



## 长期不同耕作措施对黄绵土体积质量和作物水分利用效率的影响

邓超超, 李玲玲, 谢军红, 彭正凯, 王进斌,

颀健辉, 沈吉成, Eunice Essel

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070)

**摘要** 借助 2001 年在陇中黄土高原建立的不同耕作措施长期定位试验, 研究 5 种保护性耕作[免耕(NT)、传统耕作+秸秆还田(TS)、免耕+秸秆覆盖(NTS)、传统耕作+地膜覆盖(TP)、免耕+地膜覆盖(NTP)]和传统耕作(T)对黄绵土体积质量、水分含量、作物耗水量、产量及水分利用效率的影响。结果表明: 保护性耕作均可降低 0~30 cm 土层土壤体积质量, 提升土壤孔隙度; 其中 NTS 显著降低 0~10 cm 土层土壤体积质量, 并显著提升该土层土壤孔隙度, 且随着应用年限的延长, 效果更为突出。保护性耕作显著提高播种期 0~10 cm 土层土壤含水量, 尤以 NTS 和 NTP 效果最佳。与传统耕作相比, NTS 和 NTP 在增加作物耗水量的同时也提高了作物产量和水分利用效率, 但 NTP 不利于土壤结构的持续改善。因此, 长期施用免耕秸秆覆盖耕作措施能显著改善土壤结构, 提高土壤水分利用效率, 进而提高作物产量, 促进农业可持续发展。

**关键词** 耕作措施; 保护性耕作; 土壤体积质量; 产量; 水分利用效率

**中图分类号** S152.5; S152.7

**文献标志码** A

**文章编号** 1004-1389(2018)07-1023-09

土壤体积质量作为重要的土壤物理性质之一, 与土壤孔隙度及土壤水分入渗等息息相关, 土壤体积质量的增加会引起土壤性状的恶变, 如土壤孔隙度显著减小, 土壤变得坚硬, 形成地表径流, 雨水难以入渗, 水分利用效率低, 严重影响作物的生长发育, 从而引起产量的降低<sup>[1]</sup>。土壤物理质量的好坏源于土壤结构, 并最终由耕作措施影响<sup>[2]</sup>, 大量研究表明<sup>[3-4]</sup>适宜的耕作方式可以有效改善土壤结构, 减少耕地表层侵蚀及延缓土壤肥力衰退等。陇中黄土高原属典型半干旱雨养农业区, 降水量年变率和季节变率大, 复杂多变的自然条件和长期传统耕作对土地的不合理利用, 使该地区成为中国水土流失最为严重的地区, 严重的水土流失破坏生态环境, 导致该地区土壤质量下降, 有限降水的利用效率降低<sup>[5-7]</sup>。保护性耕作是一项对农田实行少耕、免耕, 尽可能减少土壤耕作并用作物秸秆、残茬覆盖地表, 用化学药物来控制作物杂草和病虫害, 从而减少土壤风蚀、水蚀,

提高土壤肥力和抗旱能力先进农业耕作技术<sup>[8]</sup>。许多国内外专家通过土壤理化性状, 深入研究了不同保护性耕作措施对旱作农业耕地质量的影响, 但研究结果存在差异<sup>[9-10]</sup>。刘世平等<sup>[11]</sup>研究认为, 免耕措施能增加土壤体积质量, Meharban 等<sup>[12]</sup>研究指出保护性耕作与传统翻耕相比能够降低土壤体积质量, 武际等<sup>[13]</sup>研究表明, 免耕提高耕层土壤体积质量, 降低土壤含水率。这些差异可能是因研究区域、供试作物、观测时间长短等不同引起。因此, 陇中黄土高原从 2001 年开始机械化保护性耕作研究<sup>[14]</sup>。目前, 耕作措施对陇中黄土高原西部黄绵土体积质量随时间的变化的长期响应研究较少。为此, 本研究基于甘肃农业大学 2001 年布设于陇中黄土高原西部的不同耕作措施长期定位试验, 研究耕作措施对陇中黄土高原西部黄绵土体积质量、小麦和豌豆产量、水分利用效率的影响及其随时间的变化, 以期为该保护区保护性耕作措施推广应用提供理论和技术依据。

收稿日期: 2018-01-12 修回日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(31460337, 31660373, 31761143004); “十二五”国家科技支撑计划(2012BAD14B03); 甘肃省教育厅项目(2017C-12)。

第一作者: 邓超超, 男, 硕士研究生, 研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: 865851869@qq.com

通信作者: 李玲玲, 女, 博士, 教授, 研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail: lill@gsau.edu.cn

# 1 材料与amp;方法

## 1.1 试验区概况

本研究依托始于 2001 年的长期定位试验,于 2001、2007 及 2014 年进行。该定位试验设在位于甘肃省定西市安定区李家堡镇的甘肃农业大学旱作农业综合实验站。该区属中温带半干旱偏旱区,太阳辐射量为  $592.9 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,多年平均日照时数 2 476.6 h;年均气温  $6.4 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$  积温为  $2\ 239.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均无霜期为 140 d;多年平均降水量为 390.9 mm,年蒸发量达到 1 531 mm,为典

