

南极冰层取心钻探钻井液对雪层影响的模拟研究

王莉莉¹, 徐会文¹, 赵大军¹, 韩丽丽², 宋佳宇¹, Pavel Talalay¹

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:深冰层取心钻探是极地科学考察的重要组成部分。在极地勘探取样过程中做到在获得高质量冰岩心样品的同时,将钻井液对极地环境的污染降低到最低程度,对保护极地原生环境具有重要意义。依据南极科学钻探的地层条件,应用 Visual Modflow 建立了污染物在雪层中的运移模型,在污染物浓度保持恒定时,对钻孔内污染物进行了数值模拟,预测了 10 年后污染物在雪中污染羽扩散范围。在此基础上,对比分析了不同弥散系数时,雪对污染物弥散的能力。极地科学钻探使用的钻井液粘度通常是水的 10 倍,随着污染物粘度的增大,其扩散的距离也将相应减少。研究结果为深入开展极地冰层取心钻探钻井液对极地环境影响评价研究奠定了重要的理论与技术基础。

关键词:南极冰钻;钻井液;雪层;Visual Modflow;溶质运移;弥散系数;渗透系数;污染物

中图分类号:P634.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2013)12-0001-04

Simulation on the Influence of Drilling Fluids in Antarctic Ice Core Drilling on Snow Layer/WANG Li-li¹, XU Hui-wen¹, ZHAO Da-jun¹, HAN Li-li², SONG Jia-yu¹, Pavel Talalay¹ (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: Deep ice core drilling is an important constituent part of the polar scientific research. In polar exploration sampling process, at the same time of achieving high quality samples, the drilling fluid pollution to the polar region should be reduced to the lowest degree, which has great significance to the polar native environment protection. According to the stratum conditions of the polar scientific drilling, a transport model of pollutant in the snow layer is established by Visual Modflow. When the pollutants concentration maintains constant, numerical simulation for the borehole pollutants is made to predict the pollutants in snow plume diffusion range in a decade. On this basis, contrastive analysis is made on the pollutant dispersion ability of snow under different dispersion coefficient. The drilling fluid used in the polar is 10 times that of water, with the increase of pollutants viscosity, the diffusion range will also be reduced correspondingly. This study result lays the important theoretical and technical basis for the evaluation of the influence of drilling fluid used in polar ice core drilling on the polar environment.

Key words: Antarctic ice core drilling; drilling fluid; snow; Visual Modflow; solute transport; dispersion coefficient; permeability coefficient; pollutant

0 前言

南极深冰层取心钻探是南极科学考察的重要组成部分。为保证钻孔质量、获取高品质的冰心样品、维护具有强蠕变性冰层孔壁的稳定性,不可避免地要使用到钻井液。从大量的国内外文献来看,用于极地深冰层取心钻探的钻井液多为高污染环境的油类产品。这些油类产品具有较强的挥发性和渗透性,对极地的大气环境和冰雪层将产生一定的污染。在低温条件下,油类产品的挥发性将大幅度下降,尽管这些油类在原生态或者简单处理之后,其中的多数介质的粘度会比较大,但不可避免地会在孔隙度比较大的雪层中产生渗透,从而造成对极地原生环境的破坏。此外,部分产品属于营养类物质,也将

破坏原有的极地微生物环境。由于温度和气候等方面的原因,极地环境自然恢复所需的时间远超过其它地区。

在进行极地科学考察的同时,需要保护极地的环境。早在 1972 年,联合国在瑞典首都斯德哥尔摩发布的联合国人类环境会议宣言里就制定了南极环境保护政策。1991 年 10 月 4 日,签署的“关于南极环境保护的南极条约议定书”充分证明了保护南极环境的重要性^[1]。我国在 2011~2012 年度的第 28 次南极科学考察时,在 Dome A 的昆仑站开展了深冰层取心钻探项目,并于 2012~2013 年度的第 29 次南极科学考察获取了高品质的冰心样品。为保证我国顺利开展深冰层取心钻探项目的进行,开展对

收稿日期:2013-08-19;修回日期:2013-10-31

基金项目:国家自然科学基金项目“极地钻探钻井液及其对环境的影响的研究”(编号:41276189)

作者简介:王莉莉(1988-),女(汉族),吉林白山人,吉林大学硕士研究生在读,地质工程专业,从事极地钻探方面的研究工作,吉林省长春市西民主大街 938 号,wanglili0967@163.com。

