

水蚀风蚀交错带小流域淤地坝泥沙沉积特征

王永吉¹, 杨明义^{1,2}, 张加琼^{1,2}, 张风宝^{1,2}, 赵恬茵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 杨陵 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要:淤地坝泥沙沉积特征是小流域土壤侵蚀及坝地内泥沙运移沉积过程的信息载体。通过对水蚀风蚀交错带典型坝地内不同剖面中泥沙沉积旋回厚度及粒径组成变化的分析,初步探讨了坝地内泥沙沉积空间分布特征及对小流域土壤侵蚀和泥沙运移沉积过程的响应。结果表明,坝地泥沙沉积旋回厚度从坝尾到坝前呈现不均匀变化,但沉积旋回厚度总体呈逐渐变薄的趋势,沉积旋回中沙层厚度普遍大于粘层厚度;坝地内不同剖面沉积旋回泥沙主要由细砂粒组成,其平均含量为 59.8%,其次为粉砂粒(23.4%),黏粒(11.2%)和粗砂粒(5.6%)含量较少;从坝前到坝尾各个剖面中沉积泥沙颗粒组成粗化度逐渐增大,且沉积旋回中沙层的粗化度变化大于粘层的变化。初步揭示了淤地坝沉积泥沙从坝尾到坝前的沉积规律,可以为以后相关工作的开展提供参考。

关键词:黄土高原水蚀风蚀交错带;水土保持;沉积旋回;颗粒组成;粗化度;厚度

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)02-0001-05

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2017.02.001

Characteristics of Sediment in Check Dam of Small Watershed in Wind-Water Erosion Cross Region

WANG Yongji¹, YANG Mingyi^{1,2}, ZHANG Jiaqiong^{1,2}, ZHANG Fengbao^{1,2}, ZHAO Tianyin¹

(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, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Check dam and sediment deposition characteristics play the important role in studying the progress of eroded sediment migration and characteristics. In this paper, we analyzed the thickness and grain composition of sediment in different soil profiles in check dam in wind-water erosion cross region, we discussed the spatial distribution characteristics of sediment, and its response to soil erosion and sediment transport process. The results show that the sediment presents a non-uniform change from the tail to the front of the dam, but the layers of sedimentary cycle gradually becomes thin as a whole, the thickness of the sandy layer is generally greater than that of the clayey layer; the sediment in different location of dam is mainly composed of the fine sand, the average content of fine sand is 59.77%, followed by silt (23.41%), clay (11.21%), coarse sand (5.62%); deposition of sediment particles gradually become coarse from the tail to the front of the dam, and coarsening degree becomes greater, the coarsening degree of sand horizon is bigger than that of the clayey layer.

Keywords: wind-water erosion cross region on the Loess Plateau; soil and water conservation; sedimentary cycle; grain composition; coarsening degree; thickness of sedimentary cycle

淤地坝是黄土高原防治水土流失的重要工程措施,它具有蓄水拦沙、淤沙造田、减缓沟道下切、稳定沟坡及减少重力侵蚀等作用。淤地坝在拦蓄泥沙的同时,也赋存了大量的流域次降雨侵蚀产沙信息,为反演小流域土壤侵蚀历史演变提供了重要的信

息载体。许多学者利用淤地坝内的沉积物开展了小流域土壤侵蚀历史、泥沙来源、坝地水分养分变化特征等方面的研究,取得了大量研究成果^[1-11],为小流域综合治理和开发利用提供了重要的参考依据。

淤地坝沉积旋回厚度及颗粒组成作为小流域侵蚀

收稿日期:2016-11-18

修回日期:2016-11-29

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41671281,41571130082,41371283);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(A314021403-C2);西北农林科技大学科技创新一般项目(2452015095)

第一作者:王永吉(1991—),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀方面研究。E-mail:1425147492@qq.com

通信作者:杨明义(1970—),男,山东莱州人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀核示踪研究。E-mail:ymyzly@163.com

