

# 基于 SEAWAT 的海水入侵数值模拟

陈开荣<sup>1</sup>, 陈汉宝<sup>1</sup>, 赵海亮<sup>2</sup>

(1. 天津大学 河流海岸工程泥沙研究所, 天津 300072; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:** 基于三维有限差分理论, 运用地下水模拟软件 Visual MODFLOW 中的 SEAWAT 模块, 模拟了大连海洋大学新校区变密度条件下的海水入侵。模拟中考虑了有防渗墙和无防渗墙两种工况, 并分析和比较了这两种工况下, 新校区的地下水位和盐分浓度, 其分布及变化规律。模拟结果表明: 防渗墙对新校区地下水位和盐分浓度的分布及变化, 影响都很小; 盐分最终侵入校园区域, 并且随着时间的增长, 浓度上升至较高水平。

**关键词:** 海水入侵; 数值模拟; 变密度; SEAWAT

中图分类号: P641.8

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0140-06

## Three-dimensional numerical simulation of seawater intrusion based on SEAWAT

CHEN Kairong<sup>1</sup>, CHEN Hanbao<sup>1</sup>, ZHAO Hailiang<sup>2</sup>

(1. Institute for Sedimentation, River and Coast Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M. O. T, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** A three-dimensional finite-difference groundwater flow model was implemented to investigate the seawater intrusion problem of the new campus of Dalian ocean university under condition of variable density. The modeling package SEAWAT which was employed in the Visual MODFLOW was applied for this purpose. Two different scenarios with and without the seepage-proof wall that was set along the north boundary of the schoolyard were considered to predict the groundwater table distribution and the salt concentration distribution and their respective variation under different conditions. The simulation results show that the groundwater table distribution and the salt concentration distribution and their variation are rarely affected by the seepage-proof wall. The salt enters the new campus and reaches a high level eventually.

**Key words:** seawater intrusion; numerical simulation; variable density; SEAWAT

## 0 引言

目前, 全世界已经有几十个国家和地区的几百个地方发现了海水入侵问题, 如荷兰、德国、意大利、比利时、法国、希腊、西班牙、葡萄牙、英国、澳大利亚、美国、墨西哥、以色列、印度、菲律宾、印度尼西亚、巴基斯坦、日本、中国、埃及等<sup>[1]</sup>。海水入侵是在人为因素下超量开采地下水, 致使滨海含水层中咸淡水之间的动态平衡受到破坏, 而出现海水侵入淡水储水区域的现象。它属于一种地质灾害, 产生的主要原因是地下淡水受到超量开采。

在理论研究方面, 最初人们关注的是咸淡水之间的界面问题, 研究的也最多, 曾提出过突变界面模型和过渡带模型两种理论。突变界面模型最早是

由 Ghyben(1889) 和 Herzberg(1901) 提出的<sup>[2-3]</sup>, 认为海水与淡水不相混溶, 咸淡水之间存在界面突变; Hubbert(1940)、Glover(1959)、Henry(1959) 等人对此进行过数值模拟研究<sup>[4-6]</sup>。而过渡带模型最早是由 Pinder(1970) 提出的<sup>[7]</sup>, 认为海水与淡水是互相混溶的, 咸淡水之间盐分浓度逐渐过渡, 这一模型更符合实际情况, 所以本文采用这一模型; Lee(1974)、Segol(1975, 1976)、Frind(1982)、Huyakorn(1987) 等人对此进行了数值模拟研究<sup>[8-12]</sup>。之后研究的焦点转向了水流的稳态与非稳态, 土壤的饱和与非饱和方面, 但始终没有涉及到海水与淡水之间密度变化的问题。后来, Guo et al.(2002) 考虑了海水密度变化这一因素的影响, 推导出了以等效淡水水头为主因变量的变密度地下水流运动控制方

