

doi: 10.12029/gc20170505

张永双, 孙璐, 殷秀兰, 孟晖. 2017. 中国环境地质研究主要进展与展望[J]. 中国地质, 44(5): 901-912.

Zhang Yongshuang, Sun Lu, Yin Xiulan, Meng Hui. 2017. Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review[J]. Geology in China, 44(5): 901-912(in Chinese with English abstract).

中国环境地质研究主要进展与展望

张永双 孙璐 殷秀兰 孟晖

(中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要:环境地质研究是以人-地相互关系为核心、促进人类与地质环境协调共处的重大课题,受到国内外地质学界普遍关注。本文在简要回顾环境地质学科发展历程的基础上,较系统地总结了国内外环境地质研究的主要进展及存在的问题。结合我国当前生态文明建设和未来发展需求,提出环境地质研究是新时期地质工作的重要使命,未来发展方向和重点领域应涵盖城市地质研究、水资源可持续利用和管理、地质灾害监测与综合防治、生态环境系统保护、地球关键带相关问题研究等,强调学科交叉及新技术新方法的系统性研究,在合理开发利用资源和保护地质环境中发挥重要作用。

关键词:环境地质;资源;环境;进展;展望

中图分类号:P66 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2017)05-0901-12

Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review

ZHANG Yongshuang, SUN Lu, YIN Xiulan, MENG Hui

(China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081)

Abstract: Environmental geology which emphasizes the entire spectrum of human interactions with the environment and aims to maintain sustainable development of human body and geological environment, has been recognized as a major concern in geology and environment research. This paper reviewed the developing process of environmental geology discipline, and discussed the significant achievements and key issues of environmental geology research in the whole world. This provides a perspective from which to propose that environmental geology research is an urgent need for geological work with the purpose of meeting the requirements of ecological civilization construction and country development. The study of the work puts forward the development direction and priorities of research areas of environmental geology in the aspects of urban environmental geology, water resource sustainable utilization and management, geological hazard monitoring and integrated control, ecological environment protection, and earth critical zone research. It is suggested that interdisciplinary research and comprehensive research on new technology and method constitute the general trend of environmental geology development, which will profoundly influence the research progress and provide better understanding of relationships between human body and geological environment, and the problem as to how to plan better to utilize resources and protect geological environment.

收稿日期:2017-09-20;改回日期:2017-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41501351)和国家级地质环境监测与预报项目(121080000022)资助。

作者简介:张永双,男,1968年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事工程地质与地质灾害方面的研究工作;E-mail:zhys100@sohu.com。

Key words: environmental geology; resources; environment; progress; prospect

About the first author: ZHANG Yongshuang, male, born in 1968, doctor, senior researcher, majors in engineering geology and geohazard research; E-mail: zhys100@sohu.com.

Fund support: Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41501351) and the Project of State Geo-environment Monitoring and Forecasting of China (No. 1210800000022).

1 引 言

地质环境是支撑人类生存和发展的重要基础。随着世界人口剧增和经济迅速发展,人类活动深刻影响了地质环境,全球性的环境地质问题频发,社会影响大。我国近30年来工业化、城镇化快速推进,国土结构急剧变化,土地、地下水、矿产等资源开发力度加大,地下水资源衰减、地质灾害、矿山环境地质问题、环境污染等问题较突出。截至2016年底,全国有24个省(区、市)存在不同程度的地下水超采,现有地下水降落漏斗191个,面积约 $8.4 \times 10^4 \text{ km}^2$;有21个省(区、市)的近102个县级以上城市发生了地面沉降;2011年以来我国突发性地质灾害造成直接经济损失超过310亿元,依然是制约经济社会发展的重要因素;地下水和土壤质量状况总体不容乐观,部分耕地和工矿废弃地土壤环境问题突出。这些问题加剧了资源、环境和人口之间的矛盾,威胁人类生存和可持续发展。在新形势下,我国社会经济发展和环境保护对环境地质工作需求越来越迫切。按照我国“五位一体”发展布局和生态文明建设要求,正确认识人类活动对地质环境的影响,掌握区域环境地质问题的特征和规律,是新时期地质工作的重要使命和重大课题,对于合理开发利用资源和保护地质环境、促进人类与地质环境的协调发展具有重要的现实意义。本文在简要回顾环境地质发展历程的基础上,通过梳理国内外环境地质研究主要进展,探讨未来环境地质研究的发展趋势和方向,有助于确定我国新时期环境地质工作重点,更好地服务于社会经济发展、资源环境保护和环境地质学科发展的需要。

2 环境地质研究的历史回顾

环境地质学作为人地关系发展的产物,以人-地相互作用和相互关系研究为核心,旨在服务于人与自然可持续发展,已成为当今国内外地质学界关

注的热点。从学科内涵而言,环境地质学有广义和狭义之分。广义的环境地质学包括环境水文地质学、环境工程地质学、环境地球化学、生态环境地质学等,属于环境科学的范畴(徐绍史,2010)。狭义的环境地质学主要涉及与人类活动相关的地下水、地质灾害、矿山地质环境、水土环境等研究领域。本文立足于我国主要环境地质工作,从狭义角度总结国内外环境地质研究和学科发展进程,分析未来环境地质学科的发展方向,进而推进相关环境地质工作的开展。

2.1 环境地质研究起步阶段

环境地质学起源于20世纪60、70年代,是为减缓人类活动对自然的破坏、满足社会发展的需要而诞生的(哈承祐,2006)。当时美国、英国、西德等工业发达国家,已感到环境地质问题的迫切性,开始把地质灾害、资源开发利用等列为环境地质研究的范畴。Flawn(1970)较早对环境地质概念和研究范畴进行了探讨。Burton(1978)、Alexander(1983)等提出环境地质研究的主旨是了解地质环境与人类活动的相互作用,认识地质灾害的特征和规律,并预测其趋势。该时期为环境地质研究的起步阶段,我国在这一阶段对环境地质问题的认识和关注度总体较低,主要是为满足城市建设和经济发展需求,部署了少量水文地质、工程地质、地球化学等专项调查工作,并在地下水资源开发利用、地面沉降、地方病等方面开展了相关研究(王大纯等,1965;张宗祜,1979)。

