

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.05.014

室内氡浓度的非线性分析

张明礼, 匡欢传, 谢 标, 杨 柳, 杨 浩

(南京师范大学 地理科学学院, 南京 210023)

摘 要: 氡是一种天然放射性气体, 其中室内氡与人类健康密切相关, 室内氡浓度成为公众关注的问题之一。假定室内外空气中氡及氡子体均一混合的前提下, 推导出一个关于室内氡浓度计算的模型, 据此计算室内氡浓度。结果表明: 室内氡浓度随时间和通风量系数的增加, 趋向一个稳定的值, 最终达到室内外氡浓度平衡。该模型计算出的室内氡浓度理论值(6.35~40 Bq/m³)与任天山和王玫等的实测结果(6~50 Bq/m³)一致, 表明模型可靠。

关键词: 室内氡浓度; 通风量系数; 氡进入率; 空气流动速率

中图分类号: X591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)05-0078-07

Nonlinear Analysis of Indoor Radon Concentration

Zhang Mingli, Kuang Huanchuan, Xie Biao, Yang Liu, Yang Hao

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P. R. China)

Abstract: Radon is a natural radioactive noble gas that is naturally found in the ground. Exposure (excessive) to radon can pose a threat to the public health and get the public attention worldwide. Requiring the balanced mixing of radon and its daughters in indoor radon and outdoor air, a quantitative calculation model is deduced. The results showed that the indoor radon levels reach a steady value with the increases of ventilation ratio and time, resulting in the balance for radon concentration indoor and outdoor air ultimately. Based on the model calculation, radon in door air has a theoretiacl value ranging between 6.35 and 40 Bq/m³, which are in accordance with the actual measurements(6.0~50 Bq/m³) by Tianshan Ren and Mei Wang, etc. The established quantitatively model for calculating the change of radon levels in indoor air could provide the technical support for indoor radon control and environmental assessment.

Key words: indoor radon concentrations(C_{Rn}); ventilation ratio(S); radon entry rate; air exchange flow rate

氡是天然放射性铀系中一种惰性气体, 具有极强迁移活性, 但其化学性质极不活泼, 一般情况下很难与其它元素发生化学反应。通常, 有空气的地方, 就存有氡及其子体。自然界, 氡存在 3 种天然放射性同位素 ²²²Rn、²²⁰Rn 和 ²¹⁹Rn, 其分别来源于天然放射系中的铀系、钍系和锕系, 半衰期分别为 3.825 d、54.5 s 和 3.92 s。由于 ²²⁰Rn 和 ²¹⁹Rn 半衰期短, ²²²Rn 半衰期相对较长, 故通常所指的氡为 ²²⁶Ra 直接衰变

的产物 ²²²Rn。氡极易溶于液体(水)和脂肪, 通过呼吸道与皮肤侵入机体, 其衰变子体常吸附在呼吸道, 造成内照射, 该照射剂量在体内累积到一定程度, 引发机体病变, 最终导致肺癌。现代研究表明室内氡浓度长期暴露会增加肺癌的危险度。此外, 氡可能引发畸形、基因畸形遗传和白血病等不良后果^[1]。因此, 室内环境中氡浓度对人体健康的影响已成为理论界亟待解决的重大问题。要研究氡浓度对人体

收稿日期: 2013-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(41173094, 41273103, 41030751)

作者简介: 张明礼(1978-), 男, 博士, 主要从事土壤侵蚀的核素示踪、环境评价研究, (E-mail) zhangmingli@njnu.edu.cn.

