

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.02.008

退耕还林背景下的小流域侵蚀产沙研究

陈鸿¹, 刘刚^{1,2}, 刘普灵^{1,2}, 张宁宁^{2,3}

(1.西北农林科技大学 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.榆林学院 生命科学学院 陕西 榆林 719000)

摘要:以退耕还林实施效果的显现期(2003-2011年)为背景,采用指纹识别技术反演淤地坝泥沙来源及小流域侵蚀产沙演变。结果显示,9年间,沟道、人工林、灌木地和缓坡耕地的平均泥沙贡献率分别为40%、25.9%、20.3%和13.8%。淤地坝泥沙主要来自沟道。根据各源地泥沙贡献率及其与面积占比的关系,确定小流域中不同土地利用类型的平均侵蚀强度由大到小依次为沟道>缓坡耕地>人工林>灌木地。随着退耕年限的增加,人工林泥沙贡献率出现小幅增长,沟道侵蚀有下降趋势,但沟道仍为黄土高原丘陵区侵蚀泥沙的主要来源地。退耕还林时期栽植的灌木有效减少了侵蚀作用,缓坡耕地则仍需辅以相应的水土保持措施。

关键词:指纹识别技术;侵蚀演变;淤积旋回;泥沙贡献率;淤地坝

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0468-155X(2020)02-0052-07

黄土高原位于黄河流域中游,特殊的气候、土壤和地形条件,加之人类不合理的土地利用方式,使它成为世界上水土流失和土地退化最严重的地区之一^[1]。退耕还林工程使黄土高原水土流失得到明显遏制,入黄泥沙显著减少^[2],生态环境呈现出新的面貌。在新的侵蚀环境下,小流域集水和汇水过程、速率等均发生变化,而泥沙运动的动力是由水提供的,水的流速、流量和方向等直接影响着泥沙的侵蚀、搬运和沉积等作用。相比径流小区观测、水沙资料分析和遥感调查等传统方法,指纹识别技术可直接从泥沙入手进行研究^[3]。20世纪70年代,国外学者首先将其用于泥沙示踪研究。随着多变量线性混合模型^[4]的加入,以及多因子的指纹识别^[5]和多元判别分析方法(DFA)^[6]的运用,使它作为一种高效、便捷的研究手段被广泛使用。淤地坝是黄土高原水土流失治理中的一项重要工程措施^[7],通过对坝库泥沙的分析,能够挖掘出流域大量的侵蚀信息^[8],其分析的基本单元通常为淤积旋回。张信宝等^[8]根据泥沙对洪水的响应机制,利用¹³⁷Cs将淤积旋回与历次降雨事件对应。侯建才等^[9]基于此方法,初步探索了淤积旋回在小流域侵蚀过程和泥沙来源中的运用。杨明义等^[10]首次证明了利用指纹识别技术研究黄土高原地区洪水泥沙来源的可行性,随后的许多研究^[11-13]也证实其同样适用于黄土高原淤地坝泥沙来源解析。近年来,这项技术日趋完善^[14]。本文通过坝库淤积泥沙剖析,反演了退耕还林实施以来淤地坝的泥沙来源,探索退耕还林工程对黄土高原小流域侵蚀产沙的影响,同时判断流域内不同土地利用类型的侵蚀强度差异。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

湫沟小流域位于陕西省延安市(图1),属黄土高原丘陵沟壑区第二副区,流域面积为5.23 km²。研

收稿日期:2019-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41761144060);中国科学院国际合作局对外合作重点项目(161461KYSB20170013);陕西省重点研发计划青年科技新星项目(2017KJXX-83)

作者简介:陈鸿(1995-),男,福建福鼎人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: chchenhong@outlook.com