历史的重要信息载体,结合其他相关资料,对准确估算小流域侵蚀强度和侵蚀泥沙的运移沉积规律具有重要作用。相关学者在这方面进行了研究,并取得了一些研究成果^[7-12]。目前对淤地坝沉积物泥沙粒径分布特征和厚度的研究大多针对单一剖面,而对坝地内不同空间剖面泥沙颗粒组成的变化特征和沉积旋回厚度变化的研究相对较少。另外,水蚀风蚀交错带是黄土高原土壤侵蚀最为严重的区域,也是侵蚀最为复杂的区域,坝地内沉积泥沙特性是否赋存着特殊的多动力综合侵蚀信息,目前还未见报道。为此,本文以陕北地区六道沟小流域内典型淤地坝为研究对象,分析坝地泥沙沉积旋回厚度和泥沙粒径组成的空间分布变化特征,探究坝控小流域内侵蚀泥沙在淤地坝内的沉积再分布过程以及分布特征,为深入研究坝地内侵蚀泥沙运移、沉积过程和特征提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 小流域概况

研究区位于陕北神木县六道沟小流域内,该小流域地处毛乌素沙漠边缘,水蚀、风蚀、重力侵蚀全年交替叠加进行,属于黄土高原强烈侵蚀中心,小流域内风沙地貌和流水地貌交错插花分布,重力侵蚀造成的塌方随处可见;年均气温 7~9℃,年降雨量 250~450 mm,其中 70%~80%的降雨集中在 6—9 月^[13],降雨强度大,历时短,多以大雨或暴雨的形式发生,加之重力侵蚀和风蚀为水蚀提供了大量的松散泥沙,流域内土壤侵蚀严重,产沙量高。所选淤地坝位于六道沟小流域内的老爷满支沟,该坝建于 1978 年,长 270 m、宽 86 m,坝体为公路。坝地前是农地,坝尾为灌木杂草地。老爷满沟道面积为 0.56 km²,大于 100 m 的沟壑密度为 5.32 km/km²,大于 20 m 的沟壑密度为 14.24 km/km²,年侵蚀强度为 11 250 t/km²,由于淤地坝位于老爷满支沟的沟头处,它几乎拦截了支沟内所有泥沙^[14]。

1.2 样点布设与取样

据调查老爷满淤地坝建于 1978 年,坝体为公路,设计有溢洪道,但溢洪道从来没有发挥过作用。采样在 2015 年 7 月开展,沿坝前到坝尾的中线,结合坝地沉积物的淤积状况分别挖 6 个直径为 2 m 的土壤剖面,分别标记为 1 号剖面、2 号剖面、3 号剖面、4 号剖面、5 号剖面、6 号剖面。剖面在坝地内的分布位置可以参考图 1。其中 1 号剖面距离淤地坝 50 m,挖深 7.55 m,已经挖到沟道底部原始地表,2—6 号剖面都挖 2 m 深。分别在挖好各个剖面上进行采样,采样过程中利用沉积旋回的物理性质差异(颜色,颗粒组

成等),判别沉积旋回的沙层和粘层,首先测定沙层和粘层的厚度,然后分别采样,对于厚度比较大的粘层或者沙层,采集多个样品,以保证沙层或者粘层的采样的代表性,每个样品采集 1 kg 左右。一次侵蚀产沙事件对应一个沙层和一个粘层(侵蚀泥沙在淤地坝内粗颗粒先沉降,细颗粒后沉降),每个剖面采集的样品数量、沙层数、粘层数及沉积旋回数见表 1。其中 6 号剖面采集 20 个样品,但因为 6 号剖面位于坝尾,挖掘过程中有许多大块的砾石,无法清晰区分粘层和沙层,即无法辨识沉积旋回,其余各个剖面的样品采集情况见表 1。