2.2 环境地质研究发展阶段

进入20世纪80、90年代,可持续发展得到世界各国的共识。随着《环境与发展宣言》、《21世纪议程》等重要文件的出台,国际科学界启动了《国际地圈-生物圈计划》、《国际减灾十年》等重大国际计划。环境地质学以环境和灾害为主题,得到国际地质学界广泛关注,逐步发展为地质学的一个分支学科,并推动了环境地质研究快速发展(张宗祜等,

1995)。在此期间,Keller(1982)定义了环境地质学是一门应用地质学,利用地质理论和方法研究人类活动与环境的相互作用,旨在减少人类活动对环境的负面影响,并提出解决方案。随后,西方国家相继启动了环境地质填图计划、地下水资源和水质评价计划等,服务于地质灾害风险评估和防控、土地利用评价和环境保护规划、地下水资源保护和水质改善、危险废物处置场地及重要工程选址,以及矿产资源开发和环境影响评价等(USGS,1986,1995,1998;袁建新,1996;曲永新等,1998;张丽君等,1999)。该时期的环境地质研究主要集中在地质灾害(地震、火山喷发、滑坡、地面塌陷、放射性物质和有毒废物危害)、海岸带环境问题(海岸线变迁、湿地退化、海湾和河口污染、洪灾等)、地下水资源保护和管理、能源开发及其对环境的影响、生态系统保护和农业发展,以及城市环境地质问题等(Lawrence,1992;Hagan,1994;Zektser et al.,2006)。

我国环境地质研究始于20世纪80年代,是面向国家改革开放时期重大工程建设和城市快速发展的需要而产生的。国内一批学者相继引入环境地质理念,并进行了深入讨论和研究,形成如下共识:①环境地质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科学、环境科学及其他相关学科的理论与方法,研究地质环境的基本特征、功能和演变规律及其与人类活动之间相互作用、相互影响的学科;③环境地质学研究对象广义上为人类社会与地质环境组成的复杂系统,即岩石圈与大气圈、水圈、生物圈的相互关系;④环境地质学着力为可持续发展战略服务(王瑞久等,1988;陈梦熊,1995;胡海涛等,1999;罗国煜等,2000;施斌,2002;张宗祜,2005;哈承祐,2006)。

在此期间,我国地质部门的改革和一系列工作计划任务极大地推动了环境地质学科的发展,特别是1988年原地质矿产部(1998年以后为国土资源部)被赋予地质环境保护的职责,进一步将地质环境保护拓展到地质灾害等领域。该时期,我国环境地质研究主要集中在区域性环境地质调查与编图、水资源开发与生态环境问题研究、地质灾害防治等方面,先后开展了全国大江大河和重要交通干线沿线地质灾害专项调查、全国重点地区水资源与地质

环境论证、以供水和工程建设及地质灾害防治为主线的重要城市环境地质调查等,编制完成了长江流域和黄河流域环境地质图系、以地下水和地质灾害等为主题的环境地质图件,初步建立起全国环境地质监测网,为国民经济建设和社会发展做出了重要贡献。此外,矿山环境地质研究也得到了重视和发展(王思敬等,1995)。

2.3 环境地质研究快速发展和完善阶段

21世纪以来,全球和区域合作成为环境地质研究的重要组织形式,主要研究内容包括全球性气候、全球性海平面变化、全球物质和能量循环等。环境地质研究进入快速发展和完善阶段。美国、欧洲等国家逐渐确立了以问题为导向、以需求为研究目标的工作思路,环境地质研究在气候与土地利用变化、水资源利用和保护、地质灾害预警预报、城市环境地质、矿山环境地质、环境健康、生态系统等领域不断完善和深化(USGS,2007;BGS,2009)。各种先进的物探、化探、遥感、地理信息系统、大数据等技术在环境地质研究中得到广泛应用,全球性和区域性的监测网络已经建成。

我国在此阶段确立了走可持续发展道路,将保护环境列为一项基本国策。在此背景下,国土资源部中国地质调查局组织实施了国土资源大调查计划(2000—2012年),围绕国家发展和资源环境保护需求,先后部署开展了全国地下水资源与环境评价、城市环境地质调查与评价、大江大河(长江、黄河)环境地质调查、东南沿海及重要经济区环境地质调查、地面沉降调查与防治、地质灾害防治预警预报、矿山环境地质调查、地下水污染调查与防治等多项环境地质调查工作,基于工作成果编制了全国及地方环境地质图系,基本摸清了我国主要环境地质条件及问题;地下水、地面沉降、突发性地质灾害、矿山地质环境、水土地质环境等专业监测网形成并完善,监测预警能力显著提高;开发了各类环境地质信息系统,地质信息服务能力显著提升(殷跃平,2004;文冬光等,2006;李超岭等,2015)。

近年来,围绕京津冀协同发展区、长江经济带、“一带一路”绿色发展以及集中连片贫困区脱贫攻坚等重大需求,中国地质调查局以“瞄准重大需求、解决重大问题、聚焦重大目标、形成重大成果”为导向,部署了重要经济区和城市群综合地质调查、地

下水调查和监测、地质灾害调查和防治、矿山地质环境调查、资源环境承载能力评价与监测预警、地质数据信息服务等工程,编制出版了一系列支撑服务重要经济区和城市群规划建设的环境地质图集等,并形成一系列政策建议报告。基于以上工作,我国形成了环境地质研究的重点领域:城市环境地质、水资源合理利用和保护、地质灾害防治、矿山地质环境、环境污染和人类健康、农业可持续发展等(刘传正等,2012;奚小环等,2013;吴爱民等,2016;郝爱兵等,2017;武强等,2017)。

3 国内外环境地质研究主要进展

结合国内外环境地质工作,重点从地下水开发相关的环境地质问题、突发性地质灾害、矿山环境地质、水土环境污染、地质环境承载能力等方面总结当前国际环境地质研究进展。

3.1 地下水开发相关的环境地质问题研究

水资源保护和合理利用是环境地质领域研究

的重点和热点。20世纪以来,美国、日本、中国、欧洲及东南亚国家地下水开采量大幅增加,导致严重的地下水水位和水质下降、地面沉降、地裂缝等环境地质问题(USGS, 2003; Hayashi et al., 2009; Guo et al., 2015)(图1)。基于此,国内外地下水研究重点逐渐从含水层调查与水量评价转向地下水环境评价、地下水资源保护和管理。目前,美国在水资源管理、地下水储量的人工补给、地下水污染防治等领域走在世界前列(Vurro et al., 2017)。此外,迫于地面沉降问题的严重性,联合国教科文组织成立了地面沉降工作组,显著推动了地面沉降成因机理、监测和损失评估、沉降发展过程模拟预测及防控技术等领域的研究,为地面沉降防治做出了重要贡献(Galloway et al., 2007, 2011)。

