

第一章 总论

地质灾害气象预报是预测由于气象因素作用，使地质和生态环境遭受破坏，从而导致人类生命、物质财富造成损失的一门技术。它是气象、地质灾害预报结合逐步发展形成的一种技术，是大气圈、岩石圈和生物圈相互作用的产物。它涉及的学科分别是气象学、天气学、数值天气预报、地质学和生态学等。气象因素导致地质灾害主要包括崩塌、滑坡、泥石流、水土流失、地面塌陷、地面沉降、地裂缝、冻融、土地沙漠化等。

1.1 地球科学展望

1830年，英国地质学家莱伊尔发表了《地质学原理》一书，使地质科学成为一支独立的学科^[1]。地质科学是研究地球、地壳构成的岩石圈及其演化规律的科学。具体来说，是研究地球、地壳岩石圈的成分、结构、构造与历史，各类岩石及矿床形成的规律，岩石圈的空间分布和时间顺序；研究古地理环境的更替和生物在地球上的进化史的科学。1840年鸦片战争发生以后，地质科学从西方传入我国，具体来讲地质科学最早是在1892年在我国出现的。当时江南有一学堂设置了地质矿物学科课程^[2]，从此在我国有了地质科学的教育。从国家机构设置来讲是在1913年^[2]，北洋政府农商部设立了我国第一个地质调查研究所，由丁文江教授出任第一任所长。1916年，我国开始进行有组织的地质调查^[2]。直到1949年解放，由于内乱外患，我国真正从事地质科学研究的工作者还只有290多人。这一时期涌现了许多著名的地质学家，如章鸿钊、丁文江、李四光、翁文灏等，他们从事研究的领域有岩石、地层、大地构造、古生物、矿藏学等，奠定了我国地质科学发展的基础，并且从此开始培养了一批又一批的地质学家。1949年解放后到文化大革命以前，由于我国经济建设和社会发展对矿藏资源和水资源的需要，促进了全国范围的地质调查工作，使我国地质科学获得了有史以来空前规模的发展。20世纪70年代文化大革命结束以后，由于改革开放政策的实施，通过国际学术交流，我国地质科学界发生了很大的改变，迎来了我国地质科学发展的新时期，这一时期可以说是我国地质科学发展的转折点。

20世纪初中期地球科学发展的重大进展主要包括^[3]在地球及其各个圈层（岩石圈、生物圈、水圈、大气圈）的起源、结构、演化和运动规律等方面，经过几个世纪的努力取得了基础理论上突破性的进展，并取得了很大的社会效益。20世纪一些重大事件的发生，标志着地质科学取得了重大的进展。例如，1905年，地质界揭示了大气电离层的存在，为无线电通讯提供了发展的前提条件；石油地质科学领域在20世纪也取得了很多成就，使化石能源成为世界经济发展的血液；另外固体地球科学的发展推动了矿产资源的巨大发展。矿产资源包括金属矿产和非金属矿产，金属矿产大家都很熟悉，如金、银、铅、锌以及贵金属等，非金属矿产包括许多建筑材料、宝石等，这些都是固体矿产资源。因此固体地球科学的进展推动了固体矿产工业的巨大发展；20世纪大气科学中短期和长期天气预报的发展。现在天气预报已

经是家喻户晓，并且对人类工农业和社会生活的发展具有深远的影响；遥感技术、卫星技术、地理信息系统等高科技的发展。这些技术现在已经应用于许多科技领域、军事、林业、农业等；海洋科学在 20 世纪的发展促进了新兴海洋产业在新世纪的崛起。特别值得指出的是 20 世纪 60 年代后期，板块构造理论的提出。板块构造理论是地球科学理论发展上的创新，引起了地球科学理论思维的重大变革，为认识地球岩石圈的演化历史、结构构造和演化规律奠定了坚实的基础。板块理论的提出是地球科学发展过程中的根本性的变化。

从 20 世纪后期到 21 世纪初，地球科学从学科纵向深入发展转到了学科交叉、横向发展时代，从固体地球科学转向了行星地球的地球系统科学时代；从增加地球知识、侧重于资源开发的时代转向了增进地球认识、为人类社会、经济可持续发展服务的时代；科学研究的时空尺度在扩大，局地、区域、全球的认识彼此联系，高新技术在分析测试、观测监测、计算机模拟中得到了日益广泛的应用，地球科学作为大科学研究的舞台愈加宽阔。

20 世纪 80 年代以来，地球科学有了更加迅猛的发展。空间探测、航空航天遥感、大陆科学深钻、地震层析成像技术、深部找矿、大规模海洋观测、深海钻探与大洋钻探、南、北极与青藏高原科学考察等给人们认识我们所居住的地球提出了许多问题，也给地球科学的发展带来了新的机遇。地球科学正受到人类社会前所未有的重视。地球科学研究正在发生不以人的意志为转移的变化。

1.1.1 思维方式的变化

在传统地学以学科分化研究为主的基础上，更加强调了地球科学的“系统论”思想，即把地球作为宇宙中太阳系的一个行星来认识，研究整个地球的结构、演化过程和动力学；视地球为地核、地幔、地壳以及岩石圈、大气圈、水圈、生物圈各部分组成并相互作用的一个整体系统，提出了“地球系统科学”，这是一种高度综合的整体化研究思路。传统的理论思维模式是以观察材料和事实为基础，从相互关系中去认识和阐述规律、概括理论。新的思维模式是具有整体观念，更多地从系统整体出发，注意发展从理论假设出发进行演绎，使分析与综合、归纳与演绎互相补充、辩证统一；综合的内容更加深广，包括空间与时间、质量与数量、静态与动态、内部与外部、自然和人文等方面，深入研究系统的结构功能及动态演变过程；综合的方法更具有逻辑性和精确性，多通过结构分析、功能评价、过程监测与动态预测等途径来解决，并且可能用形式化语言、图解模式、数学模式等来表达综合的结果。理论思维模式的这种逐渐转变，必将把现代地球科学研究推向多学科相结合、系统综合集成的新水平。

1.1.2 研究对象的变化

由于系统论的哲学基础和“整体性研究”方法的出现，以及复杂系统理论和非线性科学的发展，地学研究对象的时空尺度相对地变大了。对地球上发生的各种自然现象的认识，逐步由各个时段的研究串联起来，既面向过去，也面对未来，从其过去的历史、现在的状态推向未来可能趋势的预测，形成一条“了解地球系统的过去、现今和未来的行为”的时间链。在空间方面，由过去侧重于局地现象的认识，转向对该现象区域性、全球性的表现、影响、过程与动力学机制的模拟研究。地球科学的思维和方法论正在从局部观向整体观拓展，由线性思维走向复杂性思维，从注重分析转变为分析与系统集成相结合，研究者的视野越来越宽阔。

1.1.3 研究内容的变化

地学研究从自然现象的物理过程、化学过程扩展到生物过程，特别是人类活动对地球环境与气候的影响和反馈以及人与自然关系、人地关系的协调。近几十年来，一些全球性重大问题如人口剧增、资源过度消耗、环境污染、生态破坏、南北差距扩大等日益突出，严重阻碍着经济的发展和人民生活质量的提高，继而威胁着全人类的未来生存和发展。于是在过去以学科为导向的研究的同时，出现了以问题为导向的跨学科研究。研究重点、学科结构也发生了变化，如全球变化的研究，由于大气中 CO_2 及其他温室气体浓度的增加可能导致全球变暖，已引起公众和各国政府的密切关注。针对气候变化、臭氧层耗减、生物多样性保护以及荒漠化等全球环境变化问题，已分别制订了有关国际公约，开展合作，以促进人类社会的可持续发展。地球和地表自然界是有机的整体，全球各个圈层之间的相互作用密切。随着人口增长、社会发展和科技进步，人类活动对地理环境的影响愈加强烈。人类对某一地区施加的影响，会对其他地区产生作用，而今天的措施又将对未来产生影响。当今瞩目的全球环境变化问题是与长期以来人类活动影响的缓慢累积过程有着密切的关系。全球环境变化研究在过去、目前和未来，都是地学的重要研究领域。在国际地圈生物圈计划 (IGBP) 和国际全球变化人文因素计划 (IHDP) 的推动下，不断开拓新的研究领域。全球环境变化及其区域响应涉及古地理环境演变、土地利用和土地覆被变化、减轻自然灾害、典型区域环境定位研究以及全球环境变化的对策等众多领域。其中，全球环境变化的社会经济对策涉及自然地带推移变化、土地利用与农林牧业的结构与布局、能源结构调整、海岸带的防御措施以及自然资源合理利用和自然灾害防治等。

