

前 言

黄土高原面积约为 64 万 km^2 , 约占我国国土面积的 6.7%, 黄土和黄土状岩石约为 44 万 km^2 , 属于世界黄土分布最多的区域。由于黄土特殊的工程地质特性, 区内巨型滑坡灾害、水土灾害和巨型洪灾等重大灾害分布广、类型多、突发性强, 直接影响“一带一路”倡议、西部大开发, 以及黄河流域生态保护和高质量发展等国家重要战略的实施。

2013 年以来, 黄土高原为缓解人地矛盾, 使黄河流域的生态、资源、社会、经济能够协调发展, 从多角度解决人类生存和发展的问題, 治沟造地、平山造地和固沟保塬等重大工程在黄土高原开始推行并实施。由于此类工程规模大、范围广、效应长的工程特点, 工程建设对地质环境的影响尚未可知, 地质环境对重大工程建设的影响仍旧匮乏。因此, 揭示黄土高原人类聚落区时空演化规律, 研究地质环境与人类聚落区、重大工程建设之间的相互影响关系, 构建基于人类活动与地质环境互馈作用的黄土重大工程建设灾变防控模式, 对改善重大工程建设中的人地矛盾、合理开发资源、保护生态环境、促进人地协调的可持续发展模式提供科学依据。本书以黄土高原为研究对象, 通过遥感解译、现场调研和模型模拟等手段, 探究了黄土高原人类活动与地质环境的互馈作用。首先, 基于多源遥感数据和地质环境因素指标, 探明了人类聚落区的时空演变规律, 并查明地质环境对人类聚落适宜性的影响; 其次, 通过空间叠加分析法, 探清了地质环境对三类重大工程分布规律的影响; 然后, 借助系统动力学和生态足迹模型, 阐述了人类重大工程活动对社会经济、生态环境和工程灾变的影响; 最后, 综合人类活动与地质环境的相互影响, 阐明人地互馈作用, 提出了基于自然的解决方案理念的黄土重大工程灾变科学防控模式。

本书相关研究依托国家自然科学基金重大项目“面向人地协调的黄土重大工程灾变防控研究”(项目批准号: 41790445)和国家自然科学基金青年项目“极端降雨条件下浅层黄土边坡中径流和入渗的水量分配规律及机制研究”(项目批准号: 42307235)开展。本书依据陈婉琳在博士期间的主要研究成果编制而成, 在野外工作中, 得到了成都理工大学滑坡研究团队成员的大力支持和积极配合; 在成书过程中, 许强负责统稿与审定, 陈婉琳负责 1~5 章编写, 赵宽耀负责 6~8 章编写, 赵伟华教授和周小棚博士协助完成部分整理和校改工作。成都理工大学环境与土木工程学院“双一流”学科、“天府万人计划”专项(项目批准号: 10912-TFWR2019-00683)、四川省研究生教育教学改革项目“基于国家级创新平台的地质工科高层次人才分类培养模式和质量提升路径研究与实践”(项目批准号: YJGXM24-A007)为本书的出版提供了资助, 在此一并致以衷心的感谢。

限于作者水平, 书中谬误之处定有不少, 恳请读者批评指正。

作 者

2025 年 4 月 20 日

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 人地关系的协调发展研究	2
1.2.2 人类聚落区的特征研究	4
1.2.3 地质环境特征研究	5
1.2.4 重大工程建设的特征研究	6
1.2.5 基于自然的解决方案的研究	8
1.3 研究内容、方法及技术路线	10
1.3.1 主要研究内容与方法	10
1.3.2 研究目标	12
1.3.3 解决的关键科学问题	12
1.3.4 技术路线	12
第 2 章 黄土高原区域环境条件概况	14
2.1 黄土高原概况	14
2.1.1 黄土分布	14
2.1.2 黄土高原范围	16
2.2 地理环境条件	19
2.2.1 气象	19
2.2.2 植被覆盖率	19
2.3 地质环境条件	22
2.3.1 地形地貌	22
2.3.2 地质构造	22
2.3.3 地层岩性	26
2.3.4 水文地质条件	28
2.3.5 地质灾害	30
2.4 社会环境条件	30
2.4.1 行政区划	30
2.4.2 人口密度	31
2.4.3 道路交通	32
2.5 基于三类环境条件的分区特征	35
2.5.1 不同环境因素的分区特征	35

2.5.2 综合分区规律	37
第3章 黄土高原人类聚落区时空演变及分类研究	39
3.1 人类聚落区概述	39
3.2 基于夜间灯光数据的人类聚落区时空演变特征	41
3.2.1 数据源获取	42
3.2.2 数据处理	44
3.2.3 结果分析	51
3.2.4 结果讨论	54
3.3 基于 GlobeLand30 数据的人类聚落区分类特征	54
3.3.1 数据源获取	55
3.3.2 数据处理	58
3.3.3 结果分析	65
3.3.4 结果讨论	70
第4章 地质环境对人类聚落区适宜性的影响研究	73
4.1 地质环境因素指标选取及量化	73
4.1.1 指标选取原则	73
4.1.2 指标的量化	74
4.1.3 指标体系的构建	76
4.2 地质环境因素对聚落区分布的影响	79
4.2.1 地质环境各因素对聚落区整体分布的影响	79
4.2.2 地质环境各因素对不同类型聚落分布的影响	82
4.2.3 地质环境各因素演变对聚落区分布的影响	88
4.3 地质环境因素对聚落区分布影响的敏感性分析	88
4.3.1 信息熵方法简述	89
4.3.2 数据处理	89
4.3.3 敏感性分析结果	92
4.4 基于预测模型的人类聚落区适宜性分析	94
4.4.1 适宜性模型构建	95
4.4.2 模型预测结果	104
4.5 基于人类工程活动干预的聚落适宜性改善	107
4.5.1 影响适宜性的各因素分类	108
4.5.2 针对可控因素的改善措施分析	108
4.5.3 人类工程活动对适宜性提高的作用	109
第5章 地质环境对重大工程分布的影响研究	112
5.1 三类典型黄土重大工程概述	112
5.1.1 典型平山造地工程概述	113
5.1.2 典型治沟造地工程概述	114
5.1.3 典型固沟保塬工程概述	115

