

Review and Prospect of Sustainable Development of Island Freshwater Lens

Longfeng Fan^{1,2}, Haiying Li^{2,3}, Xuchun Ye^{1*}

¹School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing

²China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing

³National Hydropower Sustainable Development Research Center, Beijing

Email: *yxch2000@swu.edu.cn

Received: Feb. 22nd, 2019; accepted: Mar. 27th, 2019; published: Apr. 17th, 2019

Abstract

As a valuable natural fresh water resource except rain water in the island area, freshwater lens is very important to meet the water demand in the island. However, freshwater lens is not easy to form and is vulnerable to natural factors and human activities. Therefore, how to meet the maximum water needs of the island residents without causing a lens is a difficult problem in science and technology. This paper systematically introduces the formation mechanism and influencing factors of freshwater lens in island, and reviews the newly study progress of sea island freshwater lens. It is found that the application of 3D model in freshwater lens is becoming more and more mature, but limited by the model theory and complex hydrogeological conditions of islands, and the formation and mechanism of freshwater lens in islands with the consideration of multiple factors are generally lacking. This brings challenges to the sustainable development and utilization of fresh water lens in islands. Therefore, we should pay attention to the conventional systematic observation of the present water resources, and strengthen the study of hydrological processes in islands by means of geostatistics and GIS, as well as the sustainable integrated management of the island water resources.

Keywords

Freshwater Lens, Formation Theory, Influencing Factors, Sustainable Development Strategy

海岛淡水透镜体研究进展及可持续发展展望

樊龙凤^{1,2}, 李海英^{2,3}, 叶许春^{1*}

¹西南大学地理科学学院, 重庆

²中国水利水电科学研究院, 北京

³国家水电可持续发展研究中心, 北京

作者简介: 樊龙凤(1993-), 女, 甘肃泾川人, 硕士研究生, 主要方向为水资源及水环境演变。

*通讯作者。

文章引用: 樊龙凤, 李海英, 叶许春. 海岛淡水透镜体研究进展及可持续发展展望[J]. 水资源研究, 2019, 8(2): 199-208.

DOI: 10.12677/jwrr.2019.82024

Email: *yxch2000@swu.edu.cn

收稿日期: 2019年2月22日; 录用日期: 2019年3月27日; 发布日期: 2019年4月17日

摘要

淡水透镜体作为海岛地区除雨水外的宝贵天然淡水资源,对于满足海岛居民用水需求及生态系统维护至关重要。然而,淡水透镜体形成不易,它是极易受到自然因素和人类活动影响的脆弱含水层类型。因此,如何做到既能最大限度满足岛上居民用水需求,又不造成透镜体难以恢复的破坏,是一个科学技术难题。本文系统介绍了淡水透镜体的形成机理和影响因素,综述了国内外有关海岛淡水透镜体的最新研究进展。发现三维模型在淡水透镜体的应用方面日臻成熟,但受模型理论和海岛复杂水文地质条件的限制,普遍缺乏考虑多因素影响的海岛淡水透镜体形成与机制研究,这给海岛淡水透镜体的持续开发利用带来了挑战。未来应重视海岛水资源系统观测,结合统计方法和GIS等手段,加强海岛地区多水文过程及可持续的海岛水资源综合保障与管理策略研究。

关键词

淡水透镜体, 形成理论, 影响因素, 可持续发展策略

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海岛是海洋的重要组成部分,拥有丰富的生物、化学、矿产和动力资源,具有巨大的经济、科学和生态价值[1]。海岛也是国家领土不可或缺的重要组成部分,是开发海洋的前进支点和国防建设的前沿基地,对发展海洋经济和国家安全具有重要意义[2]。世界上的海岛星罗棋布,这些小岛多由沙丘、珊瑚环礁或石灰岩岛屿构成,并以独立的水文地质单元与大陆相隔[3] [4]。与同纬度大陆相比,海岛地区通常面临雨量大、蒸发强、径流少、地下水赋存条件差等问题[5]。大多海岛几乎不存在地表水资源,而主要以淡水透镜体的形式储存地下。所谓“淡水透镜体”,即由于地下淡水和地下内渗海水之间因密度差异而形成的覆盖在咸水之上、呈透镜状的淡水体[6]。淡水透镜体作为海岛地区宝贵的甚至是唯一的淡水资源,是海岛资源开发利用及可持续发展的重要基础。然而,海岛淡水透镜体属于典型的脆弱含水层,极易受到常规气候变化、自然灾害和人为因素的影响[7]。目前,淡水透镜体的持续开发利用方面仍面临很多困难,海岛淡水资源短缺是世界上最普遍的问题[7] [8] [9]。

我国是一个海洋大国,拥有面积超过 500 平方米的海岛近 7000 个。由于历时原因,我国海岛开发建设大大滞后于其它一些发达的海洋国家,有关海岛淡水透镜体的研究还很不足。随着“一带一路”战略的实施和“海上丝绸之路”的重视,海岛淡水资源的供应也将受到越来越大的挑战[10]。目前,海岛居民用水主要依赖从大陆远距离运水、海水淡化及通过硬化设施收集并处理的雨水来满足用水需求。如何提高海岛淡水资源供应率,满足居民基本淡水需求以及保证海岛生态安全是开发建设中的重要问题。基于此,本文对国内外有关海岛淡水透镜体的形成机理、影响因素、脆弱性评估及优化管理等研究进行回顾与总结,并从可持续发展的角度提出相关策略建议,试图为我国海岛淡水透镜体的科学研究及持续开发提供借鉴和参考。

