

上扬子地块黔北坳陷及周缘水文地质-地球化学特征与油气保存

朱振宏¹, 楼章华¹, 金爱民¹, 张润合², 斯春松², 姚根顺²

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:从地下水化学-动力学角度对上扬子地块黔北坳陷及周缘油气保存条件进行了研究。结果表明:黔北坳陷及周缘自震旦纪以来共经历了3次重要的水文地质旋回,即加里东期、海西期—印支期和燕山期—喜马拉雅期。黔北坳陷及周缘在加里东期和海西期—印支期是两次主要的油气成藏期,但加里东末期和燕山期—喜马拉雅期运动使得区内原已形成的油气藏几乎被破坏殆尽。多次构造运动和多期大气水下渗作用使得现今黔中隆起埋深小于2 500 m,黔北坳陷埋深小于3 000 m的地层水矿化度低,处于自由交替带且底界尚不清楚,油气保存条件较差;川南坳陷在埋深800 m的浅部地层已进入交替阻滞带,油气保存条件相对较好。

关键词:水化学;水动力;油气保存;黔北坳陷及周缘;上扬子地块

中图分类号:TE133

文献标识码:A

Hydrogeological-hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions of the Qianbei Depression and its periphery, Upper Yangtze Block

Zhu Zhenhong¹, Lou Zhanghua¹, Jin Aimin¹, Zhang Runhe², Si Chunsong², Yao Genshun²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, Zhejiang 316021, China; 2. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: The petroleum preservation conditions in the Qianbei depression and its periphery were studied based upon the analysis of groundwater hydrochemical and hydrodynamic characteristics. The results show that the Qianbei depression and its periphery experienced three hydrogeological cycles as follows: Caledonian epoch, Hercynian-Indosinian epoch, and Yanshan-Himalayan epoch. Caledonian epoch and Hercynian-Indosinian epoch are the two main periods of oil-gas reservoirs deposition, although these reservoirs were eroded almost completely during the period of Caledonian and Yanshan-Himalayan movements. The hydrocarbon preservation conditions of strata less than 2 500 meter depth below surface in the Qianzhong uplift and 3 000 meter depth below surface in the Qianbei depression are generally poor due to the multiple tectonic movements and meteoric water infiltrations. This zone with low mineralization formation water is named as free exchanging zone and its lower boundaries are still unclear. The strata deeper than 800 meter are regarded as an exchanging-inactive zone in the Chuannan depression and hydrocarbon preservation conditions thereby are relatively good.

Key words: hydrochemistry, hydrodynamics, hydrocarbon preservation, Qianbei Depression and its periphery, Upper Yangtze Block

地下水是油气运移、聚集的动力和载体,与油气成藏、保存密切相关。前人对此做了大量的研究工作^[1-20]。杨绪充^[4]总结了沉积盆地地下水动力场的基本特征,研究论证了沉积盆地地下水动力与油气运移和聚集的关系。刘方槐等^[5]研究了含油气盆地的油田水文地质学和水文地球化学,并根据地下水与地表水的相互联系,在纵向上将水文地质条件划分为3个

不同的区带,即自由交替带、交替阻滞带和交替停止带。程如楠^[6]认为沉积盆地水文地质特征具有旋回性,其抬升剥蚀阶段的大气水下渗作用是油气藏后期调整或破坏的主要因素。楼章华等^[9-14,21-24]从盆地流体历史分析的角度对沉积盆地流体动力和流体化学特征开展了新的探究,在总结中国南方海相地层地下水化学特征与油气保存条件关系的基础上,提出了比

收稿日期:2015-08-12;修订日期:2016-09-07。

第一作者简介:朱振宏(1987—),男,博士研究生,石油地质。E-mail:zhu_zhen_hong@126.com。

通讯作者简介:金爱民(1973—),男,博士、副教授,油田地下水和油气成藏保存研究。E-mail:aiminjin@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05005-003-008HZ,2011ZX05002-006-003HZ)。

较系统的评价油气保存条件的水文地质地球化学综合判别指标体系。地下水水文地质-地球化学是研究复杂构造地区油气保存条件的行之有效的方法和手段。李梅等^[16-18]研究了高邮凹陷地下水化学-动力学与油气运聚的关系。王君等^[20]研究了东濮凹陷文留地区地层水化学与油气运聚的关系。

黔北坳陷及周缘地表出露的油气苗、沥青和古油藏表明研究区具备良好的生油基础,但后期经历了多期构造运动,油气保存条件遭到破坏。目前,关于黔北坳陷及周缘油气保存条件的研究主要限于盖层的影响。本文尝试从流体作用角度,通过分析研究区地下水化学-动力学特征来分析评价黔北坳陷及周缘的油气保存条件。该方法对复杂地区油气保存条件的研究具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 地质背景

黔北坳陷及周缘地区位于四川、云南和贵州三省交汇区,大地构造上属于上扬子地块的西南边缘。主要构造单元包括川南坳陷、黔北坳陷、滇东黔中隆起和黔中隆起(图1)。研究区地处隔槽式变形带向隔挡式变形带渐变的过渡性地带。其中,背斜构造带核部

出露寒武系一下奥陶统,翼部由中-上奥陶统、志留系、泥盆系、二叠系和三叠系等组成;向斜核部广泛出露上三叠统一下白垩统。

黔北坳陷及周缘地区作为上扬子地块的一部分,其构造演化与上扬子地块区域性构造演化具有一致性。晋宁运动以后,扬子地台基底基本固结,并开始接受盖层沉积^[25-27]。加里东早期,研究区是稳定的大陆边缘,形成滇黔北坳陷、川南坳陷和滇东黔中隆起等大型坳陷、隆起构造的雏形;加里东晚期,上扬子地区整体隆升,断裂发育,形成了大范围北东向的构造变形^[28-29],乐山-龙女寺隆起和黔中滇东隆起的形成,使研究区呈现“两隆夹一坳”的构造格局^[30]。海西期,持续隆升,发生了大规模的拉张运动,康滇地区及研究区西部陆内裂谷作用显著,大规模的玄武岩喷发,坳陷内主要表现为玄武岩喷溢覆盖,形成著名的峨眉山玄武岩。印支期,受古特提斯洋关闭的影响,造山运动强烈,扬子地台整体隆升为陆,中国南方由海相地台发展阶段转变为陆相沉积发育阶段,构造-沉积面貌发生了根本的转变^[28]。燕山早期,滇黔北及周缘以湖相沉积为主;燕山晚期,上白垩统以前的地层普遍发生褶皱断裂,同时早期形成的断裂再次复活,这也基本形成了本区现今的构造特征^[30-31]。喜马拉雅期,研究区以强

