

莱州湾东岸海底地下水来源判别及量值估算

卜庆伟, 李福林, 陈学群, 林琳

(山东省水利科学研究院, 山东 济南, 250013)

摘要:采用稳定同位素—— ^{18}O 、D, 结合常规离子分析结果确定了莱州湾东岸海底地下水的来源, 并采用数值方法估算了其量值。结果表明: 莱州湾东岸海底地下水主要来源于波浪、潮汐的海水补给, 同时在一定程度上受地下水径流排泄的影响, 三者对海底地下水的贡献率分别为31.0%、56.3%和12.7%。研究结果对于合理开发、科学保护海底地下水具有重要现实意义。

关键词: 莱州湾东岸; 海底地下水径流; 来源; 量值

中图分类号: P641.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)11-0074-05

海底地下水排泄(Submarine groundwater discharge, 简称 SGD)是海岸带陆海相互作用的重要途径, 对海岸海洋过程和化学输移具有十分重要的影响^[1]。SGD 很早就被发现并作为生活用水水源^[2]。然而, 受技术水平及人们对海岸地下水动力作用认识的影响, 该领域研究进展缓慢。1996 年, 国际知名期刊发表了多篇相关研究论文, 对 SGD 的来源识别及其对海岸的影响进行了探讨^[3-5], 大大推动了该领域的研究。

由于之前研究较少关注其来源、认识上的不统一导致 SGD 量值差别很大, 因此, SGD 来源的识别是其量值确定的前提。利用同位素——镭研究 SGD 的来源是由 Moore 首先提出的^[3], 之后在国外很多地方开展了相关技术应用研究^[6-10], 国内利用此技术开展相关研究相对较少, 仅有郭占荣研究了隆教湾的海底地下水排泄^[11]。本文以莱州湾东岸为研究区, 借鉴地下水来源同位素识别方法, 尝试采用稳定同位素 ^{18}O 、D 识别该地区海底地下水的来源, 在此基础上估算 SGD 量值, 成果对相关领域研究具有良好的借鉴意义。

1 研究区概况

研究区位于山东半岛的西北部, 莱州湾东岸(图 1)。海岸线西起虎头崖, 东至刁龙嘴, 长约 30 km。海区范围包括太平湾(莱州湾内的一个次生小湾), 陆域包括莱州市西北部的海积冲积平原及丘陵低山, 面积 360 km², 地貌类型从陆向海依次分布冲积平原—潟湖平原—滩脊平原(砂坝)—水下岸坡。区内有龙王河、苏郭河、朱旺河、南洋河等几条小河流。区内多年平均地表径流量 1.29 亿 m³, 降水入渗地下水补给量为 4 320 万 m³。海底地下水分布于太平湾内的

浅海区域范围, 目前开发利用范围主要限于高低潮线之间的潮滩区, 最远处海岸达 1 000~1 500 m。

本海域潮汐属不规则半日潮区, 三山岛测站($37^{\circ}24' \text{N}, 119^{\circ}57' \text{E}$)的观测资料表明, 潮汐类型判别系数为 0.86, 平均涨潮时 6 h 22 min, 平均落潮时 6 h 06 min。以黄海高程为基准, 当地平均海平面 0.06 m, 平均高潮位为 0.56 m, 平均低潮位为 -0.45 m。本区波浪以风浪为主, 强浪向和常浪向均为 NNE 向, 三山岛潮波统计平均波高 1.3 m, 平均周期 4.9 s, 最大波高 3.9 m。

2 研究区海底地下水的赋存环境

莱州市沿岸海底地下水主要赋存于第四系松散沉积层中, 通过对潮滩上大量开采井的调查以及陆上钻孔资料的分析, 结合庄振业、韩春瑞公开发表的钻孔资料^[12-13], 该地区含水层结构自上而下可分概化为以下几层:

第一层(潜水层), 直接埋藏在海水之下, 厚 1~5 m, 岩性主要为粉细砂, 属全新统浅海 - 潮间带沉积相, 沉积层内含有孔虫和介形虫化石。本层直接接受上层海水渗透补给, 含水量饱和状态, 水质为咸水, 水化学类型为 Cl-Na 型, 与现代海水一致, 受海洋潮汐波动和波浪爬高影响甚大。

第二层(弱透水层), 埋藏在海底以下约 5 m 深度。岩性为黄褐色亚黏土, 厚度 2~3 m。据研究, 该层含少

收稿日期: 2012-04-10; 修回日期: 2013-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40776050); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901076); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(2006BS08025)

作者简介: 卜庆伟(1980-), 男, 山东东平人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事水资源与水环境研究, E-mail: bqw1980@163.com

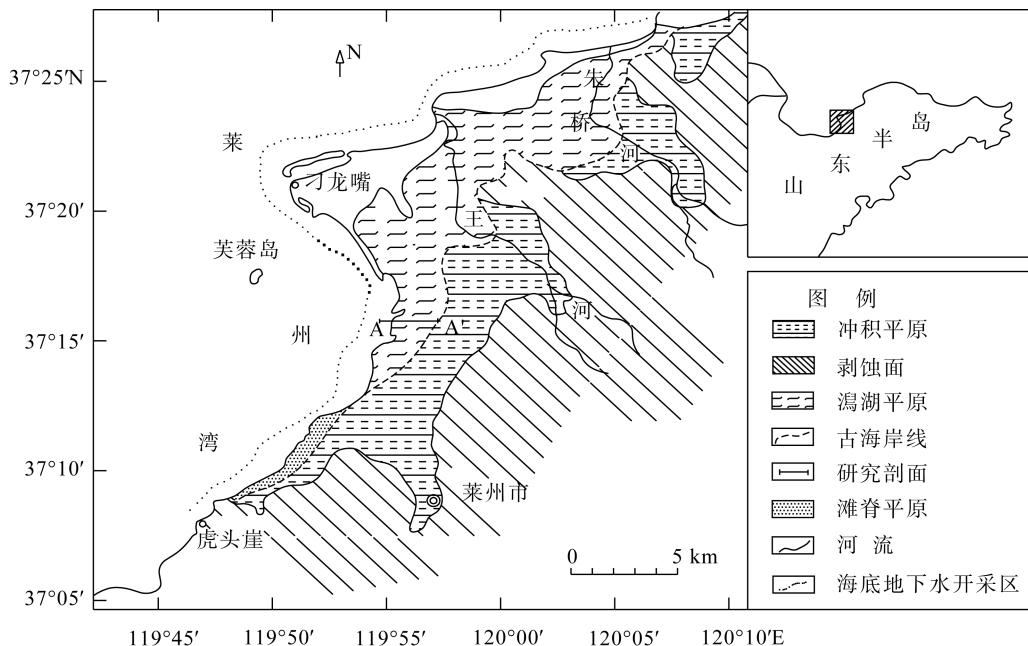


图 1 研究区位置与海岸地貌示意图
Fig. 1 Location map and coastal geomorphology

量有孔虫和介形虫化石，属全新统早期海相沉积。

第三层(承压含水层)，该层埋深在海底 8 m 以下，顶板为上述第二层亚黏土，底板为本区的构造基底—变质岩，平均厚度 20~25 m 左右。该层岩性主要为粉砂、细砂和粗砂，砂层中间或以深层黏土质粉砂或亚黏土相隔，属晚更新世的冲洪积相地层，本区自中更新世早期以来沉积了 3~5 套冲洪积相旋回，故而发育了上细下粗的几个亚含水层。上部的 1~2 层亚含水层曾是沿海养殖大菱鲆的主要供水水源，出水量约 40 m³/h，由于近年来开采量增大，地下水位下降迅速，上部含水层疏干，仅剩底部的 2~3 层沉积相发育的含水层，为主要供水层，出水量 20~30 m³/h。水质类型 Cl-Na-Mg 型。

