

无人机遥感监测技术在 CO₂ 地质封存泄漏风险事故监测中的应用

滕 腾, 陈新新, 李鹏飞, 马俊杰

(西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘要: [目的] 通过无人机遥感监测技术对泄漏 CO₂ 响应效果的研究, 为 CO₂ 的捕捉与封存 (carbon capture and storage, CCS) 泄漏风险事故的新型监测技术的应用提供理论基础。[方法] 通过环境背景值监测、试验监测、理论模拟和数据对比分析的方法为无人机遥感监测技术对 CCS 泄漏风险事故的响应效果进行了研究。[结果] 以泄放 CO₂ 引起环境中 CO₂ 浓度变化幅度超过某一断面环境背景最高值一个标准差作为响应浓度差, 在试验条件下无人机在距离泄漏源 10 m, 高 9 m 的位置响应到浓度变化, 响应浓度为 502 mg/kg, 此处的环境背景值为 448 mg/kg。通过高斯模型进行计算发现该试验条件下泄放的 CO₂ 扩散至此处的理论数值为 40 mg/kg。[结论] 无人机遥感监测系统能够对泄漏的 CO₂ 做出响应, 能够应用到实际 CCS 泄漏事故中, 且因为工业尺度下的泄漏量很大, 无人机遥感监测平台能够对大空间场做出有效的监测响应。

关键词: CO₂ 地质封存; 无人机遥感监测; 高斯模型; 环境背景值; 泄漏风险

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2018)03-0136-07

中图分类号: TE992.1, X141

文献参数: 滕腾, 陈新新, 李鹏飞, 等. 无人机遥感监测技术在 CO₂ 地质封存泄漏风险事故监测中的应用 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 136-142. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.022. Teng Teng, Chen Xinxin, Li Pengfei, et al. Application of unmanned aerial vehicle remote sensing monitoring technology on CO₂ sequestration and leakage risk assessment [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 136-142.

Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing Monitoring Technology on CO₂ Sequestration and Leakage Risk Assessment

TENG Teng, CHEN Xinxin, LI Pengfei, MA Junjie

(College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

Abstract: [Objective] Using unmanned aerial vehicle(UAV) remote sensing monitoring technology to monitor the response of leaked CO₂, in order to provide a theoretical basis for monitoring accident risk of carbon capture and storage(CCS). [Methods] By environmental background value monitoring, experimental monitoring, theoretical simulation and data comparison analysis, the response of UAV remote sensing monitoring platform to the risk assessment of CCS leakage was studied. [Results] The standard deviation of CO₂ concentration change in the environment caused by CO₂ emission that over the highest value of the environmental background of a section, was taken as the response concentration difference. Under the experimental conditions, the UAV was located at a horizontal distance of 10 m and a vertical distance of 9 m from the source of leakage. The response concentration was 502 mg/kg, when the environmental background value was 448 mg/kg. Calculation from Gaussian model showed that the theoretical value of the CO₂ diffusion under the experimental conditions at the experimental location was 40 mg/kg. [Conclusion] The UAV remote sensing monitoring platform can respond to the leaked CO₂ and can be applied to the actual CCS leakage accident risk assessment. As the large amount of leakage under the industrial scale, the UAV remote sensing monitoring platform can provide effective monitoring for large space field.

收稿日期: 2018-01-18

修回日期: 2018-02-14

资助项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)“CO₂ 地质封存关键技术”(2012AA0501030)

第一作者: 滕腾(1992—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 研究方向为生态规划、环境影响评价及 CO₂ 地质封存监测技术。E-mail: 904301243@qq.com.

通讯作者: 马俊杰(1962—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境影响评价、生态规划研究以及 CO₂ 地质封存监测技术研究。E-mail: 603828872@qq.com.