健康的影响,就必须先搞清室内氡浓度与其来源之间的可量性关系。

近5 a对室内氡的研究大多集中于室内氡的检测、水平扩散系数测量与有效防护方法等,如王振基等^[2]对标准氡室内氡气体活度的计算方法与测量验证的研究;连福龙等^[3]对主动式活性炭盒法测氡影响因素的探讨;竺云波等^[4]对居室氡浓度及其影响因素的分析;张强等^[5]对建材制品中测定氡的影响因素及其在防氡建材分析中的应用研究;李先杰等^[6]对氡析出率测量仪的检定装置的介绍;王榆元等^[7]探讨了含水率对建材砖氡析出率的影响;李晓玲^[8]对中国室内氡污染现状及相关控制标准的相关综述;其他国家如 UNSCEAR 对室内氡的研究发出的最新报告^[9];Ielsch 等^[10]提出了一种利用岩石和土壤的地球化学和物理性质参数来计算土壤表面的氡析出率的模式 TRACHGE;Fazalur 等人用固体核径迹法和静电收集法对不同种类建材的析出率进行了测量;EScobar 等^[11]用活性炭吸附法测量土壤的²²²Rn 析出率^[12]。然而,对室内氡浓度分析较零散(与一种氡源的关系分析)。综合定量分析室内氡浓度与氡来源的关系,能使室内氡浓度对人体的危害更具有可衡量性与可操作性,为人类如何降低室内氡提供科学指导。

本文在前人研究成果的基础上,拟通过对室内氡来源现状分析建立室内氡浓度的定量计算模型,从而为室内氡浓度的研究与评价提供参考依据。

1 定量模型建立

1.1 建模基础条件

现代研究表明:室内氡主要来源于建筑物地基和周围土壤、建筑材料、空气中的氡、家用燃料以及供水^[13-14]。一些学者已对室内氡的氡源进入率作了相关研究。

1.1.1 建筑物地基土壤氡进入率 土壤中氡可自由扩散,形成氡气体渗流进入室内,但土壤的氡及其衰变源进入室内,受诸多因素的影响,它不但取决于土壤的湿度、密度、孔隙率、房子的建筑结构以及气象参数中的气温、气压、风向和风速等客观因素,还受人为因素的影响,如换气率。任天山等人认为土壤氡进入率可以表示为^[15]:

$$C = x_s \cdot Q_s \quad (1)$$

式中: C 为土壤氡的进入率; X_s 为土壤气体中的氡浓度, Bq/m^3 ; Q_s 为渗流率,即单位时间内进入室内的土壤气体的体积占房间体积的份数, h^{-1} 。

1.1.2 建筑材料的氡进入率 现代研究发现,建筑

材料衰变过程中产生的氡部分能通过扩散进入室内,其进入率主要受建筑材料性状、表面积、建筑材料的氡扩散长度以及建材的厚度等影响。据此,学者们认为建筑材料析氡进入率可以表示为^[16]:

$$B = N/v(2r_1 \cdot s_1 + r_2 \cdot s_2) \quad (2)$$

式中: $N=3\ 600$; v 是房间体积, m^3 ; s_1 和 s_2 分别为墙壁和地板的表面积, m^2 ; r_1 和 r_2 分别为砖和混凝土的面积析氡率。

1.1.3 室外空气中氡的进入率 某些情况下,室外空气中的氡是室内氡的一个重要来源,主要进入途径是室内外空气交换。假定室外空气中的氡浓度 $A_{out}(Bq/m^3)$, 换气率为 $\lambda(h)$, 则氡进入率为^[15]:

$$A = A_{out} \cdot \alpha \cdot \lambda \quad (3)$$

1.1.4 家用燃料的氡进入率 人类在家中使用时,若遇到通风不畅,便产生天然气,据研究显示,天然气中氡的浓度有时极高,可能是室内氡的重要来源之一,相关研究显示,天然气所致氡的进入率计算公式可以表示成^[17]:

$$D = D_{ng} \cdot Q_{ng}/v \quad (4)$$

其中: D_{ng} 为天然气中的氡浓度, Bq/m^3 ; Q_{ng} 为消耗率, m^3/h ; v 为房间体积。

1.1.5 供水所致氡的进入率 设水中氡浓度为 $X_w, Bq/m^3$, 水的消耗量为 $Q_w, m^3/h$, 脱气系数为 ϵ , 房子体积为 v , 则由水氡脱气所致的进氡率 E 为^[18]:

$$E = X_w \cdot Q_w \cdot \epsilon/v \quad (5)$$

1.2 模型构建

基于对前人研究的探讨,并结合室内氡来源的特性,可看出一般情况下家用燃料产生的天然气、供水、建筑材料以及建筑地基土壤中氡进入室内部分相对较稳定,但室外空气氡进入率最不稳定,易受房间通风性能的影响。不同来源的氡进入室内以后,室内²²²Rn 随时间不断积累;同时氡不断衰变,加之受通风影响,从而使室内氡浓度发生变化。已有研究显示,房间的通风是影响室内氡浓度的关键因子之一^[15,20],根据自然界空气流动的特性,空气流动方向总是从浓度高的流向浓度低的形成一个小空气循环。因此,通风时室外空气流入室内的同时,室内空气流出室外,室内外空气交换随之产生,室内氡浓度随之改变。要合理计算出不同时刻室内氡的浓度,就得分析房间的通风性能;而要分析房间的通风性能必然涉及到房间送风量与房间体积。通风研究显示,房间送风量受房间的结构、位置、送风方式以及室内外空气正负压变差等诸多因子的制约。由于生活中房间结构与位置确定后为静态,一般不轻易改变。因此,暂且把房间的通风性能取决于房间送风

方式和室内外空气的压差。房间送风方式受空气通过某介质进入房间接触表面积的大小与当时室内外空气的流动速率等影响,故模型引入通风量系数 S 和室内外空气流动交换速率 v_t 2 个变量。通风量系数 S 指某时刻空气通过某介质如窗户、门等进入室内时,介质表面积的大小, m^2 ; 室内外空气流动速率 v_t 指某时刻通风时,空气通过某介质如窗户、门等进入室内的空气的进入速率, m/h , 大小与送风方式、室内空气变差程度以及房间通风道朝向等诸多因子有关。通风状态下,随着时间的推移,房间空气的总体积总保持相对一致,即房间流出的空气体积 $v_{出}$ 等于流进室内的空气体积 $v_{进}$, 又因为室内外空气交换时,房间的通风量系数与通风时间相对一定。因此,室内空气流动速率应该与室外空气流动速率一致,否则 $v_{进}$ 与 $v_{出}$ 不相等。因此,通风条件下,可把室内外空气流动速率 v_t 近似看成一个常数,不随通风量系数 S 变化。在上述前提下,我们可近似地把通风性能问题理解为通风时,空气进入室内介质表面积大小的改变,即房间通风量系数 S 的大小的变化。如当完全不通风时,即 S 为 0, 不发生室内外空气交换,室内外空气交换流动速率也为 0; 当通风时,即 $S > 0$, 室内外空气发生交换,产生室内外空气流动速率 v_t , 当完全通风时,即 S 为房间通风通道的总表面积。其理论实质为换气次数模型的再次演绎,把分子中房间送风量 M_a 二次变量递推化,即房间通风量系数 S 与空气流动速率的乘积 v_t 与房间总体积的比, h^{-1} 。代入换气次数模型中得: $\lambda_v = M_a/v = Sv_t/v$, 式中, λ_v 换气次数, h^{-1} ; M_a 为房间送风量, m^3/h ; v 为房间体积, m^3 ; S 为通风量系数, m^2 ; v_t 为室内外空气流动交换速率, m/h 。

综上所述,假定室内外空气氡浓度均一混合,空气中氡的浓度一致;氡均匀地散发到房间的整个空间;送入室内的空气立即与室内空气充分混合,送风量等于排风量,则室内氡的变化可用下式描述:

$$\frac{dC_{Rn}}{dt} = A\lambda_v - C_{Rn} \cdot (\lambda_{Rn} + \lambda_v) + \frac{Bv_1 + Cv_2 + Dv_3 + Ev_4}{v} \quad (6)$$

式中: C_{Rn} 是 t 时刻的氡浓度, Bq/m^3 ; λ_{Rn} 是氡的衰变常数, $7.6 \times 10^{-3} h^{-1}$; B, C, D, E 分别为建筑材料所致氡进入率、建筑物地基土壤氡进入率、家用燃料的氡进入率和供水所致氡的进入率; A 为空气氡的浓度; v 为房间的体积; v_1, v_2, v_3, v_4 分别为建筑材料、建筑物地基土壤、家用燃料和用水的体积。如果把 B, C, D 和 E 当常数。则通过对式(6)整理,我们可

