segment of biogas and important cap in this area. Zhangjiapo Formation has a complete combination of generation, transport, storage, and cap for helium accumulation from bottom to top and can be used as an important zone for helium exploration.

Keywords: Weihe basin; Gushi Sag; Huazhou exploration area; tectonism; sedimentary characteristics; helium accumulation

氦气是一种具有独特性质的惰性气体,已被广泛应用于医疗、工业等高新领域(Anderson, 2018; Halford et al., 2022; 张健等, 2023; 司庆红等, 2023; 常洋梅等, 2025)。随着全球氦资源供需矛盾加剧及国内对氦气需求量的持续增长,使得本就缺乏氦气资源的中国面临更为严峻的安全形势,因而亟需开展氦气资源成藏研究与新区勘探(李玉宏等, 2022; Tao et al., 2024; 冯旭亮等, 2025; 邹易等, 2025; 李云波等, 2025)。已有研究表明,渭河盆地地区内氦气资源丰富,多口地热井伴生气中均检测出高于工业价值的氦气含量(0.21%~9.226%)且主要为壳源成因类型,具有良好的勘探前景与开发潜力(卢进才等, 2005; 韩伟等, 2014; 李玉宏等, 2018; Zhang et al., 2019; 周俊林等, 2022; 魏泽坤等, 2023)。前人结合氦气成藏机理、地质条件及井口伴生气资源显示特征等因素,初步圈定了华州-潼关、武功-咸阳及郿邑-蓝田 3 个氦气远景区(李玉宏等, 2018)。

固市凹陷位于渭河盆地中东部,盆地内完整地沉积了新生界古近系、新近系和第四系。前期调查发现,固市凹陷南缘多口地热井井口均产出富氦甲烷气体,具有富氦天然气勘探潜力,且储层主要集中于新近系(陈五泉, 2015; 周俊林等, 2022)。基于典型富氦天然气藏成藏规律条件与认识(Brown, 2019; Rapatskaya et al., 2020; 何发岐等, 2022; 彭威龙等, 2022),断裂体系和有利储集相带的空间展布与相互配置是氦气富集成藏的关键。因而,研究和探讨渭河盆地固市凹陷南缘新近纪以来构造运动与沉积演化特征的耦合关系对进一步查明该区的氦气成藏规律具有重要意义。

新生代以来,受印度板块与欧亚板块碰撞引起青藏高原隆升的远程效应影响以及太平洋板块向西俯冲、华北板块继续向东南方向的逃逸,导致渭河盆地处于左行走滑的拉张环境(白相东, 2018; Dong et al., 2022)。固市凹陷作为渭河盆地的次级构造单元,秦岭造山带

的构造隆升控制着该区的构造格架、基底结构及变形特征等,影响区内的物质来源与沉积演化过程,使得整个固市凹陷(南部)不同时期的沉积学特征与秦岭造山带隆升过程必然存有空间上的耦合关系,同时记录了大量的盆山演化动力学信息(张瀚之, 2017; 杨鹏等, 2018)。固市凹陷华州探区位于华州—潼关氦气远景区西部,紧邻秦岭造山带北缘。目前,关于华州探区及周缘的相关研究主要集中于氦气成因来源、富集规律及资源分布等方面,并认为新近系为主要的富集储层段(陈五泉, 2015; 李玉宏等, 2018; 周俊林等, 2022)。针对该地区新近纪时期构造活动和沉积演化过程的耦合关系等相关研究则较为薄弱,制约了对区内沉积体系更为详细的剖析及氦气成藏规律的进一步认识。鉴于此,基于本团队在渭河盆地已开展的地热及氦气资源勘探开发与相关基础研究工作,且所在单位于2018年获得了全国首个氦气探矿权——陕西省渭南市华州—华阴地区地热水及氦气普查探矿权,笔者以固市凹陷华州探区为研究对象,综合多条地震剖面、测井曲线和钻井、录井、测井、岩心及C-He同位素特征等资料,结合前人已取得的研究成果,探讨研究区新近纪以来构造—沉积响应特征及盆山耦合关系,明确主要勘探层系沉积相类型及演化模式,初步查明氦气成藏地质条件与富集模式,以期为进一步明确和指导研究区氦气资源勘探部署提供依据。

1 区域地质背景

渭河盆地位于陕西省中部,其大地构造位置介于秦岭造山带与鄂尔多斯盆地之间,北邻渭北隆起,南依秦岭造山带,西起鄂尔多斯西南缘弧形构造带,东至三门峡地区,形成近EW向断裂的隆凹格局,为NEE向展布的新生代断陷盆地(图1a、图1b)(王建强等, 2015; 刘林等, 2018)。渭河盆地以太古宇和元古宇片岩、花岗岩及下古生界灰岩等不同的岩相组合为基底,其上覆盖有新生界地层(任战利等, 2020)。沿渭河断裂可将盆地划分为南北两区,北部基底以古生代碳酸盐岩为主,其上沉积有新生界地层;南部发育有巨厚的新生界地层,其超覆于太古或元古代变质岩及印支期—燕山期花岗岩基底之上,且新生界地层与古老基底被认为是重要的氦气勘探黄金组合(任战利等, 2020; 秦胜飞等, 2023)。盆地南缘沉积有较为完整的新生代地层,即红河组(E_2h)、白鹿塬组(E_3b)、高陵群(N_1g)、蓝田—

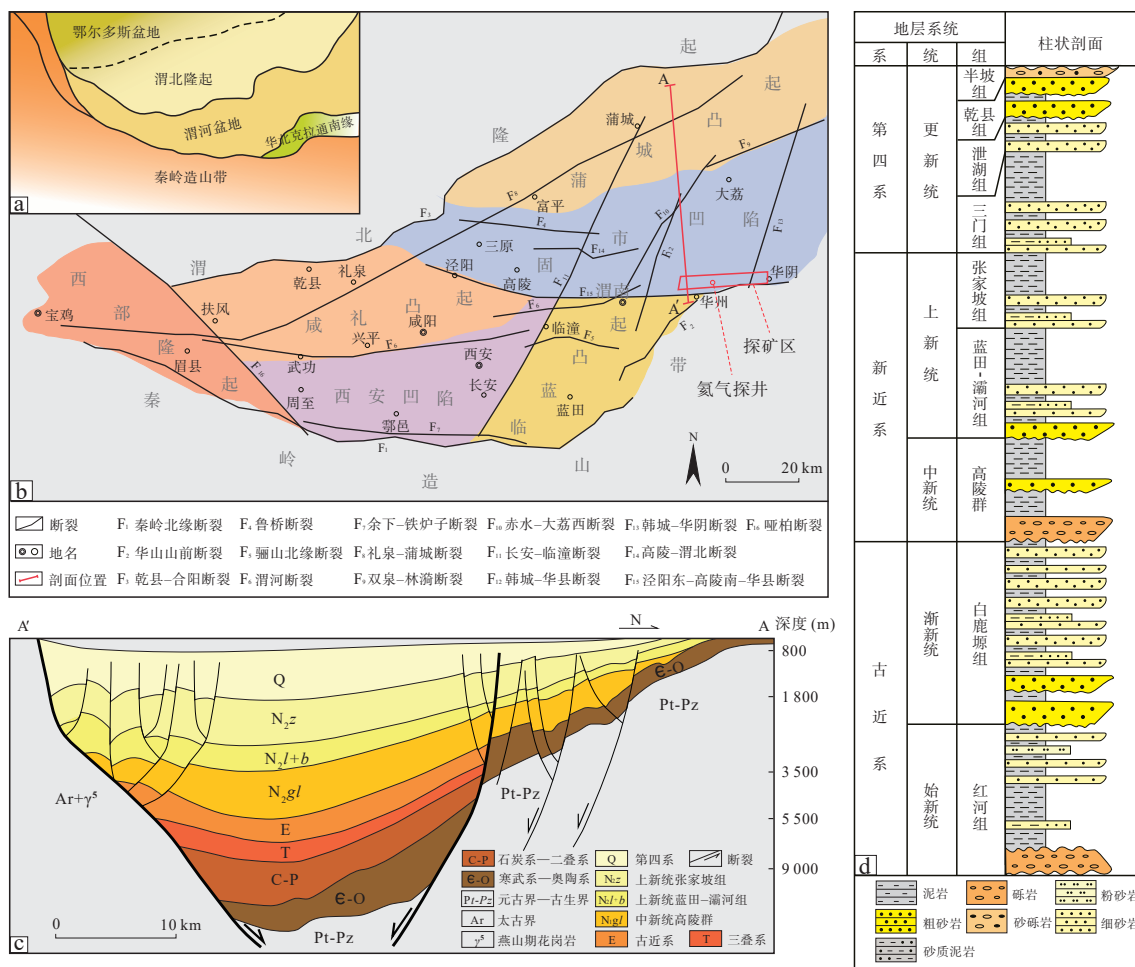
灞河组(N_2l+b)、张家坡组(N_2z)及第四系(Q),总厚度可达7 km,主要岩性组合为砂岩—泥岩互层,以扇三角洲、湖泊相沉积体系为主,呈现出下粗上细的正旋回沉积特征,纵向上为氦气成藏提供了良好的盖储条件(图1c、图1d)(刘林等, 2018; 韩元红等, 2022)。