超低温钻井液各组成材料对环境的影响进行分析研究^[2~4],通过数值模拟找出其影响规律,建立不同参数低温钻井液数据库,加强对南极的环境保护具有十分重要的理论与实际意义。

1 研究区环境与地层概况

Dome A 不仅是南极冰盖的最高点,也是东南极大陆的中心。该区域冰体厚度超过 3000 m,年平均温度达 $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[5]。冰川的物质来源主要是大气的固体降水——雪,不同地区的冰川由于气候条件的差异,雪转化成冰的过程也不一样,冰层上雪的厚度也各不相同。按照降雪时间长短和形态变化程度的不同,可将雪分为新雪、老雪、风吹雪、湿雪和粒雪等^[6]。由于上部雪—雪冰层渗透性强,是钻井液造成污染的重要区域。根据已有的资料,按雪层密度的大小,自上而下将雪层划分为 5 层。模拟研究就选在上部的 100 m 雪层。

2 模型建立

2.1 研究区域范围

模型选取的研究范围为钻探场区及其周边其它地域,占地面积为 2500 m^2 ,区域内地势平缓。由于钻探场区范围较小,达不到自然边界,故可将其简化为人为边界,即定流量边界。边界侧向流量可用达西定律计算^[7~8]。

2.2 Visual Modflow

污染物在雪层中渗透规律的数值模拟选用了 Visual Modflow 软件。Visual Modflow 软件是加拿大 Waterloo 公司开发出来的可视化模拟系统,它综合了已有的 MODFLOW(水流评价)、MODPATH(平面和剖面流线示踪分析)和 MT3D(溶质运移评价)等地下水模型。该软件具有操作简单、界面友好等优点,可进行二维及三维的水流、溶质运移等模拟,并已成为目前国际上先进的地下水渗流和溶质运移的标准可视化专业软件,广泛应用于地下水不同污染物运移模拟与预测不同管理方案对污染物运移的影响^[9~13]。

2.3 水流模型建立

利用 Visual Modflow 建立了地下水流数值模型。网格剖分采用等间距有限差分的离散方法。模型含 5 层网格,采用等边正方形网格剖分,每个单元大小为 $1.25\text{ m}\times 1.25\text{ m}$,模拟时间定为发生扩散后 10 年内。

水流模型的解法选择了收敛更快、解更稳定的 WHS 解法^[13]。溶质运移模型中对流项选择隐式

GCG 解法,并选择 MT3DMS 运行模型^[8],可以使模拟结果更加快速准确。

2.4 数学模型

Visual Modflow 是一个三维有限差分地下水渗流模型^[14],其数学方程如(1)式。

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_{xx} \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_{yy} \frac{\partial H}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_{zz} \frac{\partial H}{\partial z}) + W = S_s \frac{\partial H}{\partial t}$$

式中: k_{xx} 、 k_{yy} 、 k_{zz} ——地下水流主渗透方向的渗透系数; H ——水头高度; W ——源汇项; S_s ——含水层单位释水系数; t ——渗流时间。

2.5 模型参数

在使用 Visual Modflow 软件对南极雪层进行数值模拟中,要使用到 2 个重要的流体参数,分别是渗透系数和弥散系数。

渗透系数又称水力传导系数,在各向同性介质中,它定义为单位水力梯度下的单位流量,表示流体通过孔隙骨架的难易程度。依据南极科学钻探所给定的地层条件,可计算出各层雪的渗透系数^[15],见表 1。

表 1 模型所使用的雪层的渗透系数

| 雪层 | 渗透系数/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) |
|---------------|---------------------------------------|
| 第一层(0~20 m) | 0.67 |
| 第二层(20~40 m) | 0.47 |
| 第三层(40~60 m) | 0.31 |
| 第四层(60~80 m) | 0.22 |
| 第五层(80~100 m) | 0.13 |

水力弥散系数是表征在一定流速下,多孔介质对某种污染物质弥散能力的参数,它在宏观上反映了多孔介质中地下水流动过程和空隙结构特征对溶质运移过程的影响。它是描述由机械弥散和分子扩散引起溶质迁移的因子。分子扩散较机械弥散小得多,因此忽略了分子扩散^[13]。物理意义是:每秒钟污染物在纵向弥散的面积。由于南极雪层的特性差异大,其弥散系数不易确定,为得到钻井液在不同情况下的渗透规律和扩散距离,将弥散系数设定为 3 个数量级,分别为 $0.1[1/(\text{mg/L})]$ 、 $0.01[1/(\text{mg/L})]$ 、 $0.001[1/(\text{mg/L})]$,就应满足不同深度下数值模拟要求。

