

水文地质学中 应用模拟的理论与实践

[苏] И. К. 加维奇 著

地质出版社

水文地质学中 应用模拟的理论与实践

〔苏〕И.К.加 维 奇 著

杨 守 廉 译 李 宝 兴 校

地质出版社

内 容 提 要

本书总结了水文地质学中应用模拟的文献资料。首次从方法论的角度介绍了模拟能为人们揭示新知识领域的作用；书中简明地陈述了在拟定工程预测时模拟的任务和在区域水文地质研究中应用模拟的任务；确定了模拟在水文地质学中的发展前景；总结了借助于模拟计算机和电子计算机用不同方法处理逆问题的研究成果；提出了如处理代数方程组一样的处理逆问题的新方法；探讨了在区域水文地质学中应用模拟的问题；书中还阐明了用模拟再建自流水盆地含水岩组古动力学问题处理的理论根据和方法。

本书可供水文地质、工程地质、石油、土壤改良和矿山工程技术人员和学者以及地质勘探院校的高年级学生阅读和参考。

И.К.Гавич

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГИДРОГЕОЛОГИИ

Москва «Недра» 1980

水文地质学中应用模拟的理论与实践

〔苏〕И.К.加维奇 著

杨守廉 译 李宝兴 校

责任编辑：王肇芬 吴霞芬

地质出版社出版

（北京西四）

妙峰山印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：850×1168¹/₃₂印张：12¹/₁₆字数：263,000

1987年9月北京第一版·1987年9月北京第一次印刷

印数：1—1,800册 国内定价：3.40元

统一书号：13038·新 359

序 言

党和政府作出的加速发展国民经济的决议，给水文地质工作者提出了重要任务。在地下水的研究和勘测工作中，这些任务的解决在许多方面取决于有效地利用和发展最新科学技术方法和成就，如能在实践中很好地掌握这些方法和成就，则将为全面深入地处理各种水文地质问题开辟良好的条件。

模拟，特别是运用模拟技术和数字技术的数学模拟，就是这些科学研究方法之一。模拟方法在很短时间内几乎在全部水文地质工作中得到应用，是因为它能在复杂的水文地质条件下，考虑大量因素的作用，详细地研究被分析的客体，给客体做出定量评价，并在一定条件下能提高原始数据的可靠程度，根据最佳检索原理处理各种问题。

目前，实践对工程预测和计算结果的精度和置信度提出了很高的要求，因此，模拟方法的这一优点尤为重要。

模拟作为渗流计算的一种专门方法早已被应用。然而，模拟在水文地质学中得到最充分的发展和应用是近10—15年的事，目前正大量利用模拟法处理各种普查勘探和区域性的问题。特别是研究下述水文地质问题更是经常应用模拟法，如地下水资源和储量的区域评价；研究潜水通过包气带的补给条件；为普查与勘探石油和天然气再建自流水盆地含水岩组的古动力学；处理土壤改良水文地质的各种问题以及许多其它问题。模拟作为实用工程计算方法已成为当今科学的研究方法。

模拟技术很久以来就用于解决热工技术、动力工程、水工技术、石油工程和其它一些学科的各种科学技术问题。对这些问题有过论述的有H.H.巴甫洛夫斯基、B.И.阿拉文、H.И.德鲁日宁、С.Н.努麦洛夫、B.С.卢基扬诺夫、П.Ф.菲里恰科夫、

Л.Н.巴甫洛夫斯卡娅、В.Е.布赫曼、Л.И.古坚马赫尔、Л.Д.科兹多巴、Б.М.科甘、П.М.别拉什。他们在著作中提出的模拟方法和技术方面的许多问题，已被水文地质工作者所采用。此外，一般相似理论领域的著名学者Л.И.谢多夫、В.А.维尼科夫、А.А.古赫曼、М.В.基尔皮切夫、Л.С.埃根松等人的著作，在发展水文地质模拟的理论基础方面也起到了不可忽视的作用。

