

陕北安塞坊塌小流域的沟道形态及其泥沙连通性

张意奉¹, 焦菊英^{1,2}, 陈一先², 唐柄哲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 杨凌 712100;

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, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:通过对陕北安塞坊塌小流域主沟道及其支流小沟道的研究,旨在探究沟道级别、沟道比降和径流节点特征对泥沙连通性的影响程度,以及泥沙淤地坝对泥沙连通性的作用。采用 ArcGIS 软件,基于 1:10 000 比例尺地形图生成的数字高程模型(DEM),利用水文分析模型提取沟道网络图和沟道坡度图,进而获得沟道级别、沟道比降和径流节点,并结合野外实地调查,记录沟道泥沙潜在连通位置。结果表明:泥沙连通性随着沟道级别的升高而降低;沟道比降随着沟道级别的升高逐级减小,泥沙连通性随着沟道比降的降低也减弱;径流节点数和沟道级别成正相关关系;同时修建的淤地坝对泥沙连通性有着阻碍作用,而且在坝地人工沟渠中泥沙连通性呈弱连通性。研究表明通过沟道形态指标,可以反映出沟道泥沙连通性的变化并实现对泥沙连通性的评价。

关键词:沟道网络; 沟道级别; 沟道比降; 径流节点; 泥沙连通性

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0011-05

Channel Morphology and Sediment Connectivity of Fangta Watershed in Ansai County of Northern Shaanxi Province

ZHANG Yifeng¹, JIAO Juying^{1,2}, CHEN Yixian², TANG Bingzhe¹

(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. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Study on the main channel and its tributary channel of Fangta watershed in Ansai County of northern Shaanxi, aims at investigating the influences of channel networks, channel levels, runoff nodes and check dams on sediment connectivity. ArcGIS software are used to extract the channel networks, channel level and runoff node based on the digital elevation model derived from topographic maps with the scale of 1:10 000, and the location of sediment connectivity was recorded by combining with the field investigation. The results show that sediment connectivity and channel slope decrease with the increase of channel level, sediment connectivity also decreases with the decrease of channel slope, the feature information index of runoff nodes has the positive correlation with channel level. The channel morphology indexes can reflect the change of channel sediment connectivity and realize the evaluation of sediment connectivity.

Keywords: channel network; channel level; channel slope; runoff node; sediment connectivity

黄河潼关水文站年均输沙量已由 20 世纪 70 年代前的 16 亿 t 锐减到 2000—2015 年的 2.57 亿 t,特别是 2010—2015 年平均仅为 1.65 亿 t^[1]。虽然黄河泥沙从总量上来看,是有明显的减少,但是这并不能说明黄土高原的土壤侵蚀问题得到了控制和解决,这是因为仅在

流域出口监测的输沙量不能说明流域内部泥沙输移的情况。由于土壤侵蚀过程在沟道中会有泥沙沉积现象出现,所以并不是所有的泥沙都会到达出口。

近年来提出的泥沙连通性,即流域内泥沙通过分离和输移从源到汇的传输程度^[2-4],并且受景观中地貌的

影响^[2]。泥沙连通性是来衡量侵蚀泥沙在地貌单元之间的传输情况,用来看泥沙运动的潜能,同时将流域内各部分联系起来,可以说明流域内部泥沙的输移与冲淤特征,使侵蚀、输移过程表达的更准确,并且不同地貌结构的沟道泥沙输移潜能不同。泥沙连通性土壤侵蚀泥沙是从坡面运输到沟道,而沟道中泥沙的输移与沟道的形态有关。对于沟道形态已有大量的相关研究,如北京市山区小流域主沟道分级及其水文特征^[5-6];人工沟渠对流域径流、污染物传输和水文连通的影响^[7];基于 ArcGIS 软件对 DEM 进行处理对沟谷节点提取和沟道级别划分等研究^[8-12],但对沟道形态变化与泥沙连通性的关系的研究还较为薄弱。

因此,本文主要以陕北安塞坊塌小流域主沟道及其支流小沟道为研究对象,对坊塌流域 5 m×5 m 分辨率的 DEM 影像进行处理,通过提取获得沟道分级、沟道比降以及沟道径流节点这 3 个指标来对沟道形态特征进行描述,并且结合野外实地调查泥沙连通性,旨在探明这 3 个指标与泥沙连通性的关系,最终阐明沟道形态对泥沙连通性的影响。

