

青岛城市规划区岩芯²²²Rn 含量及其影响因素*

张晓洁^{1,2}, 窦衍光^{3**}, 肖柳⁴, 赵世彬^{1,2}, 张涵^{1,2}, 所芳屹²

(1. 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, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100;
3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266100; 4. 通标标准技术服务(青岛)有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要: 本研究采用实验室模拟的研究方法,对青岛城市规划区岩芯样品进行了²²²Rn 释放量测试,根据岩芯中²²²Rn 的深度分布特征,进一步测定了岩芯的²²⁶Ra 含量。结果表明岩芯中²²²Rn 活度范围为 0.1~16.8 kBq·m⁻³,平均值为(1.9±2.6) kBq·m⁻³(n=180),不同类型样品的²²²Rn 释放能力表现为闪长岩>粉质黏土>砂质泥岩>中粗砂>花岗岩。岩芯中²²⁶Ra 含量范围为 6.0~44.0 Bq·kg⁻¹,平均值为(12.1±11.3) Bq·kg⁻¹(n=40),其中²²⁶Ra 在砂质泥岩和中粗砂中含量最低,在闪长岩中含量最高。对于成岩样品,²²⁶Ra 含量和孔隙率可能是影响其²²²Rn 释放量及深度分布的重要因素。

关键词: ²²²Rn; ²²⁶Ra 含量; 孔隙率; 青岛城市规划区

中图分类号: P734

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2022)04-097-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20210126

引用格式: 张晓洁, 窦衍光, 肖柳, 等. 青岛城市规划区岩芯²²²Rn 含量及其影响因素[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 97-104.

Zhang Xiaojie, Dou Yanguang, Xiao Liu, et al. Study on radon concentration in cores and its influence factors in Qingdao urban planning area[J]. Periodical of Ocean University of China, 2022, 52(4): 97-104.

天然放射性物质主要以电离辐射的形式,通过内照射、外照射的方式对人体细胞产生电离作用,破坏细胞结构,抑制细胞的生物活性,从而对人体造成伤害^[1]。与外照射相比,内照射引起的辐射损害对人体更加致命,目前认为吸入剂量是最重要的内照射辐射途径,而吸入剂量主要来源于氡气^[2-3]。2009 年氡气已被 WHO(世界卫生组织)公布为致癌物之一^[4-6],是除香烟以外,导致肺癌的第二大因素^[7-8]。自然界中存在着三种不同半衰期的氡同位素,即²¹⁹Rn($t_{1/2}=3.96$ s)、²²⁰Rn($t_{1/2}=55.6$ s)和²²²Rn($t_{1/2}=3.83$ d),分别来源于铀系、钍系和锕系衰变系。由于三种氡同位素半衰期的差异和检测手段的限制,其中²²²Rn 最受关注,本研究中的氡气仅指²²²Rn。

青岛市是我国沿海重要的中心城市,素有“东方瑞士”之称。青岛基岩以花岗岩为主,主要构造是北东向展布的平缓宽阔褶皱,有多条 NE 向断裂穿过,构成青岛的构造架格^[9]。青岛市区土壤覆盖层很薄,平均深度只有 20 cm 左右^[10]。据全球统计,环境空气中约有 77.7%的氡来源于陆地释放,且其中绝大部分来源于岩石和土壤^[11-13]。

目前我国对于土壤和岩石中氡的研究主要集中在

表层(0~1 m)^[14-16],对深层岩芯中氡气释放能力的研究较少。随着现代城市的高速发展,地下空间的开发利用已经成为城市发展的趋势,与地上空间相比,地下空间更加封闭,更易造成氡气的积累,因此开展深层岩芯中氡气的含量、分布特征及影响因素研究,将为地下空间的合理开发提供参考。本研究采用实验室模拟的研究方法,重点研究青岛城市规划区岩芯(0~100 m)中²²²Rn 含量及深度分布特征,并结合其母体核素²²⁶Ra 的含量,探究岩芯中²²²Rn 释放的影响因素,以期为城市地下空间开发利用提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 样品采集及描述

本研究选取青岛城市规划区 6 根岩芯样品开展研究。其中,ZK06、ZK10、ZK13、ZK34 分布在青岛市主城区;ZK02 分布在黄岛区;ZK52 分布在即墨区(见图 1)。ZK06、ZK34 和 ZK52 岩芯长度为 60 m,ZK02、ZK10、ZK13 岩芯长为 100 m。

6 根岩芯共测试 180 个样品,分为土壤样品和岩石样品两类。根据样品类型差异基本可划分为 5 种,分别为粉质黏土(位于土壤表层,未成岩,包括粉土、素填

* 基金项目:中国地质调查局项目(DD20189230)资助

Supported by Project of China Geological Survey(DD20189230)

收稿日期:2021-03-24; 修订日期:2021-05-18

作者简介:张晓洁(1989—),女,助理实验师,主要从事同位素海洋学研究。E-mail:oucxcj@163.com

** 通讯作者:E-mail:douyanguang@gmail.com

土和粉质黏土)、中粗砂(土壤层,未成岩)、砂质泥岩、花岗岩和闪长岩,其中73%的样品岩性为花岗岩(见表1)。土壤样品呈现粉末状(粉质黏土、中粗砂),以冲填土形式存在于岩芯表层;岩石样品呈圆柱状(花岗岩、砂质泥岩和闪长岩),在沉积层之下。

