

刘花台, 郭占荣. 海底地下水排泄的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(7): 774-785, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.07.0774. [Liu Huatai, Guo Zhanrong. A review on submarine groundwater discharge [J]. Advances in Earth Science 2014, 29(7): 774-785, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.07.0774.]

海底地下水排泄的研究进展*

刘花台¹, 郭占荣²

(1. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361102; 2. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 海底地下水排泄 (SGD) 是全球水循环的一个重要组成部分, 是陆—海相互作用的研究热点。首先分析了海底地下水排泄的组成和驱动力, 总结了海底地下水排泄的主要评价方法及其优缺点; 其次阐述了海底地下水排泄向海洋输送溶解物质的重要作用及其对海洋生态环境的影响, 并通过剖析咸淡水混合带的地球化学过程, 指出地下河口在研究海底地下水排泄中的重要地位; 最后给出未来海底地下水排泄的研究方向。

关键词: 陆源地下水; 循环海水; 地下河口; 通量

中图分类号: P641 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2014)07-0774-12

1 引言

海底地下水排泄 (Submarine Groundwater Discharge, SGD) 最典型的事例是海底泉, 古代人们就发现了海底泉并将其作为淡水利用, 特别是在黑海和地中海有很多海底泉出露^[1]。1980 年 Johannes^[2] 在研究西澳大利亚海岸水体后, 指出海底地下水排泄现象十分普遍, 在有些地方其具有的生态影响可能远大于地表径流; 与此同时, Bokuniewicz^[3] 指出海底地下水排泄可能是海岸带水文学的主要部分, 但当时人们并没有意识到其在全球的影响和重要意义。

在 20 世纪 90 年代之前, 只有极少量的关于海底地下水排泄的研究报道。从 90 年代开始, 海底地下水排泄的文章在 *Nature* 上发表^[4], 学术界逐渐认识到海底地下水排泄的重要性, 于是国际上启动了几项大的研究计划, 使海底地下水排泄成为一个陆海相互作用的研究热点^[5, 6]。

1997 年, 针对海底地下水排泄研究, 海洋研究科学委员会 (Scientific Committee on Oceanic Re-

search, SCOR) 和海岸带陆—海相互作用计划 (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ) 组建了 2 个工作组 (WG-112 和 WG-114), 其中工作组 WG-112 的任务是研究海底地下水排泄通量及其对海岸带海洋学过程的影响, 目的是更准确全面地了解海底地下水排泄量是如何影响沿海的化学过程和生物过程的^[7]; 工作组 WG-114 的任务是研究渗透性海洋沉积物中的物质运移和化学反应, 目的是了解流经可渗透性海洋沉积物的地下水渗流对局部和全球生物地球化学循环的重要性及其对周围环境的影响^[8]。2000 年, SCOR 和 LOICZ 在美国 Florida 和澳大利亚 Perth 开展了多种方法相互比较试验, 2002 年, 又在纽约 Shelter Island 开展了多种方法相互比较试验, 目的是探索海底地下水排泄评价的标准方法^[9]。2000 年, 国际原子能机构 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 和联合国教科文组织 (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, UNESCO) 提出一个 5 年研究计划, 推动核技术和同位素技术在海岸带海底地下水排泄研

收稿日期: 2014-05-04; 修回日期: 2014-06-09.

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“海底地下水排泄 (SGD) 的地球化学过程、物质输送及其对海洋的贡献和影响” (编号: 41372242) 资助。

作者简介: 刘花台 (1967-) 女, 河北石家庄人, 副教授, 主要从事海岸带水文地质学和环境科学研究. E-mail: lht@xmu.edu.cn

研究中的应用,目的是开发和改进海底地下水排泄的研究方法和技术并且进行多种方法的比较研究,为海岸带管理提供科学依据^[10]。为此,IAEA 和 UNESCO 选择了 5 个水文地质条件完全不同的沿海地区开展了工作:2000 年在澳大利亚 Perth 滨海平原(岩性为第四纪松散沉积物)、2002 年在意大利 Sicily(岩性为喀斯特)和美国纽约 Long Island(岩性为冰碛沉积物)、2003 年在巴西 Ubatuba(岩性为裂隙结晶岩)、2005 年在毛里求斯 Mauritius Island(岩性为火山岩)^[11]。

全球海岸线十分漫长,地质、构造和岩性等条件差异非常明显,单从海岸带类型来讲,有基岩海岸、砂砾质海岸、泥质海岸、三角洲海岸、三角港海岸、珊瑚礁海岸、红树林海岸、峡湾海岸、岛礁海岸、岩溶海岸、火山碎屑海岸等,每种类型海岸的海底地下水排泄过程及其通量差异都很大^[12]。目前,全球海底地下水排泄在砂砾质海岸、三角洲海岸和岩溶海岸等研究较多,研究地点主要集中在北美洲的美国东、西海岸,南美洲的巴西东部沿海,欧洲的地中海沿岸和波罗的海沿岸,澳洲的澳大利亚东、西海岸,亚洲的韩国和日本沿岸^[13,14]。我国的海底地下水排泄研究主要集中在黄河、长江、珠江等河流入海口,属于三角洲海岸类型,松散沉积物分布面积广而厚,沿岸含水层富水性较好,地下水输入比较明显^[15-17];胶州湾、厦门湾和香港吐露湾,既有基岩海岸,又有砂质海岸,还有小型河流三角洲,地下水的输入分布很不均一^[18-21];海南岛东海岸,不同程度分布着红树

林和珊瑚等,地下水输入对红树林和珊瑚有着特殊意义^[22];闽江河口三角洲不明显,属于三角港海岸,地下水的输入量十分有限^[23]。

2 海底地下水排泄及其驱动力

海底地下水排泄这个术语在 20 世纪 70 年代的文献中就出现了,当时简称为 SGWD^[24]。海底地下水排泄曾经一度还使用其他英文表达,如“submarine outflow of groundwater”或“groundwater flow across the sea floor”^[25]。2003 年,Burnett 等^[26]将海底地下水排泄定义为大陆边缘上从海底(海床)到沿岸海域中的任何水流,不管水流的起源、流体成分或驱动力,该定义后来被海洋研究科学委员会和海岸带陆海相互作用计划采用。Moore^[27]认为 SGD 定义不应该包括生物扰动作用和海流引起的剪切流这 2 个海洋过程,他将海底地下水排泄定义为大陆边缘上从海底到沿岸海域中的水流,该水流径流途径的长度在数米到数公里之间,不管水流的起源、流体成分或驱动力。如果按照物质组成、来源和驱动力来划分,SGD 可以划分为地下淡水排泄(Submarine Fresh Groundwater Discharge, SFGD)和地下咸水排泄(Recirculated Saline Groundwater Discharge, RS-GD)^[13,26](图 1)。

SFGD 通常也称作陆源地下淡水排泄,其来源于大陆,是大气降水入渗补给地下形成的地下水,包括潜水和承压水,陆源地下淡水在其向海域的渗流过程中与含水介质发生充分的水岩作用,所以地下