通信作者:刘刚。E-mail: gliu@foxmail.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究区年均气温为 9.8 ℃, 年均降水量为 537 mm, 全年降水量 70% 以上分布在 6-9 月份, 且多以暴雨形式出现, 年际变化大。流域内成土母质为黄土, 土壤以黄绵土为主, 占 90% 以上。1999-2002 年, 在退耕还林的实施下, 流域内荒坡地和坡耕地面积急剧减少。截至 2003 年, 二者基本实现向刺槐林、灌草地和机修梯田的转化, 流域内仅剩占总面积 3% 左右的缓坡耕地。湫沟大坝于 2002 年开始建设, 2003 年底蓄水使用。坝址位于沟口, 无任何泄洪措施。坝高为 28.5 m, 顶宽为 4 m, 总库容为 118.5 万 m³, 拦泥库容为 59.1 万 m³。淤地坝自建成运行以来, 无泥沙外泄。2003 年开始正式蓄水。

1.2 土样采集与处理

沿库尾向坝体方向的轴线设置 3 个淤积泥沙采样点, 分别距离坝体 60 m、225 m 和 380 m 处(图 1)。2012 年 5 月进行采集工作, 采样工具为内径 42 mm 的双净面不锈钢管。样品风干后, 取全剖面 1 kg 左右作为淤积泥沙代表样品, 用于 2003-2011 年泥沙来源解析。剖面剩余部分按照 0.5 cm 厚度分层, 进行颗粒组成测量。分层粒度测量发现三者典型旋回数量相同, 且在剖面上的分布相似, 但距坝体 60 m 的样品剖面长度最大, 同时典型旋回与暴雨事件对应度较高, 故以其剖面划分的淤积旋回构建时间序列。泥沙源地分为人工林、灌木地、缓坡耕地和沟道 4 种类型。人工林包括陡坡耕地退耕后种植的刺槐林和零星的山杨(占流域面积 25.3%), 以及崩坡上小于 25° 种植苹果树的坡地(占流域面积 7%), 林下植被覆盖稀少。灌木地(占流域面积 34.2%) 主要植被为柠条、黄蒿和其他杂草, 坡度较陡。沟道虽不属于土地利用类型, 但其作为黄土高原丘陵区的主要侵蚀来源地貌也被考虑。天然林经治理后恢复良好, 不将其列为潜在泥沙源地。流域内梯田面积约占 9%, 但均为高标准的机修硬埂梯田, 可认为无侵蚀发生^[15]。小流域共设置 102 个样点, 其中人工林 37 个, 灌木地 30 个, 缓坡耕地 15 个, 沟道 20 个。根据坡面走向, 沿径流线从分水岭至坡脚设置样点, 使用不锈钢铲, 采集样点周围 5 m 以内土壤 1 kg 左右, 取样深度为 0~5 cm。沟道土样采集自沟壁, 分布在沟道中部及下部沟道连接处。源样点采集工作于 2012 年 7 月完成。

实验室需测量的指标有 13 种, 分别为颗粒组成、¹³⁷Cs 比活度、全氮(TN)、全磷(TP)、土壤有机质(SOM)、K、Mg、Na、Ca、Fe、Mn、Cu、Zn。测试工作于 2013 年 5 月进行。所有样品经自然风干, 剔除植株碎屑、根系及砾石, 研磨后过 2 mm 筛备试。土壤颗粒组成分析采用英国马尔文激光粒度仪 MasterSizer 2000。TN 采用全自动凯式定氮仪测定, TP 采用磷钼酸比色法, 采用重铬酸钾容量法测定样品的 SOM。K、Mg、Na、Ca、Fe、Mn、Cu、Zn 采用火焰原子吸收分光光度计测定。将粒径小于 1 mm 样品称取 250 g 以上装入 ¹³⁷Cs 测定样品盒中, 称量样品净重量, 密封后静置 20 天。采用美国 ORTEC 公司生产的 8 192 道低本底 γ 能谱分析仪, 测定在 661.6 keV 处 ¹³⁷Cs 全峰面积, 测量时间均为 8 h。

