

第 30 届国际地质大会论文集



第 24 卷

环 境 地 质
环 境 地 质
环 境 地 质

张 之 一 主 编



地 质 出 版 社

100
23-24
1

第 30 届国际地质大会论文集

第 24 卷

环 境 地 质

张之一 主编

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本卷论文集涉及当代环境地质研究的一些主要方面:不同地质作用对人类环境的影响,大江大河开发中的环境地质问题,微量元素与人体健康,废物处置的地质问题,以及环境地质制图等,反映了欧洲、亚洲、美洲等地近期环境地质的最新研究成果和现状。此书可供从事地质、环保、水利、城建、规划部门的科技、决策人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境地质/张之一主编. -北京:地质出版社,1998.12
(第30届国际地质大会论文集)
ISBN 7-116-02687-8

I. 环… II. 张… III. 环境地质学-国际学术会议-文集 IV. X141-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 32168 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:沈树荣 周继荣

责任校对:田建茹

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092^{1/16} 印张:14.75 字数:347 000

1998 年 12 月北京第一版·1998 年 12 月北京第一次印刷

印数:1—500 册 定价:35.00 元

ISBN 7-116-02687-8

P·1945

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

第 30 届国际地质大会论文集

(中 文 版)

陈毓川 赵 逊 张之一 主编
项礼文 蔡爱莉 曹佑功

第 30 届国际地质大会论文集英文版共 26 卷,已由荷兰国际科学出版社(VSP)于 1997 年全部出版。中文版由第 30 届国际地质大会组织委员会编辑,地质出版社出版。

第 30 届国际地质大会论文集卷目

- 第 1 卷: 地球的起源和历史
- 第 2 卷: 地学与人类生存、环境、自然灾害
- 第 3 卷: 全球变化
- 第 4 卷: 岩石圈构造和深部作用
- 第 5 卷: 现代岩石圈运动 地震地质
- 第 6 卷: 全球构造带 超大陆的形成与裂解
- 第 7 卷: 造山带 地质填图
- 第 8 卷: 盆地分析 全球沉积地质学 沉积学
- 第 9 卷: 21 世纪能源矿产和矿产资源 矿床地质 矿产经济学
- 第 10 卷: 地学新技术方法
- 第 11 卷: 地层学
- 第 12 卷: 古生物学 地史学
- 第 13 卷: 海洋地质学 古海洋学
- 第 14 卷: 构造地质学 地质力学
- 第 15 卷: 火成岩岩石学
- 第 16 卷: 矿物学
- 第 17 卷: 前寒武纪地质学和变质岩石学
- 第 18 卷: 化石燃料地质——石油、天然气和煤
- 第 19 卷: 地球化学
- 第 20 卷: 地球物理
- 第 21 卷: 第四纪地质
- 第 22 卷: 水文地质
- 第 23 卷: 工程地质
- 第 24 卷: 环境地质
- 第 25 卷: 数学地质和地质信息
- 第 26 卷: 比较行星学 地质教育 地质学史

前 言

这部论文集包括了 26 篇论文,选自 30 届国际地质大会在环境地质方面的 8 个专题讨论会。本来,在这个方面总共有 9 个专题会议,但专题 18-2“煤炭地球化学及其对环境和人体健康的影响”的作者们拟将他们的论文发表在一个期刊上,故没有纳入本文集。

本文集论文选自以下专题会议:“地貌学与环境影响评价”,“微量元素和人体健康”,“大江、大河治理和开发中的环境地质问题”,“火山活动及其对环境的影响”,“岩溶的形成和演化及其环境变化信息(UNESCO/IUGS IGCP379—岩溶作用与碳循环)”,“区域环境地质评价及制图”,“工业废料、城市垃圾处置的环境地质问题”,“核废料处置的环境水文地质和工程地质问题”。

在 8 个专题中,共有 194 篇论文录于 30 届国际地质大会的论文摘要第 3 卷。其中,79 篇论文被安排口头发言,64 篇展讲。本论文集中 26 篇论文的选取是基于专题讨论会召集人在对会前提交 30 届国际地质大会秘书局的有关论文摘要进行评审后提出的推荐。然而,最后的决定是在作者在会上作了报告并经召集人协商后作出的。

因此,本论文集实际上涉及了环境地质的各个方面,那就是:不同地质过程,如地壳运动、火山、气候变化、土壤侵蚀、岩溶和地下水压力对人类环境的影响;大江、大河开发中的环境地质问题;微量元素与人体健康;与废物处理有关的地质问题;以及环境地质制图。

这些论文反映了用地球系统科学方法进行环境地质研究的现代趋势,即:在了解岩石圈、水圈、大气圈、生物圈和人类圈相互作用的基础上评价人类生活的环境。IGCP379 从事的岩溶作用与大气温室气体源汇关系的估算,在评价核废料场地时考虑今后 13 万年气候变化的影响,水、岩、土、植物中微量元素迁移与人体健康关系的讨论,以及许多世界主要河流综合治理的实践都是这个方面的好例子。

借此集出版之际,对全体作者、专题会议召集人和岩溶地质研究所的同事们在准备本论文集过程中所给予的热心合作和贡献表示衷心的感谢。

袁道先

1997 年 2 月于桂林

目 录

第一篇 地质作用和人类环境

- 气候变化及其对核废料深层地质贮存未来动态的影响之序列分析
..... L. M. King-Clayton, F. Kautsky, N. O. Svensson(1)
- 中国高放废物处置库——甘肃北山预选区地壳稳定性研究
..... 徐国庆, 王驹, 金远新, 陈伟明(17)
- 日本釜石矿地下水压力变化与地震的关系——日本地质环境稳定性研究
..... Kohson Ishimaru, Isao Shimizu(22)
- 中国长白山天池火山研究 刘若新, 魏海泉, 李晓东(31)
- 通过渤海黄河口沉积物的地球化学及古地磁学研究探讨近期黄土高原的土壤流失
..... 陈灏, G. B. Shimmield(47)
- 日本北部宗谷山径流特征对排水密度差异的影响
..... Yukiya Tanaka, Yasushi Agata(57)

