

# 火山与岩溶地貌的相似性分析及勘探启示

巩建强

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015)

**摘要:** 通过野外露头的实际对比发现, 火山熔岩隧道与岩溶溶洞均为由廊道-厅堂构成的近水平长条形空间, 其形成均与流体对岩层的侵蚀有关, 后期主要经历机械垮塌和沉积充填破坏; 破火山口与岩溶漏斗均为近中央部位存在陡直管道的漏斗形洼地, 两者分别是在熔岩喷出和流水下渗通道的基础上, 由岩层垮塌改造形成, 后期主要经历沉积充填作用; 火山渣状熔岩与岩溶石芽地貌均为破碎岩块纵横排列形成的带状、席状岩石群, 岩石孔缝在后期埋藏中经历沉积和化学充填作用。相似的结构形态及后期改造过程, 使其埋藏后的储集空间类型与展布相似, 据此可借鉴已有的碳酸盐岩缝洞储层研究成果, 指导火山岩储层的预测与评价。

**关键词:** 火山地貌; 岩溶地貌; 相似性; 储集空间; 勘探启示

中图分类号: TE112.222

文献标识码: A

## Similarity analysis of volcanic and karst landforms and the exploration revelation

GONG Jianqiang

(Exploration & Development Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

**Abstract:** Through the actual comparison of field outcrops, it is found that both lava tunnels and karst caves are horizontal strip spaces formed by corridors and halls, and their formation is related to the erosion of rock layers by fluids. In the later period, they mainly experience mechanical collapse and sedimentary filling failure. Both caldera and karst funnel are funnel-shaped depressions with steep pipes near the center. They are formed by rock collapse on the basis of lava ejection and flowing water infiltration channels, and mainly go through sedimentation and filling in the later period. Scoria lava and karst stone bud landform are zonal and sheet rock groups formed by the horizontal and vertical arrangement of broken rock blocks. They are caused by collapsed rock stratum surrounding tunnels of lava or water flows. Both are easily remolded by sedimentary filling. Scoria and clint are complex arranged bond-like and/or sheet-like broken rocks. Fractures and pores/caves are easily found and mainly filled by sediment and/or chemical minerals. The similar structural morphology and the post-reconstruction process make the type of reservoir space after burial similar to the distribution. Therefore, the existing research results of carbonate fracture-cavern reservoirs can be used for reference to guide the distribution prediction and evaluation of volcanic rock reservoirs.

**Key words:** volcanic landform; karst landform; similarity; reservoirs space; exploration revelation

受温度、压力、环境骤变的影响, 深部岩浆在喷出地表及其后的流动过程中, 会因熔岩内挥发性气体外泄、熔岩流表层与内部凝结速度差异、岩浆回撤及岩层垮塌等原因, 在不同的位置形成不同的微构造单元, 构成多种地貌景观, 其中较为常见的有熔岩隧道、破火山口、翻花熔岩(渣丘熔岩)及火山锥碟等<sup>[1-3]</sup>。碳酸盐岩等可溶性岩石, 在长期的地表水和地下水溶蚀作用下, 也可形成溶洞、岩溶漏斗、岩溶石芽及石林石峰等地貌<sup>[4-6]</sup>。通过野外露头的实

