

淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究

李 勉,姚文艺,史学建
(黄河水利委员会黄河水利科学研究院,郑州 450003)

摘 要:黄土高原淤地坝在拦沙减蚀方面发挥着重要作用。从淤地坝拦沙量与减蚀量计算方法、淤地坝拦沙减蚀作用与效益、淤地坝减蚀作用机理、淤地坝泥沙沉积特征与流域侵蚀产沙关系四个方面,归纳总结了其研究历史及现状,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,以其能为更加科学地评价黄土高原淤地坝减蚀作用,更有针对性地开展其今后的理论研究及生产建设提供参考。

关键词:黄土丘陵区;坡向;生态与环境建设

中图分类号:S 157.31 文献标识码:A 文章编号:1005-3409(2005)05-0107-05

Study on the Effect of Silt Dams for Conserving
Soil and Water and Its Sedimentation Characteristic

LI Mian, YAO Wen-yi, SHI Xue-jian
(Yellow River Institute of Hydraulic Research, the Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Silt dams play active and important role in conserving soil and water. On the basis of concluding and summarizing the past and present situation of the effect of silt dams for conserving soil and water in 4 aspects, including the calculation methods of blocking and reducing sediment, the effect and role in conserving soil and water, the mechanism in reducing erosion intensity, the relationship between the sedimentation characteristics and erosion type evolution in small watersheds, the problems existed in present research were analyzed, and the future developing direction in these fields were also pointed out and discussed, so that the role of silt dams in conserving soil and water can be evaluated scientifically and provide some references for future research and construction of silt dams on Loess Plateau.

Key words: loess hilly area; slope direction; ecological and environmental construction

泥沙是治黄的症结所在,减少入黄泥沙一直是黄河治理工作的重要任务之一。黄河泥沙主要来源于黄土高原的千沟万壑,尤其是 7.86 万 km² 的多沙粗沙区。大量的泥沙不仅淤塞河道坝库,使坝库难以正常发挥效益,同时抬高了下游河床,使之成为“地上悬河”,给两岸人民的生命财产安全造成严重威胁。修建于各级沟道中的淤地坝,从源头上封堵了向下游输送泥沙的通道,在泥沙的汇集和通道处形成了一道人工屏障,在解决黄河泥沙问题、确保黄河安澜方面发挥了重要作用。同时,在改善生态与环境及农业生产条件、建设稳产高产基本农田、调整农村产业结构、高效利用水资源、巩固退耕还林还草成果、促进农村经济发展等方面,也发挥着极其重要的作用。因此,无论从西部大开发的战略角度考虑,还是从退耕还林还草政策实施后,如何解决黄土高原地区人民群众衣食住行、经济发展问题及黄河减沙的角度来看,加快黄土高原地区淤地坝建设已势在必行。50 多年来,广大科技工作者在淤地坝减水减沙效益、减蚀作用机理、坝地泥沙沉积特征及泥沙来源等方面做了大量工作,回顾并总结以往研究成果,对于正确评价淤地坝减水减沙效益、进一步加强小流域淤地坝拦沙机理研究有重要意义,对目前黄土高原正在大规模开展的淤地坝建设也有一定的指导意义。

1 淤地坝拦沙减蚀作用与机理研究

在沟道中建造淤地坝拦截泥沙是我国黄土高原地区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。水利专家李仪祉先生于 1927 年提出在沟道中修筑淤地坝,防治沟壑扩展,减少入黄泥沙的技术方案,作为治黄方略的一个重要组成部分付诸实施。建国后,尤其是 1952 年绥德水保站成立后,淤地坝建设有了突破性进展。20 世纪 80 年代后,国家自然科学基金、水利部水沙基金、黄委会水保基金等相继资助开展了河龙区间水沙变化分析研究,其中淤地坝拦沙减蚀计算方法、减蚀作用及其机理分析是很重要的一部分。

1.1 淤地坝拦沙量与减蚀量计算方法

许多学者研究探讨了水土保持各项措施减水减沙效益计算方法,对淤地坝的拦沙量与减蚀量的计算方法也进行了较深入全面的总结和研究^[1~4]。其中,以张胜利、曾茂林等的研究最具代表性^[3,4]。张胜利等研究认为,淤地坝拦沙量的计算方法主要有典型推算法和全面调查法。前者的计算公式为:

$$\Delta W_{sg} = M_s f (1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2) \tag{1}$$

