

黄河流域防洪形势与对策

刘晓燕¹, 暴入超², 赵正伟²

(1. 水利部黄河水利委员会, 450003, 郑州; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 450003, 郑州)

摘要:在全球极端暴雨频发背景下,黄河流域防洪安全对保障全面建设社会主义现代化国家具有十分重要的意义。分析了黄河流域防洪安全现状及存在问题,剖析了保障黄河长治久安面临的严峻挑战,以确保堤防不决口、确保河床不抬高、让黄河成为造福人民的幸福河为目标,提出了新时期黄河流域防洪减灾体系的对策措施,论证了黄河长治久安的前景和保障思路。

关键词:黄河流域;防洪;问题;挑战;防洪减灾体系

The flood-control situation and the countermeasures faced by the Yellow River basin//Liu Xiaoyan, Bao Ruchao, Zhao Zhengwei

Abstract: With frequent occurrence global extreme rainfall, the flood control of the Yellow River basin is of great significance to build a modern socialist country. The current situation and existing problems of flood control in the Yellow River basin was analyzed, and the severe challenges faced in ensuring the long-term stability and safety of the Yellow River are discussed as well. With the goal of “ensuring that dikes do not breach, that the riverbed does not rise, making the Yellow River a peaceful river for the benefit of the people”, the countermeasure of flood control and disaster reduction in the Yellow River basin is proposed. The prospect and measures for assuring a long-term stability and safety of the Yellow River are discussed.

Keywords: Yellow River basin; flood control; problems; challenges; flood ccontrol and disaster reduction system

中图分类号: TV212.4+TV87 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)12-0035-06

一、黄河流域防洪安全现状

黄河是我国第二大河,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等9省(自治区),在山东省东营市垦利区注入渤海,干流全长5464 km,流域面积79.5万km²(含内流区4.2万km²)。黄河上游兰州以上地区是径流主要来源区,中游是黄河下游洪水和泥沙的主要来源区,下游是地上悬河。

根据洪水淹没风险,黄河流域防洪保护区总面积12.6万km²。其中,黄河下游防洪保护区面积10万km²,涉及河南、山东、安徽、江苏、河北等5省32个市

161个县(区),地跨黄河、淮河、海河三大流域,区内分布有郑州、济南、开封等13座大中型城市,国家粮食生产基地及其灌排系统,中原油田、胜利油田、兖济煤田、淮北煤田、南水北调东线和中线等国家工业基地和基础设施星罗棋布,京广、京九、京沪和陇海等铁路纵横交错,京港澳、大广和连霍等高速公路四通八达,是黄河防洪的重中之重。

黄河安澜是中华儿女的千年期盼,但历史上受生产力水平和社会制度的制约,再加上“以水代兵”等人为破坏,黄河“屡治屡决”的局面始终没有根本改观。公元前602年—1938年的2540年间,黄河下游共决口1590次,改道26次。

收稿日期:2024-06-05

作者简介:刘晓燕,正高级工程师,主要从事黄河水沙变化、黄河防洪等研究工作。

基金项目:国家重点研发专项(2023YFC3208605)。

新中国成立以来,在不断发展完善的治河思想指导下,我国基本建成了黄河流域防洪减灾体系,包括270余座大中型防洪水库、2995 km干流堤防和5784 km支流堤防、东平湖和北金堤等蓄滞洪区,以及保障防洪工程正常运用的水文测报体系、水工程调度体系和政策法规体系,黄河下游呈现出连续70多年伏秋大汛不决口和连续20多年河床不抬高的安澜局面。

