

KARST COLLAPSE IN NORTH CHINA

中国北方岩溶塌陷

贺可强 王 滨 杜汝霖 著



地质出版社

中国北方岩溶塌陷

贺可强 王 滨 杜汝霖 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是我国第一部较全面系统地论述中国北方岩溶塌陷的专著,系作者在该区长期工作的多项成果的系统总结。针对中国北方矿区开采排水和城市过量抽水等造成的严重危害,采用系统科学和非线性科学新理论技术相结合、理论分析与实验分析相结合、定性分析与定量分析相结合等方法,较深入地分析了中国北方岩溶塌陷形成的地质背景和环境因素,监测了典型岩溶塌陷的形成过程,较全面地总结了岩溶塌陷现状、特点及分布规律,并对覆盖型(层)岩溶塌陷的形成条件与动力因素、基本特征与分类、形成机理与评价、风险分区与区划、预测预报与防治等都进行了较详细的分析与探讨,其中在力学机制研究上根据极限平衡理论建立的公式和力学模型对塌陷区进行预测属前沿性创新成果。多方面深入系统的分析与论述,以及对中国南北方岩溶塌陷进行的多方面对比,使本书具有显著的区域性、时代性、实用性和针对性。

本书资料丰富、内容翔实、观点新颖、图文并茂,具有一定的理论深度和较高的学术价值,对在岩溶塌陷地区进行调查、监测、规划、预测、评价和治理等有重要的参考和借鉴价值。

本书可供从事岩溶地质、岩溶地貌、环境地质、水文地质、工程地质、地质灾害及生态地质等方面工作的科技、生产人员及有关大专院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国北方岩溶塌陷/贺可强等著. —北京:地质出版社, 2005. 11

ISBN 7-116-04592-9

I. 中... II. 贺... III. 岩溶—地面塌陷—研究—中国 IV. P642.252.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 099968 号

ZHONGGUO BEIFANG YANRONG TAXIAN

责任编辑:孙亚芸 周立君

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话:(010)82324508 (邮购部); (010)82324573 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zhs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm $\frac{1}{16}$

印 张:17 图版:4 面

字 数:410 千字

印 数:1—800 册

版 次:2005 年 11 月北京第一版·第一次印刷

定 价:65.00 元

ISBN 7-116-04592-9/P·2606 审图号 GS (2005) 925 号

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

序

岩溶（喀斯特）在中国分布广泛。在南方有云南石林、桂林山水、黄龙与九寨沟湖泊与钙华坝、长江三峡、黄果树瀑布等著名于世的岩溶景观；在北方太行山、燕山、吕梁山、山西高原、鲁中南山地等也发育有不同特色的岩溶景观。在南方，除了地表发育的奇特岩溶景观之外，地下也相应发育有奇异的洞穴系统，而在北方则发育由许多通道构成的一系列岩溶泉水系统。

由于过量开采岩溶地下水资源，开采各种与岩溶化地层相关密切的矿产资源，以及各种工程建设，都会诱发不良的地质环境效应，并产生岩溶塌陷。应当说，在自然界岩溶发育过程中，产生岩溶塌陷是自然的产物，但是由于人类开发活动，没有采取相应的防治措施，就会导致诱发与加剧岩溶塌陷的发生与发展，并危害到人们的生命财产，对生产建设造成损害。

我国最早出现的由工程建设所诱发的岩溶塌陷灾害，是于 1955 年建成的我国第一座大型水库——官厅水库所诱发的，后来经过调查研究，很好地得到处理解决。在北方后来也发生一系列岩溶地区水库的渗漏而诱发岩溶塌陷的现象，在开采煤炭资源时，产生岩溶塌陷，并造成危害也是较多见的。

中国南方的岩溶塌陷，可有多种类型，其分布也是很广泛的，可以说，有岩溶发育的地带都有天然岩溶塌陷现象发生。中国北方地区也广泛发育有岩溶塌陷现象，其中特别是还有碳酸盐岩与硫酸盐岩共存而产生的岩溶陷落柱现象。

对于南方岩溶塌陷，曾引起许多学者的关注，也有较多的论文与专著问世。但是，对于北方岩溶塌陷，虽然有许多文章成果也曾涉及，但专门论述岩溶塌陷的论著，尚是付之阙如。

今天，由贺可强、王滨和杜汝霖合著的《中国北方岩溶塌陷》，应当是我国第一部专门论述北方岩溶塌陷的论著。这本关于岩溶塌陷的论著，是作者在多年研究有关岩溶水文地质与岩溶塌陷的基础上，又广泛收集了有关北方岩溶塌陷的资料与研究成果，深入分析了有关北方岩溶塌陷的形成背景与环

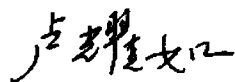
境,以及岩溶塌陷的形成过程,进而进行了我国北方岩溶塌陷区划,探索了有关的风险分区与评价。在这项研究中,作者们针对北方岩溶发育的特点,特别论述了覆盖岩溶塌陷的形成条件及有关动力学因素,建立了有关力学模型,对有关这类岩溶塌陷进行预警预报,提供了重要的力学机理分析方法基础。

