

秸秆覆盖对黑土区侵蚀沟植被恢复和固土的作用

张瑜, 刘肃, 徐子棋, 崔斌

(吉林省水土保持科学研究院, 吉林 长春 130033)

摘要: [目的] 评估东北黑土区秸秆覆盖技术对侵蚀沟的防护作用, 旨在为该区侵蚀沟植被恢复、水土流失防治提供数据支撑。[方法] 通过野外试验, 观测了秸秆覆盖和无秸秆覆盖条件下侵蚀沟不同坡向土壤水热状况、苜蓿生长状况和水土流失状况的变化。[结果] ① 秸秆覆盖能够显著改善侵蚀沟土壤水热状况, 即提高土壤水分含量, 降低 14:00 土壤温度, 阴坡秸秆覆盖提高土壤含水量 1.8%~6.8%, 阳坡秸秆覆盖提高土壤含水量 1.1%~4.0%, 阴坡秸秆覆盖降低 14:00 土温 0.6~3.1 °C, 阳坡降低 14:00 土温 0.9~3.6 °C; ② 秸秆覆盖显著改善了侵蚀沟不同坡向苜蓿的生长及生物量积累状况, 有利于侵蚀沟岸植被恢复; ③ 秸秆覆盖可有效拦蓄径流、减少泥沙侵蚀量, 全年平均保水率为 57.34%, 全年平均保沙率为 67.60%。[结论] 秸秆覆盖是一种有效的侵蚀沟治理措施, 该技术的推广将有助于减缓黑土区水土流失, 保障国家粮食安全。

关键词: 黑土区; 秸秆覆盖; 侵蚀沟; 苜蓿

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)01-0157-05

中图分类号: S157.2

文献参数: 张瑜, 刘肃, 徐子棋, 等. 秸秆覆盖对黑土区侵蚀沟植被恢复和固土的作用[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 157-161. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.01.023; Zhang Yu, Liu Su, Xu Ziqi, et al. Effects of straw mulching on vegetation restoration and soil loss control on eroded gullies in black soil area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 157-161.

Effects of Straw Mulching on Vegetation Restoration and Soil Loss Control on Eroded Gullies in Black Soil Area

Zhang Yu, Liu Su, Xu Ziqi, Cui Bin

(Institute of Soil and Water Conservation of Jilin Province, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: [Objective] The impacts of straw mulching technology on the gully erosion in black soil area were evaluated in order to provide reference for vegetation restoration and soil erosion prevention. [Methods] Field experiments were conducted to observe the variations in soil hydrothermal conditions, alfalfa growth, and soil as well as water loss in two slope aspects of gully banks under the presence and absence of straw mulch. [Results] ① Straw mulching was observed to significantly improve the soil water and heat conditions in the gully. Straw mulching on the shady and sunny slopes increased the soil moisture by 1.8%—6.8% and 1.1%—4.0%, respectively, and reduced the soil temperature at 14:00 by 0.6—3.1 °C and 0.9—3.6 °C, respectively. ② Further, the straw mulching evidently improved the growth and biomass accumulation of alfalfa in two slope aspects of the gully banks, which was conducive to the vegetation restoration of gully banks. ③ Straw mulch could also effectively reduce soil erosion on the gully banks. The annual average runoff and sediments reduction rates were 57.34% and 67.60%, respectively. [Conclusion] The results obtained indicate that straw mulching is an effective measure for the control of gully erosion; consequently, the promotion of this technology will facilitate the reduction in the soil and water loss in the black soil area, which will ensure the food security of the country.

