

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

黄高宝¹, 郭清毅¹, 张仁陟², 逢 蕾¹, Guangdi LI³, Kwong Yin CHAN⁴, 于爱忠¹

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730070;

3. NSW Department of Primary Industry, Wagga Wagga, NSW 2650, Australia; 4. NSW Department of Primary Industry, Richmond, NSW 2753, Australia)

摘要: 保护性耕作 (conservation tillage) 能够减少水土流失、提高耕地产量, 是一类具有生态保护意义的持续性农业耕作形式。2002年至2004年在定西旱地农业地区进行了保护性耕作条件下旱地农田春小麦-豌豆双序列轮作土壤水分动态及产量效应的试验研究, 结果表明: 保护性耕作能够显著改善 0~200 cm 土层土壤贮水量及含水量, 随着降水量的增多土壤对降水的保蓄能力增强。在降水较少年份免耕秸秆覆盖的这种作用表现突出, 而在降水充沛的年份免耕地膜覆盖则更具优势。耕层土壤水分因受降水等因素的影响而变化剧烈, 耕层以下土壤水分变幅相对较小。播种期、五叶期及收获期土壤具有较高含水量, 而开花期土壤含水量则较低。在两种轮作体系中, 播种期春小麦和豌豆免耕秸秆覆盖处理 0~50 cm 土层含水量分别较常规耕作增加 28%、26% 和 11%、23%, 降水生产效率较常规耕作提高了 17.79%~26.81%。在春小麦-豌豆轮作体系中免耕秸秆覆盖处理的作物产量 (春小麦 + 豌豆) 及水分利用效率分别为 3 420 kg/hm² 和 8.11 kg/(hm²·mm), 较常规耕作分别提高 26.81% 和 25.39%。

关键词: 保护性耕作; 旱地; 双序列轮作; 水分动态; 水分利用效率 (WUE)

文章编号: 1000-0933(2006)04-1176-10 中图分类号: S152.7; S157.4+2 文献标识码: A

Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland

HUANG Gao-Bao¹, GUO Qing-Yi¹, ZHANG Ren-Zhi², PANG Lei¹, Guangdi LI³, Kwong Yin CHAN⁴, YU Ai-Zhong¹ (1. Faculty of Agronomy, Gansu Agricultural University, Gansu, Lanzhou 730070, China; 2. Faculty of Resource and Environment, Gansu Agricultural University, Gansu, Lanzhou 730070, China; 3. NSW Department of Primary Industry, Wagga Wagga, NSW 2650, Australia; 4. NSW Department of Primary Industry, Richmond, NSW 2753, Australia). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1176~1185.

Abstract: Conservation tillage can reduce water and soil erosion and improve crop yields. It is a kind of sustainable farming system which is beneficial for the environment. Effects of conservation tillage on soil water dynamic and crop yield in a phased rotation systems with spring wheat and field pea were studied in dryland in the middle of the Loess Plateau, Dingxi, Gansu from 2002 to 2004. Results showed that conservation tillage increased soil water storage and soil moisture in 0~200 cm depth as the rainfall increased. This effect was more obvious on no-tillage with straw cover in the drier years, and on no-tillage with plastic mulch in the deep depth. The soil moisture at top soil varied greatly with precipitation and other climatic factors, whereas soil moisture in the deep soil was rather stable. Soil moisture was higher at seeding stage, 5-leave stage and harvesting, but lower at anthesis. In the current rotation system, soil moisture content of 0~50 cm was 28%、26% and 11%、23% higher on no-tillage with straw

基金项目: 澳大利亚国际农业研究中心 (ACIAR) 合作项目 (SMCN(LWR2)/1999/094)

收稿日期: 2005-01-17; **修订日期:** 2005-10-17

作者简介: 黄高宝 (1965~), 男, 甘肃天水人, 教授, 主要从事多熟种植、耕作制度、水肥高效利用和宏观农业教学及研究. E-mail: Huanggb@gsau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by ACIAR "Improving the productivity and sustainability rainfed farming systems for the western Loess Plateau of Gansu Province" (SMCN(LWR2)/1999/094)

Received date: 2005-01-17; **Accepted date:** 2005-10-17

Biography: HUANG Gao-Bao, Professor, mainly engaged in the multiple cropping, farming system, high using efficiency of water and fertilizer and macro-agriculture. E-mail: Huanggb@gsau.edu.cn

cover than conventional tillage for spring wheat and field pea respectively. As the result, the precipitation productive efficiency on no-tillage with straw cover increased by 17.79% ~ 26.81% compared with conventional tillage. In the current spring wheat and field pea rotation system, the combined crop yields reached 3 420 kg/hm² and water use efficiency 8.11 kg/(hm²·mm) on the no-tillage with straw cover treatment, which was 26.81% and 25.39% higher than conventional tillage treatment, respectively.

Key words: conservation tillage; dryland; spring wheat; field pea; soil moisture; water use efficiency

生态环境警钟的敲响使保护性耕作(conservation tillage)^[1~11]越来越受到国内外学者的重视。免耕作为低耗持续农业生产和保护性耕作的一项重要手段,其作用逐渐扩大^[8,12,13];免耕和秸秆覆盖对土壤理化性质、微生物区系及生态环境的影响等方面都有不少报道^[9,14~17];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^[3~6,10,18~22];李全圣等^[7]认为,下垫面性状对农林系统微生态环境有较大的影响,因此小麦-豌豆免耕、轮作和秸秆还田、秸秆覆盖是一类新型的耕作栽培方式,它们能有效的改变农田的下垫面,以维护土壤结构的稳定性,减少土壤侵蚀,增产节支。

位于甘肃省中部的定西旱地农业区,降水量偏少,水分成为制约农业发展的限制因子。该区多年平均降水量 390.99 mm,雨季降水量大而集中,整个冬季和春季干旱少雨。年降水的 60% ~ 75% 集中于 6 ~ 9 月份,农作物播种期和幼苗生长期的 3 ~ 5 月份降水量只占全年降水的 18% ~ 26%,降水与作物生长严重错位。长期以来,传统的土壤耕作技术力求纳秋水、抗春旱,但由于休闲期土地裸露、蒸发强烈,传统耕作方式使 80% 以上的耕地土壤水分和养分无效损失加重,导致土壤退化严重^[23,24],成为旱地农业生产中的一大难题。为了农业的可持续发展和水土保持的需要,本试验以保持土壤水分、减少水土流失及解决降水与作物生育期错位为出发点,针对传统耕作方式所存在的问题,重点研究保护性耕作对旱地农田春小麦和豌豆双序列轮作土壤水分动态及产量的影响,以期探索出一种提高旱地土壤保水能力和减少水土流失的方法与途径,改善日益恶化的生态环境,实现粮食生产的可持续发展,达到经济效益、社会效益和生态效益的协调统一。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2002 年 3 月 ~ 2004 年 4 月在甘肃省定西县李家堡乡进行。李家堡位于甘肃省中部偏南,属中温带半干旱区。海拔 2000m,年均太阳辐射 141.6 × 1.48kJ/cm²,日照时数 2476.6h,年均气温 6.4℃,≥0℃积温 2933.5℃,≥10℃积温 2239.1℃,无霜期 140d。多年平均降雨量 390.99mm,年蒸发量 1531mm,干燥度 2.53,为典型的半干旱雨养农业区。试验地土壤为黄绵土,土壤容重 1.19g/cm³,pH 值 8.36,土壤有机质 12.01g/kg,全氮 0.76g/kg,全磷 1.77g/kg。试验地前茬作物均为春小麦。2002 年度春小麦生育期降水 218.8mm,豌豆生育期降水 167.0mm;2003 年度春小麦生育期降水 298.4mm;豌豆生育期降水 175.9mm。