水文地质模拟的方法原理，在В.М.舍斯塔科夫、И.Е.热尔诺夫、И.И.克拉中、В.Д.菲利莫诺夫、М.А.威维奥洛夫斯卡娅、Н.А.奥基里维、Н.А.米亚斯尼科娃、И.С.帕什科夫斯基、В.А.米罗年科、Л.К.戈赫别尔格、И.К.加维奇和其他许多专家的著作中均有专门论述。当今，不论是国内还是国外用于处理不同水文地质问题的模拟技术与方法问题，都已得到很好地研究。计算方法正在不断发展，与模拟技术同时正在采用各种高速数字计算机，主要用于处理逆问题和最优化预测问题。

尽管在模拟和数字技术应用方面以及模拟方法方面已有大量著作问世，但在水文地质模拟中还有许多问题只是刚刚提出来或者只是部分得到解决，其中有些问题，例如，相似理论、逆问题处理等一些带普遍性问题在文献中还论述得不多，而对水文地质预测问题的处理方法探讨和阐述得比较好。因此，本书第一篇概括介绍了模拟这一水文地质学的科学研究方法的发展和演进特点，确定了水文地质模拟的概念和内容，探讨了应用模拟法解决的问题和任务。本篇着重系统地论述了用于处理水文地质问题的相似理论和模拟理论的基本原理。还着重讨论了具有特殊作用的水文地质条件概化原理和方法，对高质量地实现模拟的决定性意义。水文地质工作者利用掌握的大量数据处理逆问题，并用这些数据在建立模型的同时可以定量评价整个岩层的各个要素和水均衡，同时对评价灌溉地区河谷的水动力学作用，查明含水层之间发生水力联系的地段等，都有重要意义。

模拟、特别是逆问题的单值性和置信度问题是目前研究的最

重要问题之一。在复杂的水文地质条件下，应用逆问题法是作为论证已建模型和据这些模型所作工程预测可靠性的主要方法。本书第二篇论述了运用地下水动态观测资料处理逆问题的理论和方法。特别着重讨论了逆问题处理的单值性问题，以及用逆问题处理、因素方差评价法论证模型的置信度问题。现有这些处理问题的方法，特别是应用数值法处理问题的方法得到了进一步发展。

本书采纳了莫斯科地质勘探学院同第二测绘总局、土壤改良和水利部、国立水利工程设计院、俄罗斯苏维埃联邦社会主义共和国土壤改良和水利部北高加索水利工程设计院、电力部水力建筑勘测设计院、苏联地质部地质局等单位密切合作完成的解决许多问题的系统成果。本书的体裁和内容在某种程度上反映了作者在莫斯科地质勘探学院讲授《水文地质模拟》课程20多年教学活动的成果。

本书反映和进一步发展了Г. Н. 卡明斯基和А. М. 奥夫钦尼科夫的一系列思想和建议。作者仅以本书作为对他们的永恒纪念。

作者感谢И. И. 克拉申和В. Б. 戈罗霍夫斯基对本书处理逆问题部分所提出的宝贵意见。在整理付印手稿时Л. К. 霍尔托娃、Т. И. 加维奇、К. Т. 加维奇、Л. Б. 卡利尼娜、З. Н. 列夫钦科曾给予很大帮助，对此作者仅致诚挚的谢意。

