

朱继良,许模,孙建平,等.重庆涪陵页岩气勘查开发区岩溶水文地质结构研究[J].中国岩溶,2020,39(1):1-10.
DOI:10.11932/karst2019y32

重庆涪陵页岩气勘查开发区岩溶水文地质结构研究

朱继良¹,许模²,孙建平¹,康小兵²,史箫笛²

(1.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北保定 071051;2.成都理工大学地质
灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘要:通过对页岩气勘查开发区碳酸盐岩分布特征、岩溶发育规律及岩溶水的赋存与动力循环过程展开研究,采用系统分析法,归纳出平缓单斜型单层、背斜褶曲型多层、向斜褶曲型单层和断裂型四种岩溶水文地质结构,其中平缓单斜型单层和背斜褶曲型多层水文地质结构区岩溶介质类型主要为管道—裂隙型,地下水径流通畅,易导致岩溶水污染。

关键词:页岩气;岩溶地区;地下水环境;水文地质结构

中图分类号:P618.13;P641.462

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2020)01-0001-10 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

自2005年中国开展页岩气地质研究和勘探开发以来,经历了从页岩气地质条件研究、“甜点区”评选与评价井钻探及勘探开发前期准备,到海相页岩气工业化开采试验、海陆过渡相与陆相页岩气勘探评价两大发展阶段,现正有序向海相页岩气规模化开采、海陆过渡相与陆相页岩气工业化开采试验阶段递进^[1-2]。2014年在涪陵焦石坝地区探明了中国首个千亿立方米大型页岩气田^[3],落实了 $50\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 产能建设目标,实现了四川盆地页岩气工业化生产,成为中国页岩气勘探开发历史性转折点,掀起了中国页岩气勘探开发的新高潮^[4-5]。目前,重庆涪陵区页岩气已探明地质储量 $10\ 675\times 10^8\text{ m}^3$,建成产能 $10\times 10^8\text{ m}^3$,累积产气 $6.11\times 10^8\text{ m}^3$ ^[6]。

近十几年来,水平井和水力压裂技术的发展趋

向成熟,使得页岩气的大规模商业开发成为可能。然而页岩气开采产生的空气污染、温室气体排放、辐射以及采出水污染等环境问题在世界范围内引起了争议^[7],尤其在页岩气勘探开发中实施水力压裂对地下水的影响更是受到广泛关注,其中的污染物一般包括两类:一类是杂散烃类气体的污染,二类是溶解性化学物质的污染^[8-12]。

中国页岩气资源量大,分布区地形复杂,其中川渝地区页岩气储量丰富,当地水资源相对充裕,成为西南地区优先勘探和开发的地区。因受碳酸盐岩岩性特征和岩溶发育程度的影响,岩溶水文地质结构和功能千差万别,水文地质结构的不同,污染物对地下水的影响程度也不一样,对于分布着大量碳酸盐岩的川渝页岩气开发区,地下水系统的分布及其循环演化规律更加复杂,查明岩溶水文地质结构,能为页岩气开发利用提供有效的指导意见,从而减少

资助项目:川渝页岩气勘查开发区1:5万环境地质调查(DD20160253);川渝页岩气勘查开发区典型地段浅层含水系统地下水运移规律研究(DJS-16-1002)

第一作者简介:朱继良(1976—),男,博士,教授级高级工程师,主要从事水工环地质调查评价与监测研究工作。E-mail:zjl16@163.com。

通信作者:康小兵(1981—),男,博士,副教授,主要从事地下水科学与工程方面的教学和研究。E-mail:kangxiaobing09@cdut.cn。

收稿日期:2018-11-30

甚至规避页岩气开发对地下水的污染,这对于区内页岩气的进一步开发利用及其对水环境影响的评价具有重要意义。

1 研究区地质条件

1.1 地质构造及地形地貌

研究区地形地貌严格受地质构造的控制,山脉走向与构造线一致,呈北北东、北东向;地势大致东南高西北低,西北-东南断面呈向长江及乌江河谷倾斜的对称马鞍状(图1);地形极为复杂,特别在乌江两岸,由于地壳急剧上升,地表水强烈切割,山势陡峻,峡谷众多。区内最高海拔为1 977 m,最低为138 m,多在200~800 m之间;东部为铜矿山脉,南北走向,山脊呈“一山一槽二岭”形态。同时,乌江紧邻研

究区,呈不规则的“S”型由南向北流,在涪陵城区注入长江,长江呈不规则的“V”字型由北西向北东流。

涪陵焦石坝-罗云坝页岩气勘查开发区处于新华夏系第三沉降带的四川盆地东南缘,大部分属于川东弧形构造带的组成部分。新华夏系与南北向构造成交接符合关系,构造线约向西弯曲,褶皱紧凑,构造复杂,岩层倾角为3°~80°,局部直立甚至倒转,节理裂隙发育。

研究区位于四川盆地川东高陡褶皱带包鸾-焦石坝背斜构造区(图2),西侧以华蓥山深大断裂为界与川中构造区相接,东侧以齐西深大断裂为界与鄂西断褶带相邻,北侧与秦岭褶皱带相接^[13-14]。从南至北,构造走向由北北西转向北北东,再转向北东,形成四川盆地最具特征的弧形褶皱带。

