

低射气介质地区浅部土壤氡气迁移规律研究

李 伟¹, 刘鸿福^{1,*}, 张新军¹, 陈 峰², 梁桂玲²

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 新奥气化采煤有限公司, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要: 以内蒙古乌兰察布低放射性地区所测氡浓度作为分析对象, 运用分形理论, 提出了氡浓度分形分析法, 得到在坑深 30~60 cm 范围内氡浓度分布的分形规律和分形维数。结果表明, 不同坑深下, 氡气分布具有很强的自相似性, 符合分形规律, 且分形维数在坑深 40 cm 左右达最小值。氡气浓度均值变化系数定量地表征了不同坑深下氡浓度变异程度, 得出坑深 40 cm 左右变化率最小, 分布相对稳定。两种方法相结合表明, 野外测氡时, 坑深取 40 cm 效果较好。

关键词: 氡浓度; 活性炭; 氡气测量; 分形理论

中图分类号: TL99 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2013)02-0312-05

doi: 10.7538/yzk.2013.47.02.0312

Research on Radon Migration Rules in Shallow Soil of Low Radioactive Containing Material

LI Wei¹, LIU Hong-fu^{1,*}, ZHANG Xin-jun¹, CHEN Feng², LIANG Gui-ling²

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. ENN Coal Gasification Mining Co., Ltd., Ulanchar 012000, China)

Abstract: Taking field measuring radon concentration in Ulanchar, China as the analytical objects, radon concentration fractal method was proposed with adopting fractal theory, and the fractal laws and the fractal dimensions for the distribution laws of radon concentration were obtained within the depth range from 30 cm to 60 cm. The results indicate that the radon distribution has strong self-similarity according to fractal laws and the minimum value of fractal dimensions is reached at the depth of 40 cm. The factor of mean value difference quantitatively expressed the extent of variation for radon concentration under different depths, and the same result with radon fractal measuring method was got. Two methods show that the best buried depth for field radon equipment is 40 cm.

Key words: radon concentration; activated carbon; radon measurement; fractal theory

氡气作为一种地下信息指示性示踪剂, 在工程应用(采空区探测、煤炭气化地下火区追 溯、隐伏构造勘查、油气勘探等)中取得了显著效果^[1-3]。探测氡运移的内在机制^[4-5], 前人已

收稿日期: 2011-11-30; 修回日期: 2012-02-09

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2011AA050102); 山西省青年基金资助项目(2009021007-1)

作者简介: 李 伟(1987—), 男, 山西平遥人, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业

*通信作者: 刘鸿福, E-mail: lhfcxp@163.com

作了大量工作,但在多深的坑(孔)中进行野外氡气测量受干扰因素最小方面的文献报道较少,文献[6-7]在山西就气温、地温和气压因素的变化研究了浅部土壤中氡气迁移规律,得出野外氡气采样深度以40 cm左右为最佳。

自Mandelbrot^[8]于1967年提出分形概念以来,其定量表达直观性强、实用化程度高等优点逐步在科学和工程应用中显现出来,研究领域得到拓宽^[9-14]。野外氡气测量受气温、气压、湿度等因素影响,其分布呈现出非均匀性和各向异性,因此,要保证采集氡气能较好地反映地下信息,需确定浅部土壤测氡采样器的合适深度。氡气分布受地表因素作用具有随机性,但分形几何学为定量描述和探索不规则事物变化的复杂性提供了有力工具,有效地解决了这一问题。本文运用分形理论,提出氡浓度分形分析法,结合氡浓度均值变化率进行低射气介质地区浅部土壤氡气迁移规律研究。

