

地球气体运移与地热资源形成机制研究

卢予北^{1,2}

(1. 河南省地质研究院, 河南 郑州 450016; 2. 河南省深部探矿工程技术研究中心, 河南 郑州 450053)

摘要:通过多年地热钻探工程实践认为:在传统地热系统“热、通、储、盖”理论指导下,采用水文地质调查和地球物理勘探方法进行地热资源靶区和井位选址,存在着钻井风险大、勘查成果远不及预期等问题,特别是随着地热勘查深度的增加,其问题愈发严重。针对以上问题和地球气体相关文献,结合地热钻探工程实践,阐明了地球内部存在着巨大高温高压气体,地热、油气及煤系气等能源资源的形成与地球气体的运移密切相关,地热资源的形成主要是深部气体起到携带和驱动(介质和动力)作用,并在一定地质环境和空间富集。在此基础上重新建立了水热型地热资源成藏模式,有对流型、传导型和对流-传导复合型3种。并提出在传统地热系统理论上,进一步实现地热理论创新、建立地球气体动力学学科,使地热系统理论更加科学和完善,从而为地热资源的持续稳定开发利用提供可靠的理论依据。

关键词:地球气体运移;地热资源;形成机制;地球气体动力学;对流型成藏模式;传导型成藏模式;对流-传导复合型成藏模式

中图分类号:P314 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2024)02-0001-07

Study on migration of the earth interior gases and the formation mechanism of geothermal resources

LU Yubei^{1,2}

(1. Henan Academy of Geology, Zhengzhou Henan 450016, China;

2. Henan Engineering Research Centre of Deep Exploration, Zhengzhou Henan 450053, China)

Abstract: Through years of geothermal drilling engineering practice, it is thought that under the guidance of the traditional geothermal system theory of “heat source, channel, reservoir, overlying rock”, some problems exists such as high drilling risk and imperfect exploration results using hydrogeological survey and geophysical exploration methods to select geothermal resource target areas and drilling locations. The problem is more serious especially with the increase of exploration depth. In view of the above problems, combined with relevant literature and the practice of geothermal drilling engineering, this paper shows that there are huge high-temperature and high-pressure gases in earth interior and the formation of the geothermal, oil and gas, gas-bearing coal seams and other energy is closely related to the gases migration in the earth interior. The formation of geothermal resources is mainly caused by the action of carrying and driving (medium and power) of the deep gas and is enriched in a certain geological environment and space. On this basis, the model of reservoir-formation of hydrothermal geothermal resources is re-established, including three types of convective, conductive and compound type of convective-conductive. Moreover, on the basis of the traditional geothermal system theory, innovation of geothermal theory and the dynamics of the earth interior gases are further proposed to make the geothermal system theory more scientific and perfect. It provides a reliable theoretical basis for the continuous and steady development and utilization of geothermal resources.

Key words: gases migration in earth interior; geothermal resources; formation mechanism; dynamics of earth interior

收稿日期:2024-02-02; 修回日期:2024-02-25 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.02.001

基金项目:2023年度河南省重点研发专项“河南省中深层地热清洁能源开发利用关键技术研究”与示范”(编号:231111320800)

作者简介:卢予北,男,汉族,1964年生,二级教授,河南省地质研究院地热首席专家,河南省地热协会秘书长,地质工程专业,博士,主要从事地
质地质和深部钻探技术研究工作,河南省郑州市金水区金水东路16号,13633810500@163.com。

引用格式:卢予北.地球气体运移与地热资源形成机制研究[J].钻探工程,2024,51(2):1-7.

LU Yubei. Study on migration of the earth interior gases and the formation mechanism of geothermal resources[J]. Drilling Engineering, 2024,51(2):1-7.

gases; convective type of reservoir-formation; conductive type of reservoir-formation; compound type of convective-conductive of reservoir-formation

1 问题的提出

随着地热资源勘查开发深度的不断增加和一些地热找矿盲区勘查的全面展开,目前我国地热清洁能源的开发利用正处于一个高潮繁荣的场景。其地热钻井深度从20世纪80—90年代的800~1500 m,发展到现在的2000~3500 m^[1-3];开发利用的热储层从以前的以新近系明化镇组、馆陶组为主,转变为现在的以更深的岩溶热储为主^[4-6]。