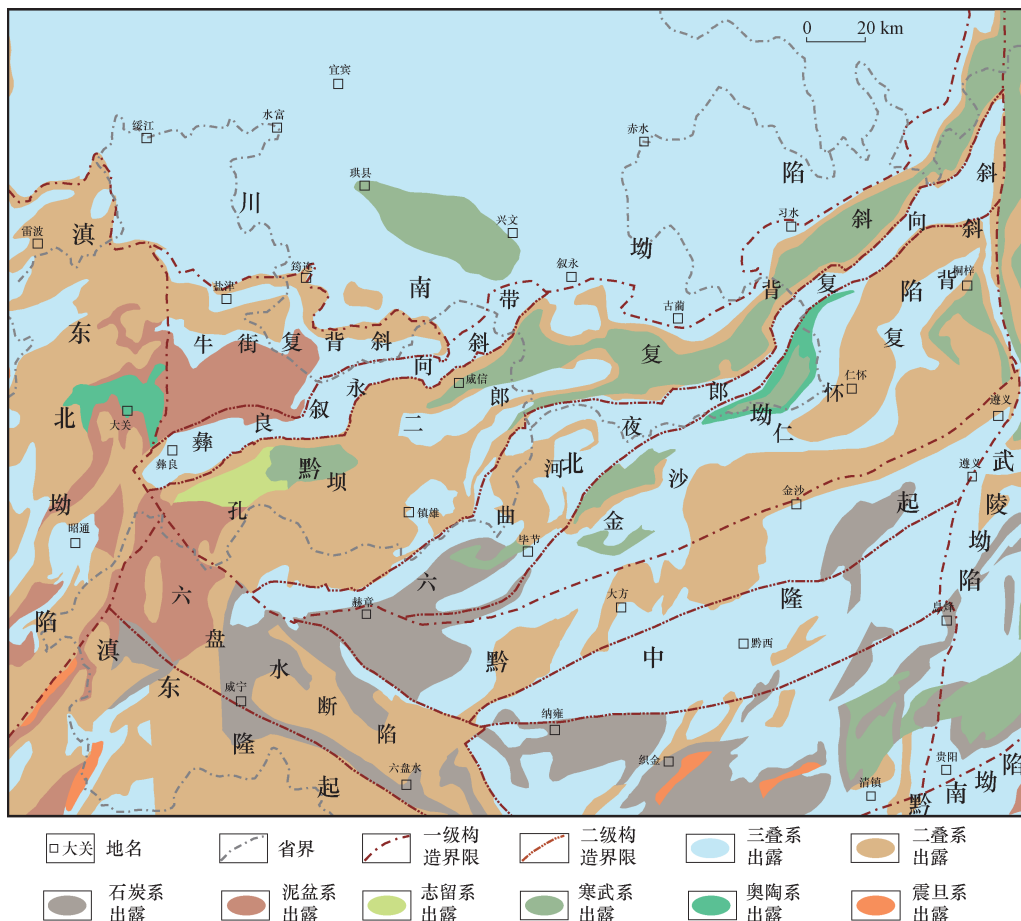


图1 黔北坳陷与周缘构造纲要

Fig.1 Outline map showing tectonic units in the Qianbei Depression and its periphery

烈隆升为主;继承和加强了燕山运动的构造格局,研究区上白垩统至古近系发生不同程度的逆冲断裂、褶皱变形、挤压隆升及褶皱叠加,早期的构造进一步被改造,使之复杂化而成为现今的构造格局^[30,32]。

2 地下水化学特征与油气保存

2.1 地层水矿化度、变质系数、脱硫系数与油气保存

水文地质-地球化学指标能够直观地反映油气保存条件的优劣,其中以大气水活动最为频繁。埋深较浅的地层最容易受到大气水下渗作用的影响,其结果是淡化地层水原始的矿化度,从而使矿化度降低;而埋深较大的地层,大气水下渗作用减弱;当埋深达到某一深度,大气水下渗作用基本停止,地层水逐渐浓缩^[14]。前人认为,地层水矿化度、变质系数($\rho_{\text{Na}^+}/\rho_{\text{Cl}^-}$)和脱硫系数($\rho_{\text{SO}_4^{2-}} \times 100/\rho_{\text{Cl}^-}$)是指示地层水变质程度的重要指标,矿化度越大,变质系数、脱硫系数越小,表明地层水文地质环境封闭性越好^[10-12](表 1)。

本次研究收集了研究区下组合(Z—S,震旦系—志留系)的 13 口井、24 个井段的地层水化学资料(表 2)。通过对比分析认为,研究区地层水化学具有明显的平面分区性,主要表现为从黔中隆起—黔北拗陷—川南拗陷,同一地层的水文地质开启程度逐渐减小,地层水矿化度逐渐增大,地层水变质系数、脱硫系数逐渐减小。黔中隆起西北缘的方深 1 井和底 1 井下组合(Z—S)地层水矿化度均小于 10 g/L,水型为 $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaHCO}_3$ 型,变质系数大于 6,脱硫系数大于 7,表明黔中隆起整体处于开放的水文地质环境,整体不利于油气保存。黔北拗陷下组合(Z—S)地层水特征差异性明显。拗陷东南部的芒 1 井、中 2 井和 3415 厂井地层水矿化度在 1.32 ~ 2.79 g/L,水型为 $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaHCO}_3$ 型,变质系数为 1.17 ~ 43.39,脱硫系数为 70.94 ~ 100,表明该地层水文地质开启程度强烈,不利于油气保存。而黔北拗陷东北部丁山构造的丁山 1 井虽然在 2 431 ~ 2 437 m 井段寒武系娄山关群和 3 509 ~ 3 532 m 井段震旦系灯影组地层水矿化度分别为 9.18 g/L 和 20.82 g/L,水型为 $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaHCO}_3$ 型,地层水变质

系数、脱硫系数分别为 43.39 和 70.94;但在 4 578 ~ 4 603 m 井段震旦系灯影组地层水矿化度为 294.42 ~ 367.00 g/L,且地层水变质系数和脱硫系数分别为 0.96 ~ 0.97 和 0.12 ~ 0.77,水型也变为 CaCl_2 型,表明黔北拗陷东北部下组合(Z—S)水文地质环境随埋深增加逐渐封闭,油气保存条件变好。另外,川东南页岩气勘探也证实在埋深 4 000 m 左右有良好的区域性盖层^[33]。川南拗陷下组合(Z—S)呈现随地层的埋深地层水矿化度逐渐增大,地层水变质系数、脱硫系数逐渐减小的趋势。天宫堂构造的宫深 1 井由寒武系娄山关群至震旦系灯影组,地层水矿化度由 35.14 g/L 上升至 74.12 g/L,水型也由 MgCl_2 型转变为 CaCl_2 型,且震旦系灯影组变质系数也小于 0.70。资阳构造的多口钻井在埋深 3 374 ~ 4 452 m 的震旦系灯影组地层水矿化度为 63.35 ~ 78.91 g/L,水型为 CaCl_2 型,变质系数为 0.55 ~ 0.61,表明整体处于较为封闭的水文地质环境,有利于油气保存。

垂直分带性特征在川南拗陷和黔北拗陷东北部表现明显。黔北拗陷丁山构造的丁山 1 井由寒武系娄山关群到震旦系灯影组上部(埋深 3 509 ~ 3 532 m)再到震旦系灯影组下部(埋深 4 578 ~ 4 603 m)地层水矿化度由 9.18 g/L 上升至 20.82 g/L 最终至 294.42 ~ 367.00 g/L,水型也由 $\text{Na}_2\text{SO}_4/\text{NaHCO}_3$ 型转变为 CaCl_2 型。而在川南拗陷,埋深较浅的三叠系嘉陵江组的地层水矿化度为 31 ~ 49 g/L,变质系数为 0.86 ~ 1.00,脱硫系数为 0.02 ~ 14.40;震旦系灯影组地层水矿化度相对较高,水型主要为 CaCl_2 型,变质系数整体小于 0.61,脱硫系数小于 2.75。这表明随埋深增加,黔北拗陷东北部和川南拗陷地层的水文地质环境逐渐转变为封闭环境。据推测黔北拗陷东北部丁山构造陷埋深大于 4 500 m 和川南拗陷埋深大于 800 m 地层整体封闭性较好,有利于油气保存。

2.2 地层水氢、氧同位素特征与油气保存

地下水按其成因和生成环境可区分为大气成因溶滤水、原海相或陆相成因沉积水、变质成因再生水和岩浆成因初生水 4 种类型^[4,34-35]。这 4 种成因类型地下

表 1 海相油气保存条件的水文地质-地球化学综合判别指标体系^[12]

Table 1 Hydrochemical evaluation index system for distinguishing the preservation conditions in marine reservoir hydrocarbon fields^[12]

保存条件	很好(Ⅰ)	好(Ⅱ)	中等(Ⅲ)	差(Ⅳ)
地下水成因	沉积埋藏水	短暂受大气水下渗影响	较长期受大气水下渗影响	长期受大气水下渗影响
矿化度/(g·L ⁻¹)	>40	30~40	20~30	<20
变质系数	<0.87	0.87~0.95	0.95~1.00	>1.00
脱硫系数	<8.50	8.50~15.00	15.00~30.00	>30.00
水型	CaCl_2 为主, MgCl_2 次之, 偶见 NaHCO_3 和 Na_2SO_4	以 MgCl_2 为主, 常见 Na_2SO_4		NaHCO_3 和 Na_2SO_4

注:矿化度指地层水中各离子质量浓度(ρ)之和;变质系数= $\rho_{\text{Na}^+}/\rho_{\text{Cl}^-}$;脱硫系数= $\rho_{\text{SO}_4^{2-}} \times 100/\rho_{\text{Cl}^-}$ 。

表 2 黔北坳陷与周缘钻井水化学简表

Table 2 Hydrochemistry of well fluids drilled in the Qianbei Depression and its periphery