我国自20世纪80年代以来开展了两轮全国地下水资源评价工作,编制了中国地下水资源与环境图集,评价了全国地下水资源开发利用潜力以及地下水资源开发相关的环境地质问题,提出了地下水



图1 中国主要平原盆地地下水水位动态特征图(数据截至2016年底)
Fig.1 Dynamic characteristics of groundwater level in main basins of China (data up to 2016)

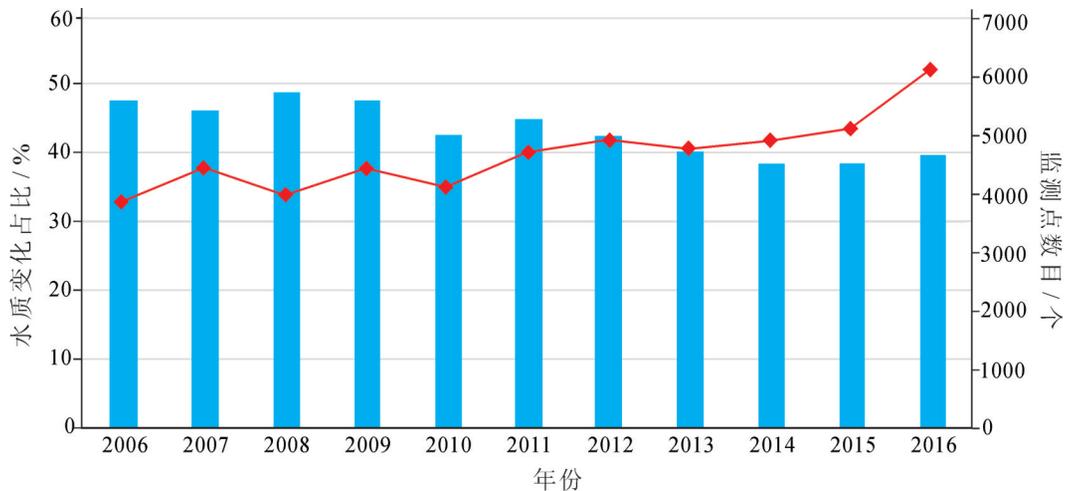
资源可持续利用建议(张宗祜,2004);开展了东、中部重点地区和城市地下水水质和污染调查评价,基本查明地下水质量和污染状况;开展了国家级及地方地下水监测工程,建立了国家、省、地(市)、县四级地下水监测网络,共计2万多个监测井,监控面积积达 $350 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。根据2016年底数据,全国约有一半监测区地下水位保持稳定,约有1/3监测区水位下降(图1)。全国地下水水质的发展变化趋势总体也不容乐观(图2)。

针对地面沉降和地裂缝问题,2000年以来主要开展了长江三角洲、华北平原、汾渭盆地、江汉—洞庭湖平原、京津冀等地区地面沉降地裂缝调查和监测等工作,建立了华北平原、长江三角洲、汾渭盆地地面沉降专业监测网,对地面沉降和地裂缝的形成机制、模拟预测、监测预警技术方法等进行了深入研究,基本掌握了地面沉降分布与演化特征,有效服务于全国地面沉降防灾减灾规划落实、重要城市群地质环境保障以及全国重大工程规划布局等决策管理(邢丽霞等,2013;Zhu et al., 2015;雷坤超等,2016)。当前,国际地面沉降研究更注重理论模型探索和监测新技术新方法的应用,如多学科(包括数值方法、断裂力学、损伤力学等)融合,模型可视化技术和功能耦合模型建立,基于3S技术(特别

是InSAR技术)和地球物理勘探技术等完善监测预警、分级评估和防治措施的辅助决策体系等。我国在这些方面还需进一步加强研究(Liu et al., 2014; Zhou et al., 2017)。

3.2 突发性地质灾害研究

突发性地质灾害研究对象主要包括崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等,一直是国际环境地质研究的重点。国外发达国家非常重视滑坡灾害减灾防灾的理论、方法和技术研究,特别是2000年以来,在特大滑坡成灾模式研究、高精度监测预警技术、风险评估方法、防治技术研发等方面取得了明显进展(Sassa et al, 2010; Ali et al, 2014; Mandrone, 2016; Robbins, 2016)。在滑坡监测预警方面,美国、日本、意大利、德国、法国等研究水平较高,在监测传感器、数据采集、传输与分析等领域取得了很多先进成果。美国地质调查局在全国建立了多处滑坡水文实时观测基地,并与气象机构合作建立早期监测预警系统;日本在滑坡观测试验和预测模型研究方面处于世界领先地位;德国利用雷达卫星数据进行干涉数据处理,监测精度可达到毫米级,在滑坡监测中发挥了巨大作用。近年来,许多国家把滑坡风险评估研究作为限制滑坡影响区发展的强有力工具,发布了滑坡风险评估指南,用于指导滑坡灾害综合防灾减灾



年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
优良-较好级/%	48.0	46.4	49.0	47.8	42.8	45.0	42.7	40.5	38.5	38.7	39.8
水质监测点总数/个	3880	4441	3985	4438	4110	4727	4929	4778	4896	5118	6124

图2 近10年全国地下水水质发展变化趋势图
Fig.2 Trend of the groundwater quality in China in the past 10 years

