

【特稿】

高标准免管护新型淤地坝坝身过流安全性研究

张金良^{1,2}, 宋志宇^{1,2}, 李潇旋^{1,2}, 盖永岗^{1,2}

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;

2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003)

摘 要: 高标准免管护淤地坝可避免传统淤地坝存在的洪水漫顶溃坝风险高、管护压力大、拦沙不充分等问题。为了给高标准免管护新型淤地坝技术的优化改进和推广应用提供理论依据, 基于高标准免管护淤地坝原型漫顶过流冲刷试验, 采用 ABAQUS 有限元软件和地质雷达探测技术, 对其结构应力、变形及滑移脱空情况进行分析, 结果表明: 高标准免管护淤地坝在洪水漫顶、坝身过流情况下, 坝体产生的增量位移较小, 对坝体的稳定性、安全性不会产生大的影响; 泄流结构(溢洪道)不会产生超过黄土固化新材料强度的拉、压应力, 结构强度满足泄流要求; 泄流结构和大坝之间不会产生大的相对滑移和脱空, 结构稳定可靠。

关键词: 淤地坝; 防冲刷保护层; 洪水漫顶; 有限元分析; 应力; 变形

中图分类号: S157.3⁺1; TV641.2⁺3 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.12.001

引用格式: 张金良, 宋志宇, 李潇旋, 等. 高标准免管护新型淤地坝坝身过流安全性研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(12): 1-4, 17.

Study on Overflow Safety of a New Type of Warping Dam with High Standard and Free Management

ZHANG Jinliang^{1,2}, SONG Zhiyu^{1,2}, LI Xiaoxuan^{1,2}, GE Yonggang^{1,2}

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources(Preparation), Zhengzhou 450003, China)

Abstract: High-standard and free management new warping dam can avoid the existing problems of traditional warping dam such as high risk of collapse, high pressure of management and maintenance, and insufficient sand containment. In order to provide a theoretical basis for the optimization, improvement and popularization of the high-standard and free management new warping dam, based on the overtopping and overflowing scouring test, the ABAQUS finite element software and geological radar detection technology were used to analyze the structural stress, deformation and slip cavitation. The results show that the increment displacement of the dam body is small under the condition of the flood overflows, and the stability and safety of the dam body will not be greatly affected. The discharge structure (spillway) will not produce tensile and compressive stress exceeding the strength of loess solidification new materials, and the structural strength can meet the discharge requirements. There is no large relative slip or cavitation between the discharge structure and the dam, and the structure is stable and reliable.

Key words: warping dam; scour protection; overtopping flood; finite element analyses; stress; displacement

黄土高原是黄河泥沙的主要来源区^[1], 淤地坝是黄土高原地区重要的水土保持措施之一^[2-3]。早期建设的淤地坝设计标准较低^[4-6], 受制于均质土坝坝身不能过流等, 存在溃决风险高、管护压力大、拦沙不充分等问题^[7-9]。针对传统淤地坝存在的问题, 王博^[10]在其设计施工管理、减沙机理、淤积程度等方面进行了分析, 惠波等^[11]对黄土高原地区淤地坝淤满情况进行了分析, 郑宝明等^[12]开展了淤地坝设计防洪标准、工程结构、最优坝体断面等方面的研究, 刘晓燕等^[13]基于实测数据分析了淤地坝拦沙作用的时效性, 李勉等^[14]研究了淤地坝在次洪水淤积过程中泥沙的再分布特征。近年来, 随着传统淤地坝病险问题日趋严重, 有关淤地坝的创新研究逐渐深入, 如陈祖煜团队^[15]研发了一种新型复合 PET 材料以及柔性溢洪道布置形式, 王亮等^[16]提出了淤地坝蓄水加固改造方案, 党维

