

厦门岛南岸地下水的氢氧同位素的示踪研究*

蔡明刚¹ 黄奕普¹ 陈敏¹ 刘广山¹ 金德秋²⁽¹⁾ 厦门大学海洋系 厦门 361005)⁽²⁾ 北京大学化学系 北京 100871)

提要 实测了厦门岛沿岸地区地下水的氢、氧稳定同位素组成,并据此开展了沿岸地下水水文学的同位素示踪研究。对地下水、海水及大气降水的 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 方程进行数理分析后表明,大气降水是厦门沿海浅层地下水的主要来源。利用稳定同位素质量平衡模型,估算 9810 号台风所致降水对地下水的贡献。结合水文资料,通过地下水氢、氧同位素组成的时空分布特征,验证了地下水由北向南运移并最终排入沿岸海域的运移途径。研究还初步探讨了地下水稳定同位素组成对潮汐变化的响应。

关键词 地下水, 2H , ^{18}O , 示踪剂, 厦门

中图分类号 Q59 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3096(2003)09-0001-06

地下水水文学是运用水文循环和水量平衡研究地下水形成、运移及水资源等的学科,其研究结果具有重要的理论和实际意义。同位素技术是地下水水文学的重要研究手段之一,在研究地下水的起源、年龄和运移等方面具有独特的优势。

近年来国外研究表明,地下水可能成为沿岸海域营养物质的重要载体和输运途径,进而影响甚至改变传统的沿岸海域的生物地球化学循环模式。作为曾被长期忽视的沿岸营养源,地下水可载带大量营养盐排放入海,并与水体富营养化及藻类水华之间存在直接的联系^[1,2]。因此,近年来地下水向海排放对沿岸海域生态系统的影响正愈来愈受到人们的重视^[3,4]。

2H 与 ^{18}O 分别为氢、氧的重稳定同位素。在天然水体中,含轻同位素的水分子($H_2^{16}O$)具有比含重同位素的水分子 $H_2^{18}O$ 及 HDO 更高的蒸汽压和扩散能力,这就造成表层水体中含重同位素的水分子浓度较轻同位素高^[5]。因此,水汽的蒸发和冷凝以及不同水体的混合,均会对水体中氢、氧同位素组成造成一定程度影响,导致其含量的非均匀分布^[6]。 2H 与 ^{18}O 作为行为保守的天然稳定同位素,就成为示踪水体运移、交换与混合的理想示踪剂。

基于上述考虑,本文实测了厦门沿岸地下水、海水中氢、氧同位素时空变化,并据此开展了地下水水文学的稳定同位素示踪研究。该研究同时将有助于推进沿岸地下水-海水相互作用的研究进程。

1 样品的采集与测定

1.1 研究区域概述

采样地点位于厦门岛南部沿岸地区,地质构造为第四系台地-阶地堆积。海岸地貌主要为海蚀阶地,海拔高度为 5~10 m,阶地平坦,微向海倾斜。沿海为沙质海滩,邻近海域潮水为规则半日潮。

1.2 样品采集和测试方法

在采样区域内按离海岸线距离不同,选取 5 口井作为采样站位($W_1 \sim W_5$),采集表层地下水样,并同时采集沿岸表层海水样(S),如采样站位示意图所示(图 1)。所有站位每次均分高、低潮采样。采样时间选取当月最大潮日,以最大限度地观测潮汐对沿海地下水的影响。

水样盛满小塑料瓶后蜡封,带回同位素实验室进行预处理和 2H , ^{18}O 的质谱测定。详细的分析与测量方法见文献[6,7]。

* 高等学校博士学科专项科研基金 98038408 号;福建省自然科学基金 D97002 号;厦门大学科研基金 0050-Y07009 号。
第一作者:蔡明刚,出生于 1974 年,博士,主要研究方向:同位素海洋化学、海洋环境化学等。电话:0592-2186491, E-mail: mgcai@jingxian.xmu.edu.cn

