

榆神府矿区典型小流域侵蚀产沙对退耕还林(草)及煤矿开采的响应

王晓彤¹ 张加琼^{1,2*} 杨明义^{1,2} 王永吉¹

(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)

摘要 在脆弱的自然环境和强烈的煤矿开采活动共同影响下,黄土高原以榆神府矿区为核心的生态脆弱带土壤侵蚀极其严重。虽然退耕还林(草)工程的持续实施有效缓解甚至遏制了土壤侵蚀,煤矿开采却引发了新的问题,改变了小流域侵蚀产沙特征。本研究在该区域选择代表性坝控小流域——老爷满小流域,运用复合指纹识别法判别淤地坝沉积泥沙来源,旨在揭示退耕还林(草)和煤矿开采对榆神府矿区典型小流域侵蚀产沙特征的影响;从已建立的坝地运行期间的沉积旋回时间序列中选取退耕还林(草)之前10年(1990—1999年)和之后10年(2000—2010年),对比分析源地对坝地沉积泥沙的贡献差异及其变化特征。结果表明:2000—2010年沉积旋回的年均厚度由1990—1999年的(42.7±29.9) cm减小到(16.6±13.7) cm,坝地采样点单位面积年均沉积量由579.9 kg·m⁻²减少到245.8 kg·m⁻²。研究期间小流域首要泥沙源地均为沟壁(平均贡献为79.2%±10.1%),但与1990—1999年相比,2000—2010年间受退耕还林(草)工程影响较大的坡面对坝地沉积泥沙的贡献率呈现增加趋势,年均贡献增加7.4%。结合区域的降雨和煤矿开采情况,上述现象表明在退耕还林(草)和降雨侵蚀力减小的共同影响下,流域的侵蚀产沙强度总体明显减弱;煤矿开采对坡面侵蚀产沙有重要的影响,导致退耕还林(草)对坡面水土流失的防治效果受到明显的影响。由此可见,煤矿开采增加了坡面的侵蚀产沙风险,受煤矿开采影响的区域是坡面水土流失治理的重点区域。

关键词 土壤侵蚀; 复合指纹识别; 退耕还林(草); 煤矿开采; 淤地坝

Effects of “Grain for Green” program and coal mining on sediment production in a typical small watershed of Yushenfu Mining Region, Northwest China. WANG Xiao-tong¹, ZHANG Jia-qiong^{1,2*}, YANG Ming-yi^{1,2}, WANG Yong-ji¹ (¹State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: Soil erosion in the ecologically fragile zone is severely affected by the intensified coal mining activities in the Yushenfu Mining Region of the Loess Plateau. Soil erosion controlling projects such as the “Grain for Green” program are continuously implemented by the government, which has effectively mitigated or even controlled soil erosion. Coal mining results in new environmental problems, which has changed the erosion characteristics and sediment transport in watersheds. In this study, we identified the sediment source trapped behind the check dam using a composite fingerprinting approach and clarified the impact of “Grain for Green” program and coal mining on variation of the amount and sources of sediment during two decades, in a representative check-dam which controlled the watershed of Laoyeman. The two decades were divided into two stages, *i.e.* an earlier decade (1990–1999) and a later decade (2000–2010) with respect to the implement of the “Grain for Green” program in the flood couplets sequence established during the running of the dam. The annual average thickness of flood couplets during 2000–2010 decreased

本文由国家自然科学基金项目(41671281)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41671281).
2020-03-08 Received, 2020-04-05 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jqzhang@nwsuaf.edu.cn

from (42.7±29.9) cm to (16.6±13.7) cm during 1990–1999, and the annual sediment deposition per unit area (square meter) at the sampling site reduced from 579.9 kg·m⁻² to 245.8 kg·m⁻². The main source of sediment was gully wall (averaged 79.2%±10.1%) during the study period. However, compared with sediment sources during 1990–1999, the contribution of sediment from slope during 2000–2010, which was greatly affected by the “Grain for Green” program, showed an increasing trend (average annual contribution increased by 7.4%). According to the coal mining and the variation of rainfall erosivity, our results indicated that under the combined effects of the “Grain for Green” program and decreases of rainfall erosivity, the intensity of sediment production in the watershed was substantially decreased. Coal mining had important impacts on sediment contribution from the slope, and obviously affected soil erosion controlling effects of the “Grain for Green” program. It is obvious that coal mining has increased the risk of erosion and sediment production on the slope, and that soil erosion control on the slope should focus on areas affected by coal mining.

Key words: soil erosion; composite fingerprinting approach; “Grain for Green” program; coal mining; check dam.

土壤侵蚀是我国面临的主要生态环境问题之一,由土壤侵蚀引起的土地退化、河道淤积、农业面源污染等问题严重影响社会生产发展^[1]。黄土高原尤其是以榆神府矿区为核心的生态脆弱带土壤侵蚀极其严重,矿区开发对地表形态的破坏更加剧了水土流失,主要表现为裂隙的发育、采空区的塌陷以及松散物质的堆积,煤矿开采改变了土壤侵蚀原有的输移沉积方式,导致区域生态脆弱性提高^[2-4]。另一方面,为控制严重的土壤侵蚀,国家在该区域实施了一系列生态工程。特别是1999年开始施行的退耕还林(草)工程,在治理水土流失、改善生态环境等方面取得了显著成效,使该区域林草覆盖面积大幅度提高,土壤侵蚀强度明显降低^[5-7]。在退耕还林(草)和煤矿开采的影响下,该生态脆弱带小流域侵蚀产沙特征究竟发生了怎样的改变非常值得关注。

