

中国沿海地区海水入侵现状与分析

刘杜娟

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 首先介绍了我国存在着严重海水入侵灾害的三大河三角洲——长江三角洲、珠江三角洲、老黄河三角洲(莱州湾地区)海水入侵现状。长江口和珠江口海水入侵主要受河流入海径流量和河口潮汐影响,莱州湾地区海水入侵的产生则主要是人类过量开采地下水所致。地下淡水和咸水之间存在着一个动态平衡的混合界面,淡水储存一旦减少,平衡状态被打破,该界面便会向陆移动,最终产生海水入侵。海水入侵的发生受着诸多因素制约。在中国沿海地区,地下淡水的储备与人类的用水需求之间存在着矛盾,人类过量开采地下水是产生海水入侵的主导因素。因而开源节流、人工回灌地下水、阻隔水流等措施在防治海水入侵方面是行之有效的。

关键词: 中国沿海地区; 海水入侵; 机制; 危害; 防治措施

中图分类号: X43;p512.32;p731.2;p343.5 **文献标识码:** A

1 引言

海水入侵是由于滨海地区地下水动力条件发生变化,引起海水或高矿化咸水向陆地淡水含水层运移而发生的水体侵入过程和现象。目前人们对海水入侵的定义还没有取得一致意见,甚至对这一现象的称谓及涵盖的范围都存在着不同认识。国外文献一般称之为盐水入侵(salinity intrusion),国内文献除称其为海水入侵外,还有海水侵染、海水内浸、海水地下入侵、盐水入侵、咸水入侵、咸水侵染、卤水侵染等,但相对而言,接受“海水入侵”这一名词的人数更多^[1]。

目前全世界范围内已有50多个国家和地区的几百个地段发现了海水入侵,主要分布于社会经济发达的滨海平原、河口三角洲平原及海岛地区。20世纪80年代以来,我国渤海、黄海沿岸不同程度地出现了海水入侵加剧现象,其中以山东省莱州湾沿岸最为突出。全国累计海水入侵面积达1 000 km²左右,最大入侵距离超过10 km,最大入侵速率超过400 m/a。由此造成的经济损失每年约8亿元人民币^[1]。

币^[1]。

本文在前人工作的基础上,简要总结了我国三大河三角洲(长江三角洲、珠江三角洲和老黄河三角洲莱州湾地区)海水入侵现状,并就其形成机制、影响因素、造成的危害以及相应的防治对策作出分析。

2 中国大河三角洲海水入侵现状

我国海岸线长达 1.8×10^4 km,是全球海岸线最长的国家之一,沿海地区是我国社会经济发展战略重点所在,尤其是长江、珠江、黄河三角洲地区。

2.1 长江口海水入侵现状

长江三角洲地区除长江口外,其他入海口都建有挡潮闸,所以长江口是该区唯一遭受海水入侵危害的河口。长江口为盐、淡水混合型河口,对其海水入侵强度变化起决定作用的主要是长江下泄流量和河口潮汐两个因素。长江径流量的季节性变化和河口潮汐的周期性运动,使长江口海水入侵变化有一定的规律性。

1979年春是近10多年来长江口海水入侵最为严重的时期。1978年长江流域枯水,1979年春又遭

春旱,加之沿江各地大量抽水,致使实际到达河口的径流量减少,导致河口海水入侵加剧。根据实测资料分析,吴淞水厂氯度值最高达到 $3\,950 \times 10^{-6}$,氯度值超过 250×10^{-6} 的持续时间长达 64 d(1979年1~3月)^[2]。此次海水入侵影响范围,从口门向上游延伸 170 多 km,直至江苏省常熟市的望虞河口与浒浦河口。

1987年春是又一次海水严重入侵时期^[2]。1987

表 1 1987年2月16日至4月10日长江口实测氯度值特征指标统计

Table 1 Indexes of chlorinity surveyed on the spot in Yangtze estuary from Feb. 16 to Apr. 10, 1987