1.1.4 研究形式的变化

现代科学技术的发展史是各个学科不断相互交叉、渗透并产生新学科的历史。而科学上的重大突破，新的生长点乃至新学科的产生，常常在相邻学科彼此交叉和相互渗透的过程中形成。特别是地学中“以问题为导向”的研究更体现了这一点。比如对于气候变化的最新认识表明，气候变化不仅仅是由大气层的内部热力、动力过程而产生，还包括了大气圈、水圈、冰雪圈和岩石圈所构成的地球气候系统中各圈层相互作用的结果，而且与生物圈、人类活动有很大关系。因此，气候系统动力学与气候预测的研究将涉及到大气科学、海洋科学、地理学（如冰川、沙漠学）、水文学、地球化学、生态学等地学各分支学科，同时与物理学、化学、生物学、计算数学等也有密切关系。

1.1.5 组织形式的变化

由于地球科学大尺度、综合性的特点，一些重大的地球科学研究的突破，已不是个别的科学团体、个别的国家可以实现的，它必须要联合多个分支学科、多个科学团体，甚至多个国家共同攻关，因此出现了地球科学新的组织形式，这就是建立国际性研究计划。在这方面，已有以全球环境变化为对象的“世界气候研究计划”、“国际地圈生物圈计划”、“国际全球变化人文因素计划”、“国家生物多样性计划”以及研究岩石圈物理过程的“国际岩石圈计划”和“国际减灾十年计划”等。世界上还有 50 多个国家专门成立了负责组织与实施全球变化研究

的国家委员会或领导机构。近年来，中国科学院先后建立的一些联合研究中心，如水问题研究中心、区域持续发展研究中心、灾害问题研究中心等也是这种跨研究所的多部门联合研究组织形式的具体体现。

1.1.6 信息交流的变化

首先信息交流已与物质迁移、能量交换一道成为地学现象过程研究的主要问题之一。数据与信息系统的建设和地球信息系统的开发已被各个国家计划视为必不可少的支撑条件、能力建设和现代研究手段。其次，地球信息科学这一新概念的出现，标志着在地学范围内形成了由测绘学、摄影测量与遥感、地图学、地理信息系统、计算机图像图形学、卫星定位技术、专家系统技术及现代通讯技术等有机结合的又一跨学科优先研究领域。

地球科学发展中所涉及的上述两个方面，目的是用各种现代方法获取、存贮、处理、显示、传播和应用与地理和空间分布有关的地学数据，包括提示地球信息传输机理，建立地球信息管理系统和分析模型，如动态基本信息因子确定、分类体系与数据形式的规范化和标准化、图形与图像动态数据自动采集与开发、遥感地学动态分析模型、知识库和专家系统等。这方面的信息虽多为数据信息，但也给地学研究提出了许多新问题、新挑战与发展机遇。

1.1.7 方法手段的变化

高新技术特别是空间技术的应用，已能三度空间、动态地探测地球环境的结构和运动形态，使地球科学的理论研究以丰富的实测资料为基础。如现代海洋研究手段，包括设备先进的调查船、海洋遥感卫星、浮标观测系统、深潜探测技术、高性能大容量计算机和先进的实验室等。同时，地球科学对于科技进步与现代设备的依靠程度也愈来愈高。在探测方面，航空航天遥感、超深钻技术、深潜技术、地球层析成像、全球数字地震台网和全球定位系统等共同构成了向海、陆、空和地下深部进行全面探测的技术体系。在模拟与实验方面，现在已经具备了利用高温高压（包括超高温、超高压）大腔体设备、同步辐射技术、精密测定技术、模拟分析方法及计算机技术等全面描述和研究地球介质的物理、化学性质及条件的能力。在测试与分析方面，正在向由电脑控制的高灵敏度、高分辨率、自动化仪器分析的技术方面发展。纳米地质学、纳米矿物学也是得益于隧道扫描技术的发展而发展的。在数据计算与信息处理方面的发展尤为引人注目，大型计算机设备都是首先运用到大气科学研究中；GPS、RS、GIS一体化使地球上许多现象的定量、定点、实时研究或建立全球模型成为可能；特别是自动化、数字化处理数据的能力，使地学信息网络迅速发展，实现全球资源共享。这些方法手段的变化，不仅使地学研究取得第一性资料的质量、效率大大提高，为认识和解释地学问题提供了更多事实依据，而且会因此而促使一些新思想和新理论的诞生。

展望新世纪，地球科学将会得到更加突飞猛进的发展，行星地球演化和变化的基本过程和规律将会在更广泛的空间尺度和时间尺度上被揭示和阐明。地球科学研究的主要趋向、热点与重点问题是：

(1)突出地球系统科学，关注全球变化与地球各圈层相互作用及其变化的研究，以及人类活动引发的重大环境变化研究。地球系统观、地球系统科学是地球科学研究的主导方向。全球变化研究充分体现了跨学科、跨部门、国际化、全球化和日益重视在高层次上综合集成

的大科学研究特点。地球各圈层相互作用的研究包括了气圈、水圈、冰冻圈、生物圈、岩石圈、地壳、地幔、地核相互作用的物理过程、化学过程、生物过程以及人地关系、人类与环境相互影响、相互作用的研究。如岩石圈的研究，当前以至将来一段时间，对岩石圈的研究是统一于“板块构造理论”框架之下。与板块的构造、运动、演化相关的岩石圈乃至整个地球中的许多现象，如大型构造地貌（高原、平原、山系等）的产生、地震与火山爆发、岩浆与矿产的形成以及由构造运动引起的海平面升降导致的沧海桑田变化，或直接或间接与岩石圈板块有关。特别是全球变化，它就是在陆圈-水圈-大气圈-生物圈（包括人类）的相互联系、相互作用中产生的，在这个开放的巨系统中，岩石圈这个子系统在全球变化中占有独特的地位，不仅岩石圈内部变化对全球变化有影响，而且在岩石圈-水圈界面、岩石圈-气圈界面、岩石圈-生物圈界面的相互作用，更为全球变化研究者所特别关注。

(2)突出地球演化的动力过程研究，地球内部深层过程与岩石圈动力学、气候系统动力学与气候预测、生态系统动力学与生态环境的保护和建设。1974年美国著名的第四纪地质学家 F.R. Flint 教授将 19 世纪的达尔文进化论与 20 世纪 60 年代出现的海底扩张—板块构造学说以及预测将会出现“气候变迁理论”统称为关于地球动力学三个方面的科学，即“生物圈动力学理论”、“岩石圈动力学理论”和“大气圈动力学理论”^[4]。生物圈动力学理论是通过生物与其化石祖先的延续关系，重建古气候、古环境，揭示其进化史；岩石圈动力学理论乃是地质时代中岩石圈演变、洋陆更迭的历史进程，是通过板块的形成、运动和消亡来认识的。这两项基本理论都是通过进行的过程去认识问题、总结规律的，把地球视为一个具有长期演化历史的、活动的、发展和变化的地球内部各种因子之间以及地球与外部各种因子之间相互作用的行星，这是发展地球科学基本理论的必由之路。对于探索“大气圈动力学理论”也必然要采用这样的科学观点。

