

★ 军事地质信息丛书 ★

军事地质 合成孔径雷达遥感调查技术

董玉森 吴春明 安志宏 王力哲 编著



科学出版社

军事地质信息丛书

军事地质合成孔径雷达遥感 调查技术

董玉森 吴春明 安志宏 王力哲 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

地质环境是战场环境的重要组成部分,基于合成孔径雷达(SAR)数据开展军事地质信息提取对完善战场环境具有重要意义。本书从电磁波传播机理、SAR数据获取及处理、军事地质需求及组成要素、军事地质SAR遥感调查的内容和理论方法、军事地质活动性要素调查内容和理论方法等多个方面,结合相关实例阐述SAR在军事地质遥感调查中的相关理论和方法,为军事地质SAR遥感调查提供强有力的技术支持。

本书可作为基础地质、军事地质、空间信息与数字技术、遥感信息工程等专业本科生、研究生的教材和参考书,也可作为开展工程地质、军事地质、遥感信息工程研究的工程技术人员的参考书和指导书。

图书在版编目(CIP)数据

军事地质合成孔径雷达遥感调查技术/董玉森等编著. —北京:科学出版社, 2019.9

(军事地质信息丛书)

ISBN 978-7-03-060112-4

I. ①军… II. ①董… III. ①合成孔径雷达—遥感技术—应用—军事
IV. ①E919

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第288232号

责任编辑:杨光华 李建峰/责任校对:刘 畅

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencecp.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2019年9月第 一 版 印张:10

2019年9月第一次印刷 字数:237 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“军事地质信息丛书”

编 委 会

主 编 王力哲 秦绪文

副主编 吴冲龙 胡祥云 牟 林

编 委 (按姓氏拼音排序)

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 陈 刚 | 陈伟涛 | 董玉森 | 何珍文 |
| 姜 三 | 李显巨 | 刘 刚 | 王明威 |
| 吴春明 | 左博新 | | |

“军事地质信息丛书”序

进入 21 世纪,高新技术的迅猛发展和广泛应用,推动了武器装备的发展和作战方式的演变。战场环境信息的采集、存储、挖掘和分析能力,是打赢现代化战争的基本保障。近年来,随着全球军事大数据信息技术和应用的兴起,数据已经成为军事信息化的重要资源,以“数据”为核心的信息系统是赢得战争主动权的基础设施能力之一。随着世界各国的军队信息化建设的进行,信息保障工作逐渐贯穿了现代战争的全业务流程,“信息赋能”也日益成为军队信息化的重大标志之一。

自古以来,军事地质信息在战争中的重要地位已经得到国内外的高度认同。从第一次世界大战开始,地质学家就在地表水和地下水的管控与利用、军事作战计划制定等方面发挥着非常重要的作用。到第二次世界大战时,随着各种探测手段的提高,军事地质信息的作用更加受到重视。德国、美国和日本相继建立了自己的军事地质信息保障部队。海湾战争期间,军事地质信息在打赢现代化战争中的作用更加显著。美军借助可见光和红外卫星遥感感知平台,获取大量有关敌情的地质态势信息,利用信息基础设施加以传输、存储和处理。

与军事地理信息一样,军事地质信息是战场环境、战争态势存在和动态变化的重要场景。随着新型传感器和高分辨率遥感技术和地球物理探测技术的飞速发展,针对典型军事地质信息,从不同探测维度开展军事地质信息探测、管理与分析研究,对提升战场环境地质态势感知能力,推动现代战争信息化发展,具有非常重要的作用。目前,国内外尚没有一套专门研究军事地质信息的丛书。因此,为了让国内从事军事科学研究和地球科学研究的本科生和研究生及相关工作者系统了解军事地质信息探测现状与能力,受科学出版社委托,我们组织了中国地质大学(武汉)从事军事地质信息领域研究的人员,在系统梳理军事地质信息需求的基础上,开展了军事地质信息探测与分析研究,并编著了“军事地质信息丛书”。