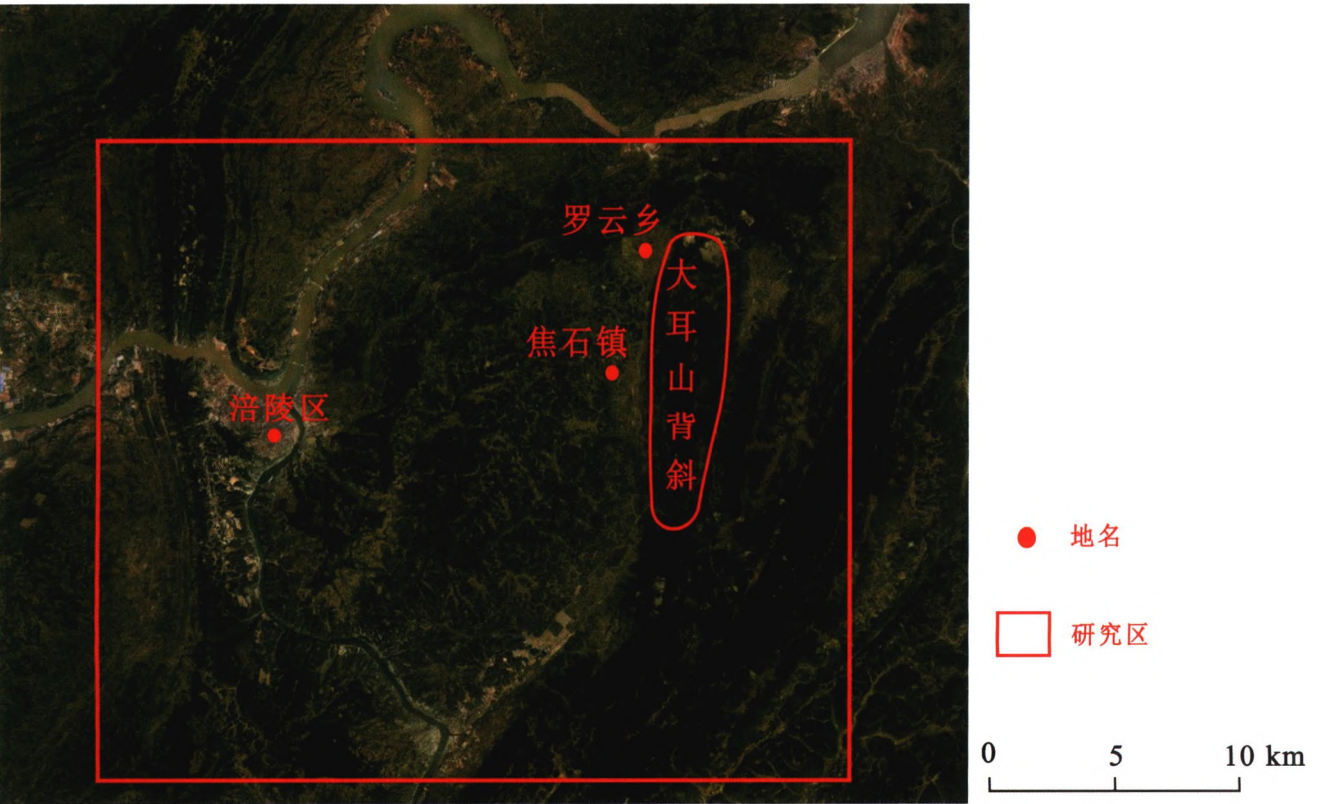


图1 研究区地形地貌
Fig. 1 Topography and geomorphology in the study area

1.2 地层岩性

研究区内出露的地层由老到新依次为二叠系下统阳新组(P_y)、上统吴家坪组(P_{2w})和长兴组(P_{2c});三叠系下统大冶组(T_1d)和嘉陵江组(T_j)、中统雷口坡组(T_2l)、上统须家河组(T_{3xj});侏罗系下统珍珠冲

组(J_1z)、中下统自流井组(J_{1-2z})、中统新田沟组(J_{2x})、下沙溪庙组(J_{2xs})。其中,侏罗系为碎屑岩非可溶岩;二叠系和三叠系碳酸盐岩出露面积最广(图3),以纯质灰岩为主;志留系无碳酸盐岩出露,仅局部以互层状泥灰岩分布;石炭系地层受构造控制及后期营力改造作用几乎全区缺失。

