

国家自然科学基金 (40972193, 41372269)
国家自然科学基金青年基金 (41202187)
高等学校博士学科重点基金 (20116101130001)

资助

地理信息系统 在黄土工程地质中的应用

谷天峰 王家鼎 著



地震出版社

国家自然科学基金 (40972193, 41372269)

国家自然科学基金青年基金 (41202187)

高等学校博士学科点重点基金 (20116101130001)

资助

地理信息系统 在黄土工程地质中的应用

谷天峰 王家鼎 著



地震出版社

Seismological Press

图书在版编目 (CIP) 数据

地理信息系统在黄土工程地质中的应用/谷天峰, 王家鼎著. —北京:
地震出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-5028-4351-9

I. ①地… II. ①谷…②王… III. ①地理信息系统—应用—黄土区—工程
地质—研究 IV. ①P642. 13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 236387 号

地震版 XM3059

地理信息系统在黄土工程地质中的应用

谷天峰 王家鼎 著

责任编辑: 王秋月

责任校对: 刘素剑

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467972

总编室: 68462709 68423029

传真: 68467972

专业部: 68467928 68721991

经销: 全国各地新华书店

印刷: 廊坊市华北石油华星印务有限公司

版 (印) 次: 2013 年 10 月第一版 2013 年 10 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 320 千字

印张: 12.5

印数: 0001 ~ 1000

书号: ISBN 978-7-5028-4351-9/P (5040)

定价: 45.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

序

我国黄土面积达 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，约占陆地面积的 6.6%。由于黄土具有一些特殊的物理、力学性质，从而使黄土地区的崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害极其严重，如陕西、甘肃、山西等省均为全国乃至全世界地质自然灾害最严重的地区之一。黄土分布广泛、数量众多、性质复杂，严重地威胁着人民的生命财产安全，给区域地质环境和社会发展造成极大的影响。只有对这些地质灾害进行科学地评价，正确掌握其分布规律、危害程度以及发展趋势，才能采取相应的措施来避免或减少灾难发生。因此如何对环境工程地质条件进行科学、高效地评价，将直接影响到未来对地质灾害的认知程度和防治措施，同时也直接影响到我国经济的可持续发展和构建和谐社会的战略。

地理信息系统作为一门新兴的信息技术，已成为专门用于采集、存储、管理和分析空间数据的强有力工具，被广泛应用于工程地质信息的管理以及地质灾害的监测、预报和防治等方面，并取得了巨大的成功。利用 GIS 可以管理海量的基础数据和专题数据，快速地筛选和提取评价要素指标，方便地建立各种分析评价模型以及准确地完成评价和评估，同时还可以实时提供有关图件，完成监测预警数据的管理、实现与分析等。近年来，GIS 技术在黄土工程地质领域也开始发挥作用，其贯穿于评价数据的获取、评价计算以及结果的表达等全过程之中，将黄土地质灾害的评价从传统的繁琐手工劳作中解放出来，并为运用多种数学方法进行对比分析提供了便利。

王家鼎教授及其科研组多年来一直从事黄土工程地质问题的研究，如黄土滑坡、黄土湿陷与震陷、黄土液化、黄土泥流以及黄土地震震害等方面，做出了突出的贡献，已出版多本专著。GIS 在黄土工程地质中的应用是黄土工程地质学的另一个重要分支，本书通过对黄土工程地质专门问题数据信息管理与分析方面的研究和地质灾害的数据与 GIS 结合的关键技术问题的探索，获得了以下具有创新性成果：

(1) 黄土地区城市地质环境质量评价对黄土地区城市规划和建设有重要的参考价值。以咸阳市区为研究对象，从理论与实践相结合的角度研究了 GIS 支持下的城市地质环境质量评价方法。从 GIS 空间数据库、空间分析和 GIS 开发理论等入手，研究了城市地质环境综合评价和经济评估的 GIS 应用模型，建立了咸阳市的地质环境数据库，并对其环境质量和影响进行了综合评价。

(2) 黄土边坡稳定性分析和评价是工程地质研究中的重要内容。本书利用 GIS 对大量的空间数据进行处理，将其应用于不同类型的一维、二维、三维黄土边坡的稳定性分析模型中，并在多处大型工程高边坡中得以实现。

①为了对强降雨引起的区域黄土边坡失稳的危险性进行有效、定量的评价，本书将 TRIGRS 模型及 Rosenblueth 点估法相结合，应用于黄土边坡稳定性计算和可靠性分析中，形成一套完整的评价体系，并用这套评价体系对降雨诱发的研究区浅层边坡进行稳定性评价，效果良好。

②提出一个耦合二维力学分析模型的区域斜坡稳定性评价方法。这种方法依据地形条件把研究区域划分为若干个斜坡单元，根据黄土斜坡单元的平均倾向和坡度来确定黄土斜坡单元主滑面位置，采用基于 GIS 的二维力学模型计算每个滑动面的稳定性系数，进而对黄土区域斜坡的稳定性进行有效、定量的评价。