本套丛书涵盖了从可见光高空间分辨率遥感、雷达遥感、激光雷达遥感、无人机遥感到地球物理勘察技术等不同的探测手段及数据管理技术,内容全面、条理清晰、针对性强、实例丰富,是国内第一套系统总结军事地质信息的专业丛书。本套丛书可作为开展地质信息、遥感信息工程、军事地质等研究的工程技术人员的参考书和指导书,也可作为地质信息、空间信息与数字技术、军事地质、遥感信息工程等专业本科生、研究生的教材和参考书。

军事地质信息是一门年轻的学科,其发展是无止境的。我们期待广大读者对本套丛书进行批评与指正,协力为我国军事信息现代化发展贡献一份力量。

王力哲 秦绪文

2019年7月1日于南望山麓

前 言

军事地质的思想可以追溯到战国时代。从冷兵器时代古人对军事地质要素的朴素认知和初步利用,到现代化战争条件下对军事地质要素的全方位利用,军事地质在人类战争中逐步占据了重要位置。随着战争空间的发展和深化,现代战争对区域军事地质环境提出了更高的要求,促使现代军事地质调查的内容不断扩展、不断深入。面对即将到来的决策智能化、战争快速化、战场模糊化的智能化战争,战场环境保障将对军事地质提出更高的需求。

自 20 世纪 60 年代起,合成孔径雷达(SAR)影像就在地质调查中发挥了重要作用,以其全天候的观测能力,且受到云、雨的影响较小,而受到众多遥感技术工作者和地质学家的关注。当前军事地质遥感调查主要使用光学遥感数据,对雷达遥感数据的应用较少。因此,在中国地质大学(武汉)军事地质遥感团队完成《军事地质遥感理论与方法》一书以后,为扩展军事地质遥感调查手段和数据源,提高遥感技术在军事地质调查中的应用范围,在前期工作的基础上,从现代战争对军事地质的需求出发,笔者撰写本书作为对传统光学遥感调查手段的补充。

本书紧密围绕现代战争对战场地质环境的需求,从供需关系的角度出发,介绍 SAR 在军事地质遥感调查中的应用潜力,是对当前军事地质遥感调查工作中在光学遥感数据之外的有益补充。本书在分析军事地质发展历史的基础上,总结现代战争中军事地质的作用,分析现代战争对军事地质的需求,进而总结军事地质遥感调查的要素内容;结合 SAR 影像特征,分析不同军事地质要素 SAR 调查解译的方法;同时针对目前所关注的活动性军事地质要素提出解译方法。这些内容可以为从事军事地质调查、军事地质教学和科研的工作者提供参考。

全书共 4 章。第 1 章主要讲述军事活动对军事地质的需求,进而说明军事地质要素组成,并分析军事地质遥感调查的历史和现状,以及 SAR 在军事地质调查中的应用情况;第 2 章介绍 SAR 的理论基础;第 3 章介绍军事地质要素 SAR 调查的理论和方法;第 4 章结合实例对具有活动性特征的军事地质要素,如活动断层、滑坡,以及核试验的 SAR 监测方法进行介绍。

本书由董玉森主笔和统稿。各章执笔人:第 1 章,王力哲、董玉森、安志宏;第 2 章,董玉森、吴春明;第 3 章,王力哲、董玉森、陈伟涛;第 4 章,董玉森、鲁大江。阿布都拉-阿布都卡地尔、崔静月、岳文丽、张帮政等协助完成本书的排版和校对工作。