1 实验装置与方法

1.1 实验装置

实验采用静态、累积测氡装置CD-1 α 杯仪及TYHC-1活性炭测氡仪。CD-1 α 杯仪具有灵敏度高、本底低、操作简便、电压(1.5 V)低、累积测量周期(4 h左右)较短等优点,可进行现场连续性测量且工作性能稳定。TYHC-1活性炭测氡仪为太原理工大学自行研制,采用单片机实现仪器微机化,野外自动显示、采集、存储数据。探测器采用高分辨率NaI闪烁体探测器,测定能量范围为0.5~3.0 MeV、能量分辨率为8% (对¹³⁷Cs而言),工作温度为-10~50℃。

1.2 实验方法

实验中用小型凿岩机凿取直径为15 cm,深度分别为30、40、50、60 cm坑各100个,不同深度坑均呈正方形排开,各坑间距0.5 m。采用被动式吸附法,即 α 杯法和活性炭吸附法进行氡测量。

1) α 杯法

将电离室清洗干净,用静电除尘液除去 α 杯上的静电尘土,而后将装置的集气杯(吸附杯)放置在凿好的坑里,其上用塑料布、砂袋及土埋实(图1a),4 h后取出并用CD-1 α 杯仪进行测量。同时,用温湿度计测定土壤气温、湿度(气压基本不变,可不予考虑),如此重复测1 d。不同坑深各放置5个集气杯,每个集气杯测量间距为1 m。实验期间,天气条件基本一致。氡浓度测量值相对误差不大于 $\pm 15\%$ 。

2) 活性炭吸附法

活性炭吸附装置由塑料瓶和罩杯两部分构成(图1b)。瓶内装有活性炭,瓶口放有硅胶以吸附水分。测试前将罩杯清洗干净,用静电除尘液除去罩杯上的静电尘土,而后将携有硅胶的塑料瓶(吸附杯)放置在罩杯上,最后将装置放入凿好的坑里,其上用塑料布、砂袋及土埋实,5 d后取出并用TYHC-1活性炭测氡仪测量。不同坑深各放置100个集气杯,间距0.5 m。实验期间,天气条件基本一致。氡浓度测量值相对误差不大于 $\pm 11\%$ 。

2 浅部土壤氡气分析法

2.1 氡浓度分形分析法

为减小同一坑深氡浓度差异,在坑深30~60 cm处,根据当地地表因素分布状况,统计

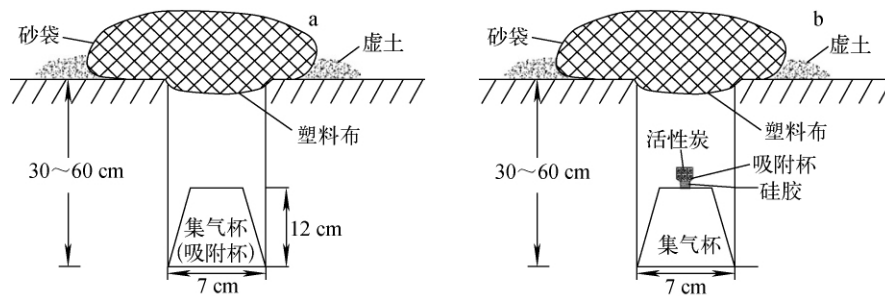


图1 测氡吸附装置示意图

Fig. 1 Layout of radon adsorption equipment

湿度 $\geq S$ 的氡浓度总和 N ,同时统计对应湿度 S 的气温 t_s ,以此建立氡浓度分形模型,为:

$$N = A_0 S^{-D_s} \quad (1)$$

$$N = A_1 t_s^{-D_t} \quad (2)$$

对氡浓度分形模型取对数,有:

$$\ln N = -D_s \ln S + \ln A_0 \quad (3)$$

$$\ln N = -D_t \ln t_s + \ln A_1 \quad (4)$$

式中: A_0 为湿度 S 对应的氡浓度分布初值; A_1 为气温 t_s 对应的氡浓度分布初值; D_s 为氡浓度-湿度分形维数; D_t 为氡浓度-气温分形维数。

