

万家寨水利枢纽已累计参与21次调水调沙，助力黄河河槽稳定和下游行洪畅通　　黄河水利委员会供图

河南省人民政府参事、水利部黄河水利委员会首席专家张金良——
让黄河自己把沙送走

□本报记者　张佳鑫

“别的江河治理，大体是在解‘一元高次方程’，未知数只有水——水多了是洪灾，水少了是旱灾，水脏了是污染。而黄河要解的是‘二元高次方程’，多出来的‘一元’是沙。”张金良说。

习近平总书记指出，黄河水少沙多、水沙关系不协调，是黄河复杂难治的症结所在，要求紧紧抓住水沙关系调节这个“牛鼻子”。这条典型的水沙两相流大河上，水沙关系不协调是复杂难治的症结所在——泥沙一多，下游就淤。过去下游河道每年淤积约4亿吨泥沙，河床每年抬高8至10厘米，开封段河床高出背河地面13米，新乡段更是高出20米。

“河床淤高，大堤加高，再淤高，再加高，新中国成立后下游大堤先后经历了4次大规模加高培厚。但‘人堤赛跑’终有极限，大堤不可能无限加高。”张金良说。

治本之策在于增水、减沙、调水调沙。2001年底，黄委下定决心开展调水调沙试验，成立以时任黄委主任李国英为总指挥的首次调水调沙试验总指挥部。在三门峡枢纽局分管防汛的张金良被紧急调任黄委防汛办公室主任，兼任调水调沙试验总指挥部办公室主任。

试验先要回答核心问题：多大流量、多高含沙量、持续多久、什么样的颗粒级配，泥沙才能顺畅入海而不淤在河床上？张金良和老搭档刘继祥等同事系统分析了376场天然洪水，提炼出花园口站流量2600立方米每秒、含沙量20千克每立方米、持续6天以上的调控指标体系。

2002年首次试验，靠小浪底单库下泄清水，与伊洛河、沁河来水及沿程引水动态耦合，在花园口塑造出协调的洪水过程。试验中也摸清了一个惊心的数据：下游主河槽最小过流能力已萎缩至约1800立方米每秒。调水调沙，非做不可！

2003年秋汛，他们又探索了三门峡、小浪底、陆浑、故县四库联合调度，实现干支流水沙精准对接。但到了2004年，黄河没来洪水，试验怎么往下走？张金良提出了一个大胆的方案——人工影响异重流。

这一灵感，源于2000年他的博士生导师曹楚生院士半夜打来的一个电话。当时小浪底水库刚下闸蓄水不久，库区淤积铺盖尚未形成，地下厂房绕渗严重。曹院士问他：“你天天琢磨泥沙，有没有招让淤积铺盖早点形成？”张金良彻夜未眠，想到利用高含沙洪水潜入清水底部形成异重流、推进到坝前落淤的办法。经严密计算，以及三门峡、小浪底两水库配合，当年汛期异重流成功抵达坝前，地下厂房渗水大幅度减轻。

“总指挥李国英全面审阅方案，主导推动了试验的开展。我至今还清晰记得，他提出在没有天然洪水时，是人工塑造洪水形成了异重流，应称作‘人工塑造异重流’更为准确。”张金良回忆。

2004年实施的人工塑造异重流，由万家寨、三门峡、小浪底三库串联接力。各库泄多大流量、启动哪里的沙源、异重流在何处潜入，是张金良带着团队一笔一笔手算出来的。随着三座水库按调算的时间和流量依次启闸，小浪底库水位逐步下降、露出库尾泥沙的时刻，恰逢三门峡下泄的大流量水流赶到，一举冲起库尾淤沙，化作高含沙水流钻入小浪底清水底部，贴着库底一路滚向坝前。当小浪底排沙洞准时开启，“黄龙”咆哮出库。在李国英的指挥下，人类首次在大河上人工塑造异重流宣告成功。

“如果说水库‘蓄清排浑’是单机版软件，调水调沙就是整条河联网运行的网络版软件。”张金良说。如今，黄河调水调沙已由试验转入常态化生产运用，截至2026年累计实施33次。下游河道主河槽平均下切3.1米，过流能力提升到约5000立方米每秒。

