

黄土高原水蚀风蚀交错带坡耕地土壤风蚀特征

邓鑫欣¹, 张加琼^{1,2}, 杨明义^{1,2}, 张风宝^{1,2}, 刘章³

(1. 西北农林科技大学 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;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014030)

摘要:黄土高原水蚀风蚀交错带受风力及水力共同作用, 是世界上土壤侵蚀最严重区域之一。研究通过选取神木县六道沟流域迎风坡和背风坡 4 块坡耕地, 所选样地进行留茬和翻耕处理, 利用⁷Be 示踪技术测试表层土壤样品(0—20 mm), 估算土壤风蚀速率, 以期阐明坡面风蚀速率空间分布特征, 明确有效防治风蚀的农田耕作措施。结果表明: 迎风坡风蚀速率显著高于背风坡($p < 0.05$), 留茬可显著减少坡面风蚀速率($p < 0.05$), 迎风坡翻耕地、迎风坡留茬地、背风坡翻耕地和背风坡留茬地平均风蚀速率分别为 778.2, 388.4, 78.5, 4.7 t/(km²·a)。风蚀速率沿坡面由上而下均呈现递减趋势, 且留茬地更为显著。4 块样地风蚀速率等值线的局部形变显示了坡面的微地貌变化, 其中以留茬地更为明显且出现高侵蚀中心和沉积中心。因此, 为有效防治该区域的土壤风蚀, 建议采取秋收后留茬、春季播种前翻耕的方式, 并根据坡向和作物类型等调整留茬高度。

关键词: ⁷Be 示踪技术; 风蚀速率; 农田耕作措施; 空间分布特征; 水蚀风蚀交错带

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0001-06

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2019.03.001

Characteristics of Soil Wind Erosion on Sloping Farmland in the Water-Wind Erosion Crisscross Region on the Loess Plateau

DENG Xinxin¹, ZHANG Jiaqiong^{1,2}, YANG Mingyi^{1,2}, ZHANG Fengbao^{1,2}, LIU Zhang³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou, Inner Mongolia 014030, China)

Abstract: The wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau is one of the most serious erosion areas in the world due to the combined action of wind and water. We selected four sloping farmlands facing opposite slope aspects in the Liudaogou watershed to study the effect of tillage pattern on soil wind erosion using ⁷Be tracing approach. The selected fields remained crop stubbles or plowed after harvest. We collected surface soil samples (0—20 mm) from sloping farmlands with different management measures facing different slope aspects to estimate the rates of soil wind erosion, to delineate the spatial distribution characteristics of wind erosion rate, and to clarify effects of tillage measures on wind erosion. The results showed that wind erosion rate on windward slope was significantly greater than that on leeward slope ($p < 0.05$); stubble remaining could significantly reduce wind erosion in condition of applying the same tillage operations ($p < 0.05$); wind erosion rates of farmlands of plowed land, and stubble land located on the windward slope and the leeward slope were 778.2 t/(km²·a), 388.4 t/(km²·a), 78.5 t/(km²·a), and 4.7 t/(km²·a), respectively; wind erosion rate decreased gradually in a top-down direction along the slope, and the reduction rates in the stubble fields were more significant than that in the plowed fields. The deformation of the wind erosion rate contours showed the changes of the micro-geomorphological, especially in the stubble plots with high erosion or deposition centers. Therefore, in order to effectively control soil wind erosion in the study region, we suggested to adopt the methods of stubble remaining after autumn harvest, plow before spring sowing,

收稿日期: 2018-10-11

修回日期: 2018-11-16

资助项目: 国家自然科学基金(41401314, 41371283); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JQ4115); 中国科学院“西部之光”人才培养计划西部中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心博士科研基金

第一作者: 邓鑫欣(1994—), 男, 陕西安康人, 硕士, 研究方向土壤侵蚀。E-mail: 15829620732@163.com

通信作者: 杨明义(1970—), 男, 山东莱州人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀核素示踪技术研究。E-mail: ymyzly@163.com

and increase stubble height according to slope aspect and crop types.

