

doi:10.3799/dqkx.2013.105

# 采用 $^{222}\text{Rn}$ 示踪胶州湾的海底地下水排泄及营养盐输入

郭占荣, 马志勇, 章斌, 袁晓婕, 刘花台, 刘洁

厦门大学海洋与地球学院, 福建厦门 361005

**摘要:** 为了量化胶州湾东北海岸带的海底地下水排泄量和评价通过海底地下水排泄输入的营养盐数量, 分别于2011年10月和2012年5月在胶州湾北岸东大洋码头附近对海水中的 $^{222}\text{Rn}$ 进行了48 h连续测量. 通过构建测量点海水中 $^{222}\text{Rn}$ 质量平衡模型, 计算得到海底地下水排泄速率平均值分别为6.38 cm/d和8.29 cm/d; 实际观测到的海底地下水排泄速率变动较大, 其主要控制因素是降水量、潮汐和波浪. 根据海底地下水排泄速率, 获得地下水输入的DIN(溶解无机氮)为 $47.0 \times 10^3$  mol/d(2011年10月)和 $48.6 \times 10^3$  mol/d(2012年5月), 可溶性 $\text{SiO}_2$ 为 $15.5 \times 10^3$  mol/d(2011年10月)和 $17.3 \times 10^3$  mol/d(2012年5月), DIP(溶解性磷酸盐)为 $0.6 \times 10^3$  mol/d(2012年5月), 地下水对胶州湾的营养盐输入具有重要贡献.

**关键词:** 海底地下水排泄;  $^{222}\text{Rn}$ ; 营养盐; 胶州湾; 海洋地质.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2013)05-1073-08

收稿日期: 2012-10-10

## Tracing Submarine Groundwater Discharge and Associated Nutrient Fluxes into Jiaozhou Bay by Continuous $^{222}\text{Rn}$ Measurements

GUO Zhan-rong, MA Zhi-yong, ZHANG Bin, YUAN Xiao-jie, LIU Hua-tai, LIU Jie

College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China

**Abstract:** The aim of this paper is to quantify submarine groundwater discharge (SGD) into the northeast coast of Jiaozhou Bay, then estimate the SGD-derived nutrient fluxes. At Dongdayang dock located at the north shoreline of Jiaozhou Bay, the author deployed one in-situ 48 h continuous experiment for measuring  $^{222}\text{Rn}$  activity in seawater, in October 2011 and May 2012, respectively. Through establishing  $^{222}\text{Rn}$  mass balance model at the observing site, the average SGD rates are assessed to be 6.38 cm/d for October 2011 and 8.29 cm/d for May 2012. Measured results show the SGD rates fluctuate greatly, daily and seasonally, which are mainly controlled by precipitation, tidal pump and wave oscillation. Based on the SGD rates, the SGD-derived nutrient fluxes are calculated to be  $47.0 \times 10^3 - 48.6 \times 10^3$  mol/d for DIN (dissolved inorganic nitrogen),  $15.5 \times 10^3 - 17.3 \times 10^3$  mol/d for the soluble  $\text{SiO}_2$ , and  $0.6 \times 10^3$  mol/d for DIP (dissolved inorganic phosphorus), respectively. These SGD-derived nutrient fluxes contribute to the eutrophication in Jiaozhou Bay to a certain degree which need due attention.

**Key words:** submarine groundwater discharge; radon-222; nutrients; Jiaozhou Bay; submarine geology.

进入21世纪,随着大量关于世界各地沿海海底地下水排泄(SGD, submarine groundwater discharge)的研究报道相继发表,人们逐渐认识到海底地下水排泄的存在及其意义(Burnett *et al.*, 2001; Schwartz, 2003; Moore, 2006; Windom *et al.*, 2006; Beck *et al.*, 2007; Hwang *et al.*, 2010; Bobba *et al.*, 2012).海底地下水排泄是全球水循环的重要环节,也是陆源物质入海的重要途径.传统的观点认

为入海的水量主要是河流,海底地下水排泄无法与河流入海量相比,甚至小到可以忽略不计.但是,近年来大量的研究成果表明,海底地下水排泄量不仅可以与河流入海量相比,甚至在某些沿海地区超过河流入海量(Moore, 1996; Swarzenski *et al.*, 2007).更让人们意想不到的是,地下水中营养盐(海洋学上将氮、磷、硅称作营养元素)含量往往高于河水中的含量,这就意味着海底地下水排泄还可以输

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41072174).

作者简介:郭占荣(1965—),男,博士,教授,从事海岸带水文地质和海洋地质研究.E-mail: gzh@xmu.edu.cn

送大量的营养盐入海,而且营养盐的输送量可以超过河流的输送量(Street *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2009; Dulaiova *et al.*, 2010).此外,沿海地区地下水往往还受到工业污染,所以这又意味着海底地下水排泄可以提供输送大量其他污染物(如重金属、有机污染物等)到近海环境中(Charette and Buesseler, 2004; Laurier *et al.*, 2007; Johannesson *et al.*, 2011).近年来已有相当多的研究成果报道了海底地下水排泄引起沿岸海域水体富营养化、赤潮爆发现象(Lee and Kim, 2007; Costa Jr. *et al.*, 2008).

海底地下水排泄的地方是海岸带一个特殊的区域,这里有海水与地下水的相互作用,有咸淡水混合带的存在,还有水—岩相互作用.海底地下水排泄中包括陆源地下淡水和循环海水,循环海水似乎在水量平衡中没有什么贡献,但是循环海水的组成不同于原海水的组成,因为循环海水在其循环期间与含水层发生了物质交换(Charette and Sholkovitz, 2006).此外,在水—岩相互作用过程中始终伴随着微生物作用(Bratton *et al.*, 2009).因此,海底地下水排泄不仅是地下水及其溶解物质入海的过程,还是复杂的生物地球化学过程.