探索并未止步。为了让水库与全河调水调沙更好匹配，张金良又带领团队将多沙水库运用方式从“蓄清排浑”推向“蓄清调浑”的新阶段，通过设置动态泥沙侵蚀基准面和“三槽”淤积形态，实现“沙多调沙、沙少调水”与水资源跨年调节。这一技术成功破解了泾河东庄水利枢纽140千克每立方米超高含沙量的建库禁区，也支撑了黄河水沙调控体系的“核心发动机”——古贤水利枢纽于2024年7月正式开工建设。

习近平总书记强调，健全水沙调节机制，完善以骨干水库等重大水利工程为主的调控体系。如今，东庄水库高坝巍然屹立，古贤工地机械轰鸣。张金良常站在流域图前憧憬：“待未来黑山峡、古贤、碛口、桃花峪等骨干工程全面建成，全河水沙调控体系完全闭合，这条让历代水利人倾注了毕生心血的大河，定能岁岁安澜，造福两岸。”

黄河水利科学研究院原副院长、总工程师江恩慧——
读懂水与沙，才读得懂黄河

□本报记者　张佳鑫

2026年深秋，江恩慧的案头摆着一份反复打磨的万字长文——《人民治黄80年黄河泥沙研究进展综述》，要将80年浩瀚的泥沙科研脉络浓缩其中。

翻开手稿里密密麻麻的批注，这位与黄河泥沙打了40余年交道的科学家感慨：“习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上指出，黄河水少沙多、水沙关系不协调，是黄河复杂难治的症结所在。人民治黄80年在科技领域最大的突破，正是围绕泥沙问题展开的基础研究与工程实践。”

认识泥沙，首先得摸清它从哪儿来、怎么走。人民治黄伊始，老一辈治黄人便把目光投向广袤的黄土高原。1957年组建的花园口河床演变测验队，首次揭示了下游滩槽冲淤分布特征，其成果不仅催生了我国第一部《黄河下游河床演变》专著，更为后来划定7.86万平方公里多沙粗沙区、1.88万平方公里粗泥沙集中来源区并实施靶向治理打下坚实基础。

在实践中碰壁，在探索中突围。三门峡水库建成初期的严重淤积，倒逼水库转向“蓄清排浑”运用。此后，治黄科研人接力攻关，相继揭示了强不平衡输沙、高含沙洪水“揭河底”冲刷、洪峰增值及极细沙减阻机理等，一步步把黄河的水沙脾气摸透。

这些规律的揭示，离不开科研手段的跨越。早在2001年，时任水利部黄河水利委员会主任李国英就提出建设“原型黄河”“模型黄河”“数字黄河”，“三条黄河”数据互通、效果互验，让治黄从经验判断走向科学决策。其中，“模型黄河”是黄河保护治理不可或缺的重要研究平台。

“原型黄河是认识黄河最直接的现场，可大河茫茫一片，水下泥沙怎么起动、河槽怎么冲淤根本看不清；而在实体模型上，我们却能爬上台阶、蹲下来，从各个角度仔细观察和琢磨。”江恩慧说。她认为黄河有两大特征最难模拟：高含沙和游荡性。江恩慧所在的团队刻苦攻关，提出了黄河高含沙洪水模型相似律，在140米长的实体模型上首次把高含沙洪水和游荡特性逼真重现。当时的上级领导现场观摩后，连声赞叹：“这真像黄河！”

模型准不准，大水是试金石。1996年汛前，江恩慧在模型上做洪水预演试验。当流量涨到6000立方米每秒时，原阳高滩边沿的路堤突然破口，滩区大量进水。这一结果与当时许多人的经验大相径庭。“我那时年轻，一下子懵了。但科研人员必须实事求是，试验做出来是什么样，就必须照实上报！”江恩慧顶住压力交出了报告。仅仅一周后，“96·8”洪水袭来，洪水上滩位置和演进路线竟与模型预报吻合。河南黄河河务局正是依据试验结果，提前给几处控导工程加修了子埝，成功避免了洪水漫顶冲垮工程。

