

# 现有和新近的氡控制系统建筑：回顾

波利马博·拉曼，诺林·特里斯  
土木工程局，加拿大渥太华

**摘要：**为支持新的加拿大氡气指南的实施，全面审查氡气缓解技术在世界各国进行了使用，特别强调了有气候的北美和欧洲和类似于加拿大的建筑技术。本次审查的结果在此呈现为对管理人员的帮助氡控制计划、提供氡测试和缓解服务的公司以及其他相关方，均在加拿大和其他地方，他们正面临实施氡控制战略的问题。多种氡气缓解措施世界各地都采用了各种策略，并且都在降低氡浓度方面取得了一些成功。一般来说，涉及对房屋进行物理改造（例如子板减压）的主动缓解技术在以下方面更有效与被动技术相比，实现持续和大量的氡减少（例如改善通风或裂缝密封）。在很大程度上，最佳缓解策略的选择将取决于建筑类型、土壤条件和气候。修复后应定期测量氡水平，可能每5年测量一次，以确保浓度继续保持在可接受的水平。

**关键词：**大氡气；氡控制；系统建筑；氡测试；房屋改造

## RADON CONTROL SYSTEMS IN EXISTING AND NEW CONSTRUCTION: A REVIEW

Bliss Mahbub Rahman and Naureen .Tracy  
Civil Engineering Bureau, Ottawa, Canada

**Abstract:** In support of the implementation of the new Canadian radon guideline, a comprehensive review of radon mitigation techniques used in countries around the world was undertaken, with particular emphasis on North America and Europe that have climates and construction techniques similar to Canada. The results of this review are presented here as an aid to administrators of radon control programmes, companies offering radon testing and mitigation services and other concerned parties, both in Canada and elsewhere, who are facing issues of implementing a radon control strategy. A wide variety of radon mitigation strategies have been employed worldwide and all have achieved some success in reducing radon concentrations. Generally, active mitigation techniques involving physical alterations to a house (e.g. sub-slab depressurisation) are more effective in achieving a sustained and substantial radon reduction than passive techniques (e.g. improved ventilation or sealing of cracks). To a large extent, the choice of an optimal mitigation strategy will depend on the building type, soil conditions and climate. Radon levels should be measured at periodic intervals after remediation, perhaps once every 5 y, to ensure that concentrations continue to remain at acceptable levels.

**Keywords:** radon gas, radon control, system building, radon testing, home renovation

### 引言：

地球表面附近普遍存在的镭提供了人类暴露于其中的氡气及其衰变产物的持续来源。控制这种暴露的环境条件变化很大。由于室内压力通常低于室外压力，地下的氡可以通过直接从土壤中扩散或通过地基裂缝渗入建筑物。氡也可以从地下水和建筑材料进入建筑物，尽管来自建筑材料的氡的贡献非常小。一旦进入建筑物，它可以在封闭的地方积聚，并达到比室外更高的浓度。最

近的研究表明，在住宅中经常发现的氡及其衰变产物会导致肺癌的显著风险。因此，国际放射防护委员会、国际原子能机构（IAEA）和欧盟就控制家庭和职业氡暴露提供了建议。此外，一些国家已经制定了室内空气中氡的指导方针。

在加拿大，联邦省领土辐射保护委员会（FPTRPC）建议将加拿大关于家庭和某些公共建筑中氡浓度的指南从 800 降低到 200 Bqm<sup>-3</sup>。2007 年 6 月，该指南被采纳

为加拿大的官方氡气指南。FPTRPC 还建议建立氡测试和缓解程序。

在实施这些建议时，很快就发现加拿大缺乏有关当前缓解技术的知识和经验。在过去的几十年里，全球在氡气减排领域的经验发生了相当大的变化。因此，作者对其他国家的氡气减排实践进行了审查，以确定哪种技术或技术组合可能最适合加拿大的环境和建筑实践。本次审查的结果在此呈现为对氡控制计划管理人员、提供氡测试和缓解服务的公司以及加拿大和其他地方面临实施氡控制战略问题的其他相关方的帮助。

首先简要介绍了现有和新建建筑物中常用的氡缓解技术。然后，作者转向最近邻国美国的经验，然后研究了英国和北欧的实践，这些地方的建筑和气候状况与加拿大相似。它还包括有关南欧和世界其他地区实践的信息。最后，总结了最有效的方法，并确定了对未来工作的关注。

