

秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展

刘燕青, 王计磊, 李子忠

(中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:随着我国经济的发展,我国农业生产得到很大的提高,但水资源短缺,耕地退化仍是干旱半干旱区农业生产的主要限制因子。坡耕地作为土壤侵蚀多发地,土地生产力受到土壤侵蚀的严重威胁,秸秆覆盖可在一定程度上抑制土壤水分蒸发,增加地表糙度、促进水分入渗,从而提高土壤含水量;防止外营力与地表土壤颗粒直接相互作用,抑制土壤侵蚀的发生,同时也可提高土壤有机质含量,改善土地生产力。为更加有效地利用水资源、防治土壤侵蚀,保护生态安全,推进生态文明建设,我国学者开展了一系列研究,涉及到农田水分利用效率及土壤侵蚀在秸秆(覆盖方式、度或量)、降雨和地形等因素综合影响下的响应,并取得了可观成果。秸秆覆盖量在 3~10 t/hm² 时,可减少土壤无效蒸发 20%~90%,此后增加覆盖量抑制蒸发的效果不太显著。秸秆覆盖虽然在一定条件下会阻隔降雨入渗,但也会抑制潜水蒸发和返盐,最终表现为提高了土壤含水量和作物水分利用效率。秸秆带状覆盖在发挥“保土增墒”作用同时又降低了对播种、出苗带来的不利影响,大量研究认为 30%~60% 的秸秆覆盖度并结合高留茬可减少水土流失 60%~90%,也有研究认为在强降雨条件下(≥ 100 mm/h),秸秆覆盖于坡度较陡或犁底层存在的耕地,会加剧侵蚀。通过总结秸秆覆盖措施对土壤水和土壤侵蚀影响的研究成果,认为目前秸秆覆盖措施的研究较为全面和深入,但还有待更进一步研究的地方:秸秆覆盖对土壤水分运动和土壤侵蚀影响效果及机理的定量化研究;秸秆覆盖技术规程的制修订;秸秆覆盖及播种等相关机械研制及改进;秸秆覆盖措施的区域适用性及评价;作物生长模型、水土流失模型中秸秆覆盖参数的确定及校验。

关键词: 秸秆覆盖; 水土流失; 水分入渗; 水分蒸发

中图分类号: S157.1; S27

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)06-0429-08

Research Process on the Effects of Straw Mulch on Soil Moisture and Soil Erosion

LIU Yanqing, WANG Jilei, LI Zizhong

(College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: With the development of China's economy, agricultural productivity in China has also been greatly improved. However, water shortage and cultivated land degradation are still the main limiting factor for agricultural production in both arid and semi-arid regions. Sloping land with frequent soil erosion is seriously threatened by soil erosion. Straw mulch, to some extent, can inhibit soil water evaporation, increase surface roughness, promote water infiltration, and thus improve soil water content; meanwhile, straw mulch can prevent direct interaction between external forces and surface soil particles, reduce the occurrence of soil erosion, and improve soil organic matter content and thus improve soil productivity. In order to make more effective use of water resources, prevent and control soil erosion, protect ecological security, and promote ecological civilization construction, Chinese scholars have carried out a series of studies involving the influence and mechanism of different straw mulch methods, straw mulch degree and straw mulch amount on farmland water use efficiency and soil erosion, and have achieved considerable results. When the application of straw mulch is about 3~10 t/hm², the soil ineffective evaporation could be reduced by about 20%~90%. After that, the effect of increasing the straw mulch on evaporation inhibition was not significant. Although

收稿日期: 2020-12-05

修回日期: 2021-01-04

资助项目: 国家重点研发计划粮食丰产增效科技创新重点专项(2016YFD0300203-5); 国家自然科学基金区域(吉林)创新发展联合基金(U19A2035); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018zh001)

第一作者: 刘燕青(1997—), 女, 甘肃天水人, 教授, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: 2639706940@qq.com

通信作者: 李子忠(1972—), 男, 山东平原人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源利用和土壤物理学研究。E-mail: zizhong@cau.edu.cn

straw mulch may prevent rainfall infiltration under certain conditions, it can also inhibit underwater evaporation and salt rehydration, and finally improve soil water content and water use efficiency. Straw strip mulch, which prevents soil erosion, reduces the negative influence of it on seeding and germinating. A lot of researches suggest that 30%~60% of straw coverage and high stubble can significantly reduce water loss and soil erosion by 60%~90%. Some studies also suggest that under the circumstance of high rainfall intensity (≥ 100 mm/h), straw mulching on farmland with steep slope or plough layer will increase soil erosion. This paper summarizes the results of predecessors' study on soil water and soil erosion, and concludes that the current straw mulching measures are comprehensive and in-depth research, but there still have some areas to be further studied: quantitative research on the effect and mechanism of straw mulch on soil water movement and soil erosion; definitional revision of straw mulch technical regulations; development of straw mulch and seeding machinery; regional applicability and evaluation of straw mulch measures; determination and calibration of straw mulch parameters in crop growth model and soil erosion model.

