

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0056

张汉雄, 胡晓农, 陈麟. 莱州湾南岸海底地下水交换量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 177-181. ZHANG H X, HU X N, CHEN L. Study on submarine groundwater exchange capacity in south Laizhou Bay[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 177-181. (in Chinese)

莱州湾南岸海底地下水交换量研究

张汉雄¹, 胡晓农², 陈麟²

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 相对于定性研究海水入侵的程度及规律, 定量研究能更直观的给出海水入侵地区的 SGD(Submarine groundwater discharge) 以及流入量。选择潍坊昌邑市北部潮间带地区, 布设 3 km 长监测剖面, 通过监测地下水水位、水温、以及电导率数据, 运用数学方法定量估算海底地下水交换量。同时, 运用计算所得结果, 对研究区海水入侵情况进行评估, 为将来该地区地下水监测提供科学依据。计算结果表明, 潮间带流入量明显大于流出量, 海水呈现朝陆推进趋势。

关键词: 莱州湾; 海水入侵; 海潮; 海底地下水排泄

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0177-05

Study on submarine groundwater exchange capacity in south Laizhou Bay

ZHANG Hanxiong¹, HU Xiaonong², CHEN Lin²

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;

2. Department of Water Resources and Environment, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Compared with the qualitative study of seawater intrusion, the quantitative study can give a more direct description of the submarine groundwater discharge and inflow in the seawater intrusion area. We set up a 3 km long monitoring section in an intertidal zone located in the north of Changyi City of Weifang. According to the data of groundwater level, water temperature, and conductivity, we conducted a quantitative estimation of the submarine groundwater exchange capacity by mathematical methods. The results of the calculation were used to evaluate the trend of seawater intrusion in the study area, and to provide a scientific basis for future groundwater monitoring in the area. The results showed that the inflow in the intertidal zone was obviously larger than the outflow, so the sea water is showing a trend of landward intrusion.

Key words: Laizhou Bay; seawater intrusion; sea tide; submarine groundwater discharge

海底地下水排泄 (Submarine Groundwater Discharge, 简称 SGD) 是地下水水体向海洋沉积物与水界面运移的重要途径, 也是有机物、营养物质、重金属离子以及天然同位素等内陆物质向海洋输送的重要通道, 影响着近岸海洋生态系统的平衡以及海洋中各种元素的地球化学循环^[1]。

从很早的时期开始, 人们就对 SGD 进行了初步的研究, 不过因为它的隐蔽性以及定位、测量、计算技术的相对落后, 致使人们一直没有重视 SGD 对海岸生态水域环境的重要作用。在本世纪初, 人们重新认识了 SGD 对海岸生态环境的重要影响, 不断对这种缓慢、分散, 但持续不断的物质输送途径进行研

收稿日期: 2017-07-15 修回日期: 2017-09-19 网络出版时间: 2018-01-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180129.1611.010.html>
基金项目: 中国地质调查项目(1212011303800)

Fund: China Geological Survey Projects(1212011303800)

作者简介: 张汉雄(1990), 男, 山东寿光人, 主要从事海水入侵与地下水数值模拟研究。E-mail: 444219401@qq.com

通讯作者: 胡晓农(1962), 男, 江苏淮阴人, 教授, 博士生导师, 长期从事地下水数值模拟研究。E-mail: bill.x.hu@gmail.com

究^[2]。与此同时 Burnett 等^[3]突破了海洋和水文学家们对“海底地下水”定义的限制,重新把海底地下水定义为“从海底沉积物通过海床进入上覆水的所有流动水体”。根据此定义,SGD 被分成了两类,首先包含了从海岸含水层进入海洋的内陆淡水(传统意义的地下水),其次为在海底不断倒灌排放、循环流动的海水。

全世界水量平衡估算显示,SGD 通量大概为河水入海量的 0.2%~10% 左右。Moore 等^[4]进一步指出,在整个大西洋的研究区域上的 SGD 通量至少为 10^6 ($\text{m}^3/(\text{km} \cdot \text{d})$)。Charette 等^[5]在 2009–2010 年,使用镭同位素定量计算了美国佛罗里达 Caloosahatchee 河河口的 SGD 以及营养盐通量,指出 SGD 表现出明显的季节性,最低为 2010 年 4 月的 8.5×10^4 (m^3/d),最高为 2010 年 10 月的 1.3×10^6 (m^3/d)。Tait 等^[6]利用不同的放射性同位素和地球物理的方法估算了南太平洋珊瑚礁泻湖的 SGD。Su 等^[7]通过镭、氡同位素评估了 Little Lagoon 地区的 SGD 对造成水华的影响,认为当存在高 SGD 时,其带来的营养物质是导致水华的主要驱动;而在低 SGD 时,水华是多种原因造成的。