2. 海岛淡水透镜体的形成理论

Badon Ghyben 和 Herzberg 分别于 1889 年和 1901 年独立提出了计算地下淡水与海水交界面的方法,即经典

的“Ghyben-Herzberg”理论[11]。该理论认为淡水透镜体厚度与海平面以上的水位高度值直接相关，两者比值为40:1 (见图1)。“Ghyben-Herzberg”理论假定淡水透镜体与海水之间处于静水平衡状态，而忽略了潮汐等其他因素的影响，常被用来确定淡水透镜体的几何边界[12]。Buddemeier [13]基于“Ghyben-Herzberg”理论和水平流的“Dupuit”方程，假设在淡水和海水之间存在一突变界面，建立了计算淡水透镜体边界的“Dupuit-Ghyben-Herzberg(DGH)”概念模型和求解技术。DGH模型假设，在一个均质、各向同性的条(带)状岛上，淡水透镜体以岛的中心对称分布，其厚度与平均海平面上的水位高度值呈正比[14]。假设海水密度保持不变，淡水透镜体厚度取决于含水层补给率(R)与垂直导水率(K)的比值。一般来说，R/K值越大，淡水透镜体越厚，并与岛屿大小呈正比[15]。随R和K的变化，淡水透镜体出现不对称现象，其最大厚度会向R/K比值较高处倾斜[16][17]。较高的垂直渗透率有利于促使淡咸水混合，使过渡带变厚，从而限制淡水透镜体发育，而基底防渗单元则会阻碍地下水的垂直运动，导致地下水位虽高于通常水位，但总体积较小[18]。

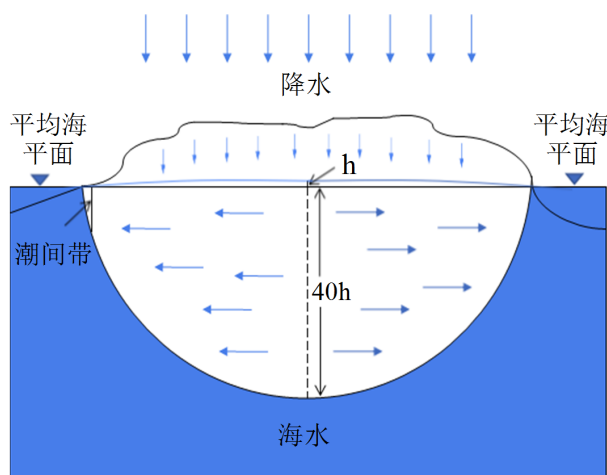
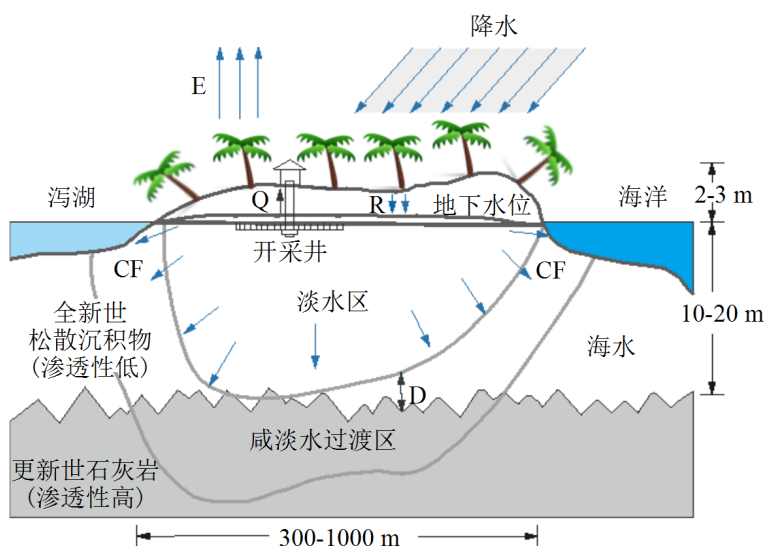


Figure 1. Dupuit-Ghyben-Herzberg model of island groundwater
图1. 海岛地下水的 Dupuit-Ghyben-Herzberg 模型



图注：R 为降雨补给；Q 为抽水量、E 为蒸散发、CF 为排泄流出量、D 为与海水混合量

Figure 2. Freshwater lens of coral reef island [15]
图2. 珊瑚礁岛淡水透镜体[15]

传统的“Ghyben-Herzberg”和“DGH”两种模型都将淡-海水界面视为突变界面，然而由于弥散作用、淡-海水之间密度差和浓度差的影响，实际的淡-海水之间形成了一个有一定厚度的咸淡水过渡带[19] (图 2)。实际上，许多珊瑚岛上的咸淡水过渡带可能比上面的淡水带还要厚。咸淡水过渡带内的浓度变化导致的流体密度改变会影响海岛淡水透镜体内的水头分布，进而影响流速和浓度的变化。因此，海岛淡水透镜体内的水流运动是变密度流和溶质运移耦合的三维运动[20]。降水是海岛地下淡水的唯一补给来源，但海岛能形成淡水透镜体还取决于地质地貌结构，如岛屿的岩性、成岩阶段和岩溶发育程度等[21]。淡水透镜体多发育在珊瑚礁岛上，如图 2 所示，海岛地下淡水在间歇性降雨补充和持续耗竭之间处于动态平衡，且淡水透镜体形态往往不对称。

