

输入海洋的沿岸区地下水研究进展

Advances of the research of submarine groundwater discharge (SGD) in coastal ocean

刘建辉, 郭占荣

(厦门大学 海洋与环境学院, 福建 厦门 361005)

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2008)04-0087-05

海底地下水排泄 (Submarine Groundwater Discharge, 简称 SGD) 最早以泉的形式被人们发现, 从发现海底地下水排泄现象至今, 已有近 20 个世纪, 古罗马地理学家 Strabo (63B. C. ~ 21A. D.) 最早记载了这一现象。他在著作中提到: “在地中海距离叙利亚西北部一海港 Latakia 2.5 miles 的地方有处海底泉水, 人们将泉水用铅漏斗和皮革管收集到小船上, 然后运到 Latakia 城作为生活用水^[1]。开发利用 SGD 的最典型例子是: 为了获得淡水资源, 在希腊东南海滨建造了一条拦海大坝, 将海底泉水拦截起来, 结果在海中形成一个淡水湖, 用来灌溉岸上的田地^[1]。

海底地下水排泄不像河流流入海洋那样明显, 但是, 在滨海含水层与海水存在联系的地方, 且含水层水位或水头高于海平面, 就会有地下水直接排泄到海洋中, 深部承压含水层的地下水可能排泄到距离海岸更远的海域^[2]。随着人们对海底地下水排泄认识的提高, SGD 不单是一个输入地下水量的问题, 同时涉及海域水量平衡和化学物质输入等问题^[3]。虽然 SGD 在全球水量平衡中起的作用不是最大, 但是一些主要元素和次要元素的地球化学循环被陆源淡水的直接排泄强烈影响, 或者被再循环海水流经滨海含水层系统时的化学反应强烈影响^[4]。此外, SGD 可能是滨海地区污染地下水输入海洋的一个重要途径, 包括营养盐的输入^[5-8]。

虽然发现海底地下水排泄由来已久, 而且也认识到 SGD 的作用和影响, 但是它的科学研究迟迟未能开展起来。其原因主要有三个方面, 一是与河流向海洋输入相比, SGD 的测定要困难得多, 因为 SGD 在海水下面且时空变化非常大^[2]; 二是 SGD 属于发生在陆-海界面的一个过程, 而传统上陆-海界面是陆地环境与海洋环境的分界, 也是陆地水文地质学研究领域和海洋学研究领域的分界, 水文地质学家只重视研究对陆地环境有影响的海水入侵等问

题, 却不关心 SGD 对海洋环境的作用, 而海洋学家注意到了能看得见的地表水输入, 却低估了看不见的地下水输入, 因而 SGD 在很长时期被水文地质学家和海洋学家忽视了^[2]; 三是起初人们对 SGD 在水循环、营养盐和化学物质输入及海洋生态环境效应等方面的重要性认识不足^[1-2]。所以, 直到 20 世纪 80 年代后期, SGD 的研究才逐渐开始得到重视和发展。

1 评价方法

无论是研究地下水溶解物质的 SGD 输入, 还是研究 SGD 输入的生态环境效应, 首先要查清 SGD 的输入量。目前, SGD 输入量的评价方法可以概括为 3 种类型, 即水文地质模型法、物理测量法和同位素示踪法。

1.1 水文地质模型法

水文地质模型法主要包括水均衡法、数值模拟法、水文分割法、达西定律和流网法。

水均衡法主要适用于区域尺度的陆源淡水 SGD 评价, 水均衡法计算结果的可靠性依赖于两个方面, 一是年平均通量 (降水量、蒸发量、地表径流量) 能够根据长期资料来精确确定, 二是 SGD 输入量要大于降水量、蒸发量、地表径流量的测量误差 (至少大于 2~3 倍)。最近研究显示, 全球陆源淡水 SGD 输入量不超过地表水输入量的 10%, 加之降水补给量和蒸发排泄量的评价的误差不可避免。所以, 水均衡法的应用非常局限, 它主要应用于面积较大的 karst 海岸带, 因为那里的 SGD 输入量较大, 与其他均衡项处于同一数量级^[9]。

