

不同秸秆移除条件下冻融对农田土壤风蚀可蚀性的影响

杨居聪¹, 贺宇欣^{1,2}, 王 阳¹, 刘淑珍¹, 苟 思^{1,2}

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

摘 要:为研究实际生产中不同秸秆移除率条件下冻融作用对土壤风蚀指标的影响,2011—2013 年在美国堪萨斯州 3 个县设置 3 个不同秸秆移除率:0,50%,100%,对春秋季节土壤侵蚀比(EF)、平均几何直径(GMD)、地表随机粗糙度(RR)进行了统计分析。结果表明:(1)在冻融作用下,秸秆留茬能够有效减轻土壤风蚀,随着秸秆移除率的增大,土壤 EF 值增大,GMD 值、RR 值减小;(2)经过 2011—2012 年的冻融作用,2012 年春季 Norcatur、Colby、Scott City 三地秸秆 100%移除组的 EF 值增幅分别为 149%,185%,16%,50%移除组的 EF 值增幅分别为 40%,152%,−28%,0 移除组的 EF 值增幅分别为 29%,47%,9%;(3)休耕对于增强土壤抗风蚀能力有一定积极作用。研究成果为我国易发生土壤风蚀季节性冻融地区的适宜秸秆移除率的研究提供参考。

关键词:秸秆移除;冻融;土壤风蚀;土壤侵蚀比

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0001-07

Freezing and Thawing Impacts Agricultural Erodibility Under Varied Straw Cover

YANG Jucong¹, HE Yuxin^{1,2}, WANG Yang¹, LIU Shuzhen¹, GOU Si^{1,2}

(1. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to examine the effect of freeze-thaw on soil erosion at different crop straw removal rates, three different removal rates at 0, 50%, 100% were set in three experimental sites in Kansas from 2011 to 2013. Measured parameters include erodible fraction (EF; aggregates<0.84 mm), geometric mean diameter (GMD) and random roughness (RR). The results showed that straw stubble could effectively reduce wind erosion under the effects of freezing and thawing; the EF value of soil increased and the GMD value and RR value decreased with the increase of the removal rate of straw; After freezing and thawing in 2011—2012, the increase rates of EF were 149%,185%,16% under the treatment of the 100% removal in Norcatur, Colby and Scott City, respectively, 40%, 152%, −28% under the treatment of the 50% removal, and 29%, 47%, 9% under the treatment of 0 removal; fallow has the positive effect on enhancing the ability of soil to resist wind erosion. These results have certain reference values for the research on suitable straw removal rate in the seasonal freezing and thawing area which is prone to soil erosion in China.

Keywords: crop straw removal; freeze-thaw; soil wind erosion; erodible fraction

土壤风蚀是一个综合的自然地理过程,涉及气候、植被、土壤、地形地貌等多种因子^[1-2],这些因子的非线性相互作用导致了系统的混沌特征^[3]。严重的土壤风蚀会引起土壤质地变粗,可持续生产能力降低^[4]。冻融作用使土层发生变形,产生冻胀、融陷和流变等,严重改变了土壤表层结构及干重度,降低土

壤粘聚力,从而对土壤抗风蚀能力产生影响。作物留茬作为防治农田休闲期土壤风蚀的有效措施^[5],其留茬量会影响着土壤的抗风蚀能力。中国国家能源局在 2016 年印发的《生物质能发展“十三五”规划》中提出“开发利用生物质能,是能源生产和消费革命的重要内容,是改善环境质量、发展循环经济的重要任

收稿日期:2018-01-22

修回日期:2018-03-12

资助项目:四川大学 2016 校青年启动基金(20826041A4222);国家自然科学基金青年科学基金(51709190);四川省科技支撑计划重点研发项目“生态沟渠治理农业面源污染关键技术研究”(2016FZ0111)

第一作者:杨居聪(1994—),男,四川雅安人,在读硕士研究生,主要从事土壤物理性质研究。E-mail:2016223060095@stu.scu.edu.cn

通信作者:贺宇欣(1984—),男,四川成都人,博士,讲师,主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail:yuxinhe@scu.edu.cn

务。”作物秸秆作为生物质液体燃料中的重要原料,被大量投入到生物质燃料的生产中,造成田间作物留茬量的减少,而过低的留茬量可能会导致土壤风蚀加重。目前,国内外学者对作物留茬已经有许多研究:Fryrear^[6]测得在 50% 秸秆覆盖度下,土壤风蚀量较翻耕田降低了 90% 以上;Fronning 等^[7]发现在免耕条件下,玉米秸秆留茬覆盖能够改善土壤性质,提高土壤有机碳含量,提高作物产量以及土壤抗风蚀水蚀能力;臧英等^[8]发现免耕留茬、免耕留茬+耙和免耕无覆盖的风蚀量分别比传统耕作相对减少 73.75%, 75.31% 和 14.17%;陈智等^[9]通过移动式风蚀风洞研究了阴山北麓农牧交错区麦薯带状间作农田土壤的抗风蚀效果,提出保护性耕作带截留风蚀物的标准留茬高度和植被覆盖度分别为 30 cm 和 50%。

