第42卷 第4期	中	国	岩	溶	Vol. 42	No. 4
2023 年 8 月	CARSO	DLOG	ICA	SINICA	Aug.	2023

季少聪,张庆玉,梁彬,等.雄安新区蓟县系雾迷山组地层水对白云岩溶蚀的模拟实验研究[J].中国岩溶,2023,42(4):809-818. DOI:10.11932/karst20230414

# 雄安新区蓟县系雾迷山组地层水对白云 岩溶蚀的模拟实验研究

季少聪<sup>1,2,3</sup>,张庆玉<sup>1,2,3</sup>,梁 彬<sup>1,2,3</sup>,李景瑞<sup>1,2,3</sup>,巴俊杰<sup>1,2,3</sup>, 聂国权<sup>1,2,3</sup>,董红琪<sup>1,2,3</sup>,莫国宸<sup>1,2,3</sup>

 (1.中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室,广西桂林 541004; 2.联合国 教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心,广西桂林 541004;

3. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西平果 531406)

**摘 要:**为了研究雄安新区雾迷山组地层水对白云岩的溶蚀作用,文章以雾迷山组白云岩为研究对 象,以井下雾迷山组地层水为实验流体,开展高温高压条件下溶蚀模拟实验。实验结果表明:(1)样 品在地层水中的溶蚀速率随温度增加总体呈下降趋势,具有快速下降—缓慢增加—快速下降的特征, 在100~140℃范围内明显增加。样品在地层水中的溶蚀速率随压力增加明显增大。反应溶液的Ca<sup>2+</sup>、 Mg<sup>2+</sup>浓度增加量随温度、压力变化特征与样品溶蚀速率随温度、压力变化特征一致;(2)孔隙、微裂 隙欠发育的样品仅在样品表面发生溶蚀,使得样品表面变模糊。孔隙、微裂隙发育的样品,沿粒间、 晶间孔隙及各类裂隙溶蚀、扩展,最终呈一定程度连通;(3)埋藏成岩环境下,在100~140℃ 范围存在一个保持较高溶蚀能力的温度窗口,这可能是研究区雾迷山组白云岩岩溶储层形成的有利 温度区间。

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 0 引 言

雄安新区是我国中东部地热资源最丰富、开发 利用条件最好的区域,包含雄县、容城、高阳三个大 中型地热田<sup>[1-4]</sup>。雄安新区蓟县系雾迷山组储集性好、 出水量大、易于回灌,是目前地热资源勘探的重点<sup>[2]</sup>。 王贵玲等分析了雄安新区高阳低凸起雾迷山组热储 特征<sup>[1]</sup>,鲁锴等研究了雄安新区蓟县系雾迷山组白云 岩岩溶热储特征及优质储集层发育的主控因素<sup>[2]</sup>。 碳酸盐岩的溶蚀作用是指流动的有侵蚀性流体 与碳酸盐岩之间相互作用的过程及产生的结果,从 地表到深埋藏地层中均可发生<sup>[5-7]</sup>,碳酸盐岩溶蚀形 成的溶孔、溶洞和溶缝是重要的储集空间<sup>[8-15]</sup>。碳酸 盐岩溶蚀实验是研究碳酸盐岩溶蚀有利条件和分布 规律的重要方法<sup>[16-17]</sup>。20世纪70年代以来,国内外 学者陆续开展了碳酸盐岩溶蚀模拟实验,探讨成分、 结构、温度、压力、流体等因素对溶蚀作用的影 响<sup>[18-25]</sup>。早期的溶蚀实验主要模拟地表环境进行实

收稿日期:2022-04-27

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB23026062), 中国地质调查项目(DD20221658), 广西自然科学基金项目(2022GXNSFBA035454)和岩溶 所基本科研业务费(2021008)共同资助

第一作者简介:季少聪(1994—),硕士,助理研究员,主要从事碳酸盐岩古岩溶储层研究。E-mail: jishaocong00@163.com。

通信作者:张庆玉(1983-),博士,研究员,主要从事碳酸盐岩古岩溶储层研究。E-mail:zqyjlu@163.com。

验,实验温度小于 100 ℃。20 世纪 80 年代,国内外 学者主要研究深埋藏环境下碳酸盐岩溶蚀机理,实 验方法采用流体与岩石颗粒或块体之间的表面反应 方式。近年来,随着实验技术的进步,已有学者陆续 开展碳酸盐岩内部溶蚀实验<sup>[20]</sup>。