(3)突出地球信息科学，关注数字地球、3S(GIS、RS 和 GPS)一体化和地球科学定量化的研究趋势。在地球系统科学与全球变化研究的方法论中，是以观测监测采集数据，分析评价和解释判断，概念化并建立数值模型，进行验证、改善模型并提供预报这样的循环方式进行的，这也就是提供数据，评价整理数据，建立模型，验证模型、提供分析结果的数据信息流动、处理、加工过程，每一环节都与数据信息系统密不可分。当前，地球科学数据的规范化整理与信息资源的共建共享已经成为潮流。数据信息系统与地球信息科学的发展也带来地球科学研究观念的改变。例如，数据信息作为科研基础的时代转向数据信息作为科学驱动力的时代；以遥感、地理信息系统和全球卫星定位技术作为重要的高科技已经进入科学普及时代；地球科学研究方法论的改进使地球科学研究进入综合模型时代。

(4)突出地球管理科学，关注减灾、环境保护治理、资源合理开发利用以及碳循环、水资源、食物与纤维、能源战略等问题

地球科学及其各分支学科的目标，是在人类增加对地球认识的基础上，维持其足够的资源供给及其持续利用，减轻自然灾害造成的损失，保护与改善环境，促进生态系统良性循环，协调人与自然关系，从整体上为经济和社会的发展、提高人类生活质量、增强科学能力做出重大贡献。因此，控制人类活动的规模、程度，从人一地关系的角度审视环境的变化，为社会与自然的协调发展提出科学建议，促使人类在减缓和适应全球变化方面尽快采取相应的措施，从而保护地球的可居住性，实现可持续发展。

(5) 突出地球科学跨学科研究进展与创新, 关注经济社会发展对地球科学的影响与需求、地球科学在自然科学内部与其他学科的交叉融合以及高新技术在地球科学中的应用。展望 21 世纪, 地球系统科学的新思维和地球观测新技术的发展, 必将对地球科学的发展和增强人类管理地球能力的提高继续产生革命性的影响。

1.2 地质灾害研究进展

地质灾害概念是前国际工程地质协会主席 Arnould 教授^[5]在 1976 年发表的题为“地质灾害-保险和立法及技术对策”一文中提出来的。以后逐渐被各国采用, 我国大概是在 20 世纪 80 年代末采用, 到 1990 年代以后“地质灾害”这个名词才频繁出现在专业论文和新闻报道中。1987 年联合国第 42 届大会决定从 1990 年开始开展世界范围的“减轻自然灾害十年”活动。我国原国家科学技术委员会社会发展科技司组织原国家地震局、原国家气象局、国家海洋局、水利部、原地质矿产部、农业部、原林业部的专家对严重危害我国的地震、气象、海洋、洪涝、地质、农业及森林等重大自然灾害的灾情、特点、规律、对策进行了综合的、系统的、全面的调查研究, 并在此基础上成立了国家科学技术委员会、国家计划委员会、国家经济贸易委员会自然灾害综合研究组。正是在这种情况下, 我国才真正开展了地质灾害研究。在 1990~2000 年国际减轻自然灾害十年活动(IDNDR) 期间, 我国对地质灾害调查、研究、监测和防治等开展了大量工作, 对全国地质灾害进行了全面的调查和综合评价, 编制了以地质灾害为主的全国环境地质图系和各省地质灾害现状调查图, 初步调查了我国地质灾害发育现状和分布规律, 并对主要地质灾害发展趋势进行了预测。开展了三峡链子崖危岩体、黄腊石滑坡体等 200 余处重点地质灾害的防治工作, 为减轻地质灾害对我国重点地区的危害做出了重要贡献。

在“八五”和“九五”计划期间组织了地质灾害防治和监测预报的科技攻关, 系统地解决了我国地质灾害减灾防灾的技术难题, 地质灾害防治初步形成了一套基于地质工程理论和方法的地质灾害防治思路和技术方法体系, 为实现将自然灾害造成的损失减轻 30% 的目标提供了有力的技术支撑。随着在复杂地质体中进行重大工程建设的情况日益增多, 遭遇到的灾害地质体不仅在规模上越来越巨大, 而且结构更加复杂, 对它的变形破坏过程的了解更加模糊。原有的以一般岩土体为研究对象的岩土工程理论与方法已不能满足要求。地质工程研究迅速发展, 它是工程地质继岩土工程后的一个新拓展。地质工程面对的是正在变形破坏过程中的复杂地质体, 研究的主题是工程场址山体稳定性和区域地壳稳定性评价、控制和改造, 其核心是对不良地质体进行工程改造与控制。

长江三峡链子崖危岩体防治工程是地质灾害防治工程的杰作。链子崖危岩体防治工程的基本特点是: 灾害地质体结构复杂, 设计、施工均存在模糊性; 危岩体稳定性差, 施工风险大; 紧邻长江边, 场地施工条件差; 位于长江黄金水道最窄处, 距三峡大坝仅 27 km, 社会责任大。通过 8 年努力, 终于成功地完成了防治任务, 其成功经验是: 以地质工程理论和技术为指导; 具有阵容雄厚的专家组支撑; 科研单位与施工单位形成联合体共同攻关; 勘查、设计、施工形成较为统一的整体, 设计是工程全过程的核心; 建立了立体的实时监控系统。

随着我国社会经济飞速发展, 愈来愈要求在地质灾害防治的基础上开发利用灾害体, 如

在举世瞩目的三峡工程库区移民迁建中，由于地质环境复杂，建设用地严重不足，因此，在地质灾害防治基础上，开始利用滑坡体，使灾害向兴利方面转化，并强调了地质灾害防治工程的环境协调性。

1.2.1 地质灾害过程模拟和过程控制研究

建立和完善了针对复杂地质结构的地质模型和岩体稳定性分析的理论与方法，并分别针对二维边坡地质模型的建立与稳定性分析、三维节理岩体建模与稳定性分析以及复杂地质结构三维可视化等问题，开发了三套计算机软件系统。建立和发展了地质灾害过程模拟与过程控制的理论与方法。涉及的关键技术包括：

(1)复杂地质结构三维地质建模的理论与方法。包括：多元信息的描述与数据融合技术、数据库管理及其与图形系统的接口、地质体的三维数学模型描述、复杂块体模型建模理论、三维图形可视化技术等。

(2)复杂地质性态、复杂地质过程及复杂地质环境的数值模拟理论与方法。包括：复杂地质结构模拟、动力作用过程模拟、水-岩作用过程模拟、水-热作用过程模拟、热-力作用过程模拟及开挖卸荷过程模拟等。

(3)复杂地质灾害的过程模拟与过程控制。选择不同类型的滑坡地质灾害和边坡稳定性问题，对本项研究的理论成果进行实际应用验证，通过过程模拟和过程控制，为相关工程实际问题的解决和地质灾害防治提供依据。作为系列成果，本研究系统解决了地质灾害过程模拟与过程控制领域的诸多关键理论与技术问题，并取得了以下主要研究成果。

1.2.2 建立和完善了针对复杂地质结构的地质建模理论与方法

(1)结合溪洛渡水电站工程和长江三峡水电站地下厂房工程，开发了“复杂岩体结构建模系统”。该系统采用多元信息的融合技术，实现了复杂地质信息的数据库管理。所开发的系统具有地形图的绘制、剖面图的生成和交互式修改、平硐结构面三维扩展及其交互式修改、三维地质实体模型的建立等功能。该系统为地质勘探资料管理及工程地质问题分析评价提供了重要的工具。