1.2 试验设计与方法

试验采用春小麦和豌豆双序列轮作方式(W/P 和 P/W)。共设 6 个处理,4 次重复:①传统耕作(T),试验地在前茬收获后三耕两耱。②免耕(NT),整个试验阶段免耕。③免耕秸秆覆盖(NTS):整个试验期免耕。从 8 月至翌年 3 月地面覆盖前茬作物秸秆,前茬作物收获的所有秸秆脱粒后立即还原小区。④秸秆还田(TS),试验地耕耱同 T(三耕两耱),但在第一次耕作的同时将秸秆翻入。前茬作物收获的所有秸秆脱粒后立即还原小区,并随耕作翻入土壤。⑤传统耕作覆盖地膜(TP),试验地耕耱同 T(三耕两耱),但在 10 月份最后一次耱后覆盖塑料地膜。膜侧种植作物,宽窄行种植。⑥免耕覆盖地膜(NTP),整个试验阶段免耕。10 月份用覆膜机覆膜(同 TP)。

试验采用随机区组排列,试验地小区的面积为 20m × 4m,供试作物为春小麦(定西 35 号,播种量 187.5 kg/hm²)和豌豆(绿豌豆,播种量 180kg/hm²)。春小麦各处理均施纯氮 105kg/hm²,纯 P₂O₅ 105kg/hm²(AU + 二铵);豌豆各处理均施纯氮 20kg/hm²,纯 P₂O₅ 105kg/hm²(过磷酸钙 + 二铵),所有肥料均作为基肥在播种的同时施入。T、NT、NTS、TS 用中国农业大学研制的免耕播种机播种;TP、NTP 用当地的起垄覆膜膜侧播种机播种,宽

窄行种植。覆盖所用秸秆为当年的春小麦及豌豆秸秆,收获打碾后切碎(5cm左右)均匀还与各自的小区。收获时取样 20 株进行考种,各小区除去边行 0.5m 后单打单收,并以各小区打碾产量为准折算公顷产量。

1.3 试验测定及方法

试验期间每隔 15d 测定 1 次土壤水分。其中 0~10cm 用烘干法测定,10cm 以下用中子水分仪测定。共 9 层:依次为 0~5cm,5~10cm,10~30cm,30~50cm,50~80cm,80~110cm,110~140cm,140~170cm,170~200cm。同时测定田间最大持水量(Drainage Upper Limit, DUL)及作物有效水分下限(Crop Lower Limit, CLL)^①。

中子仪的读数最后矫正成体积含水量。矫正曲线:

$$Y_{10-30\text{cm}} = 63.226x + 3.7518 (R^2 = 0.754)$$

$$Y_{40-200\text{cm}} = 58.923x - 0.4483 (R^2 = 0.7666)$$

2 结果与分析

2.1 试验区年降水变异

试验期间实际降水情况由位于试验地内的雨量器记录,如图 1 所示。

根据定西旱农试验区年气象资料统计,2001 年、2002 年和 2003 年及多年平均(33a)降水量分别为 356.0mm、350.7mm、564.8mm 和 390.9mm。

降水量相对变化率 P :

$$P = \left(\frac{R - \bar{R}}{\bar{R}} \right) \times 100\%$$

式中, R 为降水量, $\bar{R}$ 为平均年降水量。取 $P \geq 25\%$ 为丰水年, $P \leq -25\%$ 为干旱年。

由年降水量相对变化率 P 可知,2001 年、2002 年为平水年,2003 年为丰水年。年降水量呈倒 V 字型分布,7~9 月份降水集中,且强度大,其 3 个月降水量约占全年降水量的 53%,冬春季降水较少。年内季节降水分布的差异是造成旱地农田水土流失及作物生长关键期干旱缺水的主要原因之一。

2.2 保护性耕作条件下不同轮作体系 0~200cm 土壤水分的水平动态变化

休闲轮作对土壤水分的影响较大,但其影响程度与当年的降水量及分配密切相关。在不同的轮作体系中,经过较长时间的休闲之后,土壤水分有一个很大的改善,降水量增加土壤对降水的保蓄能力提高(图 2、图 3)。休闲轮作制对土壤水分的影响程度因当年降水(主要是雨季降水)量的不同而不同,而且随着降水量的增多,相互之间的差异就越明显^[25]。由图 2、图 3 可以看出,经过两季休闲轮作,T,NTS,NT,TS,TP,NTP 各处理土壤贮水量分别增加 51.87~54.47mm、53.40~84.90mm、30.78~47.65mm、15.85~57.25mm、55.61~62.49mm、63.34~75.70mm。与常规耕作相比,免耕秸秆覆盖在降水较少的年份(2002 年)更有利于保蓄土壤水分,这主要是因为免耕秸秆覆盖在土壤表面留有作物残茬,减少了土壤蒸发,具有良好的蓄水保墒作用。免耕秸秆覆盖在第二季休闲末土壤贮水量最高达到 84.90 mm,较传统耕作高出 30.43 mm,为苗期作物生长提供了良好的水分条件。

2.3 保护性耕作条件下不同轮作体系土壤含水量的垂直变化

农田土壤水分垂直变化随气候类型区、降水年型及不同土壤耕作措施而表现出一定的变化。表 1、表 2 是不同轮作系统各处理不同生育期 0~200cm 土壤平均含水量变化情况。由此可以看出,0~40cm 土层土壤水分受降水、气温、蒸散、土壤耕作、覆盖等气象因素及部分作物根系的影响明显,土壤水分变化剧烈。尤其是表层土壤(0~10cm),由于蒸发、作物蒸腾强烈,通常具有较低的水分含量。40~120cm 土层是作物根系及深

