

东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征

李胜龙^{1,2}, 李和平^{1,2}, 林艺^{1,2}, 肖波^{1,2,3}, 王国鹏^{1,2}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 农业部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 3. 中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探究不同耕作方式农田土壤风蚀特征, 揭示风蚀对表层土壤理化性质及养分含量的影响, 以东北地区典型农田土壤(黑土和风沙土)为研究对象, 通过野外集沙仪定点监测与室内理化分析方法, 对不同耕作方式(垄作、免耕)和不同地表覆盖措施(无覆盖、留茬、覆盖)下的土壤风蚀特征展开研究。结果表明: (1) 风沙土的输沙量显著高于黑土, 在 0—100 cm 高度范围内风沙土的输沙量平均为黑土的 168 倍。随高度的上升输沙量急剧减少, 其中 0—10 cm 输沙量最大, 占总输沙量的 50% 以上, 40 cm 以上则无明显风蚀物; (2) 不同耕作方式下, 免耕农田土壤风蚀输沙量较垄作样地减少了 66.0%~94.1%; 而相同耕作措施下, 不同地表覆盖的输沙量表现为无覆盖>留茬>覆盖, 与无覆盖相比, 留茬及秸秆覆盖下的输沙量可以减少 90.3%~99.4%; (3) 受风蚀影响, 表层土壤颗粒、有机质及养分流失严重, 其中风蚀物的砂粒含量是表层土壤的 1.06~1.42 倍, 且 10—20 cm 风蚀物中有机质、全氮和全磷含量均比表层土壤高; (4) 通过修正风蚀方程(RWEQ)估算得出, 垄作无覆盖(RTNF)风蚀模数高达 181.7~86 582.9 t/(km²·a), 风蚀剧烈, 而免耕覆盖(NTF)的风蚀模数仅为 9.89 t/(km²·a), 为微度风蚀。研究显示垄作及无覆盖方式下农田土壤风蚀程度剧烈, 加剧了表层土壤颗粒和养分流失的风险, 而免耕和地表覆盖能有效缓解风蚀危害。

关键词: 风沙土; 垄作; 免耕; 土壤养分; 秸秆覆盖

中图分类号: S157.1; S34

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0110-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.016

Effects of Tillage Methods on Wind Erosion in Farmland of Northeastern China

LI Shenglong^{1,2}, LI Heping^{1,2}, LIN Yi^{1,2}, XIAO Bo^{1,2,3}, WANG Guopeng^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193; 2. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture, Beijing 100193; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Wind erosion is a serious problem in agricultural regions of Northeastern China, where a north continental monsoon climate is prevalent and land is prepared for seeding using conventional cultivation ways such as ridge tillage or no tillage method. Affected by wind erosion, many studies reported the effect of tillage methods and coverage types on soil wind erosion, and pointed out that soil fine particles and nutrients (i.e., nitrogen and phosphorus) of top soil lose seriously by wind erosion, which have negative impacts on agricultural production and environment. Generally, wind erosion was affected by wind speed, soil water content, soil texture, and even the land cover types (like standing residues and flat residues) after harvest during wind season. Moreover, conservation tillage like no tillage or residue cover, could reduce soil wind erosion effectively on farmland. However, differences between black soil and aeolian sandy soil with different tillage and cover methods, especially in soil particles distribution and nutrient contents of wind erosion sediments, were unknown. Field experiments were conducted with ridge tillage and no tillage on farmland of three typical cover methods (no residue cover, remain standing residues and flat residues) on black soil and aeolian sandy soil in Northeastern China from April to June in 2016 and 2017. The soil particle distribution, organic matter, total nitrogen and phosphorus of wind erosion sediments were measured. Our results showed that the amount of wind erosion significantly decreased with increasing height; it was the highest at 0—10 cm

收稿日期: 2019-03-14

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项(2017QC048, 2018QC071)

第一作者: 李胜龙(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail: lslcau1993@cau.edu.cn

通信作者: 肖波(1981—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail: xiaobo@cau.edu.cn

and accounted for more than 50%, while it was closed to zero above 40 cm. The sediments from black soil were significantly lower than that from sandy soil. Furthermore, the amount of wind erosion of aeolian sandy soil was 168 folds than that in black soil at 0—100 cm in the same farming methods. In terms of tillage methods, the amount of sediments of no tillage were reduced by 66.0% to 94.1% as compared with ridge tillage, which indicated that no tillage could greatly decrease wind erosion. Apart from tillage types, flat residues can also reduce wind erosion obviously. Compared with no flat residues, the amount of sediment was reduced more than 90.3% by remain standing residues and flat residues during the spring. Affected by the wind erosion, the organic matter content of sediments was increased by 73.3%~85.8%, and even the soil particle distribution and nutrients of sediments lose seriously. The results of model analysis with RWEQ were verified by the results of our experiments, and the wind erosion modulus of RTNF (ridge tillage with no flat residues) was 181.7 to 86 582.9 t/(km² · a), however it was only 9.89 t/(km² · a) in NTF treatment (no tillage with flat residues). Our experiments indicated that remained stubble and residue cover management were effective ways to prevent soil wind erosion, while the ridge tillage and no residues can result in severe erosion and nutrients. It is, therefore, essential to pay high attention to the ridge tillage and no cover cultivate methods and adjust tillage and cover methods in Northeastern China.

Keywords: aeolian sandy soil; ridge tillage; no tillage; soil nutrient; flat residues

土壤风蚀是气流或气固两相流对地表物质剥蚀、分选和搬运的过程,其主要受近地表风速、紊流强度等侵蚀因子和土壤质地、表层土壤含水量等可蚀性因素共同影响^[1]。我国土壤受风蚀影响严重,其中发生风蚀及受风蚀作用影响的面积占国土面积的50%以上^[2]。东北黑土区是我国重要的商品粮供应地^[3],但近年来,该区农业生产强度加大,地表保护措施不足,土壤质地粗化现象严重。同时,由于冬春季大风天气频繁,风力强劲,使得表层土壤干燥、疏松的耕地风蚀作用强烈^[4],严重影响农业生产,对社会经济和生态环境危害较大^[5-6]。有研究^[7]表明,东北黑土区风蚀面积达 3.4×10^4 km²^[8]。剧烈的农田土壤风蚀,不仅降低表层土壤有机质及养分含量,威胁粮食生产,同时也加剧区域土地退化程度,破坏生态环境。土壤风蚀不仅是土地沙漠化过程的首要环节,也是土地沙化和沙尘灾害发生的根源,更是干旱和半干旱地区最严重的土地荒漠化问题之一^[9]。因此,针对东北区土壤风蚀特征研究,对缓解农田土壤风蚀和保护农业生产等方面具有重要意义。

国内学者针对东北农田土壤风蚀展开了相关研究,杨新等^[10]根据多年气象资料分析表明,东北典型黑土区土壤风蚀环境处于中等程度;刘铁军等^[2]研究发现,农田黑土风沙流主要集中在0—8 cm高度,且风沙流断面风蚀物含量与高度呈指数递减趋势;林艺等^[6]通过室内模拟试验得出,黑土起沙风速为5 m/s,且风蚀速率随土壤含水量的增加先增加后下降。除了针对黑土风蚀机理研究外,在防治和减缓土壤风蚀的措施研究上,减少农田土壤翻耕并增加地表秸秆覆盖等保护性耕作方式被认为是一种有效、经济的途径^[11-12]。