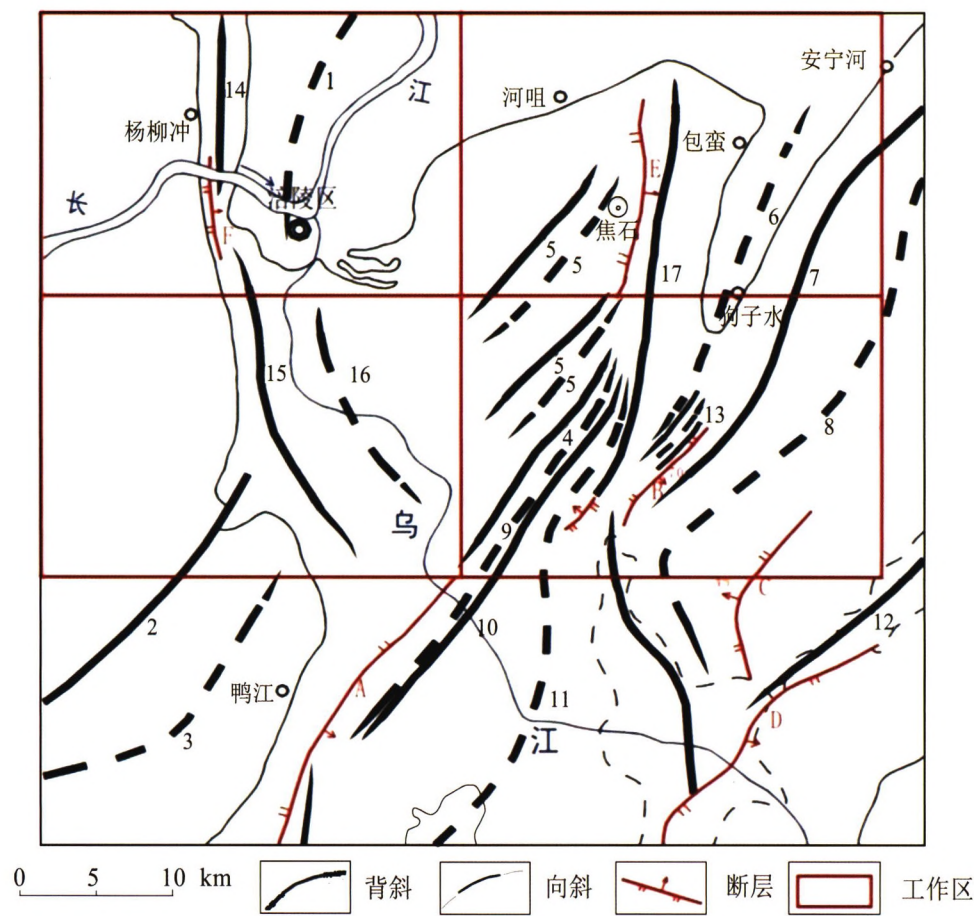


图2 研究区构造纲要图

Fig. 2 Structural outline of study area

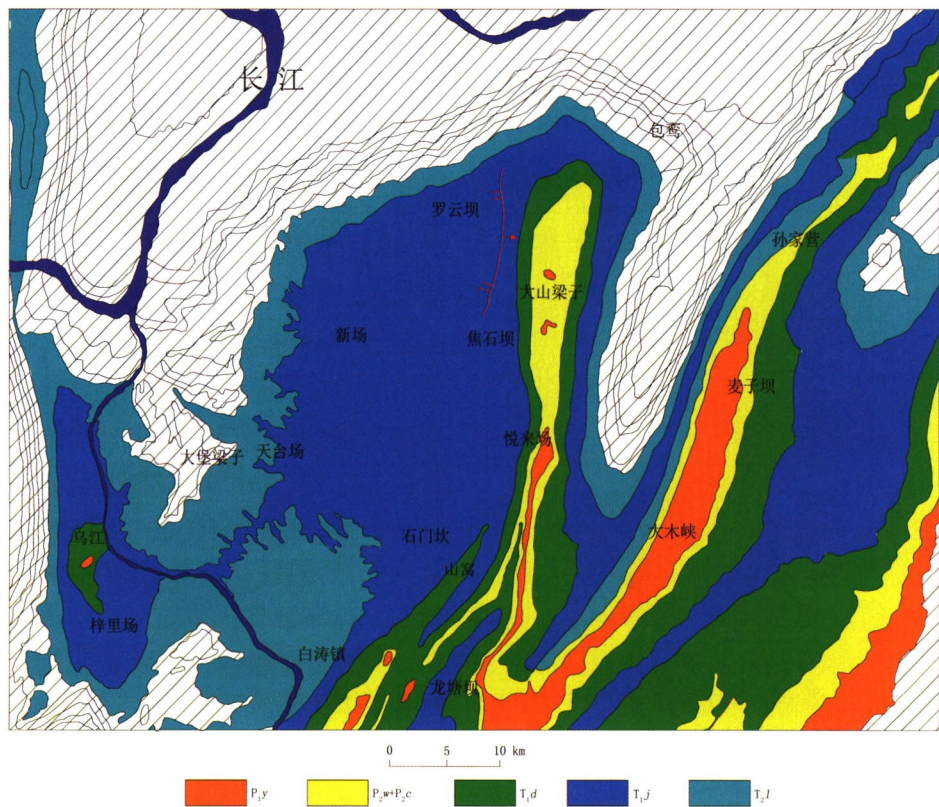


图3 研究区碳酸盐岩分布图

Fig. 3 Distribution of carbonate rocks in study area

研究区内长江以北的区域以及长江以南的部分区域,没有碳酸盐岩出露;其余绝大部分区域,三叠系和二叠系地层广泛分布于由岩溶化山地补给区延伸至谷地、洼地和盆地等岩溶负地形排泄区,而研究区东部受构造影响形态多以环带状或狭长的条带状为主;逐渐向南过渡,受新构造运动抬升作用,其地形地势走高,上覆新地层部分被剥蚀,埋深更大的二叠系、志留系老地层被改造出露地表,分布比重变大。

2 研究区岩溶水文地质条件

2.1 含水岩组及其富水性

研究区出露的地层中,碳酸盐岩含水岩组为二叠系上统吴家坪组、二叠系上统长兴组、三叠系下统大冶组、三叠系下统嘉陵江组、三叠系中统雷口坡组,主要隔水层为大冶组一、三段的泥页岩层以及吴家坪组底部的页岩层(表1)。长兴-吴家坪组含水岩组(P_2c - P_2w)主要分布于大耳山背斜核部;大冶组含

水岩组主要分布于大耳山背斜两翼;嘉陵江-雷口坡组(T_j - T_l)岩溶含水层是区内出露面积最大的可溶岩层,大耳山背斜两翼均有出露,但其西翼出露范围更大。

区内岩溶含水岩组共分为四组,从新到老依次为 T_j - T_l 含水岩组、 T_d 含水岩组、 P_2c - P_2w 含水岩组、 P_y 含水岩组,其富水性划分详见表2,各含水岩组特征如下所述:

(1) T_j - T_l 含水岩组。区内出露面积最大的可溶岩层,为独立的含水层系统,上覆和下伏隔水边界分别为 T_{3xj} 与 T_1d 碎屑岩,隔水层具有稳定连续的层厚。该层组出露范围广、面积大,大耳山背斜西翼是主要的分布区,主要为质纯灰岩和过渡类碳酸盐岩。

(2) T_d 含水岩组。主要分布在研究区背斜两翼,其顶底部为 20~50 m 的页岩、泥岩等碎屑岩。中段以灰岩为主,局部地段有含泥质的过渡类碳酸盐岩;顶部泥岩、页岩隔水层厚度较小,层厚不足 20 m,极薄处仅几米,在局部地段易失去隔水效果,使 T_j 与 T_d 发生越层的水力联系;底部碎屑岩厚度较大,分布连续,具有良好的隔水作用。