近几十年来,胶州湾海水中氮、磷含量逐年增加,海水富营养化越来越严重,赤潮爆发频次增加.2009年,胶州湾约 55.8% 的水域面积富营养化,由南向北富营养程度呈逐渐加重趋势,尤其以墨水河—白沙河河口的富营养化最为严重;湾内无机氮平均浓度为 0.27 mg/L,最高达到 0.73 mg/L,超过国家二类水质标准的水域面积占 46.7%;湾内活性磷酸盐平均浓度为 0.02 mg/L,最高达到 0.08 mg/L,超过国家二类水质标准的水域面积占 21.5%(王艳玲等, 2011).从胶州湾海水的 Si : N : P 的比值来看,浮游植物生长基本处于磷限制(陈晨等, 2012).

本文利用<sup>222</sup>Rn 的连续测量,评价胶州湾东北部海岸的海底地下水排泄量,在此基础上,根据沿岸地下水中营养盐测量数据,估算随海底地下水排泄进入胶州湾的营养盐数量,试图了解海底地下水排泄在胶州湾海水富营养化中的作用.

## 1 研究地点

胶州湾是与黄海相通的典型的半封闭海湾,平均水域面积约 367 km<sup>2</sup>,湾口最窄处 3.1 km,湾底沉积物以砂质和淤泥质为主.湾内平均水深 7 m,最大

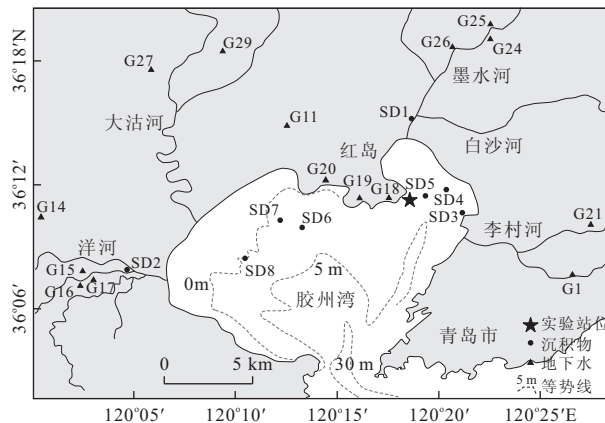


图 1 胶州湾及取样点、连续测量点位置

Fig.1 Sampling stations and measurement site in Jiaozhou Bay

水深 64 m(湾口处),湾的西北部水深较浅,低潮时会出露大面积的潮滩.注入湾内的河流主要有洋河、大沽河、墨水河—白沙河、李村河(图 1).胶州湾潮汐类型属于正规半日潮,潮汐周期约为 12.417 h,最大潮差 4.75 m,平均潮差 2.8 m.胶州湾地处典型的东亚季风气候区,多年平均降水量 680.5 mm,全年降水集中在 7、8 月,两月降水量占全年降水量的 45%,12 月份降水量最少,平均仅为 9.8 mm.胶州湾全年频率最高的风向是 SE、N 和 NNW 向,并且有明显的季节变化,年平均风速为 5.5 m/s.

环胶州湾的陆地,东南部和南部丘陵出露大面积的基岩(主要是岩浆岩),地下水类型以基岩风化裂隙水为主,其他地段以第四纪松散沉积物为主,局部出露白垩系青山群砂岩.所以,环胶州湾的地下水类型以第四系松散沉积物孔隙潜水为主,主要分布于洋河、大沽河、墨水河—白沙河下游平原.含水层多为双层结构,岩性以砂砾石和砂为主,夹有少量的粘土,含水层厚度 5~20 m.地下水主要接受大气降水补给,以蒸发方式和向海径流方式排泄.

胶州湾北岸有一处向湾内凸出的地方——红岛,海水<sup>222</sup>Rn 连续测量地点就选择在红岛的东大洋码头(图 1 五角星).码头伸入到海水中,为进行海水<sup>222</sup>Rn 连续测量提供了可能.

## 2 样品采集与测量

### 2.1 海水中<sup>222</sup>Rn 的测量

2011 年 10 月 18—20 日和 2012 年 5 月 13—15 日分别进行了海水中<sup>222</sup>Rn 的 48 h 和 50 h 连续测量,连续测量采用便携式测氡仪(RAD7).测量时,将

潜水泵和温盐深自动记录仪(CTD)绑定在一根粗竹竿上,把竹竿插入湾底沉积物中固定住,潜水泵和CTD距离海床约30 cm. RAD7每隔1 h记录一次海水的<sup>222</sup>Rn活度,CTD每隔5 min记录一次水深、水温和电导率,自动风速仪每隔30 s记录一次风速,另一台RAD7每隔2 h记录一次大气中的<sup>222</sup>Rn活度.

为了查清母体<sup>226</sup>Ra对子体<sup>222</sup>Rn的支持,在连续测量点每隔2 h取30 L海水,用于测量海水中的<sup>226</sup>Ra活度,测量方法为直接射气闪烁计数法(郭占荣等,2008,2011).

此外,为了获得胶州湾外海水端元的<sup>222</sup>Rn活度,2011年9月27日采集湾外海水样5个,2012年5月6日采集湾外海水样10个.水样用250 mL专用采样瓶采集,回到实验室后,用RAD7的水附件测量<sup>222</sup>Rn活度.

## 2.2 地下水中<sup>222</sup>Rn的测量

2011年9—10月和2012年4—5月,对胶州湾沿岸地下水中<sup>222</sup>Rn进行了取样测量,地下水样采自居民水井,少部分水井仍在饮用,绝大部分水井用于灌溉和洗衣(图1).地下水样品也是用250 mL专用采样瓶采集,回到实验室后,用RAD7的水附件测量<sup>222</sup>Rn活度.

## 2.3 孔隙水中<sup>222</sup>Rn的测量

2011年10月21日,在胶州湾内用抓斗采泥器采集了8个表层沉积物样(图1).沉积物运回实验室后,取每个沉积物样品约150 g装入1 000 mL锥形瓶内,然后加入400 mL海水,放置在振荡器上密封培养4周.按照<sup>222</sup>Rn的半衰期,4周后锥形瓶内沉积物孔隙水、海水中的<sup>226</sup>Ra与其子体<sup>222</sup>Rn基本上达到放射性衰变平衡,同时,上部气体中<sup>222</sup>Rn与下部水体中的<sup>222</sup>Rn也基本上经过水—气交换达到了平衡,所以沉积物上覆水体中的<sup>222</sup>Rn活度基本可以代表沉积物孔隙水中的<sup>222</sup>Rn活度.测量时,将锥形瓶内海水密封转移到250 mL RAD7专用采样瓶内,不能让空气进入采样瓶,然后用RAD7的水附件测量<sup>222</sup>Rn活度.