固市凹陷内部断裂广泛发育,被切割成多个块体,结构特征表现为东深西浅、南陡北缓的格局形态,南部以骊山北缘断裂和华山山前断裂为界,北界为乾县—合阳断裂,凹陷中心位于固市一带(图1b)(刘建朝等, 2014; 周俊林等, 2022)。固市凹陷新生界地层沉积厚度可达6 km以上,新近系发育有扇三角洲和湖泊相等沉积相类型,自下而上呈现出多套下粗上细的沉积韵律,分别为高陵群、蓝田—灞河组和张家坡组(刘建朝等, 2014)。区内所沉积的上新统张家坡组湖相泥岩、深部残留的石炭系—二叠系煤系地层及基底分布的太华群变质岩与印支期—燕山期花岗岩是潜在的烃源岩与氦源岩,具有良好的氦气成藏地质条件。研究区位于固市凹陷以南的华州地区(图1b)。

2 渭河盆地及周缘新生代构造演化

盆缘造山带的构造活动始终控制着盆地的形成与演化,而盆地的沉降与物质充填又响应于山脉隆升及剥蚀过程,二者是同一地质过程的两种不同表现形式,其共生关系进一步强化了盆山耦合效应(Xu et al., 2017; Caracciolo, 2020; 董云鹏等, 2022)。依据渭河盆地固市凹陷所处的大地构造位置与变形特征,研究区周缘新生代以来的构造活动主要表现为秦岭造山带北缘的多阶段隆升、剥露作用(图1a、图1b)。近年来,利用低温热年代学数据来定量揭示造山带隆升—剥露过程及演化机制已成为最为有效的研究方法之一(Dickinson et al., 2009; Chew et al., 2015)。位于秦岭北缘的华山、太白两大(主脊)岩体较为完整地记录了秦岭造山带新生代以来的隆升演化过程,综合分析现已积累的大量年代学资料(磷灰石、锆石裂变径迹和(U-Th)/He法等)(图2)对探讨华州探区周缘的构造活动及其地质响应特征具有重要意义(万景林等, 2005; 刘建辉等, 2010; Liu et al., 2013; Heberer et al., 2014; 肖霖, 2018; Clinkscales et al., 2021; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2022a, 2022b)。

中生代、新生代,尤以晚白垩世以来,秦岭造山带处于强烈伸展构造背景下的陆内造山阶段,表现为急



a、b. 构造单元划分及邻区地质图(据韩元红等, 2022 修改); c. 地质剖面图(据周俊林等, 2022 修改);

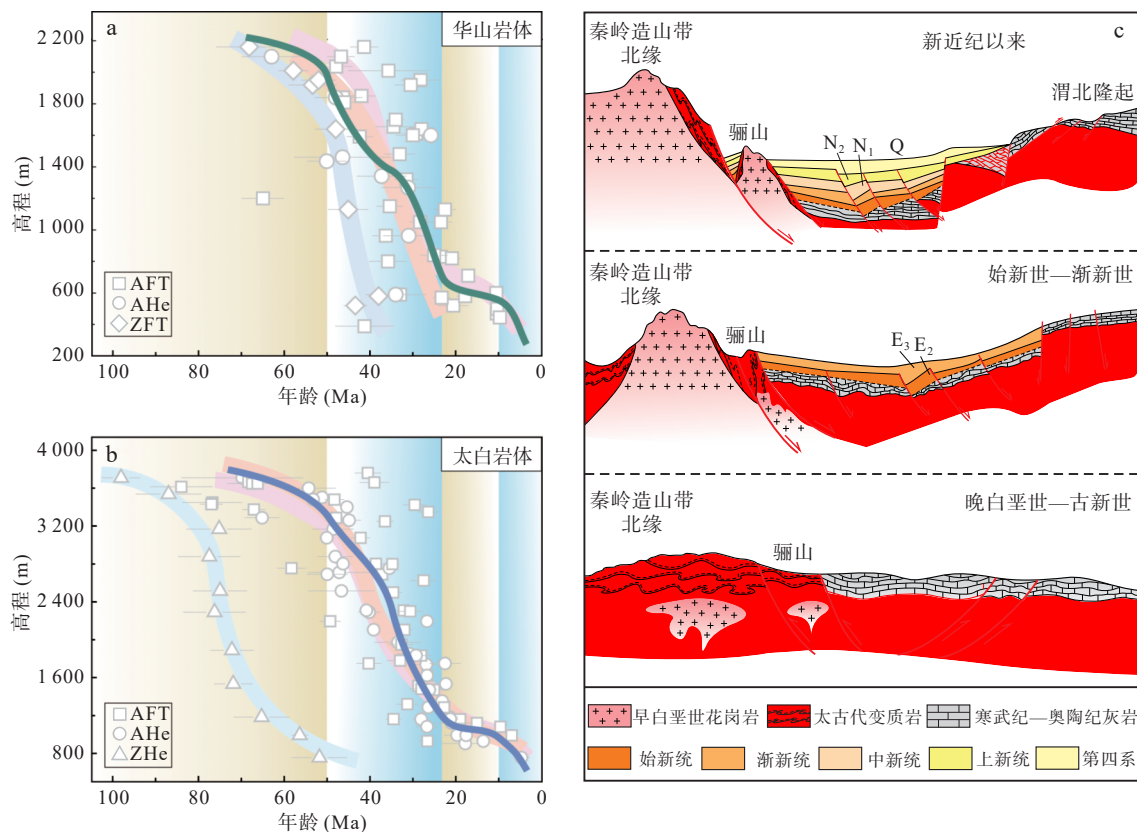
d. 新生代地层格架图(据李智超, 2017 修改)

