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

张风宝[1,2], 杨明义[1,2], 张加琼[1,2], 解迎革[3], 赵国平[4]

(1. 西北农林科技大学 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;
2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨凌 712100;
4. 陕西省林业科学院 黄土高原水土保持与生态修复国家林业局重点实验室, 陕西 西安 710082)

摘 要:[目的] 总结利用黄土高原淤地坝沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀的主要成果,并对其目前存在的问题和以后发展方向进行探讨,以期为深度解译淤地坝沉积泥沙中赋存的小流域土壤侵蚀信息提供基础支撑。[方法] 通过查阅国内外文献,结合野外调查和研究经验,总结利用淤地坝沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀的相关工作。[结果] 黄土高原大量的淤地坝、坝地泥沙明显的沉积旋回和现有的可靠断代技术是利用淤地坝沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀的基础;利用淤地坝沉积泥沙可估算小流域土壤侵蚀强度的变化,识别小流域侵蚀泥沙来源;淤地坝内的泥沙沉积量、理化性质及生物标志物的变化能够反演小流域环境演变过程。[结论] 黄土高原广泛分布的淤地坝沉积泥沙赋存有大量小流域土壤侵蚀和侵蚀环境演变的信息,在黄土高原小流域土壤侵蚀机理及小流域环境演变研究中具有重要作用。

关键词:黄土高原;淤地坝;小流域;土壤侵蚀;泥沙来源

文献标识码:A **文章编号**:1000-288X(2018)06-0365-07 **中图分类号**:S157

文献参数:张风宝,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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.055. Zhang Fengbao, Yang Mingyi, Zhang Jiaqiong, et al. Progress on application of sediment in check dam to study soil erosion of small watershed on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6):365-371.

Progress on Application of Sediment in Check Dam to Study Soil Erosion of Small Watershed on Loess Plateau

ZHANG Fengbao[1,2], YANG Mingyi[1,2], ZHANG Jiaqiong[1,2], JIE Yingge[3], ZHAO Guoping[4]

(1. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi* 712100, *China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 4. *Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation & Ecological Restoration of the Loess Plateau, Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an, Shaanxi* 710082, *China*)

Abstract: [Objective] This study briefly summarized main research results, existing problems and future focuses of using sediment in check dam to study soil erosion of small watershed on the Loess Plateau in order to provide basic support for deeply interpreting the soil erosion information in sediment of the check dam in the future. [Methods] Studying on the basis of sediment in check dams on watershed scale were summarized by both literature review, field investigation and research experiences. [Results] A large number of check dams on the Loess Plateau, the visible flood couplets in check dam and the reliable chronology for the flood couplets are the base for studying soil erosion in small watershed by using sediment deposits in check dam. The changes of soil erosion intensity and sediment source in small watershed could be interpreted by using sediment deposits in check dam. The environmental evolution in small watershed could be deduced by the amount of sediment, the physicochemical properties of sediment and the biomarkers of sediment in check

收稿日期:2018-12-14 **修回日期**:2018-12-20

资助项目:国家重点研发计划项目课题"未来 30～50 年黄河泥沙变化趋势预测"(2016YFC0402406);国家自然科学基金项目(41671281);陕西省自然科学基金项目(2018JM4040)

第一作者:张风宝(1980—),男(回族),宁夏回族自治区彭阳县人,博士,副研究员,博士生导师,主要从事黄土高原土壤侵蚀的相关研究。E-mail:fbzhang@nwsuaf.edu.cn。

dam. [Conclusion] Vast quantities of information on soil erosion and evolution of eroded environments of watershed was recorded by sediment of check dams, which would provide great potential in the understanding of soil erosion mechanism and environmental evolution on watershed scale of the Loess Plateau.

Keywords: Loess Plateau; check dam; small watershed; soil erosion; sediment sources

黄土高原土壤侵蚀严重,是黄河泥沙的主要源地[1]。为防治水土流失,改善生态环境,保障黄河安澜,有关部门在该地区开展了大量的水土保持工作。其中,淤地坝既能拦截泥沙,保持水土,防洪滞洪,又能淤地造田,增产粮食,加快脱贫致富,是黄土高原最为重要的和具有综合作用的沟道水土保持工程措施[2]。黄土高原由无数个小流域构成,小流域是土壤侵蚀发生、水土流失治理及土壤侵蚀研究的基本单元。小流域侵蚀产沙资料是研究小流域土壤侵蚀机理,建立小流域产沙模型,优化小流域水土保持措施布局和揭示侵蚀环境交化对侵蚀泥沙响应的基础。然而,在黄土高原地区仅有极少数小流域有实测泥沙资料,绝大多数小流域缺乏侵蚀泥沙资料。黄土高原广泛分布的淤地坝保存了历次侵蚀产沙事件的信息,为挖掘小流域侵蚀产沙资料提供了可能[3-4]。同时,沉积泥沙中赋存着大量的小流域侵蚀环境演变和侵蚀泥沙来源的信息,是研究小流域土壤侵蚀变化特征及反演侵蚀环境变化的良好载体,为小流域侵蚀产沙及环境变化相关资料的获取提供了新的途径[5-7]。自从 20 世纪 80 年代起,相关学者就开始基于淤地坝沉积泥沙信息研究黄土高原小流域的土壤侵蚀特征,近 40 a 来,取得了一些研究成果,也存在一些问题。本文就近几十年来基于坝地沉积泥沙研究小流域侵蚀方面取得成果和存在问题做一简要的综述,以期为更深入地利用淤地坝沉积信息研究黄土高原小流域土壤侵蚀提供必要的支撑。

