

东北黑土区秸秆还田方式对不同退化程度 农田地表粗糙度的影响

邢书昆^{1,2}, 张光辉^{1,2}

(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
水土风沙灾害风险防控全国重点实验室,北京 100875)

摘要: [目的] 探究秸秆还田方式和土地退化程度影响地表粗糙度(LSR)季节变化的作用与机制。[方法] 以东北典型黑土区未退化、轻度、中度和重度退化农田为研究对象,设置秸秆移除(对照)、覆盖条耕还田、旋耕还田和深翻还田4种处理,共建立16个监测小区。于2023年大豆生长季的不同阶段,周期性测定地表粗糙度、土壤理化性质和枯落物蓄积量。[结果] 地表粗糙度受秸秆还田方式、土地退化程度、作物生长季节及其交互作用的影响显著。对于不同秸秆还田方式,覆盖条耕还田处理LSR最大(7.41~7.93 mm),其次为深翻还田(6.25~7.43 mm),秸秆移除处理最小(4.85~6.68 mm)。土地退化造成LSR的显著下降,从未退化农田的6.68~7.93 mm降低至重度退化农田的4.85~7.41 mm。随着大豆生长推进,LSR总体呈下降趋势,但农事活动导致LSR剧烈波动。LSR与土壤黏结力、团聚体稳定性、有机质含量和枯落物蓄积量呈极显著正相关($p < 0.01$),而与秸秆腐解百分比和土壤体积质量呈极显著负相关($p < 0.01$)。[结论] 应考虑黑土农田退化程度,因地制宜筛选秸秆还田方式。对于未退化农田,旋耕或深翻还田更有利于疏松土壤结构,改善通气透水性能,缓解因地形平坦造成的涝渍胁迫;对于退化农田,秸秆覆盖条耕还田能够减少土壤结构破坏,提升团聚体稳定性和地表粗糙度,更有效地调控坡面水文过程,降低土壤侵蚀风险。

关键词: 黑土区; 侵蚀退化; 秸秆还田; 微地形; 季节变化

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0140-10

Effects of Different Straw Returning Approaches on Land Surface Roughness in Croplands with Different Degradation Degrees in Black Soil Region of Northeast China

XING Shukun^{1,2}, ZHANG Guanghui^{1,2}

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of
Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] This study explores the effects and mechanisms of different straw return approaches and land degradation degrees on the seasonal variations of land surface roughness (LSR). [Methods] Croplands with non-degraded, lightly, moderately, and severely degraded soils in the typical black soil region of Northeast China were selected as the research sites. Four treatments were applied: straw removal (control), strip mulching, rotary tillage, and deep plowing, resulting in a total of 16 monitoring plots. During different soybean growth stages in 2023, periodic measurements were conducted on LSR, soil physicochemical properties, and litter accumulation. [Results] LSR was significantly affected by the straw returning approach, land degradation degree, crop growth stage, and their interactions. For different straw returning approaches, strip mulching yielded the highest LSR

收稿日期: 2025-10-11

修回日期: 2025-10-31

录用日期: 2025-11-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1501202)

第一作者: 邢书昆(1996—),男,博士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 202231051002@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 张光辉(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail: ghzhang@bnu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

(7.41 mm to 7.93 mm), followed by deep plowing (6.25 mm to 7.43 mm) and the lowest under straw removal (4.85 mm to 6.68 mm). Land degradation caused a significant decrease in LSR, decreasing from 6.68 mm to 7.93 mm in non-degraded cropland and from 4.85 mm to 7.41 mm in severely degraded cropland. With the progression of soybean growth, LSR tended to decline overall but fluctuated sharply due to farming activities. LSR showed extremely significant positive correlations ($p < 0.01$) with soil cohesion, aggregate stability, organic matter content, and litter accumulation but had extremely significant negative correlations ($p < 0.01$) with straw decomposition percentage and soil bulk density. [Conclusion] Straw returning approaches should be chosen considering the land degradation degree of black soil croplands and based on local conditions. For non-degraded cropland, rotary tillage or deep plowing helps loosen soil, improve aeration and water permeability, and alleviate waterlogging stress in flat terrain. For degraded croplands, straw mulching can reduce soil structure damage, enhance aggregate stability and LSR, more effectively regulate slope hydrological processes, and lower soil erosion risk.

Keywords: black soil region; land degradation; straw return; microtopography; seasonal variation

Received: 2025-10-11

Revised: 2025-10-31

Accepted: 2025-11-07

Online(www.cnki.net): 2025-12-19

东北黑土区是我国重要的商品粮基地和土壤资源宝库,然而,受降雨集中、地形起伏、耕作扰动等因素的共同作用,该区水土流失面积高达21.2万 km^2 ,其中轻度、中度和重度水蚀面积分别占79.4%、12.9%和7.7%^[1-2]。地表粗糙度是表征土壤微地形起伏程度和地表阻力特征的关键指标,直接影响地表填洼与入渗过程、坡面水文与泥沙连通性,改变土壤侵蚀发生与发展过程^[3-5]。因此,研究退化黑土农田地表粗糙度变化规律与主控因素,对于维持或提升地表粗糙度、缓解农田水土流失、改善土壤墒情和促进作物生长具有重要意义。

秸秆还田作为保护性耕作的核心措施,通过增加地表粗糙度和土壤有机质含量、改善土壤团聚体结构与养分循环,已成为黑土区应对土壤退化的关键农艺措施^[6-7]。目前,黑土区秸秆主要以旋耕、深翻、覆盖免耕和覆盖条耕等方式还田^[8-9],不同还田方式的作业特点截然不同,对地表的扰动过程与强度、秸秆还入的深度与程度差异显著^[10-11],导致地表粗糙度的明显变化。一般认为,秸秆覆盖能够显著增加农田微地形起伏度,同时保护地表免受雨滴打击,减缓土块或团聚体崩解与分散,增加地表粗糙度^[12-13]。耕作深度增加也会增强微地貌空间异质性^[14],但其影响随着降雨次数的增加而逐渐减弱^[15]。降雨侵蚀、秸秆腐解百分比、土壤理化性质变化、枯枝落叶覆盖及与表土混合等都会引起地表粗糙度的动态变化^[16-17],但其影响程度通常不及农事活动(如播种、施肥、中耕、锄草、收获等)。综上,秸秆还田方式通过直接或间接作用显著影响地表粗糙度及其动态变化。

东北黑土区独特的长缓坡地形导致不同地块之间,甚至同一地块不同坡位土壤侵蚀退化程度差异

明显^[7,18],该差异直接改变秸秆还田及其分解过程的土壤环境(如黑土层厚度、土壤质地、结构、有机质含量、水分与温度等),从而可能引起地表粗糙度对秸秆还田方式的响应呈显著差异。然而,现有研究多集中于还田方式对土壤养分或作物产量的影响,针对不同还田方式如何影响黑土农田地表粗糙度季节变化的研究仍相对薄弱,且普遍未充分考虑农田退化程度的潜在影响,在一定程度上制约秸秆还田技术在不同退化程度农田上的科学推广与精准应用。

