

# 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响

马勇勇<sup>1</sup>, 李占斌<sup>1,2</sup>, 任宗萍<sup>1\*</sup>, 李鹏<sup>1</sup>, 鲁克新<sup>1</sup>, 李聪<sup>3</sup>,  
汤珊珊<sup>1</sup>, 王添<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 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, 杨凌 712100; 3. 河南黄河水文勘测设计院, 郑州 450004)

**摘要:** 为研究坡面不同草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响, 在模拟降雨条件下, 选取地形收敛指数和地形湿度指数作为结构连通性指标、简化水文曲线和相对地表连接函数作为功能连通性指标分析了不同草带布设位置(坡面中上、中、中下、下部)坡沟系统水文连通性。结果表明: 不同草带布设位置对坡沟系统的连通过程影响不同。植被布设越靠近沟坡部分产流时间越长; 植被布设在中下坡位、下坡位比中上坡位和中上坡位的总径流量小, 对径流汇集影响大。中上坡位布置植被比其他位置有较好的结构连通性, 其降雨后的地形更利于水系连通。不同格局地形收敛指数分布类似正态分布, 地形湿度指数分布符合正偏态分布。中上坡位布置植被降雨后地形比其他格局更利于汇流; 中上坡位布置植被降雨后的地形湿度指数均值比降雨前减少 10.59%, 整体变化最大, 也更利于产流。植被布设越靠近坡顶部分其功能连通性越好, 但对于降水的储蓄能力较差。中上坡位布置植被相比其他格局需要较少的水量达到产流, 功能连通性最好。降雨停止时, 中下部和下部坡位布设植被约有 70% 的总降雨量用于储蓄, 而中上部和上部仅为 50%。

**关键词:** 水文; 径流; 侵蚀; 结构连通性; 功能连通性; 地形收敛指数; 地形湿度指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.022

中图分类号: TV121<sup>+.1</sup>

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-08-0170-07

马勇勇, 李占斌, 任宗萍, 李鹏, 鲁克新, 李聪, 汤珊珊, 王添. 草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 170-176. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.022 <http://www.tcsae.org>  
Ma Yongyong, Li Zhanbin, Ren Zongping, Li Peng, Lu Kexin, Li Cong, Tang Shanshan, Wang Tian. Effect of different positions of grass strips on hydrological connectivity in slope-gully system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 170-176. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.08.022 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

连通性的概念起源于景观生态学, 目前在水文学中越来越受到重视<sup>[1-2]</sup>。水文连通性表征空间异质性和系统全局水文行为的影响, 例如地形阻塞或区域入渗率较高引起的截流或断流<sup>[3-4]</sup>。基于景观连通性的定义, 水文连通性相应地被分为结构连通性和功能连通性 2 个方面。结构连通性表征空间中状态变量的连续性质(例如地表高度或土壤表面性质), 而功能连通性反映了系统边界刺激对水和相关颗粒或分子移动能力或输移速率的影响<sup>[5]</sup>。目前国内外学者在水文连通性研究方面取得了一些成果。Antoine 等<sup>[5]</sup>在对比分析了不同的水文连通性度量指标的基础上, 提出了包含简化水文曲线和相对地表连接函数在内的功能性水文连通指标; Appels 等<sup>[6]</sup>分析了平坦

地区小流域尺度地形和径流形成过程与水文连通性的关系; 夏军等<sup>[7]</sup>、李宗礼等<sup>[8-9]</sup>对河湖水系连通进行了概念研究和框架探讨; 夏敏等<sup>[10]</sup>利用水系连通度、水文连通度和水系格局连接度对巢湖环湖区水系连通进行了评价; 赵进勇等<sup>[11]</sup>基于图论边连通度对胶东地区水网连通进行了分析; 高常军等<sup>[12]</sup>综述了水文连通性已有研究成果, 并指出应重点关注跨时空尺度的综合连通性和连通工程前、中、后需遵循的理论原理。王盛萍等<sup>[13]</sup>基于模拟降雨试验探讨了坡度和雨强对坡面水文连通性的影响; 曹梓豪等<sup>[14]</sup>基于植被格局情景模拟和汇流路径长度指数分析了河岸缓冲带坡面水文连通性。为此, 本文基于室内模拟降雨试验, 以坡沟系统为研究对象, 选用结构连通性指标(地形收敛指数和地形湿度指数)、功能连通性指标(简化水文曲线和相对地表连接函数)分析了模拟降雨条件下草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

黄土高原丘陵区典型地貌特征可粗略划分为梁峁坡面(分水岭至峁边线的梁坡)和沟坡(峁边线至坡脚线)<sup>[15]</sup>。根据黄土高原典型小流域坡沟地貌横剖面的调

收稿日期: 2017-11-23 修订日期: 2018-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404); 国家自然科学基金青年项目(41601291, 51609196); 国家自然科学基金重点项目(41330858); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2016JM4017); 国家自然科学基金面上项目(L1624052)