Keywords: black soil area; straw mulching; gully; alfalfa

收稿日期: 2019-06-25

修回日期: 2019-09-12

资助项目: 国家重点研发计划“东北黑土区侵蚀沟生态修复关键技术研发与集成示范”项目(2017YFC0504200); 国家重点研发计划“山地丘陵区坡面理水防蚀工程措施优化与集成”项目(2018YFC0507002-05)。

第一作者: 张瑜(1980—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事黑土区水土保持研究。Email: 124058200@qq.com。

通讯作者: 徐子棋(1990—), 女(汉族), 吉林省白山市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土保持生态修复研究。Email: 235175758@qq.com。

中国东北黑土区总面积 $1.03 \times 10^6 \text{ km}^2$, 该区域土壤肥沃, 土质疏松, 有利于耕作, 且地力较高, 是中国主要的粮食生产区域之一^[1-3]。由于人类不合理的开发利用, 该区域水土流失面积不断扩大, 程度不断加剧^[4]。沟蚀是东北黑土区主要的水土流失形式之一^[5]。近年来, 该区域侵蚀沟数量不断增加, 程度不断发育^[4]。第一次全国水利普查数据显示, 东北黑土区侵蚀沟数量为 2.96×10^5 条, 且该区域沟蚀发育迅速, 2006—2012 年增加了 4.00×10^4 余条^[2]。沟蚀不仅降低土壤质量, 严重侵占、切割了农耕地, 影响农业生产, 而且严重地影响了该区域生态结构、功能^[1,4]。因此, 由于水力侵蚀生态破坏的严峻性及其对农业可持续发展的影响, 黑土区侵蚀沟的防治成为近年来研究的热点^[1,3]。

秸秆覆盖是一种水土保持耕作核心技术, 其可以减少水力侵蚀, 增加入渗, 改善土壤理化性状, 并能够提高土壤有机质含量^[6-8]。多位学者通过室外和室内试验相结合, 研究了不同土壤类型坡耕地秸秆覆盖的水土保持效果^[9-11]。前人通过室内试验和室外试验研究了不同土壤类型区(黑土区、黄土区、紫色土区和红壤区等)坡面秸秆覆盖对水土流失、养分流失、水力学特征等方面的影响^[6,7,12-17]。徐锡蒙等^[18-19]、覃超等^[20]、温磊磊等^[8]进行室内模拟试验研究了秸秆覆盖对黄土区沟蚀的影响。严坤等^[21]对三峡库岸秸秆覆盖的水土保持作用进行了分析。朱高立等^[22]在室内模拟降水条件下研究了秸秆覆盖对水蚀崩岗的治理效果。然而室外试验条件下秸秆覆盖对黑土区沟蚀及侵蚀沟植被恢复影响的研究却鲜有报道。

本研究通过野外试验, 研究了秸秆覆盖对黑土区侵蚀沟岸土壤水、热、植被生长和水土流失的影响, 以为秸秆覆盖在侵蚀沟植被恢复、水土流失防治应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

项目区位于吉林省东辽县杏木国家级水土保持科技示范园区内, 地理坐标为东经 $125^{\circ}22'40''$ — $125^{\circ}26'10''$, 北纬 $42^{\circ}58'05''$ — $43^{\circ}01'40''$ 。该区域属中温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温 5.2°C , 有效积温 $2\ 700 \sim 2\ 800^{\circ}\text{C}$, 最高气温 38°C , 最低气温 -40°C , 年均无霜期 137 d, 年均日照时数 2 497.9 h。年最大降水量 911.0 mm, 年最小降雨量 410.6 mm, 年均降水量 658.1 mm, 土壤类型以暗棕壤为主。

1.2 试验布设

试验布置于园区内一条东西走向侵蚀沟的沟岸

之上。于 2017 年 4 月初对侵蚀沟两侧各 20 m 沟岸进行整形后, 形成坡度为 15° , 坡长 4 m 的直线型坡面。进行刨毛坡面表层土后, 在整个坡面均匀撒播苜蓿(*Medicago sativa*)草籽, 播种量 $18 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。在阴坡(南坡)和阳坡(北坡)各 10 m 长度范围撒播草籽的坡面铺盖由干玉米秸秆横向编织成的草帘, 施用量为 $3\ 000 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 利用 U 型钢丝打入土内固定。其余阴坡和阳坡两侧各 10 m 坡面利用铁锹人工夯实, 不做秸秆铺盖。在阳坡秸秆覆盖处和无秸秆覆盖处离坡底 1.5 m 处分别设置一个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的径流小区, 四周用 30 cm 高的铁皮围起来, 小区右下角铁皮开孔并挖坑放置一个水桶用来接收径流。

