

淤地坝赋存信息在流域侵蚀产沙研究中的应用

李勉¹, 杨二¹, 李平², 李莉¹

(1. 黄河水利科学研究院水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003; 2. 黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站, 陕西 绥德 718000)

摘 要:黄土高原淤地坝在拦蓄大量泥沙的同时,也赋存了大量环境变化信息。该文从淤地坝赋存信息在小流域侵蚀产沙速率、泥沙来源和泥沙输移比研究方面的作用进行了归纳和总结,分析了目前研究中存在的问题,提出了今后研究的发展方向,以期能为更好地利用这些赋存信息,发挥其在黄土高原土壤侵蚀和环境演变过程研究中的作用提供参考。

关键词:淤地坝; 侵蚀速率; 泥沙来源; 泥沙输移比; 黄土高原

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0357-06

Application of Information Recorded in Check Dams for Soil Erosion and Sediment Yield Studies

LI Mian¹, YANG Er¹, LI Ping², LI Li¹

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau of the Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. Suide Soil and Water Conservation Scientific Experimental Station, Yellow River Conservancy Commission, Suide, Shaanxi 718000, China)

Abstract: Check dams stored a lot of sediment and recorded much information for past environmental changes on the Loess Plateau. Studies on erosion rate, sediment source and sediment delivery ratio in small watersheds based on the information in check dams are summarized, the existing problems are analyzed, and future research topics are also pointed out, so that the recorded information in check dams can be better used for future researches on soil erosion and environmental evolution process on the Loess Plateau.

Keywords: check dam; erosion rate; sediment source; sediment delivery ratio; Loess Plateau

黄土高原是我国水土流失最严重的地区,在沟道中建造淤地坝拦截泥沙是当地人民群众在长期实践中独创的防治水土流失的重要工程措施。随着黄土高原水土流失治理的需要,20 世纪 50 年代,许多流域开展了淤地坝建设,并在 60 年代得到了大力推广和普及。淤地坝在拦蓄泥沙的同时,也记录了环境变化,尤其是侵蚀环境变化的信息。许多学者利用淤地坝赋存信息在小流域侵蚀产沙速率、泥沙来源和泥沙输移比等方面开展了研究,取得了不少重要成果。总结和评价这些工作,不仅可以更好地认识黄土高原小流域土壤侵蚀历史变化过程和特征,促进淤地坝拦蓄泥沙作用研究,而且对推进流域侵蚀环境整治,促进该区域正在实施的大规模坝系建设也具有一定的实践指导意义。

1 小流域侵蚀产沙速率研究

由于淤地坝沉积泥沙记载着建坝后几十年的历史产沙信息,通过解读这些信息可以对淤积期间土壤侵蚀强度作出客观评价。因而,基于淤地坝赋存信息的小流域侵蚀产沙速率研究受到了人们的重视。最早的相关研究始于 20 世纪 50 年代,罗来兴和祁延年^[1]调查了天然“聚淤”的年淤积量,并据此推算出陕北无定河和清涧河流域黄土区域的侵蚀速率为 9 000~18 000 t/(km²·a),这是该区域最早的侵蚀强度量化研究数据。之后,绥德水土保持科学试验站开展了韭园沟淤地坝建设后侵蚀产沙速率变化特征研究,表明淤地坝建设初期年均拦沙量和侵蚀速率最大,之后呈下降趋势^[2]。王茂沟流域关地沟淤地坝沉

积泥沙的研究表明,1959—1987 年期间,土壤侵蚀速率由强变弱,已由最初的 $26\ 051\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 下降到后期的 $12\ 702\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ [3]。2001 年韭园沟 11 座闷葫芦坝当年暴雨泥沙淤积量的调查表明,各集水区的侵蚀速率为 $1\ 391 \sim 4\ 578\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,相比建坝初期有显著下降 [4]。王茂沟流域背塔沟坝 1959—2012 年泥沙沉积量的调查表明,流域侵蚀强度呈剧烈侵蚀—下降—增加—显著下降趋势 [5]。整个无定河流域的研究也表明,由于淤地坝的大量修建,侵蚀产沙速率随时间变化呈递减趋势,只是在 20 世纪 90 年代,由于淤地坝库容的减少,拦沙作用下降,侵蚀速率又有所增加 (图 1) [6]。

