

我国北方风蚀区冬油菜抗风蚀效果

王学芳^{1,2}, 孙万仓^{1,*}, 李孝泽³, 武军艳¹, 刘红霞¹, 曾潮武¹, 蒲媛媛¹,
张鹏飞¹, 张俊杰¹

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 730070; 2. 甘肃农业职业技术学院, 甘肃 730020;
3. 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要:河西走廊地区属我国北方风蚀区, 通过对河西走廊冬油菜、冬小麦、麦茬和春播等 4 种主要农田地表类型(处理)进行风洞模拟实验, 比较各个处理的抗风蚀效果。结果表明: 冬油菜、冬小麦、麦茬和春播 4 种处理地表的粗糙度分别为 4.2、4.1、3.9 和 0.7; 起动风速分别为 14、13、12 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 平均风蚀模数分别为 22.3、23.3、42.5 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 543.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 输沙率分别为 0.1、0.1、0.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 23.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。依据粗糙度、起动风速、风蚀模数和输沙率评判, 4 种主要地表类型的抗风蚀效果依次为, 冬油菜 > 冬小麦 > 麦茬 > 春播最差。因此, 推广冬油菜、冬小麦等越冬作物的种植是解决我国北方风蚀区农田土壤风蚀、土地沙漠化以及根治沙尘暴尘源的有效途径和措施。

关键词:冬油菜; 风洞试验; 农田风蚀

文章编号: 1000-0933(2009)12-6572-06 中图分类号: S314, S565.4 文献标识码: A

Wind erosion-resistance of fields planted with winter rapeseed in the wind erosion region of Northern China

WANG Xue-Fang^{1,2}, SUN Wan-Cang^{1,*}, LI Xiao-Ze³, WU Jun-Yan¹, LIU Hong-Xia¹, ZENG Chao-Wu¹, PU Yuan-Yuan¹, ZHANG Peng-Fei¹, ZHANG Jun-Jie¹

1 Agricultural College of Gansu Agricultural University, Gansu 730070, China

2 Gansu Agricultural Technology College, Gansu 730020, China

3 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6572 ~ 6577.

Abstract: Wind erosion is very severe in some regions of Northern China. This study was conducted to determine wind-resistance of fields planted with winter rapeseed using a simulated wind tunnel experiment. Treatments included four typical farmland surfaces, i. e., winter rapeseed, winter wheat, wheat stubble without crop, and spring seeding of rapeseed; all being in Hexi Corridor, Northern China. The results showed that the degrees of roughness for winter rapeseed, winter wheat, wheat stubble and spring seeding were 4.2, 4.1, 3.9, and 0.7, respectively; starting wind speeds were 14, 13, 12, and 6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively; mean values of modulus of wind erosion were 22.3, 23.3, 42.5, and 543.6 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, respectively; and the rates of transportation were 0.1, 0.1, 0.2, and 23.3 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$, respectively. Furthermore, by that the roughness and the starting wind speed change from bigger to little, and that the modulus values of wind erosion and rates of transportation change from little to bigger, Based on these four parameters described above, the wind erosion-resistance of these four farmland surfaces can be ranked in order of: winter rapeseed > winter wheat > wheat stubble >

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2007BAD52B08); 国家科技部农业科技成果转化资助项目(2008GB2G100322); 国家 863 计划资助项目(2009AA101105); 农业部公益性行为(农业)科研专项经费资助项目(200903002-04)

收稿日期: 2008-08-05; 修订日期: 2009-04-08

致谢:中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室董治宝、吴奇俊、赵爱国、张正德、李宏、李芳等完成风洞实验, 特表谢忱。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangcangsun@yahoo.com.cn

spring seeding. Our results suggest that in order to reduce soil wind erosion, desertification and the sources of sand and dust storms, in the windy regions of Northern China, one should firstly adapt those crops living through the winter periods, including winter rapeseed and winter wheat, especially winter rapeseed; and secondly one should decrease the area of spring seeding as much as possible; and thirdly spread wheat stubble area to the areas where spring wheat has been traditionally planted using tillage practices.

