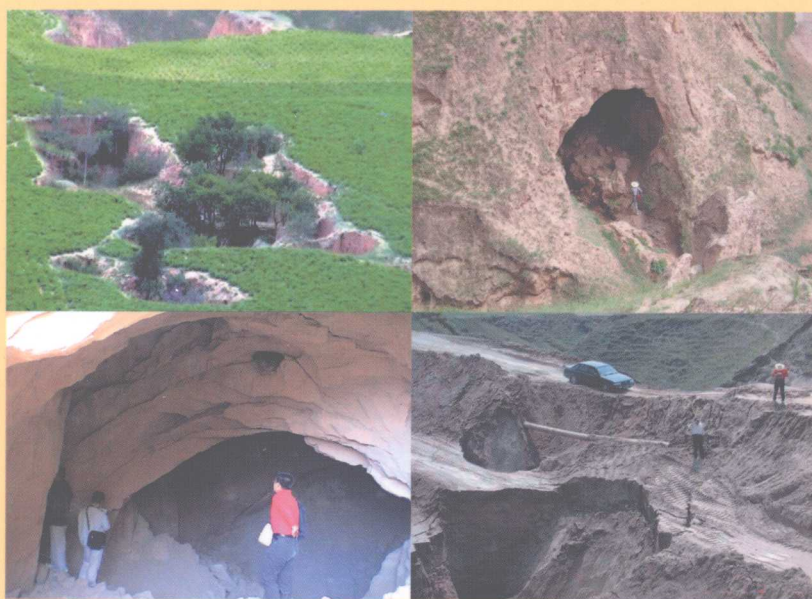


黄土洞穴灾害

彭建兵 李庆春 陈志新 等/著
刘永华 范文 李喜安



科学出版社
www.sciencep.com

国家西部交通建设科技项目资助

黄土洞穴灾害

彭建兵 李庆春 陈志新 等 著
刘永华 范文 李喜安

科学出版社

北京

内 容 简 介

黄土洞穴灾害是黄土地区的一种独特的地质现象,也是一种特殊地质灾害。在干旱半干旱气候的黄土高原,黄土洞穴发育普遍、灾害严重,不仅造成了严重的水土流失,而且对黄土地区农田基本建设、公路工程、铁路工程、输油、输气输水管道以及厂房、民居等各类工业与民用建筑均构成了不同程度的威胁。本书是关于黄土高原洞穴灾害的一部系统性较强的专著。全书分为三篇,第一篇为黄土洞穴研究的基本理论;第二篇为黄土洞穴灾害探测的技术方法;第三篇为黄土洞穴灾害防治的理论技术。本书是国内外第一部系统研究黄土洞穴灾害的学术专著。

本书内容丰富,涉及黄土灾害学、黄土地质学、黄土工程地质、黄土力学、岩土工程、地球物理勘探等学科,可供地质学、工程地质学、水文地质学、水土保持、建筑工程、岩土工程、交通工程、环境工程、地球物理勘探等领域的科研人员、技术人员、教师、研究生和大中专院校学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

黄土洞穴灾害/彭建兵等著. —北京:科学出版社, 2008

ISBN 978-7-03-020209-3

I. 黄… II. 彭… III. 黄土结构-洞穴-灾害-防治 IV. TU929
P642.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 169994 号

责任编辑:谢洪源 彭胜潮 韩 鹏/责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008年1月第一次印刷 印张:24 1/4 插页:8

印数:1—1 000 字数:554 000

定价:89.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

前言

我们供职的长安大学坐落在黄土高原南部，古城西安大雁塔脚下。多年来，我们一直以生活、工作在这片神奇的黄土地为幸、为荣。

黄土高原，西起龙羊峡，东至桃花峪，北抵毛乌素沙漠，南达秦岭北坡，面积达 53 万 km^2 ，占中国陆地面积的 5.5%。这是一片十分神奇的土地：无边黄土纷纷下，从天而降的黄土，厚厚地广覆着这片土地，沃野千里，谷稼殷积，滋养了中华民族的祖先，养育了世世代代黄土地人；“黄河之水天上来”，奔腾不息的黄河，蜿蜒地流淌在它的腹地上，切割着、分离着这片土地，同时又用她宽大的怀抱和甘甜的乳汁哺育了黄河两岸人民，蕴育了数千年的黄河文明；“九曲黄河万里沙”，百万年尺度的侵蚀，不仅源源不断地为黄河提供泥沙，还将这片土地的面貌雕刻得沟壑纵横、满目疮痍。

