

黄土区沟道阶梯状边坡水土流失防治措施与机理

刘佳鑫^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 刘普灵^{1,2}

(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, 陕西 杨凌 712100)

摘要:陕北地区沟道造地工程中新修沟道阶梯状边坡抗蚀性较弱。研究利用室内人工模拟降雨试验, 研究新开挖沟道阶梯状边坡在降雨作用下不同水土保持措施的水沙效应, 并观测其侵蚀发育过程。结果表明: 极端气象条件(120 mm/h 雨强)与坡顶部区域汇水作用是导致阶梯状边坡产生快速侵蚀破坏的两个主要条件。当边坡仅受到降雨作用, 雨强在 60 mm/h~90 mm/h 之间变化时, 产沙速率稳定, 不同雨强下产沙速率呈现倍率关系, 坡面侵蚀现象无明显差异, 坡体无明显破坏; 120 mm/h 雨强条件下, 产沙速率显著上升, 侵蚀发育过程出现明显变化, 坡体破坏明显。阶梯状边坡平台反坡措施能有效减少 60 mm/h、90 mm/h、120 mm/h 三种雨强下产沙量 58.4%、35.2%、62.1%, 减少径流量 69.6%、26.6%、60.8%, 并有效减缓坡体表面破坏及侵蚀发育速度。用放水试验模拟无截排水措施情况, 发现截排水措施能够有效降低产沙量 92.7%, 同时改变了侵蚀发育的现象, 将急剧下切发育的细沟侵蚀转变为了发育较为缓慢的层状面蚀。从减水减沙的角度, 坡顶截排水措施与平台反坡措施皆为有效的阶梯状边坡水土流失防治措施。

关键词:黄土陡坡; 土壤侵蚀; 水土保持

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0065-05

Measures and Mechanism to Prevent Water Loss and Soil Erosion on Multi-Stair Slope in Loess Area

LIU Jiaxin^{1,2}, Liu Gang^{1,2}, Liu Puling^{1,2}

(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. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The new built multi-stair slope in gully of loess area is susceptible to soil erosion. We used the simulated rainfall experiment to examine the relation among soil and water conservation measures, rainfall intensity and the phenomenon of soil erosion on multi-stair slope in loess area and observed the development process of soil erosion. The results show that the extreme weather conditions (rainfall intensity 120 mm/h) and upslope runoff are two key factors leading to soil erosion on multi-stairs slope in loess area. When the rainfall intensities ranged between 60 mm/h~90 mm/h, the sediment yield rate influenced by the rainfall was stable. There was no obvious difference between phenomena of soil erosion and the slope without obvious damage. When the rainfall intensity was 120 mm/h the sediment yield rate rose quickly, the phenomenon of soil erosion was obvious. The reverse slope measure can effectively reduce the sediment yield by 58.4%, 35.2%, 62.1% and reduce the runoff by 69.6%, 26.6%, 60.8%, respectively, under the rainfall intensities of 60 mm/h, 90 mm/h and 120 mm/h. At the same time, the erosion rate decreased. Water test was used to simulate the slope without drain measures. The results show that drain measures can effectively reduce the sediment yield by 92.7%, and at the same time changed the development phenomenon of erosion, the drain measure turned the erosion phenomenon from rill erosion to sheet erosion. From the point of view of water and sediment reduction, the drain measures and reverse slope measures are both effective measures to prevent water loss and soil erosion on multi-stair slope in loess area.

Keywords: loess steep slope; soil erosion; soil and water conservation

收稿日期: 2016-08-04

修回日期: 2016-09-19

资助项目: 陕西省科技统筹创新工程计划(2013KTDZ03-03-01); 国家科技支撑计划项目(2015BAC01B03-03); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(人字(2014)91号); 西北农林科技大学博士科研启动基金(2013BSJJ082)

第一作者: 刘佳鑫(1991—), 男, 河北省石家庄市人, 博士研究生, 主要从事水土保持与土壤侵蚀机理研究。E-mail: skzn@foxmail.com

通信作者: 刘刚(1982—), 男, 陕西西安人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事水土保持与土壤侵蚀机理研究。E-mail: gliu@foxmail.com