数值模拟法是利用有限元法或有限差法通过转

收稿日期: 2005-05-18; 修回日期: 2008-01-25

作者简介: 刘建辉 (1983-), 男, 福建宁德人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋地质学与水文地质学; 郭占荣, 通讯作者, E-mail: gzh@xmu.edu.cn

换差分方程为代数方程来求解地下水流方程。无论是有限元法还是有限差法都要进行空间和时间的离散,然后求解离散单元的水头方程,地下水排泄量可以根据含水层的水头和渗透系数的分布而计算获得。数值法的优点是可以模拟不规则几何形状的含水层和非均值的含水层,模拟 SGD 的时空变化,但是,该方法依赖于大量的实测数据,如水位、离子浓度、水的密度、水文地质参数等。数值模拟法一般适用于区域尺度的滨海含水层,它既可以计算陆源淡水 SGD,也可以计算海水再循环 SGD^[10]。不过,目前的数值模拟多数只计算陆源淡水 SGD,因为滨海含水层的模拟数据(水头、密度、水文地质参数)很难获得,尤其是下伏于海水且距离海岸较远的含水层。正是因为滨海含水层的模拟数据很难获得,因此,SGD 的数值模拟开展得较晚,远晚于内陆地区的地下水数值模拟。与内陆含水层的模拟相比,滨海 SGD 的数值模拟还要面临更多的困难,如要考虑潮汐作用、波浪作用、流体密度变化等复杂情况^[11,12]。由于地下淡水和海水的界面往往是一个咸淡水过渡带,过渡带的宽度可达几十米到数千米^[13]。所以,突变界面模型的计算精度较低,只有变密度三维水流和水质的耦合模型才能较好地仿真含水层的实际情况^[14,15],而目前使用变密度三维模型计算 SGD 的还很少见^[10,16]。

水文分割法是根据河流入海口附近径流量随时间的变化曲线来分割基流,将基流近似认为全部来自地下水的排泄,并且把该基流作为 SGD。水文分割法在俄罗斯较流行,俄罗斯专家曾用该方法估算大陆架或全球 SGD^[9,10]。水文分割法评价的是陆源淡水 SGD,而且只是那些埋藏非常浅的并与河流有联系的含水层的排泄量,没有包括较深部潜水含水层和承压含水层的 SGD^[9]。Zektser 等^[7]1993 年用水文分割法并结合水文地质方法,计算获得全球陆源 SGD 的输入量为 2 400 km³/a,约是全球地表水输入量(37 500 km³/a)的 6.4%。

达西定律的应用要求已知含水层的渗透系数、水流的渗流断面和水流的水力梯度,它既可以用于区域尺度的计算,也可以用于局部尺度的计算^[10]。因为达西定律多应用于海岸线以内的陆地区域,所以,它计算的是陆源淡水 SGD,前提条件是运移到海滨的地下水确实排泄到海里。潮汐作用可能引起海岸带局部的渗流方向改变,从而给使用达西定律计算净海底地下水排泄带来分析上的困难^[9]。

流网法广泛用于各种水文地质条件的区域尺度地下水问题的研究,它原理简单且有效,可以获得初步的、粗略的径流评价结果^[9],且只能计算陆源淡

水 SGD。流网的构建要求大量的地下水位(或水头)数据,通常的问题是水文地质参数的面积平均化,它与 SGD 的评价精度直接有关。另外,流网法基于简化的水文地质假设,例如,假设含水层是均质的、各向同性的、流态是稳定的。但是,海岸带的水文地质条件一般是很复杂的,所以,流网法的应用受到很大局限^[9]。

