

# Leakage Risk Evaluation Model for Wells in the Process of CO<sub>2</sub> Storage in Low Permeability Reservoirs

Bingyi Jia<sup>1</sup>, Ping Yue<sup>1</sup>, Xingmei Kang<sup>2</sup>, Xinhui Lei<sup>2</sup>, Minhao Zhou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation of Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield, CNPC, Xi'an Shaanxi  
Email: 1058987453@qq.com

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Mar. 8<sup>th</sup>, 2019; published: Mar. 15<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

In the process of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS), CO<sub>2</sub> may leak from wellbore, faults, cracks and fractures, and may also overflow from reservoirs and caprocks by molecular diffusion. The high concentration CO<sub>2</sub> from the wellbore leakage may cause great danger to the people's life on the wellsite. Therefore, it is necessary to develop an evaluation model for CO<sub>2</sub> leakage. The risk of CO<sub>2</sub> wellbore leakage can be evaluated by the model of toxic gas leakage and diffusion. According to the gas diffusion concentration, the critical damage and toxicity value of CO<sub>2</sub> concentration, the influence region of CO<sub>2</sub> diffusion can be determined. Based on the simulation model, the leakage source area is divided into fatal region, heavy injury region, untoward effect region and safety region. The leakage risk of the CCUS is evaluated in a low permeability reservoir, in Changqing Oilfield, Ordos Basin, China. The forecast of the CO<sub>2</sub> leakage risk is then used to guide the installation of the near surface CO<sub>2</sub> concentration monitor and to design the CO<sub>2</sub> leakage disposal scheme.

## Keywords

CO<sub>2</sub> Storage, Low Permeability Reservoir, Wellbore Leakage, Risk Evaluation, Model

---

# 低渗透油藏CO<sub>2</sub>埋存井筒泄漏风险评价模型

贾冰懿<sup>1</sup>, 乐平<sup>1</sup>, 康兴妹<sup>2</sup>, 雷欣慧<sup>2</sup>, 周旻昊<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都

<sup>2</sup>中国石油长庆油田勘探开发研究院, 陕西 西安

Email: 1058987453@qq.com

收稿日期: 2019年2月22日; 录用日期: 2019年3月8日; 发布日期: 2019年3月15日

文章引用: 贾冰懿, 乐平, 康兴妹, 雷欣慧, 周旻昊. 低渗透油藏 CO<sub>2</sub> 埋存井筒泄漏风险评价模型[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(3): 112-120. DOI: 10.12677/ag.2019.93014

## 摘要

在CO<sub>2</sub>地质埋存过程中, CO<sub>2</sub>可能从井筒、断层、裂缝泄漏, 也有可能通过分子扩散从储层和盖层溢出。但从井筒泄漏所造成的短期风险的影响较大, 容易对井场的工作人员生产生活造成伤害, 因此需要根据油藏和井筒的参数, 建立CO<sub>2</sub>泄漏规模、泄漏风险的评价模型。本文对鄂尔多斯盆地长庆油田某低渗透油藏注入CO<sub>2</sub>井筒泄漏的危险性进行了研究, 模拟CO<sub>2</sub>从井筒泄漏后, 采用有毒气体泄漏扩散的模型进行气体扩散后CO<sub>2</sub>浓度的研究, 结合二氧化碳泄漏扩散危害浓度临界值, 确定二氧化碳扩散的影响区域。通过模型计算泄漏源附件区域划分为致命区、严重伤害区、不良反应区和安全区的距离和范围, 并对低渗透油藏CO<sub>2</sub>埋存井筒泄漏风险进行评价。