由于军事地质工作刚刚起步,加之作者水平和知识范围有限,书中难免会出现疏漏之处,恳请专家和读者指正。

董玉森

2019 年 5 月

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第1章 绪论 | 1 |
| 1.1 军事地质及其要素组成 | 3 |
| 1.1.1 军事地质的概念及发展历程 | 3 |
| 1.1.2 军事活动对军事地质的需求 | 6 |
| 1.1.3 军事地质调查的需求 | 9 |
| 1.1.4 军事地质要素的组成及调查分类 | 13 |
| 1.1.5 小结 | 23 |
| 1.2 军事地质遥感调查 | 23 |
| 1.2.1 军事地质遥感调查历史与现状 | 23 |
| 1.2.2 军事地质遥感调查的优势及不足 | 25 |
| 1.3 军事地质 SAR 遥感调查 | 27 |
| 1.3.1 基础地质 SAR 遥感调查 | 27 |
| 1.3.2 军事地质 SAR 遥感调查历史 | 28 |
| 1.3.3 军事地质要素 SAR 遥感调查潜力 | 28 |
| 第2章 合成孔径雷达理论基础 | 31 |
| 2.1 电磁波传播理论 | 33 |
| 2.1.1 电磁波的传播与极化 | 33 |
| 2.1.2 电磁波与自然表面的相互作用 | 36 |
| 2.1.3 电磁波的穿透性 | 38 |
| 2.2 合成孔径雷达基础 | 39 |
| 2.2.1 SAR 探测与成像机理 | 39 |
| 2.2.2 合成孔径雷达干涉测量机理 | 44 |
| 2.2.3 极化 SAR 技术机理 | 51 |
| 2.2.4 SAR 数据波段及雷达卫星概况 | 57 |
| 2.3 星载低频长波下视雷达 | 61 |
| 2.3.1 星载低频长波下视雷达特征 | 61 |
| 2.3.2 星载低频长波下视雷达反射机理与成像处理 | 62 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 第3章 军事地质 SAR 遥感调查 ····· | 67 |
| 3.1 SAR 数据预处理····· | 69 |
| 3.1.1 常用 SAR 数据····· | 69 |
| 3.1.2 常规 SAR 数据处理流程····· | 71 |
| 3.2 军事地质要素 SAR 调查解译方法····· | 74 |
| 3.2.1 地质要素的散射特征····· | 75 |
| 3.2.2 军事地质要素 SAR 解译的基本原则····· | 75 |
| 3.2.3 军事地质要素 SAR 解译的方法····· | 76 |
| 3.3 岩体要素 SAR 调查····· | 77 |
| 3.3.1 岩体要素 SAR 识别机理····· | 77 |
| 3.3.2 沉积岩类 SAR 调查····· | 80 |
| 3.3.3 侵入岩类 SAR 调查····· | 84 |
| 3.3.4 喷出岩类 SAR 调查····· | 87 |
| 3.3.5 变质岩类 SAR 调查····· | 91 |
| 3.4 土体要素 SAR 调查····· | 96 |
| 3.4.1 土体要素识别机理····· | 96 |
| 3.4.2 巨粒类土 SAR 调查····· | 98 |
| 3.4.3 粗粒类土 SAR 调查····· | 99 |
| 3.4.4 细粒类土 SAR 调查····· | 101 |
| 3.4.5 特殊土体 SAR 调查····· | 102 |
| 3.5 构造要素 SAR 调查····· | 105 |
| 3.5.1 断裂构造 SAR 调查····· | 106 |
| 3.5.2 褶皱要素 SAR 调查····· | 113 |
| 3.6 地质灾害 SAR 调查····· | 118 |
| 3.6.1 滑坡 SAR 调查····· | 119 |
| 3.6.2 泥石流 SAR 调查····· | 121 |
| 第4章 军事地质要素活动特征提取 ····· | 123 |
| 4.1 活动断层特征 SAR 调查····· | 125 |
| 4.1.1 活动断层特征····· | 125 |
| 4.1.2 利用 DInSAR 进行活动断层调查····· | 126 |
| 4.1.3 利用 SBAS 技术进行活动断层调查····· | 130 |
| 4.2 滑坡体活动特征调查····· | 132 |
| 4.2.1 滑坡体的运动特征····· | 132 |

| | |
|--------------------------------|-----|
| 4.2.2 利用 DInSAR 进行滑坡体调查····· | 132 |
| 4.2.3 利用 PSInSAR 进行滑坡体调查····· | 133 |
| 4.3 地下核试验特征调查····· | 135 |
| 4.3.1 地下核试验引起的地面形变特征····· | 135 |
| 4.3.2 利用 DInSAR 进行核试验特征调查····· | 136 |
| 参考文献····· | 139 |
| 后记····· | 147 |

