

壮丽70年·奋斗新时代

编者按

地球科学研究是野外工作、实验室分析、数据处理等内容的交叉融合,也是甘当人梯的前辈和不断超越的后辈教学相长的过程,需要科学家付出艰苦卓绝的努力。无论是羊圈沟里的风餐露宿还是深夜实验室的灯火通明,科研人员在风雨中逆行、在“磨刀石里榨油”。在这条“接地气”的科学道路上,他们是永不停歇的探索者与“朝圣”者。

我们欣喜地看到,黄河水沙管理从此有据可查,对致密油气有效勘探与开发,也将从根本上改变我国能源严重依赖进口的处境。丰硕成果的背后,是无数科研工作者对地球科学事业呕心沥血、躬身求索,一批批新人崭露头角,让这项伟业得以传承。

本期自然科学基金版将总结国家自然科学基金重大项目研究进展,展示其取得的成绩。

黄土高原“朝圣”记

——揭开黄土高原生态系统与水文相互作用的奥秘

■本报记者 甘晓

“几回回梦里回延安,双手搂定宝塔山。”信天游奔放热烈的韵律,是每一个陕北人的“心头好”。新中国成立70周年之际,见证中国历史转折点的宝塔山,令人神往。

此时,距离宝塔山几十公里外的羊圈沟生态恢复与水土保持实验基地,中国科学院院士、中科院生态环境研究中心研究员傅伯杰团队的科学工作者正在开展野外实验。

到羊圈沟去,也被研究组同学们称为“朝圣”。多年来,在国家自然科学基金重大项目“黄土高原生态系统与水文相互作用机理研究”的支持下,他们为揭示黄土丘陵沟壑中隐藏的奥秘,展开一场科学“朝圣”之旅。

从羊圈沟到黄土高原

出生在咸阳的傅伯杰是土生土长的陕西人,自然对黄土高原有割舍不下的情分。作为地理学家的他,对这里环境和生态系统的细节变化谙熟于心。

“这分别是1982年、1999年和2013年,黄土高原植被覆盖的情况。”9月中旬,傅伯杰在办公室接受《中国科学报》采访时,向记者展示了几张土地利用和土地覆被图。自退耕还林还草政策实施以来,黄土高原农地大幅度减少,林草面积显著增加,区域景观和生态系统发生巨大变化。这些变化有什么生态和环境效应,特别是生态系统和水文及水分有什么相互作用?带着这些问题他们开始了重大科学基金项目的研究。

研究人员发现,随着植被面积增加,诸多新问题暴露出来。例如,树的生长比草需要消

耗更多水分,更容易导致土壤干旱,进而造成树木生长缓慢,形成“小老头树”。事实上,在一些地区,确实因为种植树木让土壤干层现象加剧。“在哪些地方种树、哪些地方种草,种什么树、种多少,这代表了生态系统的结构和景观格局。”长期关注黄土高原生态系统的傅伯杰分析,这其中,水是关键因素。

位于典型丘陵沟壑区的羊圈沟,是研究景观格局与生态过程的绝佳地点。早在1996年,傅伯杰通过实地考察选址,选取这里作为研究基地。通过长达十多年的坚守,他们在小流域尺度上开展了系统的研究。

那么,在更大的范围内呢?在黄土高原这样一个生态脆弱区、气候变化敏感区,也是黄河重要的产水区 and 绝大部分泥沙的来源区,合理开展生态建设是跨尺度利弊权衡的中心问题,需要强有力的科技支撑。

基于这样的考虑,在首轮退耕还林(草)工程结束后,傅伯杰带领团队向国家自然科学基金委员会提出项目申请。2014年,重大项目“黄土高原生态系统与水文相互作用机理研究”启动,至2018年底顺利结题。

傅伯杰指出,该重大项目的目标不仅要科学上探求环境变化和人类活动对黄土高原生态系统分别有多大的影响,更要为指导和规范人类生态恢复活动提供科学依据。

5年来,在该重大项目支持下,研究人员的“朝圣”之路走出了羊圈沟。他们在黄土高原上建立了251个定位监测样地,开展了6次覆盖502个样方的大规模调查,将他们对生态系统的研究扩展到整个黄土高原的尺度上。

“逆行者”取“真经”

在羊圈沟的生活有点“困”。常驻的研究人员一年中有半年时间在那里待着,住在从老乡那里租来的窑洞里,五六个人挤一张炕,仪器设备放在另一间,打电话则要跑到山上空旷的地方找信号,洗澡要专门进趟城,断水断电也是家常便饭。

