

## 沙区旱垄作对油菜生长环境的影响\*

刘目兴<sup>1,2,3</sup> 王静爱<sup>1,4,5</sup> 严平<sup>1,2,3</sup> 刘连友<sup>1,2,3</sup>李小雁<sup>1,2,3</sup> 杨秀春<sup>1,2,3</sup> 赖延斌<sup>1,4,5</sup>

(1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875) (2 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(3 北京师范大学中国沙漠研究中心, 北京 100875) (4 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

(5 北京师范大学区域地理实验室, 北京 100875)

**摘要** 垄作是沙区旱作农田常用的集水防风耕作技术。本文通过野外试验观测和土壤样品分析, 对不同结构的垄作与平作下油菜生长环境进行了研究。结果表明, 垄作相对于平作增加了生长季内土壤耕作层水分含量, 降低了其波动幅度, 改变了土壤水分在垂直剖面上的分布, 使湿润锋位于耕作层, 有利于油菜对土壤水分的吸收, 对缓解干旱对作物生长的胁迫有积极作用。垄作下土壤易蚀性颗粒含量降低, 地表粗糙度和垂直风速梯度增大, 有效降低了土壤可蚀性和近地表风速, 对防治土壤风蚀和保护作物幼苗有重要作用。不同结构的垄作比较, 垄高 15 cm、垄沟比 1/12 和垄高 25 cm、垄沟比 1/24 的两种垄作在油菜生长季内集水效果较优, 而垄高 25 cm、垄沟比 1/6 的垄作在农田休闲期内防治风蚀效果较好。故结构合理的垄作是沙区旱作农田微观土地利用结构调整的有效措施。

**关键词** 垄作; 土壤水分; 土壤风蚀; 旱作农田

中图分类号 S352.5; S15 文献标识码 A

垄作是在犁耕形成的细长垄脊上或犁沟内进行种植的一种耕作方式, 是通过改变地表微地形, 拦蓄径流, 增加土壤蓄水, 降低近地表风速, 防止土壤风蚀的一种保护性耕作措施<sup>[1,2]</sup>。关于垄作对作物生长环境的影响, 国内外研究集中于垄脊上种植作物时田间小气候的研究, 并得出垄脊种植下干燥、温暖的生长环境对春季种子发芽及作物幼苗生长有促进作用<sup>[3]</sup>。目前垄脊种植在国内外都得到一定的推广<sup>[2,4]</sup>。我国北方半干旱沙区, 气候干燥, 降水少, 蒸发强烈, 冬春季节多大风扬沙天气, 水分胁迫和土壤风蚀是限制作物生长的主要因子。作物种植在垄沟内(集水区)的垄作方式更适于该地区的气候条件。20 世纪 80 年代中期, 卢宗凡等研究表明, 在黄土高原上小麦垄沟种植与平播种植年际间土壤水分差异显著<sup>[5]</sup>。吕殿青等通过室内模拟试验, 研究得出相同土壤深度垄沟土壤水分略大于平地, 相同入渗水量时沟内含水量大于垄脊和平地, 垄沟有利于局部调节径流并促进作物生长的结果<sup>[6]</sup>。Hamlett 等对不同降水量下, 垄台、垄沟及平作的土壤容积含

水量随时间的变化进行了观测, 结果表明, 降水后土壤水分从垄脊渗入垄沟, 垄沟含水量高于平作, 平作高于垄脊, 垄脊土壤变干速度最快<sup>[7]</sup>。Benjamin 等研究发现, 在等量降水后, 垄脊上土壤含水量随时间增长迅速下降, 而垄沟内变化不大<sup>[8]</sup>。曹玉琴等<sup>[9]</sup>和李永平等<sup>[10]</sup>对旱作农田不同作物垄沟技术进行了试验研究, 证实了垄沟种植有保墒增产作用。Chepil 和 Milne 研究表明, 垄脊高 6.35 cm 的土垄以适当的角度排列, 土壤风蚀速率仅为平作的 1/4~1/3; 垄作通过降低地表风速及垄沟对土粒的沉积作用来减少土壤风蚀<sup>[11]</sup>。通过风洞试验研究, Marlatt 发现垄脊高 2 英寸(5.08 cm) 间距为 12 英寸的泡沫聚苯乙烯垄可以将风速降低 90%<sup>[12]</sup>; Armbrust 等则认为在耕作土壤上, 垄脊高 20 cm 的垄作比平整地表防止风蚀更有效, 而垄作降低风蚀的作用随垄脊的高度、地表土块大小及摩擦风速的变化而变化<sup>[13]</sup>。Hyder 和 Bement 对砂壤土起垄后土壤性质研究结果表明: 垄脊土壤容重减小, 而垄沟内增大; 降水后垄沟内土壤水分含量较高, 且变干速率较慢;