构造	地层	井名	层位	井段/m	矿化度/(g·L ⁻¹)	变质系数	脱硫系数	水型
川南坳陷	中生界	塘 1	T _{1j}	848.15 ~ 998.40	37.06	0.93	13.83	MgCl ₂
		塘 10	T _{1j}	943.96	38.44	0.94	13.87	MgCl ₂
		塘 13	T _{1j}	1 169.63 ~ 1 384.50	36.72	1.00	14.40	MgCl ₂
		塘 14	T _{1j}	1 088 ~ 1 114	31.77	0.63	7.79	MgCl ₂
		塘 3	T _{1j}	1 098.00 ~ 1 106.16	36.21	0.94	13.90	MgCl ₂
		塘 33	T _{1j}	308.31 ~ 1 112.67	31.71	0.90	0.02	MgCl ₂
		塘 4	T _{1j}	993	36.63	0.93	13.01	MgCl ₂
		合 5	T _{1j}	2 052.24	41.61	0.93	7.16	CaCl ₂
		莲花 1	T _{1j}	928 ~ 951	49.19	0.30	2.96	CaCl ₂
		纳浅 4	T _{1j}	977.00 ~ 993.86	47.43	0.86	0.86	CaCl ₂
		坛 4	T _{1j}	1 113.00 ~ 1 124.70	46.50	0.95	9.59	CaCl ₂
		长 1	T _{1j}	1 100.00 ~ 1 446.56	45.12	0.61	4.66	CaCl ₂
	下古生界 - 震旦系	宫深 1	Є _{2+3ls}	3 481.48 ~ 3 560.00	35.14			MgCl ₂
			Z _{2dy}	4 628.86 ~ 4 716.00	74.12	0.63		CaCl ₂
			Z _{2dy}	4 911.92 ~ 4 980.00	61.24	0.64		CaCl ₂
		自深 1	Z _{2dy}	5 322.72 ~ 5 386.00	59.10	0.68	2.75	CaCl ₂
			Z _{2dy}	5 451.88 ~ 5 533.50	66.86	0.65	1.94	CaCl ₂
		资 1	Z _{2dy}	3 994 ~ 4 067	75.69	0.55		CaCl ₂
		资 2	Z _{2dy}	3 684.72 ~ 3 754.40	63.35	0.58		CaCl ₂
		资 3	Z _{2dy}	3 830 ~ 3 864	72.11	0.58		CaCl ₂
		资 4	Z _{2dy}	4 485 ~ 4 552	78.91	0.57		CaCl ₂
		资 5	Z _{2dy}	3 374.00 ~ 3 419.50	66.24	0.61		CaCl ₂
黔北坳陷	下古生界 - 震旦系	丁山 1	Є _{2+3ls}	2 431 ~ 2 437	9.18			Na ₂ SO ₄
			Z _{2dy}	3 509 ~ 3 532	20.82	43.35	70.94	NaHCO ₃
			Z _{2dy}	4 578 ~ 4 603	294.42 ~ 367.00	0.96 ~ 0.97	0.12 ~ 0.77	CaCl ₂
		3415 厂	Є _{2+3ls}		1.71	8.16	100	Na ₂ CO ₃
		中 2	Z _{2dy}	738 ~ 833	2.13	1.17	97	Na ₂ CO ₃
		芒 1	Є _{1q}		2.79			Na ₂ SO ₄
			Z _{2dy}	1 506 ~ 2 210	1.32			Na ₂ SO ₄
	下古生界 - 震旦系	方深 1	Є _{1n}	1 686 ~ 1 785	9.45		7.23	NaHCO ₃
			Z _{2dy}	2 000 ~ 2 015	2.27		48.16	Na ₂ SO ₄
			Z _{2dy}	2 314 ~ 2 315	2.31		22.66	Na ₂ SO ₄
底 1		Є _{2+3ls}	100	1.65			Na ₂ CO ₃	
		Є _{1g}	230	2.81			Na ₂ CO ₃	
		Є _{1q}	300	2.79			Na ₂ CO ₃	
		Z _{2dy}	1 265.03	1.18	10.50		Na ₂ CO ₃	
		Z _{2dy}	1 271 ~ 1 282	0.52	6.88	82.12	Na ₂ CO ₃	

注：T_{1j} 为三叠系嘉陵江组；T_{3x} 为三叠系须家河组；Є_{2+3ls} 为寒武系娄山关群；Z_{2dy} 为震旦系灯影组；Є_{1q} 为寒武系清虚洞组；Є_{1n} 为寒武系牛蹄塘组；Є_{1g} 为寒武系高台组。

水由于其来源和生成环境不同,氢、氧同位素组成存在较大差异。因此,可根据不同成因类型地下水氢同位素值(δD)和氧同位素值(δ¹⁸O)的变化范围大致判定地下水起源和成因。

根据氢、氧同位素测试数据点与大气降水曲线的分布关系(图 2),黔北坳陷及周缘地区地层水 δD 和 δ¹⁸O 呈现明显的平面分区性。川南坳陷下组合(Z—S)和上组合(D—T₂,泥盆系—中三叠统)地层水氢、氧同位素以远远地右偏于大气水降水线为特征;下组合

(Z—S)地层水氢、氧同位素数据点靠近岩浆水和变质水的范围,表明川南坳陷下组合(Z—S)地层水为变质成因再生水或岩浆成因初生水^[34],整体上未受大气水作用影响,地层封闭条件好,有利于油气成藏保存;上组合(D—T₂)地层水氢、氧同位素数据点右偏于全球大气降水线,位于全球大气降水线和变质水之间,部分数据点靠近变质水范围边缘,表明川南坳陷上组合(D—T₂)地层水为原海相成因沉积水,并受到局部轻微变质作用的影响,整体上受大气水作用影响相对较

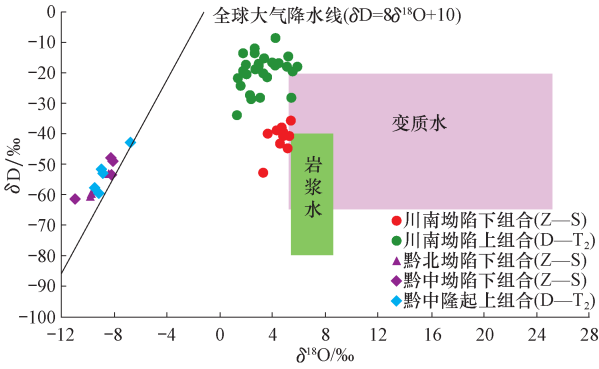


图2 黔北坳陷及周缘地层水氢(δD)、
氧(δ¹⁸O)同位素关系

Fig. 2 Hydrogen and oxygen isotope compositions of
formation water in the Qianbei Depression and its periphery
(川南坳陷数据引自林耀庭,1996^[34]。)

弱,地层封闭条件相对较好,有利于油气保存。黔北坳陷下组合(Z—S)地层水氢、氧同位素数据点位于全球大气降水线左上方并靠近全球大气降水线,表明下组合(Z—S)地层水为大气成因溶滤水,受大气水作用影响明显,地层封闭性差,不利于油气保存。黔中隆起下组合(Z—S)和上组合(D—T₂)地层水氢、氧同位素数据点均左偏于并靠近全球大气降水线,表明黔中隆起下组合(Z—S)和上组合(D—T₂)地层水为大气成因溶滤水,整体上受大气水作用影响,地层封闭条件差,不利于油气成藏保存。

3 富氮天然气特征与油气保存

黔北坳陷地处黔中隆起向四川盆地的过渡带,构造改造强烈,断裂发育,水动力特征对油气保存条件的破坏不容忽视。沿断裂垂向渗入和构造高部位顺着地

层侧向渗入是大气淡水下渗作用的两种主要方式^[21]。

富氮天然气在构造活动强烈的沉积盆地边缘和沉积盆地内部的断裂发育带常见,往往与淡化的地层水相伴,表明曾经或现今与地表水发生过缓慢交替,因此是大气水下渗强烈的直接证据^[14,36-37]。

根据黔北坳陷及周缘已有钻井气体组分的氮气(N₂)体积分数可以看出(表3),黔北坳陷下寒武统气体组成的N₂含量高,超过85%,最大已经达到95%以上。如昭通构造的昭101井在984.90~1 713.30 m井段(Є_{1n})处气样的N₂体积分数大于95%,甲烷(CH₄)的体积分数小于5%;太阳构造的阳1井在2 903.69~2 903.90 m井段(Є_{1q},寒武系清虚洞组)处气样的N₂体积分数高达91.37%,CH₄体积分数仅为0.53%。这表明滇黔北坳陷埋深2 900 m以上的地层受到大气水下渗作用影响强烈。黔中隆起大方构造方深1井2 364 m井段(Z_{2dy},震旦系灯影组)以上地层中N₂体积分数均相对较高,而在2 398~2 445 m井段(Z_{2dy})处N₂体积分数减小为53.65%~53.78%,CH₄体积分数为1.70%~1.72%(表3),表明黔中隆起埋深2 400 m以上的地层同样受到大气水下渗作用的影响。