不过,一下雨,他们就“嗨”起来了。“一到下雨,老乡都往山下跑,学生们都兴奋地往山上跑。”这是傅伯杰对野外工作最形象的描述。为了获得降雨后树干茎流、降水再分配等数据,研究人员都成了期盼下雨的“逆行者”。

2014年,羊圈沟基地正式建设了科研生活用房,“逆行者”才有了真正的家,这也成为他们走出羊圈沟的坚实后盾。

在长期观测的基础上,“逆行者”们用坚持和智慧取得了“真经”。

他们发现,在南北、东西样带上降水量不同的地方,实际上存在一个种树还是种草的分界线,那便是年均降水量在530毫米左右的界线。用专业语言描述的结论便是,年均降水小于这一数值的地区,林地的土壤水分处于接近或者低于土壤萎蔫点的水平。

“这表明,比年均降水530毫米更干旱的地方,不适合大范围种树,更适合种草,既能保持水土,又能建立良好的生态系统。”傅伯杰解释。

另一项基于大量监测数据开展的工作也具有指导实践的意义。研究人员以“固碳量”这一概念为视角,通过耦合地面观测、遥感和



傅伯杰(左一)带领团队在进行野外调查

生态系统模型等多种手段,量化分析了黄土高原地区植被恢复的固碳、径流、蒸散发等生态效应,构建了自然—社会—经济水资源可持续利用耦合框架。

傅伯杰介绍,这项研究得到的结论是,目前黄土高原植被恢复已接近该地区水资源植被承载力的阈值。同时,在未来气候变化条件下,该承载力阈值在383~528克碳/平方米·年间浮动。研究结果2016年发表在《自然—气候变化》上。

“这两项研究都得到了一个量化的结论,帮助我们去权衡退耕还林还草和土壤含水量以及地表径流量之间的关系。”他强调,黄土高原植被恢复应综合考虑区域的产水、耗水和用水的需求,以及生态系统的可持续性。

泥沙去哪儿了?

“九曲黄河万里沙,浪淘风簸自天涯。”研究黄河多年,傅伯杰欣赏这首意境豪迈的诗。当然,有关黄河的奥秘更令他着迷。例如,明明自古以来黄河就是世界上输沙量最大的河流,那90%以上的“万里沙”来源于中游的黄土高原,但是上世纪70年代以来,来自黄河潼关水文站的数据却显示,每年输沙量从16亿吨锐减为3亿吨左右。

“万里沙”的黄河,似乎正在走向“黄河清”的方向。那么,这些泥沙都去哪儿了?

“究竟是气候变化还是人类活动?这两种因素哪种占主导?如果是人类活动,那么,我们能做些什么?”该重大项目执行过程中,傅

伯杰意识到,是时候揭开谜底了。

研究人员发展了泥沙归因诊断分析方法,率定各因素的贡献及其作用。利用黄土高原过去60年的降水、径流和泥沙观测数据,研究发现58%的输沙量减少是由产流能力降低引起的,其次是产沙能力和降水的贡献,分别占30%和12%。

在更具体的时间上,坝库、梯田等工程措施是1970年代至1990年代黄土高原产沙减少的主要原因,占54%。2000年以来,随着退耕还林还草工程的实施,植被措施成为土壤保持和产沙减少的主要贡献者,占57%。

最终,这项研究指向一个结论,最近几十年黄河泥沙减少的主要原因是人类活动影响。研究成果于2016年在《自然—地球科学》上发表。

傅伯杰指出,这说明,黄河水沙管理需要从黄土高原小流域综合治理转向全流域整体协调。

5年来,取得科研突破的同时,研究人员还向中央有关部门提交了黄河水沙可持续管理、改善黄土高原淤地坝和梯田管理以及完善退耕还林(草)长效机制等政策建议报告,得到国家决策部门关注。他们的研究结论已经在地方政府的相关政策中得到应用。

刚刚开学的9月,按照惯例,课题组几名老师带领新入学的研究生前往羊圈沟“朝圣”。依据植被和水分相互作用的研究结果,研究人员在延安市退耕还林还草办公室的支持下,开展了刺槐林疏伐样地观测研究,进一步指导黄土高原退耕还林和植被恢复——他们不仅将论文写进国际著名期刊,更将论文写在黄土高原变绿的大地上。