图1 渭河盆地综合地质图

Fig. 1 The comprehensive geological map of Weihe basin

剧隆升, 所形成的秦岭北缘断裂和华山山前断裂控制着渭河盆地的沉积演化过程(张国伟等, 2001; Dong et al., 2011, 2022; 王建强等, 2015)。晚白垩世—古新世(70~50 Ma), 秦岭造山带北缘与华北克拉通南缘处于右旋压扭性构造环境, 地幔逐渐隆起, 秦岭造山带经历了缓慢的隆升阶段, 其上覆地层遭受剥蚀, 在右旋拉张作用下, 渭河盆地初见雏形(图2)(Dong et al., 2022); 始新世—渐新世时期(50~25 Ma), 受控于印度板块向欧亚板块的聚敛活动及青藏高原构造隆升事件远程效应的影响(50~45 Ma)(Ding et al., 2022), 区域性伸展作用导致秦岭北缘正断层的形成与持续扩展, 秦岭造山带北缘开始快速隆升(图2)(Enkelmann et al., 2006; Liu et al., 2013)。渭河盆地处于拉张断陷与构造沉积的初始阶段, 新生代地层整体协同发育并不整合于古老基底之上, 以红河组和白鹿塬组地

层为特征, 自下而上构成粗—细—粗旋回序列, 沉积类型以冲积扇体系为主(图1d、图2)(Liu et al., 2013; 李智超, 2017)。伴随着同时期秦岭造山带北缘的持续隆升, 渭河盆地南部于早、晚渐新世(~35 Ma、~25 Ma)发生两次相对快速的隆升事件, 可能会造成盆地内始新世—渐新统红河组和白鹿塬组缺失(图2)(Liu et al., 2013); 渐新世晚期—中新世中期(25~10 Ma)(图2), 秦岭造山带处于缓慢隆升阶段, 渭河盆地由断陷沉降转为隆起, 区内沉积速率较慢的高陵群地层与之呈响应关系, 主要岩性为砂岩、泥岩及砂泥岩互层(图1)(李智超, 2017); 晚中新世—第四纪, 区内的拉张伸展、差异升降运动仍然持续, 骊山凸起进一步隆起, 秦岭造山带北缘所发育的小型正断层已互通连接成侧向延伸的大型正断层, 断裂活动加剧并促使秦岭造山带发生强烈且快速隆升(图2), 造成地层持续发



a、b. 矩形、圆圈和三角形分别代表磷灰石裂变径迹和(U-Th)/He 年龄(AFT, AHe)与锆石(U-Th)/He 年龄(ZHe), 不同实线代表演化趋势, 斜率反映隆升速率的快慢程度; 数据来源于万景林等, 2005; 刘建辉等, 2010; Liu et al., 2013; Heberer et al., 2014; 肖霖, 2018; Clinkscales et al., 2021; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2022a, 2022b

图2 秦岭造山带北缘华山、太白岩体年龄-高程变化图(a、b)(据 Liu et al., 2013 修改)与渭河盆地及周缘新生代构造演化示意图(c)(据王建强等, 2015; Dong et al., 2022 修改)

Fig. 2 (a, b) Age-elevation map of Huashan and Taibai plutons of the northern margin of the Qinling orogenic belt, and (c) sketch map of the tectonic evolution in Weihe basin and adjacent area during the Cenozoic

生大规模沉降与扩展, 且沉积速率增大, 发育有上新统蓝田-灞河组、张家坡组及上覆的第四系(图1)。

研究区地球物理结果显示, 区内断裂发育, 以正断层为主, 主要的控盆断裂深切基底(F_1)(图3), 其以上发育一系列走向近乎相似的次级断裂及小地堑为特征, 表现形式多为负花状及反“Y”字形断裂等, 控制并影响着局部构造格局(F_{2-13})(图3)。因此, 华州探区南缘秦岭造山带的构造活动与区内断裂发育及地质特征等具有耦合关系, 长期控制着区内的构造演化特征与沉积格局。

3 地层特征与沉积相类型

沉积相是沉积环境与沉积物的综合反映, 是流体矿产资源勘探研究的基础, 控制着流体资源的开发与利用(朱筱敏等, 2004), 其展布受断裂构造控制明显,

沿断裂边缘向沉积中心呈相序递变规律分布。综合区域地质构造与演化特征、二维地震、钻井岩心的岩性组合及地球物理测井等资料, 以氦气探井(井深~4 015 m)钻遇地层为研究主体, 重点对华州探区新近系蓝田-灞河组及上覆张家坡组地层地质特征、沉积相类型及沉积体系进行分析。

3.1 地层特征

华州探区氦气探井钻遇地层结果显示(图4), 由老到新为太古界变质岩、中生界花岗岩、新近系蓝田-灞河组和张家坡组及第四系。钻录测井资料及取心结果显示, 钻遇深度约为3 751~4 015 m处可见太华群变质岩(~116 m, 下段)和燕山期花岗岩侵入体(~148 m, 上段), 岩性分别为变质岩和花岗岩, 变质岩以斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、变粒岩为主, 而花岗岩以二长花岗岩、正长花岗岩为主, 二者均具高角度劈理、错断层面发育, 层面被钙质和泥质充填; 钻遇井深约为3 751~1 964 m

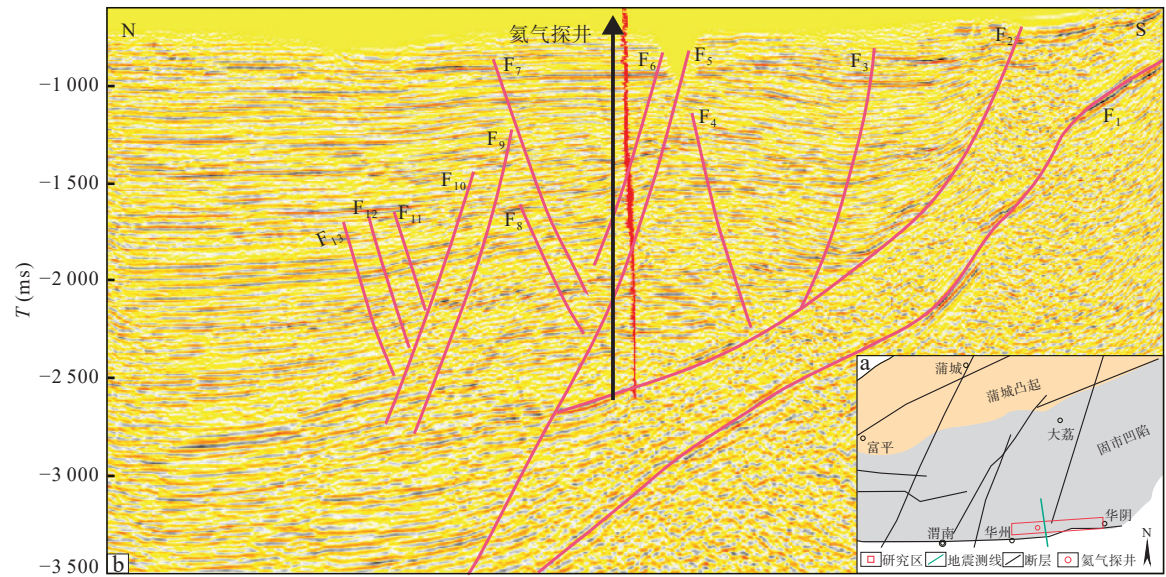


图3 华州探区近南北向地震剖面地质解释图(据蔡鑫磊等, 2025 修改)

Fig. 3 The geological interpretation map of near S-N seismic profile in Huazhou exploration area

