

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.05.09

# 页岩气开采区地下水脆弱性评价模型

辜海林, 岳晓晶, 陈鸿汉, 毕二平

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了更准确评价页岩气开采过程中水力压裂和废水回注对地下水的影 响, 需要采用不同指标体系的模型对地下水脆弱性进行评价。通过分析页岩气开采过程中污染物的潜在运移途径, 在 DRASTIC 模型的基础上分别建立了开采井区地下水脆弱性评价模型 DIRTEV 和回注井区地下水脆弱性评价模型 DIRWOCT。根据相关资料对模型中各评价因子进行了分级及评分, 运用模糊综合矩阵法确定了各因子权重, 并利用单参数法对评价结果进行了敏感性分析。对四川某页岩气采区的评价结果表明, 所建模型能较好地应用于页岩气开采区地下水脆弱性评价。

**关键词:** 地下水; 脆弱性评价; DRASTIC 模型; 页岩气开采区; 水力压裂; 深层回注

**中图分类号:** TV213.4; P641.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2018)05-0057-06

## Assessment model of groundwater vulnerability in shale gas exploitation area

GU Hailin, YUE Xiaojing, CHEN Honghan, BI Erping

(School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to assess more precisely the effects of hydraulic fracturing and wastewater reinjection on groundwater during the shale gas exploitation, the model with different evaluating index is required to evaluate the groundwater vulnerability. Based on the DRASTIC model, the assessment model of groundwater vulnerability in mining area, DIRTEV, and groundwater vulnerability assessment model in reinjection well area, DIRWOCT, were established, respectively, by analyzing the potential transport pathways of pollutants during shale gas exploitation. The evaluation factors in the model were graded and graded according to the relevant information. The weight of each factor is determined by fuzzy comprehensive matrix method, and the sensitivity analysis of the evaluation results is carried out by using the single parameter method. The evaluation results of a shale gas mining area in Sichuan show that the established models can be applied to the groundwater vulnerability evaluation in shale gas exploitation areas.

**Key words:** groundwater; vulnerability assessment; DRASTIC model; shale gas exploitation area; hydraulic fracturing; deep reinjection

在页岩气开发过程中, 大规模的水力压裂对地下水环境的影响逐渐引起了人们的关注<sup>[1-3]</sup>。已有资料表明, 水力压裂液、压裂返排水、处理排放水的泄露或不合理排放都会造成地下水的污染<sup>[1-2,4]</sup>, 而我国关于页岩气开采活动对地下水环境的影响研究相对较少。通过对页岩气开采区地下水进行脆弱性

评价, 可以为页岩气的勘探开发选址、废液废渣排放标准的制定和产能区内地下水环境的保护提供理论支撑。

本文根据页岩气的开采特点, 将浅部含水层和深部含水层概化为一个评价整体, 以页岩气开采区内的开采井区和回注井区两个最容易发生地下水污

基金项目: 大型油气田及煤层气开发科技重大专项(2016ZX05040)

作者简介: 辜海林(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水文地质与工程地质。E-mail: 625049006@qq.com

通信作者: 毕二平, 教授。E-mail: bi@cugb.edu.cn

染事故的区域作为目标评价区,在 DRASTIC 模型<sup>[5]</sup>的基础上,通过分析开采井区和回注井区污染物的潜在运移途径来筛选评价因子,提出了页岩气开采井区地下水脆弱性评价模型 DIRTEV 和回注井区地下水脆弱性评价模型 DIRWOCT。