5.2 地质环境对平山造地工程分布的影响	117
5.2.1 地质环境影响因素分析	117
5.2.2 各因素对工程分布的影响	124
5.3 地质环境对治沟造地工程分布的影响	126
5.3.1 地质环境影响因素分析	126
5.3.2 各因素对工程分布的影响	130
5.4 地质环境对固沟保塬工程分布的影响	132
5.4.1 地质环境影响因素分析	132
5.4.2 各因素对工程分布的影响	133
第 6 章 重大工程建设对社会经济发展和生态环境的影响研究	137
6.1 重大工程建设对不同社会属性用地的影响	137
6.1.1 城镇用地的变化特征	137
6.1.2 农业用地的变化特征	140
6.2 重大工程建设对区域社会经济发展的影响	146
6.2.1 构建系统动力学模型	146
6.2.2 重大工程建设对社会发展趋势的影响	153
6.2.3 重大工程建设对社会经济发展的情景分析	158
6.3 重大工程建设对生态环境的影响	160
6.3.1 构建生态足迹模型	160
6.3.2 模型结果	162
6.3.3 结果讨论	163
第 7 章 重大工程建设的灾害效应研究	166
7.1 治沟造地工程区灾害特征及类型分析	166
7.1.1 现有灾害特征分析	166
7.1.2 灾害链分析	182
7.1.3 潜在灾害类型特征分析	184
7.2 平山造地工程区灾害类型及特征分析	187
7.2.1 现有灾害特征分析	187
7.2.2 灾害链分析	193
7.2.3 潜在灾害类型特征分析	194
7.3 固沟保塬工程区灾害类型及特征分析	196
7.3.1 现有灾害特征分析	196
7.3.2 灾害链分析	197
7.3.3 潜在灾害类型特征分析	198
7.4 重大工程建设区的灾害共性分析	199
第 8 章 基于自然的解决方案的重大工程全寿命周期灾变防控模式研究	201
8.1 人地互馈机制分析	201
8.1.1 互馈关系的界定	201

8.1.2 互馈机制的搭建	202
8.2 基于自然的解决方案的理念应用	204
8.2.1 理念应用的重要意义	204
8.2.2 准则框架的应用	205
8.3 重大工程选址规划阶段防控模式研究	207
8.3.1 遵循人地协调发展规律	208
8.3.2 科学合理利用土地资源	209
8.3.3 因地制宜顺应自然规律	211
8.4 重大工程设计施工阶段防控模式研究	213
8.4.1 控变形	213
8.4.2 控水	214
8.4.3 控侵蚀	215
8.5 重大工程运营阶段防控模式研究	215
8.5.1 构建“空-天-地”一体化实时监测体系	216
8.5.2 构建人地联合调控机制	216
8.6 防控建议应用效益	217
8.6.1 基于研究成果的防控建议	217
8.6.2 建议实施成效	217
参考文献	220

第1章 概述

1.1 研究背景及意义

黄土高原面积约为 64 万 km²，约占我国国土面积的 6.7%，黄土和黄土状岩石约 44 万 km²（刘东生等，1985），约占黄土高原面积的 70%。由于黄土特殊的工程地质特性，黄土高原成为我国生态环境最脆弱的地区之一，区内巨型滑坡灾害、水土灾害和巨型洪灾等重大灾害分布广、类型多、突发性强，直接影响“一带一路”倡议、西部大开发，以及黄河流域生态保护和高质量发展等国家重要战略的实施（兰恒星等，2022）。

黄土高原居住着全国近五分之一的居民（刘东生，1966），在人口快速增长的情况下（刘艳华等，2012），人类活动愈发频繁。人类活动是指人类为了生产和生活而进行的一系列不同规模、不同类型的活动，包括各类工程建设活动，以及人类基本生活活动，如道路、建筑、水库等工程建设活动，以及居住、观光、娱乐等基本生活活动，其中主要通过工程建设活动来改造和影响人地关系。重大工程的建设迅速改变着整个黄土高原广大城市和乡村的面貌，使城市快速发展（虞春隆和朱颖彬，2018），乡村重新振兴（鲁大铭等，2020），一方面带给人类舒适便利的居所与享受，另一方面造成了环境污染、生态恶化、资源浪费、灾害频发等问题，人地相互作用仍旧是构建安全黄河、绿色黄河、生态黄河、和谐黄河和智慧黄河需要关注的重点（彭建兵等，2020a）。黄土高原人类聚落区作为人类进行所有活动的基础条件，以及重大工程建设的依托，近年来，人地矛盾突出，如聚落区人口密度的增加、建设用地的紧张、灾害的频发，使人类活动与地质环境矛盾再次升级。为缓解聚落区的人地矛盾，使黄土高原的生态、资源、社会、经济协调发展，从多角度解决人类生存和发展的问題，平山造地（蒲川豪等，2020）、治沟造地（杜鹏川等，2019；邹锡云等，2019）、固沟保塬（崔新盛等，2019；王小帆等，2019）等重大工程在黄土高原推行并实施。从 2013 年工程实施至今，三类黄土重大工程建设对地质环境的影响尚未可知，地质环境对重大工程建设影响的研究仍旧匮乏。因此，揭示黄土高原人类聚落区时空演化规律，研究地质环境与人类聚落区、重大工程建设之间的相互影响关系，构建基于人类活动与地质环境互馈作用的黄土重大工程建设灾变防控模式，可对改善重大工程建设中人地矛盾、合理开发资源、保护生态环境、促进人地协调的可持续发展模式提供科学依据。