1 利用淤地坝沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀的可行性

1.1 大量淤地坝提供了充足的研究样本

黄土高原地区淤地坝数量大,分布广,便于选择典型的淤地坝,为大范围利用淤地坝沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀提供了可能。黄土高原地区淤地坝最早是自然形成的,如有“淤地坝鼻祖”之称的黄土洼(陕西省子洲县裴家湾乡王家圪洞)是公元 1569 年因沟壑两岸大山发生巨型滑坡而形成的,群众叫“天然聚湫”,距今已有 433 a 的历史[8]。有文献可考的人工修筑淤地坝最早是在明代万历年间(公元 1573—1619 年)。在清朝、民国时期都有淤地坝建设的相关记录。例如,陕西省清涧县高杰乡辛关村、佳县仁家村、子洲县岔巴沟、米脂县马家铺都有近百年以前的坝地[2]。由于各方面的原因,新中国成立之前淤地坝建设整体缓慢。新中国成立后,黄土高原地区淤地坝建设得到了快速发展。大体经历了 4 个阶段:20 世纪 50 年代的试验示范,60 年代的推广普及,70 年代的快速发展建设和 80 年代后以骨干坝为主体,完善提高坝系建设阶段,其中 60—70 年代是淤地坝建设高峰期[9-10]。截至 2011 年底,黄土高原地区建成的各类淤地坝共计56 065座,其中大型骨干坝 5 487 座,中小型坝50 578座。主要分布在陕西、山西、内蒙古、河南、甘肃、宁夏、青海等 7 省(区),其中陕西和山西省的淤地坝占淤地坝总数的 80%以上[11]。黄土高原大量分布的不同类型淤地坝为研究不同区域、不同时段及不同尺度下小流域土壤侵蚀特征及其变化提供了基础保障,有非常广泛的可选择性。

1.2 明显的沉积旋回是建立时间序列的基础

黄土高原地区,侵蚀性降雨产生的洪水将侵蚀泥沙带入淤地坝中,淤地坝相当于小流域的沉砂池。根据水中泥沙沉降规律,沉降过程中存在颗粒分选作用,粗颗粒最先沉积,其次为粉砂,最后为黏粒。一般而言,每场洪水过程在淤地坝内都能形成一个明显沉积旋回层,即下粗(砂粒)上细(黏粒),其厚度与次降雨侵蚀产沙量密切相关。根据众多调查研究发现[3,12-17],沉积旋回泥沙在颗粒组成、颜色方面具有明显差异,易于辨识,为区分每一次侵蚀产沙事件奠定了基础。同时,龙翼等[12]发现由于沉积旋回顶部的细颗粒孔隙度高,含水量大,每年末次洪水沉积层的顶部暴露在地面,春冬冻融过程扰动了原来的致密结构,形成了多孔类似“冻豆腐”层的冻融结构。据此可以对沉积层进行年际划分。淤地坝沉积泥沙中明显的沉降旋回及“冻豆腐”结构是次降雨侵蚀事件及年际尺度的主要标识,为利用淤地坝沉积泥沙获取高时间分辨率小流域侵蚀产沙事件奠定了基础。

1.3 可靠的断代技术是建立准确时间序列的保障

淤地坝沉积旋回记录了小流域历次侵蚀产沙事件,因此建立剖面沉积旋回时间序列是利用沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀的关键环节。目前主要是基于淤地坝运行历史及当地一些特殊事件发生的时间,结合^{137}Cs示踪断代技术,大雨对大沙原则,碳氮比突变以及沉积泥沙中一些特有标识物(粉煤灰、除草剂等)标定特定年份。地表土壤中的^{137}Cs 主要来源于 20 世纪 50—70 年代大气核试验产生的核尘,1954 年首次在土壤中监测到^{137}Cs,1963 年出现明显的沉降峰值,之后