Keywords: ^7Be measurement; wind erosion rate; farmland tillage pattern; spatial distribution pattern; wind-water erosion crisscross region

黄土高原水蚀风蚀交错带因地形破碎,地面物质组成及土壤侵蚀过程复杂,土地利用类型多样,地表植被覆盖度低,风蚀和水蚀交替发生,交错分布等共同作用,土壤侵蚀剧烈,是黄土高原的强烈侵蚀中心^[1]。该区域风蚀主要发生在冬春季节,发生的区域以坡耕地为主。较其他土地利用类型(林地、荒草地等),耕地地表疏松且覆盖度低,土壤风力可蚀性高^[2]。该区域土壤侵蚀研究集中于土壤水蚀方面,而对于风蚀研究十分有限,现有研究结果显示该区域坡耕地土壤风蚀和水蚀之比为 1:1.5~1:2.7^[3-4],风蚀在总侵蚀中占比较低。但是风蚀会带走表层土壤中的细颗粒,导致地表粗化,养分流失,土地生产力降低,对当地农业的可持续发展造成严重威胁^[5],同时还会对下风向区域的大气、水体、人类健康等造成危害。因此,加强对该地区的土壤风蚀研究是开展区域土壤侵蚀防治的基础。

目前,黄土高原地区各类作物 3 月底到 5 月初种植,8 月末到 10 月初收获,秋收后到次年耕种前坡耕地常用翻耕和留茬两种,农田约有 6 个月的时间处于易被侵蚀状态,尤其是 3 月、4 月份大风频发造成严重的土壤风蚀。前人的研究表明,留茬能有效削减农田风蚀^[6],且直立残茬的效果明显优于平铺松散残茬。对不同类型作物残茬,在相同的侧影盖度(silhouette area index)条件下,小麦类作物留茬风蚀防治效果最佳,玉米类作物留茬效果次之,黄豆类的作物抗蚀防治效果最差^[7]。直立残茬的侧影盖度可用作物茎秆的直径、高度和密度的乘积表示^[8],为获得较好的风蚀效果,增加留茬高度效果最为明显^[9]。因此,为有效控制风蚀可以采用作物轮作、套作、增加留茬高度等措施。对北方农牧交错区,作物秸秆通常是重要燃料和饲料来源,因而确定合理的留茬高度可以协调取暖、畜牧与风蚀防治在秸秆需求上产生的矛盾。

目前,黄土高原水蚀风蚀交错带对坡耕地的风蚀研究报道较少,且现有研究主要集中于裸露坡面风蚀速率、风蚀量和风蚀强度的估算^[10-12],而尚未见有关于坡耕地在实施不同耕作措施条件下风蚀速率空间分布的相关报道。造成该区域土壤风蚀研究薄弱的根本原因一方面是由于风蚀可在任意方向发生,搬运的空间尺度大,同时受土壤水蚀、复杂地形和地面物质组成多样等因素的影响,定量研究难度大;另一方面现行地表测量技术手段精度有限,且吹蚀和沉降

