

新形势下黄河水沙调控策略研究

胡春宏^{1,2}, 张双虎^{1,2*}, 张晓明^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 黄河水沙调控对保障黄河长久安澜至关重要。近几十年来, 受自然因素和水土保持等人类活动的双重影响, 黄河来水来沙量持续发生变化, 水资源量略有减少、来沙量锐减, 为此, 科学研判未来黄河来水来沙量是制定水沙调控策略最基础、最关键的科学问题。本文分析了 1919—2020 年百年尺度下的黄河来水来沙量的演变情况, 并预测了未来 50 年的黄河来水来沙量; 系统总结了目前黄河水沙调控面临的主要问题, 即黄河上游河道淤积萎缩、黄河下游滩区治理策略与高质量发展要求不适应、黄土高原水土流失治理区域不均衡等。在此基础上, 提出了新水沙条件下的黄河水沙调控策略建议, 一是以黄河上游黑山峡河段开发和古贤水利枢纽建设为重点, 完善水沙调控体系; 二是黄河下游滩区分区治理、改造河道并释放部分滩区, 实现滩区防洪运用与高质量发展的协同; 三是科学开展黄土高原分区分类水土保持措施, 调整黄土高原治理格局, 协同推进生态保护和乡村振兴。

关键词: 黄河; 新水沙条件; 水沙调控; 水利枢纽; 分区治理; 生态保护

中图分类号: TV882.1 **文献标识码:** A

Research on Water and Sediment Regulation of the Yellow River under New Situation

Hu Chunhong^{1,2}, Zhang Shuanghu^{1,2*}, Zhang Xiaoming^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China)

Abstract: Water and sediment regulation is critical for the long-term safety of the Yellow River. Influenced by both natural factors and human activities such as water and soil conservation, the amount of water and sediments of the Yellow River continues varying. The amount of water resources decreases slightly and sediments decrease sharply. A scientific prediction of the amount of sediments in the future is crucial for formulating the strategy for water and sediment regulation of the Yellow River. In this paper, we analyze the variation characteristics of the amount of water and sediments from 1919 to 2020, predict the annual sediment transport of the Yellow River in the next 50 years, and systematically summarize the main problems regarding water and sediment regulation in the Yellow River Basin such as river sedimentation atrophy in the upper reaches, incompatibility between river regulation strategies with high-quality development requirements in the lower reaches, and mismatched measures of soil and water loss control in the Loess Plateau. Three targeted strategies for water and sediment regulation under new conditions are proposed. The first is to perfect the water and sediment regulation engineering system with focus on the development of Heishanxia reach and the construction of the Guxian water conservancy project. The second is to manage regionally floodplains at the lower reaches, renovate river channels, and release a part of the floodplains. The third is to adjust soil and water conservation measures according to local nature and water

收稿日期: 2021-12-16; 修回日期: 2022-01-05

通讯作者: *张双虎, 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师, 研究方向为水利工程运行调度领域的理论与应用研究;

E-mail: zhangshh@iwhr.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“黄河流域生态保护和高质量发展战略研究”(2020-ZD-18)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

conditions.

Keywords: Yellow River; new water and sediment conditions; water and sediment regulation; hydropower-complex project; regional management; ecological protection

一、前言

黄河是我国第二大河流，是中华民族的母亲河，黄河流域在保障国家粮食安全、能源安全和生态安全等方面至关重要。黄河以占全国 2.5% 的水资源量，养育了全国 12% 的人口、灌溉了 15% 的耕地、支撑了 14% 的国内生产总值，全国 12.3% 的粮食和 55% 的煤炭均产自黄河流域。

黄河流域水少沙多、水沙关系极不协调。黄河善淤、善决、善徙，历史上曾三年两决口、百年一改道，洪涝灾害频繁，因此，为保障黄河长久安澜，须紧紧抓住水沙关系调节这一关键问题。几千年的治黄史可以说是一部水沙调控的历史。从东汉时期王景的因势利导、蓄洪滞沙，明代潘季训的筑堤束水、以水攻沙 [1,2]；到 20 世纪 60 年代的宽河固堤、蓄水拦沙、上拦下排 [3]，再到 2002 年小浪底水库建成后的调水调沙 [4]，每个时期的黄河水沙调控策略都是基于当时的水沙条件、工程条件以及对水沙规律的认知和治黄经验总结的基础上制定的。2013 年发布的《黄河流域综合规划(2012—2030 年)》是我国目前黄河水沙调控体系布局 and 关键工程规划的主要依据 [5]，据其预测，到 2030 年进入黄河的泥沙量（潼关水文站断面）将为 $9 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9$ t/a。但近年来，受气候变化和水土保持减沙、水库拦沙等强人类活动影响，黄河来沙量远低于预期，如潼关水文站 2001—2010 年实测年均输沙量为 3×10^8 t/a、2011—2020 年实测年均输沙量为 1.78×10^8 t/a [6]。另外，从我国大江大河长系列来沙量来看，总体呈显著性的减少趋势 [7]。

黄河来水来沙量是黄河水沙调控的最基础条件，对黄河未来水沙条件的预判，事关黄河治理方略和水沙调控策略的制定。目前，黄河流域水沙调控策略与未来水沙量不匹配，与黄河高质量发展要求存在明显差距。为此，本文系统分析 1919—2020 年百年尺度下的黄河流域来水来沙量演变过程，预测未来 50 年的水沙量，总结目前黄河水沙调控面临的主要问题，提出新水沙条件下黄河水沙调控的