以得到以下微分方程的解:

$$C_{Rn} = \frac{(Bv_1 + Cv_2 + Dv_3 + Ev_4 + Av\lambda_v) - C_0 e^{-(\lambda_{Rn} + \lambda_v)t}}{v(\lambda_{Rn} + \lambda_v)} \quad (7)$$

其中: C_0 为常数, Bq ; t 为时间, h 。

把 $\lambda_v = Sv_t/v$ 代入式(7)我们可以得到:

$$C_{Rn} = \frac{(Bv_1 + Cv_2 + Dv_3 + Ev_4) - C_0 e^{-\frac{(\lambda_{Rn} + v_t S)t}{v}} + Av_t S}{v\lambda_{Rn} + v_t S} \quad (8)$$

参照 UNSCEAR 公布的最新各种室内氡源的相关参数及标准,并利用式(1)~(5)计算与实验中的对比,我们可以得到室外空气氡浓度 A 、建筑材料所致氡进入率 B 、建筑物地基土壤氡进入率 C 、家用燃料的氡进入率 D 和供水所致氡的进入率 E 的相对合理值分别为 5、10、29、1 和 0.3 $Bq/(m^3 \cdot h)$; 氡的衰变常数 λ_{Rn} 为 $7.6 \times 10^{-3} h^{-1}$ 。参照 UNSCEAR 公布的最新标准,在有地板且没有裂缝的房基土壤和建筑材料所致氡进入室内厚度通常在 0.2 m^[19]; 初始可以直接从室内测的,房间的体积和房间通风道的表面积以及空气流动速率都可以从实际生活中得到。该模型不仅考虑到自然通风,也涉及到机械通风,由于机械通风可以近似看着一个常数,在微分中不影响结果,积分后加上该常数。因此,该模型具有预测的可行性。

2 讨论

方程式(7)、(8)是 2 个可以用来预测室内氡浓度变化的基本方程,要预测一间房的氡浓度,只要给出房间的长宽高、墙壁的厚度、通风量系数、用水量和家用燃料量以及空气交换流动率,就可以利用上述方程计算出该房间的氡浓度。如果房间在 10 m² 以上,可以不考虑土壤所致氡的来源^[19]。

分析上述方程可以发现,室内氡的浓度除了受不同氡来源的影响外,房间的通风量系数 S 和空气流动速率 v_t , 时间 t 和氡衰变常数 λ_{Rn} 亦影响着室内氡浓度的估计值的准确性。参照 UNSCEAR 公布的最新各种室内氡进入率的相关参数及标准和相关文献^[20-22], 令室外空气氡浓度 A 、建筑材料所致氡进入率 B 、建筑物地基土壤氡进入率 C 、家用燃料的氡进入率 D 和供水所致氡的进入率 E 分别为 5、10、29、1、0.3 $Bq/(m^3 \cdot h)$; 氡的衰变常数 λ_{Rn} 为 $7.6 \times 10^{-3} h^{-1}$ 。假定房子的长宽高分别为 10、10、3.5 m, 即房间室内体积 v 为 350 m³; 空气的交换流动速率 v_t

为 185 m/h;室内氡的初始浓度为 40 Bq/m³,即 $t=0$ 时, C_{Rn} 的值。代入式(8)计算得到理论值为(6.35~40 Bq/m³)与任天山和王玫等文献的实测结果(6~50 Bq/m³)一致,说明了该模型在计算室内氡浓度的可靠性。

2.1 房间的通风量系数

预测室内氡的理论模型,几乎都没有把房间的通风量系数 S 考虑在他们的模型之中,而式(8)充分证明了房间的通风介质表面积大小是影响室内外空气交换的关键因子之一,更是改变室内氡浓度变化的核心因素之一,对室内氡浓度计算的精度影响大。例如,在不考虑室内氡浓度初始值的前提下,即不考