作者简介: 马勇勇, 主要从事水土保持机理研究。

Email: mayyluck@foxmail.com

\*通信作者: 任宗萍, 博士, 讲师, 主要研究方向为流域水沙过程。

Email: renzongping@163.com

查结果，梁峁坡面一般较平缓，坡度约为 10°~35°；沟谷地形复杂且坡面破碎，既有大于 60°的悬崖，又有 40°~60°的荒坡和少量 25°~35°的耕地<sup>[16-17]</sup>。依据黄土高原小流域坡沟实际情况、室内试验设计原则和西安理工大学雨洪侵蚀大厅的设施情况，本文设计的黄土高原坡沟系统概化模型如图 1 所示。该模型为钢质土槽，宽 1.0 m、深 0.6 m，其中梁峁坡面坡度为 12°、坡长 8 m，而沟坡坡度为 25°、坡长 5 m；模型水平投影面积为 12.36 m<sup>2</sup>，梁峁坡面和沟坡的水平投影面积比例为 1.73 : 1.0。

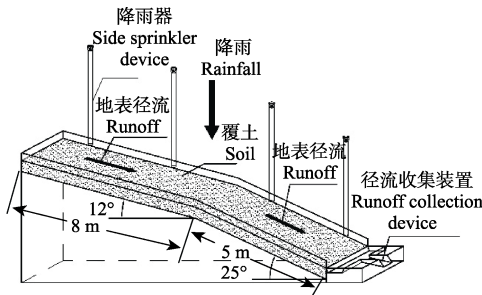


图 1 模拟降雨试验装置图  
Fig.1 Experiment device of simulated rainfall

黄土高原水资源匮乏，Jia 等<sup>[18]</sup>对黄土高原植被恢复后土壤含水量的研究表明：人工林不同程度地消耗了更深土层的土壤水分，导致土壤干层的形成。因此，在植被恢复时应“量水而行”、以较少的植物措施达到保持水土的目的显得尤为重要。韩鹏等<sup>[19]</sup>研究表明，综合考虑经济投入及当地环境限制，黄河流域植被覆盖度约为 25%时的水土保持效益最佳。因此，本试验设定植被覆盖度为 25%，选用马尼拉草(*Zoysia matrella*)分别在坡中上部、坡中部、坡中下部、坡下部布设 2 m×1 m 的草带，该草带覆盖效果较好，并具有方便移植、可重复利用等特点。以草带在坡面上的空间位置对 4 个植被布设位置进行命名，详见图 2。为避免试验的偶然现象，每种植被覆盖格局均进行 2 次重复降雨试验。

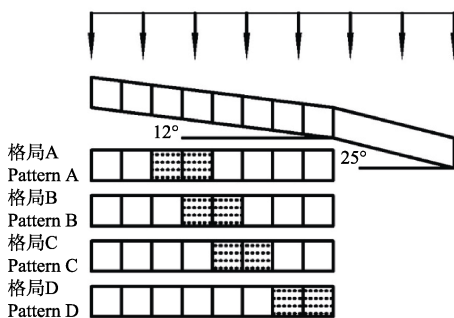


图 2 草带格局示意图  
Fig.2 Sketch map of different grass strip patterns

1.2 试验方法

本试验用土为西安近郊黄土，属于黄绵土土类下的黄壤土，可代表以黄绵土为主的黄土高原地区土壤。采用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度分析仪器测得试验用土的土壤颗粒组成如表 1 所示。

表 1 试验用土粒径构成  
Table 1 Size compose of experiment soil

粒径 Particle size/mm	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.002	<0.002
百分比 Percent/%	0	0.03	0.56	0.60	6.21	91.39	1.21

在试验装土前，首先在钢槽底铺设厚度为 5 cm 的天然细沙，然后每 5 cm 装填一层试验用土，层间打毛以防止分层，填土总厚度为 20 cm；覆草部分预留 10 cm 将草带填充并压实以防止降雨时滑动。为保证试验用土物理性质的一致性，控制干土容重为 1.3 g/cm<sup>3</sup>、初始土壤重量含水量为 20%。根据黄土高原地区暴雨研究成果并参考其他学者的室内模拟降雨试验取值<sup>[20-23]</sup>，本试验设定试验雨强为 1.5 mm/min，并在试验开始前进行雨强率定并确保降雨空间均匀度至 80% 以上。

模拟降雨开始后，立刻计时，并用集流桶收集每分钟在坡沟系统出口处的全部浑水样；坡沟系统出口处产生径流 30 min 后停止降雨，模拟降雨试验结束。在试验开始前、结束后，采用三维激光扫描仪(Trimble FX, 美国天宝)扫描坡沟系统的坡面地形，以便后期地形地貌数据处理。

1.3 水文连通性度量

本文采用地形收敛指数和地形湿度指数度量结构连通性。地形收敛指数<sup>[24]</sup>是根据流向来区分地貌形态指标，指数>0 表示凹陷地形(如洼地，图 3a)，指数<0 表示凸起地形(如山脊，图 3b)，指数=0 表示平坦地形(图 3c)。