式中: ΔW_{sg} ——流域淤地坝拦沙量(t); M_s 单位面积坝地拦沙量(t/hm²); f ——流域坝地面积; α_1 ——人工填垫坝地面

① 收稿日期: 2005-01-22
基金项目: 国家自然科学基金委员会、黄河水利委员会联合资助基金项目(50479066, 50239080)
作者简介: 李勉(1968-),男,河南焦作人,高级工程师,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。

积在坝地总面积中所占比例系数; α_6 ——推移质在坝地拦沙量中所占比例系数。其中, M_s 与沟道地形、坝高等有关, 不同流域 M_s 不同; f 的确定有 2 种方法, 1 是新增坝地面积, 2 是前期已淤成的坝地面积, 对后一种坝地的拦沙量目前尚无较好的计算方法, 一般仅计算第 1 种的拦沙量; 不同流域, α_1 和 α_6 也不相同, 据对无定河和孤山川流域的调查, α_1 分别为 25% 和 13%, α_6 约为 10% ~ 20%。由于沟道地形的复杂性, 淤地坝大小高低的多样性, 用该方法推算流域淤地坝拦沙量时, 结果难免有或大或小的误差。全面调查法是对流域淤地坝逐个进行调查, 将所有淤地坝的拦沙量加起来, 得出全流域的拦沙量。该方法工作量很大, 但精度较高。黄河中游不少支流, 特别是陕西省内的一些支流淤地坝的拦沙量, 均采用这种方法进行了调查。

淤地坝减蚀量一般按下式计算:

$$\Delta W_{sg} = W_{sg} L h / 2 H \quad (2)$$

式中: ΔW_{sg} ——计算年淤地坝的减蚀量(t); W_{sg} ——计算年流域每公里长的沟蚀量(t), 用该年流域侵蚀模数乘以沟谷泥沙系数(即沟谷产沙量占流域产沙量的百分比), 再除以该流域的沟道密度求得; L ——淤地坝所淤坝地长度(km), h ——坝前淤泥厚度; H ——沟沿线平均高度。

1.2 淤地坝拦沙减蚀作用与效益

在淤地坝拦沙效益方面, 各课题组通过调查, 查明大、中、小型淤地坝每淤 1 hm² 坝地, 平均可拦沙分别为 13.08 万 t、10.08 万 t 和 5.145 万 t, 典型坝系拦沙效果更显著; 内蒙古准格尔旗西黑岱小流域总面积 32 km², 从 1983 年开始完善沟道坝系建设, 到目前建成淤地坝 38 座, 累计拦沙 645 万 t, 已达到泥沙不出沟; 川掌沟流域自 1983 年以来年均拦沙量达 245.21 万 t, 占年均流失量的 91%, 而治沟骨干工程及淤地坝拦沙量就占年均拦沙量的 92.5%^[5]。延安市建成的 1.14 万座淤地坝已累计拦蓄泥沙 17 亿 t, 相当于全市 6 年输入黄河的泥沙总量。临汾地区建成的 12 条坝系, 总拦沙量为 5 120 万 m³, 与渠、路、林、建筑物等形成的生态防护体系, 可截留泥沙 70% 以上^[6]。曾茂林等的研究标明, 黄土高原单坝、小流域、重点支流和黄河流域的淤地坝拦沙作用和减蚀作用都非常显著, 无定河流域不同坝高的坝地每公顷平均拦沙量为 57 150 m³, 淤地坝的拦沙量约占水土保持总拦沙量的 40% ~ 80%^[4]。有关资料表明, 河龙区间 21 条支流的水保措施减沙效益中, 淤地坝减沙量占水保措施减沙量的 42% ~ 80%, 坝系的拦沙减沙效益是其它水保措施不能比的。方学敏等通过对比坝系完整的绥德王茂沟流域和仅有 2 座淤地坝的李家寨沟流域的侵蚀产沙变化^[7], 发现从 1953 ~ 1986 年, 王茂沟流域淤地坝拦沙总量为 166.5 万 t, 年均拦沙 5.05 万 t, 流域输沙模数由治理前的 18 000 t/km² 降低到治理后期的 504 t/km², 减少了 97%, 基本上实现了对泥沙的完全控制; 而与王茂沟在流域面积、地形、土壤及沟道条件等方面都比较接近的非治理沟李家寨沟, 流域侵蚀产沙非常剧烈。在降水条件相似的情况下, 王茂沟流域的径流量和输沙量较李家寨沟流域均有所减少, 其中以输沙量减少较明显。完整的坝系具有持续拦沙作用, 王茂沟流域 1987 年后的年均拦沙量仍达 3.07 万 t^[8]。王家沟流域建成坝系后, 流域年输沙模数为 5 208 t/km², 较治理前减少了 63%^[9]。冉大川等的分析表明^[2], 河龙区间淤地坝的减洪减沙作用随着时间的延续呈下降趋势, 具有时限性及非持续性(图 1)。1970 ~ 1996 年, 泾河、北洛河、渭河流域已淤平坝地年均减洪量分别占淤地坝年均减洪