## 关键词

CO<sub>2</sub>埋存, 低渗透油藏, 井筒泄漏, 风险评价, 模型

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

碳捕获、利用和储存(CCUS)是实现二氧化碳减排的重要技术之一[1][2]。目前学者在CCUS方面已经开展了大量理论研究[3][4]和现场实践[5][6]。由于储层地质条件和人类活动的不确定性, 在CCUS操作过程中, 二氧化碳可能会通过生产井和废弃井、断层、裂缝以及盖层的“薄弱带”泄漏[7][8][9]。尤其是对于注水井或生产井, 二氧化碳泄漏通常发生在钻井环空水泥、井筒塞或围岩破裂带, 这些泄漏多由化学或机械效应引起[10][11]。二氧化碳泄漏通常会导致地下水的pH值降低、盐度升高、离子和其它化学反应增加, 以及土壤和浅层大气中的游离二氧化碳含量升高, 乃至危害到矿场人员的生命安全[12][13][14]。本研究主要目的是对实施CO<sub>2</sub>埋存项目中井筒泄漏风险进行评价。CO<sub>2</sub>井筒泄漏后带来的风险评价模型, 可以采用有毒气体泄漏扩散的模型进行评估, 评价对现场工作人员水体健康和生命安全的影响。目前关于CO<sub>2</sub>从井筒快速泄漏后的扩散模拟, 主要是基于统计概率的拉格朗日扩散模型[15][16][17][18]、基于流体力学N-S方程的欧拉模型[19][20]和基于解析解分析和经验估计的高斯模型[21]。Gasda等人[22]将数值模型和分析模型与一组简化假设结合起来, 生成了一个高效的数值分析混合模型, 以分析二氧化碳封存的风险。Mao等人[23]开发了一个与二氧化碳井筒泄漏相关的温度信号模型, 以实现早期检测CO<sub>2</sub>泄漏的预测模型。Kopp等人[24]基于1200个储层样本, 提出了一个CO<sub>2</sub>泄漏风险的分析方程。本研究主要根据H3区块CO<sub>2</sub>埋存研究区的现场条件, 参照有毒气体的扩散模型来研究CO<sub>2</sub>泄漏扩散特征及模式、建立相关的CO<sub>2</sub>泄漏预测模型并对危险性进行评估, 为后续近地表CO<sub>2</sub>浓度传感器的分布设计方案及CO<sub>2</sub>泄漏处置方案等提供依据。

## 2. 井筒泄漏规模与风险评价

对于CO<sub>2</sub>地质埋存, 目前公认井筒的完整性为最大的泄漏风险因素。

井筒常见的泄漏风险包括: 水泥和套管外壁之间的区域、水泥与套管内墙之间的区域、水泥塞、套管磨损(如铁锈)、在圆形孔中水泥磨损(水泥缝)、地层与水泥之间的区域泄漏(图1)。本文主要讨论了水泥塞的泄漏情况。

