



国外地质模型与油藏管理丛书

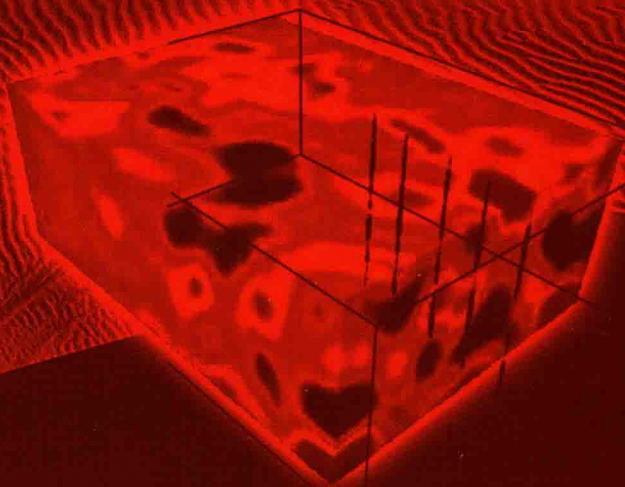
地球科学中的 不确定性建模



MODELING UNCERTAINTY
IN THE EARTH SCIENCES

[美] 杰夫·卡尔斯 (Jef Caers) 著

程国建 李小和 陈军斌 译



石油工业出版社

国外地质模型与油藏管理丛书

地球科学中的不确定性建模

[美]杰夫·卡尔斯(Jef Caers) 著

程国建 李小和 陈军斌 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了复杂的地球科学不确定性建模中遇到的各种问题、可采用的技术手段和实用的建模工具,以及不确定性建模对实际地质工程决策的影响。通过基于决策驱动的方式来阐述地球科学不确定性建模的基本概念、方法及原理,也试图通过一种非数学的方式直接突出这一建模技术的核心要素和方法。所介绍的地学建模原理、技术及工作流在现实世界里经受住了考验,且在高质量的商业或开源软件中得到了具体实现。

本书可供从事石油地质、地球勘探专业的科研人员、技术人员及石油院校相关专业师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

地球科学中的不确定性建模/[美]卡尔斯(Caers,J.)著;程国建,李小和,陈军斌译. —北京:石油工业出版社,2016.3

(国外地质模型与油藏管理丛书)

书名原文:Modeling Uncertainty in the Earth Sciences

ISBN 978-7-5183-0998-6

I. 地…

II. ①卡… ②程… ③李… ④陈…

III. 地球科学-不确定系统-系统建模

IV. P

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第300975号

Modeling Uncertainty in the Earth Sciences

by Jef Caers

ISBN 978-1-119-99263-9

Copyright © 2011 by John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Petroleum Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons Limited.

本书经 John Wiley & Sons Limited 授权翻译出版,简体中文版权归石油工业出版社有限公司所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2014-1195

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523541 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:11.25

字数:245千字

定价:68.00元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

《国外地质模型与油藏管理丛书》

编 委 会

主 任：屈 展

副主任：方 明 肖忠祥 陈军斌 程国建

主 审：屈 展 方 明

编 委：陈军斌 程国建 肖忠祥 章卫兵

王俊奇 韩继勇 张 益 林加恩

魏新善 曹 青 闫 健 张国强

双立娜 李小和 刘 烨 李 中

译者前言

随着高新技术的发展及管理理念的更新,进入 21 世纪的油气工业面临着多挑战,如从定性地质构造观察到定量建模描述、从微观结构分析到油藏三维可视化展布、从历史拟合到油藏自动监测、从分散管理到集成式优化管理、从单一数据源到多异构数据体的大规模集成应用等。这些转型的根本目标还是油气生产率的提升以及对安全环保等因素的考量,为了应对这些挑战,西安石油大学组织专家、学者翻译了 8 本相关外文原版专著,形成《国外地质模型与油藏管理丛书》,本套丛书各分册为《集成油藏资产管理——原理与最佳实践》、《油藏流线模拟——理论与实践》、《实用地质统计学——SGeMS 用户手册》、《地球科学中的不确定性建模》、《石油地质统计学》、《岩石物理特性手册》、《油藏模拟——历史拟合及预测》、《油藏监测》。本丛书得到西安石油大学出版基金,陕西省工业攻关计划项目“致密油藏压裂水平井关键技术研究”(课题编号:2013K11-22),陕西省工业科技攻关项目“鄂尔多斯盆地致密砂岩储层微观尺度智能化表征”(2015GY104),西部低渗—特低渗油藏开发与治理教育部工程研究中心和陕西省油气田特种增产技术重点实验室联合资助。

