

DOI: 10.11766/trxb201702210617

黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征*

郭慧莉¹ 孙立全¹ 吴淑芳^{1†} 李宜坪¹ 张永东²

(1 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 重庆市万盛经济技术开发区水务局, 重庆万盛 400800)

摘要 为明确鱼鳞坑坡面抗侵蚀演化过程及其水流水力学特性, 采用间歇性人工模拟降雨实验, 对鱼鳞坑坡面水流水力学特性以及阻力规律进行了系统分析。结果表明: (1) 鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程表现为: 雨滴溅蚀—片蚀—股流冲刷—跌坑—细沟侵蚀—下切侵蚀—溯源侵蚀—崩塌。(2) 随着降雨历时的增加, 由于鱼鳞坑的层层拦截与蓄满, 其下方的坡面径流流速、水深均呈波动式增长趋势, 坑内出现旋涡, 坡面径流呈现断续股流。降雨累积历时为58 min左右, 总降雨量达到87 mm时, 鱼鳞坑侵蚀量急剧增加, 拦蓄径流作用失效。(3) 五场降雨过程中, 上坡和中坡水流流态为层流, 下坡由于鱼鳞坑蓄满后径流出现波动, 水流流态由层流变为紊流且时而为缓流时而为急流。(4) 鱼鳞坑坡面水流阻力来源于降雨阻力、颗粒阻力、形态阻力叠加, 在整个降雨过程中阻力总和呈下降趋势; 其中, 受地形高低起伏、地表糙度的影响, 形态阻力一直居于主导地位。

关键词 鱼鳞坑坡面; 间歇性降雨; 侵蚀演化过程; 水力学特性

中图分类号 S157.1 文献标识码 A

在黄土高原干旱半干旱地区, 降水是维持植物生长的唯一水分来源, 土壤水分不足已成为林木正常生长发育及水土保持效益发挥的主要限制因子^[1]。如何有效地保护和利用水土资源, 提高水分利用效率, 因地制宜地采用合适的造林整地措施, 并做到生态环境改善, 对于黄土高原来说是一个重要且急需解决的问题。

鱼鳞坑措施是通过改变微地形缩短径流线, 加强降水的就地拦蓄和入渗来使土壤含水量显著提高^[2]。坡面上采取鱼鳞坑措施, 可以有效地拦截地表径流, 减少坡面水土流失, 同时也起到改善坡面上壤水分的作用, 从而为植被生长创造良好的水分条件^[3]。因此, 众多学者对半干旱黄土丘陵沟壑区不同立地类型不同规格的鱼鳞坑的集水效果以及鱼鳞坑的土壤含水量、侵蚀量等进行了大量研究^[4-5], 结果发现, 大鱼鳞坑整地的林地土壤含水量较高, 土壤侵蚀量较少, 适宜在黄土沟壑区的造

林过程中应用和推广, 在布设鱼鳞坑时, 要根据不同立地类型配置不同规格标准的鱼鳞坑, 在实现植被恢复的同时, 生态环境也得以有效改善。孙军^[6]对黄土高原延河流域不同水土保持措施及土壤水文生态效应进行了研究, 得出鱼鳞坑措施在中小降雨量时, 蓄水保水效应较佳, 是较适合于黄土高原的土地利用方式; 但在次降雨量较大时, 鱼鳞坑措施的减流效果不稳定, 变化在5.56%~33.90%之间。王青宁等^[7]研究了黄土坡面植被重建鱼鳞坑整地的土壤水分特征, 结果表明: 鱼鳞坑的雨季蓄水过程明显, 春季阳坡鱼鳞坑较原状荒坡的含水量增幅均值可达18.18%, 其改善土壤水分状况的程度高于阴坡(增幅均值为9.93%); 李虹辰^[8]研究了黄土丘陵区旱作枣园鱼鳞坑与覆盖措施土壤水分动态效应, 研究得出生长季内鱼鳞坑+树枝覆盖、鱼鳞坑+秸秆覆盖、鱼鳞坑无覆盖处理0~180 cm土层平均土壤含水量较对照均有提高, 其中以鱼

* 国家自然科学基金项目(41671276)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671276)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wsfjs@163.com

作者简介: 郭慧莉(1993—), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事坡面土壤侵蚀过程研究。E-mail: 15191851961@163.com

收稿日期: 2017-02-21; 收到修改稿日期: 2017-04-11; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-05-25

鳞坑+树枝覆盖效果最好，平均含水量较对照提高14.2%。不同鱼鳞坑和覆盖组合措施，次降雨量对土壤水分的影响主要集中在100 cm以内，对深层土壤水分影响不显著。吴淑芳等^[9]对鱼鳞坑坡面薄层水流剥离土壤颗粒的水动力学过程进行了研究，结果表明：随放水流量增加，坡面流速迅速增大，导致水流切应力、单位水流功率、径流动能增大，进而水流对土壤颗粒的剥离能力增强，最终土壤侵蚀加剧。

尽管鱼鳞坑工程措施在黄土高原地区有着显著的蓄水拦沙功能，但当遇到强降雨时，它会产生破坏性的土壤侵蚀。吴淑芳^[3]研究得出：当在15°左右的坡面上，上方汇水流量超过 $3.0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ，鱼鳞坑内水流形成漩涡，坑内壁逐渐被径流剥蚀、冲刷直至严重破坏，进而下方的鱼鳞坑拦蓄径流作用失效。唐小娟^[10]对鱼鳞坑的蓄水拦沙作用进行了研究，发现鱼鳞坑在开始有一些拦蓄作用，但是一旦鱼鳞坑蓄满后被大雨冲垮，则失去蓄水拦沙的功能，反而对坡面有破坏作用。

综上诸多学者对鱼鳞坑的水土保持效应进行了大量研究，在研究过程中仍存在以下几个方面的问题。第一，以往大多研究集中于鱼鳞坑的土壤水分状况、不同规格鱼鳞坑集水效果、鱼鳞坑与覆盖措施结合的土壤水分动态效应以及鱼鳞坑对植被生长影响研究，对同一地表采用间歇性降雨，观测鱼鳞坑坡面的图形化的动态侵蚀演化过程、侵蚀发生的重点部位及侵蚀参数的时空动态变化过程还未见报道。近年来，越来越多的高新技术被应用于侵蚀研究，例如计算机软件^[11]、高清晰摄像设备^[12]和微地形扫描技术^[13-14]等，这些技术的使用使得坡面侵蚀现象能够被更加精确地监测和更加全方位地揭示。第二，近年来，对于坡面流水力学特性的研究，众多学者主要集中对整个坡面在平均状态条件下进行研究，然而类似鱼鳞坑这种复杂地形的坡面，其坡面流作为三维非恒定、非均匀沿程变量流，随地形高低起伏变化，其流动形态千变万化，均匀流理论很难揭示水力学特性在非均匀坡面上的变化情况，尤其是坡面流速的获取、水深的计算，水流阻力的计算。