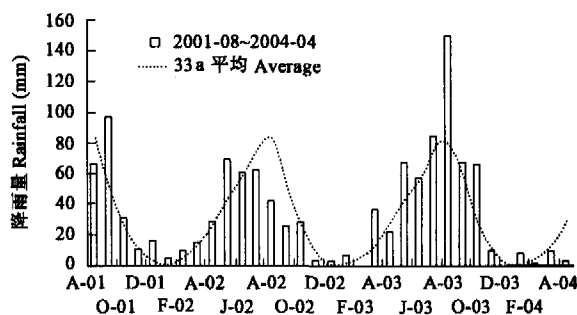


图 1 定西地区 2001 年 8 月~2004 年 4 月降雨量及 33a 月平均降雨量分布

Fig.1 Distribution of monthly rainfall in 2001-08 ~ 2004-04 compared to long-term average of 33 years in Dingxi (mm)

① CLL 是对土壤和作物特性的反映,是一种作物在特定土壤上吸水能力的一种极限,与凋萎湿度有很大的区别,它更客观、更准确地反映一种作物在特点土壤上吸水的能力和状况

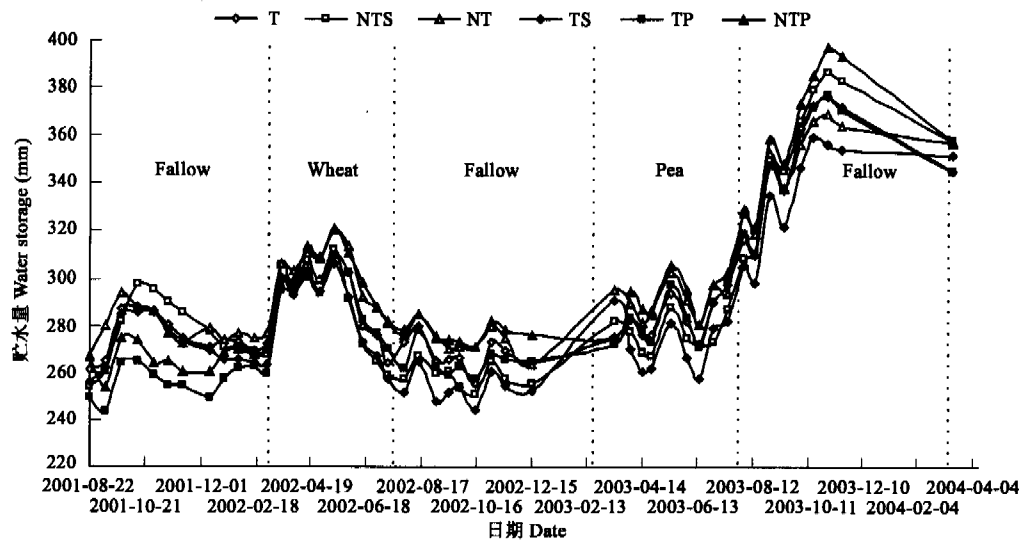


图 2 春小麦-豌豆轮作体系各处理 0~200cm 土壤贮水量动态变化(02.3.17~04.3.15)

Fig. 2 Water storage from 0 to 200 cm soil profiles of rotation with spring wheat and field pea systems in Dingxi (02.3.17 ~ 04.3.15)

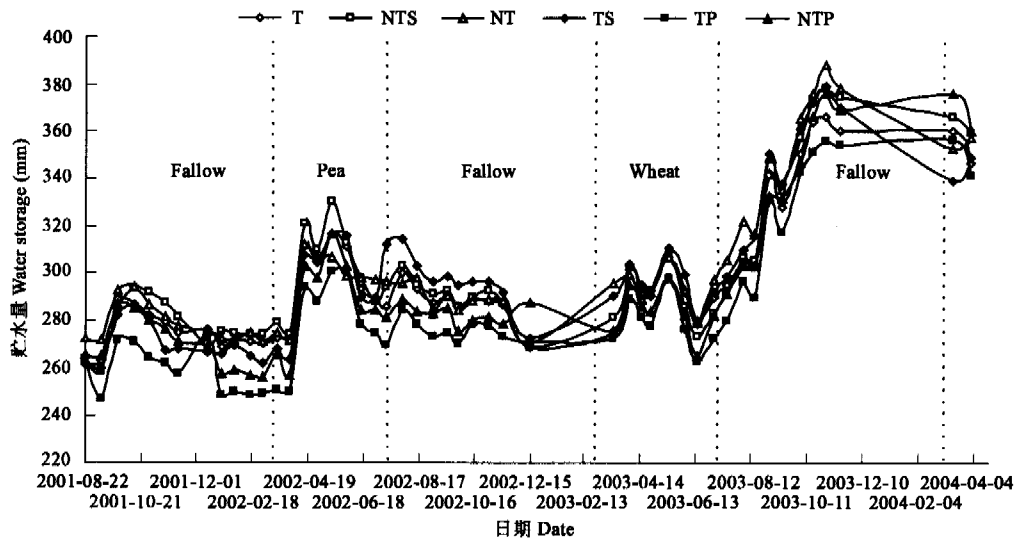


图 3 豌豆-春小麦轮作体系各处理 0~200cm 土壤贮水量动态变化(02.3.31~04.4.4)

Fig. 3 Water storage from 0 to 200 cm soil profiles of rotation with field pea and spring wheat systems in Dingxi(02.3.31 ~ 04.4.4)

层根系的主要分布层,土壤水分变化主要受作物的影响,变幅相对较小,主要是调节上下土层水分的变化,是土壤水分消耗与蓄积的源和库。120~200cm 土层基本不受作物和气象因素的影响,相对比较稳定。土壤水分有季节变化,但没有明显的干湿期,其调节作用主要表现在土壤含水量最高时期和最低时期。总体来说土壤表层含水量较低,耕层土壤含水量增加,耕层以下又逐渐降低并趋于稳定。休闲轮作不仅能够增加土壤蓄水量,同时还可以提高土壤含水量,尤其是以豆科为前茬作物时,能为春小麦提供良好的土壤水分条件。因此在西北旱农区,豌豆收获后土壤内贮存的水分较小麦地显著增加,使豌豆成为多种作物的良好前作。

不同生育时期,由于作物长势的不同,因此不同耕作措施的土壤含水量也表现出不同的变化趋势。经过长时间的休闲之后,作物生长前期(即播种期)一般具有较高的土壤含水量,尤其是免耕秸秆覆盖能有效的保蓄耕层土壤水分。在两个轮作体系中,无论是以春小麦还是以豌豆为前茬,免耕秸秆覆盖处理在 0~50cm 土层均表现出了较高的含水量。W/P 轮作体系中春小麦 NTS 处理 0~50cm 土层含水量为 19.36%,较常规耕作增加 28%,与其他处理之间差异极显著($SSR_{0.01}$)。各处理含水量排列顺序为:NTS>TP>TS>NTP>T>NT。

表 1 春小麦-豌豆轮作体系不同生育时期各处理土壤含水量变化情况(V%)

Table 1 Soil moisture in 200 cm soil profile of rotation system with spring Wheat and field pea at different bearing stage under different treatments