目前,模拟实验流体多以自主配置的酸溶液、高 盐度水溶液或海水为主,而以实际地层水作为实验 流体的模拟实验较少。本文以雄安新区雾迷山组白 云岩为研究对象,以井下雾迷山组地层水为实验流 体,开展高温高压条件下溶蚀模拟实验,分析温度、 压力、岩性、结构等因素对白云岩溶蚀作用的影响。

# 1 地质概况

雄安新区位于冀中坳陷北部,大地构造上处于 华北陆块中东部的渤海湾盆地西北部。冀中坳陷北 为燕山褶皱带,西接太行山东缘断层,南与邢衡隆起 毗邻,东与沧县隆起相邻。雄安新区重要的构造单 元为牛驼镇凸起、容城凸起、高阳低凸起,四周被凹 陷环绕,北部是廊坊固安凹陷,东部为霸县凹陷,南 部为饶阳凹陷,西南和西部为保定凹陷和徐水凹陷<sup>[4]</sup> (图 1)。

研究区雾迷山组沉积后共经历了凌源、芹峪、印 支、燕山和喜山5期构造抬升作用,遭受长期风化剥 蚀和大气淡水淋滤,中生界和古生界剥蚀严重,新生 界碎屑岩直接覆盖在元古界蓟县系雾迷山组之上。 研究区雾迷山组主要岩石类型包括晶粒白云岩、颗 粒白云岩、微生物白云岩、硅质白云岩和角砾白云 岩5种类型<sup>[2]</sup>。

# 2 样品采集与实验方法

#### 2.1 实验样品

以采自雄安新区 D03 井雾迷山组的 3 种白云岩 样品、D16 井雾迷山组的 1 种白云岩样品、蓟县野外 剖面高于庄组的 1 种灰岩样品和桂林七星岩标准灰 岩为实验样品,经薄片鉴定岩性分别为粉晶白云岩、 纹层状白云岩、中晶白云岩、中晶白云岩、泥晶灰岩 和亮晶砂屑灰岩。主量元素测试结果表明,白云岩 样品 (A1~A4)的 CaO 含量介于 20.88%~30.06%, MgO 含量介于 15.27%~21.55%; 灰岩样品(A5~A6) 的 CaO 含量较高,均在 45% 以上, MgO 含量很低,均 低于 5%(表 1)。

# 2.2 实验装置

实验采用中国地质科学院岩溶地质研究所自主 设计的高温高压溶解动力学模拟实验装置,由模拟 实验装置、反应釜、平流泵、活塞容器、调压阀、空 气增压系统、空气压缩机和高纯 CO<sub>2</sub> 气瓶等部分组 成,其中反应釜固定容量 1 L,工作压力为 0~50 MPa, 工作温度为室温至 250 ℃。该实验装置可满足模拟 不同温度、不同压力、不同水化学特征及开放、封闭 两种环境下的碳酸盐岩溶蚀机理模拟实验要求,。

#### 2.3 实验方案

以采自雄安新区地热井井下雾迷山组全段地层 水为反应液,其水化学特征如表 2 所示。同时考虑 温度和压力两个因素,开展 40 ℃、10 MPa 至 150 ℃、 20 MPa 范围内共 12 组温度、压力点的溶蚀实验 (表 3),模拟从浅埋藏到深埋藏环境下雄安新区雾迷 山组地层水对白云岩的溶蚀作用。

#### 3 实验结果

#### 3.1 溶蚀速率特征

根据溶蚀试片直径、厚度以及小孔直径测量结 果,计算溶蚀试片表面积,计算公式如下:

 $S = \Pi (R_1 + R_2) h + \Pi (R_1^2 - R_2^2) / 2$ 

根据溶蚀试片质量称量结果和表面积计算结果, 计算溶蚀试片单位面积的溶蚀速率,计算公式如下:

$$v = \left(m_1 - m_2\right) / \left(S \cdot t\right)$$

式中: *S* 为表面积; *R*<sub>1</sub> 为直径; *R*<sub>2</sub> 为小孔直径; *h* 为厚 度; *v* 为溶蚀速率; *m*<sub>1</sub> 为实验前质量; *m*<sub>2</sub> 为实验后质 量; *t* 为实验时间。*R*<sub>1</sub>、*R*<sub>2</sub>、*h*、*m*<sub>1</sub>、*m*<sub>2</sub> 结果可以通过测 量得到, *t*=24 h。

根据溶蚀速率计算结果(表 4),制作不同样品溶 蚀速率随温度、压力变化曲线(图 2),结果表明:

(1)不同样品在地层水中的溶蚀速率随温度变化特征具有相似性。当流体和压力条件相同时,样品在地层水中的溶蚀速率随温度增加总体呈下降趋势,具有快速下降—缓慢增加—快速下降的特征,溶蚀速率在100~140 ℃范围内明显增加。

(2)不同样品在地层水中的溶蚀速率随压力变 化特征具有相似性。当流体和温度条件相同时,样



图 1 雄安新区大地构造位置及构造单元划分(据文献<sup>[4]</sup>,有改动) Fig. 1 Tectonic location and tectonic unit division of the Xiong'an New Area (modified according to reference<sup>[4]</sup>)

表 1	实验样品主量元素测试结果
10.1	大型计由上生儿系的风泪不

Table 1	Test results of major elements of experimental samples
---------	--

	以下で	日公	ш и.	组份/%										
<b>忭品</b> 编兮	米柱位直	层位	右性	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	$P_2O_5$	MnO	LOI
Al	D03井	雾迷山组	粉晶白云岩	26.86	1.56	0.35	20.88	15.27	0.32	0.02	0.08	0.03	0.01	33.92
A2	D03井	雾迷山组	纹层状白云岩	23.85	0.02	0.10	22.98	16.47	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	35.99
A3	D03井	雾迷山组	中晶白云岩	2.17	0.01	0.14	29.99	21.46	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	45.48
A4	D16井	雾迷山组	中晶白云岩	1.28	0.04	0.17	30.06	21.55	0.07	0.02	0.00	0.00	0.01	46.02
A5	蓟县野外剖面	高于庄组	泥晶灰岩	9.36	0.28	0.14	45.62	4.20	0.14	0.03	0.00	0.01	0.01	40.06
A6	桂林七星岩	/	亮晶砂屑灰岩	0.55	0.21	0.08	54.26	1.00	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	43.55

		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •								
Table 2         Hydrochemical characteristics of reaction solutions in the dissolution experiment										
成分/mg·L <sup>-1</sup>	$\mathbf{K}^{+}$	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	Cl					
含量	30.07	579.57	37.40	19.28	790.63					
成分/mg·L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2–</sup>	NO <sub>3</sub>	pН					
含量	2.79	341.37	32.64	< 0.05	8.49					

#### 表 2 溶蚀实验反应液水化学特征

#### 表 3 本次溶蚀模拟实验选取的温度和压力

Table 3 Temperature and pressure selected for the dissolution experiment

实验编号	温度/ ℃	CO <sub>2</sub> 分压/MPa	压力/MPa	实验编号	温度/ ℃	CO <sub>2</sub> 分压/MPa	压力/MPa
1	40	3	10	7	40	6	20
2	60	3	10	8	60	6	20
3	80	3	10	9	80	6	20
4	100	3	10	10	100	6	20
5	120	3	10	11	120	6	20
6	150	3	10	12	150	6	20

#### 表 4 实验样品的溶蚀速率计算结果

Table 4 Calculation results of dissolution rates of experimental samples

温度、压力		溶蚀速率/10 <sup>-5</sup> g·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>								
仙身	正月	A1粉晶白云岩	A2纹层状白云岩	A3中晶白云岩	A4中晶白云岩	A5泥晶灰岩	A6亮晶砂屑灰岩			
40 °C	10 MPa	3.70	3.82	4.14	4.60	/	130.90			
60 °C	10 MPa	2.24	3.49	1.66	2.03	28.99	43.16			
80 °C	10 MPa	2.75	3.02	0.99	1.01	29.79	44.30			
100 °C	10 MPa	2.87	1.88	1.70	1.89	26.95	35.53			
120 °C	10 MPa	3.80	2.60	2.16	1.81	29.60	50.75			
150 °C	10 MPa	0.93	1.83	1.10	1.33	17.48	28.15			
40 °C	20 MPa	5.18	5.02	5.82	4.58	53.34	168.47			
60 °C	20 MPa	3.47	5.04	5.54	4.50	56.86	160.61			
80 °C	20 MPa	4.64	4.14	4.64	4.06	55.37	128.20			
100 °C	20 MPa	4.69	3.57	3.10	2.83	50.84	108.19			
120 °C	20 MPa	5.98	5.38	3.42	3.49	38.80	113.99			
150 °C	20 MPa	3.92	4.66	2.02	2.03	37.08	88.38			

品在地层水中的溶蚀速率随压力增加明显增大。

(3)白云岩样品溶蚀速率结果明显低于灰岩样 品。在实验条件下,白云岩样品溶蚀速率介于 (0~6)×10<sup>-5</sup>g·cm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>之间(图 2a~d),灰岩样品溶蚀 速率介于 (20~180)×10<sup>-5</sup>g·cm<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>之间(图 2e~f), 是白云岩样品溶蚀速率的 10~30 倍。