1 研究区概况

坊塌流域地处陕西省延安市安塞县沿河湾镇坊塌村(36°47'19"—36°49'35"N,109°14'40"—109°17'09"E),汇入延河流域的支流杏子河。流域面积为 8.66 km²,流域沟壑密度 3.8 km/km²,坡度以 8°~25°为主,占整个流域的 77.2%(图 1)。坊塌流域内有 8 座淤地坝,其中 7 座淤地坝在沟口构成坝系,见图 2。第一座淤地坝(1#坝)建于 1975 年,淤满后于 1990 年分别在上游 3 个支沟修建淤地坝(2—4#坝),再次淤满后又于 2011 年分别在 3 座淤地坝上游修建(5—7#坝)。8 号坝位于左侧支沟沟头,修建于 1960 年左右,于 1975 年左右开始耕种。1—4 号坝的坝地当地农民仍在耕作,5、6 号坝在 2013 年的暴雨中被冲毁。该流域属于暖温带半湿润气候向半干旱气候的过渡地区,年平均气温为 8.8℃,年平均降水量为 542.5 mm,降水主要集中在 7—9 月且多暴雨。土壤主要以黄绵土为主,水土流失严重。

2 研究方法

2.1 沟道分级与汇流阈值的选取

沟道分级采用 Strahler 水系分级方法^[13],当级别相同的沟道汇到一起时,该沟道级别才会升高,即将没有支沟的沟道定义为起始一级沟道,然后两个一级沟道交汇为二级沟道,依此类推。径流节点是同一流域不同单元径流的流入汇合点。径流节点同样也

是径流动能聚焦的关键点,同样依据 Strahler 对水系分级划分原则,节点级别确定为交汇于该点的两条(或多条)沟道中级别最低的沟道级别。例如:两条 1 级沟道交汇形成 2 级沟道,该节点的级别为 1 级节点;1 级沟道和 2 级沟道甚至更高级别沟道的交汇点的级别都为 1 级节点,依此类推。

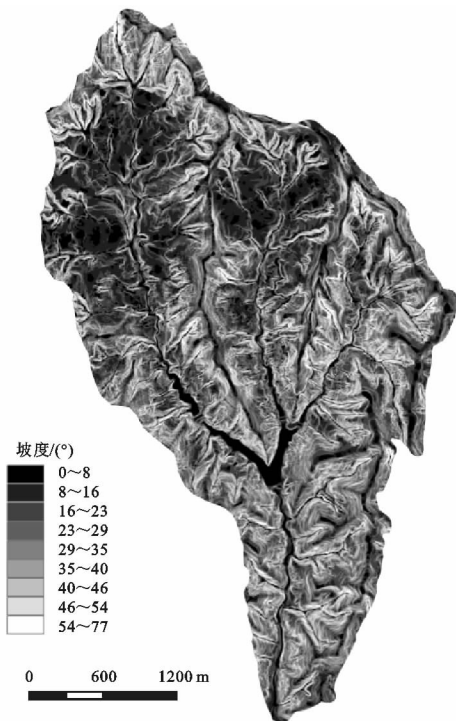


图 1 坊塌小流域沟道坡度

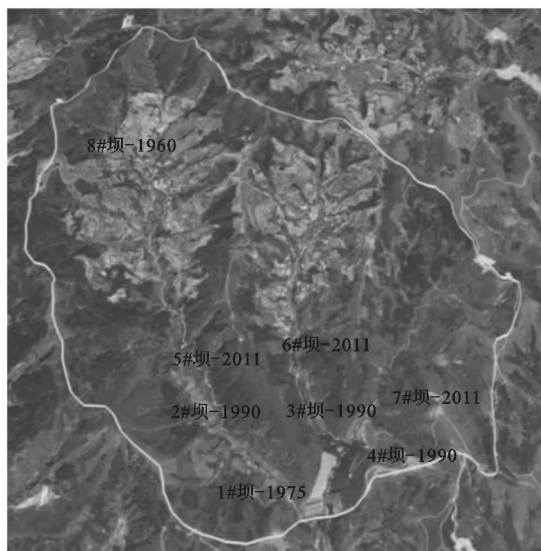


图 2 坊塌小流域淤地坝系

通过设定不同的汇流阈值可得到不同级别的沟道网络图,而阈值的设定一般都是根据研究的对象,不同级别的沟道对应不同的阈值。本文通过尝试设定阈值为 1 000,500,300,200,100(图 3),经过细致的比较,发现阈值设为 1 000,500 时显示的沟道大多是级别为四级和五级的沟道,其包含的一级、二级沟道极少几乎没有;阈