4 温泉特征与油气保存

温泉是由地表水渗入地下,经地热增温后流出地表形成,其分布及水温特征在一定程度上反映了大气水下渗循环深度和水文地质开启程度。一般而言,中温(40~60℃)和高温温泉(60~90℃)是断裂活动、大气水下渗强烈、地层封闭性差、地下深部流体热能在地表出露的标志^[14,24]。因此,中温和高温温泉出露的地区不利于油气保存^[21]。

表3 黔北坳陷及周缘钻井甲烷(CH₄)与氮气(N₂)含量

Table 3 Content of CH₄ and N₂ of well drilling in the Qianbei Depression and its periphery

构造单元	局部构造	井名	层位	井段/m	CH ₄ 含量/%	N ₂ 含量/%
黔北坳陷	太阳构造	阳 1	S ₁ <i>l</i>	963. 50	76. 65	16. 92
				946		60. 42
				984	6. 98	77. 20
			Є ₁ <i>q</i>	2 903. 69 ~ 2 903. 97	0. 53	91. 37
				2 907. 67 ~ 2 907. 94	12. 02	88. 09
	芒部构造	昭 101	Є ₁ <i>n</i>	984. 90 ~ 1 713. 30	<5. 00	>95. 00
黔中隆起	安底背斜	底 1	Є ₁ <i>n</i>	1 261. 30		98. 82
			Z ₂ <i>dy</i>	1 271. 58		97. 23
				1 282. 32		97. 02
			Є ₁ <i>n</i>	1 726. 70		79. 00
	大方构造	方深 1		2 358		92. 72
			Z ₂ <i>dy</i>	2 364		94. 73
			2 398 ~ 2 445	1. 70 ~ 1. 72	53. 65 ~ 53. 78	

注:S_{1l}为志留系龙马溪组;Є_{1q}为寒武系清虚洞组;Є_{1n}为寒武系牛蹄塘组;Z_{2dy}为震旦系灯影组。

4.1 温泉与断裂分布特征

研究区温泉多为中温和低温温泉(图3),且多数沿构造单元边界主控断裂带呈线状分布,少数分布在构造单元内部断裂发育处。中温温泉主要分布在齐岳山-习水断裂带和遵义-贵阳断裂带附近,如息烽县温泉乡温泉温度为48℃、仁怀县盐津桥温泉温度为54℃。低温温泉除了分布在上述的边界深大断裂带,还分布在赫章-遵义断裂带和黔北坳陷、黔中隆起内次级断裂发育处。

4.2 温泉温度与循环深度

黔北坳陷及周缘地区温泉温度分布范围在21~54℃(图4),属中-低温温泉,且随着温泉出露地层时代变老,温泉温度有缓慢上升的趋势(图5)。

温泉循环深度可以反映大气水下渗的深度或所能到达的层位,这一指标可通过温泉出露地表温度进行估算,此循环深度即现今大气水下渗深度^[12,38]。虽然

通过温泉温度可以估算温泉循环深度,但温泉循环深度还受区域热源条件和地质条件,如断裂活动时间、切割深度、地温场等因素影响。从黔北坳陷及周缘部分温泉的地质条件分析(表4),温泉多发于构造单元边界深大断裂带,且断裂大都属于基底断裂,不同程度地切割了震旦系、下古生界和上古生界,并具有多期活动。温泉的储层多为震旦系和下古生界。值得一提的是,地温梯度、温泉温度与温泉循环深度有良好的对应关系,地温梯度高且温泉温度高的温泉,循环深度大。黔北坳陷习水和仁怀地区地温梯度大于25℃/km,温泉温度在38~40℃,循环深度普遍大于960m;桐梓和毕节地区地温梯度在20~25℃/km,温泉温度为23~30℃,其温泉的循环深度为500~600m。黔中隆起遵义、息烽和织金地温梯度为25~30℃/km,温泉温度在30~54℃,温泉的循环深度为780~1880m;而在金沙、黔西、清镇和开阳等地虽地温梯度大于25℃/km,但温泉温度小于28℃,其循环深度小。

综上所述认为,黔中隆起区东部、南部和东南部深

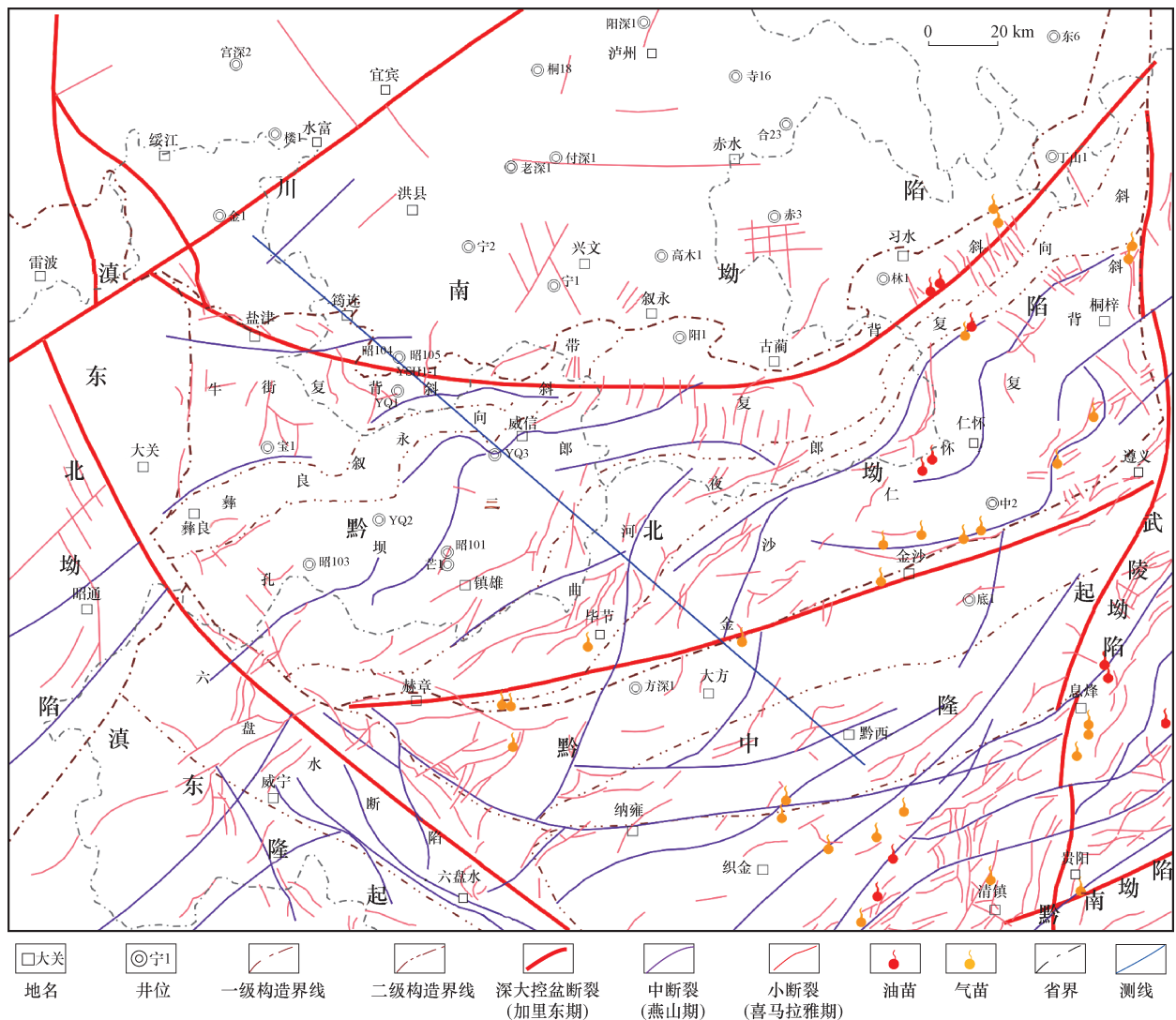


图3 黔北坳陷及周缘温泉与不同期次断裂分布

Fig. 3 Distribution of hot spring and multi-period faults in the Qianbei Depression and its periphery