第 1 章

绪 论

军事活动一直伴随着人类文明的历史进程。一方面它破坏社会经济的发展,甚至引起人类文明的停滞或倒退,另一方面它又促进了人类文明的发展与进步。在军事活动中,军事战场环境的建设至关重要。近期我军已经明确将地质环境列入包括地理环境、气象环境、电磁环境和核化环境在内的五大战场环境,表明军事地质已经正式成为军事要素中的重要一部分。因此,对军事地质的概念、需求和组成进行分析是战场地质环境建设的前提。在我国,现代军事地质学作为一个新生的学科,它既继承了早期军事工程学、军事水文学、军事地形学等诸多学科的精华,也面临着如何发展的问题。相对于外军,我军的军事地质工作起步晚、发展滞后,构建适应我军新时代强军特色的军事地质调查方法体系与战场地质环境保障体系已经成为当务之急。因此,有必要对军事地质的发展历程、与军事地质相关的概念和军事地质调查要素进行简要的分析总结。

1.1 军事地质及其要素组成

1.1.1 军事地质的概念及发展历程

1. 军事地质的相关概念

军事地质起源于前人在战争中对自然的朴素认知和利用。现代军事地质学是涉及地质学(毕思文, 2003; 刘本培 等, 2000)、遥感地质学(薛重生 等, 2011)、军事地质学(刘晓煌 等, 2017a, 2017b, 2017c)、军事地理学(袁树文, 2007; 姜春良, 1995)及现代军事地质遥感(王康 等, 2017; 于德浩 等, 2017; 李远华 等, 2012)等学科的一部分。这里分别对其概念进行概述。

1) 地质学

地质学(geology), 是研究地球及其演变的一门自然科学, 研究对象为地球的固体硬壳——地壳或岩石圈中的结构构造、地球的形成演变历史、地质过程和各种地质现象, 以获得地球的物质组成、内部构造、外部特征、各圈层之间的相互作用和演变历史。

2) 遥感地质学

遥感地质学(remote sensing geosciences), 是从航空地质学(aerogeology)和摄影地质学(photogeology)发展起来的基于摄影图像和空间遥感图像进行区域地质和专题地质研究的交叉学科, 其基本概念是运用空间遥感图像地学信息进行区域地质解译、地质调查填图和各种地质专题研究。它的研究对象与地质学的研究对象一样, 都是地球上地质体的结构构造、地球的形成演变历史、地质过程和各种地质现象。与传统地质学不同的是遥感地质学主要是依据地质体的电磁波谱特征, 运用遥感科学及空间信息技术, 从遥感图像及其他空间数据中获取地球表面及地表一定深度下的地质信息, 以达到宏观地、准确地、快速地研究地质体和地质现象的目的。

3) 军事地质学

军事地质学(military geosciences), 是地质科学与军事科学之间的交叉学科。其研究对象主要是地球表层和地壳浅部系统各地质要素属性及其之间的相互作用及对国防工程、军事活动、战场环境和后勤保障系统的影响。军事地质学是以地球系统科学和军事科学理论为基础, 以军事和国防需求为导向, 以军事活动保障、战场环境建设、军事工程构筑和战略资源需求等过程中的地质科学与工程问题为研究核心(蔡钟业 等, 1986; 王杭生 等, 1985), 探讨认识军事地质要素的类型、属性、分布、变化对军事活动、战场环境和国防工程建设等的影响和制约机理, 试验探索天空地多种探测技术和信息科学技术在军事地质要素数据采集、空间分析和综合评估等方面的应用, 查明战略矿产资源形成分布规律, 为国防建设和军事决策提供科学依据与技术支持。

