

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.184>



水力压裂对地下水影响的深部脆弱性评价

芦红¹, 王丽¹, 杨鑫鑫², 郝光³, 刘明柱^{1*}

1. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083
2. 辽宁水文地质工程地质勘察院, 辽宁大连 116037
3. 云南省设计院集团勘察分院, 云南昆明 650223

摘要: 为评价区块尺度页岩气开采过程中深部污染物对上部含水层的污染风险, 基于“源—途径—驱动力—受体”概念模型, 采用层次分析法构建了页岩气开采对地下水影响的深部脆弱性评价指标体系. 利用该体系对贵州省某页岩气开采区块进行了评价, 结果表明: 评价区地下水深部脆弱性以低和较低为主, 两者面积占研究区总面积的69.15%, 主要分布于研究区西北部、中部及东南部, 中间层厚度是影响评价结果的主要指标. 该评价体系能够评估页岩气开采区地下水深部脆弱性, 丰富了现有地下水脆弱性评价体系, 可为区内页岩气井的布设选址及地下水环境保护提供技术支撑.

关键词: 页岩气; 地下水; 深部脆弱性评价; 概念模型; 水文地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2019)09-2920-11

收稿日期: 2019-06-18

Deep Vulnerability Assessment of Hydraulic Fracturing Effect on Groundwater

Lu Hong¹, Wang Li¹, Yang Xinxin², Hao Guang³, Liu Mingzhu^{1*}

1. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Liaoning Investigation Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Dalian 116037, China
3. Yunnan Design Institute Group Survey Institute, Kunming 650223, China

Abstract: In order to evaluate the pollution risk of deep pollution sources on upper aquifer during shale gas exploitation, the deep vulnerability assessment index system of groundwater was built up by analytic hierarchy process from three aspects: natural protection, impact route and driving force, based on the “source-pathway-drive-receptor” conceptual model. In addition, groundwater deep vulnerability assessment of shale gas mining block in Guizhou Province was assessed as an example. The results show the deep groundwater vulnerability rank mainly is low and medium-low in the study area, accounting for 69.15% of the total area, which is distributed in the northwest, central and southeast of the study area. The thickness of the intermediate layer is the main indicator affecting the evaluation. The evaluation system can be applied to the groundwater deep vulnerability assessment of shale gas exploitation area, enriching the existing groundwater vulnerability assessment system, and providing technical support for shale gas well layout and groundwater environmental protection.

Key words: shale gas; groundwater; deep vulnerability assessment; conceptual model; hydrogeology.

基金项目: 贵州省公益性基础性地质工作项目(黔国土资地环函[2014]23号).

作者简介: 芦红(1992-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水环境研究. ORCID: 0000-0002-9529-1431. E-mail: luhonggw@qq.com

*通讯作者: 刘明柱, ORCID: 0000-0001-7401-6986. E-mail: liumz@cugb.edu.cn

引用格式: 芦红, 王丽, 杨鑫鑫, 等, 2019. 水力压裂对地下水影响的深部脆弱性评价. 地球科学, 44(9):2920-2930.

0 引言

页岩气是一种清洁高效的非常规能源.我国页岩气技术可开采量高达 $31.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上,世界排名第一(Liang *et al.*, 2017; 王晓川等, 2018).然而在页岩气开发过程中,大规模水力压裂可能会引起一系列环境问题,如水资源浪费、诱发地震、噪声污染和地下水污染等(Kissinger *et al.*, 2013; Lange *et al.*, 2013),其中最具争议的是地下水污染问题.已有相关研究表明,页岩气开采过程中可能通过两种方式对地下水产生影响(张东晓和杨婷云, 2015; 辜海林等, 2018):一是地表或近地表污染物向下运移污染浅层地下水;二是注入储气层的压裂液和(或)地层高盐度卤水向上运移污染浅层地下水.

地下水脆弱性评价是地下水污染防治区划的基础.目前的地下水脆弱性评价主要关注地表或近地表污染源对浅层的影响,评价方法比较成熟,已被广泛应用于干旱地区(马金珠, 2001)、煤矿区(王森森等, 2018)、水源地(金爱芳等, 2012; 林茂等, 2016)、盆地(姜桂华, 2002; 范琦等, 2007)等众多方面,促进了该地区的地下水环境保护.

对于页岩气开采过程中深部污染源对上部含水层影响的深部脆弱性评价方法还缺少系统的研究.李绍康等(2018)采用文献计量学和频数统计法,综合考虑来自于地表与地下污染风险指标,构建了页岩气开发地下水污染风险评价指标体系.辜海林等(2018)将浅部含水层和深部含水层概化为一个含水系统,在DRASTIC基础上,分别建立了开采井区DIRTEV和回注井区DIRWOCT地下水脆弱性评价模型.上述模型的优点是评价结果综合了来自于地表和地下的污染风险,缺点是难以从评价结果中区分污染风险来源.利用现有的评价方法已可以有效评价页岩气开采过程中来自于地表人类活动对浅层地下水的影响,而对于来自于页岩气开采等深部活动对上部含水层影响的评价则需要深入研究.

本文基于页岩气开采过程中“源—途径—驱动力—受体”的概念模型,以注入储气层的压裂液和高盐度地层水为深部潜在污染源,以区域浅层地下水为保护目标(受体),尝试构建页岩气开采对地下水影响的深部脆弱性评价指标体系,以图丰富地下水脆弱性评价体系,为区块内页岩气开采井布设及地下水环境保护与管理提供技术支撑.

1 页岩气开采深部污染物影响上部含水层的概念模型

构建页岩气开采深部污染物向上运移影响上部地下水的“源—途径—驱动力—受体”概念模型,可以更直观地分析深部污染物影响上部地下水的过程及途径,有利于地下水深部脆弱性评价指标的选取及指标体系的构建,概念模型见图1.