型的 1 年 1 熟雨养农业区。

试区土壤为典型黄绵土(2001 年 8 月主要理化特性见表 1),土层深厚,土质较绵软,质地较均匀,贮水性能良好,2007 年总降雨量 454.7 mm,较多年平均降雨量多 63.8 mm,春小麦和豌豆生育期降雨量分别为 182.9 mm 和 148.1 mm,2014 年总降雨量 360.3 mm,较多年平均降雨量少 30.6 mm,春小麦和豌豆生育期降水分别为 168.4 mm 和 140.5 mm。2007 和 2014 年降雨量分布见图 1。

表 1 试区土壤主要理化特性

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

土层/cm Soil layer	体积质量/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) Volumic mass	有机碳/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Organic C	全氮/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Total N	速效磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Olsen P	速效钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) Olsen K	田间持水量/ ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) Field capacity	pH
0~5	1.29	7.63	0.85	13.3	349.6	0.27	8.4
5~10	1.23	7.46	0.87	11.9	330.2	0.27	8.3
10~30	1.32	6.93	0.78	4.9	244.0	0.27	8.4

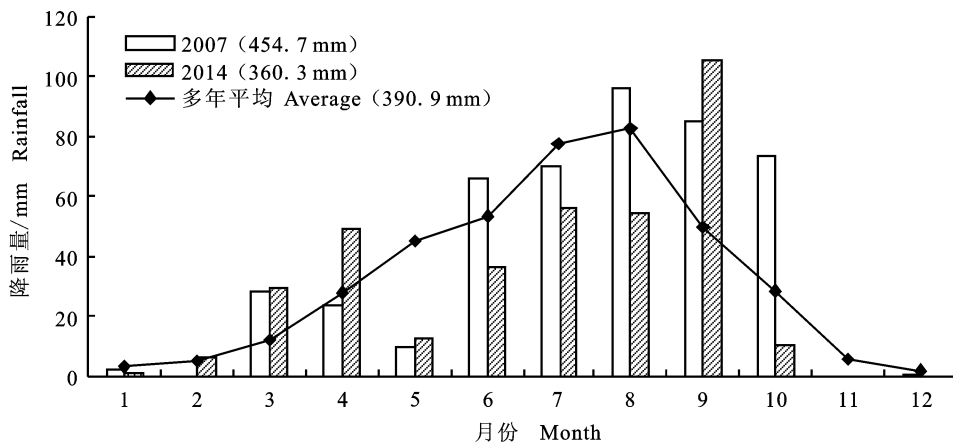


图 1 2007 和 2014 年月降雨量

Fig. 1 Monthly rainfall in 2007 and 2014

## 1.2 试验设计

试验采用双序列轮作方式(豌豆—小麦、小麦—豌豆)。各序列分别设 6 个处理,具体为传统耕作(T):试验地前茬作物 8 月份收获后进行第 1 次耕作,8 月底和 9 月分别进行第 2、3 次耕作,耕深依次 20 cm、10 cm 和 5 cm,9 月份耕后耨 1 次,10 月份冻结前再耨 1 次,这是定西地区典型的传统耕作方式;免耕(NT):试验整个阶段都免耕不覆盖,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种;传统耕作+秸秆还田(TS):耕作方式同 T,但随第 1 次耕作将所有前茬作物秸秆翻入土壤;免耕+秸秆覆盖(NTS):整个试验期采取完全免耕,免耕播种机一次性完成施肥和播种,收获脱粒

后的作物秸秆覆盖再还原小区;传统耕作+地膜覆盖(TP):耕作方式同 T,在第 2 次耨后在地表覆盖塑料薄膜,膜宽 40 cm,间距 20 cm,膜侧种植作物;免耕+地膜覆盖(NTP):整个试验阶段采取免耕,覆膜及播种方式同 TP。重复 4 次,小区面积  $80 \text{ m}^2$  ( $4 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ),随机区组排列。试验春小麦品种为‘定西 40 号’,豌豆品种为‘绿农 2 号’。春小麦播量  $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;豌豆播量  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。麦行距 20 cm,豌豆行距 24 cm,播深均为 7 cm。春小麦播期为每年 3 月中旬,7 月下旬至 8 月上旬收获;豌豆于 4 月上旬播种,7 月中、下旬收获。小麦各处理施氮  $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , $\text{P}_2\text{O}_5$   $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (尿素+二铵);豌

豆各处理施氮  $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 播种时作基肥混施。作物生长期田间杂草人工拔除, 休闲期用 2,4-D 丁酯与草甘膦除去。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤体积质量 春小麦、豌豆收获后, 采用环刀法<sup>[15]</sup>测定 0~5 cm、5~10 cm 和 10~30 cm 土壤体积质量。