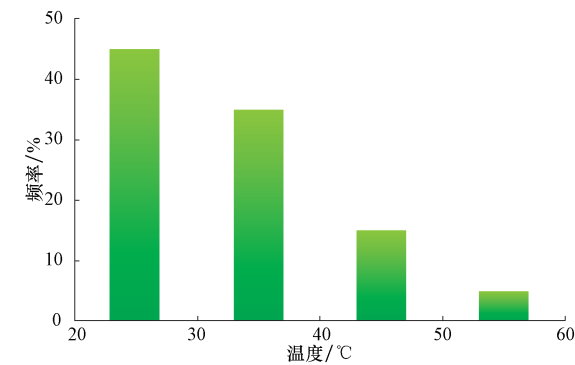


图 4 黔北坳陷及周缘温泉温度统计
Fig. 4 Histogram of hot spring temperature in the Qianbei Depression and its periphery

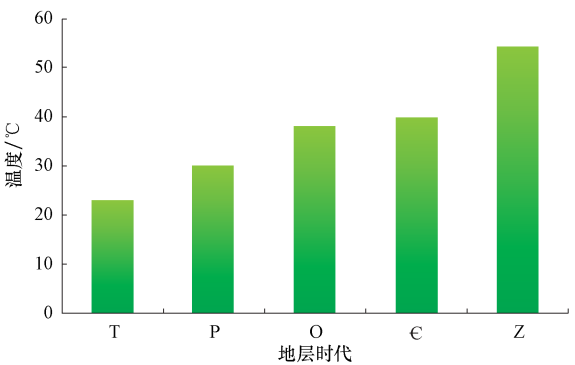


图 5 黔北坳陷及周缘温泉温度与地层分布关系
Fig. 5 Relationship between hot spring temperature and host strata in the Qianbei Depression and its periphery
Z. 震旦系; ̵. 寒武系; O. 奥陶系; P. 二叠系; T. 三叠系

表 4 黔北坳陷及周缘部分温泉地质条件统计

Table 4 Statistical table of hot spring water profile in the Qianbei Depression and its periphery

构造单元	温泉位置	主控断裂	主控断裂切割层位	主控断裂活动时间	储层层位	地温梯度/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)	温泉温度/ $^{\circ}\text{C}$	循环深度/ m
黔北坳陷	习水两岔口	齐岳山—习水断裂	Z—S, D—T, J	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	ϵ_{2+3ls}	30	40	1 473
	仁怀盐津桥	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	29.8	48	1 414
	仁怀团结	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	$O_1t—O_1h$	29.8	38	967.5
	桐梓楠木园	遵义断裂	Z, ̵	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	20~25	28	521
	毕节星秀田	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	$P_1q—P_1m$	20~25	30	655
	毕节草堤	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	T	20~25	23	530
黔中隆起	遵义芭蕉	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	25~30	30	1 123
	遵义正安	遵义断裂、 赫章—遵义断裂	Z—S, T	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	25~30	32	780
	遵义枫香	遵义断裂	Z, ̵	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	25~30	36	878.2
	织金金家坝	贵阳—普定断裂	Z, ̵, O, P, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	26.1	38	1 124
	织金杜家桥	贵阳—普定断裂	Z, ̵, O, P, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	26.1	32	811.3
	金沙岩孔	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	28.8	23	363
	金沙水口寺	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	28.8	28	521.1
	大方撮坝	赫章—遵义断裂	Z—S, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	$P_2c—P_2d$	19.8	26	462.7
	清镇五里桥	贵阳—普定断裂	Z, ̵, O, P, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	Z_2dy	25	25	446.7
	黔西王家渡	贵阳—普定断裂	Z, ̵, P, T	加里东期、燕山期、喜马拉雅期、现今	$P_1q—P_1m$	25	24	366.5
	开阳洋桥	遵义断裂	Z, ̵	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	30	24	394.6
	开阳白马洞	遵义断裂	Z, ̵	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	30	21	238.3
	开阳马岔河	遵义断裂	Z, ̵	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	30	40	1 228
	息烽	遵义断裂	Z, ̵	海西—印支期、燕山期	Z_2dy	25~30	54	1 880

注:循环深度数据引自李梅,2011^[39]。̵_{2+3ls}为寒武系娄山关群;Z_{2dy}为震旦系灯影组;O_{1t}为奥陶系桐梓组;O_{1h}为奥陶系红花园组;P_{1q}为二叠系栖霞组;P_{1m}二叠系茅口组;P_{2c}为二叠系长兴组;P_{2d}为二叠系大隆组。

大断裂发育处大气水下渗强烈,大气水深度介于 800 ~ 1 800 m,最大下渗深度为息烽地区的 1 880 m,表明水文地质开启程度高,地层封闭性差,不利于油气保存;黔中隆起西北部的金沙、大方地区及西南部的水城地区大气水下渗深度为 300 ~ 500 m,表明水文地质开启程度低,地层封闭性相对较好,有利于油气保存,如大方构造方深 1 井下寒武统牛蹄塘组气测异常表明存在局部的良好保存条件。黔北坳陷东北部靠近齐岳山-习水断裂带、遵义断裂带处,大气水下渗强烈,下渗深度为 960 ~ 1 470 m,表明水文地质开启程度高,地层封闭性差,不利于油气保存;东南部毕节地区大气水下渗深度为 500 ~ 600 m,表明水文地质开启程度低,地层封闭性较好,有利于油气保存;而在坳陷内向斜低缓区断裂发育少,无温泉出露区,表明水文地质封闭环境较好,有利于油气保存。川南坳陷无深大断裂发育,地表温泉出露较少,水文地质封闭性较好,有利于油气保存。

5 地下水动力场与油气保存

5.1 现今地下水动力场与油气保存

根据地形、流体地球化学特征、温泉分布及水循环深度估算等研究,可以建立黔北坳陷与周缘现今地下水动力场(图 6)。黔中隆起先后经历了加里东末期的抬升剥蚀、印支期的抬升和燕山期-喜马拉雅期的强烈褶皱断裂、剥蚀及逆冲推覆,二叠系和三叠系广泛出露,断裂发育且开启程度较高,大气水下渗强烈,整体处于大气水下渗向心流区,油气保存条件差。黔北坳陷为黔中隆起向四川盆地的斜坡过渡带,燕山期-喜马拉雅期褶皱断裂发育,表现为背斜-向斜交替分布和坳-隆相间的构造格局,背斜轴部多出露寒武系,局部出露震旦系(如桑木场、桐梓、松林及岩孔等背斜),

