

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.04.018

CSTR:32310.14.stbcb.2025.04.018

张继永,肖玉玲,邹伟婷,等.黄土丘陵区不同水土保持措施坡面小区侵蚀性降雨标准[J].水土保持学报,2025,39(4):350-359.

ZHANG Jiyong, XIAO Yuling, ZOU Weiting, et al. Erosive rainfall criteria of slope plots under different soil and water conservation measures in loess hilly areas[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):350-359.

黄土丘陵区不同水土保持措施坡面小区侵蚀性降雨标准

张继永¹,肖玉玲²,邹伟婷¹,信忠保¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京100083;2.北京林丰源生态环境规划设计院有限公司,北京100083)

摘要: [目的]为厘定不同水土保持措施下的径流小区发生产流产沙的场次降雨侵蚀性降雨标准,并探究侵蚀性降雨标准的影响因素。[方法]利用黄土丘陵区甘肃天水罗玉沟流域桥子沟试验场17个标准径流小区的2011—2020年降雨产流产沙观测资料,采用频率分析法和泥沙连通性IC值,评估不同水土保持措施下侵蚀性降雨标准及其影响因素。[结果]水土保持措施减小不同径流小区产流产沙,与对照小区相比,草地和林地小区的产流产沙下降最明显,减沙率分别为80.39%和79.78%,农地减沙率明显小于草地和林地,仅为47.41%;水土保持措施提高侵蚀性降雨标准,对照小区侵蚀性降雨标准为场次降雨量11.62 mm,而林地和草地的标准分别为18.26、18.08 mm,农地居中,为13.76 mm;侵蚀性降雨标准与产流场次数、连通性指数(IC)、径流系数等指标呈负相关,侵蚀性降雨标准越大,IC值越小,径流系数越小,水文连通性越弱。[结论]经过水土流失治理后,坡面的水文连通性降低,侵蚀性降雨量减小,产流能力显著下降,而侵蚀性降雨标准显著上升,且不同水土保持措施间存在差异。研究揭示不同水土保持措施下坡面侵蚀性降雨标准及其影响因素,可为黄土高原坡面水土流失监测提供参考依据。

关键词:黄土高原;坡面产流产沙;侵蚀性降雨标准;水土保持措施;泥沙连通性

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)04-0350-10

Erosive Rainfall Criteria of Slope Plots under Different Soil and Water Conservation Measures in Loess Hilly Areas

ZHANG Jiyong¹, XIAO Yuling², ZOU Weiting¹, XIN Zhongbao¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Lin Fengyuan Ecological Environment Planning and Design Institute Company, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to establish the criteria for erosive rainfall events under different soil and water conservation measures in runoff plots, and to explore the influencing factors of these criteria. [Methods] Using observational data on rainfall, runoff and sediment yield from 17 standard runoff plots at the Qiaozigou experimental site in the Luoyugou watershed of Tianshui, Gansu Province, in the Loess Hilly Region from 2011 to 2020, frequency analysis and sediment connectivity (IC) assessments were employed to evaluate the criteria for erosive rainfall and their influencing factors under various soil and water conservation measures. [Results] Soil and water conservation measures reduced runoff and sediment yield across different plots. Compared to the control plot, grassland and woodland plots exhibited the most significant reductions in runoff (80.39%) and sediment yield (79.78%). The reduction rate for cropland (47.41%) was notably lower than that for grassland and woodland. Conservation measures elevated the criteria for erosive rainfall, which was ranked in the order of control plot (11.62 mm) < cropland (13.76 mm) < grassland (18.08 mm) < woodland (18.26 mm). The criteria for erosive rainfall showed a negative correlation with the number of runoff events, the connectivity index (IC) and the runoff coefficient, with higher criteria associated with lower IC values, smaller runoff coefficients and weaker hydrological connectivity. [Conclusion] Following soil and water conservation, the hydrological

收稿日期:2025-01-24

修回日期:2025-03-21

录用日期:2025-04-16

网络首发日期(www.cnki.net):2025-05-21

资助项目:国家自然科学基金项目(42177319, U2243231)

第一作者:张继永(2000—),男,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:zjy370724@163.com

通信作者:信忠保(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail:xinzhongbao@126.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

connectivity of slopes decreased, the amount of erosive rainfall reduced, the runoff capacity significantly declined and the criteria for erosive rainfall notably increased, with variations among different measures. This study elucidates the criteria for erosive rainfall on slopes under various soil and water conservation measures and their influencing factors, providing a reference for monitoring soil and water loss on slopes on the Loess Plateau.

Keywords: the Loess Plateau; runoff and sediment production on slopes; erosive rainfall criteria; soil and water conservation measures; sediment connectivity

Received: 2025-01-24

Revised: 2025-03-21

Accepted: 2025-04-16

Online(www.cnki.net): 2025-05-21

黄土丘陵沟壑区地形地貌复杂多样,地表沟壑纵横,在气候变化和人为活动因素的共同作用下,使得该区域水土流失问题一跃成为我国乃至全球水土流失最为严重的地区之一^[1]。大量研究^[2-4]表明,黄土丘陵沟壑区水土流失的形成主要与降雨、土壤特征、地表植被覆盖及人类不合理的开发利用等因素有关。

降雨和径流是造成区域水土流失的主要驱动力,但不是所有的降雨都能够产生水土流失,只有部分能够造成水土流失的降雨被称为侵蚀性降雨,而侵蚀性降雨的临界降雨值被称为侵蚀性降雨标准^[5]。侵蚀性降雨是区域水土流失的主要发生形式,其影响因素主要包括降雨特征和下垫面状况。降雨特征能够影响区域水土流失的参数,主要为降雨量和降雨强度,其次是降雨雨型和历时等特征指标^[6];而下垫面状况主要是植被覆盖及微地形地貌^[7-8],植物措施可通过植被根系的固土作用来减少土壤侵蚀^[9],但不同植被类型的植被覆盖程度、枯落物厚度及植被根系的发达程度不同,从而导致不同植被的水土保持效益具有差异性^[10]。