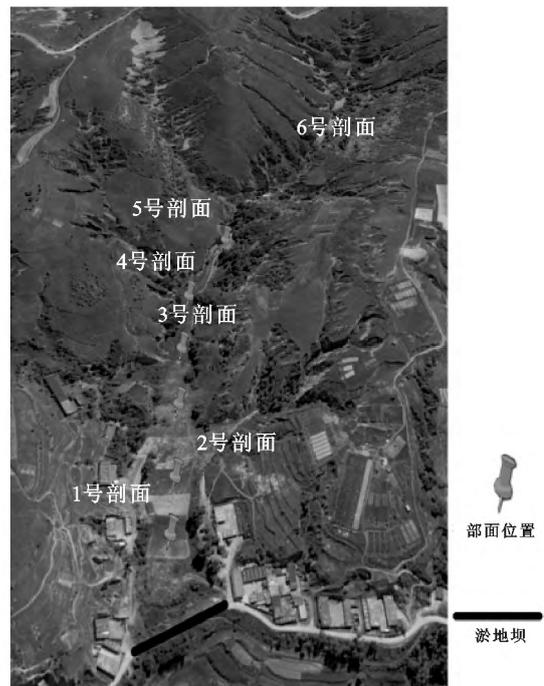


图 1 六道沟老爷满流域采样位置

表 1 各个剖面的采样深度、采样总数及沉积旋回总数和离坝体的距离

剖面位置	剖面离坝体距离/m	采样深度/m	采样总数/个	沉积旋回总数/个
剖面 1	50	7.55	132	42
剖面 2	80	1.72	33	10
剖面 3	134	2.21	36	12
剖面 4	174	2.20	39	9
剖面 5	204	2.28	38	11

1.3 样品分析

坝地沉积泥沙颗粒组成测定在中国科学院水利部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完成,使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪,取样速度为 1 000 次/s,测定时间为 5 min/每个样,仪器的测量范围为 0.002 mm~2 mm,每个样品重复测定 2 次,结果取其平均值。土壤颗粒的分级采用国际土壤颗粒分类制:黏粒(<0.002 mm)、粉

砂粒(0.002~0.02 mm)、细砂粒(0.02~0.2 mm)、粗砂粒(0.2~2 mm)。

2 结果与分析

2.1 坝地沉积旋回厚度空间分布特征

根据泥沙沉积理论,每场侵蚀性降雨坝地内沉积物剖面上都对应一个典型的沉积旋回,即上部为颜色较深且颗粒较细的粘层,下部为颜色较浅且颗粒较粗的沙层,部分沉积旋回在沙层与粘层之间存在过渡层。表 2 为所研究淤地坝坝地不同位置 2 m 深剖面上粘层、沙层及沉积旋回的基本统计参数。

表 2 各个剖面沉积旋回粘层、沙层及总厚度的平均值及标准差

剖面位置	沉积泥沙	最小值/cm	最大值/cm	平均值/cm	标准差
剖面 1	粘层	0.50	20.00	3.00	4.67
	沙层	1.00	21.00	8.00	5.94
	沉积旋回	2.00	41.00	11.00	9.51
剖面 2	粘层	1.00	20.00	5.70	6.45
	沙层	4.50	21.50	11.05	6.28
	沉积旋回	6.50	24.50	16.75	6.99
剖面 3	粘层	0.50	15.00	4.42	4.84
	沙层	3.00	38.50	13.75	9.39
	沉积旋回	4.00	39.50	18.17	9.44
剖面 4	粘层	2.00	32.00	9.15	9.59
	沙层	4.00	29.50	12.80	8.38
	沉积旋回	8.00	43.50	21.95	12.05
剖面 5	粘层	1.00	38.00	7.73	10.80
	沙层	2.50	34.00	12.36	8.78
	沉积旋回	6.00	40.50	20.09	11.34

由表 2 可知,整体而言,沉积旋回沙层厚度大于粘层,沉积旋回厚度在不同剖面上呈不均匀变化,但

沙层的厚度普遍大于粘层的厚度,这与该流域土壤中黏粒含量少有关。粘层和沙层平均厚度从坝前到坝尾呈增大趋势,6 号剖面出现大量砾石,不能明显区分沙层和粘层。说明从坝尾到坝前洪水对泥沙有良好的分选性,随着洪水搬运能力的减小,组成沙层的大颗粒物质从坝尾到坝前逐渐沉积,越靠近坝前沉积量越小,细颗粒泥沙亦相同。