收稿日期:2003-06-23;修回日期:2003-06-26

2 结果与讨论

2.1 含量与分布

2.1.1 沿岸地下水、海水 ^2H , ^{18}O 含量

研究区域地下水的 δD 测值介于 $-57.1\text{‰} \sim -31.2\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 测值介于 $-7.63\text{‰} \sim -4.67\text{‰}$ 之间, 二者平均值分别为 -41.2‰ 和 -6.23‰ (表 1)。各站地下水氢、氧同位素含量差别显著, 反映了所处于陆海交界的特殊位置, 影响因素较多, 不仅与采样季节的降水来源与强度有关, 而且也与邻近水体的补给和交换密切相关。

研究区域附近表层海水 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 测值明显高于地下水, 分别为 $-17.8\text{‰} \sim -10.2\text{‰}$ 和 $-2.35\text{‰} \sim -1.29\text{‰}$ (表 1), 但低于邻近海区测值^[8]。这主要是由于海水站位邻近岸边, 受陆地径流影响较大, 故 δ 值偏负。

2.1.2 地下水 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 含量的空间变化

总体而言, 地下水中 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 呈沿海向陆逐渐降低的空间变化趋势(图 2)。就月份变化来看, 12 月 δD 空间分布与 11 月相比变化较大, 一方面, 陆端 (W_5 站) 与海端 (S 站) 表层水 δ 值均呈现出一定程度的升高。研究区域在 1998 年 9、10 月降水量较大, 达到 469.8 mm, 主要集中在 9810 号台风期间 (3 日降雨量共计 343 mm, 该降水 δD 为 $-75.8\text{‰} \sim -108.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-10.30\text{‰} \sim -14.87\text{‰}$)。受到该低氘降水的影响, 11 月陆、海端水样 δD 值均较低, 11、12 月降雨量迅速减少, 仅分别为 1.5 mm 和 34.4 mm, 相应地地下水的 δ 值较前月有了一定程度的升高; 另一方面, 位于陆、海端之间的地下水 ($\text{W}_1 \sim \text{W}_4$ 站) δ 值均较