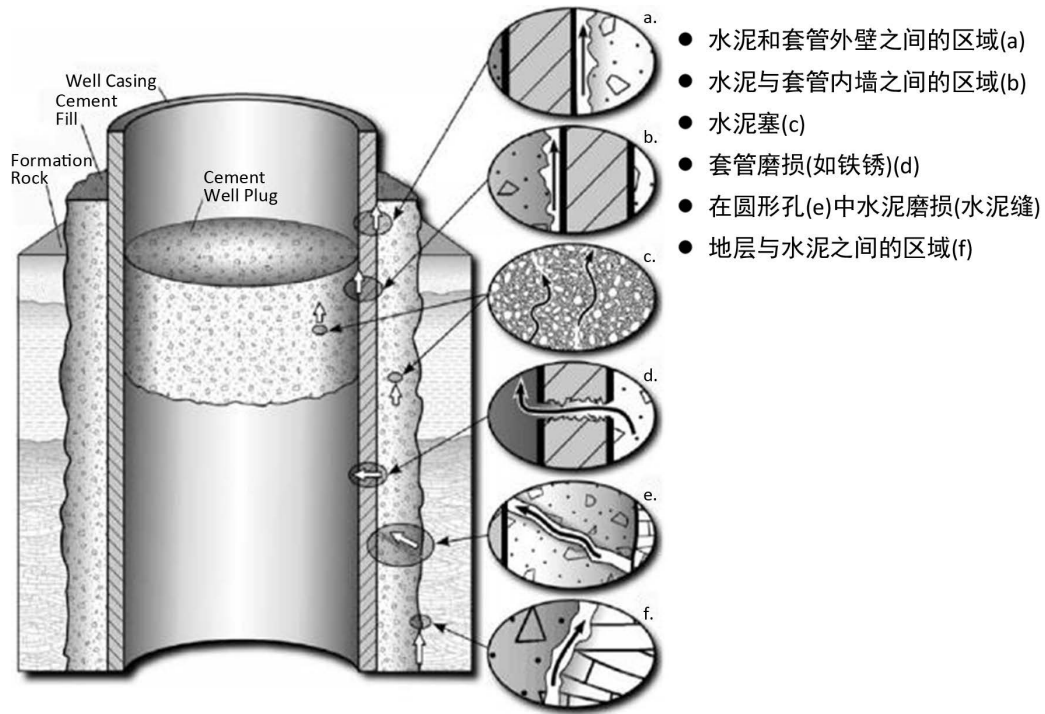


Figure 1. Wellbore schematic diagram (cited from literature 10)  
 图 1. 井筒示意图(引自文献 10)

### 3. CO<sub>2</sub> 的泄漏模型

#### 1) CO<sub>2</sub> 的泄漏速率

造成 CO<sub>2</sub> 泄漏的原因有很多，如管道破裂、地质活动造成封存体不稳定、钻井密封不佳等。其相应的气体泄漏速率( $Q_G$ , mg/s)均可按式(1)进行计算。

$$Q_G = Y C_d Q A p \sqrt{\frac{MK}{RT_G} \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}} \quad (1)$$

气体的泄漏速度与其流动状态有关，因此，在计算气体的泄漏量之前，必须判断气体的流动状态，当  $\frac{P_0}{P} \leq \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}}$  时，气体的流动为临界流；当  $\frac{P_0}{P} > \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K}{K-1}}$  时，气体的流动为次临界流。

其中： $Q_G$  为气体泄漏速度，kg/s； $C_d$  为气体泄漏系数；当裂口形状为圆形时取 1，三角形取 0.95，长方形取 0.9； $A$  为裂口面积，m<sup>2</sup>； $M$  为相对分子质量； $R$  为气体常数，J/(mol·K)； $T_G$  为气体温度，K； $Y$  为流出系数，对于临界流， $Y=1$ ，对于次临界流， $Y$  按照下式计算； $P_0$  为容器内介质压力，Pa； $P$  为环境压力，Pa； $k$  为气体的绝热指数(热容比)，即定压热容  $C_p$  与定容热容  $C_v$  之比，针对矿场条件 CO<sub>2</sub>。查表可知本研究  $k$  取值 1.30。

$$Y = \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{1}{k}} \times \left[1 - \left(\frac{P_0}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]^{\frac{1}{2}} \times \left[\frac{2}{k-1} \times \left(\frac{K+1}{2}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

#### 2) CO<sub>2</sub> 的泄漏浓度的分布

气体在大气中扩散时的模型有很多种，经常采用的有多烟团模式、分段烟羽模式或重气体扩散模式等。一般当事故发生且有害物排放时间较长时(几小时至几天)，一般采用高斯烟羽模式进行泄漏浓度的分

布计算，公式如下：

$$C = \frac{Q_G}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y_r^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z_s + \Delta h - z_r)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z_s + \Delta h + z_r)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (3)$$

式中： $c$  为位于  $s(0,0,z_s)$  的点源在接收点  $r(x_r,y_r,z_r)$  产生的浓度； $\Delta h$  为烟羽抬升高度； $\mu$  为当地风速，m/s； $\sigma_y, \sigma_z$ ，为下风距离  $x_r$ (m)处的水平风向扩散系数和垂直方向扩散系数，具体计算公式如下：

$$\sigma_{j,k}^2 = \sigma_{j,k}^2(t_k) - \sigma_{j,k}^2(t_{k-1}) \quad (4)$$

对于大气扩散系数，一般采用经验公式进行拟合计算，本文按照文献[11]中的计算结果，采用如下经验公式：

$$\sigma = a + bx^g + dx \quad (5)$$

其中水平方向和垂直方向上扩散系数见表 1 和表 2。

**Table 1.** Diffusion coefficient in horizontal direction

**表 1.** 水平方向上的系数

稳定度级别	A	b	g	d	e
A	0.0048	280.7300	0.9311	-72.0300	1.0740
B	0.0010	245.1368	0.9521	-91.0407	1.0500
C	0.0180	266.5212	0.9776	-163.4154	1.0200
D	-0.0220	2172.3657	0.9972	-2104.2353	1.0000
E	0.0030	243.9271	0.9897	-192.9929	1.0100
F	-0.0150	1905.1755	0.9984	-1871.2704	1.0000