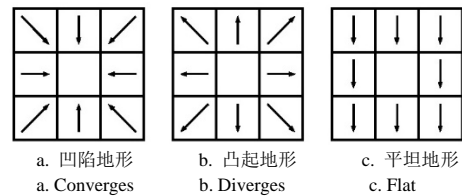


图 3 地形示意图

Fig.3 Diagram of topographic

地形湿度指数(Topographic wetness index, TWI)<sup>[25]</sup>是用于刻划地形变化及其对土壤径流的影响的指标。地形湿度指数愈大，意味着该区域要么具有更大的坡面汇流面积，要么就是具有较低的水力坡降，则该区具有更大潜力的饱和带发展，土壤愈容易达到饱和而产生流。地形湿度指数的计算公式如下

$$TWI = \ln \left( \frac{\alpha}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

式中  $\alpha$  表示流经地表  $i$  点的单位等高线长度上的汇流面积 (m<sup>2</sup>/m)，即上坡面积； $\beta$  为该点处坡度(°)。

本文采用 Antoine 等<sup>[5]</sup>提出的简化水文曲线和相对地表连接函数表征功能连通性。Antoine 等<sup>[5]</sup>在假设降雨是时空均匀的、径流的流速无限大(即忽略径流的转移时间)同时不考虑水分入渗的前提下，将降雨过程简化为径流填洼过程。累积入流量为输入研究区域的累积水量，

即累积降雨量；累积蓄积量为储蓄在研究系统的累积水量，即累积降雨量与累积产流量之差。当采用径流系数  $C$ （瞬时流出量/瞬时入流量）作为累积入流量的函数时，水文曲线就可以被缩放为简化水文曲线。由于径流系数  $C$  的取值范围为  $0 < C < 1$ ，故在直角坐标系中简化水文曲线与横向坐标轴之间所包围区域的面积为总产流量，而简化水文曲线与纵向坐标轴、直线  $y=1$  所包围区域的面积为洼地填充量（如图 4a）。将径流系数  $C$  作为地表洼地存储水量的函数，并将这个指标称为相对地表连接函数。相对地表连接函数描述了地表洼地存储水量的动态变化过程，反映了水文过程的连通程度（如图 4b）。本文利用模拟降雨试验数据反推简化水文曲线和相对地表连接函数，并以此反映功能连通性。

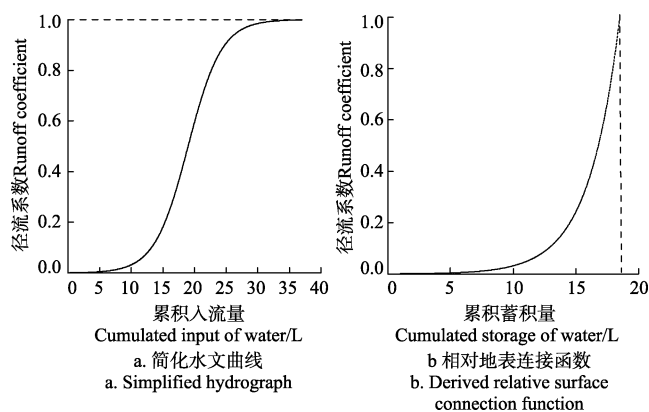


图 4 简化水文曲线和相对地表连接函数图

Fig.4 Simplified hydrograph and derived relative surface connection function

## 2 结果与分析

### 2.1 不同草带布设位置下的坡沟系统产流特征

在恒定雨强条件下，不同草带布设位置下的坡沟系统初始产流时间不同（见表 2）。从降雨开始到坡面出口有径流形成，格局 D 用时 20.48 min；格局 A、格局 B 和格局 C 分别用时 3.00、12.05、13.65 min，与格局 D 用时相比分别减少了 85.35%、41.16%、33.35%。因此，草带布设位置越靠近沟坡，则坡面初始产流时间就越长，即有更多的雨水储蓄在坡沟系统中。本文经分析认为，在试验过程中布设的草带对坡沟系统径流汇集有阻断作用，即植被越靠近沟坡，则汇流路径长度越短且坡面上方来水越少，进而坡面径流连通过程变缓，即初始产流时间增大。

表 2 不同草带布设位置下坡沟系统初始产流时间统计  
Table 2 Runoff initial time and total runoff under different positions of grass strip

草带格局 Grass strip patterns	格局 A Pattern A	格局 B Pattern B	格局 C Pattern C	格局 D Pattern D
初始产流时间 Time of initial runoff generation/min	3.00	12.05	13.65	20.48
总径流量 Runoff amount/L	312.83	385.90	253.42	275.20