(2)提出了全新的复杂块体建模理论——“切割法”。以此为基础，开发了“边坡块体稳定性分析系统(SASW version1.2)”。该系统克服了复杂形态如五面体、六面体等块体建模的困难，可以根据组成块体的各结构面的产状和位置自动建立块体的几何模型；可以自动判断滑动面和滑动方式，以及各种工况条件下块体的稳定性状况以及相应的加固处理方案。程序提供了动力分析法和等效静力法两种地震影响分析方法，动力分析法中提供了地震波模拟功能。程序界面友好，操作简便，所有图形都可以通过旋转和缩小、放大从任意角度观察。

(3)开发了“边坡二维建模及治理方案计算机辅助设计系统(Slope-CAD version1.0)”。该系统具有交互式地质建模功能，可以利用系统所提供的功能强大的建模工具箱，方便、直观地建立任意复杂的二维地质模型。该系统采用特殊的算法，实现了坡体的自动条分和条块参数的自动采集；并可以实现治理方案的智能化设计。

1.2.3 建立和发展了地质灾害过程模拟与过程控制的理论与方法

(1) 结合边坡地质灾害发育的地质-历史过程及动力学机理,综合采用当前数学-力学及岩土数值模拟的最新成果,建立了边坡地质灾害全过程模拟的数学-力学理论及相关的模拟技术。其特点是:充分考虑了边坡地质灾害形成机理及其变形破坏过程的特点,并针对复杂地质结构建模和复杂地质过程、复杂介质性态及复杂地质环境模拟与“仿真”等关键理论与技术问题,建立了一套理论严谨、实际操作可行、适用性较强的分析理论与方法,开发了配套的模拟技术。

(2) 针对边坡地质灾害中地下水作用的特点和边坡的介质特性,从地下水在复杂介质中流动的基础理论问题研究出发,建立了复杂介质条件下边坡渗流场的分析方法及基于水-岩力学作用的边坡地质过程行为模拟理论。提出了节理岩体概化为 EPM 模型的判据,对应的渗流模型及渗流场与应力场耦合的力学模型;基于离散单元法,建立了块体介质系统中地下水流动及其作用的离散元模型及固-液耦合数值计算方法,开发了考虑水-岩相互作用的离散单元程序。

(3) 针对高地震烈度地区边坡岩体的失稳分析及数值模拟,本研究发展了离散单元法和传统的地震动力分析方法;提出了动力离散元方法的基本思想,建立了相应的数值计算基本方程,并与可变形块体相结合,开发了通用的动力离散元分析程序(DDEM)。

(4) 从岩石热学及温度应力场效应出发,建立了边坡热-力耦合作用数值模拟理论和方法,并根据温度变化的周期性致使热应力具有的交变特性,提出了边坡浅表部岩体在交变热应力作用下,疲劳破坏的论点及其相应的理论判据。进一步将岩石热学与渗流场模拟相结合,提出了边坡水-热耦合作用的数值分析方法。

(5) 结合边坡工程实践,提出了几类常见的复杂介质或介质性态的模拟理论与方法:针对节理岩体的优势组成特性,提出了节理岩体正交各向异性模拟理论,建立了正交各向异性岩体的弹塑性分析模型和数值计算方法;针对节理的不连续性和断续延伸特点,提出了模拟这类结构面的“虚拟节理法”针对开挖卸荷过程中岩体所表现的复杂工程特性,通过对开挖卸荷过程的物理模拟试验,揭示了卸荷情况下岩体力学特性的变化;表明在开挖卸荷条件下,岩体的强度和变形特性较通常的加载情形,会有很大程度的降低,且下切或开挖卸荷速率越快,变形和强度特性的降低程度越大。

1.2.4 将上述理论和方法用于工程实践中

(1) 以攀枝花矿山营盘山高陡边坡为例,提出和深化了边坡变形稳定性的概念,并从变形稳定性的角度对营盘山高陡开挖边坡在各开挖阶段的稳定性状况进行了模拟和评价,所得结论已应用于矿山设计和生产。

(2) 以康定白土坎滑坡为例,重点研究了边坡岩体在地震条件下的动力响应与动力失稳过程,分析计算了白土坎滑坡在地震动力作用下的变形破坏过程、稳定性状况以及整治处理措施。

(3) 以香港深基座滑坡为主要研究对象,重点研究了不同水文地质结构的边坡在暴雨条件下的水-力相互作用方式、边坡的稳定性状况和变形破坏模式。从而为这类滑坡的预报和

防治提供了新的途径。

(4)以三峡船闸高边坡为例，重点研究了开挖卸荷对边坡变形的影响，对三峡永久船闸在开挖过程中的变形机理、变形方式以及变形量等进行了较为深入系统的研究，获得了与实际监测非常吻合的结果，并指导了船闸的后期施工及边坡安全控制。

(5)以贵州印江岩口滑坡为例，提出了边坡变形破坏的全过程模拟思想和方法，模拟再现了岩口滑坡从小变形到大变形失稳破坏的全过程；在此基础上，提出了滑坡残体和围岩体稳定性的控制措施。

1.2.5 地质灾害信息系统

(1)提出了地质灾害空间数据库标准体系，并在地质灾害调查工作中开始了初步的应用。从地质灾害空间数据库建设的角度出发，建立了地质灾害空间数据信息的层次结构关系，提出了图元类型编码原则，图元类型数字编码方案，给出了空间数据的分层标准和图元属性表结构，提出了地质灾害空间数据库的数据存储方案，形成了一套内容齐全、结构完整的地质灾害空间数据库标准。

(2)开发建立了地质灾害区划分析模型结构和指标，以及主要灾种的时空分析模型体系及模型库管理系统。运用地质灾害评价分析理论和 GIS 的集成技术，开发建立了地质灾害区划分析模型结构算法及指标；开发完成了地面沉降、岩溶塌陷、滑坡和海岸侵蚀等地质灾害主要类型的时空分析模型体系；提出了以“要素分析、趋势预测、危险性评价、易损性分析和风险性分析”为体系的评价方案；通过建立模型库系统实现了模型的优化管理和运行。

(3)成功地开发了“地质灾害信息处理与减灾决策支持系统”软件，实现了“数据信息维护、数据信息查询、模型分析、数据输出(通讯)”等功能并在如下方面取得了突出进展：

a. 开发完成了图元与多重外挂数据库的连接操作，并实现了图元与属性的联动。

b. 开发的模型评价分析系统实现了与空间数据库间的数据关连操作，建成了集“数据库维护、信息检索查询、模型评价分析”等功能于一体的集成环境。

(4)利用 GHIDS 系统进行了示范性研究工作，完成了京津唐地区地质灾害空间示范数据库的建设；利用示范数据库的资料，进行了唐山市岩溶塌陷危险性和风险性分析；建成了湖北省地质灾害示范数据库，完成了全省范围内的地质灾害区划，提出了地质灾害危险程度预测成果。

1.3 环境地质科学研究进展

地质科学是研究地球的科学，历来与人类社会生存发展联系在一起。传统的地质科学研究地球的形成、演化，进而在为满足不断发展的社会对矿产资源、能源的需求的同时，自身也得到了发展。随着人口剧增、资源的开发、科学技术的进步，人类面临资源、发展与环境的压力是前所未有的。顺应时代变化的需要，地质科学衍生出许多边缘学科，环境地质学是其中之一。

环境地质学是 20 世纪 60 年代在国外书刊上出现的，关于它的涵义和研究范畴，各国学者持有不同的理解。最初使用这个名词的是 Hackett^[7] 他认为“环境地质学是研究和用地

