

黄土高原地区淤地坝拦沙分析方法研究进展

蒋凯鑫¹, 莫淑红¹, 于坤霞¹, 李占斌^{1,2}

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 淤地坝是黄土高原地区水土流失治理中行之有效的沟道治理措施, 其通过滞洪拦泥淤地的方式在减沙减蚀方面发挥着至关重要的作用。随着流域生态保护的日趋科学合理, 有必要对淤地坝在不同阶段的拦沙量进行定量准确分析, 以评估其在水土流失治理中真实具体的效益, 为黄河流域高质量发展的精准施策提供参考依据。通过查阅国内外淤地坝相关研究, 结合野外调查采样、室内上机测试以及后续相关研究经验, 系统总结归纳当前淤地坝拦沙量分析的实地调查、地形测绘法、数理归因法、成因分析法、权重系数法、模型模拟法和指纹识别技术 7 种方法, 阐述各方法原理、步骤、适用性、需要解决的问题等, 并对未来淤地坝拦沙量分析进行展望, 以期能为进一步精准定量分析淤地坝拦沙量提供参考。

关键词: 淤地坝; 拦沙量; 黄土高原; 黄河中游

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)06-0001-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.001

Research Progress on Sediment Retention Analysis Methods of Yudiba Dams in the Loess Plateau

JIANG Kaixin¹, MO Shuhong¹, YU Kunxia¹, LI Zhanbin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Yudiba dam serves as an effective measure for controlling gully erosion and mitigating soil and water loss in the Loess Plateau. Its role in reducing sediment yield and transport in watersheds is achieved by temporarily obstructing or slowing down floodwaters, thereby retaining sediment and preventing silting into the river. With the ecological protection of the basin becoming more and more scientific and reasonable, it is necessary to quantitatively and accurately analyze the sediment retention of Yudiba dams in different stages in order to evaluate their real and specific benefits in the control of water and soil loss, which can provide a reference for the precise implementation of high-quality development in the Yellow River Basin. By consulting the literature and data of related research on Yudiba dams at home and abroad, combined with field investigation and sampling, laboratory instrument testing and subsequent related research experience, this paper systematically summarizes seven methods for analyzing the sediment retention of Yudiba dams: field investigation, topographic mapping method, mathematical attribution method, cause analysis method, weight coefficient method, model simulation method and dating analysis in fingerprint identification technology. The principle, steps, applicability and problems to be solved of each method are described, and the follow-up sediment retention analysis of Yudai Dam is prospected, with a view to providing reference for further accurate quantitative analysis of sediment retention of Yudiba dams.

Keywords: Yudiba dam; sediment retention; Loess Plateau; middle stream of Yellow River

黄河是全世界泥沙含量最高、治理难度最大、水害最严重的河流之一^[1], 其泥沙问题始终是热点研究问

题^[2]。新中国成立以来, 在党和国家高度重视下, 黄河水沙治理取得显著成效^[3-4]。作为黄河流域的重要组成

收稿日期: 2023-05-18

资助项目: 国家自然科学基金项目(52179024, U2040208)

第一作者: 蒋凯鑫(1994—), 男, 博士生, 主要从事旱区水循环机理及水文模型研究。E-mail: jiangkaizn@qq.com

通信作者: 莫淑红(1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: moshuhong@xaut.edu.cn

部分^[5],中游黄土高原地区贡献入黄泥沙近 90%^[6],是我国最严重的水土流失与生态环境脆弱区^[7]。

众多研究^[8-10]表明,人类活动是黄河中游黄土高原地区近年来入黄泥沙锐减的主导因素。作为黄土高原地区人民群众,在长期同水土流失斗争实践中创造出可滞洪拦泥、淤地造田的水土保持沟道治理工程,淤地坝对控制侵蚀、减少入黄泥沙发挥着重要作用^[11]。近年来,党和政府在政策等方面给予足够支持,特别是于 2019 年 9 月 18 日在郑州召开的黄河流域生态保护和高质量发展座谈会^[12],2022 年 4 月 2 日通过《水利部 国家发展改革委关于印发黄土高原地区淤地坝工程建设管理办法的通知(水保〔2022〕162 号)》^[13],2022 年 10 月 30 日通过并自 2023 年 4 月 1 日起施行的《中华人民共和国黄河保护法》^[14],再次说明淤地坝工程对于减少黄河中游黄土高原地区入黄泥沙的重要性已毋庸置疑。

淤地坝作为治理黄土高原地区水土流失的关键措施之一,其拦沙的准确计算是评估淤地坝减沙效益的重要衡量指标且对该地区水土流失治理、淤地坝安全运行管理、黄河水沙变化等相关研究均有实际指导意义。近年来,众多学者^[5,8,10]对淤地坝拦沙作用及其对输沙变化的贡献率方面开展相关研究并取得大量成果,但就淤地坝拦沙量分析方面来说,多数成果^[9-10]在研究区域、研究时段、研究方法、淤地坝类型、资料来源等方面均存在较大差异,难以直接对比。因此,从黄土高原地区淤地坝拦沙分析方法的角度切入,对相关成果进行总结归纳,以期为深入理解黄河中游黄土高原地区的输沙量变化以及淤地坝实际效益提供一定的参考。

1 淤地坝总拦沙分析方法

1.1 实地调查法

当前,黄土高原地区淤地坝相关数据源^[15]基本均来自于实地调查。第一次全国水利普查,其数据截

止时间为 2011 年年底,给出的骨干坝统计指标包含坝名、总库容、已淤库容、控制面积、坝高、坝长、经纬度等,但无“建坝时间”信息。近年来,黄河水利委员会完成以服务于淤地坝防汛安全检查为目的的统计资料,其统计的骨干坝信息包括坝名、总库容、设计拦沙库容、控制面积、经纬度,但无截至目前的淤积总量信息和相关省(自治区)的逐年淤地坝年报数据。1990 年以来,黄河水利委员每年下达的淤地坝建设任务。2022 年黄河水利委员会完成黄土高原中型以上淤地坝首次大规模系统风险隐患排查,其数据截至 2020 年年底,排查结果显示,黄土高原地区有 16 788 座中型以上淤地坝,其中大型坝 6 265 座、中型坝 10 523 座、下游有人淤地坝 1 356 座^[16]。

2000 年以来,黄河中游淤地坝大规模详查主要有黄河上中游管理局组织实施的涉及陕甘宁晋及内蒙古 5 个省(自治区)的黄河中游多沙粗沙区水利水土保持工程现状调查,截止时间为 1999 年;水利部组织实施的黄土高原淤地坝安全大检查专项行动,其数据截止时间为 2008 年;第一次全国水利普查^[17],其数据截止时间为 2011 年,其中各省(自治区)淤地坝数量见表 1,共有淤地坝 58 446 座,淤地面积 927.57 km²,其中库容 50 万~500 万 m³的治沟骨干工程 5 655 座,总库容 57.01 亿 m³。此外,部分行政区也对辖区内进行淤地坝详查,2014 年底,内蒙古鄂尔多斯市启动全市范围内淤地坝拦蓄泥沙效益调查及隐患排查工作,经统计,全市共完成淤地坝调查 1 616 座(有 23 座损毁),累计淤积泥沙量 1.38 亿 m³,占设计拦泥库容的 28%。

