

薛碧颖, 窦衍光, 林曦, 等. 青岛城市规划区不同岩性氡浓度差异及其控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(9): 10-16.

# 青岛城市规划区不同岩性氡浓度差异及其控制因素

薛碧颖<sup>1</sup>, 窦衍光<sup>1,2\*</sup>, 林曦<sup>1</sup>, 邹亮<sup>1,2</sup>, 王蜜蕾<sup>1</sup>, 胡睿<sup>1,2</sup>, 徐刚<sup>1,2</sup>, 岳保静<sup>1,2</sup>, 张晓洁<sup>3</sup>, 董杰<sup>4,5</sup>, 郝胜优<sup>4,5</sup>

(1 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237;

3 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 4 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局), 青岛 266100;

5 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:** 青岛是典型的花岗岩地区, 通过分析青岛不同岩性的氡浓度探讨其差异和控制因素。结果表明: 青岛不同岩芯的氡浓度变化范围为 0.05~19.51 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 2.56 KBq/m<sup>3</sup> ( $n=210$ ), 花岗岩氡浓度均值为 1.54 KBq/m<sup>3</sup>, 同其他岩性相比氡浓度较低。不同岩性样品氡浓度释放量平均值表现为粉质黏土>泥岩>砂质泥岩>泥质砂岩>闪长岩>粉土/填土>砂岩>正长花岗岩>粗砂>花岗岩>二长花岗质片麻岩。综合来看, 土壤层中氡浓度最高, 其次是沉积岩和岩浆岩, 变质岩中氡浓度最低。不同岩性氡浓度与其铀含量和孔隙率有关, 除花岗岩外, 沉积岩和变质岩中铀含量越高所含氡浓度越高, 沉积岩、岩浆岩以及变质岩的氡浓度和孔隙率大小呈正相关, 沉积岩中氡浓度高于岩浆岩, 推测与其所含的富水砂层有关; 土壤的土质均匀疏松, 孔隙度最高, 氡在土壤中有大量的存储空间, 故在所有岩性中所含的氡浓度最大。

**关键词:** 氡浓度; 不同岩性; 控制因素; 青岛城市规划区

中图分类号: P619.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.116

## 0 引言

氡(Rn)是一种天然放射性气体, 吸入后会对人的呼吸系统造成辐射损伤。目前氡已被世界卫生组织公布为致癌物之一, 是除香烟外导致肺癌的第 2 因素。空气中氡及其子体所致的辐射剂量约占所有天然辐射所致剂量的 54.6%<sup>[1]</sup>, 其中 90% 为室内氡所致<sup>[2]</sup>。室内氡浓度受许多因素影响, 其中地基岩石、土壤中的氡和建材释放的氡是主要来源, 房屋地基的土壤和岩石以及沿裂隙从地下深处迁移来的氡都可以通过扩散和渗透进入室内<sup>[3-4]</sup>, 由于地表分布的各类岩石和土壤中铀、钍含量各不相同, 导致产生的氡也有所差异。

收稿日期: 2021-03-28

资助项目: 中国地质调查局“城市地质调查工程”二级项目“青岛多要素城市地质调查”(DD20189230)

作者简介: 薛碧颖(1992-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事海洋地质与海岸带方面的研究工作. E-mail: biying\_xue@163.com

\* 通讯作者: 窦衍光(1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质与城市地质方面的研究工作. E-mail: douyanguang@gmail.com

目前, 我国对于氡的研究主要集中在土壤层<sup>[5-8]</sup>, 对于岩石的氡释放能力的研究较少。随着我国城市化进程的加快, 地下空间的开发利用已经成为城市发展的趋势, 地下空间是拓展现代城市空间的重要资源, 成为缓解土地资源供应紧张、交通拥堵、生态环境日益恶化等“城市病”问题的重要途径。地下设施处于建筑物底层, 受地基岩石、土壤中氡的影响较大, 同时由于地下设施自然通风条件较差, 室内氡气聚集, 造成氡浓度累积。当建成地下空间后, 氡气活度应在标准规定的范围内, 否则将会对人体造成辐射危害<sup>[9]</sup>。青岛市是典型的滨海山地型基岩城市, 基岩类型以花岗岩为主, 地下空间地质结构特征分明<sup>[10]</sup>。土壤中放射性元素铀、钍含量偏高<sup>[11]</sup>, 土壤层较薄且疏松, 土壤厚度一般为 40~50 cm<sup>[12]</sup>, 氡气储存条件差, 基岩释放的氡气更容易透过疏松的土壤扩散到环境中。沿海城市海风对近地表土壤中的氡气有一定的稀释作用, 使得青岛市土壤氡浓度整体水平不高<sup>[13]</sup>。通过对青岛不同岩性氡浓度的分布特征进行研究, 分析氡浓度分布差异的原因, 不仅对于发现和评价环境放射性污染