**Table 2.** Diffusion coefficient in vertical direction

**表 2.** 垂直方向上扩散系数

稳定度级别	a	b	g	d	e	适宜区间/km
A	0.2116	255.0555	2.9324	128.3861	0.9750	0.01~0.30
	433.5448	463.6611	2.1029	-443.9089	0.0400	0.30~3.10
B	0.0050	29.4599	2.9124	89.0947	0.9270	0.01~0.40
	368.8647	112.0109	1.0909	-373.3432	0.0100	0.40~32.00
C	0.0020	65.9466	0.9155	-4.8161	0.9260	0.01~100.00
D	0.1928	385.5170	0.7029	-352.3391	0.6900	0.01~0.35
	-5.4895	43.6252	0.6430	-7.2937	0.8550	0.35~100.00
E	0.8166	803.2275	0.5165	-782.5406	0.5100	0.01~0.80
	-8.7993	420.0559	0.6342	-389.8360	0.6450	0.80~100.00
F	0.6833	15.1577	0.7375	-1.5122	0.1300	0.01~0.50
	-5.2489	350.1995	0.6116	-33.2868	0.6200	0.50~100.00

\*A 级  $x > 3.10$  km，扩散系数恒等于 5.00 km；B 级  $x > 32.00$  km，扩散系数恒等于 5.00 km。

### 3) 烟羽抬升高度

天气状况不同，所采用的计算模型也存在较大的差异。对于长庆油田 H3 项目，根据现场测试并参考往年的气相条件，综合考虑下采用如下的模型来计算烟羽的抬升高度。

$$\Delta H = Q_n^{\frac{1}{3}} \left( \frac{dT_a}{dZ} + 0.0098 \right)^{-\frac{1}{3}} U^{-\frac{1}{3}} \quad (6)$$

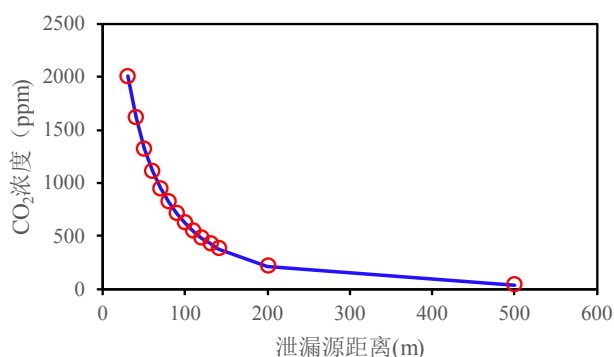
式中： $dT_a/dZ$  为排气筒以上大气的温度梯度，K/m； $U$  为排气筒出口的平均风速，m/s。 $Q_h$  为烟羽的热释放率，kJ/s，其具体的计算公式如下所示：

$$Q_h = 0.35 p_a Q_v \frac{\Delta T}{T_s} = 0.35 p_a Q_v \frac{T_s - T_a}{T_s} \quad (7)$$

式中： $Q_v$  为烟羽实际排放率， $m^3/s$ ； $\Delta T$  为排气筒出口温度与环境温度差，K； $T_s$  为排气筒的出口温度，K； $T_a$  为环境温度，K，如果没有实测值，可参考邻近气象台的气象资料。