由式(3)、(4)可知,若不同坑深下氡气分布特征具有自相似性,则 $\ln N$ 与 $\ln t_s$ 、 $\ln S$ 之间呈线性关系。以 $\ln N$ 为纵坐标,以 $\ln t_s$ 、 $\ln S$ 为横坐标,其斜率则为氡气分布的分形维数 D 。几何关系上,分形维数 D 可定量表征不同坑深下氡气分布与地表因素之间的复杂程度。 D 越大,两者之间影响越大,复杂程度升高; D 越小,两者之间影响越小,复杂程度趋于简单。

以乌兰察布1d内湿度变化为依据,分别统计不同坑深下 $S \geq 30\%$ 、 50% 、 70% 、 90% 的氡浓度和,同时记录此湿度下的平均气温,根据式(3)、(4)得出 D 。经计算,不同坑深下,氡浓度分布分形结果列于表1。将表1中的数据进行拟合,得到不同坑深下 $\ln N$ 与 $\ln S$ 、 $\ln N$ 与 $\ln t_s$ 的关系式,结果示于图2和图3。

由图3可知,在30~60cm坑深范围内, $\ln S$ 与 $\ln N$ 、 $\ln t_s$ 与 $\ln N$ 之间有良好的线性关系,相关系数 R 均大于0.85,这表明不同坑深在气温、湿度介质条件作用下,氡浓度分布具有很强的自相似性,符合分形规律。

以分形维数 D 和坑深为纵横坐标,绘制氡浓度-湿度及氡浓度-气温分形曲线(图4)。可看出,坑深在30~60cm范围内, D 随坑深增大呈先降低、后升高的趋势,并在40cm左右达到最小值,说明氡浓度变化在这一坑深受外界因素影响最小,变化较为稳定。

表1 不同坑深下氡浓度分布分形结果

Table 1 Fractal result of radon concentration under different depths

坑深/cm	$S/\%$	$t_s/^\circ\text{C}$	$\ln S$	$\ln t_s$	N	$\ln N$	D_s	D_t
30	30	26	1.477	1.4	236.83	2.37	1.2306	1.4623
	50	21	1.699	1.32	216.83	2.34		
	70	19	1.845	1.28	109.58	2.04		
	90	10	1.954	1	60.33	1.78		
40	30	26	1.477	1.41	249.15	2.40	0.7557	0.9563
	50	21	1.699	1.32	228.65	2.36		
	70	16	1.845	1.2	120.65	2.08		
	90	11	1.954	1.04	120.65	2.08		
50	30	28	1.477	1.44	283.35	2.45	1.1175	1.0857
	50	21	1.699	1.32	260.85	2.42		
	70	11	1.845	1.04	145.10	2.16		
	90	10	1.954	1	80.60	1.91		
60	30	26	1.477	1.41	267.17	2.43	1.1387	1.048
	50	21	1.699	1.32	244.50	2.39		
	70	10	1.845	1	139.50	2.14		
	90	9	1.954	0.95	73.00	1.86		

