

胶州湾周边地下水和河水中²²²Rn 的 分布特征及影响因素

潘 峰, 郭占荣*, 马志勇, 章 斌, 袁晓婕

厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361102

摘要:以胶州湾周边的洋河、大沽河、墨水河-白沙河以及李村河流域等为研究地点,于 2011 年 9 月底和 10 月初对研究地点的地下水和河水进行了调查和取样,分析和研究了地下水和河水中²²²Rn 的分布特征及其影响因素。从区域尺度上来看,岩浆岩地区以及断层发育地区的地下水和河水中²²²Rn 活度比新生代沉积岩地区的活度高。但是,局部水动力条件、水文地质因素、岩石与矿物学性质等因素可能在一定程度上影响某些相邻采样点地下水和河水中²²²Rn 活度。此外,地下水的补给程度和人类活动也是影响河水中²²²Rn 活度的重要因素。

关键词:地下水;河水;²²²Rn;胶州湾

中图分类号:TL12 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2015)06-0490-07

doi:10.7538/hhx.2015.37.06.0490

Distribution Characteristics and Influence Factors of ²²²Rn in Riverine Water and Groundwater Around Jiaozhou Bay

PAN Feng, GUO Zhan-rong*, MA Zhi-yong, ZHANG Bin, YUAN Xiao-jie

College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract: As the research site of four watersheds around Jiaozhou Bay, this article investigated and took samples of groundwater and riverine water on September and October 2011 to analysis and study the distribution characteristics of ²²²Rn activities and the influence factors in the water around Jiaozhou Bay. The samples were taken by special sampling bottle from RAD7 and placed about 15 min to reach the radioactive equilibrium status. Then the activities of ²²²Rn can be measured by emanometer RAD7 and RAD-H₂O. The results show that the activities of ²²²Rn in groundwater and riverine water from the regional scale are much higher in the magmatic areas and the fault developed areas which contain higher concentration of ²³⁸U decay series. Some adjacent sampling points vary widely both in groundwater and riverine water. The activities of ²²²Rn in groundwater and riverine water around Jiaozhou Bay

收稿日期:2014-11-04; **修订日期:**2015-08-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41072174)

作者简介:潘 峰(1990—),男,山东乳山人,硕士研究生,海洋地质专业

* **通信联系人:**郭占荣(1965—),男,内蒙古鄂尔多斯人,教授,从事海岸带水文地质学和海洋地质的教学与研究工作, E-mail: gzh@xmu.edu.cn

mainly depend on the activities of ²³⁸U decay series from the nearby soil and rocks. Other geological factors such as fault development, hydrodynamic condition, hydrogeological factors, petrological and mineralogical properties can also affect the activities of ²²²Rn to some extent. In addition, the degree of supply from the groundwater and human activity are other two important factors to the activities of ²²²Rn in riverine water.