针对上述问题，本研究拟采用三维激光扫描仪，借助ArcGIS软件，对鱼鳞坑典型坡面进行了五场降雨的侵蚀演化过程分析，试图实现此过程的图形化与数字化，并分析鱼鳞坑坡面流的水力学特

性以及其所受的阻力规律，以期对黄土高原鱼鳞坑工程措施合理布设提供理论依据与决策支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验用土为黄绵土，用Mastersize2000激光粒度仪测定其机械组成，其中砂粒（2~0.02 mm），粉粒（0.02~0.002 mm），黏粒（<0.002 mm）分别占35.25%、54.54%和10.21%，以上均为体积分数，土壤质地为粉砂质壤土。土样风干后过10 mm筛，并将其填装于长5 m、宽1 m、高0.5 m，坡度为15°的土槽中。装土之前先在土槽底部铺15 cm厚天然沙，细沙上铺透水纱布，以保证试验土的透水性接近于天然坡面，土壤容重控制在1.1~1.3 g cm⁻³。

试验模拟了黄土高原普遍采取的水土保持措施鱼鳞坑。鱼鳞坑是在填充好的土槽内沿坡面方向挖半圆形坑，呈“品”字形排列，深度10 cm，半圆直径30 cm（如图1，图2为5场降雨结束后的坡面形态）。土槽下端安装集流装置，用来收集径流、采集泥沙样。

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室模拟降雨大厅进行，试验采用降雨设备为下喷式自动模拟降雨系统，喷头高度16 m，降雨强度设定为90 mm h⁻¹左右，进行5场间歇性降雨，每场降雨间隔3~5 d，待表面无积水、较干燥时，进行下一场降雨。降雨历时依据坡面出现明显的微地形变化特征来确定。待坡面产流后每隔2 min接取径流泥沙样，降雨结束后用量筒测量并计算获取瞬时径流量，用烘干法得到径流含沙量。细沟内流速用QYLS-303型坡面薄层水流流速测量仪进行测量，采用高锰酸钾染色法测定距坡顶1 m、3 m、5 m的坡面水流流速，间隔4 min，测距1 m，同时用水位测针测量上、中、下坡面及细沟内水深。

为验证坡面薄层水流流速自动测量仪与高锰酸钾染色法之间所测流速的差异性，试验开始前，在装好土的3 m土槽内，地表面人工形成具有一定沟网形态的细沟，对细沟内的流速分别采用这两种方法进行测量，且两种方法的误差均在10%以内，最大为9.7%，最小为0.5%，因此，本试验利用这两种方法的测定值确定了修正系数（0.96），尽量保证数据的一致性。



图1 鱼鳞坑初始地形

Fig. 1 Initial form of fish-scale pits

1.2 细沟侵蚀参数计算

首先采用大型三维激光扫描仪获取地表高程数据。具体测量前要对测量区域进行实地考察，按照小区坡面的实际情况设定激光扫描仪的安装位置和靶点的架设位置。试验中由于鱼鳞坑坡面变化较大，同时侵蚀沟道发育深浅不一，而激光扫描仪的扫描角度又受到限制（上下 270° 、左右 360° ）。为此，本研究将测量区域划分为4个站点进行测量，各个测量站点之间的数据靠标靶点进行拼接，然后开始体表的扫描。扫描时，除第一场降雨外，其后每场降雨初始地形均为前一场的终极地形，获取精度为1 mm的DEM数据，第一场降雨前扫描地形DEM数据记作A0。降雨一定时间后地表形态发生微小变化时停止降雨，静置至土槽表面水充分入渗，再次扫描地表所得DEM数据记作A1。待降雨后的土槽表面（A1）无积水时，且放置若干天（待室外天气而定），在A1的基础上可继续进行第二次降雨，降雨后再次扫描地表所得DEM数据记作A2。依此类推，分别记作A3、A4、A5，直至最后一场降雨坡面有较大细沟出现，坡面大体形态没有太大变化时，停止该处理的降雨试验。采用ScanMaster软件对三维激光扫描仪所得土槽地形高程DEM（A1、A2、A3、A4、A5）进行去噪、拼接等初始处理，从而得到去除无效点后同一坐标系下的完整坡面高程数据。

之后，将高程数据导入ArcGIS 软件中，得到坡面细沟侵蚀动态演化过程图，同时以沟深 $\geq 1\text{cm}$ 侵蚀深度作为确定侵蚀沟的标准，对细沟沟网和细沟面积进行提取并量取细沟沟宽，在此基础上计算细沟平面密度和平均深度^[15]。

1.3 水力学参数计算

借鉴河流动力学原理和方法，用相应经验公式对坡面流水力学参数进行计算，包括无量纲参数雷



图2 鱼鳞坑的最终地形

Fig. 2 Ultima form of fish-scale pits

诺数 Re 、弗劳德数 Fr 。各水力学参数计算公式如下：

$$Re = \frac{Uh}{v} \quad (1)$$

式中， U 为流速， m s^{-1} ； h 为水深， m ； v 为水运动黏性系数，取值为 $7.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

式中， g 为重力加速度， m s^{-2} 。

1.4 阻力参数计算

利用Abrahams等^[16]提出的坡面水流阻力分类方法，根据不同地表处理的阻力来源，坡面流阻力分为颗粒阻力 f_g 、形态阻力 f_f 、波阻力 f_w 和降雨阻力 f_r ，并且四种阻力可以叠加，叠加后的阻力为坡面流总阻力 f 。