沟道土地整治工程是延安地区为增加高质量耕地数量,促进、保障和巩固退耕还林还草成果与改善生态环境而提出的新举措。在沟道土地整治过程中,为保证开挖山体边坡稳定并减小水土流失,根据山体坡度按照每3~5 m高度将开挖面修建为阶梯状^[1]。在沟道土地整治工程实际观测中发现,沟道泥沙的主要来源为坡面细沟侵蚀发育所带来的泥沙,边坡受重力作用而整体滑塌的现象并不常见。目前对于阶梯状边坡稳定性的研究主要集中在边坡坡率^[2-3],水作用下黄土滑坡机理^[4-5],以及卸载作用下黄土边坡变形机理方面^[6-7],而对于阶梯状边坡受降雨径流冲刷及侵蚀发育过程的研究相对较少。另外,大多研究并未考虑坡、梁、峁顶部的汇水产流作用对边坡水土流失过程的影响。一些研究表明^[8-10],反坡水平阶措施对5°~25°的坡耕地具有较好的减水减沙作用,而该措施对于高陡边坡的水土流失防治效果如何尚未明晰。

本研究利用室内模型模拟野外阶梯状边坡,通过人工模拟降雨及放水试验,观测不同降雨条件下边坡产流产沙及侵蚀发育过程,分析阶梯状高陡边坡的水土流失特征,以及截排水和反坡措施的减水减沙效益。为治沟造地削切边坡修建提供理论依据,为配套水土保持措施的制定提供数据基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤选用延安市宝塔区甘谷驿镇顾屯村(36°46'10.76"N 109°50'4.36"E)沟道土地整治工程中新开挖土壤。该地区年均降水量530 mm,降水多集中在夏季,且多暴雨。土壤类型为黄绵土,黏粒(<2 μm)、粉粒(2~20 μm)和沙砾(20~2 000 μm)分别为9.08%,59.59%和31.33%,pH值为8.43,土壤有机质含量为1.52 g/kg。在实验室中自然风干,过5 mm筛,去除石块等杂质,待用。

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。降雨设备为中国科学院水利部水土保持研究所研制的侧喷式人工降雨系统,降雨高度16 m,保证了降雨在接触模型时达到雨滴终点速度,本试验通过率定降雨选取合适受雨区域,降雨均匀度大于90%。试验用径流小区采用1.5 m(长)×1 m(宽)×1.5 m(高)三面封闭正面开放式的可移动钢槽。

1.2 试验设计

为保证试验小区内土体均匀,采用分层铺土的方式,按照每10 cm一层共铺设15层,容重控制在1.

40 g/cm³~1.52 g/cm³,容重从上到下均匀递增,土壤初始含水率设置为15%。铺土完成后通过人工切的方式将钢槽内土体修筑为阶梯状边坡的形式,每一级边坡高50 cm,边坡立面坡度约为60°,边坡平台面宽20 cm,反坡处理将平台面坡度削切为向坡脚方向降低5°。

降雨强度根据研究区多年自然降雨气象资料及当地次暴雨事件中出现的最大降雨强度,并结合2013年延安特大暴雨事件,选择60 mm/h,90 mm/h和120 mm/h三个具有代表性的雨强分别表征小雨强、大雨强及特大雨强,降雨时间为1 h。在降雨试验中边坡模型的处理分别为阶梯状边坡平台面水平及平台面反坡5°两种,阶梯状边坡平台面水平处理作为对照。

放水试验用于模拟无坡顶汇水面截排水措施的土壤侵蚀状况,在选定的代表性雨强(90 mm/h)条件下,根据野外边坡实际情况,次试验放水量为90 L,放水时间为1 h。

1.3 数据采集与分析

降雨及放水试验自试验产流开始取样,取样间隔为3 min,取试验全样,样品称重后,将泥沙放入烘箱在105℃条件下烘干称重,计算试验中产流量及产沙量。试验结束后统计表面侵蚀深度超过10 mm区域面积与总表面积的比值作为地表破坏面积百分数指标 $S_{雨强值}$ 。

