舟山北部海域海底淡水资源研究

张志忠[1,2)]，邹亮[1,2)]，韩月[2,3)]

1）国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室，山东青岛，266071；

2）青岛海洋地质研究所，山东青岛，266071；3）中国海洋大学，山东青岛，266100

内容提要：利用舟山北部海域2009年完成的高分辨率单道地震测量成果，结合前人调查资料和邻近的上海长江三角洲陆地地区水文地质资料，对地震资料进行了解译和综合分析研究，查明了海底第四纪松散沉积物分布规律，初步圈定了早更新世时期的长江古河道和钱塘江古河道位置。结果揭示在调查区西部钱塘江口北侧、嵊泗列岛和“嵊泗二井”以北、嵊泗东北部海域第四纪松散层发育，所圈定的早更新世古河道分布区可能是海底淡水资源丰富区，为舟山北部海域海底淡水资源进一步调查指明了方向，为海底淡水资源开发提供了科学依据。

关键词：海底淡水资源；单道地震调查；古河道；舟山北部海域

海底淡水资源特别是海底泉的开发利用早已引起世界许多沿海国家的重视。但是，所关注的海底泉主要都是碳酸盐岩溶含水层和基岩裂隙含水层地下水在海底溢出形成的(Fleury et al.，2007)，对于海底地下水大多数只是研究海底地下水的排泄(SGD)对海洋环境的影响问题(Mijatovic，2007；郭占荣等，2008)，对海底第四纪松散层孔隙淡水资源利用的调查研究还很薄弱(刘海龄等，1995；陆志坚，1989)。我国是一个海洋大国，有18 000 km的漫长海岸线。海岸带地区是人口密度最大的地区，也是经济最发达地区。我国26个主要海岸带城市中，88%的海岸带城市都是水资源短缺型城市。我国海岛众多，面积大于500 km^{2}的岛屿有6 500多个，面积在500 km^{2}以下的岛屿和岩礁约10 000个；其中许多海岛远离大陆，交通不便，淡水资源短缺。水资源短缺对我国海岸带城市和海岛的经济和社会发展已经产生了巨大影响，因此开展我国近海海域海底第四纪淡水资源调查研究、查找海底供水水源地是非常必要的。

舟山市地处长江口东南、杭州湾外缘的东海近海海域，是由众多海岛组成的重要的旅游、港口和渔业城市。舟山群岛区内共有1390个岛屿，有人居住的岛屿98个。位于舟山市东北部、远离舟山岛的嵊泗县，为严重缺水地区；由于境外引水与境内输水都很困难，海水淡化成本太高，进一步修建各种蓄水工程又受空间所限，使当地居民用水严重短缺。从20世纪90年代开始，浙江省地质矿产局和上海海洋地质调查局等单位就在舟山北部海域采用单道地震、水文地质钻探、抽水试验等方法开展旨在寻找海底长江古河道淡水资源的调查工作，对区内的海底淡水资源有了一定的认识。但是，对于区内第四纪地层分布、沉积环境、古河道分布和含水层水文地质特征等研究程度还非常有限。为此，青岛海洋地质研究所2009年开始实施了国土资源大调查项目——“舟山海域海底淡水资源调查与评价”。

1 资料来源

2009年8～9月，采用Delph Seismic数字地震采集系统，气枪震源，压强选用2000 PSI，激发间隔选用6 s，在舟山北部海域完成了高分辨率单道地震测线2230 km(图1a)。对于获得的每条地震测线，进行频谱分析和频率扫描，得出有效频带，然后选择相应的参数进行带通滤波和道平衡，完成单道地震数据的处理工作。