1.2 物理测量法

物理测量法包括渗流仪法、温度法和电导率法。

1977 年, Lee 发明了手动渗流仪。不过,起初渗流仪并未用于测定 SGD,而是用于测定地下水向河流或湖泊的排泄。Bokuniewicz^[18]首次将渗流仪用于 SGD 测定,即测量了纽约 Great South Bay 的 SGD。后来,一些学者又相继在更多的沿岸海域用渗流仪研究了 SGD^[19]。自从 Lee 发明手动渗流仪以来,又先后开发出来适合海底测量的热脉冲型自动渗流仪、连续热型自动渗流仪和超音速型自动渗流仪^[20]。与其他评价 SGD 的方法比较,渗流仪既原理简单又造价低廉,尤其是手动渗流仪。Lee 式渗流仪主要由一个容积 208 L 的不锈钢箱体、一个带开关的导管和一个容积 4 L 的集水袋组成。测量的时候将不锈钢箱体的开口端插入沉积物中,渗入箱体的水通过导管进入集水袋,根据集水袋中水体积的变化和时间的关系就可以计算出 SGD。根据 Taniguchi^[20]对几种渗流仪的比较研究, Lee 式手动渗流仪的观测结果与其他 3 种自动渗流仪的结果有较好的一致性,手动渗流仪最大的缺点是劳动强度大、消耗时间多。当然,手动渗流仪的测量会受到某些因素的影响,如集水袋的机械性质、仪器与沉积物接触部位的渗漏、波浪的干扰和压力差的干扰^[2]。尽管存在这些缺陷,但如果人们在测量过程中注意克服这些潜在的问题,就可以获得可靠的结果^[21,22]。自动渗流仪可以获得高分辨率时间系列的数据,特别是可以识别潮汐等短暂作用过程。自动渗流仪可以每隔 5 min 记录一次数据连续工作几天^[2],大大降低了劳动强度,提高了信息量的获取效率。

温度法基于温度可以作为一种示踪剂来评价地下水通量,因为在地下环境中的热被由地下水流引起的传导和对流来输送。Bredhoeft 和 Papadopoulos^[9]早在 1965 年依据稳定态热量传导-对流方程就提出了评价一维地下水流通量的类型曲线。温度法就是根据近岸钻孔的温度-深度剖面数据和海底孔隙水温度数据利用传导-对流方程来计算 SGD^[23]。Taniguchi 等^[23]曾经利用靠近海岸带的钻孔温度数据评价日本东京湾的 SGD。电导率法是依据电导率

在海水柱中随深度变化的特点,越靠近海水电导率越小,电导率的减小通过一个简单的稀释计算来获得 SGD。温度法和电导率法评价的都是陆源淡水 SGD,因为温度-深度剖面 and 电导率-深度剖面给出的是空间上的综合值,所以它们的结果代表的是一个区域尺度的陆源淡水 SGD^[9]。

1.3 同位素示踪法

在天然状态下,镭和氡在地下水中相对于沿岸海域海水来说要富集得多,而且很稳定,也易于测量,自然成为最好的示踪剂选择^[24]。同位素示踪法包括氡示踪法、镭示踪法。

因为氡是由沉积物中的放射性同位素衰变产生的,所以它能够被流经沉积物的淡水排泄或海水再循环带入海水中。用氡评价 SGD 的基本原理是:通过²²²Rn 放射性浓度的观测数据,求出近岸海域单位面积水柱中过量²²²Rn 的总数,用平均潮位、大气逃逸损失、混合损失来校正过量的²²²Rn,得到²²²Rn 的总通量,再用²²²Rn 的总通量除以地下水中²²²Rn 的浓度,从而获得 SGD 通量^[24]。通过氡测量的 SGD 既包括陆源淡水 SGD 又包括再循环海水 SGD,氡本身无法区分出二者,其原因是海岸带的淡水和海水混合得较为彻底,即使想利用氡样的盐度测定来识别淡水和海水也不可能^[25]。不过,氡和镭两者结合起来可以计算陆源 SGD 和再循环海水 SGD。

镭通常在淡水中是保守的,因为它被吸附在沉积物介质的表面上。当海水取代了含水层孔隙中的淡水时,镭就解吸离开介质表面,具有较大活动性,镭的解吸也可以发生在咸淡水过渡带形成期间^[26]。可见,由镭测定的是再循环海水 SGD。用 Ra 评价 SGD 的方法是:根据短寿命 Ra 同位素²²³Ra 和²²⁴Ra 的放射性浓度在近岸的分布,计算涡动混合系数,再根据长寿命 Ra 同位素²²⁶Ra 的浓度随离岸距离的降低,计算其浓度梯度,将涡动混合系数与浓度梯度的乘积作为²²⁶Ra 的通量,²²⁶Ra 通量与地下水中²²⁶Ra 浓度的商就是 SGD 输入量^[24]。

