

# 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响

罗珠珠<sup>1,2</sup>, 蔡立群<sup>1,2</sup>, 李玲玲<sup>2</sup>, 牛伊宁<sup>2</sup>, 张仁陟<sup>2</sup>, 谢军红<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学省部级共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 通过长期定位试验,研究了黄土高原西部旱农区传统耕作措施(T)和5种保护性耕作措施免耕+秸秆覆盖(NTS)、免耕(NT)、传统耕作+秸秆还田(TS)、传统耕作+地膜覆盖(TP)和免耕+地膜覆盖(NTP)对土壤有机质、速效养分以及作物产量的影响。结果表明,经过6a不同耕作措施后,各处理土壤有机C、NO<sub>3</sub>-N以及速效P含量均有所提高,其中有机C含量比试验初期提高了4.92%~18.05%,NO<sub>3</sub>-N含量提高了17.98%~31.08%,速效P含量提高143.04%~212.87%。各处理土壤速效钾含量均有所下降,其中以NTS和TS降幅较小,仅为2.75%和6.26%。6a间小麦和豌豆平均产量均以NTS最高(分别为2030 kg·hm<sup>-2</sup>和1381 kg·hm<sup>-2</sup>),而NT最低(1608 kg·hm<sup>-2</sup>和1060 kg·hm<sup>-2</sup>)。传统耕作秸秆还田能促进土壤耕层肥力的提高,但产量效应不明显;地膜覆盖有某些年份增产效应明显,但不利于土壤肥力的持续提高。因此,在黄土高原西部旱农区实施免耕秸秆覆盖既有利于作物产量的提高,也可以改善耕层土壤肥力。

**关键词:** 免耕; 秸秆覆盖; 地膜覆盖; 土壤养分; 产量; 黄土高原

**中图分类号:** S157.4+2; S512.1+2 **文献标志码:** A

## Long-term effects of tillage system on soil nutrients and grain yields in rainfed area of Loess Plateau

LUO Zhu-zhu<sup>1,2</sup>, CAI Li-qun<sup>1,2</sup>, LI Ling-ling<sup>2</sup>, NIU Yi-ning<sup>2</sup>, ZHANG Ren-zhi<sup>2</sup>, XIE Jun-hong<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** This study determined the long-term effects of tillage systems on soil nutrients and crop productivity in a semiarid environment. A long-term field study was initiated at Dingxi, the western Loess Plateau of China, in 2001. Field pea (*Pisum sativum* L.) in rotation with spring wheat (*Triticum aestivum* L.) were grown under six tillage systems: conventional tillage (T), conventional tillage with stubble incorporating (TS), no-till with no stubble retention (NT), no-till with stubble retention (NTS), conventional tillage with plastic film mulching (TP), and no-till with plastic mulching (NTP). The results showed that, compared with the pretreatment, six tillage systems increased soil organic carbon by 4.92%~18.05%, available N by 17.98%~31.08%, available P by 143.04%~212.87%. However, compared with the pretreatment, six tillage systems decreased available K by 2.75% and 6.26% under NTS and TS, respectively. The average grain yields in a six-years term were highest under NTS with stubble retention for both spring wheat and field pea (2030 vs. 1381 kg·hm<sup>-2</sup>), and lowest under NT without stubble retention for both spring wheat and field pea (1608 vs. 1060 kg·hm<sup>-2</sup>). Conventional tillage with stubble incorporating could improve soil fertility, but this practice could not increase grain yield. The plastic mulch could increase grain yield in some seasons, but this practice could not sustainably improve soil fertility. Therefore, no-till with stubble retention is the most promising system for increasing grain yield and improving the sustainable development of agriculture in the semiarid Northwest China.

