

风蚀过程中翻耕农田土壤抗剪强度变化

刘瑞娟¹, 李继峰^{1,2}, 冯哲¹, 杨美妞¹, 常春平^{1,3}, 郭中领^{1,3}, 王仁德⁴

(1.河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024; 2.河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024;
3.河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024; 4.河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050021)

摘要: 为探究土壤风蚀过程中土壤抗剪强度的变化, 以河北坝上干扰破坏地表及未干扰破坏地表的典型翻耕农田为研究对象, 采用土壤抗剪强度野外原位直剪试验测定了土壤抗剪强度在风蚀事件前后及风蚀季的变化, 结合室内试验分析了土壤抗剪强度与土壤干团聚体粒度的关系。结果表明: 未受到干扰破坏及受到干扰破坏2种类型农田地表土壤抗剪强度与作用在土壤表面的法向应力呈正相关关系, 土壤抗剪强度随法向应力的增大而增大; 土壤抗剪强度变化与风蚀事件的发生密切相关, 除2021年4月27、28日风蚀事件后表层土壤受含水率影响外, 其余2次风蚀事件后土壤抗剪强度均发生明显增大, 整个风蚀季的土壤抗剪强度变化也呈现出先增大再减小最后略增大的趋势; 在风蚀过程中, 受到干扰破坏农田地表对于土壤风蚀过程的响应更为敏感, 其抗剪强度变化较未受干扰破坏地表抗剪强度变化更为剧烈; 土壤抗剪强度随土壤干团聚体平均重量直径增大而增大。为减少坝上地区风蚀的危害, 应合理采用保护性耕作措施, 在风蚀季减少对农田表层的干扰。

关键词: 翻耕农田; 土壤风蚀; 土壤抗剪强度; 土壤抗蚀性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0112-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.015

Changes in Shear Strength of Ploughed Farmland Soil During Wind Erosion

LIU Ruijuan¹, LI Jifeng^{1,2}, FENG Zhe¹, YANG Meiniu¹,

CHANG Chunping^{1,3}, GUO Zhongling^{1,3}, WANG Rende⁴

(1.College of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024;

2.Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change,

Shijiazhuang 050024; 3.Hebei Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction,

Shijiazhuang 050024; 4.Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021)

Abstract: In order to explore the changes in soil shear strength during soil wind erosion, typical ploughed farmland on the disturbed and undisturbed surfaces of the Bashang Plateau in Hebei Province was used as the research object. The changes of soil shear strength before and after wind erosion events and wind erosion seasons were measured by in-situ direct test, and the relationship between soil shear strength and particle size of soil dry aggregate was also analyzed in conjunction with laboratory experiments. The results showed that the shear strength of undisturbed and disturbed surface soil was positively related to the normal stress acting on the soil surface, and the soil shear strength increased with the increasing of the normal stress. The change of shear strength was closely related to the occurrence of the wind erosion events, and a significant increase in shear strength occurred after the wind erosion event in both cases, except for the surface soil after the wind erosion event on April 27 and 28, 2021, which was influenced by the water content. The change of shear strength throughout the wind erosion season also showed a trend of first increasing, then decreasing and finally slightly increasing. In the process of wind erosion, the surface of disturbed farmland was more sensitive and its shear strength changed more sharply than that of undisturbed farmland surface. The soil shear strength increased with the increasing of mean weight diameter (MWD) of soil dry aggregate. In order to reduce the damage of wind erosion in Bashang plateau, conservation tillage measures should be reasonably applied, the interference to farmland surface should be reduced during the wind erosion season.

收稿日期: 2021-12-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(41901001, 41877066); 河北省在读研究生创新能力培养项目(10117094)

第一作者: 刘瑞娟(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土壤风蚀研究。E-mail: 1377012936@qq.com

通信作者: 李继峰(1987—), 男, 硕士生导师, 主要从事土壤风蚀研究。E-mail: lijifeng@hebtu.edu.cn

Keywords: ploughed farmland; soil wind erosion; soil shear strength; soil erosion resistance

土壤风蚀是风力作用下土壤表层细颗粒和营养物质被吹蚀、搬运与堆积的过程^[1-2],可导致风蚀发生地区土壤沙化、粗化、肥力下降以及结构性变差,是干旱半干旱地区土壤退化的主要原因之一^[3-4]。土壤风蚀是气流—土壤界面相互作用机制的连续动力过程,影响土壤风蚀的各要素可以分类归纳为风力侵蚀力、地表粗糙干扰力、土壤抗侵蚀力3类影响因子^[5]。相比用土壤沙粒、粉粒和黏粒含量以及 CaCO_3 、有机质含量等土壤理化指标表达的土壤可蚀性,土壤抗蚀性可以从表土对风的抵抗力角度描述土壤抗蚀因子产生的土壤抗蚀力。土壤抗蚀力是表土本身具有的抵抗风剪切力的能力,对于土壤抗蚀力的表达,必须是力学意义明确且易于测量的土壤力学指标。土壤抗剪强度表征土壤在外力剪切作用下土体剪切破坏产生的抵抗力^[6],在土壤水力侵蚀过程中,抗剪强度作为水蚀的关键性指标,是影响土壤水力侵蚀临界摩阻速度和土壤水蚀的关键因素^[7-10]。土壤风蚀与土壤水蚀在侵蚀动力和侵蚀过程上均有相似性,土壤水蚀研究的理论和方法为土壤风蚀研究起到借鉴作用,因此土壤抗剪强度也可作为土壤风蚀的指标^[11],表征土壤抗蚀性的大小。大量研究^[12-13]表明,土壤抗风蚀能力与土壤抗剪强度密切相关,有学者^[14-15]研究含水率、地温和植被覆盖等因素与不同土地利用类型土壤抗剪强度的关系,描述了土壤抗风蚀能力与土壤抗剪强度的关系。代军等^[16]研究发现,辽西北风沙地不同土地利用方式下的土壤综合抗蚀性表现为花生地>樟子松林地>荒草地>大扁杏林地,土壤的力学指标与土壤抗蚀性指标存在正相关关系。由此可见,用土壤抗剪强度表示抗风蚀能力是可行的。

土壤粒度、养分等土壤抗蚀性影响因素随风蚀过程在不断变化,土壤抗风蚀能力也随着风蚀事件的发生和发展产生相应变化。张正偲等^[3]研究表明,风蚀过程中造成土壤表层粗化,地表细颗粒物减少,细颗粒物的最小粒径也逐渐增大;刘刚等^[17]的对照试验表明,土壤风蚀造成无牧草覆盖的土壤表层颗粒粗化,细粒物质流失,种植牧草可提高土壤的抗蚀性;王仁德等^[18]的研究也发现,无论是风蚀月、风蚀季还是多年的时间尺度,特别是翻耕农田表层土壤中粒径 $<0.85\text{ mm}$ 的土壤团聚体含量均呈现降低趋势,土壤的可蚀性均有所降低;李昂等^[19]研究发现,从整个风蚀季来看,裸地的土壤有机质流失严重,有牧草和小麦覆盖的地表有机质流失较小。前人研究结果皆从土壤理化性质出发来研究土壤抗蚀性变化,但从力学角度描述的土壤抗风蚀能力在风蚀季的变化鲜有报道。

