

# 威远构造阳新灰岩岩溶隙洞系统 发育演化特征

李定龙

(淮南矿业学院地质系, 232001)

贾疏源

(成都理工学院水文系, 610059)

本文以水—岩作用的观点,从历史的、岩溶的角度,对四川威远构造二叠系阳新统天然气储集空间—溶隙孔洞系统(以下简称隙洞系统)的演化过程分期(沉积期、暴露期及埋藏期)进行了探讨。大量溶蚀迹象表明阳新灰岩至少发育有沉积型、暴露型及埋藏型三种岩溶。现今阳新统的隙洞系统是岩溶长期作用叠加产物,阳新统储层主要为岩溶控制性储层。

**关键词** 隙洞系统 岩溶 储集层/阳新灰岩 威远构造

**第一作者简介** 李定龙 男 30岁 讲师 水文地质 工程地质

四川盆地的油气勘探开表明,二叠系阳新统碳酸盐岩为“极非均质性裂缝型储层”,其渗透率90%均小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,孔隙度一般1%—2%,最高9%,喉道小,连通性差,排驱压力高,基本属致密岩层;但该层在很多气井中每天却可喷出几十万至几百万立方米的天然气,放空、井漏、井喷等现象屡见不鲜,表明阳新灰岩在低孔渗背景下,确实存在着高孔、高渗透段。

据作者1987—1990年间先后对露头剖面(兴文石林、古宋大湾、眉山六井湾、珙县巡场、珙泉1矿等)和井下岩芯(阳52、板2、古宋135、威阳19、威阳28及威阳46井等)资料(图1)的收集整理,表明阳新灰岩储集空间的形成与近地表成岩早期、表生期及埋藏期所经受的溶蚀作用有重大关系。

## 一、地质背景

威远构造位于川中台隆南部,是四川盆地最大的天然气储集构造。构造中阳新灰岩(栖霞组和茅口组)普遍发育,厚度400 m左右,深埋地腹1500—4000 m之间,地层层序如表1所示。

阳新灰岩以富含多种生物碎屑的泥晶灰岩为主,夹亮晶生物碎屑灰岩、泥灰岩、硅质岩及碳质页岩从下往上可划分出三个沉积旋回:一是栖霞组一段—二段(阳二<sup>1</sup>—阳二<sup>2</sup>)。从黑

色、深灰色的“眼球”状泥晶绿藻灰岩过渡到浅灰褐色红藻灰岩,由下往上泥质含量渐少,间夹有较多的薄层硅质灰岩。二是茅口组一段—三段(阳三<sup>1</sup>~阳三<sup>3</sup>)。一段(阳三<sup>1</sup>)中“眼球”状灰岩中夹有滑石层,向上渐变为质纯的泥晶绿藻灰岩;二段(阳三<sup>2</sup>)为含硅质结核的藻灰岩;三段(阳三<sup>3</sup>)由亮晶红藻灰岩和骨屑泥晶灰岩组成。三是茅口组四段(阳三<sup>4</sup>)旋回。以黑灰色、深灰色泥晶绿藻灰岩为特征,含零星硅质结核,由于剥蚀未能见其全貌。

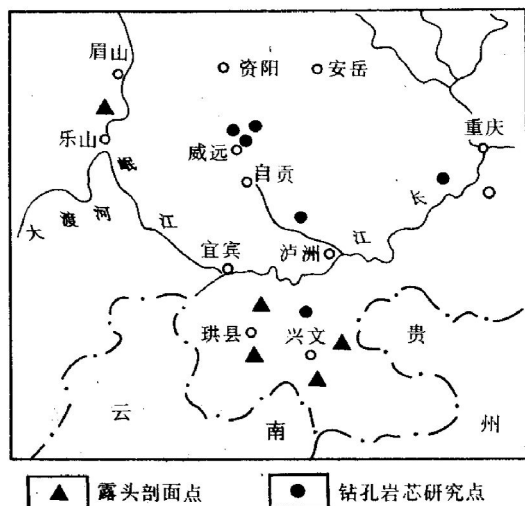


图1 阳新灰岩研究点位置图

阳新灰岩沉积后主要经历了东吴、印支、燕

山及喜山期构造运动,其中前三期皆以垂直升降运动为主,产生的构造裂隙有限。喜山运动是威远构造形成的最后定型运动,强裂挤压作用产生的大量构造裂隙,为埋藏期岩溶水的储存运移提供了重要条件。