Keywords: CO₂ geological storage; UAV remote sensing monitoring; Gaussian model; environmental background value; risk of leakage

近年来,由化石燃料燃烧产生的温室气体(GHG)大量排放造成的全球变暖的问题引起了社会广泛关注。自工业革命以后,工业生产和人类生活的能源供给主要来源于传统化石燃料的燃烧。现如今,经济社会的高速发展更是加大了人类的能源需求量,致使大量的化石燃料被使用,由于其燃烧产生的大量的温室气体包括 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等引发了多种生态环境问题。其中 CO₂ 是导致全球气候变暖和温室效应的最主要原因,控制并减少大气中的 CO₂ 是抑制全球气候变暖、缓解温室效应的重要手段。且二氧化碳的捕捉与封存^[1-2](carbon capture and storage, CCS)被认为是唯一能在工业尺度上大规模削减温室气体排放量的技术方法。大量的 CO₂ 泄漏会对气候、植被—土壤、地下水以及人类身体健康造成影响,甚至诱发地震^[3-6],因此对 CCS 进行泄漏监测具有十分重要的意义。

随着无人机技术快速发展,无人机遥感监测技术已被视为航空遥感和航天遥感后的第三代遥感技术,基于无人机遥感平台的大气环境监测系统具有立体监测、响应速度快、监测范围广、地形干扰小等优点,有效弥补了传统以环境监测车和便携式设备为主体的大气环境监测体系的不足,是目前环境监测方面重要的发展方向之一^[7-8]。本文拟通过背景值监测,理论模拟,试验监测 3 个方面对无人机遥感监测平台在 CCS 泄漏风险事故监测上的响应效果进行研究。

1 研究方法

本文主要是研究无人机遥感监测平台在 CCS 泄漏风险事故监测上的响应效果,故在进行研究之前提出了一个相对完善的研究方法体系。该方法中主要包括试验场环境背景值监测、理论模拟以及飞行监测试验这 3 个方面,并通过 3 组数据的对比分析确定无人机遥感监测平台对 CCS 泄漏风险事故的响应效果。

1.1 环境背景值监测

在进行释放监测试验之前,对试验场的环境背景值进行监测具有十分重要的意义。环境背景值对于释放实验的监测有着非常重要的作用,只有获取了有效的、稳定的环境背景值,才能较为可信的判断监测仪器响应到的 CO₂ 浓度变化数据是由于实验释放造成的。本次试验搭载的监测平台选用的是由深圳圣凯安公司研发设计的一款针对无人机平台的气体监测仪,主要包括采样单元、数据传输单元、数据分析单

元等,采样单元监测的数据可通过数传或 GPRS 传输到地面显示平台进行实时监控、数据管理以及图表生成,其采样单元是基于 NDIR 红外吸收检测原理的气体传感器模组,采用的是国外进口光源、特殊结构的光学腔体和双通道探测器,监测仪器在使用之前已经进行了校准,获取的数据不需要处理,可直接显示实时浓度数据。

由于无人机的旋翼会对旋翼下方空气产生扰动,在经过多次试验验证和综合考虑本次试验采用的无人机平台的载荷问题后,选定将监测平台放置在无人机旋翼下方 2 m 处。本次环境背景值监测选取了试验场的 3 个断面,分别将 5, 9 和 13 m 高度作为监测断面。

1.1.1 飞行高度为 5 m 的环境背景值监测 基于无人机飞行平台的记录数据,并在到达预定位置后开启监测仪器进行数据监测和记录,其结果如表 1 所示。

表 1 飞行高度为 5 m 的环境背景 CO₂ 浓度分布

纬度(N)	经度(E)	CO ₂ 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	实际高度/ m
34.149 33	108.874 6	490	4.9
34.149 31	108.874 6	480	5.0
34.149 31	108.874 6	460	5.0
34.149 32	108.874 6	473	5.1
34.149 35	108.874 6	463	5.0
34.149 37	108.874 5	493	4.9
34.149 39	108.874 5	496	5.0
34.149 39	108.874 5	463	5.0
34.149 39	108.874 6	463	5.0
34.149 39	108.874 6	466	5.0
34.149 37	108.874 6	476	5.0
34.149 35	108.874 6	476	5.0
34.149 32	108.874 6	476	5.0
34.149 31	108.874 6	476	4.9
34.149 31	108.874 7	476	5.0
34.149 32	108.874 7	480	5.0
34.149 36	108.874 7	465	4.9
34.149 40	108.874 7	453	5.0
34.149 42	108.874 7	460	4.9
34.149 43	108.874 7	473	5.0
34.149 43	108.874 7	473	5.0
34.149 40	108.874 8	493	5.0
34.149 40	108.874 8	450	5.0
34.149 37	108.874 8	473	5.1
34.149 33	108.874 8	466	5.0
34.149 32	108.874 8	464	5.0
34.149 31	108.874 8	460	5.1