我国在 SGD 方面的研究开始较晚,但 SGD 的研究越来越受到重视。众多学者选取莱州湾典型剖面,有针对性地对莱州湾地区进行水化学研究,通过对莱州湾地区地下水各因素的分析,对莱州湾海(咸)水入侵过程有了进一步的了解^[8-10]。李福林等^[11]对莱州湾东岸的海底地下水的水化学特征进行了分析,揭示了海底含水层与陆地含水层中在空间上的联系,指出近岸带地下水已经受到了污染,影响了海洋的生态与环境。郭占荣等^[12]使用镭同位素,通过“水平涡动扩散模型”评估了福建漳州市隆教湾的 SGD 通量;苏妮等^[13]利用镭同位素地球化学示踪的方法,结合海南东北部沿岸水域镭同位素数据,计算了当地的 SGD 通量;黄磊^[14]分别使用 ^{224}Ra 和 ^{226}Ra 同位素的“质量平衡模型”,通过量化每个源汇项,估算出九龙江河口区的 SGD 通量的平均值为 2.01×10^8 (m^3/d),并发现海底地下水总排泄量中存在 60%~90% 的循环海水。马倩等^[15]利用广义达西定律计算了莱州湾东部沿岸的 SGD 以及流入量,并发现渗面向海方面的流出量明显下降。

本文在整理研究区野外数据的基础上,采用数学计算的方法^[15]来综合分析莱州湾南岸近岸海岸带的 SGD 量,以期为该地区海水入侵监测提供科学依据。

1 研究区概况及水文地质条件

研究区位于山东省潍坊昌邑市北部潮间带地区,属暖温带季风性半湿润气候。年平均降水量在 612.5~660.1 mm 范围内。研究剖面全长(观测井 W_1 至 W_5 ,图 1、图 2)约 3 km,在海岸线以外,由堤坝向海延伸,地理坐标位置在北纬 $36^\circ 43' - 37^\circ 09'$ 范围内,东经 $119^\circ 22' - 119^\circ 37'$ 之间。

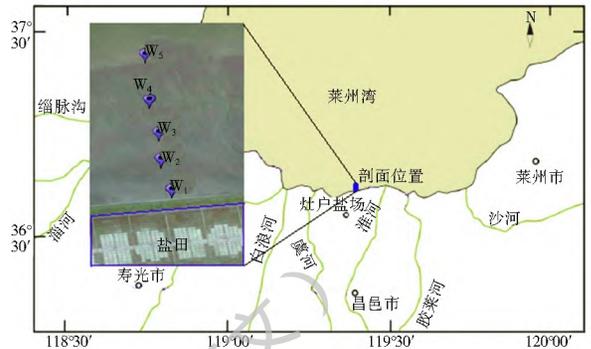


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

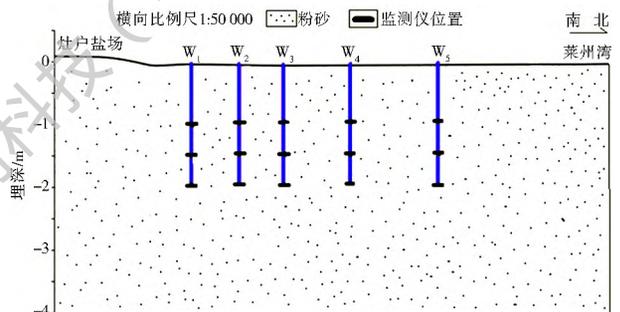


图 2 监测井分布

Fig. 2 Distribution of the monitoring wells

研究剖面位于潮间带,受潮汐作用影响,当海水涨潮时,地下水由海向陆推进,即北向南方向,达到高潮时刻刚好可淹没剖面最南部观测井(W_1);当海水退潮时,地下水由陆向海推进,达到低潮时,观测井 W_1 完全干涸、 W_2 地表干涸。含水层属于滨海含水层,主要由上层潜水含水层与下层承压含水层组成。潜水含水层主要由细砂与中砂组成,平均厚 5~8 m;承压含水层由中粗砂及砾石组成,平均厚度 10 m。研究区地下水补径排关系主要受季节以及潮汐作用、人类因素等影响,潜水含水层主要受大气降雨、海洋侧向补给、地表水体的渗漏补给以及地下水侧向径流补给;承压含水层的补给来源主要为卤水体渗漏补给、层间越流补给以及海洋侧向补给。地下水排泄方式主要为人工开采、蒸发、以及海底地下水排泄等方式,其中人工开采对承压含水层影响最大。