\* 国家“十一五”科技攻关防沙治沙关键技术研究项目: 毛乌素沙地生物治理技术研究与示范(靖边)和北京市自然科学基金资助项目(6053026)资助

作者简介: 刘目兴(1979~), 男, 山东巨野人, 博士研究生, 主要从事土壤风蚀及保护性耕作技术研究。E-mail: liumx@ires.cn

收稿日期: 2004-11-02; 收到修改稿日期: 2005-05-22

土壤湿度为 9% ~ 12% 时, 垄作下直径大于 0.833 mm 的团聚体的含量达到 73%, 而平作下仅为 58%<sup>[14]</sup>。以上研究表明, 垄作对提高垄沟土壤水分含量, 降低近地表风速及土壤风蚀速率, 降低土壤可蚀性有一定作用。但不同垄作结构下, 作物生长季内土壤水分、土壤理化性质的变化规律, 近地面风速廓线及地表粗糙度的变化规律尚未明确。本文试图根据对不同结构的垄作及平作对照地的田间观测结果, 探讨垄作结构对垄沟内土壤水分、土壤理化性质及地表粗糙度的影响, 并由此提出较为适合沙区旱作农田推广的垄作方式。

## 1 研究区域

研究区位于内蒙古自治区太仆寺旗头支箭镇小

河套村, 地理位置为 115° 25' E, 42° 06' N, 海拔 1 380 m 左右。该区属温带半干旱大陆性气候, 年平均降水量 387 mm, 年际变率大, 且 49% 集中在 7、8 月份; 年平均蒸发量 1 734 mm, 约为年均降水量的 4.5 倍, 水分亏缺严重。降水历时短、强度大, 易形成地表径流, 作物生长中水分胁迫严重, 旱灾频发。年平均气温 2℃, 无霜期 90~ 120 d。冬春季节干冷多风, 年平均风速为 3.4 m s<sup>-1</sup>, 4 月份平均风速更是达到 4.6 m s<sup>-1</sup>, 年大风日数 50~ 80 d, 是我国最大风区之一<sup>[15]</sup>。1971~ 2000 年间, 共发生沙尘暴 45 场, 其中 4、5 月份占 80%; 扬沙日数为 101 d, 4、5 月份占 67%。

试验田地貌类型为丘间地, 地下水深 5~ 10 m。农田土壤属于沙质暗栗钙土, 下伏基质为全新世沙质沉积物和玄武岩坡积物, 耕作层厚度不足 30 cm, 地表以下 0~ 30 cm 内土壤理化性质如表 1。

表 1 试验田土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in the experimental cropland

深度 Depth (cm)	机械组成 Particle component (%)						养分含量 Nutrient content (mg g <sup>-1</sup> )			
	> 0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001	有机质	速效磷	全氮	速效钾
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	O. M.	Available P	Total N	Available K
0~ 10	34	25	13	4	8	16	12.0	0.05	1.72	0.13
10~ 20	26	29	15	2	11	17	25.4	0.08	1.81	0.12
20~ 30	34	24	15	2	8	17	33.0	0.06	1.32	0.08

研究区植被类型为温带草原和温带荒漠植被, 以小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、克氏针茅 (*Stipa krylovii*)、羊草 (*Leymus chinensis*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、冷蒿 (*Artemisia frigida*) 等为主。农业机械化水平低, 集约化程度差, 属于粗放型的传统平作, 干旱和土壤风蚀是限制农业生产发展的主要因素。

## 2 试验设计

试验于 2003 年在同一块秋翻地上进行, 包括 4 种垄作方式并以传统平作为对照。平作 (CK) 为传统耕作方式, 即在前一年的秋翻地上春耕 (4 月中

旬) 后直接播种, 翻耕深度为 20 cm, 田块形状为 30 m × 20 m 的条状耕地。垄作处理为先将农田深翻 25 cm 左右, 人工就地聚土起垄, 并压实。不同的垄作结构示意图及参数如图 1 和表 2 所示。田间共设 15 个小区, 各种耕作方式均重复 3 次。各小区平行排列, 由南至北依次为 T<sub>3</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>4</sub>、T<sub>1</sub>、CK, 小区间设置宽 6 m 的缓冲带, 垄作田土垄走向基本一致, 且与冬春季节盛行风向垂直 (表 2)。垄作下作物种植在垄沟内, 种植作物均为油菜, 7 月 5 日播种, 10 月 15 日收获。各田块播种量均为 7.5 kg hm<sup>-2</sup>, 施肥量为 60 kg hm<sup>-2</sup> 磷酸二铵, 中耕除草一次, 追肥一次为 150 kg hm<sup>-2</sup> 尿素。

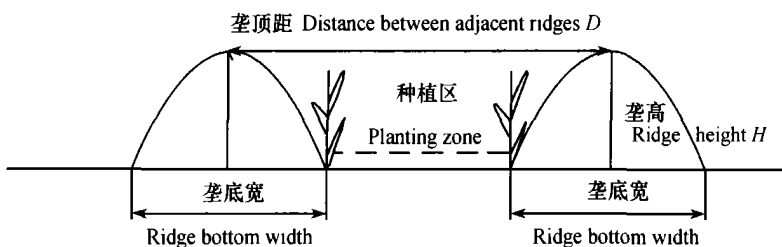


图 1 垄作结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ridge tillage structure