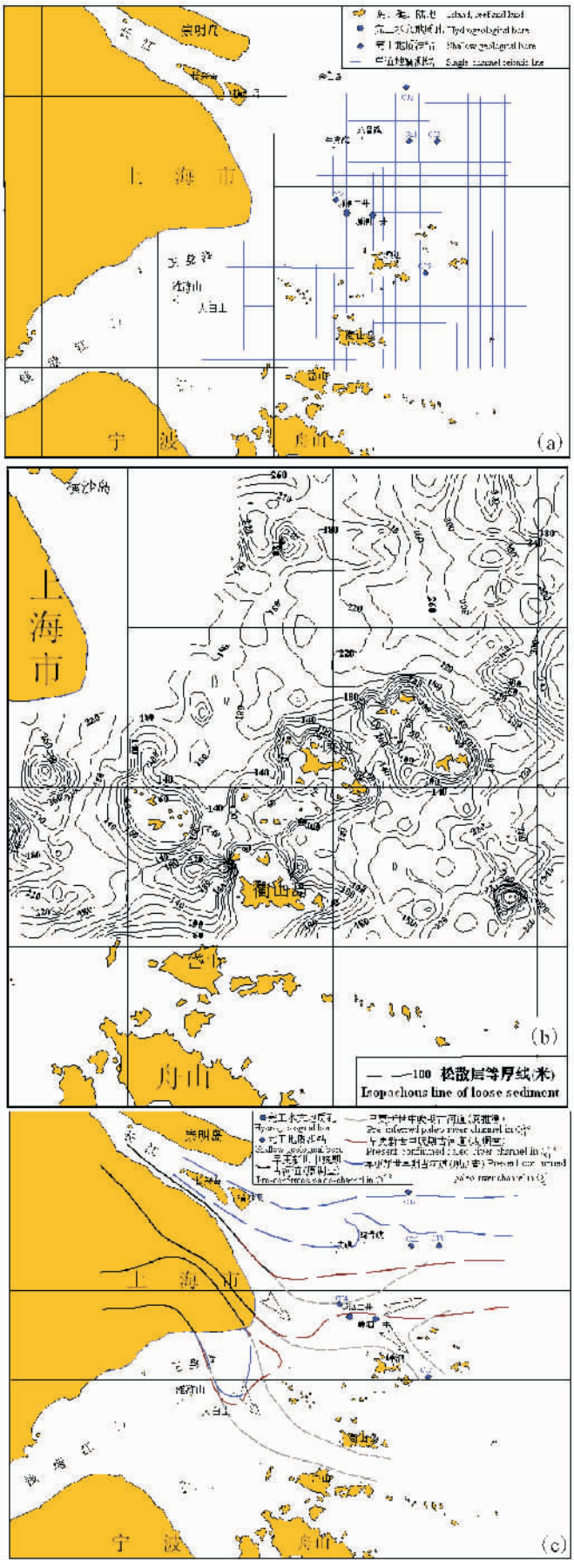
2 上海市区域水文地质特征和古河道分布

在舟山海域邻近的上海长江三角洲陆地地区，第四系划分为更新统和全新统(更新统又分为三个

注：本文为国土资源大调查项目(编号 1212010914044)的成果。

收稿日期：2010-05-09；改回日期：2010-09-07；责任编辑：章雨旭。

作者简介：张志忠，男，1965年生。博士，研究员。主要从事水文地质、环境地质研究。通讯地址：266071，山东青岛市福州南路62号海洋地质研究所；电话：0532－85755831；Email：zhangzzcy@163.com。



亚统：下更新统 Q_1、中更新统 Q_2 和上更新统 Q_3），十个组（Q_1^1、Q_1^2、Q_1^3、Q_2^1、Q_2^2、Q_3^1、Q_3^2、Q_h^1、Q_h^2 和 Q_h^3），Q_1 的下组 Q_1^1 下段为含砾中粗砂，局部夹黏土及亚黏土，属冲洪积相，底界埋深 280～350 m；上段为黏土、亚黏土、亚砂土，属湖相，底界埋深 249～287 m；中组 Q_1^2 下段为含砾中细砂、中粗砂，底部见砂砾层，局部变为黏土，为河流冲积相，亦见有湖相，底界埋深 218～265 m；上段为黏土、亚黏土，夹砂层，属湖相，底界埋深 195～255 m；上组 Q_1^3 下段为细砂、中细砂，夹亚砂土及亚黏土，属河流冲积相，底界埋深 180～210 m；上段为黏土、亚黏土，夹粉细砂层，属湖相，亦见河流冲积相，在南汇滨岸地带见海陆过渡相，底界埋深 165～170 m。Q_2 的下组 Q_2^1 为含砾中粗砂，含砾中细砂，局部夹亚黏土，属河口相，底界埋深 135～150 m；上组 Q_2^2 下段为细砂夹粉砂或亚砂土，属河湖相；中段为中细砂或砂砾，上段为黏土及亚黏土，属海陆过渡相地层，底界埋深 122 m。Q_3 的下组 Q_3^1 为粉细砂，中上部夹亚黏土、亚砂土，河口沙岛区为砾质中粗砂与中细砂互层，属海陆过渡相，底界埋深 83～101 m；上组 Q_3^2 下段为亚黏土、亚砂土夹薄层粉砂，河口砂质组分增加，为滨海深湖相；中段为亚黏土夹亚砂土、粉细砂，为滨岸浅海相；上段为暗绿色硬黏土和灰黄色亚黏土、亚砂土，属湖泊相；底界埋深 64～81 m。Q_h 的下组 Q_h^1 下段为粉细砂、亚砂土为主，底部见砾石，属潮汐河道—边滩相；上段为黏土、亚黏土夹粉细砂，属滨海相，底界埋深 23～62 m；中组 Q_h^2 下段为淤泥质黏土，上段为粉砂、亚黏土、亚砂土，属滨海—浅海相，底界埋深 20～40 m；上组 Q_h^3 下段为粉砂夹亚黏土，上段为粉砂、亚黏土、亚砂土，属河口相地层，底界埋深 5～10 m。