### 一、现有建筑物中的氡气减排

对家庭氡暴露的干预通常从测量氡浓度开始。如果浓度超过某个指导值，则采取措施将氡气水平降低到指导值以下。现有建筑物中的氡减排措施可分为两大类：

- 防止氡进入室内空间的技术，即改变室内和室外压力之间的梯度并密封所有可能的裂缝、开口和爬行空间；

- 氡进入后去除氡的技术，即经常采用的措施包括自然通风或机械通风。

这些技术可以是主动的也可以是被动的。被动系统不需要任何形式的机械辅助，而主动系统则依赖泵或其他机械设备。被动系统的例子包括不透水的氡气屏障、墙壁通风口和窗户通风口。主动系统的示例包括风扇辅助的子板减压/通风系统和建筑物的正压。主动系统通常更有效，但存在初始成本高、持续运营成本高以及需要定期检查和维修等缺点。在主动/被动房屋通风系统中，自然通风可以用室外空气代替含氡的室内空气，还可以中和压力。这通常通过打开窗户来实现。如果打开足够数量的窗户和通风口，自然通风可以将氡浓度降低多达 90%。

### 二、新建建筑中的抗氡特性

采用抗氡结构（RRC）技术建造的新房通常依赖于减少土壤气体进入点并提供将气体排放到外部的途径的被动控制措施。任何一种方法的有效性将取决于每个房屋的独特特征、氡气水平、氡气进入途径以及工作的彻底和仔细程度。氡气控制系统通常可以被认为是有用的，

如果它：

- 简单且便宜，
- 将氡气含量降低 50% 以上，
- 也降低其他土壤气体的浓度，
- 提高能源效率，
- 使用被动系统，如果发现氡气水平升高，可以轻松升级为主动系统，并且有助于控制水分，有时甚至可以消除地下室常见的“霉味”。

为了保护氡水平升高地区的公众健康，世界范围内已经开发了各种施工技术。这些技术可能会根据不同的基础和场地要求而有所不同。已发现以下技术在 RRC 中很有用。当这些与良好的建筑实践相结合时，通常可以以相对简单且具有成本效益的方式实现氡抗性。

- 底板减压：这种方法包括将塑料管穿过地基并进入地下，以便将氡气排出，并在排气扇的帮助下将氡气排入外部空气。该系统通常被认为是降低氡水平的最有效方法。

- 砌块墙或踢脚板通风：该系统从混凝土砌块墙内的空间中抽取氡气，然后才能进入房屋（“墙吸”）或将空气吹入砌块墙，以防止氡气进入墙壁（“墙加压”）。尽管此方法可用于任何氡水平，但它最适合高于 1500 Bqm-3 的水平。

- 地基排水吸力：一些房屋的地基通过穿孔管或排水瓦将水排出。这些瓷砖很少完全充满水。如果这些排水瓦在房屋周围形成部分或连续的环路，它们可能会充当将氡气从房屋中带走的管道。

- 热回收通风或热交换器：换气扇用于将富含氡的室内空气替换为室外空气。热回收系统利用废气中的热量来加热进入的空气。在有空调的房子里，在温暖的天气里，这个过程是相反的：排出的空气被用来冷却进入的空气。这可以节省 50% 到 80% 的热量/凉爽度，这些热量/凉爽度会在没有热交换器的等效通风系统中损失。

- 水处理：水中氡的潜在问题是使用水时氡释放到空气中。氡的释放量取决于水中的初始氡浓度，并且会随着水温和暴露于空气的表面积的增加而增加。当水来自离房子很近的井或泉水时，水中的氡浓度最高。可以通过将水中的氡喷入密闭的空气空间、引入气泡或将水储存在水箱中直到氡衰变来去除水中的氡。另一种方法是使用颗粒活性炭（GAC）从水中去除氡。GAC 方法已经经过更广泛的测试，并且更常用于个人家庭。从中心位置处理和分配的水的氡浓度通常较低，因为氡已经有时衰变或逸出到空气中。

- 房屋加压: 该系统保持房屋与土壤接触的部分压力高于土壤中空气的压力, 从而防止包括氡在内的土壤气体进入房屋。要使该系统工作, 房屋必须密封良好, 即没有打开的窗户、通风口等。这种技术也可能有效, 因为它将新鲜的不含氡的空气带入房屋, 从而有效地稀释了氡。这种方法最常见的应用是迫使楼上的空气进入地下室或爬行空间。

- 爬行空间密封和通风: 覆盖裸露的土壤可减少氡流入房屋, 并且还可能提高大多数其他氡减少方法的有效性。连接到地下室的爬行空间可以被覆盖、通风或与地下室的其余部分隔离。

