

海岛地下淡水资源开发利用与海水入侵防治

李国敏

中国科学院地质与地球物理研究所
(北京市德外祁家豁子, 100029)

摘要 与盆地的地下水资源系统相比,海岛地下水系统具有独特的补给、径流与排泄特点以及地下水动力学特征,即地下淡水需要保持向海水的一部分排泄量(或一定的水力梯度)才能与浓度驱动下的盐分向内陆方向的扩散得到平衡,形成相对稳定的咸淡水过渡带。由于这一特点,海岛地下淡水资源评价具有独特性,即一方面可开采利用的资源量小于补给量,另一方面如何布置开采方案与海水入侵密切相关。鉴于海岛地下淡水资源的宝贵性,结合地下水资源优化开采配置的海水入侵模拟与预报模型研究,分析在各种自然和人为活动条件下,介于地下淡水资源与海水之间的咸淡水过渡带的变化与运动规律,并进行各种风险评价,以得到最大程度的开发利用宝贵的海岛地下淡水资源,又能有效的控制、防止和减轻海水入侵危害的目的也显得特别重要。本文以广西北海市围洲岛淡水透镜体为例进行了分析与讨论。

关键词 海岛 地下淡水透镜体 地下水动态 海水入侵 数值模拟

作者简介: 李国敏,男,水文地质学专业博士。中国科学院“百人计划”入选者,地质与地球物理研究所研究员、博士生导师、地下水资源与环境学科组组长。现主要从事地下水资源与地下水污染数值模拟研究。

我国有漫长的海岸线和众多海岛:分布于我国大陆沿海大陆架、大陆斜坡及深水海盆中的岛屿计有 5000 多个;大陆海岸线北从中朝交界的鸭绿江口起,南至中越交界的北仑河口止,总长度约为 18000km(雷宗友,1988)。海岛的地下淡水资源开发利用与海水入侵研究有其特殊的重要性,这是因为:①全世界范围内的沿海地区和海岛,特别是三角洲和海港及旅游点周围,人口密度日益增高;②越来越多的远离陆地的海岛成为国防与海洋资源开发的基地;③许多海岛含水层范围有限,特别是完全与内陆隔离的小岛。随着我国沿海地区经济的高速发展与国防现代化的加速,海岛的水资源供需矛盾日益突出,目前已经在部分海岛发生了海水入侵危害,并在大多数开发的海岛存在着海水入侵等环境地质问题的势头,这一环境地质问题已经成为制约海岛开发与利用中经济、资源和环境可持续发展的瓶颈。开展海水入侵研究,制订海岛上合理的地下水开发利用与管理方案,防止和减轻海水入侵的危害,具有重要的理论意义和实用价值。

海水入侵的理论上溯到上世纪末与本世纪初。Ghyben 和 Herzberg 分别于 1888 年和 1901 年在荷兰和德国独立地提出了计算地下淡水—海水交界面的方法,即著名的 Ghyben—Herzberg 公式。近百年来,海水入侵模型研究经历了从理论假设到合理概化,从理想模型、室内实验模型到数值模型这一漫长的过程。Bear(1972, 1979)和 Custodio 等(1987)对海水入侵进行了较系统的阐述。

概括起来,研究海水入侵的模型按研究手段不同可分为实验室模型与理论模型,理论模型又分为解析模型与数值模型;按研究对象又可分为突变界面模型与基于海水—淡水以弥散带接触的过渡带模型;按研究地理单元又可分为海岸模型

与海岛模型。数值模型具有可以刻画复杂水文地质条件、人为活动条件等诸多因素影响下的咸淡水界面或过渡带运移规律的优点，在 70 年代之后，随着计算机的发展与普及，已被众多学者用于研究海水入侵问题。

一些学者利用解析法开展海岛地下淡水透镜体的动力学研究。例如 Vacher 等(1992)利用了考虑裘布依假定的 Ghyben-Herzberg 模型对巴哈马的 Bermuda 和 Great Exuma 岛进行了模拟计算，两岛具有相同的含水层，但淡水透镜体的形态相差却很大，模拟研究表明气候条件的差异是主要原因。Hunt(1979)对多哥共和国 Tongatapu 岛及 DasGupta 等(1993)对斯里兰卡 Mannar 岛的研究也具有特色。