按照地质时代、水动力条件和成因类型，上海地区第四系松散岩类孔隙含水层可划分为七个含水层，即全新统潜水、微承压含水层，上、中更新统

图 1 舟山北部海域单道地震测量测线位置及综合解译成果：(a) 测线位置图；(b) 松散层等厚线图；(c) 古河道位置初步结果

Fig. 1 Locations of high-resolution single channel seismic lines and integrated results of interpretation at north Zhoushan sea area: (a) locations of single-channel seismic lines; (b) isopachyte of loose sediment; (c) primary result of submarine paleo-river channels locations

承压含水层(第一、二、三承压含水层)和下更新统含水层(第四、五承压含水层)。浅部的第一、第二、第三含水层水质都较差;较深处的第四(顶板埋深160.0～180.0 m)、第五承压含水层(顶板埋深250.0～280.0 m)是富水性最好的淡水(矿化度小于 1 g/L)含水层,是上海地区良好的饮用水源和开采量非常大的含水层;第四承压含水层主要为早更新统中晚期古河道地层,含水层顶板为一层分布普遍而稳定、厚度 20～40 m 的致密硬粘土隔水层,阻断了本含水层和上部含水层之间的联系(张卫等,1999)。

上海市第四纪覆盖层中,表现的古气候变化有六个寒冷期和与之相邻的五个温暖期和冰后期。在早更新世早期开始出现第一寒冷期,之后在早更新世中期和晚期相继出现了第二、第三寒冷期和第一、第二温暖期,但在这两个温暖期出现的海侵范围均较小,仅在本区东部沿海见到薄层海相层,本区主要为陆地、湖泊、河流环境;在中更新世第三个温暖期以后的温暖时期由于海侵规模大(范围已达上海绝大部分地区),相邻陆相含水层中淡水大多数受海侵影响而变为咸水和半咸水。经过大量的第四纪地质、水文地质钻孔研究,发现上海地区在早更新世存在 2 条古河道:北部一条为浏河—南汇古河道,可能属于古长江水系,从江苏的浏河经宝山至川沙、南汇,最后在南汇泥城角及东海农场一带入海;南部的另一条为枫泾—奉城古河道,可能属于古钱塘江水系,自西向东由枫泾一带进入上海地区,经金山、松江,南汇的新场折向南去,在奉贤五四农场、燎原农场一带进入杭州湾(陆志坚,1989;李家彪,2008)。

大陆架是沿岸大陆被海水淹没的浅海地带,陆地上观测到的岩层与构造往往向浅海下延伸。据此,从区域地层和沉积环境分析推断,在邻近上海长江三角洲陆地地区的舟山北部海域,海底第四纪淡水资源最有可能赋存于下更新统地层(对应于上海地区的第四、五承压含水地层)中,以相对比较封闭的下更新统陆相砂层(特别是埋藏古河道中的厚层砂层)最有可能储存可饮用的淡水资源。鉴于上述情况,海底淡水资源调查重点应主要集中于第四系下部的下更新统地层上。

