

优先保泉
建地铁从“郊区”到市区

在城市发展中,轨道交通能满足快速、大运量城市交通出行的需求,为解决交通拥堵的优先选项。早在1988年,济南就萌生了地铁梦,但直到2015年7月济南第一条轨道交通线才打下第一桩基孔正式开工。2019年4月1日,济南终于圆了地铁梦,成为第一个通地铁的副省级城市。横贯济南东西城区,有“地下经十路”之称的4号线,也终于在6年后开通,这37年间到底经历了什么?

这要从济南特殊的地质条件说起。

“世界上建地铁最难的城市有两个:一个是西安,地下都是文物;一个是济南,地下都是泉脉。”约突泉旁的导游道出了济南建地铁要面对的特殊难题。在泉城建地铁,除了要满足国家设定的建设条件外,还要以保泉为先。

保泉,是济南地铁建设的“红线”和“底线”。

老舍笔下,济南的泉水“冒,冒,冒,永不疲乏,永不退潮,只是自然有这样的力量”。在文献记载中,济南的泉水已至少喷涌了3500年,能追溯到南朝。据山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心的测定,济南的泉水早在46000年至23500年前就已出露。济南有1209处泉水、950处名泉,众多泉水集中出露于城区,属世界仅有。

济南建地铁的巨大难度也在这里。“济南地质条件复杂,看不见的泉脉在地下绵延,建设地铁会不会影响泉脉,需要首先解决。”济南轨道交通集团科研管理部门部长门燕青说,这个问题的解决,有赖于对泉水特别是泉水成因的认识。

在20世纪90年代,对泉水成因、泉域范围,学界尚存争议,泉城能不能建地铁还亟待科学研究支撑。

20世纪90年代开始,济南就多次设立城市轨道交通筹建机构,但又先后因国家政策限制,泉水出现全年停喷等情况而撤销。在泉水成因和如何科学保泉的问题没有得到科学解答之前,济南主动为地铁建设按下“暂停键”。

直到经过多年的勘察、论证,济南逐步摸索出一条科学保泉之路。山东省地矿工程勘察院(山东省地矿局八〇一队)一位泉水保护专家介绍,2000年以来,济南实施“引黄保泉”“生态补源”,并推进“封井、引水、增雨、补源、节水”的各项保泉措施。

2003年9月6日,趵突泉停喷18个月后来复涌,此后持续喷涌至今。“泉水复涌后,我们建议济南坚持调蓄补源、采外补内、开源节流的方法保泉。”上述专家说。科学保泉和城市发展找到了平衡点,济南地铁建设才重新启动。

2009年起,济南系统推进轨道交通线网规划、泉水保护专题研究、客流预测分析、建设规划和工程可行性研究等工作。同年7月,济南市委托省地矿局八〇一队等多家专业单位共同进行勘探、物探、水文试验等,历时8个月完成的《济南市轨道交通建设对泉水影响研究报告》,划定了地铁建设的敏感区与适宜区,明确

“在避开敏感区域前提下,地铁建设不会对泉脉造成不利影响”。首次正面回答了济南能否建设地铁。

济南轨道交通集团总经理李虎说,济南轨道交通集团本着“慎之又慎,安全第一,确保泉水保护万无一失”的建设理念,济南建设地铁“先外后内,先易后难”,一期建设的3条地铁线路均离泉水敏感区较远。

经十路建地铁的呼声更高。济南南依泰山,北靠黄河,城市狭长生长,贯穿东西的交通主动脉经十路日均承载车流量超10万辆次。高峰时段通勤压力尤为突出,双向十二车道的道路资源在潮汐车流冲击下频频突破承载极限。济南迫切需要一条能够连接东西城区,缓解经十路交通压力的地铁线路。2013年底济南轨道交通集团成立后,在推进一期线路建设时,就同步开始了二期规划报批工作,其中横贯市区的4号线成为重中之重。