海岛海水入侵过渡带模拟多由剖面二维模型完成。由美国地质调查局 Voss 所设计的考虑密度、水头与浓度相互作用的饱和-非饱和带中地下水流动与溶质运移或热量运移的 SUTRA(二维有限元软件)常被用于模拟海岛的剖面二维海水入侵问题。Voss 等(1987)用 SUTRA 模拟了美国夏威夷 Oahu 岛南部的层状玄武岩含水层中的海水入侵问题。Underwood 等(1992)利用 SUTRA 剖面二维模型模拟和分析了各种因素对双层珊瑚岛地下水系统中淡水透镜体的大小、过渡带结构及潮汐波动传播的影响。Griggs 等(1993)也利用 SUTRA 模拟了 Marshall 群岛 Majuro 岛 Laura 地区的剖面二维地下水流动问题，并进行了灵敏度分析。结果表明，50%的海水浓度等值线的深度对渗透系数很敏感，过渡带的宽度对横向弥散度很敏感，并指出线状布置的浅井或沟是开采淡水比较好的方法。艾康洪(1993)采用上游加权有限元方法建立了考虑密度、水头与浓度相互作用的剖面二维海水入侵模型，并用于广西漫尾岛咸淡水过渡带的数值模拟。李国敏(1994)利用 Leismann 和 Frind(1989)所提出的引入人工弥散量和加权方法建立了考虑密度、水头与浓度相互作用的三维有限元海水入侵模型，用于广西北海市涠洲岛的海水入侵模拟与分析。此外，Buxton 等(1992)用三维有限差软件 MODFLOW(McDonald 等,1988)的地下水流动程序与粒子追踪格式 (particle-tracking)模拟了纽约州长岛的地下水补给区。

井孔在界面上部抽水所引起的升锥也是众多学者研究的一个重点，这对开采井布置与开采方案的设计十分重要。Bear 与 Dagan 提出了以裘布依假定为基础的近似公式(Bear, 1979)。Mozt(1992)提出了越流含水层中因抽水而引起突变界面升锥问题，并用于分析美国佛罗里达州 Pasco 县的实例。Das Gupta 等(1988)、和 Hunt(1985)等还分别从不同角度研究了升锥问题的解析模型。Liu 等(1981)和 Taigbenu 等(1984)用边界元方法研究了二维的海水入侵位置及抽水所引起的界面升锥问题。

海岛地下水位潮汐波动规律的研究是与海水入侵有关的课题。由于地下水位的潮汐波动，传统的抽水试验效果不好甚至失败，而勉强计算参数时不得不对观测资料进行校正。抽注水试验会引起观测孔中的水位变化，而海潮的波动也引起了观测孔中水位的周期性变化，因此可以合理地直接利用水位潮汐动态求参。可通过建立解析公式，获取有关参数，为进一步的海水入侵研究或滨海地下水资源评价提供初步的参数或边界条件。Carr 等(1969)给出了地下水头波动的解析模型。李国敏(1987)利用复变函数导出了上述公式并用于实地估算广西涠洲岛的含水层参数。Van der Kamp(1972)给出了承压含水层顶板向海底无限延伸假定下的地下水头动态公式。李国敏(1988)和李国敏等(1991)将 Jacob 和 Van der Kamp 的两个极端公式统一起来，给出了承压含水层向海底有限延伸条件下的动态公式，并用于估算广西北海第一承压含水层在海底的等效边界。Nielsen(1990)给出了考虑潮间带坡度时地下水头的动态公式。Erskine(1992)、Yim 等(1992)、

Serfes(1991)、Inouchi 等(1990)、柿沼忠男(1988)也分别研究了地下水动态问题或地下水动态对界面浓度的影响。

综上所述,滨海与海岛含水层中的海水入侵研究经过近百年的努力,已经取得了众多成果。数值方法已逐渐成为模拟和求解海水入侵问题最有力的工具。海水入侵的过渡带模型将成为研究的方向。本文分别以广西北海市围洲岛淡水透镜体为例,探讨如何利用地下水水质模型为工具,根据水文地质条件,来预测咸淡水过渡带的变化与发展趋势,为管理与决策部门提供各种可能的计算结果,从而达到海岛地下水资源管理与规划的具体目标,同时有效的控制与防止海水入侵的环境地质危害。

一. 涠洲岛水文地质条件与地下水循环特征

涠洲岛位于广西北部湾,是由火山喷发所形成的岛屿,地势南高北低,最高海拔 79.7m。地表无长期性河流,在岛的北部、东部及低洼地带有小流量泉水出露,垂直海岸线方向的冲沟较发育。有一小型水库。