“磨刀石里榨油”的五年

——非常规油气勘探开发理论基础获突破

■本报见习记者 程唯伽

如果把常规油田勘探开采比作“从海绵里挤水”,非常规油气开采则是“磨刀石里榨油”。

按西安交通大学电子与信息学部教授、海洋石油勘探国家工程实验室副主任高静怀的说法,非常规油气聚集在像“磨刀石”一样致密的砂岩里,想要寻找油气聚集的“甜点”或挖掘地下深处的“宝藏”,需要日复一日地苦练“火眼金睛”的本领,拥有“金刚钻”,方能撬“瓷器活”。

“火眼金睛”和“金刚钻”指的就是他作为主持人所承担的国家自然科学基金重大项目“非常规油气勘探与开发地球物理基础理论与方法研究”中的创新理论与核心技术。自2014年起,高静怀带领项目团队提出并创建我国致密油气勘探与开采的地球物理理论和方法,取得了丰硕成果。

进军非常规油气勘探领域

谈及自己油气地球物理勘探的职业生涯,高静怀至今仍怀念他的恩师——被誉为“中国海洋地质之父”的中国科学院院士刘光鼎。

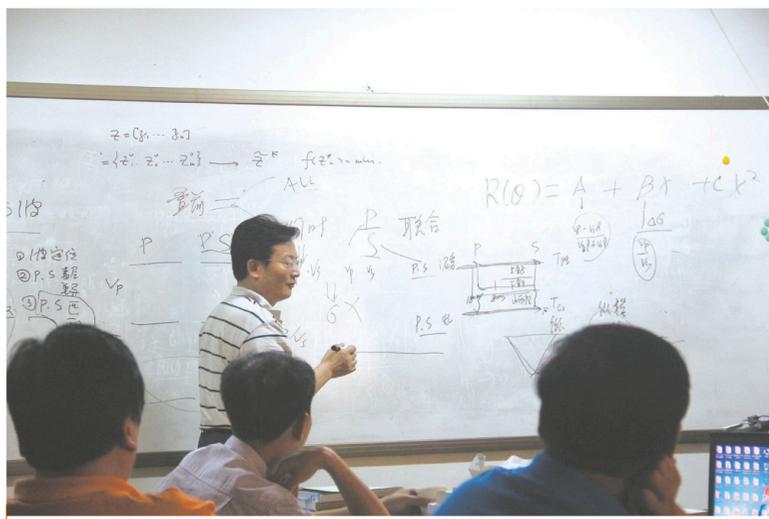
1997年,高静怀进入中国科学院地球物理研究所博士后站,师从刘光鼎并参加了由其主持的国家自然科学基金重大项目“陆相油储地球物理理论及三维地质图像成像方法”。

研究过程中,高静怀提出了一种用于薄互层储层分析的“最佳匹配地震子波”的相空间变换,为后来从事的非常规油气勘探理论奠定了基础。

“刘光鼎院士一直教诲我们,一定要为国家做事情。”回忆起那段激情燃烧的岁月,这位年过半百的学者语气高昂坚定,带着老一辈科学家的为国奉献的浩然之气。

很快,这样的报国壮志就有了用武之地。大洋彼岸,美国率先取得被称为“页岩气革命”的突破,成为世界头号天然气生产国,其页岩气产量也突飞猛进。这意味着,从此美国油气将自给自足不再依赖于中东。

一场无声的竞争正在紧张地展开。不能再等了!彼时,我国常规石油天然气



高静怀为课题成员讲解项目中的科学问题

产量增速已趋于平缓并呈现缓慢下降趋势,需要尽快找到它的替代能源——非常规油气资源。经过多番思索之后,高静怀将目光投向了探索非常规油气的地球物理理论与核心技术上。

他告诉《中国科学报》,我国非常规油气包括页岩油气、致密油气、煤层气等,资源非常丰富。其中,可采致密油气占我国非常规油气比例约一半以上,致密砂岩油气、致密碳酸盐岩油气总和大约接近于煤层气和页岩气的油当量之和。若能实现对致密油气有效勘探与开发,必将从根本上改变我国能源严重依赖进口的现状。

然而,想要实现非常规油气有效勘探开发,需解决两个关键问题,即准确预测非常规油气富集有利区(甜点)和表征压裂过程非常

规油气运移状态。

高静怀表示,要解决非常规油气这两个关键问题,必须打破常规思维框架,创建非常规地球物理新的理论与方法。为此,他邀请本领域内相关专家多次进行研讨,提炼科学问题,设计研究方案,并向国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)提出立项建议。

