

DOI: 10.11766/trxb201803200612

黄河下游河岸坡面产流产沙特征及其与汇流路径长度关系*

曹梓豪^{1, 2, 3} 赵清贺^{1, 2†} 左宪禹⁴ 丁圣彦^{1, 2} 张祎帆^{1, 2} 徐珊珊^{1, 2}
任嘉衍^{1, 2}

(1 河南大学环境与规划学院, 河南开封 475004)

(2 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南开封 475004)

(3 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

(4 河南大学数据与知识工程研究所, 河南开封 475004)

摘要 植被和地形是影响坡面侵蚀过程的重要因子, 探讨两者交互作用下坡面产流产沙和汇流特征对深入理解坡面侵蚀过程和水土保持具有重要意义。采用模拟降雨试验, 探讨不同降雨强度 (54和90 mm·h⁻¹)、坡度 (5°、10°、15°、20°) 和植被盖度 (0%、15%、30%) 下黄河下游河岸坡面的侵蚀产流、产沙特征, 并基于水文连通性模型——汇流路径长度指数 (Flowlength) 探究植被和地形在土壤侵蚀过程中的作用以及汇流长度与产流产沙特征的关系。结果表明: 54和90 mm·h⁻¹雨强下, 不同植被盖度对径流流速均有减缓作用, 而90 mm·h⁻¹雨强下30%盖度的减缓作用较为明显; 径流总量和径流深随坡度和植被盖度增加而逐渐减少的变化基本一致, 随雨强增加, 受坡度影响逐渐增大。54 mm·h⁻¹雨强下, 当坡度 < 15° 时, 侵蚀产沙量随坡度增加增幅较小; 当坡度 > 15° 后, 侵蚀产沙量增幅较大。90 mm·h⁻¹雨强下, 当坡度 < 15° 时, 侵蚀产沙量随坡度增加而增加; 当坡度 > 15° 后, 其随坡度增加而减少。相关分析表明, 坡度对产沙量、产流量和径流深均具有显著影响, 显著水平分别为 $P < 0.001$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$; 植被盖度仅对平均流速影响显著 ($P < 0.05$)。但植被盖度对汇流路径长度影响极为显著 ($P < 0.001$), 裸坡的汇流路径长度明显大于植被覆盖坡面; 坡面产流产沙量随汇流路径长度的增加基本呈增加趋势。在坡度和植被盖度交互作用下, 坡面产流所引发的土壤侵蚀效应受坡度影响较为明显, 而在汇流过程所引发的土壤侵蚀效应中, 植被的影响明显大于坡度。

关键词 河岸坡面; 产流产沙; 汇流路径长度; 水文连通性; 黄河下游

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

作为一种特定的、受多种因素相互作用的水土流失形式, 坡面侵蚀受植被盖度和坡度影响显著^[1]。大量研究表明, 植被盖度与径流量、土壤流失量之间存在强相关性, 径流量和产沙量均随

* 国家自然科学基金项目 (41301197)、河南省高等学校重点科研项目 (18A170004) 和河南省高校科技创新团队支持计划项目 (16IRTSTHN012) 资助 Supported by the National Natural Sciences Foundation of China (No. 41301197), the Colleges and Universities Key Scientific Research Projects of Henan Province (No. 18A170004), and the Program for Innovative Research Team (in Science and Technology) in University of Henan Province (No. 16IRTSTHN012)

† 通讯作者, Corresponding author, E-mail: zhaqinghe@henu.edu.cn

作者简介: 曹梓豪 (1992—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事流域生态水文过程研究。E-mail: caozihao@163.com

收稿日期: 2018-03-20; 收到修改稿日期: 2018-05-07; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-05-30

植被盖度增加呈不同程度减小趋势^[2-6]；坡度对坡面侵蚀的演变发展过程和侵蚀强度起着重要作用，其大小在一定程度上决定了径流的冲刷与搬运能力^[7-9]。然而，现有研究大多局限于分析单因子在产流和产沙过程中的影响^[4-6, 8-9]，缺乏对植被和地形的共同作用及其对产流、产沙和汇流特性影响的深入研究^[10-11]。坡面水文连通性，反映水文循环各要素之间物质、能量以及生物的水介导运输^[12]，是理解流域或坡面汇流机制的有效途径^[13-14]。由植被斑块及其间隙的裸土在空间上形成的具有特定生态系统功能的源汇斑块镶嵌结构所引发的水文连通性，直接影响着坡面的侵蚀产沙状况。如，Ludwig等^[15]采用径流和泥沙源汇间的连通性反映小区或坡面植被覆盖阻滞水土的能力；Liu等^[16]通过观测试验，分析了黄土高原羊圈沟小流域不同坡面植被空间配置下水文连通性产生的土壤侵蚀效应；Mayor等^[17]综合考虑植被空间分布和地形，探讨了干旱区径流在源汇间的连通性对土壤侵蚀的影响。

河岸带是河流-陆地生态系统之间重要的生态过渡区，具有独特的生态系统结构和服务功能，尤其是河岸带的地形和植被，在拦截、过滤、沉积上坡地表径流与泥沙、稳固河岸、防止河岸冲刷等方面具有重要作用^[18]。因此，开展河岸带水土保持效应研究对区域的水沙调控具有重要意义。然而，河岸坡面植被盖度以及源汇斑块镶嵌格局变化所引发的汇流路径长度、侵蚀产流产沙特征变化以及两者关系的研究有待深入，如何从植被和地形交互作用产生的汇流路径长度变化分析河岸带水土流失效应有待探讨^[14]。黄河下游地区作为我国重要粮食产地之一，受经济发展和农耕活动影响，河岸带开发利用程度较高，区域内植被斑块破碎化严重，河岸带水土保持功能面临严峻挑战。因此，本文通过在黄河下游河岸带坡面上开展野外模拟降雨试验，分析不同坡度和植被盖度下河岸坡面产流产沙特征的同时，引入水文连通性模型，基于汇流路径长度指数探究其与产流产沙之间的关系，以期为黄河下游河岸带水土保持功能评估和退化河岸带的恢复提供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究以黄河下游中牟段河岸带为对象，

试验设置于中牟县九堡村（34° 55′ 52′ N，114° 1′ 21′ E）附近的黄河南侧河岸坡面（图1）。黄河中牟河段上界与郑州市相连，下界与开封市郊相接，区内堤长31.37 km，河道宽窄不定，河势游荡多变；河岸带平均宽度2.07 km，平均高程83.5 m^[19]。该区为暖温带大陆性半湿润季风气候，年均气温约12~16℃，年均降水量约550~650 mm。该区降雨具有年际变化大，空间分布不均的特点，且近年来呈现有雨日减少、特大暴雨频率增加、旱涝灾害加剧的趋势^[20-21]。该区土壤受黄河洪水泛滥影响，多为黄河冲积物和洪积物，土层深厚，土壤质地主要为亚砂土和粉砂土^[21]；区内植被主要为杨树（*Populus*）、柳树（*Salix babylonica*）、混交人工林和河漫滩草地，林下草本植物主要为禾本科（Gramineae）、菊科（Compositae）、豆科（Leguminosae）和十字花科（Brassicaceae）等^[20]。