具有重要意义, 还可为城市的地下空间开发利用提供决策参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品获取

本研究依托“青岛多要素城市地质调查”下设的陆域工程地质钻探子项目, 选取 7 根钻孔岩芯进行氡浓度测试, 其中 ZK52 和 ZK48 位于即墨区, ZK02、ZK13 和 ZK15 位于西海岸新区, ZK34 位于城阳区, ZK03 位于胶州市。ZK13、ZK15 和 ZK48 工程地质类型为块状侵入岩岩组, ZK03 为厚层状碎屑岩岩组, ZK02 为层状变质岩岩组, ZK34 为上层黏性土多层结构, ZK52 为上层黏性土双层结构, 详细信息见表 1。

表 1 青岛城市规划区采样岩芯信息

Table 1 Bedrock lithology of Qingdao urban planning area			
岩芯名称	岩芯长度/m	主要岩性	地理位置
ZK48	60	花岗岩、闪长岩	即墨区
ZK52	60	粉质黏土、粗砂、闪长岩、花岗岩	即墨区
ZK34	60	粉质黏土、砂质泥岩	城阳区
ZK02	100	二长花岗岩片麻岩	西海岸新区
ZK15	200	正长花岗岩	西海岸新区
ZK13	100	花岗岩	西海岸新区
ZK03	100	填土、泥岩、泥质砂岩、砂岩	胶州市

每根岩芯按照钻孔深度平均取样 30 个, 单个样品质量约 400 g, 共 210 个样品。样品根据岩性差异可划分土壤和岩石 2 种类型, 土壤样品呈粉末状, 以冲填土形式存在于岩芯表层, 现场取样进行装样封存; 岩石样品呈圆柱状, 取样长度 15 cm, 回室内经粉碎机粉碎成接近 2 cm 长度的不规则小石块后装样封存。以上样品采集全部符合相关规范要求, 岩芯具体取样位置见图 1。

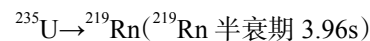
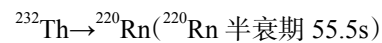
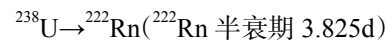
### 1.2 测试方法

装样完成后, 将样品管封存 20 d 以上(氡气与其子体达到久期平衡), 采用 RAD7 测氡仪测定平衡后样品管中的氡气活度。实验中使用的 5 台 RAD7 测氡仪均具有较低的空白值, Win A 和 Win C 计数率均为 0.01 cpm。仪器使用过程中, 需要定期校正探测效率, 2014—2020 年间, 对实验室 4 台仪器进行连续跟踪校准测试, 校准仪器所使用的 4

个标准为仪器公司(美国 DURRIDGE 公司)生产的“ROCK SAMPLE RADON CALIBRATION”, 编号分别为 044、049、050 和 073, 校准结果显示所有仪器处于良好稳定的测试状态, 探测效率均保持在 0.30~0.45 cpm/pCi·L<sup>-1</sup> 之间, 每台仪器测试阶段效率稳定。本实验中所有的氡数据均用经过当月校准的实际效率值计算而得。氡浓度测试工作在中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室完成。

## 2 结果

环境空气中的氡主要来源于土壤、岩石和各种地质体等<sup>[14-16]</sup>, 自然界中存在 3 种不同半衰期的氡同位素, 即<sup>222</sup>Rn、<sup>220</sup>Rn 和<sup>219</sup>Rn, 分别来源于天然放射性元素铀、钍和锕系同位素<sup>[17]</sup>, 氡同位素半衰期分别为:



后两者半衰期很短, 因此重点关注<sup>222</sup>Rn 的特征和危害<sup>[17]</sup>。

岩芯的氡浓度范围为 0.05~19.51 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 2.56 KBq/m<sup>3</sup> (n=210)。其中, 整体氡浓度最高的岩芯为 ZK34, 浓度均值为 4.94 KBq/m<sup>3</sup>, 整体氡气活度最低的岩芯为 ZK02, 浓度均值为 0.31 KBq/m<sup>3</sup>, 各岩芯的岩性柱状图和氡气空间分布如图 2 所示。

ZK02 钻孔岩性表现为不同风化程度的二长花岗岩片麻岩, 氡浓度变化范围为 0.05~1.86 KBq/m<sup>3</sup>, 整根钻孔氡浓度较低且各层位之间氡浓度波动较小。

ZK03 钻孔岩性 0~4.0 m 为填土, 4.0~9.4 m 为全风化泥岩, 9.4~51.0 m 为泥质砂岩, 51.0~61.3 m 为泥岩, 61.3~76.2 m 为泥质砂岩, 76.2 m 以下为砂岩, 氡浓度变化范围为 0.11~8.34 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 3.58 KBq/m<sup>3</sup>。

ZK13 钻孔岩性均为微风化花岗岩, 氡气变化范围为 0.28~2.05 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 0.97 KBq/m<sup>3</sup>。