总量的 4.1%、5.9% 和 2.1%, 淤地坝年均减蚀量分别占淤地坝年均减沙总量的 6.2%、5.6% 和 2.8%; 黄土丘陵沟壑区淤地坝的减蚀作用最为显著。河龙区间未淤成坝地的拦沙量约占淤地坝拦沙总量的 14% 左右; 泾河、北洛河流域未淤成坝地的拦沙量分别占淤地坝拦沙总量的 9% 和 8%。许炯心分析了黄河中游河口镇至龙门区间年输沙量和年雨量的时间变化趋势, 发现在 1970 年以来多沙粗沙区入黄泥沙量减少的总体背景上, 出现了 1986 ~ 1997 年间入黄泥沙量增加的近期趋势, 分析认为这一趋势与 20 世纪 80 年代以后淤地坝修建量大为减少, 70 年代修建的淤地坝与拦沙库已大部失效有密切关系, 并提出了一些对策和建议^[10]。据“八五”攻关研究成果, 80 年代无定河和三川河流域水土保持措施拦沙效益分别达 67.7% 和 55.9%, 其中淤地坝拦沙量分别占总拦沙量的 56.6% 和 65.5%; 黄河水利委员会黄河上中游管理局的初步调查统计表明, 20 世纪 70 年代以来, 三门峡以上一般年份来沙量减少了 3 亿 t, 其中淤地坝及水库减沙占 90% 以上, 并对淤地坝的拦沙作用作了分析预测, 认为黄土高原区 11 万多座淤地坝可拦沙 280 亿 t, 黄土高原区坝系基本完善后, 每年将减少入黄泥沙近 11 亿 t, 加上黄河中游其它水土保持措施, 解决下游河道的淤积, 实现“河床不抬高”, 确保安澜的目标是可以实现的。

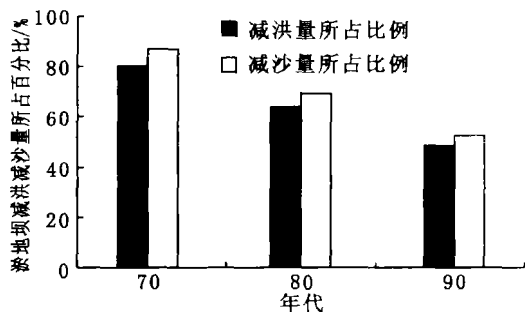


图 1 淤地坝减洪量和减沙量占同期水土保持措施减洪减沙总量比例的变化过程

淤地坝减蚀量主要包括淤地坝制止沟底下切和稳定沟坡、制止沟岸扩张的保土量。但由于观测资料不足, 目前还难以准确计算。较早的研究认为, 淤地坝减蚀量为淤地坝拦沙量的 1% ~ 3%, 计算时常取 2%。最近的研究成果认为, 淤地坝间接减蚀量占天然产沙量的 20% 左右^[11]。熊贵枢等用支流把口站的资料分析得出, 无定河赵石窑以上坝库年均减少沟壑侵蚀(减蚀)量为 2 080 万 t, 其总减蚀量约为多年平均输沙量的 20.8%, 说明淤地坝不仅有直接的拦沙作用, 而且还有较明显的固岸、减蚀作用^[12]。