地点	统计实例系列(h)	含氯度最大值($\times 10^{-6}$)	含氯度大于 250×10^{-6} 的小时数	含氯度大于 250×10^{-6} 的时数与总统计时数之比	T_0
三条港	1 440	16 637	1 440	100%	0/60=0.00
青龙港	1 440	14 288	1 209	84%	10/60=0.17
崇头	1 440	7 869	834	58%	25/60=0.42
堡镇	1 440	5 825	1 289	90%	7/60=0.12
南门	1 440	2 945	1 080	75%	17/60=0.28
新建	1 440	1 599	524	36%	40/60=0.67
高桥	1 440	2 965	1 108	77%	15/60=0.25
吴淞	2 880	3 110	880	30.5%	86/120=0.72
宝钢	2 160	1 705	831	38.5%	55/90=0.61
钱泾口	1 440	1 466	506	35%	55/60=0.87
徐六泾	1 440	133	000	0%	60/60=1.00

注: $T_0 = T_1/T_2$, T_1 为一天内含氯度小于 250×10^{-6} 的历时数大于 4 h、可供抽水的天数; T_2 为统计实测系列天数。

由此可见,长江口下泄入海流量是控制长江口海水入侵强度的主导因素。在长江洪季,径流十分丰富,长江口河段基本为淡水所控制。吴淞口多年日均氯度大于 100×10^{-6} 的机率不足 1%;而在长江枯季,径流作用显著减弱,潮汐作用相对增强,海水入侵较为严重,吴淞口多年日均氯度大于 100×10^{-6}

的机率可达 40%以上。受潮位周期性升降影响,河口水体含氯度也随之变化。一般年份,氯度与潮位过程线之间具有较好的相似性,只是氯度变化滞后于潮位变化,两者之间存在一定的相位差(图 1)。而在长江丰水年份($P=20\%$),较强的径流作用则使氯度月变化与潮位变化之间的对应关系不明显^[3]。

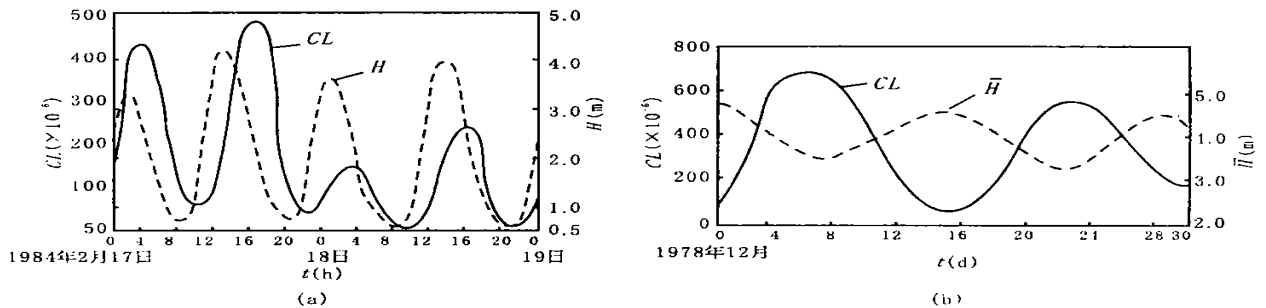


图 1 高桥站逐时氯度与潮位过程线(a)和吴淞站逐日氯度与平均高潮位过程线(b)

Fig. 1 Hourly curve of chlorinity and tide level in Gaoqiao station (a) and daily curve of chlorinity and average high tide level in Wusong station (b) (据杨桂山等,1993^[3])

长江口南北支河段海水运移和氯度分布具有不同特点。北支河段分流量小,潮流作用强,总体海水入侵强度远大于南支河段,氯度分布从上游至口门沿程递增。南支则是长江排泄径流的主要通道,总体

海水入侵强度没有北支严重。由于海平面上升影响,长江口海水入侵的危害将会加剧。杨桂山等(1993)^[3]经过计算表明,当海平面上升 50 cm 时,枯季南支落憩 1‰和 5‰等盐度线的入侵距离将分别

比现状增加 6.5 km 和 5.3 km。在长江下泄流量不足 $11 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,两等盐度线可分别上溯至高桥和小九段以上河段。海平面上升 80 cm 时,1‰和 5‰等盐度线入侵距离将分别比现状增加 9.8 km 和 8.1 km 左右。