#### 3.2 水化学演化特征

根据实验前后反应溶液的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度测试 结果,计算 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度增加量及其随温度、压力 变化曲线,如表 5、图 3 所示。 结果表明:反应溶液的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度增加量随 温度增加总体呈下降趋势,具有快速下降—缓慢增 加—快速下降的特征,且在 100~140 ℃ 范围内明显 增加;反应溶液的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度增加量随压力增加 明显增大。这一结果与样品溶蚀速率随温度、压力 变化规律一致。

## 3.3 溶蚀形态特征

通过观察实验前后溶蚀试片样品的表面形貌和 微观结构,对比分析不同样品的溶蚀特征,结果 表明:



#### 图 2 实验样品的溶蚀速率随温度、压力变化曲线

(a) A1, 粉晶白云岩 (b) A2, 纹层状白云岩 (c) A3, 中晶白云岩 (d) A4, 中晶白云岩 (e) A5, 泥晶灰岩 (f) A6, 亮晶砂屑灰岩

Fig. 2 Dissolution rate curve of experimental samples with the variation of temperature and pressure

(a) A1, Powder crystal dolomite (b) A2, Laminated dolomite (c) A3, Mesocrystalline dolomite (d) A4, Mesocrystalline dolomite (e) A5, Micrite limestone (f) A6, Sparite arenaceous limestone

表 5	实验前后反应液的	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+1}$	浓度

Table 5	Concentrations of Ca <sup>2</sup>	<sup>+</sup> and Mg <sup>2+</sup>	in reaction solution	ns before an	nd after the	experiment
---------	-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------	--------------	--------------	------------

2+ •

温度	压力	实验前离子浓度/mg·L <sup>-1</sup>			实验	后离子浓度	$\frac{1}{2}$ /mg·L <sup>-1</sup>	离子浓度增加量/mg·L <sup>-1</sup>		
/℃	/MPa	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup>
40	10	37.40	19.28	56.68	346.98	69.44	416.42	309.58	50.16	359.74
60	10	37.40	19.28	56.68	151.00	36.68	187.68	113.60	17.40	131.00
80	10	37.40	19.28	56.68	143.50	34.35	177.85	106.10	15.07	121.17
100	10	37.40	19.28	56.68	141.07	35.08	176.15	103.67	15.80	119.47
120	10	37.40	19.28	56.68	147.30	35.12	182.42	109.90	15.84	125.74
150	10	37.40	19.28	56.68	44.89	31.52	76.41	7.49	12.24	19.73
40	20	37.40	19.28	56.68	422.04	84.65	506.69	384.64	65.37	450.01
60	20	37.40	19.28	56.68	359.91	80.98	440.89	322.51	61.70	384.21
80	20	37.40	19.28	56.68	273.30	62.40	335.70	235.90	43.12	279.02
100	20	37.40	19.28	56.68	299.05	74.40	373.45	261.65	55.12	316.77
120	20	37.40	19.28	56.68	319.70	69.70	389.40	282.30	50.42	332.72
150	20	37.40	19.28	56.68	303.34	62.99	366.33	265.94	43.71	309.65





(1)各样品在实验条件下均发生一定程度的溶 蚀现象,以溶蚀试片样品表面溶蚀为主。部分样品 实验后表面变模糊(图 4c~d、i~j),亮晶砂屑灰岩样 品实验后表面呈现凹凸不平的特征(图 4k~l)。

(2) 孔隙、微裂隙发育的样品, 沿孔隙、微裂隙溶 蚀程度较高。如图 5a、d 所示, 中晶白云岩样品白云



#### 图 4 实验样品实验前后照片对比

(a) 粉晶白云岩,实验前 (b) 粉晶白云岩,实验后 (c) 纹层状白云岩,实验前 (d) 纹层状白云岩,实验后 (e) 中晶白云岩,实验前 (f) 中晶白云岩,实验后 (g) 中晶白云岩,实验前 (h) 中晶白云岩,实验后 (i) 泥晶灰岩,实验前 (j) 泥晶灰岩,实验后 (k) 亮晶砂屑灰岩,实验前 (l) 亮晶砂屑灰岩,实验后 Fig. 4 Comparison of photos of experimental samples before and after the experiment