“相比一期线路,二期线路的报批难度更大。”重点参与济南城市轨道交通第二期建设规划报批工作的山东轨道交通工程咨询有限公司高级工程师王鑫说,二期线路也绕开了泉水敏感区,但与一期相比,线路离泉水敏感区更近。其中,穿越经十路的4号线,还在泉水出露点的上游位置,评审专家们高度关注拟规划线路是否会影响泉脉和周边泉水径流。

“2017年,济南修订了《济南市名泉保护条例》,明确将‘优先保泉’作为重要原则贯穿于城市轨道交通规划、建设、管理全过程,要求城市轨道交通规划和建设必须符合名泉保护条例。”参与二期建设规划线路《泉水环境影响评价》撰写工作的山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队)高级工程师吴沙沙介绍,二期拟规划线路多个站点位于泉水补给区和出露区,根据条例规定,需在立项前完成详细的水文地质论证,施工中加强对地下水与径流通道保护,避免破坏泉脉和造成水质污染,并采取有力措施促进雨水回补地下水。

历时四年编制,2019年公布的《济南市名泉保护总体规划》进一步细化了保泉要求和管理规范。《“济南市名泉保护总体规划”为济南轨道交通二期建设规划提供了重要依据。”门燕青说,地铁建设要达到总体规划中对保护泉水的要求,促使济南轨道交通集团深化泉水理论和保泉技术研究,努力实现“通地铁”与“保泉涌”的双赢。

“看”清泉脉
模型让地下构造“活”起来

建地铁的前提是保泉。“保泉的第一步是识泉,识泉的关键是‘看’清济南地质构造,摸清泉水的潜流通道和喷涌成因,具体到地铁建设,还要弄明白地铁建设与地下水的位置关系。”门燕青说,济南地铁建设走向城市核心区域的过程,伴随着对泉水认识的逐步深入。

为了“看”清地下,济南轨道交通集团打造了国内首个数字孪生城市四维地质可视化信息平台,融合物联网、云计算、人工智能与增强现实等前沿技术,构建BIM+GIS的泉域四维地质环境可视化信息系统,首次刻画出现南城区近2000平方公里的可更新、高精度地质环境耦合模型。“这个

模型是四维的,它除了模拟地质外,还能模拟出地下水的流动,能模拟建地铁线路沿线的地质条件和泉水运移规律,在线路规划阶段指导保泉。”济南轨道交通集团总经理助理兼总数据师李罡说。

“这个平台在二期地铁建设规划报批以及后来的轨道交通规划、建设与运营的全过程,都起到关键作用。”王鑫说,以前看不见的地下构造,在模型中“活”了起来,在二期线路报批时,评审专家可任意调用剖面,直观“看”到地质和水位信息,科学评估线路布局的合理性。

为构建好这个大规模的三维地质体,让模拟更接近现实,项目团队搜集了济南60多年来的多源地质数据,涵盖住建、地调、地勘等多部门档案,归集轨道交通建设中的9500个初期钻孔和二期1.5万个勘探孔,累计使用超3万个钻孔数据,30万条水位水质记录,10万组试验数据和200余份成果图件与报告。其中,老一辈地质专家为支持济南轨道交通事业提供了近千个二十世纪六七十年代的深钻数据。

“最早的钻孔是1941年的。”济南泉脉保护技术研究中心技术人员王宗月打开了平台,数据库中一张张穿越历史而来的钻孔卡片,清晰记录着钻孔的地理位置,用柱状图画出了不同岩层深度的岩性。”随着城市发展,这些钻孔的点位大多数已被高楼覆盖,很难复钻。地质条件几十年间是相对稳定的,所以这些珍贵的地质资料为认识济南地质构造和平台搭建提供了重要支撑。”

王宗月说,可视化平台还可以直观展示轨道沿线不良地质体,优化勘察布孔,提高勘察效率,还能模拟盾构掘进中可能遇到的复杂地层,为设备选型与参数设定提供依据,保障施工安全与经济性。”在4号线全线穿越岩层的施工中,勘察单位给出了几十兆帕的强度,但借助平台进一步开展水文地质研究,我们发现部分区段岩体强度达到了一百多兆帕,远超初期预期。”这一关键数据为盾构设备选型和关键参数配置提供了依据。”