1.2 试验设计

本研究关注降雨在河岸坡面上的产流及汇流过程造成的土壤侵蚀效应。因此，在不考虑纵向上河道流水冲刷和下切影响的前提下，按中牟地区多年观测降雨量进行模拟降雨试验。根据中牟段河岸带坡度和植被覆盖情况，结合前期考察与研究^[11, 22-23]，本研究设置4个坡度（5°、10°、15°和20°）和3种盖度（0%、15%和30%）。根据坡度设置，在河岸带选择4个受人为破坏小且下垫面状况基本一致（表1）的自然坡面进行模拟降雨试验（各坡面间土壤含水量、土壤容重等均在一定范围内波动，无明显差异）。试验前先提取坡面植被盖度以保证与试验方案基本一致；有植被覆盖的试验结束后剪除植被，采用三维激光扫描系统（LRIS-3D）扫描坡面，提取地表微地形，之后进行裸坡面试验；最后将提取的植被盖度与地形数据在Matlab中进行用于评估水文连通性的汇流路径长度指数计算。

1.3 人工降雨模拟试验

首先，在河岸带上测量选取与试验预设坡度一致的坡面；其次，布设试验小区（1 m × 3 m），四周用钢板围合，小区底端安置与小区等宽、底面紧贴地面集流槽，在集流槽下方出口挖取直径与小区等宽的圆坑用以放置收集泥沙样品的集流桶；最后，在小区正上方架设降雨模拟器。为减少风对降雨影响，在降雨模拟器四周的三侧用防风布围合，只保留下风向或垂直风向一侧进行观察（图1a）。

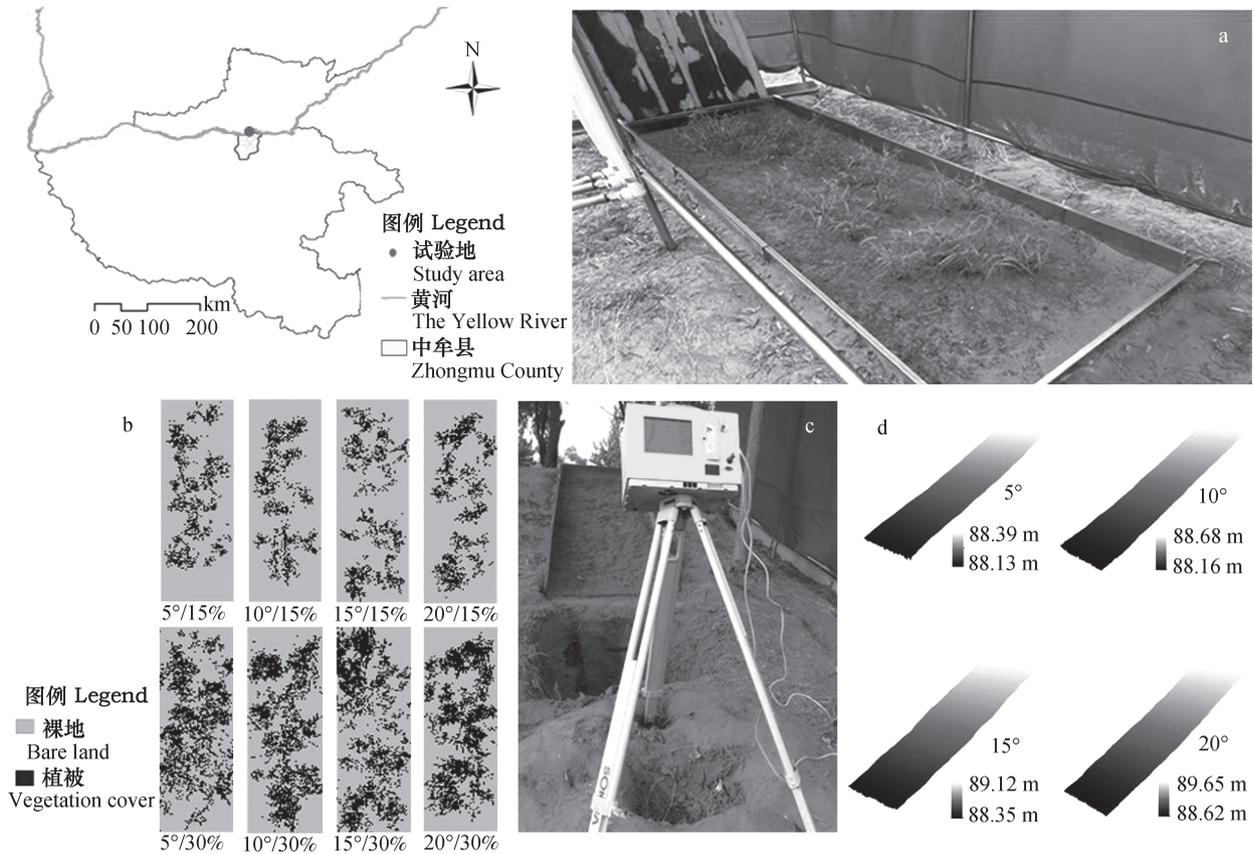


图1 研究区位置和试验小区

Fig. 1 Location of the study area and experiment plots

表1 下垫面状况

Table 1 Conditions of the underlying layer

坡度 Slope gradient / °	土壤含水量 Soil water content / %	土壤容重 Soil bulk density / (g·cm ⁻³)	粒径 Particle size / μm			主要植物 Main plant
			Dx (10)	Dx (50)	Dx (90)	
5	22	1.60	4.50	27.09	79.13	狗尾草
10	18	1.57	5.69	37.55	97.05	狗尾草
15	19	1.55	6.08	33.75	70.60	狗尾草
20	20	1.59	7.30	36.38	73.99	狗尾草

注：Dx (10)、Dx (50)、Dx (90) 分别表示一个样品的累计粒度分布百分数达到10%、50%和90%时所对应的粒径大小 Note: Dx (10), Dx (50) and Dx (90) stands for particle size of a sample with cumulative particle size distribution percentage reaching up to 10%, 50% and 90%, respectively

本研究采用下喷式人工降雨模拟器 (JLC-RY1) 模拟降雨, 设备有效降雨面积1.5 m × 3 m, 降雨高度2 m, 降雨均匀程度在85%以上。根据中牟地区降雨量, 经仪器校正、雨强大小和均匀度率定, 分别设置大 (90 mm·h⁻¹)、小 (54 mm·h⁻¹) 两个降雨强度, 依次进行不同坡度和植被盖度的试验。