2.2 珠江三角洲海水入侵现状

影响珠江口海水入侵的动力是潮汐和径流。周文浩(1998)^[4]研究认为,在珠江口外,枯水期底层盐度在 30‰~33‰之间,相关不大,而表层盐度磨刀门海区明显见小。根据海岸带实测资料,当其他口门外表层含盐度为 2‰以上时,磨刀门海区近口处只有 4‰~14‰。珠江口含盐度等值线明显受上游径流来水量影响。伶仃洋海区由于上游来水量不大,潮势较强,加上底坡平缓,海水自伶仃洋长驱直入。崖门的情况与伶仃洋相似。

周文浩(1998)^[4]分析了珠江口主要代表站的含盐度资料之后认为,河口变淡是总的趋势。变淡的因素也是潮汐和径流。这两个因素的变化是由于:(1)河口延伸、原断面径流动力增加;(2)浅海淤积,海水入侵阻力加大。由于浅海淤积速率大于珠江口相对海平面上升速率,所以他认为海水入侵对珠江三角洲的影响是逐步减弱的。

2.3 莱州湾海水入侵现状

山东省莱州湾地区是指广饶、寿光、寒亭、昌邑、平度、莱州、招远和龙口八个县(市区)的沿海地区,面积 10 000 km^2 ,人口约 455 万。这里是经济发达的沿海开放地区,其海水入侵具有动态变化大、潜在危害大、难以治理等特点。

据有关资料^[5],近 20 a 来,莱州湾东、南沿岸的海水入侵灾害一直在发展。1989 年海水入侵面积达 627.3 km^2 ,1995 年达 762.5 km^2 ,地下水漏斗负值区超过 2 000 km^2 。庄振业等(1999)^[5]根据莱州湾地区各县市多年的观测数据,将 1975~1995 年 20 年间该区的海水入侵灾害划分为初始、发展、恶化、缓解四个发展阶段。(1)1976~1979 年为初始阶段。水质的季节性变咸预示了海水入侵的即将开始。(2)1980~1986 年为发展阶段。1981~1986 年本区降水连年偏小,工业用水急剧猛增,导致咸水锋面急剧向陆迁移,海水入侵范围迅速扩大数倍。(3)1987~1989 年为严重恶化阶段。1987~1989 年是本区海水入侵严重的三年,水资源补给量降到历史上的最低点,而工农业需水量成倍增长,导致本区各县市地下水负值总面积达 1 498 km^2 (1989 年),海水入侵范

围也增至 627.3 km^2 。(4)1990~1995 年为缓解阶段。此时降雨有所增加,调入一定量的黄河水和采用一些节水抗灾措施后,海水入侵灾害虽然仍在发展,但其势头得到了抑制,速率明显变慢。

3 海水入侵机制

海水入侵地下水是咸淡水相互作用、相互制约的流体动力学过程。在自然状态下,含水层中的咸、淡水保持着某种平衡,滨海地带地下水水位自陆地向海洋方向倾斜,陆地地下水向海洋排泄,二者维持相对稳定的平衡状态。两者之间的过渡带或临界面基本稳定,可以阻止海水入侵。然而,这种平衡状态一旦被打破,咸淡水临界面就要移动,以建立新的平衡。如果大量开采地下水或者河流入海径流量减少,淡水压力降低,临界面就要向陆地方向移动,含水层中淡水的储存空间被海水取代,于是就发生了海水入侵。吉恩和赫兹伯格分析认为^[1],在天然条件下海岸带附近咸、淡水分界面的埋深相当于淡水水位高出海平面高度(h_i)的 40 倍。开采地下淡水时,经常在开采井附近形成降落漏斗和咸水入侵的反漏斗;如果开采量过大,则咸水反漏斗扩大上升,使咸水进入开采井中而污染水源(图 2)。

4 影响海水入侵的因素

4.1 水文地质条件

滨海地区地下淡水与海水之间存在水力联系是海水入侵的物质基础。发生海水入侵的滨海平原区地层主要为第四纪松散沉积物,透水能力强,地下淡水与海水之间缺乏稳定的隔水层。当地下水位长期处于海平面以下时,海水通过含水层迅速向陆入侵,形成海水倒灌。