利用试验过程中在坡沟系统出口处收集的每分钟径流浑水样，可以计算得到每分钟的坡沟系统产流量，进而在直角坐标系中绘制不同草带格局下的坡沟系统产流过程曲线，如图 5 所示。从图 5 可以看出，在产流初期，由于汇水面积小，时段径流量增长较快；随着降雨的持续进行，时段径流量逐渐趋于一个相对稳定的数值。经分析认为，图 5 中不同草带格局下的坡沟系统相对稳定的时段径流量出现波动的主要原因在于：一是侵蚀过程中坡面出现的跌水导致的，二是模拟降雨装置的系统误差造成的<sup>[26]</sup>。从图 5 还可以看出，格局 C 和格局 D 的坡沟系统产流过程较早达到产流稳定期；在产流稳定期相同产流时段内，格局 A 和格局 B 的时段径流量均大于格局 C 和格局 D，且波动较强烈；格局 C 的坡沟系统总产流量最少，分别为格局 A、格局 B、格局 D 的 81.01%、65.67%、92.09%。

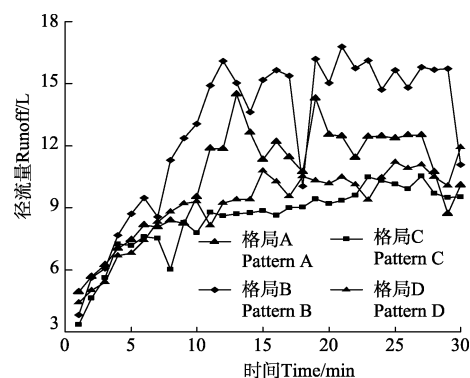


图 5 不同草带格局下坡沟系统径流量变化

Fig.5 Variation of interval runoff amounts under different grass strip patterns on slope-gully system

### 2.2 结构连通性变化特征

根据试验数据分析结果，模拟降雨试验前、后不同草带格局下的坡沟系统地形收敛指数分布类似于正态分布，因此本文选用偏度系数和峰度系数对其定量描述。从表 3 可以看出，不同草带格局下的坡沟系统地形收敛指数的偏度系数均小于零，即分布为负偏斜，因此凹陷地形相对凸起地形而言所占的比例更大，微地形更有利于径流汇流。与模拟降雨试验前相比，格局 A 的地形收敛指数的偏度系数在模拟降雨试验后减小，分布函数向右偏斜，表明在坡沟系统中有更多的凹陷地形分布。格局 B、格局 C 和格局 D 的偏度系数在试验后增大，比试验前更趋近于零，即其分布向正态分布靠近，分布函数与降雨试验前相比更加对称。与模拟降雨试验前相比，格局 A 的地形收敛指数峰度系数在降雨试验后减小，说明降雨试验后的地形收敛指数的频率分布越分散，即降雨后的地形与降雨前相比有更多凹凸地形。与模拟降雨试验前相比，格局 D、格局 C 和格局 B 的地形收敛指数峰度系数在降雨试验后增加，说明降雨后地形收敛指数的分布越集中，即降雨后的地形与试验前相比趋于平坦。格局 B 的峰度系数变化最大，且试验后数值为试验前的 1.31 倍，说明地形收敛指数的分布变化更加剧烈。

根据试验数据分析结果，模拟降雨试验前、后不同

草带格局下的坡沟系统地形湿度指数分布均服从正偏态分布，即峰值向左偏移、长尾向右侧延伸，而与偏度系数(见表 3)都大于零相一致。从表 3 可以看出，与模拟降雨试验前相比，不同草带格局下的坡沟系统地形湿度指数平均值在降雨试验后均减小，说明在仅考虑地形因素条件下降雨前的地形与降雨后相比更容易使土壤达到饱和而产流。格局 A 降雨后的地形湿度指数比降雨前减少了 10.59%。格局 B 降雨后的偏度系数与降雨前相比仅减小了 0.11%，而格局 A、格局 C 和格局 D 降雨后的偏度系数与降雨前相比分别增加了 8.91%、0.42%、4.60%，即地形湿度指数的分布更加不对称。不同草带格局下的坡沟系统降雨后的地形湿度指数的峰度系数与降雨前相比均增大，说明降雨后的地形湿度指数分布越集中，其中格局 B 降雨后的峰度系数是降雨前的 1.228 倍。

表 3 结构连通性统计

Table 3 Statistical table of structural connectivity

草带格局 Grass strip patterns	地形收敛指数 Topographic convergence index		地形湿度指数 Topographic wetness index		
	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	平均值 Mean	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
	格局 A Pattern A	试验前 Before rain -0.173 9	1.864 8	3.449 3	1.895 5
	试验后 After rain -0.183 8	0.812 7	3.084 1	2.064 5	5.778 1
格局 B Pattern B	试验前 Before rain -0.135 4	1.745 1	3.507 7	1.638 7	3.572 8
	试验后 After rain -0.014 0	2.285 1	3.373 0	1.637 0	4.386 5
格局 C Pattern C	试验前 Before rain -0.140 8	3.458 8	3.530 8	1.700 7	3.999 1
	试验后 After rain -0.024 9	4.126 2	3.447 4	1.707 8	4.518 9
格局 D Pattern D	试验前 Before rain -0.196 1	2.882 1	3.320 1	1.834 4	4.549 3
	试验后 After rain -0.128 9	2.980 3	3.187 2	1.918 7	5.191 3