实地调查内容包括淤地坝的数量、建成时间、库容和已淤积库容等,具有较强的可信度。但此方法耗时耗力耗财,外加黄土高原地区淤地坝数量过于庞大,特别是中小型淤地坝,很难做到事无巨细,同时调查间隔时间较长也导致错过淤地坝中途发生的变化。

表 1 第一次全国水利普查各省(自治区)淤地坝数量

省 (自治区)	淤地坝				治沟骨干工程			
	数量		淤地面积		数量		总库容	
	座数/座	比例/%	面积/km ²	比例/%	座数/座	比例/%	库容/(万 m ³)	比例/%
山西	18007	30.81	257.51	27.76	1116	19.73	92418.0	16.21
内蒙古	2195	3.75	38.42	4.14	820	14.50	89810.4	15.75
河南	1640	2.81	30.83	3.32	135	2.39	12470.3	2.19
陕西	33252	56.89	556.90	60.04	2538	44.88	293051.6	51.41
甘肃	1571	2.69	23.88	2.57	551	9.74	38066.4	6.68
青海	665	1.14	0.72	0.08	170	3.01	9622.1	1.69
宁夏	1112	1.90	18.97	2.05	325	5.75	34630.6	6.07
新疆	4	0.01	0.34	0.04	/	/	/	/
合计	58446	100.00	927.57	100.00	5655	100.00	570069.4	100.00

注:淤地坝常按库容划分为大型淤地坝、中型淤地坝和小型淤地坝。大型淤地坝一般由坝体、放水建筑物和泄洪建筑物及配套工程组成,而小型淤地坝一般仅包括坝地^[18];此处治沟骨干工程,也称骨干坝,等同于 2021 年 2 月 28 日实施的《淤地坝技术规范》中的大型淤地坝。

1.2 地形测绘法

地形测绘法借助淤地坝所处沟道的实测地形图或采用 3S 技术等提取淤地坝信息并对沟道进行概化或地形插值后,结合不同年份的坝地淤积高程,利用棱台或圆台等体积计算公式估算淤地坝的总淤积泥沙量。

弥智娟等^[19]在皇甫川流域内,采用地形图、TM 影像、Google Earth 影像等多源数据,利用遥感及 GIS 技术提取流域内淤地坝座数、位置、坝控面积等主要信息,结果表明基于多源数据的淤地坝主要信息提取技术可行且准确;马煜栋等^[20]在无定河流域(榆林地区)内,采用卫星影像、踏勘、资料收集等方式,利用 3S 技术提取流域内淤地坝座数、位置、水面和坝控面积等主要信息,结果显示,研究区内所解译出的疑似淤地坝图斑 1 257 个,主要分布在下游区域且沟道内多为水域或耕地;魏艳红等^[21]在延安市安塞区马家沟流域内,概化淤地坝地形图等高线之间的立体形状为圆台,以高程为自变量、等高线间体积为因变量得到淤地坝库容曲线,进而依据实测淤积高程、面积得到淤地坝已淤泥沙量;Zeng 等^[22]在黄土高原地区选取 102 条无坝沟道,借助无人机摄影测量建立 DEM(分辨率为 0.12~0.24 m),通过淹没分析对无坝沟道淤地坝修建及泥沙淤积进行研究,并对地形因子和拦沙量进行量化,进一步基于回归分析建立不同的淤地坝拦沙量估算模型,并验证模型的准确性,结果表明,该方法在黄土高原地区具有较好的适用性,能准确计算不同尺度淤地坝拦沙量;Fang 等^[23]基于多源遥感数据的面向对象分类方法,获取黄土高原淤地坝的空间分布,然后结合无人机摄影测量和虚拟淤地坝建设进而建立经验公式,以此关联泥沙淤积面积和泥沙量,之后基于从地表到深层测量的土壤容重数据,进一步估算每个淤地坝相对应的泥沙淤积量,结果显示,黄土高原地区 50 226 座淤地坝总计拦截约 102 亿 t 泥沙,相当于 1970—2020 年黄河输入渤海湾泥沙量的 46%,表明淤地坝是黄河输沙量急剧减少的主要原因。

近年来,地球物探技术也被引入淤地坝库容确定的工作中。Fang 等^[24]在黄土高原地区选取 6 个典型淤地坝,通过高密度电阻率测量系统(electrical resistivity tomography, ERT)反演淤地坝库容地形,并结合挖掘淤积剖面、钻孔采样等方式进行验证,结果表明 ERT 具有较高精度(95.7%),可作为新方法估算淤地坝(特别是无资料地区的淤地坝)已淤积泥沙量;王韵等^[25]选取宁夏西吉县一座小(二)型水库,利用探地雷达(ground penetrating radar, GPR)对坝前已淤泥沙进行探测试验,结果表明,GPR 可以较好反映原河床上方的淤积泥沙轮廓及分层特征。

该方法计算准确性依赖 3 点:一是高精度的

DEM。相比传统方法,通过机载 LiDAR 快速获取流域高精度 DEM 的方法越来越可行,而对机载 LiDAR 原始点云进行插值的算法的成熟,使该方法真正被广泛应用。李朋飞等^[26]在董庄沟流域内,分别选用反距离加权插值法、克里金插值法、自然邻域插值、样条插值、趋势面插值、不规则三角网等 6 种插值方法对机载 LiDAR 原始点云进行插值分析显示,在点云密度较大时(39~77 点/m²),各插值方法差异不大,点云密度较小时(1~19 点/m²),缓坡和陡坡最优插值为自然邻域插值和不规则三角网,点云密度较大时(39~77 点/m²),缓坡和陡坡最优插值均为样条插值。高精度 DEM 对计算流域时段始末的产输沙具有较好的效果。谢有忠等^[27]在台湾省兰阳溪中上游区域,利用台风前后 2 次高精度空载激光雷达获取 DEM 数据(分辨率为 2 m),应用高程差值分析河道地形变化,结果显示,高精度 DEM 在分析河道地形变迁和泥沙沉积方面效果极佳;代文等^[28]在黄土高原窑家湾小流域内,利用 2 期(2006 年、2019 年)分辨率为 1 m 的 DEM 数据,分析得到流域输沙空间分布,结果显示,基于高精度的 DEM 数据的空间输沙模型可高效便捷得到流域输沙空间分布。二是沟道地形插值方法。黄土高原沟道具有较多不规则的横截面,直接采用几何法估算会导致结果误差偏大。支再兴等^[29]在王茂沟流域内,选用分辨率为 2 m 的 DEM 数据,采用四阶带参 Hermite 插值法重建流域淤地坝修建前的沟道地形,结果表明,相比三阶 Hermite 插值方法,重建沟道精度可提高 15%。三是坝地淤积泥沙在不同深度的容重。潘明航^[30]通过对皇甫川流域罕将沟淤地坝深度和容重进行分析发现,在采样深度(9.79 m)内,淤积泥沙容重与深度的对数呈线性关系;曾奕^[31]对沙堰沟小流域坝地泥沙淤积剖面容重和深度进行分析发现,在深度<12.7 m 时,容重随深度增加而增大,呈线性关系;深度≥12.7 m 时,容重为一稳定值,即 1.56 g/cm³。此方法无法计算逐时段拦沙,而淤地坝的逐时段拦沙对深入分析黄河中游水沙变化的阶段特征具有重要意义。