ZK15 钻孔岩性为不同风化程度的正长花岗岩, 氡浓度变化范围为 0.29~19.51 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 2.33 KBq/m<sup>3</sup>。

ZK34 钻孔 0~20 m 以粉质黏土为主, 20 m 以下为强风化砂质泥岩。氡浓度变化范围为 0.88~11.35 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 4.94 KBq/m<sup>3</sup>, 该孔 0~20 m 内氡浓度普遍高于 20~60 m, 与其他钻孔相比, 该钻

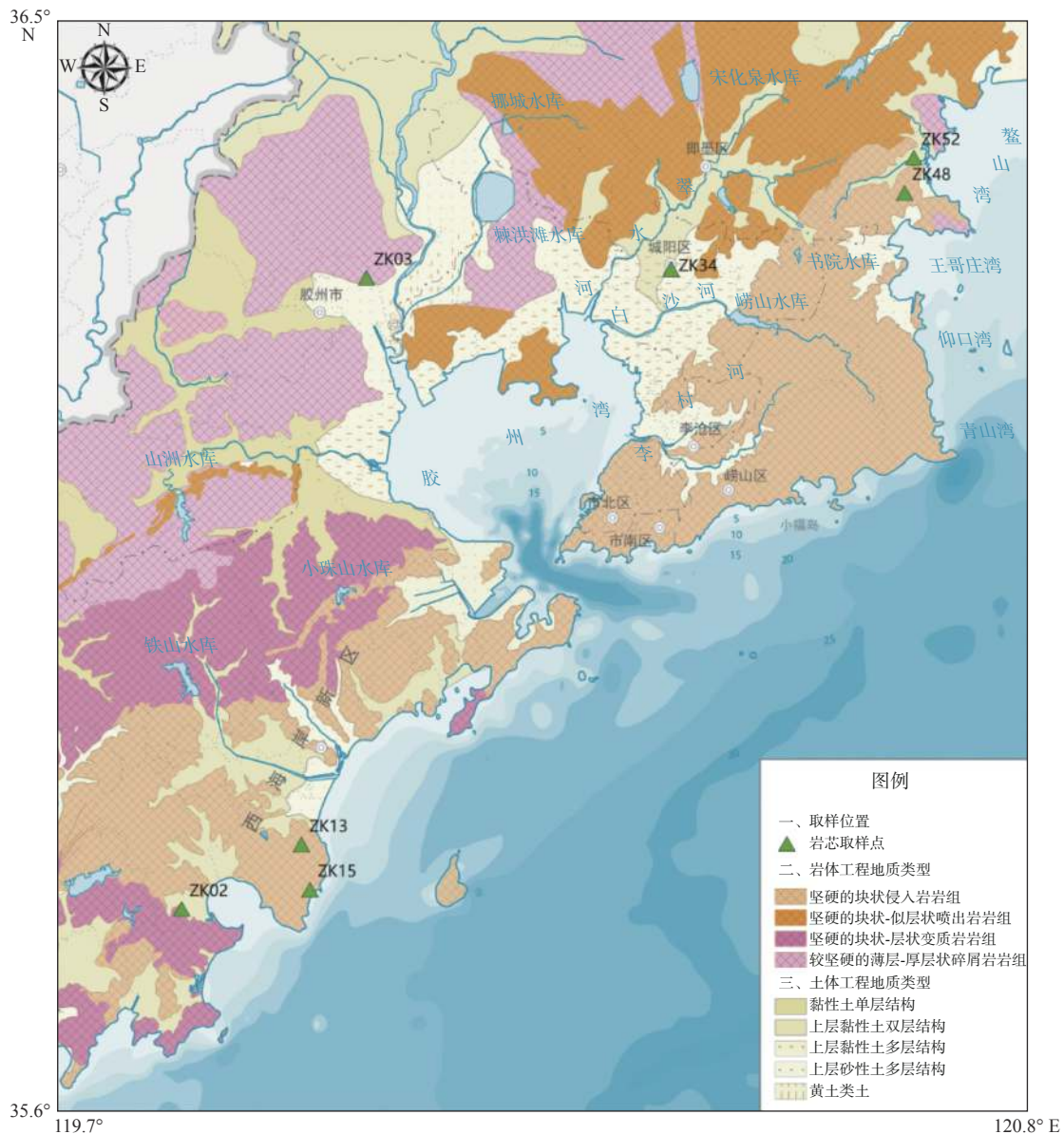


图1 岩芯取样分布

Fig.1 Map of sampling sites

孔氡浓度较高。

ZK48 钻孔 0~5.6 m 为强风化花岗岩, 5.6~15.2 m 为强风化闪长岩, 15.2 m 以下为不同风化程度的花岗岩。氡浓度变化范围为 0.32~9.21 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 2.01 KBq/m<sup>3</sup>, 在 3.9、23.1 和 34.1 m 处各有一个高值点。