综合表 1 和表 2 可知,沉积旋回厚度从坝前到坝尾呈增大趋势。一方面是因为坝地从坝尾到坝前沟道逐渐变宽,相同的泥沙量在坝尾处的沉积厚度要大于坝前的沉积厚度,另一方面因为从坝尾到坝前洪水搬运能力降低,洪水中所携带的泥沙减少,沉积的泥沙量相对坝尾较少,因此沉积旋回的平均厚度从坝尾到坝前呈减小趋势。结合表 1,因为在相同的采样深度下(2 m),剖面 1 的沉积旋回个数为 16 个,剖面 2 为 10 个,剖面 3 为 12 个,剖面 4 为 9 个,剖面 5 为 11 个,其中剖面 2 的采样深度因挖掘过程中遇到大块石头,无法继续挖掘而较其他剖面浅,剖面 4 因受支沟影响,沉积旋回个数较少。可以发现在相同的采样深度下坝前剖面的沉积旋回个数较坝尾剖面多,因此记录的降雨侵蚀事件更完整。在小流域内高强度,短历时的暴雨事件在坝尾剖面的沉积旋回中可能没有记录,但是在坝前剖面可以找到相应的沉积旋回。因此坝前剖面记录的小流域侵蚀产沙事件更完整全面,可以为其他学者在以后研究工作中在选择淤地坝剖面位置时提供一定的参考。