此分册第 1 章至第 9 章由李小和博士翻译,其余由陈军斌博士翻译,程国建教授对全书进行了统稿及校对。由于译者专业知识及外文水平所限,难免在原文理解、语义阐释、文字表达方面不够准确,甚至出错,诚恳希望读者朋友多提宝贵意见和建议。联系方式:西安石油大学数字油田研究所,dofi@xsyu.edu.cn。

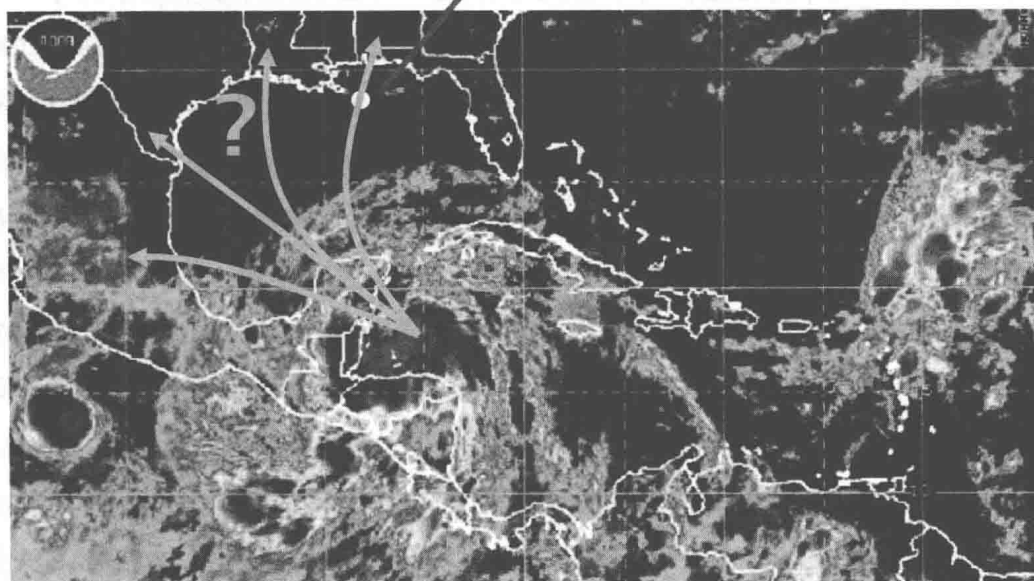
译者

原书前言

2010年6月26日 CNN 头条新闻:

热带风暴加海上浮油等于不确定性

英国石油公司“深水地平线”钻井平台泄漏



决策问题:英国石油公司(BP)可在三天内撤离清理浮油的工人,这使得格尔夫(Gulf)海湾深水井将继续产生大量的石油泄漏,但若不撤离继续保留工人清理海上浮油可能会使他们暴露在热带风暴亚历克斯(Alex)下,而其可能会发展成为飓风。一个简单的问题就是:在这种情况下最好的决策是什么?

出于科学性或工程目的考虑,无论是在局部区域还是在全局进行地球科学建模,由于缺乏数据和不了解基本现象及过程的发生,不确定性都是客观存在的。本书汇集了可用于复杂的地球科学中的不确定性建模中遇到的各种问题、可采用的技术手段和实用的建模工具,以及不确定性建模对实际地质工程决策的影响。

建模已成为地球科学中的一个标准工具。大气科学家建立气候模型,地震学家建立地球深部的结构模型,水文地质工作者建立地下蓄水层模型。许多书籍和论文中已经探讨了建模问题,它覆盖了数学和地球科学的许多分支学科。通常,建立一个或几个模型测试假设,验证或测试某种现实世界发生的特定工程行为,