- 裂缝、接缝或孔洞的密封或堵塞: 氡气可以通过地板或墙壁上接触土壤的任何开口, 例如公用管道周围的开口、地下室地板和墙壁之间的接缝, 包括周边(法语)排水沟、其他地漏(尤其是排到干井的排水沟)、顶排混凝土块上的孔以及微小的裂缝和开口(例如混凝土块中的孔隙)。当使用其他方法时, 用填缝化合物密封此类裂缝和开口通常是重要的初步步骤。对于有轻微氡问题的房屋, 单独密封可能就足够了。

### 三、RRC 技术的国际经验

#### 3i. 美国

美国环境保护署(EPA)研究了降低现有和新住宅中高氡浓度的各种方法的有效性。根据 EPA 空气与能源工程实验室的报告, 主动土壤减压(ASD)是美国使用最广泛的技术。这种方法一直被发现以与其他替代方法相当的成本提供最高的氡气减少。还发现其他技术在美国 ASD 困难或不切实际或需要降低氡气的情况下也很有用。EPA 得出的结论是, 建造能够抵抗氡进入的房屋通常比在建造后减少氡渗入更便宜。这些数据代表了 EPA 对单一方法可以实现的最佳减排量的评估。根据每栋房屋的独特特征, 可以获得更高或更低的减免。

EPA 的进一步调查扩展到学校和其他大型建筑, 重点是 ASD 作为缓解技术。还考虑了对供暖、通风和空调(HVAC)系统的修改。调查得出的结论是, 首选方法是设计用于建筑增压的 HVAC 系统, 安装简单的 ASD 并密封子板和建筑内部之间的所有入口通道。板坯减压通常用于公共和私营部门的氡减排; 然而, 值得注意的是, 与政府资助的缓解措施相比, 私营部门更频繁地采用空气对空气热交换器和密封开口。

阿拉斯加的氡气减排经验与加拿大等其他气候寒冷的国家特别相关。阿拉斯加大学的 R.D. Seifert 报告说, 板坯减压加上填缝和密封低于等级是缓解氡的最有效技

术。这可以通过在分级填充物下方安装穿孔管来帮助将土壤气体从建筑物中排出。蒸汽缓凝器(聚乙烯)也应安装在任何类型的新基础系统下方。沿着地下室最深处的一排穿孔管通常足以用于氡气缓解系统。

#### 3ii. 英国

英国已经制定了一项实质性和不断发展的计划, 以尽量减少室内高氡水平。

英国建筑法规适用于自 1992 年以来在氡气影响地区建造的房屋: 但是, 目前没有立法要求在施工完成和房屋被占用后监测此类修复的有效性。建议对受氡气影响地区的所有新房屋进行强制性测试。

在受氡影响的地区建造新房的英国开发商被要求在他们的建筑物中加入简单的保护措施。这些措施取决于该地区氡气风险的严重程度, 如根据国家氡气调查数据绘制的地图所示。由英国环境和地区部资助的建筑研究机构有限公司(BRE)已在英国建筑中开展氡气研究 10 多年。BRE 与建筑商和设计师合作, 为新建筑制定实用、具有成本效益的措施, 并为处理现有建筑的扩建、改建和改建提供指导。BRE 进行了全面的现场试验, 在 300 多座现有建筑中测试各种不同的解决方案, 并在 500 座新建筑中测试英国最常见的建筑类型的保护措施。尽管最初的工作集中在为受影响最严重的物业寻找解决方案, 但也正在考虑为氡含量较低的建筑物提供更简单的解决方案。在开发解决方案时, 已经尝试了一系列技术并取得了不同程度的成功:

(i) 各种类型的板坯减压(在英国称为“氡气池系统”),

(ii) 改善通风: 被动室内通风和被动和主动地板通风,

(iii) 室内加压和,

(iv) 简单的密封。

据报道, 使用传统的风扇辅助集水坑技术对房屋进行施工后修复被证明是非常有效的, 在所有情况下氡浓度都降至行动水平(200 Bqm-3)或更低。在施工期间安装膜并没有导致年平均氡浓度显著降低。正在进行研究以开发真正有效的抗氡措施, 这些措施可以在施工时轻松安装在国内物业中。不同的氡气治理系统的详细信息, 包括在英国的安装和操作模式, 已在各种出版物中进行了描述。最近, 英国 BRE 发布了保护新建建筑物的修订报告。新报告取代了它的早期版本, 这些版本主要用于新住宅和住宅扩建。增加了关于保护扩建、改建和翻新项目的额外设计细节的更详细的建议, 以及关于在建筑