3. 海岛淡水透镜体形成发育的影响因素

3.1. 自然因素

地形：岛屿的大小、形状和地形特别是高于平均海平面以上岛屿的宽度和高度，在岛屿水资源中起着至关重要的作用。一般来说，相对大而宽的岛屿比小而窄的岛屿可能拥有更多类型的水资源[22]。其中，岛屿宽度是海岛淡水透镜体产生的关键因素[7]。岛屿太小，降水很快流入海洋，不会形成淡水，通常能够维持淡水透镜体的岛屿最小宽度约为 400 m [21]。根据地形，岛屿有高、低岛之分，与低岛相比，在相同的降雨和植被条件下，高岛淡水透镜体体积可能较大[23]。若岛屿属于狭长型或海湾，海水入侵的可能性增加，不利于淡水透镜体形成。

气候：岛屿大小、形状和位置随短期和长期气候模式的演变而推移[16] [24]。从理论上讲，在补给和海平面不变的情况下，淡水透镜体的自然排泄与补给相平衡，且透镜的大小和厚度是恒定的[22]。对于高渗透珊瑚礁岛，降雨量越大，入渗补给量越多，淡水透镜体越厚，且淡水透镜体的储量随年降雨量的变化而变化[22]。对于渗透性低的海岛，淡水透镜体对降雨的响应没有那么强烈，且蒸发量越大，地下水补给损失也越大，淡水透镜体越薄。例如，马绍尔群岛年降水量的 40%~60%在蒸发蒸腾过程中损失[25]，使淡水透镜体的入渗补给量大打折扣。

水文地质：含水层的渗透性、岩溶发育程度和不整合面深度等水文地质特征对海岛淡水透镜体的分布、盐度和可持续性有直接影响[23]。海岛地下水系统往往根据含水层参数的变化作出反应：高渗透的碳酸盐岛屿地下淡水库存的季节和年际变化可能较大，而在低渗透的硅质岛屿上变化不明显[16]。含水层参数的不均匀性是碳酸盐环礁淡水透镜体分布的主要因素，而硅质岛淡水透镜体的分布主要与硅质碎屑沉积物的总体渗透性较低有关，且影响碳酸盐岛的高渗透(高达 1000 m/d)沉积物一般不存在于硅质岛[16] [26]。总体来说，具有中等渗透性的海岛地下淡水资源最为丰富，渗透率过低或过高均不利于地下淡水的形成[7]。珊瑚岛屿上当海潮发生时，在淡水和海水之间会形成很厚的咸淡水过渡区，因此，裂隙和溶洞决定淡水透镜体外形。不整合面深度，往往是淡水透镜体厚度的主要控制因素[27]。例如，珊瑚岛淡水透镜体主要形成于不整合面之上的全新世沉积物中，而不整合面之下的更新世石灰岩地层被强烈剥蚀，岩溶发育充分，海水和淡水极易混合，难以保存淡水[28]。

土壤和植被：土壤和植被通过影响地表径流、入渗补给和蒸散发等水文循环过程进而使淡水透镜体形态发生变化[7]。土壤厚度和渗透性影响淡水透镜体质量和数量。例如，汤加的火山石灰岩岛屿表层土壤较厚，保水能力较好，使得地下水免受来自地表污物的污染[29]。珊瑚岛表层通常为薄沙质土壤，渗透性强，表层土壤通常缺乏有机质和养分，保水保肥能力差，淡水透镜体易遭受来自地表污物的影响[23]。植被类型和密度对淡水透镜体形态有重要影响。海岛上各种植被的截留和蒸腾作用都会使地下水补给减少，使淡水透镜体厚度变薄[28]。例如，低珊瑚岛上的耐盐深根椰子树可直接从地下水取水，在干季可能导致地下淡水资源大量损失[30]。

潮汐：海岛淡水透镜体承托于咸水之上，其下通过岩石孔隙与海水相通。由潮汐引起的海平面日波动会造成海岛淡水透镜体的滞后性移动，促进淡水与海水混合，增加过渡区的厚度，使淡水透镜体厚度减少[27]。潮汐作用对海岛地下水的影响因岩石渗透性差异而不同。渗透性高的岛屿(如碳酸盐岛)，淡水和咸水的潮汐混合是造成淡水流失的重要力量，而在渗透性低的岛屿(如硅质岛)，潮汐信号的传播程度普遍较低，且潮差与混合带厚度

的相关性较弱[16] [24]。经典的理论预测表明, 地下水对潮汐的响应时间随海岸线距离的增加而延缓, 然而在高渗透的环礁岛上, 潮汐信号易于传播, 地下水对潮汐的响应与离海岸的水平距离无关[23]。

3.2. 人为因素

海岛地下含水层固有的脆弱性使淡水透镜体极易受到人类活动的干扰[31]。其中, 超采地下水、地表污染和海岸线工程建设是影响海岛淡水透镜体水量水质和形态的重要因素。

超采地下水: 岛居民主要依靠开采地下水来满足基本的生活生产需求。传统的抽水开采方式, 通常会导致局部地区地下水出现超采现象。由于淡水透镜体对干旱和抽水长期效应的响应很难预测, 对长期使用的抽水井, 如果缺乏定期监测和有效管理, 可能出现大范围地下水超采现象, 严重时会出现抽水倒锥击穿透镜体的现象, 并很难恢复到抽水前的平衡状态, 从而影响整个海岛地下水资源的可持续开发及利用[19] [29] [32]。