管理。关于自然灾害保险,法国、挪威、英国等建立了较完善的巨灾保险机制以及具有一定强制性的保险制度,但滑坡灾害保险尚未普及。

我国是世界上突发性地质灾害最严重的国家之一(图3),防灾减灾形势依然严峻。2000年以来,我国相继部署开展了重大建设工程项目的地质灾害评估、全国地质灾害调查与区划、地质灾害群测群防体系建设、典型地区地质灾害专业监测预警示范、全国地质灾害数据采集与监测预警等工作,加强了地质灾害调查评价、监测预警、应急处置和工程治理工作,建立了较完善的地质灾害综合防治体系;编制了全国及地方地质灾害发育分布、易发性、危险性评价等图集,基本掌握了地质灾害类型及其发育分布特点,建立了地质灾害监测预警体系,开发了全国地质灾害信息系统(殷跃平,2004;刘传正等,2015)。地质灾害减灾防灾科学技术研究取得了明显进展,在特大型滑坡识别、应急救援关键技术、监测预警预报、灾害强度与风险快速评估技术等取得了一系列成果(吴树仁等,2012; Zhang et al., 2014; Tang et al., 2015; Yin et al., 2016),建立了从地质灾害调查、监测预警和防治为一体的减灾防灾研究体系和基地,培养了大批人才,具备了良好的产学研结合基础,为国家地质灾害减灾和公共安全提供了技术支撑。特别是三峡库区、地质灾害多发山区研究形成的技术理论、方法及应用,促使我国地质灾害防灾减灾的科技水平整体居于国际先进地位。

面对极端条件的频繁出现,地质灾害变化多端,滑坡-碎屑流、滑坡-涌浪等灾害链频发,已有的地质灾害理论与技术方法仍不能满足防灾减灾严峻形势的需要。与国外发达国家相比,我国在滑坡灾害防治的基础研究、关键技术研发方面仍存在一

定差距,主要表现在:特大滑坡失稳机理和演化过程的基础研究不足;滑坡灾害快速识别的新技术应用程度不高;复杂环境下的监测预警技术不能满足需求;地质灾害链空间预测与风险评估技术尚处于探索阶段,风险评估的精确性有待提高;商业保险还没有成为地质灾害风险补偿的重要手段;地质灾害治理工程的风险理念和技术标准等还有待进一步完善。

3.3 矿山环境地质研究

矿山环境地质主要研究矿产资源开发活动与地质环境之间相互影响与制约关系,在合理开发利用矿产资源的同时,减少和减轻矿山环境地质问题,促进矿业健康发展(徐友宁,2008)。早在20世纪70年代,美国、加拿大、澳大利亚、德国等矿业发达国家就十分重视矿山环境的保护和治理。近十几年来,矿产资源开发与环境保护一体化已成为当前国际矿业发展的重要趋势(Zhang et al., 2013; Adiansyah et al., 2015; Gastauer et al., 2018)。

我国矿山环境地质研究主要集中在矿山环境地质问题的形成机理、环境影响评估、土地复垦和生态环境修复、矿山地质灾害防治、固体废物堆放填埋和处理、环境污染治理等(武强等,2008;何芳等,2010; Fan et al., 2012)。2002年以来,我国组织开展了两轮全国矿山地质环境摸底调查、重点矿区矿产资源开发遥感调查与监测、矿产资源集中开采区和青藏高原生态脆弱区矿山地质环境详查等工作,覆盖11万多个矿山,初步查明了我国矿山地质环境现状,编制了全国性和地方性矿山环境地质图系,建立了全国矿山地质环境调查数据库及信息系统;在湖南、湖北等地区建立了矿山地质环境监测示范区,探索了矿山环境监测技术方法(张进德等,

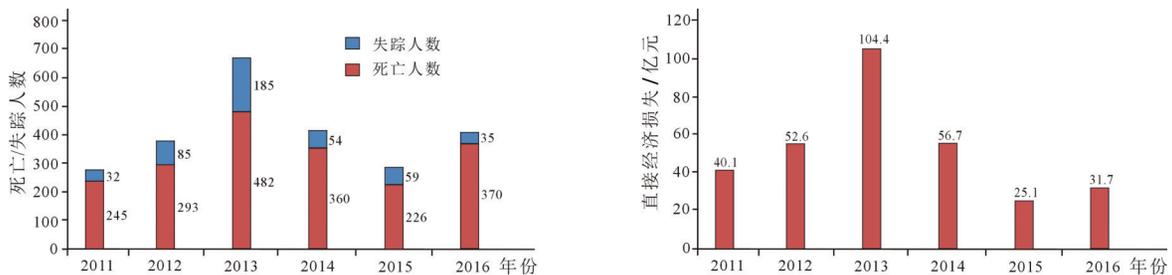


图3 我国突发地质灾害造成死亡/失踪人数和经济损失统计(据国土资源公报,2011—2016年)

Fig.3 Statistics of the number of the dead and missing people and damage costs induced by geo-hazard in China (after China Land & Resources Bulletin, 2011-2016)

2009;熊自力,2015)。这些工作为全国矿产资源规划编制、矿山地质环境保护与恢复治理、矿山“复绿行动”等提供了重要的决策依据。

3.4 水土环境污染研究

水土环境污染研究内容主要包括污染预防、风险管控和治理修复,目的是改善环境质量。其中,水土污染修复研究作为国际前沿,已被提到保护人类健康和社会持续发展的高度。20世纪80年代以来,美国、日本、澳大利亚、欧洲各国制定了水土污染修复计划,涵盖调查评估、方案设计、修复工程、设备制造、药剂研发应用等方面(USEPA, 2007; Wang et al., 2009)。美国先后部署了针对地下储油库污染清理项目、污染场地超级基金清理项目、针对废弃或闲置的污染场地的棕色土地清理项目以及针对美国国防部军事污染修复项目等(USEPA, 2005),研发了物理、化学、生物修复技术和设备,并开展了一系列的修复工程。基于此,美国构建了完善的水土污染修复技术体系以及行业产业链,走在世界前列。

我国水土污染修复工作起步较晚,相关技术和经验与欧美国家相比还存在较大差距。2000年以来,水土污染修复列入国家高技术研究规划发展计划,截至2016年底,我国共部署相关项目142项,其中863计划37项,973计划10项,科技支撑项目56项,公益性行业项目39项。经过十多年发展,我国初步建立了持久性污染物、石油与挥发/半挥发有机污染物及重金属污染场地修复技术体系、成套设备和集成应用系统,研发了水泥窑协同处置、土壤洗脱、热脱附技术、原位加热、固化/稳定化、化学氧化/还原、可渗透反应墙等技术,污染场地修复技术向多样化、复核化、一体化快速发展(谷庆宝等,2008;李发生,2016)。但是,目前仍然缺乏水土污染修复的相关规范以及工程应用,并且还未能将土壤及地下水作为有机整体进行综合治理。值得一提的是,2015年以来,国务院先后颁布实施了《水污染防治行动计划》、《土壤污染防治行动计划》,这两个计划的出台是我国水土环境管理领域的一个标志性事件,将极大的推动我国水土污染修复发展。