注:平均浓度为 472 mg/kg;浓度数据标准差为 12。

通过监测数据发现,在实验场的 5 m 高的断面下,CO₂ 浓度最高值为 496 mg/kg,最低值为 450 mg/kg,平均浓度为 472 mg/kg,5 m 断面层的波动幅度为 46 mg/kg,断面浓度的标准差为 12,导致断面 CO₂ 浓度出现波动主要原因是环境风速的不稳定、无人机旋翼速度变化造成的空气扰动和距离地面太低受地面环境干扰情况较大。

1.1.2 飞行高度为 9 m 的环境背景值监测 表 2 是根据无人机飞行数据和监测平台记录下的不同位置的浓度数据。

表 2 飞行高度为 9 m 的环境背景 CO₂ 浓度分布

纬度(N)	经度(E)	CO ₂ 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	实际高度/ m
34.149 33	108.874 6	446	9.0
34.149 33	108.874 6	440	9.2
34.149 33	108.874 6	430	9.1
34.149 36	108.874 6	430	9.1
34.149 40	108.874 6	453	9.1
34.149 40	108.874 6	483	9.1
34.149 41	108.874 6	456	9.1
34.149 41	108.874 6	433	9.0
34.149 40	108.874 7	460	9.0
34.149 38	108.874 6	433	9.0
34.149 35	108.874 6	433	9.0
34.149 32	108.874 6	446	9.1
34.149 32	108.874 7	440	9.1
34.149 33	108.874 7	473	9.0
34.149 33	108.874 8	446	8.9
34.149 38	108.874 8	466	9.0
34.149 41	108.874 8	460	9.0
34.149 41	108.874 8	440	9.0
34.149 41	108.874 8	446	9.0
34.149 42	108.874 9	460	9.1
34.149 39	108.874 8	463	9.0

注:平均浓度为 449 mg/kg,浓度数据标准差为 15。

通过监测数据发现,在实验场的 9 m 高的断面下,CO₂ 浓度最高值为 483 mg/kg,最低值为 430 mg/kg 平均浓度为 449 mg/kg,监测数据的标准差为 15。相较于 5 m 断面的 46 mg/kg 的波动幅度 9 m 断面的波动幅度达到 53 mg/kg,相对稳定性略微较低,但总体浓度相较于 5 m 断面有所较低,平均浓度相差了 23 mg/kg。

1.1.3 飞行高度为 13 m 的环境背景值监测和 CO₂ 垂直浓度监测 在进行 13 m 断面层的环境背景值监测的过程中没有完全按照预设航线进行飞行,在飞行半个断面后在垂直高度上不断拉高高度至 40 m

左右,分别在多个高度下获取了 CO₂ 浓度值,浓度分布如表 3 所示。

表 3 飞行高度为 13 m 的环境背景 CO₂ 浓度分布

纬度(N)	经度(E)	CO ₂ 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	高度/ m
34.149 34	108.874 5	433	13.0
34.149 35	108.874 5	446	13.1
34.149 36	108.874 5	460	13.0
34.149 36	108.874 6	420	13.0
34.149 37	108.874 6	463	12.9
34.149 37	108.874 7	470	13.1
34.149 37	108.874 8	446	13.0
34.149 36	108.874 8	446	13.1
34.149 35	108.874 8	473	13.0
34.149 36	108.874 8	453	13.0
34.149 37	108.874 8	453	13.1
34.149 38	108.874 7	473	13.0
34.149 39	108.874 6	433	13.0
34.149 38	108.874 5	446	13.0
34.149 39	108.874 5	426	12.9
34.149 39	108.874 5	420	13.0

注:平均浓度为 448 mg/kg;浓度数据标准差为 18。

在 13 m 的断面层下,CO₂ 浓度最高值为 473 mg/kg,最低值为 420 mg/kg,平均浓度为 448 mg/kg,13 m 下波动幅度为 53 mg/kg 与 9 m 断面层的波动幅度一样,但通过监测数据标准差发现,13 m 断面层的背景浓度数据的标准差要高于 9 m 断面层,但平均浓度有所降低且与 9 m 高度的断面层浓度相近。

表 4 为同一位置不同高度下的 CO₂ 浓度分布。由表 4 可知,在同一位置不同高度下的 CO₂ 浓度变化幅度较小,最高值浓度出现在 31.9 m 的高度下为 486 mg/kg,最小值为 15 m 的高度下的 453 mg/kg。