地热资源的安全、高效、持续、稳定开发利用关键技术归纳起来主要有2个方面:一是地热资源的靶区选定技术;二是钻井工程技术。其中,钻井工程的投资和钻探风险最大。目前的地热钻井选址,都是在前期地球物理勘探和水文地质调查基础上按照目前公认的“热源、通道、储层、盖层”地热系统理论进行靶区和井址选定。通过已有的地热资源勘查和钻井工程验证来看,达到预期成果和效果的不足50%,特别是在2000 m以深的岩溶热储地热资源勘查中,预期性更差。其表现形式主要有:有热无水、有水无热、无热无水等^[7-9]。有些地热井布置在主要控热和导热构造带上,却无热无水或温度、水量都较低,而距构造带几十千米的地热井却温度、水量都远远高于近处^[10-11];有些地热井在同一断裂带和水文地质单元上,井间距相差不足几百米,而水量和温度却相差很大等等^[12-17]。这些地热井位都满足了“热源、通道、储层、盖层”的地热系统要求,为什么存在这种天壤之别现象?

目前国内地热专家、学者提出了许多地热资源形成机制的理论和观点,如:“热、通、储、盖”组成地热系统,花岗岩放射热源,构造聚热,地热与地震共生同源,壳幔生热等^[18-21],为地热地质理论的建立奠定了基础。但是,大量的地热钻井工程实践证明^[22-23],上述的理论和观点依然存在一定偏差,特别是在地热资源形成机制方面,由于地质条件和深部构造差异较大、热储层非均质性强,到目前为止,还没有形成一套成熟的地热地质学理论^[24],从而导致地热资源分布规律不清、勘查开发风险较大等问题。所以,随着地热资源勘查深度的增加,进一步研究完善地热资源形成机制和分布规律,实现地热地质理论创新,具有一定的意义。

2 地球气体运移及研究现状

2.1 地球气体运移表现形式

从宏观上来讲,地球内部由固态、液态(水)、气态、临界态和熔融态物质组成^[25]。其中,地球内部的气体是高能高压超临界态,压力几千到几百万大气压(1大气压=0.1 MPa),是最为活跃、迁移扩散速度最快的介质,它可以分布在地球的各个圈层,为地球内部的能量和元素迁移演化、地质作用等方面提供了诱发、控制、驱动源动力^[26]。上地壳中的固体矿产、油气、煤系气、地热等资源形成都与深部气体运移密切相关^[27-31]。其表现形式主要有:地震、火山喷发、煤火自燃、天坑形成、森林火灾、雾霾及生态环境损害^[32-33]。特别是各国通过大陆科学钻探工程和地热钻井工程发现地球深部富集大量气体,并且与井深度呈正相关。如:德国超深钻探发现7000 m岩石中富含N₂和He等气体。俄罗斯科拉半岛、瑞典锡利扬扭超深钻探中都发现了H₂、CH₄和N₂等深部气体。中国大陆科学钻探工程(连云港东海县)从400 m开始CH₄和烃类气体富集异常,深部则出现He和CO₂等气体富集^[34-35]。在河南太行山南麓鹤壁市、豫西洛宁县、洛阳龙门等100 m(鹤壁,第四系)、300 m(鹤壁,第四系)、1200 m(鹤壁,古近系)、3200 m(鹤壁,寒武-奥陶系)、2000 m(洛宁,古近系)、1800 m(洛阳龙门,寒武-奥陶系)一般供水井和地热井完井时均出现持续井喷现象,其主要气体成分为CH₄、CO₂和N₂、H₂S^[33,36]。上述钻井工程佐证了地球内部存在巨大气体,并以不同表现方式不间断进行着运移演化。

2.2 地球气体研究现状

早在1913年苏联科学家就提出“射气作用”,并指出“一个不大的成气元素族在地壳中却起巨大作用”。1954年著名的地球化学家Goldschmidt认为“地球目前的气圈和水圈都是在地质时期(46亿年以后)从地球内部逸散出来的挥发物质形成的”,他还指出了排气作用反映了各种地球化学表现^[37]。1980年代早期,瑞士、苏联科学家进一步完善地球气体理论体系,并且提出了地气勘查法寻找隐伏矿床的新方法。