③利用 GIS 建立了黄土滑坡的三维地质模型，开发了三维极限平衡程序，评价了机场、高铁等滑坡的稳定性。

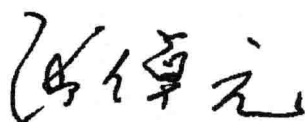
(3) 黄土地震地质灾害小区划是区分不同场地的地震破坏作用，对地面断裂错动、滑坡、崩塌、地基土液化和软土震陷等黄土地震地质灾害进行评价。利用 GIS 对黄土地震地质灾害的影响因素进行了分析，评价不同灾害的危险性，并建立其危险性指数模型，编制了黄土地震地质灾害小区划图。

(4) 黄土泥流的危险性评价主要用来划分出各区域泥石流危险等级，是泥石流防治工作中一项重要内容。以陕北为例，基于研究区的遥感影像、DEM 以及实地调查资料等，用该评价系统对陕北的泥石流危险性进行评价并编制出该区泥石流程度分区图。

(5) 黄土湿陷、黄土振（震）陷的区域性程度分区，是了解黄土高原黄土灾害发育规律的重要资料，也是区域防灾规划的依据。利用 GIS 技术对整个黄土高原的黄土湿陷和振（震）陷进行分区图的编制，获得了良好的效果，可直接用于城镇防灾规划和公路、铁路、水利、房屋等勘察与设计。

本专著通俗易懂，层次清晰，逻辑严密，是一部不可多得的有关黄土工程地质方面的专著。它的付梓，不仅对工程地质学的发展有重要的促进作用，而且对黄土高原的地质灾害防治、高速铁（公）路、机场、水利、建筑地基等的勘察设计具有重要的参考价值。

是为序！



中国地质学会工程地质专业委员会第二届主任委员

2013 年 4 月

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 引 言	(1)
1.2 黄土的工程地质特征	(2)
1.3 黄土的主要工程地质问题	(3)
1.3.1 黄土湿陷	(3)
1.3.2 黄土滑坡与崩塌	(3)
1.3.3 黄土泥石流	(5)
1.3.4 黄土震陷与液化	(5)
1.3.5 黄土地区地裂缝与地面沉降	(6)
1.4 地理信息系统与黄土工程地质研究	(7)
1.4.1 GIS 与工程地质勘查分析	(7)
1.4.2 GIS 与地质灾害调查评价	(8)
参考文献	(9)
第2章 地理信息系统基础	(12)
2.1 基本概念及相关理论	(12)
2.1.1 地理信息系统基础知识	(12)
2.1.2 地理信息系统的类型	(13)
2.1.3 地理空间	(13)
2.1.4 空间数据的基本特征	(13)
2.1.5 空间数据的结构	(14)
2.2 空间数据采集与处理	(15)
2.2.1 空间数据的来源	(15)
2.2.2 空间数据的采集	(16)
2.2.3 空间数据的编辑和处理	(17)
2.3 空间分析技术	(18)
2.3.1 空间数据的量算	(18)
2.3.2 空间数据的查询	(18)
2.3.3 叠合分析	(19)

2.3.4 缓冲区分析	(20)
2.3.5 空间密度分析	(20)
2.3.6 空间数据的统计分析	(20)
2.3.7 重分类	(21)
2.4 地理信息系统二次开发	(21)
2.4.1 系统开发流程	(21)
2.4.2 系统的开发方式	(23)
参考文献	(24)

第3章 黄土工程地质数据库

3.1 空间数据库	(25)
3.1.1 空间数据库概述	(25)
3.1.2 工程地质空间数据库设计理论	(26)
3.1.3 Geodatabase 数据模型及建模技术	(28)
3.2 黄土地质灾害数据库设计及建立	(29)
3.2.1 概述	(29)
3.2.2 数据库结构框架设计	(31)
3.2.3 地质灾害数据库的建立	(31)
3.3 黄土地震地质灾害数据库建设	(34)
3.3.1 概述	(34)
3.3.2 数据库设计依据和原则	(35)
3.3.3 黄土地震地质灾害数据库设计	(35)
3.3.4 数据入库	(36)
3.3.5 数据校验	(38)
3.3.6 黄土地震地质灾害信息管理	(39)
参考文献	(40)

第4章 GIS在黄土地区城市地质环境评价中的应用

4.1 黄土地区城市地质环境评价	(42)
4.1.1 地质环境评价概况	(42)
4.1.2 地质环境评价方法概述	(43)
4.2 咸阳市地质环境背景	(45)
4.2.1 环境地质条件	(45)
4.2.2 地基土的工程性质	(48)
4.2.3 咸阳市地质灾害问题	(51)