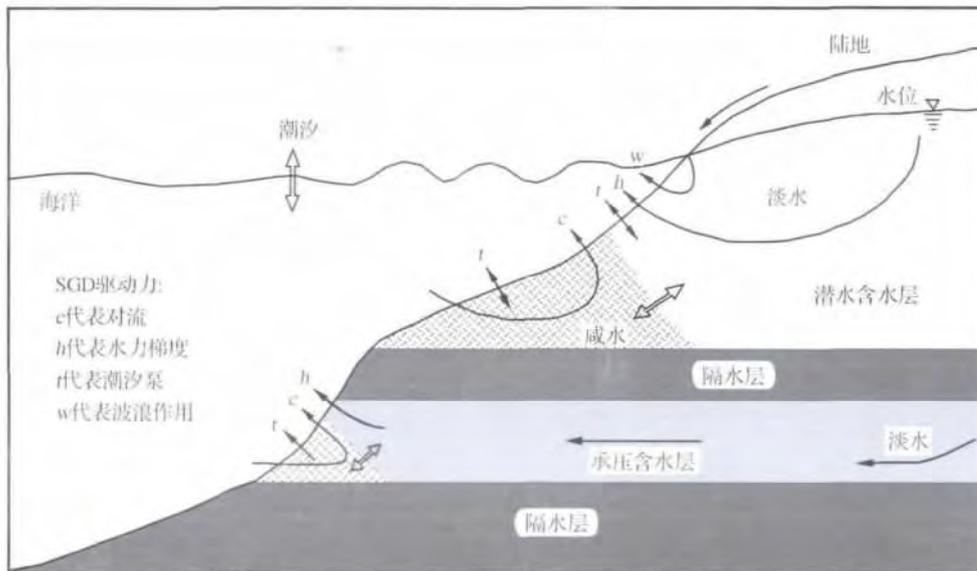


图 1 海底地下水排泄(SGD)概念示意图^[26]

Fig. 1 Schematic diagram of submarine groundwater discharge^[26]

水中溶解了大量的可溶物质,故其物质组成主要来自土壤、沉积物和岩石的溶滤。SFGD 向海底渗流的驱动力是水力梯度,通常情况下,陆地上的地下水位高于海水位,水头差驱使陆地上含水层中的地下水向海底排泄^[26-29]。一些沿海地区的深部承压含水层可以延伸到海底很远的地方,意味着陆源地下淡水可以排泄到离岸很远的地方。上佛罗里达含水层(the Upper Floridan Aquifer, UFA)位于美国南卡罗来纳州和毗连的乔治亚州,是世界上很著名的一个大型可自流的承压含水层,该含水层被认为延伸至 Port Royal Sound 和北美东南大陆架之下,赋存淡水和微咸水的含水层延伸到距离海岸线 120 km 远的地方,当地海水深度达 600 m^[30]。国内很典型的海底深层承压水在浙江省舟山嵊泗海域海底被发现,原来该含水层是长江古河道在海底的延伸部分,第 I 承压含水层和第 III 承压含水层的承压水均是淡水,其中第 I 承压含水层单井每天的最大出水量可达 1 500 m³,第 III 承压含水层单井每天最大出水量可达 8 000 m³^[31]。

RSGD 通常也称作循环海水排泄,其来源于海水,又回归于海水,驱动力主要有潮汐泵、波浪作用和密度差^[26-29]。潮汐泵作用下的循环海水,在涨潮时海水渗流进入含水层成为地下水,在退潮时又从含水层中排泄出来回归海洋,显而易见,在潮差大的地方,循环海水在含水层中的循环深度(运移尺度)大些,在潮差小的地方,循环海水的循环深度小些;波浪作用下的循环海水,主要发生在海底表层沉积物范围内,波峰来时迫使海水进入表层沉积物,波谷来时迫使海水退出表层沉积物,与潮汐泵作用相比,其循环深度较潮汐泵要小得多,循环频率却较潮汐泵要高得多,表现为表层沉积物中孔隙水(海洋学上习惯称作间隙水)的快速更替。

密度差驱动下的循环海水,发生在海岸带含水层的咸淡水混合带下方。由于海水的密度大于地下水,所以含水层中通常形成盐水楔。实际上盐水楔的界面不是突变的,而是一个咸淡水混合带,该混合带是由海水向上覆淡水扩散而形成的,扩散到上面的海水随同淡水一同排泄入海。海水向上扩散的同时,迫使下面的海水补偿进来(补偿流),从而形成海水循环^[32]。

对于海洋受体来说,陆源地下淡水排泄是净输入,增加了海水数量(体积),而循环海水实质上并没有增加海水数量。但是,循环海水与陆源地下淡水排泄一样,二者都对海洋形成净溶解物质输入,增

加了海水中的溶解物质数量和种类^[33]。当海水在含水层中循环时,不仅与陆源地下淡水发生混合作用和化学反应,而且还会与含水层发生水岩作用,溶解岩土中的可溶物质。所以,循环海水的意义更多地体现在其地球化学循环和物质输入方面。

3 海底地下水排泄研究方法

海底地下水排泄量的研究方法主要有 3 种:渗流仪法、水文地质模型法和地球化学示踪法。

3.1 渗流仪法

渗流仪是用来收集从海底排泄出来的地下水的仪器,最早的渗流仪是一个截面积为 0.25 m² 的一端开口的箱子,顶部连接一个塑料袋用来收集地下水^[34]。目前,更先进的自动渗流仪基于热脉冲技术^[35]、声学多普勒技术^[36]或者染料稀释技术^[37],能够连续记录海底地下水排泄随着潮汐周期的变化情况。渗流仪测量比较费时费力,需要潜水员到海床上安放和收回渗流仪,而且渗流仪只能测量局部的 SGD,如果需要了解区域 SGD 的排泄特点和规律,必须布设大量的测量点。另外,渗流仪测量过程容易受潮流和波浪的干扰或损坏^[38]。渗流仪的这些局限性在一定程度上限制了它的使用。

3.2 水文地质模型法

水文地质模型法是指利用水文地质学中计算地下水数量的数学方法来评价海底地下水排泄量,主要包括达西定律、水量均衡法和数值模拟法。达西定律实现了地下水量从定性、半定性分析到定量评价的飞跃,是地下水定量评价的基础。达西定律又称为线性渗透定律,计算地下水在水力梯度驱动下渗流通过含水层的水量。达西定律运用的前提条件是假设研究区渗透系数是常数,但是在实际情况中,含水层的渗透性往往是非均质的。水量均衡法其理论依据是某一区域范围甚至全球范围内水分的收支是平衡的,SGD 是收支中的一项,如果在知道其他各收支项的基础上,根据平衡公式即可获得 SGD 的量。水量均衡法在计算过程中很多收支项是估算的,特别是蒸发蒸腾项较难估算,因此误差比较大。

数值模拟法是利用数学方法和计算机技术来仿真地下含水系统,能够比较好地考虑具体的水文地质条件。数值模拟法通常包括有限元法和有限差分法,如 MODFLOW 就是有限差分模型,得到了较为广泛的应用。随着计算机存储量和计算速度的提高,为数值模拟法准确刻画实际的水文地质条件提供了可能。早期的数值模型只能模拟单相流,不能

模拟水流穿过咸淡水界面的情形。但现代的两相流数值模型允许地下水流穿越等盐度线,也允许密度驱动的水流循环^[39]。理论上讲,地下水流数值模型可以较为真实地仿真水文地质条件和水动力情况。但是,目前地下水流数值模型面临的问题是:数据严重缺乏,特别是缺少含水层渗透性和溶质密度的数据,长时间系列的监测数据就更加缺乏,以至于无法进行模型识别和校正;许多过程可以引起盐分在大范围时空尺度上发生扩散,但在模型处理中往往将盐分扩散概化成一个单一参数;来自海洋的驱动力被简单化或者忽略,模型一般不包括潮汐泵、波浪波动、风暴、季节性海平面变化等海洋过程;由于循环海水的模拟比较困难,大多数地下水流模型模拟的是陆源地下淡水排泄量,其结果不能与渗流仪、示踪剂方法评价的总地下水排泄量进行对比^[27,40]。

