

黄土地上的行者

——记西北大学地质学系教授王家鼎及其团队

■ 吴应清



王家鼎

无论有没有去过黄土高原，人们只要一提到它，“面朝黄土背朝天”的形象便会跃然脑海。这是世界上最大、最厚、最连续的黄土覆盖区，横跨了青、甘、宁、陕、晋、豫、内蒙古7省区，集中了地球上70%的黄土。

在这片土地上，也曾出现过发达的农业文化，但明清之后，苦难的记忆开始在一代代人不断上演。由于过度开垦，水土流失越发严重的黄土高原沟壑纵横，交通成为当地人民面临的最大难题，也成为当地人民最为迫切的需求。时至今日，在黄土高原上修路也并非易事，但我国的科研人员却做到了。他们不仅打通了黄土高原通往外界的道路，还在黄土地上实现了“中国速度”。

2010年，郑西高铁开通运行；2014

年，大西高铁开通运行；2017年，宝兰高铁开通运行……一条条高铁轨道，一列列风驰电掣般的高铁列车成为黄土地上亮眼的风景。这背后凝结了无数人的心血，其中就包括西北大学地质学系教授王家鼎以及他的团队。

20年来，以王家鼎为首的西北大学地质工程团队面向国家战略，服务重大需求，瞄准“一带一路”沿线及黄土高原重大地质灾害防控，重点解决了一系列铁路建设中新型黄土滑坡、沉降防治技术瓶颈背后的关键科学问题，强化了我国黄土灾害研究的国际领先地位。其中，王家鼎主持的“重大工程黄土灾害机理、感知识别及防控关键技术”项目，是他埋首黄土地20年，在多条铁路建设攻坚的实践中孕育出的丰硕成果。截至目前，王家鼎已主持国家重大、重点项目5项，获国家科技奖和省部级一等奖6项，发表论文200余篇，其中SCI论文50余篇，获国家发明专利10项。

全新的探索

2200万年以前，青藏高原已经隆起至相当的高度，可以阻挡来自印度洋的水汽，亚洲内陆从此陷入干旱，形成了大面积的沙漠。紧接着，强劲的冬季风在沙漠中卷起沙尘暴，沿着青藏高原的边缘向东推进，但是在六盘山、吕梁山、太行山、秦岭的阻挡下，沙尘颗粒在山脉之侧不断

沉降。就这样，黄土高原逐渐形成。

黄土高原的形成过程，决定了它不可能像其他高原那样“坚固”。黄土高原上的黄土结构非常疏松，具有湿陷性、振陷性、崩解性，加之黄土高原特殊的地貌、气候等因素，黄土地区滑坡、崩塌、泥石流等重大灾害分布广、类型多、突发性强、群发周期显著，危害极重，严重限制了黄土高原区生态环境保护和高质量发展，威胁着区域人居安全和社会稳定，也威胁着铁路、公路、机场、矿山、输油、输气、输水等长输生命线工程以及水利设施等工程的安全运营，甚至严重影响国民经济的发展。如何将各类工程及人民生命财产置于安全屏障里，抵御上下左右的灾害侵袭是地质工程领域亟待解决的重大科学难题。

2004年，《中长期铁路网规划》发布后，中国开始进入高速铁路的大规模建设时期。2005年9月25日，郑西高速铁路客运专线开工建设。与普通铁路不同的是，高速铁路采用无砟轨道，对沉降要求极其严格，必须控制在1.5cm内，两轨间距的精准定位更是在毫米级别。然而由于黄土结构的疏松性，其很容易产生沉降，所以铁道部门为了保证黄土路基铁路的安全性，设立了关于如何解决高速铁路的机车振动引起路基沉降问题的重大科研项目，并公开招标。

当时，全国有4所大学竞标，由4位院

士、17位全国著名专家，成立了一个评审小组，公开答辩，当场决定项目所属权。最终，王家鼎率领团队以高分成功中标。他介绍说：“一方面，我们这个团队之前一直从事地震相关的研究，对工程抗震的相关工作比较熟悉；另一方面，黄土就在我们的‘家门口’，我们有着得天独厚的研究优势，所以我们成功拿下了这一任务。”

在没有任何前人经验和相关数据可以参考的前提下，王家鼎率领团队经过3年的艰苦攻关，通过大量的野外实验、野外调查、室内试验及实验计算等，终于拿出了第一份湿陷性黄土地基的动力特性与设计参数。