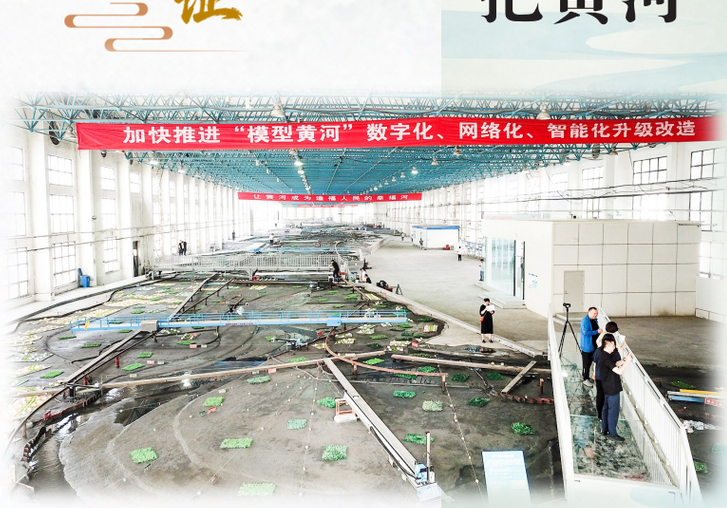
实体模型做准了，数学模型也随之迎来突破。过去的水流挟沙能力公式多依据少沙河流建立，含沙量一高就“拐头”失准。江恩慧与团队修正了河床变形方程和泥沙运动方程，把其中两个原本取定值的参数，改为随水流泥沙因子自动调整的动态公式，并利用实体模型跟随性极强的实测资料加以验证，再代回方程形成闭环；同时提出半理论半经验的水流挟沙能力公式和动床阻力公式，使模拟精度大幅度跃升，在20世纪90年代黄委组织的数学模型同台比试中脱颖而出。

科研手段的迭代，推动着治沙理念的更新。过去水库拦沙排沙被视为顺应自然的过程，调水调沙将其升级为主动协调水沙关系。江恩慧团队进一步提出“泥沙动态调控”技术，将水动力调控与水库清淤等强人工措施有机结合，让粗泥沙尽量拦在库里清淤利用，让细泥沙随洪水送入大海。由此，沿用多年的“拦、调、排、放、挖”5字处理泥沙方略中，被他们加上了一个关键的“用”字。团队潜心20年创建的“测—取—输—用—评—管”全链条技术体系，推动水库清淤和泥沙资源化利用纳入《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》和《中华人民共和国黄河保护法》的制度框架。

年轻时常跟着老专家跑一线的经历，让江恩慧深知，黄河下游滩区居住着近200万群众，治黄决策只有得到地方政府支持、老百姓理解，才能真正落地。她率先开启治黄社会问题研究，将行洪输沙、社会经济、生态环境三大子系统统筹耦合，提出“流域系统科学”。

谈过往研究时江恩慧也着眼未来。她表示：“黄河泥沙研究怎样发挥更大作用，仍需要我们水利科研人不断低头深思、抬头望路。”

治黄物证



模型黄河

把黄河“搬”进了实验室

□讲述人：**万强**（黄河水利科学研究院泥沙研究所河道整治研究室主任）

推开模型试验厅的大门，你可能以为误入了黄河“微缩片场”，一段800米长的黄河仿真模型让人惊叹：小浪底坝下至陶城铺299公里游荡性河段和165公里过渡性河段，按1:600水平、1:60垂直比尺压缩成模型河，两岸滩区村庄、桥梁、大堤、整治工程一一复刻。就像给黄河下游做了个“沙盘替身”。

为啥把黄河搬进实验室？因为她的脾气捉摸不定：水少沙多、河势游荡多变，洪水过后河床怎么冲刷、主溜往哪摆，浑水下根本看不见。而实验室里几小时就能跑完天然黄河的一场大规模洪水过程，让洪水先“彩排”，就能够预测典型洪水下的洪水演进和河势演变、工情险情状况，弥补资料分析和数值模拟的不足，为防汛部门制定防洪预案提供技术支撑。

让模型“活”起来，最难的是造沙。天然沙按比例缩小会变成黏泥巴，水冲不动，模拟不出“善淤、善决、善徙”。几代科研人员测试过煤粉、塑料沙、电木粉、核桃壳等十几种材料，最终在火电厂废料粉煤灰里找到答案：特殊筛选处理后容重轻、起动流速低，能逼真重现河床“冲、淤、摆”，完美契合了要求。

以前试验靠人工拿水准仪量地形、旋桨流速仪测流速，几十号人忙半天。2024年黄河下游河道模型数智化升级：全自动水沙过程控制系统、阵列式雷达水位计、流场监测系统、自动含沙量测量设备、水下地形仪以及智慧管控平台。现在几位工作人员在中控室下令，上游设备就能自动配比泄放不同含沙量浑水；设备代替试验员收集数据；试验一停，移动测桥滑过河床开展自动地形测量，毫米级冲淤地形断面图很快自动生成。