^{137}Cs沉降量逐年下降,70 年代初基本没有^{137}Cs 沉降[18],1986 年苏联切尔诺贝利核电站泄露事故对黄土高原是否影响还有争议,有学者发现存在一个小峰值[19]。^{137}Cs 随时间的沉降特征在黄土高原淤地坝沉积旋回时间序列建立过程中已广泛应用[3,5,7,13-14],保证了时间序列的准确性。但因建坝年代限制,并非所有坝地沉积旋回都可用^{137}Cs 标识作为时标。

每一个沉积旋回都对应着一次侵蚀性降雨事件,因此可以根据降雨时间序列和淤积层时间序列的一致性和大雨对大沙的产沙原则,将沉积旋回与相应的降雨参数相对应,建立淤地坝沉积旋回时间序列。魏霞等[20]将淤积量大的淤积层和降雨指标(包括最大 30 min 降雨强度、次降雨量、次平均降雨强度、降雨侵蚀力等各项指标)较大的降雨场次相对应,作为控制性降雨场次。在控制性层之间,按照淤积层的个数,将其中所有场次的降雨根据选定降雨指标,按照大小筛选出相应降雨场数,剔除明显不产流产沙的降雨场次,再按时间先后顺序与淤积的先后顺序将筛选出的降雨和淤积层数一一对应,建立了淤地坝沉积泥沙与侵蚀性降雨的关系。Zhao Tianyin 等[14]基于降雨侵蚀力与侵蚀产沙的关系,同时结合^{137}Cs 时标功能建立了坝地沉积旋回的时间序列。目前,"大雨对大沙"的原则是进行淤地坝沉积旋回时间序列建立的理论基础,应用较多[13,15,16,21-23]。

准确详细的淤地坝运行历史也是沉积旋回时间坐标建立的基础。建坝时间、於满时间、坝地利用时间及其他如坝体修补、有无溃坝事件等都可成为建立沉积旋回时间坐标的主要时间点。值得一提的是耕作活动的影响。一般情况下,一旦进行耕作活动,沉积旋回的结构就被扰动破坏,同时淤地坝开始启动排洪设施。因此在调查过程中需要准确确定坝地开始耕作的时间。另外,在实际操作过程中,一些特殊的标记物也可成为沉积旋回断代的主要标识,如坝地内首次出现地膜、农药、特定的生产活动产物等都可成为主要时间点的标识物。如在陕北神木地区,沉积旋回泥沙中粉煤灰和重金属含量就和当地煤矿开采等相联系。各种断代技术、标识物及小流域人类活动的相关记载,相互印证,相互补充,能够建立比较可靠的沉积旋回时间序列,为获取高时间分辨率的泥沙资料提供保障,是利用淤地坝沉积旋回研究小流域土壤侵蚀的基础。

2　利用淤地坝沉积泥沙研究小流域土壤侵蚀特征

2.1　估算小流域土壤侵蚀强度的变化

土壤侵蚀强度是反映土壤流失的重要指标,是土壤侵蚀学研究的核心问题,也是合理布设水土保持措施的基本科学依据。淤地坝建成后,拦截了历次降雨侵蚀事件的泥沙,流失掉的泥沙量很少,尤其是"闷葫芦坝",因此,可以把淤地坝内沉积泥沙量近似地作为淤地坝运行期间小流域侵蚀产沙量[24]。根据淤地坝的运行历史及已建立的淤地坝沉积旋回时间序列,可以较准确地估算出小流域侵蚀产沙强度随时间的变化过程。这方面已经有的研究报道比较多。张信宝等[3]估算出陕西省安塞县云台山沟小流域 1960—1970 年年均产沙模数为1.29×10^4 t/(km^2 · a)。Zhao Tianyin 等[14]估算出陕西省绥德县一小流域侵蚀模数为11 970 t/(km^2 · a)。并发现侵蚀强度随时间呈现明显的阶段性变化。Wei 等[16]基于淤地坝沉积泥沙对比了黄土丘陵沟壑区和砒砂岩区小流域侵蚀强度变化,发现砒砂岩区小流域坝地年均沉积速率〔702.0 mm/(km^2 · a)〕高于黄土丘陵区〔171.6 mm/(km^2 · a)〕,并在实施退耕工程后沉积速率出现明显拐点,砒砂岩地区拐点在 1996 年,而黄土丘陵沟壑区拐点在 1991 年,间接反映了北部砒砂岩区植被恢复较慢的实际情况。Zhao Guangju 等[13]在基于淤地坝估算小流域土壤侵蚀强度的基础上,对 WATEM/SEDEM 模型进行了验证并取得满意的预测结果。这些研究说明根据沉积剖面的时间序列和淤积量可定量分析小流域侵蚀产沙强度随时间的变化特征及对侵蚀环境变化的响应。