虑式(8)常数 C_0 ,令 $t=0$,并且其他参数都不变,只改变房间通风量系数 S ,具体数据如表 1。则根据式(8),可得到图 1。结合图 1 与表 1,我们发现当室内完全不通风时,不考虑室内氡浓度的初始值的前提下,室内理论氡浓度 C_{Rn} 为 475.2 Bq/m³;一旦通风室内氡浓度就快速下降,但当房间通风量系数 S 的值到达一定值时,室内氡浓度开始趋向于缓和,也可发现当 S 足够大时,室外氡浓度与室内浓度一致。因此,从模型中可以发现通风量系数 S 是降低室内氡浓度的重要手段,在生活中多开门窗能有效降低室内氡的浓度。

表 1 不考虑其他因素前提下 t 为 0,室内氡浓度 C_{Rns} 与通风量系数 S 之间的关系

A	C	B	D	E	v_1	v_1	v_2	D	v_4	λ_{Rn}	S	v	C_{Rns}
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	0	350	475.2
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	1	350	11.66
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	2	350	8.356
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	3	350	7.243
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	4	350	6.684
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	5	350	6.348
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	6	350	6.124
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	7	350	5.964
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	8	350	5.844
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	9	350	5.75
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	10	350	5.675
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	11	350	5.614
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	12	350	5.563
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	13	350	5.519
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	14	350	5.482
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	15	350	5.45
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	16	350	5.422
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	17	350	5.397
5	29	10	1	0.3	185	68	20	1	10	0.007 6	18	350	5.375

各参数的单位:A 和 C_{Rn} ,Bq/m³;B、C、D 和 E,Bq/(m³·h); v_1 、 v_2 、 v_3 和 v_4 以及 v ,m³;S,m²; λ_{Rn} ,h⁻¹。

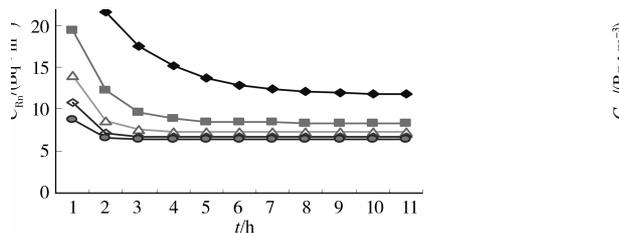


图 1 不考虑室内氡浓度初始值的前提下, C_{Rns} 与 S 的关系

2.2 室内氡浓度的时间因子

不同来源的氡进入室内后,室内²²²Rn 随着时间积累,同时由于放射性衰变和通风使之不断减少。因此,时间 t 是室内氡浓度变化的一个重要因子。假定其他因子不变,房间的通风量系数 S 为 1 m²,则根据方程(8)拟合,得到表 2、3 和图 2 结果如下。

从表 2 和图 2 中,我们发现当房间通风时,且通

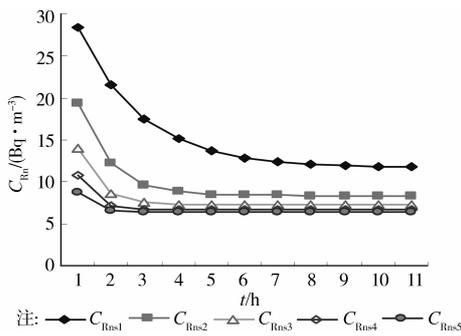


图 2 室内氡浓度 C_{Rn} 与时间 t 的关系

(其中 C_{RnS1} 、 C_{RnS2} 、 C_{RnS3} 、 C_{RnS4} 和 C_{RnS5} 分别为通风量系数 S 为 1、2、3、4、5 m^2 时,室内氡浓度与 t 的关系图)