Key Words: winter rapeseed; wind tunnel experiment; soil wind erosion; *Brassica rapa*

我国北方风蚀区主要包括新疆、宁夏、青海、甘肃、陕西、内蒙古等,一般春季干旱多风,致使浮尘、扬沙、沙尘暴等灾害频繁发生且强度增大,导致农田土壤的风蚀沙化加剧。据统计^[1],我国风蚀面积为 400.1 万 km²,其中重度风蚀沙化面积 100.3 万 km²。依照联合国风蚀沙化损失评估^[2],我国由此丧失的可利用土地为 1.04 万 km²/a,仅此造成的经济损失高达 35.8 亿元/a。农业部发布报告认为^[3],我国出现沙尘暴的主要尘源来自农田。因此,农田土壤风蚀、沙化问题为人们所广泛关注。本研究对以河西走廊为代表的我国北方风蚀区冬油菜、冬小麦、麦茬和春播等 4 种主要农田地表类型(处理)的风蚀发生情况进行分析,对各个处理的土壤风蚀原因进行量化比较,以阐明冬油菜等处理防止农田土壤风蚀的效果,为作物结构调整及发展冬油菜生产提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计及取样

试验设在甘肃武威凉州黄羊镇甘肃农业大学教学试验场,该区位于河西走廊的东端,是我国西北旱寒区的典型代表,年均气温 7.8℃,春季干旱少雨,蒸发量是降雨量的 12 倍;全年大于 5 级的起沙风速日数超过 200 d,大于 8 级的大风日数一般为 30~80 d。

试验设冬油菜、冬小麦、麦茬覆盖和春播 4 个处理:(1)冬油菜覆盖,2006 年春小麦收获后,耕翻土壤,2006 年 8 月下旬播种冬油菜陇油 6 号,2007 年 3 月返青;(2)冬小麦覆盖,2006 年春小麦收获后,耕翻土壤,2006 年 9 月上旬播种冬小麦矮脚 7 号,2007 年 3 月返青;(3)麦茬覆盖,2006 年春小麦收获后的留茬高约 10 cm。以上 3 种通称为覆盖处理。(4)春播,2006 年春小麦收获后,耕翻土壤,冬灌,2007 年 3 月旋耕机旋耕后,3 月下旬播种春小麦。

2007 年 4 月 2 日,在不破坏地表结构的情况下,每个处理用土样箱量取体积为 30 cm×20 cm×20 cm 的土样,入箱后用塑料薄膜包扎带回进行模拟实验。并在现场进行不同处理土壤含水量和覆盖度测定。

1.2 风洞试验

在中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室风洞实验室进行。风洞全长 37.78 m,试验段长 16.23 m,矩形横断面积 1 m×0.6 m,四壁平滑,由多层胶合板和玻璃窗构成。风洞的风速从 2~40 m·s⁻¹连续可调(紊乱强度在 0.4% 以下),采用毕托管和测微压力计测量风速。

样箱位于实验段入口下风向 12.06 m 处,样箱表面与风洞底部齐平。以油菜植株高度 20 cm 为水平方向的设点距离,分别于样箱中心点处及其前 10、30、50 cm 和 70 cm 及后 10、30 cm 和 50 cm 8 个点处放置多路风速廓线仪测定垂直于地面 0.4、0.6、1.2、2.5、5 cm 和 8 cm 高处的风速值;试验风速分别为 10、14、18 m·s⁻¹和 22 m·s⁻¹的净风风速下吹蚀 10 min,不设重复,并对 0~2、2~4、4~6、6~8、8~10、10~12、12~14、14~16、16~18 cm 和 18~20 cm 高处的风蚀量用 WITSEG 集沙仪收集。风蚀量用感量为 10⁻⁴ g 的电子天平对风蚀前后的样箱称重并计算所得。

2 结果与分析

2.1 不同处理对起动风速的影响

沙土颗粒从风中获取其运动的动量后才能运动,因此,当风力逐渐增大到某一临界值时,地表沙土颗粒开

始运动,这个使沙土颗粒开始运动的临界风速为起动风速^[4]。它与地表颗粒物的粒径大小、含水量的高低和植被覆盖度大小等成正比关系^[5-7]。在相同的实验和土壤条件下,冬油菜的起动风速最大,为 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其次是冬小麦和麦茬,分别为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,春播处理起动风速最小,仅为 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验中当风速超过 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,明显观察到春播处理形成许多风蚀沟,产生土壤风蚀,并在空气中形成浮尘、扬沙等沙尘现象。而冬小麦在 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、麦茬在 $13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、冬油菜达 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上才有可能发生土壤风蚀。