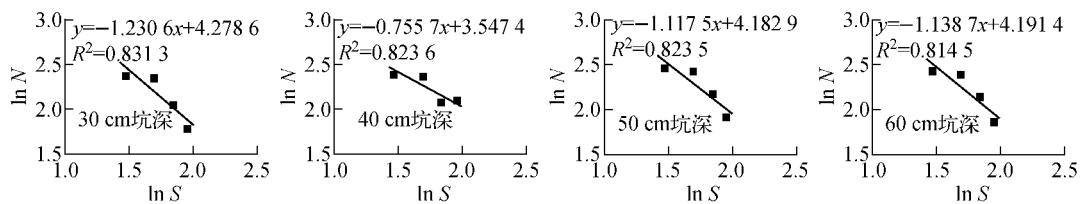


图2 不同坑深下氡浓度与湿度分形模型图

Fig. 2 Fractal model of humidity and radon concentration under different depths

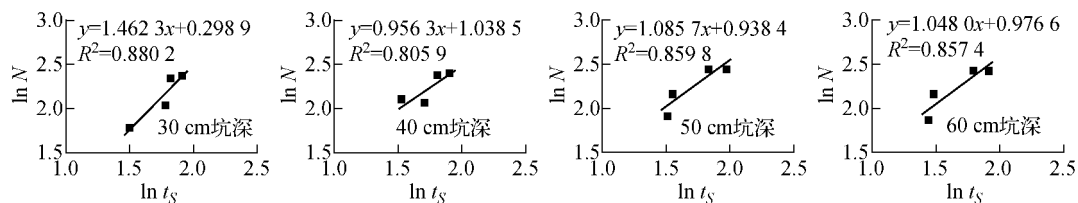


图 3 不同坑深下氡浓度与气温分形模型图

Fig. 3 Fractal model of radon concentration and temperature under different depths

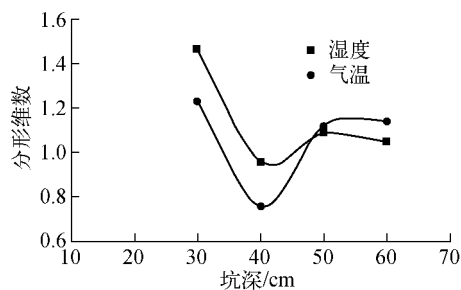


图 4 坑深与分形维数的关系

Fig. 4 Relational graph of depth and fractal dimension

分形维数 D 变异程度表明不论气温、湿度如何变化,野外氡气采样深度均以 40 cm 较为合适,浅部土壤氡气演化以 40 cm 较为恒定,地表因素对其影响最小。

2.2 氡浓度均值变化率

用氡浓度均值变化率定量地表征同一坑深不同时期氡浓度均值变异程度,能准确反映氡浓度由季节变化引起的动态发展和稳定性,表达式为:

$$J = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n C_i \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{|J_{i-1} - J_i|}{\sum_{i=1}^n |\Delta J|} \quad (6)$$

$$\Delta\gamma = \gamma_{\max} - \gamma_{\min} \quad (7)$$

其中: C 为活性炭测定仪野外所测氡浓度; J 为每月氡浓度均值; ΔJ 为相邻月份氡浓度均值差; γ 为相邻月份氡浓度均值变化率; $\Delta\gamma$ 为变化率最大差值。

图 5 为相邻月份氡浓度均值变化率。可看出,坑深为 30、50、60 cm 时曲线变化不稳定、复杂、差异大;40 cm 时曲线变化平稳、均匀、差值变化较一致。

由此得出,野外测氡装置所测氡浓度随季节变化中,氡浓度均值变化率以坑深 40 cm 影

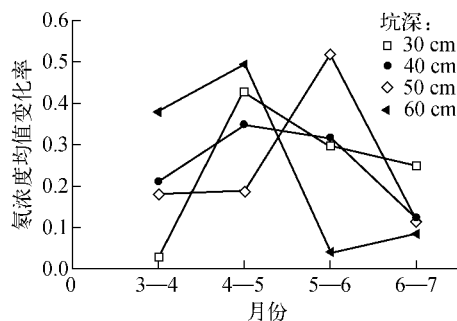


图 5 氡浓度均值变化率

Fig. 5 Change rate of mean value difference of radon concentration

响最小,变化较为稳定,能较好地反映地下信息,提高准确性。

4 结论

1) 运用分形理论,以不同坑深下所测氡浓度作为分析对象,提出了氡浓度分形分析法,得到氡气在坑深 30~60 cm 范围内氡浓度分布的分形规律和分形维数。

2) 不同坑深下氡气分布具有很强的自相似性,符合分形规律。分形维数 D 变异程度表明,浅部土壤氡气演化以 40 cm 较为恒定,地表因素对其影响最小。

3) 氡浓度均值变化率定量地表征了不同坑深下氡浓度变异程度,得出坑深 40 cm 左右变化率最小,分布相对稳定。

4) 两种方法结合分析了低射气介质地区浅部土壤氡气迁移规律,表明野外氡气采样深度以 40 cm 较为合适。

参考文献:

[1] 刘鸿福,白春明,舒祥泽. 用测氡技术探测煤矿地下火区的研究[J]. 煤炭学报,1997,22(4): 402-405.