如通过免耕和留茬覆盖等保护性措施,以削弱风对地表的剪切力,从而大幅度减轻农田的土壤风蚀^[11]。Mendez等^[13]和Labiadh等^[14]对比了免耕及传统翻耕等耕作方式下农田土壤风蚀特征,研究发现免耕措施能极大降低农田的风蚀;Jia等^[15]对不同高度秸秆风蚀差异研究显示,50 cm秸秆样地的土壤起沙临界风速提升了33%;林艺等^[6]研究表明,秸秆覆盖能显著降低黑土风蚀速率。因此,开展针对农田保护性耕作措施与风蚀影响程度的研究,能为北方(尤其是东北农作区)农业生产提供理论指导。

东北地区风害频繁,黑土风蚀强烈,同时近年来该地区大力推广保护性耕作方式,而针对该耕作方式下农田土壤风蚀特征的研究则显得十分必要。基于此,为探究不同耕作方式下土壤风蚀特征差异,揭示地表留茬及覆盖对风蚀的影响。本研究以东北典型黑土和风沙土为研究对象,通过2年的野外观测试验,比较不同耕作方式(免耕、垄作)和不同覆盖措施(无覆盖、留茬、覆盖)下土壤风蚀差异,分析风蚀物颗粒组成与养分含量,并结合修正风蚀方程(revised wind erosion equation, RWEQ)估算各耕作措施下输沙量,定量研究农田土壤风蚀特征。研究结果可为东北地区改善耕作方式及防治农田土壤风蚀提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省四平市梨树县中国农业大学吉林梨树实验站(43°02′—43°46′N, 123°45′—124°53′E),地处吉林省西南部,为松辽平原腹地。该区地势东南高、西北低,南部为低山丘陵,中部为波状平原,北部为东

辽河冲积平原。该区属寒温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温 6.5℃,年降水量约 587 mm。全年日照时间 2 393~2 928 h,无霜期 115~188 d,雨热同季,四季分明,春季干旱多风,大风天气主要发生在 3—5 月^[8]。黑土、黑钙土及风沙土是该区主要土壤类型,但土壤腐殖质层薄,耕层浅,有机质及养分含量

低,土壤侵蚀较严重。玉米和大豆为主要作物类型,种植历史悠久^[6]。

1.2 野外试验与样品测定

于 2016 年和 2017 年的 4—6 月进行野外原位定点风蚀观测试验。样地土壤类型为黑土和风沙土,土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验样地土壤基本理化性质

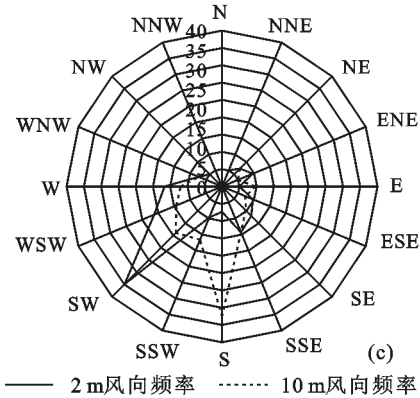
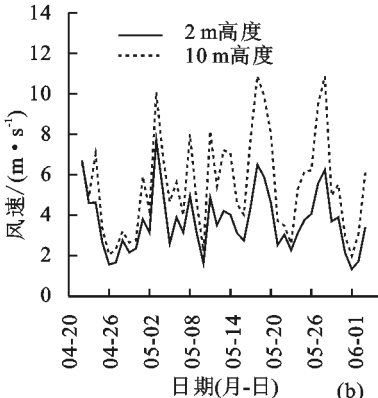
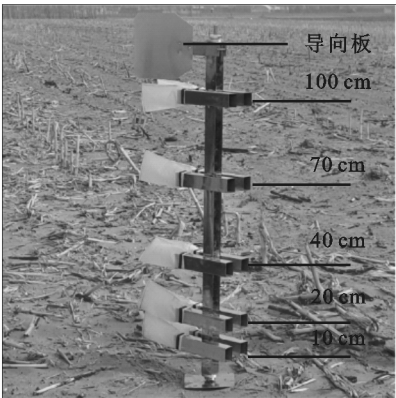
样地	处理	土壤质地	容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 含水量/%	pH	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	全氮含量/ (g·kg ⁻¹)	全磷含量/ (g·kg ⁻¹)	CaCO ₃ / (g·kg ⁻¹)
黑土	RTNF	粉砂质壤土	1.42±0.10b	21.71±0.80a	5.24	23.22±0.92b	0.54±0.02b	0.12±0.03ab	20.10±1.10c
	RTS	粉砂质壤土	1.44±0.12b	20.84±1.52a	5.81	31.54±0.33a	0.82±0.01a	0.11±0.03ab	22.52±1.23c
	NTF	粉砂质壤土	1.55±0.04a	18.74±0.74b	5.08	30.68±0.35a	0.18±0.01d	0.18±0.01a	18.36±0.78c
	NTS	粉砂质壤土	1.56±0.14a	17.62±0.55b	5.69	30.86±1.32a	0.88±0.03a	0.10±0.02ab	21.34±0.56c
	RTNF	砂土	1.56±0.21a	7.03±0.79c	6.05	8.99±0.56c	0.23±0.03cd	0.03±0.01c	33.65±1.12b
风沙土	RTF	砂质壤土	1.66±0.09a	9.74±0.47c	5.46	22.49±0.22b	0.36±0.01c	0.03±0.03c	40.86±1.67a
	NTS	砂土	1.60±0.13a	7.60±0.89c	5.74	12.80±0.60c	0.34±0.03c	0.03±0.01c	35.42±1.33b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示各样地土壤特性差异显著(P<0.05)。

在耕作方式上,本研究选取垄作(ridge tillage)和免耕(no tillage)2 种该区主要农田耕作方式样地,即翻耕起垄与不翻耕直接播种耕作。其中,试验样地垄作方式下的垄高平均为 10~15 cm,行距平均为 50~60 cm。在地表覆盖类型上,该区农作物收获后通常进行覆盖与留茬 2 种处理。覆盖方式即在收割后将作物秸秆与残茬保留于农田,经测定,秸秆的平均覆盖量在 900 g/m² 以上;而留茬则是在收割后将作物秸秆移除,只将作物的直立残茬保留在田内。残茬高度视农作物种类及收割方式而定,一般玉米与大豆留茬高度为 10~40 cm。经实地测定,本研究将地表无明显留茬(平均高度<10 cm)且无秸秆覆盖(收割后秸秆被移除,地表无明显秸秆残留)样地定义为“无覆盖”(no flat residues);将作物留茬高度>20 cm 而地表无秸秆覆盖样地定义为“留茬(standing

residues)”;将地表作物留茬>20 cm 且收割后保留秸秆(覆盖量>900 g/m² 以上)的样地定义为“覆盖(flat residues)”。

于 2016 年选取黑土 4 种处理方式样地,即垄作无覆盖(ridge tillage with no flat residues, RTNF)、垄作留茬(ridge tillage with standing residues, RTS)、免耕覆盖(no tillage with flat residues, NTF)和免耕留茬(no tillage with standing residues, NTS);对风沙土选取垄作覆盖(ridge tillage with flat residues, RTF)、RTNF 和 NTF 3 种处理样地。试验所选样地均面积均大于 1 300 m²,其中垄作耕作方式均在当年翻耕筑垄耕作,而免耕样地均为当年直接播种,不进行翻耕操作。2 年野外试验均在相同样地进行,但 2017 年黑土样地耕作方式为 RTF 和 NTF,风沙土样地为 RTNF、NTF 和 NTF。