1.3 指纹识别技术

指纹识别技术是基于泥沙样品中的地球化学元素等其他可作为指纹因子的指标, 来推算潜在的泥沙来源。为了筛选出在各源地间存在显著差异的因子, 采用的 Kruskal-Wallis 检验统计量 H 为^[16]:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \tag{1}$$

式中: R_i 为各组秩和; N 为各组观察值总个数; n_i 为单个组内观察值个数。当某项属性的 P 值小于 0.05 时, 说明该属性在组间差异性显著, 符合指纹因子备选条件; 差异不显著的因子($P > 0.05$) 则会被剔除。寻找最优因子组合由多元判别分析实现。这里引入 Wilks' lambda 计算法^[16], 计算式为:

$$A = \frac{SS_{error}}{SS_{error} + SS_{treat}} \tag{2}$$

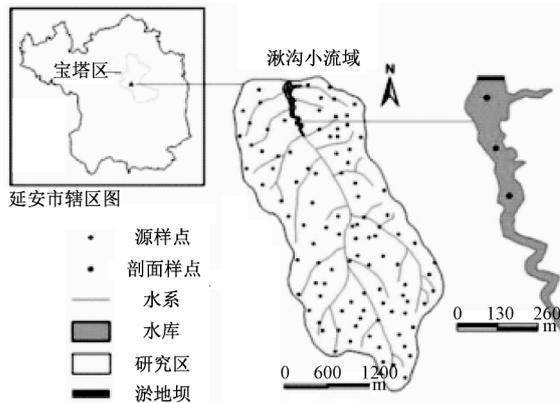


图 1 研究区及采样点位置

Fig.1 Location of study area with sampling points

式中: SS_{error} 为组内离差平方和; SS_{treat} 为组间离差平方和。当所有观测组均值相等时, λ 值等于 1; 当组内变异小于组间变异时, λ 值接近于 0.000, 说明组合辨别率较高。在找到最佳因子组合的基础上, 接着采用多元混合模型^[17] 计算各源地泥沙贡献率:

$$R_{es} = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[C_i - \left(\sum_{s=1}^m P_s C_{si} \right) \right] / C_i \right\}^2 \tag{3}$$

式中: R_{es} 为残差平方和; n 为指纹识别因子数量; C_i 为淤地坝淤积泥沙指纹因子 i 的含量; m 为泥沙源地数量; C_{si} 为潜在泥沙源地 S 中的指纹因子 i 平均含量; P_s 为泥沙源地 S 的泥沙贡献率。当 R_{es} 取到最小值时, P_s 值即为相应的泥沙贡献率。最后采用拟合优度 (Goodness of Fit, GOF)^[18] 检验模型对样本观测的结果, 计算式为:

$$GOF = \left\{ 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| C_i - \left(\sum_{s=1}^m P_s C_{si} \right) \right| / C_i \right\} \times 100\% \tag{4}$$

当 $GOF > 80\%$ 时, 一般认为混合模型的计算结果被接受。

2 结果与讨论

2.1 坝前旋回分层及时间序列的建立

泥沙输移比会随流域面积的增加迅速减小^[19], 本研究流域面积为 5.23 km^2 , 且黄土高原丘陵区中小流域泥沙输移比接近 1^[20], 径流携带的泥沙大部分经沟道流出沟口汇入淤地坝。进入淤地坝的泥沙在沉降过程中产生的分选作用, 造成淤积泥沙粗细相间分布, 出现一定的淤积层理分布特点^[18]。根据这一特点, 从剖面下部至上部, 以第一个明显的砂粒含量极大值为始, 剖面样品长度被设置为 205 cm 。