## 1 评价模型的建立

### 1.1 目标含水层的确定

通常地下水脆弱性评价只是考虑浅部含水层,而页岩气开采井或废水回注井都会贯穿目标层以上的整个地层,其中可能包括浅部含水层在内的多个含水层(TDS 小于 1 g/L 的含水层为淡水含水层<sup>[6]</sup>)。在大规模的页岩气开发活动中,压裂液等污染物可能通过固井质量较差或封堵性能较差的开采井和回注井从深部向上运移,从而污染深部含水层和浅部含水层。此外,当目标区内深部含水层在他处出露地表时,浅部含水层受到污染的风险将大大增加。因此,在进行页岩气开采区地下水脆弱性评价时,将浅部含水层和深部含水层分开评价或者只是评价浅部含水层会影响评价结果的准确度。基于此,本文将浅部含水层和深部含水层(垂向上距离开采层或回注层最近的淡水含水层)概化为一个含水系统,无论是浅部污染物还是深部污染物,只要一进入该含水系统,都视为造成地下水污染。

### 1.2 潜在的污染方式

整个页岩气开采过程中,污染物产生(处理)量最大的是开采井的水力压裂过程(回注井的废水回注过程)。水力压裂的单井注水量(压裂液)在 0.8 万~10 万 m<sup>3</sup>不等<sup>[1]</sup>,在压裂结束后,注入水量的 5%~50% 会返排至地表(返排液)<sup>[7-8]</sup>,在产气过程中还会产生一部分高 TDS 的采出水。施工过程中污染物的意外泄露会对地下水产生影响,而钻井、水力压裂和产气过程中产生的废水量大,且处理难度高,目前最常用的处理方式是深井回注,使得回注区地下水也有受到污染的风险。从污染物的运移途径上分析,开采井区和回注井区既有相同之处也有不同之处,所以将页岩气开采区地下水脆弱性评价分为开采井区和回注井区两部分(开采和回注属于整个页岩气开采过程中的两个环节)。

开采井区和回注井区相同点为:①都有地表渗漏污染浅部含水层的风险。水力压裂液的制备运输、返排液(采出水)的运输、地表储存设备和管线的泄露、不合理的排放等都会引起污染物的泄露,造成浅部含水层的污染。②污染物都有垂向上运移污染深部含水层的风险。页岩气开采过程中人为产生的裂隙(包括水力压裂、钻井施工等产生的裂隙)、

原生的断层裂隙等都有可能成为目标层(开采层和回注层)内污染物向上运移的通道。

开采井区和回注井区的不同点是目标层内污染物泄露的影响因素存在差异。开采井区井密度大,开采目的层埋深较大,主要考虑水力压裂、频繁钻井施工等对储层封闭性的影响;回注井区井密度小,回注层埋深相对较小,主要考虑回注层的埋藏、盖层封闭性等对回注层封闭性的影响。

除地表渗漏和深部运移污染含水系统外,页岩气开采过程中的井管破裂、钻井液漏失等都可能造成污染物直接进入含水系统,但这都是施工过程中的偶发性事故,具有极大的不确定性,不容易被量化,所以本文所建模型不考虑这种污染方式。

### 1.3 模型因子筛选原则

国内地下水脆弱性评价普遍采用 DRASTIC 模型<sup>[5]</sup>,该模型具有普适性,在较大尺度上使用较为方便,但是当对某一特殊区域或特殊情况下的地下水进行脆弱性评价时,其评价精度就显得不足。为了弥补 DRASTIC 模型存在的缺陷,一些学者根据评价区的特点对 DRASTIC 模型进行了一定程度的改进,如张川等<sup>[9]</sup>在充分考虑呼伦贝尔高平原地区水文地质条件的情况下提出了 DRASTIC 模型的改进模型——DRASL 模型。

本文以 DRASTIC 模型为基础,结合页岩气开采特点和我国页岩气藏区的地质和水文地质特征来进行评价模型的改进。确定模型因子筛选原则为:①选择对地下水污染影响最明显的地质与水文地质条件作为评价因子<sup>[10]</sup>;②筛选容易被量化的因子,并且所涉及的资料容易获取;③结合页岩气开采过程中污染物的潜在运移途径来选择,不考虑污染物在含水层中的运移情况;④各因子之间的依赖性要尽可能小,减少因子之间的重叠(例如 DRASTIC 模型中含水层介质和含水层的水力传导系数两个因子就密切相关);⑤不考虑施工过程中的不确定性因素,如井管破裂、井喷等偶发性施工事故,主要考虑页岩气开采施工前能获取的参数。