正是由于黄土高原土性复杂、气候特殊、地形破碎、沟壑纵横、环境脆弱，所以崩塌、滑坡、泥石流和水土流失等地质灾害在这片千疮百孔的土地上疯狂肆虐，严重地危及着各类工程建设及人民生命财产的安全，制约着当地经济的可持续发展。这些地质灾害，由于其危害严重、影响面大，越来越受到当地政府和人民的重视。但长期以来，人们却忽视了另一种隐患——黄土洞穴灾害。

黄土洞穴在水土流失方面作为一种独特的侵蚀方式，其危害极大。据有关文献记载（王景明，1990；王斌科，1989），宁县马槽沟在 1960 年一次暴雨中，因沟头发生洞穴侵蚀而使得沟头一次向塬畔推进了 40m；武山县 1959~1961 年梯田上平均发生洞穴 85 个/ $(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，合侵蚀量 $200\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ；邓家堡在 1962 年一场暴雨中，288 亩梯田上形成陷穴 193 个（含陷穴坍塌而成的地边壑），合侵蚀量 $6300\text{t}/\text{km}^2$ 。2002 年野外调查我们发现，四十里铺公路边的十余亩梯田中竟发育各种洞穴 153 个，合侵蚀量 $8000\text{t}/\text{km}^2$ 。这些洞穴不仅造成严重的水土流失，同时还对梯田工程、蓄水灌溉工程等农田基本建设构成了严重危害。

黄土高原上的公路大都直接建在黄土层之上，加之其线性分布特点，使得黄土洞穴对公路的危害显得更为严重，对公路的破坏屡见不鲜。如 211 国道甘肃环县境内 K217+600 处，2002 年 8 月 4 日一场大雨后，公路黄土路基中的暗穴塌陷 30 多米，后虽经抢修但因降雨而再次塌陷，造成交通中断达 15 天。甘肃庆阳—西峰国道 K13+800~K13+812 段，因暗穴塌陷所引发的黄土洞穴灾害 46 处，最大的一个陷穴直径竟达 21.9m，深度达到 11m，由于黄土洞穴过于密集、危害太大，迫使该段公路最终报废而不得不改线；定—西公路四十里铺段，200m 长度范围内的路肩、路面上竟发育各种黄土洞穴 100 余个；甘肃静宁—秦安公路在 2000 年曾发生汽车行驶诱发路基下暗穴的塌陷，导致汽车掉进陷坑中。据对甘肃庆阳公路总段公路水毁资料的随机抽查和不完全统计，2002 年仅 4~7 月，G211、G309、S202 等公路的庆阳段因黄土暗穴造成的重大公路灾害点达到 58 个，直接损失 400 余万元；定西地区每年 7~10 月，因暴雨形成的公

路黄土暗穴塌陷、边坡破坏及涵洞破坏,其养护和应急灾害处理费用高达 8000 余万元,由此而造成的交通中断及交通事故等所带来的损失则更为惨重。

黄土洞穴对铁路运输的危害也较为严重,如陇海铁路甘草店段在 1954 年 8 月因暴雨使得路基中发育的暗穴塌陷,造成路面钻洞,竟引起客车颠覆,严重危害了人们的生命财产。除此之外,黄土洞穴还对黄土地区的输油、输气及输水管道以及拦蓄水工程、厂房、民居等各类工业与民用建筑均构成了不同程度的威胁。

黄土洞穴的危害还表现在影响着其他地质灾害的产生和发展,并最终水土流失、崩塌、滑坡、泥石流等各种地质灾害的形式表现出来。在黄土洞穴广为分布的黄土高原,许多黄土崩塌、滑塌以及中小型滑坡与黄土洞穴的发生和发展关系密切,甚至互为因果。黄土边坡随其内部黄土洞穴的发生、发展而滑塌破坏,这种现象在黄土洞穴广为分布的黄土高原地区尤为普遍。另外,作为黄土高原地区地表水的一种排泄通道,黄土暗穴也为黄土地区的泥石流灾害提供了水源和物源。

世界上关于黄土洞穴问题的最早提法始于 19 世纪 20 年代,其着眼点是将黄土洞穴作为一种土壤侵蚀的独特方式进行研究。我国关于黄土洞穴问题的研究开始于 20 世纪中期,其间我国一些土壤学家和地理学家针对黄土洞穴侵蚀成因、分布特征提出了一些初步看法,形成了机械侵蚀成因说、化学溶蚀成因说以及多因素作用成因说的成因观点和黄土喀斯特现象与特征的描述。近二三十年以来,由于工程领域的迫切需要,作为与黄土洞穴问题相似的一门学科——塌陷学,应运而生。在此期间的一些学者着重从地面塌陷、地面沉降、地面裂缝等方面出发,对岩溶洞穴进行了深入的研究并取得了许多重要成果。