1.1 污染源

页岩气开采过程中注入到储气层中的单井压裂液体积为 $0.8 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3$ (Vengosh *et al.*, 2014),尽管会有5%~50%的压裂液返排至地表,但仍有大量的压裂液滞留在储气层.压裂液成分复杂,含有上百种化学物质,对地下水具有较大的污染风险.高盐度地层水富含大量重金属和放射性物质,也会对上部地下水产生影响.因此选择注入储气层的压裂液和高盐度地层水作为深部污染源.

1.2 向上迁移的途径

深部污染物向上运移可能的途径有天然断层或裂隙(途径1)、井(途径2)以及地层基质空隙(途径3)(图1; Harrison, 1983; Warner *et al.*, 2012; Jackson *et al.*, 2013; Reagan *et al.*, 2015).

天然断层或破碎带、裂隙都有可能成为深部污染物向上迁移的途径(王正和等, 2018).在页岩气开采过程中,因水力压裂而产生的裂隙很可能会连通或激活压裂区附近的天然断层、裂隙,形成污染物向上迁移的通道.美国页岩气水力压裂裂隙向上延展高度的统计数据显示,80%的压裂裂隙向上延展高度小于200 m,只有1%可能超过350 m(Cai and Ofterdinger, 2014),而页岩气藏储层埋深一般都在上千米.这种迁移途径存在与否,取决于天然断层

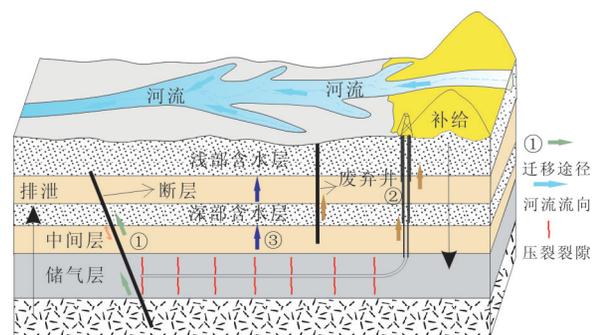


图1 基于“源—途径—驱动力—受体”的深部脆弱性概念模型

Fig.1 Conceptual model for deep vulnerability based on "source-path-drive-receptor"

或破碎带、裂隙的空间分布与压裂裂隙上升高度。目前学术界较为普遍的共识是水力压裂一般不会产生直接连通地表的裂隙(张东晓和杨婷云, 2015)。

页岩气生产井、其他矿产开采井以及废弃井也有可能直接或间接成为深部污染物向上运移的潜在途径,产生这种途径的原因有:(1)油管 and 套管受到腐蚀而渗漏;(2)套管外固井不牢;(3)套管和固井水泥间存在环形空隙;(4)固井水泥内存在裂隙;(5)固井水泥和地层之间存在环形空隙等;(6)废弃井封井不严。此类迁移途径存在与否取决于成井或封井质量。

此外,深部污染物还可通过上覆盖层中天然空隙向上迁移,迁移的快慢取决于盖层的渗透性能和顶底部间压力差。

1.3 向上迁移的驱动力

驱动深部潜在污染物向上迁移的动力主要有补给区至排泄区的势能差、页岩气储层超压及压裂液注入增加的压力差、压裂液与地层水因浓度差异产生的密度差。(1)在区域地下水系统的排泄区,由于补给区与排泄区之间存在高程差异而产生势能梯度,驱动地下水向排泄区运移,将深部污染物带至排泄区而进入上部含水层,这是一种在水力压裂前后都会长期存在的、天然的、区域尺度的驱动力。(2)由于页岩气储层处于超压状态,其与浅部地层存在压力差而产生向上的压力梯度,当存在水力连通途径时,水力压裂液、地层水以及页岩气等会在压力梯度作用下向上运移。但随着水力压裂产生压裂裂隙、压力密封遭到破坏、生产水返排后,压力梯度会逐渐减小并消失。(3)在水力压裂阶段,由于压裂液注入页岩气储层增大了与浅部地层的压力梯度,驱使压裂液、地层水以及页岩气等远离水平井而向上迁移。通常情况下,随着压裂阶段结束、返排开始,这种额外增加的压力梯度会逐渐减小,因此由水力压裂引起的压力梯度增大是短期的。但有的工艺在开采前有一段封井期,时间可长达6个月,这期间井内高压会持续驱动流体迁移。(4)通常,水力压裂液(几十 g/L)与高盐度地层水(几百 g/L)之间因密度差而产生的浮力流也可以驱动流体向上运移。随着二者混合程度的增大,密度差会逐渐减小。

1.4 受体

页岩气储气层上部可能存在多个含水层,目前尚未开发利用的深部含水层可能最终被认定为饮用水源,这取决于未来对饮用含水层的定义及

对地下水资源的需求。页岩气开发过程中深部污染物会在向上迁移的途径和驱动力的共同作用下影响上部含水层,因此选择储气层上部含水层作为保护目标(受体)。

2 页岩气开采深部脆弱性评价体系

地下水深部脆弱性是指在不考虑污染物水文地球化学特性的情况下,在深部采气、水力压裂等人类活动作用下,污染物从深部地层向上运移,到达上部含水层的倾向及可能性。基于前文深部污染物向上迁移的概念模型分析,按照科学性、全面独立性及定量可行性原则,本文应用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP), 选取天然防护、影响途径及驱动力 3 个准则层指标及 7 个指标层指标(表 1), 并通过构建判断矩阵和求解获取各指标权重,构建水力压裂对地下水影响的深部脆弱性评价指标体系。

