

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.009

滨海地下水库建设与利用方式对含水层 水盐运移规律的影响

王宗志,王宇,王坤,白莹

(南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室,江苏南京 210029)

摘要:为揭示地下水库建设与地下水开采方式对滨海含水层水盐运移规律的影响,建立了 $300\text{ m} \times 900\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的概念数值模型,并采用非承压含水层变密度流模拟方法,解析地下水库建设前后不同开采情景下的滨海含水层水盐运移规律。结果表明:地下水库建设可显著降低海水入侵范围与程度;地下水开采能在一定时间范围内加速地下水库残留海水入侵扩散程度,咸水入侵系数与开采规模、开采井与地下坝之间的距离成指数关系;合理布设开采井位置与开采规模,能有效降低地下水开采对库区水体咸化的负面影响。

关键词:滨海含水层;海水入侵;地下水库;地下水开采方式

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0069-10

Influences of coastal underground reservoir construction and utilization on saltwater and freshwater transport law in aquifers // WANG Zongzhi, WANG Yu, WANG Kun, BAI Ying (*The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: In order to reveal the impact of underground reservoir construction and extraction methods on the saltwater and freshwater transport law in coastal aquifers, a $300\text{ m} \times 900\text{ m} \times 30\text{ m}$ conceptual numerical model was established. The variable density current simulation method of unconfined aquifer was used to analyze the saltwater and freshwater transport law in coastal aquifer under different extraction scenarios before and after the construction of underground dam. The results show that the construction of underground dam can significantly reduce the scope and degree of seawater intrusion. Groundwater extraction can accelerate the intrusion and diffusion of residual saltwater in underground reservoirs within a certain time range. The coefficient of saltwater intrusion is exponentially related to extraction scale and the distance between extraction wells and underground dams. Reasonable layout of the location and scale of extraction wells can effectively reduce the negative impact of groundwater extraction on water salinity in the reservoir area.

Key words: coastal aquifers; seawater intrusion; underground reservoir; groundwater extraction method

滨海地区经济发展、人口发育迅速,水资源需求量大,加之受气候变化、海平面上升影响,多数滨海地区面临水资源短缺和海水入侵的双重威胁^[1-2]。在流域下游适宜位置建设贯穿地下含水层的物理隔渗墙,截断海水入侵路径,形成可“挡咸蓄淡”的地下水库,既可以防治海水入侵,又能有效增加水资源利用量^[3],已成为滨海流域,特别是水资源匮乏的山东半岛独流入海流域保障水资源安全的常用工程措施^[4-6]。由于在建库之前含水层内多已发生海水入侵,地下水库建成后库区内残留大量咸水,地下坝

刚性阻断海水入侵的同时,导致库区内残留咸水外排困难,地下水咸化问题严重^[7-8]。若地下水开采井位置和开采流量控制不当,不仅增加库区咸化范围,甚至导致开采井水体盐度上升^[9]。因此,研究地下水库开采井位置和开采流量对库区水盐运移的影响规律是滨海流域地下水保护与利用的重要基础和前提。

国内外学者对地下水位及水质管理开展了大量研究^[10-12],在滨海地区主要关注海水入侵范围及其对咸淡水边界条件、地下水库修建等变化的响

基金项目:国家自然科学基金项目(U2240223);水利技术示范项目(SF-202210)

作者简介:王宗志(1977—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水资源复杂系统运行与管理研究。E-mail:zzwang@nhri.cn

应^[13-16]。早期研究主要是采用数值模拟方法,认为天然条件下残留于地下水库内的盐水楔是近乎静止的,后来相关试验结果表明,地下含水层内高浓度盐分可以随着顶部的淡水流出封闭系统,盐浓度逐渐降低^[17]。近些年,随着数值模拟技术的高速发展,已经成为研究地下水水量水质的主要方法。SEAWAT 是美国地质调查局在地下水流模拟模型 MODFLOW^[18] 与地下水溶质运移模拟模型 MT3DMS^[19] 基础上,考虑变密度水流及溶质运移过程,通过二次开发形成的一种变密度地下水流模拟模型。SEAWAT 已成为目前研究变密度地下水问题常用的模型之一,有较好的稳定性与有效性。为探究地下水库修建后库区内盐浓度的变化规律, Luyun 等^[20] 利用 SEAWAT 模型构建了实验室尺度的水盐运移二维概念模型,模拟分析了地下坝建立后库区内水盐运移规律,结果表明地下坝修建后,残留盐水楔首先被压平,同时趾部向淡水侧入侵,后逐渐消退,该过程受地下坝高度影响显著。此后,学者们就不同含水层类型、地下坝高度的地下水库库区水盐运移过程进行了模拟分析,指出由于地下坝改变了含水层水盐平衡,残留盐水楔存在先向淡水侧入侵,后缓慢淡化的演变过程^[21-22]。随着沿海地区水资源压力升高,地下水开采对地下水库库区残留咸水影响受到越来越多学者的关注。陈开荣等^[23] 运用 SEAWAT 模型模拟了大连海洋大学新校区海水入侵问题,分析了有无防渗墙情况下含水层中水流场和浓度场的变化。Wu 等^[24] 基于 SEAWAT 模型构建了三维承压含水层概念模型,分析了地下坝等物理屏障对滨海含水层地下水开采的保护作用,指出地下物理屏障能够提高开采井最大安全开采强度;但由于在该研究案例中,仅在含水层中央设置了一段长度有限的地下坝,高浓度咸水可绕过地下坝从两侧进入库区,导致模拟结果地下坝对开采井保护效果有限。事实上,我国滨海地下水库多修建于独流入海小流域的下游,为彻底阻断海水入侵路径,地下坝往往贯穿含水层直达不透水层基岩,且两侧与不透水岩石相连,几乎全部切断了海水进入库区的通道。

综上所述,已有研究初步探索了地下水库水盐运移规律及其对地下水开采的保护作用,但仍缺乏地下水库建成后库区水盐运移及其对地下水开采响应规律的系统研究。因此,本文基于 SEAWAT 模型构建滨海地区三维变密度流模型,设置不同开采井位置和开采流量,通过多方案模拟分析,探究地下水开采影响下的地下水库水盐运移规律,以期对滨海地下水库的运行管理提供参考。