由于本研究所有处理均未涉及地表覆盖物、植被、砾石等粗糙源，所以波阻力为零，各地表的叠加阻力 $f=f_g+f_f+f_r$ 。

2 结 果

2.1 鱼鳞坑坡面侵蚀发育演化过程研究

通过应用 Scan Master 以及 ArcGIS 软件对5场间歇性降雨坡面侵蚀形态发育过程实现了图像化和侵蚀参数的数字化提取，如图5所示。从图中可以看出，在前两场降雨过程中，鱼鳞坑坡面并无明显变化，降雨初期，坡面土壤含水量比较低，降雨大多就地入渗，加之鱼鳞坑横向切断径流，层层拦截，使得径流的产、汇流过程重新分布，并将一部分降雨蓄纳在鱼鳞坑内；随着降雨历时的增加，土壤含水量增大，14.23 min后，部分鱼鳞坑被填满，整个过程中鱼鳞坑坡面以雨滴溅蚀和片蚀为主，部分出现小股流及较小跌坎。最大跌坑长

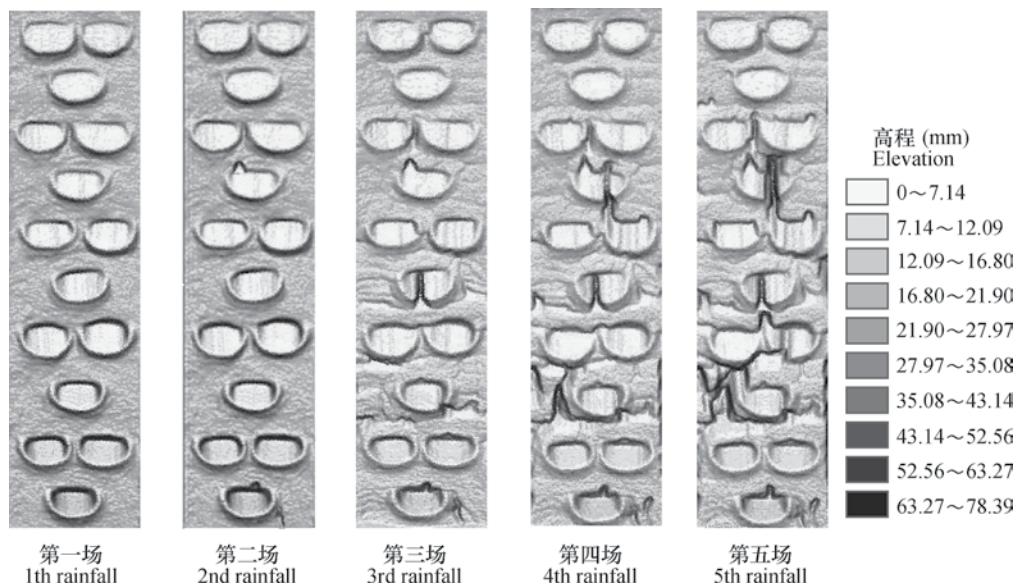


图3 鱼鳞坑坡面细沟形态发育过程

Fig. 3 Rill morphological development process of fish scale pits

表1 鱼鳞坑处理细沟侵蚀参数

Table 1 Parameters of rill erosion of fish-scale pit

场次 Session	降雨历时 Rainfall duration (min)	细沟平面密度 Rill horizon density	平均沟深 Rill average depth (cm)	最长沟长 Longest rill length (cm)	最大沟深 Deepest rill depth (cm)	最长沟平均沟宽 Average width of the longest rill (cm)
1	40	—	—	—	—	—
2	15	—	—	—	—	—
3	25	0.063	3.9	53	5.5	12
4	15	0.085	5.4	58	6.7	17
5	15	0.088	6.6	80	7.8	22

3.3 cm, 宽2.7 cm, 深1.4 cm。第3场降雨开始前, 坡面表层土壤含水量已达20.23 %, 在降雨0.87 min后坡面开始产流, 且在降雨4.60 min后鱼鳞坑被填满, 此时坡面股流增加, 径流冲刷作用加大, 鱼鳞坑初始形态开始被破坏, 坡面开始出现细沟侵蚀, 在坡面中部鱼鳞坑内产生一条长28 cm的小细沟。至第4场降雨, 鱼鳞坑形态进一步遭到破坏, 且发生下切侵蚀, 坡面上新形成两条细沟流路, 一条出现在鱼鳞坑内, 一条在中下部坡面上。此时最长沟长达53 cm, 沟宽11.8 cm, 沟深5.5 cm。至第5场降雨, 坡面中部细沟变化缓慢, 而上部和下部两条细沟继续发育, 出现溯源侵蚀现象, 沟长分别较第4场降雨增加了28.6 cm和27 cm。此时最长沟长、

沟宽、沟深较细沟出现初期增加至80 cm、22 cm和7.8 cm, 如表2所示。

2.2 鱼鳞坑坡面流流速

坡面径流的流速直接关系到坡面水蚀的土壤分离、泥沙输移和沉积过程, 是计算其他水动力学参数的基础。因此对坡面径流流速及其分布的研究至关重要^[17-18]。图4是鱼鳞坑处理坡面流速时空分布图, 由图可以看出: 坡面流速总体上随降雨场次增加而增加, 就单次降雨而言, 由于鱼鳞坑高低起伏特征, 不同坡位的流速呈现波动趋势且由于下坡汇流面积大, 下坡流速明显大于中坡和上坡流速。产流初期, 随着降雨历时的增加, 径流量增加, 流速增大, 但是从20 min左右开始, 下坡流速开始下