主要策略，以期为黄河的水沙调控、生态保护和高质量发展提供支撑。

二、百年尺度下黄河水沙量演变过程及未来趋势预测

(一) 黄河来水来沙量演变过程

从 1919—2020 年百年尺度来看，黄河干流主要断面天然年径流量无显著的趋势性变化 [8]；但受人类活动影响，主要断面的实测年径流量和实测年输沙量呈减少趋势 [9]，且减少趋势通过 99% 的置信度检验。根据黄河干流主要断面水沙序列突变点分析结果可知，黄河年来水量、年输沙量序列还存在显著突变点。其中，上游头道拐断面天然年径流量在 1933 年、1990 年、2005 年发生突变，实测输沙量在 1933 年、1986 年、2005 年发生突变；中游花园口断面天然年径流量在 1933 年、1990 年、2004 年发生突变，潼关断面实测年输沙量在 1933 年、1980 年、1997 年发生突变。

20 世纪 80 年代，在制定黄河“八七”分水方案时，来水量采用的是 1919—1975 年多年平均天然径流量（利津断面为 5.8×10^{10} m³、花园口断面为 5.59×10^{10} m³），来沙量采用的是 1919—1959 年实测多年的平均输沙量（潼关断面为 1.6×10^9 t）。

根据上述水沙系列突变点分析，考虑黄河流域控制性水利枢纽建设运用和水土保持等强人类活动影响以及黄河“八七”分水方案等，将 1919—2020 年的百年时间划分为 1919—1959 年、1960—1989 年、1990—2004 年和 2005—2020 年等 4 个阶段，来分析黄河来水来沙量的演变过程，并选取 1919—1959 年系列为基准系列，将基准系列对应各断面的年均来水来沙量作为基准值。

1. 黄河上游来水来沙量变化过程

黄河上游头道拐断面天然年径流量、实测年径流量和实测年输沙量过程及不同阶段统计特征值对比情况，如图 1~图 4 所示。1919—1959 年头道拐断面多年平均天然径流量为 3.187×10^{10} m³、多

年平均实测径流量为 $2.505 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、多年平均实测输沙量为 $1.42 \times 10^8 \text{ t}$ (基准值)。与基准值相比: 1960—1989 年头道拐断面多年平均天然径流量增加了 13.1%、实测径流量减少了 1.1%、实测输沙量减少了 7.4%; 1990—2004 年头道拐断面多年平均天然径流量减少了 14.6%、实测径流量减少了 41.8%、实测输沙量减少了 74.8%; 2005—2020 年头道拐断面多年平均天然径流量增加了 7.2%、实测径流量减少了 17.5%、实测输沙量减少了 56.9%。

2. 黄河中游来水来沙量变化过程

黄河中游代表断面天然年径流量、实测年径流量和实测年输沙量过程及不同阶段统计特征值对比情况如图 5~图 8 所示。1919—1959 年黄河中游代表断面 (天然年径流量为花园口断面、实测年径流量和年输沙量为潼关断面) 多年平均天然径流量为 $5.433 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、多年平均实测径流量为 $4.258 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 、多年平均实测输沙量为 $1.6 \times 10^9 \text{ t}$ (基准值)。与基准值相比: 1960—1989 年黄河中游代表断面多年平

均天然年径流量增加了 11.2%、实测径流量减少了 8.1%、实测输沙量减少了 26.7%; 1991—2004 年黄河中游代表断面多年平均天然径流量减少了 21%、实测径流量减少了 45.4%、实测输沙量减少了 59%; 2005—2020 年黄河中游代表断面多年平均天然径流量减少了 5.6%、实测径流量减少了 35.4%、多年平均实测输沙量减少了 88%。

从百年尺度来看, 黄河天然年径流量呈现出明显的丰枯交替变化规律, 而实测年输沙量呈显著的趋势性减少。① 1960—1989 年与 1919—1959 年相比, 黄河进入“多水少沙”阶段。黄河上游、中游代表断面年均天然径流量分别增加了 13.1%、11.2%, 年均实测输沙量却分别减少了 7.4%、26.7%。该阶段黄河来沙减少, 主要受益于新中国成立后大规模的黄土高原水土流失治理, 显著减少了进入黄河的泥沙。② 1990—2004 年与 1960—1989 年相比, 黄河进入“少水少沙”阶段。黄河上游、中游代表断面年均天然径流量分别减

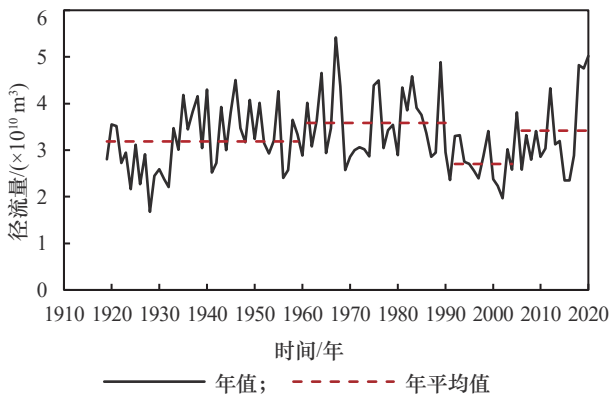


图 1 头道拐断面天然年径流量 (1919—2020 年)