1.3.2 土壤总孔隙度 土壤总孔隙度 =  $(1 - \text{土壤体积质量} / \text{土壤密度}) \times 100\%$ 。式中, 土壤密度取值  $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.3.3 土壤水分 测定播前和收后土壤含水量, 测定深度为 200 cm。其中 0~5 cm、5~10 cm 和 10~30 cm 层次采用烘干法<sup>[15]</sup>测定质量含水量, TRIME 水分测定仪(德国 TRIME-PICO TDR)测定 30~50 cm、50~80 cm、80~110 cm、110~140 cm、140~170 cm 和 170~200 cm 层次体积含水量。

体积含水量 = 质量含水量  $\times$  土壤体积质量

1.3.4 产量测算 各小区去除边行单打单收, 再折算成每公顷产量(Y)。

1.3.5 耗水量(ET)  $ET = P + W1 - W2$

式中, P 为春小麦和豌豆生育期降水量(mm), W1 和 W2 分别为播前收后 0~200 cm 土层内的贮水量(mm)。

1.3.6 水分利用效率(WUE)  $WUE = Y / ET$

式中, Y 为籽粒产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ), ET 为实际耗水量(mm)。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft excel 2016 对数据进行处理, 用 SPSS 19.0 进行显著性与统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同耕作措施对黄绵土体积质量和总孔隙度的影响

由表 2 可知, 耕作措施对 0~30 cm 土壤体积质量的影响主要集中在 0~10 cm 土层。豌豆—春小麦轮作序列下, 2007 年小麦地 0~5 cm 土壤体积质量 NTS 最低, T 最高, NTS 与 T 差异显著, 5~10 cm 和 10~30 cm 土壤体积质量各处理间无显著差异。2014 年 0~5 cm 土壤体积质量  $T > NT > TS > TP > NTP > NTS$ , NTS 与 T 差异显著, 5~10 cm 土层 NTS 处理土壤体积质量明显低于 T、NT、TP 处理, NTS 与 T 处理差异显

著, 10~30 cm 土层中, 各处理间均无显著差异。

2007 年小麦地 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤孔隙度均为 NTS 最大, T 最低, NTS 与 T 差异显著。春小麦—豌豆轮作序列下, 2007 年 0~5 cm 土壤体积质量  $T > TP > NT > TS$   $NTP > NTS$ , NTS 与 T、TP 差异显著, 与 NT、TS 和 NTP 无差异, 5~10 cm 土壤体积质量 NTS 与 T 差异显著, 与其他处理差异不显著, 10~30 cm 各处理间无显著差异。2014 年 0~5 cm 土层 NTS 处理土壤体积质量最低, NTS 与 T 处理差异显著, 5~10 cm 土层中, NTS 与 NT、TP 差异不显著, 与 T 差异显著, 10~30 cm 土层中, NTS 与 T 差异显著。

同时, 以 2007 年和 2014 年同处理平均值比较, 0~30 cm 土壤体积质量随保护性耕作应用年限的延长而逐渐降低。如 NTS 处理 2001、2007 和 2014 年 0~5 cm 土壤体积质量分别为  $1.29 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $1.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

不同耕作措施下 0~30 cm 土壤孔隙度发生显著变化(表 3)。在豌豆—春小麦轮作序列, 2007 年 0~5 cm 土壤孔隙度 NTS 与其他处理间差异显著; 5~10 cm 土壤孔隙度 NTS 与 T、TS 差异显著, 与 NT、TP 和 NTP 差异不显著; 10~30 cm 土壤孔隙度 NTS 与 T 差异显著。2014 年 0~5 cm 土壤孔隙度  $NTS > NTP > TS > TP > NT > T$ , NTS 与 T 差异显著, 5~10 cm 土壤孔隙度 NTS 与其他各处理间差异显著, 10~30 cm 土壤孔隙度 NTS 与 T 差异显著。春小麦—豌豆轮作序列下, 2007 年、2014 年 0~5 cm、5~10 cm 土壤孔隙度均表现为 NTS 最大, T 最小, NTS 与 T 差异显著, 10~30 cm 土壤孔隙度 NTS 与 TS 差异不显著, 与 T 差异显著。

同时, 以 2007 年和 2014 年同处理平均值比较, 0~30 cm 土壤孔隙度随保护性耕作应用年限的延长而逐渐增大。如 NTS 处理 2001、2007、2014 年 0~5 cm 土壤孔隙度分别为 51.32%、58.49%、61.32%。这表明保护性耕作可降低 0~30 cm 土层土壤体积质量, 提升土壤孔隙度; 其中免耕秸秆覆盖显著降低 0~10 cm 土层土壤体积质量, 并显著提升该土层土壤孔隙度, 且随着应用年限的延长, 效果更为突出。

因此, 应用保护性耕作有利于土壤结构的持续改善, 进而为作物增产奠定基础, 其中以免耕秸秆覆盖效果最佳。

表 2 2001 — 2014 不同耕作措施下小麦和豌豆地 0~30 cm 土壤体积质量

Table 2 Soil volumic mass of 0—30 cm in spring wheat and pea field under different tillage practices from 2001 to 2014