注:(a)为集沙仪装置示意;(b)和(c)分别为 2016 年试验期间 2 m 和 10 m 高度风速和风向频率。

图 1 集沙仪装置及试验区风速统计

试验前,于每个样地中部随机安放 3 个阶梯式集沙仪(图 1a,HH.SCC-X 型阶梯式,2 年试验期间共计安装 36 个)。收集口截面积为 25 cm²,所设最大

测量高度为 100 cm,分别收集距离地面 10,20,40,70,100 cm 5 个高度的风蚀产沙量(图 1b)。由于集沙仪仅对 5 个高度的风蚀沙量收集,并非垂直方向上

连续收集,因此,本文定义各高度所收集沙量为土壤“输沙量”。集沙仪竖直安装于观测样地,保持底部与地面平齐。各集沙仪采样器在采沙过程中互不干扰,以对每个样点分别进行连续采样。在连续监测采样过程中,集沙仪通过导向板起到气流导向作用,从而保证集沙口的进风口始终正对来风方向。在采样开始时记录时间,同时打开各个集沙仪的口盖,同步收集,且观测结束时同时关闭。

在野外试验开展前,采取每个样地的表层 5 cm 土壤样品以获取土壤基本性质,每个样地 6 个重复。样品采集区域视耕作、覆盖类型而定,其中,垄作样地在垄上采集,而平铺残茬覆盖的地块,于残茬覆盖下采集。根据试验区风速和集沙仪收集量确定样品采集频率。将所收集的风蚀物带回实验室,过筛并挑出非土壤颗粒杂质,于 75 ℃下烘 24 h 并称重、保存,以备风蚀物有机质及养分含量(全氮、全磷)的测定。土壤容重用烘干法、土壤有机质采用重铬酸钾容量法、颗粒组成采用激光粒度仪(Mastersizer 2000,国际制分类)、全氮以半微量凯氏法、全磷以 $\text{HClO}_4\text{—H}_2\text{SO}_4$ 法、 CaCO_3 以气量法测定^[16]。

1.3 风蚀模拟与风蚀模数估算

为评价研究区风蚀程度,采用修正风蚀方程(RWEQ)对输沙量进行估算。RWEQ 将土壤风蚀影响因子划分为 5 类:气候因子(WF)、可蚀性因子(EF)、农作物残茬因子(COG)、地表粗糙度因子(K')和土壤结皮因子(SCF)。本研究根据模型计算得出最大输沙量,再与集沙仪收集到的输沙量对比,验证模型模拟效果。模型主要参数计算为^[17-18]:

$Q_{\max}=109.8(WF \cdot EF \cdot COG \cdot K' \cdot SCF)$ (1)

$S=150.71(WF \cdot EF \cdot COG \cdot K' \cdot SCF)^{-0.3711}$ (2)

$S_L=\frac{2z}{S^2}Q_{\max}e^{-(z/S)^2}$ (3)

式中: $Q_{\max}$ 为最大输移能力(kg/m); S 为关键地块长度(m); S_L 为土壤损失量(kg/m²); z 为所计算的下风向距离,本文根据田块长度,统一取值 50 m^[19]。其中,WF、EF、COG、 K' 和 SCF 等因子的具体计算方法见公式(4)~公式(8)。

其中气象因子 WF 计算式为:

$WF=S_wS_d\sum_{i=1}^NV_2(V_2-V_t)^2N_d\rho/Ng$ (4)

式中: V_2 为 2 m 处风速(m/s); V_t 为 2 m 处临界风速(本文为 5 m/s); N 为风速观察次数,500 次; N_d 为试验天数; ρ 为空气密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s); S_w 为土壤湿度,无量纲; S_d 为雪覆盖因素(试验期间无积雪,此值为 1)。

土壤可蚀性因子 EF 计算式为:

$EF=[29.69+0.31(Sand)+0.17(Silt)+0.33(Sand/Clay)-2.59(OM)-0.95(CaCO_3)]/100$ (5)

式中:Sand 为土壤中的砂粒含量(g/kg);Silt 为土壤中粉粒含量(g/kg);Sand/Clay 为土壤中砂粒与黏粒的比例;OM 为土壤中有有机质含量(g/kg); CaCO_3 为土壤中碳酸钙含量(g/kg)。

农作物残差因子 COG 计算式为:

$COG=e^{-0.0438SC}$ (6)

式中:SC 为地表覆盖度(%)^[19],本文于实地进行实地测量。

地表粗糙度因子 K' 分 2 种情况,在垄作下采用公式为:

$K'=4H^2/S$ (7)

式中: H 为垄高(m); S 为随机糙度。而田地没有垄时,地表起伏较小,本研究采用链条法实地测定。

地表结皮因子 SCF 采用 Hagen 建立的土壤结皮因子定量计算公式为:

$SCF=1/(1+0.0066(Clays)+0.021(OM)^2)$ (8)

式中:Clay 为黏粒含量(%);OM 为有机质含量(g/kg)。试验期间无灌溉、无积雪,降雨较少。各因子模拟值计算结果见表 2。

表 2 RWEQ 模型各因子计算结果						
样地	处理	WF/ (kg·m ⁻¹)	EF	COG	K'	SCF
黑土	RTNF	41.34	0.57	0.99	0.08	0.89
	RTS	41.34	0.54	0.98	0.06	0.82
	NTF	42.30	0.58	0.96	0.02	0.90
	NTS	42.30	0.64	0.97	0.03	0.83
	RTNF	45.79	0.63	1.00	0.99	0.94
风沙土	RTF	45.45	0.57	0.97	0.10	0.85
	NTS	45.79	0.71	0.99	0.35	0.95

研究区全年的大风天气集中在春季,试验期间(4—6 月)实测距离地表 2,10 m 处风速均较高,适合野外定位监测。原位监测数据显示,整个试验周期内,风速高于起沙风速(5 m/s)的天数约占全年风速高于起沙风速天数的 50%^[6],且西南和南风风向频率较高(图 1c)。因此,为探究研究区全年土壤风蚀情况,本研究结合集沙仪所控制面积,推算不同耕作方式下土壤风蚀模数。最后,参照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[20],对各样地土壤风蚀程度进行分级与评价。

本文各样地输沙量数据均为 2016 年和 2017 年每个样地内 3 个集沙仪数据的平均值,运用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理,用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行单因素方差分析(One-Way