尽管如此,我们在研究国内外文献时发现,黄土洞穴问题作为专门工程地质问题的研究报道在国内外文献中很少见到,表明对黄土洞穴及其与之相关的工程地质问题的研究程度还较低,甚至许多基础性问题迄今为止还属研究空白。目前为止还未建立起一套较为系统并且实用的黄土洞穴分类与命名体系,给研究工作与学术交流带来不便;关于黄土洞穴分布规律的研究,由于未展开大面积调查和区域统计工作,人们还没有把握黄土洞穴的区域性分布规律,因而也就不可能给区域性工程建设的规划与设计提供这方面的指导;根据现有文献资料,关于黄土洞穴成因的争论远未结束,各种观点各持己见,且大多浅尝辄止,尚无系统的野外调查勘探资料和现场试验或室内计算、模拟分析等成果的支持;黄土暗穴具有很强的隐蔽性,对其进行精确定位探测是比较困难的,少数专家虽然围绕这一问题展开了一些研究工作,但仍然有许多技术难题没有解决,因此研究和开发出一套简便、快捷、经济、有效的黄土暗穴探测技术迫在眉睫;黄土洞穴对各类工程的危害十分严重,要对其进行有效的预防和治理,首先必须对黄土洞穴的工程危害进行科学定量评价,然而这方面的研究还十分欠缺,远远不能满足工程建设的需要;黄土洞穴危害预测和黄土洞穴的防治,直接关系到黄土洞穴分布区各类工程建(构)筑物的施工与运营的安全性,而这方面的研究成果目前还极少。

综上所述,目前对黄土洞穴及其工程危害的研究尚属起步阶段,许多方面都尚待进一步深化和系统化。因此,对黄土高原地区黄土洞穴及其工程危害问题展开系统的研究,无论是对黄土洞穴学研究的本身,还是对其工程危害的评价与防治研究均具有重大的理论与现实意义。

为了从根本上预防黄土暗穴对公路的危害,交通部将“探测湿陷性黄土暗穴技术研究”作为2001年西部交通建设科技项目的招标项目,笔者有幸在激烈竞争中中标,承担了这一研究任务。在历时三年的研究工作中,课题组成员不畏寒冬酷暑,数次奔波在黄土高原的梁梁峁峁、沟沟岔岔,许许多多洞穴留下了他们辛勤的足迹,正是由于他们无私的奉献,才使得该项目最终取得了一系列新的学术成果。本书是对该课题研究成果的系统总结和深化,其主要创新性学术成果概括如下:

(1) 以大量的现场调查为基础,总结描述了黄土洞穴的基本特征;以黄土洞穴的成因为主线首次对黄土洞穴进行了全面的分类;考虑到工程实用性,根据黄土暗穴的发育深度、断面大小、断面形状等形态学参数对黄土暗穴进行了形态学分类,并提出了简单的命名方案。

(2) 查明了黄土高原地区黄土洞穴的空间分布规律。将黄土洞穴分布区按洞穴发育密度划分为6个强度等级、39个子区块。该研究成果及图件填补了国内这方面的研究空白。

(3) 研究了黄土洞穴形成的地质环境条件,揭示了黄土的疏松结构、渗透性、湿陷性和崩解性等特性与黄土洞穴成因的关系,尤其是黄土的宏观湿陷及其边界效应、黄土节理裂隙、地表水及地下水等与黄土洞穴形成的密切关系;这些因素构成了黄土洞穴形成的根本内因,而地下水则是黄土洞穴形成与发展的源动力。

(4) 概化了黄土洞穴的形成模式,将黄土洞穴的形成演化过程分为孕育期、形成期、发展期、破坏期和消亡期五个阶段,并对各阶段的不同特点进行了分析。

(5) 总结出了黄土洞穴的环境灾害效应及其对工程的危害,重点研究和论述了公路不同部位的破坏特点和模式,通过数值模拟方法分析研究了黄土洞穴对公路路基、桥梁及路堑边坡等可能产生的影响。

(6) 开展了物探资料处理的特殊方法技术研究及软件开发,对部分现有软件进行了改进。涉及的方法主要有电磁波和弹性波法两大类,包括高精度自然电场法、充电法、分布式并行高密度电法、瞬变电磁法、探地雷达法、多道瞬态面波探测法、超浅层反射地震法、工程VSP法及浅层三分量地震法,初步形成了黄土暗穴探测的专门方法技术群。

(7) 开发研制出了GVSP-II型深探孔工程多波VSP测井仪。该仪器集多通道地震数据采集、数字信号传输及地面程控系统为一体,具有多波与高分辨地震数据采集仪器的基本特性,整体性能好,可以满足1000m井深范围内各类岩土层弹性波速度测试、工程VSP或孔间地震CT数据采集等需要。

