

军事地球科学：历史经验与现代挑战

张栋^{1,2)}, 葛良胜^{3,4,5)}, 吕新彪⁴⁾, 戚冉^{3,6)}, 闫家盼^{1,2)}, 赵由之^{1,2,5)}

- 1) 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北廊坊, 065000;
- 2) 中国地质调查局地球浅地表探测技术创新中心, 河北廊坊, 065000;
- 3) 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京, 100055;
- 4) 中国地质大学地质探测与评估教育部重点实验室, 武汉, 430074;
- 5) 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京, 100083;
- 6) 中国地质大学地质调查研究院, 武汉, 430074



Pre-pub. online: www.geojournals.cn/georev

内容提要: 军事地质学以战争和平时军事活动实践应用为研究领域, 在军事行动、作战环境、战场情报和非战争军事行动中具有重要应用价值。军事需求应用推动军事地质学向军事地球科学创新发展。军事地球科学基于地球科学交叉学科, 致力于研究解决军事活动涉及的多元自然物质属性、多层空间物理特征和多系统环境挑战。总结国外军事地质学应用研究历史经验, 归类军事地球科学研究的地质环境影响历史战争、地球科学对军事活动影响、地缘安全利益与资源需求、支持军事活动的地球科学技术等重点领域, 建议我国军事地球科学关键问题聚焦理论方法、典型场景和全球议题, 提出现代科学挑战: (1) 战场地质空间情报的智能应用; (2) 陌生地域特殊环境隐匿目标的遥感侦察识别技术; (3) 战场侦察的法证军事地球科学; (4) 军事新能源安全保障; (5) 现代战争军事地球科学。综述研究成果为提升地质工作服务国防和军队现代化能力提供了科学依据。

关键词: 军事地质学; 军事地球科学; 地质环境; 军事应用

军事地质是一门古老而又弥新的应用科学。伴随战争的出现, 将地质学基础原理、专业技术和客观规律运用到军事活动中, 一直是军事地质研究的核心问题。历史上, 军事地质经历过多次战争, 特别是两次世界大战和近现代局部战争的实战检验, 军事地质持续发挥着探察地形结构和地下空间的独有优势, 在现代信息化战争中仍然具有举足轻重的地位作用。Pogue (1917) 在美国《科学》杂志发表“Military Geology”一文, 标志着军事地质学概念的正式出现, 直到2011年第九届国际军事地球科学大会(ICMG)才以新的多元学科名义正式提出军事地球科学“Military Geosciences”(Rose, 2018)。近百年以来, 军事地质研究以围绕军事活动和解决作战应用为目的, 从早期军事地理学研究涉及地形景观的地质问题(Erdmann, 1944), 到专业的军事工程与水文地质学(Patrick et al., 1989; Kiersch, 1998; Mather et al., 2012), 再到借助现代遥感与计算机技术的军

事遥感地质学(于德浩等, 2017)和地球物理专业知识的军事地球物理学(刘光鼎和刘代志, 2003), 直到现在上升到以地球科学为理论指导的涵盖自然环境、生态环境、人文环境等广义地球环境系统的军事地球科学(Bondesan et al., 2022a), 致力于解决军事活动涉及的多元自然物质属性、多层空间物理特征与多系统环境挑战正日益成为研究焦点。

我国古代兵法兵书有关地形地貌的记载, 兵器所需原始石材、金属与火药等资源获取和冶炼技术, 城池选址、护城河开挖和长城、灵渠等重大工程, 都是我国古代军事活动运用地质学原理的智慧典范。在军事地质学概念由西方正式提出后, 我国民国时期就紧随其后正式翻译编印过当时国外军事地质学有关著作。新中国成立后, 军事地质应用研究主要侧重于军事工程地质、军事水文地质和军事地形测绘等方面。目前, 国内将地质学与军事结合主要体现在地质学知识与技术的军事应用, 针对国外军事

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20230136、DD20230598)的成果。

收稿日期: 2024-01-25; 改回日期: 2024-06-26; 网络首发: 2024-07-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.025

作者简介: 张栋, 男, 1979年生, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质资源与地质工程调查研究工作; Email: 1606298990@qq.com。通讯作者: 葛良胜, 男, 1966年生, 博士, 研究员, 主要从事项目管理与研究工作; Email: geliangsheng@aliyun.com。

地质发展趋势与热点问题的综述(李万伦等,2020;张广有等,2022),以现代战争为视角的军事地质保障特点规律新认识(孙兴丽等,2017;刘晓煌等,2018;张栋等,2019,2021;葛良胜等,2023)。

多样化军事需求应用已成为推动传统军事地质学向现代军事地球科学创新发展的主要动力。受制于我国薄弱的军事地质理论研究水平,总体而言我国地质科学研究和军事应用结合较不紧密。西方自提出并在战争实践中不断完善发展军事地质,已经建立起比较成熟的现代军事地球科学研究体系。现阶段我国还没有很好地借鉴国外成熟的研究途径及应用方式,聚焦利用地质条件来塑造或改造战场,趋利避害发挥地质应有的功能作用。地质是地下空间或地表以下物质的基础,构成了战场空间及其军事活动的基本载体,军事地质作为一种技术保障手段,如果没有一种有效的研究方式来转化形成军事应用优势,可能难以针对现代战争提出完整合理的技术保障方案。基于此,文章通过系统的文献综述,回顾国外军事地质发展历史,梳理军事地质主要应用经验,论述当前军事地质应用研究关键科学问题,提出现代军事地球科学研究挑战,以期更好地推动我国对军事地质的理解认知与实践发展。

1 军事地质学历史经验

1.1 历史回顾

军事地质学是地质学在战争和平时军事活动中的实践应用。在战争中,军事地质学常被用于地形分析、工程勘察和资源评估,军事地质学家包括受过专门训练的军事人员和编入军队的地质工程师,军事研究也带来了许多重要的地质发现。地质学至少从拿破仑时期就开始支持军事活动,1798年拿破仑入侵埃及时,他的远征军中就包括两名地质学家(Rose,2005)。在18、19和20世纪的大部分时间里,军事地质学都被定义为“地形情报”(Leith,2002),广泛地被应用于评估军队和车辆机动的地形分析和确定前进路线,发现集结地区和建筑材料,分析山地边坡稳定性和岩石开挖特性,绘制地表和地下水文地质图。从美国南北战争到朝鲜战争,军事地质学一直发挥着积极作用,甚至早于美国南北战争时期,军队就在进攻和防御中使用了隧道和城堡等地下挖掘时的地质信息(Leith,2002)。第一次世界大战期间,美国军事地质学家编制了第一份军事工程地质图,列出了深入敌方地域地表物质的物理特性和建造防御工事的基本信息。据维基百科

(Wikipedia)有关军事地质学的词条收录,军事研究导致了許多地质新发现,然而由于保密常常推迟了这些进展。例如,第一次世界大战期间,奥地利军队允许进行科学考察的军事地质学家(德语系国家对军事地质学家的称谓:Kriegsgeologen),由军事目的间接促使了在海底发现自然资源矿床并绘制了海底磁条带图,被认为催生了板块构造的新概念。到第二次世界大战时,军事地质学已经是一门发展很快的科学。军事地质学被用于确定二战期间盟军进攻的最佳地点,包括北非、意大利和法国。这包括研究诺曼底海滩的砂土特性和内陆土壤对炮击的耐受性、英吉利海峡海底的沉积物以及西西里岛山体滑坡的发生概率等。1942年,美国地质调查局成立了军事地质处(MGU)。战时美国地质调查局对军事地质学家的要求是编制地形情报,确定军队和车辆在陆地上的机动能力,勘探地下水、化石燃料和矿产资源,寻找建筑材料和辅助解决工事构筑问题,以及确定机场选址(Hunt,1950;Terman,1998)。二战中,英国有军人编制的地质学家在多个战场司令部担任参谋(Rose,2011)。这些军职身份的地质学家研究工作主要以供水水源为核心,随着二战规模扩大,又增加了一系列临时机场快速建设选址和跨海滩地形越野通行能力研究,并绘制了专题地图,用于向参与作战规划的非地质学专业的参谋传达地质信息。英国军事地质学家当时的这些工作得益于大不列颠地质调查局的现有资料,从国内在战前发布的大量民用地质图中筛选并改化为军事地质图,由工程兵团利用地质装备提供技术支撑。德国自1914年第一次世界大战爆发时已开始普遍利用军事地质学,二战期间,如Häusler(1995a,b)综述到,德国发动战争后就开始设置400名左右的地质学家支持军队建设,战后德国陆军军事地质机构的研究资料被美国归还后部分保存在德国陆军的国防地理信息中心(Willig et al.,2012a,b)。学者能查阅的历史案例范围既有为协助作战规划而临时开展的地质工作,如为预定于1940年入侵英格兰的“海狮行动”作战规划(Rose et al.,2004),也有协助占领和设防的长期工程,如法国海岸附近的“大西洋壁垒”岸防工程(Robins et al.,2012)。朝鲜战争期间,在朝鲜和韩国之间的非军事禁区,由于变质岩的结构,地形非常崎岖,而最好的谷地是花岗岩地形,这些谷地常被朝鲜利用作为军事集结地域(Cameron,1998a,b)。