总体看来,我国秸秆留茬防治风蚀的工作主要是通过改变秸秆留茬量的短时间风洞试验测定土壤风蚀量、风蚀物截留率以及近地表风速,以得出秸秆留茬对土壤风蚀量的影响,其中涉及土壤物理性质指标如土壤侵蚀比 EF 值的研究比较少。而在实际生产中,土壤风蚀还受到气候(主要是气温、降雨以及风速)、土壤质地、耕作制度等因素的制约。特别是我国东北、西北以及中纬度大部分受季节性冻融过程比较频繁的地区,冻融作用对耕地的土壤结构变化起了很大的作用。因此进行不同秸秆移除率下冻融作用对土壤风蚀的影响试验有一定的必要性,由于美国农业已基本实现现代化,试验田附近群众活动干扰小,具备试验所需的耕地条件以及仪器设备(Modified Rotary Sieve——改进旋转土壤筛分仪,可以大量筛分土样且其中有 0.84 mm 粒径的筛网),故本文试验在美国堪萨斯州进行,通过研究不同秸秆移除率下冻融作用对土壤风力侵蚀指标的影响,定量分析在不同处理下土壤风蚀指标规律,对比我国现有部分试验数据,为我国类似季节性冻融地区有效防治土壤风蚀,确定合适的秸秆移除率提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验由通信作者在美国 2011 年 9 月到 2013 年 3 月间完成,试验地分别位于美国堪萨斯州西部的 Norcatur(39°50'11"N,100°11'18"W),Colby (39°23'44"N, 101°3'9"W)和 Scott City(38°28'47"N,100°54'27"W)。堪萨斯州属于温带大陆性气候,冬季寒冷夏季炎热,年内温差大,作物生长期从 4 月中旬到 9 月中旬。1981—2010 年,1 月份平均气温 -3~1℃,7 月份平均气温 24~27℃,年平均气温大约为 13℃;堪萨斯全州的平均降水

量约 690 mm,年平均降水量在东南部约为 1 000 mm,西部约为 500 mm,西部降水主要集中在夏季,经常出现旱灾和沙尘天气。由图 1 可知,各试验地 2012 年 5—9 月降雨量都比 2011 年相应月份的降雨量小,Norcatur, Colby, Scott City 三地 2012 年降雨量为 2011 年的 52%,57%,63%,且各试验地 2011 年年降雨量均低于往年平均,故各试验地 2012 年均经历了大旱。由图 2 可知试验地 2011—2013 年月气温与往年平均相差不大(气温、降雨数据来源:NOAA)。

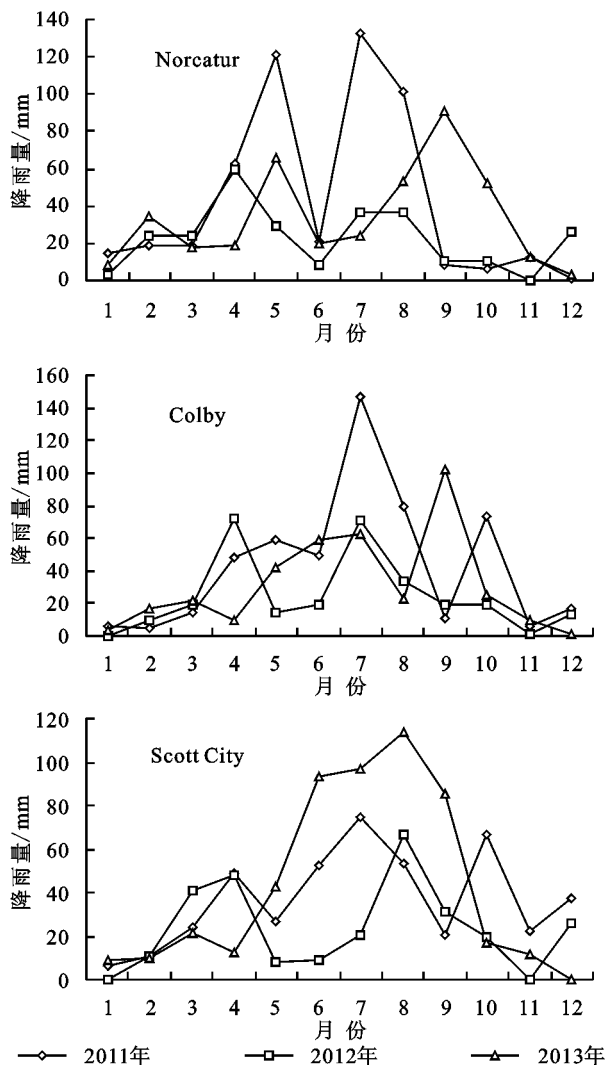


图 1 2011—2013 年月降雨量

试验地点土壤质地类似(砂粒含量 24%~28%, 粉粒含量 56%~58%, 黏粒含量 16%~18%), 土壤类型、种植系统见表 1。本文中试验地点均位于堪萨斯州西部地区,试验地土壤类型为粉质壤土,试验地坡度均小于 1%。Norcatur, Colby 土壤有机碳含量分别为 3.76%, 3.96%, 土壤有机碳含量高,生物活性相对较高,而 Scott City 土壤有机碳含量较低,为 1.35%。与其他两地不同的是,Scott City 土壤中蒙脱石含量高。