值为 300 提取的沟道网可以显示 DEM 图上坊塌小流域的沟道;阈值为 200,100 时提取的沟道还会显示出 DEM 图上原本没有的更小的沟道。因此,最终选定用阈值为 300 对坊塌流域进行沟道分级。利用沟道分级的方法在阈值为 300 的结果上最终得到沟道分级图,将坊塌流域的沟道进行分级处理。

2.2 沟道形态特征的提取

沟网分级:利用 ArcGIS 10.2 软件对空间分辨率为 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的 DEM 进行处理(图 4)。首先通过 Hydrology 工具包中的 Fill 命令来填洼和削峰;再以 Fill 工具生成的无洼地栅格数据作为输入,应用 Flow Direction 命令对 DEM 进行流向分析;并将无洼地 DEM 流向分析作为输入,利用 Flow Accumulation 进行汇流分析,确定水流的路径;然后,通过 con (“flow_acc”>阈值,1),采用 Map Algebra 中 Raster Calculator 生成沟网进行沟网分析,用 Stream to feature 将沟网栅格矢量化,将伪沟道手动剔除;最后,利用 Stream Order 命令,依据 Strahler 分级方法^[12]的分级方法将沟道进行分级,将最简单的没有分枝的沟道定义为第一级沟道,两个一级沟道汇合为第二级沟道,依此类推,得到沟网分级图。

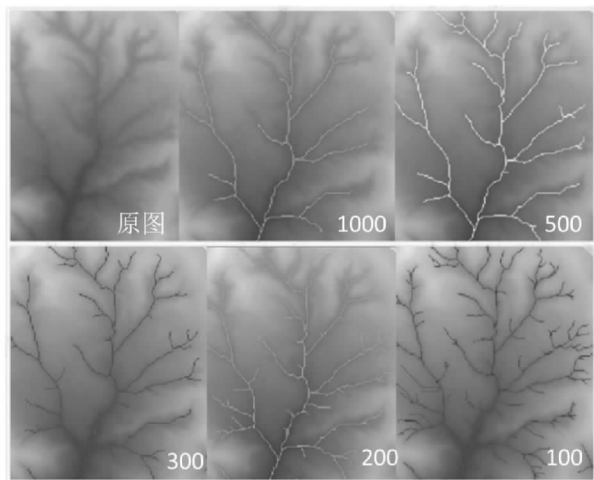


图3 不同阈值下沟道分级对比

沟道比降:通过在沟网分级图的属性表 Add fields 中添加每一级沟道线段起止坐标进行几何计算操作 Calculate Geometry,利用 Data Management Tools 中的 Feature Vertices to Points 命令将沟道线段转为折点,再利用 Spatial Analyst Tools 命令中 Extract Values to Points 工具来提取 DEM 上沟道折点对应的高程值,根据约翰斯通—克罗斯法,即高程差/沟道水平距离来计算其比降,得到各沟道级别的比降。径流节点:基于沟网分级的结果,利用 Data Management Tools 中 Feature to point 命令进行沟道节点提取,采用与沟网分级类似的方法,对径流节

点进行分级,最后利用手动修正得到沟道节点图。

2.3 野外调查

通过实地观测,对沟道的主沟道、支沟道的沟道底部泥沙和沟道形状进行调查与记录,选取典型沟道并且观察沟道侵蚀程度以及泥沙沉积情况,利用拍照记录所观察的沟道。同时,依据泥沙连通性的定义,将泥沙连通性强弱与沟道内泥沙淤积情况相联系,即沟道内泥沙残留量肉眼可见则为弱连通性;沟道内倘若泥沙大多被冲刷,露出基岩表层,则为强连通性;基于两者之间的,没有泥沙存留也没有泥沙冲刷的其连通性就为中等连通性。