生育期 Bearing stage	土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment													
		生育期 Bearing stage							生育期 Bearing stage						
		T	NTS	NT	TS	TP	NTP		T	NTS	NT	TS	TP	NTP	
2002-03-17 春小麦 播种期 Spring wheat at seeding in 2002	0~5	10.19	19.51	10.72	11.40	11.31	10.01	2003-04-05	14.24	22.11	13.91	13.13	13.86	14.35	
	5~10	15.18	20.07	14.07	16.44	17.14	15.79	豌豆 播种期	17.14	21.34	16.90	17.50	17.72	18.94	
	10~30	20.09	21.54	20.17	20.69	19.96	21.02	Field pea at seeding	14.26	16.92	15.18	14.16	16.23	17.73	
	30~50	15.07	16.31	15.25	14.78	13.67	14.79	in 2003	11.84	12.14	12.36	11.37	11.49	13.23	
	50~80	13.33	13.86	13.74	14.62	12.68	13.14		12.42	11.27	12.46	11.18	11.79	12.38	
	80~110	14.03	13.35	14.13	13.43	13.48	13.95		13.74	12.32	13.44	12.74	12.96	13.64	
	110~140	14.75	14.01	15.49	14.54	15.34	15.32		14.24	13.28	14.63	13.06	14.27	14.71	
	140~170	15.93	14.95	16.30	15.38	15.74	15.66		15.59	14.14	15.80	14.39	15.17	14.62	
	170~200	16.14	16.15	16.83	16.16	16.25	16.35		15.55	15.17	16.32	14.95	15.60	15.61	
	5% *	b	a	b	b	b	b		bc	a	abc	c	bc	ab	
	1% **	B	A	B	B	B	B		AB	A	AB	B	AB	AB	
2002-05-14 春小麦 五叶期 Spring wheat at 5-leaf in 2002	0~5	20.68	24.57	22.42	24.43	25.62	26.00	2003-05-16	22.34	24.66	22.63	22.88	23.51	21.18	
	5~10	16.85	20.46	17.99	17.62	22.46	22.14	豌豆 五叶期	20.74	22.11	20.76	21.55	22.33	22.41	
	10~30	19.60	20.51	20.40	20.21	21.00	21.95	Field pea at 5-leaf	19.75	21.67	19.52	19.57	20.95	20.88	
	30~50	15.10	16.05	15.52	15.11	14.55	15.71	in 2003	12.67	13.73	13.47	12.18	13.11	14.08	
	50~80	14.25	14.89	14.59	13.91	13.69	13.97		12.52	12.08	12.77	11.81	12.19	13.00	
	80~110	14.48	13.85	14.36	13.73	13.59	14.45		13.76	12.39	13.70	12.53	12.94	13.86	
	110~140	14.98	14.09	15.97	14.41	15.09	15.63		14.31	13.18	14.83	13.47	14.57	15.05	
	140~170	16.09	15.34	16.47	15.95	15.67	15.71		15.34	14.19	15.84	14.64	15.35	15.19	
	170~200	16.61	16.25	16.87	16.42	15.94	16.48		15.69	15.36	16.73	15.15	15.61	15.85	
	5% *	b	ab	ab	b	ab	a		b	ab	ab	b	ab	a	
	1% **	B	AB	AB	AB	AB	A		AB	AB	AB	B	AB	A	
2002-06-30 春小麦 开花期 Spring wheat at anthesis in 2002	0~5	7.21	8.54	7.20	6.45	8.21	7.30	2003-06-15	6.29	8.14	6.29	7.42	7.11	7.54	
	5~10	8.57	8.66	9.22	8.87	10.67	10.19	豌豆 开花期	9.31	9.38	9.57	9.04	9.49	9.43	
	10~30	14.68	14.79	15.45	14.75	15.42	17.11	Field pea at anthesis	15.12	15.17	15.67	14.37	15.98	15.25	
	30~50	10.94	11.17	12.16	10.90	11.43	12.96	in 2003	12.69	12.55	13.43	12.01	12.52	13.92	
	50~80	12.26	11.53	13.08	11.96	12.46	13.25		12.74	12.05	12.89	11.89	12.28	13.11	
	80~110	14.13	13.09	14.33	13.31	13.60	14.38		13.63	12.80	13.60	12.64	13.10	13.96	
	110~140	15.01	14.17	16.06	14.65	15.08	15.49		14.30	13.52	14.74	13.43	14.31	14.91	
	140~170	16.22	15.25	16.42	15.37	15.81	15.69		15.22	15.03	15.94	14.42	15.46	15.53	
	170~200	16.58	16.26	16.77	16.28	16.26	16.39		15.75	15.15	16.27	15.36	15.46	15.72	
	5% *	bcd	cd	ab	d	abc	a		ab	ab	a	b	ab	a	
	1% **	ABC	BC	AB	C	ABC	A		A	A	A	A	A	A	
2002-07-29 春小麦 成熟期 Spring wheat at maturing in 2002	0~5	19.20	25.88	18.47	16.15	17.28	19.38	2003-07-17	24.01	25.56	23.99	25.02	25.76	24.37	
	5~10	14.29	20.56	16.03	13.67	14.28	15.97	豌豆 成熟期	23.58	25.34	23.50	25.49	25.52	23.24	
	10~30	14.41	14.32	15.84	13.67	14.88	14.41	Field pea at maturing	19.46	20.70	20.66	17.74	21.59	20.56	
	30~50	10.28	9.88	11.04	13.73	10.24	11.49	in 2003	12.43	12.12	12.89	11.62	12.18	13.28	
	50~80	11.15	10.71	11.76	10.07	11.10	11.81		12.80	11.88	13.25	12.12	12.45	13.09	
	80~110	14.00	11.63	13.27	10.74	12.32	13.35		13.91	12.80	13.42	12.71	13.20	13.92	
	110~140	14.55	12.89	14.19	11.97	13.62	14.35		14.46	13.67	14.18	13.52	14.51	14.83	
	140~170	15.60	14.24	15.78	12.81	14.97	15.61		15.51	14.34	15.41	14.74	15.27	15.32	
	170~200	15.74	14.91	16.22	14.54	15.45	15.84		15.74	15.27	16.31	15.29	15.47	15.54	
	5% *	ab	a	ab	b	ab	ab		ab	ab	ab	b	a	ab	
	1% **	A	A	A	A	A	A		A	A	A	A	A	A	

表 2 豌豆-春小麦轮作体系不同生育时期各处理土壤含水量变化情况(V%)

Table 2 Soil moisture in 200cm soil profile of rotation system with field pea and spring Wheat at different bearing stage under different treatments

