新形势下黄土高原淤地坝系建设关键问题与安全韧性提升对策

张 攀[1,2]，姚文艺[1,2]，张祎帆[1,2]

（1.黄河水利委员会黄河水利科学研究院，450003，郑州；2.水利部黄土高原水土保持重点实验室，450003，郑州）

摘 要：针对极端暴雨频发的新形势，为提升黄土高原淤地坝系安全韧性，引入坝系平衡理论，以多目标协同为分析框架，从风险级联与系统韧性、时空优化、“水－沙－农－稳”耦合3个维度构建问题诊断体系，并结合唐家河流域朱家湾淤地坝“7·15”溃坝事件进行案例分析。研究发现：当前坝系建设存在规划布局不系统、设计标准不协调、建设标准偏低、管护经费短缺、监测设施薄弱等关键问题，其本质是对“水－沙－农－稳”多目标协同关系的系统性偏离，以及风险级联与系统韧性、时空优化等核心原理的缺失。朱家湾溃坝案例进一步表明，单坝脱离坝系统筹设计是风险级联的重要成因：无溢洪道的“两大件”结构在超标准暴雨下缺乏安全余量，溃坝洪水对下游坝库形成远超设计标准的冲击，暴露出串联坝系设计中未充分考虑上游溃坝洪水作为下游设计输入条件的规范短板。此外，时空失衡的累积效应具有不可逆性，上游坝库快速淤满与下游坝库长期“空腹”并存，使坝系整体拦沙效率低于设计预期。新形势下黄土高原淤地坝系安全韧性提升应从优化规划布局、提升建设质量、创新管护机制、强化监测预警、完善政策体系5个方面协同发力，构建“规划—建设—管护—监测—政策”全链条韧性提升体系，为坝系安全度汛和高质量发展提供理论依据与实践参考。

关键词：淤地坝；安全韧性；坝系平衡；风险级联；黄土高原

Key issues in the construction of Yudiba dam systems on the Loess Plateau and countermeasures for enhancing safety resilience under new circumstances

ZHANG Pan[1,2], YAO Wenyi[1,2], ZHANG Yifan[1,2]

(1.Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation on Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Against the backdrop of frequent extreme rainstorms, this study introduces the theory of dam system equilibrium to enhance the safety resilience of Yudiba dam systems on the Loess Plateau. With multi-objective synergy as the analytical framework, a diagnostic system is established that encompasses three dimensions: risk cascading and system resilience, spatiotemporal optimization, and water-sediment-agriculture-stability coupling. The “7·15” dam-break event involving the Zhujiawan Yudiba dam in the Tangjia River basin is examined as a case study. The results reveal several key problems in current dam system construction, including a lack of systematic planning and layout, uncoordinated design standards, low construction standards, insufficient funding for operation and maintenance, and inadequate monitoring facilities. These problems

收稿日期：2026-09-12 修回日期：2026-10-19

作者简介：张攀，正高级工程师，主要从事水土保持与泥沙治理研究。E-mail：zpyrcc@163.com

基金项目：国家重点研发计划项目（2025YFC3215500）；国家自然科学基金黄河水科学研究联合基金项目（U2443214）；河南省自然科学基金项目（242300421042）。

essentially stem from a systemic departure from multi-objective synergy among water, sediment, agriculture, and stability, as well as a failure to incorporate core principles relating to risk cascading, system resilience, and spatiotemporal optimization. The Zhujiawan dam-break case further indicates that designing individual dams without considering the dam system as a whole is a major cause of risk cascading. The two-component structure (the dam body and the water-release structure) without a spillway lacks adequate safety margin under rainstorms exceeding the design standard, and the resulting dam-break flood subjects downstream dams and reservoirs to impacts far exceeding their design standards. This exposes a gap in the design specifications for cascade dam systems: upstream dam-break floods are not adequately considered as design input conditions for downstream dams. In addition, the cumulative effect of spatiotemporal imbalance is irreversible, with upstream reservoirs rapidly filling with sediment while downstream reservoirs remain underfilled for prolonged periods, resulting in overall sediment retention efficiency below design expectations. Under the new circumstances, enhancing the safety resilience of Yudiba dam systems on the Loess Plateau requires coordinated efforts in five areas: optimizing planning and layout, improving construction quality, innovating operation and maintenance mechanisms, strengthening monitoring and early warning, and improving policy systems. These efforts aim to build a full-chain resilience enhancement framework covering planning, construction, operation and maintenance, monitoring, and policy, and to provide theoretical support and practical references for flood-season safety and high-quality development of Yudiba dam systems.

Keywords: Yudiba dam; safety resilience; dam system equilibrium; risk cascading; Loess Plateau
中图分类号：TV+S157.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1123(2026)20-0057-10
DOI：10.3969/j.issn.1000-1123.2026.20.008

淤地坝是黄土高原地区水土流失治理的关键工程措施，在拦沙淤地、滞洪减灾、改善生态与促进农业生产等方面发挥着不可替代的作用。黄土高原淤地坝建设历史悠久，新中国成立后历经20世纪50—60年代推广普及和70年代水坠筑坝技术推动下的建设高潮，以及随后的规范建设、建设波动等阶段，目前已迈入高标准建设新时期。截至2025年，黄土高原已建成淤地坝6.02万座，形成坝系2000余条，累计拦减泥沙74亿t，淤泥造田8.53万hm^2。

随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略，淤地坝建设迎来新的发展机遇。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》要求“大力建设高标准淤地坝”，《中华人民共和国黄河保护法》将淤地坝建设管理提升至法律层面。然而，坝系建设实践中仍存在规划布局不系统、建设标准偏低、管护经费短缺、监测设施薄弱等突出问题，严重制约综合效益持续发挥与工程安全运行。