1 研究方法

1.1 模型构建及参数设置

滨海含水层水盐运移过程非常复杂,建立简化边界和地质特性的概念数值模型,通过控制特定参数和边界条件变化,能有效揭示不同因素对水盐运移的影响规律,一直是该领域常用研究方法^[25-26]。以往研究中多采用垂向二维模型,假设海水入侵沿海岸线方向均质分布,然而开采井为点源输出,开采地下水将会引起咸淡水界面的三维空间变化。因此本文基于 SEAWAT 构建了三维非承压含水层变密度流模型。水流方程与溶质运移方程为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho K_{fi} \left(\frac{\partial h_f}{\partial x_i} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_s q_s = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial C_k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C_k) + q_s C_{sk} + \sum_n R_n = \frac{\partial (\theta C_k)}{\partial t} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; K_{fi} 为主轴方向的等效淡水渗透系数; ρ_f 为淡水密度; Z 为计算点高程; h_f 为等效淡水水头; S_f 为等效淡水单位储水系数; t 为时间; θ 为有效孔隙度; C 为溶质浓度; ρ_s 为源(汇)流体密度; q_s 为源(汇)单位体积流量; C_k 为溶质 k 的溶解浓度; D_{ij} 为水动力弥散张量; v_i 为渗流速度; C_{sk} 为源(汇)流中溶质 k 的浓度; R_n 为第 n 项化学反应,考虑介质对溶质的化学作用对浓度的影响。

本文旨在探究开采井作用下的地下水库水盐运移过程,不针对具体工程,基于概化含水层试验模型展开。概化模型尺寸参考已有的关于海水入侵和含水层水盐运输研究所用的概念模型,如 Zheng 等^[25] 采用的垂向二维模型含水层的长度和厚度分别取 300 m 和 30 m,宽高比取 30,大于前人研究所采用的宽高比;Kaleris 等^[26] 采用的模型宽高比为 18,可尽量避免两侧边界对咸淡水分布的不利影响^[27]。本文设置为长(L)、宽(W)、高(H)分别为 300、900、30 m 的三维概念数值模型,如图 1 所示。

边界条件设置中,考虑到我国已建滨海地下水库多修建在非承压含水层内^[28],模型左侧为海水输入,海水盐质量浓度为 35 g/L,为定水头边界;右侧为淡水流量边界,盐质量浓度为 0,同样为恒定水头边界,淡水水头设置为 29.4 m,海水水头设置为 28.5 m,水力坡降为 3‰。含水层的主要参数设置参考 Zheng 等^[25] 的研究,渗透系数设置为 6 m/d,孔隙度设置为 0.4,纵向弥散度设置为 1 m,横向弥散度设置为 0.1 m。地下坝工程参数与模拟方法参考

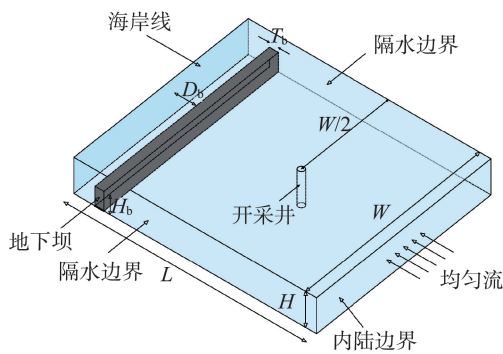


图1 三维概念数值模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of three-dèimensional conceptual numerical model

Zheng 等^[25]的研究,地下坝与海岸线的距离 D_b 取 50 m,位于天然条件下海水入侵形成的盐水楔内,地下坝高度 H_b 取 24 m,高于天然条件下该位置处盐水楔厚度 ($T_b = 3$ m),将坝体位置处单元格设置为非活动单元格来模拟地下坝的影响。

模型离散考虑 Péclet 数 (P_e) 的限制,一维流动测试表明,当 $P_e < 4$ 时,能有力保证有限差分方法的稳定。 P_e 计算公式为

$$P_e \approx \Delta L / \alpha_L \leq 2 \quad (3)$$

式中: α_L 为纵向弥散度; ΔL 为平行于地下水流动方向的单元尺寸,在三维模型中利用 Zheng 等^[25]提出的二维模型相似的方法处理,即

$$\Delta L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (4)$$

式中 Δx 、 Δy 和 Δz 分别为 x 、 y 和 z 方向的网格边长。模型中 α_L 设为 2.5,根据式(4), ΔL 应小于 10 m,为此在垂向离散为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 网格,平行于海岸方向离散为 3 m,满足 Péclet 数要求。模型离散后共形成 675 000 个网格单元。

1.2 方案设置

为探讨地下水开采对含水层内水盐运移规律的影响,设置 17 种开采井位置及开采量方案进行模拟,方案设置见表 1。其中,方案 1 为基础方案,只布设地下坝,不设置开采井,模拟不开采地下水时库区内咸淡水状态的变化过程;方案 2~5 用于分析开采量对地下水库水盐运移的影响,考虑 30、60、90、120 m^3/d 4 种开采量,各方案开采井到地下坝距离均为 150 m;方案 6~9 用于分析开采井位置对地下水库水盐运移的影响,设置了 120、130、140、160 m 4 种开采井到地下坝距离方案,各方案开采量均为 60 m^3/d ;为对比地下坝修建前后,相同开采情景下含水层水盐运移规律,方案 10~17 设置为方案 2~9 的对照组。所有方案开采井均布设在地下坝中间位置所在截面,即 $y = 450$ m 处,在 x 方向上布设于

自然状态下盐水楔的外部,为完整井,贯穿整个含水层。将自然状态下水盐平衡状态时每个单元的水位、浓度值作为模型模拟的初始条件。模型时间步长为 1 d,各方案运行时间均为 100 a。

表 1 模型方案设置

Table 1 Model schemes setting

方案	距海岸线距离/m	开采量/(m^3/d)	是否建坝
1	0	0	否
2	200	30	是
3	200	60	是
4	200	90	是
5	200	120	是
6	170	60	是
7	180	60	是
8	190	60	是
9	210	60	是
10	200	30	否
11	200	60	否
12	200	90	否
13	200	120	否
14	170	60	否
15	180	60	否
16	190	60	否
17	210	60	否