**Keywords:** no till; stubble retention; plastic film mulching; soil nutrients; grain yields; Loess Plateau

收稿日期:2014-05-05

基金项目:国家科技支撑计划(2012BAD14B03);国家自然科学基金(31171513,31160269,41461067);甘肃省财政厅高校基本科研业务  
费项目(035041049);甘肃农业大学青年导师基金(GAU-QNDS-201402)

作者简介:罗珠珠(1979—),女,甘肃天水人,副教授,博士,主要从事土壤生态的教学与研究工作。E-mail:luozz@gsau.edu.cn。

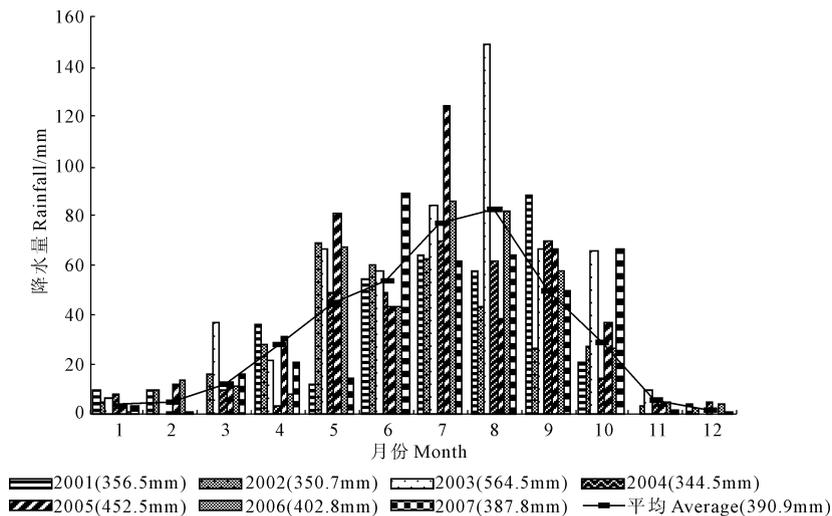
土地利用方式和管理措施的改变经常会使土壤理化性质发生变化,从而影响土壤的生态功能以及作物的生长发育和产量形成。黄土高原干旱、半干旱雨养农业区常年以传统耕作方式对土壤进行翻耕、耙耱,这种强烈的机械扰动,加之作物秸秆大量移出常常导致表土暴露和土壤结构的破坏,增加了水土流失,并导致土壤肥力持续下降。因此,寻求一种培肥保墒,减轻土壤水蚀的耕作技术是该区实现农业可持续发展的当务之急。国外大量研究表明,以少耕、免耕为代表的保护性耕作措施具有良好的生态效益,可以改善土壤结构<sup>[1-2]</sup>,提高土壤有机质含量<sup>[3]</sup>,降低地表径流和土壤侵蚀<sup>[4]</sup>,改善土壤养分状况<sup>[5-6]</sup>,提高作物产量和水分利用率<sup>[7-8]</sup>;同时,免耕还具有节能、省工和降低生产成本的优点<sup>[9-10]</sup>。但是,国内谢瑞芝等<sup>[11]</sup>总结了 1994—2005 年我国保护性耕作的研究成果,发现关于保护性耕作对土壤性质和作物产量的影响说法不一,这可能是土壤类型、气候条件、种植制度不同所致。

鉴于保护性耕作研究存在明显的地域特色,本研究在 2001—2007 年长期定位试验的基础上,对黄土高原西部半干旱区 6 种不同耕作措施下土壤肥力和作物生产情况进行研究,旨在为适应当地生态条件的耕作方式的筛选和生产技术调控提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试区概况

试验设在陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的定西市安定区李家堡镇麻子川村。属中温带半干旱区,平均海拔 2 000 m,年均太阳辐射 141.6 kcal·cm<sup>-2</sup>,日照时数 2 476.6 h,年均气温 6.4℃,≥0℃积温 2 933.5℃,≥10℃积温 2 239.1℃;无霜期 140 d。多年平均降水 390.9 mm(图 1),年蒸发量 1 531 mm,干燥度 2.53,80%保证率的降水量为 365 mm,变异系数 24.3%,为典型的雨养农业区。土壤为典型的黄绵土,土质绵软,土层深厚,质地均匀,贮水性能良好。



注:括号内数字表示年降水量。Note: The figures in brackets represents annual rainfall.