ANOVA),以 Origin 2019 软件作图与拟合。

2 结果与分析

2.1 不同高度输沙量差异

由图 2 可知,不同土壤风蚀差异较大,2 年试验期间风沙土输沙量平均高达 3 042.3 g,是黑土输沙量的 168 倍。各样点输沙量随高度升高而急剧降低,0—10 cm 输沙量最多,平均占总输沙量的 50%以上,其中 2016 年风沙土 RTNF 样地该层更是占总输沙量的 72.72%。随着高度的增加,输沙量急剧降低,在 40 cm 以上各样地输沙量极少,仅占总量的 0.04%~17.27%,且黑土 40 cm 以下输沙量趋近于 0。

不同耕作方式下,土壤输沙量随高度的增加也具

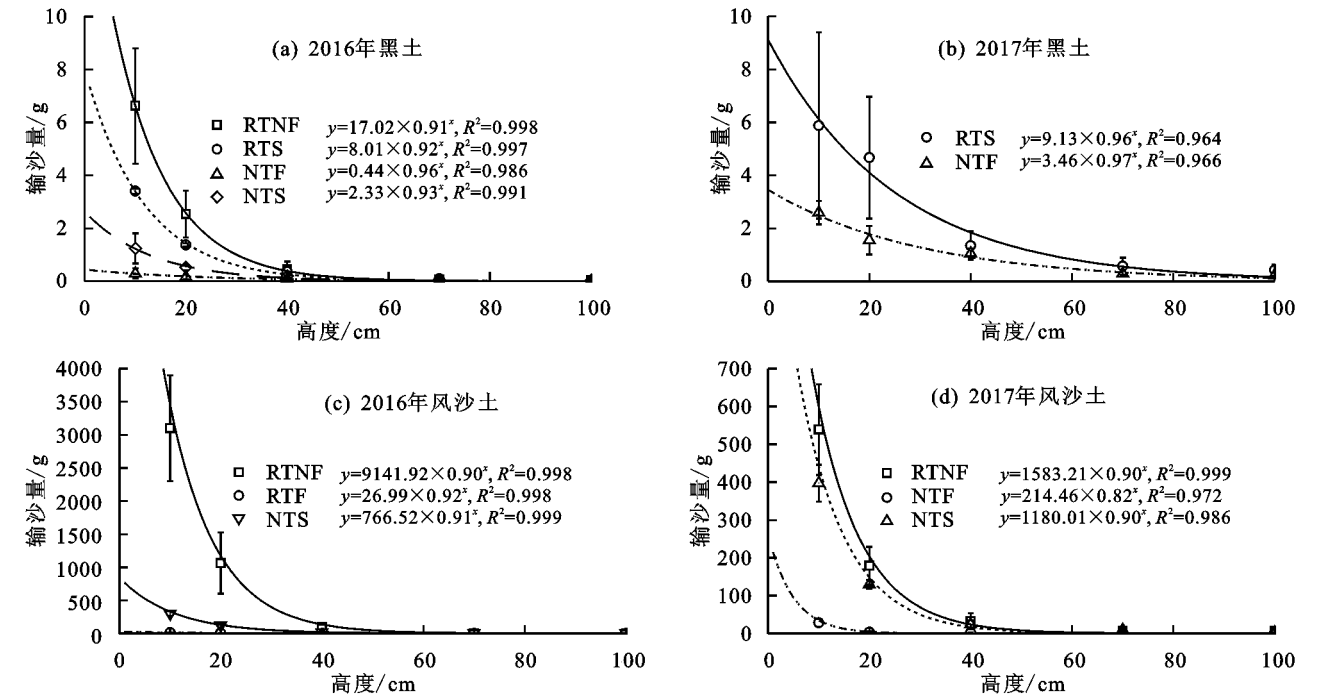


图 2 不同耕作方式下输沙量随高度变化关系

2.2 不同耕作方式下土壤输沙量差异

耕作方式不同,各样地输沙量差异显著。2016 年和 2017 年的试验结果显示,同高度下黑土垄作措施输沙量较免耕高(图 3)。如 2016 年 4 月 28 日黑土 0—10 cm 所收集的风蚀物中,垄作措施下的输沙量为 2.00~4.44 g,而免耕措施下的土壤输沙量仅为 0.26~0.68 g,比垄作措施减小 66.0%~94.1%。而在相同耕作条件下,地表覆盖方式的不同,风蚀差异表现为无覆盖输沙量最高,留茬其次,覆盖最低。如 2016 年 4 月 28 日和 5 月 20 日 2 次收集样品中,黑土 0—10 cm 的 RTNF 输沙量是 RTS 的 1.61~2.22 倍,而 NTS 输沙量则是 NTF 的 2.72~4.63 倍,且各样地 2016 年和 2017 年相同高度输沙量均表现出类似结果。

风沙土的输沙量平均较黑土高,且在相同高度下,其输沙量表现为无覆盖>留茬>覆盖(图 4)。与黑土地样地相同,风沙土无覆盖输沙量最高,在 0—40 cm RTNF

有较大差异(图 2)。其中,同高度输沙量表现为垄作>免耕。2 年监测数据显示,0—40 cm 黑土垄作样点输沙量平均为 0.46~6.63 g,是免耕样点的 1.94~5.11 倍;而风沙土的 RTNF 在 0—40 cm 的输沙量最高达 3 099.5 g,是免耕的 8.17~10.32 倍。在相同耕作方式下,各覆盖类型输沙量差异主要体现在 0—40 cm 高度范围,在 40 cm 以上各覆盖类型样地输沙量差异不明显,且表现为无覆盖最高,留茬其次,覆盖最低。黑土 RTNF 在 0—40 cm 处输沙量平均为 9.63 g,占总输沙量的 98.97%,是 RTS 输沙量(5.14 g)的 1.87 倍。通过对输沙量与高度的拟合分析可知,两者均存在显著的指数函数关系($R^2>0.96$)。