Key words: groundwater; riverine water; ²²²Rn; Jiaozhou Bay

氡(Rn)是一种无色无味、具有放射性的惰性气体,共有 33 个同位素,与本研究比较相关的主要有三种,即²²²Rn($T_{1/2}=3.823$ d)、²²⁰Rn($T_{1/2}=55.6$ s)和²¹⁹Rn($T_{1/2}=4$ s),它们分别是铀系(²³⁸U)、钍系(²³²Th)及铀系(²³⁵U)的中间产物。鉴于²²⁰Rn和²¹⁹Rn的半衰期很短,很少用于水文学研究中,而²²²Rn在地下水含量通常很高,所以在地下水研究中应用广泛。Folger 等^[1]用数值模拟方法研究了水中氡的迁移,认为氡是依靠其载体的流动而迁移的,但长距离的迁移与其母体铀、钍的迁移息息相关。某一地区水中²²²Rn 的活度从根本上取决于该地区母岩中含铀矿物的种类和丰度,地层中的各种含铀矿物不断衰变产生²²²Rn,使得地下水中往往富集²²²Rn,特别是封闭性良好的含水层能够累积足够多的²²²Rn。与地下水相比,地表水更多地暴露在大气中,使得地表水中的²²²Rn 容易逸散到大气中,所以地表水中²²²Rn 含量比地下水中少很多,一般小 1~2 个数量级。此外,有断层、温泉、热液活动的地方,水中的²²²Rn 活度往往都比较高^[2]。从 1996 年开始,文献[3-6]采用²²²Rn研究海底地下水排泄,并且将过去常常用来测量大气中²²²Rn 的测氡仪(RAD7)用于水中氡的测量,配合 RAD-H₂O 附件和 RAD-AUQA 附件,使得分散取样测量水中²²²Rn 和连续测量水中²²²Rn 成为可能。而且,文献[7-9]发现 RAD7 测量水中²²²Rn 非常有效,即使²²²Rn 活度很低也容易测量。²²²Rn 是一种化学性质保守的气体,很难与其他物质发生反应,所以,²²²Rn 成为研究水循环的理想示踪剂,常常用于地下水与地表水相互转化研究和海底地下水排泄研究。Peterson 等^[10]用²²²Rn 研究注入 IRL 泻湖的河流表明,排入此类河流的地下水量要大于直接排入泻湖的地下水量,地下水通过河流间接输送的物质及能量对河口生态系统影响很大;郭占荣等^[11]用²²²Rn 连续监测胶州湾海水系统,估算出海岸带的海底地下水排泄速率及其输送的营养盐通量,发现海底地下水排泄对胶州湾营养盐的贡献不可忽略。

本工作主要以胶州湾周边的 4 个流域(洋河、大沽河、墨水河-白沙河、李村河)的下游平原为研究对象,目的是分别分析地下水、河水中²²²Rn 分布的空间差异,并探讨引起这种变化的主要原因。鉴于²²²Rn 是研究水循环的理想示踪剂,以期为进一步研究胶州湾海底地下水排泄提供一定的科学依据。

1 研究区概况

胶州湾位于南黄海之西,山东半岛南部,地理跨度为北纬 35°55′N~36°18′N,东经 120°04′E~120°23′E。胶州湾是一个典型的半封闭海湾,口窄腹大,呈葫芦状,湾口最窄处仅 3.14 km,平均潮位时水域覆盖面积约 302.9 km²,湾内平均水深为 7.0 m,最大水深可达 66.9 m^[12]。湾内发育有四条水道,自西向东依次为岛耳河水道、大沽河水道、中央水道和沧口水道,四条水道在团岛附近汇合后由湾口通向外海。胶州湾潮汐类型为正规半日潮,潮汐周期约为 745 min,平均潮差为 2.78 m,最大潮差为 4.75 m^[13]。

胶州湾地处典型的东亚季风气候区,其气候具有大陆性与海洋性过渡型特征,年平均降水量为 680.5 mm,其中 7、8 月份降水量最大,占全年总降水量的 45%,冬季降水量最小,只占 5%^[14]。胶州湾周边丘陵地区河谷发育,所有河流均排入海,其中以大沽河径流量最大。河流均属于季节性河流。

胶州湾及周边地区的地层可分为三大类岩系:太古界和元古界变质岩系、中生界侏罗系和白垩系的火山碎屑岩系、河湖沉积岩及第四系松散沉积物。胶州湾及周边地区位于新华夏构造第二隆起带——胶南隆起区东北缘和胶莱凹陷区中南部。地质构造走向以 NE 向为主,本区构造以断裂构造为主,其中即墨-沧口断裂带基本控制胶州湾的地质地貌格局。

胶州湾周边地区地下水类型以第四系孔隙潜水为主,局部分布基岩和基岩风化带裂隙水。河

流两岸分布第四纪松散沉积物,流域之间分布有白垩系青山群火山碎屑岩、砂砾岩。第四纪松散沉积物厚度一般为 5~20 m,由河流冲洪积物和海积物组成,海积物分布在海岸附近。松散沉积物含水层系统多为双层结构,岩性以细砂和粉砂质砂为主,夹有少量的粘土透镜体^[15]。主要接受大气降水和侧向径流补给。地下水位动态变化受降水的季节性影响,8—9 月地下水位达到全年最高。地下水流向与地形坡向基本一致,即由山前平原向海湾地带汇集。地下水排泄方式主要是人工开采、蒸发和排泄入海。