### 1.4 模型因子的确定

按照前述确定评价因子的筛选原则对页岩气开采井区和回注井区地下水脆弱性评价因子进行筛选,最终确定开采井区地下水脆弱性评价模型的评价因子为地下水埋深  $D$ 、包气带介质  $I$ 、净补给量  $R$ 、构造发育程度  $T$ 、开采井数量  $E$  和储层距含水系统的垂向距离  $V$ ,回注井区地下水脆弱性评价模型的评价因子为地下水埋深  $D$ 、包气带介质  $I$ 、净补给量  $R$ 、日均回注水量  $W$ 、回注层露头范围  $O$ 、盖层厚度  $C$  和构造发育程度  $T$ ,分别记为 DIRTEV 模型和

DIRWOCT 模型。

a. 地下水埋深  $D$ 、包气带介质  $I$  和净补给量  $R$  为污染物经地表入渗进入含水系统这一过程中对污染物迁移有显著影响的 3 个因素,各因子的具体含义与钟佐燊<sup>[10]</sup>的一致。其中净补给量指降雨入渗补给地下水的量。

b. 构造发育程度  $T$ 。①与北美页岩气储集条件相比,我国页岩盆地构造断裂更发育<sup>[11]</sup>。国外学者的研究认为,天然存在的断层裂隙可能是深部流体向上迁移的潜在途径<sup>[12-13]</sup>。在构造发育的区域内进行水力压裂作业,压裂液的注入可能激活原有的断层或封闭裂隙<sup>[14]</sup>,使其形成相互连通的导水通道,污染物通过这些通道进入含水系统污染地下水。②回注层岩石渗透率低,储层中的废水主要在发育的裂隙、岩溶或构造内运移。当区内构造发育时,储层中的废水很可能通过潜在的导水通道发生外泄<sup>[15]</sup>。

c. 开采井数量  $E$ 。随着钻井数量的增加,区域内水力压裂的总次数增多,污染物的数量增加,发生污染事故的概率也会增加<sup>[1]</sup>。Garfield 地区的研究表明,地下水中较高的  $\text{Cl}^-$  浓度(当地地下水中的  $\text{Cl}^-$  主要来源于返排水)与气井的数量有关<sup>[13]</sup>。此外,大量的钻井作业更有可能增加深部和浅部含水层的水力联系,固井和完井较差的钻井也有可能成为污染物潜在的运移途径。因此,随着钻井数量的增加,污染物泄露的风险增大,地下水更容易被污染。

d. 储层距含水系统的垂向距离  $V$ 。储层距含水系统的垂向距离是指储气层顶板距含水系统底边界的垂向距离。Fisher 等<sup>[14]</sup>对美国大量水力压裂造缝高度统计表明,水平井的水力压裂作业通常可以在垂向上产生几十至几百米高的微裂隙,并且由于封闭断层裂隙的存在,常规方法测量的裂隙增长高度要小于水力压裂模型测量的高度。水力压裂过程产生的微地震可能激活原有封闭的断层裂隙<sup>[14]</sup>,成为潜在的导水通道。因此,储层距含水系统的垂向距离越小,污染物进入含水系统的概率越大。

e. 日均回注水量  $W$ 。目前页岩气开采废水主要的处理方式是深井回注,废水回注前会在地表设施中进行处理以达到回注要求。而回注过程中由于管线破损和地表储存设施中废水泄露造成的地下水污染事故时有发生<sup>[16]</sup>。井场回注规模越大,处理的废水量越多,污染物泄露的风险越大。因此,DIRWOCT 模型用日均回注水量来表示回注场地发生污染物泄露的风险。

f. 回注层露头范围  $O$ 。美国环境保护署(EPA)