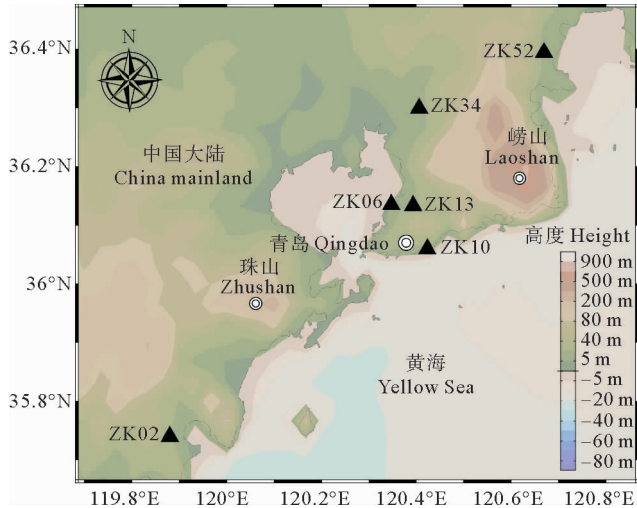


图1 岩芯采样分布图

Fig.1 Schematic map of sampling sites

1.2 样品测试

1.2.1 ^{222}Rn 测定方法 将6根岩芯按照总深度平均差分取样,每根岩芯平均取样30个,每个样品质量约400 g。对于未成岩样品直接进行装样,而对于成岩样品则先粉碎至长度约2 cm的不规则小石块再进行装

样。装样完成后,将样品管封存20天以上(^{222}Rn 与其子体达到久期平衡),用RAD7测氡仪测定平衡后样品管中的 ^{222}Rn 活度。本实验中使用的5台RAD7测氡仪均具有较低的空白值,Win A和Win C计数率低于0.01 cpm。仪器使用过程中,需要每月校正探测效率,校准仪器所使用的4个标准为美国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5台仪器的探测效率均保持在0.30~0.45 CPM($\text{pCi} \cdot \text{L}^{-1}$) $^{-1}$ 之间,每台仪器测试阶段效率稳定。测试过程中仪器的设置参数如下,Protocol: None; Cycle: 00:30; Recycle: 06; Mode: Auto; Thoron: on; Pump: auto; Tone: off; Fomat: med; Units: $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.2.2 ^{226}Ra 测定方法 选取ZK06、ZK13、ZK34和ZK52孔开展 ^{226}Ra 含量分析,其中ZK06和ZK13分别选取9个深度,ZK34和ZK52分别选取11个深度,共计40个样品。样品处理方法如下,将岩芯样品研磨、过筛、装样后密封于10 mL样品管(装样高度为9 cm)中20天,用ORTEC®公司的井型-高纯锗伽马谱仪进行样品测试,测试方法详见参考文献[17]。测试结束后采用GammaVision © v7.02软件对样品测试获取的 γ 射线谱图进行解谱, ^{226}Ra 选取其子体 ^{214}Pb 在351.9 keV能量的活度峰^[18-20]。工作开展期间,井型-高纯锗伽马谱仪在351.9 keV处的能量峰效率偏差小于5%(见表2),测试状态稳定。

表1 不同类型 ^{222}Rn 测试样品量和状态描述

Table 1 Numbers and status description of five types of lithologic samples for radon measurement

样品类型 Sample type	数量/个 Numbers	样品状态 Sample status
粉质黏土(包括粉土、填土和粉质黏土) Silty clay	17	松散粉末状(土壤样品) Bulky powder (soil sample)
中粗砂 Medium coarse sand	10	细颗粒状(土壤样品) Fine particle (soil sample)
花岗岩 Granite	131	圆柱状(岩石样品) Cylindrical (rock sample)
闪长岩 Diorite	4	圆柱状(岩石样品) Cylindrical (rock sample)
砂质泥岩 Sandy mudstone	18	圆柱状(岩石样品) Cylindrical (rock sample)

表2 井型-高纯锗伽马谱仪测试标准时的计数率结果统计($h=9\text{ cm}$, $n=17$)

Table 2 Statistics of counting rate results of well-type gamma spectrometer for standard determination ($h=9\text{ cm}$, $n=17$)

测定核素 Nuclide	^{214}Pb	^{214}Bi	^{210}Pb	^{228}Ac	^{208}Tl	^{40}K
能量峰 Energy peak/keV	351.9	609.3	46.5	911.2	583.1	1460.1
平均值 Average value	23.55%	7.52%	30.38%	6.06%	5.30%	4.07%
中位数 Medion	23.55%	7.51%	30.54%	6.08%	5.30%	4.08%
相对标准偏差 RSD	0.99%	1.10%	2.64%	5.05%	4.59%	0.63%

注:“ h ”代表装样高度;“ n ”代表测试次数。“ h ” is the height of the sample; “ n ” is the numbers of tests.

