

# 海水入侵防治研究与实践进展

李福林<sup>1,2</sup> 赵德三<sup>3</sup> 陈学群<sup>2</sup> 王永吉<sup>4</sup>

(1.中国海洋大学地球科学院; 2.山东省水利科学研究院; 3.山东省农业委员会; 4.国家海洋局第一海洋研究所)

**摘要:** 中国海水入侵的防治在近 30 年内经历了调查研究、试验探索和全面实施等三个历史阶段, 取得了在河口海岸地区和潜水含水层地区海水入侵防治的成功实践经验, 但目前对于承压含水层和多层含水层地区海水入侵的防治, 尚缺乏有效的理论指导和实践示范。近年来沿海地区兴起的填海造陆式的防潮工程、河口地下坝工程以及潮间带抽取地下咸水养殖技术等新型的防治工程, 是否会对海岸环境产生负面影响, 需要进一步的跟踪监测研究。借鉴国际上海岸生态恢复”和“河流生态恢复的先进理念, 我们提出海水入侵的生态防治理论, 应当是今后海水入侵防治的实践方向, 需要作进一步的理论完善和工程技术储备工作。

**关键词:** 海水入侵防治 理论与实践 生态恢复

海水入侵是海岸地区的普遍问题<sup>[1]</sup>, 国际上海水入侵的研究经历了静力学、渗流动力学和渗流—弥散动力学等研究阶段<sup>[2]</sup>, 学术研究的领域也从原来单纯的对咸淡水界面模型的模拟, 发展到包括海水入侵的基本理论、数值模型、水文地球化学和环境同位素、研究和调查方法、防治和减缓对策、生态影响、全球气候和海面变化影响等多个方面<sup>[3,4]</sup>。

中国海水入侵的研究领域主要集中在咸淡水界面运移模型(范家爵 1988, 吕贤弼 1991, 薛禹群等 1991, 艾康洪 1994, 李国敏 1995, 袁益让等 1996, 陈鸿汉 2000 等)、海水入侵的沉积环境(尹泽生 1992, 庄振业 1996, 孟广兰 1997, 李道高 2000 等)、水文地球化学和地球物理勘探(陈建生 1987, 韩延树 1993, 吴吉春 1996, 邱汉学 1996, 张永祥 1996, 周训 1997, 李福林 1999 等)、灾害防治(赵德三 1991, 1996 等)以及大量的个例研究等方面。

海水入侵的研究主要是因实践的需要而推动发展起来的, 因此, 一开始, 便与防治实践结下了不解之缘。相对于基础理论研究和应用技术研究而言, 目前中国海水入侵防治的实践, 不单纯是一个水文地质学中的技术层面的问题, 而是牵扯到资源利用和环境保护的区域发展的重要课题, 已早早从书本走到了活生生的现实, 中国海水入侵防治理论的发展明显落后于实践的发展。因此, 有必要对中国海水入侵防治的理论与实践作进一步的总结, 以利于完善和提高。

## 1. 中国海水入侵防治的发展阶段

根据海水入侵防治的理论发展以及实践深度, 可把中国海水入侵的防治分为三个历史阶段。

### 1.1 调查和初步研究阶段(20 世纪 70 年代后期——80 年代中期)

最早发现海水入侵现象的是沿海地区使用机井灌溉的农民。20 世纪 70 年代中期, 为开发地下水资源, 沿海和内陆一样, 兴起了打井高潮。原来布局在天然咸淡水界限附近的水井, 只有当大潮或风暴发生时,

井水才发生短暂的变咸，之后恢复。后来，随着农业灌溉面积扩大，水井密度的增加，开采量增加，某些水井水质长期变咸，浇地后造成庄稼枯萎乃至死亡。如山东省的龙口和莱州在 1975 和 1976 年便有井水变咸无法恢复的调查报道。进入 80 年代，沿海乡镇企业异军突起，工矿企业发展迅猛，其水源地布局不合理，多建在咸淡水界限附近，过量抽取地下水，加剧了海水入侵的发展，以致出现工农业争水打官司的局面。至 80 年代中期，海水入侵已成为十分普遍的一种现象，当地群众称之为“海水倒灌”，调查和初步研究由当地水利部门和农业部门完成，调查材料上多称之为“海水侵染”。