规定,回注井一定范围内一般不允许存在回注层的人工或天然露头<sup>[17]</sup>。人工露头主要是指未封闭的或者未经废弃处理的灌注井和开采井、维护较差的开采井等,这些井通常深度较大,贯穿多个地层。天然露头主要是指由构造活动生成的褶皱、断层等造成的地层出露。无论是人工露头还是天然露头,都增加了回注层与外界联系的可能性,加大了回注水泄露的风险。

g. 盖层厚度  $C$ 。回注层盖层的特性直接影响回注空间的安全性。盖层的岩性、裂隙发育特征、厚度、渗透性、连续性等诸多因素共同决定了盖层对深部流体的封隔能力。DIRWOCT 模型选用盖层厚度代表盖层封隔能力的原因如下:①在实际的生产过程中,要想获得详细的盖层资料难度较大,而且成本较高;②封隔能力较差的盖层在厚度较大时也能对污染物的运移产生阻滞作用<sup>[18]</sup>;③盖层通常为多种岩性或不同渗透性地层的互层,较厚的盖层能够弥补某一地层的不连续性分布带来的影响;④大厚度的盖层不易被小断裂错开,遇大断裂也容易形成侧向封堵<sup>[19]</sup>;⑤盖层厚度一定程度上能够表示距离含水层的垂向距离。总之,盖层厚度越大,污染物越不容易泄露,地下水受到污染的风险越小。

由于 DIRTEV 模型中因子  $E$  和 DIRWOCT 模型中的因子  $W$ 、 $O$  需要根据实际的场地资料或者拟建场地的设计资料来获取,因此开采井区和回注井区地下水脆弱性评价模型不能同 DRASTIC 模型一样进行大区域尺度上的地下水脆弱性评价,只适合不同井场之间的脆弱性评价,评价目标更具体,评价精度更高。

## 1.5 模型中因子等级划分及评分

模型中可量化的因子按照 Aller 等<sup>[5]</sup>的划分原则来划分等级,不可量化的因子根据其地对地下水的影响程度划分。因子评分范围为 1~10,分值越大,表示对地下水的影响越大,具体等级划分及评分见表 1~3,对于评分为区间的评价因子,具体评分值需根据实际条件来确定,具体可参见文献[10]。

a. 地下水埋深  $D$ 、包气带介质  $I$  和净补给量  $R$ 。等级划分及评分参照文献[10]确定。

b. 开采井数量  $E$ 。通过对四川国家级页岩气示范性开发区的调查得知,一般钻井平台的钻井数量在 3~8 口。

c. 构造发育程度  $T$ 。等级划分及评分参照 Wang 等<sup>[20]</sup>的研究确定。

d. 储层距含水系统的垂向距离  $V$ 。为了尽可能降低页岩气开采对地下水的影响,纽约州规定:

表1 因子 R、T、E 等级划分及评分

净补给量 R		构造发育程度 T		开采井数量 E	
净补给量/ mm	评分	构造类型	泥沙比/ %	井数量/ 口	评分
(0,50.8]	1	三级断层	30	(0,2]	1
(50.8,101.6]	3		50	(2,4]	3
(101.6,177.8]	6	二级断层	30	(4,6]	5
(177.8,254]	8		50	(6,8]	7
>254	9	一级断层	30	(8,10]	9
			50	>10	10

表2 因子 W、O、C 等级划分及评分

日均回注水量 W		回注层露头范围 O		盖层厚度 C	
注水量/ (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	评分	距离/km	评分	厚度/m	评分
(0,60]	1	(0,0.8]	8~10	(0,25]	10
(60,150]	3	(0.8,1.6]	5~10	(25,75]	7~10
(150,270]	5	(1.6,2.4]	2~7	(75,150]	2~8
(270,420]	7	(2.4,3.2]	2~5	(150,200]	2~6
(420,600]	9	>3.2	1	(200,300]	2~4
>600	10			>300	1