(a) Powder crystal dolomite, before experiment (b) Powder crystal dolomite, after experiment (c) Laminated dolomite, before experiment (d) Laminated dolomite, after experiment (e) Mesocrystalline dolomite, before experiment (f) Mesocrystalline dolomite, after experiment (g) Mesocrystalline dolomite, before experiment (i) Micrite limestone, before experiment (j) Micrite limestone, after experiment (k) Sparitearenaceous limestone, before experiment (l) Sparite arenaceous limestone, after experiment



#### 图 5 实验样品实验前后显微镜下照片对比

(a) 中晶白云岩, 实验前 (b) 纹层状白云岩, 实验前 (c) 粉晶白云岩, 实验前 (d) 中晶白云岩, 实验后 (e) 纹层状白云岩, 实验后 (f) 粉晶白云岩, 实验后 Fig. 5 Comparison of photos of experimental samples under microscope before and after the experiment

(a) Mesocrystalline dolomite, before experiment (b) Laminated dolomite, before experiment (c) Powder crystal dolomite, before experiment (d) Mesocrystallinedolomite, after experiment (e) Laminated dolomite, after experiment (f) Powder crystal dolomite, after experiment

石晶粒发生溶蚀,晶间孔隙溶蚀扩大;如图 5b、c、e、 f 所示,纹层状白云岩和粉晶白云岩样品发育少量微 裂隙,且沿着微裂隙溶蚀较发育,局部可见串珠状 溶孔。

# 4 讨 论

#### 4.1 温度、压力对碳酸盐岩溶蚀控制性作用

通过比较同一样品在不同温度、压力条件下的 溶蚀速率,分析温度、压力对碳酸盐岩溶蚀作用的影 响。如图2所示,当压力条件相同时,样品在地层水 中的溶蚀速率随温度增加总体呈下降趋势,具有快 速下降—缓慢增加—快速下降的特征,溶蚀速率在 100~140℃范围内明显增加;当温度条件相同时,样 品在地层水中的溶蚀速率随压力增加明显增大。同 时,反应溶液的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度增加量随温度、压力 变化特征与样品溶蚀速率随温度、压力变化特征一 致(图3)。这一实验结果与佘敏进行的在自主配置 的高盐度反应液中碳酸盐岩的溶蚀模拟实验结果基 本一致<sup>[12]</sup>。

因此,在埋藏成岩环境下,随着深度增加、温度 升高,会导致碳酸盐岩埋藏溶蚀量的降低,但在 100~140 ℃范围存在一个较高溶蚀能力的窗口,这 可能是研究区雾迷山组白云岩岩溶储层形成的有利 温度区间。

# 4.2 岩性、结构对碳酸盐岩溶蚀控制性作用

通过比较不同岩性、结构样品在相同实验条件 下的表面形貌、微观结构变化特征,分析岩性、结构 对碳酸盐岩溶蚀作用的影响。如图 4、5 所示,孔隙、 微裂隙欠发育的样品,实验过程中可溶流体实际上 很难进入该样品发生较大规模溶蚀,而仅在样品表 面发生溶蚀,使得样品表面变模糊(图 4c~d、i~j、 k~l);孔隙、微裂隙发育的样品,沿粒间、晶间孔隙及 各类裂隙、缝洞溶蚀、扩展,最终呈一定程度连通 (图 5b~c、e~f)。

#### 5 结 论

(1)温度、压力是影响研究区白云岩溶蚀作用的 重要因素。样品在地层水中的溶蚀速率随温度增加 总体呈下降趋势,具有快速下降—缓慢增加—快速 下降的特征,在100~140 ℃范围内明显增加;样品在 地层水中的溶蚀速率随压力增加明显增大。反应溶 液的 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>浓度增加量随温度、压力变化特征与 样品溶蚀速率随温度、压力变化特征一致。

(2)沿孔隙、微裂隙溶蚀作用程度较高。孔隙、 微裂隙发育的样品,沿粒间、晶间孔隙及各类裂隙溶 蚀、扩展,最终呈一定程度连通。

(3)溶蚀模拟实验表明,在100~140 ℃范围存在 一个保持较高溶蚀能力的温度窗口,这可能是研究 区雾迷山组白云岩岩溶储层形成的有利温度区间。

# 参考文献

[1] 王贵玲,高俊,张保建,邢一飞,张薇,马峰.雄安新区高阳低凸 起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J].地质学 报,2020,94(7):1970-1980.

> WANG Guiling, GAO Jun, ZHANG Baojian, XING Yifei, ZHANG Wei, MA Feng. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1970-1980.