这一时期，对海水入侵的防治是一种被动式的防御。井水变咸了，老百姓弃井，改向淡水一侧继续打井使用；浅层水变咸，改用深层水。企业行为也是如此，如山东省寿光市羊口盐场的自来水供水水源地初期建在王高镇三号县路的北侧，后因水质变咸，一再向南侧的淡水区迁移，由于地下水漏斗的牵引，咸水入侵速度达到 350m/a。

因此，该时期的海水入侵防治是一种无序的被动式的防御。

## 1.2 研究、试验和探索阶段（20 世纪 80 年代中期——90 年代中期）

该阶段由于前期无序的开发以及被动的防御，造成海水入侵的加速和大规模发展，山东省海水入侵区由局部地段不断扩大成片，可划分为淮北平原咸水入侵区、蓬、黄、掖滨海平原海水入侵区以及烟台、威海、青岛、日照等地市的众多河口地段海水入侵区。该时段也是我国“七五”和“八五”建设同步时期，特别是 80 年代末期，莱州湾沿岸一些市县粮食减产，工厂被迫减产、停产，造成了极大的危害。海水入侵灾害引起了省级政府和中央政府的高度重视。

国家安排了“七五”攻关第 57 项（75-57）和“八五”攻关项目“海水入侵防治试验研究”（85-806），部分高校和研究单位还从事了基金项目及其他项目的研究工作，研究区域从山东省扩大至辽宁、河北、福建和广西等全国沿海各地，从沿海扩展到海中的岛屿。研究领域从海水入侵的起源、成因、类型和机理，到海水入侵的渗流、弥散、扩散的路径和基本规律等各个方面，涌现了一大批研究成果，尤其是数值模拟的研究达到了较高水平和影响。该时期与海水入侵防治密切相关的理论认识主要有：

- （1）现代海水入侵和咸（卤）水入侵的类型不同，防治措施也应不同。
- （2）海水入侵与沉积环境相关，应突出重点，区别防治。
- （3）海水入侵的发展存在阶段性变化规律，应采取分阶段防治措施。
- （4）海水入侵防治要多项措施相结合，综合防治。

以赵德三、尹泽生等为代表的攻关项目组，提出综合防治海水入侵的措施，并付诸于实际行动。具体包括兴建防潮堤、拦蓄补源、淡水帷幕、地下水回灌、引调客水、节水以及适应性作物栽培的农业开发等等。其成果集中反应在几部著作中<sup>[5,6]</sup>。

此外，一些学者还根据外国的经验，介绍了抽注水帷幕等防治措施，但该时期对于海水入侵的防治，处在研究、试验和探索阶段，上述防治措施仅限于技术层面，未上升到理论的层次。

值得一提的是，山东省水科院在考察日本国海水入侵的防治经验后，进行了地下坝防治海水入侵的工程试验研究，在龙口八里沙河建成中国第一座防治海水入侵的试验坝，探索了一条利用地下防渗墙（subsurface barrier）防治海水入侵的成功路子，该项成果获 1996 年度国家科技进步三等奖。

### 1.3 防治工程全面实施阶段（90 年代中期至今）

从“九五”开始，国家对资源环境领域的科技投入方向逐渐转向中国西部，仅有为数不多的几个国家自然科学基金项目支持研究项目，该时期海水入侵防治试验的研究工作也基本告一段落，但国家和地方政府对防治工程投资的支持力度增大。除了常规的拦蓄补源、地下水回灌防治工程，结合水利灌溉工程每年汛期实施外，这一时期还出现了一些新型的海水防治工程。