2013年,自然科学基金委批准了该建议,并发布重大项目“非常规油气勘探与开发地球物理基础理论与方法研究”申请指南。高静怀组建的团队申请并获批。

按项目计划书,高静怀领衔西安交通大学团队,联合西北大学教授杨华和蒲仁海、清华大学教授杨国辉、厦门大学教授柳清伙和中国科学院地质与地球物理研究所研究员常旭等众多学科领军人物,协同各自团队开展

多学科交叉研究联合攻关。

聚焦非常规富集“甜点”

如何探测非常规油气分布?如果用形象的比喻就是给地球做CT,以查明砂泥岩薄互层空间分布、油气层结构及流体分布。

不过,这场“体检”远比常规油气探测复杂,非常规致密油气藏具有油气源储共生、非均质性极强、无明显边界等特点,其储层渗透率一般小于0.1毫达西,孔径是头发丝的1/100。常规地球物理方法面对如此复杂的对象几乎失效。

拼了!项目专家组建议聚焦非常规油气中的致密油气,并以鄂尔多斯盆地致密油气为目标,兼顾松辽和其它盆地,以期取得具有普适性的相应理论和技术突破,继而撬开这一非常规能源宝藏。

该项目聚焦的核心科学问题是“如何利用地球物理方法表征非常规油气富集区及其特征,表征储层压裂改造过程中油气的运移和分布规律”。历时五年,取得了丰硕的成果。

一是建立了致密油气典型地质—地球物理模型及优质储层评价标准。

二是提出了致密油气勘探开发波动理论。

三是提出了致密油气勘探开发地球物理信号处理新理论。

四是研发了用于致密油气勘探开发的核心技术。

高静怀透露,该项目所提出的方法与技术在长庆油田分公司、中石油大庆钻探工程公司、中海油国内探区及海外十余个探区得到推广应用,取得了巨大经济效益。

打造地球物理“最强阵容”

非常规油气的勘探与开发是一个庞大的系统工程,它涉及地质学、地球物理学、油藏工程、信息科学、材料科学、数学等众多学科,也涉及井筒工程、储层压裂改造等技术领域。在高静怀看来,正是众多的学科交叉才打造出这一“最强阵容”。

依托这一最强阵容,很多原本就极具威望的“武林高手”迈向了更高层的国际舞台。

例如,因在该重大项目中首次提出了用于低频电磁勘探的混合谱元法和混合有限元方法,2016年,厦门大学教授柳清伙荣获国际应用计算电磁学学会杰出成就奖。2018年,他又因提出求解致密油气波动方程的快速、高精度时域伪谱算法荣获国际应用计算电磁学学会计算电磁学奖。

而高静怀自己,也荣获2016年教育部科技进步一等奖,并担任了IEEE会刊《地球科学与遥感》副主编。

与此同时,一批批科研新星也冉冉升起。包括入选2017年度“博士后创新人才支持计划”的高照奇、荣获2017年度“陕西省优秀博士学位论文奖”的贾骏雄和入选2019年度“博士后创新人才支持计划”的刘乃豪等。

三人行,必有我师焉。在西安交通大学副教授贾骏雄看来,组内成员不仅是齐心的伙伴,更是强劲的“师资力量”。“研究过程中我们反复钻研,往往就一个科学问题召开多次研讨会。”他说。

研究过程不可避免地也存在失败。西安交通大学博士生张兵告诉《中国科学报》,他主要研究“散射与吸收效应分离”这一国际难题。“我们在构建压缩映射算子及其数学理论等方面遇到了困难,最终通过与西安交通大学讲座教授韩渭敏等交流,历时两年才攻克了该难题。”

他回忆说,无数个深夜凌晨,高静怀老师办公室的灯都亮着,有任何疑问他总会不厌其烦地给学生一遍遍解释分析。

在高静怀看来,正是中国科学家代代言传身教,才使得这种坚韧不拔的精神得以传承。

在他的案头,醒目地放着一本《陆相油储地球物理学导论》,那是凝结了刘光鼎等老一辈地球物理学家多年心血的著作。高静怀表示,多年来他从未忘记恩师的教诲,即让这个国家变得强大且富有尊严。他告诉记者,他们团队目前瞄准“深地探测”这一重大科学目标,立志为中国深部油气资源探测和利用做出新的贡献。