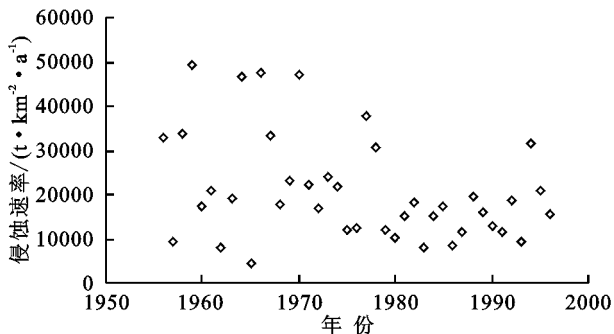


图 1 无定河流域 1956—1996 年期间的年均侵蚀速率

黄土丘陵区其他流域的研究也证实了侵蚀产沙速率的下降趋势。如李勇和白玲玉 [7] 利用延安碾庄沟淤地坝普查资料,分析发现 1957—2000 年流域侵蚀产沙速率为 $25\ 800\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;侵蚀产沙速率的时间大小序列为:50 年代 > 60 年代 > 70 年代 > 80 年代。准格尔旗西黑岱流域淤地坝拦沙作用的研究也表明,流域土壤侵蚀模数随时间变化呈显著递减趋势 [8]。

近年来,核示踪技术在侵蚀产沙研究中得以广泛应用,其中应用最多的是 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 。 ^{137}Cs 是一种人工放射性核素,源于 20 世纪 50—70 年代期间的大气核爆试验产生的放射性尘埃。降到地表的 ^{137}Cs 只随土壤颗粒的移动而发生再分布,是研究土壤侵蚀和泥沙沉积的一种良好示踪剂。由于 1963 年是全球沉降高峰期,因此,1963 年或 1964 年沉积物层节中的峰值具备实际时标意义,并被广泛用来作为沉积物计年的一个重要时标。国内,张信宝等 [9] 最早将 ^{137}Cs 计年方法应用于淤地坝沉积断代研究,根据子长县赵家沟淤地坝的沉积量及 ^{137}Cs 含量变化,估算出流域的侵蚀产沙速率为 $4\ 627 \sim 32\ 472\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;根据安塞云台山沟坝库沉积剖面泥沙的 ^{137}Cs 含量变化,结合坝库修建、运行历史和降水资料的对比分析,区分出坝库内 44 次洪水沉积旋回的对应暴雨时间,较以往单独通过暴雨场次估算淤地坝旋回层沉积时间又多了一种辨识手段,进一步促进和提高了小流域侵蚀产沙速率的精细化研究 [10]。之

后,其他一些学者也都应用该方法在划分出淤地坝泥沙沉积年份的基础上,开展了小流域侵蚀产沙的定量化研究,重建了集水区的历史产沙速率,为深入认识土壤侵蚀变化过程和规律,客观评价淤地坝拦沙减蚀作用提供了重要技术支撑 [3,11-13]。

^{210}Pb 是一种天然放射性核素,由大气沉降的外源性或过剩 ^{210}Pb (标为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) 才具有沉积计年和示踪意义,可以用于近 100 年来沉积速率的测定。目前,多用于湖泊、水库泥沙沉积速率研究,在淤地坝方面的应用较少。俱战省等 [14] 综合应用 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 技术以及中国土壤流失方程,利用塘库沉积泥沙赋存信息对三峡库区腹地工农沟小流域土壤侵蚀速率进行了定量评价;基于 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 技术的塘库沉积物定年的结果,估算了三峡库区黄冲子小流域不同时期的土壤侵蚀量,并与 RUSLE 模型计算的流域侵蚀速率进行了对比,表明 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 定年结果可靠 [15]。