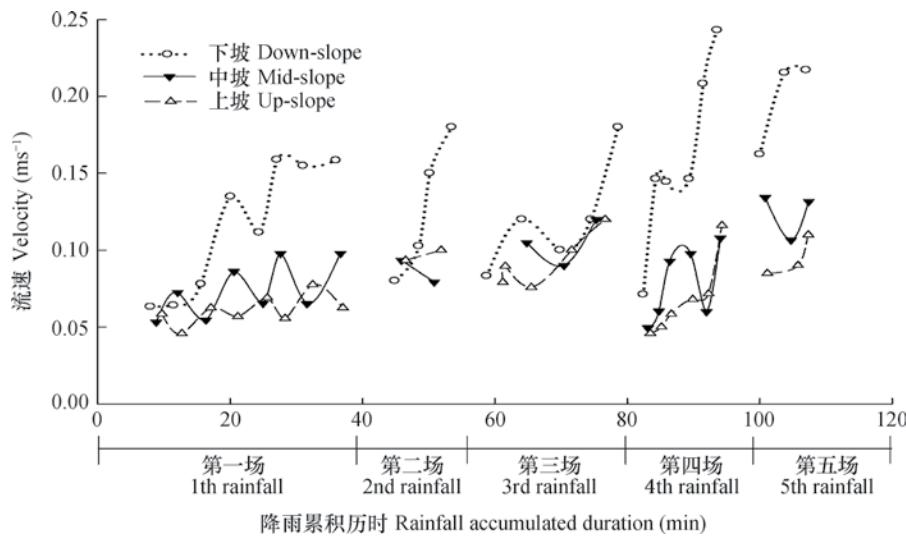


图4 鱼鳞坑处理流速时空分布图

Fig. 4 The temporal and spatial distribution of velocity of fish scale pits

降至25 min左右又开始上升，这是由于坡面径流在流动过程中会携带泥沙，当携带泥沙量较大时，来沙量超过径流的输移能力，流速减小，泥沙便会沉积，填平小坑洼地，坡面粗糙度降低，径流含沙量减少，流速又开始上升。在第2场降雨过程中，由于第1场降雨作用，减小了坡面粗糙度，坡面流速呈现大幅增加的趋势。由于从第3场降雨开始，坡面出现细沟侵蚀且鱼鳞坑遭到破坏，地表起伏变化大，流速在后3场降雨过程中出现波动变化。第4场降雨末期，下坡流速增大至峰值后至第5场降雨又有所降低，出现这种现象是因为在这期间，中下部鱼鳞坑被填埋，地表粗糙度显著降低，水流流速增加，之后，由于水流绕过鱼鳞坑形成沟道，各沟道贯通后侵蚀加剧，径流泥沙迅速增大，导致流速减小。

2.3 鱼鳞坑坡面流水深

由图5可以看出，坡面水深与坡面流速有相同的变化趋势，总体上是逐渐增长的。在第1场降雨过程中，由于水流下冲力，随着流量的增加一部分水流来不及下渗，使得坡面径流深随时间累积历时的增加而增大，此外，鱼鳞坑对水流的层层拦蓄使得上坡和中坡水深大于下坡水深，且波动变化。在第2、3场降雨过程中，由于土壤含水量增大以及坡上方鱼鳞坑逐渐被水流填满，随着降雨历时和流量的增加，坡面径流深也逐渐增加，并且坡度作用使得下坡水深最大。之后，由于细沟侵蚀和鱼鳞坑破坏加剧，增加了坡面径流的随机性和不确定性，从

而增加了坡面径流深的波动变化和不确定性。在第4场降雨过程中，坡面水深的变化幅度明显增大，这是因为随着大多数鱼鳞坑被冲垮，整个坡面地表形态遭到严重破坏，导致了坡面径流深随降雨历时的增加而忽增忽减。由于，坡上方沟道流路加深加宽，大量水流由细沟流向下游，使得在第5场降雨中，下坡水深明显大于上坡和中坡水深。

2.4 鱼鳞坑坡面层流与紊流

雷诺数是判别层流和紊流的定量准则，表征水流惯性力与黏性力比值的无量纲参数。由图6可以看出，坡面雷诺数随降雨历时的增大呈现先增大后减小再增大的变化趋势，在整个降雨过程中，上坡和中坡雷诺数均小于500，水流流态为层流，下坡雷诺数在前4场降雨过程中小于500至第5场降雨时超过500，水流流态由层流变为紊流。上坡雷诺数变化范围在23.87~241.2，中坡雷诺数变化范围在28.64~289.4，下坡雷诺数变化范围在32.98~613.4，且变化幅度随降雨历时的增加而增大。结合试验的观测记录分析可知，在径流冲刷初期，跌坎细沟尚未出现，径流在从坡上向坡下流动的过程中，流速逐渐增大，在惯性力和粘滞力的对比关系中，径流惯性力占比越来越大，所以雷诺数逐渐增大，水流紊乱性增加。随着试验的进行，坡面开始出现跌坎且鱼鳞坑被破坏，水流含沙量增大，雷诺数减小，这与赵春红^[19]的研究结果一致。图中还显示出在第3、4场降雨过程中，雷诺数变化幅度明显增强，这是由于从第3场降雨开始，