ZK52 钻孔 0~7.5 m 为粉质黏土, 7.5~15.5 m 为粗砂, 15.5~17.5 m 为闪长岩, 17.5 m 以下为不同风化程度的花岗岩, 氡浓度变化范围为 0.43~16.82 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 3.92 KBq/m<sup>3</sup>, 与其他钻孔相比, 该孔氡浓度较高且各层位间变化幅度较大。

对比 7 根钻孔的岩性资料发现, 不同岩性样品氡浓度释放量不尽相同。其中二长花岗质片麻岩

氡浓度均值最低, 为 0.31 KBq/m<sup>3</sup>, 粉质黏土氡浓度均值最高, 为 4.92 KBq/m<sup>3</sup>。本研究中土壤层氡浓度范围为 0.33~11.35 KBq/m<sup>3</sup>, 释放均值为 3.6 KBq/m<sup>3</sup>, 与前人研究得出的均值 4.5 KBq/m<sup>3</sup> 相近<sup>[18]</sup>, 研究结果小于世界土壤氡浓度均值 7.4 KBq/m<sup>3</sup><sup>[19]</sup> 和中国土壤氡浓度均值 7.3 KBq/m<sup>3</sup><sup>[6]</sup>, 属于土壤氡浓度正常区域。不同岩性样品氡浓度释放量平均值表现为粉质黏土>泥岩>砂质泥岩>泥质砂岩>闪长岩>粉土/填土>砂岩>正长花岗岩>粗砂>花岗岩>二长花岗质片麻岩。

综合来看, 土壤层中氡浓度最高, 其次是沉积岩和岩浆岩, 变质岩中氡浓度最低(图 3), 土壤层氡浓度平均值为 3.6 KBq/m<sup>3</sup>, 沉积岩氡浓度平均值为