搭建起数字孪生城市四维地质可视化信息平台后,济南在地铁建设前进行精准勘测,不断研究和利用地下水精细化探查技术,“勘”清泉脉。

针对济南复杂的水文地质条件,如溶洞、孤石、硬岩与软硬交错地层,济南轨道交通集团联合山东大学、中南大学、山东省地矿工程勘察院等单位,引入广域电磁法、探地雷达、井地电阻率及钻孔三维声呐成像等综合物探技术,完成了济南中心城区70平方公里范围、地下1000米以浅的地质精准探测。

“我们运用中国工程院院士何继善主导研究的大深度高精度广域电磁勘探技术,和院士团队一同进行了地表以下1000米以浅的广域电磁探测,形成了泉城地下三维电性结构图。”李虎说,这是该项技术首次被创新应用于城市泉脉识别,通过捕捉岩溶含水通道引起的低电阻异常,结合钻孔验证,精准圈定地下水主要径流路径。

李虎说,这一技术之前多用于郊野找矿,济南通过技术创新降低了市区嘈杂环境对勘探的干扰,让这一技术真正成为洞悉泉城地下的“千里眼”,实现了主城区近2000平方公里的可更新、高精度地质环境耦合模型。“这个

与泉共生

济南地铁长成记

12月27日,济南将翻开城市交通全新一页。济南地铁4号线、6号线东段、8号线将通车,地铁即将网连泉城。在全国最长的城市道路之一经十路下方,第一批乘客将乘坐济南地铁4号线穿过泉城公园地下,向北约1.4公里,约突泉正水涌若轮,仍处在最佳观赏期。自1988年提出轨道交通构想,渴盼了37年,山东省会城市济南,终于将在城区中心迎来地铁。

“世界上建地铁最难的城市有两个:一个是西安,地下都是文物;一个是济南,地下都是泉脉。”37年的蹉跎背后,是济南这座城市在保泉与城市建设之间的反复权衡、考量、论证,也是建设者从理论研究和技术创新上的不断突破。保泉与城市建设之间,该如何平衡?现代工程建设与生态保护、如何和谐共生?泉城济南给出了自己破解世界难题的答卷。