近年来，受全球气候变化影响，黄土高原极端暴雨事件频发，对淤地坝系安全构成严峻挑战。2022年7月特大暴雨导致宁夏西吉县唐家河流域4座中型淤地坝溃决，暴露出坝系在极端条件下的安全韧性短板。坝系是以小流域为单元，由大中小型淤地坝及小水库等坝库群构成的工程设施体系。坝系平衡的本质是将单坝平衡目标以坝系方式从时间和空间上重新分配，其理论内涵包含侵蚀-拦截平衡、风险级联与系统韧性平衡、“水-沙-农-稳”（水资源调控-泥沙拦截-农业生产-防洪安全）耦合协同、时空优化4项基本原理，可指导坝系工程设计、防洪安全、规划布局与建设时序等实践环节（见图1）。安全韧性是坝系在极端条件下维持功能、抵御风险、快速恢复的能力，其核心在于通过坝系整体协同联动实现风险分担与消纳。然而，当前淤地坝规划设计及运行管理均缺乏从坝系整体出发的系统考量，对各坝库间协同联动、风险分担、功能互补等问题重视不足，制约了坝系安全韧性的形成。

基于此，本文以坝系平衡理论为分析框架，将4项基本原理转化为问题诊断的具体维度，系统剖析黄土高原坝系建设中规划布局、工程建设、运行管护、监测预警与信息化等方面存在的关键问题；同时以朱家湾淤地坝溃坝事件为典型案例，从风险级联与系统韧性角度剖析其溃坝成因，揭示安全韧性缺失导致风险逐级传导的机理，以期为新形势下黄土高原淤地坝系安全韧性提升与防洪安全设计提供理论依据与实践参考。

一、新形势下黄土高原淤地坝系建设面临的关键问题

1.坝系规划布局

（1）坝系规划缺乏系统性，水源保障功能考虑不足

淤地坝系形成周期长，早期建设多为群众自发打坝，缺乏整体规划，导致现有坝系在空间布局、功能分工上存在先天不足。进入新时期，部分小流域坝系规划仍未充分遵循“全面规划、统筹兼顾”的原则，空间布局缺乏科学依据。一是规划前瞻性不足，未能充分考虑流域内土地利用变化、植被恢复成效等动态因素对水沙条件的影响。一些大型淤地坝设计淤积年限为30～50年，但由于退耕还林还草、水土保持及生态建设等工作的显著成效，实际淤积速率远低于设计值，达到设计淤积高程往往需要延长数十年甚至更长时间。二是坝系规划与国土空间规划、林地保护规划等衔接不够，部分坝址规划与生态保护红线、基本农田存在冲突，而占用基本农田则需经过严格的审批与补划程序，往往难以获批。这种规划间的脱节，使得前期投入大量工作但工程无法实施，造成资源浪费并影响坝系整体布局的完整性。三是坝系规划对水源保障功能考虑不足。坝系的水源保障需要依靠塘坝、小型水库等蓄水工程来实现。但现行规划多侧重防洪拦沙，对蓄水设施配置缺乏系统安排，“一塘一坝”“上拦中蓄下灌”等配置模式未纳入整体布局。从“水－沙－农－稳”耦合原理看，“水”功能的缺失直接削弱了“农”功能的实现基础，没有蓄水保障，坝地灌溉无从谈起，农业生产效益难以发挥，进而弱化了群众参与管护的内生动力，形成“无水则无农、无农则无管”的恶性循环。

坝系空间布局的核心是“侵蚀－拦截平衡”以及“水－沙－农－稳”多目标协同。前者强调流域产沙与坝系拦沙能力的动态匹配，防止拦截过剩或不足；后者要求在保障防洪安全的前提下，统筹水资源利用、泥沙拦截与农业生产，实现多重效益的协同优化。当前规划对流域侵蚀产沙空间异质性及多目标间协同权衡重视不够，导致部分区域拦截能力过剩而功能闲置，以及部分区域拦截能力不足而安全隐患突出。研究表明，坝系相对稳定系数（坝地面积与控制面积之比）存在明显的区域差异性，但现行规划对此缺乏差异化考量，导致坝系布局与区域实际侵蚀条件不相匹配。特别是在水资源本就稀缺的黄土高原地区，坝系规划中水资源保障功能的缺位，进一步加剧了区域水资源的供需矛盾。

（2）坝系设计标准不协调与风险级联机制缺失

受限于不同时期的技术条件和发展阶段，当前坝系规划对各区段洪水频率分布规律的认识尚不充分，单坝设计标准之间的系统协调有待加强，上下游来水差异及洪水演进叠加效应在设计中的体现仍显不足。