3 污染物模拟预测

将所建立的地下水流和溶质运移模型及南极雪层的渗透系数,利用 Visual Modflow 软件对钻探场区污染物扩散范围进行了数值模拟,并给出了不同时间段内污染羽范围,以此评价污染物对雪层污染情况。

3.1 弥散系数为 $0.1 [1/(mg/L)]$ 时

图 1 是模拟钻探场地 2 年、6 年、10 年后污染羽的分布图。

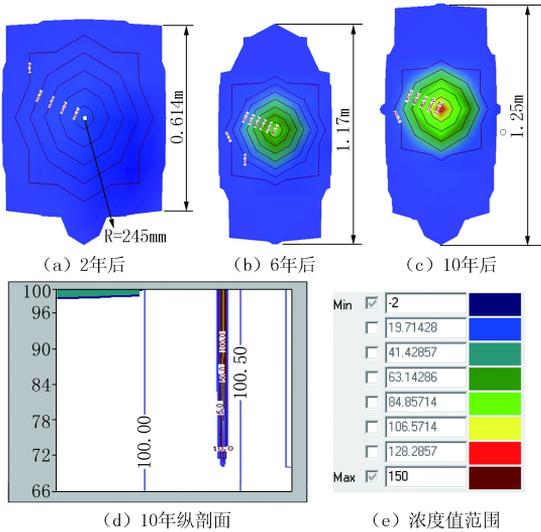


图 1 弥散系数为 $0.1 [1/(mg/L)]$ 时钻探场地污染羽在水平面与纵剖面上的分布图

从图 1 可以看出,由于污染源的存在,污染物将不断的进入到雪层之中,致使污染羽不断扩大。(a) 显示的是 2 年污染物水平面运移情况,污染面积约为 $0.3780 m^2$,运移最大浓度为 $16 mg/L$; (b) 显示的是 6 年污染物水平面运移情况,污染面积约为 $0.5925 m^2$,运移最大浓度为 $90 mg/L$; (c) 显示的是 10 年污染物水平面运移情况,污染面积约为 $0.7540 m^2$,运移最大浓度为 $140 mg/L$; (d) 显示的 10 年后纵剖面,最大运移为 $30 m$ 。(e) 显示的为浓度值范围。

3.2 弥散系数为 $0.01 [1/(mg/L)]$ 时

图 2 是模拟钻探场地 2 年、6 年、10 年后污染羽的分布图。

从图 2 可以看出,当弥散系数由 $0.1 [1/(mg/L)]$ 降低到 $0.01 [1/(mg/L)]$, 2 年时污染面积增加了 3.913 倍达到 $1.479 m^2$,运移最大浓度增长了 15.625 倍达到了 $250 mg/L$; 6 年时的污染面积则增长了 4.494 倍,约为 $2.663 m^2$,运移最大浓度增加了 5 倍,为 $450 mg/L$; 而 10 年增大到 4.873 倍, $3.674 m^2$,运移最大浓度增加到 4.286 倍,达到了 $600 mg/L$; 在纵向剖面上,10 年最大运移增加较少,则为 $37 m$ 。可见弥散系数对于水平面上的影响要远大于纵向剖面。