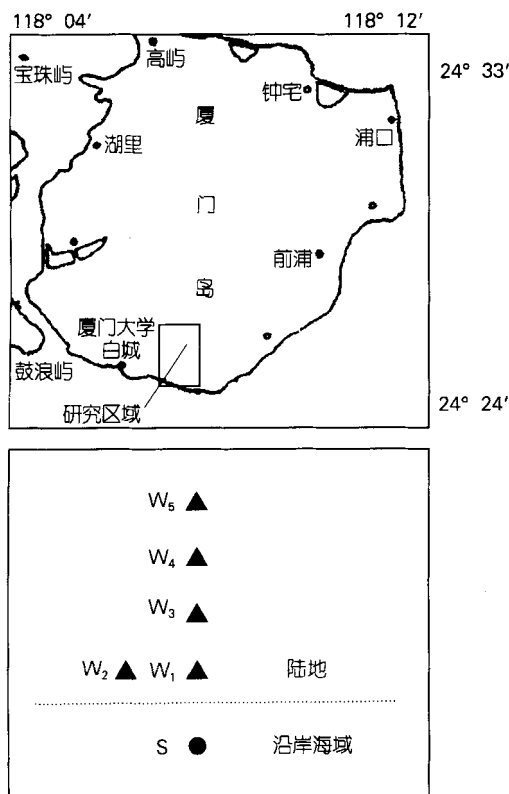


图 1 厦门沿岸地下水、海水采样示意图

Fig. 1 Sketch map of sample sites of coastal groundwater and seawater in Xiamen

表 1 厦门沿岸地下水、海水的 δD , $\delta^{18}\text{O}$

Tab. 1 δD , $\delta^{18}\text{O}$ of coastal groundwater and seawater, Xiamen

样品名称	采样时刻 ¹⁾	$\delta\text{D}_{\text{VS MOW}}(\text{‰})$		$\delta^{18}\text{O}_{\text{VS MOW}}(\text{‰})$	
		1998-11-06	1998-12-06	1998-11-06	1998-12-06
S	H	-15.9 ± 0.6	-10.2 ± 0.3	-1.94 ± 0.02	-1.29 ± 0.03
	L	-17.8 ± 0.4	-12.6 ± 0.1	-2.35 ± 0.05	-1.53 ± 0.02
W_1	H	-33.4 ± 0.1	-38.6 ± 0.1	-4.82 ± 0.01	-5.85 ± 0.01
	L	-32.0 ± 0.4	-38.1 ± 0.4	-4.87 ± 0.01	-5.99 ± 0.01
W_2	H	-31.9 ± 0.2	-42.6 ± 0.3	-5.07 ± 0.04	-6.34 ± 0.02
	L	-31.9 ± 0.5	-42.0 ± 0.3	-5.12 ± 0.06	-6.33 ± 0.06
W_3	H	-31.3 ± 0.1	-39.4 ± 0.3	-4.67 ± 0.03	-5.99 ± 0.05
	L	-31.2 ± 0.2	-37.5 ± 0.2	-4.75 ± 0.01	-5.76 ± 0.01
W_4	H	-46.8 ± 0.1	-47.4 ± 0.4	-7.85 ± 0.03	-6.36 ± 0.02
	L	-39.2 ± 0.1	-46.8 ± 0.1	-5.99 ± 0.04	-6.40 ± 0.02
W_5	H	-39.7 ± 0.4	-37.9 ± 0.3	-6.03 ± 0.06	-5.69 ± 0.03
	L	-57.1 ± 0.1	-38.5 ± 0.2	-7.63 ± 0.06	-5.91 ± 0.01

¹⁾ H 与 L 分别表示高、低潮时刻。

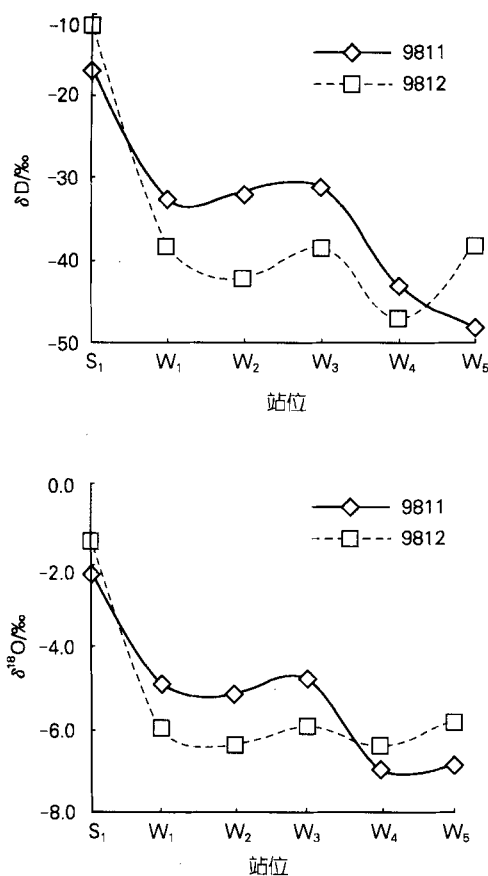


图2 沿岸地下水 δD , $\delta^{18}O$ 的空间分布

Fig.2 The distribution of δD and $\delta^{18}O$ of coastal groundwater

12月有一定程度的降低。其原因可能是,由低氘降水形成的“新生的”地下水,当其流经研究站时,与原有“较老”的水体发生交换和混合,导致水体 δ 值降低。上述分析初步表明,厦门沿岸地下水补给受大气降水影响较大。