表 4 同一位置不同高度下 CO₂ 垂直浓度分布

纬度(N)	经度(E)	CO ₂ 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	高度/ m
34.149 36	108.874 5	465	5.9
34.149 36	108.874 5	453	13.0
34.149 36	108.874 5	473	24.3
34.149 36	108.874 5	486	29.9
34.149 36	108.874 5	466	34.6
34.149 36	108.874 5	460	39.0

通过多个断面的环境背景值监测发现,在同样的条件下试验场内的 CO₂ 浓度随着高度在不断变化,

从 3 个断面层的平均浓度的角度来看,随着高度的升高,环境中的 CO₂ 浓度降低,可能与 CO₂ 本身具有沉降性有关,但是以某个高度点的一个浓度数据对比发现浓度与高度的关系不是很明显,究其原因可能是试验场相对较小,无人机旋翼对试验场的空气流动造成了很大的扰动,导致飞行过程中监测到的是一个相对不稳定的空气场,但是在实际监测过程中同样存在无人机旋翼的干扰,同样条件下的背景值才更具有参考意义;通过断面层监测数据的标准差发现随着高度的增加,监测数据的离散程度升高,可能是断面层越高大气环境越不稳定导致的。普遍认为在全球环境中,CO₂ 在空气中的含量在 380~390 mg/kg,由于试验场所处位置周围有多处高层建筑和居民点,人类活动频繁且试验当天环境污染程度较高,雾霾严重,风速较小等原因导致试验场 CO₂ 浓度处于较高水平。

1.2 飞行监测试验

1.2.1 试验方案 本次试验是为了模拟 CCS 项目中出现的泄漏风险事故,但由于试验条件所限,不可能做到工业大尺度下的泄漏事故,故本次试验采取的泄放流量为 30 g/s,总泄放时长为 420 s。试验中采用搭载了减压阀和流量计的大容量 CO₂ 储气瓶作为稳定泄漏源,将气瓶平放,源高度视为 0。具体试验方案如图 1 所示。

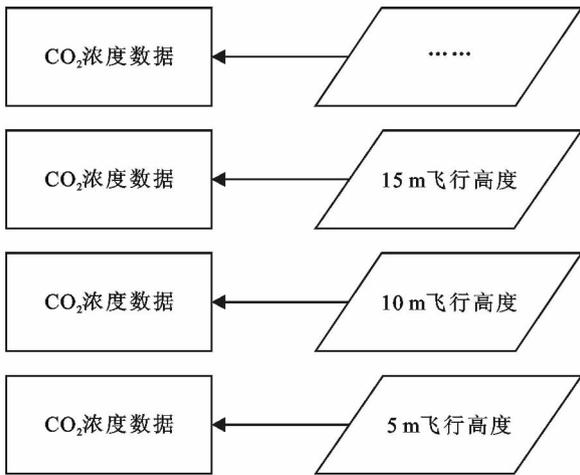


图 1 飞行实验方案

1.2.2 飞行监测航线 在进行试验时,在飞行过程中由于试验场环境的变化导致无法按照预先设计的航线进行飞行。在考虑试验场环境的实际情况后,决定以逆风向进行飞行,且以正对泄放源的方向进行飞行监测。

1.2.3 数据记录与分析 由于监测平台和飞行平台具有自主记录数据的功能,在试验后通过相关技术手段获取了监测数据和飞行记录数据。本次试验将引

起环境背景值浓度变化达到 3 个标准差以上(与平均值的偏差超过 3 倍标准差的测定值就可称为高度异常值)视为监测仪器对于泄放 CO₂ 的响应。将获取的监测数据与飞行数据进行整合后的数据见表 5。

表 5 整合后的 CO₂ 浓度分布

纬度(N)	经度(E)	CO ₂ 浓度/ (mg · kg ⁻¹)	高度/ m
34.149 38	108.874 70	413	9.2
34.149 37	108.874 80	433	9.2
34.149 37	108.874 80	466	9.2
34.149 38	108.874 80	473	9.2
34.149 39	108.874 80	502	9.2
34.149 38	108.874 90	512	8.4
34.149 39	108.874 90	540	5.8
34.149 38	108.874 90	566	5.7
34.149 38	108.874 90	520	5.2
34.149 38	108.874 90	566	4.3
34.149 38	108.874 90	573	5.0
34.149 37	108.874 90	533	5.7
34.149 39	108.874 80	563	5.7
34.149 39	108.874 80	526	6.5
34.149 40	108.874 80	626	5.8
34.149 40	108.874 80	613	5.8
34.149 40	108.874 80	646	5.8
34.149 41	108.874 80	660	5.8
34.149 41	108.874 80	746	5.8
34.149 40	108.874 80	660	5.8
34.149 40	108.874 80	613	5.8
34.149 38	108.874 80	666	5.8
34.149 39	108.874 70	606	5.0