2 结果与分析

2.1 降雨强度与产沙量的关系

由图1可知,60 mm/h,90 mm/h和120 mm/h降雨强度条件下,径流小区产流量均随时间呈线性增加的趋势,其平均产流速率分别为568 g/min,713 g/min,1 156 g/min。不同降雨强度下小区产沙量随时间的累积曲线相对于产流量的稳定趋势则有明显的不同。在60 mm/h和90 mm/h雨强条件下,产沙速率近乎稳定,平均分别为8.4 g/min和15.2 g/min,在次降雨中无明显波动。而120 mm/h雨强条件下,产沙量总体趋势呈现非线性趋势,在0~33 min,33~51 min和51~60 min,产沙速率分别为43.3 g/min,31.6 g/min与278.2 g/min。小区表面的破坏面积百分数分别为 $S_{60}=5\%$, $S_{90}=10\%$, $S_{120}=33\%$ 。

三种雨强下产流量与产流时间呈现出线性关系,产流速率在整场降雨中近乎稳定,120 mm/h雨强下产流速率出现小幅度递增的原因主要是120 mm/h雨强下局部地表出现了破坏导致入渗情况发生了变化。同时120 mm/h雨强下产沙量的显著增加和呈

现的波动性,也是由于表面局部在不同时段发生明显破坏的缘故(图 2)。大雨强下溅蚀强烈,径流挟沙能力强,坡面侵蚀发育明显^[11],地表破坏面积百分数 S_{120} 达到 33%,直接导致产沙量的增加。

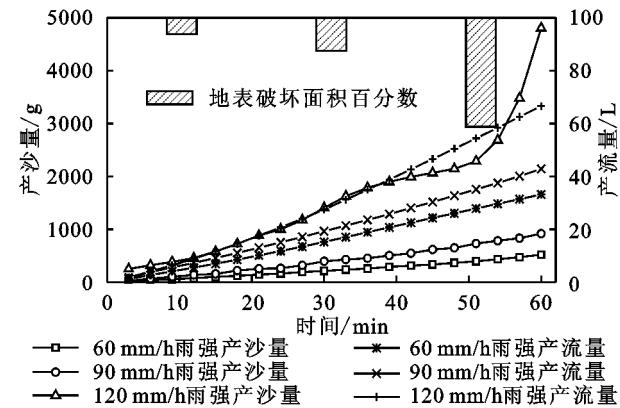


图 1 不同降雨强度下径流小区产流量、产沙量累积曲线及地表破坏面积百分数



图 2 120 mm/h 雨强下降雨 60 min 后径流小区坡面状况

2.2 坡顶截排水措施对产沙量的影响

利用放水试验模拟在 90 mm/h 雨强条件下削切边坡上方有、无截排水措施。图 3 表明了有、无截排水的试验小区产沙量随降雨历时的变化规律。在有截排水措施条件下,地表的破坏面积百分数 S_{90} = 10%,累积产沙量为 937.2 g,60 min 时间内单位时间产沙量曲线平缓,变动幅度较小;无截排水措施时,地表破坏面积百分数最终达 $S_{90\text{冲}}$ = 18%,累积产沙量 12 817.9 g。单位时间产沙量在不同时段呈现出不同的变化规律,0~15 min 时单位时间产沙量趋于平稳,自 15 min 起单位时间产沙量产生大幅度变化;15~30 min 单位时间内产沙量不断升高;30~45 min 单位时间产沙量呈稳定下降趋势;45~60 min,

单位时间产沙量先呈现上升趋势,而后趋于平稳。对照试验中观测到的现象,15~30 min 细沟 I、II 不断下切发育,30~45 min 细沟 I 发育减缓趋于稳定,45~60 min 细沟 II 逐渐减缓发育并趋于稳定,见图 4。对照两组试验结果,坡面的破坏面积百分数 $S_{90\text{冲}}$ 为 S_{90} 的 1.8 倍,而产沙量达到了 13.7 倍,坡面的横向破坏发育速率比较稳定,而纵向破坏急剧发育,即坡面细沟的下切侵蚀发育明显,从而提供了绝大部分的泥沙来源。