第四层(隔水底板)：主要由太古界胶东群山变质岩及二长花岗岩组成。除风化带和构造裂隙有一定富水性能外，富水性很少，构成本区水文地质系统的隔水底板。

上述四层单元在空间分布上并不连续，有的层次有缺失，从陆到海，其厚度也有一定变化(图 2)。

3 研究区海底地下水来源判别

3.1 样品测试方法及测试结果

项目组于 2006 年 11 月对莱州湾东岸朱旺地区进行了现场调查并分别对水库水、地下淡水、海底地下水、海水及咸淡水交界面地下水进行了取样分

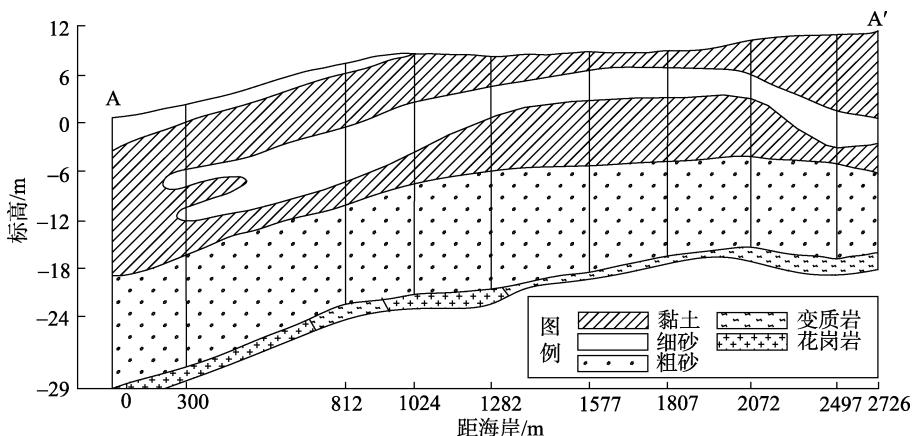


图 2 朱旺断面地质剖面概化图
Fig. 2 Sketch map of geology in Zhuwang section

析。其中,水库水、海水采样依据《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91-2002)执行,地下淡水、咸淡水交界面地下水、海底地下水依据《地下水环境监测技术规范》(HJ/T164-2004)及《地下水污染地质调查评价规范》(DD2008-01)执行。样品常规离子由山东省水利工程质量与安全检测中心站测试,同位素由

中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室稳定同位素实验室测试,使用的质谱仪型号为 MAT-252、MAT-253,同位素结果为相对国际标准 V-SMOW 水样的比值。具体数据见表 1(δ : 样品的同位素比值相对于标准物质同位素比值的千分差; c : 样品检测指标的质量浓度)。

表 1 莱州湾东岸样品分析结果

Tab. 1 Analysis of samples in east coast of the Laizhou Bay

编号	$\delta^{18}\text{O}(\text{\textperthousand})$	$\delta\text{D}(\text{\textperthousand})$	$\rho_{\text{Cl}^-}(\text{mg/L})$	$\rho_{\text{NO}_3-\text{N}}(\text{mg/L})$	样品来原
SGW	-1.80	-12.90	14736	1.96	海底地下水
SW	-1.17	-7.65	16698	1.42	海水
GW1	-8.08	-57.30	133	4.46	陆地地下水
GW2	-8.19	-57.96	176	4.45	陆地地下水
RW	-2.49	-31.38	31.07	2.90	地表水库水

3.2 结果分析与讨论

研究区样品稳定同位素 $\delta^{18}\text{O}$ - δD 关系曲线见图 3, 图中大气降水线根据全球降水同位素监测网(Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP)烟台站($37^{\circ}31'48''\text{N}$, $121^{\circ}24'00''\text{E}$)在 1986~1991 年数据采用压轴回归方法拟合, 公式为: $\delta\text{D}=6.98\delta^{18}\text{O}+1.08(r^2=0.81, n=44)$)。