在国外,Romero-Díaz 等 [16] 在西班牙 Segura 流域,通过坝地淤积量的计算研究了集水区的侵蚀产沙速率,并与其他侵蚀计算方法进行了比较,认为前者可以获得更精确的侵蚀量,更好地确定水土保持规划、项目和工程的实施地点。Bellina 等 [17] 基于西班牙 36 座淤地坝的泥沙淤积量估算了流域的侵蚀速率,发现其侵蚀产沙速率很低,平均仅 $140\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,并从流域集水面积、土壤特性、地表覆盖状况、平均坡度、年降水量等方面分析了成因。Nichols 等 [18] 通过对美国 Walnut Gulch 试验站 2 个小流域出口坝地泥沙淤积量的计算,研究了集水区的侵蚀产沙速率和沙量平衡。Boardman 和 Foster [19] 在南非 Sneeuwberg 地区,利用淤地坝赋存的产沙信息和 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 定年方法,研究了流域的侵蚀速率,并与世界各地干旱、半干旱地区的研究结论进行了比较。

小流域侵蚀产沙速率与降雨、下垫面、土地利用方式等有密切关系,通过对其变化过程,尤其是长时间系列变化过程的研究,可以在一定程度上反映和揭示流域侵蚀环境的演变规律。黄土丘陵区 400 多年前形成的黄土洼古聚淤的研究表明,古聚淤沉积剖面中 31 个年度的后 5 a 产沙模数急剧增加,反映了滑坡发生后新的土地大开发后短期内侵蚀环境的变化结果;明代该地区次暴雨洪水的产沙模数和年均产沙模数都与现今淮宁河中游年输沙量相近,表明该地区明代的土壤侵蚀环境与现代接近 [20]。20 世纪 50 年代以来淤地坝侵蚀产沙的研究表明,建坝初期流域侵蚀速率较大,之后侵蚀速率明显下降,结合侵蚀环境变化分析认为,这与小流域下垫面的巨大变化有关,尤其是 20 世纪 90 年代后期,由于退耕还林(草)措施

的实施,土地利用方式发生了较大变化,坡耕地数量大量减少,造成侵蚀产沙速率的快速下降^[2-5,9-12,21-23]。黄土丘陵区侵蚀速率的下降也显著影响到了入黄泥沙的数量,以致黄河多年的平均输沙量已有20世纪80年代以前的10多亿t减少到目前的4.5亿t左右,表明整个黄土高原的侵蚀环境发生了较大变化。

由于黄土丘陵区年产沙模数和汛期降水量具有良好的相关性^[9-12,24],加之淤地坝泥沙沉积旋回层中砂粒含量的增加以及最大粒径极值的出现,往往对流域侵蚀性暴雨洪水的发生有重要的指示作用^[21-22],通过对淤地坝侵蚀产沙速率变化过程的研究可以更好地推算降水的历史变化特征,揭示侵蚀性降雨的发生频次、强度等特征。因而,利用淤地坝,尤其是古聚淤的侵蚀产沙信息,结合核素、孢粉等示踪技术,可以推测和了解流域历史时期降水和地表植被变化特征,揭示环境演变过程和规律。

2 小流域泥沙来源研究

针对黄土高原小流域泥沙来源,围绕治坡为主还是治沟为主,国内许多学者通过野外观测资料对比分析较早地开展了沟间地与沟谷地产沙比的研究,一些学者还通过泥沙粒度分析、模型计算和室内模拟试验等手段开展了小流域泥沙来源的研究。这些都在小流域泥沙来源的定量化研究方面进行了积极的探索,取得了一些重要成果,对黄土丘陵区水土流失的治理发挥了重要的指导作用。但由于研究手段和方法的限制,定量化程度还有待提高。

