

# 黄土高原小流域淤地坝泥沙粒度的剖面分布<sup>\*</sup>

汪亚峰<sup>1\*\*</sup> 傅伯杰<sup>1</sup> 陈利顶<sup>1</sup> 吕一河<sup>1</sup> 王德<sup>2</sup> 宋成军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; <sup>2</sup> 中国科学院烟台海岸带可持续发展研究所, 山东烟台 264003)

**摘要** 2006年 6月,按照泥沙旋回分层连续取样,分析了黄土高原丘陵沟壑区典型小流域1954年修建的淤地坝泥沙粒径的剖面分布特征。结果表明:该坝地泥沙旋回至少 28个,旋回层的厚度范围在 2~60 cm;沉积剖面土壤粒径以粉砂 (0.05~0.002 mm)为主,占 60%以上,其粒径集中分布于 0.01~0.05 mm,粗泥沙 (粒径 >0.05 mm)含量约占 23.09%;随淤积深度的增加,泥沙各粒径范围的变异程度增加,2 m 土壤深处可作为研究区淤地坝粒径变异突变点的标识,粒径变异是河道比降和水沙动力条件共同作用的结果;研究区淤地坝泥沙沉积剖面存在 72 cm厚的累积耕作层,累积耕作层的明确对于淤地坝泥沙侵蚀环境具有指示作用。

**关键词** 黄土高原 淤地坝 泥沙粒度 旋回层次 侵蚀过程

**文章编号** 1001- 9332(2009)10- 2461- 07 **中图分类号** S152.3 **文献标识码** A

**Profile distribution of sediment particle sizes at a check dam in a small watershed of Loess Plateau.** WANG Ya-feng<sup>1</sup>, FU Bo-jie<sup>1</sup>, CHEN Li-ding<sup>1</sup>, LÜ Yi-he<sup>1</sup>, WANG De<sup>2</sup>, SONG Cheng-jun<sup>1</sup> (<sup>1</sup> State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; <sup>2</sup> Yantai Coastal Zone Research Institute for Sustainable Development, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China). Chin J Appl Ecol, 2009, 20(10): 2461- 2467.

**Abstract:** Sediment gyration sampling was conducted in June 2006 to analyze the profile distribution of sediment particle sizes at a check-dam built in 1954 in a typical small watershed of hilly and gully Loess plateau. There were at least 28 layers of sediment gyration at the check-dam, with the layer depth varied from 2 cm to 60 cm. In the sediment profile, silt (0.05- 0.002 mm) occupied >60%, its particle size being mainly within the range of 0.01 - 0.05 mm, while coarse sand (>0.05 mm) accounted for 23.09%. The variation degree of sediment particle sizes increased with increasing depth, and an abrupt change was observed at the depth 2 m. Both longitudinal gradient and hydrodynamic condition caused the variation of sediment particle sizes. There was an accumulated plough layer of 72 cm thickness in the profile, which had indicative role for the sediment erosion environment of check dam.

**Key words:** Loess Plateau; check dam; sediment particle size; gyration; erosion process

水土流失是全球性的环境问题之一<sup>[1-4]</sup>,严重的水土流失不仅会引起当地的土壤退化和土地资源破坏,而且由此产生的大量泥沙还会淤塞江河湖泊、加剧洪水灾害<sup>[5]</sup>。黄土高原是我国水土流失最严重的地区之一,除自然因素外,不合理的土地利用是造成黄土高原水土流失的重要驱动因子<sup>[6]</sup>。在黄土高

原水土流失治理方面,至今已开展了大量的生态恢复和治理措施,在长期治理水土流失、改善当地生态环境的过程中,淤地坝工程是小流域综合治理的一项重要措施。通过筑坝拦截泥沙造田淤地,可有效控制流域水土流失、减少入黄泥沙,并且能够增加当地高产农耕地数量。目前,对于淤地坝的研究多集中于工程设计以及建设成效与经验方面<sup>[7-9]</sup>,对淤地坝减沙拦沙效应研究主要集中于拦截泥沙总量和下游泥沙含量的变化<sup>[10-13]</sup>、以及通过河流中悬浮泥沙颗粒来分析侵蚀和沉积的区域特性<sup>[14-16]</sup>,而对于淤地