地表污染: 由于缺乏足够的环境卫生管理和健全的排污系统, 人畜粪便、垃圾处理区、化肥和农药等造成的地下水污染发生在许多海岛上[29]。影响地下水污染最关键的因素是地下水埋深。海岛淡水透镜体属于浅层含水层类型, 若对生活生产污水进行简单处理或未经处理直接排放, 污水会迅速到达透镜体并造成严重污染, 给人类健康带来极大风险。例如, 环礁岛淡水透镜体埋深通常小于 2 m, 地表污物可在 2 h 内到达透镜体[4]。

海岸线工程: 海岸线工程建设会改变岛礁某些岸段的物理形态, 以及当地的水文和地貌动力学过程, 从而使淡水透镜体形态发生变化[33]。例如, 就地开采砂砾石会使海岸侵蚀加剧, 海岛面积减小, 透镜体体积缩小; 使表层土体变薄, 削弱土层对污染物的拦截能力, 加重透镜体易受污染的程度[23]。

4. 海岛淡水透镜体的主要研究内容和方法

4.1. 淡水透镜体的计算模型

淡水透镜体的相关计算模型在海岛地下水资源估算、脆弱性分析以及探讨淡水透镜体的形成机理及影响因素等方面具有不可替代的作用。其中, 数学模型是研究淡水透镜体最多, 也相对成熟的一种方法, 早期有一维、二维模型, 目前多采用三维模型来模拟透镜体的形成及演变。Alsumaiei 等[34]基于 SEAWAT 模型, 模拟了马尔代夫环礁岛淡水透镜体的流动动态, 研究发现小岛淡水透镜体的抗干扰能力更差, 透镜体所需恢复时间与岛屿表面积之间相关性很强。Gingerich 等[35]采用三维数学模型模拟了环礁岛淡水透镜体在洪泛事件后的恢复状况, 强调人工回灌雨水是缩短透镜体恢复时间的有效措施, 而 Post 等[36]采用类似的数据和模型发现, 对于德国巴尔特鲁姆硅质碎屑岛来说, 补给条件是次要的。周从直等[37] [38]构建了西沙永兴岛淡水透镜体三维数学模型, 根据野外和实验获取的水文地质参数, 运用有限差分法对模型进行了数值求解, 从而准确模拟了开采条件下透镜体厚度和贮量的变化。方振东等[39]通过 Visual Modflow 软件, 分析了永兴岛淡水透镜体抽水倒锥的演变规律, 强调抽水倒锥对抽水强度十分敏感。三维数学模型为制定淡水透镜体开采策略, 提供了理论与技术支持。然而, 由于野外实验不可控因素多, 导致数学模型多是在缺乏实测资料的情况下模拟淡水透镜体的范围。

海岛淡水透镜体的形成与演变受到诸多自然因素(如气象、海洋环境和水文地质等)和人为因素(如开采)的影响。室内物理模型作为野外实验的有效补充, 能够深入了解海岛淡水透镜体的形成发育机理, 是分析降水、开采等因素对透镜体影响的便捷而有效的方法。近年来, 有学者通过室内物理装置模拟了淡水透镜体形成及倒锥的演变过程。例如, 赵军等[40]通过室内模拟实验发现, 雨强越大, 入渗补给量越大, 淡水透镜体越厚, 最终维持在一定厚度的稳定状态; 但随开采强度增大, 透镜体易被击穿。赵林等[41]采用类似方法模拟了不同土层结构在降雨入渗条件下淡水透镜体的形成与消退过程, 得到双土层结构更有利于形成和维护淡水透镜体, 在无补给条件下, 双土层中的淡水透镜体, 在隔离地下咸水的同时, 能够为地表植被提供一定的淡水资源。总的来说, 室内物理模型具有实验条件易控制、可重复, 能够获得精确的实验数据, 在某些情况下甚至可替代原位试验, 但也存在一定局限性, 如尺度大小、水动力及气候条件和模拟理论的限制。

4.2. 极端气候事件对淡水透镜体的影响

随着全球气候变化,海平面上升、气旋活动和干旱等极端事件发生的可能性大大增加,进而对海岛淡水透镜体带来威胁。海平面上升及相伴的海水入侵现象是造成海岛淡水透镜体形态改变的主要原因[42]。海平面上升1 m时对透镜体影响很小,但当岛屿面积因侵蚀而减少时,透镜体体积就会减少[4]。海平面上升对淡水透镜体尺寸大小的影响与环礁岛大小没有线性关系,小岛淡水透镜体的抗干扰能力和恢复能力更差[43]。伴随海平面上升的风暴对地下水盐渍化的影响程度取决于淡水透镜体上方非饱和基底的厚度,基底越薄,水洗盐化程度越低[44]。

热带气旋产生的风暴潮导致低洼岛屿经常被部分或全部淹没,造成海水入侵,使地下淡水盐渍化[45]。Holding和Allen[46]的研究显示,风暴过后淡水透镜体随着时间的推移逐渐恢复,若采取补救措施,则很快就会达到先前饮用水的标准。Kovacs等[47]对尤卡坦半岛地下水的研究表明,咸淡水混合极易受到由气候驱动引起的极端风暴事件的影响。Coutino等[48]研究中强调,伴随严重气象事件的咸淡水混合更易发生在人为开采的尾矿中,而非含水层系统内。这说明淡水透镜体对人类活动的影响也具有高度的敏感性。