2 样品采集及测量

实验仪器为美国 DURRIDGE 公司生产的测氡仪 RAD7 及其水附件(RAD-H₂O),不确定度为 10%,标准误差为 2%,检测范围为(3~6.67)×10⁵ Bq/m³,采样瓶为 RAD7 自带的细口玻璃采样瓶。

2.1 水样采集

2011 年 9 月底至 10 月初,在胶州湾周边的李村河流域、墨水河-白沙河流域、大沽河流域、洋河流域共采集地下水样 29 个、河水样 34 个,地下水和河水采样点分布详见图 1 和图 2。

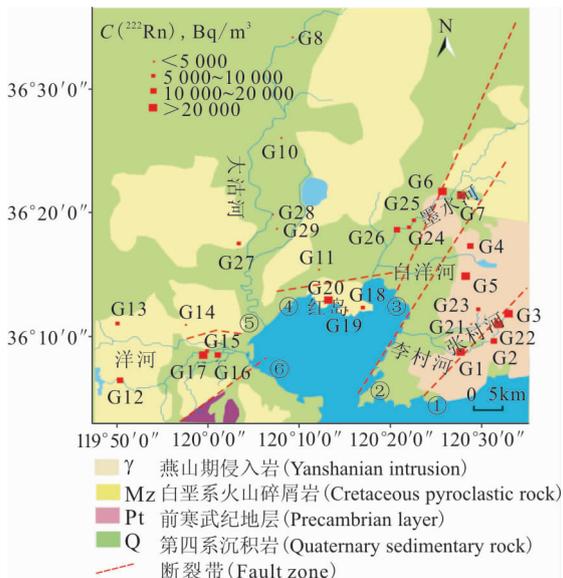


图 1 胶州湾周边地下水采样点²²²Rn 活度浓度分布
Fig. 1 Spatial distribution of $C(^{222}\text{Rn})$ in groundwater around Jiaozhou Bay

地下水样和河水样均选用 RAD7 的 250 mL 专用取样瓶,使用溢流法将其注满;采样时,将一

根中空软管插入采样瓶瓶底,出气口露出,然后将采样瓶口朝下完全放入水体中,待瓶内空气从软管排出,水样完全进入瓶内时抽出软管,在水体中盖上密封盖,确保瓶内无气泡。

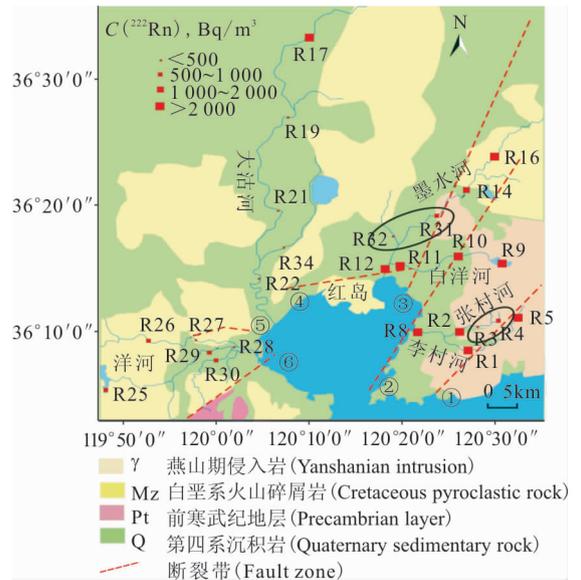


图 2 胶州湾周边河水采样点²²²Rn 活度浓度分布
Fig. 2 Spatial distribution of $C(^{222}\text{Rn})$ in riverine water around Jiaozhou Bay