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	2001	豌豆—春小麦(P-W)		春小麦—豌豆(W-P)	
			2007	2014	2007	2014
			g · cm <sup>-3</sup>			
0~5	T	1.29	1.24 a	1.23 a	1.23 a	1.24 a
	NT		1.21 ab	1.17 b	1.14 ab	1.18 ab
	TS		1.22 ab	1.12 bc	1.07 b	1.10 b
	NTS		1.15 b	1.05 d	1.05 b	1.02 c
	TP		1.23 ab	1.16 b	1.20 a	1.16 ab
	NTP		1.22 ab	1.13 bc	1.11 ab	1.13 b
5~10	T	1.23	1.26 a	1.23 a	1.25 a	1.25 a
	NT		1.21 a	1.22 a	1.17 ab	1.24 ab
	TS		1.25 a	1.14 ab	1.18 ab	1.12 cd
	NTS		1.25 a	1.06 b	1.13 b	1.10 d
	TP		1.24 a	1.18 a	1.20 ab	1.20 ab
	NTP		1.22 a	1.14 ab	1.15 ab	1.16 bcd
10~30	T	1.32	1.32 a	1.31 a	1.29 a	1.29 a
	NT		1.25 a	1.30 a	1.21 a	1.26 ab
	TS		1.31 a	1.24 a	1.24 a	1.23 b
	NTS		1.28 a	1.23 a	1.27 a	1.20 b
	TP		1.27 a	1.25 a	1.26 a	1.26 ab
	NTP		1.26 a	1.24 a	1.21 a	1.24 ab

注:同列不同小写字母表示处理间 0.05 水平上差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level, the same below.

表 3 2001 — 2014 不同耕作措施下小麦和豌豆地 0~30 cm 土壤孔隙度

Table 3 Soil porosity of 0—30 cm of wheat and pea field under different tillage practices from 2001 to 2014

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	2001	豌豆—春小麦(P-W)		春小麦—豌豆(W-P)	
			2007	2014	2007	2014
			%			
0~5	T	51.32	53.21 c	53.58 d	53.58 c	53.21 d
	NT		54.33 b	55.84 c	56.98 bc	55.47 c
	TS		53.96 bc	57.73 b	59.62 ab	58.49 b
	NTS		56.60 a	61.13 a	60.38 a	61.51 a
	TP		53.58 c	56.22 bc	54.72 c	56.23 bc
	NTP		53.96 bc	53.96 bc	59.24 ab	58.11 b
5~10	T	53.58	52.45 b	53.58 c	52.83 c	52.83 d
	NT		54.33 a	53.96 c	55.85 b	53.21 cd
	TS		52.83 b	56.98 b	55.47 b	57.74 a
	NTS		53.58 a	60.00 a	57.36 a	58.49 a
	TP		53.21 ab	55.47 bc	54.72 bc	54.72 bc
	NTP		53.96 a	53.96 a	56.98 b	56.60 ab
10~30	T	50.18	50.18 b	50.56 b	51.32 c	51.32 b
	NT		52.83 a	50.94 b	54.34 a	52.45 b
	TS		50.56 ab	53.21 a	53.21 ab	53.58 a
	NTS		51.69 a	53.58 a	52.08 b	54.72 a
	TP		52.07 a	52.83 ab	52.45 b	52.45 b
	NTP		52.45 a	52.45 a	53.21 a	54.34 a