#### 4. 实例井筒泄漏分析

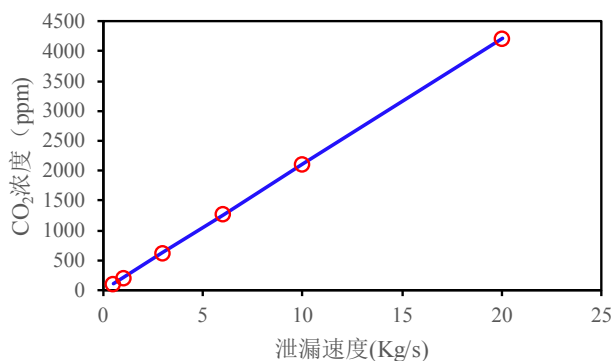
测试时大气压为 87,323 Pa，环境温度为 20℃，排气筒高度方向上的温度梯度为 0.006 K/m。在 CO<sub>2</sub> 泄漏过程中，井筒压力急剧减小，至井口时油压为 0.2 MPa，井筒温度为 35℃。油管泄漏口的形状为圆形，泄漏口的油管直径为 76 mm (3<sup>1/2</sup>in)，泄漏系数  $C_d$  取 1。测试点的地表平均风速为 3 m/s。当泄漏气体为 CO<sub>2</sub> 时，其相对分子质量  $M$  为 44 g/mol，气体常数  $R$  为 8.314 J/(mol·K)。计算烟羽高度时，泄漏口的平均风速为 20 m/s，其实际排烟速率为 0.01 m<sup>3</sup>/s。根据上述理论公式精算后，井场附件 CO<sub>2</sub> 浓度的分布如下图所示：



**Figure 2.** The relationship between the different distances of leak points and CO<sub>2</sub> concentration

**图 2.** 泄漏点不同距离与 CO<sub>2</sub> 浓度关系

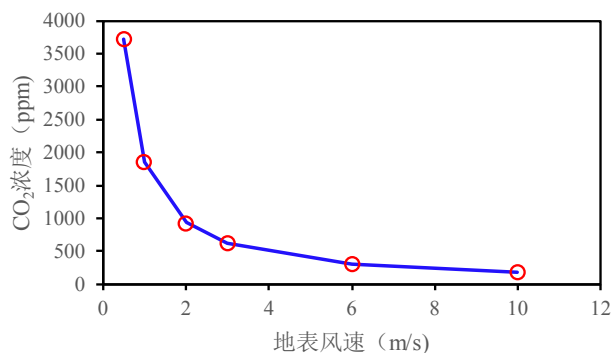
由图 2 可发现，在其他参数一定的情况下，空气中 CO<sub>2</sub> 的浓度随着测试点离泄漏点距离的增加而成指数规律下降。



**Figure 3.** CO<sub>2</sub> concentration at 100 meters from the leak point under different leak velocities

**图 3.** 不同泄漏速度下距泄漏点 100 米处 CO<sub>2</sub> 浓度

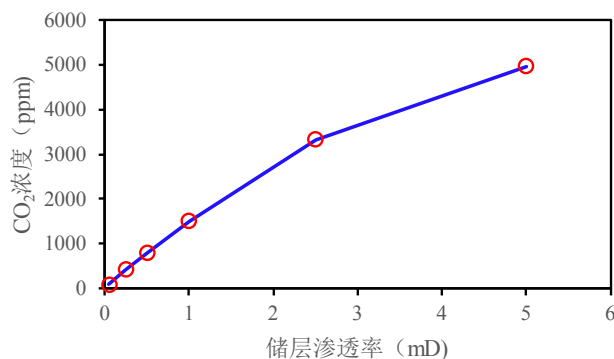
由图 3 可发现, 在不同泄漏速度下, 距离泄漏点 100 米处的 CO<sub>2</sub> 浓度与泄漏速度成正相关关系。



**Figure 4.** CO<sub>2</sub> concentration at 100 meters from the leak point under different surface wind speeds

**图 4.** 不同地表风速下泄漏点 100 米处 CO<sub>2</sub> 浓度

在 CO<sub>2</sub> 的泄漏监测中, 测试点的距离及测试时的风速对 CO<sub>2</sub> 的浓度监测具有显著的影响(图 4)。基于之前的计算方法, 本文研究了在不同的测试距离及风速下空气中的 CO<sub>2</sub> 浓度的变化规律。在同一测试距离下, 空气中 CO<sub>2</sub> 的浓度会随着风速的降低而增加。