勤等^[17]基于对病险坝在暴雨洪水情况下的连续观测研究了淤地坝水毁机理, 但均没有解决洪水漫顶溃坝的难题。张金良等^[17]基于小流域水文计算新方法、淤地坝新坝型结构、黄土固化新材料、设计施工新技术等, 创新性地构建了高标准免管护淤地坝理论技术体系, 目前该技术体系已在陕西、内蒙古等省(区)得到应用。本研究基于高标准免管护淤地坝原型漫顶过流冲刷试验, 采用 ABAQUS 有限元软件和地质雷达探测

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402408); 国家自然科学基金重点资助项目(41530532)

作者简介: 张金良(1963—), 男, 河南新安人, 正高级工程师, 博士, 博士生导师, 主要从事黄河流域重大工程与水沙调控等研究工作

通信作者: 李潇旋(1990—), 男, 河南西华人, 工程师, 博士, 研究方向为水利工程和水工结构等

E-mail: lixiaoxuan1990@126.com

技术,对其结构应力、变形及滑移脱空情况进行分析,以期为标准免管护新型淤地坝技术的优化改进和推广应用提供理论依据。

1 高标准免管护新型淤地坝基本原理

(1) 新型淤地坝结构。高标准免管护新型淤地坝结构见图1,其创新了坝工结构设计理念,通过在传统淤地坝坝体上设置高强度防冲刷保护层,从而实现坝顶溢流运用且防溃决、免管护、多拦沙。

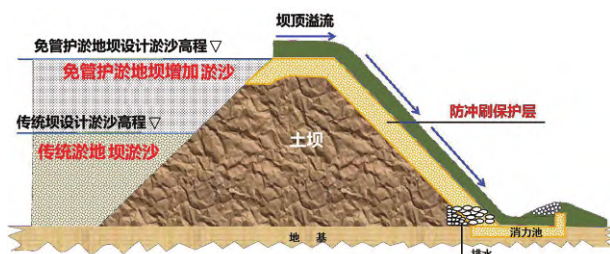


图1 高标准免管护新型淤地坝结构示意图

(2) 黄土固化新材料。黄土高原地区存在大量的黄土,采用张金良等^[1]研制的黄土固化剂可对当地筑坝黄土进行固化,在固化剂掺量为30%的情况下,黄土固化新材料28d无侧限抗压强度可达11 MPa,间接拉伸强度为1.1 MPa,首次吸水后的吸水率随龄期延长变化不大,30次冻融循环后强度损失率为23.3%,具有较好的耐久性和抗冲刷性能,可以满足新型淤地坝过流冲刷防护要求,并能降低建设成本。

(3) 设计施工新技术。黄土固化新材料可用于旧坝改造和新坝建设,根据实际工程施工需要,可采用防冲刷保护层全覆盖、防冲刷保护层局部覆盖、预制台阶式连锁块全覆盖等3种施工方式,详见文献^[7]。

2 新型淤地坝原型试验及结构应力变形分析

2.1 新型淤地坝原型试验概况

为了充分验证高标准免管护新型淤地坝技术可行性及新型坝工结构的安全性,在黄河水土保持西峰治理监督局南小河沟水土保持试验场建设了原型试验坝,其位于花果山水库左岸,坝长70 m,坝高约15 m,下游坡比约1:1.7,是对现有坝下游坝坡进行改造而成的新型坝(溢洪道),见图2。过流坡面和消力池均通过碾压铺设厚度约1.5 m的保护层(即黄土固化新材料),坝顶浇筑1 m厚的混凝土用于支撑液压翻板,溢洪道两侧边墙为砖砌结构。除试验坝外,还设置了试验用上下游蓄水池、进水池、阀门井、消力池、水泵、抽水管、液压翻板、控制室及电气设备等。

为了对溢洪道结构的稳定性和抗冲刷能力进行全



图2 原型试验坝实景

面验证,并探索新型淤地坝设计和施工标准,进行了长历时循环放水试验。试验前将花果山水库内的蓄水抽到上游蓄水池,试验开始后下泄流量大于抽水流量,上游蓄水池水位快速下降,下泄流量与抽水流量达到平衡状态时上游蓄水池水位稳定在某一高度,以此模拟连续的漫顶洪水冲刷过程。试验坝溢洪道单宽最大瞬时流量和稳定流量分别为4.82、1.00 m³/(s·m),最大泄流流速超过15 m/s。