2.1 评价指标筛选

2.1.1 天然防护 储气层与其上部含水层之间的低渗透性地层被称为中间层(Ladevèze *et al.*, 2017)。有研究证实,在没有诸如渗透性断层或渗漏井之类的途径时,来自储气层的污染物通过中间层到达上覆含水层的可能性很小(Birdsell *et al.*, 2015; Engle *et al.*, 2016)。因此中间层可作为天然的地质屏障,能够有效阻隔深部污染物向上迁移,评价阻隔能力大小的指标主要有:

(1)中间层厚度。中间层厚度指储气层至上部目标含水层(受体)间低渗透性地层的累计厚度,该厚度影响深部污染物在地层中的运移时间和各种水文地球化学作用时间。中间层厚度越大,深部污染物到达浅部含水层的时间越长,运移过程中物理稀释、氧化还原、生物降解等水文地球化学作用越充分,则进入上部含水层的可能性就越小,深部脆弱性就越低。

(2)中间层等效渗透系数。中间层等效渗透系数也是影响深部污染物向上运移的因素(Birdsell *et al.*, 2015)。中间层渗透系数反映中间层的渗透传输性能。在存在驱动力的前提下,中间层等效渗透系数决定了流体迁移的难易程度。渗透系数越大,污染物在驱动力的作用下向上迁移的可能性越大,地下水脆弱性越高。

2.1.2 影响途径 (1)断层底部距储层的距离。断层(含破碎带和裂隙)会破坏地层完整性,可能成为

表 2 准则层权重矩阵

Table 2 Weight matrix of Criteria layer

评价指标	天然防护	影响途径	驱动力
天然防护	1	8/7	8/7
影响途径	7/8	1	1
驱动力	7/8	1	1

2.2 指标权重确定

2.2.1 判断矩阵的构建 地下水脆弱性评价体系中指标的权重反映了各评价因子对地下水污染脆弱性影响程度的大小,合理确定指标权重是客观评价地下水深部脆弱性的基础.对于3个准则层,天然防护作为保护上部含水层的重要屏障,可有效阻隔深部潜在污染物向上运移,因此相对重要;影响途径与驱动力是深部潜在污染物影响上部含水层的必要条件,二者缺一不可,具有同等重要性,据此构建的准则层权重矩阵如表2所示.

对于影响途径准则层,断层底部距储层距离决定了水力压裂裂隙连通断层的可能性,井龄表征了钻孔作为影响途径的可能性,两者作为影响途径表征指标具有相同重要性;当水力压裂裂隙连通断层后,深部污染物才会沿可渗透断层向上迁移,因此断层性质相对于断层底部距储层距离,重要性相对较低,据此构建影响途径准则层下评价指标权重矩阵如表3.

由判断矩阵随机一致性检验标准可知,当权重矩阵阶数 ≤ 2 时,矩阵总有完全一致性,因此天然防护及驱动力准则层下的指标层无需建立权重矩阵,可直接对指标进行重要性对比,确定各自权重.

2.2.2 权重计算及检验 利用方根法(谢崇宝等,1996;关鑫等,2017)计算判断矩阵特征向量确定各指标权重,深部脆弱性评价各指标权重见表4.

首先计算矩阵各行各元素乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij} (i, j=1, 2, 3, \dots, n), \quad (1)$$

然后计算 M_i 的 n 次方根 X_i :

$$X_i = \sqrt[n]{M_i}, \quad (2)$$

表 3 影响途径指标权重矩阵

Table 3 Weight matrix of index of potential impact pathway

评价指标	断层底部距储层距离	断层性质	井龄
断层底部距储层距离	1	8/6	8/8
断层性质	6/8	1	6/8
井龄	8/8	8/6	1

表 4 深部脆弱性评价指标权重

Table 4 Weight of deep vulnerability index

准则层	权重	指标层	权重
天然防护	0.36	中间层厚度(m)	0.55
		中间层渗透系数	0.45
		断层底部距储层的距离(m)	0.36
影响途径	0.32	断层性质	0.28
		井龄(a)	0.36
		地层压力系数	0.40
驱动力	0.32	地形高差(m)	0.60

最后对向量进行归一化 W_i :

$$W_i = \frac{X_i}{\sum_{i=1}^n X_i}, \quad (3)$$

$W=(W_1, W_2, \dots, W_n)$ 为所求特征向量近似值,即各指标的权重.

在层次分析法中,需要对判断矩阵进行一致性和随机性检验,判断权重是否合理.当阶数 ≤ 2 时,矩阵总有完全一致性.当阶数 > 2 时,如果矩阵随机一致性比例 $CR < 0.1$,则认为判断矩阵具有满意的一致性,说明权重分配合理;否则就需要调整判断矩阵,直到取得满意的一致性为止.

矩阵随机一致性比例 CR 检验公式为:

$$CR = CI/RI, \quad (4)$$

式中: CR 为判断矩阵随机一致性比率; CI 为判断矩阵一致性指标; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标,需查表获取对应矩阵阶数的数值.

判断矩阵一致性指标 CI 计算公式为:

$$CI = (\lambda_{\max} - n)/(n-1), \quad (5)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征根; n 为判断矩阵阶数.

本文中准则层权重矩阵及影响途径指标权重矩阵计算最大特征向量 λ_{\max} 均为3, $n=3$, $RI=0.38$,则 $CI=0$, $CR=0 < 0.1$,因此判断矩阵具有满意的一致性,权重分配合理.

2.3 评价方法

地下水深部脆弱性指数 P :

$$P = \sum W_i \times (W_{ij} \times R_{ij}), \quad (6)$$

式中: W_i 为第 i 个准则层指标权重; W_{ij} 为第 i 个准则层下第 j 个指标权重, R_{ij} 为各指标评分值.地下水深部脆弱性指数值越小,表明深部污染物影响浅层地下水的风险越低.