物收集设备效率普遍较差,难以对风蚀准确定量。因而难以评估不同农田管理措施对风蚀的防治效果,不利于制定科学有效的风蚀防治措施。

天然放射性核素 ^7Be 在示踪土壤风蚀上具有独特优势,尤其是短期内的土壤风蚀。 ^7Be 通过干湿沉降到达地表后^[13-15],迅速被地表土壤颗粒吸附^[16-17],加之其半衰期短仅 53.3 d,在土层中向下迁移的深度有限,其主要分布在表层 0—20 mm 的土壤中,含量随深度的增加呈指数递减^[18],这种分布特征为定量示踪短期内的土壤风蚀提供了准确、便利的方法。此外,研究区干湿季节分明,风季侵蚀性降雨稀少,几乎无水蚀发生,提供了充足的时间使得风蚀期间 ^7Be 在表层土壤中垂直分布形式得以恢复^[19],更加准确计算土壤风蚀。并且,前人的研究验证了在研究区域 ^7Be 示踪土壤风蚀的适用性^[20],为本研究的开展奠定基础。因此,本研究利用 ^7Be 在示踪短期土壤风蚀的独特优势,利用研究区域干湿季节分明的特征,研究坡耕地留茬和翻耕裸露坡耕地土壤风蚀速率及其空间分布特征,分析不同农田耕作措施下土壤风蚀防治效果,为科学制定坡耕地土壤侵蚀防治措施具有重要意义。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木县六道沟小流域(110°21′—110°23′E,38°46′—38°51′N)。六道沟小流域位于毛乌素沙地和黄土高原的过渡地带,属于典型的盖沙黄土丘陵地貌,是黄土高原水蚀风蚀交错带的比较典型的区域(图 1)。该区域地形破碎,风沙地貌和流水侵蚀地貌交错分布,主要的土地利用类型有耕地 6.2%、荒草地 24.9%、灌木地 21.7%、人工草地 33.6%、林地 5.0%以及建设用地 3.3%^[21]。主要种植作物包括玉米、谷子、马铃薯以及大豆等^[22]。年均气温 8.9℃,多年平均降水量为 422.7 mm(1957—2011 年),降水集中在 6—9 月份,平均占全年降水量的 77.4%,且多以暴雨形式出现^[23]。当地主风向为西北,次主风向为东南,东风最弱,夏季多为南风、东南风,冬春两季多为偏北风^[24]。大风日数年均 13.5 d,最长达 44 d,年均沙尘暴日数 11.5 d,最长达 22 d,其中大部分(63.0%)发生在 4 月,而该区农耕地翻耕主要集中在秋收后,导致该地区在大风时期地表裸露风蚀强烈,土壤退化严重。

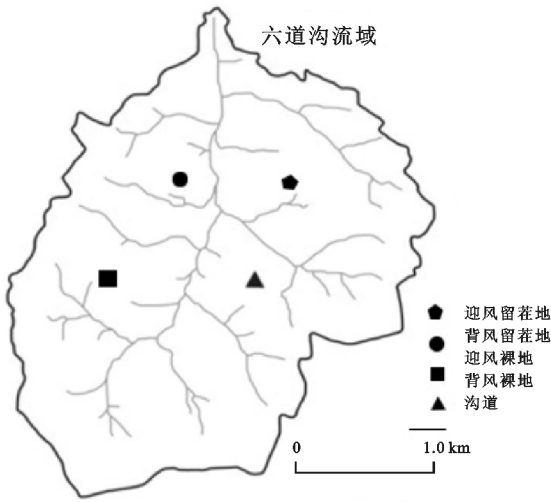


图 1 研究区示意图

1.2 样品采集与测试

1.2.1 坡耕地样品采集 研究区内由于降雨集中且多为暴雨,土壤中的可溶性养分一部分被农作物吸收,一部分被夏秋季雨水冲失掉,导致土壤肥力下降使土壤板结严重。因此,大多当地农民在秋收后翻耕土地,少部分地块余留残茬。在研究区域内选取 4 块平直,坡度类似(均约为 6°),秋收后分别留茬和翻耕的农耕地坡面,标记为 A, B, C 和 D(表 1)。2015 年 5 月风季基本结束后沿 A, B 两坡面,顺坡方向平行等间距(样线间距 6 m)布设样线三条样线,采集土壤样品。A 坡在每条样按 10 m 间距采集样品, B 坡在每条样线按 8 m 间距采集样品。2016 年 5 月风季基本结束后按照上述方法在 C, D 两坡面采集土壤样品。C 坡样线间距为 15 m, 样点间距为 8 m; D 坡样线间距为 20 m, 样点间距为 4 m。在每个采样点,使用直径 3 cm 的环形采样器呈品字形采 0—20 mm 土壤样品用于 ⁷Be 含量测定。

表 1 采样地块基本情况

地块编号	地块坡向	地块尺寸 (长×宽)/ (m×m)	处理方式
A	东南坡	85×23	玉米留茬地,留茬高度 10~15 cm,平均茬高 12 cm,平均密度为 7 株/m ²
B	西北坡	72×23	
C	东南坡	66×50	翻耕裸地
D	西北坡	36×72	

1.2.2 ⁷Be 背景值样品采集 2014 年风季前(10 月上旬),在样品采集区附近的背风平坦区域用 60 cm 的石棉瓦围取 1 个 2 m×2 m 的小区,作为 ⁷Be 背景值采样区。去除杂草翻耕平整后,围封以避免风蚀和人为影响。分别于 2015 年和 2016 年 5 月中旬风季基本结束后采集小区内分层样和全样。采样深度为 0—20 mm。全样使用

