

# 第一章 “模型黄河”工程建设的必要性和可行性

## 1 新世纪治黄目标和战略措施

### 1.1 黄河流域概况及主要特点

黄河是我国的第二条大河，发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓，流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东等九省（区）在山东垦利县注入渤海。干流河道全长 5 464 km，流域面积 79.5 万  $\text{km}^2$ （包括内流区 4.2 万  $\text{km}^2$ ，下同）其中上、中游地区面积占流域总面积的 97.1%。黄河流域所处的地理位置和上、中、下游的面积分布，决定其有着不同于其他江河的显著特点。

#### 1.1.1 水土流失严重 产沙量高

黄河流经的黄土高原是世界上水土流失面积最广、侵蚀产沙强度最大的地区。黄河上中游水土流失面积 45.4 万  $\text{km}^2$ ，占流域总面积的 57.1%。水土流失面积中，侵蚀模数大于  $8\,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  的极强度水蚀面积 8.5 万  $\text{km}^2$ ，大于  $15\,000\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$  的剧烈水蚀面积 3.67 万  $\text{km}^2$ ，两者分别占全国同类面积的 64% 和 89%。中游多沙粗沙区面积 7.86 万  $\text{km}^2$ ，仅占黄土高原地区水土流失面积的 17%，但年均产沙量达 11.82 亿 t，占入黄泥沙总量的 63%，其中大于 0.05 mm 的粗泥沙占全河粗泥沙总量的 73%，是黄河下游河道淤积泥沙的主要来源区。

#### 1.1.2 水少沙多 水沙异源

黄河多年平均天然径流量 580 亿  $\text{m}^3$ ，仅为长江的 1/17。三门峡水文站实测多年平均输沙量 16 亿 t，是长江的 3 倍。多年平均含沙量  $35\text{kg}/\text{m}^3$ ，洪水期干流最大含沙量可达  $900\text{kg}/\text{m}^3$  以上。黄河的输沙总量和含沙量均为世界大

江大河之首。

水少沙多是黄河水沙过程的基本特点，尤其是自 1986 年以来黄河径流量不断减少。如 1986~1999 年黄河下游年均水量仅为 279 亿  $m^3$  约为 1919~1985 年平均值 464 亿  $m^3$  的 60% 其中，1997 年水量仅为 166.4 亿  $m^3$  不足多年均值的 36%，而近年含沙量的降低程度却远不及水量减少的幅度。如 1986~1999 年的年均含沙量仍可达到多年均值的 82% 尤其是汛期平均含沙量较多年同期的含沙量却增加了 16% 以上 从而使得水少沙多的状况更为严重。

黄河水量的 56% 来自于上游流域 而 90% 的泥沙来自于中游的河口镇至三门峡区间，水沙异源的特点十分突出。

### 1.1.3 水沙分配不均，水沙搭配不合理

黄河丰、枯水年交替出现，水沙年际变化大。以三门峡水库修建前的资料统计 三门峡水文站最大年水量为 659 亿  $m^3$  (1937 年) 最小年水量为 202 亿  $m^3$  (1928 年) 前者为后者的 3.3 倍 最大年沙量为 39.1 亿 t (1933 年) 最小年沙量为 4.88 亿 t (1928 年) 相差 8 倍。沙量变幅明显大于水量变幅。

在天然情况下，黄河水沙年内分配也很不均。黄河水沙主要集中在汛期 (7~10 月) 汛期水量占年水量的 60% 左右，汛期沙量占年沙量的 85% 以上。汛期沙量主要集中在暴雨洪水期，5~10 天的沙量往往可占年沙量的 50%~90%。在年内，沙量的集中程度更甚于水量的集中程度。但近年来，由于人类活动等因素的影响，年内水沙分配则发生很大变化。汛期水量比重显著减小，沙量比重增大 来沙更集中于 7、8 两月，9 月下旬~10 月水沙特征已接近于非汛期的水沙特征。如 1985~1999 年汛期平均水量占全年的比例已由多年的 59.9% 降至 46.0% 而非汛期的水量比例却由多年的 40.1% 升至 54.0%；汛期沙量占全年的比例由多年的 86.5% 进一步增至 94.6% (表 1-1) 使得水沙搭配更加不合理。这种年内水沙分配的变化趋势对于下游河道是极为不利的。

表 1-1 黄河下游控制站来水来沙变化统计

时段 (年·月)	水量(亿 m <sup>3</sup> )			沙量(亿 t)			含沙量(kg/m <sup>3</sup> )		
	全年	非汛期	汛期	全年	非汛期	汛期	全年	非汛期	汛期
1919.7~1985.6	464	186	278	15.60	2.10	13.50	33.6	11.3	48.6
1985.11~1999.10	278	150	128	7.64	0.41	7.23	27.5	2.7	56.5
1989.11~1999.10	259	146	113	7.61	0.46	7.15	29.4	3.1	63.2