随着核示踪技术的推广和应用,张信宝等^[25]最早利用黄土高原淤地坝赋存的泥沙信息,借助¹³⁷Cs示踪技术开展了山西离石羊道沟小流域1985年和1986年2次洪水过程中淤地坝的泥沙来源研究,得出沟间地和沟谷地的相对产沙百分比分别为7%和93%,26%和74%,这一成果对定量评价黄土丘陵区小流域泥沙来源,深入认识小流域侵蚀产沙特征具有重要意义。李少龙等^[26]还尝试利用²²⁶Ra示踪方法研究了皇甫川大塔沟流域淤地坝泥沙来源,辨识出了基岩和黄土的产沙贡献率,同时指出该方法仍处于探索阶段,仍有不少理论和实际问题有待解决。之后,文安邦等^[27]在子长赵家沟、李勉等^[3]在绥德关地沟、Zhao等^[13]在准格尔旗小石拉塔沟,都利用¹³⁷Cs分析方法研究了黄土丘陵区沟谷地、沟间地的相对产沙量。此外,一些学者还在云贵高原和川中丘陵区,利用坝库或沟谷泥沙淤积信息和¹³⁷Cs方法开展了小流域泥沙来源研究。

在土壤剖面中,由于²¹⁰Pb_{ex}主要集中在表层10—40

cm以上,其中50%以上集中在表层5cm以上,且随着土壤剖面深度的增加呈指数减少。因而,与¹³⁷Cs技术相结合,可以更为细致地开展侵蚀泥沙来源研究,识别出泥沙来自于土壤表层还是次表层,并可对侵蚀方式(面蚀或沟蚀)作出确切判断。因而,¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}方法的结合为小流域泥沙来源的定量化研究又提供了一种新的技术手段。Li等^[28]根据¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}的比值研究了延安羊圈沟淤地坝泥沙的来源,发现其主要来源于农地的表层和次表层土壤。张信宝等^[29]在四川武家沟小流域利用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}方法开展了小流域泥沙来源研究,运用混合模型求得林地、农地和裸坡地(含沟岸)的相对来沙量分别为18%,46%和36%。

国外许多学者都利用¹³⁷Cs或结合²¹⁰Pb_{ex}方法开展了流域泥沙来源研究,取得了许多重要成果。如Plata Bedmar等^[30]根据西班牙东南部Puentes水库沉积泥沙中¹³⁷Cs的含量,推断出1970—1994年,大约有40%的沉积泥沙来自于流域表层10cm的土层,60%来源于次表层。Simms等^[31]在澳大利亚Cordeaux水库利用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}复合示踪方法研究了水库淤积泥沙来源,识别出水库不同位置泥沙的主要来源。Nichols等^[18]通过对美国亚利桑那州Walnut Gulch试验站2个小流域出口坝地泥沙淤积情况的研究,发现85%的泥沙来源于坡面。

随着泥沙来源示踪技术的发展和應用,其他一些示踪技术,如土壤养分、土壤磁性、植物孢粉等也开始被应用到小流域泥沙来源研究。如张凤宝等^[32]根据绥德王茂沟淤地坝沉积泥沙和坝控小流域内不同泥沙源地土壤中养分含量的差异,研究发现沟壁坍塌和沟道扩展是其主要泥沙来源,重力侵蚀和沟蚀是主要侵蚀类型。高进长等^[33]通过对川中丘陵区万安沟小流域塘库沉积泥沙和不同土地利用类型的表层土壤中 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析,研究认为 $\delta^{13}\text{C}$ 技术有助于定量评价沉积泥沙的来源,同时指出该技术的适用条件,即只有在沉积泥沙主要来源为土壤有机物时,才能定量评价沉积泥沙的不同来源。Lacey等^[34]尝试用 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 、总有机碳和总氮开展了泥沙来源研究,弥补了低活度¹³⁷Cs和²¹⁰Pb_{ex}来源地研究的不足。