(8) 成功地试验并推出了湿陷性黄土地区暗穴探测的成套技术系列:基于电磁波和弹性波的两大类地球物理探测技术是探测黄土暗穴的主流技术;高密度电法和瞬变电磁法是成本低、效率高、准确率大的有效普查方法;多道瞬态面波技术、浅层地震勘探的组合技术是实现黄土暗穴精细探测的实用技术;通过已知靶区和依托工程8处几十条十余万物理探测点的试验与资料解释,证明所推荐方法探测的总体有效率可达到85%以上,探测精度在30m埋深范围内可识别大于1m的暗穴不均匀体。

(9) 运用结构力学、有限元法、随机介质理论及三维动力有限元分析等方法分别定量评价了黄土洞穴对路基和边坡的危害作用方式,确定了公路暗穴破坏的临界厚度和范围以及公路暗穴防治的深度和宽度,提出了公路暗穴危害评价的工作指南,为黄土地区公路暗穴的防治提供了可靠的理论依据,填补了国内外这方面研究的空白。

(10) 依托一些高速公路工程,进行了黄土洞穴工程治理的大量现场试验工作,在此基础上首次提出了公路不同部位黄土洞穴的具体治理方案及处理的技术标准。

这些研究成果是集体智慧的结晶。参加本课题研究的成员共 60 余人,他们分别是:课题负责人:彭建兵、李庆春、陈志新。

工程地质专题组:范文、门玉明、苏生瑞、李喜安、宋彦辉、卢全中、刘妮娜、石玉玲、黄强兵、陈党明、周新民、邓亚虹、陈立伟、孙萍、石耀武、李滨、赵永伟、李小波、李昌贤、白晓宇、林永亮、邢姣秀、王佳运、温克兵、李亚兰、席先武、杨向军、张俊、程传国、叶万军、刘雪岭、杨小永、李金河等。

地球物理探测专题组:刘永华、冯兵、王玉贵、牛建建、李斌、唐文、李绥平、杜大彬、霍忠义、郭进田、王保庆、聂爱兰、刘国华、张继峰、沈鸿雁、王立明、陈建伟、刘聪伟、杨辉、王玉娇、王永刚、吴鹏、李媛媛、肖梅、曾灿、刘文清等。

本书是在总结各专题研究报告的基础上分别执笔编写的,第一篇黄土洞穴研究的基本理论由彭建兵、李喜安、陈志新等执笔;第二篇黄土洞穴灾害探测由李庆春、刘永华、冯兵、王玉贵执笔;第三篇黄土洞穴灾害防治由范文、门玉明、苏生瑞、宋彦辉、李喜安、刘妮娜等执笔;最后由彭建兵统一审阅并定稿。

本书所依托的课题能顺利完成是各方面的支持和帮助的结果。课题在实施过程中,自始至终得到了交通部科教司重大项目处赵之忠处长,西部交通建设科技项目管理中心陈国靖主任、魏道兴处长、谢素华高级工程师、张擎副教授及项目管理中心的诸位同志的支持、指导和帮助,在此表示衷心的感谢。西北综合勘察院顾问、总工程师,中国勘察大师林在贯教授级高级工程师,西安有色勘察院顾问总工关文章教授级高级工程师,长安大学孙建中教授和朱光明教授,陕西省交通厅建设处副处长赵之胜高级工程师等给予技术指导;长安大学王秉刚教授和张登良教授为项目设计方案提供了重要指导性意见,张登良教授、关文章教授级高级工程师和西安交通大学的高静怀教授还详细审阅了报告的初稿,并提出许多宝贵意见。课题鉴定时,中国科学院院士、浙江大学徐世浙教授,中国科学院院士、西北大学张国伟教授,成都理工大学副校长黄润秋教授,西安交通大学高静怀教授对我们的成果提出了重要的修改意见,使本书的最终成果增色不少,在此特向各位专家表示衷心的感谢。在项目立项和实施过程中,长安大学马建校长、谢永利教授、贺栓海教授、陆宁教授、裴先治教授、韩玲教授、郭军杰科长、黑爱芝科长、陈淑娟科长、张宏波工程师、田瑾工程师、张惠霞工程师为我们的研究工作提供了许多支持和帮助。在此,特向诸位表示衷心的感谢!

