

山东临朐 2019 年“8·10”特大暴雨水土保持调查

林祚顶¹, 刘宝元², 丛佩娟¹, 焦菊英², 王春梅³, 党维勤⁴, 邢先双⁵

(1.水利部水土保持监测中心,北京 100053;

2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100; 3.西北大学城市与环境学院,西安 710127;

4.黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站,陕西 榆林 719000; 5.山东省水土保持监测站,济南 250002)

摘要: 2019 年 8 月 10 日 6 时至 12 日 6 时,受台风“利奇马”影响,山东淄博、东营、潍坊等地区发生特大暴雨天气,造成了严重的水土流失灾害。暴雨发生后,水利部水土保持监测中心组织调查人员,运用现代技术手段对暴雨中心典型小流域进行了系统、全面的水土保持实地调查。结果表明:(1)本次特大暴雨降雨量为 570.6 mm,最大 24 h 降雨 507.6 mm,均超过历史记录;(2)本次暴雨造成严重水土流失灾害,典型小流域水蚀模数达 9 741 t/km²,是多年平均值的 2.4 倍,梯田损毁率达 5.96%,河道淤积厚度达 10~30 cm,近 1/3 生产道路完全损毁,引起了严重的重力侵蚀,多处发生滑坡、泥石流;(3)通过对比小流域调查发现,高林草覆盖和重点工程治理分别可削减洪峰模数 79%和 36%,降低水蚀模数分别达 80%和 54%;重点治理小流域道路损毁比例减少 23.9%,梯田损毁减少 40.4%,重力侵蚀减少 40%以上。调查摸清了本次特大暴雨径流输沙特征、土壤侵蚀状况、水土流失成灾情况、水土保持措施效益等,初步形成了科学的暴雨水土流失调查方法体系,为今后暴雨水土保持调查制度的建立提供了良好基础。

关键词: “利奇马”台风; 特大暴雨; 水土保持调查; 水土流失; 水土保持措施

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0149-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.022

Soil and Water Conservation Survey After a Heavy Storm on 10th August , 2019 in Linqu, Shandong Province

LIN Zuoding¹, LIU Baoyuan², CONG Peijuan¹, JIAO Juying²,

WANG Chunmei³, DANG Weiqin⁴, XING Xianshuang⁵

(1.*Soil and Water Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100053;*

2.*Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling,*

Shaanxi 712100; 3.*College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127;*

4.*Suide Experimental Station For Soil and Water Conservation, the Yellow River Conservancy Commission,*

Yulin, Shaanxi 719000; 5.Soil and Water Conservation Monitoring Station of Shandong Province, Ji'nan 250002)

Abstract: A heavy storm occurred from 06:00 am August 10 to 06:00 am August 12, 2019, caused by Typhoon “Lichima”, in Zibo, Dongying, and Weifang, Shandong Province. This storm caused severe soil erosion disaster. A survey was organized by the Water and Soil Conservation Monitoring Center of the Ministry of Water Resources to conduct a systematic and comprehensive field survey of soil and water conservation. The survey was taken in typical small watersheds just in the rainstorm center, and modern technology was utilized. The characteristics of runoff and sediment transport, soil erosion rate, disaster, and the effectiveness of soil and water conservation measures were surveyed. The methodology for soil and water conservation survey with heavy storm was primary established based on the results and processes of this survey. This survey could provide an essential information for future establishment of a legal system of heavy storm soil and water conservation survey.

Keywords: typhoon “Lichima”; heavy storm; soil and water conservation survey; soil and water loss; soil and water conservation measures

收稿日期: 2020-07-01

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501604); 国家自然科学基金项目(41977062)

第一作者: 林祚顶(1965—),男,博士,教授级高级工程师,博士,主要从事水文、水保监测。E-mail: zdlin@mwr.gov.cn

通信作者: 刘宝元(1958—),男,博士,教授,博导,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: baoyuan@bnu.edu.cn

由于气候变化,极端暴雨的强度、频次都在增长并有可能持续增长^[1-3],极端暴雨引发洪水灾害,导致严重水土流失,引起越来越多的关注^[4-7]。暴雨洪水造成土壤破坏、肥力下降、生态环境恶化、基础设施损毁、河床抬高等危害^[8-10]。如何及时了解极端天气情况下水土流失状况,科学评估水土流失危害及水土保持效果,为区域水土流失动态监测和常规站点监测提供有效补充,是当前水土保持监测工作亟需解决的问题。