## 二、岩溶类型及其发育特征

### (一) 沉积岩溶

阳新灰岩沉积过程中,因局部短暂暴露地表,伴随淡水成岩过程发育的岩溶称为沉积岩溶。

#### 1. 特征

岩溶现象限制于阳新灰岩内一定部位,并可多次重复出现。沉积间断暴露面上下岩性、岩相和碳稳定同位素组成均突然变化(图2)。

岩溶发育段内岩溶洞穴形态各异,上部大都被侵蚀,下部视环境不同为海相生物碎屑(图3-a)或巨晶方解石等充填(图3-b),在颜色、岩性、生物及内部结构等方面与围岩都有一定差别,且岩溶充填层往往经受差异压实,岩溶化岩体可压碎成角砾(图3-c),碎屑充填物因挤压而塑性变形等。并可出现岩溶化极强的呈网纹状的溶积钙质泥岩充填层。

钙结层为近地表暴露及大气渗流成岩作用的产物<sup>[1]</sup>。岩溶段内钙质或白云质结核普遍发育,如珙县巡场剖面钙质结核大多成层分布,横向可追索,纵向具韵律,大小不一(几厘米),形状各异(圆形、长形等),呈豆粒状、角砾状及蜂窝状结构。

表1 威远气田二叠系层序表

| 统   | 组 (段)  |                                                   |
|-----|--------|---------------------------------------------------|
| 乐平统 | 长兴组    |                                                   |
|     | 龙潭组    |                                                   |
|     | 峨眉山玄武岩 |                                                   |
| 阳新统 | 茅口组    | 四段(阳三 <sup>4</sup> ) P <sub>1m</sub> <sup>4</sup> |
|     |        | 三段(阳三 <sup>3</sup> ) P <sub>1m</sub> <sup>3</sup> |
|     |        | 二段(阳三 <sup>2</sup> ) P <sub>1m</sub> <sup>2</sup> |
|     |        | 一段(阳三 <sup>1</sup> ) P <sub>1m</sub> <sup>1</sup> |
|     | 栖霞组    | 二段(阳二 <sup>2</sup> ) P <sub>1q</sub> <sup>2</sup> |
|     |        | 一段(阳二 <sup>1</sup> ) P <sub>1q</sub> <sup>1</sup> |
|     | 梁山组    | 阳一 P <sub>1l</sub>                                |
| 志留系 |        |                                                   |

## 2. 形成条件

早二叠纪川南、川西南地区为浅海碳酸盐台地, 在“峨眉地裂运动”<sup>[3]</sup>拉张作用影响下破裂而成台块。因沉积台块频繁振荡导致沉积层短暂暴露地表而发育岩溶。

阳新灰岩暴露期间, 大气淡水渗入沉积层内形成淡水透镜体(图4)。可分为渗流带、潜流带及混合水带三个环境。渗入水带入的 $\text{CO}_2$ 及有机质分解出的 $\text{CO}_2$ 循环于上述不同环境中, 从而产生与其相应的作用和特征。在降雨状态下, 雨水与裸露的碳酸盐岩产生广泛的化学溶蚀作用, 加大了孔隙网络; 另一方面化学浓集作用可能降低局部地带孔隙度。在潜流带, 时有含不饱和碳酸盐的大气水补给, 使得溶解作用更为广泛, 在潜水面附近, 裂隙和节理被溶蚀扩大发育成洞穴或孔洞, 岩溶最为发育。 $\text{CO}_2$ 分压高的饱和碳酸钙的淡水沿大气潜流带底界与 $\text{CO}_2$ 分压低的咸海水相混合, 由于两种水 $\text{CO}_2$ 分压平衡性和离子强度的不同, 混合水在可变范围内碳酸盐可变得不饱和, 产生(混合)溶蚀作用。