4.3	咸阳市地质环境质量的综合评价	(54)
4.3.1	咸阳城市地质环境质量综合评价模型	(54)
4.3.2	评价因子的选取	(57)
4.3.3	评价因子的筛选与优化	(59)
4.3.4	评价数据库的建立	(59)
4.3.5	咸阳城市地质环境质量评价	(61)
4.4	咸阳城市地质环境的经济评价	(63)
4.4.1	咸阳城市地质环境质量经济评价模型	(63)
4.4.2	咸阳城市地质环境的经济评价	(67)
	参考文献	(72)

第5章 GIS在黄土地区地震地质灾害评价中的应用

5.1	概 述	(75)
5.2	研究区地震地质灾害背景	(76)
5.2.1	研究区自然地理概况	(76)
5.2.2	区域地质环境	(78)
5.2.3	地震地质背景	(80)
5.3	潜在地震地质灾害调查与分析	(80)
5.3.1	潜在地震地质灾害的类型	(80)
5.3.2	潜在地震地质灾害的调查与评价	(80)
5.4	研究区地震地质灾害危险性评价	(82)
5.4.1	地震滑坡评价	(82)
5.4.2	黄土震陷危险性评价	(86)
5.4.3	液化危险性区划	(88)
5.5	综合地震地质灾害小区划	(90)
	参考文献	(91)

第6章 GIS在黄土地区地质灾害易发性评价中的应用

6.1	概 述	(94)
6.1.1	地质灾害评价研究概述	(94)
6.1.2	研究区自然地质环境背景	(95)
6.1.3	研究区地质灾害类型	(97)
6.2	黄土地区地质灾害分布特征及发育规律	(99)
6.2.1	地质灾害的空间分布规律	(99)
6.2.2	地质灾害的时间分布规律	(101)

6.2.3 地质灾害形成条件及影响因素	(102)
6.3 基于 GIS 的黄土地区地质灾害易发性分析研究	(104)
6.3.1 评价因子的选取	(104)
6.3.2 评价因子权重的确定	(109)
6.3.3 信息量模型	(114)
6.3.4 基于 AHP 的信息量模型评价方法	(116)
参考文献	(120)

第 7 章 GIS 在黄土斜坡稳定性分析中的应用

7.1 概 述	(122)
7.2 基于 GIS 的一维黄土边坡稳定性分析	(122)
7.2.1 研究区工程地质条件分析	(123)
7.2.2 TRIGRS 原理	(123)
7.2.3 Rosenblueth 点估法	(126)
7.2.4 结果及讨论	(128)
7.3 基于斜坡单元的黄土区域斜坡稳定性评价	(130)
7.3.1 基于 GIS 的二维力学模型计算方法	(131)
7.3.2 基于斜坡单元的黄土斜坡稳定性分析实例	(135)
7.4 基于栅格的三维黄土滑坡稳定性评价	(139)
7.4.1 滑坡区工程地质条件	(140)
7.4.2 滑坡基本特征及其形成机制	(140)
7.4.3 基于栅格的三维黄土滑坡稳定性评价	(144)
参考文献	(147)

第 8 章 GIS 在黄土泥石流危险性评价中的应用

8.1 概 论	(151)
8.2 研究区泥石流灾害的分布、类型及成因分析	(152)
8.2.1 研究区地质环境	(152)
8.2.2 泥石流灾害的分布规律	(152)
8.2.3 泥石流灾害的类型	(153)
8.2.4 泥石流灾害的成因分析	(154)
8.3 泥石流危险性区划	(157)
8.3.1 区域泥石流评价指标体系的建立	(157)
8.3.2 区域泥石流危险性评价模型的建立	(168)

第 9 章 GIS 在黄土湿陷与黄土震陷中的应用 (174)

9.1 黄土湿陷 (174)

9.1.1 概 述 (174)

9.1.2 咸阳市黄土湿陷分区图编制 (175)

9.1.3 基于 GIS 的黄土区黄土湿陷分区图编制 (176)

9.2 黄土振陷 (177)

9.2.1 概 述 (177)

9.2.2 黄土震陷的地域分异 (178)

9.2.3 GIS 在黄土震陷前后微结构变化中的应用 (181)

参考文献 (187)

第1章 绪论

1.1 引言

黄土形成于反复波动的气候环境中,沿袭不同的古地貌,披覆于不同的地层岩性之上,是经过不同程度地质作用改造后形成的不同时代、不同成因,具有特殊物质组成,物理、力学特性和地形地貌景观的第四纪松散堆积物。