际对比发现, 火山岩的多种地貌单元与岩溶地貌在结构形态、形成过程及后期充填破坏等方面具有相

收稿日期: 2018 - 12 - 02

作者简介: 巩建强, 高级工程师, 1974年生, 1998年毕业于西南石油学院应用地球物理专业, 现从事油气勘探方面的研究工作。

基金项目: 国家科技重大专项“济阳坳陷油气富集机制与增储领域”(2016ZX05006-003)。

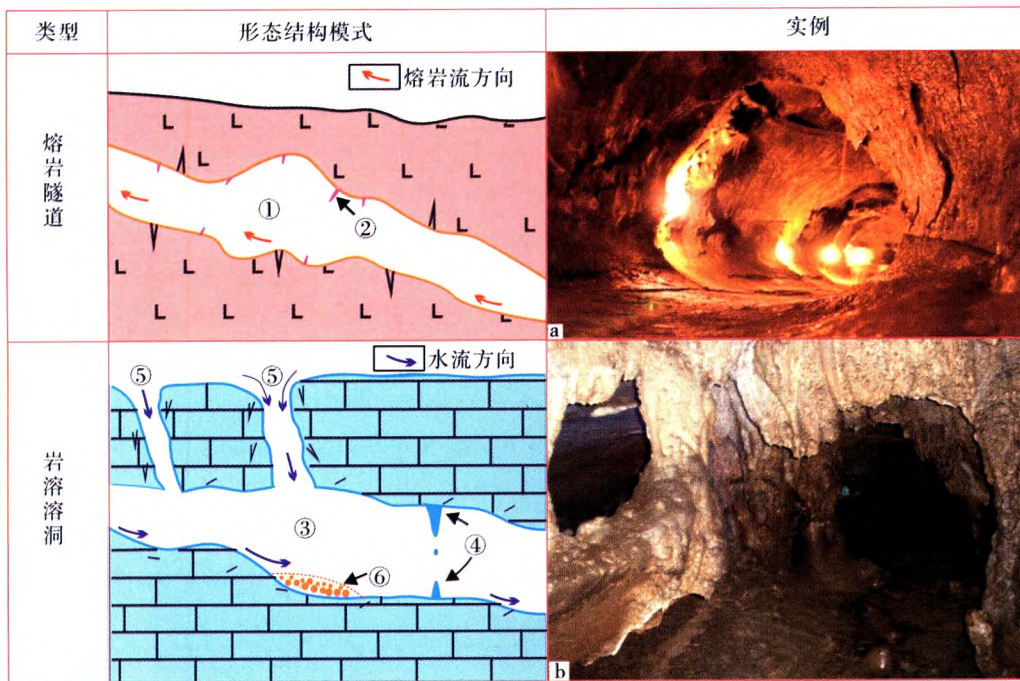
似性，如岩溶隧道与岩溶溶洞、破火山口与岩溶漏斗、翻花熔岩与石芽地貌等。但对于火山岩储层形成机理与分布规律的研究，还局限于熔岩孔隙类型与成因、岩性与岩相分析<sup>[7-15]</sup>。火山与岩溶地貌形态及后期改造过程相似，两类储层具有相似的储集空间类型与展布规律。对比两种地貌单元的相似性，可以为寻找火山岩中新的储集空间类型提供依据，开拓火山岩储层的研究思路与勘探领域。

### 1 熔岩隧道与岩溶溶洞

熔岩隧道是岩浆在流动过程中，由于熔岩内外凝固速度的差异，在壳层凝固之后，下伏液态熔岩仍处于流动状态，待液态熔岩流走之后，又无新的熔岩补充，所形成的隧道和洞穴<sup>[16]</sup>。熔岩隧道的结构形态与碳酸盐岩溶洞非常相似，其“管道-空洞”结构对应岩溶径流带的“廊道-厅堂洞”结构(图1)。此外，熔岩隧道内的火山碎屑物和残留岩浆冷却后，还可以凝结在火山管道内，形成类似钟乳石的“岩熔钟乳”(岩熔荆棘)，如五大连池火山群东西焦德

布火山北部的熔岩隧道，即是火山喷发的熔岩在流动过程中形成的地下洞穴，最大的熔岩隧道(白龙洞)长达515 m，空洞部分洞宽、洞高均超过10 m，洞底或斜坡或平直，洞内还有分支，洞顶、洞壁发育熔岩钟乳、熔岩荆棘，洞底还发育岩熔石笋等。

熔岩隧道与岩溶溶洞，分别是熔岩流在火山岩层中和地下径流在可溶岩层中形成的近水平长条形空间，均由狭长的“廊道”和局部宽阔的“厅堂”构成。两者不仅形态类似，其后期经历的充填破坏作用也极为相似，主要为机械垮塌充填和沉积充填破坏作用。前者玄武岩或火山碎屑岩洞顶会在重力作用下发生垮塌，充填洞穴，如我国山东碣石山“双子洞”大部分已被火山碎屑物质充填，“龙马洞”正在经历玄武岩洞顶的垮塌充填(图2a)。后者洞顶和洞壁也可在重力作用下，发生机械垮塌<sup>[10,17]</sup>，如塔里木盆地西北缘一间房剖面上见到了奥陶系灰岩溶洞(图2b)。除此之外，火山间歇期，熔岩隧道可以成为水流通道，流水携带的碎屑物质(外源或内源)在水动力变化处可卸载充填溶洞，与碳酸盐岩溶洞内地下河沉积充填作用类似<sup>[18]</sup>。