2.2 不同耕作措施下播种期 0~200 cm 土壤体积含水量垂直变化

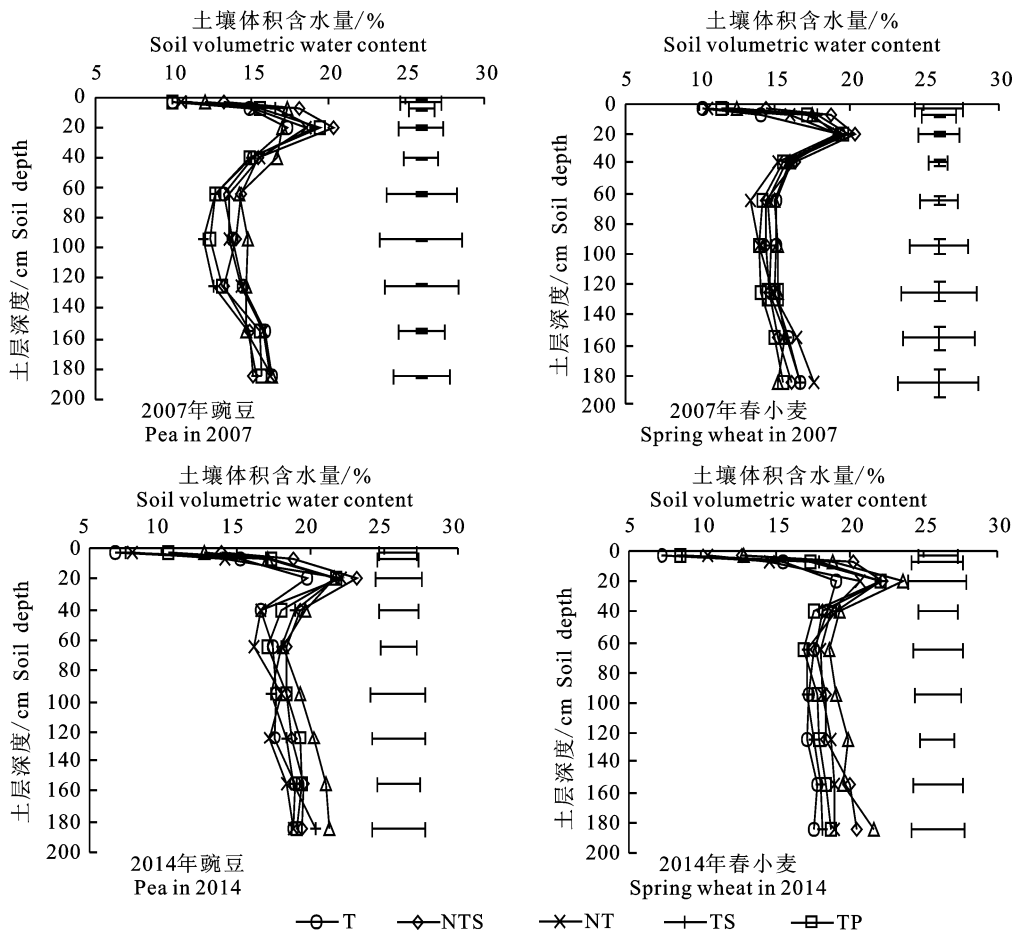
不同保护性耕作措施对小麦播种期土壤体积

含水量的影响主要集中在 0~10 cm 土层(图 2)。2007 年豌豆地和春小麦地播种期 0~5 cm 土壤体积含水量 NTS 与 T、NT 差异显著,5~10 cm

体积含水量 NTS 与 T、NT、TP 处理差异显著,10~30 cm 各处理间不显著。豌豆地 0~10 cm 土层平均体积含水量由大到小的排序为 NTS>NTP>TS>TP>NT>T,NTS 和 NTP 较 T 分别提高 25.83%和 18.09%,春小麦地 0~10 cm 土层平均体积含水量表现相同趋势,NTS、NTP 较 T 分别提高 36.33%和 23.31%。2014 年豌豆地、春小麦地表层 0~10 cm 土壤平均含水量 NTS 和 NTP 处理高,T 和 NT 低,NTS 和 NTP 处理与 T 和 NT 处理达显著,10~30 cm 体积含

水量豌豆地 NTS 与 T 差异显著,春小麦地 NTS 和 NTP 与 T 差异显著。豌豆地 0~10 cm 土层平均体积含水量由大到小的排序为 NTS>NTP>TP>TS>NT>T,NTS 和 NTP 较 T 提高 49.16%和 36.47%。春小麦表现相同趋势,NTS 和 NTP 较 T 分别提高 44.29%和 38.71%。

因此,免耕秸秆覆盖和免耕地膜覆盖能有效防止土壤水分蒸发,使土壤具有较高含水量,为种子萌发及幼苗生长提供良好的环境条件。



短线表示 LSD 值在 0.05 水平上差异显著 Short lines indicate the LSD value is significant difference at 0.05 level

图 2 2007 年和 2014 年不同耕作措施豌豆和春小麦播种期 0~200 cm 土壤体积含水量  
Fig. 2 Soil volumetric water content of pea and spring wheat sowing stages at 0—200 cm under different tillage treatments in 2007 and 2014

### 2.3 不同耕作措施对豌豆和春小麦耗水量、产量及水分利用效率的影响

由于 2007 年作物播种后 20 多天无有效降水,此时作物出苗不齐,豌豆缺苗尤为严重,因此,2007 年豌豆、春小麦产量严重低下。如表 4 所示,保护性耕作措施对作物耗水存在差异,2007 年豌豆 NTS 处理耗水最多,NT 最少,NTS 与

NT 差异不显著;春小麦处理 T 耗水最多,NTS 次之,NTS 与 T 差异不显著。2014 年豌豆 NTS 耗水最多,NTS 与 T 差异显著,春小麦也是 NTS 耗水最多,TP 最少,NTS 与 TP 差异显著。以 2 a 平均值比较,豌豆 NTS 比其余各处理多消耗水分 19.50~32.44 mm,春小麦 NTS 处理分别较其余各处理多消耗 2.21~47.63 mm 水分。

表 4 不同耕作措施对耗水量、产量及水分利用效率的影响

Table 4 Effects of different tillage treatments on water consumption, yield and water use efficiency

