

文章编号: 1001-8166(2006)10-0991-08

“黄河流域水资源演化规律与可再生性 维持机理 研究进展”^{*}

刘昌明^{1,2}

(1. 北京师范大学教育部水沙科学重点实验室, 北京 100875; 2 中国科学院陆地水循环与地表过程
重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要:黄河是中国第二条大河,流域面积 80 万 km²,它曾是中华民族文化的摇篮。当前在中国西部大开发中具有举足轻重的重要战略地位。但是黄河流域地处中国的半干旱与半湿润地带,流域的水资源量先天不足,流域内的人均水资源占有量很少,相当全国人均水资源占有量的 1/3。由于气候的暖干变化与人类活动的影响,过去 30 年来,黄河下游与其主要支流频繁地发生了断流,这种发展的征兆不仅加剧了脆弱的水资源供应与需求的平衡,而且给流域上、中、下游原有生态系统与环境带来更大的冲击。黄河的治理终归是涉及国家稳定和国家安全的国家大事。因此,1999 年科技部在“国家重点基础研究发展规划”中立项,启动了 5 年研究项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”。作者作为项目的首席科学家根据项目各课题已发表的近 900 篇论文与几十部专著等大量成果,简要概括了黄河水资源的基础性、技术性和应用性研究等三大方面的进展。

关键词:黄河流域; 资源演化规律; 河流水资源可再生性维持; 水资源管理; 黄河治理
中图分类号: P33 **文献标识码:** A

黄河在众多国际河流中是一条非常特殊的大河: 以年平均不到 2 000 m³/s 的流量,流长达到 5 400 km,为世界所罕有; 发源于海拔 5 km 以上的青藏高原,流经中国的三大台地,在下游平原形成世界上最长、最高的悬河; 黄河中上游流域拥有世界上最大的黄土高原,其幅员和沉积厚度是世界上独一无二的; 黄河水少沙多的特点和其高含沙量与高含沙水流在世界上极其罕见,后者可居河流之榜首; 黄河流域地处多个气候带,是东亚重要的半干旱与半湿润地带的过渡带,气候时空多变,水循环脆弱,极易受到人类活动的影响而变化; 解放后 50 多年来的治黄,修建的大中小型水库超过 10 000 座,库容大于黄河的年平均径流,显然黄河已是充分被调节的河流,这也是世界上非常少见的。

由上述黄河的几点主要特点可见研究的独特性

与复杂性。据历史资料,从大禹治水(公元前 2033 年)至今已有 4 039 年之长,但黄河的水问题还不能说已经研究清楚。特别是随着社会经济的迅猛发展,近 50 年来黄河的水循环正在发生着空前的变化,如 1972 年以来的黄河下游断流,尤其是 20 世纪 90 年代的连年断流惊憾了世界; 当今的黄河应是今非昔比。

世界上有许多的大河都有着庞大的研究计划,如欧洲人口密集的多瑙河的流域水资源管理侧重于体制研究,北美人烟稀少的育空河水资源与全球变化的研究。这些大河的研究均比黄河的水问题要容易得多。黄河水问题的研究显然具有很高的难度。科研工作黄河治理中取得新的进展,即便是一些定性的认识,也是难能可贵。国外学者对黄河研究的兴趣,包括日本的几个黄河研究项目,都能说明黄

收稿日期: 2006-07-17; 修回日期: 2006-07-24.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(编号: G19990436)资助。

作者简介: 刘昌明(1934-),男,湖南汨罗人,中国科学院院士,本项目“973”首席科学家,长期从事水文、水资源等方面的研究。

E-mail: liucm@igsnrr.ac.cn

河研究已经成为国际学术界的热点,具有前沿性。本项目立项开展研究以来已取得了比较丰富的成果,其水平与国外同行业研究水平相比,至少在水问题的复杂性和难度上应高于同类研究。黄河水问题的研究,在一定意义上讲,国内的首次研究成果也是国际之创新。

1 基础性研究方面的主要进展

1.1 气候变化与人类活动对径流的影响鉴别

水循环的变化受控于自然和人类活动两组向量。如何区分两种不同驱动因子的影响,为流域水循环调控提供科学依据是当前相关领域研究的热点和难点。本研究根据实测资料,综合应用各种技术和方法,定量分析了气候变化和人类活动对黄河流域水循环变化的影响,得出了一些创新性的认识:黄河上游实际来水量减少,主要是气候变化的影响,兰州以上气候的影响作用占 75%;黄河中游人类活动的影响明显加大,约占 57%,已大于气候因素的影响。黄河花园口以下,主要是人类活动影响导致年径流量的减少^[1,2]。

1.2 水资源可再生性概念的提出

对水资源可再生性的内涵、基本特征、概念模型、理论框架等进行了深入细致的探讨,认为水资源可再生是由自然再生、社会再生、水质恢复和水量再生四种类型构成的复杂耦合系统。构建了水资源可再生性评价指标体系。对水资源可再生性综合评价的理论依据、运用条件和过程,做了较深入的研究,提出了水资源可再生性维持阈值的概念,形成了较完整的水资源可再生性的理论体系^[3]。