1.3 测定指标

土壤含水量、土壤温湿度的测定采用中国赛亚斯公司生产的 SYS-TDR200 型土壤水分温度速测仪(探针长度 6 cm)。土壤温度和湿度分别在阳坡、阴坡秸秆覆盖处和无秸秆覆盖处的坡上、坡中和坡下测定, 并取平均值。从 2017 年 5 月 30 日至 9 月 30 日, 每月 15 日和 30 日的 14:00 进行测定。

苜蓿株高和主根长测定在分别在阳坡、阴坡秸秆覆盖处和无秸秆覆盖处各选择 10 株长势具有代表性的植株, 用卷尺进行测定, 精确到 0.1 cm。苜蓿株高在 2017 年 5 月 20 日至 9 月 27 日每 10 d 测定一次。主根长于 6 月 30 日, 7 月 30 日, 8 月 30 日和 9 月 30 日测定一次。苜蓿的地上、地下部分鲜重于 9 月 30 日在阳坡、阴坡秸秆覆盖处和无秸秆覆盖处各挖区 10 株长势具有代表性的苜蓿用天平称重(10 株占地投影面积约 100 cm^2), 精确到 0.01 g。

产流降水量和降水时间用 DL16 WMO 寒旱极地气象站进行观测, 从 2017 年 4 月初开始, 观测到 9 月 30 日。平均雨强计算公式:

$$\text{平均雨强} = \text{降水量} / \text{降水时间} \quad (1)$$

径流结束后, 对小区径流手收集桶内的径流体积进行称量, 之后静置 1d, 倒掉上清液并用烘箱 105°C 烘至恒重, 称量泥沙重。

1.4 数据处理及分析

利用 Excel 进行数据整理及图、表绘制, 利用 SPSS 17.0 进行方差分析(ANNOVA 单因素方差分析 Duncan 法)、相关分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖对侵蚀沟岸土壤水热状况影响

由图 1a 可知, 本研究侵蚀沟在整个观测过程中阳坡的土壤含水量都低于阴坡, 且同坡向秸秆覆盖处

土壤含水量高于无秸秆覆盖处。阴坡秸秆覆盖提高土壤含水量 1.8%~6.8%，阳坡秸秆覆盖提高土壤含水量 1.1%~4.0%。由图 1b 可知，同处理时，阳坡 14:00 时土壤温度高于阴坡，同坡向时，秸秆覆盖处 14:00 土壤温度低于无秸秆覆盖处。阴坡秸秆覆盖

降低 14:00 土温 0.6~3.1℃，降低 14:00 土温 0.9~3.6℃；这说明：秸秆覆盖能够保持、提高土壤含水量，且能降低 14:00 的土壤温度。因此，秸秆覆盖更有利于为侵蚀沟两岸植被供应水分，并利于降低 14:00 高温对植被的伤害，使土壤环境更有利于植物生长。