为进一步明确土壤抗蚀性与土壤抗剪强度的关系,从力学角度厘清土壤抗蚀性在土壤风蚀过程中的变化过程,本文以河北坝上典型翻耕地中未干扰破坏地表与干扰破坏地表2种类型的样点为研究对象,采用野外原位试验和室内分析相结合的方法,对比分析土壤抗剪强度在风蚀事件前后及风蚀季的变化,进而探讨土壤抗蚀性在风蚀过程中的变化,为从土壤力学性质方面揭示土壤风蚀的机理提供试验探索,为构建力学意义明确的土壤抗蚀性指标提供理论和数据支撑。

1 试验区概况

研究区位于河北省坝上地区康保县风蚀综合观测场($41^{\circ}25' - 42^{\circ}08' \text{N}$, $114^{\circ}11' - 114^{\circ}56' \text{E}$),该区位于北方农牧交错带的中部,是京津冀风沙源治理工程的重点区域,属于温带大陆性气候,多年平均降水量 338.50 mm ,多年平均风速 2.99 m/s ,其中3—5月风力最大,月平均风速达 3.48 m/s ,1—2月和12月次之,9—11月稍次,6—8月风力最小,近30年的年平均大风日数约为40天;土壤类型为栗钙土,土壤有机质含量较低;主要土地利用类型为耕地、草地、灌草地等。由于长期过度放牧和不合理的土地利用方式,该地区土壤风蚀严重。

2 材料与方法

2.1 样地设置

本试验在河北省康保县土壤风蚀综合观测场进行,综合考虑当地地形状况、土地利用方式及土地耕作方式等因素,选取地表较为平坦均一的典型翻耕农田作为试验地块。试验地块分为2种类型:一类为农田在经过翻耕后无人为干扰,具备较完整土壤结皮的地表(称作翻耕未干扰破坏地表);另一类为翻耕农田表层结皮经人为粉碎破坏后的地表(称作翻耕干扰破坏地表)。为研究翻耕农田未干扰破坏地表抗剪强度在风蚀季及风蚀事件前后的变化,分别在风蚀事件前后对样地进行抗剪强度测定,试验过程中为防止直剪试验对地表破坏影响试验结果,每次直剪试验均选择在第1次测试样点周围地表未干扰破坏的区域进行;为研究翻耕农田遭受干扰破坏地表土壤抗剪强度在风蚀季及风蚀事件前后的变化,设置另1块地表结皮被干扰破坏区域进行土壤抗剪强度直剪试验,每次试验前均对翻耕农田地表进行充分干扰破坏。通过上述试验对比研究翻耕农田未干扰破坏地表与干扰破坏地表抗剪强度在整个风蚀季的变化程度。

2.2 土壤直剪试验

河北坝上地区的土壤风蚀现象主要发生在每年

的 4—5 月,本研究于 2021 年 4—5 月在试验样地开展翻耕农田表层土壤抗剪强度原位测试。在观测期间,研究区共发生 3 次典型风蚀事件,分别发生于 2021 年 4 月 15 日、4 月 27—28 日和 5 月 4 日。4 月 15 日风蚀事件发生过程中平均风速为 12.65 m/s,最大风速为 17.63 m/s,该风蚀事件起沙持续时间长,风蚀剧烈,为 1 场强风蚀事件;4 月 27—28 日风蚀事件为 1 场弱风蚀事件,该风蚀事件发生过程中平均风速为 9.96 m/s,最大风速为 14.24 m/s;5 月 4 日风蚀事件为 1 场中等强风蚀事件,风蚀事件发生过程中平均风速为 10.67 m/s,最大风速为 14.98 m/s。

为研究翻耕农田表层土壤抗剪强度在风蚀事件前后及风蚀季的变化,分别在风蚀事件发生前、风蚀事件发生后(同为下一风蚀事件发生前)对未经干扰破坏及经干扰破坏的翻耕农田地表进行土壤抗剪强度野外原位测定。根据观测期间典型风蚀事件的发生时间分别在 2021 年 4 月 14 日、4 月 16 日、4 月 21 日、4 月 24 日、4 月 30 日、5 月 5 日,这 6 天进行翻耕农田 2 类地表土壤抗剪强度野外原位测定。本研究利用自主设计的便携式土壤抗剪强度直剪仪^[20]对表层土壤抗剪强度进行测定,在抗剪强度原位测定过程中,通过在剪切盒上分别加载 4 个不同质量砝码(0.5, 1, 1.5, 2 kg)以达到不同等级法向应力要求,对应 4 个等级法向应力分别为 5, 10, 15, 20 N, 剪切速率设置为 2.5 mm/s,在每个法向应力下,分别测试 5 个平行试验,以保证试验结果的准确性。

2.3 样品采集与处理

在每次抗剪强度原位测定试验后,采集对应样点表层 0—5 cm 土壤样品进行土壤理化性质分析,同时利用铝盒采集对应表层土壤样品,采样后对铝盒进行密封,用于测定土壤样品的含水率。对采集的土壤样品使用南京土壤仪器厂生产 SZS 型三维振筛机进行不同粒径干团聚体筛分,振筛试验样品用量为 500.00 g,筛分时间为 5 min,振筛孔径设置为 5, 2, 0.85, 0.425, 0.35, 0.25, 0.106 mm,最后分析筛分后不同粒径土壤干团聚体样品的质量,计算土壤干团聚体平均重量直径(MWD)^[21]。计算公式为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \times m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (1)$$

式中: MWD 为土壤干团聚体平均重量直径(mm); r_i 为任一粒径范围内干团聚体的平均直径(两筛分粒径 r_i 与 r_{i+1} 间粒径的平均值)(mm); m_i 为对应于 r_i 的干团聚体重量百分比。

2.4 抗剪强度数据处理

Skidmore 等^[22]的研究认为,团聚体稳定性可以定义为团聚体破碎暴露出新的表面积所需要的能量,

该能量和力与位移围成曲线下的面积有关;Hagen 等^[23]在此基础上设计了一种垂直的土壤破碎能量计来计算土壤破碎时所需要的能量。土壤剪切过程也是土壤颗粒重新排列、较大的土壤颗粒或团聚体破碎、土体变形的过程,直剪仪测得的表层土壤剪切破碎时需要的能量可表征表层土壤在遭受风力剪切破坏时的能量,本文采用直剪仪测得的表层土壤剪切破坏过程中的能量来表示土壤的抗剪切强度,以表征土壤抵抗风力侵蚀的能力。

