



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.018

陈煌, 张征, 姜华君, 等. 填海工程背景下半岛地下水流场及污染物运移的数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 122-131. CHEN H, ZHANG Z, LOU H J, et al. Numerical simulations of peninsula groundwater flow and contaminant transport in different scenarios of land reclamation[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 122-131. (in Chinese)

# 填海工程背景下半岛地下水流场 及污染物运移的数值模拟

陈煌<sup>1</sup>, 张征<sup>1</sup>, 姜华君<sup>2</sup>, 梁康<sup>2</sup>, 姜俊鹏<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 环境科学与工程学院, 北京 100083;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 以古雷半岛为例, 基于GMS地下水数值模型探索海砂填海(情景一)、海砂+黏土填海(情景二)、黏土填海(情景三)这三种填海情景对研究区地下水流场及污染物运移的影响。结果表明: (1) 研究区在填海背景下地下水位整体抬升, 水位上升幅度由小到大依次为情景一、情景二、情景三, 最高升幅达4.78 m。(2) 不同填海情景下的地下水流场差异在填海区的黏土区域最为明显, 情景二、情景三与情景一的地下水水位差最大值分别为4.44 m和8.20 m。(3) 在仅考虑物理作用的情况下, 三种填海情景下污染物运移均呈现以水平运移为主、垂向运移为辅的特点。(4) 相较于污染物运移基本相同的情景一与情景二, 预测时间30 a时, 水平方向上情景三污染物迁移面积、迁移速率分别下降23.07%、18.89%; 垂向上污染物主要积聚于第一层含水层, 情景三观测井在第一层含水层的污染物浓度为情景一(或情景二)的5.87倍。说明采用低渗透性黏土填海对于污染物运移具有一定的阻滞作用。

**关键词:** 填海工程; 地下水流场; 污染物运移; GMS; 古雷半岛

**中图分类号:** X5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0122-10

## Numerical simulations of peninsula groundwater flow and contaminant transport in different scenarios of land reclamation

CHEN Huang<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>1</sup>, LOU HuaJun<sup>2</sup>, LIANG Kang<sup>2</sup>, LOU Junpeng<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of

Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Using the numerical model GMS, in this paper we analyzed the impacts of three reclamation scenarios on groundwater flow field and contaminant transport in the Gulei Peninsula. The three designated reclamation scenarios were sand reclamation (Scenario 1), clay + sand reclamation (Scenario 2), and clay reclamation (Scenario 3). The results showed that (1) There was a regional increase of water table up to 4.78 m after reclamation. The extent of increase from small to large was as follows: Scenario 1, Scenario 2, and Scenario 3. (2) The groundwater flow field difference between different scenarios was the most prominent in the clay region. The maximum difference of water table between Scenario 2 and Scenario 1 was 4.44 m, and that between Scenario 3 and Scenario 1 was 8.20 m. (3) When only the physical interaction was considered, the horizontal contaminant transport was more prominent than the vertical transport in all the three scenarios. (4) Compared with the case of Scenarios 1 and 2, which had basically the same contaminant transport intensity, for the predicted duration of 30a, the contaminant transport area

收稿日期: 2016-12-10      修回日期: 2017-07-22      网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.1040.018.html>

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA13010303)

Fund: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Class A) (XDA13010303)

作者简介: 陈煌(1994), 女, 湖南岳阳人, 主要从事地下水环境影响评价方面研究。E-mail: chenhuang1012@126.com

通讯作者: 张征(1957), 男, 北京人, 教授, 博士, 主要从事污染预测与环境评价研究。Email: zhzhang624@163.com

and speed in Scenario 3 respectively decreased by 23.07% and 18.89% in the horizontal direction; in the vertical direction, the contaminant mainly accumulated in the first layer. The concentration of contaminants in the first layer in Scenario 3 was 5.87 times of that in Scenario 1 (or Scenario 2). This indicates that reclamation with low-permeability clay have a certain retardation effect on contaminant transport.

**Key words:** land reclamation; groundwater flow field; contaminant transport; GMS; the Gulei Peninsula

土地资源性短缺和结构性短缺日益成为沿海地区和岛屿地区社会经济发展的制约因素,填海造陆成为一种既可以拓展土地空间又可以在一定程度上避免政策制约的良方而被广泛应用<sup>[1]</sup>。然而,半岛是陆地与海洋环境的重要物质传输、能量传递和信息交流的重要场所和通道,对其实施填海工程会对填海工程区、原有陆地和近海海域的地形地貌、水文地质、环境质量和生物群落等产生一系列不同程度的影响<sup>[2-18]</sup>。海岛特殊自然环境条件演变而成的水循环系统与内陆有明显区别,通常地表水资源匮乏,地下水资源多呈“透镜体”形状,水量有限,开采环境相当脆弱。地下淡水是工业、旅游业及当地居民用水的主要来源,同时为海岛生态环境保护的重要保障。因此,填海工程对地下水环境的影响以及因地下水环境改变而造成的区域湿地、红树林和珊瑚礁生态系统的衰退等生态环境问题被广泛关注和研究<sup>[19-26]</sup>。

古雷半岛是我国东南沿海地区广泛分布的典型岛屿,作为海峡两岸重要的交流窗口,因独特的区位优势已经成为众多大型石化工业集中分布的国家级开发区。当地政府为了扩大古雷石化园区发展所需建设用地,发挥闽南金三角整体优势和推动海峡西岸连片发展,将对半岛西侧部分海域实施吹填海工程。然而,古雷半岛西侧的东山湾聚集了珊瑚自然保护区、红树林自然保护区、农渔业区等环境敏感区。填海造陆可能会对区域环境产生一定的影响,但不同的填海材料和填海方式对区域地下水及生态敏感保护的影响程度不尽相同,如何量化评估不同填海情景对区域地下水含水层及敏感保护目标造成的影响是必须要考虑的科学问题,同时也是国家、地方政府和石化企业等需要迫切解决的现实问题,这对该地区海岸带开发利用具有重要的现实意义<sup>[5, 14, 24, 27-29]</sup>。因此,本文在野外水文地质调查和水文地质试验基础上,根据古雷半岛填海区工程概况,分别设置三种填海情景(海砂填海、海砂+黏土填海、黏土填海),采用国际上著名的地下水模拟系统 Groundwater Modeling System(GMS),开展三种不同填海情景下的地下水流场及污染物运移的数值模拟对比分析,希望能为评估填海工程对地下水环境造

成的影响及其当地地下水环境的保护提供一定的参考。

## 1 研究区概况

古雷半岛位于福建省漳州市漳浦县,三面临海,南邻台湾海峡。由北向南呈条带状朝大海延伸,南北长 17.3 km,东西宽 3~4 km(最窄处仅 300 m)<sup>[30]</sup>,面积约 40 km<sup>2</sup>。原为近岸孤岛,后因泥砂淤积形成陆连岛,地势由南向北倾斜。南部以台地、丘陵为主,海拔约 50 m,最高峰古雷山海拔 270 m。总体处于闽东南沿海丘陵地貌区内,主要有构造剥蚀侵蚀的低山、丘陵、残丘、岛屿、台地以及冲洪积阶地或冲海积海湾平原等地貌类型。近年来,古雷半岛因其独特的区位优势已成为中国东南沿海的石化工业集中分布区<sup>[31]</sup>。古雷半岛地处亚热带海洋性气候区,气候温和,冬无严寒、夏无酷暑。季风现象较为明显,冬季多为东北风,夏季多为西南风。多年平均气温 21.3℃,全年无霜期。年均降水量 1 327.4 mm,主要集中在每年的 5 月-8 月份,占年降水量的 61%。多年平均蒸发量 1 658.2 mm。