根据水均衡原理,即全球降水量等于蒸发蒸腾量、河流径流量与地下淡水排泄量的和。Burnett等^[26]估算每年全球的地下淡水入海量为2400 km³,其中约1500 km³来自大陆、约900 km³来自岛屿,是河流径流输入量的6%。Zektser等^[41]利用地下水基流分割原理,计算地下水泄流输入到河流中的排泄量,进而计算地下淡水入海量,他们估算每年全球的地下淡水入海量为2200~2400 km³,是河流径流输入量的5%~6%,与Burnett等的估算基本一致。由于海岸带地质、构造、含水层等很不均一,SGD的输入通量也非常不均一。在纽约Great South湾,SGD通量比河流输入量高20%以上^[3]。在美国南卡罗来纳州South Atlantic Bight东南部,SGD通量占河流径流入海量的40%左右^[4]。在有石灰岩分布的海岸带,SGD通量往往大于地表水输入量,如尤卡坦半岛北部^[42]。

3.3 地球化学示踪法

地球化学示踪法通常是利用铀钍衰变系列的天然放射性核素,这些天然核素在地下水中通常有较高的浓度,而在近岸海水中有较低的反应性,即化学行为较保守。利用示踪剂评价海底地下水排泄量的基本理论是示踪剂的质量平衡原理,其大致思路是:在已知某示踪剂的其他来源及其在近岸水体中的滞留时间的情况下,该示踪剂在近岸水体中的存量(inventory)可以转化成该示踪剂的离岸通量,这个示踪剂通量被认为是由地下水输入的。然后借助地下水端元中该示踪剂的浓度,将该示踪剂通量转化成海底地下水排泄量^[43]。如果已知其他化学组分在地下水端元中的含量,还可以进一步估算SGD输

入的溶解物质通量。示踪剂技术有效地综合了海岸带水体中的SGD信号,平滑掉了地下水排泄的非均一性,结果显示的是区域尺度上海底地下水排泄的平均水平^[44]。

镭同位素广泛地用于海底地下水排泄的研究,是因为镭同位素在咸的海岸带地下水中高度富集,远高于其在海水中的浓度,这就意味着少量的地下水输入可以成为海水中的一个强烈信号。在许多情况下,可以用长寿命镭同位素²²⁶Ra($t_{1/2}=1600$ a)和²²⁸Ra($t_{1/2}=5.7$ a)识别SGD的不同来源^[43]。在评价河口水体和沿岸水体的滞留时间或混合速度方面,以及评价镭的扩散通量方面,短寿命的镭同位素²²³Ra($t_{1/2}=11.4$ d)和²²⁴Ra($t_{1/2}=3.6$ d)是非常有用的^[45,46]。

²²²Rn($t_{1/2}=3.8$ d)在地下淡水和地下咸水中均非常富集,沿岸海水中高²²²Rn活度的出现往往指示有重要的海底地下水排泄存在。Cable等^[47]的研究显示在佛罗里达大陆架水体中高²²²Rn活度分布的范围与已知海底泉的分布范围非常吻合。常用的测量水体中²²²Rn活度的仪器是美国Durrige Company制造的RAD7测氡仪,该仪器与其附件RAD-AQUA配合使用可以实现水体中²²²Rn活度的现场长时间连续测量,因而可以评价海底地下水排泄在潮汐周期的变化模式,也可以将²²²Rn评价的SGD与全自动渗流仪的测量结果相比较^[48]。

Charette等^[49]利用示踪剂对局域尺度(空间尺度小于1 km)和区域尺度(空间尺度10~300 km)的海底地下水排泄通量进行了对比研究,结果发现局域尺度的地下水排泄通量从10³变化到2×10⁵ m³/(km·d),而区域尺度的地下水排泄通量从10⁵变化到6×10⁶ m³/(km·d),区域尺度的地下水排泄通量较大,这是因为它的范围不仅包括海岸线而且包括了内大陆架部分。Moore等^[50]在已知大西洋内²²⁸Ra存量的基础上,采用²²⁸Ra质量平衡法计算获得总SGD通量为(2×10¹³~4×10¹³) m³/a,是输入大西洋河流径流量的80%~160%,将该SGD通量分配到85000 km的大西洋海岸线上,则得到单位长度海岸线上的SGD通量为(0.6×10⁶~1.3×10⁶) m³/(km·d),该值落在Charette等给出的区域尺度地下水排泄通量的范围内。

4 海底地下水排泄输送溶解物质的研究

4.1 溶解物质输入量

海底地下水排泄为海洋提供了重要的营养盐、

碳、微量元素等物质。海底地下水排泄和地下河口混合水的化学反应以往在评价陆海之间的物质通量时被严重忽略^[27]。因为海底地下水排泄中营养盐、碳、微量元素等物质浓度通常较河流中的高,这意味着地下水在这些物质的海洋收支平衡中比河流更重要^[27]。虽然陆源地下淡水入海量仅占河流径流输入量的 6%,但是其输入海洋的溶解物质却占河流输入量的 25%~50%^[51]。研究发现海底地下水排泄为海岸线和大陆架上的盐沼、河口、珊瑚礁和其他生物群落提供了营养盐,如由海底地下水排泄输入到南卡罗来纳大陆架的 N 和 P 超过了当地河流输入的 N 和 P^[52]。Garrison 等^[53]指出 SGD 向夏威夷卡纳纳湾输入的 N 和 P 通量分别是地表水输入通量的 5 倍和 2 倍。Charette 等^[54]发现在美国 Chesapeake 湾 SGD 输入的 N 和 P 通量基本上与地表水输入的不相上下。

关于 SGD 作为微量元素(痕量元素)输入到近岸海域的源,一些研究表明 SGD 输入的微量元素通量往往等于或高于河流或大气输入的通量。金属元素 Ba 和 Ra 通常在 SGD 中较富集,Moore^[55]评价了恒河河口附近由 SGD 输入的 Ba 通量,该通量超过枯水季节河流输入的量。Shaw 等^[56]评价北美东南沿海由 SGD 输入的 Ba 通量为 $70 \times 10^3 \text{ mol/d}$,约为河流输入的 4 倍,而且发现 SGD 中 Ba 的浓度超过重晶石饱和度的 6 倍。Basu 等^[57]认为恒河流域通过 SGD 输入到孟加拉湾的 Sr 通量与河流输入的相当,恒河流域对海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比率升高的贡献超出预想。Lin 等^[58]利用 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\Delta^{87}\text{Sr}$ 和 Ba 作为示踪剂研究了台湾南部屏东海岸的 SGD,结果显示屏东海岸带地区过剩的 $\Delta^{87}\text{Sr}$ 和 Ba 来源于循环海水。Duncan 等^[59]指出在美国东南沿海,海岸带含水层中有机碳降解引起的可溶稀土元素输入海洋的通量等于或者大于河流输入。Bone 等^[60]认为由 SGD 输入马萨诸塞州 Waquoit 湾的 Hg 的通量是大气输入 Hg 通量的 10 倍,而以往则认为大气输入是 Waquoit 湾 Hg 的主要贡献者。