表3 因子 I、V、D 等级划分及评分

包气带介质 I			储层距含水系统的垂向距离 V		地下水埋深 D	
类别	评分	典型评分	距离/m	评分	埋深/m	评分
承压层	1	1	(0,100]	10	(0,2.3]	10
粉砂/黏土	2~6	3	(100,200]	9	(2.3,7.0]	9
页岩	2~5	3	(200,300]	8	(7.0,14.0]	7
灰岩	2~7	6	(300,400]	7	(14.0,23.2]	5
砂岩	4~8	6	(400,500]	6	(23.2,35.0]	3
层状灰岩、砂岩、页岩	4~8	6	(500,600]	5	(35.0,50.0]	2
含较多粉砂和黏土的砂砾	4~8	6	(600,700]	4	>50.0	1
变质岩/火成岩	2~8	4	(700,800]	3		
砂砾	6~9	8	(800,900]	2		
玄武岩	2~10	9	>900	1		
岩溶灰岩	8~10	10				

注:对于因子 I 当无法获取其详细资料时,可以取典型评分值。

①水力压裂作业在井管任何位置产生的裂隙高度不得超过 600 m;②水力压裂在井管任何位置产生的裂缝顶部距离已知饮用水层不小于 300 m<sup>[21]</sup>。Fisher 等<sup>[14]</sup>对美国多个盆地内的水力压裂造缝高度研究表明,一般的水力压裂造缝高度在几十至几百米,最高达到 460 m。考虑到中国页岩气盆地地质结构复杂、构造发育的特点,设置储层距含水系统的垂向距离安全值为 900 m。

e. 日均回注水量 W。不同的地质结构和不同的回注层特性使得不同回注井回注能力存在一定的差异。四川、鄂尔多斯等地气田废水回注数据<sup>[22-24]</sup>表明,目前回注井的日均回注水量在 30~600 m<sup>3</sup>/d,因此日均回注水量的上限设定为 600 m<sup>3</sup>/d。

f. 回注层露头范围 O。美国根据回注液的类型将回注井分为 5 类(油气开采使用的回注井为第 II 类),并且规定 I 类危险回注井的地质核查范围不低于 3.2 km,II 类回注井的地质核查范围不低于 0.8 km(视情况而定)<sup>[25]</sup>。周瑞立<sup>[22]</sup>探讨了四川某地区回注井的影响范围,结果表明回注井的控制范围大多在 3 km 内。据此,回注层露头范围的上限设定为 3.2 km。

g. 盖层厚度 C。美国规定水力压裂裂缝顶部距离含水层的安全距离为 300 m<sup>[21]</sup>,李博<sup>[25]</sup>在关于气田水回注系统风险评价中定义厚度超过 300 m 的

盖层封闭能力为好,付广等<sup>[26]</sup>对我国松辽盆地、塔里木盆地等主要油气盆地盖层厚度研究表明,盖层厚度大多处于 300 m 左右,因此盖层厚度选择的安全值为 300 m。

## 2 脆弱性评价与敏感性分析

### 2.1 脆弱性评价

为定量评价页岩气开采区地下水脆弱性,需对 DIRTEV 模型和 DIRWOCT 模型进行数值计算,主要包括因子权重划分和脆弱性等级划分两个部分。根据各因子对地下水的影响程度,采用模糊综合矩阵法<sup>[27]</sup>来确定其权重,然后运用迭置指数法进行脆弱性指数计算:

$$P_{\text{DIRTEV}} = 0.28r_D + 0.22r_I + 0.08r_R + 0.13r_T + 0.17r_E + 0.10r_V \quad (1)$$

$$P_{\text{DIRWOCT}} = 0.25r_D + 0.20r_I + 0.08r_R + 0.07r_W + 0.16r_O + 0.10r_C + 0.13r_T \quad (2)$$

式中:P 为地下水脆弱性指数,其值越低,地下水越不易被污染; $r_i$ 为各因子等级评分。地下水脆弱性等级划分标准为:1≤P<2,低;2≤P<4,较低;4≤P<6,中等;6≤P<8,较高;8≤P≤10,高。