受厄尔尼诺和拉尼娜事件的影响,太平洋小岛面临的主要自然威胁是长期干旱,许多小岛地下淡水在天然条件下也可能因蒸发和流出而严重减少[3][4][7]。Barkey等[49]研究了马绍尔环礁岛地下淡水在平均降雨和干旱条件下的变化情况,发现小岛(宽度 < 300 m)地下水在厄尔尼诺干旱期间完全枯竭,其中一半被归类为“极易受干旱影响”。Bailey等[50]研究显示,耗尽的淡水透镜体可能需要一年半才能恢复,因此,预测、规划和应对干旱对解决小岛淡水资源紧缺问题至关重要。Alberti等[51]发现小岛含水层不仅可以在岛屿中部容纳连续的淡水透镜体,且淡水储存也可能发生在海岸线旁边。长期的定性研究表明,海岸线的淡水透镜体可能具有抵御干旱和海水入侵的能力,这对人们重新认识和管理沿海脆弱含水层系统有指导意义。

4.3. 淡水透镜体的优化管理

Mtoni等[33]指出过度开采地下水是引起海水入侵的主要原因。Ataie-Ashtiani等[52]利用人工神经网络和遗传算法建立了基于小岛淡水透镜体多目标管理的模型,强调集成最新的创新工具可能实现淡水透镜体的优化管理。Pauw等[53]通过人工补排系统,模拟了淡水透镜体的未来发展状况,指出受控的人工补排系统有可能增加淡水透镜体的厚度。Shamsuddin等[54]采用网格密度相关流模型对沿海含水层的研究发现,适度采补结合条件下地下水位的下降速率比无补给时要慢很多,结合用水数据来确定最佳开采量对当地地下水的可持续利用和水生态平衡至关重要。Gingerich等[35]采用三维数值模型模拟了环礁岛淡水透镜体在洪水事件后的恢复状况,重点强调了人工回灌雨水是缩短淡水透镜体恢复时间的有效措施。

随着海岛地区人口的稳步增长和向城市中心的迁移,有限地下水资源被污染的风险逐步增大,从而对海岛开发过程中的地下水供水系统提出更高的要求。Post等[36]在对有关环礁岛含水层的关键过程、调查技术和管理方法的总结中指出,由于复杂的水文地质过程和实地调查的局限性,未来在预测过度开采、污染和气候变化等对环礁岛淡水透镜体的影响方面仍然面临着严峻的挑战。

4.4. 淡水透镜体的水质净化

珊瑚礁岛的土质结构粗疏松散,降水在短时间内大都经渗透直接到达淡水透镜体。珊瑚礁岛地层本身含盐量高,加之受天然鸟粪层、地表腐殖质以及人为污染,导致海岛地下淡水往往不能直接饮用,必须针对不同用水需求进行适当的处理[55]。因此,对岛上人们长期使用的取水井进行定期现场取样分析,能实时有效地掌握海岛淡水透镜体的水质状况,是进行淡水透镜体水质处理的前提。目前,有关海岛淡水透镜体的水质净化处理技术包括电凝聚法、生物膜法等。比如,范启雄等[56]采用电凝聚法对珊瑚礁岛淡水透镜体中的腐殖质等有机污染物的去除开展了试验,发现该方法对珊瑚岛地下水中的有机污染物有良好的去除效果。周从直等[57]对受到有机

污染的珊瑚礁岛淡水透镜体,开展了原位曝气生物修复试验,发现地下水色度和化学需氧量均随曝气时间的增加而降低。赵素丽[55]也通过实验验证了曝气技术在西沙永兴岛地下水污染治理中的可行性。室内淋洗实验发现,在持续淋溶数小时后,水的盐度均能达到饮用水标准。然而,海岛地下水是否还存在其他水质问题对人类健康带来风险,比如水的毒理性质等?因此,在研究海岛地下淡水储量的同时,应将水质作为其中一个重点。

5. 海岛淡水透镜体可持续发展研究展望

海岛淡水透镜体只有在充沛的大气降水、特殊的水文地质条件、咸淡水密度差等共同作用下,且具有一定宽度范围的海岛上才能形成。淡水透镜体的水质水量极易受到气候变异和人为胁迫的影响,严重时可能导致淡水透镜体功能丧失。中国海洋面积辽阔尤其南部海域更是21世纪海上丝绸之路的必经之地,海洋资源丰富但开发不足,这对于海洋经济强国的建设十分不利。我国海岛多为珊瑚礁岛,由于复杂的水文地质过程和实地调查的局限性,未来在预测过度开采、污染和气候变化等对海岛淡水透镜体的影响方面仍面临严峻的挑战。因此,加强海岛淡水透镜体的研究,制定科学合理的开发、管理和保护策略对海岛的可持续发展具有重要的意义。

1) 国内外对淡水透镜体的研究主要采用解析法和数值模拟,而有关室内物理模拟的研究较少,且室内物理模拟主要考虑降雨开采条件下淡水透镜体的形成和演变,而未考虑蒸发、潮汐等外界自然条件的影响。解析法只有在简单的边界条件下才能实现,不利于对复杂地质环境条件下海岛淡水透镜体的具体研究;基于经验和理论的数值模拟常常以野外试验数据为基础,由于野外条件很难控制,其模拟结果精度不够高[10][12]。室内物理模拟作为野外试验的有效补充,其能够获取相对准确的实验数据。因此,未来研究中应综合考虑各主要影响因素以及多水文过程之间的相互作用,加强海岛淡水透镜体的物理模拟与原位试验相结合的研究。