1.3 黄河下游功能性断流和河流健康

提出了以年内断流天数、年最大断流河长和年总断流河长等指标来综合判定断流严重程度的定量方法和功能性断流的概念及其量化判定方法。以不同的时间尺度,详尽地分析了 20 世纪 50 年代以来黄河功能性断流情况,揭示了黄河功能性断流与零流量断流之间的关系,揭示了河流功能性断流的特征与机理^[4]。同时按流量分级统计的结果,结合功能性断流表征因子,构建了反映黄河下游河流健康状况的指标。功能性断流概念和研究方法的提出,使得黄河断流的研究能够从维持河流系统健康的角度出发,科学地考虑河流系统的功能要求,在黄河断流的认识水平上取得了突破,也使得缓减断流的对策更加切实可行。

1.4 水资源全要素、层次化动态评价方法

在分析水资源内涵及其特征的基础上,提出了水资源评价的三大基本准则,以及基于准则的水资源的层次化评价口径,从而对不同赋存形态有效水分在资源层面进行了有效界定与统一。评价方法以流域水循环为基础,通过对循环过程中水分有效和无效的判断来评价水分是否具有资源属性,同时依据与社会经济系统密切程度进行分级评价,进行广义水资源、狭义水资源和国民经济可利用量的界定,并给出了一套有效的计算方法^[5],其评价结果不仅可以客观体现全部“真实”资源量,而且有益于人工调控,是对传统水资源评价方法的革命性发展。

1.5 黄河河道水污染机理与多泥沙河流水质评价方法

查明了近半个世纪来黄河水中主要离子组分的演化特征(水质浓化趋势——轻度咸趋势)及其与黄河流域灌溉农业发展的关系;论述了黄河下游河段水质恶化程度与河道断流频度的关系;研究了径流变化、溶质变化与污染控制的关系;从机理上揭示了水—沙相互作用对黄河耗氧有机物水质参数(COD、高锰酸盐指数和 BOD)的影响,研究提出了适应多泥沙河流特点的耗氧有机物污染程度的 BOD 监测方法和 COD 评价方法^[6],填补了黄河水资源研究中的空白。

1.6 资源水—灾害水—生态水“三水”转化结构及其优化

针对水资源在河流系统中的不同服务目标,结合研究区域的实际情况,将水量划分为生态环境水、资源水和灾害水 3 个组成部分,提出了水资源转化结构的概念和确定方法^[7],以反映河流系统功能的动态变化。其中资源水包括潜在资源水和消耗资源水两个亚组分。计算了黄河下游 1950—2001 年逐年的三类水量,探讨了 50 多年来黄河下游水资源转化结构的变化规律,揭示出生态环境水不足是黄河下游河流系统功能以及河流健康状况呈现不利变化的重要原因。以优化水资源转化结构为目标,建立了多目标优化模型,突破了以往水资源优化研究中只进行总量优化的传统做法,并从理论上针对不同情景水文年下水资源的优化配置及相应水资源转化结构的变化规律进行了研究。

1.7 萎缩性河道演变机理和“小水大灾”效应

河道萎缩是河道排洪输沙功能衰退的一种河床演变过程,其主要反映是河槽过流能力降低、同流量下水位不断抬升,形成“小水大灾”等灾害效应。实

体模型试验和原型资料的研究结果表明,在一定的河床边界条件下,其萎缩的模式与水沙条件和河段的河型有关。当来流量为漫滩洪水且含沙量较高的情况下,为“滩槽并淤”模式。在这一模式下河槽过水面积逐步减小,过洪能力下降,一遇“洪水”就可形成河道水位较大幅度的抬高。当来流量未漫滩且含沙量较高时,形成“集中淤槽”模式。对于“集中淤槽”模式,由于主河槽输沙能力的下降,其灾害性更为严重。研究指出,若长期缺乏大流量洪水过程,其泄洪输沙能力会发生累积性降低,河道萎缩将进一步加剧,当河道萎缩至一定程度后,即使发生小流量洪水过程,也会形成漫滩成灾现象,从而产生“小水大灾”效应^[8]。