为保证初始条件一致性, 试验前先用撒水器在试验小区内均匀撒水, 撒水量控制在土壤表面达到充分饱和但又未发生流的程度。降雨过程中接入稳压器 (SY-3000VA) 稳定电压至220 V使水泵输出功率稳定以保证试验稳定、测量数据可靠; 水箱始终处于满蓄状态以保证供水充足。试验过程中,

从产流开始计时,历时30 min,前5 min每隔1 min取1次径流泥沙样,后25 min每隔5 min取1次径流泥沙样,每场试验共收集10次样品;坡面流速测定采用高锰酸钾染色剂法,以相同时间间隔进行测量。

1.4 坡面植被、微地形提取

植被盖度提取:首先,在不扰动小区下垫面土壤情况下,对植物进行简单修剪,小区植物主要是河岸带自然生长的狗尾草(*Setaria viridis*);其次,借助相机(Canon SX60 HS)在小区正上方沿坡对小区进行拍照,利用Photoshop CS4软件处理照片,获取植被盖度(为保证提取精准,此过程重复多次直至获取的盖度与实际设定的盖度相比误差在0.5%之内);最后,在ArcGIS 10.2中对提取的植被盖度图像进行栅格化处理(分辨率0.01 m),如图1b所示。

地表微地形提取:首先,在不扰动表层土壤和破坏微地形的前提下剪除坡面植被;之后,将三维激光扫描系统放置在坡面正前方1.5 m处,采集坡面地形点云数据(精度达毫米级),依次完成对4个小区微地形的采集(图1c)。最后,基于ArcGIS 10.2将采集的点云集群按小区边界进行裁剪,提取内部有效点云数据生成高分辨率的DEM(分辨率0.01 m),如图1d所示。

1.5 数据处理

试验结束后,将收集的10次样本进行称量获取径流泥沙总重,之后静止24 h待泥沙沉淀后分离上层清液与泥沙,分别称取湿泥沙重量和上清液重量,最后在烘箱中(105 °C)将泥沙烘干(24 h)至恒重,称取泥沙干重,以此计算各时段总径流量和泥沙量。

在试验过程中,为减少人为操作对降雨和坡面的影响,径流深(h)根据径流量计算,公式如下:

$$h = \frac{q}{U} = \frac{Q}{U \cdot Bt} \quad (1)$$

式中, q 为单宽流量($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$); Q 为 t 时间内径流量(m^3); t 为径流取样间隔时间(min); U 为断面平均流速($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$); B 为过水断面宽度(m)。

流速的测量包含3个断面流速(顺坡向下,位

于1、2和3 m)和全程流速,最后将断面流速和全程流速取平均值乘以修正系数0.67^[24]作为坡面平均流速。

连通性指标汇流路径长度的计算过程见文献[17]。该指数假设裸土斑块作为径流和泥沙的“源”,植被斑块和地表洼地作为径流和泥沙的“汇”^[25]。根据坡面DEM,水流从坡面高处向低处汇流过程中,选用单一流向算法定义流道^[26]。其中,水流从一个栅格到另一栅格的流动只选择相邻最大落差方向,直至水流到达植被斑块或地表洼地,若最大落差方向存在多个,水流方向随机分配^[17]。此外,水流过程中地形的“汇”不同于植被斑块,其确定方法为:如果某一栅格的高程低于相邻所有栅格的高程,则此栅格就成为径流的“汇”。根据以上准则,在Matlab程序中完成对每个栅格汇流路径长度的计算。汇流路径长度指数作为所有栅格汇流路径长度的平均值,其值越高表明水文连通性发展越好,越有利于径流泥沙输移^[27]。

2 结果

2.1 坡面产流特征

图2表明,径流平均流速随雨强和坡度增大而增大,随植被盖度增加而减小;径流深受雨强和植被盖度影响与平均流速相同,而受坡度的影响则相反,随坡度增大而减小。随雨强增大,同一坡面裸坡和15%植被盖度间平均流速差异较小,15%和30%盖度间差异较大,植被覆盖坡面的径流深随坡度增加其呈线性下降的趋势逐渐明显。这与梁志权等^[28]的研究结果一致,即降雨强度的增加会使单位时间内进入坡面的水量增加,产生较大的坡面径流量,导致坡面径流流速随之增大;随坡度增加,较多的径流重力势能转化为沿坡面方向的动能,亦会导致径流流速增大,由此引发的较快径流流速减弱了坡面径流深。此外,雨强的增加减小了随坡度变化中裸坡和15%植被盖度间的径流流速差异,增加了15%和30%盖度间的差异。

径流深在 $54 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强下随坡度变化表现的曲线下降趋势以及在 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 雨强表现的线性下降趋势,说明小雨强下坡度对径流深影响不明显,只有在近似平地(5°)向有一定倾角坡度

(10°)变化中表现出坡度对径流深的影响,在之后有较大倾角的不同坡度间,径流深保持平缓,维持在5 mm左右;在大雨强下径流深随坡度增加逐渐减小,受坡度影响明显。坡度对径流的影响主要通过增大水体重力来加速径流、减少入渗实现^[29],而已有研究发现两者存在负相关^[6],表明坡面植被状况较差可导致径流流速加快、流量增加。

径流总量随坡度和植被盖度增加呈下降趋势,随雨强增加呈增加趋势。同一坡面不同植被盖度间径流总量差异随雨强增加逐渐增大。这与梁志权

等^[28]、余长洪等^[30]的研究结果相一致。随雨强的变化表明,小雨强下坡度对径流量影响不明显;大雨强下径流总量随坡度增加逐渐下降的同时在各坡度间存在较大差异,受坡度影响明显。此外,裸坡产生的径流总量在10°坡面偏低,这与10°坡面存在较多径流和泥沙容易汇集的洼地有关,与有植被覆盖(15%)时根茎对地表洼地的垫高、填充相比,径流和泥沙会相对减少;随植被盖度持续增加(30%),植被对降雨拦截、径流阻碍所造成的径流总量减少作用将明显大于洼地的汇集作用,结果导致30%植被盖度下径流总量最少。