或试图尽可能真实地描述物理过程。不确定性问题(过去、现在或将来)经常被提及,但往往是作为一个方面说明;它很少作为一个定量或预测目的使用。到目前为止很少有将地球科学建模的不确定性作为主题的书籍,在我探讨的知识范围内,没有一本有关地球科学中的不确定性建模的书能让地球科学专业本科水平的学生真正理解和掌握这些知识。在高级技术期刊或书籍中,专业人士通常迷失在无数的不确定性模型的技术细节、局限性和假设上。

因此在2009年,我决定在斯坦福大学开授一门全新的课程“地球科学中的不确定性建模”,这门课将成为地球科学专业以及相关的领域(如土木与环境工程和地球系统研究)高年级本科生和研究生(地质、地球物理和油藏工程专业)的第一年课程的一部分。这门课的重点不是建立一个单一的地质模型或其他任何目的的物理过程的模型,随后“添加”相关的不确定性,而是直接建立一种实用的决策目标的不确定性模型。我们的想法不是从某一现象的一个单一的估计开始,随后“微动”数字让人对估计有一点把握。这个想法是为了让学生直接思考不确定性的方面,而不局限于在一个单一的气候条件、地震或水文模型,以及任何单一的猜测中。这是一个新的教学大纲所涉及的内容。

在我曾与地球科学专业各学科同事的讨论过程中,以及从我作为斯坦福大学石油储层预测中心主任十余年的经验来看,我得到的结论是如果依赖特定决策问题或实际应用,那么这种不确定性建模是相关的。我坚信,如果不考虑不确定性对决策问题有什么影响,那么在不确定性建模中花费的时间或资源将毫无“价值”可言(当然不是以美元计算)。例如:我们能改变气候相关的政策吗?我们要为二氧化碳纳税吗?我们能清理一个污染场地吗?我们从哪儿下钻为好等等。

让我们更进一步考虑这个问题:如果对一些现象的不确定性是“无限”的,也就是说,任何可以想象出的都是可能的,但这个不确定性对某个决策问题没有影响,那么为什么还要将建立不确定性模型摆在首位,如果它会浪费时间和资源的话!虽然这是一个极端的例子,任何建模方法首先要构建一个关于地球现象的不确定性模型,然而只考虑了决策问题可能是非常低效的,也可能是无效的。应该强调的是,建立一个地质模型和建立一个地球的不确定性模型之间有明显的差异。例如,从地震数据建立一个单一的地质模型,可以增加我们对所生活的星球的认识,更好地认识我们的星球随地质时间产生的短期或长期的演化。一个不确

定性模型将要求地震学家考虑地球结构所有的可能性或情景,其周密的细节将会产生大量的可能性,因为地震数据不能解决米级或千米级的细节。构建所有这些可能性太困难了,因为即使只有一个模型都需要很大的计算量。然而,重点应该是地震学研究可以确定在一个特定区域未来的地表运动,以及对建筑结构的影响,那么很多先验地质情况或地下的可能性可能不需要考虑。应用这些将使得建立不确定性模型计算效率更高且更有效。知道什么是建立不确定性模型的关键要素,正是本书的主要内容。