风量系数 S 和其它一定时,室内氡浓度 C_{Rn} 随时间快速降低,但当时间到达一定值(拟合值 t 为 6 h 时,

室内氡浓度 C_{Rn} 斜率变小,开始趋向于 0,随着 t 增大,室内氡浓度最终和室外空气氡浓度趋向一致,根据方程(8)的运算和表 2 数据,当 $t \geq 22$ h 时, C_{Rn} 趋向稳定值 11.66,验证了上述理论。在生活中当房间的门窗面积一定的时候,可通过增加开窗的时间来降低室内氡的浓度。我们已计算出房间室内体积为 $350 m^3$,通风量系数为 $1 m^2$ 时,通风 6 h 就可以使室内氡浓度与室外趋向一致;当 S 为 $2 m^2$ 时,通风 4 h 就能室内氡浓度与室外趋向一致;当 S 为 $5 m^2$ 时,不超过 2 h 就能到达一致。从表 3 中,可以发现当通风量系数 S 不同时,室内氡浓度 C_{Rn} 趋向稳定值不同,如当 $S=2 m^2$ 时, C_{Rn} 趋向于 $8.36 Bq/m^3$;而 S 为 5 时, C_{Rn} 趋向于 $6.35 Bq/m^3$ 。所以,该模型为房子的通风设计提供了合理的依据。

表 2 当 $S=1 m^2$ 时,室内氡浓度 C_{Rn} 与时间 t 的关系

A	C	B	D	E	v_1	v_2	v_3	v_4	λ_{Rn}	t	v	C_0	C_{Rn}	
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	1	350	-5 317	28.37
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	2	350	-5 317	21.51
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	3	350	-5 317	17.47
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	4	350	-5 317	15.09
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	5	350	-5 317	13.68
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	6	350	-5 317	12.85
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	7	350	-5 317	12.37
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	8	350	-5 317	12.08
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	9	350	-5 317	11.91
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	10	350	-5 317	11.81
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	11	350	-5 317	11.75
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	22	350	-5 317	11.66
5	29	10	1	0.3	185	20	68	1	10	0.007 6	23	350	-5 317	11.66

各参数的单位: A 和 C_{Rn} , Bq/m^3 ; B, C, D 和 $E, Bq/(m^3 \cdot h)$; v_1, v_2, v_3 和 v_4, m^3 ; v 为 m^3 ; S, m^2 ; λ_{Rn}, h^{-1} ; t, h ; C_0 为 Bq 。

表 3 室内氡浓度 C_{Rn} 与通风量系数 S 、时间 t 的关系并与实测对比

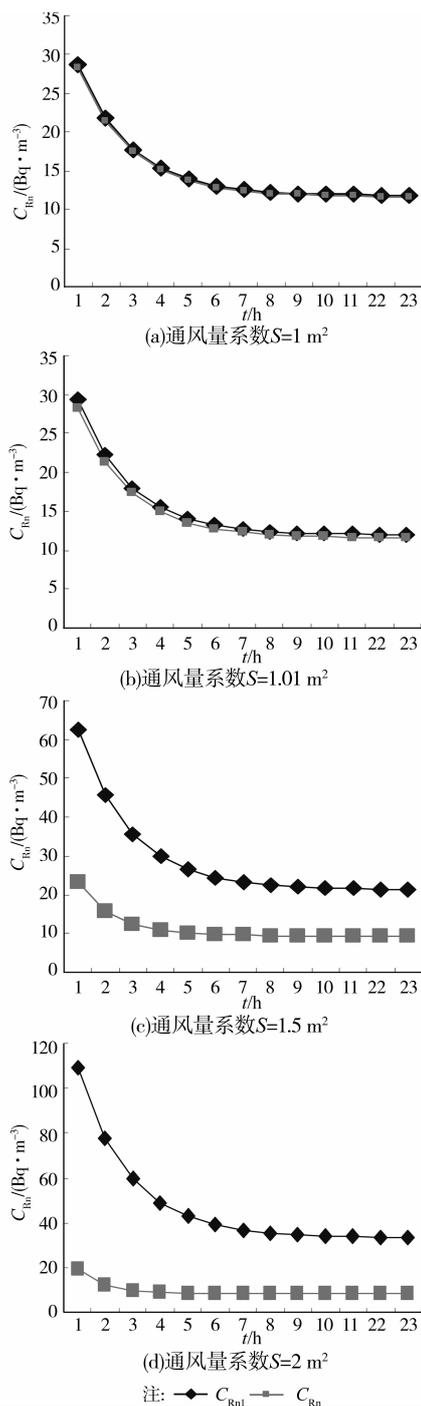
C_{Rn}	t										实测 $C_{Rn}^{[20]}$	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\bar{x} \pm S$	$\bar{x} \pm S$
$C_{Rn}(S=1)$	28.37	21.51	17.47	15.09	13.68	12.85	12.37	12.08	11.91	11.81	24.2 ± 3.2	24.9 ± 6.0
$C_{Rn}(S=2)$	19.40	12.20	9.68	8.82	8.52	8.41	8.38	8.36	8.36	8.36	40.6 ± 10.6	37.7 ± 11.4
$C_{Rn}(S=3)$	13.95	8.60	7.50	7.30	7.25	7.25	7.24	7.24	7.24	7.24	18.9 ± 7.4	
$C_{Rn}(S=4)$	10.71	7.17	6.74	6.69	6.68	6.68	6.68	6.68	6.68	6.68	20.6 ± 4.4	
$C_{Rn}(S=5)$	8.74	6.52	6.36	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	6.35	21.3 ± 4.2	

