

地-空界面天然氡辐射场的数理模型*

葛良全 姜海静 赖万昌 曾 兵 谷 懿

成都理工大学地球核技术四川省重点实验室, 成都 610059

摘要 地-空界面上氡辐射场的分布特征, 不仅可应用于矿产资源勘查、工程地质、地震预报等领域; 而且可为环境放射性氡水平及其辐射环境效应的预测与评价, 提供理论依据和数据处理的方法技术. 文中以氡的扩散和对流理论为基础, 建立了地-空界面氡浓度定解问题, 进而得出了土壤中氡浓度和大气氡浓度分布的数学表达式, 以及大气氡浓度与地表介质铀含量的数学表达式. 理论分析表明: 土壤氡析出率不仅与土壤镭含量、射气系数有关, 而且还与土壤中氡的扩散系数与对流速度有关; 在开放空间内, 大气氡浓度与土壤氡逸出率成正比, 与大气对流速度成反比. 室内通风, 增强空气对流, 可有效地降低空气中氡浓度. 通过不同深度土壤氡浓度的长期观测结果表明, 土壤中氡浓度理论计算值与实测值符合性较好. 在土壤深度为 1.4 m 处, 两者相对误差为 3.1%.

关键词 地-空界面 氡浓度 扩散 对流 氡析出率

地-空界面核地球物理辐射场中, 放射性氡场占有重要的地位. 氡不仅是一种有效的地质示踪元素; 而且放射性氡对人体具有较大的危害性. 研究地-空界面上氡场的分布特征, 一方面能解决地质找矿、地质工程、地震预报、考古等领域中的应用问题^[1-4]; 另一方面, 可建立地-空界面氡浓度与土壤中铀、钍含量的相互关系^[5], 为环境放射性氡水平及其辐射环境效应的预测与评价, 提供理论依据和数据处理的方法技术.

放射性氡有三个同位素, 即²²²Rn, ²²⁰Rn 和 ²¹⁹Rn. 它们分别来源于地表介质中放射性铀系列、钍系列和锕铀系列. 由于²²⁰Rn 和 ²¹⁹Rn 的半衰期很短, 分别为 55.6 s 和 3.96 s, 所以氡在浅层地质体中的迁移主要考虑²²²Rn (半衰期为 3.825 d). ²²²Rn 是放射性铀系列中²²⁶Ra 的衰变子体, ²²⁶Ra 经 α 衰变为²²²Rn 后, 一部分²²²Rn 被固定在矿物晶格内, 另一部分逃逸出矿物晶格, 进入到岩石或土壤的孔隙中, 进而迁移至地表进入大气, 这部分氡被称为自

由氡. 许多学者对自由氡在地表介质中的迁移问题进行了深入的研究, 提出了扩散作用、对流作用、泵吸作用、接力传递作用和团簇迁移等迁移形式^[6,7]. 其中, 扩散作用与对流作用被认为是最主要的氡迁移形式.

均匀介质(岩石或土壤)中氡扩散与对流作用迁移的定量问题在一些专著或文献中已有较深入的研究, 获得了土壤中氡浓度随深度的数学表达式, 并通过实验得出了氡在不同岩石和不同类型土壤中的扩散系数和对流速度^[8,9]. 程业勋和刘庆成^[10]根据氡扩散作用与对流作用的迁移理论建立了地-空界面两侧地表介质和大气中氡浓度的定解问题, 提出了在地-空界面上氡浓度连续的边界条件, 并由此推导出土壤中氡浓度与大气氡浓度的数学表达式. 本文提出了新的边界条件, 即地-空界面上氡气流密度连续, 对地-空界面两侧地表介质和大气中氡浓度的定解问题进行求解, 推导出土壤中氡浓度与大气氡浓度随土壤深度与地表高度的数学表达式, 并提出了地-

2009-04-20 收稿, 2009-07-28 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40374051, 40774063)

** E-mail: glq@cdut.edu.cn

空界面上土壤与空气中氡迁移率比的物理概念,较好地解释了土壤中氡浓度与大气氡浓度的变化特征.

1 地-空界面氡浓度的定解问题

1.1 地-空界面氡的稳态迁移方程

假设:地-空界面地表介质为无限厚、无限大的均一地质体,半无限大空间地表介质中铀镭元素含量分布均匀;空气中铀镭元素含量为零;土壤、空气中氡的迁移只考虑垂直迁移;氡的迁移仅考虑扩散和对流作用.