1.8 人类活动条件下水沙变异规律

通过对黄河流域系统下游沉积带的研究,确定了 5 ka BP 以来黄河下游的 4 次突变现象,其发生年代分别为 5 ka BP 左右、2.3 ka BP 左右、公元 7~10 世纪和公元 19 世纪中叶,但只有第一次突变是自然因素的变化造成的,后三次都是由人类活动引起的。建立了环境要素和人类活动对水沙变异影响的定量关系。研究表明,自 20 世纪 70 年代以来,降雨减水减沙作用不断减小,随着水土保持措施的提高,人类活动减水减沙所占比重不断增大。定量分析给出了黄河中游河口镇—潼关区间是影响流域产沙的环境要素复合临界^[9],相应的单个环境要素的复合临界分别为:悬移质泥沙中值粒径 d_{50} 为 0.067 mm,干流平均比降 G_i 为 6.37‰,降雨量 P 为 447.45 mm。用流域系统中产流产沙系统与泥沙输移子系统、泥沙沉积子系统耦合关系的概念,对黄河干流高含沙水流的形成机理进行了研究。流域因素是黄河下游高含沙水流形成的决定因素,不同来源的水沙对干流高含水流的形成有决定性的影响,来自中游多沙粗沙区的水沙在很大程度上决定了高含水流的发生,而来自河口镇以上清水区的径流则有很强的稀释作用,可以减少下游高含沙水流发生的机遇。

1.9 黄河流域地下水系统的新划分

地下水系统的划分是正确评价和合理开发利用地下水资源的基础。本研究将黄河流域地下水划分为 5 种基本类型:松散岩类孔隙水;碎屑岩类裂隙孔隙水;碳酸盐岩类裂隙岩溶水;岩浆岩和变质岩类裂隙水;多年冻结层水。将黄河流域地下水划分为 9 个一级地下水系统、32 个地下水子系统。该地下水系统划分较之以往的研究工作成果主要不同点在于进一步查清了流域地下水的埋藏、分

布和形成条件。根据流域水分布特点、地表水和地下水循环交替情况,以及地质构造、水文地质条件等对全流域进行了地下水系统分区^[10]。首次在黄河上游的青海省共和盆地内查明了地下水分水岭与地表水分水岭的不一致性。查明在鄂尔多斯高原北部的地表水内流区内,存在深部和浅部两个地下水循环系统。确定了黄河下游地上悬河段黄河水对地下水补给影响宽度。确定黄河流域地下水系统总面积为 $82.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

1.10 水资源临界调控理论

将界壳论、控制论、协同论、耗散结构理论有机结合,建立了水资源临界调控理论,为水资源系统分析提供了一种新思路和新方法^[11]。提出水资源系统的有序度及有序度熵,并将其应用于临界调控,开创了水资源系统分析的新途径。以可持续发展和水资源可再生性理论为指导,分析了流域水资源多维临界调控的目标和特征,提出了流域水资源多维临界调控评价的概念和由水资源利用效果、发展可持续性水平、调控风险和综合评价组成的流域水资源多维临界调控方案评价的理论框架。建立了由水资源可再生性指标群、水资源与社会经济生态环境协调性指标群和风险因素指标群组成的基于风险的流域水资源多维调控评价指标体系。

2 科学技术系统方面的主要进展

2.1 黄河流域分布式水文模拟系统

分布式水文模型已成为当前联系地球系统“陆地—大气—海洋”相互作用的重要工具,它也是现代水文模型发展的一个趋势和方向。本项目密切跟踪国际同类研究的发展动态,在大量的国内外交流协作的基础上,充分整合各方面的优势资源开发了独具特色的分布式水文模拟系统(HMS, Hydro Informatic Modeling System)^[12]。HMS 系统以类定义为基础,构建了水文模型方法库。在方法库中封装了 40 多个水文过程模拟计算方法,涉及水文变量 400 多个;以国产组件式 GIS 软件 SuperMap 为支撑,建立了水循环信息平台,实现了 GIS 和水文模拟功能的有机集成;基于模块化结构设计,实现自定义模型的功能。HMS 系统集成了 3 种不同时空尺度的分布式水文模型,避免了单一水文模型在跨越不同时空尺度应用中所面临的水文尺度效应的难题,其联合应用可以从微观到宏观系统深入地认识流域水循环过程。这一系统性成果已达到国际同类研究的领先水平。总体上看,系统具有开放性、灵活性,

可操作性强等特点。这一系统性成果已达到国际同类研究的领先水平。

2.2 水循环要素的遥感解译和反演

建立了两种基于遥感的分布式蒸散发计算方法。通过引入湿润指数的相对变化量作为气候调节因子,利用 1982—2000 年 8 km 分辨率的 AVHRR/NDV 数据及气候数据,首次实现了全流域年地表蒸散发的估算;针对局地能量收支受地形起伏和下垫面性质不同的影响存在巨大差异这一问题,研制了起伏地形条件下辐射、气温、湿度等要素的分布式模型;将辐射平衡、气温、水汽压等系列要素分布式计算与区域蒸散发模型耦合,以蒸散发互补理论为基础,结合 NOAA-AVHRR 资料反演的地表反照率资料,实现了黄河流域实际蒸散发分布式模拟,解决了常规非均匀陆面蒸散发研究中模型参数确定的难题;应用遥感条件温度植被指数和气象湿润指数相结合的方法,计算土壤表层土壤水分状况,并确立由表层土体逐层向下的土壤水分相关模型,首次建立了大区域、连续时间段、厚层土体土壤水分遥感估算方法^[13],计算出 1982—1998 年黄河全流域 1 m 土体每 10 cm 土层土壤水分,填补了黄河流域土壤水分观测资料缺乏的空白。