我国是世界上黄土分布最广的国家之一,黄土厚度薄者几米、十几米、几十米,厚者数百米。我国黄土分布广泛,西部可达新疆伊利,东至山东胶东,北部可达吉林、内蒙,南至云南、西藏等地,集中分布在我国甘肃、青海、宁夏、内蒙、陕西、山西、河南、河北等省区,面积达 $6.3 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占我国领土面积的 6.6%, 占世界黄土覆盖面积的 49%。

由于黄土形成的地理环境、气候、生物条件及地质背景等有所不同,致使黄土的物理、力学性质在区域上有着显著的差别。由于各地气候条件差异,使得黄土高原黄土天然含水量具有自北至南及自西向东逐渐增高的特点;受土体结构、粘粒含量影响,黄土的重度也具有自西北向东南逐渐增高的趋势;黄土的孔隙比、压缩系数、液限、塑限、抗剪强度等同样表现出明显的地域差异。

西起乌鞘岭,东至太行山,南起秦岭、伏牛山,北达长城沿线的黄土高原是我国黄土的集中分布区。随着我国国民经济的高速发展,黄土地区在经济、资源等方面已经显现出了重要的地位和作用。但由于黄土高原地区破碎的地貌、纵横的沟壑、复杂的土性和特殊的气候条件,使得该地区表现出十分突出的地域特点。频繁而广泛的水土流失、崩塌、滑坡、泥石流、湿陷、振陷等各种地质灾害,在相当程度上影响了各类工程的建设,从而成为西部大开发和建设的严重障碍。

从上世纪 50 年代初开始,我国的地质工作者对于我国黄土的分布、厚度、地层、沉积环境、地貌条件以及组成黄土的物质成分等进行了广泛的调查、研究和分析,并取得了丰硕的成果,形成了具有中国特色的黄土科学研究体系,对我国黄土地区的工程建设起到了重要的作用。随着国家发展战略的转移,西部地区大型工程建设日益增多,如高速公路、高速铁路、机场、地铁、长大隧道、特大桥以及高填方等。工程建设中暴露出的越来越多的黄土工程地质问题对从事黄土工程地质研究的工作者来说,提出了新的要求,研究高度和挑战难度日益增加。与此同时,随着黄土工程地质研究的领域和深度不断扩展,它与其他学科的交叉程度和定量化不断加强,逐步形成了《黄土工程地质学》这门既具有交叉学科特点,又具备极强应用学科特点的分支学科。

黄土工程地质学发展到一定的程度,就必须与其他学科进行高度的交叉和融合,吸纳其他学科的新理论和新方法,以不断充实和完善自己的理论体系。而地理信息系统 (Geographic Information System, 简称 GIS) 正是在这方面表现出了强大的生命力,将其与工程地质结合是一个新的发展方向。GIS 指在计算机软、硬件系统的支持下,对地球表层空间中的

有关地理分布数据进行采集、存贮、管理、分析、显示和描述的技术系统和决策支持系统。GIS 起源于 20 世纪 60 年代, 作为有关空间数据管理、空间信息分析及其传播的计算机系统, 虽然 GIS 起步晚, 但发展快, 目前已成功地应用到九大学科一百多个领域中, 譬如土地利用、资源管理、环境监测、地质灾害评价、交通运输、城市规划、经济建设以及政府各职能部门。GIS 的出现, 为黄土地区工程地质问题的分析提供了一个强有力的工具。

基于 GIS 的显著优点, 利用地理信息系统优越的空间信息管理功能, 可有效地存储、管理和分析岩土工程中大量不同种类的数据, 以充分挖掘和使用工程信息, 将 GIS 与黄土地区工程地质研究相结合, 已成为当下黄土研究的一个重要手段。

1.2 黄土的工程地质特征

我国黄土高原地区的黄土在地层学上连续完整、厚度巨大; 在粒度成分上有既全域持稳又定向渐变的特点; 在主要工程性质上突出表现为欠固结性(上部)、轻度超固结性(深部)与易侵蚀性^[1]。黄土具有不同于其他土类的工程性质, 这些工程性质在不同的工程和环境条件下, 在黄土地质灾害的形成与演变中起重要作用。黄土的特殊性很多, 此处仅列出以下几种:

1) 湿陷性

湿陷性具有自重湿陷性和非自重湿陷性两种表现。在中国的中央黄土高原及其周邻, 黄土的湿陷性强烈程度和自重湿陷性高低在平面上具有自北向南东方向减弱, 在剖面上则有自新黄土至老黄土沿深度减弱, 直至消失的总规律。

2) 结构性与结构强度

由于特殊的堆积环境与成岩作用过程、颗粒组构的微观结构特点、可溶盐的存在与赋存形式及基质吸力, 黄土试样往往显示一定的结构性。随着土样天然湿度的增高, 其结构强度相应降低, 直至达到饱和状态。