1.1.1 地表介质(土壤)中氡浓度 N_1 的变化 在 dx 层中(如图1),单位时间内 dx 层内氡浓度 N_1 的变化由三部分引起:

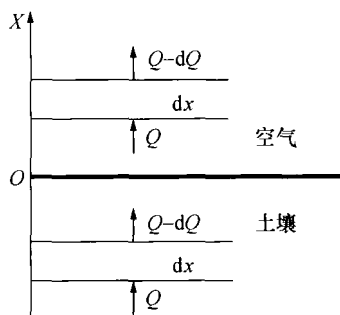


图1 地-空界面氡迁移示意图

(i) 由扩散作用与对流作用,从底面扩散、对流进入 dx 层的射气流量 Q 与从顶面出射 Rn 射气流量 $(Q-dQ)$ 之差即 dQ ;

(ii) dx 层中氡射气自身衰变引起的减少;

(iii) dx 层中从镭衰变引起射气的增加;

于是有:

$$\frac{d}{dt}(N_1 \cdot S \cdot dx) = (Q - dQ) - Q - \lambda N_1 S dx + A S dx \quad (1)$$

式中, N_1 为地表介质中氡射气浓度, Bq/cm^3 ; S 为单位层的表面积, cm^2 ; Q 为从底面流进入 dx 层的射气流量, Bq/s ; λ 为 ^{222}Rn 的衰变常数, $2.1 \times 10^{-6}/s$; A 为地表介质单位层厚单位时间内镭衰变产生的射气浓度, $Bq/cm^3 \cdot s$.

根据氡气扩散作用和对流作用,则在地表介质

中氡气的稳态迁移方程为^[6,7]:

$$D_1 \frac{d^2 N_1}{dx^2} - v_1 \frac{dN_1}{dx} - \lambda N_1 + A = 0$$

即:

$$\frac{d^2 N_1}{dx^2} - \frac{v_1}{D_1} \frac{dN_1}{dx} - \frac{\lambda}{D_1} N_1 = -A/D_1 \quad (2)$$

式中, D_1 为地表介质中氡的扩散系数, cm^2/s ; v_1 为地表介质中氡的对流速度, cm/s .

1.1.2 空气中氡浓度 N_2 的变化 与土壤中相同思路,在空气中 dx 层中氡气浓度的变化为:

$$\frac{d}{dt}(N_2 \cdot S \cdot dx) = (Q - dQ) - Q - \lambda N_2 \cdot S \cdot dx = -dQ - \lambda N_2 \cdot dx \cdot S \quad (3)$$

根据扩散理论,则由扩散作用产生的射气量为^[6,7]:

$$Q = -D_2 \frac{dN_2}{dx} \cdot S, \quad \frac{dQ}{dz} = -D_2 \frac{d^2 N_2}{dx^2} \cdot S \quad (4)$$

式中,负号表示氡浓度增大方向与 x 方向相反, D_2 为空气中氡的扩散系数.

由对流作用产生的射气量为^[6,7]:

$$Q = v_2 N_2 \cdot S, \quad \frac{dQ}{dx} = v_2 \frac{dN_2}{dx} \cdot S \quad (5)$$

式中, v_2 为空气中氡的对流速度.

将(4),(5)式代入(3)式,有:

$$\frac{d}{dt}(N_2 \cdot S \cdot dx) = D_2 \frac{d^2 N_2}{dx^2} \cdot dx \cdot S - v_2 \frac{dN_2}{dx} \cdot dx \cdot S - \lambda N_2 dx \cdot S$$

即:

$$\frac{dN_2}{dt} = D_2 \frac{d^2 N_2}{dx^2} - v_2 \frac{dN_2}{dx} - \lambda N_2 \quad (6)$$

稳态时有:

$$\frac{d^2 N_2}{dx^2} - \frac{v_2}{D_2} \cdot \frac{dN_2}{dx} - \frac{\lambda}{D_2} N_2 = 0 \quad (7)$$

将(2)、(7)式联立, 得出地-空界面上氡稳态迁移方程组:

$$\begin{cases} \frac{d^2 N_1}{dx^2} - \frac{v_1}{D_1} \cdot \frac{dN_1}{dx} - \frac{\lambda}{D_1} N_1 = -A/D_1 \\ \frac{d^2 N_2}{dx^2} - \frac{v_2}{D_2} \cdot \frac{dN_2}{dx} - \frac{\lambda}{D_2} N_2 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

1.2 边界条件

(1) $x \rightarrow -\infty$, N_1 为有限值.