\* 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(40621061)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-05-03)和国家科技支撑计划项目(2006BAD09B10)资助。

\*\* 通讯作者。Email: wyl912@163.com  
2009-03-10收稿, 2009-07-25接受。

坝沉积泥沙颗粒分布特性的直接研究却鲜见报道。淤地坝作为泥沙强烈沉积的地貌单元,其泥沙沉积物对流域侵蚀、沉积过程和搬运机制等具有重要的记录作用<sup>[17-18]</sup>。为此,本文采用坝地打竖井、泥沙层次分析及降雨匹配等方法,于2006年6月研究了黄土高原典型小流域内坝地沉积泥沙的颗粒特性及剖面分布规律,旨在为侵蚀性土壤颗粒粒径对近现代土地利用变化和人类活动对水土流失的影响提供指示作用<sup>[19-20]</sup>。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于延安市宝塔区羊圈沟流域(36°42' N, 109°31' E),距延安市区14 km,面积2.02 km<sup>2</sup>。区域地貌类型为黄土梁和黄土沟,海拔1034~1259 m,沟谷密度2.74 km·km<sup>-2</sup>,属典型黄土丘陵沟壑区。该区属半干旱大陆性季风气候,年均降水量535 mm,降水多集中在7—9月,且降水的年际变率较大。流域内土壤以黄绵土为主,抗蚀性差,水土流失严重<sup>[21]</sup>。从20世纪50年代起,当地人民就在该流域内建筑了一系列拦沙淤地坝。本文以1954年修建的坝地为研究对象,该坝主要拦截了1955年至淤满时期(1965年)集水区内的泥沙,坝高7 m,控制面积约0.63 km<sup>2</sup>。坝地淤满之后进行耕种,根据对当地农户的调查,淤地坝淤满初期种植芦苇(*Phragmites communis*)1~2 a,之后便种植糜子(*Panicum miliaceum*)、高粱(*Sorghum vulgare*)等农作物,一年翻耕2次。

### 1.2 研究方法

2006年6月,对研究区淤地坝进行野外采样。坝地采样点的选择主要考虑取样深度,所选深度要保证能够取到最厚的泥沙沉积层,取样点又不能太靠近坝体,以免受到修坝所造成的干扰。采样点位于坝地中央,距坝梁10 m处的坝轴线上,人工开挖直径1.2 m的竖井1口,井深6 m,沿井壁由上到下取样,记录沉积层次及厚度,共取28个沉积旋回层次,每个沉积旋回取样不少于1个,该剖面共采集土壤样品73个,代表完整的泥沙沉积序列。

土样带回实验室风干,过2 mm筛,用Mastersizer 2000激光粒度仪进行土壤粒径分析,测定前去除土壤有机质和碳酸盐,上机前用六偏磷酸钠溶液分散土壤溶液,测量范围为0.02~2000 μm,每个土样重复测定3次。每个旋回层次的粒径组成由采样深度加权平均得到。

### 1.3 数据处理

利用Excel 2003进行数据描述性统计分析及相关性分析,利用Origin 8.0软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄土高原小流域淤地坝沉积旋回的层次特征

淤地坝拦截侵蚀性降雨产生泥沙,单次洪水经过淤积后形成一个沉积旋回,随着时间的推移,由多次降雨事件产生多次洪水后形成对应的泥沙沉积旋回,淤地坝淤满之后,则该坝地的垂直剖面记录了从建坝到淤满期间洪水形成的所有泥沙沉积层次。研究区淤地坝单个旋回层次表现出泥沙表层细、底层粗的沉积规律,由多个沉积旋回构成的沉积剖面则出现泥沙由细到粗的周期性分布规律(表1)。当2次暴雨在发生时间上较接近时,由于前一次暴雨形成的泥沙没有完全沉积,导致2次降雨的泥沙出现部分混合现象,虽然不能明确地观察和分辨出2个层次,但泥沙层混合处的粒径分布则表现出一定的变异性。