基于上述抗剪强度数据,绘制剪切力与剪切位移关系曲线图(图 1),采用梯形法计算剪切位移在 0~27 mm 剪切变化曲线与横坐标轴(剪切位移)围成的面积,用该面积表示表层土壤受剪切破坏时的能量大小^[23],计算公式为:

$$\tau = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i + y_{i+1})(x_{i+1} - x_i)}{2} \quad (2)$$

式中: τ 为特定法向应力下的土壤抗剪强度(J); x_i 为位移($0 < x < 27$ mm); y_i 为剪切力(N)。

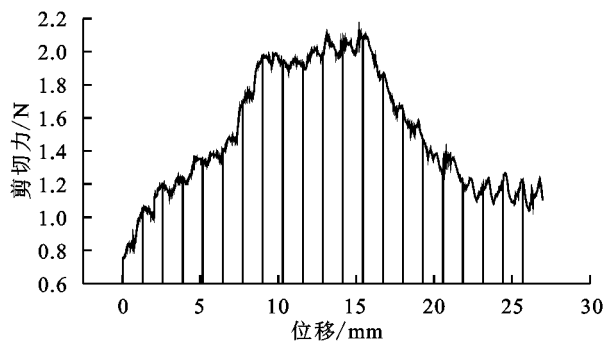


图 1 土壤剪切力—剪切位移曲线

3 结果与分析

3.1 风蚀事件前后抗剪强度变化

根据试验方法,在风蚀季对翻耕地未干扰破坏地表及干扰破坏地表 2 种类型样点分别进行 6 次抗剪强度原位测定试验,分别得到 3 次风蚀事件前后的 2 类地表在 5, 10, 15, 20 N 4 个不同等级法向应力下的表层土壤抗剪强度(图 2)。在 6 次抗剪强度野外原位测定中,2 种类型地表在不同法向应力下对应抗剪强度的变化趋势一致,在 5 N 法向应力下土壤的抗剪强度最小,随法向应力的增加,抗剪强度总体呈线性增大,20 N 法向应力下抗剪强度最大。不同类型地表土壤抗剪强度与作用在土壤表面的法向应力呈正相关,通过对 4 个法向应力与对应的抗剪强度进行线性拟合发现,除 5 月 5 日未干扰破坏的样点外,各拟合关系式的 R^2 均大于 0.8,进一步说明法向应力与抗剪强度有明显的线性关系。对于 5 月 5 日 20 N 法向应力下的抗剪强度异常情况,初步原因分析为野外试验地表情况不均一导致。

在整个风蚀季研究区共观测到 3 次较强的风蚀事件,第 1 次风蚀事件为 4 月 15 日强风蚀事件,按照

试验设计,于4月15日强风蚀事件前的4月14日和风蚀事件发生后的4月16日,分别在翻耕农田未干扰破坏与干扰破坏2类地表进行2次土壤抗剪强度原位测定试验,在4月15日强风蚀事件之后,未干扰及干扰破坏翻耕农田地表抗剪强度在4个法向应力下都发生明显增大(图2a及图2d),其中,未干扰破坏地表在5,10,15,20 N法向应力下对应抗剪强度分别增长165.01%,62.59%,31.33%,25.15%,受干扰破坏地表在4个法向应力下抗剪强度分别增长216.59%,105.32%,45.34%,44.22%。2类地表在5 N的法向应力下抗剪强度的增长率最大,在20 N法向应力下增长率最小,从整体来看,受干扰破坏地表抗剪强度的增长幅度大于未受干扰破坏地表。

第2次风蚀事件为4月27,28日弱风蚀事件,2类翻耕农田地表在经过此次风蚀事件之后抗剪强度在4个法向应力下都有变小趋势(图2b,图2e),未干扰破坏农田地表土壤在4个法向应力下的抗剪强度分别减小9.58%,36.23%,20.19%,0.16%,干扰破坏农田地表抗剪强度在5 N法向应力下增大13.09%,在10,15,20 N法向应力下抗剪强度分别减小36.19%,25.9%,36.97%。陈旭等^[24]和倪九派等^[25]研究表明,土壤结构、土壤含水率和土壤孔隙度对抗剪强度均有显著影响,尤其表层土壤含水率变化对土壤抗剪强度影响较大,土壤抗剪强度也随着含水率的上升而增大^[26],土壤抗风蚀能力随土壤水分的增加而增强。通过对试验样地地表土壤含水率的测定发现,4月24日表层土壤含水率为1.6%,4月30日表层土壤含水率为0.7%,风蚀事件前表层土壤含水率高于风蚀事件后表层土壤含水率。另外,经过4月15日的强风蚀事件,翻耕农田表面土壤颗粒粗化现象较为严重,本次风蚀事件的风速较小,只在27,28日下午部分时段发生不明显风蚀现象,风蚀程度较弱,因此出现在风蚀之后土壤抗剪强度减小的情况。

5月4日的第3次中等强度风蚀事件前后2次抗剪强度原位测试分别在4月30日和5月5日进行。由图2可知,在本次风蚀事件之后除翻耕未干扰破坏地表在20 N法向应力下抗剪强度异常外,其余抗剪强度在4个法向应力下均呈增大趋势(图2c,图2f),未受干扰破坏地表在法向应力5,10,15,20 N下抗剪强度分别增长46.21%,25.03%,23.79%,—30.25%,受到干扰破坏的地表在4个法向应力下抗剪强度分别增长21.57%,24.92%,8.99%,0.24%,除受到干扰破坏样点在5 N法向应力下的抗剪强度外,2类地表在5,10,15,20 N 4个法向应力下对应的抗剪强度增长率呈现减小的趋势,未受到干扰破坏的样点抗剪强度增大的幅度大于受到干扰破坏的样点。另外,此次风蚀事件之后抗剪强度增强

程度整体小于4月15日强风蚀事件。

3.2 风蚀季抗剪强度整体变化

根据翻耕农田未干扰破坏地表及干扰破坏地表2种类型样点分别进行的6次抗剪强度原位测定试验,得到2种类型样点表层土壤在4个不同等级法向应力下的抗剪强度在整个风蚀季的变化(图3)。总体来看,除在野外进行抗剪强度原位测定试验时,由于地表性质不均一造成部分抗剪强度测定结果存在偏差外,2类样点表层土壤在4个不同等级法向应力下的抗剪强度在整个风蚀季呈现出先增大后减小再略微增大的趋势,其中有4次异常分别为翻耕未干扰破坏样点在4月24日10 N法向应力、4月30日20 N法向应力、5月5日20 N法向应力下的抗剪强度以及翻耕干扰破坏样点在4月30日5 N法向应力下的抗剪强度,这些异常情况的出现确定为野外原位试验地表性质不均一所导致。