表 1 显示, 样品中黏粒含量的变动范围在 $5.6\% \sim 28.9\%$ 之间, 粉粒含量变动范围在 $56.3\% \sim 84.6\%$ 之间, 砂粒含量变动范围在 $0.2\% \sim 35.9\%$ 之间, 淤积物中粉粒的含量远大于砂粒和黏粒。此外, 剖面样品中各粒径的组分出现峰值与谷值交替的现象 (图 2) 其中 * S 为典型旋回层。从 205 cm 深度开始向上, 样品中的砂粒百分含量由多变少后又变多, 出现了一个峰值。对应深度处, 粉粒和黏粒的百分含量出现了一个谷值, 即存在粒度含量的转折点。由于砂粒百分含量的变异系数最大, 且砂粒最先沉降, 故选出 13 个砂粒含量极大值点作为旋回分层的初步参考。此外, 风干后的剖面样品出现多条裂隙。这是由于黏粒较强的胀缩性, 使土体中黏粒含量高的部分在土壤含水率降低时发生收缩^[21]。因此, 以风干后样品的自然裂隙, 结合剖面样品中砂粒含量极大值点进行旋回分层。根据现有降雨资料, 将各旋回与相应年限降雨资料建立初步的淤积剖面时间序列 (图 2)。

表 1 泥沙剖面样品不同组分的颗粒属性

Table 1 Particle characteristics of different components in sediment samples

土壤颗粒/mm	极小值/%	极大值/%	标准差	方差	变异系数
黏粒 (<0.002)	5.6	28.9	6.6	42.9	0.42
粉粒 (0.05~0.002)	56.3	84.6	5.8	33.6	0.08
砂粒 (>0.05)	0.2	35.9	10.2	103.4	0.80

初步分层得到 14 个淤积旋回。在黄土高原丘陵区, 坝库中明显的旋回层通常由暴雨产生^[12], 较小的雨强并不会在坝底形成完整的旋回, 或因旋回层太薄而导致无法区分^[9]。降雨资料完整时, 可先将厚度较大的旋回层与暴雨事件对应, 这些层次可作为进一步确定其他旋回与降雨事件对应的控制性层次。两个控制性层次间的旋回也按照厚度由大到小进行筛选, 较大厚度层次对应较大降雨事件, 如此依次类推。本文把暴雨标准定为 24 h 累计降雨量 $> 55 \text{ mm}$ ^[22], 9 年间小流域共有 11 场暴雨事件。通过旋回和降雨对应关系的分析, 确定了 S2, S4, S7, S8, S9, S10, S13 和 S14 共 8 个旋回是在这 11 场暴雨事件下形成的, 故将其列为典型旋回。研究期内小流域无坝体修补、溃坝和大型耕作活动等扰动破坏旋回的事件, 可认为所选取的典型旋回可靠性较高。它的确定有利于精确剖面样品的时间序列, 为小流域侵蚀产沙研究提供保障。