研究区北部为渤海莱州湾,潮汐为不规则半日潮,潮差约 2 m(图 3)。受渤海海流和季风影响,研究区位于一个多风暴潮海域,尤其在秋季,当发生连续几日偏南风突然转为偏北风时,海水位会剧增暴涨,易形成风暴潮,并可向南岸的陆地浸淹达十余公里。而历史上曾多次波及地面高 7 m 地区,形成严重潮灾。

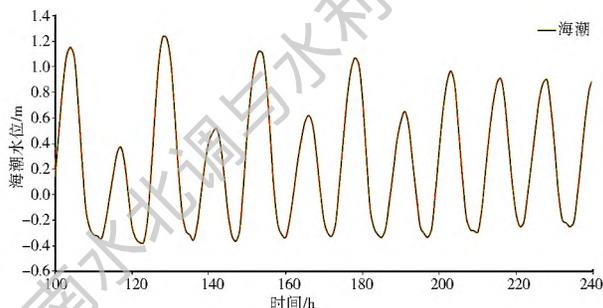


图 3 潮汐变化
Fig. 3 Tidal change

2 数据采集

在山东潍坊昌邑市北部潮间带地区布设 5 个监测点,由南向北分布,依次为 W_1 至 W_5 ,剖面长度约 3 km。每个监测点设置三个监测井,井深分别为 1 m、1.5 m 和 2 m。利用自动观测仪(CTD-Diver)对地下水进行监测,监测各井中的水位、水温、电导率,监测频次 1 次/h。

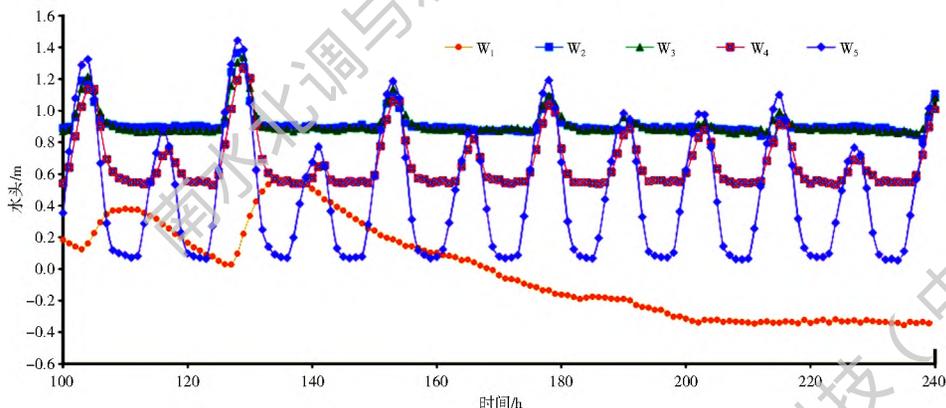


图 4 2014 年 W_1 至 W_5 各点观测水头随时间变化的关系
Fig. 4 Observed water head variation over time at W_1 - W_5 observation points in 2014

3.2 地下水盐度分析

图 5 为各观测井盐度与海潮变化。各观测井中地下水的盐度整体上变化不明显,仅在部分时间段随着海潮的波动而出现小幅度的变化。由于研究区剖面南部盐场大量晒盐,导致各监测井中所测盐度均大于测得的海水平均盐度 32.68 g/L。大面积晒盐区域会造成卤水的渗漏进入地下水中。 W_3 附近出现了一个高盐度区,分析原因认为在地下形成了

监测井监测分为短期监测和长期监测两种。短期监测的起始时间为 2014 年 8 月 11 日 22:00,截止时间为 2014 年 8 月 17 日 18:00,历时 120 h。长期监测的起始时间为 2014 年 8 月 7 日 18:00,截止时间为 2014 年 9 月 12 日 10:00,历时 35 d

3 地下水观测数据分析

3.1 地下水水头分析

将观测水头转化为等效淡水水头,等效淡水水头公式表示为:

$$h_f = \frac{\rho}{\rho_f} h - \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z \quad (1)$$

