

基于人工降雨试验的残茬覆盖水土保持效益评价

杨静怡¹, 谢云^{1,2}, 辛艳¹

(1.北京师范大学地理科学学部,北京 100875;2.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

摘要: 基于人工降雨试验,研究不同残茬覆盖度在 4°坡对黑土坡面水土保持效益的影响。试验设置 3 个平行条件,分别为 4 个雨强(30,60,90,120 mm/h),5 个残茬覆盖度(15%,35%,55%,75%以及裸土对照组)以及 2 种土壤初始含水量(8%和 30%,分别对应干、湿运行)。结果表明:对黑土坡面进行残茬覆盖处理,能够起到抑制土壤产流产沙的作用,且覆盖度越高,其抑制作用越明显。15%,35%,55%,75%覆盖度下保水效益可以分别可以达到 30%,27%,57%,72%;保土效益分别可以达到 36%,53%,89%,94%。根据保水保土效益与覆盖度的关系建立了指数函数关系式。与保水效益相比,残茬覆盖处理的保土效益更为明显。残茬覆盖不仅能提高黑土养分,更是保护黑土的有效方式。

关键词: 人工降雨;黑土;残茬覆盖;水土保持效益

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0081-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.012

Evaluation of Soil and Water Conservation Benefits of Residual Cover Under Artificial Simulated Rainfall

YANG Jingyi¹, XIE Yun^{1,2}, XIN Yan¹

(1.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875;

2.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: Rainfall simulation experiments were conducted to study the effects of different residue coverage on soil and water conservation of the black soil on 4° slope. Three parallel conditions were set up in the experiment, which were five residue coverage (bare, 15%, 35%, 55% and 75%), four rainfall intensities (30, 60, 90 and 120 mm/h), two initial soil moistures (8% and 30%, corresponding to dry and wet operation). The results showed that residue cover had positive effects on reducing the soil erosion and the runoff and sediment production of the black soil, and the higher the coverage, the more obvious the inhibition. The water conservation benefits under the 15%, 35%, 55% and 75% residue coverage could reach 30%, 27%, 57% and 72%, respectively. The soil conservation effects under the four residue coverages could reach 36%, 53%, 89% and 94%, respectively. Exponential functions were established between the soil and water conservation benefits and the residue coverage. Compared with the water conservation benefit, the soil conservation benefit of residual cover was more obvious. Residue cover could not only increase the nutrient contents, but also an effective way for the black soil protection.

Keywords: artificial rainfall; black soil; residue coverage; soil and water conservation benefits

残茬覆盖是利用农作物秸秆残茬,将其覆盖在土壤表面,从而提高土壤保水保土能力的耕作措施。通过覆盖处理,土壤表面粗糙度增大,对径流起到滞阻作用,延缓产流时间,使覆盖层中能够保持比无覆盖下更高的水量,有效增加土壤对于降雨的入渗^[1-2]。另外,残茬覆盖可削弱雨滴对地表土壤的打击作用,减少土壤结皮的产生^[3]。已有研究^[4-5]表明,残茬覆

盖能够有效促进水分入渗,减少径流量与土壤流失量。其保水保土效益随残茬覆盖度增加而增加,产流时间和土壤含水量达到饱和的时间也随覆盖度的增加而延后^[5-7]。Renard 等^[8]在修订版通用水土流失方程(RUSLE)中建立“地表覆盖次因子”,指出随着地表覆盖度的增加,侵蚀速率呈指数函数递减;朱高立等^[9]研究指出,秸秆覆盖能有效延缓产流时间,且

收稿日期:2020-03-02

资助项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0507000,2017YFE0118100)

第一作者:杨静怡(1996-),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:201821051009@mail.bnu.edu.cn

通信作者:谢云(1964-),女,教授,主要从事土地生产力、土壤侵蚀和气候影响评价研究。E-mail:xieyun@bnu.edu.cn

产流时间与残茬覆盖度呈线性正相关关系;吕凯等^[10]的研究指出,秸秆覆盖显著影响产流产沙量,与其呈负相关关系。王安等^[11]通过人工降雨试验,得到在 250 g/m²的残茬覆盖下,最大可以减少 75%的产沙量;Sadeghi 等^[12]基于人工降雨试验发现,秸秆覆盖处理最大可减少约 96.7%的径流量;潘艳华等^[13]通过径流小区观测,得出秸秆覆盖能够减少约 20%的径流量和 10%~30%的土壤流失量。