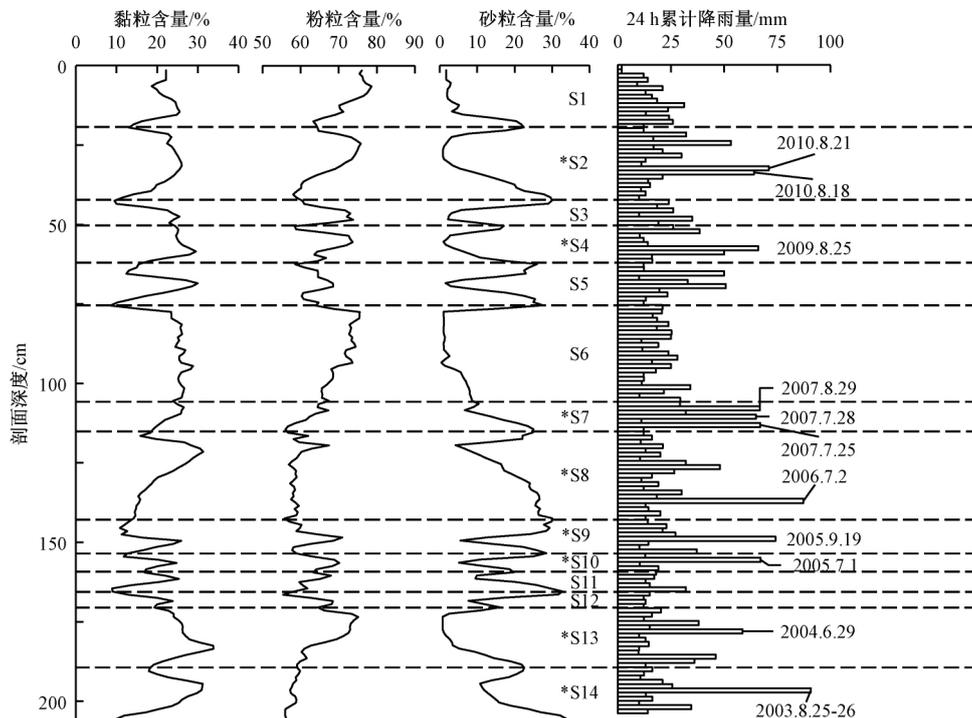


图 2 淤积泥沙剖面样品颗粒百分含量随深度的变化

Fig.2 Variation of particle percentage content with depth in sediment profile samples

2.2 淤地坝泥沙来源

参考杨明义等^[10]的试验结果,本文选择了¹³⁷Cs 比活度, TN, TP, SOM, K, Mg, Na, Ca, Fe, Mn, Cu 和 Zn 共 12 种指标作为指纹因子。表 2 为经过式(1)的 Kruskal-Wallis H 检验,其中*表示在 P=0.05 时显著。初选的 12 种指标均通过了 Kruskal-Wallis H 检验。

表 2 泥沙源地指纹识别因子的 Kruskal-Wallis H 检验结果

Table 2 Results of Kruskal-Wallis H test in sediment sources

指纹因子	H 值	P 值	指纹因子	H 值	P 值
TP /%	65.7	0.000*	Mn / (g/kg)	71.1	0.000*
TN /%	17.8	0.000*	Ca / (g/kg)	76.6	0.000*
SOM /%	51.3	0.000*	Fe / (g/kg)	72.5	0.000*
K / (g/kg)	78.4	0.000*	Cu / (g/kg)	139.5	0.000*
Na / (g/kg)	27.2	0.000*	Zn / (g/kg)	51.9	0.000*
Mg / (g/kg)	37.9	0.000*	¹³⁷ Cs 比活度 / (Bq/kg)	38.3	0.000*

经判别分析式(2)计算,得到由 Cu、Fe、Mg、Mn 和 K 等 5 种土壤理化指标构成的最优因子组合(表 3)。单个因子辨别率均较低,最高为 Fe 辨别正确率为 42.2%,最低为 Mg 辨别正确率为 30.4%。而最优因子组成的累计辨别率达到了 95.1%。对 4 种不同泥沙源地的判别正确率(表 4),最高的是人工林,为 97.3%。剩余的判别正确率由高到低分别是沟道、缓坡耕地和灌木地,分别为 95%、93.3%和 93.3%。4 种泥沙源地的判别正确率均大于 85%,判别效果良好。

根据最优组合中各因子在源地和淤积泥沙代表样品中的浓度,得到 2003-2011 年间淤地坝的泥沙来源信息(图 3,其他*包括梯田、天然林等,试验假设小流域泥沙均来自 4 个源地)。试验混合模型 GOF 值为 82%~92%。贡献率/面积比系数为泥沙贡献率与各泥沙源地面积的比值。4 种潜在泥沙源地的贡献率/面积比系数由大到小依次为:沟道 5.36,缓坡耕地 4.95,人工林 0.8,灌木地 0.59,即 2003-2011 年 4 种潜在泥沙源地平均侵蚀强度由大到小的顺序为沟道>缓坡耕地>人工林>灌木地。9 年间,淤地坝内 40%的泥沙来自沟道,占流域总面积 7.4%的沟道是淤地坝泥沙的主要来源,说明研究区沟道