2.2 不同处理对地表粗糙度的影响

不同处理下垫面上空气动力学的粗糙度(Z_0)指影响地表风速和土壤风蚀强度的植被及地表特征等因素的总和,与植被覆盖度、植物高度及植物本身的特征有关^[5-7]。试验结果:冬油菜地表的覆盖度为 95%、粗糙度达 4.08、覆盖物的量为 252.5 g m^{-2} 、最大吸水重 1226.3 g m^{-2} 、最大含水重 973.8 g m^{-2} ,均居最高;麦茬分别为 87.4%、3.92、 239.1 g m^{-2} 、 879.5 g m^{-2} 、 640.4 g m^{-2} ;冬小麦各项指标分别为 57.2%、4.1、 4.2 g m^{-2} 、 17.0 g m^{-2} 、 12.8 g m^{-2} 均较低;春播处理各项指标均为 0。可见,冬油菜等地表覆盖处理的粗糙度等均较大,即 0 风速面几何高度比春播地升高约 3 个单位,使贴地层风速降低为零。同时,大量的覆盖物返田并可接纳雨雪,保水保肥(表 1)。

表 1 不同处理地表的覆盖效果
Table 1 Effect of coverage in different Treatments

处理 Treatments	覆盖度 Coverage degree (%)	粗糙度 Roughness Z_0	覆盖物重量 Coverage weight ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	最大吸水重 Max water absorption ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	含水量 Max water capacity ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
冬油菜 Winter rapeseed	95.0	4.2	252.5	1226.3	973.8
冬小麦 Winter wheat	57.2	4.1	4.2	17.0	12.8
麦茬 Wheat stubble	87.4	3.9	239.1	879.5	640.4
春播型 Spring seeding	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0

为进一步探讨起动风速与地表粗糙度的关系,利用非线性回归模型对不同处理的起动风速(U_t)与地表粗糙度(Z_0)进行拟合,二者之间存在显著的正相关关系, $R^2=0.978$, $U_t=1.2e^{0.33Z_0}$,见图 2。

2.3 不同处理对贴地层风速的影响

风速流场是研究不同处理贴地层风的特性及其空间变化的主要指标^[5,8,9]。在 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下 25cm 高度内不同处理对其迎风向前 70cm、中心 0 和背风向后 -50cm范围内空间风速的影响。其中,贴地层 4 mm 高处冬油菜、麦茬和冬小麦覆盖的风速分别为 3.5、4.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 4.3 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而春播处理可达 10.1 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。不同处理对其后即背风向低于起动风速的垂直高度来看,冬油菜最高达 8cm、冬小麦 3cm、麦茬为 2cm,春播最低为 0;从降低低于起动风速的水平范围来看,冬油菜为 80cm(-50 ~ 30cm)、冬小麦为 52cm(-50 ~ 2cm),麦茬为 70cm(-50 ~ 20cm),春播为 0(图 2)。可见,冬油菜降低风速的空间范围最大,并对其后较大范围仍有进一步降低风速的影响,因而防止土壤风蚀的效果最好。其次是冬小麦,再次是麦茬,春播最差。

2.4 不同处理对输沙率和风沙流结构的影响

风沙流即挟沙风,风沙流在沙漠形成、沙漠化土地的出现及发展、风沙危害中起着重要的作用。输沙率是单位时间单位面积的风蚀搬运量。不同处理的输沙率随高度的变化形成特有的风沙流结构,是空气与地表两者相互作用的结果^[5]。在贴地层 20 cm 高度内,春播处理的输沙率平均为 $23.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$,分别是冬油菜、