收稿日期: 2012-07-08; 修回日期: 2012-08-05

作者简介: 陈开荣(1987-), 男, 云南昭通人, 硕士研究生, 主要进行地下水流与溶质运移数值模拟研究。

程<sup>[13]</sup>,将理论研究推向一个新的高度。

本文基于 SEAWAT 模拟软件,采用咸淡水过渡带模型,考虑了海水密度变化的影响,模拟并分析了大连海洋大学新校区的海水入侵。

## 1 海水入侵数学模型

### 1.1 控制方程

变密度条件下的海水入侵数学模型,包括地下水流和溶质运移两大控制方程,而这两大控制方程是双向耦合的,必须进行联立求解。

Guo et al. (2002) 基于质量守恒定律和达西定律,推导出了以等效淡水水头为主因变量的变密度地下水流运动控制方程<sup>[13]</sup>,形式如下:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} [\rho K_{fx} (\frac{\partial h_f}{\partial x} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial x})] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} [\rho K_{fy} (\frac{\partial h_f}{\partial y} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial y})] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} [\rho K_{fz} (\frac{\partial h_f}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial z})] \\ & = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \bar{\rho} q_s \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $K_f$  为等效淡水渗透系数,  $m/s$ ;  $S_f$  为等效淡水单位储水系数,  $1/m$ ;  $h_f$  为等效淡水水头,  $m$ ;  $\rho$  为海水密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_f$  为淡水密度,  $kg/m^3$ ;  $\bar{\rho}$  为源(汇)流体密度,  $kg/m^3$ ;  $Z$  为计算点高程,  $m$ ;  $t$  为模拟时间,  $s$ ;  $q_s$  为源(汇)单位体积流量,  $1/s$ ;  $\theta$  为多孔介质的有效孔隙率;  $C$  为溶质浓度,  $kg/m^3$ 。

溶质运移控制方程遵循质量守恒定律,假设多孔介质均相,均质,而且是饱和的,假设液体是稳态流,用达西定律来求解<sup>[14]</sup>,得到如下形式:

$$\begin{aligned} & [\frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_z \frac{\partial C}{\partial z})] - \\ & \frac{\partial}{\partial x} (\bar{v}_x C) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}_y C) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}_z C) = \frac{\partial C}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别为平行于主方向  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的溶质弥散系数,  $m^2/s$ , 定义为溶质弥散度与孔隙水平流速的乘积;  $\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_y$ 、 $\bar{v}_z$  分别为平行于主方向  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的孔隙水平流速,  $m/s$ , 与渗流流速的关系为  $\bar{v}_x =$

$$\frac{v_x}{\theta}, \bar{v}_y = \frac{v_y}{\theta}, \bar{v}_z = \frac{v_z}{\theta}。$$

### 1.2 定解条件

控制方程只能反映出地下水流和溶质运移的普遍规律,要获得其具体形式,还需要在时间和空间上加以限制,以表明所研究实际问题的特定条件,这就

是初始条件和边界条件,二者合称为定解条件<sup>[15]</sup>。

通常将模拟开始时( $t = 0$  或  $t = t_0$ ),模拟区域内未知函数的分布称为初始条件,用如下形式表示:

$$h|_{t=0} = h(x, y, z, 0) \quad (3)$$

而边界条件则是用来描述在模拟区域的边界上,未知函数所满足的条件。常见的边界条件有三类,第一类边界条件给出了未知函数在边界上的取值,第二类边界条件给出了未知函数在边界上的导数值,第三类边界条件则是已知未知函数及其导数的线性组合。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

大连海洋大学新校区位于普兰店湾南岸,东邻万科海港城商住区,西靠沈大高速公路普湾大桥,南背小黑山脉,北接新建滨海公路。其东西长约 1 600 m,南北宽约 1 200 m,用地面积 170.4 万  $m^2$ 。为了保证校园水系的水质清澈,并为校园绿化提供科学依据,需要研究在普兰店湾海域的海水潮位波动过程中,海水对校园区域的侵入情况,内容包括校园区域的地下水位和盐分浓度的分布和变化规律。

### 2.2 网格剖分

运用有限差分方法求解海水入侵数学模型,在求解之前,需要对模拟区域进行三维有限差分网格剖分。模拟区域的范围,平面上,以校园所在区域为中心,包括北部普兰店湾海域,南部小黑山脉和西侧沈大高速公路;垂向上,由地表向下包含四层土体,依次是素填土、淤泥质黏土、粉质黏土和粗砂;以模型坐标表示,  $X$  取值为 0 ~ 1719.53 m,  $Y$  取值为 0 ~ 2417.11 m,  $Z$  取值为 -31.5 ~ 4.5 m。沿校园北边界设置一道防渗墙,防渗墙从地表深入地下至高程 -1.5 m。