表1 研究区含、隔水岩组特征表

Table 1 Characteristics of water-bearing and water-separating rocks in the study area							
界	系	统	地层名称	代号	厚度/m	岩性简述	含隔水层
中生界	三叠系	上统	须家河组	上亚组 T_{3xj}^2	164	碎屑岩	隔水层
				下亚组 T_{3xj}^1	34~131	碎屑岩	
				三段 T_2^3	261		
		中统	雷口坡组	二段 T_2^2	114	深灰色泥质灰岩夹粉晶白云质灰岩	岩溶含水层
				一段 T_2^1	115~186		
		下统	嘉陵江组	四段 T_1^4	101	浅灰色细晶白云岩夹白云质灰岩	岩溶含水层
				三段 T_1^3	120	灰色生物碎屑灰岩	
				二段 T_1^2	96	浅灰色细晶白云岩夹白云质灰岩	
				一段 T_1^1	145~237	灰色生物碎屑灰岩	
				三段 T_1^3	157~209	上部碎屑岩	相对隔水层
		大冶组		二段 T_1^2	126~215	深灰色生物碎屑灰岩夹泥质灰岩	岩溶含水层
				一段 T_1^1	43	下部为碎屑岩	相对隔水层
上古生界	二叠系	上统	长兴组	P_2c	95	灰色、浅灰色生物碎屑灰岩	岩溶含水层
			吴家坪组	P_2w	126	底部为碎屑岩	相对隔水层
		下统	阳新灰岩	P_{1y}	466	灰色生物碎屑灰岩	岩溶含水层
			梁山组	P_{1l}	5	碎屑岩	
		石炭系	中统	黄龙组	C_2h	15	碎屑岩
下古生界	志留系	中统	罗惹坪组	二段 S_2l^2	304	碎屑岩	相对隔水层
				一段 S_2l^1	338	碎屑岩	
		下统	小河坝组	S_{1x}	362	碎屑岩	页岩气开采目标层位
			龙马溪组	S_{1l}	177	碎屑岩	

表 2 含水岩组富水性划分
Table 2 Water-rich subdivision of water-bearing rocks

岩溶地下水类型	富水性划分			主要地层	分布位置
	等级	地下水径流模数/ $L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$	泉与地下河流量/ $L \cdot s^{-1}$		
碳酸盐岩类 裂隙溶洞水	水量丰富	≥ 6	≥ 50	$T_j+T_2l/T_1d/P_{ly}$	背斜/翼部/核部
	水量中等	3~6	10~50	$T_j+T_2l/T_1d/P_{ly}/P_{2c}+P_{2w}$	背斜/翼部/核部
	水量贫乏	≤ 3	≤ 10	$T_1d/P_{2c}+P_{2w}$	单斜/核部
夹层或互层 裂隙溶洞水	水量中等	3~6	10~50	$T_j+T_2l/T_1d/P_{2c}+P_{2w}$	单斜/翼部
	水量贫乏	≤ 3	≤ 10	$T_1d/P_{2c}+P_{2w}$	单斜

(3) P_{2c} - P_{2w} 含水岩组。以泥灰岩、泥质灰岩为主,夹少量灰岩及白云质灰岩,主要受到构造剥蚀作用,出露于背斜核部,出露的水点中以表层岩溶泉为主,无岩溶大泉、地下河出露,富水性较弱。

(4) P_{ly} 含水岩组。在研究区背斜核部受到构造剥蚀作用出露,岩性以质纯灰岩为主,该地层厚度较大,且连续稳定,富水性较强。

2.2 岩溶水补、径、排特征

根据补、径、排形式的差异,将研究区内的补、径、排模式分为集中型补、径、排模式和分散型补、径、排模式。

(1)集中型补、径、排模式。在地形较低处汇集一定量的降水通过漏斗或落水洞灌入地下,有时甚至整条河流在此潜入地下,岩溶水以岩溶洼地、落水洞

为补给来源,汇入岩溶管道,以暗河出口或大泉形式集中排泄到地表河流。该模式岩溶管道主要分布于 T_j - T_2l 灰岩、白云质灰岩地层中,径流速度快,出水量大。集中排泄点发育是区内岩溶水排泄的主要特征之一,包括岩溶大泉和地下暗河两种形式。地下河管道主要分布于 P_{2c} 和 T_j - T_2l 灰岩地层中,其中还包括伏流-暗河系统的发育,岩溶水在运动过程中形成了“平流→跌流→平流”的流动模式(图 4)。其出口多位于河谷或者新构造运动隆起的河谷斜坡部位,靠近排泄面,出水量大,在峰丛-峰林洼地区,中心地带多是地下水的补给区,地下往往发育地下河系,边缘地带多是地下水排泄区,常见地下河出口。其泉点排泄主要位于河流及其两侧。另外,在缓丘盆地或平原谷地附近,岩溶水顺势径流过程中遇到阻碍时,在隔水带边界低洼处以溢流泉或泉群的形式出露地表。

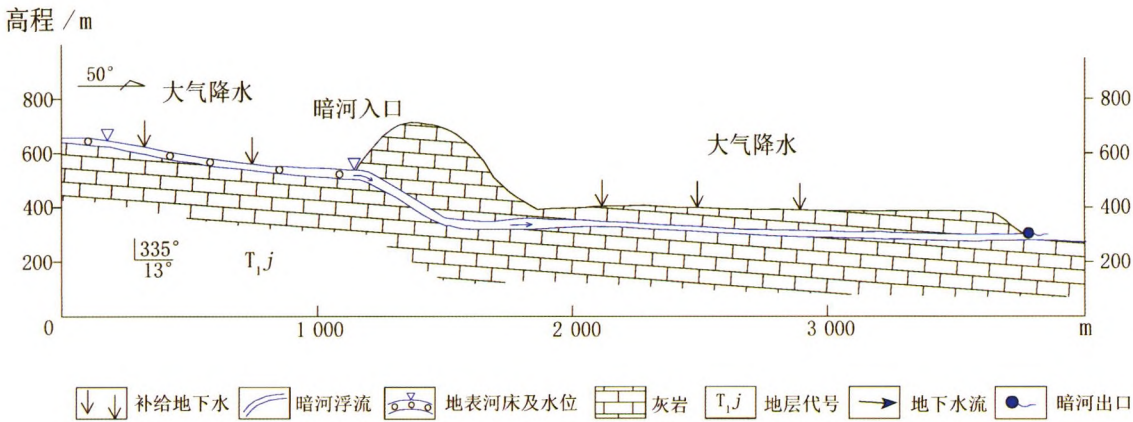


图 4 岩溶水管道流剖面示意图
Fig. 4 Sketch of pipeline flow profile of karst water

(2)分散型补、径、排模式。分散排泄是从分水岭至河谷地带尚未形成大而长的地下河系统,以致沿途被大小冲沟、溪沟切割后(图 5),岩溶水直接分散泄流或以泉点零星出露,流量普遍较小,一般不超过 10