1.3 量化指标

滨海含水层海岸带咸水与淡水之间界面的位置、形状、运移是研究海水入侵的核心内容^[29]。因此,为分析开采方案对库区咸水的影响,主要分析指标为咸水入侵距离 (L_{WC}) 和咸水入侵面积 (S)。咸水入侵距离是指盐水楔趾部位置,即 10% 海水盐度等值线所在位置与地下坝之间的距离,计算时采用相邻单元格浓度之间的线性插值。由于本文中地下水井布设于模型中间区域, y 方向盐水楔存在空间变化,因此采用模型中心处 ($y = 450$ m) 盐水楔趾部位置表征入侵距离。咸水入侵面积是指模型底部 10% 海水盐度 ($\rho_{NaCl} = 3.5$ g/L) 等值线与地下坝包围的面积,其与地下坝向淡水一侧的面积 S_0 之比为咸水入侵面积占比。咸水入侵系数 R 的计算公式为

$$R = (L_{WC} - L_{WC0}) / L_{WC0} \quad (5)$$

式中 L_{WC0} 为初始时刻库区盐水楔长度。

2 结果与分析

2.1 地下水库建设对水盐运移的影响

为分析地下水库建设后库区残留盐水楔运移过程及其对地下水开采井的响应,选取方案 1 和方案 3,从模拟结果中提取了入侵时间 t 分别为 1、3、5、10、30、50、70、100 a 时含水层三维盐质量浓度分布。图 2 为方案 1 地下水库库区内盐水楔随时间变化,初始时刻,库内盐水楔长度为 80.67 m,地下水库建设后库区残留盐水楔首先向内陆侧入侵,盐水楔趾

部向淡水一侧延伸,盐水楔整体尤其是高浓度区域逐渐坦化;入侵时间为 5 a 时,库区内高质量浓度咸水区域趋于水平,入侵过程基本结束;之后盐水楔缓慢消退,入侵时间为 30 a 时,库区高质量浓度区域已被基本冲淡,低浓度盐水楔区也在逐步消退;入侵时间为 100 a 时,库区内仅坝后底部区域残余少量低质量浓度咸水。因此,可得到最大咸水入侵距离为 83.76 m,最大咸水入侵面积为 75 380.04 m²,经过 60 a 可以移除库区 80% 左右的咸水体积,到 100 a 可以移除 95% 左右的咸水体积。库区盐水楔产生上述变化的原因是地下坝建设不仅阻断了海水侧高质量浓度咸水继续向淡水侧入侵的路径,也切断了库区残留盐水楔向海洋侧的消退路径。图 3 为方案 1 在 $y = 450$ m 处截面盐质量浓度及流速分布,可以看出,坝后残留的高质量浓度咸水(残留水与海水的 NaCl 质量浓度比为 50% ~ 90%),流速很慢,在浓

度梯度的作用下,高质量浓度咸水扩散到低浓度混合带(残留水与海水的 NaCl 质量浓度比为 10% ~ 50%),由流速方向可以看出,低浓度混合带越过地下坝,成为坝后咸水消散的主要通道。以上结果与 Wu 等^[24]和 Zheng 等^[25]的研究结论一致。

图 4 为方案 3 地下水库盐水楔随时间变化。库区内水盐运移的过程与方案 1 基本一致,初始阶段盐水楔入侵(0 ~ 16 a),在一段时间后缓慢消退。由于在模型中央位置布设开采井,引起中间位置($y = 450$ m)附近盐水楔快速向淡水侧入侵,入侵速度明显高于两侧。方案 3 相较方案 1 咸水入侵程度更为强烈,开采方案下咸水入侵距离更远,引发了更大面积的底部咸化。相对于方案 1 坝后高浓度区域在入侵时间为 30 a 时基本淡化完成,开采情景下,坝后中间区域仍残留高浓度咸水,表明方案 3 咸水入侵持续时间更长,咸水消退更加困难。图 5 为方案 3 在 $y = 450$ m

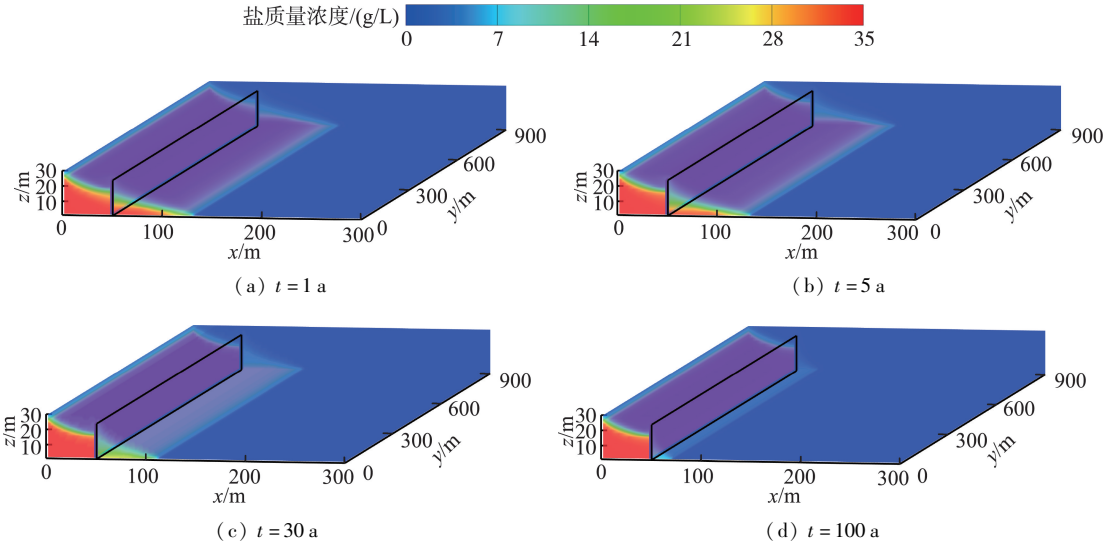


图 2 方案 1 地下水库库区内盐水楔随时间变化

Fig. 2 Change of saline wedge in underground reservoir area over time under scheme 1