[2] 鲁锴,鲍志东,季汉成,刘金侠,王贵玲,马峰,郭瑞婧,曹瑛倬, 杨飞,符勇,李潇博,华盈鑫,阙宜娟,李宗峰,许西挺,胡先才. 雄安新区蓟县系雾迷山组岩溶热储特征、主控因素及有利区 预测[J].古地理学报,2019,21(6):885-900.

> LU Kai, BAO Zhidong, JI Hancheng, LIU Jinxia, WANG Guiling, MA Feng, GUO Ruijing, CAO Yingzhuo, YANG Fei, FU Yong, LI Xiaobo, HUA Yingxin, QUE Yijuan, LI Zongfeng, XU Xiting, HU Xiancai. Characteristics, main controlling factors and favorable area prediction of karstic geothermal reservoirs of the Jixianian Wumishan Formation in Xiong'an New Area[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(6): 885-900.

 [3] 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 雄安新区深部 岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 523-532.

WU Aimin, MA Feng, WANG Guiling, LIU Jinxia, HU Qiuyun, MIAO Qingzhuang. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018, 39(5): 523-532.

 [4] 唐博宁,朱传庆,邱楠生,崔悦,郭飒飒,陈驰.雄安新区雾迷山 组岩溶裂隙发育特征[J].地质学报,2020,94(7):2002-2012.
 TANG Boning, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, CUI Yue, GUO Sasa, CHEN Chi. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2002-2012.

 [5] 邓宇林,郭绪磊,罗明明,陈祥勇,况野,周宏. 基于扫描电镜和 CT成像技术的碳酸盐岩溶蚀作用微观结构和变化规律研 究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 698-707.
 DENG Yulin, GUO Xulei, LUO Mingming, CHEN Xiangyong, KUANG Ye, ZHOU Hong. Study on the microstructure and variation law of carbonate rock dissolution based on scanning electron microscopy and CT imaging technology[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 698-707.

[6] Sanders D. Syndepositional dissolution of calcium carbonate in neritic carbonate environments: Geological recognition, processes, potential significance[J]. Journal of African Earth Science, 2003, 36(3): 99-134.

- [7] 夏日元, 唐健生, 罗伟权, 邓自强, 关碧珠. 油气田古岩溶与深 岩溶研究新进展[J]. 中国岩溶, 2001, 20(1): 76.
   XIA Riyuan, TANG Jiansheng, LUO Weiquan, DENG Ziqiang, GUAN Bizhu. New progress in the study of paleokarst and deep karst in oil and gas fields[J]. Carsologica Sinica, 2001, 20(1): 76.
- [8] 马永生,何登发,蔡勋育,刘波.中国海相碳酸盐岩的分布及油 气地质基础问题[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1007-1020.
   MA Yongsheng, HE Dengfa, CAI Xunyu, LIU Bo. Distribution of fundamental science questions of petroleum geology of marine carbonate in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1007-1020.
- [9] 何治亮,张军涛,丁茜,尤东华,彭守涛,朱东亚,钱一雄.深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J].石油与天然气地 质,2017,38(4):633-644.

HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Xi, YOU Donghua, PENG Shoutao, ZHU Dongya, QIAN Yixiong. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633-644.

- [10] 张宇,赵伦,李长海,张祥忠.古岩溶油气储层研究进展[J].中 国岩溶, 2022, 41(5): 808-824.
  ZHANG Yu, ZHAO Lun, LI Changhai, ZHANG Xiangzhong. Research progress of paleokarst oil and gas reservoirs[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 808-824.
- [11] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 张宝民, 潘文庆, 周进高, 汪泽成. 中 国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石 油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.

ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, ZHANG Baomin, PAN Wenqing, ZHOU Jingao, WANG Zecheng. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-12.

[12] 沈安江,赵文智,胡安平,佘敏,陈娅娜,王小芳.海相碳酸盐岩 储集层发育主控因素[J].石油勘探与开发,2015,42(5):545-554.

SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, SHE Min, CHEN Yana, WANG Xiaofang. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 545-554.

[13] 张庆玉,李景瑞,梁彬,淡永,曹建文.塔里木盆地塔中地区奥 陶系古岩溶包裹体特征及古环境意义[J].中国岩溶,2020, 39(6):894-899.

ZHANG Qingyu, LI Jingrui, LIANG Bin, DAN Yong, CAO Jianwen. Characteristics and paleoenvironmental significance of Ordovician karst inclusions in the Tazhong area, Tarim Basin[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 894-899.