黄土高原淤地坝的旋回层次是由比较明显的泥层和沙层组成,整个剖面上所有沉积旋回的泥层厚度在0.5~11 cm,沙层厚度在1.5~50 cm(表1),说明不同的降雨条件使洪水动力条件不一致,在泥沙沉积过程中导致泥沙层厚度有所差别。从研究区淤地坝沉积剖面土壤各粒径的描述统计(表2)可以看出,粉粒含量(73.4%)最多,砂粒含量(19.42%)次之,粘粒含量(7.18%)最少;各粒径在整个剖面的变异系数大小依次为砂粒>粘粒>粉粒,说明粘粒和砂粒在搬运或沉积过程中具有较差的分选性,而这种现象恰好可反映出泥沙颗粒对于侵蚀环境(暴雨强度)的指示作用。研究区淤地坝典型的旋回层次(即沉积层次完整,具有较大厚度,泥层、沙层明显)是第4、10和21层,对应的土层深度分别为96.5~203 cm、248.5~309.5 cm和457~503 cm。从旋回层厚度推测,依据大来水对应大量来沙的基本规律,说明这3个典型的旋回层次是3次强降雨作用的结果。由图1可以看出,1955—1965年间,次降雨量35 mm的降雨次数为28次,与沉积旋回层数可较好地吻合;小流域尺度35 mm的降雨量是侵蚀产沙型降雨。研究期间,该区次降雨量大于60 mm的降雨次数为3次,分别为1963年9月6日、1961年8月11日和1958年9月2日的降雨,从时间尺度上看,与第4、10和21旋回层的关联程度最高。考虑到研究区原始沟道横面为V字型,随淤积面抬

表 1 研究区坝地洪水沉积旋回的泥沙特征

Tab 1 Sediment characteristics of the check-dam flood sediment gyration in the study area (1954-1965)

旋回层次 Gyration layer	剖面深度 Section depth (cm)	泥层厚度 Mud layer thickness (cm)	沙层厚度 Sand layer thickness (cm)	粘粒平均含量 Average clay (<0.002 mm) content (%)	粉粒平均含量 Average silt (0.05~0.002 mm) content (%)	砂粒平均含量 Average sand (1~0.05 mm) content (%)
耕作层 Cultivation layer	0~20	-	-	6.03	66.46	27.52
1	20~72	-	-	6.03	67.41	26.56
2	72~85	3.0	10.0	5.89	66.51	27.60
3	85~96.5	0.6	10.9	6.07	68.47	25.47
4	96.5~203	-	-	6.62	70.46	22.92
5	203~217.5	2.5	12.0	7.25	69.93	22.83
6	217.5~220	1.0	1.5	9.99	83.49	6.52
7	220~229	2.1	6.9	7.66	79.48	12.87
8	229~244	3.0	12.0	6.46	68.87	24.67
9	244~248.5	2.0	2.5	7.78	75.91	16.31
10	248.5~309.5	11.0	50.0	6.56	72.09	21.35
11	309.5~330	4.0	15.5	6.94	73.93	19.13
12	330~359.5	8.0	21.5	6.59	68.44	24.97
13	359.5~369.5	1.3	8.7	8.77	80.45	10.78
14	369.5~376	1.0	5.5	7.67	77.74	14.59
15	376~389	3.6	10.6	7.44	72.09	20.47
16	389~397	2.0	6.0	10.04	85.21	4.75
17	397~406	2.0	7.0	7.62	74.00	18.38
18	406~417	2.0	9.0	6.79	75.46	17.75
19	417~452	4.5	31.5	6.55	71.48	21.97
20	452~457	1.5	3.5	7.09	73.85	19.06
21	457~503	7.0	39.0	6.72	70.77	22.51
22	503~521	5.0	13.0	5.88	70.60	23.52
23	521~523	0.5	1.5	8.64	87.81	3.55
24	523~533.5	3.5	7.0	6.79	67.46	25.75
25	533.5~536.5	1.5	1.5	6.93	74.35	18.72
26	536.5~539.5	1.5	1.5	10.28	79.38	10.35
27	539.5~564.5	5.0	20.0	5.82	66.29	27.89
28	564.5~624.5	10.0	>50.0	5.37	70.10	24.53

- 该层次泥层和沙层没有明显界线 There was no evidence borderline between mud layer and sand layer

表 2 研究区淤地坝沉积剖面土壤各粒径含量的描述统计

Tab 2 Descriptive statistic of content of different sediment particle sizes in check dam sediment profile in the study area (%)