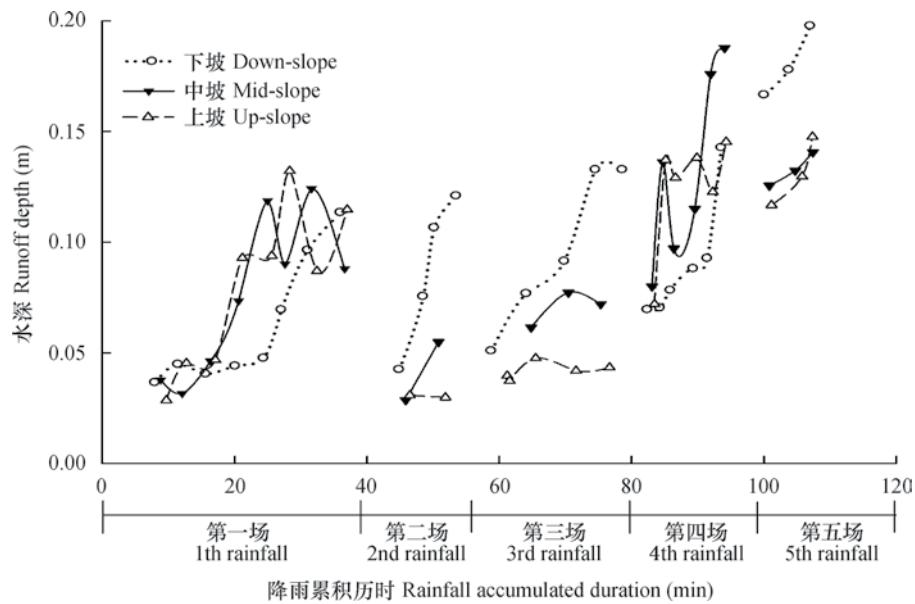


图5 鱼鳞坑处理水深时空分布图

Fig. 5 The temporal and spatial distribution of runoff depth of fish scale pits

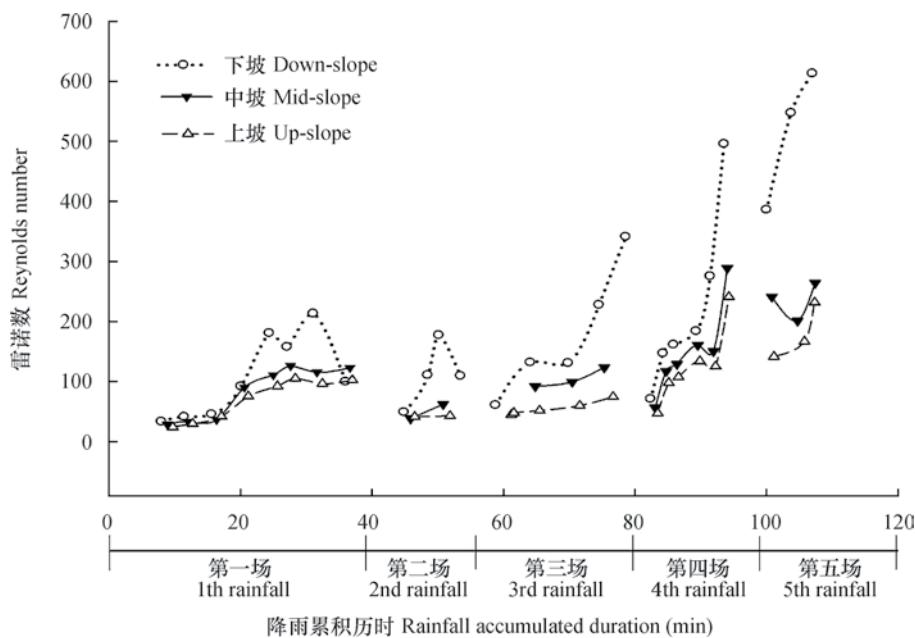


图6 鱼鳞坑处理雷诺数时空分布图

Fig. 6 The temporal and spatial distribution of Reynolds number of fish scale pits

发生细沟侵蚀且侵蚀进一步加剧，出现溯源侵蚀，鱼鳞坑也进一步遭到破坏，使得雷诺数出现变化幅度更大的波动性增长。在整个降雨试验过程中，下坡雷诺数最大，上坡和中坡的雷诺数较为接近，这是因为下坡汇流面积大，而汇流会增加水流紊动性^[20]。

2.5 鱼鳞坑坡面急流与缓流

弗劳德数 Fr 是表征水流流态的无量纲水力参数之一，它是水流惯性力与重力的比值。由图7可以看出，无论是上坡还是中坡与下坡，弗劳德数均呈现大幅度的波动式变化，没有明显的规律性。在整个试验过程中，上坡弗劳德数的变

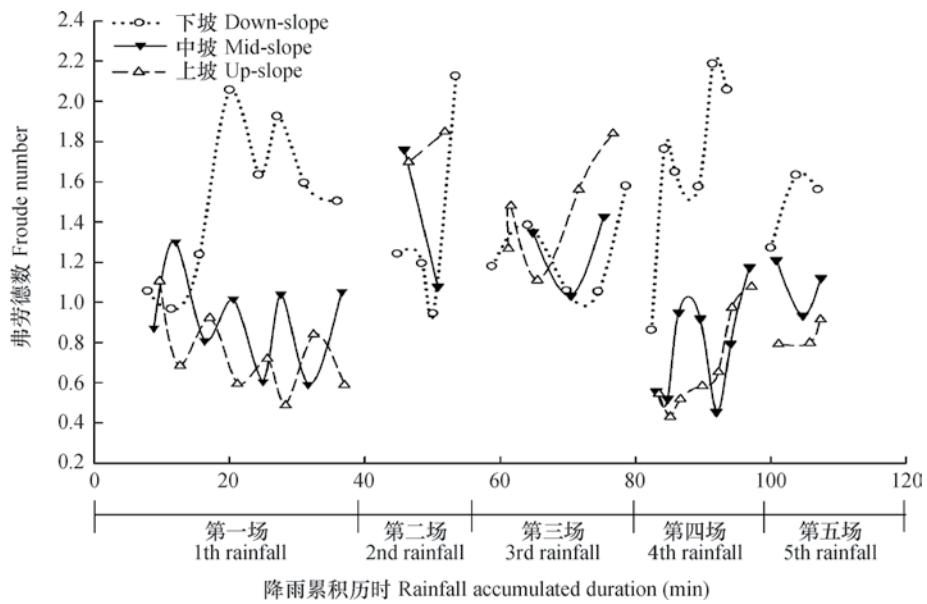


图7 鱼鳞坑处理弗劳德数时空分布图

Fig. 7 The temporal and spatial distribution of Froude number of fish scale pits

化范围在 $0.430 \sim 1.849$ ，中坡弗劳德数的变化范围在 $0.456 \sim 1.761$ ，下坡弗劳德数的变化范围在 $0.521 \sim 2.186$ 。从图中还可以发现，从第2场降雨开始，各坡位弗劳德数的变化频率和变化幅度均明显增大，结合试验观测记录分析出现这种现象的原因可知，从第2场降雨开始，鱼鳞坑坡面的原始性状开始遭到破坏，坡面上从出现小跌坑到细沟产生再到细沟侵蚀加剧出现溯源侵蚀，鱼鳞坑从遭到轻微破坏到更大面积的严重破坏，这些现象共同导致了坡面弗劳德数的大幅波动式变化。

2.6 鱼鳞坑水流阻力分布规律

图8显示的是鱼鳞坑处理坡面水流阻力随降雨累积时间的变化过程图。由图可以看出，颗粒阻力、降雨阻力有着相同的波动变化特征，总体上均呈波动式减小的趋势。其中，坡下方颗粒阻力、降雨阻力和叠加阻力的波动幅度明显大于坡上方。结合试验观测记录进一步分析可知，随着降雨的进行，坡面表层的松散土壤颗粒一方面会由于雨滴的击溅作用变紧实，另一方面，雨滴会携带疏松土壤，对坡面土壤颗粒产生分散作用，松散的土壤颗粒逐渐被降雨带走，此外，溅起的土壤颗粒会落在小洼地，减小坡面粗糙度，颗粒阻力随之减小。同时，随着降雨的进行，坡面土壤含水量逐渐增加，使得雨滴打击造成水流延迟产生的相应附加阻力减小。27 min后，颗粒阻力、降雨阻力和叠加阻力开