1. 水文地质概况

根据地质条件与地层组合,涠洲岛含水层系统由上向下可分为火山岩含水层与砂砾孔隙含水层。火山岩含水层还可据介质特点分为玄武岩孔洞—裂隙含水层与火山碎屑孔隙含水层。由于各层垂向上的叠置,以及它们之间垂向上补给的同源性,使其构成一个统一的含水层系统,如图 1 所示。其中咸淡水分界线是根据 Ghyben—Herzberg 公式所圈定的。位于岛屿中部的一观测孔,潜水位标高 11.20m,下伏砂砾碎屑孔隙含水层中的地下水位仅 3.4m,水头差为 7.8m;而近海的一些观测孔中,上下层中水头差减小并发生逆转。这反应出在岛的中部地下水自上向下补给,而近岸处地下水自下向上流动。在岛的边缘地带,已有多组钻孔在不同深度揭露到咸水,勾绘出地下水系统为一“漂浮”在海咸水之上的淡水透镜体。(1)

2. 地下水循环特征

降雨是涠洲岛地下水的主要补给来源。本区年降雨量大(多年平均 1380.1mm,1990 年为 1491.7mm),火山斜坡地形平缓,加上表层红土渗透能力强,对降雨入渗非常有利。每次较大的降雨过程,潜水位都有明显的上升。而一般的降雨,很少形成地表径流。水库入渗也是本区地下水补给的来源之一,位于该岛西北部。

地下水的排泄主要经过如下几种途径:径流排泄、人工排泄、蒸发排泄。径流排泄呈与海岛一样的丘状辐射潜流入海,只在局部河谷岸边以切割下降泉的形式排泄;人工排泄是通过开采井与民井向岛上军民生活及菜田灌溉供水,是地下水的一种主要排泄方式。蒸发排泄是指近地表的地下水通过地面蒸发,植物蒸发等形式排泄。

在总体上地下淡水体呈“鸡蛋”状“漂浮”在咸水之上。在平面上,地下水从岛的中央流向岛的边缘,垂向上看,地下水先向下流动,在界面附近部分转向

(1) 钟振福,蒋同根等,1990,北海市涠洲岛战备工程供水勘察水文地质报告,广西壮族自治区北海地质矿产勘察公司。

斜上方运动并指向岛边缘，部分则在“界面”附近与下伏咸水混溶。“界面”是指在水动力弥散作用下所形成的咸淡水过渡带。

3. 地下水动态

降雨是影响海岛中部地下水动态的主要因素，近海地带地下水动态还受潮汐效应的影响，此外人工开采也是影响局部地下水动态的因素。因此地下水动态变幅受到补给与排泄条件的影响。地下水动态类型为人渗—径流型。

潜水水位动态规律与降雨的规律性一致。进入雨季后，潜水位随着降雨量的多寡而波动因含水层富水性、所处地形不同而有所区别，地形高的地方井水位年变幅 1.3~5.1m，低洼处只有 0.14~0.9m，玄武岩中水位年变幅达到 3~5m。

在近海岸地带，承压水与潜水的水位动态随着海潮的波动而发生周期性的波动。

4. 海水入侵现状

涠洲岛是我国南海北部湾的海防前哨，其附近海面是北部湾重要的渔场。该岛南湾一带是一个天然弧形港湾。每年 9 月至次年 1、2 月渔汛期间，来自各地的捕鱼船只众多。本区降雨多集中在 5—10 月间，岛上又无常年溪流，水利设施较少，干旱现象时常发生。为了满足生活、生产及军防用水，1962 年之后曾先后钻探深井取水，使用水条件得到了改善。

早期的工作主要解决南湾街附近的军民用水问题，钻井过于集中，这样就带来两个问题：一是对全岛地下水淡水资源无法全面系统地调查和开发利用，布井过密使抽水效果降低；二是因井位邻近海水，密度过大而引起海水入侵，导致抽水井水质变咸而报废。随着岛上生产与旅游业的发展，用水量不断增加。北海地矿公司在该岛中部建立供水工程，抽取玄武岩含水层中的地下水，使岛上用水矛盾得到了缓解。从地下水系统的角度看，加大玄武岩潜水含水层的人工排泄量，会对整个地下水系统产生影响。在多大程度上破坏原有的咸淡水平衡，尚有待于进一步研究。