3 案例应用

3.1 研究区自然概况

研究区位于贵州省东北部,地理范围为北纬 $27^{\circ}28' \sim 27^{\circ}54'$ 、东经 $108^{\circ}39' \sim 108^{\circ}59'$,总面积约 914.63 km^2 (王玉芳等,2017).主要水系有车坝河和舞阳河,多年平均降雨量为 $1\,200 \sim 1\,300 \text{ mm}$,多年平均陆地蒸发量为 $600 \sim 700 \text{ mm}$.地形地貌为低山丘陵,地形高差为 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}$,高低起伏较大,区内西南部和东部地势较高,东南部海拔最低.根据区域地质构造状况,研究区在地貌上处于由东侧铜仁断裂、西侧江口断裂对冲结合南、北两侧隆起而形成的构造盆地内(王生林,2017).

3.2 研究区水文地质条件

研究区出露地层由新到老分别为第四系(Q)、奥陶系下统部分层系、寒武系的娄山关群($\epsilon_{2+3}ls$)、高台组(ϵ_{2g})、清虚洞组(ϵ_{1q})、杷榔组(ϵ_{1p})、变马冲组(ϵ_{1b})、九门冲组(ϵ_{1j})、牛蹄塘组(ϵ_{1n})、震旦系(Z)、板溪群(Pt)等(图2).研究区主要含水岩组为高台组和清虚洞组,岩性为碳酸盐岩,厚度均大于 200 m ,分布面积广泛;杷榔组、变马冲组和九门冲组的岩性为灰岩、页岩、粉砂岩互层,为相对阻水层,总厚度约 500 m ,其中杷榔组厚度为 $341 \sim 458 \text{ m}$,变马冲组厚约 100 m ,九门冲组厚度仅 20 m 左右.研究区浅层地下水补给以大气降水入渗为主,径流发生在具有水力联系的裂隙网络中,水流受裂隙走向和空间形态的控制.排泄的主要方式为侧向径流排泄、泉和人工开采.断层主要分布在研究区西北、东南及北部地区,在中部地区零星分布,走向均为北东—南西向,倾角较大,近乎直立,断层导水性较好.牛蹄塘组为主要储气层,地层厚度为 $59 \sim 72 \text{ m}$,埋深 $< 2\,000 \text{ m}$.整个地层岩性可分为上、中、下三部分,上部为灰色灰质泥岩,见方解石条带;中部岩性主要为灰黑色钙质页岩,与粉砂岩、页岩不等厚互层;底部为黑色硅质岩、高炭质页岩.地层水矿化度较高,约 $1\,870 \text{ mg/L}$,水化学类型为 NaHCO_3 型.天然条件下牛蹄塘组地层含水性及透水性差,参与区域地下水流动系统能力微弱;水力压裂产生裂隙网络后,在地层压力及区域地下水流动势能作用下,局部水力压裂区地层水参与区域地下水流动系统,向区域排泄区流动(典型水文地质剖面见图3b).

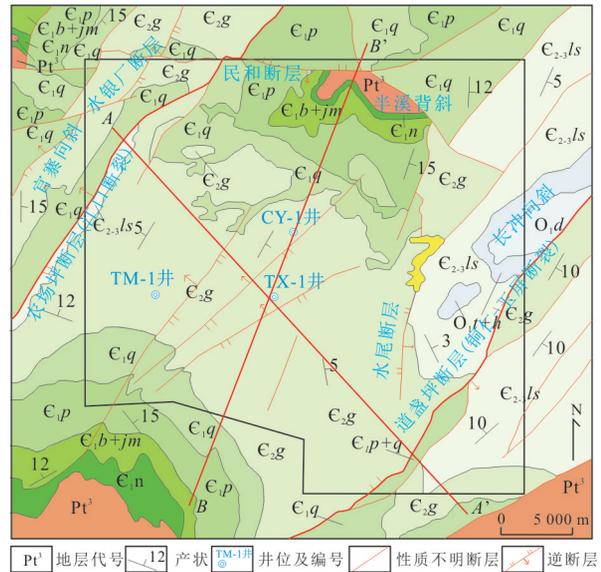


图2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

据王生林(2017)

3.3 研究区深部脆弱性评价

通过分析研究区的天然防护、影响途径及驱动力等属性,对研究区各深部脆弱性评价指标进行计算分级.

3.3.1 单指标评价 (1)中间层厚度.高台组为研究区内主要饮用含水层,因此选择其作为深部脆弱性评价的保护目标.中间层为清虚洞组、杷榔组、变马冲组以及九门冲组.根据研究区钻孔资料获取各地层顶底界埋深,中间层厚度等于牛蹄塘组顶界埋深减去高台组底界埋深,通过ArcGIS软件对地层埋深进行插值及中间层厚度计算,中间层厚度为 $162 \sim 2\,100 \text{ m}$,并按照表1评分标准得到中间层厚度评分分区图(图4a).

(2)中间层渗透系数.由于缺少研究区中间层渗透系数实测数据,通过收集的文献数据(表5),利用中间层等效渗透系数计算公式,得到中间层渗透系数为 $1 \times 10^{-13} \text{ m/s}$,对比指标评分表可知研究区中间层渗透系数评分值为1.

中间层等效渗透系数计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{K_i}}, \quad (7)$$

式中: K 为中间层等效渗透系数, m/s ; M_i 为第 i 层厚度, m ; K_i 为第 i 层渗透系数, m/s .