2.2 试验坝变形与应力三维有限元分析

2.2.1 三维有限元模型

试验坝三维有限元模型见图3,坐标系取顺河流向下游为X轴正向、竖直向上为Z轴正向、沿坝轴线从右岸向左岸为Y轴正向。建模范围为试验坝及其上游10 m、下游30 m、左右岸各20 m、坝基以下20 m。模型网格划分以八节点六面体等参单元为主,共划分单元35 708个、节点43 068个。模型底部约束全部自由度,左右面Y向约束,前后面X向约束。

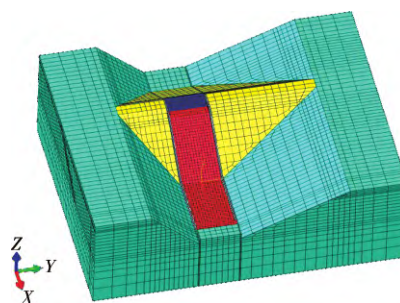


图3 试验坝三维有限元模型

2.2.2 本构模型及参数

坝体和坝基力学特性采用邓肯张E-B本构模型来表示,切线弹性模量 E_t 和切线体积模量 B_t 计算公式分别为

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \varphi)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 \quad (1)$$

$$B_t = K_b p_a \left(\sigma_3 / p_a \right)^m \quad (2)$$

当偏应力小于历史最大偏应力且应力小于历史最大应力时,回弹模量 E_{ur} 为

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\sigma_3 / p_a \right)^{n_{ur}} \quad (3)$$

式中: E_t 为弹性模量,kPa; K 、 n 为弹性模量的拟合常数; p_a 为大气压力,kPa; σ_1 、 σ_3 分别为大、小主应力,

kPa; R_f 为破坏比; c 为黏聚力, kPa; φ 为摩擦角, $^\circ$, $\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/p_a)$, 其中 φ_0 为初始摩擦角、 $\Delta\varphi$ 为摩擦角的增量; B_v 为体积模量, kPa; K_b 、 m 为体积模量的拟合常数; E_{ur} 为回弹模量, kPa; K_{ur} 、 n_{ur} 为回弹模量拟合常数, n_{ur} 与加载时的 n 一致。

固化黄土、坝基和其他材料的物理指标及模型参数, 通过试验并参考相关文献^[18-20] 来确定, 见表1和表2。

表1 弹性材料物理指标

材料	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
砌体墙	1.9	2	0.160
混凝土	2.0	20	0.167
黄土固化新材料	1.8	6	0.200

表2 坝体和坝基模型参数

位置	$\varphi_0/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	c/kPa	K	n	R_f	K_{ur}	K_b	m
坝体	30	0.85	15	350	0.35	0.8	620	210	0.20
坝基	26	0.80	13	320	0.32	0.8	550	190	0.15

2.2.3 接触及荷载条件

由于防冲刷保护层与坝体材料的刚度相差悬殊, 因此在荷载作用下会表现出剪切滑移、脱开分离等不同于连续体的变形。本研究依据库仑摩擦定律来模拟防冲刷保护层与坝体接触面的力学行为, 法向设定为刚性接触、切向设定为摩擦接触, 摩擦系数取值为 $\tan(0.75\varphi_0)$ 。

洪水漫流过程中因流速、流量、坡面及消力池表面平整度的差异等而产生极为复杂的冲刷和侵蚀, 对此难以量化表述。本研究把水流对坡面及消力池表面的复杂作用简化为自重压力和因坡面(消力池表面)粗糙而产生的冲刷切应力(见图4), 在漫顶冲刷过程中, 坡面上的水流速度逐渐加快, 水流速度在坡脚处达到峰值后在消力池中逐渐减缓, 即冲刷切应力从坝顶向坡脚逐渐增大, 在消力池中逐渐减小。