$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} z \quad (2)$$

式中: h_f 为等效淡水水头(m); h 为水头(m); ρ_f 为淡水密度(g/L); ρ 为咸水密度(g/L); z 为标高(m)。

图 4 为各观测井观测水头随时间变化。剖面南部为灶户盐场,常年大面积晒盐,且不定期抽取地下卤水晒盐,因此对 W_1 点的观测数据有很大影响。在低潮阶段,对比 W_2 至 W_5 各点的水头值可以发现,水头值从大到小依次为 $W_2 > W_3 > W_4 > W_5$ 。这说明在研究剖面上有来自内陆的地下水对研究区剖面位置进行补给,导致近岸的观测井水位高于向海位置观测井。

一个地下水排泄通道,受盐场抽取卤水影响,部分卤水通过排泄通道向海排泄,在 W_3 监测井位置形成高浓度区域。

4 海底地下水排泄量计算

由观测数据可以得出,在观测期内, W_2 至 W_5 井都是饱和的(除抽水晒盐影响外)。通过数学方法^[15],使用 2014 年 1 m 和 2 m 的监测数据,来估算

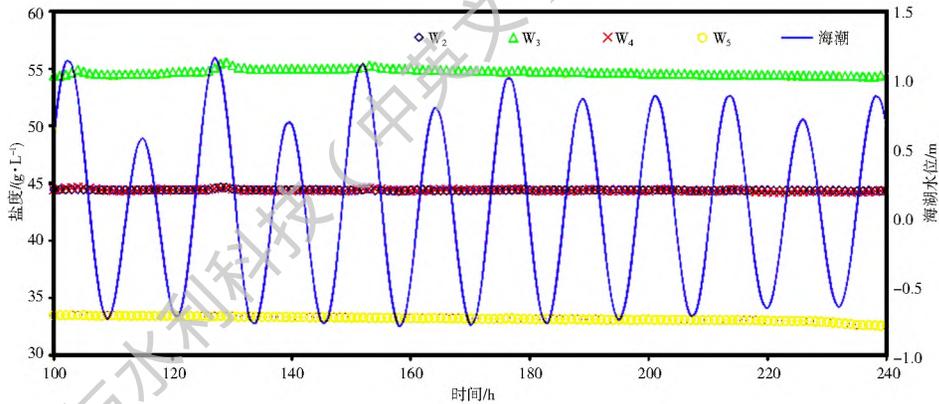


图 5 2014 年 W₂ 至 W₅ 各点盐度与海潮变化关系

Fig. 5 Salinity and tidal water level change over time at W₂ W₅ observation points in 2014

海底地下水排泄量与地下水的流入量。考虑到密度的影响,垂向的地下水流量可以用如下的广义达西定律表示:

$$q_v = - \delta K_v \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (3)$$

式中: q_v 表示垂向地下水流量 (m^2/d); n 代表垂直的方向; K_v 表示垂向的水力梯度; h_f 表示等效淡水水头 (m); ρ 表示咸水密度 (g/L); 可以定义为:

$$\rho = \rho_0 (1 + \varepsilon c) \quad (4)$$

式中: $\rho_0 = 998.2 \text{ kg}/m^3$ 是 20°C 时淡水的密度; c 为孔隙水的盐度 (g/L); 参数 $\varepsilon = 7.143 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$ 。参数 δ 是动力黏滞系数, 可以定义为:

$$\delta = \frac{\mu_0}{\mu} = 1 - \xi c \quad (5)$$

式中: μ 是孔隙水的动力黏滞度, $\mu_0 = 0.001 \text{ kg}/(m^3 \cdot s)$; 常量 $\xi = 1.566 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, 把 (4) 式带入 (3) 式可以得出:

$$q_v = - \delta K_v \left(\frac{\partial h_f}{\partial z} + \varepsilon c \right) \quad (6)$$

考虑到潮间带地区是一个近乎水平的潮滩, 通过滩面的水量交换可以近似地表示为垂向流, 导数 $\partial h_f / \partial z$ 可以近似为:

$$\frac{\partial h_f}{\partial z} \approx \frac{h_1 - h_2}{\Delta L} \quad (7)$$

式中: h_1 是 1 m 深度时的等效淡水水头 (m); h_2 是 2 m 深度时的等效淡水水头 (m); ΔL 是两个压力传感器 (Diver) 之间距离 (m); 孔隙水的盐度 c 可以近似地表示为:

$$c \approx \frac{c_w + c_s}{2} \quad (8)$$

式中: c_w 为井中观测的盐度; c_s 为观测的海水盐度 ($30 \text{ g}/L$)。因此, 垂向地下水流量可以表示为:

$$q_v \approx - \delta K_v \left(\frac{h_1 - h_2}{\Delta L} + \frac{\varepsilon (c_w + c_s)}{2} \right) \quad (9)$$