上述作用随台地升降, 海水进退, 在某个地区可多次反复进行。岩溶发育的程度, 与植被、地形、成岩作用基准面及暴露时间等有关。因而导致某段由起初胶结或弱胶结的孔隙型转化为扩大了孔、洞、缝连通的岩溶系统。但这一时段较为短暂, 很快又为海侵所替代, 早先发育的孔洞不同程度地被方解石和生物碎屑充填消亡。尽管孔、洞被充填, 但因岩溶岩和充填物力学性质的差异, 而使岩溶带成为后生改造的有利地带, 也是沉积层储渗性能最好的地带。

### (二) 暴露岩溶

即前人所谓的“阳顶岩溶”, 是阳新灰岩沉积并普遍成岩之后, 暴露地表直至龙潭煤系上覆沉积期间发育的岩溶。

#### 1. 特征

阳新灰岩顶部发育的岩溶经风化剥蚀已残存不全, 有的已剥蚀至层间岩溶段。区内自西向东, 剥蚀增强, 泸州一带剥蚀至茅口组三段(阳三<sup>3</sup>)。中部在玄武岩覆盖前南北向有一槽谷, 南北端各具一侵蚀漏斗; 玄武岩覆盖后, 仍具一溶蚀低谷, 南北端仍各有一漏斗, 中间为一槽谷(图5)。

顶部溶蚀面起伏不平, 其上有可开采的小型高岭土矿, 属阳新顶溶蚀面溶沟、溶槽式残积矿床, 深度可达20—30 m。顶部发育的洞穴大多为铝土质矿物、巨晶方解石、玄武岩及其它次生矿物充填。铝土质充填物多被挤压变形, 呈不规则脉状或残留于缝合线内。也有为上覆龙潭煤系层泥页岩充填的现象, 如威2井, 在进入茅口组四段15 m后见多层泥、页岩充填。

上述岩溶特征多集中于阳新灰岩顶剥蚀面以下50 m内, 一般不超过100 m。

#### 2. 形成条件

早二叠世末, 由于东吴运动影响, 区内阳新灰岩普遍抬升出露地表遭受淋滤。阳新灰岩处于接受大气降水补给的潜水环境, 富含 $\text{CO}_2$ 的大气渗入水不断地对顶部阳新灰岩产生溶蚀作用, 广泛地发育了暴露岩溶。

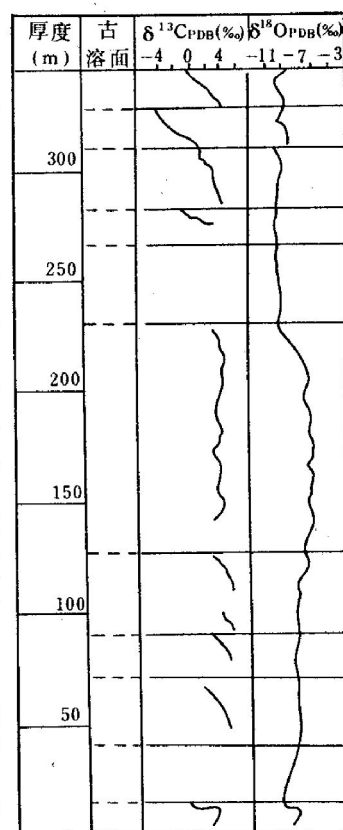


图2 古宋阳新灰岩剖面碳氧同位素图

(据卢武长、杨绍全测定值)