从整个风蚀季来看,风蚀季开始的一次强风蚀事件之后,农田表层土壤发生明显粗化,表层土壤颗粒粒度增加使得抗剪强度明显增大,当风力低于临界起动风速时,已粗化的地表无明显持续性风蚀现象,但仍有外界细粒物质在试验样地部分区域沉积,农田土壤表层的细粒物质在一定程度增加,随着细粒物质的增加,表层土壤抗剪强度逐渐减小,直到下次风蚀事件出现使土壤表层的细粒物质继续损失,使得抗剪强度再度增大。

3.3 风蚀季2类地表抗剪强度变化

为了研究风蚀季翻耕农田未干扰破坏与干扰破坏2种类型地表抗剪强度的变化规律,对整个风蚀季4个法向应力下的抗剪强度进行分析发现,在风蚀季期间随着风蚀事件的发生,翻耕农田未干扰破坏与干扰破坏2种类型地表的抗剪强度差异在逐渐缩小,并且干扰破坏的样点在整个风蚀季抗剪强度变化程度较剧烈,除5 N法向应力下对应的抗剪强度外,整个风蚀季抗剪强度中最低值出现在风蚀季的后半阶段(图4)。对比整个风蚀季2类地表在不同法向应力下抗剪强度变化幅度发现,未受干扰破坏地表在5,10,15,20 N法向应力下抗剪强度最大与最小的差值分别为16.772,17.222,14.718,27.032 J,受干扰破坏地表在5,10,15,20 N法向应力下抗剪强度最大与最小的差值分别为22.487,22.444,20.836,38.685 J。在20 N法向应力下,2类地表抗剪强度的变化幅度最大;在15 N法向应力下,抗剪强度变化幅度最小,受干扰破坏地表在4个法向应力下的抗剪强度变化幅度均大于未受干扰破坏地表抗剪强度的变化幅度。

4 讨论

4.1 风蚀季抗剪强度与风蚀抗蚀性

在当前相关研究中,关于土壤抗剪强度的测定大

多基于室内控制试验和野外短期试验,针对土壤风蚀角度的土壤抗剪强度野外长期监测研究较为匮乏,本研究选取坝上典型翻耕农田未经干扰破坏及经过干扰破坏 2 种类型地表,在 1 个风蚀季内对 2 类地表进行较长时间的观测,测定风蚀过程中土壤抗剪强度的动态变化,分析风蚀过程中土壤抗蚀性的变化,对比未干扰与干扰破坏 2 种翻耕农田地表在整个风蚀季抗剪强度的变化发现,整个风蚀季土壤抗剪强度变化与风蚀事件的发生密切相关,土壤抗蚀性在风蚀事件之后发生显著增强;在风蚀季,未受干扰破坏地表在表层土壤结皮的保护下抗剪强度整体变化较小,而失去表层土壤结皮保护受到干扰破坏的地表在整个风蚀季抗剪强度变化剧烈。地表结皮被干扰破坏后,地表土壤对于风蚀过程的响应更为敏感,由土壤风蚀造成的地表粗化现象增加土壤抗剪强度,风蚀过程中,未受干扰破坏地表的结皮在一定程度上保护地表

土壤,阻碍土壤颗粒在风蚀过程中的侵蚀与搬运,使得风蚀季后地表仍具备相对较强的抗剪强度。在风蚀季减少对翻耕地表层土壤的破坏和扰动能够使表层土壤抗剪强度趋于稳定,从而减少土壤风蚀的危害。王仁德等^[27]研究表明,在风力条件相同的情况下,翻耕土壤是免耕土壤风蚀量的 3 倍左右,并且风蚀量随着免耕年限的增加而减少,也表明较少对土壤的扰动有利于减缓土壤风蚀的程度;郭慧慧等^[28]在探讨农牧交错带不同土地利用方式对土壤风蚀的研究中也发现,采用免耕或者留茬的耕种方式,减少迎风坡土地的开垦和利用,降低地表土粒移动可以提高土壤的抗风蚀能力;李胜龙等^[29]的研究表明,在不同的耕作方式中垄作的输沙量明显高于免耕,因此可以通过免耕及地表留茬或秸秆覆盖等保护性耕作措施来减缓对土壤表层的扰动和破坏,增强表层土壤的抗剪强度与抗蚀性。