考虑不确定性建模的正确性或一致性方面是很困难的,这是我的学生和高级研究人员的经验。事实上,重要的是不确定性建模的量化,这是科学问题,也是一个哲学问题。因为不确定性建模与被建模的对象“缺乏知识”有关,这立刻就引入一个哲学问题——“什么是知识?”。即使有大量的数据,我们对于宇宙的认识仍是有限的,因为我们人类的局限性,我们只能够观察到我们能够观测的;我们只能理解我们所能理解的。我们的“知识”是在不断进化的:只考虑牛顿物理学,这被认为是一个确定性科学,直到爱因斯坦发现导致当时传统数学和物理崩溃的相对论。虽然这看起来可能是很深奥的探讨,但对我们如何看待不确定性和处理不确定性也有实践意义,甚至包括日常的实际情况。通常,不确定性建模是通过我们观测到的不能排除所有可能性来建模。我把这称为“包含”的方法来对不确定性建模:一个列表或一组可选择的事件或结果,它汇集了所有可利用的一致信息。列表或集合是一个完全有效的不确定性模型。然而本书中,我会经常用“排除”法来讨论及思考不确定性问题,即从可以想象的所有的可能性中排除这些可以由任何可用信息排除的可能性。虽然“包含”和“排除”的方法可能会导致相同的不确定性量化,但“排除”的方法将在不确定性建模的实践中提供一个更现实的办法。这是一个更为保守的方法,“排除”后,因为人类倾向于包含少于其余的可能性。在一组同等事物中我们倾向于更快地同意包含了什么,而不是同意排除了什么。在“排除”法中,我最初注重的是所有可以想象的可能,一开始,不需要考虑太多来自于信息、数据方面和专家的偏见。这样,我们往往倾向于最终以“少有惊喜”而结束。然而同时,我们需要认识到这两种方法受限于我们能够想象到的方案,不管我们研究宇宙的哪一部分(例如地球或大气层),都是通过我们自己本身所具有的宇宙知识进行的。

我的不确定性建模方面的实践经验多基于地表以下情况。本书中的图解和实例研究多偏向于这个领域。这是不确定性建模的一个有难度的领域,因为地表以下情况是复杂的,数据稀少且不直接,介质为多孔隙或有断层的。许多地表以下情况不确定性建模的应用实用且与社会生活相关:自然资源的开采和提取,包括地下水、核材料和气体(比如天然气和二氧化碳)的存储。然而,本书并不是地表以下情况不确定性建模的手册;在许多具有类似特征的应用中,我们将地表以下情况建模作为一个研究示例和不确定性建模的说明。这些特征包括:复杂介质、复杂的物理性质和化学性质、高度复杂的计算、涉及学科多,最重要的是它们本身是主观的,但是要求有一致且可重复的方法,这个方法能够被所涉及的所有科学领域理解和表示。本书里提出的许多工具、工作流和方法适用于其他领域的建模,这些领域的建模与地表以下情况建模有共同的要点:表层拓扑学和几何学建模以及空间变化特性建模(特性是离散或者连续的)、响应函数和物理模拟模型的评估,比如通过物理定理来进行评估。本书中的应用聚焦在“地球科学”领域。然而,许多提及的建模工具可用于诸如理解断层几何和沉积系统、碳酸盐岩生长系统、生态系统、环境科学、地震学、土壤科学等领域。

因此本书的主要目的有以下两个方面:为对地球科学、环境科学或矿产和能源感兴趣的本科或一年级研究生提供一个不确定性建模可理解的引导性的概述;为对不确定性建模实践方面感兴趣的专业人士提供初级读本。作为一本初级读本,我将提供一个泛泛的概述。因此本书不打算提供不确定性建模的所有可用工具的详尽清单。本书将是百科全书式的,将会使学生和第一读者主动思考主要信息和关键的问题,理论理解或广博的知识强调概念性的思维。

有关特定方法的内部运作的理论细节留给其他更专业的书,本书不作讨论。在学校,习惯于强调学习事物是怎样精确工作的(比如如何用高斯消元法求解矩阵);因此,通常情况下,为什么特定的工具适用于解决特定的问题,实际上这些经验是基于无数技术细节和理论基础上形成的。因此,本书的目的是提供一个不确定性建模概述,而不是提供一些不确定性建模有限方面的细节,理解做了什么、为什么用这样的方式做,而不一定要理解是怎么样精确地工作的(例如需要知道高斯消元法以及高斯消元法做了什么,但不需要精确地记得它是如何工作的,除非是想改进其性能)。专业人士很少有时间来精确地了解所有建模技术的内部运

作,或者很少参与这些方法的详细开发。这是一本为用户解决工程问题并且为设计师在其设计中创建一种可理解模式的书。

本书不提供:

(1) 不确定性建模的详细概要;(2) 附有练习的教科书;(3) 解释每个技术的内部运作的详细数学方法清单;(4) 怎样构建不确定性模型的“有配方的食谱”;(5) 这个领域中每一个相关论文的详细参考文献列表。