#### 1.1.4 河道淤积严重，“悬河”程度不断加剧

由于水少沙多等原因，使得大量泥沙输入下游河道后，造成河道的严重淤积。河床临河滩面一般高于背河地面 4~6m，部分地段达 10m 以上，成为淮河和海河的分水岭，是举世闻名的“地上悬河”。

黄河下游河道的严重淤积，导致河床演变剧烈，主流摆动频繁。特别是近年来由于进入黄河下游的水沙条件发生重大改变，致使主河槽严重淤积萎缩，河道排洪、输沙能力迅速降低，“悬河”形势日趋严峻。同时，“二级悬河”程度不断加剧。如根据 2002 年 10 月实测资料统计，东坝头至高村河段的滩地横比降已经达到 5‰ 以上，远大于河道纵比降。由此，大大增加了黄河下游的防洪负担。

#### 1.1.5 黄河河口入海流路游荡摆动

黄河挟带大量泥沙注入渤海，使黄河河口不断淤积延伸，入海流路易于发生摆动改道。例如，黄河下游现行河道，在新中国成立前，以宁海为顶点的自然改道就有 6 次，其后改道点暂时下移到渔洼，人工改道 3 次，影响范围遍及约 6 000km<sup>2</sup> 的扇形地区。

黄河具有的这些不同于其他大江大河的突出特点，决定了对其演化规律的认识和对其治理的难度极大，从而也就决定了研究黄河的科学手段和途径必须是综合的。尤其是在目前科技发展水平下，模型试验的方法对于研究黄河问题将有着更为重要的作用。

## 1.2 黄河治理开发中存在的重大问题

治理黄河，历来是中华民族安民兴邦的大事。新中国成立以来，黄河治理开发取得了巨大成就，促进了流域社会经济的发展，保障了黄淮海大平原的安全。但是，目前，黄河的治理开发仍面临着一些亟待解决的重大问题。探求解决这些问题的途径和措施，是制定“模型黄河”工程规划的前提条件和落脚点。

### 1.2.1 洪水威胁依然是我国的心腹之患

黄河下游河段、中游的禹门口至潼关河段和三门峡库区、上游的宁蒙河段都存在着不同程度的暴雨洪水威胁和凌汛危害。由于黄河下游泥沙严重淤积而形成的举世闻名的“地上悬河”，洪水威胁最为严重，一直是黄河防洪的重点。

目前，小浪底水库已建成投入运用，河床淤积在一定时期内可得到缓解，但黄河下游防洪形势仍不容乐观。一是小浪底至花园口区间洪水仍未得到控制，下游还有发生大洪水的可能；二是泥沙问题在相当长的时期内难以根本解决；“悬河”的严峻形势将长期存在，特别是当前下游局部河段的“二级悬河”形势更为严重，给防洪造成了新的压力；三是堤防工程仍存在许多薄弱环节，河道整治工程还很不完善；四是小浪底水库拦沙运用初期下泄相对清水期间，随着河床的冲刷下切及新的水沙条件下河势的重新调整，工程出现险情的可能性将有所增加；五是黄河滩区和东平湖滞洪水库安全建设任务还很重；六是防洪非工程措施建设滞后，防洪指挥系统建设还不适应抗洪抢险的需要。

### 1.2.2 水资源供需矛盾十分突出

黄河流域人均水量和耕地亩均水量均远低于全国平均水平。20世纪90年代，年均耗用河川径流量已达307亿 $m^3$ （其中流域外耗用106亿 $m^3$ ），是50年代的2.5倍。用水量的持续增加，导致黄河下游断流频繁发生，进一步加剧了河道淤积萎缩。20世纪90年代黄河利津断面实测年径流量平均仅120亿 $m^3$ ，比50年代平均年径流量减少360亿 $m^3$ ，维持河流基本功能的条件几乎丧失，造成河口地区生态环境不断恶化。1999年对黄河干流实行水量统一调度以来，下游断流现象虽然有所缓解，但黄河流域属资源性缺水地区，随着社会

经济的发展，需水量将不断增加，水资源供需矛盾更加突出。黄河缺水已成为黄河流域社会、经济可持续发展的主要制约因素。

### 1.2.3 生态环境恶化尚未得到有效遏制

黄河流域生态环境恶化的问题，突出表现在黄土高原地区的水土流失和黄河干支流的水污染两方面。

黄土高原地区治理水土流失的主要问题：一是长期以来投入严重不足，治理进度缓慢。二是多沙粗沙区治理滞后，沟道坝系工程少，加上现有不少坝系已到了运用后期 病险坝库多 蓄洪拦沙作用衰减较大 因而 该地区治理的减沙效果还不显著。三是目前水保工程措施的治理标准还较低，中常降雨条件下的减水减沙效果明显，但一旦遭遇大暴雨洪水，减水减沙效果明显降低，中游产生高含沙量大洪水的机遇依然存在。同时，随着骨干坝库库容的减小，相应的减水减沙作用也明显降低。四是预防监督和管理不力，边治理、边破坏的现象在一些地方还相当严重。严重的水土流失，不仅使环境受到的压力越来越大，而且使下游出现高含沙水流的频次增多，加重了主河槽的淤积。