冷战则改变了军事地质学的研究重点。核武器

的发展和试验需要对高压和高温下的岩石特性、对地表物质的爆炸影响以及核武器对岩石、土壤和其他自然材料的影响进行深入的研究。军事设施也逐步深入地下。随着导弹发射井和战略地下指挥所通过增加岩石深度得到保护或加固,对寄主岩石性质进行准确的地质评估变得至关重要(Leith et al., 1998)。到20世纪末,由于分布在不同地质环境中具有不同地质特征的地下军事设施数量的激增,给美国军事地质学家提出了巨大挑战。当时的军事地质学主要有两个目标:探测地下设施并确定其特征,用常规武器击溃坚硬的地下目标。为了实现这些目标,军事地质学家使用遥感技术来发现和描述陌生地域地下设施的地质特征,包括岩石特征、岩石风化和上覆土壤发育、岩石的体积模量以及岩体的工程力学性质,甚至包括弹头如何穿透岩石的数据。这些不同的数据用于计算建模和三维反演,成为确定武器打击效果和确定工事入口或地下设施脆弱性的工具,有时甚至用于新武器的研制。当时军事地质学的主要研究内容还包括评估地下核试验场的地质条件,进行区域地质和地球物理分析以准确定位和识别核试验,检测地下核试验场周围放射性气体的含量(Leith, 2002)。

进入21世纪,军事地质学综合利用了多种地球科学知识,不仅是传统的地质学,还包括地震学和其他地球物理学、古生物学、法证地球科学(Geoforensics:指利用地球科学技术揭示隐藏在自然环境中的埋藏物体并以此作为法律证据的一门新兴交叉学科)、岩土力学、土壤学、遥感科学和计算机科学,用于支持核试验监测,研究风化岩石特性和统计岩石变化性,利用多光谱、高光谱和雷达数据研究目标背景特征,开展计算机绘图、数据处理和建模分析等。与所有科学一样,军事地质学已经并将继续受益于技术进步,特别是遥感工具和材料分析技术。与此同时,地下工程技术的进步使得建造更深层与更复杂的地下军事设施成为可能,伪装和隐蔽技术的进步也使得识别和探测陌生地域地下军事设施更具挑战性。冷战以后,美、英、德等国军事地质学家通常服务于正规部队或作为预备役,主要为多种军事项目、演习和作战活动提供技术指导,在阿富汗和伊拉克战争中为作战部队提供供水水源的技术指导(Dow et al., 2012),帮助阿富汗部分地区重建了民用灌溉设施(Mattliews, 2011)。2014年,世界上最古老的地质学会伦敦地质学会将Sue Tyler Friedman勋章(颁发给地质研究历史中的杰出领

域)第一次颁发给军事地质学领域卓有成效的研究者(Rose, 2018)。

1.2 传统经验

1.2.1 军事行动

军事地质学的主要研究目的是直接支持军事行动。传统上军事地质学主要集中在地质学和地理学研究上(Häusler, 2006; Häusler et al., 2011),在作战方面的应用也一直偏重于自然景观对军事作战的影响,以及如何转化地形为军事优势。Collins(1998)、Winters(2001)、Jacobs et al.(2002)、Palka et al.(2005)、Galgano et al.(2011)等学者都深入探讨了地理、地质与作战环境的相互作用及其对战略战术性军事规划、不同环境下军事行动的影响。从美国在阿富汗二十多年的军事作战经验中可以看出,地形和景观是军事的重要元素。综合而言,军事地质学能够了解地貌景观特点下的地质环境,才能对战场情报编制具有实质意义,从而有助于开展优势进攻或积极防御,利用地形顺利行进或阻挡敌方行进,在长时间的战役中获取资源,了解可能采取的工程措施(如开挖隧道及道路、飞行场地或防御工事施工等),为部署能影响军事作战的技术提供指导(Kiersch, 1998; Blake, 2002; Gellasch, 2004; Rose, 2008; Rose et al., 2010)。

地形对进攻、武器装备运用和地面军事行动有显著影响。为避免与地形相关的机动路线受阻或军用车辆沉陷等危险性对军事行动造成影响,需要具备快速识别和评估地形条件的能力,但这种能力经常受限于地质信息的匮乏和面临动态变化环境的制约(Roskin et al., 2012)。地形分析的地质方法很早就应用于干湿条件等变化环境的越野机动路线评估(Erdmann, 1944),Zevi(2015)提出地形的地质结构作为战场基础可能是决定军事行动成功与否的重要因素。已有研究表明支持地形危险性评估的地质环境因素包括地貌景观、土壤、植被和地质(Birkeland, 1999; Schaetzel et al., 2005)。为支持中东沙漠地貌景观环境的地面军事行动或相似环境的武器装备机动性测试和军事训练,美国军事地质学家们在选择地质因素时,将岩石类型作为土壤母质来源以确定土壤类型(Sabol et al., 2016),土壤因素则充分考虑了类型、空间分布、地下信息(包括分层结构和深度)、力学强度(贯入阻力和剪切强度)、密实度和特殊属性(包括沙尘结构中黏土、泥、细砂的分配和易溶盐成分的电阻率)(McDonald et al., 2016a)。Roskin(2016)研究了以色列加沙地带农业

区边缘过往军事行动中装甲履带车辆在冬季多雨季节反复沉陷的实例,分析了不同土壤类型的沉陷频率和圆锥指数与土壤深度的关系,证明土层结构是地形危险性影响评估的重要地质因素。

地下空间的地质条件对于地下军事设施构筑、侦察和打击十分重要。地下军事设施的构筑和安全防护需要掌握岩体的工程与水文地质特征,复杂的岩石地层介质可以有效屏蔽地下目标暴露征候从而降低被侦察发现的概率,深钻地打击武器向地下深入的岩石可侵彻能力(Penetrability:指爆破战斗部穿透一定深度岩石介质产生爆腔破坏效应的能力)和打击条件下的地质结构易损性已成为地下军事设施打击评估的重要因素。Eastler et al. (1998)认为岩石环境影响地下军事设施的构筑深度、地下结构布局和打击下的易损性,提出影响地下军事设施易损性的三个主要地质变量为地下设施深度、岩体强度和覆被层可侵彻能力。其中可侵彻能力描述成一个综合变量,地质因素依赖于岩石抗压强度、岩石风化程度与深度,以及包括由节理、裂隙、层理等数量决定的岩石质量(Rock quality:非地质学专门术语,表征岩石完整性的物理量,等同于岩体完整性系数);在侵彻武器方面,由武器外形结构和飞行速度与撞击角度等飞行参数决定。Young (1992)建立了基于试验数据的深钻地武器侵彻岩石、土壤和混凝土深度统一的经验公式,提出了描述岩石可侵彻能力的定量指标参数和计算公式。地下目标打击评估的另一重要方面是侵彻武器的打击效果。地下目标寄主岩石的裂隙系统可以强烈影响侵彻武器的侵入效果,岩石的脆性破裂结构控制了侵彻弹头最终的侵入轨迹(Jacobi et al., 2001)。Ehlen (2001)强调侵彻弹头沿平行于一定延伸且优势方位的节理侵入可以增加武器的侵彻深度和侵彻破坏能力。Ehlen (1998)认为区域线性构造和岩石节理在走向方向上不具有统计学意义的差异,并利用不规则碎片几何学开展了禁入区线性构造产状统计模拟研究,以增强侵彻武器打击效果。由于陌生或不可进入区域的潜在地下目标在岩石露头尺度下的节理数据难以获取,区域构造纲要资料和线性构造影像解译数据在宏观尺度上可能更具有分析应用价值。

军事地质学在传统作战应用研究中也广泛吸纳了其他自然科学。例如增加土壤学和地貌学研究,可以提高土壤盖层、地形背景对军用车辆机动性影响的评估效果(Bacon et al., 2008)。水文土壤学是研究水圈与土壤圈之间相互作用的新兴领域,现在

已越来越广泛地应用于军事地质学,包括测定土壤含水量用以判断土壤特性(Engle et al., 2010),浅表水文环境对土壤强度和装备机动能力的影响(Priddy et al., 2012),作战过程对土壤扰动与水文响应的机理(Caldwell et al., 2006)。其他研究还包括冰雪盖层对军用车辆机动通行能力的影响(Shoop et al., 2006a, b; Lee et al., 2009);由于现有技术提高了对土壤特性的认知,相应地也加大了红外线和电磁传感器在地雷临时爆炸装备的检测应用(Miller et al., 2004; Lopera et al., 2007);未爆弹中炸药的处理与转移,尤其是土壤环境下炸药中化合物的化学和生化转换研究,已变得愈加关键(Pennington et al., 2002; Yamamoto et al., 2004; Pichtel, 2012)。