质学达到协调和完善状态的一个新方法”。Flawn^[6]更广泛更明确地概括为“环境地质研究包括自然资源的寻找和开采，废物的处理，构造运动对建筑结构的效应，地球物质成分和细微变化对人体健康的影响，由于人口和工业的高度集中，产生各类环境地质问题，亦都在它的研究范畴之内”。Keller^[8]指出“环境地质学是一门应用地质学，主要研究人与自然环境之间的相互作用的各个方面”。由 Michael Abaly 主编的环境辞典中，将环境地质一词定义为“应用地质数据和原理，解决人类占有或活动造成的问题（如矿物的采取、废弃物的消纳、地表侵蚀等地质评价）”。原苏联地质部制定了《地质生态调查和填图要求》（赵运昌译编 1994），把环境地质学定义为地质生态学，指出“地质生态学是地质学科的分支学科，把地质环境的状态成分和性质作为生态系统的组成部分。指出地质环境与大气圈和水圈的相互作用，可能导致地球表面不断变化，出现生态和社会性的危险过程（灾害）；人类大规模经济和技术活动影响着地质环境状态和性质的改变，地质环境对国民经济的目标功能，起着超前的决定作用”。当然也有的学者对环境地质一词持相反意见，如 Oakeshott^[9]说“环境地质是一些荒谬名词”又说“所有地质学都是环境的”显然这些意见没有考虑到地质科学的发展。20 世纪 80 年代初期，在第 26 届国际地质大会上，莫斯科大学 Sergeev 教授进一步举出了人类工程经济活动是强大的地质营力，并已成为一些新的应力作用。国际地科联环境规划地质科学学委员会出版《地学在规划和管理人类环境中的重要作用》指出“人们不能制止环境问题的发生，但改善规划和维持人类社会的方式，是环境地质科学的目的”。

回顾 1950 年代以来，我国的水文地质、工程地质几乎全盘从苏联引进。随着第一个、第二个五年计划的实施，水文地质、工程地质工作者力图认识和鉴定地下水或岩土工程的自然属性及其地质背景，或是论证地下水补给、径流、排泄条件，求取含水层参数，提供符合国家标准的一定涌水量和水质的新建水源地，或是为长江三峡或三门峡水电站进行勘探，论证工程建设基础的稳定性，或是为新建铁路选线或是为长江大桥桥址选线方案比较进行着艰苦卓绝的野外勘探和试验（实验）工作，鉴定岩土工程的自然属性，包括力学强度评价和场区工程的稳定性，提供了一批符合国家建设要求的工程场址（厂址）。当时为了保证矿山建设环境安全，国家亦明确规定露天开采场的矿山必须对边坡的安息角加以确定、地下坑道开采要求对矿层顶部底板抗压、抗剪强度的测试，以及对预留矿柱的要求，并做出相应的评价。为了保护地下水水质要求在地下水集中开采区建立相应的卫生防护带，这些都是早期对矿产资源开发的环境保护要求，对推动当时国家蓬勃发展的经济建设有着重大作用。

进入 20 世纪 60 年代至 20 世纪 70 年代，随着国民经济发展，一方面社会经济有了长足进步，另一方面由于对自然资源的过度开发与消耗和污染物质的随意排放，开始出现了资源的短缺、环境污染和生态环境相继出现了意想不到或估计不足的环境地质问题，诸如过量抽汲地下水导致地面沉降以及随后天津、宁波、苏州、无锡、常州等地区，甚至一些内地相继出现了地面沉降。从 20 世纪 60 年代至 20 世纪 70 年代 华北平原持续干旱 平原区出现了“机井热”，大量开采地下水，几乎与此同时华北平原海河流域，建成了控制山区面积 86%、总库容达 265 亿 m³ 的地表水库《地矿部地质专报（6）》（1992）以致改变了平原区天然径流 当然也截断了地下水天然补给，导致水资源循环系统发生了根本性变化，一方面形成了严重的水资源供需矛盾，导致大面积地下水降落漏斗的扩张，出现了深层地下水的枯萎状态和浅层地下水疏干、地表径流的功能受到了抑制，另一方面由于抽汲地下水灌溉，部分回归水入渗，

产生了新的盐分反复式积聚，致使地下水资源进一步匮乏。由于周边水循环的环境变化，天津沿海地区地表水体的覆盖率由 20 世纪 50 年代的 27.8% 减少到 20 世纪 80 年代的 7.7% 这或许是人们不易察觉又十分重要的水循环负效应。随着大规模煤田、金属矿山的开发，著名的广东仁化凡口铅锌矿、湖南斗笠山煤矿等矿山，由于矿山疏干排水，降低地下水位 破坏了岩溶化含水层的岩体力学平衡状态 或者由于增大了水力坡度 使洞穴、溶隙及上覆土层被潜蚀冲刷 导致岩溶塌陷 危害矿井、城镇及农田。铁路沿线 特别山区铁路几乎年年受夏季暴雨袭击，导致山区铁路路基遭受崩塌、滑坡、泥石流的灾害侵袭而停止运营多有报导。

从 20 世纪 70 年代以后对环境地质开始有所讨论，胡海涛等^[21]认为环境地质学主要是研究地质作用，地球物质与人类活动之间的相互关系和影响，也可以说主要是研究人类工程-经济活动与地质环境之间的相互作用和影响，从而达到合理利用和保护地质环境之目的。张宗祜^[10]认为环境地质应当是研究人类技术活动与地质环境相互作用影响的学科。陈梦熊^[11]认为环境地质学是一门综合性很强应用地质学范畴的一门分支学科，以研究人-地关系为主，介于地质科学与环境科学之间的一门边缘学科或综合性学科。王瑞久等^[13]认为 环境地质学的研究对象分为两个方面 地球自身变化对人类的影响 包括火山、地震、海啸等方面和地球受人类活动引起的的影响，二者可以概括为一句话，研究人类与地质环境之间相互作用的两个领域。其研究目的是保护人类的健康和安全，保护人类的环境质量，以及促进土地及其资源的合理利用。毛同夏^[12]认为环境地质学是环境科学领域的一个重要部分。指出环境地质学是应用地质学的理论与方法，研究地质环境的基本特性、功能和演变规律，研究人类活动与地质环境之间的相互作用、相互制约的，解决人类开发利用自然环境遇到和可能引发的地质问题，探索在发展社会经济的活动中，合理利用与保护地质环境的途径。综上所述 各家对环境地质学涵义有如下几点共同的认识：

- (1) 环境地质学是地质科学中一门新兴的应用学科，是环境科学的重要组成部分；
- (2) 环境地质学是应用地质理论与方法，研究地质环境的基本特征、功能和自身演变规律的学科；
- (3) 环境地质学侧重研究人类工程技术经济活动与地质环境相互作用、相互影响、相互制约的关系；
- (4) 环境地质学着力为人类合理开发利用地质矿产资源和保护人类生存的地质环境，在可持续发展战略中做出贡献。

可见，环境地质学已经成为国际地质学界认同为地质科学中一支应用学科，并且已经成为环境和环境保护方面一项不可忽视的研究领域。20 世纪 70 年代后期，人们开始重视环境地质研究 人们自觉不自觉地把水文地质、工程地质、环境地质联系起来 即人们通常称之为水、工、环。在一定意义上说来 水、工、环地质工作要求人们不仅重视人类工程技术经济活动与自然地质作用的复合系统引起的环境变化，并且尽可能减少或减缓环境的恶化对人类造成的损失。近几十年来环境地质学科的发展，实际上与国民经济建设和社会发展联系在一起的，特别是改革开放以来，东部沿海城市获得了很大发展，当然面临环境地质矛盾亦是突出的、尖锐的，下面列举若干方面研究成果作为环境地质学科的进展。