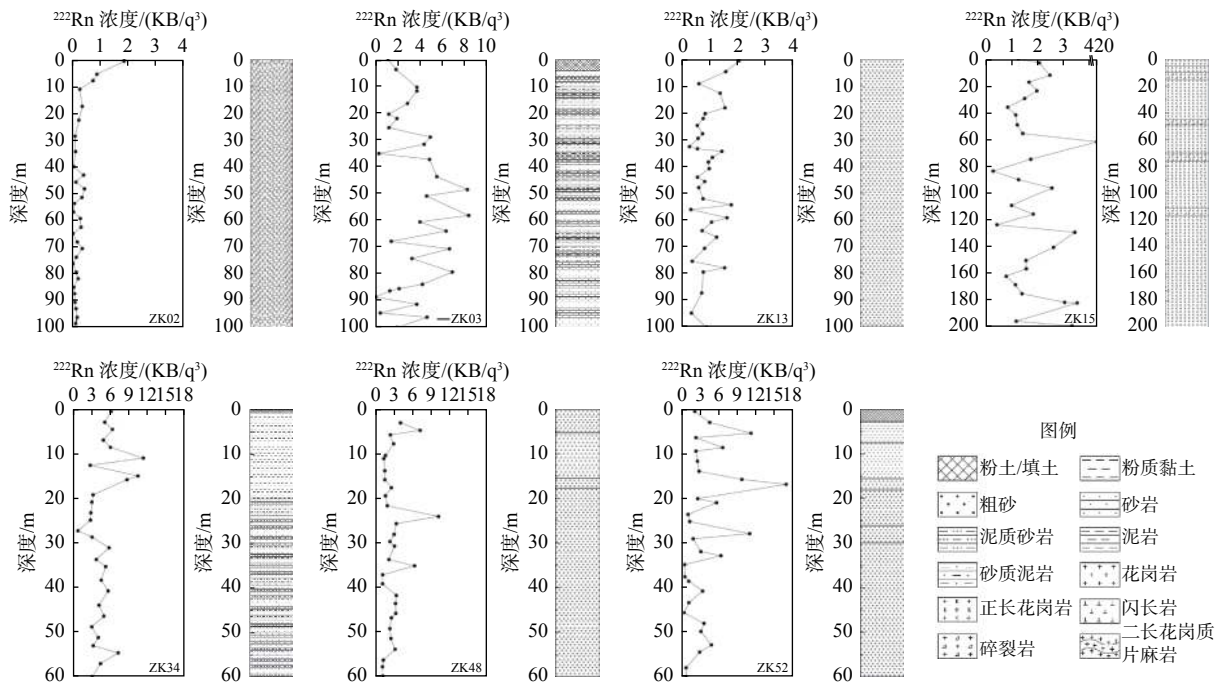


图 2 不同岩芯氡浓度空间分布特征  
Fig.2 The spatial distribution of radon in cores

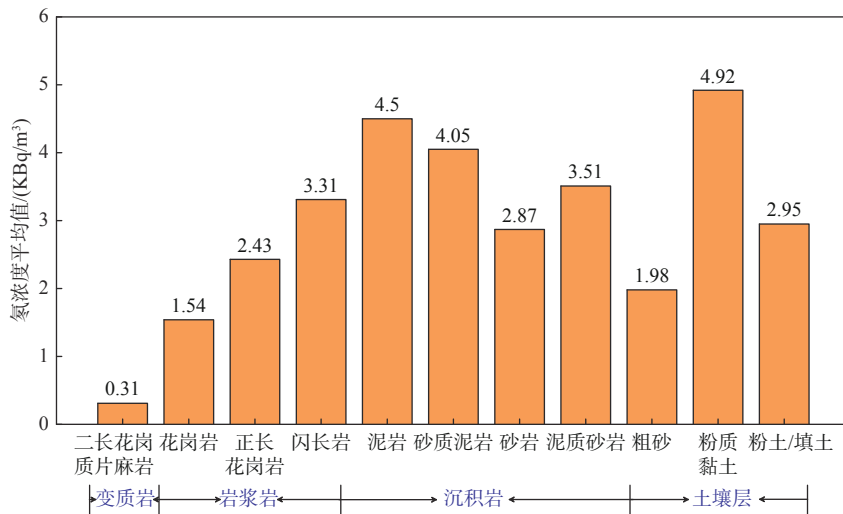


图 3 不同岩性样品氡浓度  
Fig.3 Radon concentrations in different lithological samples

3.43 KBq/m<sup>3</sup>, 岩浆岩氡浓度平均值为 1.91 KBq/m<sup>3</sup>, 变质岩氡浓度平均值为 0.31 KBq/m<sup>3</sup>。尽管青岛市基岩以花岗岩为主, 但花岗岩氡气释放浓度均值为 1.54 KBq/m<sup>3</sup>, 同其他岩性相比氡浓度较低。

### 3 讨论

#### 3.1 不同岩性对铀含量和氡浓度的控制

在青岛城市规划区选取不同岩性进行氡浓度

测试, 主要岩性有: 花岗岩、闪长岩、正长花岗岩、二长花岗质片麻岩、泥岩、砂岩以及第四系覆盖的土壤层(粗砂、粉质黏土、粉土/填土)。选取的花岗岩和闪长岩主要分布在即墨和西海岸新区, 砂岩和泥岩主要分布在胶州湾北侧的城阳区和胶州市, 二长花岗质片麻岩分布在古镇口湾西侧, 基岩之上为土壤覆盖层。部分岩性的特征描述如下: 花岗岩为肉红色-褐色, 中粗粒结构, 块状构造, 节理裂隙发育, 沿裂隙面见铁色侵染, 风化程度主要为中风化和微风化; 闪长岩为灰绿色, 粒状结构, 矿物成分以长石、

角闪石、辉石及黑云母为主;二长花岗质片麻岩为黄褐色,中粗粒结构,片麻状构造,矿物成分以斜长石、钾长石、石英、黑云母及少量角闪石为主;泥岩为深灰色,碎裂结构,矿物成分以黏土矿物、长石和石英为主;砂岩为红褐色,细砂结构,主要矿物成分为长石、石英及岩屑,泥质胶结;粉质黏土为黄褐色,可塑—硬塑状,含约10%~15%风化岩碎屑,部分可见铁锰质结核和钙质结核。

研究发现,青岛市土壤氡浓度平均为 $3.6 \text{ KBq/m}^3$ ,较全国水平整体偏低。不同岩性的铀含量各不相同<sup>[20]</sup>,火成岩中铀含量随 $\text{SiO}_2$ 含量增高而增高,故花岗岩中氡浓度略高<sup>[11]</sup>;沉积岩中铀含量与沉积环境和所含有机质、炭质、磷物质的量

有关,一般炭质泥页岩中的铀含量较高<sup>[21]</sup>(表2);此外,ZK34和ZK03孔岩性以沉积岩为主,主要位于青岛大沽河、墨水河和白沙河附近,砂层为主要的富水岩层,氡气可溶于地下水<sup>[22]</sup>,地下水氡浓度与地下围岩的铀含量成正比<sup>[23]</sup>,推测青岛沉积岩层中氡浓度偏高还与富水砂层有关;变质岩中主要造岩矿物的铀含量非常低,大多数沿铁镁矿物裂隙、边缘和解理面富集,在磷灰石、锆石、金红石等副矿物中铀含量也非常少,含量通常只有百万分之一<sup>[24]</sup>,因此氡浓度在变质岩中最低。除花岗岩外,沉积岩和变质岩的氡浓度总体上和铀含量呈正相关(图4),沉积岩中氡浓度高于岩浆岩,推测与其所含的富水砂层有关。

表2 岩石和土壤中铀含量平均值与青岛市氡浓度平均值对比

Table 2 Comparison of average contents of uranium and radon concentrations in bedrocks and soils