#### （1）填海造陆式的防潮和蓄淡工程

山东省莱州市朱家村 1994 年底—1998 年，为防治海水沿地表和河口的入侵，投资 1166 万元填湾造陆，分别建成长 800m 和 3000m 的两道拦海大坝，与普通防潮堤工程直接建在岸边不同，该村是将海岸线平直外推 1500m，形成荷兰式的填海造陆防潮工程。此后又相继投资在围坝内开挖临海浅塘水渠、兴建淡水水库、栽植果树林和芦苇，营建人工湿地。该村经过几年的治理，不仅成功防治了海水入侵，还达到了较好的社会环境效益。村支书王成湛也因此获得中国环境新闻工作者协会和香港“地球之友”设立的 2002 年度“地球奖”。

#### （2）河口地下坝工程

是指在滨海平原河口地区，主要采取高压喷射灌浆、静压灌浆等方法，构筑地下防渗墙，形成地下拦水坝，拦蓄地下潜流，以达到提高地下水位，防治海水入侵的目的。地下坝与其上游段的拦蓄工程常常结合形成所谓的地下水库，能够有效阻断海水入侵兼顾蓄水供水。地下坝一般选择在河流入海处的咸淡水界线附近，构筑的坝基下切不透水岩层，灌注材料选择防水性很强的水泥，大坝厚度约在 30-50cm，坝长可达数千米。目前全国已建有不同规模的地下水库 7 座，其中山东省有八里沙河、黄水河、白沙河、大沽河、外夹河和王河等 6 座地下水库，辽宁省建有龙河地下水库 1 座。地下坝和地下水库工程，具有提高地下水位，防治海水入侵、扩大淡水供应、不占耕地、无垮坝风险、投资小等优点。

#### （3）潮间带抽咸养殖工程

在潮间带抽取地下咸水养鱼是中国水产科学院黄海水产研究所的雷霖霖先生首先倡导的<sup>[8]</sup>。1992 年他把原产于欧洲大西洋东北部沿海的“大菱鲆”（*scophthalmus maximus*）引进中国并培育成功。1998 年首先在山东省莱州市的朱旺村创办起“温室大棚+深井海水”的养殖模式，此后，由于效益显著，逐渐推广到整个莱州市和山东省烟台的其他县市及日照市。现在，大菱鲆的养殖已从环渤海地区辐射到江苏、上海、浙江、福建、广东等沿海省市，形成了年产 15 亿元的新兴产业。在潮间带抽取地下咸水养殖，由于取水量巨大，降低了咸水水头，客观上起到了阻止海水沿地下含水层的入侵的目的。以莱州市为例，现有养殖大棚 1000 多个，每个大棚日用水 700—800m<sup>3</sup>，全市每天抽取地下咸水量高达 70—80 万 m<sup>3</sup>，已超出地下淡

水的开采量。这样，必然打破原先的入侵动态，据初步观测，莱州朱旺剖面的海水入侵区有变淡的趋势。

## 2 海水入侵防治的理论与实践经验总结

从上述发展阶段的各项措施，我们可以总结出以下几种防治理论。

### 2.1 现有海水入侵防治理论

#### （1）入侵类型差别防治论

中国存在现代海水入侵和咸卤水入侵两种类型，防治应分别针对不同的入侵源采取不同的措施。该理论对于制定海水入侵的宏观战略规划时，具有较强的优势。

#### （2）入侵层次防治论

咸水赋存于多层的海相地层中，由于开采层的变化，存在顺层、多层和越层的入侵，针对这种情况，应当根据不同层位的入侵实际情况，对重点层位进行防治。该理论对于技术层面，控制海水入侵的越流入侵、串层入侵有较为有效的指导意义。

#### （3）灾害阶段防治论

蔡祖煌和庄振业分别提出咸（卤）水和海水入侵发展的阶段性变化规律<sup>[2,7]</sup>，认为海水入侵从发生到发展，经历初始、加剧、减缓等三个阶段，该理论认识对于防治不同阶段的海水入侵具有指导意义。

#### （4）地下水限采论

基于地下水超采是引发海水入侵的主要原因，提出沿海地带要统一规划，限制地下水开采量。该理论对于制定县市级地下水开发规划，划定禁采区、限采区具有重要指导意义，已经在全国部分省市开始实施。