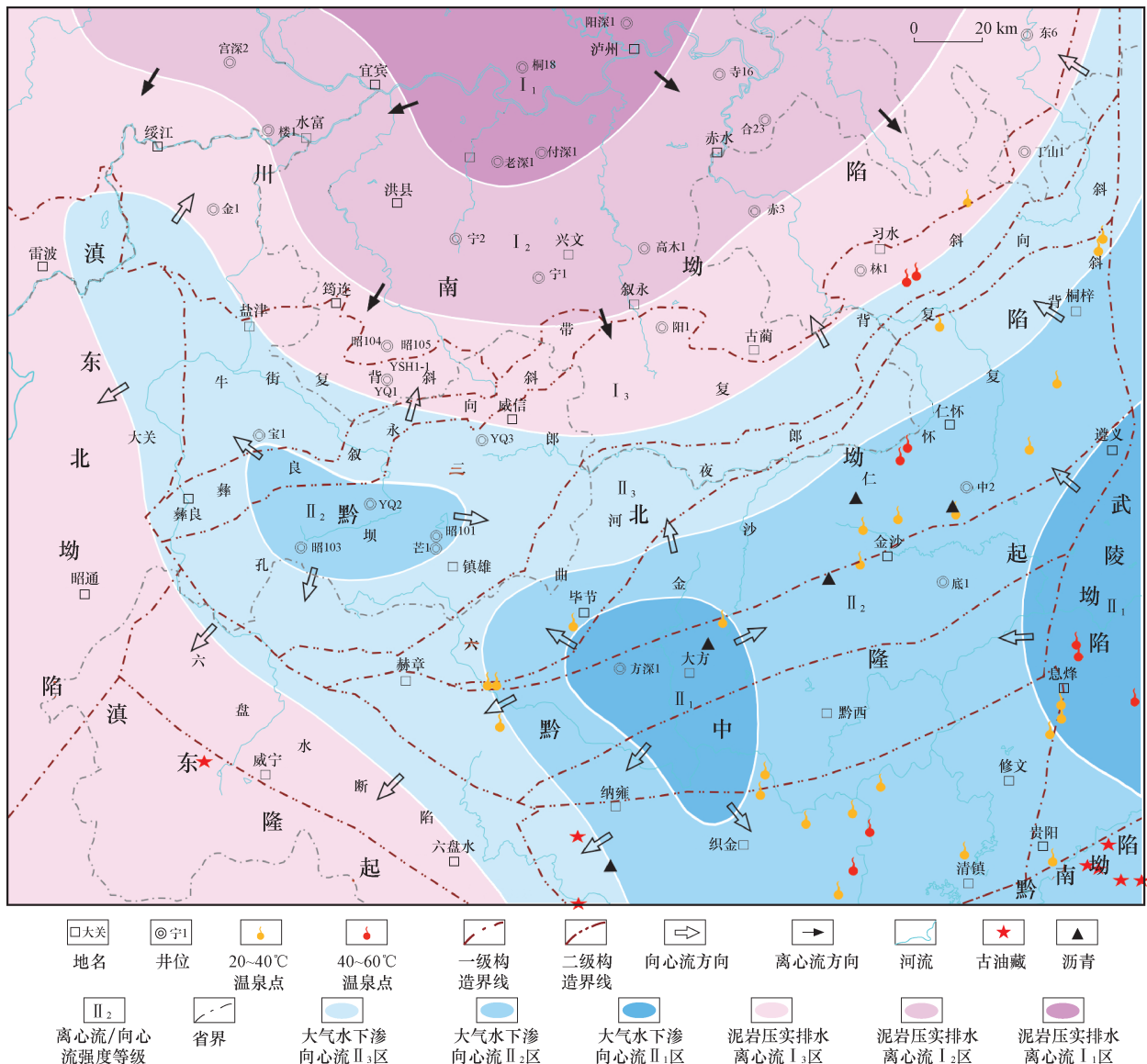


图 6 黔北坳陷与周缘现今地下水动力场平面分布

Fig. 6 Plane distribution of present hydrodynamic field in the Qianbei Depression and its periphery

但向斜轴部常见侏罗系,整体大气水下渗作用相对较弱,油气保存条件变好。川南坳陷自早古生代以来一直处于构造低位置,地形平缓,构造活动相对较弱,无深大断裂发育,整体处于泥岩压实排水离心流区,油气保存条件好。

5.2 地下水动力场形成演化与油气保存

沉积盆地的水文地质特征具有旋回性。一个水文地质旋回可以分为两个阶段:①沉积水文地质阶段,为压实水形成的离心流发育阶段;②渗入水文地质阶段,为大气水下渗形成的向心流发育阶段^[9]。因此,地下水动力场的形成、演化同样具有旋回性,每个旋回又可以划分为盆地沉积埋藏阶段的泥岩压实水离心流阶段和抬升剥蚀阶段的大气水下渗向心流阶段。埋藏阶段是油气藏形成的主要时期,抬升剥蚀阶段则是油气藏破坏和调整时期。因此,每个旋回中盆地抬升剥蚀时期发育的大气水向心流有可能破坏早期的油气藏^[5,9,40]。

黔北坳陷及周缘地区自古生代以来主要经历了3次水文地质旋回:加里东期、印支期和燕山期。黔北坳陷及周缘水文地质旋回控制了地下水动力场的形成、演化,而地下水动力场的形成、演化控制了油气运聚、成藏和保存(图7)。

加里东期,黔北坳陷及周缘沉积了巨厚的海相地层,并发育了上震旦统陡山沱组(Z_2ds)、下寒武统牛蹄塘组(ϵ_1n)、上奥陶统五峰组(O_3w)和下志留统龙马溪组(S_1l)等主力烃源岩。加里东中期,上震旦统陡山沱组和寒武系烃源岩进入生油气阶段^[41],油气开始运移。坳陷生烃中心位于黔北坳陷的威信一带。生成的油气在强大的离心流作用下分别往南、北两侧的黔中隆起和川南坳陷相对低势能区运移聚集并成为油气保存的有利地区(图7d)。

加里东末期的广西运动对黔北坳陷及周缘影响强烈,表现为发育平缓褶皱和断裂,川南坳陷和滇黔北坳陷略有抬升,黔中隆起则持续隆升,地层遭受剥蚀,构造高点的金沙—织金一带沉积间断,使研究区大部分缺失上志留统一石炭系。由于川南坳陷较黔北坳陷抬升剥蚀作用强,黔北坳陷深部地层压力得以保存,因此水动力仍以离心流为特征,但其范围明显减小。该阶段抬升剥蚀导致的大气水下渗作用主要发育在黔中隆起。川南缓坡带、黔北坳陷与黔中隆起之间的斜坡带主要发育越流泄水带,成为油气的有利聚集区(图7a)。

海西沉积期,滇黔北坳陷及周缘整体埋深,上覆的巨厚二叠系与中—下志留统形成平行不整合。研究区内下寒武统牛蹄塘组烃源岩再次生烃,下志留统龙马溪组烃源岩开始生烃,在川南坳陷和黔北坳陷发育强离心流。由于黔中隆起自海西运动以后持续隆升,且

生烃中心位于川南坳陷和黔北坳陷,沉积压实离心流指向相对低势能区的黔中隆起,黔中隆起属于越流泄水区,是油气运移聚集的有利地区(图7e)。印支期,研究区整体处于持续抬升阶段,剥蚀作用强烈,生烃作用停止。该阶段川南坳陷和黔北坳陷地势较低,剥蚀厚度小,仍发育小范围离心流。黔中隆起大气水下渗强烈,早期形成的油气被破坏。在黔北坳陷与黔中隆起之间的斜坡带如大方构造成为越流泄水区,是油气的有利聚集区(图7b)。

燕山—喜马拉雅沉积期,黔北坳陷及周缘进入内陆湖盆沉积阶段,侏罗纪时在四川盆地形成大型坳陷湖盆,沉积连续且厚度大(图7f)。早期的油藏裂解成气,晚古生代二叠系烃源岩开始生、排烃,川南坳陷和黔北坳陷再次发育强离心流。由于黔中隆起地势高且位于坳陷湖盆的边缘,为相对较低势能区,有利于油气聚集。燕山晚期的燕山运动,是黔北坳陷与周缘重要的一次褶皱造山运动,使晚白垩世以前的地层普遍发生褶皱断裂,也使早期形成的断裂再次活动,造成上白垩统与下伏不同时代的地层呈明显的角度不整合接触(图7c)。伴随强烈的抬升剥蚀作用和断裂活动,黔中隆起和黔北坳陷南部大气水强烈下渗,油气保存条件遭到严重破坏,推测越流泄水带位于川南坳陷和黔北坳陷的过渡带,为油气的有利聚集区;而川南坳陷地表覆盖巨厚三叠系,通天断层不发育,大气水下渗作用较弱,油气保存条件较好。

6 结论

1) 黔北坳陷及周缘在加里东期和海西期—印支期分别形成了两次主要的油气藏形成期,但加里东末期、印支期和燕山期—喜马拉雅期运动使得原已形成的油气藏几乎被破坏殆尽。

2) 黔北坳陷及周缘地层水化学分布具有明显平面分区性和垂直分带性。平面分区性表现为:由黔中隆起—黔北坳陷—川南坳陷,下古生界及震旦系地层水矿化度逐渐增大,变质系数和脱硫系数逐渐减小,水文地质开启程度逐渐减小,地层封闭性逐渐变好,油气保存条件逐渐变好。垂直分带性表现为:黔中隆起埋深小于2 500 m、黔北坳陷埋深小于3 000 m的地层处于自由交替带且底界尚不清楚,地层水矿化度小于10 g/L,变质系数和脱硫系数较大,水文地质开启程度大,地层封闭性差,油气保存条件差;另外,黔北坳陷东北部丁山1井在4 578~4 603 m深度地层水矿化度在300 g/L左右,变质系数和脱硫系数小,推测埋深4 500 m以下存在良好盖层,有利于油气保存。川南坳陷埋深800 m的地层进入交替阻滞带,由中生界—上古生