受自然和人为因素影响,沉积物来源在时间和空间上有很大差异,使用传统方法具有一定的局限性^[8]。复合指纹识别法是量化源地侵蚀产沙贡献的有效手段^[9]。该方法基于流域各潜在源地的土壤物理、化学和生物性质的差异,利用数理统计的方法筛选出最佳指纹因子组合,并结合相关模型估算各源地对沉积泥沙贡献。该技术已广泛应用于河流、海洋等泥沙、污染物、营养物等来源研究^[10],最近拓展到风成沉积物的研究中,并逐渐从一种研究手段变为一种泥沙管理工具^[11-12]。然而,侵蚀泥沙样品准确获取的问题,限制了复合指纹识别法在土壤侵蚀中的应用。淤地坝拦截的沉积泥沙为运用复合指纹识别法研究沉积物来源提供了天然载体,解决了准确获取沉积物样品的瓶颈问题。淤地坝拦蓄

的沉积泥沙形成了可区分历次侵蚀产沙事件的沉积旋回,为研究小流域侵蚀产沙特征及其侵蚀环境奠定了基础^[13-15]。

本研究以榆神府矿区内的典型小流域为研究对象,根据坝地运行期间的沉积旋回时间序列选取退耕还林(草)之前和之后20年间的沉积旋回时间序列,利用复合指纹识别法分析沉积泥沙来源的变化,对比退耕还林(草)之前10年和之后10年小流域泥沙源地对沉积泥沙贡献率的变化,探讨退耕还林(草)和煤矿开采对小流域侵蚀产沙特征的影响。本研究对黄土高原生态脆弱带矿区坡面的水土流失治理具有重要意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究所选的老爷满小流域(38°47′N, 110°21′E)是陕西神木六道沟流域的支沟流域,也是榆神府区内受煤矿开采和退耕还林(草)工程共同影响的一个典型小流域。流域内坡耕地在1999年以前广泛分布,到2015年坡耕地所占面积仅占流域面积的8%,退耕效果显著;同时,流域位于榆神府矿区的核心地带(图1),流域附近有大小煤矿多处,煤矿开采造成流域地表裂隙密集分布,因此,老爷满小流域在榆神府矿区极具代表性,便于研究退耕还林(草)和煤矿开采对榆神府矿区小流域侵蚀产沙的影响。流域内海拔1081~1274 m,面积约0.56 km²,沟壑纵横,20世纪90年代中期年均侵蚀强度为11250 t·km⁻²^[16]。淤地坝位于老爷满小流域出口处,长约350 m、宽约86 m,坝顶修建为公路。该坝地靠近坝体区域于2011年开始耕种,2015

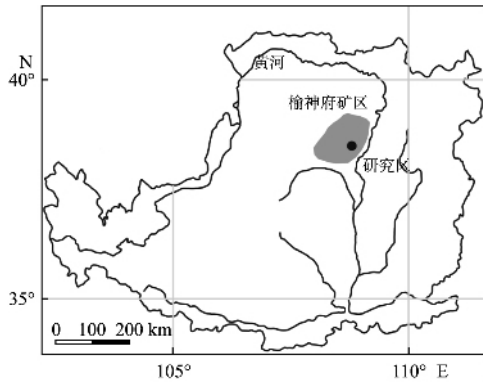


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Location of the study area.

年采样时采样区域为农田。该区域属于中温带半干旱气候,年均气温 $8.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均干燥度 1.8,年均降水量 437.4 mm ,其中 6—9 月的降水量占全年降水量的 50%以上^[17],降雨表现为雨量大、历时短的特征,以大雨、暴雨多见。流域地貌类型属于片沙覆盖的黄土丘陵,具有风沙地貌与流水地貌交错分布的特征^[18]。流域内土壤类型主要有红色古土壤、黄土和沙,红色古土壤几乎全部位于沟壁,黄土在沟壁和坡面均有分布,沙集中分布在流域上游的东南坡面上。土地利用类型主要有耕地、草地、林地、园地和工矿用地等。坡耕地在 1990 年时大面积存在,由于 1999 年退耕还林(草)工程的实施,到 2010 年几乎所有的坡耕地都转变为林草地,植被覆盖度大大提高。同时,工矿用地大幅增加,煤炭开采活跃产生的裂隙主要位于流域上游东北坡。

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于 2015 年 7 月,包括小流域表层土壤样品(源地样品)和坝地的沉积剖面分层样品。小流域表层土壤样品采集深度为 $0\sim 5\text{ cm}$,在每个采样点按三角形布设随机采集的 3 个子样品合并为一个样品,样点布设综合考虑流域内的土壤类型(红色古土壤、黄土和沙)、地貌部位(坡面和沟壁)以及土地利用类型(农地、退耕地、草地和林地),在保证样点涵盖所有类型的潜在泥沙源地的同时,尽量使样点均匀分布,因此不同类型的源地样品采样个数因各源地在流域所占面积比例不同而异,整个流域共采集 96 个源地样品,其中,红泥沟壁样 17 个,黄土沟壁样 14 个,无沙坡面样 54 个,覆沙坡面采样 11 个。淤地坝沉积剖面的分层样品通过人工开挖剖面的方式采集,为了保证剖面记录侵蚀产沙事件的完整性,避免筑坝造成的人为干扰,本研究选择的剖面开挖点距离坝体约 52 m ,且位于坝地中