表 1 土壤质地

试验站点	土壤系列	土壤分类	种植系统(2011 年春—2013 年春)
Norcatur	尤利西斯粉质壤土	粉细,混合,土壤有机碳含量高,弱发育冰凉软土	小麦—玉米—休耕(免耕 20 a)
Colby	里奇菲尔德粉质壤土	细质,土壤有机碳含量高,粘淀半干润软土	小麦—玉米—休耕(免耕 15 a)
Scott City	里奇菲尔德粉质壤土	细质,土壤有机碳含量较低,蒙脱石含量高,粘淀半干润软土	小麦—高粱—高粱(免耕 17 a)

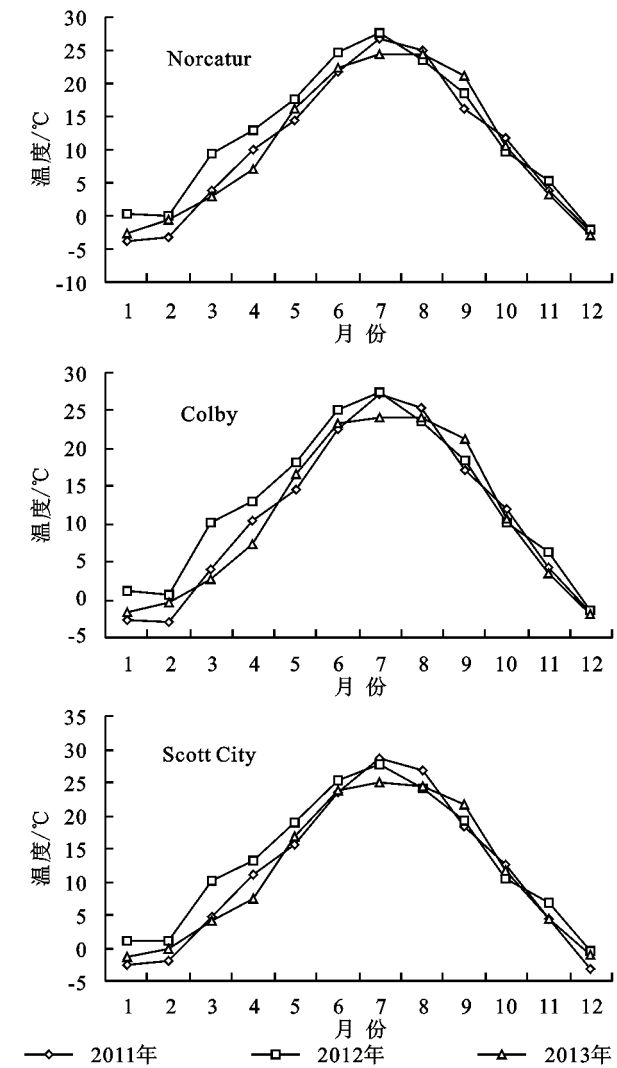


图 2 2011—2013 年月平均气温

1.2 试验设计

本试验为短期试验,试验数据的采集始于 2011 年秋,结束于 2013 年春。试验采用免耕的耕作方式,样本的采集使用随机完全区组设计,设置 4 个重复,在每年春季(3 月份)以及每年秋季(9 月份)分别采取试验区土壤样本,并对样本进行编号 11F(2011 年秋季)、12S(2012 年春季)、12F(2012 年秋季)、13S(2013 年春季)。对每份样本进行 EF、GMD、RR 等指标的检测,EF、GMD 的值可以用来判断土壤风蚀的敏感性,即抗风蚀能力,通过对春秋季节土壤 3 个指标进行对比分析,得出春秋季节土壤受侵蚀程度的相对大小。另外设置秸秆不同移除率作为另一变量,秸秆移除率分别设置 100%,75%,50%,25%,0,由于本文主要探究冻融作

用对土壤可侵蚀性的影响,本文只选取移除率为 100%,50%,0 的试验组进行数据分析。

1.3 测量指标及方法

1.3.1 土壤侵蚀比 EF 土壤侵蚀比(Erodible Fraction,EF),EF 是指土壤样本中土壤颗粒粒径小于 0.84 mm 的土壤颗粒质量占土壤样品总质量的百分比。采取无扰动土壤样本,称取其中直径小于 0.84 mm 的颗粒的质量并计算其占土样总质量的百分比,反映了土壤易受风力侵蚀的比例,EF 值越大,土壤越易受风力侵蚀。