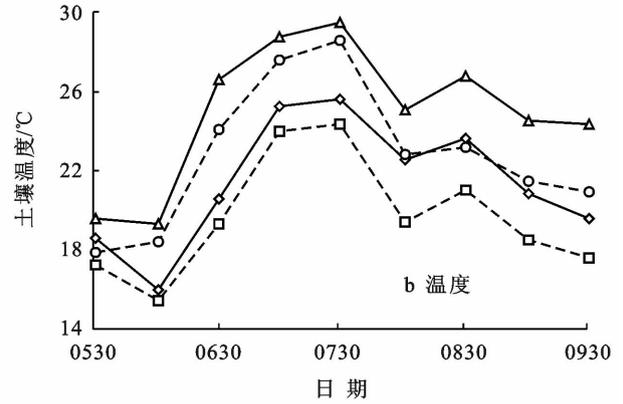
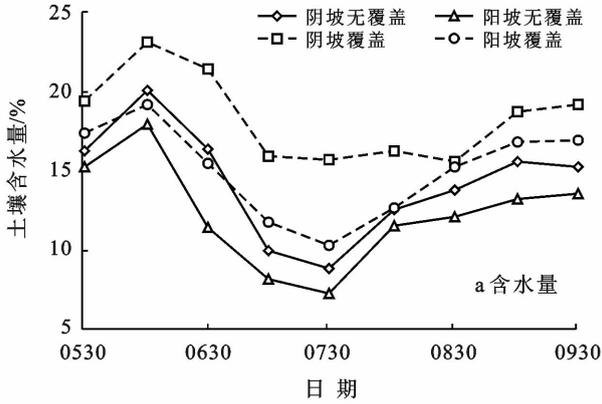


图 1 秸秆覆盖对侵蚀沟土壤水热状况影响

2.2 秸秆覆盖对侵蚀沟岸苜蓿生长及生物量积累影响

苜蓿株高和主根长生长特征见图 2。由图 2 可知，苜蓿在生长期内的生长速度总趋势为“慢—快—慢”，速生期是 2017 年 6 月 19 日至 8 月 8 日，速生期内阳坡覆盖、阳坡无覆盖、阴坡覆盖和阴坡无覆盖的株高生长量分别占生长季总生长量的 55.33%，60.10%，57.23%，59.72%。6 月 9 日开始，同坡向时，覆盖处理的苜蓿株高显著大于无覆盖处理 ($p < 0.05$)，同处理时，阳坡苜蓿株高显著大于阴坡苜蓿株高 ($p < 0.05$)。例如，8 月 8 日时，阳坡覆盖苜蓿株高是阳坡无覆盖株高的 119.25%，阴坡覆盖苜蓿株高是阴坡覆盖苜蓿株高的 140.33%。整个生长过程同坡向

时，覆盖处理的苜蓿主根长显著大于无覆盖处理 ($p < 0.05$)，同处理时，阳坡苜蓿株高显著大于阴坡苜蓿主根长 ($p < 0.05$)。例如，9 月 30 日时，阳坡覆盖苜蓿主根长是阳坡无覆盖的 115.99%，阳坡覆盖苜蓿主根长是阴坡覆盖的 150.86%。同坡向时，覆盖处理的苜蓿地上、地下鲜重显著大于无覆盖处理 ($p < 0.05$)，同处理时，阳坡苜蓿株高显著大于阴坡苜蓿地上、地下部分鲜重 ($p < 0.05$)。同坡位时，覆盖处理苜蓿的根冠比略小于无覆盖处理苜蓿。这说明：阳坡比阴坡更有利于苜蓿生长和生物量积累，秸秆覆盖显著改善了侵蚀沟不同坡向苜蓿的生长及生物量积累状况，即覆盖秸秆有利于侵蚀沟岸植被恢复。