根据公式 (9) 得出的垂向地下水流量, 在观测期内各个点 (W_2 至 W_5) 的流出量 q_{out} 和流入量 q_{in} 可以表示为:

$$q_{out} = \frac{1}{t_e - t_0} \int_{t_0}^{t_e} \max_t \{0, q_v(t)\} dt \quad (10)$$

$$q_{in} = \frac{1}{t_e - t_0} \int_{t_0}^{t_e} \max_t \{0, -q_v(t)\} dt \quad (11)$$

式中: t_0 和 t_e 分别为观测期开始和结束的时间, 使 X_2, \dots, X_5 分别对应 W_2, \dots, W_5 , 在 W_2 和 W_5 之间的总的流入和流出量可以由沿着向海方向的, 在 X_2 和 X_5 之间的积分估算出来:

$$SGD = \sum_{i=2}^4 \left(\int_{X_i}^{X_{i+1}} q_{out} dx \right) \quad (12)$$

$$Inf\ low = \sum_{i=2}^4 \left(\int_{X_i}^{X_{i+1}} q_{in} dx \right) \quad (13)$$

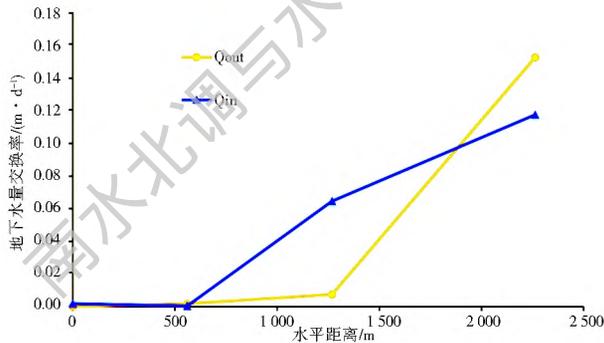
式中: q_{out} 在 (X_i, X_{i+1}) ($i = 2, 3, 4$) 之间的是由相邻两个 X_i 和 X_{i+1} 之间的直线距离决定的, q_{in} 也是这样。

通过计算, 得到观测期内的垂向地下水流量, 见图 6。图 6 为 W_2 和 W_5 之间的横断面上平均水量交换率。每一个点的流出量展示在表 1 中。表 1 中, W_2 至 W_5 渗透系数逐渐增大, W_2 点处渗透系数明显小于其它各井, 分析原因是由于所选剖面受潮汐作用影响, 随着海水涨潮退潮, W_2 点处低渗透性沉积物逐渐增多, 低潮时地表出露, 逐渐形成渗透系数由岸向海逐渐增大趋势。图 6 显示, 从 W_2 到 W_5 , 流出率不断增大, 起初增长缓慢, 而后显著增多, 同时流入率一开始略有下降, 而后也是显著增多。导致这个现象的原因是由于研究剖面沉积物的低渗透性和潮间带上平缓的坡度。通过式 (12)、式 (13) 的计算, 在 W_2 和 W_5 之间的总 SGD 和流入量分别为 $80.4 \text{ m}^2/d$ 和 $108.5 \text{ m}^2/d$ 。

表 1 各点位置高程及对应的渗透系数和海底地下水排泄量(SGD)

Tab. 1 Elevation of each point and the corresponding coefficient of permeability and SGD

位置	$Kv / (10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$SGD / (10^2 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1})$
$W_2 (X_2 = 0 \text{ m})$	0.07	0.009
$W_3 (X_3 = 560 \text{ m})$	0.50	0.18
$W_4 (X_4 = 1268 \text{ m})$	0.90	0.75
$W_5 (X_5 = 2262 \text{ m})$	1.07	15.28

图 6 观测期内 W_2 至 W_5 剖面上的地下水流入和流出交换率Fig. 6 Groundwater inflow and outflow exchange rate at W_2 - W_5 sections in observation period

5 结论

通过对研究区剖面观测数据以及计算结果分析得出以下结论。由于潮间带上较低的渗透系数以及较为平缓的坡度,潮间带剖面上存在渗出面。由内陆到海洋的方向的潮间带上,存在相对较高水头的地下水排泄到地表,即SGD。随着由陆向海SGD的逐步增加以及流入量增多,计算得出在潮间带观测井 W_2 和观测井 W_5 之间的总SGD和流入量分别为 $80.4 \text{ m}^2/\text{d}$ 和 $108.5 \text{ m}^2/\text{d}$ 。通过计算可知,研究区流入量大于流出量,说明海水呈现向陆推进趋势。

参考文献(References):

[1] BU METT W C. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods[J]. Science of the Total Environment, 2006, 367(2-3): 498-543. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2006.05.009.