1.3.1 沿海经济发达地区及城市环境地质研究取得进展

从世界范围来说城市人口增长是不可逆的,1900年前世界上没有500万人口的城市,1950年有6个人口为500万的城市,2000年这样的城市已有60个,其中增长最快的是发展中国家,世界上将有60亿人口中的一半生活在城市,而且大部分居住在沿海。城市历来是人类活动对地壳表层影响最大的地区,我国沿海经济区人口密集,工业及经济发达,享有舟楫之利,历来是我国对外开放的门户,同时又是支援内地建设的基地。从20世纪60年代起地质部门首先为满足经济及国防建设,对沿海及岛屿开展了供水水文地质条件及工程建设适宜性的调查。20世纪70年代有关部门对海岸带进行了多学科、多层次的综合调查。随着改革开放的兴起,地矿部门专门先后多次开展了沿海城市环境地质环境,1986~1990年即“七五”期间选择了秦皇岛、南通、宁波、闽南三角开放区以及湛江等地的环境地质研究,1991~1996年即“八五”又开展了上海浦东及厦门专属性环境地质研究。与此同时,由地矿部地质环境司主持沿海主要城市水资源及地质环境评价。上述多项研究成果,对沿海城市地震带分布、地震危险性、区域地壳稳定性规律,对沿海地下水资源开发与诱发地面沉降、地面塌陷以及水环境污染引发城市水资源短缺,对未来海平面升降,江岸、海岸稳定,港口回淤等重大环境地质问题进行了论证。还编制了一套适用沿海城市的环境地质样板图系(宁波),为沿海城市改革开放奠定了比较好的基础。

垃圾至今仍然是困扰城市发展的一大难题,据1999年2月科学时报报导,全国垃圾的历年固体废弃物堆存量已达60多亿t,侵占土地面积多达5亿 m^2 。截至1996年底我国城市数目已达666座,其中有200多座城市陷入垃圾包围之中,北京地区50 m^2 以上的垃圾堆已达4000多处,上海已达2000多处,长期以来采用露天堆放、自然填沟和填坑消纳城市垃圾,对土壤、地下水、大气已造成现实影响和潜在危害。上海浦东等地开展了垃圾地质填埋,对地下水污染影响做了有益的研究。

现代化城市愈来愈向“高”、“大”、“深”方面发展,所谓高是高层建筑林立,大指建筑物规模愈建愈大,所谓深是指建筑物向地下发展,甚至过江隧道、越海隧道都在拟议或建设之中。因此迫切需要研究地质条件以及建设将引发或已经产生的那些负面效应,为指导城市建设规划提供科学依据,为满足改革开放城市健康发展提供地质科学建议。

1.3.2 水资源开发引起的环境的地质问题受到了重视

我国水资源总量居世界第六位,人均占有量却只有2300 m^3 ,约为世界人均的1/4,美国的1/6,前苏联的1/8。人均水资源已排在世界的121位,是世界上13个贫水国家之一。我国是一个季风气候的国家,同时水资源时空分布极为不平衡,给水环境带来先天性矛盾。降水70%~80%集中在夏季6~9月,长江及其以南地区水资源占全国总量的80.4%,人口占全国53.3%,耕地却只占35.2%,属于人多地少水资源相对丰富的地区,而长江以北水资源仅占全国总量的14.7%,耕地占59.2%,人口占44.4%,属于人多地多水资源短缺地区^[20]。黄淮海流域耕地和农业产量,几乎占全国40%,人口占34.8%,而水资源仅及全国7.7%,人均水资源只有500 m^3 ,相当于以色列水平,亩均水资源少于400 m^3 ,这里既是我国主要农业产粮区,又是我国水资源短缺地区。但是这个地区地下水资源为754.12亿 m^3 ,占黄淮海平

原水资源总量 1549.37 亿 m^3 的 48.7%，发挥地下水在时空分布上的优势，对改善这个地区水环境有着重要意义。以海河流域为例，截至目前，无论地表水还是地下水，开发利用程度均居高不下，几乎到了枯竭状态。多年来河北省地下水及水文地质工程地质研究所，原北京地质学院和现中国地质大学（武汉）等单位均为此做了大量工作。研究表明充分发挥当地浅层地下水调节的功能，合理开发利用当地浅层地下水，以丰补歉，对于旱涝碱咸等多种自然灾害治理，防止环境退化，都是现实意义的，特别在开采咸水区浅部薄层淡水，汛期前降低了地下水位，腾出库容，有利于接受雨水补给，达到防涝治碱的目的。

地下水资源在国民经济建设和人民生活方面起着重要的作用是众所周知的，特别在长江以北的城市地下水资源开发占有重要地位，据统计^[19] 全国有 310 个城市以开采利用地下水作为供水水源，约占全国城市供水的 71%。其中有 54 个城市以地下水为主要供水水源 北方城市就占 46 个 约占 70% 南方 8 个城市以地下水作为主要供水水源 占 20% 左右。因此，地下水在人民生活中作用是不容忽视的。环境地质工作不仅在于提供足够水量又符合饮用或工业用的水质，而且要弄清开发后将产生哪些负面问题，并提出预防办法。

由于水资源开发不当而造成生态环境恶化，在西北干旱地区最为突出，已严重影响农业生产和居民生活。以甘肃河西走廊为例^[1] 由于盲目兴修水利工程 导致绿洲地区泉流量从 20 世纪 50 年代 32 亿 m^3 减少到 90 年代 14 亿 m^3 。其中石羊河流域由年泉排泄量 8 亿 m^3 减少到现今完全消失，以致原有灌溉系统，几乎全面破坏。下游民勤地区，由于上游截流，补给来源减少 地下水位剧烈下降 造成大片植被死亡 草场退化 沙漠面积不断扩大。

我国本来水资源并不充裕但水环境污染又十分严重，据调查全国 10 亿 km^2 干支流的河道已污染达 4.6 亿 km^2 占 46.4%。地下水污染 特别在城市中地下水都不同程度受到污染 其中浅层地下水中“三氮”和硬度指标呈上升趋势，致使综合超标状况逐渐加重。为了保护地下水水源 地下水污染研究始于 20 世纪 70 年代，大体要求弄清地下水污染源，污染途径和污染程度，从而提出防治地下水污染措施，在一定意义上对地下水污染研究还处在被动状态。20 世纪 80 年代以来国外开展了地下水污染源位处理的方法多种多样，国内许多单位开展了类似研究。诸如清华大学、南京大学等，对山东淄博大武水源地岩溶地下水受到石油类有机污染，借助长期强力抽水 抽水总量达 26000 m^3/d ，基本上能截获地下水污染。由中国水利勘察设计院与美国环境保护署在中国北方饮用水应用膜技术合作方面取得了较大进展，该项目采用膜技术对石油化工污染地下水、含高氟地下水和地下水受微生物污染的处理等方面显示了广阔的应用前景。中国地质大学（北京）沈照理、钟佐堦^[14] 等论证了污水土地处理系统是一个利用地质环境净化功能的工程系统，并且介绍了国际上已相当大程度开展的城市污水快速渗滤方法。这种方法伴有某种预处理措施，然后，选择渗透性较好的多孔介质，借助包气带净化污水的作用原理，去除污染物。这种快速渗滤方法具有价格低廉，运行可靠，效果明显和操作简单、管理方便等优点，当然这种方法去污能力及去污机制还有待进一步研究。但是人们已经看到了一旦地下水特别是浅层地下水遭受污染，为减轻污染程度或借助于强力抽水或借助岩（土）孔隙介质去除污染、改善地下水环境，仍然是一个可喜的方向。环境地质工作要求在弄清污染程度基础上，选择最优场地、确定最优方法，使地下水污染减轻到最低限度。