研究区基岩主要为燕山早期混合花岗岩,第四系覆盖层由残积层、冲洪积层、海陆交互沉积层组成,并且分布有上更新统残积层及前泥盆系澳角群动力变质岩等。其中海积层和风积层出露面积最大,分别出露于半岛西北部及西侧、半岛东侧,两者面积之和约占总面积的 70% 以上。岩性自东岸向西岸泥质增多,西岸以淤泥、黏性土夹粉细砂为主,东岸以粉细砂夹淤泥、黏性土为主。该区主要地下水类型为基岩裂隙水和松散岩类孔隙水,局部含微承压-承压水。区域内基岩裂隙水主要赋存于坡残积层及其下伏基岩风化带中,水量总体较贫乏,泉流量常见值 < 0.1 L/s,单孔涌水量 < 100 m<sup>3</sup>/d,富水性弱。松散岩类孔隙水主要分布于风积砂和海积砂层中,含水层厚度 5~20 m,水位埋深 0.5~5 m,单井涌水量一般为 100~350 m<sup>3</sup>/d,赋水性中强。研究区水文地质条件见图 1, A-A' 水文地质剖面图见图 2。大气降水是研究区地下水的唯一补给源,雨水渗入含水层后在地形的控制下由南北两侧向中部

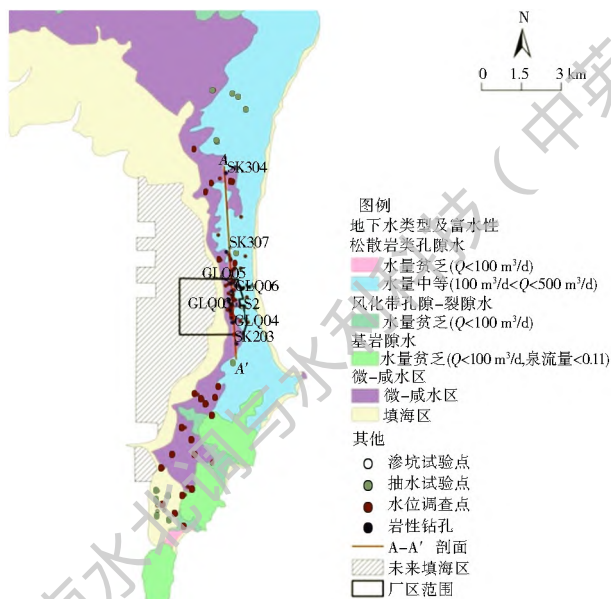


图 1 研究区水文地质图

Fig. 1 Regional hydrogeological condition of the study area

汇集,于半岛中轴形成近南北向的脊状分水岭后分别向东西两侧径流入海。地下水水位动态主要受大气降水影响,随季节变化明显,雨季高旱季低。古雷半岛松散岩类孔隙水(潜水)交替强烈,pH 值一般 7.0~7.2,矿化度、水质类型随陆域向两侧海域变化,矿化度升高,一般 206.5→910.89 mg/L;水质类型一般具有如下变化趋势:  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Ca} \cdot \text{Na}^+$

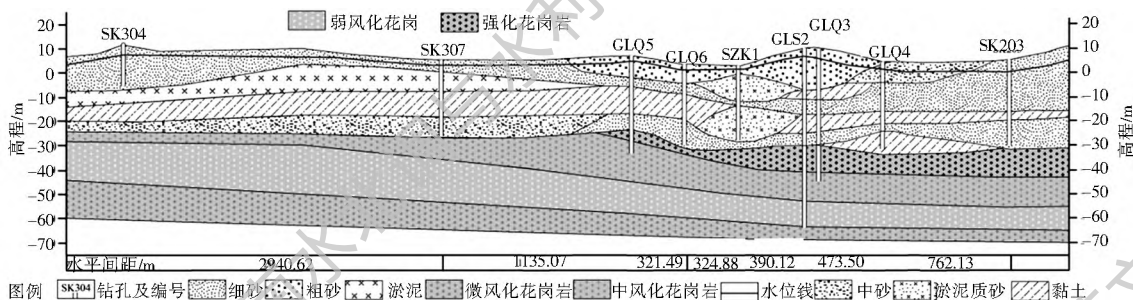


图 2 A-A' 水文地质剖面

Fig. 2 A-A' hydrogeological section map of the study area

情景三:填海材料为黏土,主要成分为轻亚黏土,水平渗透系数为 0.05 m/d。

## 2.2 模拟条件及计算过程

### (1) 模拟范围。

地下水流场模拟范围的确定以区域水文地质条件为基础,同时充分考虑地下水系统的完整性及独立性。本研究调查范围北部到达杜浔镇中心,南部到达古雷山南峰,面积约 52 km<sup>2</sup>。根据获取的古雷半岛区域水文地质条件,本研究的地下水流初始模型模拟范围约为 41.24 km<sup>2</sup>;填海后研究区范围约为 63.18 km<sup>2</sup>,如图 1 所示。

利用 GMS 软件,综合考虑研究区主要含水层分布范围、模拟精度和计算机计算能力等实际情况,

$\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}^+ \text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}^+ \text{ClNa}$ 。

## 2 研究方法

基于 GMS 数值模型,通过设置不同填海情景,采用数值模拟的方法探索不同填海材料和填海方式对该半岛地下水流场的影响以及预测其地下水污染状况。

### 2.1 填海情景设置

因石油化工企业聚集,土地资源紧张,为扩大厂区用地,当地政府决定对古雷半岛西侧进行填海,面积 21.94 km<sup>2</sup>,最大宽度 3.16 km,场地标高 6.21~8.89 m。在已有填海工程方案基础上,设定三种不同的填海情景。

情景一:半岛三面临海,海砂资源丰富、价格低廉,主要成分为粉砂,粒径 0.05~0.1 mm,水平渗透系数为 1.0 m/d,是半岛未来填海的主要材料。

情景二:古雷半岛西侧东山湾有漳江口红树林自然保护区、东山湾珊瑚自然保护区和东山湾农渔业区等重要环境敏感区。黏土渗透系数低,对污染具有较好的阻隔效果。故将填海区域一分为二,将情景一海砂填海区西侧宽 827 m 的南北向条带区置换为黏土,主要成分为轻亚黏土,水平渗透系数为 0.05 m/d。

研究区含水层实行网格加密剖分,水平方向 X、Y 均按 50 m×50 m 进行方形网格剖分,ij 分别代表水平方向行、列方格数,未填海、三种填海情景的地下水模型分别剖分为 16 578、25 315 个二维单元格。垂直方向 Z 网格按含水层剖分为 4 层,L 代表自上而下含水层层数。