①岩熔隧道；②岩熔荆棘；③溶洞；④石钟石笋；⑤落水洞；⑥沉积物

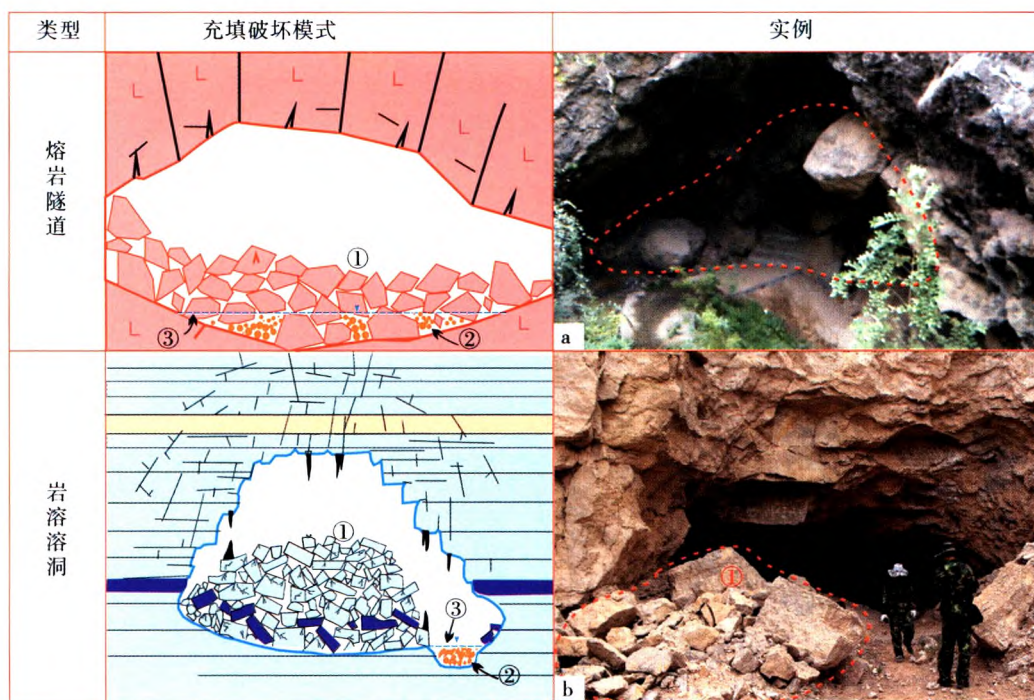
a. 美国瑟斯顿岩溶隧道;b. 云南九乡溶洞

图1 熔岩隧道与岩溶溶洞结构对比

### 2 破火山口与岩溶漏斗

破火山口是岩浆大量喷出或回撤导致深部地层压力降低，引起火山口周围崩塌下陷，又经风、水等

自然营力侵蚀而形成的火山地貌<sup>[19-21]</sup>。破火山口在漏斗形火山口的基础上发育而成，形态常为低平的锅形洼地，平面上呈圆形或近圆形(图3a)，有时会因后期火山喷发或流水改造，成为一边存在缺口的马蹄形(图3b)，如山西大同的破火山口<sup>[22]</sup>。破火山



①机械垮塌充填；②暗河沉积充填；③暗河水面  
a. 山东碣石山；b. 塔北一间房剖面

图2 熔岩隧道与岩溶溶洞充填特征对比

口直径常常为原火山口的数倍到数十倍，达几十米甚至几十千米，如日本九州阿苏山破火山口略呈椭圆形，南北长 24 km，东西宽 18 km，面积 250 km<sup>2</sup>。

岩溶漏斗又称溶斗，是流水对可溶岩石的溶蚀或暗河冲积引起溶洞洞顶垮塌而形成的漏斗状或碟状地貌，如重庆奉节县荆竹乡小寨村岩溶漏斗（图 3c）。在漏斗中央部位存在较为陡直的落水洞，是地表径流与地下渗流带连接的通道，地表水在向溶斗汇聚并经落水洞流入地下的过程中，不断侵蚀地表溶岩和落水洞壁，使溶斗面积不断扩大、甚至连接几十平方千米，如云南罗平的岩溶漏斗群（图 3d）。

破火山口与岩溶漏斗不仅形态相似，其形成与破坏过程也具有可比性，两者分别是在熔岩喷出和流水下渗通道的基础上，由岩层垮塌改造形成；形态上均为内缘陡直、外缘低缓的漏斗形。若溶斗发育在山体斜坡部位，长期单向水流作用可在溶斗高部位侵蚀成谷，形成与马蹄形破火山口相似的形态。此外，两者在中央部位均存在沟通深部的陡直通道，即火山径与落水洞，在剖面上与浅层漏斗构成“喇叭”状。不仅如此，一定条件下火山径和落水洞均可被碎屑物充填堵塞，并积水成湖，成为相似的碎屑物堆积环境，并逐渐为沉积充填物夷平。