总之,这本论述我国北方岩溶塌陷的论著,填补了我国岩溶研究方面的一个空白。书中提出的有关新论点、新认识,有助于今后对我国北方岩溶发育规律与岩溶塌陷的研究,以使上升到新的层次。这本论著中的丰富的内容与创新的观念,对我国今后在岩溶地区建设中,如何避免诱发有害的岩溶塌陷,也有重要的借鉴、参考及指导意义。

很高兴看到这一新的岩溶塌陷论著问世,这本论著定会在今后生产实践及理论探索中受到更多关注。

是以为序。

中国工程院院士



2005年8月16日

前 言

岩溶塌陷 (Karst Collapse) 是我国主要的地质灾害之一, 是岩溶地区因岩溶作用而发生的一种地面变形和破坏的灾害。它是指岩溶洞隙上方的岩、土体在自然或人为因素作用下引起变形破坏, 并在地面形成塌陷坑 (洞) 的一种岩溶动力地质作用与现象, 即岩溶的一种驱溶 (溶蚀或沉淀) 的动力地质作用和现象。

根据不完全统计, 全球已有 16 个国家存在严重的岩溶塌陷问题。

中国是世界上岩溶塌陷发育最广泛、受害严重的国家之一, 岩溶塌陷区面积约为 $330 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从黑龙江到海南岛, 从青海盐湖到东海之滨, 都有程度不同的岩溶塌陷分布。据不完全统计, 除上海、宁夏和新疆等一些地区外, 全国 24 个省 (市、自治区) 约有岩溶塌陷 903 处、塌陷坑 32000 个。给城市建设、交通运输、矿山开采、农田水利、生态环境及人民生活等都带来了严重的危害, 造成的年经济损失超过亿元。

中国北方全区面积约 $77 \times 10^4 \text{ km}^2$, 岩溶区面积约为 $47 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占研究区总面积的 60.9%, 是仅次于我国南方的第二大片岩溶塌陷发育广泛、受害严重的地区。

近 20 多年来, 随着中国北方国民经济的快速发展, 工农业生产和人民生活用水量增加, 抽取地下水与坑道排水与日俱增, 从而使岩溶塌陷灾害日益广泛和频繁出现, 成为中国北方岩溶区的主要环境地质灾害。据初步统计, 全区共有岩溶塌陷 104 处, 塌陷坑 5070 个, 不仅损坏了地表生态, 恶化了水文地质环境, 同时还影响着对各种资源的开发和利用, 严重阻碍着区域的社会经济建设和可持续发展。

中国北方广泛分布的石炭-二叠系煤矿和矽卡岩型铁矿的开采均不同程度受到奥陶系岩底板和顶板突水的威胁。因此, 如何在查清中国北方岩溶塌陷的形成机制和分布规律的基础上, 进而采取有效的预测、预报及防治措施, 从而实现矿山的安全生产和环境的综合治理, 是当前亟待探索研究和解决的具有重大理论与实际意义的课题。

作者等曾长期从事中国北方岩溶地区的区域地质、水文地质、工程地质、环境地质及灾害地质工作, 积累了大量岩溶塌陷的资料。近些年来, 在中国工程院重大咨询项目“中国可持续发展水资源战略研究”、山东省重大科技计划项目“山东省岩溶水资源可持续开发战略研究” (项目编号: 003150106)、国土资源部国土资源大调查项目“山东省枣庄市市中区地质灾害调查与区划” (项目编号: 20001230002194) 及山东省自然科学基金项目“滑塌型地质灾害非线性动力学研究” (项目编号: 2003E01) 的项目研究中, 又进一步对重点地区和典型实例进行了反复、深入、详细的调查与研究, 并得到了国家自然科学基金项目 (项目编号: 40472141) 的资助与支持。本书的完成就是上述多项成果系统的总结。

岩溶塌陷的研究是岩溶学与环境地质及工程地质相结合而发展起来的一门边缘交叉的

新学科,涉及诸多的学科领域。因此研究岩溶塌陷必须以整体的地球科学系统理论和现代岩溶学理论为指导,依据大量的调查研究资料,在深入分析我国北方岩溶及岩溶塌陷形成的地质背景及基本特征的基础上,着重从地球表面各圈层相互耦合的大气圈—水圈—生物圈—岩石圈的关系及人类活动相结合的角度来探讨岩溶塌陷的形成与发展,从而进一步提出覆盖型岩溶塌陷的形成是水—土—岩—气多相综合体系趋向平衡动力调整的观点,并在岩溶塌陷的分类和分布规律及形成机制的基础上明确提出了对岩溶塌陷的预测、预报及防治对策。