第二篇 岩溶和环境

- 岩溶洞穴由层理面演变而来的观点(斯洛文尼亚, 什科茨扬斯凯洞群)
..... M. Knez(67)
- 论中国岩溶峰丛洼地的形成 蒋忠诚(80)
- 日本西南部山口, 秋吉台高原一碳酸盐岩地区二氧化碳的地球化学循环
..... Kazuhisa Yoshimura, Youji Inokura(86)
- 碳酸盐岩土壤 CO₂ 的动态特征及其对溶蚀作用的驱动 徐胜友, 何师意(96)
- 洞穴沉积物氧同位素计温及古气候记录的研究 覃嘉铭(103)

第三篇 大江大河开发中的地质问题

- 中国大江大河的开发治理与环境地质 司富安, 邵维中, 杨国维(111)
- 伏尔加河水力资源开发对地质环境影响研究的经验
..... I. A. Paraboutchev, A. D. Larionov(119)
- 长江开发治理中的环境地质问题 陈德基, 严沛漩(130)
- 治理开发黄河中的环境地质 马国彦, 徐复新, 崔志芳(138)
- 鄱阳湖区地学环境特征及其开发治理的战略方案 陆中光(146)

第四篇 微量元素与人类健康

- 硒、氟地球化学特征与人体健康 李家熙, 黄怀曾, 刘晓端, 葛晓立, 吴功建(149)
- 伊朗北部恩泽利湖沉积物的重金属污染 S. Kousari(156)
- 中国大巴山区碘和硒的分布规律 雒昆利, 闫黎东, 张奇, 葛岭梅(163)
- 中国大运河的重金属污染 翁焕新, Charlie Y. Xu(171)

第五篇 废物处置地质问题

- 粘土坑挖掘与填埋的水文地质条件影响分析

第一篇 地质作用和人类环境

气候变化及其对核废料深层地质贮存 未来动态的影响之序列分析

L. M. King-Clayton

(Quanti Sci Ltd. , 47, Burton Street, Melton Mowbray, Leics. , UK)

F. Kautsky

(Swedish Nuclear Power Inspectorate, S-106 58, Stockholm, Sweden)

N. O. Svensson

(Department of Quaternary Geology, Lunds Univ. ,
Tornavägen 13, S-223 63, Lund, Sweden)

摘 要 瑞典核能检查机构(SKI)最近正在执行 94 号场地项目的部分内容,包括帮助评价关于核废料深部贮存未来动态情况的建设性方案。该项目所用的真实地质数据来自 Äspö 场地,并且假定一个假设的贮存场所(把它缩小到原尺寸的 10%)位于瑞典沿海地区地下近 500m 深的花岗岩基岩处。本次研究的主题是对场地未来 130 000 年的气候及随之产生的地表及地下环境的变化进行预测。中心气候变化序列分析是在气候模型 ACLIN(天文气候标准)^[29]IMBRIE & IMBRIE 模型^[26]和 PCM 模型^[4]的基础上提出的。这些模型假定,从现在到以后的 5 000 年、20 000 年、60 000 年和 100 000 年将出现几次冰期。Äspö 区域被“预测”在很大程度上将会受后三次冰期的影响,并且在后两次冰期中冰川将抵达和覆盖这一区域(冰川厚度将分别达到 2 200m 和 1 200m)。当然,序列分析只是对瑞典东南部未来的气候变化提供一种解释。这种对未来 130 000 年气候变化的判断受到大量不确定因素的限制。在对气候变化时间序列进行预测的基础上,本项工作的进一步目标是提供能反映冰进和冰退时冰盖前部和底部有关物理和水文地质条件的最直接的标志,并使未来冰期对大范围内的地下水流、岩压及水化学的影响在各方面与模型设置的情况相同。本次研究对场地时间特征进行了描述,对未来不同时间主要参数的变化进行了预测,最后将这些描述和预测输入到模型,评价假定贮存场所的变化。本次研究侧重于废物贮地对气候预测的不确定因素和参数灵敏性的反应方面。

关键词 气候变化 冰期 放射性废物 瑞典 序列分析

1 引言

94 号场地项目的部分内容包括对废物深部贮存的未来动态进行评价。所用数据来自 Äspö 硬岩试验室,并假定废物贮存场所位于瑞典沿海地区地下 500m 深的花岗岩基岩处(图 1)。

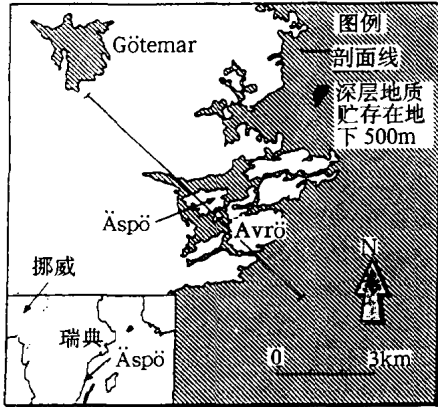


图 1 Äspö 位置及用来建立中心序列的剖面线

研究的主要目的包括 130 000 年后气候变化以及场地地表与地下环境变化的预测。基于过去气候的变化,该区域的气候很有可能发生变化,冰川与冻土将可能覆盖这一区域。这些变化有可能明显改变地下水流动方式,并由此导致放射性物质从假设贮存处向外迁移。