$L \cdot s^{-1}$ 。岩溶水接受大气降雨渗入式补给,赋存和运移空间主要为小型裂隙,形成裂隙型介质结构,具有层流特征。在径流过程中遇河流切割或相对隔水层便会出露于地表。对降雨反应迅速,往往一天内完成

流量的涨消。分散排泄还见于区内南部局部岩溶发育程度较弱的 T_1d 灰岩中,岩溶水赋存和运移空间主要

要为小型裂隙,形成裂隙型介质结构,具有层流特征。

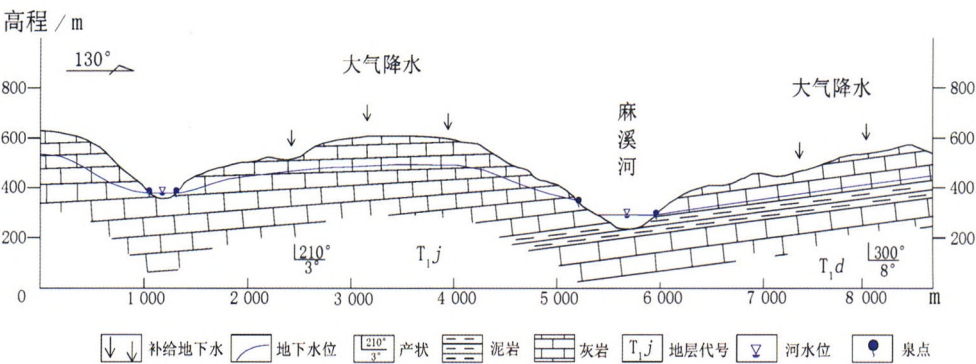


图5 分散型补、径、排模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of divergent replenishment-runoff-discharge model

3 研究区水文地质结构类型

根据碳酸盐岩地层在不同构造部位的出露分布特征,以及碳酸盐岩地层的空间组合和相互水力关

系特征,将研究区划分为平缓单斜型单层、背斜褶曲型多层、向斜褶曲型单层、断裂型四种岩溶水文地质结构(图6)。

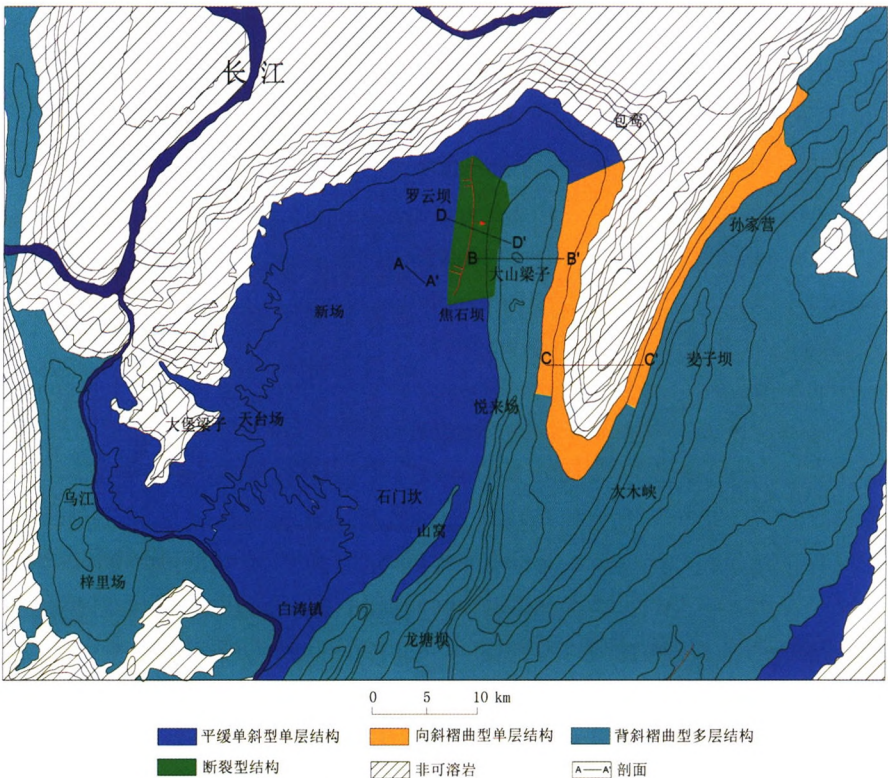


图6 研究区水文地质结构类型平面分布图

Fig. 6 Planar distribution of hydrogeology structures types in study area

3.1 平缓单斜型单层结构

碳酸盐岩地层发育在低序次褶皱的宽缓翼部,富水性强,中部大耳山背斜西翼的低序次宽缓褶皱

区(图6、图7),岩层倾角平缓,大面积分布 T_1j - T_2l 岩溶含水层,面积约300 km²;呈溶谷地,汇水条件优越,形成一个独立补、径、排系统的水文地质单元,大面积平缓分布的质纯灰岩层组,有利于地下水缓慢

顺层径流,使水岩作用时间充分,其岩溶发育程度普遍强烈,地表岩溶洼地、落水洞、天窗等岩溶地貌普遍;地下水补给以点状集中注入式补给为主,岩溶水循环流动以集中型补、径、排模式为主。