2019年8月10日6时至12日6时,受台风“利奇马”影响,山东淄博、东营、潍坊等地出现大暴雨,局部地区发生特大暴雨天气。据统计,全省平均降水量144.5 mm,潍坊市平均降水量237.4 mm,折合水量37.65亿m³。其中,临朐县次降雨量超过570 mm,最大24 h降雨达507.6 mm,为超百年一遇特大暴雨(简称山东临朐“8·10”特大暴雨),造成了严重的水土流失灾害。

为深入了解次暴雨土壤侵蚀强度、水土流失危害、水土保持工程损毁及水土保持措施防灾减灾作用等情况,进一步为区域(流域)水土流失综合治理及其成效评估、水土流失规律研究、行业部门宏观决策等提供技术支撑,2019年8月15—22日,水利部水土保持监测中心组织开展了山东临朐“8·10”特大暴雨水土保持综合调查,对暴雨洪水特征、土壤侵蚀情况、水土流失危害和水土保持措施效果等进行了分析。本次调查应急反应速度快、所选流域对比性强、充分应用地理信息系统(GIS)、无人机遥感、现代测量等技术,对调查结果进行了多尺度、多角度分析。本次调查将为我国暴雨水土保持调查制度的形成提供重要基础,并对水土流失规律的研究有重要意义。

1 调查方法

1.1 调查时间与人员

暴雨水土保持的时效性决定了调查结果的客观性。暴雨过程结束72 h内,水利部水土保持监测中心组织了包括中科院水利部水土保持研究所、黄河水利委员会绥德水土保持科学试验站、西北大学、山东省水土保持监测站、潍坊市水文局、潍坊市水土保持监测站等单位20多名科研人员赴暴雨中心山东省临朐县开展调查,第一时间收集了受灾原貌和水土保持措施受损情况,保证了调查结果的科学性。

1.2 调查对象

本次特大暴雨发生在山东省临朐县,属沂蒙山泰山国家级水土流失重点治理区。在暴雨中心选择3条对比小流域,其中曾家沟(1.61 km²)为非重点水土保持治理小流域,相邻的耿家沟(4.35 km²)属国家水土保持重点工程坡改梯项目区,秋花沟(1.92 km²)为次生林区、森林覆盖率高。3条调查小流域具有较强的对比性,曾家沟和耿家沟结果对比可反映工程治理作用,曾家沟

和秋花沟结果对比可反映植被覆盖的水土保持作用。

暴雨水土保持调查时间紧、任务重,在短时间内完成覆盖全区的调查是不可能的,因此本次调查采用抽样方法,考虑小流域不同部位、土地利用方式、地貌特征等多个因素,对土壤侵蚀、水土流失灾害、水土保持措施效益等进行了抽样调查。

1.3 调查技术和流程

综合运用传统调查、GIS、无人机遥感调查、GNSS RTK 等现代测量技术,对细沟和细沟间侵蚀、切沟侵蚀、道路侵蚀、重力侵蚀以及洪水泥沙、河道冲淤、梯田损毁等进行现场调查。调查基本流程采用“八步法”,包括调查流域的选择、流域背景信息无人机航摄、要素分布的快速遥感解译、抽样设计、野外调查、典型要素无人机高精度调查、精度校正与质量检查、数据入库等环节。

1.4 主要调查内容

1.4.1 基础资料收集

(1)地形、遥感、土地利用、水土保持措施、社会经济等基础数据;

(2)暴雨中心及周边9个气象站点降雨数据;

(3)小流域控制站点(辛庄水土保持监测站)及调查区下游中尺度流域水文站(弥河黄山水文站)降雨、径流、泥沙数据。

1.4.2 野外数据采集 主要通过无人机调查与地面调查相结合的方法进行,重点调查曾家沟、耿家沟、秋花沟土壤侵蚀、暴雨成灾、水土保持措施效果等。具体包括暴雨洪水、细沟侵蚀、切沟侵蚀、重力侵蚀、道路侵蚀、梯田损毁、河道冲淤等调查内容。其中无人机调查包括2个尺度:对重点调查小流域曾家沟、耿家沟全流域进行无人机航摄,获取10 cm分辨率数字正射影像(DOM)及数字地面模型(DSM),以快速掌握调查小流域整体侵蚀与受灾状况。同时,对典型梯田损毁坡面、道路破坏路段和重力侵蚀地块进行更高分辨率无人机航摄(1~2 cm分辨率),以掌握典型侵蚀发生部位更精确的数据。地面调查包括传统地面典型样方抽样调查和野外 GNSS RTK 高精度实测。其中 GNSS RTK 主要用于道路断面、典型梯田、典型重力侵蚀实测,以千寻差分信号为基准,获取了2 400个坐标点平面位置及高程位置,用于无人机遥感和传统测量的精度校验。