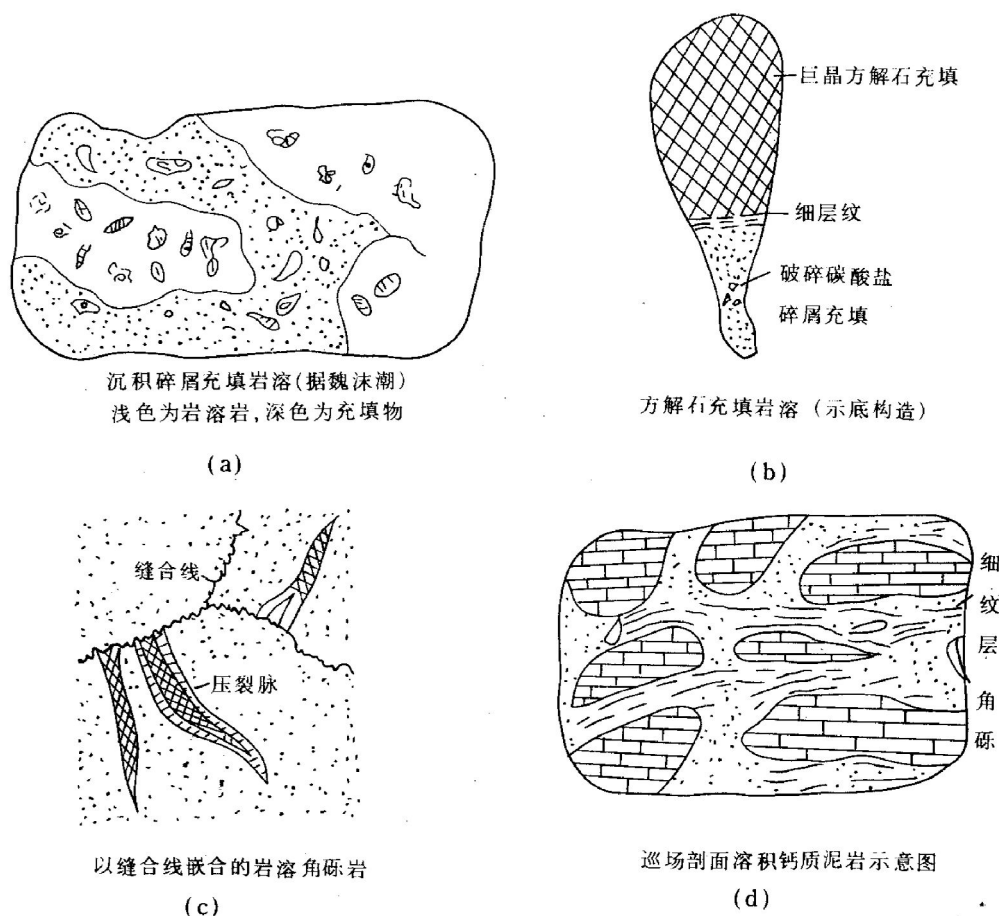


图3 沉积岩溶特征

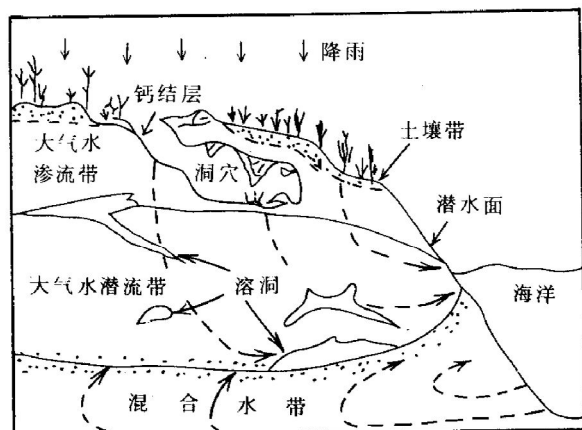


图4 淡水透镜体中岩溶作用环境

当时处于低纬度(二叠纪, 北纬  $35^{\circ}$ , 东经  $65^{\circ}$ ) 及阳新灰岩顶部众多铝土矿存在都证明了当时气候炎热、潮湿, 此外本区局部地带及西部玄武岩的广泛分布对陆生植物的繁殖也很有利, 这样的自然条件都有利于岩溶发育。