1.3 淤地坝减蚀作用机理

修建在侵蚀发育强烈地区的淤地坝, 随着拦沙量的增加和淤地范围的扩大, 抬高了局部侵蚀基准面, 减缓了沟道比降, 减小了水流行进速度, 从而能有效减轻沟道重力侵蚀, 起到一定的减蚀作用^[3]。与淤地坝拦沙减蚀作用及效益研究相比, 淤地坝拦沙减蚀机理方面的研究开展的相对较少, 且主要集中在以下几方面。

1.3.1 抬高侵蚀基准, 缩短沟坡坡长, 减弱重力侵蚀, 控制沟蚀发展

据实测资料分析, 淤地坝淤积体呈锥形, 大部分泥沙淤积在坝的前部, 淤泥面存在一定的比降, 其值较原沟道比降为小。据无定河流域 53 座淤地坝的观测, 原沟道比降为 0.74% ~ 4.04%, 平均为 2.02%, 而坝地淤泥比降为 0.063% ~

0.863%, 平均为 0.253%, 淤积比降只有原沟道比降的 0.03 ~ 0.26^[9, 11]。曾茂林等分析认为, 淤地坝的减蚀作用最明显的是在淤积面以下部分, 由于建坝后坝内淤积, 可以抬高侵蚀基准面, 使干沟比降从 1.13% ~ 1.50% 减缓到 0.05% ~ 0.10%, 从而制止了沟底下切, 同时, 因沟道流水侵蚀作用而引起的沟岸滑坡, 其剪出口往往位于坡脚附近, 由于淤积物淤埋上游两岸坡脚, 掩埋了滑坡体剪出口, 坡面比高降低, 坡长减小, 使坡面冲刷作用和岸坡崩塌减弱, 对滑坡运动产生阻力, 促使滑坡稳定, 因此, 淤地坝在稳定两岸沟坡, 减轻沟蚀, 防止沟道下切和沟岸坍塌方面起到了重要作用^[4]。此外, 随着淤地坝淤积面的升高, 可以大大缩短沟坡坡长。据研究, 对于坝高为 15 m 左右的淤地坝, 淤积后一般可使近坝段的沟壁坡长从 40 ~ 60 m 缩短为 20 ~ 40 m, 从而使沟谷侵蚀和重力侵蚀的发展几率大大降低, 起到明显的减轻沟蚀和重力侵蚀的作用; 淤积面以上相当范围内也会由过去的侵蚀型转变为淤积型或平衡型, 从而大大减少侵蚀的发生^[4]。

1.3.2 拦蓄洪水泥沙, 减轻沟道冲刷

由于淤地坝一般库容较小, 多数汛前不蓄水, 当出现暴雨洪水时, 水流可直抵坝前, 受坝体的拦阻其挟带的泥沙将沉积在库内。许多学者分析认为, 坝地每公顷拦沙量不同, 主要是由于沟道地形和坝高不同造成的, 坝愈高, 拦沙量愈多, 坝高低于 5 m 与坝高于 30 m, 其拦沙量可以相差 4 ~ 5 倍; 淤地坝拦沙效益的大小与修建时间的长短也有密切关系, 一般而言, 新建淤地坝拦沙效益大, 修成几年后拦沙效益变小, 这是因为这时的任务主要是防洪保收, 不再是蓄洪拦沙的缘故^[3]; 淤地坝拦沙效益的大小与沟谷地形也有密切关系, 对于相同坝高的淤地坝, U 型谷拦沙量远远大于 V 型谷拦沙量。由于淤地坝运用初期能够利用其库容拦蓄洪水泥沙, 削减洪峰, 减少对下游的冲刷, 同时, 坝体的下游也会因打坝拦截了上游的洪水, 大大减少了上游洪水对下游侵蚀的动力, 使原来的侵蚀型转变为非侵蚀型, 从而大大减轻了沟道洪水的冲刷强度和挟沙能力^[4]。

1.3.3 减缓地表径流流速, 增加侵蚀泥沙地表落淤

沟道中淤地坝修建后, 由于提高了坝址处的侵蚀基准, 减缓了坝上游淤积段河床比降, 加宽了河床, 减小了水流流速和径流深, 从而大大减小了水流的侵蚀能力和挟沙能力。同时, 由于淤地坝的拦沙蓄水作用, 延长了含沙水流在淤地坝内的滞留时间, 增加了其沉积落淤量。淤地坝运用后期形成坝地后, 沟道径流产汇流条件发生了质的变化, 在一定程度上也减缓了地表径流流速, 增加了侵蚀泥沙地表落淤量。