### 2.2 敏感性分析

相同的地下水脆弱性等级在地质和水文地质条件不同的区域反映的情况是不一样的,需要对评价

结果进行敏感性分析来确定影响评价区地下水脆弱性的主要因素。本文采用单参数敏感性分析法来分析模型中各因子对地下水脆弱性的影响程度,计算公式为

$$W_i = \frac{w_i r_i}{P} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $W_i$ 为各因子的有效权重,有效权重越大,对地下水脆弱性影响越大; $w_i$ 为各因子的权重。

### 3 实例验证

选取四川省泸州市某页岩气开采井区 A 来对 DIRTEV 模型进行验证。该井区总占地约 9 822 m<sup>2</sup>,设计钻井数为 6 口,设计日产气量约 30 万 m<sup>3</sup>。场地周边地层主要为第四系中更新统(Q<sub>2</sub>)砂卵石层、三叠系须家河组(T<sub>3xj</sub>)砂岩、雷口坡组(T<sub>2l</sub>)灰岩;区内地下水以大气降水补给为主,地下水类型主要为第四系松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水;该区域处于帚状构造带末端,构造作用相对较弱,构造形态相对简单。

井区各参数取值及评分见表 4,由式(1)计算得  $P_{DIRTEV} = 5.96$ ,开采井区地下水脆弱性等级为中等。对评价结果的敏感性分析结果(表 4)表明,影响该区域地下水脆弱性大小的主要因素为地下水埋深(37.78%),其中构造发育程度(19.49%)和包气带介质(19.79%)对地下水脆弱性的影响程度几乎相同,储层距含水层的垂向距离对地下水脆弱性影响最小(4.50%)。

表 4 DIRTEV 模型各因子取值、评分及有效权重

评价因子	参数取值	评分	有效权重/%
<i>D</i>	0.2 ~ 2.03 m	10	37.78
<i>I</i>	黏质粉砂土	3	19.79
<i>R</i>	96.7 mm	3	10.79
<i>T</i>	处于帚状构造带末端,构造作用相对较弱	7	19.49
<i>E</i>	6 口	5	7.65
<i>V</i>	583.5 m	5	4.50

选取位于四川省宜宾市南部的回注井区 B(A 井场压裂废水回注点)对 DIRWOCT 模型进行了验证。回注层位为栖霞组(P<sub>1q</sub>)、茅口组(P<sub>1m</sub>)灰岩,该地层在下游数千米处出露,且出露处有地下水排泄点。井区水文地质区划属“盆周山地”地下水区,细分属含纯灰岩岩溶地下水亚区、碳酸岩裂缝地下水亚区、风化带空隙裂隙地下水亚区,地下水以降雨入渗补给为主。回注井远离边界大断层,距离近 1.5 km 处发育了两条小型断层,目前处于闭合状态。

井区各参数取值及评分见表 5,由式(2)计算得  $P_{DIRWOCT} = 6.43$ ,回注井区地下水脆弱性等级为较

高。敏感性分析结果(表 5)表明,地下水埋深(34.99%)是影响该区域地下水脆弱性的主要因素,其中盖层厚度(15.55%)和包气带介质(18.66%)对地下水脆弱性影响相似,而净补给量(7.47%)和回注层露头范围(7.47%)对地下水脆弱性影响程度相同,构造发育程度(6.07%)对评价结果影响最小。

表 5 DIRWOCT 模型各因子取值、评分及有效权重

评价因子	取值	评分	有效权重/%
<i>D</i>	6 m	9	34.99
<i>I</i>	灰岩	6	18.66
<i>R</i>	106 mm	6	7.47
<i>W</i>	450 m <sup>3</sup> /d	9	9.80
<i>O</i>	3.2 km	3	7.47
<i>C</i>	<20 m	10	15.55
<i>T</i>	扬子准地台的次级构造上扬子台坳	3	6.07