目前,通过小浪底等已建中游水库联合调控,可以将黄河下游花园口站1000年一遇洪水流量由42 300 m³/s削减至22 600 m³/s。小浪底水库投运以来,下游河槽的最小平滩流量已由21世纪初的1800 m³/s提高至4600 m³/s;下游建成标准化堤防1371 km,全线达到设防标准,其中花园口站、孙口站、艾山站以下设防流量分别为22 000 m³/s、17 500 m³/s、11 000 m³/s;当孙口站洪水流量超10 000 m³/s时,利用东平湖蓄滞洪区分洪,可将艾山站下泄流量削减至设防流量以内;下游发生超标准洪水时,利用高村以上堤防超高、北金堤蓄滞洪区和东平湖蓄滞洪区,可将高村以下洪峰削减至设防流量以内。通过上游已建的龙羊峡和刘家峡等水库联合调度和干流堤防约束,黄河上游兰州段防洪标准达到100年一遇;宁蒙河段防洪标准为20年一遇~50年一遇,大部分河段平滩流量已恢复到2200 m³/s以上,凌汛压力有效减轻。支流防洪形势总体向好,渭河下游、沁河下游、伊洛河下游和大汶河中下游等主要支流的重点河段达到了2008年流域防洪规划确定的防洪标准。

二、河道与水沙形势

1. 悬河形势

与其他大江大河不同,黄河下游是悬河,其堤防相当于超大平原水库的大坝,一旦堤防决口,犹如垮坝洪水狂泄,摧毁力和影响范围之大,远非一般平原河流的洪水可比。1938年6月9日,花园口人为决口改道,形成了宽30~40 km、长400 km的黄泛区,导致1250万人受灾、89.3万人死亡、391万人外逃。

新中国成立以来,70余年下游堤防未决口保障了黄淮海平原防洪安全,但也使河床淤高了约1 m。目前下游临背悬差一般在4~6 m,最大10达m。2000年以来,下游主槽普遍刷深2~3 m,基本消除了“槽高滩低”的现象,但滩地横比降和滩地平均高程并未改变。

未来,通过水库群科学调控洪水泥沙可有效冲刷河槽,但滩区淤积难以避免;河势得到控制后,泥沙淤积

也将集中在河槽附近,滩地横比降恐将继续发育。因此,黄河下游悬河和二级悬河现象将长期存在。

2. 洪水形势

关于黄河干支流各断面和各重要区间的设计洪水,相关单位已进行过大量研究并经审定。小浪底水库建成后,对于悬河和二级悬河叠加、防洪保护区面积达10万km²的黄河下游,更值得关注的是来自小浪底、陆浑、故县和河口村等骨干水库至黄河花园口区间(简称“小花间”)的无控区洪水。小花间无控区是黄河下游“下大洪水”(以三门峡至花园口区间干流及支流伊洛河、沁河来水为主形成的洪水)的常见暴雨中心,1761年特大洪水和1982年特大洪水的暴雨中心即为伊洛河陆浑和故县水库以下的无控区,该区也是1958年下游特大洪水的重要来源区。

近年来,在全球气候变化背景下,突破历史纪录、颠覆传统认知的极端暴雨频繁发生,其突发性和严重性日益突出。从2021年郑州“7·20”特大暴雨洪水和塔克拉玛干沙漠罕见洪水、2022年珠江流域北江特大洪水、2023年海河“23·7”流域性特大洪水、2024年珠江特大洪水等可见,“非常态”的极端暴雨越来越成为“新常态”。其中,郑州2021年特大暴雨中心距离小花间只有100 km左右,暴雨形成条件基本一致。极端暴雨突发性极强,很难准确地预报落区、量级和发生时间,给洪水调度和防洪预案启动带来很大挑战。而且,流域已建中小型水库防洪标准普遍不高,遭遇极端暴雨时极可能发生水毁,进而增大洪峰。

伊洛河是小花间的最大支流,因地势低洼,伊河和洛河交汇区(下称“伊洛夹滩”)一直被视为伊洛河洪水的自然滞洪区,面积134 km²,总库容10.7亿m³,以往历次规划均考虑了该区的滞洪削峰作用。但是,伊洛夹滩现已建成20年一遇~50年一遇的堤防,部分堤段达100年一遇,导致夹滩滞洪作用大幅度减弱。伊洛夹滩内分布有全国重点文物“二里头夏代遗址”,若按100年一遇防洪标准采取工程防护措施,伊洛夹滩滞洪库容将减少72%。清除伊洛河黑石关铁路桥卡口可减轻伊洛夹滩河段的防洪压力,但将增大入黄洪水流量。按几十年前的伊洛夹滩下垫面考虑,如果“7·20”郑州特大暴雨中心重现在陆浑和故县水库以下的无控区,经现状水库群调控后,花园口站洪峰流量为21 900 m³/s;但是,如果伊洛夹滩堤防严防死守,加之陇海铁路桥卡口清除,花园口洪峰流量将达26 300 m³/s,该量级远超黄河下游花园口站设防流量。由此