2 最新进展

1980 年 Johannes 撰文阐述了 SGD 的输入对海水水量平衡、化学物质平衡及生态的重要性,开始引起人们对 SGD 的关注,出现了从多角度、多学科研究 SGD 的发展趋势。特别是 20 世纪 90 年代后期,SGD 的研究更加受到了国际科学界的高度重视,成为陆-海相互作用研究的一个热点。国际科学理事会海洋研究科学委员会(SCOR)和 IGBP 核心项目“海岸带陆-海相互作用(LOICZ)”共同成立了两个工作

组来专门研究 SGD,这两个工作组一个是 1997 年成立的 SCOR WG-112 工作组,专门开展“沿海海洋过程的海底地下水排泄量及其影响”研究,目的是“更精确更全面地查明海底地下水的排泄量并且查明 SGD 是如何影响沿岸海域的化学过程和生物过程”。另一个是 1999 年成立的 SCOR WG-114 工作组,专门开展“可渗透性海洋沉积物中的物质运移和反应”,目的是“进一步查明地下水通过可渗透性海洋沉积物输送到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”^[1]。在 2000 年 8 月,SCOR 和 LOICZ 在 3 个地区又共同组织了 SGD 的多种方法相互比较研究,目的是比较分别由渗流仪法、同位素示踪法和数值法获得的海底地下水排泄量以及评价这些方法的优势、不足和适用条件^[1]。这次比较研究取得了多项有价值的成果。

经过多年的理论研究和实践,国内外专家普遍认为最适用、最有潜力的 3 种方法是渗流仪法、环境同位素示踪法和数值模拟法^[1,2],特别是渗流仪法是唯一能直接测量 SGD 的方法,以其原理简单、测量成本低而得到广泛应用,仍然是目前 SGD 研究的主要手段。2000 年 SCOR 和 LOICZ 开展的 SGD 比较研究显示,渗流仪法和同位素法的结果一般具有较好的一致性^[1],而在个别地区数值法的计算结果要比前两种方法低 7~9 成,Smith 等^[11]认为造成这种偏差的原因是模型没有考虑潮汐泵、波浪等短暂作用过程对地下水流的影响,而 Burnett 等^[2]认为数值法计算结果偏低的原因是模型未考虑再循环海水的 SGD 部分。此外,通过比较实验和研究,科学家对各种方法的优缺点、适用条件有了较清楚的认识。

3 存在问题

在过去 20 多年里,科学界对 SGD 的重要性的认识在逐渐提高,特别是近些年来欧美等国对 SGD 的研究明显加强。但 SGD 的研究仍很薄弱,存在许多问题有待解决。这些问题包括:对沿岸海域 SGD 的数量及其输送的物质了解得远远不够,造成这种了解不够的原因源自缺乏足够的 SGD 数据、对 SGD 定义的混淆及对不同来源 SGD 的驱动力的认识^[1]。目前全球绝大多数沿岸海域没有 SGD 数据,尤其是亚洲、非洲和南美的海域^[19],而且已开展的 SGD 研究多位于喀斯特、滨海平原、三角洲等海岸带,其他诸多类型的海岸带(如岩浆岩、变质岩)还缺少研究,从而影响在全球范围内系统认识和评价 SGD^[2,27]。目前应用的数值模型多数没有考虑对 SGD 有影响的潮汐泵、波浪运动这些短暂作用过程,而且变密度三维数值模型还很少应用^[11,16]。SGD 的监测、测量

和取样技术有待进一步改进,渗流仪现场抗波浪、风等干扰的技术需要解决,渗流仪中集水袋及与其连接的管道的阻力应该最小化^[19]。识别不同来源 SGD 的方法也需要发展,特别是区分陆源 SGD 和海水再循环 SGD 的方法,以及区分密度梯度、压密作用、热对流等驱动的 SGD 的方法^[1]。区分不同来源的 SGD 十分重要,因为只有区分出 SGD 的来源,才能进一步研究 SGD 溶解物质的来源,特别像污染物一类的物质可能主要是陆源的。SGD 溶解物质及其环境效应的研究还很薄弱,陆源物质在海洋沉积物中的运移和反应、咸淡水过渡带物质的相互作用、营养盐和污染物的环境影响等研究都不深入^[28-31]。在以往进行过的所有研究中很少采用两种或两种以上的方法,缺乏多种方法的相互比较和验证,可信度不高^[2]。在评价 SGD 的计算中通常使用很多假设,但是以往的研究很少进行必要的误差分析^[2]。以上所述问题,均有待在今后工作中改进和完善。