因此,本文在东北典型黑土区选择4种不同退化程度的农田,开展原位监测,分析不同秸秆还田方式下地表粗糙度的季节变化特征,旨在探究还田方式与土地退化影响地表粗糙度的作用与机制,为揭示黑土农田侵蚀过程动力机制,优化秸秆还田方式提供理论支撑和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在鹤北小流域(48°59'00"~49°03'00"N, 125°16'00"~125°21'00"E)进行,该小流域位于黑龙江省嫩江市九三农垦分局鹤山农场,隶属于嫩江支流老莱河流域,流域面积约为27.6 km^2 。鹤北小流域地处小兴安岭向松嫩平原过渡的漫川漫岗地带,地形以长缓坡为主,坡度多在1.7%~10.5%,坡长为500~4 000 m^[7]。该区属寒温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温为0℃,年平均降水量546 mm,季节分配不均,70%以上的降雨集中在6—8月; $\geq 10^\circ\text{C}$ 年积温约为2 100℃,无霜期约114 d。主要土壤类型为典型黑土,多分布在平岗地和缓坡地,黑土A层厚度一般 $< 30\text{ cm}$,有机质质量分数为4%~6%,土壤质地多为黏壤土^[19]。该区开垦70多年,大部分原生植

被已被破坏,土地利用以耕地为主,占流域总面积的 80% 以上。主要耕作方式为顺坡垄作,多采用玉米和大豆轮作。

1.2 研究方法

1.2.1 试验样地和试验设计 2022年4月,对小流域进行全面踏查,结合已有研究,选取鹤北小流域8号

小流域1块典型农田为研究对象,地块面积约为 0.23 km²,平均坡度为 2.46°。根据北京师范大学九三水土保持试验站对地块土壤侵蚀的长期监测^[18,20],结合实地调查的黑土层厚度、土壤质地、母质层出露情况及侵蚀沟发育程度等信息,将不同坡位的农田划分为4种退化程度(表1)。

表 1 试验样地基本信息

Table 1 Basic information of experimental plots

退化程度	坡度/(°)	土壤侵蚀模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	黑土厚度/ cm	土壤质地		
				黏粒 (<0.002 mm)/%	粉粒 (0.002~0.05 mm)/%	砂粒 (0.05~2 mm)/%
未退化	1.78	<200	>70	48.62±1.44A	43.29±0.69A	8.09±0.76A
轻度退化	2.30	700	35	43.67±1.38B	40.56±0.51B	15.77±0.89B
中度退化	2.07	1 800	25	38.56±1.29C	39.74±0.34B	21.70±1.15C
重度退化	4.03	4 200	<15	30.64±0.84D	38.42±0.17C	30.95±0.84D

注:土壤质地数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同退化程度农田指标差异显著($p<0.05$)。

未退化样地位于坡顶,轻度退化、中度退化和重度退化样地沿坡面依次向下分布,间距约 200 m,其中重度退化样地位于凸型坡中部。基于大疆精灵 4-RTK 无人机遥感影像生成的 DEM 数据,计算不同退化程度样地的坡度依次为 1.78°、2.30°、2.07°和 4.03°,坡向一致。随着退化程度加剧,估算的土壤侵蚀模数从 <200 t/(km²·a) 上升至 4 200 t/(km²·a),黑土层厚度从 >70 cm 下降至不足 15 cm。土壤黏粒含量显著下降,而砂粒含量显著增加($p<0.05$),土壤类

型由粉质黏土转变为粉质黏壤土和粉质壤土。重度退化样地浅沟发育明显,部分地点出现“破皮黄”现象。

试验于 2022 年 10 月开始,共设计 16 个处理(4 种退化程度×3 种秸秆还田方式+4 个对照处理)。3 种秸秆还田方式分别为覆盖条耕还田(SM)、旋耕还田(SR)和深翻还田(SP),对照处理为旋耕秸秆移除(CK),各处理作业流程与特征见表 2。2023 年 5 月初,各样地采用免耕播种机播种、施肥、镇压等 1 次作业;6 月 18 日进行 1 次中耕锄草;10 月初收获大豆。

表 2 不同秸秆还田方式及对照处理作业特征

Table 2 Operational characteristics of different straw returning approaches and control treatment

处理	秸秆形态与还田量	主要作业步骤与耕作深度	种植方式
秸秆移除(CK)	无秸秆还田	秋季作物收获后移除秸秆,使用旋耕机旋耕土壤,深度为 15 cm	顺坡垄作(垄台宽 70 cm、高 15 cm,垄沟宽 40 cm)
覆盖条耕还田(SM)	粉碎的大豆秸秆,长度 5~10 cm;还田量 4.5 t/hm ² (干重)	秸秆人工归行,形成 40 cm 覆盖带与 70 cm 耕作播种带;播种带浅旋约 5 cm	顺坡耕作
旋耕还田(SR)	同 SM 处理	秸秆均匀抛洒地表后,旋耕混入土壤;深度为 15 cm	同 CK 处理
深翻还田(SP)	同 SM 处理	秸秆均匀抛洒后,人工深翻埋入土壤;翻埋深度约 25 cm	同 CK 处理

1.2.2 地表粗糙度测定 本文采用摄影测量法(photogrammetry)测定地表粗糙度(land surface roughness, LSR)。该方法基于运动恢复结构(structure-from-motion, SfM)与多视影像立体重建(multi-view stereo, MVS)原理实现三维建模,具有野外操作方便、分辨率高等优点^[16-17],主要包括照片拍摄、软件处理和 LSR 计算 3 个步骤。

测定过程中,在选定的地点放置 1 个铝制方框(30 cm×30 cm),对方框的 8 个角点依次编号(1~8,图 1),作为控制点。随后,将方框内的所有植株剪至 2 cm 高度(假定坡面径流深度不超过该高度),并小心捡去未混入土壤的枯落物。在阴天或遮蔽阳光条件下,使

用固定焦距(20 mm)的数码相机(Nikon D7500)环绕方框拍摄照片。相机距离地面高度约 1.2 m,每个地点至少拍摄 20 张照片,每张照片包含至少 4 个控制点,相邻照片重叠度控制在 50%~60%。

拍摄完成后,将照片导入 Agisoft PhotoScan 1.2.5 软件生成三维密集点云,并进一步导入 ArcGIS 10.7 软件生成分辨率为 0.2 mm 的数字高程模型(DEM)(图 1)。随后,根据方框内部 4 个控制点的三维坐标,将 DEM 裁剪为 30 cm×30 cm,用所有网格高程的标准差来表征地表粗糙度(图 1)。