[14] 张庆玉,梁彬,秦凤蕊,曹建文,淡永,李景瑞.塔里木盆地奥陶 系古潜山碳酸盐岩岩溶储层评价与预测:以轮古7井区以东为 例[J].中国岩溶,2017,36(1):32-41. ZHANG Qingyu, LIANG Bin, QIN Fengrui, CAO Jianwen, DAN Yong, LI Jingrui. Evaluation and prediction of carbonate karst reservoirs in the Ordovician buried hills beneath the Tarim basin: An example east of the Lungu 7 well block[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 32-41.

季少聪等: 雄安新区蓟县系雾迷山组地层水对白云岩溶蚀的模拟实验研究

[15] 梁乘鹏, 淡永, 徐胜林, 李富祥, 庞春雨, 魏家琦. 塔里木盆地新 垦地区奥陶系层间岩溶储层形成机制与控制因素[J]. 中国岩 溶, 2019, 38(3): 427-437.

> LIANG Chengpeng, DAN Yong, XU Shenglin, LI Fuxiang, PANG Chunyu, WEI Jiaqi. Interlayer karst reservoir characteristics and development controlling factors of Ordovician in the Xinken area, Tarim Basin[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(3): 427-437.

[16] 佘敏,蒋义敏,胡安平,吕玉珍,陈薇,王永生,王莹.碳酸盐岩溶蚀模拟实验技术进展及应用[J].海相油气地质,2020, 25(1):12-21.

> SHE Min, JIANG Yimin, HU Anping, LV Yuzhen, CHEN Wei, WANG Yongsheng, WANG Ying. The progress and application of dissolution simulation of carbonate rock[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(1): 12-21.

[17] 罗文军,季少聪,刘义成,刘曦翔,淡永,梁彬,聂国权.四川盆 地高石梯-磨溪地区震旦系灯影组白云岩溶蚀差异实验研 究[J/OL].中国岩溶:1-10.http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.11 57.P.20210202.1045.002.html.

> LUO Wenjun, JI Shaocong, LIU Yicheng, LIU Xixiang, DAN Yong, LIANG Bin, NIE Guoquan. Experiment for the differential dissolution of dolomite of Sinian Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin [J/OL]. Carsologica Sinica: 1-10.http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1157.P.20210202.1045.002. html.

- [18] 杨俊杰,黄思静,张文正,黄月明,刘桂霞,肖林萍. 表生和埋藏 成岩作用的温压条件下不同组成碳酸盐岩溶蚀成岩过程的实 验模拟[J]. 沉积学报, 1995(4): 49-54. YANG Junjie, HUANG Sijing, ZHANG Wenzheng, HUANG Yueming, LIU Guixia, XIAO Linping. Experimental simulation of dissolution for carbonate with different composition under the conditions from epigenesis to burial diagenesis environment[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995(4): 49-54.
- [19] 佘敏,朱吟,沈安江,郑兴平,贺训云.塔中北斜坡鹰山组碳酸 盐岩溶蚀的模拟实验研究[J].中国岩溶,2012,31(3):234-239.

SHE Min, ZHU Yin, SHEN Anjiang, ZHENG Xingping, HE Xunyun. Simulation experiment for the dissolution of carbonate rocks of the Yingshan formation on the northern slope of Tazhong uplift[J]. Carsologica Sinica, 2012, 31(3): 234-239.

[20] 佘敏, 寿建峰, 沈安江, 潘立银, 胡安平, 胡圆圆. 碳酸盐岩溶蚀 规律与孔隙演化实验研究[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 564-572.

SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, PAN Liyin, HU Anping, HU Yuanyuan. Experimental simulation of dissolution law and porosity evolution of carbonate rock[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 564-572.

- [21] 蒋小琼. 普光与建南气田碳酸盐岩礁滩相储层埋藏溶蚀作用 对比研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. JIANG Xiaoqiong. Contrastive research on the burial dissolution of carbonate reef-shoal reservoir rocks of Puguang and Jiannan gas fields in Sichuan basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014.
- [22] 蒋小琼, 王恕一, 范明, 张建勇, 管宏林, 鲍云杰. 埋藏成岩环境 碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 643-646.

JIANG Xiaoqiong, WANG Shuyi, FAN Ming, ZHANG Jianyong, GUAN Honglin, BAO Yunjie. Study of simulation experiment for carbonate rocks dissolution in burial diagenetic environment[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30(6): 643-646.

[23] 彭军,王雪龙,韩浩东,尹申,夏青松,李斌.塔里木盆地寒武系 碳酸盐岩溶蚀作用机理模拟实验[J].石油勘探与开发,2018, 45(3):415-425.

PENG Jun, WANG Xuelong, HAN Haodong, YIN Shen, XIA Qingsong, LI Bin. Simulation for the dissolution mechanism of Cambrian carbonate rocks in Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 415-425.