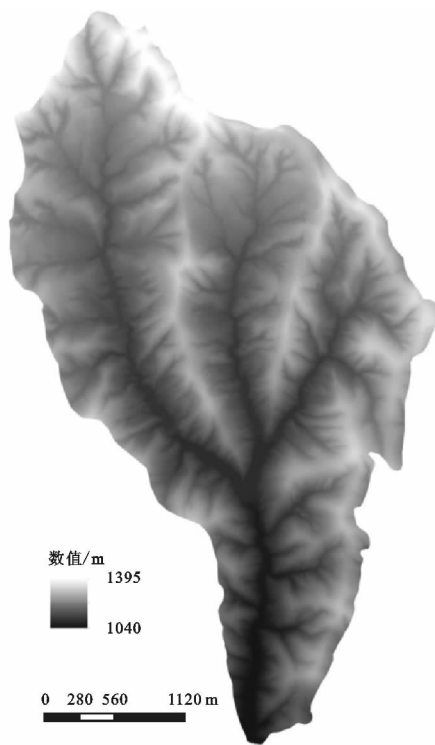


图4 坊塌小流域沟道 DEM

3 结果与分析

3.1 沟道级别与泥沙连通性

通过图 5 和表 1 可知,坊塌流域 1 级小支沟数量最多,几乎是 2~5 级沟道总数的 2.25 倍,并且通过野外试验调查得知,在大多数小支沟中泥沙冲刷现象比较严重,沟道底部泥沙几乎被冲刷所剩无几,露出基岩,因此沟道级别较低的沟道为强连通性(图 6A),同时说明在沟头处很可能出现泥沙连通的源,会发生溯源侵蚀。此外,经过实地调查也发现,在沟道级别较低的沟道,沟道内部虽然淤积量较多(图 6C),但是沟道中由于侵蚀严重,沟道里有陷穴、跌坎出现,因此该处在未来会成为潜在的泥沙连通性的路径,具有强泥沙连通性。相反,对于沟道级别较高的主沟来说,由于沟道宽度较大,长度较长,上游来水的动力减弱,没有较大的冲刷现象,而且

有些位置的植被相对茂密,阻碍泥沙的输移,沟道内部泥沙淤积可见并且有一定的厚度,为弱连通性(图 6D),并且会成为泥沙汇。除此之外,级别高的沟道有时会因为人为放牧的影响,其连通性会增加,成为中等连通性(图 6B)。沟道级别升高并加之淤地坝的建设,使得上游来沙淤积,携带的泥沙沉积形成坝地,对沟道泥沙连通性起到阻碍作用。