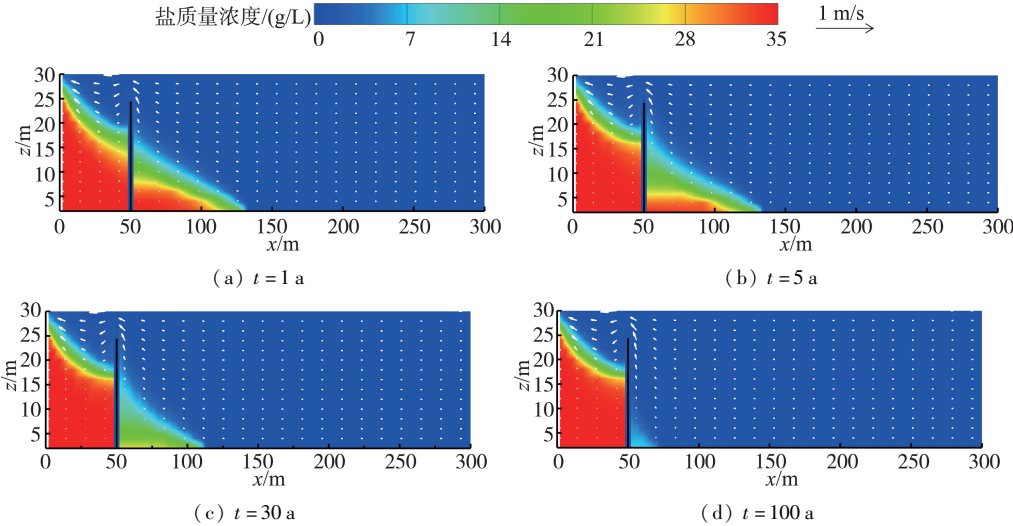


图 3 方案 1 在 $y = 450$ m 处截面盐质量浓度及流速分布

Fig. 3 Distribution of salt concentration and flow velocity in section of $y = 450$ m under scheme 1

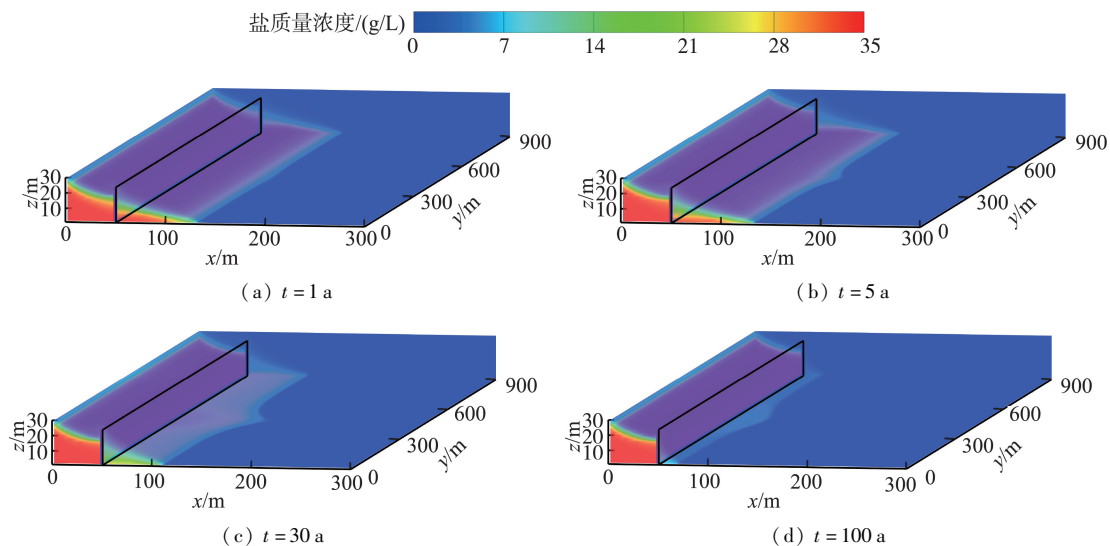


图4 方案3地下水库库区内盐水楔随时间变化

Fig. 4 Change of saline wedge in underground reservoir area over time under scheme 3

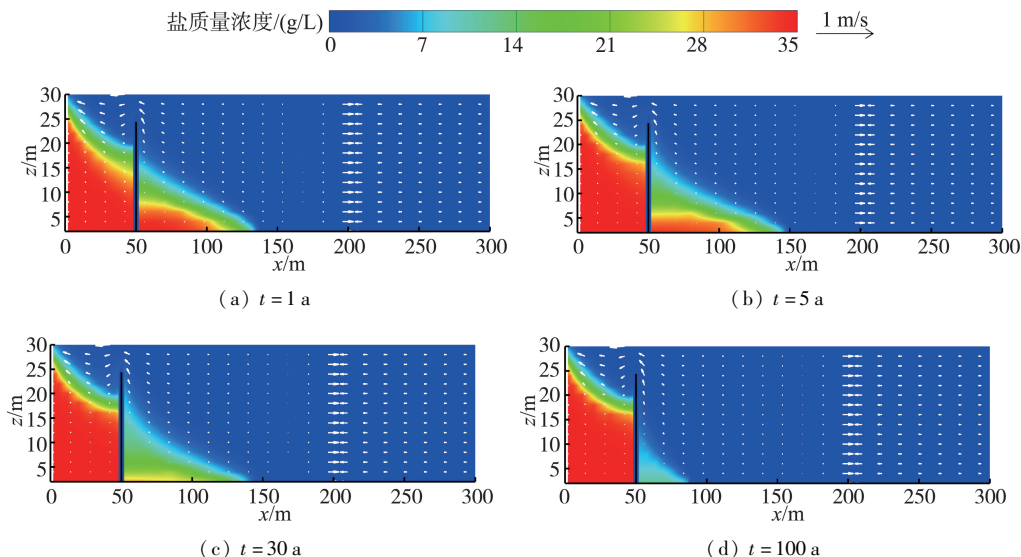


图5 方案3在 $y = 450$ m处截面盐浓度及流速分布

Fig. 5 Distribution of salt concentration and flow velocity in section of $y = 450$ m under scheme 3

(开采井布设)处截面盐浓度及流速分布,可以看出,抽水改变开采井附近流速,开采井盐水楔侧水流方向由原来的流向海水侧转变为流向开采井,进一步加剧了咸水入侵。以上分析可以看出,地下水开采显著降低库区残留盐水楔淡化速度,增加库区咸化范围,可能导致库区水质污染,威胁地下水库安全运行。

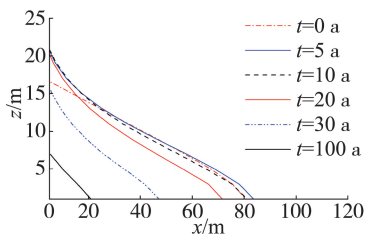
为进一步分析地下水开采方式对库区残留盐水楔运动过程的影响,提取了方案1与方案3在 $y = 450$ m(开采井布设)处截面的咸淡水交界面的演变模拟结果(图6)。可见,方案1和方案3在初始时刻, $y = 450$ m处截面上含水层中的咸淡水交界均近似一条直线,库区内底部入侵距离明显大于上部入侵距离,即随深度增加,海水入侵速度逐渐变大,底部入侵距离最大。对比图6(a)(b)可以看出,修建