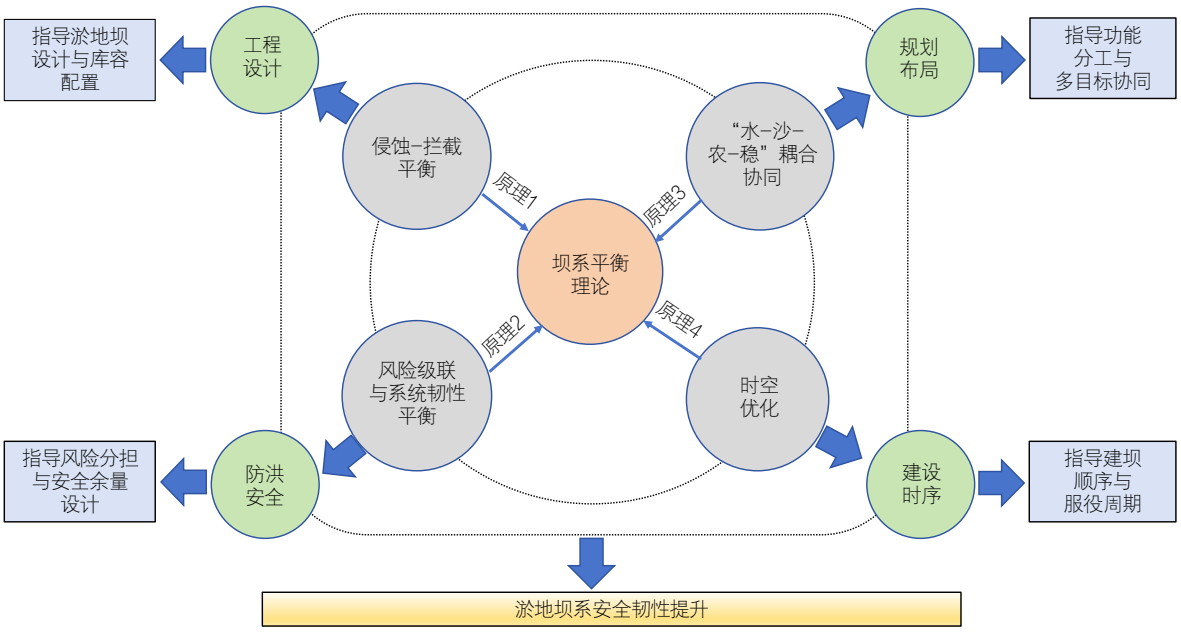


图1 坝系平衡理论对坝系安全韧性提升的映射关系

这导致上游坝库因洪水“尖瘦”、设计标准相对偏高而造成工程浪费，下游坝库因洪水总量大、相同标准下防洪风险显著偏高，易成为坝系薄弱环节。与此同时，坝系水文连通性未被纳入设计考虑，上下游缺乏基于泥沙输移规律的联动配置。各坝独立分配拦沙库容，上游坝库率先拦截大量泥沙而迅速淤满、功能衰减，下游坝库因来沙不足而长期“空腹”、拦沙潜力闲置。这种不均衡不仅降低了坝系整体拦沙效率，而且上游淤满后丧失调洪能力，将洪水风险转移至下游，进一步加剧了下游的超标准运行压力。

从坝系平衡理论视角审视，现行设计的主要局限在于将各坝视作独立工程而非坝系中的功能节点。每一座坝的设计洪水标准仅基于其自身控制面积和工程等级确定，上下游水力联系未被纳入设计边界条件。当上游坝库在超标准暴雨中失稳时，其下泄流量并非原始沟道洪水，而是叠加了溃坝释放库容水量的放大洪水，这正是风险级联效应的本质。系统韧性的实现依赖于“分级消能”和“错峰调节”，而独立设计既没有为超标准工况预留安全余量，也未能形成“上游削峰、下游控量”的级联缓冲结构。与此同时，各坝服役周期的失衡进一步放大了上述缺陷。上游坝库因率先遭遇来沙而快速淤满，其设计寿命被压缩；下游坝库因来沙被拦截而长期达不到设计淤积高程，使坝系整体拦沙效率低于设计预期。

（3）新材料新工艺推广应用不足，新型坝建设滞后

当前淤地坝建设以传统均质土坝为主，该坝型技术成熟、可就地取材，是黄土高原淤地坝工程的主体形式。但在一些特殊条件下，如筑坝材料匮乏区、地形复杂施工困难区及后期管护力量薄弱的偏远地区，传统土坝的应用受到一定限制。与此同时，改性新材料淤地坝、3D打印淤地坝、防溃决多拦沙淤地坝、柔性溢洪道淤地坝等新型坝，在试验示范中展现出建造快、适应变形、强度提高、管护成本降低等优势，可作为传统坝型的有益补充，为提升坝系安全防御能力和适应性提供新的技术路径。然而，这些新技术、新坝型目前仍处于试验示范阶段，尚未投入大规模工程应用，面临技术标准缺失、设计经验不足等瓶颈，有待加快推广应用。

从坝系整体功能需求来看，新型坝推广不足，限制了坝系在复杂条件下的功能协同与长效运行能力。传统土坝在大多数区域能够满足安全与拦沙需求，但在部分筑坝材料差、侵蚀剧烈或管护困难的区段，引入新型坝可有效弥补短板，增强坝系应对极端暴雨和复杂侵蚀环境的整体韧性，实现风险的分级管控与上下游淤积进程的动态协调。新型坝推广滞后，实质上是坝系平衡理论在技术层面尚未充分落地，应加快技术标准制定与示范推广，推动淤地坝建设形成“传统坝型为主体、新型坝型为补充”的多元化发展格局。

2.工程建设

（1）建设标准偏低，工程病害频发

受历史条件限制，早期建设的淤地坝多为群众自发修建，普遍存在建设标准低、施工质量参差不齐、泄洪设施不完善等历史欠账。近年来，病险淤地坝除险加固工作取得了积极成效，一大批工程安全隐患得到有效消除，放水设施、泄洪建筑物等关键部位得到修复完善，工程安全状况明显改善。但受投资标准总体偏低的制约，部分中型坝难以增设必要的溢洪道等泄洪设施，病险隐患未能彻底消除，安全基础尚不牢固。

在长期运行过程中，淤地坝工程病害问题仍较突出，主要类型及危害见表1。

就坝系整体平衡而言，病险坝的存在会破坏坝系上下游之间的协同关系。上游病险坝因调洪能力下降，难以有效削峰滞洪，易将超量洪水泥沙集中下泄，诱发风险沿沟道向下游级联传递，削弱整个坝系的系统韧性。因此，在巩固已有除险加固成效的基础上，应适度提高新建淤地坝的建设标准，强化施工质量管控。同时建立病险坝动态排查与销号机制，优先治理位于风险传递关键节点上的病险工程，并结合坝系整体布局统筹推进除险加固与功能提升，从源头减少病险坝产生，筑牢坝系安全运行的根基。