剖分时对校园区域进行了局部网格加密,采用正方形网格,网格边长为 25 m;校园四周采用长方形网格,共剖分出三种长方形网格,第一种长方形网格长 60.425 m,宽 43 m;第二种长方形网格长 60.425 m,宽 25 m;第三种长方形网格长 43 m,宽 25 m(图 1)。

### 2.3 边界条件及初始条件

根据交通运输部天津水运工程科学研究所的实测资料,普兰店湾海域设计潮位为 1.2 m,低潮位为 -1.18 m;小黑山脉稳定地下水位为 2 m;地下水的流动方向由小黑山脉流向普兰店湾海域。因此,模拟区域水流边界条件作如下处理:普兰店湾海域其

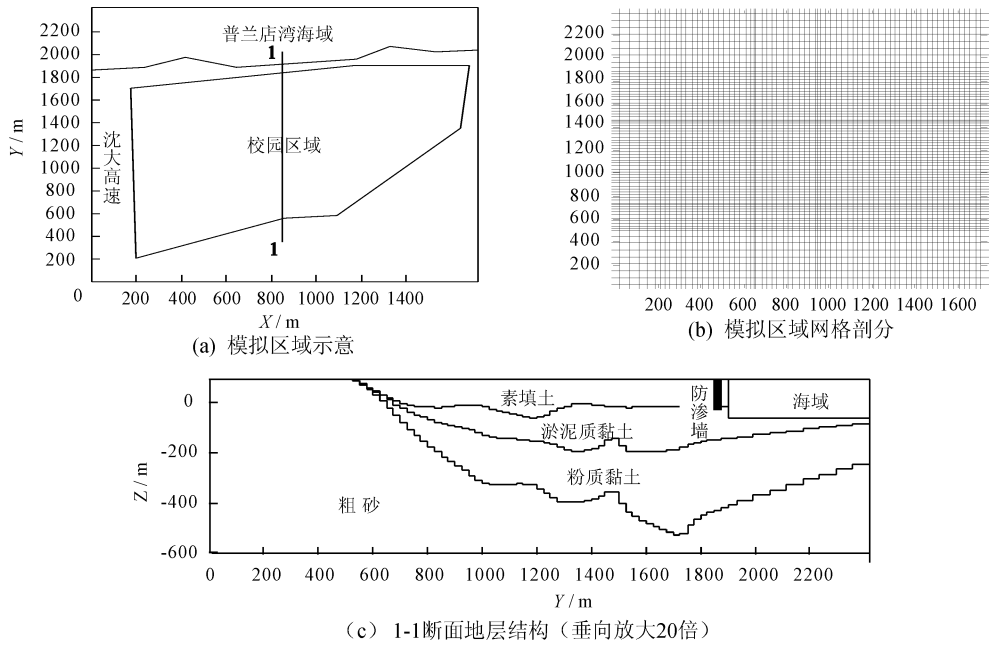


图1 模拟区域及其网格剖分

潮位值随时间波动,在设计潮位 1.2 m 和低潮位 -1.18 m 之间线性变化;小黑山脉水位设为定值,在整个模拟过程中保持不变,取稳定水位 2 m;校园东西两侧水位,临海侧与波动潮位相同,小黑山脉一侧与山前水位相同,中间区域则以线性内插取值。至于溶质运移边界条件,普兰店湾海域盐分浓度设为定值,取渤海平均含盐量 3 500 mg/L,不随时间变化;校园两侧及小黑山脉给定水头所在边界,SEAWAT 软件自动将其设置为定质量通量边界条件,取值根据水流流入模型和流出模型两种情况给定:若是流入,其值为零;若是流出,其值为盐分浓度和 水流流量的乘积<sup>[16]</sup>。除此之外的其它边界上,水流边界条件和溶质运移边界条件都取为零通量边界。MODFLOW 规定,一个模型的 6 个侧面均为不透水边界,即所模拟的水文地质体系与外界没有任何水力联系<sup>[17]</sup>。边界条件见图 2。

关于初始条件的设置,校园所在区域初始水头设为 1.3 m,四周定水头边界所在区域其水头值与其各自初始时刻水头值相同。由于溶质运移需要较长的时间才能形成,所以模拟时间取为 10 年,共分 20 个应力期,每个应力期表示半年模拟时间。