2.2 坝地沉积旋回颗粒组成时间变化特征

对主剖面沉积旋回的粘层和沙层的颗粒组成百分比进行加权合并(按厚度),作为一个完整的沉积旋回分析,沉积旋回颗粒组成见图 2。

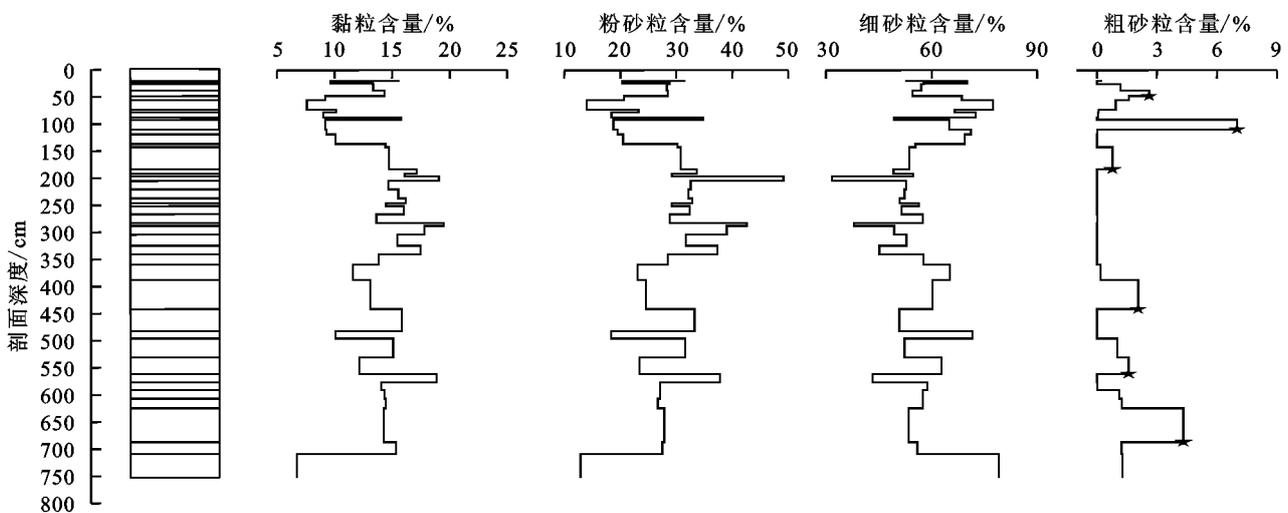


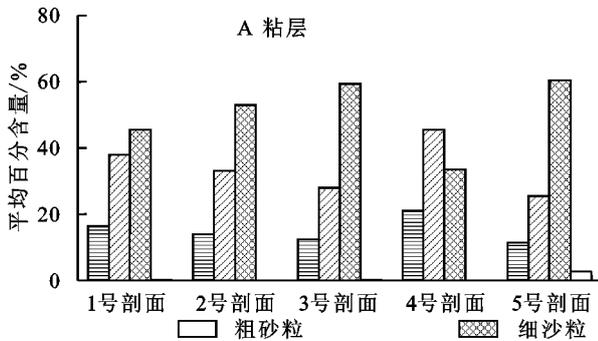
图 2 主剖面沉积旋回颗粒变化

由图 2 可知,主剖面沉积泥沙中黏粒百分含量和粉砂粒百分含量具有较好的正相关性,相关系数达到 0.95,细砂粒百分含量和黏粒、粉砂粒百分含量具有较好的负相

关性,相关系数为-0.97,说明洪水对沉积泥沙颗粒良好的分选作用,某个沉积旋回中细颗粒泥沙百分含量高,那么粗颗粒泥沙的百分含量相对低,反之亦然。沉积泥沙的

主要组成成分是细砂粒,其平均百分含量达到 57.39%,其次为粉砂粒 28.29%,黏粒 13.78%,粗砂粒 0.68%。

剖面 1 沉积旋回的颗粒组成从第 1 沉积旋回到第 42 沉积旋回呈不规则变化,规律不明显。个别沉积旋回颗粒组成发生突变,沉积旋回中粗砂粒变化过程中有 6 处(第 5,11,15,31,35,40 沉积旋回)明显的峰值,而且沉积旋回的厚度较大,这可能与小流域内大暴雨事件有关,如产流量大时,洪水搬运能力增大,从坝控小流域坡面带入坝地的粗颗粒泥沙会增多,造成该次侵蚀事件沉积旋回的粗颗粒含量会较大,这一



结论与其他学者的研究结果相同^[2,15]。对小流域的强烈侵蚀事件有很好的标记作用,结合该地区的降雨资料,对沉积旋回的断代分析有很好的辅助作用,也说明了洪水对泥沙颗粒良好的分选作用。

2.3 沉积旋回颗粒组成及粗化度的空间变化特征

在整个采样过程中,每个沉积旋回按照“粘层+沙层”采样。然后分别对每个剖面沉积旋回的粘层和沙层进行颗粒组成分析,对沉积泥沙颗粒组成变化特征进行研究。利用各个剖面沉积旋回沙层和粘层的颗粒分析结果见图 3。

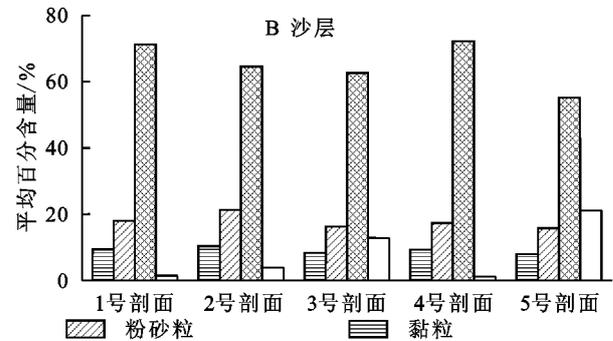


图 3 各个剖面沉积旋回粘层、沙层的颗粒组成变化特征

从图 3A 可以看出,各个沉积旋回粘层的黏粒和粉砂粒的百分含量从坝前到坝尾逐渐减小,但是细砂粒的百分含量从坝前到坝尾的变化规律是逐渐增大。粗砂粒在前 4 个剖面含量很少,几乎可以忽略不计,在 5 号剖面中开始有少量粗砂粒。其中 4 号剖面沉积旋回颗粒组成较其他几个剖面比较异常,可能是由于 4 号剖面位于支沟口,支沟内的泥沙对 4 号剖面的沉积泥沙造成了一定的影响。可见洪水运移能力对细砂粒和粗砂粒沉积有重要影响,从坝尾到坝前随着洪水搬运能力的逐渐降低,洪水中的粗颗粒泥沙(细砂粒和粗砂粒)逐渐沉积,越靠近坝前,洪水的搬运能力越小,洪水中携带的粗颗粒泥沙越少,因此沉积旋回中的粗颗粒泥沙百分含量越小,细颗粒泥沙(黏粒和粉砂粒)的沉积规律相反。综上可得出:沉积泥沙的颗粒粒径越大,被搬运的距离越短,越靠近坝前,沉积量越少。泥沙的颗粒粒径越小,被搬运的距离越远,越靠近坝前沉积量越多。这一结果与毕银丽等^[6]在安塞坊塌沟和大东沟小流域淤地坝的研究结论一致。