本书是我国第一部具有显著区域特色的论述中国北方岩溶塌陷的专著。它在前人工作的基础上以丰富的实际资料和较高的工作程度,采用系统科学和非线性科学新理论与新技术相结合、理论分析与试验分析相结合、定性分析与定量分析相结合的方法,较全面地收集了本区岩溶塌陷的资料,较深入地分析了塌陷区的背景条件 and 环境因素,监测了典型岩溶塌陷的形成过程,详细地总结了岩溶塌陷的现状,并对覆盖型岩溶塌陷的形成条件和动力因素、基本特征和分类、形成机制及区划、风险分区与评价、预测预报与防治以及中国南北岩溶塌陷对比等方面都进行了较深入的探讨,从而使覆盖型岩溶塌陷的研究在理论和方法上较以前有显著的提高和进展,如补充发现岩溶塌陷的形成过程具有阶段性、同步性、持续性、周期性及重复性等特征。特别应该提出的是,在力学机制研究基础上,根据极限平衡理论建立的公式和力学模型对塌陷区进行预测属前沿性的创新成果,具有重要的理论与实际意义。

本书对我国北方特有的古岩溶塌陷(陷落柱)进行了较以前更为广泛全面、系统、详细的分析与论述,并取得了规律性的认识。

所有这些不仅填补了我国北方在这一研究领域的一些空白,充实了岩溶塌陷的分类和内容,还对加强我国区域岩溶塌陷研究及岩溶塌陷新学科理论体系的建立和发展等都会起到一定的推动作用。因此,本书具有一定的理论深度和较高的学术价值。

本书在撰写过程中承蒙中国地质科学院桂林岩溶地质研究所崔光中研究员、王福星研究员、孙常英研究员,中国地质科学院正定水文地质工程地质研究所张发旺研究员,中国地质科学院成都地质矿产研究所焦淑沛研究员,山东省国土资源厅刘彦博教授级高级工程师,山西省地质矿产厅靳援军高级工程师,中国科学院地质与地球物理研究所万志清博士,山东科技大学高宗军教授,鲁南地质工程勘察院万继涛高级工程师,石家庄经济学院谭绩文教授及山西省地矿局第一水文地质工程地质队等都为本书提供了部分宝贵资料,特别是中国工程院院士卢耀如教授在百忙中为本书撰写了序言并给予了高度评价。在此,对他们所给予的关怀、鼓励与支持表示衷心的感谢。

山东省地质环境与效应工程技术研究中心白建业、周敦云、郭栋同志及研究生张永平、陈淑奎、王启胜、王荣鲁等同学参与了本书图件的清绘与文字整理工作,对他们所付出的劳动也表示衷心的感谢。

本书由青岛理工大学贺可强、石家庄经济学院王滨和杜汝霖共同撰写而成,贺可强负责大部分章节的撰写及全书的纂编与定稿工作。由于现有资料和作者水平所限,书中难免存在这样或那样的问题,敬请读者批评和指正。

作 者

二〇〇五年七月于青岛

目 录

序 前 言

第一章 岩溶塌陷研究概况	(1)
第一节 岩溶塌陷的概念	(1)
第二节 覆盖型(层)岩溶塌陷形成的一些特点	(2)
第三节 中国北方岩溶塌陷的分布及危害	(3)
第四节 国内外岩溶塌陷研究历史、现状及展望	(13)
参考文献	(18)
第二章 中国北方岩溶塌陷形成的地质背景	(20)
第一节 中国北方地理概况	(20)
第二节 可溶岩的岩石类型	(23)
第三节 中国北方岩溶水动力条件	(26)
第四节 中国北方区域构造基本轮廓	(32)
第五节 生物对岩溶发育的作用和影响	(35)
第六节 中国北方第四系沉积物特征	(39)
参考文献	(44)
第三章 岩溶塌陷形成的基本条件和动力因素	(45)
第一节 岩溶塌陷形成的基本条件	(45)
第二节 地下水环境变化与岩溶塌陷	(50)
第三节 岩溶塌陷形成的基本动态平衡关系	(54)
参考文献	(57)
第四章 中国北方岩溶塌陷的基本特征及分类	(58)
第一节 中国北方岩溶塌陷的基本特征	(58)
第二节 中国北方岩溶塌陷的分类	(63)
第三节 中国北方岩溶塌陷的典型实例	(66)
参考文献	(108)
第五章 中国北方岩溶塌陷形成机理与塌陷预测模型	(110)
第一节 岩溶塌陷预测与评价现状概述	(110)
第二节 岩溶塌陷的基本预测方法与适用条件	(111)
第三节 岩溶塌陷形成的机理与时空阶段性	(116)
第四节 土洞的形成机理与临界土洞高度	(122)
第五节 土洞稳定性力学评价模型	(126)