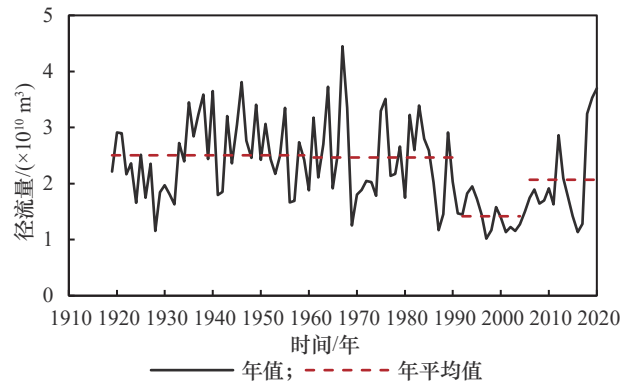


图 2 头道拐断面实测年径流量 (1919—2020 年)

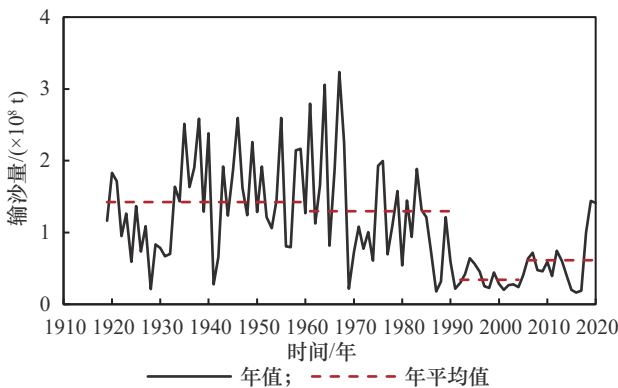


图 3 头道拐断面实测年输沙量 (1919—2020 年)

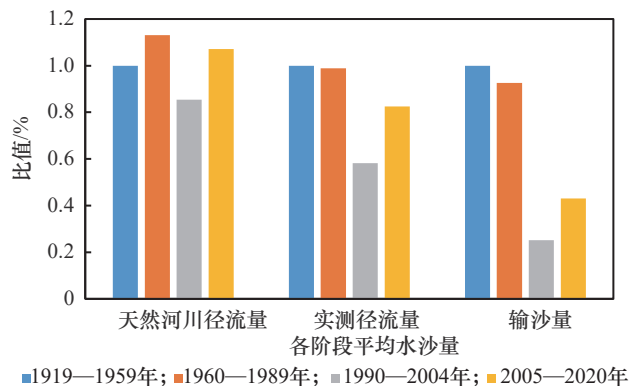


图 4 头道拐断面各阶段年平均水沙量与基准值的比值

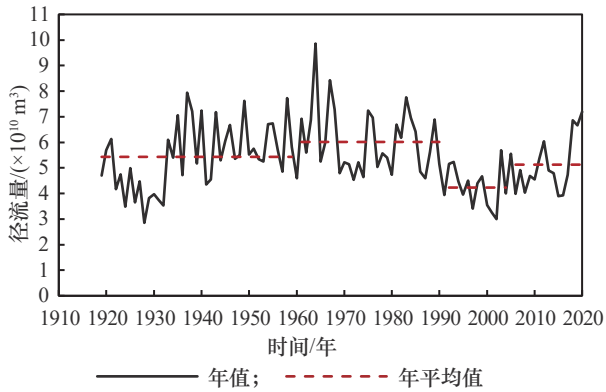


图5 花园口断面天然年径流量(1919—2020年)

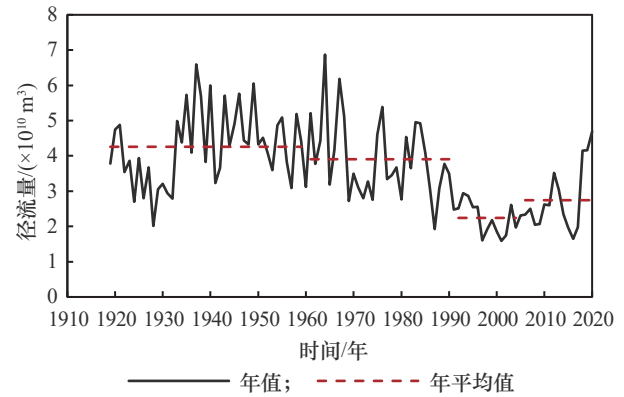


图6 潼关断面实测年径流量(1919—2020年)

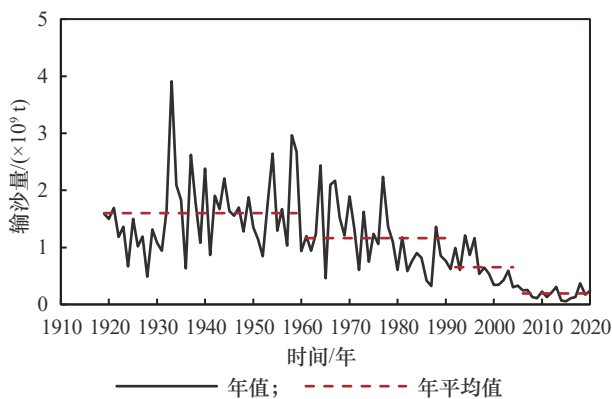


图7 潼关断面实测年输沙量(1919—2020年)