(2) $x \rightarrow +\infty$, N_2 为趋近零的有限值.

(3) $x=0^-$, $N_1=0$, 因为空气中 Rn 浓度远小于土壤中 Rn 浓度, 约小三个数量级, 在地-空界面上可以认为土壤孔隙中 Rn 浓度趋于 0.

(4) $x=0$, (即地空界面上), $q_1|_{x=0^-} = q_2|_{x=0^+}$.

q_1 , q_2 分别为地表介质(土壤)和空气中的射气流密度, 单位为 $Bq/cm^2 \cdot s$. 射气流密度定义为单位时间通过单位面积上的 Rn 浓度. 当氡的迁移仅考虑扩散作用与对流作用时, 射气流密度 q_1 , q_2 的表达式可表示为:

土壤中氡的射气流密度 q_1 :

$$q_1 = \frac{Q_{\text{扩散}}}{S} + \frac{Q_{\text{对流}}}{S} = \frac{-D_1 \frac{dN_1}{dx} \cdot S}{S} + \frac{v_1 N_1 \cdot S}{S} = -D_1 \frac{dN_1}{dx} + v_1 N_1 \quad (9)$$

同理, 空气中氡的射气流密度 q_2 :

$$q_2 = -D_2 \frac{dN_2}{dx} + v_2 N_2 \quad (10)$$

令:

$$q_2|_{x=0^+} = q_1|_{x=0^-} = q_0$$

式中, q_0 为土壤向大气迁移的 Rn 射气流密度 $Bq/cm^2 \cdot s$, 即地表氡的析出率.

2 地-空界面上壤中氡与大气氡浓度的数学表达式

2.1 地表介质(土壤)中氡浓度分布的表达式

(8)式中, 地表介质中氡传播的微分方程的通解为:

$$N_1 = C_1 e^{\frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{2D_1} x} + C_2 e^{\frac{v_1 - \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{2D_1} x} + A/\lambda \quad (11)$$

由边界条件(1)和(3), 得到地表介质中氡浓度分布的表达式为:

$$N_1 = \frac{A}{\lambda} (1 - e^{\frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{2D_1} x}) = N_\infty (1 - e^{\frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{2D_1} x}) \quad (12)$$

其中, N_∞ 表示地表介质中产生可移动氡浓度的能力, 与介质中镭的浓度、介质射气系数、密度等物理量相关.

(12)式表明, 在地-空界面近地表一侧, 氡浓度随着地表深度的减小而呈指数规律减小.

由(9)式, 可得在地-空界面上($x=0^-$), 土壤中氡的射气流密度(土壤氡析出率)为:

$$q_1|_{x=0^-} = \frac{1}{2} N_\infty (v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}) \quad (13)$$

由于 N_∞ 与土壤镭含量、射气系数有关, 所以土壤氡析出率不仅上述因素有关, 而且还与氡的扩散系数 D_1 与对流速 v_1 有关.

2.2 空气中氡浓度分布的表达式与土壤氡析出率的表达式

(8)式中, 空气中氡传播的微分方程的通解为:

$$N_2 = C'_1 e^{\frac{v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}{2D_2} x} + C'_2 e^{\frac{v_2 - \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}{2D_2} x} \quad (14)$$

根据该方程的边界条件(2), 代入(14)式得到空气中氡浓度分布的表达式为:

$$N_2 = C'_2 e^{\frac{v_2 - \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}{2D_2} x} \quad (15)$$

其中, C'_2 为待定系数.

由边界条件(4)和(9), (10)两式, 计算可得 C'_2 待定系数:

$$C'_2 = N_\infty \frac{(v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1})}{(v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2})}$$

把 C'_2 代入(15)式, 可求出空气中氡浓度分布的表达式为:

$$N_2 = N_\infty \frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}} e^{\frac{v_2 - \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}{2D_2} x} \quad (16)$$

该式表明, 在地-空界面大气一侧, 当其他条件一定时, 在趋近地表处, 氡浓度有极大值, 随着高度的增加, 氡浓度呈指数规律减小. 在近地表大气中 ($x=0$), 氡浓度分布如下式所示:

$$N_2|_{x=0^+} = N_\infty \frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}} = N_\infty \beta \quad (17)$$

其中, $\beta = \frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}$, β 称为土壤与空气中氡的迁移率比.