(3)断层底部距储层的距离.根据三维地质物

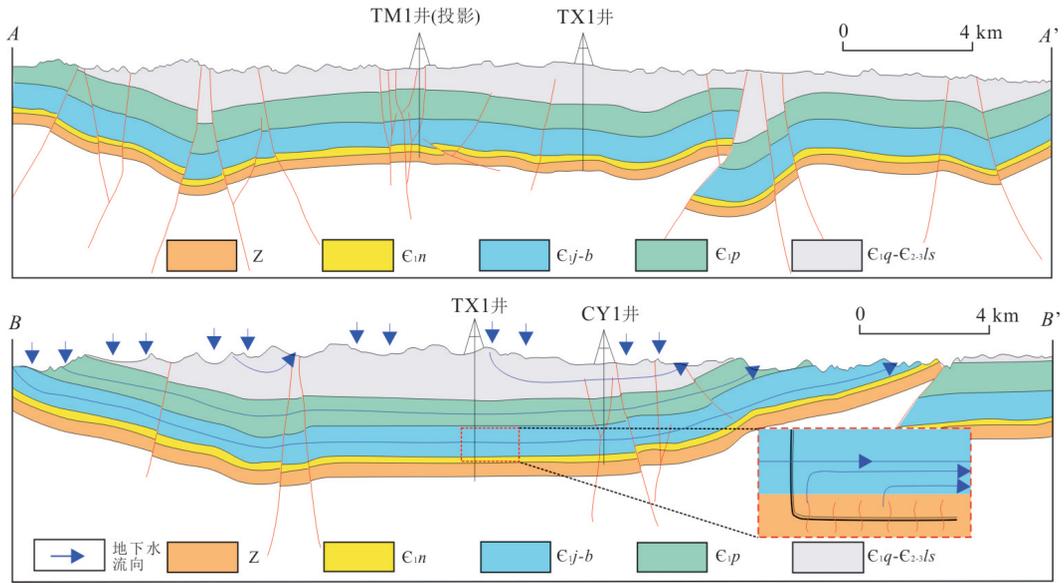


图 3 研究区地质构造样式及地下水流系统示意图

Fig.3 Geological structural styles and groundwater flow system schematic map of the study area

据王濡岳等(2016)修改

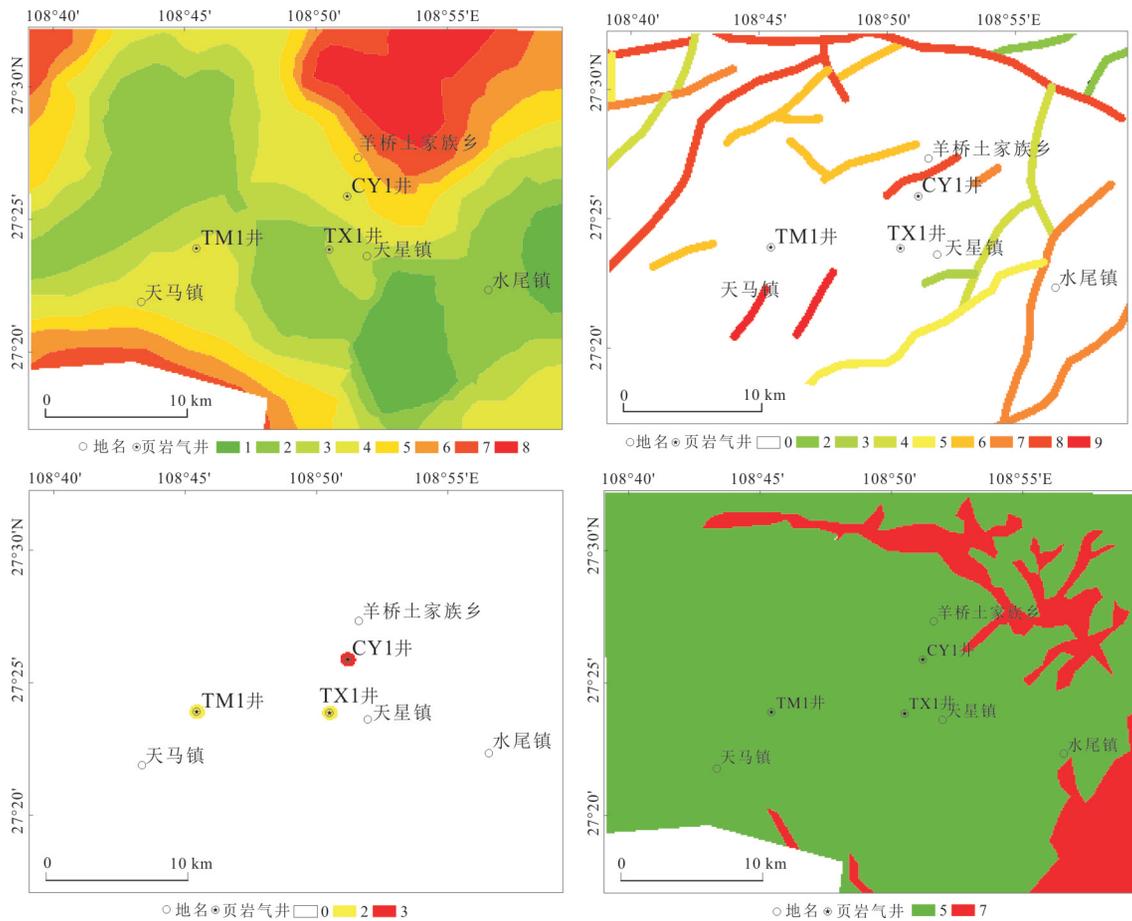


图 4 中间层厚度评分图(a)、断层性质评分图(b)、井龄评分图(c)和地形高差评分图(d)

Fig.4 Rating results of the thickness of intermediate layers (a), fault properties (b), well age (c) and terrain height difference (d)

表5 中间层渗透率及数据来源

Table 5 Permeability of intermediate layers and data source

序号	地层	渗透率(μm^2)	数据来源
1	清虚洞组	均值 1.5×10^{-5}	贺永忠等(2015)
2	杷榔组、变马冲组	$1 \times 10^{-9} \sim 9 \times 10^{-7}$	赵泽恒等(2007)
3	九门冲组	$1.99 \times 10^{-7} \sim 4.25 \times 10^{-5}$	王濡岳等(2016) 赵泽恒等(2007)