在大豆出苗期、幼苗至分枝形成期、开花结荚期、鼓粒灌浆期和成熟收获期,周期性(间隔 21 d 左

右)测定不同处理样地的地表粗糙度(图 2)。为进一步反映粗糙度的时间变异特征,在儒略日第 132 d(大豆播种后)开始第 1 次测定,共测定 8 次。在每次拍摄照片时,对于垄作样地(秸秆移除、旋耕还田和深翻还

田),沿对角线在垄台选择 3 个代表性样方进行拍摄;而对于平作样地(覆盖条耕还田),沿对角线分别在秸秆覆盖带和耕作播种带各选择 3 个样方拍摄照片,各样方地表粗糙度平均值作为该样地该监测期的 LSR。

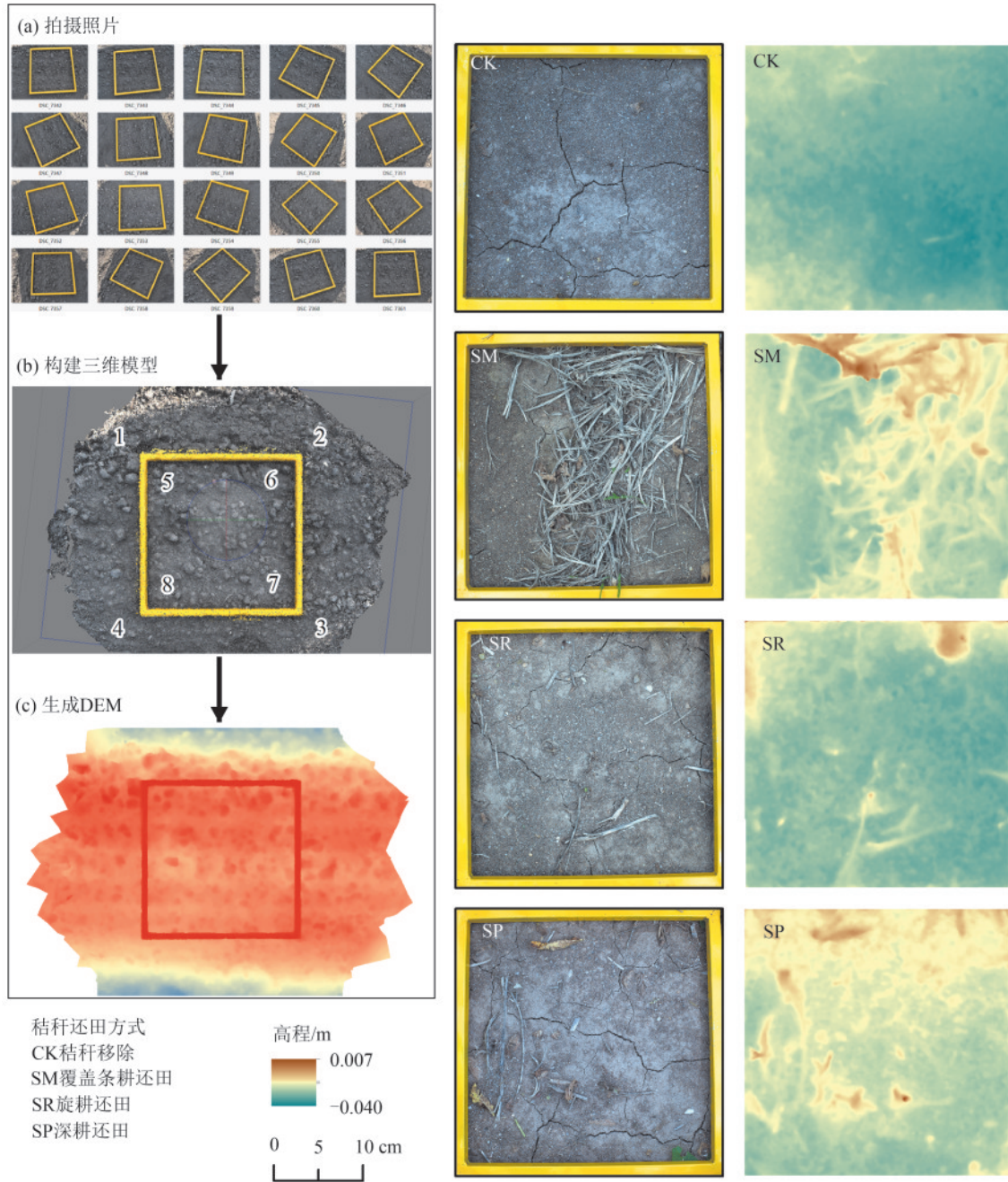


图 1 地表粗糙度测定流程及不同处理 DEM 比较

Fig.1 Measurement process of LSR and comparison of DEMs under different treatments

1.2.3 降雨特性、秸秆腐解百分比、土壤理化性质和枯落物蓄积量监测 降雨量通过 2 个安装在试验地块顶部和底部的翻斗式自记雨量计测定,每分钟记录 1 次,精度为 0.2 mm。根据日降雨量数据计算累积降雨量(图 2)。秸秆腐解百分比、土壤理化性质和枯落物的周期性监测与地表粗糙度测定同步。对于秸秆腐解百分比,不同还田方式处理的采样方法有所差异。对于旋耕和深翻还田

样地,使用直径 8 cm 的土钻沿对角线在垄台采集土壤-秸秆混合样品,取样深度直至无秸秆残体出现。对于覆盖条耕样地,则在秸秆覆盖带内使用 20 cm × 20 cm 样方全量收集秸秆。每次采样重复 3 次。采集的混合样品置于 0.25 mm 筛网上,用清水冲洗后烘干(65 °C, 48 h)并称量,得到秸秆残余量。然后根据初始秸秆还田量(4.5 t/hm²)计算各监测时间点秸秆腐解百分比(SDP,%)。

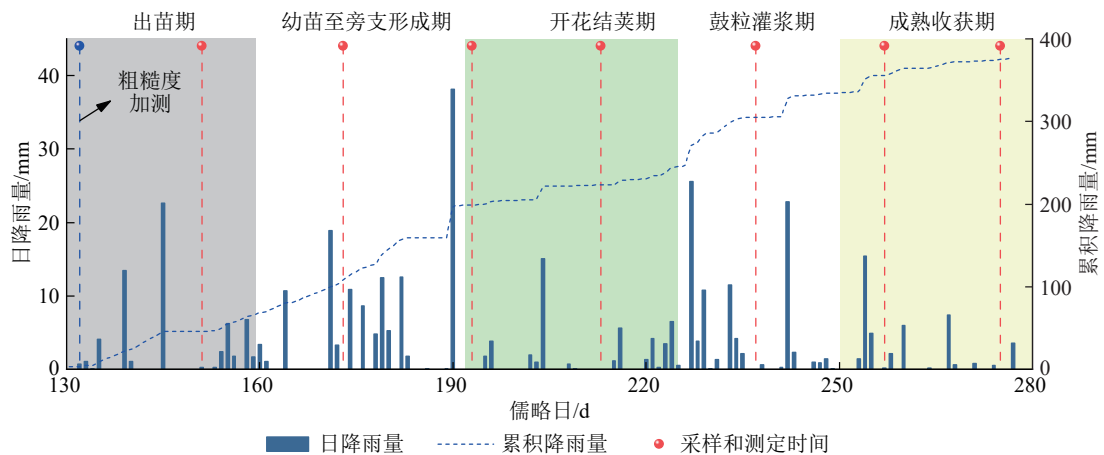


图2 大豆生长季降雨特征、LSR及影响指标测定时间

Fig.2 Rainfall characteristics and measurement times of LSR and its influencing metrics during soybean growing season