部。剖面直径约 2 m 、深 7.53 m ,其深度基本达到淤积底部的基岩层,以便准确建立沉积泥沙的旋回时间序列(图 2a)。剖面样品采集时使用木铲按肉眼可见的泥沙颗粒的粗细沉积分层(沙层和黏层)沿土壤剖面从下到上依次分层采集沉积样品。对较厚的沙层或黏层,适当增加采样数量。整个剖面共采集沉积分层样 132 个(包括地表耕作层)。同时使用环刀沿土壤剖面自下而上按沙层和黏层采集土壤容重样品共 21 个,其中,沙层采样 11 个,黏层采样 10 个。为研究退耕还林(草)之前 10 年和之后 10 年间小流域的侵蚀产沙特征,本研究从完整的沉积剖面中选取了上部的 4.96 m ,共计包含沉积分层样 93 个,其中,89 个分层样为可区分的自然沉积旋回,4 个样品为受耕作影响的混合层;89 个分层样中,有 31 个次降雨沉积旋回。依据侵蚀性降雨径流对泥沙颗粒的分选作用,粗颗粒先沉降形成沙层,细颗粒后沉降形成黏层,按“上部黏层+下部沙层”将相邻的黏层和沙层合并为一次侵蚀性降雨产生的一个沉积旋回(图 2b)。王永吉^[19]根据研究区 1978—2015 年的降雨资料,依据大暴雨导致强烈侵蚀形成厚沉积的原则,将侵蚀性降雨事件与沉积旋回厚度进行初步对应,结合坝地建设、运行历史的时间标志,准确建立了坝地运行期间的沉积旋回时间序列。

对所有小流域表层土壤样品和坝地的剖面样品,经风干、去除杂质、过筛等预处理后,测定粒径、磁化率、土壤有机质含量、土壤养分(全氮、全磷、全钾)、地球化学元素。土壤颗粒粒径使用 Mastersizer-2000 激光粒度仪(Malvern Instruments, Malvern, UK)测定。使用 Bartington MS2 双频磁化率仪(Bartington Instruments, Witney, UK)测定土壤高频磁化率(χ_{hf})和低频磁化率(χ_{lf}),并求得样品的频率磁化率(χ_{fd})。土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。土壤全氮采用全自动凯氏定氮仪测定。将样品筛至 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 后,用 ICP-MS 测定 Mo、Cu、Pb、Zn、Ag、Ni、Co、Mn、Fe、As、U、Th、Sr、Cd、Sb、Bi、V、Ca、P、La、Cr、Mg、Ba、Ti、Al、Na、K、W、Zr、Ce、Sn、Y、Nb、Ta、Be、Sc、Li、S、Rb、Hf、In、Re、Se、Te 和 Tl 45 种地球化学元素(Vancouver Office, British Columbia, Canada)(包括全磷和全钾)。土壤容重用环刀法测定。

1.3 最佳指纹因子组的筛选

首先,采用聚类分析结合实地采样调查的方法划分潜在泥沙源地,源地分类对泥沙来源判别以及源地贡献的准确估计均有重要影响^[12]。其次,由于潜在指纹因子必须满足两个前提条件:在侵蚀、搬



图2 坝地沉积剖面(a)和沉积旋回层(b)

Fig.2 Sediment sampling profile (a) in the check dam and its deposition layers (b).

运、沉积过程中,指纹因子的性质不发生改变或其变化可以预测(保守性);在各个潜在泥沙源地中存在显著性差异(诊断性),因此,需要测试潜在指纹因子的保守性和诊断性。指纹因子的保守性可通过“阈值检验”的方法来实现。该方法通过比较源地样品与沉积物样品中指纹因子的值,剔除沉积物中某因子含量的最大值高于源地中该因子含量或沉积物中其含量的最小值低于源地中该因子含量的指纹因子。潜在指纹因子的诊断性采用一系列统计方法实现。先是非参数检验(Kruskal-Wallis H-test),通过计算K-W统计量及其相应的概率P值,概率P值小于给定的显著性水平 α 则拒绝原假设,表明各样本组总体分布存在显著差异,剔除检验结果为组间差异不显著的指纹因子。多元判别分析(DFA)是一种基于Wilks Lambda分布的判别函数,按照源地划分将有意义的元素进行归类,筛选出一组统计意义上具有最佳判别能力的复合指纹因子组合。

1.4 泥沙贡献的估算

泥沙贡献的估算依据最小二乘原理,采用多变量线性混合模型拟合求解:

$$f = \sum_{f=1}^n \left\{ \left[C_f - \left(\sum_{s=1}^m P_s S_{sf} \right) \right] / C_f \right\}^2 \quad (1)$$

式中: n 为指纹因子的数目; C_f 为沉积物中因子 f 的浓度; m 为潜在沉积物来源数量; P_s 为来自潜在沉积物来源 s 的贡献比; S_{sf} 为潜在源区 s 中指纹因子 f 的平均浓度值。此公式限制条件为各源地贡献大于0,且各源地贡献和为1。

蒙特卡洛随机模拟抽样与遗传算法结合的方法,可最小化目标函数的解析解,从而得到上述多变量线性混合模型的最优解,可大大提升估算贡献的准确性^[20]。因此,本研究采用蒙特卡洛5000次迭代结合遗传算法估算泥沙贡献率。

为了验证结果的可靠性,采用基于绝对误差的拟合优度(goodness of fit, GOF)计算泥沙来源贡献率估算的不确定性。其公式为:

$$GOF = 1 - \left\{ \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| C_i - \sum_{j=1}^m S_{is} - P_s \right| / C_i \right\} \quad (2)$$