2.4 水文地质参数

输入模型参数时需要用到一些水文地质参数,包括渗透系数  $K$ 、总孔隙率  $n$ 、有效孔隙率  $\theta$ 、给水度  $\mu$ 、储水系数  $S$  等。为简化计算,模型中各层土体都当作各向同性处理;鉴于有效孔隙率的实测资料难以获得,根据经验,有效孔隙率取为总孔隙率的 0.8

倍;而潜水含水层的给水度与其有效孔隙率相等。根据交通运输部天津水运工程科学研究所的实验结果,素填土: $K = 1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ ,  $n = 0.394$ ,  $\eta = \theta = 0.315$ ,  $S = 2.6 \times 10^{-3}$ ;淤泥质黏土: $K = 3.33 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ,  $n = 0.55$ ,  $\mu = \theta = 0.44$ ,  $S = 1.3 \times 10^{-3}$ ;粉质黏土: $K = 3.55 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ,  $n = 0.224$ ,  $\mu = \theta = 0.179$ ,  $S = 2.6 \times 10^{-3}$ ;粗砂: $K = 0.02 \text{ cm/s}$ ,  $n = 0.342$ ,  $\mu = \theta = 0.274$ ,  $S = 0.01$ 。

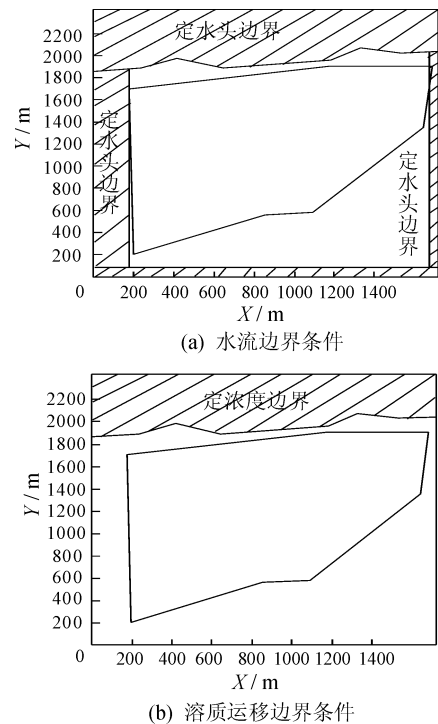


图2 边界条件

### 2.5 模拟结果分析

由于研究对象是在外海潮位的变动过程中,校园区域的地下水位和盐分浓度,它们的分布和变化规律。所以,分析的重点是,各种典型潮位下校园区域的地下水位分布,以及校园区域盐分浓度随时间

的变化规律。

2.5.1 地下水位分布 模拟中考虑了外海潮位随时间的波动,每个应力期内,潮位波动值在设计潮位 1.2 m 和低潮位 -1.18 m 之间线性内插取值。典型潮位下校园区域地下水位分布如图 3 所示。