分类	花岗岩	中性火成岩	基性火成岩	石灰岩	泥页岩	砂岩	变质岩	土壤
铀/ $\times 10^{-6}$	4.70 <sup>[17]</sup>	2.40 <sup>[17]</sup>	0.90 <sup>[17]</sup>	2.20 <sup>[21]</sup>	3.60 <sup>[21]</sup>	2.50 <sup>[21]</sup>	0.10~0.22 <sup>[24]</sup>	1.80 <sup>[17]</sup>
氡/( $\text{KBq/m}^3$ )	1.54	/	/	/	/	2.87	0.31	3.6

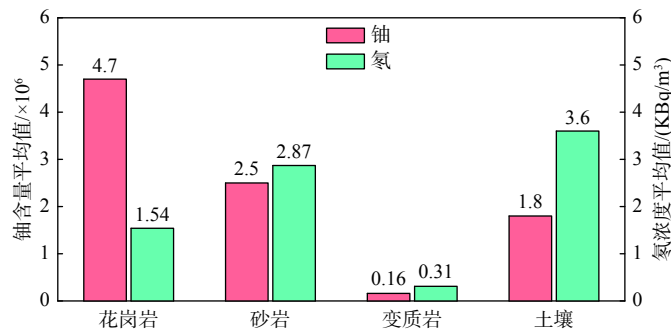


图4 不同岩性样品铀含量和氡浓度对比

Fig.4 Comparison of uranium content and radon concentration in different types of lithological samples

### 3.2 孔隙率对氡浓度的制约

岩石和土壤中氡浓度受多种因素影响,氡浓度与岩石粒度、孔隙率、几何形状以及测试时的温度、湿度和气压等条件有关<sup>[16,25]</sup>,由于实验中所有样品的原始状态、测试条件和参数等均保持一致,因此,孔隙率可能是影响氡释放的重要因素。氡迁移至地表主要分为2个阶段:①固体晶格中的放射性同位素经 $\alpha$ 衰变形成氡原子,氡原子通过核反冲作用离开固体晶格进入连通的微裂隙中形成可迁移的氡<sup>[26]</sup>;②可迁移的氡原子在介质的孔隙、裂隙中通过各种机制向多孔介质表面运移<sup>[27]</sup>,多孔介质的孔隙率会对氡的迁移有影响(图5、6)。

不同岩性的孔隙率存在差异。砂质泥岩样品

孔隙率范围为18.63%~25.17%<sup>[30-31]</sup>,变质岩孔隙率范围约为0.2%~0.5%<sup>[32-33]</sup>,不同风化程度的花岗岩会随着风化程度的增加孔隙率变大,其中微风化花岗岩孔隙率约为1%~2%,中风化花岗岩孔隙率约

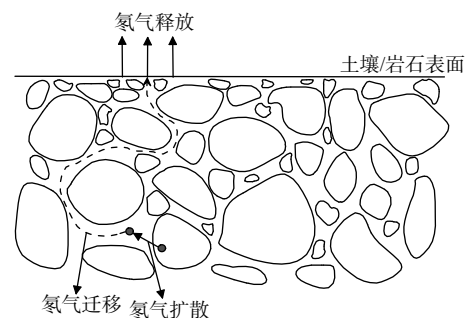
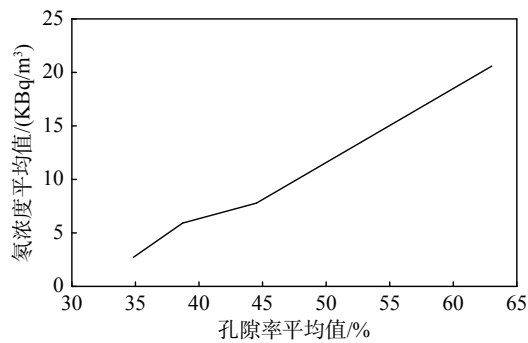


图5 氡气迁移示意<sup>[28]</sup>

Fig.5 Schematic map of radon transportation<sup>[28]</sup>

图 6 氡浓度和孔隙率关系<sup>[29]</sup>Fig.6 The relationship between radon concentration and porosity<sup>[29]</sup>

为 3%~4%<sup>[34]</sup>, 二长花岗岩的孔隙率为 0.37%<sup>[35]</sup>, 平均孔隙率约为 1.8%~2.6%, 总体上看沉积岩相比花岗岩和变质岩的孔隙率明显偏高。砂岩、泥岩等沉积岩由于其孔隙率较高, 内部产生氡气更易扩散, 使得氡浓度较高。表层土壤为粉土/填土、粉质黏土等时, 土质均匀且疏松, 孔隙度再次增大, 氡在土壤中有大量的存储空间, 故在所有岩性中所含的氡浓度最大。