表 2 垄作田块结构特征参数

Table 2 The characteristic parameters for the structure of ridge tillage

试验处理代号 Treatment code	土垄高度 Ridge height H (cm)	垄顶距 Distance between adjacent ridges D (m)	垄沟比 Ratio between H and D (H/D)	垄底宽 Width of ridge bottom (cm)	土垄条数 Number of ridge	田块面积 Field area (m <sup>2</sup> )
T <sub>1</sub>	15	0.9	1/6	38.0	8	90 88
T <sub>2</sub>	25	1.5	1/6	59.3	9	172 8
T <sub>3</sub>	15	1.8	1/12	31.5	10	258 9
T <sub>4</sub>	25	6.0	1/24	76.0	7	575 1

### 3 研究方法

土壤水分测定用烘干称重法<sup>[16]</sup>。每种耕作方式(垄作在垄沟内)选取 3~4 个样点,同一耕作方式下各样点均匀分布于各个小区,采样深度分别为:5、10、15、20、25、30、40、50、60、70 cm。土壤水分测定日期根据油菜各个生长期时间长短确定,平均每 5 d 测一次,自 2003 年 7 月 5 日播种开始,到同年 10 月 2 日成熟为止,共测 17 次。生长季内平均土壤重量含水率为各次所测结果的平均值。0~30 cm 和 0~70 cm 内土壤重量含水率分别为 0~30 cm 和 0~70 cm 内不同深度测量结果的平均值。

土壤容重用环刀法测量,包括耕作处理前背景值的测量和油菜生长季内不同样地土壤容重的测量。土壤养分与机械组成采样分析同步进行,包括耕作前背景值采样、生长季中及收获后采样。土壤养分分析指标包括有机质(油浴 K<sub>2</sub>CrO<sub>7</sub> 法)、水溶性钙(乙酸铵交换-EDTA 滴定法)、速效钾(乙酸铵浸提-火焰光度法)、pH(pH S-3C 型酸度计测定)、速效磷(碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法)及全氮(凯氏法),粒度分析用比重计法<sup>[17]</sup>。试验用风速梯度仪观测,当风向与土垄走向垂直时,各田块高度为 4、3、2、1.6、1、0.8、0.5、0.3 m 的 30 min 平均风速,用 Excel 绘制风速廓线,并对风速和高度进行回归模拟,推算地表粗糙度<sup>[18]</sup>。

### 4 结果与分析

#### 4.1 油菜生长季平均土壤重量含水率

垄作土地利用结构下油菜生长季内土壤耕作层(0~30 cm)平均土壤水分含量显著高于平作(图 2),在各种垄作结构中,T<sub>3</sub> 处理的土壤含水量最高,较传统平作高 12.2%;比 T<sub>4</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 传统平作分别高 8%、

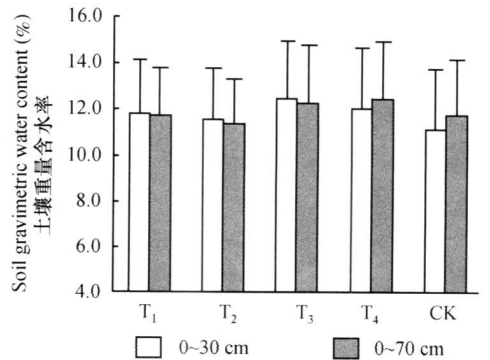


图 2 油菜生长季平均土壤重量含水率

Figure 2 Average soil gravimetric water content during growing season of the rape

6%、3.5%。0~70 cm 土壤重量含水率以 T<sub>4</sub> 最大,较传统平作高 6.1%;其次是 T<sub>3</sub>,比传统平作高 4.5%;再次是 T<sub>1</sub>,比传统平作低 0.4%;T<sub>2</sub> 的重量含水率最小,比传统平作低 3.6%。垄作下垄沟内土壤水分含量增高是由于降雨强度大于 10 mm d<sup>-1</sup> 时垄作的集流作用(观测日期内共 8 次降水强度大于 10 mm d<sup>-1</sup>),以及降雨后土壤水分自垄脊向垄沟内的运动产生的结果<sup>[8, 19]</sup>。各种垄作结构之间比较,T<sub>3</sub> 耕作层土壤重量含水率最高,而 T<sub>4</sub> 在 0~70 cm 内集水蓄墒效果最好,T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 耕作层和 0~70 cm 土壤重量含水率都较低。这与垄作处理(第 1 年)时,T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 由于培土起垄后,垄沟内熟土层变薄,土壤蓄水能力降低有关,而 T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 熟土层破损相对较小<sup>[14]</sup>。此外,由于处于同一块旱作农田内,降水补给量相同,且生长季内各个实验小区均无径流收支,土壤水分的差异主要是由于降雨入渗和土壤蒸发、植物蒸腾而导致的差异<sup>[20]</sup>。T<sub>3</sub> 和 T<sub>4</sub> 下油菜产量和生长季末地上生物量较平作高<sup>(1)</sup>,生长季内作物蒸腾耗水较多,但土壤含水量仍较高,可见垄沟内土壤含水量的增加得益于垄作的集流作用和降雨入渗的增加。T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 则由于土垄面积比例较大(表