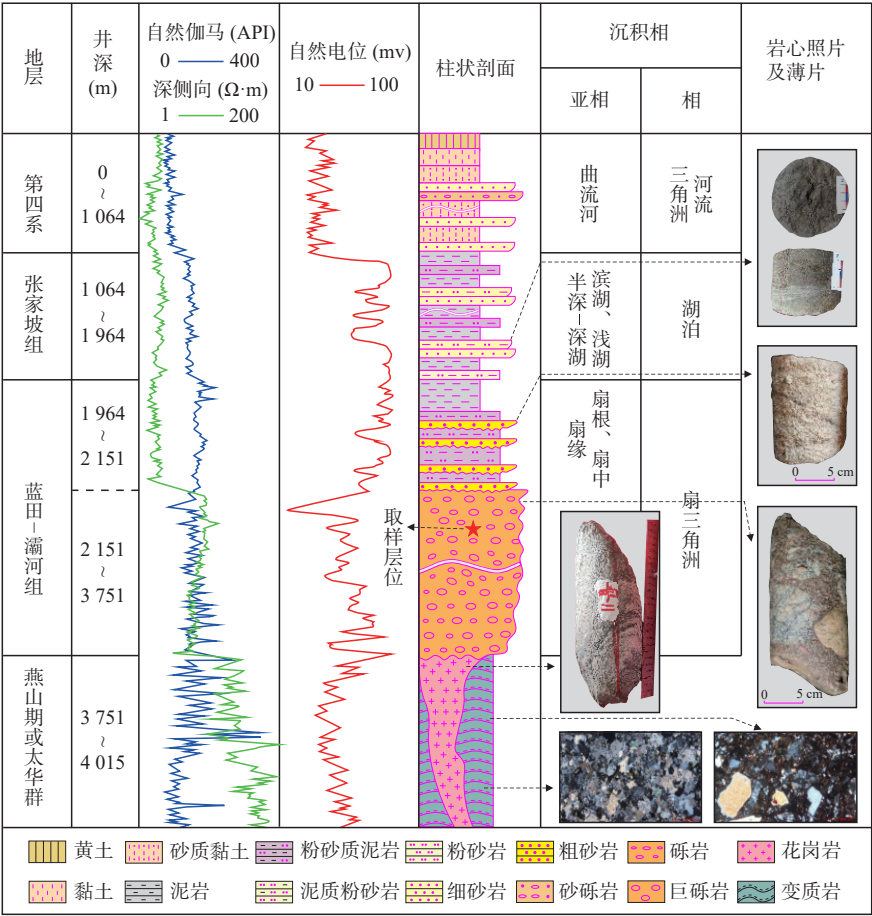


图4 氦气探井地层柱状图及岩心和显微照片(据蔡鑫磊等, 2025 修改)

Fig. 4 The stratigraphic column map and photos of core and microsection of Helium exploration well

为蓝田—灞河组,底部与基底呈不整合关系接触,下段发育有巨厚灰色、灰白色砾岩(~1 600 m),几乎呈源岩状态,未经搬运和分选,岩性特征指示源岩为花岗类侵入岩或变质岩,上段为砂岩、砂质泥岩及泥岩互层;张家

坡组(1 964~1 064 m)呈整合接触关系覆盖于蓝田-灞河组之上,主要岩性为砂岩、泥岩、砂质泥岩及泥质砂岩互层;第四系(~1 064 m)发育有三门组及上覆的秦川群,岩性主要为黏土、砂砾及黄土层互层。

3.2 沉积相类型

3.2.1 扇三角洲沉积

扇三角洲是堆积在河流出山口处的沉积物,主要由粗粒碎屑物质组成的扇形沉积体,可分为扇根、扇中和扇端沉积亚相。扇三角洲粒度整体上较粗,而从扇根到扇缘的粒度依次变细,分选性逐渐均匀、磨圆度逐渐变好。研究区扇三角洲沉积体系主要发育于南部的秦岭造山带北缘山前(蓝田-灞河组下段,井深为2 151~3 751 m)(图4),多为河道沉积和泥石流沉积,岩性主要由灰色、灰白色(巨)砾岩、粗砾岩组成,分选差、无磨圆,砾石成分多以花岗岩及片麻岩为主,含少量石英砾、长石砾、泥砾,粒径大小不均、杂乱分布,底部冲刷强烈、少量泥质填充,整体显示为山前快速混杂堆积、未经搬运破碎的块状砾岩,呈现出扇根或扇根-扇中的过渡区带特征(图4);蓝田-灞河组上段主要发育扇中-扇缘沉积亚相,底部岩性为含砾砂岩及粗砂岩,成分以石英为主、长石次之,上部为泥质砂岩、棕褐色泥岩及灰色砂、泥岩不等厚互层,自下而上整体属于由粗到细的正韵律演变序列(图4)。

3.2.2 湖泊沉积

湖相沉积是陆地上地形相对低洼及流水汇集地区沉积物堆积而成,可分为滨湖、浅湖、半深湖及深湖亚相。研究区张家坡组发育最为典型且以滨湖、浅湖、半深湖-深湖亚相为特征,岩性主要为灰色细砂岩、泥质粉砂岩与灰绿色泥岩、粉砂质泥岩互层(图4)。滨湖亚相位于浅湖以上地带,主要以泥岩、砂质泥岩为主,可见水平、波状及交错层理,湖水较浅,属于氧化环境,发育有泥滩沉积和泥裂构造;浅湖亚相湖水较浅,岩性主要为灰绿色泥岩和粉砂质泥岩为主,泥岩可见水平层理,而粉、细砂岩可见砂纹层理,多处于氧化环境,发育湖湾和沙坝微相;半深湖-深湖亚相湖水较深,岩性主要为灰色-棕灰色泥质、粉砂质泥岩,局部发育黄铁矿及灰色砂质条带。

4 沉积演化模式

渭河盆地是新生界地层沉积于不同基底之上而形成的断陷盆地,受南缘秦岭造山带和北部北山断块

长期构造活动的改造,于古近纪时期开始经历拉张断陷及构造沉降阶段,并接受来自不同源区的沉积碎屑物质,而新近纪以来是渭河盆地沉积演化的重要阶段(刘护军, 2004; 杨鹏等, 2018)。华州探区位于渭河盆地固市凹陷南侧,新近纪时期,研究区沉积演化特征与南侧秦岭造山带北缘的构造隆升过程具相互耦合关系(图1、图2)(Liu et al., 2013; 张瀚之, 2017)。

华州探区及邻近区域已有的多口钻井资料显示,除发育钻遇最古老沉积盖层为古近系白鹿塬组外,其余钻井均仅揭示中新统高陵群上段(图1)(周俊林等, 2022)。结合前人对渭河盆地及邻区地质资料研究结果认为,晚渐新世—中新世(高陵期),渭河盆地继续接受沉降并逐渐向北扩张,盆地底部为一套较粗粒碎屑物沉积,秦岭造山带北缘及渭北隆起地区发育有冲积扇沉积,但盆地整体仍为浅湖相沉积环境(图5)。晚中新世—早上新世(蓝田-灞河期),氦气探井钻探成果资料显示,山前巨厚砾岩体直接覆盖于太古宙变质岩及燕山期花岗岩之上(图2),指示秦岭造山带在该时期处于快速隆升-剥蚀阶段,研究区紧邻秦岭北缘山前,断陷沉降作用不断加剧,水动力较强且水体逐渐扩大,所形成的砾岩及砂砾岩体快速堆积沉积于古老基底之上,发育扇三角洲相(图5)。渭北隆起西南缘岐山-麟游地区磷灰石裂变径迹法热史模拟结果揭示渭河盆地的沉降和渭北隆起的抬升时期大致具有同时性,暗示始新世以来渭北隆起可能是研究区接受沉积的次要物源区(任战利等, 2015; 祁凯等, 2017; 杨鹏等, 2018);随后,受局部各断裂发生较为明显的构造抬升及沉降运动的影响,沉积物的岩性及厚度变化相对较小,水动力逐渐减弱、沉积环境趋于稳定,主要以砂岩、砂质泥岩及泥岩互层为代表,由扇三角洲的扇根向扇中-扇缘沉积亚相过渡,沉积中心则由邻近秦岭北缘山口逐渐向东推移且沉积厚度依次加厚(图5)。晚上新世(张家坡期),地壳缓慢下降,伴随着骊山凸起的快速抬升,水体逐渐扩展、加深,沉积有厚层泥岩及粉砂质泥岩互层,纵向上具有明显的浅-深-浅及粗-细-粗的完整沉积旋回序列(图3、图5),显示出以湖相沉积为主,发育有滨湖、浅湖相等亚相,局部发育半深湖相,多属弱还原-还原环境。