因此,截排水措施对坡顶汇水的截留作用,可以极大地减弱坡顶汇水对坡面的冲刷,减沙效益平均可达 92.7%,尤其在降雨后期,其减沙效益最大可达 98.3%。因此,截排水措施对于治沟造地工程阶梯状边坡具有较好的防护作用。

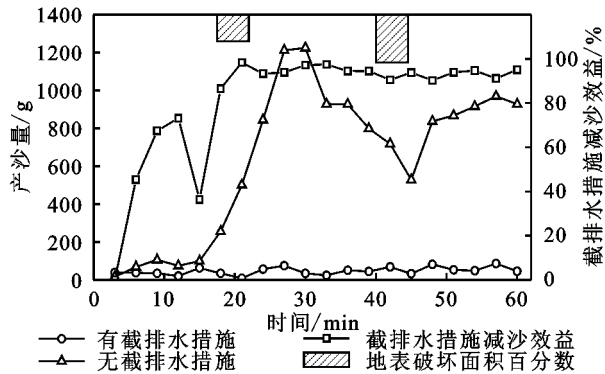


图 3 有、无截排水措施径流小区产沙量、减沙效益变化及地表破坏面积百分数

2.3 平台反坡对产流产沙的影响

由表 1 可以看出,60 mm/h,90 mm/h,120 mm/h 雨强下减沙效益分别为 58.4%,35.2%,62.1%。图 5 表明,120 mm/h 无反坡条件下产沙曲线出现了明显的非线性变化,地表破坏面积达到了 33%(表 1),径流小区坡体表面侵蚀严重;其他各场次产沙过程曲线均近似呈线性变化,产沙速率稳定。图 5 及表 1 表明,反坡小区较无反坡小区能够有效减少径流,增加入渗,入渗速率在各雨强与措施组合下均呈现稳定状态。60 mm/h,90 mm/h,120 mm/h 雨强下,增加入渗即减水效益分别为 69.6%,26.6%,60.8%。

反坡小区较无反坡小区产生的这种泥沙量减少、入渗量增加的现象主要与其特殊的反坡构造有关^[12-14]。反坡构造能够使上一级坡面的径流在接触反坡平台面时消减一部分动能,而后将径流反向流向平台坡脚。同时随着水流在平台面的淤积,反坡平台上水流流速趋近于零,动能不断减小,直至淤满反坡平台面后,以较小的启动速度冲刷下一级坡面。这样水流的冲刷能力就被极大地降低,坡面上被侵蚀破坏而产生的泥沙量随之减少。同时泥沙随水流进入反坡平台面后,因为水流

挟沙能力减弱,大部分泥沙被淤积在平台面上,因此反坡能够有效降低泥沙产量。由于径流在反坡平台

面上的淤积,导致入渗时间增加及入渗水压的增加,最终使得反坡模型下入渗量明显增加。



图 4 有截排水措施(A)与无截排水措施(B)径流小区坡面发育对比

以往的研究中表明,通常情况下水土保持措施效益随着雨强的增加而减小,而文中 120 mm/h 雨强下反坡措施的水土保持效益高于 90 mm/h 雨强下反坡措施的水土保持效益,是由于大雨强下侵蚀剧烈,侵蚀沟发育明显,虽然泥沙已经发生了输移,但并未进入沟道,而是在反坡措施平台上发生了堆积,因此 120 mm/h 雨强下减沙效益高于 90 mm/h 雨强下减沙效益,同时被破坏的坡面极易积水,导致不能向沟道及时排导,使得 120 mm/h 雨强下减水效益高于

90 mm/h 雨强下的减水效益。

表 1 地表破坏面积百分数及反坡模型较无反坡模型减少产沙量、增加入渗量百分比

雨强 措施	60 mm/h		90 mm/h		120 mm/h	
	反坡	无反坡	反坡	无反坡	反坡	无反坡
地表破坏面积百分数/%	3	5	5	10	16	33
减少泥沙量/g	2244.4		3313.7		13949.0	
减少泥沙百分比/%	58.4		35.2		62.1	
增加入渗量/L	32.2		26.5		57.2	
增加入渗百分比/%	69.6		26.6		60.8	