东北黑土区是我国主要的粮食产区,其土壤质量与可持续发展状况关系到国家粮食安全战略^[14-15]。当地的作物及作物残茬年产量较高,便于就地取材进行秸秆还田处理,保护土壤减少水土流失,因此残茬覆盖是当地具有推广潜力的水土保持耕作措施。而目前东北黑土区针对残茬覆盖水土保持效益的定量研究相对较少,有必要针对此问题开展研究。本文通过人工模拟降雨试验,使用玉米秸秆,研究黑土在不同残茬覆盖度与不同降雨条件下的坡面产流产沙规律,并评价其保水保土效益,以期为东北黑土区残茬覆盖水土保持效益定量研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

利用本课题组已有的人工降雨下残茬覆盖的研究成果^[16],进行进一步的水土保持效益分析。人工模拟降雨试验于 2014 年夏季至 2015 年夏季,在北京师范大学地表过程与生态资源国家重点实验室房山试验基地人工模拟降雨大厅进行。试验采用基于 Meyer 研发的槽式下喷式降雨机^[17],该雨机单机有效降雨宽度 4.4 m,需组合使用。雨机喷头型号为 Spray V-jet,美国制,水压 0.04 MPa,可模拟 20~200 mm/h 的雨强。试验盛土水槽规格为 2 m(长)×1 m(宽)×0.5 m(深),坡度设置为 4°,水槽前段设有三角形截留口,以便收集径流和泥沙样,底部留有均匀小孔可使透过土层的水分自由排出,避免影响下渗。每次并排使用 2 个水槽,搭配 3 台降雨机完成试验。

试验用黑土取自黑龙江省西北部农垦总局九三分局鹤山农场境内(125°16′—125°21′E,48°59′—49°03′N),人工取 20 cm 耕层土装入编织袋,运送至房山试验基地,试验前将土样自然风干,并去除杂质。经测定,黑土原位土壤砂粒、粉粒、黏粒含量依次为 31.9%,33.1%,35.0%,有机质含量为 5.0%,土壤容重为 1.16 g/cm³。试验选取房山试验基地自种的玉米秸秆为覆盖物,收获后在田间自然风干晾晒,并使用铡刀切至 5~8 cm,每次人工降雨试验使用新的秸秆,以避免秸秆含水量的影响。

试验选取固定坡度 4°,此坡度是东北黑土区坡耕地侵蚀强度分级中强烈侵蚀的坡度。另外设计残

茬覆盖度、雨强和土壤含水量 3 个变量研究残茬覆盖黑土坡面在不同降雨条件下的产流产沙过程。雨强设计参照《中国暴雨统计参数图集》^[18],根据黑土区多年降雨特征,选择 30,60,90,120 mm/h 共 4 个雨强,降雨历时均为 1 h。残茬覆盖度根据《黑土区水土流失综合防治技术标准》^[19]中“荒山荒坡面蚀强度判别指标表”中划定的林草覆盖度范围,设定 15%,35%,55%,75%,以及裸地对照 5 组覆盖度等级。试验设定干湿运行,在人工降雨前使用 TDR(手持式时域反射仪)测定土壤含水量,测量结果显示,干运行土壤含水量集中在 7%~10%,湿运行土壤含水量集中在 30%~35%,选用平均值即土壤初始含水量分别为 8%和 30%左右,代表自然条件下极干和极湿状态下的土壤含水量。总计 40 组人工模拟降雨试验,每组试验进行 2 次重复。