2 结果与讨论

2.1 岩芯²²²Rn 活度及其深度分布

岩芯的²²²Rn 活度范围为 0.1~16.8 kBq·m⁻³, 平均值为(1.9±2.6) kBq·m⁻³(n=180)。其中, 整体²²²Rn 活度最高的岩芯为 ZK34, 活度均值为(4.9±2.3) kBq·m⁻³(n=30); 整体²²²Rn 活度最低的岩芯为 ZK02, 活度均值为(0.3±0.4) kBq·m⁻³(n=30), 各岩芯²²²Rn 活度范围及均值详见表 3。

世界土壤²²²Rn 活度和中国土壤²²²Rn 活度均值分别为 7.4 kBq·m⁻³[21] 和 7.3 kBq·m⁻³[22] (见表 4),

本研究中岩芯表层的土壤样品²²²Rn 活度范围 0.3~11.4 kBq·m⁻³, 平均值为(4.1±3.3) kBq·m⁻³(n=27), 小于中国土壤²²²Rn 活度均值, 属于土壤²²²Rn 活度正常的区域。姚德等对青岛市土壤²²²Rn 调查的研究结果显示, 青岛市土壤²²²Rn 活度变化范围为 1.7~18.8 kBq·m⁻³, 平均值为 4.5 kBq·m⁻³[14], 本实验与前人研究结果相近。与王喜元及邹新悦等研究结果对比发现[22-23], 本研究中土壤²²²Rn 活度高于兰州、徐州、西宁等城市。与表层土壤样品相比, 岩石样品²²²Rn 活度范围为 0.1~16.8 kBq·m⁻³, 平均活度为(1.5±2.2) kBq·m⁻³(n=153), 岩石样品的整体²²²Rn 释放量低于土壤样品。

表 3 岩芯²²²Rn 释放量与岩性特征

Table 3 Radon concentrations and lithologic distribution in cores

岩芯名称 Name	²²² Rn 范围 Range /(kBq·m ⁻³)	²²² Rn 均值 Mean /(kBq·m ⁻³)	样品类型 Sample type
ZK02	0.1~1.9	0.3±0.4(n=30)	二长花岗岩质片麻岩
ZK06	0.2~4.6	1.0±1.0(n=30)	0~4 m 为粉质黏土; 4~60 m 为花岗岩
ZK10	0.1~3.1	0.9±0.7(n=30)	0~16 m 为中粗砂; 16~100 m 花岗岩
ZK13	0.3~2.1	1.1±0.5(n=30)	花岗岩
ZK34	0.9~11.4	5.0±2.3(n=30)	0~20 m 为粉质黏土; 20~100 m 为砂质泥岩
ZK52	0.5~16.8	3.9±3.8(n=30)	0~7 m 为粉质黏土; 7~15 m 为中粗砂; 15~20 m 为闪长岩; 20~60 m 为花岗岩

表 4 不同城市土壤²²²Rn 活度对比

Table 4 Investigation of radon activity in soil samples in China

城市 City	样本数 Sample	²²² Rn 活度范围 Range /(kBq·m ⁻³)	²²² Rn 活度均值 Mean /(kBq·m ⁻³)	参考文献 References
吉林四平	—	0.1~46.7	7.0	[24]
全国	144	—	7.3	[22]
北京郊区	10	—	14.0±10.0	[25]
北京	14	—	7.0±6.0	[25]
贵阳	4	—	9.0±16.0	[25]
通化	—	—	3.4	[22]
兰州	—	—	2.2	[22]
徐州	—	—	1.8	[22]
太原	—	—	4.0	[22]
西宁	—	—	3.6	[22]
广州	1 582	2.1~238.6	32.2	[26]
青岛	—	1.7~18.8	4.5	[14]
广东	67	0.7~1 199.2	100.4±154.6	[13]
深圳	56	5.6~109.2	29.8±21.8	[27]
北京	80	1.0~3.50	1.8	[23]
北京	9	4.8~34.5	16.1±2.1	[28]
青岛土壤样品	27	0.3~11.4	4.1±3.3	(本研究)

注: “—”表示无数据。“—” represents no data.

根据 ^{222}Rn 含量及深度分布特征(见图2),可将岩芯大致划分为2组类型,即ZK02、ZK06、ZK10、ZK13为第一组,ZK34和ZK52为第二组。第一组中各岩芯 ^{222}Rn 浓度较低且深度分布差异较小,除了表层土壤和极个别岩石样品以外, ^{222}Rn 活度自上而下保持较低水平且平稳分布。尤其是ZK02,除表层的一个样品以外,其余层位 ^{222}Rn 活度范围为 $0.1\sim 1.0\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $(0.3\pm 0.2)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=29$)。第二组中的岩芯均表现出上层 ^{222}Rn 活度高于下层的分布趋势,各