**Figure 5.** CO<sub>2</sub> concentration at 100 meters from the leak point under different reservoir permeability

**图 5.** 不同储层渗透率下泄漏点 100 米处 CO<sub>2</sub> 浓度

渗透率会影响 CO<sub>2</sub> 从储层向井筒流动的速度, 因此储层的渗透率越高, 井筒泄漏 CO<sub>2</sub> 的速率会越大, 距离泄漏点 100 米处监测点的 CO<sub>2</sub> 的浓度也会越高(图 5)。但受井筒流动压降的影响, 二者正相关但并不严格满足线性关系。

## 5. CO<sub>2</sub> 泄漏风险评估

### 1) 影响范围预测

根据泄漏气体的扩散浓度, 并参考 CO<sub>2</sub> 的危害浓度临界值, 确定气体泄漏的影响区域并将泄漏附近区域划分为致命区、严重伤害区、不良反应区和安全区。影响范围的划分使工作人员在泄漏事故发生时能比较迅速地判断周边某处的安全状态并及时做出相应的策略, 在最短的时间内制定出应急方案, 将生命安全和财产损失降到最小。

按照上述计算过程, 当监测点离 CO<sub>2</sub> 泄漏点的高度为 1 m 时, 将不同风速下各个区域的最大影响半径列入表 3。由表 3 可知, 随着风速的增加, 相应各个区域的半径逐渐减小。因为随着风速增加, 空气中 CO<sub>2</sub> 稀释得更快, 其影响范围也会越小。

**Table 3.** Environmental risk values of CO<sub>2</sub> leakage at different wind speeds  
**表 3.** 不同风速下 CO<sub>2</sub> 泄漏环境风险值

风速(m/s)	最大半径(m)		质量分数	ppm
	1.0	3.0		
致命区	5.8	2.2	10	100,000
严重伤害区	10.2	4.3	4	40,000
不良反应区	41.3	19.5	0.5	5000

## 2) 泄漏风险评价

针对长庆油田 H3 项目, 本案例采用信息扩散法进行泄漏风险评价。因致命区和严重伤害区对工区和附近区域的群众健康和生态环境影响最为严重, 故将其风险值与泄漏处的风险值作等效处理; 不良反应区按照泄漏风险随浓度降低而减小的规则进行处理。泄漏风险分布可按梯形模糊关系进行简化计算, 方法如式(7)所示:

$$r = \begin{cases} r_0 & 0 < x_0 \leq l_0 \\ \frac{r_0}{l-l_0}(l-x_0) & l_0 < x_0 \leq l \\ 0 & x_0 > l \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $r$  为计算点的泄漏风险值;  $r_0$  为泄漏处的风险值;  $l_0$  为严重伤害区最大影响半径, m;  $l$  为最大影响半径, m;  $x_0$  为计算点与泄漏处的距离, m。由于  $l_0$  和  $l$  与危险物质泄漏总量有关, 所以事故不同则泄漏量也不同,  $l_0$  和  $l$  也不同。 $r$  按国内外同类性质风险源的平均风险值计算。对有毒气体的泄漏事故进行风险评价, 不仅需对事故和泄漏源本身进行评价, 同时还应考虑当时的气候条件和周边人群分布状况, 方法如式(8)所示:

$$r_0 = R_1 R_2 R_3 R_4 \quad (8)$$

式中,  $R_1$  为致命概率区内的人口数,  $R_2$  为致命概率,  $R_3$  为事故发生概率,  $R_4$  为出现不利天气概率。

当风速 1 m/s 时, 严重伤害区的最大半径为 5.8 m, 致命概率区内的人口数约 2~3 人,  $D$  稳定度下致命概率近似为 1.99, 事故发生概率为  $2.2 \times 10^{-5}$ , 出现不利天气概率为 0.3。由式(8)可求得  $r_0 = 3.9 \times 10^{-5}$ 。将  $r_0$  带入式(7)得到泄漏处不同区域的泄漏风险值。例如, 在距泄漏源 300 m 处的  $r$  为  $1.18 \times 10^{-5}$ 。泄漏附近不同区域的风险值见表 4。