1992年杜乐天等通过对山东、张家口、辽宁、浙

江等地区的幔源包体的研究发现:地幔岩石中富含大量的 H_2 、 CH_4 、 CO 、 CO_2 和 H_2O ;对各大洋和海水取样检测发现:海底深处存在大量的地球气体逸出区,并在海水中溶解了大量的 H_2 、 CH_4 、 3He 气体。另外,世界许多地区大陆架以及冻土带存在大规模非生物形成的甲烷逸出^[25]。近年来,国内将地球深部气体的运移和检测应用在地震研究、铀矿及油气勘探中开始受到关注,并取得了显著成效。特别是在松辽盆地、莺-琼盆地、三水盆地、济阳拗陷、四川威远、塔里木柯克亚和雅克拉气田等都被证实有深部来源的天然气和壳幔复合型的 He 和 CO_2 气藏^[38-40]。地球气体运移与地热资源形成机制研究方面,国内未见相关报道和文献,仅有少量的将地球气体测量应用于温泉勘查方面的文献^[41]。Byrne等^[42]通过地球深部的惰性气体检测和同位素体系分析研究($^3He/^4He$, $^{20}Ne/^{22}Ne$, $^{40}Ar/^{36}Ar$, ^{20}Ne , ^{36}Ar , ^{84}Kr),准确预测了冰岛蒸汽型地热系统的储层温度。

3 地球气体运移与地热成藏模式

3.1 地球气体运移与地质信息识别

瑞典科学家Kristansson K和Malmqvist L在研究氢迁移机理时,发现地球深部的氢不是靠扩散运移,而是靠深部的气体携带做垂向运移,并且垂向运移速度远远高于气体的扩散速度^[43-46]。地球气体

测量和运移规律的研究成果表明^[47-48]:地球深部气体主要以垂向方式向地表运移,并在高压高温气体驱动下穿过不同岩层携带纳米级物质元素运移到地表或大气中,目前地球气体及其它元素测量可达39种。 H 、 H_2 是自然界最小的原子和分子,具有导热性高、扩散速度快、渗透性强、溶解度小、密度低等特征。所以, H 、 H_2 在地球内部可以扩散到岩石裂隙或孔隙的任何区域,并且导致岩石强度降低或断裂^[49]。 He 是最为稳定的惰性气体,2个稳定同位素其成因不同, 3He 主要源于地幔(脱气), 4He 主要源于地壳(放射)。 $^3He/^4He$ 值与大地热流值 q 的关系式为 $q=6.993\ln(^3He/^4He)+165.16$ 。从公式中可以看出: q 与 3He 成正相关, $^3He/^4He$ 值越大,大地热流值越高,说明该区域的热源主要来自于地幔,反之,热源则来自于地壳。同时,在深部地热和气体上移过程中,加速了地壳中的有机质的催化成熟与成烃。所以,利用 $^3He/^4He$ 值可以识别隐伏构造、大地热流、热源、油气及煤系气来源和演化。

地球内部各圈层分布的气体组分不尽相同,但是,除地核外圈、下地幔和中地幔外,所有圈层都有大量的 CH_4 、 CO_2 和其它气体分布^[27],见表1。由于 H 和 H_2 具有极强的穿透性,在运移过程中,在不同地质环境下衍生了 H_2O 、 HCl 、 HF 、 H_2S 、 H_3B 、 NH_3 和烃类等气体^[28]。

表1 地球内部各圈层气体分布特征及主要组分

Table 1 Gas distribution characteristics and main components in different spheres of the earth

地球圈层	气体分布特征	气体主要组分
上地壳	分布地下7000 m以浅的沉积岩或少量的结晶岩中,气体分布连续性较差	CO_2 、 N_2 、 H_2S 、 CH_4 、 O_2 、 CO 、 He 、 Ar 、 Hg 和高碳烷烃及其它烃类、水蒸气等
中地壳	分布在地下7000 m以深的变质岩或火成岩中,气体分布连续性较差	H_2 、 CH_4 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 CO 、 CO_2 为主、水蒸气极少
上地幔	气体量巨大,气体和熔融相互伴生,主要岩性是二辉橄榄岩、方辉橄榄岩和榴辉岩	H_2 、 CH_4 、 CH 、 CH_2 、 CH_3 、 CO_2 、 He ,不存在 H_2O ,气体具有强还原性
地核外圈	也称氢圈,气体量巨大,主要溶解在液铁中	H 、 H_2