直径 3 cm 的环形采样器呈“品”字形采 5 个;层样以 20 mm 间距分 10 层采集一组。层样采集使用自行设计的上推分层采样器采集,分层采样器与 Mabit 等^[25]研究中使用的 FISC 采样器类似。

1.2.3 样品测试分析 所有样品经烘干,去除杂草和砾石等处理后过 1 mm 筛,称量,装入与标准源相同规格的柱状塑料盒中(填满),使用美国 ORTEC 公司多道低本底 γ 能谱仪在 477.6 keV 状态下测定,每个样品的测定时间约为 86 400 s,每个 ⁷Be 样品的含量都衰变校正到采样时的含量,用全峰面积法(TPA)求算 ⁷Be 的比活度。

1.3 土壤风蚀速率计算

本研究使用 Yang 等^[20]通过风洞试验建立的 ⁷Be 示踪土壤风蚀速模型估算土壤风蚀速率。Yang 等^[18]基于 Walling 等^[23]的水蚀模型,借鉴 Walling 等^[26]的 ¹³⁷Cs 估算具有分选性的土壤侵蚀速率的模型,提出了考虑颗粒分选作用的 ⁷Be 风蚀速率估算模型,该模型可以准确估算土壤风蚀速率,并在陕西省神木县六道沟流域进行野外验证^[18]。对发生风蚀的采样点,侵蚀速率 R_{Be} (kg/m²) 估算公式为:

$$R_{Be} = Ph_0 \left(\frac{A_{ref}}{A_{Be}} \right) \tag{1}$$

$$P = \left(\frac{S_e}{S_o} \right)^v \tag{2}$$

式中: R_{Be} 为土壤风蚀速率(kg/m²); S_o 为地表风蚀前土壤的原始比表面积(m²/g),使用 1—2 cm 土层的比表面积代替; S_e 为地表风蚀后土壤的比表面积(m²/g); P 为风蚀相关的颗粒校正系数; h_0 为张弛质量深度(kg/m²); A_{ref} 为研究区土壤中 ⁷Be 的背景值(Bq/m²); A_{Be} 为采样点土壤的 ⁷Be 的总活度(Bq/m²); v 为常数(风蚀取值为 0.75)。

对发生沉积的采样点,土壤风积速率为:

$$R_{Be} = \left(\frac{A_{Be} - A_{ref}}{PC_{Be,d}} \right) \tag{3}$$

根据 ⁷Be 在土壤剖面中的指数递减分布特征,沉积点的 ⁷Be 活度依据 Walling 公式计算:

$$C_{Be,e} = A_{ref} (1 - e^{-\frac{R_{Be}}{h_0}}) / R_{Be} \tag{4}$$

$$C_{Be}(x) = \frac{\int_s C_{Be} \cdot eR_{Be} ds}{\int_s R_{Be} ds} \tag{5}$$

式中: x 为质量深度(kg/m²); $C_{Be}(x)$ 为 x 处的 ⁷Be 活度(Bq/kg); $C_{Be}(0)$ 为地表($x=0$)的 ⁷Be 浓度(Bq/kg)。

2 结果与分析

2.1 ⁷Be 背景值及其剖面分布

⁷Be 背景值是估算土壤风蚀量的基础,而 ⁷Be 在土壤表层的分布是利用 ⁷Be 示踪土壤侵蚀的关键。

在计算表层土壤中 ^7Be 浓度随深度变化趋势时,为得到较精确的结果,采用质量深度(单位面积内的土壤质量)代替深度,因为在样品采集过程中面积较深度更容易控制。背景值采样区 ^7Be 的土壤剖面分布显示 ^7Be 含量在土壤表层0—2 mm含量最高且随采样

深度的增加在土壤中呈指数递减趋势(图2)。该结果与前人研究结果一致^[26-27]。2015年和2016年 ^7Be 背景值分别为203.80,246.66 Bq/m^2 。此外,表征 ^7Be 土壤剖面分布形式的主要参数张弛质量深度(h_0)在2015年、2016年的 h_0 分别为2.45,3.14 kg/m^2 。