黄河水污染问题主要是：用水量和排污量大的企业较多，加之水污染治理严重滞后，缺乏有效监督，大量未经处理或达不到排放标准的废污水进入黄河干支流。2000年水质监测结果与1985年相比，Ⅳ类、Ⅴ类及劣于Ⅴ类水质河长比例增加了30%。水污染的加剧已严重影响到了黄河的供水安全。

## 1.3 推进治黄现代化进程的战略举措

1999年6月，江泽民总书记在视察黄河时指出：“21世纪即将到来 我们必须抓紧思考一个问题，即如何从战略的高度，进一步把黄河的事情办好，把黄河的水害治理好。”2001年9月 汪恕诚部长从现代水利的角度出发 要求新世纪黄河的治理开发要实现‘堤防不决口、河道不断流、水质不超标、河床不抬高’的目标 谋求黄河的长治久安。

《黄河近期重点治理开发规划》明确提出 到本世纪中叶 黄河治理开发的总体目标是，建成完善的黄河防洪减淤体系，有效控制黄河洪水泥沙，初步形成‘相对地下河’ 谋求黄河长治久安。形成节水型社会 实现南水北调西线工

程向黄河流域调水 170 亿  $m^3$  左右，水资源供需矛盾基本解决；黄河流域地表水水质恢复良好状态。黄河流域适宜治理的水土流失区基本得到治理，平均每年减少入黄泥沙达到 8 亿 t 生态环境实现良性循环。

为推进治黄现代化进程，黄河水利委员会（以下简称黄委）党组提出了加大治黄科技含量 着力建设“三条黄河”即建设“原型黄河”“数字黄河”和“模型黄河”的科学治黄新理念。其中的“模型黄河”，通俗地讲是试验室中的黄河。它是由一些专门的实体模型所组成的具有特殊功能的科学试验技术体系 主要是通过“原型黄河”所反映的自然现象进行反演、模拟和试验 从而揭示“原型黄河”的内在规律。“模型黄河”工程建设是促进治黄科技水平不断提升的重要保障措施之一。

## 2 实体模型试验在治黄中的应用回顾和存在的问题

### 2.1 应用回顾

早在 1923 年，德国恩格斯教授就利用实体模型开展了黄河丁坝试验。新中国成立后，实体模型试验在治黄中逐步得到发展并发挥了较好的指导作用。与此同时，黄河实体模型的模拟技术也得到迅速发展。

自 20 世纪 50 年代中期以后，围绕三门峡水利工程问题，先后开展了三门峡水库排沙效果、黄河下游河床变形预报及整治工程措施、三门峡水库低水位运用后黄河下游河床演变过程等一系列模型试验研究，为三门峡水库运用及改建提供了重要科学依据。

为解决小浪底水利工程的规划、设计及施工中的一些关键问题，黄河水利科学研究院（以下简称黄科院）及南京水利科学研究院（以下简称南科院）等单位自 1982 年起分别开展了多次模型试验，研究小浪底水库泄水建筑物优化布置形式和电站防沙措施，从而提出了优化布置方案和防淤堵措施。另外，还通过水工模型试验，对小浪底水库坝线坝型的选择和大坝电站泄流排沙等建筑物的布局和运行方式进行了多方案的试验研究和论证，并依据试验结果，首次将孔板消能技术应用于小浪底水库泄洪洞的设计中，这些研究成果有效地

解决了工程设计中的有关重大技术问题。自 1995 年黄委先后建设了小浪底水库模型和小浪底至苏泗庄河段河道模型，分别完成了小浪底水利枢纽温孟滩移民安置区河段河道整治模型试验、小浪底水库拦沙运用初期两种运用方式、小浪底水库 2000 年运用方案试验研究等。利用小浪底水库模型主要研究了在不同的水库运用条件下，库区水沙运动规律及变化过程，出库含沙量及泥沙组成 库区纵、横剖面形态变化过程等 还展现了异重流运行、出库过程 并通过小浪底至苏泗庄河段河道模型开展了小浪底水库拦沙初期运用方式对下游河道的防洪减淤效果试验研究。通过这些模型试验为小浪底水库拦沙初期运用方式的制定提供了科学依据。