从以上分析可知,A 井区、B 井区地下水脆弱性等级分别为中等和较高,其中影响 A 井区地下水脆弱性的主要因素为地下水埋深,次要因素为构造发育程度和包气带介质;影响 B 井区地下水脆弱性等级的主要因素为地下水埋深,次要因素为盖层厚度和包气带介质。脆弱性评价和敏感性分析结果与场地实际情况相符,表明所建模型不仅可以确定出目标评价区地下水脆弱性等级,还能识别出可能导致评价区地下水污染的主要因素和次要因素,能够较好地运用于页岩气开采区地下水脆弱性评价。

### 4 结 语

根据页岩气开采特点,将浅部含水层和深部含水层概化为一个整体作为评价目标,确定了页岩气开采过程中污染物主要通过地表入渗和深部垂向上运移进入含水系统。基于水力压裂和废水回注的特点,分别构建了开采井区地下水脆弱性评价模型 DIRTEV 和回注井区地下水脆弱性评价模型 DIRWOCT。对实际场地的评价结果表明,所建模型可以较好地应用于页岩气开采区地下水脆弱性评价,并能识别出影响评价区地下水脆弱性的主要因素。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 张东晓,杨婷云. 美国页岩气水力压裂开发对环境的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 801-807. (ZHANG Dongxiao, YANG Tingyun. Environmental