Keywords: straw mulch; soil erosion; soil water infiltration; soil water evaporation

中国地域辽阔,水资源丰富但淡水资源不足且空间分布不均衡,已成为制约我国干旱半干旱区农业生产的重要因素之一^[1]。水土流失不仅造成水资源的浪费,还因土壤颗粒的流失加剧土壤结构的破坏,引起土壤退化及农田干旱缺水情况的发生^[2]。土壤蒸发是土壤水分无效损失的一种途径^[3],且为引起土壤盐渍化发生重要动力因素之一^[4],探索农田有效的蓄水保土途径受到学者的广泛关注。目前常用的蓄水保土措施有横坡垄作、地膜覆盖、秸秆覆盖和植物篱等,其中秸秆覆盖还田可有效改善土壤—大气界面微环境的水热交换状况^[5-6],减少作物棵间蒸发,提高土壤有机质含量,促进良好土壤结构体的形成,增强土壤蓄水抗旱能力^[7-8];也能够有效地保护地表土壤,减少土壤侵蚀的发生^[2];同时可避免秸秆焚烧造成的大气污染,是促进干旱半干旱区农业可持续发展的重要农艺措施,也是农业废弃物资源化利用的重要途径。如在东北黑土区,作物熟制为一年一熟,秋收后地表多为裸露,春季干旱,且多大风季节,加剧了土壤蒸发和土壤颗粒吹蚀,对当地农业安全生产造成严重威胁^[9],而秸秆覆盖还田可有效改善上述状况的发生。2019年“中央一号”文件提出发展生态循环农业,推进畜禽粪污、秸秆、农膜等农业废弃物资源化利用;2020年为深入贯彻习近平总书记关于对东北黑土地实行战略性保护的重要指示精神,认真落实党中央、国务院决策部署,加快保护性耕作推广应用,制定了《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025年)》。同时,为有效防治水土流失、提高水分利用效率,我国学者开展了一系列研究,涉及到秸秆覆盖方式、覆盖度和覆盖量等对农田水分及土壤侵蚀的影响及机理的研究,且取得了较为丰硕的成果^[10-12]。本文通过对已取得成果进行总结,以期保护水土资

源,保障农业安全生产提供科学依据,同时找出目前研究存在的薄弱环节,为今后更为深入全面的研究提供参考。

1 秸秆覆盖类型

1.1 根据秸秆来源划分

我国作为农业大国,农作物秸秆总产量高达104亿t/a,其中玉米秸秆、稻草和麦秆占比较大,分别为32.5%,25.1%,18.3%^[13]。目前秸秆主要通过堆肥、制备饲料、建材和直接还田等方式进行资源化利用,但在实践中,由于劳动力成本提高、秸秆利用技术不成熟等原因,作物秸秆资源化利用率低,焚烧、随意丢弃等现象仍然长期存在^[14],如2018年卫星遥感共监测到全国秸秆焚烧火点7647个^[15]。秸秆覆盖还田不仅可以降低劳动力成本,而且可以培肥地力,具有良好的社会、经济效益和生态效益,值得大面积推广应用。秸秆覆盖根据作物来源可以分为玉米秸秆覆盖、小麦秸秆覆盖、水稻秸秆覆盖等。

1.2 根据秸秆覆盖形式划分

根据秸秆覆盖形式可分为整秆覆盖和秸秆粉碎覆盖^[16]。整秆覆盖指在作物收获的同时覆盖整秸秆,适合机械化水平低或风大的地区。秸秆粉碎覆盖通常指使用配有秸秆粉碎装置的谷物联合收割机,在收获作物的同时将秸秆粉碎(5~10 cm)后抛撒覆盖在地表的过程,但遇大风时秸秆易随风移动,降低覆盖效果。后有研究指出粉碎与留茬结合,可有效避免这一问题,在收获时地表留茬16~20 cm,其余秸秆粉碎抛撒于地表,这样留茬可以固定秸秆,防止秸秆漂移,适用于水稻田或容易产生水土流失的坡耕地上^[17]。

1.3 根据覆盖度和覆盖量划分

秸秆可直接覆盖于地表,也可经旋耕后与土壤达

到不同程度的混合,覆盖于地表又可根据地表秸秆覆盖度分为全覆盖和部分覆盖。秸秆全覆盖是指将作物秸秆均匀地覆盖于地表,地表秸秆覆盖率为100%,可最大面积保护地表土壤,但可能会对下季作物播种及土壤温度产生影响;秸秆带状覆盖是一种局部覆盖方式,地表秸秆覆盖率小于100%,可在一定程度上减轻秸秆全覆盖对播种及地温产生的不良影响。根据覆盖量可划分为全量覆盖、非全量覆盖,对于秸秆覆盖度和覆盖量的选择,应当结合作物、气候和土壤类型等因素,因地制宜地利用作物秸秆。

2 秸秆覆盖对土壤水分的影响

土壤含水量是表征土壤水分状况的重要指标,影响着植被生长、分布格局和演变过程。秸秆覆盖主要通过:(1)抑制土壤水分蒸发;(2)促进雨水入渗;(3)改善土壤结构、提高土壤蓄水保水能力来调控土壤含水量。明晰秸秆覆盖对土壤水分运动影响及作用机理,探明影响其保水保土效果的因素是全面认识秸秆覆盖对水分利用效率和土壤侵蚀影响的核心环节,也是推广和应用秸秆覆盖措施的理论基础。