4.2 地形地貌条件

沿海平原一般地势低平,地下水埋藏浅,由于过量开采地下水,使其水位下降,形成负值区,改变了滨海地区地下水径流补给方向,从而引起海水入侵。

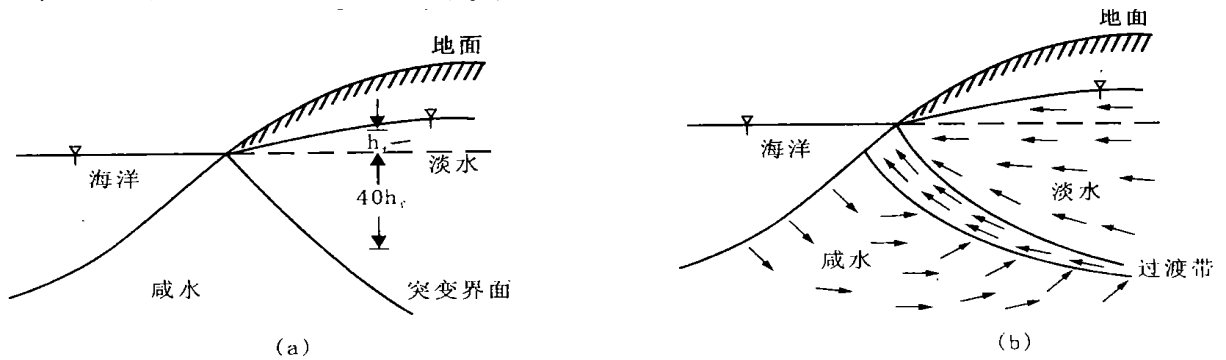
4.3 气候条件

地下水来源主要靠大气降水来补给。如果气候持续干旱,地下水补给量严重不足,同时河流入海径流量也减少,将加剧海水入侵活动。全球气候变暖、相对海平面上升可增大潮水沿河流的上溯距离,加剧风暴潮侵袭,结果亦可诱发海水入侵。

4.4 人类活动

人类活动对地下淡水资源的开发利用是滨海地

带咸、淡水平衡状态遭受破坏的重要因素。许多地区



(a) 水力平衡条件下海水与淡水的相混溶界面

(b) 滨海含水层中淡水和海水的流动过程及混合带

图 2 滨海含水层中淡水和海水的流动过程及分界面变化示意图

Fig. 2 The flow process and interface change between fresh water and seawater in water-bearing strata at seashore

(a) the unmixing interface between seawater and fresh water under hydraulic balance

(b) the flow process and mixed zone between seawater and fresh water in water bearing strata at shallow sea

(据潘懋, 李铁峰, 2002^[1])

由于长期超量开采地下水而使地下水水位大幅度下降, 形成低于海平面的负值区, 进而发生海水入侵。海水养殖和引潮晒盐等经济活动把大量海水引入陆地也扩大了海水向地下淡水的入侵范围。此外, 在入海河流的上游地区修建水库、塘坝等水利设施, 使河流入海水量普遍减少, 在河口地区大量挖砂降低河床标高的人为活动, 则加剧了潮水上溯距离, 使河流两侧发生海水入侵。

总之, 在影响海水入侵的因素中, 干旱少雨、水资源不足是背景条件, 含水层导水性等水文地质特征是基础条件, 不合理的人类开发活动是诱发条件。三者共同作用的结果可能导致沿海地区出现大范围的海水入侵。

5 海水入侵的危害

5.1 水质恶化, 灌溉用水源地减少

海水入侵使地下淡水资源更加缺乏, 沿海地区居民和牲畜饮用水受到影响。海水入侵首先使地下水氯离子含量增加, 矿化度升高, 使之逐渐丧失了使用价值。一方面继续超采地下水使地下水位再度下降, 另一方面不得不移地开采地下水, 导致海水入侵范围的不断扩大, 出现地下水位下降→海水入侵→地下水咸化→地下水位再下降的恶性循环。