1.2.2 作战环境

军事地质学在军事作战中发挥作用更加充分考虑了作战环境的地理背景、地质环境、资源与生态环境的安全和政治考量。Gilewitch (2014)阐述了干燥地区对开展现代军事作战所面临的巨大挑战,探讨了优选环境因素的重要性,并分析了特定地理地质背景与沙漠地形、辐射平衡和风成演变过程,以及沙尘对设备、人员和战术的影响。Gellasch (2014)分析了阿富汗不同自然地理区域的水文地质环境特点,探讨了缺乏可持续性优质水源对实施军事作战的负面影响,指出了解军事作战环境的水文地质条件,尤其是在严峻作战场地的水文地质条件,不仅有利于解决水源问题,而且还能最大程度地减少因自然和人文污染带来的威胁,避免对军事力量造成短期或长期的健康风险。Bacon et al. (2014)论证了可溶性富盐地质环境对沙漠地区军事作战、军事人员潜在健康影响以及减少军事材料磨损腐蚀的重要性。Doe et al. (2014)针对美国西南部沙漠地区的军事用地,指出西南部沙漠地区大面积的空旷地带提供了一种关键的军事空间资源,可模拟现代战场空间开展陆地和空中的军事培训。Huang et al. (2014)从水文地貌学和水文地质学的角度,分析了沟谷地貌环境对军事行动特别是车辆机动性的影响。Wohl (2014)则重点论述了干旱环境土地沟渠网络的问题,针对降雨、径流及山坡河道演变过程的时空变化、支流与主河道之间的不整合性、流量的短时性或间断性趋势、以及干旱土地缺乏均衡的水文地质特征,探讨了沟渠网络下限阈值和修复能力的测定方式,并通过对美国亚利桑那州尤马军事试验场的实例研究,提出了一套监测指标,用于评价与管理相关河道或整个流域网络的环境状况。Dickerson et

al. (2014) 论证了地质环境研究可用于了解美国内华达州内利斯空军基地培训靶场中沙漠盆地的时空和演变过程,通过放射性碳测年分析了地形地貌、沉积物和化石及其第四系演变过程,发现该地历史上曾经分布有洪积湖、湿地、季节性湖泊和草甸。Warren (2014) 阐述了美国西南部沙漠环境军事基地广泛分布的生物土壤壳的性质,评述了这些土壤壳对地表土壤稳定性的影响,分析了土壤壳对扰动的地质响应机制,探讨了沙漠环境军事基地综合性生态保护修复措施。Wadman et al. (2014) 从美国大陆地区到位于北卡罗来纳州的美国最大的两栖训练场,阐述了如何利用近岸测深、波浪和近岸循环及其内在的地质机制,识别了昂斯洛海滩侵蚀性热点,以支持海岸带登陆作战训练。海湾战争中美军运用卫星影像、战场情报侦察和地面样品分析手段,详细评估了科威特波斯湾海岸带萨布哈盐碱地地质条件对自然岸滩和人工海岸武器装备机动性的评估和测验,海岸带环境地形危险性分析有利支撑了海湾战争联军地面军事行动的成功 (Knowles et al., 1998)。运用地质取样分析、现代遥感技术和地球物理探测技术,地质数据正越来越多地应用到现代战争——美军沙漠作战环境的地形危险性评估模型 (McDonald et al., 2016b)。美国自冷战时期开始就十分重视地下军事设施探测和评估,美国军事地质学家通过岩石质量和风化深度等在内的地质数据以评估常规钻地武器打击地下军事设施的易损性或薄弱点,这些数据被用于建立岩石质量与钻地武器侵略能力关系的计算机模型 (Eastler et al., 1998)。阿富汗战争中,通过地层、断裂等地质数据的地理信息系统空间分析技术,美军识别易溶性灰岩环境隐匿洞穴的空间分布也取得了良好效果 (Gross et al., 2004)。

1.2.3 战场情报

从拿破仑时期到叙利亚战争,从军事地理学到军事地质学,军事地质作为专题情报持续支持军事行动一直是其研究核心。无论是否是现代战争,对利用地形展开进攻和防御、地下军事设施构筑和打击、地下水和天然建筑资源利用一直是军事地质情报支持地面行动的传统领域。从美国南北战争葛底斯堡战役地形危险性的下伏基岩分析 (Inners, 2008) 到二战诺曼底登陆战役的法国西北部岩土工程地质专题图 (Rose et al., 2006),再到阿富汗战争美军利用地层和构造寻找隐匿洞穴 (Gross et al., 2004)、利用岩石类型的法证地球科学评估本·拉

登藏匿地 (Ruffell et al., 2008) 和阿富汗喀布尔盆地水文地质模型 (Gellasch, 2014),传统地质学知识一直是军事地质情报支撑的源动力;另一方面,由于陌生环境未知的危险性对军事行动的严重影响,现代卫星遥感侦察、应用地球物理探测和计算机信息建模技术被广泛运用于军事领域,无论是中东地区沙漠作战环境的地形危险性评估 (McDonald et al., 2016a)、海湾战争登陆海岸分析和地下水点定位 (Knowles et al., 1998),还是自冷战以来对地下军事设施的探测与打击评估,地质情报编译、现代地质探测技术和地理信息系统的联合已成为军事地质情报支持军事行动的关键能力。围绕现代战争的武器装备评估、环境安全监测和军事用地管理等多样化军事需求推动军事地质情报研究持续发展 (Steenkamp—Fonseca et al., 2018)。其中最引人注目的研究实例是,美国西点军校军事研究院通过多种极端自然环境下的土壤数据,检测履带式 and 轮式装甲车辆机动性,支持包括临时爆炸装置在内的侦察和击破技术 (Fleming et al., 2016);采用遥感影像动态监测伊斯兰国 (IS) 恐怖组织为反抗联军镇压而点燃伊拉克北部油井所造成的环境恶化趋势 (Bulmer, 2018);叙利亚战争土叙边境库尔德政党及其民兵对山地地表、地下工事和城市作战中的地质情报考量 (Bulmer, 2022);针对现代战争军事地质情报产品的专题图层、作战场景和即时信息三种快速支撑方式 (Teichmann, 2022)。示例说明,应对军事行动带来的环境风险和快速保障等挑战已成为军事地质多样化情报研究领域的焦点。进入 21 世纪,西方将军事地质提及到军事地球科学高度,并从全球多维空间获取综合地学情报,为全域作战联合信息环境奠定了基础。2013 年,国际军事地球科学联合会 (IAMG) 成立 (Rose, 2018),北美和西欧主要国家开始每隔两年组织国际军事地球科学大会 (ICMG),持续关注地学环境情报在作战辅助决策中的技术实现和地位作用 (Guth, 2020a; Bondesan et al., 2022b)。

1.2.4 非战争军事行动

军事地质在非战争军事行动方面的应用起步相对晚,主要侧重于军事用地管理 (Doe et al., 2005)、文化资源保护 (Schramm, 2006) 和冲突后维稳行动 (Harmon et al., 2014)。在伊拉克战争美英联军沙漠军事行动期间,军事地质还被运用到气候变化监测 (Palka, 2011)、环境安全评估 (King, 2000)、军事装备检测 (Harmon et al., 2011)、士兵健康监测

(Engelbrecht et al., 2009a, b) 和军事培训 (Shaw et al., 2000) 等方面。军事培训和军事用地管理被认为是军事地质在非战争军事行动应用最多的领域 (McDonald, 2002; Warren et al., 2005)。

2 现代军事地球科学研究领域

军事活动总是与广义范畴的地球科学紧密联系在一起,从提供原始武器的石料资源到利用地形展开进攻和防御,战争与地质一直都有密切关联。现代军事活动更加广泛地依赖于陆、海、空、星际情报及其动态变化信息,基于地球科学的地质学及诸多交叉研究领域,对于评估地形与环境条件如何影响武器装备和军事行动都将是至关重要的 (Bondesan et al., 2022a),这也是传统军事地质学向现代军事地球科学转变的关键所在。Galgano et al. (2020) 定义的军事地球科学是将更广泛的地球科学应用于支持军事行动,包括战役行动的直接战术支持和更为广泛的战略活动。现代军事地球科学以作战环境变化更新、战场空间维度扩展和多样化军事活动为背景,更加重视地学系统性内在影响与规律研究,除持续研究地理和地质等在军事活动中的作用外,尤以四个方面的研究领域最为特色:

(1) 地学环境影响历史战争。以史为鉴聚焦研究地学环境影响过往战争历史,特别是经典战斗和战役的历史意义,以启示现代战争更好地关注地理、地质、资源与生态等地学环境对军事活动的重要影响。通过发现历史上有意或无意地运用地质条件成功解决典型战例中的地形、资源、空间等问题,用现代军事地球科学新视角剖析古战场战斗成败的关键因素,建立地球科学与军事历史关联,总结战争历史经验教训,是当前历史军事地球科学的主要研究内容。2017年南非第十二届 ICMG 会议专门设置了关于历史军事地球科学的讨论 (Rose, 2018)。这一讨论的议题主要是军事历史中的地理地质影响作用,运用现代地貌景观可视化工具与地学分析技术理解与探察古战场,以及对古战场遗迹、军事工事要塞和经典战役战斗场地的科学考察。Guth (2020a) 则以地球科学和历史至当前军事行动的联系为视角,系统介绍了军事地球科学支持和分析军事活动的研究领域,这些研究领域包括德国自拿破仑战争至一战以来的军事地质研究历史革新,美国南北战争时期蒙大拿古战场的现代考古学、GIS 和军事地理分析,一战时期法国与比利时战场行军的资源保障,二战西线战场有利地形的地质支撑作用等。这

种以历史观为代表的军事地球科学,其研究主要目的是在古战场开展军事教学培训,以便让军事指挥官理解当时战场所面对或克服的挑战,并通过现代技术识别这些威胁,更好地利用地学环境应对现代战争 (Guth, 2020b)。

(2) 地球科学对军事活动影响。现代军事地球科学重点研究地球科学对军事活动的影响,特别是地表过程和地貌演化,以及与军事设施可持续管理、环境健康、人员安全、高效管理人文资源和环境安全 (例如水资源、气候变化) 等相关的环境问题。强调环境和资源的研究响应了全球化视角和对待环境态度的变化趋势,并且这一领域不只局限于战场军事行动,还扩展到维和行动、镇压叛乱和灾后重建等非战争军事行动。与环境 and 资源相关的研究方式也表明地球内部系统、表层系统等地球科学同作战行动场景、武器装备运用和军事用地管理等密切相关。例如,2016年《军事地球科学和沙漠战争》专著 (McDonald et al., 2016b) 专门讨论了沙漠在过往和现代战争中所扮演的角色,聚焦沙漠地区军事用地管理和沙漠环境如何影响军事装备和人员。专著提出的研究示例包括基本的自然景观和地貌进程如何影响过往战斗的结果,和如何集成地球科学与广泛军事活动之间所面对的现代挑战。

(3) 地缘安全利益和资源需求。强调研究地缘安全利益和资源需求是现代军事地球科学关注的兴趣点。这包括国际海峡水道通行安全、地缘联合反恐作战、跨地域地貌场景关联和冲突热点事件的地缘战略安全诉求等,也包括一系列应对地缘安全利益的技术难题解决方案,比如放射性辐射环境对军事活动的影响、军事设施的资源与环境承载能力,同时也包括一系列的资源安全问题,如跨境 (trans-border) 水资源保障、冲突地区的能源资源安全管控和支撑军事活动的生态与农业资源安全等。2015年美国海军学院第十一届 ICMG 会议以“未来军事地球科学:科学能力、全球安全和可持续性”为主题 (Rose, 2018),则是这一研究领域的生动写照。

(4) 支持军事活动的地球科学技术。探讨支持军事活动的地球科学技术是永恒的研究主题。当前主要包括运用数字高程模型、数学模型、本构模型和多光谱与高光谱影像等多源遥感信息,用以支持军事活动的地学环境特征分析,也包括星载、机载、激光雷达、合成孔径雷达和无人搭载技术,对指挥线路侦察、收集地面移动数据、对车辆机动的影响和地下空间探测识别等。除此之外,集合军人、科研院校专

家学者、政府服务部门、商业企业等一起参与探讨军事地球科学技术的广阔领域,也是现代军事地球科学体系化联合和军民融合性技术发展的重要标志。

3 关键问题与面向挑战

3.1 关键科学问题

历史上世界主要国家在地质的军事应用上虽有不同,但需要解决的军事地质问题却非常相似。总体上,军事地质学研究发展是随着战争形态的演变、武器装备的更新和现代探测技术的进步,从早期将地质学原理、方法和研究融入到军事任务目标中,到现代强调地学环境对军事活动具有重要影响的研究思维转变(张栋等,2019)。当前我国针对现代军事地球科学应突出更为广泛的军事需求应用,关键科学问题可能主要聚焦三个方面:

(1)运用军事和地学联合思维,解决作战环境理论和研究方法问题。地质在现代战争中如何发挥作用,地质和军事的契合点到底体现在哪些方面,传统地质研究如何发挥专长解决好军事问题,跨越学科、知识和技术领域的现代军事地球科学认知如何运用到实际问题研究中,以及地质要素作用机理和作战环境影响评估等军事地质主要研究问题,在国内还没有与之匹配的现代军事地球科学基础应用理论来描述和归纳。尝试从军事研究思维角度,从战场空间、地域结构和环境背景等入手,引入地质构造格局控制论、环境—资源变化响应机制等地学环境研究内容,提出相关概念涵义和基本原理,建立军事地球科学研究思维和关键支撑技术,形成一套较完整的紧贴军事应用的战场地质环境研究方法,可能是部分解决我国军事地球科学基础应用理论短板弱项问题的关键锁钥。

(2)针对地形与景观实际场景,解决地质与军事应用紧密结合问题。面向地质要素在现代作战环境和联合信息环境体系中如何突出应用问题,发挥地质在探察地表及地下空间结构和其与地形、景观关联研究的优势,明确回答在一个预定地域到底由什么地质实体类型组成,这些地质实体是怎样给战场空间提供结构支撑与时间演化的多物质基础的,并有哪些规律可以从地质角度来识别,和如何运用这些规律解决好军事应用问题,从而深化地质条件对典型场景军事行动的影响分析,提升对战场地质环境信息的实际运用能力。尝试以多样化地理景观类型为约束,通过建立区域军事地理—地质单元,从地质角度重新认识战场空间地域结构,研究地质环

境和作战地域类型的时空关联,提出地质条件影响战场环境的关键因素,开展复合数据量化评估,提升陌生地域分析能力,从而提供典型场景战场地质环境研究示范案例,推动军事地质与作战应用关系的理解认知,解决军事活动对地质的实际应用问题。

(3)基于地缘安全与全球视野,解决地球科学面向的军事安全保障问题。俄乌冲突再一次证明现代战争具有霸权国家利用地缘政治问题大打代理人战争,实则对全球粮食、资源与能源安全构成严重威胁的混合战争特征。在大国地缘博弈与全球资源争夺加剧的背景下,针对地理空间、地质环境、自然资源、人文环境等实体,必将加快现代军事地球科学多元化研究与全球化视角的议题讨论。地球科学概念的提出与发展,特别是地球表层系统与人类和军事活动的生存环境息息相关,地球内部系统涉及地壳表层与内部之间的物质和能量传输,不仅造就了人类和军事活动所需要的资源,而且给人类乃至战争提供环境约束和灾变效应。尝试运用地球科学理论指导现代军事地球科学的空间、环境、资源、目标等体系性与多样化问题,将是军事地球科学解决军事安全保障问题的重要命题。

3.2 面向主要挑战

现代军事地球科学学科交叉与信息融合,地球空间结构与资源环境响应特点鲜明,现代战争规律下的军事地质保障领域宽泛,其所面临的挑战必然多元复杂。但聚焦军事作战和围绕多样化军事需求仍将是持续性的研究课题,未来挑战可能主要集中于以下五个方面。

3.2.1 战场地学空间情报的智能应用

未来战场信息领域的对抗将成为战争重心。本文提出“战场地学情报与统一信息空间”认知概念,其核心是利用战场空间地表与地下综合地学信息,依托现代信息技术实现地学保障要素的深度融合,提升战场态势感知能力。现代作战领域已经由传统的物理域拓展到认知域,传统的信息系统面向的是数据处理,但难以对知识进行综合处理;信息融合技术能够解决海量数据交换问题,但无法实现对认知域的深度处理。基于此,在传统信息系统开发过程中注重应用人工智能技术,实现战场地学情报与联合信息空间智能应用平台将成为重要的技术挑战。该平台将基于人工智能理念,采用智能数据分析技术和知识检索算法,预期实现对军事地球科学领域相关数据信息的智能处理。该平台将构建基础数据管理系统、基础知识管理系统、辅助决策系统和数据

接口系统:

(1)基础数据管理系统的数据库矢量数据结构包括由暂时处于知识域状态的多元异构地质、地理、气象、水文、资源等数据形成的相对固定数据和动态数据。重点研究内容可能包括目标场景三维感知中多元异构数据的协同关联机制研究、基于现代遥感技术的陌生地域地学特征参数解译样本数据集构建、数据驱动的民用地质数据快速整编改化关键技术研究等。