质地 Texture	平均值 Mean value	中位数 Median	标准差 SD	变异系数 CV	方差 Variance	最小值 Min	最大值 Max
粘粒 Clay	7.18	6.79	1.29	0.18	1.66	5.37	10.28
粉粒 Silt	73.40	72.09	5.80	0.08	33.67	66.29	87.81
砂粒 Sand	19.42	21.35	6.94	0.36	48.18	3.55	27.89

升,淤积相同量泥沙的层次厚度将逐渐减小,说明早期较小雨强也可能产生较厚的旋回层次,因此,1955年7月2日的降雨很可能与第28旋回层有关联。

从表3可以看出,研究区泥层厚度与沙层厚度呈极显著相关( $P < 0.01$ ),粘粒含量与粉粒和砂粒含量、粉粒含量与砂粒含量间也呈极显著相关( $P < 0.01$ ),说明每一个旋回层次的泥层和沙层厚度的比例较一致。6—9月,黄土高原的降雨多以暴雨为主,其特性是降雨历时短、降雨强度大,导致产流产沙

能在较短时间内聚集,降雨停止后,有一个稳定的后沉降过程,该过程对粘粒沉降的作用最大,会形成明显的胶泥层,加之降雨频次在黄土高原不是很大,导致能够形成记录次降雨侵蚀的沉积层次。

## 2.2 黄土高原小流域淤地坝泥沙不同粒径含量的剖面分布

降雨量、降雨强度的变化将引起径流量及水流流向的变化,而地表植被的空间分布决定了其对降雨的拦截效应,丘陵区陡坡耕种对土壤顺坡的搬运、

表 3 研究区泥沙层厚度和各平均粒径的相关性

Tab 3 Correlations between mud-sand thickness and different mean particle sizes in the study area

	泥层厚度 Mud layer thickness	沙层厚度 Sand layer thickness	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
泥层厚度 Mud layer thickness	1	0.889 **	- 0.461 *	- 0.399 *	0.409 *
沙层厚度 Sand layer thickness		1	- 0.463 *	- 0.391	0.403 *
粘粒 Clay			1	0.915 **	- 0.932 **
粉粒 Silt				1	- 0.999 **
砂粒 Sand					1

\*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

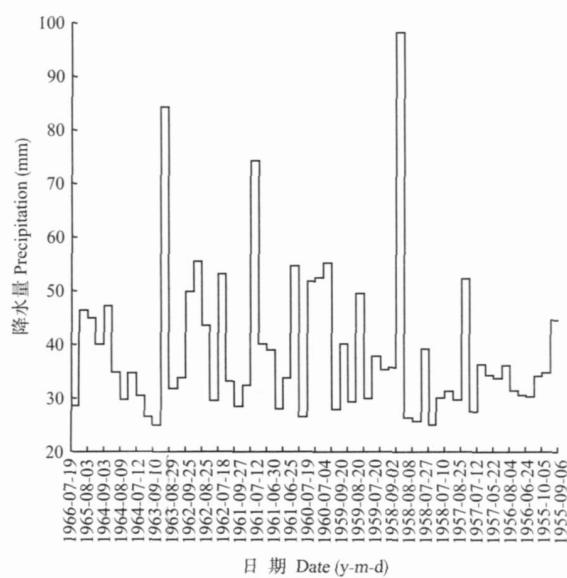


图 1 研究区次降雨大于 25 mm 的降雨量

Fig 1 Precipitation greater than 25 mm for rainfall events in the study area (1955- 1966).

迁出也有很大影响,说明降雨、植被及人为活动的变化将导致搬运物质的数量、成分、颗粒大小、有机成分及其含量等发生改变。当洪水被淤地坝拦截后可使沉积物在垂直方向上由于成分、颜色和结构的不同而形成层次性,最明显的层次标志就是土壤颗粒从上而下“细粗细粗”的分布规律。