测定的土壤理化性质包括土壤质地、土壤体积质量(BD, kg/cm^3)、黏结力(Coh, kPa)、团聚体稳定性(MWD, mm)、物理结皮厚度(PCT, mm)和有机质含量(SOM, g/kg)。土壤质地通过激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)测定。由于1个生长季内土壤质地不会发生显著变化,仅在出苗期测定1次,采样深度0~20 cm,各处理样地设3次重复。土壤体积质量和团聚体稳定性分别通过环刀法(100 cm^3)和湿筛法测定,土层深度均为0~10 cm,每次测试重复3次。土壤黏结力采用袖珍式黏结力仪(Eijkelkamp 1410)在预先饱和的土壤表面测定,各样地重复测定20次。土壤物理结皮厚度使用数字游标卡尺(精度0.03 mm)测定,监测时在各处理样地沿对角线采集10个土壤结皮样品,并在东、南、西、北4个方向测定其厚度,4个方向及10个重复样品的平均值作为该处理样地的物理结皮厚度。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加加热法进行测定,采样深度为0~20 cm,各处理样地均设3次重复。枯落物蓄积量(LA, g/m^2)采用样方法($20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$)测定,通过全量收集样方内的枯落物,清洗、烘干、称重并计算得到,每次测试各处理样地设3次重复。

1.2.4 数据分析方法 通过单因素方差分析(LSD事后比较检验, $p < 0.05$)对不同秸秆还田方式和土地退化程度下的地表粗糙度、秸秆腐解百分比、土壤理化性质及枯落物蓄积量进行差异显著性检验。通过多因素方差分析比较还田方式、退化程度和季节变化对各监测指标的影响程度。利用 Pearson 相关分析和线性回归分析揭示地表粗糙度与降雨量、秸秆腐解百分比、土壤理化性质和枯落物蓄积量间的关系与作用机制。数据处理和分析使用 SPSS 26.0 (IBM SPSS Statistics, 2019)软件,绘图使用 Origin Pro 21.0 (OriginLab Corp., 2020)软件。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆还田方式下地表粗糙度特征

地表粗糙度受秸秆还田方式、土地退化程度、大豆生长季节变化及其相互作用的影响显著(图3)。整体来看,季节变化影响最大($F=108.8, p < 0.001$),其次为还田方式($F=65.9, p < 0.001$)和退化程度($F=37.4, p < 0.001$),两两之间的交互作用影响相对较小($F \leq 6.7$)。随着大豆生长季推进,LSR整体呈下降趋势,但在成熟收获期略有回升。不同处理的LSR季节变化特征存在明显差异。对于秸秆移除、旋耕还田和深翻还田处理,LSR在幼苗至旁支形成期明显上升,而覆盖条耕处理 LSR 在大豆生长季呈波动性降低趋势。

多因素方差分析F值:

D: 37.4***

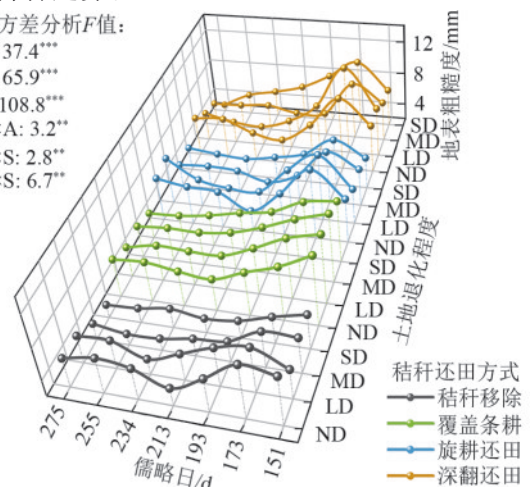
A: 65.9***

S: 108.8***

D×A: 3.2**

D×S: 2.8**

A×S: 6.7**



注:ND、LD、MD和SD分别为未退化、轻度、中度和重度退化样地;D为土地退化程度;A为秸秆还田方式;S为大豆生长季节变化。下同。

图3 不同秸秆还田方式地表粗糙度季节变化

Fig.3 Seasonal variations of LSR under different straw returning approaches

随着土地退化程度加剧,不同秸秆还田方式下 LSR 平均值逐渐减小(表3),其中秸秆移除和旋耕还田处理的 LSR 显著下降($p < 0.05$),分别从未退化的

6.68、7.44 mm 降低至重度退化的 4.85、5.52 mm。秸秆还田方式对 LSR 的影响随退化程度加剧而增强。秸秆还田明显增大 LSR, 但不同还田方式间差异明显, 覆盖条耕处理的 LSR 最大(7.41~7.93 mm), 其次为秸秆深翻还田处理(6.25~7.43 mm), 中度和重度退化农田覆盖条耕处理的 LSR 显著大于秸秆移除、旋耕或深翻还田处理($p < 0.05$), 秸秆移除处理的 LSR 最小(表 3)。

2.2 不同还田方式下秸秆腐解百分比、土壤理化性质及枯落物蓄积量

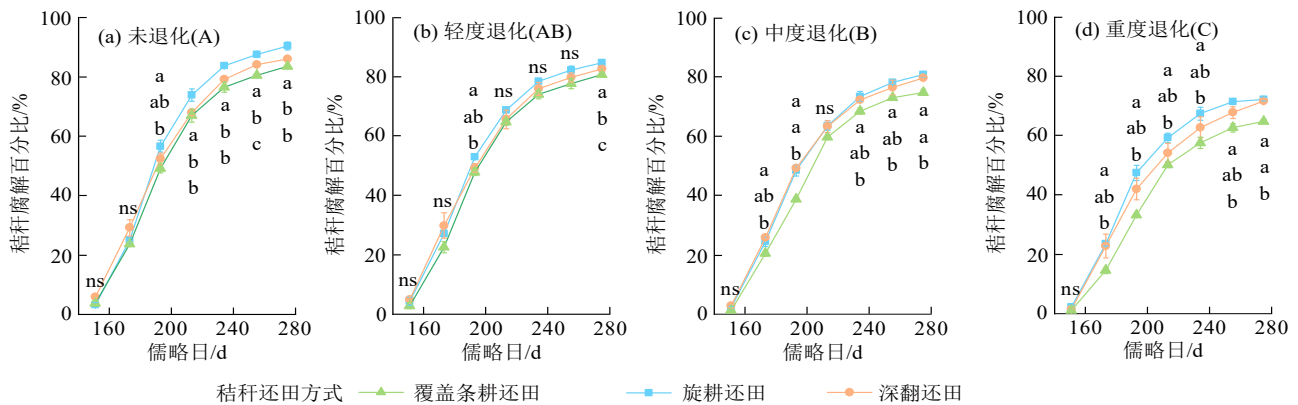
在大豆生长季, 秸秆腐解百分比整体呈现前期快速增大、后期缓慢增大的季节变化特征(图 4)。随着土地退化程度加剧, 秸秆腐解百分比呈明显下降趋势, 并且在大豆成熟收获期差异显著($p < 0.05$)。秸秆还田方式显著影响秸秆腐解, 随着大豆生长推进, 不同还田方式间的差异越来越显著(图 4)。在成熟收获期, 秸秆旋耕还田腐解百分比最高(72.3%~