2) 海岛淡水透镜体在海水弥散作用和淡水分散流出的循环过程中,处于一种相对稳定的状态。事实上,淡水透镜体的存在过程也是透镜体内淡水流失的过程。一方面,对于处在稳定状态的淡水透镜体来说,若不对其进行开发利用,每年降雨回补的淡水将白白流失;另一方面,若开采不当,会使淡水透镜体咸化、损失严重,还可能引发生态灾难[33]。因此,人们在海岛开发过程中,对地下水供水系统提出了高要求:既能最大限度满足用水需求,又不造成透镜体难以恢复的破坏。加强海岛地区基础水文地质研究,重视海岛淡水透镜体的贮量和补给变化,以及抽水倒锥的演变过程等参量,从而确定可持续开采量、最大抽水速率、最佳开采方式等。

3) 随着海岛的开发建设,岛上居民生活、社会经济和旅游业的发展,海岛淡水透镜体的水量和水质必将受到重大影响。目前,大多居民仍未充分认识到海岛淡水资源管理和生态环境保护的重要性,这不利于海岛淡水透镜体开采、管理与保护策略的实施。在全球气候变化和海岛资源开发的大背景下,根据海岛地区社会经济发展的需求,如何确定合适的管理策略以应对未来气候变化和人口增长带来的挑战,将是十分紧迫的任务。

4) 我国对海岛淡水透镜体的研究仍然不多,主要集中在个别岛屿,目前岛上的地下淡水仍未充分发挥其作用和价值。为了了解我国海岛地下淡水资源的整体状况,应重视和加强对海岛水资源现状常规系统观测,开展有关提高海岛地下淡水利用价值、海岛雨水资源利用潜力等方面的研究。此外,针对珊瑚砂特殊的结构特征,通过珊瑚砂土层的改良来实现雨水高效收集,为海岛淡水透镜体的可持续利用与管理积累基础数据。

基金项目

感谢中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13010401)和国家重点研发计划项目课题(2016YFC0305401)的支持。

参考文献

- [1] 鲍艳红. 海岛水循环经济模式的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
BAO Yanhong. Research and application of the economic mode of insular water recycling. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)

- [2] KUWAHARA, S. The development of small islands in Japan: An historical perspective. *Journal of Marine & Island Cultures*, 2012, 1(1): 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.imic.2012.04.004>
- [3] IAN, W., TONY, F., TABOIA, M., et al. Climatic and human influences on groundwater in low atolls. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(6): 581-590.
- [4] WHITE, I., FALKLAND, T., PEREZ, P., et al. Challenges in freshwater management in low coral atolls. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(16): 1522-1528. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.051>
- [5] 陈国伟. 浙江省海岛地区供水配置探讨[J]. *水利规划与设计*, 2006(1): 19-22.
CHEN Guowei. Discussion on water supply allocation in Island area of Zhejiang Province. *Water Resources Planning and Design*, 2006(1): 19-22. (in Chinese)
- [6] FALKLAND, A. Hydrology and water resources of small islands: A practical guide. *Studies and reports on hydrology no. 49*. Paris: UNESCO, 1991.
- [7] FALKLAND, A. Tropical island hydrology and water resources: Current knowledge and future needs. In: *Second international colloquium on hydrology and water management in the humid tropics*. Technical documents in hydrology no. 52, UNESCO International hydrology programme V, Paris, 2002: 237-298.
- [8] MOGLIA, M., PEREZ, P. and BURN, S. Water troubles in a Pacific atoll town. *Water Policy*, 2008, 10(6): 613-637. <https://doi.org/10.2166/wp.2008.004>
- [9] UNDERWOOD, M. R., PETERSON, F. L. and VOSS, C. I. Groundwater lens dynamics of coral atolls. *Water Resources Research*, 1992, 28: 2889-2902.
- [10] 赵焕庭, 王丽荣. 珊瑚礁岛屿淡水透镜体研究综述[J]. *热带地理*, 2015, 35(1): 120-129.
ZHAO Huanting, WANG Lirong. Review on the study of freshwater lens in the coral reef island. *Tropical Geography*, 2015, 35(1): 120-129. (in Chinese)
- [11] TERRY, J. P., CHUI, T. F. M. and FALKLAND, A. Atoll groundwater resources at risk: Combining field observations and model simulations of saline intrusion following storm-generated sea flooding. In: *Groundwater in the coastal zones of ASIA-Pacific*. Berlin: Springer, 2013: 247-270.
- [12] 甄黎. 海岛淡水透镜体形成与演化规律的物理模拟[D]: [硕士学位论文]. 南京市: 河海大学, 2008.
ZHEN Li. Physical simulation of formation and evolution of island freshwater lens. Nanjing: Hehai University, 2008. (in Chinese)
- [13] BUDDEMEIER, R. Climate and groundwater resources on atolls and small islands. *Weather and Climate*, 1992, 12: 9-16.
- [14] HUBBERT, M. K. The theory of ground-water motion. *Journal of Geology*, 1940, 49(3): 327-330. <https://doi.org/10.1086/624965>
- [15] SCHNEIDER, J. C., KRUSE, S. E. A comparison of controls on freshwater lens morphology of small carbonate and siliciclastic islands: Examples from barrier islands in Florida, USA. *Journal of Hydrology*, 2003, 284(1-4): 253-269.
- [16] VACHER, H. L. Hydrogeology of Bermuda—Significance of an across-the-island variation in permeability. *Journal of Hydrology*, 1978, 39(3): 207-226. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90001-X](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90001-X)
- [17] VACHER, H. L. Ground-water in barrier islands—Theoretical-analysis and evaluation of the unequal-sea level problem. *Journal of Coastal Research*, 1988, 4(1): 139-148.
- [18] VACHER, H. L. Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(100): 580-591. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<0580:DGHAOS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<0580:DGHAOS>2.3.CO;2)
- [19] FALKLAND, A. C. Climate, hydrology, and water resources of the cocos (keeling) islands. *Atoll Research Bulletin*, 1994: 400.
- [20] 郑义. 滨海盐碱地淡水透镜形成模拟及保水研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
ZHENG Yi. Simulation of freshwater lens formation and water conservation of coastal areas. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [21] 梁恒国, 周从直, 方振东. 珊瑚岛淡水透镜体的形成特征及影响因素[J]. *西南给排水*, 2006(5): 23-24.
LIANG Hengguo, ZHOU Congzhi and FANG Zhendong. Formation characteristics and influencing factors of coral island freshwater lens. *Southwest Water & Wastewater*, 2006(5): 23-24. (in Chinese)
- [22] 周从直, 方振东, 梁恒国, 等. 雨量变化对珊瑚岛淡水透镜体的影响[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(1): 53-57.
ZHOU Congzhi, FANG Zhendong, LIANG Hengguo, et al. Influence of rainfall on freshwater lens in a coral island. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(1): 53-57. (in Chinese)
- [23] WHITE, I., FALKLAND, T. Management of freshwater lenses on small Pacific islands. *Hydrogeology Journal*, 2010, 18(1): 227-246. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0525-0>
- [24] SCHNEIDER, J. C., KRUSE, S. E. Assessing selected natural and anthropogenic impacts on freshwater lens morphology on small barrier Islands: Dog Island and St. George Island, Florida, USA. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14(1-2): 131-145.