2.2 沿岸地下水水文学的氢、氧同位素示踪研究

2.2.1 沿岸地下水来源的 2H , ^{18}O 示踪研究

已有研究表明,当其它化学指标(如 α)不甚清晰时,可利用 2H 和 ^{18}O 迅速鉴定地下水是否源于大气降水、海水或其它天然水体^[9,10]。研究区域位于沿岸地区,且地下水水样采自潜水含水层,所以地下水中 2H 、 ^{18}O 含量主要取决于地下水的来源,而水-岩交换的影响较小^[11]。因此,此处仅考虑大气降水和沿岸海水对地下水的 δ 值的贡献。

据表1地下水及1999年大气降水的氢、氧同位

素数据,可得研究区域地下水及海水的 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 方程,分别为($\delta D = 8.29 \delta^{18}O + 9.16$, $R = 0.970$)和($\delta D = 7.17 \delta^{18}O + 1.38$, $R = 0.988$)。此外,蔡明刚等^[12]给出了同一时期厦门岛大气降水线方程为($\delta D = 8.16 \delta^{18}O + 10.68$, $R = 0.996$)。

利用数理统计方法对上述3个方程进行显著性比较:取显著性水平为0.01,依次检验两个方程的剩余标准离差、截距及斜率。结果表明,地下水 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 方程与大气降水线方程并无显著差异,而与沿岸海水相差较大。这说明大气降水是研究区域浅层地下水的主要来源,在采样期间,沿岸海水对地下水的直接混合作用相对较小。Gehrels等^[13]利用荷兰Veluwe浅层地下水、大气降水的 $\delta^{18}O$ 值,判断冬、夏季降水均对地下水进行补充。Lee等^[9]利用氢、氧同位素评价了韩国Cheju岛地下水的来源,结果表明,地下水在一年四季均受到大气降水的回补。

2.2.2 台风降水对地下水贡献的 2H , ^{18}O 法估算

地下水中氢、氧同位素组成反映了补给水的同位素组成,但只有超过一定阈值的降水才对地下水补给有所贡献,这一阈值主要取决于当地气象条件、植被及土壤类型等^[15,11]。相比之下,植物根系的吸收作用不是大气降水和地下水分馏的主要过程^[14]。下面仅以1998年第10号台风降水(系当年研究区域最大的台风降水,降水量约300~400mm,以下简称9810号台风)为例,利用沿岸地下水中氢、氧稳定同位素组成变化,估算该次台风对地下水的补给贡献。

选择研究站中离海最远的陆端站(W_5 井)作为研究对象,并利用下面的稳定同位素质量平衡方程^[15],可估算9810号台风降水对该站地下水的影响:

$$\delta_i \cdot X_i + \delta_e \cdot (1 - X_i) = \delta_k$$

上式中, δ_i , δ_e 及 δ_k 分别表示台风降水及台风前后地下水中的 δD 或 $\delta^{18}O$ 含量; X_i 为一段时间内台风降水对地下水的贡献(%)。

因未测台风降水前地下水的稳定同位素含量,故取离陆端最远,且基本不受沿岸海水影响的 W_5 站地下水的11月 δ 值作为台风降水前地下水的 δ 代表值(此时因台风降水而“新生”的地下水基本上暂未影响到该处水体)。分别将上述 δD 和 $\delta^{18}O$ 数值代入质量平衡方程中,可估算出在9810号台风降水后约10d左右,台风降水对研究区域陆端地下水的补给比例(X_i)分别约为27.5%和23.1%,平均为25.3%。若暂不考虑海水的影响,用受沿岸海水影响最大的 W_1 站地下水水样的 δD 与 $\delta^{18}O$ 数据进行计算,则可求出台风降水对地下水的补给比例分别为26.5%和

25.7%,与上述计算值基本一致,表明我们的计算依据和结果是可信的。研究区域地下水成因类型主要为孔隙水及裂隙水,其多为雨水经地表渗透并穿过岩石空隙及裂隙形成的,相应地更新和回补速率也较快。可见,本研究利用 δD 与 $\delta^{18}O$ 估算台风对地下水更新比例较高,与研究区域的水文地质特征是一致的。Lee 等^[19]用同样方法估算出韩国 Cheju 岛 6~9 月的大气降水对地下水的贡献约占全年地下水回补的 67%。Jørgensen^[15]实测了丹麦 Læsø 岛含盐表层地下水、海水的氢、氧稳定同位素组成,并估算出沿岸海水同源与新鲜雨水的地下水的混合比例约为 0~50%。