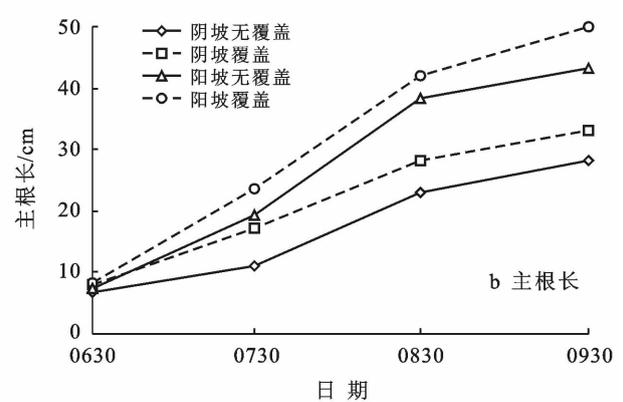
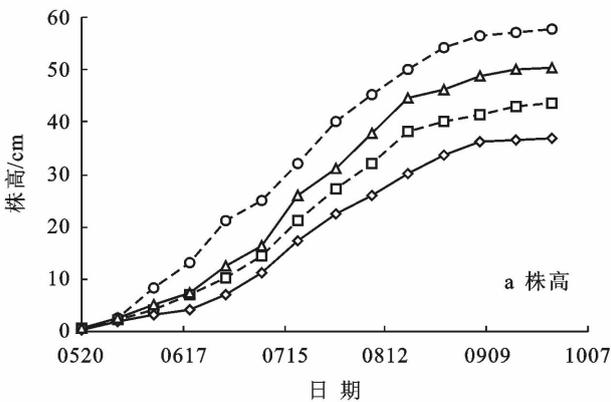


图 2 秸秆覆盖对侵蚀沟不同坡向苜蓿生长的影响

2.3 秸秆覆盖对侵蚀沟岸水蚀影响

由表 1 可知，研究区 2017 年全年产流降水共 8 次，

其中，6 月份 2 次，7 月份 4 次，9 月份 2 次。秸秆覆盖显著减少了试验小区的径流量和侵蚀泥沙量。8 次产流降

水中,保水率范围为 47.82%~71.94%,保沙率范围为 64.93%~73.02%,全年平均保水率为 57.34%,全年平

均保沙率为 67.60%。这说明研究区侵蚀沟 15° 小区覆盖秸秆可有效拦蓄径流、减少泥沙侵蚀量。

表 1 试验小区降水、产流、产沙状况

日期	降雨量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)	无覆盖小区 径流量/cm ³	覆盖小区 径流量/cm ³	保水率/ %	无覆盖小区 侵蚀量/g	覆盖小区 侵蚀量/g	保沙率/ %
20170629	6.4	5.2	101.3	33.6	66.82	8.912	3.086	65.37
20170630	29.9	8.2	2450.4	748.8	69.43	68.464	24.0096	64.93
20170712	46.6	13.84	2770.5	1289.3	53.46	80.568	27.116	66.34
20170722	18.2	4.2	72.4	20.3	71.94	20.229	5.4576	73.02
20170725	13.3	7.3	150.2	58.9	60.77	20.265	6.0184	70.3
20170726	28.4	10.37	2611.2	1253.3	52.01	75.355	24.7752	67.12
20170910	8.2	8.6	1461.6	611.2	58.17	58.348	17.6544	69.74
20170916	10.6	8.1	910.9	475.2	47.82	34.208	11.1	67.55
全年	161.6	8.72	10528.5	4490.9	57.34	366.053	118.604	67.60

对 8 次产流降水进行降水和产流、产沙相关分析,结果见表 2。由表 2 可知,空白小区和覆盖小区的径流与降水量呈显著正相关($p < 0.05$),与平均雨强极显著正相关($p < 0.01$),空白小区和覆盖小区的侵蚀量与降水量和平均雨强呈显著正相关($p < 0.05$),且径流量、侵蚀量与平均雨强的相关性大于与降水量的相关性。对试验小区进行降水与产流、产沙回归分析,结果见表 3。由表 3 可知,各方程 R^2 值均超过

0.965,且显著性良好,故拟合效果较理想。

表 2 试验小区降水与产流、产沙相关系数

项目	降水量/ mm	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)
空白小区径流量/cm ³	0.788*	0.846**
覆盖小区径流量/cm ³	0.774*	0.908**
空白小区侵蚀量/g	0.762*	0.853*
覆盖小区侵蚀量/g	0.787*	0.852*