#### （5）人工补源论

主要包括拦蓄补源和地下水回灌，目的旨在抬高地下淡水水位。该理论指导的是一种常规的水利工程措施，只要合理利用，其成效十分显著，特别是对于入海流量巨大的河流，应当积极提倡。

#### （6）刚性工程论

主要指建造防潮堤和地下坝工程等刚性工程措施，通过直接切断淡水与咸水的联系来达到控制海水入侵的目的。

#### （7）客水论

该理论基于北方水资源短缺的现实和未来用水增长的需求，认为只有利用客水才是解决用水和防治海水入侵的根本措施，实际上属于水资源优化配置范畴。山东省沿海地区的成功经验和规划方案是，“限制开采地下水，扩大利用黄河水，积极引用客水”。

#### （8）抽咸补淡论

该理论最早由中国地质科学院水文地质环境地质研究所在华北地区进行综合治理旱涝碱咸的研究和试验中提出，目标是在地下咸水分布区，开采浅层苦咸水，腾出地下库容，利用天然降雨进行补给，以达到合理利用咸水资源，逐步降低土壤含盐量的目的。引申到海水入侵防治范畴，即是所谓的莱州市朱旺和朱

家村的模式，在咸水区大量抽取地下咸水，形成抽水帷幕，在淡水区兴建淡水水库，以淡压咸，从而达到防治海水入侵的目的。

2.2 实践经验及存在的问题

目前，山东省沿海已经初步形成海水入侵的综合防治体系（图 1）。在具体实践过程中，海水入侵得到治理效果较好的是拦蓄补源、地下水回灌措施以及地下水库的建设，应用地区主要是河口地区和现代海水入侵区域。比如，山东省的寿光市的弥河、莱州市的王河均利用汛期大量雨洪，实施引水回灌，抬高地下水位；龙口、莱州、青岛、烟台等地通过地下坝截渗，阻隔咸水向淡水区入侵，均取得了较好的效果。而且往往采取多种措施结合，达到综合防治的目的。