1.2 试验方法

试验填土深度为 0.35 m,采用分层填装方法填土,共分 2 层,中间分层处用毛刷打平,以便消除分层对土壤水分下渗的影响。填土前将大石块过筛剔除,确保土壤容重在 1.2 g/cm³左右。填土之后,为消除地表粗糙度对坡面产流产沙的影响,使用木板将土壤表面刮平,然后按照不同残茬覆盖度手动均匀铺撒玉米秸秆。每次试验后将土全部挖出晾晒,使用同样的方法重复装土,确保土壤容重和土壤前期含水量一致。每次人工降雨试验前在盛土水槽分别选择坡上、坡中和坡下共 6 个点,使用手持式 TDR(时域反射仪)测定土壤体积含水量。

玉米残茬覆盖度通过照相法测定,即通过拍摄不同重量的玉米秸秆(kg/m²)照片,使用 ENVI 软件监督分类方法计算获得对应覆盖度。基于 Gregory^[20]的研究,建立玉米残茬生物量和覆盖度的关系曲线:

$$S_p = 1 - e^{-0.00024 \times B_s} \quad (1)$$

式中: S_p 为残茬覆盖度(%); B_s 为残茬生物量(kg/hm²)。

试验设计的 0,15%,35%,55%,75%的残茬覆盖度对应的残茬生物量分别为 0,0.68,1.80,3.32,5.78 t/hm²。每次降雨试验之前,按照 5 个覆盖度分别对应的残茬生物量干重对土壤进行覆盖。

降雨试验开始后,观察坡面变化情况,并记录产流时间。开始产流后,每隔 5 min 取 1 次径流、泥沙样,整个降雨过程持续 1 h。干运行试验结束后,将水槽静置 24 h 后开始湿运行试验。每次试验结束后使用量筒测得径流体积,烘干法测量泥沙含量,计算获得径流深(mm)和产沙量(g)。试验数据使用 SPSS 软件分析。

1.3 残茬覆盖保水保土效益计算

残茬覆盖的保水和保土效益指在相同的降雨条

件下,有残茬覆盖的坡面与裸坡相比,所能够保持的径流量和侵蚀量,计算公式^[21]分别为:

$$E_w = \left(1 - \frac{r_{cover}}{r_{bare}}\right) \times 100\% \quad (2)$$

$$E_s = \left(1 - \frac{SL_{cover}}{SL_{bare}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: E_w 和 E_s 分别为残茬覆盖坡面的保水和保土效益(%); r_{cover} 为有残茬覆盖坡面的径流量(mm); r_{bare} 为裸坡下的径流量(mm); SL_{cover} 为有残茬覆盖坡面的土壤侵蚀模数(t/hm^2); SL_{bare} 为裸坡下的土壤土壤侵蚀模数(t/hm^2)。

2 结果与分析

2.1 残茬覆盖对产流过程的影响

在不同平行试验条件下的土壤产流速率具有相似的规律,随着时间的延续产流速率均逐渐增加至一稳定值。土壤产流速率均随雨强的增大而增大,在同一雨强下土壤产流速率随覆盖度的增大而减小,产流速率曲线的斜率也随残茬覆盖度的增大而减小(图 1)。湿运行与干运行相比,产流规律相同,但因土壤含水量较高其初始产流速率较高,与干运行的稳

定产流率相近。

在 30,60 mm/h 的中小雨强下各覆盖度都能明显减少产流,高覆盖度减少产流作用明显,55%和 75%覆盖度下的产流速率与其他覆盖度有显著差异(sig=0.05)。在 90 mm/h 的雨强下,75%覆盖度的产流速率极显著低于其他覆盖度(sig=0.01),在雨强较大时,高覆盖度的作用明显好于低覆盖度。在 120 mm/h 雨强下,各个覆盖度均在 5 min 时即开始产流且速率很快增大,大雨强削弱了残茬覆盖减少产流的能力,使各覆盖度之间的产流速率差异减小。干运行下 15%,35%,55%,75%的覆盖度能够将稳定产流率减少至裸地的 63%,65%,38%,19%,湿运行下能减少至裸地的 80%,83%,60%,51%。