2.2.3 沿岸地下水流向的同位素示踪研究

从图 2 中可以看出,在沿陆端 (W_5 站) 至海端 (S 站) 方向上,地下水 δ 值呈逐渐增加趋势。这一趋势在 11 月表现得尤为明显:由陆向海, δD 值从陆端的 -48.4‰ 逐渐升至海端的 -16.8‰, $\delta^{18}O$ 的空间分布亦然(图 2)。

地下水的空间分布主要受控于大气降水补给和邻近水体混合过程^[5]。如前所述,沿岸地下水主要来源于大气降水,10 月底的台风带来大量的降水,受其来源及运移路径影响,其氢、氧重同位素含量较低^[12]。相应地,由该低 δ 值降水“新生”的地下水 2H , ^{18}O 含量亦较低,最低值出现在离海最远的 W_5 站。在地下水运移过程中,“新生”的低 δ 值地下水逐渐与原有“较老的”地下水发生水体混合和交换,由于研究区域地下水的混合与交换直至完全排放需要一定的时间,因而在空间分布上,11 月 δD 与 $\delta^{18}O$ 值呈现出陆端地下水同位素含量较低,而沿陆向海由于新、老地下水的交换与混合, δ 值逐渐升高。地下水同位素组成随离海距离的变化特征,揭示了研究区域地下水从北向南、由陆向海运移并最终排入沿岸海域。Krabbenhoft 等^[5]研究了美国威斯康星州中北部 Sparkling 湖区地下水 $\delta^{18}O$ 分布,发现从地下水上游到下游,直至湖边,其 $\delta^{18}O$ 值逐渐升高,并趋于接近湖水的 δ 值,进而揭示了地下水流向为从南至北。

11 月降水量相对 9、10 月而言极少,仅 1.5 mm。相应地,降水对地下水中稳定氢、氧同位素组成影响较小。同时,经一段时间的水体交换和混合,表现为 12 月份研究区域地下水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 空间分布较为平缓。

图 3 为研究区域地下水水位(黄海高程)等值线图,其中高程为黄海高程系,坐标为厦门 92 坐标系,图中数据表示水位的变化,单位为 m。从图中可以看出,沿岸地下水水位标高沿北向南逐渐降低,表明地下水主要接受大气降水补给,总体上由北向南向海径

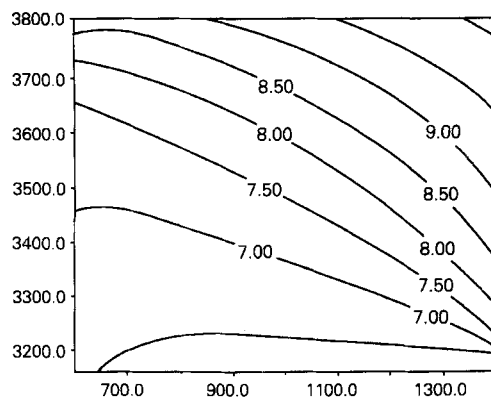


图 3 研究区域地下水水位等值线

Fig. 3 Map of groundwater level isoline of study area

流排泄。这与利用稳定同位素获得的结果完全一致,表明利用氢、氧同位素示踪地下水水体运动的方法是可行的,其结果是可信的。

2.3 沿岸地下水 $\delta^{18}O$ 对潮汐变化的响应

图 4 为地下水 $\delta^{18}O$ 在一个潮周期内高、低潮时刻的变化图。11 月份采样日低潮时刻地下水中 $\delta^{18}O$ 值呈现出陆端差异大,海端差异小的变化特征, $W_1 \sim W_5$ 站地下水 $\delta^{18}O$ 高、低潮之差值仅为 0.05‰~0.08‰,但在陆端 W_4 和 W_5 站,该差值却分别达到了 -1.86‰和 1.60‰。沿海地下水 $\delta^{18}O$ 随高低潮变化较小,也说明了咸、淡水之间的转变是相当缓慢的。Mehra 等^[16]认为该缓慢变化主要是由于相对较短