表1 淤地坝工程主要病害类型及危害

病害类型	主要表现	主要危害
坝体沉降变形	压实度不足或地基处理不当，坝顶凹陷、坝坡变形	影响坝体整体稳定，降低防洪标准
溢洪道损毁	冻融及水流冲刷致使溢洪道开裂、倾覆，岸坡滑塌体堵塞进口	泄洪能力下降，超标准洪水时漫顶风险增大
放水设施损毁	卧管多孔齐开致有压流水击，造成爆裂；滑塌体掩埋卧管	放水功能丧失，库水位无法有效控制
坝体及接合部渗漏	防渗体老化或质量缺陷致集中渗漏，坝体与岸坡、涵管接合部薄弱	长期渗流引发接触冲刷，危及坝体安全

（2）坝地配套设施严重不足

已建成坝地的道路、灌溉、排水、田间配套工程严重不足，导致机械化作业难以开展。一是坝地道路不健全，多数坝地缺乏通达的生产道路，大型农机具无法进入，耕作仍以人力和小型机械为主，生产效率低下；二是灌溉设施缺失，坝地缺乏配套的灌溉管网，即便邻近水源也难以有效利用，无法发挥水资源优势；三是排水系统不完善，坝地内涝和盐碱化问题突出。由于缺乏有效的排水设施，坝地地下水水位抬高，土壤可溶性盐分随毛细水上移至表层，水分蒸发后盐分积聚，导致土壤盐碱化。据调查，黄土高原地区需提升改造的老旧淤地坝中，坝地盐碱化问题占比达11.9%，大量坝地因盐碱化无法持续耕种，造成了土地资源浪费。

从坝系功能协同的角度看，坝地配套设施是连接“沙”与“农”两大目标的关键纽带。配套设施不足导致坝地农业产出低下、盐碱化严重，直接削减了坝系的农业生产效益，使“农”的目标难以实现；同时，因坝地无法高效利用，农民对坝地收益预期下降，参与管护的积极性降低，进一步加剧了“建—管—用—益”的脱节。这实质上破坏了坝系“水－沙－农－稳”多目标协同的闭环逻辑，最终制约坝系综合效益的持续发挥。因此，完善坝地配套设施不仅是提升农业产能的技术需求，更是维系坝系多目标平衡、实现长效运行的重要保障。

3.运行管理

（1）管护经费不足，加重防汛负担

淤地坝运行管护面临的最突出问题是经费短缺。由于缺乏稳定的岁修经费来源，日常养护、工程维修、监测设备运维等难以完全到位。地方水利部门在财政压力较大的情况下，有时需从防汛经费中调剂部分资金用于淤地坝维修，客观上增加了防汛工作的整体负担。同时，因维修养护不够及时，小问题未能得到迅速处理，出现了“小病变大病、小病拖成险”的现象，如坝面冲沟加深、排水设施局部损坏、渗水点未能及时封闭等，一定程度上增加了后续维修的难度和成本，也给工程安全和下游防护带来了不利影响。

从时空优化原理看，坝系的可持续运行依赖于全生命周期的均衡投入，运行期的持续管护投入与建设期的一次性投入同等重要。缺乏岁修经费意味着管护投入的周期性断裂，使坝系无法按照设计的服役周期实现“淤积—加高—再淤积”的动态平衡，而是陷入安全余量持续收窄、累积损伤无法及时修复的退化路径。

（2）占地补偿缺位，影响工程实施

淤地坝建设涉及占用农民土地情况，但补偿机制尚不完善。一是占地补偿标准不够明确，淤地坝作为公益性水土保持工程，其用地性质应按建设用地还是农用地管理缺乏统一意见，补偿标准缺少明确依据；二是补偿资金难以落实，配套资金本就紧张，可用于占地补偿的更加有限；三是补偿方式相对单一，多以一次性补偿为主，长期收益分享机制尚不健全。部分农户在土地被占用后未能及时获得相应补偿，一定程度上影响了其对工程建设的理解与支持，增加工程推进难度，给工程顺利实施和后期管护带来不利影响。

这一问题的实质在于削弱了“建—管—用—益”闭环的社会基础。当占地农户既未获得合理补偿，也未从坝地利用中获得长期收益时，其对坝系工程持消极态度，不仅配合度下降，甚至可能出现人为破坏放水设施、侵占坝地等现象，使坝系的制度性支撑被削弱。

（3）蓄水与防洪矛盾制约空库运行

现行规程规范对淤地坝汛期运行有明确要求。《水利部关于进一步加强黄土高原地区淤地坝工程安全运用管理的意见》（水保〔2019〕109号）、《黄土高原地区淤地坝工程建设管理办法》（水保〔2022〕162号）及《淤地坝技术规范》（SL/T 804—2020）均明确规定，汛期淤地坝必须空库运行，严禁蓄水运用。这一刚性规定的根本原因在于，淤地坝多建于沟道之中，坝体防洪标准有限，汛期蓄水将直接增大溃决风险。

然而，在实际运行中，群众生活、养殖、灌溉对坝内蓄水的依赖程度较高。在部分饮水困难地区，淤地坝成为重要的补充水源，有的群众直接取用坝库蓄水作为生活用水；坝地和周边农田的灌溉也离不开坝库蓄水，尤其在春旱和夏伏旱期间，坝库蓄水是主要的灌溉来源；此外，养殖业用水需求较大，淤地坝库区往往成为周边养殖户的集中取水点。在群众较为强烈的用水需求下，严格执行汛期空库运行面临较大难度，基层管理人员常处于“执行规定”与“服务群众”的两难境地。部分淤地坝坝前水位持续偏高，坝体渗漏现象有所加剧，防洪安全风险相应增加。

这一矛盾的根源在于规划阶段对“水”功能定位的缺失，坝系中蓄水设施（如塘坝）的配置长期未得到应有重视，将坝系功能窄化为单一的“拦沙工程”，忽视了通过“一塘一坝”“上拦中蓄下灌”等模式的水资源分级调蓄功能。当工程功能定位与群众现实需求之间存在结构性错位时，相关制度规定便面临执