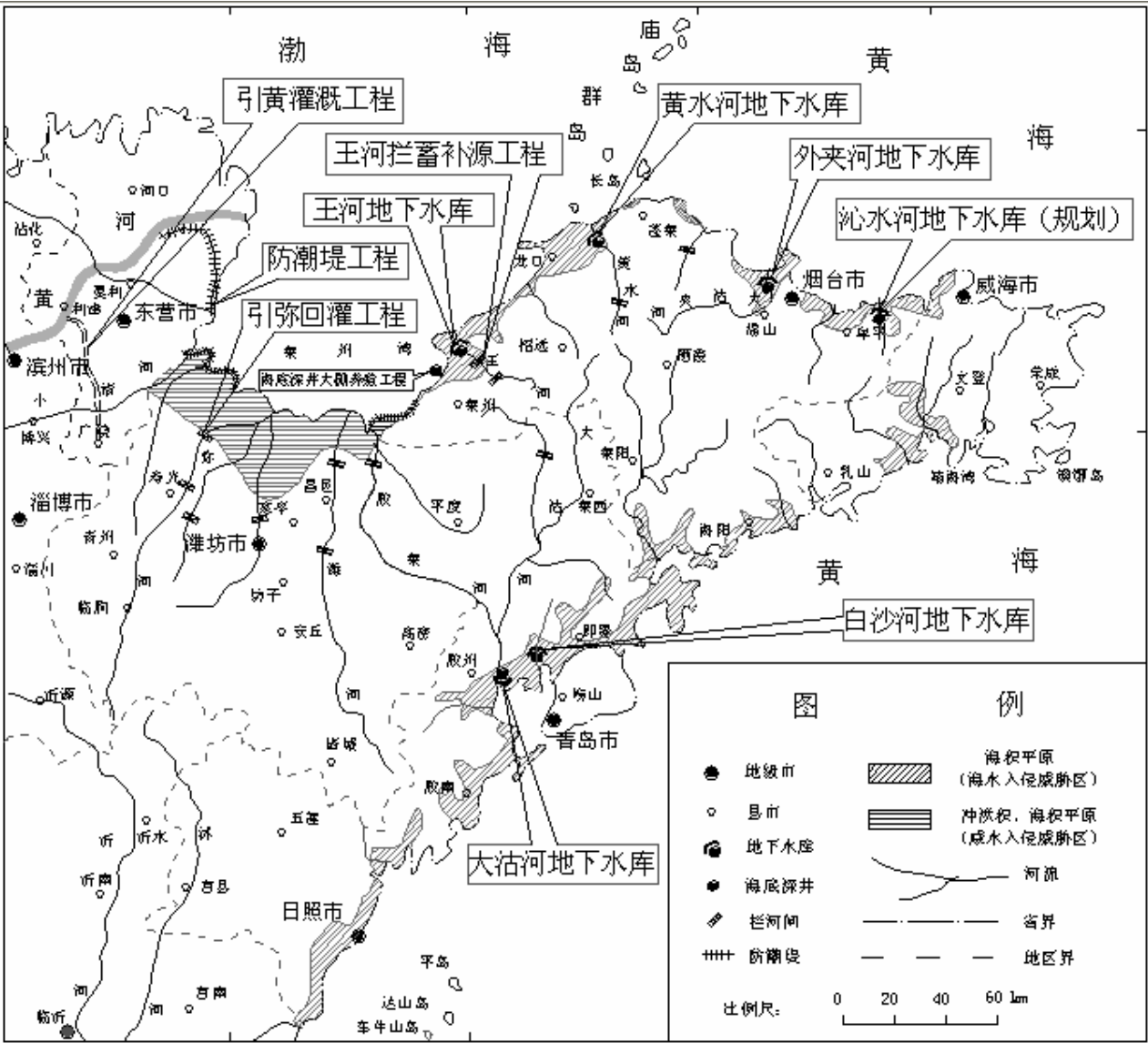


Fig.1 Distribution of seawater intrusion prevention engineering of Shandong province

但是，目前在防治工作中还存在许多问题，主要表现在：

- (1) 对承压含水层和多层含水层的入侵，尤其是咸卤水地区，第四系埋藏厚度较大，存在多个咸水层入

侵问题，目前还缺乏有效的防治实践措施。

(2) 防治工程的规划和设计沿用老规范标准，缺乏创新和系统性。

(3) 措施比较简单，缺乏高技术含量，如美国密西西比河采用上游放水水库和河口挡盐潜坝结合的方式来防治海水入侵。

(4) 现有的防治工程和措施，目标单一，较少考虑对生态环境的影响，对海水入侵的跟踪监测和治理工程的环境后效研究也很不够。

这一切，使得我们海水入侵防治工作还处在一个较低的层次。因此，如何在不违反安全性和海水入侵防治效果的基础上，研拟出一个可以兼顾生态和环境的新型措施，将是未来我国进行相关海岸防护工程的新趋势。需要提倡新的防治理念。

### 3.海水入侵的生态防治论

在海水入侵防治上的两种极端论点，即任其入侵至不透水岩层的消极论，以及完全把地下咸水赶出陆地的，均是不明智和不经济的做法。鉴于目前海水入侵防治理论上的不完善，防治理论以单一论居多，各有适用范围，未形成综合体系，以及较少顾及生态和环境的现状。我们借鉴国外海岸防护和河流生态恢复的先进理念<sup>[9, 10]</sup>，提出生态防治理论的观点，以期对海水入侵防治理论的发展有所裨益。

所谓海水入侵的生态防治理论，是以防治海水入侵和海岸生态恢复为双重目标，综合运用各种工程的和非工程的措施，集成一个立体的防治体系，维持咸淡水界面达到一种动态的平衡，把海水入侵控制在一个可容忍的程度。