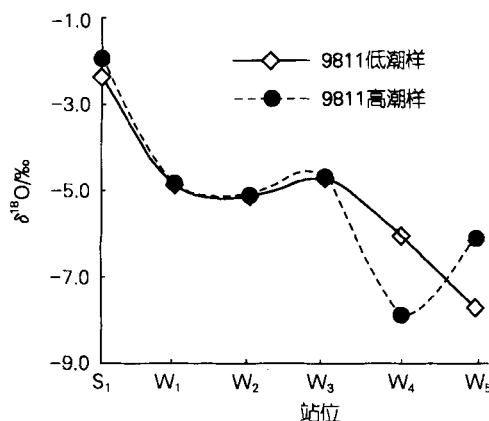


图 4 沿岸地下水中 $\delta^{18}O$ 的高低潮变化(1998 年 11 月)

Fig. 4 The change of $\delta^{18}O$ of coastal groundwater with the time of high and low tide (1998.11)

周期的天文潮引起的咸、淡水界面往复移动,同时也由于降水补充的季节性变化引起的长期变动和不常发生的干旱造成的。

潮汐对沿岸地区地下水氢、氧同位素含量的影响可能包括以下两方面。第一,海水与地下水的直接混合与交换。但前文已述,地下水流向为沿岸向海流动,且其水位普遍高于海平面(图2,3),此外,从盐度(数据未给出)变化看,除 W_1 站位外,其余各站地下水受海水影响较小。表明采样时间内不存在明显的地下水与海水的直接交换与混合。第二,潮汐导致沿岸地下水的水位梯度变化。潮汐变化使海水水头升高或降低,影响了地下水径流坡度、流速及其向海侧压水位梯度,进而影响到地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值。因此,可以初步认为,在离海较远的陆端站位,地下水受海水交换的影响甚微,潮汐引起的地下水水位梯度变化可能是导致 δ 值变化的主要因素之一。

此外, W_1 站与 W_6 站地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 对潮汐变化的响应迥异(图4),这主要是两个站位水体性质不同所致(另文发表)。有关地下水对潮汐过程的响应机制,仍有待于进一步深入研究。

3 结语

通过实测厦门沿岸地下水,海水中氢、氧同位素组成,开展了地下水来源、运移等水文学的同位素示踪研究,并初步探讨了地下水稳定同位素对潮汐变化的响应,结果表明:(1)厦门沿岸地下水中 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 含量变化范围较大,大气降水是其主要来源,海水的影响相对较小。(2)利用 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 估算了 9810 号台风降水对沿岸地下水的贡献,通过质量平衡计算,得出在该台风降水 10 d 后,其对沿岸地下水的补给约为 25%。(3)沿岸地下水 δD , $\delta^{18}\text{O}$ 呈现出由陆向海逐渐升高的空间分布特征,揭示了研究区域地下水由北向南,沿陆向海运移的水文学信息。(4)观察了一个潮周期内地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 的响应和变化,初步认为潮汐引起的地下水水位梯度变化可能是导致陆端地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 变动的原因之一。