### (2) 概念模型。

研究区包气带厚度小,对污染物运移的阻碍作用微弱,故在模型计算中忽略包气带对污染物的阻滞作用。古雷半岛地质空间结构清晰,含水层水平分布均匀连续、垂向变化明显,具有统一连续的地下水水位。地下水系统的物质输入、输出会随时间变化,一年中丰水期水位变化最为明显,从环境影响评

价的安全性考虑,采用2015年9月份的实际水位数据对已有古雷半岛丰水期最大潮汐时的地下水水流场进行了验证,结果显示两者水位基本一致,故将其作为研究区全年的稳定流场。

侧向边界:南、北部边界均垂直地下水水流场,北部到达杜浔盐场,南部到达古雷山北侧,作为第二类边界;东侧和西侧以海岸线为界(包括西北部的海水养殖厂),作为第一类边界。垂向边界:研究区的上部边界为潜水面,为水量交换边界,接受大气降水入渗和潜水蒸发;下部边界为渗透性极差的弱风化花岗岩,概化为隔水边界。根据研究区实际的含水层岩性及垂向分布特征,将模型自上而下概化为4层:第一层含水层以海积及风积粉细砂、中细砂为主,厚度为10~20m;第二层弱透水层为致密黏土,5~10m;第三层含水层为细砂,3~5m;第四层隔水层为风化花岗岩,10~30m。

### (3) 数学模型。

根据实际掌握的水文地质条件,同时考虑到模拟常年稳定流场下的污染物迁移情况的实际需求,选取多年平均条件下的地下水水流场及源汇项,可建立起研究区的非均质、各向异性、三维稳定流数学模型,用如下微分方程的定解问题来描述:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_h \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_v \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \varepsilon = 0, (x, y, z) \in \Omega \\ H(x, y, z, t)|_{z=0} = h_0, (x, y, z) \in \Omega \\ K_h \left( \frac{\partial H}{\partial x} \right)^2 + K_h \left( \frac{\partial H}{\partial y} \right)^2 + K_v \left( \frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial H}{\partial z} (K_v + p) + p = 0, (x, y, z) \in \Gamma_0 \\ H(x, y, z, t)|_{\Gamma_1} = h_0, (x, y, z) \in \Gamma_1 \\ K_n \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = q, (x, y, z) \in \Gamma_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H$ 为地下水位标高(m); $K_h$ 、 $K_v$ 为分别为水平和垂直渗透系数(m/d); $\varepsilon$ 为潜水含水层的垂向补排强度[ $\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$ ],其中包括大气降水入渗量、地下水蒸发量; $h_0$ 为含水层的初始水位标高(m); $h_1$ 为第一类(定水位)边界水位标高(m); $p$ 为潜水面的蒸发和降水等(m/d); $\Gamma_0$ 为渗流区域的上边界,即地下水的自由表面; $\Gamma_1$ 为一类边界; $\Gamma_2$ 为二类边界; $n$ 为二类边界外法线方向; $K_n$ 为边界面法向方向的渗透系数(m/d); $q$ 为第二类边界上的单宽渗流量,流入为正,流出为负,隔水边界为0( $\text{m}^2/\text{d}$ ); $x, y, z$ 为坐标变量(m); $\Omega$ 为渗流区域。

基于准三维地下水水流场中的对流-弥散方程和定解条件,污染物运移模拟应用GMS软件中的MT3DMS模块计算求解。

$$\begin{cases} \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial(u_x c)}{\partial x} - \frac{\partial(u_y c)}{\partial y} - \frac{\partial(u_z c)}{\partial z} + I, (x, y) \in \Omega, t > 0 \\ c(x, y, 0) = c_0(x, y), (x, y) \in \Omega, t > 0 \\ (c(x, y, t)u \cdot \text{grad}c) \cdot n|_{B_1} = (c(x, y, t)u - D \cdot \text{grad}c) \cdot n|_{\Gamma_1}, (x, y) \in B_1, t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $c$ 为饱和含水层中的污染物的浓度( $\text{ML}^3$ ); $t$ 为时间(T); $u_x$ 、 $u_y$ 为孔隙平均实际流速( $\text{LT}^{-1}$ ); $u_x = v_x/n$ ,  $u_y = v_y/n$ ,其中 $v_x$ 、 $v_y$ 为渗流速度( $\text{LT}^{-1}$ ), $n$ 为有效孔隙(无量纲); $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$ 为坐标轴方向的主弥散系数( $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ ), $D_x = \alpha_L \cdot u$ ,  $D_y = \alpha_T \cdot u$ ,  $D_z = \alpha_V \cdot u$ ,其中 $\alpha_L$ 、 $\alpha_T$ 、 $\alpha_V$ 分别为纵向弥散度、横向弥散度、垂向弥散度(L); $I$ 为单位时间单位面积含水层内由于源汇项流量 $W$ (包括污染源、抽水和降水入渗)引起的污染物浓度 $c$ 变化, $I = c_s W/n$ ;  $c_0(x, y)$ 为初始时刻区域 $\Omega$ 上的溶质浓度分布; $B_1$ 为研究区给定溶质通量边界。

### (4) 水文地质参数的确定。

野外调查工作共实施109个水位调查点,11个抽水试验点,5个野外现场渗坑试验点(见图2)。抽水井均穿过包气带至含水层。以试验结果和经验值为参考,经过模型调参获得研究区各含水层自上而下水平渗透系数 $K_h$ 分别为0.05~15m/d不等、0.001m/d、1.0m/d、0.0001m/d。垂直渗透系数 $K_v$ 根据经验值按水平渗透系数 $K_h$ 的1/10给定。研究区补给主要来源于降雨入渗,故按照经验值<sup>[32-33]</sup>选取降雨入渗系数0.14~0.35。最大蒸发速率参考年均蒸发量计算经过调参后为0.0041~0.0067m/d不等,极限蒸发深度为3m。弥散系数采用定水头的淋滤实验获得,纵向弥散度 $\alpha_L = 13.2\text{cm}$ ,本模型给定 $\alpha_V/\alpha_L = 0.2$ , $\alpha_H/\alpha_L = 0.2$ 。

### (5) 模型识别和验证。

模型的验证和识别是判断一个模型是否符合实际环境条件的重要依据。模型必须满足水文地质参数符合实际水文地质条件、地下水补给量与排泄量基本相等( $\Delta Q/Q_{\text{补}} < 10\%$ )、地下水模拟流场与实际流场基本一致等条件。研究区未填海条件下水文地质参数设置符合古雷半岛水文地质条件,地下水水流模型水均衡( $\Delta Q/Q_{\text{补}}$ )为-0.65%,地下水模拟等值线与实测等水位线基本一致(见图3),因此本研究数值模型可信,模拟流场可以客观反映研究区实际地下水水流场。

## 2.3 污染源强设定

本研究以拟建古雷半岛炼化一体化项目化工原料罐区苯储罐泄漏为例( $i=184, j=78, L=1$ )。根



图 3 地下水模拟流场与实际流场对比  
Fig. 3 Comparison of the simulated and actual flow field of groundwater

据储罐区内外压差及裂口面积等,按照化工行业常用的经验公式(3)输入研究区相应数据<sup>[34]</sup>,计算出苯泄漏速率为 18.37 kg/d(纯物质)。

$$Q_L = C_d A \rho \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho} + 2gh} \quad (3)$$