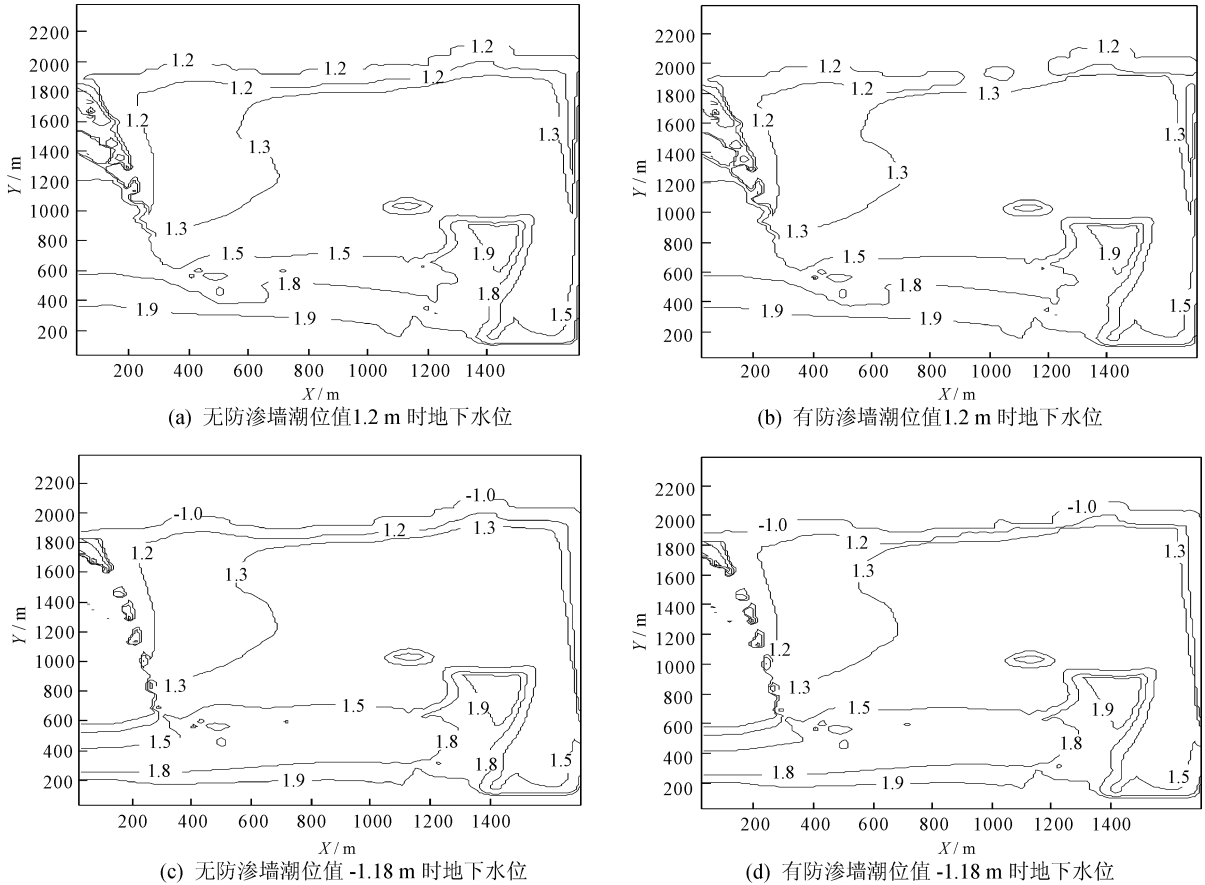


图 3 有无防渗墙各典型潮位时地下水位分布

图 3 显示的是有无防渗墙条件下,各种典型潮位时校园区域的地下水位分布。从图中可以看出,防渗墙对校园区域的地下水位分布几乎没有影响,其具体原因在此暂不作解释,将在后面分析纵断面上的流场时给出。外海潮位的波动对校园区域的地下水位是有一定影响的,但这种影响很小。当外海潮位比较高时,校园区域的地下水位会有轻微的上升(图中等值线变稀且向北移动)。产生这种现象的原因分析如下:从图中标出的地下水位值可以看出,地下水的流动方向是从南面小黑山脉流向北面普兰店湾海域的,因此,当海域内潮位值较高时,地下水的流动会受到阻滞,造成校园区域地下水位壅高。

2.5.2 流场 为了清晰地看到地下水的流动情况,需要绘制模拟区域的流场图,如图 4。从图 4 中可清楚地看到地下水的流动情况,平面上,地下水从小黑山脉流出,流经校园区域,最终流入普兰店湾海域;垂

向上,地下水的流动空间主要位于模型底部的粗砂层内,随着粗砂层厚度的变化,渗流的速度大小也发生了相应的变化。产生这种现象的原因是,渗流必须满足质量守恒定律,也就是水流的连续性方程,当过流断面减小时,流速就会增大。还可以看到,增加防渗墙前后,流场几乎没有改变,原因与前面的地下水位分布是相同的,正是因为地下水的流动空间位于模型的底部,而防渗墙打入地下的深度又太浅,导致防渗墙没有足够的长度对校园区域的地下水位和流场产生影响。

2.5.3 盐分浓度分布 由前面的分析得知,防渗墙的存在对地下水流几乎没有影响,因此,接下来只考虑无防渗墙时盐分浓度随时间的变化规律,如图 5。图 5 给出了模拟开始后第 5 年和第 10 年校园区域的盐分浓度分布,从中可以看出,到模拟第 5 年,盐分已完全占据了校园区域,但此时浓度还不是很