自从 Fe 被公认为亚北极太平洋浮游生物必不可少的微量营养元素以来,输入海洋的 Fe 已经成为一个重要的话题^[61]。大气曾经被认为是 Fe 输入表层海洋的主要源^[62],近年来该观点遇到新的研究成果的挑战,Windom 等^[63]报道在巴西东南沿海 SGD 输入大量的 Fe 到近岸海域,他们用镭示踪剂评价得出,在 240 km 长海岸线的大陆架上的 Fe 通量相当于整个南大西洋大气输入 Fe 通量的 10%。有些研

究者认为 SGD 过程可能是海洋中金属循环的一个重要组成部分,因为其他过程似乎不足以达到这些金属的质量平衡。Milliman^[64]提出地下水输入的 Ca 可能是海洋中 Ca 的主要来源,只有这样才能解答海洋中 Ca 的质量不平衡问题。Johannesson 等^[65]根据地下水中 Nd 的浓度推测 SGD 可能提供重要的 Nd 通量,而在目前质量平衡评价中却将其遗漏。

SGD 输入海洋的溶解无机碳 ($\text{DIC} = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) 和溶解有机碳 (Total Organic Carbon, TOC) 是碳从陆地到海洋的一个重要途径。Cai 等^[66]指出地下水中通常富含 CO_2 ,这主要是由于植物根部的呼吸作用以及在细菌作用下有机物矿化作用所致,地下水中的二氧化碳分压 ($p\text{CO}_2$) 一般比大气分压要高 1~3 个数量级,意味着 SGD 很可能是沿岸海域和大气 CO_2 的来源。他们测量了南卡罗来纳沿岸 North Inlet 的淡水井和咸水井中地下水的 DIC,发现地下水中 DIC 的浓度均高于河水和海水,SGD 输入的 DIC 通量达到 $0.17 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。Goni 等^[67]认为在 North Inlet 由 SGD 输入的 DOC 通量为 $50 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。Moore 等^[68]利用 Ra 通量和地下水中 DIC/Ra 和 DOC/Ra 比率评价 SGD 输入南卡罗来纳 Okatee 盐沼的 DIC 和 DOC 通量分别为 $2 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $50 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,二者都远远超过河流输入的量。Santos 等^[69]评价佛罗里达西海岸通过 SGD 输入的 DOC 通量为 $19 \sim 27 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而且夏季的 DOC 通量较高。地下水中 DOC 平均浓度为 $(5.9 \pm 2.5) \text{ mg/L}$,如果采用陆源 SGD 是河流径流量的 5%~10% 来估算,则全球由 SGD 输入的 DOC 通量约为 22 Tg C/a ^[70]。虽然关于 SGD 输入海洋的 DIC 和 DOC 通量研究相对较少,但是有一点很清楚,那就是在陆海碳循环的收支研究中必须考虑 SGD 的贡献。

4.2 输入的溶解物质对海域生态环境的影响

地下水中营养盐浓度往往比地表水高几个数量级,地下水输入可能是近岸海洋生物的重要营养来源。在 20 世纪 60 年代,Kohout 等^[71,72]调查了海底地下水排泄对海洋生物的重要性,他们研究发现佛罗里达州 Biscayne 湾的生物分带与海底地下水排泄存在一定的关系。Marsh^[73]发现关岛的珊瑚礁与地下水输入的营养盐有直接联系。Johannes^[2]发现西澳大利亚 Perth 以北沿海地下水输入的硝酸盐浓度是河流输入的 3 倍,推测其具有的生态影响可能远大于地表径流。在牙买加的 Discovery 湾,Elia 等^[74]发现地下泉附近的盐度和硝酸盐呈强烈的负相关,

推算地下水中的 NO_3^- 高达 $120 \mu\text{mol/L}$ 。Paytan 等^[75]在印度洋、大西洋和太平洋的6处珊瑚礁,证实SGD是这些珊瑚礁生态系统重要的营养盐来源。Lapointe 等^[76]认为在佛罗里达湾,地下水输送的N和P滋养了百慕大哈林顿湾的Cladophore藻群。

近年来的SGD研究表明,沿岸海域海水富营养化、赤潮暴发、重金属和有机物污染,甚至近岸海洋生态系统的失衡,可能与海底地下水排泄有关。Laroche 等^[77]根据多年的监测数据,认为SGD输入的溶解态无机氮(Dissolved Inorganic Nitrogen, DIN)对长岛地区的赤潮有重要影响。Lee 等^[78,79]研究推测韩国南部海湾的有害赤潮暴发是由于SGD输入了过量营养盐。Tse 等^[21]认为香港Tolo湾的海水富营养化与SGD排泄的营养盐有非常大的关系。

世界上约一半的人口居住在约60 km宽的海岸带以内,随着沿海地区人口、工农业和城市建设的快速发展,将会有更多的营养盐、污染物随着SGD输入至海洋。Lapointe 等^[76]认为受到生活污水、工业废水和氮肥使用而污染的地下水中的N/P比值往往很高,而Slomp 等^[80]进一步研究指出因为P比N更容易从地下水中清除,所以SGD中N/P比率通常高于雷德菲尔德比率(Redfield ratio, 即16:1),他们利用模型预测,50年后SGD输入的营养盐可能使全球近海系统的氮限制变为磷限制。

5 地下河口及其地球化学循环

5.1 地下河口的概念

大气起源的内陆地下水与海水在沿海含水层中混合形成由陆地到海洋的淡水—微咸水—咸水—盐水的过渡带,在这个咸淡水混合带中,咸水与含水层固体物质的化学反应改变了水体的组分,这种现象非常像河流颗粒物和再悬浮沉积物改变了地表河口水体的组分一样^[81]。为了强调海岸带含水层中发生的混合作用和化学反应的重要性,Moore^[81]将海岸带含水层中陆源地下水与海水发生混合和化学反应的区域(或地带)称作地下河口(Subterranean Estuary, STE),其实质上是地下水与海水在含水层中的混合带。Moore之所以将含水层中的咸淡水混合带叫做地下河口,是为了与地表河口(surface estuary)进行对照。地表河口是地表河水与海水的混合带,在那里发生河水与海水的混合和化学反应。地下河口与地表河口有许多相似之处^[81]:①地下河口是地下淡水与海水的混合带,地表河口是地表淡水(河水)与海水的混合带;②地下淡水与海水的混

合作用及混合水与含水层固体颗粒的化学反应改变了混合水的物质成分,河水与海水的混合作用及混合水与河流颗粒和再悬浮沉积物的反应改变了混合水的物质成分。地下河口与地表河口也有许多不同之处^[81,82]:①地表河口水体循环较快,滞留时间较短,而地下河口水体循环较慢,滞留时间较长;②河流携带的颗粒和再悬浮沉积物使得地表河口颗粒浓度较高,导致强烈的水岩作用,而地下河口中水体与含水介质直接接触,且水体滞留时间长,导致更为强烈的水岩作用;③地表河口与大气圈直接接触,通常含氧高,Fe和Mn等金属呈氧化态存在,而地下河口不能与大气直接接触,通常处于低氧、高 $p\text{CO}_2$ 状态,Fe和Mn等金属呈还原态存在;④地下河口处于还原状态,富含有机质的循环海水在地下河口分解,往往产生大量的营养盐;⑤在生物方面,地表河口有丰富的、多种多样的生命,而地下河口中的生命主要是细菌。