2.3 功能连通性变化特征

如前所述，简化水文曲线反映了模拟降雨开始后坡面水文连通性的动态变化过程。图 6 是基于模拟降雨试验实测径流数据反推得到的不同草带格局下的坡沟系统简化水文曲线。降雨初期，由于土壤下渗能力大于降雨强度，降雨全部通过地表渗入土壤中，用于土壤含水量增加，因此坡面无地表径流产生；随着降雨的持续进行，土壤含水量逐渐增大而下渗能力逐渐降低，当下渗能力小于降雨强度时，坡面开始产生地表径流且时段径流量随着下渗能力的减少而逐渐增大；当土壤含水量达到饱和和含水量后，下渗率趋于稳定，此后时段径流量也趋于稳定<sup>[27]</sup>。土壤侵蚀过程通常伴随有地形地貌动态变化过程<sup>[28]</sup>，由此造成的地表填注量的动态变化致使径流系数在后续降雨中呈波动性变化。

图 6 中的简化水文曲线越靠近 Y 轴，则说明在其他条件相同情况下到达坡沟系统出口处的水量就越多，即连通性越好。不同草带格局下坡沟系统水文连通性大小

顺序依次为：格局 A > 格局 B > 格局 C > 格局 D。在产流稳定期，格局 C 和格局 D 的径流系数为 0.4~0.6，而格局 A、格局 B 的径流系数分别为 0.6~0.7 和 0.8~0.9，因此在降雨后期格局 B 的坡沟系统有更多的降雨形成径流，而坡面入渗水量和地表填注水量较少。

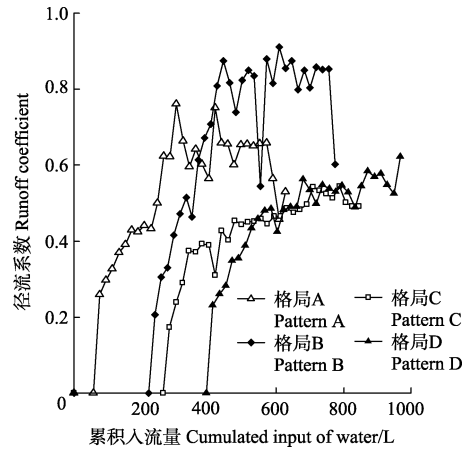


图 6 不同草带格局下坡沟系统简化水文曲线  
Fig.6 Simplified hydrograph of slope-gully system under different grass strip patterns

如前所述，相对地表连接函数表征了径流系数随累积蓄积量的变化情况。图 7 是基于模拟降雨试验实测径流数据反推得到的不同草带格局下坡沟系统相对地表连接函数变化过程线。从图 7 中可以看出，不同草带格局下坡沟系统相对地表连接函数变化过程线的形状和趋势与图 6 中的简化水文曲线相似，即在降雨开始阶段，大部分的降雨用于地表蓄积；随着降雨的持续进行，用于地表蓄积的水量逐渐减少，而时段径流系数相应地逐渐增大并时段径流系数和时段地表蓄积量分别趋于一个相对稳定的数值。

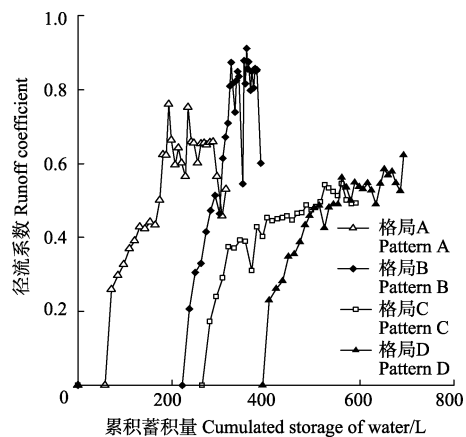


图 7 不同草带格局相对地表连接函数图  
Fig.7 Variation of derived relative surface connection functions under different grass strip patterns

根据试验数据分析结果，降雨结束时格局 A、格局 B、格局 C 和格局 D 的坡沟系统累积地表蓄积量分别占累积入流量的 50.18%、46.13%、70.01%、71.57%；同时，格局 C 和格局 D 对于降雨的地表蓄积作用强于格局 A 和格

局 B, 即格局 A 和格局 B 的坡沟系统水文功能连通性要好于格局 C 和格局 D。分析其原因在于: 分别位于坡面的中下部、下部的格局 C 和格局 D 对上方径流的减速、消能作用比较明显, 导致上方径流在坡面上的入渗量总体增大; 分别位于坡面的中上部、中部的格局 A 和格局 B 对上方径流的阻挡作用明显低于格局 C 和格局 D。