式中:  $Q_L$  为液体泄漏速率(kg/s);  $P$  为容器内介质

压力(Pa);  $P_0$  为环境压力(Pa);  $\rho$  为泄漏液体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g$  为重力加速度,  $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ;  $h$  为裂口之上液位高度(m);  $C_d$  为液体泄漏系数,无量纲;  $A$  为裂口面积。

由于储罐区泄露不易被发现,按照每季(3个月)一次监测频率,设定污染源在前 90 d 内未被发现,视为连续稳定释放的点源,90 d 后发现污染并立即采取措施,污染物不再释放,故模型可分为 2 个应力期。泄漏区域污染物运移速率慢、浓度梯度大,为了及时发现地下水污染,更好地展现污染羽水平运移范围和浓度变化以及垂向上各含水层污染物浓度变化,在泄漏点西侧 50 m 设定 1 个观测井( $i = 184, j = 77$ ),以探索不同填海情景下污染物的运移规律。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同填海情景下的地下水流场

根据模型模拟结果(图 4),三种填海情景下原有陆域地下水流场形态与初始流场趋势基本一致,呈现南北两侧高,中部次之,东西部最低分布规律,与地形保持一致。地下水由南北两侧向中部汇集,在中轴形成近南北向的脊状分水岭,最后分别向东西两侧径流入海。

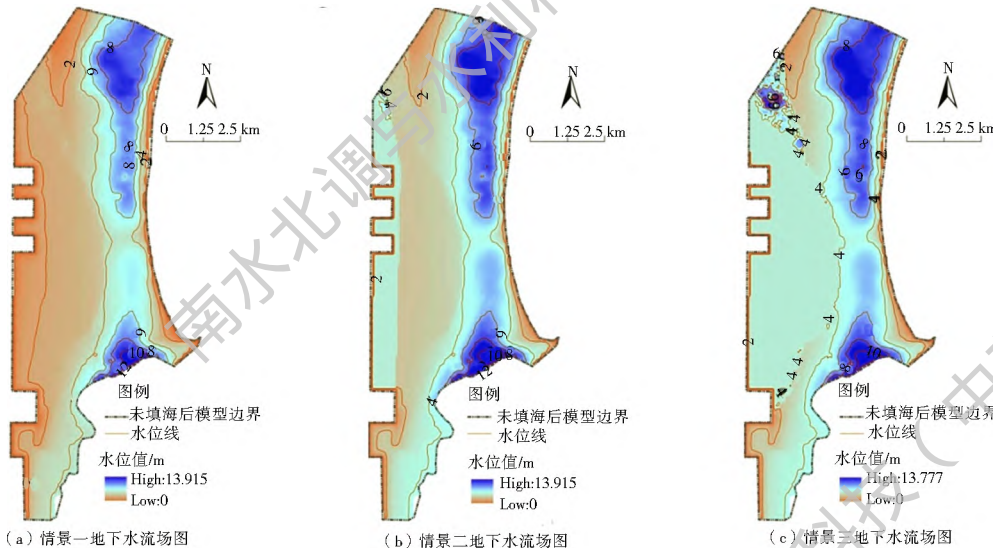


图 4 三种不同填海情景下的地下水流场  
Fig. 4 The groundwater flow field under three reclamation scenarios

研究区地下水初始流场平均水位 1.27 m, 最高水位 14.00 m, 最低水位与海平面持平。填海工程实施后,半岛地下水水位发生变化,三种填海情景最高水位依次为 13.92 m、13.92 m、13.78 m, 最低水位三者均与海平面基本持平。海砂填海、海砂+黏土填海、黏土填海三种填海情景下的陆域地下水流场相比于初始流场,半岛四周水位呈现明显的上升趋势,上升幅度最高值分别为 4.05 m、4.05 m、4.78

m, 上升区主要出现在未填海西侧临海陆域。填海工程的实施区域包含划定的填海区和低于填海区规定标高的少部分沿海陆域,西侧临海陆域因填海造成地下水排泄受阻,呈现大幅度抬升。在填海区域,填海材料的加入使原来的海洋转变为陆地,海水驱退,填海区接受大气降水和原有陆域补给大于蒸发和海洋排泄量,故地下水水位升高。古雷半岛实施填海工程后整体水位呈上升趋势,水力坡度降低,地

下水水流速度减缓,地下水分水岭由陆地向海洋一侧移动,而且经过一定时间后将达到新的平衡。

利用 ArcGIS 10.1 栅格计算分析获得三种不同填海情景两两比较中的地下水水位差空间分布图,如图 5 所示。通过比较分析得到: (1) 情景二相较于情景一(图 5a),在大部分原有陆域和海砂填海区与前者变化一致,而未填海陆域东北侧临海区域和黏土填海区地下水水位高,水位差最值分别为- 0.67 m、4.44 m; (2) 情景三相较于情景一(图 6(b)),未填海陆域中部地区水位值低,而填海区和未填海靠近填海侧水位高,水位差的最值分别为- 0.31 m、8.20 m; (3) 情景三相较于情景二(图 5(c)),未填海陆域东侧地区和西侧黏土填海区水位低,但在未填海陆域西侧和后者海砂填海区水位高,水位差最值分别为- 0.47 m、8.20 m。水位差最大值均出现在未填海区的北端区域,地下水因填海工程实施被迫滞留而抬升明显。上述结果和分析说明填海材料的渗透系数越低、覆盖面积越大,对地下水流动的阻碍作用越强,并且其对填海区流场的影响大于未填海区。

### 3.2 不同填海情景下的地下水污染物运移

根据前述污染物源强设置以及项目运营期的情况<sup>[34,35]</sup>,综合选取泄漏发生后的近、中、远三个典型

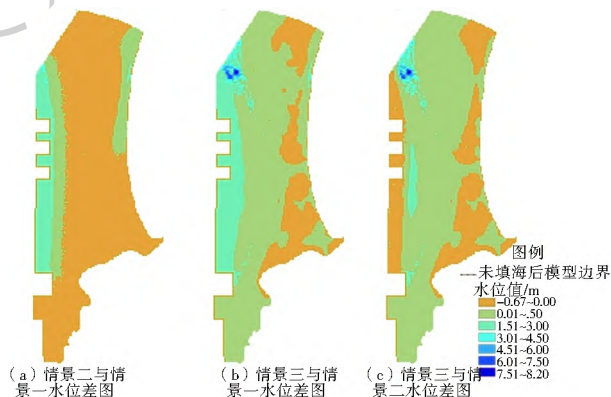


图 5 三种填海情景下的地下水流场比较

Fig. 5 Comparison of groundwater flow field under three reclamation scenarios

期作为典型代表,即污染物运移 100 d、1 000 d、10 950 d(一般项目服务年限为 30 a)三个典型时刻来对污染物迁移范围和运移规律开展详细分析。苯发生泄漏后因重力和渗透作用通过包气带进入地下水,随着地下水的运动而迁移,从而对地下水含水层造成污染。参考《地下水水质标准》(DZ/T 0290- 2015)<sup>[36]</sup>,污染物浓度高于 III 类水质苯浓度阈值 0.01 mg/L 即处于污染状态。三种填海情景下的地下水污染羽在水平和垂向上的迁移分布范围分别见图 6、图 7,污染运移相关参数数值见表 1。