地下坝在纵向上主要引起地下坝附近咸淡水界面向上方延伸,最终越过地下坝,咸水开始向库外输移;在横向上引起盐水楔先向淡水侧入侵,后逐渐回退,进入回退阶段后咸淡水界面倾角变大,表明含水层底部回退速度高于顶部。开采井抽水情况下,相对于不抽水情况下的盐水楔界面发生了明显变化,咸淡水界面在地下坝附近向上延伸趋势不变,但库区内含水层下部入侵速度明显高于不抽水情况。以上分析结果反映出开采井抽水会加速地下水库含水层底部海水入侵,这与在天然含水层开采地下水引发海水入侵问题类似^[30]。

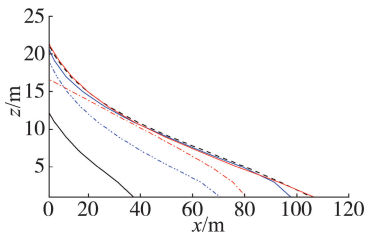
2.2 地下水开采方式对水盐运移的影响

2.2.1 开采量的影响

为探究开采井的开采量 Q 对咸淡水界面的影



(a) 方案 1

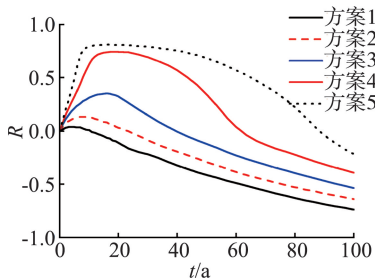


(b) 方案 3

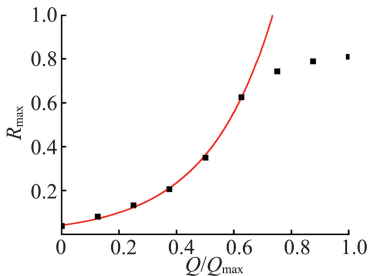
图 6 方案 1 与方案 3 盐水楔形状随时间变化

Fig. 6 Changes in shape of saltwater wedge ($y=450$ m) over time between scheme 1 and scheme 3

响,对比方案 1~5 的模拟结果,计算各方案下咸水入侵系数 R 及其最大值 $R_{\max}$,结果如图 7(a) 所示。可以看出,5 种方案下咸水入侵距离变化趋势相同,初始阶段咸水入侵系数快速上升,盐水楔持续向淡水侧入侵。方案 1~5 咸水入侵系数分别经过 4、8、16、18、16 a 达到最大值,分别为 0.038、0.13、0.35、0.74、0.81,随后缓慢下降。可见随着开采强度增大,盐水楔入侵程度显著增强,主要体现在随开采量的增加,盐水楔初期入侵速率越快,盐水楔向淡水侧入侵距离增大,进而发生更大面积的底部咸化;且消



(a) R 随时间的变化



(b) $R_{\max}$ 与开采量的拟合关系

图 7 不同开采量对咸水入侵系数的影响

Fig. 7 Effect of different extraction output on salt water intrusion coefficient

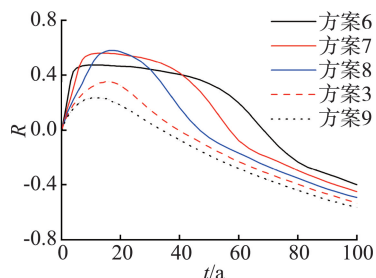
退期盐水楔消退更为缓慢,盐水楔保持在较远入侵距离的时间较长。

为进一步定量研究开采量对海水入侵的影响,在上述方案的基础上增加 4 组盐水楔未入侵至开采井的开采量方案, Q 分别为 15、45、75、105 m^3/d 。对结果进行无量纲化处理,得到咸水入侵系数最大值与开采流量的关系如图 7(b) 所示,其中 $Q_{\max}$ 代表最大开采量,为 120 m^3/d 。可见,在相同开采井位置条件下,随着开采量的增大,咸水入侵系数先快速升高,后趋于稳定。对开采量为 0~75 m^3/d 段曲线进行拟合,指数函数的拟合效果较好,表明在这一区间咸水入侵程度随开采流量的增加而加大,且流量越大,咸水入侵系数增加的趋势越明显。当开采量增加至 90 m^3/d ,咸水入侵系数不再符合指数函数关系,其原因在于此时盐水楔趾部已入侵至开采井,盐水楔长度不再增大。由此可见,当已建开采井位置固定位于距离地下坝 150 m 处时,开采量不应超过 75 m^3/d 。以上分析表明,对于特定位置的开采井,存在保证井水不咸化的最大开采量,控制开采量小于该值,才能保证地下水库供水安全。当开采量分别为 15、30、45、60、75、90、105、120 m^3/d ,对应咸水入侵面积占比分别为 33.68%、33.86%、34.05%、34.24%、34.44%、34.65%、34.85% 及 35.05%,随开采流量增加咸水入侵面积线性增加,咸水入侵面积占比对开采流量变化响应的敏感度低于咸水入侵距离。

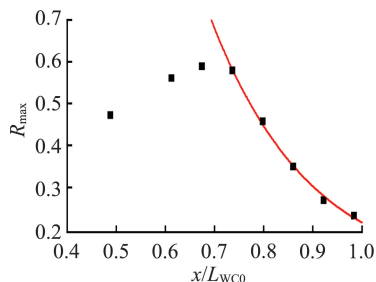
2.2.2 开采井位置的影响

开采井位置的不同将会导致开采井与初始盐水楔的距离发生变化,从而对咸淡水界面产生不同影响。研究方案 3 和方案 6~9 的模拟结果,得到开采量为 60 m^3/d 的情况下,不同开采井位置对咸水入侵系数的影响,结果见图 8(a)。方案 6、方案 7、方案 8、方案 3、方案 9 分别经过 11、14、17、16、12 a,咸水入侵系数达到最大值,分别为 0.47、0.56、0.58、0.35、0.23。方案 6 情况下,初始阶段盐水楔入侵速率最快,盐水楔迅速入侵至开采井处,且该方案下盐水楔入侵持续时间最久。此时,咸水势必会大量进入开采井,开采的地下水将无法满足不同工农业用水的水质要求。方案 7 盐水楔同样入侵至开采井处,但与方案 6 相比,盐水楔入侵持续时间缩短。方案 8 咸水不再入侵至开采井,咸水入侵距离与方案 2 相近,入侵时间显著缩短。方案 3、方案 9 咸水入侵距离显著下降,入侵时间进一步缩短。由图 8(a) 可见,距离地下坝越近,咸水初始入侵速度越大,且入侵时间越久。当开采井距离地下坝 140 m 时,咸水入侵距离最远,这主要是因为方案 6、方案 7 咸水进