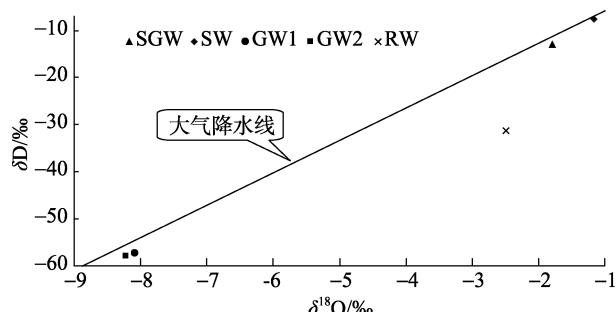


图 3 莱州湾东岸样品稳定同位素组成

Fig. 3 $\delta^{18}\text{O}$ vs δD in the samples in east coast of the Laizhou Bay

由图 3 可以发现, 样品中的稳定同位素值均位于当地降水线的右下方, 表明各水源主要受到大气降水的补给。水体在接受降水补给之前经历蒸发作用会引起氢氧同位素的富集, 使氢氧同位素点偏离大气降水线并位于其右下方^[14]。地表水库样品由于水面面积较大, 蒸发作用更为明显, 加之降雨较少, 偏离程度较高。地下水同位素含量相对海水较低, 说明水汽在由海洋向内陆转移过程中发生了同位素的大陆效应^[15-17], 并通过地下水体现。

海底地下水主要赋存于第四系松散沉积层中, 上有海水及隔水层覆盖, 不可能直接受降雨影响,

因此, 对其来源的分析应集中于大气降水的源头——海洋及受大气降水补给的地下水体。海底地下水、当地地下水及海水与当地的大气降水线具有良好的一致性, 偏离程度低, 也说明三者具有密切的水力联系。海底地下水的硝酸盐含量超过了近岸海水却低于近岸地下水, 氯离子含量远大于地下水和海水较为接近的事实从另一方面证实了海底地下水接受近岸含水层的径流补给和海水补给。

就补给方式而言, 由于海底地下水与内陆含水层具有较强的水力联系, 海底地下水通过地下含水层接受内陆地下水补给。而海水补给方面, 海滩注水试验显示, 部分地区海滩砂的水平渗透系数为 75 m/d, 垂向渗透系数为 0.001 m/d。由此可见, 由于海底淤泥质海相层的存在, 海底地下水接受海水的垂向补给量很少, 其主要补给方式应是潮汐、波浪导致的水平补给。

通过上述分析, 莱州湾东岸海底地下水除受到内陆含水层的净补给外, 更大程度应是由波浪、潮汐作用引起的海水补给。为进一步证实此结论, 结合当地海底地下水开采量实际, 本次研究运用数值方法估算径流量。

4 太平湾海底地下水径流量的估算

4.1 模型和方法

按照 Burnett 等^[2]的观点, 海底地下水径流量是指“陆地边缘地带从海底流向海岸海洋的任意水流, 而不论其流体的组成或驱动力如何”。而根据莱州湾东岸地区海底地下水来源分析, 研究区海底地下水径流量包括直接入海的地下水径流量和海水入渗的流量两大部分, 海水入渗又包括波浪和潮汐两个分量, 因

此, 研究区海底地下水径流量估算采用以下模型^[1]:

$$D_{\text{SGD}} = D_n + D_w + D_t \quad (1)$$

其中: D_{SGD} 为海底地下水径流总量; D_n 为地下水径流直接入海的净值分量; D_w 为波浪影响下单位岸线长度内入渗量; D_t 为潮汐波动引起的海水入渗分量。

D_n 由达西定律计算求得。根据实测结果, 研究区地下水水力坡度为 5‰。

D_w 值可由下式计算:

$$D_w = KS_w L \quad (2)$$

式中: K 为海滩沙的渗透系数; S_w 为波浪爬高坡度; L 为波浪破碎线与爬升线之间的距离; S_w 、 L 可根据研究区波浪条件及海滩坡度进行计算, 公式如下:

$$S_w = \frac{3\sigma^2 S_b}{8 + 3\sigma^2} \quad (3)$$

$$L = \frac{H_b}{\sigma(S_b - S_w)} \quad (4)$$

式中: σ 为破碎指数; H_b 为破碎波高(m); S_b 为海岸坡度。其中:

$$\sigma = \frac{1.56}{1 + \exp(-19.5S_b)} - 43.75[1 - \exp(-19S_b)] \frac{H_b}{gT^2} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度; T 为波周期(s)。