(17)式表明, 近地表的大气氡浓度仅与地表介质中产生可移动氡浓度的能力及氡的迁移率比相关. 同时也可看出, 大气氡浓度不仅与地表介质中氡向大气的逸出有关, 而且还与大气氡的对流速度和扩散系数有关. 当大气的对流作用很小时, 如在密封的地下室或房间内, $v_1 = v_2 = 0$. 大气氡仅与氡在地表介质与大气中的扩散有关. 根据(17)式有:

$$N_2 = N_\infty \sqrt{\frac{D_1}{D_2}} \quad (18)$$

一般情况下, 大气的对流作用远大于扩散作用, 可认为 $D_2 = 0$. 根据(13), (17)式, 在地-空界面上(近地表的)空气中氡浓度为:

$$N_2 = \frac{q_0}{v_2} \quad (19)$$

上式表明, 大气氡浓度与土壤氡析出率成正比, 与大气对流速度成反比. 所以, 室内通风, 增

强空气对流, 可有效地降低空气中氡浓度.

3 地-空界面氡浓度与地表介质铀含量的相关表达式

地表介质中单位时间氡衰变率等于镭衰变率, 即:

$$\lambda_{Rn} N_{Rn} = \lambda_{Ra} N_{Ra} \quad (20)$$

式中, N_{Rn} 和 N_{Ra} 分别为某一时刻单位体积中氡和镭的原子数; λ_{Ra} 为镭的衰变常数, 数值为 $1.37 \times 10^{-11}/s$.

在(12)和(17)式中, N_∞ 为地表介质中自由氡浓度的极限值, 在镭-氡放射性平衡条件下, N_∞ 可表示为:

$$\begin{aligned} N_{\infty} &= \lambda_{Ra} N_{Ra} \cdot \alpha = \\ &= \lambda_{Ra} \frac{C_{Ra} \cdot 6.02 \times 10^{23} \cdot \rho \cdot \alpha}{226} \text{ (Bq/cm}^3\text{)} = \\ &= \frac{1.37 \times 10^{-11} \cdot 6.02 \times 10^{23}}{226} \cdot C_{Ra} \cdot \rho \cdot \alpha \cdot 10^6 \text{ (Bq/m}^3\text{)} = \\ &= 3.649 \times 10^{16} C_{Ra} \cdot \rho \cdot \alpha \text{ (Bq/m}^3\text{)} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, C_{Ra} 为地表介质中镭的重量含量 g/g; α 为氡的射气系数.

引入铀-镭平衡系数 K_p , 则地表介质中镭含量可用铀含量 C_U (g/g) 来表示:

$$C_{Ra} = K_p \times C_U \times 3.4 \times 10^{-7} \quad (22)$$

将(21), (22)式代入(12)和(16)式, 可得地表介质和空气中氡浓度与地表介质中铀含量的关系式.

$$\begin{aligned} N_1 &= N_\infty (1 - e^{\frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{2D_1} x}) = \\ &= 12.4 \times 10^9 C_U K_p \cdot \rho \cdot \alpha \cdot (1 - e^{\frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{2D_1} x}) \text{ (Bq/m}^3\text{)} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} N_2 &= N_\infty \frac{v_1 + \sqrt{v_1^2 + 4\lambda D_1}}{v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}} e^{\frac{v_2 - \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}{2D_2} x} = \\ &= \frac{12.4 \times 10^9 C_U K_p \cdot \rho \cdot \alpha \cdot}{v_2 + \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}} e^{\frac{v_2 - \sqrt{v_2^2 + 4\lambda D_2}}{2D_2} x} \text{ (Bq/m}^3\text{)}. \end{aligned} \quad (24)$$