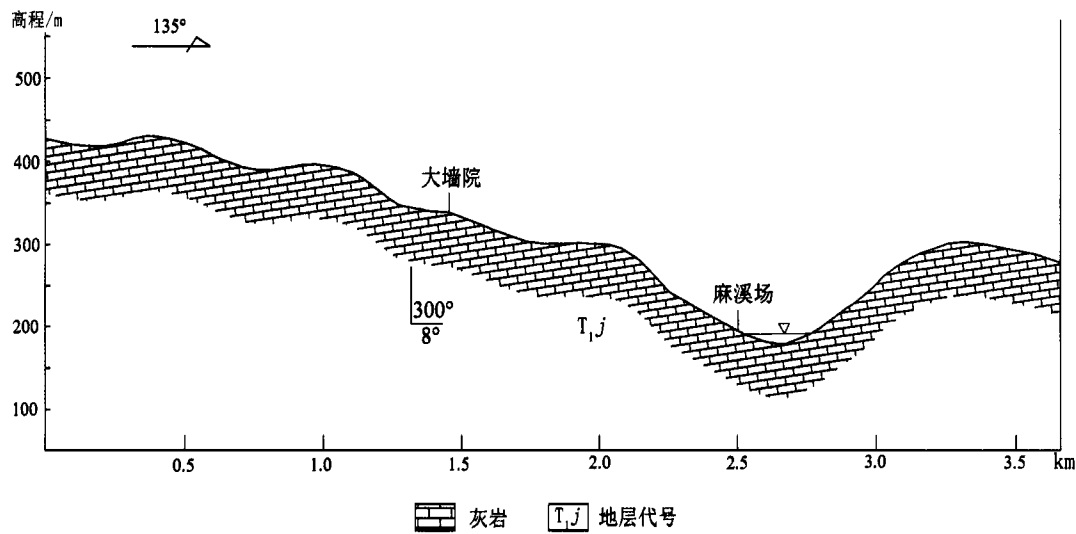


图7 单斜水文地质结构剖面(A-A'剖面)

Fig. 7 Section of monoclinic hydrogeological structure (A-A' profile)

同时,其厚层状纯碳酸盐岩易形成强烈的溶蚀现象,在经历后期地质营力改造过程中,受控于构造方向的岩溶动力作用是单斜地层的主要方式,岩层内部易发育具有固定方向的溶蚀裂隙。单斜地层大面积宽缓出露时,构造作用的强烈影响使岩体层面裂隙张开度远远要大于其他方向裂隙面,隙间距变得更为密集,层间裂隙成为了地下水主要的径流通道。当层间受到更为强烈的溶蚀扩容作用时,将会形成岩溶管道,成为富水性更好的地下河。因此,该结构易形成良好的储水、导水空间,地下水资源丰富,水位埋深较浅,大泉、暗河总出水量达3 000 L·s⁻¹,每平方千米高达30~50 L·s⁻¹。

3.2 背斜褶曲型多层结构

研究区内褶皱紧密的条形背斜形成与构造轮廓基本一致的垄脊山,其轴部构成地下水与地表水的

分水岭,地下水向两翼分流。地表落水洞、漏斗等常沿构造线方向排列,形成岩溶水的补给区,例如,箐口场、大耳山等背斜(图6)。其背斜翼部岩溶发育受地层倾角影响较大,陡翼部位岩溶往往沿层面裂隙及纵张裂隙发育,形成顺层径流的暗河管道,由于露头狭窄,地形陡峻,不易形成槽谷,补给条件不良,富水性相对较差;缓翼部位露头宽阔,除走向裂隙外,还发育一组“X”扭裂隙,地下水沿走向、倾向运动,岩溶作用强烈,地貌常呈条形槽谷,地下水易于富集。

背斜褶曲型多层结构内出露的岩溶含水层主要为T_{1j}-T_{2l}含水岩组、T_{1d}含水岩组和P_{2c}-P_{2w}含水岩组,其中隔水层为T_{1d}一、三段泥页岩层,主要分布在倾角中陡以上的两翼(图8),在大耳山背斜背部倾伏端,T_{1d}一段隔水层尖灭,使得T_{1j}-T_{2l}和T_{1d}两层岩溶含水层发生水力联系。其内T_{1j}-T_{2l}、T_{1d}含水岩组以

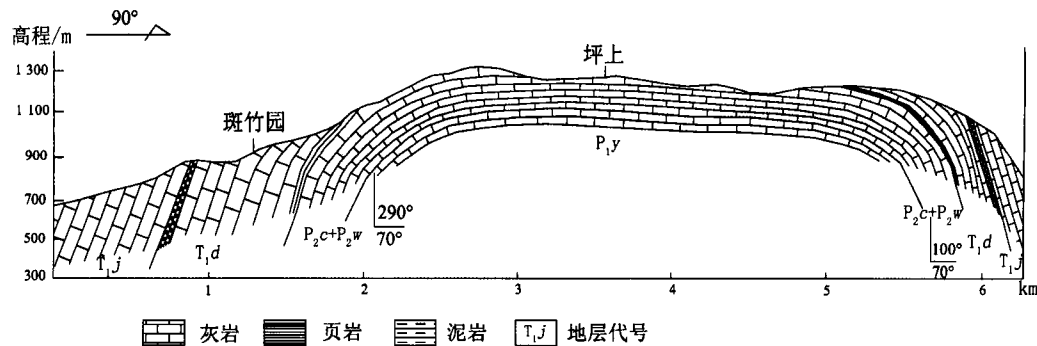


图8 背斜水文地质结构剖面(B-B'剖面)

Fig. 8 Section of anticline hydrogeological structure (B-B' profile)

集中型补、径、排模式为主, P_2c-P_2w 含水岩组多发育溶蚀裂隙、孔隙等, 以分散型补、径、排模式为主。

3.3 向斜褶曲型单层结构

向斜褶曲型单层结构内核部为 T_{3xj} 以及侏罗系的碎屑岩, 两翼以质纯灰岩和白云岩为主, 出露 T_{1j} -

T_{2l} , 典型代表为区内弹子台向斜(图9)。此向斜分布在大耳山背斜和方斗山背斜之间, 两翼为 T_{1j} - T_{2l} 岩溶含水层, 岩溶水顺层向两侧和深部运动, 核部的碎屑岩隔水性较强, 阻止了核部接受补给的大气降水向深层运移; 其岩溶发育较弱, 无大泉出露, 岩溶水循环流动以分散型补、径、排模式为主。