根据《地热田地球化学勘查》可知: CO_2 异常对深部构造带极其敏感, Rn 对控热构造和构造交汇部位敏感,由此,可以提供深部热源上升通道信息。不同地球气体的逸出可以初步判定其热源和地热田类型,见表2。

综上,通过对大气和地表土壤中气体检测和分

析,可以准确了解地球内部信息(断层埋深、断层走向、断层宽度、隐伏矿特征、地热来源、油气及煤系气来源等),与传统的地球物理和地震勘查方法相比,其探测深度更深、精度更高、探测效率更快。

3.2 地热成藏模式

地球内部高温高压气体分布、运移和气体组分

表2 地热田类型与地球气体识别^[50]

Table 2 Geothermal field type and earth interior gases identification

地热田类型	地球气体识别	热源传递方式
沉积盆地型地热田	CH ₄ 、N ₂ 、H ₂ S、CO ₂	热传递以传导为主,山前或山区盆地构造附近以对流-传导复合热传导为主,可再生能源弱
构造断裂带型地热田	H ₂ SiO ₃ 、F、Rn、CO ₂	热传递以对流为主,可再生能源强
岩浆型地热田	CO ₂ 为主,其次为H ₂ S和N ₂	热传递以传导为主

受地质环境、构造和岩性影响。由于气体持续运移和频繁活动,导致系列的生态环境问题和灾害,如大气、土壤和地下水污染、地质灾害、干旱酷热、地震、火山喷发等。但是,在地热、油气和煤系气等能源资源的形成和富集方面,气体的运移发挥了巨大作用。由于地球气体的“裂、震、热、爆”效应^[51],可以增加或扩充热源、水源通道和热储层空间,从而为地热资源的形成提供了热源和动力。

2002年俄罗斯地质学家 Летников 认为地球排气的同时也在排出巨量的热量。其中,太古宙时期大面积排气排热,并且强度最大;元古宙时期是区域性排气排热;显生宙时期减弱为线状排气排热;新生代时期为断续状排气排热。所以,仅按照目前的“热源、通道、储层、盖层”地热系统理论寻找地热资源的有利靶区和甜点显然理论依据不充分。

只要深度足够,深部热源无处不在。关键是在目前经济技术条件下,人们总是希望地热资源埋深越浅越好。地热资源形成机制是否需要考虑地球内部气体的运移规律和作用?多数情况下深部的热主要是靠气体的运移携带到地壳浅部,气体是传热的介质和动力。有了气体的运移和驱动,才可能形成稳定持续的地热资源。针对上述观点,重新提出水热型地热资源的成藏模式,主要有对流型、传导型和对流-传导复合型3种模式。

3.2.1 对流型地热成藏模式

对流型地热资源成藏模式以隆起山地或断裂构造带附近为主,其热主要依靠深部气体以对流形式输送到浅部,具有可再生能源强、温度高、资源量大、呈条带状分布等特征。赋存的地质环境条件:(1)深部热输送通道(深大断裂或构造);(2)深部气体持续不断的运移上升,为热的传导和对流提供动力;(3)浅部有储存热、水和气的空间(砂岩热储和岩溶热储);(4)浅部构造发育,并有水的补给源;(5)有足够厚的盖层和封闭圈。

3.2.2 传导型地热成藏模式

传导型地热资源成藏模式以凹陷沉积盆地为主,其热主要依靠隐伏侵入岩或深大断裂中的高温高压气体辐射作用以传导方式向浅部或周边进行传递,呈面状分布特征。赋存的地质环境条件:(1)较大面积隐伏侵入岩分布(花岗岩)或深部热输送通道(深大断裂或构造);(2)浅部有储存热、水和气的空间(砂岩热储和岩溶热储);(3)深部气体持续不断的运移上升,为热的传导和对流提供动力;(4)浅部构造发育,并有水的补给源;(5)有足够厚的盖层和封闭圈。