表 3 试验小区降水与产流、产沙回归方程

方程名称	R^2	sig.	回归方程
空白小区径流方程	0.965	0.00	$y_1 = 63.645x_1 + 111.149x_2 - 866.322$
覆盖小区径流方程	0.967	0.00	$y_1 = 26.939x_1 + 63.845x_2 - 498.112$
空白小区侵蚀量方程	0.970	0.00	$y_2 = 2.21x_1 + 0.367x_2 - 1.016$
覆盖小区侵蚀量方程	0.972	0.00	$y_2 = 0.717x_1 + 0.279x_2 - 1.621$

注: y_1 为空白小区径流量(cm^3); y_2 为覆盖小区径流量(cm^3); x_1 为空白小区侵蚀量(g); x_2 为覆盖小区侵蚀量(g)。

3 讨论与结论

覆盖是一种传统的栽培措施,其能够调控土壤的水、肥、气、热、微生物,从而达到促进作物生长、增产的效果^[23-24]。本研究结果表明,黑土区侵蚀沟阴坡、阳坡进行秸秆覆盖能够显著提高 5—9 月表层土壤水分含量、降低表层土壤 14:00 的温度,使土壤环境更有利于植被生长。14:00 是一天中气温最高的时间。有研究证明,过高的地温会抑制植物生长^[25]。因此,秸秆覆盖增加了研究区可供植物利用的土壤水分,降低了土壤高温对植物的伤害,改善了土壤水热环境。诸多学者的研究也有相似结论。谢慧慧等^[26]在山西省六道沟小流域的首蓆人工草地进行秸秆覆盖试验,

结果表明,秸秆覆盖形成地表阻碍层,防止太阳过度照射。可降低地表 0—6 cm 土壤温度,且能够增加地表土壤水分含量。王丽丽等^[25]和田寿乐等^[23]的研究结果认为,覆盖通过减少地面蒸发来提高土壤含水量。冯浩等^[27]的研究表明,覆盖能够使减少水分向深处下渗,并在水分上升到土壤表层时形成阻碍,从而提高土壤表层含水量,同时秸秆覆盖对 0—15 cm 的表土温度影响显著,夏季平均减低土温 1℃。胥生荣等^[28]研究认为秸秆覆盖能够提高年平均气温,减小昼夜温差,起到稳定温度的作用。此外,秸秆覆盖还能够改良土壤结构,增加土壤有机质含量,并减少土壤 N 和 P 元素流失量^[14,28]。

本研究结果表明,秸秆覆盖显著改善了侵蚀沟岸

不同坡向苜蓿的生长及生物量积累状况,即秸秆覆盖有利于侵蚀沟岸植被恢复。前人研究也表明,秸秆覆盖有利于苜蓿生长。刘玉华等^[29]称,6—8月的高温、温差较大会造成苜蓿早衰,影响其生长和产量,4—6月的降水量对苜蓿的产量有很大影响,秸秆覆盖可稳定低温,并弥补3月光照不足和4—6月水分不足对苜蓿生长的制约。谢慧慧等^[26]和宋兴阳等^[30]的研究结果显示,地表覆盖可提高苜蓿水分利用率和苜蓿产量。

本研究结果表明,降雨量和平均降水强度是影响侵蚀沟岸径流量和侵蚀量的重要因子,且径流量、侵蚀量与平均雨强的相关性高于与降雨量的相关性。一年内不同雨强和次降雨量下,秸秆覆盖能够显著降低侵蚀沟岸径流量和侵蚀量。空白小区和覆盖小区的径流与降水量呈显著正相关($p < 0.05$),与平均雨强极显著正相关($p < 0.01$),空白小区和覆盖小区的侵蚀量与降水量和平均雨强呈显著正相关($p < 0.05$),且径流量、侵蚀量与平均雨强的相关性大于与降水量的相关性。前学者也认为秸秆覆盖能有效防治水土流失。温磊磊等^[8],杨青森等^[14]认为,黑土区侵蚀沟设置秸秆覆盖可分散、截获径流,增加入渗,并减少侵蚀量。众多学者认为,秸秆覆盖能够延迟产流、增加入渗,削弱雨滴击溅的动能,防治土壤结构的破坏及搬运,同时提高地表粗糙度、增加临时蓄水能力^[7,10,31-32]。徐锡蒙等^[18-19]的研究结果表明,秸秆覆盖能够削弱黄土去侵蚀沟沟壁崩塌作用,降低径流流速和挟沙能力,防治侵蚀沟尺寸扩大。黄新君等^[9]和白永会等^[12]的研究结果表明,秸秆覆盖增加地表粗糙度,提高了侵蚀临界径流剪切力,降低土壤可蚀性。