5 氦气成藏特征与富集模式

5.1 成藏特征

目前,全球范围内尚未发现以氦气为主的天然气

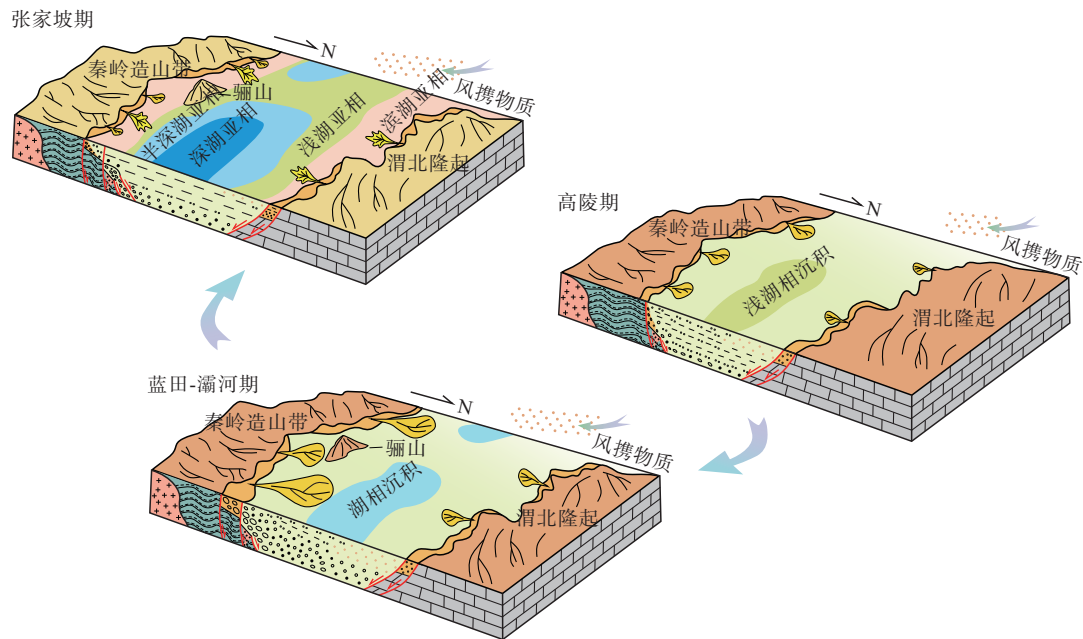


图5 研究区及周缘新近纪不同时期沉积相模式图(据蔡鑫磊, 2017; 李智超, 2017 改)

Fig. 5 The model maps of sedimentary facies in the research area and adjacent area during the different periods in the Neogene

藏, 氦气多以伴生组分(极微量)赋存于天然气中(或以水溶态存在), 其有效运聚和成藏条件与常规天然气相似, 具备“生、储、盖、圈、运、保”六大关键因素, 且不同地区氦气含量及成因来源具有一定的差异性(李玉宏等, 2022; Tao et al., 2024)。渭河盆地是中国氦气资源调查的重点区域, 区内多口地热井气体样品中 He 含量大于 1%, 最高可达 9.226%, 居于全球前列。前人依据盆地地热井井口气的组分特征、烃类气成因及伴生气 He 同位素等一系列研究成果, 认为盆地存在水溶气资源、游离态氦及伴生气资源, 且氦气伴生气主要以壳源成因为主(李玉宏等, 2011; Zhang et al., 2019)。

纵观全球富氦天然气藏的区域地质构造特征, 下伏古老基底变质岩与花岗岩是主要的氦源岩, 主导氦气富集区的空间展布(Brown, 2010), 而沟通“源-藏”的有效输导体系对氦气成藏同样具有控制作用。研究表明, 渭河盆地氦源岩主要由古老基底、隐伏的花岗岩体及盆地南缘秦岭造山带北侧所分布的一系列富 U 花岗岩体组成(李玉宏等, 2018), 且盆地内断裂体系显著发育, 主要有秦岭北缘断裂、华山山前断裂及渭河断裂等(图 1、图 3)。华州探区氦气探井钻探结果显示, 研究区新生界地层深部为太古宙变质岩及所侵入的燕山期花岗岩(图 4), 可作为潜在的壳源氦的主要气源岩; 区内发育的基底断裂(深大断裂)、沉积层断裂、不整合面及储层是控制氦气

运聚、输导与成藏的主要体系(图 3), 且渭河盆地自新生代以来发生的强烈断陷作用致使区内广泛发育断层并促进形成多个牵引背斜圈闭, 为沟通深部源岩和浅部储层提供关键的运聚通道与成藏空间(周俊林等, 2022; Tao et al., 2024)。浅层 NNE、NW 向后期断裂体系与 NW 向深大断裂相互切割(刘林等, 2018), 为氦气重新分布及二次运移提供有效空间。

甲烷 C 同位素值($\delta^{13}C_1$)是判别天然气成因类型及演化程度最为有效的指标之一, 对于揭示和示踪天然气的演化与来源、扩散与传输过程及烃源岩对比等具有重要作用(Rice, 1993)。自然界中, 生物成因甲烷 $\delta^{13}C_1$ 值约小于 -60% , 煤型成因甲烷气 $\delta^{13}C_1$ 值约为 -40% ~ -10% (Havig et al., 2018)。综合已有研究资料, 氦气探井邻近地区地热井井口气体组分与 C-He 同位素值结果显示, 天然气中的甲烷气为多源成因, 大部分样品的 $\delta^{13}C_1$ 值为 -37% ~ -23% , 以煤型甲烷气为主, 其余样品则以生物甲烷气为特征(表 1)(张雪, 2015; 周俊林等, 2022); He 同位素特征显示, 氦气成因类型主要以壳源为主, 部分样品中混入极少量的幔源氦(李玉宏等, 2011; 张雪, 2015)。相应地, 本次分析测试结果表明(表 1), 华州探区氦气探井蓝田-灞河组层段(深度约为 2 366~2 371 m)(图 4)排液过程中所采气样的 $\delta^{13}C_1$ 值约为 -33.9% ~ -24.5% , 指示研究区发育煤型甲烷气, 可能与深部存在石炭系—二叠系含煤系地层有关。同时, 所采

样品的氦气含量为 0.008%~1.708%、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 1.96×10^{-7} (表 1), 为壳源成因氦, 表明研究区氦源岩为深部太古宙变质岩基底及燕山期花岗岩。此外,

本次获取的钻井、录井资料区别于先期地热井井口气混合开采的方式, 为已知具体层位的蓝田-灞河组甲烷气及氦气相关信息。

表 1 氦气探井及邻区地热井井口气体组分与碳及氦同位素值统计表

Tab. 1 The statistic table of gas components and carbon and helium isotope values of geothermal wells in adjacent areas and Helium exploration well