在沉积物粒径组成上,研究区淤地坝沉积物土壤粒径以 0.01 ~ 0.05 mm 为主,然后依次为 0.05 ~ 0.25 mm、粘粒 ( $< 0.001$  mm) 和细粉粒组 (0.001 ~ 0.005 mm)、0.25 ~ 1 mm;在沉积物粒径分布上:除 0.25 ~ 1 mm 粒径外,其余各级粒径含量分布按变异程度由小到大可划分为 3 个土层深度区间,即 0 ~ 96 cm、96 ~ 200 cm 和 200 cm 以下(图 2)。0.25 ~ 1 mm 粒径仅在 130、325、380、410、470 和 550 cm 土壤深度出现且含量不高,该粒径范围的分布情况可指示侵蚀强度的大小。在 320 cm 土壤深处,0.25 ~ 1 mm 粒径含量超过 5%,是该粒径范围在剖面分布

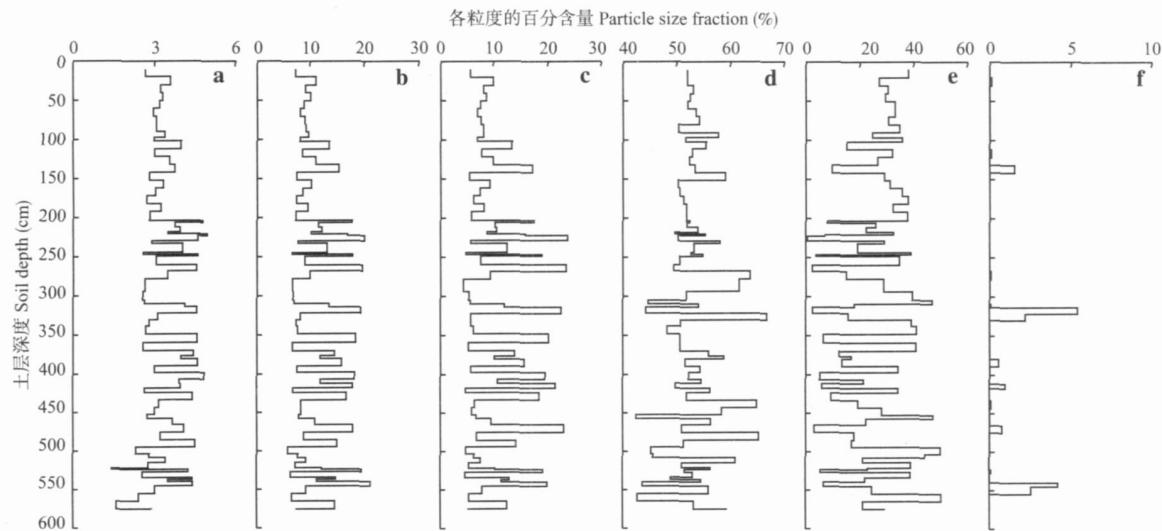


图 2 研究区坝地土壤粒径的剖面分布

Fig 2 Profile distribution of soil particle size on the check-dam in the study area (1955- 1965).

a)  $< 0.001$  mm; b)  $0.001 \sim 0.005$  mm; c)  $0.005 \sim 0.01$  mm; d)  $0.01 \sim 0.05$  mm; e)  $0.05 \sim 0.25$  mm; f)  $0.25 \sim 1$  mm.

的最大值,在此深度其他粒径分布存在一个共同规律,即 $<0.001\text{ mm}$ 、 $0.001\sim0.005\text{ mm}$ 和 $0.005\sim0.01\text{ mm}$ 粒径含量均出现峰值,而 $0.01\sim0.05\text{ mm}$ 和 $0.05\sim0.25\text{ mm}$ 粒径含量为谷值。 $<0.001\text{ mm}$ 、 $0.001\sim0.005\text{ mm}$ 和 $0.005\sim0.01\text{ mm}$ 粒径含量表现出相似的剖面分布特征,即其含量峰值和谷值均出现在同一土层深度。

随着土层深度的增加,研究区淤地坝各土壤粒径范围的变异程度有所加大。在淤地坝拦沙初期,河道比降最大,水沙动力条件复杂,导致沉积泥沙在粒径上变异增大;随着坝地拦沙量的增加,河道比降也随之降低,流水动力条件变得平稳,致使泥沙粒径变异程度减小。