综上所述,秸秆覆盖能够有效减轻黑土区侵蚀沟水土流失,且能够改善侵蚀沟土壤环境,有助于侵蚀沟岸植被恢复,可在侵蚀沟治理中进行推广。下一步,还应对秸秆覆盖结合种植苜蓿整体防治沟蚀作用以及不同植物与秸秆覆盖组合的生态护坡作用差异进行研究。

[参 考 文 献]

[1] 王计磊,李子忠. 东北黑土区水力侵蚀研究进展[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.

[2] 孔令冉,董雯昕,杨天一,等. 东北黑土区沟道侵蚀机理及防治研究进展[J]. 国土与自然资源研究,2018(4):1-4.

[3] 孟令钦,李勇. 东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J]. 水土保持学报,2009,23(1):7-11,44.

[4] 范昊明,顾广贺,王岩松,等. 东北黑土区侵蚀沟发育与环境特征[J]. 中国水土保持,2013(10):75-79.

[5] 吴琼,樊向国. 东北典型黑土区坡一沟侵蚀分布关系[J].

水资源开发与管理,2018,16(8):22-27,52.

- [6] 李朝栋,李占斌,马建业,等. 不同长度小麦秸秆覆盖下黄土耕地坡面流体力学特性[J]. 农业工程学报,2017,33(4):153-160.
- [7] 车明轩,宫渊波, Muhammad N K, 等. 不同雨强、坡度对秸秆覆盖保持水土效果的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):131-135,142.
- [8] 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,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.
- [9] 黄新君,陈尚洪,刘定辉,等. 秸秆覆盖和有机质输入对紫色土壤可蚀性的影响[J]. 中国农业气象,2016,37(3):289-296.
- [10] 张翼夫,王庆杰,胡红,等. 华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J]. 农业机械学报,2016,47(5):138-145,154.
- [11] 许晓鸿,隋媛媛,张瑜,等. 黑土区不同耕作措施的水土保持效益[J]. 中国水土保持科学,2013,11(3):12-16.
- [12] 白永会,查轩,查瑞波,等. 秸秆覆盖红壤径流养分流失效益及径流剪切力影响研究[J]. 水土保持学报,2017,31(6):94-99.
- [13] 王安,郝明德,王英文. 人工降雨条件下秸秆覆盖及留茬的水土保持效应[J]. 水土保持通报,2012,32(2):26-28,34.
- [14] 杨青森,郑粉莉,温磊磊,等. 秸秆覆盖对东北黑土区土壤侵蚀及养分流失的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(2):1-5.
- [15] 刘柳松,史学正,于东升,等. 秸秆覆盖对干湿态红壤坡面流体力学参数的影响[J]. 中国水土保持科学,2009,7(6):20-25.
- [16] 刘柳松,史学正,任红艳,等. 秸秆覆盖对干态和湿态土壤产流过程的影响[J]. 水土保持学报,2009,23(4):6-9,81.
- [17] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(1):85-88.
- [18] 徐锡蒙,郑粉莉,吴红艳,等. 玉米秸秆覆盖缓冲带对细沟侵蚀及其水动力学特征的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(24):111-119.
- [19] 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.
- [20] 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):8-15.
- [21] 严坤,王玉宽,徐佩,等. 秸秆覆盖对三峡库区坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持通报,2016,36(1):6-10.