3　舟山北部海域第四纪地层层序、厚度和古河道分布

对于舟山北部海域 2009 年取得的单道地震测量资料,根据沉积地质学、地震地质学和层序地层学原理,并参考调查区内已有钻孔(嵊泗一井、嵊泗二井、CH1、CJ3、CJ4 和 CJ5)资料,对调查区内第四纪地层划分成了 14 个区域性的地震反射界面(从上到下编号为 T0～T13)和 14 个地震单元(U1～U14)(图 2a),地震单元 U1、U3、U5、…、U13 为海相层;地震单元 U2、U4、U6、…、U14 为陆相层。U1～U5 分别为相当于氧同位素 1 期～5 期的地层,U6 以下由于深部钻探资料较少无法进行准确的时代界定

由于舟山北部海域岛礁众多,海底起伏较大。除岛礁区为基岩直接出露外,海底均被第四纪松散沉积物所覆盖。海底基岩界面在单道地震剖面中一般都有区别于上下地层反射特征的明显的强反射相位,比较容易识别(图 2a)。通过单道地震资料解译成果得出:舟山北部调查区海底第四纪松散地层厚度为 0～432.9 m,分布变化很大,在很多区域地层发育不全(图 1b)。

从图 1b 中可以看出,在嵊泗县城和牛皮礁、鸡骨礁之间,除岛礁附近区域以外,海底第四纪松散地层沉积比较平稳,厚度变化不大,一般为 180 m 左右,牛皮礁和鸡骨礁北部有变厚趋势。向调查区的东北和东侧方向,海底松散沉积物变化较大,有逐渐增厚趋势。调查区的西南杭州湾偏北湾口处,海底存在一沉积洼地,松散沉积物最大沉积厚度达 373 m。调查区南部除西南侧岛礁附近以外,海底松散沉积物厚度总体呈现向东和南方向,有增厚趋势。

从 2009 年的单道地震剖面中可以看到许多不同规模、不同时代的古河谷或谷状地形,内部大多已被充填。部分地段可见复合河谷,内可见杂乱堆积,河道侧向迁移频繁,隐约可见数个小河谷,并有谷叠谷、谷中谷的现象(图 2a),说明河道的发育有继承性。通过地震层序与区内“嵊泗一井”和“嵊泗二井”地质钻探成果分析,结合邻近调查海域的上海陆地区域地质资料经过综合对比分许,初步确定了调查海域早更新世中晚期(相当于上海地区的第四承压含水层)、早期(相当于上海地区的第五承压含水层)长江和钱塘江古河道的位置(图 1c)。

在早更新世中晚期,北部的长江古河道自南汇东部向东海大陆架延伸,进入大戢洋北部,通过嵊泗列岛和“嵊泗二井”以北,牛皮礁、鸡骨礁以南海域向东延伸;南部的钱塘江古河道经奉城进入滩浒山、大白山以北的王盘洋;与前人的预测有较大的出入(陆志坚,1989)。