黄土高原人类活动涉及对地质环境条件的适应与改造，人类聚落区和重大工程建设作为人类活动的重要方式，需要从不同的尺度去分析人类活动与地质环境的互馈作用，因此，要研究黄土高原人类活动与地质环境的互馈作用，首先，需要探明黄土高原人类聚落区时空演变规律和聚落适宜性对地质环境因素的响应特征；其次，通过梳理平山造地、治沟造地、固沟保塬三类重大工程建设的目的与意义，揭示地质环境对重大工程建设分布的影响；然后，从社会经济发展、生态环境、灾害效应等方面，揭示重大工程建设对地质环境条件

的影响；最后，综合上述人类活动与地质环境的相互影响作用，阐明人地互馈作用，在此基础上，提出基于自然的解决方案（nature-based solutions, NBS）新理念的严重工程灾变防控应对措施，为未来黄土重大工程建设提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 人地关系的协调发展研究

1. 人地关系研究现状

人地系统是地球表层上人类活动与地理环境相互作用形成的开放的复杂巨系统（吴传钧，2008），是“人类社会与地理环境的关系”的简称（傅祖德，1999），代表着一种动态变化的概念（方修琦，1999）。国内外学者对于人地关系思想的历程可分为三个阶段：萌芽阶段、探索阶段和发展阶段，依次经历了天命论、决定论、可能论（或然论）、适应论和协调论等思想的演变过程（图 1-1）（North, 1981; Gaile and Willmott, 1989; Roseland, 2000; 任启平, 2005; 吴传钧, 2008; 刘凯, 2017）。

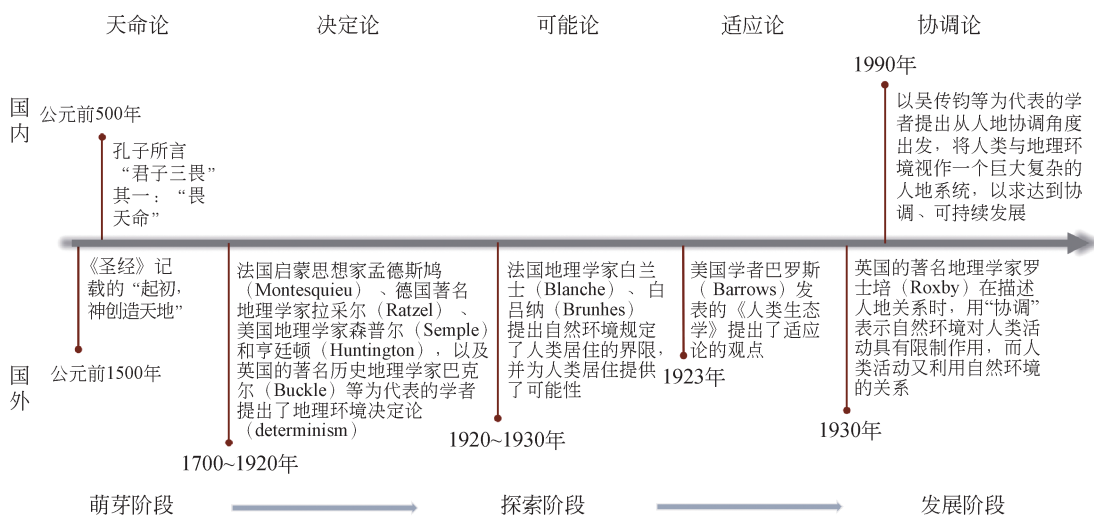


图 1-1 国内外人地关系思想研究发展概况

整个演变过程中，可以看到人地系统思想的产生经历了漫长的历史过程，西方地理学者从不同的角度分析人地关系的演变、分布规律以及内在规律，在演变的过程中人地协调关系的思想逐渐完善和成熟（程钰，2014）。国内对于人地这个复杂巨系统的理解过程中，人始终占据主导地位，从古代的“天人合一”思想到近代的人地关系协调思想，再升华到现代的“可持续发展”理论，人与地关系矛盾的协调过程从古至今都是相关科学重点研究的综合问题（毛汉英，1995）。在新形势下，以“人地系统相互作用的机制”为切入点，从不同时间尺度、不同空间尺度、不同学科角度全面挖掘人地关系相互作用的机制，才能站在更高的高度重新审视新时期的人地关系地域系统（方创琳，2000a, 2000b）。从“过

程归纳、区域比较、定性分析、逻辑判断”等方法入手,围绕着“区域均衡、资源环境承载能力、地域功能、空间结构”等领域,研究影响区域发展格局变化的驱动力、自然圈对人类活动圈层的作用、综合地理区域原理和方法等(樊杰, 2014)。充分发挥系统综合和多学科优势,吸收系统论、信息论、协同论等理论,并综合生态学、经济学、地理学、地质学、社会学等学科进行交叉研究,引进遥感(remote sensing, RS)、地理信息系统(geographic information system, GIS)、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)——“3S”技术、情景模拟、数据挖掘、大数据分析等技术,将研究从定性转换为定量分析,使科学与技术有机结合,从而指导区域社会经济的发展方向。

