

距趵突泉最近 1.4 公里、离黑虎泉最近 1.5 公里，山东济南轨道交通 4 号线进入试运行

靠近泉水敏感区，怎样修建地铁？

本报记者 李心萍

美丽中国

核心阅读

泉水，山东济南的一张名片。南依泰山、北跨黄河，济南地势南高北低。南边的石灰岩如巨型海绵吸水，北边的火成岩似铁壁挡路，地下水在其间迸发出千姿百态、形态各异的天然涌泉。地铁，改善交通的一个方案。随着城市化进程加速，济南的发展对交通基础设施完善提出更高要求。2000 年，济南提出初步地铁规划，但彼时趵突泉出现停喷现象，地铁建设一度搁置。泉水保护与地铁修建能否兼顾？当下，成功穿越趵突泉泉群重要补给通道的济南轨道交通 4 号线进入试运行，标志着济南地铁建设迈出关键一步。

“有了三维模型，地下的泉水世界是什么模样就比较清楚”

济南轨道交通 4 号线全长 40.3 公里，是济南首条靠近泉水敏感区的地铁线路，距趵突泉最近仅 1.4 公里，离黑虎泉最近仅 1.5 公里。“4 号线能顺利贯通，首先得益于识清泉脉。”济南轨道交通集团党委委员、副总经理刘凤洲说。识清泉脉，首先得找泉脉。早在 1958 年，济南就开始了水文地质的数据积累，近年来更研发出“瞬变电磁—地质钻探—跨孔 CT”综合勘察技术。依托 60 余年水文地质监测数据，以及近年勘探收集的 300 万组数据，济南轨道交通集团、山东省地矿工程勘察院、山东省地质调查院等单位组成的科研团队为济南建立了一个地下三维模型，呈现泉水脉络分布。“有了三维模型，地下的泉水世界是什么模样就比较清楚。”济南轨道交通集团科研管理部部长门燕青说。从垂直向看，泉水分为浅、中、深 3 层径流，犹如人体的主动脉；层与层之间，有交叉通道，犹如人体的毛细血管。从平面看，泉水分为四大运行通道，同样有“毛细脉络”互相连通。门燕青介绍，依托地下三维模型，济南划定地下空间利用深度控制线，为城市总体规划提供指导。其次，则是识泉源。

“我们细化了济南泉水的形成机制及补给来源。”山东省地矿工程勘察院高级工程师张振杰说，以趵突泉泉域为例，其补给来源包括西部岩溶层流补给、千佛山断裂束带状渗漏、南部山区降水入渗等。

张振杰举了个例子，假设千佛山一带有一场降雨，那么最快几小时之后，趵突泉泉群就可能呈现出这场降雨带来的变化。

如今，济南泉水保护迈入智慧时代。济南轨道交通集团基于数字孪生技术构建的一体化物联网系统，可实时可视化、可量化监测地下水运行状态，为工程建设与泉水保护的协同发展提供科学依据。



“坚持地铁给泉水让路，线网主动绕避泉水直接补给区与集中出露区”

识清泉脉，济南地铁建设就有了指引书。兼顾泉水保护与地铁修建，设计施工团队在不同阶段确定了相应策略。“在地铁规划设计阶段，我们坚持地铁给泉水让路，线网主动绕避泉水直接补给区与集中出露区。”济南轨道交通集团规划技术中心主任刘家海说。以济南轨道交通 4 号线泉城公园站为例，该站位于趵突泉正南方。常规地铁站建设深度为 20 米至 30 米，与趵突泉补给通道存在重合。“为避免泉水补给通道，我们将泉城公园站整体抬升 6 米，最大埋深控制在 15 米以内，成为一座半地下车站。”济南轨道交通 4 号线建设方中铁十四局项目技术负责人宋增亮说，通过抬升车站与浅埋隧道方式，济南轨道交通 4 号线尽可能减少了对地下水径流的影响。施工阶段，建设团队在地铁临近保泉核心区时，在车站底部打造过水通道，防止破坏地下水动态平衡。