2.2 样品测量

使用美国 DURRIDGE 公司生产的测氡仪 RAD7 及其水附件(RAD-H₂O)测量水样中的²²²Rn活度,河水、地下水的测量标准选用 RAD7 内置的 250 mL 测量标准。在进行仪器校准后,仪器标定系数的不确定度在 95%的可信度下小于 5%。采样完成后水样放置约 15 min,²²²Rn 与其衰变子体²¹⁸Po($T_{1/2} = 3.05$ min)达到长期放射性平衡状态,再将其抽入 RAD7 中测量²²²Rn 的子体²¹⁸Po。测出²²²Rn 活度(A)后仍需将其校正到采样时的活度(A₀),计算公式如下:

$$A_0 = \frac{A}{e^{-\lambda t}}$$

式中,A₀,采样时的活度;A,测量时的活度;λ,衰变系数;t,采样至测量所经时间。

3 结果与讨论

胶州湾周边研究区地下水与河水中²²²Rn 活度浓度差异显著(图 3),地下水中²²²Rn 活度浓度远高于河水,两者的平均值(柱形图中的正方形空心点代表平均值,下同)几乎相差一个数量级。出

现这一差异是因为相对于河水,地下水处于封闭的环境中,²²²Rn作为气体在封闭环境中更容易富集,而在流动的河水中逸散很快;另外,由于地下水流动缓慢且空间分布广泛,水-岩相互作用更加充分,对岩土中放射性核素的溶解更加彻底,²²²Rn活度浓度也更高。

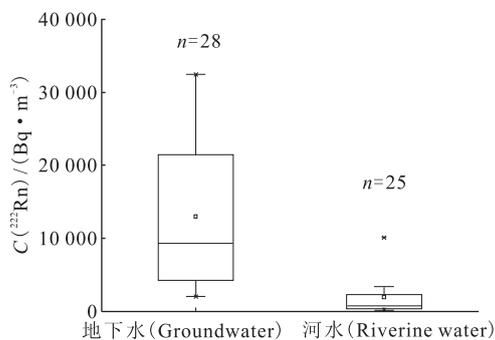


图3 胶州湾河水、地下水中²²²Rn活度浓度对照

Fig. 3 Comparison for ²²²Rn activity concentration in riverine water and groundwater around Jiaozhou Bay

3.1 地下水中²²²Rn活度的分布特征及其影响因素

研究区域地下水中²²²Rn活度浓度范围为2 475~37 095 Bq/m³,平均活度浓度为13 001 Bq/m³($n=28$)。李村河流域(G1、G2、G3、G21、G22、G23)地下水中²²²Rn的平均活度浓度为17 234 Bq/m³($n=6$),墨水河-白沙河流域(G4、G5、G6、G7、G24、G25、G26)为17 123 Bq/m³($n=7$),大沽河流域(G8、G10、G27、G28、G29)为4 399 Bq/m³($n=5$),洋河流域(G12、G13、G14、G15、G16、G17)为13 342 Bq/m³($n=6$),红岛地区(G11、G18、G19、G20)为9 680 Bq/m³($n=4$)。调查的四个流域地下水中²²²Rn活度浓度大小排列顺序为:李村河流域>墨水河-白沙河流域>洋河流域>大沽河流域(图4)。大沽河流域地下水中的²²²Rn平均活度浓度明显低于其它三个流域,分析其原因是李村河流域、墨水河-白沙河流域、洋河流域的采样点多数位于中生界中酸性岩浆岩分布区,通常岩浆岩地层中的²²²Rn活度高于沉积岩和变质岩地层^[16],对整个区域地下水中²²²Rn活度浓度贡献显著;而大沽河流域样品主要采集于下游河湖沉积岩及第四系松散沉积物(图1、图2中Q),其²²²Rn含量较低,对区域内地下水中²²²Rn活度浓度贡献较少。反映了地质环境背景对地下水中²²²Rn活度浓度明显的控制作用。