生育期 Bearing stage	土层 (cm) Soil layer	处理 Treatment													
		T	NTS	NT	TS	TP	NTP	生育期 Bearing stage	T	NTS	NT	TS	TP	NTP	
2002-04-16 豌豆 播种期 Field pea at seeding in 2002	0 ~ 5	16.93	21.81	15.26	16.65	17.52	16.40	2003-03-15	7.02	12.35	7.95	7.55	9.88	10.16	
	5 ~ 10	23.35	24.31	21.96	22.87	23.76	21.76	春小麦 播种期	9.64	13.48	10.27	10.81	12.32	12.81	
	10 ~ 30	21.38	22.52	20.39	21.75	21.32	21.02	Spring wheat at seeding	15.30	16.17	16.48	17.21	15.93	15.97	
	30 ~ 50	15.35	16.90	14.23	15.38	14.43	14.82	in 2003	13.46	13.67	13.43	14.15	13.29	12.90	
	50 ~ 80	13.57	14.85	13.16	13.67	12.60	13.16		13.42	13.20	13.98	13.96	12.61	12.92	
	80 ~ 110	13.64	14.10	14.20	13.76	13.20	13.59		13.63	13.95	14.64	14.33	13.46	13.26	
	110 ~ 140	14.79	14.73	15.51	14.71	13.94	14.34		14.25	14.19	15.95	14.94	14.17	14.13	
	140 ~ 170	16.05	15.17	16.64	15.78	14.65	15.50		15.63	14.92	16.51	15.74	14.48	14.80	
	170 ~ 200	16.97	16.50	17.43	15.77	15.42	16.56		15.03	15.59	16.41	16.04	15.01	15.74	
	5% *	ab	a	b	ab	b	b		a	a	a	a	a	a	
	1% **	A	A	A	A	A	A		A	A	A	A	A	A	
2002-05-14 豌豆 五叶期 Field pea at 5-leaf in 2002	0 ~ 5	23.50	25.89	24.57	24.65	25.90	38.65	2003-05-16	21.94	23.21	21.62	22.53	22.79	22.26	
	5 ~ 10	21.49	22.02	24.61	20.13	22.48	21.33	春小麦 五叶期	19.69	20.12	19.63	21.52	21.35	22.43	
	10 ~ 30	21.42	22.61	20.14	21.78	21.25	20.91	Spring wheat at 5-leaf	20.50	20.29	20.20	20.89	21.05	19.81	
	30 ~ 50	15.49	17.02	14.02	15.61	13.44	15.32	in 2003	14.64	14.60	13.15	14.55	14.85	13.94	
	50 ~ 80	13.76	15.30	12.90	14.41	13.28	13.39		13.79	13.99	13.72	14.21	13.29	13.52	
	80 ~ 110	13.90	14.11	13.93	14.00	13.39	13.77		14.11	14.49	14.31	14.44	13.50	13.70	
	110 ~ 140	14.74	14.91	14.93	14.89	14.33	14.39		14.35	14.47	14.32	14.77	13.73	14.23	
	140 ~ 170	16.18	15.36	15.64	16.26	14.84	15.62		15.54	15.10	16.34	15.50	14.76	14.82	
	170 ~ 200	17.12	16.45	16.29	15.98	15.70	16.64		16.37	15.74	16.81	15.92	15.32	15.43	
	5% *	a	a	a	a	a	a		a	a	a	a	a	a	
	1% **	A	A	A	A	A	A		A	A	A	A	A	A	
2002-06-15 豌豆 开花期 Field pea at anthesis in 2002	0 ~ 5	4.06	3.53	2.90	1.58	3.64	2.95	2003-07-02	22.89	24.89	24.12	24.70	24.29	24.39	
	5 ~ 10	6.49	6.45	7.00	6.37	6.69	5.37	春小麦 开花期	20.21	19.72	20.37	20.54	22.35	20.22	
	10 ~ 30	17.86	18.59	17.90	18.66	18.11	18.00	Spring wheat at anthesis	16.56	16.05	16.33	16.38	15.84	16.14	
	30 ~ 50	14.41	15.34	14.21	14.62	13.74	14.27	in 2003	11.80	10.79	11.05	11.58	10.10	11.47	
	50 ~ 80	14.14	15.72	13.76	14.04	13.63	13.68		12.72	12.09	12.46	13.16	11.66	12.01	
	80 ~ 110	14.12	14.48	14.59	14.13	13.55	13.88		13.84	13.91	14.49	14.18	12.91	13.60	
	110 ~ 140	14.86	14.58	15.98	15.01	14.54	14.55		14.26	14.43	15.09	14.72	13.93	14.00	
	140 ~ 170	16.34	15.41	16.67	16.16	15.03	15.74		15.38	15.07	16.31	15.65	14.57	14.93	
	170 ~ 200	17.15	16.30	17.39	15.91	15.42	16.30		16.35	15.69	17.19	15.67	14.94	15.80	
	5% *	a	a	a	a	a	a		a	a	a	a	a	a	
	1% **	A	A	A	A	A	A		A	A	A	A	A	A	
2002-07-12 豌豆 成熟期 Field pea at maturing in 2002	0 ~ 5	6.93	9.60	8.36	7.42	5.75	6.33	2003-08-04	23.11	23.30	27.08	23.96	25.97	25.08	
	5 ~ 10	12.08	13.06	12.43	12.20	10.49	7.30	春小麦 成熟期	24.31	24.55	25.37	23.78	25.13	23.90	
	10 ~ 30	15.52	16.79	16.37	18.79	16.50	16.44	Spring wheat at maturing	26.11	26.98	26.76	26.80	26.26	26.23	
	30 ~ 50	13.14	13.60	12.59	14.41	12.15	12.61	in 2003	13.17	13.41	13.62	13.51	13.24	14.07	
	50 ~ 80	13.48	14.49	13.45	15.29	12.85	13.28		12.20	12.02	12.29	12.69	11.62	11.77	
	80 ~ 110	13.67	14.34	14.57	15.45	13.20	14.06		13.30	13.44	14.07	13.44	12.77	13.13	
	110 ~ 140	14.82	14.83	15.85	16.07	14.32	14.62		13.94	14.04	15.03	14.15	13.71	13.79	
	140 ~ 170	16.02	15.52	16.67	16.89	14.54	15.63		15.03	15.00	16.18	15.23	14.15	14.66	
	170 ~ 200	17.01	16.91	17.39	16.96	15.31	16.54		16.08	15.73	16.88	15.72	14.80	15.47	
	5% *	ab	ab	ab	a	b	ab		b	ab	a	ab	ab	ab	
	1% **	A	A	A	A	A	A		A	A	A	A	A	A	

豌豆 NTS 处理 0~50cm 土层含水量为 18.13%,较常规耕作增加 26%,与其他处理之间差异显著($SSR_{0.05}$)。各处理含水量排列顺序为:NTS>NTP>TP>NT>T>TS。P/W 轮作体系中豌豆 NTS 处理 0~50 cm 土层含水量为 21.38%,较常规耕作增加 11%,与其他处理之间差异显著($SSR_{0.05}$)。各处理含水量排列顺序为:NTS>TP>TS>NTP>T>NT。春小麦 NTS 处理 0~50 cm 土层含水量为 13.92%,较常规耕作增加 23%,与其他处理之间差异不显著,含水量排列顺序为:NTS>NTP>TP>TS>NT>T。因此,在作物生长前期,秸秆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。