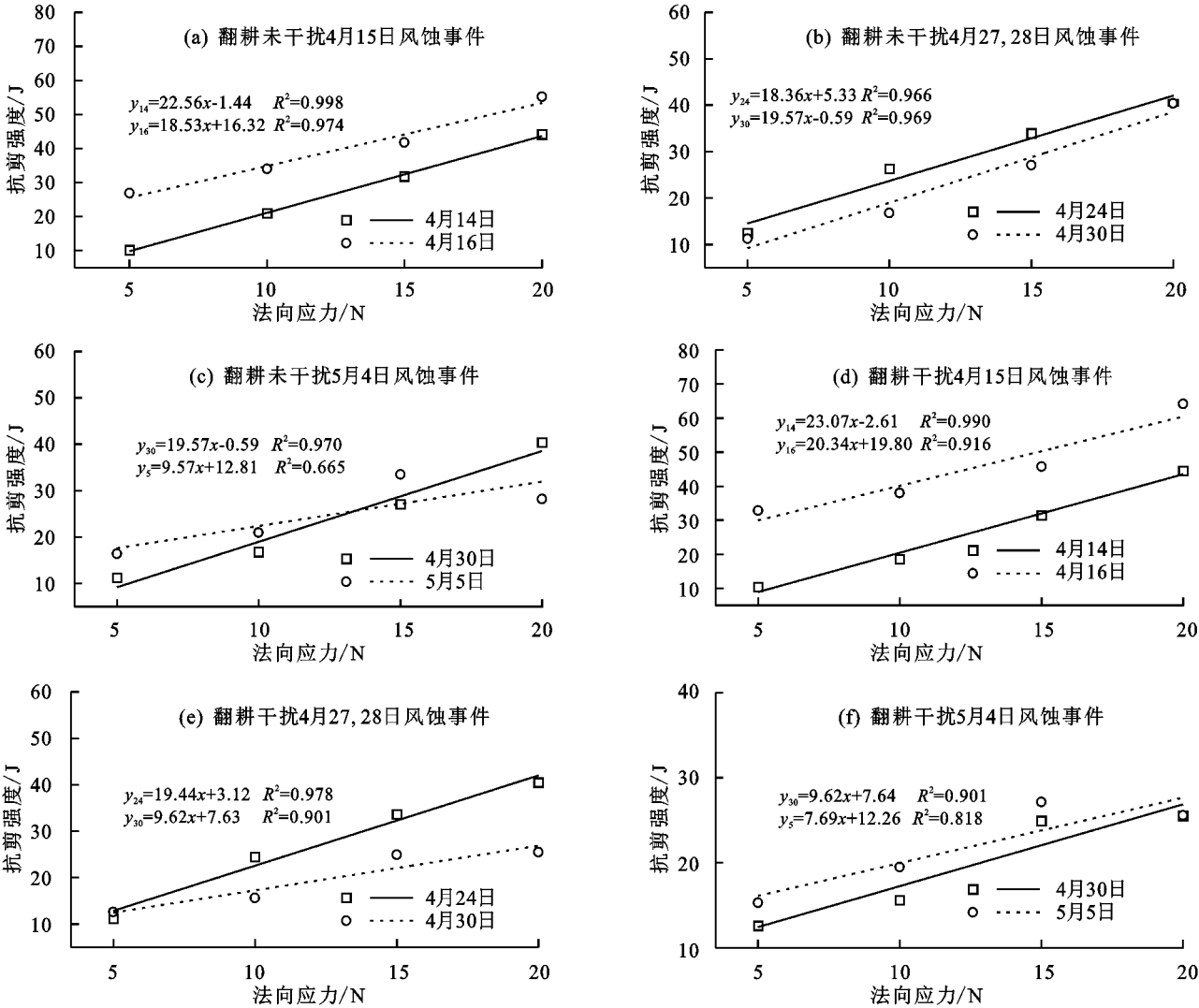


图 2 风蚀事件前后 2 类地表抗剪强度对比

在前人^[30]的研究中,利用风蚀风洞模拟试验获得不同土壤在不同风速下的风蚀速率,构建土壤抗剪

切力与土壤抗风蚀力的关系,将风蚀速率表达为与抗剪切力、风力剪切力的相关函数,建立三者之间的联

系。在野外试验中,土壤抗剪强度可以用来定量描述土壤风蚀程度的强弱,也可以作为具有明确力学意义

的土壤抗蚀性指标,但是二者定量关系仍需进一步通过理论及试验方法来确定。

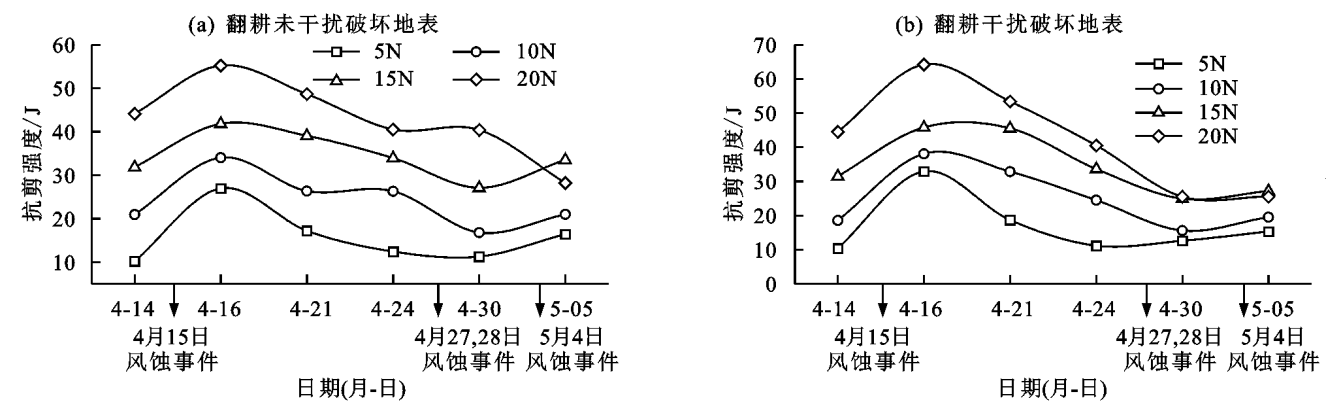


图 3 翻耕农田未干扰及干扰破坏地表土壤抗剪强度在风蚀季的变化趋势

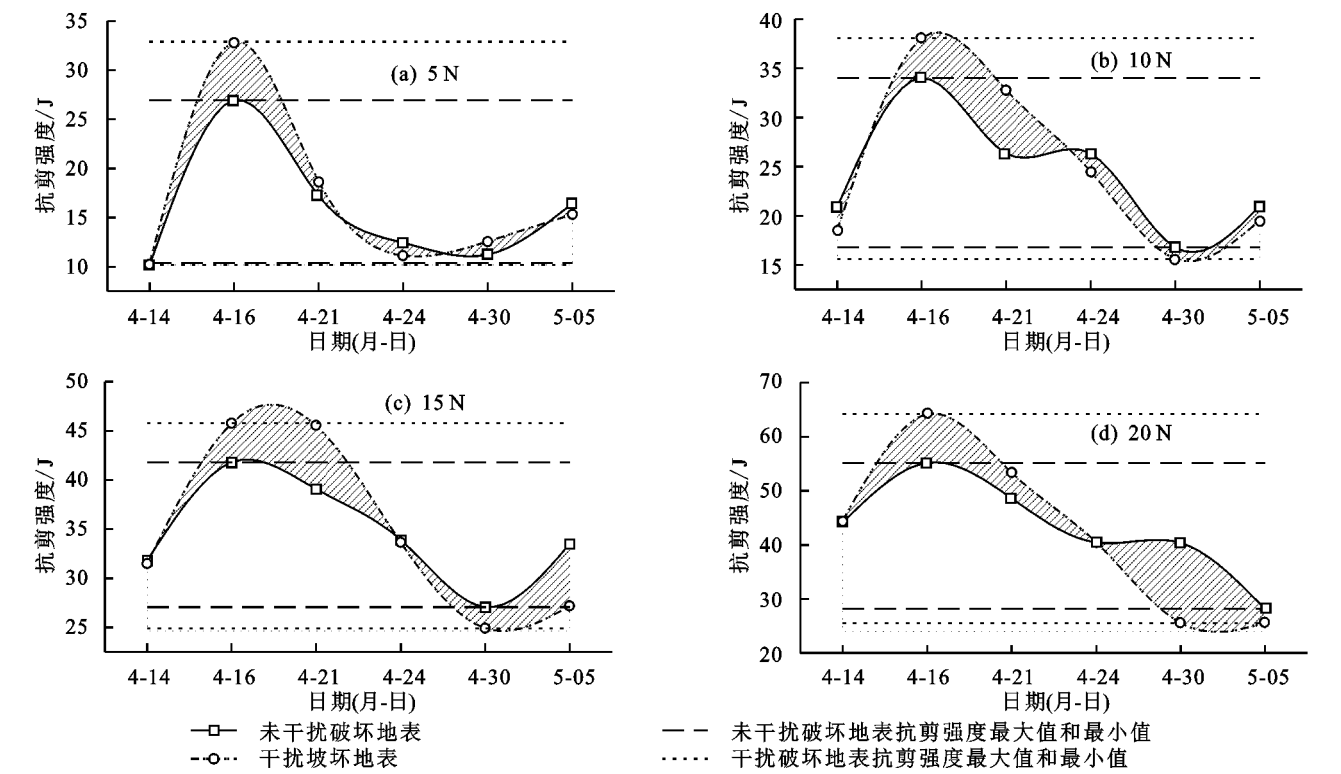


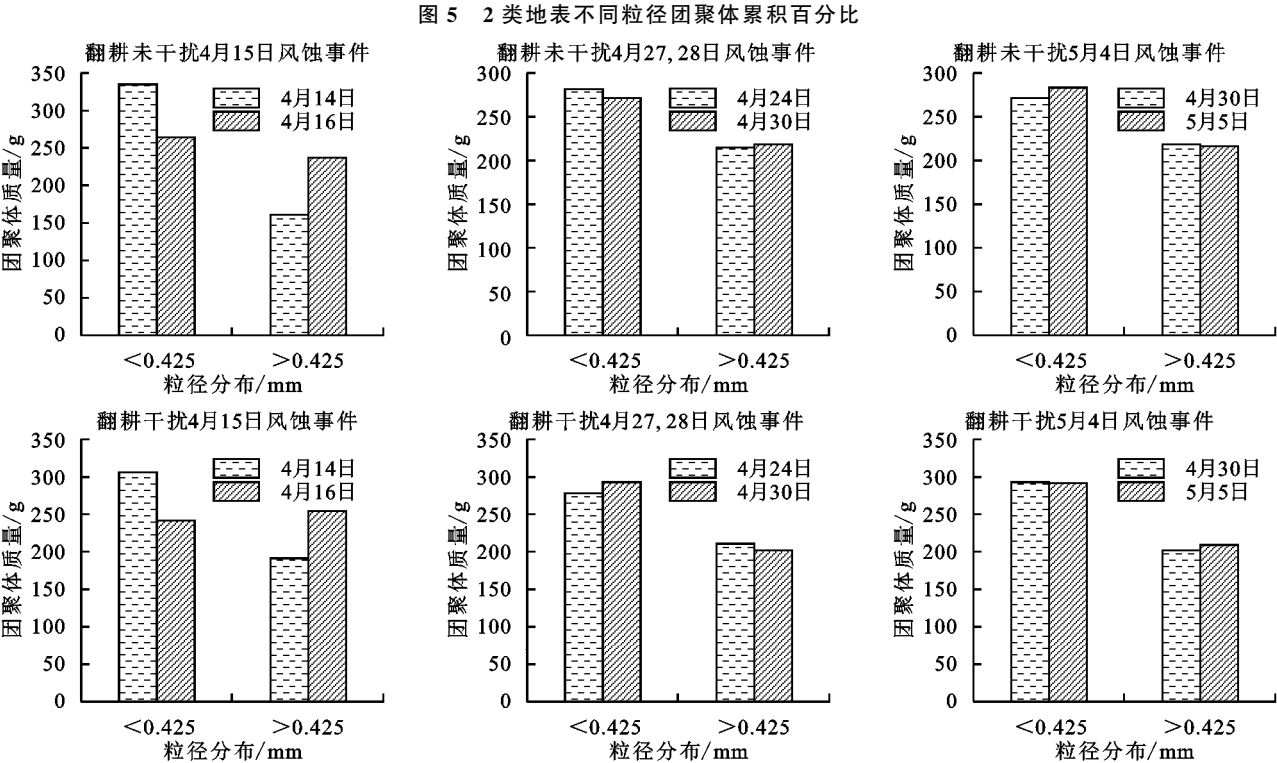
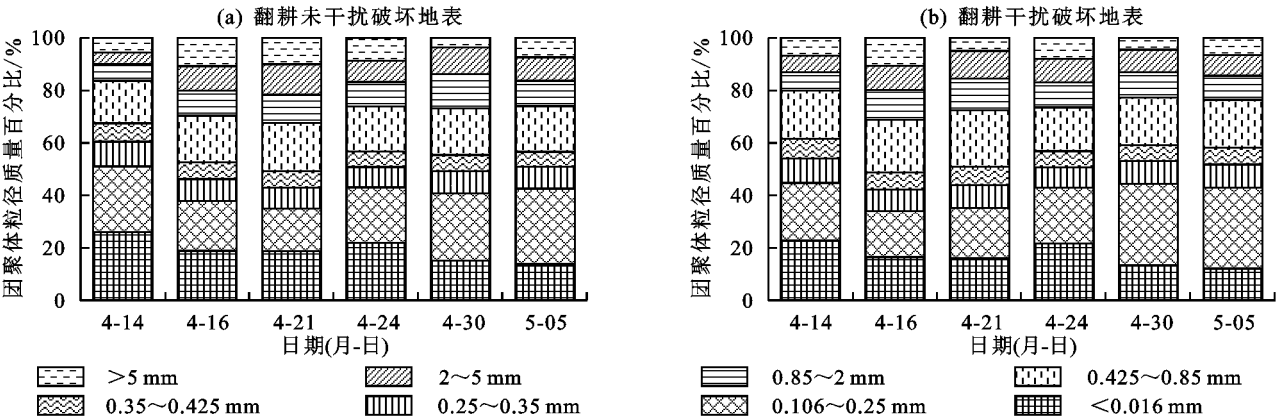