表 3 最优指纹因子和组合判别结果

步骤	被引入的因子	单因子判别率/%	累计判别率/%
1	Cu	41.2	41.2
2	Fe	42.2	59.8
3	Mg	30.4	83.3
4	Mn	33.3	89.2
5	K	34.3	95.1

表 4 最优指纹的单个源头泥沙判别正确率

土地利用类型	样本个数	判别正确率/%
灌木地	30	93.3
沟道	20	95.0
人工林	37	97.3
缓坡耕地	15	93.3
累计	102	95.1

侵蚀较活跃,得到与 Wang 等^[13]一致的结果;人工林和灌木地贡献率/面积比系数均小于 1,二者泥沙贡献率均小于其面积比值;缓坡耕地占流域总面积的 2.7%,但泥沙贡献率达到 13.8%。在黄土高原地区高强度降雨条件下,缓坡耕地仍会发生较为严重的侵蚀事件,而在退耕还林实施后植被条件转好的背景下,沟道仍为黄土高原丘陵区侵蚀泥沙的主要来源。研究小流域陡坡耕地被完全退耕为林地和灌草地,栽植的灌木有效减少了侵蚀作用。9 年间,林、果园地(人工林+灌木地)泥沙贡献率之和为 46.2%,远小于林果植被面积占流域面积之比 66.6%(不包括天然林),说明退耕还林对减少小流域侵蚀产沙做出重要贡献。

2.3 小流域侵蚀产沙演变

剖面样品中不同旋回的相对贡献率是由最优组合中各因子在源地土壤和淤积剖面不同旋回层中的浓度得到。图 4 显示,灌木地和缓坡耕地泥沙贡献率变化无显著规律,人工林贡献率随退耕年限的增加(旋回次序由大到小)略有增长,但波动较大。相反,沟道贡献率不断降低(沟道贡献率在 S14 较高的原因与 2003 年修建大坝过程中造成的库区周围和沟道的土体扰动有关),由 S13、S9 的 86.3%、92.7%,下降至 S1 的 2.2%,泥沙贡献率减少了 80%以上。研究认为,坡面对产流产沙的响应在植被恢复、坡改梯等一系列水保措施的实施下远大于沟道,结果通常是抑制其产流产沙^[23],沟道产沙量则会在退耕还林

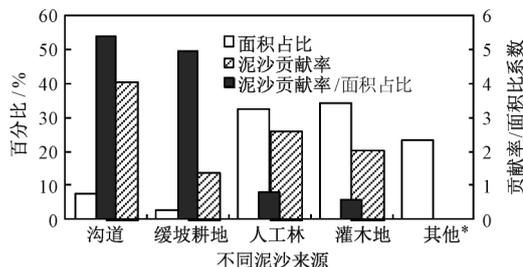


图 3 不同泥沙来源地面积百分比及其泥沙贡献率关系

Fig.3 Area proportion of different sediment sources and its relationship with sediment contribution rate