随着气温的升高及作物的成长,五叶期作物蒸腾作用逐渐加强,不过由于作物仍处于苗期,自身的蒸腾作用还较弱,主要还是以土壤蒸发为主,此阶段秸秆覆盖处理的保水作用逐渐减弱。在 W/P 轮作体系中,春小麦 NTP 处理 0~30 cm 土层含水量为 23.36%,较常规耕作增加 23%,各处理含水量排列顺序为:NTP>TP>NTS>TS>NT>T。豌豆 NTS 处理 0~30 cm 土层含水量为 22.81%,较传统耕作增加 9%,各处理含水量排列顺序为:NTS>TP>NTP>TS>NT>T。P/W 轮作系统豌豆 NTP 处理 0~30 cm 土层含水量 26.96%,较常规耕作增加 22%。各处理含水量排列顺序为:NTP>NTS>TP>NT>TS>T。春小麦播种期各处理之间含水量排列顺序为:TP>TS>NTP>NTS>T>NT。

开花期随着温度的升高,地表蒸发、作物蒸腾强度随之增加,作物根系对水分的利用也有很大的影响。免耕覆盖处理的春小麦与豌豆 0~10 cm 土层含水量迅速增加,这与测定前期的降水有很大关系,而且充分说明免耕覆盖具有抑制蒸发及蓄水保墒的作用。这是由于免耕减少了对土壤结构的破坏,同时地表覆盖加大了土壤热梯度差,使土壤深层水分不断上移,并在上层集积,使土壤耕层含水量明显增加。

至收获期,各作物均已收获,作物对水分的利用减弱,土壤表层含水量有所回升。W/P 轮作体系春小麦 NTS 处理 0~10 cm 土层含水量为 23.22%,较常规耕作增加 39%,各处理含水量排列顺序为:NTS>NTP>NT>T>TP>TS。P/W 轮作体系豌豆各处理含水量排列顺序为:NT>TP>NTP>NTS>TS>T。

总体来看,保护性耕作对水分的保蓄作用在干旱半干旱的定西地区降水较少的年份(2002 年平水年)较降水较多的年份(2003 年丰水年)优势明显,尤其是在地表没有作物覆盖时免耕秸秆覆盖在表层土壤的蓄水保墒作用更加突出。

2.4 保护性耕作条件下不同轮作体系的产量效应及降水利用情况

表 3 保护性耕作对不同轮作体系产量及对水分利用的影响

Table 3 Effects on yield and water use of different rotation system under conservation tillage

轮作顺序 Rotation sequence	处理 Treatment	产量 Grain yield(kg/hm ²)			比传统 Compare (%)	耗水量 Water consumption (mm)	WUE (kg/(hm ² ·mm))	试验期间 降水量 Rainfall (mm)	降水生产效率 Precipitation productive efficiency (kg/(hm ² ·mm))
		麦+豆 Wheat+pea	小麦 Wheat	豌豆 Pea					
麦·豆 W/P	T	2697Bb	1816	881	—	416.86	6.47	915.5	2.95
	NTS	3420Aa	2151	1269	26.81	421.59	8.11	915.5	3.74
	NT	2217Bc	1414	803	-17.80	402.88	5.50	915.5	2.42
	TS	2559Bbc	1736	823	-5.12	371.61	6.89	915.5	2.80
	TP	2447Bbc	1385	1062	-9.27	408.60	5.99	915.5	2.67
	NTP	2280Bbc	1258	1022	-15.46	409.78	5.56	915.5	2.49
豆·麦 P/W	T	3069Aa	1416	1653	—	464.63	6.61	915.5	3.35
	NTS	3615Aa	1825	1790	17.79	466.46	7.75	915.5	3.95
	NT	2961Bb	1545	1416	-3.52	446.26	6.64	915.5	3.23
	TS	3173Aa	1646	1527	3.39	464.29	6.83	915.5	3.47
	TP	3647Aa	2033	1614	18.83	451.45	8.08	915.5	3.98
	NTP	3669Aa	2140	1529	19.55	449.60	8.16	915.5	4.01

* 产量为轮作系统小麦与豌豆产量之和 Grain yield equal to spring wheat add field pea of rotation system

水分利用效率是研究作物产量、蒸腾耗水和地表蒸发之间相互消长关系的具体表现^[26]。降雨是本地区土壤水分的主要来源,若不考虑地表径流,则时段水分平衡要素包括土层贮水量变化,降水量,蒸发量,渗透量

(通常认为 0),通过土壤水分平衡计算,对作物水分利用效率进行研究,可以了解不同处理对土壤水分的利用状况。

由表 3 得出,无论在何种轮作体系中,免耕秸秆覆盖的产量表现稳定,而且始终高于传统耕作。在 W/P 轮作体系中 NTS 产量最高达到 $3\,420\text{ kg/hm}^2$,比传统耕作增产 26.81%。国内外很多研究认为,免耕覆盖之所以能够提高作物产量是因为土壤剖面土壤水分的提高^[27~29],而且提高了土壤水分的有效性^[30]和利用率^[31,32],因此为作物生长创造了一个良好的土壤环境。不同的轮作顺序也能使产量有所增加,这是因为轮作改善了土壤理化性状^[33],提高了土壤表层含水量及土壤贮水量^[34],从而使作物产量及水分利用效率进一步提高。在 P/W 轮作体系中,除免耕处理外,其余处理较常规耕作均有不同程度的增产。在两个轮作序列中,免耕均没有体现出增产的效果,这与相关报导^[26,31,34,35]免耕能够增产的情况不太一致,可能是因为免耕年限较短,这种增产作用还没有体现出来。

轮作体系中各处理的耗水量均有增加的趋势。在 W/P 轮作体系中 NTS 处理的水分利用效率较常规耕作提高了 25.35%,P/W 轮作体系中 NTP 处理的水分利用效率比传统耕作提高了 23.45%。其原因是由于覆盖减少了土壤水分的无效蒸发,增加土壤有效持水量。相关研究也表明,免耕、覆盖均能减少土壤水分蒸发,促进植株蒸腾,使无效耗水转化为有效耗水,但耗水量并未减少;少免耕法有较好的保墒功能,在作物生长季节可明显增加耗水量,提高农田水分的有效利用^[36]。免耕秸秆覆盖还能有效提高对降水的利用率,Vnger 等探明,通过秸秆覆盖来提高生长期间的降水利用率从而提高高粱产量。在两种轮作体系中,免耕秸秆覆盖降水生产效率较常规耕作提高了 17.79%~26.81%。