90.4%), 其次为深翻还田(71.7%~86.1%), 覆盖条耕还田最低(64.9%~83.7%)。

表 3 大豆生长季不同秸秆还田方式 LSR 差异显著性比较
Table 3 Significance comparison of LSR among different straw returning approaches during soybean growing season

处理类型	退化程度			
	未退化	轻度退化	中度退化	重度退化
秸秆移除	6.68±0.56Aa	6.19±0.61ABa	4.91±0.5Bb	4.85±0.49Bb
覆盖条耕	7.93±0.7Aa	7.85±0.72Aa	7.89±0.72Aa	7.41±0.72Aa
旋耕还田	7.44±0.64Aa	6.81±0.66ABa	5.74±0.57Bb	5.52±0.42Bb
深翻还田	7.43±0.67Aa	7.11±0.98Aa	5.98±0.56Ab	6.25±0.76Aab

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示相同退化程度农田不同秸秆还田方式间差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示相同还田方式处理不同退化程度农田间差异显著($p < 0.05$)。



注:图中不同小写字母表示不同秸秆还田方式处理秸秆腐解百分比差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示成熟收获期不同退化程度农田秸秆腐解百分比差异显著($p < 0.05$)。

图 4 不同还田方式秸秆腐解百分比季节变化

Fig.4 Seasonal variations of straw decomposition percentage under different straw returning approaches

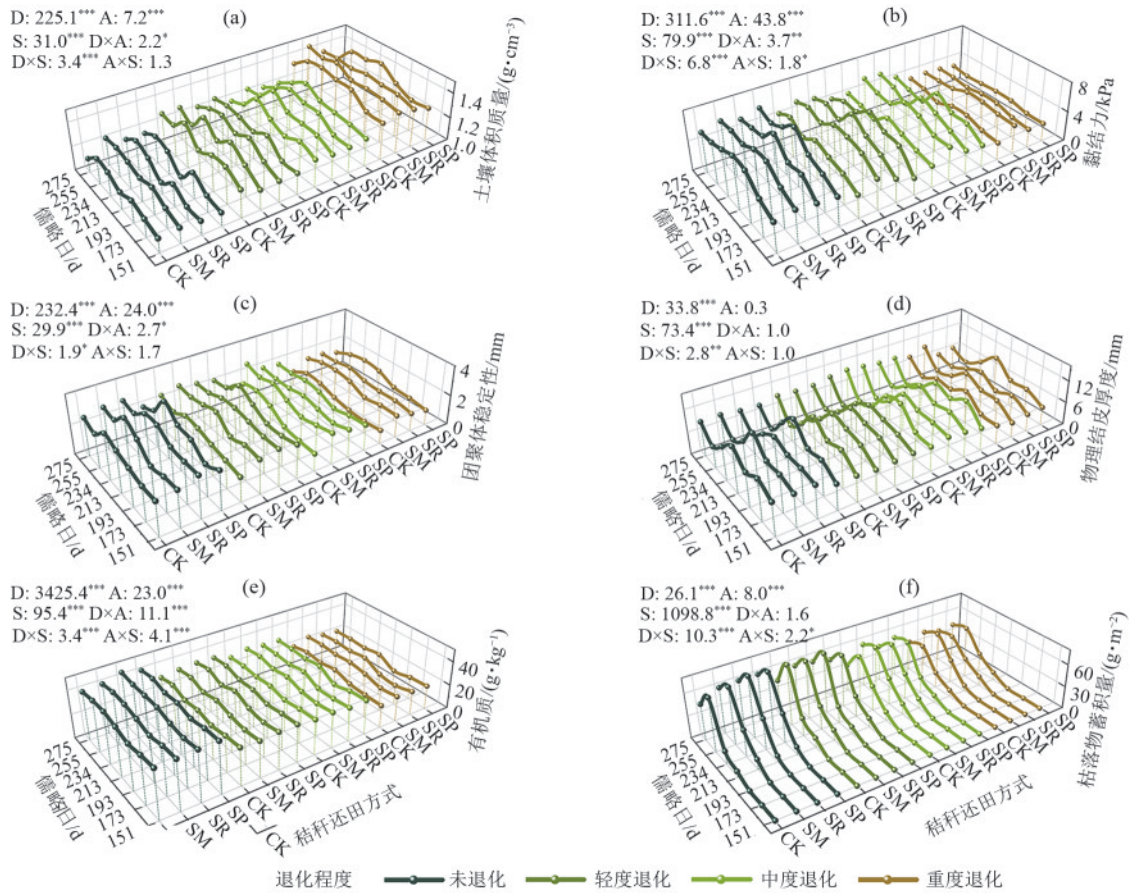
多因素方差分析结果表明, 土壤理化性质和枯落物蓄积量受退化程度、秸秆还田方式、大豆生长季节变化及其交互作用的显著影响(图 5)。其中, 土壤体积质量、黏结力、团聚体稳定性和有机质质量分数受退化程度影响最大($F \geq 225.1, p < 0.001$)(图 5); 而物理结皮厚度和枯落物蓄积量受大豆生长季节变化影响最显著($F \geq 73.4, p < 0.001$)。

随着大豆生长推进, 土壤体积质量、黏结力、团聚体稳定性呈先缓慢增加, 后缓慢下降的趋势; 物理结皮厚度波动明显, 呈增加-减小-再增加的趋势; 土壤有机质质量分数整体缓慢增加; 枯落物蓄积自开花结荚期开始出现, 随后快速增加, 在成熟收获期有所下降(图 5)。对于整个大豆生长季, 随着退化程度加剧, 土壤体积质量显著增加($p < 0.05$), 而黏结力、团聚体稳定性和有机质质量分数显著下降($p < 0.05$)(表 4)。

秸秆还田方式对土壤体积质量、黏结力和团聚体稳定性的影响随着退化程度加剧愈加显著, 覆盖条耕还田处理表现出最大的土壤体积质量、黏结力、团聚体稳定性和有机质质量分数。