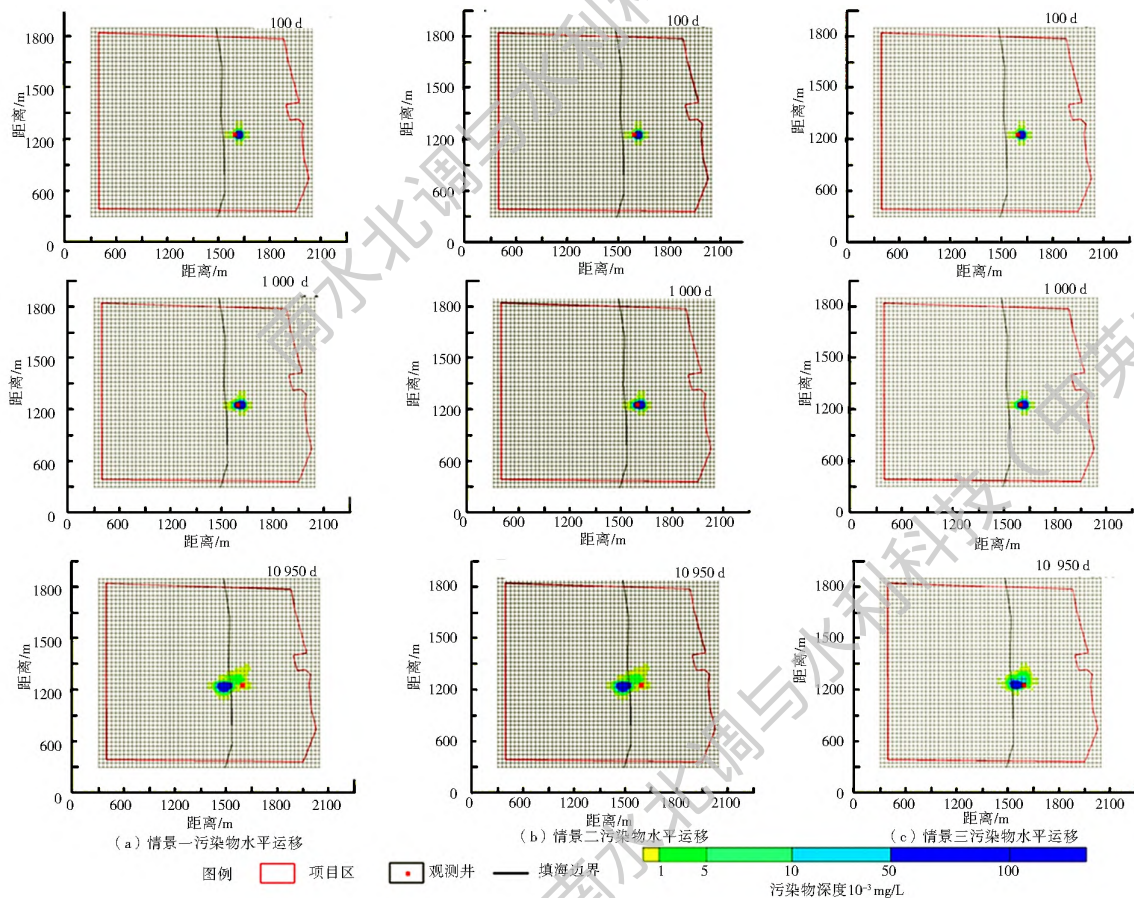


图 6 不同填海情景不同时刻污染物水平运移预测

Fig. 6 Prediction of horizontal transport of contaminants at different times in different reclamation scenarios

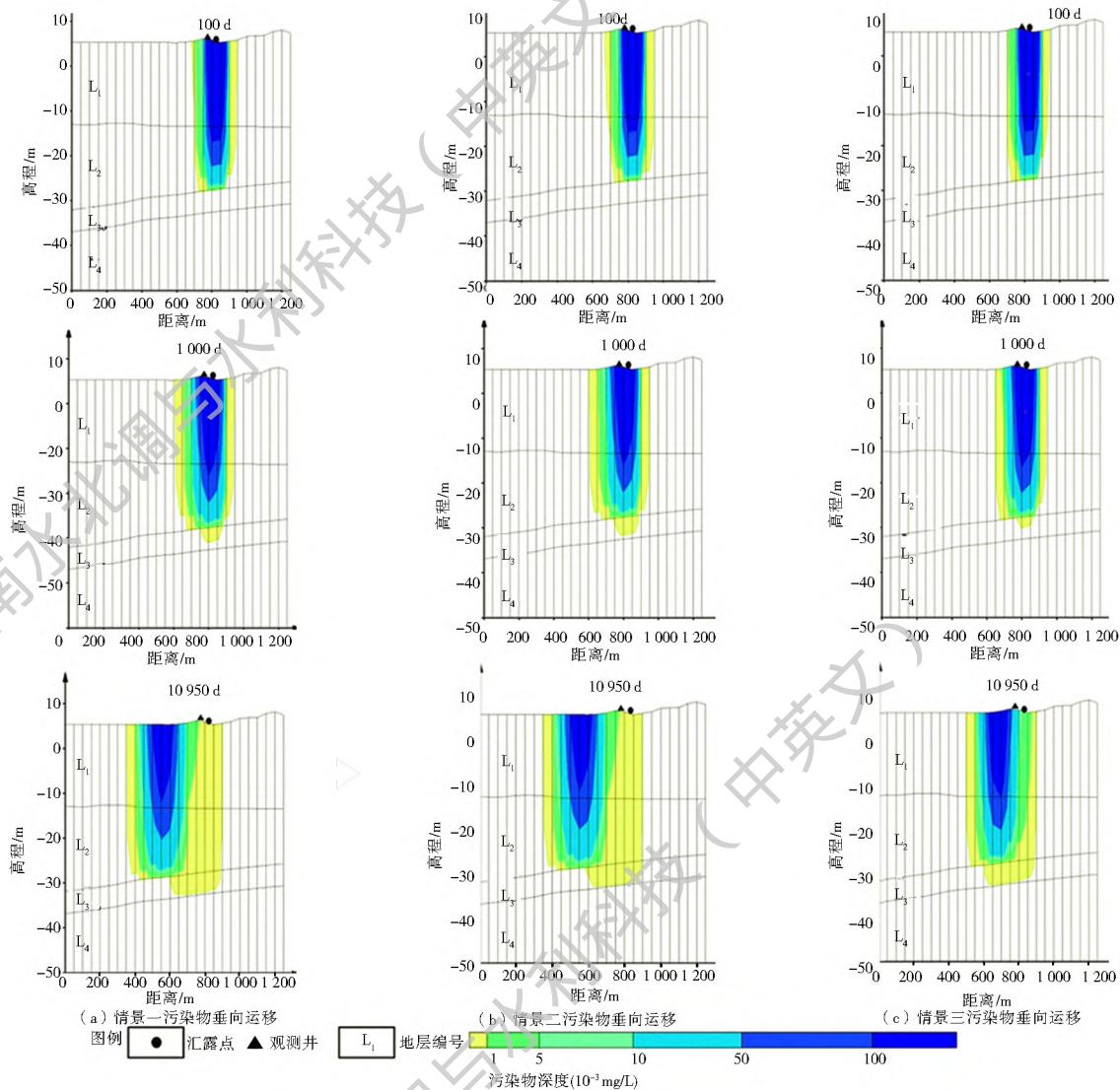


图 7 不同填海情景不同时刻污染物垂向运移预测

Fig. 7 Prediction of vertical transport of contaminants at different times in different reclamation scenarios