### 3 翻花熔岩与岩溶石芽

翻花熔岩即渣状熔岩，是熔岩在流动过程中，由于熔岩流内外温度存在差异，熔岩表层先趋于凝固形成表壳，该固结 - 半固结的表壳被内部继续流动的熔岩推挤，加之冷却收缩而形成的破碎且杂乱堆积的熔岩。这些渣状熔岩还可被强劲的熔岩流驮着继续运移，并在陡坡处倾泻而下，形成石塘、石寨等地貌景观<sup>[23]</sup>。如我国五大连池火山群火烧山的“翻花石海”以及老黑山“龙门石寨”景观（图 4a）。

岩溶石芽是可溶岩平缓坡面上常见的岩溶地貌，是地表水沿岩层裂隙流动不断溶蚀岩层形成的岩石群，其形态受岩性和构造裂隙控制，多呈尖脊状、尖刀山状，规模一般在半米至一、二米，个别可达十余米。我国重庆市石柱县黄水镇的“千野牧场”即是典型的岩溶石芽地貌，又如浙江省常山县的三衢石芽，岩石受流水冲刷、溶蚀，形成沟壑相间的石芽群，与岩熔流动形成的翻花熔岩非常相似（图 4b）。

翻花熔岩与岩溶石芽宏观上均为尖脊状岩块纵横排列形成的带状、席状岩石群，岩块之间为熔岩流推挤和流水溶蚀等作用形成的裂缝、裂隙，它们在埋藏过程中除受上覆沉积物充填之外，还会发生化学充填作用，火山岩地层的钻井岩心中多见方解石充填现象。如春风油田排 66 井石炭系安山岩中见厚达数厘米的方解石充填缝（图 5a）；塔河油田 S76 井奥陶系灰岩岩心除网状缝被方解石充填外，还见燧石结核等（图 5b）。