3 结论

保护性耕作是控制水土流失的有效措施。其中免耕秸秆覆盖能有效减少土壤蒸发、增加土壤的有效持水量,提高作物产量、水分利用效率及降水利用率。

(1) 休闲轮作能够改善土壤水分,随着降水量的增多土壤对降水的保蓄能力增强。经过两季休闲轮作,T,NTS,NT,TS,TP,NTP 各处理土壤贮水量分别增加 51.87 mm~54.47 mm、53.40 mm~84.90 mm、30.78 mm~47.65 mm、15.85 mm~57.25 mm、55.61 mm~62.49 mm、63.34 mm~75.70 mm。免耕秸秆覆盖在降水较少的年份(2002 年)更有利于保蓄土壤水分。

(2) 0~40 cm 耕层土壤水分受降水、气温、蒸散、土壤耕作、覆盖等因素及部分作物根系的影响明显,土壤水分变化剧烈。40~120 cm 是作物根系及深层根系的主要分布层,土壤水分变幅相对较小。120~200 cm 土层基本不受作物和气象因素的影响,相对比较稳定。

(3) 播种期、五叶期及收获期土壤具有较高含水量,而开花期土壤含水量则迅速下降。在两种轮作体系中,免耕秸秆覆盖处理 0~50 cm 土层在作物生长前期均表现出了较高的含水量。春小麦和豌豆 NTS 处理播种期 0~50 cm 土层含水量分别较常规耕作增加 28%、26% 和 11%、23%。

(4) 在两种轮作体系中,免耕秸秆覆盖的产量表现稳定,其降水利用率较常规耕作提高了 17.79%~26.81%。在 W/P 轮作体系中 NTS 处理的作物产量及水分利用效率分别较常规耕作提高 26.81% 和 25.35%。

(5) 单纯免耕的增产效果在本试验中没有体现出来,可能是因为免耕年限较短,这种增产作用还没有体现出来。

References:

- [1] Huang G B, Zhang R Z, *et al.* Conservation tillage effects on spring wheat and field pea in the western Loess Plateau China. Soil management for sustainability. Proceeding of international soil tillage research organization 16th triennial conference, 2003. 7
- [2] Jia Y Z, Wang J Y, *et al.* Study of Soil Conservation Tillage Technology Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2002(6): 12~15.
- [3] Jiang Y H, Yu Z R, Ma Y L. The Effect of Stubble Return on Agro-ecological System and Crop Growth. Chinese Journal of Soil Science, 2001, 32(5): 209~213.
- [4] Kang Q X, Wang X C, Meng X M, *et al.* A Study of the Effects and Technique of Multiple Cropping with High Wheat Stubble Mulching, Acta Agriculturae

- Boreall-Sinica, 1999, 14(2): 1 ~ 5.
- [5] Lao X R, Wu Z Y, Gao Y C. Effect of Long-Term Returning Straw to Soil on Soil Fertility. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 49 ~ 52.
 - [6] Li G T, Zhao Z J, Huang Y F, *et al.* Effect of straw returning on soil nitrogen transformation. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 162 ~ 167.
 - [7] Li Q S, Wu J J, Yan L, *et al.* Effects of Properties of Underlying Surface on Micro-ecological Environment of Agro-forestry System. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(3): 329 ~ 334.
 - [8] Li X J, Zhang Z G. Effects on Soil Ecological Environment by No-tillage. Journal of Shandong Agricultural University, 1998, 29(4): 520 ~ 526.
 - [9] Liu S P, Zhuang H Y, Lu J F, *et al.* Influence of No-tillage on Soil Structure. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1): 33 ~ 37.
 - [10] Shen Y H, Huang X G, Wang H Q. Field Effects of Straw Mulching. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(1): 45 ~ 50.
 - [11] Li L L, Huang G B, Zhang R Z. Conservation Agriculture Development in Western Loess Plateau of Gansu Province. In: Gao W S ed. Food Security and Farming System Development. Changsha: Hunan Scientific & Technological Press, 2004. 185 ~ 188.
 - [12] Huang G B. No-till and reduced tillage test and application in Gansu province. Conservation tillage workshop. Organized by the Center for Conservation Tillage Research (CCTR) with the support of ACIAR, 2003. 8
 - [13] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, *et al.* Conservation tillage systems in North America and their significance for China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 335 ~ 340.
 - [14] Gao Y C, Zhu W S, Chen W X. The Relationship Between Soil Microbial Biomass and the Transformation of Plant Nutrients in Straw Mulched No-tillage Soils. Scientia Agricultura Sinica, 1994, 27(6): 41 ~ 49.
 - [15] Wang X C, Wang H C, Xu X F, *et al.* Effect of different cultivation modes on soil factors and wheat development on riceharvested field along Huanghe River banks. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(S1): 27 ~ 32.
 - [16] Xu Y C, Shen Q R, Lei B K. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 849 ~ 852.
 - [17] Zhang Z G, Xu Q, Blevins R L. Influences of Long-term Mulched No-tillage Treatment on Some Soil Physical and Chemical Properties and Corn Yields. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35 (3): 384 ~ 391.
 - [18] Gong Jie, Huang G B, Chen L D. Comprehensive ecological effect of straw mulch on spring wheat field in dryland area. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 69 ~ 73.
 - [19] Sun H G, Lei H Q. Effects of plant residues on soil structure. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1998, 6(3): 39 ~ 42.
 - [20] You M Z, Zhang X Y. The eco-agricultural significance on the high stubble mulch of winter wheat. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1999, 7(2): 53 ~ 54.
 - [21] Yuan J F. Effects of straw mulch in wheat field and its effects on yield increase. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 1996, 4(3): 61 ~ 65.
 - [22] Zeng M X, Zhang Y J. Effects of Returning Straw into the Field on Farmland Eco-Environment. Agro-Environment and Development, 1997, 14(1): 1 ~ 7.
 - [23] Leng S L, Han S F. Theory and Technology on Crop Saving water and increasing production in Dryland of Northern China. Beijing: Chinese Agriculture Scientific & Technological Press, 1996.
 - [24] Tao Y F, Wang L X, Han S F. Water Productivity Potential and Exploitation in Dryland Area of Northern China. Beijing: Meteorological Press, 1996.
 - [25] Zhong L P, Han S F, Xi Y. Statistical Analysis of Soil Moisture Regime in Raifed Farmlands in Chengcheng County of Shaanxi Province. Agricultural Research in the Arid Areas, 1990(4): 44 ~ 53.
 - [26] Dong Z W, Gao K C, Shi X Q. Increase Production Effects on Maize and sorghum by No-tillage and Straw Mulched in Dryland. In: China Farming System Institute ed. Study on No-tillage and Mulched of China. Beijing: Beijing Scientific & Technological Press, 1991. 66 ~ 70.
 - [27] Blevins R L, *et al.* Influence of no-tillage on soil moisture. Agron J, 1971(41): 796 ~ 807.
 - [28] Jones O R, Hanser V L. No-tillage effects on infiltration, runoff and water conservation on dryland. American Society of Agriculture Engineers, 1994, 37 (2): 473 ~ 479.
 - [29] Wittmus H, Yazar A. Moisture Storage. Water use and corn yield for seven tillage systems under water stress. Proceeding of Crop Production with Conservation Tillage in the 80s. St Joseph MI, 1980, ASAE.
 - [30] Wu X M, Xue J H, Guan S C. Discussion on Soil Water Conditions and Crop Increase Production in Mulched Farmlands. Agricultural Research in the Arid Areas, 1990(4): 92 ~ 97.
 - [31] Zhu W S, Gao Y C. Study on Straw Mulchrd and No-tillage in Northern China. In: China Farming System Institute ed. Study on No-tillage and Mulched of China. Beijing: Beijing Scientific & Technological Press, 1991. 12: 11 ~ 21.
 - [32] Adem H H, *et al.* Management of tillage and crop residues for double-cropping in fragile soils of south-eastern Australia. Soil and Tillage Research, 1984, (4): 577 ~ 589.
 - [33] Tawainga Katsvairo, *et al.* Tillage and Rotation Effects on Soil Physical Characteristics. Agronomy Journal, 2002(94): 299 ~ 304.