3.5 地质环境承载能力研究

资源环境承载能力既是一个区域性问題,也是一个全球性问題,作为衡量人地关系协调发展的重

要判据,是衡量区域可持续发展的重要指标之一(樊杰等,2015)。美国、日本等国家已将资源环境承载能力的理论应用于环境规划与管理,进而指导社会经济发展。国内外研究热点大多集中在要素承载能力方面,如水资源、土地资源、环境承载能力研究等,同时在资源环境综合承载能力研究的理论、方法和应用方面也取得了一定进展(Graymore et al., 2010; Singh et al., 2012; 樊杰等,2015,2017)。

我国继20世纪90年代三峡库区移民迁建新址重大地质灾害防治研究以及2008年汶川灾后重建选址地质安全与水土资源保障程度综合评价研究之后,资源环境承载能力评价首次作为基础性科技支撑工作,为库区迁建和灾后重建规划提供了科学依据和技术支撑。其中,地质环境作为资源环境承载能力评价的要素,被纳入资源环境承载能力体系,并成为一个新的分支。地质环境承载能力评价在玉树、舟曲、芦山灾后恢复重建规划和重建工作,以及环渤海地区国土规划编制中得到应用,为我国国土空间规划和社会经济发展规划提供了重要决策支撑。在中共中央要求“建立资源环境承载能力监测预警机制,对水土资源、环境容量和海洋资源超载区域实行限制性措施”的背景下,国土资源部中国地质调查局部署开展了全国资源环境承载能力调查评价、全国地质资源环境承载能力评价与监测预警等工作,编制了《国土资源环境承载能力评价技术要求》(试行)(国土资厅函[2016]1213号),并在全国、省、市、县域尺度开展实证研究。2016年,国家发改委、国土资源部等13部委联合下发“关于印发《资源环境承载能力监测预警技术方法(试行)》的通知”(发改规划[2016]2043号),要求各地和有关部门参照执行。我国资源环境承载能力评价和监测预警研究进入全面试行阶段(樊杰等,2017)。目前,北京、上海等地区正在组织开展支撑土地利用规划的地质环境成灾能力评价,以及地质环境承载能力评价监测预警等工作。

4 中国环境地质研究展望

当前,我国正致力于“富强、民主、文明和谐的美丽中国”建设,生态文明建设作为中华民族永续发展的千年大计,已上升为新时代要求的重要组成部分。无疑,环境地质研究已经成为生态文明建设



图4 中国主要矿山环境地质问题图
Fig.4 Mine geo-environmental problems in China

和可持续发展的重要基础性工作。面对“强化水污染防治、土壤污染管控和修复;实施重要生态系统保护和修复重大工程,强化湿地保护和恢复;加强地质灾害防治;建立以国家公园为主体的自然保护地体系”等迫切需求,我国环境地质工作面临新的挑战 and 机遇,必须朝着服务城市发展、统筹谋划水资源可持续利用和管理、加强地质灾害综合防治、服务和支撑生态地质环境管理、加强地球关键带相关问题研究等方向发展。基于以上考虑,未来我国环境地质研究的重点领域和工作方向主要包括以下方面:

(1)在城市环境地质方面,聚焦重要经济区和城市群建设的重大问题和需求,开展全要素城市环境地质调查、城市地下三维地质结构探测和建模,加强工程建设和地下空间开发适宜性评价,评估城市地下空间资源潜力和利用前景。构建多要素的城市地质环境综合监测网以及评价技术方法,评价资源环境综合承载能力。建立城市地质信息服务

平台,包括三维可视化地质模型及综合地质信息系统研发,基于平台实现地质信息的共享与服务,探索为城市规划、建设和运行管理全过程提供精准服务的表达形式和应用服务机制。

(2)在地下水资源利用和保护方面,统筹谋划开展新一轮全国地下水资源评价,评价全国地下水资源开发利用潜力及相关环境地质问题,提出地下水资源可持续利用方案建议。围绕国家生态保护需求,开展典型区水文地质环境地质调查,研究湿地系统等生态水文演变过程和驱动机制,以及地下水开发利用与生态环境调控。基于国家级地下水监测工程,健全完善各级地下水监测网,提升自动化监测能力建设,增加监测要素和数据参数,实现实时传输和快速响应。

(3)在地质灾害综合防治方面,加强威胁城镇、重要交通干线和水电设施、重要矿山的地质灾害调查与评价,开展复杂条件下地质灾害致灾机理与时空演化规律研究,研发地质灾害链动态预测及智能

互联监测预警技术,开展基于环境因素变化的滑坡动态定量风险评估研究,探索地质灾害保险机制并提出相应的技术标准。同时,完善各级地质灾害信息网络,提高地质灾害评估和预警的及时性和准确性,健全地质灾害应急响应体系和响应机制。

(4)在生态环境地质方面,进一步开展地质遗迹调查和评价,加强地质遗迹成景机制、模式及景观保护分级研究,明确保护与开发利用的主次。促进地质遗迹研究成果转化,推动地质文化村镇建设,探索地质遗迹资源、特色农产品、民俗文化和人文景观等资源相互融合机制。

(5)在地球关键带相关问题研究方面,加强以土壤、包气带、含水层为重点的地球关键带的综合调查监测,研究关键带的物质流和能量流传输,尤其是化学物质、污染物的迁移转化过程和相互作用,充分融合地质科学与地理科学、海洋科学、气象科学、水文科学、生物科学等相关学科,解决更综合、更复杂的生态问题。

5 结 语

环境地质问题已引起全球广泛关注。本文在简要回顾环境地质学科发展历程、梳理国内外典型环境地质问题的基础上,着重总结了近十余年来国际环境地质研究的主要进展。结合我国生态文明建设需求,提出了未来环境地质研究的方向和重点领域:服务城市发展、统筹谋划水资源可持续利用和管理,加强地质灾害综合防治,支撑生态环境管理,加强地球关键带相关问题研究等。

未来环境地质研究仍然应以人-地相互关系为核心,精准服务社会可持续发展。同时,更加关注生态环境的系统保护和管理,强调学科交叉和新技术新方法研究;结合生态文明建设和发展需要,进一步拓展学科研究领域,不断丰富环境地质理论体系和应用实践。