此外, 由于淤地坝建成后增加了坝地, 提高了农业单产, 有力地促进了陡坡退耕还林还牧。据汾西县独堆河流域统计, 坝系建成后该流域退耕近 533.34 hm²^[6]; 皇甫川流域西黑岱乡通过坝系工程建设, 退耕 1 133 hm², 伊旗花套图流域坡耕地由 1993 年坝系建设前的 91.3 hm² 退为 16.7 hm²^[13]。由于 1 hm² 坝地的农作物产量是坡耕地和荒坡地的 3 ~ 7 倍^[11], 每建成 1 hm² 坝地可以促进几公顷的坡耕地退耕。因此, 坡耕地面积的大量减少也是淤地坝发挥减蚀作用的一个间接方面。

2 淤地坝泥沙沉积特征与流域侵蚀产沙关系

由于淤地坝沉积泥沙记载着建坝后几十年的环境变化历史, 能评价和预测区域土壤侵蚀变化状况, 为水土保持与

治理提供基础资料, 所以, 其泥沙沉积特征与侵蚀产沙关系研究受到了人们的重视。国内在此方面的研究最早始于对天然聚淤和谷坊堰塘的调查。20 世纪 50 年代, 罗来兴等调查了天然“聚淤”的年淤积量, 并据此推算了无定河和清涧河流域的年侵蚀量^[14]; 朱震达则依据谷坊堰塘所淤积泥沙的数量推算估计了该集水面积的水土流失量^[15]。但由于研究手段的限制, 对“聚淤”、谷坊、堰塘和坝地泥沙沉积动态变化过程的研究开展较少。

20 世纪 60 年代, Menzel 研究了放射性核素⁹⁰Sr 在径流中的输移特征, 开创了核素示踪研究的先范^[16]。此后, 人工核素¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、²⁴¹Am、⁹⁰Sr 和²³⁹⁻²⁴⁰Pu 等被广泛用于土壤侵蚀和泥沙来源示踪研究^[17-21]。由于人为放射性元素在原自然环境中不存在, 没有环境本底值的干扰, 由人类生产出后才释放到自然环境中, 且主要存在于地球最表层, 所以极适于表层过程的环境示踪, 但考虑到散落量、比活度强度、半衰期和测试技术等原因, 目前应用最广的是¹³⁷Cs。由于土壤中的¹³⁷Cs 能反映出坡地侵蚀和沉积, 得出相对土壤侵蚀率和反映流域土壤侵蚀及沉积的变化, 并能探索侵蚀泥沙源地和泥沙搬运路线, 进行较大范围、大时间尺度(10 a 以上)的研究, 而不需要频繁地对试验场点进行监测, 从而解决了传统方法所无法解决的问题。因此, 多年来放射性核素¹³⁷Cs 被广泛应用于积雪、湖泊和水库的沉积年代和沉积速率研究, 并获得了极大的成功。国外许多学者在此方面开展了许多富有成效的研究工作, 如 Plata Bedmar 等根据西班牙东南部 Puentes 水库沉积泥沙中¹³⁷Cs 的含量, 推断出 1970 ~ 1994 年间, 大约有 40% 的沉积泥沙来自于流域表层 10 cm 的土层, 60% 来源于次表层, 且很可能是沟蚀造成的^[22]; Poesen 等认为, 由沟蚀产生的侵蚀量在不同的时间跨度内有很大变化, 其侵蚀量可占总侵蚀量的 47% ~ 83%^[23]。国内, 张信宝等利用¹³⁷Cs 示踪方法研究了黄土高原王家沟小流域 1985 年和 1986 年 2 次洪水过程中坝库泥沙来源, 得出沟间地和沟谷地相对产沙百分比, 认为后者是主要产沙来源区^[24]。杨明义等应用¹³⁷Cs 方法研究了小流域泥沙来源, 计算了沟间地与沟谷地产沙比^[25]。文安邦等通过沟间地、沟谷地不同类型土地表层土壤和淤地坝坝库淤积泥沙¹³⁷Cs 含量的对比分析, 得出了 1973 ~ 1977 年 15 次洪水泥沙中沟间地、沟谷地相对来沙比^[26]。庄作权利用放射化学及地球化学示踪方法研究了台湾德基水库集水区的泥沙来源^[27]。