- [34] Chan K Y, Heenan D P. Effect of tillage and stubble management on soil water store, crop growth and yield in a wheat-lupine rotation in southern NSW. *Aust. J. Agric. Res.*, 1996(47): 479 ~ 488.
- [35] Yao Y Q, Lu J J, Wang Y H, *et al.* Effect of conservation tillage on yield and benefit of winter wheat in dry-land in west Henan. *Agricultural Research In The Arid Areas*, 2002, 20(4): 42 ~ 44.
- [36] Lin H M, Chen Y, Li Y Z, *et al.* Effects of Minimum Tillage and No-tillage on Dynamic of Soil Moisture and Their Ecological Significance in Semiarid Region. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1996, 31(1): 32 ~ 35.

参考文献:

- [2] 贾彦宙, 王俊英, 等. 土壤保护性耕作技术应用研究. *内蒙古农业科技*, 2002(6): 12 ~ 15.
- [3] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响. *土壤通报*, 2001, 32(5): 209 ~ 213.
- [4] 亢青选, 王解丑, 孟晓明, 等. 高麦茬覆盖复播效应及技术研究. *华北农学报*, 1999, 14(2): 1 ~ 5.
- [5] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究. *农业工程学报*, 2002, 18(2): 49 ~ 52.
- [6] 李贵桐, 赵紫娟, 黄元仿, 等. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响. *植物营养与肥科学报*, 2002, 8(2): 162 ~ 167.
- [7] 李全胜, 吴建军, 严力蛟, 等. 下垫面性状对农林系统微生态环境的影响. *生态学报*, 1999, 19(3): 329 ~ 334.
- [8] 李新举, 张志国. 免耕对土壤生态环境的影响. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 1998, 29(4): 520 ~ 526.
- [9] 刘世平, 庄恒扬, 陆建飞, 等. 免耕法对土壤结构影响的研究. *土壤学报*, 1998, 35(1): 33 ~ 37.
- [10] 沈裕琥, 黄相国, 王海庆. 秸秆覆盖的农田效应. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 45 ~ 50.
- [11] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟. 甘肃黄土高原西部保护性农业发展研究. 中国农学会耕作制度分会编. *粮食安全与农作制度建设会议论文*. 湖南: 湖南科学技术出版社, 2004. 185 ~ 188.
- [13] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 335 ~ 340.
- [14] 高云超, 朱文珊, 陈文新. 秸秆覆盖免耕土壤微生物生物量与养分转化的研究. *中国农业科学*, 1994, 27(6): 41 ~ 49.
- [15] 王小纯, 王化岑, 许新芳, 等. 不同耕种方式对沿黄稻茬麦田土壤因子及小麦生育的影响. *应用生态学报*, 1996, 7(S1): 27 ~ 32.
- [16] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 849 ~ 552.
- [17] 张志国, 徐琪, Blevins R L. 长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响. *土壤学报*, 1998, 35(3): 384 ~ 391.
- [18] 巩杰, 黄高宝, 陈利顶, 等. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(3): 69 ~ 73.
- [19] 孙海国, 雷浣群. 植物残体对土壤结构性状的影响. *中国生态农业学报*, 1998, 6(3): 39 ~ 42.
- [20] 由懋正, 张喜英. 小麦高留茬覆盖的生态农业意义. *中国生态农业学报*, 1999, 7(2): 53 ~ 54.
- [21] 袁家富. 麦田秸秆覆盖效应及增产作用. *中国生态农业学报*, 1996, 4(3): 61 ~ 65.
- [22] 曾木祥, 张玉洁. 秸秆还田对农田生态环境的影响. *农业环境与发展*, 1997, 14(1): 1 ~ 7.
- [23] 冷石林, 韩仕峰. 中国北方旱地作物节水增产理论与技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1996.
- [24] 陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发. 北京: 气象出版社, 1993.
- [25] 钟良平. 陕西澄城旱地农田水分状况的统计分析. *干旱地区农业研究*, 1990(4): 44 ~ 53.
- [26] 董竹蔚, 高克昌, 石秀清. 旱地玉米及高粱免耕整株秸秆覆盖蓄水肥田增产效应. 中国耕作制度研究会编著. *中国少免耕与覆盖技术研究*. 北京: 北京科学技术出版社, 1991: 66 ~ 70.
- [30] 巫新民. 农田覆盖的土壤水分状况及其增产作用的探讨. *干旱地区农业研究*, 1990(4): 92 ~ 97.
- [31] 朱文珊, 高云超. 北方一年两熟地区秸秆覆盖免耕技术原理及应用效果研究. 见: *中国少耕免耕与覆盖技术研究*, 中国耕作制度研究会. 北京: 北京科学技术出版社, 1991. 12: 11 ~ 21.
- [35] 罗永藩. 我国少耕与免耕技术推广应用情况与发展前景. *耕作与栽培*, 1991(2): 1 ~ 7.
- [36] 姚宇卿, 吕军杰, 等. 保持耕作对豫西旱地冬小麦产量及效益的影响. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(4): 42 ~ 44.
- [37] 朱文珊, 高云超. 北方一年两熟地区秸秆覆盖免耕技术原理及应用效果研究. 中国耕作制度研究会, 中国少耕免耕与覆盖技术研究. 北京: 北京科学技术出版社, 1991. 12: 11 ~ 21.
- [38] 蔺海明, 等. 半干旱地区少免耕对土壤水分动态的影响. *甘肃农业大学学报*, 1996, 31(1): 32 ~ 35.