目 录

前 言

第一篇 黄土洞穴研究的基本理论

第一章 黄土洞穴的分类与基本特征	3
1.1 黄土高原地质地貌概况	3
1.1.1 黄土高原区域地质概况	3
1.1.2 黄土高原地貌概况	4
1.1.3 黄土地层分布概况	5
1.1.4 黄土高原地质灾害与土壤侵蚀概况	10
1.2 黄土洞穴的分类与基本特征	11
1.2.1 黄土洞穴的成因分类	12
1.2.2 黄土暗穴的分类	16
1.2.3 黄土洞穴的基本特征	21
第二章 黄土洞穴的分布规律与形成环境	28
2.1 黄土洞穴的分布规律	28
2.1.1 黄土洞穴的地区分布规律	28
2.1.2 黄土洞穴分布的微地形地貌规律	33
2.1.3 黄土洞穴的层次发育规律及其特点	37
2.2 黄土洞穴形成的地质环境	40
2.2.1 黄土洞穴形成的地层环境	40
2.2.2 黄土洞穴形成的地质构造环境	44
2.3 黄土洞穴形成的水文地质与气候环境	50
2.4 黄土洞穴形成的生物环境	52
2.4.1 动植物对黄土洞穴形成的影响	52
2.4.2 人类工程活动环境	52
第三章 黄土洞穴的成因机理	54
3.1 黄土洞穴成因研究综述	54
3.2 黄土洞穴的成因	55
3.2.1 黄土土性与洞穴形成的关系	55
3.2.2 黄土节理裂隙与黄土洞穴形成的关系	68
3.2.3 地下水与黄土洞穴形成的关系	72
3.2.4 黄土洞穴的形成演化过程	81

第二篇 黄土洞穴灾害探测

第四章 黄土洞穴地球物理探测技术简介	89
4.1 概述	89
4.2 电法、电磁法	91
4.2.1 并行多道高密度直流电法	91
4.2.2 瞬变电磁法	94
4.2.3 探地雷达技术	101
4.3 弹性波法	107
4.3.1 浅层高分辨率反射地震	107
4.3.2 多道瞬态瑞雷面波探测	117
4.3.3 工程 VSP 方法	127
4.3.4 浅层多分量地震	134
第五章 黄土洞穴地球物理信息处理软件开发及其关键技术	142
5.1 黄土洞穴地球物理信息处理软件开发研制	142
5.1.1 系统研发的需求分析	142
5.1.2 系统目标及主要功能	144
5.1.3 设计概念和关键技术	144
5.1.4 系统结构及处理流程	145
5.2 黄土洞穴地球物理弱信息提取关键技术	150
5.2.1 黄土洞穴理论模型构建及地球物理响应的数值模拟技术	150
5.2.2 资料处理中的交互技术	169
5.2.3 信噪分离与波场分离技术	175
第六章 黄土洞穴探测试验分析	190
6.1 黄土洞穴快速探测和定性评价试验	190
6.1.1 典型试验结果及分析	191
6.1.2 工程试验结论及建议工作布置程序	200
6.2 黄土洞穴地球物理组合技术精细探测试验	202
6.2.1 典型试验结果及分析	203
6.2.2 工程试验结论	220

第三篇 黄土洞穴灾害防治

第七章 黄土洞穴的环境灾害效应及其公路工程危害	227
7.1 黄土洞穴的环境灾害效应	227
7.1.1 黄土洞穴的地质灾害效应	228
7.1.2 黄土洞穴的环境影响效应	229
7.2 黄土洞穴的公路工程危害	232
7.2.1 黄土洞穴对公路工程的危害类型	232

7.2.2 黄土洞穴对公路工程危害的一般特点	240
7.3 黄土洞穴对公路工程的危害模式及致灾机理	242
7.3.1 黄土洞穴对路基、路面危害的模式及致灾机理	242
7.3.2 黄土洞穴对路堤边坡危害的模式及致灾机理	243
7.3.3 黄土洞穴对路堑边坡危害的模式及致灾机理	248
7.3.4 黄土洞穴对桥梁危害的模式及致灾机理	250
7.3.5 黄土洞穴对隧道危害的模式和致灾机理	251
7.3.6 黄土洞穴对公路排水设施危害的模式和致灾机理	253
第八章 黄土洞穴工程危害的定量评价	254
8.1 概述	254
8.2 地质分析法	255
8.3 结构力学方法	256
8.3.1 按梁板模型估算顶板安全厚度	256
8.3.2 按破裂拱模型估算顶板安全厚度	258
8.3.3 塌陷平衡法	258
8.3.4 坍塌填塞法	259
8.3.5 合理拱模型	259
8.3.6 承载拱模型	260
8.3.7 实例分析	260
8.3.8 结果分析	261
8.4 随机介质理论方法	261
8.4.1 计算原理	262
8.4.2 计算模型	263
8.4.3 实例分析	265
8.4.4 结果分析	266
8.5 行车荷载作用下洞穴稳定性的动力有限元分析	266
8.5.1 基本理论	267
8.5.2 计算模型及材料参数	269
8.5.3 黄土洞穴稳定性分析	271
8.5.4 黄土洞穴与公路相互作用分析	277
8.6 地震作用下黄土洞穴稳定性有限元分析	280
8.7 Flac 方法在黄土洞穴危害评价中的应用	285
8.7.1 FLAC ^{2D} 基本原理	285
8.7.2 公路路基下伏黄土洞穴危害分析	289
8.7.3 公路边坡潜伏黄土洞穴危害研究	294
第九章 黄土洞穴预测预报研究	299
9.1 黄土区公路沿线洞穴预测的地质方法	299
9.1.1 黄土洞穴预测的地层岩性方法	300
9.1.2 黄土洞穴预测的微地形地貌方法	300
9.1.3 黄土洞穴预测的坡形坡度方法	303
9.1.4 地形切割程度的预测方法	304