对于地下空间选址时, 要摸清岩性、断裂、土壤等地质情况<sup>[36]</sup>, 防止建筑物地基底层土壤和岩土中的氡气进入室内, 避免出现氡异常情况。当建成地下空间后, 应及时检测氡气浓度, 若超过《地下建筑氡及其子体控制标准》中规定的 0.4 KBq/m<sup>3</sup> 时<sup>[37]</sup>, 要采取相应的降氡措施, 如增加通风换气量<sup>[38]</sup>, 使地下空间的氡浓度不会对人体造成辐射危害。

## 4 结论

(1) 青岛不同岩芯的氡浓度变化范围为 0.05~19.51 KBq/m<sup>3</sup>, 平均值为 2.56 KBq/m<sup>3</sup> (n=210)。

(2) 不同岩性样品氡浓度释放量平均值表现为粉质黏土>泥岩>砂质泥岩>泥质砂岩>闪长岩>粉土/填土>砂岩>正长花岗岩>粗砂>花岗岩>二长花岗质片麻岩, 综合来看, 土壤层中氡浓度最高, 其次是沉积岩和岩浆岩, 变质岩中氡浓度最低。

(3) 青岛城市规划区不同岩性的氡浓度与其铀含量和孔隙率有关。除花岗岩外, 沉积岩和变质岩中铀含量越高所含氡浓度越高, 沉积岩、岩浆岩和变质岩的氡浓度与孔隙率大小呈正相关。沉积岩中氡浓度高于岩浆岩, 推测与其所含的富水砂层有关; 土壤的土质均匀疏松, 孔隙度最高, 氡在土壤中有大量的存储空间, 故在所有岩性中所含的氡浓度最大。

## 参考文献:

- [1] 联合国原子能辐射效应科学委员会. 电离辐射源与效应[M]. 山西: 山西科学教育出版社, 2002: 1-281.
- [2] 张志勇, 王强. 新沂土壤中氡浓度的放射性调查研究[J]. 能源技术与管理, 2014, 39(02): 186-188.
- [3] 马吉英. 室内氡对人体健康的危害及防护[J]. 中国辐射卫生, 2012, 21(4): 506-508.
- [4] SZAJERSKI P, ZIMNY A. Numerical analysis and modeling of two-loop experimental setup for measurements of radon diffusion rate through building and insulation materials[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113393.
- [5] 符适, 孙浩, 张浩. 深圳市光明新区土壤氡浓度水平及分布规律调查[J]. 广东科技, 2010, 19(20): 6-8.
- [6] 王喜元. 中国土壤氡概况[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 19-35.
- [7] 张建伟, 赵全升, 郭秀岩, 等. 聊城—兰考断裂及其土壤汞、氡气异常[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1419-1425.
- [8] 周云龙, 岑况, 施泽明. 四川阿坝土壤与空气中氡气浓度及分布调查[J]. 现代地质, 2013, 27(4): 993-998.
- [9] 谢润楠. 花岗石氡析出率及室内氡辐射风险评估研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015: 8-12.
- [10] 智庆玺, 张可宗, 栾勇鹏, 等. 新空间格局下青岛城市地下空间开发战略研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(S1): 1518-1525.
- [11] 程业勋, 章晔, 刘庆成. 地质环境中氡浓度的影响因素[C]//1995年中国地球物理学会第十一届学术年会论文集, 湖北: 1995.
- [12] 高正, 李震, 陈鲁宁, 等. 青岛地区土壤氡填图技术方法研究[J]. 中国辐射卫生, 2007, 16(4): 462-463.
- [13] 刘庆成, 陈昌礼, 程业勋, 等. 青岛市环境氡浓度分布规律与预测方法研究[J]. 现代地质, 1998(1): 3-5.
- [14] NAGARAJA K, PRASAD B S N, MADHAVA M S, et al. Radon and its short-lived progeny: variations near the ground[J]. *Radiation Measurements*, 2003, 36(1): 413-417.
- [15] 任天山. 室内氡的来源、水平和控制[J]. 辐射防护, 2001, 21(5): 291-299.
- [16] 秦春艳, 王南萍, 肖磊, 等. 北京广东典型地区室内氡气浓度与地质背景关系[J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 441-444.
- [17] 陈昌礼, 刘庆成, 孙小林. 青岛市氡的环境地质调查初探[J]. 物探与化探, 1997, 21(4): 293-299.
- [18] 姚德, 孙梅, 杨富贵, 等. 青岛城区土壤重金属环境地球化学研究[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 539-550.
- [19] 朱文泉. 人类环境中氡的危害及其治理[J]. 国外铀金地质, 1994, 11(3): 244-248.
- [20] ASHEESH M, SHARMA S K, PANIGRAHI D C. <sup>222</sup>Rn exhalation flux rate and <sup>226</sup>Ra in the soils of a copper-mineralised area[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2020, 191(4): 465-476.
- [21] 沈平, 朱惠英, 徐永昌. 沉积岩中铀、钍、钾分布特征[J]. 沉积学报, 1983(3): 109-122.
- [22] 李亚平, 许正繁. 氡的迁移富集及对环境的影响[J]. 广东地质, 1999, 12(2): 75-78.