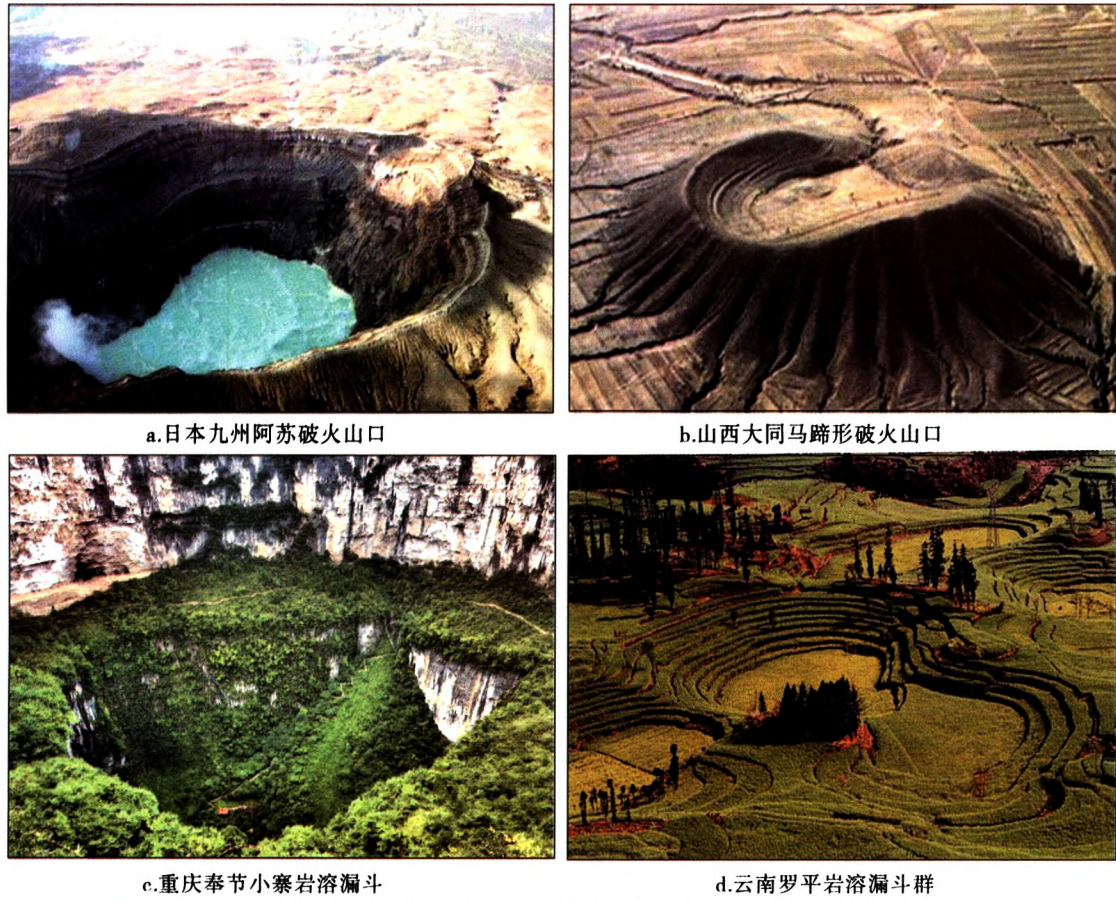


图3 破火山口与岩溶漏斗地貌形态对比

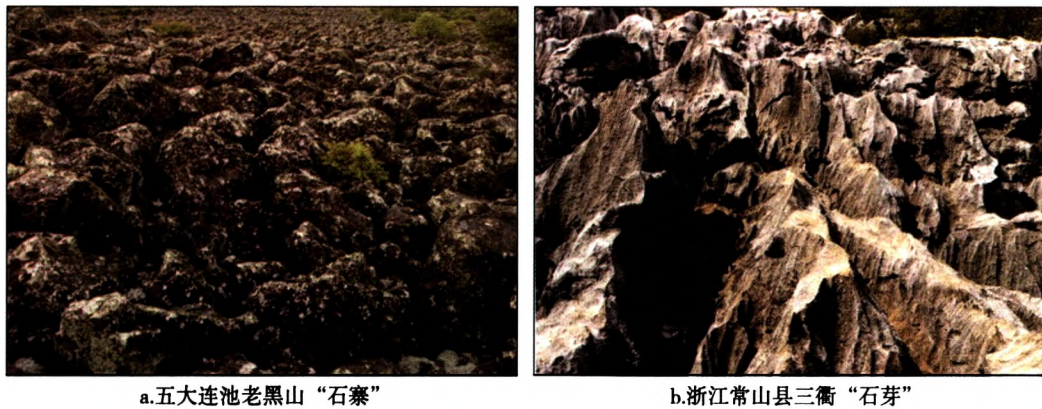


图4 翻花熔岩与岩溶石芽地貌特征

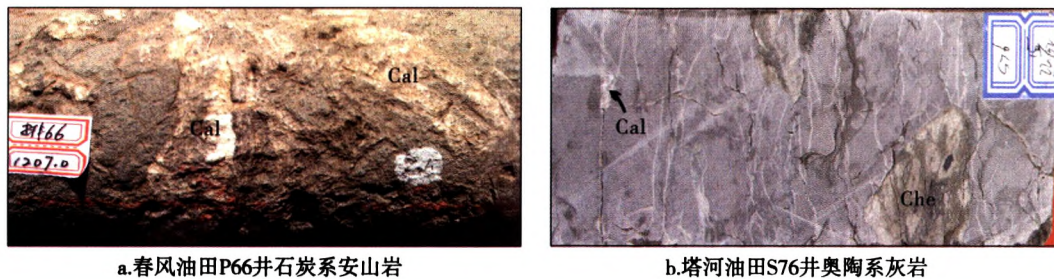


图5 火山岩与碳酸盐岩缝洞充填改造现象

#### 4 其他相似地貌

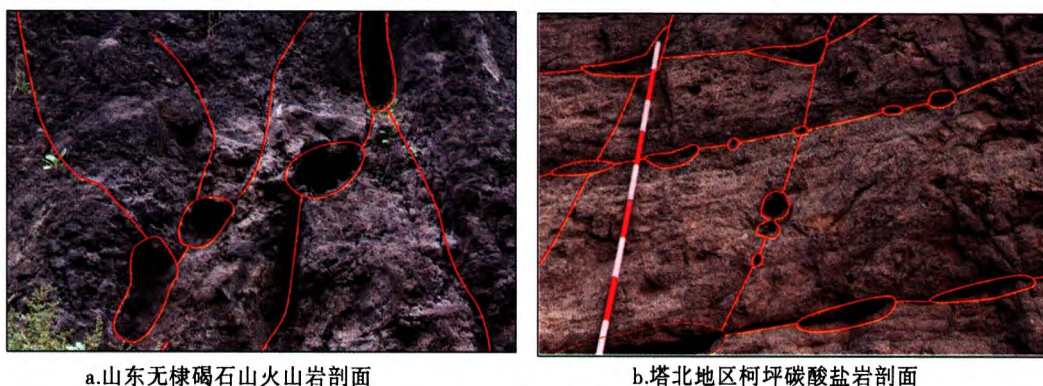
除上述几种类型之外，火山活动区与岩溶区还发育其他相似地貌单元，如由熔岩流内气体不断外泄形成的火山锥与岩溶区小型渗流洞<sup>[24-25]</sup>，火山口