像地表河口一样,地下河口也受到海平面变化的强烈影响。现如今看到的地表河口和地下河口是处于末次冰期之后海侵发生而海岸线沉溺的一种环境。大约在2万年前,SGD可能集中在现今的大陆架边缘,当时地表河口的河道切穿承压含水层顶板,形成自流泉。在海平面上升期间,这些河道被粗粒碎屑物充填,充填后的河道便成为现如今大陆架上浅层地下水流的有效导水通道,而那些河流深切留下的天窗可能成为浅层含水层和深层含水层的联系通道^[83]。Faure 等^[84]指出在低海平面期间,出露的大陆架边缘的淡水泉可能成为沿岸迁徙居民的基本饮用水源。

像地表河口一样,地下河口在人类活动影响下也经历着强烈的变化。通过地表河口疏浚河道增加了地表水与地下河口的联系,沿海地区不断增加的地下水开采量降低了地下水位而引起海水入侵海岸带含水层,结果导致沿海可饮用水的盐化和地下河口的盐化速率加快。地下河口向内陆的扩展可能导致SGD输入更多的营养盐、碳和金属等物质到海洋,因为影响这些输入物质浓度的生物化学反应可以在更大的空间尺度内发生,还可以影响数千年与海水从未接触的含水层^[27]。

5.2 地下河口的生物地球化学循环

地下河口是地下水与海水在海岸带含水层中的混合带,但是混合水体的组分绝不是地下水与海水组分的简单混合,也就是说,排泄到海洋中的流体在化学性质上完全不同于地下水,也完全不同于海

水 因为一系列生物地球化学反应改变了混合水的物质组成。常见的化学反应有^[27]: 由于离子强度的增加, 离子从吸附体上解吸; 碳酸盐的溶解和沉淀; 有机质的再矿化导致碳、营养盐和金属的释放; 产生和消耗金属氧化物的氧化还原反应可能释放或捕获其他离子。含水层的渗透率和优先渗流途径可能被上述化学反应所改变, 化学反应的沉淀物可能限制或者堵塞渗流通道, 而溶解作用可能扩大已有的渗流通道或者新开辟渗流途径^[85]。Back 等^[86] 研究发现混合中海水的比例如果高于地下水可以造成方解石沉淀, 减少海岸带含水层的孔隙度, 而混合中海水的比例如果低于地下水则可以溶解方解石, 增加孔隙度, 用该机理他们解释了沿尤卡坦半岛东岸石灰岩中过多的次生孔隙产生的原因。Baker 等^[87] 研究证实硫酸根离子的存在会抑制白云岩的形成, 所以海水与地下水混合物中的硫酸盐还原菌更有利于白云岩的形成。

地下河口是一个生物地球化学反应十分活跃和强烈的地带, 地下水输入到海洋的净物质通量很大程度上取决于其在地下河口的地球化学过程^[88]。Ueda 等^[89] 在 Tokyo Bay 研究指出, 地下淡水给咸淡水混合区提供的 NO_3^- 和有机物为反硝化菌创造了有利条件, 地下水中的 NO_3^- 在排入海水之前有一部分被脱氮。Charette 等^[90, 91] 在 Waquoit Bay 地下河口研究时发现, 咸淡水混合带孔隙水中 Ba 和 Sr 有非保守性添加, 氧化锰的还原溶解是维持高浓度 Ba 的一个重要过程。在咸淡水混合带的垂直剖面上, Fe 的氧化物随深度增加, 而 Mn 的氧化物却在剖面中部出现最大值。Beck 等^[92] 在 West Neck Bay 研究指出, 地下河口混合区发生的化学反应导致溶质的移除和添加, Si 和 DOC 在地下河口的混合是保守的, 非保守的 Co 和 Ni 在地下河口发生混合后浓度分别增加 10 倍和 2 倍, 非保守的 PO_4^{3-} 和 NO_3^- 在地下河口发生混合后浓度减少到原来的一半。Spieteri 等^[93] 在 Waquoit Bay 地下河口, 发现一层还原带上覆于一层氧化带, 还原带含高浓度的 Fe^{2+} , NH_4^+ , DOC, PO_4^{3-} , 氧化带富含 NO_3^- 。元素在 2 个带中的运移几乎是保守的, 但是在潮间带之下当 2 个带相遇时, 发生氧化铁沉淀, PO_4^{3-} 因吸附于氧化铁上而被移除, 硝化作用加强而反硝化作用被抑制。Gonnea 等^[94] 在 Waquoit Bay 进一步研究发现, 在地下河口, 咸淡水混合带中的 Rn 的特征完全不同于淡水部分和循环海水部分中的 Rn 。Ra 在氧化锰表面上的累积控制了孔隙水中 Rn 的活度。而 Ra 在

含水层介质的解吸作用随孔隙水盐度增加和 pH 值减小而增加, 含水层介质上如果出现 Fe 和 Mn 的氧化物则会抑制 Ra 的解吸。在咸淡水混合带有氧化锰层形成, 其具有高盐、高锰、低氧化还原电位特征, 随着含水层补给的季节变化, 氧化锰层或向陆或向海移动。Santos 等^[95] 在 Gulf of Mexico 的一个地下河口研究发现, 潮汐泵驱动的氧和不稳定的有机物输入促进了地下河口营养盐的循环。在地下淡水区, N 的主要形态是 DON, 在咸淡水混合区, N 的主要形态是 NO_3^- , 在海水循环区, N 的主要形态是 NH_4^+ 。地下水中溶解 DOC 夏天比冬天高 2 倍, 而 DON 和 NO_3^- 夏天比冬天高 1 个数量级。

大多数金属元素在氧化条件下是可溶的, 而在还原条件下是不可溶的。地下河口通常是缺氧的, 在这种还原条件下许多金属元素被沉淀在地下河口, 而当含氧的循环海水进入地下河口时, 则把这些沉淀的金属又溶解搬运到近岸海域^[27]。所以, 在评价全球收支平衡时应该考虑那些氧化还原性质比较敏感的金属元素在地下河口的移除过程。Charette 等^[96] 发现循环海水进入地下河口后导致 Fe 的氧化而形成“铁幕”(iron curtain)。Windom 等^[97] 认识到巴西南部沿海的地下河口存在 U 的移除现象。含有 H_2S , NH_4^+ , CH_4 , DOC 和还原的金属的 SGD 可能造成近岸海水缺氧, 这些还原流体在近岸海底沉积物中的积累还可能引起缺氧事件发生^[27]。在 Walvis 湾附近的纳米比亚大陆架上 H_2S 暴发就是一个例子, 该事件是在一次内陆降雨后发生的^[98]。

海底地下水排泄的生物地球化学过程十分重要, 因为它关系海底地下水排泄评价的准确性, 由于对该过程的了解不够, 大多数研究在计算 SGD 及其物质通量时, 通常采用地下水的平均浓度作为端元, 这种算法对于保守性的元素是可行的, 但对于非保守元素则可能导致对通量的高估或低估^[21]。只有查清地下河口的生物地球化学过程, 才能准确选择计算通量时的地下水端元。研究表明 SGD 及其溶解物质通量评价结果的不确定性很大程度上取决于地下水端元的选择^[10, 11]。Beck 等^[92] 研究 West Neck Bay 的地下水输入通量时发现, 如果以靠近岸边的地下淡水为端元, 则计算 Cu 的化学通量为 $6.3 \times 10^3 \mu\text{mol/d}$, 如果以潮间带的地下水(盐度为 17)为端元, 则计算 Cu 的化学通量为 $2.1 \times 10^5 \mu\text{mol/d}$, 结果相差 2 个数量级。