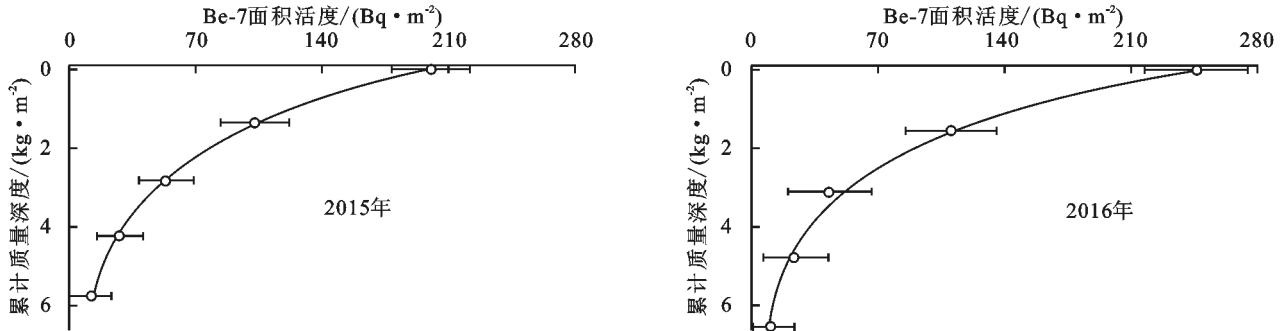


图2 2015年和2016年风季背景值小区 ^7Be 的剖面分布特征

2.2 坡面风蚀速率及其空间分布特征

依据 ^7Be 活度的坡面分布,利用风蚀速率估算模型计算结果绘制了风蚀速率等值线图。整体上看4个坡面上部风蚀速率等值线均较平直,风蚀速率呈现出从坡上至坡下逐渐减少的趋势,地块边缘有沉积现象,留茬地风蚀速率的减缓趋势要明显高于翻耕地。无论坡向,留茬地出现等值线闭合的高侵蚀中心和沉积中心(图3)。前人对裸露坡面的研究结果显示,风

蚀等值线发生形变的主要原因是地表微地貌变化^[4,11-12]。本研究中留茬地风蚀速率等值线形变较裸地更大,表明作物残茬有进一步改变地表微地貌,进而改变风蚀速率空间分布的作用。对迎风坡翻耕裸地,由于地表没有任何覆盖,风蚀速率等值线图能更为直观地展示可蚀性风的作用效果。风蚀速率等值线与坡向基本垂直表明当地主导风向为北风,与前人所得结论相同^[10]。