2 淤地坝逐时段拦沙分析方法

2.1 数理归因法

数理归因法多为仅考虑气候变化和人类活动建立在数理统计分析基础上的“黑箱”模型,如水文法、累积斜率法、双累积曲线法等,通过划分基准期(认为此时段内人为干扰对水沙的影响可忽略)和变化期,然后在基准期建立降水—径流、降水—输沙相关关系,之后将变化期的降水带入基准期构建的降水—径流、降水—输沙数学模型获得变化期没有人为干扰的情况下径流、输沙模拟值,而后认为其与变化期对应

的径流、输沙实测值间的差值是人类活动造成的减水减沙量。

该方法虽直观、简便,但难以分离出各项水土保持措施的减水减沙贡献率,为此可考虑作为输入地表征气候变化的降水、蒸发等、表征人类活动的各项水利水保措施、植被覆盖度等与作为输出的流域径流输沙的数理归因方法得到发展应用。李晓乐等^[32]以 1960—2015 年大理河流域为研究对象,选取代表气候变化的降水、潜在蒸散发和代表人类活动的水土保持措施梯田、林地、草地、淤地坝,基于 Gamlss 模型定量分析各因素对流域输沙量变化的贡献率,结果表明,相比基准期(1960—1970 年),变化期 I (1971—2002 年)淤地坝减沙贡献率为 43%,变化期 II (2003—2015 年)为 36%;钟雪^[33]在延河流域内,选取耕地面积、农村人口、城镇化率、总产值、人均收入差距、淤地坝累计拦沙量、七八月总降水量,对各因子标准化后采用多元回归分析等方法,对流域 1981—2016 年输沙进行拟合表明,对流域输沙影响最大的依次是人均收入差距(总效应 2.19)、淤地坝累积拦沙量(1.53);李磊磊^[34]在窟野河流域内,经趋势突变检验将水沙变化划分为 1980—1998 年和 1999—2017 年 2 个阶段,选取降水、退耕还林(耕地面积、植被覆盖)、水保措施(淤地坝)、经济(水保投入比例)和农村人口,采用系统动力学 Vensim 软件定量分析各因子对流域输沙变化的贡献率表明,1980—1998 年、1999—2017 年人类活动均占据主导作用,其中淤地坝贡献占比分别为 18.9%,14.1%。该方法在数理统计的基础上,主要获取淤地坝对流域水文站输沙变化的贡献率,间接得到淤地坝对整个流域的减沙量(非淤地坝坝地实际拦沙量)。

该方法存在 4 个问题:一是可提供水文要素实测值的水文站的控制流域与流域下垫面按类型所划分区域不匹配,造成在包含多种土壤侵蚀类型区的流域内仅建立 1 个降水—径流(降水—输沙)相关关系很难反映流域内实际情况的局面。二是降雨资料与实际流域降雨信息不匹配。当前研究的降雨资料主要来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),时间分辨率多为日、月、年,雨量站站网密度除在个别需要满足科研生产需要的流域(如岔巴沟流域,流域面积 205 km²,布设 11 个雨量站)外,难以满足水文站网规划技术导则^[35],而黄土高原地区汛期(6—9 月)降水占全年的 70%,且主要形式为短历时强降水^[36-38],其中极端降雨事件对该地区的产输沙具有更为深重的影响^[39]。三是对存在极端雨洪事件的年份的水文要素模拟误差过大,且近年来,黄河中游极端事件发生频次的明显提高^[40]又促使误差进一步变

大。四是降水因子在变化期发生变化。Cai 等^[41]利用采自吕梁山中北部多地树轮宽度等资料重建黄土高原地区 1773—2020 年共计 248 年的水文年降水序列分析表明,黄土高原地区经历 4 个相对干旱期和 4 个相对湿润期,其中 1910—1932 年和 1796—1806 年分别是最干旱和最湿润的时期;在 10 年尺度上,20 世纪 20 年代和 21 世纪 10 年代分别是最干旱和最湿润的 10 年,而在 100 年尺度上,19 世纪相对湿润,20 世纪相对干旱;虽然 20 世纪下半叶降水呈显著减少趋势,但其在 21 世纪初期得到扭转并逐渐变得湿润,2014—2020 年是过去 250 年中第 2 个最湿润时期。

2.2 成因分析法

成因分析法,即“水保法”,通过对水土保持试验站(如隶属于黄河上中游管理局的天水、西峰、绥德水土保持科学试验站)径流小区观测资料的分析来确定淤地坝单位坝地拦沙量,进而对已核实的各时段淤地坝坝地面积与对应单位坝地拦沙量指标的乘积进行求和,即得流域内淤地坝逐时段拦沙量。冉大川等^[42]在大理河流域内对 1960—2002 年不同类型淤地坝减沙效应研究发现,现状条件下大理河流域小型淤地坝、中型淤地坝和大型淤地坝(含骨干坝)的减沙指标分别为 60 140,94 660,152 825 t/hm²;冉大川等^[43]在西柳沟流域,依据地区相似性原则,结合西柳沟流域自身情况指出,1990—2010 年流域内淤地坝坝地适当修正的减沙指标为 650 t/hm²,淤地坝坝地拦蓄泥沙量为 24.7 万 t。

该方法计算简洁,但计算结果的准确性取决于单位坝地拦沙量指标和坝地面积是否能反映实际情况,其中单位坝地拦沙量指标取决于 2 个方面因素:一是流域内地貌类型及水土流失特点的差异。无定河流域可划分为河源涧地区、风沙区、黄土丘陵沟壑区 3 个水土流失类型区。二是淤地坝种类。按淤地坝和下游沟道的连通方式^[44]可以分为不连通、通过溢洪道连通、通过竖井或卧管连通、通过溢洪道和竖井或溢洪道和卧管连通、通过竖井或卧管与溢洪道连通、通过坝体损毁的豁口连通、通过排水渠连通、通过排水渠—竖井连通、通过排水渠—溢洪道连通、通过排水渠—竖井和溢洪道连通、通过排水渠—坝体损毁豁口连通 11 类。坝地面积取决于不同类型淤地坝统计结果的准确性和每一座淤地坝坝地面积统计结果的准确性两方面因素。2011 年第一次全国水利普查重新界定“坝地面积”为在沟道拦蓄工程上游因泥沙淤积形成的地面较平整的可耕作土地,而“已淤地面积”专指淤地坝拦蓄泥沙淤积形成的地面较平整的可耕作土地。“坝地面积”中的一部分是由“已淤地面积”转化而来,但还包括台地等其他类型坝地。在此之