表 1 三种填海情景下的污染运移参数

Tab. 1 Contaminant transport parameters in three reclamation scenarios

填海情景	预测时间/d	污染羽面积/m <sup>2</sup>	水平运移距离/m	平均速率/(m·d <sup>-1</sup> )	中心点浓度/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
(一) 海砂填海	100	28 125	150	1.5	1 015 712
	1 000	40 000	200	0.2	634 407.4
	10 950	109 000	450	0.04	325 570
(二) 海砂+黏土填海	100	28 125	150	1.5	1 015 712
	1 000	40 000	200	0.2	634 407.4
	10 950	109 000	450	0.04	325 570
(三) 黏土填海	100	22 500	137.5	1.38	1 038 384
	1 000	22 500	140	0.14	752 017.2
	10 950	83 855	365	0.03	540 762.2

在水平方向上, 污染物在地下水水流场的作用下往海岛西侧运移, 在地下水中不断迁移扩散, 浓度逐渐减小, 污染羽面积不断增大, 运移速度减缓, 但在预测时间 30 a 内未运出厂区。情景一与情景二污

染物运移基本相同, 扩散强度高于情景三。情景一和情景二二的污染羽运移最大水平距离为 450 m, 最大运移范围 109 000 m<sup>2</sup>, 中心浓度向西侧运移了 250 m, 浓度最高值达 1 064 695.50 mg/L; 情景三最大水平距离为 365 m, 最大运移范围 83 855 m<sup>2</sup>, 中心浓度向西侧运移 150 m, 最高值达 1 064 785.00 mg/L。相较于情景一或情景二, 情景三水平运移面积、运移速率分别下降 23.07%、18.89%。在垂直方向上, 污染物泄漏后下渗进入第一层含水层, 由于含水层连通性, 在 100 d 内即到达第二层含水层并且不断积聚, 呈现以水平运移为主、垂向运移为辅的特征。在 1 000 d 后突破第二层含水层阻滞进入第三层含水层, 但预测时间 10 950 d 内未对第四层含水层造成污染。

三种填海情景下观测井在污染物泄漏 10 d 内会受到污染, 并且污染物垂向浓度变化明显, 受污染含水层污染物浓度随时间变化见图 8。因为情景一与情景二变化趋势一致, 所以两者浓度-时间曲线发

生重叠。第一层含水层赋存潜水,污染物浓度在三种填海情景均呈现先上升后下降的趋势,情景一和情景二在 2 410 d 同时达到最大值 368 768 59 mg/L 后逐渐下降至 10 950 d 时浓度为 783 78 mg/L,情景三在 2 760 d 达到最大值 391 776 56 mg/L 后逐渐下降 10 950 d 浓度为 4 602 91 mg/L,30 a 时情景三观测井浓度为情景一或情景二的 5.87 倍。第二层含水层污染物浓度随时间浓度不断升高,三种情景在 10 950 d 分别达到最大值 20 36 mg/L、20 36 mg/L、26 73 mg/L。第三层含水层污染物浓度随时间增加浓度不断升高,三种情景在 10 950 d 分别达到最大值 0.01 mg/L、0.01 mg/L、0.02 mg/L 第四层含水层在预测时间内浓度低于 0.01 mg/L,即认为没有受到污染。三种填海情景在同一时刻污染物浓度均随含水层埋深增加而降低,而同一含水层情景一和情景二污染物浓度出现先高于后低于情景三的现象。由上述运移结果可以看出,在未考虑土壤对污染物的化学、

生物作用条件下,污染物运移差异主要由填海材料、含水层岩性和填海后地下水流场变化引起。情景一与情景二在泄露点附近区域水文地质条件相同,地下水流场基本一致,故地下水污染物运移特征基本相同。由于情景三填海材料对地下水流的阻滞作用强于情景一和情景二,其污染物运移速率、距离和面积等参数显著低于后两者,但污染物因迁移扩散强度低而不断滞留在未填海区域,浓度削减缓慢。填海材料渗透性不仅会影响流速,也会改变局部地下水流向,从而影响污染物迁移扩散方向与运移范围。泄露点周围第一层潜水含水层与外界连通性好,存在频繁的物质和能量的交换,地下水交换频繁、运移速度快,污染物在该层的衰减速率明显高于其他含水层。而第二层黏土层渗透性弱,对污染物截留作用强,在预测期内模拟浓度呈现大幅度下降,这对微承压-承压含水层起到了较大的保护作用。与情景一、情景二相比,情景三污染物抵达观测井时间长且衰减速率慢。

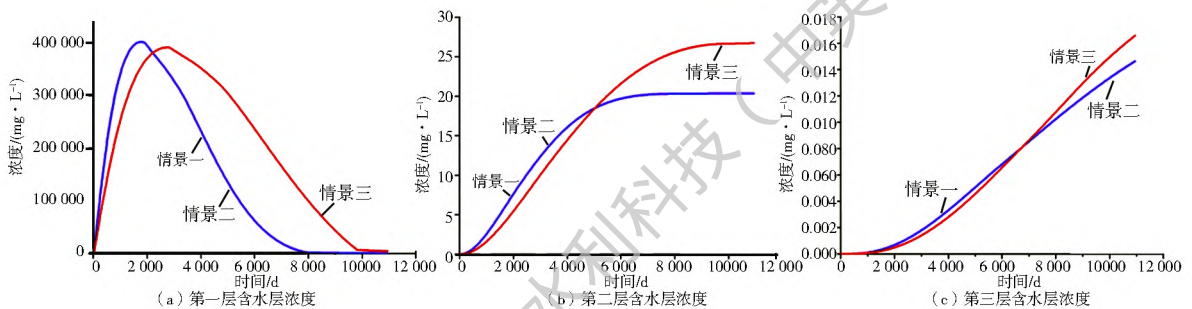


图 8 观测井在不同填海情景下的垂向各层污染物浓度变化

Fig. 8 Contaminant concentration changes in different vertical layers of observation wells under different reclamation scenarios

### 3.3 地下水污染防治措施与建议

根据地下水污染运移结果及分析,如果古雷半岛中部靠近填海边界发生泄露事故,污染物对地下水的影响范围小,主要集中在厂区泄露点半径 0.5 km 内,在不采取任何防控措施的情况下,虽然泄漏事件在预测时期内不会污染半岛西侧海域环境敏感区,但是会严重污染源强泄露点附近及下游临近的潜水含水层,甚至在远期时会造成源强点下伏局部微承压-承压含水层水质轻微污染。因此,按照“源头控制、分区防治、污染监控、应急响应”相结合的原则,建议拟建项目在施工期要对苯储罐区等潜在污染源进行分区分级水平防渗和垂向防渗,并且在其下游设置不同层位的地下水监测井进行定期采样检测,对污染物的产生、入渗、扩散、应急响应进行全方位监测与控制。