为此，我们提出如下几点可供操作的具体措施。

#### 3.1 构建生态型海岸防护建筑物

传统的海岸防护工程，不外乎兴建离岸堤、突堤和防潮堤，将海岸线变成一道固若金汤的“海岸长城”。这种“水泥化”的海岸防护工程，不但需花费巨额的建造及维护费，使海岸景观变得极为单调，剥夺了民众亲海的空间，也破坏了珍贵的海岸生态环境。

从生态防治理论出发，要废弃直立式防潮堤的传统设计理念，代之以斜坡式，靠近水面部分因风浪作用力大可置放混凝土消波块，水面下则置放石块，这种护岸可减轻地基的承载力且造价低廉，重要的是这种抛石护岸具有鱼礁藻场效果。

在无碍航行安全下，可采取不破坏景观的离岸潜堤设计，或以适当宽度的海滩沙丘及种植沙丘植物替代消波块，以增加海岸的自然景观性，以及维护海岸之栖地，并保护海岸的生态环境。

另一种新的作法，是二重堤或主副堤的设计，即在主堤前面另设置一复断面的倾斜堤，取代主堤前的大量消波块，复断面堤前面的消波块可减小数量或体积，不需完全阻挡波能。复断面堤后面的小段部，有适当的水深和足够的宽度可生长海藻海草。而中间水域因波浪变小可成为很好的生物栖息环境。

#### 3.2 地下水库设计和建设要考虑环境影响

目前国内修建的地下水库，均是建在不透水基岩上的“封闭式”或“贮存型”，地下坝拦截了地下潜流，造成地下水在库内循环速度变缓，一旦上游污水流入，水质的恢复需要较长的时间。对此我们可以采取强排的方法处理，但要浪费很大的人力物力。从生态防治的角度出发，最好设计不建在基岩上的“开敞式”、“半封闭式”或“径流调控型”的地下水库，以利于地下水的循环和物质交换，当然，要加强监测和用水管理，保证库内地下水位降低的幅度不至于引起咸水的入侵。这在咸水入侵的非敏感地段和危险性相对较差地段可以采用。另外，设计和建设时还要考虑地下水位升高会不会带来坝基的不稳定及由此产生的滑坡，地下水位接近地面能否带来对植被和作物的不利影响等等。

### 3.3 合理规划布局，潮间带适度开采地下咸水

个别沿海地区为了单纯经济利益，形成一哄而上的抽咸养殖的局面，地下水位大幅度下降，水量出现明显不够，倡导咸水养殖的雷霖霖也认识到了这一点。大功率柴油机车开进海滩打井，土石料和人工垃圾随处大量弃置，造成近海新一轮污染，而且金灿灿的砂质海岸养殖大棚林立，防护林被沙坑包围。潮间带生物资源丰富，海滩是吸引的旅游场所，人类活动的增强对海岸生态系统和栖息地的威胁，必然引起生物多样性的丧失的亲自然环境的破坏。另一方面，滨海淡水含水层和近岸地下咸水层是一个统一的陆海相互作用的水文地质单元，地下咸水的大幅度开采，在引起咸淡水界面后退的同时，咸水区由于抽水井密封不严、废井的“开天窗”等人为因素，接受上覆海水的补给量也会大大增强，如果大规模的海水涌入地下咸水层，能否引起新一轮的海水入侵尚属未知。因此，我们提倡咸水开采要在计算允许开采量基础上，因地制宜，统一规划布局，加强管理。

### 3.4 河道用水，要留有入海径流，保护河口海岸湿地和生态

河流生态恢复技术是一种新的治河理念，在满足人对水的开发利用水域需求的同时，还兼顾水体本身存在于一个健全生态系统之中的需求，同时，河流恢复工程建设还提倡公众对于水环境保护的积极参与，造成一种人与自然亲近的环境，能够体现水域天然的美学价值。

根据这一观点，在开发利用河流时，要明确河流与其上下游、左右岸的生物群落处于一个完整的生态系统中，进行统一的规划、设计。在满足供用水要求的基础上，尽可能维持一定的入海径流，保护河口湿地，保护海岸植被群落，不仅能够有效缓解海水入侵，还可为当地野生的水生与陆生植物、鱼类与鸟类等动物的栖息繁衍提供方便条件，改善生态环境，更好协调人们在用水与生态系统建设的不关系。