探解译报告及二维地震剖面图可知,研究区断层切割深度均已超过储气层底板埋藏深度;因此,研究区断层底部距储层的距离均小于零,对比指标评分表,断层底部距储层的距离评分值为10分。

(4)断层性质.研究区断层倾角较大、近乎直立,直通地表且连续.根据研究区地质及构造资料,确定每条断层分级与断层泥比例,并参照表1评分标准确定断层评分,将每条断层两侧影响范围设置为500 m,得到断层性质评分图(图4b)。

(5)井龄.选取研究区内终孔深度超过1 000 m的钻井,将每口钻井的影响范围设置为500 m.由于研究区深部钻孔资料较少,在此仅选择具有代表性的3个页岩气井进行地下水深部脆弱性评价.根据终孔日期计算每口井的井龄,井龄范围为4~7 a,并对照评分标准得到井龄评分图(图4c)。

(6)地层压力系数.研究区牛蹄塘组埋深主要为1 200~2 000 m,地层压力系数为0.93~1.13(王濡岳等,2016),属于常压;对比指标评分表,储层压力评分为单一值,为5分。

(7)地形高差.通过下载涉及研究区范围的DEM高程图,利用ArcGIS软件对高程图进行融合,然后进行补给区和排泄区之间的地形高差计算并分级,对照指标评分标准,得到地形高差评分图(图4d)。

3.3.2 评价结果与分析 根据所建立的深部脆弱性评价指标体系,对各指标评分图按照相应权重进行加权叠加,并利用自然间断法确定脆弱性分区的阈值,从而得到深部脆弱性评价等级分区图(图5)。

对研究区地下水深部脆弱性等级分区图在ArcGIS中进行统计计算,得出各等级面积占比结果,其中脆弱性低占比40.32%,脆弱性较低占比28.83%,脆弱性中等占比18.17%,脆弱性较高占比8.49%,脆弱性高占比4.19%。

研究区页岩气开采对地下水影响的深部脆弱性以低和较低为主,其中低脆弱性广泛分布于整个研究区西北部、中部及东南部,整体相对集中,主要

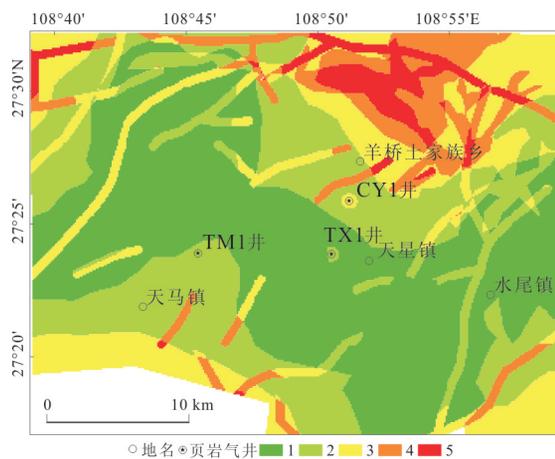


图5 研究区地下水深部脆弱性等级分区

Fig.5 Deep vulnerability map of groundwater in the study area

因为中间层厚度较大,能有效减小深部脆弱性;脆弱性较高和高的地区主要分布在研究区东北部,原因是此地区为储气层露头区,中间层厚度较薄且地势较低,与补给区之间的地形高差较大,为区域排泄区,深部潜在污染物在此向上运移的风险更大.断层附近地下水脆弱性等级均在中等以上,因此在布设页岩气井时应尽量避免断层带分布区。

4 结论

(1)通过分析页岩气开采深部污染物对地下水的的影响,本文构建了深部污染物向上迁移影响上部含水层的“源—途径—驱动力—受体”概念模型。

(2)本文提出了“地下水深部脆弱性”概念,从天然防护、影响途径以及驱动力3个角度,共筛选出中间厚度、中间层渗透系数、断层底部距储层的距离、断层性质、井龄、地层压力系数以及地形高差7项指标,并运用层次分析法确定了各指标权重,构建了页岩气开采对地下水影响的深部脆弱性评价体系。