在早更新世早期,北部的长江古河道自长兴岛、横沙岛向东海大陆架延伸,到达牛皮礁、鸡骨礁的西

北部，自鸡骨礁的北部向东延伸；南部的钱塘江古河道与早更新世中晚期时的古河道位置基本相同，也是在滩浒山、大白山以北的王盘洋，只是分布范围略小。

上述古河道分布主要是建立在对 2009 年完成的 2230 km 单道地震调查资料的初步分析基础上

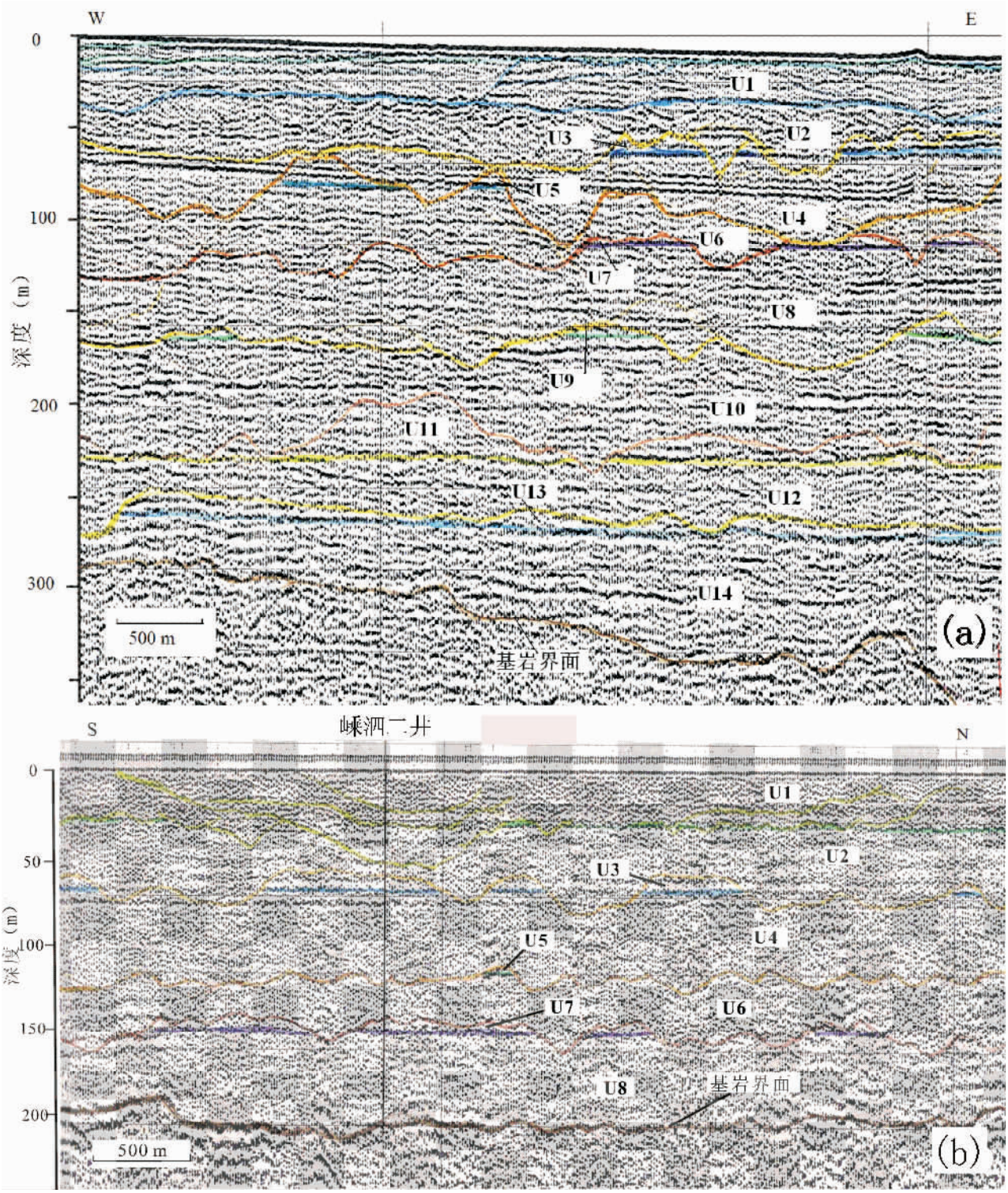


图 2 第四纪地层单道地震典型剖面

Fig. 2 Typical profiles of high-resolution single channel seism in Quaternary strata

(a) 第四纪地层地震单元划分；(b)切穿嵊泗二井的单道地震剖面

(a) classification of seismic units in Quaternary strata; (b) single-channel seismic profile across No. 2 well of Shengsi

的,有较强的调查依据。据与舟山北部海域古河道分布原推测者讨论得知,前人对海域的古河道分析预测可能主要是建立在对舟山北部海域海底地形地貌和少量单道地震调查资料基础上的,依据不充分,所以可靠性相对较差。

4　舟山北部海域海底淡水资源研究

1993 年 1～2 月,根据已有的舟山嵊泗附近海域地质、地球物理调查研究结果,上海海洋地质调查局利用"勘探二号"石油钻井平台在嵊泗以北 15 km 处海域实施了"嵊泗一井"(坐标为:北纬 30°53′34.88″,东经 122°25′25.05″),该孔揭露基岩面以上第四纪地层总厚度 191.5 m,通过水文地质钻探、地质录井、物探测井和在下更新统上段三个砂层(第四砂层 Q_1^{3c}、第五砂层 Q_1^{3b} 和第六砂层 Q_1^{3a})层段中进行的简易抽水试验等工作。结果表明,第四(Q_1^{3c})、六(Q_1^{3a})、七(Q_1^{2})三个主要淡水含水层段(相当于上海地区的第四承压含水层)具有开采价值。