注:平均浓度为 566 mg/kg。

通过整合后的数据发现,再与环境背景值进行对比后,以引起环境中 CO₂ 变化幅度超过背景浓度值最高的值的 1 个标准差作为响应浓度,此处环境背景值平均浓度为 449 mg/kg,最高浓度为 483 mg/kg,监测数据标准差为 15。此条件下监测仪器第一次响应到由于泄放导致环境中的 CO₂ 发生变化的浓度是 502 mg/kg。

1.3 试验条件下的高斯模型理论模拟

对于大气中的污染物的扩散情况的预测往往都会以数学模型的方式进行,而高斯烟羽扩散模型^[10-12]更是被广泛应用于污染物扩散方面的研究。目前美国、欧盟以及中国都将其列为环境影响评价中大气环境预测的基本模型,高斯烟羽模型公式下^[13]:

$$c(x, y, z) = \frac{Q_m}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

$$\left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中: $c(x, y, z)$ ——泄漏 CO_2 在 (x, y, z) 点处的质量浓度 (mg/m^3); u ——风速 (m/s); Q_m ——泄漏源的泄放速度 (g/s); H ——有效源高, 等于泄漏源高度和抬升高度之和, 即 $H = H_s + \Delta H$, (m); H_s ——泄漏源高度 (m); ΔH ——抬升高度, 可由抬升模型求得; m ; σ_y, σ_z 分别是 y, z 方向的扩散系数, 是由排放源到计算点的下风向距离, 大气稳定度的函数, 烟羽的排放高度及地表粗糙度决定的。

1.3.1 扩散系数的确定 在中国国家标准中《制定地方大气污染物排放标准的技术原则和方法》(GB3840-91)规定取样时间在 30 min 时, 扩散参数可按下述方法确定。由于大气扩散系数与大气稳定度密切相关, 而大气稳定度又与太阳辐射强度、云量、

风速等气象因子有关, 因此, 扩散系数的确定方法有许多类型, 通常需要首先确定大气稳定度, 然后建立不同温度条件下的风和距离与扩散系数的函数关系, 再由下风向距离求算扩散系数的具体数值。

帕斯圭尔扩散曲线法可根据易得到的气象观测资料直接估算出污染物在大气中的扩散情况。帕斯圭尔首先根据云量、云状、太阳辐射和地面风速等常规气象资料, 将大气的扩散稀释能力划分为 A, B, C, D, E, F 6 个稳定度级别, 然后根据大量的扩散试验数据和理论上的讨论, 用曲线法表示每一个稳定度级别的 σ_y 和 σ_z 随距离的变化。这样就可以用前面的扩散模式进行浓度估算了。

根据常规气象观测资料确定稳定度级别: 帕斯圭尔划分稳定度级别的标准如表 6 所示。

表 6 帕斯圭尔大气稳定度级别

地面风速 ^① / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	太阳辐射状况(白天)			无辐射 (阴天) ^②	云量(夜晚)	
	强	中等	弱		$\geq 5/10$ ^③	$\leq 4/10$
<2	A	A—B	B	D	—	—
2~3	A—B	B	C	D	E	F
3~5	B	B—C	C	D	D	E
5~6	C	C—D	D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D	D