2.1 秸秆覆盖对土壤蒸发的影响

土壤水分蒸发指水蒸气从土壤表面进入大气的过程,是土壤水分无效损失的主要途经,受到包括温度、湿度、风速和大气压等在内的多种因素控制。秸秆覆盖相当于给土壤表面添加天然保护层,通过减少土壤空气与大气间的水分交互通道以及到达地面的

太阳辐射,抑制土壤蒸发,储蓄土壤水分,提高土壤水分利用效率^[18-20]。关于秸秆覆盖对土壤水分蒸发影响的研究主要在我国西北、华北等地区开展,研究内容多集中不同覆盖材料、覆盖量、覆盖方式等对蒸发影响^[19,21-23](表1)。田间微型蒸发仪是土壤棵间蒸发研究的常用装备,陈素英等^[24]用自制的微型蒸发仪在华北地区开展了不同秸秆覆盖量对冬小麦田棵间蒸发影响的研究,发现秸秆覆盖有效抑制土壤蒸发,在冬小麦生育期内,少覆盖处理(3 000 kg/hm²)比对照平均减少了21%,多覆盖(6 000 kg/hm²)减少了40.4%,但由于覆盖处理导致春季土温回升缓慢,推迟了小麦生育期,加上后期的干热风,造成覆盖处理的冬小麦减产4.1%~10.4%。而刘超等^[25]在陕西杨凌示范区研究不同秸秆覆盖量对土壤蒸发的影响表明,秸秆覆盖量在6 000~9 000 kg/hm²范围时,保墒效果和玉米增产效果明显,此外于庆峰等^[22]认为玉米秸秆覆盖可通过调节土壤水肥气热,在抑制土壤棵间蒸发的同时提高玉米产量,其中10 t/hm²为秸秆覆盖量阈值,超过该覆盖量后土壤蒸发抑制作用呈减弱趋势,而玉米增产作用趋于稳定。由此可见,秸秆覆盖对田间水分无效蒸发有良好的抑制效应,但是其对作物产量的影响因气候、土壤类型、管理措施等条件的不同变异性较大,因此明晰秸秆覆盖对作物产量和土壤水分影响的作用机制,探索适合当地气候地理条件的最佳秸秆覆盖量及其覆盖方式,对抑制土壤蒸发提高作物产量具有重要意义。

表1 秸秆覆盖对土壤蒸发影响研究进展

研究区域	研究内容	研究方法	主要结论	参考文献
甘肃省武威市	不同覆盖材料对小麦棵间蒸发的影响	田间微型蒸发仪	相较于无覆盖措施,地膜覆盖和秸秆覆盖日均棵间蒸发量分别降低15.6%,36.1%	景明等 ^[19]
吉林省长春市	粉碎秸秆和秸秆覆盖度对土壤蒸发的影响	田间微型蒸发仪	秸秆粉碎施入土壤使土壤蒸发量平均提高13.72%,秸秆覆盖处理土壤蒸发平均降14.39%	柏会子等 ^[21]
内蒙古河套灌区磴口县	秸秆覆盖量对土壤蒸发的影响	田间微型蒸发仪	秸秆覆盖量达到10 t/hm ² 后,对棵间蒸发的抑制作用减弱	于庆峰等 ^[22]
内蒙古河套灌区	秸秆隔层结合地膜覆盖对蒸发过程的影响	室内土柱模拟试验	与地膜覆盖相比秸秆隔层结合地膜覆盖使潜水累计蒸发量降低了86.33%	赵永敢等 ^[23]

秸秆覆盖方式是影响土壤水分蒸发的重要因素之一,不同的覆盖形式对水分蒸发的影响不同。柏会子等^[21]对比了秸秆粉碎(2 mm)施入土壤和秸秆覆盖还田对土壤蒸发的影响,表明秸秆覆盖还田对土壤蒸发有明显抑制作用,秸秆粉碎与土壤混合因增加土壤孔隙含量,而提高了土壤蒸发能力。强小曼等^[26]通过大田试验发现留茬结合小麦秸秆覆盖相较于单纯秸秆覆盖对棵间蒸发的抑制效果好,尤其在连续强

降雨后土壤含水量升高,其抑制效果更为明显。土壤蒸发现象能够持续进行与深层土壤水分在土水势梯度下向表土的转运有关,秸秆地下覆盖可降低深层土壤水分蒸发,有效阻隔水盐上行^[27-28],近年来逐渐受到关注。赵永敢等^[23]开展了室内土柱模拟试验,表明秸秆隔层处理土壤累积蒸发量比均质土低75.07%~95.42%,表层覆膜+秸秆隔层的控盐、抑制蒸发的效果最为明显。周长泉等^[29]研究了双层秸秆不同层位

覆盖对土壤水分蒸发的影响,发现上层埋深 8 cm 结合下层埋深 30 cm 的双层秸秆覆盖模式可有效减小土壤水分蒸发。可见关于秸秆覆盖对土壤蒸发影响的研究面在逐渐拓展,由秸秆表层覆盖到秸秆地下覆盖,由秸秆单一覆盖,到秸秆—地膜二元覆盖,但关于秸秆覆盖对土壤蒸发过程、调控机理的探索较少,且研究结果随空间、时间和试验条件的变异性较强,全面认识土壤蒸发发生规律、明晰秸秆保水效应影响因素及其在整个土壤水分蒸发过程中发挥的作用还有待进一步研究,这也是今后研究的重点。