9.1.5 黄土洞穴的节理裂隙预测方法	305
9.2 公路沿线黄土洞穴预报的其他方法	305
9.3 黄土区公路沿线洞穴预测评价的主要因素及方法	307
9.3.1 预测评价的主要因素及方法	307
9.3.2 预测结果分析	313
9.4 黄土高原主干公路穿越区洞穴发育程度宏观预测	316
第十章 黄土洞穴治理方法研究	320
10.1 黄土洞穴治理方法研究现状分析	320
10.2 明挖回填法在黄土洞穴治理中的应用	321
10.2.1 明挖回填法概述	321
10.2.2 技术要素	322
10.2.3 试验过程及结果分析	322
10.2.4 结论	325
10.3 注浆法在黄土地区路基洞穴治理中的应用	325
10.3.1 注浆法的国内外发展现状	325
10.3.2 注浆法治理湿陷性黄土地区路基洞穴室内试验	326
10.3.3 注浆法的现场试验	330
10.3.4 注浆法的优点	339
10.4 土工合成材料在黄土地区公路洞穴治理中的应用	340
10.4.1 土工合成材料在公路工程中的应用现状	340
10.4.2 土工合成材料在黄土地区公路洞穴治理中的应用	341
10.4.3 试验方案布置	341
10.4.4 试验结果	342
10.4.5 试验结果分析	345
10.5 强夯法在黄土路基洞穴治理中的应用	346
10.5.1 设计参数的选取	347
10.5.2 强夯法现场试验的实例介绍	348
10.5.3 试验过程及数据分析	348
10.5.4 结果分析	350
10.6 用 SDDC 法治理湿陷性黄土地区路基中洞穴	351
10.6.1 SDDC 法简介	351
10.6.2 设计与施工	353
10.6.3 效果检验	354
10.6.4 SDDC 法在黄土路基洞穴处理中的应用	355
10.6.5 SDDC 法处理洞穴效果有限元模拟	357
10.7 爆破法在洞穴处理中的应用	361
10.8 湿陷性黄土地区公路洞穴的综合治理	362
10.8.1 湿陷性黄土地区路基中洞穴的综合治理	362
10.8.2 做好公路综合排水设计	362
10.8.3 路线布设应尽量避免地质不良地带	363

10.8.4 公路排水设施	363
10.9 湿陷性黄土地区公路洞穴治理方法建议	367
10.9.1 湿陷性黄土地区公路洞穴治理深度及治理范围建议	367
10.9.2 公路洞穴治理方法建议	368
参考文献	370
图版	

第一篇

黄土洞穴研究的基本理论

全世界没有第二个类似的奇观，这里的一切都令人惊讶。

——阿尔曼得（原苏联）

第一章 黄土洞穴的分类与基本特征

1.1 黄土高原地质地貌概况

黄土高原是一种独特的自然地理单元，主体位于北纬 $34^{\circ}\sim 41^{\circ}$ 、东经 $103^{\circ}\sim 114^{\circ}$ ，地势西北高、东南低，海拔介于 $2000\sim 1000\text{m}$ (图 1-1)；狭义上，其范围北界长城，南抵汾渭盆地北缘，东起吕梁山西麓，西迄陇西盆地西缘，范围包括陇西、宁南（宁夏回族自治区南部）、陇东、陕北、晋西等地区，呈近东西向展布，总面积约 23万 km^2 ，一级地貌类型有黄土塬及黄土梁峁。本书中黄土高原所指的范围主要为西起兰州，东至吕梁山西麓，北到长城一带，南达渭河盆地北缘的广大区域，主要包括陇西、陇东、陕北、晋西等地区。