例如，在 4 号线千佛山站，建设团队利用溶洞新型透水充填材料、抗动水封堵材料，在车站两侧及基坑底部修筑了通道，既保障车站安全防水，又让地下水能沿着通道流动。“通过汇水结构、地下水导水结构及排水结构的有效结合，我们实现上下游地下水的连通，让地下水流场保持建设前状态。”宋增亮说。保泉水，一是保证泉水路畅通通，二要预防泉水流失。在千佛山站施工过程中，12 口回灌井呈环形布置，建设团队利用“基坑降水精准回灌技术”，将施工中抽出的地下水净化后，回灌至原含水层，“同层、同源、同质、同量”回灌率达 90%。监测数据表明，即便在 2022 年济南轨道交通多线同步建设的高峰期，趵突泉水位最高达 30.27 米。

“为岩溶地貌城市轨道交通建设提供了可借鉴的方案”

济南轨道交通 4 号线，通过“绕避抬升”解决泉水保护难题后，又遇到了新难题：富水岩溶区地质复杂，盾构施工难度极高。泉城公园站至千佛山站，约 1 公里的区间里，夹杂着近 300 个大小不一的溶洞，溶洞见洞率达 69.72%。“我们遇到的最大溶洞高度近 22.4 米，洞跨约 38 米，施工环境犹如大型蜂巢，难度极高。”宋增亮说。怎么办？给隧道照 CT，摸清地质。山东大学、山东省地矿工程勘察院等单位依托超前地质预报技术与智慧化管理平台，对隧道前方地层进行全方位、多频次扫描。“通过提升地质勘察精度，查明了线路

地下空间发育特征，全面掌握溶洞分布特征，为线路建设提供支撑。”山东省地矿工程勘察院工程地质中心主任胡韬说。个性化设计，定制装备。济南重工集团盾构装备研制团队对盾构机刀盘、螺旋输送机、同步注浆系统等关键部件进行升级改造。最终，定制盾构机成功实现盾构施工穿越富水岩溶区，有效控制了地面沉降。值得关注的是，盾构施工同样秉承绿色理念。“施工用水与掘进泥浆、刀盘切削土体混合成的泥渣，经沉淀、过滤处理后，分离出的砂石用作建筑材料，回收水体用来清洗道路、养护混凝土，实现了水资源与砂石资源的双重循环利用。”宋增亮说。整个轨道交通 4 号线建设过程中，济南轨道交通集团在沿线布设 64 个地下水长期监测点，结合常态化水质检测，实现对地下水位与水质的实时监控与预警。4 月 30 日，济南轨道交通 4 号线全线洞通。5 月 16 日，趵突泉、黑虎泉地下水位分别攀升至 27.95 米、27.92 米，较 5 月初分别上涨 12 厘米、14 厘米。“这充分说明，在靠近泉水敏感区建设地铁隧道与车站是可行的，济南为岩溶地貌城市轨道交通建设提供了可借鉴的方案。”济南轨道交通集团党委副书记、总经理李虎说。清晨，天光微亮，泉水咕咚咕咚地涌，黑虎泉畔已人头攒动。泉水畔的烟火气息正浓，轨道上的方便快捷指日可待。图①：济南轨道交通 4 号线泉城公园站空间示意图。图②：试运行的轨道列车行驶在 4 号线上。新华社记者 徐速绘摄

自然之子



人物小传
石小涛，男，出生于湖北黄冈市红安县，三峡大学水生态研究院院长，主要研究生态水利学和鱼类过坝技术。

说起与长江鱼类的缘分，三峡大学水生态研究院院长石小涛(见上图，三峡大学供图)笑着说：“有同行说，我是研究鱼的里面最懂水利的，研究水利的里面最懂鱼的。”基于跨学科优势，16 年来，他用研究成果帮助长江里千万条鱼儿翻越水坝，顺利实现洄游、繁衍等。

研究“鱼道”，聚焦水利工程与生态环境和谐共生

石小涛出生于湖北黄冈市红安县，家乡虽不挨着长江干流，但有长江支流流经。小时候，石小涛就常在小河、池塘边玩耍，对大自然有着浓厚的兴趣。高考后，他主动填报了华中农业大学，学习水生生物相关知识。不少亲戚朋友说：“这孩子，好不容易可以跳出农门，怎么又要跳回来，准备毕业了回家养鱼？”石小涛不为所动。热爱是研究的基础，从本科读到博士，石小涛“如鱼得水”。后来，随着他的研究方向从水生生物转向了水利工程，着眼点从传统水工逐渐转向了“生态水工”。2009 年，位于湖北宜昌市的三峡大学向他发出邀请，时任党委书记刘德富对他说：“过去我们都是研究如何建设水利工程，现在要研究如何让水利工程与生态环境和谐共生。”刘德富告诉他，当时国内的水利工程建设中，迫切需要的一个研究方向就是“鱼道”研究。“三峡大学位于长江边、葛洲坝与三峡大坝附近，研究鱼儿过坝的鱼道，有着得天独厚的优势，而且与我的专业非常契合。”石小涛欣然应邀，选择了三峡大学的这一最新研究方向。