3.3 弥散系数为 $0.001 [1/(mg/L)]$ 时

图 3 是模拟钻探场地 2 年、6 年、10 年后污染羽的分布图。

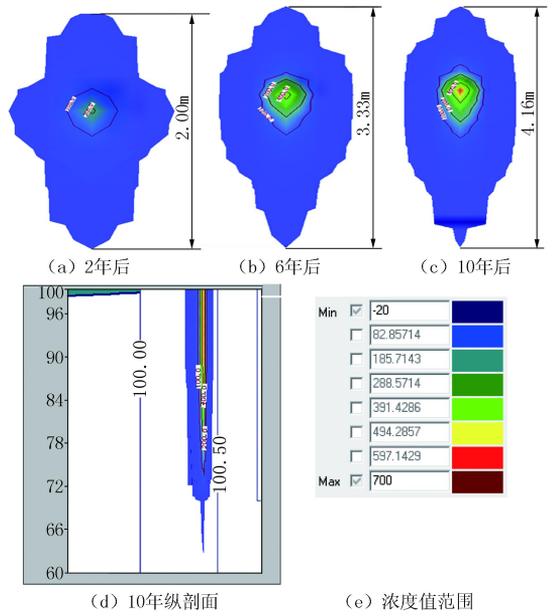


图 2 弥散系数为 $0.01 [1/(mg/L)]$ 时钻探场地污染羽在水平面与纵剖面上的分布图

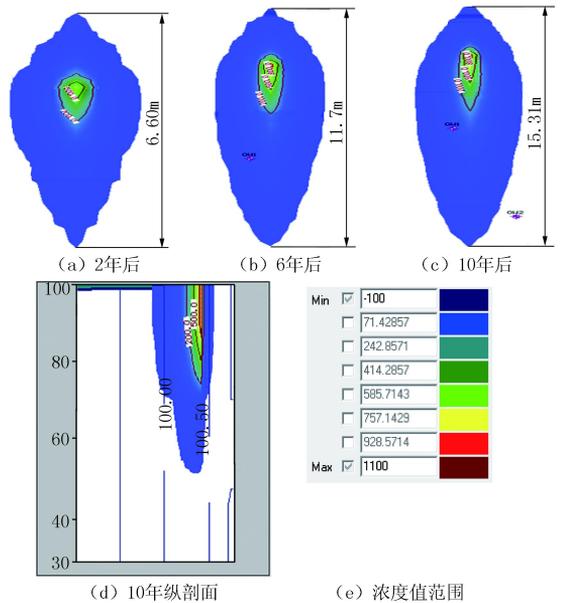


图 3 弥散系数为 $0.001 [1/(mg/L)]$ 时钻探场地污染羽在水平面与纵剖面上的分布图

从图 3 可以看出,当弥散系数由 $0.1 [1/(mg/L)]$ 降低到 $0.001 [1/(mg/L)]$, 2 年时污染面积增加了 20.2 倍达到 $7.636 m^2$,运移最大浓度增长了 50 倍,达到了 $800 mg/L$; 6 年时的污染面积则增长了 35.16 倍,约为 $20.832 m^2$,运移最大浓度增加了 11.11 倍,为 $1000 mg/L$; 而 10 年污染的面积增大到 45.49 倍,约 $34.297 m^2$,运移最大浓度增加到 7.143 倍,达到了 $1000 mg/L$; 在纵向剖面上,10 年最大运移增加了 1.9 倍,达到 $50 m$ 。从而也可以看出,弥散系数减小 100 倍,尽管污染的面积有所增加,但其

浓度可看作达到了稳定值 800 ~ 1000 mg/L, 可以认为达到了饱和状态。

污染物的弥散系数的大小受到雪层孔隙度和流动介质粘度的影响比较大。由模拟结果可以看出, 弥散系数是影响钻井液污染面积与浓度大小的重要参数。根据实验室对南极深冰层取心钻进所使用的钻井液的粘度进行了测试, 钻井液在 -60 °C 时的粘度大致是水在 20 °C 时粘度的 8 ~ 10 倍, 其扩散的能力也将减小。

4 结论

(1) 据南极雪层的物理特性, 建立了钻探场区钻井液运移扩散模型, 利用 Visual Modflow 软件对 3 种弥散系数条件下, 浓度一定时, 模拟分析了污染物在水平面和纵向剖面上随着时间扩散的变化规律, 客观反映了整个钻探场区内溶质运移的空间分布规律, 这种方法适合于钻井液在雪层的扩散能力的研究。

(2) 从模拟结果可以看出, 弥散系数对于污染物在水平面的扩散速度的影响巨大, 在纵向剖面上污染的程度和范围主要受污染物密度的影响, 与弥散系数关系不大。

(3) 当弥散系数不同时, 污染物的污染范围随着时间的增加而增大, 但其浓度的增加要小得多。弥散系数 0.001 [1/(mg/L)] 时, 污染物的浓度随时间的变化比较小, 约为 800 ~ 1000 mg/L, 可以认为是污染物的饱和浓度值。

(4) 南极深冰层取心钻进所使用的钻井液多为油基介质, 在 -60 °C 时的动力粘度大致是水在 20 °C 时粘度的 8 ~ 10 倍, 其扩散的距离和污染的程度也将相应下降。模拟结果是在给定的条件下得到的, 尚需在实际工作中予以验证。

参考文献:

- [1] Antarctica Agreements: Antarctic Treaty System, Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty, Antarctic Conservation Act [Z]. Books LLC, 2010.
- [2] 韩俊杰, 韩丽丽, 徐会文, 等. 极地冰层取心钻进超低温钻井液理论与试验研究 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2013, 40 (6): 23 - 26.
- [3] HAN Lili, XU Huiwen, CAO Pinlu, et al. Viscosity testing method of ultra-low temperature drilling fluids for polar glacier drilling [J]. Global Geology, 2012, 15 (4): 276 - 280.
- [4] 徐会文, 韩丽丽, 韩俊杰, 等. 南极冰层取心钻探酯基钻井液的理论及试验 [J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2013, 40 (S1): 279 - 282.
- [5] 任贾文, 效存德, 侯书贵, 等. 极地冰芯研究的新焦点: NEEM 与 Dome A [J]. 科学通报, 2009, 54 (4): 399 - 401.
- [6] 韩丽丽. 南极冰钻超低温钻井液技术研究 [D]. 吉林长春: 吉林大学, 2013.
- [7] 卢文喜. 地下水运动数值模拟过程中边界条件问题探讨 [J]. 水利学报, 2003, (3): 33 - 36.
- [8] 沈媛媛, 蒋云钟, 雷晓辉, 等. 地下水数值模拟中人为边界的方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35 (6): 12 - 15.
- [9] 张翠云, 马琳娜, 张胜, 等. Visual Modflow 在石家庄市地下水硝酸盐污染模拟中的应用 [J]. 地球学报, 2007, 28 (6): 561 - 566.
- [10] Rajamanickam R, Nagan S. Groundwater quality modeling of Amravathi River Basin of Karur district, Tamil Nadu, using Visual Modflow [J]. International Journal of Environmental Sciences, 2010, 1 (1): 91 - 108.
- [11] 武强, 董东林, 武钢, 等. 水资源评价的可视化专业软件 (Visual Modflow) 与应用潜力 [J]. 水文地质工程地质, 1999, 26 (5): 21 - 23.
- [12] 马志飞, 安达, 姜永海, 等. 某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟 [J]. 环境科学, 2012, 33 (1): 64 - 70.
- [13] McDonald M C, Harbaugh A W. MODFLOW—a three-dimensional finite-difference groundwater flow model [R]. U. S. Geological Survey, 1988. 88 - 875.
- [14] 薛禹群, 朱学愚, 吴吉春, 等. 地下水动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- [15] Vladimir Ya., Lipenkov. Bubbly-ice densification in ice sheets: II. Applications [J]. Journal of Glaciology, 1997, 43 (145): 397 - 407.

我国首次钻获高纯度新类型“可燃冰”

中国地质调查局网站消息 (2013 - 12 - 18) 2013 年 12 月 17 日, 国土资源部在京举行新闻发布会, 宣布我国海洋地质科技人员在广东沿海珠江口盆地东部海域首次钻获高纯度天然气水合物 (又称“可燃冰”) 样品, 并通过钻探获得可观的控制储量。

此次钻获的天然气水合物, 赋存于水深 600 ~ 1100 m 的海底以下 220 m 以内的 2 个矿层中, 上层厚度 15 m, 下层厚度 30 m, 自然产状呈层状、块状、结核状、脉状等多种类型, 肉眼可辨。岩芯中天然气水合物含矿率平均为 45% ~ 55%; 其中天然气水合物样品中甲烷含量最高达到 99%。通过实施 23 口钻探井, 控制天然气水合物分布面积 55 km², 折算成天然气, 控制储量为 1000 ~ 1500 亿 m³, 相当于一个特大型常规天然气田规模。此次发现的天然气水合物, 在同一矿区有多种类型, 多层位富集, 且矿层厚度大、含矿率高、甲烷纯度高, 目前在国际上罕见。

国土资源部地质勘查司副司长车长波在发布会上介绍, 我国已探索出一套适合我国海域特点的天然水合物资源综合勘查技术体系。今后, 国土资源部将按照国家规划部署要求, 全面组织实施我国海域、陆域天然气水合物资源勘查评价。一是加快勘查评价和重点靶区钻探取芯, 二是开展天然气水合物成藏机理和富集规律等理论研究, 三是加大天然气水合物试开采及环境评价等关键技术攻关力度。

据悉, 从 1995 年起, 我国即开始天然气水合物前期研究。自 1999 年起, 国土资源部设立海域天然气水合物资源调查专项, 并先后在南海海域和祁连山冻土带钻获实物样品。2011 年, 国务院批准设立了新的天然气水合物国家专项。2013 年, 中国地质调查局所属的广州海洋地质调查局在珠江口盆地东部海域首次实施 3 个航段的钻探, 再次实现了我国海域找矿的重大突破。