4号线泉城公园站,为泉水让路“浮”出地面,成为全线唯一半地上站。 记者 王媛 摄

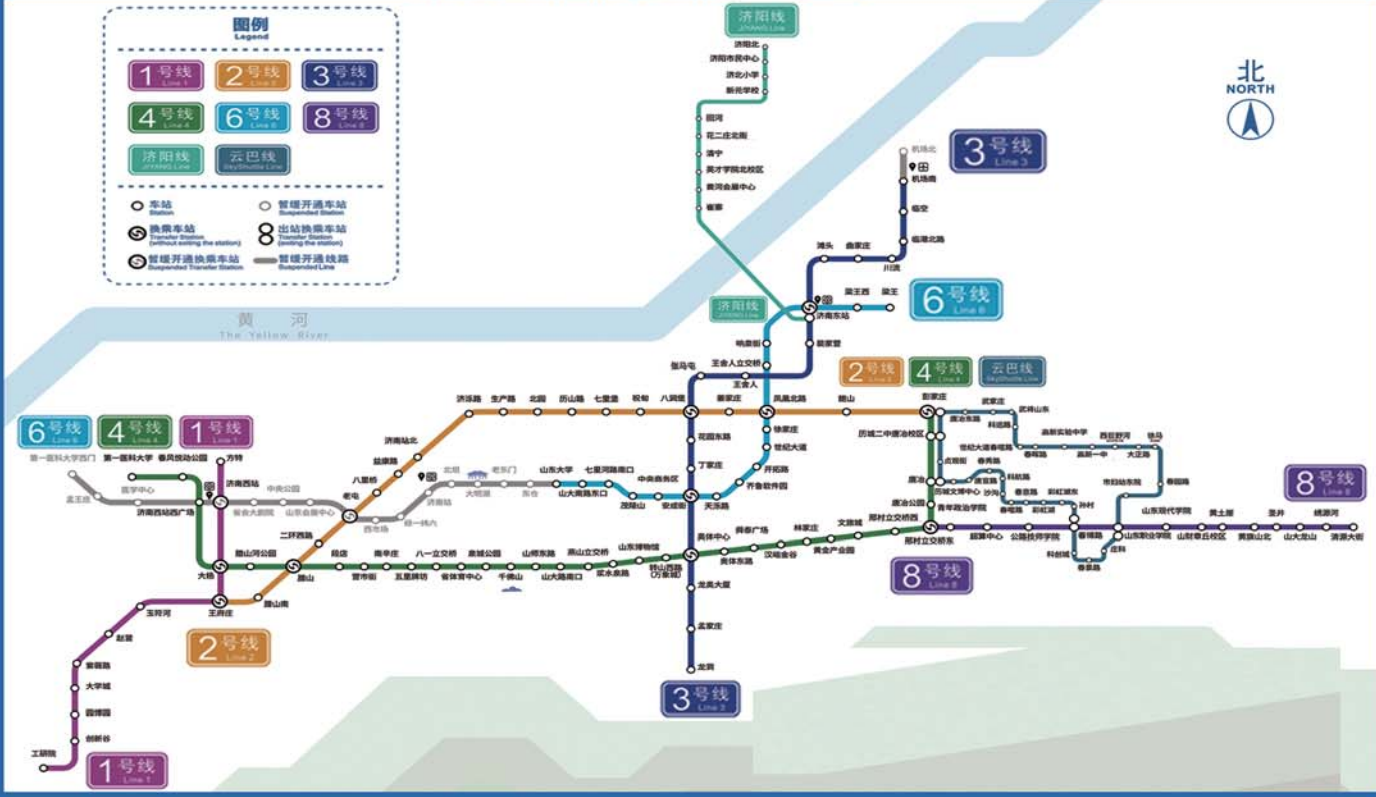


“月牙飞瀑”盛景首次连续5年出现。



4号线列车整装待发。

济南市轨道交通线网图(示意)
Jinan Rail Transit System Map



“躲开”泉脉
“绕避升抬”给泉水让路

“看”清了地下泉脉和地下径流情况,济南轨道交通集团创新提出了“绕避升抬”的线网规划原则,为地铁建设中的保泉水工作筑起了第一道坚实屏障。

门燕青介绍,“绕”指绕开泉水核心区。在还没有精准掌握核心区泉水径流通道位置与埋深的情况下,济南轨道交通线网规划始终主动绕开这一区域,从平面空间上拉开轨道交通与泉水核心区的距离,最大限度降低或规避轨道交通建设对泉水生态系统可能造成的影响。济南轨道交通一期、二期线路都绕开了泉水核心区。比如,4号线千佛山段经过反复论证,最终选择了绕开岩溶水主径流区的方案,保持与泉群的安全距离。

“避”则是避开岩溶含水层。地铁建设在泉水环境影响评价阶段,开展详细的地质与水文勘探,明确岩溶含水层和径流通道位置,济南地铁在线网规划和设计阶段,就确保线路区间和车站避开这些敏感层位,从垂直空间上拉开与地下水径流通道的距离。

“升”则是升高轨道交通线路埋深。对于可能穿越含水地层的区间,通过合理调整线路的坡度和埋深,使轨道交通线路适当升高至现状岩溶水位以上,避免与含水地层接触,最大程度降低对泉水的影响。4号线进行线网规划时,依据勘察数据,线网埋深设置在岩溶位线之上。

“抬”是抬高轨道交通车站埋深。对临近泉水核心区的车站,在设计阶段综合考量地下水位、地层结构和泉水径流等因素,通过优化车站设计方案,如采用单层、半地下、浅埋、地面或高架车站等方式,确保车站底板高于岩溶水水位,最大程度减少对地下水的影响。

趵突泉泉群正南约1.4公里处的4号线泉城公园站,就为给泉水让路“浮”出了地面。这是目前全省唯一的半地上车站——车站B、C出入口露出地面的屋面平均高7.1米,穹顶最高点高出地面9.6米,地铁车辆则在地下浅层穿过,轨面埋深12.4米。