本书试图提供:

(1) 作者在通过决策来驱动不确定性建模上的个人观点;(2) 一个概念性、说明性的综述,通过一种非数学的方式直接突出这一建模技术的核心要素和方法;(3) 在现实世界里经受住了考验的方法、工作流和技术,且在高质量的商业或开源软件中加以实现;(4) 不确定性建模虽然聚焦在地表以下情况,但有资格应用在其他领域的各个部分;(5) 进一步的建议是阅读与本书水平相当的书;(6) 相关教学材料,例如 PDF 格式的幻灯片、作业、软件和数据以及额外的补充材料,详见 <http://uncertaintyES.stanford.edu>。

致 谢

很多人在这本书作出了贡献:通过讨论以提供思路或提供图件和其他材料。首先,我想感谢能源 160/260“地球科学中的不确定性建模”班的学生。正如任何作者所希望的一样,斯坦福大学的教室是最好的开放论坛。他们的注解、评论和批判性思维,诸如什么是重要部分、什么需深入了解以及在理解时哪里有潜在的误区等方面,激发了我的思维。

我想要感谢 Gregoire Mariethoz 和 Kiran Pande 的评论意见。Reidar Bratvold 给我提供了他的关于“作出好的决策”方面的早期版本的书,我们进行讨论并做了深刻的思考,从而完成了第 4 章的写作。还要感谢第 8 章我的合著者 Guillaume Caumon 在结构建模和不确定性建模中作出的贡献;第 8 章中许多要点是在 Nicolas Cherpeau 的帮助下并且使用了由 Paradigm 公司提供的 gOcad(Skua)软件完成的,在此一并感谢。Kwangwon Park 和 Celine Scheidt 在第 9 章和第 10 章的基于距离的不确定性建模技术方面的帮助是无价的。我还要感谢 Schlumberger 提供的在一些实例研究中用到的 Petrel/Ocean 软件;Esben Auken 在第 1 章的案例研究介绍中为本书提供了有用的注解;Mehrdad Honarkhah 帮助我在第 12 章中构建我的课程项目案例。

Mehrdad Honarkhah 作为一个教学助理,他从头到尾研究了 my 课程并且成功地做出了本书的第一个版本。我还想感谢 Alexandre Boucher 对 S-GEMS 软件的使用和开发作出的贡献以及为本书封面供图;Sebastien Strebelle、Tapan Mukerji、Flemming Jorgensen、Tao Sun、Holly Michael、Wikimedia 和 NOAA 为本书中提供了基本的图形资料。

我感谢 SCRF 财团(斯坦福油藏预测中心)的成员公司对本书的财政支持。我还想要感谢我最好的朋友和同事 Margot Gerritsen 和 Steve Gorelick,感谢他们不仅在写作方面,还在很多其他事情中对我的热情鼓励和支持。最后,我想感谢 Wiley-Blackwell 和感谢 Izzy Canning,给我提供出版这部作品的机会,同时也让我有了更丰富的经验!

目 录

1 绪论	(1)
1.1 应用实例	(1)
1.2 不确定性建模	(4)
参考文献	(6)
2 统计学与概率论知识概述	(7)
2.1 概述	(7)
2.2 图示数据	(7)
2.3 以数值描述数据	(10)
2.4 概率论	(13)
2.5 随机变量	(16)
2.6 二元数据分析	(25)
参考文献	(29)
3 不确定性建模的概念和原理	(30)
3.1 什么是不确定性	(30)
3.2 不确定性的来源	(30)
3.3 确定性建模	(31)
3.4 不确定性模型	(33)
3.5 模型和数据的关系	(34)
3.6 不确定性的贝叶斯规则	(34)
3.7 模型的验证和伪证	(36)
3.8 模型复杂性	(37)
3.9 不确定性讨论	(38)
3.10 实例	(38)
参考文献	(41)
4 地球工程中不确定性条件下的决策	(42)
4.1 概述	(42)
4.2 决策	(43)
4.3 构造决策问题的工具	(53)