(2)基础知识管理系统由功能性专家系统和训练样本组成。功能性专家系统构成知识库,包括知识逻辑模型、知识产品模型、知识框架模型、知识面向对象模型。训练样本库由算法程序库支撑,包括基于机器学习的多种算法。知识库向算法程序库提供基于专家知识经验或实践验证的理论模型框架、数学模型知识和经验指标参数,算法程序库在知识库边界约束基础上开展基础数据管理系统中数据的算法优选和样本训练。关键创新点将是装备—地学环境耦合的地面特性智能识别算法和典型场景地表—地下空间快速感知建模技术。

(3)辅助决策系统由数据智能处理结果组成,包括对知识域进行研究确定的决策算法和数据处理结果的标注、识别诊断、决策结果可视化与形成专题信息产品等。关键研究问题包括地学数据的复合定量评估模型研究、智能编图和信息可视化。

(4)数据接口系统主要解决数据交换问题并建立符号共享体系,实现“所见即所得”可视化表达和制图输出。

难点为军事地球科学多元数据的符号体系均一化处理。战场地学情报与联合信息空间智能应用平台的构建,主要目的是建立地学环境数据的科学分析能力,预期体现在:将报告、图像和其他形式的地学信息描述成更直观、可解释的格式,以便快速理解信息环境;基于热点事件提供动态、持续的环境预测分析;在信息空间和地理空间中互动描述可用信息的地学环境背景;识别信息和目标中的地学异常现象;提供与地学关联信息的军事辅助决策。

3.2.2 陌生地域特殊环境隐匿目标的

遥感侦察识别技术

现代军事地球科学的主战场将是陌生地域或难以直接到达地区,目标遥感侦察识别技术将成为研究领域新常态。针对陌生地域特殊自然环境中的隐匿目标这一特定场景,预期探索研究将可能聚焦于高植被密度区植被—土壤特征光谱指数分类与识别

机理、覆盖区山地不稳定斜坡(潜在地质灾害隐患点)雷达数据最优分隔尺度分类识别、基于多源影像融合的山地冰冻区消融速度提取和综合灾害效应定量模拟3个方面:

(1)植被—土壤特征光谱指数分类与识别机理研究的科学目标是基于植被物候对环境变化响应,从多光谱卫星遥感数据中获取长期、连续、多尺度的植被土壤参数角度,开展植被与土壤光谱指数分类、微波植被光学厚度等新兴遥感指标在目标侦察识别方面的应用研究。

(2)不稳定斜坡激光雷达数据最优分隔尺度分类识别的科学目标是,针对高植被覆盖区不稳定斜坡传统遥感识别精度有限背景,基于星载、机载LiDAR数据提供地物三维信息和时序InSAR数据对地表变形响应,从光谱和高度信息对研究影像多尺度分割和提取特征角度,开展最优分割尺度、机器学习分类和变形区分研究,探索LiDAR、InSAR等雷达数据与高空间分辨率影像的融合处理与分类算法,为深度地表覆盖条件下不稳定斜坡智能识别提供技术支撑。

(3)基于多源影像融合的山地冰冻区消融速度提取和综合灾害效应定量模拟研究的科学目标是,基于空间分辨率、光谱分辨率光学遥感数据与微波数据融合处理,提取特定山地环境的冰冻区消融速度,从冰冻区表面位移量和平均运动速度计算角度,开展非冰冻稳定地段残余位移和冰冻区主冰流线剖面运动速度的时序数据归一化处理与位移偏差精度研究,探索不同山地冰冻区前缘消融速度和前缘冰体冰雪崩或冰湖溃决的灾害效应对目标破坏的定量反演模拟。

3.2.3 战场侦察的法证军事地球科学

法证地球科学的多种技术方法其实质是一种情报证据识别手段,已被证实可用于军事领域(Leith, 2002; Ruffell et al., 2008; Mazhari, 2010; Laterza et al., 2018)。特别感兴趣的是,据Leith(2002)报道,本·拉登的搜寻挑战包括对只能在录像带上看到的岩石背景的分析。录像并不是法证地球科学为维护国家安全而选择的物证,但它提供的有用信息限制了可能的搜索区域;仔细检查二战期间日本气球中用作配重的鹅卵石,就能准确定位日本攻击美军太平洋基地的集结地;阿富汗战争对于美军准确了解阿富汗山区天然和人工洞穴的位置和特征,地质学证据变得尤为重要。法证地球科学的传统地质手段,还包括利用岩石类型和地震传播的知识区分自

然地震和核爆地震,充分利用地球化学的 ICP-MS 分析技术对炮弹残片的微量元素检测以实现战场武器痕迹的来源识别(Laterza et al., 2018)。法证地球科学,尽管主要面向刑事侦查领域(刘远和魏文博, 2023),目前在军事领域还不被熟知,但相同的物证痕迹提取与检测手段,可被广泛地复制于军事领域(张栋等, 2024),战场物证提取、材料情报侦察和武器痕迹检测,以及大量运用地球物理和地球化学知识与专业技术,将是法证军事地球科学在军事情报侦测研究领域的重要课题。

3.2.4 军事新能源安全保障

以稀有、稀散和稀土元素为主体的战略性关键金属矿产资源,在新材料、新能源、信息技术、航空航天、国防军工等新兴产业具有不可替代的重大用途(翟明国等, 2019)。关键金属或关键矿产是重要的战略资源,对国家军事能源安全保障具有重大意义,在此不再累述。本文认为除关键矿产外,还有一种没有被军事活动有效利用的地热新能源,并且在高原高寒地区具有广泛的应用价值。地热是新型清洁可再生能源,具有可替代传统能源、赋存浅储量大、易开发广利用等优势,应用于工业发电、生活供暖、医疗旅游、农业养殖等民用领域,军事上作为潜在先进能源还未高效利用。未来针对地热矿田热储靶区侦察定位技术和地热水环境示踪技术将是地热新能源军事应用领域的主要方向:

(1) 地热矿田热储靶区侦察定位技术应瞄准构建中浅层地热矿田热源与储存系统靶区精确定位理论与方法,重点围绕地热成因理论、中浅层地热靶区精确识别、热能转化利用参数分析、中低温热水地热泵稳定提取可行性、低温环境武器装备动力输出和军事设施保温防护等开展研究。

(2) 地热水环境示踪技术应重点围绕典型地热化学性质与来源示踪、热矿物质水有益元素与矿物含量对高原病和战伤救治康复影响机理、地热水地球化学亲缘性与土壤理化性质作用关系等开展研究,提出不同地球化学类型地热水成因模式、医疗救治康复阈值和恶劣土壤改良指标,形成军事用地与地热点利用样本数据集。

通过建立地热新能源军事应用的支撑技术,提出高原高寒环境地热能源保障模式,解决军事医学致伤修复和军事用地持续利用等关键问题,预期可有效节约传统能源,提高军事用地利用率,增强军事设施保温防护能力,提供低温环境武器装备动力输出能量,改善高原艰苦地区医疗救治条件等实际效

益,可为军队战时能源自给、常态后勤保障、服务重大任务等提供安全保障。

3.2.5 现代战争与军事地球科学

现代战争以信息化战争为基本形式,基于网络信息平台,在陆海空天网电等全域多维进行的以体系对抗为主的战争。俄乌冲突表明现代战争具有新的混合战争特点,并将信息对抗、意识形态对抗、军事对抗等不同领域的军事干预和非军事干预融为一体,其本质是混合了多种要素和特质,重点在于“模糊”与“融合”。所谓模糊,是指传统战争中那种较为明确的作战对手、作战空间等与混合战争形态下的复杂多变形成鲜明对比;所谓融合,是指对手在同一个战场空间使用了各种技术手段和从常规到非常规等多种战术方法。俄乌冲突马里乌波尔亚速钢铁厂的战斗充分说明,其地下设施从二战历史上就定位于军事防御工程,到现在一直都是城市夺控作战的焦点;电视画面中乌东平原沼泽化黑土即使冬季也常使武器装备深陷其中难以有效机动,这些武器装备被当作无人机群定点清除的“活靶子”令人触目惊心。可见,包括地下地质信息在内的地理空间情报(Geospatial Intelligence)仍然在现代战争中发挥着积极作用,军事地质仍将是现代战争中的一类关键地学要素。由此,现代战争的陆、海、空战场的军事地质保障更具全域性、基础性、纵深性、耦合性与系统性特点(张栋等, 2021;葛良胜等, 2023)。同时,现代战争以人工智能和大数据为核心的智能化战争形态发展趋势,广泛运用智能化技术实现战争全方位的信息化、数字化和智能化,云计算、大数据、人工智能、数字孪生等信息赋能新兴技术也已打破了传统信息作战的界线。现代军事地球科学基于地球科学的多学科交叉特点,地理地质、气象海洋和生态资源等地学环境作为主要研究对象,也必将成为地球科学领域应对现代战争的主战场。因此,基于地球科学数据驱动的地理空间情报和战场态势感知的基础数据响应与智能分析,有助于准确识别目标并快速提供决策依据;基于地形变化与地球动力学的地球科学基础研究,探索地球表面的演化及其与地质过程的相互作用,也有助于深入理解战场作战环境中的地形景观、地质过程、灾害效应和军事活动之间的内在关联机制。