(1) 刘目兴. 内蒙古太仆寺旗旱作农田垄作试验研究. 北京师范大学地理学与遥感科学学院. 硕士学位论文, 2004

2), 地表裸露面积增加, 土壤蒸发旺盛, 土壤含水量相对较低。

### 4.2 土壤水分时空变异规律

垄作改变了 0~ 70 cm 内土壤水分在垂直剖面上的分布(图 3), 影响了油菜生长季内不同深度土壤水分的标准差和变异系数(表 3)。传统平作下土壤水分随深度的增加而增加, 湿润峰在 70 cm 以下。垄作下土壤水分随深度的增加先迅速的增加, 而后趋于平缓, 在 50 cm 以下均有一定程度的降低, 湿润峰在 30 cm 以内。因此, 垄作改变了土壤水分在垂直剖面上的分布, 使土壤水分集中于地表耕作层, 有利于作物对土壤水分的吸收。

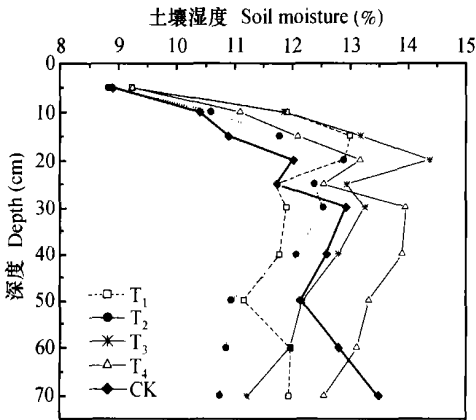


图 3 0~ 70 cm 土壤水分剖面(标准差见表 3)

Fig 3 Soil moisture profile in the depth of 0~ 70 cm (standard deviation see Table 3)

生长季内土壤重量含水率的标准差  $S$  和变异系数  $CV$  反映了土壤水分的稳定性。同一深度土壤

重量含水率的标准差和变异系数越大, 土壤含水量波动越大, 墒情越不稳定。而根据变异系数的大小可将土壤剖面自上而下划分为速变层、活跃层和稳定层, 其变异系数分别为  $> 25\%$ 、 $20\% \sim 25\%$  和  $< 20\%$ <sup>[21]</sup>。由表 3, 垄作下 0~ 5 cm 的土壤水分生长季内的变异系数大于  $25\%$ , 且远高于 5 cm 以下土层的变异系数。受天气变化、作物生长和人类活动的影响, 该层墒情变化明显, 土壤含水量在油菜生长季内波动幅度大, 称为速变层; 5~ 60 cm 的土层, 随深度的增加变异系数逐渐减小, 变异系数在  $20\% \sim 25\%$  之间, 土壤含水量相对稳定, 但受降水及干旱的影响, 土壤水分季节变化仍较活跃, 为活跃层; 60 cm 以下, 变异系数小于  $20\%$ , 土壤含水量较为稳定, 为稳定层。传统平作下, 土壤水分季节变化相对剧烈, 地表 0~ 30 cm 土壤水分变异系数大于  $25\%$ , 速变层较垄作下更厚, 70 cm 以内土壤水分变异系数均大于  $20\%$ , 故稳定层深度在距地表 70 cm 以下。与平作比较, 垄作降低了作物生长季内土壤水分的波动幅度, 减小了速变层的厚度, 使土壤含水量受地面气象状况或人类活动的影响较小。不同结构的垄作比较,  $T_1$  和  $T_3$  下速变层内土壤水分的标准差和变异系数较  $T_2$  和  $T_4$  下大, 而稳定层内却较  $T_2$  和  $T_4$  下小, 这可能与作物对雨水的截留和蒸腾对深层土壤水分的吸收有关<sup>[21]</sup>。油菜生长季内  $T_2$  和  $T_4$  下叶面积指数较  $T_1$  和  $T_3$  下大<sup>(1)</sup>, 地表植被覆盖度大, 对降水的截留能力较强, 故由降水引起的表层土壤含水量的波动较小; 叶面积指数大, 作物蒸腾强烈, 根系对深层水分的吸收较多, 对深层水分的变化影响较大。

表 3 不同耕作方式下各层土壤水分标准差和变异系数

Table 3 Standard deviation and variation coefficient comparison of soil moisture in different layers under different tillage

深度 Depth (cm)	$T_1$		$T_2$		$T_3$		$T_4$		CK	
	$S^{1)}$	$CV^{2)}$	$S$	$CV$	$S$	$CV$	$S$	$CV$	$S$	$CV$
0~ 5	2.70	29.27	2.01	22.68	2.65	28.67	2.52	27.27	3.21	36.01
5~ 10	2.32	19.53	2.06	19.44	2.31	19.49	2.42	21.78	2.62	25.18
10~ 15	2.97	22.83	2.42	20.51	2.82	21.38	2.68	22.13	2.74	25.13
15~ 20	2.77	21.49	3.06	23.73	3.41	23.68	2.69	20.44	2.77	23.00
20~ 25	2.60	22.16	2.92	23.60	3.12	24.09	2.70	21.50	3.05	26.01
25~ 30	2.43	20.43	2.54	20.23	3.10	23.41	2.94	21.05	3.65	28.26
30~ 40	2.46	20.89	2.40	19.87	2.97	23.22	3.04	21.90	3.04	24.15
40~ 50	2.45	21.97	2.30	20.98	2.76	22.70	3.05	22.87	3.10	25.58
50~ 60	2.21	18.46	2.22	20.42	2.54	21.27	2.68	20.42	3.03	23.67
60~ 70	2.29	19.19	2.63	24.43	2.04	18.20	2.99	23.85	2.92	21.61