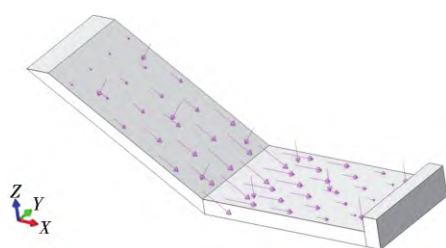


图4 水流对坡面及消力池表面的作用力示意

在稳定流情况下自重压力为常数, 由坡面上的水深和坡度决定; 冲刷应力可依据如下广义牛顿内摩擦定律来计算:

$$\sigma = -p\delta + 2\mu\varepsilon - \frac{2}{3}\mu \nabla v \delta \quad (4)$$

式中: σ 为应力张量, kPa; p 为平均应力, kPa; μ 为与流体性质有关的比例系数; δ 为 Kronecker 函数值(0 或 1); ε 为流速梯度; ∇v 为流速散度。

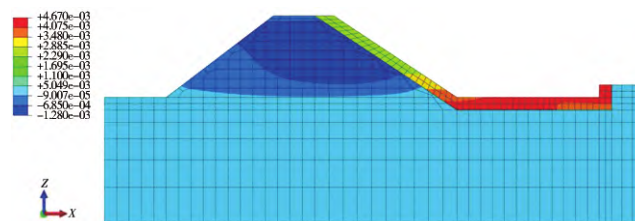
对于冲刷切应力而言, 有:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (5)$$

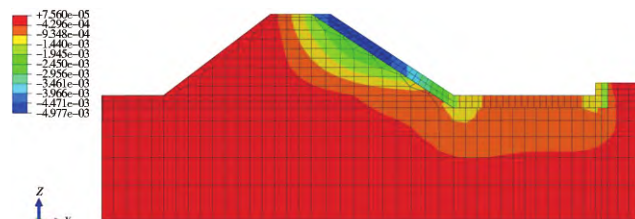
式中: τ 为冲刷切应力, kPa; v 为流速, m/s; z 为竖向坐标, m。

2.2.4 变形及应力计算结果分析

选取坝体中间横断面进行漫顶过流作用下的应力变形分析。由于试验坝是由旧坝改造而成的, 坝体沉降已经完成, 因此对坝体变形的分析重点是在坡面水流和防冲刷保护层重力作用下的坝体位移增量。由图5可知, 在漫顶过流情况下, 坝体水平向最大位移增量约为 1.28 mm, 竖向向最大位移(沉降)增量约为 2.45 mm。由图6可知, 坝体应力分布未见异常, 在洪水漫顶情况下对新型淤地坝坝体稳定性、安全性不会产生大的影响。



(a) 顺河向位移



(b) 垂直位移(沉降)

图5 典型断面位移增量分布云图(单位: m)

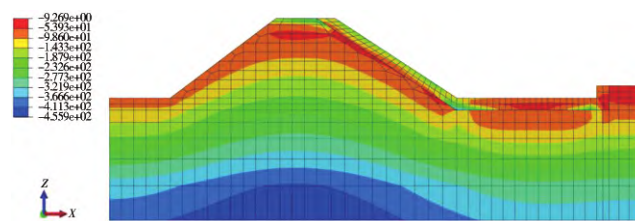


图6 典型断面小主应力分布云图(单位: kPa)

由黄土固化新材料溢洪道结构应力计算结果(见图7)可知: 泄流结构顺坡向最大压应力约为 0.5 MPa, 发生在坝趾处; 沿坝轴线方向, 防冲刷保护层底面产生了最大约 0.12 MPa 的拉应力; 从主应力来看, 泄流结构最大主应力约为 0.27 MPa(为拉应力), 最小主应力约为 0.52 MPa(为压应力)。整体来看, 泄流结构在大坝遭遇最大单宽流量为 $4.82 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 的大流量泄流时, 不会产生超过黄土固化新材料强度的拉、压应力, 结构强度满足泄洪要求。