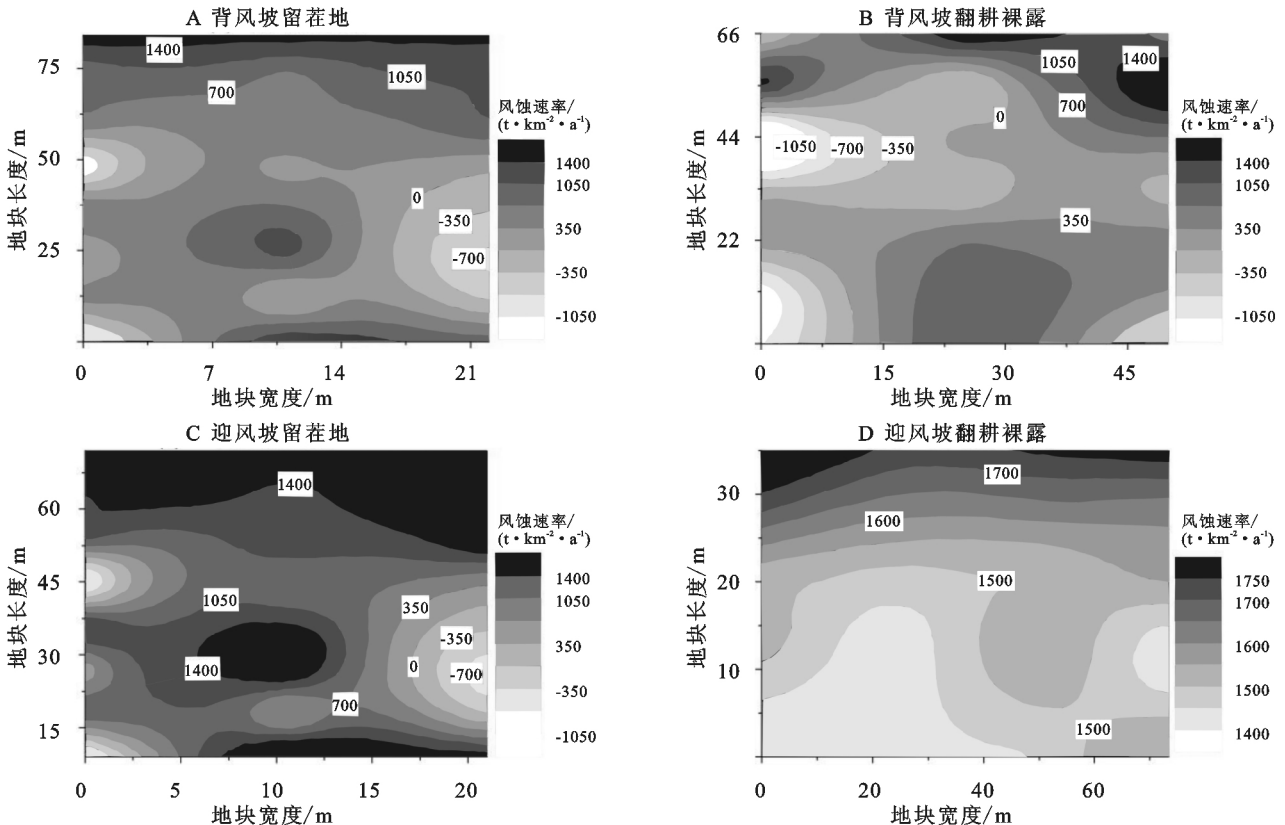


图3 不同管理措施及坡向下风蚀速率等值线(坡度均约为 6°)

本研究坡耕地的风蚀速率总体范围为-1 399.5~1 765.4 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,其平均值为312.43 $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ (表

2)。然而,不同坡向、耕作方式条件下,土壤风蚀速率均存在巨大差异。在坡向相同条件下,留茬可显著减少坡

面风蚀速率($p < 0.05$),在迎风坡,留茬地比翻耕地减小了 50.1% 的风蚀量,在背风坡其值降低更为明显,高达 15.7 倍(表 2)。在耕作方式相同条件下,迎风坡风蚀速率显著高于背风坡($p < 0.05$)。无论采用何种耕作措施,背风坡的风蚀速率均远远小于迎风坡面。可见,在研究区采取保护性耕作措施,尤其是在迎风坡面,对有效控制土壤风蚀十分必要。

表 2 坡向及耕作方式对坡耕地土壤风蚀的影响

坡向	耕作方式	土壤风蚀速率/($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)		
		最大值	最小值	平均值
背风坡	翻耕	1765.4	-1250.6	78.5
背风坡	留茬	1587.5	-1399.5	4.7
迎风坡	翻耕	1758.0	-1307.5	778.2
迎风坡	留茬	1547.9	-1015.4	388.3

3 讨论

农田土壤风蚀防治主要利用某些因素的有利性及可控性,使农田土壤风蚀降低到最小程度。许多学者^[3-11,28-29]从这一角度出发,进行了大量的野外观测及风洞试验研究,结果表明保护性耕作措施可以有效降低农田土壤风蚀。现行的保护性耕作措施中,留茬是一种有效且成本较低的风蚀防治手段,因而在农耕地,尤其是生态环境脆弱的区域被广泛应用。本研究结果表明,在任何坡向条件下,留茬均能显著减小土壤风蚀($p < 0.05$),在迎风坡,留茬地的风蚀速率仅为裸地的一半;而在背风坡条件下,由于避开了主风向大风对坡面的直接吹蚀,加之留茬对表层土壤的防护,而其余次风向风力不足难以对留茬坡面产生较大侵蚀,因此风蚀速率的影响最为显著,较背风坡面翻耕地风蚀速率减少了 15.7 倍。可见,无论坡面坡向,留茬均可以通过地上部分削减近地表风力,加之地下根系固结土壤,增加土壤内部的凝聚力,从而能增加土壤本身抵抗风蚀的能力,降低坡面风蚀^[28-29]。