### (三) 埋藏岩溶

埋藏岩溶系指沉积岩溶、暴露岩溶发育之后, 龙潭煤系沉积以来, 在半封闭、封闭环境下发育的岩溶。

#### 1. 特征

钻井所取的岩屑中, 于不同层位常见到颜色发白, 结构松散, 手搓成粉末, 加酸剧烈起泡的物质(生产单位称之为白垩)。电镜扫描发现其内不仅具大量溶蚀残余砾屑, 而且有大量的新生矿物(黄铁矿、蒙脱石等)受到了溶解, 有些矿物内部有宽大的溶蚀微缝, 表明阳新灰岩在埋藏条件下不仅岩溶发育, 而且溶蚀作用强。

阳新灰岩岩芯上常见的沿方解石斑块、方解石脉体及缝合线发育的溶蚀孔洞均属埋藏岩溶的产物。由于沉积岩溶和暴露岩溶洞穴大都被充填消亡, 因此, 现今阳新灰岩勘探中屡见

不鲜的放空、井漏、井喷等现象,很大程度上均反映了埋藏岩溶发育极强的情况。威远构造上多口井统计表明,这些岩溶发育极强的地段,恰好是沉积岩溶和暴露岩溶发育的地带,且往往与方解石斑块发育相联系,反映出埋藏岩溶受控于沉积、暴露岩溶的发育分布、岩溶叠加发育的情况。

## 2. 形成条件

阳新灰岩深埋地腹不能获得渗入水补给,其岩溶水只可能来自阳新灰岩同生沉积水,或与其顶、底相接触的龙潭煤系和志留系页岩的沉积压实水。而志留系在阳新灰岩

沉积时已大规模压实脱水,龙潭煤系沉积时阳新灰岩因反复暴露成岩也较早脱水,因此,引起埋藏岩溶发育的岩溶水,极可能主要是起源于龙潭煤系的沉积压实水。

龙潭煤系为含煤砂页岩系,碎屑成分以峨眉山玄武岩的风化剥蚀产物为主,岩屑普遍经受了绿泥石化、高岭石化及碳酸盐化。据龙潭煤系物质组成和阳新灰岩顶残积高岭土矿(酸性介质条件下保存)等分析,不难看出龙潭煤系压实水流随上覆层的增厚,将不断演化为偏酸性的重碳酸钠型水。这种酸性水伴随诸如脱气增压作用、水热增压作用等将不断进入阳新灰岩。阳新灰岩经历了沉积、暴露岩溶改造后,尽管大部分溶蚀孔洞被充填,但仍可保留一部分缝(如压溶缝)、洞(孤立洞穴)、隙(晶间孔隙)以及(古)岩溶面。因此,沉积岩溶段及暴露岩溶段是埋藏条件下岩溶水渗透、储集的重要层位。阳新灰岩埋藏后所经受的印支、燕山及喜山期构造变动产生的构造裂隙,将导致这种酸性压实水不断向纵深发展。当龙潭煤系压实酸性水进入阳新灰岩,势必排挤残存于阳新灰岩内的同生沉积水( $\text{CaCl}_2$ 型),并在适当部位混合,导致混合溶蚀作用。

随上覆层厚度增大,一方面层内有机质分解产生有机酸,另一方面随地温增高,随热解气的形成,同时约有1%的 $\text{CO}_2$ 气体产生。威远构造上阳新统6口井天然气组分分析表明,均含有一定量的 $\text{CO}_2$ 气体,最少 $37.4 \text{ g/m}^3$ ,最多 $93.5 \text{ g/m}^3$ 。因此地层中不乏可溶蚀酸性水。

随着气藏的形成,凝析新生水由于温度、压力变化导致水的气液态转换不断产生,它在与其它水混合或溶有 $\text{CO}_2$ 后将有强烈的溶蚀作用。黄华梁等<sup>[3]</sup>指出:“气藏凝析水溶蚀及其与地层水混合溶蚀”是气藏岩溶形成的主要溶蚀机理。