4 结语

在当前深刻变革和复杂调整的国际地缘政治安全形势下,世界主要国家十分关注军事地球科学面

向的多维全域作战环境和广泛多样军事应用领域,已形成比较系统的军事地球科学研究和极具特色的专业技术体系,持续的国际军事地球科学大会正在为各种古老和新颖的议题提供研究思路与解决方案,为战时军事地质领域卓有成效的研究者授勋,也标志着军事地质学为历史战争的胜利做出过卓越贡献。比较而言,我国对现代军事地球科学还存在理解认知不清、基础研究薄弱、研究对象不明、战略统筹不足等诸多问题。对于解决台湾问题、实现国家完全统一的历史使命,我国地质学家更应以此为已任高度关注军事地质安全保障问题。为此,建议我国通过地球科学多学科交叉合作,聚焦与现代战争军事活动相关的空间、环境和资源,加强对战场地学空间情报的智能应用、陌生地域特殊环境隐匿目标的遥感侦察识别、战场侦察的法证军事地球科学、军事新能源安全保障和现代战争军事地球科学等问题的基础研究,为深化我国的军事地质调查实践、服务国防与军队现代化能力以及启示我重要方向军事斗争准备提供重要的地质科学依据。

致谢:研究成果得到自然资源部“军事地质研究与应用”科技创新团队支撑,论文得到军队某科技委员会专家指导;审稿专家提出的修改意见,特别是责任编辑章雨旭研究员提供的引导性思路促使作者深入思考并提升了论文质量;在此一并深表感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 葛良胜,王梁,张栋,戚冉. 2023. 军事地质导论. 北京:国防工业出版社: 1~434.
- 李万伦,吕鹏,孟庆奎,王铭晗. 2020. 国外军事地质学热点问题. 地质论评, 66(1): 189~197.
- 刘光鼎,刘代志. 2003. 试论军事地球物理学. 地球物理学进展, 18(4): 576~582.
- 刘晓煌,张露,孙兴丽,李喜来,等著. 2018. 现代军事地质理论与应用. 北京:科学出版社: 1~217.
- 刘远,魏文博. 2023. 法证搜寻:应用地球物理学研究的新方向. 地球物理学进展, 38(4): 1824~1841.
- 孙兴丽,刘晓煌,鲁继元,毛景文,徐学义,关洪军,李保飞,刘玖芬,鲍宽乐,鲁世朋. 2017. 现代战争特点及军事地质调查. 地质论评, 63(1): 99~112.
- 于德浩,龙凡,杨清雷,王康,李季,杨彤. 2017. 现代军事遥感地质学发展及其展望. 中国地质调查, 4(3): 74~82.
- 张栋,吕新彪,葛良胜,路彦明,黄辉. 2019. 军事地质环境的研究内涵与关键技术. 地质论评, 65(1): 181~198.
- 张栋,路英川,吕新彪,孙军刚,葛良胜,戚冉. 2021. 联合作战军事地质保障特点与关键问题. 军事测绘导航, (1): 25~28.

- 张栋,葛良胜,吕新彪,王斌,闫家盼,杨煜坤,任堃. 2024. 法证军事地球物理:战场侦察与痕迹识别. 地球物理学进展(待刊).
- 张广有,孟庆奎,王智超,毕记省. 2022. 美国军事地质发展和启示. 地质论评, 68(5): 1912~1917.
- 翟明国,吴福元,胡瑞忠,蒋少涌,李文昌,王汝成,王登红,齐涛,秦克章,温汉捷. 2019. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题. 中国科学基金, 33(2): 106~111.
- Bacon S N, McDonald E V, Baker S E, Caldwell T G, Stullenbarger G. 2008. Desert terrain characterization of landforms and surface materials within vehicle test courses at U. S. Army Yuma Proving Ground. *Journal of Terramechanics*, 45: 167~183.
- Bacon S N, McDonald E V, Dalldorf G K, Lucas W, Nikolich G. 2014. Recommendations for the development of a dust-suppressant test operations procedure (TOP) for U. S. Army materiel testing. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X^{II}: 83~100.
- Birkeland P W. 1999. *Soils and geomorphology*. New York: Oxford Univ. Press: 1~440.
- Blake R N E. 2002. Airfield country: terrain, land-use, and the air defense of Britain, 1939~1945. In: *Fields of Battle: Terrain in Military History*. Dordrecht: Kluwer: 365~380.
- Bondesan A, Ehlen J. 2022a. Military geoscience: a multifaceted discipline. In: *Military geoscience: A multifaceted approach to the study of warfare*, *Advances in Military Geosciences*. Switzerland: Springer Nature: 1~15.
- Bondesan A, Ehlen J. 2022b. Military geoscience: A multifaceted approach to the study of warfare, *Advances in Military Geosciences*. Switzerland: Springer Nature: 1~356.
- Bulmer M H. 2018. Military use of environmental degradation by Islamic State, Northern Iraq. In: *Scientia Militaria*. South African Journal of Military Studies, 46(1): 123~147.
- Bulmer M H. 2022. Geological considerations for military works in the Afrin battlespace, Syria. In: *Military geoscience: A multifaceted approach to the study of warfare*, *Advances in Military Geosciences*. Switzerland: Springer Nature: 305~334.
- Caldwell T G, McDonald E V, Young M H. 2006. Soil disturbance and hydrologic response at the National Training Center, Ft. Irwin, California. *Journal of Arid Environments*, 67: 456~472.
- Cameron C P. 1998a. Dearly bought ridges, steep access valleys, and staging grounds: The military geology of the eastern DMZ, central Korean Peninsula. In: *Military Geology in War and Peace*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X^{III}: 83~98.
- Cameron C P. 1998b. Clandestine tunnel-4, northern Punchbowl, Korean Demilitarized Zone. In: *Military Geology in War and Peace*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X^{III}: 99~110.
- Collins J M. 1998. *Military Geography for Professionals and the Public*. Potomac: 283.
- Dickerson R, Malczyk N. 2014. Quaternary geologic studies on playas of the Nevada Test and Training Range in support of the Nellis Air Force Base training mission. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X^{III}: 1~18.
- Doe W W III, Shaw R B, Bailey R G, Jones D S, Macia T E. 2005. U. S. Army training and testing lands: an ecoregional framework for assessment. In: *The Scope of Military Geography: Across the Spectrum from Peacetime to War*. New York: McGraw-Hill Primus,