因此，从整个水文地质条件与地下水系统—地下淡水透镜体出发，建立海水入侵的数值模型，查明并模拟海水入侵的主要影响因素及发展趋势，对制定涠洲岛地下水开采的合理规划及控制和治理海水入侵具有现实的指导意义。

二. 含水层参数值的初步界定

1. 用地下水潮汐动态确定玄武岩含水层导水性及给水度

由于海洋的潮汐波动，使滨海含水层中的地下水位作相应的周期性潮汐波动。海水涨潮时，首先是在近海区含水层中的地下水位抬高，并存在衰减及滞后现象；落潮时则相反(李国敏，1988；李国敏，陈崇希，1991)。衰减是指从观测孔测出的水位波动幅度小于海潮波动幅度，滞后是指观测孔中所测出地下水位潮汐的峰值(或谷值)要滞后于对应海水潮汐的高潮(或低潮)水位。愈远离海岸，地下水位潮汐衰减得越快，滞后时间也愈长。

传统的含水层求参数方法是基于抽水试验所引起观测孔中地下水位降深来确定含水层的导水系数或给水度，此法在近岸含水层中难以奏效。这是因为某些观测孔中的地下水潮汐动态严重地干扰了因抽水而引起该孔中的水位降深，甚至在涨潮段，抽水后在观测孔中的地下水位却在上升。

但实际上观测孔中的地下水位潮汐动态特征反映了含水层的导水特性以

及其在向海方向上的边界条件等信息,它是一种丰富的信息源。根据地下水动力学原理,结合实际的水文地质条件,可以建立地下水位潮汐动态的数学模型,得出地下水位的动态公式。通过对实际的长期观测孔中水位动态资料分析,可以帮助我们确定含水层的某些参数(Carr 等, 1969),并有助于认识含水层的导水特性及在临海方向上的边界条件(Li 等, 1991; Drogue 等, 1984)。李国敏(1992b)应用潮汐方法所求出的玄武岩含水层的水力传导系数、给水度,可作为海水入侵模型中的参数初值。另外,广西北海地矿公司据抽水试验及广西水文队据降雨后水位动态所计算出的火山含水层的渗透系数 K 为 16.39m/d , 降雨入渗系数为 0.267 , 可作为数值模型反求参数及模拟时参考。

2. 砂砾碎屑孔隙含水层水流参数

广西涠洲岛存在的湛江组孔隙含水层,是附近内陆地区广泛分布的地层。其岩性与北海半岛一致,由上部粘土层与下部的中粗砂层构成。我们曾对北海禾塘村水源地进行地下水流动的准三维流数值模拟(陈崇希等, 1989(2); 李国敏, 1988),反求出一系列含水层的参数,可作为涠洲岛相应含水层的初始参数范围,用于海水入侵动态的模拟。这些系数是:上部粘土垂向渗透系数 $0.0212\sim 0.6552\text{m/d}$;下部砂层渗透系数 $10.31\sim 64.46\text{m/d}$ 。降雨入渗系数 0.4 左右。

湛江组下部的雷琼组,仅有几个钻孔揭露,进行的水文地质工作较少。由于其岩性较上部湛江组为细并多夹粘土层的特点,参考湛江组参数,雷琼组应取较小的渗透系数和较大的弹性给水度作为数值模型的初步参数。

3. 弥散度

弥散度是海水入侵过渡带模型及其他地下水运移问题中最重要的参数之一,它影响着过渡带或污染带的形状与范围。弥散度一般通过野外弥散试验或模拟显著的溶质运移过程来获取。在涠洲岛海水入侵模型研究中没有进行弥散试验,海水入侵仅发生在局部范围。为何还要进行海水入侵模型研究?弥散度参数如何取得呢?这是基于如下考虑:一是弥散试验代价昂贵并且难以保证达到设定目标。一次野外弥散试验需要投入大量的人力与物力,往往由于含水层空间结构的不确定性导致事先设计的弥散试验难以保证满足预期的效果。二是若示踪剂选择不当还会对海岛有限的地下淡水资源造成污染。三是由于含水层结构的非均匀性,使成功的弥散试验所求出的弥散度值具有尺度效应。四是海水入侵研究超前性的重要性,我们不能坐等海水入侵已经造成严重危害时再着手调查、研究,而应该在海水入侵的初期乃至还没有发生海水入侵时就着手设计、模拟与论证,为滨海及海岛有限的宝贵的地下淡水合理开发利用,及防治海水入侵做好理论上研究及预见性分析,供决策部门参考。