在相同坡向条件下,与裸露坡面相比,留茬坡面风蚀速率等值线均出现明显变形,很多地方出现等值线闭合区域,且闭合区域风蚀速率较高。此外,留茬也引起坡面两侧出现少量的沉积。由此可见,与裸露坡面相比,留茬在降低近地表风速的同时也能改变坡面近地表风的分布,增加坡面风蚀速率空间分布的复杂性,即既存在吹蚀又存在沉积。留茬可能导致在坡面某些部位形成涡流从而改变风蚀速率。因此,在风蚀水蚀交错带农田管理过程中应该套种不同种类的作物以提高作物残茬密度,从而减少风蚀速率,保护农田的肥力。对翻耕裸露耕地,迎风面坡翻耕地风蚀

速率比背风坡高且等值线变形程度较小,从坡上到坡下风蚀速率呈递减趋势,整个坡面无沉积出现。其主要受地形的影响,迎风坡在主风向(北风及西北风)的影响下,风蚀剧烈,风蚀速率空间分布变异较小,等值线变形较小;而背风坡气流扩散导致风速减小并形成涡流,流场分布复杂,风蚀速率空间分布变异较大^[30]。该结果表明,留茬虽能降低坡面总风蚀速率,但增加了坡面风蚀速率空间分布的复杂性,现行所采用的留茬方式未能改善坡面上部风蚀速率较大的现象,反而使得坡面下部出现与坡面顶部相似风蚀速率较高的情况。可见,在水蚀风蚀交错带利用坡耕地留茬方式来防治风蚀时,风蚀速率空间分布的复杂性也是不可忽略的,尤其需注重坡面上部及下部的多重防护。此外,在相同耕作措施下,背风坡的风蚀量均远远小于迎风坡面,即使在留茬条件下也不能弱化坡面对土壤风蚀的影响。因此,在研究区域采取保护性耕作措施,对有效控制土壤风蚀十分必要,尤其是在背风坡面留茬的效果最显著。基于研究区域大风频发,沙尘活动最活跃的时节主要集中在 4 月,因而,无论在迎风坡还是背风坡的区域内,采取秋收后先不翻耕尽量留茬,待农地播种时(一般为 5 月初)再进行翻耕。另外为获得较好的风蚀控制效果,建议农耕地选在背风坡面较好,同时考虑不同作物残茬的特性,尤其在风蚀较严重的迎风坡面,取小麦种植为主或采取小麦与玉米间作的方式。

4 结论

利用⁷Be 示踪技术在黄土高原水蚀风蚀交错带研究了位于不同坡向坡面坡耕地在采取秋耕裸露和秋耕留茬两种耕作条件下的风蚀速率及其空间分布特征。结果显示,同一坡向条件下留茬可以明显减小土壤风蚀速率;相同管理方式下,迎风坡坡面风蚀速率高于背风坡,坡面上部风蚀速率均较严重。风蚀速率等值线图可用于分析风蚀速率的空间分布特征。留茬坡面风蚀速率分布变化较翻耕裸露坡面大。此外,与裸露地坡面相比,留茬坡面两侧出现沉积,而在迎风坡条件下无沉积出现。建议秋收后先不要翻耕尽量留茬,待风季后进行耕种时再进行翻耕,以有效控制坡耕地土壤风蚀。

参考文献:

- [1] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. 中国水土保持, 2000(11): 13-14.
- [2] 岳德鹏, 刘永兵, 臧润国, et al. 北京市永定河沙地不同