- LIU Hongfu, BAI Chunming, SHU Xiangze. A study of detecting underground fire zone applying radon measuring technology[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(4): 402-405(in Chinese).
- [2] PAULINA A, BRUCE B Y, ANDAM A. Soil radon concentration along fault systems in parts of south eastern Ghana[J]. Journal of African Earth Sciences, 2008, 51: 39-48.
- [3] KARINE M P, MICHEL B. Radon, helium and CO₂ measurements in soils overlying a former exploited oilfield, Pechelbronn district, Bas-Rhin, France[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, 101: 835-846.
- [4] 刘鸿福, 贾文懿, 王广忠. 氡及其子体运移规律的实验研究[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(2): 109-113.
LIU Hongfu, JIA Wenyi, WANG Guangzhong. The experimental research of radon and its daughters migration rules[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29(2): 109-113 (in Chinese).
- [5] 贾文懿, 方方, 周蓉生. 氡及其子体向上运移的内因与团簇现象[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(2): 171-175.
JIA Wenyi, FANG Fang, ZHOU Rongsheng. Internal causes of radon and its daughters upward migration and cluster phenomenon[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(2): 171-175(in Chinese).
- [6] 刘鸿福, 白春明, 程小平. 浅部土壤中的氡气测量[J]. 核技术, 1997, 20(6): 363-369.
LIU Hongfu, BAI Chunming, CHENG Xiaoping. Radon measurement in shallow soil[J]. Nucl Tech, 1997, 20(6): 363-369(in Chinese).
- [7] 张新军, 刘鸿福. 野外活性炭测氡法实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(3): 304-306.
ZHANG Xinjun, LIU Hongfu. The experimental research of field activated carbon measuring radon[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(3): 304-306(in Chinese).
- [8] MANDELBROT B B. Statistical self-similarity and fractional dimension [J]. Science, 1967, 155: 636-638.
- [9] 谢和平, 高峰, 周宏伟. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4): 1-9.
XIE Heping, GAO Feng, ZHOU Hongwei. Fractal fracture and fragmentation in rocks[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(4): 1-9(in Chinese).
- [10] 胡耀青, 赵阳升, 杨栋. 煤体的渗透性与裂隙分维的关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1452-1456.
HU Yaoqing, ZHAO Yangsheng, YANG Dong. Relationship between permeability and fractal dimensions of coal mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(10): 1452-1456(in Chinese).
- [11] 傅雪海, 秦勇, 张万红. 基于煤层气运移的煤孔隙分形分类及自然分类研究[J]. 科学通报, 2005, 50(S1): 51-55.
FU Xuehai, QIN Yong, ZHANG Wanhong. The research on fractal and nature classification of coal pores in based on gas migration[J]. Science Bulletin of China, 2005, 50(S1): 51-55(in Chinese).
- [12] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合. 显微CT试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 28-34.
ZHAO Yangsheng, MENG Qiaorong, KANG Tianhe. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 28-34 (in Chinese).
- [13] 康志勤, 赵阳升, 孟巧荣. 油页岩热破裂规律显微CT实验研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3): 842-848.
KANG Zhiqin, ZHAO Yangsheng, MENG Qiaorong. Micro-CT experimental research of oil shale thermal cracking laws[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(3): 842-848(in Chinese).
- [14] 韩东昱, 龚庆杰, 向运川. 区域化探数据处理的几种分形方法[J]. 地质通报, 2004, 23(7): 714-719.
HAN Dongyu, GONG Qingjie, XIANG Yunchuan. Some new fractal methods for regional geochemical survey data processing[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(7): 714-719(in Chinese).