年份 Year	处理 Treatment	耗水量/mm Water consumption		籽粒产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) Grain yield		WUE/(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	
		豌豆 Pea	春小麦 Spring wheat	豌豆 Pea	春小麦 Spring wheat	豌豆 Pea	春小麦 Spring wheat
2007	T	129.54 ab	195.03 a	205.59 cd	561.53 c	1.59 d	2.88 b
	NT	120.93 b	177.38 a	276.86 bc	633.47 bc	2.29 bc	3.57 b
	TS	125.79 ab	189.68 a	341.86 b	666.30 bc	2.72 b	3.51 b
	NTS	132.36 a	194.15 a	552.61 a	943.87 a	4.18 a	4.86 a
	TP	122.40 ab	164.51 a	179.87 d	731.79 b	1.47 d	4.45 a
	NTP	128.40 ab	193.01 a	248.72 cd	926.44 a	1.94 cd	4.80 a
2014	T	245.11 b	196.50 ab	1 193.65 c	1 085.87 c	4.66 c	5.53 d
	NT	252.24 a	167.15 b	1 228.42 bc	1 111.22 bc	5.59 bc	6.67 dc
	TS	231.86 b	172.78 ab	1 367.49 b	1 273.51 bc	6.63 ab	7.47 bc
	NTS	281.28 a	201.80 a	1 610.86 a	1 671.73 a	8.28 ab	8.34 abc
	TP	226.37 b	136.19 c	1 525.31 a	1 339.33 b	7.64 a	9.97 a
	NTP	226.51 b	181.15 ab	1 529.73 a	1 601.76 a	8.03 a	8.89 ab

2007 年豌豆产量 NTS>TS>NT>NTP>T>TP, NTS 与其余各处理差异显著, NTS 较 T 提高 1.69 倍。春小麦产量 NTS 最高, NTP 次之, T 最低, NTS 与 NTP 无显著差异, 与 T 差异显著, NTS、NTP 较 T 分别提高 68.09%、64.99%。2014 年豌豆产量 NTS>NTP>TP>TS>NT>T, NTS 与 NTP、TP 差异不显著, 与 T 差异显著, NTS 较 T 提高 34.95%。春小麦产量 NTS、NTP 较 T 分别提高 53.95%、47.51%。

不同保护性耕作措施对豌豆和春小麦水分利用效率的影响基本与产量一致, NTS 和 NTP 提高了豌豆和春小麦的水分利用效率。2007 年豌豆、春小麦水分利用效率 NTS 比 T 分别提高 1.63 倍和 68.75%。2014 年豌豆和春小麦水分利用效率 NTS 较 T 分别提高 77.68% 和 50.81%。

综上所述, 免耕秸秆覆盖和免耕地膜覆盖在增加作物耗水量的同时豌豆和春小麦的产量及水分利用效率也随之提高。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同耕作措施对土壤体积质量的影响

耕作措施对土壤最显著的影响就是引起土壤物理结构的变化<sup>[16]</sup>, 但就耕作措施对土壤体积质量影响研究结果不尽一致。廖萍和黄国勤<sup>[17]</sup>研究发现, 免耕秸秆覆盖可以降低土壤体积质量, 增加土壤孔隙度, 改善土壤的通透性。但也有研究表明<sup>[18]</sup>, 免耕与传统耕作处理下 0~10 cm 土层

土壤体积质量差异不明显, 且免耕地土壤体积质量略高。本研究通过连续 7 a 和 14 a 的保护性耕作定位试验发现, 保护性耕作各处理均能降低土壤体积质量, 增加土壤孔隙度, 且随保护性耕作应用年限的延长, 免耕秸秆覆盖降低 0~5 cm 和 5~10 cm 土层土壤体积质量, 增加土壤孔隙度效果越显著, 这与姚珍等<sup>[19]</sup>、王昌全等<sup>[20]</sup>研究结果一致, 认为与传统耕作农田相比, 长期免耕能降低土壤体积质量, 增加土壤总孔隙度。在农业生产中, 耕层土壤体积质量的好坏直接影响着土壤肥力状况和作物根系的发育<sup>[21]</sup>。因此, 在陇中黄土高原西部旱农区实施免耕秸秆覆盖有助于降低土壤体积质量, 增加土壤孔隙度, 形成良好的土壤结构; 且增加秸秆覆盖后, 有利于土壤疏松多孔, 为作物生长发育奠定良好土壤物理基础。

#### 3.2 不同耕作措施对土壤含水量、作物耗水量、产量及水分利用效率的影响

春旱突出是困扰黄土高原旱作农业的主要问题<sup>[22]</sup>, 作物播种期农田土壤水分状况不仅与降雨量的多少密切相关, 而且与耕作方式以及地表裸露状况有关<sup>[23-24]</sup>。本研究通过测定不同耕作措施下豌豆和春小麦播种期 0~200 cm 土壤含水量发现, 免耕秸秆覆盖和免耕地膜覆盖 0~10 cm 土层平均土壤体积含水量显著高于传统耕作, 为作物出苗提供了良好的水分环境, 这与张丽华等<sup>[25]</sup>在渭北旱原半湿润区研究表明保护性耕作有利于土壤水分蓄存结果相似; 同时研究发现, 免耕秸秆覆