岩芯 ^{222}Rn 高、低浓度的分界线深度不尽相同,但都在 $20\sim 30\text{ m}$ 左右的深度范围内出现浓度波动,例如ZK34在 $0\sim 20\text{ m}$ 内 ^{222}Rn 活度为 $(6.2\pm 2.8)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=10$), 20 m 以下 ^{222}Rn 活度为 $(4.1\pm 1.5)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=20$);ZK52在 $0\sim 30\text{ m}$ 内 ^{222}Rn 活度为 $(5.3\pm 4.6)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=16$), 30 m 以下 ^{222}Rn 活度为 $(2.3\pm 1.8)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=14$),ZK52岩性种类较多, ^{222}Rn 活度整体波动也较大。

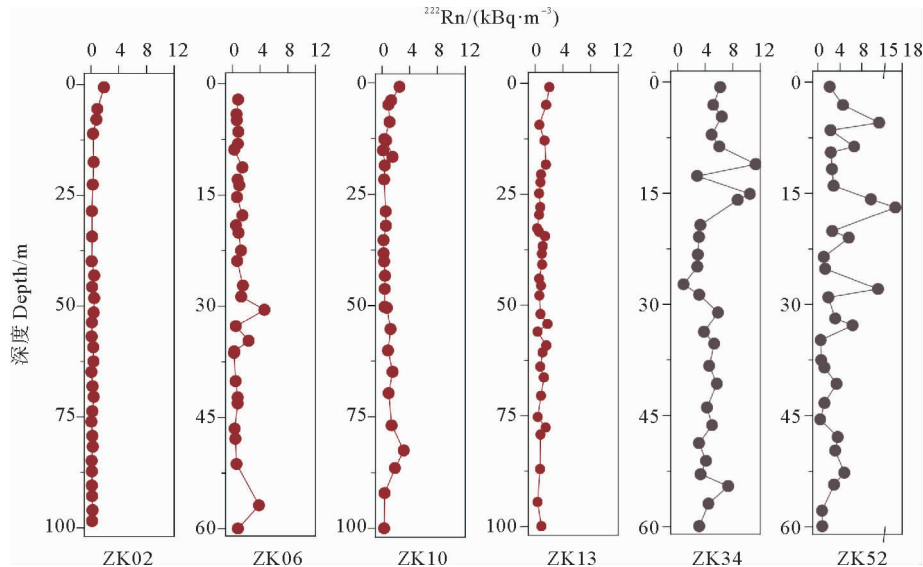


图2 岩芯中 ^{222}Rn 释放量深度分布特征

Fig.2 The spatial distribution of radon in cores

对比6根岩芯的岩性资料发现(见表5),不同类型样品 ^{222}Rn 释放量不尽相同。其中花岗岩、粉质黏土、中粗砂、砂质泥岩和闪长岩中 ^{222}Rn 释放量均值分别为 $(1.1\pm 1.4)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=131$)、 $(5.3\pm 3.5)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=17$)、 $(2.1\pm 1.8)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=10$)、 $(4.1\pm 1.5)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=18$)和 $(7.1\pm 7.7)\text{ kBq}\cdot\text{m}^{-3}$ ($n=9$)。对比 ^{222}Rn 活度释放量平均值得出,不同类型样品 ^{222}Rn 释能力表现为闪长岩>粉质黏土>砂质泥岩>中粗砂>花岗岩。青岛市基岩类型以花岗岩为主,与其他类型样品相比,其 ^{222}Rn 释放量最低。

2.2 岩芯 ^{226}Ra 的含量及分布

^{226}Ra 是 ^{222}Rn 的母体核素,岩芯中的 ^{222}Rn 由 ^{226}Ra 衰变产生,因此岩芯中的 ^{226}Ra 含量是决定其 ^{222}Rn 释放量的关键因素^[28]。测试结果显示,岩芯中 ^{226}Ra 活度范围为 $6.0\sim 44.0\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $(12.1\pm 11.3)\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($n=40$)。

对于土壤样品, ^{226}Ra 活度范围为 $9.9\sim 39.1\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $(20.0\pm 8.1)\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,曹龙生等对我国大陆主要省份土壤中天然放射性核素含量分布研究发现^[29],我国28个主要省市土壤中 ^{226}Ra 变化范围值为

$1.0\sim 437.8\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,本研究得出的青岛市岩芯中 ^{226}Ra 含量均在其研究结果范围之内。对于岩石样品, ^{226}Ra 活度范围为 $5.9\sim 52.0\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $(22.9\pm 12.4)\text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$,两种类型的样品相比,土壤样品的 ^{226}Ra 含量略高于岩石样品。

表5 不同类型样品 ^{226}Ra 含量及 ^{222}Rn 释放量

Table 5 ^{226}Ra and ^{222}Rn concentrations in five types of lithologic samples

样品类型 Sample type	$^{222}\text{Rn}/(\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3})$	$^{226}\text{Ra}/(\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1})$
花岗岩 Granite	$1.1\pm 1.4(n=131)$	$23.1\pm 13.5(n=20)$
粉质黏土 Silty clay	$5.3\pm 3.5(n=17)$	$21.7\pm 8.6(n=8)$
中粗砂 Medium coarse sand	$2.1\pm 1.8(n=10)$	$16.9\pm 7.5(n=2)$
砂质泥岩 Sandy mudstone	$4.1\pm 1.5(n=18)$	$16.6\pm 3.1(n=6)$
闪长岩 Diorite	$7.1\pm 7.7(n=4)$	$31.9\pm 11.5(n=4)$