行困境。

4.监测预警与信息化

（1）自动化监测覆盖率偏低

黄土高原淤地坝量大面广、位置偏远，自动化监测覆盖率总体偏低，现有监测体系仍以人工巡查为主。受人员素质、天气条件、交通状况等因素制约，巡查频次和覆盖面难以保证。在监测指标上，现有工作多集中于坝体外观和库水位，对内部变形、渗流压力、浸润线等关键安全指标缺乏有效监测。在信息传递上，数据采集后需逐级上报，链条较长，时效性偏弱，难以及时响应。

从风险级联与系统韧性原理看，系统韧性的前提是对系统状态的实时感知。没有监测数据就无法识别风险，无法识别风险就谈不上预警和防控。坝系风险防控在“感知”环节即已缺失，风险识别滞后，直接导致响应窗口期丧失。监测设施是坝系实现“四预”（预报、预警、预演、预案）智慧化管理的基础支撑，监测设施覆盖率低当前仍是提升“四预”能力的主要制约因素。

目前，下游有人居住的淤地坝已全面完成监测设施建设，实现了从无到有的突破。但在监测指标完整性、设备运行稳定性、数据应用能力等方面仍有较大提升空间，需持续完善并推动人防与技防深度融合。

（2）信息化建设滞后与智慧管理平台缺失

现有信息管理系统数据精度不足，更新周期长，多源数据融合度低，难以满足精细化管理需求。更为关键的是，当前系统多为分散建设的独立模块，规划、建设、运行、维护等各环节数据相互割裂，缺乏统一的集成管理平台。由于缺少集数据汇聚、模型计算与风险预警于一体的智慧平台，暴雨—洪水—淤积—溃决链的全过程模拟无法开展，坝系级联溃决风险难以定量评估和动态预演，风险预警与应急决策缺乏系统支撑，与智慧水利“四预”的要求差距显著。

二、朱家湾淤地坝溃坝事件分析

为深入剖析坝系安全韧性缺失的形成机理，以宁夏西吉县唐家河流域朱家湾淤地坝“7·15”溃坝事件为案例，从坝系平衡理论视角出发，围绕风险级联与系统韧性、时空优化、“水－沙－农－稳”耦合3个维度，诊断安全韧性缺失的关键环节。

1.工程概况与溃坝过程

朱家湾淤地坝（以下简称朱家湾坝）位于宁夏西吉县唐家河流域中游，2007年9月建成，属中型坝，由坝体和放水建筑物组成，未设溢洪道（泄洪设施）。唐家河流域建有淤地坝19座（大型8座、中型9座、小型2座），朱家湾坝位于坝系中游位置，下游2 km处为北坡大型淤地坝，形成典型的“上游中型坝－下游大型坝”串联结构。2022年7月15日，该流域遭遇超200年一遇特大暴雨，实测最大累计降水量112.6 mm，最大小时雨强72.6 mm。在暴雨冲击下，朱家湾坝因无泄洪设施，入库洪水无法及时下泄，水位迅速攀升至坝顶漫顶溃决。溃坝瞬时流量达620 m^3/s，为原始沟道洪峰流量的24倍，洪水历时670 s，溃决后约11 min内全部蓄水下泄，对下游北坡大型淤地坝构成直接冲击。

2.基于坝系平衡理论的风险机制诊断

（1）风险级联与系统韧性：从单坝脆弱到系统性溃决的传导机制

风险级联与系统韧性原理的核心是：坝系的整体安全不等于各单坝安全的简单相加，而是取决于各坝之间的风险传递关系。朱家湾溃坝完整展示了从单坝脆弱到系统性溃决的逐级传导路径。

①第一级：无溢洪道的脆弱结构。朱家湾坝为“两大件”结构（由坝体和放水建筑物组成），无溢洪道。在正常来水条件下，卧管放水可维持库水位安全；但遭遇超标准暴雨时，入库流量远超卧管泄流能力，坝前水位迅速抬升，坝体几乎成为一个“只进不出”的蓄水容器，任何水位抬升都直接转化为坝体水压力增量，直至漫顶。从系统韧性角度看，具备充足安全余量的工程应具备多路径泄洪能力，即使主要泄洪通道遭遇极端工况，仍有备用路径保障安全。而“两大件”结构恰恰缺乏这一保障，其安全完全系于“来水不超标”的前提，一旦前提被打破，溃坝将成为必然。

②第二级：势能向动能的能量转化与释放。当坝体漫顶溃决时，库内蓄水储存的势能在短时间内转化为溃口出流的动能。坝体在淤积期内拦截并储存的不仅是泥沙，还有与泥沙伴生的水量，这些水量在正常条件下以“慢排”方式下泄，溃坝时以“瞬泄”方式释放，其峰值流量远超沟道任何频率的天然洪水。淤地坝在运行期积累了蓄水势能，若无足够泄洪能力，溃坝时将集中释放，形成远超原始洪峰的破坏力。

③第三级：风险沿沟道向下游传递。朱家湾坝溃决后约11 min内全部蓄水下泄，对下游北坡大型淤地坝形成直接冲击。该坝设计防洪标准虽高于朱家湾坝，但其设计依据是天然沟道洪水，而非上游坝库溃决产

生的“放大洪水”，意味着下游坝库面临的是远超其设计洪水标准的冲击。这正是风险级联的本质特征：上游脆弱性转化为下游的超标准荷载。若北坡坝在冲击下失稳，风险将进一步向下游传递，形成“单坝—坝系单元—支沟坝系”的逐级放大链条。