3.2.3 对流-传导复合型地热成藏模式

对流-传导复合型地热资源成藏模式以隆起山地与沉积盆地过渡带和隆起山地中的盆地为主,其热主要依靠山前深大断裂(构造)高温高压气体或导热性较好岩石以对流或辐射传导方式进行热传递,具有可再生能源强、温度高、资源量大,呈线状或面状分布。赋存地质环境条件:(1)深大断裂和构造隐伏花岗岩或导热性好的变质岩同时存在;(2)浅部、中部和深部气体持续不断的运移,为热的传导和对流提供动力(地球气动力学和热动力学);(3)浅部有储存热、水和气的空间(砂岩热储和岩溶热储);(4)有水的补给源;(5)有足够厚的盖层和封闭圈。需要注意的是:深大断裂或构造埋深较浅,且上部盖层条件较差时,气体携带热一部分散到大气中,另一部分运移到其它空间。由于散热快,一般在火山口附近和大断裂、构造附近很可能导致地热温度较低情况。

3.3 理论创新与地球气体动力学建立

按照目前的地热系统研究理论,精准寻找高品位地热资源理论依据显然不足。地球气体的研究也仅限于地震和监测技术方面,在地球气体运移与地热资源形成机制研究和地球气体动力学建立方面尚属空白。从近年来地热资源勘查和钻井工程

来看,目前的地热系统理论缺少了地球气体动力学的理论支持,进行地热地质理论创新和地球气体动力学建立意义重大。

地球内部气体以溶解、吸附、逸散方式进行运移和富集,一方面可能导致灾害,另一方面催化能源资源和其它矿产的形成演化。通过有序科学开发利用地热及煤系气,不仅可以解决能源保障问题,而且还可以释放地球内部能量,达到减灾防灾目的。面临的科学问题主要有:(1)地球气体分布带生态环境影响;(2)地球气体的来源与迁移规律;(3)地球气体运移对地热资源形成的作用机理;(4)地球气体异常与地热、油气和煤系气分布关系。

地球深部的热源如何传输是地热资源勘查和地热系统研究的重中之重,也是未来的关键技术之一。深部高温高压气体无孔不入,并且其组分有强大的作用力破坏岩石,使气体作为介质携带热在一定地质环境中储存形成地热资源。

通过调查及动态监测工作,确定地球深部气体的迁移、扩散和富集规律。根据不同的气体成分和同位素值来确定地热等能源资源的热源埋深、通道和热通量。特别是对 Rn 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2 、 He 、 H_2S 等气体的监测和运移富集规律研究,能够精确定构造和断裂情况。在此基础上再重点研究地球气体的衰减周期,为地热资源的持续开发利用提供预测和理论支持。

通过钻探建立地下气液动态监测井点,对气体的成分及渗出规律,以及水体中的相关成分、水位水温的变化进行动态监测,掌握气体逸出规律、气体组分的变化,研究地下气体的迁移模式和扩散规律。

在此基础上,建立地球气体动力学,以便完善、丰富和发展地热及其它能源资源的找矿理论。

4 结论

深部高温高压气体广泛赋存于地球内部,是地热及其它能源资源迁移演化的重要介质和驱动力。利用气体识别地球深部信息和地热来源,具有效率高、测深大、精度高等优点。在目前的地热系统理论指导下,仅靠水文地质调查和地球物理勘探方法确定地热资源靶区和井位,其成功率和精准度较低,地热钻井风险巨大。所以,在传统地热系统理论基础上进一步实现理论创新,重点研究地球气体

运移与地热资源形成机制,建立地球气体动力学理论体系,可以解决地热靶区和甜点精度等问题。同时,为地热资源的高效、持续、稳定、安全开发利用提供更加科学的理论依据。

参考文献(References):