图 1 试区 2001—2007 年各月降水量与多年平均月降水量

Fig.1 Monthly and average rainfall during 2001—2007 at the experiment site

### 1.2 试验设计

该试验所依托的研究共设 6 个处理,如表 1 所示。结合小麦豌豆的年间轮作,为了加快研究进程,研究设计了小麦→豌豆(2002 年小麦→2003 年豌豆→2004 年小麦→2005 年豌豆→2006 年小麦→2007 年豌豆,简称 W→P)和豌豆→小麦(2002 年豌豆→2003 年小麦→2004 年豌豆→2005 年小麦→2006 年豌豆→2007 年小麦,简称 P→W)2 个轮作序列,4 次重复,共 48 个小区,小区面积 80 m<sup>2</sup>(4 m×20 m),随机区组排列。2001 年 8 月开始布置试验,所有秸秆还田处理均覆盖小麦秸秆 4 500 kg·hm<sup>-2</sup>(秸秆铡短

至 15 cm),之后 2002—2007 年间每年收获后所有秸秆全部还原小区,田间留茬 5~10 cm。

供试作物春小麦为“定西 35”,播种量 187.5 kg·hm<sup>-2</sup>;豌豆为“绿农 1 号”,播种量 100 kg·hm<sup>-2</sup>。T、NT、TS、NTS 处理用中国农业大学研制的免耕播种机播种,春小麦行距 20 cm,豌豆行距 24 cm,播深均为 7 cm。TP 和 NTP 处理用当地小型播种机播种,这种播种机同时具有播种、施肥和覆膜的功能。因此,该播种机在 10 月份用来覆膜,3 月份用来播种施肥。春小麦播期为每年 3 月中旬,收获期为 8 月上旬,豌豆播期为每年 3 月下旬,收获期为 7 月中旬。

小麦各处理均施 N 105 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 105 kg·hm<sup>-2</sup> 105 kg·hm<sup>-2</sup>(二铵 + 过磷酸钙),所有肥料都作为基肥在播种时同时施入。

表 1 试验处理描述

Table 1 Descriptions of treatments in the long-term conservation tillage experiment

代码 Code	处理 Treatments	耕作方法 Description
T	传统耕作 Conventional tillage with no straw	试验地在前茬收获后三耕两耩。8 月份收获后马上进行第 1 次耕作,8 月底和 9 月分别进行第 2、3 次耕作,耕深依次为 20 cm, 10 cm 和 5 cm。9 月份第 3 次耕后耩 1 次,10 月份冻结前再耩 1 次。这是定西地区很典型的传统耕作方式。 The field was ploughed 3 times and harrowed twice after harvesting. The first plough was in August immediately after harvesting, and the second and third ploughs were in late August and September, respectively. The plough depths were 20 cm, 10 cm and 5 cm, respectively. The field would be harrowed after last cultivation in September and re-harrowed in October before the ground was frozen. This was the typical conventional tillage practice in Dingxi region.
NT	免耕 No till with no straw cover	全年不耕作,播种时用免耕播种机一次性完成施肥和播种。 No-till throughout the life of the experiment; no straw cover
TS	传统耕作 + 秸秆还田 Conventional tillage with straw incorporated	耕作方式同 T,但在结合第一次耕作将所有前作秸秆翻埋入土。 The field was ploughed and harrowed exactly as the T treatment (3 passes of plough and 2 harrows), but with straw incorporated at the first plough. All the straws from the previous crop would be sent back to the original plot immediately after threshing and then incorporated into ground.
NTS	免耕 + 秸秆覆盖 No-till with straw cover	播种、除草方法同 NT,收获脱粒后将全部前作秸秆覆盖在原小区。 No-till throughout the life of the experiment. The ground was covered with straw from the previous crop from August till next March. All the straw from previous crop would be sent back to the original plot immediately after threshing.
TP	传统耕作 + 地膜覆盖 Conventional tillage with plastic mulch	试验地耕耩同处理 1(三耕两耩),但在 10 月份最后 1 次耩后覆盖塑料薄膜(垄膜)。膜宽 40 cm,膜侧种作物,因此该处理作物宽窄行种植,宽行 40 cm,窄行 10 cm,平均 25 cm。 The field was ploughed and harrowed exactly as for T treatment (3 passes of plough and 2 harrows), but covered with plastic after the last harrow in October. Plastic film would be laid out between crop rows and the covering belt width was 40 cm. Thus, the row spaces between crops were 40 and 10 cm alternatively, with an average of 25 cm.
NTP	免耕 + 地膜覆盖 No-till with plastic mulch	全年不耕作,覆膜及播种的时间和方式同 TP,每年换膜不换位置。为避免前茬秸秆挂坏薄膜,收获后用剪草机剪平或耩平残茬。 No-till throughout the life of the experiment. The plastic film would be laid in October using the same machine as the treatment 5. To avoid the damage of plastic film, the crop residue would be mowed or/and harrowed after harvesting.