目前,拟定侵蚀性降雨标准的方法主要有2种:1)根据大量的试验和观测,运用频数分析和回归分析的方法,拟定研究区侵蚀性降雨标准。王万忠^[11]在黄土高原、滇东北、四川盆地等地研究得到的侵蚀性降雨标准集中在8~20 mm。2)根据错选和漏选的降雨事件侵蚀力相等原则,运用降雨侵蚀力偏差系数法,评判拟定的侵蚀性降雨标准。殷水清等^[12]确定黄土高原坡面侵蚀的侵蚀性降雨标准为12 mm;汪邦稳等^[13]根据赣北第四纪红壤区裸地2001—2009年1359场降雨事件,拟定其侵蚀性降雨标准为11.4 mm;刘和平等^[14]通过对不同植被覆盖下径流小区的产流产沙特征研究发现,北京的侵蚀性降雨雨量标准为18 mm;而张文源等^[15]提出,耕地的侵蚀性降雨雨量标准为15 mm;马良等^[16]和李林育等^[17]分别对赣北山区、四川盆地的降雨特征与水土流失的关系进行研究,提出相应的侵蚀性降雨标准。以上研究用不同方法厘定黄土丘陵第三副区不同水土保持措施下的侵蚀性降雨标准,但均未从水文连通性的角度与侵蚀性降雨标准建立联系。

侵蚀性降雨与泥沙连通性密切相关,泥沙连通性反映地表和流域内各个部分间泥沙输移的能力和速率,泥沙连通性高意味着泥沙的输移速率快,更多的水分形成地表径流,因此,泥沙连通性高的地区通常也有较高的产流能力^[18-19]。地表泥沙连通性受降水影响较大,随着降水量、雨强增加,地表泥沙连通性随之上升^[20]。泥沙连通性强弱通过泥沙连通性指数进行定量表达,BORSELLI等^[21]提出,IC指数只考虑地形因素与权重因子对泥沙连通性的影响,应用较为广泛^[22]。

径流小区是理解坡面产流能力受下垫面条件影响机制的重要方法^[23],径流小区下垫面相对单一且易于控制,开展不同覆被和下垫面影响下坡面产流能力评估便于验证,是坡面土壤水蚀研究最经典的方法^[24]。本研究将结合水文方法和数理统计,根据桥子沟试验场17个坡面径流小区2011—2020年共10 a降雨产流产沙观测资料,厘定不同水土保持措施下侵蚀性降雨标准,探究不同坡面产流产沙能力及其影响因素,研究可揭示黄土高原水土保持措施对坡面的产流机制,可为坡面水土流失监测提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取中国黄土高原罗玉沟流域的桥子沟试验场17个径流小区为研究区,位于甘肃省天水市罗玉沟流域东北部的坡耕地上,地理坐标105°30′~105°45′E,34°34′~34°40′N,平均海拔高度约1445 m,流域面积72.79 km²,属黄土丘陵区第三副区,是水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室野外试验基地(图1)。

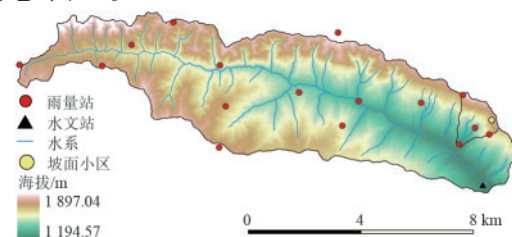


图1 试验场径流小区位置

Fig.1 Location map of the runoff plots at the experimental site

桥子沟试验场布设不同坡度梯度和不同措施(林、草、农)的标准径流小区(5 m×20 m)15个,无水土保持措施的裸地对照小区(5 m×20 m)2个(表1)。试验场多年平均降水量(546.1±123.68) mm

(1986—2018年),多年汛期(5—10月)平均降水量410 mm,占多年平均降水量的77.4%,雨热同期。试验场土壤结构在黄土高原丘陵沟壑区第三副区中具有较强的代表性。

表1 试验场17个径流小区基本情况

Tab. 1 Basic parameters of 17 runoff plots in the experimental site

| 编号 | 小区 | 土地利用 | 坡度/(°) | 面积/m ² | 植被 | 水土保持措施 |
|--------|------|------|--------|-------------------|-----|--------|
| Plot01 | A-1 | 林地 | 6.0 | 100.6 | 杏树 | 鱼鳞坑 |
| Plot02 | A-2 | 牧草地 | 7.4 | 100.8 | 小冠花 | 等高耕作 |
| Plot03 | A-3 | 农地 | 7.8 | 100.9 | 冬小麦 | 横垄耕作 |
| Plot04 | B-1 | 林地 | 8.2 | 101.0 | 杏树 | 鱼鳞坑 |
| Plot05 | B-2 | 牧草地 | 8.3 | 101.1 | 小冠花 | 等高耕作 |
| Plot06 | B-3 | 农地 | 8.6 | 101.1 | 冬小麦 | 横垄耕作 |
| Plot07 | C-1 | 林地 | 14.8 | 103.4 | 杏树 | 鱼鳞坑 |
| Plot08 | C-2 | 牧草地 | 15.6 | 103.8 | 小冠花 | 等高耕作 |
| Plot09 | C-3 | 农地 | 15.7 | 103.9 | 冬小麦 | 横垄耕作 |
| Plot10 | CK-1 | 对照 | 14.9 | 103.5 | 裸地 | 无 |
| Plot11 | CK-2 | 对照 | 15.1 | 103.6 | 裸地 | 无 |
| Plot12 | D-1 | 林地 | 12.4 | 102.4 | 杏树 | 鱼鳞坑 |
| Plot13 | D-2 | 牧草地 | 10.1 | 101.6 | 小冠花 | 等高耕作 |
| Plot14 | D-3 | 农地 | 9.6 | 101.4 | 冬小麦 | 横垄耕作 |
| Plot15 | E-1 | 林地 | 21.8 | 107.7 | 杏树 | 鱼鳞坑 |
| Plot16 | E-2 | 牧草地 | 20.6 | 106.8 | 小冠花 | 等高耕作 |
| Plot17 | E-3 | 农地 | 20.5 | 106.8 | 冬小麦 | 横垄耕作 |

1.2 数据来源

降雨与产流产沙数据为黄委会天水水土保持科学试验站2011—2020年实测日数据汇总得到的历年数据,包括径流小区逐日降水量表和逐次径流泥沙测验成果表。

研究通过UAV/SoFM方法,获取黄土高原17个不同覆被的坡面径流小区(林地、草地、农地、对照小区)精细DEM,探究黄土地区不同水土保持措施(鱼鳞坑、等高耕作、横垄、对照)下的坡面径流小区泥沙连通性。