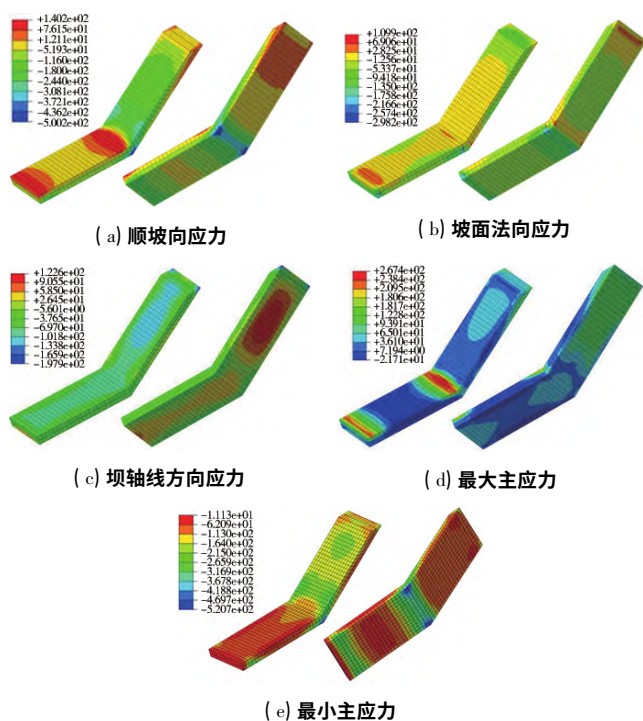


图7 溢洪道结构应力分布云图(单位: kPa)

2.3 溢洪道结构与坝体之间的相对滑移及脱空情况分析

溢洪道结构在泄流荷载作用下与大坝之间的相对滑移情况见图8、图9(溢洪道结构顺坡向的位移以向下为正,表面法向位移以向坝体为负),可以看出,最大滑移量约为2.45 mm,出现在坝体中部偏上位置。

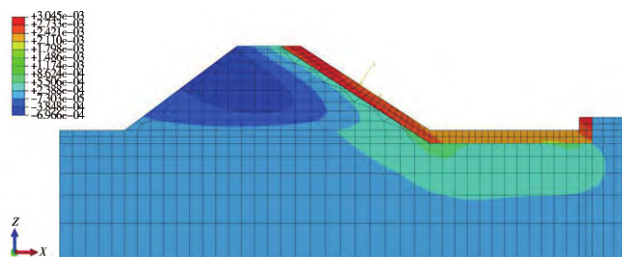


图8 溢洪道结构顺坡向位移分布云图(单位: m)

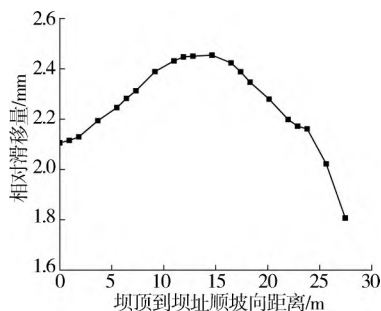


图9 溢洪道与坝体的相对滑移情况

溢洪道结构在泄流荷载作用下与大坝之间的脱空情况见图10、图11,可以看出,防冲刷保护层下滑挤压坝趾处的土体,二者发生相对变形,在坝趾处造成脱空区域,最大脱空值(二者法向最大位移的差值)约为1 mm。综上所述,溢洪道和坝体之间不会产生大的相对滑移和脱空,黄土固化新材料溢洪道结构稳定可靠。

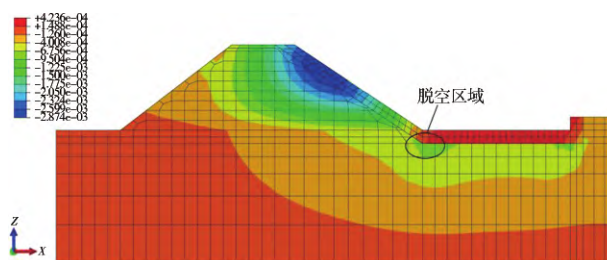


图10 坡面法向位移分布云图(单位: m)