2.3 流域水资源二元演化模型

基于“自然—人工”二元水循环模式,采取“分离描述”和“耦合模拟”的建模思路,建立了黄河流域水资源二元演化模型,即由流域分布式水循环模拟模型和流域集总式水资源调配模型来分别描述天然主循环与人工侧支循环的基本过程,然后通过集总式模型信息的时空离散与分布式模型信息的时空聚合来实现模型的耦合模拟,实现了对于“自然—人工”二元驱动下的流域水循环全过程的模拟和水资源演变规律的描述,能够对人类活动影响下的长系列水循环过程进行精细模拟,可作为流域水资源评价基本工具^[14]。该模型的开发成功,为我国水资源分布式动态评价提供了有效的定量工具。

2.4 流域植被—侵蚀动力学模型

在 Thomes 的耦合方程组的基础上,引入生态应力的表达项和相应的侵蚀率变化项,考虑长期、短期和瞬时生态应力项,根据应力对植被活力降低的作用程度,提出了致命应力、损伤应力、脆弱植被、驯服植被等概念,确立了植被功能强度为功能系数、植被覆盖率和植被活力三者之乘积,并从理论上探讨了流域产流产沙与植被因素之间的动力平衡关系,进一步丰富和量化了植被—侵蚀动力方程中的各种

应力^[15]。

2.5 流域生态环境需水量的理论与计算方法

系统地提出了流域生态环境需水量的概念,对流域生态环境需水量进行分类;对流域生态环境需水量的量质统一性、时空分异性、安全阈值性与兼容性及其与流域生态系统健康的关系进行系统的探讨,提出流域生态环境需水标准确定准则、评价指标与保证体系^[16],形成了较为系统地流域生态环境需水理论体系。借鉴水文学、生态学等多学科的方法,提出河流、湖泊与湿地、合口、旱地植被和城市生态环境需水量的计算方法,并构建流域生态环境需水量的整合计算模型;提出了基于生态环境需水量的流域生态水文分区指标与方法,湖泊、湿地和城市生态环境需水分类的指标标准和方法。

2.6 流域非点源污染负荷调查与估算方法

依据非点源污染产生的特征和产污规律,对黄河流域非点源污染进行了分区计算,并构建一套完整的基于 GIS 技术下分区分级技术方法体系。针对大尺度流域非点源污染负荷估算的特点,构建了黄河流域非点源污染负荷估算的二元结构模型,并对黄河流域非点源污染负荷进行了估算。首次对黄河流域非点源污染物(COD、氨氮、总氮、总磷等)污染负荷进行了匡算,分析了其时空分异规律,并研究了不同类型的非点源污染负荷(城市、农村生活、农田径流等)分布规律和特点^[17],对黄河水污染防治具有重大的实际价值。

2.7 同位素技术确定地下水的可更新能力

充分利用同位素对水循环的示踪和计时性特点,并结合其他水文地质研究手段开展地下水与黄河水的相互作用研究,查明不同河段河水、大气降水和地下水之间的转换关系,建立流域内典型地下水系统的水循环模式,进而确定地下水的循环速度并对地下水的可更新能力进行了评价^[18]。认为:与黄河有积极循环交替的地下水循环速度为:浅层地下水:64(关中盆地黄土台原区)~2400 m/a(银川平原);深层地下水:1.21(包头平原)~31.6 m/a(黄河下游);地下水的可更新时间为:浅层地下水:16(黄河影响带)~200 年(关中盆地渭北山前洪积扇区);深层地下水:409(包头承压水)~11128 年(关中盆地渭北岩溶水)。该研究对于认识流域内地下水资源的形成和时空分布规律、制订合理的地下水开发模式具有十分重要的意义。

2.8 变异条件下的地下水演化仿真

为提高地下水资源计算的精度和预测地下水动

态变化趋势,采用地下水数值模拟的方法进行了地下水资源评价,数值模拟区包括河套平原、关中盆地、天桥泉域、太原盆地、临汾盆地和黄河下游悬河段,数值模拟的范围几乎包括了黄河流域主要河谷平原区和盆地地区,数值模拟的总面积为 7.7 万 km^2 。在极其干旱年份地下水的总补给资源量为:331.73 亿 m^3 ,比多年平均值少 29.2%。但各地减少量不同,差异较大。其中,上游甘肃省和陕西省减少大于 36%,宁夏减少为 10%,其余各省基本上减少 22%~31.9%。论述和计算了各种变异条件下对黄河上游基流量和大型灌区(银川平原,内蒙古河套平原和关中盆地)地下水的影响;以及傍河取水、黄河水库修建和黄河断流等对地下水的影响^[10]。