3) 吸水势

吸水势亦称基质吸水势。与膨胀土一样作为典型的非饱和黏性土之一, 黄土在低含水量状态下常有很高的且不同于一般的吸水势。吸水势的力学效果是一种负孔隙水压力效应, 使黄土具有很高的强度, 这种强度随着含水量的增高而降低。一般当含水量超过 25% 或土的饱和度大于 65% 时, 由吸水势产生的负孔隙水压力效应就降得较低, 直至消失, 这时黄土的强度也会降得很低。

4) 动力敏感性

由于黄土的大孔隙性和节理裂隙发育, 造成了其本身疏松、性质易变等特点。它不仅对水具有敏感性, 而且对外动力具有极强的敏感性。如在外动力(地震、车辆振动、机械振动等)振动作用下其微弱的黏聚力被冲断、消散, 导致土颗粒相互滑移而产生沉降变形, 微结构震密。在工程上表现出震(振)陷、震(振)密等等。这已被黄土地区历次大地震的震害迹象、铁路公路路基下沉等所证实。

1.3 黄土的主要工程地质问题

1.3.1 黄土湿陷

黄土在工程实践中最明显和最重要的工程地质性质是黄土的湿陷性。黄土湿陷性常常会造成建筑物地基失稳、道路沉陷、边坡塌陷、地下管线被毁等,给人们的生产、生活带来极大的不便和严重的损失。

黄土湿陷性是指黄土在自重压力或土的附加压力与自重压力共同作用下受水浸湿后产生急剧大量的附加下沉现象。湿陷性黄土可以分为自重湿陷性黄土和非自重湿陷性黄土两类,受水浸湿后的黄土只在自重压力作用下就产生的湿陷,称为自重湿陷;受水浸湿后黄土在自重压力和附加压力共同作用下才产生的湿陷,称为非自重湿陷。不同地区黄土由于具有不同的自然环境和气候条件,往往同一时代的黄土湿陷性差别很大。

作为反映黄土湿陷变形特征的主要指标—湿陷系数,是指黄土在受水浸湿后,单位厚度土样在土体自重压力或附加压力与自重压力共同作用下产生的湿陷量。在自重压力作用下产生的湿陷量,称为自重湿陷系数,用 δ_{zs} 表示;土体在附加压力与自重压力共同作用下产生的湿陷量,称为非自重湿陷系数,用 δ_s 表示。我国黄土的湿陷系数大体上有自西而东逐渐变小的规律。陇西地区较大,陇东、陕北地区次之,关中、汾河地区更小些,河南、河北、山东地区最小。

中国黄土的广阔性以及它在工程建设中特殊的重要作用,使得中国学者在黄土力学特性及应用方面的研究在世界上占有举足轻重的地位,在一定程度上代表了黄土力学特性及应用研究的国际水平。

尽管如此,对湿陷性黄土的认识仍存在不足。其机理仍然是一个难度很大的复杂问题,人们探索了半个多世纪提出了一系列的观点,如可溶岩、胶体不足说、毛管说、欠压密说、结构说以及脉动弱化说^[2]。但是这些学说仍然不能圆满的解释黄土湿陷的机理,还需要进行深入的研究。

在实际工程建设中,由于黄土湿陷而造成的事故屡见不鲜,尤其是在我国西北干旱和半干旱地区,工程中遇到的土工问题,大部分都是黄土湿陷性问题。随着中西部地区经济的发展和西部大开发战略的实施,许多重点工程 and 项目纷纷出台,特别是在高等级公路和地下铁路建设中,不可避免地面临黄土地基的湿陷性问题。

1.3.2 黄土滑坡与崩塌

1.3.2.1 黄土滑坡

黄土滑坡是滑坡的一种特殊类型。它是黄土区某些斜坡地段不稳定的土体在重力作用下沿着一定的软弱面整体向下滑移的地质现象。黄土滑坡危害之严重,爆发之频繁,已给人民生命和财产安全带来了巨大的威胁^[3],如:1920年宁夏海原县发生地震群发性滑坡,形成40余个堰塞湖,大量村庄被毁,死亡10万人;1983年甘肃洒勒山大滑坡,约 $3.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 土石在一分钟内顷刻下滑,掩埋四个村庄,死亡237余人;1995年甘肃兰州发生黄茨滑坡,即时搬迁1000人^[4,5]。

我国学者在黄土滑坡分布规律、发育特征、物质组成、结构构造、诱发因素、变形特征、运动特征、成灾特征、破坏机理、稳定性分析、防治措施等方面,进行了大量的研究工作,取得了大量的研究成果^[6-11]。

黄土滑坡分类较为繁多,很不统一。主要采用按产生时代和按规模的分类方法。

1) 黄土滑坡产生的时代

从斜坡发育历史及后期堆积分析,我国黄土高原的黄土滑坡可以分为3期;即古滑坡、老滑坡和新滑坡。

(1) 古滑坡:发生在晚更新世初期或稍前,即发生在Ⅲ级河流阶地形成之后,Ⅱ级阶地形成之前或其间。在滑坡体表面堆积了晚更新世黄土-古土壤系列,大部分滑坡体前缘有Ⅱ级河流阶地堆积。