前,不同来源的淤地坝统计信息中对“已淤地面积”的定义存在较大差异,甚至还包括河道内的川台旱地。本文采用“坝地面积”的说法且其与“已淤地面积”内涵一致。

2.3 权重系数法

权重系数法依据坝控流域产沙量与坡度、植被覆盖度和土壤可蚀性因子等显著相关^[45],淤地坝拦沙取决于坝控流域内土壤侵蚀模数、拦沙效率的原则,多借助刘宝元等^[46]利用黄土高原地区径流小区实测资料建立的中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE),选取影响淤地坝坝控流域内产输沙的主要因子,计算逐年权重系数反推淤地坝的逐年拦沙量;王云毅^[47]在黄土高原“十大孔兑”之一的罕台川流域内,对流域内具有拦沙能力的淤地坝按照已淤泥沙与已淤年限的比值得到,流域内淤地坝从建成年至2013年单坝的年均拦沙量;杨吉山等^[48]在清水河流域内假定坝库均匀分布,坝库控制流域内平均侵蚀强度与全流域平均侵蚀强度相似,坝库拦沙率基本符合指数型规律,拦沙率与剩余库容率高度相关可近似替代,剩余可淤积库容率系列均值取淤地坝建成首年和计算时段末年共计2年均值的前提下,选取坝控面积、平均侵蚀强度、拦沙率建立淤地坝逐年拦沙量计算公式,反推出清水河流域1971—2012年淤地坝的逐年拦沙量;蒋凯鑫等^[49]在无定河流域内按照某时段或年份流域内淤地坝拦沙量与该时段或年份流域内淤地坝的总有效控制面积成正比、与产沙降雨指标的 n 次方成正比的原则,选取淤地坝控制面积、产沙降雨指标作为权重系数反推出不同时期淤地坝拦沙量;郑明国^[50]在大理河、清涧河和延河流域引入历年淤地坝坝控面积、降水2个因子作为反推淤地坝逐年拦沙量的权重系数,完成3个流域内淤地坝逐年拦沙量的反推;刘晓燕等^[51]在实测淤地坝已淤泥沙的基础上,引入有效坝控面积占流域面积的比例、流域输沙量2个因子,构建榆林、延安等淤地坝集中地区的拦沙量计算公式,得到陕北淤地坝的拦沙量;呼媛等^[52]在延河流域内假定淤地坝拦沙量占累积拦沙量的比值近似等于水文站逐年实测输沙量占序列累积输沙量的比值,水文站逐年实测径流量占序列累积径流量的比值与其逐年实测输沙量占序列累积输沙量的比值相等,即淤地坝逐年拦沙量占总拦沙量的比值近似等于水文站逐年实测径流量占总时段累积径流量的比值,通过对水文站实测逐年输沙量进行趋势突变检验,划分基准期、变化期并分别拟合径流—输沙得到相关系数,引入不同时期径—输沙相关系数和对应的实测径流量建立逐年拦沙量计算公式,反推出不同时期骨干坝的逐年拦沙量;杨媛媛等^[53]在大理河

流域内通过选取降雨侵蚀力因子、植被覆盖管理因子、水土保持措施(仅考虑梯田措施的影响)因子,计算骨干坝已淤泥沙的逐年反推权重系数,得到骨干坝修建完成运行至调查年份的逐年拦沙量;Zhang等^[54]在黄河中游多沙粗沙区内,通过骨干坝预期寿命、坝控面积、拦沙率和所在流域的产沙模数估算12条一级支流不同时期骨干坝拦沙量。

该方法作为当前黄土高原地区淤地坝逐时段拦沙分析的主流方法,皆在权重系数方面进行摸索,引入多种既有或自定义的因子,并在各研究区域内对淤地坝进行逐时段拦沙量的反推,但尚需考虑2个方面。一方面,淤地坝坝系。实际中淤地坝所处沟道内单座淤地坝发挥作用的情况并不常见,更为普遍的情况是不同类型的淤地坝通过不同的级联方式构成复杂的坝系结构,且该坝系结构还随着坝系内不同淤地坝的修建早晚、是否失效和除险加固等问题的逐一发生或同时发生而变化。另一方面,淤地坝失效。淤地坝按照设计要求其拦泥库容淤满即失效,但实际中多数淤地坝拦泥库容淤满后依旧可发挥拦沙作用。高云飞等^[55]通过选取清水川、窟野河、秃尾河、无定河、延河共计5条黄土高原地区黄河一级支流内20世纪70年代前修建的11座失效骨干坝(1989年和2011年2次调查期间已淤库容无明显变化),与实地调查数据比对分析得出,黄土高原骨干坝、中小型淤地坝失效标准为已淤库容与总库容比值分别达0.77,0.88;唐鸿磊^[56]以岔巴沟流域左岸一级支沟蛇家沟流域为研究对象,通过数值模拟提出,淤地坝在淤满设计库容后可形成额外库容,该额外库容可保证淤地坝在不同强度下的降雨事件中可继续直接拦沙,同时模拟结果也表明,淤地坝淤满设计库容后间接减蚀效率增强。

2.4 模型模拟法

模型模拟法是指基于物理机制的水文模型对流域水文过程进行模拟,可区分各要素对水沙变化影响的方法。模型有SEDD(sediment delivery distributed model, SEDD)、SWAT、MIKE系列、WEPP(water erosion prediction project, WEPP)等。

Zhang等^[57]在窟野河流域内,选取降水、淤地坝、土地利用(1987年、2006年、2016年3期)3个因子,采用野外调查和SEDD模型模拟相结合的方法,定量分析3个因子对流域侵蚀产沙的影响表明,淤地坝是流域内侵蚀减少的主导因素,1987—2016年减沙量贡献占比为40.09%;李二辉^[58]在皇甫川流域内,通过将淤地坝近似于无控制水库,基于SWAT模型挑选并输入20座修建于1980年之前的淤地坝相关信息,设置不同工况得到,在研究时段内,淤地坝是

径流输沙减少的主要因素,占人类活动总减沙量的 69.4%;袁水龙等^[59]在王茂沟流域内,采用 MIKE SHE 和 MIKE 11 模型,分析 1962—1966 年流域内淤地坝的减沙效益表明,相比未建坝,骨干坝可使输沙模数下降 24.74%,中型坝 47.11%,小型坝 64.11%,而淤地坝坝系可使流域输沙量减少 83.92%;黄志凯^[60]在南小河沟流域的杨家沟内,选取 2018 年 11 场径流,基于 Geo-WEPP 模型对流域淤地坝建设前和建设后进行模拟表明,淤地坝可使流域年侵蚀量由 570.5 t/a 减少至 381.5 t/a,下降幅度达 33.1%。