2007 年 5～6 月,中国煤炭地质总局第三水文地质队实施了"嵊泗二井"(WGS-84 坐标为:北纬 30°54′12.5147″,东经 122°18′42.3918″),该孔揭露基岩面以上第四系地层总厚度 201.0 m。通过地质钻探(部分层段取芯)、岩屑录井、物探测井和样品孢粉分析等将揭露的地层自下而上可划分为下更新世(Q_1)、中更新世(Q_2)、上更新世(Q_3)和全新世(Q_h),共揭露三个含水层,第Ⅰ承压含水层(相当于上海地区的第一、第二承压含水层)位于海底黏性土以下 41.50～57.35 m,第Ⅱ承压含水层(相当于上海地区的第三承压含水层)为 70.00～125.00 m,第Ⅲ承压含水层(相当于上海地区的第四承压含水层)为 139.33～182.00 m,含水层顶、底部都有较厚的隔水黏土层。通过抽水试验查明第Ⅰ含水层单井涌水量为 30.7 m^3/h,矿化度为 1.277 g/L,水质类型为 Cl、HCO_3—Na、Ca 型,水质较好,接近可饮用水标准,可作为饮用水水源。第Ⅲ含水层单井涌水量为 119.3 m^3/h,水量较为丰富,矿化度为 8.131 g/L(李家彪,2008),水质类型为 Cl—Na 型,为微咸水。

从 2009 年完成的穿过"嵊泗二井"南北向的单道地震剖面(图 2b)可以看出,嵊泗二井揭露的第四纪地层对应于 U1～U8 共 8 个地震单元,和调查区第四纪地层发育完全区域的 14 个地震单元相比,缺乏下部 6 个地震单元,虽则依靠井中岩屑和少部分岩心样品通过孢粉分析等资料判定"嵊泗二井"下部存在下更新世地层,但从单道地震等资料来看基本可以判定下更新世地层发育不全,因此"嵊泗二井"进行抽水试验的第Ⅲ承压含水层可能并不能对应上海地区所称的第四承压含水层,可能是第三承压含水层和第四承压含水层的混合层,"嵊泗二井"附近海域海底早更新世的第四承压含水层仍可能存在淡水资源。

从 2009 年完成的单道地震测量解释成果来看,U8 地震单元以下,海相层都不太发育、厚度较薄,而陆相地层很发育、沉积厚度较大,对淡水资源的赋存比较有利。从调查海域海底第四纪地层分布和古河道初步分析结果可以看出,舟山北部海域的西部钱塘江口北侧、嵊泗列岛和"嵊泗二井"以北、嵊泗东北部海域第四纪松散层发育、早更新世古河道分布区可能是海底淡水资源丰富区,应该作为进一步调查研究的重点。

5　结论

舟山北部海域,第四纪地层可划分为 14 个地震单元,海底第四纪松散地层厚度为 0～432.9 m,分布变化很大。根据 2009 年的调查资料,初步圈定了调查海域存在的早更新世中晚期(相当于上海地区的第四承压含水层)、早期(相当于上海地区的第五承压含水层)长江和钱塘江古河道的位置。根据邻近陆地上海长江三角洲地区区域水文地质条件和舟山北部海域的调查研究成果,认为调查区西部钱塘江口北侧、嵊泗列岛和"嵊泗二井"以北、嵊泗东北部海域第四纪松散层发育,所圈定的早更新世古河道分布区可能是海底淡水资源丰富区。

由于调查研究区目前还缺乏切穿第四纪松散层的地质孔和详实的地质资料,水文地质调查也不系统,所开展的第四纪地层层序、沉积环境、水文地质条件分析研究只是初步结论,随着调查工作的进一步开展对于海域的水文地质条件研究程度将会得到更大提高。

参　考　文　献　/　References

郭占荣,黄磊,刘花台. 2008. 镭同位素示踪隆教湾的海底地下水排泄. 地球学报,29(5):647～652.