但是, 由于人为放射性核素¹³⁷Cs 最早沉降始于 20 世纪 50 年代, 在土壤中达到可测量浓度始于 60 年代, 无法用于研究 60 年代以前淤地坝沉积泥沙的沉积特性及来源, 而天然放射性核素²¹⁰Pb_{ex}可以弥补¹³⁷Cs 方法的不足, 开展更长时间尺度(100 年)土壤侵蚀及泥沙输移、沉积规律的研究, 因而, 利用多核素复合示踪技术以弥补单一核素示踪方法的不足, 进一步提高研究成果的精确度, 成为当前土壤侵蚀示踪技术发展的方向和趋势。Wasson^[28]等利用²¹⁰Pb_{ex}方法研究了澳大利亚 Burrinjuck 水库的泥沙沉积年代及速率; 王秀玉等应用²¹⁰Pb_{ex}方法测定了近代鄱阳湖底泥的沉积速率, 得出湖心区沉积速率最低的结论^[29]。近年来, 国外 Murry^[30], Wallbrink^[31], Sutherland^[32], VandenBygaart^[33]等在研究中发现最初的¹³⁷Cs 沉降量不是固定的, 而是有很大的变异性, 提出了用²¹⁰Pb_{ex}和¹³⁷Cs 的比值来减少这种变异性的方法。万国江等利用¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}复合示踪方法研究了云贵高原洱海

和红枫湖的沉积速率,并据此辨识出这些湖泊汇水区不同的侵蚀特征^[34]。李勉应用¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}复合示踪方法研究了川中紫色丘陵区小流域水田沉积泥沙来源及泥沙输移比^[35]。此外,李少龙等在黄土丘陵区皇甫川流域利用放射性核素²²⁶Ra分析法,通过对比堆积黄土、原生基岩和淤地坝沉积泥沙中²²⁶Ra的浓度,研究了沉积泥沙来源,并认为利用该方法通过在河道中连续取样,可用于研究并区分黄土产沙、基岩产沙在河道中的运移规律^[36]。Murry和Wallbrink等还提出了用²²⁶Ra和²³²Th的比值,根据比例法测算不同源区迁移到沉积区的泥沙百分含量的方法,为小流域泥沙来源的研究提供了新思路^[37]。

由此可见,国内的研究目前多集中于淤地坝沉积泥沙来源及沉积速率方面,对其泥沙沉积的动态变化过程以及与流域侵蚀产沙强度的作用关系开展的较少。国外的研究由于没有黄土高原特有的淤地坝沉积剖面,因而其研究也多集中于小流域侵蚀产沙来源方面。

3 存在问题及未来展望

3.1 存在问题

由于黄土丘陵区侵蚀类型的复杂性、侵蚀过程的特殊性,以及传统研究方法的局限性,以往对淤地坝的研究大多侧重于淤地坝减水减沙效益及其计算方法和泥沙来源方面,对淤地坝建坝后较长时间尺度内,尤其是在淤地坝不同发展

阶段,淤地坝泥沙沉积过程、特征及其与坡沟侵蚀产沙间的响应关系,侵蚀泥沙在坝地内的再分布特征及规律,淤地坝泥沙沉积与小流域侵蚀产沙强度的耦合作用关系,建坝后小流域土壤侵蚀特征演化规律等方面的研究甚少,故此,在揭示建坝后土壤侵蚀特性演化规律及淤地坝减蚀作用机理,正确认识和评价淤地坝减蚀作用程度和过程方面仍存在许多不足,还有不少问题亟待解决。这些都直接影响到今后淤地坝的建设和治黄措施的选择及制定,对黄土高原治理具有举足轻重的作用。

3.2 未来展望

随着黄土高原小流域坝系建设的大规模开展,多核素复合示踪、3S监测等先进技术以及神经网络、分形分维等方法在土壤侵蚀研究领域的广泛应用,为淤地坝理论与实践方面的深入研究提供了可能和条件。因此,在已有研究成果的基础上,紧密结合水土保持工程实际,利用现代多核素复合示踪技术及其它先进技术手段,追踪并反演建坝后几十年内坝地泥沙沉积过程和流域土壤侵蚀特性演化过程,探索其泥沙运动机理,揭示淤地坝减蚀机理及建坝后坝地泥沙沉积与土壤侵蚀特性演化间的耦合作用机制、方式,进一步丰富土壤侵蚀理论研究,推进流域侵蚀环境整治,促进该区域以至整个黄土高原正在实施的大规模坝系建设将是今后淤地坝理论与实践研究的重要方向之一。