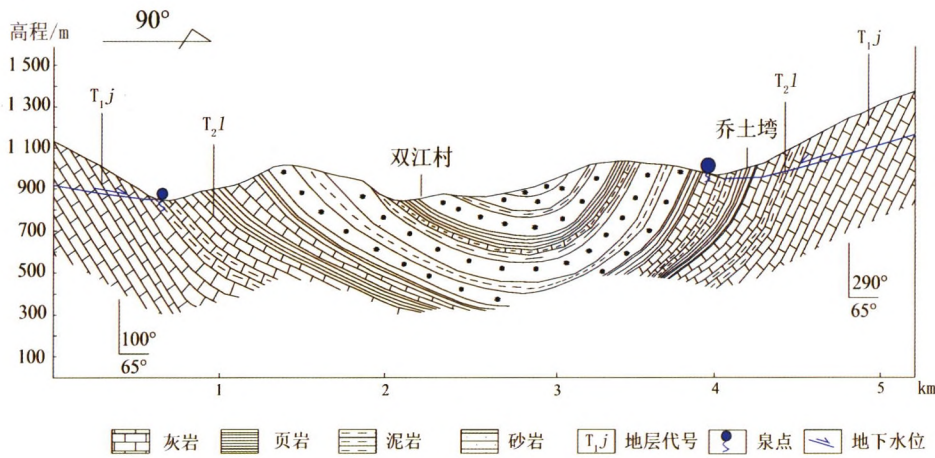


图9 向斜水文地质结构剖面(C-C'剖面)

Fig. 9 Section of syncline hydrogeological structure(C-C' profile)

3.4 断裂型结构

研究区内切割碳酸盐岩地层的断层共11条, 以压扭性为主, 多分布在背斜轴部及翼部, 按其地下水活动的影响又可分为导水和阻水两种, 压性逆断层一般起阻水作用, 张扭性正断层可起导水作用。但由于断层出露位置较高, 多处于地下水补给区, 因此断裂带附近地下水露头稀少, 岩溶发育形态以落水洞等垂直型为主, 其中研究区内对岩溶地下水的富集有较明显的控制作用的是由焦石坝断层构成的

大耳山断裂型结构(图10)。焦石坝断层位于大耳山背斜西翼, 南北向延伸, 长14 km, 倾向东, 倾角为76°, 为一压性逆断层。区内压扭性断裂带, 都比较紧密, 破碎带规模较小, 常形成胶结好的断层角砾岩和糜棱岩带, 并有断层泥、方解石脉、石膏和钙质结核等物质充填。此类断裂带本身完全不含水和不透水, 但断层上盘, 牵引褶曲和裂隙较发育, 形成密集的裂隙系统, 岩溶水循环流动以分散型补、径、排模式为主。

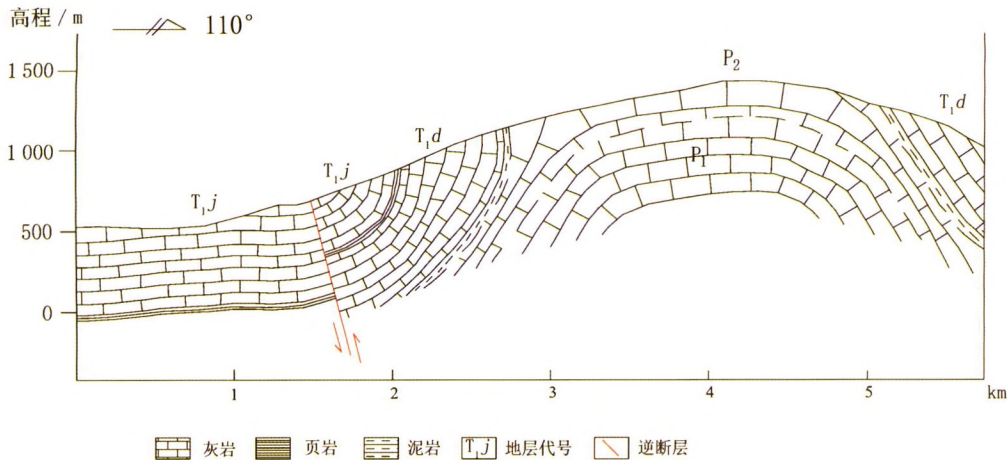


图10 断层水文地质结构剖面(D-D'剖面)

Fig. 10 Section of fault hydrogeological structure(D-D' profile)

4 水文地质结构对地下水环境的控制作用

页岩气开发引发的地下水环境问题主要来自于钻井液、废液(钻井液和返排液)和储存液的泄露。不同的水文地质结构对污染液的响应程度也不一样。

(1)平缓单斜型结构位于大耳山背斜西翼的低序次宽缓褶皱区,以 T_1j-T_1l 含水岩组为主,大面积平缓分布质纯灰岩层组,水岩作用充分,岩溶发育程度强烈,含水介质类型为管道型和裂隙-管道型,是良好的储水、导水结构。污染物随岩溶水迁移范围远,污染范围大,多以泉、暗河形式排泄到地表,对含水系统污染程度较严重。研究区内页岩气开发井主要分布于此结构内,开采过程中可能会引发地下水污染问题。

(2)背斜褶曲型多层结构地表多发育落水洞、漏斗,地表和地下水连通性较好,污染物常随地表水经落水洞、漏斗直接注入地下,但其两翼发育有相对隔水层 T_1d 一、三段泥页岩层,从而减缓或阻断了污染物的迁移途径。