## 4 结论

根据 GMS 数值模拟结果,填海工程实施后,对

填海区地下水的影响大于未填海区,地下水流向改变不明显,但地下水水位整体抬升,流速减小,地下水分水岭朝海岛西侧移动。不同填海材料及其组合的方式会对地下水流场产生不同的影响。渗透系数越低对地下水流场的阻碍作用越强,但本文提出的组合方式——情景二(海砂+黏土填海)对研究区地下水流场影响在未填海区和海砂填海区与情景一(海砂填海)基本相同,只有在黏土填海区滞留地下水效果明显。在未考虑环境对污染物的化学、生物作用的前提下,填海材料渗透性、含水层岩性和地下水流场是影响污染物运移的主要因素。填海情景下污染物向半岛西侧运移,以水平运移为主、垂向运移为辅。水平方向上污染羽面积和最大水平运移距离持续增加,污染物中心浓度持续减小;垂直方向上随含水层埋深的增加浓度减小。与情景三(黏土填海)相比,情景一和情景二污染物运移基本相同且水平运移强、垂直运移弱。

研究表明,污染源位于临近填海区的原有陆域中部,本文提出的组合填海方式对污染物运移



阻滯效果不明显,采用黏土填海对周边环境的影响最小。另外,研究区发生泄漏后污染物运移速度慢、分布集中,且在 30 a 内未运移出厂区,对周边海域的环境影响弱,但是对源强泄露点附近及下游临近潜水含水层污染严重,不采取任何措施的情况下甚至会污染局部微承压-承压含水层。因此,临近含水层受污染的潜在风险高,必须严控污染源,并及时做好污染监测与防控。

由于数据和实验条件有限,没有考虑研究区地下水污染物背景值以及土壤对污染物的生物和化学作用,在实际情况下前者会使污染物浓度更高,后者会使污染物浓度变化更为复杂。此外,如果半岛过度抽取地下水使区域地下水水均衡遭到破坏,则本文建立的非均质、各向异性、三维稳定流水文地质模型将与实际情况出现偏差。为了更好地评估填海工程对地下水环境的影响,仍需要完善地下水监测机制并进行长期跟踪研究,做好污染防控,以使填海工程对地下水环境的不利影响最小化。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘伟,刘百桥.我国围填海现状、问题及调控对策[J].广州环境科学,2008,23(2):26-30.(LIU W,LIU B Q.Current situation and countemeasures of sea redamation in China[J].Guangzhou Environmental Sciences,2008,23(2):26-30.(in Chinese))
- [2] 张水浸,林双淡,江锦祥,等.杭州湾北岸潮间带生态研究Ⅰ.软相底栖动物群落的变化[J].生态学报,1986,6(3):253-261.(ZHANG S J,LIN S D,JIANG J X,et al.Ecology of intertidal zone along northern coast of Hangzhou Bay II.variations of benthic faunal community in soft bottom[J].Acta Ecologica Sinica,1986,6(3):253-261.(in Chinese))
- [3] 潘乐陶.香港填海面面观[J].地理学报,1997,52(S1):122-126.(Otto Poon.Overview of reclamation in Hongkong[J].Acta Geographica Sinica,1997,52(S1):122-126.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0375-5444.1997.z1.016.
- [4] 王学昌,孙长青,孙英兰,等.填海造地对胶州湾水动力环境影响的数值研究[J].海洋环境科学,2000,19(3):55-59.(WANG X C,SUN C Q,SUN Y L,et al.Study on impact of Jiaozhou Bay sea filling on hydrodynamic environment[J].Marine Environmental Science,2000,19(3):55-59.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-6336.2000.03.013.
- [5] 倪晋仁,秦华鹏,赵智杰.基于水质模型的海湾填海岸线选择[J].环境科学学报,2001,21(6):684-688.(NI J R,QIN H P,ZHAO Z J.Determination of post reclamation coastline based on water quality model[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2001,21(6):684-688.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0253-2468.2001.06.008.
- [6] 秦华鹏,倪晋仁,李义天.基于泥沙数学模型的海湾填海岸线选择[J].泥沙研究,2002(3):52-58.(QIN H P,NI JR,LI Y T.Determination of post reclamation coastline based on Sediment Transport Model[J].Journal of Sediment Research,2002(3):52-58.(in Chinese)). DOI:10.3321/j.issn:0468-155X.2002.03.009.
- [7] 秦华鹏,倪晋仁,梁林.基于水动力学数学模型的海湾填海岸线选择[J].水动力学研究与进展[J].2002,17(1):92-100.(QIN H P,NI J R,LIANG L.Determination of post reclamation coastline based on hydrodynamic model[J].Journal of Hydrodynamics,2002,17(1):92-100.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-4874.2002.01.013.
- [8] 孙长青,王学昌,孙英兰,等.填海造地对胶州湾污染物输运影响的数值研究[J].海洋科学,2002,26(10):47-50.(SUN C Q,WANG X C,SUN Y L,et al.Study on impact of Jiaozhou Bay sea filling on pollutant transport[J].Marine Sciences,2002,26(10):47-50.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-3096.2002.10.014.
- [9] 陈彬,王金坑,张玉生,等.泉州湾围海工程对海洋环境的影响[J].台湾海峡,2004,23(2):192-198.(CHEN B,WANG J K,ZHANG Y S,et al.Impact of reclamation activities on marine environment in Quanzhou Bay[J].Journal of Oceanography in Taiwan Strait,2004,23(2):192-198.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-8160.2004.02.010.
- [10] 林迪洋.湛江湾填海工程的水动力条件影响及泥沙冲淤预测[D].青岛:中国海洋大学,2005.(LIN D Y.Effect of the hydrodynamic conditions of Zhanjiang Bay reclamation project and prediction of its silt sedimentation[D].Qingdao:Ocean University of China,2005.(in Chinese)) DOI:10.7666/d.y828648.
- [11] 李杨帆,朱晓东,孙翔.城市扩张下港湾湿地环境影响评价研究:景观变化视角——以江苏省连云港市为例[A].中国地理学会2006年学术年会论文摘要集[C].北京:2006.(LI Y F,ZHU X D,SUN X.Study on environmental impact assessment of estuary wetlands under urban expansion a case study of Lianyungang, Jiangsu [C].Proceedings of the 2006 Annual Conference of The Geographical Society in China[A].Beijing:2006.(in Chinese))
- [12] 陈伟琪,王萱.围填海对海岸带生态系统服务功能的负面影响分析及其货币化评估技术探讨[A].中国海洋学会2007年学术年会论文集(上册)[C].北京:2007.(CHEN W Q,WANG X.Analysis of the negative impact of reclamation on the ecosystem service function of coastal zone and discussion on its monetary evaluation technology[A].Proceedings of 2007 Academic Annual Meeting of Chinese Society for Oceanography (1) [C].Beijing:2007.(in Chinese))
- [13] 李学宁.天津海岸侵蚀与淤积研究[D].北京:中国地质大学(北京),2007.(LI X N.The study of erosion and siltation of the coast of Tianjin[D].Beijing:China University of Geosciences (Beijing).2007.(in Chinese))
- [14] 王萱,陈伟琪,江毓武,等.基于数值模拟的海湾环境容量价值损失的预测评估——以厦门同安湾围填海为例[J].环境科学,2010,30(3):420-425.(WANG X,CHEN W Q,JIANG Y W,et al.Evaluation of losses in bay environmental capacity based on numerical simulation a case study of sea reclamation in Tong'an Bay, Xiamen[J].China Environmental Science,2010,30(3):420-425.(in Chinese))
- [15] 秦延文,郑丙辉,李小宝,等.渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响[J].环境科学,2012,33(7):2359-2367.(QIN