目 录

序言

第一篇 水文地质模拟的理论基础 1

第一章 水文地质模拟的现状与发展 1

第一节 模拟的概念 1

第二节 水文地质模拟的演进 3

第三节 水文地质模拟发展的几个主要阶段 7

第二章 模拟的基本概念、分类和任务 11

第一节 模拟在认识水文地质客体中的作用 11

第二节 地区性的和区域性的水文地质模型 13

第三节 模拟·客体·模型 18

第四节 水文地质模拟的分类 22

第五节 用模拟处理水文地质问题的主要类型 31

第三章 适用于水文地质问题的相似理论和模

拟理论的基本原理 36

第一节 水文地质模拟的特点 36

第二节 定义方程式和单值条件 39

第三节 相似和模拟的几种主要形式 40

第四节 相似和模拟过程 40

第五节 相似或模拟常数 44

第六节 导出物理量的模拟条件 46

第七节 各类场的模拟条件 47

第八节 相似或模拟定数 50

第九节 相似或模拟特征函数和准则 54

第十节 相似理论用于水文地质过程的基本定理 56

第十一节 水文地质过程的	
几个主要相似准则·····	66
一、在封闭的含水层中地下水的渗流·····	66
二、存在入渗补给时地下水的渗流·····	67
三、有水力联系的含水层中地下水的渗流·····	68
四、岩层顶板上有外力荷载时地下水的渗流·····	72
五、单值解条件及其在求准则中的作用·····	74
第十二节 现场模拟的原理·····	75
第十三节 模拟条件·····	85
第四章 水文地质条件的概化和建立模	
型的若干特点·····	87
第一节 水文地质条件典型化	
和概化的任务·····	87
第二节 概化的要求及其顺序·····	90
第三节 水文地质条件概化的原理·····	91
一、水流量结构和形状的简化·····	91
二、形成岩层水均衡主要水源的概化·····	93
三、边界和边界条件的概化·····	95
四、初始条件的概化·····	96
第四节 整个岩层结构和渗流不均匀性的概化·····	96
一、客体渗透性质的空间变异性及其评价原则·····	97
二、关于整个岩层结构的概化和模型类型的选择·····	102
第五节 利用模拟概化和建立模型的特点·····	108
一、岩层结构图的校正·····	110
二、边界水动力作用和水交替形式的确定·····	111
三、模型和岩层水均衡的评价·····	115
四、水文地质条件概化误差的因素方差评价·····	119
第六节 片段法·····	123
第七节 建立模型的特点·····	129
第二篇 全等判别(识别)问题理论	
的水文地质原理·····	132
第五章 水文地质全等判别问题及其处理原理·····	132

第一节	逆问题的用途和内容	132
第二节	逆问题即全等判别问题	136
第三节	全等判别理论用于处理逆问题的基本 概念	142
第六章	逆问题理论的水文地质原理	147
第一节	逆问题的解法及其处理方法	147
一、	经典逆问题	150
二、	逆系数问题	153
第二节	均衡式中主要有限差分方程式的推导	165
一、	稳定逆问题	166
二、	非稳定逆问题	171
第三节	逆问题单值解条件的研究	174
一、	问题的解法	174
二、	线性代数方程的性质	175
三、	求单值解的要求	178
四、	各种渗流形式的单值解条件	180
五、	封闭层中地下水的渗流	183
六、	有外来迳流和水源时地下水的渗流	191
第四节	最佳处理逆问题的解法	196
第七章	准则的格的研究和最佳处理	
	逆问题的原则方案	200
第一节	平行平面渗流的拟合准则	201
一、	准则的格	202
二、	准则的性质和特点	205
三、	不稳定渗流拟合准则的特点	21 ⁸
第二节	径向平面渗流时选择控 制的准则和主要参数	219
一、	准则的格	220
二、	准则的性质和特点	221
第三节	最佳处理逆问题的原则方案	227
一、	原始数据质量的评价, 用途的说明和水文地质 相似准则的选取	228

二、原始数学地质模型的选择和建立	230
三、用水均衡法论证地质模型的置信度 (地质模型的正则化)	233
四、逆问题处理方法和最佳化准则的选取	237
五、用模仿模拟模型的选择和论证	240
六、已建模型置信度的评价和最佳方案的选择	242
第八章 利用地下水天然动态和扰动动态	
观测资料处理逆问题	245
第一节 用标准曲线法计算水文地质参数	245
一、处理的总过程	245
二、用开采试验抽水模拟法计算统计模型的参数 并论证其置信度	249
第二节 采用灵敏度函数处理逆问题	253
一、灵敏度函数及其性质	253
二、采用影响准则计算薄层状模型的岩层参数	259
第三节 利用数值法和地下水动态观测数 据计算水文地质参数	263
第四节 用求解代数方程组的方法计算水 文地质参数	272
第九章 模型和模拟结果的置信度和精度的论证	276
第一节 模拟结果的置信度和精度的概念	276
第二节 误差种类及其产生和评价	281
一、误差及其产生条件	281
二、与原始数据质量和数量以及与水文地质条 件概化有关的误差	283
三、模拟方法引起的误差	287
四、由内插法引起的误差	292
五、与模拟的装置有关的误差	293
第三节 模型的置信度论证方法的选择 和简要说明	294
一、论证模型置信度的目的	294
二、逆问题法	294