第六节 抽水型岩溶塌陷力学预测模型	(129)
第七节 渗压效应型岩溶塌陷的力学预测模型	(132)
第八节 岩溶塌陷的神经网络预测模型	(145)
参考文献	(149)
第六章 中国北方岩溶陷落柱的发育特征及其成因	(152)
第一节 古岩溶陷落柱的概念与分布	(152)
第二节 岩溶陷落柱的形态及其结构特征	(158)
第三节 古岩溶陷落柱形成的基本条件及其形成时期	(163)
第四节 古岩溶陷落柱典型实例	(166)
第五节 古岩溶陷落柱的突水问题	(174)
第六节 古岩溶陷落柱的成因机制简述	(179)
参考文献	(182)
第七章 中国北方和南方岩溶塌陷的对比	(183)
第一节 中国岩溶塌陷的基本概况	(183)
第二节 中国岩溶塌陷的地质特征	(186)
第三节 中国北方和南方岩溶塌陷的差异	(187)
参考文献	(195)
第八章 中国北方岩溶塌陷的区划	(196)
第一节 中国北方岩溶塌陷区划的基本原则与方案	(196)
第二节 各级区划的基本特征及发展趋势	(201)
参考文献	(205)
第九章 中国北方岩溶塌陷风险分区与评价	(206)
第一节 岩溶塌陷风险评价分区与评价概述	(206)
第二节 岩溶塌陷风险评价	(209)
第三节 典型岩溶塌陷区风险分区与评价实例	(214)
参考文献	(227)
第十章 中国北方岩溶塌陷的危害及防治对策	(228)
第一节 岩溶塌陷对资源、环境与可持续发展的危害	(228)
第二节 中国北方岩溶塌陷的预防和监测预报	(237)
第三节 中国北方岩溶塌陷的勘察与治理方法	(243)
第四节 典型岩溶塌陷点的勘察与治理实例	(247)
参考文献	(259)
后 记	(261)
部分岩溶塌陷图片	

Contents

Preface

Introduction

Chapter 1	General situation of karst collapse research	(1)
Section 1	Concept of karst collapse	(1)
Section 2	Some features of overburden karst collapse occurrence	(2)
Section 3	Distribution and damage of karst collapse in north China	(3)
Section 4	History, present situation and future of karst collapse research of home and abroad	(13)
Chapter 2	Geological background of karst collapse occurrence in north China	(20)
Section 1	General geographic situation in north China	(20)
Section 2	Types of soluble rock	(23)
Section 3	Dynamic condition of karst water in north China	(26)
Section 4	Basic outline of the regional tectonic structure in north China	(32)
Section 5	Action and influence of biology to karst development	(35)
Section 6	Feature of Quaternary system in north China	(39)
Chapter 3	Basic condition and dynamic factor of karst collapse occurrence	(45)
Section 1	Basic condition of karst collapse occurrence	(45)
Section 2	Ground water environment change and karst collapse	(50)
Section 3	Basic dynamic equilibrium relation of karst collapse occurrence	(54)
Chapter 4	Basic feature and classification of karst collapse in north China	(58)
Section 1	Basic features of karst collapse in north China	(58)
Section 2	Classification of karst collapse in north China	(63)
Section 3	Typical examples of karst collapse in north China	(66)
Chapter 5	Formation mechanism and prediction model of karst collapse in north China	(110)
Section 1	Present situation of karst collapse prediction research and evaluation	(110)
Section 2	Basic prediction methods and their suitable condition of karst collapse	(111)
Section 3	Mechanism and time & space stages of karst collapse formation	(116)
Section 4	Mechanism and critical height of soil cavities	(122)

Section 5	Mechanical evaluation model of soil cavity stability	(126)
Section 6	Mechanical prediction model of karst collapse induced by pumping	(129)
Section 7	Mechanical prediction model of karst collapse induced by seepage of rainfall	(132)
Section 8	Nerve net prediction model of karst collapse	(145)
Chapter 6	Origin and development feature of palaeo-karst collapse pillars in north China	(152)
Section 1	Concept and distribution of palaeo-karst collapse pillars	(152)
Section 2	Shape and structure of palaeo-karst collapse	(158)
Section 3	Basic condition and formation time of palaeo-karst collapse pillars	(163)
Section 4	Typical example of palaeo-karst collapse pillars	(166)
Section 5	Water invasion problem of palaeo-karst collapse pillars	(174)
Section 6	Brief introduction of the mechanism and origin of palaeo-karst collapse pillars	(179)
Chapter 7	Comparison of palaeo-karst collapse between north China and south China	(183)
Section 1	General situation of karst collapse in China	(183)
Section 2	Geological features of karst collapse in China	(186)
Section 3	Differences of karst collapse between north China and south China	(187)
Chapter 8	Regional division of karst collapse in north China	(196)
Section 1	Basic principles and plans of karst collapse division in north China	(196)
Section 2	Basic features and development trends of different divided levels	(201)
Chapter 9	Risk division and evaluation of karst collapse in north China	(206)
Section 1	General introduction of risk division and evaluation	(206)
Section 2	Risk evaluation of karst collapse	(209)
Section 3	Classification of karst collapse strength and determination of risk analysis index	(214)
Chapter 10	Damage and prevention plan of karst collapse in north China	(228)
Section 1	Damage of karst collapse to the sustainable development of the resource and environment	(228)
Section 2	Monitoring, prediction and prevention of karst collapse in north China	(237)
Section 3	Investigation and control methods of karst collapse in north China	(243)
Section 4	Investigation and control examples of the typical karst collapse	(247)
Postscript		(261)
Pictures concerned of karst collapse		