1.3 侵蚀性降雨标准计算

利用试验场坡面小区2011—2020年降雨产流产沙数据,侵蚀性降雨标准按照降雨量从大到小排列17个径流小区2011—2020年的所有的产流降雨数据,将对应小区的侵蚀量逐个累加,得到*N*次侵蚀性降雨的总侵蚀量(*q*),分别计算高于某一雨量的累计侵蚀量占总侵蚀量的百分比(PQ,%)。一般来说,期望允许土壤流失量占总流失量的20%以下,即侵蚀性降雨所引起的土壤流失量应占总流失量的80%以上。基于17个径流小区的产流降雨数据,对*x*与PQ求得拟合方程,并取PQ=80%时的降雨雨量为侵蚀性降雨标准(图2)。

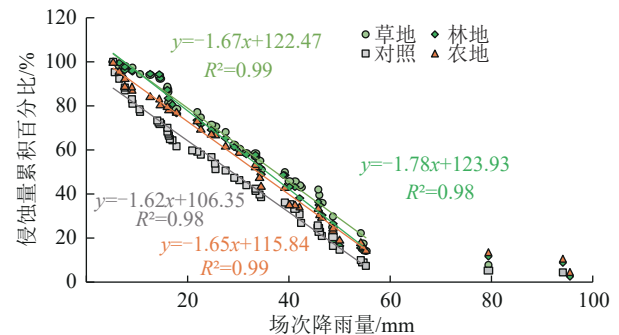


图2 坡面土壤侵蚀累积量与场次降水量关系

Fig. 2 Relationship between cumulative slope soil erosion and rainfall of a single event

通过这样的标准,可保证侵蚀性降雨所引起的土壤侵蚀量占总侵蚀量的80%以上^[25]。不同地区侵蚀性标准计算见表2,本文取80%的降雨标准。不同水土保持措施的径流小区侵蚀性降雨标准和径流深等指标取不同坡度小区的平均值。

1.4 泥沙连通性指数

BORSELLI等^[21]提出泥沙连通性概念,基本假设为流域内任意一点其泥沙连通性不仅受该点上坡汇流面积和平均坡度大小影响,且泥沙连通性强弱与该点侵蚀泥沙向下输移搬运的距离和流路坡度有关。

表2 侵蚀性降雨标准

Tab. 2 Statistics on erosive rainfall criteria

| 序号 | 区域 | 尺度 | 土地利用/土壤 | 降雨类型 | 侵蚀性降雨标准/mm | 标准 | 文献来源 |
|----|-----------|-----|---------|------|------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1 | 8 000个小区 | 坡面 | 综合 | 场次 | 12.7 | — | WISCHMEIER等 ^[6] |
| 2 | 8 000个小区 | 坡面 | 综合 | 场次 | 6.4 | 15 min内 | WISCHMEIER等 ^[6] |
| 3 | 黄土高原 | 坡面 | 农地 | 场次 | 8.1 | $p=80\%$ | 王万忠 ^[11] |
| 4 | 黄土高原 | 坡面 | 人工草地 | 场次 | 10.9 | $p=80\%$ | 王万忠 ^[11] |
| 5 | 黄土高原 | 坡面 | 林地 | 场次 | 14.6 | $p=80\%$ | 王万忠 ^[11] |
| 6 | 黄土高原 | 坡面 | 通常(农耕地) | 场次 | 9.9 | $p=80\%$ | 王万忠 ^[11] |
| 7 | 东北黑土 | 坡面 | 农地 | 场次 | 8.9 | $p=80\%$ | 高峰等 ^[8] |
| 8 | 东北黑土 | 坡面 | 农地 | 场次 | 11.6 | 侵蚀量90% | 高峰等 ^[8] |
| 9 | 东北黑土 | 坡面 | 农地 | 场次 | 13.9 | 200 t/km ² 和侵蚀量85% | 高峰等 ^[8] |
| 10 | 北京 | 坡面 | 农地 | 场次 | 18.9 | 综合 | 刘和平等 ^[14] |
| 11 | 赣北山区 | 坡面 | 红壤 | 场次 | 11.2 | $p=80\%$ | 马良等 ^[16] |
| 12 | 四川盆地紫色丘陵区 | 小流域 | 农耕地 | 场次 | 11.3 | $p=90\%$ | 李林育等 ^[17] |
| 13 | 喀斯特 | 坡面 | 农耕地 | 场次 | 15.0 | $p=80\%$ | 张文源等 ^[15] |
| 14 | 赣北第四纪红壤区 | 坡面 | 梯田 | 场次 | 16.2 | 综合分析评价 | 汪邦稳等 ^[13] |
| 15 | 赣北第四纪红壤区 | 坡面 | 裸露小区 | 场次 | 11.4 | 综合分析评价 | 汪邦稳等 ^[13] |
| 16 | 黄土高原 | 坡面 | 农地 | 场次 | 12.0 | — | 谢云等 ^[1] |
| 17 | 黄土高原 | 小流域 | 综合 | 场次 | 10.0 | | 谢云等 ^[1] |
| 18 | 黄土高原 | 坡面 | 林地小区 | 场次 | 21.0 | | 夏露等 ^[23] |
| 19 | 黄土高原 | 坡面 | 草地小区 | 场次 | 21.0 | | 夏露等 ^[23] |
| 20 | 黄土高原 | 坡面 | 裸地小区 | 场次 | 8.7 | | 夏露等 ^[23] |
| 21 | 黄土高原 | 坡面 | 农地小区 | 场次 | 9.7 | | 夏露等 ^[23] |
| 22 | 黄土高原 | 小流域 | 草地小流域 | 场次 | 16.5 | | 夏露等 ^[23] |
| 23 | 三峡库区 | 小流域 | 农地小流域 | 场次 | 10.0 | | 崔璨等 ^[3] |
| 24 | 鄱阳湖 | 流域 | — | 场次 | 14.0 | | 田杏敏等 ^[2] |
| 25 | 鄱阳湖 | 流域 | — | 日降雨 | 10.0 | | 田杏敏等 ^[2] |
| 26 | 喀斯特地区 | 坡面 | 生物措施 | 场次 | | 85%以上 | 杨坪坪等 ^[4] |
| 27 | 北京房山 | 坡面 | 黑土 | 场次 | 10.0 | | 王瀛等 ^[5] |
| 28 | 北京房山 | 坡面 | 褐土 | 场次 | 10.0 | | 王瀛等 ^[5] |
| 29 | 北京房山 | 坡面 | 紫土 | 场次 | 5.4 | | 王瀛等 ^[5] |
| 30 | 北京房山 | 坡面 | 红壤 | 场次 | 6.1 | | 王瀛等 ^[5] |
| 31 | 北京房山 | 坡面 | 黄土 | 场次 | 9.5 | | 王瀛等 ^[5] |
| 32 | 辽宁二道岭小流域 | 坡面 | 地埂植物带小区 | 场次 | 21.15 | $p=95\%$ | 包昂等 ^[25] |
| 33 | 辽宁二道岭小流域 | 坡面 | 顺垄小区 | 场次 | 11.65 | $p=95\%$ | 包昂等 ^[25] |
| 34 | 辽宁二道岭小流域 | 坡面 | 横垄小区 | 场次 | 9.6 | $p=95\%$ | 包昂等 ^[25] |
| 35 | 辽宁二道岭小流域 | 坡面 | 裸地小区 | 场次 | 4.45 | $p=95\%$ | 包昂等 ^[25] |