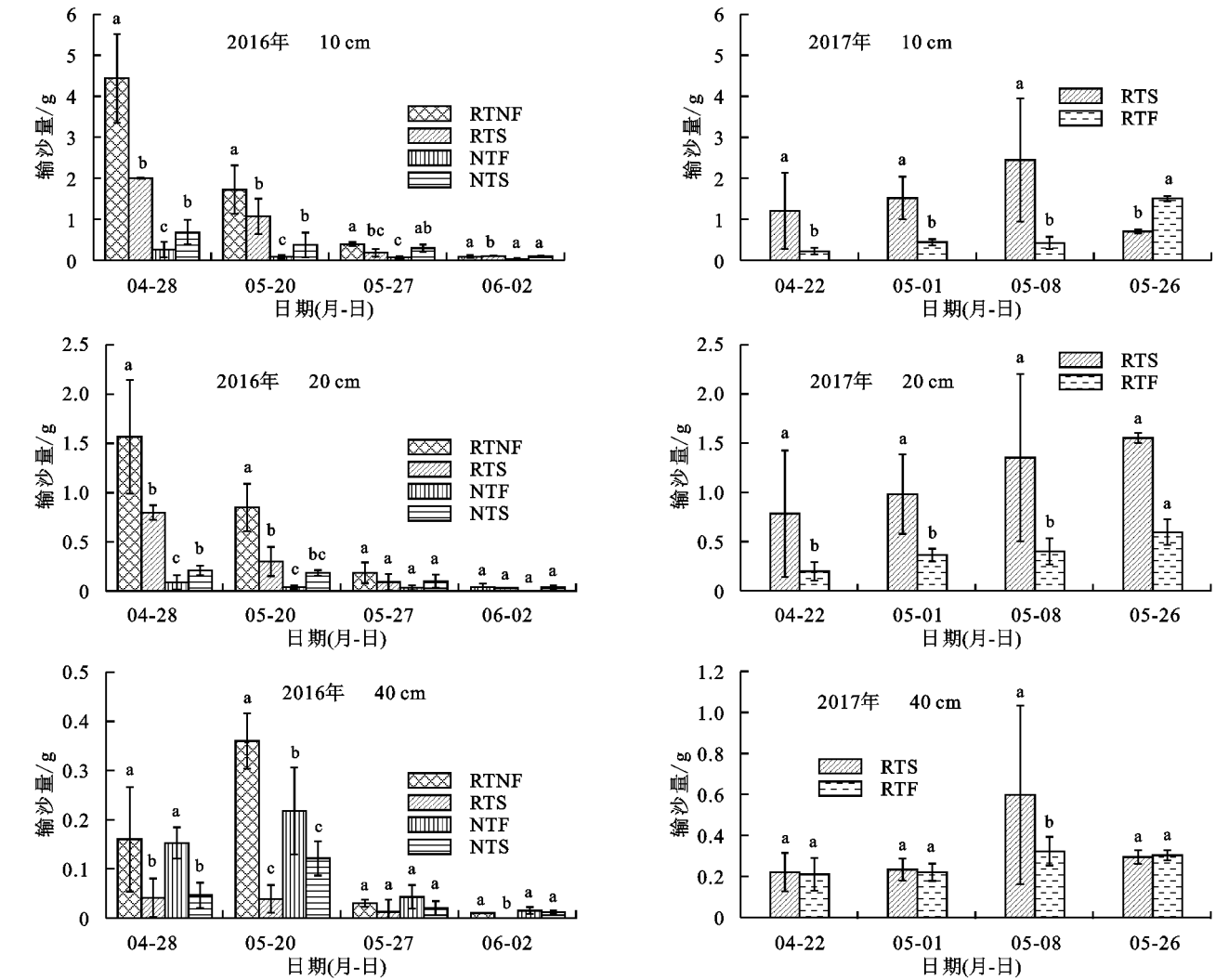
平均输沙量达 2 502.5 g,显著高于留茬与覆盖样地。整个试验期内,RTNF 与 NTS 输沙量均显著高于 NTF 与 RTF,其中 RTNF 输沙量整体是 RTF 的 39.6~218.4 倍,NTS 输沙量平均是 NTF 的 7.89~168.16 倍。且在 2016 年 5 月 19 日,RTNF 的 0—10 cm 单次收集风沙量达 1 217.35 g,超过 RTF 和 NTS 的 1 061.1~1 210.2 g。与无覆盖及留茬相比,地表秸秆覆盖措施下输沙量极低,很大程度上降低风沙土风蚀。如 RTF 与 NTF 的输沙量总量仅 18.96~33.99 g。

2.3 风蚀物颗粒组成及养分含量差异

从表 3 可以看出,风蚀物砂粒含量整体高于表层土壤。各样地风蚀物砂粒含量为 44.46%~95.24%,是表层土壤的 1.06~1.42 倍。而不同样地的风蚀物黏粒含量差异较大,其中黑土风蚀物黏粒含量较表土层高,0—20 cm 高度黏粒含量是表层土壤的 2.09~5.53 倍;风沙土样地表现为风蚀物粉粒和黏粒含量极

低,其黏粒含量为 0.40%~5.92%,均低于表层土壤。随高度的增加,风蚀物砂粒含量增加。黑土 RTNF 措施下风蚀物的砂粒含量整体为 44.46%~51.47%,

超过表层土壤的 21.97%~41.95%;而风沙土 40 cm 砂粒含量高达 80.80%~95.24%,超过其 10 cm 高度的 3.01%~5.19%。



注:40 cm 以上高度输沙量较少,此处未列出。下同。

图 3 不同耕作方式下黑土输沙量

黑土风蚀物有机质含量随高度的增加而增加,且与表层土壤差异明显(表 4)。其中,黑土 10 cm 风蚀物有机质含量高达 39.07~47.46 g/kg,平均是表层土壤的 1.50~1.68 倍,而 20 cm 高度风蚀物有机质含量更高,超出表层土壤的 53.14%~97.50%;风沙土风蚀物有机质含量整体为 8.69~15.60 g/kg,与表层土壤差异不大,且 RTF 风蚀物有机质含量较表层土壤有降低趋势。

各样点风蚀物全氮和全磷含量整体高于表层土壤。其中,黑土 RTNF 的 10,20 cm 风蚀物全氮含量为 0.70~0.80 g/kg,较表层土壤上升 29.63%~41.15%,且 NTS 的 20 cm 风蚀物是表层的 1.15 倍。风沙土 40 cm 处风蚀物的全氮最高,平均是表层土壤的 1.12~1.56 倍。风蚀物的全磷含量也整体上较表层土壤高,其中黑土 NTS 是表层土壤的 2.8 倍,而风沙土 RTNF 全磷含量更是高出表层的 0.16 g/kg。

2.4 风蚀模拟与风蚀强度估算

从表 5 可以看出,RWEQ 模型对黑土和风沙土输沙量的模拟结果表明,各耕作方式下 2 种土壤的模拟值与试验实测值差异较小($y=1.385x-0.7674$, $R^2=0.987$),各耕作方式下土壤输沙量模拟结果效果较好,表明 RWEQ 模型可较好地运用于东北黑土区的各耕作类型下农田土壤风蚀模拟研究。

通过计算风蚀模数与参照《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[20] 标准可知,黑土输沙量均较少,土壤风蚀强度均为微度,而风沙土输沙量极高,风蚀强度能达到剧烈。

对比风蚀模数可知,黑土整体上表现为 $RTNF>RTS>NTS>NTF$ 。其中,NTF 措施下的土壤风蚀模数仅为 9.89 t/(km²·a),而 RTNF 高达 181.72 t/(km²·a),这表明黑土的免耕方式抗风蚀作用明显。而对于风沙土而言,不同耕作措施下的土壤风蚀强度

差异巨大。RTF 措施下的土壤风蚀模数最小,为 344.80 t/(km² · a),土壤风蚀强度为轻度;而 RTNF 措施下的风蚀模数为 86 582.9 t/(km² · a),远大于