注: ①指距地面 10 m 高处; ②包括白天和夜晚; ③为薄云遮天或低云的情况。

对该标准的划分说明如下: ①稳定度级别中, A 指极不稳定, B 指不稳定, C 指微不稳定, D 指中性, E 指微稳定, F 指稳定; 从 A→F 表示大气扩散能力逐渐减弱; ②稳定度级别 A—B 表示按 A、B 级别数据内插; ③夜间(夜晚)定义为日落前一小时至日出后一小时的时段; ④不论何种天气状况, 夜间前后各一小时算作中性, 即 D 级稳定度; ⑤强太阳辐射对应于碧空下太阳高度角大于 60° 的条件, 弱太阳辐射相当于碧空下太阳高度角从 15° 到 35° 。在中纬度地区, 仲夏晴天的中午为强太阳辐射; 寒冬晴天中午为弱太阳辐射。云量将减少太阳辐射, 在确定太阳辐射时云量应与太阳高度一起考虑。例如, 在碧空下应当是强太阳辐射; 在有碎中云(云量为 $6/9 \sim 9/10$)时要减弱到中等太阳辐射; 在有碎低云时减弱到弱太阳辐射。

对于扩散参数 σ_y 和 σ_z 可按照下式计算:

$$\sigma_y = \gamma_1 x \alpha_1 \quad (2)$$

$$\sigma_z = \gamma_2 x \alpha_2 \quad (3)$$

式中: α_1 ——横向扩散系数回归指数; α_2 ——垂直扩散系数回归指数; γ_1 ——横向扩散系数回归系数; γ_2 ——垂直扩散系数回归系数; x ——距排气筒下风向水平距离。

以上各指数、系数的数值可按照表 7 确定。按表 7 和公式(2), (3)确定的扩散系数 σ_y 和 σ_z 对应的采样时间为 30 min。根据实验场的气象条件和环境状况, 本次实验大气稳定度级别确定为 B 等级, 具体参数见表 7(部分节选)。

表 7 扩散系数幂函数表达式数据

扩散系数	稳定度级别	α_1	γ_1	下风向距离/m
		σ_y	B	
		0.865 014	0.396 353	>1 000
	B—C	0.919 325	0.229 500	0~1 000
		0.875 086	0.314 238	>1000
扩散系数	稳定度级别	α_2	γ_2	下风向距离/m
		σ_z	B	
		1.093 560	0.057 025	>500
	B—C	0.941 015	0.114 682	0~500
		1.007 700	0.075 718	>500

1.3.2 烟羽抬升有效高度的确定 一般情况下, 烟羽抬升的有效高度会因为天气状况的不同而采用不

同的计算模型,本文参考中国国家标准中《制定地方大气污染物排放标准的技術原则和方法》(GB3840-91)。国标公式中在不同情况下都给出了相应的计算公式,并充分的考虑了烟气热源、风速、城市和农村地面粗糙度的不同以及烟气温度与大气温度的差别等相关影响因素。本文根据试验场地测试时的情况和气象条件,选用了以下烟羽抬升模型进行计算^[9]:

$$\Delta H = Q_h^{1/3} \left(\frac{dT_a}{dT_s} + 0.0098 \right)^{-1/3} u^{1/3} \quad (4)$$

式中: ΔH ——烟气抬升高度(m); dT_a/dT_s ——环境温度梯度(K/m); u ——泄露口的排气速度(m/s); Q_h ——烟气热释放率(kJ/s),其具体的计算公式为:

$$Q_h = 0.36 P_a Q_v \frac{\Delta T}{T_s} = 0.35 P_a Q_v \frac{T_s - T_a}{T_s} \quad (5)$$

式中: P_a ——环境大气压力(Pa); Q_v ——实际排烟率(m³/s); ΔT ——烟气出口温度与环境温度差(K); T_s ——烟气出口温度(K); T_a ——环境大气温度(K)

1.3.3 试验条件下的理论数值模拟

(1) 试验场地概况。本次试验场地位于陕西省西安市长安区内,周围建筑相对稀疏,风速风向较为稳定,利于 CO₂ 扩散,同时亦比较适合进行无人机的飞行监控试验。在试验场附近 10 m 左右的地方有一个环境监测站,相关气象资料可以通过监测的记录数据获取。

(2) 试验案例模拟。试验测试时的大气压为 102 900 Pa,环境温度为 2.4 °C,测试时温度在高度方向上的温度梯度为 0.008 K/m。本次试验选择的泄放源为储气瓶。其内部压力为 3.5 MPa,瓶内的