$$EF = \frac{M_a}{M_t} \times 100 \tag{1}$$

式中: M_a 指土样中直径小于 0.84 mm 的颗粒或团聚体的质量; M_t 指土样的总质量。

1.3.2 几何平均直径 GMD 几何平均直径(Geometric Mean Diameter,GMD),反映了土样的粒径大小和土壤团聚体的稳定性,同时能间接反映土壤的侵蚀程度,GMD 越小,平均粒径越小,则土壤侵蚀越严重。GMD 采用湿筛法测定^[10]:大于 0.25 mm 的团聚体称为大团聚体,小于 0.25 mm 的团聚体称为微团聚体。称取 60 g 风干土样放置于团聚体分析仪的套筛顶部(套筛孔径自上而下依次为 2 mm,0.25 mm 和 0.05 mm),沿桶壁缓慢加入去离子水至水没过土样,浸泡、润湿 5 min,竖直震荡 2 min,上下移动 5 次,振幅为 3 cm。收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒中,65℃烘干 48 h 至恒重,计算团聚体的质量分数。

$$GMD = \exp \left[\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \ln X_i) \right] \tag{2}$$

式中: X_i 为第 i 个筛子上团聚体的平均直径; W_i 为第 i 个筛子上团聚体重量百分比。其中,大于 2 mm 筛上的团聚体平均直径采用 3.5 mm^[11]。

1.3.3 地表随机粗糙度 Surface Random Roughness (RR) 地表随机粗糙度(Surface Random Roughness,RR),使用 pin meter(由 101 根直径 6 mm,长 50 cm,间距 1 cm 的针管组成)测量地表粗糙度,通过 Sigma Scan Pro5 软件对针尖数字照相机传回的每根针尖的土壤表面图像进行分析,从而计算土壤粗糙度。

1.4 数据统计与分析

记录 2011 年秋季至 2013 年春季中的春秋季节内不同秸秆移除率试验条件下取样检测时的 EF、GMD、RR 原始数据,利用 Excel 2010 对数据进行处理并绘制相关图表。用 SAS 9.3 软件对试验数据进

行统计分析,采用混合效应线性模型,用约束最大似然估计法原理计算协方差矩阵获得统计数据的差异性。小写字母代表 5% 水平的显著性差异,下同。

2 结果与分析

2.1 不同移除率下冻融变化对 EF 值的影响

由图 3 可知,EF 值随秸秆移除率的增加而增大。2011 年秋,Norcatur 与 Colby 的 EF 值均小于 30%,Scott City 的 EF 值均大于 30% 且最高达到 55.5%。2012 年春,Norcatur,Colby 和 Scott City 的 100% 移除组 EF 值分别为 53%,74%,64%,增幅最大,较 2011 年秋分别为 149%,185%,16%。2011 年秋至 2012 年春,各试验地可能都受到了不同程度的冻融作用,土壤中的重力水反复冻结膨胀使得大颗粒团聚体不断遭到破坏,分散为小颗粒,导致土壤侵蚀比 EF 值增加。值得注意的是,Scott City 土壤中的主要成分为蒙脱石,蒙脱石质地较硬且易吸水膨胀^[12],容重降低会增大土壤可侵蚀性,但 Scott City 的 EF 值变化没有其他两地明显,并且它的 50% 移除组 EF 值非增反减,可能是由于该试验地土壤表面结皮,临时提高了稳定性,但这对土壤结构的破坏明显,一旦含水率降到一定下限,土壤极易受到风蚀,这在 2012 年春到 2012 年秋 Scott City 的 50% 移除组有所体现。土壤侵蚀比 EF 值随着冻融次数及持续时间的增加而增大^[13],与本试验相符。

2012 年秋,Norcatur,Colby,Scott City 各处理的平均 EF 值分别为 34.8%,59.9%,54.6%,后两地的 EF 值已经到了一个比较高的水平。从图上看,对比 2012 年秋、2013 年春各试验地各处理下的 EF 值有增有减,但 EF 值变幅与 2011 年秋至 2012 年春的冻融循环相比要小许多。由图 1 可知,2012 年各试验地 5—11 月里大多数月降雨量都明显低于 2011 年,故在 2012—2013 年冻融期间,土壤含水量较低,试验地极度干旱的天气^[14]削弱了冻融作用。同时,经过第一轮的冻融循环,不稳定的土壤大团聚体已经被分解得差不多。

在土壤水分充足的情况下,冻融作用使各试验地土壤侵蚀比 EF 值明显增大,并且由于试验地大旱,EF 值在 2012—2013 年受冻融作用的影响比 2011—2012 年弱。各地 100% 移除组的 EF 值增幅均比其他两组高,该处理组的土壤由于没有秸秆保护,直接暴露在自然环境下,容易受到风力侵蚀和冻融作用的影响,50% 移除组和 0 移除组的 EF 值变化相差较小。秸秆留茬能有效缓解 EF 值在冻融过程中增大,