近 10 a 来,黄土高原极端暴雨事件频发,淤地坝在防洪滞洪保障人民生命财产的同时,为研究极端降雨事件小流域侵蚀产沙特征提供了新途径。Zhang 等[17]以陕西省延长县胡家湾淤地坝为例分析了 2013 年 7 月极端降雨事件的侵蚀产沙,发现在退耕坡面植被及梯田等对极端暴雨侵蚀的防控有限。魏艳红等[25]对延河流域 2013 年 7 月连续暴雨下淤地坝毁坏及淤积情况进行了调查。2017 年 7 月 25—26 日在陕西省子洲县和绥德县发生极端暴雨事件,绥德县城几近淹没。中国科学院水利部水土保持研究所及黄河水利专业委员会等单位组织力量进行了灾后调查[26-27],获得近千余座不同类型淤地坝内泥沙沉积的资料,积累了大量极端降雨条件下小流域侵蚀产沙的数据资料,这些资料无疑为研究极端降雨下黄土高原小流域侵蚀产沙及检验黄土高原水土保持措施对极端降雨灾害的防控提供了宝贵的资料。

2.2　识别小流域泥沙来源

小流域泥沙来源是研究小流域土壤侵蚀的一项重要内容,只有"因源制宜",才能对各种水土保持措施做出合理的布局。传统测定泥沙来源的方法主要有径流小区法[28]、普查法[29]、水文资料分析法[1]及模

型模拟法[30]等。利用传统方法虽然能够获得泥沙来源的一些资料,但自身都存在一定的局限性。淤地坝保存了来自小流域内不同部位的泥沙样,从坝地沉积泥沙入手,基于指纹因子法研究泥沙来源较传统方法有更多优势,并且能够克服传统方法的不足。利用指纹因子法反推黄土高原淤地坝沉积物泥沙来源的研究,刚开始采用单因子或者两因子识别技术,如利用土壤颗粒组成、^{137}Cs 和 ^{210}Pb 示踪等[31-34]识别泥沙来源。简单指纹识别方法尽管克服了小区法和大面积调查法的一些缺点,但其计算结果的可靠性较差,只能区分两种或3种泥沙源地的泥沙来源。在此情况下,有关专家提出了复合指纹识别技术[35]。复合指纹识别技术就是基于小流域内不同源地土壤理化指标的差异,借助数理统计的方法找到小流域内最佳指纹因子及其组合,结合相关模型计算不同源地泥沙的贡献率。杨明义等[36]首先在延安市燕沟流域的一条支流上研究了次降雨过程不同时段泥沙来源的变化情况,证明复合指纹识别技术在黄土高原小流域内的适用性。之后,Chen 等[22,37]基于淤地坝沉积物,利用复合指纹技术,研究了黄土高原不同区域小流域泥沙来源的变化。Zhang 等[17]研究了极端暴雨下泥沙来源的变化并与普通侵蚀事件泥沙来源进行了比较。Wang 等[23]利用复合指纹示踪技术研究了退耕前后淤地坝泥沙来源的变化,说明退耕工程对小流域泥沙来源的影响。总之,基于黄土高原淤地坝沉积泥沙,解决了泥沙来源研究的瓶颈问题,为研究小流域泥沙来源演变及对影响因子的响应奠定了基础,也为优化小流域治理措施的合理布局提供了理论支撑。

3 坝地泥沙对小流域侵蚀环境变化的响应

淤地坝沉积泥沙主要受到降雨条件、侵蚀类型、土地利用类型及人类活动等条件的影响,是坝控小流域侵蚀环境变化信息的载体。通过分析沉积旋回泥沙的理化性质、沉积量、生物标识物等,可挖掘大量的小流域侵蚀环境演变信息。

3.1 沉积泥沙化学特性对小流域环境变化的响应

土壤中各元素的含量因土地利用类型不同而存在一定的差异,同时受到人类活动的影响,赋存有大量小流域环境变化的信息,其被侵蚀后又包含了大量对植被、降雨、分选性响应的信息。目前,关于坝地沉积泥沙化学性质的研究中,多数是通过分析其化学特性的剖面变化规律,探讨其养分富集等[38-39]。近几年来,研究者开始通过坝地泥沙化学特性的变化反推小流域侵蚀环境的演变。张风宝等[6]通过对比分析,发现沉积旋回养分含量与沟壁土壤相接近,表明淤地坝运行期间小流域泥沙主要来源于沟壁坍塌和沟道扩展,重力侵蚀和沟蚀是主要侵蚀类型;同时,有机质和全氮在坝地沉积旋回中呈明显阶段性变化,结合流域耕种历史,沉积泥沙养分含量的阶段性变化在一定程度上反映了农村土地联产承包责任制对小流域土地利用和土壤侵蚀的影响。周玮莹等[40]分析了小流域土壤及沉积泥沙中的碳(C)、氮(N)、磷(P)的化学计量特征,结合泥沙量与降雨侵蚀力的阶段性变化,对小流域流域侵蚀环境进行了反演。Wang 等[41]基于淤地坝沉积泥沙不同团聚体中有机碳含量的变化,反推退耕工程前后小流域有机碳流失特征及对降雨特性的响应。通过分析沉积泥沙化学性质的变化,深入探讨小流域侵蚀环境演变、养分流失机制等问题是未来的一个重要研究方向。