根据弥散度参数的尺度效应分析结果(李国敏, 1992a),分别给出了世界范围内利用不同种类模型(解析与数值)对不同岩性(孔隙与裂隙)进行模拟分析中的百余个纵向弥散度数据的分维数,从中选取了广西涠洲岛模型研究中所涉及到的弥散度的取值范围。由于横向弥散度的数据不多,这里没有进行分维计算。一般参考文献上认为横向弥散度是纵向弥散度的 $1/5\sim 1/20$ 。为了进一步验证弥散度取值的可靠性,结合近岸供水井,建立了涠洲岛局部模型,对弥散度参数与水流参数进行了校正。

(2)陈崇希、林敏等, 1989, 滨海多含水层系统水资源评价及承压含水层海底等效边界研究——以广西北海市禾塘村水源地为例, 广西壮族自治区地矿局。

三. 地下淡水透镜体开发方案设计与海水入侵模拟

笔者(1994)利用 Leismann 和 Frind 所提出的引入人工弥散量和加权方法建立了考虑密度、水头与浓度相互作用的三维有限元海水入侵模型,将非线性数据拟合的 Levenberg-Marquadt 方法引入到海水入侵模型中并加以改进用于反求参数,采用分形理论估计弥散度初值,将地质统计中的 Kriging 方法引入模型插值计算含水层层面标高和初始水头分布。在上述基础上开发出海水入侵模拟、校正与分析的软件,并用于广西北海市涠洲岛的海水入侵模拟与分析。通过模拟计算可知,在 90 年代初的开采条件下,由 50%海水浓度所表达的海岛淡水透镜体的形状与规模与无开采条件下相比无明显的变化。除了近岸局部范围内因布井不当及开采强度与频率偏大而引起海水入侵外,在整体上咸淡水过渡带基本上保持稳定状态,海岛中部尚未遭受到海水入侵危害。

由于地下水动力系统的不同,海岛地区地下水资源评价与内陆有很大差别,在海岛含水层中,接受大气降水补给的地下淡水资源,必须保证相当一部分地下水在一定水力梯度作用下排泄入海,流动着的淡水始终不断地将水动力弥散作用面进入淡水体中的盐分携带入海,使咸淡水之间存在着比较稳定的过渡带,使淡水透镜体内部的水质保持不变。常年可利用的地下水资源量小于含水层的年平均降水补给量。

根据涠洲岛面积、降雨入渗系数及多年平均降雨量,岛上地下水资源多年平均补给量约 25000m³ / d。在 90 年代初的开采井分布条件下,等比例的增加开采井的取水量,当开采地总量达到 7500m³ / d 时,计算出了 50%海水浓度的分布所表达的淡水透镜体的形状与规模。由计算结果可知,在岛中部开采井的下部此界面有明显的升高,经过 10 年计算(取平均降雨补给量),该界面趋于稳定。说明在目前开采井分布条件下,平均开采量达到平均补给量的三分之一时尚属安全。因为开采井的设计、布置与密度、开采强度与频率都与海水入侵密切相关,因此很难确切地计算出海水入侵到岛中部开采井时的临界状态。

根据海岛地下淡水透镜体地分布与形状,在近海地区,淡水体比较薄并受潮汐波动的影响强烈,不易布置开采井。相对而言,海岛中部地区的淡水透镜体厚度较大,可以适量布置开采井。开采井的深度宜小不宜大。开采强度要以降雨补给量的一部分及模拟分析结果为限制依据。

为了进一步说明开采井的布置和密度与安全开发利用地下淡水资源(即不发生海水入侵)的密切关系,在 90 年代初的开采条件下,在海岛的中部新增加开采井的取水量,使新增开采总量达到 2500m³ / d,计算地下淡水透镜体的形状与规模。共选取三种开采方案:一口井、两口及四口等流量开采井。图 2 给出了海岛淡水透镜体在第一种方案条件下,数值模拟结果在第三节点层上的浓度等值线分布图,表明该开采方案引起了海水入侵。图 3 是通过图 2 上 AB 剖面的浓度等值线图,它清楚地表明了单一大流量抽水井开采方案在井的下方引起了明显的海咸水升锥现象。对两口井开采的第二种方案及四口井开采的第三种方案也分别进行了数值模拟,与第一种方案的模拟计算结果一起绘制在图 4 上。从图 4 中的三种开采方案结果比较不难看出,仅单一大流量抽水井开采方案在井的下方引起了明显海水入侵现象外,四口井开采的第三种方案引起的井中地下水浓度的变化最小。这对海岛地下淡水合理开发利用具有指导意义,即海岛上不宜采用单个大流量开采井,应采用多口小流量开采井的方案。至于如何具体地布置开采井的分