野外实验，寻找鱼儿翻越大坝的更优方案

长江鱼类众多，中华鲟是一种洄游产卵的鱼类。为了保护、补充中华鲟资源，湖北宜昌、荆州等地每年都会举行中华鲟增殖放流活动，将人工养殖的中华鲟放归长江，今年 4 月就有超 22 万尾子二代中华鲟放归长江。除了增殖放流，水利工程中的鱼道建设也越来越被重视。2002 年修订的《中华人民共和国水法》明确规定：“在水生生物洄游通道、通航或者竹木流放的河流上修建永久性拦河闸坝，建设单位应当同时修建过鱼、过船、过木设施，或者经国务院授权的部门批准采取其他补救措施，并妥善安排施工和蓄水期间的水生生物保护、航运和竹木流放，所需费用由建设单位承担。”水坝上要建过鱼设施，究竟怎么建？许多建设单位并不清楚。石小涛便把一个个建筑工地变成了实验室，从雪域高原到西北边陲，石小涛带领团队走访了几十座水电站，足迹遍及西藏、四川、贵州、新疆和青海等地，累计行程超 4 万公里。“我们通常是用卡车把实验设备从学校搬运过来，在长江边、工地旁搭帐篷，建野外实验室。”石小涛说。研究发现，鱼儿过坝通常需要逆流而上，水坝过高的话，就算有一条直接的通道，鱼儿也游不上去。所以鱼道里通常设有一块块挡板，分级缓解水流压力，帮助鱼儿以“之”字形向上游。“每一片水域的鱼类品种不同，游动的能力不同，水温、流速、漩涡状态也不同，所以我们要科学监测各项数据，还要采集当地鱼种，放入模拟自然水流的设施里做实验。”石小涛说，“每一级通道要设计多高、多宽，过鱼才能又多又好？需要不断寻找更优方案。”近年来，石小涛率团队探索将数字化技术引入鱼道设计中，但他和团队成员仍然一年至少有 3 个月在野外开展实验。“大自然千变万化，数字化模型只能辅助，并不能完全代替野外现场实验。”石小涛说。

投身科普，在更多人心中种下长江大保护的种子

“我们分组执行任务，1 组负责测量水文数据，搜集长江江豚的声呐信号，2 组负责用望远镜监测江面鱼群变化情况，3 组负责记录数据……”9 月初，在三峡大坝旁的鱼道监测站，石小涛的独创课程《长江大保护创新实践》又开讲了。这堂经常开在长江边的选修课，每学期都能吸引来自水利工程、环境工程、法学等 10 多个专业的 100 多名同学报名。“实践教学是这门课程的初衷。我希望通过这门课程，让学生们亲近大自然，认识长江江豚等水生生物，在他们心里种下长江大保护的种子。”石小涛说。除了授课，石小涛还组建志愿服务队，打造“长江大保护”主题科普账号，带领学生和志愿者通过多种方式向公众传播长江大保护的知识。“长江禁渔后，长江宜昌段的长江江豚多了，不少群众也很喜欢长江江豚。但有人会用无人机近距离跟拍长江江豚，甚至投喂长江江豚，这些都不利于长江江豚的保护。通过我们的科普宣传，人们逐渐意识到这种行为是不对的，投喂现象少了。”石小涛高兴地说。打开石小涛的科普账号，《鱼儿怎么过坝？》《长江生物面临的主要威胁是什么？》等科普视频生动有趣，吸引了不少观众。其中《鱼儿怎么过坝？》2024 年 9 月获得湖北省科普短视频大赛(社会组)一等奖。“我希望通过这种方式，让更多人增强生态意识，自觉保护长江生态。”石小涛说。

本版责编：张 晔 杨笑雨 何宇澈
版式设计：张芳曼

捞水草
净水质

10 月 14 日，北京什刹海景区的湖面上，工作人员对湖水水生植物残体及杂质进行清理打捞、逐层清运，防止水草腐烂影响水体生态，保持景区水域的洁净，为市民游客营造清爽宜人的亲水环境。
郭俊锋摄(人民视觉)