(2) 老滑坡:产生在全新世初期,相当于Ⅰ级阶地河床下蚀时期。在滑坡体表面上一般堆积了全新世黑垆土(S_0)和黄土状土(Qh)或全新世坡-残积物,有的老滑坡体前缘堆积了Ⅰ级阶地。

(3) 新滑坡:是在全新世河漫滩侵蚀期以后产生的滑坡。新滑坡有两种:一种是古老滑坡体的整体或局部复活,像陕西宝鸡卧龙寺黄土滑坡;另一种是原生黄土切层滑坡,例如陕西泾阳南源蒋刘、太平等地黄土滑坡。新滑坡往往密集分布、群起发生、频次很高、危害严重。

2) 黄土滑坡规模

按照黄土滑坡体的大小,将黄土滑坡分为以下4种类型

- (1) 小型黄土滑坡,滑坡体积小于 $3 \times 10^4 \text{ m}^3$;
- (2) 中型黄土滑坡,滑坡体积为 $3 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4 \text{ m}^3$;
- (3) 大型黄土滑坡,滑坡体积为 $50 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4 \text{ m}^3$;
- (4) 巨型黄土滑坡,滑坡体积大于 $300 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

诱发因素决定了滑坡的变形破坏机制。黄土滑坡的诱发因素除降雨外,人工削坡、冻融、地震、灌溉、坡顶加载等也是文献中经常提及的诱发因素。黄土滑坡的形成与运动机理是目前国际上探索的热门科学问题,吸引了大批学者来中国研究,提出了一系列的观点,如饱和黄土蠕滑动液化说、地震作用下黄土解体斜抛粉尘化说、机车振动作用下黄土疲劳变形说、黄土峰残速降说等等^[1,12-14]。但这些学说仍不能很好解释黄土滑坡的机理,需要不断探索创新。

1.3.2.2 黄土崩塌

黄土崩塌是指整体岩块或土块从陡峻斜坡上向下倾倒、崩落和翻波的地质现象。在黄土高原地区,坡度大于 60° 、坡高大于5m的黄土陡崖,就有可能发生黄土崩塌。在黄土区,尤其是梁峁区,黄土崩塌屡有发生,其规模不像黄土滑坡那样宏大,但其往往造成惨重的人员伤亡和财产损失^[15-18]。据雷祥义^[19]、张茂省^[17,20]等的现场调查和不完全统计,仅1985~2010年间,陕北黄土高原的神木、米脂、子洲、绥德、清涧、子长、安塞、志丹、吴堡、佳县等地共发生78起伤亡性黄土崩塌灾害事故,造成273人死亡。雷祥义^[19]按照土体受力状态和起始运动方式将陕北伤亡性黄土崩塌分为两类:张裂-滑移式黄土崩塌和坍塌。

1) 张裂-滑移式黄土崩塌

陕北黄土高原的地貌总体为塬、梁、峁。沟间地和沟谷地构成黄土高原的正、负地貌特

色。在谷缘附近,常见有大小不等的土体以垂直节理或裂缝与稳定土体分开,其下往往存有顺坡倾伏的古土壤层或古风化面,它起到了向坡下滑动的软弱光滑面的作用。这种土体除受重力作用外,在水沿裂缝灌入土体后,一则会产​​生静水压力和动水压力,二则能软化起隔水层作用的古土壤层或接触风化面,从而使土体逐渐滑移,其重心一旦滑出陡坡,就会产生崩塌。张裂-滑移式黄土崩塌主要分布在延安以北、神木-榆林-横山-靖边-定边一线(长城)以南的黄土梁峁区沟谷地的谷坡坡脚或谷坡上。

2) 坍塌

人们在崖壁直立的黄土体内挖掘而成的窑洞称为土窑。如果土窑洞因崖面大块土体下挫坍塌而被毁,称为坍塌。坍塌一般发生在黄土塬、梁、峁的边坡上。多数发生在第一、二层黄土(L_1 、 L_2)中,坍塌土体一般约 $100 \sim 400 \text{ m}^3$ 左右,常常造成惨重的伤亡。

在黄土地区,尤其是在梁、峁沟壑区,人们在不同发育阶段的谷坡上开挖桩基建宅,形成了新的人工边坡一宅基边坡,它严重破坏了自然土体的稳定平衡条件,导致伤亡性黄土崩塌频繁发生^[19]。陕北伤亡性黄土崩塌集中发生在每年的6~10月,尤其是集中发生在6~8月。大气降水尤其是大暴雨往往是伤亡性黄土崩塌产生的触发因素。