可见,支流洪水演进环境变化,已经提高了黄河下游超标准洪水处理措施的启用概率。

3. 泥沙形势

2000—2023年,黄河潼关站实测输沙量2.34亿t/a,但还原干支流坝库拦沙后的潼关以上流域产沙仍达5.5亿t/a。基于潼关以上黄土高原2022年下垫面产沙能力(3.6亿~4.9亿t/a),依靠古贤、东庄和其他水库及淤地坝拦沙,未来50年甚至21世纪,潼关沙量可以基本控制在3亿t/a。但是,对于长治久安所需要的更远未来,黄河沙量很难长期维持在3亿t/a以内,原因是:

①植被梯田进一步减沙的潜力极小。能够降低流域产沙能力的可变因子是植被和梯田,但2018年以来植被盖度已停止增加,农村劳动力减少大幅度降低了梯田需求,弃耕则使梯田田埂逐渐雨损。

②流域尺度上的林草梯田覆盖率与下垫面产沙能力的响应规律和2010年以来的实测数据都证明,在现状林草梯田覆盖率已达63%的背景下,继续增大林草梯田覆盖率,对降低产沙能力的作用十分有限。

③水库和淤地坝是拦沙的主要措施,但水库和淤地坝库容有限,可以修建水库的坝址也有限;同时,农民对坝地的需求大幅度降低,而淤地坝的防洪压力越来越大,导致淤地坝建设的驱动力降低。

假定黄土高原产沙量分别为4亿t/a、5亿t/a、6亿t/a,考虑古贤和东庄水库生效并新建4000余座淤地坝,对未来100年黄土高原入黄沙量和黄河潼关站输沙量进行了推演,结果表明(图1):未来50~80年内,黄河潼关站输沙量仍将维持低位水平,之后,由于已(在)建坝库淤满,黄河沙量将与黄土高原产沙量基本相同,届时,即使植被梯田可以维持在2025—2035年水平,黄河沙

量也将达4亿t/a左右。事实上,植被和梯田都存在明显的受损风险,很难长期维持在理想水平。

4. 径流形势

黄河下游河道冲淤不仅取决于来沙量,而且取决于来水量。由于流域下垫面变化,花园口天然径流量已由1919—1975年的559亿m³/a降低至1956—2016年的484亿m³/a。而流域产流能力降低与人类用水增加的叠加,进一步使花园口实测径流量由20世纪五六十年代498亿m³/a,减少至2000年以来的289亿m³/a。跨流域调水可以缓解经济社会缺水困境,但显然难以实现对黄河河道内大量补水。测算表明,远期黄河下游实际来水量很难超过270亿m³/a。

三、防洪体系存在的问题

1. 洪水泥沙调控能力亟待加强

一是小浪底水库调水调沙的后续动力不足,仅靠万家寨等现状工程,难以塑造适宜的人工洪水过程,小浪底水库有效库容和下游良好河槽难以长期维持。古贤水库建成后,可望改变该状况。

二是对小花间无控区洪水缺乏有效调控手段。小花间无控区洪水峰高量大,预见期仅8h。漫滩后15h,花园口站流量将由5000m³/s上涨到10000m³/s;24h后,高村站流量将达10000m³/s,滩区受淹人口达70%,这对完成百万群众撤离和安置造成巨大挑战。因此,小花间无控区洪水的防御是下游防洪的突出短板,需建设黄河桃花峪工程,实现从被动向主动的转变。