5.2 土壤生态系统失衡, 耕地资源退化

滨海地区土壤生态系统因受气候及地下水含量变化的影响, 土壤中的水分及营养元素很不稳定。海水入侵后使地下咸水沿土壤毛细管上升进入耕作

层, 导致土壤发生盐渍化。农业长期利用高矿化度水进行灌溉, 盐分不断在土壤表层聚积, 导致其物理性状变差, 微生物活动减弱, 有机质下降, 最终导致土壤肥力下降。

5.3 影响工农业生产

海水入侵区水质恶化, 土壤盐渍化, 导致水田面积减少, 旱田面积增加, 有效灌溉面积减少, 耕地面积减少, 荒地面积增加, 农业生产受到严重影响。

海水入侵区的工业企业也会受到影响。由于水质恶化, 水质要求较高的企业不得不开辟新的水源地或实行远距离异地供水, 这不仅增加了产品的生产成本, 同时也可能使新辟水源地遭受污染, 扩大海水入侵范围。没有充足资金开辟新水源地的企业只能使用被海水污染的水源, 结果使生产设备严重锈蚀, 使用寿命缩短, 更新周期加快, 同时还造成产品质量下降, 有的企业则被迫搬迁或停产。

5.4 对人口素质及社会稳定的影响

海水入侵使人口健康水平降低。由于淡水缺乏, 海水入侵区的大量人口时常或常年饮用咸水, 导致地方病流行。许多人患甲状腺肿大、氟斑牙、氟骨病、布氏菌病、肝吸虫病等。据有关资料, 山东莱州湾地区 8 县市氟病患者人数达 61 万, 加上其他地方病, 患者总数达 68 万人^[6]。日本和美国的学者通过研究还发现, 中风、几种慢性心血管疾病及癌症与饮用盐份超标的地下水关系较为密切。

5.5 自然生态环境恶化

沿海地带生态环境脆弱, 其生态系统在自我调

节和抗干扰的缓冲性方面都比较弱。海水入侵的结果使土壤含盐量增加,盐生植物群落如碱蓬、黄须菜等日益增多,在大范围内其覆盖度可达90%以上,从而使植物群落由陆生栽培作物为主的生态环境转化为耐盐碱的野生植被环境。

6 海水入侵的防治措施

6.1 合理开采地下淡水资源,开源节流

解决淡水问题是减轻海水入侵的主要途径。从沿海地区水资源供求情况来看,缺乏淡水已成定局。从长远看,引调客水是控制沿海地区海水入侵的重要战略措施。但从近期来看,通过工程措施和调度手段使水资源供需状态趋于好转更加切合实际。要合理布置开采井,放弃咸、淡水界面附近的抽水井,分散开采、定期停采或轮采地下水、缩短水位恢复时间,以防止形成降落漏斗。

6.2 开展人工回灌,引淡压咸

开展人工回灌,补充地下淡水,提高滨海地区地下淡水的水位和流速,以淡水压咸水,迫使海水后退,有效防止海水入侵。回灌水源主要有当地雨季的地表水、外地引水、处理后的废污水等。

6.3 阻隔水流

阻隔水流具体有设置隔水墙、修筑地下拦水坝、农田暗管排水、深井排水、竖井排水等措施。通过设置隔水墙可使淡水和咸水分离,具体方法是灌注某种呈悬浮状态的物质,如高塑性粘土浆,使悬浮物充填土壤孔隙,形成不透水屏障。农田暗管排水在排碱、除涝、防渍、降低地下水位等方面效果十分显著,在工程截渗方面也行之有效。深沟排水在天津洼涝盐碱地治理和改碱过程中已被广泛采用,并取得一定成效^[7]。竖井排水是工程排水和农田排水中行之有效的排水措施。通过截渗和农田排水,可改善地下水水质,补充承压含水层水量,改善软地层压缩条件。

6.4 改善生态环境

通过兴修水利工程,调整种植业结构,植树造林,发展畜牧等措施,在海水入侵区建立结构合理、功能稳定、经济效益高的农业生态经济体系,提高抗灾能力,缓解海水入侵灾害带来的不利影响。