2. 人地协调研究现状

人地协调发展始终是人地系统研究的核心。随着人口、资源、环境、社会等问题的出现,人地协调发展还是可持续发展的关键前提(叶岱夫, 2001)。托马斯·罗伯特·马尔萨斯(Thomas Robert Malthus)在《人口论》中提到人口和土地相对演变的关系,认为在自然条件下,人口增长力和土地生产力这两种力量是不平衡的,但是自然法则最终会使结果趋于平衡。这是从宏观上来看自然环境对人地关系的反馈。从历史发展来看,人地协调是一个动态的过程,协调也只是一种相对概念,按其演化阶段可以将人地关系分为混沌、原始协调、改造索取、改造征服、协调共生五个阶段(香宝, 1994),表现在全球、国家和局部地域三个不同尺度上(王长征和刘毅, 2004)。人地关系地域系统是远离平衡态的开放系统,形成耗散结构的过程靠因开放而不断向其输入低熵能量、物质和信息,产生负熵流而得以维持,可以分为协调共生型、人地冲突型、警戒协调型、不确定混沌型(方创琳, 2000b)。由于人地系统本身的复杂性,其协调关系中也包含了一个复杂的巨系统,巨系统下还包含了一系列的子系统(朱超平和王新生, 2009),如人口经济与资源环境相协调(吴跃明等, 1996)、城市发展与用地空间相协调(崔功豪和武进, 1990)、人类社会—生态环境—经济发展的协调(严登华和何岩, 2000)等子系统,子系统协调才能使总系统趋于协调。由于其系统的复杂性,评价人地关系是否协调多采用在定性分析的基础上,对协调度进行定量分析。李裕瑞等从土地利用、景观格局、生态安全、社会响应和综合评价等角度探讨了黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对当地乡村人地关系的影响(李裕瑞等, 2019)。而资源环境承载力(Freeman et al., 1994; Cohen, 1995; 唐剑武和郭怀成, 1997; 洪阳和叶文虎, 1998)、生态脆弱性(邱彭华等, 2007; 徐广才等, 2009; Lange et al., 2010)、环境韧性(Elmqvist et al., 2003; Brown and Westaway, 2011; Mori et al., 2013; Nemeth and Olivier, 2017)等分析供需平衡的指标可以对人地部分子系统的协调性进行半定量的评价,从而将评价结论应用于实际工程项目中,如在汶川、玉树、舟曲等灾区重建规划工作中,对人地系统进行了生态环境承载力的评价(樊杰等, 2008; 欧阳彬和戴钢书, 2011; 汪霞等, 2014; 郝韵等, 2022)。

上述对于人地系统和人地协调发展的研究中,均提出了系统的复杂性和协同性,因此,要研究人类活动和地质环境间的互馈机制,不能再从单一角度、单一尺度上对互馈进行研究,而是需要依次从人和地两个角度来研究人地之间的关系转变和相互影响,方可对互馈机制有更完善的认识和研究。

1.2.2 人类聚落区的特征研究

1.2.1 节指出,黄土高原人地系统研究需从人和地两个角度依次分析,人类聚落区作为人类活动结果的综合产物,可以直接反映人类活动与地质环境之间的密切程度,即不同的聚落区的聚落类型特征具有差异性,因此,可通过对聚落区特征和分类的研究,找出人类活动的特征与规律。本节主要针对人类聚落区特征分析方法研究现状进行评述。

1. 基于遥感影像的人类聚落区提取方法

近年来,随着遥感技术的飞速发展(Xie et al., 2008; Bioucas-Dias et al., 2013; 王海伟等, 2015),以及数据信息的公开化和普及化(杨存建等, 2001; 王家耀等, 2004),不计其数的遥感影像为宏观分析研究提供了丰富的数据源。对聚落区的研究也从单体或局部(陈紫兰, 1997; 王海宁, 2008),延伸到宏观区域的分析上(蒋雪中等, 2002; 刘沛林等, 2010),尤其是随着影像精度的提升,影像类型的增加,聚落区边界提取的方法数不胜数(Kettig and Landgrebe, 1976; 胡最等, 2009),大部分遥感影像对于聚落区的提取,是通过面向对象的监督分类特征提取,该方法利用影像的光谱信息及对应的感兴趣区进行分类提取(于淼和李建东, 2005),如高分一号(GF-1)、资源三号、Worldview、QuickBird、GeoEye等卫星提供的全天候、全覆盖、多分辨率、多尺度、多光谱的影像产品,都可以对地表各类土地利用类型进行提取。但由于受到分类方法、人为主观感受等因素的影响,提取效果参差不齐(Muchoney et al., 2000; 赵春霞和钱乐祥, 2004; 余先川等, 2012),加之受到计算机硬件系统的限制,宏观大范围的研究往往耗时耗力,准备数据需要耗费极大精力(Pesaresi and Benediktsson, 2002; 邓锬等, 2008; 刘建华和毛正元, 2009; Blaschke, 2010)。因此,除了基础影像产品外,还有各种琳琅满目的遥感专题产品,如夜间灯光数据可以直接反映人类活动区域的特征(杨眉等, 2011; 赵敏和程维明, 2015),该遥感产品数据经常被用以分析人口密度、城市分布和扩展特征(卓莉等, 2005; 何春阳等, 2005; Ma et al., 2012; Li et al., 2018),此类数据更具二次研究的便捷性和可靠性。

针对以上遥感影像的特征,对聚落区提取分析的方法及其误差产生的原因,本书选用不同尺度的专题遥感产品相互对应,通过二次处理对遥感影像进行精细化提取,提高对聚落区边界的识别精度。