6 展 望

综合上述分析, 海底地下水排泄在通量评价上

已经有大量的研究报道 相比而言 地下水携带的溶解物质入海通量研究偏少^[68] 而地下河口的生物地球化学过程的研究则更少^[90,91]。今后应该在以下几个方面加强研究。

(1) 加强地下河口的生物地球化学循环的研究。海岸带含水层中营养盐、碳和金属等的浓度分布范围和变化往往很大 所以需要了解海岸带含水层中这些组分的主要控制因素 还需要了解这些组分的浓度在 SGD 从陆地到海洋的流径上是如何发生变化的 可能发生哪些化学反应。关于地下河口研究 面临的最大困难是地下水不同深度的分层取样。通常海岸带现成的水井很少 即使有水井 也是混合井 不能满足地球化学循环的研究 小型的孔隙水取样器不能达到预期的深度^[99] 而采用大型的钻探设备费用又太高。另外 取样孔和观测孔容易遭受人为损坏 维护成本较高。现实困难一时还难以改观 这也是地下河口的生物地球化学过程研究进展缓慢的原因所在。

(2) 加强人类活动对地下河口和 SGD 的影响研究。海岸带含水层和地下河口对海平面上升、地下水开采、港口疏浚、海岸线的变化这些影响因素都会有响应 但这些因素对海岸带含水层和 SGD 的综合影响效应还不清楚^[27]。大多数影响因素会扩大地下河口的空间尺度 这是比较确定的 但是它们对海岸带含水层中营养盐、碳和金属等物质浓度的影响却是不确定的 所以 需要更多地关注这些人为因素对溶解物质浓度的影响。

(3) 加强海岸带水文地质条件的研究。要想查清地下河口的地球化学过程 必须对海岸带水文地质条件有足够的了解。以往的 SGD 研究 很少涉及水文地质条件 这是由示踪法、渗流仪法的特点决定的 该方法基本上不需要水文地质学的知识。纵观 SGD 的研究历史 水文地质学家参与 SGD 研究太少 没有发挥其应有的作用。水文地质学家在完整地刻画地下水流条件、定量分析海岸带含水层中地下水流方面具有明显专业优势 可以弥补海洋学家常用示踪法研究 SGD 的不足^[100]。水文地质学家与海洋学家合作 还能够解决陆源地下淡水和循环海水的区分问题。

(4) 加强不同类型海岸带 SGD 的研究。目前全球 SGD 研究在大江大河入海口陆架区、砂砾质海岸和岩溶海岸开展的相对比较多 而其他海岸带的研究则偏少。另外 全球海岸带 SGD 的研究程度很不平衡 有些海岸带 SGD 研究程度已经很高 而大

部分海岸带 SGD 研究还没有开展。从长远来看 查清全球海岸带 SGD 通量及其物质输送量 对于准确评价 SGD 在全球水循环中的作用和重新构建海洋中化学物质收支平衡模式均具有深远的意义。

参考文献(References):

- [1] Kohout F A. Submarine springs: A neglected phenomenon of coastal hydrology [J]. *Hydrology*, 1966, 26: 391-413.
- [2] Johannes R E. The ecological significance of the submarine discharge of ground water [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1980, 3: 365-373.
- [3] Bokuniewicz H J. Groundwater seepage into Great South Bay, New York [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1980, 10: 504-508.
- [4] Moore W S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ²²⁶Ra enrichments [J]. *Nature*, 1996, 380: 612-614.
- [5] Fan Wei, Zhang Guangxin, Li Ranran. Review of groundwater-surface water interaction in wetland [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(4): 413-423. [范伟, 章光新, 李然然. 湿地地表水—地下水交互作用的研究综述 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(4): 413-423.]
- [6] Li Hailong, Wan Li, Jiao Jiujiu. Hot issues in the study of coastal hydrogeology [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 685-694. [李海龙, 万力, 焦赳赳. 海岸带水文地质学研究中的几个热点问题 [J]. *地球科学进展* 2011, 26(7): 685-694.]
- [7] Burnett W C. Offshore springs and seeps are focus of working group [J]. *EOS, American Geophysical Union*, 1999, 80: 13-15.
- [8] Boudreau B P, Huettel M, Froster S, et al. Permeable marine sediments: Overturning an old paradigm [J]. *EOS, American Geophysical Union*, 2001, 82: 133-136.
- [9] Lambert M J, Burnett W C. Submarine groundwater discharge estimates at a Florida coastal site based on continuous radon measurements [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 55-73.
- [10] Burnett W C, Aggarwal P K, Aureli A, et al. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 367: 498-543.
- [11] Povinec P P, Bokuniewicz H, Burnett W C, et al. Isotope tracing of submarine groundwater discharge offshore Ubatuba, Brazil: Results of the IAEA-UNESCO SGD project [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, 99: 1 596-1 610.
- [12] Bokuniewicz H, Buddemeier R, Maxwell B, et al. The typological approach to Submarine Groundwater Discharge (SGD) [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 145-158.
- [13] Taniguchi M, Burnett W C, Cable J E, et al. Investigation of submarine groundwater discharge [J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16: 2 115-2 129.
- [14] Zhang J, Mandal A K. Linkages between submarine groundwater systems and the environment [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4: 219-226.
- [15] Peterson R N, Burnett W C, Taniguchi M, et al. Radon and ra-