第一章 岩溶塌陷研究概况

第一节 岩溶塌陷的概念

岩溶 (Karst) 是在以碳酸盐类为主的可溶性岩石分布区, 由于地下水及地表水对该种可溶岩石以溶蚀为主要地质作用, 并由此产生的一系列特殊的地质、地貌现象的总称。这种特殊的地质地貌现象包括溶蚀洞穴、溶蚀沟谷、溶蚀裂隙、地下暗河、落水洞、溶蚀洼地、溶蚀峰林等。在岩溶发育地区, 由于地下溶洞、暗河、溶蚀裂隙等溶蚀现象的存在, 因而具有特有的工程地质和环境地质灾害。

岩溶塌陷 (Karst Collapse) 是岩溶地区因岩溶作用而发生的一种地面变形和破坏的灾害, 是我国主要的地质灾害之一。它是指岩溶洞隙上方的岩、土体在自然或人为因素作用下引起变形破坏, 并在地面形成塌陷坑 (洞) 的一种岩溶动力地质作用与现象, 即岩溶的一种驱溶 (溶蚀或沉淀) 的动力地质作用和现象。岩溶塌陷可分为基岩塌陷和上覆土层塌陷两种^①, 前者由于下部岩体中的洞穴扩大而导致顶板岩体的塌落, 后者则由于上覆土层中的土洞顶板因自然或人为的因素失去平衡而产生下陷或塌落。由基岩洞穴发展成的塌陷, 常产生深达十几米到数百米的井筒状塌陷漏斗; 由土洞发展成的塌陷, 也产生深几米到10~20m的圆形陷坑, 或碟形、盆形、锥形塌陷漏斗 (袁道先, 1998)。

岩溶塌陷实质上是在地球运动和演化过程中由内营力与外营力相互制约、相互作用及影响的结果, 特别是地壳表层各层圈 (包括气圈、水圈、生物圈及岩石圈) 的物质运动及相互作用产生变异的结果。因此可以说, 岩溶塌陷是水-土-岩-气多相综合体系从一种平衡向另一种平衡动力调整的结果, 其形式、发育和分布受到特定的地质、水文地质条件等因素的控制。

岩溶塌陷的形成一般具备以下三个条件。

(1) 发育于可溶岩中的裂隙或洞穴

溶蚀裂隙和洞穴是地面塌陷物质的运移通道或储存场所, 又是水流或气流活动的途径, 它们是塌陷形成的基础。

(2) 裂隙和洞穴上方的岩土体覆盖层

岩溶塌陷体既可以是组成岩溶洞隙顶板盖层的各类岩石, 也可能是覆盖于可溶岩之上的各类松散土层。在土层塌陷中, 洞穴或大的裂隙、管道上覆土层的物理力学性质、厚度等将决定其形成的土拱的稳定性、抗潜蚀和吸蚀能力。

(3) 水动力条件

不管是地表水的入渗、降雨, 还是人类对地下水运动的影响 (如抽排地下水), 都会

① 基岩塌陷和土层塌陷为广义的岩溶塌陷, 本书后文所说岩溶塌陷主要为狭义的塌陷, 即土层塌陷。

导致水动力场的改变,成为岩溶塌陷的触发(诱发)因素。我国一些塌陷较严重的地段(如河北秦皇岛柳江供水源地自1987年以来,不到一年时间产生塌陷286个)都是人为地改变其水动力条件的结果。

岩溶塌陷也是一种在特殊条件下岩溶作用及其发展到一定阶段的产物,并形成有特色的岩溶环境,因此可形成于不同的岩溶历史时期,既有古岩溶塌陷,也有现代岩溶塌陷。古至任何地质时期,新至今日的每时每刻。空间的分布也很广泛,地球上凡是有碳酸盐岩等可溶岩类分布的地区,都有可能发生岩溶塌陷。

根据可溶类岩石的出露情况可将其分为裸露型岩溶、覆盖型(层)岩溶及埋藏型岩溶三大类。

裸露型岩溶 指可溶岩类基本上直接出露地表,没有或很少被第四系松散沉积物覆盖,常形成一些岩溶山地与高原。

覆盖型(层)岩溶 指可溶类岩石大部分被第四系沉积物覆盖,覆盖率一般在70%以上,仅局部零星见有基岩出露,覆盖层一般小于30m,最厚不大于100m。

埋藏型岩溶 指可溶岩被非可溶岩地层埋藏,深达数十至上千米。如我国北方山西高原有广大面积的裸露型岩溶,它的东西两侧广泛分布着埋藏型或覆盖型(层)岩溶,因此,成为我国北方重要的岩溶塌陷地区。

岩溶塌陷研究是岩溶学与环境地质及工程地质相结合而发展起来的一门边缘交叉学科,涉及诸多的学科领域,如区域地质学、构造地质学、水力学、水文地质学、地下水动力学、土质学、岩石学、岩石力学、地质灾害学、地球化学、生物学及人文科学等。

因此,研究岩溶塌陷必须以整体的地球科学系统理论和现代岩溶学理论为指导,依据大量的调查研究资料,在深入分析我国北方岩溶及岩溶塌陷形成的背景及基本特征时,着重从地球表面各圈层相互耦合的大气圈-水圈-生物圈-岩石圈的关系,及与人类活动的结合上来探讨岩溶塌陷的形成与发展。并在总结中国北方岩溶塌陷的分类和分布规律及形成机制的基础上,进一步提出对岩溶塌陷的预测预报等防治对策。