RTF 和 NTS,为剧烈风蚀。因此,相对于风沙土,保护性耕作并且地表覆盖等措施能较明显提高风沙土抗风蚀能力。

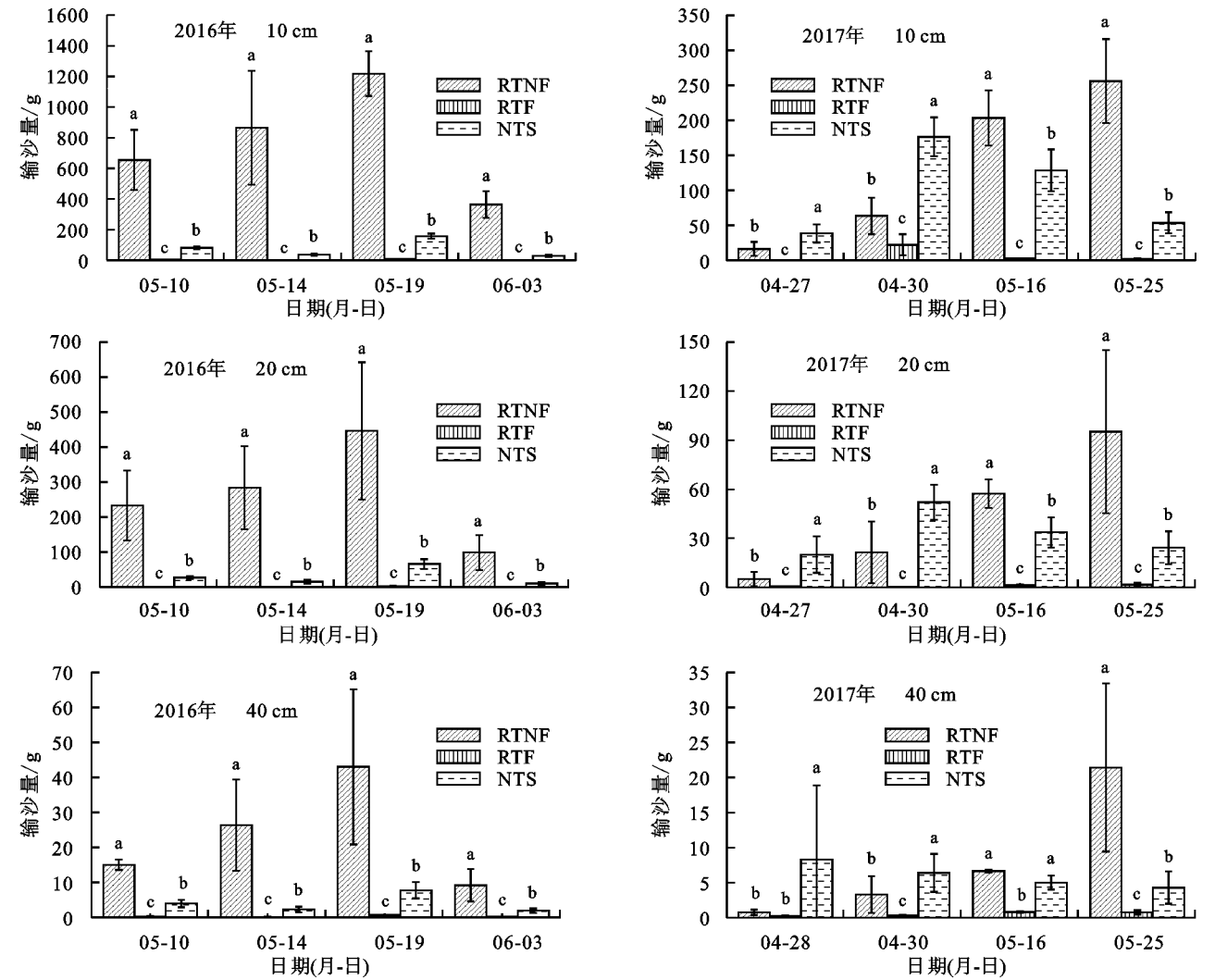


图 4 不同耕作方式下风沙土输沙量

表 3 不同耕作方式土壤风蚀物颗粒组成

样地	处理	砂粒/%				粉粒/%				黏粒/%			
		TS	10 cm	20 cm	40 cm	TS	10 cm	20 cm	40 cm	TS	10 cm	20 cm	40 cm
黑土	RTNF	36.45	44.46	51.74	—	62.51	52.19	45.50	—	1.04	2.17	2.76	—
	NTF	35.33	49.41	47.63	—	63.79	47.44	49.32	—	0.57	3.15	3.05	—
	NTS	36.07	45.47	49.14	—	63.36	51.40	48.20	—	0.88	3.13	2.66	—
风沙土	RTNF	72.40	78.44	75.04	80.80	21.14	15.64	19.50	17.45	6.46	5.92	5.46	1.75
	RTF	89.99	93.19	94.72	95.24	7.05	5.96	4.87	4.36	3.96	0.85	0.41	0.40
	NTS	79.04	86.25	81.29	90.73	18.16	12.60	17.07	8.71	2.18	1.15	1.64	0.56

注:TS为表层土壤;免耕覆盖(NTF)整体收集土样较少,无法进行测量,此处未给出;标“—”表明因土样过少而无法测量。下同。

表 4 风蚀物土壤有机质、全氮和全磷含量

单位:g/kg

样地	处理	有机质				全氮				全磷			
		TS	10 cm	20 cm	40 cm	TS	10 cm	20 cm	40 cm	TS	10 cm	20 cm	40 cm
黑土	RTNF	23.22	39.07	45.86	—	0.54	0.70	0.80	—	0.12	0.24	0.10	—
	RTS	31.54	47.46	40.14	—	0.82	0.85	0.87	—	0.11	0.08	0.08	—
	NTS	30.86	45.32	47.26	—	0.88	0.75	1.01	—	0.10	0.11	0.28	—
风沙土	RTNF	8.99	9.01	8.69	15.49	0.23	0.21	0.25	0.36	0.03	0.09	0.11	0.19
	RTF	22.49	15.45	12.22	—	0.36	0.37	0.35	—	0.03	0.12	0.09	—
	NTS	12.80	13.41	15.60	15.55	0.34	0.33	0.34	0.38	0.03	0.11	0.13	0.18

表 5 不同耕作方式土壤 RWEQ 风蚀模拟与风蚀程度评价

样地	处理	S/m	$Q_{\max}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	$S_L/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	实测值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	风蚀模数/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	风蚀程度
黑土	RTNF	124.77	182.70	0.24	0.09	181.72	微度
	RTS	146.13	119.33	0.11	0.05	94.53	微度
	NTF	206.69	46.87	0.02	0.01	9.89	微度
	NTS	176.10	72.17	0.05	0.2	34.91	微度
风沙土	RTNF	44.50	2941.46	31.25	43.29	86582.93	剧烈
	RTF	114.13	232.32	0.36	0.17	344.80	轻度
	NTS	62.13	1196.58	6.36	4.17	8342.53	极强度

3 讨论

3.1 土壤质地与水分状况对风蚀程度的影响

土壤质地(土壤结构、颗粒组成等)及有机质含量等基本理化性质的不同,对风蚀特征产生较大影响^[21]。试验区土壤质地为典型黑土与风沙土,土壤质地差异较大,使得两者风蚀特征差异明显。一方面,黑土有机质含量较高,有利于促进土壤团聚体的形成,提高土壤稳定性及抗风蚀能力,减少可蚀性颗粒含量;另一方面,风沙土有机质较黑土低,且砂粒含量较高,导致其可蚀性颗粒含量极高,土壤抗蚀性较低^[22]。因此,这使得风沙土输沙量显著高于黑土,同时在同等高度下黑土输沙量明显低于风沙土。这与杨新等^[10]和王仁德等^[22]的研究结果类似。由于风沙物质基本上就地起沙,土壤颗粒分离、搬运和沉积过程均在发生于表层土壤,在风力、下垫面条件改变的情况下土壤颗粒会重新回落陆地表面^[1],因此试验中大部分风蚀物主要在距地表 0—40 cm 高度范围。刘铁军等^[2]和景国臣等^[5]对东北黑土风蚀特征的研究表明,风蚀物主要集中在 80 cm 高度以内,且距地表 10 cm 风蚀物含量最高,并与高度之间呈指数关系。