### 3 讨论

目前, 国内外学者开展了许多有关植被格局对坡沟系统产流产沙过程及径流能量的影响研究, 并取得了丰硕的研究成果<sup>[15,23,26,29-31]</sup>, 而有关植被布设位置对坡沟系统水文连通性的影响研究较为少见。本文采用室内模拟降雨试验对比研究了坡中上、坡中、坡中下、坡下 4 种植被布设位置对坡沟系统水文连通性的影响, 研究结果表明: 在 4 种植被布设位置中, 坡下布设植被的坡面产流时间最长、功能连通性最差, 对坡沟系统水文连通性的影响最大, 即与其他布置位置相比, 坡下布设植被使得坡沟系统径流汇集连通过程受阻最严重, 地表蓄积的水量最多, 保水效益最好, 该成果与程圣东等<sup>[23]</sup>进行的植被格局对坡沟系统蓄水效益试验结论相同。简化水文曲线是累积入流量与径流系数的函数关系图, 与时间-径流量图相比增加了产流前的系统入流量, 更直观地展现了整个降雨过程中径流变化过程以及水量分配; 相对地表连接函数是累积蓄积量与径流系数关系图, 是体现水文连通过程的指标, 在产流稳定期点密度也反映出径流量大小。基于室内模拟降雨试验, 本研究经过结构和功能连通性计算度量出的结果, 与游珍等<sup>[32]</sup>和夏军等<sup>[33]</sup>采用产流产沙观测法在野外小区进行不同植被布设模拟降雨试验结果一致。

径流形成过程是一种受到降水、地形地貌、土壤性质、植被状况等多因素综合影响的物理过程<sup>[27,29-35]</sup>, 涉及地表径流与土壤入渗的分配, 与前期土壤含水量、土壤饱和和导水率等关系密切。降雨过程中土壤含水量不同, 水分入渗条件也会发生显著变化, 进而对降雨量分配结果产生影响, 坡面径流、壤中流的汇集连通等也会随之改变。受试验观测手段和精度等限制, 本研究只利用坡面出口实测径流过程分析了不同植被布设位置对坡沟系统水文连通性的影响。在以后的研究中, 应通过增加土壤含水量和坡面沿程径流观测, 开展模拟降雨条件下坡面径流形成过程和径流三维连通特性的研究。

### 4 结论

本文采用降雨强度为 1.5 mm/min 的室内模拟降雨试验对比研究了坡中上、坡中、坡中下、坡下四种植被布设位置对坡沟系统水文连通性的影响, 主要结论如下:

1) 不同植被布设位置对坡沟系统水文连通过程的影响存在较大差异。在相同降雨条件下, 植被布设位置越靠近沟坡, 则坡沟系统的初始产流时间就越长; 与中坡位和中上坡位相比, 植被布设在坡中下位和下坡位时, 坡沟系统的总径流量较小, 对坡面径流汇集连通的影响程度较大。

2) 比其他植被布设位置相比, 中上坡位布设植被的坡沟系统有较好的水文结构连通性, 且降雨后的地形更利于坡面径流的水文汇集连通, 同时降雨后的坡沟系统地形湿度指数均值比降雨前减少了 10.59%, 减少幅度最大, 也更利于产流; 不同草带布设位置下坡沟系统地形收敛指数分布类似于正态分布而地形湿度指数分布符合正偏态分布。

3) 在相同降雨条件下, 植被布设位置越靠近坡顶, 则坡沟系统的水文功能连通性越好, 但对降水的地面蓄积能力越差; 在本模拟降雨试验中, 中下坡位和下坡位布设植被的坡沟系统地表蓄积量约占总降雨量的 70%, 而中上坡位和中坡位布设植被仅约占 50%。

### [参 考 文 献]

- [1] Ali G A, Roy A G. Revisiting hydrologic sampling strategies for an accurate assessment of hydrologic connectivity in humid temperate systems[J]. *Geography Compass*, 2009, 3(1): 350-374.
- [2] Bracken L J, Croke J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(13): 1749-1763.
- [3] Fryirs K A, Brierley G J, Preston N J, et al. Buffers, barriers and blankets: the (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades[J]. *Catena*, 2007, 70: 49-67.
- [4] Meerkerk A L, Wesemael B van, Bellin N. Application of connectivity theory to model the impact of terrace failure on runoff in semi-arid catchments[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23: 2792-2803.
- [5] Antoine M, Javaux M, Bièdiers C. What indicators can capture runoff-relevant connectivity properties of the micro-topography at the plot scale?[J]. *Advances in Water Resources*, 2009, 32(8): 1297-1310.
- [6] Appels W M, Bogaart P W, Sjoerd E A T M van der Zee. Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 493-504.
- [7] 夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26-31.  
Xia Jun, Gao Yang, Zuo Qiting, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 26-31. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李宗礼, 李原园, 王中根, 等. 河湖水系连通研究: 概念框架[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 513-522.  
Li Zongli, Li Yuanyuan, Wang Zhonggen, et al. Research on interconnected river system network: conceptual framework[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 513-522. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李宗礼, 郝秀平, 王中根, 等. 河湖水系连通分类体系探讨[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(11): 1975-1982.  
Li Zongli, Hao Xiuping, Wang Zhonggen, et al. Exploration on classification of interconnected river system network[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(11): 1975-1982. (in Chinese with English abstract)
- [10] 夏敏, 周震, 赵海霞. 基于多指标综合的巢湖环湖区水系连通性评价[J]. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(1): 73-77.  
Xia Min, Zhou Zhen, Zhao Haixia. Evaluation of water system connectivity of the district around Chaohu lake based on comprehensive index[J]. *Geography and Geo-Information*