泥沙连通性强弱通过 IC 值反映,具体计算公式为:

$$IC = \log_{10} \left(\frac{D_{up}}{D_{dn}} \right) = \log_{10} \left(\frac{\overline{W} \overline{S} \sqrt{A}}{\sum_i \frac{d_i}{W_i S_i}} \right)$$

式中: D_{up} 为连通性的上坡组成部分,反映上坡汇集区泥沙向下输移的潜力; D_{dn} 为连通性的下坡组分,表示泥沙输移到下方目标所经过的长度^[26]; W 为上坡汇集区的平均权重因子; S 为上坡汇流区域的平均坡度; A 为上坡汇流区域的面积, m^2 ; d_i 、 S_i 和 W_i 分别为第 i 个栅格沿水流方向到泥沙汇的路径长度, m ;泥沙连通性指数(IC)从 $-\infty \sim +\infty$, IC 值越大,泥沙连通性越强。本研究采用 CAVALLI 等^[27]对 IC 的计算方法,选择地表糙度指数(RI)作为泥沙输移阻力的权重因子 W ^[28]。

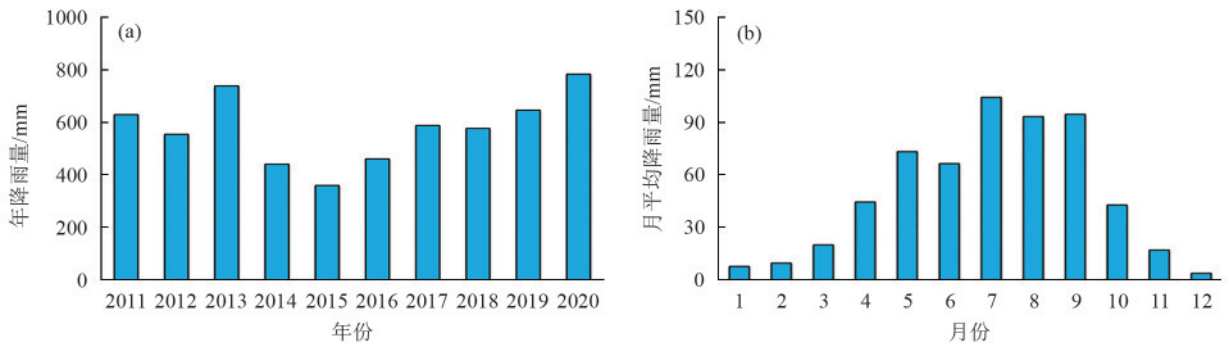


图 3 试验场年际和年内降雨量

Fig.3 Interannual and annual rainfall at the experimental site

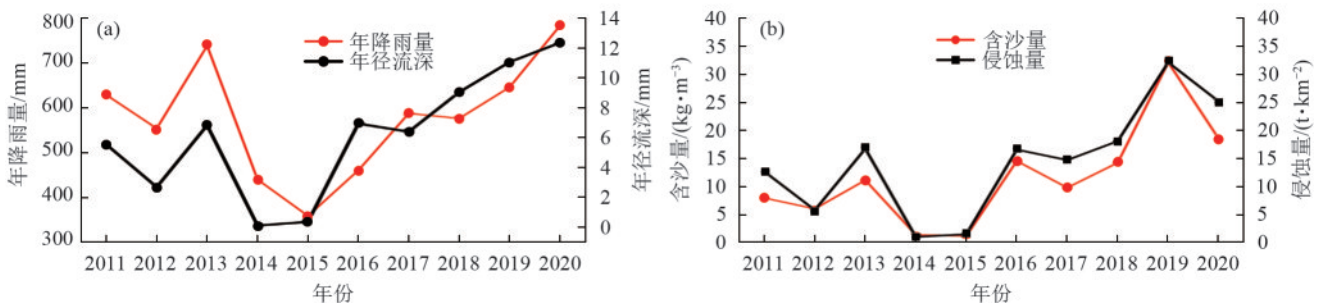


图 4 降水径流输沙年际变化

Fig.4 Interannual variation of rainfall, runoff and sediment transport

2.2 不同水土保持措施下产流产沙和侵蚀性降雨标准

根据研究区 2011—2020 年不同水土保持措施下年产流特征发现,对照和农地小区的年径流深和径流系数高于林地和草地小区。其中,对照小区的径流深和径流系数分别为 16.1 mm 和 2.79%,农地径流深和径流系数略小于对照小区,分别为 15.12 mm 和 2.62%,林地和草地差异不明显,草地年均产流量和径流系数最小,分别为 11.6 mm 和 2.01%(图 5)。

2 结果与分析

2.1 年际产流产沙变化

研究区 2011—2020 年 1 009 场降雨事件显示,10 a 平均年降水量为 (576.9 ± 131.51) mm,年际和年内降雨分布极不均匀,2015 年降雨量最低,为 359.1 mm,最高为 2020 年的 782.2 mm。自 2015 年开始,试验场降雨量呈上升趋势(图 3a)。试验场 4—10 月降雨量占全年降雨量的 80.74%~96.16%,其他月份降雨量仅占全年降雨量的 20% 以下(图 3b)。