三、因素方差分析法	296
四、各方法应用的条件	306
第四节 逆问题和预测问题处理精度和 规定置信度的评价	306
第三篇 区域水文地质问题的模拟	314
第十章 用模拟再建含水层组的古动力学	314
第一节 含水层组古水动力学模型的建立原理	317
一、边界和外力载荷对压实过程的影响	319
二、在岩层压实和孔隙压力形成中渗透荷载的作用	324
三、粘土层骨架和孔隙水的弹性力在形成孔隙压 力和水的挤出过程中的作用	324
第二节 含水层组古水动力学模 型的数学论证	327
第三节 模拟模型的数学论证和处理方法	334
第四节 建立古水动力学模型的一般顺序和方法	339
第五节 用模拟再建南曼格什拉克盆地阿尔 俾—谢诺曼含水岩组的古水头	345
一、盆地地质发育的特点和控制时刻的划分	345
二、再现阿尔俾—谢诺曼层组现代水动力学环境	347
三、古水头和古排泄形成区域图的编制	349
四、阿尔俾—谢诺曼层组静地补给量的评价	351
五、边界条件图和渗透略图的编制	352
六、再建古水头的模拟	354
七、根据模拟资料对阿尔俾—谢诺曼层组 古动力学形成条件的研究	354
参考文献	357
俄汉对照专业词汇	367

第一篇 水文地质模拟的理论基础

第一章 水文地质模拟的现状与发展

第一节 模拟的概念

在现代科学中,模拟作为一种科学认识客观现实世界的方法在物理学、化学、生物学、构造学、地貌学、水力学、动力学、热工技术、水工技术和石油工程等许多不同科学领域中得到应用。水文地质学也在广泛地运用模拟,它既用于解决普查勘探和工程方面的具体问题,也用于解决一般理论性的和区域性的问题。模拟用于地下水渗流过程方面,研究得最为充分,各种质量转换和热传递问题的模拟也得到了发展。

当前,对“模拟”这个概念论述很多,并且成了哲学分析的对象[97, 57]。就一般意义来说,模拟就是采用某种方法反映(再现)客观存在的现实,以便研究它所具有的客观规律性。模型就是这种反映的形式和手段。模型一词源于拉丁文 *modus* (*modulus*),意思是度量、样品、形象、方法。由此可见,这个概念含义很广,它能描述被研究的原客体的任何形象(反映)。它可以是被测客体的实物样品,或者是被研究的现象或过程设想的结构。

从科学技术角度,模拟可定义为各种不同过程和现象在专门

模型上的再现。进行模拟时，一种研究过程常在实验室条件下用更简单而直观的方法，再现另一研究过程所代替。这种取代之所以可能，是因为许多过程与所要描述的这些过程的数学方程式具有恒等的特性。诸过程的模拟是由世界物质的统一性和存在物质的永恒运动规律所决定的。

与一定的含水层或含水岩组（或岩系）有关的所有水文地质过程和现象都是在具体的地质环境中进行的，其特点是具有一定的水文地质参数。因此，使用水文地质客体这个概念是适宜的。

它系指水文地质盆地、含水岩组和含水层或其一部分，以及它们所具有的过程和现象。所谓水文地质模拟就是用专门模型再现水文地质客体，以研究它所具有的规律性。这种研究可以在实验室条件下建立的模型上进行，也可在天然条件下专门选择的“（模拟）模型”中进行。

在模拟地下水渗流过程中，数学模型作为一种主要模型得到了推广。数学模型运用数学模拟，即运用描述水文地质过程的方程式和取代它的另一过程的方程式的恒等性。数学模型主要是用电的和水力的模拟装置和数字装置。其它模拟类型，如光学模拟、热力模拟和膜比法等，在水文地质中则很少使用。物理模拟，由于要保持所研究的过程和所模拟的过程的物理相似性，因此必须制作很大的模型。此外，这种模型对所测过程的测量精度不很高，所以很少使用。现场模拟作为一种定量研究方法，刚刚开始得到发展。

模拟是以相似和模拟理论作为依据的，因为正是相似理论能回答下列问题：

怎样建立模型，应该满足什么样的要求才能使模型中发生的过程与现场研究的过程相似或类同，

在试验中哪些数值应当测量，如何处理这些测量结果，
应怎样从现场过渡到模型，或者反之，

以什么样的途径把许多相似或类同过程的单个试验数据综合

到一个整体组上去。

采用数学模型进行模拟时要广泛利用包括计算数学在内的数学工具,以及信息论、最佳过程控制理论的许多内容。借助计算机和仪器把模型确定并建立起来,要求水文地质工作者掌握电工技术、电子技术和其它一些技术方面等许多学科的丰富知识。由此可见,模拟同许多科学和技术学科联系密切,它是在许多科学的边缘上发展起来的,而且在水文地质学中是具有广阔前景的实用科学研究方法。