## 3 质量平衡模型

为了计算海底地下水排泄量,必须首先知道来源于海底地下水排泄的<sup>222</sup>Rn通量,然后才可以根据地地下水端元的<sup>222</sup>Rn活度信息求得.设想一个较短的均衡时段(例如本研究采用每2 h为一个均衡计算

时段),那么测量点海水系统内<sup>222</sup>Rn含量的增加或减少是由于多种源汇项的变化而造成的.所以,源于海底地下水排泄的<sup>222</sup>Rn通量,在海水系统中<sup>222</sup>Rn的增量或减量以及其他源汇项能够确定的前提下,则可以借助质量平衡模型间接获得.针对连续测量点的实际情况,海水系统中<sup>222</sup>Rn主要来源于母体<sup>226</sup>Ra的生产、沉积物的扩散、涨潮输入和SGD输入,而海水系统中<sup>222</sup>Rn主要损失于大气逃逸、退潮输出、混合稀释、放射性衰变,其中放射性衰变因均衡时段很短可以忽略.于是,质量平衡方程可以表述如下:

$$\Delta F = F_{226\text{Ra}} + F_{\text{sed}} + F_{\text{in}} + F_{\text{SGD}} - F_{\text{atm}} - F_{\text{out}} - F_{\text{mix}}, \quad (1)$$

式中: $\Delta F$ 是均衡时段内海水系统中<sup>222</sup>Rn的增加量或减少量,增加为正,减少为负,具体由2个相邻均衡时段内海水中实测的<sup>222</sup>Rn活度的差值确定; $F_{226\text{Ra}}$ 是母体生产通量; $F_{\text{sed}}$ 是沉积物扩散通量; $F_{\text{in}}$ 是涨潮输入通量; $F_{\text{SGD}}$ 是SGD输入的<sup>222</sup>Rn通量; $F_{\text{atm}}$ 是大气逃逸通量; $F_{\text{out}}$ 是退潮输出通量; $F_{\text{mix}}$ 是与湾外<sup>222</sup>Rn活度较低的海水混合稀释造成的损失通量.

## 4 结果与讨论

### 4.1 海水中实测<sup>222</sup>Rn的变化

2011年10月18—20日,对东大洋码头海水系统中<sup>222</sup>Rn进行了48 h连续测量,<sup>222</sup>Rn活度的变化范围为52.6~95.6 Bq/m<sup>3</sup>,平均值为69.1 Bq/m<sup>3</sup>;2012年5月13—15日,对东大洋码头海水中<sup>222</sup>Rn又进行了50 h连续监测,<sup>222</sup>Rn活度的变化范围为57.9~225.2 Bq/m<sup>3</sup>,平均值为118.4 Bq/m<sup>3</sup>(图2).第2次测量时段的<sup>222</sup>Rn活度普遍大于第1次的结果,最低值比较接近,但最大值是第1次的2倍多,平均值是第1次的1.7倍.说明海水中<sup>222</sup>Rn活度不仅存在日内的变化,还存在季节性的变化,短时间内的变化可能与潮汐(水深)变化、波浪振动有关,而季节性变化可能主要受降水量控制.从海水中<sup>222</sup>Rn活度的变化来看,其基本上与水深呈现负相关关系(图2),可能的解释是:低潮位时,近岸地下水的水力梯度变大,海底地下水排泄量增加,使得海水中<sup>222</sup>Rn活度随之升高(因为地下水端元中<sup>222</sup>Rn活度一般比海水中高1~2个数量级);相反,高潮位时,近岸地下水的水力梯度变小,海底地下水排泄量减小,海水中<sup>222</sup>Rn活度随之降低.

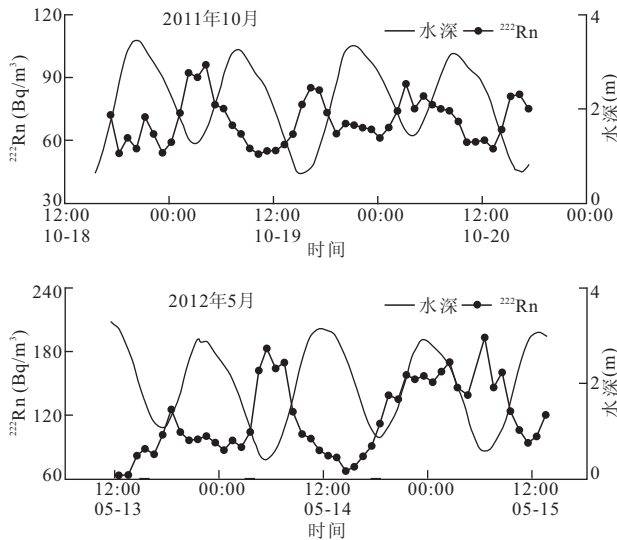


图 2 海水中<sup>222</sup>Rn 活度与水深变化(时间:第 1 行是钟点(时:分);第 2 行是日期(月-日))

Fig.2 Variation of <sup>222</sup>Rn activities in seawater and depth of water in the monitoring site

## 4.2 地下水中的<sup>222</sup>Rn

2011 年 9—10 月和 2012 年 4—5 月,笔者在环胶州湾的李村河流域、墨水河—白沙河流域、大沽河流域、洋河流域测量了 30 多个地下水样的<sup>222</sup>Rn 活度,从流域下游平原选择 14 个地下水样作为地下水端元的代表(图 3).图 3 说明地下水中<sup>222</sup>Rn 活度在时空上都存在一定变化.2011 年 9—10 月,地下水中<sup>222</sup>Rn 活度介于 2 474.8~36 907.3 Bq/m<sup>3</sup>,空间上的变幅接近 15 倍;2012 年 4—5 月,地下水中<sup>222</sup>Rn 活度介于 4 697.0~46 475.2 Bq/m<sup>3</sup>,空间上的变幅接近 10 倍.地下水中<sup>222</sup>Rn 活度在空间上的变化主要与含水层的岩性、下伏基岩的岩性和断裂带有关,通常岩浆岩地层中的<sup>222</sup>Rn 活度高于沉积岩和变质岩地层(Zhuo *et al.*, 2001).从同一个取样点在 2 个年份的变化来看,多数点变化不大,仅个别点(如 G11、G17、G19)变化略大些.同一个取样点<sup>222</sup>Rn 活度随季节的变动可能与含水层的氧化还原环境变化有关,例如,随着 Fe、Mn 等元素发生氧化反应生成氧化物沉淀时,可以移除地下水中溶解态的镭(Gonnessa *et al.*, 2008),母体<sup>226</sup>Ra 的移除势必会影响子体<sup>222</sup>Rn 的活度.