结合当前信息化战争和未来智能化战争的特点, 现代军事地质学(modern military geosciences)以地球系统科学和军事科学理论为基础, 以军事活动和国防需求为导向, 采

用地质学、态势感知、大数据、人工智能、模拟仿真及可视化等工作方法(安跃文, 2005), 为建设信息化、智能化战场环境提供技术和数据的一门高度交叉的学科。研究三维空间下地球表层及表层之下地质要素属性及其之间的相互作用及对国防工程、军事活动、战场环境和后勤保障系统的影响。

4) 军事地理学

军事地理学(military geography), 是以自然地理、人文地理为基础, 全面、综合地对区域地理形势、自然条件、经济因素、社会状况、交通运输、城镇要地等所构成的军事地理要素及其变化规律进行研究, 并分析其与战争的关系和对国防建设、军事活动的影响, 为制定战略方针、规划武装力量建设、战场准备、指导作战行动等提供依据的一门学科。

5) 现代军事地质遥感

现代军事地质遥感(modern military remote sensing geology), 是现代军事地质学与遥感地质学的交叉性学科, 它利用可见光遥感、红外遥感、雷达遥感, 以及其他非接触式的地球物理探测手段, 通过人机交互方式, 借助于高性能计算技术、模拟仿真及可视化技术、大数据管理与分析技术、人工智能技术等, 开展与军事地质相关的地表及地下一定深度地质信息提取、分析和成果展示研究, 为战场环境建设提供科学、直观的军事地质数据。

2. 军事地质的发展历程

在军事活动中, 充分利用各种资源, 强化己方力量优势以实现战争目标是众多军事家所关注的内容。在冷兵器战争时代、热兵器战争时代、机械化战争时代、当前的信息化战争时代及未来的智能化战争时代, 根据科技水平的进步与发展, 作战方式也随之变化, 军事地质的发展也依托不同作战方式的进步而不断进步(张栋等, 2019)。

1) 冷兵器战争时代

在冷兵器战争时代, 主要依靠人的体能效应, 借助于具有杀伤作用的兵器通过相应的作战方法进行战争, 冷兵器有戈、矛、剑、刀和弓、箭、弩等。我国古代很早就将朦胧的地质学知识特别是地形地貌、工程地质等应用于军事。我国古代兵法巨著《孙子兵法》对军事活动影响要素进行了分析, 认为军事活动成功的要素在于“道、天、地、将、法”, 而“地者, 高下、远近、险易、广狭、生死也”, 反映了军事活动对地形地貌、地质条件的需求, 并因地制宜用于战场选址、作战方案确定及筑城构工等各个方面, 体现了冷兵器时代军事活动对地质条件的需求和应用。

2) 热兵器战争时代

18~19 世纪的热兵器战争时代, 是利用火炸药发生燃烧、爆炸或发射弹丸进行杀伤和破坏的兵器及相应作战方法进行战争, 其主要依靠火炸药燃烧、爆炸产生的化学能或转化为物理能展开低姿态隔离射杀(邢怀学等, 2015; 林聪裕, 2014)。1798 年, 拿破仑在远征埃及的军队中增加了地质学家, 对敌占区矿产资源进行勘察, 并协助军事勘测人员进行路线勘测和地形测绘(Rose, 2005)。1815 年, 法国对欧洲各地间断发起战争, 当

法国战时对欧洲的统治导致英国无法进口适合研磨火药的石灰岩时,军事拨款投资开展了地质勘测,目的是在英国范围内找出可替代石灰岩的资源(Rose, 1996)。因此,热兵器战争时期及战时构工军事地质应用是在冷兵器战争的基础上,增加了战时资源勘察采矿作业。