坝地表层向下72 cm范围内,土壤各粒径的平均含量非常相近,粘、粉、砂含量分别约为6%、66%、27%。根据对当地农户的调查,淤地坝淤满初期种植芦苇1~2 a,之后便种植糜子、高粱等农作物,一年深耕2次,说明表层土壤在长期耕作翻动条件下,土壤粒径组成被混合均匀,而该土层的厚度达到72 cm。当降雨事件发生后,尽管上游来水来沙被上一阶梯坝地拦截,但该坝左右两侧的汇水面产生少量泥沙继续在坝地淤积,致使耕作层逐渐抬升,因此出现累积耕作层,厚度达72 cm。

累积耕作层的出现,提示人们在研究淤地坝泥沙对侵蚀环境记录的信息时,首先需确定人为扰动层次的厚度,虽然该层次对于侵蚀环境的记录会缺乏准确性,但其赋存信息却能够对人为活动的干扰

强度有较好的指示功能。从调查得知,研究区坝地淤满后最初的耕作时间在1965年,因此72 cm土壤深处可作为1965年的时间标志。

### 2.3 黄土高原小流域淤地坝泥沙土壤特征粒径的剖面分布

用来描述平均粒度和粒度分布范围的参数叫做特征粒径。特征粒径通常是用来刻画粒度分布的重要指标。本研究选取的土壤颗粒特征粒径为体积加权平均粒径( $D[4,3]$ )、表面积加权平均粒径( $D[3,2]$ )、有效粒径( $d(0.1)$ )、中值径( $d(0.5)$ )和众数径( $d(0.9)$ )。

由图3可以看出, $D[4,3]$ 、 $d(0.5)$ 和 $d(0.9)$ 的剖面分布趋势基本一致, $D[3,2]$ 和 $d(0.1)$ 的剖面分布趋势相似。平均粒径 $D[4,3]$ 在0~2 m土层内的变异程度较小,其主要集中分布在0.03~0.04 mm,原因在于随着淤地坝内部泥沙淤积厚度的加大,相当于抬升沟道基面,从而降低沟道纵比降,客观调节了水来沙的稳定性,同时,由于泥沙淤积对原始沟道的掩埋,在一定程度上控制了沟道侵蚀;在2 m以下土层范围,平均粒径变异程度较大,说明沟道纵比降水动力条件复杂,且多次产沙间的扰动较大,导致沟道侵蚀严重。

淤积剖面存在几处典型的沉积层次:2.5~3 m土层的平均粒径逐渐增加,记录了较完整的一个旋回层次,说明坝地拦蓄水沙后,粒径沉降是一个从粗到细的过程;整个沉积剖面内平均粒径最大(0.057 mm)的位置在3.13 m土壤深处,该沉积层

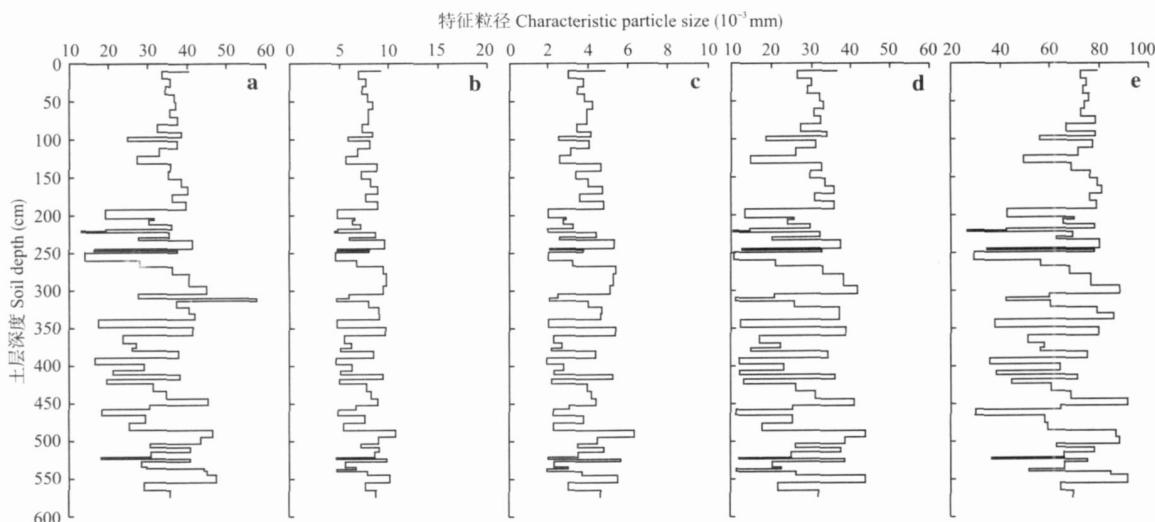


图3 研究区坝地土壤颗粒特征粒径的剖面分布

Fig. 3 Profile distribution of check-dam soil characteristic particle size in the study area