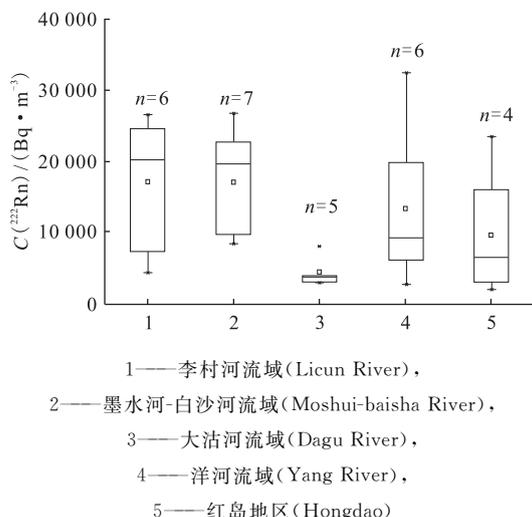


图4 胶州湾各流域地下水中²²²Rn活度浓度对照
Fig. 4 Comparison for ²²²Rn activity concentration in groundwater in four watersheds, around Jiaozhou Bay

红岛地区的²²²Rn平均活度浓度介于大沽河流域与其他三个流域之间,从地质背景来看,红岛地区分布有大片的白垩系砂砾岩和火山碎屑岩,但其上覆的冲积平原及滨海沉积分布广泛,边淑华等^[17]研究了胶州湾海域的淤积状况,发现胶州湾内湾和其他小湾等区处于淤积状态,湾口和外湾大部分地区属于侵蚀区。红岛地区的不断淤积不仅使其陆地面积不断增加,而且在一定程度上降低了区域整体的²²²Rn活度浓度。值得注意的是,一些区域会存在距离很近而²²²Rn活度浓度差异很大的采样点,如图1中G15(6 969 Bq/m³)与G17(19 925 Bq/m³)、G19(4 203 Bq/m³)与G20(23 534 Bq/m³)、G21(4 410 Bq/m³)与G22(24 500 Bq/m³)等,陈迪云等^[18]的研究表明,地下水中氡活度受到多种因素的控制,除受到附近围岩铀系和钍系核素含量控制外,还受到水动力学因素和所赋存的岩石或土壤性质以及矿物学性质等因素的影响。水动力学条件不仅决定水-岩相互作用进行的程度、水对周围岩石和土壤中放射性元素的溶解量,而且控制着地下水的运移速率,决定了地下水中²²²Rn运移时间的长短(²²²Rn的半衰期只有3.8 d,运移时间对浓度的影响明显)。岩石学和矿物学性质决定了放射性衰变形成的氡从其中析出来的难易程度,岩石的裂隙和土壤的空隙越发育,铀系和钍系核素所赋存的矿物越易破碎溶解,其中的氡就越容易进入地下水中,反之形成的氡则不易释放出来进入地下水。

此外,水文地质条件也是影响相邻采样点 ^{222}Rn 活度差异的因素,距离相近的采样点很有可能处于不同的地下水含水层以及地下水系统,彼此之间缺乏水力联系或者水力联系较差, ^{222}Rn 活度差异显著也就不难理解。但是,需要注意的是,这些因素仅仅是在一定程度上影响相邻采样点 ^{222}Rn 活度差异的可能原因,就各个流域整体来看,岩石和土壤的放射性核素含量仍然是影响地下水中 ^{222}Rn 活度的决定性因素。

^{222}Rn 的母体是镭(^{226}Ra),两者都属于 ^{238}U 衰变系,区域 ^{238}U 的活度直接决定 ^{222}Rn 的活度。徐磊^[19]对青岛地区地表的土壤天然放射性调查研究显示,地表放射性核素 ^{238}U 浓度的高低和该区岩性、岩浆侵入活动有关,岩浆岩地区 ^{238}U 浓度比较高,而新生代沉积岩地区的浓度相对较低(图 5)。李村河流域、墨水河-白沙河流域、洋河流域的采样点多数位于中生界中酸性岩浆岩分布区,所以三者地下水中 ^{222}Rn 活度普遍较高,而大沽河流域采样点普遍位于第四系松散沉积物分布区,其地下水中 ^{222}Rn 活度则较低。另外,戴华林等^[20]研究表明,当岩石中存在岩溶、节理裂隙、断裂破碎带时,它们便是地下水和气体良好的储存场所和运移通道,水和气体的运动带动了氡的迁移。胶州湾周边发育多组断裂,图 1、图 2 中列出了对研究区采样点有影响的几条主要断裂带,栾光忠^[2]对青岛主要断裂构造的研究表明,NE 向断裂为青岛地区的主要构造线方向,断裂具有张性、张扭性构造特征,具有很强的透水性。而李村河流域和墨水