除土壤有机质与机械组成外,土壤含水量差异也是影响输沙量的主要因素^[23]。在湿润条件下,土壤中水分子与土壤颗粒之间的拉张力增加了颗粒间的内聚力,而含水量的增加,土壤的黏滞性和团聚作用加强,从而提高土壤风蚀的起动风速^[6]。因此,在土壤含水量较高时,即使风力达到起沙风速也较难发生土壤颗粒移动。试验过程中,黑土的土壤含水量较风沙土高,这也导致两者风蚀具有较大差异。林艺等^[6]等定量分析土壤含水量与风蚀速率关系表明,含水量较高时(>5%),土壤颗粒间薄膜水的作用增大土粒分离的作用,从而降低风蚀速率;肖巍强对不同含水量条件下土壤风蚀特征研究结果显示,土壤含水量越大,临界起沙时间推迟越后,且湿沙临界起沙时间与含水量之间为正幂函数关系^[24]。

3.2 不同耕作和覆盖方式对土壤风蚀的影响

耕作方式不同,农田土壤风蚀程度具有较大分

异^[25]。试验区农田耕作以传统垄作和免耕方式为主。由于免耕方式对表层土壤破坏较小,不仅可增加土壤蓄水量,并且随着风蚀的持续,农田和草地地表易形成粗化层,同时地表结皮、植被和残茬的保护作用明显,风蚀强度降低,最终减少土壤输沙量^[11,14];传统垄作方式需进行翻耕筑垄,该过程对地表破坏较大,而破碎的地表能提供较多的风蚀物,最终使得风蚀强度整体较高^[13]。本试验结果也表明,黑土和风沙土免耕措施下输沙量极低,但垄作条件下输沙量均有明显上升。Mendez 等^[13]对不同耕作方式风蚀程度的研究显示,深耕或传统耕作风蚀程度均显著高于免耕;王仁德等^[22]对农田风蚀特征的定量研究表明,翻耕后土壤风蚀量是不翻耕地的 3 倍以上,且随免耕年限的增加,土壤风蚀侵蚀率呈现递减趋势。

除耕作方式外,农作物留茬及覆盖措施也对土壤风蚀产生较大影响^[13]。一方面,地表残茬及农作物秸秆覆盖不仅对地表起到保护作用,而且提高地表空气动力学粗糙度,减弱风对地表的风蚀^[14];另一方面,作物残体能有效减缓土壤蒸发,保持土壤水分,增加土壤紧实度,提高地表砂粒起动风速,从而增加土壤表面的抗风蚀性。除此之外,当农耕区内有较多还田的秸秆与残茬时,还会在一定程度增加土壤水稳性团聚体含量(>2 mm),从而改善土壤结构^[26],减少易蚀性土壤颗粒。这也使得本研究中,覆盖和留茬样地输沙量明显小于无覆盖样地。Gao 等^[27]研究发现,免耕留茬措施下农田土壤风蚀量显著降低,并且认为在我国北方干旱地区,收割后留茬是保护农田土壤的较好方法;Jia 等^[15]对不同高度秸秆风蚀差异研究显示,留茬高度 50 cm 样地土壤起沙临界风速提升 33%,风蚀作用明显减弱。

3.3 风蚀对土壤理化性质及养分含量的影响

在风蚀过程中,土壤颗粒分离搬运与堆积现象在近地表较为明显,且基本上就地起沙,易造成表层土壤及其养分的较大损失^[5]。由于东北黑土区土壤有机质及养分元素含量较高^[28],每年春季农耕期,大风天气持续时间长,且人为耕作造成地表疏松,土壤的

可蚀颗粒增加,从而造成风蚀区土壤颗粒、有机质及养分元素的大量流失。此外,风蚀过程中,大多以跃移为主的粒径都在区域内部被截留,土壤颗粒跃移运动且不断击溅起细小颗粒^[29],使之在大风作用下以悬移的形式被吹蚀。因此,风蚀物砂粒含量、有机质和养分含量都高于表层土壤,土壤养分损耗剧烈。多数研究表明,风蚀过程会使得土壤易蚀颗粒急剧减少,短期内使其表层 5 cm 土壤有机质、总氮和总磷降低 25% 以上^[27]。Yan 等^[12]对内蒙古草地的风蚀特征研究发现,土壤有机质越高,其颗粒物(干团聚体)越容易被侵蚀,尤其是<0.2 mm 的干团聚体易被风蚀,从而造成全氮、全磷和有机碳急剧减少。苑依笑等^[30]研究表明,富集于土壤细颗粒物中的有机质和氮素等养分会随着风蚀而逐渐减少,且有机质及氮素含量会下降 24% 以上,农田土壤肥力明显降低。

受风蚀影响,表层土壤理化性质与养分含量显著降低,严重影响土壤养分和土地生产力。对于风蚀区而言,风蚀后的土地生产力恢复则是一个非常缓慢的过程。而对于东北黑土区风蚀试验可知,免耕及地表留茬或秸秆覆盖等方式均能有效降低土壤风蚀程度。因此,通过改变耕作和地表覆盖方式以减缓风蚀的影响程度,对保护区域耕作土壤及其养分含量具有重要意义。有学者^[31]指出,植被覆盖率越高对地表风速的降低十分显著,并且与传统耕作方式下的农田相比,保护性耕作农田风蚀模数能降低 40.42%~77.42%,适量的作物留茬能有效减缓风蚀程度。因此,为缓解风蚀对东北农耕区的影响,可以在该区域加以试验并推广。

4 结论

(1)风蚀物主要集中分布于 0—40 cm 高度范围内,且 0—10 cm 输沙量最多,平均占总输沙量的 50% 以上,40 cm 以上各样地输沙量极少,仅占总量的 0.04%~17.27%,整体上输沙量与高度呈指数关系。

(2)受不同耕作方式影响,垄作输沙量明显高于免耕,在 0—40 cm 高度范围内输沙量表现为无覆盖最高,留茬其次,覆盖最低;而在相同耕作措施下,地表覆盖类型的不同,也导致输沙量具有较大差异,整体上表现为无覆盖>留茬>覆盖。

(3)风蚀作用不仅使表层土壤颗粒减少,且风蚀物主要以砂粒与黏粒为主,各样地风蚀物中砂粒含量是表层土壤的 1.06~1.42 倍。此外,风蚀物中有机质、全氮和全磷含量均高于表层土壤,其中黑土 10 cm 风蚀物有机质含量平均是表层土壤的 1.50~1.68 倍。风蚀作用极大降低东北耕作区土壤肥力,影响农业生产。而通过调整耕作方式、增加地表农作物残茬及秸秆覆盖,能显著降低风蚀影响。