保护土壤大团聚体,削弱土壤风蚀。

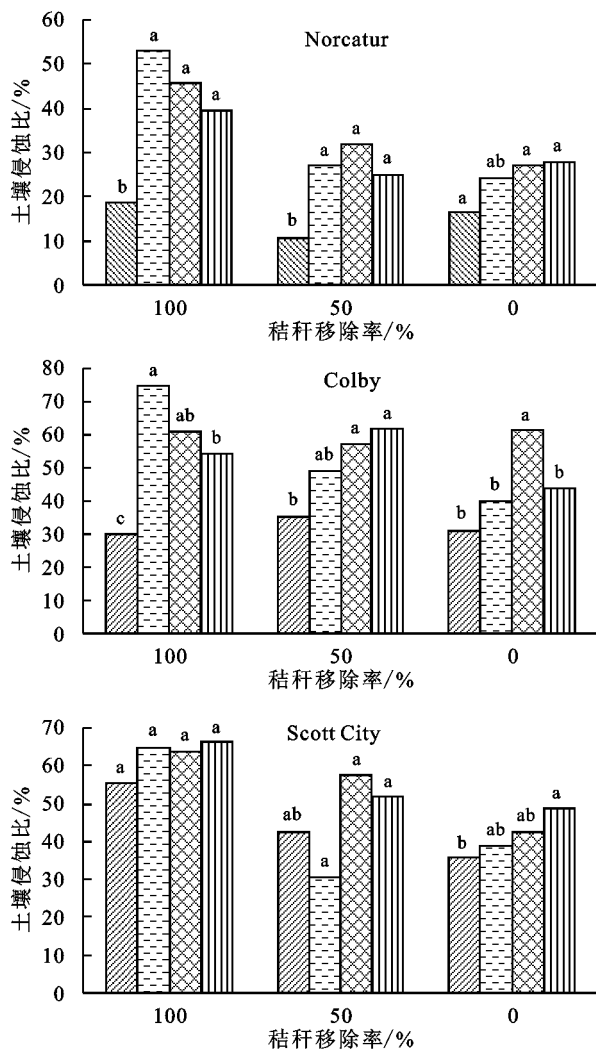


图 3 2011 年秋季至 2013 年三地不同秸秆移除率下的

土壤可侵蚀百分比

2.2 不同移除率下冻融变化对 GMD 值的影响

GMD 是反映土壤团聚体大小分布情况的常用指标,GMD 值越大表示团聚体的平均粒径团聚度越高,稳定性越强^[15]。由图 4 可知,2011 年秋 Norcatur 各处理的 GMD 值都在 4 mm 以上,50% 移除组最大,达到了 16.24 mm;而 Colby 和 Scott City 的 GMD 值在 2 mm 左右,Scott City 100% 移除组的 GMD 值最小,为 0.55 mm。2011 秋至 2012 年春,冻融作用可能使试验地的土壤大团聚体遭到破坏,Norcatur 和 Colby 的 100% 和 50% 移除组的 GMD 值急剧下降,其中降幅最大为 Colby 100% 移除组,达 91%。由于 Scott City 土壤中蒙脱石含量较高,其 100% 移除组的降幅不大,并且 50% 移除组有 96% 的增幅。在秸秆保护下,各试验地 0 移除组的 GMD 值降幅比其他处理组都小。Hammerbeck 等^[16]认为秸秆移除率较高时土壤团聚体会因为缺少保护而崩解为小颗粒,

GMD 值减小,与本试验结果相符。

2012 年秋,Colby 和 Scott City 各处理 GMD 值均小于 1 mm,Norcatur 各处理 GMD 值稍大一些,最大为 2.75 mm。经过 2012—2013 年的冻融作用,2013 年春各处理 GMD 值与 2012 年秋相比差异不大,冻融作用对 GMD 值的影响并不明显。由于 GMD 和 EF 都只与土壤粒径级配相关,因此可以推断出 GMD 值在后一次冻融作用变化不明显的原因与 EF 值相同:2012 年秋—2013 年春的冻融作用受大旱的影响而减弱,同时 2011 年秋—2012 年春的冻融作用已分解了大部分易破坏的团聚体。