该方法基于过程的水文模型,可较好反映流域侵蚀状况,并可通过设置不同工况来控制变量进而得到淤地坝对流域输沙变化的贡献。此方法在应用中尚存在问题。一是资料支撑不足。在实际情况中,很难有完整的匹配资料来搭建模型。二是适应性欠佳。当前的水文模型多来自于国外,其对于中国独有的黄土高原地区和该地区独特的淤地坝等欠缺考虑。三是参数较多。此类方法所包含的众多模型为满足更好描述研究区过程变化的初衷,引进众多参数,而因为前 2 条的原因,许多参数或在默认范围内挑选或具有明显的地域性或实际中无法实测,导致在参数率定中难免夹带个人主观带来的影响,导致结果模拟脱离初衷。四是尺度问题。空间尺度上,在点尺度、小尺度流域建立的规律或水文过程如何推广到中大尺度流域的问题依旧存在,而中尺度或大尺度的模拟往往又对流域管理和决策更具意义。时间尺度上,基于场次事件的模拟和基于日资料的模拟同样难以转换,而当前基于日资料模拟的水文模型常在日尺度模拟结果上进行升尺度来提高结果的可信度。五是计算量太大。在前 4 条问题解决的基础上,当研究区在时间、空间上变长、变大时,模型模拟所需处理的时间、数据量也将急剧膨胀,导致模拟结果获取困难。

3 淤地坝场次拦沙分析方法

前述方法得到的均为淤地坝总拦沙或逐时段拦沙,其对分析流域水沙变化以及论证淤地坝在拦沙方面的重要性具有重要意义,但淤地坝拦沙量基本来自流域内每年少量的几场侵蚀性降雨事件,而随着黄土高原生态治理日趋完善以及阶段性侧重点不同,流域产输沙也发生较大变化。因此,对淤地坝场次雨洪事件下拦沙量的分析尤为重要,同时淤地坝坝地拦蓄泥沙所蕴含的信息也可反演出坝控流域内不同水土保持措施等对流域产输沙的作用,可为淤地坝控制流域内水土保持措施的优化配置等提供重要参考。

当前淤地坝场次拦沙分析方法主要为复合指纹

识别技术,其在黄土高原地区多为对淤地坝已淤泥沙进行反演。另外也有对极端事件下的专项调查来得到淤地坝单次侵蚀性降雨事件下的拦沙量。余欣等^[61]在无定河流域遭遇“7·26”特大暴雨事件后,选取暴雨中心区的小理河流域草红沟、岔巴沟流域候石畔等“闷葫芦”淤地坝进行侵蚀调查、拦沙观测,结合核素示踪、数学模拟等方法推算出本次事件无定河流域产沙 1.249 亿 t,白家川实测 7 756 万 t,淤地坝仍是减沙主要工程措施。Bai 等^[62]在岔巴沟流域选取 12 座闷葫芦淤地坝和 17 座与下游连通方式不一的淤地坝,通过多次野外调查,对不同连通类型的淤地坝在极端降雨事件下的拦沙效益分析表明,“7·26”特大暴雨事件下的泥沙输移比为 0.21,实际淤地坝拦蓄泥沙 111 万 t,其中不同类型淤地坝拦沙效率差异较大,有排水渠淤地坝和损毁淤地坝平均拦沙效率仅为 6.48%,有竖井/卧管的淤地坝平均拦沙效率为 39.49%。

指纹识别法从 1970s 开始用于定量研究泥沙来源^[63-64],前提是假设流域内不同潜在泥沙源地的侵蚀泥沙存在一个或多个在不同泥沙源地间具有显著差异的且不随泥沙输移过程发生变化的潜在指纹因子(理化指标如放射性核素^[65]、稳定同位素^[66]、重金属^[67]、养分^[68]、粒径^[69]、磁性^[70]),通过利用多元判别分析对同一流域内侵蚀泥沙的“源”和“汇”对应样品的潜在指纹因子进行筛选进而获得一套最佳指纹识别因子组合,进一步借助数值转换模型对指纹因子在“源”和“汇”侵蚀泥沙中的含量(浓度)进行分析计算并得到各泥沙源地的相对贡献率。指纹识别法主要步骤为:(1)通过普查数据、实地踏勘、咨询当地淤地坝相关管理部门等方式,并参考所收集的能反映淤地坝所在区域的降水等资料和淤地坝及坝控流域内潜在泥沙源地等资料,选取淤地坝。(2)野外采集各潜在泥沙源地(不同土地类型、沟道、沟壁等)的代表性样品,同时划分坝地淤积剖面沉积旋迴,剥离封装每层旋迴样品并记录。(3)样品处理后上机测试获取“源”和“汇”样品的理化生指标。(4)沉积旋迴断代分析,并对应场次侵蚀性降水事件。(5)筛选具有显著差异的指纹因子,获取最佳指纹因子组合。(6)选取数值转换模型,计算各潜在泥沙源地的坝地淤积泥沙贡献率,并对结果进行可靠性检验。

指纹识别法中最基础最重要的环节为淤地坝泥沙淤积剖面沉积旋迴的划分和断代分析,其决定着淤地坝场次侵蚀性降水事件拦沙量反演的准确性。现有坝地泥沙淤积剖面断代分析主要依据是“大水对大沙”^[71-72]、“下粗上细”^[73-74]和放射性同位素(如¹³⁷Cs、

^{210}Pb)^[75-76]等。薛凯等^[77]在王茂沟流域选取“闷葫芦”,淤地坝,采集坝地淤积剖面样品并划分为75个沉积旋廻,通过 ^{137}Cs 进行断代分析,得到各侵蚀性降水事件下沉积旋廻的泥沙淤积量,表明淤地坝在1957—1990年运行期可划分为3个时期,分别为1957—1964年剧烈侵蚀期、1965—1983年侵蚀平缓期、1984—1990年侵蚀2次增大期;Li等^[78]选取黄土高原地区4个典型淤地坝,采集坝地淤积剖面样品,通过 ^{137}Cs 和“大水对大沙”进行断代分析表明,各沉积旋廻淤积泥沙量与降雨侵蚀力和30 min最大雨强具有显著相关关系,其中各沉积旋廻淤积泥沙量、降雨侵蚀力之间呈显著的幂回归,30 min最大雨强与各沉积旋廻淤积泥沙量、降雨侵蚀力之间呈指数回归;Bai等^[79]在无定河流域内,选取元坪支沟内的寨子崙淤地坝,以复合指纹识别技术为基础采用Collins混合模型和Modified Hughe混合模型对坝地已淤泥沙进行断代分析表明,淤积剖面沉积旋廻划分为85层,对应于2006—2017年不同的侵蚀性降雨事件,最大拦沙量来自于“20090818”侵蚀性降雨事件。