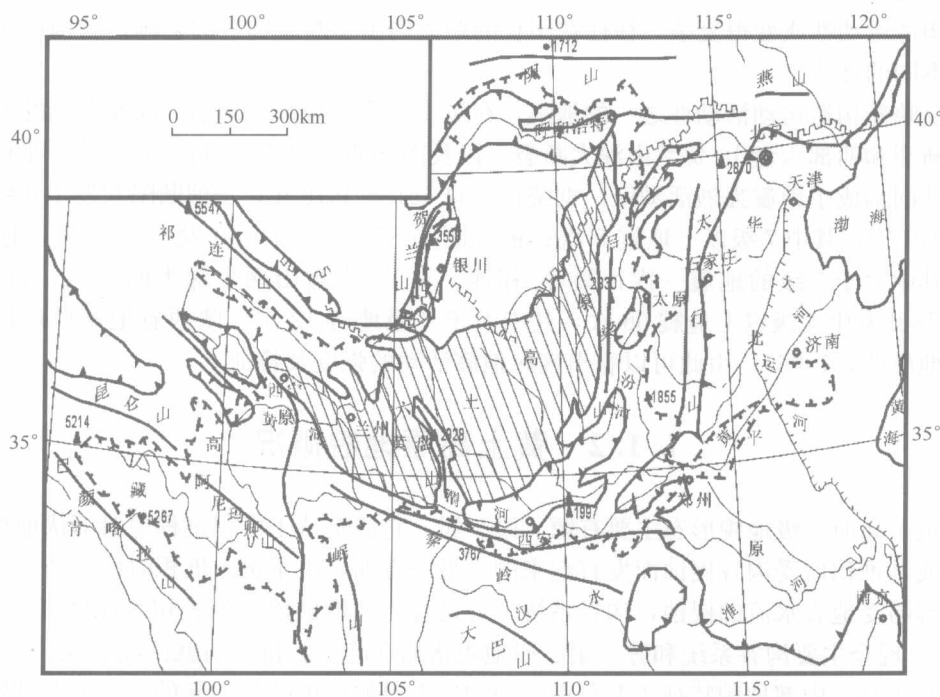


图 1-1 黄土高原位置图 (陕西省地质矿产局第二水文地质队, 1986)

1.1.1 黄土高原区域地质概况

黄土高原在大地构造上分属两个性质不同的部分，六盘山以西为祁连山褶皱带，以东是华北地台的两个次一级构造单元——鄂尔多斯台向斜和山西台背斜，这一构造基本轮廓主要是由白垩纪末的燕山运动最后奠定的。强烈的构造运动使台向斜、台背斜四周

的地层发生褶皱、断裂,隆起部分成为山地,如六盘山、吕梁山、太行山、贺兰山及渭河北岸的山地等;而断陷部分成为谷地,如河套平原、汾渭断陷谷地等。阴山、秦岭构造带也因此发生明显的断块差异性运动。

中新世期间,本区出现了一系列内陆湖盆,如陇西、宁南、陇东、陕北等地,因而形成了许多基底平坦或起伏平缓的古洼地。它们为黄土的堆积和保存提供了良好的场所,为黄土塬与黄土梁峁的形成奠定了基础。

黄土高原新构造运动总体表现为高原内部呈间歇性的、大面积的整体抬升,周围的拗陷或地堑不断地下沉。高原内部的构造抬升特点又有区域性差异,其中六盘山是第四纪抬升中心,抬升速度较快,抬升速度每年约 20mm,也是近代地震最活跃的地区。

六盘山以东地区,新构造运动的性质比较复杂,自早更新世至全新世,高原内部始终处于间歇抬升状态,断裂拗陷区不断下沉。第四纪以来抬升区的地面高程普遍达到海拔 1000m 以上。抬升强度较大地区主要分布在长城沿线的白于山至内蒙古准格尔旗一带。

六盘山以西的黄土高原地区,受西北-东南向几组断裂控制,新构造活动性区域差异较大,但总趋势仍是以间歇性抬升为主,大致以华家岭为界分成南北两个部分,以南地区新构造运动活动性要大于以北地区。华家岭以西地区由于区域构造的复杂性,也使得新构造运动性质变得复杂,往往在不长的距离内由于断裂构造的影响,新构造活动表现出不同的性质。

反映新构造运动活动性之一的地震,在黄土高原上频繁而剧烈。高原东侧的太行山深大断裂和西部六盘山-贺兰山深大断裂,以及南部的汾渭断陷和北部的银川-呼和浩特断陷共同构成了地震强烈活动区。据统计,自 1512~1979 年,汾渭断陷共发生 4 级以上地震 101 次,其中 7 级以上地震 8 次;银呼断陷 876~1979 年共发生 4 级以上地震 52 次,其中大于 7 级的地震一次;秦岭-祁连、贺兰-六盘山两个深大断裂区,自 128~1979 年共发生 4 级以上地震 66 次,其中大于 7 级地震 12 次(陕西省地质矿产局第二水文地质队,1986)。由此可以看出该区地震活动的强度及特征。