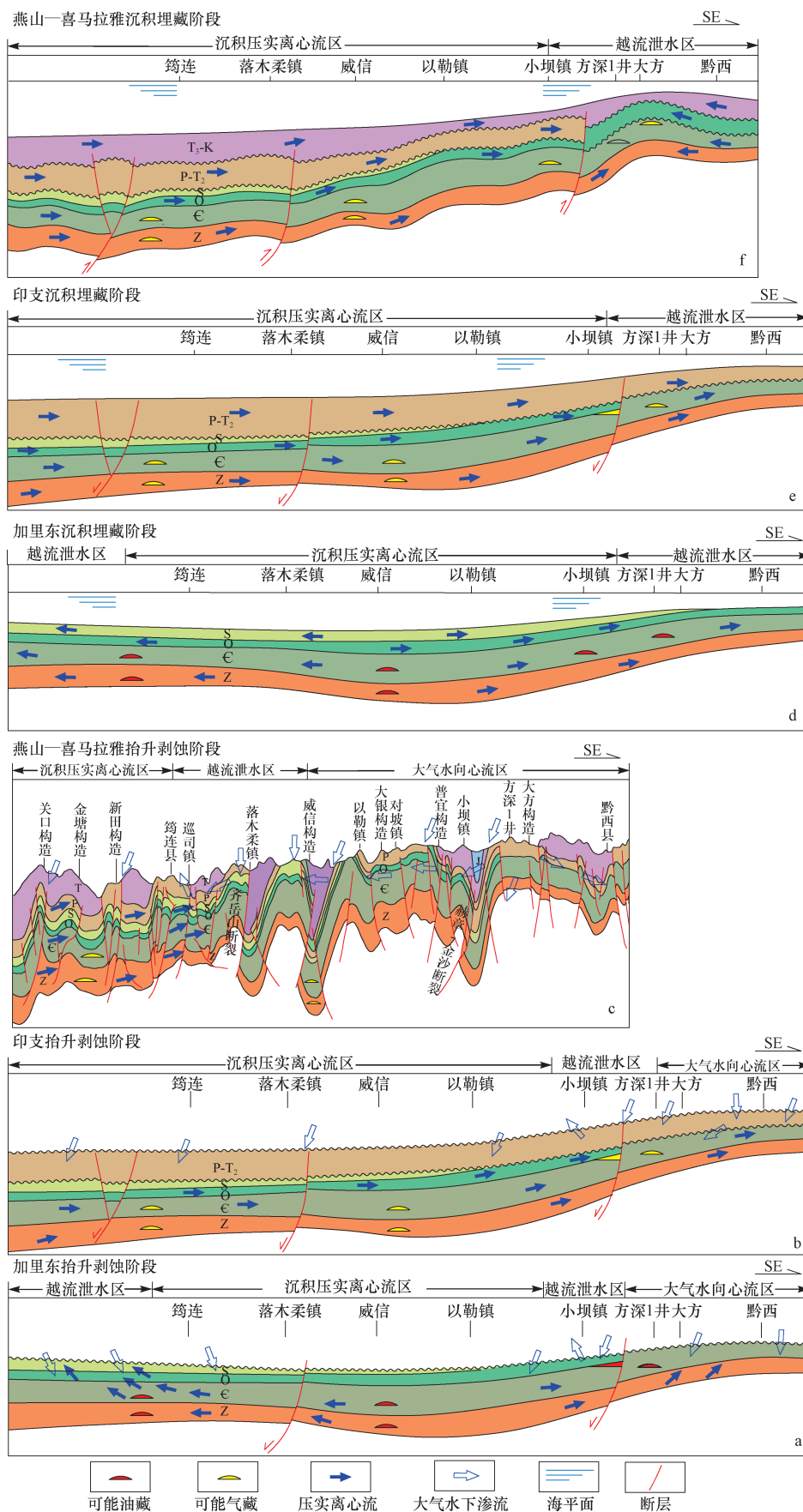


图7 黔北坳陷及周缘流体动力演化与油气保存模式(剖面位置见图3)

Fig. 7 Hydrodynamic field evolution and hydrocarbon preservation mode in the Qianbei Depression and its periphery

界一下古生界—震旦系,地层水矿化度逐渐增大,变质系数和脱硫系数逐渐减小,水文地质环境逐渐封闭,油气保存条件变好。

3) 多期次构造和大气水下渗作用使得现今黔中隆起和黔北坳陷东南部处于开放的水文地质环境,油气保存条件整体较差。黔北坳陷东北部丁山构造埋深大于4 500 m 和川南坳陷埋深大于800 m 的地层水文地质环境封闭性较好,对油气保存有利。

参 考 文 献

- [1] 汪蕴璞,田荣和,王东升,等. 评苏林油田水理论中的几个问题[J]. 地质学报,1976,50(1):31-36.
Wang Yunpu, Tian Ronghe, Wang Dongsheng, et al. Comments on several issues of Surin theory in oilfield water[J]. Acta Geologica Sinica, 1976, 50(1): 31-36.
- [2] 杨忠辉,周景田,李淑琴. 油气田的水文地球化学标志及其应用[J]. 石油与天然气地质,1982,3(4):327-334.
Yang Zhonghui, Zhou Jingtian, Li Shuqin. Hydrogeochemical symbols of oil and gas and its application[J]. Oil & Gas Geology, 1983, 13(4): 327-334.
- [3] 刘崇禧,孙世雄. 水文地球化学找油理论与方法[M]. 北京:地质出版社,1988:1-20.
Liu Chongxi, Sun Shixiong. Theory and method of Hydrogeochemical oil exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-20.
- [4] 杨绪充. 论含油气盆地地下水动力环境[J]. 石油学报,1989,10(4):27-34.
Yang Xuchong. Hydrodynamics for oil-bearing sedimentary basin [J]. Journal of Petroleum, 1989, 10(4): 27-34.
- [5] 刘方槐,颜婉荪. 油气田水文地质原理[M]. 北京:石油工业出版社,1991:11-16.
Liu Fangkui, Yan Wansun. Oil and gas field hydrogeology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 11-16.
- [6] 程汝楠. 古水文地质及其应用[M]. 北京:地质出版社,1991:1-20.
Cheng Runan. Ancient hydrological geology and its application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-20.
- [7] 汪蕴璞,林锦璇,汪林. 论含油气盆地含水系统和水文地质期的划分[J]. 地球科学——中国地质大学学报,1995,20(4):393-398.
Wang Yunpu, Lin Jinxuan, Wang Lin. Division of water-bearing systems and hydrogeological periods of oil (gas)-bearing basin [J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 1995, 20(4): 393-398.
- [8] 李贤庆,侯读杰,张爱云. 油田水地球化学研究进展[J]. 地质科技情报,2001,20(2):51-54.
Li Xianqing, Hou Dujie, Zhang Aiyun. Advancement of the geochemical study of oilfield water[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(2): 51-54.
- [9] 楼章华,高瑞祺,蔡希源. 松辽盆地地下水动力场演化与油气运移、聚集[J]. 沉积学报,1997,15(4):115-120.
Lou Zhanghua, Gao Ruiqi, Cai Xiyuan. A study on the evolution hydrodynamics, the migration and accumulation of oil and gas in the Songliao basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 115-120.
- [10] 楼章华,蔡希源,高瑞祺. 松辽盆地流体历史与油气藏分析[M]. 贵阳:贵州科学技术出版社,1998:1-4.
Lou Zhanghua, Cai Xiyuan, Gao Ruiqi. Analysis of fluid history and oil gas reservoir in Songliao Basin [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 1998: 1-4.
- [11] 楼章华,朱蓉,金爱民,等. 东营凹陷地下水动力场的形成和演化[J]. 地质科学,2003,38(1):85-96.
Lou Zhanghua, Zhu Rong, Jin Aimin, et al. Formation and evolution of hydrodynamics field in the Dongying depression [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(1): 85-96.
- [12] 楼章华,朱蓉. 中国南方海相地层水文地质地球化学特征与油气保存条件[J]. 石油与天然气地质,2006,27(5):584-593.
Lou Zhanghua, Zhu Rong. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions in marine strata in southern China [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 584-593.
- [13] 金爱民,高兴友,楼章华,等. 准噶尔盆地玛湖—盆1井西复合含油气系统侏罗系地下水动力场的形成与演化[J]. 地质科学,2006,41(4):549-563.
Jin Aimin, Gao Xingyou, Lou Zhanghua, et al. Formation and evolution of hydrodynamics field in the Jurassic of Mahu-west of Well Pen 1 multi-source petroliferous systems, Junggar basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41(4): 549-563.
- [14] 金爱民,尚长健,朱蓉,等. 桂中坳陷及周缘地下水化学—动力特征与油气保存[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(5):758-765.
Jin Aimin, Shang Changjian, Zhu Rong, et al. Ground hydrochemical & hydrodynamic characters and hydrocarbon preservation in Guizhong depression and its margin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 758-765.
- [15] 胡晓凤,王韶华,盛贤才,等. 中扬子区海相地层水化学特征与油气保存[J]. 石油天然气学报,2007,29(2):32-37.
Hu Xiaofeng, Wang Shaohua, Sheng Xiancai, et al. Hydrochemical properties of formation water and hydrocarbon preservation in Marine Strata of the Middle Yangtze area [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(2): 32-37.
- [16] 李梅,金爱民,楼章华,等. 高邮凹陷南部真武地区地层水化学特征与油气运聚的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(5):50-56.
Li Mei, Jin Aimin, Lou Zhanghua, et al. Hydrochemical properties of formation water and its relationship with oil and gas migration and accumulation in Zhenwu area of southern Gaoyou sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2010, 34(5): 50-56.
- [17] 李梅,金爱民,朱蓉,等. 高邮凹陷古近系水动力作用与油气运聚机理[J]. 中国矿业大学学报,2012,45(3):460-468.
Li Mei, Jin Aimin, Zhu Rong, et al. Properties of hydrodynamic field and the migration and accumulation of oil and gas in Zhenwu area of Gaoyou sag [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 45(3): 460-468.
- [18] 李梅,楼章华,金爱民,等. origin, flow of formation water and hydrocarbon accumulation in the Zhenwu area of the North Jiangsu Basin, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 819-829.
- [19] 梁家驹,徐国盛,李昌鸿,等. 江汉平原区古生界地层水化学特征与油气保存[J]. 断块油气田,2010,17(2):129-133.
Liang Jiaju, Xu Guosheng, Li Changhong, et al. Hydrochemical characteristics and hydrocarbon preservation of Palaeozoic formation in Jiangnan Plain [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(2): 129-133.
- [20] 王君,楼章华,朱蓉,等. 渤海湾盆地东濮凹陷文留地区现今地层水化学与油气运聚[J]. 石油与天然气地质,2014,35(4):449-455.