三是龙羊峡和刘家峡水库难以同时满足多目标需求,很难做到“保证全河供水安全”和“保证宁蒙河段塑槽用水”两全,凌汛期防凌运用与供水发电矛盾突

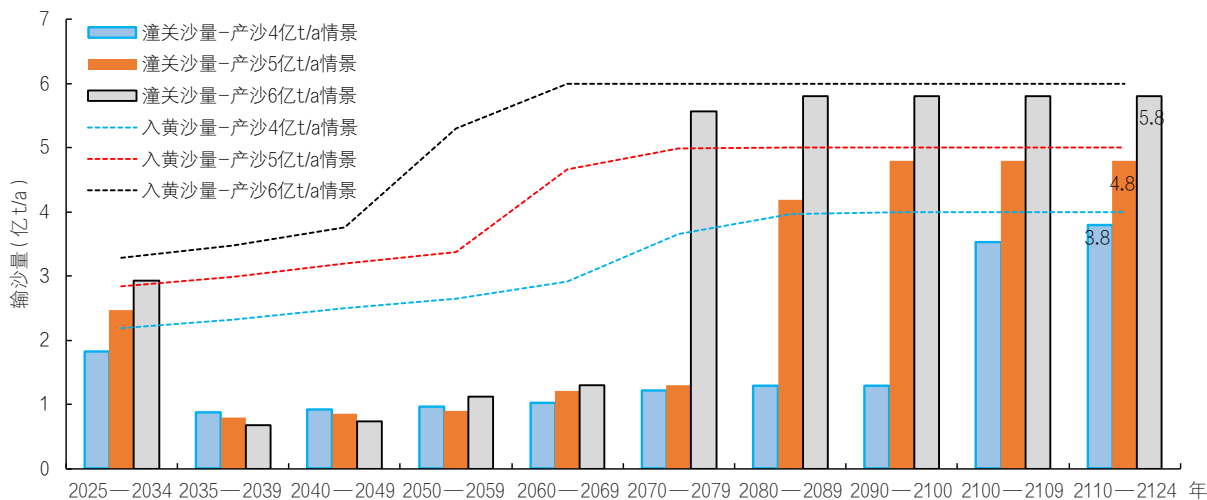


图1 黄土高原不同产沙量情景下的入黄沙量和潼关站沙量变化趋势

出,且距离宁蒙河段过远,亟须建设黑山峡水库,使上游水沙调控子体系骨干工程的功能配置更科学合理。

四是陆浑等部分骨干水库的防洪运用受到库区大量群众居住的掣肘,汾河、延河、大黑河和洛河等支流洪水调蓄能力偏低,一些重要城市防洪标准不达标。

2. 河道与河防工程存在短板

一是黄河下游二级悬河发育,且仍有108 km河段的河势未得到有效控制,堤防冲决风险依然存在;现状地形情况下,黄河下游滩区仍有55.7万人居住在20年一遇洪水淹没线以下,且修建了大量生产堤,严重制约防洪调度。

二是刁口河备用入海流路内的开发建设活动屡禁不止,保护难度大,严重威胁黄河长治久安。

三是黄河干流上中游部分河段的防洪标准只有10年一遇~20年一遇。

四是支流及山洪沟防洪标准低,主要支流达标率只有68%,中小河流治理率只有53%,部分中小河流和山洪沟洪水“下排”能力不足。

3. 蓄滞洪区防洪运用矛盾突出

东平湖是黄河流域的国家重要蓄滞洪区,但2008年流域防洪规划确定的安全建设任务仍未实施,其二级湖堤和大汶河下游堤防顶道路宽度难以满足现代化抢险机械作业需要,北排和南排不畅问题依然存在。受大汶河洪水影响,老湖金山坝以西受淹频率高,2.78万名群众安全堪忧;不足10年一遇的大汶河洪水可能向新湖分洪,危及黄河分洪空间。

北金堤蓄滞洪区面积2316 km²,现状人口209万人,重要基础设施密布,作为运用概率超1000年一遇的国家蓄滞洪保留区,长期待命与当地发展的矛盾越来越突出。

4. 黄河下游超标准洪水处理难度大

20多年来,黄河下游一直采用工程措施应对超标准洪水:发生超过花园口设防流量22 000 m³/s的洪水时,高村以上河段利用堤防3 m的实际超高或加修子堰输送洪水,高村以下通过渠村分洪闸向北金堤蓄滞洪区分洪。该方案虽可行,但可靠性不高,很难确保堤防不决口,而且实施难度很大。一是渠村分洪闸以上190 km的堤防需超设防流量御洪,花园口站洪峰流量最大可达27 400 m³/s,而该河段堤防决口的影响范围最大可达9万km²。二是启用北金堤蓄滞洪区的代价太高。为提高防洪安全保障程度,应进一步提高对中游洪水的调控能力,努力控制花园口站洪峰不超设防