- Science, 2017, 33(1): 73—77. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵进勇, 董哲仁, 杨晓敏, 等. 基于图论边连通度的平原水网区水系连通性定量评价[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(5): 1—6.  
Zhao Jinyong, Dong Zheren, Yang Xiaomin, et al. Connectivity evaluation technology for plain river network regions based on edge connectivity from graph theory[J]. Journal of Hydroecology. 2017, 38(5): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [12] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586—594.  
Gao Changjun, Gao Xiaocui, Jia Peng. Summary comments on hydrologic connectivity[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2017, 23(3): 586—594. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王盛萍, 姚安坤, 赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 526—533.  
Wang Shengping, Yao Ankun, Zhao Xiaochan. Analyzing hydrological connectivity for a slope-surface on the basis of rainfall simulation experiment[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 526—533. (in Chinese with English abstract)
- [14] 曹梓豪, 赵清贺, 左宪禹, 等. 基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3). <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201803.014>.  
Cao Zihao, Zhao Qinghe, Zuo Xianyu, et al. Optimizing vegetation pattern for the riparian buffer zone along the lower Yellow River based on slope hydrological connectivity[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3). <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.201803.014>. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 236—240.  
Xiao Peiqing, Zheng Fenli, Yao Wenyi. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gully slope system[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 236—240. (in Chinese with English abstract)
- [16] 高建恩, 杨世伟, 吴普特, 等. 水力侵蚀调控物理模拟试验相似律的初步确定[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 27—31.  
Gao Jian'en, Yang Shiwei, Wu Pute, et al. Preliminary study on similitude law in simulative experiment for controlling hydraulic erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 22(1): 27—31. (in Chinese with English abstract)
- [17] 魏霞, 李占斌, 李勋贵. 黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 108—113.  
Wei Xia, Li Zhanbin, Li Xungui. Research progress on soil erosion of slope-gully systems in the Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(1): 108—113. (in Chinese with English abstract)
- [18] Jia Xiaoxu, Shao Mangan, Zhu Yuanjun, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 113—122.
- [19] 韩鹏, 李秀霞. 黄河流域土壤侵蚀及植被水土保持效益研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(2): 181—190.  
Han Peng, Li Xiuxia. Study on soil erosion and vegetation effect on soil conservation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2008, 16(2): 181—190. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. 地理学报, 1983, 38(4): 416—425.  
Zhang Hanxiong. The characteristic of hard rain and its distribution over the Losses Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 1983, 38(4): 416—425. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 1—5.  
Zhou Peihua, Wang Zhanli. A study on rainstorm causing soil erosion in the loess plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1992, 6(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [22] 唐辉, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 127—133.  
Tang Hui, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Surface micro topography quantification and its relationship with runoff and sediment under simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(24): 127—133. (in Chinese with English abstract)
- [23] 程圣东, 李鹏, 李聪, 等. 降雨-植被格局耦合作用对坡沟系统水沙特征影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 230—241.  
Cheng Shengdong, Li Peng, Li Cong, et al. Coupling effect of rainfall-vegetation pattern on runoff and sediment characteristics in slope-gully system[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(2): 230—241. (in Chinese with English abstract)
- [24] Kiss Richard. Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations[J]. Journal of Hungarian Geomathematics, 2004, 2: 16—29
- [25] 张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 116—123.  
Zhang Caixia, Yang Qinke, Li Rui. Advancement in topographic wetness index and its application[J]. Progress in Geography, 2005, 24(6): 116—123. (in Chinese with English abstract)
- [26] 屈丽琴, 雷廷武, 赵军, 等. 室内小流域降雨产流过程试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 25—30.  
Qu Liqin, Lei Tingwu, Zhao Jun, et al. Laboratory experiments of runoff processes in small watershed under simulated rainfall [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 25—30. (in Chinese with English abstract)
- [27] 宋孝玉, 马细霞. 工程水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009.
- [28] 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[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 48—56.  
Wu Shufang, Liu Zhenghong, Huo Yunyun, et al. Development of rill erosion on loess slope and its simulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 48—56. (in Chinese with English abstract)
- [29] 魏霞, 李勋贵, 李占斌, 等. 黄土高原坡沟系统径流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 19—24.  
Wei Xia, Li Xungui, Li Zhanbin, et al. Experiments on hydraulic characteristics of runoff in slope-gully systems in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 19—24. (in Chinese with English abstract)
- [30] 丁文峰, 李勉. 不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的实验[J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1870—1878.