河道整治是黄河下游河道治理的最主要措施。长期以来，通过大量的河道实体模型试验，就黄河下游河床演变规律、河道整治方案论证、河道整治工程布局中试、河道整治工程新技术、挖河减淤关键技术等开展了一系列试验研究，研究成果在河道治理中发挥了重要的指导作用。同时，河道实体模型试验在黄河下游洪水预演预报中也得到了应用，自 1992 年以来先后多次开展了黄河下游游荡性河段洪水演进试验，增强了黄河下游防洪预案制定及防洪调度决策的科学性。

在进行大量实体模型试验研究的同时，也开展了基本理论和基本规律等基础试验研究，通过这些研究，在泥沙的起动、泥沙的输移、泥沙的沉降和絮凝、高含沙水流的流变特性、不同含沙水流的阻力、泥沙对水利枢纽有关设备和水工建筑物的磨损机理等方面都取得了可喜的成果。

实体模型试验还促进了数学模型的发展。黄委先后发展了“黄河下游准二维泥沙数学模型”、“黄河下游平面二维泥沙数学模型”、“黄河干流水库准二维泥沙数学模型”等，这些数学模型的改进和发展大多是在理论分析的基础上借助实体模型试验取得的。

2002 年 7 月，黄委进行了黄河首次调水调沙试验，这是系统地、有计划地自主调控黄河水沙的一次重大实践，也是实现人与自然和谐相处的一次具有开创性的探索。利用实体模型试验的成果，不仅为这次原型调水调沙实施方案的制定提供了重要的科学依据。同时，在调水调沙过程中还实现了“三条黄

河‘联动’即利用‘原型黄河’的实测资料对已有的‘数学模型’和已建的黄河小浪底库区模型及小浪底至苏泗庄河段河道模型进行了验证试验，进一步率定了数学模型和实体模型的物理参数，使之更能准确地模拟‘原型黄河’更好地为研究和治理‘原型黄河’服务。

几十年来，黄河实体模型试验，不仅解决了黄河治理开发规划、设计和工程建设中的众多关键问题，发挥了科学指导作用，而且也极大地促进了治黄科技水平提高和黄河实体模型模拟理论及技术的发展。

## 2.2 实体模型建设现状及存在问题

目前建成的模型有小浪底至苏泗庄河段河道模型、花园口至东坝头河段河道模型、小浪底库区局部模型和三门峡库区模型等，但从新世纪治黄形势发展需求来说，目前在模型建设中还存在如下问题：

(1)缺乏系统性和整体性。现有的黄河实体模型大多是针对某一具体项目，就某一河段或某一水库而独立建设的，没有在总体上从黄河流域治理开发及管理需求的高度，进行统一规划，缺乏系统性和完整性，各模型之间缺少关联性，对一些现象无法进行全过程的系统研究。例如，现有的小浪底库区模型还难以对三门峡水库下泄洪水后，是否会在小浪底库区形成异重流及其运行规律等现象进行完整的模拟，从而也就难以直接为小浪底水库运用调度提供更为全面的科学决策依据。再如，目前还缺少黄河下游过渡性及弯曲性河段河道模型，以及黄河河口模型，这就难以深化研究小浪底水库运用对这些河段的影响等问题。

(2)模型功能不全 难以满足“三条黄河”互动要求。现有模型多是根据某一项目重点研究内容的试验要求而设计的，其模拟功能相对较少或相对单一，缺乏对综合性功能需求的考虑。例如，现有的土壤侵蚀模型为小型的坡面土槽，不具备研究沟道治理方案的功能，甚至还不具有对坡面工程措施方案进行优化研究的功能；还有，原设计的小浪底库区模型，还难以有效地模拟水库降水冲刷产生的库区河床剧烈变形等过程。由此，也就难以完全满足“三条黄河”联动的需要。

(3)已有的模型试验厅扩展性不强，测控系统不完善，量测技术相对落后。

由于原来没有把模型试验工作提升到“模型黄河”工程的高度，没有把模型试验的科技平台建设纳入到黄河建设的大体系中，实体模型多是由单一、个体的项目组结合试验任务建设的，模型试验厅也都是按相应的模型而建设的。因此，模型试验厅的扩展性往往很有限，不便于改布其他模型。另外，项目组对测控系统建设也多缺乏长远的整体考虑，难以实现高度的现代化。同时，尽管现有的量测仪器不适应黄河高含沙水流模型试验要求，但试验项目组也常常因经费不足而无力开发。因此，现有的黄河实体模型测控技术还相对落后，科技含量还不高，含沙量、地形、河势、流速等物理参数的测验自动化水平还较低。同时，管理水平也有待提高。

另外，正是由于以往在开展黄河模型试验研究中，缺乏统筹规划，对黄河问题试验研究的长远性考虑不够，没有形成系统的“模型黄河”，从而使一些模拟技术的研究也受到了一定的限制，在一定程度上制约了黄河实体模型模拟理论及技术的发展。例如，虽然对黄河水库、河道模拟的技术相对成熟，但是对岸坡或滩沿等重力侵蚀的模拟仍缺乏成熟的理论和方法，还存在局部变形的相似性不高等问题；水流运动时间比尺与河床变形时间比尺相协调的理论问题还没有解决；对黄河河口及黄土高原的模拟问题还缺乏研究等。通过“模型黄河”工程建设，对于促进黄河实体模型模拟理论及技术的研究和发展亦有重要的作用。