致谢: 本文的完成得益于近年来国土资源系统特别是中国地质调查局组织开展的相关工作,文中引用了部分未正式出版的规划内容和内部资料,中国地质环境监测院张进德教授级高工、郑跃军教授级高工提供了部分资料,深表谢意! 由于环境地质涉及领域较广,很难面面俱到地深入分析,本文只是抛砖引玉,不足之处请同行批评指正。

References

- Adiansyah O S, Rosano M, Vink S, Keir G. 2015. A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 108(1): 1050–1062.
- Alexander D. 1983. Environmental geology: A hazard in its own fight? [J]. *Environment Management*, 7(2): 125–128.
- Ali A, Huang J, Huang, Lyamin A V, Sloan S W, Griffiths D V, Cassidy M J, Li J H. 2014. Simplified quantitative risk assessment of rainfall-induced landslides modeled by infinite slopes [J]. *Engineering Geology*, 179: 102–116.
- British Geological Survey. 2009. Strategy 2009–2014: Applied Geoscience for Our Changing Earth[R]. Nottingham, England: British Geological Survey.
- Brown C E. 1995. Role of environmental geology in US Department of Energy's advanced research and development programs to promote energy security in the United States [J]. *Environmental Geology*, 26: 220–231.
- Burton I, Kates R W, White G F. 1978. *The Environment as Hazard*. London [M]: Oxford University Press, 240.
- Chen Mengxiong. 1995. Basic theory and perspective of development environmental geoscience [J]. *Journal of Engineering Geology*, 3 (3): 31–34 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xinmin, Luo Guoyu, Li Xiaozhao, Yan Changhong. 2000. *Geotechnical Engineering of Urban Environment* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1–7 (in Chinese).
- Fan Jie, Wang Yafei, Tand Qing, Zhou Kan. 2015. Academic thought and technical progress of monitoring and early-warning of the national resources and environment carrying capacity (V 2014) [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 35(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Fan Jie, Zhou Kan, Wang Yafei. 2017. Basic points and progress in technical methods of early-warning of the national resource and environmental carrying capacity (V 2016) [J]. *Progress in Geography*, 36(3): 266–276 (in Chinese with English abstract).
- Fan Y X, Lu M. 2012. Design of hazards list based on hazard components for Chinese coal mine [J]. *Procedia Engineering*, 45: 264–270.
- Flawn P T. 1970. *Environmental Geology: Conservation, Land-use Planning and Resource Management* [M]. New York: Harper and Row, 313.
- Galloway D L, Burbey T J. 2011. Regional land subsidence accompanying groundwater extraction [J]. *Hydrogeology Journal*, 19(8): 1459–1486.
- Galloway D L, Hoffmann J. 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived groundwater displacements in hydrogeology [J]. *Hydrogeology Journal*, 15, 133–154.

- Gastauer M, Silva J R, Junior C F C, Siqueira J O. 2018. Mine land rehabilitation: Modern ecological approaches for more sustainable mining [J]. *Journal of Cleaner Production*, 172(20): 1409–1422.
- Graymore M L M, Sipe N G, Rickson R E. 2010. Sustaining human carrying capacity: A tool for regional sustainability assessment [J]. *Ecological Economics*, 69(3): 459–468.
- Gu Qingbao, Guo Guanlin, Zhou Youya, Yan Zengguang, Li Fasheng. 2008. Classification, application and selection of contaminated site remediation technology: An overview [J]. *Research of Environmental Sciences*, 21(2): 197–202 (in Chinese with English abstract).
- Guo H P, Zhang Z C, Cheng G M, Li W P, Li T F, Jiao J J. 2015. Groundwater– derived land subsidence in the North China Plain [J]. *Environmental Earth Sciences*, 74(2): 1415–1427.
- Ha Chengyou. 2006. Environmental geology: advances and prospects [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1247– 1256 (in Chinese with English abstract).
- Hagan W W. 1994. The role of the state geological surveys in environmental geology [J]. *Environmental Geology*, 23: 166–167.
- Hao Aibing, Lin Liangjun, Li Yamin. 2017. Promoting the multi– factor urban environment survey and serving the urban planning, construction and development [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 4: 1 (in Chinese).
- Hayashi T, Tokunaga T, Aichi M. 2009. Effects of human activities and urbanization on groundwater environments: An example from the aquifer system of Tokyo and the surrounding area [J]. *Science of the Total Environment*, 407(9): 3165–3172.
- He Fang, Xu Youning, Qiao Gang, Liu Ruiping. 2010. Regional distribution characteristics of mine environmental geological problems in China [J]. *Geology in China*, 37(5): 1520– 1529 (in Chinese with English abstract).
- Hu Haitao, Ha Chengyou, Zhong Lixun. 1999. China environmental geological issues [C]// Zhang Bingxi (ed.). *Development Strategy of Geological Work in China*. Beijing: Geological Publishing House, 15–19 (in Chinese).
- Keller E A. 1982. *Environmental Geology* [M]. Columbus: Ohio, Charles E. Merrill Publishing Co., 526.
- Lawrence L. 1992. *Planning the Use of the Earth's Surface* [M]. Berlin: Springer Publishing Co., 457–482.
- Li Fasheng. 2016. Analysis on the remediation technology decision and industry development of the contaminated site in China under the new situation [J]. *Environmental Protection*, 44(20): 12–15 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanzheng, Liu Yanhui, Wen Mingsheng, Tang Can, Zhao Luqiang. 2015. Early warning for regional geo– hazards during 2003–2012, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 26(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanzheng, Liu Yanhui. 2012. Some discussion on geo– hazards control and geo–environment sustainable development [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1469– 1476 (in Chinese with English abstract).
- Liu G X, Jia H G, Nie Y J, Li T, Zhang R, Yu B, Li Z L. 2014. Detecting subsidence in coastal areas by ultrashort– baseline TCP InSAR on the time series of high– resolution TerraSAR– X Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4): 1911–1923.
- Mandrone G. 2016. An ultrasonic prototype to remedy pipes clogging: experimental effects on drains used for landslide mitigation [J]. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, 75 (2): 673–680.
- Morton R A, Buster N A, Krohn M D. 2002. Subsurface controls on historical subsidence rates and associated wetland loss in south central Louisiana [J]. *Transactions Gulf Coast Association of Geological Societies*, 52: 767–778.
- Qu Yongxin, Zhang Yongshuang, Feng Yuyong. 1998. Present attractive typical subjects and related technology in international environmental geotechnology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 6(4): 301–304 (in Chinese with English abstract).
- Robbins J C. 2016. A probabilistic approach for assessing landslide– triggering event rainfall in Papua New Guinea, using TRMM satellite precipitation estimates [J]. *Journal of Hydrology*, 541: 296–309.
- Sassa K, Nagai O, Solidum R, Yamazaki Y, Ohta H. 2010. An integrated model simulating the initiation and motion of earthquake and rain induced rapid landslides and its application to the 2006 Leyte landslide [J]. *Landslides*, 7(3): 219–236.
- Shi Bin. 2002. On environmental geotechnology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 10(4): 349– 355(in Chinese with English abstract).
- Singh R K, Murty H R, Gupta S K, Dikshit A K. 2012. An overview of sustainability assessment methodologies [J]. *Ecological Indicators*, 15(1): 281–299.
- Tang H M, Li C D, Hu X L, Su A J, Wang L Q, Wu Y P, Criss R, Xiong C R, Li Y N. 2015. Evolution characteristics of the Huangtupo landslide based on in situ tunneling and monitoring [J]. *Landslides*, 12(3): 511–521.
- USEPA. 2005. Superfund annual report (EPA– 540– R– 05– 001) [R]. Washington DC: U. S. EPA.
- USEPA. 2007. Treatment technologies for site cleanup: annual status report (12th edition) [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency.
- USGS. 1986. Regional Aquifer– system Analysis Program of the U.S. Geological Survey Summary of Projects [R]. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- USGS. 1995. Design of the National Water– Quality Assessment Program: Occurrence and Distribution of Water– Quality Conditions [R]. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- USGS. 1998. Strategic Directions for the U.S. Geological Survey