2.2 秸秆覆盖对土壤入渗的影响

水分入渗是水循环和转化的一个重要过程,受到地形、雨强、土壤性质(土壤含水量、土壤糙率和土壤质地)等因素的影响。降雨条件下,土壤水分入渗作用与产流息息相关,雨滴溅蚀作用会破坏地表土壤结构,堵塞土壤孔隙,抑制土壤入渗,促进地表径流的产生,而秸秆覆盖可以保护地表土壤免受雨滴的直接打击,增加地表糙度,减缓地表径流流速,延长水土相互作用的时间^[30],促进土壤水分的入渗。研究表明,黄土坡面免耕秸秆覆盖下的土壤入渗速率为传统耕作的 1.4 倍,平均径流系数减少 97.49%^[31];对南方赤红壤进行稻草秸秆覆盖,其入渗率与无覆盖处理相比可提高 32%^[32]。王晓燕等^[33]研究了华北地区秸秆覆盖对土壤入渗的影响,发现秸秆覆盖可将土壤稳定入渗率提高 1.1 倍并可延缓地表径流的产生。可见尽管土壤类型不同,秸秆覆盖也达到了相应的提高入渗、减少径流产生的效果。

秸秆覆盖量、覆盖方式是影响土壤入渗的主要因素,通常情况下秸秆覆盖量越高,径流开始的时间和土壤含水量达到饱和的时间越晚,且稳定入渗率越高^[33],但秸秆覆盖达到一定厚度后,会在一定程度上阻碍部分水分的入渗,从而造成水分的无效蒸发^[22]。赵永敢等^[23]探索了秸秆地下覆盖对土壤水分入渗的影响,结果表明秸秆隔层处理与无秸秆隔层相比入渗速率降低了 70%,具有明显阻渗作用,但秸秆隔层通过抑制潜水蒸发和返盐,提高了土壤含水量。可见秸秆覆盖对水分入渗影响并非总是正效应,因此有必要综合多因素探讨秸秆覆盖的最佳用量和施用方式,并基于整个农田系统来综合评价秸秆覆盖处理的保水效果。目前关于秸秆覆盖对土壤入渗的影响多通过固定雨强的人工模拟试验来探索^[31-33],且多集中在秸秆覆盖量和覆盖方式等方面,而水分入渗的发生、发展过程以及结果受到雨强、雨型、降雨历时和土壤含水量等因素的影响与制约,尤其在自然降雨条件下,雨强并不是稳定的,雨型是变化的,固定雨强的人工

模拟降雨试验不能很好地反映自然状态下水分入渗发生规律。刘立晶等^[34]通过人工模拟降雨方法研究了不同雨型(小雨、中雨和大雨)条件下秸秆覆盖处理对 0—20 cm 农地水分入渗的影响,结果表明秸秆覆盖对雨水入渗有暂时的阻隔作用,不同雨强下秸秆覆盖的阻滞入渗作用出现的土层不同,中雨后秸秆阻滞入渗作用表现在 5—20 cm 土层,大雨后阻滞入渗作用出现在 10—20 cm 土壤,但这种阻隔作用会随雨强的增加而减弱。刘战东等^[35]研究表明,同一覆盖处理下土壤水分入渗深度和入渗量随雨强的增大而增大。水分入渗是水从土壤表面进入土壤形成土壤水的过程,量化秸秆覆盖对土壤水分入渗的影响及机理还需要更加微观的研究。

2.3 秸秆覆盖对土壤结构的影响

秸秆覆盖对土壤结构的改善也是调控土壤含水量的重要因素,其主要从两方面对土壤结构产生影响:(1)如 2.2 所述,秸秆覆盖可削弱降雨对土壤的溅蚀作用,防止土壤板结;(2)提高土壤有机质含量,促进良好团聚体的形成^[36]。良好的土壤结构—团粒结构的形成需要土壤黏粒,以及粘结土粒的胶结剂,秸秆覆盖于地表减少了径流对土壤细小颗粒的搬运侵蚀,同时促进有机质积累,使小粒径团聚体向中粒径团聚体转化^[37-38],从而降低了容重,促进了毛管孔隙的形成,促进水分入渗,提高了土壤蓄水能力。如王识然等^[39]研究发现,秸秆覆盖还田处理下土壤容积含水量比未覆盖处理高 1.4~1.6 倍。杨永辉等^[36]研究表明,有机质与 >0.25 mm 水稳性团聚体质量分数和土壤稳定入渗速率呈一定的正相关关系。秸秆覆盖对土壤结构的影响涉及到秸秆腐解,关于秸秆腐解过程对土壤其他理化性质的影响,以及分解物参与土壤团聚体形成等物理、化学和生物学过程的机制有待深入研究。

3 秸秆覆盖对土壤侵蚀的影响

水土流失这一全球性资源与环境问题,是生态环境退化的反映,也是导致生态环境进一步恶化的原因。雨滴溅蚀通常被认为是坡面水力侵蚀的最初阶段^[40],该过程使土壤表层结构破碎,堵塞土壤孔隙,抑制土壤入渗作用,促进径流的产生,为面蚀和沟蚀发生提供条件,是侵蚀发生发展过程中不容忽视的一个阶段。面蚀、沟蚀发生在雨滴击溅侵蚀之后,是水力侵蚀破坏土壤资源,造成土地退化的主要发生方式。秸秆覆盖可增加地表覆盖度,拦截降雨,调节地表径流^[30],提高团聚体稳定性,以提高土壤抗侵蚀能力^[36],是坡耕地土壤侵蚀防治的有效措施。明晰秸秆覆盖下雨滴溅蚀、面蚀及沟