济南轨道交通集团建设投资有限公司4号线项目部现场经理张兆辉说,泉城公园站建设的原方案需下挖22米,底板接近30年最高水位,考虑到车站处于地下径流的“上游”位置,集团对方案进行了优化,车站整体抬升了7米,埋深减少至15米,成功避开了岩溶含水层,抬升的车站也因此“浮”出了地面,经过精心设计,与泉城公园融为一体,成为泉水保护与城市建设和谐共生的生动注脚。

科技“护”泉
“勘测测流”组合拳硬核破题

进入施工阶段,济南地铁面临着更为复杂的保泉技术挑战。济南通过“勘测测流”的技术组合拳,破解难题。

施工降水回灌,让地下水“返回统一深度”。曾在多个城市进行地铁施工的中铁二十局4号线省体育中心站现场技术工程师陆亚中坦言,第一次遇到对地下水如此“吝啬”的甲方,在济南建地铁,他第一次接触到降水原位回灌技术。

多数建设工程进行基坑开挖时,会排走挖出的地下水,空出作业面。工程施工降水多通过市政管网排走,若同期出现大规模施工降水,将影响地下水储量。为最大程度减

少施工对地下水的影,济南轨道交通集团联合山东省地矿工程勘察院(山东省地矿局八〇一队)研发出了“基坑降水原位回灌一体化”装置,让地下水实现“同层往返”。

4号线千佛山站开工时,施工方在地铁基坑外围布设了22口回灌井,施工现场,抽出的地下水经流沉箱初步净化,再通过专业水处理装置过滤杂质,最终通过回灌井重新回注到基坑阻水墙外的原含水层。“基坑降水原位回灌技术,能实现‘同源、同层、同质、同量’的原位回灌。站点施工期间累计回灌水量达50万立方米,相当于200个标准游泳池的蓄水量。”张兆辉说。

这一技术早在济南进行地铁一期建设时就已研发投入,在二期建设中,进一步升级,回灌效率提高了3倍以上。

导流技术首度应用,打造地下水“隐形通道”。为缓解车站建成后可能引起的地下水位壅高问题,济南地铁二期建设中还首次研发应用了轨道交通车站导流技术。“像泉城公园站,虽然已经做了抬高设计,但还存在水位在车站迎水侧和背水侧出现高差的风险,这就可能影响车站安全。”山东省地矿工程勘察院(山东省地矿局八〇一队)高级工程师高扬说,U型导流通道技术正为解决这一难题而研发。施工中,在车站两侧打下汇水碎石桩,底部预留导流槽。竖向汇水系统能快速把被车站结构截堵的地下水导流到车站下方的导流槽,再经导流槽导流到车站另一侧原含水层中,有效恢复地下水的径流,“就像是给地下水安装了一条‘隐形过水通道’,让地下水自由流动,又保障了车站安全。”

CT+透水材料,精准应对溶洞与涌水。济南岩溶地质发育显著,4号线建设临近泉水敏感区,溶洞成为隧道施工中的重大隐患,安全穿越岩溶区,事关保泉和盾构施工安全。

在山东省地矿工程勘察院(山东省地矿局八〇一队),记者看到一张红绿蓝相间,标注着钻孔编号的长图,里面画出了4号线保泉重点路段的溶洞位置。

“为了摸清溶洞分布,我们几乎是给大地做了‘全身体检’,像医院体检拍CT一样,我们在保泉重点路段,做了跨孔CT扫描。”山东省地矿工程勘察院(山东省地矿局八〇一队)高级工程师王洪祯说,跨孔CT扫描通过向地下布设2个一组的钻孔,对钻孔之间的地下空间进行扫描。“4号线2.2公里长的保泉重点路段,我们做了740组扫描,详细查明了地下50m以浅,直径大于等于50厘米的溶洞的三维空间分布和充填情况。”

除钻孔扫描外,4号线千佛山站至泉城公园站区间,还用上了济南轨道交通集团联合山东大学研发的光纤微动探测装备。“光纤微动探测装备是我们为探明济南复杂的泉域地质而研发的,这种技术类似蝙蝠利用超声波定位,它把市区车辆噪声变为发射源,识别地下溶洞和破碎带。”山东大学齐鲁大学学院城市地下空间工程系教授、博士生导师王旌介绍,探测装备基于地震波反射法,探测精度达到米级。