### 3 “模型黄河”工程建设的必要性

认识自然才能改造自然，才能在使自然满足人类发展的同时更好地实现人与自然和谐相处。认识自然离不开生产实践和科学试验。对于水少沙多的黄河，其自然规律具有特殊性和复杂性，面对新世纪治黄形势的要求，科学试验有其不可替代的作用。“模型黄河”工程可以系统地反映影响黄河变化的各种因素和它们相互之间的关系，能够将一些抽象的现象展现在人们面前甚至可以量化，能够直观反映各种不同治理方案的结果。因此，建设“模型黄河”工程是现代治黄和科技治黄的必然选择。

### 3.1 解决治黄重大实践问题的要求

黄河存在的洪水威胁严重、水资源供需矛盾尖锐、水土流失和水环境恶化等三大突出问题，使得黄河治理开发的任务极为艰巨和重大。我国制定的 21 世纪可持续发展议程和实施西部大开发的重大战略决策，也为黄河的治理开发提出了更高的要求。黄河的治理开发对于黄河流域社会、经济的可持续快速发展，将起着愈来愈重要的保障作用。

面对新世纪国家社会、经济发展对黄河治理的要求，《黄河近期重点治理开发规划》明确提出了 2001~2010 年十年的治理开发目标。为实现其目标，需要解决一系列的应用基础及关键技术问题，例如，黄土高原多沙粗沙区小流域侵蚀产沙规律、坝系“相对平衡”机制及关键技术、水土保持措施体系配置及治理方案优化等；小浪底水库运用方式、三门峡水库运用方式及其库区治理方案优化，利用水库体系联合运用进行调控水沙的机制与关键技术、小浪底水库等大型水利工程运用对黄河下游河床演变的影响、黄河下游游荡性河道整治技术及方案等、河口演变规律及综合治理方案等。通过“模型黄河”工程建设，可以为这些问题的研究和解决搭建有效的科学试验研究平台，从而提高治黄现代化的科技水平。

因此，建设“模型黄河”工程是解决治黄生产实践重大关键技术问题和应用基础问题的要求。

### 3.2 黄河问题复杂性的研究要求

黄河因含沙量高而所具有的演变规律比世界上其他任何河流都要复杂得多，例如河床冲淤剧烈且堆积性强、河势调整迅速且摆动幅度大等。由此不仅使得对黄河规律的认识非常困难，而且，对其他一般河流的现有认识和结论大都不能直接应用于黄河，甚至现有的水动力学理论也难以适用于求解黄河的高含沙水流等问题。从研究手段上而言，鉴于黄河问题的复杂性，加上受种种条件的限制，黄河的定位观测资料难以达到系统、全面，尤其是缺乏对洪水过程的详细观测，难以对影响自然现象各要素的作用和它们之间的相互转换关系给出明晰的结果，加上原型观测的周期又较长。因此，仅靠原型观测资

料进行分析研究，对黄河的一些基本规律还难以取得深化认识，从而直接影响到治黄措施的重大决策。以往，在黄河治理开发中曾有过这方面的经验教训，例如在原建设黄河花园口、位山、王旺庄等拦河坝工程时，由于对黄河水沙条件及河床演变等自然规律缺乏深化认识，加上没有进行必要的模型试验，前期试验论证分析不够，致使工程失败，造成人力、物力的很大浪费。又如，在黄河下游河道整治初期，个别河段河道整治工程是因险而建的，前期缺乏对全河段工程规划方案的充分论证试验，加之受投资力度的限制，工程修建慢，致使工程建成后仍不能有效控制河势，流路调整难以到位等。再如一些水利工程建设，由于不符合黄河多沙河流的特点而导致工程建成后不能正常运行，有的不断改建，有的甚至失去作用。随着流域及其相关地区社会经济发展，黄河防洪、减淤、供水、灌溉、发电和生态环境保护之间的矛盾将愈来愈突出，管理与决策的多目标性将更为明显。显然，仅靠已有的理论和实践经验来决策各种重大的治理开发方案已满足不了现代治黄的要求。通过模型试验，可以有机地反映各因素之间的相互关系，并可对因素分离，定量回答在不同边界条件下各种因素的影响程度，从而与其他科学手段相结合，有效地揭示出黄河的内在规律，提高管理与决策的科学性。