参考文献	(57)
5 连续性空间建模	(58)
5.1 概述	(58)
5.2 变异函数	(59)
5.3 布尔模型或对象模型	(66)
5.4 三维训练图像模式	(69)
参考文献	(70)
6 不确定性空间建模	(71)
6.1 概述	(71)
6.2 基于对象的模拟	(71)
6.3 训练图像方法	(73)
6.4 基于变异函数的方法	(77)
参考文献	(80)
7 用数据约束空间模型的不确定性	(81)
7.1 数据集成	(81)
7.2 基于概率的方法	(82)
7.3 基于变异函数的方法	(86)
7.4 逆向建模方法	(88)
参考文献	(99)
8 结构不确定性建模	(100)
8.1 概述	(100)
8.2 地下结构建模数据	(101)
8.3 地质表面建模	(102)
8.4 构建结构模型	(104)
8.5 结构模型网格化	(106)
8.6 通过厚度建模表面	(108)
8.7 结构不确定性建模	(109)
参考文献	(113)
9 可视化不确定性	(114)
9.1 概述	(114)
9.2 距离的概念	(115)
9.3 可视化不确定性	(117)

参考文献	(126)
10 响应不确定性建模	(127)
10.1 概述	(127)
10.2 代理模型及排序	(128)
10.3 实验设计和响应面分析	(128)
10.4 响应不确定性建模的距离方法	(134)
参考文献	(142)
11 信息的价值	(143)
11.1 概述	(143)
11.2 信息价值问题	(144)
11.3 实例研究	(153)
参考文献	(157)
12 案例研究	(158)
12.1 概述	(158)
12.2 解决方案	(161)
12.3 敏感性分析	(164)

1 绪 论

1.1 应用实例

1.1.1 概述

为了说明本书中涉及的不确定性模型所需要理解的概念以及工具,首先介绍一个虚拟案例的研究。“虚拟”是指本案例中涉及某些领域中研究的实际情况,但在这个例子中的数据 and 地质研究结论,特别是实际结果并非是“真实的”,这一点在阅读完本案例后就可以理解。

世界上的绝大多数饮用水由地下水源提供。在过去的几十年中,由于城市数量的增长和农业活动,许多地下蓄水层已被地表的污染物破坏。污染还将持续造成威胁,直到临界地表补偿水区域被地下水保护区环绕。而只有人们搞清楚地表污染源和地下蓄水层之间复杂的液压关系之后,才能成功实现。

在丹麦发生过这种类型的例子。自 1999 年以来,丹麦政府一直致力于确定关键补给区(是地上水进入地下水系统以补充系统),在丹麦乡村地区收集的地球物理数据集,由于这一地区水提取率高,被认定为特别有研究价值的区域。对于补充保护区,需收集一些更典型的、有利于作出明智决策的数据。这些决策是相当重要的,它将与农场搬迁、工业和城市发展以及相应的供水系统相关。因此,若错误地确定一个易受污染的地区,会导致需要付出昂贵代价去弥补。事实上,丹麦政府制订了一个十条计划(表 1.1),设定目标,制订了具体措施,其中一些措施可能与保持农场业的活力、确保经济健康发展以及此区域的生态健康有所冲突。

表 1.1 丹麦政府的十条计划表

序号	丹麦政府的十条计划(1994)
1	杀虫剂对健康不利应远离市场
2	杀虫剂税—消耗的农药杀虫剂将减半
3	硝态氮污染现象在 2000 年之前将减半
4	应鼓励有机农业
5	特别保护饮用水领域
6	新的土壤污染的行为——废弃的沉积物必须清理
7	增加绿化和恢复自然以保护地下水
8	发展欧盟所取得的成就
9	提高地下水的控制和饮用水的质量
10	与农民及其相关组织谈话