埋藏期间,层内水及层间水的运移转换速度十分缓慢,但由于作用时间漫长,产生大溶蚀缝洞的效应是不难理解的。

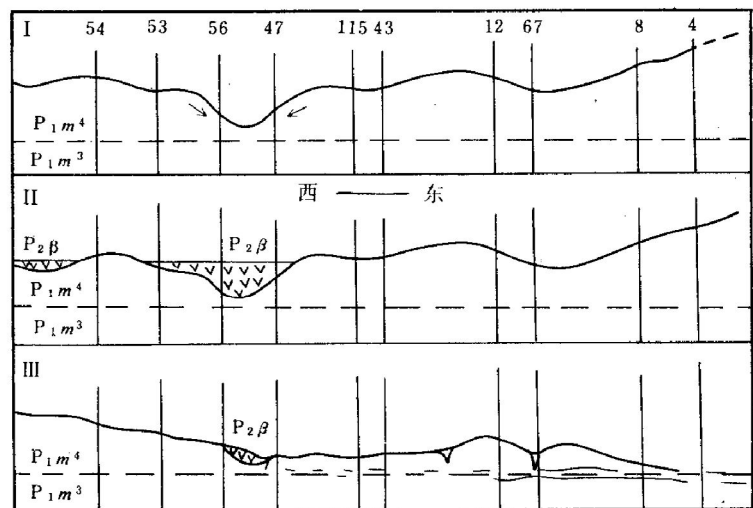


图5 威远构造阳新灰岩东吴期暴露岩溶发育过程示意图

I—形成由北向南流动的水系和槽谷; II—玄武岩注入槽谷;

III—玄武岩引起水系变迁,东侧岩溶强于西侧

## 三、岩溶演化

阳新灰岩自沉积至今,其储集空间——隙洞系统的演化形成主要是次生改造作用的结果,

溶蚀改造作用影响最大, 经历时间最长。可归纳为三个阶段和不同的亚段, 其岩溶水的运动特征、岩溶作用及其所产生的岩溶隙洞特征均有差异 (表2)。不同阶段, 强弱有别的岩溶作用使得阳新灰岩原生孔缝被改造的面目全非, 次生隙、洞、缝处于不断的形成和破坏中。

表1 咸远构造二叠系阳新灰岩岩溶发育演化简表

| 演化阶段         |      |     | 时代                   | 水文地质条件                                                         | 岩溶作用                                                                  | 岩溶缝洞特征                                                                                |
|--------------|------|-----|----------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 沉积阶段<br>(I)  |      |     | 阳新灰岩<br>沉积开始<br>至其暴露 | 沉积同生水随沉积厚度增加通过疏松孔隙压实垂向排向海盆, 部分地段间断遭淡水淋滤                        | 局部暴露遭受岩溶作用, 沉积过程中皆伴有压实压溶作用, 以溶蚀改造微孔缝为主                                | 层间岩溶发育的洞穴大都被充填, 但发育段储渗性能大大改善, 是此阶段孔、洞、缝发育最好地段, 也易为后期改造                                |
| 淋滤阶段<br>(I)  | 第一亚段 | 开启  | 阳新灰岩暴露开始至玄武岩覆盖       | 以岩溶淡水运动为主, 其在阳顶部位循环可返回沉积盆地, 地表水径流方向由北向南, 地下水流向由北东向西南           | 岩溶作用以消耗淋滤水中 $\text{CO}_2$ 为主进行, 西强东弱, 岩溶面貌以槽谷、洼地、漏斗为特征, 规模大, 范围广      | 以发育较大溶蚀孔洞为主, 顶部最强, 层间段次之, 一旦串通层间岩溶溶蚀强度更大, 孔、洞、缝连通性好, 孔缝空间扩大                           |
|              | 第二亚段 | 开启  | 玄武岩覆盖开始至龙潭煤系开始沉积     | 西南部玄武岩覆盖对淋滤水起阻隔作用, 也迫使早先地表径流改向, 地下水流向也由早先北东向西南转为西南往东北          | 仍以消耗渗入水中 $\text{CO}_2$ 进行岩溶作用, 局部伴有玄武岩风化产生的酸性物, 岩溶北强于南, 经槽谷漏斗, 残丘等为特征 | 于 I <sub>1</sub> 亚段基础上, 孔、缝进一步发育改造, 风化剥蚀物将对孔、缝、洞充填, 玄武岩充填其下表层洞穴, 下部将易于保存, 其边缘有利于孔、洞发育 |
| 埋藏阶段<br>(II) | 第一亚段 | 半封闭 | 龙潭煤系沉积开始至雷口坡暴露       | 阳新灰岩压实胶结排水, 大部顺层排向海盆, 龙潭煤系压释进水少, 大多沿两层不整合而运移排泄                 | 缺乏酸性物质来源, 岩溶作用较弱, 以压溶压实改造孔缝为主, 混合溶蚀不强, 大多具破坏性                         | 上覆层增厚使阳顶洞穴大多为泥炭铝土质充填压实消亡, 潜穴则为方解石充填, 缝洞改造以沉淀胶结为主                                      |
|              | 第二亚段 | 封闭  | 雷口坡暴露至白垩系沉积结束        | 阳新灰岩压释排水困难, 岩溶水主要来自龙潭煤系、志留系等压释水, 垂向渗入为主, 侧向循环甚弱                | 以消耗压释进入的酸性及天然气中 $\text{CO}_2$ 发生混合溶蚀为主, 溶蚀出一些小的孔洞, 规模小                | 顶部被充填或半充填的孔、洞重新复活, 缝洞有所改造变好, 规模不大, 强度也较弱, 构造往复振荡带缝洞显著变好                               |
|              | 第三亚段 | 封闭  | 白垩系沉积结束至新的第三纪 (?)    | 岩溶水发生大规模范围调整, 在边界断裂的推压下向本区东北方向汇聚, 平面上仍接受上、下层压释水补给, 分布不均, 翼部相对多 | 以多种混合溶蚀作用为主, 对早期孔、洞、缝强烈改造, 规模大、范围广, 岩溶作用普遍, 是塑造现今岩溶的决定段               | 早先发育的缝洞系统被瓦解, 进行大规模、大范围的调整变化, 孔缝发育再次进入高潮, 总体本区缝洞发育北强于南, 东强于西, 玄武岩边缘也较好                |