## 4.3 <sup>222</sup>Rn 的潮汐输入与输出

为了便于量化潮汐输入和输出的<sup>222</sup>Rn 通量,先将连续测量点实测的<sup>222</sup>Rn 活度乘以水深变成<sup>222</sup>Rn 库(radon inventory)(郭占荣等,2012),<sup>222</sup>Rn 库可以理解为单位面积水柱中的<sup>222</sup>Rn 活度.涨潮时,在

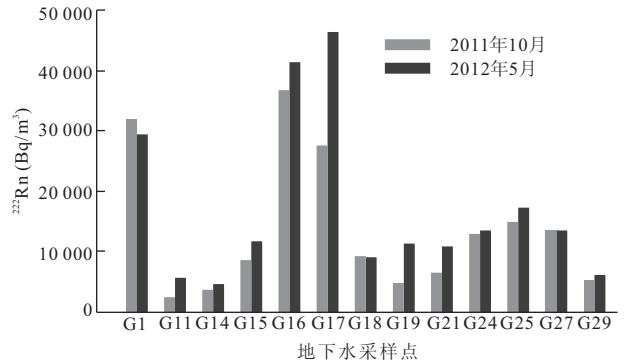


图 3 地下水中<sup>222</sup>Rn 活度的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variation of <sup>222</sup>Rn activities in groundwater

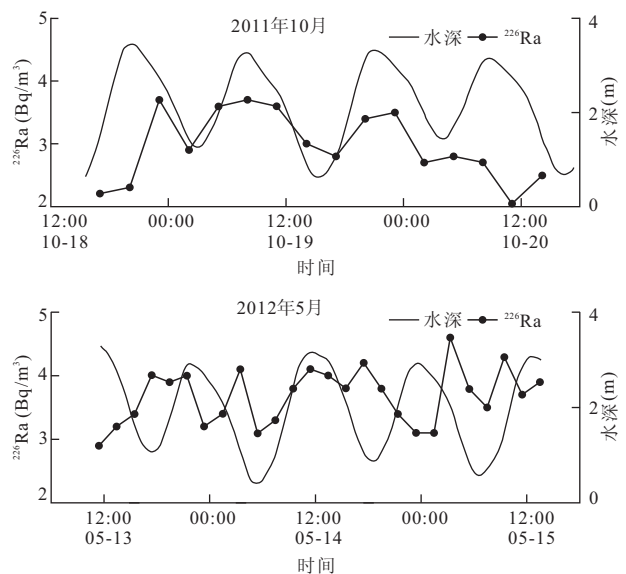


图 4 连续测量点海水中<sup>226</sup>Ra 活度及其变化(时间:第 1 行是钟点(时:分);第 2 行是日期(月-日))

Fig.4 Variation of <sup>226</sup>Ra activities in seawater and depth of water in the monitoring site

水柱中加上潮流输入的<sup>222</sup>Rn,即加上  $\Delta H_{in} \times$  湾外海水端元<sup>222</sup>Rn 活度;退潮时,在水柱中减去潮流输出的<sup>222</sup>Rn,即减去  $\Delta H_{out} \times$  测量点海水<sup>222</sup>Rn 活度.实际计算时, $\Delta H_{in}$  和  $\Delta H_{out}$  是按 2 h 的时间间隔的水深差(水位差)确定的.

## 4.4 母体<sup>226</sup>Ra 支持

实验时段在连续测量点每隔 2 h 或 3 h 测量一次海水的<sup>226</sup>Ra 活度.与海水中<sup>222</sup>Rn 变化类似,<sup>226</sup>Ra 也存在日变化和季节变化,但其活度与水深的关系不像<sup>222</sup>Rn 那样明显(图 4).原因可能是:地下水中<sup>226</sup>Ra 活度远低于<sup>222</sup>Rn 活度,虽然伴随潮汐泵输入的海底地下水排泄,但其中的<sup>226</sup>Ra 比较容易被海水

表1 沉积物孔隙水中<sup>222</sup>Rn活度Table 1 <sup>222</sup>Rn activities in the pore water of sediments

样品编号	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8
沉积物(Bq/kg)	0.70	0.87	0.48	0.75	0.82	0.46	0.76	0.65
孔隙水(Bq/m <sup>3</sup> )	2 416.65	3 447.46	2 060.54	2 756.01	2 717.87	1 653.81	2 549.66	2 283.38

稀释,同时又受波浪作用干扰,所以,<sup>226</sup>Ra活度与水深没有明显的关系.2011年测量时段海水中<sup>226</sup>Ra活度在1.95~3.73 Bq/m<sup>3</sup>之间变化,平均值2.97 Bq/m<sup>3</sup>;2012年测量时段<sup>226</sup>Ra活度在2.95~4.60 Bq/m<sup>3</sup>之间变化,平均值3.68 Bq/m<sup>3</sup>(图4).第2次测量时段的<sup>226</sup>Ra活度普遍大于第1次测量的结果,这与<sup>222</sup>Rn的变化一致,但是海水中<sup>226</sup>Ra活度均较<sup>222</sup>Rn活度小1~2数量级.可见,海水中<sup>222</sup>Rn获得母体支持的数量非常小,反过来说明有大量母体不支持的<sup>222</sup>Rn来源于其他补给源,也就是说海水系统中有大量的过剩<sup>222</sup>Rn.