目前,利用多种示踪技术相结合的复合指纹识别方法受到了众多学者的关注。杨明义和徐龙江^[35]通过筛选出土壤全N、低频磁化率、Cu、¹³⁷Cs和²²⁶Ra组成复合指纹识别因子,利用混合模型,得出次洪水泥沙来自坡地果园、主沟道、坡耕地和支沟的比例分别占60%,33.7%,3%和3.3%,表明复合指纹识别方法可以研究洪水泥沙来源,并能对重力侵蚀产沙作出定量分析。郭进等^[36]利用复合指纹识别方法在三峡库区

定量辨析了塘库表层沉积泥沙的来源,对旱地、水田、林草地的相对输沙贡献做出了定量评价,表明该技术能较好地辨析小流域泥沙来源。Collins 等^[37]在英国和非洲的 8 个流域检验和评价了单“指纹”示踪和多参数复合“指纹”示踪泥沙来源水平的差异,认为由同类“指纹”因子构成的组合对泥沙来源的识别能力优于单“指纹”,但稳定性差,而来自不同类别的“指纹”因子的组合具有最佳的泥沙来源示踪能力。Lamba 等^[38]在美国威斯康星州 Pleasant Valley 流域通过分析不同来源地和沉积泥沙中 37 种无机元素的含量差异,研究了河流下游沉积泥沙的来源,得出农业用地和侵蚀河岸是其细颗粒泥沙的主要来源。Nosratia 等^[39]通过建立混合模型,对伊朗 Hiv 流域不同泥沙源地与水库沉积泥沙中 28 种示踪元素的差异分析,利用复合指纹识别方法评价了泥沙来源研究的不确定性。

上述研究表明,随着新技术新方法的引入和应用,小流域泥沙来源研究方法已由单一发展到多样,示踪方法也由单“指纹”示踪发展到多参数复合“指纹”示踪,在很大程度上提高了研究成果的精度和可信度。

3 小流域泥沙输移比研究

泥沙输移比是流域侵蚀产沙及输移过程研究中的一个基本理论问题,输移比大小直接关系到侵蚀泥沙入河量的多少,对下游河道的安危、水库的使用年限有很大影响,对正确评价水土保持减沙效益以及下游河道治理决策有着重要意义。

由于三门峡水库的严重淤积,黄河流域泥沙输移比的研究受到了广泛的关注。我国泥沙输移比的研究是在 20 世纪 70 年代后期由龚时旻和熊贵枢首先开始的,研究认为,黄河河龙区间黄土丘陵区的多年泥沙输移比接近 1。之后,许多学者利用水文观测、3S 技术或¹³⁷Cs 示踪等方法开展了泥沙输移比研究。

黄土高原修建的淤地坝拦蓄了大量泥沙,对流域泥沙输移产生了重要影响,其相关研究也受到了重视。许炯心和孙季^[40]的研究表明:天然状况下,无定河流域的泥沙输移比接近 1.0,但由于流域内人工沉积汇(水库和淤地坝)的拦沙作用,泥沙输移比大幅减小到 0.2~0.4;沟道措施对流域泥沙输移比减小的影响要大于坡面措施。淤地坝拦沙的变化对无定河流域沟道—河道系统泥沙输移比变化的贡献率高达 87.27%,而汛期降雨变化的贡献率仅为 12.73%^[41],而且坝地面积增大对流域泥沙输移比减小的贡献最大,其次为地表径流系数减小的贡献^[6]。陈浩等^[42]研究指出:黄土丘陵沟壑区在流域治理度达到 70%条件下与治理前相比,泥沙输移比可以