[24] 谭飞,张云峰,王振宇,董兆雄,黄正良,王前平,高君微.鄂尔 多斯盆地奧陶系不同组构碳酸盐岩埋藏溶蚀实验[J]. 沉积学 报, 2017, 35(2): 413-424.
TAN Fei, ZHANG Yunfeng, WANG Zhenyu, DONG Zhaoxiong, HUANG Zhengliang, WANG Qianping, GAO Junwei.
Simulation experiment for the burial dissolution of different petrofabric carbonate rocks of Ordovician in the Ordos Basin[J].
Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(2): 413-424.

[25] 范明, 蒋小琼, 刘伟新, 张建勇, 陈红宇. 不同温度条件下CO<sub>2</sub>水 溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 沉积学报, 2007(6): 825-830. FAN Ming, JIANG Xiaoqiong, LIU Weixin, ZHANG Jianyong, CHEN Hongyu. Dissolution of carbonate rocks in CO<sub>2</sub> solution under the different temperatures[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007(6): 825-830.

# Experimental simulation of dissolution to dolomite in formation water of Jixianian Wumishan Formation in the Xiong'an New Area

JI Shaocong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qingyu<sup>1,2,3</sup>, LIANG Bin<sup>1,2,3</sup>, LI Jingrui<sup>1,2,3</sup>, BA Junjie<sup>1,2,3</sup>, NIE Guoquan<sup>1,2,3</sup>, DONG Hongqi<sup>1,2,3</sup>, MO Guochen<sup>1,2,3</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China)

Abstract With the richest geothermal resources and the best development and utilization conditions in the central and eastern China, the Xiong'an New Area is the home of three large and medium-sized geothermal fields—Xiongxian, Rongcheng and Gaoyang. The Jixianian Wumishan Formation in the Xiong'an New Area has good reservoir endowment, large water yield and easy reinjection, which is the focus of geothermal resource exploration. At present, acid solutions, high-salinity water solutions or sea water which are prepared by researchers themselves are mainly used in simulation experiments, but less formation water is used as the experimental fluid. In this study, the dolomite of Wumishan Formation in the Xiong'an New Area is taken as the research object, and the formation water of Wumishan Formation in the underground is taken as the experimental fluid. The dissolution simulation experiment under high temperature and high pressure has been carried out to analyze the influence of temperature, pressure, lithology, structure and other factors on the dissolution of dolomite. This experiment adopts the simulation experimental device of dissolution kinetics under the conditions of high-temperature and high-pressure independently designed by Karst Geology Research Institute of the Chinese Academy of Geological Sciences. The formation water from the whole section of Wumishan Formation in the geothermal well of the Xiong'an New Area is taken as the reaction fluid. At the same time, considering the two factors of temperature and pressure, a total of 12 groups of experiments in the range of 40 °C, 10 MPa to 150 °C, 20 MPa have been carried out to simulate the dissolution of formation water of Wumishan Formation in the Xiong'an New Area on dolomite from the shallow burial to the deep burial.

The experimental results show that dissolution rates of samples in the formation water decreased with the increase of temperature in general. The rates experienced a rapid decrease before a slow increase and then a rapid decrease again, with an obvious increase from 100 °C to 140 °C. Dissolution rates of samples in formation water increased obviously with the increase of pressure. The variation of  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  concentrations with temperature and pressure was consistent with that of dissolution rates with temperature and pressure. All samples showed a certain degree of corrosion under the experimental conditions, mainly the corrosion of the sample surface. The samples with less developed pores and microcracks only corroded on the surface, which blurred the sample surface. The samples with developed pores and microcracks were eroded and expanded along intergranular pores, intercrystalline pores and various fractures, and finally connected to a certain extent. Therefore, the results of this study show that the buried dissolution of carbonate rocks will decrease in the burial diagenetic environment, with the increase of depth and temperature. But there is a window with higher dissolution capacity in the range of 100 °C-140 °C, which may be a favorable temperature range for the formation of dolomite karst reservoirs in the Wumishan Formation in the study area. For the samples with undeveloped pores and microcracks, it is difficult for soluble fluid to enter the sample for large-scale corrosion, but only to stay on and blur the sample surface during the experiment. The samples with pores and microcracks developed are corroded and expanded along intergranular and intercrystalline pores and various fractures and fissures, and are finally connected to a certain extent.

Key words Xiong'an New Area, Wumishan Formation, dolomite, formation water, dissolution experiment, karst geothermal reservoir

(编辑张玲杨杨)