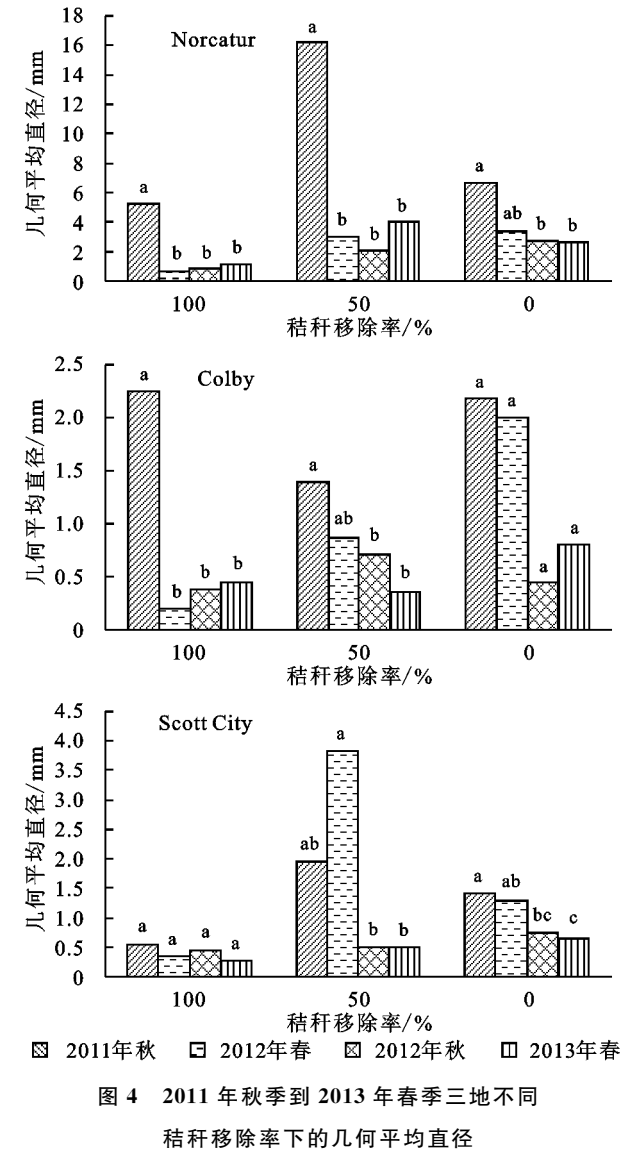


图 4 2011 年秋季到 2013 年春季三地不同秸秆移除率下的几何平均直径

2.3 不同移除率下冻融变化对 RR 的影响

粗糙的土壤表面可以有效地吸收风能来减小近地表风速^[17],并且可以通过凹凸不平的表面留住被风吹走的土粒^[18]。由图 5 知,各试验地的 RR 值随秸秆移除率的增大而减小,100%移除组的 RR 值在不同时期基本都小于 0 和 50%移除组。经过 2011

年秋至 2012 年春的冻融作用,除了 Colby 的 100%移除组的 RR 值有所增长,其余处理组的 RR 值在 2012 年春都有一定程度的减小。地表粗糙度与降雨、耕作有关,由于本试验采用免耕方式,故不考虑耕作对 RR 值的影响,Lyles 和 Tatarko^[19]发现降雨击溅对土壤的扰动,会使土壤表面变得更平,减小土壤团聚体的形成。同时,尚伦宇等^[20]经过试验发现,玛曲地区在冻融的过程中,随着地表植被枯黄程度的增加,下垫面更加均一,土壤地表粗糙度呈逐渐减小的趋势。由图 4 可知,相较于其他两组 2012 年春的 RR 值 8 mm,Colby 的 100%移除组 RR 值不足 2 mm,而 Colby 的 100%移除组 2012 年春的 EF 值增幅和 GMD 值降幅比其他两地高,似乎可以推断冻融作用在秸秆留茬的情况下对 Colby 土壤风蚀指标的影响更大。

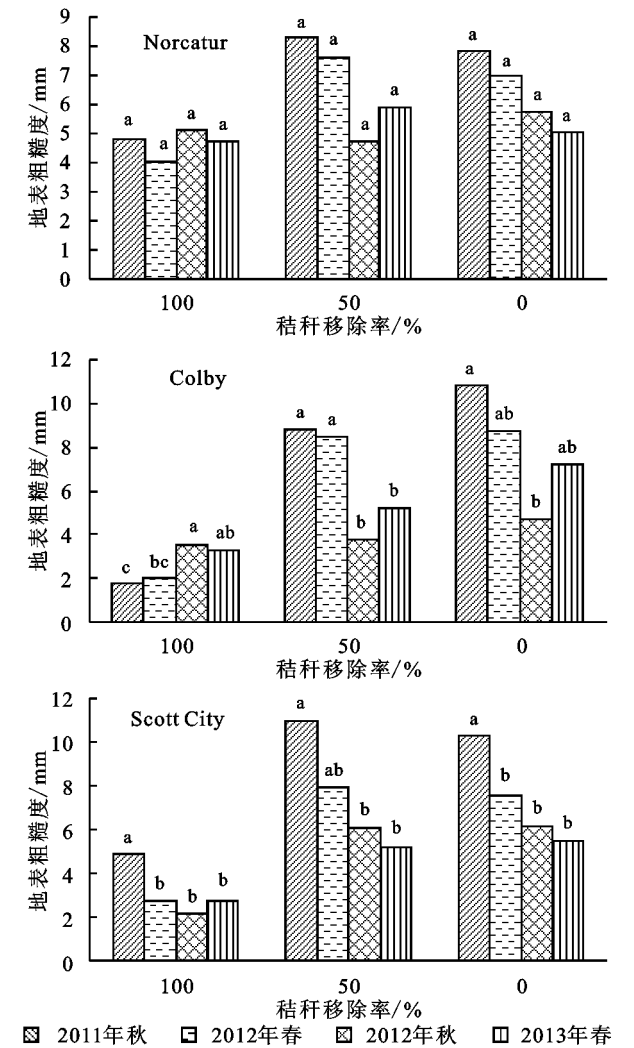


图 5 2011 年秋季至 2013 年春季不同移除率下的随机粗糙度值

如果不考虑雨雪天气、大风天气以及秸秆留茬的影响,冻融作用可能会使土壤地表粗糙度增大,王恩姮等^[21]通过室内模拟冻融试验发现冻融后黑土区耕作土壤表面粗糙度增加。经过 2012 年秋至 2013 年