蚀发生过程和特点,是准确掌握和预测侵蚀发生发展过程、有效布置防治措施的基础。

3.1 秸秆覆盖对雨滴溅蚀的影响

雨滴溅蚀是坡面水力侵蚀的最初阶段,常发生于裸露地表,过程中土壤结构破碎,细颗粒堵塞土壤孔隙,抑制土壤入渗作用,促进面蚀和沟蚀的发生和发展^[40]。在一定径流水深条件下,溅蚀作用还可以增大坡面径流紊动性,增强径流携沙能力^[41]。此外,溅蚀会造成土壤板结,影响作物出苗率。秸秆覆盖对雨滴溅蚀的抑制作用主要体现在两个方面:(1) 研究发现雨滴溅蚀率与降雨动能呈显著正相关,秸秆覆盖于地表改变了雨滴击溅的直接作用对象,削弱了降雨动能,从而减少溅蚀的发生^[42]。(2) 秸秆还田提高土壤有机质含量,促进良好团聚体的形成^[36],并增强其稳定性,减弱了土壤对雨滴机械打击和消散作用的敏感程度,增强了土壤抗侵蚀能力^[43]。Kukal等^[44]通过人工模拟降雨探究了秸秆覆盖对雨滴溅蚀和降雨入渗的影响,结果表明:与不覆盖处理相比,秸秆覆盖减少了68%的溅蚀量,土壤入渗率比无覆盖处理高54%。

3.2 秸秆覆盖对面蚀的影响

面蚀与沟蚀是水力侵蚀造成土壤流失、土地退化和面源污染的主要发生方式,因此是坡面水力侵蚀防治的重点。地表径流是水土流失的主要驱动力,秸秆覆盖主要通过:(1) 促进降雨入渗,减少径流产生;(2) 增加地表糙度,影响径流流速和径流剪切力等水力学特征^[45],从而影响坡耕地土壤侵蚀发生发展。李飞等^[46]研究表明天然降雨条件下秸秆覆盖相对常规模式可使东北坡耕地土壤径流量减少94.03%~97.97%,土壤流失量减少90.21%~97.39%。王安等^[47]通过人工模拟降雨试验,研究了秸秆覆盖对黄土坡面土壤侵蚀的影响,结果显示秸秆覆盖最高可减少75%的土壤侵蚀量,若结合高留茬,对土壤侵蚀的抑制作用会更强。白永会等^[32]采用模拟降雨试验的方法,开展了秸秆覆盖对红壤水土流失防控效益和径流剪切力影响的研究,发现秸秆覆盖减流效益达到69.3%,减沙效益达到99.2%,秸秆覆盖和未覆盖的临界启动径流剪切力分别为2.8,1.5 N/m²。可见针对不同的土壤和气候类型,秸秆覆盖均具备很好的防蚀效果。

人工模拟降雨方法可不受时间地点限制,可开展不同处理措施对坡面侵蚀的影响研究,受到研究者的青睐。车明轩等^[48]通过室内人工模拟降雨,探究了紫土坡面秸秆覆盖水土保持作用的影响因素,发现雨强是影响秸秆覆盖保持水土作用的重要因子,与覆盖保水保沙率呈极显著负相关。也有研究^[49-50]认为除雨强外坡度也影响着秸秆覆盖水土保持效果,在陡坡

或强降雨(≥ 100 mm/h)条件下,秸秆覆盖反而会加剧土壤侵蚀。唐泽军^[50]发现,当降雨强度达到100 mm/h时,在较小的坡度上,覆盖坡面土壤流失量与裸土坡面大致相当,而在较大坡度上,覆盖坡面的土壤流失量大于裸土坡度;当降雨强度达到150 mm/h时,覆盖坡面的土壤流失量在试验设置坡度上均大于裸土坡面。庄晓晖^[51]利用人工模拟降雨,研究了强降雨秸秆覆盖下受犁底层影响的黄土坡耕地产流产沙特征,结果表明,秸秆覆盖在降雨初期促进降雨入渗,延迟了产流起始时间,使耕作层很快饱和。但由于犁底层入渗率低,在强降雨条件下,秸秆覆盖坡面的土壤入渗率在产流之后快速降低,很快达到最小稳定入渗率,最终使得坡面径流量远大于未受到犁底层影响的裸土地面,加剧了侵蚀的发生。可见秸秆覆盖只有在特定的条件下才具备防蚀效果,而在极端降雨条件、陡坡或犁底层存在的情况下反而会加剧侵蚀。