减小 50%左右。刘卉芳等^[43]分析了黄土高原马家沟淤地坝在水土保持措施中的贡献,发现 1990—2007 年年均减沙量最大的是淤地坝,坝地的减沙贡献率在 1990—2000 年为 41.51%,在 2001—2007 年平均达到了 46.58%。朱恒峰等^[44]的研究表明,20 世纪 70 年代以来开展的大规模水土保持建设工程,使得延河流域的泥沙输移比显著下降,最小值仅为 0.26,到 80 年代末,泥沙输移比有所回升,认为泥沙输移比变化的主要原因是流域内淤地坝、水库等沟道工程措施的拦沙作用所致,其波动变化主要受库坝质量及拦蓄库容变化的影响。张鸾等^[45]通过对岔巴沟流域的研究发现,由于淤地坝对泥沙的拦截作用,20 世纪 80 年代的平均泥沙输移比仅为 0.325。马三宝等^[46]研究发现,经过 20 多年的大规模治理,韭园沟流域泥沙输移比已由 1953 年治理前的接近 1.0 下降到 1981 年的 0.59,2004 年更降到了 0.27;分析认为在流域泥沙输移比变化的影响因素中,淤地坝的作用明显大于坡面水土保持措施的效果,同时提出小流域治理程度达到 15%左右,其输移比可以降低 50%以上。淤地坝建设后的 60 a 来,王茂沟小流域不同时期的泥沙输移比都低于 0.25,1995—2004 年期间最低,仅有 0.01,说明淤地坝建设对流域泥沙输移比变化有重要影响(图 2)^[47]。

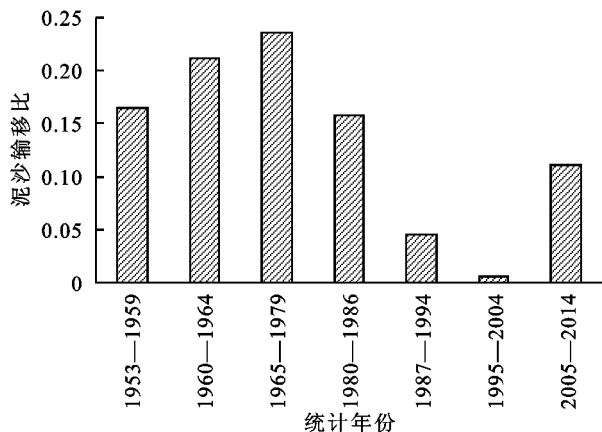


图2 王茂沟小流域泥沙输移比变化过程

国外学者也开展了坝库对流域泥沙拦蓄和输移比影响作用的研究。Polyakov 等^[48]在美国 Santa Rita Mountains 小流域野外 4 a 的观测表明,淤地坝拦蓄了同期产沙量的 50%,大大地降低了泥沙输移比。Nichols 等^[18]通过对美国亚利桑那州小流域的研究表明,淤地坝建设后 44 a,泥沙输移比仅为 0.06。Carolina 等^[49]对比研究了西班牙小流域土地利用变化和淤地坝建设对侵蚀产沙的影响,发现仅通过土地利用变化不修建淤地坝可使产沙量减少 54%,而土地利用没有变化时,淤地坝可以拦蓄 77%的产沙量,指出淤地坝是一种有效而短期的泥沙控制措施,而土

地利用变化对产沙量有重要而长期的影响。因而,在小流域侵蚀产沙治理措施方面,不能仅依靠单一的治理措施,而应两者兼顾,方能达到持续有效的作用。

4 存在问题和未来研究方向

4.1 存在问题

纵观国内外的研究现状可以看出,目前的研究仍多局限于单个坝库,涉及同一流域多个坝库的对比性研究尚未见报道。故而,在揭示流域侵蚀产沙速率和泥沙来源的普遍性规律方面还有许多问题未能解决。小流域泥沙输移比研究虽已取得很大进展,但限于多数流域长系列水沙实测资料的缺乏,对流域泥沙输移比动态变化过程的研究甚少,这在一定程度上制约了对流域泥沙输移变化过程及规律的深入认识,影响了各类水保措施治理效益的客观评价。