当时，郑西铁路客运专线有限责任公司的相关负责人致电王家鼎，诚恳地说道，因为时间紧张，设计必须走在前面，能不能把已有的数据拿出来先交给设计部门进行设计。对此，王家鼎团队夜以继日，仅用一个星期就将相关数据整理了出来。

王家鼎至今还记得他拿出第一张数据表的心情，既激动又忐忑。他坦言，虽然所有的数据都是经过严格、客观的计算得出，但是心里依旧十分紧张。“对我们而言，郑西高铁最大的困难就是，这是一次全新的探索。没有前人的经验，只能靠我们自己去走出一条路来。当时，我们的心情很复杂，一是这么长时间的努力终于有了一份答案，但是这个‘答案’能否经得起实践的考验，我们也很紧张。”

郑西高铁从2010年开通运营至今，没有出现任何纰漏，时间证明了王家鼎团队的成果是科学有效的，是经得起考验的。他们交出了一份不负众望、令人满意的答卷。

黄土地上的奇迹

在大面积湿陷性黄土地区修建高速铁

路，是一个世界性难题，也是全球奇迹。郑西高铁开创了黄土地区修建高铁的先河，获得了很多成功经验。有了在郑西高铁中的实践经验，在第二条铁路——大西高铁的相关研究工作上，王家鼎就从容了很多。

大西高铁是我国黄土地区继郑西高铁之后修建的第二条高速铁路，也是国家《中长期铁路网规划》的重要组成部分。与郑西高铁不同的是，大西高铁的路线主要位于山西、陕西境内，沿途经过的大多是山区，面临的问题更加复杂和艰巨。其中，黄土湿陷、振陷、边坡失稳等复杂问题都需要设立科研项目进行专门研究。

在这段高速铁路的设计中，王家鼎团队与原铁道部第三勘察设计院合作研究设计，独立承担了降雨、地震及列车振动引起的黄土边坡失稳（滑坡）研究、黄土路基振（震）陷研究、黄土湿陷研究以及路基加固黄土填料改良研究等多个科研项目。团队在郑西高铁研究成果和经验的基础上，经过数年现场工程地质调查、大型现场浸水试验等多项试验以及分析计算等艰苦细致的科研工作，提出了新的观点和方法，取得了创新性成果。相关成果获得国家发明专利并直接应用于大西高速铁路的设计中，产生了巨大的经济效益和社会效益。

王家鼎善于从实践中发现问题，进而上升到理论上加以研究解决，提出一系列观点和方法，再返回到实践中进行检验和指导。在之后的不断攻关中，王家鼎团队在重大工程黄土灾害方面取得的相关理论和技术越来越完善、成熟。

在黄土振陷方面，王家鼎团队基于动力试验和微观测试，发现了引起黄土振陷的宏观敏感因子，揭示了在动力作用下黄土变形特征及结构性对振陷的影响；突破

了黄土动力学的理论瓶颈，创建了“长持时，小振幅”振动下基于塑形包络的弹塑性累积模型和塑性应变累积行为的“安定型”判别标准，创新了振陷理论。

在黄土湿陷方面，王家鼎团队首次发现了地层结构对宏观尺度上的湿陷性影响，通过原位大型浸水试验试坑外围地层的竖向和侧向变形监测，揭示了其随坑心距和深度变化规律，提出了湿陷岩桥（古土壤层）滞后塌陷理论，解开了桩基深部隐藏沉降信息的死结，创建了桥桩基古土壤湿陷段摩阻力“由正转负”的计算方法。

承载高铁的桥梁受深部湿陷层对桩摩阻影响极大，由于黄土、古土壤交错分层，湿陷信息易被掩盖。为此，他们还发明了浸水条件下土体内部应力、水分运移和变形的物联网监测系统，破解了深部湿陷信息获取的难题，成功应用于郑西高铁、大西高铁及西安地铁等。

在迈入高铁工程领域之前，王家鼎已经从事地震型黄土滑坡、灌溉和暴雨引起黄土滑坡机理研究多年，他首次提出了“灌溉诱发黄土滑坡的黄土蠕、滑动液化机理”“地震诱发黄土滑坡的土体解体、斜抛和粉尘化机理”，推导出滑坡滑动轨迹、滑速和滑距等公式，这是国内最早提出黄土滑坡机理的新观点，被国内外学者广泛引用和评述。

之后，在铁路工程的实践当中，王家鼎又创新性地提出了振（震）动和水联合作用对黄土边坡的促松、促裂、促渗和促滑机理，用黄土结构损伤描述了动力切断土颗粒间黏结键的过程，以断裂力学揭示了振动促使裂隙产生、扩展的内在机制，证实了振动对黄土的渗透有加速作用，再现了振（震）动与水的促滑过程，创新了振（震）动和水联合作用对黄土边坡的四