#### 4.5 沉积物扩散通量

当沉积物孔隙水中<sup>222</sup>Rn活度比上覆水中<sup>222</sup>Rn活度高时,交换就可能发生在沉积物-水体界面.通过沉积物-水体界面的扩散通量是根据 Lambert and Burnett(2003)提出的公式计算的.

根据8个沉积物样培养的实验结果,沉积物及其孔隙水中<sup>222</sup>Rn活度见表1.SD4和SD5距离连续测量点较近,选择二者计算沉积物-水界面的扩散通量,计算的平均扩散通量为0.27 Bq/(m<sup>2</sup>·h).

#### 4.6 大气逃逸损失

<sup>222</sup>Rn是一种微溶于水的气体,如果水-气两相处于不平衡状态,那么通过水-气界面可能发生<sup>222</sup>Rn交换.<sup>222</sup>Rn在水-气界面的交换通量根据 Lambert and Burnett(2003)提供的公式计算.大气损失通量除了与水-气两相中<sup>222</sup>Rn含量有关外,还受到风速、水温的影响.2011年测量时段<sup>222</sup>Rn的大气逃逸损失通量变化介于0.48~1.99 Bq/(m<sup>2</sup>·h),2012年测量时段因为风速较小,<sup>222</sup>Rn的大气逃逸损失通量略偏小,介于0.40~1.55 Bq/(m<sup>2</sup>·h)(图5).

#### 4.7 混合损失

混合损失是湾内高<sup>222</sup>Rn海水与外海输入的低<sup>222</sup>Rn海水混合引起的<sup>222</sup>Rn的稀释.监测点海水系统中的过剩<sup>222</sup>Rn,经过潮汐影响、沉积物扩散、大气逃逸的校正后,剩余的<sup>222</sup>Rn(称作净<sup>222</sup>Rn通量)应该是计算时段内SGD输入的<sup>222</sup>Rn与混合损失的差值,差值为正说明SGD输入的<sup>222</sup>Rn大于混合损

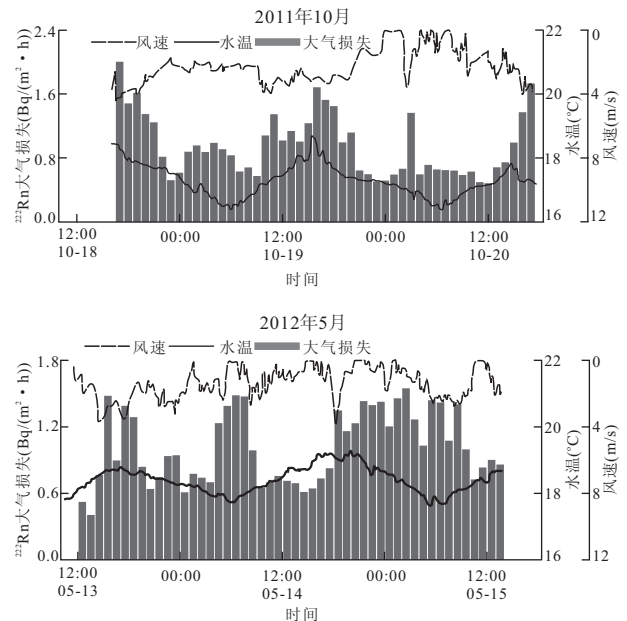


图5 连续测量点处大气损失与风速、水温(时间:第1行是钟点(时:分);第2行是日期(月-日))

Fig.5 Variation of atmospheric loss, wind velocity and water temperature in the monitoring site

失,差值为负说明SGD输入的<sup>222</sup>Rn小于混合损失(图6).为了有一个明确的混合损失,选择图6中负差值作为混合损失,这种选择显然是对混合损失的保守估计,因为每个时段都应该同时存在<sup>222</sup>Rn的SGD输入和混合损失,SGD输入的<sup>222</sup>Rn不可能为零.

估算的混合损失在2011年实验时段为4.2~59.7 Bq/(m<sup>2</sup>·h),在2012年实验时段为8.1~102.3 Bq/(m<sup>2</sup>·h),第2次的混合损失大于第1次的混合损失,这与第2次连续测量点海水中<sup>222</sup>Rn活度普遍大于第1次而湾外海水中<sup>222</sup>Rn活度比较稳定有关.假设相邻时段的混合损失近似相等,笔者把保守的混合损失加到相邻时段正的净<sup>222</sup>Rn通量上,将该结果作为每个时段SGD输入的<sup>222</sup>Rn通量,显然,该通量也是保守估计.SGD输入的<sup>222</sup>Rn通量在2011年实验时段为0.09~60.14 Bq/(m<sup>2</sup>·h),平均值为18.70 Bq/(m<sup>2</sup>·h);2012年实验时段为0.05~232.74 Bq/(m<sup>2</sup>·h),平均值为34.96 Bq/(m<sup>2</sup>·h).



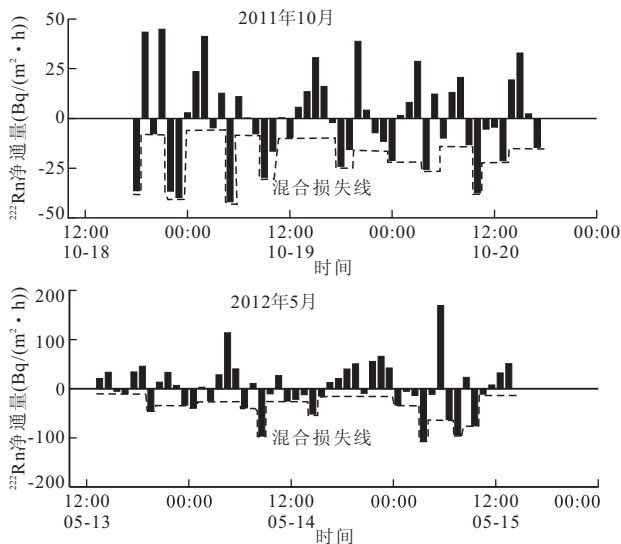


图 6  $^{222}\text{Rn}$  的混合损失通量的估算(时间:第 1 行是钟点(时:分);第 2 行是日期(月一日))