不同类型样品对比发现(见表 5), ²²⁶Ra 在砂质泥岩和中粗砂中含量最低, 分别为 $(16.6 \pm 3.1) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=7$)和 $(16.9 \pm 7.4) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=2$), 在闪长岩中含量最高, 为 $(31.9 \pm 11.5) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=7$), 花岗岩中 ²²⁶Ra 含量为 $(20 \pm 13.5) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=19$)。五种类型样品中 ²²⁶Ra 含量表现为闪长岩 > 花岗岩 > 粉质黏土 > 中粗砂 > 砂质泥岩。结合前文对五种类型样品的 ²²²Rn 释放量研究结果表明, 与其他类型样品相比, 虽然花岗岩的 ²²²Rn 释放量不高, 但其本身含有的 ²²⁶Ra 活度却并不低, 推测岩芯中 ²²²Rn 的释放量还受其他因素的影响。

2.3 岩石样品 ²²²Rn 深度分布的影响因素分析

对比 4 根岩芯 ²²²Rn 及其母体核素 ²²⁶Ra 的深度分布发现, 在大部分层位, 两者空间上呈现出比较相似的

分布趋势(见图 3)。北京地区浅层土壤(0~1 m) ²²²Rn 浓度的深度分布特征研究, 同样也发现不同深度土壤样品的 ²²⁶Ra 含量和 ²²²Rn 释放量垂向变化趋势具有一致性^[28]。然而, 本研究岩芯之间对比发现, ZK06、ZK13、ZK34 和 ZK52 中 ²²²Rn 平均释放量为 (1.2 ± 1.2) 、 (0.9 ± 0.4) 、 (4.1 ± 1.5) 和 $(2.3 \pm 1.8) \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, 相应岩芯 ²²⁶Ra 平均含量为 (30.9 ± 12.2) 、 (31.0 ± 5.3) 、 (16.1 ± 3.1) 和 $(27.4 \pm 16.1) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 ZK34 岩芯 ²²⁶Ra 含量最低, 释放的 ²²²Rn 却最多。这表明除了母体核素含量的天然影响以外, 还存在其他因素也能够显著影响岩石 ²²²Rn 的释放量。为了更直观的了解该影响因素, 可以从 ²²⁶Ra 衰变产生 ²²²Rn 并从岩芯释放到外界的这一过程来分析。

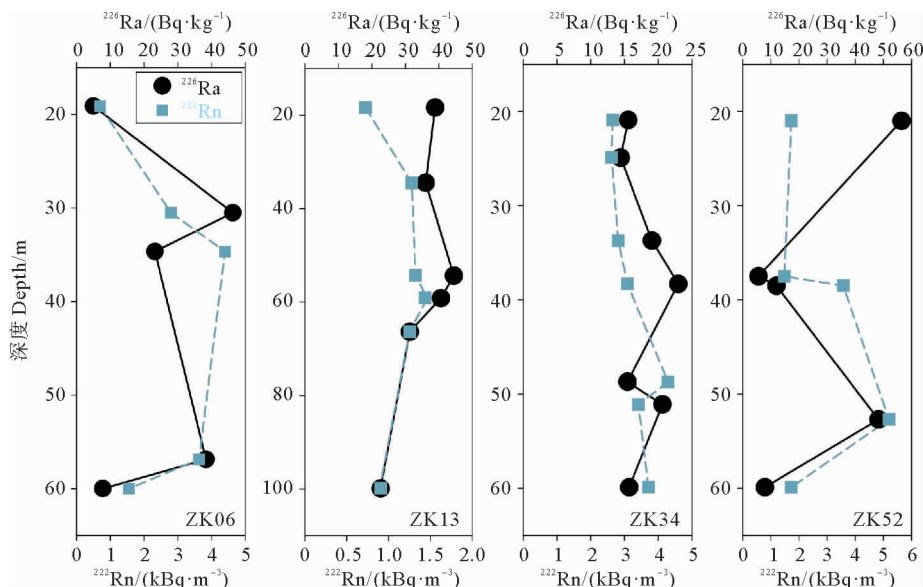


图 3 岩芯中 ²²²Rn 释放量及 ²²⁶Ra 深度分布

Fig.3 Spatial distributions of radon and ²²⁶Ra in cores

如图 4 所示, 在不考虑 ²²²Rn 自身衰变的情况下, 外界检测到的 ²²²Rn 活度主要受到以下三个过程的影响, 岩石中的 ²²⁶Ra 衰变产生 ²²²Rn 并扩散到岩石“间隙”中, ²²²Rn 沿着岩芯中的“通道”到达岩芯表面, 岩芯表面 ²²²Rn 的逸散损失^[30]。由于本研究中所有样品均经过了 20 d 的封存时间, 因此, ²²²Rn 的释放量主要受前两个过程的控制。研究发现除母体核素含量的影响以外, 还有诸多因素影响岩石中 ²²²Rn 释放的前两个过程, 例如岩石的粒度、几何形状、孔隙度等样品固有属性, 以及测试时的装样密度、温度、湿度、气压等外界环境条件^[23, 31-33]。本实验中所有岩石样品的原始状态、处理方式以及测试条件均保持一致, 因此推测孔隙率可能是影响岩石样品 ²²²Rn 释放量的另一重要因素。