- [1] 卢予北,张古彬,陈莹.河南省地热资源开发利用现状与问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(10):35-39.
LU Yubei, ZHANG Gubin, CHEN Ying. Current situation of development and utilization of geothermal resources in Henan and the issue study[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(10):35-39.
- [2] 卢予北.河南省“十一五”深部钻探工程综述[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(Z2):51-55.
LU Yubei. Overview of deep drilling projects in Henan Province during the Eleventh Five Year Plan[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(Z2):51-55.
- [3] 卢予北,李艺,卢玮,等.新时代地热资源勘查开发问题研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):1-8.
LU Yubei, LI Yi, LU Wei, et al. Research on the exploration and development of geothermal resources in the new era[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):1-8.
- [4] 谭现锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (4) : 110-117.
- [5] 谭现锋,刘肖,马哲民,等.干热岩储层裂隙准确识别关键技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):48-57.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, MA Zhemin, et al. Discussion on the key technology for fracture identification in hot dry rock reservoir[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):48-57.
- [6] 邵一臻,赵福金,荆京,等.山西干热岩GR1井高温固井技术研究与实践[J].钻探工程,2022,49(6):42-47.
XIAO Yizhen, ZHAO Fujin, JING Jing, et al. Research and practice of cementing slurry technology for Well GR1 in Shanxi high temperature hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):42-47.
- [7] 河南省自然资源科学研究院.河南省地热资源地质工作成果集成与综合评价[R].郑州,2021.
Henan Academy of Natural Sciences. Integration and comprehensive evaluation of achievements in geothermal resources geological work of Henan Province[R]. Zhengzhou, 2021.
- [8] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院.河南省地热开发产业化关键技术研究 with 成果集成报告[R].郑州,2021.
No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. The report of key technology research and achievement integration on industrialization of geothermal development in Henan Province [R]. Zhengzhou, 2021.
- [9] 河南省地质研究院.河南省汝州地区地热资源调查[R].郑州,2024.

- Henan Academy of Geology. Investigation of geothermal resources in Ruzhou area, Henan province[R]. Zhengzhou, 2024.
- [10] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院. 中国洪水文化生态区地热田勘查报告[R]. 郑州, 2018. No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. Exploration report on geothermal fields in the Qishui cultural ecological area of China[R]. Zhengzhou, 2018.
- [11] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院. 河南省干热岩资源潜力调查评价[R]. 郑州, 2019. No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. Investigation and evaluation of the potential of hot dry rock resources in Henan Province[R]. Zhengzhou, 2019.
- [12] 河南省地质矿产勘查开发局第一水文地质工程地质队. 郑东新区地热资源勘查报告[R]. 郑州, 2008. 1st Hydrogeology and Engineering Geology Team Under Henan Geology and Resources Survey Bureau. Exploration report on geothermal energy resources in new district of Zhengzhou[R]. Zhengzhou, 2008.
- [13] 河南省地质矿产勘查开发局第一地质工程院. 河南省洛阳市洛南新区地热资源普查(预可行性勘查)报告[R]. 驻马店, 2011. 1st Geological Engineering Institute Under Henan Geology and Resources Survey Bureau. Survey Report on geothermal resources in Luonan New Area, Luoyang City, Henan Province (Pre feasibility exploration)[R]. Zhumadian, 2011.
- [14] 河南省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质队. 河南省郑州市西南郊地热资源预可行性勘查(普查)报告[R]. 郑州, 2011. 2nd Hydrogeology and Engineering Geology Team Under Henan Geology and Resources Survey Bureau. Report of pre-feasibility exploration in geothermal resources in the southwest suburb of Zhengzhou City, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2011.