1.3.3 黄土泥流

黄土高原的黄土层具有厚且结构疏松、孔隙度大、柱状节理发育、易被侵蚀剥离等特征,加之区内暴雨集中且强度大、沟壑纵横、沟坡陡峻、植被稀疏,为泥流、滑坡、崩塌和地面沉陷等地质灾害的形成提供了必要条件。黄土泥流作为黄土高原地区常见的一种地质灾害,其危害程度不容忽视。泥流是泥石流的一个特殊类型,其以流体内固体物质中小于2 mm的细颗粒占98%以上,粉砂以下粒级占80%以上,砂砾仅占有10%~20%而区别于一般的泥石流。泥流在分布区域、形成条件、流体性质、沉积特征等方面和典型的泥石流相比,均具有一些鲜明的特点。泥流同时也是土壤侵蚀的一种特殊形式,是水土流失发展到极为严重阶段的标志。泥流爆发突然,来势凶猛而迅速,破坏力强,对黄土高原的工农业生产和人民生活造成严重的危害^[21]。

黄土泥流主要在晋西、陕北、渭河上游和兰州河谷集中分布。频繁的泥流活动,不仅会淤埋冲毁水库塘坝、农田、灌渠,给黄河下游地区造成严重泥沙淤积,危害城镇、工矿、交通等,造成人身伤亡和财产损失,也给本已脆弱的黄土高原的生态环境带来了严重破坏,影响到区域退化生态环境的恢复和可持续发展^[22]。

1.3.4 黄土震陷与液化

1.3.4.1 黄土震陷

黄土是一种弱胶结、大孔隙、遇水易发生变形的特殊土,在水和动荷载作用下往往会产生湿陷、震陷和液化等地质灾害现象。黄土工程性能较差,当遇到强烈的地震作用时,往往表现出很高的地震易损性。震陷是指在地震作用下,土层结构损坏,体积压缩、软化,或地基塑性区扩大,使土层或建筑物产生附加下沉。很多震害实例和黄土震陷的研究表明,在地震作用下,黄土具有明显的震陷性。黄土震陷会使地基产生不均匀沉陷,可导致建筑物的开裂、倾斜或倒塌;在斜坡地段产生的黄土震陷可能诱发地震滑坡等灾害。黄土震陷引起的地震灾害在西北地区尤为突出。

黄土震陷是多因素综合作用的结果,除了结构性差异对其具有显著的控制性作用外,其自身的物性因素也是重要的影响因素。震陷多发生于全新世黄土和更新世马兰黄土中,其中含水量和孔隙比等物性因素对震陷的发生发展具有重要影响^[23,24]。

1.3.4.2 黄土液化

我国黄土地区大多处于高烈度地震区,地震所引起的黄土液化,已为震害调查和室内试验所证明。黄土液化是指黄土含水量较高时,在一定强度的地震作用下黄土层会发生液化或流动,从而引起该地区建筑物地基的失稳或斜坡丘陵地带的泥流。黄土液化与砂土液化的定义相同,即饱和黄土在动荷载(如地震)作用下产生超孔隙水压力,同时土中的有效应力降低,当土中的有效应力降为零,即可发生液化。

饱和黄土在强震作用下,结构迅速破坏,体积收缩,在不排水条件下孔隙水压力上升和有效应力下降,从而导致土体软化,最终土体液化。王家鼎最早提出了黄土液化的概念,后来又有所发展^[14]。王兰民等^[25]分别从土动力学、水电化学和微结构角度分析了黄土液化的机理:当黄土浸水处于饱和状态时,中、大孔隙中充满了水,部分小孔隙和绝大多数微孔隙未充水,黄土中的易溶盐部分溶解。在一定强度的动荷载作用下,开始时由于原有微结构没有破坏,应变以弹性为主,其孔压为弹性孔压。随着振次的增加,易溶盐继续溶解,从而导致中溶盐的大量溶解,而中溶盐呈次生结晶分布在黄土孔隙中,它的溶解会使中、大孔隙结构强度降低而崩溃,粉粒物质散离,落向这些孔隙中。在此过程中,一方面孔隙体积减小,孔隙水来不及排除导致孔压上升,作用于土骨架的有效应力急剧下降,土的强度大幅度损失,应变急剧增大。另一方面,随着孔压的继续升高,可溶盐继续溶解,原来没有充水的小孔隙和微孔隙由于孔壁隔水物质和胶结物质溶解而充水,这在一定程度上消散了原来充水的大、中、小孔隙中的水压力。由于孔压的传递,使孔压达不到有效围压,尽管孔压达不到有效围压,但由于多孔隙结构的破坏,颗粒间的相互位移和重新排列使颗粒间的密度增大,黄土仍产生较大和残余应变,使黄土呈现出低抗剪性和高流动性,产生液化。