秸秆覆盖的水土保持效果也受覆盖度和覆盖量的影响。杨青森等^[52]通过野外原位人工模拟降雨试验,开展了秸秆不同覆盖量对东北黑土区土壤侵蚀影响研究,发现20 t/hm²的覆盖处理下坡面径流量、产沙量分别减少87%,99.86%,而40 t/hm²的秸秆覆盖处理下坡面无产流。张翼夫等^[53]研究了玉米秸秆覆盖对华北地区农田土壤侵蚀的影响,研究结果显示秸秆覆盖具有很好的水土保持作用,在沙土地的效果优于壤土,30%~60%是水土保持效果和播种效果最佳的秸秆覆盖度。刘柳松等^[54-55]则认为30%是红壤地区较为经济且水土保持效果好的秸秆覆盖度。唐涛等^[56]采用人工模拟降雨试验,研究了秸秆不同覆盖度对西北干旱地区土壤侵蚀的影响,结果表明在覆盖率大于40%条件下水土流失能够得到有效控制,但当覆盖度低于40%时,秸秆覆盖对水土流失的作用不明显。由此可见最佳秸秆覆盖度的空间变异性很大,探索适合特定地区的秸秆覆盖度和覆盖方式,对提高土地生产力,保护生态环境具有重要意义。

3.3 秸秆覆盖对沟蚀和风蚀的影响

坡面水蚀从面蚀过渡到沟蚀后,径流深度、流速及侵蚀力的增加,使土壤颗粒大量损失,严重影响土地生产力和可持续发展能力。秸秆覆盖可通过减小坡面径流的流速,减弱径流挟沙能力以及侵蚀力,从而达到了减少坡面侵蚀量的目的,是沟蚀发展的重要防治措施^[57]。徐锡蒙等^[57]研究认为,秸秆覆盖可有效减少黄土区细沟和浅沟土壤侵蚀量,且玉米秸秆缓冲带覆盖可有效抑制沟头前进,是减少该区土壤侵蚀的有效覆盖方式。覃超等^[58]认为在斜坡长4.5~7.5 m处布设玉米秸秆缓冲带防治侵蚀的效果较好。

在干旱半干旱区,风力侵蚀也是降低坡耕地土壤质量的一个重要因素,秸秆可以保护地表,避免风对地表土壤的直接作用。于爱忠等^[59]采用风洞试验研究了秸秆覆盖对甘肃地区风力侵蚀的影响,认为秸秆覆盖可明显增加地表不可蚀性土壤颗粒,降低风力侵蚀的可能性。刘振东等^[60]对不同覆盖度对风力侵蚀的抑制效果进行了研究,结果显示当秸秆覆盖度为 30%,结合留茬措施,抗风蚀效率可达 70%~78%。

以上结果表明,秸秆覆盖通过减少地表径流产生,影响地表径流水力学参数,可显著降低耕地水力侵蚀危害,同时也可避免风与地表土壤的直接接触,降低风力侵蚀的发生,保护地表土壤,减少土壤侵蚀量。然而,目前研究多聚焦于秸秆覆盖对土壤侵蚀及径流损失的防控效果,对秸秆覆盖下水力侵蚀发生过程的数量化表达,以及降雨、地形等因素影响下土壤侵蚀发生临界值的研究,以及各因素的互作对秸秆覆盖处理下水力侵蚀的影响机理研究还有待深入。

4 研究展望

综上所述,秸秆覆盖通过降低土壤—大气能量交换,稳定土壤温度,抑制土壤蒸发作用,增加土壤含水量;通过避免外营力与地表土壤颗粒的直接接触,削弱径流侵蚀力等方面抑制土壤侵蚀的发生,是干旱半干旱区提高水土资源利用效率的重要农艺措施。目前,关于秸秆覆盖对土壤水分及土壤侵蚀影响的研究较为丰富,涉及到机理、效应等方面,这在一定程度上完善了秸秆覆盖“保墒抗旱”的研究,但秸秆覆盖对土壤水分、土壤侵蚀的作用效果以及对作物产量的影响,受气候类型、秸秆类型、还田方式和作物种类等因素的影响而存在较大的变异,如有研究表明秸秆覆盖不利于播种、秸秆阻挡作物出苗,在寒冷地区秸秆覆盖可降低春季地温回升速率,对作物出苗发育不利^[46],也有研究表明秸秆覆盖在陡坡、高雨强或犁底层存在的情况下会加速侵蚀。为解决上述问题,促进秸秆覆盖措施的推广应用,今后的秸秆覆盖研究应当强化以下 4 方面:

(1) 明晰秸秆覆盖对土壤水分运动和土壤侵蚀影响的作用机制,量化其作用效果。作用机理研究是掌握秸秆覆盖与土壤水分、侵蚀关系的关键,要在不同试验条件下开展量化研究,室内模拟与野外观测相结合。如秸秆覆盖在高雨强、陡坡和犁底层存在下加剧侵蚀的作用机理还比较模糊,只有加强作用机制研究,才能为有效解决应用难题,发展秸秆覆盖技术,提供理论支持。

(2) 秸秆覆盖措施的区域适用性及评价,制定秸秆

覆盖技术规程,因地制宜科学推广秸秆覆盖技术。秸秆覆盖效果受气候、作物和管理措施等因素的影响,其作用效果具有较大空间变异性,所以在不同地区可选取具有代表性地块长期监测土壤质量、作物产量和病虫害害变化,并评估机具的适用性,优化秸秆还田技术规程,促进相关机械的升级。如秸秆带状覆盖措施的提出,有效解决了对作物出苗率的影响,但此类研究多集中在特定的区域,且没有形成统一的量化结论,覆盖技术可能不具有普适性,在今后的研究中仍需加强该方面的研究,促进秸秆还田措施的推广应用。