在一定的雨强下土壤残茬覆盖增加了地表的粗糙度,延缓了产流趋势,减少了土壤产流,使产流时间延后。随着雨强的增大,相同时间内土壤受到了更多雨量的打击,更快发生超渗产流且产流速率达到稳定的时间越短,产流开始时产流速率曲线的斜率越大,而稳定产流率与雨强大小的差值逐渐减小。雨强越大,达到明显保水效果所需的残茬覆盖度越高。

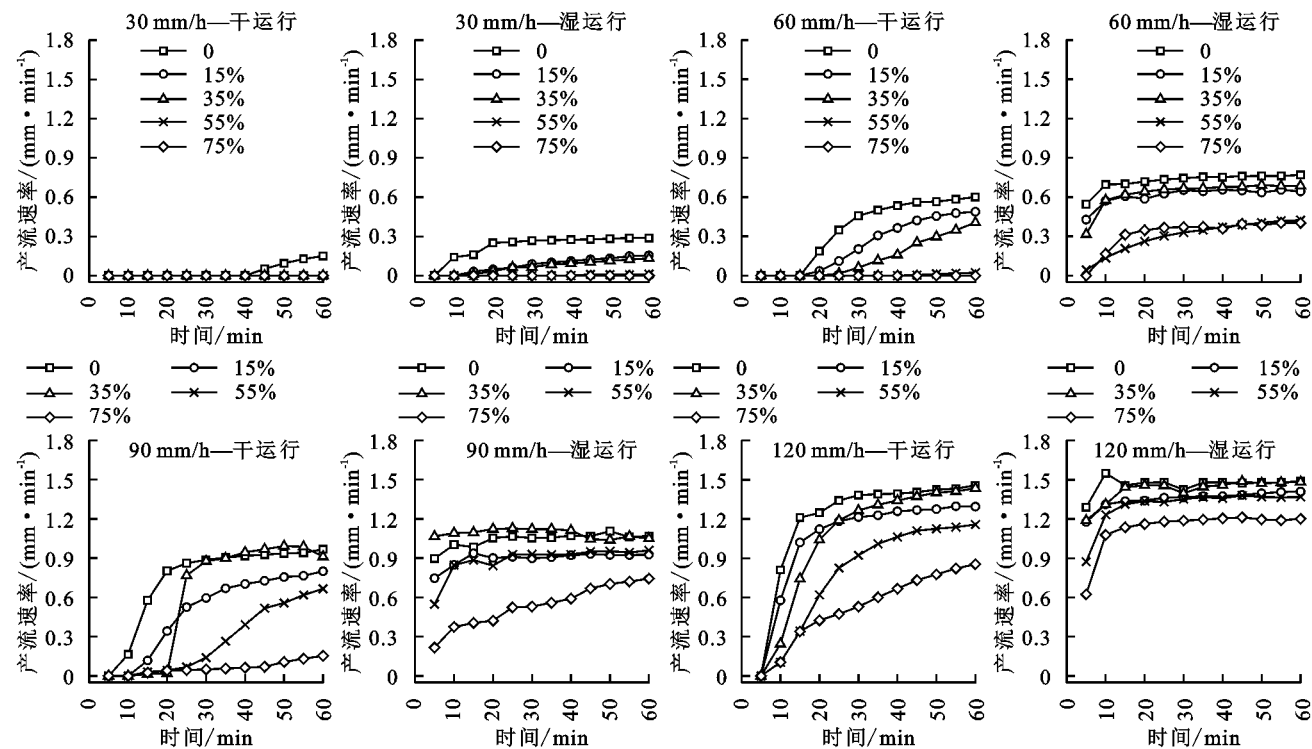


图 1 不同残茬覆盖度的土壤在不同雨强下的产流速率

2.2 残茬覆盖对产沙过程的影响

干湿运行下的土壤产沙速率的趋势均为先增加再逐渐趋于平缓。土壤产沙速率随雨强的增大而增大,雨强越大,达到稳定产沙速率的时间越短。在同一雨强下土壤产沙速率随覆盖度的增大而减小(图 2)。15%,35%,55%,75%的覆盖度能够将稳定产沙速率分别降至裸地的 65%,48%,12%,6%。残茬覆