中国在海水入侵问题研究方面取得了大量成果,有些成果达到国际先进水平。但是,中国开展海底地下水排泄研究起步较晚,且有关的研究和成果也很少^[32],与中国 1.8 万 km 多绵长海岸线和类型多样的海岸带很不相适应,同欧美、日本、澳大利亚等国家在 SGD 研究方面存在较大差距,SGD 的重要性还未引起中国科学界的足够重视,尽快加强中国沿岸海域的 SGD 研究显得十分迫切。

4 发展趋势

4.1 改进测量技术和方法

提高目前测量仪器在局部压力干扰下对孔隙水交换的灵敏度,尤其是对局部压力的、短暂的作用过程,如波浪、风等的作用。急需具抗干扰能力的现场测量仪器。需要改进对海底及海底沉积物的监测、测量和取样技术,海底孔隙水交换的精确评价依赖于对海底水流特征、沉积物地貌和沉积物渗透性的了解。

4.2 进行相互校正试验和研究

这种校正实验应该推广到目前所有的测量和评价方法。校正实验应该是多方面的,也应该在各种环境下重复实验(如喀斯特海岸带、滨海平原区、三角洲、岩浆岩海岸带等环境)。如果没有多种方法的相互验证,那么任何一种方法的可信度都会遭到怀疑。

4.3 开展全球海岸带类型学的研究

海岸带类型学的研究包括对全球海岸带滨海含水层的地质类型进行类型划分和研究,如喀斯特类

型含水层、滨海平原类型含水层、三角洲类型含水层等;还包括对全球海岸带环境参数的类型进行类型划分和研究,如降水、蒸发、温度等。在这些类型学研究基础上,建立全球 SGD 数据库,就可以在全球尺度上更加全面地认识 SGD。

4.4 加强 SGD 向海洋输送化学物质及其生态环境效应的研究

包括陆源化学物质的输入研究,特别是陆源营养盐、污染物的输入研究,再循环海水与滨海含水层的相互作用和化学反应,海域地球化学平衡模式,以及对水质有强烈依赖性的海域生态环境效应的研究。

4.5 区分不同来源的 SGD

要区分不同来源的 SGD,必须首先了解水流的各种驱动力,如水力梯度、密度梯度、热对流、压密作用等驱动力。了解不同 SGD 的驱动力及其各种驱动力之间的相互作用。在很多情况下,这些驱动力是同时发生作用的,所以根据测量数据很难将不同来源的 SGD 区分出来。因此,建立关于不同作用过程及其生物地球化学循环效应的数学模型成为不可缺少的工具。

4.6 开展海底孔隙水交换(SPE)的研究

以往人们对于 SPE 的认识不够,最近研究发现 SPE 不仅数量巨大,而且孔隙水交换(SPE)会携带有机质和氧气进入沉积物中,会不断改变海底微地貌和边界层水流特征等。由于海底孔隙水交换是一个很短暂的、局部的作用过程,所以,对监测、测量和取样等技术提出更高要求。

参考文献:

- [1] Burnett W C, Moore W S, Taniguchi M. Groundwater and pore water inputs to the coastal zone[J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66: 3-33.
- [2] Burnett W C, Taniguchi M, Oberdorfer J. Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone[J]. **Jour Sea Research**, 2001, 46: 109-116.
- [3] Johannes R E. The ecological significance of the submarine discharge of ground water[J]. **Mar Ecol Prog Ser**, 1980, 3: 365-373.
- [4] Moore W S. The subterranean estuary: a reaction zone of ground water and sea water[J]. **Marine Chem**, 1999, 65: 111-126.
- [5] Simmons J G. Importance of SGD(SGWD) and seawater cycling to material flux across sediment/water interfaces in marine environments[J]. **Marine Ecol**, 1992,