(3) 秸秆覆盖及播种等相关机械的研制与改进。机械研发是秸秆覆盖技术广泛推广应用的核心环节之一,今后的研究中,应加强各科研单位、农机制造企业和材料研发企业的协同,制定并研发适合特定区域、特定作物的机械配置,开展秸秆覆盖机具与高性能播种机核心部件研发攻关。

(4) 模型研究在科学研究和农业生产都有重要意义,秸秆覆盖是作物生长模型(如 APSIM 模型)、水土流失模型(如 WEPP 模型)的重要参数,但该参数也受外界条件影响较大,在今后研究中,需注重开展不同条件下的科学试验,确定模型中秸秆覆盖系列参数,以及评价相关模型在不同区域的适用性。

参考文献:

- [1] Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212:424-432.
- [2] Zhao J, Yang Z, Govers G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: Evidence from erosion plot data[J]. *Geoderma*, 2019, 337:729-741.
- [3] Chen S Y, Zhang X Y, Pei D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: field experiments on the North China Plain[J]. *Annals of Applied Biology*, 2010, 150(3):261-268.
- [4] Shimojimaa E, Yoshioka R, Tamagawa I. Salinization owing to evaporation from bare-soil surfaces and its influences on the evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 178(1/4):109-136.
- [5] 谢成俊,王平,陈娟.不同覆盖方式对农田土壤水热状况及马铃薯产量的影响[J].*土壤通报*, 2019, 50(5):1151-1158.
- [6] 李岩华,闫金龙,霍成斌,等.玉米鲜秸秆覆盖旱地冬小麦拔节前土壤温度效应[J].*山西农业科学*, 2019, 47(6):998-1001.
- [7] 赵聚宝,梅旭荣,薛军红,等.秸秆覆盖对旱地作物水分利用效率的影响[J].*中国农业科学*, 1996, 29(2):59-66.

- [8] Kashif A, Wang W Y, Ren G X, et al. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,182:94-102.
- [9] Tao F L, Yokozawa M, Hayashi Y, et al. A perspective on water resources in China: interactions between climate change and soil degradation[J]. *Climatic Change*, 2005,68(1/2):169-197.
- [10] Dong Q G, Yang Y Ch, Yu K, et al. Effects of straw mulching and plastic film mulching on improving soil organic carbon and nitrogen fractions, crop yield and water use efficiency in the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2018,201:133-143.
- [11] Li I Q, Li H B, Zhang L, et al. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2018,221:50-60.
- [12] Dai C T, Liu Y J, Wang T W, et al. Exploring optimal measures to reduce soil erosion and nutrient losses in southern China [J]. *Agricultural Water Management*, 2018,210:41-48.
- [13] 候其东,鞠美庭. 秸秆类生物质资源化技术研究前沿和发展趋势[J]. *环境保护*, 2020,48(18):65-70.
- [14] 崔蜜蜜,何可,颜廷武. 农民参与环境治理的意愿选择及其影响因素[J]. *调研世界*, 2015(12):29-32.
- [15] 张珺,石欣. 农户秸秆资源化利用行为及其影响因素分析[J]. *湖南农业大学学报:社会科学版*, 2020,21(1):17-24.
- [16] 白雪峰. 黑土区秸秆覆盖耕作技术保墒机理及生态效益研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2015.
- [17] 佑胜,刘伟中,张凯,等. 麦秸秆高留茬条件下不同秸秆覆盖量对稻田杂草及水稻产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2019,32(10):2313-2318.
- [18] 陈素英,张喜英,裴冬,等. 秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2004,23(4):32-36.
- [19] 景明,姜丙州,张会敏,等. 不同覆盖材料对于干旱区春小麦棵间蒸发的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2010,21(2):92-95,99.
- [20] 彭正凯,李玲玲,谢军红,等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018,32(5):217-224.
- [21] 柏会子,王洋,石海,等. 秸秆不同还田方式对土壤蒸发特性影响[J]. *土壤与作物*, 2012,1(4):241-247.
- [22] 于庆峰,苗庆丰,史海滨,等. 秸秆覆盖量对土壤温度和春玉米耗水规律及产量的影响[J]. *水土保持研究*, 2018,25(3):111-116.
- [23] 赵永敢,王婧,李玉义,等. 秸秆隔层与地覆膜盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. *农业工程学报*, 2013,29(23):109-117.
- [24] 陈素英,张喜英,裴冬,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2005,21(10):171-173.
- [25] 刘超,汪有科,湛景武,等. 秸秆覆盖量对农田土面蒸发的影响[J]. *中国农学通报*, 2008,24(5):448-451.
- [26] 强小嫚,孙景生,樊向阳,等. 不同覆盖措施下夏玉米土壤水分动态及产量效应[J]. *灌溉排水学报*, 2014,33(1):42-45.
- [27] 乔海龙,刘小京,李伟强,等. 秸秆深层覆盖对水分入渗及蒸发的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2006,4(2):34-38.
- [28] 虎胆·吐马尔白,吴旭春,迪力达. 不同位置秸秆覆盖条件下土壤水盐运动试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006,25(1):34-37.
- [29] 周长泉,赵文举,王珍珍,等. 双层秸秆不同层位覆盖对土壤水分蒸发影响[J]. *节水灌溉*, 2019(3):30-33.
- [30] 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.
- [31] 王育红,蔡典雄,姚宇卿,等. 保护性耕作对豫西黄土坡耕地降水产流、土壤水分入渗及分配的影响[J]. *水土保持学报*, 2008,22(2):29-31,37.
- [32] 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.
- [33] 王晓燕,高焕文,杜兵,等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2001,6(6):42-47.
- [34] 刘立晶,高焕文,李洪文. 秸秆覆盖对降雨入渗影响的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2004,9(5):12-15.
- [35] 刘战东,高阳,刘祖贵,等. 降雨特性和覆盖方式对麦田土壤水分的影响[J]. *农业工程学报*, 2012,28(13):113-120.
- [36] 杨永辉,武继承,吴普特,等. 秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J]. *中国水土保持科学*, 2009,7(5):70-75.
- [37] 高建华,张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010,28(4):192-196.
- [38] 蔡立群,齐鹏,张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2008,22(2):141-145.
- [39] 王识然,张琪,王宇,等. 垄沟秸秆覆盖还田对耕层土壤结构性及含水量的影响[J/OL]. *吉林农业大学学报*, 2019. DOI:10.13327/j.jjlau.2019.5042.
- [40] Comino J R, Sinoga J D R, González J M S, et al. High variability of soil erosion and hydrological processes in Mediterranean hillslope vineyards (Montes de Málaga, Spain)[J]. *Catena*, 2016,145:274-284.
- [41] Wainwright J, Parsons A J, Abrahms A D. A simulation study of the role of raindrop erosion in the forma-