春的冻融作用,各试验地 RR 值与前一次冻融后的变化趋势不太一致,接近一半的处理组 RR 值都有一定的增幅,Colby 的 0 移除组增幅达到 53.1%。2012 年大旱,试验地降雨量远低于往年平均,因此雨滴对土壤表面的磨平作用会减弱,并且冻融作用也会因为土壤含水率低而减弱。在实际田间生产中,冻融作用对 RR 值的影响可能没有降雨对 RR 值的影响大,故本文各试验地不同处理下的 RR 值总体都呈减小趋势。冻融作用下,秸秆留茬对土壤 RR 值的减小有一定的限制作用,提高了土壤的抗风蚀能力。

2.4 讨论

2011 年秋至 2013 年春,本文对 3 个试验地在不同秸秆移除率下的土壤风蚀指标 EF、GMD、RR 值进行了测定分析。数据表明,相较于 0,50% 秸秆移除组,100% 秸秆移除组经冻融作用后 EF 值明显偏大、GMD 值明显偏小,RR 值偏小程度没前两者明显。土壤风蚀主要发生在晚冬和早春,冻融作用使土壤孔隙水结冰膨胀,增大土壤团聚体的孔隙度,使土壤团聚体的稳定性下降,EF 值增大、GMD 值减小,导致土壤风力侵蚀几率增加^[22-24],影响土壤侵蚀的发生发展规律^[25]。冻融作用对这 3 个指标的影响与当地的土壤质地、耕作制度、季节变化以及极端天气都有密切的关系。例如,Scott City 与其他两地的土壤质地有很大区别,土壤中大量的蒙脱石使得 50% 秸秆移除组的 EF 值和 GMD 值在 2011 年秋至 2012 年春的冻融作用下与其他两地的变化趋势相反。同时,本文试验指标的测定也受到了极端天气和耕作制度变化的影响:2012 年堪萨斯州经历了一场罕见的大旱,Norcatur,Colby,Scott City 夏季平均降雨量远远低于三地 1981—2010 年夏季平均降雨量,进入冬季,土壤含水量低,受到的冻融作用并不明显;三地的作物大量减产,Norcatur 和 Scott City 两地的农户颗粒无收,生产者放弃收割,所以留茬率比前后的几年都要高。低于往年平均值的土壤含水量和高于往年平均值的秸秆留茬量造成了试验数据前半段和后半段变化幅度的差异。

我国华北平原处于 32°—40°N,112°—122°E,属于暖温带半湿润季风气候,年平均气温 8~15℃,年降雨量 500~900 mm,60%~70% 集中在夏季,初春、冬季易干旱且大风频繁发生,主要栽种方式是冬小麦—夏玉米轮作^[26];2001 年至目前,华北平原地区玉米已经实现免耕直播,小麦免耕崭露头角^[27],大部分耕地已有 10 多年的免耕年限。同时,华北平原地处我国北方,约在 11 月,随着气温下降,季节融化层冻结,冻结层加深,土壤冻结期

开始,夜间有较浅的冻结层,但白天处于消融状态,随着温度的进一步降低,出现季节冻结层^[28]。由此可见,我国华北平原与本文试验地的地理气候条件、耕作条件类似,本文研究结果可以为华北平原土壤风蚀防治以及适宜秸秆移除率试验提供一些理论依据。

3 结论

2011 年秋至 2013 年春,在美国堪萨斯州的 3 个试验地分别设置不同的秸秆移除率处理,对各试验地的土壤风蚀敏感性指标 EF、GMD、RR 值进行测定,得到以下主要结论:

(1) 在本试验中,冻融作用对土壤风蚀指标的变化起主要作用,同时也受到土壤质地、耕作制度、作物种类、极端天气的影响。秸秆留茬能有效地降低土壤可侵蚀比 EF 值,增加土壤几何平均直径 GMD 值,对土壤表面随机粗糙度 RR 值的增加也有一定效果,在土壤风蚀严重并且晚冬早春气温处于 0℃ 上下的地区,建议秸秆留茬 50% 以上来提高土壤的抗风蚀能力。同时,休耕对于增强土壤抗风蚀能力有一定积极作用,Norcatur 和 Colby 的试验数据表明,在进行休耕的年份,土壤的抗风蚀能力相对增强。

(2) 本试验由于人力物力等条件的限制,只对研究地区的土壤进行了三年的数据测量,并且在数据记录测量期间发生过大旱灾,干旱的天气对土壤含水量以及作物的生长有着极大的影响,影响了土壤风蚀指标的连续性。研究人员可以进行多年试验,以排除本文试验结论偶然不规律性,研究连续多年情况下冻融交替对土壤风力侵蚀指标的影响。