指纹识别法中涉及反演淤地坝在场次事件中拦沙量的沉积旋廻划分和断代分析所存在的问题主要为:(1)典型淤地坝的选取。实际操作中,为满足坝地沉积旋廻完整记录流域侵蚀泥沙的要求,仅包含坝体单件建筑物且控制流域内再无其他淤地坝也即一般位于沟头的“闷葫芦”淤地坝成为优选对象。但此类淤地坝一般为中小型淤地坝,建成至失效的时间一般仅为几年十几年,导致沉积旋廻所记录的场次侵蚀性降水事件数量有限,缺乏代表性;沉积旋廻所记录的场次侵蚀性降水事件对应的侵蚀泥沙所发生的年份或未包含放射性核素的沉降峰值年份(公认的 ^{137}Cs 沉降历史峰值出现在1963年^[65]),断代缺乏重要依据。(2)淤地坝坝地淤积剖面发生变化。在场次侵蚀性降水事件中,理想状况是淤地坝沟道内侵蚀泥沙沿程沉降在坝地内,但实际情况中却是随着淤地坝设计库容的逐渐淤满,淤积过程逐渐发生在远离坝体的上游区域,且在不同强度的降雨事件下淤积剖面也不尽相同,甚至在高强度或极端强度的降雨事件中,洪水对坝地以冲刷为主^[56]。另外考虑到淤地坝修建前的地形坡度和修建后坝地的淤积坡度,导致在坝地不同位置的淤积剖面样本容量不一,同一场侵蚀性降水事件下的不同淤积剖面沉积旋廻的淤积特征也不同。(3)坝地受到人为扰动。淤地坝在滞洪拦泥的同时也发挥着淤地造田的作用,其坝控流域内水力侵蚀等带来的坡沟泥沙让坝地养分富集、土地平整、水分充足,

非常适合农作物的种植,实际中坝地常种植抗倒伏高秆作物(如玉米)。导致实际情况中坝地在淤地坝修建、运行、失效、降等、报废、销号等全生命周期内均无耕作措施近乎不可能。(4)淤地坝坝地淤积泥沙具有的“下粗上细”“冻豆腐”层^[80]等结构特征使其具有优良的储水能力,导致在淤地坝坝地内采集淤积剖面出现随深度增加采样难度骤增甚至无法采样的情况,特别是针对近年来场次极端降雨事件(如2017年7月25日晚至次日清晨降临在无定河流域内的特大暴雨,一般称“7·26”特大暴雨事件)后的专门采样。(5)降水资料无法反映所选淤地坝控制流域内的实际降水情况。黄土高原降水具有显著的局部性,甚者在 1 km^2 内也不均匀^[81],造成沉积旋廻与场次侵蚀性降水事件一一对应时出现错误。说明所选淤地坝应尽可能的接近降水资料中对应的站点。

4 结论与展望

淤地坝是落实黄河流域生态保护和高质量发展国家战略目标的重要举措。精准计算淤地坝拦沙是正确评价淤地坝真实拦沙成效的根基,是制定水土流失综合治理规划的支撑,是确保淤地坝安全运行的必要基础,也是黄河中游黄土高原地区输沙变化趋势研究的关键环节。因此,系统梳理淤地坝拦沙分析方法对于精准计算黄土高原地区淤地坝拦沙以及淤地坝建设具有重要意义。

目前,在淤地坝总拦沙分析方法方面,实地调查法可获取淤地坝在调查截止时间内的原始数据,可信度高,也对其他淤地坝拦沙分析方法结果予以佐证;地形测绘法借助快速发展的3S技术和计算机处理技术,通过对获取的多期淤地坝DOM、DEM等测量成果的处理,进而精确获取各淤地坝拦沙量,可解决实地调查法范围有限、时效差的问题,且技术上可通过提高水平面、高程精度提高淤地坝拦沙分析结果的准确性以及通过缩短淤地坝测量成果间隔时间得到逐时段(年、汛期、月等)、场次的淤地坝拦沙。两类方法中,实地调查法常因实地调查的范围、时效、内容等难以满足科研、生产需要。地形测绘法则需尽可能排除相关因素带来的影响:(1)淤地坝坝地或存在蓄水、植被生长、建筑物等非坝地拦沙带来的高程影响;(2)不同区域不同治理阶段不同场次侵蚀性降水事件下,淤地坝拦沙随所在坝地的地形、上中下游空间变化而在mm和m之间波动的淤积泥沙厚度,与当前技术下测量精度间的矛盾所带来影响;(3)淤地坝拦沙推算所需对应精度的遥感测量数据与技术、经济方面的冲突^[82]。

在淤地坝逐时段拦沙分析方法方面,数理归因法将流域概化为一个黑箱,认为所选输入表征气候变化的代表因素如降水、蒸发等和表征人类活动的水保措施如梯田、林地、草地、淤地坝等为影响流域输沙的主要影响因素,构建其与流域输沙的函数关系得到,淤地坝对输沙变化的贡献率;成因分析法通过分析计算流域内各时段淤地坝坝地面积与对应单位坝地拦沙量指标乘积得到淤地坝拦沙量;权重系数法,通过筛选影响淤地坝控流域内产输沙的主要因子,将其作为权重系数反推已淤积泥沙得到淤地坝逐时段拦沙量;模型模拟法指基于考虑产汇流、侵蚀及产输沙过程的基于物理机制的水文模型对流域径流输沙过程进行模拟,区分各要素对水沙变化影响的方法,并可通过设置不同工况来控制变量进而得到不同影响因素对流域径流输沙的影响作用。前 3 类方法相对清晰简单,其中数理归因法分析结果的准确性和可靠性主要依赖于作为输入的主要影响因素和构建的函数关系,成因分析法关键在于如何保证单位坝地减沙指标和坝地面积与流域实际情况匹配,权重系数法则需要所选影响产输沙的因子可以反映流域淤地坝逐时段拦沙的实际情况。模型模拟法当前难点在于难以对黄土高原地区纷繁复杂的淤地坝进行统筹兼顾。

在淤地坝场次拦沙分析方法方面,当前分析方法主要为复合指纹识别技术,该方法的关键环节淤地坝泥沙淤积剖面沉积旋回的划分和断代分析决定着淤地坝场次侵蚀性降水事件拦沙量反演的准确性。另外也有对极端事件下的专项调查来得到淤地坝单次侵蚀性降雨事件下的拦沙量。当前有关淤地坝场次拦沙分析方法多应用于小流域尺度内的科学研究,难以推广至宏观尺度。