2. 人类聚落区特征研究

人类聚落区特征研究中,常规研究方向主要有聚落形成发展、区域位置、类型、空间组成结构、空间形态特征和空间形态演变等(Pearson, 1977; Henderson and Xia, 1997; 杨山, 2000b; 邢谷锐等, 2007)。对聚落形成发展、区域位置、类型和空间组成结构的研究,包含了对聚落区的形成、整合、景观设置等细节化的研究(业祖润, 2001; Small and Nicholls, 2003; 马晓冬等, 2012; Wang and Li, 2014),关注点在于聚落区内部特征的研究。对空间形态和演变特征的研究,关注的是聚落区本身几何的形状特征,以及外部边界的扩张规律分析(车震宇等, 2009; 岳邦瑞等, 2011; 韩非和蔡建明, 2011; 胡最等, 2018)。为了进一步分析聚落区形状和演化特征,还需要引入影像学的边界提取分析(邓刘洋等, 2018)、几何学的图形特征分析(Brown and Witschey, 2003; 张竟竟, 2013; 胡昂等, 2018)和地理信息系统的空间叠加分析(宋晓英等, 2015)等多角度、多学科分析方法。1985年,

英国学者巴蒂 (Batty) 受分形海岸线问题的启发, 利用分形特征提取城市边界, 随后, 分形理论逐渐被广泛应用在了各种聚落区边界提取和分析上 (Frankhauser, 2000; 蒋雪中等, 2002; 郭晓东等, 2010), 慢慢将对聚落区的研究从描述性、定性的分析转换为计量性、定量的科学描述。

针对以上聚落区特征研究方法的归纳可知, 人类聚落区虽受到多种因素的影响, 但对其形态特征的分析可以完全从数学的角度, 利用几何学原理对聚落区的特征进行准确刻画, 进而为其分类分析提供客观参数。

1.2.3 地质环境特征研究

1. 基础地质环境条件

基础地质环境条件是人类聚落区和重大工程建设得以形成和发展的先决条件, 不同的聚落类型、不同的重大工程项目对应不同的地质环境条件。黄土的形成经历了整个第四纪时期, 六盘山即是黄土形成过程中的古气候分界线, 以西的黄土分布最高界限在 2400m 左右, 以东的最高界限为 1800m 左右 (王念秦和张倬元, 2005)。据刘东生等按形成年代将黄土分为新、老黄土, 其中老黄土包括午城黄土、离石黄土, 新黄土包括马兰黄土和新近堆积黄土 (刘东生, 1959)。黄土地貌特征定于新近纪晚期, 特别是上新世晚期的喜马拉雅运动。经历第四纪期间多次黄土堆积-侵蚀轮回, 最后形成现今千沟万壑、支离破碎, 由黄土塬、梁、峁地形构成的典型黄土高原 (徐张建等, 2007)。黄土在我国分布范围、地层完整性、堆积厚度, 均可称世界之最。在黄土高原, 黄土厚度可达数百米。兰州西津村, 黄土厚约 400m (白凤龙, 1987), 形成肥沃土壤, 为农耕提供广阔的耕地 (朱永超等, 2011), 但黄土具有独特的结构和水敏性, 十分松散, 易被侵蚀 (冷艳秋, 2014)。黄河流域所穿越的大型地质灾害区, 占全国地质灾害的三分之一以上, 流域内大型滑坡、泥石流等灾难性地质灾害分布广、类型多、突发性强 (彭建兵等, 2008, 2014, 2016)。1983 年, 在甘肃东乡发生的洒勒山滑坡, 即是黄土的不均匀湿陷形成的、规模超 3100 万 m^3 的混合型滑坡 (王士天和詹铮, 1990)。正是由于受到基础地质环境条件的限制, 黄土高原整体的社会发展、人类活动都落后于东部地区。

2. 特殊地质环境条件

由于黄土的特殊地质条件, 黄土工程建设和人类活动过程中会诱发各类地质问题, 如水土流失、黄土湿陷、沉陷、黄土泥石流、滑坡、崩塌、泥石流、溃坝、盐渍化等 (雷祥义, 2001)。人类为修建住房、道路、水库、工厂、矿山所进行的工程建设活动, 以及为了农业生产进行的农田灌溉、斜坡耕地等活动, 正不断地改造着自然环境, 使地质环境发生改变, 从而引发滑坡、地面沉降等地质灾害。山西平朔某露天矿开挖后高约 140m 的高边坡, 受开挖后卸载作用和采掘爆破作业等荷载作用, 造成了近 64 万 m^3 的滑坡 (吴西臣和徐杨青, 2011)。2008 年, 在延安市吴起马连城, 由于工程堆载引发规模近 10 万 m^3 的滑坡; 2011 年, 延安机场附近的刘万家沟山坡, 由于工程卸载使山体发生最大错落约 2m 的滑坡 (彭建兵等, 2016)。除了工程建设, 人类活动也会造成大型地质灾害的发生, 其中以灌溉型滑坡最为典型, 甘肃永靖黑方台和陕西泾阳南塬宝鸡峡灌区受灌溉型滑坡影响最严重, 近年来由于灌溉诱发了近 60 多次滑坡, 造成近 20 人死亡 (许强等, 2016, 2019, 2020;

郭晨等, 2019; 魏勇, 2021)。另外, 大量的灌溉也会造成土壤退化, 形成大面积耕地的盐渍化, 如黑方台泉水中含盐量高低的变化时间与当地农业灌溉时间和季节性冻融有着紧密的联系(赵宽耀等, 2016, 2020)。

以上研究结果说明, 在黄土高原基础地质环境本身就存在脆弱性, 易受到各类地质灾害的威胁, 又因黄土性质的特殊性, 人类工程活动极易诱发各类地质灾害和问题, 不同的人类聚落区类型与地质环境之间存在怎样的关系和特性, 还需分类分步进行系统研究。