**Table 4.** Risk values for different areas near leakage sources  
**表 4.** 泄漏源附近不同区域的风险值

据泄漏源的距离/m	风险值
0~100	$1.18 \times 10^{-5}$
300	$6.38 \times 10^{-6}$
500	$2.15 \times 10^{-6}$
2000	0

## 3) 风险分级

根据不同的泄漏风险值可对各类事故进行风险分级, 以便于人们及时了解到所发生事故的危

并在最短的时间内制定应急方案,将损失降到最小。风险分级见表 5。在本案例中,当风速为 1 m/s 时,泄漏源点及距泄漏源点 100 m 处的风险值数量级为  $10^{-5}$ ,与中等危险等级对应,这次事故值得引起重视并采取相应措施。

**Table 5.** The risk classification

**表 5.** 风险分级

风险等级	风险值数量级	危险性	可接受程度
极高	$10^{-3}$	危险性极高	不能接受并马上采取措施
高	$10^{-4}$	危险性中等	应采取相应措施
中等	$10^{-5}$	与游泳事故同属一个等级	能引起注意并采取相应措施
低	$10^{-6}$	与地震或天灾发生的概率相当	不能引起人们的注意
极低	$10^{-7}$	与陨石坠落伤人的概率相当	没人在意

## 6. 结论

根据泄漏气体的扩散浓度,并参考 CO<sub>2</sub> 的危害浓度临界值,确定气体泄漏的影响区域,通过模型计算泄漏区域划分为致命区、严重伤害区、不良反应区和安全区的距离和范围,并对 CO<sub>2</sub> 埋存井筒泄漏的风险等级进行评价。

H3 区域 CCUS 实施过程中井筒泄漏风险评价表明:风速 1 m/s 的泄漏源点及距泄漏源点 100 m 处的环境风险值数量级为  $10^{-5}$ ,与中等危险等级相对应,CO<sub>2</sub> 泄漏引起的事故危险性在井场附近,建议在距离井场中心 50 米范围内的四个方向安装四个用于监测空气中 CO<sub>2</sub> 浓度的实时在线监测装置,实时在线监测 CO<sub>2</sub> 浓度。

## 基金项目

中石油股份公司重大专项项目:CO<sub>2</sub> 驱油与埋存安全风险监控技术研究(编号:2014E-3605)资助。

## 参考文献

- [1] Sun, L. and Chen, W. (2017) Development and Application of a Multi-Stage CCUS Source-Sink Matching Model. *Applied Energy*, **185**, 1424-1432. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.009>
- [2] Chen, W., Wu, Z., He, J., et al. (2007) Carbon Emission Control Strategies for China: A Comparative Study with Partial and General Equilibrium Versions of the China MARKAL Model. *Energy*, **32**, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.01.018>
- [3] Hasan, M.F., First, E.L., Boukouvala, F. and Floudas, C.A. (2015) A Multi-Scale Framework for CO<sub>2</sub> Capture, Utilization, and Sequestration: CCUS and CCU. *Computers & Chemical Engineering*, **81**, 2-21. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.04.034>
- [4] Bachu, S. (2016) Identification of Oil Reservoirs Suitable for CO<sub>2</sub>-EOR and CO<sub>2</sub> Storage (CCUS) Using Reserves Databases, with Application to Alberta, Canada. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **44**, 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.11.013>
- [5] Lacy, R., Serralde, C., Climent, M. and Vaca, M. (2013). Initial Assessment of the Potential for Future CCUS with EOR Projects in Mexico Using CO<sub>2</sub> Captured from Fossil Fuel Industrial Plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **19**, 212-219. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.07.017>
- [6] GCCSI. (2016) The Global Status of CCS: 2016 Summary Report.
- [7] Carroll, S., McNab, W., Torres, S., Singleton, M. and Zhao, P. (2011) Wellbore Integrity in Carbon Sequestration Environments: 1. Experimental Study of Cement-Sandstone/Shale-Brine-CO<sub>2</sub>. *Energy Procedia*, **4**, 5186-5194. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.496>
- [8] Apps, J.A., Zheng, L., Zhang, Y., Xu, T. and Birkholzer, J.T. (2010) Evaluation of Potential Changes in Groundwater