式中: n 为指纹因子的数目; C_i 为沉积物中因子 i 的浓度; m 为潜在泥沙源地数目; S_{is} 为潜在源区 s 中指纹因子 i 的平均浓度值; P_s 为源地 s 的贡献率。该式必须满足各源地贡献大于0且各源地贡献和为1的限制条件。通常GOF>0.8时,表示混合模型的最优解可以接受^[21]。

1.5 数据处理

本研究采用Microsoft Excel 2010软件对数据进行处理,采用Origin 2016软件进行绘图,采用SPSS 25统计分析软件对数据进行线性拟合、非参数检验($\alpha=0.05$)和判别分析,采用Matlab软件进行蒙特卡洛模拟运算。

2 结果与分析

2.1 沉积泥沙时间序列建立和泥沙来源判别

根据王永吉等^[19]建立的坝地运行期间(1978—2014年)的沉积旋回时间序列,本研究选取沉积剖面上部4.96 m深度的沉积旋回,同时排除了形成于2011—2014年间受耕作影响已被混合均匀的累积耕层(24.5 cm),以分析退耕还林(草)之前和之后20年内侵蚀产沙的变化。对0.25~4.96 m深度范围内形成于1990—2010年间的31个次降雨沉积旋回,沉积泥沙的主要组成成分为粉粒(64.1%),其次为沙粒(21.3%)和黏粒(14.6%)(图3)。其中,黏粒含量与粉粒含量呈显著正相关($y=44.59+1.34x$, $R^2=0.475$),沙粒含量与黏粒含量呈显著负相关

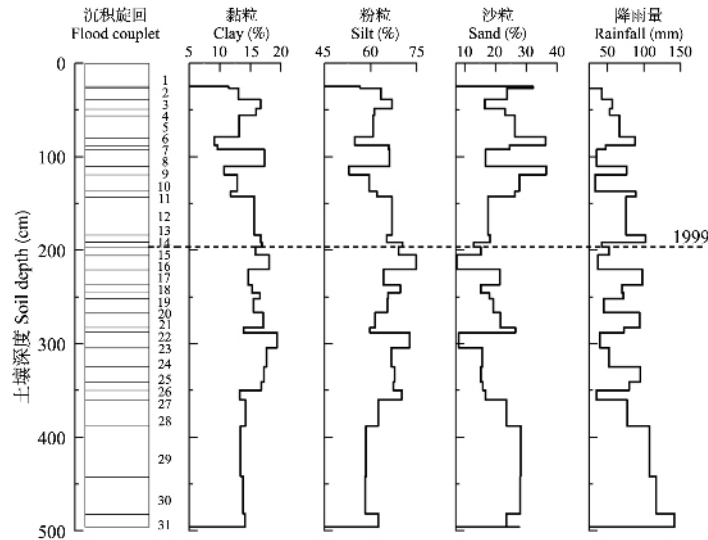


图 3 沉积旋回粒径的垂直剖面分布及旋回时间序列对应

Fig.3 Vertical profile distribution of couplet particle size and sequence of flood event couplets.

沉积旋回与发生年份的对应关系 Deposition year of couplets were as follows: 1~2→2010(表示旋回 1~2 形成于 2010 年 This meant couplets from No.1 to No.2 were formed in 2010), 3→2009, 4→2008, 5~6→2007, 7→2006, 8→2005, 9→2003, 10→2002, 11~13→2001, 14→2000, 15→1998, 16→1997, 17~19→1996, 20~26→1995, 27~28→1994, 29→1992, 30~31→1991.

($y = 54.51 - 2.28x$, $R^2 = 0.721$) ,沙粒含量与粉粒含量呈显著负相关($y = 107.85 - 1.35x$, $R^2 = 0.924$) ,说明洪水对泥沙颗粒有很好的分选作用。

通过合并同一年份产生的沉积旋回,发现 31 个次降雨沉积旋回发生于 16 年内,且退耕还林(草)工程实施之后 10 年,坝地沉积旋回数较之前 10 年减少了 3 个,但沉积旋回的年均厚度却由(42.7±29.9) cm减小到(16.6±13.7) cm。该现象表明退耕还林(草)工程实施之后 10 年虽然侵蚀事件发生的频率比之前 10 年没有明显的减弱趋势,但流域内的侵蚀产沙强度总体明显减弱。此外,侵蚀产沙强度总体明显减弱的同时,沉积旋回厚度还表现出巨大的变异性。这与侵蚀性次降雨量变化直接相关。为进一步揭示退耕还林(草)工程实施前后 10 年侵蚀产沙强度的差异,根据每年产生的各沉积旋回中沙层和黏层的容重及其厚度获得每年的单位面积泥沙沉积量。其中,沙层的容重按照其随土层深度的线性增大规律分别计算($y = 0.0003x + 1.412$, $R^2 = 0.82$) ,黏层容重随深度增大无明显变化,取平均值 1.37g cm⁻³。结果显示,退耕还林(草)工程实施之后 10 年,坝地采样点的单位面积年沉积量与之前 10 年相比呈明显减小趋势(图 4),平均沉积量由前 10 年的 579.9 kg·m⁻²减少到 245.8 kg·m⁻²,虽然前后 10 年的平均沉积量不是流域的侵蚀速率,但也表明退耕还林(草)后流域侵蚀产沙强度明显减弱,退耕还林(草)工程效果显著。