17 个径流小区逐年的降雨量和径流深年际波动存在明显同步性(图 4a),2014 年、2015 年降雨量、含沙量和侵蚀量较低。2015 年以后,降雨量呈上升趋势,径流深同步上升,含沙量和侵蚀量呈波动上升趋势(图 4b)。

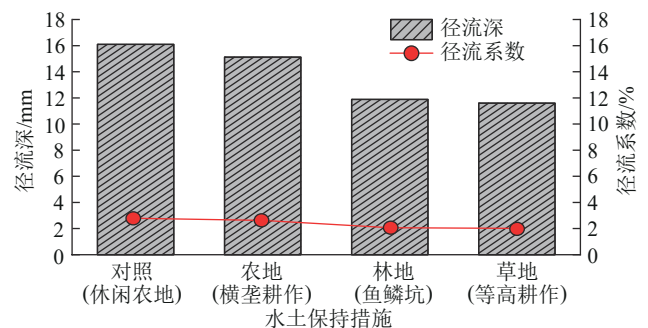


图 5 不同径流小区径流深和径流系数

Fig.5 Runoff depth and runoff coefficient of different runoff plots

不同水土保持措施有效降低侵蚀模数和含沙量,鱼鳞坑的林地、等高耕作的草地差别不大,均优于横垄耕作的农地。不同水土保持措施可提高侵蚀性降雨标准,与对照小区的标准(11.62 mm)相比,等高耕作的草地侵蚀性降雨标准最大,为 18.26 mm,其次为鱼鳞坑的林地,为 18.08 mm,林地和草地小区标准差异不明显。横垄耕作的农地侵蚀性降雨标准最小,为 13.76 mm(图 6)。

2.3 侵蚀性降雨量分布特征

试验场 2011—2020 年不同小区平均降雨量为(576.9±131.51) mm。最大降雨量达到 782.2 mm,最小降雨量仅为 359.1 mm。各年的雨季(6—8月)降雨量均超过年降雨总量的 25%,降雨分布相对集中。在 2011—2020 年,共发生 51 次侵蚀性降雨事件,产

生土壤侵蚀的年平均降雨量约为(182.3±104.6) mm,占总降雨量的 29.59%(表 3)。

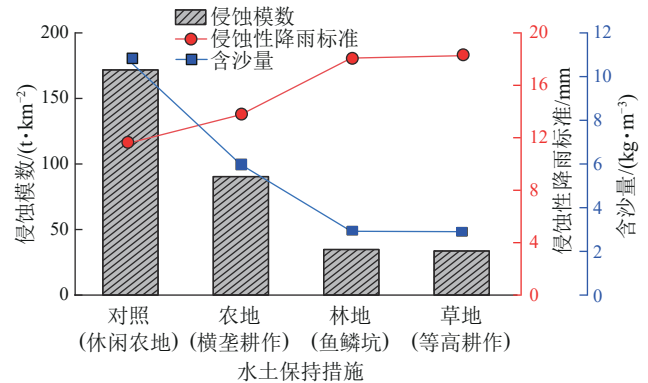


图 6 不同水土保持措施侵蚀性降雨标准

Fig.6 Erosive rainfall criteria of different soil and water conservation measures

表 3 侵蚀性降雨量年际分布

Tab. 3 Interannual distribution of erosive rainfall

| 年份 | 总降雨量/ mm | 6—8月降雨量/ mm | 6—8月降雨量占比/ % | 侵蚀性降雨量/ mm | 侵蚀性降雨量占比/ % | 侵蚀性降雨 场次 |
|------|-------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-------------|
| 2011 | 628.2 | 283.6 | 45.14 | 161.0 | 25.63 | 3 |
| 2012 | 553.6 | 263.9 | 47.67 | 122.4 | 22.11 | 4 |
| 2013 | 737.5 | 443.7 | 60.16 | 246.2 | 33.38 | 5 |
| 2014 | 440.0 | 118.8 | 27.00 | 23.6 | 5.36 | 1 |
| 2015 | 359.1 | 129.1 | 35.95 | 51.7 | 14.40 | 1 |
| 2016 | 460.4 | 164.9 | 35.82 | 144.1 | 31.30 | 6 |
| 2017 | 587.3 | 218.8 | 37.26 | 166.6 | 28.37 | 4 |
| 2018 | 575.8 | 250.4 | 43.49 | 207.4 | 36.02 | 6 |
| 2019 | 645.3 | 256.8 | 39.80 | 362.8 | 56.22 | 12 |
| 2020 | 782.2 | 513.5 | 65.65 | 337.3 | 43.12 | 9 |
| 年平均 | 576.9±124.8 | 264.4±121.0 | 43.8±11.1 | 182.3±104.6 | 29.6±13.6 | 5.1±3.2 |

注:表中年平均数据为平均值±标准差。下同。

与对照小区相比,不同水土保持措施下的坡面小区具有较好的减流减沙能力。其中,等高耕作的草地的减流减沙能力最强,分别为 27.95% 和 80.39%;其次为鱼鳞坑的林地,减流减沙率分别为 26.14% 和 79.78%。农地在减少径流方面表现出较差的效果,仅有 6.1%,但农地的减沙效果较为明显,为 47.41%(表 4)。

不同水土保持措施下的侵蚀性降雨次数占总降雨场次数比例均低于对照小区(5.05%),等高耕作的草地侵蚀性降雨次数占总降雨场次数比例最小,为 4.22%;其次为林地的 4.34%,农地占比为 4.64%。侵蚀性降雨次数占总降雨场次数比例越大,径流系数越大,对应水土保持措施下的侵蚀性降雨标准越小(表 4)。

不同水土保持措施降低各坡面小区侵蚀性降雨

量,并且提高侵蚀性降雨标准。对照小区的年侵蚀性降雨量为 186.99 mm,对应最低的侵蚀性降雨标准 11.62 mm。与之相比,草地侵蚀性降雨标准最高,为 18.26 mm,林地与草地接近,农地侵蚀性降雨标准最低,为 13.76 mm(图 7)。与对照小区相比,草地的侵蚀性降雨量最低,为 170.06 mm,其次为林地和农地。