1)  $S$ : 标准差 Standard deviation (%); 2)  $CV$ : 变异系数 Variation coefficient (%)

### 4.3 土壤理化性质对垄作的响应

0~70 cm 土壤容重背景值测量表明, 长期的传统平作使地下 20 cm 左右形成容重较大( $1.53 \text{ g cm}^{-3}$ )的犁底层<sup>[22]</sup>。油菜生长季内, 各种耕作方式下地表土壤容重都有先增大后减小的趋势, 平作下生长季中期 0~5 cm 土壤容重高于背景值, 生长季末期低于背景值, 而垄作始终高于平作和背景值(表 4)。0~5 cm

土壤容重在油菜生长季前期差异最大, 其中  $T_2$  较平作高 6.3%, 不同垄作之间比较,  $T_2$  最大,  $T_3$  最小, 这与垄作处理时熟土层破损的程度有关, 与取土深度(土垄体积/垄作田面积)成正比。垄作下作物生长区表土土壤容重的增加, 会导致土壤机械阻力的增大, 进而影响作物的生长状况<sup>[23]</sup>。因此, 如何缓解垄作下土壤容重增大的趋势尚待进一步研究。

表 4 不同耕作方式下油菜生长季内土壤性质的变化<sup>1)</sup>

Table 4 Variations of soil property in growing season of the rape under different kinds of tillage

耕作方式 Treatment	土壤容重 Soil bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ )	有机质 O. M. ( $\text{mg g}^{-1}$ )	速效钾 Available K ( $\text{mg g}^{-1}$ )	速效磷 Available P ( $\text{mg g}^{-1}$ )	全氮 Total N ( $\text{mg g}^{-1}$ )	> 0.25 mm (%)	0.05~0.25 mm (%)	< 0.005 mm (%)
背景值 Background value	1.477	23.5	0.11	0.060	1.64	31.97	25.97	25.53
生长季 CK	1.561	31.9	0.12	0.086	1.36	31.40	41.80	15.80
中期 $T_1$	1.555	24.1	0.14	0.081	1.29	22.50	33.10	30.20
Metaphase of $T_2$	1.609	15.5	0.22	0.068	1.58	28.00	34.00	26.20
growing $T_3$	1.516	17.4	0.14	0.066	1.98	25.10	35.00	26.20
season $T_4$	1.600	19.4	0.09	0.062	0.48	34.00	38.60	20.80
生长季 CK	1.386	23.0	0.08	0.074	1.56	23.40	33.20	28.80
末期 $T_1$	1.560	81.5 <sup>2)</sup>	0.08	0.059	1.12	21.90	35.70	28.80
Telophase of $T_2$	1.563	18.2	0.09	0.056	1.34	36.40	29.20	25.80
growing $T_3$	1.510	17.4	0.09	0.050	1.53	33.60	32.00	24.20
season $T_4$	1.508	19.4	0.08	0.090	1.54	24.50	39.10	21.80

1) 土壤容重测量深度为 0~5 cm 营养元素和粒度分析取样深度均为 0~30 cm Measuring depth of soil bulk density is 0~5 cm, Measuring depth of nutrition element and particle component is 0~30 cm 2) 分析过程中人为造成的误差使数据偏大 Too large value for marmade error during of analyzing process

由表 4, 油菜生长季中期, 不同垄作处理下垄沟内 0~30 cm 土壤有机质含量均较背景值有较大幅度的降低( $T_1$  除外), 而平作较背景值升高 36%。各种垄作结构间比较, 垄脊高度和垄沟比越大, 有机质含量降低越显著, 其中  $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  较背景值分别降低 34%、26%、17.5%。平作下油菜生长季末 0~30 cm 土壤有机质含量较生长季中期降低 38%, 而垄作下基本无变化,  $T_2$  甚至增加 12%。垄作与平作间土壤有机质含量差异相对减小, 但绝对数值仍低于平作和背景值。垄作下耕作层土壤有机质含量降低的原因是由于在聚土起垄过程中, 富含有机质的熟土层被堆积到垄台上, 导致垄沟内土壤有机质降低。而生长季末垄作下土壤有机质缺乏的现象较生长季中期有所改善, 可能是垄沟沉积了土壤细粒和粘粒物质的缘故。但垄沟内土壤有机质含量仍较平作和背景值低, 故增加垄沟内土壤有机质含量的方法需进一步讨论。油菜生长季内, 垄作下全氮、速效磷、速效钾的消耗量较平作大。绿熟期和成熟期内, 垄作

下油菜对土壤速效营养元素的吸收, 有利于生物量的累积和产量的提高。

0~30 cm 土壤粒度分析表明(表 4): 垄作下粒径 > 0.25 mm 的中、粗沙和粒径 < 0.005 mm 的极细粉沙、粘粒等非可蚀性颗粒含量较平作高, 粒径为 0.05~0.25 mm 易蚀性颗粒含量较低<sup>[24]</sup>; 除  $T_1$  外, 垄作下粒度平均值较平作大, 其中  $T_2$  是平作的 2 倍; 偏度均为 -0.47, 土壤为沙质土, 粒度偏粗; 峰态较平作大, 非可蚀性粗粒和粘粒含量较高。垄作下细沙、粉沙等易蚀性颗粒含量的减少和粗砂、粘粒等非可蚀性颗粒含量的增加, 对降低农田土壤的可蚀性有积极作用。