- 373~392.
- Doe W W, III, Hayden T J, Lacey R M, Goran W D. 2014. Overview of Department of Defense land use in the desert southwest, including major natural resource management challenges. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 109~118.
- Dow R I L, Rose E P F. 2012. Hydrogeology in support of British military operations in Iraq and Afghanistan 2003 to 2009. In: *Military Aspects of Hydrogeology*: Geological Society of London Special Publication, 362: 241~252.
- Eastler T E, Percious D J, Fisher P R. 1998. Role of geology in assessing vulnerability of underground fortifications to conventional weapons attack. In: *Military Geology in War and Peace*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X III: 173~188.
- Ehlen J. 1998. A proposed method for characterizing fracture patterns in denied areas. In: *Military Geology in War and Peace*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X III: 151~164.
- Ehlen J, Harmon R S. 2001. The Environmental Legacy of Military Operations. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X IV: 1~228.
- Engelbrecht J P, McDonald E V, Gillies J A, Jayanty R K M, Casuccio G, Gertler A W. 2009a. Characterizing mineral dusts and other aerosols from the Middle East-Part 1: Ambient sampling. *Inhalation Toxicology*, 21: 297~326.
- Engelbrecht J P, McDonald E V, Gillies J A, Jayanty R K M, Casuccio G, Gertler A W. 2009b. Characterizing mineral dusts and other aerosols from the Middle East—Part 2: Gra samples and resuspensions. *Inhalation Toxicology*, 21: 327~336.
- Engle E M, Harrison J B J, Hendrickx J M H, Borchers B. 2010. Digital soil boundary detection using quantitative hydrologic remote sensing: Progress in Soil Science. *Digital Soil Mapping*, (2): 123~136.
- Erdmann C E. 1944. Military geology: Applications of geology to terrain intelligence. *Bulletin of the Geological Society of America*, 55: 783~788.
- Fleming S, McDonald E V, Bacon S N. 2016. Military test site characterization and training future officers—An integrated terrain analysis approach. In: *Military Geosciences and Desert Warfare*. *Advances in Military Geosciences*: 273~296.
- Galgano F A, Palka E J, eds. 2011. *Modern Military Geography*. New York: Routledge.
- Galgano F A, Rose E P F. 2020. Military geoscience. In: *Encyclopedia of Geology* (2nd ed.). Oxford, Elsevier, 6: 648~659.
- Ge Liangsheng, Wang Liang, Zhang Dong, Qi Ran. 2023#. *An Introduction to Military Geology*. Beijing: National Defence Industry Press: 1~434.
- Gellasch C A. 2004. Groundwater: Past, present and future uses in military operations. In: *Studies in Military Geography and Geology*. Dordrecht: Kluwer: 307~319.
- Gellasch C A. 2014. Hydrogeology of Afghanistan and its impact on military operations. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 69~81.
- Gilewicz D A. 2014. Military operations in the hot desert environment. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 39~47.
- Gross M R, Ghosh K, Manda A K, Whitman D. 2004. A GIS-based spatial analysis of caves and solution cavities—Application to predicting cave occurrence in limestone terrain. In: *Studies in Military Geography and Geology*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers: 287~306.
- Guth P L. 2020a. Military geoscience—Bridging history to current operations: *Advances in Military Geosciences*. Springer Nature, Switzerland, 1~222.
- Guth P L. 2020b. Introduction: Geosciences supporting and analyzing military operations. In: *Military geoscience—Bridging history to current operations: Advances in Military Geosciences*. Springer Nature, Switzerland: 1~2.
- Harmon R S, King W C, Palka E J, Doe W W. 2011. Characterization of extreme environments for US Army materiel and human performance testing. In: *International Handbook of Military Geography*. Vienna, Truppendienst, 2: 242~249.
- Harmon R S, McDonald E V. 2014. Editors' introduction: military geoscience in the Twenty-First Century—A historical perspective and overview. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 1~10.
- Häusler H. 1995a. Die Wehrgeologie im Rahmen der Deutschen Wehrmacht und Kriegswirtschaft. Teil 1: Entwicklung und Organisation. Vienna, Informationen des Militarischen Geo-Dienstes, 47: 1~155.
- Häusler H. 1995b. Die Wehrgeologie im Rahmen der Deutschen Wehrmacht und Kriegswirtschaft. Teil 2: Verzeichnis der Wehrgeologen. Vienna, Informationen des Militarischen Geo-Dienstes, 48: 1~119.
- Häusler H. 2006. Military Geology. In: *International Handbook of Military Geography*. Vienna, Truppendienst, 1: 155~166.
- Häusler H, Mang R. 2011. Towards a pragmatic definition of military geosciences. In: *International Handbook of Military of Geography*. Vienna, Truppendienst, 2: 327~338.
- Huang Xiangjiang and Niemann J D. 2014. Simulating the impacts of small convective storms and channel transmission losses on gully evolution. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 131~145.
- Hunt C B. 1950. Military geology. In: *Application of Geology to Engineering Practice*. New York: Geological Society of America, Berkeley Volume: 295~327.
- Inners J D. 2008. Topography and geology of the Gettysburg battlefield. In: *Geology of the Gettysburg Mesozoic Basin and Military Geology of the Gettysburg Campaign*, 73rd Annual Field Conference of Pennsylvania Geologists, Gettysburg, PA: 38~47.
- Jacobi R D, Eastler T E, Xu Jiandong. 2001. Methodology for remote characterization of fracture systems in bedrock of enemy underground facilities. In: *The Environmental Legacy of Military Operations*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X IV: 27~60.
- Jacobs J A, Van Rensburg H J, Smit H A P. 2002. Military geography in South Africa at the dawn of the 21st Century. *The South African Geographical Journal*, 84: 195~198.
- Kiersch G A. 1998. Engineering geosciences and military operations. *Engineering Geology*, 49: 123~176.
- King W C. 2000. Understanding international environmental security: A strategic military perspective. Army Environmental Policy Institute, IFP-1100A: 32.
- Knowles R B, Wedge W K. 1998. Military geology and the Gulf War. In:

- Military Geology in War and Peace. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X III : 117~124.
- Laterza V, Ros V, Turetta C, et al. 2018. Chemical and lead isotope characterisation of First World War shrapnel balls and bullets used on the alpine Austrian—Italian front. In: Scientia Militaria. South African Journal of Military Studies, 46(1) : 163~187.
- Lee J H, Wang W. 2009. Characterization of snow cover using ground penetrating radar for vehicle trafficability—experiments and modeling. Journal of Terramechanics, 46: 189~202.
- Leith W, Matzko J R. 1998. Recent activities in military geology at the U. S. Geological Survey. In: Military Geology in War and Peace. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X III : 139~143.
- Leith W. 2002. Military geology in a changing world. Geotimes, 47: 24~26.
- Li Wanlun, Lü Peng, Meng Qingkui, Wang Minghan. 2020. New progress in application of military geology abroad. Geological Review, 66(1) : 189~197.
- Liu Guangding, Liu Daizhi. 2003. On military geophysics. Progress in Geophysics, 18(4) : 576~582.
- Liu Xiaohuang, Zhang Lu, Sun Xingli, Li Xilai, eds. 2018. Modern military geological theory and application. Beijing: Science Press; 1~217.
- Liu Yuan, Wei Wenbo. 2023. Forensic geophysics: A new trend of research on applied geophysics. Progress in Geophysics, 38(4) : 1824~1841.
- Lopera O, Milisavljevic N. 2007. Prediction of the effects of soil and target properties on the antipersonnel landmine detection performance of ground—penetrating radar: A Colombian case study. Journal of Applied Geophysics, 63: 13~23.
- Mather J D, Rose E P F. 2012. Military aspects of hydrogeology: An introduction and overview. In: Military Aspects of Hydrogeology. Geological Society, London, Special Publications, 362: 1~17.
- Mattliews S. 2011. Operation Tethys: An army geologist in Helmand. Geoscientist, 21(6) : 18~21.
- Mazhari S A. 2010. An introduction to forensic geosciences and its potential for Iran. Journal of Geography and Geology, 2(1) : 77~82.
- McDonald E V. 2002. Numerical simulations of soil water balance in support of revegetation of damaged military lands in arid regions. Arid Land Research and Management, 16: 277~290.
- McDonald E V, Bacon S N, Bassett S D, Amit R, Enzel Y, Minor T B, McGwire K, Crouvi O, Nahmias Y. 2016a. Integrated terrain forecasting for military operations in deserts: Geologic basis for rapid predictive mapping of soils and terrain feature. In: Military Geosciences and Desert Warfare—Past Lessons and Modern Challenges: Advances in Military Geosciences. New York: Springer Science+Business Media; 353~375.
- McDonald E V, Bullard T. 2016b. Military geosciences and desert warfare—Past Lessons and Modern Challenges: Advances in Military Geosciences. New York: Springer Science+Business Media; 1~373.
- Miller T W, Hendrickx J M H, Borchers B. 2004. Radar detection of buried landmines in field soils. Vadose Zone Journal, (3) : 1116~1127.
- Palka E J, Galgano F A. 2005. Military geography: From Peace to War. New York: McGraw-Hill; 1~496.
- Palka E J. 2011. Climate change and potential effects on future U. S. military operations. In: International Handbook of Military Geography, Vienna, Truppendienst, 2: 397~408.
- Patrick D M, Hatheway A W. 1989. Engineering geology and military operations: An overview with examples of current missions. Bulletin of the Association of Engineering Geologist, X X VI(2) : 265~276.
- Pennington J C, Brannon J M. 2002. Environmental fate of explosives. Thermochimica Acta, 384: 163~172.
- Pichtel J. 2012. Distribution and fate of military explosives and propellants in soil: A review. Applied and Environmental Soil Science, 2012: 1~33.
- Pogue J E. 1917. Military geology. Science, 46: 8~10.
- Priddy J D, Ernest S B IV, Peters J F. 2012. Effect of near-surface hydrology on soil strength and mobility. In: Military Aspects of Hydrogeology. Geological Society of London Special Publication, 362: 301~320.
- Robins N S, Rose E P F, Cheney C S. 2012. Basement hydrogeology and fortification of the Channel Islands: Legacies of British and German military engineering. In: Military Aspects of Hydrogeology. Geological Society of London Special Publication, 362: 203~222.
- Rose E P F. 2005. Napoleon Bonaparte's invasion of Egypt 1798~1801—The first military operation assisted by both geographers and geologists—And its defeat by the British. Royal Engineers Journal, 119: 109~116.
- Rose E P F. 2008. British military geological terrain evaluation for Operation Overlord: The Allied invasion of Normandy in June 1944. In: Military Geography and Geology: History and Technology. Nottingham: Land Quality Press; 215~233.
- Rose E P F. 2011. Credit due to the few: British field force geologists of World War II. In: International Handbook Military Geography, Volume 2: Proceedings of the 8th International Conference on Military Geosciences. Vienna: Truppendienst; 429~442.
- Rose E P F. 2018. The international association for military geoscience: a history to 2017. In: Scientia Militaria. South African Journal of Military Studies, 46(1) : 1~17.
- Rose E P F, Willig D. 2004. Specialist maps prepared by German military geologists for Operation Sealion: The invasion of England scheduled for September 1940. The Cartographic Journal, 41: 13~35.
- Rose E P F, Clatworthy J C, Nathanail C P. 2006. Specialist maps prepared by British military geologists for the D-Day landings and operations in Normandy, 1944. The Cartographic Journal, 43(2) : 117~143.
- Rose E P F, Clatworthy J C, Robins N S. 2010. Water supply for northwest Europe developed by British military geologists during World War II: Innovative mapping for mobile warfare. The Cartographic Journal, 47: 55~91.
- Roskin J, Aharoni E. 2012. Geography geology in the service of the military. Maarchot, 441: 46~53.
- Roskin J. 2016. Analysis of recurring sinking events of armored tracked vehicles in the Israeli agricultural periphery of the Gaza Strip. In: Military Geosciences and Desert Warfare. Advances in Military Geosciences, Springer Science+Business Media New York: 339~352.
- Ruffell A, McKinley J. 2008. Geoforensics. England: John Wiley and Sons, Ltd. : 1~330.
- Sabol D E, Minor T B, McDonald E V, Bacon S N. 2016. Parent material mapping of geologic surfaces using ASTER in support of integrated terrain forecasting for military operations. In: Military Geosciences and Desert Warfare. Advances in Military Geosciences. Springer Science+Business Media New York: 311~338.