D_t 计算公式为:

$$D_t = \frac{n_e A}{k T_t} \exp(-\alpha) [\cos(\alpha) - \sin(\alpha)] + \frac{\sqrt{2} n_e A^2}{S_b T_t} \exp(-\sqrt{2}\alpha) \cos(\sqrt{2}\alpha) + \frac{n_e A^2}{S_b T_t} \quad (6)$$

$$k = \sqrt{\frac{n_e w}{2KH}} \quad (7)$$

$$\alpha = k A / S_b \quad (8)$$

表 2 用于计算的主要参数

Tab. 2 Parameters used in calculations

H_b (m)	T_w (s)	S_b	K (m/d)	n_e	A (m)	w (rad/s)	H (m)
1.3	4.9	6.7×10^{-4}	65.88	0.45	0.91	6×10^{-6}	30

5 结论

莱州湾东岸海底地下水赋存于第四纪松散沉积物中, 第四纪中更新世以来形成并发育并受到全新世海侵的影响的水体。本文利用稳定同位素——¹⁸O、D, 结合典型常规离子分析结果, 初步识别了莱州湾东岸典型地区海底地下水的来源。研究发现, 该地区海底地下水除受到内陆地下含水层的补给外, 更大程度接受由波浪、潮汐作用引起的海水入渗补给。

式中: D_t 为潮汐影响下单位岸线入渗率; k 为潮汐影响下岸线入渗系数; A 为潮汐振幅; T_t 为潮汐周期(s); w 为潮汐频率($w=2\pi/T_t$); n_e 为海滩沙的有效孔隙度; H 为含水层厚度。

4.2 参数选择与计算结果

海岸含水层的渗透系数采用抽水试验方法取得, 海滩沉积物的渗透系数利用竖管试验法(standpipe test)测定。为简化计, 地下水入海径流量的计算选择典型断面计算(图 4)。计算所用的主要参数见表 2。

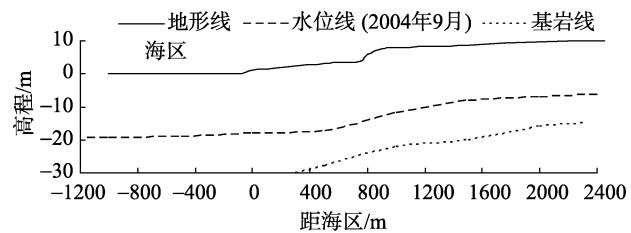


图 4 太平湾朱家村剖面地下水位

Fig. 4 Groundwater level in Zhujia section in the Taiping Bay

单位岸线(m)海底地下水径流量的计算结果如下: $D_n = 10.3 \text{ m}^3/\text{d}$; $D_w = 25.2 \text{ m}^3/\text{d}$; $D_t = 45.8 \text{ m}^3/\text{d}$; 以上三个分量占径流总量的比例分别为 12.7%, 31.0% 和 56.3%, 地下水入海的净值数量很少, 说明波浪和潮汐引起海水沿海滩沙的入渗是海底地下水径流总量的主要组成部分。

另外, 本次计算的潮汐运动引起的入渗分量大于波浪运动引起的入渗分量, 原因在于本区属半日潮区, 潮汐往复运动较全日潮频繁, 加之莱州湾东岸的海岸坡度较小(5‰), 潮汐运动带来的大量海水入渗构成海底地下水的主要来源。

结合野外实测参数资料, 利用数值方法计算了研究区海底地下水补给量, 结果表明, 地下水径流补给仅占总补给量的 12.7%, 波浪和潮汐引起海水沿海滩沙的入渗补给分别占总补给量的 31.0% 和 56.3%, 一方面说明波浪和潮汐引起海水入渗是当地海底地下水主要的补给来源, 另一方面也证明利用氢氧稳定同位素识别海底地下水来源的可靠性。