数值模拟的方法在 20 世纪 60 年代以后，随着电子计算机和计算方法的飞速发展，取得了长足的进展。国内外开发出了很多数学模型，特别是国外开发出了很多有代表性的数学模型，如美国密西西比大学国家计算水科学与工程中心的 NCCHE 模型、美国陆军工程兵团的 HEC 模型、丹麦水力学研究所的 Mike 模型、荷兰的 Delft3D 模型、英国 Wallingford 水力研究所的模型等。这些模型在世界上很多国家的河口治理、河道整治、洪水预报、水污染防治等方面得到了广泛的应用，并在河流治理研究中逐渐形成了目前的以数值模拟计算为主的技术途径。与此同时，与数学模型发展相比，实体模型试验技术的发展则相对缓慢。

黄河的演变规律极其复杂，经模拟计算验证，国外开发的如 Delft3D 模型、HEC 模型、GSTAR 模型等数学模型用于黄河河床演变计算中均存在很多问题；国内已开发的数学模型也不能有效地模拟黄河河床平面摆动、河势调

整、工程局部变形及水库近坝区冲淤过程等二维及三维性较强的河床演变现象，不能完全满足治黄重大实践问题研究和治黄科技支撑的需要。

实际上，不论是以往还是现在，实体模型试验，在国内外很多工程的建设中都起着很大的作用。如早在 1875 年，为了改善法国加龙河在波尔多城附近的航运条件，法国学者法齐就制作了一个水平比尺为 100 的动床河工模型对河道疏浚措施的效果进行了试验研究。在 20 世纪初，模型试验首先在德国，随后在法、意等国都得到了比较迅速的发展。20 世纪 30 年代以后美国在清水水流模型试验方面发展相当迅速，结合密西西比河主要支流的整治和渠化，在河工模型试验方面也有显著的发展。与此同时，该模型试验在苏联也有一定的发展。自 20 世纪初以后，在德国的莱茵河和美国的密西西比河等河道治理中，在法国的塞纳河河口、英国的塞汶河口、美国的旧金山河口等河口治理中均采用了实体模型试验。目前，在国外，对于一些复杂的河流过程，尤其是对河道整治等问题，以及包括一些应用基础问题的研究仍主要依靠实体模型试验的方法，或结合其他方法进行综合研究。例如，对土壤侵蚀的研究所采用的手段仍主要为实体模型试验和野外观测试验，尤其在土壤侵蚀数学模型的研制、开发中，多是结合室内外试验观测研究进行的。再如，美国的内务部农垦局在对 RIO Grand 等河流河道整治中都开展了实体模型试验。另外，美国不少有关研究单位在研究河流水环境问题时，也开展了大量的模型试验研究，像对于鱼类生存的河流水力学问题、河流污染物扩散等问题的研究中，都借助于河工模型试验及水槽试验的方法。在研究水利工程建筑物改建的水力学问题、引水道的防冲及防护措施等问题时，也都开展了相应的河工模型试验及水槽试验，而且，有时对同一问题的研究，同时开展了数值模拟和实体模拟试验。

因此，在黄河问题研究中，目前还难以用数值模拟的方法取代实体模拟试验的方法。总之，黄河问题的复杂性和特殊性，决定了在研究黄河问题时，尤其对一些重大、复杂问题的研究，必须采取结合模型试验或以模型试验为主的综合研究手段，必须建立起能够适应于黄河问题特殊性需要的综合性的科技条件平台。

因此建设‘模型黄河’是研究黄河复杂问题的客观要求也是目前治黄科

技发展的必然。

### 3.3 “三条黄河”联动的要求

“原型黄河”是我们治理开发和管理的对象，“数字黄河”和“模型黄河”都是研究黄河的手段、工具，不是黄河治理开发的最终目的。借助于这些手段和工具可以更好地研究“原型黄河”，认识“原型黄河”。通过这种手段的联合运用，实现各种治理开发方案在“原型黄河”上技术先进、经济合理、安全有效的目标。也就是说，为更好地建设“原型黄河”，还必须建设好另外两条黄河，即“数字黄河”和“模型黄河”。

“数字黄河”工程，可以用功能强大的系统软件和数学模型对黄河治理开发与管理的各种方案进行模拟计算和分析研究。但数学模型模拟计算的可靠度，必须靠大量的、详尽的、完整的实测资料来验证。鉴于对原型某些方面测验的资料有限，在时间上、空间上不能完全满足验证数学模型的要求，在一定程度上影响了数学模型的计算精度和推广使用，制约了数学模型的改进和提高。因而，“数字黄河”工程建设，还需要通过“模型黄河”工程的运用，为数学模型的建立和验证提供更多的物理参数，同时通过基础研究模型和动床比尺实体模型的研究，也可为数学模型的构建、控制方程的改进等提供重要的理论基础，从而促进数学模型模拟技术的提高。