1.3.5 黄土地区地裂缝与地面沉降

1.3.5.1 地裂缝

地裂缝是在内外动力作用下岩石和土层发生变形,当力的作用与积累超过岩土层内部的结合力时,岩土层发生破裂,连续性遭到破坏,形成裂隙。在地面以下因遭受周围岩土层的限制和上部岩土层的重压作用闭合比较致密,而在地表由于围压作用力减小,又具有一定的自由空间,裂隙一般较宽,即表现为地裂缝。

地裂缝灾害作为一种特殊的地质灾害,直接或者间接地恶化地质环境,降低地质环境质量,危害人类和生物圈发展,造成各类工程建设,如城市建筑、生命线工程、交通、农田、水利设施的直接破坏。地裂缝灾害在世界上许多国家都有发现,且其发生频率和灾害程度逐年加剧,已经成为一种新的、独立的地质灾害,引起了国际地质界的日益关注。

我国地裂缝虽然分布很广,但是主要集中在大华北地区的冀、晋、陕、苏、皖、鲁、豫7省,尤其是黄土地裂缝分布广泛,致灾严重,给当地的城镇基础设施造成很大的破坏^[26,27]。

1.3.5.2 地面沉降

地面沉降是因为地壳表层的土体产生压缩而导致地面标高降低的一种环境地质现象,它

兼受自然和人为双重因素的影响。所以,影响地面沉降的因素主要可以分为自然和人为两大类:自然因素包括区域地壳构造活动、土体结构组成、地层岩性、水文地质、土体的自然作用引起的土层天然固结、海平面的相对上升、地震活动引发的地层压密变形等;人为因素包括矿产资源的开发、地下液体的抽汲、地下工程施工、地表各类荷载的作用等^[28]。

地面沉降是黄土区一种严重的地质灾害现象。西安市自 50 年代末出现大面积的下沉,其后 20 年间下沉加速,最大下沉速率达 187 mm/a,沉降面积为 200 km²。地面沉降已成为困扰西安城市建设规划、土地利用、房屋建筑和地下管线工程安全使用的重要地质灾害,给城市建设和规划带来了严重的损失。西安地面沉降最主要的危害是加剧并诱发了地裂缝的活动,其灾害形式主要表现为地表建筑物随基础断裂受损、地下管道工程被折断、道路路面差异变形等。据不完全统计,西安地区地裂缝和地面沉降灾害造成的直接经济损失达 40 亿元。^[28,29]

1.4 地理信息系统与黄土工程地质研究

1.4.1 GIS 与工程地质勘查分析

工程地质勘查是基本建设中的一个程序,是设计、施工地下部分的主要依据。其主要任务是探明勘查场地工程地质和水文地质条件,为设计施工提供必要的设计参数及地基方案、地下水处理与保护等意见。为了达到上述目的,通常要在地面地形地貌调查和浅层地质结构调查的基础上,通过现场钻探、野外测试(原位物理力学性质测试)、室内试验(土样、水样和岩芯样)等多项工作,对勘查原始成果和数据进行综合分析,了解分析区域地质构造、地层结构、岩土特征、水文地质等详细信息,形成相关技术参数和合理的建议。可见,地质勘查是一项系统性较强的多种手段综合评价工作。

国外一些发达国家将 GIS 技术和方法应用于地质领域的研究。由于应用起步早,有较好的人才基础和数据基础,且管理体系相对完善,在不断的改进和完善中, GIS 技术应用于地质领域的深度和广度不断推进^[30]。早在 1970 ~ 1980 年,美国地质调查所就建成了 50 多个信息系统,作为管理地理、地质和水资源等领域空间信息的工具。随着 GIS 技术应用日益广泛深入,自 1990 年 GIS 也逐步进入到工程勘查管理应用中,但主要还是限于数据处理、数据管理及可视化等基本功能方面^[31]。1993 年 NSF (National Science Foundation) 与联邦高速公路管理处 (Federal Highway Administration) 建立了美国岩土工程试验现场信息系统,为工程勘查管理及评价提供依据。日本大阪地区历时 10 多年建立了大阪湾地层数据库信息系统,钻孔数据达 3 万多个。国外《Geotechnical Engineering》、《Canadian Geotechnical Journal》、《Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering》、《Engineering Geology》等期刊都记录了许多 GIS 技术应用于工程地质勘查领域的相关数据管理和专业模型计算分析的科研应用成果^[32-35]。

在我国传统的地质领域,数据管理与应用最初是从二维宏观地质图处理开始,到二十世纪九十年代中后期,随着“数字地球”和“数字城市”战略的实施才延伸到地质勘查领域。二十世纪九十年代中期, CAD 制图和数据库技术陆续进入工程地质勘查设计、测绘和成果管理,九十年代末 GIS 开始应用到地质勘查领域。国内少数大城市的地质勘查单位开始采用