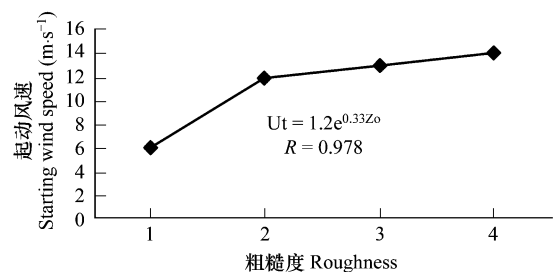
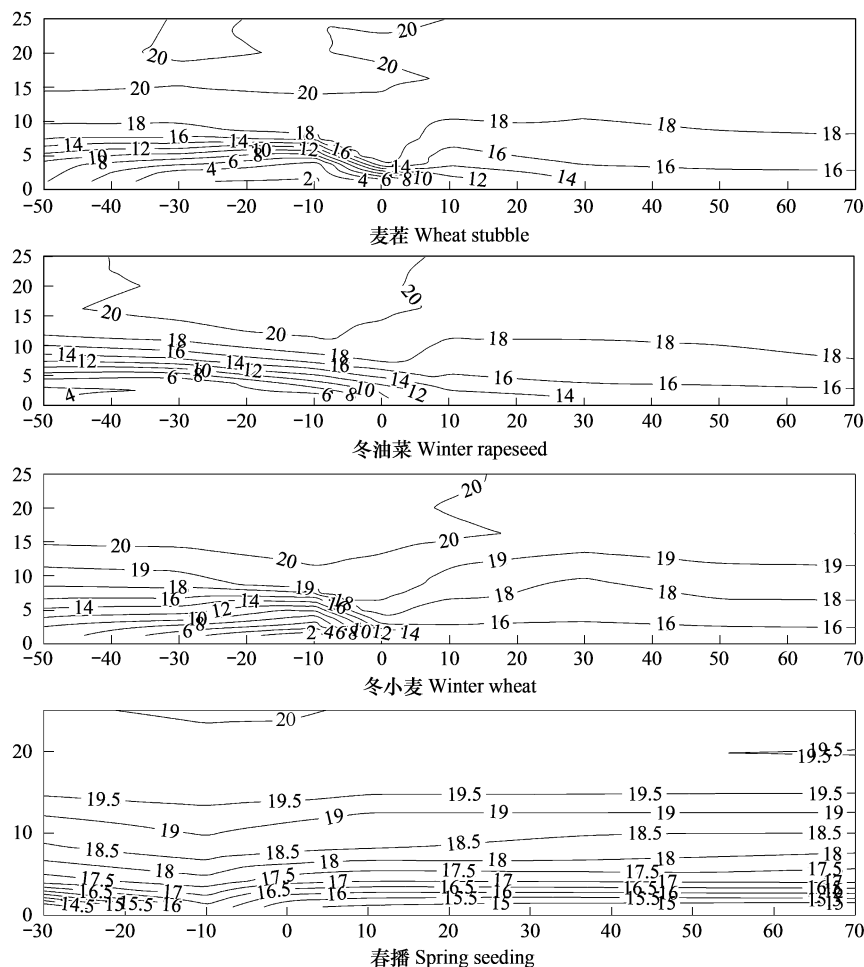


图 1 起动风速与粗糙度的关系
Fig. 1 Relation of roughness and starting wind speed

图2 22 m·s⁻¹下4种处理风速流场图Fig. 2 Charts of Flow field under wind speed of 22 m·s⁻¹ for 4 treatments

纵坐标为测点高度 (cm) Ordinate values are heights (cm) of measure points; 横坐标为测点到土样中点的位移 (cm) abscissa values are displacement of measure points (cm); 曲线为风速等值线, 其上数字为其风速 curves with values are isolines of wind speed

冬小麦和麦茬的 206、195 倍和 166 倍, 其中, 6cm 高度内风蚀量占 20cm 高度内总风蚀量的比重, 春播为 94.4%, 冬小麦为 44.6%, 而麦茬为 14.6%, 冬油菜仅为 13.2%。4 种处理在 4~6cm 层内的风蚀量均为总风蚀量的 7% 左右, 说明此层不因处理不同而变化^[5]。所有处理在 8cm 以上的风蚀量均随高度增加呈减小的变化 (图 3)。冬油菜和麦茬在 6~8cm 高度以上风蚀物主要是植物的枯碎枝叶, 相对含量较大。