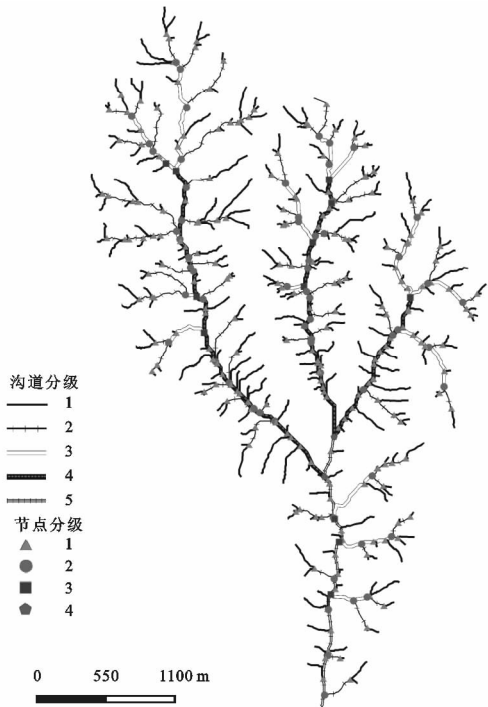


图 5 坊塌小流域沟道和径流节点

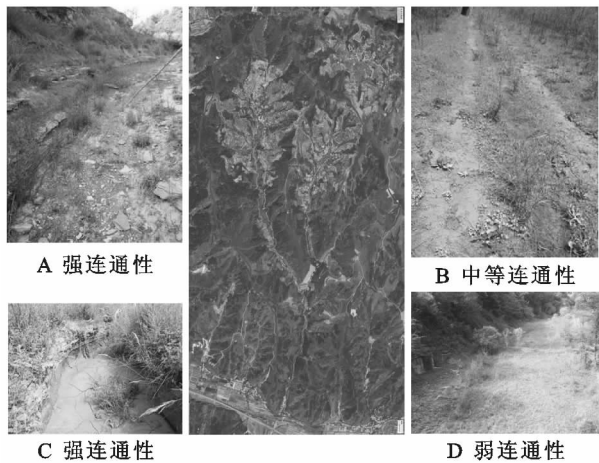


图 6 坊塌小流域沟道泥沙连通性局部情况

表 1 坊塌小流域沟道分级情况

沟道等级	沟道数量/条	数量占比/%	长度范围/m	沟道比降范围/%
1 级	296	69.32	7.50~451.14	7.6~79.5
2 级	90	21.08	14.14~786.41	3.3~40.8
3 级	23	5.39	5.00~677.01	3.0~18.0
4 级	15	3.51	5.00~1328.28	1.3~5.3
5 级	3	0.7	14.14~1991.3	1.9~5.7

3.2 沟道比降与泥沙连通性

通过沟道比降统计(表 1)可清晰的看出,沟道比降与沟道级别有着明显的关系,即沟道比降随着沟道级别的增加逐级递减。

沟道承接坡面产生的径流泥沙,随着坡面径流与泥沙不断汇入沟道,在沟道源头,也就是起始一级沟道处,由于坡度较大,在一级沟道处会造成下切侵蚀,并且沟道内泥沙随着携沙能力增强发生泥沙输移现象,使沟道泥沙连通增强,沟道不断加深。随着径流流速的降低,泥沙输移运动减弱,泥沙在沟道中不断沉积,同时沟道的泥沙连通性也减弱。

3.3 沟道径流节点与泥沙连通性

依据沟道径流节点分级图,分析沟道级别与沟道径流节点数量的关系,随着沟道级别的增加,沟道径流节点数量逐渐减少(图 7)。胡最等^[14]发现随着沟道级别的增加径流节点级别也在增加,从径流源点到径流节点的径流路径长度也在增加。苟娇娇等^[15]也得出径流节点数较少时侵蚀较弱。结合实地调查来看,在径流级别较高、径流节点数目较少的主沟道,由于汇入沟道的径流与泥沙的渠道减少,因此地形地貌起伏变化不大;相反在径流节点数目较大的小支沟来说,小单元内的地形地貌以及土壤侵蚀等都有较明显的变化。因此会使泥沙连通性随着径流节点数的减少而减弱。

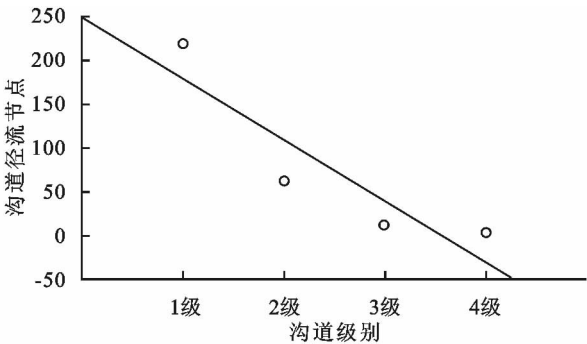


图 7 径流节点与沟道级别关系

3.4 淤地坝与泥沙连通性

淤地坝一方面可以改变沟道形状,另一方面也对沟道中径流泥沙输移过程起到阻碍作用。从图 2 可以看出研究区的三条沟道都为有淤地坝分布,形成坝系。通过野外调查发现淤地坝在不同状态下对泥沙连通性有着不同的影响;5 号坝和 6 号坝虽然在暴雨中竖井被冲毁,虽然有淤地坝,但还是呈现弱连通性;3 号坝和 4 号坝内主要为旱柳幼树,观察发现坝地内泥沙淤积量很少,同时径流泥沙大多从人工沟渠中通过,泥沙连通性也呈现弱连通性。

4 结论

(1) 沟道网络提取中阈值的选定需要将各阈值进行比较,不同阈值得到不同范围的沟道网络图,而

阈值为300的沟道网络图最适合坊塌小流域。

(2) 随着沟道级别的递增,沟道的泥沙连通性减弱。第一级、第二级和第三级沟道为强泥沙连通性,第四级和第五级沟道为弱泥沙连通性。

(3) 沟道比降随着沟道级别呈递减现象,泥沙连通性随着沟道比降的降低也减弱。

(4) 沟道径流节点数随着沟道级别的增长而减少,沟道径流节点也是表征沟道形态特征的一个量化指标。同时泥沙连通性随着径流节点数的减少而减弱。

(5) 淤地坝及人工沟渠使泥沙连通性减弱,虽然竖井被损毁的淤地坝能促使连通性增强,呈现弱连通性。

参考文献:

- [1] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 9(1):38-41.
 - [2] Bracken L J, Turnbull L, Wainwright J, et al. Sediment connectivity: A framework for understanding sediment transfer at multiple scales [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2015, 40(2):177-188.
 - [3] Bracken L J, Wainwright J, Ali G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119:17-34.
 - [4] Bracken L J, Jacky C. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 21(13):1749-1763.
 - [5] 叶芝茜, 化相国, 路炳军, 等. 北京山区小流域主沟道水文地貌特征调查与分析研究[J]. *中国水利*, 2013(21):52-53.
 - [6] 吴敬东, 段淑怀, 叶芝茜. 北京市山区小流域主沟道水文地貌调查与分级[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(6):33-38.
 - [7] 郝敏, 吕宪国, 姜明. 人工沟渠对流域水文格局的影响研究[J]. *湿地科学*, 2005(4):310-314.
 - [8] 严建钢, 金复鑫, 周小程, 等. ArcGIS中基于DEM提取沟道特征[J]. *海军航空工程学院学报*, 2013(3):311-314.
 - [9] 原立峰, 周启刚. 基于DEM的流域水文特征提取方法研究[J]. *人民黄河*, 2006, 28(5):20-21.
 - [10] 赵嘉莹, 张富, 郭嘉, 等. 南小河流域侵蚀沟道特征研究[J]. *人民黄河*, 2016, 38(3):76-79.
 - [11] 朱红春, 汤国安, 吴良超, 等. 基于地貌结构与汇水特征的沟谷节点提取与分析:以陕北黄土高原为例[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1):7-13.
 - [12] 易红伟, 汤国安, 刘咏梅, 等. 河网径流节点及其基于DEM的自动提取[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3):108-111.
 - [13] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1957, 38(6):913-920.
 - [14] 蒋圣, 梁明, 胡最. 黄土地貌区径流节点提取及其特征信息指数的DEM实验分析[J]. *地球信息科学学报*, 2015, 17(6):689-697.
 - [15] 苟娇娇. 基于DEM的黄土高原沟谷节点分形特征研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3):109-114.
- ~~~~~
- (上接第10页)
- [9] 孙娟, 康玲玲, 吕锡芝, 等. 塬面拦蓄水工程建设要点[J]. *中国水土保持*, 2018(4):23-25.
 - [10] 王晓燕, 高焕文, 李洪文, 等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(3):66-69.
 - [11] 高焕文, 李问盈, 李洪文. 中国特色保护性耕作技术[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(3):1-4.
 - [12] 覃超, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 玉米秸秆缓冲带防治黄土坡面细沟侵蚀的效果[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1):35-42.
 - [13] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鹏, 等. 沟头秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地沟蚀发育影响的试验研究[J]. *泥沙研究*, 2014(6):73-80.
 - [14] 徐锡蒙, 郑粉莉, 覃超, 等. 沟蚀发育的黄土坡面上秸秆覆盖防蚀效果研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8):130-137.
 - [15] McLaughlin D A. Erosion control effectiveness of straw, hydromulch, and polyacrylamide in a rainfall simulator [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 68(3):221-227.
 - [16] Gholami L, Sadeghi S H, Mehdi H. Straw mulching effect on splash erosion, runoff, and sediment yield from eroded plots[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(1):268-278.
 - [17] 王安, 郝明德, 臧逸飞, 等. 秸秆覆盖和留茬的田间水土保持效应[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(1):47-51.
 - [18] Flores-Cervantes J H, Istanbuluoglu E, Bras R L. Development of gullies on the landscape: A model of headcut retreat resulting from plunge pool erosion[J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2006, 111(F1):2156-2202.
 - [19] 张宝军, 熊东红, 杨丹, 等. 跌水高度对元谋干热河谷冲沟沟头侵蚀产沙特征的影响初探[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1):48-59.
 - [20] 郑粉莉. 细沟侵蚀量测算方法的探讨[J]. *水土保持通报*, 1989, 9(4):41-45, 49.