站在中控室看微缩黄河“活”起来，我忽然觉得，这段800米长的黄河不大，却藏着下游的脾气、记忆和未来。

万强　供图

掘进向前，智能跟上

□讲述人：**薄伟伟**（黄河古贤水利枢纽有限公司信息化科副科长）

常有人问：“什么是智能大坝？就是在电脑里建个大坝的三维模型吗？”通俗地讲，智能大坝就是给大坝装上“神经系统+大脑”，让它能自动感知、分析、提醒。这套系统得先“长”在工地上。

古贤大坝坝高219.5米，建成后将是国内最高的碾压混凝土重力坝，而且要立在“千层饼”似的红层地基上。建这样一座智能大坝，难点不只在坝上的智能温控、智能碾压等。隧洞埋在山体里，各道工序在导流洞通水后就被覆盖，施工数据如果没能及时进入系统，事后溯源，只能翻档案柜。

而隧洞，恰恰是现在施工的重头戏。我们起初的思路是：建好隧洞数字模型，把开挖、支护等“搬”到线上，点开模型，工程档案一目了然。可模型里的数据从哪儿来？还得靠班组层层填报。

方案汇报完，一位老专家泼了盆冷水：“隧洞里三班倒赶工期，工人浑身泥浆，哪有空填一大堆表单？系统要是给一线添负担，设计再花哨也是摆设。”

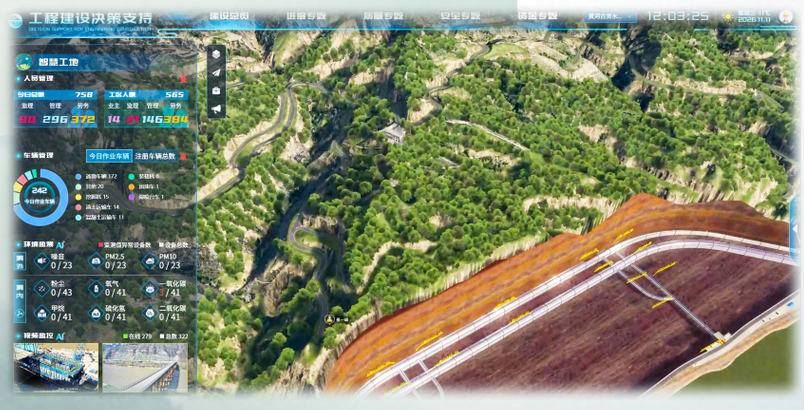
这话点中了要害。做智能系统，我们讲标准、讲严谨，数据项一个不能少；而工地上，讲的是质量、是进度，工况随时在变。干完一班活儿再填半小时表，谁都不愿意。表没人填，系统就用不起来，智能建造也就卡在“最后一米”——数据在工地，却进不了系统。

我们索性扎进工地一线跟班，顺着现场流程一点点梳理，力求打通数据从产生、采集、关联到查询的整条链条，让数据归集实现自动化和智能化。

经过反复磨合，路子有了：拿工程项目划分编码当“锚点”。每个单元工程都有一串独有的编号，相当于它的“身份证”。系统以编号为纽带，自动挂接检测、监理、报验、影像等资料，班组不用额外填表，追溯链就自动形成了。点开一个编号，哪天开挖、哪天衬砌、谁检查、谁复核、谁验收等，都在眼前。

古贤水利枢纽工程是水利部智能大坝试点。坝要从红层地基上长起来，洞要从山体里穿过去，智能化的难处不在算法多漂亮，而在系统能不能跟着一线的节奏走。

我们追求的是：掘进一米，智能就跟上一米；等坝立起来、洞子过了水，埋在混凝土里的工序，还能一条条说清。让智能跟上掘进的脚步——这是新时代黄河人的初心。



数字孪生古贤系统　　薄伟伟　供图

本栏目文字由本报记者张佳鑫、葛家诺采访整理

本版责任编辑：张佳鑫　检查校对：葛家诺　郑浩伟　美术设计：尼冰琳　照排：张佳鑫
电话：(010)63204039　电子邮箱：jsgl@chinawater.com.cn