3) 机械化战争时代

机械化战争,主要使用机械化武器装备及相应作战方法进行战争。机械化战争具有机动速度快、火力毁伤强、战场范围广、战争消耗大等特点。进入 20 世纪,先后爆发的两次世界大战是机械化战争的代表。机械化战争出现了大量新式武器装备,并且蒸汽动力代替了传统人力,使军队机动能力得到提升,战场空间也从静态逐步发展为动态,战场环境也由平面逐渐延伸到立体。第一次世界大战期间,大约 300 名军事地质学家在盟军服役,其工作重点是供水水源勘察、战壕与暗挖隧道及地下掩体开挖和建筑材料供应等;第二次世界大战期间,军事地质问题更关注机动性相对较强的攻防作战,除继续研究供水水源、建筑材料供应和矿产资源评价等问题外,还新增临时机场快速建设选址和越野机动路线预测等内容。日本在第二次世界大战期间由于本土资源匮乏,为支撑其战争机器运转,曾利用地质学家对侵占国进行过石油、煤、铁等大宗矿产资源的勘探。此后在核战争阴影的笼罩下,军事地质开始延伸到地下立体环境,为大量地下工事的构筑、抗打击评价等提供支持。在机械化战争时代,军事地质得到了很大的发展,如自第一次世界大战以来出现了岩土工程图等专业军事地质图类的军事创新,向军事指挥官阐明地质对战争行动的潜在战略价值,将可靠的地质数据转换成非地质专业人士快速掌握的信息,利用相对全面的数据库形成军事地质专题信息等。

4) 信息化战争时代

信息化战争是指依托网络化信息系统,使用信息化武器装备及相应作战方法,在陆(地表、地下)、海、空、天和网络电磁等空间进行的以体系对抗为主要形式的战争(伍仁和, 2005; 张召忠, 2004)。信息化战争强调联合作战和体系对抗能力,战场环境向“三深”(深地、深海、深空)拓展,“三快”(机动快、转换快、打击快)转变,现代战争具有“五高”(高科技、高消耗、高危害、高精度、高感知)的特点(刘晓煌等, 2017a, 2017b, 2017c)。在信息化战争阶段,军事地质除不断应用于军事战略、战役和战术规划外,军事地质学也涵盖了地形学、地质学、地球物理学、工程地质学和岩土力学、土壤学和水文学、多光谱遥感、地理信息系统和计算机建模模拟等多元学科,利用数字地球技术对数据或分析结果进行演示(刘世刚, 2008),用于直接支持军事作战行动并扩展到支撑非战争军事行动和军事用地管理等内容。

5) 智能化战争时代

未来的智能化战争时代,将是一个利用人工智能和数据进行战争的时代。如果机械化战争体现在对人的体力的极大扩展,信息化战争体现在对人的信息能力的极大扩展,而智能化战争则体现在对人的指挥控制能力的极大扩展。综合利用人工智能技术,深入、实时分析包括军事地质信息在内的战场环境信息,是智能化战争的核心。

1.1.2 军事活动对军事地质的需求

从冷兵器战争时代到信息化战争时代,再到未来的智能化战争时代,制胜打赢是战争亘古不变的主题。从古人对军事地质环境朴素的认识、利用到当前对军事地质环境的综合认知、利用,军事需求推动着军事地质的发展壮大,表现为从简单的地形地貌、水源等的调查利用到当前地形地貌、岩土体特征、水体特征、地质灾害等的综合调查利用,在需求维度上从地表二维地质特征扩展到包括地下在内的地壳浅表层空间的三维地质特征、甚至达到包括时间维度在内的四维地质特征。本小节将首先从美国近现代军事地质调查内容出发,分析军事地质需求的发展历史,然后介绍军事地质的需求。

1. 热兵器战争时代

美军在第一次世界大战时期,军事地质主要用于地面作战中的各类需求,为采矿作业、战壕及其他堡垒建设维护、公路铁路建设、供水水源勘探等提供岩土工程地质信息和咨询。因此这一阶段,其军事需求主要体现在地表战场环境的调查及工程建设上。