盖可以有效减少土壤稳定产沙速率,覆盖度越高,其减少产沙速率的作用越明显。

在 30,60 mm/h 的雨强下,各覆盖度在干湿运行下的速率变化相似,>55%覆盖度下的产沙曲线与大覆盖度下的产沙曲线差异显著(sig=0.05),在中等雨强下大覆盖度能将稳定产流速率减少至裸地的 0~15%,达到明显抑制产沙的效果。在 90 mm/h 的雨强下,其他覆

盖度下的产沙速率显著大于 55% 和 75% 覆盖度下产沙速率 ($\text{sig}=0.05$), 即使在产沙速率较大的湿运行中, 大覆盖度下的产沙速率也只有裸地的 15% 以下。在 120 mm/h 雨强下, 各个覆盖度下的稳定产沙速率差值较

大, 高覆盖度对产沙的抑制作用依然很明显 ($\text{sig}=0.01$)。在所有雨强下 55% 的覆盖度和 75% 的覆盖度下的产流速率均没有显著差异, 表明 55% 的覆残茬覆盖度已经可以起到明显的保土效果。

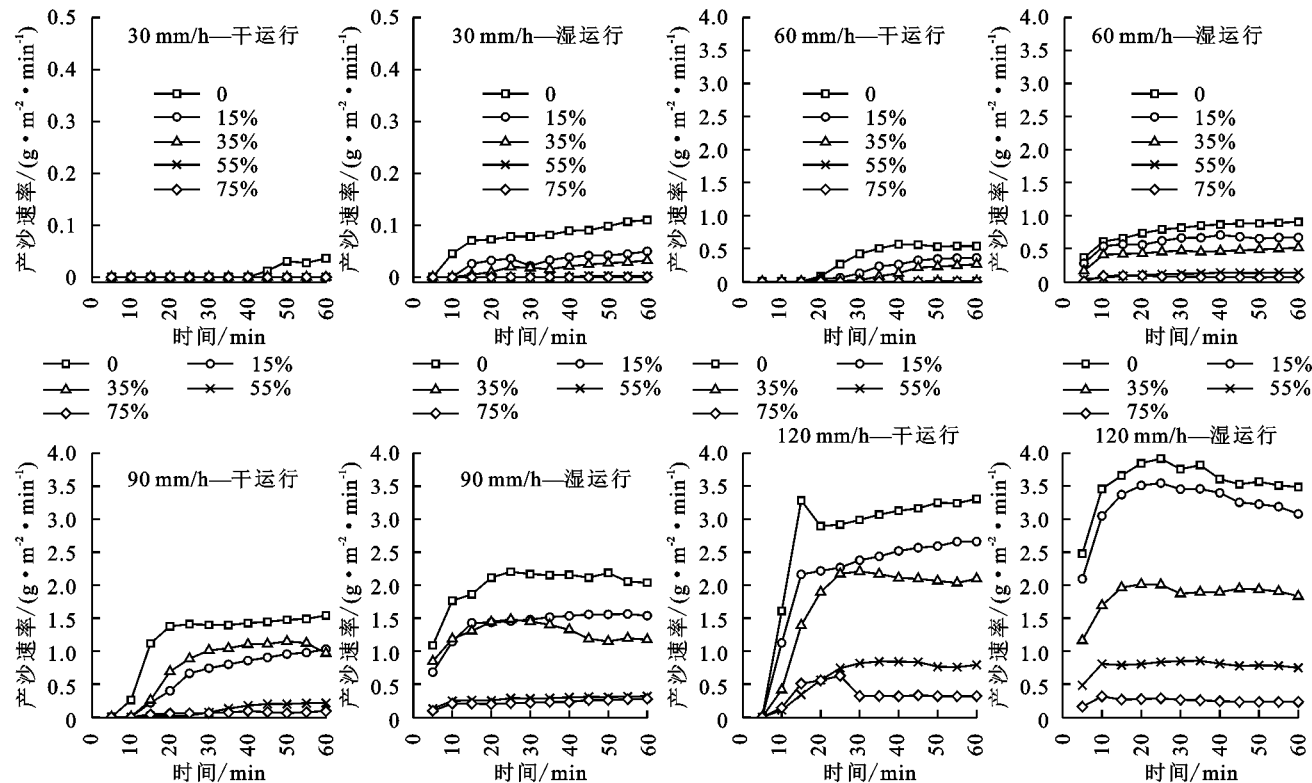


图 2 不同残茬覆盖度的土壤在不同雨强下的产沙速率

2.3 残茬覆盖的水土保持效益

残茬覆盖能够减少降雨造成的径流和土壤损失。残茬覆盖的保水效益随雨强的增大而减小, 大雨强下超渗产流更易形成, 削弱了残茬覆盖的保水作用。在不同的雨强下 15%, 35%, 55%, 75% 的残茬覆盖度的平均保水效益分别为 30%, 27%, 57%, 72%。随着残茬覆盖度的提高入渗效益随之增大, 进一步说明了残茬覆盖对黑土坡面具有保水作用。

残茬保水效益与残茬覆盖度(图 3)的回归方程为:

$$E_w = 1 - e^{-1.668 \times S_p}, R^2 = 0.908 \quad (4)$$

式中: E_w 为保水效益(%); S_p 为残茬覆盖度(%)。

拟合方程可以反映保水效益随覆盖度的变化趋势, 拟合情况较好。因为在 35% 覆盖度下的保水效益没有出现增加的异常, 在一定程度上影响了方程拟合结果。随着残茬覆盖度的增大, 其保水效益呈现增加的趋势, 但是增加曲线的斜率逐渐减小, 即在覆盖度越高的情况下增加相同覆盖度所能达到的保水效益减小。