2.3 地表粗糙度影响因素分析

对大豆生长季测定的 7 次地表粗糙度、土壤理化性质及枯落物蓄积量进行 Pearson 相关分析可知, 地表粗糙度季节变化与累积降雨量、秸秆腐解百分比及土壤体积质量的相关系数分别为 -0.544^{**} 、 -0.548^{**} 、 -0.385^{**} , 均呈极显著负相关($p < 0.01$); 与枯落物蓄积量的相关系数为 0.360^{**} , 呈极显著正相关($p < 0.01$); 而与土壤黏结力、物理结皮厚度、团聚体稳定性和有机质质量分数的相关系数分别为 0.113 、 0.066 、 0.188 、 0.170 , 相关性不显著($p > 0.05$)。



注:图中数据为多因素方差分析 F 值; *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$; CK, SM, SR, SP 分别为秸秆移除、覆盖条耕还田、旋耕还田和深翻还田处理。

图 5 不同还田方式土壤理化性质和枯落物蓄积量季节变化

Fig.5 Seasonal variations of soil physicochemical properties and litter accumulation under different straw returning approaches

表 4 大豆生长季不同还田方式处理土壤理化性质和枯落物蓄积量差异显著性比较

Table 4 Significance comparison of soil physicochemical properties and litter accumulation among different straw returning approaches during soybean growing season

退化程度	处理	土壤体积质量/ ($g \cdot cm^{-3}$)	黏结力/kPa	团聚体稳定性/ mm	物理结皮厚度/ mm	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	枯落物蓄积量/ ($g \cdot m^{-2}$)
未退化	CK	1.16±0.01Ca	5.69±0.40Aa	2.54±0.12Aa	9.29±0.75Aa	40.72±0.65Ab	36.42±14.63Aa
	SM	1.20±0.02Ca	5.96±0.34Aa	2.73±0.19Aa	9.41±0.89Aa	41.33±0.69Ab	47.06±14.02Aa
	SR	1.16±0.02Ca	5.86±0.42Aa	2.99±0.12Aa	8.77±0.61Aa	43.39±0.82Aa	48.71±15.93Aa
	SP	1.16±0.02Ca	5.82±0.47Aa	2.70±0.23Aa	8.94±1.00Aa	42.12±0.54Aab	48.13±15.10Aa
轻度退化	CK	1.29±0.02Ba	4.47±0.30Ba	2.12±0.12Ba	8.66±0.98ABa	30.89±0.62Ba	41.13±15.06Aa
	SM	1.27±0.03Ba	5.62±0.30Aba	2.54±0.11Aba	8.39±0.95Aa	31.91±0.84Ba	45.53±14.18Aa
	SR	1.27±0.02Ba	5.15±0.45ABa	2.59±0.07ABa	8.52±0.79Aa	33.00±1.06Ba	42.26±16.24Aa
	SP	1.24±0.02Ba	4.77±0.49ABa	2.42±0.15ABa	8.30±0.75Aa	31.96±0.76Ba	40.66±12.86Aa
中度退化	CK	1.26±0.02Ba	3.80±0.25Bb	1.74±0.21Bb	8.22±1.12ABa	29.15±0.37Ba	35.94±10.14Aa
	SM	1.29±0.02Ba	5.14±0.25Ba	2.19±0.14Ba	7.60±0.90Aa	30.85±0.81Ba	43.89±11.65Aa
	SR	1.28±0.02Ba	4.67±0.38Bab	1.86±0.06Bab	8.38±0.68Aa	29.26±0.90Ca	39.82±10.61Aa
	SP	1.28±0.02Aba	4.16±0.35Bb	1.78±0.08Bb	7.81±0.89Aa	29.15±0.92Ca	35.94±12.10Aa
重度退化	CK	1.39±0.02Aab	2.94±0.16Cb	1.08±0.10Cb	6.58±0.58Ba	21.06±0.75Cab	28.89±8.72Aa
	SM	1.40±0.02Aa	3.94±0.14Ca	1.67±0.09Ca	7.12±0.80Aa	23.49±0.86Ca	35.44±10.85Aa
	SR	1.36±0.01Aab	3.15±0.14Cb	1.50±0.07Cb	6.28±0.49Ba	21.30±1.13Dab	31.52±7.91Aa
	SP	1.34±0.03Ab	2.86±0.10Cb	1.49±0.14Cb	7.04±0.77Aa	20.33±0.86Db	32.83±9.26Aa

注:不同大写字母表示相同还田方式处理不同退化程度样地间差异显著 ($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同退化程度处理不同秸秆还田方式间差异显著 ($p < 0.05$)。

考虑到6月18日中耕锄草的影响,进一步对开花结荚期、鼓粒灌浆期和成熟收获期测定的5次地表粗糙度与土壤理化性质进行线性回归分析。由图6

可知,地表粗糙度与黏结力、团聚体稳定性和有机质质量分数呈极显著线性正相关($p < 0.001$),但与土壤物理结皮厚度的相关性仍不显著($p > 0.05$)。

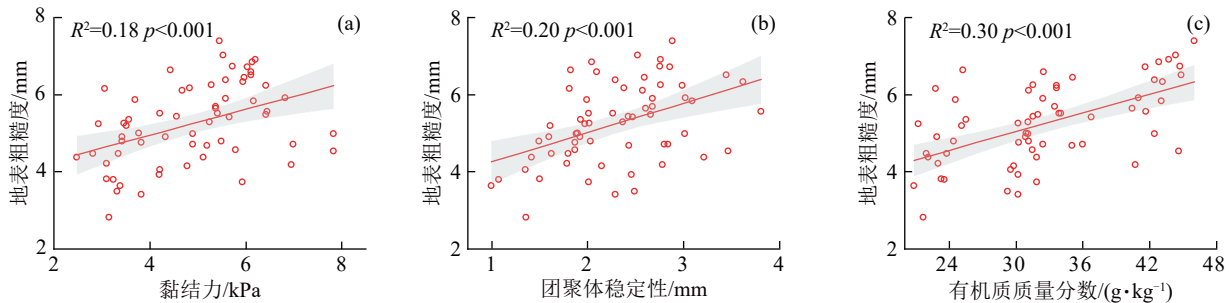


图6 地表粗糙度与黏结力、团聚体稳定性和有机质质量分数的关系

Fig.6 Relationships of LSR with soil cohesion, aggregate stability, and organic matter content