(3)以贵州省某页岩气开采区块为评价对象,运用构建的深部脆弱性评价体系,结合ArcGIS软件,计算了页岩气开采对地下水影响的深部脆弱性

指数,并进行地下水深部脆弱性等级分区,确定研究区西北部、中部以及东南部深部脆弱性低,宜作为页岩气开采区域。

(4)该方法完善了现有地下水脆弱性评价体系,对其他人为深部活动对地下水环境影响的脆弱性评价具有借鉴意义。

References

- Birdsell, D. T., Rajaram, H., Dempsey, D., et al., 2015. Hydraulic Fracturing Fluid Migration in the Subsurface: A Review and Expanded Modeling Results. *Water Resources Research*, 51(9): 7159–7188. <https://doi.org/10.1002/2015wr017810>
- Brufatto, C., Cochran, J., Conn, L., et al., 2003. From Mud to Cement—Building Gas Wells. *Oil Field Review*, 15(3):62–76.
- Cai, Z. S., Ofterdinger, U., 2014. Numerical Assessment of Potential Impacts of Hydraulically Fractured Bowland Shale on Overlying Aquifers. *Water Resources Research*, 50(7): 6236–6259. <https://doi.org/10.1002/2013wr014943>
- Chen, J. Y., Yang, X. S., Dang, J. X., et al., 2011. Internal Structure and Permeability of Wenchuan Earthquake Fault. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(7):1805–1816 (in Chinese with English abstract).
- Engle, M. A., Reyes, F. R., Varonka, M. S., et al., 2016. Geochemistry of Formation Waters from the Wolfcamp and “Cline” Shales: Insights into Brine Origin, Reservoir Connectivity, and Fluid Flow in the Permian Basin, USA. *Chemical Geology*, 425: 76–92. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.01.025>
- Fan, Q., Wang, G. L., Lin, W. J., et al., 2007. New Method for Evaluating the Vulnerability of Groundwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 38(5):601–605 (in Chinese with English abstract).
- Gu, H. L., Yue, X. J., Chen, H. H., et al., 2018. Assessment Model of Groundwater Vulnerability in Shale Gas Exploitation Area. *Water Resource Protection*, 34(5): 57–62 (in Chinese with English abstract).
- Guan, X., Zuo, R., Meng, L., et al., 2017. Study on Evaluation Method of Site Suitability for River Water Sources. *China Sciencepaper*, 12(3): 319–326 (in Chinese with English abstract).
- Harrison, S. S., 1983. Evaluating System for Ground-Water Contamination Hazards Due to Gas-Well Drilling on the Glaciated Appalachian Plateau. *Ground Water*, 21(6): 689–700. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1983.tb01940.x>
- He, Y. Z., Chen, H. G., Xie, Y., et al., 2015. Discovery of Cambrian Carbonate Platform Margin Shoal in the Southeastern Margin of Upper Yangtze Platform and Its Geological Significance—Example from Shiqian - Cengong Area of Guizhou Province. *Geological Survey of China*, 2(5):38–44 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, R. E., Gorody, A. W., Mayer, B., et al., 2013. Groundwater Protection and Unconventional Gas Extraction: The Critical Need for Field-Based Hydrogeological Research. *Groundwater*, 51(4): 488–510. <https://doi.org/10.1111/gwat.12074>
- Jiang, G. H., 2002. Study on Groundwater Vulnerability in Guan Zhong Basin (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Jin, A. F., Li, G. H., Zhang, X., et al., 2012. The Risk Source Identification and Classification Methodology of Groundwater Pollution. *Earth Science*, 37(2):247–252 (in Chinese with English abstract).
- Kissinger, A., Helmig, R., Ebigo, A., et al., 2013. Hydraulic Fracturing in Unconventional Gas Reservoirs: Risks in the Geological System, Part 2. *Environmental Earth Sciences*, 70(8): 3855–3873. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2578-6>
- Ladevèze, P., Séjourné, S., Rivard, C., et al., 2017. Defining the Natural Fracture Network in a Shale Gas Play and Its Cover Succession: The Case of the Utica Shale in Eastern Canada. *Journal of Structural Geology*, 108: 157–170. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.12.007>
- Lange, T., Sauter, M., Heitfeld, M., et al., 2013. Hydraulic Fracturing in Unconventional Gas Reservoirs: Risks in the Geological System Part 1. *Environmental Earth Sciences*, 70(8): 3839–3853. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2803-3>
- Li, S. K., Yuan, Y., Li, X., et al., 2018. Building up a Risk Assessment Index System of Groundwater Pollution in Shale Gas Development. *Research of Environmental Sciences*, 31(5):911–918 (in Chinese with English abstract).
- Liang, C., Jiang, Z. X., Cao, Y. C., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Paleoenvironment of Shale in the Wufeng - Longmaxi Formation, North Guizhou Province, and Its Shale Gas Potential. *Journal of Earth Science*, 28(6): 1020–1031. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0932-x>
- Lin, M., Ji, D. F., Cui, C. F., et al., 2016. Groundwater Vulnerability Partition in Ashi River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 29(12): 1773–1781 (in Chinese with English abstract).