入开采井不再向淡水侧入侵。以上结果说明,固定开采量的情况下,存在一个保证开采井水体不咸化的最短距离,确定该值对于库区地下水开发十分重要。



(a) R 随时间的变化



(b) $R_{\max}$ 与开采井位置拟合关系

图8 不同开采井位置下的咸水入侵系数

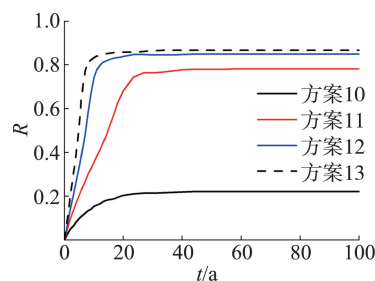
Fig. 8 Saltwater intrusion coefficient at different extraction well locations

为进一步定量研究开采井距离对海水入侵的影响,在上述方案3和方案6~9的基础上增加3组开采井位置方案,开采量同样设置为 $60 \text{ m}^3/\text{d}$,开采井与地下坝的距离分别为 135、145、155 m。对结果进行无量纲化处理,得到咸水入侵系数最大值与开采井位置关系,如图8(b)所示。采用指数函数进行拟合,可见,距离地下坝 140~160 m 段的拟合效果较好。开采井距地下坝 120 m 时咸水入侵面积占比为 34.37%,距离为 130、140、150、160 m 时,咸水入侵面积占比分别为 34.43%、34.33%、34.24% 及 34.16%。可以看出,当开采井距地下坝距离超过 120 m,随开采距离的增加,咸水入侵面积线性减小。

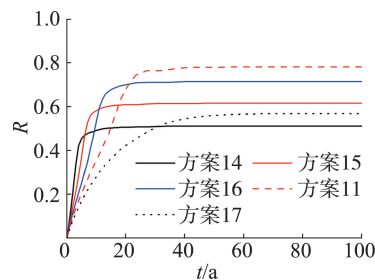
2.3 地下水库建设与地下水开采对水盐运移的共同影响

地下水库建设前,在含水层内直接开采地下水,计算不同开采井位置及不同开采量情况下的咸水入侵系数,结果见图9。初始阶段,咸水入侵系数变化趋势与地下水库建设后的情景一致,咸水入侵系数快速上升;一段时间后,咸水入侵系数达到最大值,随后处于稳定状态。在模拟期内,咸水入侵系数始终为正值,表明在地下水库建设前,咸水持续入侵,直到咸淡水作用达到新的平衡,不存在咸水消退过程。方案10~13对应咸水入侵系数的最大值分别为

为 0.22、0.78、0.85、0.87;方案14~17对应咸水入侵系数的最大值分别为 0.51、0.62、0.71、0.57。对比地下水库修建后对应方案的含水层盐水楔变化过程可知,地下坝显著降低了地下水开采引发海水入侵的持续时间与最大入侵距离。



(a) 不同开采量



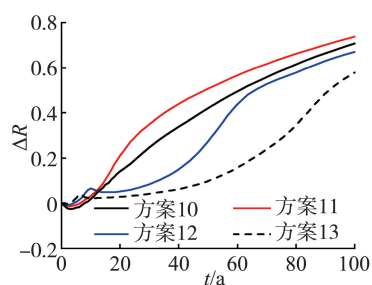
(b) 不同开采井位置

图9 地下水库建设前各方案下的咸水入侵系数

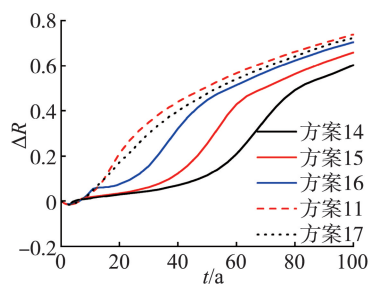
Fig. 9 Saltwater intrusion coefficient under various schemes before underground dam construction

为了定量探究相同开采情景下地下水库建设前后含水层咸水入侵情况,进一步比较了地下水库建设前后咸水入侵距离的变化。采用咸水入侵系数的相对变化 $\Delta R = (L'_{\text{wc}} - L_{\text{wc}})/L'_{\text{wc}}$ 表征地下坝对含水层水盐运移的影响,其中 L'_{wc} 为地下水库建设前的咸水入侵距离。 $\Delta R > 0$ 表示地下坝有效阻碍海水入侵,对地下水开采起到了保护作用;反之,则表示地下水库建设加剧了海水入侵,对地下水开采不利。图10(a)为地下坝建设前后方案10~13下咸水入侵系数的相对变化,总体来看,各方案下地下坝修建均降低了咸水入侵长度,且随着开采时间的增加,其影响显著增加。从时间进程上看,初始阶段, ΔR 略微下降后逐渐回升,且开采量相对大时 (90 、 $120 \text{ m}^3/\text{d}$),出现了先下降后回升、然后再下降的波动现象。发生这一现象主要原因是在地下水库建设初期,含水层内海水入侵稳定后的咸淡水平衡状态被打破,在密度差的作用下,坝后高浓度咸水向淡水侧入侵,加速了地下水开采引起的海水入侵速度,开采井流量越小,密度差的引起的加速入侵越明显。当开采流量超过最大安全流量时,盐水楔最远只入侵到开采井位置,建坝带来的影响反而降低,这是方案12、13中 ΔR 出现第二次下降的原因。在地下水