盐分浓度是到模拟第10年才上升至较高水平的。

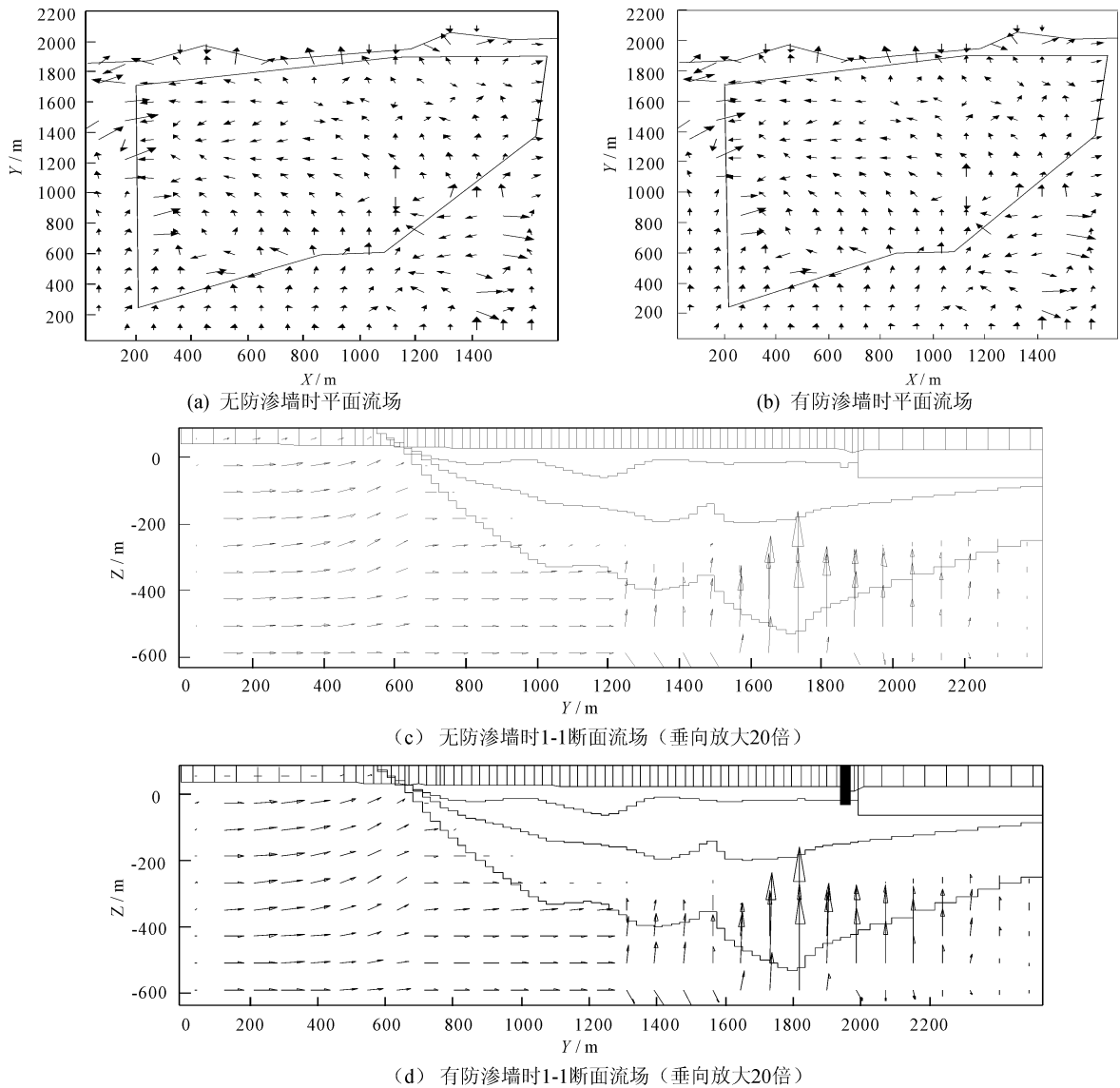


图4 有无防渗墙时流场分布对比

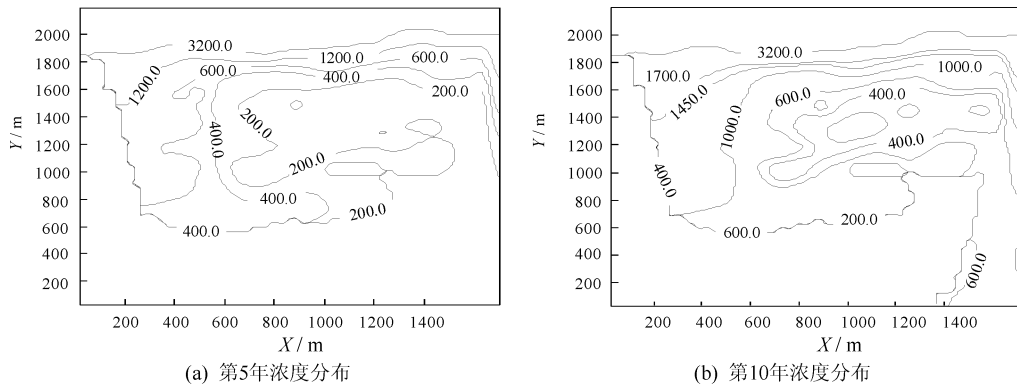


图5 盐分浓度分布

### 3 结 语

本文运用变密度条件下的地下水流和溶质运移

模拟软件 SEAWAT, 模拟并分析了大连海洋大学新校区的海水入侵, 得出以下结论:

(1) 模拟中考虑了海水与淡水之间密度的变

化,并分析了这种变化对地下水流控制方程和溶质运移控制方程的影响。

(2)模拟中考虑了外海潮位随时间的波动,结果表明,外海潮位的波动对校园区域地下水位的分布影响很小。

(3)由于地下水流的流动空间主要位于模型的底部,而防渗墙打入地下的深度又太浅,所以防渗墙对校园区域地下水位和盐分浓度的分布及变化规律几乎没有影响。

(4)盐分最终还是侵入了校园区域,并且到模拟第10年,浓度上升至较高水平。

### 参考文献:

- [1] 郭占荣,黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文, 2003,23(3):10-15.
- [2] 赵全生,王建华. 海水入侵数学模型研究综述[J]. 地下水,1994,16(3):119-124.
- [3] Abd-Elhamid H F, Javadi A A. A density dependant finite element model for analysis of saltwater intrusion in coastal aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2011;259-271.
- [4] Hubbert M K. The theory of ground water motion [J]. The Journal of Geology, 1940,47:785-944.
- [5] Glover R E. The Pattern of Fresh - Water Flow in a Coastal Aquifer [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64: 457-459.
- [6] Henry H R. Salt Intrusion into Fresh - Water Aquifer [J]. Journal of Geophysical Research, 1959, 64:1911-1919.
- [7] Pinder G F, Cooper H H. A numerical technique for calculating the transient position of the saltwater front [J]. Water Resources Research, 1970,6(3):875-882.
- [8] Lee C H, Cheng R T. On seawater encroachment in coastal aquifers [J]. Water Resources Research, 1974, 10(5): 1039-1043.
- [9] Segol G, Pinder G F, Gray W G. A Galerkin finite element technique for calculating the transient position of the saltwater front [J]. Water Resources Research, 1975, 11(2): 343-347.