1.2.4 重大工程建设的特征研究

1. 黄土重大工程的历史发展进程

黄土是第四纪以来形成的、多孔隙弱胶结的特殊沉积物(王念秦和张倬元, 2005), 而黄土高原是世界上水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一(李素清, 2004)。由于黄土高原大部分区域位于半干旱与干旱地带, 虽然在历史上曾经是林草茂盛、地面平整、土层深厚、水草丰富、土地肥沃的区域, 从秦汉时期到唐代前期都属于宜农宜牧的理想聚居之地, 但随着战乱、屯田、垦荒现象逐渐升级, 再到乱砍滥伐, 出现过“仲冬斩阳木, 仲夏斩阴木”(《周礼》)的现象(桑广书, 2003), 再加上人口剧增(中国科学院黄土高原综合科学考察队, 1991), 导致整个黄土高原环境日趋恶化, 生态系统整体结构和功能退化, 不但没有促进区域经济的发展, 还引发了严重的生态危机, 使整个黄土高原陷入“越穷越垦, 越垦越穷, 越垦越荒”的恶性循环中(邹厚远等, 1995; 胡建忠和朱金兆, 2005; 庄硕, 2013)。20 世纪 50 年代以来, 黄土高原的重大工程由原来为满足生存需求所采取的野蛮开荒, 渐渐开始转变为对生态环境的保护, 特别是对水土的保持和对水资源的合理开发等(孟庆枚, 1996; 黄奕龙等, 2003)。早在 15 世纪, 奥地利首先开展了小流域的综合治理, 随后法国、意大利、塞尔维亚、瑞士和日本也开展了小流域治理(Gander et al., 2000; Tadic and Tadic, 2005; Bossio et al., 2011)。新中国成立初期, 国内依据治理水土流失的经验总结——“坡修梯田沟打坝, 陡坡山头搞绿化”(张信宝和柴宗新, 1997), 将小流域综合治理应用在黄土丘陵沟壑区, 在沟底修建淤地坝, 打坝蓄水拦土造地, 建设高产农田, 在沟两边的缓坡上修造梯田, 上边的陡坡和山头通过鱼鳞坑、水平阶、水平沟种树、种草、种灌木, 将工程措施与生物措施相结合, 使土地得到合理利用, 减少水土流失(龚时旻和蒋德麒, 1978; 韩冰等, 1995; 王军强等, 2003; 柴春山, 2006)。20 世纪 60 年代, 黄河沿线开始大兴水利, 所修建的发电水工建筑物可与防洪、灌溉、给水、航运、养殖等结合, 实行水利资源综合利用, 可供梯级开发的枢纽有 30 多个, 如龙羊峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、青铜峡、三盛公、天桥、三门峡、小浪底等大型水利枢纽(方学敏等, 1998; 冯国斌和张立中, 2001; 贾仰文等, 2006; 王兆印等, 2007)。1999 年, 在全国范围内掀起了为期十年的退耕还林工程, 首先就在陕西、甘肃和四川三省试行(李世东, 2001a, 2001b), 从 2019 年美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)卫星对比整个地球在过去 20 年间的变化结果可以看出, 黄土高原植被覆盖率变化最大, 该结果直观地反映了“退耕还林”显著的工程效应(Chen et al., 2020)。2010 年后, 随着国民经济水平的提高, 人民对于生存环境条件的需求也在不断提高, 城市的扩张速度也不断加快, 为了能在可持续发展的前提下稳步前进, 一些新兴的重大工程在黄土高原开

始实行，如治沟造地、平山造地和固沟保塬等工程。

2. 黄土重大工程建设对于人地关系的影响

重大工程的实施会受到驱动力的影响，如城市土地扩张的主要驱动因素就是人口增长、社会经济发展（Welch, 1980; Haack et al., 1987; Harris and Ventura, 1995）。新中国成立以来，受需求驱动力的影响，整个黄土高原重大工程经历了三个需求过程：生存需求、生态需求，以及生存和生态需求，如图 1-2 所示。新中国成立初期，百废待兴，由于政策和认识上的偏差，以及本身国力的薄弱，黄土高原的发展方向更多地偏向人类，从而忽略了对环境的保护，除了大量城市新建与扩建工程，各类重工业城市与轻工业城市也在快速增长，人口从 1949 年的 4000 万人增加到 2000 年的 1 亿人（赵存兴等，1990），黄土高原 1990 年耕地面积比 1949 年增加 32%，平原区增加 26%，黄土丘陵区增加 74%，人均粮食从 225.7kg 增加到 309.8kg，基本达到了粮食自给水平（彭珂珊，2000）。经历了近 50 年的发展，保护生态环境的问题逐渐成为国家发展的重点，盲目开荒种田，以林换粮，造成水土流失，沙进人退，生态恶化，灾害频发，严峻的生态形势让各类生态工程势在必行（吴转颖，2001）。1999~2010 年在全国开展的退耕还林工程规模达到 2246 万 hm^2 ，基本消除了陡坡耕地（ 25° 以上的坡耕地）（滕晗等，2015），全区植被盖度由 1980 年的 35% 增加到 2016 年的 64%，从北洛河吴旗站监测数据可以看出，2003~2011 年间，流域内平均径流量和平均输沙量分别减少了 53.03%、89.33%（蔺鹏飞等，2015），由此可见退耕还林工程显著的水土保持效益。虽然工程可以提高耕地的投入和集约化程度，从而提高农作物产量，但是由于耕地面积大量减少，加之养殖环境限制，大多数失地农民选择外出打工，从而使乡村日渐没落，“空心村”、乡村难发展、城市人口饱和等问题接踵而至。从长远来看，经济建设和环境保护两者的统一，正是人地协调发展的前提，经济快速、健康、稳定地增长，才有足够的资本和技术支持环境的改善和治理，从而提高人类保护环境的能力。因此，振兴乡村和城市的稳步扩张与生态环境的保护都是相互促进、相辅相成的（王景新和支晓娟，2018）。因此，新的重大工程在黄土高原开始实施“山上退耕还林保生态，山下治沟