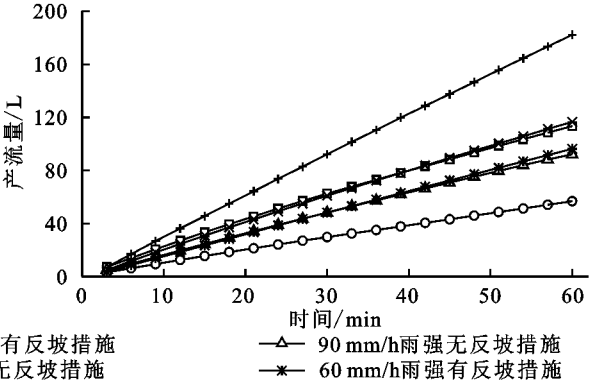
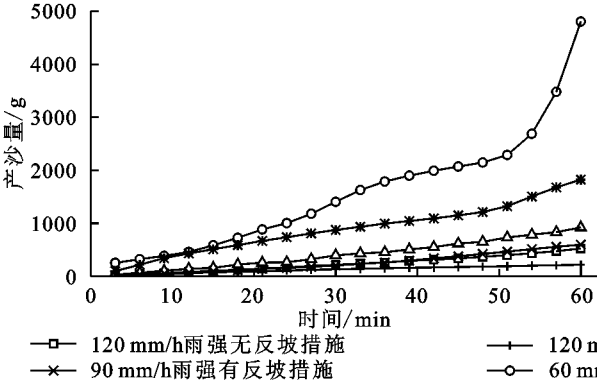


图 5 不同雨强下有、无反坡措施产沙量、入渗量累积曲线

综上,反坡小区较无反坡小区有明显的减水减沙效果,减少了坡面的冲刷,减缓了坡面侵蚀的发育,但同时提高了水分的入渗,改变了土壤含水率,影响土体内部力学性质^[15-17],降低土体强度,提升了边坡整体滑塌的风险。

3 结论

(1) 特大雨强导致的坡面径流冲刷是阶梯状边坡出现侵蚀破坏的主要原因之一。在不同降雨强度条件下,沟道阶梯状边坡模型的侵蚀发育过程存在显著差异,60 mm/h 及 90 mm/h 雨强条件下,1 h 降雨历时内,径流小区产沙速率稳定,侵蚀现象主要以层状面蚀为主,边坡模型整体无明显破坏;在 120 mm/

h 雨强下产沙速率随时间出现剧烈波动,产沙量较小雨强条件下急剧增加,侵蚀发育仍以面蚀为主,但坡脚冲刷破坏明显,沿坡脚向上出现了剧烈溯源侵蚀,阶梯状边坡模型破坏严重。

(2) 截排水措施能够有效防止坡顶面径流汇集冲刷破坏阶梯状边坡。阶梯状边坡坡顶面能使降雨产生径流汇集,产生冲刷破坏能力较强的水流,是造成阶梯状边坡顶部阶梯出现细沟侵蚀并迅速下切发育的主要原因。

(3) 反坡措施具有良好的减水减沙、增加入渗的作用,同时降低了坡面侵蚀的发育。反式水平阶构造运用在阶梯状边坡模型之上,有效地降低了阶梯状边坡表面的冲刷破坏,减少边坡表面土壤的剥离,同时

有效地将泥沙淤积于平台面,减少了泥沙向沟道中排导,防止泥沙淤积阻塞河道;入渗量的增加改变了边坡的含水率,一方面为边坡植被生长提供了良好的水分环境,另一方面边坡含水率的增加直接导致边坡土体抗剪强度的下降,进而使得边坡整体稳定性降低,增加了边坡整体滑塌的风险。

参考文献:

- [1] 蔡剑波,谢振安.土质边坡坡率法设计[J].山西建筑,2010,36(18):106-107.
- [2] 吕远强,张兴勤,姜海波,等.晋西地区工程开挖形成的黄土边坡的最优坡率[J].煤田地质与勘探,2011,39(6):58-62.
- [3] 刘强,杨俊杰,刘红军,等.天然边坡削坡工程中的稳定性研究[J].岩土工程学报,2008,30(4):566-573.
- [4] Terzaghi K. Mechanism of landslides[M]//Paige S. Application of Geology to Engineering Practice. Berkeley: Geological Society of America, 1950:83-123.
- [5] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian geotechnical Journal, 1978,15(3):313-321.
- [6] Van Asch T W J, Buma J, Van Beek L P H. A view on some hydrological triggering systems in landslides[J]. Geomorphology, 1999,30(1):25-32.
- [7] 王建华,黄暖.降雨入渗条件下非饱和黄土边坡稳定的可靠度分析[J].水力发电,2006,32(10):38-40.
- [8] 褚利平,王克勤,白文忠,等.水平阶影响坡地产生沙及氮磷流失的试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):1-6.
- [9] 李苗苗,王克勤,陈志中,等.不同坡度下反坡水平阶的蓄水减沙效益[J].水土保持研究,2011,18(6):100-104.
- [10] 田飞,谢永生,陈磊,等.薄土坡耕地石坎反坡水平阶水沙调控效果[J].干旱地区农业研究,2015,6:247-253.
- [11] 韩浩.坡面降雨径流泥沙起动规律初步研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2010.
- [12] 邢鹏远,王克勤,杨绍兵,等.反坡水平阶水土保持效益观测[J].中国水土保持科学,2010,8(5):119-124.
- [13] 孙浩峰,陈天林.半干旱黄土丘陵区水平阶整地规格与降雨量的关系[J].水土保持通报,2013,33(6):28-31.
- [14] 王萍,王克勤,李太兴,等.反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用[J].应用生态学报,2011,22(5):1261-1267.
- [15] 孙建中,等.黄土学(中篇)[M].西安:西安地图出版社,2013.
- [16] 李保雄,苗天德.黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(5):1003-1008.
- [17] Derbyshire E, Dijkstra T, Li Y J. Landslides in the loess terrain of Northwest China[M]. London: British Library Cataloguing in Publication Data, 2000:131-159.
- ~~~~~
- (上接第64页)
- [8] Sato Yoshinobu, Ma Xieyao, Matsuoka Masayuki. 黄河中游长时段水量平衡分析[C]//骆向新,尚宏琦.第三届黄河国际论坛论文集郑州:黄河水利出版社,2007. [9] 赵玉,穆兴民,何毅,蒋冲.1950-2011年黄河干流水沙关系变化研究[J].泥沙研究,2014(4):32-38.
- [10] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [11] Ran L S, Wang S J, Fan X L. Channel change at Toudaoguai station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010,20(2):231-247.
- [12] 普发贵. Mann-Kendall 检验法在抚仙湖水质趋势分析中的应用[J].环境科学导刊,2014,33(6):83-87.
- [13] 梁艳琴.横山岭水库流域径流量变化趋势及成因分析[J].河北工程技术高等专科学校学报,2014(1):4-7,20.
- [14] 汤奇成,程天文,李秀云.中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J].地理学报,1982,37(4):383-393.
- [15] 刘德林,刘贤赵,张继平.大沽夹河流域径流年内分配特征的量化研究[J].水土保持研究,2006,13(6):107-114.
- [16] 徐东霞,章光新.嫩江径流年内变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(7):48-51.
- [17] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等.1957—2008年黑河流域径流年内分配变化[J].地理科学进展,2011,30(5):550-556.
- [18] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
- [19] 穆兴民,徐学选,陈霖巍.黄土高原生态水文研究[M].北京:中国林业出版社,2001.
- [20] 范利杰,穆兴民,赵广举,等.近50a嘉陵江流域径流变化特征及影响因素[J].水土保持通报,2013,33(1):12-17.
- [21] 马柱国.黄河径流量的历史演变规律及成因[J].地球物理学报,2015,48(6):1270-1275.
- [22] 渭河流域水资源规划[R].郑州:水利部黄河水利委员会勘测规划设计研究院,2003:32-35.