1.5 综合分析

基于现场调查资料,运用遥感和GIS方法,进行了典型小流域土壤侵蚀与水土流失灾害的空间分布、相关因子等分析;同时基于临朐县水文雨量站多年资料及现场采集的数据资料,运用中国土壤侵蚀模型(CSLE)计算了临朐县细沟和细沟间土壤侵蚀量,并应用调查小流域下游弥河黄山水文站降雨、径流、泥

沙资料,对流域土壤侵蚀与河道输沙关系进行分析。本次调查按照以典型小流域为核心、中流域(弥河流域)为拓展、县域(临朐县)为推广的思路,对本次特大暴雨水土流失情况进行了全面综合的分析。

2 主要调查结果

2.1 暴雨径流输沙特征

山东临朐“8·10”特大暴雨降雨量为 570.6 mm,最大 24 h 降雨 507.6 mm,最大日雨量 441.2 mm。本次特大暴雨无论是最大 24 h 降雨量,还是最大日降雨量,均超过历史记录。据典型调查小流域下游控制站黄山水文站(控制弥河流域范围 375 km²)实测,本次暴雨洪峰流量 2 210 m³/s,为该站 1988 年建站以来最高值;径流量 1.02 亿 m³(8 月 10—18 日,本次洪水径流量),是多年平均年径流量 0.71 亿 m³的 1.44 倍;最大沙峰 18 634 kg/s,最大含沙量 11.4 kg/m³,单次洪水输沙量为 36.23 万 t(输沙模数 966 t/km²),是多年平均年输沙量的 1.65 倍。

2.2 土壤侵蚀状况

2.2.1 小流域现场调查侵蚀量 小流域水力土壤侵蚀主要为细沟侵蚀、细沟间侵蚀、坡面切沟侵蚀、道路切沟侵蚀,侵蚀模数见表 1。其中细沟、坡面切沟、道路切沟采用现场调查方法通过体积量测法计算;细沟间侵蚀采用 CSLE 模型模拟结果减去细沟侵蚀量得到。曾家沟本次暴雨总水蚀模数为 9 741 t/km²,耿家沟为 4 589 t/km²。

表 1 小流域水力侵蚀模数 单位:t/km²

流域名称	细沟侵蚀	细沟间侵蚀	坡面切沟侵蚀	道路切沟侵蚀	总水蚀模数
曾家沟	997	3965	1164	3615	9741
耿家沟	490	1796	590	1713	4589

本次调查重力侵蚀发生的类型主要有滑坡、泥石流和崩塌。经统计,曾家沟和耿家沟 2 条小流域,共计发生重力侵蚀 180 处,造成侵蚀量达 7.84 万 t,其中滑坡侵蚀量占重力侵蚀总侵蚀量 70%以上。由重力侵蚀造成的单位面积侵蚀量曾家沟和耿家沟 2 条小流域分别为 2.01,1.06 万 t/km²。

2.2.2 基于 CSLE 模型的典型小流域和临朐县侵蚀量 通过 CSLE 模型估算,本次暴雨临朐县和曾家沟、耿家沟、秋花沟小流域土壤侵蚀模数(包括细沟侵蚀和细沟间侵蚀)分别为 2 327,4 962,2 286,1 019 t/km²,分别是其多年平均土壤侵蚀模数的 2.7,2.4,2.4,1.4 倍。

2.2.3 基于小流域沟道侵蚀比例推算的县域侵蚀量 由于道路侵蚀、坡面切沟的偶发性,学术界尚未有较好的可用于区域估算的沟蚀模型,道路切沟侵蚀、坡面切沟侵蚀估算较为困难。在本次暴雨调查中运用 CSLE 模型对临朐县细沟和细沟间侵蚀进行了估算,其侵蚀模数为 2 327 t/km²。同时,发现非重点治理