3 讨论

3.1 秸秆腐解百分比、土壤理化性质及枯落物蓄积量变化特征

在一个生长季中,秸秆腐解速度先快后慢,最终趋于稳定(图4),此动态变化过程主要与土壤温度和不同秸秆组分解难易程度有关^[21]。大豆生长初期,土壤温度升高,微生物及酶活性增加,易矿化的有机化合物(如多糖、氨基酸和脂类等)被迅速降解,导致秸秆质量急剧下降^[22]。随着腐解过程推进,难降解物质(纤维素、半纤维素和木质素等)比例增加,需要特定的微生物群落进一步腐解^[23],因此,腐解百分比增加缓慢。不同秸秆还田方式对秸秆腐解百分比影响显著,旋耕还田最有利于秸秆腐解,而覆盖条耕还田效果最差(图4),主要是因为混入土壤的秸秆与土壤颗粒、水分和微生物的接触程度更紧密,更容易被微生物分解利用^[2,24]。土壤质地、水热状况、通气性和养分有效性等条件对微生物及酶活性具有重要影响,也显著影响秸秆腐解过程^[22,25]。随着土地退化加剧,土壤条件不断恶化(表1、图5),因而秸秆腐解百分比显著下降(图4)。

土壤物理性质对侵蚀引起的土地退化响应剧烈(图3),主要是因为土地退化通常始于土壤质地粗化、大团聚体破坏和土壤结构恶化^[26]。黑土富含黏土矿物,但长期土壤侵蚀导致黏土矿物选择性减少,粗颗粒积累增加^[27]。随着土地退化程度加剧,有机质更易矿化分解,从而加速大团聚体破坏和水分流失,最终导致土壤体积质量增加,黏结力下降^[28]。在不同秸秆还田方式中,覆盖条耕还田最有利于增加土壤有机质质量分数和提升团聚体稳定性。一方面,覆盖地表的作物秸秆能够有效缓冲雨滴打击,增加地表径流阻力,减缓径流流速,保护土壤团聚体不被破坏^[2];另一方面,较小的耕作扰动有助于土壤有机质积累,与黏土矿物胶结,形成有机-无机复合体,

促进土壤团聚体进一步发育^[11]。相反,旋耕或深翻作业将下层土翻至地表,增加土壤大孔隙,进而加速土壤有机质矿化^[9];同时,垄作系统加快雨水在垄沟汇聚,增加水流剪切力和土壤剥蚀,这种影响在坡度较大的退化农田更加明显^[2]。

3.2 秸秆还田方式对地表粗糙度的影响

作物秸秆通过不同方式还田可迅速改变地表土块和秸秆分布格局,塑造出凹凸不平、土块遍布的农田微地貌^[2,10],但在起垄和镇压作用下,地表趋于平整。秸秆还田方式对地表粗糙度的影响弱于季节变化。一方面,由于地表粗糙度测定始于播种后,春季的冻融循环和干湿交替过程使土块发生裂解和碎化,从而降低秋季秸秆还田及整地作业对LSR的影响。为促进种子萌发,播种后的镇压作业在一定程度上也减弱了还田方式的潜在影响。另一方面,在降雨和重力作用下,耕作后疏松的土壤不断沉降和固化^[15,17],秸秆与土壤颗粒接触更加紧密,使得不同还田方式下的地表粗糙度趋于同化。随着大豆生长季推进,LSR整体呈下降趋势,与上述土体沉降和固化作用,以及秸秆逐渐腐解、暴露于地表数量减少密切相关。除覆盖条耕还田处理外,其余处理的LSR在幼苗至旁支形成期明显增大,主要由于此阶段进行中耕和锄草的农事活动;而覆盖条耕处理杂草较少,没有中耕和锄草的扰动,因此LSR变化不明显。成熟收获期LSR缓慢上升,主要是由于枯落物蓄积量增加,在雨滴击溅和径流挟带作用下混入表土,形成微坝^[16],从而显著增加LSR。

整体而言,秸秆覆盖条耕还田处理的平均值最大,与已有研究^[12,29]结果一致。一方面,秸秆覆盖直接增加地表粗糙度;另一方面,覆盖于地表的秸秆可有效保护地表土块和团聚体,抵消雨滴和径流的削高填低作用^[13,30]。秸秆覆盖条耕的平作方式可降低径流的横向汇聚,抑制农田水土和养分流失^[2],改善作物生长状况,增加枯落物蓄积量,间接增大地表粗糙度。秸

秆旋耕还田处理的LSR相较于深翻还田处理略低,主要是因为旋耕机切削、甩击和破碎土块的作用更强,使秸秆与土壤充分混合,更有利于秸秆腐解^[11];而深翻还田可能导致较大土块和底层粗颗粒上翻至地表,同时部分秸秆裸露,从而增加地表粗糙度。

随着土地退化程度加剧,垄作方式样地(CK、SR和SP处理)的LSR显著下降(表3),而平作样地(SM处理)的LSR变化并不明显,表明在一个生长季内,退化农田地表粗糙度的季节变化受土体沉降和固化作用的影响更大,由于土壤结构稳定性下降、作物生长状况恶化(如叶片盖度减小、茎秆变细、枯落物蓄积量减少等)及雨滴对地表打击作用相对增强等多重因素或过程共同作用的结果^[29-30]。本研究发现,随着土地退化程度加剧,土壤黏粒质量分数显著下降,砂粒质量分数显著增加,而地表粗糙度整体呈下降趋势,与ZHU等^[17]在黄土丘陵沟壑区的研究结论有所差异,后者认为地表粗糙度与土壤黏粒质量分数呈负相关,而与砂粒质量分数呈正相关。二者结果的不一致主要源于坡度、土壤质地和有机质质量分数的显著差异^[16,27]。一方面黄土有机质质量分数较低,黏土矿物胶结性差,在降雨作用下土壤团聚体易分散、迁移,细小颗粒逐渐堵塞土壤孔隙并形成物理结皮,从而使地表趋于光滑^[3,31]。而典型黑土黏粒和有机质质量分数高,土壤大团聚体更加发育且稳定,直接增加地表粗糙度。另一方面,黑土区的坡度远低于黄土丘陵沟壑区,径流冲刷对地表微地貌的塑造程度较低^[17],随着退化程度加剧,黑土中砂粒质量分数升高,虽然在一定程度上可能增加地表粗糙度,但缓坡径流挟沙力不足以输移全部泥沙,最终导致砂粒在洼地沉降,地表粗糙度整体呈下降趋势^[4,15,31]。

3.3 不同退化程度农田适宜的秸秆还田方式

地表粗糙度通过影响坡面水文和土壤侵蚀过程,影响农田水土和养分流失、水热状况,并最终可能影响作物生长和产量,因此能在一定程度上反映秸秆还田方式的适宜性。然而,不同退化程度黑土农田其抗蚀性能和水肥气热等限制性因素存在差异。未退化农田通常地形平坦,黏粒质量分数高,降水时易饱和^[2],地表粗糙度增加可能带来雨水滞留过多、土壤温度上升缓慢和通气性较差等负面影响^[32]。秸秆旋耕或深翻还田通过耕作扰动加快土壤水分蒸发,同时垄作系统利于排水,增加光照面积,可选作适宜的秸秆还田方式。对于退化农田,由于坡度较大且土壤抗蚀性能较弱^[7,18],宜采用既能增加地表粗糙度同时减少土壤扰动的秸秆还田方式。覆盖条耕还田通过增加秸秆黏附地表的数量,显著增加地表粗糙度,减缓坡面径流流速,阻控侵蚀退化^[12-13];同时平作方式可显著降低土壤扰动和径流横向汇聚,维