（2）时空优化：上下游坝库淤积进程的失衡

时空优化原理要求根据泥沙输移时序合理配置各坝的拦沙功能与服役周期。朱家湾坝溃坝前已暴露出明显的时空失衡特征：朱家湾坝仅用15年（2007—2022年）即淤积6.3万m^3，接近拦沙库容11.73万m^3的54%，按此速率推算，其拦沙库容将在30年内淤满，远低于设计预期的服役年限。上游坝库的快速淤积意味着其滞洪拦沙功能正在加速衰减，滞留能力越弱，遭遇暴雨时水位攀升越快，溃坝风险越高。与此同时，下游北坡大型坝因来沙被上游层层拦截而长期处于“空腹”状态，拦沙潜力未得到有效发挥。从坝系整体看，总拦沙库容的分配严重不均：上游库容快速消耗，下游库容闲置，坝系拦沙功能的边际效益递减。更为关键的是，时空失衡的累积效应具有不可逆性，上游淤满后无法自动恢复库容，淤积的泥沙也不可能向下游转移，失衡状态一旦形成，只能通过工程干预（加高或新建）来修正，每一次干预都需投入新的资源。

（3）“水－沙－农－稳”耦合：单坝设计脱离坝系统筹

朱家湾坝溃坝暴露了坝系“水－沙－农－稳”耦合关系的断裂，根源在于单坝设计脱离坝系统筹。该坝在设计上定位为独立工程，未将其置于唐家河流域坝系中进行功能定位和风险分担。从坝系整体看，朱家湾坝下游2 km处即为北坡大型淤地坝，本应通过坝系联合调度形成“上游拦沙滞洪、下游控量错峰”的协同格局，但现行设计将各坝孤立对待，既未利用下游坝库的调蓄能力分担朱家湾坝的超标准洪水压力，也未在朱家湾坝配置溢洪道以形成安全的泄洪通道。单坝安全完全系于自身的防洪标准，坝系对单坝的风险分担和缓冲作用未予考虑。当超标准暴雨发生时，朱家湾坝因无溢洪道而无法安全宣泄洪水，壅高的库水直接导致漫顶溃决；溃坝释放的洪水泥沙沿沟道倾泻而下，对下游北坡坝形成远超其设计标准的冲击。“水”的调蓄功能因坝系连通性缺失而无法发挥，“沙”的拦截成果因溃坝而严重受损，“稳”的安全底线因单坝过载而失守。3个目标的相继失效，根源在于坝系缺乏单坝与坝群间的协同联动机制。坝系建设必须从流域整体出发，通过工程配置与联合调度实现“水－沙－农－稳”的协同平衡。

3.案例启示：串联坝系设计中的规范短板

朱家湾案例暴露出当前技术规范在串联坝系设计中的一项短板。现行规范中各坝设计洪水标准依据自身控制流域面积的天然洪水过程确定，上下游坝库按“各司其职”原则独立设计，隐含了上游坝库不会对下游产生额外荷载的假设。然而，当上游坝库遭遇超标准洪水溃决时，下泄流量叠加溃坝释放库容水量，瞬时流量可达原始洪峰的24倍，远超下游坝库基于天然洪水确定的设计标准。串联结构下，上游溃决洪水直接作用于下游坝库，极易引发连锁溃决。

当前规范尚未要求将上游坝库溃决洪水作为下游坝库的设计输入条件，也未建立坝系连锁溃决风险评估方法和设防标准。建议在规范修订中，针对串联坝系及下游有重要设施的坝库，增加上游坝库溃决洪水演进分析要求，将溃坝放大洪水纳入下游坝库校核工况，明确相应的安全设防标准，从设计源头提升坝系整体风险防控能力。

三、坝系安全韧性提升

针对上述关键问题，应从规划布局、工程建设、运行管护、监测预警、政策保障5个方面协同发力，构建“规划—建设—管护—监测—政策”全链条安全韧性提升体系，实现坝系布局更合理、工程更牢固、管护更长效、感知更智能、政策更有力，全面提升坝系在极端条件下的安全韧性水平与综合效益。

1.优化规划布局与多目标协同

坝系优化布局的核心是将坝系作为一个有机整体，根据各坝在流域中的位置和功能特征，合理配置其角色分工。骨干坝位于流域中下游，控制面积大、库容大，应以防洪安全为核心功能，承担调节洪峰、拦蓄泥沙的主要任务，配套完善泄洪设施并预留滞洪库容；中小型坝分布于支毛沟，应以坝地生产和拦沙淤地为主，配套放水设施以满足灌溉和坝地利用需求；在具备条件的沟段，可适当布设塘坝作为辅助蓄水单元，发挥水资源调蓄和补充灌溉功能。通过骨干坝防洪、中小型坝生产、塘坝蓄水的功能分工与协同联动，形成“上拦下保、分级滞洪、层层拦沙、梯级利用”的坝系运行格局。在此总体框架下，强化规划引领，突出水资源保障功能，明确蓄水坝的蓄水位与调度方案；因地制宜选择建坝时序，探索“边淤边种”模式，使群众在坝地淤成

过程中先期获益。同时，在适宜地区因地制宜推进改性新材料淤地坝、3D打印淤地坝、防溃决多拦沙淤地坝、柔性溢洪道淤地坝等新型坝试点，加快制定技术标准，开展示范工程建设，以新型坝弥补传统坝型在特殊条件下的适应性不足，为坝系优化布局提供多元化技术支撑，最终实现拦沙、防洪、蓄水、生产的统筹协调。

2.提升建设质量与配套水平

高标准淤地坝建设要求工程在结构安全、功能配套、生态适应等方面全面提升。结构安全方面，应强化质量全过程管控，重点优化涵管等关键结构设计。涵管是放水建筑物的薄弱环节，通常按无压流设计，但实际运行中操作人员为尽快泄洪常同时开启多个放水孔，导致管内形成有压流并产生水力共振，造成管体损坏。2016年内蒙古十大孔兑“8·17”洪水期间，多座淤地坝因此出现涵管裂缝、错位、渗漏等问题，暴露出超标准工况下的结构脆弱性。针对新建工程，在条件适宜地区可探索采用高密度聚乙烯、玻璃钢等抗拉强度高、耐腐蚀的复合管材，结构上可采用多级消能布置、限流装置或自动进气阀，防止有压流破坏；涵管型式应因地制宜，预制混凝土管、钢管外包混凝土、PCCP管等各有适用条件，需结合造价、施工能力和运行管理条件综合比选。针对已建工程，在涵管结构完整的前提下，可采用内嵌套钢管的工艺维修加固，施工便捷且对坝体扰动小。新技术推广应以科学试验验证为前提，审慎推进。功能配套上，应将道路、灌溉、排水等田间工程同步纳入建设内容，建设满足机械化作业需求的通达坝地的生产道路，配套灌溉管网实现“近水可用”，布设排盐碱沟降低地下水水位，对已发生盐碱化的坝地采取工程排水与生物改良相结合的综合治理措施。生态适应方面，应兼顾工程与周边环境协调，采用植物护坡等措施，增强坝系生态景观功能和长期稳定性，实现结构安全、功能配套、生态适应的有机统一。