- [10] Segol G, Pinder G F. Transient simulation of saltwater intrusion in southeastern Florida [J]. Water Resources Research, 1976, 12(1):65-70.
- [11] Frind E O. Simulation of long-term transient density - dependent transport in groundwater [J]. Water Resources, 1982,5(2):73-88.
- [12] Huyakorn P S, Anderson P F, Mercer J W. Saltwater intrusion in aquifers: development and testing of a three-dimensional finite element method [J]. Water Resources Research, 1987, 23(2):293-312.
- [13] Guo W, Langevin C D. User's guide to SEAWAT: A computer program for the simulation of three-dimensional variable density groundwater flow [R]. U. S Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Book 6, Chapter A7, 2002.
- [14] [美] Philip B D, Hanadi S ML, Charles J N. (施周, 杨朝晖, 陈世洋译). 地下水污染——迁移与修复[M]. (第二版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [15] 杨金忠, 蔡树英, 王旭升. 地下水运动数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [16] 林锦, 杨树锋, 郑春苗, 吴吉春. 变密度条件下地下水模拟优化研究与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [17] 朱学愚, 钱孝星. 地下水水文学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.
- [18] Yaouti F EI, Mandour A EI, Khattach D, et al. Modeling groundwater flow and advective contaminant transport in the Bou - Areg unconfined aquifer (NE Morocco) [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2008, 2(3): 192-209.
- [19] Rohit R G, Clement T P, Joel H H. Comparison of numerical techniques used for simulating variable-density flow and transport experiments [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(2): 272-282.