“模型黄河”可对“原型黄河”所反映的自然现象进行反演、模拟和试验，从而探求和揭示“原型黄河”内在的自然规律。同时，通过模型试验还可以就人们对黄河基本理论问题的认识、判断和假设进行验证，不断提升对黄河自然规律认知水平。利用“模型黄河”，可以直观呈现黄河不同治理开发方案的作用和对河床演变、河势调整等方面的影响结果，论证方案的合理性，使决策更科学、便捷和准确。

当然，与其他科学方法一样，模型试验作为一种科学研究手段，亦有一定的局限性。因而，“模型黄河”也需要与“数字黄河”相结合。例如，对于短河段的试验，往往因模拟原型河段的末端断面缺少水位观测资料而使试验受到影响。为此，可通过数学模型演算，补充其水位参数，从而也就可以保证实体模型能够对一系列更为复杂的过程进行模拟试验。

在“三条黄河”联动的实际应用中,可首先通过对“原型黄河”的研究提出黄河治理开发与管理的各种需求;再利用“数字黄河”对黄河治理开发方案进行计算机模拟,提出若干个可能的方案或预案,同时亦可利用“模型黄河”试验直接提出黄河治理开发的重大方案或预案。然后,进一步利用“模型黄河”对提出的优化方案或预案进行试验论证,提出可行方案或预案。或者说,“模型黄河”也是“数字黄河”通过模拟分析提出“原型黄河”治理开发方案的中试“工厂”,最终将根据“模型黄河”试验所选方案或预案在“原型黄河”上实施,经过“原型黄河”实践,逐步调整、优化,以保障实施的各项治理开发方案技术先进、经济合理、安全有效。

在黄河的治理开发和管理中,“三条黄河”相互关联,互为作用,将对推动治黄现代化起到极大的作用。

## 4 “模型黄河”工程建设的可行性

### 4.1 具有模型试验的基地

目前,黄委在郑州北郊沙门拥有 320 亩(21.3hm<sup>2</sup>)试验基地。该基地已建成黄河小浪底至苏泗庄河段河道模型试验厅、小浪底库区模型试验厅和三门峡库区模型试验厅,以及相应的实体模型,基地建设尚处于初级阶段,已建工程用地不足现有土地的 50%。根据模型相似比尺设计,经规划论证,剩余土地可以满足建设“黄土高原模型”、“陶城铺至利津河段河道模型”等试验厅及基础配套设施的建设需求。

在郑州花园口还有防汛抢险试验基地 180 亩(12.0hm<sup>2</sup>)可供建设室内外的相关模型所用。山东省东营市政府对“模型黄河”工程建设很重视,明确表示将划拨 1000 亩(66.7hm<sup>2</sup>)土地供建设黄河河口模型使用,并在黄河河口模型建设中给予有关的优惠条件。另外,以黄河河口管理局河口研究所为基础,还可建设“河口模型”野外试验观测站。

对于黄土高原模型,由于其试验研究的特殊性,除需要开展室内试验研究外,还需要开展相应的野外试验观测研究。黄河上中游管理局下属的绥德、西

峰、天水水土保持科学试验站可以作为“黄土高原模型”的野外试验基地。三个试验站已建站几十年，建设有包括坡面小区、沟道侵蚀观测及小流域径流泥沙观测等在内的试验场地，这为建设“黄土高原模型”野外试验区提供了良好的条件。

因此建设“模型黄河”工程具有足够的试验基地。

#### 4.2 黄河实体模型已初具规模

目前，已建的黄河实体模型主要有小浪底库区模型、小浪底至苏泗庄河段河道模型、花园口至东坝头河段河道模型、三门峡库区模型、部分基础研究试验水槽和土壤侵蚀土槽部分人工降雨系统等。通过黄河洪水管理亚洲银行贷款项目（简称“亚行”项目）非工程措施建设子项目，还将对小浪底库区模型进行上延，建成全库区模型；将小浪底至苏泗庄河段河道模型下延至陶城铺，并初步建立起相应的测控系统。

另外，在天水、绥德、西峰三个水土保持科学试验站，通过几十年的建设，都已初步具备了可与室内模型试验相互关联的试验场（区），这些野外定位观测试验场区将作为“模型黄河”工程的一个重要组成部分。

#### 4.3 具有模型试验的技术支撑

##### 4.3.1 模拟理论与技术条件

几十年来，黄委对黄河自然河工模型试验、气流动床模型试验及黄河河道和库区动床泥沙模型试验等相关的模拟理论和技术均先后进行了深入研究。自 1954 年开始，在室内开展了模型沙静水沉降和动水沉降试验、水流挟沙能力试验、模型沙絮凝试验、模型沙容重随时间变化过程试验、不同模型沙对模型冲淤过程影响的对比试验、模型加糙方法试验等河流模拟的有关基础性问题的研究。在河工动床模型相似原理、模拟技术、模型变率、模型沙选择、黄河高含沙洪水模型的相似律等方面，都取得了理论及技术上的突破创新，不少研究成果处于国际领先或先进水平。