参考文献:

- [1] 张春来,宋长青,王振亭,等.土壤风蚀过程研究回顾与展望[J].地球科学进展,2018,33(1):17-32.
- [2] 刘铁军,赵显波,赵爱国,等.东北黑土地土壤风蚀风洞模拟试验研究[J].水土保持学报,2013,27(2):67-70.
- [3] 郭欣欣,付强,卢贺,等.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.
- [4] Zhang X L, Zhou Q Q, Chen W W, et al. Observation and modeling of black soil wind-blown erosion from cropland in Northeastern China[J]. Aeolian Research, 2015,19:153-162.
- [5] 景国臣,李英杰,刘艳辉,等.黑龙江省土壤风蚀研究现状与方向[J].中国水土保持,2014(9):37-40.
- [6] 林艺,李和平,肖波.东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J].水土保持学报,2017,31(4):44-50.
- [7] Yan Y C, Wang X, Guo Z J, et al. Influence of wind erosion on dry aggregate size distribution and nutrients in three steppe soils in northern China[J]. Catena, 2018, 170:159-168.
- [8] 李智广,曹伟,刘秉正,等.我国水土流失状况与发展趋势研究[J].中国水土保持科学,2008,6(1):57-62.
- [9] Du H Q, Xue X, Wang T, et al. Assessment of wind-erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River, northern China[J]. Aeolian Research, 2015,17:193-204.
- [10] 杨新,郭江峰,刘洪鸽,等.东北典型黑土区土壤风蚀环境分析[J].地理科学,2006,26(4):443-448.
- [11] 赵永来,陈智,孙悦超,等.作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J].农业机械学报,2011,42(6):38-42.
- [12] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, et al. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of northern China[J]. Plant and Soil, 2013,369(1/2):585-598.
- [13] Mendez M J, Buschiazio D E. Wind erosion risk in agricultural soils under different tillage systems in the semiarid Pampas of Argentina[J]. Soil and Tillage Research, 2010,106(2):311-316.
- [14] Labiadh M, Bergametti G, Kardous M, et al. Soil erosion by wind over tilled surfaces in South Tunisia[J]. Geoderma, 2013,202/203(7):8-17.
- [15] Jia H L, Gang W, Li G, et al. Wind erosion control utilizing standing corn residue in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2015,153:112-119.
- [16] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [17] Pi H W, Sharratt B. Evaluation of the RWEQ and SWEEP in simulating soil and PM₁₀ loss from a portable wind tunnel[J]. Soil and Tillage Research, 2017,170(7):94-103.

- [16] 白向历,孙世贤,刘明,等.玉米叶片光合生理与抗旱性关系研究[J].种子,2009,28(8):4-8.
- [17] 徐爱东,邱念伟,娄苑颖.判断玉米幼苗缺氮程度的叶绿素荧光动力学指标[J].植物营养与肥料学报,2010,16(2):498-503.
- [18] 宋振伟,郭金瑞,任军,等.耕作方式对东北雨养区玉米光合与叶绿素荧光特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1900-1906.
- [19] 刘仲发,勾玲,赵明,等.遮荫对玉米茎秆形态特征、穿刺强度及抗倒伏能力的影响[J].华北农学报,2011,26(4):91-96.
- [20] 于振文.作物栽培学各论[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [21] 许菁.耕作方式与秸秆还田对冬小麦—夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2017.
- [22] 许菁,贺贞昆,冯倩倩,等.耕作方式对冬小麦—夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):101-109.
- [23] 穆心愿.耕作方式与秸秆还田对黄淮潮土性质及小麦玉米生长的调控效应[D].郑州:河南农业大学,2016.
- [24] Zlatev Z S, Yordanov I T. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants[J]. General and Applied Plant Physiology, 2004,30(3/4):3-18.
- [25] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等.不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J].应用生态学报,2012,23(2):419-425.
- [26] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 2003,33:317-345.
- [27] 史丽艳,牛文全,张俊.灌水方式对轻度盐化土壤玉米生长及土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):152-156.
- [28] Girma A, Skidmore A K, Bie C A J M D, et al. Photosynthetic bark: Use of chlorophyll absorption continuum index to estimate *Boswellia papyrifera* bark chlorophyll content[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013,23:71-80.
- [29] Jiang G M, Sun J Z, Liu H Q, et al. Changes in the rate of photosynthesis accompanying the yield increase in wheat cultivars released in the past 50 years[J]. Journal of Plant Research, 2003,116(5):347-354.
- [30] 王正航,武仙山,昌小平,等.小麦旗叶叶绿素含量及荧光动力学参数与产量的灰色关联度分析[J].作物学报,2010,36(2):217-227.
- [31] 宋振伟,郭金瑞,任军,等.耕作方式对东北雨养区玉米光合与叶绿素荧光特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(7):1900-1906.
- [32] 李潮海.土壤物理性质对玉米的生态生理效应及其调控[D].郑州:河南农业大学,2002.
- [33] Baker N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008,59:89-113.

(上接第 118 页)

- [18] Fryear D W, Ali S, Bilbro J D, et al. Revised Wind Erosion Equation (RWEQ). Wind erosion and water conservation research unit, USDA-ARS, Southern Plains Area Cropping Systems Research Laboratory [J]. Technical Bulletin, 1998 (1).
- [19] 江凌,肖赓,欧阳志云,等.基于 RWEQ 模型的青海省土壤风蚀模数估算[J].水土保持研究,2015,22(1):21-25.
- [20] 中华人民共和国水利部.SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [21] Colazo J C, Buschiazio D E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of Argentina[J]. Geoderma, 2010,159(1):228-236.
- [22] 王仁德,邹学勇,赵婧妍.北京市农田风蚀的野外观测研究[J].中国沙漠,2011,31(2):400-406.
- [23] Meng Z J, Dang X H, Gao Y, et al. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in a temperate desert steppe, Inner Mongolia of China[J]. Journal of Arid Land, 2018,10(4):1-14.
- [24] 肖巍强.水分对风沙土抗风蚀性影响的风洞模拟研究[D].西安:陕西师范大学,2018.
- [25] Labiadh M, Bergametti G, Kardous M, et al. Soil erosion by wind over tilled surfaces in South Tunisia[J]. Geoderma, 2013,202(7):8-17.
- [26] 范围,吴景贵,李建明,等.秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J].土壤学报,2018,55(4):835-846.
- [27] Gao Y, Dang X H, Yu Y, et al. Effects of tillage methods on soil carbon and wind erosion[J]. Land Degradation and Development, 2015,27(3):583-591.
- [28] 康日峰,任意,吴会军,等.26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J].中国农业科学,2016,49(11):2113-2125.
- [29] 李晓丽,申向东,苏雅,等.裸露耕地土壤风蚀物化学组分的分布特征[J].农业工程学报,2012,28(5):114-119.
- [30] 苑依笑,王仁德,常春平,等.风蚀作用下农田土壤细颗粒的粒度损失特征及其对土壤性质影响[J].水土保持学报,2018,32(2):104-109.
- [31] 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.