第二节 水文地质模拟的演进

计算技术的迅猛发展,以及最先采用模拟法的一般相似理论、渗流理论、热质量交换理论和地下水动力学的进一步深入研究,都促进了模拟法在水文地质学中的应用。许多渗流问题的统一数学解法已在某种程度上获得解决,这就为模拟的广泛和迅速发展准备了客观条件。在其它科学领域模拟的发展对此也产生了一定的影响。

开始时,模拟主要用于研究地下水渗流过程物理性质的特点和制定渗流计算方法。从三十年代起,模拟开始广泛用于处理水文地质的具体技术问题,在当时用解析方法和其它计算方法都解决不了这些技术问题。近15—20年模拟才得到最充分的发展,模拟开始广泛用于处理各种各样工程和科学研究方面的问题。

实际的需要也是促进发展的重要因素。从本世纪六十年代起提高了对水文地质计算的精度和可靠性的要求。在预测计算时,通过更全面地考虑自然环境的特点,可能满足这种要求。而采用模拟方法,这种要求得到了保证。

近30年来,处理边界问题的模拟手段和方法在许多不同的科学与技术领域得到了最广泛的发展和应用。国内外都有大量的文献论述这些问题。在渗流理论方面我国应用模拟的经验,在许多综合性的著作〔58,59, 77, 111,129〕中都有介绍。У.卡尔普柳斯

[66] П.Д.威斯特[55]、Я.贝尔、Л.札斯拉夫斯基、С.伊尔梅[14]的专著对国外模拟发展做了介绍。

模型作为科学认识的手段和形式应用已久。伽利略被认为是相似理论的奠基人之一，在他的一些著作中曾详细地研究了力学系统的相似原理^①。在И.牛顿、Ж.贝尔特兰、Л.К.麦克斯韦、В.托姆普桑（克利文）的著作中，模拟和相似理论的总设想得到了进一步的发展。二十世纪初，Е.布金格姆、Л.埃尔涅斯特—阿法纳谢娃的著作证实了相似和量纲的基本定理。稍后，苏联科学家М.В.基尔皮切夫、Л.И.谢多夫、А.А.古赫曼等许多人发展了相似理论。

物理模拟是从Ж.达西(1856年)、Ф.弗赫格麦尔(1898年)、Л.赫列一绍(1897年)的试验开始的。在我国，物理模拟在Е.А.扎马林、В.И.阿拉文、N.E.热尔诺夫和其他人[129]的著作中得到发展。

数学模拟作为一种计算方法始于Н.Н.巴甫洛夫斯基研制的水电比拟(ЭГДА)理论，和他在1918—1922年制作的在完全电介质中工作的水电比拟仪。这一方法，在Н.И.德鲁日宁[57, 58]、В.И.阿拉文和С.Н.努麦罗夫[129]、В.М.舍斯塔科夫[59, 77, 124, 154, 155]、П.Ф.菲里恰科夫和В.И.潘契申[148]、А.Г.塔拉庞[129, 137]以及其他[12, 83, 129, 145, 157]的著作中得到了进一步发展。用模拟法处理不同水文地质问题的方法原理、技术以及水电比拟法的实际应用，在许多专著[16, 58, 98, 104, 124, 145]和方法指南[57, 59, 61, 77, 89]中都有深入地说明。在国外水电比拟法[14, 66, 174, 176, 177, 186]也采用很广。