### 4.4 不同耕作方式下的地表粗糙度

地形起伏抑制土壤风蚀的作用反映于地表粗糙度的变化和风速垂直梯度的变化<sup>[25,26]</sup>。地表粗糙度的大小对土壤风蚀速率影响显著, 粗糙度越大, 抗侵蚀能力越强<sup>[27,28]</sup>。不同垄作下微地形起伏不同, 对地表粗糙度和风速垂直梯度的改变幅度不同, 故对土壤风蚀的抑制作用不同。

地表粗糙度是近地表风速为零的高度,其测定有多种方法,本文采用风速廓线模拟方程的推算法<sup>[18,24]</sup>。通过野外试验,对不同垄作及平作下不同高度的风速进行了观测,并绘制了风速廓线。由图4,各种土地利用方式下风速梯度与垂直高度均呈对数关系显著相关,相关系数均高于0.99。风速梯度变化模拟曲线反映了风速随高度变化的快慢,5种地表处理下风速( $V$ )均随高度( $h$ )呈对数递增,但递增的速率不同。而对模拟方程中自变量 $h$ 求导,可求风速随高度的变化速率,即风速梯度。而根据回归方程同样可以求出风速为零的高度,即粗糙度,结果如表5。

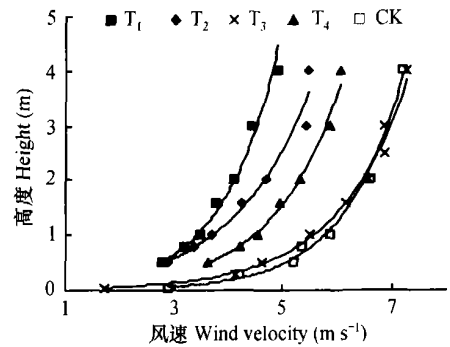


图4 不同耕作方式下的风速廓线

Fig. 4 Wind profile of different kinds of tillage

表5 不同地表处理下风速廓线模拟方程

Table 5 Simulated equations of wind speed profile under different fields' surface

处理方式 Treatment	模拟曲线方程 Simulated equation	相关系数 Correlation coefficient	样本数 N	风速梯度 <sup>1)</sup> Grads of wind velocity	地表粗糙度 <sup>2)</sup> Surface roughness (m)
CK	$V = 1.01\ln(h) + 5.78$	0.991	7	1.01	0.33
T <sub>1</sub>	$V = 0.99\ln(h) + 3.44$	0.994	7	0.99	3.05
T <sub>2</sub>	$V = 1.34\ln(h) + 3.74$	0.992	7	1.34	6.08
T <sub>3</sub>	$V = 1.27\ln(h) + 5.58$	0.999	9	1.27	1.24
T <sub>4</sub>	$V = 1.19\ln(h) + 4.49$	0.997	7	1.19	2.29

1) 风速梯度为方程求导求得 Grads of wind velocity were the differential coefficient of simulated equation. 2) 地表粗糙度是根据模拟方程回归求得 Surface roughness were calculated by regress of simulated equation

由表5,平作下地表粗糙度为0.33 cm,显著低于垄作。不同垄作间比较,T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>粗糙度高于3 cm,地表受风沙流磨蚀的面积比例较小,抗风蚀效果显著,T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>效果相对较差<sup>[29,30]</sup>。平作下风速梯度同样较垄作下小(T<sub>1</sub>除外),表明垄作下风速随高度增加的速率高于平作,垂直方向上风速梯度较大,增大了高层风沙流的输沙比例,降低了地表输沙比例,对作物苗床和幼苗的保护有积极作用。垄作间比较,土垄高度相同时,垄沟比越大,地表粗糙度和风速梯度越大;而垄沟比相同时,土垄高度越大,风速梯度和粗糙度越大,故在上述四种垄作中,T<sub>2</sub>的防风抗蚀的效果最优。由分析可见,垄作改变了地表风的流场,增大了地表粗糙度和垂直方向的风速梯度,是降低农田土壤风蚀和风沙流对作物损害的有效措施。

## 5 结论与讨论

1) 垄作增加了作物生长季耕作层土壤水分含量,其中T<sub>3</sub>重量含水率最高,较平作高12.2%;0~70 cm内,T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>重量含水率较平作高4.5%、6.1%,

T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>稍低于平作。垄作还改变了土壤水分在垂直剖面上的分布规律,使湿润锋靠近耕作层,有利于作物对土壤水分的吸收利用。

2) 相对于平作,垄作下作物生长季内同一深度土壤重量含水率的标准差和变异系数较小,土壤水分变率降低,土壤水分速变层和活跃层厚度较小,稳定层靠近地表。这对降水稀少且集中,蒸发旺盛的半干旱沙区农业旱灾的防御有重要意义。