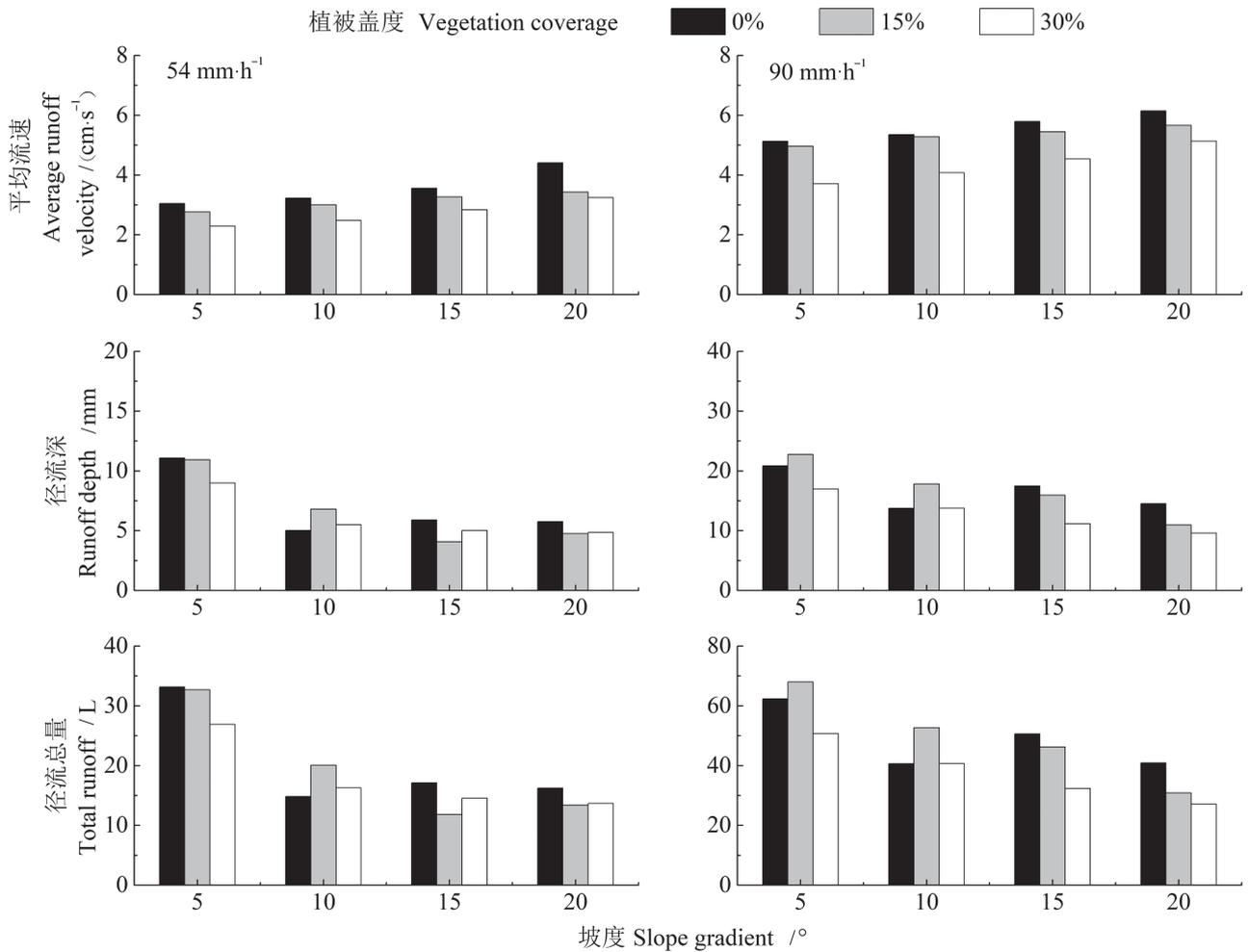


图2 不同坡度和植被盖度下产流特征

Fig. 2 Runoff characteristic related to slope gradient and vegetation coverage

2.2 坡面产沙特征

图3表明,不同雨强下侵蚀产沙量随植被盖度增加而减少,随坡度变化略有不同。54 mm·h⁻¹雨强下,侵蚀产沙量随坡度增加而增加,当坡度<15°时,其随坡度增加的增幅较小,当坡度>15°后增

幅逐渐变大。90 mm·h⁻¹雨强下,侵蚀产沙量随坡度呈先增加后降低趋势,其中当坡度<15°时,侵蚀产沙量随坡度增加而增加,当坡度>15°后其随坡度增加而逐渐减少。纵比来看,随雨强增加,同一坡面不同植被盖度间侵蚀产沙量差异增大。

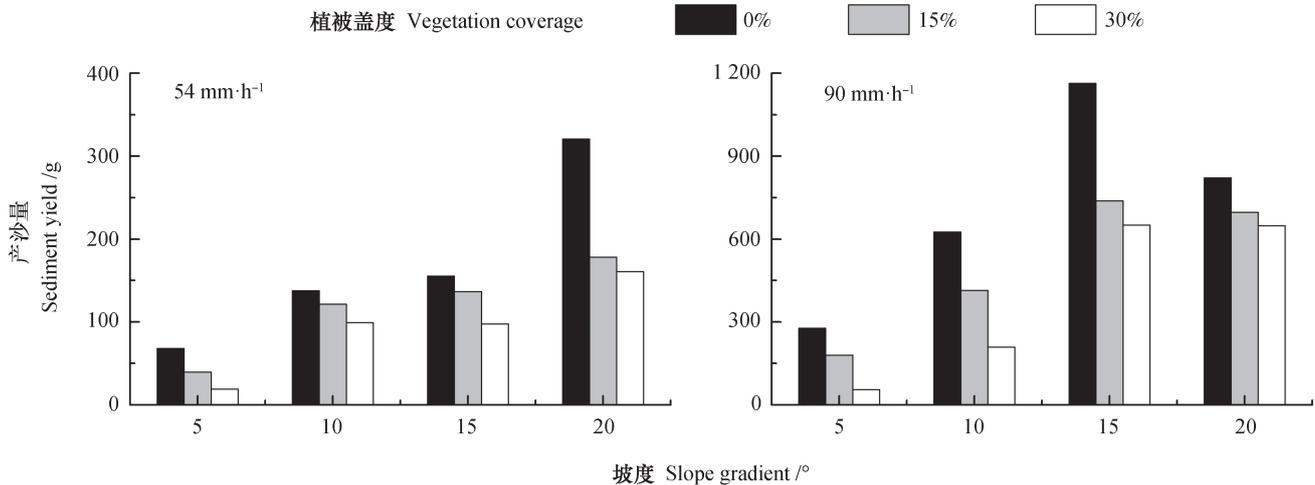


图3 不同坡度和植被盖度下侵蚀产沙特征

Fig. 3 Sediment yielding characteristic related to slope gradient and vegetation coverage