- [25] HUNT, C. D., PETERSON, F. L. Groundwater resources of Kwajalein Island, Marshall Islands. Water Resources Research Centre, 1981.
- [26] ANTHONY, S. S., PETERSON, F. L., MACKENZIE, F. T., et al. Geohydrology of the Laura fresh-water lens, Majuro atoll: A hydrogeochemical approach. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101(8): 1066-1075. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<1066:GOTLFW>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<1066:GOTLFW>2.3.CO;2)
- [27] WHEATCRAFT, S. W., BUDDEMEIER, R. W. Atoll island hydrology. Ground Water, 2010, 19(3): 311-320.
- [28] VACHER, H. L., MYLROIE, J. E. Eogenetic karst from the perspective of an equivalent porous medium. Carbonates & Evaporites, 2002, 17(2): 182-196. <https://doi.org/10.1007/BF03176484>
- [29] VELDE, M. V. D. Agricultural and climatic impacts on the groundwater resources of a small island: Measuring and modelling water and solute transport in soil and groundwater on Tongatapu. Faculty of Biological, agricultural and Environmental Engineering, Catholic University of Louvain, 2006.
- [30] FOALE, M. The coconut odyssey: The bounteous possibilities of the tree of life. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2003: 132.
- [31] LUOMA, S. Groundwater vulnerability of a shallow low-lying coastal aquifer in southern Finland under climate change. Espoo: Geological Survey of Finland, 2016: 37.
- [32] POST, V. E. A., BOSSERELLE, A. L., GALVIS, S. C., et al. On the resilience of small-island freshwater lenses: Evidence of the long-term impacts of groundwater abstraction on Bonriki Island, Kiribati. Journal of Hydrology, 2018, 564: 133-148.
- [33] HUIZER, S., RADERMACHER, M., VRIES, S. D., et al. Impact of coastal forcing and groundwater recharge on the growth of a fresh groundwater lens in a mega-scale beach nourishment. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2018, 22(2): 1-27. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1065-2018>
- [34] ALSUMAIEI, A. A., BAILEY, R. T. Quantifying threats to groundwater resources in the Republic of Maldives part II: Recovery from tsunami marine overwash events. Hydrological Processes, 2018, 32(9): 1154-1165. <https://doi.org/10.1002/hyp.11473>
- [35] GINGERICH, S. B., VOSS, C. I. and JOHNSON, A. G. Seawater-flooding events and impact on freshwater lenses of low-lying islands: Controlling factors, basic management and mitigation. Journal of Hydrology, 2017, 551: 676-688.
- [36] POST, V. E. A., HOUBEN, G. J. Density-driven vertical transport of saltwater through the freshwater lens on the island of Baltrum (Germany) following the 1962 storm flood. Journal of Hydrology, 2017, 551: 689-702.
- [37] 周从直, 何丽, 杨琴, 等. 珊瑚岛礁淡水透镜体三维数值模拟研究[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 560-566.
ZHOU Congzhi, HE Li, YANG Qin, et al. Three-dimensional numerical simulation of freshwater lens in coral islands. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (5): 560-566. (in Chinese)
- [38] 周从直, 譙华, 杜蓉. 珊瑚岛淡水透镜体的模拟与开发[J]. 后勤工程学院学报, 2016, 32(3): 1-10.
ZHOU Congzhi, QIAO Hua and DU Rong. Simulation and exploitation of the freshwater lens in Coral Island. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32 (3): 1-10. (in Chinese)
- [39] 方振东, 周从直, 梁恒国, 等. 珊瑚岛淡水透镜体抽水倒锥影响因素研究[J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28(4): 57-66.
FANG Zhendong, ZHOU Congzhi, LIANG Hengguo, et al. Research on influential factors upon the up-cone of the freshwater lens in a Coral Island. Journal of Logistical Engineering University, 2012, 28 (4): 57-66. (in Chinese)
- [40] 赵军, 温忠辉, 束龙仓, 等. 海岛淡水透镜体形成及倒锥演变规律分析[J]. 工程勘察, 2009, 37(5): 40-44.
ZHAO Jun, WEN Zhonghui, SHU Longcang, et al. Formation of freshwater lens in islands and evolution rules of the upconing. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 37(5): 40-44. (in Chinese)
- [41] 赵林, 莫惠婷, 郑义. 滨海盐碱地区包气带中淡水透镜体维持机理[J]. 吉林大学学报(地), 2016, 46(1): 195-201.
ZHAO Lin, MO Huiting and ZHENG Yi. Maintenance mechanism of freshwater lens in vadose zone on coastal saline areas. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1): 195-201. (in Chinese)
- [42] BURNS, C. G. Pacific island developing country water resources and climate change. Worlds Water, 2001, 90(12): 1610-1626.
- [43] CHUI, T. F. M., TERRY, J. P. Influence of sea-level rise on freshwater lenses of different atoll island sizes and lens resilience to storm-induced salinization. Journal of Hydrology, 2013, 502(8): 18-26.
- [44] ABDALLA, F. Ionic ratios as tracers to assess seawater intrusion and to identify salinity sources in Jazan coastal aquifer, Saudi Arabia. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9: 40. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2065-3>
- [45] SPENNEMANN, D. H. R. Freshwater lens, settlement patterns, resource use and connectivity in the Marshall Islands. Transforming Cultures e Journal, 2006, 1(2): 44-63.
- [46] HOLDING, S., ALLEN, D. M. From days to decades: Numerical modeling of freshwater lens response to climate change stressors on small islands. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2014, 11(10): 933-949. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-11439-2014>
- [47] KOVACS, S. E., REINHARDT, E. G., STASTNA, M., et al. Hurricane in grid and tropical storm Hanna's effects on the salinity of the coastal aquifer, Quintana Roo, Mexico. Journal of Hydrology, 2017, 551: 703-714.