3) 垄作土壤中,粒径为0.05~0.25 mm的易蚀性颗粒含量较低,非易蚀性粗粒和粘粒含量较高,土壤抗风蚀能力增强。而垄作下起伏的地表增大了地表粗糙度和垂直方向上的风速梯度,有效降低了近地表风速,对防止沙尘灾害和保护作物幼苗有重要作用。

各种垄作之间比较,T<sub>3</sub>和T<sub>4</sub>在提高土壤耕作层水分含量,降低土壤水分波动上效果较好,且土壤容重增大和耕作层有机质含量降低幅度相对较小,为作物提供了较为适宜的生长环境,适于在作物生长季实施。而T<sub>2</sub>下油菜生长季末土壤易蚀性颗粒含量最小,地表粗糙度最大,适于在农田休闲期土壤风蚀防治中实施。而如何通过改变起垄措施缓解耕作

层土壤容重增大和有机质含量降低的缺陷, 及多年垄作下土壤性质的变化规律, 尚需进一步研究。

**致 谢** 在试验的设计和论文写作中得到北京师范大学资源学院邹学勇教授、哈斯副教授的帮助, 在此深表感谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Lal R. Ridge tillage. *Soil & Tillage Research*, 1990, 18: 107~ 111
- [ 2 ] 王旭清, 王法宏, 任德昌, 等. 作物垄作栽培增产机理及技术研究进展. *山东农业科学*, 2001, 3: 41~ 45 Wang X Q, Wang F H, Ren D C, *et al.* Crop production increasing mechanism and the technology research development of ridge tillage (In Chinese). *Shandong Agricultural Sciences*, 2001, 3: 41~ 45
- [ 3 ] Burrows W C. Characterization of soil temperature distribution from various tillage induced microreliefs. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 1963, 27: 350~ 353
- [ 4 ] Randall C R. Extension programs and farmer experiences with ridge tillage. *Soil & Tillage Research*, 1990, 18: 283~ 293
- [ 5 ] 卢宗凡主编. 中国黄土高原生态农业. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. 31~ 34. Lu Z F. ed. *Ecological Agriculture of the Loess Plateau in China* (In Chinese). Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. 31~ 34
- [ 6 ] 吕殿青, 邵明安, 王全九, 等. 垄沟耕作条件下的土壤水分分布试验研究. *土壤学报*, 2003, 40(1): 147~ 150. Lu D Q, Shao M A, Wang Q J, *et al.* Experimental study on soil water distribution under ridge and furrow cultivation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 147~ 150
- [ 7 ] Hamlett J M, Baker J L, Horton R. Water and anion movement under ridge tillage. *Transaction of The ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, 1990, 33: 1 859~ 1 866
- [ 8 ] Benjamin J G, Blaylock A D, Brown H J, *et al.* Ridge tillage effects on simulated water and heat transport. *Soil & Tillage Research*, 1990, 18: 167~ 180
- [ 9 ] 曹玉琴, 刘彦明, 王梅春, 等. 旱作农田沟垄覆盖集水栽培技术的试验研究. *干旱地区农业研究*, 1994, 12(1): 74~ 78. Cao Y Q, Liu Y M, Wang M C, *et al.* Testing study of cultivation technique of water collection by ridge and furrow mulching rainfed farmlands (In Chinese). *Agriculture Research in the Arid Area*, 1994, 12(1): 74~ 78
- [ 10 ] 李永平, 吕廷会, 秦爱红, 等. 旱作农田改土截流蓄水种植沟耕作技术研究. *干旱地区农业研究*, 1995, 13(4): 80~ 86. Li Y P, Lu T H, Qin A H, *et al.* Research on tillage technique of water storage planting ditches by cutting off runoff through soil improvement in rainfed farmland (In Chinese). *Agriculture Research in the Arid Area*, 1995, 13(4): 80~ 86
- [ 11 ] Chepil W S, Milne R A. Wind erosion of soil in relation to roughness of surface. *Soil Sci.*, 1941, 52: 417~ 433
- [ 12 ] Marlatt W E, Hyder D N. Soil ridging for reduction of wind erosion from grass seedbeds. *J. Range Manage.*, 1970, 23: 170~ 174
- [ 13 ] Arnbrust D V, Chepil W S, Siddloway F H. Effects of ridges on erosion of soil by wind. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1964, 28: 557~ 560
- [ 14 ] Hyder D N, Bement R E. Soil physical conditions after plowing and packing of ridges. *J. Range Manage.* 1969, 22: 289~ 292
- [ 15 ] 史培军, 湖涛, 王静爱, 等著. 内蒙古自然灾害系统研究. 北京: 海洋出版社, 1992. 21~ 23. Shi P J, Hu T, Wang J A, *et al.* *Nature Disaster Systemic Research of Inner Mongolia* (In Chinese). Beijing: Ocean Press, 1992. 21~ 23
- [ 16 ] 国家气象局主编. 农业气象观测规范(上卷). 北京: 气象出版社, 1993. 77~ 78. National Weather Bureau. ed. *Observation Criterion of Agricultural Meteorology* (In Chinese). Beijing: Meteorology Press, 1993. 77~ 78
- [ 17 ] 刘光崧主编. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996. Liu G S. ed. *Soil Property Analysis and Profile Description* (In Chinese). Beijing: Standard Press of China, 1996
- [ 18 ] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 31~ 33. Zhang C L, Zou X Y, Dong G R, *et al.* Wind tunnel studies on influences of vegetation on soil wind erosion (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 31~ 33
- [ 19 ] Li X Y, Gong J D, Gao Q Z, *et al.* Incorporation of ridge and furrow method of rainfall harvesting with mulching for crop production under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 2001, 50: 173~ 183
- [ 20 ] Chen J Z, He Y Q, Chen M L. Water budget analysis of red soils in central Jiangxi Province, China. *Pedosphere*, 2004, 14(2): 241~ 246
- [ 21 ] 龚学臣, 杨立廷, 牛瑞明, 等. 冀西北风沙半干旱区农田土壤水分动态分析. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(2): 88~ 92. Gong X C, Yang L T, Niu R M, *et al.* Dynamic analysis of farmland soil moisture in Aeolian sandy semiarid region of northwest Hebei Province (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 88~ 92
- [ 22 ] 刘良梧, 周健民, 刘多森. 农牧交错带不同利用方式下草原土壤的变化. *土壤*, 1998, 30(5): 225~ 229. Liu L W, Zhou J M, Liu D S. Variation of soil property under different utilization types in the grassland of agrif pasture transition zone (In Chinese). *Soils*, 1998, 30(5): 225~ 229
- [ 23 ] Bengough A G, Mackenzie C J, Elangwe H E. Biophysics of the growth responses of pea roots to changes in penetration resistance. *Plant and Soil*, 1994, 167: 135~ 141
- [ 24 ] 吴正编著. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. 280~ 281. Wu Z. ed. *Aeolian Geomorphology* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1987. 280~ 281
- [ 25 ] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究. *水土保持研究*, 1999, 6(4): 75~ 79. Li Z S. Wind tunnel simulation of flow velocity on the windward slope (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(4): 75~ 79
- [ 26 ] 吕悦来, 李广毅. 地表粗糙度与土壤风蚀. *土壤学进展*, 1992, 20(6): 38~ 42. Lu Y L, Li G Y. Surface roughness and wind erosion (In Chinese). *Progress in Soil Science*, 1992, 20(6): 38~ 42
- [ 27 ] 刘明义, 代全厚, 张黎辉, 等. 沙地土壤风蚀动力因子分析.