### 参 考 文 献

- 1.Custodio, E. Groundwater problems in coastal areas. UNESCO, Belgium, 1987.
- 2.Cai Z H and Ma F S[J]. Basic theory of saline intrusion and its application to prediction of saline intrusion development[J]. The Chinese journal of geological hazard and control. 1996, 7(3):1-9 蔡祖煌、马凤山，海水入侵的基本理论及其在海水入侵发展预测中的应用，中国地质灾害与防治学报，1996，7(3):1-9.
- 3.Li G M and Chen C X. The development and Trend in researches of saltwater intrusion[J]. Earth Science Frontioers. 1996, 3(1,2):1-5. 李国敏、陈崇希，1996，海水入侵研究现状与展望，地学前缘，3(1,2):1-5.
- 4.Alexander H.-D. Cheng, Leonard F. Konikow and Driss Ouazar, 2001, Special Issue of Transport in Porous Media on‘Seawater Intrusion in Coastal Aquifers’,*Transport in Porous Media*, 43: 1-2.

5. Yin Z S. Researches of saltwater intrusion in the coast area of Laizhou city[M]. Ocean Press. 1992. 尹泽生, 莱州市滨海区域海水入侵研究, 北京: 海洋出版社, 1992.
6. Zhao D S. The researches of saltwater intrusion disaster prevention and control[M]. Shandong: Science Press. 1996. 赵德三, 海水入侵灾害防治研究, 济南: 山东科技出版社, 1996.
7. Zhuang Z Y *et al.* The Role of Anthropogenic Activities in the Evolution of Saline Water Intrusion Processes[J]. Journal of ocean university of Qingdao. 1999(1):141-147. 庄振业、刘东雁、杨鸣等, 1999, 莱州湾沿岸平原海水入侵灾害的发展进程, 青岛海洋大学学报, 1999(1):141-147.
8. Lei J L *et al.* Review of “green house + deep well seawater” industrialized culture pattern of turbot[J]. Marine fisheries research 雷霖霖、门强、王印庚、王秉新, 2002, 大菱鲆“温室大棚+深井海水”工厂化养殖模式, 海洋水产研究, 23(04): 1-7.
9. Ronald M. Thom, Adaptive management of coastal ecosystem restoration projects, Ecological Engineering . 2000, 15 (3-4 ): 365-372.
10. Dong Z R. Theoretical frame work for eco-hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering. 2003, 1:1-6. 董哲仁, 生态水工学的理论框架, 水利学报, 2003, 1:1-6.

## ADVANCE IN THEORY AND PRACTICE OF SEAWATER INTRUSION PREVENTION IN CHINA

Li Fulin<sup>1,2</sup> Zhao Desan<sup>3</sup>, Wang Yongji<sup>4</sup> Chen Xuequn<sup>2</sup>

(1.College of Geosciences, Ocean University of China; 2.Water Conservation Research Institute of Shandong Province; 3.Agriculture Committee of Shandong Province; 4.First Institute of Oceanography, SOA )

**Abstract:** Seawater intrusion prevention in china has passed through three periods of investigation, test and implementation in the nearly 30 years. Much success of prevention is achieved in the area of coastal aquifer and phreatic aquifer. However, effective theory and practice are needed to conduct the seawater prevention in the area of confined aquifer and multi-layer aquifer. New types of prevention engineering have being constructed in the coastal area from several years ago, of which including land-filling tidal prevention project, subsurface barrier project in the estuary and submarine salty water exploration project for breed aquatics. Whether these projects do harm to the coastal environment needs more constant monitoring and research. Using the advanced international theory and technique of coastal and river ecosystem restoration, we present that the ecological prevention theory should be the guide of the proper way to prevent seawater intrusion, but much work should be done to make the theory perfect and make progress with the engineering technology in the future.

**Keywords:** Seawater Intrusion Prevention, Theory and Practice, Ecosystem Restoration