的曾家沟和重点治理的耿家沟细沟和细沟间侵蚀占小流域总侵蚀量的比例相对稳定,分别为 50.94%和 49.81%,平均为 50.38%。据此,估算出临朐县此次暴雨总水蚀模数约为 4 619 t/km²。

2.3 水土流失成灾情况

2.3.1 加剧土壤侵蚀 依据 CSLE 模型,本次暴雨细沟与细沟间水力侵蚀模数明显增加。曾家沟、耿家沟小流域的本次暴雨侵蚀约是多年均土壤侵蚀模数的 2~5 倍。临朐县此次大暴雨造成的细沟与细沟间土壤侵蚀模数是多年平均侵蚀模数的 2.7 倍。以本次暴雨土壤侵蚀模数计算,相当于多年平均侵蚀强度的中度及以上面积比例(土壤侵蚀模数>2 500 t/km²)增加了 39%。

2.3.2 损毁耕地 调查区内耕地主要为土坎梯田,以受损田坎长度与梯田田坎总长度比值作为梯田受损率,曾家沟梯田平均损毁率为 5.96%。其中损毁率为 15%以上的梯田占 7.37%;损毁率为 5%~10%的占比最高,为 32.54%;损毁率低于 2%的占总面积的 26%。耿家沟梯田损毁情况相比曾家沟轻微,平均损毁率为 3.55%,所有梯田田块的损毁率均低于 10%,低于 2%的占总梯田面积的 56%。

2.3.3 冲淤河道 曾家沟和耿家沟流域内,沟岸基本无护岸措施,沟岸冲刷严重,部分水流路径已改变,破坏了周边林地、果园、道路等,尤其是河岸转弯处冲刷较为严重;少数实施了护岸工程的河道,基本无破坏。河道回流区、两河交汇、拦河坝以及桥梁上游等淤积量较大;在河道凸岸回流区滩体有淤积,淤积厚度在 10~30 cm。

2.3.4 损毁道路 经调查,曾家沟流域生产道路(土质)共 11.68 km,近 1/3 完全损毁,无法通行。曾家沟 37.7%的路段遭受重度及以上受损,其中 27.2%被完全破坏;耿家沟 28.7%的路段遭受重度及以上受损,其中 19.1%被完全破坏,耿家沟道路遭受损毁的程度明显低于曾家沟。局部路段因为滑坡、道路切沟导致道路完全破坏;上游为裸坡耕地时局部路段损毁明显加重,道路拐弯处损毁有加重趋势;无排水渠的道路遭受破坏严重。

2.3.5 引发重力侵蚀灾害 此次暴雨诱发了大量小型滑坡和泥石流。经现场调查与无人机遥感调查,曾家沟(1.61 km²)发生重力侵蚀 43 处/km²,其中崩塌 4 处,滑坡 30 处,泥石流 9 处;耿家沟(4.35 km²)发生重力侵蚀 25 处/km²,其中崩塌 2 处/km²,滑坡 18 处/km²,泥石流 5 处/km²。其危害包括阻断道路、掩埋耕地和果园、破坏梯田及房屋等。

2.4 水土保持效益

通过对 3 条小流域调查得出,水土保持措施在理

水、调水、减蚀、减灾方面作用明显。治理程度、植被覆盖度越高,措施体系越完备,措施管护越好的小流域,理水调水、减蚀程度和抵御灾害的能力越强。

2.4.1 理水调水效益 在本次暴雨中,曾家沟小流域洪峰模数最大,为 $20.33\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$;秋花沟小流域洪峰模数最小,为 $4.22\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$;耿家沟小流域的洪峰模数居中,为 $13.04\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{km}^2)$ 。相比曾家沟小流域,秋花沟小流域和耿家沟小流域的洪峰模数分别减少 79% 和 36%;耿家沟和秋花沟的流速较小,造成的损坏也相对较小。植被覆盖和工程措施均具有显著削减洪峰流量的作用,高覆盖林地削减洪峰作用高于水土保持措施。