- dium isotope assessment of submarine groundwater discharge in the Yellow River delta, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2008, 113: C09021 (C9), doi: 10.1029/2008JC004776.
- [16] Gu H Q, Moore W S, Zhang L, et al. Using radium isotopes to estimate the residence time and the contribution of Submarine Groundwater Discharge (SGD) in the Changjiang effluent plume, East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 35: 95-107.
- [17] Liu Q, Dai M, Chen W, et al. How significant is submarine groundwater discharge and its associated dissolved inorganic carbon in a river-dominated shelf system [J]. *Biogeosciences* 2012, 9: 1777-1795.
- [18] Guo Zhanrong, Ma Zhiyong, Zhang Bin, et al. Tracing submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes into Jiaozhou Bay by continuous ^{222}Rn measurements [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* 2013, 38(5): 1073-1080. [郭占荣, 马志勇, 章斌, 等. 采用 ^{222}Rn 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): 1073-1080.]
- [19] Guo Zhanrong, Huang Lei, Yuan Xiaojie, et al. Estimating submarine groundwater discharge to the Jiulong River estuary using Ra isotopes [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1): 118-125. [郭占荣, 黄磊, 袁晓婕, 等. 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.]
- [20] Liu Huatai, Guo Zhanrong, Yuan Xiaojie, et al. Utility of radium isotopes for evaluating residence time and submarine groundwater discharge to Wuyuan Bay [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(3): 599-606. [刘花台, 郭占荣, 袁晓婕, 等. 用镭同位素评价海水滞留时间及海底地下水排泄 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(3): 599-606.]
- [21] Tse K C, Jiao J J. Estimation of submarine groundwater discharge in Plover Cove, Tolo Harbour, Hong Kong by ^{222}Rn [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 111(3/4): 160-170.
- [22] Su N, Du J Z, Moore W S, et al. An examination of groundwater discharge and the associated nutrient fluxes into the estuaries of eastern Hainan Island, China using ^{226}Ra [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 3909-3918.
- [23] Zhang Bin, Guo Zhanrong, Gao Aiguo, et al. Estimating groundwater discharge into Minjiang River estuary based on stable isotopes deuterium and oxygen-18 [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(4): 539-548. [章斌, 郭占荣, 高爱国, 等. 用氢氧稳定同位素评价闽江河口区的地下水输入 [J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 539-548.]
- [24] Zektser I S, Ivanov V A, Meskheteli A V. The problem of direct groundwater discharge to the seas [J]. *Journal of Hydrology*, 1973, 20: 1-36.
- [25] Bokuniewicz H J. Groundwater seepage into Great South Bay, New York [J]. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 1980, 10: 504-508.
- [26] Burnett W C, Bokuniewicz H, Huettel M, et al. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 3-33.
- [27] Moore W S. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean [J]. *The Annual Review of Marine Science*, 2010, 2: 59-88.
- [28] Santos I R, Eyre B D, Huettel M. The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: A review [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 98: 1-15.
- [29] Li Hailong, Jiao Jiujiu. Quantifying tidal contribution to submarine groundwater discharges: A review [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, doi: 10.1007/s11434-013-5951-7.
- [30] Hathaway J C, Poag C W, Valentine P C, et al. U. S. geological survey core drilling on the Atlantic Shelf [J]. *Science*, 1979, 206: 515-525.
- [31] Wang Zhenyu. The offshore freshwater exploration in Chengsi, Zhejiang Province [J]. *Shanghai Geology*, 2005, 59(3): 16-21. [王振宇. 浙江嵊泗海域海底淡水资源初探 [J]. 上海地质, 2005, 59(3): 16-21.]
- [32] Robinson C, Li L, Barry D A. Effect of tidal forcing on a subterranean estuary [J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30: 851-865.
- [33] Dzhamalov R G, Safronova T I. On estimating chemical discharge into the world ocean with groundwater [J]. *Water Resources*, 2002, 29(6): 626-631.
- [34] Lee D R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries [J]. *Limnology and Oceanography*, 1977, 22: 140-147.
- [35] Taniguchi M, Burnett W C, Smith C F, et al. Spatial and temporal distributions of submarine groundwater discharge rates obtained from various types of seepage meters at a site in the North-eastern Gulf of Mexico [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 35-53.
- [36] Paulsen R J, Smith C F, O'Rourke D, et al. Development and evaluation of an ultrasonic ground water seepage meter [J]. *Ground Water* 2001, 39: 904-911.
- [37] Sholkovitz E, Herbold C, Charette M. An automated dye-dilution based seepage meter for the time-series measurement of submarine groundwater discharge [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 1: 16-28.
- [38] Cable J E, Burnett W C, Chanton J P, et al. Field evaluation of seepage meters in the coastal marine environment [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 45: 367-375.
- [39] Wilson A M. Fresh and saline groundwater discharge to the ocean: A regional perspective [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41, doi: 10.1029/2004wr003399.
- [40] Oberdorfer J A. Hydrogeologic modeling of submarine groundwater discharge: Comparison to other quantitative methods [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 159-169.
- [41] Zektser I S, Everett L G, Dzhamalov R G. Submarine Groundwater [C]. Boca Raton, FL: CRC Press 2007.
- [42] Gonzalez F U T, Herrera-Silveira J A, Aguirre-Macedo M L. Water quality variability and eutrophic trends in karstic tropical

- coastal lagoons of the Yucatan Peninsula[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 76: 418-430.
- [43] Moore W S. Sources and fluxes of submarine groundwater discharge delineated by radium isotopes [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 66: 75-93.
- [44] Burnett W C, Taniguchi M, Oberdorfer J. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone [J]. *Journal of Sea Research*, 2001, 46: 109-116.
- [45] Moore W S. Determining coastal mixing rates using radium isotopes [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 1993-2007.
- [46] Moore W S. Ages of continental shelf waters determined from Ra-223 and Ra-224 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 22117-22122.
- [47] Cable J E, Burnett W C, Chanton J P, et al. Estimating groundwater discharge into the north-eastern Gulf of Mexico using radon-222 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 144: 591-604.
- [48] Taniguchi M, Burnett W C, Dulaiova H, et al. Groundwater discharge as an important land-sea pathway into Manila Bay, Philippines [J]. *Journal of Coastal Research*, 2008, 24: 15-24.
- [49] Charette M A, Moore W S, Burnett W C. Uranium- and thorium-series nuclides as tracers of submarine groundwater discharge [C] // Krishnaswami S, Cochran J K, eds. U-Th Series Nuclides in Aquatic Systems. Amsterdam: Elsevier, 2008: 155-192.
- [50] Moore W S, Sarmiento J L, Key R M. Submarine groundwater discharge revealed by ^{228}Ra distribution in the upper Atlantic Ocean [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1: 309-311.
- [51] Dzhamalov R G, Safronova T I. On estimating chemical discharge into the world ocean with groundwater [J]. *Water Resources*, 2002, 29(6): 626-631.
- [52] Crotwell A M, Moore W S. Nutrient and radium fluxes from submarine groundwater discharge to Port Royal Sound, South Carolina [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2003, 9: 191-208.
- [53] Garrison G H, Glenn C R. Measurement of submarine groundwater discharge in Kahana Bay, O'ahu, Hawaii [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(2): 920-928.
- [54] Charette M A, Buesseler K O. Submarine groundwater discharge of nutrients and copper to an urban subestuary of Chesapeake Bay (Elizabeth River) [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, 49: 376-385.
- [55] Moore W S. The effects of groundwater input at the mouth of the Ganges-Brahmaputra Rivers on barium and radium fluxes to the Bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 150: 141-150.
- [56] Shaw T J, Moore W, Kloepfer J, et al. The flux of barium to the coastal waters of the southeastern USA: The importance of submarine groundwater discharge [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62: 3047-3054.
- [57] Basu A R, Jacobsen S B, Poreda R J, et al. Large groundwater strontium flux to the oceans from the Bengal basin and the marine strontium isotope record [J]. *Science*, 2001, 293: 1470-1473.
- [58] Lin I T, Wang C H, You C F, et al. Deep submarine groundwater discharge indicated by tracers of oxygen, strontium isotopes and barium content in the Pingtung coastal zone, southern Taiwan [J]. *Marine Chemistry*, 2010, 122: 51-58.
- [59] Duncan T, Shaw T J. The mobility of rare earth elements and redox sensitive elements in the ground-water/seawater mixing zone of a shallow coastal aquifer [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2003, 9: 233-255.
- [60] Bone S E, Charette M A, Lamborg C H, et al. Has submarine groundwater discharge been overlooked as a source of mercury to coastal waters? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41: 3090-3095.
- [61] Martin J H, Fitzwater S. Iron deficiency limits phytoplankton growth in the northeast Pacific subarctic [J]. *Nature*, 1988, 331: 341-343.
- [62] Duce R A, Tindale N W. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 1991, 36: 1715-1726.
- [63] Windom H L, Moore W S, Niencheski L F H, et al. Submarine groundwater discharge: A large, previously unrecognized source of dissolved iron to the South Atlantic Ocean [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 102: 252-266.
- [64] Milliman J D. Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean: Budget of a nonsteady state [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1993, 7: 927-957.
- [65] Johannesson K H, Burdige D J. Balancing the global oceanic neodymium budget: Evaluating the role of groundwater [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 253: 129-142.
- [66] Cai W J, Wang Y C, Krest J, et al. The geochemistry of dissolved inorganic carbon in a surficial groundwater aquifer in North Inlet, South Carolina, and the carbon fluxes to the coastal ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67: 631-639.
- [67] Goni M A, Gardner L R. Seasonal dynamics in dissolved organic carbon concentrations in a coastal water-table aquifer at the forest-marsh interface [J]. *Aquatic Geochemistry*, 2003, 9: 209-232.
- [68] Moore W S, Blanton J O, Joye S B. Estimates of flushing times, submarine groundwater discharge, and nutrient fluxes to Okatee Estuary, South Carolina [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005jc003041.
- [69] Santos I R, Burnett W C, Dittmar T, et al. Tidal pumping drives nutrient and dissolved organic matter dynamics in a Gulf of Mexico subterranean estuary [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 1325-1339.
- [70] Dai M, Yin Z, Meng F, et al. Spatial distribution of riverine DOC inputs to the ocean [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4: 170-178.
- [71] Kohout F A. The flow of fresh water and salt water in the Biscayne Bay Aquifer of the Miami area, Florida [C] // Seawater in Coastal Aquifers, U. S. Geological Survey, Water Supply Paper. 161G-C, Washington, DC, 1964: 12-32.
- [72] Kohout F A, Kolipinski M C. Biological zonation related to groundwater discharge along the shore of Biscayne Bay, Miami, Florida [C]. *Estuaries, Jekyll Island, GA*, 1967.