[2] MOORE W S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by Ra^{226} enrichments[J]. Nature, 1996, 380: 612-614. DOI: 10.1038/380612a0.

[3] BU METT W C, BOKU NIEWICZ H, HU ETTEL M. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone[J]. Biogeochemistry, 2003, 6, 333. DOI: 10.1023/B: BIOG.0000006066.21240.53.

[4] MOORE W S, SARMIENTO J L, KEY R M. Submarine groundwater discharge revealed by Ra^{228} distribution in the upper Atlantic Ocean[J]. Nature Geoscience, 2008, 1, 309-311. DOI: 10.1038/ngeo183.

[5] MATTHEW A C. Seasonal cycles in radium and barium within a subterranean estuary: Implications for groundwater derived chemical fluxes to surface waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 119: 164-177. DOI: 10.1016/j.gca.2013.05.034.

[6] TAIT D R, SANTOS I R. Estimating submarine groundwater discharge in a South Pacific coral reef lagoon using different radioisotope and geophysical approaches[J]. Marine Chemistry, 2013, 156: 49-60. DOI: 10.1016/j.marchem.2013.03.004.

[7] SU N, BUMETT W C. Natural radon and radium isotopes for assessing groundwater discharge into little lagoon, AL: Implications for harmful algal blooms[J]. Estuaries and Coasts, 2014, 37(4): 893-910. DOI: 10.1007/s12237-013-9734-9.

[8] 郭占荣, 黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003, 23(3): 10-15. (GUO Z R, HUANG Y P. Comprehensive study on seawater intrusion[J]. Hydrology, 2003, 23(3): 10-15. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2003.03.003.

[9] 管清花, 陈学群. 莱州湾南岸潍坊北部平原区咸水入侵动态变化分析[J]. 山东国土资源, 2014, 30(9): 39-43. (GUAN Q H, CHEN X Q. Analysis on dynamic changes of salt water intrusion in Northern Weibei Plain in South Laizhou Bay[J]. Land and resources of Shandong province, 2014, 30(9): 39-43. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-6979.2014.09.009.

[10] 孙云华, 张安定. 最近30年来人类活动对莱州湾南岸地貌过程及海水入侵的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(5): 43-50. (SUN Y H, ZHANG A D. Influences of human activities on the coastal landform and sea water invasion along the southern Laizhou Bay during the past 30 years[J]. Marine Geology & Quaternary geology, 2011, 31(5): 43-50. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.05043.

[11] 李福林, 陈学群. 莱州湾东岸海底地下水的水文地球化学特征及其地球化学演化模式[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 190-196. (LI F L, CHEN X Q. Hydrogeochemical characteristics and geochemical evolution model of seabottom groundwater along the east coast of Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 190-196. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1671-6647.2005.02.010.

[12] 郭占荣, 黄磊. 镭同位素示踪胶州湾的海底地下水排泄[J]. 地球学报, 2008, 29(5): 647-652. (GUO Z R, HUANG L. The estimation of submarine inputs of groundwater to a coastal bay using radium isotopes[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(5): 647-652. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1005-3021.2008.05.016.

[13] 苏妮, 张磊. 沿岸地下水排放通量[J]. 水文地质工程地质, 2009, 3: 45-50. (SU N, ZHANG L. Groundwater discharge in coastal zones[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 3: 45-50. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3665.2009.03.010.

[14] 郭占荣, 黄磊. 用镭同位素评价九龙江河口区的地下水输入[J]. 水科学进展, 2011, 22(1), 118-125. (GUO Z R, HUANG L. Estimating submarine groundwater discharge to the Jiulong River estuary using Ra isotopes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(1), 118-125. (in Chinese) DOI: 10.1007/s10040-011-1722-000.

[15] MA Q, LI H L. Estimation of seawater groundwater exchange rate: case study in a tidal flat with a large scale seepage face[J]. Hydrogeology Journal, 2015, 23: 265-275. DOI: 10.1007/s10040-014-1196-z.