各参数的单位: $C_{Rn}, Bq/m^3$; S, m^2 ; t, h 。

2.3 ^{222}Rn 衰变的影响

将 ^{222}Rn 衰变常数考虑在模型的建立中十分必要,用表 2 的数据对模型(8)拟合,结果显示(图 3)

^{222}Rn 衰变常数对室内氡浓度的计算有很大的影响,特别是当通风量系数增大时,这种情况下更不容忽视。

图3 不同通风量系数 S 下 ^{222}Rn 衰变常数对室内氡浓度

2.4 室内氡源体积与房间体积的影响

前人的模型均是以室内不同氡源的析出面积与表面析出率来表述氡含量,再通过相关分析,获得室内氡的浓度。这样分析可能有一定的缺陷,由于不同的建筑物具有不同的建筑结构,如地板、墙壁的厚度也许就不一致。因此,其结果具有一定的误差,特别是涉及到家用燃料和供水时。而式(6)用不同室内氡源进入率与氡源的体积来构建定量分析,能更好的把房间地板和墙壁等的厚度以及家用燃料和供

水充分考虑进去,从而减少计算误差。

3 结论

在假定室内外氡浓度变化时保持均一混合的基础上,根据室内外空气流动平衡理论与氡自身衰变的特性,建立了一个非线性的室内氡浓度变化定量模型。该模型的建立,能比较好地反映房间的通风量系数 S 、时间 t 和室内氡浓度变化的关系,特别是在建筑设计过程中,利用该模型中房间室内体积 v 、房间通风量系数 S 以及时间 t 与室内氡浓度的关系,可设计出一个有效降低室内氡浓度的房间通风量系数。同时,提供了一个利用房间的通风量系数和空气流动速率来分析室内氡浓度变化的技术方法。模型模拟结果显示:室内氡的浓度变化不仅受不同氡来源含量的影响,还受空气流动速率和房间通风量系数、房间的体积、衰变时间等的影响。当房间的通风量系数一定时,可以通过延长通风时间来降低室内氡的浓度,且当通风时间达一定值时,室内外空气氡浓度趋向一致;当时间一定时,可扩大通风量系数 S 来减小室内氡的浓度, S 大于一定值之后,室内外氡浓度趋向一致;并可以结合氡进入率与氡源的体积来进行预测室内氡浓度。模拟结果值与前人的实测结果存在一致性,这不仅说明建立室内氡浓度变化定量模型的可靠性,而且为调控室内氡浓度以及环境评价提供了技术支持。

参考文献:

- [1] UNSCEAR 1993 report: Sources and effects of ionizing radiation [R]. New York: United Nations, 1993.
- [2] 王振基,唐方东,何林峰,等. 标准氡室内氡气体积活度的计算方法与测量验证[J]. 中国计量,2010(6): 68-70.
Wang Z J, Tang D F, He L F, et al. Calculation method and testing validation of volume activity of radon in standard radon chamber [J]. China Metrology, 2010(6):68-70.
- [3] 连福龙,孟娟. 主动式活性炭盒法测氡影响因素研究[J]. 广东微量元素科学,2010,17(8):51-54.
Lian F L, Meng J. Research on affecting factors of measuring radon by active carbon box method [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2010, 17(8): 51-54.
- [4] 竺云波,何小金. 居室氡浓度及其影响因素分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(3): 78-80.
Zhu Y B, He X J. Indoor radon concentration and the analysis of influence factors [J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(3): 78-80.