- [73] Marsh J A. Terrestrial inputs of nitrogen and phosphates on fringing reefs on Guam[C]//Proceedings of Third International Coral Reef Symposium. Miami, Florida, 1977.
- [74] D'Elia C F, Webb K L, Porter J W. Nitrate-rich groundwater inputs to Discovery Bay, Jamaica: A significant source of N to local reefs? [J]. *Bulletin of Materials Science*, 1981, 31: 903-910.
- [75] Paytan A, Shellenbarger G G, Street J H, et al. Submarine groundwater discharge: An important source of new inorganic nitrogen to coral reef ecosystems [J]. *Limnology and Oceanography* 2006 51: 343-348.
- [76] Lapointe B E, O'Connell J D. Nutrient-enhanced growth of *Cladophora prolifera* in Harrington Sound, Bermuda: Eutrophication of a confined, phosphorus-limited marine ecosystem [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 1989, 28: 347-360.
- [77] Laroehe J, Nuzzi R, Waters R, et al. Brown tide blooms in Long Island's coastal waters linked to interannual variability in groundwater flow [J]. *Global Change Biology*, 1997 3: 397-341.
- [78] 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.
- [79] Lee Y W, Kim G, Lim W A, et al. A relationship between submarine groundwater-borne nutrients traced by Ra isotopes and the intensity of dinoflagellate red-tides occurring in the southern sea of Korea [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55: 1-40.
- [80] Slomp C P, Van Cappellen P. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge: Controls and potential impact [J]. *Journal of Hydrology* 2004, 295: 64-86.
- [81] Moore W S. The subterranean estuary: A reaction zone of groundwater and sea water [J]. *Marine Chemistry*, 1999, 65: 111-125.
- [82] Santos I S, Burnett W C, Misra S, et al. Uranium and barium cycling in a salt wedge subterranean estuary: The influence of tidal pumping [J]. *Chemical Geology*, 2011, 287: 114-123.
- [83] Mulligan A E, Evans R L, Lizarralde D. The role of paleochannels in groundwater/seawater exchange [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335: 313-329.
- [84] Faure H, Walter R C, Grant D R. The coastal oasis: Ice age springs on emerged continental shelves [J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 33: 47-56.
- [85] Hanshaw B B, Back W. A geochemical hypothesis for dolomitization by groundwater [J]. *Environmental Geology*, 1971 66: 710-724.
- [86] Back W, Hanshaw B B, Pyle T E, et al. Geochemical significance of groundwater discharge in Caleta Xel Ha, Quintana Roo, Mexico [J]. *Water Resources Research*, 1979, 15: 1 521-1 535.
- [87] Baker P A, Kastner M. Constraints on the formation of sedimentary dolomite [J]. *Science*, 1981, 213: 214-216.
- [88] Sanders C J, Santos I R, Barcellos R, et al. Elevated concentrations of dissolved Ba, Fe and Mn in a mangrove subterranean estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 43: 86-94.
- [89] Ueda S, Suzumura M, Sumi E. Denitrification in a seashore sandy deposit influenced by groundwater discharge [J]. *Biogeochemistry*, 2003, 63: 187-205.
- [90] Charette M A, Sholkovitz E R, Hansell C M. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 1. Geochemistry of the permeable sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69: 2 095-2 109.
- [91] Charette M A, Sholkovitz E R. Trace element cycling in a subterranean estuary: Part 2. Geochemistry of the pore water [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70: 811-826.
- [92] Beck A J, Tsukamoto Y, Tovar-Sanchez A. Importance of geochemical transformations in determining submarine groundwater discharge-derived trace metal and nutrient fluxes [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, 22: 477-490.
- [93] Spiteri C, Slomp C P, Charette M A, et al. Flow and nutrient dynamics in a subterranean estuary (Waquoit Bay, MA, USA): Field data and reactive transport modeling [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 3 398-3 412.
- [94] Gonneea M E, Morris P J. New perspectives on radium behavior within a subterranean estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2008, 109: 250-267.
- [95] Santos I R, Burnett W C, Chanton J, et al. Nutrient biogeochemistry in a Gulf of Mexico subterranean estuary and groundwater-derived fluxes to the coastal ocean [J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(2): 705-718.
- [96] Charette M A, Sholkovitz E R. Oxidative precipitation of groundwater-derived ferrous iron in the subterranean estuary of a coastal bay [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29, doi: 10.1029/2001GL014512.
- [97] Windom H, Niencheski F. Biogeochemical processes in a freshwater-seawater mixing zone in permeable sediments along the coast of Southern Brazil [J]. *Marine Chemistry*, 2003, 81: 121-130.
- [98] Weeks S J, Currie B, Bakun A, et al. Hydrogen sulfide eruptions in the Atlantic Ocean off southern Africa: Implications of a new view based on SeaWiFS satellite imagery [J]. *Deep-Sea Research*, 2004, 51: 153-172.
- [99] Martin J B, Hartl K M, Corbett D R, et al. A multi-level pore-water sampler for permeable sediments [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(1): 128-132.
- [100] Kazemi G A. Editor's message: Submarine groundwater discharge studies and the absence of hydrogeologists [J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16: 201-204.

A Review on Submarine Groundwater Discharge

Liu Huatai¹, Guo Zhanrong²

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: Submarine Groundwater Discharge (SGD), an important part of global water cycle, is recently recognized as a research highlight on the land-ocean interaction in the coastal zone. Firstly, This paper analyzes the components and driving force of SGD, and summarizes the main estimating methods of SGD and its individual strengths and weaknesses. Secondly, the paper describes the important role of SGD in transporting dissolved mass into the costal ocean and significant impacts on the ecological environment of costal ocean, and through analyzing the biogeochemical process in the mixing zone of fresh-salt water, indicates the important position of subterranean estuary in studying submarine groundwater discharge. Finally, the paper points out the major problems currently existing in SGD research, then presents the future research direction.

Key words: Terrestrial fresh groundwater; Recirculated saline seawater; Subterranean estuary; Mass fluxes.

2014 年第 8 期要目

非球形粒子光散射计算研究的进展综述	许丽生 陈洪滨 丁继烈 夏志业
帕米尔弧形构造带新生代构造演化研究进展	陈汉林 陈沈强 林秀斌
全球变暖 hiatus 现象的研究进展	陈幸荣 蔡 怡 谭 晶 黄勇勇 汪 雷
古一中生代之交双壳类演变研究进展	黄云飞 童金南