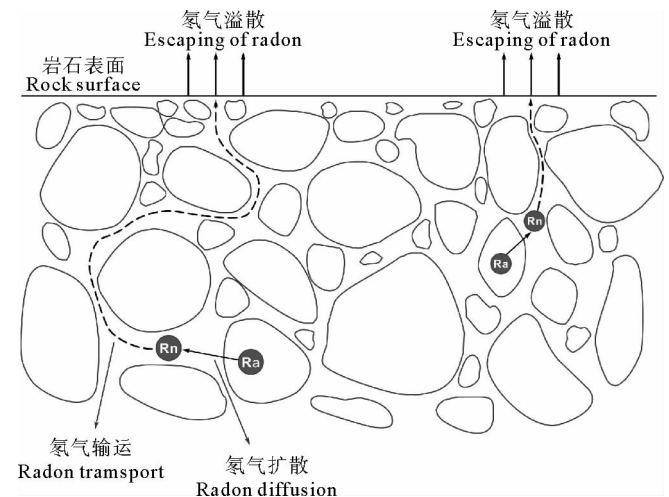


图 4 ²²⁶Ra 衰变产生的 ²²²Rn 并从岩芯释放到外界的过程示意图

Fig.4 Schematic map of ²²²Rn decayed by ²²⁶Ra and releases from the cores

ZK06 和 ZK34 岩性不同,孔隙率也存在明显差异。深井泥岩吸水特性实验研究发现^[33],砂质泥岩样品孔隙率范围为 18.63%~25.17%。砂岩与砂质泥岩渗透性能的对比研究发现^[34],砂质泥岩样品的孔隙率均值为 14.57%。相比而言,花岗岩的孔隙率明显较低。风化花岗岩矿物会随着风化程度的增加,花岗岩孔隙率会逐渐增加,其中微风化花岗岩孔隙率大约为 1%~2%,中风化花岗岩孔隙率约为 3%~4%^[35];常温下二长花岗岩的孔隙率为 0.37%^[36];湖南岳阳和湖北黄冈两地的花岗岩样品孔隙率范围为 0.72%~1.18%^[37]。通过以上分析发现,砂质泥岩孔隙率约为花岗岩孔隙率的 15~25 倍。由此可见,在本文所测试的岩芯中,虽然 ZK34 的²²⁶Ra 含量最低,但由于其孔隙率较高,内部产生的²²²Rn 有更多的“通道”扩散到表层和外界,导致更多的²²²Rn 被检测。

3 结论

通过对青岛城市规划区岩芯样品²²²Rn 释放量和²²⁶Ra 的分析,得出以下主要结论:

(1)岩芯的²²²Rn 释放量变化范围为 0.1~16.8 kBq·m⁻³,平均值为(1.9±2.6) kBq·m⁻³(n=180),小于世界土壤²²²Rn 活度和我国土壤²²²Rn 活度均值,属于土壤²²²Rn 活度正常的区域。两种类型的样品相比,岩石样品的整体²²²Rn 释放量低于土壤样品。

(2)岩芯的²²⁶Ra 含量范围为 6.0~44.0 Bq·kg⁻¹,平均值为(12.1±11.3) Bq·kg⁻¹(n=40),两种类型的样品相比,土壤样品的²²⁶Ra 含量略高于岩石样品。

(3)不同类型样品的²²²Rn 活度释放能力表现为闪长岩>粉质黏土>砂质泥岩>中粗砂>花岗岩;²²⁶Ra 在砂质泥岩和中粗砂中含量最低,在闪长岩中含量最高,与其他类型样品相比,作为青岛市的主要基岩类型,花岗岩样品的²²²Rn 释放量最低。

(4)对于同一根岩芯,²²²Rn 释放量及母体²²⁶Ra 含量在深度分布上呈现出比较相似的分布趋势,说明岩芯中的²²⁶Ra 含量是决定其²²²Rn 释放量的关键因素;但不同岩芯之间对比发现,对于岩石样品,除母体核素²²⁶Ra 含量的影响以外,样品本身的孔隙率可能也是影响²²²Rn 释放量的重要因素。

参考文献:

[1] 富英杰,宋刚,陈迪云,等. 珠三角土壤²³⁸U、²²⁶Ra、²³²Th 和⁴⁰K 含量水平研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 39(30): 18582-18584.
Fu Y J, Song G, Chen D Y, et al. Studies on ²³⁸U、²²⁶Ra、²³²Th and ⁴⁰K levels of top soils in Pearl River Delta Zone[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2012, 39(30): 18582-18584.

[2] UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation[R]. UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with Annexes.

New York: United Nations, 1982.