3.2 沉积泥沙物理特性对小流域环境变化的响应

粒径组成是土壤的主要物理特性,淤地坝沉积旋回的粒径组成主要与降雨类型、流域表层土壤、淤积过程等因素有关。分析对比沉积泥沙粒径的剖面变化,尤其是粗颗粒的含量,能在一定程度上反映地表径流的强度,从而指示降雨量的变化。此类研究在湖泊沉积中较多[42]:降雨量大的年份,地表径流发育,其剥蚀和搬运能力增强,沉积物粒径增大;降雨量小的干旱年份,地表径流贫乏,粗颗粒物质难以搬运至湖泊,沉积物粒径减小。刘鹏等[43]统计了黄土洼小流域1954年以来暴雨资料及沉积剖面中 50~100 μm 和>100 μm 的粗颗粒泥沙,得出颗粒泥沙与日降雨量≥60 mm 的暴雨在时间上存在较好的对应关系。但仍旧存在粗颗粒异常值,其含量并不稳定:即降雨量的峰值无法与粗颗粒含量的峰值相对应[44]。由于黄土高原丘陵沟壑区强烈的泥沙侵蚀并非仅与降雨量有关,还与暴雨特性有关(暴雨初始强度、连日暴雨等),所以"沉积泥沙中粗颗粒的含量指示降雨量"这一理论能否应用于黄土高原小流域还有待进一步研究。因此,在后续的工作中应该多开展一些在淤地坝沉积泥沙中粒度与环境的响应关系研究,为小流域土壤侵蚀机理的研究开辟新思路。

3.3 沉积泥沙量对小流域环境变化的响应

坝地内沉积泥沙量随时间的变化,一方面由降雨特性决定,另外一方面由小流域内下垫面变化来决定。因此,淤地坝沉积泥沙量随时间的的变化在一定程度上能反映出小流域内土地利用、植被盖度及侵蚀方式等变化。Zhao Tianyin 等[14]发现小流域内侵蚀产沙强度和侵蚀方式具有明显的阶段性变化,这种阶段性变化与小流域内水土保持工作、农事活动强度和

农村政策的变化都明显相对应。相关研究对比分析了退耕前后淤地坝沉积泥沙量的变化,发现退耕后小流域侵蚀强度明显低于退耕前侵蚀强度,这种侵蚀强度的变化是小流域内植被变化的主要体现[15-16,23],也间接说明了小流域侵蚀环境的变化。同时,基于淤地坝内侵蚀泥沙的变化,利用双累积曲线法,辨析人类活动和自然活动对于侵蚀泥沙量变化的贡献,进而揭示小流域内侵蚀强度变化的机制[16,23]。结合地理信息技术,将淤地坝内沉积泥沙量的变化与小流域内土地利用变化和植被覆盖变化在时间上进一步耦合,不仅可识别小流域土壤侵蚀强度变化的内在驱动机制,同时也可以为小流域土壤侵蚀模型的建立和验证提供基础数据[13]。

3.4　沉积泥沙中生物标志物对小流域环境演变的响应

生物标志物来源于生物体,能够记载原始生物母质相关信息,形成具有特定结构的有机分子化合物。沉积物中的生物标志物能提供有关生物输入和沉积环境变化的信息,可以用来推断小流域植被演替、生态环境的变迁等。黄土高原淤地坝建设与运行的过程正是黄土高原植被发生巨变的时期,退耕还林草及封禁过程与植被演替过程相对应,这一时期内不同阶段淤地坝沉积泥沙中有丰富的植物变化和演替的信息。Chen 等[36,45]提出了基于正构烷烃的生物标志物作为指纹因子,与土壤化学指纹因子相结合,判断陕西省绥德县王茂沟一小流域泥沙来源。生物标志物作为指纹因子可克服泥沙化学性质在沉积环境中发生变化及土壤化学性质在不同植被条件下变化的缺点,可在一定程度上提高示踪的准确性,尤其对侵蚀环境变化剧烈的小流域。一些研究发现坝地沉积泥沙中的孢粉也具有指示小流域环境变化的作用[12,46],张信宝等[46]通过比较陕北吴旗县现代淤地坝沉积泥沙中和古代聚湫坝沉积泥沙中孢粉浓度和种类的差异,结合小流域内不同土地利用类型坡面土壤中孢粉浓度和种类,试图辨析小流域内土地利用类型的转化、泥沙来源变化和植被类型的演变,推断出该地区 300 a 前的植被好于现代,沟谷地产沙量相对低于现代。现代的草地相对 300 a 前退化非常严重。另外,孢粉对流域内降雨的丰水和枯水年也有较好地指示意义[47]。孢粉示踪技术在植被环境恢复、沉积旋回区分和泥沙来源确定等方面具有一定的应用潜力,后续这方面的研究还有待进一步加强,能够解译更多的小流域环境变化的信息。