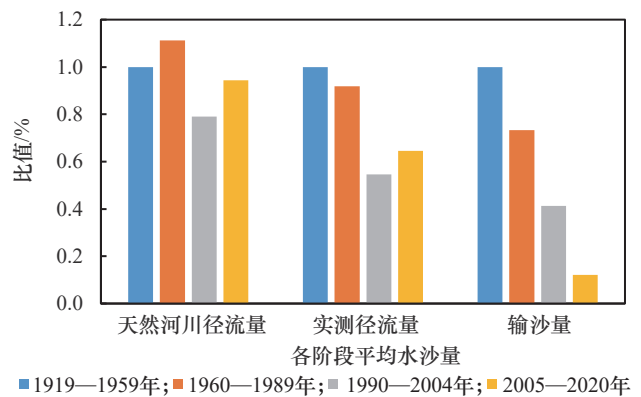


图8 代表断面各阶段年平均水沙量与基准值的比值

少了24.5%、29%，年均实测输沙量却分别减少了72.8%、43.6%。该阶段黄河上游头道拐断面输沙量锐减的主要原因是，1986年黄河上游龙羊峡水库下闸蓄水并与刘家峡水库的联合运用，显著改变了宁蒙河段水沙过程，导致宁蒙河段淤积萎缩。据统计，1990—2004年宁蒙河段累计淤积泥沙约 1.42×10^9 t、年均淤积泥沙约 9.467×10^7 t [10]。黄河中游潼关断面输沙量锐减的主要原因是，20世纪80年代开始的黄土高原小流域综合治理和治沟骨干工程等水土保持措施，显著减少了黄土高原土壤侵蚀和泥沙输移。③2005—2020年与1990—2004年相比，黄河又进入了“多水少沙”阶段。黄河上游、中游代表断面年均天然径流量增加了25.6%、19.5%，黄河上游头道拐断面年均输沙量增加了79.6%（年均输沙量增加了 2.55×10^7 t），黄河中游控制断面输沙量减少了70.5%。该阶段黄河上游头道拐断面实测输沙量增加的主要原因是2005年以来黄河上游来水较为丰沛，宁蒙河段有利于塑槽输沙的水流过程增

加、河段淤积减缓，上游来沙有利于向头道拐断面输送。据统计，2005—2020年宁蒙河段累计淤积泥沙约 2.11×10^8 t、年均淤积泥沙约 1.319×10^7 t [10]，年均淤积量仅约为1990—2004年均值的1/7。而黄河中游代表断面输沙量继续减少的主要原因是，1998年之后，黄河流域大力推进退耕还林还草、淤地坝系工程和坡改梯等水土保持措施，使进入黄河的泥沙量显著减少。

(二) 未来黄河来水来沙量变化趋势预测

黄河流域的来水来沙量是一个动态变化的过程，受降水、气候、下垫面、人工措施以及政策等的影响具有很大的不确定性。黄河的来水来沙量预测是一个非常复杂的科学问题。2000年以来，对黄河未来年均来沙量的预测值介于 $3 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8$ t/a，但预测结果与实际来沙量差异性较大。主要原因在于，黄河水沙预测方法通常采用的是水文法和水保法，而这两类方法无法统筹考虑所有影响因素；同

时减水减沙指标的选择及其指标的统计来源、统计方法等也存在差别,导致采用不同方法、不同时期、不同边界条件下的预测结果会存在很大差异;此外,预测所依据的下垫面条件也在不断发生变化,特别是2010年以来,不仅林草、梯田和淤地坝等数量在显著增加,且质量也在稳步提升。因此,基于以前下垫面所建立的水沙关系对未来情况进行预测,其结果将显著偏大 [11]。

为此,采用分布式水循环模型、流域水动力模型、大数据神经网络模型等9类方法,基于统一的未来气候和下垫面情景成果,分别对黄河未来50年水沙量进行了预测。研究结果表明,黄河中游潼关断面未来50年平均径流量和输沙量分别为 $2.4 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $2.45 \times 10^8 \text{ t}$,在90%置信区间下的径流量和输沙量分别为 $[1.64, 3.28] \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $[0.79, 5.12] \times 10^8 \text{ t}$ [12]。根据模型预测,在当前下垫面条件下,即使遭遇1933年出现的黄河中游极端暴雨,潼关断面的可能来沙量约为 $5 \times 10^8 \text{ t}$,比1933年实测输沙量减少了 $3.41 \times 10^9 \text{ t}$,减少幅度为87% [12]。另外,结合其他相关研究开展的未来黄河来水来沙量预测,即未来潼关断面年均径流量为 $2.47 \times 10^{10} \sim 2.49 \times 10^{10} \text{ m}^3$,年均输沙量为 $3 \times 10^8 \sim 3.1 \times 10^8 \text{ t}$ [13,14],综合分析得出,预计未来50年黄河潼关断面年均径流量约为 $2.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$,年均输沙量约为 $3 \times 10^8 \text{ t}$ 。

三、黄河水沙调控面临的主要问题

20世纪60年代以来,黄河流域逐渐建成了相对完善的水沙调控体系。黄土高原实施了大规模的水土流失治理,黄河干支流建成了以龙羊峡、刘家峡、万家寨、小浪底、陆浑、故县等水库为重点的水沙调控工程,水沙调控效益显著。黄土高原林草覆盖率由1949年的不足6%提高至2020年的65%,主色调由黄变绿;入黄泥沙由1919—1959年的 $1.6 \times 10^9 \text{ t/a}$ 减少至2005—2020年的 $1.93 \times 10^8 \text{ t/a}$,减少了约88%。小浪底水库连续开展了20年的调水调沙工程,黄河下游河道主槽不断淤积萎缩的状况得到初步遏制,主河槽最小过流能力从2002年汛前的 $1800 \text{ m}^3/\text{s}$ 恢复到2020年汛后的 $4500 \text{ m}^3/\text{s}$;黄河下游河道累计冲刷泥沙约为 $2.98 \times 10^9 \text{ t}$,下游河道主河槽平均降低了2.6 m。尽管黄河流域水沙调控效益显著,但随着黄河水沙量的变化特别是