坡面产沙量受降雨侵蚀力和径流搬运能力影响^[28, 30]。随坡度增加,泥沙颗粒除受雨滴溅蚀、水流侵蚀影响外,受自身重力侵蚀影响逐渐增大,导致坡面泥沙稳定性降低,不稳定的坡面泥沙和流速较快的径流增加了植被的减流拦沙难度^[23],造成了不同植被盖度的侵蚀产沙量随坡度增加呈现增加趋势。在随坡度变化中,54 mm·h⁻¹雨强下的产沙量在<15°坡面上增幅较小,在>15°的坡面上增幅较大,可以看出当坡度<15°时,产沙量受坡度影响较小,当坡度>15°后受坡度影响增加,这与先前在黄河下游河岸缓冲带模拟径流冲刷试验所得结果基本一致^[23]。90 mm·h⁻¹雨强下,从产沙量随坡度增加呈现的较大变幅可以看出其受坡度影响明显增强。54和90 mm·h⁻¹雨强下侵蚀产沙量受坡度影响与径流相似,基本都表现出大雨强下受坡度影响较为明显特征。此外,河岸坡面在大坡度大雨强下出现雨滴击溅形成的洼地,洼地的存在截留了上坡来水来沙,减弱了坡面水文连通性,因而出现90 mm·h⁻¹雨强20°坡侵蚀产沙量减小的情况。

在本研究中,当坡度>15°后,两雨强下15%和30%植被盖度间产沙量差异随坡度增加逐渐减小,裸坡与植被覆盖坡面的差异逐渐增大,这与先前的研究结果“当坡面<15°时,侵蚀产沙主要受植被盖度影响,当坡面>15°后,侵蚀产沙受植被盖度影响明显减弱,受坡度影响增加”^[23]相契合。对于植被盖度,尽管坡面>15°后不同植被盖度抑制侵蚀产沙的作用逐渐减弱,但仍有一定效果,产沙量随着植被盖度增加逐渐减少。

2.3 坡面产流产沙特征与坡度和植被盖度的关系

坡度、植被盖度与产流产沙特征的相关性表明(表2),不同雨强下坡度对产沙量($P<0.001$)、产流量($P<0.01$)、径流深($P<0.01$)和平均流速($P<0.05$)均有显著影响,而植被盖度仅对平均流速有影响(小雨强和大雨强下显著性分别为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$)。总体而言,坡度对产流产沙特征的影响大于植被盖度的影响,这可能与本研究中植被盖度对产流产沙的抑制作用未达到最优有关。根据韩鹏和李秀霞^[22]在黄河流域的研究,当植被盖度超过45%时,再继续增加植被盖度以提升水土保持效益的作用并不明显,因此在小于45%植被盖度的黄河河岸坡面上,坡度对产流产沙的促进作用可能强于植被对产流产沙的抑制作用。

2.4 汇流路径长度对坡面产流产沙的影响

图4表明,裸坡的汇流路径长度随坡度增加逐渐降低,当坡度>10°后降幅较为明显,而有植被覆盖坡面的汇流路径长度随坡度增加基本保持平稳。汇流路径长度随植被盖度增加逐渐降低,其基本保持裸坡>15%植被盖度>30%植被盖度的趋势;其中,裸坡的汇流路径长度明显大于植被覆盖坡面的汇流路径长度,而有植被覆盖坡面在不同植被盖度间(15%和30%)汇流路径长度差异较小。

根据先前研究,坡度增大有助于坡面汇流路径长度增加、水文连通性增强^[27],但本研究中,裸坡的汇流路径长度随坡度的增加逐渐降低。分析认为,裸坡在一定强度的降雨作用下,雨滴击溅将增加地表粗糙度、改变微地形,形成不同程度的洼

表2 坡度和植被盖度与坡面侵蚀产沙的相关性

Table 2 Correlations between sediment yield and slope gradient and vegetation coverage

降雨强度 Rainfall intensity $/(mm \cdot h^{-1})$	因素 Factor	产流量 Runoff volume /L	产沙量 Sediment yield /g	平均流速 Average runoff velocity $/(cm \cdot s^{-1})$	径流深 Runoff depth /mm
54	坡度 Slope gradient	-0.799**	0.885***	0.756**	-0.734**
	植被盖度 Vegetation coverage	-0.207	-0.355	-0.621*	-0.207
90	坡度 Slope gradient	-0.756**	0.820***	0.648*	-0.713**
	植被盖度 Vegetation coverage	-0.325	-0.414	-0.710**	-0.384

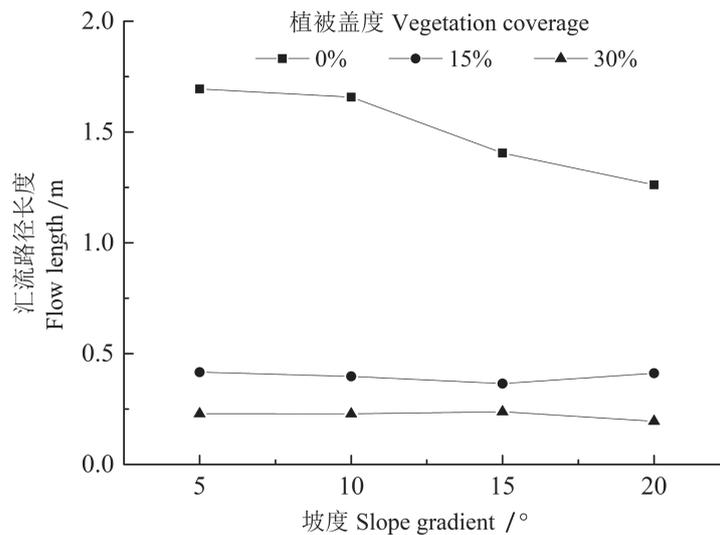
* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 

图4 不同坡度和植被盖度下的汇流路径长度

Fig. 4 Flowlengths related to slope gradient and vegetation coverage

地^[27]。随着坡度增加,洼地受径流侵蚀明显,对上坡来水来沙截留作用增强,从而造成坡面汇流受阻、水文连通性减弱。在植被坡面上,植被的存在减弱了降雨对地表的塑造^[31],因此相同植被盖度下4个坡面汇流路径长度无明显变化。随着植被盖度增加,汇流路径长度逐渐降低,坡面水文连通性发展受限。相关性分析进一步表明,植被盖度对汇流路径长度影响显著($P < 0.001$),坡面有无植被或植被覆盖程度是造成水文连通性差异的主要原因,只是这种差异在裸坡和植被坡面间较大,在不同盖度的植被坡面间较小。

根据上述结果,探究不同坡度和植被盖度所形成的汇流路径长度对坡面侵蚀产流产沙的影响。

从图5可以看出(y轴方向的标准差代表同一植被盖度下4个坡面间产流/产沙量的误差,x轴方向的标准差代表同一植被盖度下4个坡面间汇流路径长度的误差),在随汇流路径长度增加过程中,产流量增幅逐渐减小并趋于平缓,产沙量增幅虽有所减弱,但仍保持增加趋势;不同雨强下4个坡面的产流产沙量随汇流路径长度的增加基本呈增加趋势,表现出一定相关性。对比不同植被盖度发现,当植被盖度从30%减少至15%时,其产生的汇流路径长度增加,在此过程中不同雨强下产沙量均增幅明显,而产流量在大雨强下增幅明显,小雨强下增幅较小;当植被盖度从15%减少至0%时,其产生的汇流路径长度明显增加,此过程中产沙量增幅明显,