始增大，对比此时雷诺数的变化趋势，发现在颗粒阻力和降雨阻力增大的同时雷诺数减小，这可能是由于27 min后，随着被水流填满的鱼鳞坑开裂和小跌坎的出现，坡面粗糙度增大，含沙量增大，雷诺数减小，阻力增大，这与张宽地等^[21-22]在裸地和植被覆盖度较小的情况下研究结果一致。从第2场降雨至第4场降雨，各坡位阻力的大幅波动变化是由于从第2场降雨开始，坡面出现股流冲刷，产生跌坑和细沟，至第4场降雨开始鱼鳞坑被进一步破坏，增加了阻力变化的波动性。之后，由于细沟的发育和鱼鳞坑的破坏已经基本稳定，能被水流带走的泥沙颗粒逐渐减少并趋于稳定，所以阻力也逐渐减小并趋于稳定。由于鱼鳞坑坡面微地形的特殊性，整个降雨过程中形态阻力均占主导地位，并随着鱼鳞坑的逐渐破坏而呈减小趋势。

3 讨 论

3.1 鱼鳞坑保蓄水效果

针对黄土高原鱼鳞坑措施拦蓄径流减少土壤侵蚀的问题，鱼鳞坑措施是通过对坡面径流进行拦蓄和重新分配，增加坡面土壤水分入渗，在一定程度上促进林木生长发育。但是，在不同的坡度、降雨强度和流量条件下，鱼鳞坑的保蓄水效果不同。唐小娟^[10]研究表明，在 10° 坡面径流小区上，当

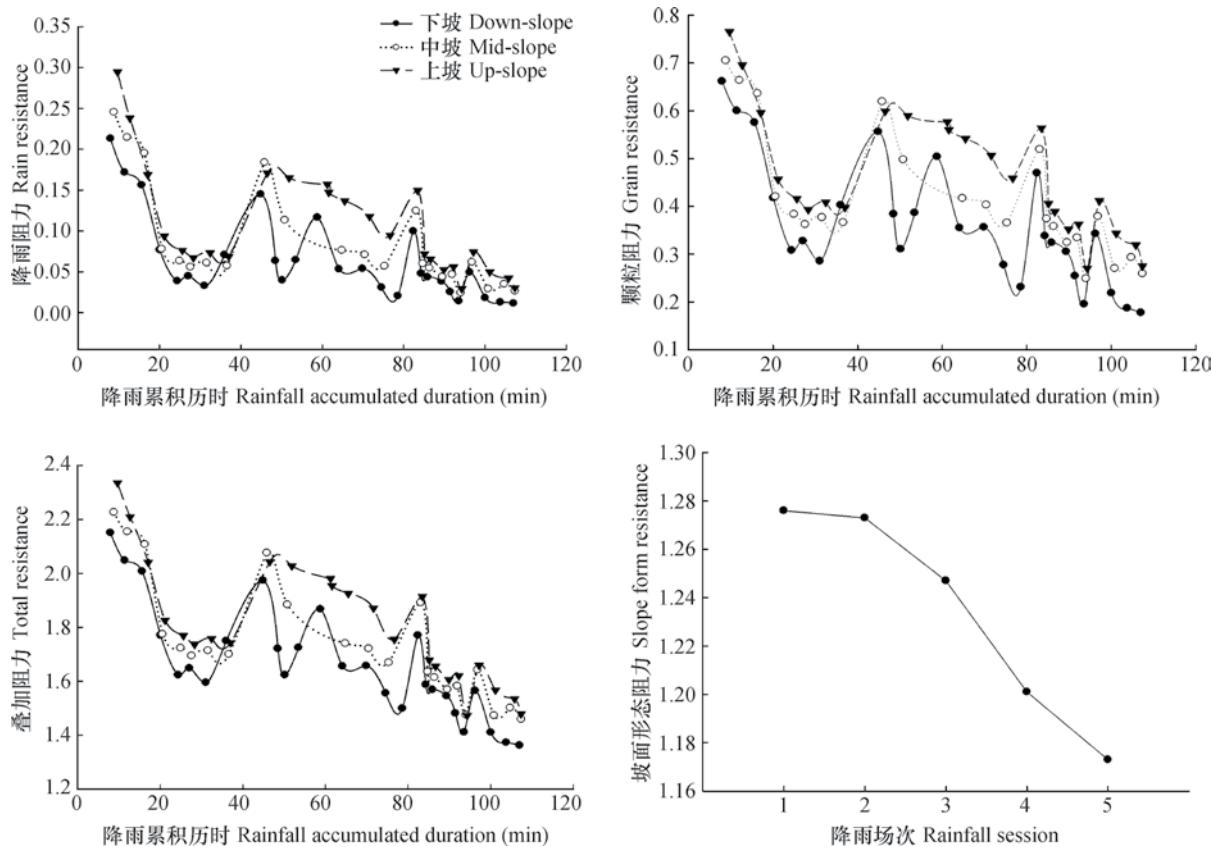


图8 鱼鳞坑处理水流阻力时空分布图

Fig. 8 The temporal and spatial distribution with flow resistances of fish-scale pits

降雨总量为52.5 mm时，柿子树+鱼鳞坑措施蓄水效果明显优于无鱼鳞坑措施的柿子树，当降雨总量达到88.9 mm时，鱼鳞坑被大雨冲垮，径流调控作用失效。在20°坡面径流小区上，当降雨总量达到104.4 mm时，鱼鳞坑径流系数和侵蚀量均高于对照，同样，在强降雨下鱼鳞坑被大雨所冲垮，无法起到保水蓄水的作用，且加剧了下方坡面的土壤侵蚀。本研究是在15°坡面上，雨强为 1.50 mm min^{-1} 左右条件下，研究得出从第3场降雨开始，即降雨累积历时为58 min，总降雨量达到87 mm时，坡上方的细沟逐渐发育，水流汇集流速加大，增大下方鱼鳞坑内水流的紊动性，出现鱼鳞坑边壁被掏蚀、下切、崩塌等一系列过程，侵蚀量显著增加，无法起到蓄水作用。

由此可见，坡度、雨强和降雨量均对鱼鳞坑的保水作用均有着重要的影响，在坡度不同的坡面上，强度与流量不同的降雨，对不同规格鱼鳞坑的冲刷效果不同，故应因地制宜，综合考虑当地地形、降雨特性等多方面影响因素，合理规划布设鱼