图 4 2 类地表抗剪强度在风蚀季变化趋势对比

4.2 土壤干团聚体对抗剪强度的影响

4.2.1 干团聚体粒径分布对抗剪强度的影响 土壤干团聚体粒径大小是影响土壤抗剪强度的重要因素,粗细颗粒的含量是影响土体功能的主要因素。在土壤可蚀性变化研究中,通常认为干团聚体粒径 $<0.85\text{ mm}$ 为可蚀性颗粒,可蚀性颗粒含量 $>50\%$ 的土壤具有高度的可蚀性,在风蚀事件发生过程中地表土壤颗粒粒径 $<0.85\text{ mm}$ 的颗粒明显减少,土壤的可蚀性显著增强^[31-33]。

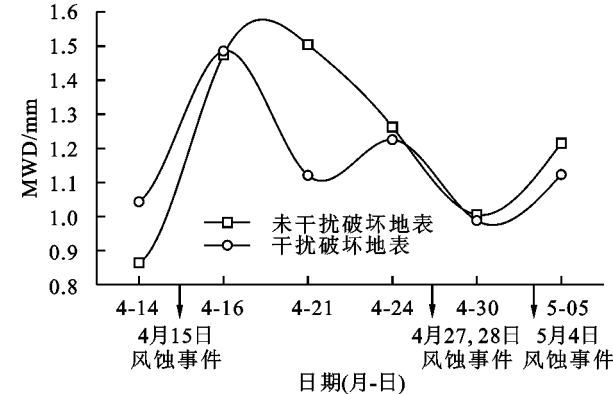
对在土壤抗剪强度原位测定试验后采集的表层土壤样品利用三维振筛进行不同粒径土壤干团聚体筛分^[34],不同粒径组土壤干团聚体质量累积百分比(图 5)表明,在 4 月 15 日强风蚀事件之后,除粒径 $>5\text{ mm}$ 的土壤干团聚体质量变多外,其余粒径组土壤干团聚体累积质量均有明显减少,但是在 4 月 27,