由于退耕还林(草)工程均在坡面实施,几乎不在沟壁开展,为了更好地研究退耕还林(草)工程对坡面侵蚀产沙的影响,本研究将潜在泥沙源地分为沟壁和坡面,但泥沙来源判定准确性较差(GOF < 0.8)。因而,结合小流域的地貌部位、土壤类型变化,将泥沙潜在源地划分为红泥沟壁、黄土沟壁、无沙坡面和覆沙坡面 4 类,并在此源地划分基础上筛选最佳指纹因子组。首先,去除在多数样品中检测不到的元素(Ag、S、In、Re、Se、Te);再通过 Kruskal-Wallis H 检验筛掉 P > 0.05 的元素(Rb、TN、X_{fd}、Cd);随后,运用“阈值检验”剔除沉积物样品浓度范围在源地样品浓度范围之外的元素(Pb、Ni、U、Th、Bi、La、Cr、Mg、Ti、Al、W、Ce、Sn、Y、Nb、Ta、Sc、Li、Hf、

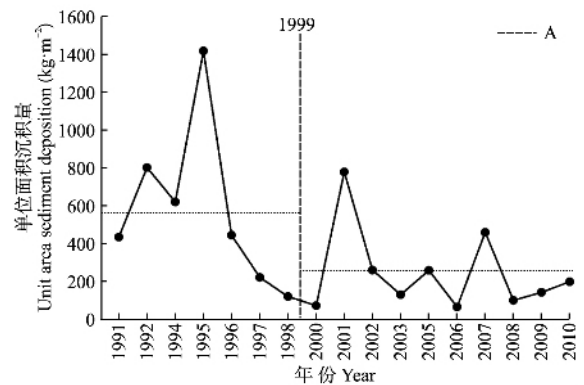


图 4 1990—2010 年单位面积年沉积量的变化

Fig.4 Change of annual sediment deposition per unit area from 1990 to 2010.

A: 各阶段的平均值 Average value of each stage.

TI);最后采用多元逐步判别分析(DFA)得到最佳指纹因子组合为 M_2 、Ba、 X_{II} 、Mn、SOC、Na、Sr 和 Cu。基于该最佳指纹因子组的源地正确判别率为 94.8%。基于筛选出的最佳指纹因子组,采用蒙特卡洛 5000 次迭代运算结合混合模型求解各个源地的泥沙贡献率,其 GOF 平均值为 0.95。为进一步分析退耕还林(草)前后小流域侵蚀产沙的变化,将红泥沟壁、黄土沟壁、无沙坡面和覆沙坡面的泥沙贡献合并为沟壁和坡面两源地侵蚀泥沙贡献。

2.2 退耕还林(草)前后的泥沙贡献变化

各源地可区分的自然沉积旋回贡献估算结果表明,退耕还林(草)工程实施之前 10 年间,沟壁的侵蚀泥沙年均贡献率为 $(83.6 \pm 8.7)\%$,坡面的年均贡献为 $(16.4 \pm 8.7)\%$ 。退耕还林(草)工程实施之后 10 年间,沟壁的侵蚀泥沙年均贡献率为 $76.2\% \pm 10.3\%$,坡面年均贡献 $(23.8 \pm 10.3)\%$ (图 5)。可见,退耕还林(草)工程实施前后的 20 年间,虽然坝地沉积泥沙的首要来源地均是沟壁[20 年平均贡献为 $(79.2 \pm 10.1)\%$],但沟壁的泥沙贡献呈现出减小趋势(年均贡献减小 7.4%),而在退耕还林(草)工程实施的主要区域(坡面)泥沙贡献却表现出增加趋势(年均贡献增加 7.4%)。上述现象表明,该区域存在其他影响因素导致退耕还林(草)工程的效果受到明显影响,未能有效遏制坡面土壤侵蚀导致的水土流失。主要可能受到降雨变化和该区域煤矿开采的影响。

基于神木气象站的日降雨资料,利用章文波等^[22]提出的日雨量侵蚀力模型计算半月侵蚀力,结果表明,退耕还林(草)之后 10 年比之前 10 年的降雨侵蚀力呈下降趋势,由此可见,降雨侵蚀力的降低

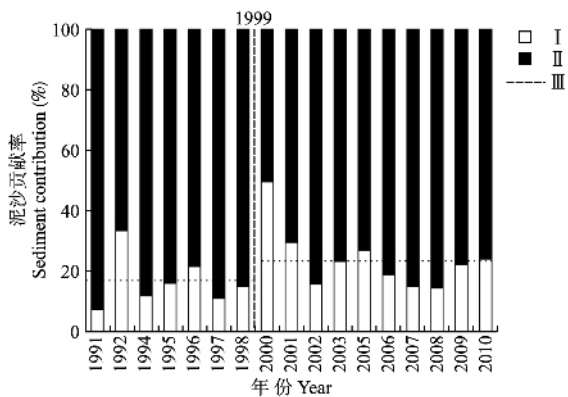


图 5 1990—2010 年沟壁和坡面的侵蚀泥沙贡献率
Fig.5 Sediment contribution of gully and slope from 1990 to 2010.
 I: 坡面 Slope; II: 沟壁 Gully; III: 坡面的平均值 Average value of slope.