- tion of desert pavements [J]. *Earth Surf. Processes Landforms*, 2006, 20(3): 277-291.
- [42] 敖畅. 黄土坡地径流养分流失特征及其化学调控机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [43] 李海茹, 广慧冰, 刘刚, 等. 有机质影响溅蚀破坏土壤团聚体的主要作用机制[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 106-114.
- [44] Kukul S S, Sarkar M. Splash erosion and infiltration in relation to mulching and polyvinyl alcohol application in semi-arid tropics[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2010, 56(6): 697-705.
- [45] 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水动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 153-160.
- [46] 李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 37-42.
- [47] 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.
- [48] 车明轩, 渊波, Muhammad Naeem Khan, 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.
- [49] Rahma A E, Wang W, Tang Z, et al. Straw mulch can induce greater soil losses from loess slopes than no mulch under extreme rainfall conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 141-151.
- [50] 唐泽军. PAM增加入渗减少土壤侵蚀及稀土元素示踪土壤侵蚀过程的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [51] 庄晓晖. 强降雨秸秆覆盖黄土坡耕地土壤侵蚀过程及动力机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] 刘柳松, 任红艳, 史学正, 等. 秸秆覆盖对不同初始含水率土壤产沙过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 108-112.
- [55] 刘柳松, 史学正, 于东升, 等. 秸秆覆盖对干湿态红壤坡面流水力学参数的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(6): 20-25.
- [56] 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, 14(4): 1-3.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 于爱忠, 黄高宝. 保护性耕作对内陆河灌区春季麦田不可蚀性颗粒的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 6-9.
- [60] 刘振东, 王飞, 赵云, 等. 保护性措施对农田土壤风蚀影响的室内风洞模拟[J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 29-35.

(上接第 428 页)

- [19] 李涛, 廖和平, 杨伟, 等. 重庆市“土地、人口、产业”城镇化质量的时空分异及耦合协调性[J]. *经济地理*, 2015, 35(5): 65-71.
- [20] 卢新海, 陈丹玲, 匡兵. 产业一体化与城市土地利用效率的时空耦合效应: 以长江中游城市群为例[J]. *中国土地科学*, 2018, 32(9): 66-73.
- [21] 刘莉君, 刘友金. 产业转移与土地利用的耦合作用机理及协调度评价: 以环长株潭城市群为例[J]. *财经理论与实践*, 2019, 40(4): 137-144.
- [22] 史思琪, 梁彦庆, 黄志英, 等. 低碳理念下我国土地集约利用水平时空异质性及其障碍因子分析[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2020, 43(3): 1-9, 64.
- [23] 景丽. 欠发达民族地区人口—土地—经济城镇化系统耦合协调发展研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [24] 田泽, 景晓栋, 肖钦文. 长江经济带碳排放—产业结构—区域创新耦合度及时空演化[J]. *华东经济管理*, 2020, 34(2): 10-17.
- [25] 梅燕, 蒋雨清. 乡村振兴背景下农村电商产业集聚与区域经济协同发展机制: 基于产业集群生命周期理论的多案例研究[J]. *中国农村经济*, 2020(6): 56-74.
- [26] Combes P P, Laurent G. The empirics of agglomeration economies[J]. *Handbook of Regional and Urban Economics*, 2015, 5(3): 247-348.
- [27] Hanlon W W, Miscio A. Agglomeration: A long-run panel data approach[J]. *Journal of Urban Economics*, 2017, 99: 1-14.
- [28] 余雪振, 梅昀. 武汉市不同土地利用结构碳排放效应[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(12): 2751-2756.