持原有土壤结构,从而有效控制水土流失并改善水热条件,因而对于退化农田,应采用覆盖条耕还田。

虽然本文通过监测地表粗糙度及其影响因素的季节变化,因地制宜筛选出不同退化程度农田最佳的秸秆还田方式,但受试验地块面积的限制,每种处理仅布设1个试验小区,未来应增加平行处理小区,使结果更为可靠。本文研究结果基于单个大豆生长季,未来应延长试验年限,增加地表粗糙度监测次数,特别是大豆收获后初始值的测定,以更全面理解半湿润区秸秆还田方式对农田地表粗糙度的调控机制。

4 结论

1) 秸秆还田方式和土地退化程度显著影响黑土农田地表粗糙度季节变化,秸秆覆盖条耕还田最有利于增大农田地表粗糙度,但其适宜性随土地退化程度而异。

2) 对于未退化农田,秸秆旋耕或深翻还田更有利于缓解雨季涝渍胁迫和初春土壤低温限制;而对于退化农田,秸秆覆盖条耕处理既能增加农田地表粗糙度,同时减少土壤扰动,更有效地调控坡面水文过程,降低土壤侵蚀风险。

3) 耕作扰动是驱动地表粗糙度强烈变化的主要因素,其次为降雨和重力共同引起的土体沉降和固化过程,而稳定的土壤团聚体则是维持和增大农田地表粗糙度的重要条件。这些结果对于优化不同退化程度黑土农田的秸秆还田措施,减缓水土和养分流失具有重要意义。

参考文献:

- [1] 田芷源,卢慧中,马瑞,等.东北黑土区耕地侵蚀退化空间分异特征[J].土壤学报,2025,62(4):931-645.
TIAN Z Y, LU H Z, MA R, et al. Spatial differentiation characteristics of soil erosion and degradation in black soil cropland of northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(4):931-645.
- [2] XING S K, ZHANG G H, ZHANG N, et al. How straw return approaches affect runoff and sediment in croplands of different degradation degrees in the black soil region of China[J]. Journal of Hydrology, 2025, 653: e132786.
- [3] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.
WANG L H, WANG Y F, WANG J, et al. Effects of soil surface roughness on runoff generation mechanism on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 120-128.
- [4] 钱秋颖,秦富仓,李龙,等.自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J].水土保持学报,2021,35(3):46-52.
QIAN Q Y, QIN F C, LI L, et al. Spatial heterogeneity of surface roughness of slope erosion under natural rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 46-52.
- [5] 王云泽,周凤艳,韩艳刚,等.不同水土保持措施对地表粗糙度及其变化的影响[J].安徽农业科学,2025,53(3):77-81.

- WANG Y Z, ZHOU F Y, HAN Y G, et al. Effects of different soil and water conservation measures on land surface roughness and its changes [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2025, 53(3): 77-81.
- [6] 隋鹏祥. 秸秆还田方式与施氮量对春玉米产量形成及氮素利用的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- SUI P X. Effects of straw incorporation approaches and N rate on yield formation and nitrogen use of spring maize [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [7] WANG C S, ZHANG G H, CHEN S Q, et al. Effect of straw incorporation on controlling runoff and soil erosion in cropland with different land degradation degrees [J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35(2): 717-731.
- [8] 安俊朋, 李从锋, 齐华, 等. 秸秆条带还田对东北春玉米产量、土壤水氮及根系分布的影响[J]. *作物学报*, 2018, 44(5): 774-782.
- AN J P, LI C F, QI H, et al. Effects of straw strip returning on spring maize yield, soil moisture, nitrogen contents and root distribution in Northeast China [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(5): 774-782.
- [9] 李瑞平, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 玉米秸秆不同还田方式对黑土耕层温度影响的短期效应[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2693-2702.
- LI R P, LUO Y, SUI P X, et al. Short-term effect of different returning methods of maize straw on the temperature of black soil plough layer [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2693-2702.
- [10] ADIMASSU Z, ALEMU G, TAMENE L. Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss and crop yield in the Humid Highlands of Ethiopia [J]. *Agricultural Systems*, 2019, 168: 11-18.
- [11] 丁天宇, 郭自春, 钱泳其, 等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 71-78.
- DING T Y, GUO Z C, QIAN Y Q, et al. Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil (Vertisol) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 71-78.
- [12] BUSARI M A, KUKAL S S, KAUR A, et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(2): 119-129.
- [13] 刘燕青, 王计磊, 李子忠. 秸秆覆盖对土壤水分和侵蚀的影响研究进展[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 429-436.
- LIU Y Q, WANG J L, LI Z Z. Research process on the effects of straw mulch on soil moisture and soil erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(6): 429-436.
- [14] LAMPURLANÉS J, CANTERO-MARTÍNEZ C. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 85(1/2): 13-26.
- [15] 梁心蓝, 赵龙山, 吴佳, 等. 模拟条件下不同耕作措施和雨强对地表粗糙度的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(24): 4840-4849.
- LIANG X L, ZHAO L S, WU J, et al. Effects of different tillage treatments and rainfall intensities on soil surface roughness under simulated condition [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(24): 4840-4849.
- [16] ZHU P Z, ZHANG G H, ZHANG B J, et al. Variation in soil surface roughness under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020, 188: e104465.
- [17] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG C S, et al. Variation in land surface roughness under typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2021, 206: e105549.
- [18] 李海强. 东北黑土区侵蚀小流域土壤质量空间分异特征及影响因素研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- LI H Q. Study on spatial variation of soil quality and its influencing factors in small eroded watershed in mollisols region of northeast China [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [19] 尚晨晨. 基于坡长因子的东北黑土区土壤侵蚀计算方法优化研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- SHANG C C. Study on the optimization of soil erosion calculation methods in black soil region of northeast China based on slope length factor [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2020.
- [20] DONG Y F, WU Y Q, QIN W, et al. The gully erosion rates in the black soil region of northeastern China: Induced by different processes and indicated by different indexes [J]. *Catena*, 2019, 182: e104146.
- [21] LATIFMANESH H, DENG A X, LI L, et al. How incorporation depth of corn straw affects straw decomposition rate and C and N release in the wheat-corn cropping system [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 300: e107000.
- [22] 雷琬莹, 李娜, 滕培基, 等. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(9): 1393-1408.
- LEI W Y, LI N, TENG P J, et al. Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(9): 1393-1408.
- [23] ZHAO S C, LI K J, ZHOU W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 216: 82-88.
- [24] JUHOS K, NUGROHO P A, JAKAB G, et al. A comprehensive analysis of soil health indicators in a long-term conservation tillage experiment [J]. *Soil Use and Management*, 2024, 40(1): e12942.

(下转第158页)