a)  $D[4,3]$ ; b)  $D[3,2]$ ; c)  $d[0,1]$ ; d)  $d[0,5]$ ; e)  $d[0,9]$ .

可作为标记过去某次强降雨和强来沙事件的参考。该层次的形成与 1961 年 8 月 13 日的强降雨关联程度最高。

### 3 结语

从较长的时间尺度来看,沉积物粒度和环境过程研究以湖泊沉积或海相沉积为主<sup>[22-25]</sup>,重点研究沉积物粒度对环境演变的指示作用<sup>[26-29]</sup>;在较小尺度上,淤地坝泥沙能够用于解释流域侵蚀和沉积环境近几十年的变化,淤地坝泥沙淤积的旋回层次反映了次降雨产沙过程。相邻旋回层次间分界越明显,说明 2 次降雨产沙间的相互影响程度越小、间隔时间可能越长,这能够为建立次降雨和对应侵蚀产沙过程提供标识依据。

研究淤地坝沉积泥沙层次时,要明确淤地坝累积耕作层的厚度范围,使淤积泥沙能够有较可靠的时间标识,为降雨和泥沙匹配提供依据。

坝地沉积剖面存在粒径变异的转折点,这个点位可用来衡量水沙动力条件和沟道比降对泥沙粒径分布所起的作用。

淤地坝作为重要的水土保持工程措施,具有很强的减沙功能,并且能增加当地农田面积。从科研角度看,淤地坝拦蓄的泥沙赋存了过去侵蚀产沙过程和侵蚀环境相关信息,这些信息对水沙过程的认识提供了依据。

### 参考文献

- [1] Zheng F-L (郑粉莉), He X-B (贺秀斌). Effect of destruction and restoration of vegetation on soil erosion in the Loess Plateau *Soil and Water Conservation in China* (中国水土保持), 2002 (7): 21 (in Chinese)
- [2] Zhang H-X (张惠霞), Zheng S-Y (郑书彦), Xu B-R (徐伯荣). Study on soil and water losses in Loess Plateau *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2004, 11(3): 320-321 (in Chinese)
- [3] Liu D-S (刘东生). Loess and the Environment Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese)
- [4] Shi H, Shao MA. Soil and water loss from the Loess Plateau in China *Journal of Arid Environments*, 2000, 45: 9-20
- [5] Lal R. Soil erosion impact on agronomic productivity and environment quality. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1998, 17: 319-464
- [6] Fu BJ. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China *Soil Use and Management*, 1989, 5: 76-82
- [7] Li M (李敏). The theory and practice of check-dam safety and stabilization *Yellow River* (人民黄河), 2005, 27(11): 68-69 (in Chinese)
- [8] Zhao S-G (赵寿刚), Chang X-Q (常向前), Yang X-P (杨小平). The methods of control quality to building quickly check-dam. *Subtropical Soil and Water Conservation* (亚热带水土保持), 2005, 17(4): 37-38 (in Chinese)
- [9] Wan T-C (万廷朝). Effect and experience of building check-dam in Dingxi City *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2005, 25(6): 89-90 (in Chinese)
- [10] Ran D-C (冉大川), Guo B-Q (郭宝群), Ma Y (马勇). Sediment particle size change analyze based on building check-dam in middle reaches of Yellow River *Yellow River* (人民黄河), 2005, 27(11): 28-30 (in Chinese)
- [11] Stolte J, Liu B, Ritsema CJ, et al. Modelling water flow and sediment processes in a small gully system on the Loess Plateau in China *Catena*, 2003, 54: 117-130
- [12] Morche D, Schmidt KH. Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps, Germany *Geomorphology*, 2006, 80: 131-145
- [13] Wei T, Chen Z, Duan L, et al. Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71: 37-46
- [14] Xu J-X (许炯心). The zonality characteristic of erosion and sediment yield on river basin in China *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1994, 39(11): 1019-1022 (in Chinese)
- [15] Ankers C, Walling DE, Smith RP. The influence of catchment characteristics on suspended sediment properties *Hydrobiologia*, 2003, 494: 159-167
- [16] Li M (李勉), Yao W-Y (姚文艺), Shi X-J (史学建). Study on the effect of silt dams for conserving soil and water and its sedimentation characteristic *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2005, 12(5): 107-111 (in Chinese)
- [17] Zhang X-B (张信宝), Wen Z-M (温仲明), Feng M-Y (冯明义), et al. Application of <sup>137</sup>Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of the Hilly Loess Plateau, China *Science in China (Series D)* (中国科学 · D辑), 2007, 37(3): 254-260 (in Chinese)
- [18] Hou J-C (侯建才), Li Z-B (李占斌), Li M (李勉), et al. Research on the sediment source and sediment yield intensity in a small watershed based on the alluvium information of soil-saving dam. *Journal of*