### 1.3 采样与实验分析

分别于 2001、2003、2005、2007 年作物收获后,分 0~5、5~10、10~30 cm 3 个层次采集样品。各小区随机取 3 个点,剔除石块、植物残根等杂物,混合装袋带回实验室,样品经风干后研磨、过筛分装以备测定土壤性状。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法<sup>[12]</sup>。速效养分含量采用常规方法测定。作物测产时剔除边行后,以各小区打碾实际产量为准,折算公顷产量。

### 1.4 数据分析

基础数据采用 Excel 2003 软件处理,统计分析采用 SPSS 18.0 统计软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同耕作方式下土壤有机碳变化动态

如图 2 所示,试验进行 2 a 后(2003 年)各处理

土壤有机 C 含量均比试验初期有所增加,其增幅为 9.91%~17.06%,其中 NTS 和 TS 处理归因于秸秆还田,其它处理则因为作物收获时进行留茬收割(当地农民收获作物时一般连根拔出,地上部分和地下部分均移出农田之外),一部分根茬未带出农田,补充了碳源。随着试验的推进,至 2005 年各处理土壤有机 C 含量均有所下降,这与当地降水有关,2004 年降水量年为整个试验期间最低(344.5 mm),导致土壤含水量降低而土壤温度升高,土壤有机碳矿化增强,特别是 T 处理连年的耕作导致土壤有机 C 矿化强烈,其含量甚至略低于试验初期;而且,枯水年较低的生物量导致土壤中根茬残留物减少,也削弱了土壤有机碳积累。2007 年各处理土壤有机 C 含量又有所提高,T、NT、TS、NTS、TP、NTP 处理分别比试验初期提高了 7.74%、9.86%、18.05%、17.47%、4.92%、9.07%。

### 2.2 不同耕作方式下土壤养分变化动态

由图 3 可知,试验进行 2 年后耕层 0~30 cm 硝态氮含量变化迥异,部分处理有所增加(T、NT、TS、TP),但部分处理(NTS 和 TP)有所下降。随着试验的推进,2005 年各处理硝态氮含量比试验初期均有所增加。截至 2007 年,T、NT、TS、NTS、TP、NTP 处理土壤速效 N 含量分别比 2001 年提高 31.08%、20.17%、27.20%、18.97%、23.18%、17.98%。相对于耕作三处理 T、TS、TP,免耕三处理 NT、NTS、NTP 处理速效氮增幅较小,这可能与免耕处理土壤上层含水量较多,引起上层土壤可溶性氮向下移动有关。

由图 4 可知,试验期间各处理耕层 0~30 cm 土壤速效磷含量均有不同程度的提高,其中 2003 年以 NTP 增幅较大,增加了 202.69%,2005 和 2007 年以 NTS 增长较快,分别增加了 184.98%和 212.87%,这可能与免耕条件下土壤含水量较多,改善了磷向根系扩散有关。

由图 5 可知,试验期间各处理速效钾含量均有下降,这主要归因于整个试验期间从未施用过钾肥,但作物生长需要吸收一定数量的钾。因此,自 2001 年 8 月至 2007 年 8 月作物收获后,尽管部分处理(TS、NTS)通过秸秆还田可在一定程度上弥补钾素损失,但各处理土壤速效钾含量均有所减少,其中以 NTS 和 TS 降幅较小,仅为 2.75%和 6.26%,这表明秸秆还田可明显延缓土壤钾的耗竭速度。

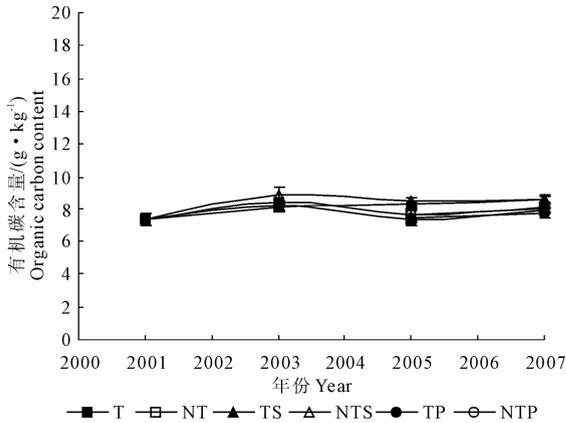


图 2 不同耕作措施下耕层土壤有机碳动态

Fig.2 Dynamic changes of soil organic carbon in the layer of 0~30 cm under different tillage systems