周围堆积的火山碎屑岩, 在构造活动及长期的风雨侵蚀下形成的“石林”与岩溶“石林”地貌等。此外, 经历长期物理与化学侵蚀, 火山岩剖面之上也可形成类似溶岩剖面的“缝洞复合体”(图 6), 两者在后期埋藏之后, 均可成为油气储集空间与渗流通道。

## 5 油气勘探启示

碳酸盐岩与火山岩都是重要的油气储层, 均具有较强的非均质性<sup>[26-28]</sup>, 因此, 准确预测有效储层分布是制约两类储层勘探的关键, 这就需要揭示其储集空间类型及分布规律。相对火山岩, 人们对碳酸盐岩储层的认识较为深入, 较早地认识到该类储

层不仅存在类似碎屑岩储层的粒间孔、晶间孔、溶蚀孔等, 还存在特殊的岩溶缝洞型储集体系。所谓岩溶缝洞型储集体系, 是指由岩溶作用形成的缝洞, 在后期埋藏过程中保留或新形成的储集空间, 包括未充填的岩溶缝洞、缝洞充填物间孔隙, 以及由岩溶作用引起的裂缝系统等<sup>[29-32]</sup>。岩溶缝洞型储层是碳酸盐岩储层的重要类型, 目前已在国内外多个含油气盆地中发现此种类型的油气田(藏), 如美国德克萨斯州西部二叠盆地的 Puckett、Yates、Hobbs 等油田<sup>[33-34]</sup>、加拿大阿尔伯塔省 Grosmont 油田<sup>[35]</sup>、墨西哥的 Golden Lane 油田<sup>[36]</sup>、俄罗斯 Timan - Pechora 盆地的 Kharyaga 油田<sup>[37]</sup>, 以及我国塔里木盆地塔河、塔中油气田等<sup>[38-39]</sup>。



a. 山东无棣碣石山火山岩剖面

b. 塔北地区柯坪碳酸盐岩剖面

图 6 火山岩与碳酸盐岩缝洞复合体对比

自 1887 年美国圣金华盆地火山岩油气藏被发现以来, 目前已在全球 20 多个国家的 300 多个盆地或区块内的火山岩内发现了油气聚集<sup>[29]</sup>。对于火山岩储集空间类型及发育机制的研究, 一直是火山岩油气成藏研究的重要内容<sup>[40-41]</sup>。目前主要将储集空间形成机制归为火山作用、成岩作用和构造作用, 分别对应原生孔隙(气孔、晶间孔、粒间孔等)、次生孔隙(各类溶蚀孔)和裂缝<sup>[8]</sup>, 而由火山岩熔作用形成的孔洞在后期埋藏过程中保留或新产生的储集空间, 还尚未引起人们的关注。从火山与岩溶地貌形态及后期充填破坏的相似性可知, 在火山岩的后期埋藏过程中, 熔岩隧道、破火山径、翻花熔岩间隙等岩溶空间, 也会保留或部分保留形成类似岩溶缝洞储集体的“岩熔缝洞”储集空间。火山岩具有更强的耐风化侵蚀性, 使岩熔缝洞更容易被保留<sup>[42-43]</sup>, 从而形成高孔渗的优质储层, 这类储层在我国石炭 - 二叠系、侏罗 - 白垩系、古近系和新近系火山岩地层中均大量存在。

针对岩溶缝洞储层, 国内外已进行了多年研究, 特别是近 10 年来, 我国学者结合塔河油田实际, 在岩溶缝洞发育机制、分布规律与充填特征等方面开

展了大量的研究工作, 提出了缝洞系统、缝洞单元概念和发育模式, 揭示了缝洞充填规律, 且形成了多种缝洞预测方法和技术等<sup>[6, 32, 44-46]</sup>。从火山与岩溶地貌的相似性来看, 这些成果或可用于“岩熔缝洞”储层的预测和评价。