第二节 覆盖型(层)岩溶塌陷形成的一些特点

作为覆盖型(层)岩溶发育区的特殊地质灾害,岩溶塌陷不同于采矿造成的地面塌陷,也不同于开采地下水造成的大规模地面沉降,它具有其独特的特点。

(1) 岩溶塌陷的发育发生具有渐近性与突发性相结合的特点

岩溶塌陷是覆盖层土体在各种动力长期作用下,不断失稳破坏的结果。因此,地面塌陷坑的形成往往不是一蹴而就的,而是经过长期的孕育与盖层土体的反复破坏最终形成的。就其时空发育过程,可划分为内部塌陷与地表塌陷两个阶段;内部塌陷覆盖层内部土体破坏、土洞发展的过程,具有渐近性、长期性的特点;地表塌陷是土洞发育至地面,造成地面土体破坏,形成地表塌陷坑的阶段,具有突发性、连续性的特点,速度很快,有些塌陷是瞬时发生的。

(2) 潜伏性

由于岩溶塌陷是从基岩开口洞穴向上逐渐发展的,在造成地表塌陷之前,其发育过程

是在覆盖岩土体内部进行的,即使借用相关仪器也很难查清其发育发展情况、规模大小、可能造成地表塌陷的时间及地点,因此具有发展过程潜伏性的特点。

(3) 治理难度大、反复性强

岩溶塌陷由于具有突发性及潜伏性特点,所以使得对其的预防工作难以顺利进行,且收效甚微。同时由于塌陷区多为地下水强渗流区,加之地表降雨、地面积水下渗补给岩溶水等因素,已塌地区的塌陷坑即使回填后,重新塌陷的可能性也很大。在地下水位降幅较大的时段,如果适逢强降雨,岩溶塌陷极易在已发部位复发,形成二次、三次甚至多次塌陷。

(4) 发生规模大、速度快、危害大

岩溶塌陷大部分是由于人工过量抽取地下水,造成开口岩溶-地下水动力-盖层土体系统稳定失衡所致,且塌陷多发生在水源地降落漏斗范围内。因此,塌陷多发区均为用水集中、人口稠密的地区。在这些地区,只要其具备发生的三个要素,随时都有可能发生塌陷。而且一旦塌陷发生,很容易形成塌陷群体,使塌陷面积扩大。且塌陷处理后易复发,加之其发生具突发性、潜伏性,而使防治工作难以采取有利的措施,对土地资源、矿山资源、水资源及人类居住生活环境的可持续发展造成很大危害。

由于以上特点,近几十年来,岩溶塌陷对人们正常的生产、生活及人身财产安全造成了严重威胁,引起了广泛关注。

第三节 中国北方岩溶塌陷的分布及危害

一、中国北方岩溶塌陷的分布

近几十年来,随着国民经济的快速发展、工农业生产和人民生活用水量的增加,抽取地下水与坑道排水与日俱增,从而使岩溶塌陷灾害日益广泛和频繁出现,造成严重的经济损失和社会影响,成为岩溶区的主要环境地质灾害。据不完全统计,全球已有 16 个国家存在严重的岩溶塌陷问题。我国岩溶塌陷区分布面积约为 $330 \times 10^4 \text{ km}^2$ (高庆华等, 2003), 是世界上岩溶塌陷发育最广泛的国家之一。

中国北方的地理位置为北纬 $42^\circ \sim 33^\circ 29' 44''$, 东经 $126^\circ 11' 26'' \sim 108^\circ 50' 46''$ 。西起黄河及渭东北部,东临渤海,北接燕山及长白山,南邻秦岭、伏牛山及淮河以北一线,包括冀、晋、鲁、辽东半岛与辽西、豫西、豫北、渭北东部、徐淮及京、津、唐等重要经济区。全区面积 $77 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中碳酸盐岩分布面积 469397 km^2 , 占研究区总面积的 60.6%。从全国范围来说,北方碳酸盐岩如此大面积集中分布,是仅次于南方的第二大片区域,为区内现代岩溶及古岩溶的发育提供了必要的物质基础(图 1-1)。

据初步统计,除上海、宁夏、新疆等地以外,全国在 24 个省(市、区)内共有岩溶塌陷 903 处,塌陷坑约 32000 个^①。其中尤以南方的桂、黔、湘、赣、川、滇等省最为发

^① 雷明堂(2004)在《中国工程地质世纪成就》一书中指出:“全国共有 22 个省(市、自治区)发生岩溶塌陷 1400 例以上,塌陷坑数超过 4 万个。”