本项目首先需要对所有可能影响贮存系统动态的要素事件与过程进行研究。为此,需要下面一些主要资料,尤其是关于 Äspö 场地气候变化的定论描述;未来不同时期气候条件对场地地表环境影响的描述;这些变化对贮存系统产生影响的可输入模型的定量信息。

正如参考文献[14]所述,本次研究主要是为预测贮存系统未来动态及探索它将如何出现提供一种评价的手段。

2 过去与将来气候之间的联系

试图预测未来气候变化是一项困难的工作,需要了解地球过去气候的变化,同时需要模型预测未来。众所周知,北半球的冰期开始于 2 300 000 年以前,从那时起,第四纪时期出现多次冰期和间冰期,在中更新世与晚更新世时冰期/间冰期的周期接近 100 000 年。据此可对未来冰期进行初步预测:前一次间冰期——伊姆间冰期(大约距今 115 000~130 000 年)大约延续 10 000~15 000 年,而处于目前温暖阶段的全新世已持续了很长时间。全新世适宜生长的气候也已过去了几千年,因此下个冰期比较寒冷的气候很可能已经开始。这种简单气候预测的最大缺陷是未能考虑产生冰期与间冰期旋回的原因。需要建立含有可调控冰期与间冰期循环过程的气候参数模型。

本文在已有模型的基础上力图提供一种对未来气候与冰期变化进行框架式判断的手段。模型包括 ACLIN(天文气候指标)^[29],IMBRIE & IMBRIE 模型^[26]和 PCM 模型^[4]。这些模型认为,米兰科维奇轨道参数是描述大规模气候变化的主要因子。依据这些模型估计了全球冰川的变化,以及相应的海平面变化。(图 2 和图 3)基于与最后一次冰期相似的原则,对芬诺斯堪的亚古陆即将到来的冰期进行预测。需要着重指出的是,作为一个概要而不是具体的预测,本次序列分析描述的是一连串似乎比较合理的事件,而不包括对可能途径和参数进行解释,后者将在以后给予讨论。

为了开展“中心气候变化序列分析”,引入下述变量和假定:

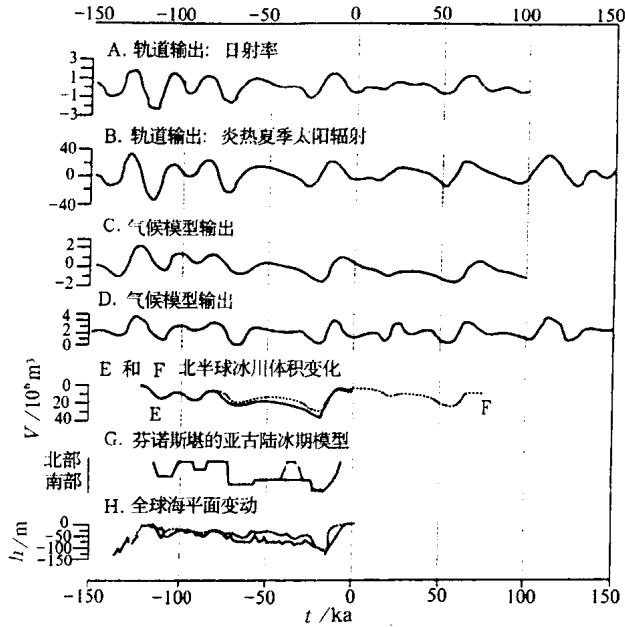


图 2 “中心气候变化序列分析”的气候预测与过去气候的对比

A—利用米兰科维奇参数计算的日射率(6月,北65度);B—北半球炎热夏季太阳辐射(6月,北65度),偏离1950年;C—IMBRIE & IMBRIE 气候模型^[26];D—ACLIN 气候模型^[29];E—北半球冰川体积模型^[4];F—Gallee^[23]对 Berger^[4]未来80 000年冰川体积变化模型的合成;G—斯堪的纳维亚冰期曲线^[31];H—魏克塞尔海平面记录^[15,8,38]

(1) 利用轨函数诱使日射变化,即以利用米兰科维奇轨道参数为初始资料输入的气候模型为基础。在运用模型计算结果时,要注意其不适用于冰期频率小于20 000年的。

(2) 利用IMBRIE & IMBRIE模型和PCM模型计算的冰川体积估计未来地球海平面的升降。由于这些模型未考虑周期,冰川体积及全球海平面变化的计算主要利用ACLIN模型。

(3) 采用单个芬诺斯堪的亚古陆穹隆和冰雪最大厚度为3 000m的冰雪模型预测未来一个大的冰期。

(4) 预测的全球海平面经过预测的地壳均衡校正,得到当地的海平面。

(5) 各冰川期的地壳均衡校正通过与Fjeldskar(数据未发表^[22])给出的模型结果相比较而作出估计。该模型适用于低粘度的地幔(1.6×10^{22} P),75~100km厚的软流层(0.7×10^{20} P)和接近90km厚的岩石圈。

(6) 即将到来的冰期分布范围与程度通过与魏克塞尔冰期直接比较而得。假设未来的斯堪的纳维亚冰期与本模型采用的全球冰川体积的形成时期同步出现。

涉及全球气候变化的各种不确定及可选择的因素包括:

(1) 未来的气候不一定按米兰科维奇形式发展。

(2) 在利用过去的气候记录解释100 000年的冰川旋回时,气候模型中还需要考虑更多的因素。例如:不同的反应时间,自然界CO₂效应的影响结果,冰川对地壳造成的下拗作用,冰层基底滑动,海平面变化与冰层变动间的反馈等等。在某种程度上讲,这些因素均应输入

模型,尽管做了一些方面的工作^[5],但还有许多工作要做。

(3) 最近显示,在上一次冰期,巨大冰山的卸荷(Heinrich 事件)对全球范围内气候变化起着控制作用^[13],这一因素在未来仍将存在。

(4) 气候变化的突发性。来自格林兰岛中央冰心的数据表明,最近 230 000 年的气候是不稳定的,特征是气候突变与海洋循环密切相关。这一发现进一步强调了米兰科维奇响应只是气候变化的因素之一。

(5) 人类活动对气候的影响(如温室效应)未被考虑。由于化石燃料数量有限,CO₂ 使全球变暖与本次研究的时间尺度相比十分短暂。但如果这短期的变暖使格林兰岛冰川融化或触发其它长期影响气候的因素,则将长期地影响。根据现有模型^[5],在未来 5 000 年内人类活动所引起大气 CO₂ 含量增长将使整个格林兰岛的冰层融化,从而推迟下一冰期的来临。这表明,可能在公元 50 000 年以前芬诺斯堪的亚古陆冰封将不会再出现,且其冰雪量仅有现在格林兰岛冰原的一半。

涉及 Äspö 场地的局部条件,尤其是冰雪地壳均衡与海平面变化的各种不确定和可选择因素同样需要考虑:

(1) 全球气候模型预示的全球冰川体积和全球海平面变化,不需要与末次冰期形成的芬诺斯堪的亚古陆的冰雪体积有相同的阶段联系;否则,当地海平面变化可能达到极端,从而产生严重偏差。

(2) 对魏克塞尔冰层厚度不同的估计^[2,36,30]对拼造冰川地壳均衡模型以及模拟预测未来冰期产生极大影响。本文给出的冰雪模型,即单个巨厚的芬诺斯堪的亚冰穹窿亦可换为厚度更薄的或有相互分离的冰穹的冰原。末次冰期对斯堪的纳维亚古陆造成的影响本应包括几块联合穹地和沿波罗的海冰雪条带的形成。

(3) 本序列分析提供了一种简明的有关当地海平面和冰川地壳均衡的描述,因此还不能解释前期膨胀和水力均衡效应,也无法解释现代地壳的持续抬升。采用更为详尽的地球物理模型将是预测未来冰期地壳反应的更为有效的途径。

3 94 号场地项目的中心内容:气候变化序列分析

本文旨在描述瑞典东南部未来气候的变化,然而未来 130 000 年气候变化的预测受到大量不确定因素的限制。很明显,对下述 7 个不同的假设发展阶段,无论用何种参数都不能给出其真实定量的值。现有的估计只能作为大致的参考和阶段间的比较。

本次研究依据 IMBRIE & IMBRIE 气候模型^[26]的计算结果和 ACLIN 模型对公元 100 000 年的气候预测,并将其与第四纪的地质记录,尤其是冰川和海平面变化的地质记录相比较,按将古论今的方法判断冰期将可能出现在距今 5 000 年,20 000 年,60 000 年和 100 000 年。SKB/TVO 研究结果和 Bjork 与 Svensson^[6]的报道与本次研究思路相似,是本次研究的背景材料。通过 McEwen 和 De Marsily^[32]的精心研究,永冻层研究已经建模完成,还有 Svensson 的成果^[43,44]均对本文起到参考作用。对未来气候演化的预测示于图 3。

0~10 000 年 随着斯堪的纳维亚地区的冰层逐渐变厚,瑞典的气候会逐渐变冷。中央山区的冰层将厚约 1 000m;同时,斯德哥尔摩或向南尚无冰雪。中部山区地壳下拗 300m。海平面将逐渐降低至低于目前斯德哥尔摩地区及 Äspö 地区海平面 20~40m。作为这一时期