2.4.2 减蚀效益 本次调查发现,水土保持措施减蚀效果显著,森林覆盖率高的流域减少土壤侵蚀效果最为明显。曾家沟、耿家沟、秋花沟小流域的本次暴雨单位面积水蚀模数分别为 $4\,962, 2\,286, 1\,019\text{ t/}$

km^2 。相比非重点治理的曾家沟,森林覆盖率最高(占总面积 90%)的秋花沟、重点治理的耿家沟水蚀模数分别减少 80% 和 54%。

对比不同土地利用类型的地块可以看出,林草措施具有一定抵御暴雨侵蚀的能力。细沟是发生明显土壤侵蚀的直接表征,耿家沟与曾家沟的撂荒地、林草地均未发生细沟侵蚀,而坡耕地细沟侵蚀模数可达 $4\,500\sim 20\,000\text{ t/km}^2$,平均可达 $8\,715\text{ t/km}^2$;梯田的细沟侵蚀最大可达 $5\,000\text{ t/km}^2$,平均为 563 t/km^2 。

2.4.3 减少暴雨侵蚀灾害 对比不同治理程度小流域灾害情况可以发现,重点治理的耿家沟灾害发生程度明显低于普通治理程度的曾家沟,在较大程度上减少了水土流失灾害,其中无法通行道路比例减少了 23.9%,梯田损毁率减少了 40.4%,滑坡发生频次减少了 40%,泥石流发生频次减少了 44.4%,崩塌发生频次减少了 50%(表 2)。水土保持措施减灾效益明显。

表 2 不同治理程度小流域水土流失灾害情况对比

流域名称	无法通行 路段比例/%	梯田 损毁率/%	滑坡发生频次/ (处·km ⁻²)	泥石流发生频次/ (处·km ⁻²)	崩塌发生频次/ (处·km ⁻²)
曾家沟	37.7	5.96	30	9	4
耿家沟	28.7	3.55	18	5	2

3 启示与建议

3.1 建议建立暴雨水土保持调查制度

单次大暴雨、特大暴雨造成的土壤侵蚀量巨大,对水土保持工程的损毁危害严重。因此,开展场次暴雨水土流失调查,对于分析研究土壤侵蚀和水土流失状况和规律等具有重要的作用。同时,暴雨也是对水土保持工程措施质量、配置模式、水土保持效益检验的试金石,通过开展暴雨调查发现,水土保持工程措施在设计、施工、建后管护、配套措施配置、综合效益发挥等方面的问题,为我们在完善工程设计标准、加强建设运行管理、因地制宜布设水土流失防治措施、有效开展水土保持效益评价等方面提供有益借鉴。

因此,为完善水土保持监测工作,落实《水土保持法》关于定期对水土流失造成的危害进行公告的规定,建议建立暴雨水土保持调查制度,作为各级水土保持监测机构职责纳入日常工作。调查成果以年鉴形式汇集成册。在此基础上,加强大数据分析,探索暴雨水土流失及其产沙规律,为完善水土保持相关工作提供技术支撑。

本次调查探索建立的调查流域的选择、流域背景信息无人机航摄、要素分布的快速遥感解译、抽样设计、野外调查、典型要素无人机高精度调查、精度校正与质量检查、数据入库“八步法”,经过了实践操作与质量把控,可为今后开展相关野外调查提供很好的借鉴。

3.2 提高水土流失防治标准,实现高质量发展

调查区国家水土保持重点工程受投资、建设标准以及农民耕种习惯等影响,措施体系不够完备,缺乏坡面、道路截排水措施,梯田田坎标准偏低,缺乏田坎植被保护,经果林缺乏林下植被保护等问题造成暴雨水土流失严重。

建议提高国家水土保持重点工程投资和防治标准,完善措施体系,开展高标准建设,加强林下植被保护和树盘等措施建设,加强道路、沟道排水设施建设,加大水土流失治理工程建设力度,增强抵御自然灾害能力,实现流域高质量发展。

3.3 建议将水土保持工程纳入灾后重建体系

调查发现,场次暴雨造成生产道路、农田排水设施等水土保持工程损毁量大、面广、程度深,仅靠当地群众自救难以实现灾后重建,损毁措施如得不到及时修复,受灾区必将成为水土流失严重易发区。建议将水土保持工程损毁纳入水利工程灾后重建内容,将水土流失灾害等指标纳入民政部灾后调查统计范围。

3.4 创新机制,加强工程日常管护

本次调查发现,水土保持工程管护对其效益发挥至关重要。建议积极探索管护模式,创新管护路径,研究通过以奖代补、“三变”模式(资源变股权、资金变股金、农民变股民)等方式,解决国家生态建设项目长期存在的政府部门既是裁判员又是运动员,参建企业缺乏建设和经营主导权,集体和农民作为旁观者、局