河-白沙河流域位于研究区东部的崂山山脉,NE 向的区域性控制断裂带即墨断裂(图 1 中③)、沧口断裂(图 1 中②)以及劈石口断裂(图 1 中①)横亘其中,对地下水中 ^{222}Rn 活度贡献较大,导致这两个流域采样点整体上 ^{222}Rn 活度最高。

3.2 河水中 ^{222}Rn 活度的分布特征及其影响因素

4 个流域河水中 ^{222}Rn 活度浓度范围为 165~10 131 Bq/m^3 ,平均值为 1 971 Bq/m^3 ($n=25$) (图 2)。李村河流域除支流张村河上游两个采样点 ^{222}Rn 活度浓度低于 600 Bq/m^3 外,其余水样的 ^{222}Rn 活度浓度均高于 2 000 Bq/m^3 。墨水河-白沙河流域除 R31、R32 低于 1 000 Bq/m^3 外,其余水样皆大于或接近 2 000 Bq/m^3 。对比图 1 和图 2 可以发现,这两个流域采样点 ^{222}Rn 活度浓度相对高低的分布基本一致,李村河流域地下水和河水都是支流张村河的上游 ^{222}Rn 活度浓度偏低,而墨水河中游同样如此(图 2 中黑色椭圆框中的采样点)。这说明在这两个流域,地下水与河水中 ^{222}Rn 活度浓度的控制因素比较一致,最重要的是说明地下水对河水存在明显的补给关系。而实际上采样期间的九月份,青岛地区雨季刚刚结束,降雨量很少,但地下水位却升至一年来的最高值,河水主要来源于地下水的补给。前文所述地下水中 ^{222}Rn 活度浓度普遍高于河水,且整体高出一个数量级,地下水的补给对河水中 ^{222}Rn 活度浓度贡献显著,因此地下水中 ^{222}Rn 活度浓度的高低很大程度上决定了河水中 ^{222}Rn 活度浓度的高低。值得注意的是,李村河河口和墨水河-白沙河河口附近河水的 ^{222}Rn 活度浓度相对于各自中游河段异常高,李村河达到 8 237 Bq/m^3 ,墨水河-白沙河达到 2 739 Bq/m^3 ,这是由于区域性断裂带通过这两个河口附近(图 2 中的②沧口断裂带、④上马镇断裂带),使其更容易接受下覆岩石土壤以及地下水中的 ^{222}Rn 及其母体核素,导致河水中 ^{222}Rn 活度浓度极高。除此之外,李村河流域位于青岛市人口最密集、工业最发达的主城区,根据徐磊^[19]的研究表明,在人类活动改造自然环境的地段(如养殖场、居民生活区)其地面 ^{238}U 等放射性核素浓度要高于自然环境变化较少的地段(如林地),这也是李村河流域河水中 ^{222}Rn 活度浓度相对于墨水河-白沙河流域较高的一个原因。