- Quality in Response to CO<sub>2</sub> Leakage from Deep Geologic Storage. *Transport in Porous Media*, **82**, 215-246. <https://doi.org/10.1007/s11242-009-9509-8>
- [9] Doherty, B., Vasylykivska, V., Huerta, N.J. and Dillmore, R. (2017) Estimating the Leakage along Wells during Geologic CO<sub>2</sub> Storage: Application of the Well Leakage Assessment Tool to a Hypothetical Storage Scenario in Natrona County, Wyoming. *Energy Procedia*, **114**, 5151-5172. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1669>
- [10] Nordbotten, J.M., Celia, M.A., Bachu, S. and Dahle, H.K. (2005) Semianalytical Solution for CO<sub>2</sub> Leakage through an Abandoned Well. *Environmental Science & Technology*, **39**, 602-611. <https://doi.org/10.1021/es035338i>
- [11] Boyd, A.D. (2016) Risk Perceptions of an Alleged CO<sub>2</sub> Leak at a Carbon Sequestration Site. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **50**, 231-239. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.03.025>
- [12] Oldenburg, C.M. and Unger, A.J. (2003) On Leakage and Seepage from Geologic Carbon Sequestration Sites. *Vadose Zone Journal*, **2**, 287-296. <https://doi.org/10.2136/vzj2003.2870>
- [13] Keating, E., Dai, Z., Dempsey, D. and Pawar, R. (2014) Effective Detection of CO<sub>2</sub> Leakage: A Comparison of Groundwater Sampling and Pressure Monitoring. *Energy Procedia*, **63**, 4163-4171. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.448>
- [14] Leytem, A.B., Dungan, R.S., Bjorneberg, D.L. and Koehn, A.C. (2011) Emissions of Ammonia, Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide from Dairy Cattle Housing and Manure Management Systems. *Journal of Environmental Quality*, **40**, 1383-1394. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0515>
- [15] 张志雄, 谢健, 戚继红, 等. 地质封存二氧化碳沿断层泄漏数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2018(2): 109-116.
- [16] 马劲风, 杨杨, 蔡博峰, 等. 不同类型二氧化碳地质封存项目的环境监测问题与监测范围[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 10-14.
- [17] 赵兴雷, 崔倩, 王保登, 等. CO<sub>2</sub>地质封存项目环境监测评估体系初步研究[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 15-20.
- [18] 周颖, 蔡博峰, 曹丽斌, 等. 中国碳封存项目的环境应急管理研究[J]. 环境工程, 2018, 36(2): 1-5.
- [19] Cortis, A. and Oldenburg, C.M. (2009) Short-Range Atmospheric Dispersion of Carbon Dioxide. *Boundary-Layer Meteorology*, **133**, 17-34. <https://doi.org/10.1007/s10546-009-9418-y>
- [20] Yu, Y.S., Li, Y. and Lu, H.F. (2011) Global Field Synergy Optimization and Entropy Generation Assessment for CO<sub>2</sub> Capture Process. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 649-658. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.03.008>
- [21] Schnelle, K.B. and Dey, P.R. (2000) Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide. McGraw-Hill Professional Publishing, 135-146.
- [22] Gasda, S.E., Nordbotten, J.M. and Celia, M.A. (2009) Vertical Equilibrium with Sub-Scale Analytical Methods for Geological CO<sub>2</sub> Sequestration. *Computational Geosciences*, **13**, 469-481. <https://doi.org/10.1007/s10596-009-9138-x>
- [23] Mao, Y., Zeidouni, M. and Duncan, I. (2017) Temperature Analysis for Early Detection and Rate Estimation of CO<sub>2</sub> Wellbore Leakage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **67**, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.09.021>
- [24] Kopp, A., Binning, P.J., Johannsen, K., Helmig, R. and Class, H. (2010) A Contribution to Risk Analysis for Leakage through Abandoned Wells in Geological CO<sub>2</sub> Storage. *Advances in Water Resources*, **33**, 867-879. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.05.001>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)