3.创新管护与长效保障机制

要破解淤地坝管护难题，需从经费保障、占地补偿、蓄水调度、责任闭环4个方面协同推进。在经费保障方面，将淤地坝岁修经费纳入县级财政预算，建立“日常养护、岁修加固、应急抢险”三级经费保障体系，分别用于常规维修、结构加固和险情处置，从源头上减少病险坝产生，扭转“小病变大病、小病拖成险”的被动局面。在占地补偿方面，明确淤地坝用地政策，参照设施农业用地管理，建立占地补偿专项资金，探索“以地换地”“以补换权”等补偿模式，并将坝地经营权优先分配给占地农户，实现“占地有补偿、淤地有收益”。在蓄水调度方面，科学制定蓄水方案，在确保防洪安全的前提下允许非汛期适当蓄水，明确蓄水红线并安装水位监测设备实行超限报警，对蓄水需求强烈的坝进行防渗加固，探索“汛前腾库、汛末蓄水”的调度模式，兼顾防洪安全与用水需求。在责任闭环方面，深化产权制度改革，按照“谁管护、谁开发、谁受益”原则，将经营权和管护责任移交给有能力的经营主体，建立坝地收益分配机制，使管护报酬从收益中列支，探索“以地养坝”模式，形成“建—管—用—益”闭环，从根本上解决“有人种地、无人管坝”的问题。

4.强化监测预警与智慧管控

提升监测预警能力，需要从设施布设、网络构建、平台赋能3个层面推进。在设施布设层面，将监测设施作为淤地坝建设的标配内容，新建坝同步设计、同步建设、同步投运，已建坝分批实施改造，重点布设坝体变形、渗流、库水位、降雨等监测设施设备，确保数据“采得到、传得回、用得上”，这是实现“四预”智慧化管理的“末梢神经”。在网络构建层面，构建“天空地”一体化监测网络，将遥感影像分辨率提升至2 m以内，骨干坝采用无人机获取厘米级三维模型，布设物联网传感设备，实时采集关键参数，建设全域视频监控系统，统一数据标准与接口规范，推动监测体系与各级管理平台无缝对接。在平台赋能层面，搭建淤地坝大数据平台，整合水文、气象、自然资源等多源数据，构建数字孪生平台，实现暴雨—洪水—淤积—溃决链的全过程模拟与风险预警，同时开发轻量化移动终端应用，确保基层管理人员实时接收预警信息、上报险情隐患，形成“专业监测+群测群防”的协同防控格局。

5.完善政策体系与制度支撑

完善政策保障体系，需要从部门协调、法规标准、资金渠道3个方面协同发力。在部门协调方面，省级水利部门应加大与发改、财政、自然资源、林草等部门的协调力度，着力解决审查审批重复、用地冲突、补偿费用过高等突出问题，建立淤地坝建设联席会议制度，形成推动工作的“一盘棋”格局。在法规标准方面，适时启动相关法规修订，将淤地坝建设管理纳入法治化轨道，加快制定淤地坝“四变”（坝变库、坝变路、坝变田、坝变沟）改革、新型坝建设、涵管优化设计等技术标准，健全覆盖规划、设计、施工、管护全链

条的高标准淤地坝技术标准体系。在资金渠道方面，应充分利用《温室气体自愿减排项目方法学 淤地坝碳汇》（CCER—14—005—V01），挖掘淤地坝的碳汇能力，探索将淤地坝碳汇纳入交易市场，建立碳汇监测、核算、交易体系，通过碳汇收益反哺淤地坝建设和运行管护。此外，把淤地坝淤积形成的、可以长期稳定利用的耕地，按程序纳入耕地占补平衡指标进行交易，让“沉睡”的坝地变成可流通的“资产”，收益反哺淤地坝建设管护。全国首单淤地坝坝地占补平衡交易已于2025年12月20日在陕西榆林完成，米脂县榆林沟大坝41.38亩（1亩=1/15 hm^2，下同）新增耕地指标以6.05万元/亩成交，总金额250.35万元，标志着这项探索已从政策进入实际落地阶段。

四、结论与讨论

本研究将坝系平衡理论应用于黄土高原淤地坝系建设的问题诊断，并以朱家湾淤地坝溃坝事件进行案例分析，主要结论如下：

①当前坝系建设的核心问题在于坝系规划、设计、管理中缺乏系统统筹。规划阶段将各坝视作独立工程而非坝系功能节点，设计阶段未将上下游水力联系纳入边界条件，管理阶段管护经费短缺与蓄洪矛盾并存，三者叠加使坝系难以维持“水-沙-农-稳”多目标动态平衡，坝系建设的着力点应从单坝治理转向坝系整体统筹。

②朱家湾案例揭示了“结构脆弱—能量释放—风险传递”的级联传导路径：无溢洪道的“两大件”结构在超标准暴雨下缺乏多路径泄洪保障，蓄水势能集中释放形成远超天然洪峰的破坏力，溃坝洪水沿沟道向下游传递并形成超设计标准的冲击荷载。这一发现深化了对坝系安全的认识：单坝安全不等于坝系安全，坝系的整体安全取决于各坝之间的风险传递关系，风险级联是坝系安全韧性缺失的核心致灾机制。