1.3.3 地质灾害防治工程取得了很大进展

我国地域辽阔、山地纵横、气候多变，地质条件迥异，东西横跨经度 62° 南北纬度相差

50° 高原、丘陵、山地约占大陆面积的 79% 而盆地、平原仅占 21% 左右。中国历来是一个地质灾害频繁发生的国家 西北、华北、东北部分地区 干旱少雨 温差悬殊 风蚀剧烈 水土流失、土地沙化、沙漠化、土地冻融及土地盐渍化等地质灾害多发。西部、西南部丘陵山区及部分东南丘陵地区 崩塌、滑坡、泥石流灾害频繁发生。东部平原 地面变形、土地退化、特殊类土及海洋动力灾害等亦常危及国民经济健康发展。近几十年来国家重大工程经济建设诸如已建成的宝成、成昆铁路的沿线，黄河上游刘家峡、龙羊峡等重大水电工程以及正在施工的长江三峡水库开展了以地质灾害为主的环境地质调查，并取得了不少重要成果。长江三峡库区 从 1950 年代以来，至少进行过三次库区环境地质调查。对 20 世纪 80 年代先后发生的鸡扒子及新滩滑坡都做了勘查研究工作，其中新滩滑坡由于事先发布了预报，大部分居民得以平安撤离。“七五”以来地矿部门参与和开展了“库区迁建城市的环境地质研究”“三峡库岸稳定性研究”“库区移民环境地质研究”等攻关任务 并且出版了“长江工程库区大型滑坡崩塌图集”及多项研究成果，图集是在全面调查三峡工程库区 400 多个滑坡、崩塌基础上 选择了 40 个大型滑坡、崩塌进行了全面、系统、深入的勘查和多学科研究 为库区经济开发、国土整治、移民、城市建设、地质灾害防治等提供重要依据。为配合三峡工程的兴建，《地质工作三峡奉献四十年》一书的出版，指出地矿部对三峡工程坝址选定、库区地质灾害防治做出了应有的贡献。1993 年以来地矿部门在国家支持下为保证三峡大坝兴建，保护长江航道正常运营，开展了链子崖-黄腊石危岩体专项防治工程，设计指导思想是尽可能保持危岩体整体不扰动的天然分布状态下进行。经过 6 年努力防治工程施工取得了勘查、设计、施工、监测一体化的重大突破。在地质灾害防治工程中首次使用了 3DS(三维动画)和多媒体技术，尝试地质工程的可视化 设计开发了 WINDOWS 环境的地质灾害设计支持系统，提高了设计水平，建立了适合复杂岩层条件的预应力锚固施工方法，建立了立体的实时监控系统。研究表明两处灾害体经受了 1998 年库区暴雨、多雨及持续高水位的考验，变形破坏的发展趋势已得到了有效控制，确保了三峡航道畅通及三峡工程顺利进行，为地质灾害防治工程提供了范例。

1992 年在国家计委和地矿部地质环境管理司组织下 以省、区、市 为单元 全面对地质灾害现状做了调查。由中国水文地质工程地质勘查院段永侯等^[15]编写了《中国地质灾害》一书 重点论述了崩塌、滑坡、泥石流、地面沉降、地裂缝、地面塌陷等地质灾害的类型 灾害发生的基本特点，发展趋势，以及防治灾害的任务与对策。随后还出版了包括台湾省在内的分省地质灾害图集，对推动我国地质灾害监测、研究都有着重大理论与史料意义和实践指导作用。我国地域辽阔 地质条件各种各样 地质环境脆弱 经济建设快速发展又加上许多工程建设在山区、丘陵的陡峭边坡 必然加快边坡失稳 加之人们的防灾意识还比较薄弱 地质灾害发生频率将会愈来愈大，因此，防治地质灾害任务仍然是任重而道远。

1.3.4 土壤侵蚀和沙漠化的防治是一项多学科多部门长期工作，取得了长足的进步

土壤侵蚀又称之为水土流失，中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一。20 世纪 50 年代我国土壤侵蚀面积大于 150 万 km² 近年 40 年来，全国新增水土流失面积已超过 32.37 万 km² 增长率为 21.6% 年土壤侵蚀量为 50 亿 t 占世界总量 17%^[18]。

我国土壤侵蚀最严重的黄河中游黄土高原区 1960~1980 年黄河平均输沙量为 14.86

亿 t 坝库控沙量为 4.873 亿 t。实际年平均产沙量为 19.733 亿 t 较 1919~1949 年输沙量 16.80 亿 t 增加 2.93 亿 t。从 20 世纪 60 年代末期,地矿部在陕西成立了专业队伍,专门研究水土流失规律、防灾减灾。研究表明造成土壤侵蚀有自然作用,特别是每年雨季、暴雨成灾,在起伏破碎的坡面上形成强大的冲刷力,加速土壤侵蚀。人为加剧土壤侵蚀,主要是土地利用不合理 经营方式落后 集中在陡坡垦殖 不合理的耕作方式 顺坡耕作 广种薄收 撂荒轮垦,使土壤性状恶化,加剧土壤侵蚀。中国科学院 1995 年组织湘、鄂、赣、粤、桂五省水土流失调查,五省水土流失面积 24.8 万 km² 占五省土地面积的 21.4% 据统计,1993 年水土流失面积比 1950 年增加 2.37 倍,1993 年水土流失面积比 1980 年增加了 18.4% 相当于每年损失 312 万亩^① 耕作层 损失 N、P、K 养分 1796 万 t。研究表明,南方地区土壤侵蚀加剧是由于森林植被破坏。张宗祜^[16]在《黄土高原区域环境地质问题及治理》一书中正确指出,黄土高原地区自然条件差,环境脆弱,侵蚀危害严重,要改变贫穷落后面貌,首先要改善环境,对各类危害进行治理。指出治理是基础,没有治理就不能充分发掘自然资源的生产潜力,就谈不上合理开发利用,只要遵照自然规律和经济规律,重视保护环境,注意适宜建设规模就能做到合理开发利用资源,积累资金,支持环境改善,以开发促治理。由于风力侵蚀,我国沙漠化和潜在沙漠化土地面积占 33.4 万 km² 从 20 世纪 50 年代起沙漠化土地从原来 13.7 万 km² 增加到 17.6 万 km² 平均每年扩大 1560 km²。20 世纪 50 年代末期,有关部门及地质部门专门在宁夏、甘肃、新疆等地开展治沙研究。在国家统一指挥下,几十年来已经取得了明显效果,如三北防护林带建设,对减缓风沙南侵起了重要作用。但是由于人多地少,人口对土地资源的压力日益增大,沙进人退,沙漠推进和土地沙漠化扩大和沙区自然环境恶化的趋势并没有从根本上扭转。当然防治土壤侵蚀即水土流失、防治沙化、沙漠化是涉及多行业、多学科、多部门的系统工程,要一代一代的发展下去、一代一代的保护下去,国家应当从经济上、从法规上、从技术上支持受土壤侵蚀及沙化、沙漠化地区的人民逐渐摆脱贫困,尽可能与自然协调发展。

1.3.5 南方岩溶石山与地质环境保护取得了进展

我国碳酸盐岩出露面积达 340 万 km² 其中裸露面积达 90 万 km²。长江以南 特别是广西、贵州、云南、四川、湖南诸省碳酸盐岩连片分布 这里地势巍峨峥嵘、错落有致、风光绚丽、景色千姿百态 地下暗河、溶洞深邃莫测 源远流长。虽然年降雨量多在 1000 mm 以上 但地表水渗漏严重 大部分转入地下 雨季地表才有季节性河流和小溪 通常地表水、地下水分布不均,地下水文网又比较发育。碳酸盐岩石山区土层分布零星,而且厚度比较大。只有在峰丛洼地或山间地覆盖型岩溶盆地的第四纪松散层厚度由数十米至一二百米,地表有较多的常年性河流分布,河流两岸也常接纳一些地下河的汇入。南方石山碳酸盐岩分布区地质环境比较脆弱 通常表现在土地贫瘠、植被稀疏、土壤保水性能差 加上气温高 地面蒸发强烈 常常雨后不久就出现旱象。由于石山区降雨入渗系数在 0.3~0.4 有的高达 0.5~0.6 降水大部分转化为地下径流,另一部分降水沿着石山的坡面汇集到洼地,而地下通道又排泄不畅,滞水而产生内涝 还由地下水水位上升 淹没洼地 甚至地下水大量涌出地表 导致南方石山碳