28 日弱风蚀事件和 5 月 4 日中等强度风蚀事件之后只有粒径 $<0.425\text{ mm}$ 的土壤干团聚体质量发生了明显减少,经过对比筛分结果(图 6)发现,以 0.425 mm 为界限,粒径 $>0.425\text{ mm}$ 及粒径 $<0.425\text{ mm}$ 部分土壤干团聚体质量变化规律显著。除未干扰破坏样点 5 月 4 日风蚀事件和干扰破坏样点 4 月 27,28 日风蚀事件外,2 类地表在 3 次风蚀事件之后粒径 $<0.425\text{ mm}$ 土壤干团聚体质量均明显减少,而粒径 $>0.425\text{ mm}$ 土壤团聚体质量显著增加,并且在 4 月 15 日和 5 月 4 日风蚀事件后抗剪强度均有明显增大,土壤抗蚀性显著增强,翻耕农田 2 类地表经过 3 次风蚀事件后均呈现明显粗化规律,土壤干团聚体粒径以 0.425 mm 为界限,粒径 $<0.425\text{ mm}$ 部分及粒径 $>0.425\text{ mm}$ 部分对土壤风蚀过程的响应均较为明显。



4.2.2 土壤干团聚体平均重量直径对抗剪强度的影响 在土壤内部不同粒径组的团聚体中,粒径较大的团聚体在土壤力学结构中起到“骨架”作用,土壤团聚体平均重量直径越大,表明土壤团聚体的团聚度高,稳定性强,土壤结构越好^[35]。通过计算土壤干团聚体平均重量直径(图 7)发现,翻耕未受干扰破坏与受到干扰破坏农田在 3 次风蚀事件之后,土壤干团聚体平均重量直径与抗剪强度的变化趋势一致,在 4 月 15 日和 5 月 4 日风蚀事件之后平均重量直径均发生增大,在 4 月 27、28 日风蚀事件之后发生减小,这与抗剪强度在 3 次风蚀事件后的变化规律一致;在整个风蚀季中,翻耕未受干扰破坏地表的变化趋势与抗剪强度在风蚀季的变化趋势一致,土壤干团聚体平均重量直径呈现出先增大再减小最后增大的趋势,其变化与每次风蚀事件密切相关,翻耕受到干扰破坏地表在整个风蚀季呈现出波动变化的规律,受干扰破坏地表与未受干扰破坏地表的差异出现在 4 月 21—24 日未发生风蚀的这段时间,

这也说明受干扰破坏地表的稳定性较差。将整个风蚀季 2 类地表土壤干团聚体平均重量直径与抗剪强度进行拟合发现,土壤干团聚体平均重量直径与抗剪强度呈正相关关系,拟合结果见图 8,除翻耕未破坏 20 N 样点和翻耕破坏 15 N 样点拟合关系式的 R^2 值小于 0.5 外,其余样点拟合关系式的 R^2 值均大于 0.5。



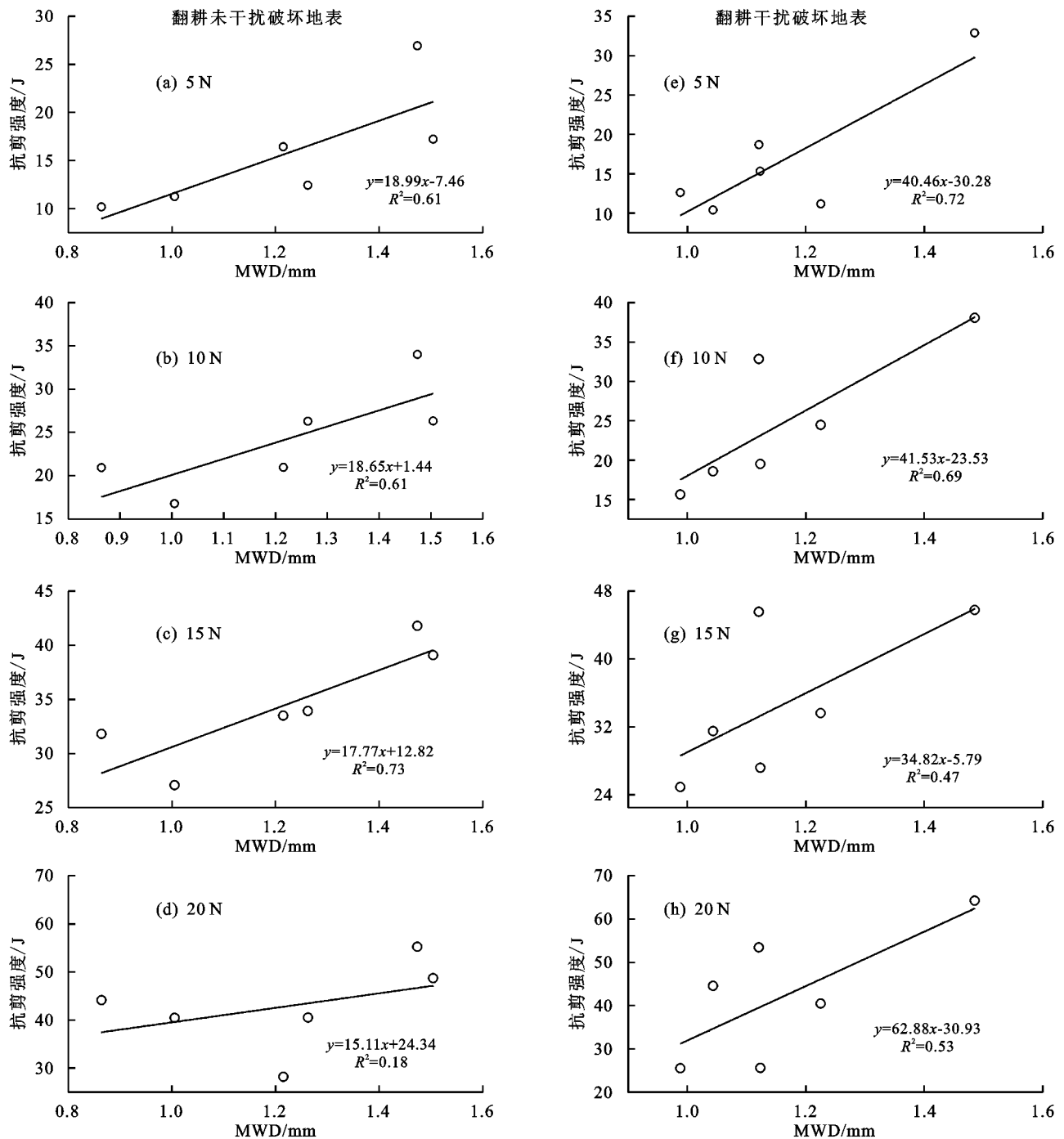


图 8 抗剪强度与土壤干团聚体平均重量直径关系

5 结论

(1)通过剪切力野外原位试验,对比分析不同法向应力的土壤抗剪强度,由小到大依次为 5,10,15,20 N。从单次风蚀事件来看,翻耕未受干扰破坏农田及翻耕受到干扰破坏农田在 3 次风蚀事件中规律一致,2 类地表在 4 月 15 日风蚀事件及 5 月 4 日风蚀事件之后抗剪强度均发生明显增大。