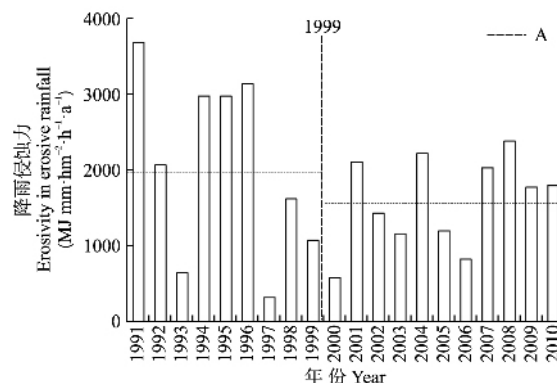


图 6 1990—2010 年降雨侵蚀力的变化
Fig.6 Change of annual erosivity in erosive rainfall from 1990 to 2010.
 A: 平均值 Average value

也对退耕还林(草)工程实施之后 10 年流域的侵蚀减弱有重大贡献(图 6)。对 2011—2014 年形成的累积耕作层,其沟壁的年均泥沙贡献为 $(65.3 \pm 9.0)\%$,坡面的年均泥沙贡献为 $(26.4 \pm 9.0)\%$,比退耕还林(草)之后 10 年沟壁的泥沙贡献减少 2.5%,而坡面泥沙贡献相对增加 2.5%。可见,研究区自退耕还林(草)工程实施之后坡面的泥沙贡献一直表现出相对增加趋势。

虽然研究期内沟壁和坡面的年侵蚀泥沙贡献一直表现出波动变化,但 2000 年坡面的侵蚀泥沙贡献明显高于其他年份。考虑 2000 年是退耕还林(草)工程实施后的第一年,流域内大量坡耕地开始挖坑进行植树造林种草,对坡面有一定破坏作用,加上幼苗的盖度小,固土作用弱,使得在退耕还林(草)工程实施初期,坡面上幼苗覆盖的土壤比有作物生长的耕地更容易被侵蚀搬运,坡面侵蚀泥沙贡献率随之增加^[23-24]。

3 讨论

退耕还林(草)前后 20 年间,淤地坝沉积泥沙厚度的减小及其沉积旋回厚度的波动变化、坡面泥沙来源贡献的相对增加,均表明在降雨侵蚀力呈现减小的背景下,退耕还林(草)和煤矿开采也同时以相反的作用影响着流域的侵蚀产沙。研究区退耕还林(草)工程实施之后 10 年相较之前 10 年的降雨量和降雨侵蚀力均呈下降趋势,表明降雨不是引起坡面侵蚀泥沙贡献率增加的因素。1990—2010 年,六道沟流域的耕地面积占流域面积比例逐渐减小,2002 年以前耕地所占比例的年变化率为 -2.8%,2002 年以后为 -8.3%;林草地面积占流域面积比例

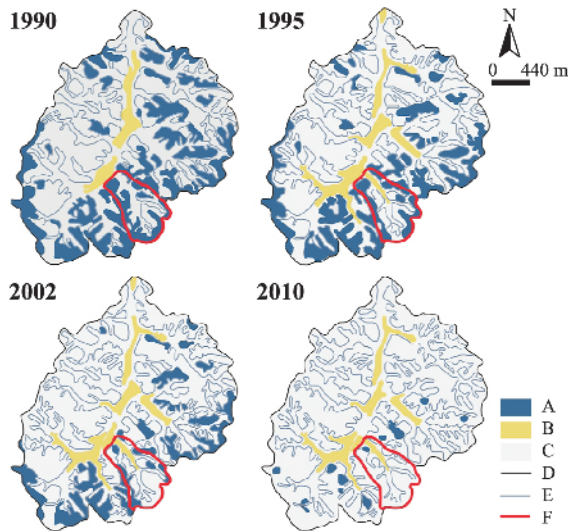


图7 六道沟流域耕地面积的变化(修改自马瞳宇等^[25])

Fig.7 Change of farmland area in Liudaogou watershed (edited based on a study of Ma T-Y, et al.^[25]).

A: 坡耕地 Slope farmland; B: 坝地 Dam land; C: 其他土地利用类型 Other land use types; D: 六道沟流域边界 Border of Liudaogou watershed; E: 沟沿线 Gully edge; F: 研究区边界 Border of study area.

逐渐增加,2002年以前林草地所占比例的年变化率为1.4%,2002年以后为2.3%,表明六道沟流域在1999年开始实施退耕还林(草)工程后,耕地面积降幅明显变大的同时林草地面积增幅同样变大^[25]。老爷满是六道沟流域的一个代表性支沟,其耕地面积减少区域与整个六道沟流域基本相同,1990—2010年间坡耕地面积不断减小,到2010年老爷满小流域少有坡耕地分布,耕地几乎均为分布在沟底的淤积平坦坝地(图7)。退耕还林(草)工程直接导致耕地逐步转变为林草地,流域内植被覆盖度大幅升高,流域自然生态环境全面改善,坡面土壤侵蚀得以有效控制^[26-27]。Wang等^[28]对黄土高原典型小流域退耕前后泥沙来源变化研究也证明了退耕还林(草)工程对坡面的侵蚀泥沙减少的积极作用。因此,本研究中有其他因素影响了退耕还林(草)的效果,导致坡面侵蚀泥沙贡献增加。

六道沟流域内坡耕地减少、林草地增加的同时,工矿面积由1990年的0.28 km²增加到2010年的14.89 km²,工矿用地面积大幅增加,说明小流域内煤矿开采活跃^[25]。榆神府矿区煤矿自1987年开始大量开采,造成地表破碎、土壤结构破坏、地下水渗漏等诸多生态环境问题的同时也改变了土壤侵蚀和泥沙输移特征。尤其是产生的地表裂隙和采空区塌陷,使得坡面和沟壑的连接部位更容易发生坍塌、滑落,从而增加了坡面的侵蚀风险。研究区周围因