育,北方则以冀、鲁、豫、晋、辽等省区为发育,在京、苏、皖等地也发生过不同程度的岩溶塌陷灾害。

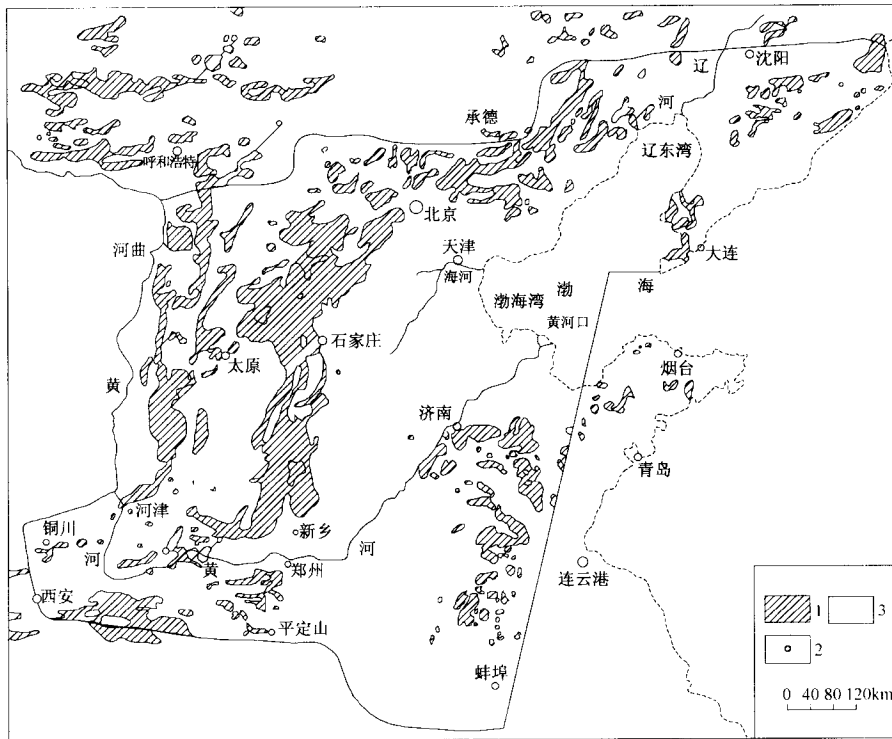


图 1-1 中国北方研究区可溶岩(碳酸盐岩与石膏)分布图

1—碳酸盐岩; 2—石膏及硬石膏; 3—非可溶岩

中国北方全区共有现代岩溶塌陷 65 处, 塌陷坑总共超过 1400 个; 古岩溶塌陷(陷落柱) 38 处, 总数为 3654 个^①(图 1-2, 表 1-1, 表 1-2)。

表 1-1 中国北方岩溶塌陷统计表

省市区	现代塌陷								古塌陷		总 计	
	矿坑排、突水		抽水		其他		小计		陷落柱为主			
	处	个	处	个	处	个	处	个	处	个	处	个
辽宁	3	27	4	22	5	206	12	255	1	1（古）	13	256
河北	7	24	2	306	3	123	12	453	8	214	20	667
山西	5	5					5	5	19	3402	24	3407
山东	5	151	9	448	1	1	15	600	1	1（古）	16	601
河南	3	40					3	40			3	40
陕西	1	1			1	6	2	7	1	1	3	8
江苏	2	2	3	9			5	11	7	34	12	45
安徽	7	32	2	11			9	43	1	1	10	44
北京					2	2	2	2			2	2
统计	33	282	20	796	12	338	65	1416	38	3654	103	5070