2.4 侵蚀性降雨标准与泥沙连通性的关系

不同水土保持措施有效降低泥沙连通性 IC 值,对照小区 IC 平均值最大,为 -2.18,泥沙连通性最强。与对照小区相比,等高耕作的草地 IC 值最小,为 -3.20,泥沙连通性最弱;林地与草地差别不大,IC 值为 -3.07;其次为农地,IC 值为 -2.51。可以看出,不同水土保持措施下的 IC 值与侵蚀性降雨标准呈负相关,侵蚀性降雨标准越大,IC 值越小,泥沙连通性越弱(图 8)。

表 4 不同水土保持措施下侵蚀性降雨分布

Tab. 4 Distribution of erosive rainfall under different soil and water conservation measures

| 地块 | 林地 | 草地 | 对照小区 | 农地 |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 降雨场次数 | 1 009 | 1 009 | 1 009 | 1 009 |
| 侵蚀场次数 | 42.60±2.70 | 43.80±3.96 | 51.00±1.41 | 46.80±3.70 |
| 侵蚀性降雨次数占总降雨场次数比例/% | 4.22±0.27 | 4.34±0.39 | 5.05±0.14 | 4.64±0.37 |
| 年降雨量/mm | 576.94±131.51 | 576.94±131.51 | 576.94±131.51 | 576.94±131.51 |
| 年平均侵蚀降雨量/mm | 170.06±12.04 | 165.44±8.36 | 186.99±9.96 | 178.84±11.96 |
| 侵蚀性降雨标准/mm | 18.08 | 18.26 | 11.62 | 13.76 |
| 年平均径流深/mm | 11.89±3.69 | 11.60±3.54 | 16.10±3.52 | 15.12±3.76 |
| 年平均侵蚀模数/(t·km ⁻²) | 34.73±13.74 | 33.68±19.83 | 171.83±73.22 | 90.36±50.37 |
| 年平均含沙量/(kg·m ⁻³) | 2.92±5.11 | 2.90±7.88 | 10.67±12.43 | 5.97±11.36 |
| 径流系数/% | 2.06±1.75 | 2.01±1.46 | 2.79±0.95 | 2.62±1.92 |

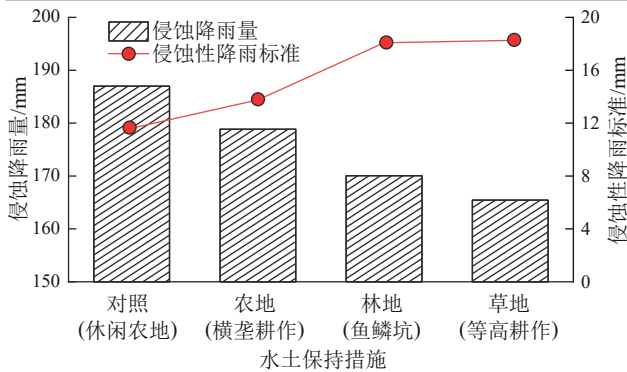


图 7 不同水土保持措施侵蚀降雨量

Fig. 7 Erosion rainfall of different soil and water conservation measures

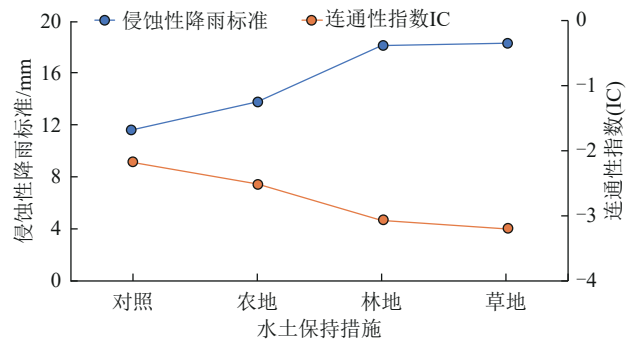
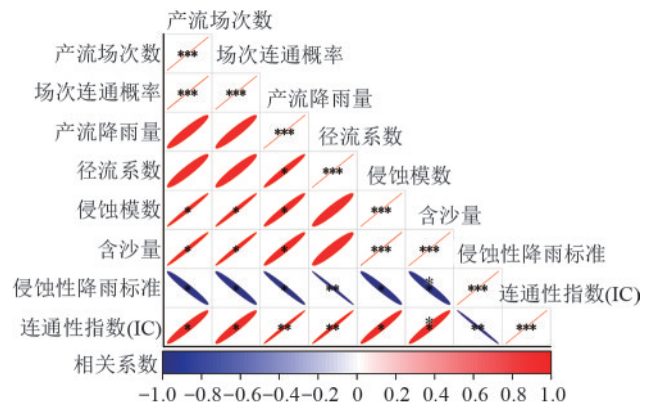


图 8 IC 值与侵蚀性降雨标准的关系

Fig. 8 Relationship between IC value and erosive rainfall criteria

在侵蚀性降雨标准和 IC 关系的基础上,研究侵蚀性降雨标准的其他影响因素。侵蚀性降雨标准与产流场次数、连通性指数 IC、径流系数等指标呈现负相关,侵蚀性降雨标准值越大,产流场次数越小,场次连通概率越小,泥沙连通性越弱,产流发生的可能性越小,连通概率越低,产流径流深、输沙模数和含沙量越小。侵蚀性降雨标准越低,表示单位降雨对土壤的侵蚀作用越小,土壤侵蚀的可能性较低,产流和产沙能力越弱(图 9)。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$ 。

图 9 侵蚀性降雨影响因素相关性

Fig. 9 Correlation analysis of factors influencing erosive rainfall

3 讨论

3.1 不同水土保持措施对侵蚀性降雨标准和泥沙连通性的响应

黄土丘陵沟壑区地形复杂多样,土壤结构疏松,极易产生土壤侵蚀^[29]。水土保持措施是影响侵蚀性降雨的重要因素^[30],由于不同植被类型的植被覆盖程度^[31]、植被结构层次、植被根系生长方式等特征不同^[32],不同水土保持措施的侵蚀性降雨标准不同,其水土保持效益也有所差异。不同学者得出不同水土保持措施下侵蚀性降雨标准不同,王万忠^[11]在 80% 的标准下得出,黄土高原林地的场次侵蚀性降雨标准为 14.6 mm,而人工草地的标准为 10.9 mm;包昂等^[25]在 95% 的标准下得出,东北区顺垄小区的场次侵蚀性降雨标准为 11.65 mm。