- Wang Jun, Lou Zhanghua, Zhu Rong, et al. Hydrochemistry of Paleogene formation water and its relationship with hydrocarbon migration and accumulation in Wenliu region in Dongpu sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 449-455.
- [21] 楼章华, 马永生, 郭彤楼, 等. 中国南方海相地层油气保存条件评价[J]. *天然气工业*, 2006, 26(8): 8-11.
- Lou Zhanghua, Ma Yongsheng, Guo Tonglou, et al. Evaluation of oil and gas preservation conditions in marine formation in south China [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(8): 8-11.
- [22] 楼章华, 李梅, 金爱民, 等. 中国海相地层水文地质地球化学与油气保存条件研究[J]. *地质学报*, 2008, 82(3): 387-396.
- Lou Zhanghua, Li Mei, Jin Aimin, et al. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions for marine strata in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(3): 387-396.
- [23] 郭彤楼, 楼章华, 马永生. 南方海相油气保存条件评价和勘探决策中应注意的几个问题[J]. *石油实验地质*, 2003, 25(1): 3-9.
- Guo Tonglou, Lou Zhanghua, Ma Yongsheng. Several problems on oil and gas preservation and their commercial prospecting in marine sequences of South China [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(1): 3-9.
- [24] 马永生, 楼章华, 郭彤楼, 等. 中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. *地质学报*, 2006, 80(3): 406-417.
- Ma Yongsheng, Lou Zhanghua, Guo Tonglou, et al. An exploration on a technological evaluation for marine system of petroleum preservation strata in South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(3): 406-417.
- [25] 王鸿祯, 刘本培. 中国中元古代以来古地理发展的轮廓[J]. *地层学杂志*, 1981, 5(2): 77-89.
- Wang Hongzhen, Liu Benpei. The palaeogeography development outline of China since the Middle Proterozoic [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1981, 5(2): 77-89.
- [26] 王鸿祯, 张世红. 全球前寒武纪基底构造格局与古大陆再造问题[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(5): 467-480.
- Wang Hongzhen, Zhang Shihong. Tectonic pattern of the world Precambrian basement and problems of paleocontinent reconstruction [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(5): 467-480.
- [27] 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等. 中国华南大陆构造与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(10): 1553-1582.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Wang Yuejun, et al. Tectonics of South China continent and its implications [J]. *Science China: Earth Science*, 2013, 43, (10): 1553-1582.
- [28] 马力, 陈焕疆, 甘克文, 等. 中国南方大地构造和海相油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 45-58.
- Ma Li, Chen Huanjiang, Gan Kewen, et al. Geotectonic and petroleum geology of marine sedimentary rocks in southern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 45-58.
- [29] 汤良杰, 崔敏. 中上扬子区关键构造变革区、构造变形样式与油气保存[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(1): 12-16.
- Tang Liangjie, Cui Min. Key tectonic changes, deformation styles and hydrocarbon preservations in Middle-Upper Yangtze region [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(1): 12-16.
- [30] 梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等. 南方多旋回构造作用制约下的中、古生界海相油气构造-成藏旋回[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 589-597.
- Mei Lianfu, Liu Zhaoqian, Tang Jiguang, et al. Tectonic-pooling cycles controlled by polycyclic tectonism in the Mesozoic-Palaeozoic marine strata of South China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 589-597.
- [31] 丁道桂, 刘光祥. 扬子板内递进变形——南方构造问题之二[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 238-252.
- Ding Daogui, Liu Guangxing. Progressive deformation in Yangtze Plate—Series 2 of the southern structure studies [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3): 238-252.
- [32] 郭旭升, 梅廉夫, 汤济广, 等. 扬子地块中、新生代构造演化对海相油气成藏的制约[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(3): 295-325.
- Guo Xusheng, Mei Lianfu, Tang Jiguang, et al. Constraint of Meso-Cenozoic tectonic evolution of Yangtze massif on formation of marine reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(3): 295-325.
- [33] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 40(1): 28-36.
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 40(1): 28-36.
- [34] 林耀庭, 熊淑君. 氢氧稳定同位素习性及其在四川盆地卤水成因研究中的应用[J]. *化工矿产地质*, 1996, 18(4): 300-306.
- Lin Yaoting, Xiong Shujun. Research on origination of saline water in Sichuan Basin with reference to hydrogen and oxygen isotopic behaviours [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 1996, 18(4): 300-306.
- [35] 陈陆望, 桂和荣, 殷晓曦, 等. 深层地下水 ^{18}O 与D组成特征与水流场[J]. *中国矿业大学学报*, 2008, 37(6): 854-858.
- Chen Luwang, Gui Herong, Yin Xiaoxi, et al. Composing characteristic of ^{18}O and D and current field in deep groundwater [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2008, 37(6): 854-858.
- [36] 陈安定. 地下富氮气体中氮主要来自地面大气水下渗[J]. *天然气地球科学*, 1998, 9(6): 30-33.
- Chen Anding. Nitrogen of the underground nitrogen-rich gas mainly comes from surface meteoric water infiltration [J]. *Natural Gas Industry*, 1998, 9(6): 30-33.
- [37] 陈安定. 氮气对海相地层油气保存的指示作用[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(1): 85-89.
- Chen Anding. Nitrogen as an index of oil-gas preservation conditions in marine strata [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(1): 85-89.
- [38] 王大纯. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1986: 1-10.
- Wang Dachun. Fundamental of hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 1-10.
- [39] 李梅. 黔南桂中坳陷水文地质地球化学与油气保存条件研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- Li Mei. Hydrogeology-geochemistry characteristics and the conditions of hydrocarbon preservation in Qiannan-Guizhong depression [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [40] 王震亮, 陈荷立. 试论古水动力演化的旋回性与油气的多期次运聚[J]. *沉积学报*, 2002, 20(2): 339-344.
- Wang Zhenliang, Chen Heli. A view on cycles of paleo-hydrodynamics evolution and phases of hydrocarbon migration and accumulation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 339-344.
- [41] 王津义, 涂伟, 曾华盛, 等. 黔西北地区天然气成藏地质特征[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(5): 445-449.
- Wang Jinyi, Tu Wei, Zeng Huasheng, et al. Geologic characteristics of natural gas accumulations in the northwest of Guizhou [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(5): 445-449.