促机理，刷新了黄土滑坡成因理论。

而这一创新成果的提出要重点从王家鼎团队参与的另一项重大铁路工程说起。

攻克难中之难

2014年12月，连接我国东西部的重要煤炭运输通道——瓦日铁路（工程名称为山西中南部铁路通道），正式建成通车。这是我国第一条按照30吨轴重重载铁路标准建设的铁路，也是我国一次性建成的最长的重载铁路。它的建成对优化路网结构、降低运输成本、推动区域发展和交流具有重要意义。

“在大面积湿陷性复杂黄土场地上建造高铁或重载铁路往往被灾害包围：上有隧道变形塌方，下有湿陷振陷沉降，左有滑坡变形侧挤，右有河冲滑塌牵引。”如何将这么重的铁路铺设在地形复杂、沉降严重的黄土地上，并保证列车的安全，是一个重大的科学难题。

针对“30吨轴重”重载铁路建造中的一系列黄土振陷、湿陷、滑坡及隧道塌方等灾害的重大科学难题和技术瓶颈，王家鼎率领团队与中国铁路设计集团、中铁十七局等单位合作，对此发起了攻关。

瓦日铁路多经过山路，隧道比例比较大。然而，在隧道开挖过程中，振动促使裂隙扩展，水加速渗出，软化土体，容易造成隧道变形或塌方。为此，王家鼎团队首次在开挖过程中利用了特制的探头感知前方围岩含水率和裂隙水压力的变化，以模糊信息优化处理法识别和预报围岩涌水塌方，解决了这种特殊地层隧道的灾害感知技术难题。同时，他们还研制出第一台振动促渗仪，攻克了黄土振动促渗的定量测试难题。

“隧道涌水的水量比较大，原有的方法很难将它堵住”，为解决这个问题，王家鼎团队研制出隧道污染涌水的特殊防腐封堵浆液与“高压气驱水、浆驱气”的快速封堵技术。他介绍说：“这个方法主要是通过压入高压空气将水压回去，然后用一种遇水膨胀的轻质材料将水堵住，最后再注入封堵浆液，这样就有效解决了涌水问题。”

边坡侧移和路基沉降是软土路基施工中常见的难题，在这方面，王家鼎团队也提出了独到的见解。他们研制了具有高精度、高采样率、安装简便及成本低廉等优点的多通道同步高速采集装置，配合多种动态传感器，解决了机车宽幅振动的多参

数感知难题，提升了铁路路基（含隧道基底）黄土振陷和边坡变形的监测水平。

在大量室内外试验基础上，王家鼎团队获得不同水泥配比改良黄土的振陷特性和振陷量，提出了压实度 $\geq 95\%$ 、水泥配比 $\geq 6\%$ 的改良黄土抗振陷设计标准，破解了铁路路基因机车振动而产生沉降的科学难题；发明了水泥改良加筋黄土路基的构筑方法，抗振陷效果提升30%。这些成果直接应用于大西高铁、巴基斯坦轻轨、晋中南和蒙华重载铁路等，并纳入行业规范。

值得一提的是，近些年，王家鼎团队还发明了黄土湿剪试验仪，探索出一条黄土 c 、 ϕ 值的湿剪试验新途径，结束了半个世纪以来黄土滑坡稳定性计算中不直接用 c 、 ϕ 试验值的历史。该湿剪试验更符合滑坡先裂后水再滑的特点，且获得的抗剪强度参数与反算法接近，在上百个黄土滑坡稳定性计算中检验，结果可靠，可大面积推广应用。

如今，王家鼎率领团队在这片土地上取得的一系列重大原创新成果，已在国内外10多条铁路中加以应用，取得了巨大的效益和影响。其中，他们参与的山西中南部重载铁路通道工程还获得号称工程界的诺贝尔奖——菲迪克奖。王家鼎说道：

“所有的成果都是集体的功劳，感谢各部门的支持和配合，也感谢团队成员的艰苦付出，正是因为大家共同的努力才取得了今天的成绩。”

“骤起狂风黄土腾，厚积浩瀚与云平。油流霸道横冲撞，沟壑呻吟不忍听。失沃高坡精髓在，仍弥王气尽如虹。大河一去八千里，华北平原始落成。”在多年科研历程中，王家鼎喜欢将自己的所见所闻所想写进诗中。行走在黄土高原30年，他率领团队见证了这片土地上的各色风景，也为这片土地带去了不一样的风景。📷



团队合影