- [5] 张强, 邓跃全, 古咏梅, 等. 建材制品中测定氡的影响因素及其在防氡建材分析中的应用研究[J]. 核技术, 2007, 30(3): 236-240.
Zhang Q, Deng Y Q, Gu Y M, et al. Study on influencing factors in radon measurement of building materials and its application in research of radon prevention materials [J]. Nuclear techniques, 2007, 30(3): 236-240.
- [6] 李先杰, 丘寿康, 刘纯魁. 氡析出率测量仪的检定装置[J]. 核射防护, 2008, 28(4): 197-201.
Li X J, Qiu S K, Liu C K. A calibration facility for radon fluxmeter [J]. Radiation Protection, 2008, 28(4): 197-201.
- [7] 王榆元, 冀东. 含水率对建材砖氡析出率的影响[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(2): 285-287, 300.
Wang Y Y, Ji D. Effect of moisture on radon exhalation rate of the building material bricks [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2010, 30(2): 285-287, 300.
- [8] 李晓玲. 我国室内氡污染现状及相关控制标准[J]. 四川环境, 2008, 27(6): 100-103.
Li X L. Review on indoor radon situation and its control standards in China [J]. Sichuan Environment, 2008, 27(6): 100-103.
- [9] UNSCEAR 2005 report: Sources and effects of Ionizing radiation [R]. New York: United Nations, 2005.
- [10] Ie1Seh G, Ferry C. Study of a predictive methodology for quantification and mapping of the ^{222}Rn exhalation rate [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2002, 63(2): 15-33.
- [11] Fazalur R. Application of the can technique and radon gas analyze for radon exhalation measurements [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, 59(3): 353-358.
- [12] Eseobar V G. Procedures for the determination of ^{222}Rn exhalation and effective ^{226}Ra activity in soil samples [J]. Applied Radiation and Isotopes, 1999, 50(5): 1039-1047.
- [13] 卢新卫, 李贵斌. 室内氡暴露及其对人体健康的影响[J]. 辐射防护, 2005, 25(2): 122-126.
Lu W X, Li G B. Study on indoor radon exposure and its effect on human health [J]. Radiation Protection, 2005, 25(2): 122-126.
- [14] 中国辐射防护研究院的研究报告[R]. 北京: 中国辐射防护研究院, 2012.
- [15] 俞义樵, 任天山. 室内氡的来源和特性[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 1999, 22(3): 85-91.
Yu Y Q, Ren T S. Sources and characters of indoor radon [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 1999, 22(3): 85-91.
- [16] Jonassen N. Exhalation of radon-222 from building materials and walls [C]. Vienna: NRE III, CONF-780422, 1980: 360.
- [17] Gesell T F. Epidemiological implications of radon in public water supplies [C]//Proceedings of the specialist meeting on the assessment of radon and daughter exposure and related biological effects. Vienna: RD Press, 1982: 120.
- [18] Gesell F. Occupational radiation exposure due to radon-222 in natural gas and natural gas products [J]. Health Physics, 1975, 29: 881.
- [19] Collé R. Radon transport through and exhalation from building materials [M]. New York: U. S. National Bureau of Standards, 1981.
- [20] 王玫. 土壤氡与室内氡浓度关系的研究[J]. 中国预防医学杂志, 2005, 6(1): 21-22.
Wang M. Relationship between radon in soil and indoor [J]. Chinese Journal of Preventive Medicine, 2005, 6(1): 21-22.
- [21] UNSCEAR 2000 report: Sources and effects of Ionizing radiation [R]. New York: United Nations, 2000.
- [22] Lin L Q. Indoor radon measurements in Beijing area [J]. The Sciences of the Total Environment, 1991, 107: 255.

(编辑 王秀玲)