物内建造氦屏障、保护大型建筑物等的建议。

### 3iii. 爱尔兰

根据爱尔兰辐射防护研究所编制的住户指南, 最常见的修复技术包括: 地板下减压(氦气池)、增加地板下通风、正压、增加室内通风以及密封地板上的裂缝和缝隙以及围绕服务入口点。对于特定建筑物最合适的修复解决方案将取决于许多因素, 包括测量的氦气浓度和建筑物的类型。氦气池在降低学校等大型建筑物中的氦浓度方面表现出显著的效果。缓解完成后进行的测量表明, 在大多数安装了氦气池的建筑物中, 氦气浓度降至 0.200 Bqm-3。他们发现最高的氦减少因子与最高的初始浓度有关。

### 3iv. 挪威

已经采用了各种修复技术, 包括安装内部和外部集水槽、对房屋下方的爬行空间进行通风以及安装风扇以增加子板减压。对于氦浓度高于 200 Bqm-3 行动水平的家庭, 挪威不建议仅通过改善通风进行补救。在测量结果显示氦浓度高得无法接受之后, 假设房主会继续通过更频繁地打开窗户来改变他/她的行为是不现实的。涉及建筑物物理变化的缓解技术, 例如氦气池可以说更好, 因为它们通常在安装后不需要建筑物居住者的积极作用才能有效(除了可能不关闭水池风扇)。Rydock 等人的一份报告中, 关于挪威建筑物中氦治理技术的长期可行性发表的数据数量有限。建议在修复后应定期测量氦水平, 也许每 5 年一次, 以确保浓度继续处于可接受的水平。

Birovljev 最近报告了基于加压/减压、通风和密封的挪威建筑氦缓解原则和技术的总体概述。特别强调避免由于湿度、低温、老化等的影响而与每种技术相关的可能问题。报告了使用基于局部过压和建筑物室内空气通风的新技术的测试案例的结果。这些技术通常会带来多种好处。除了降低氦气含量外, 它们还改善了室内空气质量并节省了能源。

### 3v. 瑞典

瑞典的氦气计划已经运行了 13 年。在瑞典, 与其他北欧国家不同, 大约 10% 的住宅是使用含有高浓度 226Ra 的明矾页岩混凝土建造的。尽管如此, 瑞典家庭中氦气的全国平均水平并不比邻国芬兰和挪威高多少。埃里克森等人。注意到只有微量的氦可以通过建筑材料的扩散进入建筑物。应在适当考虑建筑物结构和当地条件的情况下选择最佳缓解策略。用于缓解目的的具有成本效益的补救方法包括密封底板、改善通风、ASD 和密

封地板下的通风。研究得出的结论是, 需要定期重新测试缓解房屋的氦气, 例如每 10 年。

### 3vi. 芬兰

芬兰常用的氦气缓解方法包括密封、ASD 和建筑物加压。据 Korhonen 报道, 在 Denman 和 Kokotti 的研究中发现有效使用通风可以防止氦进入。Arvela 收集了有关不同缓解方法有效性的数据。所有方法的总体平均减少量为 55%。最好的结果是氦气井平均减少高达 90%。氦井的主要作用是降低建筑物下方和周围的土壤空气氦浓度。井通常建在建筑物附近, 氦气通过风扇排出。据观察, 氦井的效率取决于土壤层的均匀性、土壤渗透性、水分含量、井的深度和所用泵的效率, 可能还取决于土壤的霜线。氦气井只在粗糙的土壤中起作用。在有利的条件下, 一口氦气井可以对 20-60 米的距离产生影响。

在对公寓楼的另一项调查中, Arvela 发现最好的缓解效果是通过结合使用氦井和子板减压来实现的, 通常减少 50-80%。新风口的简单安装在一些建筑物中显示出有效的缓解, 减少超过 50%。密封进入路线通常会导致不同程度的减少 30-60%。建议根据具体情况, 首先考虑安装新鲜空气通风口和密封入口通道。如果这些被证明是不充分的, 则应考虑使用板坯减压和氦井。