## 6 结束语

理论与勘探实践均已证实, 火山岩与碎屑岩、碳酸盐岩一样, 也是重要的油气储层, 逐渐成为油气勘探开发的重要领域。本文通过对火山与岩溶地貌在结构形态、形成过程, 特别是后期充填破坏等方面的相似性分析, 提出火山岩地层中应存在类似岩溶缝洞型储层的“岩熔缝洞”储集空间, 或构成重要的火山岩储集类型。“岩熔缝洞”概念的提出, 可以丰富火山岩储层空间类型与研究内容, 开拓火山岩勘探思路。

不可否认, 作为两个岩石大类, 火山岩和碳酸盐岩在形成机制、矿物组成、岩石特征等方面的差异, 使“岩熔缝洞”与岩溶缝洞在后期埋藏过程中, 经历的物理、化学变化存在差异。因此, 对于“岩熔

缝洞”储层的预测和评价,还应从火山熔岩自身的特点出发,结合具体的构造背景与埋藏过程,进行科学地分析。

### 参考文献

- [1] BRUNO, B C. Quantifying the effect of rheology on lava - flow margins using fractal geometry [J]. *Bulletin of Volcanology*, 1994, 56 (3): 193 - 206.
- [2] 吕宗文. 黑龙江五大连池火山群现代火山构造及其形成机制[M]. *火山地质与矿产*, 1994, 15 (1): 5 - 21.
- [3] ANDERSON, S W. The development of fluid instabilities and preferred pathways in lava flow interiors: insights from analog experiments and fractal analysis [J]. *GSA Bulletin*, 2005, 396: 147.
- [4] 丁晨, 沈方. 中国喀斯特地貌的形成机制及分布[J]. *唐山师范学院学报*, 2001, 25 (5): 72 - 73.
- [5] 陈清华, 刘池阳, 王书香, 等. 碳酸盐岩缝洞系统研究现状与展望[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 23(2): 196 - 202.
- [6] 夏日元. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩储层古岩溶发育规律[M]. *水文地球化学研究进展*, 北京: 地质出版社, 2012: 233 - 240.
- [7] PETFORD N, MCCAFFREY K J W. Hydrocarbon in crystalline rocks[M]. London: the Geological Society of London, 2003.
- [8] 邹才能, 赵文智, 贾承造, 等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35 (3): 257 - 270.
- [9] 纪友亮. 油气储层地质学[M]. 山东青岛: 中国石油大学出版社, 2009: 156 - 172.
- [10] LOUCKS, R G. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial - depth modifications, spatial complexity and reservoir implications [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(11): 1795 - 1834.
- [11] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. *地学前缘*, 2011, 18 (4): 181 - 192.
- [12] 曹建文, 夏日元, 张庆玉. 应用古地貌成因组合识别法恢复塔河油田主体区古岩溶地貌[J]. *新疆石油地质*, 2015, 36 (3): 285 - 287.
- [13] 康志宏, 陈琳, 鲁新便, 等. 塔河岩溶型碳酸盐岩缝洞系统流体动态连通性研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(2): 110 - 120.
- [14] 石磊, 李书兵, 黄亮, 等. 火山岩储层研究现状与存在的问题[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31 (5): 68 - 72.
- [15] 衣健, 王璞珺, 唐华风, 等. 火山地层界面的地质属性、地质内涵和储层意义——以中国东北地区中生代 - 新生代火山岩为例[J]. *石油学报*, 2015, 36 (3): 324 - 336.
- [16] PETERSON D W, SWANSON D A. Observed formation of lava tubes during 1970 - 1971 at Kilauea Volcano, Hawaii[J]. *Studies in Speleology*, 1974, 2(6): 209 - 223.
- [17] 金强, 田飞, 鲁新便, 等. 塔河油田奥陶系古岩溶径流带的垮塌充填特征分析[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36 (6): 729 - 735.
- [18] 徐微, 蔡忠贤, 贾振远, 等. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏溶洞充填物特征[J]. *现代地质*, 2010, 24 (2): 287 - 293.
- [19] AGUST GUDMUNDSSON. Infrastructure and mechanics of volcanic systems in Iceland[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1995, 64 (1 - 2): 1 - 22.
- [20] 宋明水, 赵乐强, 吴春文, 等. 准噶尔盆地车排子地区石炭系顶部风化壳结构及其控藏作用[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37 (3): 13 - 21.
- [21] 张长建, 刘少杰, 罗少辉, 等. 塔里木盆地皮山破火山口构造及其油气地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37 (3): 281 - 285.
- [22] 安卫平, 苏宗正. 山西大同火山地貌[J]. *山西地震*, 2008, 36 (1): 1 - 5.
- [23] 李永生. 五大连池老黑山熔岩流分形特征机器成因研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [24] 白志达, 孙善平, 李家振, 等. 五大连池新期火山锥体结构及喷发过程[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 369 - 377.
- [25] 吕洪波. 五大连池世界地质公园中“火山弹”与“喷气锥”景点定名商榷[J]. *地质论评*, 2007, 53 (3): 383 - 389.
- [26] SINGLE R T, JARRAM D A. The 3D facies architecture of flood basalt provinces and their internal heterogeneity: examples from the Paleogene Skye Lava Field[J]. *Journal of the Geological Society*, 2004, 161 (6): 911 - 926.
- [27] DOU Q, SUN Y, SULLIVAN C. Rock - physics - based carbonate pore type characterization and reservoir permeability heterogeneity evaluation, Upper San Andres reservoir, Permian basin, west Texas [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2011, 74 (1): 8 - 18.