鳞坑，也可以结合覆盖及其他工程措施来增加鱼鳞坑的保水蓄水效果，使鱼鳞坑效益最大化。

3.2 鱼鳞坑水力学特性

针对复杂地表的水流动力学参数计算方面，以往在复杂地形包括鱼鳞坑坡面，诸多学者均借鉴的是明渠均匀流理论，按照各水力参数沿程不变、流速为平均流速、水深多为流量与流速的函数计算，阻力系数也是借鉴明渠均匀流Darcy-Weisbach公式、Chezy公式和Manning公式等进行相应计算与分析，计算值均是反映坡面平均状况，与地形起伏无关。本研究则在前人基础上，认真系统地分析了微地形的非均匀性和凹凸不平的鱼鳞坑坡面，通过测定鱼鳞坑内、坡面细沟内、细沟间以及不同坡位处的流速、水深，发现坡面水流各水力要素随时空是不断变化的，此过程中的水流属于非均匀流，前人均匀流理论很难解释其水力学特性变化特征。本研究按照鱼鳞坑坡面阻力来源，将阻力细分为颗粒阻力、降雨阻力、波阻力和形态阻力，凝练了一套与前人不同的阻力参数计算方法。在整个降雨过程因

鱼鳞坑地形起伏引起的形态阻力始终占主导位置，揭示了鱼鳞坑坡面起到拦截径流蓄水保土的主要原因。鱼鳞坑坡面的特殊地表形态对阻力来源、阻力变化以及流速、水深和水流流态的波动变化起决定性作用，由于坡面薄层水流极浅，水流极易受到降雨和地表形态的影响，因此更加突出了鱼鳞坑微地形对水力学特性变化的显著影响。本研究对鱼鳞坑坡面水力学特性的研究，有助于从水动力学角度深入揭示坡面侵蚀演化过程的本质。

总之，鱼鳞坑坡面土壤侵蚀过程极其复杂，在降雨条件下测量难度较大，本文只是对其水力学特性进行了初步研究，对于揭示复杂非均匀坡面上水力学特性变化具有一定的实践指导意义，今后还需在提高测量方法和测量技术的同时对鱼鳞坑坡面水流各水力要素进行更精准全面的分析研究，此外鱼鳞坑坡面的动态侵蚀演化过程也需要更多更深入的探究，以期为黄土高原鱼鳞坑坡面的侵蚀研究提供理论依据。

4 结 论

鱼鳞坑坡面侵蚀演化发育过程表现为：雨滴溅蚀—片蚀—股流冲刷—跌坑—细沟侵蚀—下切侵蚀—溯源侵蚀—崩塌。随着降雨历时的增加，坡面流速、水深和雷诺数均呈增长趋势并伴有一定的波动性。坡下方流速、水深和雷诺数的大小和波动范围均大于坡面中上方。随着降雨历时的增加，坡面和细沟内的颗粒阻力、降雨阻力和叠加阻力均呈波动式减小的趋势，坡上方阻力大于坡下方阻力。鱼鳞坑虽然有一定的蓄水作用，但是会受到较多因素的影响，尚需进行更加深入的研究，旨在为黄土高原的水土保持工作提供科学依据。

参 考 文 献

- [1] 李萍, 朱清科, 赵磊磊, 等. 黄土丘陵沟壑区鱼鳞坑雨季土壤水分状况. 农业工程学报, 2011, 27 (7) : 76—81
- [2] 歌丽巴, 王彬, 张会兰, 等. 坡面水保措施下土壤水分特征及对坡体稳定性的作用. 土壤通报, 2014, 45 (5) : 1225—1232
- [3] Ge L B, Wang B, Zhang H L, et al. Variations of soil moisture under soil and water conservation measures and the corresponding effects on slope stability (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45 (5) : 1225—1232
- [4] 吴淑芳. 坡面径流调控效应及其机理研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2006
- [5] Wu S F. Study on the effect mechanism of the slope runoff regulation (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2006
- [6] 李萍, 朱清科, 王晶, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区不同规格鱼鳞坑集水效果研究. 灌溉排水学报, 2011, 30 (5) : 91—94
- [7] Li P, Zhu Q K, Wang J, et al. Catchment effect of fish-scale pits with different specification in semi-arid hilly and gully Loess Plateau (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30 (5) : 91—94
- [8] 朱聿申, 陈宇轩, 查同刚, 等. 大鱼鳞坑双苗造林技术在黄土沟壑区的应用效果. 干旱区研究, 2016, 33 (3) : 560—568
- [9] Zhu Y S, Chen Y X, Zha T G, et al. Application of double-seedling afforestation technique in big fish-scale pits in the loess gully area (In Chinese). Arid Zone Research, 2016, 33 (3) : 560—568
- [10] 孙军. 黄土高原延河流域不同土地利用类型水土保持效应研究. 长沙: 湖南农业大学, 2008
- [11] Sun J. Impacts of different land use types on soil and water conservation in Yanhe River drainage area on the Loess Plateau (In Chinese). Changsha: Hunan Agricultural University, 2008
- [12] 王青宁, 衣学慧, 王晗生, 等. 黄土坡面植被重建鱼鳞坑整地的土壤水分特征. 土壤通报, 2015, 46 (4) : 866—872
- [13] Wang Q N, Yi X H, Wang H S, et al. Soil moisture regime of fish-scale pits for land preparation engineering in loess slope revegetation (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46 (4) : 866—872
- [14] 李虹辰. 黄土丘陵区旱作枣园鱼鳞坑与覆盖措施土壤水分动态效应研究. 陕西杨凌: 西北农林科技大学水土保持研究所, 2014
- [15] Li H C. Study on spatio-temporal distribution and utilization of soil moisture under scale-like pit and mulching measures of the Loess hilly region (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, 2014
- [16] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力过程研究. 土壤学报, 2010, 47 (2) : 223—228
- [17] Wu S F, Wu P T, Song W X, et al. Hydrodynamic