4.2 未来研究方向

黄土高原淤地坝及天然“聚淤”赋存了大量环境变化信息,为定量研究小流域侵蚀产沙与环境演变过程及特征提供了得天独厚的条件和可能。因而,依托其赋存的历史产沙信息和流域水文泥沙长系列观测资料,利用各种新技术和新方法,深入开展小流域侵蚀产沙的定量化研究,有望解决传统方法无法解决的侵蚀产沙方式的演变过程与特征、泥沙输移比研究中产沙量的定量化等难题。同时,随着对全球气候变化问题的日益关注,充分挖掘和利用淤地坝赋存的环境变化信息,深入开展土壤侵蚀环境演变过程研究将日益受到人们的重视。

参考文献:

- [1] 罗来兴,祁延年. 陕北无定河、清涧河黄土区域的侵蚀地形与侵蚀量[J]. 地理学报,1955,21(1):35-44.
- [2] 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.
- [3] 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):64-70.
- [4] 孙秋来,王宏兴,马军旗. 从淤地坝淤积调查推算坡面侵蚀状况[J]. 山西水土保持科技,2004(1):28-30.
- [5] 刘立峰,金绥庆,付明胜,等. 基于坝地泥沙淤积信息的流域侵蚀产沙特征研究[J]. 山西水土保持科技,2015(1):10-13.
- [6] 许炯心. 无定河流域的人工沉积汇及其对泥沙输移比的影响[J]. 地理研究,2010,29(3):397-407.
- [7] 李勇,白玲玉. 黄土高原淤地坝对陆地碳储存的贡献[J]. 水土保持学报,2003,17(2):1-4.
- [8] 张艳杰,秦富仓,岳永杰. 西黑岱流域淤地坝拦蓄泥沙和淤积土壤有机碳储量研究[J]. 江苏农业科学,2011,39(6):581-583.
- [9] Zhang X, Walling DE, Quine TA, et al. Use of reservoir deposits and caesium-137 measurements to investigate the erosional response of a small drainage basin in the rolling loess plateau region of China[J]. Land Degradation and Development, 1997,18(1):1-16.
- [10] 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),2007,37(3):405-410.
- [11] 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.
- [12] Wang YF, Chen LD, Fu BJ, et al. Check dam sediments:an important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014,186:4275-4287.
- [13] Zhao Guangju, Klik Andreas, Mu Xingmin, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2015,241:343-352.
- [14] 俱战省,王安邦,严冬春,等. 基于¹³⁷Cs,²¹⁰Pb和CSLE的三峡库区小流域土壤侵蚀评估[J]. 水土保持学报,2015,29(3):75-80.
- [15] 俱战省,王安邦,严冬春,等. 三峡库区小流域修正通用土壤流失方程适用性分析[J]. 农业工程学报,2015,31(5):121-131.
- [16] Romero-Díaz A, Alonso-Sarriá F, Martínez-Loris M. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison[J]. Catena, 2007,71(1):172-178.
- [17] Bellina N, Vanackera V, Wesemaela V B, et al. Natural and anthropogenic controls on soil erosion in the Internal Betic Cordillera (southeast Spain) [J]. Catena, 2011,87(2):190-200.
- [18] Nichols M H, Nearing M A, Polyakov V O, et al. A sediment budget for a small semiarid watershed in southeastern Arizona, USA [J]. Geomorphology, 2013,180/181(1):137-145.
- [19] Boardman J, Foster I D L. The potential significance of the breaching of small farm dams in the Sneeuwerberg region, South Africa[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011,11(8):1456-1465.
- [20] Zhang X, Walling D E, He X, et al. Use of landslide-dammed lake deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century[J]. Catena, 2009,79(3):205-213.
- [21] 李奎. 基于聚淤泥沙沉积分析与RUSLE模拟的黄土洼小