- [1] 郑宝明,等.黄土丘陵沟壑区第一副区小流域坝系建设理论与实践[M].郑州:黄河水利出版社,2004.
- [2] 冉大川,罗全华,刘斌,等.黄河中游地区淤地坝减洪减沙作用分析[EB/OL].http://www.huanghe.gov.cn/lib/hhkkx/2003-03-21/jj08575628921.html.
- [3] 张胜利,于一鸣,姚文艺.水土保持减水减沙效益计算方法[M].北京:中国环境科学出版社,1994.
- [4] 曾茂林,朱小勇,康玲玲,等.水土流失区淤地坝的拦沙减蚀作用及发展前景[J].水土保持研究,1999,6(2):126-133.
- [5] 内蒙古准格尔旗水土保持局皇甫川治沟骨干工程研究组.川掌沟治沟骨干工程坝系建设及其重大作用[J].中国水土保持,1995,(4):15-19.
- [6] 张文英.坝系工程效益及建设体会[J].山西水利,1999,(3):11-12.
- [7] 方学敏,万兆惠,匡尚富.黄河中游淤地坝拦沙机理及作用[J].水利学报,1998,(10):49-53.
- [8] 刘汉喜,田永宏,程益民.绥德王茂沟流域淤地坝调查及坝系相对稳定规划[J].中国水土保持,1995,(12):16-21.
- [9] 方学敏,曾茂林.黄河中游淤地坝坝系相对稳定研究[J].泥沙研究,1996,(3):12-20.
- [10] 许炯心.黄河中游多沙粗沙区水土保持减沙的近期趋势及其成因[J].泥沙研究,2004,(2):5-10.
- [11] 范瑞瑜.黄土高原坝系生态工程[M].郑州:黄河水利出版社,2004.
- [12] 唐克丽.黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M].北京:中国科学技术出版社,1993.
- [13] 赵昕,李毓祥,韩学士.坝系农业与生态环境建设[J].水土保持研究,2001,8(4):43-45.
- [14] 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.
- [15] 朱震达.南阳盆地边缘花岗岩丘陵地区侵蚀地形的初步观察[J].地理学报,1955,21(1):45-51.
- [16] Menzel R G. Transport of strontium-90 in runoff. [J]. Science, 1960, 131: 499-500.
- [17] Pennington W, R S Cambray, E M Fisher. Observations on lake sediments using fallout ¹³⁷Cs as a tracer [J]. Nature, 1973, 242: 324-326.
- [18] Ritchie, J R McHenry. Determination of fallout ¹³⁷Cs and naturally occurring gamma-ray emitters in sediments [J]. Appl. Radiat. Isot, 1973, 24: 575-578.
- [19] Robbins J, A, D N Edgington. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1975, 39: 285-304.
- [20] Siggers G B, P D Bates, M G Anderson, et al. A preliminary investigation of the integration of modelled floodplain hydraulics with estimates of overbank floodplain sedimentation derived from ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs measurements [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 211-231.
- [21] Simpson H J, C R Olsen, Triver, et al. Man-made radionuclides and sedimentation in the Hudson River [J]. Science, 1976, 194: 1979-1982.

[22] Plata Bedmar, R Cobo Rayan, E Sanz Monteroet, et al. Influence of the Puentes reservoir operation procedure on the sediment accumulation rate between 1954– 1994[A] . In: Commission Internationale des Grands Barrages Proc. 19th Congress Grands Barrages[C] . Florence, Italy, 1997, Q. 74, R. 52, 835– 847.

[23] Poesen J, J Nachtergaele, G Verstraeten, et al. Gully erosion and environmental change: importance and research needs [J] . Catena, 2003, 50(2– 4) : 91– 133.

[24] 张信宝, 李少龙, 王成华, 等. 黄土高原小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 法研究[J] . 科学通报, 1989, (3) : 210– 213.

[25] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用¹³⁷Cs 研究小流域泥沙来源[J] . 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3) : 49– 53.