- [15] 河南省地质矿产勘查开发局第二地质环境调查院. 河南省通许县岩溶热储地热资源调查报告[R]. 郑州, 2021. No.2 Institute of Geo-Environment Survey of Henan. Report on geothermal resources investigation in karstic reservoir in Tongxu, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2021.
- [16] 河南省国土空间调查规划院. 河南省南阳市城区东南部地热资源预可行性勘查报告[R]. 郑州, 2022. Henan Institute of Land and Space Planning. Report on pre-feasibility survey of geothermal resources in the southeast of Nanyang City, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2022.
- [17] 河南省资源环境调查一院. 河南省新郑城区岩溶热储地热资源调查[R]. 郑州, 2023. No.1 Institute of Henan Provincial Resources and Environment Survey. Investigation of karstic reservoir geothermal Resources in Xinzheng, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2023.
- [18] 姜光政, 王亚奇, 胡杰. 中国中—高温地热资源勘探方向与优选靶区[J]. 科技导报, 2022, 40(20):78-84. JIANG Guangzheng, WANG Yaqi, HU Jie, et al. Medium-high temperature geothermal resources in China: Exploration directions and optimizing prospecting targets [J]. Science & Technology Review, 2022, 40(20):78-84.
- [19] 唐显春, 王贵玲, 马岩, 等. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. 地质学报, 2020, 94(7):2052-2065. TANG Xianchun, WANG Guiling, MA Yan, et al. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2052-2065.
- [20] 韩江涛, 牛璞, 刘立家, 等. 地热资源与地震活动共生深部驱动机制研究现状与展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(6):1950-1968. HAN Jiangtao, NIU Pu, LIU Lijia, et al. Research status and prospect of deep driving mechanism of co-occurrence of geothermal resources and seismic activity[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6):1950-1968.
- [21] 王贵玲, 陆川. 碳中和目标驱动下地热资源开发利用技术进展[J]. 地质与资源, 2022, 31(3):412-425, 341. WANG Guiling, LU Chuan. Progress of geothermal resources exploration and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3):412-425, 341.
- [22] 卢予北, 张晗, 王攀科, 等. 河南省干热岩赋存地质环境及找矿方向[J]. 钻探工程, 2021, 48(2):1-7. LU Yubei, ZHANG Han, WANAG Panke, et al. Geological environment and prospecting fields of hot dry rocks in Henan province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2):1-7.
- [23] 张晗, 卢玮, 黄焯, 等. 河南水热型地热成因模式及钻探方法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(9):8-14, 20. ZHANG Han, LU Wei, HUANG Xuan, et al. Generation model and drilling method of hydrothermal geothermal resources in Henan Province [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9):8-14, 20.
- [24] 孙焕泉, 毛翔, 吴陈冰洁, 等. 地热资源勘探开发技术与发展方向[J/OL]. 地学前缘, <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.9.25>. SUN Huanquan, MAO Xiang, WU Chenbingjie, et al. Technique status and prospect in geothermal resources exploration and development [J/OL]. Earth Science Frontiers, <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2023.9.25>.
- [25] 杜乐天. 地球的五气圈与氢、烃资源——兼论气体地球动力学[J]. 铀矿地质, 1993, 9(5):257-265. DU Leyian. Five gas-spheres and hydrogen, hydrocarbon resources in the earth: With a discussion on geodynamics of gas [J]. Uranium Geology, 1993, 9(5):257-265.
- [26] 地球流体科学委员会. 流体地球科学进展[M]. 北京:地震出版社, 1999. Committee on Geofluid Science. Progress in Fluid Geoscience [M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [27] 杜乐天. 地球的五气圈与中地壳天然气开发[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1):25-30. DU Letian. The five gas-spheres of the earth and natural gas exploitation from middle crust [J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(1):25-30.
- [28] 杜乐天. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质论评, 2005, 51(2):174-180. DU Letian. Significance of earth degassing and its research progress[J]. Geological Review, 2005, 51(2):174-180.
- [29] 杨学祥, 牛树银, 陈殿友. 深部物质与深部过程[J]. 地学前缘, 1998, 5(3):77-86. YANG Xuexiang, NIU Shuyin, CHEN Dianyou. Materials and relevant processes in deep earth [J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(3):77-86.