(3) 我国华北平原与堪萨斯的试验地气候、耕作制度类似,因此本文试验对华北平原农业区耕地的风蚀防治研究有一定借鉴意义。同时,对于内蒙古高原、陕西、华北平原等地区的耕地,我国学者已经做过秸秆覆盖对土壤性质影响的许多研究,但对秸秆留茬对土壤风蚀指标影响的研究较少,故对以上易产生土壤风蚀的地区,秸秆留茬对土壤风蚀指标的影响研究应该进一步细化。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 刘万贤. 试验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 邹春霞, 申向东, 李春娥. 土壤风蚀影响因子分布规律研究的最大熵方法[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6): 2095-2098.
- [4] 麻硕士, 陈智. 土壤风蚀测试与控制技术[M]. 北京: 科

- 学出版社,2010.
- [5] 刘目兴,刘连友. 农田休闲期作物留茬对近地表风场的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(9):295-300.
- [6] Freyrear D W. Soil cover and wind erosion[J]. Transactions of the Asae, 1985,28(3):781-784.
- [7] Fronning B E, Thelen K D, Min D H. Use of manure, compost, and cover crops to supplant crop residue carbon in corn stover removed cropping system[J]. Agronomy Journal, 2008,100(6):1703-1710.
- [8] 臧英,高焕文,周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2003,19(2):56-60.
- [9] 陈智,麻硕士,范贵生,等. 麦薯带状间作农田地表土壤抗风蚀效应研究[J]. 农业工程学报,2007,23(3):51-54.
- [10] Gambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(4):1071-1076.
- [11] Su Y Z, Liu W J, Yang R, et al. Changes in soil aggregate, carbon, and nitrogen storages following the conversion of cropland to alfalfa forage land in the marginal oasis of Northwest China [J]. Environmental Management, 2009,43(6):1061-1070.
- [12] 范存善,王福根. 膨润土的性质及应用[J]. 中外医疗, 1999(4):12-13.
- [13] Bullock M S, Larney F J. Relationships between the wind erodible fraction and Freeze-thaw cycles in Southern Alberta [J]. Soil Quality Program, 2002:1-6.
- [14] NOAA, An interpretation of the Origins of the 2012 central Great Plains drought. Available at: http://cpo.noaa.gov/sites/cpo/Reports/MAPP/drought/2012%20drought%20report/DTF_Interpretation_of_2012_Drought_FINAL_2-pager_April_25b.pdf, 2013.
- [15] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution, Part 4-Physical Methods [M]. Methods of Soil Analysis, Soil Science Society of America, Inc., 2002:317-328.
- [16] Hammerbeck, Amber L, Stetson Sarah J, et al. Corn residue removal impact on soil aggregates in a no-till corn/soybean rotation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2012,76:1390-1398.
- [17] Biielders C L, Michels K, Rajot J L. On-farm evaluation of ridging and residue management practices to reduce wind erosion in Niger[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64:1776-1785.
- [18] Hagen L J, Armbrust D V. Aerodynamic roughness and saltation trapping efficiency of tillage ridges[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1992,35:1179-1184.
- [19] Lyles L, Tatarko J. Precipitation effects on ridges created by grain drills[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1987,42:269-271.
- [20] 尚伦宇,吕世华,张宇,等. 青藏高原东部土壤冻融过程中地表粗糙度的确定[J]. 高原气象,2010,29(1):17-22.
- [21] 王恩超,赵雨森,夏祥友,等. 冻融交替后不同尺度黑土结构变化特征[J]. 生态学报,2014,34(21):6287-6296.
- [22] Bullock M S, Larney F J, Izaurre R C, et al. Overwinter changes in wind erodibility of clay loam soils in southern Alberta[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011,65:423-430.
- [23] Li F, Zhao L, Zhang H, et al. Wind erosion and airborne dust deposition in farmland during spring in the Horqin Sandy Land of eastern Inner Mongolia, China [J]. Soil and Tillage Research, 2004,75:121-130.
- [24] Wang L, Shi Z H, Wu G L, et al. Freeze/thaw and soil moisture effects on wind erosion[J]. Geomorphology, 2014,207:141-148.
- [25] Cruse R M, Mier R, Mize C W. Surface residue effects on erosion of thawing soils[J]. Soil Science of America Journal, 2001,65(1):178-184.
- [26] 徐建文,局辉,梅旭荣,等. 近30年黄淮海平原干旱对冬小麦产量的潜在影响模拟[J]. 农业工程学报,2015, 31(6):150-158.
- [27] 任图生. 华北平原一年两熟区免耕技术的发展与展望 [C]//现代农业与农作制度建设学术研讨会暨中国耕作制度研究会成立25周年纪念会,2006.
- [28] 王洋,刘景双,王国平,等. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究[J]. 地理与地理信息科学,2007,23(2):91-96.
- [29] Chepil, W. S. Properties of soil which influence wind erosion: II dry aggregate structure as an index of erodibility[J]. Soil Sci., 1950,69:403-414.