## 结 语

阳新灰岩的岩溶发育具有长期性、多期性、不均一性和叠加性的特点。这与勘探证实的



阳新灰岩产层在纵横向上分布的不稳定性，以及不一定受构造部位控制的特征是一致的。沉积岩溶和暴露岩溶对埋藏岩溶发育有重要控制作用。埋藏阶段中的第三亚期岩溶发育对现今隙洞系统形成有决定性作用。因此，对阳新灰岩天然气的勘探，只有在查清其岩溶发育演化规律的基础上，才能正确认识其储集空间的分布规律。从以上认识出发，本区玄武岩边缘地带、阳新灰岩顶部 50 m 内及茅口组二段（阳三<sup>2</sup>）沉积岩溶发育段，应是今后重点研究和勘探对象。

研究过程中，得到四川石油管理局川西南矿区赵景续、刘仲宣高工的帮助指导，谨致谢忱！

### 参 考 文 献

- 1 罗宾·巴瑟斯特. 碳酸盐沉积物及其成岩作用. 北京：科学出版社. 1971：43—63
- 2 罗志立. 中国西南地区晚古生代以来地裂运动对石油等矿产的影响. 四川地质学报. 1981, 2 (1)：1—11
- 3 黄华梁等. 四川盆地阳新统溶蚀性气藏形成机理探讨. 天然气工业. 1985, 5 (2)：1—7

## DEVELOPMENT AND EVOLUTION OF KARST FISSURE-CAVE SYSTEM IN YANGXIN SERIES, WEIYUAN STRUCTURE

Li Dinglong

(Huainan Institute of Mining, Huainan)

Jia Shuyuan

(Chengdu Institute of Geology, Chengdu)

### Abstract

In the view of water-rock interaction, the evolution process of the reservoir spaces of natural gas in the Permian Yangxin Series of Weiyuan structure, Sichuan Province — karst fissure-cave system could be divided into depositional, emergence and burial stages. Abundant karst effected evidences found during the study show that at least three types of karst such as depositional karst, emergence karst and burial karst developed in the Yangxin Series. It is proposed by the authors that the present karst fissure-cave system of this area is the result of superposition of karst and the reservoirs are mainly karst controlled ones.