入黄泥沙的锐减,黄河水沙调控措施与来沙量趋势仍不协调,黄河水沙调控面临诸多亟需解决的问题。

(一) 黄河上游河道淤积萎缩与新“悬河”问题

黄河上游宁蒙河段由峡谷河段与平原河段构成,其中巴彦高勒至头道拐河段(统称“内蒙古河段”)是典型的平原冲积性河段。20世纪80年代以来,因主要冲积性河段淤积萎缩,河床平均高出背河地面4~6 m,内蒙古河段主槽过流能力减少,先后发生了6次凌汛决口和1次汛期决口,防凌防洪形势十分严峻。

为解决黄河流域的水资源供需矛盾,在黄河上游修建了龙羊峡(1986年汛后下闸蓄水)、刘家峡(1968年汛后下闸蓄水)等控制性水库。这些水库投入运用后蓄丰补枯,显著改变了黄河上游的水沙过程,汛期有利于输沙的大流量过程锐减。1968年刘家峡水库蓄水运用前,黄河上游兰州断面汛期与非汛期水量比为6:4;到1986年龙羊峡水库蓄水运用后,兰州断面汛期与非汛期水量比变为4:6;兰州断面年均大流量过程(大于 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$)的天数也从1985年之前的29.5天,降低至1986—1999年的3.7天,到2000—2017年兰州断面几乎未出现过流量过程。进入宁蒙河段的大流量过程减少,水流输沙动力减弱,导致内蒙古河段淤积萎缩。图9为内蒙古河段泥沙冲淤过程,从图中可以看出,在1986年龙羊峡水库下闸蓄水之前,内蒙古河段总体冲淤平衡;从1987年开始内蒙古河段持续淤积萎缩,1987—2020年,黄河内蒙古河段累计淤积泥沙约为 $1.75 \times 10^9 \text{ t}$ 、年均淤积约为 $0.51 \times 10^8 \text{ t}$ 。与之相应,三湖河口断面的平滩流量从1986年的 $4400 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低至2020年的 $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。三湖河口断面平滩流量变化过程如图10所示。

(二) 黄河下游滩区治理策略与高质量发展要求不适应

经过长期的泥沙淤积和堤防建设,在黄河下游两岸大堤之间形成了面积达 3154 km^2 的滩区。广阔的滩区既是黄河洪水泛滥时行洪、滞洪、沉沙的场所,又是近190万滩区百姓赖以生存和发展的空间。目前,在黄河滩区治理策略中,滩区百姓要外迁安置,但受资金、政策和百姓意愿等影响,滩区百姓

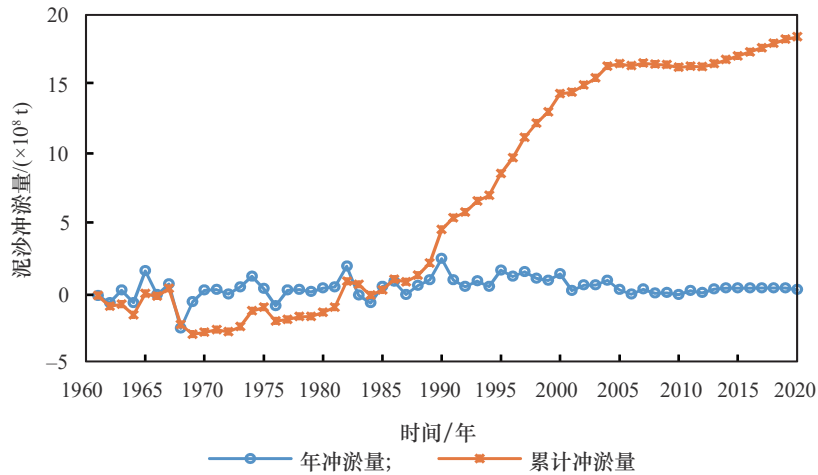


图9 内蒙古河段泥沙冲淤量变化过程

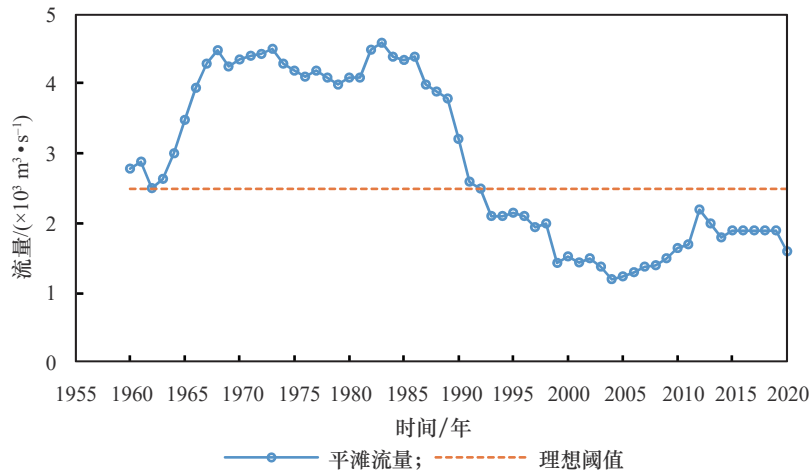


图10 三湖河口断面平滩流量变化过程

搬迁困难，长期面临水患威胁。

黄河下游河道防洪与滩区治理一直是黄河治理的重要任务之一。目前，关于下游河道防洪与滩区治理策略有“宽河固堤”与“窄河固堤”之争 [15]，争议焦点在于未来进入黄河下游的沙量预测。2013年，国务院发布的《黄河流域综合规划》[5]中指出，到2030年，水土保持措施年均可减少入黄泥沙约 $6 \times 10^8 \sim 6.5 \times 10^8 \text{ t}$ ，入黄泥沙仍有 $9 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9 \text{ t}$ ，并以此为据，提出了以“宽河固堤”为基本格局的下游河道治理策略和逐步拆除生产堤的滩区治理策略。