另外, 实验观察还发现: 20cm 以下的土粒以跃移运动为主, 20cm 以上的土粒以悬移运动为主^[5]。对集沙仪中的风蚀物分析发现: 随着集沙管管位的增高, 其中的土粒粒径越来越小; 从集沙仪后风蚀物的水平分布来看: 以试点为中心按粒径由大 (粗) 到小 (细)、由近至远呈放射状分布。可见, 土粒粒径越小, 随风跃移的越高, 后作悬移运动飘移的很远。

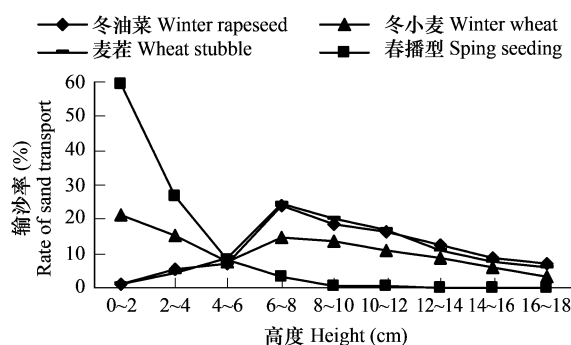


图3 不同处理风蚀量 (%) 沿高程的分布

Fig. 3 Distributing of quantity wind erosion (%) along height of different treatment

用风沙流结构数 $S = Q_{\max}/Q$ (Q 指第一层的风蚀量) 为指标来判断风蚀过程的方向性, 以揭示不同处理的风沙流结构与土粒风蚀、沉积的搬运关系^[5]。冬油菜、冬小麦、麦茬的 S 值分别为 0.11、0.76、0.13 均小于粗糙表面的临界值 2.6 而表现为堆积, 春播处理的 $S = 3.002 > 2.6$, 表现为风蚀。可见, 随着土壤风蚀的发生, 粘粒不断损失, 使地表形成极薄的粗化层, 甚至局部地区出现流沙覆盖层。这可能是土壤耕作的肥沃土层被风蚀搬运, 导致农田土地退化、空气污染等的主要原因。

2.5 不同处理的风蚀模数

风蚀模数 ($\text{kg hm}^{-2} \text{h}^{-1}$) 是衡量风蚀程度强弱的指标, 风蚀模数越大, 风蚀程度越严重^[5,12]。试验结果表明, 不同处理风蚀模数的平均值之间在 1% 水平上差异极显著 (表 4)。其中, 冬油菜的风蚀模数最小, 为 22.3, 冬小麦为 23.3, 麦茬为 42.5 (枯枝叶较多), 春播处理最大为 543.6 $\text{kg hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。另外, 分析发现, 覆盖处理的风蚀模数随着试验风速的增大, 均呈现先增加 (2 倍) 而后减缓 (1 倍多) 的变化, 而春播处理的风蚀模数始终呈急剧增大 (> 2.5 倍) 的变化。可见, 冬油菜等的地表覆盖在减弱土壤风蚀量等方面具有良好的效果。

表 2 风洞试验不同处理地表的风蚀模数

Table 2 Wind erosion modulus of soil surfaces under different treatments in wind tunnel ($\text{kg hm}^{-2} \text{h}^{-1}$)

处理 Treatments	集沙仪中风蚀物总量 Total wind-erosion of Jishayi ($\text{g m}^{-2} \text{min}^{-1}$)	风蚀模数 Modulus of wind erosions ($\text{kg hm}^{-2} \text{h}^{-1}$)			
		14 (m s^{-1})	18 (m s^{-1})	22 (m s^{-1})	平均 Mean
春播型 Spring seeding	23.302	178.0	450.0	1212.8	543.6 A
麦茬 Wheat stubble	0.209	24.6	32.7	60.3	42.5 B
冬小麦 Winter wheat	0.119	12.2	26.0	31.8	23.3 B
冬油菜 Winter rapeseed	0.113	11.2	24.0	31.6	22.3 B

标以不同字母的值在 0.01 的水平上显著 Values followed by a different letter are significantly different at 0.01