残茬覆盖的保土效益随着覆盖度的增加而增大, 且雨强越大时保土效益随覆盖度的增大而增大的幅度更大。30 mm/h 的雨强下 75% 覆盖度的保土效益是 15% 覆盖度保土效益的 1.55 倍, 120 mm/h 雨强

下的这一比例则高达 6.07 倍。大雨强下高覆盖度的保土效益表现的更为明显。4 种覆盖度下的保土效益分别为 36%, 53%, 89%, 94%。35% 覆盖度已经能够使保土效益达到 50% 以上, 与保水效益相比残茬覆盖处理的保土效益表现的更为明显, 各覆盖度下的保水效益是保土效益的 70% 左右。

残茬覆盖保土效益与覆盖度(图 3)的回归方程为:

$$E_s = 1 - e^{-2.939 \times S_p}, R^2 = 0.962 \quad (5)$$

式中: E_s 为保土效益(%); S_p 为残茬覆盖度(%)。

拟合方程的拟合程度很高, 拟合结果与实际结果相差较小。随着残茬覆盖度的增大, 其保土效益呈现增加的趋势, 且增加趋势逐渐减缓。高覆盖度下增加覆盖度所能达到的增加效益与低覆盖度下相比要小。保土效益与保水效益的变化趋势相同但明显高于保水效益, 残茬由于形态和分布的原因, 对于土壤的拦蓄作用优于对径流的拦蓄作用。

3 讨论

本文在残茬覆盖对产流的影响研究结果中出现了一些不符合普遍规律的现象(图 1), 35% 覆盖度下的产流速率大于 15% 覆盖度的产流速率, 原因可能为在该覆盖度与土壤质地下土壤表面产生的薄层水

流稍厚,与土壤结皮产生的效应类似,封堵了土壤水分入渗的通道,减少了土壤入渗而增大了产流,35%的覆盖度给予了土壤表面一定的空间形成薄层水流,而在覆盖度更大的条件下,土壤连续表面被残茬分割,减小了形成薄层水流的空间,故不再受薄层水流的影响。也有研究^[22]表明,在秸秆覆盖度在 40% 时,由于覆盖度处于偏低水平,秸秆所阻挡的滞水会突然下泄,导致产流的不稳定性,这种不稳定性有可能会