[3] 邹玉林,杜德扬. 成都市土壤中天然放射性核素含量调查研究[J]. 四川环境, 2011(2): 32-35.
Zou Y L, Du D Y. Investigation of natural radionuclide contents in soils of Chengdu[J]. Sichuan Environment, 2011(2): 32-35.

[4] 邓黎黎. 氡气测量方法研究及在环境检测中的应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
Deng L L. Study on Radon Gas Measurement Method and Its Application in Environmental Detection[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.

[5] 申超,肖德涛,陈凌,等. 土壤氡测量方法[J]. 衡阳师范学院学报, 2011(3): 51-54.
Shen C, Xiao D T, Chen L, et al. Measurement method of radon in soil[J]. Journal of Hengyang Normal University, 2011(3): 51-54.

[6] 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(2): 186-188.
Zhang Z Y, Wang Q. Radioactive investigation of radon concentration in Xinyi soil[J]. Energy Technology and Management, 2014(2): 186-188.

[7] Clarke R, Southwood T. Risks from ionizing radiation[J]. Nature, 1989, 338: 197-198.

[8] Kullab M. Assessment of radon-222 concentrations in buildings, building materials, water and soil in Jordan[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2005, 62(5): 765-773.

[9] 刘庆成,彭聂. 青岛市环境氡浓度调查[J]. 华东地质学院学报, 1996, 19(1): 86-89.
Liu Q C, Peng N. Investigation of radon concentration in the environment of Qingdao[J]. Journal of East China Geological Institute, 1996, 19(1): 86-89.

[10] 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(4): 83-84.
Gao Z, Li X, Chen L N, et al. Study on radon mapping technology in Qingdao area[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2007(4): 83-84.

[11] Swedjemark G. Indoor radon: The hazard should not be neglected [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1995, 62(4): 102-111.

[12] 任天山. 室内氡的来源、水平和控制[J]. 辐射防护, 2001(5): 291-299.
Ren T S. Source, level and control of indoor radon[J]. Radiation Protection, 2001(5): 291-299.

[13] 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.
Qin C Y, Wang N P, Xiao L, et al. The correlation between indoor radon concentrations and geological background in some typical areas of Beijing and Guangdong[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(3): 441-444.

[14] 姚德,曲丽梅,夏宁,等. 青岛市市区土壤中氡的测量与分析[J]. 核化学与放射化学, 2008, 30(3): 184-188.
Yao D, Qu L M, Xia N, et al. Survey and analyses of radon in soil of Qingdao Area[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2008, 30(3): 184-188.

[15] 王南萍,肖磊,李灿莘,等. 中国高本底城市的土壤氡水平[C]. [s.l.]: 全国天然辐射照射与控制研讨会, 2010.
Wang N P, Xiao L, Li C P, et al. Soil Radon Levels in High Background Cities in China[C]. [s.l.]: National Symposium on