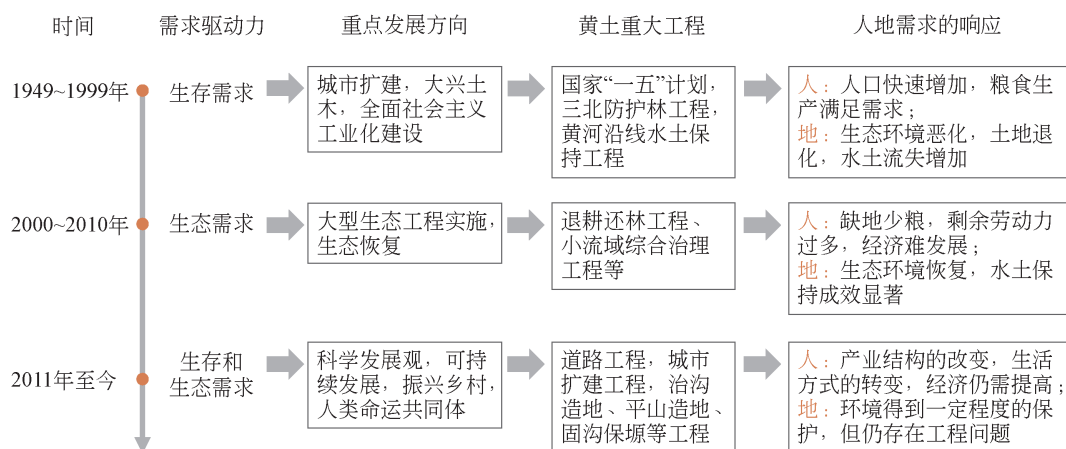


图 1-2 黄土重大工程发展史

造地保民生”的治沟造地工程，“沟头不前进、沟道不下切、沟岸不扩张”的固沟保塬工程，“中疏外扩，上山建城”的平山造地工程。

3. 国内外重大工程建设对区域环境的影响

重大工程的建设受到人类主观因素的影响，除了对工程有预期分析和评估外，工程实施后仍会存在或多或少的问题，从而对区域环境产生影响，并且对于不同的环境条件，工程实施所带来的影响也会有所不同。美国、中国、英国、法国和德国等国家都曾实施过退耕还林还草工程（李世东，2001a）。以法国为例，农产品供过于求，导致价格下跌，农民收入减少，加上政府采取配额生产和轮流休耕制度，相对贫困地区的农民大量流向城市或比较富裕的地区，农村开始出现人烟稀少和土地荒芜的现象，由此开始实施退耕还林工程。其目的一是遏制农产品过剩、价格下跌、农民利益受损；二是防止大面积的开垦或弃耕而造成生态环境破坏（李建龙，2008）。由于我国历史上长期盲目开荒，以林换粮，造成了严重的水土流失，灾害频发（徐晋涛等，2004），因此我国退耕还林还草工程主要是对生态环境保护。由于基础不同，工程所带来的效应也有所区别，发达国家是在实现了现代化的基础上进行的退耕还林还草，经济基础雄厚，其劳动生产率高，因此，工程的实施使城市化程度提高。而我国基础薄弱，农业科技含量低，劳动生产率低，失地后的农村劳动力严重过剩，从而导致了农民大量外出，造成了大量的“空心村”问题（张玲玲等，2013）。

巴西库里蒂巴作为巴西第七大城市，从 20 世纪 70 年代开始进行生态城市建设，环境优美，在 1990 年被联合国（United Nations, UN）命名为“巴西生态之都”“城市生态规划样板”（刘珊珊，2015）。该市以可持续发展的城市规划受到世界的赞誉，尤其是公共交通发展受到国际公共交通联合会的推崇，世界银行和世界卫生组织也给予库里蒂巴极高的评价。另外，其废物回收和循环使用措施以及能源节约措施也分别得到联合国环境规划署和国际节约能源机构的嘉奖（郭磊，2012）。然而，重大工程的建设也会导致很多无法挽回的影响，如位于埃及尼罗河畔上的阿斯旺水坝，工程建设自 1960 年开始，历时 10 年，建成后除了严重威胁到岸边的历史文物外，还对生态环境造成了破坏，使下游丧失了大量富有养料的泥沙沃土，从而导致尼罗河河谷和三角洲的土地开始盐碱化，肥力也丧失殆尽，同时水坝的建设严重扰乱了尼罗河的水文，造成物种的绝迹，以及地方病的蔓延（王维周，1988；朱大钧，1996；吴凡，2001）。由此可见，工程的建设应注重一些基本原则，如科学预测原则、信息原则、可行性原则、满意原则、成本效益原则，以及实现公共利益的原则。

1.2.5 基于自然的解决方案的研究

基于自然的解决方案（NBS）最早于 2002 年被用于描述农业活动中（Jackson and Jackson, 2002），是人类采用“以虫治草”的方式来替代机器除草，借助自然力量来解决生产问题的方法。随后，NBS 得到世界银行（Mackinnon, 2008a）、世界自然保护联盟（International Union for Conservation of Nature, IUCN）（IUCN, 2009, 2012, 2016, 2020a, 2020b）、欧盟（European Union, EU）委员会（European Commission, 2015a, 2015b）等组织和机构的大力推广。目前，针对 NBS 较为权威的定义来自 IUCN 和欧盟。IUCN 提出 NBS 是通过保护、修复和管理自然或人工生态系统，从而有效地、适应性地应对社会面临的问题和挑战，并造福人类和维护生物多样性。欧盟提出 NBS 是受到自然启发和支持的解