- process of soil detachment by surface runoff on Loess slope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2) : 223—228
- [10] 唐小娟. 坡地分段雨水集蓄利用技术试验研究. 西安杨凌: 西北农林科技大学水土保持研究所, 2004
Tang X J. Experimental study on rainwater catchment utilization technology in slope partition (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 2004
- [11] 原立峰, 吴淑芳, 刘星飞, 等. 基于元胞自动机的黄土坡面细沟侵蚀模型研究. *土壤学报*, 2012, 49 (5) : 1043—1049
Yuan L F, Wu S F, Liu X F, et al. Study on loess hill slope rill erosion model based on cellular automata (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (5) : 1043—1049
- [12] 严冬春, 王一峰, 文安邦, 等. 紫色土坡耕地细沟发育的形态演变. *山地学报*, 2011, 29 (4) : 469—473
Yan D C, Wang Y F, Wen A B, et al. Configuration evolution of rill development on purple slopeland (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2011, 29 (4) : 469—473
- [13] 和继军, 孙莉英, 李君兰, 等. 缓坡面细沟发育过程及水沙关系的室内试验研究. *农业工程学报*, 2012, 28 (10) : 138—144
He J J, Sun L Y, Li J L, et al. Experimental study on rill evolution process and runoff-sediment relationship for gentle slope (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (10) : 138—144
- [14] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究. *中国水土保持科学*, 2011, 9 (2) : 32—46
Huo Y Y, Wu S F, Feng H, et al. Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (2) : 32—46
- [15] 吴淑芳, 刘政鸿, 霍云云, 等. 黄土坡面细沟侵蚀发育过程与模拟. *土壤学报*, 2015, 52 (1) : 48—56
Wu S F, Liu Z H, Huo Y Y, et al. Development of rill erosion on loess slope and its simulation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1) : 48—56
- [16] Abrahams A D, Parsons A J, Hirsch P J. Field and laboratory studies of resistance to inter rill overland flow on semi-arid hillslopes, Southern Arizona/Parsons A J, Abrahams A D. Overland flow: Hydraulics and erosion mechanics. London: UCL Press, 1992: 1—23
- [17] 张颖, 牛健植, 谢宝元, 等. 森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理. *生态学报*, 2008, 28 (10) : 5084—5094
Zhang Y, Niu J Z, Xie B Y, et al. Dynamics mechanism of the effect of forest vegetation on hill-slope water erosion (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (10) : 5084—5094
- [18] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 植被保持水土有效性研究进展. *水土保持学报*, 2002, 9 (1) : 76—79
Zheng L Y, Li Z B, Li P. Advances in researches of the effectiveness for vegetation conserving soil and water (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 9 (1) : 76—79
- [19] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响. 西安杨凌: 西北农林科技大学水土保持研究所, 2014
Zhao C H. Slope and erosive rainfall runoff hydraulics and its effect on sediment transport (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, 2014
- [20] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究. *水科学进展*, 2009, 20 (2) : 236—240
Xiao P Q, Zheng F L, Yao W Y. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullyslope system (In Chinese). *Advances in Water Sciences*, 2009, 20 (2) : 236—240
- [21] 张宽地, 王光谦, 吕宏兴, 等. 模拟降雨条件下坡面流水动力学特性研究. *水科学进展*, 2012, 23 (2) : 229—235
Zhang K D, Wang G Q, Lü H X, et al. Experimental study of shallow flow hydraulics on a hillslope under artificial rainfall conditions (In Chinese). *Advances in Water Sciences*, 2012, 23 (2) : 229—235
- [22] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性. *水科学进展*, 2014, 25 (6) : 825—834
Zhang K D, Wang G Q, Sun X M, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage (In Chinese). *Advances in Water Sciences*, 2014, 25 (6) : 825—834

Erosion Evolution Processes and Hydraulic Characteristics Analysis of Fish-scale Pit Slope on Loess Plateau Region

GUO Huili¹ SUN Liquan¹ WU Shufang^{1†} LI Yiping¹ ZHANG Yongdong²

(1 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education,
Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;)

(2 Bureau of Water Resources, Economic & Technological Development Zones, Wansheng, Chongqing 400800, China)

Abstract 【Objective】Fish-scale pits measure is a widespread and typical soil and water conservation engineering measure in Loess Plateau that can be used to impound runoff and reduce the soil erosion mass and create a good water condition for vegetation growth. In order to clarify erosion evolution processes and flow hydraulic characteristics of fish-scale pits measure under the condition of continuous rainfall. 【Method】In this paper, we analysed the erosion evolution with 3D laser scanner and realized graphical and digital process of erosion evolution on fish-scale pits slope by laboratory five rainfalls simulation. 【Result】The results showed that: (1) Dynamic process of fish-scale pits erosion could be presented as splash erosion-sheet erosion-drop pit-rill erosion-longitudinal erosion-headward erosion-collapse. By the end of the 5th rainfall, the largest rill length、width and depth respectively increased to 80 cm、22 cm and 7.8 cm. During the first two rainfalls, fish-scale pits played a significant role in water storage and silt detention, sheet erosion and rill erosion occurred at some parts of slope; Later, due to excessive water of pits and high moisture content of side slope, leading to collapse phenomenon in pits and longitudinal erosion, rill headward erosion at down-slope, also increased erosion. (2) As the rainfall duration increases, the down-slope velocity and runoff depth were increased with fluctuation because the rainfall could be held up in pits. What's more, vortex occurred in pits and streams scour occurred in slope surface. The order of the average flow velocity and the average water depth is: the up-slope > mid-slope > down-slope. The velocity and depth in rill were significantly larger than the slope. The Reynolds number of up-slope and mid-slope was less than 500, and for down-slope, it was over 500 at the end of 5th rainfall. When rainfall accumulated duration reached 58 min and rainfall increased to 87 mm, erosion increased dramatically. Fish-scale pits unable to play a positive effect. (3) During five rainfalls, the upslope and mid-slope flow regime was laminar flow. With the down-slope pits being filled, slope runoff fluctuated greatly, down-slope flow became turbulent flow from laminar flow and changed between subcritical flow and supercritical flow. (4) Resistance mainly comes from rain, grain and form resistance, and form resistance that originated from the rugged slope was the dominant resistance. Due to the collapse、scour and fluctuant change of terrain, resistance decreased with rainfall accumulation duration accompanied by minor fluctuations. The order of resistance was form resistance > grain resistance > rain resistance. 【Conclusion】The study was of momentous significance to clarify the fish-scale pit slope erosion and its mechanism, also provides theory basis and decision support for loess plateau area to layout fish-scale pits reasonably. Only if we layout fish-scale pits reasonably in Loess Plateau area can we improve and keep soil moisture greatly.

Key words Fish-scale pits slope; Laboratory continuous rainfall simulation; Dynamic evolution processes; Hydraulic characteristics

(责任编辑: 檀满枝)