从图 3B 可知,5 个剖面的沉积旋回沙层颗粒主要由细砂粒和粗砂粒构成,黏粒和粉砂粒的含量很少。从坝前到坝尾沉积旋回沙层中的细砂粒的含量最大,在所有沉积旋回沙层中平均百分含量为 65.18%,黏粒和粉砂粒百分含量的变化在不同剖面的沉积旋回变化不显著,含量也相对较少,在 5 个剖面沉积旋回的沙层黏粒平均百分含量 $\leq 10\%$,4 号剖面受到支沟的影响,沉积旋回沙层中颗粒组成较异常。从坝前到

坝尾,粗砂粒的含量变化最明显,其百分含量逐渐增大。在 1,2,3,4,5 号剖面沉积旋回中沙层的平均百分含量分别为 1.4%,3.8%,12.8%,1.17%,21.10%,除去 4 号剖面,1,2,3,5 号剖面沉积旋回沙层中粗砂粒百分含量增加显著,可见洪水中粗颗粒泥沙从坝尾到坝前随着洪水搬运能力的降低,粗颗粒泥沙会首先沉积,越靠近坝前,粗颗粒泥沙在沉积旋回中的含量越少,细颗粒泥沙含量越来越大,这与其他学者的研究结果^[16-17]一致。

从坝前到坝尾,沉积旋回粘层和沙层的粗化度(细砂粒和粗砂粒的百分含量与黏粒和粉砂粒百分含量的比值)逐渐增大,从坝前到坝尾沉积旋回沙层的粗化度明显增加。1,2,3,4,5 号剖面沉积旋回沙层的平均粗化度分别为 2.77,3.82,3.84,3.02,3.56,粘层的粗化度分别为:0.90,1.94,1.80,0.53,2.00。4 号剖面粗化度异常主要是由于支沟洪水泥沙在 4 号剖面位置发生沉积所引起的。沉积旋回沙层和粘层的粗化度从坝前到坝尾逐渐增加,说明沉积泥沙的颗粒组成中粗颗粒泥沙所占的比例逐渐增加,可见随着洪水从坝尾到坝前运移能力的减小,洪水中的粗颗粒泥沙逐渐沉降,越靠近坝前,洪水中所携带的粗颗粒泥沙越少,沉积下来的粗颗粒泥沙越少,细颗粒泥沙越多,沉积泥沙的颗粒粗化度越小。

对粘层和沙层的颗粒组成百分比进行加权合并(按厚度),作为一个完整的沉积旋回进行分析,沉积旋回的颗粒组成及粗化度见图 4。

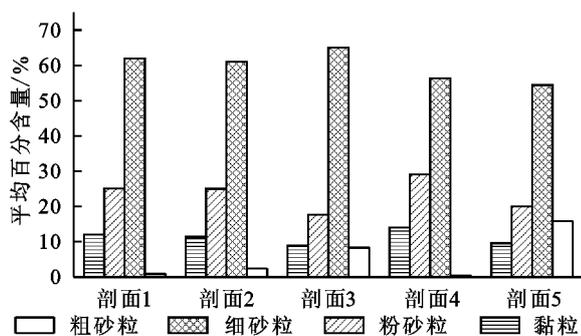
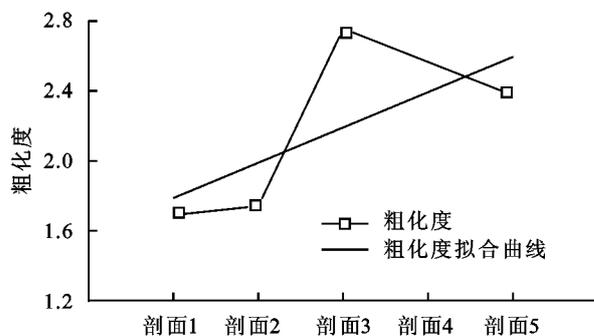