2. 机械化战争时代

在第二次世界大战时期,USGS (United States Geological Survey, 美国地质调查局) 成立 MGU (Military Geology Unit, 军事地质小组), 利用地质资料, 帮助解决战争中遇到的各种地质问题(唐金荣等, 2016) 并为盟军编写战略性军事行动研究报告, 为包括诺曼底登陆在内的军事活动提供重要的支持。在诺曼底登陆前夕, 盟军派遣地质学家对登陆区进行考察, 并派潜艇和人员对海岸带特征进行调查。结合航片资料, 分析目标区的岩土体工程特征及海岸带特征, 为盟军登陆行动提供了重要资料。而在太平洋地区, MGU 则通过航片分析岛屿的工程地质特征、地形地貌特征, 为军事行动提供战略战术规划的地质情报和资讯。在整个第二次世界大战期间, MGU 共完成大型地形图册 140 部、大型报告 42 份、地图总计 5 000 余幅, 包含了军事地理评价、河流、潜在的公路和机场、码头选址、军事设施建设维护的建筑用材料分布、供水水源等大量的地质相关信息。在这一阶段, 军事需求体现在岩土体特征、道路可通行性、军事工程地质、军事水文地质等方面。

3. 后机械化战争时代

第二次世界大战以后, 美国 MGU 作为 USGS 的一个分部, 后转变为 MGB (Military Geology Bureau, 军事地质局), 1972 年部分部门合并到 DOD (United States Department of Defense, 美国国防部)(唐金荣等, 2016), 1993 年更名为 SGS (Special Geologic Studies Group, 特殊地质研究小组)。受核战威胁, 美军的军事地质工作除全球地形编绘外, 逐步转向地下工事建设和抗打击评价方面, 后期开始转向基础性研究, 例如对武器装备的越野机动性、军事污染土地及地下水的治理、地雷探测等方面。这一阶段军事需求主要体现在岩土体特征调查、军事工程地质调查与评价, 以及越野机动能力评估、浅地表下金属探测等方面。

4. 信息化战争时代

自“911”恐怖事件开始,美国通过反恐战争和海湾战争对信息化战争进行了检验,并在2014年出版的 *Military Geosciences in the Twenty-First Century* (Harmon et al., 2014),总结了信息化战争时代军事地质的应用特点,分析了军事地质环境对武器装备、人员和战术行动的影响,提出利用军事地质环境概念分析作战场地的地质条件,并对军事用地的土壤、水资源、生态环境等的战前、战后环境治理问题进行研究。在这一阶段,美军开始重视战场地质环境建设,强调军事地质环境对军事作战的影响。

5. 美国军事地质调查的现状与发展趋势

美军历来非常重视军事地质工作,组建了专门的军事地质调查机构。DOD 将 USGS 视为重要的合作伙伴,实现了跨部门的紧密合作,USGS 向 DOD 提供各种专业知识和调查服务(如2014年,USGS 向 DOD 提供了大量的阿富汗地区地质调查成果),以满足美军在境外的军事活动需求。

由于近几年美国在全球推行霸权主义/反恐作战,受到国际国内的强大阻力,同时为应对未来可能发生的中美冲突,美军将其战略中心转移到印太地区。为了强化当前信息战争优势,并占领下一代战争的制高点等需求,美军制定了一系列的发展规划和实施方案,并在前期投入大量的人力、物力、财力去推动军事地质的调查和应用。当前和未来一段时间内美军在军事地质领域的工作主要体现在以下三个方面。

1) 在操作层面上, 继续加强军事地质调查工作

军事地质调查工作一直是美军的工作重点。由美军和 USGS 共同推动全球范围内传统的军事地质调查工作。这一工作类似于传统地质调查,通过遥感解译和地面调查相结合的手段,以科学研究或民用项目的方式,在全球热点和潜在热点地区继续进行军事地质调查。从20世纪60年代1:100万热点区地质图到当前1:10万的地质调查成果,部分热点地区还获得了1:1万甚至更高精度的调查成果,可以为美军军事行动提供便利。近年来,具有矿产资源调查能力的跨国公司与 DOD 之间的合作越来越密切。USGS 作为链接二者的枢纽,不但承担了地质调查从民到军的成果转换的任务,也成为 DOD 在全球军事地质调查任务的公开指挥者。