6.5 建立沿海地区地下水监测系统

建立沿海地区地下水动态监测网,进行水位、水化学监测,必要时辅以海水水文动态监测。根据海水入侵的形成机制和入侵规律,预测海水入侵速率、规

模和危害范围,从而为有效防治海水入侵提供科学依据。

7 结语

(1) 长江口和珠江口的海水入侵主要受入海河流径流大小以及河口潮汐影响,而存在严峻海水入侵问题的莱州湾地区,其海水入侵的发生主要是人类过量开采地下淡水所致。

(2) 沿海地区陆地淡水与海水之间存在着一个动态平衡的临界面。一旦大量开采地下水或海平面上升,将导致平衡状态的破坏,该临界面就要向陆地移动,含水层中淡水的储存空间被海水取代,结果就会发生海水入侵。

(3) 影响海水入侵的因素除了有水文地质条件和地形地貌条件之外,气候条件和人类活动则是产生海水入侵的重要因素。

(4) 海水入侵可导致沿海地区水质恶化,灌溉用水源地减少;土壤生态系统失衡,耕地资源退化;使工农业生产受到影响;降低人口健康水平,影响社会稳定;最后必将导致自然生态环境的恶化。

(5) 防治沿海地区海水入侵的措施主要有:合理开采地下淡水资源,开源节流;开展人工回灌,引淡压咸;设置隔水墙、修筑地下拦水坝等阻隔水流;调整产业结构,改善生态环境;建立沿海地区地下水监测系统。

参考文献

- [1] 潘懋,李铁峰. 灾害地质学[M]. 北京:北京大学出版社,2002:249-253.
- [2] 徐海根,朱慧芳. 海平面上升对长江口盐水入侵的影响[A]. 见:中国科学院地学部. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策[C]. 北京:科学出版社,1994:234-240.
- [3] 杨桂山,朱季文. 全球海平面上升对长江口盐水入侵的影响研究[J]. 中国科学(B辑),1993,23(1):70-76.
- [4] 周文浩. 海平面上升对珠江三角洲咸潮入侵的影响[J]. 热带地理,1998,18(3):266-269.
- [5] 庄振业,刘冬雁,等. 莱州湾沿岸平原海水入侵灾害的发展进程[J]. 青岛海洋大学学报,1999,29(1):141-147.
- [6] 韩美. 山东省莱州湾地区海水入侵对社会与经济的影响[J]. 自然灾害学报,1997,6(1):82-87.
- [7] 田佩琦. 相对海平面上升与天津盐碱地的防治[A]. 见:中国科学院地学部. 海平面上升对中国三角洲地区的影响及对策[C]. 北京:科学出版社,1994:246-250.

THE SITUATION AND ANALYSIS OF SALINITY INTRUSION IN COASTAL AREAS, CHINA

LIU Du-juan

(Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: This paper sets forth the present situation of salinity intrusion in areas of Yangtze Delta, Zhujiang Delta and Huanghe Delta (Laizhou Bay). The salinity intrusion in the former two areas is under the control of runoff and tide. But the main reason of the salinity intrusion in Laizhou Bay is the excessive drawing of underground fresh water. There is a dynamic equilibrium interface between underground fresh water and salt water. If the storage of fresh water decreases and the equilibrium is lost, the salinity intrusion occurs. This is controlled by several factors. There is a conflict between the storage of underground fresh water and the demand of human being for it. Excessive underground water drawing is the main factor that results in salinity intrusion. So, looking for new source of fresh water, water saving, recharging fresh water artificially, separating fresh water and salt water are useful to prevent the generation and development of this hazard.

Key words: China coastal areas; salinity intrusion; prevention strategies

作者简介: 刘杜娟(1973—),女,1995年毕业于河北地质学院水文地质与工程地质专业,1998年至2001年在中国地质科学院地质力学研究所攻读构造地质学专业硕士学位,从事矿田构造及构造物理化学等方面研究工作,现在国家海洋局第二海洋研究所从事海洋地质学与海洋环境综合评价等方面研究工作。