外人的问题,实现建设者、使用者、管护者三者统一,确保治理成果持续发挥效益。

致谢:参加调查的人员包括林祚顶,乔殿新,丛佩娟,刘宝元,党维勤,焦菊英,王飞,王春梅,韩剑桥,冯伟,李斌斌,王国振,庞国伟,龙永清,王雷,戈文艳,周子渊,郭静,杨勤科,符素华,陆绍娟,从辰宇,刘元昊,马春玲,谢梦霞,刘欣,朱梦阳,郭紫甜,朱浩楠,陈羽璇,仲原,苏建华等。

参考文献:

- [1] Westra S, Fowler, H J, Evans J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short - duration extreme rainfall [J].Reviews of Geophysics, 2014, 52:522-555.
- [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(Ⅰ):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展,2006,2(1):3-8,50.
- [3] 胡宜昌,董文杰,何勇.21 世纪初极端天气气候事件研究(上接第 148 页)
- [8] Pan C Z, Shanguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J]. Catena,2007,70:350-355.
- [9] Best A C. The size distribution of raindrops [J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1950, 76(327):16-36.
- [10] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff erosion and sediment under different vegetation types [J]. Water Resources Management, 2014,28(9):2415-2433.
- [11] Zhou J, Fu B J, Gao G Y, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China [J].Catena,2016,137:1-11.
- [12] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping [J].Earth Surface Processes and Landforms,2004,29(9):1161-1169.
- [13] Darboux F, Davy P H, Gascuel-Odoux C, et al. Evolution of soil surface roughness and flowpath connectivity in overland flow experiments [J].Catena,2001, 46:125-139..
- [14] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11): 110-117.
- [15] Zhang X, Yu G Q, Li Z B, et al. Experimental study on slope runoff erosion and sediment under different vegetation types [J].Water Resources Management, 2014,28(9):2415-2433.

进展[J].地球科学进展,2007,22(10):1066-1075.

- [4] Li Z Y, Fang H Y. Impacts of climate change on water erosion: A review [J].Earth-Science Reviews, 2016, 163:94-117.
- [5] 徐建华,金双彦,高亚军,等.水保措施对“7·26”暴雨洪水减水减沙的作用[J].人民黄河,2017,39(12):22-26.
- [6] 董炳江,张欧阳,许全喜,等.2018 年汛期三峡水库上游暴雨产沙特性研究[J].人民长江,2019,50(12):21-25.
- [7] 韩丹丹,穆兴民,高鹏,等.极端降水条件下大理河流域水沙特征对比分析[J].中国水土保持科学,2019,17(6): 61-68.
- [8] 李占斌,符素华,解建仓,等.窟野河流域暴雨侵蚀产沙研究[J].水利学报,1998(增刊 1):19-24.
- [9] 刘宝元,段淑怀,符素华,等.北京市“7·21”特大暴雨水土保持措施效益评价[J].北京水务,2012(5):8-13.
- [10] 王颖霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.
- [16] 张霞.黄土区地貌与植被格局的侵蚀动力过程试验研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- [17] Lei T W, Nearing M A. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model [J].Water Resources Research,1998,34(11): 3157-3168.
- [18] Li M, Yao W Y, Chen J N, et al. Impact of different grass coverages on the sediment yield process in the slope-gully system [J].Acta Geographica Sinica,2005, 60(5):725-732.
- [19] Zhang H Y, Wang Y L. Landscape ecological optimization in land resource exploitation: Overview of the methods [J].Earth Science Frontiers,2000,7(8):112-120.
- [20] Jin K, Cornelis W M, Gabriels D, et al. Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses [J].Catena,2009,78:81-86.
- [21] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J].Soil Science Society of America Journal,2015,79(3):903-916.
- [22] Nadal-Romero E, Lasanta T, García-Ruiz J M. Runoff and sediment yield from land under various uses in a Mediterranean mountain area: Long-term results from an experimental station [J].Earth Surface Processes and Landforms,2013,38(4):346-355.
- [23] Nearing M A, Simanton R, Norton D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hill-slope [J].Earth Surface Processes and Landforms, 1999,24(8):677-686.