- Natural Radiation Exposure and Control, 2020.
- [16] 贺小凤, 王国胜. 深圳市某高校校园内土壤氡浓度的测定[J]. 深圳信息职业技术学院学报, 2013(1): 35-39.
He X F, Wang G S. Determination of soil radon concentration a campus in Shenzhen[J]. Journal of Shenzhen Institute of Information Technology, 2013(1): 35-39.
- [17] 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(4): 241-246.
Zhou Y L, Cen K, Shi Z M. Surveys on radon concentration and distribution in soil and air in Aba, Sichuan[J]. Geoscience, 2013(4): 241-246.
- [18] 刘广山, 黄奕普. 沉积物中²³⁸U 等 9 种放射性核素 γ 谱法同时测定[J]. 台湾海峡, 1998(4): 359-363.
Liu G S, Huang Y P. Simultaneous measurement of ²³⁸U, ²³⁵U, ²¹⁰Pb, ²²⁸Th, ²²⁸Ra, ²²⁶Ra, ⁴⁰K, ⁶⁰Co and ¹³⁷Cs in sediment samples using HPGe γ Spectrometer[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1998(4): 359-363.
- [19] 张敬. 长江口及邻近海域沉积速率比较研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
Zhang J. Comparative Study on Sedimentation Rates in the Changjiang River Estuary and Adjacent Sea Areas[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.
- [20] Xu B, Bianchi T, Allison M, et al. Using multi-radiotracer techniques to better understand sedimentary dynamics of reworked muds in the Changjiang River estuary and inner shelf of East China Sea[J]. Marine Geology, 2015, 370(2): 76-86.
- [21] 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.
Zhu W Q. Harm of radon in human environment and its management[J]. Overseas Uranium and Gold Geology, 1994, 11(3): 244-248.
- [22] 王喜元. 中国土壤氡概况[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
Wang X Y. Overview of Soil Radon in China[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [23] 邹新悦, 陈刚, 黄晓, 等. 土壤中氡浓度检测及其影响因素[J]. 城市地质, 2016, 11(3): 70-73.
Zou X Y, Chen G, Huang X, et al. Study on radon concentration measurement in soil and its influence factors[J]. Urban Geology, 2016, 11(3): 70-73.
- [24] 邹立芝, 蒋惠忠, 王宏, 等. 四平市区土壤中氡的分布规律[J]. 吉林大学学报(地), 2002(3): 261-264.
Zou L Z, Jiang H Z, Wang H, et al. Distribution pattern of the radon in soil of Siping city, Jilin province, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2002(3): 261-264.
- [25] 孙凯男, 郭秋菊, 程建平. 土壤物理性质对土壤氡浓度及地表氡析出率的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2005(1): 78-80.
Sun K N, Guo Q J, Cheng J P. The effect of some soil physical parameters on soil radon concentration and radon exhalation from soil surface[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2005(1): 78-80.
- [26] 李亚平, 陈曦, 许正繁, 等. 广州市南沙区土壤中氡浓度水平调查研究[J]. 工程地质学报, 2006(S1): 47-50.
Li Y P, Chen X, Xu Z F, et al. Investigation of the radon concentration level in soil of Nansha district, Guangzhou city[J]. Journal of Engineering Geology, 2006(S1): 47-50.
- [27] 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.
Fu S, Sun H, Zhang H. Investigation of soil radon concentration and distribution in Guangming new district, Shenzhen City[J]. Guangdong Science and Technology, 2010, 19(20): 6-8.
- [28] 杨志杰, 赵荣, 王南萍. 北京地区浅层土壤氡浓度的垂向分布特征[J]. 辐射防护, 2018, 241(4): 14-19.
Yang Z J, Zhao R, Wang N P. Vertical distribution characteristics of radon concentration in shallow soil in Beijing area[J]. Radiation Protection, 2018, 241(4): 14-19.
- [29] 曹龙生, 杨亚新, 张叶, 等. 中国大陆主要省份土壤中天然放射性核素含量分布规律研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2012(2): 71-76.
Cao L S, Yang Y L, Zhang Y, et al. Distribution pattern of radionuclides in the soil of mainland China[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2012(2): 71-76.
- [30] Ishimori Y, Lange K, Martin P, et al. Measurement and Calculation of Radon Releases from NORM Residues[M]. [s.l.]: IAEA Technical Reports Series No 474, 2013.
- [31] 吴桂惠, 丘寿康. 粉末矿样射气系数与湿度的关系[J]. 辐射防护, 1984(4): 298-304.
Wu G H, Qiu S K. Emanation coefficient of powdered ore sample as a function of moisture content[J]. Radiation Protection, 1984(4): 298-304.
- [32] 程冠, 程建平, 郭秋菊. 土壤氡析出率影响因素及估算模型[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2006(5): 99-103.
Cheng G, Cheng J P, Guo Q J. Discussion of influencing factors on the radon exhalation rate and theoretical model[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2006(5): 99-103.
- [33] 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(6): 1113-1120.
He M C, Zhou L, Li D J, et al. Experimental research on hydrophilic characteristics of mudstone in deep well[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(6): 1113-1120.
- [34] 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.
Zhang Y C, Pan Z Z, Wang Z Y, et al. Testing study on permeability of sandstone and sandy mudstone[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 301-306.
- [35] 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.
Zhou X S, Zhang H L. Study on mineral evolution mechanism and engineering characteristics of weathered granite[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 14(4): 43-47.
- [36] 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.
Jin P H, Hu Y Q, Shao J X, et al. Study on pore structure and permeability of granite subjected to heating and water quenching[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(4): 478-484.
- [37] 张宇皓, 张帆. 比表面积及孔径对花岗岩力学性质影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 315-321.
Zhang Y H, Zhang F. Influence of specific surface and pore size on the mechanical properties of granite[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(20): 315-321.

Study on Radon Concentration in Cores and Its Influence Factors in Qingdao Urban Planning Area

Zhang Xiaojie^{1,2}, Dou Yanguang³, Xiao Liu⁴, Zhao Shibin^{1,2}, Zhang Han^{1,2}, Suo Fangyi²

(1. The Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266100, China; 4. China SGS-Cstc Standard Technical Service Co., LTD, Qingdao 266100, China)

Abstract: The authors used the laboratory simulation experiment to detect radon concentrations in cores collected in Qingdao urban planning area. According to the spatial distribution characteristics of radon concentrations in vertical profiles, the ^{226}Ra concentrations of cores were further measured. The main results indicate that, radon concentrations ranged from 0.1 to 16.8 $\text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$, and the average concentration was $(1.9 \pm 2.6) \text{kBq} \cdot \text{m}^{-3}$ ($n=300$). According to different lithology of samples, radon concentrations released from cores were shown as diorite > silty clay > sandy mudstone > medium coarse sand > granite. The ^{226}Ra concentrations ranged from 6.0 to 44.0 $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, the average concentration was $(12.1 \pm 11.3) \text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=40$). Among these samples, ^{226}Ra concentrations were the lowest in sandy mudstone and medium coarse sand, while the highest concentration was in diorite. For diagenetic samples, the ^{226}Ra concentrations and rock porosity are important influence factors for radon release property and spatial distribution characteristics from cores.

Key words: ^{222}Rn ; ^{226}Ra concentration; porosity; Qingdao urban planning area

责任编辑 徐环