丹麦的地表以下由所谓的掩埋山谷组成,这被认为是更新世(第四纪)冰川通道的“非正式形式”,也被认为是更新世冰原消长变化的结果。这些峡谷形成的主要方式是冰下或在前缘的冰川融水的侵蚀。因此,山谷形成与其形态和地层是否受过腐蚀有直接关系。第二个方式是来自冰川冰盖部分的侵蚀。创建和填充掩埋山谷的几个过程对了解丹麦含水层系统和表面污染物对地下水污染的复杂性是非常重要的。现已经在丹麦观察到了叠加三个不同地质年代的冰川。因此,不同地质年代的冰川和山谷交叉削减,并且也可能突然消失(图 1.1)。这些冰川和山谷的存在及位置可以被看作是丹麦含水层系统结构的基层。如果主要是被砂土所填充,掩埋谷地有可能成为一个高体积含水层(藏);然而,若观察到的剪切构造和填充结构显露,这些被填埋的山谷可以“再利用”。这些说明了在丹麦的含水层系统中异构性的二级水平的不确定性。

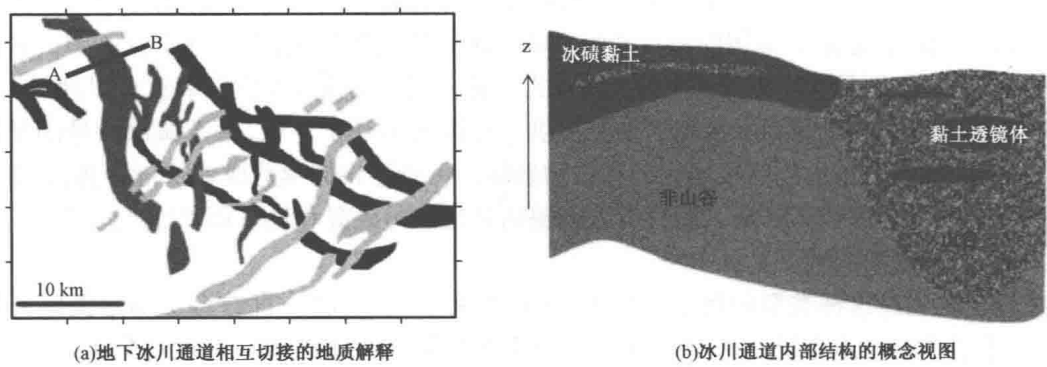


图 1.1 丹麦冰川和山谷交错图

Sandersen 和 Jorgensen 于 2006 年发现:大多数剪切构造及填充结构比整体掩埋谷地窄,但在一些区域非常广泛的分布,也可以观察到其涵盖了整个山谷宽度的结构。复杂的内部结构可在地震勘探和电磁测量中被观察到,偶尔也可在钻孔数据中被发现。

图 1.1 描述了丹麦上覆层内部异构性和变化程度的可能不同,它将山谷视为掩埋谷地。由于山谷的内部结构一般比较复杂,含水层之上的黏土层的潜在保护性可能是不连续的。从而内部的含水层将得到不同程度的自然保护。即使横向上分布广泛的黏土层,如果周围的沉积物以砂为主,防护效果只在局部有效果。因此山谷可能在山谷中和周围地层之间的含水层建立通路。

1.1.2 3D 建模

在此情况下,有关地下地层信息的不彻底性的研究,使某些特殊决策(如搬迁农场)过程变得艰难。地质学家可能会很详细地研究这些冰川和山谷的形成原因和地质过程,并且提出一个确定性的基于此理解的系统性描述,可能会使用计算机程序来模拟这一过程,以创建基于物理学理解的系统。然而,仅仅只有这样的描述在关注不确定性问题上显得捉襟见肘,这些不确定性问题对决策有着重要的影响。即使冰川和山谷的形成过程可以被全面洞察(一个相当大的假设),也不一定能因此得到这些冰川和山谷的确切位置,更不用说确定山谷内(诸如页

岩、砂、砾石、黏土的岩性)详细空间分布。

这并不意味着地质过程的研究是无用的。相反,在数据收集(钻探、地球物理调查)之外,地质研究能提供关于这些峡谷区域差异性的数据和信息。因此,需要用其他工具来建立地下冰川模型,同时量化谷地/非谷地和谷地内多样的岩性空间分布的不确定性。在理想情况下,这种模式将能反映物理学的理解,同时也能反映数据或地质理解的有限性。无论该模型是简单还是复杂,数据在建立模型和约束任何模型的不确定性等方面将发挥至关重要的作用。在丹麦,有两种类型的数据:通过钻探工作获得的数据和通过地球物理方法获得称为时域电磁调查(TEM 调查)的数据。