布,应根据相应的水文地质条件特征和进一步的海岛淡水透镜体的数值模拟分析而定。

从上述模拟与计算结果中还看出,在粘土层中浓度梯度较大,从而说明低渗透粘土层的存在,一方面有效地推迟了海水自下而上的渗透,另一方面使潜水具有较高的水位。因此在粘土层分布区进行钻探施工时,要注意封孔,不要造成人为的“天窗”,这种“天窗”有可能危及整个含水层中的淡水透镜体。

结语

对海岛含水层中的地下淡水透镜体的合理开发与管理是一个非常复杂的课题,涉及到两个方面:一是合理开采降雨人渗补给量的一部分;二是有效控制白白流到大海中的一部分淡水,通过开源与节流来管理和开发海岛淡水资源。

开源要考虑到的问题是在哪一个层位上取水,开采井的布置与密度,开采强度与频率。在近海地区,淡水体比较薄并受潮汐波动的影响强烈,不易布置开采井。相对而言,海岛中部地区的淡水透镜体厚度较大,可以适当布置开采井。开采井的深度宜小不宜大。海岛上不宜采用单个或少量的大流量开采井,应采用多口小流量开采井的方案。至于如何具体地布置开采井的分布,应根据相应的水文地质条件特征和进一步的海岛淡水透镜体的数值模拟分析而定。对于面积较小的海岛,布置一些浅井或沟可能是开采地下淡水资源比较好的方法。节流可考虑修建一些蓄水库,减小在雨季大量直接流入海中的洪水,起到调蓄水资源的作用。

海岛地下淡水资源的开发管理是一个日益突出的课题。在地下淡水透镜体技术管理(模型模拟等)的基础上,还应考虑到经济的、历史的、社会的、行政的和法律的制约,才能使技术管理达到或接近目标。

主要参考文献

艾康洪, 1993, 漫尾岛咸淡水界面运移剖面二维流水质数学模型及其应用, 中国地质大学研究生院硕士论文。

雷宗友主编, 1988, 中国海洋环境手册, 上海交通大学出版社。

李国敏, 1994, 海岛海水入侵数值模拟—三维有限元模型与应用, 中国地质大学研究生院博士论文。

李国敏, 1992a, 多孔介质水动力弥散尺度效应的分形特征, 第一届全国分形理论与地质科学学术讨论会论文集, 中国地质大学出版社。

李国敏, 1992b, 用地下水潮汐动态研究涠州岛玄武岩含水层的给水度, 地学探索(7), 中国地质大学出版社。

李国敏、陈崇希, 1991, 利用岸边水头动态确定含水层在临海方向上的边界, 地球科学, 第5期。

李国敏, 1988, 通过潮汐效应确定延伸到海底的承压含水层顶板长度, 水文地质工程地质, 第4期。

李国敏, 1987, 在线状感潮河流切割条件下承压水头动态及参数测定方法, 工程勘察, 第2期。

Droge, C. 等著, 李国敏译, 1986, 通过潮汐效应分析勘察滨海岩溶含水层, 水文地质工程地质译丛, 第6期。

贝尔(Bear, J., 1979) 著, 许涓铭等译, 1986, 地下水水力学, 地质出版社。

贝尔(Bear, J., 1972) 著, 李竞生, 陈崇希译, 1987, 多孔介质流体动力学, 中国建筑工业出版社。

E. 卡斯托迪奥(Custodio), 咸水入侵, 1987, 王维勇译, 水文地质为人类服务, 水文地质工程地质选辑, 第23辑, 地质出版社。

柿沼忠男(日) 著, 裴俊根译, 1990, 沿海地区地下水的动态与模型研究, 国外地质科技, 第1期。

Buxton, H. T. and E. Modica, 1992, Patterns and rates of ground-water flow on Long Island, New York, *GW*, 30(6), P857-866.

Carr, P. A. and G. van der Kamp, 1969, Determining aquifer characteristics by the tidal methods. *WRR*, 5(5), P1023-1031.