- Ground- Water Resources Program [R]. U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- USGS. 2003. Ground- Water Depletion across the Nation: U.S Geological Survey Fact Sheet 103-03 [R], U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- USGS. 2007. Facing Tomorrow's Challenges- U. S. Geological Survey science in the Decade 2007-2017 [R]. U. S. Geological Survey.
- Vurro C M M, Palmisano V N, Liso I S. 2017. A suitable tool for sustainable groundwater management [J]. *Water Resources Management*, 31(13): 4133-4147.
- Wang Dachun, Zhang Zonghu. 1965. Hydrogeology: advances and prospects [J]. *Chinese Science Bulletin*, 10 (6): 511- 520 (in Chinese).
- Wang L K, Hung Y, Shammass N K. 2009. Handbook of Advanced Industrial and Hazardous Wastes Treatment [M]. Boca Raton: CRC Press, 519-570.
- Wang Ruijiu, Meng Hui. 1988. Analysis of environmental geology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 4: 28-33 (in Chinese).
- Wang Sijing, Huang Dingcheng. 2004. The Century Developments and Achieves of Engineering Geology in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 25-30 (in Chinese).
- Wang Sijing, Zhou Pinggen. 1995. The Recent status and future of environmental geology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 3(4): 12-18 (in Chinese with English abstract).
- Wen Dongguang, Liu Changli. 2006. Investigation and assessment of environmental geology in China's major cities [J]. *City Geology*, 1 (2): 4-7 (in Chinese with English abstract).
- Wu Aimin, Jing Jihong, Song Bo. 2016. Water safety issues of China and ensuring roles of groundwater [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90 (10): 2939-2947 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qiang, Chen Qi. 2008. An analysis of environmental effects induced by environmental problems in mines [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 35(5): 81- 85 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qiang, Liu Honglei, Chen Qi. 2017. Theoretical study of mine geo- environmental restoration model and its application [J]. *Journal of China Coal Society*, 42(5): 1085-1092 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shuren, Shi Jusong, Wang Tao, Zhang Chunshan, Shi Ling. 2012. The Theory and Technology of Landslide Risk Assessment [M]. Beijing: Science Press, 1-2 (in Chinese).
- Xi Xiaohuan, Li Min. 2013. Reviews of the development of the exploration geochemistry during the eleventh five-year period [J]. *Earth Science Frontiers*, 20(3): 161-169 (in Chinese with English abstract).
- Xing Lixia, Ju Jianhua, Hao Aibing. 2013. The Study on Land & Resource Monitoring Achievements Combination and Assessment and Macro- deployment of Monitoring [M]. Beijing: Geological Publishing House, 45-99 (in Chinese).
- Xiong Zili. 2015. Exploring a new mode for mine geo- environmental protection and restoration [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 6: 1 (in Chinese).
- Xu Shaoshi. 2010. The Developing History of Geology in China [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 152- 187 (in Chinese).
- Xu Youning. 2008. Investigation and research on the mine geological environment: present status and outlook [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(8):1235-1244 (in Chinese with English abstract).
- Yin Y P, Cheng Y L, Liang J T, Wang W P. 2016. Heavy- rainfall- induced catastrophic rockslide- debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake [J]. *Landslides*, 13(1): 9-23.
- Yin Yueping. 2004. Initial study on the hazard- relief strategy of geological hazard in China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 15(2): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Jianxin. 1996. Brief description of environmental geotechnical engineering problems [J]. *Rock and soil mechanics*, 17(2): 88-93 (in Chinese with English abstract).
- Zektser I S, Marker B, Ridgway J, Rogachevskaya L, Vartanyan G. 2006. *Geology and Ecosystems* [M]. Boston: Springer Publishing Company, 20-25.
- Zhang H, Song J, Su C, He M. 2013. Human attitudes in environmental management: Fuzzy Cognitive Maps and policy option simulations analysis for a coal- mine ecosystem in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 115(30): 227-234.
- Zhang Jinde, Zhang Zuochen, Liu Jianwei. 2009. Survey and Research on Mine Geo- environment in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 23-46 (in Chinese).
- Zhang Lijun, Jia Yueming, Liu Minghui. 1999. Trends and important contents of environmental geology researches all over the world [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 6: 1- 5 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y S, Yin Y P, Cheng Y L, Lan H X, Wang J, Fu X X. 2014. High- position debris flow: A long- term active geohazard after the Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Geology*, 180 (180): 45-54.
- Zhang Zonghu, Li Lierong. 2004. *Groundwater Resources of China* [M]. Beijing: SinoMaps Press, 46-85.
- Zhang Zonghu, Yuan Daoxian. 1995. The important issues of geology for china's cross century- the prospects of environmental geology development [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 5: 60-69 (in Chinese).
- Zhang Zonghu. 1979. The development of hydrogeology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1: 12-14 (in Chinese).
- Zhang Zonghu. 2005. Environmental geology and geological hazard [J]. *Quaternary Sciences*, 25(1): 1- 5 (in Chinese with English abstract).