本研究表明,不同水土保持措施下的径流小区产流产沙与对照小区相比,均发生显著下降,与前人^[33-34]研究结果相一致。综合来看,横垄耕作的农地,相比于林地和草地,植被覆盖不足,翻耕播种扰

乱土壤结构,从而增加水土流失的程度,表现为较差的减流减沙能力。草地通常具有丰富的枯落物,能够减少雨滴对土壤的直接打击,从而减缓土壤侵蚀的速率,对降雨势能的消减及径流泥沙的调控作用,展示出较优的水土保持效益;林地坡面上建造一系列的鱼鳞坑,增大侵蚀泥沙空间异质性,阻断或延迟地表水流,对径流泥沙的调控作用均较强。且树木的根系能够有效固定土壤,冠层覆盖可降低降雨冲刷的强度,有效降低产流产沙。

水土保持措施是影响泥沙连通性的重要因素^[35]。本研究发现,与对照小区相比,不同水土保持措施的泥沙连通性均下降,等高耕作的草地泥沙连通性最弱,其次是鱼鳞坑的林地,横垄耕作的农地连通性最强。草地的枯落物覆盖地表可有效保护土壤,阻止雨水直接接触土壤表面,降低土壤侵蚀的程度,降低泥沙连通性。林地根系更为发达,增加地表起伏程度,且鱼鳞坑的修建增大侵蚀泥沙空间异质性,阻断或延迟地表水流,降低泥沙连通性。农地采用横垄耕作的措施,在坡面形成一种阻挡泥沙输移的屏障,有效中断或延迟地表水流,防止泥沙沿着坡面和沟道方向流动,从而降低泥沙连通性。

3.2 侵蚀性降雨标准的影响因素

黄土丘陵区由于地形的复杂性,水流在地表的流动易受到地形起伏和地表植被的影响,当降雨量较大时,发生侵蚀性降雨^[5]。影响侵蚀性降雨的因素较多,其中包括降雨量、降雨强度、径流系数、连通性强弱、含沙量和植被覆盖等^[7]。综合考虑,可更准确地评估侵蚀性降雨事件对土壤侵蚀的影响。

侵蚀性降雨标准是描述降雨对土壤侵蚀性的指标,通常指降雨强度和降雨量的组合。标准越低,表示单位降雨对土壤的侵蚀作用越小,土壤侵蚀的可能性越低^[8]。若坡面径流小区IC值、侵蚀模数、含沙量、场次连通概率等的值较高,则该研究区产流能力相对较强,且侵蚀性降雨标准的值比较低,需要对该区加强水土保持措施,以防止水土流失,反之亦然^[28]。

4 结论

1)不同水土保持措施下的径流小区产流产沙效果与对照小区相比均显著下降($p < 0.05$),减流减沙率以等高耕作的草地最优,分别为27.95%和80.39%。其次为鱼鳞坑的林地,分别为26.14%和79.78%,林草差异不明显。农地小区在减少径流方面表现出较差的效果,仅有6.1%,减沙效果较为明显,为47.41%。

2)不同水土保持措施径流小区侵蚀性降雨标准相比对照小区发生显著提高($p < 0.05$)。与对照小区的标准(11.62 mm)相比,草地和林地小区侵蚀性降雨标准最大,分别为18.26、18.08 mm,横垄耕作的农地侵蚀性降雨标准居中,为13.76 mm。场次降水坡面产流比例与对照小区的5.05%相比,草地、林地和农地小区分别为4.22%、4.34%和4.64%、95%以上的降雨未产流。

3)泥沙连通性的降低导致侵蚀性降雨标准提高,与对照小区泥沙连通性相比,草地泥沙连通性最低,其次是林地和农地,不同水土保持措施均不同程度地减少泥沙连通性。侵蚀性降雨标准与产流场次、连通性指数(IC)、径流系数等指标呈负相关,侵蚀性降雨标准值越大,产流场次次数越小,泥沙连通性越弱,产流产沙能力越弱。

参考文献:

- [1] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
XIE Y, LIU B Y, ZHANG W B. Study on standard of erosive rainfall[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000,14(4):6-11.
- [2] 田杏敏,李凤英,何小武,等.鄱阳湖流域日降雨的侵蚀性雨量标准研究[J].水土保持学报,2021,35(3):185-189.
TIAN X M, LI F Y, HE X W, et al. Study on daily erosive rainfall standard in the Poyang Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):185-189.
- [3] 崔璨,王小燕,孙宁婷,等.三峡库区典型农业小流域次降雨产沙过程及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):17-23.
CUI C, WANG X Y, SUN N T, et al. Sediment yield process and its influencing factors under sub-rainfall in typical agricultural small watershed, Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 17-23.
- [4] 杨坪坪,李勇,宋涛,等.典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J].生态环境学报,2021,30(1):53-62.
YANG P, LI Y, SONG T, et al. Characteristics of erosive rainfall patterns and benefit of soil and water conservation for biological measures on slope in karst region[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(1): 53-62.
- [5] 王瀛,杨扬,刘宝元,等.中国水蚀区5种典型土壤的侵蚀性降雨阈值比较[J].水土保持通报,2022,42(4):227-233.
WANG Y, YANG Y, LIU B Y, et al. Erosive rainfall thresholds for five typical soils in water erosion region of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 227-233.