流量。

5. 部分重要城市防洪能力不足

黄河流域有防洪任务的城市共292座,随着城市建成区扩展、人口和经济增长,部分城市防洪标准偏低,不少城市存在建筑物挤占河道导致河道排洪能力降低问题,对比2008年流域防洪规划的达标率仅66%,其中,山西太原、宁夏石嘴山和陕西延安等重要城市防洪安全仍未达标。

6. 防洪保障水平不高

监测感知能力和防汛业务应用智能化水平亟待提高,重要水工程统一调度体制和机制仍待强化,支撑防汛“四预”的计算、存储和安防能力偏低,河道及水库防洪空间管理措施与经济社会环境发展不适应,防洪工程抢险与维护体制和机制仍待完善。

四、近期防洪目标与对策

1. 防洪安全目标

党的二十大提出,我国要在2035年基本实现社会主义现代化,本世纪中叶成为富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国。为此,《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》提出了“确保堤防不决口、确保河床不抬高”和“让黄河成为造福人民的幸福河”的更高要求。

“确保堤防不决口”是基于黄河下游河道特点的必然要求。在黄河下游悬河现象和滩地横比降难以消除的背景下,堤防决口很可能意味着下游改道,影响难以承受。一方面,堤防决口改道导致的灾害损失越来越大,不仅严重威胁千万人民的生命,而且将摧毁高等级铁路和公路网络等国家重要基础设施,淤塞粮食主产区的灌排渠系,并造成巨大生态灾害,两岸区域都经受不起黄河再次改道的代价。另一方面,随着我国国际地位不断提高,决口改道带来的政治和社会影响也越来越大。1985年,《国务院批转水利电力部关于黄河、长江、淮河、永定河防御特大洪水方案报告的通知》(国发[1985]79号)确定的黄河下游防洪任务是:确保花园口站发生22 000 m³/s洪水大堤不决口;遇特大洪水,要尽最大努力,采取一切办法缩小灾害。进入新时期,国家进一步要求必须确保黄河下游大堤绝对安全。目前,黄河下游一直依靠工程措施应对特大洪水,未来该防护水平显然不宜降级。

“确保河床不抬高”是实现黄河长治久安的必然要求。通过拦沙和调水调沙,可以使黄河冲积性河段的

河槽少淤或冲刷,但发生漫滩洪水是必然事件,滩地淤积无法避免,因此“滩槽平行抬高”应该是符合实际的“河床不抬高”的解读。综合考虑黄河下游和宁蒙河段现状河槽的平滩流量、排洪输沙需要和水流造床能力,宜将“ $4500\text{ m}^3/\text{s}$ 左右”和“ $2200\sim 2500\text{ m}^3/\text{s}$ ”分别作为黄河下游和宁蒙河段河槽淤积的控制指标,并维持河槽畅通。

“让黄河成为造福人民的幸福河”是防洪的最高目标。为此,黄河下游应基本解除堤防冲决威胁,对超标洪水处置应更加灵活可靠;县级以上城市防洪标准应达标;黄河下游滩区村镇应达20年一遇防洪标准。

2. 防洪减灾措施

(1) 增强洪水泥沙调控能力

《国家水网建设规划纲要》提出:到2035年,江湖湖泊流域防洪减灾体系基本完善,防洪安全保障水平显著提高,洪涝风险防控和应对能力明显增强。按此要求,应加快建设古贤、黑山峡和桃花峪等骨干工程,并新建一批大中型防洪水库,对已建大中型水库实施改扩建、清淤扩容或除险加固,以恢复和增强对洪水的调控能力。