井名	地层 层位	甲烷 (%)	$\delta^{13}\text{C}_1$ 值 (‰)	氦气含量 (%)	$^3\text{He}/^4\text{He}$ 值 (10^{-7})	载体气 类型	氦气成 因类型
中海井		9.24	-23.84	9.226	1.08	煤型气	
御温泉		31.47	-25.80	3.019	1.09	煤型气	
中医学院		82.86	-30.80	0.115	1.49	煤型气	
渭热1井	蓝田-灞河组或高陵群 混合开采	87.12	-35.05	0.142	0.95	煤型气	
渭热2井		64.29	-36.37	0.207	1.31	煤型气	
渭热4井		72.41	-35.89	0.201	0.85	煤型气	
渭热7井		69.25	-52.16	0.334	1.19	生物气	
渭热8井	张家坡组	99.47	-64.97	0.000	1.39	生物气	壳源为主, 部分样品中 混入极少量幔源氦
辛热1井		89.16	-62.63	0.000	1.88	生物气	
华阴R1井		97.91	-65.63	0.003	0.87	生物气	
华县1井	蓝田-灞河组或高陵群 混合开采	31.89	/	3.007	/	/	
华县2井		60.05	-30.59	0.540	/	煤型气	
富华农邦		71.70	-33.47	2.110	/	煤型气	
富华农邦		59.07	/	5.080	/	/	
氦气探井	蓝田-灞河组	2.67	-33.90	0.008	1.96	煤型气	
		26.06	-24.52	1.708	/	煤型气	

5.2 富集模式

基于本次研究成果, 结合前人已对渭河盆地地热井中天然气成因特征等方面取得的认识, 可初步建立研究区氦气运移-富集成藏模式(图 6)。蓝田-灞河期, 研究区构造活动明显加强, 尤以秦岭造山带北缘的快速隆升作用为代表。区内深大断裂活动显著, 为氦气伴随深部气体或地层水的运移提供通道, 也是该时期巨厚砾岩体发育的重要地质条件(图 3、图 4)。同时, 这些断裂为氦气及古生界煤系地层高成熟度甲烷气自深部向浅部运移提供两个层级的复合通道, 不断为浅部储层提供氦气气源(图 6)。结合该时期区内的沉积演化特征, 较细沉积物随水流向沉积中心的深部持续推进, 以砂岩及泥岩交互沉积, 逐渐充填整个研究区及周缘且碎屑物质运移距离较近, 分选、磨圆较差、含泥量高、砂体厚度较大、储层物性较差, 平均孔隙度多在 5% 以上(王兴, 2005), 可作为氦气兼探层位。

张家坡期, 构造活动较为平缓, 为大型水进-水退

过程, 半深湖-深湖相泥岩极为发育, 是渭河盆地固市凹陷最为典型的一套湖相沉积体系。张家坡组泥岩厚度大(约为 700~2 000 m)、分布范围广、岩性均匀, 地层温度及埋藏深度均有利于生物气的形成, 尤以 1 300~1 800 m 深最为明显, 长期以来被认为是区内有利的生物气烃源岩层段(图 4, 表 1)。

上新世以来, 张家坡组沉积速率较高且富含有机质, 上部零散状分布的少量薄层滨浅湖相含泥质细粉砂岩, 可形成砂岩上倾尖灭圈闭; 其上覆三门组及秦川群发育的黏土、黄土、粉砂及砂砾层等及其周围的不渗透岩层均可作为封堵氦气的重要区域盖层, 并具有生物气成藏条件。因而, 研究区张家坡组生物气具自生自储及下生上储式成藏特征(刘建朝等, 2014; 张雪, 2015)。该时期较为稳定的沉积环境及微弱的压实作用促进了储层的发育, 并且, 张家坡组薄层砂岩体储集层物性普遍较好, 有效孔隙度为 10%~47%, 多数在 20% 以上, 渗透率一般为 $10\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 最大可达

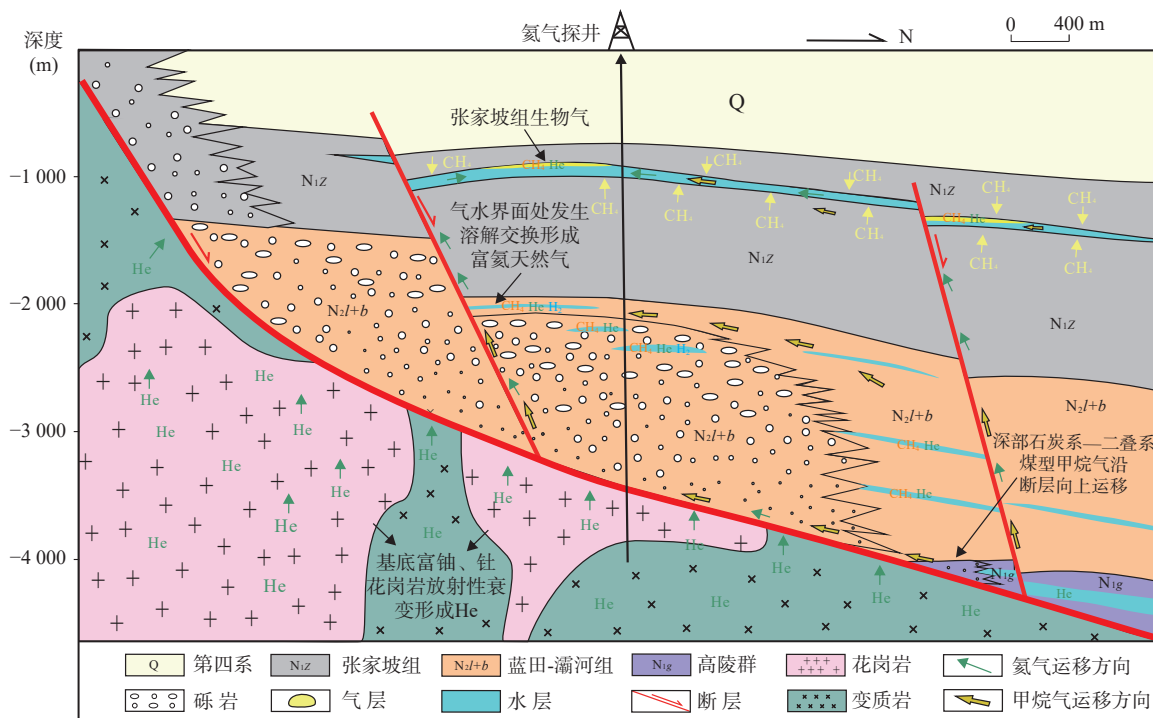


图6 研究区富氦天然气成藏模式图(据蔡鑫磊等, 2025 修改)

Fig. 6 The model map of helium-rich natural gas accumulation in the research area

$9.740 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (蔡鑫磊, 2017)。整体上, 该层段所产生的生物气在压实作用及黏土矿物脱水作用下发生初次运移之后溶解于地层水中, 以区内所发育的断裂及微裂缝为运移通道, 伴随地层水继续运移至物性较好的砂岩体(上倾圈闭)中发生聚集, 最终富集成藏(图6)(张雪, 2015)。

因此, 研究区新近纪以来所发育的不同岩性及岩相表征与构造-沉积演化特征密切相关, 华州探区及周缘的构造活动与沉积特征组合效应可为氦气成藏研究提供重要参考。

6 结论

(1) 渭河盆地固市凹陷华州探区新近纪时期沉积特征与南缘秦岭造山带构造运动具盆山耦合性。直接覆盖于太古宙基底及燕山期花岗岩之上的巨厚砾岩层是上新世时期秦岭造山带快速隆升的沉积响应结果; 蓝田-灞河组下段发育扇三角洲相扇根为主; 张家坡组岩性以砂岩、泥岩、砂泥岩互层为主, 以发育湖泊相沉积体系为特征。