开采后期,各开采方案中 ΔR 均快速增加,表明建坝方案中咸水入侵距离远小于无地下坝方案,这主要是由于地下坝的建设截断了海水入侵路径,且坝后咸水形成低浓度带向海岸侧缓慢消退,库区内残留咸水量不断降低。以上结果表明,从长期看地下坝建设能显著降低地下水开采导致的海水入侵影响,可有效保护沿海含水层地下水。图 10(b) 为方案 11 及方案 14~17 情况下的咸水入侵系数相对变化。各方案变化过程总体类似,地下水开采初期地下坝建设稍微增加了含水层咸水入侵距离,且随着开采井距离地下坝越远,这种影响就越明显。其原因可能是当前流量下,开采井距离较远时,抽水对含水层水盐运移影响小于建坝后密度差对水盐运移的作用^[10,12]。随着开采时间增加,修建地下坝对盐水楔入侵长度的降低作用愈发明显,进一步证明了地下坝对地下水开采的保护作用。对比来看,对于固定的开采量,地下坝对开采井的保护效果随其距离开采井位置呈先增大后减小的规律,最佳距离是 150 m。



(a) 不同开采流量



(b) 不同开采井位置

图 10 地下水库建设前后各方案下咸水入侵系数的相对变化

Fig. 10 Relative changes in saltwater intrusion coefficient under various schemes before and after underground dam construction

3 结 论

a. 地下水库修建后,库区内残留盐水楔沿地下坝向上延伸,越过地下坝形成与近海侧高浓度咸水相连的低浓度混合带,成为咸水消退的主要通道,残留咸水经该通道逐渐淡化。在地下水库库区内开采地下水,库内残留盐水楔总体变化趋势不变,盐水楔

趾部先向内陆侧入侵后缓慢消退。但地下水开采导致库区内咸水入侵距离、入侵持续时间和淡化所需时间均显著增加,咸水入侵程度加剧,淡化过程明显变缓。

b. 在盐水楔未入侵至开采井的安全情况下,咸水入侵系数与开采量、开采井与地下坝之间的距离呈指数关系,咸水入侵面积与开采流量、开采井与地下坝之间的距离呈线性关系。随着开采量的降低、开采井至地下坝距离的增加,海水入侵程度减弱,且流量越小、距离越远,减弱的趋势越平缓。通过合理规划库区内开采井布置方案,能够在满足水资源利用量的条件下尽可能降低地下水开采对海水入侵的负面影响。

c. 在未建设地下坝的情况下,开采地下水将引发海水持续入侵,并在一段时间后达到稳定状态;从长期看地下坝建设能显著降低地下水开采导致海水入侵的影响,可有效保护沿海含水层地下水。

参考文献:

- [1] 杜汉学,常国纯,张乔生,等. 利用地下水库蓄水的初步认识[J]. 水科学进展,2002,13(5):618-622. (ZHANG Hanxue, CHANG Guochun, ZHANG Qiaosheng, et al. Preliminary study on utilizing groundwater storage [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(5): 618-622. (in Chinese))
- [2] 朱思远,田军仓,李全东. 地下水库的研究现状和发展趋势[J]. 节水灌溉,2008,33(4):23-27. (ZHU Siyuan, TIAN Juncang, LI Quandong. Current situation and development trend of research on groundwater reservoir [J]. Water Saving Irrigation, 2008, 33(4): 23-27. (in Chinese))
- [3] 王兴超. 地下水库在海绵城市建设中的应用[J]. 水利水电科技进展,2018,38(1):83-87. (WANG Xingchao. Application of underground reservoirs in construction of sponge cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(1): 83-87. (in Chinese))
- [4] 郭飞,高茂生,郑懿珉,等. 我国北方沿海地区地下水库分类及综合对比[J]. 海洋地质前沿,2015,31(5):35-40. (GUO Fei, GAO Maosheng, ZHENG Yimin, et al. Classification and comprehensive comparison of groundwater reservoirs in the coastal areas of northern China[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(5): 35-40. (in Chinese))
- [5] 孙安帅,庞清江,陈荣波,等. 山东半岛地下水调蓄及其生态资源环境效应分析[J]. 水资源保护,2011,27(6):19-23. (SUN Anshuai, PANG Qingjiang, CHEN Rongbo, et al. Regulation and storage of groundwater and its ecological and environmental effects in Shandong Peninsula[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6):