2.9 水资源优化配置整体模型

发展基于统一整体框架的经济—水文—环境—制度综合模型是水资源优化配置模型研究必然的发展方向。基于复杂适应系统理论,提出了水资源优化配置整体模型。模型中采用了双层结构模拟系统中不同层次间的联系,并采用嵌套遗传算法求解这种高维度的非线性模型,突破了信息传递的障碍,是新的尝试^[19]。模型采用多目标系统分析,兼顾经济、水文、环境生态、制度管理等多重目标优化,完善了水资源优化配置模型。

2.10 水资源多维临界调控控制论模型体系

应用临界调控理论,建立了既有一定理论特色、又具有实用价值的水资源多维临界调控控制论模型体系^[20],即:控制者模型与被控制对象模型相结合模型。

将多属性效用理论、理想点的概念和人工神经网络原理有机结合,建立了多维临界调控方案水资源利用效果评价的人工神经网络模型。提出调控方案可持续发展水平量化评价的可承载、有发展和可持续发展的准则,在此基础上,提出了调控方案可持续发展水平评价的模糊数学方法;针对黄河流域水资源多维调控的风险特征,将蒙特卡罗随机模拟和人工神经网络模拟技术结合,建立了可进行多因素和多目标风险分析的蒙特卡罗—人工神经网络模型。

3 研究成果的应用方面

3.1 全流域水循环气象动力因子空间扩展技术开发

以地理信息系统为数据处理平台,以 1 km × 1 km 分辨率 DEM 数据作为地形的综合反映,结合晴空指数,对复杂地形下黄河流域总辐射分布进行了

模拟,并建立了黄河流域月平均气温及水汽压的空间扩展模型,实现了全流域辐射平衡的空间扩展。采用自主建立模型的计算结果或原始资料汇总统计结果插值的方法,生成了黄河流域天文辐射、日照时间、总辐射量、有效辐射量、辐射平衡量、实际日照时间、日照百分率、最大降水量、最小降水量、平均降水量、平均温度、平均最高温度、平均最低温度、蒸发皿蒸发量、地表反照率、潜在蒸散、实际蒸散、干燥指数、土壤湿度、径流深、降水量变差系数、降水概率等要素 260 余幅空间分布图,出版了“黄河流域气象水文学要素图集”^[21]。

3.2 黄河流域水资源评价计算的新结果

对黄河流域地表水、地下水资源进行了系统评价,不仅给出了基于历史下垫面和历史取水实际情况的系列水资源量实际值,更为重要的是,究利用模型优势评价出了传统方法难以得到的现状下垫面条件下的天然水资源量,对于今后水资源规划有重要的现实意义。此外,通过水循环要素的模拟,给出了流域包括地表截流水资源量和土壤水资源量在内的有效降水利用量,首次提出了黄河流域广义水资源量评价系列成果。

3.3 黄河流域地下水资源计算评价的新成果

对黄河流域地下水补给资源量和可开采资源量进行了计算和评价,分别按地下水系统和行政区划的两种计算方案,给出了 50%、75% 和 95% 降雨保证率下黄河流域地下水补给资源量和可采资源量。同时统计与计算了黄河流域地市级行政区地下水资源开采现状及开采潜力;按照各地市级行政区,预测了 2010 年与 2020 年 50%、75% 和 95% 降雨保证率下工业、农业和生活的需水量,进行了供需平衡分析。在获得的大量数据和资料基础上,编制了黄河流域地下水循环图,明确了黄河流域地下水资源的构成体系,反映了黄河流域地下水与地表水之间的水循环规律和流域内不同地段地下水对黄河水的贡献程度。

3.4 黄河下游河道动力平衡临界阈值与综合治理措施

根据多系统互动泥沙数学模型的计算结果给出了黄河下游河道冲淤平衡的临界阈值。以含沙量作为黄河下游河道冲淤平衡临界阈值的判别指标,临界含沙量为 21 kg/m^3 ;以水沙组合作为判别指标,小浪底年出库的临界水量/沙量(亿 m^3 /亿 t)组合有:407/9.2、350/7.7、305/6.45、256/5.17、204/3.88。计算表明,在小浪底水库运用之后,对于 1965—1975

年水沙系列来说,如果上游来沙量变化不大,而来水量减少 30%~40%,将是黄河下游河道发生萎缩变化的一个外因;随着流域上游同步减水减沙比的加大,河道依然是从溯源淤积向沿程淤积转化,临界阈值在 60%~70%之间。研究还指出就 1934—1985 年间平均水沙条件而言,堤距 6~10 km 是最不利于减小河床淤积速率的。根据黄河下游的新特点,提出黄河下游可以通过加强枯水河槽整治、滩区人工放淤和二级堤防建设等工程措施,同时结合河口地区的综合治理来逐步形成较为完善的排洪输沙体系,实现“宽河固堤”和“束水攻沙”治黄方略的有机统一,从而有效地减缓或消除黄河下游河道萎缩。