随着空间数据采集技术和计算机技术的快速发展以及在黄土高原地区的应用,如飞行器(卫星、无人机等)、传感器(激光雷达 LiDAR^[83]、合成孔径雷达干涉 InSAR^[84]等)、数据处理技术^[85]等,包含遥感测量技术的地形测绘法所具有的精度高、时效性强、灵活可靠的优势得以凸显,是未来黄土高原地区淤地坝拦沙分析方法在宏观尺度上的重要发展方向。而在具有科学研究导向的重点治理小流域内,复合指纹识别技术不仅可通过对沉积旋回断代分析获取不同场次侵蚀性降雨事件下的泥沙淤积,也可以反演出淤地坝建设运行以来坝控流域内侵蚀泥沙对环境变化的响应,此方法是未来黄土高原地区淤地坝拦沙分析方法在微观尺度上的重要发展方向。由于各淤地坝拦沙分析方法均存在一定的局限性,对既有方法的结合

运用和集合评估显得尤为重要,其可提高黄土高原地区淤地坝拦沙分析结果的可靠性和准确性,助力推动黄河流域生态保护和高质量发展。

参考文献:

- [1] 新华社.中共中央 国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[J].中华人民共和国国务院公报, 2021,1749(30):15-35.
- [2] 王光谦.江河治理与水沙关系:黄河流域产流产沙模拟与水沙变化[J].中国水利,2011(6):27.
- [3] Zhang J J, Zhang X P, Li R, et al. Did streamflow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River? [J]. Journal of Hydrology,2017,546:357-369.
- [4] Zhao Y, Cao W H, Hu C H, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events [J]. Catena, 2019, 177:31-40.
- [5] Gao H D, Li Z B, Jia L L, et al. Capacity of soil loss control in the Loess Plateau based on soil erosion control degree[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26 (4):457-472.
- [6] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience,2016,9(1):38-41.
- [7] 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.
- [8] Li J X, Liu Q L, Feng X M, et al. The synergistic effects of afforestation and the construction of check-dams on sediment trapping: Four decades of evolution on the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation and Development,2019,30(6):622-635.
- [9] Guo Q K, Ding Z W, Qin W, et al. Changes in sediment load in a typical watershed in the tableland and gully region of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2019,182:e104132.
- [10] Zheng H Y, Miao C Y, Wu J W, et al. Temporal and spatial variations in water discharge and sediment load on the Loess Plateau, China: A high-density study[J]. Science of the Total Environment,2019,666:875-886.
- [11] 信忠保,蔡强国,宁堆虎,等.淤地坝与 check dam 的差异及其英文译法[J].中国水土保持科学(中英文), 2022,20(3):102-108.
- [12] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J].中国水利,2019(20):1-3.
- [13] 水利部 国家发展改革委.水利部 国家发展改革委关于印发黄土高原地区淤地坝工程建设管理办法的通知[J].中华人民共和国水利部公报,2022(2):12-15.
- [14] 中华人民共和国生态环境部.中华人民共和国黄河保护法[N].人民日报,2022-12-01(15).
- [15] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M].北京:科学出版

- 社,2016:31.
- [16] 黄峰,黄委完成黄土高原中型以上淤地坝首次大规模系统风险隐患排查[N].中国水利报,2022-08-03(1).
- [17] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查公报[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [18] 中华人民共和国水利部.淤地坝技术规范:SL/T 804—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2021.
- [19] 弥智娟,穆兴民,赵广举.基于多源数据的皇甫川淤地坝信息提取[J].干旱区地理,2015,38(1):52-59.
- [20] 马煜栋,杨帅,韩静,等.陕西榆林地区无定河流域淤地坝遥感解译[J].干旱区地理,2022,45(3):786-791.
- [21] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
- [22] Zeng Y, Meng X D, Zhang Y, et al. Estimation of the volume of sediment deposited behind check dams based on UAV remote sensing [J]. Journal of Hydrology, 2022,612:e128143.
- [23] Fang N F, Zeng Y, Ran L S, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau[J]. Communications Earth and Environment, 2023,4(1):e65.
- [24] Fang N F, Zeng Y, Ni L S, et al. Estimation of sediment trapping behind check dams using high-density electrical resistivity tomography[J]. Journal of Hydrology, 2019, 568:1007-1016.
- [25] 王韵,王红雨,常留成,等.基于探地雷达的水库坝前淤积土沉积规律研究[J].水土保持学报,2021,35(4):152-158.
- [26] 李朋飞,张晓晨,严露,等.复杂地形中机载 LiDAR 点云构建 DEM 的插值算法对比[J].农业工程学报,2021,37(15):146-153.
- [27] 谢有忠,詹瑜璋,胡植庆,等.激光雷达地形资料用于河道输沙的研究[J].遥感学报,2013,17(1):193-209.
- [28] 代文,汤国安,胡光辉,等.基于无人机摄影测量的地形变化检测方法与小流域输沙模型研究[J].地理科学进展,2021,40(9):1570-1580.
- [29] 支再兴,李占斌,侯精明,等.四阶带参 Hermite 河道重建方法及应用研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2018,33(4):500-507.
- [30] 潘明航.黄土高原多沙粗沙区典型坝控流域泥沙来源研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [31] 曾奕.黄土丘陵区侵蚀环境下的流域土壤有机碳动态变化及其影响机制[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [32] 李晓乐,成晨,张永娥,等.黄土高原典型流域输沙量变化及减沙贡献率分析[J].泥沙研究,2021,46(3):28-35.
- [33] 钟雪.延河流域社会水文耦合规律研究[D].西安:西北大学,2020.
- [34] 李磊磊.基于系统动力学的窟野河流域水沙变化的社会水文学分析[D].西安:西北大学,2020.
- [35] 中华人民共和国水利部.水文站网规划技术导则:SL 34—2013[S].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [36] Hu Q, Jiang D B, Lang X M, et al. Moisture sources of the Chinese Loess Plateau during 1979—2009[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018,509:156-163.
- [37] Hu Q, Jiang D B, Lang X M. Sources of moisture for different intensities of summer rainfall over the Chinese Loess Plateau during 1979—2009 [J]. International Journal of Climatology, 2018,38:e1280-e1287.
- [38] Bao Z X, Zhang J Y, Wang G Q, et al. The impact of climate variability and land use/cover change on the water balance in the Middle Yellow River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2019,577:e123942.
- [39] Li Z, Zheng F L, Liu W Z, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961—2007 [J]. Quaternary International, 2010, 226 (1/2):92-100.
- [40] Wang W, Yin S, Gao G, et al. Increasing trends in rainfall erosivity in the Yellow River Basin from 1971 to 2020[J]. Journal of Hydrology, 2022,610:e127851.
- [41] Cai Q F, Liu Y, Fang C X, et al. Insight into spatial-temporal patterns of hydroclimate change on the Chinese Loess Plateau over the past 250 years, using new evidence from tree rings[J]. Science of the Total Environment, 2022,850:e157960.
- [42] 冉大川,姚文艺,李占斌,等.不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J].农业工程学报,2013,29(12):154-162.
- [43] 冉大川,张栋,焦鹏,等.西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):143-149.
- [44] 白雷超.黄土丘陵沟壑区淤地坝泥沙连通方式及其对拦沙效益的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [45] Vaezi A R, Abbasi M, Keesstra S, et al. Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments[J]. Catena, 2017,157:227-240.
- [46] 刘宝元,谢云,张科利.土壤侵蚀预报模型[M].北京:中国科学技术出版社,2001.
- [47] 王云毅.罕台川流域上游水土保持措施减水减沙效益研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [48] 杨吉山,张晓华,宋天华,等.宁夏清水河流域淤地坝拦沙量分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):122-127.
- [49] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报,2020,36(4):143-149.
- [50] 郑明国.基于水沙关系框架的黄土区不同水保措施减沙贡献分割方法[J].农业工程学报,2020,36(7):173-183.
- [51] 刘晓燕,高云飞.黄土高原淤地坝减沙作用研究[M].郑州:黄河水利出版社,2020.
- [52] 呼媛,鲁克新,李鹏,等.延河流域骨干坝拦沙量反推与未来可拦沙年限预测[J].水土保持学报,2021,35(3):