决方案，是一种既符合自然规律，又能有效促进经济和社会可持续发展的绿色方案和方法。

1) 概念定义的理解

基于自然的解决方案（NBS）突出自然的作用，但由于研究者的立场、角度、环境存在差异，对于该术语的解读还存在一定的争议，如 IUCN 的解读侧重于生态系统，欧盟的解读则强调其经济效益和创新效果，虽解读重心不同，但其定义大同小异。作者通过查阅大量关于 NBS 发展历程及相关案例的研究结果，认为该理念之所以能快速得到全球的大力推广，正是因为该术语用最简单的三个词给予了研究者开放式的解读，无论是哪种解读都有其参考意义，因此本书将目前较为权威且流传较广的定义列举在表 1-1 中。

表 1-1 基于自然的解决方案定义

机构或作者	定义	年份
欧盟委员会（European Commission, 2015）	受到自然启发和支持的解决方案，是一种既符合自然规律，又能有效促进经济和社会可持续发展的绿色方案和方法。 Nature-based solutions aim to help societies address a variety of environmental, social and economic challenges in sustainable ways. They are actions inspired by, supported by or copied from nature; both using and enhancing existing solutions to challenges, as well as exploring more novel solutions	2015
IUCN (2016)	通过保护、修复和管理自然或人工生态系统，从而有效地、适应性地应对社会面临的问题和挑战，并造福人类和维护生物多样性。 Nature-based solutions are defined as actions to protect, sustainably manage, and restore natural or modified ecosystems, that address societal challenges effectively and adaptively, simultaneously providing human well-being and biodiversity benefits	2016
Maes 和 Jacobs (2017)	一种利用生态系统服务的变革，减少不可再生自然资本的投入并增加可再生自然过程的投资。 We define nature-based solutions as any transition to a use of ecosystem services with decreased input of non-renewable natural capital and increased investment in renewable natural processes	2017

2) 发展历程

基于自然的解决方案（NBS）这一尊重自然和保护自然的新理念一经提出，便得到了世界各地的高度认可，得益于世界银行、世界自然保护联盟、欧盟委员会等组织机构的积极推动，该理念在过去十多年间迎来了八个跨越式的里程碑。

（1）概念初现：NBS 的概念最早于 2002 年从农业实践的角度，以保护和利用生物多样性案例的方式提出（Jackson and Jackson, 2002）。

（2）投资方案：2008 年，世界银行在年度发展报告《生物多样性、气候变化与适应：世界银行投资组合中基于自然的解决方案》中，正式提到 NBS 从保护生物多样性的角度对减缓与适应气候变化的重要性，列举多项世界银行投资组合中基于自然的解决方案（MacKinnon et al., 2008b）。

（3）积极推广：2009 年，世界自然保护联盟（IUCN）在提交给联合国气候变化框架公约（United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC）的工作报告《刻不容缓：2012 年气候变化制度应充分利用基于自然的解决方案》中引入 NBS 理念，积极推广该方案作为更广泛的全球性计划和策略（IUCN, 2009）。

（4）正式应用：2010 年，世界自然基金会（World Wide Fund for Nature, WWF）、世

界银行、IUCN 等六个机构联合发布了《自然解决方案：保护区助力应对气候变化》报告，将自然方案正式应用于减缓和适应气候变化的过程中并指导国家政策的制定（Belokurov et al., 2010）。

（5）工作重点：2012 年，IUCN 发表的年度报告《自然+：基于自然的解决方案》中提出工作重点是重视和保护自然，确保有效和公平地管理自然资源的使用，开发基于自然的解决方案，正式将 NBS 作为 2013~2016 年的三大工作计划之一，以应对气候、粮食和发展等全球挑战（IUCN, 2012）。

（6）纳入计划：2015 年，欧盟委员会在其“地平线 2020”科研计划中，纳入了 NBS 作为研究创新计划，以期通过资源的高效利用、因地制宜和系统性的干预手段，建立气候变化下具有韧性的社会生态系统，进而开展更大规模的研究和应用试点（European Commission, 2015a, 2015b）。

（7）全球行动：2019 年，联合国（UN）在气候行动峰会上确定 NBS 为全球九项重要行动之一，由中国和新西兰联合发布的《基于自然的解决方案纲要》中，编录了全球 182 个 NBS 倡议和案例，进一步扩大和加强了 NBS 在应对气候变化、粮食安全、生态和谐发展等方面的应用。

（8）发布标准：2020 年，IUCN 发布了《IUCN 基于自然的解决方案全球标准》（第一版）（IUCN, 2020c）及《IUCN 基于自然的解决方案全球标准使用指南》（IUCN, 2020b），由此提供了一套 NBS 全球统一标准化的通用框架。

从上面研究可知，虽然基于自然的解决方案是一个全新的理念，但该理念已被联合国作为应对气候变化、粮食安全、生态和谐发展等的主要工作计划，并被人们广泛接受和用于解决现实问题，对于三类重大工程建设所面临的各类问题，也可将基于自然的解决方案贯穿始终。

1.3 研究内容、方法及技术路线

1.3.1 主要研究内容与方法

黄土高原人类活动愈加强烈，以治沟造地、平山造地、固沟保塬为代表的三类重大工程建设相继启动。人类活动在地质环境的控制和限制作用下，虽然可以解决人地矛盾，但同样会对当地地质环境造成影响，所以分析人类活动与地质环境条件的互馈作用具有重要意义。本书通过分析地质环境对人类聚落区、重大工程建设的影响，再分析重大工程建设对地质环境的影响，对人类活动与地质环境的互馈作用关系进行研究，主要研究内容可归纳为以下几点。

1) 黄土高原人类聚落区时空演变及分类研究

黄土高原人类聚落区时空演变及分类研究是重大工程建设前要依托的基础人类活动区域规律，是实施重大工程建设的前提，是研究人地协调发展的背景条件。本书首先通过对聚落区历史发展特征进行概述，提出“协调假设”，即现有的人类聚落区是人类活动和地质环境条件互馈作用后的产物；然后在此假设基础上，基于夜间灯光数据提取出的 1992~