根据黄河来沙量预测，未来50年潼关断面年均输沙量约为 $3 \times 10^8 \text{ t}$ ，仅为《黄河流域综合规划》采用值的1/3。黄河下游以“宽河固堤”为基本格局的治理策略与未来来沙量不匹配；同时，拆除生

产堤将涉及滩区安全建设到位、补偿政策落实、群众安全等问题需要解决。若滩区安全建设未能解决，蓄洪滞洪效果不佳，滩区将长期面临洪水的威胁，滩区发展将受到严重制约，与黄河流域高质量发展的要求极不适应。

(三) 黄土高原水土流失治理区域不均衡

经过70多年的努力，黄土高原水土流失治理效果显著。但在大规模的水土流失治理过程中也存在一些不足之处，逐渐引发了新的问题。

1. 部分区域人工植被覆盖度已超越地区水分承载力阈值，带来土壤干旱化问题

植树造林是黄土高原水土流失治理植被恢复的主要手段。黄土高原地处半湿润、半干旱过渡带，土壤水分是植被生长的直接水分来源，若人工植被

覆盖度超过一定阈值, 植被对土壤水分的长期消耗将超出降水的补给, 带来土壤环境干旱化和大面积衰退等问题 [16]。根据相关研究, 黄土高原整体植被恢复潜力(覆盖度)约为 70% [17,18]。2020 年黄土高原植被覆盖度为 65%, 其中, 黄土高原东南部子午岭、黄龙山林区等区域植被覆盖度已达到 90% 以上, 接近或超过该地区最大恢复潜力。降水条件是黄土高原植被恢复的主要限制因子, 黄土高原植被恢复应“因水制宜”。但目前, 一些地区植被恢复措施与当地的降水条件不匹配, 宜以封禁措施为主的区域大规模植树造林, 避免出现“年年种树不见树”“小老头树”等现象。

2. 现有黄土高原治理格局空间不均衡, 亟待优化调整

依据区域自然特征与侵蚀环境, 黄土高原划分为黄土丘陵沟壑区、黄土高塬沟壑区、风沙区等九大类型区, 不同区域适宜不同的水土流失治理措施。但目前, 黄土高原水土流失治理的目标及施行措施尚缺乏分区分类统筹。宜封禁恢复草灌的区域却过度植树, 宜平衡人粮矛盾的地区却梯田化不足, 宜拦沙减蚀的流域却淤地坝工程缺失, 而城镇化率高的地区却大规模坡改梯, 生态环境趋好的流域却沟系布坝过密等, 导致区域治理不平衡 [19]。

3. “两山”理论转化的配套措施制度不足, 水土流失治理有待提质增效

多年来, 黄土高原以小流域为单元的综合治理成效显著, 减少了入黄泥沙; 但同时也存在与当地富民生态产业兼顾不足, 山区放牧、退耕还林反弹现象时有发生, 水土保持成果巩固任务较重等问题。这也显示出以减缓水土流失和增加粮食供给能力为主要目标的传统水土流失治理模式存在目标单一、与社会经济发展融合度不足等短板, 水土流失治理对农民收入增加贡献比例不高, 使农民获得感不强, 水土流失治理与黄河流域高质量发展要求还存在距离, 亟待探索既要“绿水青山又要金山银山”的高质量发展的实现路径。

四、新水沙条件下黄河水沙调控的关键策略

当前, 黄河的来水来沙量过程和通量发生了重大变化, 特别是入黄泥沙量的锐减, 使黄河水沙运动和河道演变规律发生了新的变化, 且这种变化是

确定的、趋势性的, 直接影响到黄河的水沙调控策略制定 [20]。为此, 针对目前黄河水沙调控面临的主要问题, 提出以下关键调控策略。

(一) 完善黄河水沙调控体系

通过水沙调控体系建设来调控水量沙量及其过程, 保证黄河干流河道基本的输水输沙通道规模, 维持河道基本的输水输沙能力, 是新时期黄河治理的首要策略。控制性水库是黄河水沙调控的主要抓手。目前, 黄河上游刘家峡水库至头道拐断面 1440 km 河段缺少呈上启下的控制性水库。到 2020 年汛末, 小浪底水库库区总淤积量已占水库设计拦沙库容的 42.8%, 面临后续调水调沙动力不足的问题。需要进一步完善水沙调控工程体系。

1. 加强推进黄河上游黑山峡河段治理工程的前期论证工作

黑山峡河段位于黄河上游甘肃与宁夏交界处, 具有较好的建库条件。在黑山峡河段建设控制性水利工程, 与黄河上游龙羊峡、刘家峡水库联合调水调沙, 塑造有利于宁蒙河段输沙的水沙过程, 可恢复并长期维持内蒙古河段平滩流量 2000~2500 m³/s, 可有效减缓宁蒙河段“悬河”的淤积萎缩, 降低防洪防凌安全风险。同时, 可为中游骨干水库调水调沙和有效库容恢复提供水流动力条件, 实现黄河上中下游有效联动。黑山峡河段治理工程论证工作虽已经开展了几十年, 但是在工程功能定位、建设方案等的前期论证工作进展不大, 建议结合南水北调西线工程和黄河水沙调控等, 加快推进黑山峡河段治理工程前期论证工作。