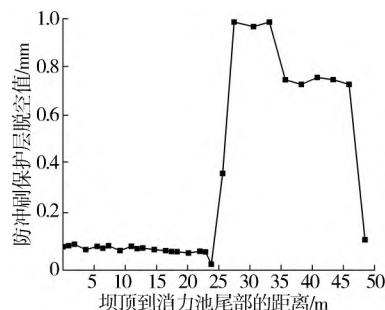


图11 溢洪道与坝体的脱空值

2.4 溢洪道结构与坝体之间脱空探测

为全面了解放水试验完成后溢洪道结构和坝体之间的脱空情况,验证数值计算的结果,冲刷试验结束后,利用地质雷达探测技术对溢洪道结构与原下游坝体之间是否存在脱空情况等进行了现场探测。采用的地质雷达探测仪型号为SIR4000(美国GSSI公司生产),其搭配200 MHz天线;采用时间模式进行探测扫描,每次扫描的采样数为1024个、记录时长为60 ns;采用5点法增益,滤波范围为100~800 MHz,从坝顶沿下游坝坡等距离布置雷达测线。由探测结果可知,反射波同相轴未发生明显错动、未出现明显缺失,雷达反射波波形未发生畸变,表明试验坝溢洪道结构与原坝体之间无明显脱空等缺陷,与数值计算结果吻合较好。

3 结论

三维有限元分析和地质雷达探测表明:高标准免管护淤地坝在洪水漫顶、坝身过流情况下,坝体产生的增量位移较小,坝体应力分布未见异常,对坝体的稳定性、安全性不会产生大的影响;泄流结构(溢洪道)不会产生超过黄土固化新材料强度的拉压应力,结构强度满足泄流要求;泄流结构和大坝之间不会产生大的相对滑移和脱空,结构稳定可靠。

高标准免管护新型淤地坝理论技术体系具有强大的生命力和广阔的推广应用前景,本项目组将在材料研发、结构优化、施工工艺提升等方面开展更加深入的研究,为高标准免管护新型淤地坝理论技术体系的推广应用提供坚实的技术支撑。

(下转第17页)

- nique [J]. Energy, 1999(24): 297-305.
- [4] ZHOU P, ANG B W. Decomposition of Aggregate CO₂ Emission: A Production-Theoretical Approach [J]. Energy Economics, 2008, 30(3): 1054-1061.
- [5] 徐军委, 刘志华. 基于对数平均权重分解法的我国二氧化碳排放因素分解研究 [J]. 中国矿业, 2014, 23(12): 24-28.
- [6] 李国志, 李宗植. 中国二氧化碳排放的区域差异和影响因素研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 22-27.
- [7] 王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素 [J]. 中国工业经济, 2010(1): 45-54.
- [8] 巩芳, 王芳. 基于 LMDI 分解模型的内蒙古碳排放实证研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(2): 36-40.
- [9] 黄勤, 何晴. 长江经济带碳排放驱动因素及其空间特征: 基于 LMDI 模型 [J]. 财经科学, 2017(5): 80-92.
- [10] JALIL A, MAHMUD S F. Environment Kuznets Curve for CO₂ Emissions: A Cointegration Analysis for China [J]. Energy Policy, 2009, 37(12): 5167-5172.
- [11] 张庆宇, 张雨龙, 潘斌斌. 改革开放 40 年中国经济增长与碳排放影响因素分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(10): 9-13.
- [12] 蔡佳丽, 张陶新. 湖南省分行业碳排放与经济增长相关性研究: 基于 EKC 曲线分析 [J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2019, 13(5): 50-56.
- [13] OECD. Indicators to Measure Decoupling of Environment Pressure from Economic Growth [R]. Paris: OECD, 2002: 13-14.
- [14] TAPIO P. Towards a Theory of Decoupling: Degrees of Decoupling in the EU and the Case of Road Traffic in Finland Between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005(12): 137-151.
- [15] LU I J, LIN S J, LEWIS C. Decomposition and Decoupling Effects of Carbon Dioxide Emission from Highway Transportation in Taiwan, Germany, Japan and South Korea [J]. Energy Policy, 2007, 35(6): 3226-3235.
- [16] 郭承龙, 周德群. 二氧化碳排放与经济增长脱钩驱动因素及趋势分析 [J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(6): 69-78.
- [17] 盖美, 曹桂艳, 田成诗, 等. 辽宁沿海经济带能源消费碳排放与区域经济增长脱钩分析 [J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1267-1277.
- [18] 邢红. 长江经济带能源消费碳排放与经济增长实证分析: 基于弹性脱钩模型 [J]. 资源开发与市场, 2019, 35(10): 1244-1251.
- [19] 王凤婷, 方恺, 于畅. 京津冀产业能源碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素: 基于 Tapio 脱钩和 LMDI 模型的实证 [J]. 工业技术经济, 2019, 38(8): 32-40.
- [20] 王健, 甄庆媛. 经济增长与 CO₂ 排放的关系研究: 以长江经济带为例 [J]. 金融与经济, 2018(4): 36-45.