大沽河流域河水中 ^{222}Rn 活度浓度基本上都在 400 Bq/m^3 以下,唯有 R17 点(移风店)的 ^{222}Rn

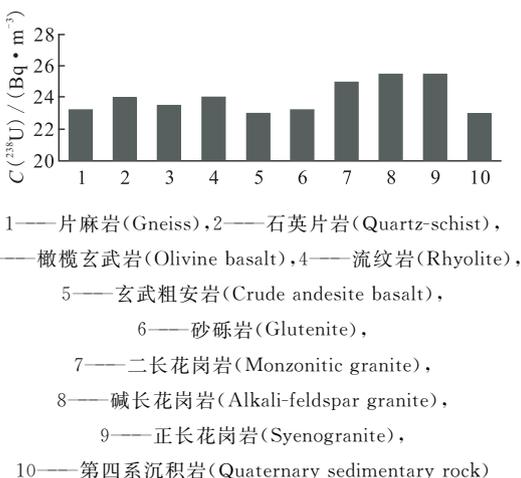


图 5 青岛地区各岩性 ^{238}U 平均活度浓度直方图及范围

Fig. 5 Range and average of ^{238}U activity concentrations of various lithology

活度浓度高达 5 299 Bq/m³, 原来怀疑其接受了地下水的补给, 但后来发现附近的地下水中 (G8)²²²Rn 活度浓度还低于该值, 该点为异常点, 其原因暂时无法解释。洋河流域河水中²²²Rn 活度浓度为 166~993 Bq/m³, 均值为 521 Bq/m³, 与李村河流域及墨水河-白沙河流域不同的是, 洋河河口处的²²²Rn 活度浓度较低 (262 Bq/m³), 这是因为洋河河口附近缺乏较大的断裂带, 并且巨厚的第四系松散沉积物分布广泛, 上游河水中²²²Rn 活度浓度也不高, 导致河口处²²²Rn 来源十分有限, 活度浓度明显较低。

从整体上看, 李村河流域和墨水河-白沙河流域的²²²Rn 活度浓度明显要高于大沽河流域和洋河流域 (图 6), 原因主要是: 李村河流域和墨水河-白沙河流域的采样点大部分位于山地, 大沽河流域和洋河流域的采样点主要位于平原, 山地比平原更多的接受地下水补给, 而李村河流域和墨水河-白沙河流域的地下水中²²²Rn 及其母体²³⁸U 衰变系核素活度浓度又很高, 对河水中²²²Rn 活度浓度贡献显著; 流域的地质背景差异, 据前文所述, 由于基岩放射性核素含量以及区域地质构造的差异, 大沽河流域²²²Rn 活度浓度应该明显小于其他三个流域, 而实际上大沽河流域采样点²²²Rn 活度浓度却高于洋河, 但是如果排除掉大沽河流域的异常点 R17, 其平均值只有 280 Bq/m³, 仅为洋河平均值的一半左右, 就基本上可以用地质背景差异来解释。这几个因素综合起来, 导致 2011 年 9 月底和 10 月初研究区 4 个流域河水采样点中²²²Rn 活度浓度差异显著。

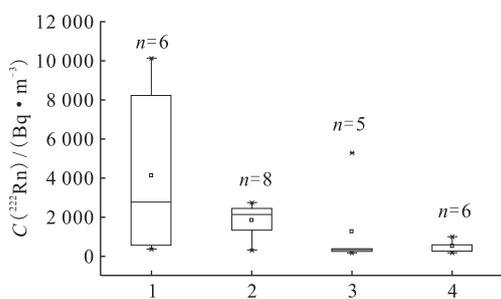
4 结 论

(1) 胶州湾周边地区地下水中²²²Rn 活度浓度较高的采样点主要分布在李村河整个流域、墨水河-白沙河与洋河流域上游的山地、丘陵区地带, 原因是受基底地质背景的影响, 因为该地区分布有大面积含高浓度²³⁸U 衰变系核素的花岗岩; 东部的李村河流域和墨水河-白沙河流域部分地区由于透水性很强的 NE 向区域性控制断裂带即墨-沧口断裂带的切穿, 位于断裂带附近的采样点²²²Rn 活度浓度较高; 一些距离相近的采样点²²²Rn 活度浓度差别较大, 主要是受局部水动力条件、水文地质因素、岩石与矿物学性质因素的影响。