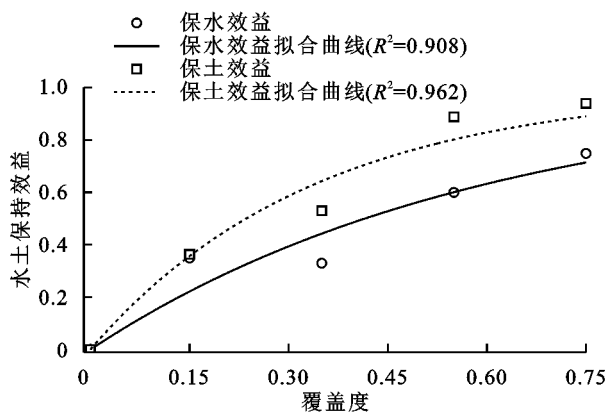


图 3 不同残茬覆盖度下的水土保持效益及方程拟合

残茬覆盖处理可以减少土壤产流产沙量,且残茬覆盖度越高其减少量越明显,相应的水土保持效益也越高,这与王安等^[2]、唐涛等^[22]、杨青森等^[23]的研究结果相符。残茬覆盖通过增加土壤表面的粗糙度来增大降水在土壤表面停留的时间,从而增加了土壤入渗量,减少了地表的产流与产沙。

残茬覆盖处理对水土保持效益的影响,可为黑土区水土保持的适宜条件评价提供依据。根据不同残茬覆盖度下的水土保持效益可以得出最经济适用的残茬覆盖度,用于农业生产的改良。本研究中 75% 覆盖度与 55% 覆盖度相比并没有明显提高水土保持效益,在实际生产应用中可以依据需要达到的保护水土的效果,以及成本和实施难易程度,综合选择最经济合适的残茬覆盖度。

4 结论

(1) 残茬覆盖能够有效抑制土壤产流产沙速率,起到保持水土的作用。覆盖度越高,减少产流产沙速率的作用越明显。15%, 35%, 55%, 75% 的残茬覆盖度能够分别减少稳定产流速率 16%, 10%, 32%, 51%, 减少稳定产沙速率 22%, 42%, 82%, 92%。

(2) 残茬覆盖处理具有良好的保土保水效益。在相同覆盖度下保土效益要好于保水效益。残茬覆盖度在 15%, 35%, 55%, 75% 下保水效益分别达到 30%, 27%, 57%, 72%; 保土效益分别达到 36%, 53%, 89%, 94%。

残茬覆盖度数值与其相应的水土保持效益符合指数函数的关系,基于此可以建立覆盖度与保水效益和保土效益的方程。两者的方程表达式分别为: $E_w = 1 - e^{-1.668 \times S_p}$; $E_s = 1 - e^{-2.939 \times S_p}$ 。式中: S_p 为残茬覆盖度(%)。方程拟合程度良好($R^2 > 0.9$),可以用于估算不同残茬覆盖度下的水土保持效益。

残茬覆盖处理是黑土区水土保持的有效方式,根据不同地块的土壤侵蚀情况及所需达到的水土保持效益选取合适的残茬覆盖度,能够起到保持黑土区水土的作用,是保护黑土资源的有效措施。

参考文献:

- [1] 蔡太义,贾志宽,黄耀威,等.中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展:不同量秸秆覆盖的农田生态环境效应[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):63-68.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郭贤仕,杨如萍,马一凡,等.保护性耕作对坡耕地土壤水分特性和水土流失的影响[J].水土保持通报,2010,30(4):1-5.
- [5] 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.
- [6] 孙建,刘苗,李立军,等.不同耕作方式对内蒙古旱作农田土壤侵蚀的影响[J].生态学杂志,2010,29(3):485-490.
- [7] 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.
- [8] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[M]. USA: USDA Agricultural Handbook, 703. U. S. Government Printing Office, 1997:158-160.
- [9] 朱高立,王雪琪,李发志,等.秸秆覆盖对崩积体坡面产流产沙影响的模拟试验[J].土壤,2017,49(3):601-607.
- [10] 吕凯,段颖丹,吴伯志.秸秆覆盖对种植烤烟坡耕地土壤侵蚀的影响[J].南方农业学报,2019,50(11):2450-2458.
- [11] 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.
- [12] Sadeghi S H, Gholami L, Moghadam E S, et al. Scale effect on runoff and soil loss control using rice straw mulch under laboratory conditions [J]. Solid Earth, 2014,6:2915-2938.
- [13] 潘艳华,王攀磊,郭玉蓉,等.幼龄果园坡耕地保护性耕作的水土保持效果[J].中国水土保持科学,2016,14(3):139-145.