图 4 各剖面沉积旋回颗粒组成及粗化度变化



由图 4 可知,从坝前到坝尾,细颗粒泥沙(黏粒和粉砂粒)在沉积旋回中的含量逐渐减少,粗颗粒泥沙(细砂粒和粗砂粒)的含量逐渐增多。沉积泥沙的粗化度从坝前到坝尾呈增大趋势(剖面 4 由于位于支沟口,支沟泥沙对其影响较大,颗粒组成与主沟道其他几个剖面不同,颗粒组成和粗化度异常)。粗化度的变化范围为 1.31~2.75,平均值为 1.98,惠波等^[18]在王茂沟坝地测得的土壤粗化度为 0.27~0.58,较平均值 0.44 大,可能是本研究区内有片沙覆盖,靠近毛乌素沙地导致的,具体情况需要进一步研究。沉积旋回整体变化趋势和粘层、沙层的变化趋势基本一致,可见洪水对坝地内沉积泥沙良好的分选作用。

3 结论

通过对陕北地区六道沟流域老爷满支沟淤地坝内不同位置沉积旋回的颗粒组成和厚度变化的研究,可以发现小流域内同一次洪水携带的泥沙在坝地内不同位置的沉积厚度不均匀,整体上呈现出波动性变化,沙层、粘层及沉积旋回总厚度从坝前到坝尾有增大趋势;坝地内沉积泥沙的颗粒组成从坝前到坝尾逐渐粗化。从坝前到坝尾,各个沉积旋回的粗化度呈现出逐渐增大的趋势,沙层的粗化度变化大于粘层的变化;坝地沉积泥沙的主要组成成分为细砂粒,在沉积旋回中的平均百分含量为 59.77%、其次为粉砂粒(23.41%)、黏粒(11.21%)、粗砂粒(5.62%)。个别沉积旋回的颗粒组成发生突变,对小流域的强烈侵蚀事件有很好的标记作用,对大暴雨和洪水有一定的时标指示作用,结合降水、产沙、地形等资料,对沉积旋回的断代分析有很好的辅助作用。

参考文献:

[1] 薛凯,杨明义,张凤宝,等. 利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史[J]. 核农学报,2011,25(1):115-120.
 [2] 张玮,杨明义,张凤宝,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.
 [3] 张凤宝,薛凯,杨明义,等. 坝地沉积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.

[4] 陈卫国,吕春娟,刘秀珍,毕如田. 坝地土壤养分的空间变异性研究[J]. 土壤通报,2015,46(4):829-836.
 [5] 包耀贤. 黄土高原坝地和梯田土壤质量特征及评价[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
 [6] 毕银丽,王百群,郭胜利,等. 黄土丘陵区坝地系统土壤养分特征及其与侵蚀环境的关系. I: 坝地土壤的理化性状及其数值分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(3):1-9.
 [7] 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.
 [8] 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.
 [9] 郭坤杰,岳大鹏,刘婧春,王朋晓,等. 黄土洼后小滩沟沉积物理化特征及其揭示的环境信息[J]. 水土保持学报,2015,29(6):154-159.
 [10] 弥智娟,穆兴民,赵广举,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区小流域泥沙粒径的分形分析[J]. 水土保持研究,2014,21(1):12-17.
 [11] 李勉,姚文艺,史学建,等. 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.
 [12] 李勉,杨剑锋,侯建才,等. 黄土丘陵区小流域淤地坝纪录的泥沙沉积过程研究[J]. 农业工程学报,2008,24(2):64-69.
 [13] 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[J]. 农业工程学报,2006,22(12):65-71.
 [14] 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[C]. 西安:陕西科学技术出版社,1993.
 [15] 汪亚峰,傅伯杰,陈利顶,等. 黄土高原小流域淤地坝泥沙粒度的剖面分布[J]. 应用生态学报,2009,20(10):2461-2467.
 [16] 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.
 [17] 王治国,胡振华,段喜明,等. 黄土残塬区沟坝地淤积土壤特征比较研究[J]. 水土保持学报,1999,5(4):22-27.
 [18] 惠波,李鹏,张维,等. 王茂沟流域淤地坝系土壤颗粒与有机碳分布特征研究[J]. 水土保持研究,2015,22(4):1-5.