- [23] KUO T, TSUNOMORI F. Estimation of fracture porosity using radon as a tracer[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2014, 122: 700-704.
- [24] 多斯特尔, 瞿维珍. 变质岩中的铀[J]. *放射性地质*, 1980, 66(4): 409-414.
- [25] TCHORZ-TRZECIAKIEWICZ D E, KŁOS M. Factors affecting atmospheric radon concentration, human health[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 584: 911-920.
- [26] ROGERS V, NIELSON K. Porosity trends in radon transport through concrete and consistency in defining diffusion coefficients[J]. *Health Physics*, 1997, 72(1): 153-155.
- [27] 冯酉森, 邬剑明, 王俊峰, 等. 自燃火区上覆不同孔隙率介质对氡迁移的影响探讨[J]. *煤炭技术*, 2014, 33(6): 22-24.
- [28] ISHIMORI Y, LANGE K, MARTIN P, et al. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues[M]. Vienna: Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues, 2013: 3-16.
- [29] YUSUFF I M, ADAGUNODO T A, OMOLOYE M A, et al. Interdependency of soil-gas  $Ra^{222}$  concentration on soil porosity at different soil-depths[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1299(1): 12010-12099.
- [30] 张豫川, 潘增志, 王祖耀, 等. 砂岩与砂质泥岩渗透性能试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(2): 301-306.
- [31] 何满潮, 周莉, 李德建, 等. 深井泥岩吸水特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(6): 1113-1120.
- [32] 吴景浓, 龚钢延, 颜玉定, 等. 岩石渗透特性的实验研究[J]. *地震工程学报*, 1989, 11(1): 59-67.
- [33] 王伟, 郑志, 王如宾, 等. 不同应力路径下花岗岩麻岩渗透特性的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(2): 260-267.
- [34] 周小生, 张海亮. 风化花岗岩矿物演化机理及工程特性研究[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2018, 14(4): 43-47.
- [35] 靳佩桦, 胡耀青, 邵继喜, 等. 高温花岗岩遇水冷却后孔隙结构及渗透性研究[J]. *太原理工大学学报*, 2019, 50(4): 478-484.
- [36] 张海薇. 四川成都地区城市地下空间氡的来源及防治[J]. *科技与创新*, 2016, 1(11): 4-5.
- [37] 国家卫生计生委卫生和计划生育监督中心. 中华人民共和国卫生标准汇编, 放射卫生标准卷(下)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 21-84.
- [38] 孙祁, 盖文佳, 江灏, 等. 地下工程降氡技术的应用与现状[J]. *辐射防护*, 2020, 40(5): 462-469.

## BEDROCK RADON CONCENTRATION IN THE QINGDAO URBAN PLANNING AREA AND ITS BEARING ON LITHOLOGY

XUE Biying<sup>1</sup>, DOU Yanguang<sup>1,2\*</sup>, LIN Xi<sup>1</sup>, ZOU Liang<sup>1,2</sup>, WANG Milei<sup>1</sup>, HU Rui<sup>1,2</sup>, XU Gang<sup>1,2</sup>,  
YUE Baojing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaojie<sup>3</sup>, DONG Jie<sup>4,5</sup>, HAO Shengyou<sup>4,5</sup>

(1 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;

3 College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

4 Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute(Qingdao Geological Exploration Development Bureau), Qingdao 266100, China;

5 Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The bedrock of the Qingdao area is dominated by granite. This paper is devoted to the radon concentrations in various bedrocks with different characteristics and influence factors. The results show that the radon concentrations the bedrocks of Qingdao change in a range from 0.05 to 19.51 KBq/m<sup>3</sup>, with an average of 2.56 KBq/m<sup>3</sup> (n=210), and the average is only 1.54 KBq/m<sup>3</sup> for granite, which is much lower than that of other rocks. The average of radon in other samples reads as follows: silty clay > mudstone > sandy mudstone > argillaceous sandstone > diorite > silt / filled soil > sandstone > syenogranite > coarse sand > granite > monzonitic granitic gneiss. Highest radon concentration is found in consolidated soil, followed by sedimentary rock and magmatic rock, and the lowest remains with metamorphic rocks. It is observed that the radon concentrations in bedrocks is positively related to uranium content or porosity. The highest radon concentration observed in sedimentary rocks is not only related to its high porosity, but also the water-rich sandy interlayers in the sedimentary sequence. The unconsolidated soil is loose and porous, there is large space to keep radon-bearing water in the soil.

**Key words:** radon concentration; different lithological rocks; control factors; Qingdao urban planning area