Fig.6 Plot showing the method for estimating the mixing loss flux of  $^{222}\text{Rn}$

无论从变化幅度还是从平均值来看,均是第 2 次实验时段的较大。

#### 4.8 海底地下水排泄速率

为了获得海底地下水排泄量,将上面得到的 SGD 输入的  $^{222}\text{Rn}$  通量除以地下水端元的  $^{222}\text{Rn}$  活度就可以转化而来。根据陆地的人文地质条件和湾内潮流路径(陈金瑞等,2011),连续测量点的计算结果基本可以代表墨水河—白沙河流域这段海岸带的海底地下水排泄,选择连续测量点附近的地下水样 G18、G19 作为地下水端元,即除以这 2 个地下水中  $^{222}\text{Rn}$  活度的平均值,获得 2011 年和 2012 年实验时段的平均海底地下水排泄速率分别为 6.38 cm/d 和 8.29 cm/d。后者较前者大,是因为在 2012 年实验之前(5 月 7—10 日),青岛有过一次较大的降雨过程,地下水得到了补给,从而增大了海底地下水排泄量。根据青岛的降水规律,10 月份和 5 月份属于降水偏枯的季节,所以推测丰水期胶州湾可能有更多的海底地下水排泄量入海。海底地下水排泄速率计算的不确定性(误差),主要来源于地下水端元的选择,因为确定真正的地下水端元比较困难,正如下游平原地下水样  $^{222}\text{Rn}$  测量结果,各水样  $^{222}\text{Rn}$  活度彼此相差还比较大(图 3)。

计算结果显示海底地下水排泄速率波动较大,2011 年实验时段海底地下水排泄速率在 0.03~20.53 cm/d 之间变化,2012 年实验时段海底地下水排泄速率在 0.01~55.21 cm/d 之间变化(图 7)。海

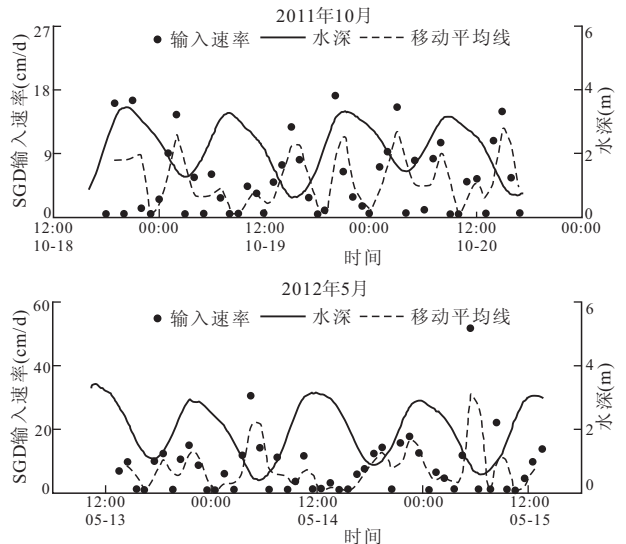


图 7 海底地下水排泄速率(时间:第 1 行是钟点(时:分);第 2 行是日期(月一日))

Fig.7 Variation for the rate of submarine groundwater discharge during monitoring

底地下水排泄受到降水、地下水开采的影响,同时受到潮汐、波浪的控制,特别是循环海水受潮汐、波浪的影响很大,波浪的频繁波动引起局部水压力变动,导致海底地下水排泄速率复杂多变,其变化频率远超过水深的变化(图 7)。

#### 4.9 营养盐输入量

为了估算海底地下水排泄输送的入海营养盐数量,近似认为墨水河—白沙河流域拥有的海岸带长约 10 km,并认为在宽约 100 m 的海床发生海底地下水排泄,由此计算得到该段海岸带的海底地下水体积排泄量分别为  $6.38 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (2011 年 10 月)和  $8.29 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (2012 年 5 月)。

在采集地下水样测量  $^{222}\text{Rn}$  的同时,笔者还对地下水样进行了营养盐分析,地下水中溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)和溶解  $\text{SiO}_2$  的分析采用分光光度法,选择距离海岸最近的 G18、G19 地下水样作为计算营养盐的端元,它们的营养盐浓度见表 2。

用海底地下水体积排泄量乘以营养盐浓度估算海底地下水排泄输送的营养盐通量,两个时段的 DIN 输送量分别是  $47.0 \times 10^3 \text{ mol/d}$ (2011 年 10 月)和  $48.6 \times 10^3 \text{ mol/d}$ (2012 年 5 月),可溶性  $\text{SiO}_2$  输送量分别是  $15.5 \times 10^3 \text{ mol/d}$  和  $17.3 \times 10^3 \text{ mol/d}$ ,DIP 输送量相对较少,2011 年未检出  $\text{PO}_4^{3-}\text{P}$ ,2012 年 5 月 DIP 输送量为  $0.6 \times 10^3 \text{ mol/d}$ 。

为了与河流输入的营养盐进行对比,在 2011 年

表2 地下水中的营养盐浓度及估算通量

Table 2 Nutrients in groundwater and nutrient loadings

日期	水样	DIN ( $\mu\text{M}$ )	DIN 通量 ( $10^3 \text{ mol/d}$ )	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 通量 ( $10^3 \text{ mol/d}$ )	$\text{SiO}_2\text{-Si}$ ( $\mu\text{M}$ )	$\text{SiO}_2\text{-Si}$ 通量 ( $10^3 \text{ mol/d}$ )
2011年10月	G18	730.3		未检出		211.9	
	G19	744.1		未检出		273.3	
	平均值	737.2	47.0			242.6	15.5
2012年5月	G18	612.7		7.2		231.4	
	G19	559.1		7.5		186.3	
	平均值	585.9	48.6	7.4	0.6	208.9	17.3