- Schaetzl R J, Anderson S. 2005. Soils: Genesis and geomorphology. New York: Cambridge University Press; 1~832.
- Schramm J M. 2006. Protection of cultural property. In: International handbook of military geography. Vienna: Truppendienst, 1: 453~464.
- Shaw R B, Doe W W III, Palka E J, Macia T E. 2000. Where does the U. S. Army train to fight?: Sustaining army lands for readiness in the 21st Century. *Military Review*, 80: 68~77.
- Shoop S A, Kestler K, Haehnel R. 2006a. Finite element modeling of tires on snow 2. *Tire Science and Technology*, 34: 2~37.
- Shoop S A, Richmond P W, Lacombe J. 2006b. Overview of cold regions mobility modeling at CRREL. *Journal of Terramechanics*, 43: 1~26.
- Steenkamp-Fonseca R, Smit H, Bezuidenhout J. 2018. *Scientia Militaria. South African Journal of Military Studies*, 46(1): 1~196.
- Sun Xingli, Liu Xiaohuang, Lu Jiyuan, Mao Jingwen, Xu Xueyi, Guan Hongjun, Li Baofei, Liu Jiufeng, Bao Kuanle, Lu Shipeng. 2017&. The characteristics of modern war and the investigation in military geology. *Geological Review*, 63(1): 99~112.
- Teichmann F. 2022. Current operational challenges and innovative approaches for military geo-services from an Austrian perspective. In: *Military geoscience: A multifaceted approach to the study of warfare*, *Advances in Military Geosciences*. Switzerland: Springer Nature; 335~350.
- Terman M J. 1998. Military geology unit of the U. S. geological survey during World War II. In: *Military Geology in War and Peace*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X III: 49~54.
- Wadman H M, McNinch J E, Foxgrover A. 2014. Environmental metrics for assessing optimal littoral penetration points and beach staging locations: Amphibious training grounds, Onslow Beach, North Carolina, USA. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 187~203.
- Warren S D, Herl B K. 2005. Use of military training doctrine to predict patterns of maneuver disturbance on the landscape. *Journal of Terramechanics*, 42: 373~381.
- Warren S D. 2014. Role of biological soil crusts in desert hydrology and geomorphology: implications for military training operations. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 177~186.
- Willig D, Häusler H. 2012a. Aspects of military hydrogeology and groundwater development by Germany and its allies in World War I. In: *Military Aspects of Hydrogeology*. Geological Society of London Special Publication, 362: 85~103.
- Willig D, Häusler H. 2012b. Aspects of German military geology and groundwater development in World War II. In: *Military Aspects of Hydrogeology*. Geological Society of London Special Publication, 362: 187~202.
- Winters H A. 2001. *Battling the elements: Weather and terrain in the conduct of war*. Baltimore: Johns Hopkins University Press; 336.
- Wohl E. 2014. Dryland channel networks: Resiliency, thresholds, and management metrics. In: *Military Geosciences in the Twenty-First Century*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology, X XII: 147~158.
- Yamamoto H, Matthew C M, Gerald E S, Clausen J. 2004. Fate and transport of high explosives in a sandy soil: Adsorption and desorption. *Soil and Sediment Contamination*, 13: 361~379.
- Young C W. 1992. Penetration equations update—June 1992: Sandia National Laboratories, Albuquerque, 6.
- Yu Dehao, Long Fan, Yang Qinglei, Wang Kang, Wang Li, Yang Tong. 2017&. Development and prospects of modern military remote sensing geology. *Geological Survey of China*, 4(3): 74~82.
- Ze evi M. 2015. The influence of geology on the course and outcome of the Third Battle of Ypres (Flanders, WWI). *The Mining—Geology—Petroleum Engineering Bulletin*: 1~17.
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, Jiang Shaoyong, Li Wenchang, Wang Rucheng, Wang Denghong, Qi Tao, Qin Kezhang, Wen Hanjie. 2019&. Critical metal mineral resources: Current research status and scientific issues. *China Science Foundation*, 33(2): 106~111.
- Zhang Dong, Lü Xinbiao, Ge Liangsheng, Lu Yanming, Huang Hui. 2019&. Research connotation and key technology of the military geological environment in the land battlefield. *Geological Review*, 65(1): 181~198.
- Zhang Dong, Lu Yingchuan, Lü Xinbiao, Sun Jungang, Ge Liangsheng, Qi Ran. 2021&. Military geology characteristics and its key problems in combined operaiton. *Military Surveying and Mapping Navigation*, (1): 25~28.
- Zhang Dong, Ge Liangsheng, Lü Xinbiao, Wang Bin, Yan Jiapan, Yang Yukun, Ren Kun. 2024&. Forensic military geophysics: Battlefield reconnaissance and trace identificaiton. *Progress in Geophysics (in press)*.
- Zhang Guangyou, Meng Qingkui, Wang Zhichao, Bi Jisheng. 2022&. The development and enlightenment of U. S. military geology. *Geological Review*, 68(5): 1912~1917.

Military Geosciences : Past Lessons and Modern Challenges

ZHANG Dong^{1,2)}, GE Liangsheng^{3,4,5)}, LÜ Xinbiao⁴⁾, QI Ran^{3,6)},

YAN Jiapan^{1,2)}, ZHAO Youzhi^{1,2,5)} 1) *Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang, Hebei, 065000;*

2) *Technology Innovation Center for Earth Near Surface Detection, China Geological Survey, Langfang, Hebei, 065000;*

3) *Command Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Beijing, 100055;*

4) *Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation, MOE, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;*

5) *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083;*

6) *Institution of Geological Research, China University of Geosciences, Wuhan, 430074*

Abstract: Knowledge and understanding of the application of geological process to warfare and peacetime

practices have been fundamental to military operation, operational environment, battlefield intelligence and MOOTW. Military geology is the term used to describe this area of geological knowledge. Over time the application of military geology has changed as these military requirements such as weaponry, battlespace and geopolitical influences have altered the scale and dynamics of military operations, the concept of military geoscience is formally proposed. Military geoscience focuses on military activities of multi-material, multi-layer and multi-system environmental properties within the earth, on the basis of multifaceted disciplines of earth science. This paper summarizes the past history lessons of military geology and induced five research fields of military geoscience abroad, including of the impact of geo-environment on historical warfares, the impact of earth science on military activities, geopolitical security interests and resource needs, as well as geoscience technologies in military activities, it is suggested that the research progresses and key scientific problems on military geoscience need to be more focused on great military demands and applications such as theory and methodology, typical scenarios and global issues. Therefore, there are several research challenges to be addressed as five follows: (1) the intelligent application of battlefield geospatial intelligence; (2) RS recognition technology for hidden targets in unknown area; (3) military geoforensics of battlefield reconnaissance and trace identification; (4) military new energy security; (5) military geoscience in modern warfare. Above overview of achievements will be an important research evidence for domestic military geoscience on disciplinary development and military application.

Keywords: military geology; military geoscience; geo-environment; military application

Acknowledgements: This study was supported by China Geological Survey (Nos. DD20230136, 20230598)

First author: ZHANG Dong, male, born in 1979, Ph. D., senior engineer, is mainly engaged in geological resource and geological engineering; Email: 1606298990@qq.com

Corresponding author: GE Liangsheng, male, born in 1966, Ph. D. research fellow, is mainly engaged in project management and military geology research; Email: geliangsheng@aliyun.com

Manuscript received on: 2024-01-25; Accepted on: 2024-06-26; Published online on: 2024-07-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.07.025

Edited by: ZHANG Yuxu