2. 优化黄河中游古贤水利枢纽的开发目标与建设规模, 尽快启动建设

小浪底水库是目前黄河中下游唯一能进行水沙综合调节运用的水利枢纽, 其库容弥足珍贵, 直接影响黄河下游防洪、生态和供水安全。需要在小浪底水库拦沙库容淤满前, 在黄河中游干流建设一座控制性水库, 与小浪底水库联合进行水沙调控,

规划中的黄河中游古贤水利枢纽工程建设条件较好, 且已经论证了近 70 年, 设计的多年平均来沙量为 7.73×10⁸ t, 总库容为 1.29×10¹⁰ m³, 其中拦沙库容为 9.342×10⁹ m³ [21]。该工程建成后, 将彻底扭转黄河小北干流河段持续淤积局面, 有助于降低黄河中游潼关高程; 同时, 古贤水库与小浪底水

库联合调度,将解决小浪底水库调水调沙后续动力不足的问题,可长期维持下游河道河槽的行洪输沙功能,缓解“二级悬河”不利态势等。但从黄河来水来沙量趋势研判来看,未来古贤水利枢纽坝址断面以上来沙量要远小于规划采用数值,水库拦沙库容明显偏大。建议基于黄河未来可能的水沙条件,进一步优化古贤水利枢纽开发目标和建设规模,并尽快启动工程建设。

(二) 开展黄河下游滩区的分区治理,彻底解决滩区防洪运用与高质量发展之间的矛盾

随着黄河中游古贤、东庄等控制性水库的建成运用,进入黄河下游的泥沙将进一步减少、洪峰流量锐减、洪水漫滩的发生概率将极低。黄河下游滩区具备分区治理、释放部分滩区的条件。

1. 因地制宜试点滩区分区治理

在维持黄河大堤现状、保障大堤外防洪安全的基础上,选择适宜河段开展滩区分区治理试点。在自然滩区内充分利用既有生产堤等防洪工程,并修建一定防洪子堤,形成封闭蓄滞洪区;在防洪子堤及其上、下游适宜处布设分洪和退水设施,根据防洪保安要求和实时洪水情况,选择性进行分洪、滞洪和沉沙;分蓄洪区以外滩区用于群众安置和生产生活用地。

2. 改造下游河道,释放部分滩区

在对黄河下游未来水沙条件进一步观测和研判的基础上,逐渐扩大滩区分区治理试点范围,最终在黄河滩区内利用已建生产堤和控导工程等建设两道防洪导堤,将黄河下游河道缩窄成为3~5 km宽、可通过8000~10 000 m³/s流量的通道;在防洪导堤与黄河大堤之间的滩区上,利用隔堤和公路等建成一定规模的滞洪区用于分滞大于10 000 m³/s的洪水;释放除新建滞洪区以外的滩区,并将其变成永久安全区,彻底解决黄河下游滩区防洪运用与高质量发展需求之间的矛盾。

(三) 调整黄土高原治理格局,协同推进生态保护和乡村振兴

黄土高原的水土保持工作仍应长期坚持退耕还林还草和淤地坝建设等相关政策。但当前存在强调植树种草、但部分区域又未遵循自然规律,区域性

措施不匹配、治理不均衡,重工程措施轻管理,治理目标和模式对乡村振兴的带动性不足等问题,为此,建议:

1. 科学确定黄土高原水土流失治理度,分区分类调整水土保持措施

黄土高原水土流失治理与生态建设中,林草植被、梯田及淤地坝等措施的减沙作用都具有临界效应[22]。一方面黄土高原水土流失治理不可能将泥沙减到零或较低的数值,另一方面林草植被、梯田及淤地坝等措施也要有一个治理度,超过了这个度,水土保持的边际效益就很低。从干流河道来看,如果中游水保措施将入黄泥沙减至很少甚至接近于清水状态,黄河中下游河道将面临剧烈冲刷、畸形河湾发育等诸多威胁防洪安全的问题;黄河河口也将面临海岸蚀退、海水入侵等诸多威胁河口生态环境与稳定的问题。为此,从流域和河道系统的角度来看,黄土高原水土流失治理需要有一个合理的“度”,以实现流域产沙和河道输沙的相对平衡。建议根据黄土高原九大类型区的特点和水土保持效果临界状态阈值等,科学确定分区域的水土流失治理度,并结合分区域水土保持现状,因地制宜地调整黄土高原治理格局。

2. 创新生态治理与乡村振兴融合发展模式

进一步探索建立多渠道、多元化的水土流失治理投入机制,在加大中央投资力度的同时,将水土保持生态建设资金纳入地方各级政府公共财政框架,并鼓励社会力量通过承包、租赁、股份合作等多种形式参与水土保持工程建设,引导民间资本参与到水土流失治理之中,提高治理效益,促进产业发展,改善人居环境,使治理成果更好地惠及群众。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 16, 2021; **Revised date:** January 5, 2022

Corresponding author: Zhang Shuanghu is a professor-level senior engineer from the China Institute of Water Resources and Hydropower Research. His major research field is theoretical and applied research in the field of operation scheduling of water conservancy projects. E-mail: zhangshh@iwhr.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on ecological protection and high-quality development strategy in the Yellow River Basin” (2020-ZD-18)