多种形式的采煤活动造成的塌陷和地表裂隙密集分布^[29]。此外,采煤塌陷和裂隙发育通过改变区域的地形和地貌,使植被根系受损,造成植被死亡^[30]。赵国平等^[31]研究发现,采煤塌陷区的植被死亡率与地表破碎度、裂隙错落呈正相关。因此,采煤引起的植被死亡也会对退耕还林(草)的效果造成影响。研究区在退耕还林(草)的背景下,坡面对沉积泥沙的贡献率在降雨侵蚀力下降的趋势下表现出相对增加趋势(年均贡献增加7.4%),表明煤矿开采对流域内坡面的破坏作用减弱了退耕还林(草)工程对坡面水土流失的防控作用。在今后的坡面水土流失治理中,应注意受煤矿开采影响的区域。

4 结 论

本研究运用复合指纹识别法判别榆神府矿区典型坝控小流域内沉积泥沙的来源,对比分析退耕还林(草)工程实施之前和之后20年间的沉积泥沙来源变化。退耕还林(草)工程实施之后10年较实施之前10年沉积旋回数减小,年均沉积旋回厚度和单位面积年沉积量明显减小,说明流域侵蚀产沙强度呈明显减弱趋势。虽然无论退耕与否沟壁均为研究小流域的首要泥沙来源地(20年平均贡献79.2%±10.1%),但沟壁泥沙贡献呈现减小趋势,而退耕还林(草)的重点区域(坡面)的侵蚀泥沙贡献却表现出增加的趋势(年均贡献增加7.4%)。综合分析退耕还林(草)、煤矿开采和降雨变化对小流域侵蚀产沙的影响,结果表明,退耕还林(草)工程有效防控了坡面水土流失,而煤矿开采也对坡面侵蚀产沙具有重要影响,其破坏坡面、损毁植被,导致坡面侵蚀风险增加,致使退耕还林(草)工程对坡面水土流失的治理效果受到影响。因此,未来对生态脆弱矿区坡面水土流失的治理应重点关注受煤矿开采影响的区域。

参考文献

- [1] 李占斌,朱冰冰,李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报,2008,45(5): 802-809 [Li Z-B, Zhu B-B, Li P. Research progress on soil erosion and soil and water conservation. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 802-809]
- [2] 全占军,李远,李俊生,等. 采煤矿区的生态脆弱性——以内蒙古锡林郭勒草原胜利煤田为例. 应用生态学报,2013,24(6): 1729-1738 [Quan Z-J, Li Y, Li J-S, et al. Ecological vulnerability of coal mining area: A case study of Shengli Coalfield in Xilinguole of Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Applied Eco-*

- logy, 2013, **24**(6): 1729-1738]
- [3] 韩健楠, 刘海南, 贺卫中, 等. 陕西榆神府生态脆弱矿区地质灾害演化过程. 灾害学, 2017, **32**(1): 177-182 [Han J-N, Liu H-N, He W-Z, et al. Evolutionary process of geological hazards in Yushenfu ecological fragile mining area. *Journal of Catastrophology*, 2017, **32**(1): 177-182]
- [4] 张胜利, 时明立, 张利铭, 等. 神府东胜煤田开发对侵蚀产沙的影响. 水土保持学报, 1992, **6**(2): 68-75 [Zhang S-L, Shi M-L, Zhang L-M, et al. The influence of coal mining at Shenfu-Dongsheng on soil erosion and sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, **6**(2): 68-75]
- [5] 张翀, 王静, 雷田旺, 等. 退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变. 干旱区研究, 2018, **35**(6): 1468-1476 [Zhang C, Wang J, Lei T-W, et al. Spatiotemporal evolution of vegetation cover and surface humidity since implementing the Grain for Green Project in the Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 2018, **35**(6): 1468-1476]
- [6] 胡春宏, 张晓明. 关于黄土高原水土流失治理格局调整的建议. 中国水利, 2019(23): 5-7 [Hu C-H, Zhang X-M. Suggestions on adjusting the pattern of soil and water loss control in the Loess Plateau. *China Water Resources*, 2019(23): 5-7]
- [7] 赵文启, 刘宇, 罗明良, 等. 黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估. 水土保持学报, 2016, **30**(5): 89-94 [Zhao W-Q, Liu Y, Luo M-L, et al. Effect of revegetation on soil erosion in small watershed of the Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(5): 89-94]
- [8] Smith HG, Blake WH. Sediment fingerprinting in agricultural catchments: A critical re-examination of source discrimination and data corrections. *Geomorphology*, 2014, **204**: 177-191
- [9] Collins AL, Walling DE. Documenting catchment suspended sediment sources: Problems, approaches and prospects. *Progress in Physical Geography*, 2004, **28**: 159-196
- [10] Owens PN. Sediment behaviour, function and management in river basins. *Sediment Management of Sediment Resources*, 2008, **4**: 1-29
- [11] Zhang JQ, Yang MY, Zhang FB, et al. Fingerprinting sediment sources in the water-wind erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau. *Geoderma*, 2019, **337**: 649-663
- [12] 周慧平, 周宏伟, 陈玉东. 指纹技术识别泥沙来源: 不确定性研究进展. 土壤学报, 2019, **56**(6): 1279-1289 [Zhou H-P, Zhou H-W, Chen Y-D. Sediment source fingerprinting: Progress in uncertainty. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, **56**(6): 1279-1289]
- [13] 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. 农业工程学报, 2008, **24**(2): 64-69 [Li M, Yang J-F, Hou J-C, et al. Study on sediment deposition process of silt dams in small watersheds in the Loess Hilly Region. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(2): 64-69]
- [14] 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. 水土保持通报, 2018, **38**(6): 365-371 [Zhang F-B, Yang M-Y, Zhang J-Q, et al. Progress on application of sediment in check dam to study soil erosion of small watershed on Loess Plateau. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(6): 365-371]
- [15] Nyssen J, Veyret-Picot M, Poesen J, et al. The effectiveness of loose rock check dams for gully control in Tigray, northern Ethiopia. *Soil Use and Management*, 2004, **20**: 55-64
- [16] 刘玉民. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊: 第18集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993 [Liu Y-M. *Journal of Northwest Institute of Soil and Water Conservation*, Chinese Academy of Sciences: Episode 18. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1993]
- [17] 王云强, 张兴昌, 从伟, 等. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究. 农业工程学报, 2006, **22**(12): 65-71 [Wang Y-Q, Zhang X-C, Cong W, et al. Study on spatial variability of soil moisture on the slope of different land use in the Loess Area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, **22**(12): 65-71]
- [18] Zhang FB, Bai YJ, Xie LY, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 2017, **549**: 244-251
- [19] 王永吉. 基于淤地坝沉积解译水蚀风蚀交错带小流域侵蚀特征演变. 硕士论文. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017 [Wang Y-J. Using the Sediment Deposits Behind a Check Dam to Interpret the Evolution of Erosion Characteristics in a Small Catchment of the Wind-Water Erosion Crisscross Region. Master Thesis. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017]
- [20] Haddadchi A, Ryder DS, Evrard O, et al. Sediment fingerprinting in fluvial systems: Review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research*, 2013, **28**: 560-578
- [21] McKinley R, Radcliffe D, Mukundan R. A streamlined approach for sediment source fingerprinting in a Southern Piedmont watershed, USA. *Journal of Soil and Sediments*, 2013, **13**: 1754-1769
- [22] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, **22**(6): 705-711 [Zhang W-B, Xie Y, Liu B-Y. Research on the method of calculating rainfall erosivity using daily rainfall. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, **22**(6): 705-711]
- [23] 王朗, 傅伯杰, 吕一河, 等. 生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化. 应用生态学报, 2010, **21**(8): 2109-2116 [Wang L, Fu B-J, Lyu Y-H, et al. Spatio-temporal variations of vegetation cover in northern Shaanxi Province under the background of ecological restoration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(8): 2109-2116]
- [24] 张学权, 胡庭兴. 退耕地不同植被恢复模式对坡面径