- 土地利用类型风蚀规律研究[J]. 林业科学, 2005, 41(4):62-66.
- [3] Tuo D F, Xu M X, Gao G Y. Relative contributions of wind and water erosion to total soil loss and its effect on soil properties in sloping croplands of the Chinese Loess Plateau[J]. *Sci. Total Environ.*, 2018, 633:1032-1040.
- [4] Zhang J Q, Yang M Y, Deng X X, et al. Beryllium-7 measurements of wind erosion on sloping fields in the wind-water erosion crisscross region on the Chinese Loess Plateau [J]. *Sci. Total Environ.*, 2018, 615:240-252.
- [5] 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 春季裸露沙质农田土壤风蚀量动态与变异特征[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(1):29-32.
- [6] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 免耕条件下农田休闲期直立作物残茬对土壤风蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(4):66-71.
- [7] 张加琼. 农田残余物吹失及其对土壤风蚀的影响研究[D]. 北京:北京师范大学, 2013.
- [8] Hagen L J. Crop residue effects on aerodynamic processes and wind erosion[J]. *Theor Appl. Climatol.*, 1996, 54(1/2):39-46.
- [9] 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8):156-159.
- [10] 张平仓, 唐克丽. 六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997(2):32-40.
- [11] Zhang J Q, Yang M Y, Sun X J, et al. Estimation of wind and water erosion based on slope aspect sin the crisscross region of the Chinese Loess Plateau[J]. *J. Soils Sediments*, 2018, 18:1620-1631.
- [12] 刘章, 杨明义, 张加琼. 黄土高原水蚀风蚀交错带耕地土壤风蚀速率空间分布[J]. *科学通报*, 2016, 61(Z1):511-517.
- [13] Azahra M, Camacho-Garcia A. Seasonal ^7Be concentrations in near-surface air of Granada in the period 1993—2001[J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 2003, 59:159-164.
- [14] 朱厚玲, 汤洁, 郑向东. 天然放射性核素铍-7 和铅-210 在大气示踪研究中的应用[J]. *气象科技*, 2003, 31(3):131-135.
- [15] Blake W H, Walling D E, He Q. Fallout beryllium-7 as a tracer in soil erosion investigations (in Chinese) [J]. *Appl. Radiat. Isot.*, 1999, 51:599-605.
- [16] 张风宝, 杨明义, 刘普灵, 等. ^7Be 在生态系统中的行为研究进展[J]. *核农学报*, 2006, 20(5):444-448.
- [17] Akata N, Kawabata H, Hasegawa H, et al. Total deposition velocities and scavenging ratios of ^7Be and ^{210}Pb at Rokkasho, Japan [J]. *J. Radionanal Nucl. Chem.*, 2008, 277:347-355.
- [18] Yang M Y, Walling D E, Tian J L, et al. Partitioning the contributions of sheet and rill erosion using Beryllium-7 and Cesium-137 [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2006, 70:1579-1590.
- [19] Zhang F, Zhang B, Yang M. Beryllium-7 atmospheric deposition and soil inventory on the northern Loess Plateau of China[J]. *Atmos Environ.*, 2013, 77:178-184.
- [20] Yang M Y, Walling D E, Sun X J, et al. A wind tunnel experiment to experiment to explore the feasibility of using beryllium-7 measurements to estimate soil loss by wind erosion[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2013, 114:81-93.
- [21] 刘春利, 邵明安. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11):2400-2407.
- [22] 黄占斌, 张小卫. 神木试区作物生产力的综合调查分析[J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(神木水蚀风蚀交错带生态环境整治技术及试验示范研究论文集)*, 1993(2):98-105.
- [23] 吴胜勇. 神木县近 55 年气候特征及变化分析[J]. *陕西气象*, 2013(2):20-23.
- [24] 李勉, 李占斌, 刘普灵, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带土壤侵蚀坡向分异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1):63-65, 99.
- [25] Mabit L, Meusburger K, Iurian A R, et al. Sampling soil and sediment depth profiles at a fine resolution with a new device for determining physical, chemical and biological properties; the Fine Increment Soil Collector (FISC) [J]. *J. Soils Sediments*, 2014, 14:630-636.
- [26] Walling D E, He Q P, Blake W. Use of ^7Be and ^{137}Cs measurement to document short and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land[J]. *Water Resour. Res.*, 1999, 35:3865-3874.
- [27] 张风宝, 杨明义, 王光谦. 坡耕地小区坡面不同坡段侵蚀泥沙贡献率的 ^7Be 示踪研究[J]. *泥沙研究*, 2011(1):38-44.
- [28] 赵沛义, 妥德宝, 李焕春, 等. 带田残茬带宽度及高度对土壤风蚀模数影响的风洞试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11):206-210.
- [29] 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.
- [30] 邢恩德, 马少薇, 郭建英, 等. 植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(6):331-334.