10月和2012年5月,笔者还取样分析了河水的营养盐浓度。按照河流径流量乘以河水营养盐浓度的方法计算,墨水河—白沙河在两个时段的DIN输送量分别是 $1\,410.4 \times 10^3 \text{ mol/d}$ (2011年10月)和 $419.5 \times 10^3 \text{ mol/d}$ (2012年5月);可溶性 $\text{SiO}_2$ 输送量分别是 $420.1 \times 10^3 \text{ mol/d}$ 和 $55.3 \times 10^3 \text{ mol/d}$ ;DIP输送量分别是 $26.3 \times 10^3 \text{ mol/d}$ 和 $3.3 \times 10^3 \text{ mol/d}$ 。与海底地下水排泄输入的营养盐比较,河流输入的营养盐变化较大,这主要与工厂、企业排放污染物的不确定性有关,而地下水中营养盐含量相对比较稳定。虽然海底地下水排泄输入的DIN、DIP和可溶性 $\text{SiO}_2$ 只是河流输入的几分之一至十分之一,但是也不应该忽视它的存在,其对胶州湾的营养盐输入仍有一定的贡献。

## 5 结论

本文通过对胶州湾北岸东大洋码头海水系统中<sup>222</sup>Rn的连续监测,综合考虑了母体支持、潮汐涨落、沉积物扩散、大气逃逸、混合损失等因素,依据<sup>222</sup>Rn质量平衡计算了墨水河—白沙河流域该段海岸带的海底地下水排泄速率,2011年10月和2012年5月实验时段的平均海底地下水排泄速率分别为 $6.38 \text{ cm/d}$ 和 $8.29 \text{ cm/d}$ 。根据环胶州湾及其沿岸的水文地质条件,推测条件类似的大沽河流域、洋河流域也应该存在相当的海底地下水排泄速率。两次实验都在偏枯的月份,推测丰水季节胶州湾会有更高的海底地下水排泄速率。基于海水系统中<sup>222</sup>Rn的连续监测,可以很好地了解海底地下水排泄的变化过程,但是其评价结果只能代表局部海岸带的情况。如果要全面了解胶州湾沿岸的海底地下水排泄,那么需要在近岸设置较多的连续观测点。另外,也可以点面结合,利用镭同位素示踪法对整个胶州湾的海底地下水排泄进行评价。

本次计算海底地下水排泄输送的营养盐通量,假设营养盐在海岸带的运移过程是保守的,采用海底地下水排泄量乘以地下水中营养盐浓度的简单方法计算,没有考虑消化—反消化作用、吸附—解吸作用、氧化还原反应等生物地球化学过程,所以营养盐通量只是一个粗略的估算,更准确的计算有待于在查清地下河口的生物地球化学过程的基础上进行。虽然获得的营养盐通量是局部地段估算值,但是反映出海底地下水排泄对胶州湾的营养盐的贡献还是不可忽略的。

## References

- Beck, A. J., Tsukamoto, Y., Tovar-Sanchez, A., et al., 2007. Importance of Geochemical Transformations in Determining Submarine Groundwater Discharge-Derived Trace Metal and Nutrient Fluxes. *Applied Geochemistry*, 22(2): 477—490. doi: 10.1016/j.apgeochem.2006.10.005
- Bobba, A. G., Chambers, P. A., Wrona, F. J., 2012. Submarine Groundwater Discharge (SGWD): An Unseen yet Potentially Important Coastal Phenomenon in Canada. *Nat Hazards*, 60(3): 991—1012. doi: 10.1007/s11069-011-9884-7
- Bratton, J. F., Böhlke, J. K., Krantz, D. E., et al., 2009. Flow and Geochemistry of Groundwater beneath a Back-Barrier Lagoon—The Subterranean Estuary at Chincoteague Bay, Maryland, USA. *Marine Chemistry*, 113(1—2): 78—92. doi: 10.1016/j.marchem.2009.01.004
- Burnett, W. C., Taniguchi, M., Oberdorfer, J., 2001. Measurement and Significance of the Direct Discharge of Groundwater into the Coastal Zone. *Journal of Sea Research*, 46(2): 109—116. doi: 10.1016/S1385-1101(01)00075-2
- Charette, M. A., Buesseler, K. O., 2004. Submarine Groundwater Discharge of Nutrients and Copper to an Urban Subestuary of Chesapeake Bay. *Limnol. Oceanogr.*, 49(2): 376—385.