③坝系安全韧性提升需要全链条协同推进。规划层面应将各坝置于坝系整体中统筹布局，特别注重单坝风险通过坝系工程体系进行分担消纳；工程层面应将泄洪设施配套作为刚性要求，优化涵管等关键结构设计；管理层面应建立稳定的岁修经费保障机制，形成“建—管—用—益”闭环；监测预警层面应构建“天空地”一体化监测网络和数字孪生平台；政策层面应加强部门协调，探索碳汇交易和坝地占补平衡等多元化资金渠道。

国内外已有研究多聚焦单坝安全评价、溃坝洪水模拟或除险加固技术，对坝系整体的风险传递机制关注不足；本文将风险级联与系统韧性原理应用于淤地坝系安全诊断，揭示了从单坝脆弱到系统性溃决的传导机制。同时，通过朱家湾案例发现了现行规范在串联坝系设计中对上游溃坝洪水作为下游设计输入条件考虑不足的短板，并提出了规范修订建议。

本研究案例分析基于近年典型溃坝事件，不同区域、坝型组合及串联结构下风险级联的表现形式可能存在差异，结论普适性有待更多流域实证检验；对溃坝洪水向下游传递的分析主要基于已有成果引用和理论推演，对风险级联的定量模拟尚有待深化，未来可进一步开展多流域、多情景实证研究，探索不同类型坝系结构下安全韧性提升的差异化路径。

参考文献：

[1] 黄河水利委员会.黄河流域水土保持公报（2025）[A].2026.
[2] 李国英.坚持系统观念 强化流域治理管理[J].水利发展研究，2022，22(11)：1-2.
[3] 李智广，王海燕，熊锐，等.淤地坝碳汇方法学内容特点及项目开发措施[J].中国水利，2026(4)：38-44.
[4] 郜国明.深入贯彻习近平生态文明思想 推进黄土高原水土保持绿色可持续发展[J].中国水土保持，2025(8)：5-10.
[5] 张攀，姚文艺.新时期淤地坝坝系平衡的概念、内涵和原理[J/OL].人民黄河，2026-07-23.https://link.cnki.net/urlid/41.1128.TV.20260722.1704.002.
[6] 李占斌，李鹏，于坤霞，等.黄土高原淤地坝风险形成机理与预警[J].中国水利，2023(18)：40-44.
[7] 莫沫.“十五五”时期水土保持总体思路与重点举措[J].中国水利，2025(22)：4-10.
[8] 陈祖煜，李占斌，王兆印.对黄土高原淤地坝建设战略定位的几点思考[J].中国水土保持，2020(9)：32-38.
[9] 王楠，樊晓华，王英顺.黄土高原淤地坝建设中有关问题探讨及对策[J].中国水土保持，2022(11)：9-11.
[10] 曹文洪，胡海华，吉祖稳.黄土高原地区淤地坝系相对稳定研究[J].水利学报，2007(5)：606-610+617.
[11] 张金良.基于新型淤地坝的黄土高原“小流域+”综合治理新模式探讨[J].人民黄河，2022，44(6)：1-5+43.

[12] 刘晓燕，高云飞，马三保，等.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报，2018，49(2)：145-155.
[13] 杨春霞，张国军，肖培青，等.黄土高原地区淤地坝建设管理的新时代需求[J].中国水土保持，2024(11)：60-62.
[14] 姚文艺，张攀.黄河流域高标准淤地坝内涵与科技问题[J].人民黄河，2023，45(2)：1-8.
[15] 常茂德，郑新民，柏跃勤，等.黄土丘陵沟壑区小流域坝系相对稳定及水土资源开发利用研究[M].郑州：黄河水利出版社，2007.
[16] 党维勤，刘立峰，胡大鹏，等.新时期淤地坝建设中工程质量存在的问题及建议[J].中国水土保持，2026(1)：29-31+109.
[17] 程鲲，赵晓林，李高歌，等.黄土高原地区老旧淤地坝提升改造规划及布局[J].中国水土保持，2025(10)：54-56.
[18] 李晓乔，牟极，孙宝龙.甘肃省黄土高原地区中型以上病险淤地坝综合治理措施体系[J].中国水土保持，2025(12)：59-61+70.
[19] 姜开勤.淤地坝建设中的用地问题探析[J].中国土地，2026(3)：54-56.
[20] 邸东.黄土丘陵沟壑区淤地坝水资源开发利用探索[J].甘肃科技，2025，41(4)：38-42.
[21] 王琳，柯琴，李炎隆，等.组合权重TOPSIS模型评价黄土高原小流域淤地坝系风险[J].应用力学学报，2022，39(4)：698-706.
[22] 张雨，刘硕.黄河流域淤地坝管理信息系统升级迭代的必要性及路径[J].中国水土保持，2026(3)：108-110.
[23] 王兴海，杨东旭，李涛，等.黄土高原丘五区典型淤地坝出险情况分析[J].西北水电，2025(6)：51-57.
[24] 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.
[25] 高雅玉，田晋华，李嘉楠.基于水土资源高效利用的淤地坝建设潜力分析[J].人民黄河，2019，41(9)：102-105+109.
[26] 李靖，张金柱，王晓.20世纪70年代淤地坝水毁灾害原因分析[J].中国水利，2003(17)：55-56+32.
[27] 党维勤，郝鲁东，高健健，等.基于“7·26”暴雨洪水灾害的淤地坝作用分析与思考[J].中国水利，2019(8)：52-55.
[28] 马建业，张扬，袁水龙.淤地坝系安全运行保障技术探析[J].中国水土保持，2019(5)：6-8+31.
[29] 于沭，李颖哲，姚雪飞，等.淤地坝系风险预警防控平台研究与应用[J].水土保持通报，2023，43(1)：84-91.

责任编辑 董林玥