盖和免耕地膜覆盖相较于传统耕作豌豆和春小麦耗水量增加的同时产量和水分利用效率也显著提高,但与免耕地膜覆盖不利于降低土壤体积质量,增加土壤孔隙度,这与黄高宝等<sup>[5]</sup>和张仁陟等<sup>[10]</sup>在此同一定位试验前期研究结果一致。其中免耕秸秆覆盖处理 2007 年的豌豆、春小麦产量和水分利用效率分别较传统耕作提高 1.69 倍、1.63 倍和 68.09%、68.75%,2014 年豌豆、春小麦产量和水分利用效率分别提高 34.95%、77.68% 和 53.95%、50.81%。其原因是长期免耕秸秆覆盖有利于土壤体积质量降低,土壤孔隙度的提高,利于降雨下渗和蓄存<sup>[26]</sup>;而且秸秆覆盖和免耕地膜覆盖有效减少休闲期农田地表面裸露面积,降低土壤水分蒸发,降低有限降水的无效损耗,从而提高作物产量与水分利用效率<sup>[27]</sup>。

总之,在陇中黄土高原地区推广以免耕秸秆覆盖为代表的保护性耕作措施,可以持续改善土壤结构,提高水分利用效率和作物产量,促进农业可持续发展。

#### 参考文献 Reference:

- [1] 宋丽萍,罗珠珠,李玲玲,等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿-作物轮作对土壤物理性质的影响[J]. 草业学报,2015,24(7):12-20.  
SONG L P, LUO ZH ZH, LI L L, *et al.* Effects of lucerne-crop rotations on soil physical properties in the semi-arid Loess Plateau of central Gansu[J]. *Acta Pratacuturae Sinica*, 2015, 24(7):12-20.
- [2] DEXTER A R. Soil physical quality[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(2):129-130.
- [3] 李玲玲,黄高宝,张仁陟,等. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤水分的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(5):94-96.  
LI L L, HUANG G B, ZHANG R ZH, *et al.* Effects of no-till with stubble retention on soil water regimes in rainfed areas[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5):94-96.
- [4] 张仁陟,黄高宝,蔡立群,等. 几种保护性耕作措施在黄土高原旱作农田的实践[J]. 中国生态农业学报,2013,21(1):61-69.  
ZHANG R ZH, HUANG G B, CAI L Q, *et al.* Dry farmland practice involving multi-conservation tillage measures in the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):61-69.
- [5] 黄高宝,郭清毅,张仁陟,等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. 生态学报,2006,26(4):1176-1185.  
HUANG G B, GUO Q Y, ZHANG R ZH, *et al.* Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1176-1185.
- [6] ZHANG Q J, FU B J, CHEN L D, *et al.* Dynamics and driving factors of agricultural landscape in the semiarid hilly area of the Loess Plateau, China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2004, 103(3):535-543.
- [7] LAI R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [8] 李琳,李素娟,张海林,等. 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究[J]. 水土保持学报,2006,20(3):106-109.  
LI L, LI S J, ZHANG H L, *et al.* Study on soil C pool management index of conservation tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3):106-109.
- [9] CHAN K Y, HEENAN D P. Effect of tillage and stubble management on soil water storage, crop growth and yield in a wheat-lupin rotation in southern NSW [J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1996, 47(3):479-488.
- [10] 张仁陟,罗珠珠,蔡立群,等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报,2011,20(4):1-10.  
ZHANG R ZH, LUO ZH ZH, CAI L Q, *et al.* Effects of long-term conservation tillage on soil physical quality of rainfed areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Pratacuturae Sinica*, 2011, 20(4):1-10.
- [11] 刘世平,陈后庆,聂新涛,等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田土壤肥力的综合评价[J]. 农业工程学报,2008,24(4):51-56.  
LIU SH P, CHEN H Q, NIE X T, *et al.* Comprehensive evaluation of tillage and straw returning on soil fertility in a wheat-rice double cropping system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4):51-56.
- [12] MEHARBAN S K, RATTAN L, MERRIE A V. Twenty two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio [J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 126:151-158.
- [13] 武际,郭熙盛,王允青,等. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(3):87-93.  
WU J, GUO X SH, WANG Y Q, *et al.* Effects of tillage patterns on crop yields and soil physical chemical properties in wheat-rice rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3):87-93.
- [14] 梁淑敏,谢瑞芝,汤永禄,等. 成都平原不同耕作模式的农田效应研究 I. 对土壤性状及作物产量的影响[J]. 中国农业科学,2010,43(19):3988-3996.  
LIANG SH M, XIE R ZH, TANG Y L, *et al.* Effects of tillage systems on fields in Chengdu Plain I. The effects of tillage systems on soil properties and crop yields[J]. *Sci-*