(2) 提高河道泄洪能力

黄河下游是黄河防洪的重中之重,要通过增设堤防护坡、堤防防渗加固、河道整治工程改(续)建和加固、宽滩区堤河淤填与滩面整治、加密加宽防浪林、完善河防工程管护道路等,增强堤防抗冲防渗能力,提高河势控制能力,降低滩地横比降,进而增强河防工程的御洪能力;通过外迁、村台安置、防护堤和临时撤退等措施,使中高风险洪水淹没区的滩区群众居所达到20年一遇防洪标准。为解决黄河下游生产堤破除和群众安全的老大难问题,应划定黄河下游排洪河槽边界,优先清理排洪河槽内严重影响防洪安全的生产堤等碍洪设施,外迁河槽内居民,规范耕地种植结构,畅通排洪输沙的主要通道,尽快将高风险区群众外迁或临堤筑台安置。要明确刁口河流路的河道和河槽范围及位置,实施常态化生态补水,制定人类活动负面清单,确保“备得住”。

宁蒙河段防洪和防凌压力并重,需加高加固堤防,改建或拆除穿堤建筑物,新建、续建和改建河道整治工程,提高河势控制和洪水防御能力;完成内蒙古滩区群众外迁,改善河道行洪环境。同时,要开展十大孔兑综合治理,减少入河泥沙。

要以2035年重要城市防洪达标为目标,全面提升

黄河干支流重要河段防洪能力,加强汾河、渭河、延河、伊洛河、沁河等重要支流防洪除涝治理,实施中小河流治理和山洪灾害防治。

(3) 确保东平湖蓄滞洪能力

针对东平湖蓄滞洪区,要实施安全建设和金山坝以西群众外迁;通过加固改造二级湖堤,提高其滞洪能力;通过清淤北排通道、改建司垓闸等,提高外排能力;适当提高老湖运用水位,减轻大汶河入湖洪水淹没影响;建设老湖与新湖东区连通闸,确保新湖东区用得成。

(4) 提升洪水风险防控能力

构建雨水情监测预报“三道防线”,提高雨水沙自动监测与传输能力。建设流域防洪工程安全监控系统、视频级联集控系统、卫星遥感影像汇集系统、工情险情灾情分析服务平台。构建流域数据底板,构建标准统一、分布部署、快速组装的模型平台,构建自优化自学习的知识平台。提高洪水、泥沙和河势预报水平,提高洪水预警和预演能力,完善洪水预案,完善水工程调度平台和各层级防汛指挥系统。加强通信传输、网络安全和计算存储保障能力,改善防汛会商环境。

对列入黄河水沙调控体系工程名录的34座水工程,实施统一调度。制定或优化水库淹没区和蓄滞洪保留区的防洪管理政策,确保洪水调蓄和滞洪工程正常发挥作用。

五、展 望

在黄河仍难以彻底摆脱水少沙多的不利局面、下游悬河和二级悬河现象长期存在、堤防决口影响越来越难以承受、极端暴雨趋多趋频趋强趋广、支流堤防建设增大入黄洪水的情况下,国家要求“全力保障黄河长治久安”。长治久安,意味着黄河下游河道应安流更长时间,彻底走出“三年两决口、百年一改道”的历史困局,进一步推动黄河治理实现从被动到主动的历史性转变。

黄河下游堤防大体形成于春秋时期,至秦汉时期两岸堤防已基本完备。汉代以来,黄河下游独流行河时间最长的是公元70年东汉王景治河至北宋初期,史称东汉故道,行河900余年,其中前800年决溢灾害较少。其次是潘季驯治河至清朝后期的河道,史称明清故道,行河276年,但堤防决溢频繁。不过,从当时的气候和人类用水状况判断,东汉至唐代黄河下游水量极可能超过 $600\text{ 亿 m}^3/\text{a}$,远大于同期来沙 $4\text{ 亿}\sim 7\text{ 亿 t/a}$ 时下游实现冲淤平衡所需要的水量($340\text{ 亿}\sim 440\text{ 亿 m}^3/\text{a}$),而未来黄河下游来水将难超 $270\text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。由此可见,即使坝

库淤满后仍能将来下游来沙量长期控制在4亿~5亿t/a,黄河下游现行河道的行河寿命也很难比肩东汉故道,预计剩余300~350年。事实上,即使下游来沙量可以控制在3亿t/a左右,河口四条入海流路的剩余寿命也只有460年。