- [48] COUTINO, A., STASTNA, M., KOVACS, S., et al. Hurricanes in grid and manuel (2013) and their impact on the salinity of the meteoric water mass, Quintana Roo, Mexico. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 715-729.
- [49] BARKEY, B., BAILEY, R. Estimating the impact of drought on groundwater resources of the Marshall Islands. *Water*, 2017, 9(1): 41. <https://doi.org/10.3390/w9010041>
- [50] BAILEY, R. T., JENSON, J. W., OLSEN, A. E. Numerical modeling of atoll island hydrogeology. *Ground Water*, 2009, 47(2): 184-196. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00520.x>
- [51] ALBERTI, L., LICATA, I. L., CANTONE, M. Saltwater intrusion and freshwater storage in sand sediments along the coastline: Hydrogeological investigations and groundwater modeling of Nauru Island. *Water*, 2017, 9(10): 788. <https://doi.org/10.3390/w9100788>
- [52] ATAIE-ASHTIANI, B., KETABCHI, H., RAJABI, M. M. Optimal management of a freshwater lens in a small island using surrogate models and evolutionary algorithms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 19(2): 339-354. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000809](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000809)
- [53] PAUW, P. S., BAAREN, E. S. V., VISSER, M., et al. Increasing a freshwater lens below a creek ridge using a controlled artificial recharge and drainage system: A case study in the Netherlands. *Hydrogeology Journal*, 2015, 23(7): 1415-1430. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1264-z>
- [54] SHAMSUDDIN, M. K. N., IDRIS, A. N., ARIS, A. Z., et al. Simulation of saltwater intrusion in coastal aquifer of Kg. Salang, Tioman Island, Pahang, Malaysia.
- [55] 赵素丽. 西沙珊瑚岛礁淡水透镜体的生物修复试验研究[J]. *水处理技术*, 2007, 33(8): 77-78.
ZHAO Suli. The bioremediation of fresh water lenses of Xisha Coral Islands. *Technology of Water Treatment*, 2007, 33(8): 77-78. (in Chinese)
- [56] 范启雄, 张金城. 电凝聚法去除珊瑚礁岛地下水有机物的效果研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(4): 29-32.
FAN Qixiong, ZHANG Jincheng. Organic matter removal efficiency of Coral Island groundwater by electrocoagulation. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(4): 29-32. (in Chinese)
- [57] 周从直, 赵素丽, 谯华. 珊瑚岛礁淡水透镜体的生物修复研究[J]. *海洋科学*, 2008, 32(4): 68-73.
ZHOU Congzhi, ZHAO Suli and QIAO Hua. Bioremediation research of freshwater lens in a coral island. *Marine Sciences*, 2008, 32(4): 68-73. (in Chinese)