3.5 黄河口水沙变异及其治理措施

研究结果表明,入海泥沙通量与降水之间具有正相关关系,而与水土保持面积和人类引水量之间具有负相关关系。目前,黄河口来水来沙量过程发生变异,水量的急剧减少已导致尾间河道严重萎缩、河口延伸造陆速度减缓、岸线蚀退突出以及湿地大幅度减少,从而严重影响河口地区的生态环境。对黄河口综合治理的研究成果表明,通过河口尾间河道整治、河口拦门沙疏浚、充分利用海洋动力、现有清水沟流路几个分叉的交替使用等措施可保证目前河口流路长期使用。如果采用引海水冲刷黄河下游尾间河槽,同时配合小浪底水库的调度运用,将有利于延长河口流路的使用寿命,对减缓黄河下游河床抬高也是十分有利的。

3.6 黄河上游大型水利枢纽联合运用对下游河道的减淤作用

黄河上游大型水利枢纽的运用会显著地改变黄河下游的水沙过程,特别是在水库运用初期,下泄水流含沙量显著降低,对减轻黄河下游河道泥沙淤积,遏制河床抬高具有明显作用。采用泥沙数学模型对四个水沙系列和大型水库的不同联合运用条件下,黄河下游河道未来 80 年的泥沙冲淤进行了 20 个方案计算,给出了冲淤过程线、冲淤总量、减淤效果、不淤年限等特征值。根据 20 个方案的计算成果以及 1961 年以来实测黄河下游实测资料,建立了黄河下游河道泥沙冲淤量与小浪底站含沙量之间的关系,指出为实现“河床不抬高”的目标,在具体措施上,近期,可以通过小浪底水库的运用,将年均出库含沙量控制在 21 kg/m^3 左右,从而可以保持黄河下游河道不抬高,甚至处于冲刷状态。中期,当小浪底水库逐渐失去调水调沙功能的时候,规划中的古贤或碛口水库可以投入运用,控制小浪底出库含沙量在 21

kg/m^3 左右,实现黄河下游河床在一个相当长的时间内不抬升。远期,在多沙粗沙区实行坚持不懈的水土保持工作是最根本的办法。

3.7 三门峡水库运用方式与降低潼关高程

潼关高程对渭河关中盆地的生态环境问题有重大影响,包括泥沙与污染等问题。该研究结果表明,三门峡水库采用全年敞泄运用时,在平水系列和枯水条件下潼关高程分别可以下降 1.64 m 和 1.09 m;当三门峡水库采用汛期敞泄以及非汛期控制 318 m、315 m 和 310 m 水位运用时,在平水和枯水系列条件下潼关高程分别可以下降 1.37~1.60 m 和 0.79~1.01 m;当三门峡水库汛期流量大于 $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ 采用 305 m 控制运用以及非汛期控制 318 m、315 m 和 310 m 水位运用时,在平水和枯水系列条件下潼关高程分别可以下降 1.27~1.49 m 和 0.70~0.88 m。此外,水库不同运用方式下降低潼关高程的过程是不同的,在来水来沙条件相同的情况下,一般经过 4~8 年后潼关高程可以达到稳定降低的状态,其中全年敞泄时约需 4 年,非汛期控制水位在 318 m 时约需 8 年,非汛期控制水位在 315 m 时约需 6 年。

3.8 黄河全流域水资源自适应水量调度

黄河流域水资源可再生维持的水量调度与干流大型水库联合调度运用研究,首次实现了黄河全流域水资源的统一调度分配,不仅将现行水量调度方案编制实现计算机控制实现,而且应用自适应理论和基于复杂适应系统的水资源优化配置理论,建立水资源自适应分配模型和优化分配模型,为黄河流域水量分配提供了新的、更为完善的手段。建立的黄河水量调度系统可根据用户的需求编制现行法年月旬调度方案、自适应调度方案以及经济优化调度方案;系统应用现代化计算机手段,建立了黄河全流域的三维仿真模型、骨干水库调控的三维仿真模型,模拟了黄河流域重点河段的流量演进过程。这是国内首次在黄河这样的大流域上实现全流域的水量调度和仿真模拟,在理论、方法和技术上都具有创新意义。

3.9 黄河流域水资源多维临界调控方案集

结合黄河治理的重大问题,分析了调控手段的变量因素,考虑已建、在建和规划的工程建设的可行性、解决性等因素,提出了多种有效的调控手段,通过调控手段有机组合设置 2010—2050 水平年黄河流域多维临界调控方案集。完成了黄河流域 2010、2020、2030 和 2050 水平年 83 个方案的调试和计

算,为维持黄河健康生命和黄河流域的可持续发展提出了一套水资源利用和管理对策措施;提出了黄河流域近期(2010年)、中期(2020年)、远期(2030年)和远景(2050年)4个规划研究水平年的水资源需求;确定了黄河流域水资源多维临界调控方案评价的指标体系及指标计算方法、主要调控风险因素及其分布、可持续发展水平评价指标的隶属函数。对2010年、2020年、2030年和2050年水平黄河流域79个多维临界调控方案进行了评价,推荐了不同水平年优先采用的水资源多维调控方案,为黄河流域水资源的可持续利用及其经济社会可持续发展决策提供了有价值的参考依据。