- [28] 付金华, 白海峰, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系碳酸盐岩储集体类型及特征[J]. 石油学报, 2012, 34(S2): 110 - 117.
- [29] 陈新发, 匡喜春, 查明, 等. 火山岩油气成藏机理与勘探技术——以准噶尔盆地为例[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [30] 曲长胜, 邱隆伟, 李文涛, 等. 渤海湾盆地滩北凹陷孔三段中基性火山岩储层特征及控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(5): 1284 - 1296.
- [31] 夏日元. 碳酸盐岩缝洞系统模式及成因研究[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- [32] 金强, 田飞. 塔河油田岩溶型碳酸盐岩缝洞结构研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 15 - 21.
- [33] CRAIG D H. Caves and other features of Permian Karst in sand and dolomite, Yates field reservoir, west Texas [M]. JAMES N. P. Choquette. Paleokarst. Springer - Verlag, 1988: 342 - 363.
- [34] ZENG H L, C KERANS, F J LUCIA. 3 - D seismic detection of collapsed paleocave systems in the Clear Fork - Glorieta platform, Hobbs field, New Mexico [C]//International Exposition and 76th Annual Meeting, Technical Program, Society of Exploration Geophysicists, New Orleans, 2006: 1023 - 1027.
- [35] BORRERO M L. Hondo evaporites within the Grosmont heavy oil carbonate platform, Alberta, Canada [D]. Edmonton: University of Alberta, 2010.
- [36] BARTOLINI C, R T BUFFLER, J BLICKWEDE. The Circum - Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics[J]. AAPG Memoir 79, 2003: 169 - 183.
- [37] BIVER P, LONGIS CH, PENNA E, et al. Modeling uncertainties in Carbonate karstic reservoirs: Presentation of tool and its application to a real field case in Russia [C]//SPE Russian Oil & Gas Exploration & Production Technical Conference and Exhibition. Moscow, Russia, 2012: 16 - 18.
- [38] 朱光有, 杨海军, 苏劲, 等. 中国海相油气地质理论新进展 [J]. 岩石学报, 2012, 28(3): 722 - 738.
- [39] 康玉柱. 塔里木盆地塔河大油田形成的地质条件及前景展望[J]. 中国地质, 2003, 30(3): 315 - 319.
- [40] 秦小双, 师永民, 吴文娟, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层主控因素分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(1): 54 - 60.
- [41] 张奎华, 林会喜, 张关龙, 等. 哈山构造带火山岩储层发育特征及控制因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 16 - 22.
- [42] SCHUTTER, S R. Hydrocarbon occurrences and exploration in and around igneous rock[C]//Petford N, McCaffrey K J W. hydrocarbon in crystalline rocks. London: the Geological Society of London, 2003: 7 - 34.
- [43] WANG R C, XU H M, SHAO Y, et al. Reservoir characteristics of carboniferous volcanic rocks in Ludong area of Junggar basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(3): 350 - 355.
- [44] 何治亮, 彭守涛, 张涛. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素和复合联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 743 - 752.
- [45] 李阳. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏开发理论及方法[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 115 - 121.
- [46] 田飞, 金强, 李阳. 塔河油田奥陶系缝洞型储层小型缝洞及其充填物测井识别[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 900 - 908.

编辑: 蒲洪果