- 中国水土保持, 2000, 7: 28~ 30. Liu M Y, Dai Q H, Zhang L H, *et al.* Factor analysis of wind erosion in sandy soil (In Chinese). *China Soil and Water Conservation*, 2000, 7: 28~ 30
- [28] Chepil W S, Milne R A. Wind erosion of soil in relation to roughness of surface. *Soil Sci.*, 1941, 52: 417~ 433
- [29] 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状及展望. *中国沙漠*, 1997, 17(1): 99~ 101. Li Z S, Chen G T. A review of roughness length (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 1997, 17(1): 99~ 101
- [30] Potter K N, Zobeck T M, Hagen L J. A microrelief index to estimate soil erodibility by wind. *Trans. ASAE*, 1990, 33: 151~ 155
- [29] 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状及展望. *中国沙漠*, 1997, 17(1): 99~ 101. Li Z S, Chen G T. A review of roughness length (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 1997, 17(1): 99~ 101

## EFFECTS OF RIDGE TILLAGE ON CROP GROWING ENVIRONMENT IN RAINFED SANDY FARMLAND

Liu Muxing<sup>1,2,3</sup> Wang Jing'ai<sup>1,4,5</sup> Yan Ping<sup>1,2,3</sup> Liu Lianyou<sup>1,2,3</sup>

Li Xiaoyan<sup>1,2,3</sup> Yang Xiuchun<sup>1,2,3</sup> Lai Yanbin<sup>1,4,5</sup>

(1 Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(2 College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(3 China Center for Desert Research, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(4 College of Geography and Remote Sensing Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

(5 Key Laboratory of Region Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** Ridge tillage is a kind of soil and water conservation tillage used frequently in the rainfed farmland of sandy areas. Through field observation and analysis of soil samples, effects of the practice were studied on growing environment of rape. The results indicate that compared with flat tillage, ridge tillage increased soil moisture of the plow layer, reduced moisture fluctuation during the growing season of rape, and altered distribution of soil moisture in the vertical profile, locating wetting front in the plow layer, which alleviated drought stress on rape growth. In addition, it also reduced the content of erodible particles in the soil, increased roughness of the land surface and vertical wind velocity grads, thus efficiently reducing soil erodibility and wind speed near the land surface, which played an important role in preventing soil wind erosion and protecting crop seedling. Comparison between various structures of ridge tillage showed ridge tillage with ridges 15 cm high and a height-spacing ratio of 1/12 (T<sub>3</sub>) and ridge tillage with ridges 25 cm high and a ratio of 1/24 (T<sub>4</sub>) did better in rainfall harvesting during the growing season of rape, while ridge tillage with ridges 25 cm high and a ratio of 1/6 (T<sub>2</sub>) did better in preventing soil wind erosion during the fallow period of cropland. So ridge tillage with a reasonable structure is an effective measure in adjusting micro land-use structure in the rainfed farmland of sandy areas.

**Key words** Ridge tillage; Soil moisture; Soil erosion; Rainfed farmland