① 古岩溶中有两个点加“(古)”字, 该点可能不是陷落柱塌陷, 暂以古岩溶塌陷处理。

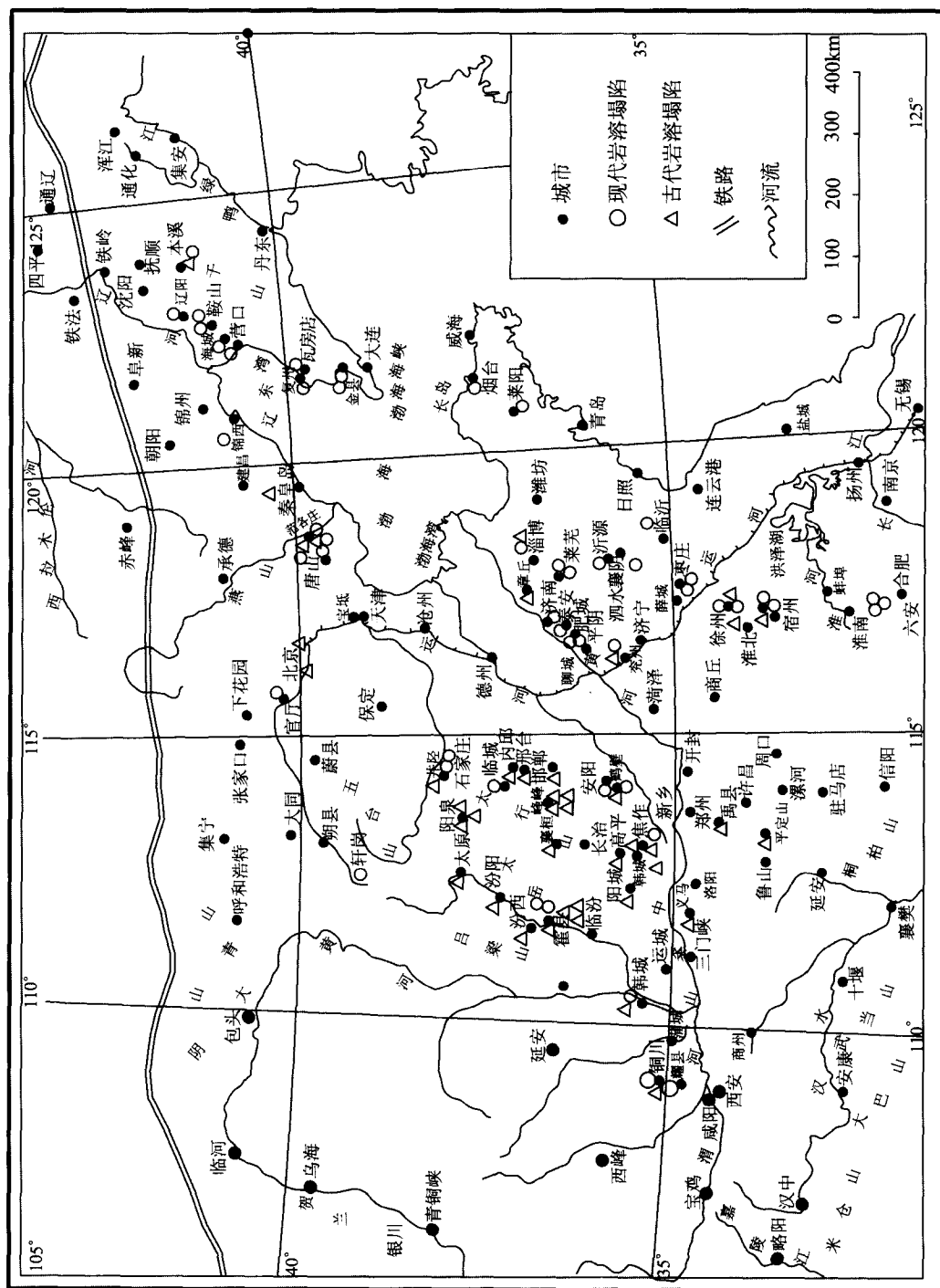


图1-2 中国北方岩溶塌陷分布图

现代岩溶塌陷中以水源地抽水塌陷较为强烈,共20处796个坑,各占现代塌陷总数的30.3%和56.8%;其次为矿坑排、突水塌陷,共34处,坑数达282个,各占现代塌陷总数51.5%和19.9%。

表1-2 中国北方岩溶塌陷类型一览表

省市	类型	序号	地点	塌陷	情况简介	资料来源
辽宁省	排水	1	辽宁锦西杨家杖子	1个	由于矿区采矿、排水造成小规模岩溶塌陷	杨文才,1998
		2	辽宁金县石棉矿区	18个	是发育于震旦系的塌陷实例,形成长2km、宽不足100m的塌陷带,18个坑	胡海涛等,1995,1990
		3	辽宁复州湾粘土矿	8个	是石炭二叠系排水疏干实例,共产生8个塌陷	山西省地矿局第一水文队资料,1990
	抽水	4	辽宁大连金州区	多处	过量开采地下水出现多处塌陷,1971年金州区吴家屯形成大片土地塌陷	杨文才,1998
		5	辽宁辽阳市西南区	1个	过量开采地下水形成塌陷,地下水位下降29m	钟以章,1991
		6	辽宁鞍山西郊水源地	多处	常年开采地下水,形成两个地下水降落漏斗,多处塌陷	杨健,2000
		7	辽宁瓦房店市三家子	17个	塌陷影响范围达4km ² ,出现17个坑,最大直径23m,深达10m	山西省地矿局第一水文队资料,1990
	其他	8	辽宁海城市	200多个	1975年地震后,震区孤山等地出现溶洞陷坑,一般直径3~4m,孤山一带有200多个陷坑	钟以章,1991
		9	辽宁鞍山市高占屯和双台子	2处	1975年,海城地震后有两地出现直径约10m的陷坑	钟以章,1992
		10	辽宁鞍山市解放路	1个	1984年暴雨后出现陷坑,由于降雨使覆盖层过饱和含水,上部压力剧增引起陷坑(荷载塌陷)	钟以章,1992
		11	辽宁本溪溪湖区	2处	据本溪湖骆驼岭兴安村资料记载有岩溶塌陷	钟以章,1991
		12	辽宁辽阳参窝水库	1个	蓄水三个月诱发地震,三年后发生4.8级地震,由地震诱发岩溶塌陷,部分民房损坏,大坝高50m,震中在岩溶区内	张英俊,1985
	古岩溶	13	辽宁本溪彩电煤矿	1个	据记载在彩电煤矿有古岩溶塌陷	钟以章,1991

注:凡表内注明处数的则按处数计算处,未注明的则按1处计算,多处则按2处计算。凡处中未注明坑个数的都按1处1坑计算。