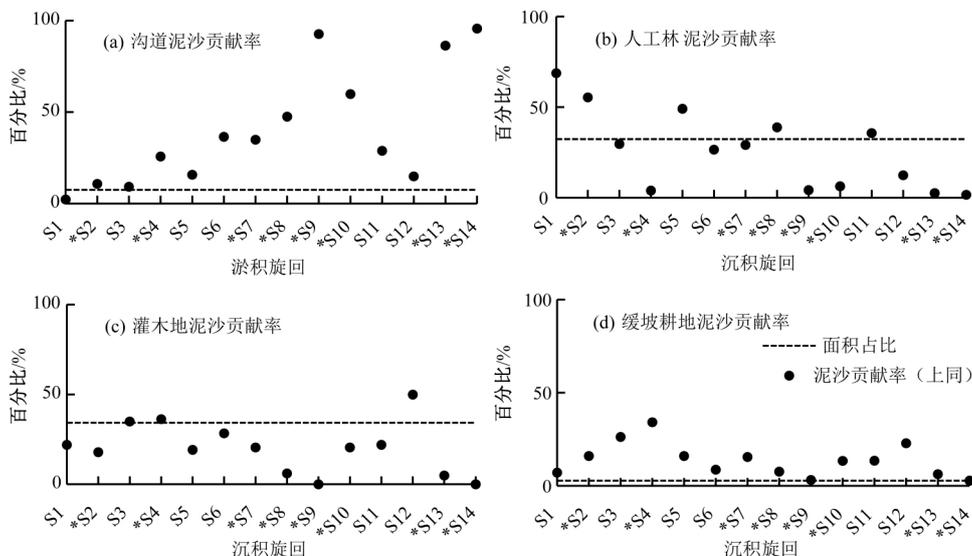


图 4 各源地面积占比及其在不同旋回中的泥沙贡献率

Fig.4 Area proportion of each source and its contribution rate in different depositional cycles

实施以后不断增加^[13]。但随着淤地坝的运行,侵蚀基准面抬高,会缓解暴雨形成的径流对下游沟道的冲刷^[23]。杨明义等^[10]在洪水泥沙来源的研究中发现,沟道发生了重力侵蚀,出现泥沙贡献率高达81.2%的情况,但整个洪水过程沟道贡献泥沙不足40%。同时,相比正常降雨,极端降雨会增加沟坡、沟壁物质的流失^[12],而研究时段内淤沟小流域遭受极端降雨的频率随时间增加明显降低(图2),这些可能是导致沟道泥沙贡献率减小的因素。

各泥沙源地典型旋回贡献率的变化特征与全剖面解析结果相似。典型旋回作为高强度暴雨下的产物,利用其判别各泥沙源地的产沙情况更可靠。典型旋回判别结果与全剖面判别结果相似,说明试验结果可信度较高。

3 结论

(1) 利用淤地坝淤积泥沙反演侵蚀过程及泥沙来源,典型旋回的确定有利于精确所建立的样品时间序列,同时它也可作为验证泥沙全剖面解析结果的手段。

(2) 研究区林、果园地泥沙贡献率之和显著小于林果植被面积占流域面积之比,体现了退耕还林在减少小流域侵蚀产沙方面的作用。

(3) 文中利用的贡献率/面积比系数可反应泥沙源地间侵蚀强度的大小差异。随着退耕年限的增加,人工林泥沙贡献率呈增长趋势,后续研究区工作应在人工林抚育和管理等方面加强。

(4) 在退耕还林实施后植被条件转好的背景下,沟道泥沙贡献率呈减小趋势,但其仍为黄土高原丘陵区侵蚀泥沙的主要来源地。而黄土高原地区高强度的降雨,使得缓坡耕地仍需辅以相应的水土保持措施。

参考文献:

- [1] Fu B J, Chen L D. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 44(3): 291-303.
- [2] 楚纯洁, 耿鹏旭, 赵聪. 黄河花园口断面水沙变化特征及趋势分析 [J]. *泥沙研究*, 2011(5): 39-44.
- [3] 徐龙江, 杨明义, 刘普灵, 等. 指纹识别技术在泥沙来源研究中的应用进展 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 197-200.
- [4] Yu L, Oldfield F. A multivariate mixing model for identifying sediment sources from magnetic measurements [J]. *Quaternary Research*, 1989, 32(2): 168-181.
- [5] Walling D E, Woodward J C, Nicholas A P. A multi-parameter approach to fingerprinting suspended sediment sources [C]// *Proceedings of the Yokohama Symposium*. Wallingford, IAHS Publication, 1993, 215: 329-337.
- [6] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique [J]. *Catena*, 1997, 29(1): 1-27.
- [7] 焦菊英, 王万忠, 李靖, 等. 黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 302-306.
- [8] 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(3): 405-410.
- [9] 侯建才, 李占斌, 李勉, 等. 基于淤地坝淤积信息的小流域泥沙来源及产沙强度研究 [J]. *西安理工大学学报*, 2007, 23(2): 118-122.
- [10] 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.
- [11] 陈方鑫, 张含玉, 方怒放, 等. 利用两种指纹因子判别小流域泥沙来源 [J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 867-875.
- [12] Zhang J Q, Yang M Y, Zhang F B, et al. Fingerprinting sediment sources after an extreme rainstorm event in a small catchment on the Loess Plateau, China [J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(8): 2527-2539.
- [13] Wang W D, Fang N F, Shi Z H, 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.