基于用有限差分代替微分方程的网格法的一般理论，是С.А.格尔什戈林[53]于1929年研究制定的。他于1934年在В.С.卢基

^①伽利略：《针对与力学和局部运动有关的两个新的科学领域的演讲和数学证明》，莫斯科—列宁格勒，1934年，49～50页。

扬诺夫[78, 111]的著作中（作为水力比拟法(ΓA)），1936年在Л.И古坚马赫尔和其他人[53]的著作中（作为水[电]比拟法）给出了有建设性意义的解法。

1936年，B.C.卢基扬诺夫同M.A.威维奥洛夫斯卡娅[78]共同把B.C.卢基扬诺夫水力系统积分仪（ИГЛ）用于处理水文地质问题。五十年代末—六十年代水力积分仪在水文地质中开始广泛应用，M.A.威维奥洛夫斯卡娅等人[16]、H.A.米亚斯尼科娃[101]、И.А.斯卡巴拉诺维奇[111, 129]、A.Б.索特尼科夫[111]、M.Г.卡尔塔戈娃[111]、И.К.加维奇[23, 24, 25]和其他人的著作介绍了这种积分仪。近些年来，使用积分仪明显少了。

六十年代初，电网格法开始在水文地质中应用。在B.M.舍斯塔科夫[59, 77, 110, 154]、И.Е.热尔诺夫[59, 61]、И.И.克拉申[70, 71]、И.К.加维奇[27, 29, 31]、И.С.帕什科夫斯基[118, 124]、A.Б.索特尼科夫[111]、И.Н.巴甫洛维茨[61, 147]、B.A.米罗年科[95, 149]、B.N.利亚里科[79]、Л.К.戈赫别尔格[46, 47]和其他人的著作中探讨了用电网格模拟不同水文地质问题的理论和方法。在方法指南[59, 90, 131]、论文、专著[22, 25, 43, 67, 71, 79, 82, 86, 98, 123, 124, 128, 147]和教学参考书[16, 37, 61, 155]中，对技术问题和方法问题都有论述。

近些年来，在水文地质勘测中大力推广数值法和广泛使用数字电子计算机[5, 51, 70, 77, 85, 86, 105, 106, 122, 132]、混合计算机和模拟—数字计算联机[51, 70, 76, 108]、联合模拟计算机[59, 77, 124, 155]。应用这些机器处理具体水文地质问题的实例，在一些水文地质专家的大量著作中[20, 81, 82, 85, 109, 118, 124, 127, 145]和在水文地质领域工作的其他专家们[22, 86, 145, 147]的著作中都有阐述。

以下问题可以在模拟计算机和电子计算机上得到处理：地下水资源和开采储量评价问题[20, 31, 39, 42, 45, 71, 81, 83,

126, 145]、有排水系统作用的灌溉区编制各种预测问题[12, 20, 30, 81, 84, 86, 147, 149, 151]、矿井和露天矿涌水量的评价问题[20, 21, 43, 93]、通过包气带的渗入补给条件问题[64, 82, 136, 147]和再建自流盆地含水岩组的古水动力学问题[1, 3, 19, 29, 36, 75, 123]；还研究了深层含水层在不同密度和水温情况下水运动条件[63, 70]、水源地开采条件和排水条件的优选问题[21, 25, 82, 85, 109, 139]和逆问题的处理问题[20, 26, 32, 95, 105, 106, 112, 127]等。模拟还用于研究水化学过程[3, 79, 139]和解决其它许多问题[20, 39, 47, 64, 81, 84, 124, 139, 197]。

在探讨各种渗流问题的模拟方法和技术的普遍性问题方面，在国外专著中，应推出У.卡尔普柳斯[66]、Р.Д.威斯特[55]、Я.贝尔、Д.扎斯拉夫斯基、С.伊尔梅[14]的著作。在美国[161, 163, 169, 173, 183—193, 195]、法国[162, 164, 166, 170, 191]、德意志民主共和国[179, 181, 182, 186, 194]、波兰[171]、保加利亚[188, 197]、罗马尼亚[178]、捷克斯洛伐克[187]和其它一些国家[165, 174, 182, 190]都已使用模拟计算机和数字计算机处理水文地质问题。

近些年来，对大区域的水资源管理问题开始重视起来，与此同时使用了模拟计算机和数字计算机[76, 161, 171, 173, 182, 190, 197, 200, 201, 202]。在著作[163, 164, 178, 185, 187]中探讨了模拟的一般问题。在著作[167, 168, 169, 170, 174, 175, 176, 177, 184, 186, 188, 192, 193, 195, 199]中论述了根据动态观测资料，应用模拟法处理逆问题。其它方面的问题在一些著作[191, 194, 196, 198, 203]中亦有研究。所有这一切都证明，模拟在今天已经成为水文地质勘测和地层渗流计算公认的好方法。