【责任编辑 张智民】

(上接第 4 页)

参考文献:

- [1] 刘晓燕. 关于黄河水沙形势及对策的思考 [J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 34-40.
- [2] 田杏芳, 柏跃勤, 张丽, 等. 淤地坝试验研究 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2005: 3-14.
- [3] 冉大川, 罗全华, 刘斌, 等. 黄河中游地区淤地坝减洪减沙及减蚀作用研究 [J]. 水利学报, 2004, 35(5): 7-13.
- [4] 吴伟. 淤地坝设计技术和泥沙淤积进程研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 1-4.
- [5] 付凌. 黄土高原典型流域淤地坝减沙减蚀作用研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007: 2-9.
- [6] 王英顺, 田安民. 黄土高原地区淤地坝试点建设成就与经验 [J]. 中国水土保持, 2005(12): 44-46.
- [7] 郑宝明. 黄土丘陵沟壑区淤地坝建设效益与存在问题 [J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 32-35.
- [8] 高照良, 杨世伟. 黄土高原地区淤地坝存在问题分析 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(6): 16-19.
- [9] 党维勤, 党恬敏, 高璐媛, 等. 黄土高原淤地坝及其坝系试验研究进展 [J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 141-145.
- [10] 王博. 黄土高原淤地坝施工技术、质量控制与运行安全保障措施 [J]. 西安: 西安理工大学, 2007: 3-5.
- [11] 惠波, 惠露, 郭玉梅. 黄土高原地区淤地坝“淤满”情况及防治策略 [J]. 人民黄河, 2020, 42(5): 108-111, 115.
- [12] 郑宝明, 王晓, 田永红, 等. 淤地坝试验研究与实践 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 3-6.
- [13] 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.
- [14] 李勉, 姚文艺, 史学建. 淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究 [J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 111-115.
- [15] 于沛, 陈祖煜, 杨小川, 等. 淤地坝柔性溢洪道泄流模型试验研究 [J]. 水利学报, 2019, 50(5): 612-620.
- [16] 王亮, 聂兴山, 郝瑞霞. 淤地坝蓄水加固改造方案的渗流和稳定性分析 [J]. 人民黄河, 2021, 43(4): 137-141.
- [17] 张金良, 苏茂林, 李超群, 等. 高标准免管护淤地坝理论技术体系研究 [J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 136-140.
- [18] 索晓芳, 郭恩辉, 赫腾飞. 重塑黄土邓肯-张模型参数初步研究 [J]. 石家庄铁道学院学报(自然科学版), 2009, 22(4): 59-62.
- [19] 高江平, 李芳. 黄土邓肯张模型有限元计算参数的试验 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 10-13, 21.
- [20] 刘军定, 李荣建, 孙萍, 等. 基于结构性黄土联合强度的邓肯-张非线性本构模型 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 1): 124-128.

【责任编辑 张智民】