- Charette, M. A., Sholkovitz, E. R., 2006. Trace Element Cycling in a Subterranean Estuary; Part 2. Geochemistry of the Pore Water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (4): 811—826. doi: 10.1016/j.gca.2005.10.019
- Chen, C., Yang, G. P., Gao, X. C., et al., 2012. Nutrients Distributional Characteristics and Eutrophication in the Sea-Surface Microlayer and Subsurface Water in the Jiaozhou Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32 (8): 1856—1865 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. R., Chen, X. E., Yu, H. M., et al., 2011. Three-Dimensional High-Resolution Numerical Study of the Tide and Tidal Current in the Jiaozhou Bay. *Periodical of Ocean University of China*, 41 (7/8): 29—35 (in Chinese with English abstract).
- Costa Jr., O. S., Nimmo, M., Attrill, M. J., 2008. Coastal Nutrient Excess on Coral Reef Demise. *Journal of South American Earth Sciences*, 25 (2): 257—270. doi: 10.1016/j.jsames.2007.10.002
- Dulaiova, H., Camilli, R., Henderson, P. B., et al., 2010. Coupled Radon, Methane and Nitrate Sensors for Large-Scale Assessment of Groundwater Discharge and Non-Point Source Pollution to Coastal Waters. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101 (7): 553—563. doi: 10.1016/j.jenvrad.2009.12.004
- Gonnecta, M. E., Morris, P. J., Dulaiova, H., et al., 2008. New Perspectives on Radium Behavior within a Subterranean Estuary. *Marine Chemistry*, 109 (3—4): 250—267. doi: 10.1016/j.marchem.2007.12.002
- Guo, Z. R., Huang, L., Liu, H. T., et al., 2008. Estimating Submarine Inputs of Groundwater to a Coastal Bay Using Radium Isotopes. *Acta Geoscientica Sinica*, 29 (5): 647—652 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. R., Huang, L., Yuan, X. J., et al., 2011. Estimating Submarine Groundwater Discharge to Jiulong River Estuary Using Ra Isotopes. *Advances in Water Science*, 22 (1): 118—125 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. R., Li, K. P., Yuan, X. J., et al., 2012. Assessment of Submarine Groundwater Discharge into Wuyuan Bay via Continuous Radon-222 Measurements. *Advances in Water Science*, 23 (2): 263—270 (in Chinese with English abstract).
- Hwang, D. W., Kim, G., Lee, W. C., et al., 2010. The Role of Submarine Groundwater Discharge (SGD) in Nutrient Budgets of Gamak Bay, A Shellfish Farming Bay, in Korea. *Journal of Sea Research*, 64 (3): 224—230. doi: 10.1016/j.seares.2010.02.006
- Johannesson, K. H., Chevis, D. A., Burdige, D. J., 2011. Submarine Groundwater Discharge is an Important Net Source of Light and Middle REEs to Coastal Waters of the Indian River Lagoon, Florida, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (3): 825—843. doi: 10.1016/j.gca.2010.11.005
- Lambert, M. J., Burnett, W. C., 2003. Submarine Groundwater Discharge Estimates at a Florida Coastal Site Based on Continuous Radon Measurements. *Biogeochemistry*, 66 (1—2): 55—73. doi: 10.1023/B: BIOG.0000006057.63478.fa
- Laurier, F. J. G., Cossa, D., Beucher, C., et al., 2007. The Impact of Groundwater Discharges on Mercury Partitioning, Speciation and Bioavailability to Mussels in a Coastal Zone. *Marine Chemistry*, 104 (3—4): 143—155. doi: 10.1016/j.marchem.2006.10.010
- Lee, Y. W., Kim, G., 2007. Linking Groundwater-Borne Nutrients and Dinoflagellate Red-Tide Outbreaks in the Southern Sea of Korea Using a Ra Tracer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71 (1—2): 309—317. doi: 10.1016/j.ecss.2006.08.004
- Lee, Y. W., Hwang, D. W., Kim, G., et al., 2009. Nutrient Inputs from Submarine Groundwater Discharge (SGD) in Masan Bay, an Embayment Surrounded by Heavily Industrialized Cities, Korea. *Science of the Total Environment*, 407 (9): 3181—3188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.04.013
- Moore, W. S., 1996. Large Groundwater Inputs to Coastal Waters Revealed by <sup>226</sup>Ra Enrichments. *Nature*, 380: 612—614. doi: 10.1038/380612a0
- Moore, W. S., 2006. The Role of Submarine Groundwater Discharge in Coastal Biogeochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 88 (1—3): 389—393. doi: 10.1016/j.gexplo.2005.08.082
- Schwartz, M. C., 2003. Significant Groundwater Input to a Coastal Plain Estuary; Assessment from Excess Radon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56 (1): 31—42. doi: 10.1016/S0272—7714(02)00118—X
- Street, J. H., Knee, K. L., Grossman, E. E., et al., 2008. Submarine Groundwater Discharge and Nutrient Addition to the Coastal Zone and Coral Reefs of Leeward Hawaii. *Marine Chemistry*, 109 (3—4): 355—376. doi: 10.1016/j.marchem.2007.08.009
- Swarzenski, P. W., Reich, C., Kroeger, K. D., et al., 2007. Ra and Rn Isotopes as Natural Tracers of Submarine Groundwater Discharge in Tampa Bay, Florida. *Marine Chemistry*, 104 (1—2): 69—84. doi: 10.1016/j.marchem.2006.08.001



国家林业局,2003.森林资源规划设计调查主要技术规定.北京:国家林业局,13-14.

王淑君,管东生,黎夏,等,2008.广州森林碳储量时空演变及异质性分析.环境科学学报,28(4):778-785.

温小乐,徐涵秋,2010.福州城市扩展对闽江下游水质影响的遥感分析.地理科学,30(4):624-629.

谢锦升,黄荣珍,陈银秀,等,2001.严重侵蚀红壤封禁管理后群落的生物量及生产力变化.浙江林学院学报,18(4):354-358.

徐涵秋,2007.基于影像的 Landsat TM/ETM+数据正规化技术.武汉大学学报(信息科学版),32(1):62-66.

徐涵秋,2008.Landsat 遥感影像正规化处理的模型比较研究.地球信息科学,10(3):294-301.

徐涵秋,张铁军,2011.ASTER 与 Landsat ETM+植被指数的交互比较.光谱学与光谱分析,31(7):1902-1907.

曾从盛,2006.福建典型区生态环境研究.北京:中国环境科学出版社,1-26.

\* \* \* \* \*

(上接 1080 页)

Wang, Y. L., An, W. C., Xu, Y., 2011. Present Status and Environmental Assessment on Water Quality of Jiaozhou Bay. *Environmental Science and Management*, 36(9): 164-167 (in Chinese with English abstract).

Windom, H. L., Moore, W. S., Niencheski, L. H., et al., 2006. Submarine Groundwater Discharge: A Large, Previously Unrecognized Source of Dissolved Iron to the South Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 102(3-4): 252-266. doi:10.1016/j.marchem.2006.06.016

Zhuo, W. H., Iida, T., Yang, X. T., 2001. Occurrence of <sup>222</sup>Rn, <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra and U in Groundwater in Fujian Province, China. *Journal of Environmental Radioactivity*, 53(1): 111-120. doi:10.1016/S0265-931X(00)00108-9

**附中文参考文献**

陈晨,杨桂鹏,高先池,等,2012.胶州湾微表层和次表层海水中营养盐的分布特征及富营养化研究.环境科学学报,32(8):1856-1865.

陈金瑞,陈学恩,于华明,等,2011.胶州湾潮汐潮流高分辨率数值模拟研究.中国海洋大学学报,41(7/8):29-35.

郭占荣,黄磊,刘花台,等,2008.镭同位素示踪隆教湾的海底地下水排泄.地球学报,29(5):647-652.

郭占荣,黄磊,袁晓婕,等,2011.用镭同位素评价九龙江河口区的地下水输入.水科学进展,22(1):118-125.

郭占荣,李开培,袁晓婕,等,2012.用氡-222 评价五缘湾的地下水输入.水科学进展,23(2):263-270.

王艳玲,安文超,许颖,2011.胶州湾海域水质现状评价.环境科学与管理,36(9):164-167.