- impacts of hydraulic fracturing in shale gas development in the united states [ J ]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42( 6 ) : 801-807. ( in Chinese )
- [ 3 ] ZOBACK M, KITASEI S, COPITHORNE B. Addressing the environmental risks from shale gas development [ M ]. Washington, D. C. : Worldwatch Institute, 2010.
- [ 4 ] LUTZ B D, LEWIS A N, DOYLE M W. Generation, transport, and disposal of wastewater associated with Marcellus shale gas development [ J ]. *Water Resources Research*, 2013, 49( 2 ) : 647-656.
- [ 5 ] ALLEN L, BENNETT T, LEHR J H, et al. DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings [ R ]. Oklahoma: US Environmental Protection Agency, 1987.
- [ 6 ] SCHLOEMER S, ELBRACHT J, BLUMENBERG M, et al. Distribution and origin of dissolved methane, ethane and propane in shallow groundwater of Lower Saxony, Germany [ J ]. *Applied Geochemistry*, 2016, 67: 118-132.
- [ 7 ] GREGORY K B, VIDIC R D, DZOMBAK D A. Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing [ J ]. *Elements*, 2011, 7( 3 ) : 181-186.
- [ 8 ] KING G E. Hydraulic fracturing 101: what every representative, environmentalist, regulator, reporter, investor, university researcher, neighbor, and engineer should know about hydraulic fracturing risk [ J ]. *Journal of Petroleum Technology*, 2012, 64( 4 ) : 34-42.
- [ 9 ] 张川, 唐蕴, 唐克旺. 呼伦贝尔高平原地区浅层地下水脆弱性评价 [ J ]. *水资源保护*, 2016, 32( 3 ) : 19-23. ( ZHANG Chuan, TANG Yun, TANG Kewang. Assessment of shallow groundwater vulnerability in Hulunbeir high plain [ J ]. *Water Resources Protection*, 2016, 32( 3 ) : 19-23. ( in Chinese ) )
- [ 10 ] 钟佐燊. 地下水防污性能评价方法探讨 [ J ]. *地学前缘*, 2005, 12( 增刊 1 ) : 3-13. ( ZHONG Zuoshen. A discussion of groundwater vulnerability assessment methods [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12( Sup1 ) : 3-13. ( in Chinese ) )
- [ 11 ] 聂海宽, 何发岐, 包书景. 中国页岩气地质特殊性及其勘探对策 [ J ]. *天然气工业*, 2011, 31( 11 ) : 111-116. ( NIE Haikuan, HE Faqi, BAO Shujing. Peculiar geological characteristics of shale gas in China and its exploration countermeasures [ J ]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31( 11 ) : 111-116. ( in Chinese ) )
- [ 12 ] WARNER N R, JACKSON R B, DARRAH T H, et al. Geochemical evidence for possible natural migration of Marcellus Formation brine to shallow aquifers in Pennsylvania [ J ]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109( 30 ) : 11961-11966.
- [ 13 ] THYNE G. Review of phase II hydrogeologic study [ EB/OL ]. ( 2008-12-20 ) [ 2017-08-20 ]. <https://www.garfield-county.com/oil-gas/documents/Thyne%20FINAL%20Report%202012> [ 1 ]. 20. 08. pdf.
- [ 14 ] FISHER M K, WARPINSKI N R. Hydraulic-fracture-height growth: Real data [ J ]. *SPE Production & Operations*, 2012, 27( 1 ) : 8-19.
- [ 15 ] 潘世兵, 王忠静, 周宏, 等. 辽河油田污水回注适宜性评价模型 [ J ]. *中国石油大学学报( 自然科学版 )*, 2003, 27( 3 ) : 67-70. ( PAN Shibing, WANG Zhongjing, ZHOU Hong, et al. Suitability evaluation model based on geographical information system for wastewater reinjection in liaohe oilfield [ J ]. *Journal of China University of Petroleum( Edition of Natural Science )*, 2003, 27( 3 ) : 67-70. ( in Chinese ) )
- [ 16 ] FERGHSON G. Deep injection of waste water in the western Canada sedimentary basin [ J ]. *Groundwater*, 2015, 53( 2 ) : 187-194.
- [ 17 ] 王政, 唐春凌, 胡金燕, 等. 油气田废水地下灌注技术及其环境风险分析 [ J ]. *石油钻采工艺*, 2010, 32( 增刊 1 ) : 162-166. ( WANG Zheng, TANG Chunling, HU Jinyan, et al. Underground injection technology and environmental risk analysis of oil-gas field wastewater [ J ]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2010, 32( Sup1 ) : 162-166. ( in Chinese ) )
- [ 18 ] 庞雄奇, 付广. 地震资料用于盖层封闭油气的综合定量评价方法 [ J ]. *石油地球物理勘探*, 1994, 29( 2 ) : 179-188. ( PANG Xiongqi, FU Guang, FANG. Quantitative barrier hydrocarbon sealing evaluation using seismic data [ J ]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1994, 29( 2 ) : 179-188. ( in Chinese ) )
- [ 19 ] 庞雄奇. 盖层封油气性综合定量评价: 盆地模拟在盖层评价中的应用 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [ 20 ] WANG Z, WU Q, ZHANG Y, et al. Confined groundwater pollution mechanism and vulnerability assessment in oilfields, North China [ J ]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64( 6 ) : 1547-1553.
- [ 21 ] STUART M E. Potential groundwater impact from exploitation of shale gas in the UK [ R ]. London: British Geological Survey, 2015.
- [ 22 ] 周瑞立. 川中高压回注井单井极限注入量计算及增注机理研究 [ D ]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [ 23 ] 罗金贵. 龙岗地区气田水回注井极限注入量计算 [ D ]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- [ 24 ] 武屹楠. 气田污水回注井回注能力研究 [ D ]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- [ 25 ] 李博. 川东地区气田水回注系统风险评价与控制措施研究 [ D ]. 成都: 西南石油大学, 2014.
- [ 26 ] 付广, 张发强. 厚度在泥岩盖层封盖油气中的作用 [ J ]. *天然气地球科学*, 1998, 9( 6 ) : 20-25. ( FU Guang, ZHANG Faqiang. The role of thickness of mudstone caprock in sealing oil and gas [ J ]. *Natural Gas Earth Science*, 1998, 9( 6 ) : 20-25. ( in Chinese ) )
- [ 27 ] 左海凤, 魏加华, 王光谦. DRASTIC 地下水防污性能评价因子赋权 [ J ]. *水资源保护*, 2008, 24( 2 ) : 22-25. ( ZUO Haifeng, WEI Jiahua, WANG Guangqian. Method of determining factor weights for groundwater vulnerability assessment [ J ]. *Water Resources Protection*, 2008, 24( 2 ) : 22-25. ( in Chinese ) )

( 收稿日期: 2017-09-20 编辑: 熊水斌 )