扣除1938年决口至1947年归故的9年,铜瓦厢决口后形成的黄河下游现行河道已行河近160年,其中1947年以来已安流77年。保障黄河下游长治久安,就是要通过水土流失治理、水库合理拦沙和调控水沙,确保河槽不抬高,优化滩地沉沙布局,努力使现行河道再安流300年以上。

在难以靠外流域调水增加黄河输沙塑槽动力的现实背景下,实现长治久安的核心在于减沙,尤其是可持续地降低流域的产沙能力。30余年的实测数据表明,目前流域入黄泥沙主要来自潼关以上的黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区。基于《黄河流域水土保持公报(2022年)》,在长系列降雨情况下,目前该区的土壤侵蚀量仍近5亿t/a,侵蚀强度为强烈及以上等级的水土流失面积仍达2.25万km²。因此,未来要以减少入河入库泥沙为目标,以水土流失严重地区为重点,巩固和提升林草植被修复成果,对严重破损的老旧梯田实施改造,以防止产沙能力反弹,新建一批高标准梯田,争取使黄土高原的侵蚀产沙量有所降低,新建一批高标准淤地坝,并对病险淤地坝实施除险加固,老旧淤地坝实施提升改造,合理控制小流域输出沙量,实施黄土高原沟壑区固沟保塬工程。

参考文献:

- [1] 中共中央国务院.黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[Z].2021.
- [2] 黄河水利史述要编写组.黄河水利史述要[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [3] 黄河流域及西北片水旱灾害编委会.黄河流域水旱灾害[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [4] 黄河水利委员会.黄河流域综合规划[M].郑州:黄河水利出版社,2013.
- [5] 黄河勘测规划设计研究院.黄河流域防洪规划修编设计洪水复核分析报告[R].2023.
- [6] 丁一汇,柳艳菊,徐影,等.全球气候变化的区域响应:中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望[J].地球科学进展,2023,38(6):551-562.
- [7] 夏军,石卫,张利平,等.气候变化对防洪安全影响研究面临的机遇与挑战[J].四川大学学报(工程科学

版),2016,48(2):7-13.

- [8] 张建云,舒章康,王鸿杰,等.郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J].地理学报,2023,78(7):1618-1626.
- [9] 刘刚,李鹏,刘强,等.黄土丘陵区淤地坝系对流域洪水过程影响与溃坝模拟[J].西安理工大学学报,2020,36(4):468-474.
- [10] 刘晓燕,高云飞,田勇,等.黄河潼关以上坝库拦沙作用及流域百年产沙情势反演[J].人民黄河,2021,43(7):19-23.
- [11] 刘晓燕.黄土高原现状产沙情势评价[J].水利学报,2023,54(1):24-33.
- [12] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [13] XIAOMING FENG, BOJIE FU, SHILONG PIAO, et al.Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. Nature Climate Change, 2016, 6(11):1019.
- [14] 刘晓燕,高云飞,党素珍,等.林草植被变化对流域产沙的影响规律及其阈值[J].水利学报,2020,51(5):505-518.
- [15] 水利部黄河水利委员会.黄河流域水资源调查评价[R].2019.
- [16] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等.基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J].地理学报,2014,69(11):1595-1603.
- [17] 潘启民,常晓辉,蒋秀华,等.黄河花园口以上地下水利用对河川径流的影响[J].人民黄河,2014,36(12):55-57+61.
- [18] 胡一三,宋玉杰,杨国顺.黄河堤防[M].郑州:黄河水利出版社,2012.
- [19] 谭其骧.何以黄河在东汉以后会出现一个长期安流的局面[J].学术月刊,1962,(3):23-35.
- [20] 刘振和.黄河壶口瀑布变迁考证和相应径流关系的初步分析[J].水科学进展,1995,6(3):218-223.
- [21] 竺可桢.中国近五千年来气候变迁的初步研究[J].考古学报,1972(1):15-38.
- [22] 史念海.黄土高原历史地理研究[M].郑州:黄河水利出版社,2001.
- [23] 水利部黄河水利委员会.黄河流域水土保持公报[Z].2024.

责任编辑 李博远