国内外针对其他不同江河的治理，也开展了大量的河流实体模型试验研究工作。20 世纪 30 年代，H·恩格斯第一个进行黄河模型试验，50 年代爱因

斯坦、钱宁提出了动床泥沙模型律。与此同时 皮卡洛夫 Ф·И·李昌华等人也分别提出了各自的动床泥沙模型律，尽管这些模拟理论和技术多是针对少沙河流定床或动床模型试验条件下提出的，并不能完全适用于黄河实体模型的设计和试验 但这些成果同样对“模型黄河”的建设具有很大的参考价值。

关于土壤侵蚀人工降雨的模拟技术和方法，国外从 20 世纪 30 年代已开展研究 我国在 20 世纪 50 年代也开始引进和研究，目前在室内人工降雨模拟方面，已经可以实现自动化调控。

对于黄河河口实体模型的设计问题，我国已先后开展了长江口模型、钱塘江口模型及珠江河口模型等试验研究工作，国外也曾开展了圣劳伦斯河口、旧金山湾等河口治理的模型试验研究。这些河口模型的设计理论和模拟方法可作为开展多沙动床黄河河口模型设计的重要参考。

综上所述 建设“模型黄河”工程 具有良好的技术基础条件。

#### 4.3.2 量测技术条件

实体模型的测控仪器及技术直接影响到试验成果的精度及水平的提高，是“模型黄河”工程的重要组成部分。黄委在长期的模型试验研究中，已成功研制出了适用于高含沙水流动床模型试验的进口流量自动控制系统、尾部水位自动测控系统和沿程水位自动采集系统。近年来，将模型地形测量仪研制作为主攻方向之一开展了研究。目前，已研制出了 HSTC-2 型浑水地形探测仪。为进一步提高量测精度，还依据“拐点法”原理研制出了新一代的地形探测仪，并已投入使用。除此之外，还自行研制出了自动控制的塑胶板交错式尾门。上述测控系统及量测仪器颇具特色，在黄河模型试验中发挥了很大作用。目前，正在开发适用于高含沙水流泥沙模型试验要求的流速仪等仪器。

国内外已研制出了一些相当成熟的流速仪、红外光测沙仪、NSY-II 型宽域粒度分析仪等量测仪器。目前，DPTV 技术已在河工模型试验中得到应用，可对河工模型试验中全场表面流速进行实时快速测量。在河口模型潮波模拟设备方面也有经验可借鉴，如已研制成功的空箱式、微型泵式和尾门式等不同类型的生潮设备和装置。目前这些较为成熟、先进的技术和仪器，虽大多只适用于低含沙水流河工模型试验的量测要求，但这些先进技术的原理，对于开发

和研制适用于黄河河工模型试验的技术、仪器及设备仍有着很大的参考价值。

“原型黄河”水文测验技术中所取得的丰富成果也将为“模型黄河”测控系统的研制提供重要的理论和技术基础。黄河水文测验已研制出了适应于高含沙水流水面流速测验的流速仪、浑水水深回声测深仪等。在泥沙采样方面先后进行了同位素测沙仪、光电测沙仪、振动测沙仪的研制试验等工作。无疑，这些先进的测验技术和丰富的实践经验，为“模型黄河”测控系统建设奠定了良好的技术基础。

#### 4.4 已有较丰富的模型试验经验

“模型黄河”工程建设需要有良好的智力支撑条件，需要以较强的技术力量作为科技资源保障。长期以来，结合数百项的黄河模型试验研究工作，在模型设计、制作和试验技术，包括测控技术等方面，黄委都积累了丰厚的理论和实践经验。

同时黄委也形成了一支由老、中、青结合的具有坚实理论基础和较丰富科研实践经验，创新能力强且能够解决重大科研、生产问题的科研队伍。利用“模型黄河”工程科技条件平台可进一步充分结合黄科院、黄河上中游管理局及其下属的三个水土保持科学试验站、黄河河口管理局等黄委内的科技力量，形成一支多单位协作、多学科交叉、优势互补、技术手段先进、人员结构合理的攻关队伍。

另外，以黄委科研力量为基础，与黄委以外相关单位协作形成强势的攻关队伍，聘请国内有关专家和学者进行咨询，充分吸收黄委以外专家、学者的理论和经验可以使“模型黄河”工程建设得到更为广泛的技术力量的支持。

#### 4.5 可以多渠道筹措资金

“模型黄河”工程建设目的是直接为黄河治理开发及管理提供科技服务，是直接和治黄生产实践结合的。因此，“模型黄河”工程建设除基础设施和一部分测控系统工程所需资金从基本建设资金中筹措之外，其余建设资金都可以结合具体的项目筹措。在项目建设过程中贯彻“模型黄河”工程的理念，将项目有机地纳入到“模型黄河”工程建设的主体框架中通过试验研究项目