(2) 研究区及周缘新近纪构造运动控制作用下的沉积-成藏特征较为显著, 发育深层断裂及一系列次级断层, 并形成多个牵引背斜圈闭, 为氦气及赋存载

体气提供主要的运移通道及储集空间。蓝田-灞河组层段所采气样的碳及氦同位素特征显示, 区内发育有煤型甲烷气且氦气来源为壳源类型。

(3) 新近系蓝田-灞河组、张家坡组沉积体系及特征是不同的构造动力下的产物。蓝田-灞河组受强烈构造运动影响, 发育的断层可作为氦气及载体气的运移通道, 但储层物性较差, 可作为氦气兼探层段。张家坡组发育于构造活动较为缓慢时期, 半深湖-深湖相泥岩极为发育且分布范围广, 被认为是区内有利的生物气烃源岩层段及区域重要盖层。

参考文献(References):

- 白相东. 秦岭北缘断裂带活动性对地质灾害影响研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2018, 1-153.
- BAI Xiangdong. Influence study from the activity of the northern margin fault zone of Qinling Mountains on geological hazard [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2018, 1-153.
- 蔡鑫磊. 渭河盆地一热两气资源勘探开发研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- 蔡鑫磊, 李谦益, 李正, 等. 渭河盆地氦气资源研究进展与勘探开发关键技术 [J]. 岩性油气藏, 2025, 37(5): 1-11.
- CAI Xinlei, LI Qianyi, LI Zheng, et al. Research progress and key

- techniques of exploration and development of helium resource in Weihe Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025, 37(5): 1–11.
- 常洋梅, 刘超, 孙蓓蓓. 鄂尔多斯盆地东缘石西区块氦源岩有效性评价及空间展布特征[J]. *煤田地质与勘探*, 2025, 53(6): 129–142.
- CHANG Yangmei, LIU Chao, SUN Beilei. Effectiveness assessment and spatial distribution characteristics of helium source rocks in the Shixi Block along the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 129–142.
- 陈五泉. 渭河盆地固市凹陷烃源岩特征及生物气资源潜力评价[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 30(4): 23–27.
- CHEN Wuquan. Characteristics of hydrocarbon source rock and resource potential evaluation of biological gas in Gushi Sag, Weihe Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2015, 30(4): 23–27.
- 董云鹏, 杨钊, 孙圣思, 等. 秦岭隆升过程及其如何控制气候环境[J]. *地球科学*, 2022, 47(10): 3834–3836.
- DONG Yunpeng, YANG Zhao, SUN Shengsi, et al. Qinling Uplift Process and How to control the climate environment?[J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3834–3836.
- 冯旭亮, 汪啸东, 罗姣, 等. 鄂尔多斯盆地地热和氦气资源远景: 来自居里面深度的证据[J]. *西北地质*, 2025, 58(3): 22–32.
- FENG Xuliang, WANG Xiaodong, LUO Jiao, et al. Geothermal and Helium Resource Prospects in the Ordos Basin: Insight from the Curie Point Depths[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(3): 22–32.
- 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.
- 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.
- 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 Faqi, WANG Fubin, WANG Jie, et al. Helium distribution of Dongsheng Gas Field in Ordos Basin and discovery of a super large helium-rich gas field[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(1): 1–10.
- 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, 周俊林, 张文, 等. 渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- 李玉宏, 李济远, 周俊林, 等. 国内外氦气资源勘探开发现状及其对中国的启示[J]. *西北地质*, 2022, 55(3): 233–240.
- LI Yuhong, LI Jiyuan, ZHOU Junlin, et al. Exploration and Development Status of World Helium Resources and Its Implications for China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(3): 233–240.
- 李云波, 王成涛, 宋党育, 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.
- 李智超. 渭河盆地新生代岩相古地理及环境演化[D]. 西安: 西北大学, 2017, 1–175.
- LI Zhichao. The lithofacies paleogeography and paleoenvironmental evolution of the Cenozoic in the Weihe basin, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2017, 1–175.
- 刘护军. 渭河盆地的形成演化与东秦岭的隆升[D]. 西安: 西北大学, 2004, 1–70.
- LIU Hujun. Formation and Evolution of the Weihe River Basin and Uplift of the Eastern Qinling Mountains[D]. Xi'an: Northwest University, 2004, 1–70.
- 刘建朝, 张林, 王行运, 等. 固市凹陷非常规水溶甲烷气成因及来源[J]. *地质力学学报*, 2014, 20(1): 61–69.
- LIU Jianchao, ZHANG Lin, WANG Xingyun, et al. Genesis and sources of non-conventional water soluble methane gas in Gushi sag[J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20(1): 61–69.
- 刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(10): 2405–2414.
- LIU Jianhui, ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, et al. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain, Qinling, China: evidence from the apatite fission track (AFT) analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(10): 2405–2414.
- 刘林, 芮会超. 渭河盆地结构特征及演化研究[J]. *地质力学学报*, 2018, 24(1): 60–69.
- LIU Lin, RUI Huichao. Exploration on structural characteristics of the Weihe basin and its evolution[J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24(1): 60–69.
- 卢进才, 魏仙样, 李玉宏, 等. 汾渭盆地富氦天然气成因及成藏条件初探[J]. *西北地质*, 2005, 38(3): 82–86.
- LU Jincai, WEI Xianyang, LI Yuhong et al. Preliminary study about genesis and pool formation conditions of rich-helium type natural gas[J]. *Northwestern Geology*, 2005, 38(3): 82–86.