(2) 胶州湾周边地区河水中²²²Rn 活度浓度较高的采样点主要分布在李村河流域和墨水河-白沙河流域, 原因主要有: 采样点大部分位于山地, 相比于另外两个流域更多地接受地下水补给, 而这两个流域地下水中²²²Rn 活度浓度又较高; 影响地下水中²²²Rn 活度浓度的地质因素同样适用于河水; 人类活动也在一定程度上影响河水中²²²Rn 活度浓度差异。

参考文献:

- [1] Folger P F, Poeter E, Wantye R B, et al. ²²²Rn transport in fractured crystalline rock aquifer: result from numerical simulation[J]. Journal of Hydrology, 1997, 195: 45-77.
- [2] 栾光忠, 王红霞, 尹明泉, 等. 青岛城市主要断裂构造特征以及对城市地质环境的影响[J]. 地球学报, 2010, 31(1): 102-108.
- [3] Cable J E, Burnett W C, Chanton J P, et al. Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon-222 [J]. Earth Planet Sci Lett, 1996, (144): 591-604.
- [4] Dulaiova H, Burnett W C, Chanton J P, et al. Assessment of groundwater discharges into West Neck Bay, New York, via natural tracers[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26: 1971-1983.
- [5] Lambert M J, Burnett W C. Submarine groundwater discharge estimates at a Florida coastal site based on continuous radon measurements [J]. Biogeochem, 2003, 66: 55-73.
- [6] Burnett W C, Dulaiova H. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements[J]. J Environ Ra-



1——李村河(Licun River),
2——墨水河-白沙河(Moshui-baisha River),
3——大沽河(Dagu River), 4——洋河(Yang River)

图 6 胶州湾各流域河水中²²²Rn 活度浓度对照
Fig. 6 Comparison for ²²²Rn activity concentration in riverine water in four watersheds, around Jiaozhou Bay

- dioact, 2003, (69): 21-35.
- [7] Swarzenski P. U/Th series radionuclides as coastal groundwater tracers[R]. US: American Chemical Society, 2007, (107): 663-674.
- [8] 郭占荣,李开培,袁晓婕,等. 用氡-222 评价五缘湾的地下水输入[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 263-270.
- [9] 李开培,郭占荣,袁晓婕,等. 氡和镭同位素在沿岸海底地下水研究中的应用[J]. 勘察科学技术, 2011 (5): 30-36.
- [10] Peterson R N, Santos I R, Burnett W C. Evaluating groundwater discharge to tidal rivers based on a Rn-222 time-series approach[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 86: 165-178.
- [11] 郭占荣,马志勇,章斌,等. 采用²²²Rn 示踪胶州湾的海底地下水排泄及营养盐输入[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2013, 38(5): 1073-1090.
- [12] 高抒,汪亚平. 胶州湾沉积环境与潮汐汉道演化特征[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 52-59.
- [13] 中国海湾志编委会. 中国海湾志(第四分册): 山东半岛南部和江苏省海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [14] 吴洁晶,李德萍,李瑞光. 青岛市降水百年变化规律的初步探讨[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(1): 16-22.
- [15] 叶玉玲. 胶州湾周边地下水水文地球化学特征及营养盐输送[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [16] Zhuo W H, Iida T, Yang X T. Occurrence of ²²²Rn, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra and U in groundwater in Fujian province, China[J]. J Environ Radioact, 2001, 53 (1): 111-120.
- [17] 边淑华,胡泽建,丰爱平,等. 近 130 年胶州湾自然形态和冲淤演变探讨[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(3): 46-53.
- [18] 陈迪云,王湘云,关晓丽,等. 珠海市地下水中放射性元素及对室内氡浓度的影响[J]. 环境化学, 2000, 19(4): 377-381.
- [19] 徐磊,夏宁,姜学钧. 青岛地区地表天然放射性调查[J]. 核农学报, 2011, 25(4): 773-778.
- [20] 戴华林,胡建平,包乾宗,等. 关于浅层地震勘探和测氡定位隐伏断裂的初步探讨[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(4): 65-68.