### 2.3 不同耕作方式对作物产量的影响

6 a 的产量结果如表 2 所示。对于小麦,2002 年以 NTS 处理产量最高,与其它处理间的差异达到显著水平;2003 年和 2006 年以 NTP 和 TP 产量较高,与其它处理间差异显著;2004 年 TP 最高,NTS 次之,但 NTS 与 TP 间差异不显著,而与其它处理间的差

异达到显著水平;2005 和 2007 年分别以 NTP 和 NTS 最高,但 NTS 与 NTP 间差异不显著,而与其它处理间的差异达到显著水平。6a 间 NTS 处理小麦平均

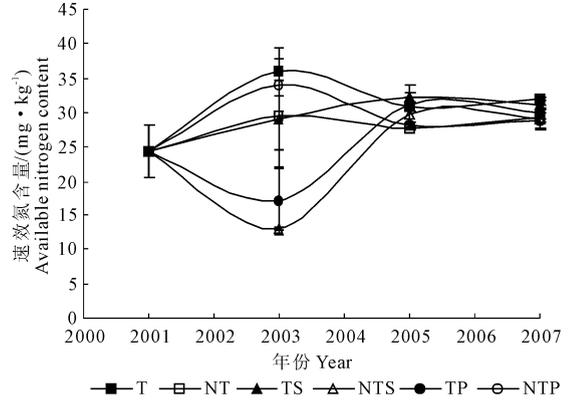


图 3 不同耕作措施下耕层土壤速效氮动态

Fig.3 Dynamic changes of soil available nitrogen in the layer of 0~30 cm under different tillage systems

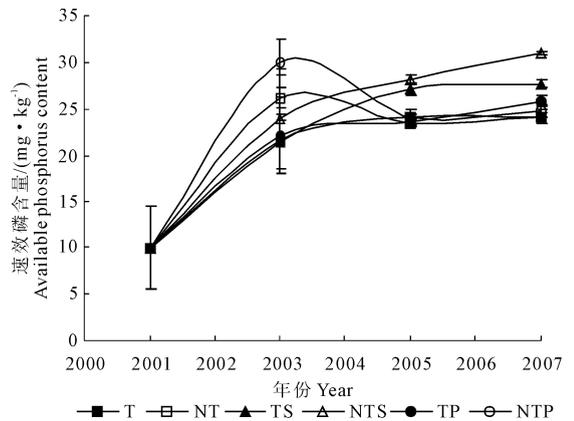


图 4 不同耕作措施下耕层土壤速效磷动态

Fig.4 Dynamic changes of soil available phosphorus in the layer of 0~30 cm under different tillage systems

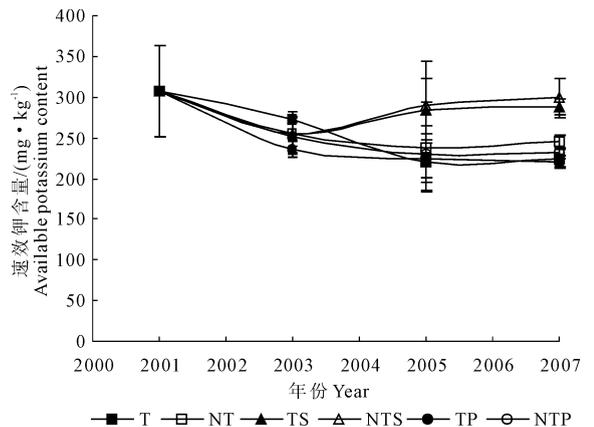


图 5 不同耕作措施下耕层土壤速效钾动态

Fig.5 Dynamic changes of soil available potassium in the layer of 0~30 cm under different tillage systems

产量为 2029.64 kg·hm<sup>-2</sup>,比 T、NT、TS、TP、NTP 提高了 18.10%、26.21%、13.15%、2.34%、2.38%。对于豌豆,2002 年、2003 年和 2007 年均以 NTS 产量最高,TS 和 NT 较低;2004 年 TP 最高,NT 最低;2005 年和 2006 年以 NTP 和 TP 产量较高,NTS 次之。2007 年以 NTS 最高,NTP 次之。统计分析表明,除了