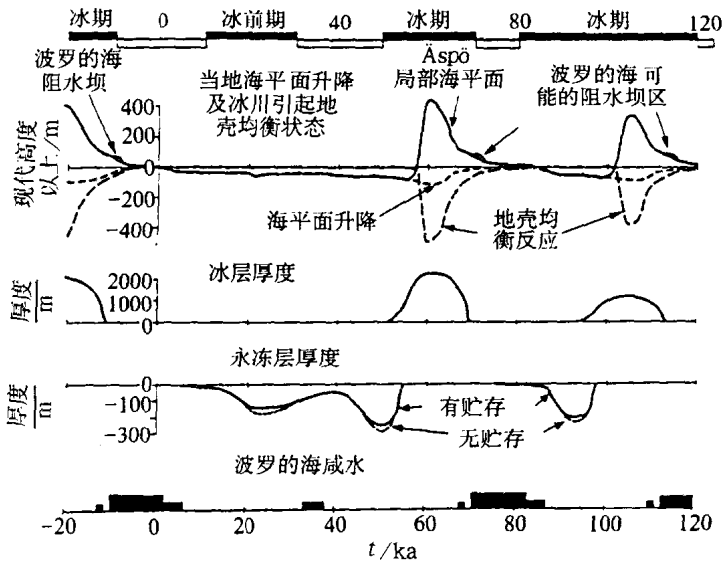


图3 全球和局部(Äspö)海平面升降预测和观察:海平面变化、冰川覆盖、冰川引起地壳均衡状态、永冻土厚度及波罗的海的咸度

过去升降记录从 Fairbanks^[21]得到,海岸线进退从 Svensson^[44]得到,永冻土厚度从地表温度预测得到

更冷的部分,永冻层将在瑞典北部出现。波罗的海由于与大洋的联系减少将逐渐变淡。

10 000~30 000年 经过短暂的温暖季节,气候开始变冷,并且将在从现在起大约20 000年以后处于完全冰期状态。冰期顶峰时期将持续5 000年,估计冰川将抵达斯德哥尔摩地区,但可能不包括 Äspö 地区。冰川中心处的冰层厚度约1 500m,斯德哥尔摩地区的冰层厚度约为800m。地壳下拗深度在冰川中心大约500m,在斯德哥尔摩地区大约60m。在冰退时期,当冰川前缘位于斯德哥尔摩地区时,海平面将比目前的海平面降低约25m,Äspö 处的海平面将降低50m。虽然未来冰期对 Äspö 场地的总体影响尚难估计,但影响可能不大。瑞典南部,包括 Äspö 将处于冻土状态。波罗的海的水将会变淡,但由于入海口的侵蚀,其水面将与大洋保持一致。

30 000~50 000年 间冰期气候干燥而寒冷(与目前格林兰岛的气候相似)。冰川将存在于瑞典地区,冻土在瑞典北部。在斯德哥尔摩地区海面动力上升与地壳升降的最后结果是其海平面将低于目前海平面30~40m,在 Äspö 没有明显的均衡升降,而海平面动力上升在10~20m左右,海平面将会比目前的海平面低30~40m,波罗的海的水大量淡化,但一些咸水也会进入其中。

50 000~70 000年 处于完全的冰川状态。冰川更加迅速扩张,冰期顶峰时期将延续大约60 000年。冰川将覆盖整个瑞典直到德国北部,与魏克塞尔冰期的顶峰状态大致相当。冰川中心厚度达3 000m。在斯德哥尔摩地区,冰川的厚度达2 500m。斯德哥尔摩地区很可能被冰川覆盖至少10 000年,或许更长。冰川中心部分下拗深度达700m,在斯德哥尔摩地区约600m,在 Äspö 约500m。当冰川消退,冰锋位于斯德哥尔摩地区时,估计该地海平面将比目前海岸线高出150m,在 Äspö 则高出80m,同时也使波罗的海的海水面高出大洋10~30m。波罗的海将被淡化,但在冰退时,咸水仍能通过均衡降压区进入波罗的海。冻土将在欧洲大面积发育。

70 000~80 000 年 快速的冰川消退致使间冰期延续至 75 000 年左右。在从前冰川中心部分,地壳隆起总量估计在 700m 左右。在斯德哥尔摩为 600m 左右,在 Äspö 为 500m 左右。这将是一个相对“温暖”的时期,斯德哥尔摩地区的气候与目前瑞典北部相似。小型山脉冰川和冻土仅在非常北的地方出现。瑞典南部的一些地区可能被从新开垦,海平面与盐度将与目前瑞典所有地区相似,并且地壳均衡回弹将使大陆表面恢复目前状态,冻土将仅存在于斯堪的那维亚的北部地区。

80 000~120 000 年 气候将逐渐变冷,并在 100 000 年左右达到冰川全盛时期。冰川将扩展,覆盖大部分的芬诺斯堪的亚古陆,在冰缘外面将出现大面积的冻土。在斯德哥尔摩地区,冰层最大厚度估计可达到 1 500m,在 Äspö 可达 1 000m,地面最大下拗深度在斯德哥尔摩地区约 500m,在 Äspö 约 400m。冰退时,相对海平面在斯德哥尔摩要高于目前海岸线 100m,在 Äspö 要比目前海平面高约 80m,但波罗的海只可能高出大洋表面 10~30m。波罗的海的水在冰退时将淡化,但咸水也会通过均衡下降区进入。

120 000~130 000 年 间冰期。该阶段的温暖气候将与目前整个斯堪的纳维亚气候相似,波罗的海的海平面与盐度也与现在相似。

4 冰期旋回的建立

本序列分析的下一步工作是需要用一系列图片来描述假设贮存地在一个冰期循环(冰进与冰退中)的潜在演化(阶段 1—7;图 4)。该项工作建立在距今 60 000 年内的冰期预测的基础上,更长时间的冰期预测可类似外推。

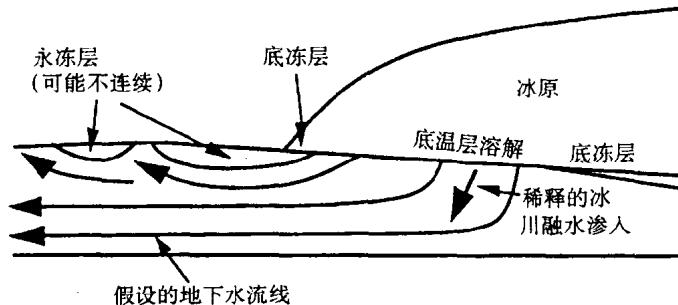


图 4 中纬度地区冰原下的暖流与水动力条件的概念模型^[1,12,18,19,24,41]

本文的目的在于说明序列分析反映了废料贮存安全性分析最有意义的特征、事件及过程。序列分析的目的就是提供反映冰进与冰退中冰原前部及下部的物理、水文地质和水文地球化学条件的最基本标志。这些标志包括冰川内部、上部、下部的自由水与下伏基岩地下水的水力联系,冰川形成和衰退的速率以及在冰进和冰退过程中冰川前缘的几何形态等。除此之外,还有一些其它相关的特征,例如永冻区和海平面的发展变化。所有这些特征均被考虑作为水文地质、地下水化学、岩石应力和地表环境的影响因素而进入评价模型。