- Zhou X L, Huang K Y, Wang J H. 2017. Numerical simulation of groundwater flow and land deformation due to groundwater pumping in cross-anisotropic layered aquifer system [J]. Journal of Hydro-environment Research, 14: 19-33.
- Zhu L, Gong H L, Li X J, Wang R, Chen B B, Dai Z X, Teatini P. 2015. Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China [J]. Engineering Geology, 193(2): 243-255.
- ### 附中文参考文献
- 陈梦熊. 1995. 环境地质科学的基本理论与发展前景 [J]. 工程地质学报, 3(3): 31-34.
- 陈新民, 罗国焜, 李晓昭, 阎长虹. 2000. 城市环境岩土工程 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1-7.
- 樊杰, 王亚飞, 汤青, 周侃. 2015. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程 [J]. 地理科学, 35(1): 1-10.
- 樊杰, 周侃, 王亚飞. 2017. 全国资源环境承载能力预警(2016版)的基点和技术方法进展 [J]. 地理科学进展, 36(3): 266-276.
- 谷庆宝, 郭观林, 周友亚, 颜增光, 李发生. 2008. 污染场地修复技术的分类、应用与筛选方法探讨 [J]. 环境科学研究, 21(2): 197-202.
- 哈承祐. 2006. 环境地质研究进展与展望 [J]. 地质通报, 25 (11): 1247-1256.
- 郝爱兵, 林良俊, 李亚民. 2017. 大力推进多要素城市地质调查精准服务城市规划建设运行管理全过程 [J]. 水文地质工程地质, 4: 1.
- 何芳, 徐友宁, 乔冈, 刘瑞平. 2010. 中国矿山环境地质问题区域分布特征 [J]. 中国地质, 37(5): 1520-1529.
- 胡海涛, 哈承祐, 钟立勋. 1999. 中国环境地质问题 [C]//张炳熹主编. 中国地质工作发展战略. 北京: 地质出版社, 15-19.
- 李发生. 2016. 新形势下我国污染场地修复技术决策和产业发展探析 [J]. 环境保护, 44(20): 12-15.
- 刘传正, 刘艳辉, 温铭生, 唐灿, 赵鲁强. 2015. 中国地质灾害气象预警实践2003-2012 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 26(1): 1-8.
- 刘传正, 刘艳辉. 2012. 论地质灾害防治与地质环境利用 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1469-1476.
- 曲永新, 张永双, 冯玉勇. 1998. 当前国际环境地质工程(环境岩土工程)研究的热点领域及其相关技术 [J]. 工程地质学报, 6(4): 301-304.
- 施斌. 2002. 关于环境岩土工程 [J]. 工程地质学报, 10(4): 349-355.
- 王大纯, 张宗祜. 1965. 水文地质学的研究现状和今后发展方向 [J]. 科学通报, 10 (6): 511-520.
- 王瑞久, 孟晖. 1988. 关于环境地质工作 [J]. 水文地质工程地质, 4: 28-33.
- 王思敬, 黄鼎城. 2004. 中国工程地质世纪成就 [M]. 北京: 地质出版社, 25-30.
- 王思敬, 周平根. 1995. 环境地质学的现状及发展方向展望 [J]. 工程地质学报, 3(4): 12-18.
- 文冬光, 刘长礼. 2006. 中国主要城市环境地质调查评价 [J]. 城市地质, 1(2): 4-7.
- 吴爱民, 荆继红, 宋博. 2016. 略论中国水安全问题与地下水的保障作用 [J]. 地质学报, 90(10): 2939-2947.
- 吴树仁, 石菊松, 王涛, 张春山, 石玲. 2012. 滑坡风险评估理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1-2.
- 武强, 陈奇. 2008. 矿山环境问题诱发的环境效应研究 [J]. 水文地质工程地质, 35(5): 81-85.
- 武强, 刘宏磊, 陈奇. 2017. 矿山环境修复治理模式理论与实践 [J]. 煤炭学报, 42(5): 1085-1092.
- 奚小环, 李敏. 2013. 现代地质工作重要发展领域:“十一五”期间勘查地球化学评述 [J]. 地学前缘, 20(3): 161-169.
- 邢丽霞, 鞠建华, 郝爱兵. 2013. 国土资源监测成果集成评价与宏观部署研究 [M]. 北京: 地质出版社, 45-99.
- 熊自力. 2015. 探索矿山地质环境保护与治理恢复新模式 [J]. 水文地质工程地质, 6: 1.
- 徐绍史. 2010. 中国地质学学科史 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 152-187.
- 徐友宁. 2008. 矿山地质环境调查研究现状及展望 [J]. 地质通报, 27 (8): 1235-1244.
- 殷跃平. 2004. 中国地质灾害减灾战略初步研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 15(2): 1-8.
- 袁建新. 1996. 环境岩土工程问题综述 [J]. 岩土力学, 17(2): 88-93.
- 张进德, 张作辰, 刘建伟. 2009. 我国矿山地质环境调查研究 [M]. 北京: 地质出版社, 23-46.
- 张丽君, 贾跃明, 刘明辉. 1999. 国外环境地质研究和工作的主要态势 [J]. 水文地质工程地质, 6: 1-5.
- 张宗祜, 李烈荣. 2004. 中国地下水资源 [M]. 北京: 中国地图出版社, 46-85.
- 张宗祜, 袁道先. 1995. 我国跨世纪的重大地学问题——环境地学发展前景 [J]. 国土资源科技管理, 5: 60-69.
- 张宗祜. 2005. 环境地质与地质灾害 [J]. 第四纪研究, 25(1): 1-5.
- 张宗祜. 1979. 发展中的水文地质学 [J]. 水文地质工程地质, 1: 12-14.