(2)从整个风蚀季来看,翻耕未受到干扰破坏农田及翻耕受到干扰破坏农田抗剪强度变化趋势一致,抗剪强度变化呈现出先增大再减小最后略微增大的趋势。

(3)对比未干扰及受到干扰破坏的地表,受到干扰破坏的农田地表抗剪强度对于土壤风蚀过程响应较为显著,因此,在风蚀季应采取免耕等保护性耕作措施来减少对翻耕农田地表的破坏,以增强农田表层土壤的抗蚀性,减轻土壤风蚀程度。

(4)土壤风蚀导致表层土壤细粒物质损失,表层土壤粗化,土壤风蚀后土壤抗蚀性明显增强。在每次风蚀事件后粒径 $>0.425\text{ mm}$ 土壤干团聚体质量及土壤干团聚体平均重量直径均增大,土壤抗剪强度随之增强。土壤抗剪强度可以作为具有明确力学意义的土壤抗蚀性指标,定量描述土壤抵抗风蚀能力

的强弱,但二者定量关系仍需进一步通过理论及试验方法来确定。

参考文献:

- [1] 王旭洋,郭中领,常春平,等.中国北方农牧交错带土壤风蚀时空分布[J].中国沙漠,2020,40(1):12-22.
- [2] 孙亚男,王文娟,刘婷.土壤风蚀影响因素研究[J].科技创业家,2014(6):187.
- [3] 张正偲,董治宝.土壤风蚀对表层土壤粒度特征的影响[J].干旱区资源与环境,2012,26(12):86-89.
- [4] 南岭,董治宝,肖锋军.农牧交错带农田土壤风蚀 PM₁₀ 释放特征[J].中国沙漠,2017,37(6):1079-1084.
- [5] 邹学勇,张春来,程宏,等.土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J].地球科学进展,2014,29(8):875-889.
- [6] 左小锋,王磊,郑粉莉,等.冻融循环和土壤性质对东北黑土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(2):30-35,42.
- [7] 张爱国,李锐,杨勤科.中国水蚀土壤抗剪强度研究[J].水土保持通报,2001,21(3):5-9.
- [8] 柯家明,李绍进,夏艳华.黄土抗剪强度在水蚀中表现形式的研究[J].特种结构,2005,22(2):53-55.
- [9] 赵晓光,石辉.水蚀作用下土壤抗蚀能力的表征[J].干旱区地理,2003,26(1):12-16.
- [10] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等.土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J].中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.
- [11] 张健乐,史东梅,刘义,等.土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):162-167,174.
- [12] Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust[J]. Reports on Progress in Physics,2012,75(10):e106901.
- [13] Feng G L, Sharratt B, Young F. Soil properties governing soil erosion affected by cropping systems in the U. S. Pacific Northwest [J]. Soil and Tillage Research, 2011,111(2):168-174.
- [14] 王晓飞,申向东,李晓丽.干寒区耕作性土壤基本性质及其对土壤抗蚀能力影响的研究[J].农村牧区机械化,2005(1):19-21.
- [15] 逯海叶.地表土壤抗剪强度影响因素的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
- [16] 代军,吕刚,杜昕鹏.辽西北风沙地土壤抗蚀性及其与力学性质关系[J].呼伦贝尔学院学报,2020,28(4):65-72.
- [17] 刘刚,李红丽,董智,等.黄河故道风沙区牧草控制风蚀效果的研究[J].中国草地学报,2007,29(1):61-65.
- [18] 王仁德,安晨宇,苑依笑,等.不同时间尺度下农田土壤风蚀可蚀性的变化[J].中国沙漠,2021,41(5):202-209.
- [19] 李昂,李昌明,尹卓忻,等.甘肃秦王川灌区种植豆禾混播牧草的农田生态保育效应[J].水土保持学报,2020,34(2):239-244,268.
- [20] 李旭.河北坝上土壤抗剪强度与抗风蚀性研究[D].石家庄:河北师范大学,2021.
- [21] 周虎,吕贻忠,杨志臣,李保国.保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
- [22] Skidmore E L, Powers D H. Dry soil-aggregate stability: Energy-based index[J]. Soil Science Society of America Journal,1982,46(6):1274-1279.
- [23] Hagen L J, Schroeder B, Skidmore E L. A vertical soil crushing-energy meter[J]. Transactions of the Asae, 1995,38(3):711-715.
- [24] 陈旭,苏芳莉,李海福,等.辽西沙化地区主要植被类型土壤抗剪强度研究[J].人民长江,2020,51(5):84-88.
- [25] 倪九派,高明,魏朝富,等.土壤含水率对浅层滑坡体不同层次土壤抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2009,23(6):48-50.
- [26] 陈红星,李法虎,郝仕玲,等.土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2007,23(2):21-25.
- [27] 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.
- [28] 郭慧慧,郝明德,李龙,等.农牧交错带土地利用类型对土壤风蚀的影响[J].水土保持通报,2016,36(6):53-57.
- [29] 李胜龙,李和平,林艺,等.东北地区不同耕作方式农田土壤风蚀特征[J].水土保持学报,2019,33(4):110-118.
- [30] 李继峰.筛分土抗剪强度与风蚀抗蚀性实验研究[D].北京:北京师范大学,2015.
- [31] 郝腾飞,喻邦江.粗颗粒含量对砾石土抗剪强度影响的试验研究[J].地质灾害与环境保护,2018,29(3):73-76.
- [32] 李振,李鹏.粗粒土直接剪切试验抗剪强度指标变化规律[J].防渗技术,2002,8(1):11-14,18.
- [33] 王贵荣,董晨,段钊,等.粗颗粒组份含量对中细砂抗剪强度的影响[J].西安科技大学学报,2020,40(1):24-30.
- [34] Wang R D, Guo Z L, Chang C P, et al. Quantitative estimation of farmland soil loss by wind-erosion using improved particle-size distribution comparison method (IPSDC) [J]. Aeolian Research,2015,19(Part B):163-170.
- [35] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤团聚体的组成及稳定性研究[J].水土保持学报,2009,23(5):228-231.