- [14] Collins A L , Pulley S , Foster I D L , et al. Sediment source fingerprinting as an aid to catchment management: A review of the current state of knowledge and a methodological decision-tree for end-users [J]. *Journal of Environmental Management* , 2016 , S0301479716307460.
- [15] 连振龙, 刘普灵, 陈翠红, 等. 黄土丘陵沟壑区林草植被恢复的减沙效益研究 [J]. *水土保持通报* , 2008 , 28(1) : 10-13.
- [16] Franz C , Makeschin F , Wei H , et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment , Brasilia DF , Brazil - using the fingerprint approach [J]. *Science of The Total Environment* , 2014 , 466-467: 513-523.
- [17] Walling D E. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems [J]. *Science of the Total Environment* , 2005 , 344(1-3) : 159-184.
- [18] Motha J A , Wallbrink P J , Hairsine P B , et al. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia [J]. *Water Resource Research* , 2003 , 39(3) : 1056.
- [19] 吴傲, 李天宏, 韩鹏. 黄河流域泥沙输移比与流域面积的关系 [J]. *泥沙研究* , 2014(1) : 61-67.
- [20] 牟金泽, 孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比 [J]. *泥沙研究* , 1982(2) : 60-65.
- [21] Chertkov V Y , Ravina I. Modeling the crack network of swelling clay soils [J]. *Soil Science Society of America Journal* , 1998 , 62(5) : 1162-1171.
- [22] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究 [J]. *水土保持学报* , 2000 , 14(4) : 6-11.
- [23] 滕晗, 夏建新, 任华堂. 退耕还林还草工程对黄土高原延河流域水土保持功能影响研究 [J]. *泥沙研究* , 2015(4) : 14-19.

Processes of erosion and sediment yield in a small watershed under the influence of the grain for green project

CHEN Hong¹ , LIU Gang^{1 2} , LIU Pu-ling^{1 2} , ZHANG Ning-ning^{2 3}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau , Northwest A&F University , Yangling 712100 , China; 2. Institute of Soil and Water Conservation , CAS & MWR , Yangling 712100 , China; 3. College of Life Sciences , Yulin University , Yulin 719000 , China)

Abstract: The implementation of the Grain for Green Project (GGP) has significantly controlled soil erosion and improved ecological environment on the Loess Plateau. In order to control soil erosion on small watershed for eco-environmental protection on the Loess Plateau , fingerprinting was used to reveal the sediment sources of check dam and the features of erosion in a typical watershed in 2003-2011. The results showed that the sediment contribution rates of gully , artificial forest , shrub , and gentle slope farmland were 40% , 25.9% , 20.3% , and 13.8% , respectively. Deposited sediment in check dam mainly came from gully. Ratio between the contribution rate of each source area and the percentage of their areas showed that the average erosion intensity following the decreasing order as gully>gentle slope farmland>artificial forest>shrubs. During implementation of GGP , the sediment contribution rate of artificial forest increased and gully reduced , respectively. However , gully is still the main source of erosion sediment in the hilly region of the Loess Plateau. The shrubs planted during the period of GGP effectively reduced erosion , but the gentle slope farmland still needs measures for soil and water conservation.

Key words: fingerprinting identification; erosion processes; depositional cycle; contribution rate of sediment; check dam

(责任编辑: 陈绪坚)