- 38-45.
- [53] 杨媛媛,李占斌,高海东,等.大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析[J].水土保持学报,2021,35(1):85-89.
- [54] Zhang X, She D L. Quantifying the sediment reduction efficiency of key dams in the coarse sandy hilly catchments region of the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Hydrology,2021,602:e126721.
- [55] 高云飞,郭玉涛,刘晓燕,等.陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J].地理学报,2014,69(1):73-79.
- [56] 唐鸿磊.淤地坝全寿命周期内的流域水沙阻控效率分析[D].杭州:浙江大学,2019.
- [57] Zhang X, She D L, Hou M T, et al. Understanding the influencing factors (precipitation variation, land use changes and check dams) and mechanisms controlling changes in the sediment load of a typical Loess watershed, China[J].Ecological Engineering,2021,163:e106198.
- [58] 李二辉.黄河中游皇甫川水沙变化及其对气候和人类活动的响应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [59] 袁水龙,李占斌,李鹏,等.基于 MIKE 模型的不同淤地坝型组合情景对小流域侵蚀动力和输沙量的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):30-36.
- [60] 黄志凯.固沟保塬工程(淤地坝)水土保持效应分析[D].西安:长安大学,2021.
- [61] 余欣,侯素珍,李勇,等.黄河无定河流域“2017.7.26”洪水泥沙来源辨析[J].水利水运工程学报,2019(6):31-37.
- [62] Bai L C, Wang N, Jiao J Y, et al. Soil erosion and sediment interception by check dams in a watershed for an extreme rainstorm on the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 35(4):408-416.
- [63] Klages M G, Hsieh Y P. Suspended solids carried by the Gallatin River of southwestern Montana: II. Using mineralogy for inferring sources[J].Journal of Environmental Quality,1975,4(1):68-73.
- [64] Walling D E, Peart M R, Oldfield F, et al. Suspended sediment sources identified by magnetic measurements[J]. Nature,1979,281(5727):110-113.
- [65] 张信宝,李少龙,王成华,等.黄土高原小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J].科学通报,1989,34(3):210-213.
- [66] Yu H Q, Adu-Gyamfi J, Oshunsanya S O, et al. Novel sediment source fingerprinting quantifying erosion-induced total nitrogen and total phosphorus outputs from an intensive agricultural catchment, North China[J]. International Soil and Water Conservation Research,2023,11(3):494-506.
- [67] 许晶晶,杜鹏飞,屈丽琴,等.接坝区不同面积小流域泥沙来源分析[J].水土保持研究,2021,28(6):39-45.
- [68] 蒋凯鑫,于坤霞,李鹏,等.砒砂岩区典型淤地坝沉积泥沙特征及来源分析[J].水土保持学报,2020,34(1):47-53.
- [69] Zhang X, Li Z B, Li P, et al. A model to study the grain size components of the sediment deposited in aeolian-fluvial interplay erosion watershed[J].Sedimentary Geology,2015,330:132-140.
- [70] 程倩云,彭韬,张信宝,等.西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的 ^{137}Cs 和磁化率双指纹示踪研究[J].水土保持学报,2019,33(2):140-145,154.
- [71] 魏霞,李占斌,李鹏,等.黄土高原典型淤地坝淤积机理研究[J].水土保持通报,2006,26(6):10-13,31.
- [72] 张宁宁,刘普灵.黄土丘陵区近 10 年典型小流域对侵蚀环境演变的泥沙响应[J].水土保持学报,2017,31(3):106-111,117.
- [73] 毕慈芬,左仲国,冉大川,等.黄河中游淤地坝淤积泥沙级配组成分析[J].人民黄河,2011,33(1):90-92.
- [74] 申震洲,亢晨波,张宁宁,等.黄土丘陵区小流域坝地沉积泥沙颗粒分布特征[J].水土保持研究,2021,28(3):1-6.
- [75] Zhang X B, Wen Z M, Feng M Y, et al. Application of ^{137}Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of the Hilly Loess Plateau, China[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences),2007,50(2):254-260.
- [76] 张凤宝,杨明义,张加琼,等.黄土高原淤地坝沉积泥沙在小流域土壤侵蚀研究中的应用[J].水土保持通报,2018,38(6):365-371.
- [77] 薛凯,杨明义,张凤宝,等.利用淤地坝泥沙沉积旋迥反演小流域侵蚀历史[J].核农学报,2011,25(1):115-120.
- [78] Li X G, Wei X, Wei N. Correlating check dam sedimentation and rainstorm characteristics on the Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2016, 265:84-97.
- [79] Bai L L, Shi P, Yu K X, et al. A new method to evaluate the accuracy of the sediment source mixing model[J]. Ecological Indicators,2022,142:e109304.
- [80] 龙翼,张信宝,李敏,等.陕北子洲黄土丘陵区古聚淤洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究[J].科学通报,2009,54(1):73-78.
- [81] 王万忠,焦菊英.黄土高原降雨侵蚀产沙与水土保持减沙[M].北京:科学出版社,2018.
- [82] 张建国,董亚维,李晶晶,等.黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中存在的问题及方法探讨[J].水土保持通报,2022,42(6):387-392,399.
- [83] 董彦丽,杨世君,高钰婷,等.基于无人机 LiDAR 系统的坝控流域地貌形态和侵蚀分区的提取[J].现代测绘,2022,45(1):13-17.
- [84] 姚闯闯,姚鑫,顾珍逵,等.基于 InSAR 识别的黄土高原活动性地质灾害发育规律分析[J].地质力学学报,2022,28(2):257-267.
- [85] 钱伟,王春,代文,等.基于多源数据的黄土高原淤地坝提取方法:江苏省,CN114529814A[P].2022-05-24.