- Ma, J.Z., 2001. Groundwater Vulnerability Assessment for the South Rim of Tarim Basin. *Journal of Desert Research*, 21(2): 170–174 (in Chinese with English abstract).
- Pfunt, H., Houben, G., Himmelsbach, T., 2016. Numerical Modeling of Fracking Fluid Migration through Fault Zones and Fractures in the North German Basin. *Hydrogeology Journal*, 24(6): 1343–1358. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1418-7>
- Reagan, M. T., Moridis, G. J., Keen, N. D., et al., 2015. Numerical Simulation of the Environmental Impact of Hydraulic Fracturing of Tight/Shale Gas Reservoirs on Near-Surface Groundwater: Background, Base Cases, Shallow Reservoirs, Short-Term Gas, and Water Transport. *Water Resources Research*, 51(4): 2543–2573. <https://doi.org/10.1002/2014wr016086>
- Vengosh, A., Jackson, R. B., Warner, N., et al., 2014. A Critical Review of the Risks to Water Resources from Unconventional Shale Gas Development and Hydraulic Fracturing in the United States. *Environmental Science & Technology*, 48(15): 8334–8348. <https://doi.org/10.1021/es405118y>
- Wang, M.M., Chen, Y.J., Xing, Z.G., et al., 2018. Groundwater Vulnerability Assessment of Open-Pit Coal Mine in Steppe Area Based on DRTIC-SL. *China Mining Magazine*, 27(10): 165–169 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R.Y., Ding, W.L., Gong, D.J., et al., 2016. Gas Preservation Conditions of Marine Shale in Northern Guizhou Area: A Case Study of the Lower Cambrian Niutitang Formation in the Cen'gong Block, Guizhou Province. *Oil & Gas Geology*, 37(1): 45–55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S.L., 2017. The Influence of Structure on Accumulation of Shale Gas in Lower Cambrian Niutitang Formation in Cen'gong, Guizhou (Dissertation). Guizhou University, Guiyang (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.C., Wu, G., Yan, J.D., 2018. Current Status and Trends of Shale Gas Development and Technology Development in the World. *China Scitechology Business*, (12): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y.F., Zhai, G.Y., Leng, J.G., et al., 2017. Well TX1 Fracturing Effect Evaluation of Niutitang Formation Shale in Cengong, Guizhou. *Earth Science*, 42(7): 1107–1115 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.H., Deng, M., Cheng, J.X., et al., 2018. Influence of Fault and Magmatism on Oil and Gas Preservation Condition, to the West of Kangdian Ancient Continent: Taking Yanyuan Basin as an Example. *Earth Science*, 43(10): 3616–3624 (in Chinese with English abstract).
- Warner, N. R., Jackson, R. B., Darrah, T. H., et al., 2012. Reply to Engelder: Potential for Fluid Migration from the Marcellus Formation Remains Possible. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(52): E3626. <https://doi.org/10.1073/pnas.1217974110>
- Wilson, M. P., Worrall, F., Davies, R. J., et al., 2017. Shallow Aquifer Vulnerability from Subsurface Fluid Injection at a Proposed Shale Gas Hydraulic Fracturing Site. *Water Resources Research*, 53(11): 9922–9940. <https://doi.org/10.1002/2017wr021234>
- Xie, C. B., Yuan, H. Y., Guo, Y. Y., 1996. Multi-Factor's Weight Allocation Model. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 17(4): 31–37 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. X., Yang, T. Y., 2015. Environmental Impacts of Hydraulic Fracturing in Shale Gas Development in the United States. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 801–807 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.H., Xue, X.L., Zhang, G.Q., et al., 2007. Hydrocarbon Potential of Lower Paleozoic Formations in Huangping Sag. *Marine Origin Petroleum Geology*, 12(3): 33–43 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建业, 杨晓松, 党嘉祥, 等, 2011. 汶川地震断层带结构及渗透率. *地球物理学报*, 54(7): 1805–1816.
- 范琦, 王贵玲, 蔺文静, 等, 2007. 地下水脆弱性评价方法的探讨及实例. *水利学报*, 38(5): 601–605.
- 辜海林, 岳晓晶, 陈鸿汉, 等, 2018. 页岩气开采区地下水脆弱性评价模型. *水资源保护*, 34(5): 57–62.
- 关鑫, 左锐, 孟利, 等, 2017. 傍河水源选址适宜性评价方法研究. *中国科技论文*, 12(3): 319–326.
- 贺永忠, 陈厚国, 谢渊, 等, 2015. 上扬子东南缘寒武系碳酸盐岩台缘滩的发现与油气地质意义——以贵州石阡—岑巩为例. *中国地质调查*, 2(5): 38–44.
- 姜桂华, 2002. 关中盆地地下水脆弱性研究(硕士学位论文). 西安: 长安大学.
- 金爱芳, 李广贺, 张旭, 等, 2012. 地下水污染风险源识别与分级方法. *地球科学*, 37(2): 247–252.
- 李绍康, 袁颖, 李翔, 等, 2018. 页岩气开发地下水污染风险评价指标体系构建. *环境科学研究*, 31(5): 911–918.
- 林茂, 纪丹凤, 崔驰飞, 等, 2016. 阿什河流域地下水脆弱性分区. *环境科学研究*, 29(12): 1773–1781.
- 马金珠, 2001. 塔里木盆地南缘地下水脆弱性评价. *中国沙漠*, 21(2): 170–174.
- 王淼淼, 陈宜金, 邢朕国, 等, 2018. 基于DRTIC-SL的草原区

露天煤矿地下水脆弱性评价. 中国矿业, 27(10): 165-169.

王濡岳, 丁文龙, 龚大建, 等, 2016. 黔北地区海相页岩气保存条件——以贵州岑巩区块下寒武统牛蹄塘组为例. 石油与天然气地质, 37(1):45-55.

王生林, 2017. 黔东南岑巩地区构造对牛蹄塘组页岩气成藏的影响(硕士学位论文). 贵阳: 贵州大学.

王晓川, 吴根, 闫金定, 2018. 世界页岩气开发及技术发展现状与趋势. 科技中国, (12):17-21

王玉芳, 翟刚毅, 冷济高, 等, 2017. 贵州岑巩 TX1 井牛蹄塘组页岩气压裂效果评价. 地球科学, 42(7):1107-1115.

王正和, 邓敏, 程锦翔, 等, 2018. 康滇古陆西侧断裂及岩浆活动对油气保存条件的影响: 以盐源盆地为例. 地球科学, 43(10):3616-3624.

谢崇宝, 袁宏源, 郭元裕, 1996. 多指标权重分配模型研究. 华北水利水电学院学报, 17(4):31-37.

张东晓, 杨婷云, 2015. 美国页岩气水力压裂开发对环境的影响. 石油勘探与开发, 42(6):801-807.

赵泽恒, 薛秀丽, 张桂权, 等, 2007. 贵州黄平凹陷下古生界油气勘探潜力. 海相油气地质, 12(3):33-43.

《地球科学》

2019年10月 第44卷 第10期 要目预告

中亚造山带东缘迪彦庙俯冲增生杂岩带早二叠世洋内弧岩浆作用及构造背景.....程 杨等

内蒙古巴林右旗巴彦查干岩体年代学与地球化学:对古亚洲洋闭合时间的限定.....杜继宇等

张广才岭福兴屯组的形成时代、物源及构造背景.....何雨思等

大兴安岭早白垩世火山岩的时空分布特征.....杨晓平等

金刚石分类、组成特征以及我国金刚石研究展望.....连东洋等

小兴安岭西北部科洛杂岩的岩石学与年代学.....那福超等

大兴安岭北段扎兰屯地区斜长角闪岩年代学、地球化学和 Hf 同位素特征及其构造意义.....钱 程等

延边地区古洞河韧性剪切带变形特征及变形时代.....张 超等

辽东半岛丹东地区中生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义.....张 朋等