3.10 黄河流域水资源可再生性维持的科学对策

运用多维临界调控模型体系分析计算和评价的结果,提出了一套基于现有调控模式的具有突破性、创新性的调控模式和水资源可持续利用的科学对策:提高节水意识,实施强化节水,建设节水型社会;大力推行清洁生产,建设高效防污工矿企业,加强污水资源化利用,以可持续发展战略指导黄河流域开发;实施南水北调工程等大型跨流域调水工程,兴建蓄引提供水工程,是支持黄河流域21世纪可持续发展的根本措施;建立多部门协调机制,加强黄河流域生态环境保护与建设,保障水资源可持续利用和社会经济可持续发展;加强黄河流域水资源合理配置与调控,提高黄河流域水资源管理水平,确保黄河水资源可持续利用得以实施;以流域为单元,加强水资源统一规划和管理;加强黄河流域水资源管理体制与政策建设和研究;实行黄河水资源有偿使用制度,加强经济手段在黄河水资源配置中的调控作用;切实加强黄河流域水资源可持续利用科学对策实施的保障措施建设;考虑社会经济发展和生态环境逐步改善要求,逐步加大采用多维集成化调控对策与措施力度,确保黄河流域水资源可持续利用的有效实施。

4 结 语

经过5年的研究圆满地完成了项目计划书确定的研究任务,在基础性、技术性和应用性的3个方面取得了创新成果,为黄河治理与西线南水北调工程提供了实施依据;撰写并发表学术论文近900篇,其中国内正式核心刊物近700篇,国际SC I检索论文100多篇,EI论文100多篇,编写图书数十部。在项目实施中一大批青年科技骨干得到了锻炼,科研业务能力明显提高,从申请立项到结题不到五年中,有

78人晋升了高级技术职称,其中41位晋升为教授或研究员。同时,吸收了37名博士后、培养了127名博士生、149名硕士生参与本项目的研究工作,其中37位博士后出站、78人获博士学位、78人获硕士学位。项目研究为水科学的发展提供了新的增长点,促进了实验室建设,提高实验室设备水平,分别与美国、加拿大、荷兰、英国和澳大利亚等国家交流合作及人才培养,成功的举办了两次香山会议,产生了积极的社会影响。

参考文献 (References):

- [1] Liu C, Zheng H. Changes of hydrological cycle elements of second half 20 century in the Yellow River basin [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(12): 2337-2345.
- [2] Liu Changming, Zhang Xuecheng. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 323-330. [刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析 [J]. 地理学报, 2004, 59(3): 323-330.]
- [3] Yang Zhifeng, Shen Zhenyao, Li Chunhui, et al. The Basic Theory and Assessment of Water Resources in the Yellow River Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2005. [杨志峰,沈珍瑶,李春晖,等. 黄河流域水资源可再生性基本理论与评价 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2005.]
- [4] Ni Jinren, Qian Zhenghan. Functional no-flow events and their identification in the Lower Yellow River [J]. *Science in China (Series E)*, 2002, 45(5): 449-457.
- [5] Wang Hao, Wang Jianhua, Qin Dayong. Research advances and direction on the theory and practice of reasonable water resources allocation [J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(1): 123-128. [王浩,王建华,秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向 [J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 123-128.]
- [6] Chen Jingsheng, He Dawei. The response of river water quality and quantity to the development of irrigated agriculture in the last four decades in the Yellow River Basin, China [J]. *Water Resource Research*, 2003, 39(3): 1047-1057.
- [7] Ni Jinren, Wang Yudong, Qian Zhenghan, et al. On the variation of water resources conversion structure in the Lower Yellow River [J]. *Science in China (Series E)*, 2004, 34(suppl D): 103-116.
- [8] Yao Wenyi, Li Wenxue, Hou Zhijun, et al. Channel shrinkage and its disaster-causing mechanism in the Lower Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 257-264. [姚文艺,李文学,侯志军,等. 黄河下游河道萎缩致灾机理探讨 [J]. 水利学报, 2005, 36(3): 257-264.]
- [9] Hu Chunhong, Guo Qingchao, Chen Jianguo. Research on debase the height of Tongguan [J]. *Journal of China Institute of Water Respires and Hydropower Research*, 2003, 1(1): 30-35. [胡春宏,郭庆超,陈建国. 降低潼关高程途径的研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(1): 30-35.]
- [10] Lin Xueyu, Wang Jinseng. The Groundwater Resources and Its Renewability [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006: 297. [林学钰,王金生. 黄河流域地下水资源及其可更新能力研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社, 2006: 297.]
- [11] Dong Chunsheng, Liu Junping, Huang Qiang, et al. Jieke analysis of river basin water resources management system [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(1): 21-25. [佟春生,刘俊萍,黄强,等. 流域水资源管理体制的界壳分析 [J]. 灌溉排水