除了在前面章节中介绍的之外,还采用了许多简化性的假设。在整个冰川旋回过程中,假设 Äspö 地区的地形不发生变化。虽然结晶基岩中的裂隙网十分复杂,仅考虑了三条断裂带(图 5 阶段 1 中的 EW-1, NE-1 和 Ävrö 断裂带),基岩中所示的流动路径仅表示其大致流

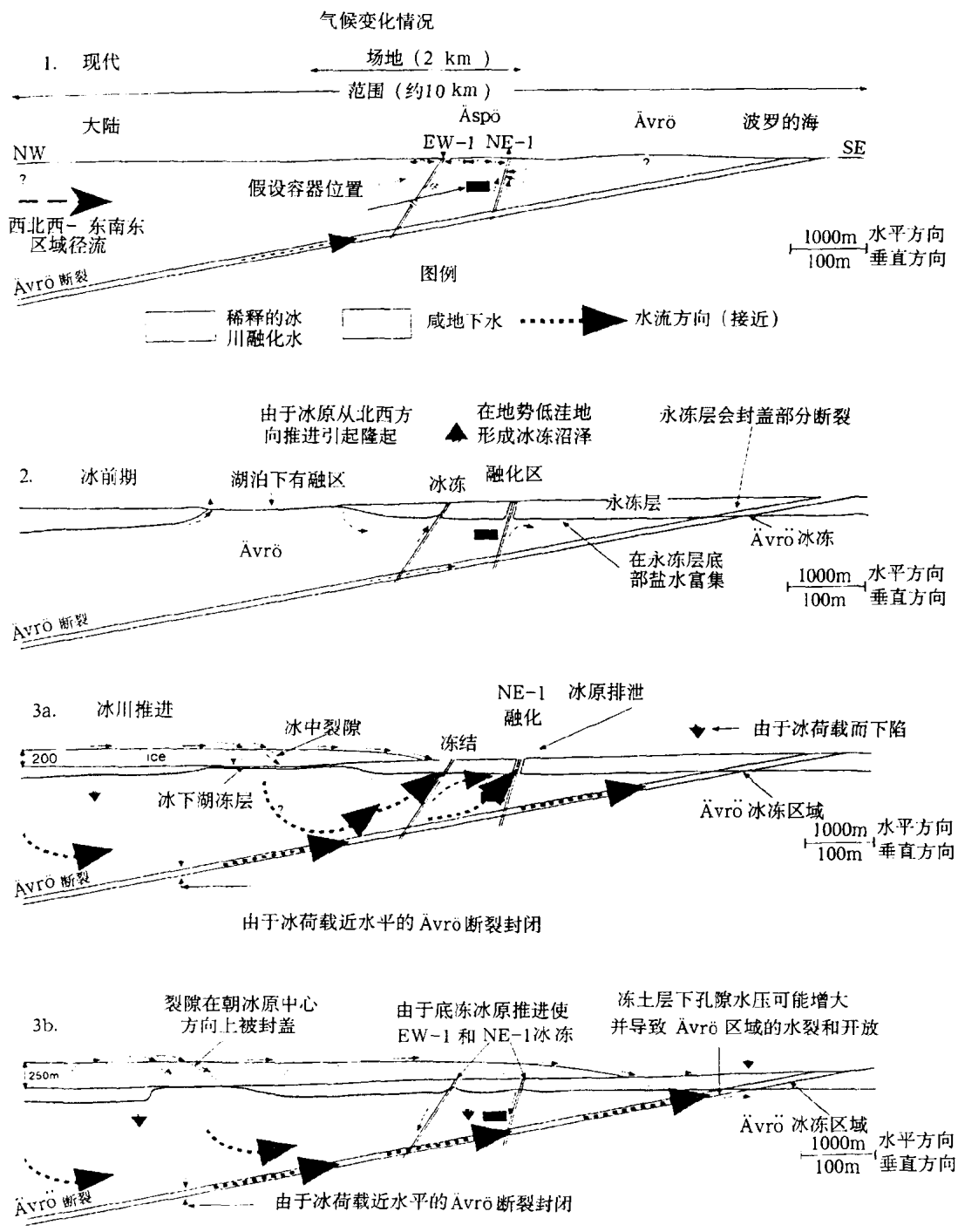
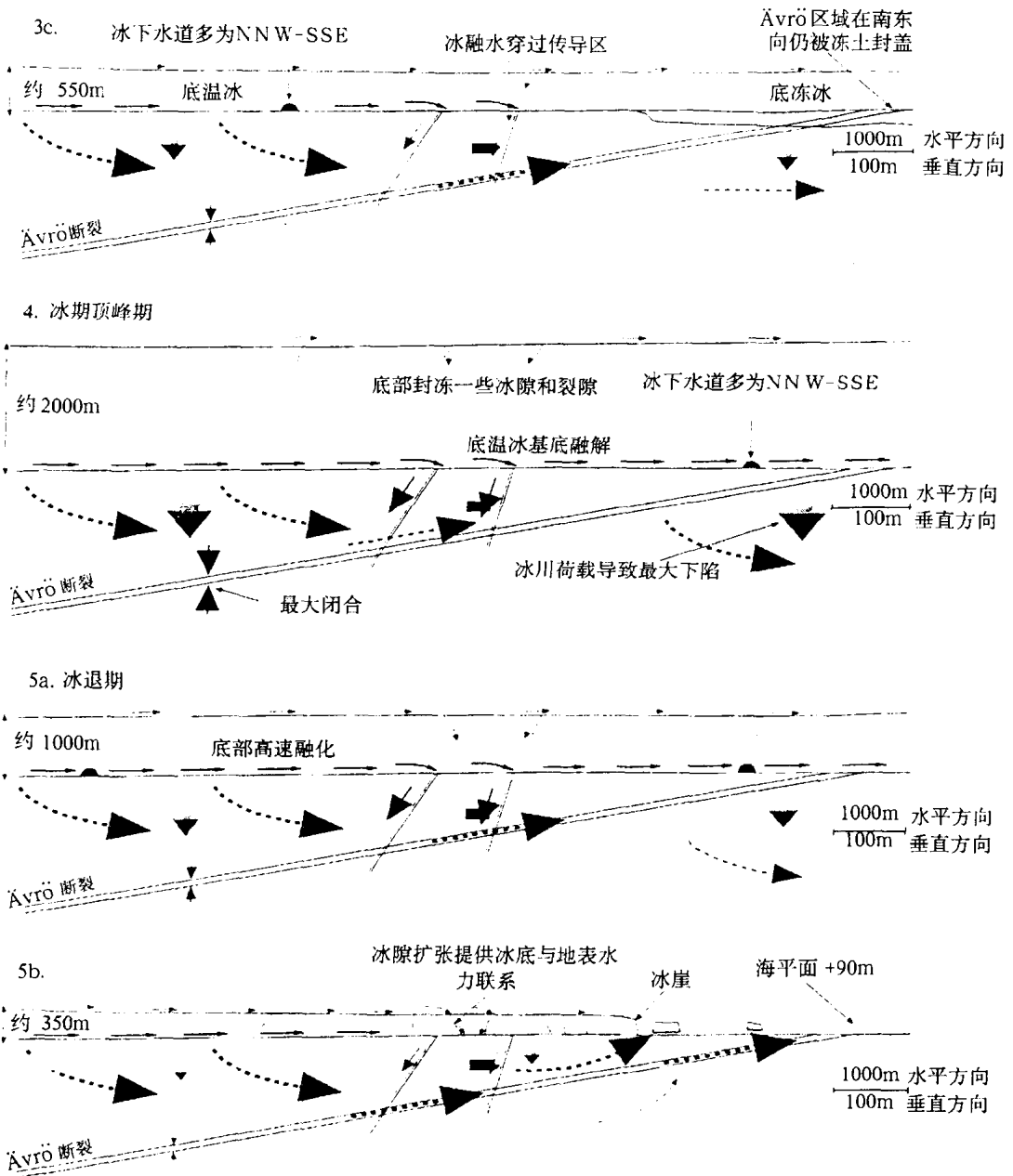
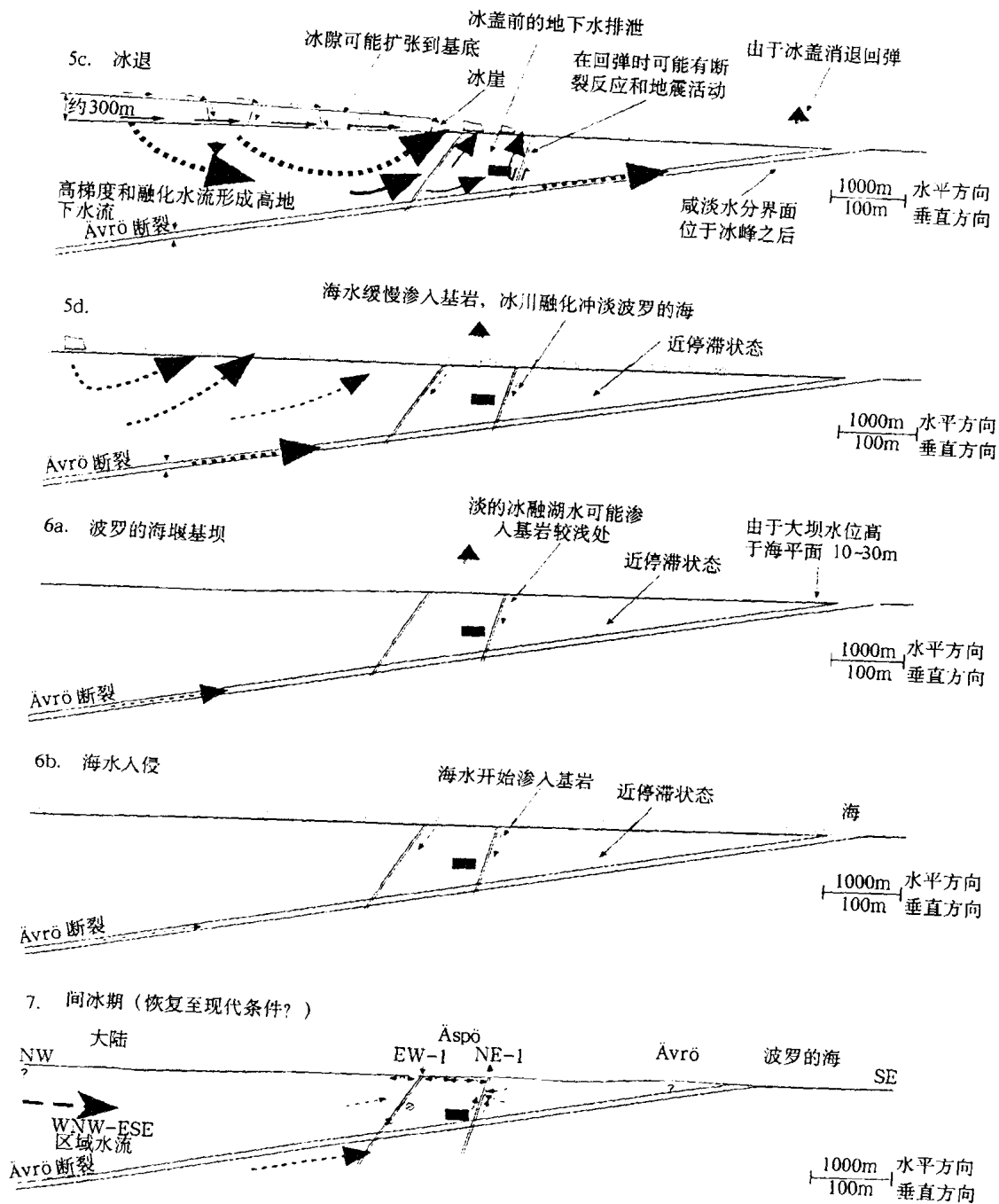