而产流量仍保持较小增幅。随汇流路径长度的增加,产流量趋于平稳的同时产沙量仍保持增加趋势,说明地表洼地和植被的存在虽然对水流及泥

沙运移有所阻碍,但随着径流和泥沙源汇间汇流路径长度的发展,坡面径流的潜在携沙能力逐渐增强。

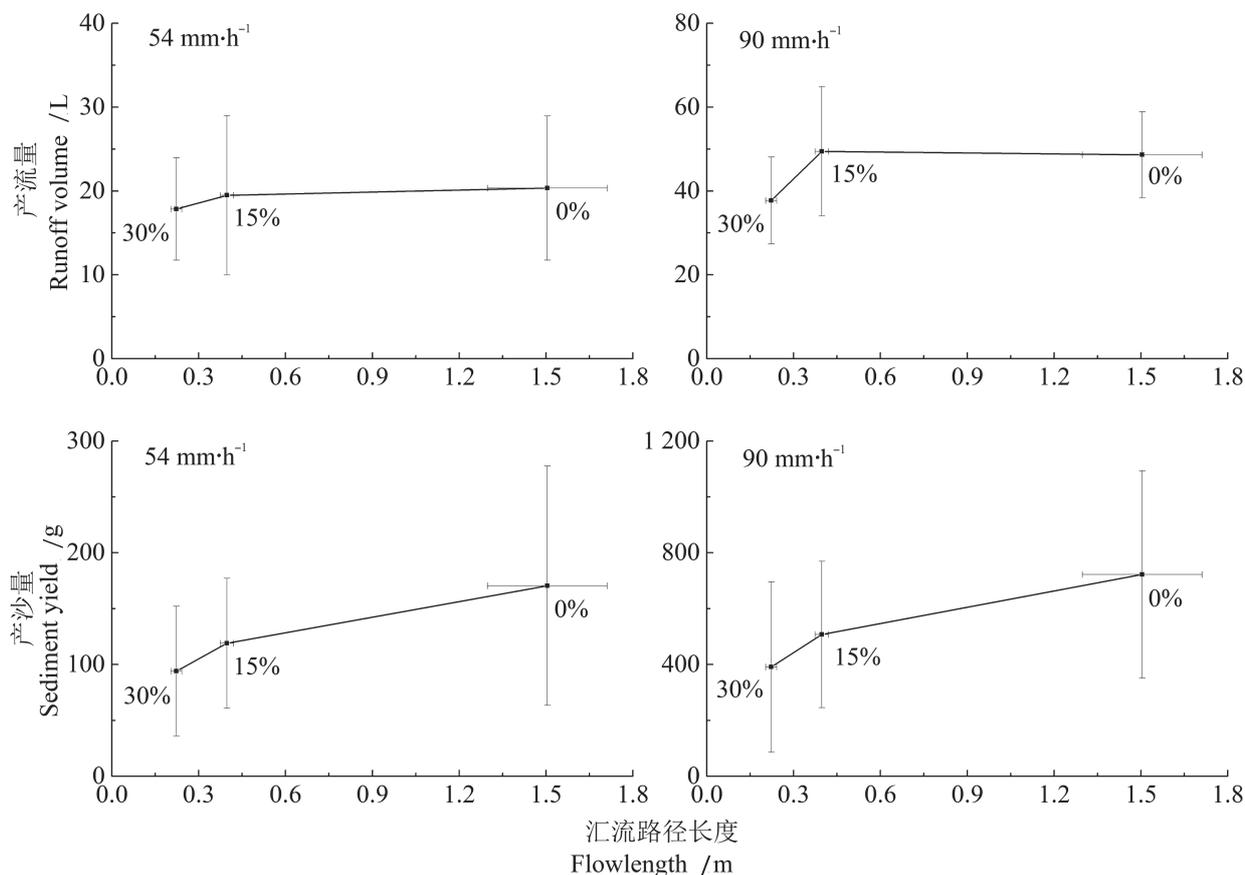


图5 汇流路径长度与产流和产沙之间关系

Fig. 5 Relationships between flow length and runoff and sediment yielding

3 讨论

本文以河岸自然坡面为研究对象开展植被覆盖和地形特征对侵蚀产沙影响研究。从以往研究来看,研究对象大多集中在非河岸自然坡面或人为装载土槽坡面^[6]。人为装载土槽坡面的研究变量以及试验中受外界环境的影响均易于控制,可在理想状态下全面地揭示不同类型土壤的侵蚀过程、机理等规律,研究结果可为各地区的土壤侵蚀防治提供明确的理论指导^[28, 31]。但是,人为装载土槽坡面试验对土壤物理结构的破坏以及对原状土的复原程度,对试验结果的影响仍不可忽视。与人为装载土槽坡面相比,野外自然坡面,虽然在试验中受所处环境以及不受控自然因素等多种因素的干扰从而导致试验所得数据可能并非完全理想,但却是自然情

况的真实反映,研究结果可为区域土壤侵蚀调控、治理提供较强现实参考^[6, 8]。

在河岸区域和非河岸区域坡面土壤侵蚀研究中,即使其涉及的坡面均属于自然坡面范畴,但由于两者属于不同景观单元或类型,在流域中发挥着不同的景观功能,因此,不同因子在坡面土壤侵蚀中的作用、由此产生的坡面产流产沙特征以及相应的水土保持功能可能存在一些异同。如针对黑土区、黄土区自然坡面的相关研究指出,坡度对侵蚀产沙的影响与雨强存在一定关系,雨强增加缩短了产流产沙历时,增强了坡度在产流产沙中的作用^[8, 32];产流产沙整体随坡度变化复杂,在 $12^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 间出现侵蚀效应临界坡度。这些针对非河岸区域的研究与本研究针对河岸坡面的结果基本一致。另外,无论河岸还是非河岸自然坡面,