CO₂ 浓度达到 99.99% 以上,气体喷出温度为 272.0 K;泄放口的直径为 30 mm;泄露口为圆状,因此泄漏系数 Cd 可以选择为 1。由于本次试验选择的将储气瓶水平放置可将源高度视为 0;试验场的环境风速为 1.5 m/s,实际排烟率为 0.015 m³/s,泄露口的烟气排出速度为 21.23 m/s。本次试验的泄放气体为 CO₂,其基本物理性质如下:相对分子质量 M 为 44 g/mol,气体常数 R 为 8.314 J/(mol·K)。参照帕斯圭尔稳定度级别,本次试验的大气稳定度定为 B 等级。结合飞行试验的响应数据,在高斯模型下计算在下风向 10 m 处,高度为 9.2 m 的扩散理论浓度。

由于本次飞行监测试验中飞行方向稳定与泄露口正对的下风向,故本次计算将水平方向记为 0,在相关条件下按照式(1)进行高斯模拟,分别计算处在下风向 10 m 处高度为 9.2 m 处的扩散理论浓度为 0.08 g/m³。因为 1.98 g/m³ 相当于 1 000 mg/kg,在本次试验中泄放后的 CO₂ 扩散至下风向 10 m 高度为 9.2 m 处的浓度应为 40 mg/kg,此次飞行试验中响应到的最高浓度为下风向 8 m 高度为 5.8 m 的位置,监测浓度为 746 mg/kg,理论扩散浓度为 690 mg/kg。

2 结果与分析

在本次飞行监测试验中,为了了解无人机遥感监测技术对 CO₂ 的泄漏监测效果,再综合考虑环境背景值、试验监测数据和理论扩散浓度后分别进行了同一位置(从第一次有浓度响应开始)不同高度下的浓度数据分析以及同一高度下不同位置的浓度数据分析(详见表 8—9)。

表 8 环境背景值、监测数据和理论数据的比较

监测点位距离 释放源距离/m	环境背景值/ (mg·kg ⁻¹)	监测浓度/ (mg·kg ⁻¹)	响应浓度(监测浓度— 环境背景值, mg·kg ⁻¹)	理论 CO ₂ 浓度/ (mg·kg ⁻¹)	高度/ m	误差(监测浓度—背景 浓度)/理论浓度
10	463	502	39	40	9.2	0.98
10	465	607	142	591	6.5	0.24
10	465	563	98	495	5.8	0.20

注:由于监测仪器数据记录原因,没有监测到 6.5 m 和 5.8 m 高度下的环境背景值,以 5.9 m 的环境背景值作为参考。纬度 34.149 39,经度 108.874 8 处的位置为下风向距离释放源 10 m 的位置,其他经纬度通过换算确定距离。

表 9 环境背景值、监测数据和理论数据的比较

监测点位距离 释放源距离/m	环境背景值/ (mg·kg ⁻¹)	监测浓度/ (mg·kg ⁻¹)	响应浓度(监测浓度— 环境背景值, mg·kg ⁻¹)	理论 CO ₂ 浓度/ (mg·kg ⁻¹)	高度/ m	对比(监测浓度—背景 浓度)/理论浓度
11	465	666	201	427	5.8	0.47
10	465	563	98	468	5.7	0.21
9	465	646	181	580	5.8	0.31
8	465	746	281	690	5.8	0.41

注:由于监测数据记录原因,没有监测到 5.8 m 高度下的环境背景值,以 5.9 m 的环境背景值作为参考。

通过分析表明,在同一位置(正对泄漏源下风向 10 m 处)监测浓度随着高度在不断变化,变化趋势与高斯模型下的理论数据浓度变化趋势相同,数据对比分析表明在无人机遥感监测系统第一次对泄漏的 CO₂ 做出响应的时候响应浓度与理论浓度差距最小,随着无人机高度下降响应浓度与理论扩散浓度差距越来越大,但是响应浓度总体变化趋势与高斯模型扩散方式相同。

以 5.8 m 作为基准高度(其中一组由于无人机不稳定的原因选取 5.7 m 作为参考)进行同一高度不同位置的数据对比发现,从距离泄漏源 10 m 处开始越靠近泄漏源的位置响应到的浓度越高,但在距离 11 m 处响应浓度比 10 m 处更高的浓度,可能是由于无人机旋翼速度变化和飞行轨迹的原因扰乱了试验场内的 CO₂ 分布。

研究还发现,在无人机第一次对泄漏的 CO₂ 做出响应时,响应浓度与理论浓度差距最小,在其他位置响应浓度与理论浓度差距很大。综合考虑后可能是如下原因造成的:

(1) 由于泄漏后的气体会在开始扩散后与空气发生稀释作用,导致泄漏的 CO₂ 很难被完全捕捉到,尤其在泄漏强度很小的时候基本上在监测到之前就已经被稀释了。

(2) 无人机的旋翼会对空气造成扰动,造成无人机周围的空气流场发生变化,导致泄漏后的 CO₂ 更加快速的被稀释;由于无人机在进行位置变化和保持稳定的过程中会改变旋翼的转速,导致无人机周围的空气流场变化更加复杂;通过监测数据也能发现无人机越靠近泄漏源对扩散的影响越大,如果靠得太近甚至会直接改变泄漏后 CO₂ 的扩散方式。

(3) 由于试验场特殊的环境状况,在进行监测的过程中发现试验场空气中的 CO₂ 浓度处在一个相对较高的水平,这也加大了无人机遥感监测平台对泄漏后的 CO₂ 响应难度。

3 结论

由于 CCS 技术在减排方面的巨大优势,引起社会的广泛关注,但是由于其存在一定的泄漏风险性。通常一个 CCS 项目往往会在埋存场注入大量的 CO₂,一旦发生泄漏事故可能会造成严重的后果,所以目前需要一种安全、可靠、能够快速响应的监测技术来对其进行监测。考虑到无人机的各方面优势,本文试图利用无人机搭载监测仪器的方式来对 CCS 项目中的泄漏风险事故进行监测。本文通过高斯模型计算和实际监测数据表明无人机遥感监测技术能够

应用到实际 CCS 项目的泄漏风险监测中。

通过本次试验研究表明,无人机遥感监测系统完全能够对 CCS 泄漏后的 CO₂ 做出响应,能够应用到实际项目中。无人机遥感监测平台在越靠近泄漏源的地方对泄漏后的 CO₂ 扩散情况影响越大,甚至在距离很小的情况下会直接改变其扩散方式。本试验采用的无人机遥感监测平台能够响应到的泄漏的 CO₂ 的极值理论浓度为 40 mg/kg。在实际应用中工业尺度的泄漏量往往是一个很大的值,无人机遥感监测系统能够响应到一个很大的空间场,具有实际应用意义。

[参 考 文 献]

- [1] 王亮方,刘辉煌. 国外 CCS 技术与产业化研究综述[J]. 系统工程,2013(8):81-86.
- [2] Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Metz B, Davidson O, et al. Carbon Dioxide Capture and Storage[J]. Mrs Bulletin, 2008, 33(4):303-305.
- [3] 聂莉娟,马俊杰,赵雪峰,等. 模拟 CCS 技术 CO₂ 泄漏对 C₃、C₄ 作物土壤化学性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015,29(5):200-205.
- [4] 韩枫,邓红章,李春荣,等. 土壤高浓度二氧化碳对植物生理生化特性的影响[J]. 应用化工,2017,46(3):422-425.
- [5] 李毅,张可霓,王笑雨. CO₂ 地质封存泄漏对浅层地下水影响的分析评价[J]. 工程勘察,2014,42(11):44-50.
- [6] 魏晓琛,李琦,邢会林,等. 地下流体注入诱发地震机理及其对 CO₂ 地下封存工程的启示[J]. 地球科学进展, 2014,29(11):1226-1241.
- [7] 胡堃. 基于无人机遥感平台的震后灾情监测系统[J]. 科协论坛,2009(1):100-101.
- [8] 谢涛,刘锐,胡秋红,等. 基于无人机遥感技术的环境监测研究进展[J]. 环境科技,2013,26(4):55-60.
- [9] 李君,翁力,赵兴雷,等. 神华鄂尔多斯 CCS 封存场地 CO₂ 泄漏预测研究[J]. 化学工程,2015,43(11):11-15.
- [10] 李琦,石晖,杨多兴. 碳封存项目井喷 CO₂ 扩散危险水平分级方法研究[J]. 岩土力学,2016,37(7):2070-2078.
- [11] 马登龙,邓建强,张早校. 地质封存中 CO₂ 泄漏的非稳态扩散数值模拟研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(9):102-107.
- [12] Hanna S R, Briggs G A, Hosker R P, et al. Handbook on atmospheric diffusion[M] // Handbook on atmospheric diffusion: Technical Information Center, U. S. Department of Energy, 1982.
- [13] 马俊杰. 环境质量评价原理与方法[M]. 西安:地图出版社,1997.