4　存在问题及研究展望

黄土高原小流域内广泛分布的淤地坝不仅是治理水土流失的重要工程措施,同时也是记录小流域侵蚀产沙和小流域侵蚀环境演变的重要载体,是获取黄土高原小流域土壤侵蚀及侵蚀环境演变信息的主要途径,在黄土高原小流域土壤侵蚀机理及小流域环境演变的研究中作用重大,为系统研究小流域土壤侵蚀机理提供了新途径。近年来,这方面的研究逐渐增多,但在有关研究过程中还存在一些问题,有待进一步加强。

(1) 尽管在研究过程中采用了多种断代手段,但淤地坝沉积旋回时间序列的建立还存在一定的不确定性和主观性,将一些新技术如模型模拟、生物标识等与传统淤地坝断代技术相结合,建立更为准确可靠的淤地坝沉积旋回断代技术方面的研究显得尤为紧迫。

(2) 目前有关坝内淤积过程和典型剖面选择的研究比较薄弱。淤地坝内淤积特征受降雨特性、水动力条件、小流域地形地貌特征等影响,沉积物厚度、容重、颗粒组成及化学性质等在空间上存在很大的变异性和淤积不均衡性,导致典型剖面的选择存在一定的困难。典型剖面的选择对估算沉积量和泥沙来源都有直接的影响,因此需系统进行坝内泥沙淤积过程的理论研究,明确坝地沉积泥沙容重、厚度. 颗粒组成及化学性质等在空间分异特特征和影响因素,为典型剖面的选择提供理论基础。

(3) 黄土高原地区大多数中小型淤地坝没有详细设计资料,如何准确估算淤地坝库容是利用淤地坝沉积泥沙研究小流域侵蚀强度的基础,也是难点。尽管目前大多研究利用建坝前地形图来确定库容,但因地形图分辨率的限制,估算结果比较粗糙。将地球物探技术如高密度电阻率仪、探底雷达等利用于淤地坝库容的确定是未来研究的一个重要方面。

(4) 淤地坝出沙系数的确定还需要进一步研究。对于有溢洪道的淤地坝,可能存在部分泥沙经由溢洪道流出,确定合理的出沙系数对准确估算小流域侵蚀强度非常重要,能够弥补目前主要利用"闷葫芦"坝进行研究的不足。部分研究者利用小型水库的出沙系数来代替,但是否准确还需实测资料进行验证[13,16]。

(5) 现有大多研究以坝地沉积泥沙反演小流域内侵蚀强度变化为主,对沉积泥沙内赋存的小流域侵蚀环境演变信息(如气候变化、人类活动强度、土地利用类型变化、植被演替、突发环境事件)挖掘不够,因此借助一些新兴技术手段,在更大尺度和范围内深度挖掘淤地坝内赋存的大量有关小流域侵蚀环境演变特征及与侵蚀强度和泥沙来源响应关系的信息应是今后研究的重点。

(6) 在黄土高原小流域内基于复合指纹示踪泥沙来源的研究大多没有考虑小流域土壤侵蚀分离、输移和沉积过程中的泥沙的分选性,可能影响所得结果

的准确性。有关复合指纹示踪泥沙来源结果准确性的评估方面研究还鲜有报道,如何结合一些新的手段,加强复合指纹示踪泥沙来源准确性评估的研究需要进一步加强。

(7) 利用复合指纹技术识别淤地坝泥沙来源过程中运用的复合指纹识别模型单一。目前,基于淤地坝沉积物的复合指纹示踪主要以多元混合模型[48]为主,而对 Collins 修正模型[49]、Landwehr 模型[50]及基于蒙特卡洛算法[51]和贝叶斯算法[52-54]的模型应用较少,尽管多元混合模型比较简单,不校正或者简单校正土壤颗粒和有机质含量,但误差可能相对较大。今后应对多种模型交叉应用,并进行模型间的对比分析。

(8) 有效技术手段和分析方法是深度解译淤地坝沉积泥沙赋存信息的瓶颈。在研究过程中要加强和联合运用多种技术手段和分析方法,使研究结果之间相互验证,以弥补各方法自身的不足,增加研究结果的准确性和可靠性。

[参 考 文 献]

[1] 龚时旸,熊贵枢. 黄河泥沙来源和地区分布[J]. 人民黄河,1979(1):7-18.