地表植被的存在都影响坡面径流量和流速。朱冰冰等^[6]、韩鹏和李秀霞^[22]分别在宁夏固原、黄河流域植被对非河岸自然坡面的土壤侵蚀影响研究得出的结果与本研究得出的植被对河岸坡面产流产沙影响的结果基本相符合。但由于河岸坡面和非河岸自然坡面在流域中所处位置不同，致使坡面植被的水土保持功能存在差异。如，虽坡面承雨量相同，但河岸坡面较大的上坡来水量以及径流中较大的泥沙含量和颗粒大小，导致其与非河岸坡面的侵蚀过程存在明显差异；河岸坡面植被类型、盖度、土壤含水量等均与非河岸区域存在明显差异，亦会导致其土壤侵蚀过程或水土保持效益有别于非河岸区域。另外，植被对不同坡面产流产沙的影响较为复杂，且认知尚未形成统一。如朱冰冰等^[6]在自然坡面的研究表明，植被盖度 $<60\%$ 时，产流产沙随植被盖度增加逐渐降低，当植被盖度 $>80\%$ 时，继续增加植被对产流产沙抑制效果不再明显；韩鹏和李秀霞^[22]在黄河流域坡面的研究表明，当植被盖度达到 45% 时，其对水沙调控作用趋于稳定。本研究表明，黄河下游河岸坡面的坡度和植被盖度对土壤侵蚀的影响存在坡度界限，此界限并非以往的临界坡度，而是两个因素（坡度、植被盖度）两种作用（产流、汇流）在土壤侵蚀中主导作用的变化，这有别于大多自然坡面土壤侵蚀特征研究，研究结果对自然坡面产流产沙特征起到了一定实证和补充作用。

4 结 论

黄河下游河岸坡面产流特征在 54 和 $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下变化基本一致，其随坡度和植被盖度增加逐渐减少，随雨强增加受坡度影响逐渐增大。坡面不同植被盖度对两雨强下径流流速均有减缓作用， $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下 30% 盖度的减缓作用更为明显。 $54\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下，坡面产沙量在 $<15^\circ$ 坡面受坡度影响较小，在 $>15^\circ$ 坡面受坡度影响增加； $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 雨强下，产沙量随坡度呈先增加后降低趋势，受坡度影响明显增强。在坡度和植被盖度对河岸坡面产流产沙过程影响中，坡度对两雨强下产流量、产沙量、径流深等均有显著影响，而植被盖度的影响较小；但在其对坡面汇流过程影响中，植被盖度对汇流长度的影响显著，裸坡的汇流路径长

度明显大于植被覆盖坡面。在地形和植被交互作用下，产流产沙量随汇流路径长度的增加基本呈增加趋势，坡面产流所引发的土壤侵蚀效应受坡度影响较为明显，而在汇流过程所引发的土壤侵蚀效应中，植被的影响明显大于坡度。

参 考 文 献

- [1] 和继军, 蔡强国, 刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响. 应用生态学报, 2012, 23 (5) : 1263—1268
He J J, Cai Q G, Liu S B. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (5) : 1263—1268
- [2] Gurnell A. Plants as river system engineers. Earth Surface Processes & Landforms, 2014, 39 (1) : 4—25
- [3] Imeson A C, Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, 104 (2) : 333—342
- [4] Garcia-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Marques M J, et al. Direct and indirect effects of Mediterranean vegetation on runoff and soil loss. European Journal of Soil Science, 2010, 61 (2) : 174—185
- [5] Vásquez Méndez R, Venturaramos E, Oleschko K, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. Catena, 2010, 80 (3) : 162—169
- [6] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究. 土壤学报, 2010, 47 (3) : 401—407
Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (3) : 401—407
- [7] Sirjani E, Mahmoodabadi M. Effects of sheet flow rate and slope gradient on sediment load. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7 (1) : 203—210
- [8] 李洪丽, 韩兴, 张志丹, 等. 东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究. 水土保持学报, 2013, 27 (4) : 49—52
Li H L, Han X, Zhang Z D, et al. Research on runoff and erosion sediment under simulate rainfall conditions of black soil in northeast China (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (4) :

- 49—52
- [9] Zhao Q, Li D, Zhuo M, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29 (2) : 609—621
- [10] 秦伟, 曹文洪, 左长清. 植被与地形对侵蚀产沙耦合影响研究评述. *泥沙研究*, 2015 (3) : 74—80
Qin W, Cao W H, Zuo C Q. Review on the coupling influences of vegetation and topography to soil erosion and sediment yield (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2015 (3) : 74—80
- [11] 张祎帆, 赵清贺, 丁圣彦, 等. 坡度和植被盖度对粉砂质河岸带坡面流侵蚀水动力特征的影响. *应用生态学报*, 2017, 28 (8) : 2488—2498
Zhang Y F, Zhao Q H, Ding S Y, et al. Effects of slope gradient and vegetation coverage on hydrodynamic characteristics of overland flow on silty riparian slope (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (8) : 2488—2498
- [12] Freeman M C, Pringle C M, Jackson C R. Hydrologic connectivity and the contribution of stream headwaters to ecological integrity at regional scales. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43 (1) : 5—14
- [13] Bracken L J, Jacky C. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. *Hydrological Processes*, 2010, 21 (13) : 1749—1763
- [14] 高常军, 高晓翠, 贾朋. 水文连通性研究进展. *应用与环境生物学报*, 2017 (3) : 586—594
Gao C J, Gao X C, Jia P. Summary comments on hydrologic connectivity (In Chinese). *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2017 (3) : 586—594
- [15] Ludwig J A, Eager R W, Bastin G N, et al. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing. *Landscape Ecology*, 2002, 17 (2) : 157—171
- [16] Liu Y, Fu B J, Lü Y H, et al. Linking vegetation cover patterns to hydrological responses using two process-based pattern indices at the plot scale. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56 (11) : 1888—1898
- [17] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water Resources Research*, 2008, 44 (10) : 2183—2188
- [18] 韩路, 王海珍, 于军. 河岸带生态学研究进展与展望. *生态环境学报*, 2013, 22 (5) : 879—886
Han L, Wang H Z, Yu J. Research progress and prospects on riparian zone ecology (In Chinese). *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (5) : 879—886
- [19] 耿思敏, 严登华, 罗先香, 等. 变化环境下黄河中下游洪涝灾害发展新趋势. *水土保持通报*, 2012, 32 (3) : 188—191
Geng S M, Yan D H, Luo X X, et al. New evolution tendencies of flood disasters under changing environment in middle and lower reaches of the Yellow River (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32 (3) : 188—191
- [20] 赵清贺, 马丽娇, 刘倩, 等. 黄河中下游典型河岸带植物物种多样性及其对环境的响应. *生态学杂志*, 2015, 34 (5) : 1325—1331
Zhao Q H, Ma L J, Liu Q, et al. Plant species diversity and its response to environmental factors in typical river riparian zone in the middle and lower reaches of Yellow River (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34 (5) : 1325—1331
- [21] 赵清贺, 卢训令, 汤茜, 等. 黄河中下游河岸缓冲带土壤粒径分形特征. *中国水土保持科学*, 2016, 14 (5) : 37—46
Zhao Q H, Lu X L, Tang Q, et al. Fractal dimension characteristic of soil particle size in the riparian buffer zone of the middle and lower reaches of the Yellow River (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14 (5) : 37—46
- [22] 韩鹏, 李秀霞. 黄河流域土壤侵蚀及植被水保效益研究. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16 (2) : 181—190
Han P, Li X X. Study on soil erosion and vegetation effect on soil conservation in the Yellow River Basin (In Chinese). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008, 16 (2) : 181—190
- [23] 曹梓豪, 赵清贺, 丁圣彦, 等. 坡度和植被盖度对河岸坡面侵蚀产沙特征的影响. *自然资源学报*, 2017, 32 (11) : 1892—1904
Cao Z H, Zhao Q H, Ding S Y, et al. Effect of slope gradient and vegetation cover on sediment yielding characteristics of the riparian slope (In Chinese). *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (11) : 1892—1904
- [24] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 21 (6) : 509—515