- 学报, 2004, 23(1): 21-25.]
- [12] Liu Changning, Zheng Hongxing, Wang Zhonggen, *et al* Distributed Simulation of Catchment Water Cycle [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006. [刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 流域水循环分布式模拟 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.]
- [13] Yang Shengtian, Liu Changning The soil water remote sensing computations and analyses of water cycle in the Yellow River Basin [J]. *Science in China (Series E)*, 2004, 34 (suppl): 1-12. [杨胜天, 刘昌明. 黄河流域土壤水分遥感计算及水循环过程分析 [J]. 中国科学: E辑, 2004, 34 (增刊): 1-12.]
- [14] Wang Hao, Qin Dayong, Wang Jianhua The advance of the modeling on the water cycling progress in the multi-scale region and dual water cycling model [C] Liu Changning, Chen Xiaoguo, eds The Evolving Law and Maintaining Mechanism of Renewable Ability of Water Resources in Yellow River Basin Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2001, 4: 34-42. [王浩, 秦大庸, 王建华. 多尺度区域水循环过程模拟与二元水循环模式的研究 [C] 刘昌明, 陈效国主编. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2001, 4: 34-42.]
- [15] Wang Zhaoyin, Wang Guangqian, Gao Qing An ecological dynamics model of vegetation evolution in erosion area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 98-105. [王兆印, 王光谦, 高菁. 侵蚀地区植被生态动力学模型 [J]. 生态学报, 2003, 23(1): 98-105.]
- [16] Yang Zhifeng, Cui Baoshan, Liu Jingling The Theory, Methods and Practices of Eco-environmental Water Needed [M]. Beijing: Science Press, 2003. [杨志峰, 崔保山, 刘静玲. 生态环境需水量理论、方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [17] Hao Fanghua, Zhang Xuesong, Yang Zhifeng A distributed non-point source pollution model: Calibration and validation in the Yellow river basin [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(4): 646-650.
- [18] Su Xiaosi, Lin Xueyu, Liao Zisheng, *et al* Variation of isotopes in the Yellow River along the flow path and its affecting factors [J]. *Geochimica*, 2003, 32(3): 349-357. [苏小四, 林学钰, 廖资生, 等. 黄河水 ^{18}O , D 和 ^3H 的沿程变化特征及其影响因素研究 [J]. 地球化学, 2003, 32(3): 349-357.]
- [19] Chang Jianxia, Huang Qiang, Wang Yin. Synergy methodology for multi-objective operational control of reservoirs in Yellow River basin [J]. *Science in China (Series E)*, 2004, 47(21): 212-223.
- [20] Xue Xiaojie, Huang Qiang, Hui Yanghe, *et al* Water requirement prediction of Yellow river basin based on RBNN and EGA [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(3): 83-85. [薛小杰, 黄强, 惠泱河, 等. 基于径向基函数神经网络与改进遗传算法的黄河流域需水预测 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 83-85.]
- [21] Liu Changning, Zeng Yan Atlas of Meteorological-Hydrological Elements in the Yellow River Basin [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2004. [刘昌明, 曾燕. 黄河流域气象水文学要素图集 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.]

A Study of Evolutionary Laws and Maintaining Mechanism of Renewable Capacity of the Yellow River's Water Resources

LU Changning^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Water and Sediment Science, MOE, at Water Science College, BNU, Beijing 100875, China;
2. Key Laboratory of Land Water Cycle and Surface Processes, CAS, at IGSNRR, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The Yellow River is China's second largest river with a drainage area of about 800,000 km² and it has been seen as a cradle of Chinese civilization. Now it serves as one of the main theatres for the on-going national campaign to develop the western hinterland of the country. The river basin lies mainly in the semi-arid and semi-humid climatic zones where water resources are congenitally deficient. Per capita water volume in the basin is less 1/3 than that of national average. Due to the impact of both warm-dry scenarios of climate and human activities, frequent dried-up of its lower reach main-courses and main tributaries have occurred in the last 30 years. The omnious development not only aggravates the fragile balance of water demand and water supply in the-basin, but also brings in more impacts on the native eco-system and the environment along the river's reaches. The river's harnessing used to be a state affair of vital importance for a national stability in terms of national security. Since 1999, the Ministry of Science and Technology of China has set up a five-year project in the National Development Program for Key Basic Science Research, as is called "973 Program". The author of this paper, as chief scientist of the project, summarized major research outcomes on the basis of about 800 papers and tens of monographs published recently. A stack of the research achievements from the project can be recapitulated by three kinds of the highlights, namely progresses in theory, technology and application to the Yellow river.

Key words: The Yellow river; Water resources evolutionary law; Renewable capacity maintenance of river water; Water resources management; River harnessing