- 彭威龙, 刘全有, 张英, 等. 中国首个特大致密砂岩型(烃类)富氦气田: 鄂尔多斯盆地东胜气田特征[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(6): 1078–1085.
- PENG Weilong, LIU Quanyou, ZHANG Ying, et al. The first extra-large helium-rich gas field identified in a tight sandstone of the Dongsheng Gas Field, Ordos Basin, China[J]. Science China: Earth Sciences, 2022, 52(6): 1078–1085.
- 祁凯, 任战利, 崔军平, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起岐山-麟游地区中新世构造热演化及地质响应——来自裂变径迹分析的证据[J]. 地质学报, 2017, 91(1): 151–162.
- QI Kai, REN Zhanli, CUI Junping, et al. The Meso-cenozoic tectonic thermal evolution of the Qishan-Linyou areas in Weibei uplift of Ordos basin and its response in geology: evidence from fission-track analysis[J]. Acta Geological Sinica, 2017, 91(1): 151–162.
- 秦胜飞, 陶刚, 罗鑫, 等. 氦气富集与天然气成藏差异、勘探误区[J]. 天然气工业, 2023, 43(12): 138–151.
- QIN Shengfei, TAO Gang, LUO Xin, et al. Difference between helium enrichment and natural gas accumulation and misunderstandings in helium exploration[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(12): 138–151.
- 任战利, 崔军平, 郭科, 等. 鄂尔多斯盆地渭北隆起抬升期次及过程的裂变径迹分析[J]. 科学通报, 2015, 60(14): 1298–1309.
- REN Zhanli, CUI Junping, GUO Ke, et al. Fission-track analysis of uplift times and processes of the Weibei Uplift in the Ordos Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(14): 1298–1309.
- 任战利, 刘润川, 任文波, 等. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1938–1949.
- REN Zhanli, LIU Runchuan, REN Wenbo, et al. Distribution of geothermal field and its controlling factors in the Weihe basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1938–1949.
- 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.
- 万景林, 王瑜, 李齐, 等. 太白山中新世抬升的裂变径迹年代学研究[J]. 核技术, 2005, 9: 712–716.
- WAN Jinglin, WANG Yu, LI Qi, et al. Apatite fission track study of Taibai Mountain uplift in the Mesozoic-Cenozoic[J]. Nuclear Techniques, 2005, 9: 712–716.
- 王建强, 刘池洋, 高飞, 等. 陕西渭河盆地前新生界地质特征及其油气意义[J]. 地质通报, 2015, 34(10): 1981–1991.
- WANG Jianqiang, LIU Chiyang, GAO Fei, et al. Pre-Cenozoic geological characteristics and oil-gas significance in Weihe basin, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10): 1981–1991.
- 王兴. 渭河盆地地热资源赋存与开发[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2005.
- 魏泽坤, 冯旭亮, 马佳月, 等. 鄂尔多斯盆地东南部重磁场特征及其氦气勘探意义[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 98–110.
- WEI Zekun, FENG Xuliang, MA Jiayue, et al. Characteristics of Gravity and Magnetic Field and their Significance of Helium Resources Exploration in the Southeastern Ordos Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 98–110.
- 肖霖. U-Th/He 热年代学: 方法及其在秦岭新生代隆升中的应用[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2018, 1–120.
- XIAO Lin. U-Th/He thermochronology: method and its application in the Cenozoic uplift of the Qinling Range[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2018, 1–120.
- 杨鹏, 任战利, 张金功, 等. 新生代渭河盆地沉积-构造迁移与渭北隆起及东秦岭耦合关系探讨[J]. 地质科学, 2018, 53(3): 876–892.
- YANG Peng, REN Zhanli, ZHANG Jingong, et al. Discussion of the coupling relationships between the Cenozoic sedimentary-tectonic migration of the Weihe Basin and the uplift of the Weibei and East Qinling areas[J]. Chinese Journal of Geology, 2018, 53(3): 876–892.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 张瀚之. 碎屑锆石反映的晚中新世以来渭河盆地沉积物物源变化和环境变迁[D]. 南京: 南京大学, 2017, 1–152.
- ZHANG Hanzhi. Variation of sediment provenance and paleoenvironment in the Weihe basin since late Miocene revealed by detrital zircon dating[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017, 1–152.
- 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, 1–153.
- ZHANG Xue. Accumulation Conditions and Resource Prediction of Nature Gas and Helium Gas in Weihe Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015, 1–153.
- 周俊林, 李玉宏, 魏建设, 等. 渭河盆地固市凹陷华州北地区氦气地质条件与富集模式[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 33–44.
- ZHOU Junlin, LI Yuhong, WEI Jianshe, et al. Geological Conditions and Enrichment Model of Helium in North Huazhou Area of Gushi Depression, Weihe Basin, China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4): 33–44.
- 朱筱敏, 杨俊生, 张喜林. 岩相古地理研究与油气勘探[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 101–109.
- ZHU Xiaomin, YANG Junsheng, ZHANG Xilin. Lithofacies paleogeography and Petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1): 101–109.
- 邹易, 罗情勇, 陈践发, 等. 含氦-富氦气藏氦气竞争溶解物理模

- 拟实验研究[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(6): 96–108.
- ZOU Yi, LUO Qingyong, CHEN Jianfa, et al. Physical simulation experiments on competitive dissolution of helium in helium-containing to helium-rich gas reservoirs[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2025, 53(6): 96–108.
- Anderson S T. Economics, helium, and the US Federal Helium Reserve: summary and outlook[J]. *Natural Resources Research*, 2018, 27: 455–477.
- Brown A A. Formation of High Helium Gases: A Guide for Explorationists[C]. AAPG Convention, New Orleans, Louisiana, USA, 2010.
- Brown A 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.
- Caracciolo L. Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 209: 103226.
- Chew D, Spikings R. Geochronology and thermochronology using apatite: Time and temperature of lower crust to surface[J]. *Elements*, 2015, 11: 189–194.
- Clinkscales C, Kapp P, Thomson S, et al. Regional exhumation and tectonic history of the Shanxi Rift and Taihangshan, North China[J]. *Tectonics*, 2021, 40(3): e2020TC006416.
- Dickinson W R, Gehrels G E. U-Pb ages of detrital zircons in Jurassic eolian and associated sandstones of the Colorado Plateau: Evidence for transcontinental dispersal and intraregional recycling of sediment[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2009, 121(3–4): 408–433.
- Ding L, Kapp P, Cai F, et al. Timing and mechanisms of Tibetan Plateau uplift[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 652–667.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3): 213–237.
- Dong Yunpeng, Shi Xiaohui, Sun Shengsi, et al. Co-Evolution of the Cenozoic Tectonics, Geomorphology, Environment and Ecosystem in the Qinling Mountains and Adjacent Areas, Central China[J]. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, 1(2): 1–19.
- Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin?[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2006, 118(5–6): 651–671.
- Halford D T, Karolytè R, Barry P H, et al. High helium reservoirs in the Four Corners area of the Colorado Plateau, USA[J]. *Chemical Geology*, 2022, 596: 120790.
- Havig J R, Hamilton T L, McCormick M, et al. Water column and sediment stable carbon isotope biogeochemistry of permanently redox-stratified Fayetteville Green Lake, New York, USA[J]. *Limnology and Oceanography*, 2018, 63(2): 570–587.
- Heberer B, Anzenbacher T, Neubauer F, et al. Polyphase exhumation in the western Qinling Mountains, China: Rapid Early Cretaceous cooling along a lithospheric-scale tear fault and pulsed Cenozoic uplift[J]. *Tectonophysics*, 2014, 617: 31–43.
- Liu J H, Zhang P Z, Lease R O, et al. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range-Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 281–296.
- Rapatskaya L A, Tonkikh M E, Ustyuzhanin A O. Natural reservoir as a geological body for storing helium reserves[C]. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2020, 408: 012060.
- Rice D D. Composition and origins of coalbed gas[J]. *Hydrocarbons from coal: AAPG Studies in Geology*, 1993, 38(1): 159–184.
- Tao S Z, Yang Y Q, Chen Y, et al. Geological conditions, genetic mechanisms and accumulation patterns of helium resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 498–518.
- Wang Y Z, Li C P, Hao Y Q, et al. Multi - Stage Growth in the North Margin of the Qinling Orogen, Central China, Revealed by Both Low-Temperature Thermochronology and River Profile Inversion[J]. *Tectonics*, 2022, 41(4): e2021TC007029.
- Xu J, Stockli D F, Snedden J W. Enhanced provenance interpretation using combined U-Pb and (U-Th)/He double dating of detrital zircon grains from lower Miocene strata, proximal Gulf of Mexico Basin, North America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 475: 44–57.
- Zhang W B, Wang F, Wu L, et al. Mountain Growth under the Combined Effects of Paleostress and Paleoclimate: Implications from Apatite (U-Th)/He Thermochronology of Taibai Mountain, Central China[J]. *Lithosphere*, 2022a, (1): 8286127.
- Zhang W B, Wang F, Wu L, et al. Reactivated Margin of the Western North China Craton in the Late Cretaceous: Constraints From Zircon (U-Th)/He Thermochronology of Taibai Mountain[J]. *Tectonics*, 2022b, 41(2): e2021TC007058.
- Zhang W, Li Yuhong, Zhao Fenghua, et al. Using noble gases to trace groundwater evolution and assess helium accumulation in Weihe Basin, central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 251: 229–246.