图5 通过冰川循环揭示发生在 Äspö 距今 5 万~7 万年的一系列情况
(现代,冰前期和冰川推进期)



续图 5 (冰进期,冰期顶峰期和冰退期)



续图 5 (冰退期, 被堵的波罗的海, 海水入侵和间冰期)

动方向。Äspö 地区的构造条件在冰川旋回中也认为是不变的。这样,冰川荷载或冰川引起的地壳均衡作用便成为影响基岩应力的唯一因素。冰原的形态表明,它在冰川旋回的早期和晚期,发育于一个几乎不变形的地层(结晶岩)基础之上,这在挪威,瑞典的大多数地区均是如此。但在欧洲内陆和波斯尼亚海湾,在冰川的繁盛期,乃至冰后退期^[10,25],冰原可能前进和后退到变形较大的地层之上。根据 Boulton 和 Payne 模拟^[11]的最大冰层厚度和冰原的水平延伸范围,并与南极圈和格林兰冰原相对比勾绘出冰原剖面多相态的叠加。例如,冰川旋回中,由于冰川波动或气候变化而引起的多次冰进和冰退以及冰舌和冰沟的形成等,本次研究均未考虑。除了魏克塞尔冰原的重现和影响斯堪的纳维亚的下次冰期的预测之外,冰原的温度和基底融化机制主要基于中纬度冰原模型^[41,19]。

在以下章节中需要讨论的序列分析概念模型示于图 5。

阶段 1:间冰期(现代阶段)

基本情况是一个不受冰冻层或冰川影响的相对温暖的间冰期。这与现代 Äspö 的情况相似。其剖面情况示于图 5 的阶段 1,并被 Smellie & Laaksoharju^[42]建模。剖面线基本定位在 NW-SE 方向(图 1)。假定地下 500m 深处有一假想的贮存场,在 Äspö 南东地区,只是该贮存场已于本次研究前关闭(停止运行)。目前,该区域的最大主应力基本呈 NW-SE 方向。尽管均衡反弹在斯堪的纳维亚仍有发生,但作为背景情况,冰川地壳均衡应力被认为等于零。

从建模角度,Äspö 现代地下水流条件已由 Smellie & Laaksoharju^[42]和 94 号场地^[40]简化。反映地形梯度的区域地下水流近于 NWW-SEE 方向,当地深部地下水水流方向与剖面线方向垂直。断裂带分别起到排泄和补给作用。

地下水水化学成分按¹⁸O,D 和 Cl 的含量(P. Glynn & C. Voss,1994)有 5 组:富含 NaHCO₃ 的现代水埋深约几百米;古老的,稀释的冰川融化水存在于 Äspö 北部相对封闭的浅层;高盐度的深层地下水存在于埋深大于 500m 的地方;中等含量的 4 000~6 000mg/L 的 Cl 化物水存在于 200~500m 深的地带;海水或具波罗的海水特征的水仅存在于 300m 以下的封闭地带。可以假定,这些水化学类型完全是早期冰川循环的结果,尽管这是不大可能的。

阶段 2:冰前期(约 48 000 年)

尽管被融化区隔离,Äspö 地区仍处于永冻区,其最大冰冻深度达 250m(图 5)。假设在断裂带 NE-1 形成融化区(永冻土层的不结冻裂口区),则可认为 EW-1 和 Ävrö 断裂带被深 250m 的冻土层封盖。显然,关于永冻层的连续性和融化区的空间分布尚存在一些不确定因素。尽管位于冰原北部前面发展的冰凸影响到 Äspö 地区,但此时的均衡隆起仍然可以忽略。虽然冰凸发展的程度尚有争议,但当冰原前缘扩展为大约 100km 时,Äspö 的冰凸可达数十米高。此时 Äspö 的海平面大约比现在低 50m,在冰川表面地形低凹的地方形成湖泊,或许这就是阶段 1 海洋一度占据的地方。如果湖泊在冰冻期前形成,冰冻后该地就可能是开放的融化区^[32]。在冰冻条件下,植被稀少,地表岩石裸露,仅在沿断裂出露发育的排泄不良的孤立低洼地带,有局部有机物集积,形成苔原沼泽。

在这个时期,冰川将不会直接侵袭 Äspö 的岩体,然而,随着冰原不断向 Äspö 扩展,挠性的冰凸将影响基岩中的应力分布^[35,39]。冰凸隆起将在随后而来的压缩荷载产生之前形成张性断裂或活动断裂。然而,在冰进过程中,尚无证据证明活动断裂的存在,因此本次研究对活动断裂不予考虑。但是,随着永冻层的不断发展,基岩裂隙充冰膨胀,附加应力将使裂隙扩