4 实验验证

地-空界面土壤中氡浓度变化实验选择在成都理工大学校园内的一处面积约为 1000 m² 的人工草地, 分别距地表 0.28 和 1.40 m 的两层深度布观测点. 实测上、下层土壤的密度分别为 1.45 和 1.42 g/cm³, 孔隙度为 46% 和 47%. 土壤中铀含量采用伽玛能谱法测定, 实测平衡铀含量为 1.44×10^{-6} g/g. 土壤中氡浓度测量采用自行研制的分布式土壤连续自动测氡仪^[11], 该仪器为分布式组网设备, 采用金硅面垒半导体探测器, 可对不同工作点的氡浓度实现多点同时测量. 其测氡原理为被动式静电收集氡的第一代衰变子体²¹⁸Po 放出的 α 射线, 根据 α 计数率来确定观测点的氡浓度值, 仪器在标准氡室中刻度, 刻度方程为: $7.46 \times N + 20 (\text{Bq/m}^3)$; 其中 N 为每小时仪器的 α 计数值.

氡气探测器分别垂直埋入实验地的以上两个深度. 表 1 是对不同深度氡浓度的理论计算值与连续测量一个月氡浓度数据的统计. 理论计算基于(23)式, 氡气在土壤的扩散系数取 $2.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$, 对流速度取 $1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, 射气系数为 15%. 表 1 数据表明, 在 0.28 和 1.40 m 两个不同深度处壤中氡浓度的理论值与实测的月统计平均值的相对误差分别为 55% 和 3.1%. 在 1.40 m 处观测点, 理论值与实测值符合得很好; 但在 0.28 m 深度处, 理论计算值明显大于实测平均值, 这可能是由于近地表受大气环境影响, 扩散与对流作用增大, 使氡气向空气中的逸出增强, 氡气在土壤的扩散系数和对流速度取值偏低造成.

表 1 不同深度氡浓度理论值与实测值统计数据表

深度/ m	理论值/ $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	月统计平均值 / $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$	月统计 样本数	月统计 标准差	理论值与月统计平 均值相对误差/%
0.28	1662	1069	720	3.3	55
1.40	5392	5230	720	14.6	3.1

5 结论

(1) 将地-空界面两侧视为半无限大均匀介质, 基于氡气的扩散作用和对流作用, 提出了地-空界面新的氡迁移定解问题, 并建立了氡的稳态迁移方程和边界条件.

(2) 通过对氡迁移定解问题的求解, 得出了土壤中氡浓度随土壤深度的数学表达式和空气氡浓度随距地表高度的数学表达式; 理论分析表明: 土壤氡逸出率不仅与土壤铀含量、射气系数有关, 而且还与壤中氡的扩散系数与对流速有关; 在开放空间内, 大气氡浓度与土壤氡逸出率成正比, 与大气对流速度成反比. 室内通风, 增强空气对流, 可有效地降低空气中氡浓度.

(3) 通过不同深度土壤氡浓度的长期观测结果表明, 壤中氡浓度理论计算值与实测值符合性较好. 在土壤深度为 1.4 m 处, 两者相对误差为 3.1%.

参 考 文 献

- 尹兵祥, 王南萍, 刘洪涛. 氡测量在油气勘探中的应用. 石油大学学报(自然科学版), 2002, 26(2): 23--25
- 王卫, 吴勇, 刘华军, 等. 测氡在滑坡研究中的应用. 工程地质学报, 2003, 11(3): 307--311
- 高清武, 上官志冠, 胡金文. 琼北火山及断裂的活动性. 地震地质, 2003, 25(2): 280--288
- 王运生. 测氡在区域构造稳定性研究中的应用. 山地学报, 2002, 20(4): 505--508
- 刘庆成, 陈昌礼, 等. 青岛市环境氡浓度分布规律与预测方法研究. 现代地质, 1998, 12(1): 134--137
- 章晔, 华荣洲, 石柏慎. 放射性方法勘察. 北京: 原子能出版社, 1990
- 吴慧山. 核技术勘察. 北京: 原子能出版社, 1998
- Iakovleva VS, Ryzhakova NK. Spatial and temporal variations of radon concentration in soil air. Radiation Measurements, 2003, 36: 385--388
- 张哲. 氡的析出与排氡通风. 北京: 原子能出版社, 1982
- 刘庆成, 程业勋, 章晔. 环境中氡迁移理论与计算方法研究. 物探与化探, 1998, 22(2): 149--152
- 姜海静, 林延畅, 葛良全, 等. 多参数土壤氡连续监测局域网系统的研制. 核电子学与探测技术, 2007, 27(2): 325--328