3 讨论与结论

3.1 冬油菜等不同处理抗风蚀效果比较

研究表明, 冬油菜、冬小麦、麦茬的地表粗糙度均高于春播处理, 且可达 6 倍左右; 其起动风速分别为春播的 2.3、2.1、2 倍; 平均风蚀模数分别为春播的 24、23、12 倍。另外, 春播的输沙率分别为冬油菜、冬小麦、麦茬的 206、195、111 倍。可见, 地表有植被覆盖时, 地表土壤颗粒开始风蚀运动的启动风速大大增加, 一般不易发生土壤风蚀。即使在大风条件下发生风蚀, 其风蚀量和输沙率都很小, 且其风沙流结构也完全不同于春播处理。翻耕地的风蚀量可达保护性耕地的几十倍。秦红灵、高旺盛^[10]、董光荣、李长治等^[11]的研究结果也与本研究结果基本一致。对上述不同处理的抗风蚀效果进行比较, 冬油菜 $>$ 冬小麦 $>$ 麦茬, 春播最差。

3.2 我国北方风蚀区农田风蚀与耕作制度问题

我国北方广大农田风蚀区, 春季气候尤其干旱、多风, 同时传统的春播、耙耱等农事活动使农田土壤结构破坏、表土细碎干燥、地表裸露, 处于遇风便起尘的状态中。实验结果表明春播处理的风蚀量可达覆盖处理的 12~24 倍、输沙率高达 111~206 倍, 覆盖处理地表 5cm 高度下的平均风速为 $8.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 春播处理高达 $11.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。春播处理在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的风速下进行风蚀, 风蚀量大, 输沙率高, 形成的挟沙风又进一步加剧土壤风蚀沙化。诸多研究表明^[12~14]: 我国春麦区与沙尘暴源区、路径区、多发区基本重合; 与浮尘、扬沙、沙尘暴等对应的风蚀作用使表土层的粘、粉粒、土壤有机碳等肥力大量损失, 导致土地沙化、生产力下降。最近农业部发布消息称我国出现沙尘暴的尘源主要来自农田而非沙漠^[3]。可见, 农田土壤的风蚀沙化问题十分严峻, 究其原因这是由于春播等不合理的耕作制度所致, 因而改变春播种植制度为秋播制度已势在必行。

3.3 推广种植冬油菜在耕作制度改革和生态环境改善方面的作用

北方风蚀区秋播冬油菜等冬作物, 其大量的枯枝叶和返青的植株, 对该区冬、春季地表形成很好的覆盖保护, 可减少土壤水分蒸发、截留雨雪等使土壤保水, 大大减轻农田土壤风蚀, 还能有效利用该区秋季的集中降雨, 缓解生产需水矛盾。另外, 冬油菜也可与马铃薯、玉米等作物进行复种和套种, 由一年一熟转变为一年两

熟或两年三熟制,增加复种指数,提高单位面积的产量和经济效益^[15],使生态环境向良性循环的方向发展。

综上所述,为解决我国北方风蚀区农田土壤风蚀、土地沙漠化及其对沙尘暴尘源的供给等重大农业环境问题,应大力推广冬油菜、冬小麦等越冬作物的种植面积,特别是冬油菜的种植面积;尽量减少春播面积。

References:

- [1] Wang S W, Dong G R. Assessment of environmental evolvement in Western China. Beijing: Science Press, 2002. 106, 116
- [2] Lu Q, Wu B. Assessment and economic value accounting of desertification disaster in China. China Populat Environ, 2002, 12(2): 29—33.
- [3] Agricultural ministry of China, the dominant sources of dust devil happened in China were not come from sandy deserts. <http://www.china.com.cn/police/txt/2008-07/30/content.16096715.htm>.
- [4] Liu X P, Dong Z B. Wind Threshold Shear Velocities of Sands at Moistened State. Bulletin of Soil And Water Conservation, 2002, 22(2): 1—4.
- [5] Wu Z. Sand Geomorphological and sand-control engineering, Beijing: Science Press, 2003. 23—107.
- [6] Mu Q S, Chen X H, Relation between threshold wind erosion velocity and vegetation coverage. Journal of Desert Research, 2004, 27(4): 565—569.
- [7] Dong Z B, Chen W N, Dong G R, *et al.* Influences of vegetation cover on the wind erosion of sandy soil. Acta Scientiae Circumstantiae, 1996, 16(4): 442—446.
- [8] Shang R Y, Qi Y X, Zhao T N, Ding G D. Field Investigation on the influence of vegetation on wind and soil erosion. Res Soil water Conserve, 2006, 4(3): 37—39.
- [9] Zhang K C, Qu J J, Zu R P, *et al.* Research of the characteristics of structure of drifting sand flux and wind velocity profile. Journal Soil Conservation, 2005, 12(1): 54—58.
- [10] Qin H L, Gao W S, Ma C Y, Yang S Q, Zhao P Y. Effects of no-tillage on soil properties affecting wind erosion during fallow in Ectone of north China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(2007-09): 3778—3784.
- [11] Dong G R, Li C Z, Jin J. Some results about soil wind erosion of wind tunnel experiment. Chin Sci Bull, 1987, 32(4): 297—301.
- [12] Sui Y Z, Yuan H M, Study on Agricultural Approaches of Preventing Sandstorm. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 565—569.
- [13] Hu Y F, Wang S Q, Yang F T. With act on wing erosion change of soil carbon and preliminary estimate in China. Geography Res, 2004, 23(6): 6—10.
- [14] Luo W Y, Dong Z B. The progress and prospects of research on wind erosion induced soil nutrient and carbon cycling. Progress in Geography, 2005, 24(4): 9—12.
- [15] Sun W C, Ma W G, Lei J M, Wang H L, Liu Q, Yang R Y, Wu J Y, Wang X F, Ye J, Zeng J, Zhang Y H, Kang Y L, Guo X J, Wei W H, Yang J, Pu Y Y, Zeng C W, Liu H X. Studies on feasibility of expanding winter rapeseed northwards into dry, cold regions in Northwest China, Agriculture Science of China, 2007, 40(12): 2716—2726.

参考文献:

- [1] 王绍武,董光荣主编,中国西部环境特征及其演变(第一卷),北京:科学出版社,2002. 106,116.
- [2] 卢琦,吴波. 中国荒漠化灾害评估及其经济价值核算. 中国人口资源与环境,2002,12(2):29~33.
- [3] 中国农业部. 我国出现沙尘暴的尘源主要来自农田,<http://www.china.com.cn/police/txt/2008-07/30/content.16096715.htm>.
- [4] 刘小平,董志宝. 湿沙的风蚀起动风速实验研究. 水土保持通报,2002,02:1~4.
- [5] 吴正著. 风沙地貌与治沙工程学. 北京:科学出版社,2003. 23~107.
- [6] 慕青松,陈晓辉. 临界侵蚀风速与植被盖度之间的关系. 中国沙漠,2004,24(5):565~569.
- [7] 董志宝,陈渭南,董光荣,等. 植被对风沙土风蚀作用的影响. 环境科学学报,1996,16(4):442~446.
- [8] 尚润阳,祁有祥,赵廷宁,丁国栋. 植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究. 水土保持研究,2006,4(3):37~39.
- [9] 张克存,屈建军,俎瑞平. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究. 水土保持研究,2005,12(1):54~58.
- [10] 秦红灵,高旺盛,马月存,杨世琦,赵沛义. 免耕对农牧交错带农田休闲期土壤风蚀及其相关土壤理化性状的影响. 生态学报,2007,27(9):3778~3784.
- [11] 董光荣,李长治,金炯. 关于土壤风洞模拟实验的某些结果. 科学通报,1987,32(4):297~301.
- [12] 隋玉柱,袁汉明. 沙尘暴农业防治途径研究. 中国沙漠,2004,24(5):565~569.
- [13] 胡云锋,王绍强,杨风亭. 风蚀作用下的土壤碳库变化及在中国的初步估算. 地理研究,2004,23(6):6~10.
- [14] 罗万银,董志宝. 风蚀对土壤养分及碳循环影响的研究进展与展望. 地理科学进展,2005,24(4):9~12.
- [15] 孙万仓,马卫国,雷建民,刘秦,杨仁义,武军艳,王学芳,叶剑,曾军,张亚宏,康艳丽,郭秀娟,魏文惠,杨杰,蒲媛媛,曾潮武,刘红霞. 冬油菜在西北旱寒区的适应性和北移的可行性研究. 中国农业科学,2007,40(12):2716~2726.