- Y W, ZHENG B H, LI X B, et al. Impact of coastal exploitation on the heavy metal contents in the sediment of Bohai Bay [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2359-2367. (in Chinese) DOI: 10.13227/j.hj.kx.2012.07.007.
- [16] 王初升, 林荣澄, 黄发明. 珊瑚礁海岸围填海适宜性的评估方法研究[J]. *海洋通报*, 2012, 31(6): 695-699. (WANG C S, LIN R C, HUANG F M. Research on the assessment method of reclamation suitability on the coral reef coast [J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(6): 695-699. (in Chinese) DOI: 10.11840/j.issn.1006-6392.2012.6.015.
- [17] 王勇智, 马林娜, 谷东起, 等. 罗源湾围填海的海洋环境影响分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(11): 129-133. (WANG Y Z, MA L N, GU D Q, et al. The research on current reclamation and reclamation demand analysis in Luoyuan Bay [J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23(11): 129-133. (in Chinese))
- [18] 黄备, 邵君波, 周斌, 等. 椒江口围填海工程对浮游动物的影响[J]. *生态科学*, 2015, 34(4): 86-92. (HUANG B, SHAO J B, ZHOU B, et al. The effect of reclamation on zooplankton in Jiajiang Estuary [J]. *Ecological Science*, 2015, 34(4): 86-92. (in Chinese) DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2015.04.014.
- [19] JIAO J J. Modification of regional groundwater regimes by land reclamation [J]. *Hong Kong Geologist*, 2000, 6, 29-36.
- [20] JIAO J J, NANDY S, LI H. Analytical studies on the impact of land reclamation on ground water flow [J]. *Ground Water*, 2001, 39(6): 912-920. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2001.tb02479.x.
- [21] JIAO J J. Preliminary conceptual study on impact of land reclamation on groundwater flow and contaminant migration in Penny's Bay [J]. *Hong Kong Geologist*, 2002, 8: 14-20.
- [22] CHEN K, JIAO J J. Preliminary study on seawater intrusion and aquifer freshening near reclaimed coastal area of Shenzhen, China [J]. *Water Science & Technology Water Supply*, 2007, 7(2): 137-145. DOI: 10.2166/ws.2007.048.
- [23] CHEN K, JIAO J J. Metal concentrations and mobility in marine sediment and groundwater in coastal reclamation areas: A case study in Shenzhen, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 151(3): 576-584. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.04.004.
- [24] HU L, JIAO J J, GUO H. Analytical studies on transient groundwater flow induced by land reclamation [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44(11): 1931-1938. DOI: 10.1029/2008WR006926.
- [25] HU L, JIAO J J. Modeling the influences of land reclamation on groundwater systems: A case study in Shekou peninsula, Shenzhen, China [J]. *Engineering Geology*, 2010, 114(3): 144-153. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.04.011.
- [26] 余海忠, 冯书才. 深圳填海工程对海水入侵的影响研究[J]. *山西建筑*, 2015, 41(4): 56-58. (YU H Z, FENG S C. The study on seawater intrusion affected by reclamation engineering in Shenzhen [J]. *Shanxi Architecture*, 2015, 41(4): 56-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-6825.2015.04.033.
- [27] 王义勇. 江苏岸外沙洲围填规模适宜性研究——以条子泥、高泥、东沙为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2011. (WANG Y Y. Study on reclamation scale suitability of Jiangsu offshore sandbanks—a case of Tiaozini, Gaoni, Dongsha [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2011. (in Chinese)) DOI: 10.7666/d.y1922160.
- [28] 赵英杰, 刘宪斌, 刘爱珍, 等. 天津南港工业区用海方式合理性探讨[J]. *中国水运月刊*, 2011, 11(5): 49-52. (ZHAO Y J, LIU X B, LIU A Z, et al. Discussion on the rationality of the sea mode in Tianjin Nangang Industrial Zone [J]. *China Water Transport*, 2011, 11(5): 49-52. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-7973.C.2011.05.023.
- [29] 李颖, 梁康, 娄华君, 等. 滨海地区石化污染事故对区域水环境影响的模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(3): 48-54. (LI Y, LIANG K, LOU H J, et al. Modeling of impact of petrochemical pollution accident on regional water environment in a coastal zone [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(3): 48-54. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2016.03.009.
- [30] 王爱军, 叶翔, 束芳芳, 等. 福建古雷半岛东侧岸滩沉积物粒度特征及冲淤动态分析[A]. 北京: 第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集[C], 2011. (WANG A J, YE X, SHU F F, et al. Coastal sediments and sediment dynamic analysis on the east side of Gulei Peninsula, Fujian [A]. Beijing: Proceedings of the Fifteenth China Marine (Offshore) Engineering Symposium [C], 2011. (in Chinese))
- [31] 周勇, 王姣. 福建省古雷地区地下水污染预测与防治[J]. *环球人文地理*, 2014(24): 90-91. (ZHOU Y, WANG J. Groundwater pollution prediction and prevention in Gulei, Fujian [J]. *National Cultural Geography*, 2014(24): 90-91. (in Chinese). DOI: 10.3969/j.issn.2095-0446.2014.24.060
- [32] 王大纯, 张人权, 史毅红, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1995. (WANG D C, ZHANG R Q, SHI Y H, et al. *Foundation of Hydrogeology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995. (in Chinese))
- [33] 曹剑锋, 迟宝明, 王文科, 等. 专门水文地质学[M]. 3. 北京: 科学出版社, 2006. (CAO J F, CHI B M, WANG W K, et al. *Special hydrogeology* [M]. 3. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [34] 中国石化工程建设有限公司. 漳州古雷炼化一体化项目60万吨/年苯乙烯装置[R]. 福建漳州古雷炼化一体化项目百万吨级乙烯及下游深加工装置可行性研究报告5960602FS-2.8, 2015. (Sinopec Engineering Incorporation. 600,000 tons/year styrene equipment of refining and chemical integration project in Gulei, Zhangzhou [R]. Feasibility study report on million ton ethylene and downstream deep processing equipment of refining and chemical integration projection in Gulei, Zhangzhou, Fujian 5960602FS-2.8, 2015. (in Chinese))
- [35] HJ 610-2016. 环境影响评价技术导则——地下水环境[S]. (HJ 610-2016. Technical guidelines for environmental impact assessment groundwater environment [S]. (in Chinese))
- [36] DZ/T 0290-2015. 地下水水质标准[S]. (DZ/T 0290-2015. Standard of groundwater quality [S]. (in Chinese))