- 流的影响. 四川林业科技, 2005, **26**(1): 28-31 [Zhang X-Q, Hu T-X. Effects of different vegetation restoration models on slope runoff on rehabilitated lands. *Sichuan Forestry Science and Technology*, 2005, **26**(1): 28-31]
- [25] 马瞳宇, 张晓萍, 马芹, 等. 近 20 年来黄土高原水蚀风蚀交错区典型小流域土地利用/覆被变化分析. 中国水土保持科学, 2012, **10**(3): 9-14 [Ma T-Y, Zhang X-P, Ma Q, et al. Analysis of land use/cover change in typical small watersheds in the water and wind erosion interlaced areas of the Loess Plateau in the past 20 years. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, **10**(3): 9-14]
- [26] 薛亚永, 王晓峰. 黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估. 干旱地区农业研究, 2017, **35**(5): 122-128 [Xue Y-Y, Wang X-F. Evaluation on soil conservation effect of returning cropland to forest and grassland in forest-steppe zone of Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, **35**(5): 122-128]
- [27] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响. 中国水土保持科学, 2017, **15**(4): 143-154 [Zhang G-H. Potential effects of changes in near soil surface characteristics driven by farmland abandonment on soil erosion. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, **15**(4): 143-154]
- [28] Wang WD, Fang NF, Shi ZH, et al. Prevalent sediment source shift after revegetation in the Loess Plateau of China: Implications from sediment fingerprinting in a small catchment. *Land Degradation and Development*, 2018, **29**: 3963-3973
- [29] 仵拨云, 李永红, 向茂西, 等. 神府矿区西沟-柳沟流域地面塌陷及其环境效应. 中国煤炭地质, 2015, **27**(11): 31-36 [Wu B-Y, Li Y-H, Xiang M-X, et al. Surface subsidence and its environmental effect in Xigou-Liugou Drainage Area, Shenmu-Fugu Mining Area. *Coal Geology of China*, 2015, **27**(11): 31-36]
- [30] 王博, 刘静, 王晨嘉, 等. 半干旱矿区 3 种灌木侧根分支处折力损伤后的自修复特性. 应用生态学报, 2018, **29**(11): 3541-3549 [Wang B, Liu J, Wang C-J, et al. Self-healing properties of lateral-root branches of three shrub species after fracture force injure in semi-arid mining area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(11): 3541-3549]
- [31] 赵国平, 朱建军, 张继平, 等. 神府煤田采煤塌陷引起的生态问题探讨. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(9): 103-107 [Zhao G-P, Zhu J-J, Zhang J-P, et al. Discussion on the several ecological problems caused by coal mining subsidence in Shenfu coalfield. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(9): 103-107]

作者简介 王晓彤, 女, 1995 年生, 硕士研究生。主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: xtwangwz@163.com

责任编辑 杨弘

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



王晓彤, 张加琼, 杨明义, 等. 榆神府矿区典型小流域侵蚀产沙对退耕还林(草)及煤矿开采的响应. 应用生态学报, 2020, **31**(6): 1971-1979

Wang X-T, Zhang J-Q, Yang M-Y, et al. Effects of "Grain for Green" program and coal mining on sediment production in a typical small watershed of Yushenfu Mining Region, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(6): 1971-1979