- entia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19):3988-3996.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978:66-77.  
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Analysis Method of Soil Physical Properties[M]. Beijing: Science Press, 1978:66-77.
- [16] 刘 爽, 何文清, 严昌荣, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 65-70.  
LIU SH, HE W Q, YAN CH R, *et al.* Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 65-70.
- [17] 廖 萍, 黄国勤. 红壤旱地保护性耕作对土壤理化性状的影响[J]. 耕作与栽培, 2006, 25(5):31-32.  
LIAO P, HUANG G Q. Effects of conservation tillage on soil physical and chemical properties of red soil[J]. *Tillage and Cultivation*, 2006, 25(5):31-32.
- [18] RAHMAN M H, OKUBO A, SUGIYAMA S, *et al.* Physical, chemical and microbiological properties of an and soil as related to land use and tillage practice[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 101(1):10-19.
- [19] 姚 珍, 黄国勤, 张兆飞, 等. 稻田保护性耕作研究-Ⅱ. 不同耕作方式对水稻产量及生理生态的影响[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(2):182-186.  
YAO ZH, HUANG G Q, ZHANG ZH F, *et al.* Studies on paddy field conservational tillage Ⅱ. The influence of different conservational tillage methods on rice yield and physiological and ecological benefits[J]. *Acta Agriculture Universities Jiangxiensis*, 2007, 29(2):182-186.
- [20] 王昌全, 魏成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 四川农业大学学报, 2001, 19(2):152-154.  
WANG CH Q, WEI CH M, LI T Q, *et al.* Effect of different zero tillage on the crop yield and soil property [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2001, 19(2):152-154.
- [21] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 等. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9):66-71.  
SUN G F, ZHANG H L, XU SH Q, *et al.* Effects of rotational tillage treatments on soil structure and water storage in double rice cropping region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9):66-71.
- [22] 黄高宝, 张恩和. 甘肃黄土高原生态环境建设与农业可持续发展战略研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1):16-19.  
HUANG, G B, ZHANG E H, Strategies for ecological environment construction and agricultural sustainable development in Loess Plateau of Gansu province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(1):16-19.
- [23] SU Z, ZHANG J, WU W, *et al.* Effects of conservation tillage practices on winter wheat water use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3):307-314.
- [24] 侯贤清, 王 维, 韩清芳, 等. 夏闲期轮耕对小麦田土壤水分及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10):2524-2532.  
HOU X Q, WANG W, HAN Q F, *et al.* Effects of rotational tillage during summer fallow on wheat field soil water regime and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2524-2532.
- [25] 张丽华, 李 军, 贾志宽, 等. 不同保护性耕作对渭北旱塬麦玉轮作田肥力和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4):199-207.  
ZHANG L H, LI J, JIA ZH K, *et al.* Effects of different conservation tillage measures on soil fertility, WUE and field in winter wheat-spring maize rotation field of Weibei Highland [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(4):199-207.
- [26] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1):78-85.  
QIN H L, GAO W SH, MA Y C, *et al.* Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1):78-85.
- [27] 余海英, 彭文英, 马 秀. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):99-104.  
YU H Y, PENG W Y, MA X. Effects of no tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1):99-104.



## Effects of Long-term Different Tillage Practices on Soil Volumic Mass and Crop Water Use Efficiency of Loessal Soil

DENG Chaochao, LI Lingling, XIE Junhong, PENG Zhengkai,  
WANG Jinbin, XIE Jianhui, SHEN Jicheng and Eunice Essel

(Gansu Provincial Key Lab of Arid Land Crop Sciences, Agronomy College Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** A long-time fixed-point experiment was conducted to study the effects of five different conservation tillage [no tillage(NT), conventional tillage with straw(TS), no tillage with straw mulching (NTS), conventional tillage with plastic film mulching (TP), no tillage with plastic film mulching (NTP)] and conventional tillage on the soil volumic mass, water content, water consumption, crop yield and water use efficiency. The results showed that conservation tillage decreased the 0–30 cm soil volumic mass and increased soil porosity, NTS significantly decreased 0–10 cm soil volume mass and improved the soil porosity, and with the extension of the application period, the effect was more prominent. Conservation tillage significantly improved the soil water content of 0–10 cm soil layer at sowing period, especially for the NTS and NTP treatment. Compared with traditional tillage, NTS and NTP treatments increased crop water consumption, crop yield and water use efficiency at the same time, but NTP treatment could not improve soil structure sustainably. Therefore, long-term application of NTS can significantly improve soil structure, increase soil water use efficiency, thus, this can further increase crop yield, promote the the sustainable development of agriculture.

**Key words** Tillage practices; Conservation tillage; Soil volumic mass; Yield; Water use efficiency

**Received** 2018-01-12

**Returned** 2018-03-03

**Foundation item** The National Natural Science Foundation of China(No. 31460337, No. 31660373 and No. 31761143004); the National Science & Technology Dillar Program during the Twelfth Five-Year Plan(No. 2012 BAD14B03); Education Department of Gansu Province(No. 2017C-12).

**First author** DENG Chaochao, male, master student. Research area: dryland and oasis farming system. E-mail: 86585 1869@qq.com

**Corresponding author** LI Lingling, female, Ph. D, professor. Research area: dryland and oasis farming system. E-mail: lill@gsau.edu.cn

(责任编辑: 史亚歌 Responsible editor: SHI Yage)