- Ding Wenfeng, Li Mian. Experimental study on the effect of slope vegetation distribution variation on runoff and sediment yield in slope-gully system[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(10): 1870–1878. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王玲玲, 姚文艺, 王文龙, 等. 黄丘区坡沟系统不同时间尺度下的侵蚀产沙特征[J]. *水利学报*, 2013, 44(11): 1347–1351.
- Wang Lingling, Yao Wenyi, Wang Wenlong, et al. Characteristics of soil erosion and sediment yield of hilly-gully system at different temporal scale in the loess region[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(11): 1347–1351. (in Chinese with English abstract)
- [32] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 坡面植被分布对降雨侵蚀的影响研究[J]. *泥沙研究*, 2005(6): 40–43.
- You Zhen, Li Zhanbin, Jiang Qingfeng. Study on the effect of vegetation patterns on the slope on the rainfall erosion[J]. *Journal of Sediment Research*, 2005(6): 40–43. (in Chinese with English abstract)
- [33] 夏军, 乔云峰, 宋献方, 等. 岔巴沟流域不同下垫面对降雨径流关系影响规律分析[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 70–76.
- Xia Jun, Qiao Yunfeng, Song Xianfang, et al. Analysis about effect rules of underlying surface change to the relationship between rainfall and runoff in the Chabagou catchment[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 70–76. (in Chinese with English abstract)
- [34] 葛基金, 杨加智, 詹美礼, 等. 坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(2): 101–104.
- Ge Jinjin, Yang Jiazhi, Zhan Meili, et al. Experimental study on influence of slope and rainfall intensity on surface erosion and sediment yield[J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(2): 101–104. (in Chinese with English abstract)
- [35] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 229–234.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study of critical flow energy for slope erosion under the influence of vegetation cover[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 229–234. (in Chinese with English abstract)

## Effect of different positions of grass strips on hydrological connectivity in slope-gully system

Ma Yongyong<sup>1</sup>, Li Zhanbin<sup>1,2</sup>, Ren Zongping<sup>1\*</sup>, Li Peng<sup>1</sup>, Lu Kexin<sup>1</sup>, Li Cong<sup>3</sup>, Tang Shanshan<sup>1</sup>, Wang Tian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, 712100, China;

3. Henan Yellow River Hydrological Survey and Design Institute, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** In order to investigate the effects of different slope grass strips patterns on hydrological connectivity of the slope-gully system, we selected topographic convergence index and topographic wetness index as structural connectivity indicators, and the simplified hydrograph and derived relative surface connection function as functional connectivity indicators which were used to analyze the hydrological connectivity of groove system in different grass strip patterns (upper, middle, lower and foot slopes). In this paper, we used artificial simulated rainfall experiment which was conducted in the State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China at Xi'an University of Technology from July to August 2014. According to the loess plateau typical geomorphic features design indoor slope gully system model, the model for steel soil bin, groove width was 1 m, including Liang Mao slope gradient of 12°, slope 8 m long; groove was 25° slope degree, slope length 5 m. Liang Mao slope and gully slope ratio was roughly control in 1.6:1.0, representing the proportion of slope gully loess plateau region. The experimental rainfall intensity was set at 1.5 mm/min, and the rainfall space was evenly distributed to more than 80% before the experiment began. We started to count the time after the rainfall was produced. All the muddy water samples were collected in every minute to calculate the runoff volume per minute. After 30 minutes of runoff, the rainfall experiment stopped. The results showed that different grass strip patterns had different influence on the connection process of slope ditch system. The closer to gully the grass strip was located, the longer the initial runoff time was. The total runoff was small in the grass strip layout in the middle and lower slope position. The lower slope and the foot slope had great influence on the runoff collection. The structural connectivity of grass strip was arranged on the placement of the middle and upper slopes which were superior to that of other positions, and were more conducive to the connection of water system after rainfall. The distribution of topographic convergence index was similar to normal distribution, while the distribution of the terrain moisture index was in line with the positively skewed distribution. The topography of the grass strip position which was arranged on the placement of the middle and upper slope was more conducive to the confluence than other patterns. In the middle and upper slope, the average topographic wetness index of the grass strips after rainfall decreased by 10.59%. The closer the grass strip was to the top of the slope, the better the functional connectivity was, but the saving capacity of precipitation was poor. Compared with other patterns, the grass strip in the upper slope needed less water to produce flow and the functional connectivity was the best. When the rainfall stopped, there were about 70% of the total rainfall was used for saving with the grass strip laid in the lower and foot slope, while the one located in the middle and upper parts were only 50%. This study can provide reference for the prevention and treatment of slope gully in the Loess Plateau, China.

**Keywords:** hydrology; runoff; erosion; structural connectivity; functional connectivity; topographic convergence index; topographic wetness index