2004 和 2005 年之外,其余年份各处理间差异均达到显著水平。6 a 间 NTS 处理豌豆平均产量为 1381.49 kg·hm<sup>-2</sup>,比 T、NT、TS、TP、NTP 提高了 20.25%、30.33%、15.83%、8.82%、10.39%。因此,免耕秸秆覆盖 NTS 一般情况下都可以提高春小麦和豌豆产量,而降水较少的干旱年份增产效果尤其显著。

表 2 不同耕作措施下作物产量/(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Grain yields under different tillage systems

作物 Crop	年份 Year	T	NT	TS	NTS	TP	NTP
春小麦 Spring wheat	2002	1816.05b	1413.50c	1735.75b	2150.67a	1385.39c	1258.42c
	2003	1416.05d	1544.73d	1645.75cd	1825.48b	2033.07ab	2139.88a
	2004	2188.94b	1664.10c	2162.09b	2381.99a	2625.36a	2170.90b
	2005	2900.22b	3076.55ab	2987.52b	3327.09ab	3277.31ab	3578.38a
	2006	1383.48bc	1316.51c	1564.79bc	1548.74bc	1777.15ab	1820.66a
	2007	561.53c	633.47bc	666.30bc	943.87a	731.79b	926.44a
	2002	1652.82ab	1416.28c	1526.77bc	1789.72a	1614.00ab	1528.72bc
豌豆 Field Pea	2003	881.35bc	803.15c	823.07c	1269.47a	1061.77b	1022.31b
	2004	1708.21a	1495.58a	1681.25a	1667.59a	1761.66a	1511.93a
	2005	1686.46b	1816.20ab	1911.06ab	2119.33a	1980.09ab	2148.07a
	2006	758.55bc	551.72c	871.94ab	890.21ab	1019.53ab	1049.07a
	2007	205.59cd	276.86bc	341.86b	552.61a	179.87d	248.72cd

注:同一行上的不同小写字母表示同一年不同处理间在 5% 水平上差异显著。

Note: Different letters in the same row represents significant difference at  $P \leq 0.05$  between treatments in same year.

### 3 结论与讨论

秸秆还田在提高土壤肥力、增加作物产量等方面已被许多研究所证实<sup>[13-16]</sup>,但免耕能否保持和提高作物产量及土壤肥力,长期以来在学术界有很大的争论。耕作措施被认为是引起农田土壤有机质含量下降的主要原因,耕作的机械扰动使土壤发生破碎、分散和混合,直接或间接地造成土壤有机质含量的下降<sup>[17]</sup>,而且对磷钾的活化和供应也有一定的作用,由于免耕土壤的有机质高于传统耕作,从而导致免耕土壤的 pH 值低于传统耕作,这是因为有机质分解产生的中间产物(有机酸)及其最终产物(CO<sub>2</sub>)均能增加土壤溶液的酸度,酸度的增加对某些固定磷的化合物具有一定的溶解力,并能削弱粘土矿物对 K 的固定作用,从而提高了土壤中固定态 P、K 的有效性<sup>[18-19]</sup>。本研究通过长达 6 a 的定位试验发现,免耕由于避免了机械扰动,降低了土壤有机碳矿化,并降低了土壤侵蚀使土层变薄引起的土壤养分损失,提高了土壤有机碳、速效氮和速效磷含量。虽然各处理都比试验前有所增加,但免耕秸秆覆盖土壤提高速度快、幅度大,这一结果与前人报道的结果较为一致<sup>[20,21-22]</sup>。免耕对土壤速效钾无明