[26] 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³⁷Cs 法研究[J] . 地理学报(增刊), 1998, 53(6) : 124– 133.

[27] 庄作权. 利用放射化学及地球化学方法追踪德基水库集水区之泥沙来源[J] . 水土保持研究, 1995, 2(3) : 195– 198.

[28] Wasson R J, R L Clark, P M Nanninga. ²¹⁰Pb as a chronometer and tracer, Burrinjuck Reservoir, Australia[J] . Earth Surface Processes and Landforms, 1987, 12: 399– 414.

[29] 王秀玉, 曾而康, 万玉松, 等. 应用²¹⁰Pb 法测定鄱阳湖底泥的沉积速率[J] . 核技术, 1987, 10(12) : 15– 18.

[30] Murry Murray A S, Marten R, Johnson A, et al. Analysis for naturally occuring radionuclides at environmental concentrations by gamma spectrometry [J] . J. Radioanalytical and Nucl. Chem. Articles. , 1987, 115: 263– 288.

[31] Wallbrink P J, A S Murray. Determining soil loss using the inventory ratio of excess lead– 210 to cesium– 137 [J] . Soil Science Society of American Journal, 1996, 60: 1201– 1208.

[32] Sutherland R A, T Kowalchuk, E de Jong. Cesium– 137 estimates of sediment redistribution by wind [J] . Soil Science, 1991, 151: 387– 396.

[33] VandenBygaart A J, D J King, P H Groenevelt, et al. Cautionary notes on the assumptions made in erosion studies using fallout ¹³⁷Cs as a marker[J] . Can. J. Soil Science, 1999, 79: 395– 397.

[34] 万国江, P G Appleby. 环境生态系统散落核素示踪研究新进展 [J] . 地球科学进展, 2000, 15(2) : 172– 177.

[35] 李勉. 小流域侵蚀与产沙关系的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex}示踪研究 [D] . 杨陵: 中国科学院水土保持研究所, 2002.

[36] 李少龙, 苏春江, 白立新, 等. 小流域泥沙来源的²²⁶Ra 分析法 [J] . 山地研究, 1995, 13(3) : 199– 202.

[37] Murray A, Ellen Wohl, Jon East. Thermoluminescence and excess ²²⁶Ra decay dating of Lake Quaternary fluvial sands, East Alligator River [J] . Australia. Quaternary Research, 1992, 37: 29– 41.

(上接第 87 页)

个复合系统, 防止土壤侵蚀的发生发展。因此, 关于草被各部分之间的耦合关系有待做进一步的研究。

表 5 草地与农地冲刷量的比较

土地利用	深度/cm	冲刷量 /(g · min ^{- 1})	土地利用	深度/cm	冲刷量/ (g · min ^{- 1})
草地	0 ~ 15	4. 5	农地	0 ~ 20	97. 2
	15 ~ 45	7. 4		20 ~ 35	94. 2
	45 ~ 75	8. 8		35 ~ 62	100
	75 ~ 150	93. 1		62 ~ 150	100

参考文献:

[1] 朱显谟. 黄土高原植被因素对于水土流失的影响[J] . 土壤学报, 1960, 8(2) : 110– 120.

[2] 李勇, 吴钦孝. 黄土高原植被根系 提高土壤抗冲性能研究. I 油松人工林根系对土壤抗冲性能的增加效应[J] . 水土保持学报, 1990, 4(1) : 1– 5.

[3] 汪有科, 吴钦孝, 赵鸿雁, 等. 林地枯落物抗冲机理研究[J] . 水土保持学报, 1993, 7(1) : 75– 80.

[4] 汪有科. 森林植被水土保持功能评价[J] . 水土保持研究, 1994, 1(3) : 24– 30.

[5] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置[J] . 水土保持通报, 1984, 4(9) : 43– 47.

[6] 白红英, 唐克丽, 张科利, 等. 草地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[J] . 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, (17) : 87– 93.

[7] 蔡庆林, 唐克丽, 陈文亮. 林地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[J] . 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, (17) : 79– 86

[8] 郑粉莉, 唐克丽, 蔡庆, 等. 子午岭林区林冠对降雨截留作用的研究[J] . 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, (17) : 64– 67.

[9] 查轩, 唐克丽, 白红英. 植被恢复对土壤抗侵蚀特性的影响研究[J] . 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1993, (17) : 36– 43.