发现溶洞后,能使用同样由双方联合研发的新型溶洞充填透水材料,该材料是孔隙结构,既具备极高强度,像钢筋一样坚固,又能保持良好的透水性,像海绵一样让水自由通过,完美兼顾结构安全与水流畅通。

此外,针对富水地层中常见的突发涌水,项目团队采用了绿色抗渗、防水封堵材料。材料可注性强,凝结快,能在遇到突发涌水时快速凝结,像“防水创可贴”一样堵住渗漏点。

更重要的是,它环保,不含强碱、强酸、重金属成分,不会对地下水造成污染。

技术创新不仅保障了地铁建设的顺利进行,还形成了一套可复制的技术标准。目前,基坑降水原位回灌技术已在二期工程共72个站点应用,导流技术也在泉城公园站、山师东路站等重点车站得到应用,并推广至千佛山站TOD综合开发项目。

全程保泉
“警诊养评”闭环与泉共生

地铁4号线顺利通车,但保泉水工作并未结束,保持着对泉水的敬畏,一场贯穿地铁全生命周期的“持久战”正在推进。秉持对泉水的敬畏,济南轨道交通集团以“警诊养评”技术策略,构建起覆盖规划、建设、运营全过程的保泉闭环体系。

在泉城公园站,记者看到,3口深度分别为25米、50米、80米的永久监测井如同“地下水听诊器”,通过智能传感设备实时捕捉厘米级精度的地下水动态,让远在办公室的监测人员能远程“听取”地下水位“呼吸”,保泉巡检员每周还会实地复核数据。

在基坑施工前,同步布设临时监测井,精确监测施工对地下水位的影响。有了“听诊器”,地铁建设者能够实时掌握地下水位的动态变化,及时发现异常情况并采取应对措施。目前,济南轨道交通集团已在全市建成200多个地下水长期监测点,形成了较为完善的监测体系,实现了对地铁沿线地下水水位二十四小时分层实时监测。

依托地下水位自动化实时监测系统,数字孪生四维地质可视化信息平台,结合常态化开展地下水水质检测,济南轨道交通集团全面强化对地下水环境的实时监测与智能预警,地铁通车一年后,还会开展泉环境影响后评估,对关键路段开展泉水影响定量评价。

“济南地铁4号线保泉全过程咨询工作开始于2021年。”王鑫说,这也是济南在地铁建设中首次引入保泉全过程咨询,目前4号线项目已完成现场巡查2800余次,采集水样1600余件,水量与水位监测分别达1700余点次和3300余点次,设置了64眼永久监测井。

监测数据也成为济南地铁建设保泉优先的力证。在4号线施工期间,2022年10月,趵突泉水位达到30.27米高位,今年10月15日,趵突泉水位更是创下近60年新高,达到30.32米。

此外,4号线建设的4年多时间,二期建设项目迎来同步施工高峰期,济南所有泉群全部喷涌的“信号泉”月牙泉都迎来喷涌,出现“月牙飞瀑”盛观。这也是2003年趵突泉复涌以来,“月牙飞瀑”盛景首次连续5年出现。

运营阶段同样需要与泉水共生,济南轨道交通集团联合山东大学研发出隧道表观病害智能精细探查机器人,精准识别裂缝与渗漏水;还有隧道结构内部病害智能巡检机器人,负责探测外部孔隙与溶洞,全面保障运营安全与地下水稳定。此外,依托轨道交通结构绿色智能养护装备及材料,实现了轨道交通运营期结构病害绿色、精准修复,养护工作更加生态友好。

正如济南轨道交通集团相关负责人所说:“我们不仅要让地铁顺利穿过泉城,更要让每一滴泉水都能自由流淌。”如今,穿行于泉脉之上的地铁,正以科技之力延续着这座千年泉城的生命律动,书写着城市建设与自然保护和谐共生的新篇章。