- 84: 173-184.
- [6] Valiela I, Costa J, Foreman K, *et al.* Transport of groundwater borne nutrients from watersheds and their effects on coastal waters [J]. **Biogeochemistry**, 1990, 10: 177-197.
- [7] Johannes R E, Hearn C J. The effect of subsurface groundwater discharge on nutrient and salinity regimes in a coastal lagoon off Perth, West Australia. **Estuarine [J]. Coastal and Shelf Science**, 1985, 21: 789-800.
- [8] Viventsova E A, Voronov A N. Groundwater discharge to the Gulf of Finland (Baltic Sea): ecological aspects [J]. **Environmental Geology**, 2003, 45:221-225.
- [9] Loaiciga H A, Zektser I S. Estimation of submarine groundwater discharge[J]. **Water Resources**, 2003, 30 (5): 473-479.
- [10] Oberdorfer J A. Hydrogeologic modeling of submarine groundwater discharge: comparison to other quantitative methods[J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66:159-169.
- [11] Smith L, Zawazski W A. hydrologic model of submarine groundwater discharge: Florida intercomparison experiment[J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66:95-110.
- [12] Destouni G, Prieto C. On the possibility for generic modeling of submarine groundwater discharge [J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66:171-186.
- [13] 薛禹群, 谢春红, 吴吉春. 海水入侵研究[J]. 水文地质工程地质, 1992, 19(6):29-33.
- [14] Xue Yuqun, Xie Chunhong, Wu Jichun, *et al.* A three-dimensional miscible transport model for sea water intrusion in China[J]. **Water Resources Research**, 1995, 31(4): 903-912.
- [15] 成建梅, 陈崇希. 山东烟台夹河中下游地区海水入侵三维水质数值模拟研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 179-184.
- [16] Langevin C D. Simulation of submarine ground water discharge to a marine estuary: Biscayne Bay, Florida [J]. **Ground Water**, 2003, 41(6):758-771.
- [17] Zektser I S, Loaiciga H A. Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future[J]. **Jour Hydrol**, 1993, 144: 405-427.
- [18] Bokuniewicz H. Groundwater seepage into Great South Bay, New York[J]. **Estuarine and Coastal Marine Science**, 1980, 10: 437-444.
- [19] Taniguchi M, Burnett W C, Cable J E, *et al.* Investigations of submarine groundwater discharge [J]. **Hydrol Process** 2002, 16: 2 115-2 129.
- [20] 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 northeastern Gulf of Mexico[J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66:35-53.
- [21] Cable J E, Burnett W C, Chanton J P. Magnitudes and variations of groundwater seepage into shallow waters of the Gulf of Mexico [J]. **Biogeochemistry**, 1997, 38: 189-205.
- [22] 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.
- [23] Taniguchi M, Turner J V, Smith A J. Evaluations of groundwater discharge rates from subsurface temperature in Cockburn Sound, Western Australia [J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66:111-124.
- [24] Burnett W C, Dulaiova H. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements[J]. **Journal of Environmental Radioactivity**, 2003, 69: 21-35.
- [25] Moore W S. Sources and fluxes of submarine groundwater discharge delineated by radium isotopes [J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66:75-93.
- [26] Moore W S. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ²²⁶Ra enrichments [J]. **Nature**, 1996, 380: 612-614.
- [27] Bokuniewicz H, Buddemeier R, Maxwell B, *et al.* The typological approach to submarine groundwater discharge (SGD) [J]. **Biogeochemistry**, 2003, 66: 145-158.
- [28] Dzhamalov R G, Safronova T I. On estimating chemical discharge into the world ocean with groundwater [J]. **Water Resources**, 2002, 29(6): 626-631.
- [29] Carolyn B D, Robert J P, Andrew G H, *et al.* Ground water discharge and nitrate flux to the Gulf of Mexico [J]. **Ground Water**, 2004, 42(3):401-417.
- [30] Oberdorfer J A, Valetino M A, Smith S V. Ground water contribution to the nutrient budget of Tomales Bay, California [J]. **Biogeochemistry**, 1990, 10:199-216.
- [31] Giblin A E, Gaines A G. Nitrogen inputs to a marine embayment: the importance of groundwater [J]. **Biogeochemistry**, 1990, 10: 309-328.
- [32] 邱汉学, 郑西来, 张效龙, 等. 黄河农场地区地下水入海通量的数值分析[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(3): 28-33.

(本文编辑:刘珊珊)