Das Gupta, A. and H. B. M. P. Amaraweera, 1993, Assessment of long-term withdrawal rate for a coastal aquifer, *GW*, 31(2), P250-259.

Das Gupta, A. and V. P. Gaikwad, 1988, Interface upconing due to a horizontal well in unconfined aquifer, *GW*. 25(4), P466-474.

Erskine, A. D., 1992, The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the UK, *GW*, 29(4), P556-562.

Griggs, J. E. and F. L. Peterson, 1993, Ground-Water flow dynamics and development strategies at the atoll scale, *WRR*, 31(2), P209-220.

Hunt, B., 1985, Seepage to collection gallery near seacoast, *WRR*, 21(3), P311-316.

Hunt, B., 1979, An analysis of the groundwater resources of Tongatapu Island, Kingdom of Tonga, *Journal of Hydrology*, Vol.40, P185-196.

Inouchi, K., Y. Kishi and T. Kakinuma, 1990, The motion of coastal groundwater in

response to the tide. *Journal of Hydrology*, Vol.115, P165-191.

Leismann, H. M. and E. O. Frind, 1989, A symmetric-matrix technique for the efficient solution of advection-dispersion problems with very large finite element grids, *WRR*, 25(6), P1133-1139.

Li, G. M. and C. X. Chen, 1991, Determining the length of confined aquifer roof extending under the sea by the tidal method, *Journal of Hydrology*, Vol.123, P97-104.

Liu, P.L-F., A. H-D. Cheng and J. A. Liggett, 1981, Boundary integral equation solutions to moving interface between two fluids in porous media, *WRR*, 17(5), P1445-1452.

McDonald, M. C. and A. W. Harbaugh, 1988, MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U. S. Geological Survey, Open-file report 88-875

Motz, L. H., 1992, Salt-water upconing in an aquifer overlain by a leaky confining bed, *GW*. 30(2), P192-198.

Nielsen, P., 1990, Tidal dynamics of the water table in beaches, *WRR*, 26(9), P2127-2134.

Serfes, M. E., 1991, Determining the mean hydraulic gradient of groundwater affected by tidal fluctuations, *GW*, 29(4), P549-555.

Taigbenu, A.E., J. A. Liggett and A. H-D Cheng, 1984, Boundary integral solution to seawater intrusion into coastal aquifers. *WRR*, 20(8), P1150-1158.

Underwood, M.R., Peterson, F. L. and Voss, C. I., (1992). Groundwater Lens Dynamics of Atoll Islands, *Water Resour. Res.*, Vol.28, No.11, pp.2889-2902.

Vacher, H. L. and Wallis T. N., 1992, Comparative hydrogeology of fresh-water lenses of Bermuda and Great Exuma Island, Bahamas. *GW*, 30(1), P15-20.

Van der Kamp G., 1972, Tidal fluctuations in a confined aquifer extending under the sea, 24th International Geological Congress, Section 11. P101-106.

Voss, C. I. and W. R. Souza, 1987, Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone, *WRR*, 23(10), 1851 ~ 1866.

Yim, C. S. and M. F. N. Mohsen, 1992, Simulation of tidal effects on contaminant

transport in porous media, GW, 30(1), P78-86.

Subsurface Freshwater Abstraction and Saltwater Intrusion

Protection in an Island

Guomin Li

Institute of Geology and Geophysics, China Academy of Sciences

Abstract Under natural conditions in the aquifer system of an island, a state of equilibrium is maintained, with a stationary freshwater-seawater transition zone and a lot of rainfall that enters the flow system remains in the upper aquifers, moves laterally, and discharges to the surrounding saltwater body. There exists a relationship between the rate of freshwater discharge to the sea and the extent of seawater intrusion. Under the disturbed conditions, the freshwater discharges to the sea is the difference between the rate of natural and artificial discharge and that of pumping. Two phenomena can lead to a deterioration of the freshwater resources: the lateral advance of the saltwater front towards the costal wells and the upcoming of underlying saltwater all over the island. It is clear that the maximum allowable rate of freshwater abstraction is a function of the sitting, screening, and pumping rates of the wells. Analysis and discusses are carried out with the objectives of understanding the mechanism of saltwater intrusion and learning to control it in order to improve the yield of the aquifer system in an island. An example is examined for the management of the freshwater lens of Weizhou Island, China.

Key words: Island, freshwater lens, groundwater fluctuation, saltwater intrusion, numerical modeling