参考文献

- [1] 钟柯. 我国人民同黄河洪水斗争的光辉历程 [J]. 科学通报, 1975 (1): 15-22.
Zhong K. Brilliant history of Chinese people fighting against the flood in the Yellow River [J]. Science Bulletin, 1975 (1): 15-22.
- [2] 周魁一, 潘季驯“束水攻沙”治河思想历史地位辨析 [J]. 水利学报, 1996 (8): 1-7, 15.
Zhou K Y. The historic contributions of Pan Jixun strategy of regulating the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996 (8): 1-7, 15.
- [3] 李文学, 李勇. 论“宽河固堤”与“束水攻沙”治黄方略的有机统一 [J]. 水利学报, 2002 (10): 96-102.
Li W X, Li Y. Integration of the Yellow River harnessing strategies of “Keeping a broad flood plain with solid embankment” and “Clearing sediments by means of converting flow” [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002 (10): 96-102.
- [4] 李国英, 盛连喜. 黄河调水调沙的模式及其效果 [J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(6): 826-832.
Li G Y, Shen L X. The mode and result of the Yellow river water and sediment regulation [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2011, 41(6): 826-832.
- [5] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域综合规划(2012—2030年) [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2013.
Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of the Water Resources. Comprehensive planning for the Yellow River Basin (2012—2030) [M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2013.
- [6] 水利部黄河水利委员会. 黄河泥沙公报(2000—2020) [R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 2020.
Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of the Water Resources. Yellow River sediment bulletin(2000—2020) [R]. Zhenzhou: Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of the Water Resources, 2020.
- [7] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报2020 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2021.
Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China. China river sediment bulletin 2020 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- [8] 水利部黄河水利委员会. 黄河流域天然径流量资料(主要水文站) [R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会, 1997.
Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of the Water Resources. The natural runoff in the Yellow River basin(key hydrological station) [R]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of the Water Resources, 1997.
- [9] 水利电力部水文局. 全国主要河流水文特征统计 [R]. 北京: 水利电力部水文局, 1982.
Hydrological Bureau of the Ministry of Water Conservancy and Electric Power. The hydrological statistical characteristics of the main river [R]. Beijing: Hydrological Bureau of the Ministry of Water Conservancy and Electric Power, 1982.
- [10] 安催花, 鲁俊, 钱俗, 等. 黄河宁蒙河段冲淤时空分布特征与淤积原因 [J]. 水利学报, 2018, 49(2): 195-206, 215.
An C H, Lu J, Qian S, et al. Spatial-temporal distribution characteristic and course of sedimentation in the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineerin, 2018, 49(2): 195-206, 215.
- [11] 胡春宏, 张晓明. 论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题 [J]. 水利学报, 2018, 49(9): 1028-1039.
Hu C H, Zhang X M. Several key questions in the researches of runoff and sediment changes and trend predictions in the Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9): 1028-1039.
- [12] 中国水利水电科学研究院. 黄河流域水沙变化机理与趋势预测 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2021.
China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The change mechanism and trend prediction of water and sediment in Yellow River Basin [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021.
- [13] 王光谦, 钟德钰, 吴保生. 黄河泥沙未来变化趋势 [J]. 中国水利, 2020 (1): 9-12, 32.
Wang G Q, Zhong D Y, Wu B S. Future trends of sediment in the Yellow River [J]. China Water Resources, 2020 (1): 9-12, 32.
- [14] 蔡蓉蓉, 张红武, 卜海磊, 等. 基于水沙组合分类的黄河中下游水沙变化特点研究 [J]. 水利学报, 2019, 50(6): 732-742.
Cai R R, Zhang H W, Bu H L, et al. Research on variation of runoff and sediment load based on the combination patterns in the Middle and Lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(6): 732-742.
- [15] 潘家铮. 黄河下游治理问题的策略 [J]. 人民黄河, 2004, 26(4): 6-7.
Pan J Z. Strategies for controlling problems in the lower Yellow River [J]. Yellow River, 2004, 26(4): 6-7.
- [16] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. Acta Ecologica Sinica , 2019, 39(20): 7398-7409.
- [17] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究 [J]. 地理学报, 2017, 72(5): 863-874.
Gao H D, Peng G W, Li Z B, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 863-874.
- [18] 赵广举, 穆兴民, 田鹏, 等. 黄土高原植被变化与恢复潜力预测 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 205-212.
Zhao G J, Mu X M, Tian P, et al. Prediction of vegetation change and restoration potential in loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 205-212.
- [19] 胡春宏, 张晓明. 关于黄土高原水土流失治理格局调整的建议 [J]. 中国水利, 2019 (23): 5-7, 11.
Hu C H, Zhang X M. Suggestions on adjustment of soil erosion control pattern in the Loess Plateau [J]. China Water Resources, 2019 (23): 5-7, 11.
- [20] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 1-11.
Hu C H. Study on water and sediment change and control strategy of the Yellow River [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 1-11.
- [21] 黄河水资源保护科学研究院. 黄河古贤水利枢纽工程环境影响报告书 [R]. 郑州: 黄河水资源保护科学研究院, 2019.
Yellow River Water Resources Protection Institute. Environmental impact assessment report of Guxian key water control project in the Yellow River [R]. Zhengzhou: Yellow River water resources protection institute, 2019.
- [22] 胡春宏, 张治昊. 论黄河河道平衡输沙量临界阈值与黄土高原水土流失治理度 [J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1015-1025.
HuHu C H, Zhang Z H. Discussing of the critical threshold of equilibrium sediment transport in the Yellow River and the degree of soil erosion control in the Loess Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1015-1025.