李家彪. 2008. 东海区域地质. 北京:海洋出版社,600～615.

刘海龄,吴世敏,杨树康. 1995. 初谈海底淡水资源的形成条件与开发意义. 海洋科学,19(5):32～33.

陆志坚. 1989. 从上海地区地下淡水古河道含水的分布探讨嵊泗列岛的供水问题. 上海地质,(1):23～26.

张卫,覃小群,易连兴. 1999. 上海地区地下水系统及地下水资源特征. 中国岩溶,18(4): 343～351.

Fleury P., Bakalowicz M., de Marsily G.. 2007. Submarine

springs and coastal karst aquifers: A review. Journal of Hydrology, (339): 79～92.
Mijatovic B. 2007. The groundwater discharge in the Mediterranean karst coastal zones and freshwater tapping: set problems and adopted solutions. Case studies. Environment Geology, (51): 737～742.

Primary Study on Submarine Freshwater Resources in North Zhoushan Sea Area

ZHANG Zhizhong[1,2), ZOU Liang[1,2), HAN Yue[2,3)

1) *The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao, Shandong*, 266071;

2) *Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao, Shandong*, 266071

3) *Ocean University of China, Qingdao, Shandong*, 266100

Abstract: Based on data from high-resolution single-channel seismic surveys in 2009, former investigation data and neighboring terrestrial hydrogeological data at the Yangtze River delta of Shanghai, writers interpreted, analyzed and studied all seismic data synthetically. Distributing feature of submarine Quaternary sediment was found out. Locations of paleo-river channels of Yangtze River and Qiantang River during the early Pleistocene were probed primarily. The study has revealed that at north of Qiantang River mouth, west to survey area, north Shengsi archipelago and No. 2 Shengsi well, and northeast sea area of Shengsi, the Quaternary stratum is very thick, the predicted distribution areas of paleo-river channel in early Pleistocene are possible abundant areas of marine freshwater resources. These data and conclusions may be helpful in further investigation of submarine freshwater resources and lay scientific basis on submarine freshwater sources exploitation at north Zhoushan sea area.

Key words: submarine freshwater resources; high-resolution single channel seismic surveys; paleo-river channel; north Zhoushan sea area

新疆塔县盆地地热显示与热储温度预测

庞忠和,杨峰田,袁利娟,李义曼

中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100029

塔什库尔干塔吉克自治县位于帕米尔高原东南部,地理和构造位置独特。西与塔吉克斯坦、阿富汗和巴基斯坦三国接壤,为314国道上通往中亚的重镇和新疆著名旅游区。构造位置属帕米尔构造结,为我国大陆上受板块运动作用最为强烈的地区之一。

以往文献记载的新疆温泉温度皆低于60℃。2001年以来,新疆地矿局第二水文工程地质大队在该区开展地热普查,已发现若干处地热异常,勘查孔钻遇的热储最高温度达101℃。

为阐明该区地热系统的成因与资源潜力,笔者等2010年夏对该区进行了地热地质考察。在对冰川地貌、冰川沉积、新构造及温泉调查,特别是塔什库尔干河岸带温泉群的发现的基础上,认为该区有形成高温地热资源的地质条件。基于区内水样的水化学和同位素组成,分析了该区地下水的循环条件,并预测塔县盆地地热系统的热储温度为173～191℃,提出其成因模式为高温对流型。

在地中海—喜马拉雅全球高温地热带上,我国已有藏南、滇西的高温地热系统发现,但在新疆尚属首次。塔县高温地热田是陆—陆碰撞构造结的新典型,原有的"滇—藏"高温地热带得以向西延展,形成"滇—藏—新"地热带。

1 自然地理概况

研究区位于塔什库尔干(塔县)盆地北部,海拔3050～3800m。地势南北高,中间低。塔县盆地呈近南北向狭长展

收稿日期:2010-10-20;改回日期:2010-10-29;责任编辑:章雨旭。

作者简介:庞忠和,男,1961年生。博士,研究员、博士生导师。主要从事水文同位素与水循环、水文地球化学与水岩相互作用及水文地热学与水热耦合过程研究。Email: z.pang@mail.iggcas.ac.cn。