- [6] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [7] 魏天兴. 黄土残塬沟壑区降雨侵蚀分析[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 47-50.
WEI T X. Study on rainfall and erosion in loess gullied-hilly area [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(4): 47-50.
- [8] 高峰, 詹敏, 战辉. 黑土区农地侵蚀性降雨标准研究[J]. 中国水土保持, 1989, (11): 19-21.
GAO F, ZHAN M, ZHAN H. Study on criteria of erosive rain in farmland of chernozem in Heilongjiang Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 1989, (11): 19-21.
- [9] 肖培青, 姚文艺, 刘希胜, 等. 植被固土减蚀作用的力学效应[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 59-62.
XIAO P Q, YAO W Y, LIU X S, et al. Mechanical effects of vegetation in soil conservation and soil erosion reduction [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3): 59-62.
- [10] 王巧利, 贾燕锋, 王宁, 等. 黄土丘陵沟壑区自然恢复坡面植物根系的分布特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 16-22.
WANG Q L, JIA Y F, WANG N, et al. Distribution of root on vegetation recovery slope in the hilly and gully Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 16-22.
- [11] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究 III: 关于侵蚀性降雨的标准问题[J]. 水土保持通报, 1984, 4(2): 58-63.
WANG W Z. Study on the relations between rainfall characteristics and loss of soil in loess region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1984, 4(2): 58-63.
- [12] 殷水清, 谢云. 黄土高原降雨侵蚀力时空分布[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 29-33.
YIN S Q, XIE Y. Spatial variations and seasonal distributions of rainfall erosivity on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(4): 29-33.
- [13] 汪邦稳, 方少文, 宋月君, 等. 赣北第四纪红壤区侵蚀性降雨强度与雨量标准的确定[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 100-106.
WANG B W, FANG S W, SONG Y J, et al. Research for standard of erosive rainfall on quaternary red soil area in north of Jiangxi Province in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(11): 100-106.
- [14] 刘和平, 袁爱萍, 路炳军, 等. 北京侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 215-217.
LIU H P, YUAN A P, LU B J, et al. Study on erosive rainfall standard of Beijing [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 215-217.
- [15] 张文源, 王百田, 杨光熾, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
ZHANG W Y, WANG B T, YANG G X, et al. Erosive rainfall and characteristics analysis of sediment yield on yellow soil area in karst mountainous [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11): 1776-1782.
- [16] 马良, 左长清, 邱国玉. 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 74-79.
MA L, ZUO C Q, QIU G Y. Erosive rainfall characteristics on red soil slope land in northern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 74-79.
- [17] 李林育, 王志杰, 焦菊英. 紫色丘陵区侵蚀性降雨与降雨侵蚀力特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 8-16.
LI L Y, WANG Z J, JIAO J Y. Erosive rainfall and rainfall erosivity in purple hilly area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(1): 8-16.
- [18] NAJAFI S, DRAGOVICH D, HECKMANN T, et al. Sediment connectivity concepts and approaches [J]. Catena, 2021, 196: 261-274.
- [19] HOOKE J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: A conceptual framework and methodology [J]. Geomorphology, 2003, 56(1/2): 79-94.
- [20] 张光辉. 从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J]. 水科学进展, 2021, 32(2): 295-308.
ZHANG G H. Understanding sediment connectivity from soil erosion perspective [J]. Advances in Water Science, 2021, 32(2): 295-308.
- [21] BORSELLI L, CASSI P, TORRI D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: A GIS and field numerical assessment [J]. Catena, 2008, 75(3): 268-277.
- [22] WOHL E, MAGILLIGAN F J, RATHBURN S L. Introduction to the special issue: Connectivity in geomorphology [J]. Geomorphology, 2017, 277: 1-5.
- [23] 夏露, 宋孝玉, 符娜, 等. 陇东黄土塬区不同下垫面条件下侵蚀产沙的降雨阈值[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 828-838.
XIA L, SONG X Y, FU N, et al. Threshold standard of erosive rainfall under different underlying surface conditions in the Loess Plateau gully region of east Gansu, China [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(6): 828-838.
- [24] JEAN P. Soil erosion in the anthropocene: Research needs [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(1): 64-84.
- [25] 包昂, 范昊明, 许秀泉, 等. 东北半干旱区不同耕作方式下的侵蚀性降雨标准比较[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 81-88.
BAO A, FAN H M, XU X Q, et al. Comparison of erosive rainfall standards under different tillage methods

- in the semi-arid region of northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(1): 81-88.
- [26] 康振威, 李勇, 黄智刚, 等. DEM分辨率对集约化蔗区小流域水文连通性指数的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 198-207.
- KANG Z W, LI Y, HUANG Z G, et al. Effects of DEM resolution on hydrological connectivity index of small watershed in intensive sugarcane area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 198-207.
- [27] CAVALLI M, TREVISANI S, COMITI F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. Geomorphology, 2013, 188: 31-41.
- [28] 王镭华, 信忠保, 梁潇瑜. 植被和梯田对黄土高原小流域泥沙连通性的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(9): 3756-3765.
- WANG R H, XIN Z B, LIANG X Y. Effects of terrace and vegetation on sediment connectivity in a small watershed on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3756-3765.
- [29] 高磊, 饶良懿, 崔飞波, 等. 太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 5-11.
- GAO L, RAO L Y, CUI F B, et al. Effect of erosive rainfall on runoff and sediment yield of typical plant measures in rocky mountain areas of Taihang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 5-11.
- [30] 张春霞, 董智, 高波, 等. 侵蚀性雨型分类及不同植被类型对棕壤坡面土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 36-41.
- ZHANG C X, DONG Z, GAO B, et al. Effects of erosive rainfall patterns and different vegetation types on soil erosion in slope with brown soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 36-41.
- [31] 何毅, 穆兴民, 赵广举, 等. 基于黄河河潼区间输沙量过程的特征性降雨研究[J]. 泥沙研究, 2015, 40(2): 53-59.
- HE Y, MU X M, ZHAO G J, et al. Variation of erosive rainfall and extreme rainfall based on processes of sediment discharge in Hekou: Tongguan reach of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(2): 53-59.
- [32] 娄义宝, 康宏亮, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区沟头植被根系垂直分布及其对土壤抗侵蚀性的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(1): 90-103.
- LOU Y B, KANG H L, WANG W L, et al. Vertical distribution of vegetation roots and its influence on soil erosion resistance of gully heads on the gullied Loess Plateau [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(1): 90-103.
- [33] 朱燕琴, 赵志斌, 齐广平, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型次降雨产流产沙特征[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 28-34.
- ZHU Y Q, ZHAO Z B, QI G P, et al. Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation types under individual rainfall events in loess hilly and gully region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 28-34.
- [34] 陈奇伯, 王克勤, 齐实, 等. 黄土丘陵区坡耕地水土流失与土地生产力的关系[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1463-1469.
- CHEN Q B, WANG K Q, QI S, et al. Soil and water erosion in its relation to slope field productivity in hilly gully areas of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(8): 1463-1469.
- [35] MU H L, YU X J, FU S H, et al. Effect of stem basal cover on the sediment transport capacity of overland flows [J]. Geoderma, 2019, 337: 384-393.