① 1 亩=1 hm²/15

酸盐岩分布区旱涝灾害环生。岩溶塌陷是碳酸盐岩分布区的一种自然地质现象。不过，由于人类工程活动诱发，加剧了岩溶塌陷的灾害层出不穷^[17]。特别是由于矿山排水或矿井突水或城镇集中开采地下水或地下管道渗漏地表污水入渗以及水库水坝渗漏或铁路沿线机车震动等引起的塌陷对人民生命财产造成了一定的损失。应当说贵州岩溶地质研究30余年以来在合理开发利用岩溶地区有限的地表水、地下水资源研究方面为当地经济振兴、矿山开发、农业发展、旅游资源的兴起、兴利避害等方面为岩溶地质环境保护与改善减少各种灾害造成的损失做出了贡献。此外岩溶景观宜人山光水色已经为我国旅游资源的开发带来很多经济效益与社会效益。虽然在碳酸盐岩溶的理论研究已经取得了若干进展，但距离岩溶地区扶贫开发，振兴经济，尚相距甚远。

1.4 地质灾害气象预报技术研究进展与展望

我国目前已建立专门进行地质灾害监测预报的中国地质环境监测院和省、地、县级分站。在地质灾害监测方面主要开展了重点地区的地质灾害巡回监测和定点监测。在上海、宁波、天津建成了地面沉降专业监测网，在西安设立了部分地裂缝监测点；在部分省区地质灾害严重的地区开展了突发性地质灾害群防群测工作；在三峡库区建立了地质灾害监测中心站，建成了库首地区GPS监测网及巴东县城滑坡单体监测网。近年来，通过专业监测与群众性监测相结合，成功地预报了十多处地质灾害，避免了数千人的伤亡和数亿元的经济损失。如1998年汛期，成功地预报了重庆巴南麻柳嘴滑坡，避免了350户1450人的伤亡；2000年2月28日成功地预报了湖北秭归秦家坪滑坡，避免了250人的伤亡。同时，由于地质灾害知识的宣传普及，公众的防灾减灾意识和自救能力明显提高。

地质灾害预测预报技术和方法研究一直是世界性的难题，自20世纪80年代以来取得了长足进展，目前已进入各种半定量-定量预测模型共存确定性模型、统计模型、灰色模型和信息模型共同发展的阶段。特别是20世纪90年代以来数字化信息预测技术、人工智能预测预报模型和非线性预测预报模型的发展，给地质灾害预测预报研究带来了新的挑战和希望。国内外对滑坡、山洪泥石流的预报研究取得了明显进展，主要的研究成果有两个方面，分别是空间预报方法，包括稳定系数预测法、神经网络法、信息模型法、灾变模型法、模糊综合评判法等；时间预报方法，包括斋滕法、灰色理论模型法、非线性动力模型法和神经网络预报方法等。

我国地质灾害监测预报技术方法不断完善和改进，并全面推广应用。

研制了分布式声发射监测系统与相应的声发射信号处理和声发射位置反演技术。声发射监测系统采用分布式，整个系统有12道分布下挂式单体采集器，通过RS-485串行通讯接口与主机(PCI控机)连接。布设在监测目标体不同位置的任一道传感器，在接收到声发射信号后即触发所有采集器同步采样，以全波形式连续监控声发射事件。声发射信号处理的目的是为了提高信噪比，便于声发射信号的识别与提取及统计管理，采用VC++语言编制Activex控件，内容有数据平滑、功率谱分析、数字滤波、互相关计算、小波变换等。在建立观测系统坐标文件、灾害体速度模型文件和声发射事件至各传感器时间文件的基础上，进行声源位置计算，在立体图上标出空间坐标。分布式采集器提高了信号长距离传输的可靠性，分

散了整个系统故障的风险；改进的接口（RS-485）加快了采集速度，消除了相移并为通道的扩展提供了广阔的余地；声发射信号处理采用 Activex 控件方式，可扩展性强，便于组合声发射信号自动处理提取与人机交互方式相结合，提高了灵活性与可靠性；该成果突破了以表征参数监测为主的模式，首次应用声发射源定位技术，能够更有效地掌握破坏区的空间分布及其从无序到有序的转化规律，为地质灾害提供了一种新的监测技术。通过室内和野外模拟试验，定位精度优于 15%。

采用先进的激光技术，解决了精度与测程之间的矛盾，研制了适合于地质灾害监测的激光光源、光学系统和 CCD 面阵激光信号检测和处理系统。通过对俄罗斯产 MC3M-5CA 型摄像望远镜改造，即在主镜头和 CCD 之间串接倍焦镜头，研制成长焦距（总焦距达 1000 mm）高倍率望远镜系统，实现了观测距离 200 m 的预定目标。由定时控制电路控制测量工作，观测周期由 1 小时到 99 小时任意设定。微机处理部分包括 DH-VRT-CG100 图样采集卡、P2 微机及图像处理软件。DH-VRT-CG100 图像采集卡分辨率为 768(H)×576(V)。室内外模拟试验表明，水平位移分辨率为 ± 0.2 mm，垂直位移分辨率为 ± 0.5 mm，测量灵敏度水平方向为 $\pm 0.1\%$ F.S，垂直方向为 $\pm 0.5\%$ F.S，采用多档次测量方式，二维位移测量范围远大于 0~500 mm。该项成果在相对位移监测方面摆脱了接触方式，代之以激光非接触方式，促进了监测技术的进步。率先将小波多尺度思想引进井间层析成像，建立了小波多尺度井间地震层析成像方法（MLSQR），很好地解决了非线性成像的难题，明显改善了基于线性化 CT 的性能，大大提高了图像的质量和分辨率。对井间地震层析成像的分辨率进行了深入研究，根据射线密度、射线正交性和点扩散函数分析，CT 图像水平方向最小分辨距离为 3 个像素，垂直方向为 2 个像素，图像垂直方向的分辨率高于水平方向的分辨率。通过有限观测角问题和有限观测系统的研究，提出了有限观测系统设计的一般原则和方法。应用小波变换和 BP 神经网络算法，实现了首波初至的高质量提取。大量的数值模拟、实验室模拟试验和实际工程应用，证实了成果的实用性和良好效果。系统总结了国内外滑坡预测预报理论和方法的发展现状，对三峡库区黄土坡滑坡、黄腊石滑坡进行了三维动态模拟计算，揭示了滑坡体不同部位稳定性的差异。初步揭示了滑坡边界轨迹结构的分形分维特征，通过三峡库区长江干流两岸重大滑坡轨迹分形结构的统计分析计算表明：①滑坡边界轨迹具有分形结构特征；②滑坡宏观扩展变形是一个增维过程；③滑坡边界轨迹越复杂，有序性越好，分维值越高，则稳定性越差；④典型滑坡边界轨迹的极限分维值大致为 1.5 左右。从预测学角度比较系统地探索了滑坡灾害预测预报的理论基础，将其概括为物理力学（或岩土力学）统计学和概率论、信息学三方面。重点探讨了滑坡预测的分形分维技术、信息模型预测技术和灰色模型技术。其成果受到国内外相关学者的重视。通过对不同类型黄土滑坡的调查分析、黄土滑坡变形破坏模型试验、滑坡动态变形的计算机仿真模拟、滑坡降雨和灌溉入渗实验研究，结合典型黄土滑坡宏观变形破坏的系统工程地质分析，将黄土滑坡变形作用机理概括为蠕动-拉裂、滑移-拉裂、塑流-拉裂、潜蚀-滑移和震动-滑移五种基本类型。采用扫描电镜详细研究了滑动带土的显微结构，定量研究了滑动带土易滑矿物、孔隙结构及矿物颗粒定向度等因素与滑动带土抗剪强度的关系。选择兰州皋兰山滑坡和白龙江中游的舟曲泄流波滑坡为典型研究对象，将非线性科学的自组织预测模型和相空间投影预测技术引入滑坡动态变形的预测，做出了趋势性的中长期与中短期预测，实际应用效果较好，具有较强的普适性。声发射源