## 结论

从这篇综述中可以看出, 不同的国家已经采用了各种各样的氦气缓解策略。在很大程度上, 最佳缓解策略的选择将取决于建筑类型、土壤条件和气候。第一步包括了解氦的来源和分布, 以及每栋建筑的建筑特点将如何影响氦的进入、积累和滞留。一般来说, 这里描述的所有修复方法在降低氦浓度方面都取得了一些成功。通过明智的方法组合, 可实现高达 90% 的氦气减少。对于许多国家而言, 实际缓解战略中的第一个建议是安装被动屏障以防止氦从土壤中渗透。这可能涉及密封现有建筑物中的裂缝和开口, 或在新建筑物的地基下铺设防渗膜。通常这种简单的方法可以以最小的成本实现显著的减少。在被动屏障不能充分减少氦的情况下, 人们正在形成共识, 即板坯减压系统(如在北美所指)或氦气池(如英国所指)提供的氦减少量最大, 至少在房屋和较小的建筑物中。一些北欧国家采用的氦井技术是这种方法的一种变体。这种方法适用于现有建筑和新建筑。另一种策略, 通常在大型建筑物中更有效, 是增加通风率。这最好与热交换器结合使用, 以在冬季加热进入的空气并在夏季冷却它。爬行空间和封闭地下室的通风尤为重要。简单地打开窗户可以暂时减少室内氦气, 但这

不太可能提供永久的解决方案。影响氡治理措施实施的其他因素包括成本、能源消耗、不完整的诊断测量、不正确的设计和人类行为。成功的干预过程也应考虑这些因素。房主之间的调查可以进一步了解人类对氡缓解不同阶段的反应,例如。决定减轻对特定技术解决方案的测量、选择和接受的适当和定性检查,并最终确保技术解决方案的正常运行和维护。由于不同的补救措施因不同的原因容易失败,目前尚不清楚缓解后的室内环境将得到充分保护多长时间。例如,是否应该每年、每5年、甚至10年或20年后重新测量缓解后家庭中的氡气水平,以验证氡气浓度是否仍然可以接受?尽管缓解系统在技术上取得了成功,但目前只有一小部分氡过量的建筑物得到缓解。过去十年在缓解发展和实施方面获得的经验表明,如果缓解要被广泛接受,就需要开发更新、成本更低的技术。

#### 参考文献:

[1]Kendall, G. M. and Macpherson, A. J. Approaches to radon control and high radon areas in UK. International Congress Series 1225, 301 - 306 (2002).

[2]Ericson, S., Lindvall, T. and Mansson, L. Indoor ionizing radiation: technical solutions and remedial strategy. Stockholm: Swedish Council for Building Research, Report D7 (1986).

[3]Tommasino, L. Encyclopedia of Analytical Science. Radon, Radiotracer Radiochemical Methods. (New York: Academic Press Ltd) pp. 4359 - 4368 (1995).

[4]Scivyer, C. and Woolliscroft, M. Radon remediation and protection in the UK: the successful application of research. In: Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate '96, Nagoya, Japan, July 21 - 26, Vol. 1, 87 - 92 (1996).

[5]Nero, A. V. and Nazaroff, W. W. Characterising the

source of radon indoors. Radiat. Prot. Dosimetry 7, 23 - 39 (1984).

[6]Lubin, J. H. and Boice, J. D. Jr. Lung cancer risk from residential radon: meta-analysis of eight epidemiologic studies. J. Natl. Cancer Inst. 89, 49 - 57 (1997).

[7]Darby, S. C., Whitley, E., Silcocks, T., Thakara, B., Green, B. M. R., Lomas, P. R., Miles, J. C. H., Reeves, G., Searn, T. and Doll, R. Risk of lung cancer associated with residential radon exposure in South-West England: a case-controlled study. Br. J. Cancer 78(3), 394 - 408 (1998).

[8]Gray, A., Read, S., McGale, P. and Darby, S. Lung cancer deaths from indoor radon and the cost effectiveness and potential of policies to reduce them. BMJ 338 a3110 (2009). doi: 10.1136/bmj.a3110. [http://bmj.com/cgi/content/full/338/jan06\\_1/a3110](http://bmj.com/cgi/content/full/338/jan06_1/a3110). Last accessed on 02 July 2009.

[9]Darby, S. et al. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. BMJ 330, 223 (2005). doi: 10.1136/bmj.38308.477650.63. <http://www.bmj.com/cgi/content/full/330/7485/223>. Last accessed on 02 July 2009.

[10]Daniel, Krewski et al. A combined analysis of north american case-control studies of residential radon and lung cancer. J. Toxicol. Environ. Health A 69(7 and 8), 533 - 597 (2006). <http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a742095762~db=all~order=page>. Last accessed on 02 July 2009.

[11]International Commission on Radiological protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21(1 - 3) (Oxford: Pergamon) (1990).

[12]ICRP. International Commission on Radiological Protection against radon-222 at home and at work. ICRP Publication 65. Ann. ICRP 2(2) (Oxford: Pergamon) (1993).