- Xi 'an University of Technology* (西安理工大学学报), 2007, **23**(2): 118- 222 (in Chinese)
- [19] Wei J, Zhou J, Tian J, et al Decoupling soil erosion and human activities on the Chinese Loess Plateau in the 20th century. *Catena*, 2006, **68**: 10- 15
- [20] van den Elsen E, Hessel R, Liu B, et al Discharge and sediment measurements at the outlet of a watershed on the Loess plateau of China. *Catena*, 2003, **54**: 147- 160
- [21] Fu BJ, Chen LD, Ma KM, et al The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China. *Catena*, 2000, **39**: 69- 78
- [22] Cao J-J (曹军骥), Zhang X-Y (张小曳), Cheng Y (程 燕), et al Size distribution of the late Cenozoic red clay and the winter monsoon variations. *Marine Geology & Quaternary Geology* (海洋地质与第四纪地质), 2001, **21**(3): 99- 106 (in Chinese)
- [23] Chen J-A (陈敬安), Wan G-J (万国江), Zhang F (张 峰), et al Environment records of lake sediments under different temporal scale: As a case of sediment grain size. *Science in China (Series D)* (中国科学院·D辑), 2003, **33**(6): 563- 568 (in Chinese)
- [24] Chen M-H (陈木宏), Zheng F (郑 范), Lu J (陆 钧), et al Matter source characteristics and Palaeoenvironment significance of index of sediment size fraction on Southwest continental slope of South China Sea. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2005, **50**(7): 684- 690 (in Chinese)
- [25] He C-H (何华春), Ding H-Y (丁海燕), Zhang Z-K (张振克), et al Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2005, **25**(5): 590- 596 (in Chinese)
- [26] Jiang Q-F (蒋庆丰), Liu X-Q (刘兴起), Shen J (沈 吉). Grain-size characteristics of Wulugu Lake sediments and its Palaeoclimate and Palaeoenvironment implication. *Acta Sedimentologica Sinica* (沉积学报), 2006, **24**(6): 877- 882 (in Chinese)
- [27] Qiang M-R (强明瑞), Chen F-H (陈发虎), Zhou A-F (周爱锋), et al Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Sugan Lake sediments, north Qaidam Basin. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2006, **26**(6): 915- 922 (in Chinese)
- [28] Wang Y (汪 勇), Shen J (沈 吉), Yang X-D (羊向东), et al Environmental changes deduced from grain size characteristics of the sediments from Hongjian-nao Lake, Shannxi Province. *Acta Sedimentologica Sinica* (沉积学报), 2006, **24**(3): 349- 355 (in Chinese)
- [29] Zheng G-Z (郑国璋), Yue L-P (岳乐平), He J-F (何军锋), et al Grain-size characteristics of the sediments at Palaeowetland in Anxi County in downstream of Shule River during Holocene and its Palaeoclimatic significance. *Acta Sedimentologica Sinica* (沉积学报), 2006, **24**(5): 733- 739 (in Chinese)

作者简介 汪亚峰,男,1978年生,博士。主要从事景观格局与生态过程研究,发表论文6篇。E-mail: wyf1912@163.com

责任编辑 杨 弘