- agement, 2014, 141: 66-73.
- [4] Zhang D, Wang H Y, Pan J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 265: 8-14.
- [5] Liu J, Zuo Q, Zhai L M, et al. Phosphorus losses via surface runoff in rice-wheat cropping systems as impacted by rainfall regimes and fertilizer applications[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(3): 667-677.
- [6] Kopacek J, Hejzlar J, Posch M. Factors controlling the export of nitrogen from agricultural land in a large central European catchment during 1900 - 2010 [J]. *Environmental Science Technology*, 2013, 47(12): 6400-6407.
- [7] 李新华, 巩前文. 从“增量增产”到“减量增效”: 农户施肥调控政策演变及走向[J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(5): 877-884.
- [8] 鲁洪娟, 周德林, 叶文玲, 等. 生物有机肥在土壤改良和重金属污染修复中的研究进展[J]. *环境污染与防治*, 2019, 41(11): 1378-1383.
- [9] 李磊, 安浩军, 岳茂武, 等. 控失肥与普通复合肥对小麦生长发育及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(24): 1-6.
- [10] 章辉. 控失肥对单季稻生长发育、产量及效益的影响研究[J]. *安徽农学通报*, 2013, 19(14): 80-81.
- [11] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [12] 张翼, 岳玉波, 赵峥, 等. 不同施肥方式下稻田氮磷流失特征[J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33(1): 1-7.
- [13] 杨坤宇, 王美慧, 王毅, 等. 不同农艺管理措施下双季稻田氮磷径流流失特征及其主控因子研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1723-1734.
- [14] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 39-43, 48.
- [15] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1561-1566.
- [16] 吕亚敏, 吴玉红, 李洪达, 等. 减肥措施对稻田田面水氮、磷动态变化特征的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(4): 349-355.
- [17] 夏小江, 胡清宇, 朱利群, 等. 太湖地区稻田田面水氮磷动态特征及径流流失研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 21-25.
- [18] 张一. 不同外源添加物质对土壤氮磷素淋溶特征的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [19] 叶玉适, 梁新强, 李亮, 等. 不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(4): 1125-1135.
- [20] 王兴龙, 朱敏, 杨帆, 等. 配施有机肥减氮对川中丘区土壤微生物量与酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 271-276.
- [21] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 3051-3058.
- [22] Cherobim V F, Huang C H, Favaretto N. Tillage system and time post-liquid dairy manure: Effects on runoff, sediment and nutrients losses[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184: 96-103.
- [23] 俞巧钢, 叶静, 马军伟, 等. 不同施氮水平下油菜地土壤氮素径流流失特征研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 22-25, 30.
- [24] 胡昱彦, 庄舜尧, 郭益昌, 等. 不同施肥模式对雷竹林氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 51-57.

(上接第85页)

- [14] 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.
- [15] Ouyang W, Wu Y, Hao Z, et al. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 613/614: 798-809.
- [16] Xin Y, Xie Y, Liu Y, et al. Residue cover effects on soil erosion and the infiltration in black soil under simulated rainfall experiments[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 651-658.
- [17] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性[J]. *水土保持通报*, 2007, 27(6): 56-60.
- [18] 水利部水文局, 南京水利科学研究院. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 9-39.
- [19] 中华人民共和国水利部. SL 446-2009 黑土区水土流失综合防治技术标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009: 5-6.
- [20] Gregory J M. Soil cover prediction with various amounts and types of crop residue[J]. *Transactions of the Asae*, 1982, 5(25): 1333-1337.
- [21] 刘雨鑫, 谢云, 辛艳, 等. 基于人工模拟降雨试验的垄作区田水土保持效益的变化研究[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 227-231.
- [22] 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.
- [23] 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.