- [30] 张铭杰,王先彬,李立武.地幔流体组成[J].地学前缘,2000,7(2):401-412.
ZHANG Mingjie, WANG Xianbin, LI Liwu. Composition of mantle fluid[J]. Earth Science Frontiers, 2000,7(2):401-412.
- [31] 郑乐平,冯祖钧,徐寿根,等.起源于地球深部的济阳拗陷CO₂气藏[J].科学通报,1995,40(24):2264-2266.
ZHENG Leping, FENG Zujun, XU Shougen, et al. CO₂ gas reservoirs originated from the deep earth in the Jiyang Depression[J]. Chinese Science Bulletin, 1995,40(24):2264-2266.
- [32] 卢予北,吴烨.雾霾及地下水土壤污染的地质作用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):1-9.
LU Yubei, WU Ye. Effects of geological factors on the formation of fog and haze and the pollution of underground water and soil[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(5):1-9.
- [33] 卢予北,李艺,周春华,等.地气灾害与地质科学问题[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):1-8.
LU Yubei, LI Yi, ZHOU Chunhua, et al. Underground gas disaster and geological science[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016,43(10):1-8.
- [34] 唐桢.地气物质迁移规律研究[D].成都:成都理工大学,2012.
TANG Zhen. Study on Geogas Transportation Rule[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [35] 许志琴.中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果[J].岩石学报,2004,20(1):1-8.
XU Zhiqin. The scientific goals and investigation progresses of Chinese continental scientific drilling project[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004,20(1):1-8.
- [36] 河南省地矿局第一地质矿产调查院.河南省洛阳洛宁盆地地热资源预可行性勘查[R].郑州,2023.
1st Geological and mineral resources survey institute of Henan. Pre-feasibility exploration of geothermal resources in the Luoning Basin of Luoyang, Henan Province[R]. Zhengzhou, 2023.
- [37] 杜乐天,王驹.气体地球动力学——一个重要的研究新方向[J].地球科学进展,1993,8(6):66-73.
DU Letian, WANG Ju. Gas geodynamics: A new direction of geoscience study[J]. Advances in Earth Science, 1993,8(6):66-73.
- [38] 高波,陶明信,王万春.深部热流体对油气成藏的影响[J].矿物岩石地球化学通报,2001,20(1):30-34.
GAO Bo, TAO Mingxin, WANG Wanchun. Influences of deeply sourced thermal fluid on the formation of hydrocarbon reservoirs[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001,20(1):30-34.
- [39] 金之钧,张刘平,杨雷,等.沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探[J].地球科学,2002,27(6):659-665.
JIN Zhijun, ZHANG Liuping, YANG Lei, et al. Primary study of geochemical features of deep fluids and their effectiveness on oil/gas reservoir formation in sedimental basins[J]. Earth Science, 2002,27(6):659-665.
- [40] 李明诚.地壳中的热流体活动与油气运移[J].地学前缘,1995,2(4):155-162.
LI Mingcheng. Hot fluid activity in crust and hydrocarbon migration[J]. Earth Science Frontiers, 1995,2(4):155-162.
- [41] 冯源升.地气测量在温泉勘查上的应用研究[D].成都:成都理工大学,2014.
FENG Yuansheng. The application research of Geogas measurement in hot spring exploration[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [42] Byrne D J, Broadley M W, Halldórsson S A, et al. The use of noble gas isotopes to trace subsurface boiling temperatures in Icelandic geothermal systems[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021,560:116805.
- [43] Kristianson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of Rn in the ground and a new physical model for the transport[J]. Geophysics, 1982,27(10):1444-1452.
- [44] Malmqvist L, Kristianson K. Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984(70):407-416.
- [45] Kristianson K, Malmqvist L. Trace elements in the geogas and their relation to bedrock composition[J]. Geoexploration, 1987(24):517-534.
- [46] Kristianson K, Malmqvist L, Persson W. Geogas prospecting: A new tool in the search for concealed mineralizations[J]. Endeavour, New Series, 1990,14(1):28-33.
- [47] 刘应汉,汪启明.寻找隐伏矿的“地气”测量方法原理及应用前景[J].青海国土经略,2006,(3):41-42.
LIU Yinghan, WANG Qiming. The principle and application prospects of geogas measurement methods for searching hidden mines[J]. Qinghai Land and Resources Strategy, 2006(3):41-42.
- [48] 刘晓辉,童纯菡.河床地区地气测量找隐伏断裂[J].物探与化探,2009,33(2):128-131.
LIU Xiaohui, Tong Chunhan. The application of geogas survey to the prospecting for concealed faults in river bed areas[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2009,33(2):128-131.
- [49] 徐永昌,沈平,刘文汇,等.东部油气区天然气中幔源挥发份的地球化学:II.幔源挥发份中的氦、氩及碳化合物[J].中国科学(D辑),1996,26(2):187-192.
XU Yongchang, SHEN Ping, LIU Wenhui, et al. Geochemistry of mantle-derived volatiles from natural gas in eastern oil and gas region: II. Helium, Argon and carbon compounds in mantle-derived volatiles[J]. Science in China: Series D, 1996,26(2):187-192.
- [50] 朱炳球,朱立新,史长义,等.地热田化学勘查[M].北京:地质出版社,1992.
ZHU Bingqiu, ZHU Lixin, SHI Changyi, et al. Chemical Exploration of Geothermal Fields[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992.
- [51] 杜乐天.地球排气作用——建立整体地球科学的一条统纲[J].地学前缘,2000,7(2):381-390.
DU Letian. Outgassing of the earth is a key link for the framework of the whole earth science[J]. Earth Science Frontiers, 2000,7(2):381-390.