(3)向斜褶曲型单层结构受应力作用,常为上部受挤压力,下部受张应力,其深部纵张裂隙发育,岩溶发育程度较高,上部岩溶发育较弱,加之核部的碎屑岩隔水性较强,阻止了核部接受补给的大气降水向深层运移,因此其地表水与地下水连通性较差,地表污染物难以进入地下水,但在页岩气开采过程中,由于钻井液和废液的泄露,可能导致污染物在向斜深部运移。

(4)断裂型结构断裂带发育糜棱岩、断层泥和破碎岩,加之方解石脉、石膏和钙质结核等物质的充填,致密性好,孔隙度及孔隙连通性较差,有隔水的作用,不利于岩溶的发育,仅在断层上盘发育连通性较好的裂隙,因此,此结构不论是岩溶发育程度还是岩溶发育深度都有限,导致其地表水和地下水沟通性较差,且地下水径流不畅,不利于地下水污染物的运移,污染物影响程度较低。

5 结论与建议

研究区内主要有 T_1j-T_1l 、 T_1d 、 P_2c-P_2w 和 P_1y 四类岩溶含水岩组,其富水性在不同构造部位而有所差异;有集中型和分散型两类补、径、排模式,前者形成管道网络介质,通过岩溶大泉及暗河集中排泄,而后者形成裂隙网络介质,通过分散的裂隙泉排泄。

研究区内岩溶水文地质结构可分为平缓单斜型单层、背斜褶曲型多层、向斜褶曲型单层和断裂型四种类型,其中平缓单斜型单层结构和背斜褶曲型多层结构区岩溶介质类型主要为管道-裂隙型,地下水径流畅通,是良好的储水、导水结构,在页岩气开采过程中应特别注意这两种类型,因其导水性能较好,污染物迁移途径顺畅,易导致地下水污染问题。而对于向斜褶曲型单层和断裂型结构,由于其以裂隙网络为主,岩溶发育深度及广度有限,污染物迁移的距离和范围较小,污染程度有限。

针对钻井液溶解性化学物质对岩溶水的污染,宜采用水基钻井液代替油基钻井液,而对于杂散烃类气体的扩散污染,宜采取“绿色完井技术”(REC技术)减少其漏失,同时可回收甲烷等气体。

参考文献

- [1] 董大忠,邹才能,李建忠,等.页岩气资源潜力与勘探开发前景[J].地质通报,2011,30(Z1):324-336.
- [2] 董大忠,高世葵,黄金亮,等.论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J].天然气工业,2014,34(12):1-15.
- [3] 严冰.中国首个大型页岩气田诞生,页岩气商业开发揭幕[N/OL].(2014-07-17)[2014-10-03]
- [4] 何世念,宗刚,王孝祥,等.中国页岩气商业开发驶入快车道:专家纵论中国石化涪陵页岩气大突破[J].中国石化,2014,35(4):27-32.
- [5] 王小牧,吴富强.重庆涪陵打造下一个“大庆”[N].中国经济时报,2014-05-07(7).
- [6] 舟丹.中国页岩气开发现状[J].中外能源,2019,24(3):26.
- [7] Vengosh A, Warner N, Jackson R, et al. The Effects of Shale Gas Exploration and Hydraulic Fracturing on the Quality of Water Resources in the United States [J]. Procedia Earth & Planetary Science, 2013(7): 863-866.
- [8] Tian L, Wang Z, Krupnick A, et al. Stimulating shale gas development in China: A comparison with the US experience [J]. Energy Policy, 2014, 75:109-116.
- [9] Wilson J M, Wang Y, Vanbriesen J M. Sources of High Total Dissolved Solids to Drinking Water Supply in Southwestern Pennsylvania [J]. Journal of Environmental Engineering, 2014, 140(5):B4014003.
- [10] Vengosh A, Jackson R B, Warner N, et al. A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48 (15): 8334-8348.
- [11] 钱伯章,李武广.页岩气井水力压裂技术及环境问题探讨[J].天然气与石油,2013,31(1):48-53.
- [12] Osborn S G, Vengosh A, Warner N R, et al. Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(10):4003-4008.

my of Sciences, 2011, 108(20):8172-8176.

[13] 郭彤楼,刘若冰.复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示:以四川盆地东部盆缘JY1井为例[J].天然气地球科学,2013,24(4):643-651.

[14] 郭旭升,胡东风,文治东,等.四川盆地及周缘下古生界海相页岩气富集高产主控因素:以焦石坝地区五峰组-龙马溪组为例[J].中国地质,2014,41(3):893-901.

Karst hydrogeologic structures of the shale-gas exploration and exploitation area in Fuling, Chongqing

ZHU Jiliang¹, XU Mo², SUN Jianping¹, KANG Xiaobing², SHI Xiaodi²

(1.Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding, Hebei 071051, China;
2.State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract Influenced by the carbonate facies and karst development degree, the types and characteristics of karst hydrogeological structures are different. Such a structural feature leads to variable pollutants in groundwater. In the shale gas development zone of Sichuan and Chongqing with widespread carbonate, the distribution of groundwater system and its cyclic evolution are more complicated. The identification of karst hydrogeological structure can provide effective guidance for the development and utilization of shale gas, and reduce or even avoid pollution of groundwater by shale gas development. Taking the area of Jiaoshiba-Luoyunba, a typical area of the Fuling shale gas exploration and exploitation zone in Chongqing as an example, this work studies the distribution characteristics of carbonate rocks, the development of karst and the occurrence and dynamic cycle of karst water in the shale gas exploration and exploitation area. Four types of karst aquifers, T_1j - T_2l , T_1d , P_2c - P_2w and P_1y , and the two types of concentrating and dispersing modes, are summarized. The system analysis method is used to extract four karst hydrogeological structures, gentle mono-slope, layered, anticline-folded multi-layer, and fault hydrogeological structures, of which the former two are of a pipeline-crack medium with smooth groundwater runoffs, prone to karst water pollution. In the latter two types of structures, the karst medium is dominated by crack networks with finite depth and extension, thus the distance and range of pollutant migration are small and the pollution capacity is limited.

Key words shale gas, karst area, groundwater environmental, hydrogeology structure

(编辑 黄晨晖)