根据美国特朗普上台后发布的《国家安全战略报告》和《国防战略报告》两份十分重要的战略文件,美方直接把中国作为主要的战略对手,文件中指出美国面临的主要威胁从反恐战争拉回到大国之间的传统战争,并将印太地区、欧洲、中东视为美国可能发生战争的重要场所。而在2019财年预算中,美国更是反复强调美国自身的矿产资源保障安全。由此可以预见,美国军事地质调查工作将呈现以下三个方面的特点。

(1) 军民共进。

以跨国企业、科学研究为掩护的军事地质调查工作将持续进行。未来一段时间内,打着矿产资源勘察开发以及科学考察名义从事军事地质调查工作的跨国公司和工作人员将会频繁出现在包括中国在内的重点区域。

(2) 资源优先。

在军事地质调查中,更加注重矿产资源的调查。围绕已经发现的矿产资源将开展更加深入的调查工作,以评估资源空间分布特征和开发潜力。为此,USGS 将在美军的支持下,对包括南北极在内的全球矿产资源进行重新评估,在重点海上和陆路战略通道周边进行调查,采用多种手段以保障其资源需求。

(3) 重心转移。

未来美军的作战核心将从反恐作战向传统作战转移。美军需要大量的军事地质资料以评估其对可能发生的军事活动的影响。因此,军事地质调查工作将从中亚、中东向印太、东欧转移,从现在的全球区域向重点区域收缩,重心将更加明确。

2) 在技术层面上,注重军事地质调查中的学科交叉、装备交叉

由于现代战场由传统的单一陆域向海、陆、空、地、天多维空间扩展,这也促使军事地质工作从陆域地面调查扩展到地下地球物理探测和海上综合调查,从航摄飞机、测绘无人机扩展到航天卫星遥感,形成多功能融合、空天地一体的探测体系。

针对这一变化,为了继续保持领先地位,美军近年来在传统军事地质调查的基础上对军事地质调查手段和调查内容进行了扩展。USGS 协调了由地质学(含工程地质、水文地质等)、测绘学、地球物理学、土壤学、植被学、统计学和计算机科学等大量的专家组成科研团队,并开展军事地质调查工作,实现天、空、地、海的综合调查,调查内容将更详细、更深入。

与此同时,USGS 与 DOD 积极互动,探讨军事装备在军事地质调查中的应用潜力。2010 年前后 USGS 和美国海军航空部队合作,利用 NP-3D“猎户座”反潜飞机在阿富汗进行飞行测试,以探测地下空间地物特征。根据公开资料,“NP-3D 先进的传感器能够形成地下岩石、水、石油和天然气的三维图像”,这不但对矿产资源的开发具有重要意义,也对阿富汗地区的反恐作战有着指导性意义。

USGS 和 DOD 更加注重新技术的应用。根据 2012 年美国发布的《大数据倡议》,DOD 及 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, 国防高级研究计划局) 发布大数据项目清单,正式把大数据研发提升为国家战略,重点发展前沿核心技术,以满足搜集、存储、防护、管理、分析和共享海量数据的要求。近期谷歌与 DOD 在人工智能领域的合作项目事件也反映出美军在高科技领域的持续投入。

USGS 在 2019 财年预算的支持下,可能会加强与军方合作,引入军方的装备和技术,更加注重包括人工智能在内的多学科交叉,从天、空、地、海等多个方面开展更加详细的军事地质调查与评估工作。

3) 开辟新的作战领域——加强地下作战空间的调查

2016 年 9 月,美国海军陆战队发布《21 世纪远征部队如何进行作战》,针对 2025 年以后的战争,要求海军陆战队提高在城市地形条件下的作战能力,必须进行适应性训练,应对全方位、全范围的区域划分的战斗,包括下水道和隧道。从 2017 年底开始,美国投