- [12] Nelsen, R B. An Introduction to Copulas[M]. Springer Series in Statistics. 2006.
- [13] 谢华,黄介生. 两变量水文频率分布模型研究述评[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 443-452.
- [14] 侯芸芸,宋松柏,赵丽娜,等. 基于 Copula 函数的 3 变量洪水频率研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 219-228.
- [15] 郭生练,刘章君,熊立华. 设计洪水计算方法研究进展与评价[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 302-314.
- [16] 郭生练,闫宝伟,肖义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008, 28(3): 1-7.
- [17] Salvadori G, De Michele C. Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events[J]. Water Resources Research, 2004, 40(12): 229-244.
- [18] Salvadori G, Tomasicchio G R, D'Alessandro F. Multivariate approach to design coastal and off-shore structures[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 65: 386-391.
- [19] 陈子燊,刘占明,赵青. 洪水峰量联合分布的 4 种重现水平对比[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(1): 130-135.
- [20] Corbella S, Stretch D D. Multivariate return periods of sea storms for coastal erosion risk assessment[J]. Natural Hazards Earth System Sciences, 2012, 12(8): 2699-2708.
- [21] 刘章君,郭生练,许新发,等. 两变量洪水结构荷载重现期与联合设计值研究[J]. 水利学报, 2018, 49(8): 956-965.
- [22] 范嘉炜,黄锦林. 基于 Kendall 重现期的降雨潮位风险分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(5): 21-24, 20.
- [23] 史黎翔,宋松柏. 基于 Copula 函数的两变量洪水重现期与设计值计算研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(10): 27-34.
- [24] Salvadori G, De Michele C, Kottegoda N T, et al. Extremes in Nature[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007.
- [25] 杨兴,赵玲玲,陈子燊. 中小流域洪峰流量与水位联合分布的设计洪水分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 43-46.
- [26] Graler B, Verhoest N, Grimaldi S. Multivariate return periods in hydrology: A critical and practical review focusing on synthetic design hydrograph estimation[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17: 1281-1296.
- [27] 赵玲玲,陈子燊,刘昌明,等. 基于广义 Pareto 分布的洪水序列频率分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(3): 32-39.
- [28] Hosking J R M. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1990, 52(1): 105-124.
- [29] 肖义,郭生练,刘攀,等. 分期设计洪水频率与防洪标准关系研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 54-60.

(上接第 161 页)

- [22] 朱高立,黄炎和,林金石,等. 模拟降雨条件下秸秆覆盖对崩积体侵蚀产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 27-31, 37.
- [23] 田寿乐,孙晓莉,沈广宁. 不同覆盖物对山地板栗园土壤性状及幼苗生长的影响[J]. 山东农业科学, 2017, 49(11): 37-44.
- [24] 钟芳,李正平,宋耀选,等. 黄土高原西部土壤蒸发实验研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 608-611.
- [25] 王丽丽,余海龙,马凯博,等. 不同地表覆盖措施对土壤水热特性及玉米生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 12-18.
- [26] 谢慧慧,樊军,郝明德,等. 地表覆盖对黄土高原水蚀风蚀交错区人工草地水分利用的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(2): 172-176, 182.
- [27] 冯浩,刘匡,余坤,等. 不同覆盖方式对土壤水热与夏玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 192-202.
- [28] 胥生荣,张恩和,马瑞丽,等. 不同覆盖措施对枸杞根系生长和土壤环境的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(12): 1802-1810.
- [29] 刘玉华,史纪安,贾志宽. 气候因子与苜蓿草产量的灰色关联度分析[J]. 草业科学, 2009, 26(8): 101-106.
- [30] 宋兴阳,王琦,李富春,等. 覆盖材料和沟垄比对土壤水分和紫花苜蓿干草产量的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(3): 798-809.
- [31] 张翼夫,李洪文,何进,等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 118-124.
- [32] 唐涛,郝明德,单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 9-11, 40.