- 流域土壤侵蚀研究[D]. 西安:陕西师范大学,2014.
- [22] 张玮,杨明义,张风宝,等. 黄丘区小流域坝地沉积泥沙粒径剖面分布特征[J]. 水土保持研究,2015,22(2):17-21.
- [23] 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):107-111.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 李少龙,苏春江,白立新,等. 小流域泥沙来源的 ^{226}Ra 分析法[J]. 山地研究,1995,13(3):199-202.
- [27] 文安邦,张信宝,沃林 DE. 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.
- [28] Li Y, Poesen J, Yang J, et al. Evaluating gully erosion using ^{137}Cs and $^{137}\text{Cs}/^{210}\text{Pb}$ ratio in a reservoir catchments[J]. Soil and Tillage Research, 2003,69(1/2):107-115.
- [29] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 双同位素法研究[J]. 科学通报,2004,49(15):1537-1542.
- [30] Plata Bedmar A, Cobo Rayan R, Sanz Montero E, et al. Influence of the Puentes reservoir operation procedure on the sediment accumulation rate between 1954—1994 [C] // Commission Internationale des Grands Barrages, Proc. 19 th Congress Grands Barrages, Florence, Italy, 1997, Q. 74, R. 52.
- [31] Simms A D, Colin W, Brian G J, et al. Use of ^{210}Pb and ^{137}Cs to simultaneously constrain ages and sources of post-dam sediments in the Cordeaux reservoir, Sydney, Australia[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008,99(7):1111-1120.
- [32] 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.
- [33] 高进长,朱虹,龙翼,等. 川中丘陵区小流域土地利用变化和泥沙来源示踪的 $\delta^{13}\text{C}$ 技术[J]. 山地学报,2015,33(5):521-527.
- [34] Laceby JP, Olley J, Pietsch TJ, et al. Identifying subsoil sediment sources with carbon and nitrogen stable isotope ratios[J]. Hydrological Processes, 2015,29(8):1956-1971.
- [35] 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.
- [36] 郭进,文安邦,严冬春,等. 复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J]. 农业工程学报,2014,30(2):94-104.
- [37] Collins AL, Walling DE. Selecting fingerprinting properties for discriminating potential suspended sediment sources in river basins[J]. Journal of Hydrology, 2002,261(1/4):218-244.
- [38] Lamba J, Thompson AM, Karthikeyan KG, et al. Sources of fine sediment stored in agricultural lowland streams, Midwest, USA[J]. Geomorphology, 2015, 236:44-53.
- [39] Nosratia K, Goversb G, Semmensc B X, et al. A mixing model to incorporate uncertainty in sediment fingerprinting[J]. Geoderma, 2014,217/218:173-180.
- [40] 许炯心,孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响[J]. 水科学进展,2004,15(1):29-34.
- [41] 许炯心. 水土保持措施对无定河流域沟道—河道系统泥沙收支平衡的影响[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):7-13.
- [42] 陈浩,蔡强国,陈金荣,等. 黄土丘陵沟壑区人类活动对流域系统侵蚀、输移和沉积的影响[J]. 地理研究,2001,20(1):68-75.
- [43] 刘卉芳,曹文洪,秦伟,等. 淤地坝在流域水土保持措施中的贡献研究[J]. 中国农村水利水电,2011,(1):55-58,64.
- [44] 朱恒峰,康慕谊,赵文武,等. 水土保持措施对延河流域侵蚀、泥沙输移和沉积的影响[J]. 水土保持研究,2007,14(4):1-4.
- [45] 张鸾,师长兴,张灏. 岔巴沟流域淤地坝对泥沙存贮—释放的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):64-69.
- [46] 马三保. 小流域治理措施对泥沙输移比的影响[J]. 人民黄河,2013,35(1):78-80.
- [47] 黄河水利委员会黄河水利科学研究院. 坡沟系统侵蚀耦合机制之泥沙输移比研究[R]. 黄河水利科学研究院,2015.
- [48] Polyakov V O, Nichols M H, McClaran M P, et al. Effect of check dams on runoff, sediment yield, and retention on small semiarid watersheds[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,69(5):414-421.
- [49] Carolina Boix-Fayos, Vente J D, Martinez-Mena M, et al. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield[J]. Hydrological Processes, 2008,22(25):4922-4935.