- 19-23. (in Chinese))
- [6] CHANG Qinpeng, ZHENG Tianyuan, ZHENG Xilai, et al. Effect of subsurface dams on saltwater intrusion and fresh groundwater discharge[J]. Journal of Hydrology, 2019, 576(1): 508-519.
 - [7] 李琴,郑西来,崔恒,等. 地下咸水体抽水修复的模拟试验[J]. 水资源保护, 2013, 29(1): 14-17. (LI Qin, ZHENG Xilai, CUI Heng, et al. Simulation study on pumping remediation of underground saltwater[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1): 14-17. (in Chinese))
 - [8] JAMALI I A, OLOFSSON B, MORTBERG U. Locating suitable sites for the construction of subsurface dams using GIS[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(6): 1-15.
 - [9] SUN Ya, XU Shiguo, KANG Pingping, et al. Impacts of artificial underground reservoir on groundwater environment in the reservoir and downstream area[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(11): 19-21.
 - [10] 王丽娟,宋翹楚,吴为,等. 江苏沿海滩涂地下水埋深及矿化度变化规律[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 52-57. (WANG Lijuan, SONG Qiaochu, WU Wei, et al. Variation law of groundwater depth and mineralization of coastal tidal flats in Jiangsu Province [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 52-57. (in Chinese))
 - [11] 牛欣怡,鲁程鹏,卢佳赞,等. 机器学习模型在地下水埋深模拟中的适应性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 74-82. (NIU Xinyi, LU Chengpeng, LU Jiayun, et al. Adaptability analysis of machine learning model in groundwater depth simulation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 74-82. (in Chinese))
 - [12] 张婧,马贵宏,高雅,等. 华北山前平原典型井灌区地下水水位变化影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 21-28. (ZHANG Jing, MA Guihong, GAO Ya, et al. Analysis on influencing factors of groundwater level change in typical well irrigation area in piedmont plain of North China [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(1): 21-28. (in Chinese))
 - [13] LANCDEVIN C D. Simulation of submarine ground water discharge to a marine estuary: Biscayne Bay, Florida[J]. Groundwater, 2003, 41(6): 758-771.
 - [14] 成建梅,陈崇希,吉孟瑞,等. 山东烟台夹河中、下游地区海水入侵三维水质数值模拟研究[J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 179-184. (CHENG Jianmei, CHEN Chongxi, JI Mengrui, et al. Three-dimensional numerical study for salt water intrusion in multi-layered coastal aquifers in the Jane River Basin, Shandong Province, China [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(1): 179-184. (in Chinese))
 - [15] 陈鹤翔,金光球,谢天云,等. 陆源淡水流量对海岸水库海水入侵的影响[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(4): 29-34. (CHEN Hexiang, JIN Guangqiu, XIE Tianyun, et al. Effects of inland fresh water discharge on seawater intrusion in coastal reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(4): 29-34. (in Chinese))
 - [16] 李璇,束龙仓,鲁程鹏,等. 石川河地下水库建库条件分析及地下水位动态预测[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 13-18. (LI Xuan, SHU Longcang, LU Chengpeng, et al. Analysis of groundwater reservoir construction conditions and prediction of groundwater level variation in Shichuan River groundwater reservoir [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 13-18. (in Chinese))
 - [17] OSWALD S E, SCHEIDEGGER M B, KINZELBACH W. Time-dependent measurement of strongly density-dependent flow in a porous medium via nuclear magnetic resonance imaging[J]. Transport in Porous Media, 2002, 47(2): 169-193.
 - [18] HARBAUGH A W, BANTA E R, HILL M C, et al. MODFLOW-2000, the U. S. geological survey modular ground-water model user guide to modularization concepts and the ground-water flow process [R]. Denver: U. S. Geological Survey, 2000.
 - [19] ZHENG C M, WANG P P. A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion, and chemical reactions of contaminants in groundwater systems: documentation and user's guide [R]. Vicksburg: U. S. Army Engineer Research and Development Center, 1999.
 - [20] LUYUN Jr R, MOMII K, NAKAGAWA K. Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall[J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3/4): 227-236.
 - [21] ABDOULHALIK A, AHMED A A. How does layered heterogeneity affect the ability of subsurface dams to clean up coastal aquifers contaminated with seawater intrusion? [J]. Journal of Hydrology, 2017, 553(1): 708-721.
 - [22] LUYUN Jr R, MOMII K, NAKAGAWA K. Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion[J]. Groundwater, 2011, 49(2): 239-249.
 - [23] 陈开荣,陈汉宝,赵海亮. 基于 SEAWAT 的海水入侵数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 140-145. (CHEN Kairong, CHEN Hanbao, ZHAO Hailiang. Three-dimensional numerical simulation of seawater intrusion based on SEAWAT [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(6): 140-145. (in Chinese))
 - [24] WU Huiqiang, LU Chunhui, KONG Jun, et al. Preventing seawater intrusion and enhancing safe extraction using finite-length, impermeable subsurface barriers: 3D analysis [J]. Water Resources Research, 2020, 56(11): 1-19.

- [25] ZHENG Tianyuan,ZHENG Xilai,CHANG Qinpeng, et al. Timescale and effectiveness of residual saltwater desalinization behind subsurface dams in an unconfined aquifer[J]. Water Resources Research, 2021, 57 (2) : 1-18.
- [26] KALERIS V K,ZIOGAS A I. The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476 (1) : 370-383.
- [27] LU Chunhui, XIN Pei, LI Ling, et al. Steady state analytical solutions for pumping in a fully bounded rectangular aquifer[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10):8294-8302.
- [28] 李凤丽,徐嘉璐,张游,等. 母猪河地下水数值模拟和调蓄分析[J]. 中国农村水利水电, 2020, 62(11):204-209. (LI Fengli, XU Jialu, ZHANG You, et al. Research on the numerical simulation and regulation analysis of groundwater reservoir in Muzhu River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 62 (11) : 204-209. (in Chinese))
- [29] 崔相飞,周训,徐中平,等. 海岸带咸淡水界面的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2):29-35. (CUI Xiangfei, ZHOU Xun, XU Zhongping, et al. Advances in research on the fresh water-salt water interface in coastal zones[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (2):29-35. (in Chinese))
- [30] 吴吉春,吴永祥,林锦,等. 黄渤海沿海地区地下水管理与海水入侵防治研究[J]. 中国环境管理, 2018, 10(2):91-92. (WU Jichun, WU Yongxiang, LIN Jin, et al. Study on the groundwater management and seawater intrusion prevention in the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Chinese Journal of Environment Management, 2018, 10(2):91-92. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-09-26 编辑:王芳)

+++++
(上接第 18 页)

- [30] 游松财,邸苏闯,袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J]. 自然资源学报, 2009, 24 (3) : 545-552. (YOU Songcai, DI Suchuang, YUAN Ye. Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau Region [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3):545-552. (in Chinese))
- [31] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47 (4) : 611-620. (LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (4):611-620. (in Chinese))
- [32] SMITH M. Cropwat: a computer program for irrigation planning and management [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [33] 封志明,张蓬涛,杨艳昭. 西北地区的退耕规模、粮食响应及政策建议 [J]. 地理研究, 2003 (1) : 105-113. (FENG Zhiming, ZHANG Pengtao, YANG Yanzhao. The scale of land conversion from farmland to forest or grassland, the grain response to it, and the relevant proposals in Northwest China [J]. Geographical Research, 2003(1):105-113. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-07-24 编辑:王芳)

+++++
(上接第 51 页)

- [31] 张桂鑫,田文德,靳满满. 基于 PCA 权重的化工报警阈值优化 [J]. 过程工程学报, 2017, 17 (3) : 588-593. (ZHANG Guixin, TIAN Wende, JIN Manman. Thresholds optimization of chemical alarms based on PCA weight [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(3): 588-593. (in Chinese))
- [32] 刘德海,于倩,马晓南,等. 基于最小偏差组合权重的突发事件应急能力评价模型[J]. 中国管理科学, 2014, 22 (11):79-86. (LIU Dehai, YU Qian, MA Xiaonan, et al. Combination weight model of emergency ability evaluation with minimum deviation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22 (11) : 79-86. (in Chinese))
- [33] WEI Wei, ZHANG Jing, ZHOU Liang, et al. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(16):20408-20425.
- [34] 华悦,叶磊,张海荣,等. 嫩江下游多变量水文干旱特征研究[J]. 水文, 2021, 41(4):88-94. (HUA Yue, YE Lei, ZHANG Hairong, et al. Research on multi-variable hydrological drought characteristics of the lower Nenjiang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 88-94. (in Chinese))
- [35] 孙永罡,宋英华,马旭清,等. 中国气象灾害大典·黑龙江卷[M]. 北京:气象出版社, 2007.
- (收稿日期:2022-10-03 编辑:王芳)