参考文献:

- [1] Li L, Barry D A. Submarine groundwater discharge and

- associated chemical input to a coastal sea[J]. Water Resources Research, 1999, 35(11): 3253-3259.
- [2] Burnett W C, Moore W S, Taniguchi M. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone[J]. Biogeochemistry, 2003, 66: 3-33.
- [3] Moore W S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments[J]. Nature, 1996, 380: 612-614.
- [4] Church T M. An underground route for the water cycle[J]. Nature, 1996, 380: 579-580.
- [5] Younger P L. Submarine groundwater discharge[J]. Nature, 1996, 382: 121-122.
- [6] Krest J M, Moore W S, Gardner L R, et al. Marsh nutrient export supplied by groundwater discharge: evidence from Ra measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2000, 14: 167-176.
- [7] Charette M A, Buesseler K O, Andrews J E. Utility of radium isotopes for evaluating the input and transport of groundwater-derived nitrogen to a Cape Cod estuary [J]. Limnol Oceanogr, 2001, 46: 465-470.
- [8] Charette M A, Splivallo R, Herbold C, et al. Salt marsh submarine groundwater discharge as traced by radium isotopes[J]. Mar Chem, 2003, 84: 113-121.
- [9] Hwang D W, Kim G, Lee Y W, et al. Estimating submarine inputs of groundwater and nutrients to a coastal bay using radium isotopes[J]. Marine Chemistry, 2005, 96: 61-71.
- [10] Lee Y W, Kim G. Linking groundwater-borne nutrients and dinoflagellate red-tide outbreaks in the southern sea of Korea using a Ra tracer. [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71: 309-317.
- [11] 郭占荣, 黄磊, 刘花台, 等. 镭同位素示踪教湾的海底地下水排泄[J]. 地球学报, 2008, 29(5): 647-652.
- [12] 庄振业, 李建华, 仇士华, 等. 莱州湾东岸的全新世海侵和地层[J]. 海洋湖沼通报, 1987, 2: 31-39.
- [13] 韩春瑞, 谭启新, 姜玉池, 等. 莱州湾东部滨海水域第四纪沉积及古地理特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 75-83.
- [14] Allen D M. Sources of groundwater salinity on islands using ^{18}O , ^2H and ^{34}S [J]. Ground Water, 2004, 42(1): 17-31.
- [15] Ingraham N L, Taylor B E. Hydrogen Isotope study of large-scale meteoric water transport in North California and Nevada[J]. Journal of Hydrology, 1986, 85: 183-197.
- [16] Salati E, Dall’Olio A, Matsui E, et al. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study[J]. Water Resour Res, 1979, 15: 1250-1258.
- [17] Ingraham N L, Taylor B E. Light stable isotope systematics of large-scale hydrologic regimes in California and Nevada[J]. Water Resour Res, 1991, 27: 77-90.

Identification and quantification of submarine groundwater discharge along the east coast of the Laizhou Bay

BU Qing-wei, LI Fu-lin, CHEN Xue-qun, LIN Lin

(Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China)

Received: Apr., 10, 2012

Key words: east coast of the Laizhou Bay; submarine groundwater discharge; source identification; quantity estimation

Abstract: Submarine groundwater discharge(SGD)is the important pathway for the study of Land-Ocean interactions, while source identification is the premise for rational utilization of submarine groundwater resources. In this paper, attempts were made to identify the source of submarine groundwater along the east coast of the Laizhou Bay by using stable isotopes— ^{18}O and D, combined with conventional ions analysis. The quantity estimation was made using numerical methods. The results show that wave action and tidal fluctuation are the main sources influencing SGD. Moreover, the land groundwater discharge, also has certain effect on it. Contributions of, wave run-up, tidal fluctuation and groundwater runoff to groundwater are 12.7%, 31.0% and 56.3%, respectively. These results are very helpful to the rational development and scientific protection of submarine groundwater.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)