图 1.2 显示了一维(垂直)探测的数据关于山谷的厚度的解释。所收集的数据,是典型的关于地学建模的情况:通过采样(此处指钻探工作)收集的一些小规模且详细的信息,而一些较大规模的间接测量可以通过地球物理方法或遥感得到。在丹麦案例的研究中,瞬变电磁法的实验数据提供了一个合理的关于山谷定位的良好约束条件,但不能预测山谷内部结构,而钻探数据正好相反。

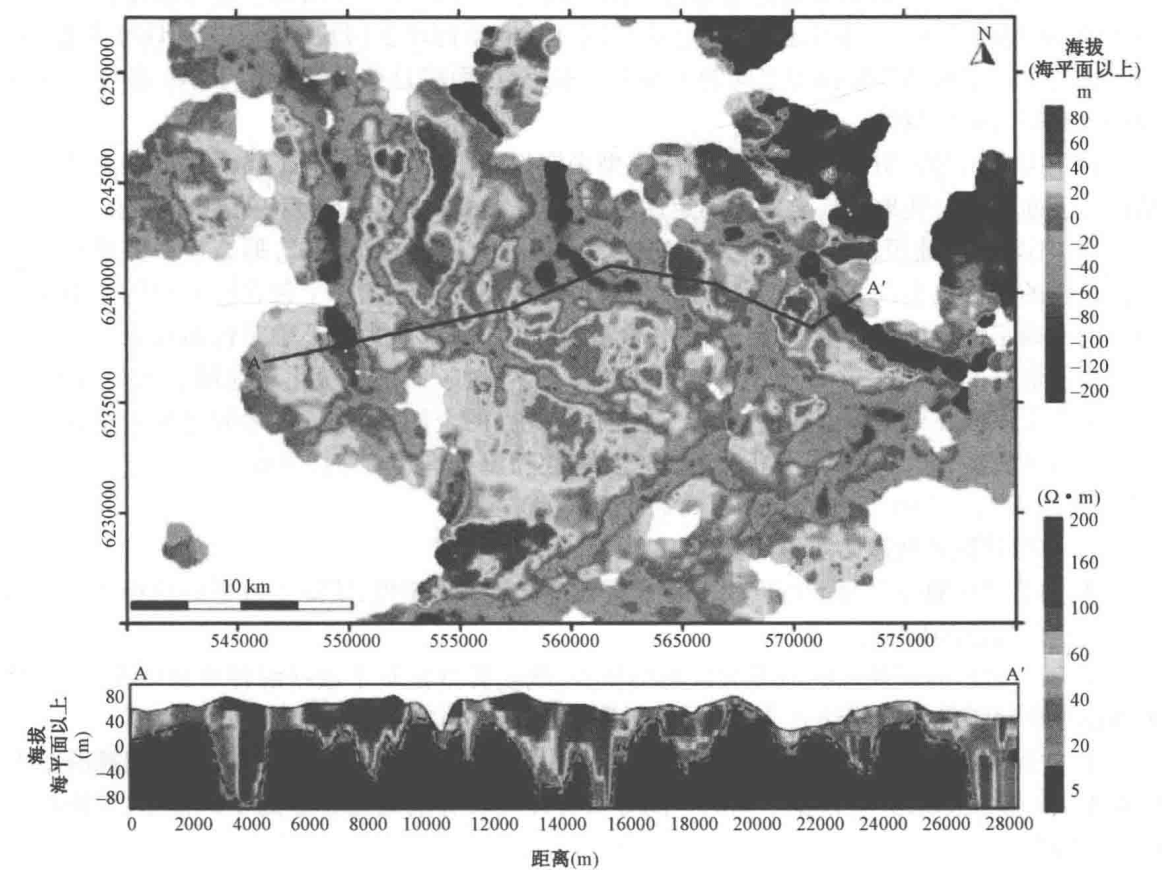


图 1.2 用 TEM 数据处理和解释的复杂山谷厚度图
较厚的地层反映了山谷的存在