显效应,而秸秆还田不但补充了土壤碳源,提高了土壤有机质和速效氮、速效磷,还可以补充土壤钾库并延缓速效钾的耗竭速度。本研究对产量的研究表明,免耕加秸秆覆盖可以提高春小麦的产量,但单独的免耕或秸秆覆盖效果并不理想。地膜覆盖在有些年份也可以增加小麦产量,但与免耕秸秆覆盖相比风险性较大,因为小麦播后~出苗前的降雨反而易于造成地膜覆盖土壤板结影响出苗,反而使得产量下降,这可能与地膜覆盖处理采用的膜侧播种法有关。虽然地膜覆盖可将有限降水集中到作物根区(垄沟内),但作物播种后出苗前的降雨易于造成地膜覆盖土壤板结,进而影响出苗。如 2002 年小麦播种后出苗前有一次 23.5 mm 之多的降水,使得地膜覆盖处理板结严重,出苗很差,甚至不到其它处理的一半。秸秆覆盖虽然引起了早春土壤温度的降低,但对小麦出苗并无显著影响,因为在春旱比较突出的黄土高原半干旱雨养农业区,影响作物出苗的关键因素是表层土壤水分,秸秆覆盖处理特别是 NTS 在整个休闲过程中积蓄了较多的水分,有良好的抑蒸保墒作用,明显提高春季小麦播种期表层土壤含水量,这对该地区保证作物苗全、苗壮具有十分重要的意义,也直接关系到产量的高低。因此,免耕秸秆

覆盖 NTS 一般情况下都可以提高春小麦和豌豆产量,而降水较少的干旱年份增产效果尤其显著。例如 2007 年,小麦全生育期降水仅为 163.9 mm(多年平均值为 248 mm)的情况下,免耕秸秆覆盖处理比传统耕作增产 68%,增产效应非常明显。

#### 参考文献:

- [1] Oyedele D J, Schjonning P, Sibbesen E, et al. Aggregation and organic matter fractions of three Nigerian soils as affected by soil disturbance and incorporation of plant material[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999,50:105-114.
- [2] Fabrizzi K P, Garcia F O, Costa J L, et al. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no tillage systems in the southern Pampas of Argentina[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005,81:57-69.
- [3] Chan K Y, Heenan D P. The effects of stubble burning and tillage on soil carbon sequestration and crop productivity in southeastern Australia[J]. *Soil Use Manage*, 2005,21:427-431.
- [4] Freebairn D M, Boughton W C. Hydrologica effects of crop residue management practices[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1985, 23:23-55.
- [5] Staley T E. Soil microbial and organic component alteration in a no-tillage chronosequence[J]. *Soil Science*, 1988,52(4):998-1005.
- [6] Ding G, Novak J M, Amarasiriwardena D, et al. Soil organic matter characteristics as affected by tillage management[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002,66:421-429.
- [7] Cannell R Q, Hawes J D. Trends in tillage practices in relation to sustainable crop production with special reference to temperate climates[J]. *Soil and Tillage Research*, 1994,30:245-282.
- [8] Papendick R I, Parr J F. No-till farming: The way of the future for a sustainable dryland agriculture[J]. *Annals of Arid Zone*, 1997,36: 193-208.
- [9] Landers J N, Saturnino H M, De Freitas P L. Organizational and policy considerations in zero tillage[C]//Saturnino, H M, Landers J N. *The Environment and Zero Tillage*. FAO, Rome, Italy, 2001:13-24.
- [10] Hobbs P R. Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2007,145:127-137.
- [11] 谢瑞芝,李少昆,金亚征,等.中国保护性耕作研究分析——保护性耕作与作物生产[J]. *中国农业科学*,2007,40(9):1914-1924.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业科技出版社,2000:30-134.
- [13] 刘金海,党占平,曹卫贤,等.不同覆盖和播种方式对渭北旱地小麦产量及土壤水分的影响[J]. *麦类作物学报*,2005,25(4):91-94.
- [14] Ottman M J, Doerge T A, Martin E C. Durum grain quality as affected by nitrogen fertilization near anthesis and irrigation during grain filling[J]. *Agronomy Journal*, 2000,92:1035-1041.
- [15] 劳秀荣,吴子一,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. *农业工程学报*,2002,18(2):49-52
- [16] 袁家福.麦田秸秆覆盖效应及增产作用[J]. *中国生态农业学报*,1997,7(3):61-65
- [17] Beare M H, Hendrix P F, Coleman D C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1994,58:777-786.
- [18] Reeves D W. The role of organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 43:131-167.
- [19] Sims A L. Irrigated corn yield and nitrogen accumulation response in a comparison of no-till and conventional till: tillage and surface-residue variables[J]. *Agronomy Journal*, 1998,90(4):630-637.
- [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.
- [21] 高明,张磊,魏朝富,等.稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. *植物营养与肥料学报*,2004,10(4):343-348.
- [22] 张磊,肖剑英,谢德体,等.长期免耕水稻田土壤的生物特征研究[J]. *水土保持学报*,2002,16(2):111-114.