[2] 白晓刚,康瑞敏. 黄土高原地区淤地坝建设的地位及发展思路[J]. 山西水土保持科技,2010(3):6-8.

[3] 张信宝,温仲明,冯明义,等. 应用 137Cs 示踪技术破译黄土丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2007,37(3):405-410.

[4] 方学敏,曾茂林,左仲国. 黄河中游沟道流域淤地坝坝系拦沙作用分析:以王茂沟流域为例[J]. 水土保持通报,1993,13(3):24-28.

[5] 薛凯,杨明义,张风宝,等. 利用淤地坝泥沙沉积旋廻反演小流域侵蚀历史[J]. 核农学报,2011,25(1):115-120.

[6] 张风宝,薛凯,杨明义,等. 坝地沉积旋回泥沙养分变化及其对小流域泥沙来源的解释[J]. 农业工程学报,2012,28(20):143-149.

[7] Zhang Xinbao, Walling D, Yang Q, et al. ^{137}Cs budget during the period of 1960s in a small drainage basin on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2006,86(1):78-91.

[8] 张金慧. 黄土洼天然聚湫之迷[J]. 山西水土保持科技,2001(3):25.

[9] 曲婵,刘万青,刘春春,等. 黄土高原淤地坝研究进展[J]. 水土保持通报,2016,36(6):339-342.

[10] 马宁,朱首军,王盼. 陕北大、中型淤地坝现状调查与分析[J]. 水土保持通报,2011,31(3):155-160.

[11] 刘晓燕,高云飞,王富贵. 黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J]. 人民黄河,2017,39(4):1-5.

[12] 龙翼,张信宝,李敏,等. 陕北子洲黄土丘陵区古聚湫洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究[J]. 科学通报,2009(1):73-78.

[13] Zhao Guangju, Klik A, Mu Xinmin, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2015,241:343-352.

[14] Zhao Tianyin, Yang Mingyi, Walling D, et al. Using check dam deposits to investigate recent changes in sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. Global & Planetary Change, 2017,152:88-98.

[15] Wei Yanhong, He Zhong, Li Yujin, et al. Sediment yield deduction from check-dams deposition in the weathered sandstone watershed on the North Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2017,28(1):217-231.

[16] Yanhong Wei, Zhong He, Juying Jiao, et al. Variation in the sediment deposition behind check-dams under different soil erosion conditions on the Loess Plateau, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018,43(9):1899-1912.

[17] Zhang Jiaqiong, Yang Mingyi, Zhang Fengbao, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the Loess Plateau, PR China [J]. Land Degradation & Development, 2017,28(8):2527-2539.

[18] Owens P, Walling D, He Qingping, et al. The use of caesium-137 measurements to establish a sediment budget for the Start catchment, Devon, UK[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 1997,42(3):405-423.

[19] 王朋晓,岳大鹏,郭坤杰,等. 黄土洼淤地坝沟道沉积物粒度特征与沉积环境分析[J]. 山东农业科学,2016,48(5):67-74.

[20] 魏霞,李占斌,沈冰,等. 陕北子洲县典型淤地坝淤积过程和降雨关系的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(9):80-84.

[21] 李勉,杨剑锋,侯建才,等. 黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J]. 农业工程学报,2008,24(2):64-69.

[22] Chen Fangxin, Zhang Fengbao, Fang Nufang, et al. Sediment source analysis using the fingerprinting method in a small catchment of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016,16(5):1655-1669.

[23] Wang Wendi, Fang Nufang, Shi Zhihua, et al. Prevalent sediment source shift after revegetation in the Loess Plateau of China: Implications from sediment fingerprinting in a small catchment[J]. Land Degradation & Development, 2018,29(11):3963-3973.

[24] 刘立峰,杜芳艳,马宁,等. 基于黄土丘陵沟壑区第Ⅰ副

区淤地坝淤积调查的土壤侵蚀模数计算[J]. 水土保持通报,2015,35(6):124-129.

[25] 魏艳红,王志杰,何忠,等. 延河流域 2013 年 7 月连续暴雨下淤地坝毁坏情况调查与评价[J]. 水土保持通报,2015,35(3):250-255.

[26] 王楠,陈一先,白雷超,等. 陕北子洲县"7·26"特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J]. 水土保持通报,2017,37(4):338-344,347-348.

[27] 刘宝元,刘晓燕,杨勤科,等. 黄土高原小流域水土流失综合治理抗暴雨能力考察报告[J]. 水土保持通报,2017,37(4):2,349-350.

[28] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. 地理学报,1966. 21(1):22-38.

[29] 王道席,侯素珍,杨吉山,等. 无定河"7·26"暴雨洪水泥沙来源分析[J]. 人民黄河,2017,39(12):18-21.