1.1.2 黄土高原地貌概况

黄土高原一级地貌形态主要有塬、梁、峁。它们是黄土堆积过程中对下伏地形的继承,或是堆积后受沟谷侵蚀而发育起来的。另一方面,由于黄土堆积时代较新,土质疏松,容易受地表水流的侵蚀,沟谷系统十分发育,地形破碎,地表切割深度可达 400~600m。现今主要沟谷系统和塬、梁、峁地貌格局在晚更新世之前就已经形成。

黄土高原内部地貌特征主要是由于新构造上升幅度的差异引起的。一般西部较东部大,高原边缘和内部山地上升的幅度更大。六盘山在黄土沉积前已有相当的海拔高度,从而构成黄土高原东、西两部分的一条重要自然地理界线。根据构造背景的不同,可以将黄土高原进一步划分为两个一级的地貌区:①与陇西构造盆地(六盘山以西)相对应的陇西黄土高原;②位于鄂尔多斯台向斜东南部(六盘山与吕梁山之间)的陇东、陕北和晋西黄土高原。在不同地貌区,黄土地貌的形态组合类型、河流沉积体系等也存在差异。如陇西(六盘山以西)及陕甘宁盆地古构造分别为复式褶皱带及断块盆地拗陷带,新生代期间又为沉降洼地,从而为黄土堆积创造了空间条件,更新世以来几度出现大面积的

不均匀上升,侵蚀基准面数次大幅度下降,经流水等侵蚀营力夷平,形成了黄土高原。

1. 黄土塬

主要分布于陕甘宁盆地南部与西部以及陇西盆地北部,如吉县塬、洛川塬、西峰塬、环县塬及白草塬等。这些塬面积大,塬面宽阔平坦(陕西省地质矿产局第二水文地质队,1986)。此外,宁南及陕北吴堡等地,尚零星展布一些面积不大的小塬,因流水强烈侵蚀切割,已成为“残塬”。

2. 黄土梁峁

主要分布于陕甘宁盆地北部、陇西盆地南部、伊盟隆起东缘及黄土塬外围地带。基底构造多为隆起或强烈褶皱带,因而黄土基底古地形起伏大,古河流及古沟谷均较发育,基底古地貌为起伏平缓的丘陵。在黄土堆积过程中,多期次的区域性强烈侵蚀,最终塑造成波浪起伏的黄土梁峁地貌景观(陕西省地质矿产局第二水文地质队,1986)。梁峁发育状况各地不一,现将黄土高原各主要地区发育特征简述如下:

(1) 陇西(包括宁南)南部(华家岭以南):该地区黄土地貌以峁为主,多为孤峁或群峁,黄土梁不发育,沟谷及冲沟切割强烈,大部分地区黄土仅残留于峁顶,峁体下部及沟谷地带基岩已裸露。

(2) 陇东北部:除环县塬外,其余地区以宽阔的黄土梁为主,峁不发育,沟谷切割较弱,沟道平均密度约 $2.85\text{km}/\text{km}^2$ 。

(3) 陕北北部:地貌形态以梁峁为主,平行梁及梳状梁均有发育,峁多为群峁,沟谷较发育,据统计,沟壑密度为 $2.2\sim 5.34\text{km}/\text{km}^2$ 。绝大部分空间为沟谷及黄土冲沟,而梁峁所占面积实际上极为有限。

3. 塬地

多出现于黄土沟谷的源头,四周为群峁和短梁所环绕,谷坡陡,谷底宽阔平坦,周边多出现短而宽的黄土冲沟。发育于白于山西段南侧及华家岭南侧。

4. 坟地

分布于黄土沟谷上游,一般长一至数公里,呈弯曲状,谷底较窄,但很平坦,谷坡平缓,两侧多为长梁,常有宽而短支沟。主要发育于白于山东段、六盘山东侧及华家岭北侧。

1.1.3 黄土地层分布概况

黄土高原是中国黄土的主体堆积地,这里黄土厚度大,地层完整,黄土分布面积占全国黄土总面积的70%以上。区内近似南北走向的六盘山山脉,把黄土高原分隔成两个不同的亚区(与黄土高原的地貌分区特征相对应):

I区:介于乌鞘岭与六盘山之间,黄土下伏的基底地层主要是第三纪的甘肃群,该区黄土为连续分布,厚度较大,一般为50m至百余米,分布于山地斜坡、山间盆地及高阶地上。马兰黄土在本区厚度较大,可达10~20m或更厚,颗粒组成较粗,黏粒含