参考文献

- 1 Paerl H W. Coastal eutrophication and harmful algal blooms: importance of atmospheric deposition and groundwater as "new" nitrogen and other nutrient sources. *Limnology Oceanography*, 1997, 42(5): 1154-1165
- 2 La Roche J E, Nizzi R. Brown tide blooms in Long Island's coastal waters links to interannual variability in groundwater flow. *Global Change Biology*, 1997, 3: 397-410
- 3 Capone D G, Bautista M F. A groundwater source of nitrate in nearshore marine sediments. *Nature*, 1985, 313: 214-216
- 4 Moore W S, Church T M. Submarine groundwater discharge. *Nature*, 1996, 382: 122
- 5 Krabbenhoft D R, Bowser C J, Anderson M P, et al. Estimating groundwater exchange with Lakes 1. The stable isotope mass balance method. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2445-2453
- 6 黄奕普, 施文远, 金德秋, 等. 南海东北部重氢的分布与黑潮水入侵南海. 见: 南海东北部海区环流课题组编. 中国海洋学文集. 第6集, 北京: 海洋出版社, 1996. 71-81
- 7 黄奕普, 邱雨生, 陈敏, 等. 南海东北部海水中 ^{18}O 的分布. 见: 南海东北部海区环流课题组编. 中国海洋学文集. 第6集, 北京: 海洋出版社, 1996. 71-81, 82-92
- 8 蔡明刚, 陈敏, 蔡毅华, 等. 厦门湾江湾水体交换的 ^{224}Ra , ^2H 示踪研究. 台湾海峡, 2000, 19(2): 157-162
- 9 Lee K S, Wenner D B, Lee I, et al. Using H and O isotopic data for estimating the relative contributions of rainy and dry season precipitation to groundwater: example from Cheju Island, Korea. *Journal of Hydrology*, 1999, 222: 65-74
- 10 Coplen T B, Herczeg A L, Barnes C. Isotope engineering using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In: Cook P, Herczeg A L. *Environmental tracers in subsurface hydrology*. USA: Elsevier Science, 2000. 79-110
- 11 Gonfiantini R, Fröhlich K, Araguás-Araguás L, et al. Isotopes in groundwater hydrology. In: Kendall C, McDonnell J J. *Isotope tracers in Catchment Hydrology*. USA: Elsevier Science, 1998. 203-206
- 12 蔡明刚, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门大气降水的氢氧同位素研究. 台湾海峡, 2000, 19(4): 446-453
- 13 Gehrels J C, Peeters J E M, De Vries J J, et al. The mechanism of soil water movement as inferred from ^{18}O stable isotope studies. *Journal Hydrological Science*, 1998, 43(4): 579-594
- 14 Turner J V, Arad A, Johnston C D. Environmental isotope hydrology of salinized experimental catchments. *J Hydrology*, 1987, 94: 89-107
- 15 Jørgensen N O. Origin of shallow saline groundwater on the Island of Læsø, Denmark. *Chemical Geology*, 2002, 184: 359-370
- 16 Mehta A J, Cushman R M, 李成, 等译. 海平面上升与沿岸过程. 北京: 海洋出版社, 1996.



THE STUDY OF HYDROGEN AND OXYGEN ISOTOPES OF COASTAL GROUND WATER IN XIAMEN ISLAND

CAI Ming Gang¹ HUANG Yi Pu¹ CHEN Min¹ LIU Guang Shan¹ JIN De Qu²

(¹ Department of Oceanography Xiamen University, Xiamen, 361005)

(² Department of Chemistry Peking University, Beijing, 100871)

Received: Jun., 23, 2003

Key Words: Groundwater, ²H, ¹⁸O, Trace, Xiamen Island

Abstract

Hydrogen and oxygen stable isotopic investigation of surface groundwater and seawater samples from coastal area of Xiamen Island were undertaken to characterize the isotopic nature and to hold the study of stable isotopic hydrology of coastal groundwater. The $\delta D \sim \delta^{18}O$ relationship of different water were compared by using mathematical statistics methods, which shows that the meteoric water is the main source of shallow groundwater of Xiamen Island. Using a stable isotopic mass-balance equation, we estimated the relative contribution of a big precipitation event brought by No.9810 typhoon to the hydrologic budget of groundwater. The characteristics of temporal and spatial distributions of ²H and ¹⁸O in coastal groundwater revealed the flow direction of groundwater, which generally flows from north to south, and finally discharges into coastal sea area. The tidal effect on the composition of stable isotopes is also primarily discussed here.

(本文编辑:刘珊珊)