[30] 秦伟,朱清科,张岩. 基于 GIS 和 RUSLE 的黄土高原小流域土壤侵蚀评估[J]. 农业工程学报,2009,25(8):157-163.

[31] 王晓."粒度分析法"在小流域泥沙来源研究中的应用[J]. 水土保持研究,2002,9(3):42-43.

[32] 张信宝,冯明义,文安邦. 黄土高原土壤侵蚀速率和泥沙来源的^{137}Cs 示踪法研究[J]. 中国水土保持,2002,(07):27.

[33] 文安邦,张信宝,沃林. 黄土丘陵区小流域泥沙来源及其动态变化的^{137}Cs 法研究[J]. 地理学报,1998,53(S1):124-133.

[34] 杨明义,田均良,刘普灵. 应用^{137}Cs 研究小流域泥沙来源[J]. 水土保持学报,1999,5(3):49-53.

[35] Collins A L, Walling D E, Leeks J L, Composite fingerprinting of the spatial source of fluvial suspended sediment: A case study of the Exe and Severn River basins, United Kingdom[J]. Geomorphologie: Relief, Processus, Environment, 1996,2(2):41-54.

[36] 杨明义,徐龙江. 黄土高原小流域泥沙来源的复合指纹识别法分析[J]. 水土保持学报,2010,24(2):30-34.

[37] Chen Fangxin, Fang Nufang, Shi Zhihua. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment[J]. Science of the Total Environment, 2016,557:123-133.

[38] 包耀贤,吴发启,谭红朝. 坝地土壤养分分布特征研究[J]. 水土保持通报,2005,25(2):12-15,86.

[39] 王云强,张兴昌,韩凤朋. 黄土高原淤地坝土壤性质剖面变化规律及其功能探讨[J]. 环境科学,2008,29(4):1020-1026.

[40] 周玮莹,杨明义. 黄土高原坝控小流域土壤 C, N, P 计量特征解析[J]. 水土保持研究,2018,25(3):17-22,28.

[41] Wang Yixia, Ran Lishan, Fang Nufang, et al. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau[J]. Catena, 2018,167:257-265.

[42] 陈敬安,万国江,张峰,等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录:以沉积物粒度为例[J]. 中国科学(D 辑):地球科学,2003,33(6):563-568.

[43] 刘鹏,岳大鹏,李奎. 陕北黄土洼淤地坝粗颗粒沉积与暴雨关系探究[J]. 水土保持学报,2014,28(1):79-83.

[44] 颜艳,岳大鹏,李奎,等. 1953—2010 年黄土洼天然淤地坝内洪水沉积物粒度旋回特征[J]. 水土保持通报,2014,34(6):349-354.

[45] Chen Fangxin, Fang Nufang, Wang Yixia, et al. Biomarkers in sedimentary sequences: Indicators to track sediment sources over decadal timescales[J]. Geomorphology, 2017,278:1-11.

[46] 张信宝, Walling D, 贺秀斌, 等. 黄土高原小流域植被变化和侵蚀产沙的孢粉示踪研究初探[J]. 第四纪研究,2005,25(6):60-66.

[47] 何永彬,张信宝,贺秀斌. 利用^{137}Cs 示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究[J]. 水土保持通报,2013,33(1):246-250.

[48] Yu Lizhong, Frank O. A multivariate mixing model for identifying sediment source from magnetic measurements [J]. Quaternary Research, 1989,32(2):168-181.

[49] Collins A L, Walling D E, Webb L, et al. Apportioning catchment scale sediment sources using a modified composite fingerprinting technique incorporating property weightings and prior information[J]. Geoderma, 2010,155(3/4):249-261.

[50] Devereux O H, Prestegaard K L, Needelman B A, et al. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland[J]. Hydrological Processes, 2010,24(11):1391-1403.

[51] Collins A L, Zhang Y, Walling D E, et al. Quantifying fine-grained sediment sources in the River Axe catchment, southwest England: Application of a Monte Carlo numerical modelling framework incorporating local and genetic algorithm optimisation [J]. Hydrological Processes, 2012,26(13):1962-1983.

[52] Richard J. Cooper, Tobias Krueger. An extended Bayesian sediment fingerprinting mixing model for the full Bayes treatment of geochemical uncertainties[J]. Hydrological Processes, 2017,31(10):1900-1912.

[53] Abban B, Papanicolaou A N, Cowles M K, et al. An enhanced Bayesian fingerprinting framework for studying sediment source dynamics in intensively managed landscapes[J]. Water Resources Research, 2016, 52:4646-4673.

[54] Gholami H, Telfer M W, Blake W H, et al. Aeolian sediment fingerprinting using a Bayesian mixing model [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017;42,2365-2376.