- [25] Muñoz-Robles C, Tighe M, Reid N, et al. A two-step up-scaling method for mapping runoff and sediment production from pasture and woody encroachment on semi-arid hillslopes. *Ecohydrology*, 2013, 6 (1) : 83—93
- [26] O' Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1984, 28 (3) : 323—344
- [27] 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. *水科学进展*, 2014, 25 (4) : 526—533
Wang S P, Yao A K, Zhao X C. Analyzing hydrological connectivity for a slope-surface on the basis of rainfall simulation experiment (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2014, 25 (4) : 526—533
- [28] 梁志权, 张思毅, 卓慕宁, 等. 不同雨强及坡度对华南红壤侵蚀过程的影响. *水土保持通报*, 2017, 37 (2) : 1—6
Liang Z Q, Zhang S Y, Zhuo M N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion process in red soil hillslopes (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37 (2) : 1—6
- [29] Cheng Q, Ma W, Cai Q. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: A case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China. *GeoJournal*, 2008, 71 (2/3) : 117—125
- [30] 余长洪, 李就好, 陈凯, 等. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究. *水土保持学报*, 2015, 29 (2) : 7—10
Yu C H, Li J H, Chen K, et al. Study on process of runoff and sediment on laterite slope in condition of strong rainstorm (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (2) : 7—10
- [31] 戴金梅, 查轩, 黄少燕, 等. 不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响. *水土保持学报*, 2017, 31 (3) : 33—38
Dai J M, Cha X, Huang S Y, et al. Effects of slope gradients on erosion under different vegetation coverage on purple slopes (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (3) : 33—38
- [32] 温永福, 高鹏, 穆兴民, 等. 野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究. *水土保持研究*, 2018, 25 (1) : 23—29
Wen Y F, Gao P, Mu X M, et al. Experimental study on runoff and sediment yield in runoff plot under field simulated rainfall condition (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (1) : 23—29

Runoff and Sediment Yielding Characteristics of Riparian Slopes along the Lower Reaches of the Yellow River and Their Relationships with Flowlength

CAO Zihao^{1,2,3} ZHAO Qinghe^{1,2†} ZUO Xianyu⁴ DING Shengyan^{1,2} ZHANG Yifan^{1,2} XU Shanshan^{1,2}
REN Jiayan^{1,2}

(1 College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

(2 Ministry of Education Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

(3 Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(4 Institute of Data and Knowledge Engineering, Henan University, Kaifeng, Henan 475004, China)

Abstract 【 Objective 】 Vegetation and topography are two important factors determining runoff and sediment yielding in slope soil erosion process. Studies reported in the past were mostly focused on effects of single control factors, e.g., slope gradient or vegetation cover, on runoff and sediment yielding, and few were found in the literature on coupling effects of vegetation and topography on runoff and sediment yielding and converging process. The Yellow River basin in China is one of the most severely eroded regions in the world, and the lower reaches of the River is world-famous for its silt-carrying load. Under

the impact of a long history of human activities, its riparian zones have been suffering serious soil erosion. However, little has been reported quantitatively on soil erosion in the riparian zones of the River. What is more, restoration and preservation of the ecological functions of the riparian zones are closely related to the interactive effects of vegetation and topography on soil erosion and hydrological connectivity on the riparian slopes. 【 Method 】 In this study, a field experiment simulating rainfall on riparian slopes along the lower reaches of the Yellow River to investigate runoff and sediment yielding characteristics as affected by rainfall intensity (54 and 90 mm h⁻¹), slope gradient (5° , 10° , 15° , and 20°), and vegetation coverage (0%, 15%, and 30%), as well as effects of slope gradient and vegetation coverage on soil erosion and relationships of runoff and sediment yielding characteristics with flowlength with the aid of a hydrological connectivity model. 【 Result 】 Results show that vegetation cover, regardless coverage, helped reduce runoff velocity under rainfall, no matter how heavy, either 54 or 90 mm h⁻¹ in rainfall intensity, and the effect was the most significant on a slope 30% in vegetation coverage under artificial rainfall, 90 mm h⁻¹ in intensity. Runoff on slopes varied in volume and depth consistently, gradually declining with rising slope gradient and vegetation coverage, and the effect of slope gradient increased gradually with intensifying rainfall. On slopes, < 15° , erosion sediment yield under rainfall 54 mm h⁻¹ in intensity increased slowly with rising slope gradient, however, the effect of slope gradient was not very obvious, whereas on slopes > 15° , the increment became bigger in magnitude. On slopes, < 15° , erosion sediment yield under rainfall 90 mm h⁻¹ in intensity, erosion sediment yield increased with rising slope gradient, whereas on slopes > 15° , it went reversely. Correlation analysis shows that slope gradient was the major factor affecting sediment yield, runoff volume and runoff depth at a significance level of $P<0.001$, $P<0.01$ and $P<0.01$, respectively, while vegetation coverage had a significant effect only on average runoff velocity ($P<0.05$), but an extra-significant one on flowlength ($P<0.001$). Runoff had a much longer flowlength on bare slopes than on vegetated slopes, while flowlength on vegetated slopes did not vary much with vegetation coverage. Vegetation cover on slopes was the main reason for difference in hydrological connectivity between slopes. In exploration of hydrological connectivity and runoff-sediment yielding, it was found that they were closely correlated, and runoff and sediment yielding exhibited a rising trend with increasing flowlength. 【 Conclusion 】 Under the interaction of vegetation cover and slope gradient, soil erosion caused by runoff yielding was obviously affected by slope gradient, but not as much as by vegetation coverage. All the findings in this study may serve as references for assessment of soil and water conservation functions of and ecological restoration of degraded riparian zones along the lower reaches of the Yellow River.

Key words Riparian slope; Runoff and sediment yielding; Flowlength; Hydrological connectivity; The lower reaches of the Yellow River

(责任编辑: 檀满枝)